실용과제 연구관리 2026-047

현장실무 적용을 위한 관로 터파기 기준 고도화 연구

Improvement of the Conduit Construction Criteria for the Site Work Application

박종배 윤정원
박용부 박인건
이수규 최민준

LHRI-P
Land Housing Research Institute Practical
LH 토지주택연구원

연구관리 2026-047

현장실무 적용을 위한 관로 터파기 기준 고도화 연구

지 은 이 박종배, 박용부, 이수규, 윤정원, 박인건, 최민준
발 행 인 김용운
발 행 처 한국토지주택공사 토지주택연구원
주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99
홈페이지 http://lhri.lh.or.kr

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로써 공사나 정부의 공식적인 견해와 관계가 없습니다.
우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

연구관리 2026-047

현장실무 적용을 위한 관로 터파기 기준 고도화 연구

Improvement of the Conduit Construction Criteria for the Site Work Application

박종배·박용부·이수규·윤정원·박인건·최민준

LH 토지주택연구원

참여 연구진

연구책임

박종배 LH 토지주택연구원 선임연구위원

연구진

박용부 LH 토지주택연구원 연구위원
이수규 LH 토지주택연구원 수석연구원
윤정원 LH 토지주택연구원 책임연구원
박인건 LH 토지주택연구원 연구원
최민준 LH 스마트건설안전본부 스마트단지기술처 단지기준팀 차장

연구심의위원(가나다순)

고준영 충남대학교 교수
김정주 전력연구원 선임연구원
박찬교 LH 세종특별본부 차장
심영종 LH 토지주택연구원 팀장
이영호 LH 스마트건설안전본부 스마트단지기술처 건설BIM기준팀 차장
전주영 LH 토지주택연구원 실장(심의위원장)

현장실험 협조

채성진, 송영환 세종특별본부
박정수, 박상학 천안아산사업단

1 연구 배경 및 필요성

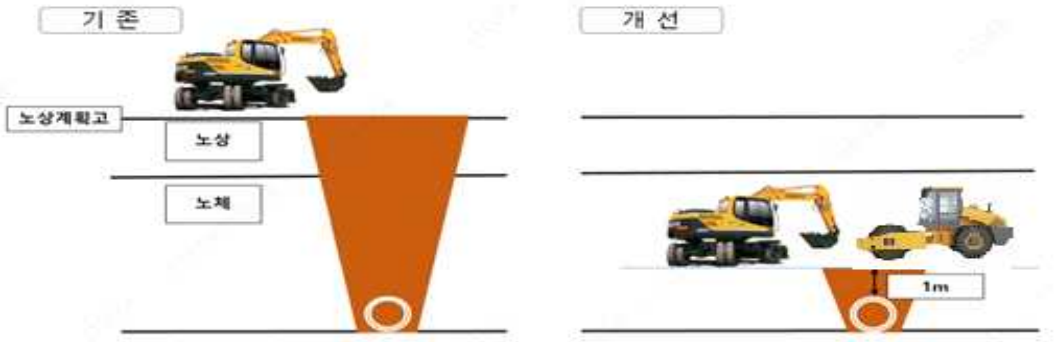
○ **2023년 3월에 LH 스마트건설안전본부(당시 건설안전기술본부)와 토지주택연구원 및 LH 품질시험인정센터를 중심으로 하는 업무협의 시스템 TF가 발족됨. TF의 목표는 관로 터파기/되메우기 방법 및 되메우기 다짐현장시험방법을 개선하기 위한 것임**

○ 우리 공사의 관로 터파기는 노상 계획고를 기준으로 함에 따라 흙쌓기를 노상계획고까지 수행하고 나서 관로 설치 지점까지 굴착하고 되메우기를 함으로써 과도한 굴착, 되메우기 및 다짐 중복 작업 등으로 인해 공사비 및 공기가 증가하는 문제점을 가지고 있음

○ 이에 선행 연구에서는 최소 토피고 1m 이상 확보 시 관로 상부에서 덤프트럭(적재하중 15t) 주행이 가능함을 검증하였으며, 개선안을 제시하였음

○ 그러나 실제 현장 적용을 위해서는 진동롤러(10t) 및 덤프트럭(적재하중 24t) 등 현장 시공 장비가 관로에 미치는 영향을 폭넓게 검증할 필요가 있었다.

○ 이에 본 연구에서는 강성관과 연성관을 대상으로 토피고 및 기초 조건에 따른 구조적 안정성을 검토하였음. 해당 연구에서는 이론적 검토, 현장실험, 수치해석을 통합적으로 수행하였으며, 덤프, 롤러에 의해 관로에 전달되는 윤하중과 토압을 측정하고 균열 및 변형발생 거동 등 관로 안정성을 확인하는 것을 목적으로 함



2 관로 터파기 관련 기준 조사

○ 본 장에서는 국내 설계 기준(KDS), 시공 기준(KCS), LH 설계 지침 등을 검토하여 연성관의 설계 및 시공 기준을 정리하였음

○ 아울러 토압 및 활하중 산정 방법, 되메우기 재료 및 다짐 기준, 다짐장비 적용 조건 등을 종합적으로 검토하였음. 특히 최근 적용이 확대되는 CLSM(유동성 채움재) 기술을 분석하여 향후 관로 시공 품질 향상 가능성을 검토하였음

3 흙쌓기 역학성능시험

○ 관로 현장 실험에 앞서 천안과 세종의 지반을 대상으로 기본 물성시험 등 실내실험을 수행하였음. 비중시험, 액·소성한계시험, 입도분석, 다짐시험 등을 수행하여 현장 다짐 품질 평가에 활용하기 위한 기초 자료를 확보하였음

4 관로의 안정성 평가실험 결과

○ 다양한 관경(D200~1500), 관종(강성관, 연성관) 및 토피고 조건에 대해 10톤 진동롤러 및 25톤 만재 덤프트럭을 주행하여 관로에서의 토압, 변형, 균열거동을 현장 실측조사하였음.

○ 현장실험에서 최소토피고 위에 10톤 진동롤러와 25톤 만재 덤프를 주행한 결과, 이중벽 연성관에는 0.05~2.0%(평균 0.75%)의 변형이 발생하였음. 이는 허용변형률인 5%에 비해 현저히 작은 변형률로 1m 최소토피고 조건에서 연성관의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타남

○ 강성관 실험 결과, 10톤 진동롤러 최대가진 주행 시 1200, 1500mm 관에서 0.15mm 이하의 미세균열이, 통상가진력 주행 시에는 더미관 위주로 0.05mm 이하의 미세균열이 발생하였고 덤프 주행 후에 추가 균열은 발생하지 않았음. 실험에서 발생한 미세균열은 KS F 4403 및 미국 ASTM C497-05의 허용균열 폭인 0.25mm보다 현저히 작은 미세균열로 최소토피고 1m를 확보하면 강성관의 안정성은 문제가 없는 것으로 나타남

5 수치해석 결과

○ 유한요소해석으로 토피고 및 관경 변화에 따른 관로거동을 분석한 결과, 토피고가 증가할수록 관로에 작용하는 윤압의 영향은 감소하고 성토하중의 영향이 증가하였음

○ 균열 검토결과, 일부 강성관의 변형률이 콘크리트의 균열개시변형률 이상인 것으로 나타났으나, 철근의 변형률은 항복변형률보다 충분히 낮아 균열 가능성은 매우 낮은 것으로 평가되었음. 실측토압이 수치해석에서의 토압보다 작았기 때문에 실제 강성관의 거동은 수치해석결과 보다 더 안전한 것으로 판단됨

LHRI Practical Report

차례

Ⅰ. 서론 ····· 1

Ⅱ. 관로 터파기 관련 기준조사 ····· 9

Ⅲ. 흙쌓기 역학성능시험 ····· 39

Ⅳ. 관로의 안전성 평가 시험 ····· 61

Ⅴ. 수치해석 결과 ····· 119

Ⅵ. 결론 ····· 135

참고문헌 ····· 141

부록 ····· 147

표차례

[표 2-1] 대표적인 강성관 및 연성관 종류 ····· 9
[표 2-2] 원심력 철근콘크리트관(KS F 4403 보통관 2종 B형) 제품표준 및 강도 ····· 10
[표 2-3] PE 이중벽관 1종(KS M3500-1) 제품표준 및 강도 ····· 11
[표 2-4] 충격계수 ····· 15
[표 2-5] 차량하중(DB)의 기준 ····· 15
[표 2-6] 받침각에 따른 계수 k 값 ····· 16
[표 2-7] 모멘트 계수(N) ····· 19
[표 2-8] 기초조건과 계수와의 관계 ····· 19
[표 2-9] 연성관 기초 설치 기준(LH 설계지침(토목), 2024) ····· 20
[표 2-10] 하수관로 되메우기 재료 조건(KCS 61 00 00, 하수관로공사, 2022) ····· 21
[표 2-11] 되메우기 재료 조건(KCS 11 20 00, 토공사, 2020) ····· 22
[표 2-12] 하수관로 되메우기 시공 조건(KCS 61 00 00, 하수관로공사, 2022) · 22
[표 2-13] 되메우기 시공 조건(KCS 11 20 00, 토공사, 2020) ····· 24
[표 2-14] 농업용 관수로 되메우기 공사(KCS 67 25 00, 농업용 관수로 공사, 2018) · 24
[표 2-15] 되메우기 후 파이프의 다짐도, 원강성 계수 및 변형률의 관계 ····· 26
[표 2-16] 콤팩터 및 램머 특징 ····· 27
[표 2-17] 최소 토피고 기준 조사(조진우 등, 2013) ····· 28
[표 2-18] 노상다짐 기준(KDS 44 30 00, 도로토공, 2023) ····· 29
[표 2-19] 노상다짐 기준(KCS 67 35 10, 농도 토공사, 2018) ····· 29
[표 2-20] 흙의 종류에 따른 다지기 장비의 적합성(KRACS 47 10 25, 토공사, 2021) 31
[표 2-21] 산업안전보건기준에 관한 규칙(별표 11, 2023.11 개정) ····· 32
[표 3-1] 현장 지반 및 되메움 다짐도 평가 ····· 40

표차례

[표 3-2] 비중시험결과 ····· 47
[표 3-3] 액·소성 한계시험 결과 ····· 50
[표 3-4] 체분석 결과 ····· 54
[표 3-5] 다짐 및 시료 준비 방법 ····· 55
[표 3-6] 다짐시험 결과 ····· 58
[표 3-7] 기본물성시험 요약 ····· 59
[표 4-1] 연구추진 범위 ····· 63
[표 4-2] 토압계 제원 ····· 67
[표 4-3] 변위계 제원 ····· 67
[표 4-4] 다짐 횟수에 따른 LFWD 탄성계수 및 상대다짐도 변화 ····· 72
[표 4-5] 세종 5-2(1) 다짐 횟수에 따른 LFWD 탄성계수 및 상대다짐도 변화 ···· 73
[표 4-6] 토피고 별 평균 탄성계수 및 다짐도 평가 결과 ····· 74
[표 4-7] 토피고 별 이론 토압 및 토압계 측정 결과 ····· 75
[표 4-8] Test 1-1 실험 조건 ····· 76
[표 4-9] Test 1-1 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa] ····· 77
[표 4-10] Test 1-1 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa] ····· 77
[표 4-11] Test 1-1 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa] ····· 77
[표 4-12] Test 1-2 실험조건 ····· 85
[표 4-13] Test 1-2 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa] ····· 86
[표 4-14] Test 1-2 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa] ····· 86
[표 4-15] Test 1-2 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa] ····· 87
[표 4-16] Test 1-3 실험조건 ····· 90

표차례

[표 4-17] Test 1-3 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa] ····· 91
[표 4-18] Test 1-3 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa] ····· 91
[표 4-19] Test 1-3 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa] ····· 92
[표 4-20] Test 1-4 실험조건 ····· 98
[표 4-21] Test 1-4 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa] ····· 99
[표 4-22] Test 1-4 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa] ····· 99
[표 4-23] Test 1-4 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa] ····· 99
[표 4-24] Test 1-5 실험조건 ····· 105
[표 4-25] Test 1-5 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa] ····· 106
[표 4-26] Test 1-5 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa] ····· 107
[표 4-27] Test 1-5 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa] ····· 107
[표 4-28] 강성관의 현장 실험결과 ····· 114
[표 4-29] 연성관의 관련 주요 KS 규격 ····· 116
[표 4-30] 연성관의 현장 실험결과 ····· 117
[표 5-1] 수치해석 모델의 입력 물성값 ····· 122
[표 5-2] 수치해석 접촉조건 ····· 123
[표 5-3] 수치해석 적용응력(10톤 진동롤러의 윤압) ····· 125
[표 5-4] 수치해석 결과 개요 (단위: mm) ····· 127
[표 5-5] 관정 실측 토압 및 수치해석 토압 비교·분석(10ton롤러 통상 가진 조건) ··· 131
[표 5-6] 수치해석에 의한 강성관의 균열발생 가능성 분석 ····· 132

그림차례

[그림 1-1] 관로 터파기/되메우기 개선안 ····· 2
[그림 1-2] 되메우기 다짐도별 덤프(약 26.5톤) 주행 시 토압 및 윤압 측정결과 ···· 3
[그림 1-3] 비다짐 되메우기 강성관의 균열 발생 ····· 3
[그림 2-1] 차량 하중에 의한 윤압(활하중) 산정 ····· 14
[그림 2-2] 암반 및 연약지반 기초 설계 방법(LH 설계지침(토목), 2024) ····· 17
[그림 2-3] 되메우기 장비 ····· 26
[그림 2-4] 유동성 채움재의 유동성(이소연 등, 2018) ····· 34
[그림 2-5] 유동화 실험(이준 등, 2018) ····· 36
[그림 2-6] CLSM 채움을 위한 관로 터파기(이소연 등, 2018) ····· 37
[그림 2-7] CLSM 채움 및 DCPT test 수행(이소연 등, 2018) ····· 37
[그림 3-1] 들밀도 시험기 ····· 41
[그림 3-2] 소형충격재하시험기 모식도 ····· 42
[그림 3-3] 지오게이지 모식도 ····· 44
[그림 3-4] Fall Cone 시험 ····· 49
[그림 3-5] 액소성 한계 시험 결과 ····· 50
[그림 3-6] 천안 시료 체분석+비중계시험 결과 ····· 53
[그림 3-7] 세종 5-2(1) 시료 체분석+비중계시험 결과 ····· 53
[그림 3-8] 세종 5-2(2) 시료 체분석+비중계시험 결과 ····· 54
[그림 3-9] 천안시료 다짐시험 결과 ····· 57
[그림 3-10] 세종 5-2(1)시료 다짐시험 결과 ····· 57
[그림 3-11] 세종 5-2(2)시료 다짐시험 결과 ····· 58
[그림 4-1] 토압계 측정 방식 ····· 62

그림차례

[그림 4-2] 변위계 측정 방식 ····· 62
[그림 4-3] 관로 매설 조건 및 하중 재하 방법 ····· 65
[그림 4-4] 실험관 센서 설치 방법 모식도 ····· 66
[그림 4-5] 토압계 설치 사진 ····· 67
[그림 4-6] 변위계 설치 사진 ····· 68
[그림 4-7] 관로 시공 방법 ····· 69
[그림 4-8] 하중 재하 방법 ····· 70
[그림 4-9] 천안 LFWD와 상대다짐도 상관관계 ····· 71
[그림 4-10] 세종 5-2(2) 상대다짐도와 간편다짐장비 상관관계 ····· 72
[그림 4-11] 토피고에 따른 토압 측정 ····· 74
[그림 4-12] 토피고 별 이론값 및 실측값 수직 토압 비교 ····· 75
[그림 4-13] Test 1-1 실험 전경 ····· 76
[그림 4-14] 10톤 롤러 동적 주행 ····· 78
[그림 4-15] 10톤 롤러 제자리 가진 ····· 78
[그림 4-16] 25톤 덤프트럭 주행 ····· 79
[그림 4-17] 진동 롤러 재하 방식에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률 비교 ····· 80
[그림 4-18] Test 1-1 관로 하중 재하에 따른 영구변형률 ····· 81
[그림 4-19] 강성관 D600 토피고 0.3m 제자리 가진 시 균열 발생 ····· 82
[그림 4-20] 강성관 D600 토피고 0.6m 제자리 가진 시 균열 발생 ····· 82
[그림 4-21] 강성관 D600 토피고 1.0m 제자리 가진 시 균열 발생 ····· 82
[그림 4-22] 강성관 D600 토피고 0.3m 균열 확인 ····· 83
[그림 4-23] 강성관 D600 토피고 0.6m 균열 확인 ····· 84

그림차례

[그림 4-24] 강성관 D600 토피고 1.0m 균열 확인 ····· 84
[그림 4-25] 강성관 D1500 토피고 1.0m 균열 확인 ····· 85
[그림 4-26] Test 1-2 실험 전경 ····· 86
[그림 4-27] 10톤 롤러 횡 및 종방향 주행 ····· 88
[그림 4-28] 25톤 덤프트럭 횡 및 종방향 주행 ····· 88
[그림 4-29] 재하 방향에 따른 연성관의 토압 증분 및 탄성변형률 ····· 89
[그림 4-30] Test 1-2 관로 하중 재하에 따른 영구변형률 ····· 90
[그림 4-31] Test 1-3 실험 전경 ····· 91
[그림 4-32] 10톤 롤러 횡방향 주행 ····· 92
[그림 4-33] 10톤 롤러 종방향 주행 ····· 93
[그림 4-34] 재하 방향에 따른 연성관의 토압 증분 및 탄성변형률 ····· 93
[그림 4-35] Test 1-3 관로 하중 재하에 따른 영구변형률 ····· 94
[그림 4-36] 강성관 D1500 토피고 1.5m 롤러 종방향 주행시 균열 발생 ····· 95
[그림 4-37] 강성관 D600 토피고 1.0m 균열 발생 하지 않음 ····· 95
[그림 4-38] 강성관 D1500 토피고 1.0m 롤러 종방향 주행시 균열 발생 ····· 96
[그림 4-39] 강성관 D1500 토피고 1.5m 균열 ····· 96
[그림 4-40] 강성관 D600 토피고 1.0m 미세균열 ····· 97
[그림 4-41] 강성관 D1500 토피고 1.0m 균열 ····· 97
[그림 4-42] Test 1-4 실험 전경 ····· 98
[그림 4-43] Test 1-4 10톤 롤러 횡 및 종방향 주행 ····· 100
[그림 4-44] Test 1-4 10톤 롤러 횡 및 종방향 주행 ····· 100

그림차례

[그림 4-45] 재하 조건에 따른 강성관의 토압 증분 및 탄성 변형률 ····· 101
[그림 4-46] Test 1-4 관로 하중 재하에 따른 영구변형률 ····· 102
[그림 4-47] 강성관 D900, D1200 균열 확인 ····· 103
[그림 4-48] 강성관 D250, D400 균열 확인 ····· 103
[그림 4-49] 시험조건별 균별 발생 조건 비교 ····· 105
[그림 4-50] Test 1-5 실험 전경 ····· 106
[그림 4-51] Test 1-5 시공 및 하중 재하 순서 ····· 108
[그림 4-52] 재하 조건에 따른 관로의 토압 증분 및 탄성 변형률 ····· 109
[그림 4-53] Test 1-5 하중 재하에 따른 영구변형률 ····· 109
[그림 4-54] 강성관 D900 균열 육안 검측 모식도 ····· 111
[그림 4-55] 강성관 D1100 균열 육안 검측 모식도 ····· 111
[그림 4-56] 강성관 D1500 균열 육안 검측 모식도 ····· 111
[그림 5-1] 수치해석 모델 ····· 120
[그림 5-2] 수치해석 관로 모델 상세 ····· 121
[그림 5-3] 수치해석 모델 요소 구성 (PE 연성관, D1200, H1000 조건) ····· 124
[그림 5-4] 성토하중에 따른 이론식 및 수치해석 결과 비교·분석 ····· 125
[그림 5-5] RCP-600 토피고별 거동 특성 ····· 128
[그림 5-6] RCP-1500 토피고별 거동 특성 ····· 129
[그림 5-7] 관경별 거동 특성 ····· 130

Ⅰ 서론

Key Point

- 관로 터파기/되메우기 방법의 현장 상황을 고려하여 개선 가능성 검토
- 관로 터파기/되메우기 개선을 위한 기준검토 및 현장실험 등을 통한 안전성 검증

1 연구배경 및 목적

1) 연구배경

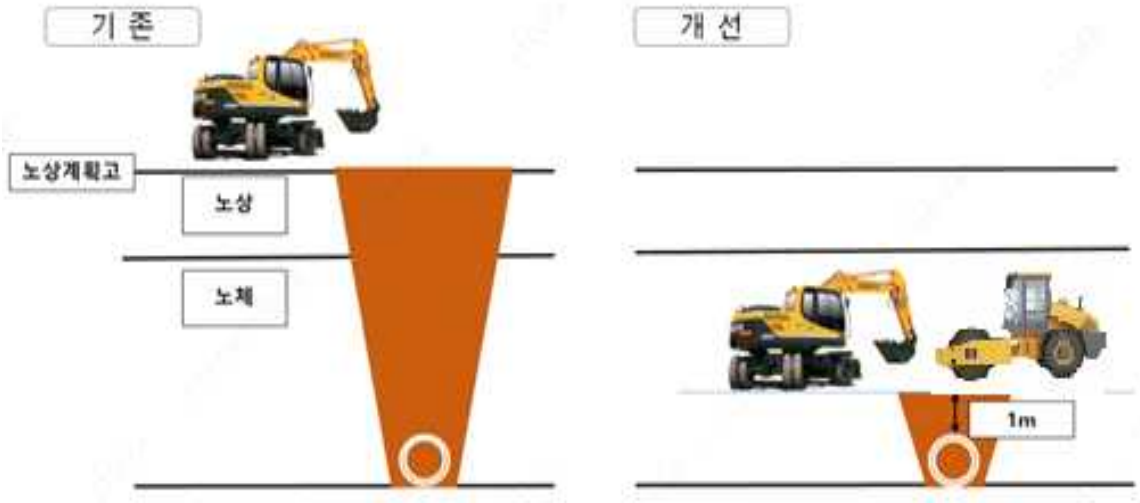
■ 연구결과 도출의 필요성

○ 2023년 3월에 LH 스마트건설안전본부(당시 건설안전기술본부)와 토지주택연구원 및 LH 품질시험인정센터를 중심으로 하는 업무협의 시스템 TF가 발족됨. TF의 목표는 관로 터파기/되메우기 방법 및 되메우기 다짐현장시험방법을 개선하기 위한 것임

○ 우리공사의 관로 터파기는 노상 계획고를 기준으로 함에 따라 흙쌓기를 노상 계획고까지 수행하고 나서, 관로 설치 지점까지 굴착하고 되메우기를 함으로써, 과도한 굴착, 되메우기 및 다짐 중복작업 등으로 인해 원가상승 및 과도한 공기소요 등의 문제점을 가지고 있음

○ 우리 연구원에서 24년도에 완료한 '단지공사 흙쌓기 시공/품질관리 방안'연구과제에서는 우리공사 토목설계지침에서 "관로상부 1m 이상은 폭에 따라 노상 다짐장비를 사용할 수 있다"는 기준에 착안하여 최소토피고 1m 위에서 15톤 만재 덤프(약 25톤)를 주행하여 강성관의 안정성을 현장실험으로 검토함

○ 실험결과, 되메우기 시 시방대로 다짐이 이루어지면 최소토피고 1m 위로 15톤 만재 덤프가 주행해도 안정성에 문제가 없음을 확인하고 [그림 1-1]과 같은 관로 터파기/되메우기 개선(안)을 제안함



[그림 1-1] **관로 터파기/되메우기 개선안**

○ 단, 관로 터파기/되메우기 개선방법을 실무에 적용하기 위해서는 토목설계지침에 명시된 노상다짐장비(예 : 10톤 진동롤러)를 최소토피고(1m) 위에서 주행해도 관로의 안정성이 확보되는지 확인이 필요하여 스마트건설안전본부의 과제제의로 연구가 착수함

○ 선행연구에서는 실험한 관로는 500mm 직경의 강성관(콘크리트관)이었고, 스마트단지기술처에서는 개선안을 적용하기 다양한 크기의 강성관과 연성관의 안정성을 확인하는 것이 필요하다고 요청함

○ 따라서 본 연구의 현장실험에서는 다음과 같은 안정성을 확인하고자 함

- 10톤 진동롤러 및 덤프에 의한 관로에 전달되는 윤하중과 토압 측정
- 관 직경별(D200 ~ D1500mm), 관 종류별(강성관, 연성관) 안정성 확인
- 실험결과와 최소토피고 및 설계방법 상호 검토 및 필요시 조치방안 제시

2) 연구목적 및 범위

○ 본 연구는 관로 터파기 기준을 현장 상황에 맞게 개선하기 위함

○ 관로 터파기 방법 개선(안)의 안전성을 확인하고 필요시 관로 안전성을 확보할 수 있는 방안/조치 등을 제시하는 것임

○ 관의 연결부 누수 등으로 인하여 발생할 수 있는 다양한 문제(기초쇄굴 및 이로인한 장기적인 안정성 약화)에 대한 검토는 연구의 범위가 아님

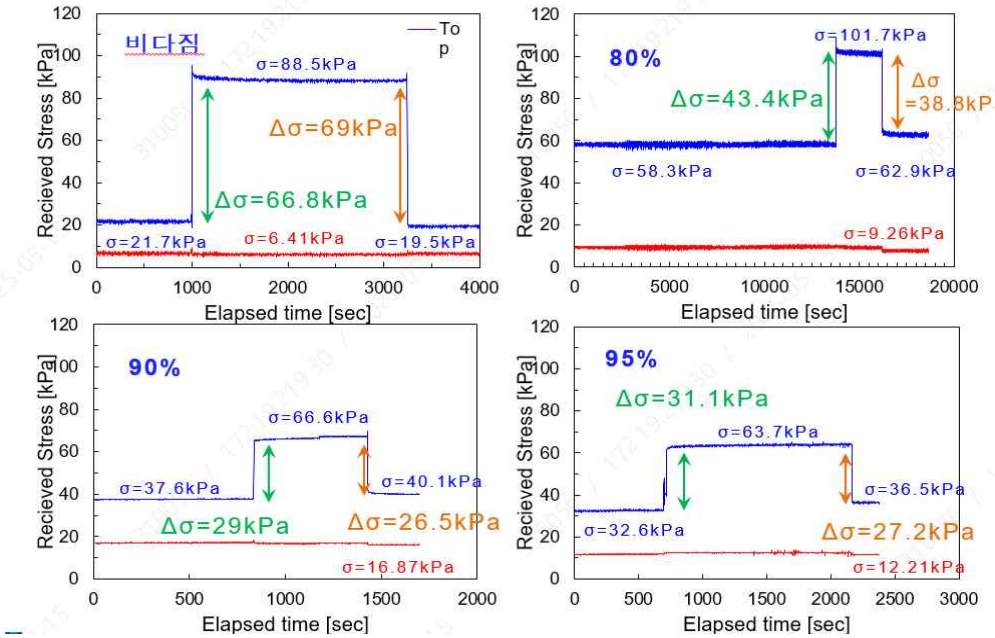
3) 선행연구 착안사항

○ 단지공사 흙쌓기 시공/품질관리 방안 연구(2024, 토지주택연구원)

- 개선된 관로 터파기 방안 제시하였고, 최소토피고 상에서의 덤프주행(15톤 만재)에 따른 강성관(D500mm)의 토압/윤압 측정 및 안전성 확인함.

○ 지하매설용 연성관의 변형특성에 관한 연구(2006, 토지주택연구원)

- 연성관에 대한 차량하중(덤프)에 대한 변형특성 조사함.



[그림 1-2] 되메우기 다짐도별 덤프(약 26.5톤) 주행 시 토압 및 윤압 측정결과



[그림 1-3] 비다짐 되메우기 강성관의 균열 발생
(80% 이상 다짐 되메우기 강성관들은 균열 미발생)

2 연구내용 및 방법

1) 연구내용

▮ 관로 관련 기준 조사

○ 강성관 및 연성관 설계기준 조사(KDS, 토목설계기침)

- 관로 토압 및 윤압 산정법
- 강성관 및 연성관 안전성 검토방법
- 강성관 및 연성관 강도 및 변형기준

○ 관로 시공법 조사(KCS, LHCS 등)

- 강성관/연성관 종류 및 제원 조사
- 터파기/되메우기 기준, 다짐기준 조사
- 다짐장비의 제원 및 실제 가동기준

▮ 관로 관련 연구 등 사례 조사

○ 관련 연구결과 및 동향 조사

○ 최신 되메우기 기술(유동화 채움재 등)

▮ 관로 안전성 검토(이론적/수치해석)

○ 관 종류별/관경별/하중별 안전성 검토

- 현장 하중 크기 분석
  - · 토압 분석
  - · 진동롤러, 덤프 하중 분석
- 기존 이론식에 의한 안전성 검토(최소토피고, 관기초 검토)
- 수치해석에 의한 안전성 검토(파괴여부, 변형량 해석)

관로 안전성 검토(현장실험)

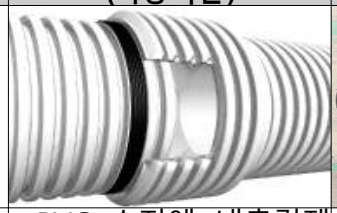
○ 현장 기본물성 및 파악 다짐도 확인

- 현장토, 되메우기토에 대한 기본물성 실험,
- 들밀도실험, 동평판실험

○ 터파기 깊이별 현장토압 측정

○ 윤하중 측정(진동롤러 출력별) : 적정 다짐에너지 파악

○ 관의 파손 및 변형 여부 분석

구 분	강성관	연성관	
	원심력 철근 콘크리트관 (흄관, 2종)	PVC (이중벽관)	PE (이중벽관)
형 상			
재질 및 개요	· 원심력 회전으로 조성된 콘크리트관으로 벽체 내에 종선 및 나선 등의 철선을 삽입한 관	· PVC 수지에 내충격제 및 첨가제를 배합하여 내.외피를 동시에 압출 성형하여 만든 관	· 파상형 PE관과 비슷하나 외압강도 증진 및 강도에 잘 견디도록 만든 2중 구조

관로 안전성 종합 분석 및 안전성 확보방안 제시

○ 이론적/수치해석 및 현장실험 결과 비교 분석에 의한 관의 안전성 종합분석

- 관로에 작용하는 토압/윤압 분석
- 관로의 파속 및 변형특성 분석

○ 필요시 관로 안전성 확보방안 제시(최소토피고 조정 또는 다짐장비 제원/출력 조정)

- 최소토피고(강성관) 및 기초에 따른 안전성(연성관) 검토

관로 터파기/되메우기 기준 제시

○ 흙쌓기층에서의 관로 터파기/되메우기 개선안

○ 최소토피고 및 다짐 시 관로 안전성 확보방안

2) 연구방법

▮ 기준조사

○ 강성관 및 연성관 설계기준 조사(KDS, 토목설계기침)

- 관로 토압 및 윤압 산정법
- 강성관 및 연성관 안전성 검토방법
- 강성관 및 연성관 강도 및 변형기준

○ 관로 시공법 조사(KCS, LHCS 등)

- 되메우기 기준, 다짐기준 조사
- 다짐장비의 제원 및 실제 가동방법

○ 최신 되메우기 기술(유동화 채움재 등)

▮ 외부 위탁

○ 연구내용 중 일부 과업은 자체 수행이 곤란하여 외부 전문기관에 용역 의뢰(외부 위탁)

○ 용역명 : 흙쌓기 지반에서의 관로 안전성 실험/해석 및 분석

▮ 실무부서 협력 및 사내외 전문가 활용

○ 현장실험을 통한 관로 안전성 확인/확보 방안의 LH 기준화를 위해 실무부서(스마트단지기술처)와의 긴밀한 협조를 위하여 실무직원이 연구 참여

○ 해당연구의 적절한 적용을 위하여 실용화 추진회의 개최

3) 연구주제별 수행방법

○ 현장조사 및 분석, 재료시험·구조해석(외부위탁), 실용화협의회 등 결과를 종합하여 시험시공계획 마련

연구항목		수행목적	수행방법	결과물
기준·사례조사	기준조사분석	• 관종별 관로 안전성 설계 및 설치방법 파악 • 관로 터파기/되메우기 시공기준 파악	• 국내외 기준 검토 •분석결과 실무 및 전문가 자문	• 설계/시공 개선(안)
	연구사례조사	• 관련 연구결과/동향조사 • 최신 되메우기 기술	• 국내외 연구/사례 조사	
실험계획 수립		• 관로 안전성 확인을 위한 세부 실험계획 수립	• 내외부 전문가 자문 • 실용화 협의회 개최	• 실험 계획 확정
관로 안전성 검토	이론적/수치해석에 의한 안전성 검토	• 기존 설계방법에 의한 관로 안전성 검토 및 실험세부계획 수립	•이론적 설계방법에 대한 관로 안전성검토(관기초, 최소토피고 검토) • 외부위탁 - 다짐하중에 대한 관로 안전성 수치해석 - 다짐하중에 대한 관로 안전성 현장실험 검증	• 관로 터파기 개선안의 안전성 확인 및 안전성 확보방안 • 관로 터파기/되메우기 시공/품질관리 기준
	현장실험에 의한 안전성 검토	• 최소토피고에서의 다짐하중에 대한 관로 안전성 확인 • 관로 안전성 확보방안 제시		
	관로 안전성 종합분석 및 안전성 확보방안 검토	관로 터파기 개선안의 안전성 확인	• 이론적/해석적 방법과 실험결과의 종합분석	

Ⅱ 관로 터파기 관련 기준조사

Key Point

- KDS 및 LH 토목설계지침을 바탕으로 강성관 및 연성관의 관로 토압 및 윤압 산정법, 안정성 검토방법 및 강도, 변형 기준을 조사하였음
- KCS 및 LHCS 등을 바탕으로 되메우기 기준, 다짐기준, 다짐장비의 제원 및 실제 가동방법, 최신 되메우기 기준 등의 관로 시공법을 조사하였음

1 강성관 및 연성관 설계기준 조사

1) 강성관 및 연성관 개요

(개요) 매설관은 관의 강성에 따라 강성관과 연성관으로 구분

○ 강성관 및 연성관의 경우 하중을 지지하는 매커니즘이 근본적으로 다르므로, 설계 시 안전성 검토 항목에서 차이 발생

○ 강성관(진동 및 전압 철근콘크리트관(VR관), 원심력 철근콘크리트관(흄관) 등): 관 자체의 강도로 상부 하중을 지지하며, 과도한 하중이 가해지는 경우 관 벽에 균열 및 파괴 발생

○ 연성관(PE관, PVC관, 파형강관): 관의 변형을 허용하며, 관이 수직으로눌릴 때 측면으로 팽창하여 주변 흙(수동토압)의 지지를 받아 하중지지

[표 2-1] **대표적인 강성관 및 연성관 종류**

종류		특징	관련 KS 규격
강성관	진동 및 전압 철근콘크리트관(VR관)	진동과 압력을 가해 만들어 조직이 치밀하고 강도가 높음	KS F 4403
	원심력 철근콘크리트관(흄관)	원심력을 이용해 성형한 전통적인 콘크리트관	KS F 4403

연성관	PE 이중벽관 (하수·배수용)	내화학성이 좋고 가벼워 시공이 빠른 특성, 충격 및 부식에 강함	KS M 3500-1
	PVC 이중벽관	내면이 매끄러워 유속 흐름이 좋음	KS M 3600
	파형강관	강철 표현에 파형을 주어 강도를 높임, 부식 방지 코팅 필요	KS D 3590

(제품표준) 강성관 및 연성관 제품표준

○ 다음은 강성관 중 널리 사용되는 원심력 철근콘크리트관(KS F 4403 보통관 2종 B형)의 제품표준 및 강도를 보여주고 있음

[표 2-2] 원심력 철근콘크리트관(KS F 4403 보통관 2종 B형) 제품표준 및 강도

호칭(안지름, mm)	두께 (mm)	중량 (kg)	균열강도 (kN/m)	파괴강도 (kN/m)
250	28	166	16.7	25.6
300	30	211	17.7	26.5
350	32	259	19.6	29.5
400	35	323	21.6	32.4
500	42	495	25.6	38.3
600	50	700	29.5	44.2
700	58	946	32.4	49.1
800	66	1230	25.4	53.0
900	75	1573	38.3	57.9
1000	82	1951	41.3	61.9
1100	88	2298	43.2	65.8
1200	95	2703	45.2	71.7
1350	103	3286	47.1	81.5
1500	112	3965	50.1	91.3

○ 다음은 연성관 중 널리 사용되는 PE 이중벽관(KS M 3500-1)의 제품표준 및 강도를 보여주고 있음

[표 2-3] PE 이중벽관 1종(KS M3500-1) 제품표준 및 강도

호칭 (평균안지름, mm)	평균바깥지름 (mm)	관벽 두께 (mm)	최소 내벽 두께 (mm)	공칭원강성 (kPa)
150	176	13	2	12.5
200	228	14	2	12.5
250	280	15	2	8
300	338	19	2	8
400	450	25	2	8
450	508	29	2	8
500	562	31	2	8
600	678	39	2	8
700	788	44	2	4
800	900	50	2	4
900	1012	56	2	4
1000	1124	62	2	4
1200	1350	75	2	4
1500	1690	95	2	2

(균열 및 파괴기준) 강성관(KS F 4403)의 균열 및 파괴기준

○ 위 기준에서는 강성관의 균열 강도 시험 시, 관체에 하중을 가하고 폭 0.05 mm를 초과하는 균열의 유무를 조사하고 있음

○ 강성관의 파괴 강도 시험 시, 관체에 하중을 가한 뒤 관체에 폭 0.05mm를 초과하는 균열이 발생했을 때의 하중과 시험기가 표시하는 최대 하중을 구하고 각각의 값을 유효길이로 나누어 균열 하중 및 파괴 하중으로 함

○ 균열 강도 검사는 1조의 관에서 1개의 시험용 관은 샘플링하여 관체에

0.05mm를 초과하는 균열이 없으면 그 시험용 관이 대표하는 조를 합격으로 함. 이 검사에서 합격하지 않은 경우, 그 조에서 다시 2개의 시험용 관을 샘플링하여 검사하고 2개 모두 합격하면 불합격 관을 제외한 그 조를 합격으로 하고 1개라도 합격하지 않으면 그 조 전체를 불합격으로 하도록 명시하고 있음

2) 관로 토압 및 윤압 산정법

(관로 토압) 매설토의 수직토압에 의한 관로 토압 산정

○ KDS 61 40 00(하수도 설계기준)에서는 매설토의 수직토압에 의해 작용하는 수직등분포 하중을 구하기위해 수직토압공식, 마스톤(Marston) 공식 등을 이용하도록 제시하고 있음

○ (강성관) 수직토압공식: 수직토압공식은 흙의 마찰력을 전혀 고려하지 않고 단순히 관상부 매설토의 중량이 관에 직접 작용하는 것으로 가정해서 구하는 식으로 측면의 마찰을 무시하여 산정

$$W_d = \gamma \times H$$

여기서, W_d는 매설토에 의한 수직토압(N/m^2)을, γ는 매설토의 단위중량(N/m^3)을, H는 흙두께(m)를 의미함.

○ 마스톤(Marston) 공식: 마스톤 공식은 토압계산에 가장 널리 이용되는 공식으로 수직토압은 굴착구간 바로 위의 흙기둥 중량의 전체가 관에 전달되지 않고 굴착면에 인접하는 흙기둥 사이의 전단마찰력을 상쇄한 하중이 관에 작용하는 것으로 하여 구함. 여기서, 전단마찰력은 이들 토압의 상대적 침하로 결정되며, 여기에는 수평토압이 관여함. 마스톤 공식에서는 이 수평토압에 랭킨(Rankine) 공식을 이용하고 있음. 일반적으로 사용되는 마스톤 공식은 아래와 같음

$$W = C_1 \times \gamma \times B^2$$

여기서, W는 관이 받는 하중(kN/m)을, r는 매설토의 단위중량(kN/m^3)을, B는 폭요소(width factor)로서 관의 상부 90° 부근에서 관매설을 위해 굴토한 도랑의 폭(m)을, C_1은 흙의 종류, 흙두께, 굴착폭 등에 따라 결정되는 상수임

○ 하수도설계기준에서는 마스톤공식의 도랑형(trench) 기준의 하중계수(C_1)만을 예시로 기술하고 있으며, 세부 기준을 명확하게 제시하지 않고 있는 실정임. 그러나, 실제 마스톤공식은 수직 굴착면을 기준으로 벽면의 마찰력을 도출하는 방법으로, 굴착면의 기울기가 완화될수록(도랑의 폭이 증가할수록) 전단마찰력이 감소하고 하중 특성이 돌출형(projecting)에 가까워지게 되며, 이를 천이폭(transition width)으로 표현하고 있음

○ Marston(1930)은 도랑형, 돌출형, 완전하지 않은 도랑형 및 돌출형 등에 따라 식을 구분하였으며, 본 절에서는 도랑형 및 돌출형에 대해서만 식을 기술하였음. 도랑형 및 돌출형 구분에 대한 세부적인 내용은 Marston(1930)의 연구에 제시하고 있음. 마스톤공식의 도랑형 식은 다음과 같음

$$W_c = C_d \times \gamma \times B_d^2$$

$$C_d = \frac{1 - e^{-\frac{2K\mu'}{B_d}H_c}}{2K\mu'}$$

여기서, W_c는 마스톤 공식에 의해 도출된 수직하중(N/m)을, C_d는 도랑형 관 하중계수를, γ는 매설토의 단위중량(N/m^3)을, B_d는 관 상단의 도랑 폭(m)을, μ'는 뒷채움재의 내부 마찰각(°)을, K는 주동토압계수를, μ'은 뒷채움재와 터파기면의 내부 마찰각(°)을(터파기재와 뒷채움재가 동일하므로 $\mu' = \mu$), H_c는 관 상단부터 계획고까지 수직거리(m)를 의미함. 마스톤공식의 돌출형 식은 아래와 같음

$$W_c = C_p \times \gamma \times B_c^2$$

$$C_p = \frac{e^{\pm \frac{2K\mu}{B_c}H} - 1}{\pm 2K\mu}$$

여기서, C_p는 돌출형관 하중계수를, B_c는 관 외경(m)을, μ는 뒷채움재의 내부 마찰각(°)을, 부호(+,-)는 강성관의 침하 및 주변지반 침하량의 침하 크기에 따라 달라지는 부호임

○ (연성관) 연성관의 경우 상부토압에 의해 관 측부의 매설토와 관로가 똑같이 변형하므로 관로에 작용하는 하중은 관로 폭만의 토압으로 하고 매설토에 의한 수직토압은 수직토압공식을 통해 도출

○ 수직토압공식은 흙의 마찰력을 전혀 고려하지 않고 단순히 관상부 매설토의 중량이 관에 직접 작용하는 것으로 가정

$$W_d = \gamma \times H$$

여기서, W_d는 매설토에 의한 수직토압(N/m^2)을, γ는 매설토의 단위중량(N/m^3)을, H는 흙 두께(m)를 의미함

(관로 윤압) 차량 하중에 의한 관로 윤압(활하중) 산정

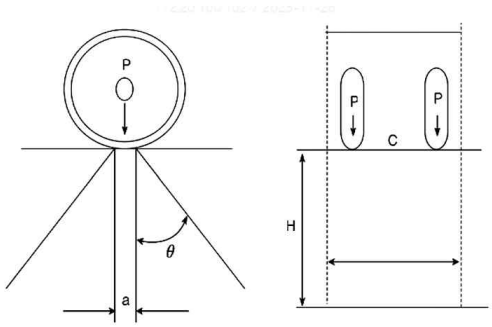
○ KDS 61 40 00(하수도 설계기준)에서는 매설관로의 상부로 차량 등이 통과하는 경우 그 하중에 의한 압력이 토압하중에 가산되는데 차량하중은 후륜하중을 사용하여 전륜하중의 영향은 무시하는 것으로 함

○ 강성관 및 연성관의 윤압 산정: 활하중에 의한 수직토압은 강성관 및 연성관 모두 동일

$$W_r = \frac{2p\,(1+i)}{C(a+2H\tan\theta)}$$

여기서, W_r은 윤압(활하중)(N/m^2)을, p는 후륜하중(참고치수 DB-13.5: 5.4t, DB-18:7.2t, DB-24:9.6t)을, a는 차륜접지길이(참고치수 0.2m), C는

차륜점유폭(참고지수 2.75m), θ는 분포각(참고지수 45°), i는 충격계수, H는 흙두께(m)를 의미함



[그림 2-1] **차량 하중에 의한 윤압(활하중) 산정**

○ LH 설계지침(토목)(2024)의 경우에도 매설관거의 상부로 차량 등이 통과하는 경우, 그 하중에 의한 압력이 토압하중에 가산되는데 차량하중은 후륜하중을 사용하며 전륜하중의 영향은 무시하도록 제시

○ 또한 위 기준에서는 하수관 기초설계 시 도로등급에 따라 적정 활하중을 선택하여 설계하되, 주도로(광로, 대로, 중로)와 부도로(주로, 소로)가 교차하는 교차로 구간에서는 주도로의 활하중을 적용하도록 하며, 특히 산업단지(물류, 유통단지 포함)내 중로 이상의 경우 중차량 통행을 감안하여 DB-24를 적용하도록 제시

[표 2-4] **충격계수**

H(m)	H ≤ 1.5	1.5 < H ≤ 6.5	H ≥ 6.5
i	0.5	2.4	9.6

[표 2-5] **차량하중(DB)의 기준**

하중(DB)	총중량(t)	전륜하중(t)(10%)	중륜하중(t)(40%)	후륜하중(t)(40%)
DB-24	43.2	2.4	9.6	9.6
DB-18	32.4	1.8	7.2	7.2
DB-13.5	24.3	1.35	5.4	5.4

3) 강성관 및 연성관 안정성 검토 방법

(강성관) 안정성 검토 방법

○ 강성관의 안정성 검토는 수직토압(토압+윤압) 도출 → 관체에 발생하는 최대 휨모멘트 도출 → 관의 허용저항 휨모멘트 도출 → 안전율 평가의 절차로 수행됨

○ KDS 61 40 00(하수도 설계기준)에서는 강성관의 강도계산을 위해 철근콘크리트 관의 경우 균열하중을 외압강도로 적용하고, 도관의 경우 파괴하중을 외압강도로 정의함

○ 최대휨모멘트 도출: 매설관에 등분포 하중(토압+윤압)이 작용하는 경우 관체에 발생하는 최대휨모멘트는 아래와 같음

$$M_{\max} = k \times q \times R^2$$

여기서, $M_{\max}$는 관체에 발생하는 최대휨모멘트($kN \cdot m/m$)를, k는 관의 받침조건에 따라 변하는 계수를, q는 매설관에 작용하는 등분포하중(kN/m^2)을, R은 관두께 중심반경(m)을 의미함

[표 2-6] 받침각에 따른 계수 k 값

받침각 2α(도)	k값	
	고정받침의경우	자유받침의경우
30	-	0.470
60	-	0.377
90	0.303	0.314
120	0.243	0.275
180	0.220	-

○ 허용저항 휨모멘트 도출: 관체의 허용 저항 휨모멘트는 실무에서 아래와 같이 사용됨

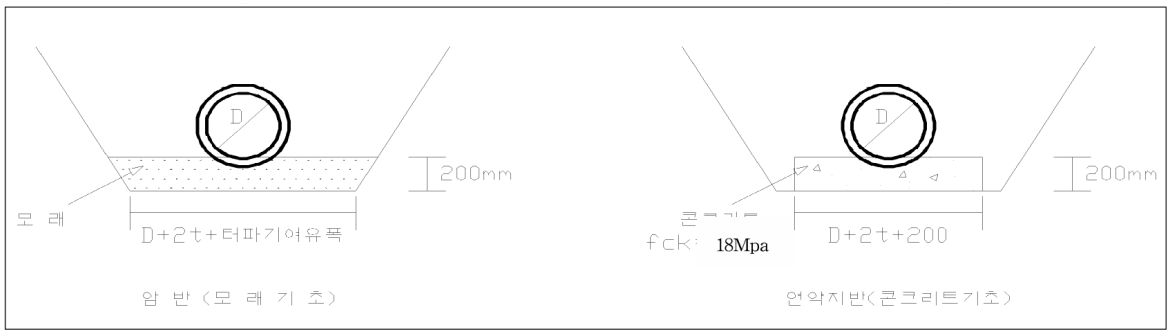
$$M_r = 0.318 \times Q \times R + 0.239 \times W_t \times R$$

여기서, M_r은 허용저항 휨모멘트, Q는 관의 외압강도(kN/m), W_t는 관의 단위 미터 당 중량(kN/m)을 의미함

○ 안전율 평가: LH 설계지침(토목)(2024)에서는 하수관 기초형태 및 규격을 선정하기 위하여 반드시 구조계산을 실시하도록 제시하고 있으며, 안전율을 1.1로 적용하여 다음과 같이 기초 타입 선정

$$\text{허용저항휨모멘트}(M_r) \geq \text{안전율} \times \text{기초타입별최대휨모멘트}$$

○ 암반지역 및 연약지반은 구조계산 결과에 관계 없이 시공성 및 관보호를 위해 다음과 같이 기초를 설계해야 함(LH 설계지침(토목), 2024). 다만, 구조계산결과 표준치보다 상회할 경우에는 구조계산 결과에 따름.



[그림 2-2] 암반 및 연약지반 기초 설계 방법(LH 설계지침(토목), 2024)

여기서, 터파기 여유폭은 LH 설계지침(토목)(2024) 3.7.3 구조물 터파기 비탈면 기울기의 종류별 터파기 여유폭 적용

(연성관) 안정성 검토 방법

○ 연성관의 안정성 검토는 강성관에서 수행하였던 휨모멘트에 대한 안전율 평가와 함께 휨응력 및 허용변형률에 대한 검토 필요

○ 최대휨모멘트 및 최대휨응력 도출

$$M_{\max} = K_1 \times q \times R^2 + K_2 \times p \times R^2$$

$$f = \frac{M_{\max}}{Z}$$

여기서, $M_{\max}$는 관체에 발생하는 최대휨모멘트($kN \cdot m/m$)를, K_1 및 K_2는 각각 매설토와 활하중에 의한 휨모멘트 계수를, q는 매설관에 작용하는 등분포하중(kN/m^2)을, R은 관두께 중심반경(m)을, p는 활하중에 의한 등분포하중(kN/m^2)을, f는 관체에 발생하는 최대휨응력(kN/m^2)을, Z는 관길이 1m 당 단면계수(m^3/m)를 의미함

○ 허용저항 휨모멘트 및 허용휨응력 도출

$$M_r = N \times W_c \times R$$

$$W_c = (0.149 \times PS + 0.061 \times E^{'})/(D_e \times L) \times \Delta D$$

$$f_a = M_r/Z$$

여기서, M_r은 허용저항 휨모멘트를, N은 모멘트 계수를, W_c는 관의 허용외압을(kN/m), PS는 최소강성(kN/m^2)을, $E^{'}$은 되메우기 흙의 반력계수(kN/m^2)를, D_e는 변형 지연 요인(1.5)을, L은 유효 받침각에 의한 상수를, ΔD는 관의 변형률 5% 일 때 수평 또는 수직 변형량(m)를, f_a는 허용저항 휨응력을 의미함

○ 안전율 평가: 강성관과 동일하게 안전율을 1.1로 적용하여 다음과 같이 기초 타입 선정

$$\text{허용저항휨모멘트}(M_r) \geq \text{안전율} \times \text{기초타입별최대휨모멘트}$$

[표 2-7] 모멘트 계수(N)

유효받침각 (2α)	0°	30°	60°	90°	120°
관정	0.150	0.148	0.143	0.137	0.131
관저	0.294	0.234	0.189	0.157	0.138

[표 2-8] 기초조건과 계수와의 관계

기초조건	시공받침각 (θ)	유효받침각 (2α)	관위치	휨모멘트계수		변형계수	
				K_1	K_2	K_3	K_4
A	90°	60°	관정	0.132	0.079	0.102	0.030
			관저	0.223	0.011		
B	180°	90°	관정	0.120	0.079	0.085	0.030
			관저	0.160	0.011		
C	°360	120°	관정	0.107	0.079	0.070	0.030
			관저	0.121	0.011		

○ 변형률 도출: 관체에 발생하는 수직방향 변형량 및 변형률 도출

$$\delta = K_3 \cdot \frac{qR^4}{EI} + K_4 \cdot \frac{pR^4}{EI}$$

$$V = \frac{\delta}{2R} \times 100$$

여기서, δ는 토압과 윤압에 의한 변형량의 합(m)을, K_3 및 K_4는 각각 매설토 및 활하중에 의한 변형률 계수를, E는 관재료의 탄성계수(kN/m^2)를, I는 관길이 1m 당 단면2차모멘트(m^4/m)를, V는 관의 직경변형률(%)을 의미함

○ 변형률 판정: 연성관의 변형률은 장기변형률 기준으로 내경의 5% 이내로 명시되어 있음(공사완료 후 50년, 5.0% 이내)

○ LH 설계지침(토목)(2024)에서는 연성관의 경우 기초를 설치해야 하며, 구조계산 결과 및 지반조건에 따라 다음 표에서 정하는 기준 이상으로 설치하도록 제시

[표 2-9] 연성관 기초 설치 기준(LH 설계지침(토목), 2024)

절토지역	원지반 불량 성토지역	연약지반
180° 모래 기초	무근 콘크리트 기초	무근 or 철근콘크리트 기초 (철근 13mm, 간격 20cm)

여기서, 모래기초는 20mm 이하 쇄석, 재생골재, 재생모래를 대체 사용할 수 있으며, 연약지반은 LH 설계지침(토목)(2024) 3.10.2 연약지반 판정기준에 따름

○ LH 설계계지침(토목)(2024)에서는 하수관 자유기초에 사용하는 재료는 석분, 화강암질 풍화토(마사토), 모래를 사용할 수 있으며, 경제성 수급상황 및 현장여건을 감안하여 선정하도록 제시

2 관로 시공법 조사

1) 관로 시공방법 개요

■ (개요) 되메우기 및 다짐기준 개요

○ 관로 터파기 후 되메우기 및 다짐공사는 매설된 관로의 장기적인 안정성과 기능을 확보하는데 필수적임. 특히, 연성관의 경우 주변 흙의 다짐 품질에 따라 변형 거동이 결정되므로 시공 기준 준수가 요구됨

○ 되메우기 및 다짐관련 LH 기준은 LH 설계지침(토목)(2024)에 기술되어 있으며, 국가기준으로 KDS 61 40 00 (하수도 설계기준, 2020) 및 KCS 61 00 00(하수관로공사 표준시방서, 2022) 등이 있음

2) 되메우기 재료 및 시공기준

■ (되메우기 재료) 되메우기 재료 기준 및 품질관리

○ KCS 61 00 00 하수관로공사 표준시방서(2022) 및 KCS 11 20 00 토공사(2020) 등에서는 하수관로 되메우기 재료에 대해서 상세하게 다루고 있음

[표 2-10] **하수관로 되메우기 재료 조건(KCS 61 00 00, 하수관로공사, 2022)**

KCS 61 20 15 굴착 및 되메우기
6.2.1 재료일반 하수관로 되메우기 재료 조건은 다음에 적합하여야 한다. (1) 활성이 없는 무기질의 흙으로서 최대입경 100mm 이하이어야 하며 식물의 뿌리, 동결재료, 화석 연료의 재 등이 포함되지 않을 것 (2) 벤토나이트, 온천여토, 산성백토, 유기질토 등 흡수성이 크며 압축성이 큰 흙이 포함되지 않을 것 (3) 빙토, 빙설, 초목 등 다량의 부식물을 함유하지 않을 것 (4) 통상적 방법으로 최적함수량에서 명시된 밀도로 다져질 수 없는 부적합한 성질의 재료가 아닐 것 (5) 함수비가 너무 높아 다지기에 부적합하고 공사사용전 현장에서 건조시킬 수 없는

재료가 아닌 것
(6) 관과 직접적으로 접촉되는 관주위(관상단 200mm까지) 되메움재 사용시 양질토 기준 중 최대치수 100mm 까지 사용 가능하나, 관에 손상을 줄 수 있는 호박돌이나 날카로운 암편이 함유되어 있는 사용하지 않아야 함
(7) 굴착토질이 아래 조건을 만족하는 양질토일 경우 그대로 사용
① 최대치수 : 100mm 이하
② 4.75mm 체 통과량 : 25~100%
③ 0.075mm 체 통과량 : 15% 이하
④ 소성지수 : 10% 이하
⑤ 시방 다짐 실시한 흙 수정 N 치 : 10 이상

[표 2-11] **되메우기 재료 조건(KCS 11 20 00, 토공사, 2020)**

KCS 11 20 25 되메우기 및 뒤채움
2.1.2 되메우기 재료 하수관로 되메우기 재료 조건은 다음에 적합하여야 한다 (1) 되메우기 재료는 구조물의 기초를 시공하기 위하여 터파기한 재료 또는 땅깎기의 재료를 말하며 KCS 11 20 20에 적합하여야 한다 (2) 되메우기 재료는 압축성이 적고 물의 침투에 의해 강도가 저하되지 않아야 하며, 다지기 쉽고 동상의 영향을 받지 않는 재료를 사용하여야 한다 (3) 구조물과 포장층 아래의 파낸 구덩이와 도랑에 대한 되메우기는 명시된 구조물 쌓기로 하여야 하고, 보통쌓기는 넓은 구역과 조경구역의 땅파기와 도랑의 되메우기에만 이용한다 ··· 이하생략

■ (되메우기 시공) 되메우기 시공 및 절차 기준

○ KCS 61 00 00 하수관로공사(2022) 및 KCS 11 20 00 토공사(2020)에서는 하수관로 되메우기 시공에 대해서 상세하게 다루고 있음

[표 2-12] **하수관로 되메우기 시공 조건(KCS 61 00 00, 하수관로공사, 2022)**

KCS 61 20 15 굴착 및 되메우기
6.3.2 되메우기

(1) 되메움 재료는 덩어리지거나 동결된 상태가 아니고 자갈, 입목, 이토 및 점질토 덩어리 등이 혼입되지 않은 양질 토사이어야 한다
(2) 다짐에 필요한 최적함수비는 현장 시험결과에 따라 공사감독자(건설사업관리자)의 지시에 따르며, 최적 함수비를 유지하기 위해 습윤시키거나 통풍에 의해 건조시켜야 한다
(3) 별도의 지시에 되었거나 규정을 하지 않는 한 최종계획고까지 시공하되, 기존 시설물을 손상시키지 않도록 조심스럽고 성실하게 수행하여야 하며, 소요 다짐 및 다짐도가 되도록 다진다.
(4) 되메움 재료를 부설하는 동안 관의 위치가 안전하게 유지되고, 관 및 보호공에 손상이 되지 않도록 해야 한다
(5) 관 주위(관상단 200mm까지) 되메움은 재료의 분리가 일어나지 않도록 주의 깊게 200mm 두께로 다짐을 시행한 후 관로의 중심선 좌우에 대칭(동일한 높이)으로 되메우기하여 과다한 편심응력이 걸리지 않도록 하여야 하며, 관의 중심구간(스프링구간)이하인 헌치부(측면 곡면부)의 가짐을 철저히 하기 위하여 봉다짐이나 삽다짐 등을 실시하도록 하여야 한다. 이때 적정다짐 시기는 관의관경(D)의 D/2(스프링구간)를 넘지 않도록 다짐을 시행하여야 한다
(6) 관경이 400mm 이하인 경우에는 관의 부상방지를 위해서 관의 스프링구간(관의 중간지점)에 대해서 한번 다지고 관의 상단부에 다짐을 실시한다. 관경이 400mm 초과하는 경우에는 다음 3.2.7의 조항을 따른다
(7) 관 상단 200mm 이상의 되메움은 최대 300mm 층으로 되메우면서 다져야 한다. 각 매설층은 살수 혹은 래머(또는 콤팩트 등)로 다져야 하며 관 자체에 손상을 줄 정도의 봉 다짐을 해서는 아니되며, 관 상부에 불도저로 한꺼번에 다량으로 메우거나 트럭으로부터 직접 쏟아부어 관체에 과중한 하중을 주지 않도록 한다. 또한 되메우기 재료가 모래인 경우, 필요하면 더돋기를 시행하여야 한다. 되메우기가 부실하거나 충분히 못할 경우에는 이를 보완 시공해야 한다. 다짐을 그 다음 층을 되메움하기 전에 완전하게 균일 다짐을 행하여야 한다
(8) 특히 관 주변에 물이 많이 발생하는 홍수기나 하천인근의 수중구간에서 연성관을 시공하는 지역에서는 시공시 발생하는 관의 부상에 주의를 기울여서 부력방지공(부력방지앵커, 관 받침대 등)을 설치하여 관의 경사를 고려한 안정적인 시공을 하여야 한다
(9) 되메우기 다짐은 충분히 다짐이 끝났을 때 관이 완전히 원형을 유지해야 하며, 되메움과 다짐 시 관 및 시설물에 손상이 가지 않도록 주의해야 하며, 손상된 부분은 시공자 부담으로 원상 복구해야 한다
(10) 터파기 토사는 1-3-6 2. 재료 2.1.7의 조건을 만족 시 공사감독자(건설사업관리자)의 승인을 얻은 후 관 되메움재로 할 수 있으며, 되메움 토사가 관 기초, 관 주위, 관 상단 되메움 모래로서 사용 가능할 경우에도 공사감독자(건설사업관리자)의 승인을 얻은 후 사용할 수 있다
(11) 관로의 매설깊이는 동결심도 및 하중을 고려하여야 하며 1.0m 이상을 원칙으로

하나 현장여건상 불가피한 경우 관 보호공을 적용하여 조정할 수 있다

··· 이하생략

[표 2-13] **되메우기 시공 조건(KCS 11 20 00, 토공사, 2020)**

KCS 11 20 25 되메우기 및 뒤채움
3.3.2 되메우기, 흙쌓기 및 땅고르기 하수관로 되메우기 재료 조건은 다음에 적합하여야 한다 (1) 지하구체공사 종료 후 되메움 시기는 흙의 반입방법, 다짐방법, 콘크리트 강도 등을 고려하여 구조물에 손상이 없도록 결정한다 (2) 되메우기에 앞서 구조체에 붙어 있는 거푸집 등은 완전히 제거한다 (3) 되메우기 흙의 재료는 이 기준에 따른다. 이 기준에 그 내용이 없는 경우는 공사감독자의 승인을 얻어 사질토 또는 굴착된 흙 중에 체가름하여 잡석이나 다짐에 방해되는 이물질을 제거한 흙을 사용한다 (4) 되메우기 재료는 모래, 석분, 또는 양질의 토사를 사용하고 발파석인 경우 최대 입경이 100mm 이하로 한다 ··· 이하생략

[표 2-14] **농업용 관수로 되메우기 공사(KCS 67 25 00, 농업용 관수로 공사, 2018)**

KCS 67 25 10 농업용 관수로 공사
3.1.2 되메우기 (7) 파형 폴리에틸관의 30cm 까지는 자갈이 섞이지 않은 양질의 흙으로 다지면서 채워주어야 하며 관의 위치가 변하지 않도록 유의하되 완공 후 상부하중에 의한 관의 횡방향 하중을 상쇄할 수 있도록 되메우기 시에 횡방향 역변형을 약 3%까지 사전에 발생시켜야 한다 ··· 이하생략

※ 대부분의 기준들(KCS 61 00 00, KCS 11 20 00)에서는 하수관로 되메우기 재료의 최대입경을 100mm 이하로 제시하고 있으나, 다짐 시 100mm에 달하는 날카로운 암편이 관체에 손상을 유발시킬 수 있다. 따라서 가급적 관 주위 및 헌치부(측면 곡면부) 다짐 수행 시 암편이 포함되지 않은 양질의 토사를 사용하여 되메우기 하는 것을 권장함

• 기존 현장에서 되메우기한 흙에 뾰족한 암편이 섞여 있어 PVC 관의 천단부 손상이 발생한 사례 확인

3) 되메우기 다짐

(목표다짐도) 목표다짐도 및 다짐층 기준

○ LH 설계지침(토목)(2024)에서는 주요구조물 되메우기·채움 토공산출량은 해당 설계지침 3.8.1에 제시된 바와 같이 일부 구간은 KSF 2312 D다짐의 다짐도 95%, 일부 구간은 KSF 2312 A다짐의 다짐도 90%로 하여 산출하도록 제시하고 있음

- 관류 되메우기 장비 : 상부(굴삭기), 하부(인력)
- 다짐장비 : 상부(콤팩터 1.5ton), 하부(램머 80kg)
- 단, 관로상부 1m 이상은 폭에 따라 노상 다짐장비를 사용할 수 있음

○ KCS 61 20 15 굴착 및 되메우기에서는 관로공의 뒷채움재는 관로주위의 경우 90% 이상, 관상단 및 노반의 경우 95% 이상 다짐을 원칙으로 함

○ 위 기준에서는 관 상단 200mm 이상의 되메움은 최대 300mm 층으로 되메우면서 다지도록 제시하고 있다. 또한 관 주위(스프링 구간 이하)의 헌치부(측면 곡면부) 다짐을 철저히 하기 위해 봉다짐이나 삽다짐 등을 실시하도록 제시

(다짐도 및 변형률) 연성관 다짐도 및 변형률 관계

○ KCS 61 20 15 굴착 및 되메우기에서는 위 다짐조건을 만족시킬 수 없는 경우, 시공의 다짐 정도에 따른 관의 변형 그래프(도표)를 참조하여 현장에 적절한 시공을 유도하도록 제시

[표 2-15] 되메우기 후 파이프의 다짐도, 원강성 계수 및 변형률의 관계

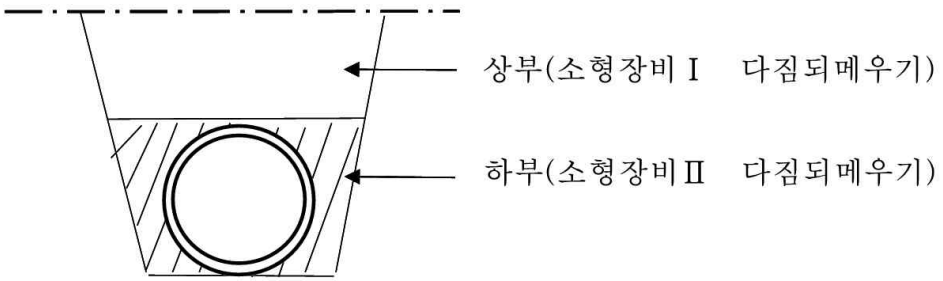
다짐도 및 강성값		공칭 원강성계수(SN) : 파이프 강성의 약 2배			
		2	4	8	16
다짐도 (%)	94 초과 다짐 시 변형률	-0.4~2.1	0~1.5	0.5~1.3	0.6~1.0
	87 - 94 다짐 시 변형률	2.4~5.3	1.8~4.2	1.6~3.0	1.2~2.0
	87 미만 다짐 시 변형률	5.6~11.2	4.5~9.0	3.1~6.5	1.4~4.4

4) 다짐 장비의 제원 및 가동방법

(다짐장비 기준) 되메우기 시 다짐장비 사용 기준

○ LH 설계지침(토목)(2024)에서는 관류 되메우기 시 다짐 장비를 다음과 같이 규정하고 있음

- 관 상부용 : 소형장비 Ⅰ(콤팩터 1.5ton)
- 관 하부용 : 소형장비 Ⅱ (램머 80kg)
- 관로 상부 1m 이상 : 폭에 따라 노상 다짐장비 사용 가능



[그림 2-3] 되메우기 장비

(다짐장비 제원) 되메우기 다짐장비 제원 및 가동방법

○ 콤팩터 1.5 ton : 하부 평판의 편심축 회전을 통해 발생하는 고속 미세 진동으로 흙 입자 사이의 간격을 감소시켜 조밀하게 배열하는 장비. 강한 타격보다는 진동효과를 이용하므로 관로에 가해지는 충격 하중이 적어, 관 상부

보호층 다짐이나 되메우기 최종 마감면의 평탄성 확보에 효과적

○ 콤팩터 가동 방법

- 연료 밸브와 엔진 스위치를 켜고, 초크 레버를 조작해 시도 줄을 당겨 시동 걸기
- 엔진 예열 후 가속 레버를 고속으로 올려 원심클러치가 작동하며 진동 및 전진 시작
- 손잡이로 방향을 잡아주며 다짐 누락 방비를 위해 이전 경로와 약 1/3씩 겹치도록 운행

○ 램머 80 kg : 엔진의 동력을 상하 왕복 운동으로 변환하여, 좁은 다짐판에 1톤 이상의 강력한 충격 에너지를 집중시킴. 다짐판 면적이 작아 협소한 공간의 작업성이 우수하며, 특히 다짐이 어려운 관 하부 및 측면의 틈새까지 흙을 강제로 밀어 넣어 침하는 방지하는데 필수적

○ 램머 가동 방법

- 장비 전도에 주의하며 한 손으로 핸들을 잡고 시동 줄을 당겨 시동 후 충분히 예열
- 스로틀 레버를 고속으로 빠르게 올려 타격을 시작하며, 장비의 동력에 맞추어 가볍게지지
- 관 하부 틈새에 흙이 채워지도록 장비를 비스듬히 기울이거나 방향을 전환하며 다짐 수행

[표 2-16] 콤팩터 및 램머 특징

구분	콤팩터(Plate Compactor)	램머(Tamping Rammer)
주요 용도	관 상부 및 표면 마감 다짐	관 하부 및 측면 틈새 다짐
작동 원리	편심축 회전에 의한 고속 미세 진동	상하 왕복 운동에 의한 충격
다짐 효과	흙 입자 재배열(밀도 증가) 및 평탄성 확보	측면 흙 밀어넣기 및 다짐
상대적 적합도	사질토 (모래, 자갈 등 입자가 굵은 흙)	점성토 (진흙 등 입자가 고운 흙)
장점	배관 파손 위험이 적고 넓은 면적 작업 유리	좁은 공간(협소부) 작업 및 타격력 우수
대표 모델	전일기계 JPC-80, 미카사 MVC-F80 등	전일기계 JRT-75, 미카사 MT-77 등

5) 최소 토피고 및 노상다짐 기준 조사

(최소토피고 기준) 국내외 최소토피고 기준 조사

○ 관의 매설깊이가 증가할수록 차량하중에 의한 윤압이 감소하므로 일정 최소 토피고를 확보하는 경우 노상다짐장비를 통한 다짐장비 활용 가능

- LH 설계지침(토목)(2024)의 경우 “관로상부 1m 이상은 폭에 따라 노상 다짐장비를 사용할 수 있다”고 제시하고 있음
- KCS 11 20 25 되메우기 및 뒤채움에서는 진동 롤러를 사용하는 뒤채움부는 구조물 구체에서 1m 정도 떨어져서 다짐롤러를 사용하도록 제시

  * 해당 기준의 경우 3.3.3 뒤채움 시공기준에 명시된 내용으로 구조물 구체가 최소토피고를 설명하는지, 단순 이격거리를 설명하는지에 따라 해석이 달라질 수 있음
- KCS 67 25 10 농업용 관수로 공사에서는 관의 정부 위 60cm 까지의 되메우기와 다짐은 관체에 편압이 걸리지 않도록 주의하여야 하며 롤러, 불도저 등 대형기계에 의한 다짐을 하지 않도록 제시
- 국외의 경우 미국 0.9~1.2m, 영국 0.45~0.9m, 프랑스 0.8m, 캐나다 0.8~1m 등으로 조사된 바 있으며, 전반적으로 세계 각국의 최소 매설깊이를 약 1m로 제시하고 있음(조진우 등, 2013)

[표 2-17] 최소 토피고 기준 조사(조진우 등, 2013)

매설관 항목	미국	영국	일본	프랑스	캐나다
Oil	-	-	1.2~1.8m	-	-
Electricity	0.91	Road : 0.6m Walkway : 0.45m	Pavement + 0.3m (al least 0.6m)	0.8m	0.8~1.0m
Gas	1.2	Road : 0.6m Walkway : 0.45m	Pavement + 0.3m (al least 0.6m)	0.8m	0.8~1.0m
Water	0.91	-	Pavement + 0.3m (al least 1.0m)	0.8m	0.8~1.0m
Drain	0.91	-	-	0.8m	0.8~1.0m

(노상다짐) 노상다짐 기준 조사

○ KDS 44 30 00 도로토공(2023) 및 KCS 67 35 00 농도 공사(2018)에서 노상다짐 기준에 대하여 다루고 있음

[표 2-18] 노상다짐 기준(KDS 44 30 00, 도로토공, 2023)

KDS 44 30 00 도로토공
4.3.2 다짐 3. 노상 (1) 1층의 다짐 완료 후 두께가 0.2m 이하이어야 하며, 각 층마다 KS F 2312 C, D 또는 E 방법에 의하여 정하여진 최대건조밀도의 95% 이상의 밀도가 되도록 균일하게 다져야 한다 (2) 노상 다짐규정은 최소 관리규정이므로 모든 부위가 소정의 다짐도를 만족시켜야 하며, 균일한 지지력과 강성을 갖도록 얇고 균일하게 포설하여 다져야 한다

[표 2-19] 노상다짐 기준(KCS 67 35 10, 농도 토공사, 2018)

KCS 67 35 10 농도 토공사
3.5 다짐 (1) 설계도서 및 공사감독자(또는 감리자)의 지시에 따라 흙쌓기 재료를 소정의 두께로 깐 후에 롤링, 탬핑 또는 이 두가지의 혼합방식으로 소요밀도 등을 얻을 때까지 다짐을 해야 한다. 본 작업에는 땅깎기부의 노상 및 흙쌓기부의 원지반을 다지는 것도 포함된다 (2) 흙쌓기 작업 시에는 차도부는 물론 길어깨 및 흙쌓기 비탈면도 소정의 다짐도에 도달할 때까지 고르게 다져야 한다 (3) 땅깎기부 노상의 지정된 깊이 및 쪽쌓기 접속부와 종방향의 흙쌓기, 땅깎기 접속부 등도 소정의 다짐도에 도달할 때까지 고르게 다져야 한다 (4) 흙쌓기의 시공에 있어서는 균일하고 효율적인 다짐을 위하여 그레이더 등으로 고르기를 하고 함수비를 최적함수비 상태로 조절한 후에 다져야 한다 (5) 계약대상자는 공정계획에 따라 다짐작업을 할 장비의 종류, 대수, 장비조합 등에 대한 계획서를 제출하여 공사감독자(또는 감리자)의 승인을 받은 후에 작업을 수행하여야 한다 (6) 노체 다짐은 1층의 다짐 두께가 300mm 이하이어야 하며 최대건조밀도의 90% 이상의 밀도가 되도록 균일하게 다져야 한다 (7) 노상 다짐은 1층의 다짐 후 두께가 200mm 이하이어야 하며 최대건조밀도의 95% 이상의 밀도가 되도록 균일하게 다져야 한다

(노상다짐장비) 노상다짐장비 관련 기준

○ KCS 61 20 15(굴착 및 되메우기) 8.3.2 포장공에서는 로울러(roller) 기준을 제시하고 있으며, “로울러는 자주식으로 10t 이상의 전륜 로울러 및 8t 이상의 타이어 로울러이어야 한다”고 명시하고 있음

○ KCS 11 20 25(되메우기 및 뒤채움) 3.3.3 뒤채움 시공기준에서는 “진동롤러를 사용하는 뒤채움부는 구조물 구체에서 1m 정도 떨어져서 중량 10t 이상의 대형 진동 다짐 롤러를 사용하되, 진동에너지를 크게하여 다짐 효율이 커지도록 하여야 한다”고 명시하고 있음

○ KCS 11 20 20(쌓기) 3.2.21 프루프 롤링에서는 “수급인은 노상 최종 마무리면의 표면 전체에 대하여 공사감독자의 확인을 위한 타이어 롤러 또는 하중을 만재한 덤프 트럭으로 프루프 롤링을 실시하여야 한다”고 명시하고 있으며, 타이어 롤러의 복륜하중은 49kN 이상, 타이어 접지압은 0.55Mpa로 명시하고 있음

○ LHCS 11 20 20(흙쌓기(성토)) 3.32 프루프롤링에서는 타이어로울러 및 덤프트럭을 주행시켜서 노상면의 변형이 확인되는 곳을 검사하고 있으며, 타이어롤러의 복륜하중은 5ton 이상, 타이어 접지압은 0.55Mpa(후륜의 타이어 공기압 100~110PSI) 이상으로 제시

○ KRACS 47 10 25(토공사) 5.3.4 다지기 장비에서는 흙의 종류에 따른 다지기 장비의 적합성 기준을 제시하고 있음

[표 2-20] 흙의 종류에 따른 다지기 장비의 적합성(KRACS 47 10 25, 토공사, 2021)

흙의 종류	타이어 로울러		진동로울러		자주식소일컴팩터	견인식탬핑로울러	진동컴팩터	램머/탬퍼	로드로울러	비탈다짐기
	자주식	견인식	자주식	견인식						
GW, GP	○	○	◎	◎						
GW-GM GP-GM GW-GC GP-GC	◎	◎	○	○	○					
GM	◎	◎	○	○		○				
SW	◎	◎	○	○					○	
SP-SM SW-SM SP-SC SW-SC	◎	◎	○	○						
경암버력			◎	◎					○	
GC	◎	◎				○				
SC	◎	◎				○				
SP		○	○	◎						
SM		◎				◎				
연암버력 리핑암 버력	○	○	◎	◎						
ML, CL	○	○				◎				
비탈어깨 비탈면		○					○	○		◎
구조물 근접부							○	○		◎

◎:유효한 것, ○:사용할 수 있는 것

6) 터파기 비탈면 기준 조사

(국내 시방기준) 국내 터파기 비탈면 시방기준 조사

○ LHCS 11 20 15 터파기에서는 “수급인은 토질과 지하수위 등 현지 작업여건을 검토하여 작업원의 안전에 필요하고 거푸집 설치, 벽면방수 등에 적당한 작업공간과 감독자의 검사에 충분한 공간이 확보될 수 있도록 터파기 비탈면 기울기와 여유폭을 확보하여야 한다”라고 명시하고 있음

○ KCS 11 20 15 터파기에서는 “터파기 비탈면의 기울기, 흙막이벽의 시공, 인접구조물 보호 등 터파기작업과 관련하여 필요한 제반 검토를 시행하여야 하며 이에 따른 시공상세도를 작성하여야 한다”라고 명시하고 있으며, 국내시방기준에서는 명확한 비탈면 기울기를 제시하지 않음

○ KDS 11 70 05(쌓기깎기)에서는 쌓기비탈면 및 깎기비탈면의 경사는 별도의 비탈면 안정해석을 통해 결정하는 것을 원칙으로 기술하고 있음

(산업안전보건기준) 국내 터파기 비탈면 산업안전보건기준 조사

○ 산업안전보건기준 제 339조 굴착면의 붕괴 등에 의한 위험방지에서는 “사업주는 지반 등을 굴착하는 경우 굴착면의 기울기를 별표 11의 기준에 맞도록 해야 한다. 다만, 건설기술진흥법 제 44조 1항에 따른 건설기술에 맞게 작성한 설계도서상의 굴착면의 기울기를 준수하거나 흙막이 등 기울기면의 붕괴방지를 위하여 적절한 조치를 한 경우에는 그렇지 아니하다”라고 명시하고 있음

○ 별도 붕괴방지를 위한 조치 등을 수행한 경우는 2-21 표를 반드시 준용하지 않아도 되는 것으로 판단됨

[표 2-21] 산업안전보건기준에 관한 규칙(별표 11, 2023.11 개정)

지반의 종류	굴착면의 기울기
모래	1 : 1.8
연암 및 풍화암	1 : 1.0
경암	1 : 0.5
그 밖의 흙	1 : 1.2
- 굴착면의 기울기는 굴착면의 높이에 대한 수평거리의 비율을 말한다	

3 최신 되메우기 기술

1) CLSM (Controlled Low-Strength Material) 기준

(개요) CLSM 개요

○ CLSM(Controlled Low-Strength Material)은 고유동성 채움재라고도 불리며 기존 모래 다짐을 대체하는 재료로 최근에는 산업부산물 활용, 고유동성 및 속경성 등을 보완한 재료가 개발되고 있음

(기준) CLSM 시방 기준

○ KCS 61 20 20 (터파기 지보공) 2.3.9 해체 및 철거에서는 “물다짐이어렵거나 현장발생토사를 활용하여야 하는 구간에서의 뒤채움재 재료로 유동화 처리토인 CLSM 공법 등을 사용하여 물 다짐 시공을 적용하여 적정 강도를 발현시킬 수 있고 다짐으로부터 제약을 받는 구간에 자유롭게 시공할 수 있다”라고 명시하고 있음

○ KCS 61 20 15 (굴착 및 되메우기) 6.3.2 되메우기에서는 “물다짐이 어렵거나 현장발생토사를 활용하여야 하는 구간에서의 뒤채움재 재료로 유동화 처리토인 CLSM 공법 등을 사용하여 물 다짐시공을 적용하여 적정강도를 발현시킬 수 있고 다짐으로부터 제약을 받는 구간에 자유롭게 시공할 수 있다”라고 명시하고 있음

○ KCS 61 20 15 (굴착 및 되메우기) 6.3.2 되메우기에서는 관련규격으로 미국 ASTM CLSM 표준시방 기준을 제시하고 있음

- ASTM D 4832-95 (Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders)
- ASTM D 5239-92 (Standard Practice for Characterizing Fly Ash for Use in Soil Stabilization)
- ASTM D 6103-07 (Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material)
- ASTM D 5971-96 (Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Controlled Low Strength Material)

2) CLSM 특징

(특징) CLSM 특징

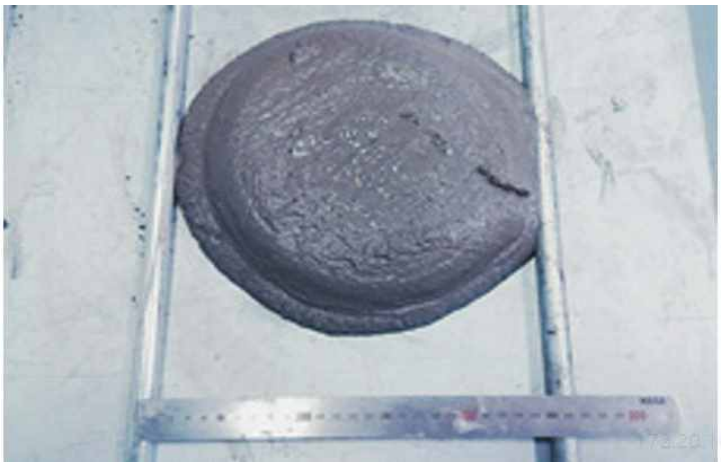
○ CLSM은 굳지 않은 상태에서는 유동성이 매우 크므로 별도의 다짐 없이 자중만으로 좁은 공간을 채울 수 있고, 굳은 후에는 8.3Mpa (1,200 psi) 이하의 저강도를 발현하는 특징이 있다. 압축강도를 1Mpa (150psi) 이하로 낮추게 되면 추후 재굴착 가능

- Self-Leveling and Self-Compacting (자기 수평 및 자기 다짐) : 높은 유동성으로 인해 진동 및 다짐 장비 없이도 관로 하부의 좁은 틈새까지 충전 가능
- Excavability (재굴착성) : 일반 콘크리트와 달리 강도를 낮게 설정하여, 향후 유지보수 시 백호(Backhoe)나 인력으로 굴착 가능

○ 시공성 개선: CLSM은 자기수평성 및 자기다짐성을 가지므로 별도의 다짐 공정이 필요 없어 시공 시간을 단축하고 시공비 절감 가능. 기존 다짐 장비를 이용한 시공 시 발생할 수 있는 다짐 불량 문제 해결 가능

○ 현장 적용성: 협소한 공간이나 지하 매설물의 주변과 같이 다짐이 어려운 곳에 효율적으로 채울 수 있다.

○ 경제성 및 환경 친화성: 석탄회와 같은 산업부산물을 재활용하여 제조할 수 있어 경제적이며 환경친화적



[그림 2-4] 유동성 채움재의 유동성(이소연 등, 2018)

(개선) 개선된 CLSM 개발

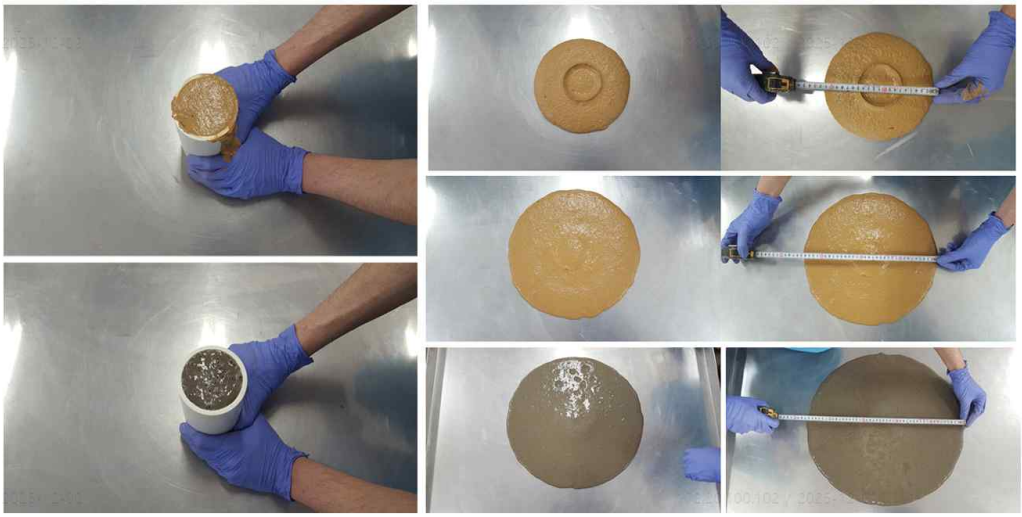
○ 최근에는 기존 CLSM의 단점을 보완하고 다양한 환경에 적용하기 위한 유동화 채움재 공법이 개발되고 있다. 특히 현장 재료 및 산업부산물 등을 활용하여 활용성을 높인 연구가 주로 수행되고 있음

○ 채덕호 등(2014)은 산업폐기물인 매립석탄회를 혼합한 유동성 충진재의 동적 거동특성에 관한 연구를 수행하였으며, 일반적인 점토나 황토 기반 충진재보다 높은 7일 재령 강도를 확보할 수 있는 것으로 나타남

- 본 연구에서는 도심지 지하 매설관이나 기초 하부 지지층의 보강에 사용되는 유동성 충진재의 공학적 적용성을 평가하였음
- 일축압축시험 및 공진주 시험을 통해 재료의 정적 강도 및 동적 거동 특성을 분석하였음
- 결과적으로, 석탄회 혼합 충진재가 일반적인 점토나 황토 기반 충진재보다 높은 7일 재령 강도 및 전단탄성계수를 보이는 것으로 나타남

○ 이준 등(2018)은 표준토를 모사한 현장 굴착토를 사용하여 CLSM의 공학적 특성을 평가하였으며, 다양한 현장 토질 조건에 대응 가능한 CLSM 적정 배합비율 도출

- 국내 토질의 80%를 차지하는 SM, ML, CL, CH 등의 표준토를 모산 현장 굴착토를 사용하여 CLSM의 공학적 특성을 평가
- 특히, 물-결합재비(W/B) 및 표준 토량비(S/B)가 유동성과 초기 압축강도에 미치는 영향을 분석
- 도출된 최적 배합비가 재료분리 저항성 및 재굴착성에 대한 기준을 충족하며, 표준토 종류에 따른 CLSM의 적정 배합비율 도출



[그림 2-5] 유동화 실험(이준 등, 2018)

○ 이소연 등(2018)은 저회와 석고를 활용한 고유동성 채움재 연구를 수행하였으며, 실험을 통해 초기 강도를 확보하면서 재굴착이 용이한 장기 강도를 만족하는 최적 배합비를 도출하였음

- 본 연구에서는 기존 채움재의 느린 경화 속도를 개선하기 위해 화력발전소 부산물인 저회와 석고를 활용한 고유동성 채움재를 개발하였음
- 실험을 통해 차량 통행이 가능한 초기 강도를 확보하면서 재굴착이 용이한 장기 강도를 만족하는 저회와 석고 50:50 비율, 시멘트 2%의 최적 배합비 도출
- 현장 실험 결과, 고유동성 채움재를 통해 긴급 복구에 필수적인 4시간 이내의 급속 시공이 가능함을 입증



[그림 2-6] CLSM 채움을 위한 관로 터파기(이소연 등, 2018)



[그림 2-7] CLSM 채움 및 DCPT test 수행(이소연 등, 2018)

○ 오세욱 및 방성택(2020)은 해양점토와 현장토를 활용한 유동성 채움재의 공학적 특성에 관한 연구를 수행하였으며, 목표 성능을 충족시킬 수 있는 최적의 배합비를 제시하였음

- 본 연구에서는 해양점토와 현장토, 고화재를 혼합한 시료를 사용하여 유동성 채움재의 공학적 특성을 규명하기 위한 연구를 수행하였음
- 특히 채움재가 관로 부식에 미치는 영향을 분석하기 위해 전기비저항 시험과 PH 시험을 통해 재료의 화학적 안정성 검토
- 연구를 통해 재굴착이 가능한 목표 강도(저강도 발현) 및 높은 유동성을 확보하고 부식 방지 기준을 충족할 수 있는 최적의 배합 비율 제시: 해양점토에 고화재 8% 이하, 현장토 20% 이하로 혼합하여 28일 이상 양생 권고

○ 최동욱 등(2024)은 유동성 채움재 혼합 재료로서 제지애쉬를 활용한 기초연구를 수행하였으며, 재굴착이 가능한 수준의 CLSM 강도 조건을 만족시킬 수 있는 것으로 나타남

- 본 연구에서는 제지 공장에서 발생되는 제지애쉬의 활용성을 평가하기 위한 기초 실험 수행
- 100% 제지애쉬 폰합물은 매우 낮은 유동성을 보인 반면, W/B 및 시멘트 치환율의 증가에 따라 유동성이 증가하는 것으로 확인
- 재령 28일 압축강도는 모든 혼합 조건에 대하여 2.25-4.05MPA 범위에서 측정되었으며, 이는 재굴착이 가능한 수준으로 골재 혼입 배합을 통해 CLSM의 강도 조건을 만족시킬 수 있는 것으로 판단됨

Ⅲ 흙쌓기 역학성능시험

Key Point

- 들밀도 시험법과 간편다짐시험법의 결과를 비교하여 현장 다짐도 평가를 위한 간편 다짐시험법을 적용하고자 함
- 천안, 세종 5-2(1), 세종 5-2(2) 시료는 각각 SW-SC, SW-SM, SP로 분류
- 비중은 2.58~2.65, 최대건조밀도는 1.93~2.05 g/cm³, 최적함수비는 8.18~9.02% 범위로 나타남
- 세종 5-2(1) 시료는 가장 높은 최대건조밀도(2.05 g/cm³)와 가장 낮은 최적함수비(8.18%)를 나타내어 상대적으로 우수한 다짐 특성을 보임

1 시험개요

1) 시험 내용

(내용) 시험 내용

○ 흙쌓기층 지반의 다짐 상태를 평가하기 위하여 들밀도시험(Sand Cone Test), 소형충격재하시험(Light Falling Weight Deflectometer, LFWD), 그리고 지오게이지(GeoGauge) 시험을 수행함

○ 들밀도시험은 현장 다짐도를 직접 산정하기 위한 전통적인 방법으로 적용하였으며, 소형충격재하시험과 지오게이지는 현장에서 신속하게 지반의 강성 및 다짐 상태를 평가할 수 있는 간편다짐시험법으로 활용

○ 특히 소형충격재하시험과 지오게이지의 적용성을 비교·분석하여 대상 지반의 물성을 보다 신속하고 효율적으로 평가할 수 있는지 검토

○ 소형충격재하시험은 낙하하중에 의해 발생하는 충격하중을 이용하여 지반의 동적 거동을 평가하는 충격식 측정방법이며, 지오게이지는 저진폭의 진동을 지반에 가하여 강성을 측정하는 비충격식 측정방법으로 분류

○ 지오게이지 측정 과정에서 사용자가 인지하기 어려운 수준의 미세 진동을 발생시켜 지반의 동적 응답을 계측한다는 점에서 진동 기반 측정 원리를 이용

○ 전통적인 들밀도시험과 간편다짐시험법의 결과를 비교함으로써 현장 다짐도 평가를 위한 간편다짐시험법의 적용 가능성을 검토함

[표 3-1] 현장 지반 및 되메움 다짐도 평가

구분	들밀도 시험	소형충격재하시험 (LFWD)	지오게이지 (Geogauge)
장비 사진			

○ 다짐도 평가 시험을 토대로 천안과 세종시험소에서 대상지반에 대한 다수의 물성치를 획득하였으며 이러한 결과는 상대 다짐도에 따른 들밀도시험과 LFWD, 지오게이지의 연관성을 분석함

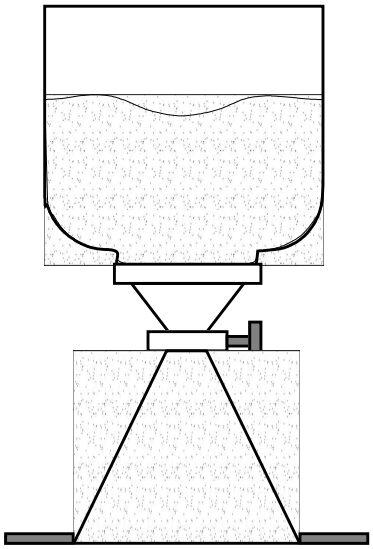
2 다짐도 평가 방법

1) 현장들밀도시험

(개요) 시험 개요

○ 현장 들밀도 시험(KS F 2311)은 실내교정시험을 통하여 획득한 시험기의 제원을 바탕으로 현장에서 직접 시험공을 굴착하여 밀도를 산정하는 시험법임

○ 시험공을 굴착한 뒤 표준사가 채워져있는 시험기를 바닥에 부착하고, 기지의 표준사로 치환한 뒤 중량차이를 이용하여 현장의 밀도를 측정함



[그림 3-1] 들밀도 시험기

(원리) 시험원리 및 방법

○ 시험장소의 지표면을 곧은 날로 수평으로 고른다. 이때, 지표면에 느슨한 흙, 돌 또는 쓰레기가 있으면 제거

○ 평평하게 고른 지표면에 밑판을 밀착

○ 밑판의 구멍 안쪽의 흙을 시험 구멍 굴착 기구를 사용하여 판후, 파낸 흙의 전량을 용기에 넣고 함수량이 변화하지 않도록 용기에 마개를 하여 보존함

○ 시험 구멍에서 파낸 흙의 전 질량을 측정

○ 계량이 끝난 흙을 잘 혼합하여 함수비를 계산

$$\rho_t = \frac{m}{V_o}$$

여기서, ρ_t : 습윤 밀도 (g/cm^3)

m : 시험 구멍에서 파낸 습윤 흙의 질량 (g)

V_o : 시험 구멍의 체적 (cm^3)

2) 소형충격재하시험(LFWD)

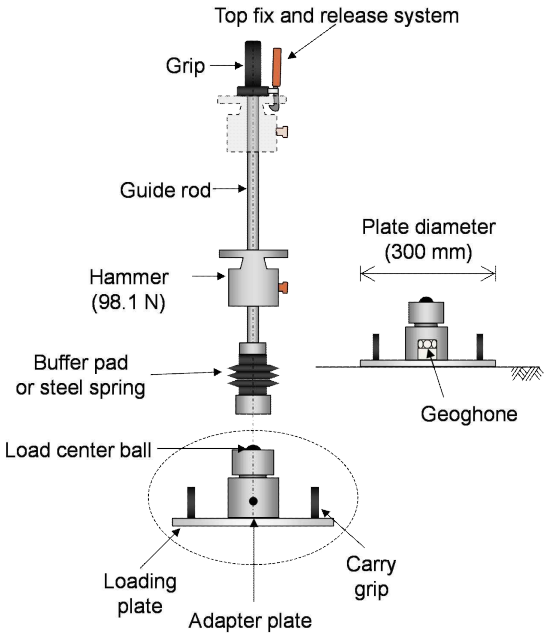
(개요) 시험 개요

○ LFWD는 원위치 시험장치인 평판재하시험의 대안으로 FWD를 독일에서 휴대용으로 개발한 장비임

○ LFWD는 여러 종류가 있으며, 각 시험기 종류에 따라 디자인과 작동모드가 다양하나 작동원리는 동일함

○ 일반적으로 LFWD는 재하장치와, 재하판, 그리고 중앙부의 처짐을 측정하는 지오폰 센서로 구성되어있고 본 연구에서 사용한 LFWD는 독일에서 제작한 ZFG2000 모델을 사용함

○ 동적 재하를 위한 추는 10kg이며, 펄스의 폭은 18ms이고 재하판의 직경은 300mm이며 재하로 인한 변위는 30mm까지 측정할 수 있음



[그림 3-2] 소형충격재하시험기 모식도

○ 재하판 중앙에서 측정된 변위량을 내장된 소프트웨어를 이용하여 다음식으로 LFWD 탄성계수, ELFWD를 산정

$$E_{LFWD} = \frac{2(1-\nu^2)\sigma \times R}{\delta}$$

여기서, σ 작용된 응력
R 재하판 반경 (150mm)
δ 변위

(방법) 시험 방법

○ 재하판을 수평에 맞춰 대상지반에 거치한 후 해머를 위에 올림

○ LFWD 측정기의 'ok' 버튼을 누르고 시범낙하 3회 이후, 측정낙하를 3회 수행

○ 기록된 값을 기록후 'print'버튼을 눌러 결과를 출력

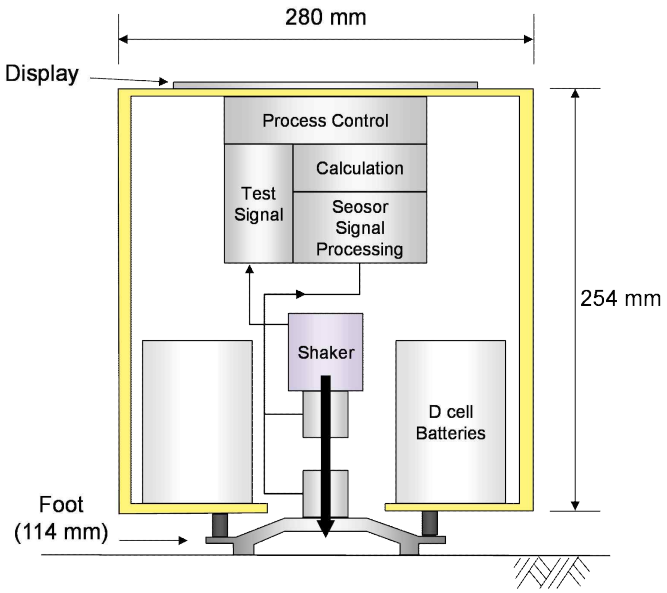
3) 지오게이지(Geogauge)

(개요) 시험 개요

○ Geogauge 본체의 무게는 약 10kg이고 280mm의 직경에 높이는 254mm 임 지반과의 접촉부는 외경 114mm, 내경 101mm의 링 형태 모양

○ 장비 내부의 쉐이커에 의해 100~196Hz 범위내의 특정한 25개의 주파수에서 매우 작은 동력을 발생하고 매우 작은 동력에 의해 발생되는 매우 작은 변위량은 본체 내에 탑재되어 있는 지오폰 센서로 측정

○ Geogauge에서 측정되는 강성 측정값은 25개의 특정 주파수에서 측정된 25개의 강성지수의 평균값임 강성측정값, HG는 다음 식에 의해 탄성계수(EG)로 변환될 수 있음



[그림 3-3] 지오게이지 모식도

$$E_G = H_G \frac{(1-\nu^2)}{1.77R}$$

여기서, E_G Geogauge로 측정된 탄성계수

H_G Geogauge 강성 측정값

ν 포아송비

R 지반 접촉부 반경 (57mm)

(방법) 시험 방법

○ Geogauge를 측정하고자 하는 지반 위에 올린 후, 'Measure' 버튼을 누름. 75초 후 측정되는 강성지수를 기록하고, 'Save'버튼을 눌러 데이터를 저장

○ 설명된 장치 및 절차는 가정된 포아송비에 대한 영률을 결정할 수 있는 토양층 또는 토양-골재 혼합물의 강성을 측정하는 수단을 제공하고 속도로 적용과 일치하는 정적 하중에 대해 장치에 의해 낮은 변형 주기 하중이 적용

○ 이 방법은 과소다짐, 과다다짐 또는 노력 낭비를 방지하기 위해 다짐을 모니터링하거나 제어하는 비파괴적 방법으로 유용함. 강성이 특정 재료, 수분 함량 및 다짐 절차에 대한 밀도와 어떻게 관련되는지 이해함으로써 달성된 강성은 예를 들어 방법 D698의 요구 사항을 충족하기 위해 밀도 기반 다짐

제어 또는 사양과 관련하여 다짐과 관련될 수 있음

○ 이 방법은 상당량의 미세분을 함유한 미사질 및 점토질 물질에 적용됨. 그러한 경우, 다짐 노력과 수분 함량은 강성으로 인한 다짐 품질과 관련하여 더 중요한 관계를 형성하므로 강성 측정 시 방법 D 2216과 같이 수분 함량을 측정해야함

○ 이 공법은 매설관의 설치를 포함하여 도로기초나 토공공사에 유용

○ 이 방법은 포장 실패의 위험을 완화하는 데 적합하다. 고속도로 노반, 노반 및 기저 강성의 상대적 균일성을 보장함으로써 포장에 대한 응력이 보다 균일하게 분산됨. 이러한 방식으로 포장의 수명이 연장되고 수리가 최소화함.

○ 이 방법은 토양 표면이나 토양 집합 구조물이 설계 하중을 지지할 수 있는 시기를 결정하는 데 적합함. 이는 밀도나 수분 함량의 측정 가능한 변화 없이 시간이 지남에 따라 재료가 경화(강화)되는 안정화된 충전에 유용함

3 실내시험 결과

1) 기본 토성시험

(1) 비중 시험

(개요) 시험 개요

○ 비중 시험은 흙 입자의 밀도를 물의 밀도와 비교하여 흙 입자의 비중을 구하는 시험임. 시험을 통해 획득한 비중은 흙의 고체 부분의 무게, 부피, 공극비 등의 산출에 사용되거나 포화도, 전체 단위중량을 계산하는 데 사용됨

(방법) 시험 방법

○ #10 체를 통과한 건조토를 20g 준비

○ 비중병(피크노미터+스토퍼) 무게(Wf)를 측정

○ 비중병에 시료를 넣고 무게(Wk)를 측정하고 비중병 안에 들어있는 흙의 무게(Ws)를 측정

○ 시료가 들어있는 비중병에 증류수를 절반 정도 채워 10분 이상 가열

○ 가열 후 30℃ 이하로 방치 후 시료 병의 남은 공간을 증류수로 가득 채워 온도(Tb) 및 무게(Wb)를 측정

○ 빈 비중병에 증류수를 가득 채운 후 온도(Ta) 및 무게(Wa)를 측정

(결과) 시험 결과

○ 시험 결과는 Archimedes 원리를 적용하여 비중병 안에서 흙 시료가 물속에서 받는 부력을 계산하여 흙 입자의 비중을 구함

○ 물의 밀도는 온도에 따라 달라지기 때문에 가열 후 증류수를 추가한 온도

(Tb)의 밀도를 계산 후, 부력(Fb')을 계산하기 위해 건조토의 무게(Ws)에 증류수로 가득 채운 비중병의 무게(Wa)를 더한 후 시료+증류수를 채운 비중병의 무게(Wb)를 빼서 계산

○ 온도 Tb에서의 비중(Gs')은 건조토의 무게(Ws)를 부력으로 나눠서 계산할 수 있으며, 비중 시험은 표준온도 15℃에서의 비중(Gs)을 의미함으로 온도에 따른 밀도 차이를 보정하여 계산

$$F_b' = (W_s + W_a) - W_b$$

$$G_s' = \frac{W_s}{F_b'}$$

$$G_s = \frac{\gamma_{w(T_b)}}{\gamma_{w(15℃)}} G_s'$$

여기서, F_b' : 부력 (g)
W_s : 공기 중 흙 시료 무게 (g)
W_a : T_b에서 비중병과 증류수 무게 (g)
W_b : 시료와 증류수를 채운 비중병의 무게 (g)
G_s' : T_b에서 비중
G_s : 15℃에서 비중

[표 3-2] 비중시험결과

	천안	세종 5-2(1)	세종 5-2(2)
비중 G_s	2.58	2.65	2.63

(2) 액·소성 한계 시험

(개요) 시험 개요

○ Fall cone 시험은 일정한 질량과 각도를 가진 콘을 흙 시료 표면에 접촉시킨 후 자유 낙하시켜, 일정 시간 동안의 관입깊이를 측정하는 방법

○ 본 시험에서는 함수비를 달리한 시료에 대해 콘 관입깊이를 측정하고, 관입깊이와 함수비의 관계를 이용하여 액·소성한계를 산정

○ 액·소성한계는 일반적으로 80 g, 30° 콘을 사용하였을 때 콘의 관입깊이가 20 mm, 2mm가 되는 함수비로 정의됨. 따라서 여러 함수비 조건에서 측정한 관입깊이와 함수비의 관계를 반로그 그래프로 나타낸 후, 관입깊이 20 mm, 2mm에 대응하는 함수비를 각각 액성 및 소성한계로 결정

(방법) 시험 방법

○ 0.425mm 체를 통과한 흙을 준비

○ 함수비를 조절한 시료를 시료통에 채우고 표면을 평탄하게 정리

○ 콘의 끝이 시료 표면에 접촉하도록 위치시킴

○ 콘을 자유낙하시켜 5초간 관입

○ 관입깊이 d (mm)를 측정

○ 통일한 함수비 w (%)를 측정

○ 시료의 함수비를 조절하여 위의 과정을 반복



[그림 3-4] Fall Cone 시험

$$w_L = w_d = 20mm, w_L = alog(20) + b$$

$$w_P = w_d = 2mm, w_P = alog(2) + b$$

$$I_P = w_L - w_P$$

여기서, w_L : 액성한계 (%)
w_d : 관입깊이 (mm)
w_P : 소성한계 (%)
I_P : 소성지수

(결과) 시험 결과

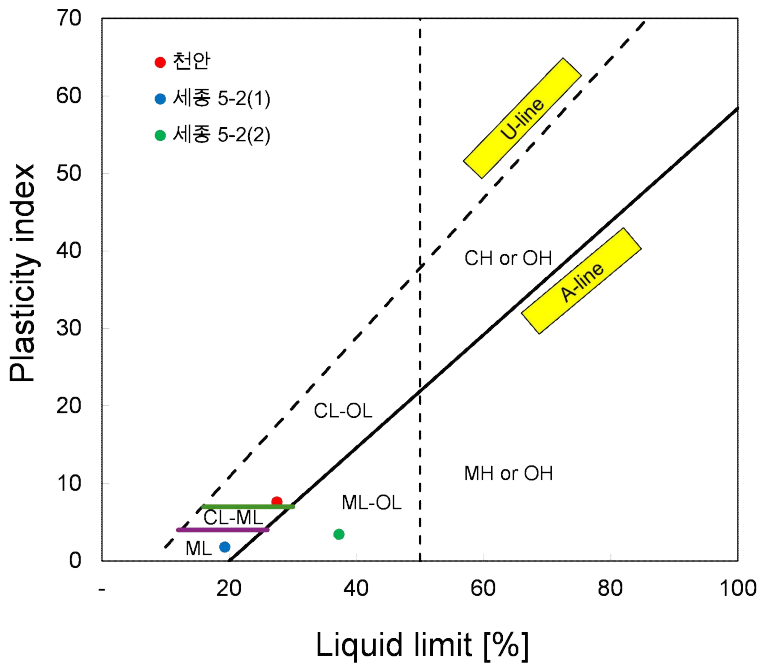
○ Fall Cone을 통해 획득한 관입 깊이와 함수비 간의 관계를 그래프로 나타낸

후 20mm, 2mm 관입깊이에 해당하는 함수비를 각각 액성 한계와 소성 한계로 결정함.

[표 3-3] 액·소성 한계시험 결과

	천안	세종 5-2(1)	세종 5-2(2)
액성 한계 LL [%]	27.56	19.32	37.27
소성 한계 PL [%]	19.89	17.52	33.80
소성지수 PI	7.67	1.80	3.47

○ 천안 시료는 액성한계 약 25%, 소성지수 약 8%로 CL-OL 영역에 위치함. 반면 세종 5-2(1) 및 세종 5-2(2) 시료는 액성한계와 소성지수가 모두 낮아 ML 영역에 분류됨. 천안 시료가 세종 시료에 비해 상대적으로 높은 소성을 나타내는 것으로 확인됨.



[그림 3-5] 액소성 한계 시험 결과

(3) 입도분석 시험

(개요) 시험 개요

○ 입도분석 시험은 흙 시료의 입도분포를 알아보기 위해 실시하는 시험으로 체분석과 비중계 분석이 있음.

○ 체분석은 표준체를 사용하여 각 체를 통과하는 시료의 중량 백분율과 각 체에 남는 시료의 중량 백분율을 구하는 시험으로 75mm부터 0.075mm까지에 대한 입도분포 곡선을 그릴 수 있음.

○ 입도분포 곡선에서, 입경별 누가 통과율을 읽어서 입도분포의 좋고 나쁨을 판단하고, 자갈, 모래, 실트, 점토 등의 구성 비율을 확인함.

○ 0.075mm 이하의 흙 시료의 경우 비중계시험을 통해 체분석으로는 파악하기 어려운 미세 입자 분포를 평가함 비중계시험은 흙 입자가 물에 침강하는 속도를 측정하여 입자 크기 분포를 산출함.

○ 토립자 굵기는 Stoke's 법칙을 적용하여 0.2mm~0.0002mm의 입자에 유효함.

(방법) 체분석 시험 방법

○ 시험에 사용될 시료를 건조기에 105~110℃에서 24시간 동안 충분히 건조함.

○ 건조된 흙의 무게를 측정함.

○ 체를 작은 사이즈부터 0.075mm, 0.15mm, 0.25mm, 0.425mm, 0.6mm, 1.18mm, 2mm, 4.75mm, 19mm 순서로 쌓음.

○ 체 세트 아래 받침 접시를 놓고 맨 위에는 뚜껑을 씌움.

○ 체 세트를 진동기계를 사용하여 충분히 섞음.

○ 각 체에 남은 흙과 바닥 받침 접시에 남은 흙을 개별적으로 무게를 측정함.

○ 각 체에 남은 흙의 무게를 전체 시료에 대한 백분율로 환산하여 입도분포곡선을 작성함.

(방법) 비중계 시험 방법

○ 메스실린더의 내경(D)와 면적(A)를 측정하고, 비중계의 눈금과 구부 부피(Vb)와 구부 길이(L2)를 측정함.

○ #10체를 통과한 노건조 시료를 다음 중량에 맞게 준비한다. 시료의 소성지수가 20보다 작은 경우는 115g, 20보다 크거나 같은 경우는 65g을 준비함.

○ 소성지수가 20보다 작은 경우 분산제(엑사메타인산나트륨 40g/l 125cc)와 섞고 15시간 이상 방치함.

○ 소성지수가 20보다 크거나 같은 경우 분산제(엑사메타인산나트륨 40g/l 125cc)를 탄 후 뚜껑을 덮어 건조기에 1시간 방치 후, 물 100cc를 추가하여 15시간 이상 방치함.

○ 이후 분산제 100cc를 더 추가하여 분산용기에 담고 분산기에 1시간 이상 교반

○ 분산제와 섞인 흙탕물을 실린더에 옮긴 후 증류수를 추가하여 1,000cc 부피로 맞춤

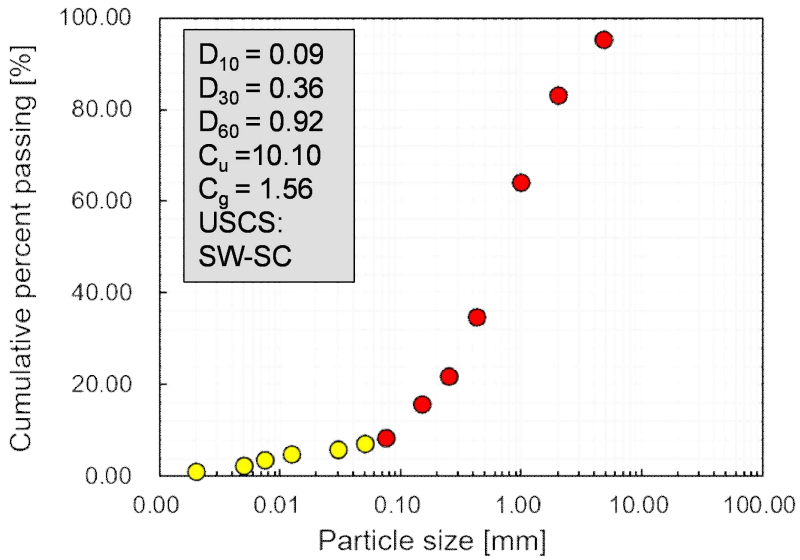
○ 실린더의 입구를 막아 30회 이상 충분히 섞은 후 실린더를 10~25℃로 조절된 항온 수조에 넣고 비중계를 넣음.

○ 항온 수조에 넣음과 동시에 1, 2, 5, 15, 30, 60, 120, …, 1,440분 경과마다 비중을 측정함(5분 이후에는 비중계를 꺼내 두고 읽을 때 다시 넣음).

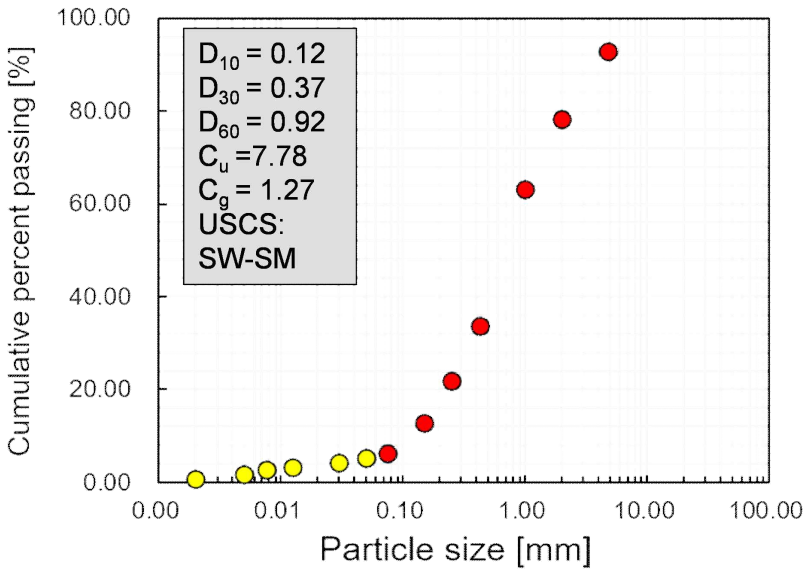
(결과) 시험 결과

○ 입도분포 곡선을 통해 10%, 30%, 60% 통과율일 때의 입도 직경을 획득하여, 시료의 균등계수(Cu)와 곡률계수(Cg)를 획득할 수 있음.

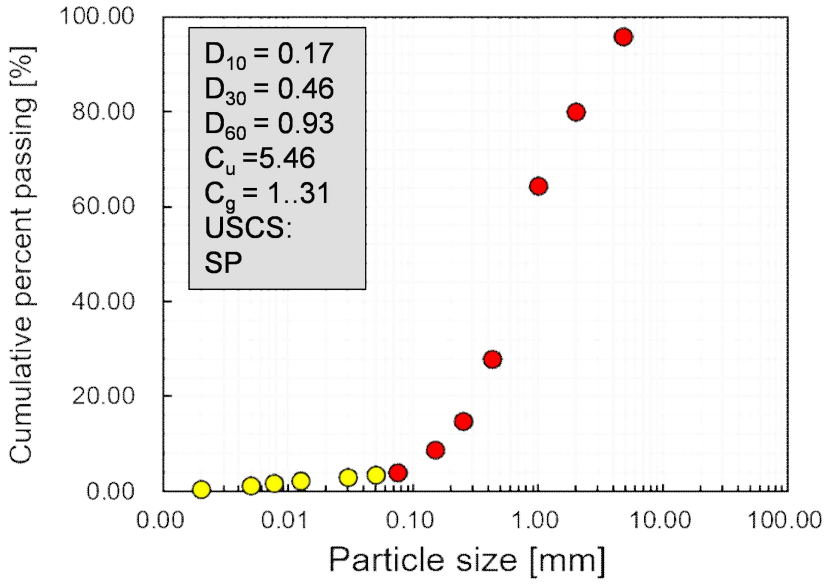
○ 비중계시험을 통해 획득한 경과 시간에 따른 흙탕물의 비중을 통해 입자의 직경과 누가 통과율을 계산할 수 있음.



[그림 3-6] 천안 시료 체분석+비중계시험 결과



[그림 3-7] 세종 5-2(1) 시료 체분석+비중계시험 결과



[그림 3-8] 세종 5-2(2) 시료 체분석+비중계시험 결과

[표 3-4] 체분석 결과

	D10	D30	D60	Cu	Cc	USCS
천안	0.09	0.36	0.92	10.10	1.56	SW-SC
세종 5-2(1)	0.12	0.37	0.92	7.78	1.27	SW-SM
세종 5-2(2)	0.17	0.46	0.93	5.46	1.31	SP

(4) 다짐시험

(개요) 시험 개요

○ 다짐은 토목 및 건설 분야에서 중요한 역할을 함. 잘 다져진 흙은 구조물의 기초가 되는 중요한 요소이며, 다짐의 정도에 따라 구조물의 안정성, 내구성, 그리고 수명에 큰 영향을 미침. 흙을 다질 때 흙 입자의 공극이 최소화되는 최대 건조 단위 중량에 도달하기 위해서는 각각의 흙에 맞는 최적 함수비

(Optimum Moisture Content, OMC)를 찾는 것이 중요함.다짐시험은 흙의 다짐 특성을 파악하여 최적함수비와 최대 건조 단위 중량을 구하기 위한 시험임.

○ 다짐시험은 KS F 2312에 따라 수행하였으며, 표준은 37.5mm 체를 통과한 흙을 사용하고, 래머를 사용하여 흙을 다짐하여 최적함수비를 획득함.

[표 3-5] **다짐 및 시료 준비 방법**

다짐방법	래머질량 (kg)	몰드 안지름 (cm)	다짐 층수	1층당 다짐 횟수	허용 최대 입자 지름 (cm)
A	2.5	10	3	25	19
B	2.5	15	3	55	37.5
C	4.5	10	5	25	19
D	4.5	15	5	55	19
E	4.5	15	3	92	37.5

○ 시료는 최적함수비에 해당하는 함수비까지 건조하여 다질 때 물을 가함으로써 필요한 함수비로 조절하는 건조법과 자연 함수비에서 건조 또는 물을 가함으로써 시료를 필요한 함수비로 저장하는 습윤법으로 나뉠 수 있으며, 또한 동일한 시료를 함수비를 바꾸어 반복하는 반복법과 항상 새로운 시료를 함수비를 바꾸어 사용하는 비반복법이 있음.

○ 시험 장비는 A다짐, C다짐에 사용할 수 있는 10cm 몰드와 B다짐, D다짐, E다짐에 사용할 수 있는 15cm 몰드와 2.5kg, 4.5kg 래머가 있음.

(방법) 시험 방법

○ 몰드와 밑판의 질량(m1)을 측정함

○ 시료를 몰드에 넣고 밑판을 밟은 상태에서 래머의 손잡이를 낙하고 45cm에서 자유낙하 시켜 다짐함.

○ 다진 후의 시료 윗면은 몰드의 위 끝에서 약간 위가 되도록 조성. 다만, 10mm를 넘어서는 안 됨.

○ 다진 후 칼라를 떼고, 몰드 상부의 여분 흙을 곧은 날로 주의 깊게 깎아 내고 평면으로 다듬질함. 자갈 등을 제거함으로써 표면에 생긴 구멍은 입자 지름이 작은 흙으로 메움.

○ 몰드와 밑판의 외부에 붙은 흙을 잘 닦아내고 전체 질량(m2)을 측정함.

○ 시료 추출기 등을 사용하여 다진 시료를 몰드에서 제거하고 함수비(w)를 구함. 함수비 측정용 시료는 측정 개수가 1개인 경우는 다진 흙의 중심부에서, 2개인 경우에는 상부 및 하부에서 채취함.

○ 반복법 및 비 반복법 중 어느 경우나 예상되는 최적함수비를 포함하여 6종류 이상의 함수비로 반복. 반복법에 의할 경우 다진 후의 함수비 측정용 시료를 채취한 후의 시료를 다지기 전의 최초 상태가 될 때까지 잘게 부순 후, 나머지 시료와 함께 소요량의 물을 가하여 함수비가 균일하게 되도록 혼합함.

○ 시험을 통해 획득한 함수비와 질량을 통해 다짐곡선을 얻을 수 있으며, 이를 통해 최적함수비와 최대 건조 단위 중량을 획득할 수 있음.

$$\gamma_t = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + \frac{w}{100}}$$

여기서, γ_t : 습윤 단위 중량 (g/cm^3)

m_1 : 몰드와 밑판의 질량 (g)

m_2 : 다진 후의 전체 중량 (g)

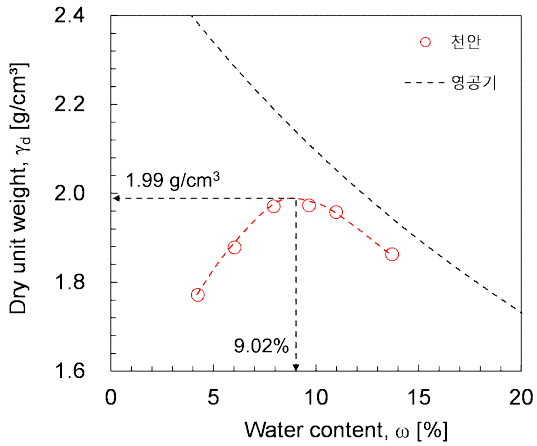
V : 몰드의 용량 (cm^3)

w : 함수비 (%)

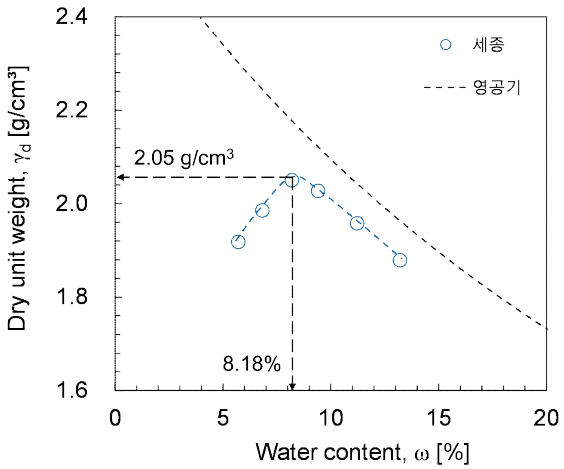
γ_d : 건조 단위 중량 (g/cm^3)

(결과) 시험 결과

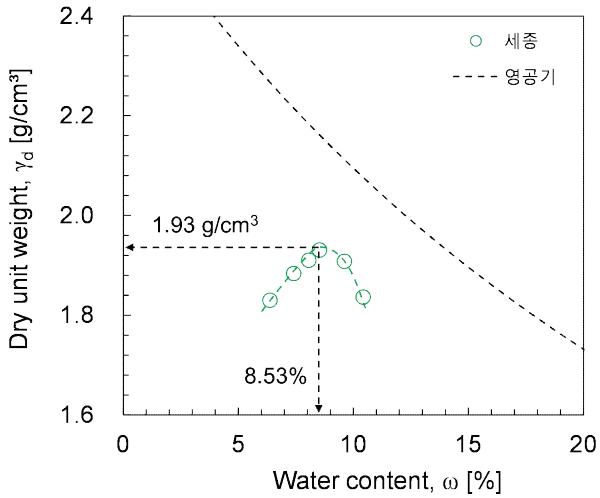
○ 천안, 세종 5-2(1), 세종 5-2(2) 시료에 대해 다짐시험을 D다짐 방법으로 수행함. 세가지 시료는 건조법과 반복법을 사용하여 실험을 수행함.



[그림 3-9] 천안시료 다짐시험 결과



[그림 3-10] 세종 5-2(1)시료 다짐시험 결과



[그림 3-11] 세종 5-2(2)시료 다짐시험 결과

○ 세 시험 부지 모두 최대건조단위중량은 1.9~2.1 g/cm³ 범위, 최적함수비는 8~9% 범위로 유사한 특성을 나타냄. 특히 세종 5-2(1) 부지는 가장 높은 최대건조단위중량과 가장 낮은 최적함수비를 보여 상대적으로 우수한 다짐 특성을 나타내는 것으로 평가됨.

○ 본 시험 결과는 현장 다짐도 산정 및 되매움재의 기초 자료로 활용함.

[표 3-6] 다짐시험 결과

위치	다짐방법	최대건조단위중량 $\gamma_{d,max}$ [g/cm3]	최적함수비 [%]
천안	D	1.99	9.02
세종 5-2(1)	D	2.05	8.18
세종 5-2(2)	D	1.93	8.53

(5) 기본물성시험 정리

○ 비중은 2.58~2.65 범위로 나타났으며, 세종 5-2(1) 시료가 2.65로 가장 크게 나타남. 입도분포 특성을 나타내는 균등계수(Cu)는 5.46~10.45 범위로 나타났으며, 곡률계수(Cc)는 1.31~2.19 범위로 확인되어 대부분 양호한 입도분포를 갖는 것으로 평가됨.

○ 액성한계(LL)는 19.32~37.27%, 소성지수(PI)는 1.80~7.67로 나타남. 천안 시료는 상대적으로 높은 소성지수를 나타내어 세립분 함량의 영향을 받는 것으로 판단되며, 세종 5-2(1) 및 세종 5-2(2) 시료는 낮은 소성지수를 나타남

○ 다짐시험 결과, 최대건조밀도는 1.93~2.05 g/cm^3 범위로 나타났으며, 세종 5-2(1) 시료가 가장 높은 값을 보임. 최적함수비는 8.18~9.02% 범위로 확인되어 세 시험 부지 모두 유사한 다짐 특성을 나타남.

○ 통일분류법에 따른 분류 결과, 천안 시료는 SW-SC, 세종 5-2(1) 시료는 SW-SM, 세종 5-2(2) 시료는 SP로 분류됨. 전반적으로 시험 부지의 시료는 모래질 토사로 구성되어 있으며, 세립분 함량과 입도분포 특성에 따라 물성 차이가 나타나는 것으로 확인됨.

[표 3-7] **기본물성시험 요약**

	천안	세종 5-2(1)	세종 5-2(2)
비중	2.58	2.65	2.63
최대간극비	1.30	1.02	1.04
최소간극비	0.45	0.45	0.65
균등계수 (Cu)	10.00	10.45	5.46
곡률계수 (Cc)	1.77	2.19	1.31
액성한계 (LL)	27.56 %	19.32 %	37.27 %
소성한계 (PL)	19.89 %	17.52 %	33.80 %
소성지수 (PI)	7.67	1.80	3.47
최적함수비	9.02 %	8.18%	8.53%
최대건조밀도	1.99 g/cm3	2.05 g/cm3	1.93 g/cm3
USCS	SW-SC	SW-SM	SP

Ⅳ 관로의 안전성 평가 시험

Key Point

- 토피고가 증가할수록 토압 증분과 변형률이 감소하여 매설관의 구조적 안정성이 향상되는 것으로 확인
- 관종 및 관경에 따라 거동 특성이 다르게 나타났으며, 관경이 증가할수록 토압 증분과 변형률은 감소함
- 실제 시공 조건을 모사한 시험에서는 미세균열만 발생하여 적정 토피고와 다짐 품질이 확보될 경우 매설관의 구조적 안전성을 확보한 것으로 나타남

1 현장실험을 통한 이론식 검증

1) 시험개요

(개요) 연구 개요

○ 본 연구에서는 관로의 관종, 관경, 기초각 및 토피고 변화에 따른 하중 재하 거동을 평가하기 위하여 현장 실험을 수행함.

○ 실험은 총 Test 0부터 Test 1-5까지 단계적으로 구성하였으며, 토압 및 관 변형 계측을 통해 관로의 구조적 안정성을 검토함.

○ 또한 실제 시공 환경을 모사하기 위하여 10톤 진동 롤러와 25톤 덤프트럭을 이용한 하중 재하 시험을 수행함.

○ 각 시험구간에서는 관 외부에 설치된 토압계를 이용하여 수직 및 수평 토압을 측정하였으며, 관 내부에 설치된 변위계를 이용하여 관의 연직 변위를 계측.

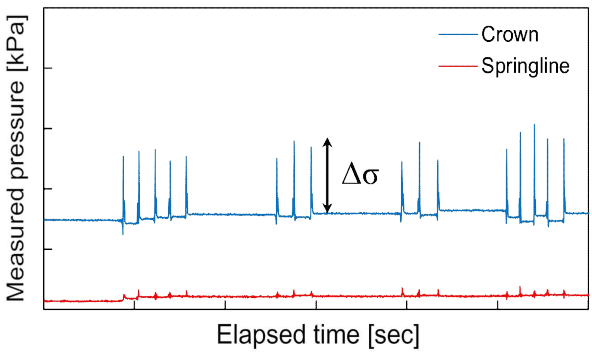
○ 또한 10톤 진동 롤러의 출력 조건을 단계적으로 변화시키면서 다짐하중을 재하하였고 25톤 덤프트럭을 최대 적재 후 주행시켜 차량하중을 재하함.

○ 이를 통해 실제 시공 및 공용 환경에서 발생할 수 있는 하중 조건을 재현하고, 매설관의 토압 및 변형 거동을 종합적으로 평가함.

(현장실험) 현장실험을 통한 토압 및 변위 계측

○ 관로에 작용하는 초기 연직토압(토압)은 σ_i, 차량 하중을 고려한 연직토압(토압+윤압)은 σ_j로 나타냄. 여기서, 차량 하중으로 인한 연직 응력 증분(윤압, $\Delta\sigma$)으로 정의함.

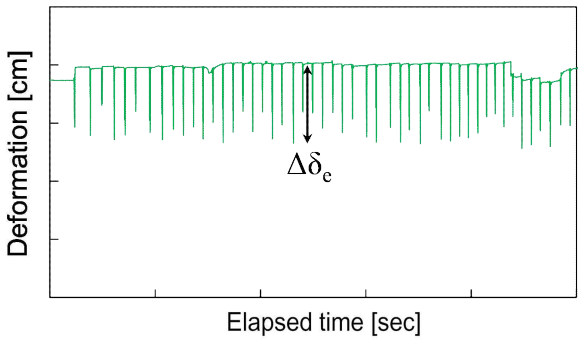
$$\Delta\sigma = \sigma_j - \sigma_i \ [kPa]$$



[그림 4-1] 토압계 측정 방식

○ 하중이 재하되면 순간적으로 변위가 증가하고 하중 제거 후 변위가 회복되는데, 이때 하중 재하 전 변위(δei)와 최대 변위(δej)의 차이를 탄성변형량(Δδe)으로 정의 함.

$$\Delta\delta_e = \delta_{ej} - \delta_{ei} \ [cm]$$



[그림 4-2] 변위계 측정 방식

○ 본 연구는 토피고, 관종, 관경 및 하중 조건 변화에 따른 관로의 토압·변형 거동과 구조적 안정성을 평가하기 위해 Test 0부터 Test 1-5까지 단계적으로 수행함([표 4-1] 참조).

[표 4-1] 연구추진 범위

구분	실험항목	실험 종류	토피고	하중 재하	측정
Test 0	· 토피고에 따른 하중 분석		· 0.30 ~ 1.50m		토압
Test 1-1	· 강성관 D600 (기초각: 90°) · 강성관 D600 (기초각: 90°) · 강성관 D600 (기초각: 90°) · 강성관 D1500(기초각: 90°) · PE D1500(기초각: 180°)	5종	· 강성관 D600 (토피고: 0.30m) · 강성관 D600 (토피고: 0.60m) · 강성관 D600 (토피고: 1.00m) · 강성관 D1500 (토피고: 1.00m) · PE D1500 (토피고: 1.00m)	10톤 진동 롤러 25톤 덤프 트럭	토압 변형
Test 1-2	· PE D600 (기초각: 360°) · PVC D400(기초각: 180°) · PE D200(기초각: 180°) · PE D900(기초각: 180°) · PE D1200(기초각: 180°)	5종	· PE D600 (토피고:1.00m) · PVC D400 (토피고: 1.00m) · PE D200 (토피고: 1.00m) · PE D900 (토피고: 1.00m) · PE D1200 (토피고: 1.00m)		
Test 1-3	· PVC D200(기초각: 180°) · 강성관 D600 (기초각: 90°) · PVC D600(기초각: 180°) · 강성관 D1500(기초각: 90°) · 강성관 D1500(기초각: 90°)	5종	· PVC D200 (토피고: 1.00m) · 강성관D600 (토피고: 1.00m) · PVC D600 (토피고: 1.00m) · 강성관D1500 (토피고: 1.00m) · 강성관 D1500 (토피고: 1.50m)		
Test 1-4	· 강성관 D250 (기초각: 90°) · PE D400 (기초각: 180°) · 강성관 D400 (기초각: 90°) · 강성관 D900 (기초각: 90°) · 강성관 D1200 (기초각: 90°)	5종	· 강성관D250 (토피고: 1.00m) · PED400 (토피고: 1.00m) · 강성관 D400 (토피고: 1.00m) · 강성관 D900 (토피고: 1.00m) · 강성관 D1200 (토피고: 1.00m)		
Test 1-5	· PE D600 (기초각: 180°) · 강성관 D900 (기초각: 90°) · 강성관 D1100 (기초각: 90°) · 강성관 D1500 (기초각: 90°)	4종	· PE D600 (토피고: 1.00m) · 강성관 D900 (토피고: 1.00m) · 강성관 D1100 (토피고: 1.00m) · 강성관 D1500 (토피고: 1.00m)		

2 관로 및 계측기 설치

(방법) 터파기 방법

○ 관로 설치를 위한 터파기 공정은 실제 현장 시공 조건을 최대한 반영하면서 실험의 안전성과 재현성을 확보할 수 있도록 계획함.

○ 관로 설치 위치는 각 시험구간 간 상호 간섭을 방지하고 장비 이동 및 계측 작업공간을 확보하기 위하여 관로 터파기간 간격을 4m로 설정함.

○ 터파기 시 굴착 사면의 안정성을 확보하기 위하여 굴착 경사각은 1:1의 비율로 계획함. 이는 굴착 중 토사의 붕괴 및 사면 불안정을 방지하기 위한 것으로, 실험 동안 안전한 작업 환경을 유지할 수 있도록 설계함.

○ 관로 하부 기초는 모래기초로 관로에 작용하는 하중을 균일하게 분산시키고 안정적인 지지 조건을 확보하기 위하여 두께 200mm로 조성함.

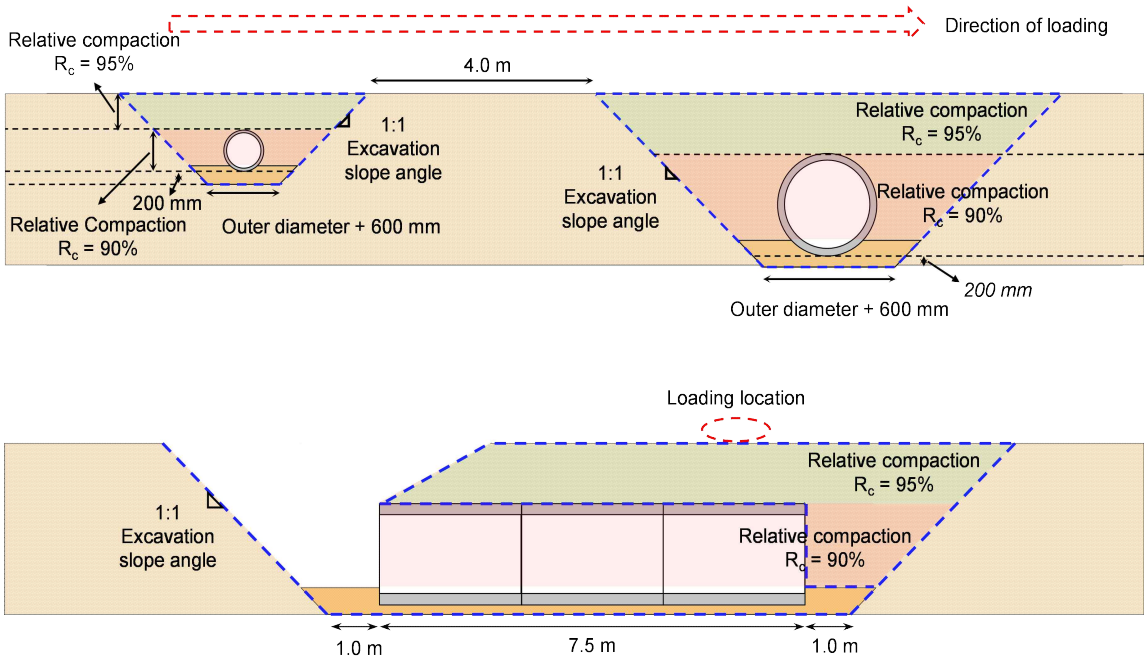
○ 터파기 폭은 관로 설치 및 되메움 작업 시 다짐 장비의 원활한 작업 공간을 확보할 수 있도록 관의 외경에 600mm 이상을 추가하여 터파기를 수행함.

(방법) 관로 시공 방법

○ 강성관의 경우 상부 성토 및 하중 재하 과정에서 발생할 수 있는 토사의 밀림 현상과 관로의 변형을 방지하기 위하여 관 3본을 연결하여 설치함. 관 연결부는 실제 시공 상태와 동일하게 시공함.

○ 연성관도 경계조건의 영향을 최소화하기 위하여 기본 설치 길이 외에 3m를 추가 연장하여 충분한 관 길이를 확보함.

○ 이와 같이 터파기 형상, 굴착 경사, 기초 조건 및 관 설치 길이를 종합적으로 고려하여 시험구간을 조성함으로써 실제 현장 시공 조건을 모사하고, 하중 재하 시 관로의 거동을 보다 신뢰성 있게 평가할 수 있도록 계획함.



[그림 4-3] 관로 매설 조건 및 하중 재하 방법

(설치) 토압계 설치

○ 토압계는 매설관 외부에 설치하여 관체에 작용하는 수직 및 수평 토압을 측정함. 관 상부에는 수직 토압 측정을 위한 토압계를 설치하였으며, 관 측면에는 수평 토압 측정을 위한 토압계를 설치함.

○ 토압계 프레임을 제작하여 토압계와 동일한 높이가 되도록 홈을 가공한 후 매립하여 설치하여, 되메움 과정에서 발생할 수 있는 편심 하중이나 국부 응력의 영향을 최소화 함.

○ 토압계 프레임의 하부는 관로와의 밀착성을 확보하고 측정 오차를 최소화하기 위하여 관의 곡률에 맞도록 가공하여 제작함.

○ 센서 설치를 위한 별도의 천공이나 볼트 체결은 관체에 국부적인 응력 집중을 유발하고 관로를 손상을 발생시킬 가능성이 있어 시행하지 않았음. 관체의 구조적 건전성을 유지하기 위하여 고강도 접착제를 사용하여 토압계 프레임을 관 표면에 부착함. 이를 통해 계측기의 안정적인 고정과 관체 손상을 방지함.

(설치) 변위계 설치

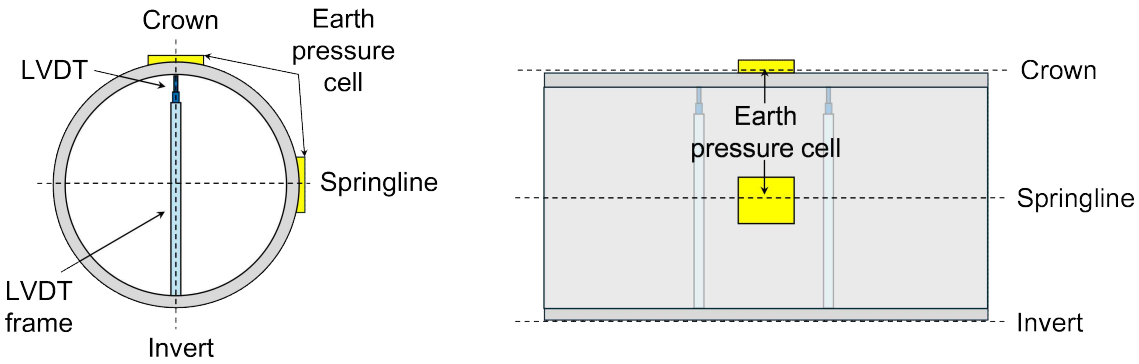
○ 관 변형 거동을 측정하기 위하여 변위계는 관 내부에 설치. 변위계는 관 중심부에 수직 방향으로 설치하여 하중 재하 시 발생하는 관의 연직 변위를 측정할 수 있도록 구성함.

○ 변위계 프레임은 관 내부 바닥에 고정하였으며, 계측 중 프레임의 이동이나 전도를 방지하기 위하여 하부에 중량물을 배치하여 안정적으로 고정. 변위계 측정봉은 관 상부에 접촉되도록 설치하여 관 상부의 침하 및 하중 재하에 따른 탄성변위를 실시간으로 측정함.

○ 변위계와 토압계의 위치는 실험관의 중앙에 설치. 설치가 완료된 후에는 각 계측기의 영점을 확인하고 데이터 수집 장치와 연결하여 정상 작동 여부를 검토함.

○ 10톤 진동 롤러와 25톤 덤프트럭 하중 재하 시험 중 토압 및 변위 데이터를 실시간으로 취득함.

○ 이와 같은 계측기 설치 방안을 통하여 매설관 외부에 작용하는 수직·수평 토압과 관체의 연직 변위를 동시에 측정할 수 있었으며, 토피고 및 하중 조건 변화에 따른 매설관의 거동 특성을 종합적으로 평가함.



[그림 4-4] 실험관 센서 설치 방법 모식도

[표 4-2] 토압계 제원

	직경	두께	용량 [kgf/cm2]	입·출력 저항	허용 인가 전압
QS-5K	30mm	10mm	5	350	2 ~ 10V
GS-5K	50mm	15mm			

[표 4-3] 변위계 제원

	스트로크	비선형성	반복성 오차	사용 가능 온도 범위	인가전압
LPS-30S	30mm	±1% F.S	±0.1% F.S	0℃ ~ 60℃	DC 10V
LPS-100S	100mm	±0.4% F.S			



[그림 4-5] 토압계 설치 사진



[그림 4-6] **변위계 설치 사진**

3 관로 시공 및 하중 재하 방법

(시공) 현장 관로 시공

○ 아래 그림은 관로 설치를 위한 터파기 작업이 완료된 상태를 나타남. 터파기는 계획된 토피고와 관로 위치를 고려하여 수행하였으며, 굴착 사면의 안정성을 확보하기 위하여 1:1의 굴착 경사를 적용함.

○ 이후 관로 설치 전 기초층을 조성하는 과정을 나타남. 관 하부 지지력을 확보하기 위하여 기초재를 포설하고 다짐 작업을 수행하였으며, 관로가 균일하게 지지될 수 있는 조건을 마련함.

○ 관로를 설치하고 토압계, 변위계 등 계측기를 부착하여 하중 재하 시 발생하는 토압 및 변위 거동을 측정함.

○ 관로 설치 및 계측기 부착이 완료된 후에는 관 주변 및 상부에 대해 단계적으로 되메움 작업을 수행함. 되메움은 실제 시공 조건을 재현할 수 있도록 층별로 포설하였으며, 각 층에 대해 목표 다짐도를 만족하도록 작업함.



1. 관로 자리 터파기 수행



2. 관로 설치 및 연결



3. 계측기 설치



4. 되메움 수행

[그림 4-7] 관로 시공 방법

(방법) 하중 재하 방법

○ [그림 4-8]은 10톤 진동 롤러 및 25톤 덤프 트럭을 이용한 하중 재하 시험 장면을 나타낸다. 하중 재하는 관로 축에 대한 재하 방향에 따라 횡방향 재하와 종방향 재하로 구분하여 수행함.

○ 횡방향 재하 시에는 진동 롤러와 덤프트럭이 실험관 축과 직교하는 방향으로 주행하도록 하여 차량하중이 관로를 횡단하도록 하였으며, 종방향 재하 시에는 진동 롤러와 덤프트럭이 실험관 축과 평행한 방향으로 주행하면서 관로 상부를 반복 주행함.

○ 진동 롤러 재하 시험에서는 진동 출력을 단계적으로 조절하여 다양한 하중 조건을 구현하였으며, 각 단계별로 작용하는 토압 및 변위 거동을 계측함.

○ 덤프트럭 재하 시험에서는 실제 현장에서 발생할 수 있는 최대 하중 조건을 모사하기 위하여 차량을 만재 상태 이상으로 적재하여 주행함.



<10톤 롤러 횡방향 주행>



<10톤 롤러 종방향 주행>



<25톤 덤프트럭 횡방향 주행>



<25톤 덤프트럭 종방향 주행>

[그림 4-8] 하중 재하 방법

4 현장 실험

(1) 시험성토

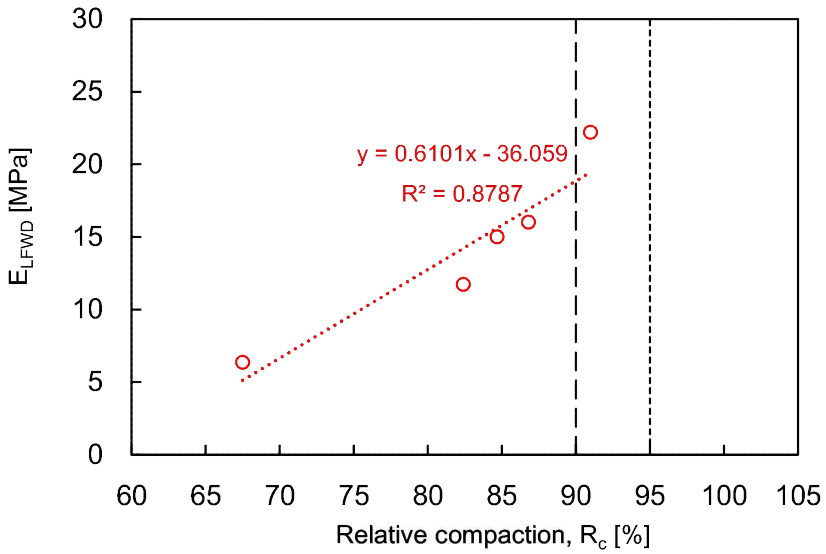
(성토) 시험 성토: 천안

○ 천안 시험소에서 시험성토구역을 조성하여 10톤 진동 롤러의 다짐 횟수에 따른 상대다짐도를 획득 함.

○ 10톤 롤러 다짐 횟수가 증가함에 따라 LFWD 탄성계수와 상대다짐도가 증가하는 경향을 나타남.

○ LFWD 탄성계수는 비다짐 상태에서 6.36 MPa에서 최대 22.21 MPa까지 증가하였으며, 상대다짐도 또한 67.5%에서 91.0%로 증가

○ 높은 상관성을 나타내어, LFWD 시험을 활용한 현장 다짐도 평가가 가능한 것으로 판단됨.



[그림 4-9] 천안 LFWD와 상대다짐도 상관관계

[표 4-4] 다짐 횟수에 따른 LFWD 탄성계수 및 상대다짐도 변화

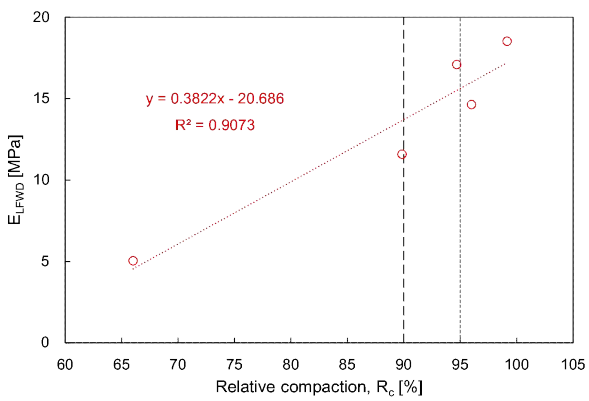
측정값	0회(비다짐)	6회	10회	14회	18회
E_{LFWD} [MPa]	6.36	11.72	15.00	16.02	22.21
함수비 [%]	11.39	14.05	14.23	14.23	12.47
상대다짐도 [%]	67.5	82.4	84.7	86.8	91.0

(성토) 시험 성토: 세종

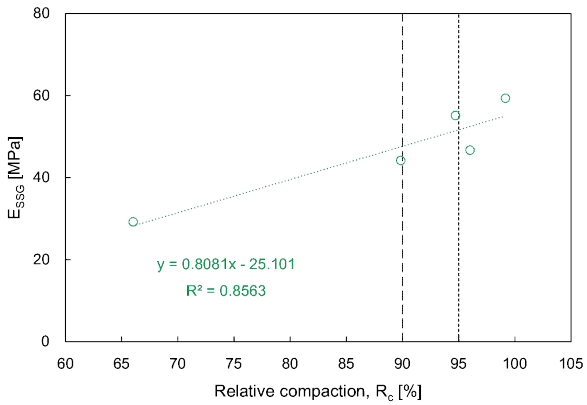
○ 세종 실험 부지에서 시험성토구역을 조성하여 1톤 진동 로울러의 다짐 횟수에 따른 상대다짐도를 획득함.

○ 다짐 횟수가 증가함에 따라 상대다짐도와 LFWD 및 GeoGauge 탄성계수가 모두 증가하는 경향을 나타남.

○ 상대다짐도와 LFWD의 상관계수(R^2)는 0.9073, GeoGauge의 상관계수(R^2)는 0.8563으로 나타나 두 시험 모두 다짐 상태 평가에 활용 가능한 것으로 확인됨.



<LFWD와 상대다짐도 비교>



<지오게이지와 상대다짐도 비교>

[그림 4-10] 세종 5-2(2) 상대다짐도와 간편다짐장비 상관관계

[표 4-5] 세종 5-2(1) 다짐 횟수에 따른 LFWD 탄성계수 및 상대다짐도 변화

측정값	0회(비다짐)	4회	8회	16회	32회
E_{LFWD} [MPa]	5.04	11.59	14.65	17.10	18.34
E_{LFWD} [MPa]	29.22	44.18	46.71	55.19	59.36
함수비 [%]	7.86	7.82	7.30	7.34	7.01
상대다짐도 [%]	66.02	89.84	95.99	94.69	99.15

(2) Test 0: 토피고별 토압

(성토) 시험 성토

○ 토피고 변화에 따른 지중 응력 분포 특성을 분석하기 위하여 토피고별 토압 측정을 수행함.

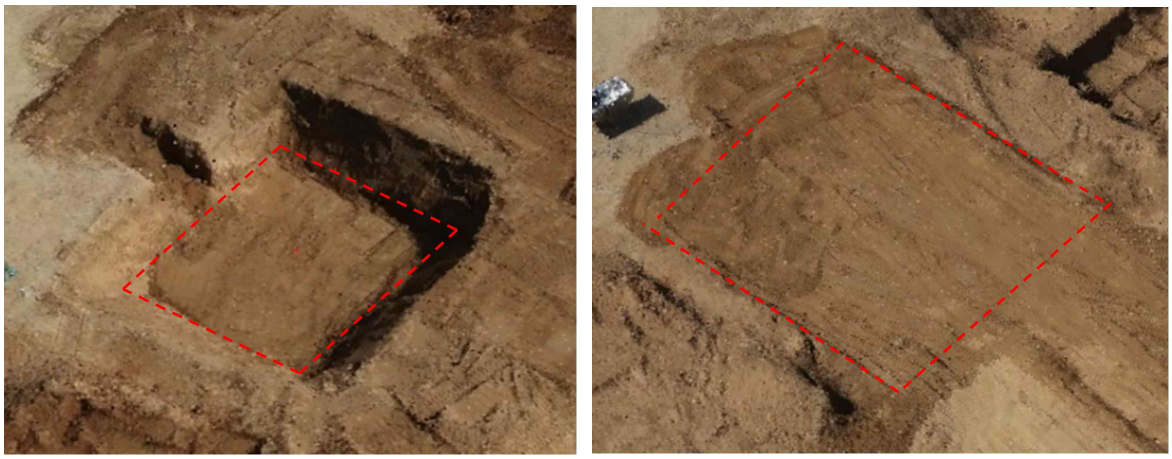
○ 토압 측정은 성토 지반 내 특정 위치에 토압계를 설치한 후 단계적인 성토를 실시하면서 연직 토압의 변화를 계측하는 방식으로 진행함.

○ 이를 통해 토피고 증가에 따른 토압 발생 양상을 정량적으로 평가함. 시험 구간은 일정 면적의 성토 지반을 조성한 후 토압계를 설치하여 계측을 수행하였으며, 성토가 진행됨에 따라 발생하는 수직 토압을 측정함.

○ 측정 위치는 토압계 주변 지반의 교란을 최소화할 수 있도록 선정함. 토압 측정은 총 5단계에 걸쳐 수행하였으며, 토피고는 0.3 m에서 1.5 m까지 단계적으로 증가시키면서 계측을 실시함.

○ 각 단계의 토피고 높이는 드론 측량 결과를 토대로 획득 각 단계에서는 목표 높이까지 성토 및 다짐을 완료한 후 충분한 안정화 시간을 확보하고 토압을 측정함.

○ 이후 다음 단계의 성토를 수행하여 토피고 증가에 따른 토압 변화를 연속적으로 평가함.



[그림 4-11] 토피고에 따른 토압 측정

[표 4-6] 토피고 별 평균 탄성계수 및 다짐도 평가 결과

토피고 [m]	E_{LFWD} [MPa]	E_{SSG} [MPa]	상대다짐도 [%]	함수비
0.28	25.7	107.154	96.0	7.0
0.48	21.2	94.7	92.9	8.2
0.85	14.2	54.4	88.5	12.1
1.28	16.9	92.5	88.9	9.5
1.58	15.5	62.2	90.9	12.4

(결과) 토피고 별 토압 측정 결과

○ 그래프에서 점선은 실측값과 이론값의 비교 결과를 나타내며, 검은색 파선은 실측값과 이론값이 동일한 1:1 관계를 의미함.

○ 프레임을 설치한 토압계의 경우 이론 토압과 실측 토압 사이에 높은 상관성을 나타내었으며, 전반적으로 1:1 선에 근접한 분포를 보임.

○ 이는 프레임이 토압계를 안정적으로 지지하여 센서와 지반의 접촉 상태를 유지하고, 지반 내 응력을 효과적으로 전달한 결과로 판단됨.

○ 반면 프레임이 없는 토압계의 경우 결정계수는 높게 나타나 이론 토압과 실측 토압 간의 선형성은 우수하였으나, 토압이 증가할수록 이론값과 실측값의 차이가 증가함.

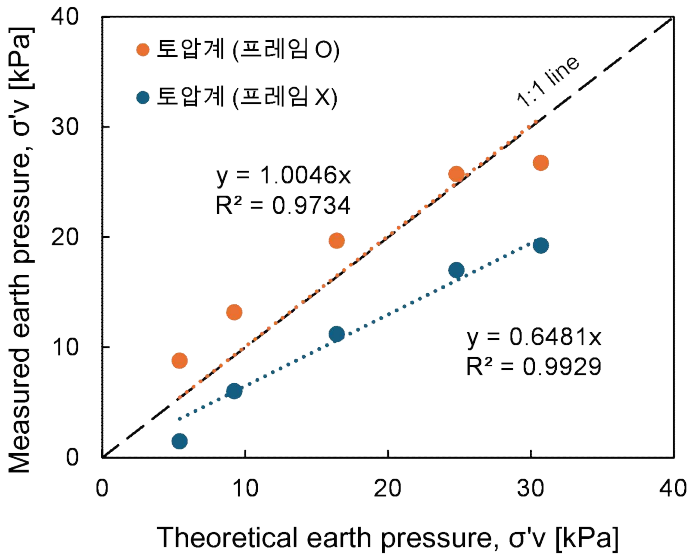
○ 프레임 설치 유무에 따른 결과를 비교하면, 프레임을 설치한 경우 토압계가 이론 토압을 보다 정확하게 재현하는 것으로 나타남 .

○ 반면 프레임이 없는 경우 측정값은 이론 토압과 높은 상관성을 유지하였음에도 불구하고 과소평가되는 경향을 보임 .

○ 따라서 현장 토압 측정 시에는 센서의 안정적인 고정과 응력 전달 효율을 확보할 수 있는 프레임 설치가 필수적이며, 특히 매설관과 같이 곡면 구조물에 토압계를 설치하는 경우에는 구조물의 곡률에 맞게 제작된 프레임을 적용하는 것이 측정 정확도 향상에 효과적인 것으로 판단됨.

[표 4-7] 토피고 별 이론 토압 및 토압계 측정 결과

토피고 [m]	이론식 토압 [kPa]	토압계 (프레임 X) 토압 [kPa]	토압계 (프레임 O) 토압 [kPa]
0.28	5.43	1.45	8.77
0.48	9.25	6.01	13.18
0.85	16.43	11.18	19.67
1.28	24.81	16.99	25.73
1.58	30.70	19.24	26.74



[그림 4-12] 토피고 별 이론값 및 실측값 수직 토압 비교

(3) Test 1-1

(개요) 실험 개요

○ Test 1-1에서는 강성관과 연성관의 기본적인 하중 재하 특성을 비교하기 위하여 강성관 D600 및 D1500과 PE D1500을 대상으로 실험을 수행함.

○ 강성관은 기초각 90° 및 연성관은 기초각 180°, 토피고는 0.30 m, 0.60 m 및 1.00 m로 변화시켜 토피고에 따른 거동 특성을 평가. 또한 동일 토피고 조건에서 강성관과 연성관의 특성을 비교하여 관종에 따른 하중 전달 특성을 분석함.

[표 4-8] Test 1-1 실험 조건

관종	토피고, H [m]	관경, D [m]	기초각 [°]	H/D
강성관	0.30	0.60	90	0.50
강성관	0.60	0.60	90	1.00
강성관	1.00	0.60	90	1.67
강성관	1.00	1.50	90	0.67
PE	1.00	1.50	180	0.67



[그림 4-13] Test 1-1 실험 전경

[표 4-9] Test 1-1 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.0	C-D600-0.3	C-D600-1.0	C-D600-0.6	PE-D1500-1.0
기초	7.45	6.93	6.51	5.76	7.14
관정	12.01	7.82	8.34	12.27	9.70
0.3	8.29	7.43	8.94	9.48	9.05
0.6	7.43	-	8.33	9.33	4.67
1.0	9.57	-	5.81	-	8.32
평균	8.95	7.39	7.59	9.21	7.78

[표 4-10] Test 1-1 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.0	C-D600-0.3	C-D600-1.0	C-D600-0.6	PE-D1500-1.0
기초	45.8	45.5	41.7	55.1	61.6
관정	67.4	59.0	59.2	70.5	72.3
0.3	60.0	48.3	80.4	95.2	80.1
0.6	51.0	-	59.8	61.2	83.3
1.0	51.8	-	41.1	-	44.0
평균	55.2	50.9	56.5	70.5	68.3

[표 4-11] Test 1-1 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.0	C-D600-0.3	C-D600-1.0	C-D600-0.6	PE-D1500-1.0
기초	88.0	90.1	90.2	90.4	93.9
관정	92.0	90.8	90.1	94.5	89.9
0.3	94.2	94.1	98.7	93.0	92.4
0.6	93.8	-	94.1	94.2	98.0
1.0	94.1	-	94.3	-	94.2
평균	92.4	91.7	93.5	93.0	93.7

(하중 재하) 롤러 및 덤프 하중 재하 방법

○ 하중 재하 시험은 실제 시공시 발생 가능한 하중 조건을 모사하기 위하여 10톤 진동 롤러와 최대 적재 상태의 25톤 덤프트럭을 이용하여 수행함.

○ 실험 순서는 10톤 롤러 출력별 동적 주행, 10톤 롤러 출력별 제자리 가진, 25톤 덤프트럭 주행 순으로 수행함. 모든 하중은 매설관 축과 직교하는 횡방향 재하 조건으로 적용하였으며, 이를 통해 차량 및 다짐 장비가 관로를

횡단할 때 발생하는 하중 전달 특성을 평가함.

○ 10톤 진동 롤러를 이용한 실험에서는 진동수 및 진동폭을 조절하여 4 단계로 변화시키면서 반복 주행 및 제자리 가진을 수행함. 이를 통해 다짐 에너지 증가에 따른 토압 및 관 변형의 변화를 분석하고, 시공 중 다짐 작업이 매설관에 미치는 영향을 평가함.

○ 또한 25톤 덤프트럭은 최대 적재로 운행하여 실제 공사 차량에 의해 발생할 수 있는 최대 수준의 차량하중을 재현. 각 하중 재하 단계에서 토압계와 변위계를 이용하여 매설관에 작용하는 토압과 변형 거동을 계측함.



[그림 4-14] 10톤 롤러 동적 주행



[그림 4-15] 10톤 롤러 제자리 가진



[그림 4-16] 25톤 덤프트럭 주행

(평가) 롤러 출력에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률

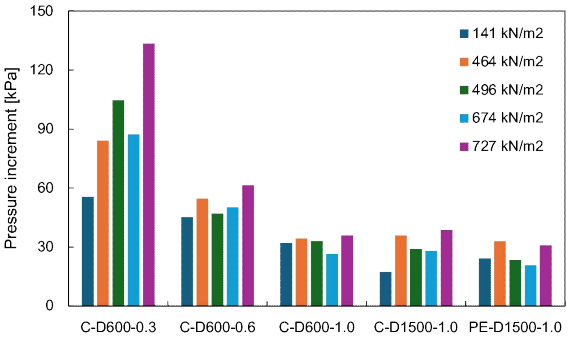
○ [그림 4-17]은 진동 롤러의 재하 방식에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률을 비교한 결과를 나타남. 전반적으로 롤러 출력이 증가할수록 토압 증분과 변형률이 증가함.

○ 토피고가 증가할수록 토압 증분과 변형률은 감소함. 토압 측정 결과, 강성관 D600의 토피고 0.3 m 조건에서 가장 큰 토압 증분이 발생하였으며, 특히 제자리 가진 조건이 동적 주행 조건보다 높은 토압을 나타남.

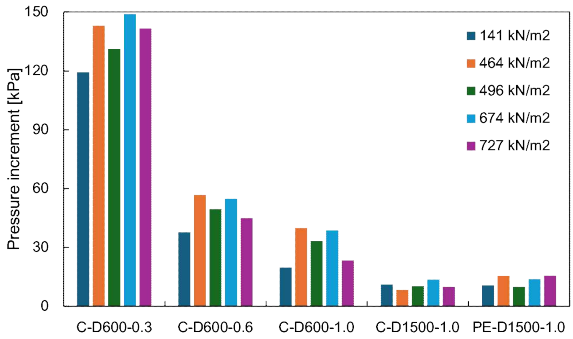
○ 또한 토피고가 1.0 m 이상인 경우에는 토압 증분이 감소함. 변형률 역시 토압 결과와 유사한 경향을 보였으며, 토피고 0.3 m 조건에서 가장 크게 발생함.

○ 특히 제자리 가진 조건에서 동적 주행 조건보다 큰 변형률이 발생하여 진동이 동일 위치에 반복적으로 작용할 경우 관체에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타남.

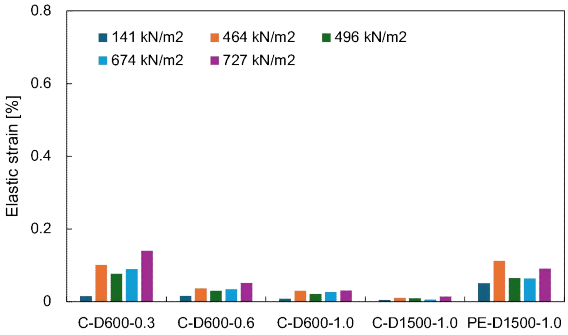
○ 종합적으로 토압 증분 및 변형률은 가진력 증가에 따라 증가하고 토피고 증가에 따라 감소하였으며, 제자리 가진이 동적 주행보다 관로에 더욱 불리한 하중 조건을 형성하는 것으로 나타남.



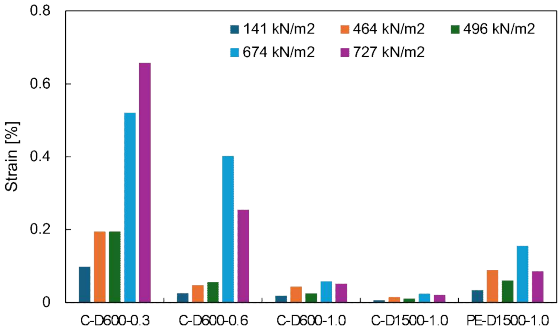
<동적 주행 토압 증분>



<제자리 가진 토압 증분>



<동적 주행 탄성 변형률>



<제자리 가진 탄성 변형률>

[그림 4-17] 진동 롤러 재하 방식에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률 비교

(평가) 롤러 및 덤프 주행에 따른 토압 및 변형률

○ 횡방향 주행 하중 조건에서 롤러와 덤프트럭 재하 시 발생한 토압 증분 및 변형률을 비교한 결과 분석임.

○ 전반적으로 덤프트럭 재하 시 토압 증분과 변형률이 롤러 재하보다 크게 나타났으며, 토피고가 증가할수록 두 값 모두 감소함.

○ 특히 토피고 0.3 m의 강성관 D600에서 가장 큰 결과가 발생하였으며, PE D1500은 강성관에 비해 상대적으로 큰 변형률을 나타남

○ 이는 토피고 증가에 따른 하중 분산 효과와 관 재질에 따른 변형 특성 차이에 기인한 것으로 판단됨.

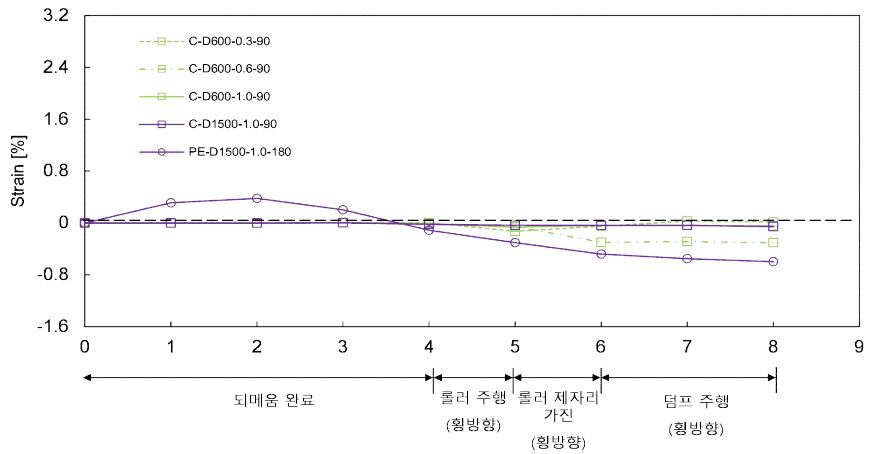
(평가) 하중 재하에 따른 관로 시계열 영구변형률

○ [그림 4-18]은 하중 재하에 따른 관로의 영구변형률 변화를 나타냄. 전반적으로 강성관은 되메움 및 반복 하중 재하 이후에도 영구변형률이 0% 부근

으로 나타나 매우 안정적인 거동을 보임.

○ 반면 PE-D1500 연성관은 롤러 및 덤프트럭 재하에 따라 압축 방향의 영구변형이 누적되는 경향을 나타냈으며, 최종적으로 약 0.7%의 영구변형률이 발생함.

○ 또한 강성관은 토피고가 증가할수록 영구변형률이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 상부 지반의 하중 분산 효과에 의한 것으로 판단됨. 연성관에서 발생한 영구변형률이 1% 미만으로 구조적 안정성에는 큰 문제가 없는 것으로 평가됨.



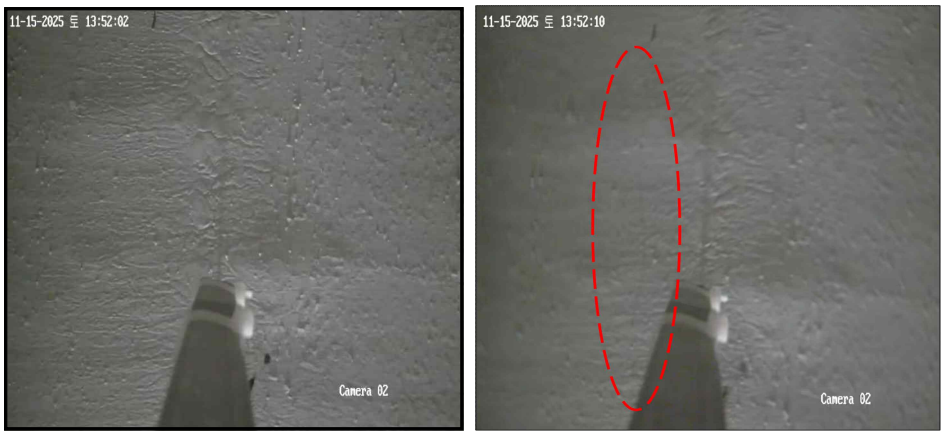
[그림 4-18] Test 1-1 관로 하중 재하에 따른 영구변형률

(CCTV) 균열 확인

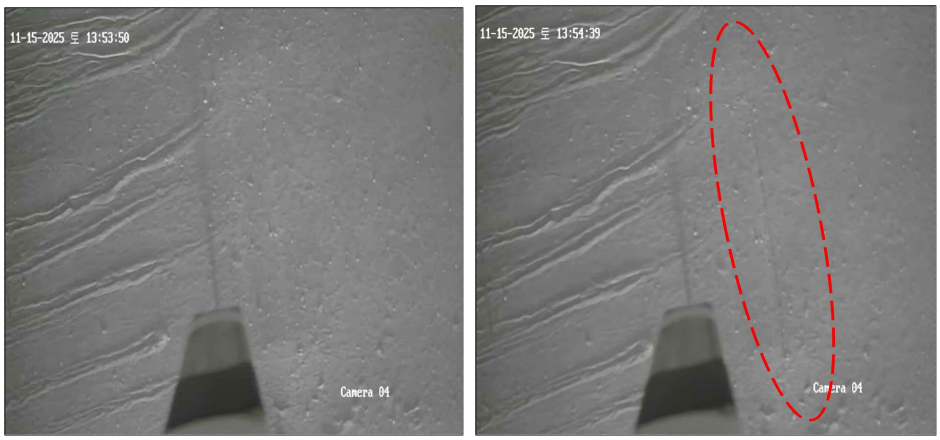
○ CCTV 균열 조사 결과, 10톤 진동 롤러 출력별 동적 주행 조건으로 관로 상부를 통과할 때에는 D600 강성관과 D1500 강성관 모두에서 균열이 발생하지 않음.

○ 반면, 진동 롤러를 이용한 제자리 가진 시험에서는 가진 출력이 증가함에 따라 D600 강성관의 관정 내부에서 균열이 발생. 이는 반복적인 진동 에너지가 동일 위치에 집중적으로 작용하면서 관체에 국부적인 응력이 발생하였기 때문으로 판단됨.

○ 한편, D1500 강성관의 경우에는 동일한 제자리 가진 조건에서도 균열이 발견되지 않음.



[그림 4-19] 강성관 D600 토피고 0.3m 제자리 가진 시 균열 발생



[그림 4-20] 강성관 D600 토피고 0.6m 제자리 가진 시 균열 발생



[그림 4-21] **강성관 D600 토피고 1.0m 제자리 가진 시 균열 발생**

(육안 검사) 균열 확인

○ 실험 종료 후 관체의 균열 발생 여부를 확인하기 위하여 육안조사를 수행함. 확인 결과, 강성관 D600의 토피고 0.3 m 및 0.6 m 조건에서는 관정, 관저 및 측면부에서 균열이 확인되어 실험관 전체 단면에 걸쳐 균열이 발생함.

○ D600 토피고 1.0 m 조건에서는 관정 부위에서 균열이 확인되었으나, 관저 부위에서는 미세균열만 발생. 또한 측면부의 경우 한쪽에서만 균열이 확인되어 토피고 0.3 m 및 0.6 m 조건에 비해 균열 발생 범위가 감소한 것으로 나타남.

○ 강성관 D1500 토피고 1.0 m의 경우 관 입구부에서 일부 균열이 확인되었으나 균열이 실험관 전 구간으로 진전되지는 않았으며, 측면부에서는 균열이 발생하지 않은 것으로 확인됨. 모든 강성관에서 나머지 더미관 2본에서는 균열이 발생하지 않음.

○ 따라서 D1500 강성관은 동일한 하중 조건에서도 D600 강성관에 비해 균열 발생이 제한적으로 나타나 상대적으로 우수한 구조적 안정성을 확보한 것으로 평가됨.



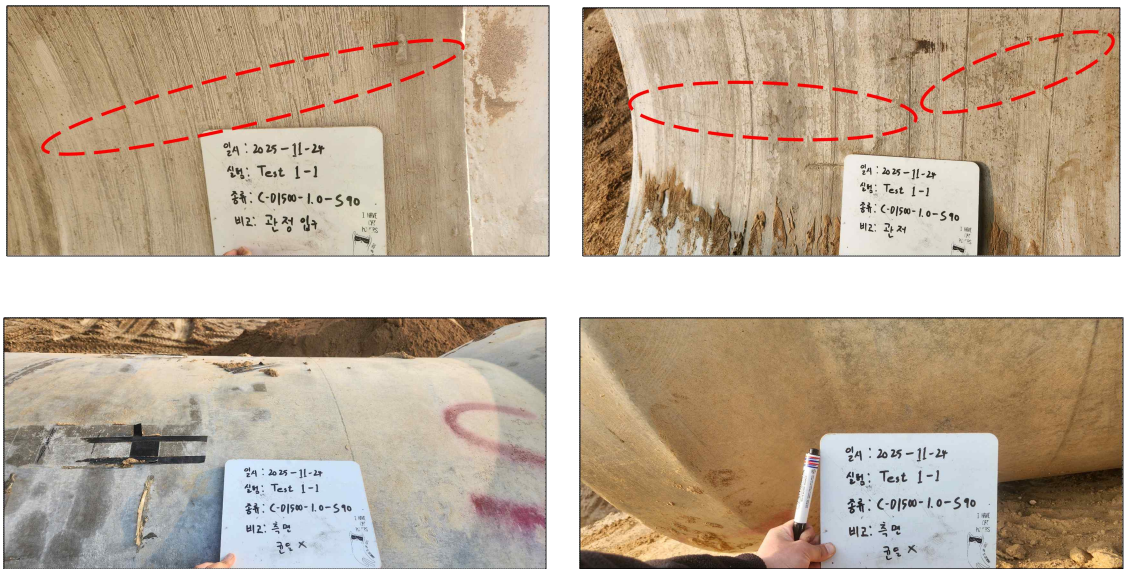
[그림 4-22] 강성관 D600 토피고 0.3m 균열 확인



[그림 4-23] 강성관 D600 토피고 0.6m 균열 확인



[그림 4-24] 강성관 D600 토피고 1.0m 균열 확인



[그림 4-25] 강성관 D1500 토피고 1.0m 균열 확인

(3) Test 1-2

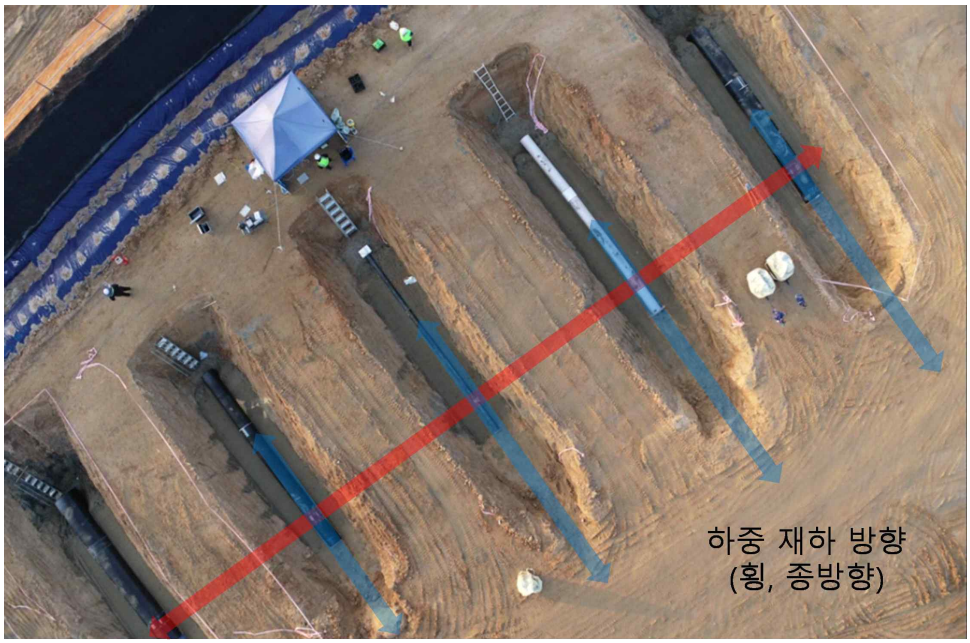
(개요) 실험 개요

○ Test 1-2에서는 연성관의 관종 및 관경 변화에 따른 영향을 검토하기 위하여 PE D600, PE D200, PE D900 및 PE D1200과 PVC D400을 대상으로 실험을 수행함.

○ 모든 시험은 토피고 1.00 m 조건에서 수행되었으며, 관경 증가에 따른 토압 및 변형 특성과 관종에 따른 구조적 거동 차이를 평가함.

[표 4-12] Test 1-2 실험조건

관종	토피고, H [m]	관경, D [m]	기초각 [°]	H/D
PE	1.00	0.2	180	5.00
PVC	1.00	0.4	180	2.50
PE	1.00	0.6	360	1.67
PE	1.00	0.9	180	1.11
PE	1.00	1.2	180	0.83



[그림 4-26] Test 1-2 실험 전경

[표 4-13] Test 1-2 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa]

되메움고 [m]	PE-D1200-1.0	PE-D600-1.0	PE-D200-1.0	PE-D400-1.0	PE-D900-1.0
기초	6.84	6.99	7.26	6.91	7.01
관정	7.50	7.3	7.60	7.53	7.63
0.3	6.45	8.75	7.25	6.71	6.80
0.6	6.21	6.66	4.59	7.29	6.66
1.0	6.41	7.47	8.32	7.06	7.83
평균	6.68	7.42	7.00	7.10	7.18

[표 4-14] Test 1-2 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa]

되메움고 [m]	PE-D1200-1.0	PE-D600-1.0	PE-D200-1.0	PE-D400-1.0	PE-D900-1.0
기초	4.24	5.09	5.18	4.7	4.34
관정	5.41	4.89	4.52	4.50	6.61
0.3	4.96	4.69	5.34	5.62	5.1
0.6	4.65	4.72	4.61	5.07	5.57
1.0	5.48	4.85	5.823	4.94	4.44
평균	43.00	42.14	44.31	43.18	45.31

[표 4-15] Test 1-2 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa]

되메움고 [m]	PE-D1200-1.0	PE-D600-1.0	PE-D200-1.0	PE-D400-1.0	PE-D900-1.0
기초	94.3	91.2	91.7	91.9	93.6
관정	94.5	95.5	95.7	92.4	92.2
0.3	92.5	92.2	93.1	93.6	92.7
0.6	93.4	94.8	91.4	94.4	92.1
1.0	94.3	96.1	93.2	94.1	92.1
평균	93.8	94.0	93.0	93.3	92.5

(하중 재하) 롤러 및 덤프 하중 재하 방법

○ 하중 재하 시험은 10톤 진동 롤러와 최대 적재 상태의 25톤 덤프트럭을 이용하여 수행함. 하중은 매설관 축과 직교하는 횡방향 재하와 매설관 축과 평행한 종방향 재하로 구분하여 적용함.

○ 횡방향 재하 시에는 10톤 진동 롤러와 25톤 덤프트럭이 매설관 축과 직교하는 방향으로 주행하도록 하여 차량 및 다짐 하중이 관로를 횡단하는 조건을 재현함.

○ 종방향 재하 시에는 장비가 매설관 축과 평행한 방향으로 주행하면서 관로 상부를 통과하도록 하여 관 축 방향의 하중 전달 특성을 평가함.

○ 한편, 10톤 진동 롤러의 제자리 가진 시험은 실제 현장 시공 시 적용되지 않는 조건으로, 동일 위치에 반복적으로 진동 하중이 집중되는 극한의 재하 조건에 해당함.

○ 따라서 본 연구에서는 현장 적용성을 고려하여 롤러 및 덤프의 주행 조건에 대한 결과를 중심으로 실험함.



<롤러 횡방향 주행>



<롤러 종방향 주행>

[그림 4-27] 10톤 롤러 횡 및 종방향 주행



<덤프 횡방향 주행>



<덤프 종방향 주행>

[그림 4-28] 25톤 덤프트럭 횡 및 종방향 주행

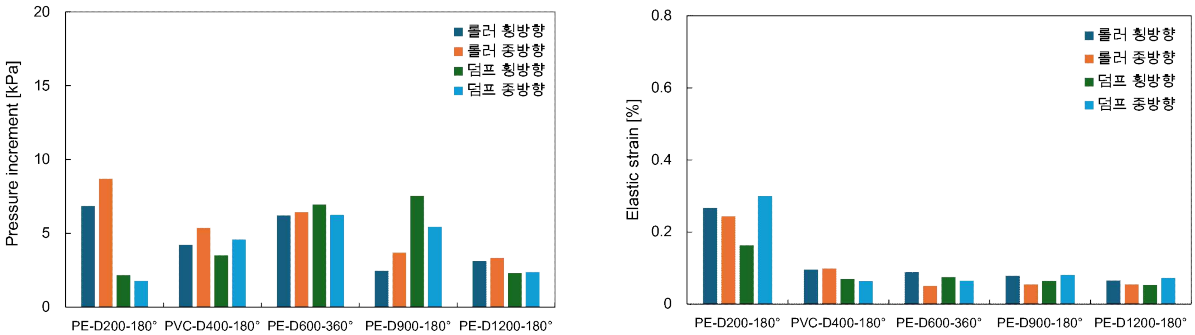
(평가) 하중 재하 종류 및 재하 방향에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률

○ [그림 4-29]는 재하 방향에 따른 연성관의 토압 증분 및 탄성변형률을 비교한 결과를 나타남 토압 증분은 시험체별로 차이를 보였으며, PE-D900에서 상대적으로 큰 값을 나타냄.

○ 또한 재하 방향에 따라 토압 증분이 다소 상이하게 나타나 하중 전달 특성의 영향을 받는 것으로 확인. 탄성변형률은 PE-D200에서 가장 크게 발생하였으며, 관경이 증가할수록 감소함.

○ 그러나 모든 시험 조건에서 탄성변형률은 0.3% 이하로 나타나 하중 제거 후 대부분 회복되는 탄성 거동을 보임.

○ 종합적으로 연성관은 재하 방향에 따른 차이는 존재하였으나, 토압 증분과 탄성변형률 모두 비교적 작은 수준으로 나타나 안정적인 거동을 보이는 것으로 평가됨.



<하중 재하에 따른 토압 증분> <하중 재하에 따른 탄성 변형률>

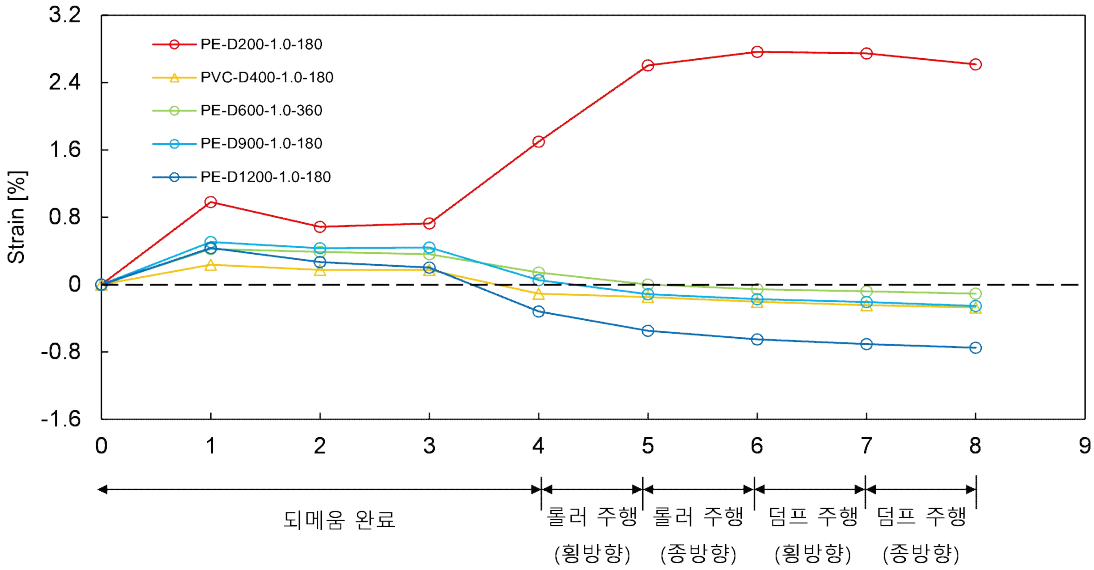
[그림 4-29] 재하 방향에 따른 연성관의 토압 증분 및 탄성변형률

(평가) 하중 재하에 따른 관로 시계열 영구변형률

○ PE-D200은 하중 재하가 반복될수록 영구변형률이 지속적으로 증가하여 가장 큰 변형을 나타냈으며, 최종적으로 약 2.5% 이상의 영구변형률이 발생

○ 반면 PVC-D400, PE-D600, PE-D900 및 PE-D1200은 대부분 ±1% 이내의 영구변형률을 나타내어 비교적 안정적인 거동을 보임.

○ 종합적으로 PE-D200에서 가장 큰 영구변형이 발생하였으며, 나머지 시험체는 반복 하중 재하 후에도 영구변형이 크지 않아 구조적으로 안정적인 것으로 평가됨.



[그림 4-30] Test 1-2 관로 하중 재하에 따른 영구변형률

(4) Test 1-3

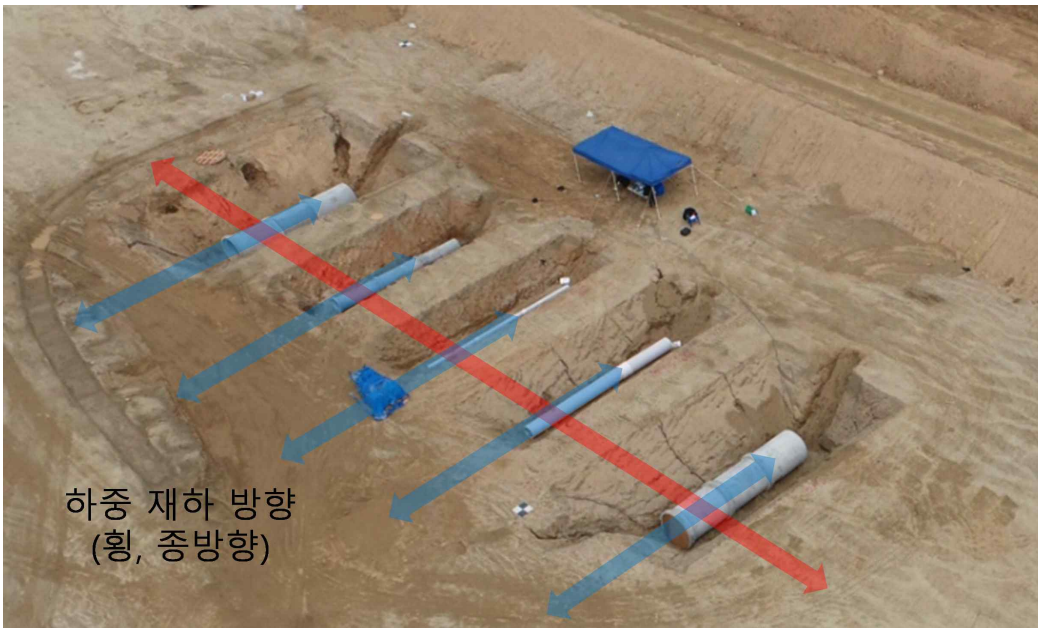
(개요) 실험 개요

○ Test 1-3에서는 강성관과 연성관의 관종 및 토피고 변화에 따른 거동을 비교하기 위하여 PVC D200, PVC D600, 강성관 D600 및 강성관 D1500을 대상으로 실험을 수행함.

○ 특히 강성관 D1500의 경우 토피고 1.00 m와 1.50 m 조건을 적용하여 토피고 증가에 따른 하중 분산 효과를 분석함.

[표 4-16] Test 1-3 실험조건

관종	토피고, H [m]	관경, D [m]	기초각 [°]	H/D
PVC	1.00	0.20	180	5.00
PVC	1.00	0.60	180	1.67
강성관	1.00	0.60	90	1.67
강성관	1.00	1.50	90	0.67
강성관	1.50	1.50	90	1.00



[그림 4-31] Test 1-3 실험 전경

[표 4-17] Test 1-3 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.5	C-D600-1.0	PVC-D200-1.0	PVC-D600-1.0	C-D1500-1.0
기초	14.0	15.4	15.9	17.2	15.7
관정	19.0	19.0	21.6	20.0	18.4
0.3	18.5	14.6	16.8	13.5	14.5
0.6	16.2	14.7	17.8	16.6	16.9
1.0	22.4	19.5	26.3	24.2	20.2
평균	18.0	16.6	19.7	18.3	17.1

[표 4-18] Test 1-3 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.5	C-D600-1.0	PVC-D200-1.0	PVC-D600-1.0	C-D1500-1.0
기초	70.5	62.4	60.9	75.4	67.2
관정	55.2	64.2	70.7	66.8	64.9
0.3	60.1	57.7	58.8	60.3	56.2
0.6	56.0	50.7	60.3	50.8	58.8
1.0	68.0	62.1	91.0	76.7	97.2
평균	62.0	59.4	68.3	66.0	68.9

[표 4-19] Test 1-3 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.5	C-D600-1.0	PVC-D200-1.0	PVC-D600-1.0	C-D1500-1.0
기초	95.1	93.9	94.2	98.5	93.9
관정	94.8	94.2	95.8	94.2	96.2
0.3	94.8	93.8	94.2	95.4	99.1
0.6	98.1	94.2	94.5	95.1	96.2
1.0	96.1	98.2	94.2	94.8	96.7
평균	95.8	94.9	94.6	95.6	96.4

(재하 방법) 롤러 및 덤프 하중 재하 방법

○ Test 1-2와 동일하게 하중 재하 시험은 10톤 진동 롤러와 최대 적재 상태의 25톤 덤프트럭을 이용하여 수행함.

○ 또한 Test 1-2와 동일한 장비 주행 조건을 적용하여 횡방향 재하와 종방향 재하 시험을 실시. 횡방향 재하 시에는 10톤 진동 롤러와 25톤 덤프트럭이 매설관 축과 직교하는 방향으로 주행하도록 하여 차량 및 다짐 하중이 관로를 횡단하는 조건을 재현함.

○ 종방향 재하 시에는 장비가 매설관 축과 평행한 방향으로 주행하면서 관로 상부를 통과하도록 하여 관 축 방향의 하중 전달 특성을 평가함.



[그림 4-32] 10톤 롤러 횡방향 주행



[그림 4-33] 10톤 롤러 종방향 주행

(평가) 하중 재하 종류 및 재하 방향에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률

○ 토압 증분은 PVC-D200과 PVC-D600에서 상대적으로 크게 나타났으며, 강성관 D1500에서는 가장 작은 값이 나타남.

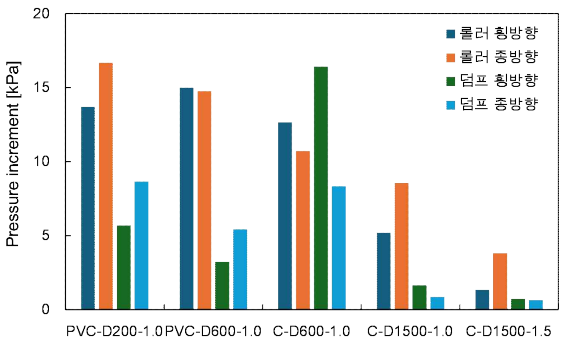
○ 동일 시험체 내에서도 재하 방향에 따라 토압 증분에 차이가 발생함.

○ 변형률은 PVC-D200에서 가장 크게 발생하였으며, 관경이 증가할수록 감소함.

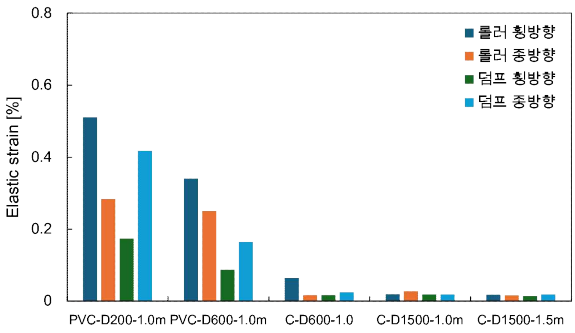
○ 특히 강성관 D1500은 토피고 1.0 m 및 1.5 m 조건 모두에서 매우 작은 변형률을 보여 높은 강성을 나타냄.

○ 덤프트럭 재하 시에는 롤러 재하에 비해 변형률이 감소함.

○ 종합적으로 관경이 증가할수록 토압 증분과 탄성변형률은 감소하는 경향을 보였으며, 강성관이 연성관보다 하중에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타남.



<동적 주행 토압 증분>



<동적 주행 토압 증분>

[그림 4-34] 재하 방향에 따른 연성관의 토압 증분 및 탄성변형률

(평가) 하중 재하에 따른 관로 시계열 영구변형률

○ 되메움 완료 시점까지 모든 관로에서 변형률은 ±1.0% 이내로 나타났으며, 이후 하중 재하 조건에 따라 관종별로 상이한 거동을 보임.

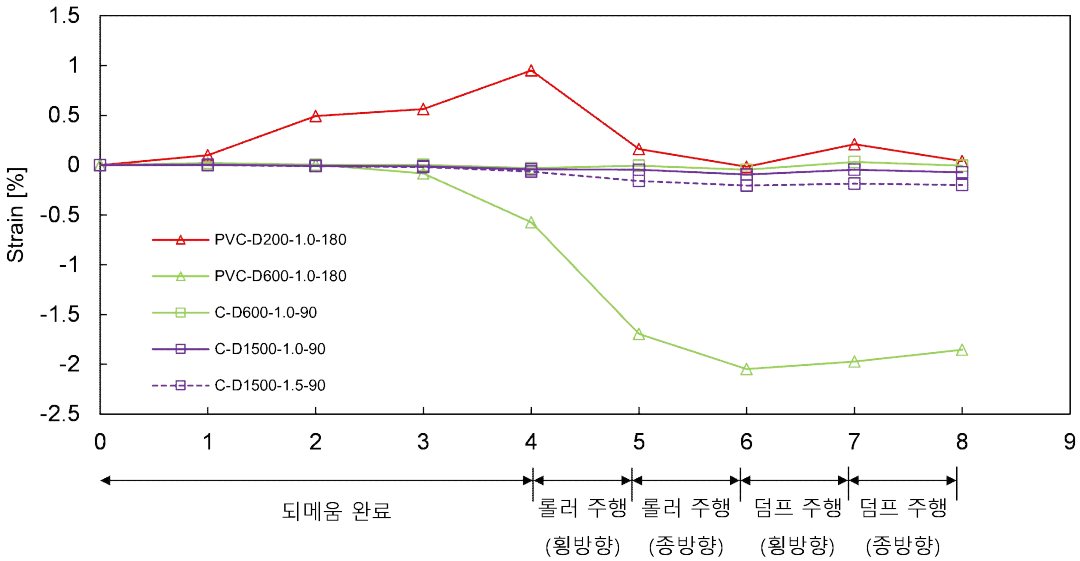
○ PVC-D200은 되메움 과정에서 최대 약 0.9%의 변형이 발생하였으나, 롤러 및 덤프트럭 재하 이후 점차 감소하여 최종적으로 0%에 가까운 수준을 나타남.

○ 반면 PVC-D600은 롤러 횡방향 주행 이후 압축 변형으로 전환되었으며, 최종적으로 약 -2.0% 내외의 영구변형률을 나타내어 가장 큰 변형이 발생함.

○ 강성관인 C-D900과 C-D1500(토피고 1.0 m 및 1.5 m)은 하중 재하 전후 변형률 변화가 크지 않았으며, 대부분 ±0.3% 이내의 작은 값을 나타남.

○ 특히 C-D1500은 토피고 변화와 관계없이 안정적인 거동을 보였으며, 하중 재하에 따른 영구변형이 거의 발생하지 않은 것으로 확인됨.

○ 따라서 연성관(PVC)은 하중 재하에 따른 변형이 상대적으로 크게 발생한 반면, 강성관은 전반적으로 안정적인 거동을 나타내어 하중 저항성이 우수한 것으로 평가됨.



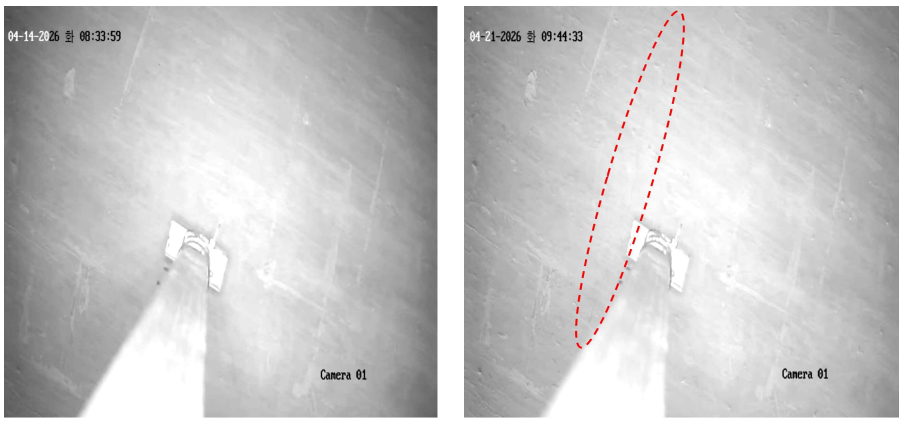
[그림 4-35] Test 1-3 관로 하중 재하에 따른 영구변형률

(CCTV) 균열 확인

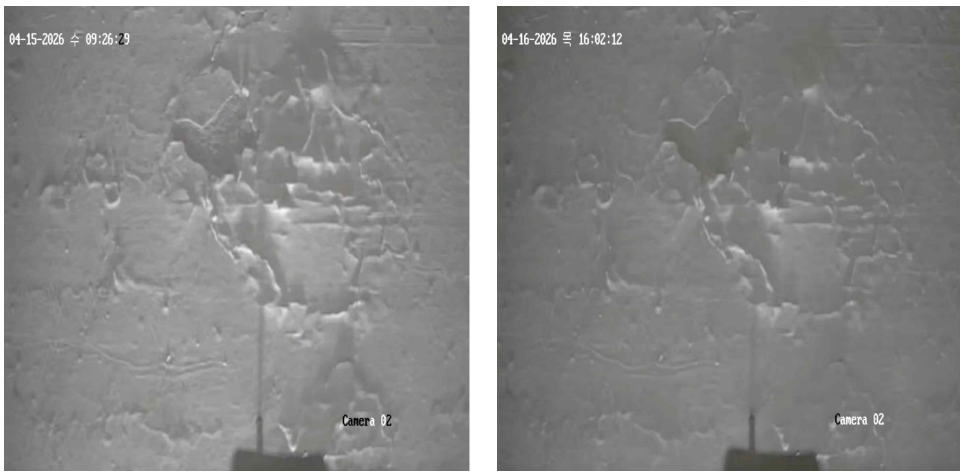
○ 하중 재하 시험 시 실시한 CCTV 조사 결과를 나타냄. 조사 결과, 강성관 D1500의 경우 토피고 1.5 m 및 1.0 m 조건에서 롤러 종방향 주행 시 관정부근에 종방향 균열이 발생한 것으로 확인됨.

○ 반면 강성관 D600 토피고 1.0 m 조건에서는 명확한 균열은 확인되지 않음. 따라서 해당 조건에서는 하중 재하에 따른 구조적 손상이 발생하지 않은 것으로 판단됨.

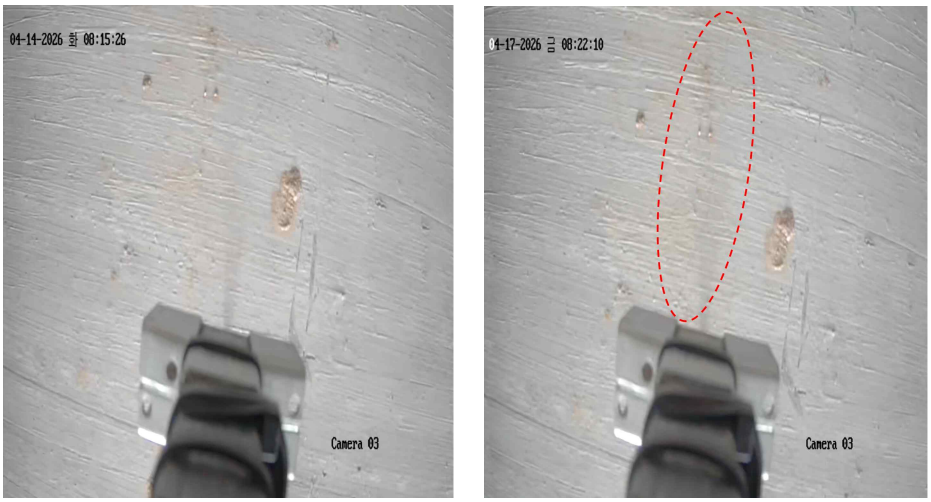
○ 종합적으로 강성관 D1500에서는 롤러 종방향 주행 조건에서 관정 부근의 국부적인 균열이 확인되었고 D600 토피고 1.0 m 조건에서는 균열이 발생하지 않음.



[그림 4-36] 강성관 D1500 토피고 1.5m 롤러 종방향 주행시 균열 발생



[그림 4-37] 강성관 D600 토피고 1.0m 균열 발생 하지 않음



[그림 4-38] 강성관 D1500 토피고 1.0m 롤러 종방향 주행시 균열 발생

(육안 조사) 균열 확인

○ 강성관 D1500에서 토피고 1.0 및 1.5m에서 관정 및 관저에 균열이 발생함.

○ 측면부에는 균열이 나타나지 않음. 강성관 D600 토피고 1.0 m 조건에서는 관 입구부 및 관정 부근에서 미세균열이 일부 확인되었으나 균열의 폭과 길이가 매우 작아 구조적인 손상으로 판단할 수준은 아닌 것으로 판단됨.

○ 강성관 D1500 더미관에서 확인된 균열은 10톤 진동 롤러가 관로 축과 평행한 방향으로 반복 주행하면서 발생함, 이는 Test 1-1에서 동일 관종 및 유사 조건의 더미관 조사 결과 균열이 확인되지 않았던 점을 통해 뒷받침됨.

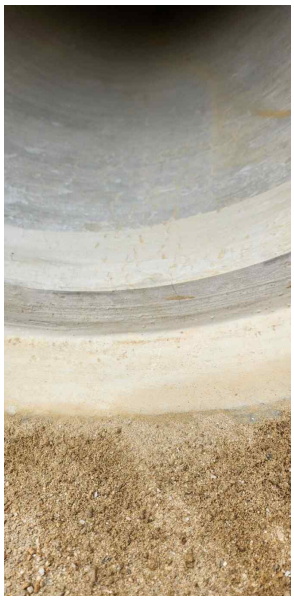


<실험관 관저 균열> <실험관 관정 균열> <더미관 관저 균열> <더미관 관정 균열>

[그림 4-39] 강성관 D1500 토피고 1.5m 균열



<실험관 관정 입구>



<실험관 관저 입구>

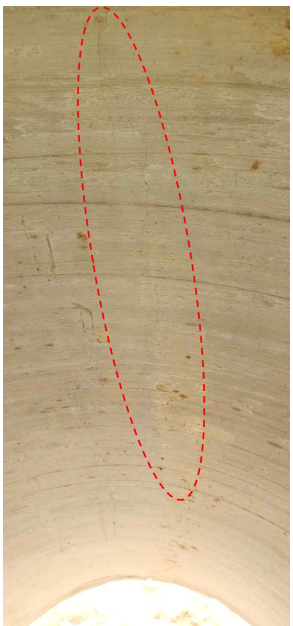


<실험관 관저>

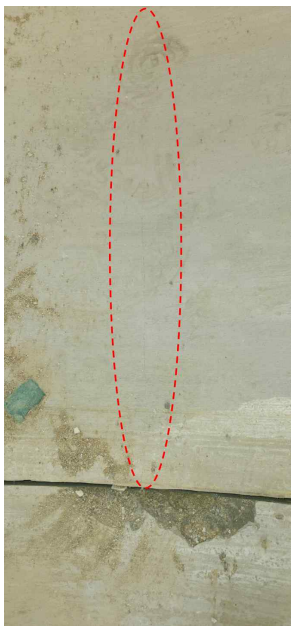


<실험관 관정>

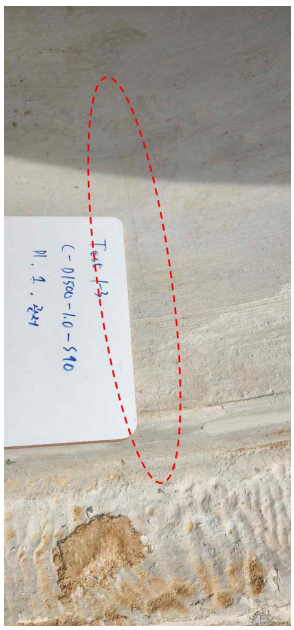
[그림 4-40] 강성관 D600 토피고 1.0m 미세균열



<실험관 관정 균열>



<실험관 관저 균열>



<더미관 관저 균열>



<더미관 관정 균열>

[그림 4-41] 강성관 D1500 토피고 1.0m 균열

(5) Test 1-4

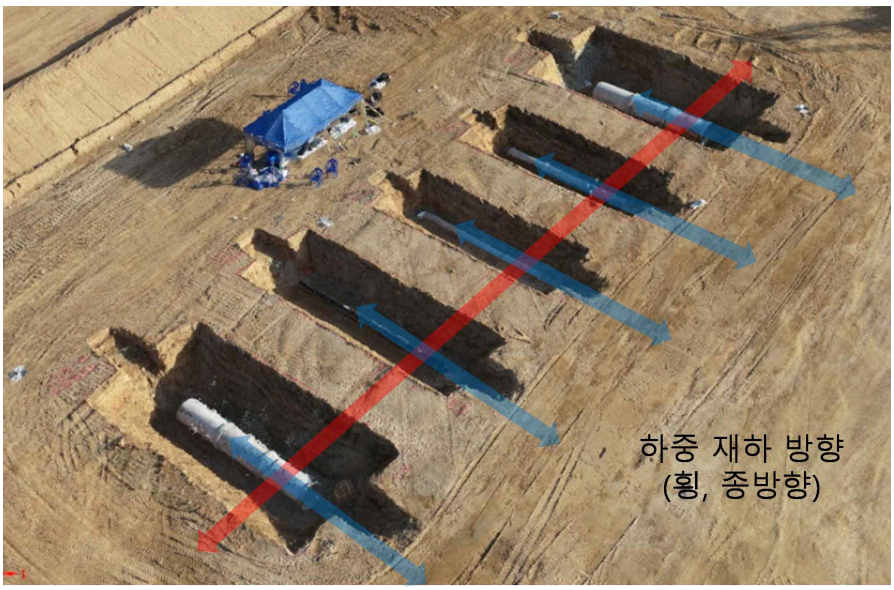
(개요) 실험 개요

○ Test 1-4에서는 강성관의 관경 변화가 매설관에 미치는 영향을 평가하기 위하여 강성관 D250, D400, D900 및 D1200과 PE D400을 대상으로 실험을 수행함.

○ 모든 시험은 토피고 1.00 m 조건에서 실시하였으며, 관경 증가에 따른 토압 분포 및 관 변형 특성을 분석함.

[표 4-20] Test 1-4 실험 조건

관종	토피고, H [m]	관경, D [m]	기초각 [°]	H/D
강성관	1.00	0.25	90	4.00
PE	1.00	0.40	180	2.50
강성관	1.00	0.40	90	2.50
강성관	1.00	0.90	90	1.11
강성관	1.00	1.20	90	0.83



[그림 4-42] Test 1-4 실험 전경

[표 4-21] Test 1-4 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1200-1.0	C-D400-1.0	C-D250-1.0	PE-D400-1.0	C-D900-1.0
기초	17.4	16.6	18.2	13.1	18.8
관정	18.0	20.2	25.2	16.0	16.3
0.3	18.5	14.6	16.8	13.5	14.5
0.6	16.2	14.7	17.8	16.6	17.3
1.0	22.4	19.5	29.3	24.2	20.2
평균	18.3	17.0	20.9	16.7	17.6

[표 4-22] Test 1-4 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.5	C-D600-1.0	PVC-D200-1.0	PVC-D600-1.0	C-D1500-1.0
기초	49.2	51.8	58.7	40.8	50.4
관정	53.3	57.6	62.5	62.6	58.6
0.3	60.1	57.7	55.9	60.3	56.2
0.6	56.0	50.7	53.3	50.5	58.2
1.0	69.3	62.1	91.0	76.7	97.2
평균	56.2	55.3	63.3	58.2	61.8

[표 4-23] Test 1-4 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.5	C-D600-1.0	PVC-D200-1.0	PVC-D600-1.0	C-D1500-1.0
기초	95.1	99.1	94.6	94.2	94.2
관정	94.8	98.6	95.1	94.8	94.1
0.3	96.7	95.9	94.2	95.1	95.8
0.6	96.0	96.1	95.8	95.4	95.0
1.0	95.1	95.1	95.2	95.1	95.5
평균	95.5	97.0	95.0	94.9	94.9

(하중 재하) 롤러 및 덤프 하중 재하 방법

○ Test 1-3와 마찬가지로 하중 재하 시험은 10톤 진동 롤러와 최대 적재 상태의 25톤 덤프트럭을 이용하여 수행. 하중은 매설관 축과 직교하는 횡방향 재하와 매설관 축과 평행한 종방향 재하로 구분하여 적용

○ 횡방향 재하 시에는 10톤 진동 롤러와 25톤 덤프트럭이 매설관 축과 직교하는 방향으로 주행하도록 하여 차량 및 다짐 하중이 관로를 횡단하는 조건을 재현함.

○ 추가로 횡방향 주행시에 드럼을 켜지 않은 상태로 주행을 수행함.

○ 종방향 재하 시에는 장비가 매설관 축과 평행한 방향으로 주행하면서 관로 상부를 통과하도록 하여 관 축 방향의 하중 전달 특성을 평가함.



<롤러 횡방향 주행>



<롤러 종방향 주행>

[그림 4-43] Test 1-4 10톤 롤러 횡 및 종방향 주행



<덤프 횡방향 주행>



<덤프 종방향 주행>

[그림 4-44] Test 1-4 10톤 롤러 횡 및 종방향 주행

(평가) 하중 재하 종류 및 재하 방향에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률

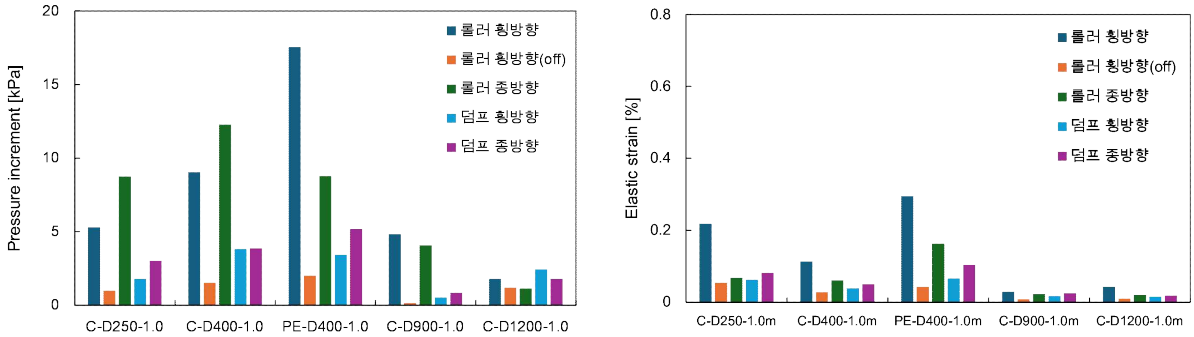
○ 토압 증분은 강성관 D400에서 가장 크게 발생하였으며, 특히 롤러 횡방향 재하 조건에서 최대 값을 나타냄.

○ 반면 D900 및 D1200에서는 상대적으로 작은 토압 증분이 측정되어 관경이 증가할수록 토압 증분이 감소함.

○ 탄성변형률 또한 토압 증분과 유사한 경향이 나타남. D400에서 가장 큰 탄성변형률이 발생하였으며, D900 및 D1200에서는 매우 작은 변형률이 측정됨.

○ 또한 대부분의 시험체에서 롤러 재하 시 덤프트럭 재하보다 큰 변형률이 발생하는 것으로 나타남.

○ 종합적으로 관경이 증가할수록 토압 증분과 탄성변형률은 감소하는 경향을 보였으며, 모든 시험체에서 발생한 변형률은 0.3% 이하로 나타나 구조적으로 안정적인 거동을 보이는 것으로 평가됨.



<동적 주행 토압 증분> <동적 주행 탄성 변형률>

[그림 4-45] 재하 조건에 따른 강성관의 토압 증분 및 탄성 변형률

- 하중 재하에 따른 관로 시계열 영구변형률

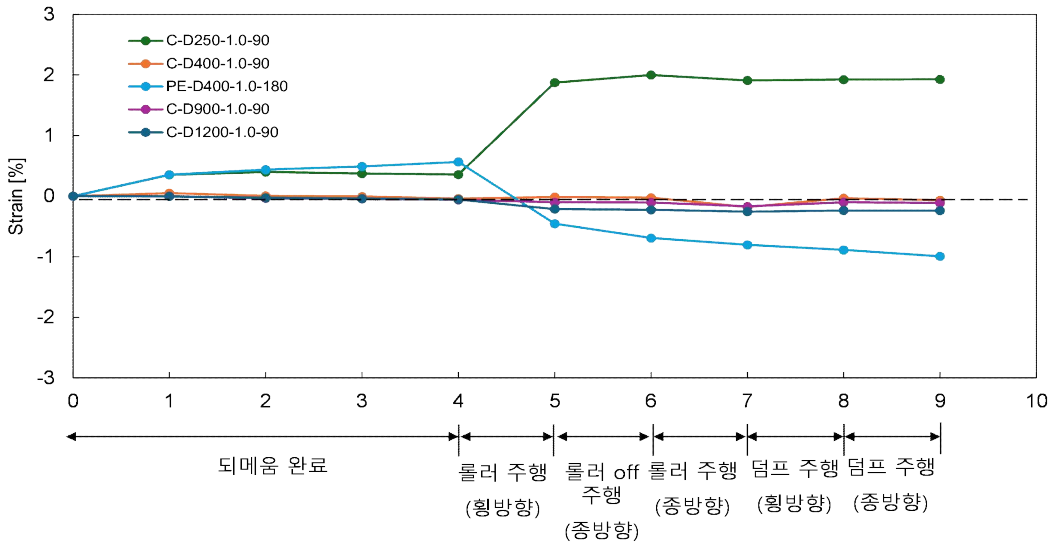
○ [그림 5-46]은 관경 변화에 따른 관로의 영구변형률 변화를 나타낸 것임. 전반적으로 강성관 D400, D900 및 D1200은 되메움 및 하중 재하 이후에도 영구변형률이 0% 부근으로 나타나 매우 안정적인 거동을 보임.

○ 반면 C-D250은 롤러 재하 이후 영구변형률이 증가하여 약 2.0% 수준의

잔류 변형이 발생하였으며, 이후 덤프트럭 재하 후에도 유사한 수준을 유지함.

○ PE-D400은 롤러 및 덤프트럭 재하에 따라 압축 방향의 영구변형이 누적되어 최종적으로 약 -1.0%의 영구변형률이 나타남.

○ 종합적으로 D400 이상 강성관은 반복 하중 재하 후에도 영구변형이 거의 발생하지 않아 우수한 구조적 안정성을 나타냈으며, C-D250과 PE-D400에서 상대적으로 큰 영구변형이 발생한 것으로 확인됨.



[그림 4-46] Test 1-4 관로 하중 재하에 따른 영구변형률

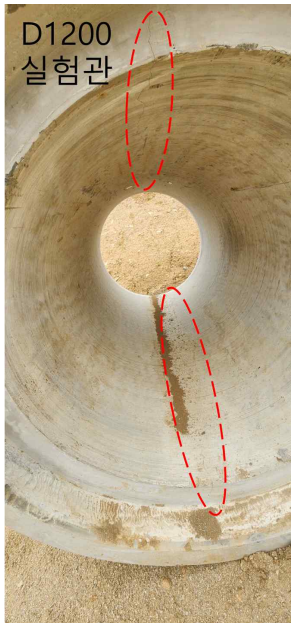
- 관로 균열

○ 그림 5-47 및 그림 5-48은 하중 재하 후 관로 내부 균열 조사 결과를 나타낸 것이다. 조사 결과, 강성관 D900 및 D1200에서는 실험관과 더미관 모두에서 관정 및 관저 부근에 종방향 균열이 확인됨.

○ 반면 강성관 D250 및 D400에서는 균열이 발생하지 않아 양호한 상태를 유지하는 것으로 나타남. 이는 관경이 증가할수록 관체에 작용하는 하중의 영향이 커지고 균열 발생 가능성이 증가함을 보여주며, 상대적으로 소구경 관로인 D250 및 D400은 하중 재하에 대해 안정적인 거동을 나타낸 것으로 판단됨.







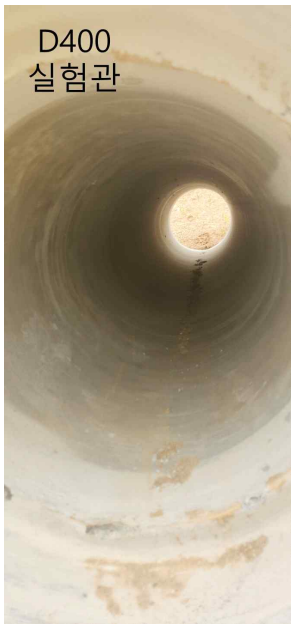


<D900 실험관 균열> <D900 더미관 균열> <D1200 실험관 균열> <D1200 더미관 균열>

[그림 4-47] 강성관 D900, D1200 균열 확인









<D250 실험관 균열 없음> <D400 실험관 균열 없음>

[그림 4-48] 강성관 D250, D400 균열 확인

실험 정리 및 실험 부지 변경

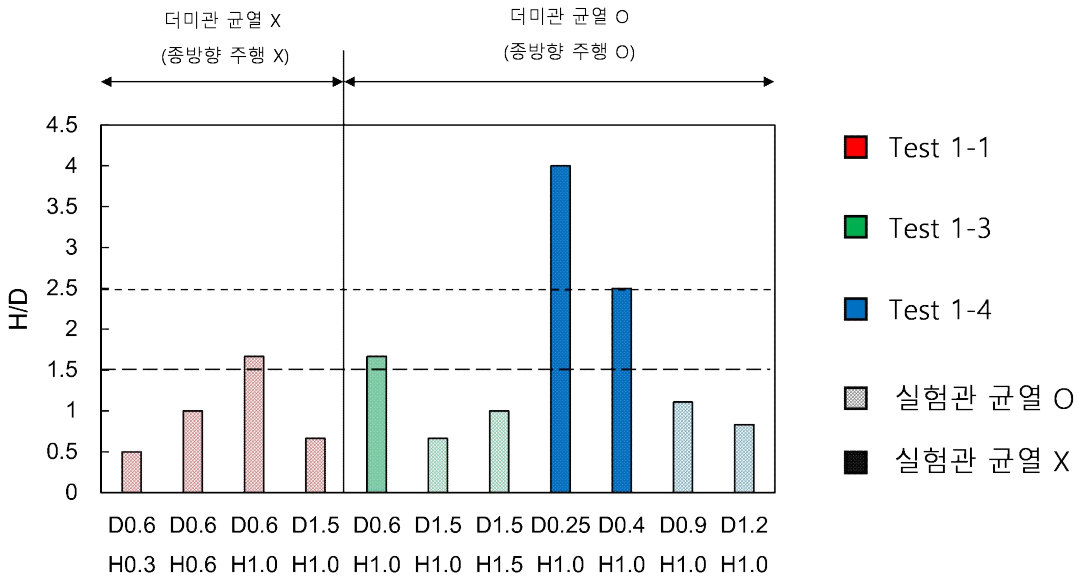
○ 강성관의 균열은 특정 하중 조건에서 발생하는 것으로 확인. Test 1-1에서는 10톤 진동 롤러의 제자리 가진 조건에서 균열이 발생하였으며, Test 1-3에서는 롤러 최대 출력 조건으로 횡방향 50회 주행 후 종방향 주행 시 균열이 발생함.

○ 또한 Test 1-4에서는 롤러 최대 출력 조건에서 관로의 횡방향 및 종방향 주행 시 균열이 확인됨. 이러한 시험 조건은 실제 관로 시공 현장과는 다소 차이가 있다. 일반적인 관로 시공 시에는 진동 롤러를 최대 출력으로 운용하지 않으며, 대부분 중간 출력 조건에서 다짐 작업을 수행함.

○ 또한 관로 상부 약 1 m 되메움 완료 후 약 30 cm의 추가 성토를 실시한 뒤 노상 다짐을 수행하며, 다짐 횟수 또한 일반적으로 6~8회 수준에서 관리됨. 천안 실험부지는 함수비가 높은 흙으로 조성되어 상대다짐도가 약 85% 수준으로 나타났으며, 세종 5-2(1) 실험부지는 비다짐 성토 구간으로 측벽 강도가 충분히 확보되지 못한 것으로 판단됨.

○ 이로 인해 하중 재하 시 측벽 지지 효과가 감소하여 관체에 불리한 조건이 형성되었을 가능성이 있음. 이에 따라 Test 1-5에서는 보다 실제 시공 조건에 부합한 환경을 구현하기 위하여 실험 부지 및 조건을 변경함.

○ 실험은 측벽 강도가 충분히 확보된 세종 5-2(2) 부지에서 수행하였으며, 해당 부지는 원지반 기준 약 4~6 m 높이의 노체 다짐이 완료된 구간임. 또한 실험 구간은 폭 약 20 m, 길이 약 100 m 규모로 조성되어 실제 현장 조건에서의 매설관 거동을 평가할 수 있음.



[그림 4-49] **시험조건별 균별 발생 조건 비교**

(6) Test 1-5

(개요) 실험 개요

○ Test 1-5에서는 대구경 관로를 대상으로 하중 재하 거동을 평가하기 위하여 PE D600, 강성관 D900, 강성관 D1100 및 강성관 D1500을 대상으로 실험을 수행함.

○ 센서가 설치된 실험관 기준으로 양쪽에 더미관을 설치함.

○ 강성관 D1500은 한쪽 입구를 개방하여 하중 재하에 따른 균열을 육안으로 관측함. 모든 시험은 토피고 1.00 m 조건에서 실시하였으며, 관경 증가에 따른 구조적 안정성을 검토함.

[표 4-24] **Test 1-5 실험 조건**

관종	토피고, H [m]	관경, D [m]	기초각 [°]	H/D
PE	1.00	0.60	180	1.67
강성관	1.00	0.90	90	1.11
강성관	1.00	1.10	90	0.91
강성관	1.00	1.50	90	0.67



[그림 4-50] Test 1-5 실험 전경

[표 4-25] Test 1-5 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{LFWD} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.0	C-D1100-1.0	C-D900-1.0	PE-D600-1.0
기초	25.3	24.6	25.5	28.2
관정	16.5	16.0	14.5	19.7
0.3	14.05	16.0	14.5	14.9
0.6	17.27	16.7	17.8	16.4
1.0	15.09	14.8	17.3	12.1
평균	17.6	17.6	17.9	18.3

[표 4-26] Test 1-5 되메움고 별 평균 탄성계수 E_{SSG} [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.0	C-D1100-1.0	C-D900-1.0	PE-D600-1.0
기초	111.0	135.9	137.3	88.9
관정	69.7	64.8	67.2	63.8
0.3	83.3	66.5	84.8	62.6
0.6	92.2	100.6	62.6	70.9
1.0	102.4	100.6	100.6	57.1
평균	91.7	93.7	90.5	68.6

[표 4-27] Test 1-5 되메움고 별 평균 상대 다짐도 R_C [MPa]

되메움고 [m]	C-D1500-1.0	C-D1100-1.0	C-D900-1.0	PE-D600-1.0
기초	104.4	106.2	108.2	104.4
관정	95.2	96.0	96.2	94.2
0.3	94.2	95.2	94.8	95.8
0.6	95.4	95.4	94.6	95.4
1.0	95.1	95.1	95.2	95.8
평균	96.9	97.6	97.8	97.1

(하중 재하) 롤러 하중 재하 방법

○ 관로는 실제 시공 조건을 모사하기 위하여 종방향으로 매설한 후 토피고 1.0 m까지 되메움을 수행함.

○ 이후 상부면을 평탄화하기 위해 10톤 진동 롤러를 무진동 조건으로 6회 주행함.

○ 다음으로 관로 상부에 약 30 cm를 추가 성토한 후, 노상 형성을 위하여 진동 없이 2회 추가 주행하여 상부면을 평탄화함.

○ 노상 정리가 완료된 후에는 실제 현장 다짐 조건을 고려하여 10톤 진동 롤러의 중간 출력 조건에서 진동 하중을 재하하였으며, 노상 다짐 기준에 따라 6~8회 반복 주행을 실시함.

○ 모든 다짐 작업이 완료된 후에는 관로 한쪽 측면을 굴착하여 관로의 균열 발생 여부를 조사하였으며, 이를 통해 하중 재하에 따른 관로의 구조적 안정성을 평가함.



<Test 1-5 되매움 완료>



<토피고 1m 무진동 주행>



<30cm 추가 성토>



<진동 종방향 주행>

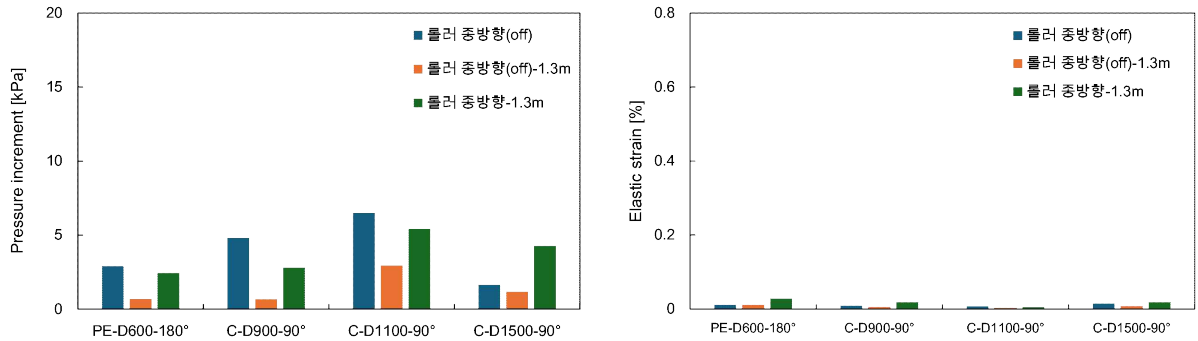
[그림 4-51] Test 1-5 시공 및 하중 재하 순서

(평가) 하중 재하에 따른 토압 증분 및 탄성 변형률

○ 토압 증분은 모든 시험체에서 롤러 진동 조건(Off)보다 토피고를 1.3 m로 증가시킨 조건에서 감소함. 특히 D900 및 D1100 강성관에서 감소폭이 상대적으로 크게 나타나 토피고 증가에 따른 하중 분산 효과가 확인됨.

○ 탄성변형률의 경우 모든 시험체에서 매우 작은 수준으로 나타났으며, 최대값 또한 0.03% 이하로 측정됨. 토피고 증가에 따른 변형률 변화는 크지 않았으나 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 관경에 관계없이 안정적인 거동을 나타냄.

○ 토피고를 증가시킬 경우 관체에 전달되는 토압이 감소하여 하중 분산 효과가 향상되는 것으로 나타났으며, 모든 강성관에서 발생한 탄성변형률은 매우 작은 수준으로 확인되어 구조적 안정성이 확보된 것으로 판단됨.



<동적 주행 토압 증분> <동적 주행 탄성 변형률>

[그림 4-52] 재하 조건에 따른 관로의 토압 증분 및 탄성 변형률

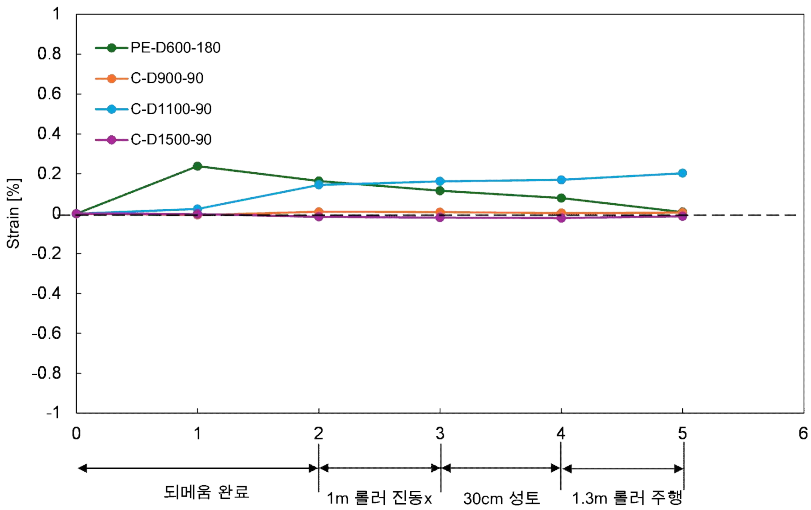
(평가) 하중 재하에 따른 관로 시계열 영구변형률

○ 모든 시험관에서 영구변형률은 ±0.3% 이내의 매우 작은 범위에서 발생하여 안정적인 거동을 보임.

○ PE-D600은 1 m 되메움 완료 시 약 0.3%의 변형률을 나타낸 후 점차 감소하는 경향을 보였으며, 최종적으로 약 0.05% 수준으로 나타남.

○ C-D1100은 되메움 및 다짐이 진행될수록 변형률이 소폭 증가하여 최종적으로 약 0.2%의 변형률을 나타남.

○ 반면 C-D900과 C-D1500은 전 시험 단계에서 0%에 가까운 변형률을 유지하여 하중 재하에 따른 영향이 매우 작은 것으로 확인됨.



[그림 4-53] Test 1-5 하중 재하에 따른 영구변형률

(육안 검측) 관로 균열

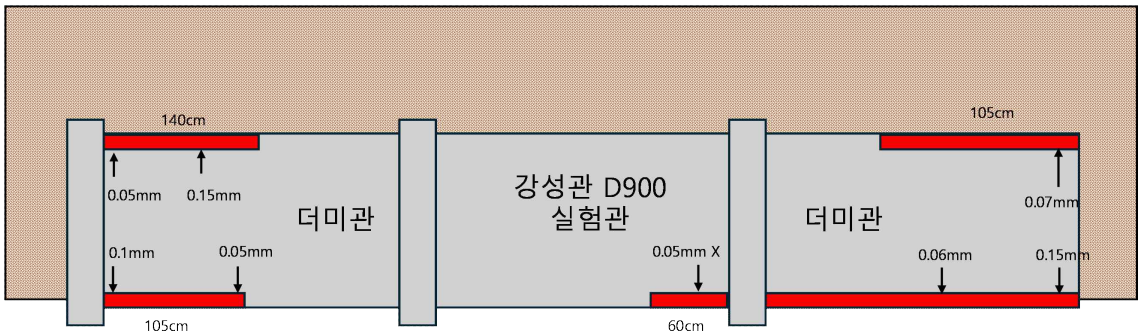
○ 빨간색으로 표시된 구간은 균열 발생 위치를 나타내며, 각 균열의 길이와 최대 균열폭을 함께 표기함.

○ 강성관 D1100의 경우, 실험관에서는 관정 부근에서 길이 약 60 cm의 균열이 확인되었으나 균열폭은 0.05 mm 이하로 나타나 구조적인 손상으로 판단할 수준은 아니었음. 반면 더미관에서는 관정 및 관저 부근에서 길이 120~135 cm의 균열이 확인되었으며, 균열폭은 0.05~0.20 mm 범위로 나타남. 특히 구속되지 않은 수부 더미관의 관정 및 관저에서는 최대 0.20 mm의 균열폭이 측정되어 가장 큰 균열이 발생함.

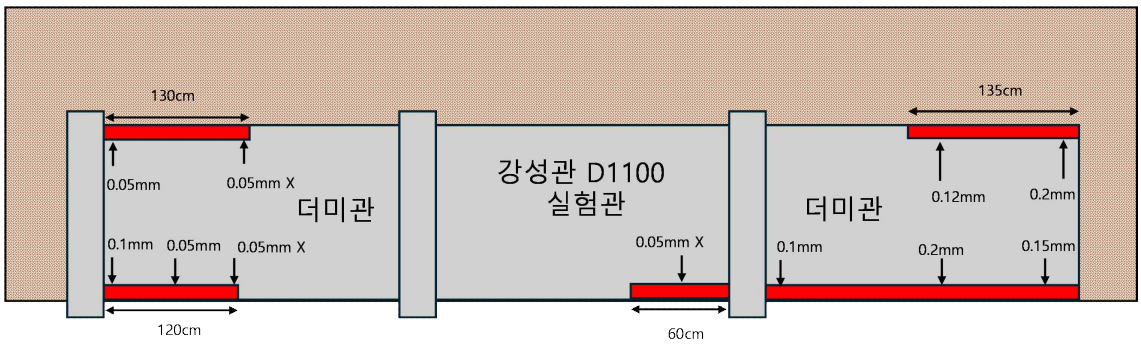
○ 강성관 D900의 경우에도 실험관에서는 관정 부근에 길이 약 60 cm의 미세균열이 확인되었으나 균열폭은 0.05 mm 이하로 매우 작게 나타남. 더미관에서는 관정 및 관저 부근에서 길이 105~140 cm의 균열이 확인되었으며, 균열폭은 0.05~0.15 mm 범위로 측정되었다. 그러나 D1100과 마찬가지로 대부분의 균열은 더미관에서 관찰되었으며, 실험관에서는 미세균열 수준에 그침.

○ 조사 결과, 실험관과 더미관의 관정 및 관저 부근에서 일부 균열이 확인되었으며, 확인된 균열의 최대 폭은 모두 0.05 mm 이하의 미세균열 수준으로 나타남. 실험관에서는 관정 및 관저 부근에 각각 길이 약 60 cm의 미세균열이 확인되었으며, 더미관에서도 유사한 위치에서 균열이 관찰됨.

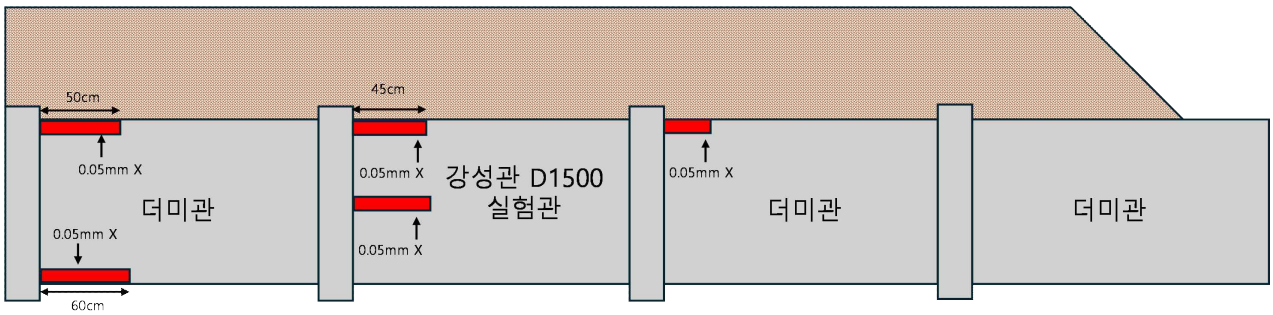
○ 강성관 D900, D1100, D1500 모두 실험관에서 발생한 균열은 균열폭 0.05 mm 이하의 미세균열 수준으로 나타났으며, 실제 시공 시에는 관로가 연속적으로 연결되어 구조적 구속 효과가 발생하므로, 본 시험에서 확인된 수준의 미세균열은 관로의 전반적인 구조적 건전성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단됨.



[그림 4-54] 강성관 D900 균열 육안 검측 모식도



[그림 4-55] 강성관 D1100 균열 육안 검측 모식도



[그림 4-56] 강성관 D1500 균열 육안 검측 모식도

5 관로 안전성 종합 분석 및 안전성 확보 방안

1) 관로 파괴형상에 따른 안전성 분석

■ 관로의 파괴 형상

○ 강성관과 연성관의 파괴 메커니즘은 재료적 특성에 따라 차이를 보임. 강성관은 연직하중, 교통하중 및 지반침하 등 관로 외부에 작용하는 하중을 관로 자체가 저항하지만, 연성관은 관로의 주변 지반과 상호작용을 통해 외부하중에 저항함

○ 강성관은 외부하중에 의한 균열을 동반한 구조적 파괴가 발생하지만, 연성관은 과도한 관로 변형에 따른 국부적 좌굴로 인한 파괴가 발생함

○ 강성관의 파괴는 관정(Crown)과 관저(Invert) 내부와 관 측면부(Springline)의 외부에서 휨 균열로부터 시작된 균열은 관에 매설된 강선(Steel-cage)의 원주를 따라 전단 균열로 이어지게 됨.

○ 연성관은 강성관과 달리 탄성거동하는 재료적 특성으로 인하여 국부적 좌굴 또는 관로의 변형에 따른 변형 파괴가 지배적임.

○ 파괴 지배모드의 차이로 인하여 강성관과 연성관의 품질 평가 기준은 각각 균열폭과 변형률로 나뉘어짐. 강성관의 품질 기준은 균열 폭에 대한 강도를 기준으로 하며, 연성관의 품질 기준은 연직 하중에 의한 관로의 수직 변형률을 기준으로 함.

■ 강성관의 균열 안전성 분석

○ 강성관의 균열 안전성은 계획 하중 재하 후 관로의 균열발생 여부를 바탕으로 분석함.

○ 강성관의 균열 안전성은 KS F 4403(원심 철근콘크리트관) 해설에 명시된 강성관의 균열 폭(0.25mm)를 기준으로 판단됨. KSF 4403 해설에 외압 시험 시의 균열 하중을 판정하는 균열 폭과 일반적으로 사용하는 철근 콘크리트 관의 허용 균열을 구분하여 명시하고 있음(KS F 4403, 2019).

○ 시험실에서 단일 관로를 대상으로 시행하는 철근 콘크리트관의 외압시험에서는 관체에 육안 한계에 가까운 0.05mm의 균열 폭이 발견했을 때의 강도를 균열강도로 규정하고 있으며,

○ 일반적으로 시공현장에서 상대다짐도 90% 이상의 노체에 매설되는 철근콘크리트관의 허용 균열 폭을 0.25mm로 규정하고 있음.

○ 현장에 매설되는 관로의 허용 균열 폭은 국내 KS 기준 이외, 미국 ASTM C497-05 또한 흄관(Reinforced Concrete Pipe, RCP)의 균열하중을 관에 0.01in(0.254mm)의 균열이 발생했을 때로 규정하고 있어, 이를 근거했을 때, 균열 안전성 분석의 기준을 균열 폭 0.25mm로 설정함.

KSF 4403: 2019(원심 철근콘크리트관)

3. 규정 내용의 보충적인 설명

3.6 시험 방법(본체의 8.)

3.6.1 외압 시험(본체의 8.1)

…

또한 균열 강도 시험과 파괴 강도 시험은 하중값이나 측정 항목 등이 다르기 때문에 각각에 대하여 시험 방법을 명기함.

…

외압 시험시의 균열 하중 판정에 대하여는 관체에 균열을 발견했을 때의 하중을 균열 하중으로 하는 것이 좋다는 의견이 강하게 나왔기 때문에 **육안 한계에 가까운 나비 0.05mm를 초과하는 균열의 발생을 가지고 하게 되었다.**

그러나 **일반적으로 관거에 사용되는 철근 콘크리트 관에서는 나비 0.25m 정도의 균열이 있어도 철근이 쉽게 부식하지 않는다는 것이 내외의 실적에서 판명되었으므로 허용되는 균열 나비는 0.25mm로 되어 있다.**

「Standard Test Methods for Concrete Pipe, Manhole Sections, or Tile」(ASTM C497-05)

4. 3점법에 의한 외압강도 시험

4.7 강도산정

4.7.3 관 내경 또는 수평길이(horizontal span) 1피트당, 그리고 관 길이 1선형feet 당의 D-하중 강도(D-load strength)는 0.01인치 균열 D-하중 강도 또는 극한 D-하중 강도(ultimate D-load strength) 를 기준으로 산정한다. **0.01인치 균열 D-하중은 시험체에** 0.01인치(0.254 mm) 균열**이 발생하도록 하는 시험하중(test load) 을 관의 유효 길이(laying length) L 및 관 내경(또는 수평경간) 으로 나누어 계산**한다.

○ KSF 4403을 근거로 설정한 허용 균열폭을 기준으로 강성관의 현장실험 결과를 [표 4-28]에 정리하여 나타내었음.

[표 4-28] 강성관의 현장 실험결과

연번	시편[1)]	실험지역	균열여부	균열 발생원인	균열 발생위치	최대균열폭[2)](mm)
1	RCP- 600-90-0.3	다짐흙쌓기지반(천안)	X	-	-	-
2	RCP- 600-90-0.6	다짐흙쌓기지반(천안)	X	-	-	-
3	RCP- 600-90-1.0	다짐흙쌓기지반(천안)	X	-	-	-
4	RCP-1500-90-1.0	다짐흙쌓기지반(천안)	X	-	-	-
5	RCP- 250-90-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	X	-	-	-
6	RCP- 400-90-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	X	-	-	-
7	RCP- 900-90-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	O	길이방향 롤러 진동 주행 (최대 가진력)	관저	<0.15mm
8	RCP-1200-90-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	O	길이방향 롤러 진동 주행 (최대 가진력)	관정	<0.15mm
9	RCP-1500-90-1.5	비다짐흙쌓기지반(세종)	O	길이방향 롤러 진동 주행 (최대 가진력)	관정	<0.15mm
10	RCP-1500-90-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	O	길이방향 롤러 진동 주행 (최대 가진력)	관정	<0.15mm
11	RCP- 900-90-1.3	노체지반(세종)	O	길이방향 롤러 진동 주행 (통상 가진력)	관저	<0.05mm
12	RCP-1100-90-1.3	노체지반(세종)	O	길이방향 롤러 진동 주행 (통상 가진력)	관저	<0.05mm
13	RCP-1500-90-1.3	노체지반(세종)	O	길이방향 롤러 진동 주행 (통상 가진력)	관정	<0.05mm

1)Notation: RCP-직경(mm)-기초각(°)-토피고(m)

2)관로의 허용 균열폭 0.25mm(KSF4403, ASTM C497-05)

○ 현장실험은 지반조건이 상이한 3곳의 조성 지반에서 수행함

① 다짐흙쌓기지반 : 비다짐부지에 2.5m 높이의 성토지반 조성(30cm 층다짐)

② 비다짐흙쌓기지반 : 장기 방치된 비다짐 성토지반

③ 노체지반 : 상대다짐도 90%로 조성된 노체지반

○ 성토지반에서는 진동롤러 주행(횡방향주행)에서는 균열이 발생하지 않았고 가혹조건(3분 이상 제자리 가진) 시에만 균열이 발생함. 실제 관로공사에서 진돌롤러가 제자리에 멈춰선 채 다짐을 수행하지 않으므로 균열이 발생하지 않은 것으로 판단함.

○ 비다짐흙쌓기지반(세종2)에서는 강성관의 직경에 따라 균열의 발생여부를 확인하고자 계획토피고 1.0m와 모래기초 90도를 동일하게 적용하여 관로의 안전성을 평가함. 평가결과, 관로 내경 400mm 이하 관로에서 균열이 발생하지 않았으나, 900mm, 1200mm, 1500mm의 관로의 직경이 대구경으로 커질수록 관저(관로 내측 하부, Invert)와 관정(관로 내측 상부, Crown)에서 균열이 발생함. 그러나, 균열의 발생한 균열의 최대 폭은 0.15mm 이하로, 이는 KSF 4403의 허용균열 0.25mm 대비 60%로 관로는 구조적 안전성을 확보한 것으로 나타남.

○ 900mm 이상의 대구경관로를 대상으로 실제 관로공사와 가장 유사한 시공방법을 구현하기 위하여, 상대다짐도 90% 노체다짐으로 조성된 노체지반(세종)에서 계획토피고 1.0m와 모래기초 90도의 동일 조건으로 실험을 진행함. 노체지반에서 시행한 실험은 1m의 계획토피고까지 인력다짐으로 되메우기를 시행하였으며, 이후 노상다짐장비(롤러다짐)을 운행하기 위하여 30cm 토사를 부설함. 실험결과 900mm, 1100mm, 1500mm 내경의 관로 모두 관저 또는 관정부위에서 0.05mm 이하의 균열이 소켓부로부터 관로의 길이방향으로 약 60cm 이내로 발생함. 이는 KS F 4403과 ASTM C497-05의 허용균열나비의 1/5로 관로의 외압에 의하여 발생한 균열보단 롤러장비의 진동으로 인하여 접합부에 연결된 관로간의 간섭으로 인하여 발생한 균열로 판단됨.

○ 따라서, 실험결과를 바탕으로 계획토피고 1.0m를 확보한 강성관에는 노상다짐장비를 사용할 수 있으나, 다만 진동롤러의 출력을 표준출력으로 제한하며 관로 직상부에서 관로에 직접 영향을 미칠 수 있는 제자리 가진 등의 다짐은 지양해야 할 것으로 판단됨.

■ 연성관의 안전성 분석

○ 관로 상부의 사하중과 활하중을 관로가 저항하는 강성관과 달리 연성관은 관로 주변의 지반과의 상호작용으로 하중을 분사하여 저항함. 이에, 국내외 기준에서 연성관은 관로의 수직변위를 근거로 안전성을 평가함.

○ 오 · 우수관로로 활용되는 연성관은 대표적으로 PE관, PVC관, PP관이 있으며 국내외 기준은 [표 4-29]와 같음.

[표 4-29] 연성관의 관련 주요 KS 규격

연번	규격번호	명칭	재질
1	KS M 3500-1	배수 및 비압력 매설용 구조형 폴리에틸렌(PE)관-제1부: 이중벽관	PE
2	KS M 3500-2	배수 및 하수용 비압력 매설용 구조형 폴리에틸렌(PE)관-제2부: 다중벽관	PE
3	KS M 3600	배수 및 하수용 비압력 매설용 구조형 폴리염화비닐(PVC)관-이중벽관	PVC
4	KS M 3700-1	배수 및 하수용 비압력 매설용 구조형 폴리프로필렌(PP)관-제1부: 이중벽관	PP
5	KS M 3700-2	배수 및 하수용 비압력 매설용 구조형 폴리프로필렌(PP)관-제2부: 다중벽관	PP

○ [표 5-30]에 정리한 것과 같이, 연성관의 사용한계 수직변형률은 5%이며, 과도한 외압강도는 국부적 좌굴 등 연성관의 구조적 불안정성을 야기하여 관로의 파괴로 이어질 수 있음.

- 김영진(2006)은 3% 변형은 야적 또는 운반과 상하차 시의 변형을 의미하고, 더불에 관의 시공 후 30일 이내에 측정한 변형량이 3%(정확하게는 3.33%)를 넘지 않는다면 50년 후에 그 변형량이 최대 5%를 넘지 않는다는 의미가 있음을 설명하고 있음. 또한 이러한 의미가 연성관의 허용 변형량이 최대 5%라는 것을 의미하지는 않으며, 오히려 상하수도 협회 규격과 단체표준 규격의 모체가 되는 ASTM F894를 살펴보면, 연성관의 경우 그 최대 허용변형량은 일반적으로 업체와 사용자의 협의에 따른다고 되어 있으며, 일반적으로 7.5%를 최대 허용 변형량으로 본다고 되어 있음

○ 현장실험에서 최소토피고 1.0m 위 10t 진동롤러와 25ton 만재 덤프를 주행하여 연성관의 수직 변위를 계측하였으며, 수직 변형률을 연성관 자재별 KS 표준에 규정된 기준에 따라 연성관의 안전성을 평가하여 [표 4-30]에 결과를 정리하여 나타내었음.

[표 4-30] 연성관의 현장 실험결과

연번	시편[1]	실험지역	변형률(%)[2]	
			되메움 완료	10t 롤러하중 재하
1	PE – 200-180-1.0	다짐흙쌓기지반(천안)	-[3]	-[3]
2	PE - 900-180-1.0	다짐흙쌓기지반(천안)	0.5	0.2
3	PE -1200-180-1.0	다짐흙쌓기지반(천안)	0.4	0.7
4	PE - 600-360-1.0	다짐흙쌓기지반(천안)	0.5	0.3
5	PVC- 400-180-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	0.6	1.0
6	PVC- 200-180-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	-[3]	-[3]
7	PVC- 600-180-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	0	2.0
8	PE - 400-180-1.0	비다짐흙쌓기지반(세종)	0.6	1.0
9	PE - 600-180-1.3	노체지반(세종)	0.3	0.05

1) Notation: 연성관 종류-직경(mm)-기초각(°)-토피고(m)
2) KS M 3500(PE) 및 KS M 3600(PVC) 규정된 최대변형률 5%를 기준으로 함
3) 관로 내경이 200mm 이하로 변형계 설치의 어려움이 있어 데이터 측정 오류가 발생하여 분석에서 제외함

○ 연성관은 강성관과 달리 탄성적인 재료특성상 변형이 크게 발생하므로, 모래기초 위 연성관로 매설 후 되메움부터 관로의 수직 변형을 계측함. 계측결과, 되메움 토사의 다짐 작업 시 발생하는 수평토압에 의하여 PE관은 400mm부터 1500mm 까지의 관내경에 따라 0.3에서 0.6%의 상향 변위(평균 0.46%)가 발생함. 상대적으로 PE관 보다 자재의 강성이 큰 PVC 연성관에서는 상향 변위가 0에서 0.6%가 발생하였음

○ 모래기초 각도에 따른 내경 600mm PE 연성관의 상향변위를 검토한 결과, 180도와 360도의 모래기초각도 변화에 따른 연성관의 상향 변형은 모두 0.5%로 모래기초각도의 영향은 없는 것으로 나타났다. 이는 측면 구속압이 모래기초와 되메움 토사에서 동일하게 작용하여 동일한 상향 변형을 발생시킨 것으로 판단됨.

○ 계획토피고까지 되메움 완료 후 10t 롤러 다짐장비로 하중을 재하했을 때, PE관의 직경별 하향 변형률은 0.2 ~ 1.0%까지 변형률(평균 0.45%)이 발생하였으며, PVC 관은 1 ~ 2%까지 하향 변형률(평균 1.5%)이 발생하였음.

○ 1.0m와 1.3m의 최소토피고를 확보한 매설 연성관(PE 및 PVC)에 10ton 진동롤러와 25ton 만재트럭 주행결과, 2%가 가장 큰 하향 변형률로 이는 하수관로공사 표준시방서 기준 허용 변형률인 5% 미만으로 충분한 안전성을 확보하는 것으로 나타났음.

○ 이러한 연성관의 결과는 기존 연성관의 모래기초 각도를 90°에서 180°로 확대함에 따라 모래기초의 강성이 증대되었으며, 주변 되메움 다짐 지반의 횡방향 구속력이 향상되어 연성관의 변형이 감소된 것으로 판단됨.

관로 안전성 확보 방안

○ 관로공사 중 관로 파손을 최소화하기 위하여 아래 사항을 중점적으로 관리할 필요가 있음.

① 토질 및 관로 조건에 적합한 기초를 선정하고 진동롤러를 최소토피고(1m) 상에서 주행 시 최대가진력이 아닌 통상가진력으로(KCS 11 20 20 3.4.2. 시험시공 참조) 다짐작업을 수행해야 할 것임.

② 롤러 다짐 시 접합부 간의 간섭에 의한 균열을 방지하기 위하여 접합부 시공 철저

③ 관로 하부 헌치부 다짐 철저

V 수치해석 결과

Key Point

- 관경 및 토피고 조건에 따른 강성관의 거동 특성 수치해석
- 수치해석 결과와 현장 계측 결과의 비교·분석
- 허용응력 기반 균열 발생 가능성 평가 및 실제 균열 발생 사례와의 비교·검증

1 수치해석 결과

1) 수치해석 개요

○ 유한요소법(Finite Element Method, FEM)은 연속체의 거동을 수치적으로 해석하기 위한 대표적인 기법으로, 복잡한 형상과 경계조건을 갖는 공학 문제를 효과적으로 분석할 수 있음.

○ FEM은 해석 대상 영역을 다수의 작은 요소(element)로 분할한 후 각 요소의 거동을 수학적으로 계산하고, 이를 조합하여 전체 구조물 또는 지반 시스템의 응답을 예측하는 방법임. 해석 과정에서는 대상 영역을 메쉬(mesh)로 구성하여 공간적으로 이산화하고, 경계조건 및 재료 물성치를 적용한 후 연립방정식을 구성하여 미지의 응답값을 산정함.

○ 이를 통해 응력, 변형, 변위 및 하중 전달 특성 등 다양한 공학적 거동을 정량적으로 평가할 수 있음. FEM은 지반공학 분야에서도 널리 활용되고 있으며, 비탈면 안정성 평가(Török et al., 2018), 성토체 거동 분석(Loganathan et al., 1993), 기초의 지지력 평가(Kotake et al., 2001), 동적 응답 해석(Li et al., 2003), 지하수 유동 및 투수 해석(Ouzaid et al., 2020) 등 다양한 문제 해결에 적용됨. 특히 실제 현장시험으로 확인하기 어려운 응력 분포와 변형 거동을 분석할 수 있어 실험 결과를 보완하고 설계 기준을 검토하는 데 효과적으로 활용할 수 있음.

○ 본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus(Smith, 2009)를 이용하여 수치해석을 수행함. 해석 모델은 2차원 조건으로 구성함.

2) 수치해석 모델 구성

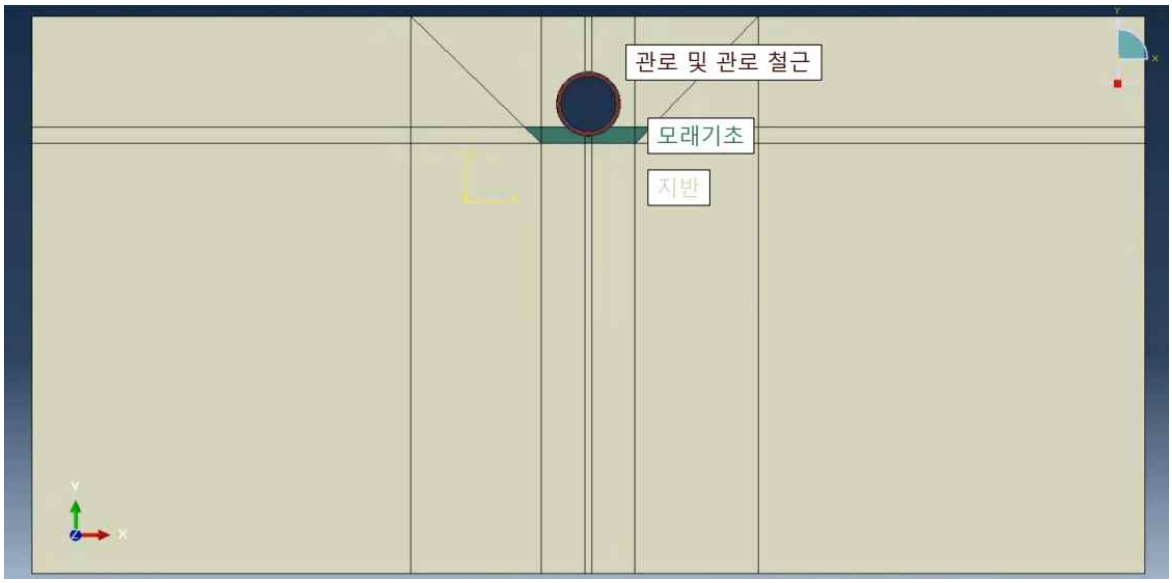
(모델) 지반 모델

○ 모델은 경계조건 영향(boundary effect)을 영향 최소화를 위해 [그림 6-1]과 같이 가로 30 m, 세로 15 m로 설정하였으며 모델의 측면 경계조건은 수평방향으로 고정하였고, 모델의 하부 경계조건은 수평 및 수직방향으로 고정하여 상부에서 재하되는 하중이 지반을 통하여 최종 관로에 전달되도록 설정함.

○ 모델은 지반, 관로 기초, 관로, 매설 철근 총 4개 파트로 구성함([그림6.1]).

○ 해석 단계(Step)는 Geostatic 단계와 하중 단계로 구분함. Geostatic 단계에서는 모델 전체에 자중을 적용하고, Predefined Field를 이용하여 초기 응력 평형 상태를 형성함. 이후 하중 단계에서는 10톤 진동롤러의 횡방향 이동하중을 적용하였으며, 관로의 안정성 및 균열 발생 가능성은 대수변형률(Logarithmic Strain, LE)을 기준으로 검토하였음.

○ 초기 응력 평형 상태 형성에 필요한 정지토압계수(K_0)는 직접전단시험 결과를 바탕으로 산정함. 대상 시료의 내부마찰각은 Φ = 43°로 평가되었으며, Jaky의 경험식($K_0 = 1 - \sin\Phi$)을 적용하여 정지토압계수 0.33를 산정함.



[그림 5-1] 수치해석 모델

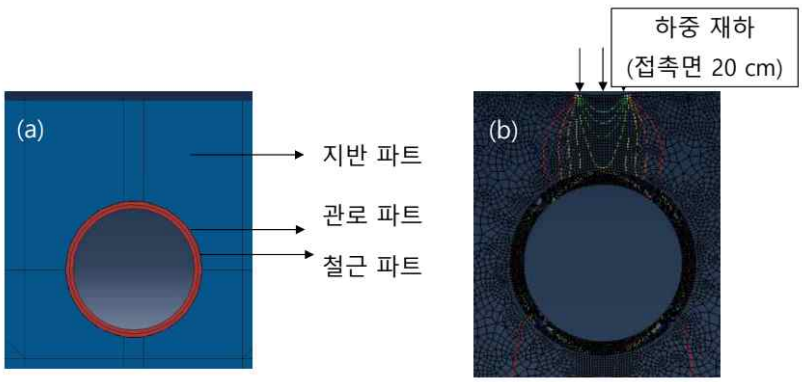
(모델) 관로 상세

○ [그림 6-2(a)]와 같이 강성관 모델은 관로의 재료 특성을 반영하기 위해 관로 파트와 내부 철근을 구성함.

○ 연성관에 대한 수치해석을 수행할 경우에는 철근 파트를 제외하고 관로 파트의 재료 물성을 변경하여 동일한 모델을 적용함.

○ [그림 6-2(b)]는 관로 상부에 작용하는 하중이 지반을 통해 관로로 전달되는 응력 경로를 나타냄.

○ 하중은 10톤 진동롤러의 가진력을 응력단위로 환산하여 적용함. 진동롤러는 실제로 넓은 폭을 가지지만, 본 해석에서는 드럼의 길이방향을 기준으로 단면 (횡방향 이동)을 고려하였으며, 지반과 직접 접촉하는 접지폭을 50 cm로 설정하여 등분포하중으로 적용함. 이를 통하여 롤러 하중이 지반 내에서 분산되어 매설관로로 전달되는 거동을 모사하고자 함.



[그림 5-2] **수치해석 관로 모델 상세**

(물성) 입력 물성

○ [표 6-1]은 수치해석에 적용된 지반, 모래기초, 관로 및 철근의 물성치를 정리함. 지반은 탄성체로 가정하였으며, 탄성계수는 실제 조성된 현장 지반에서 획득한 평균값인 10 MPa 를 적용함. 지반의 밀도는 현장에서 수행한 들밀도 시험 결과를 바탕으로 1.8 g/cm^{3}를 적용하였으며, 포아송비는 일반적인 성토지반의 특성을 고려하여 0.3으로 가정함.

○ 소성 거동을 고려하기 위하여 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 내부마찰각 ϕ = 43°, 팽창각 0°, 점착력 10 kPa를 적용함. 또한 소성 경화율을 0으로 설정하여 Perfect plastic 거동을 구현함.

[표 5-1] 수치해석 모델의 입력 물성값

구분		입력 물성값
탄성계수 [MPa]	지반	10
	콘크리트 (E_c)	25,000
	모래 기초	11.61
	철근 (E_s)	200,000
포아송비	지반	0.3
	콘크리트	0.2
	모래 기초	0.35
	철근	0.3
밀도 [g/cm^3]	지반	1.8
	콘크리트	2.4
	모래 기초	1.89
	철근	7.85

(구성) 접촉조건 및 요소망 구성

○ 접촉조건(Contact condition)은 서로 다른 재료 또는 구조물 간의 하중 전달 및 상호작용을 모사하기 위한 중요한 요소이다. 특히 매설관과 지반의 경우 외부 하중이 지반을 통해 관로로 전달되므로, 접촉면에서 발생하는 응력 전달 특성과 상대 변형 거동을 적절하게 반영할 필요가 있음.

○ 접촉조건이 적절히 고려되지 않을 경우 관로와 지반 사이의 하중 전달 메커니즘을 정량적으로 모사하기 어려우며, 응력 분포 및 변형량 산정 결과에도 영향을 미칠 수 있음.

○ 본 연구에서는 [표 5-2]에 정리한 바와 같이 관로와 지반 사이의 상호작용을 고려하기 위하여 ABAQUS에서 제공하는 General contact 기능을 적용함. General contact는 해석 모델 내에서 발생 가능한 접촉면을 자동으로 인식하여 접촉 거동을 모사하는 기법으로, 복잡한 형상 및 다수의 접촉면이 존재하는 문제에 효과적으로 적용할 수 있다. 이를 통하여 관로, 기초 및 지반 사이에서 발생하는 하중 전달 및 접촉 거동을 보다 합리적으로 모사하였음.

○ 접촉면의 법선방향 거동은 Hard contact 조건을 적용하여 압축응력은 전달되도록 하였으며, 접촉면 분리 시 인장응력은 전달되지 않도록 설정함. 이를 통하여 하중 재하 시 지반과 관로 사이에서 발생하는 응력 전달 특성 및 변형 거동을 보다 현실적으로 모사하고자 하였음.

[표 5-2] 수치해석 접촉조건

항목	입력조건
접촉 방법	General contact
접촉 대상	관로 외면-지반 내면
기준 표면	관로 외면
상대 표면	지반 내면
접촉 거동	Hard contact
마찰 조건	Penalty friction (μ = 0.6)
접촉 분리	허용

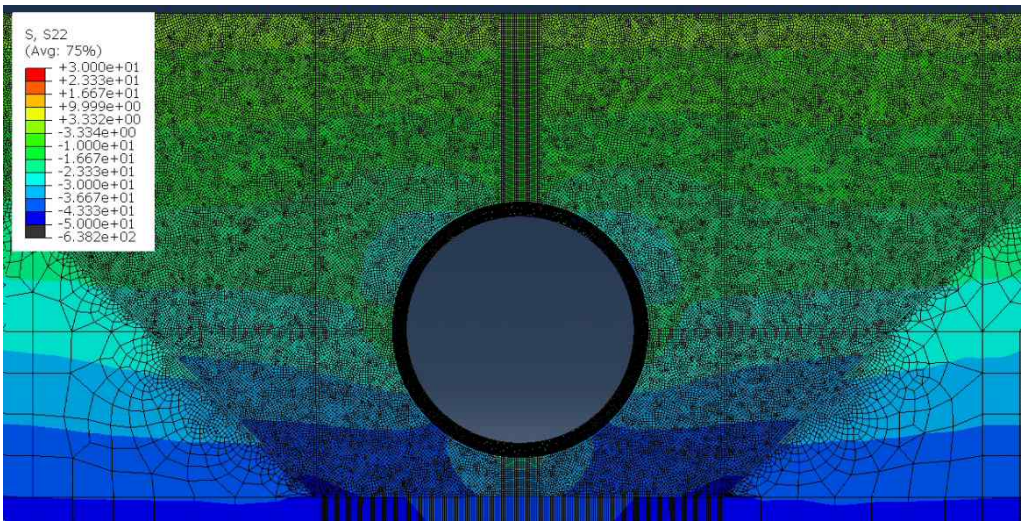
(설계) 요소망 설계

○ 유한요소해석에서 요소망(Mesh)은 해석 대상 영역을 다수의 요소로 분할하여 구조물 및 지반의 거동을 수치적으로 모사하기 위한 과정임. 요소망의 크기와 형상은 해석 결과의 정확도와 계산 효율성에 직접적인 영향을 미치므로, 해석 대상의 형상과 응력 분포 특성을 고려하여 적절하게 구성할 필요가 있음.

○ 본 연구에서는 관로와 지반의 상호작용을 효과적으로 모사하기 위하여 해석 조건에 따라 요소망을 구성함. 특히 관경, 매설심도 및 터파기 형상이 서로 상이하므로, 각 해석 조건에 적합한 요소망을 산정하여 적용하였음.

○ 응력 집중 및 변형이 크게 발생할 것으로 예상되는 관로 주변과 터파기 경계부는 상대적으로 세밀한 요소망을 적용하였으며, 거동 변화가 크지 않은 원거리 영역은 비교적 큰 요소를 사용하여 해석의 효율성을 확보함.

○ 이를 통하여 다양한 해석 조건에서 발생할 수 있는 응력 전달 특성 및 변형 거동을 안정적으로 모사하고자 하였으며, 각 모델의 형상적 특성과 해석 목적을 고려하여 요소망을 적절히 조정 다음 [그림 6-3]은 앞서 설명한 요소망 구성 절차를 바탕으로 구축한 수치해석 모델의 예를 나타낸 것임(PE 연성관, D1200, H1000 조건).



[그림 5-3] **수치해석 모델 요소 구성 (PE 연성관, D1200, H1000 조건)**

(조건) 하중조건

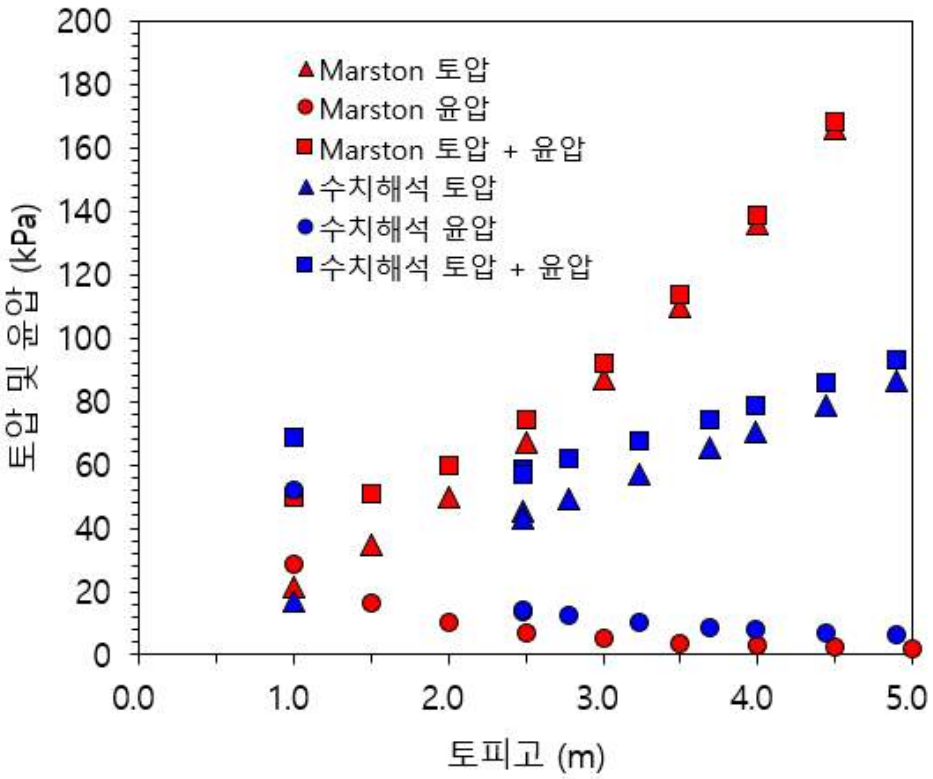
○ 매설관은 시공 중 다짐장비, 운반차량 및 기타 중장비에 의한 하중의 영향을 받을 수 있으며, 이러한 하중은 지반을 통하여 관로에 전달되고 응력 및 변형 거동에 영향을 미칠 수 있어, 관로의 구조적 안정성을 평가하기 위해서는 실제 사용 환경에서 발생할 수 있는 하중조건을 고려할 필요가 있음.

○ 10톤 진동롤러의 가진력은 총 4단계로 구분되며, 각 단계별 가진력은 표 6.3에 정리함. 실제 시공 시에는 관로 주변에서 진동 다짐을 수행하지 않거나 저진동 조건으로 시공하는 것이 일반적이나, 본 연구에서는 실규모 실험 조건과의 비교를 위하여 1단계 가진력(Case 1)을 적용하여 수치해석을 수행함. 또한 Case 1은 1~4단계 가진력 중 가장 낮은 수준의 가진력으로, 실제 시공 조건을 고려한 보수적인 해석 조건임. 아울러 관로 상부를 통행하는 시공장비로부터 발생하는 횡방향 하중이 관로에 미치는 영향을 검토하기 위하여 해당 조건에 대한 해석을 수행하였음.

○ 토피고 변화에 따른 관로의 역학적 거동을 분석하기 위하여 토피고 (z)에 해당하는 상재하중을 지표면에 등분포하중 형태로 재하함. 이를 통하여 하중 재하에 따른 지반 내 응력 전달 특성과 관로에 발생하는 응력 분포 및 변형 거동을 분석함.

[표 5-3] 수치해석 적용응력(10톤 진동롤러의 윤압)

입력하중 Cases	적용응력 [kPa]
Case 1	185.6
Case 2	198.4
Case 3	269.6
Case 4	290.8
토피고별	1.8 g/cm^3 × 9.81 m/s^2 × z m



[그림 5-4] 성토하중에 따른 이론식 및 수치해석 결과 비교·분석

성토하중에 따른 이론식 및 수치해석 결과 비교·분석

○ 성토하중에 따른 이론식 및 수치해석 결과를 [그림 5-4]에 정리함.

○ 이론식은 Marston 공식을 적용하였으며, 돌출형 시공 조건을 고려하여 계수 Cp를 산정한 후 관로에 작용하는 토압 및 윤압을 평가함.

○ 본 연구에서는 이론식의 간편화를 위해 돌출형 시공 조건으로 토압을 산정하였으며 H_e(등가 침하 높이)를 고려하지 않았으므로 깊이에 따른 이론식 토압이 매우 크게 증가한 것으로 판단됨.

○ 동일한 물성치를 적용한 수치해석 결과와 Marston 이론식을 비교한 결과, 토피고 1m에서 Marston 이론식이 약 27% 더 큰 토압이 산정됨. 이는, Marston 이론식의 도랑 조건에서 발생하는 아칭 효과와 하중 집중 현상으로 인한 것으로 판단됨. 수치해석 모델은 지반 내 응력 재분배 거동을 고려함에 따라 상대적으로 완만한 응력 분포를 나타냄.

○ 토피고 약 1.5m 이상부터 토피고가 증가할수록 윤압의 영향은 감소하고 성토하중의 영향은 증가하여, 관로에 작용하는 지배하중이 윤압에서 성토하중으로 전환되는 경향을 나타냄([그림 5-4] 참조).

○ 또한, 토피고가 증가함에 따라 Marston 이론식과 수치해석 결과의 차이가 증가하는 것으로 나타남. 이는 수치해석이 Marston 이론식보다 지반의 아칭 효과를 고려하는 것으로 판단함.

(실험결과) 수치해석 결과 개요

○ 수치해석 결과는 실제 계측 데이터와의 비교·분석 및 허용응력 개념에 따른 관로의 균열 발생 가능성을 평가하기 위하여 정리함. 이를 위하여 자중단계에서 발생한 응력을 기준으로 하중단계 (하중단계 응력-자중단계 응력)에서 추가로 발생한 응력을 산정하여 비교·분석을 수행함.

○ [표 6-4]는 본 보고서에서 수행한 비교·분석 결과를 종합적으로 정리한 것으로, 각 결과에 해당하는 실험명을 함께 수록함.

[표 5-4] 수치해석 결과 개요 (단위: mm)

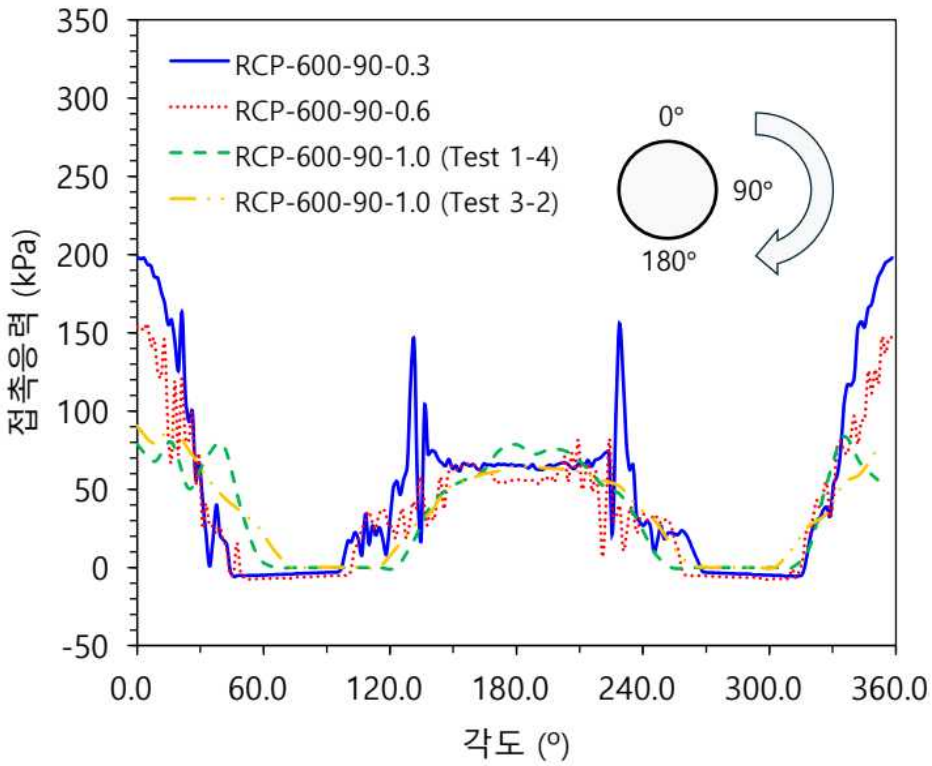
토피고 H / 관종 D	300	600	1000	1500
250	-	-	Test 4-3	-
400	-	-	Test 4-2	-
600	Test 1-2	Test 1-3	Test 1-4/ Test 3-2	-
900	-	-	Test 4-5	-
1100	-	-	Test 5-1	-
1200	-	-	Test 4-1	-
1500	-	-	Test 1-1/ Test 3-5	Test 3-1

수치해석 결과: 토피고별

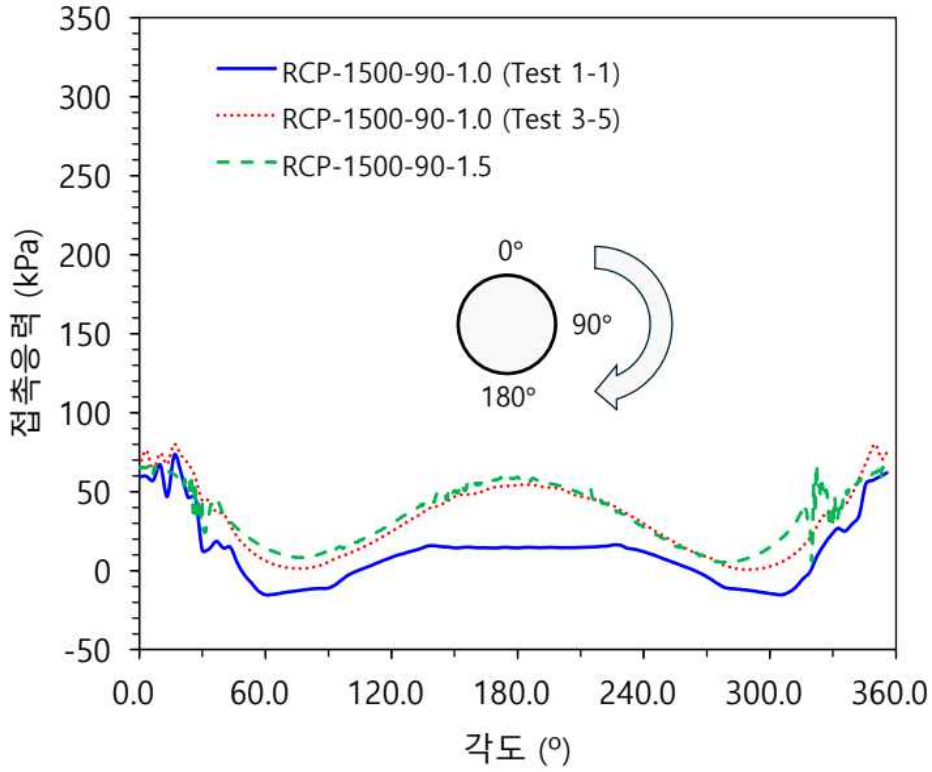
○ [그림 5-5]와 [그림 5-6]은 수치해석 결과에서 토피고별로 정리한 그래프임. 토피고가 증가함에 따라 관정(0°)에서 발생하는 최대 접촉응력은 전반적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 이러한 결과는 토피고 증가함에 따라 윤압의 영향이 감소하기 때문으로 판단됨.

○ 모든 조건에서 접촉응력은 관정부에서 최대값을 나타내고 측면 부근에서 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 상부 하중이 관정을 통하여 우선적으로 전달되고 측면부에는 상대적으로 작은 응력이 전달되는 강성관의 거동 특성을 반영하는 것으로 판단됨.

○ 일부 구간에서 접촉응력이 음의 값으로 산정되었으나, 이는 자중단계에서 형성된 접촉응력이 하중 재하 과정에서 일부 접촉면의 분리로 인하여 증분 응력이 감소하면서 발생한 결과로 판단되며, 발생 범위 및 크기를 고려할 때 전체 응력 분포 및 관로 거동을 해석하는 데 지대한 영향을 미치는 수준은 아닌 것으로 보여짐.



[그림 5-5] RCP-600 토피고별 거동 특성



[그림 5-6] RCP-1500 토피고별 거동 특성

수치해석 결과: 관경별

○ [그림 5-7]은 관경에 따른 수치해석 결과를 나타내었다. 관경이 증가함에 따라 작용하는 증분 접촉응력은 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 관정(0°)과 관저(180°)에서 경향성이 뚜렷하게 나타남.

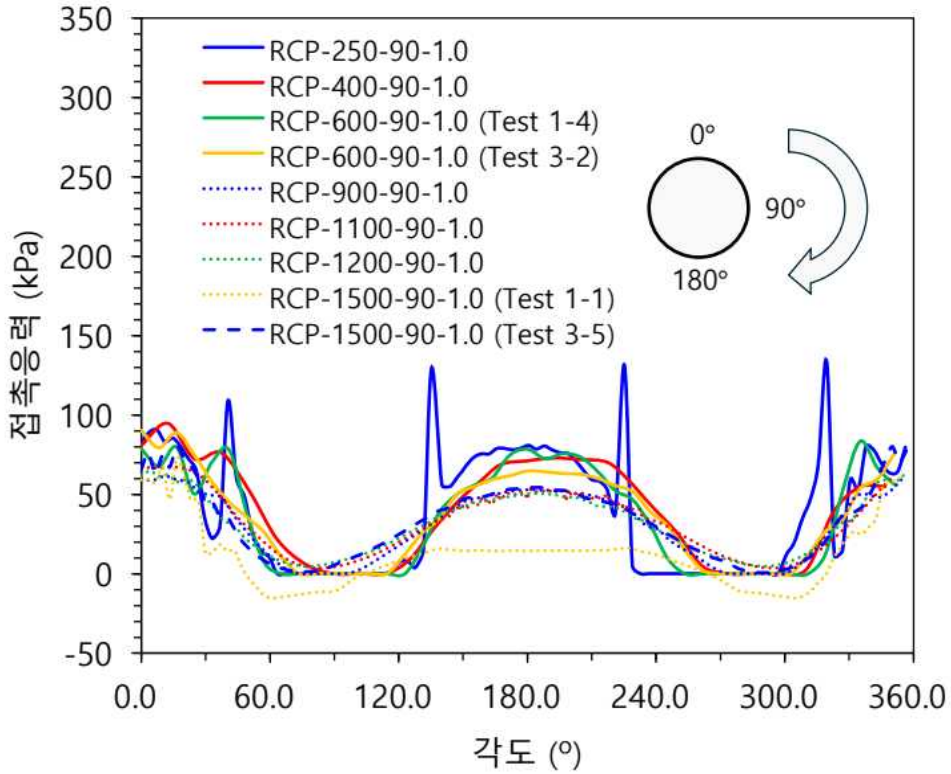
○ 모든 조건에서 증분 접촉응력은 관정부와 관저부에서 상대적으로 크게 발생하고 관로의 측면 부근에서 감소하는 유사한 분포 형상을 나타내었으며, 이러한 결과는 관경 변화에도 불구하고 하중 전달 메커니즘은 크게 변화하지 않는 것으로 보여짐.

○ 일부 구간에서 음의 증분 접촉응력이 산정되었으나, 이는 자중단계에서 형성된 접촉응력이 하중 재하 과정에서 접촉면이 부분적으로 분리되면서 발생한 결과로 판단되며, 전체적인 응력 분포 경향 및 관로 거동을 해석하는 데 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단됨.

○ 관경 증가에 따른 증분 접촉응력 감소 경향은 관체 주변 토체의 하중 재분

배 및 아칭효과가 상대적으로 증가한 결과로 판단됨.

○ 관정부에서 발생하는 접촉응력은 관경 변화에 관계없이 유사한 수준을 나타낸 반면, 측면부에서는 관경 증가에 따라 접촉응력이 감소하는 경향을 보였다. 이는 Marston 이론식과 같이 관경 증가에 따라 총 토하중은 증가하더라도, 하중 전달 영역 또한 확대되어 국부적인 응력 집중이 완화된 것으로 보여짐.



[그림 5-7] 관경별 거동 특성

수치해석 결과: 실측 데이터 비교

○ 수치해석 결과와 비교하기 위하여 강성관 관정에서 실측된 토압계 데이터를 대상으로 토압, 윤압 및 토압과 윤압의 합산값을 각각 구분하여 다음 [표 5-5]와 같이 비교·분석함.

○ 실제 지반에서 발생하는 아칭 효과 및 응력 재분배 거동으로 인하여 실측값이 수치해석 결과보다 낮게 나타남.

[표 5-5] 관정 실측 토압 및 수치해석 토압 비교·분석(10ton롤러 통상 가진 조건)

시편	실측 (kPa)			수치해석 (kPa)		
	토압	윤압	토압+윤압	토압	윤압	토압+윤압
RCP- 250-90-1.0	36.7	5.3	42.0	17.5	68.3	85.8
RCP- 400-90-1.0	25.1	9.1	34.1	16.8	62.9	79.7
RCP- 600-90-0.3	6.9	121.2	128.1	5.9	201.1	207.0
RCP- 600-90-0.6	20.8	63.0	83.8	8.4	151.6	160.0
RCP- 600-90-1.0 (Test 1-4)	44.5	34.9	79.4	16.8	56.5	73.3
RCP- 600-90-1.0 (Test 3-2)	9.2	12.7	21.9	16.6	65.4	82.0
RCP- 900-90-1.0	23.0	5.5	28.5	16.8	43.2	60.0
RCP-1100-90-1.0	32.6	6.5	39.1	16.8	51.8	68.6
RCP-1200-90-1.0	30.9	1.8	32.7	16.7	47.5	64.2
RCP-1500-90-1.0 (Test 1-1)	45.8	25.3	71.1	16.9	60.6	77.5
RCP-1500-90-1.0 (Test 3-5)	39.9	5.2	45.1	16.8	55.5	72.3
RCP-1500-90-1.5	50.7	1.3	52.0	26.3	38.8	65.1

수치해석 결과: 균열검토

○ 강성관을 구성하는 콘크리트의 압축강도를 바탕으로 인장강도를 산정하였으며, 이를 수치해석 결과와 비교하여 균열 발생 가능성을 검토함. 검토에 적용한 콘크리트 인장강도, 균열개시 대수변형률 및 철근 항복변형률은 [표 5-6]에 정리함.

○ 강성관의 설계기준 압축강도는 ASTM C76에 따라 27.6 MPa(4,000psi)를 적용하였으며, 콘크리트 인장강도는 경험식 $f_r = 0.63\sqrt{f_{ck}}$ (철근콘크리트, 동명사)에 따라 약 3.3 MPa로 산정함. 관로의 균열 발생 여부는 산정된 인장응력과 콘크리트 인장강도를 대수변형률 개념에서 검토하였다(εcr = fr/Ec =

3.3/25,000 = 132 με).

○ 강성관 내부를 구성하는 철근은 ASTM A496의 물성을 적용하였으며, 철근의 항복강도는 fy = 485 MPa로 가정함. 또한 수치해석을 통하여 산정된 대수변형률과 철근의 항복변형률을 비교하여 관체의 구조적 안정성을 검토하였다(εy = fy/Es = 485/200,000 = 2425 με). 검토 결과 철근에 발생하는 변형률은 항복변형률에 비해 충분히 낮은 수준으로 나타났으며, 이에 따라 하중 작용에 의해 콘크리트 인장부에서 초기 균열이 발생하더라도 철근의 항복으로 이어질 가능성은 낮은 것으로 판단됨.

[표 5-6] 수치해석에 의한 강성관의 균열발생 가능성 분석

연번	시편	대수변형률 LE (με)	개시균열비율 ($\varepsilon_{LE}/\varepsilon_{cr}$, %)	철근항복비율 ($\varepsilon_{LE}/\varepsilon_{y}$, %)
1	RCP- 250-90-1.0	110.6	83.8	4.6
2	RCP- 400-90-1.0	158.3	119.9	6.5
3	RCP- 600-90-0.3	301.2	228.2	12.4
4	RCP- 600-90-0.6	234.0	177.3	9.6
5	RCP- 600-90-1.0	156.4	118.5	6.4
6	RCP- 900-90-1.0	119.1	90.2	4.9
7	RCP-1100-90-1.0	142.3	107.8	5.9
8	RCP-1200-90-1.0	133.8	101.4	5.5
9	RCP-1500-90-1.0	145.5	110.2	6.0
10	RCP-1500-90-1.5	153.1	116.0	6.3

○ 개시균열비율 검토 결과, 연번 1과 연번 6 모델에서 개시균열비율이 100% 이하로 균열이 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 두 모델 콘크리트 최대 변형률에서의 철근 변형률은 항복 변형률 대비 4.6%와 4.9%로 나타남.

○ 600mm 내경의 강성관에 토피고 높이 증가에 따른 변형률 검토결과(연번 3, 4, 5), 300mm, 600mm, 1000mm 토피고에서 발생한 개시균열비율은 각각 228.2%, 177.3%, 118.5%로 100%를 초과하는 것으로 나타나, 균열 발생 가능성이 있는 것으로 나타났다. 다만, 이는 철근의 보강효과를 고려하지 않은 것으로 철근의 최대변형률이 12.4%로 항복변형률 대비 매우 낮게 발생하여 실제적인 균열은 발생하지 않을 것으로 판단됨.

○ [표 5-6] 분석결과, 일부 개시균열비율이 100%를 초과하였으나, 철근의 인장변형률이 항복변형률 대비 낮게 되어 균열이 발생하지 않을 것으로 나타났는데, 현장실험결과도 최대 및 통상 가진 조건에서도 강성관에는 허용균열보다 큰 균열은 발생하지 않았음.

- 현장실험결과, 10ton 롤러 다짐 장비의 최대가진 조건에서 발생한 최대균열폭은 0.15mm이며, 통상 가진 조건에서 발생한 최대균열폭은 0.05mm 이하이다. 이는 KS F 4403에서 제시하고 있는 허용균열폭(0.25mm) 보다 상당히 작은 나비의 균열로, 구조적 안정성에는 영향이 없는 것으로 나타남.

○ [표 5-5]에서 보면 실측토압이 수치해석 토압에 비해 상당히 작은 것으로 나타났으므로, 현장실험결과가 수치해석에 비하여 구조적 안전성을 확보하는 것으로 판단됨.

Ⅵ 결론

Key Point

- LFWD와 GeoGauge는 상대다짐도와 높은 상관성을 나타내어 현장 다짐도 평가에 효과적으로 활용 가능한 것으로 확인
- 최소 토피고(1m)와 되메우기의 다짐 품질이 확보될 경우 매설관은 노상 다짐장비 주행에 대해 충분한 구조적 안전성을 확보하는 것으로 나타남
- 이를 통해 본 연구에서 검토한 관로 시공법 개선(안)으로 시공할 경우도 충분한 관로 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

1 흙쌓기 역학성능시험

(결론) 흙쌓기 역학성능시험 결론

○ 본 연구에서는 천안 및 세종 시험부지를 대상으로 들밀도시험, LFWD, GeoGauge 시험과 기본물성시험을 수행하여 지반의 다짐 특성과 간편다짐시험의 적용성을 평가함.

○ 기본물성시험 결과, 시험 시료는 각각 SW-SC, SW-SM 및 SP로 분류되었으며, 전반적으로 모래질 토사로 구성된 것으로 확인됨. 비중은 2.58~2.65, 최대건조밀도는 1.93~2.05 g/cm^3, 최적함수비는 8.18~9.02% 범위로 나타나 유사한 다짐 특성을 보였다. 특히 세종 5-2(1) 시료는 가장 높은 최대건조밀도와 가장 낮은 최적함수비를 나타내어 상대적으로 우수한 다짐 특성을 보였음.

○ 또한 현장시험 결과, 상대다짐도가 증가할수록 LFWD 및 GeoGauge로 산정된 탄성계수가 증가하는 경향을 나타냈으며, 두 시험 모두 다짐 상태를 효과적으로 반영하는 것으로 확인됨. 특히 LFWD는 상대다짐도와 높은 상관성을 보여 현장 다짐 품질을 신속하게 평가할 수 있는 간편다짐시험법으로 활용 가능성이 높은 것으로 판단됨.

○ 따라서 본 연구를 통해 전통적인 들밀도시험과 간편다짐시험 결과 간의 연관성을 확인하였으며, LFWD와 GeoGauge를 활용한 현장 다짐도 평가의 적용 가능성을 검증함.

2 관로 안전성 평가 검증 실험

(결론) 일반 결론

○ 본 연구에서는 관종, 관경, 토피고 및 하중 재하 조건에 따른 매설관의 거동 특성을 평가하기 위하여 현장 실험을 수행함. 토압, 변형률 및 균열 조사를 통해 매설관의 구조적 안정성을 종합적으로 검토함.

○ 시험 결과, 토피고가 증가할수록 장비주행에 따른 윤압과 변형률은 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 상부 지반의 하중 분산 효과에 기인한 것으로 판단됨.

(결론) 연성관 결론

○ 현장실험에서 최소토피고 위에 10톤 진동롤러와 25톤 만재 덤프를 주행하였을 때 이중벽 연성관(PE 200, 400, 600, 900, 1200, 1,500, PVC 200, 400, 600)에는 0.05 ~ 2.0%(평균 0.75%)의 변형률이 발생함.

○ 이는 허용변형률인 5%에 비해 현저히 작은 변형률로 1m 최소토피고 상에 10톤 진동롤러와 25톤 만재 덤프가 주행하여도 연성관은 충분히 안정한 것으로 나타남.

○ 특히, 현장의 조건(노체다짐, 롤러 통상진동하중)을 재현한 TEST 5의 연성관(PE 600)은 0.05%의 영구변형률을 나타냄.

○ 연성관에 대한 실험에서 매우 안정적인 변형거동을 나타낸 것은 LH가 연성관의 기초로 모래기초 180°를 적용하기 때문인 것으로 판단됨.

○ 본 실험에서는 되메우기 전부터 변형계를 설치하여 관로 되메우기 및 하중재하 전과정에 대해 변형률을 측정하였는데, 관로 되메우기 과정에서 연성관의

관정이 위로 솟아나는 거동을 보였는데, 이는 되메우기 횡방향 구속압에 의한 것으로 판단됨. 되메우기 후에 진동롤러와 덤프주행이 시작되면 연성관의 관정이 0점을 지나 하방향으로 변형하였는바, 시방을 잘 지키는 되메우기 다짐작업이 연성관의 하방향 변형률을 줄이는 효과가 있는 것으로 판단됨.

(결론) 강성관 결론

○ 강성관(원심력 철근콘크리트관 KSF F 4403 보통관 2종 B형)(직경 250, 400, 600, 900, 1,100, 1,500mm)의 안정성을 불리한 조건에서 검토하기 위하여 모래기초 90°를 일률적으로 적용함.

○ 강성관에 대한 변형률 측정은 미소 변형률을 나타내어 전형적인 강성관 변형 거동을 나타냄.

○ 강성관 상부를 횡방향으로 주행한 TEST 1에서는 10톤 롤러의 진동하중을 최소~최대로 가진주행하고 25톤 만재 덤프 주행에도 강성관에 균열이 발생하지 않았음. 이는 횡방향 주행 시 하중 및 진동이 가해지는 시간이 매우 짧기 때문인 것으로 판단됨.

○ TEST 3 및 TEST 4에서는 10톤 롤러의 최대가진력과 25톤 만재 덤프로 횡방향 뿐 아니라 종방향 주행을 함. 이때, 직경 250, 400, 90mm관에서는 균열이 발생하지 않았고, 1200, 1,500mm 관에서 0.15mm 이하의 미세균열이 발생함.

○ 이는 KS F 4403 및 미국 ASTM C497-05의 허용균열폭인 0.25mm 보다 작은 균열로 10톤 진동롤러의 최대 가진조건에서도 최소 토피고 1m를 확보하면 안정성은 문제가 없는 것으로 나타남.

○ TEST 5에서는 강성관(900, 1,100, 1,500mm)에 대해 실제 현장조건(노체 지반, 10톤 진동롤러 통상가진력)을 구현해 최종적인 안정성 실험을 하였으며, 실험결과는 실험본관에는 거의 균열이 발생하지 않았고, 구속이 되지 않은 더미관 위주로 0.05mm 이하의 미세균열이 발생함.

○ 이는 KS F 4403 및 미국 ASTM C497-05의 허용균열폭인 0.25mm의 1/5 수준으로 최소 토피고 1m 이상확보 시 10톤 롤러의 통상가진력에 대해 충분한 안정성을 확보하는 것으로 실험결과 나타남. 진동롤러 주행 후 25톤 만재 덤프 주행에 의해서는 추가 균열이 발생하지 않았음(단 시방에

의한 되메우기 다짐과 연결부 시공이 전제되어야 함).

○ 스마트건설본부와 연구원이 제안한 관로 설치방법 개선(안)을 적용하기 위한 핵심인 최소토피고(1m)에서의 노상다짐장비의 주행이 관로에 미치는 영향을 검토한 결과 불리한 기초조건 및 진동롤러의 최대가진력에서도 강성관과 연성관이 안정한 것으로 나타남. 보다 확실한 관로의 안정성을 확보하기 위해서는 설계/시공 시 토질 및 관로 조건에 적합한 기초를 선정하고 진동롤러를 최대가진력이 아닌 통상가진력으로(KCS 11 20 20 3.4.2. 시험시공 참조) 흙쌓기 다짐을 수행해야 할 것임.

3 수치해석 결과

(결론) 수치해석 결론

○ 본 연구에서는 유한요소해석(FEM)을 활용하여 토피고 및 관경 변화에 따른 관로의 응력 및 변형 거동을 분석하고, 현장 계측 결과와 비교하여 수치해석 모델의 적용성을 검토함.

○ 토피고가 증가할수록 관로에 작용하는 윤압의 영향은 감소하고 성토하중의 영향이 증가하였으며, 관정에서 발생하는 최대 접촉응력과 변형률은 전반적으로 감소하는 경향이 나타남. 또한 관경이 증가할수록 접촉응력이 감소하고 응력 분포가 완만해져 하중이 보다 넓은 영역으로 분산되는 것으로 분석되었음.

○ 접촉응력은 모든 조건에서 관정부와 관저부에 집중되고 측면부에서는 감소하는 전형적인 강성관의 거동 특성을 나타냈으며, 이는 실제 현장 계측 결과와도 유사한 경향이 나타남.

○ 균열 검토결과, 일부 강성관의 변형률이 콘크리트의 균열개시 변형률 이상인 것으로 나타났으나, 철근의 변형률은 항복변형률보다 충분히 낮아 균열 가능성은 매우 낮은 것으로 평가되었음. 또한, 실측토압이 수치해석에서의 토압보다 작았기 때문에 실제 강성관의 거동은 수치해석결과 보다 더 안전한 것으로 판단됨.

4 제 언

터파기/되메우기 관련 제언

○ LH 토목설계지침에는 관의 터파기 여유폭은 0.3m로 하고 관 하부지반은 램머(80kg)로 상부는 콤팩터(1.5ton) 장비로 되메우기 다짐을 하라고 되어 있으나, 여유폭이 다짐장비에 비하여 작아 운용이 어렵고, 램머는 진동/충격이 있어 관에도 충격을 줄 수 있고 작업자가 장시간 운용하기에 어려운 문제가 있는 것으로 판단되므로, 여유폭을 충분히 두고 소형콤팩터로 일관되게 작업하는 것이 다짐품질을 더 쉽게 확보할 수 있을 것으로 판단되므로 이에 대한 검토가 필요함.

참고문헌

1. Ahangari, K., Noorzad, A., (2010). Use of casing and its effect on pressure cells. Mining Science and Technology (China) 20, 384-390.
2. American Society for Testing and Materials, “ASTM A 496-02, Steel Wire, Deformed, for Concrete Reinforcement (2003)”
3. American Society for Testing and Materials, “ASTM C76-08, Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe (2008)”
4. American Society for Testing and Materials, “ASTM D4832, Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders (2023)”
5. American Society for Testing and Materials, “ASTM D5239, Standard Practice for Characterizing Fly Ash for Use in Soil Stabilization (2021)”
6. American Society for Testing and Materials, “ASTM D5971, Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Controlled Low Strength Material (2025)”
7. American Society for Testing and Materials, “ASTM D6103, Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material (2026)”
8. American Society for Testing and Materials, “ASTM D6758, Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil-Aggregate In-Place by Electro-Mechanical Method (2021)”
9. American Society for Testing and Materials, “ASTM D6951, Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications (2023)”
10. American Society for Testing and Materials, “ASTM E2583-07,

Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD) (2020)”
11. Dave, T. N., Dasaka, S. M., (2011). A Review of Pressure Measurement using Earth Pressure Cell. International Journal of Earth Sciences and Engineering 04, 1031-1034
12. Elmi, D., Mirghasemi, A.A., (2013). Effects of Arching on Measurement of Embedded Pressure Cell in Embankment Dam. 7th International Conference On Case Histories in Geotechnical Engineering.
13. Kotake, N., Tatsuoka, F., Tanaka, T., Siddiquee, M. S. A., and Huang, C. C. (2001). FEM simulation of the bearing capacity of level reinforced sand ground subjected to footing load. Geosynthetics International, 8(6), 501-549.
14. KS D 3590, “파형 강관 및 파형 섹션(2025)”
15. KS F 2311, “모래 치환법에 의한 흙의 밀도 시험 방법(2022)”
16. KS F 2312, “흙의 실내 다짐 시험방법(2022)
17. KS F 2320, “노상토 지지력비(CBR) 시험 방법(2020)”
18. KS F 2444, “얕은 기초의 평판 재하 시험 방법(2019)”
19. KS F 4403, “원심력 철근 콘크리트관(2019)”
20. KS M 3500-1, “배수 및 하수용 비압력 매설용 구조형 폴리에틸렌(PE) 관-제1부: 이중벽관(2023)”
21. KS M 3600, “배수 및 하수용 비압력 매설용 구조형 폴리염화비닐(PVC) 관(2021)”
22. Labuz, J., Theroux, B., (2005). Laboratory Calibration of Earth Pressure Cells. Geotechnical Testing Journal 28, 188-196.
23. Li, L. C., Tang, C. A., Li, G., Wang, S. Y., Liang, Z. Z., and Zhang, Y. B. (2012). Numerical simulation of 3D hydraulic fracturing based on an improved flow-stress-damage model and a parallel FEM technique. Rock Mechanics and rock engineering, 45, 801-818.

24. Logan, D. L. (2011). A first course in the finite element method (Vol. 4), Thomson, 817p.
25. Loganathan, N., Balasubramaniam, A. S., and Bergado, D. T. (1993). Deformation analysis of embankments. Journal of Geotechnical Engineering, 119(8), 1185-1206.
26. Marston, A. (1930). The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments, Highway Research Board Proceedings 9: 138~170.
27. Moser, A.P., (2001). Buried pipe design, 2nd ed. ed. McGraw-Hill, New York.
28. Ouzaid, I., Benmebarek, N., and Benmebarek, S. (2020). FEM optimisation of seepage control system used for base stability of excavation. Civil Engineering Journal, 6(9), 1739-1751.
29. Smith, I. M., Griffiths, D. V., and Margetts, L. (2013). Programming the finite element method, John Wiley and Sons, 212p.
30. Török, Á., Barsi, Á., Bögöly, G., Lovas, T., Somogyi, Á., and Görög, P. (2018). Slope stability and rockfall assessment of volcanic tuffs using RPAS with 2-D FEM slope modelling. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18(2), 583-597.
31. Zhu, B., Jardine, R., Foray, P., (2009). The Use of Miniature Soil Stress Measuring Cells in Laboratory Applications Involving Stress Reversals. Soils and Foundations 49, 675-688.
32. 고용노동부, “산업안전보건기준에 관한 규칙(2023)”
33. 국토교통부, “건설기술 진흥법(2025)”
34. 국토교통부, “표준시방서, 토공사 (KCS 11 20 00 : 2020)”
35. 국토교통부, “국가철도공단 전문시방서, 토공사 (KRACS, 47 10 25 : 2021)”
36. 국토교통부, “설계기준, 도로토공 (KDS 44 30 00 : 2023)”
37. 국토교통부, “설계기준, 쌓기,깎기 (KDS 11 70 05 : 2020)”

38. 국토교통부, “표준시방서, 농도 공사 (KCS 67 35 00 : 2018)”
39. 국토교통부, “표준시방서, 되메우기 및 뒤채움 (KCS 11 20 25 : 2020)”
40. 국토교통부, “표준시방서, 쌓기 (KCS 11 20 20 : 2023)”
41. 국토교통부, “표준시방서, 터파기 (KCS 11 20 15 : 2020)”
42. 김영진, (2006) 지하매설용 연성관의 변형특성에 관한 연구, 한국토지공사 보고서
43. 농림축산식품부, “표준시방서, 농업용 관수로 공사 (KCS 67 25 00 : 2018)”
44. 박종배, 박용부, 이수규, 김영민, 이영근, (2024) 단지공사 흙쌓기 시공/품질관리 방안, LH토지주택연구원 report
45. 신현묵, “철근콘크리트공학, 제 11판(2013)”
46. 오세욱, 방성택, (2020). 해양점토와 현장토를 활용한 유동성 채움재의 공학적 특성, 한국지반환경공학회논문집, 21(9), 25-32.
47. 윤정원, 이수규, 박인건, 박종배, (2026). 최소 토피고 조건에서의 콘크리트 매설관 구조 안정성 평가: 현장 실측 토압을 통한 이론식 검증 중심으로, 한국지반공학회논문집, 42(1), 7-17.
48. 이소연, 윤환희, 손민, 공진영, 정혁상, (2018). 저회와 석고를 활용한 지반함몰 긴급복구용 고유동성 채움재 연구, 한국지반신소재학회논문집, 17(2), 19-31.
49. 이준, 김영욱, 이봉춘, 정상화, (2018). 표준토 조건별 하수관용 유동화 채움재의 공학적 특성. 한국건설순환자원학회논문집, 6(3), 182-189.
50. 조진우, 최봉혁, 조원범, 김진만, 홍성경, 정석영, 김준호, (2013). 매설심도에 따른 가스 배관의 응력 변형 특성. 한국가스학회논문집, 17(5), 51-57.
51. 채덕호, 김경오, 신현영, 조완재. (2014). 매립석탄회를 혼합한 유동성 충진재의 동적거동특성, 한국지반환경공학회논문집, 15(4), 5-11.
52. 최동욱, 김진우, 최승원, 박은세, 이예은, 조병휘. (2024). 유동성 채움재(CLSM) 혼합 재료로써 제지애쉬 활용성에 대한 기초 연구, 2024대한

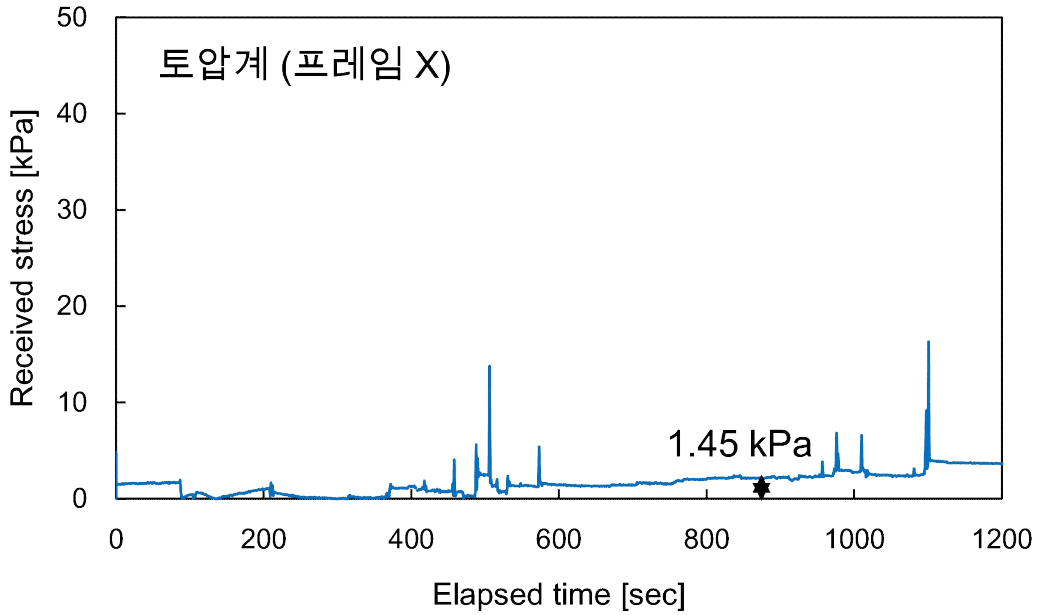
토목학회 정기학술대회논문집.
53. 한국도로공사 “도로설계요령, 제2권 토공 및 배수(2020)”
54. 한국상하수도협회 “하수관로공사 표준시방서 (KCS 61 00 00 : 2022)”
55. 한국상하수도협회 “하수도 설계기준 해설편 (KDS 61 40 00 : 2020)”
56. 한국토지주택공사, “설계지침(토목)(2024)”
57. 한국토지주택공사, “터파기, (LHCS 11 20 15 : 2020)”
58. 한국토지주택공사, “흙쌓기(성토), (LHCS 11 20 20 : 2020)”
59. 환경부, “설계기준, 관로시설 설계기준 (KDS 61 40 00 : 2022)”
60. 환경부, “표준시방서, 굴착 및 되메우기 (KCS 61 20 15 : 2017)”
61. 환경부, “표준시방서, 터파기 지보공 (KCS 61 20 20 : 2017)” 242

부 록

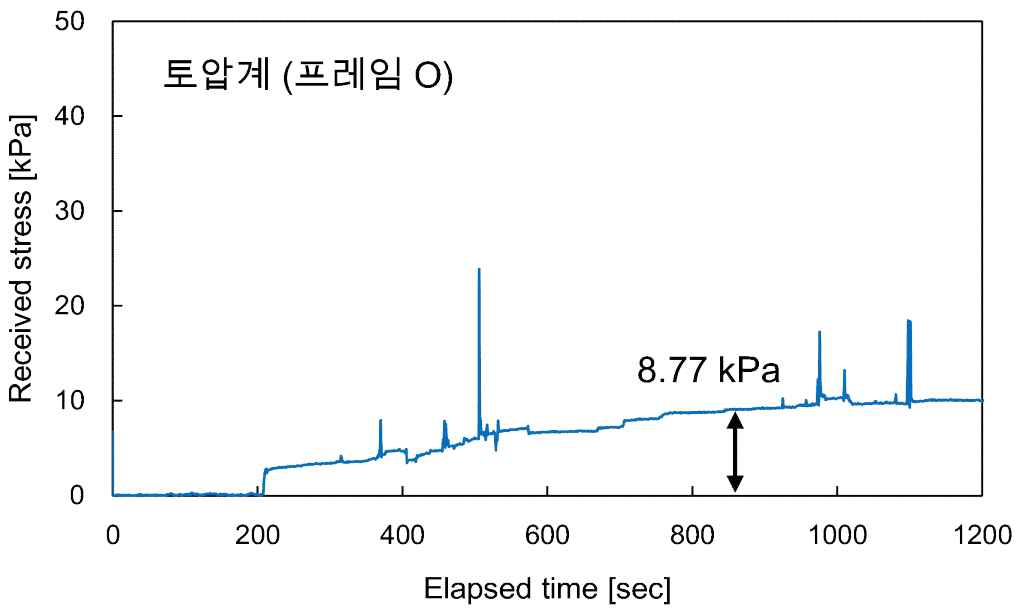
1. 관로 안전성 평가 실험 ····· 148

2. 수치해석 결과 ····· 242

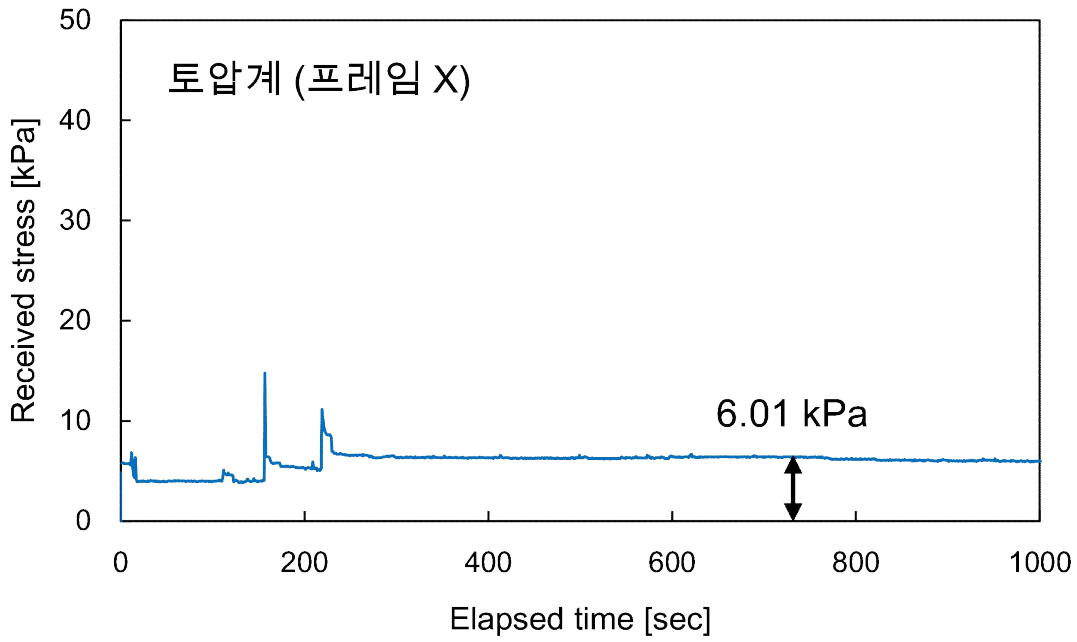
Test 0 [수직 토압: 토피고 0.28m, 프레임 X]



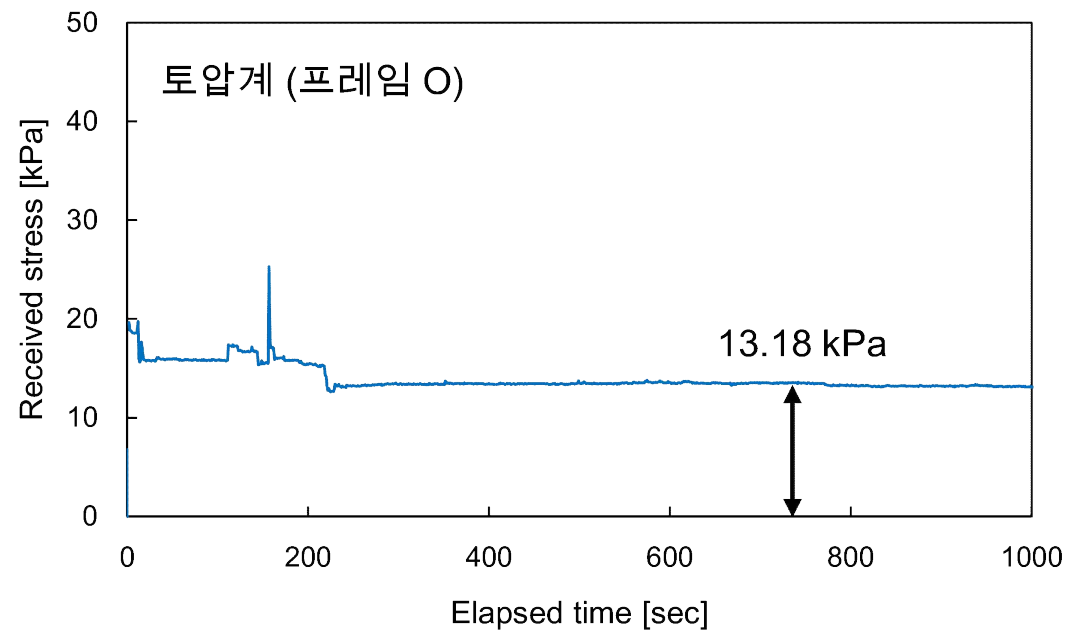
Test 0 [수직 토압: 토피고 0.28m, 프레임 O]



Test 0 [수직 토압: 토피고 0.48m, 프레임 X]

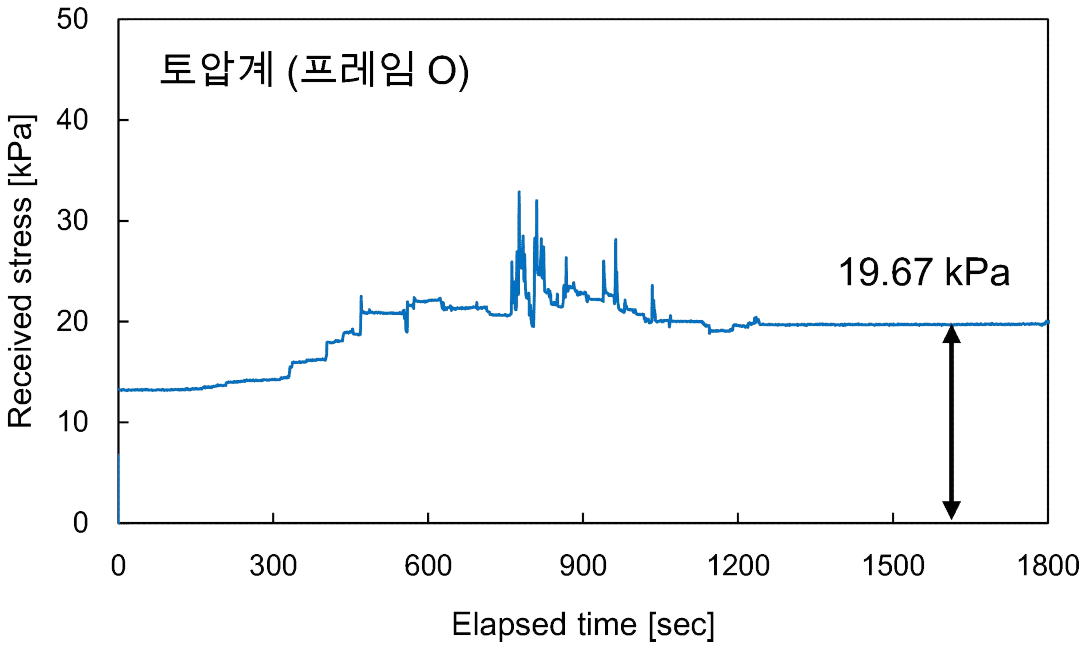


Test 0 [수직 토압: 토피고 0.48m, 프레임 O]

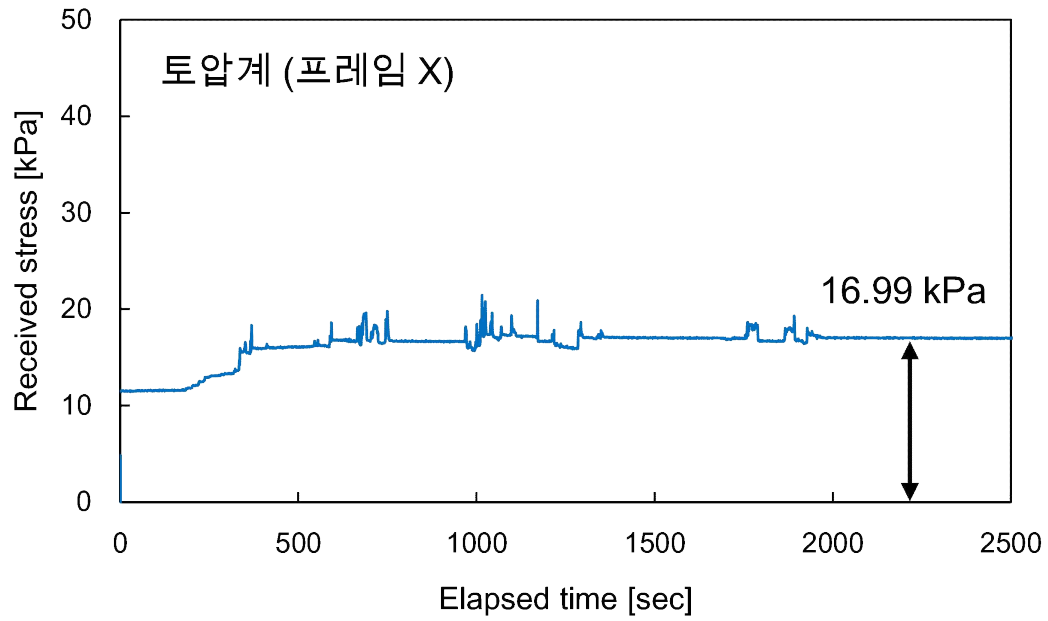


Test 0 [수직 토압: 토피고 0.85m, 프레임 X]

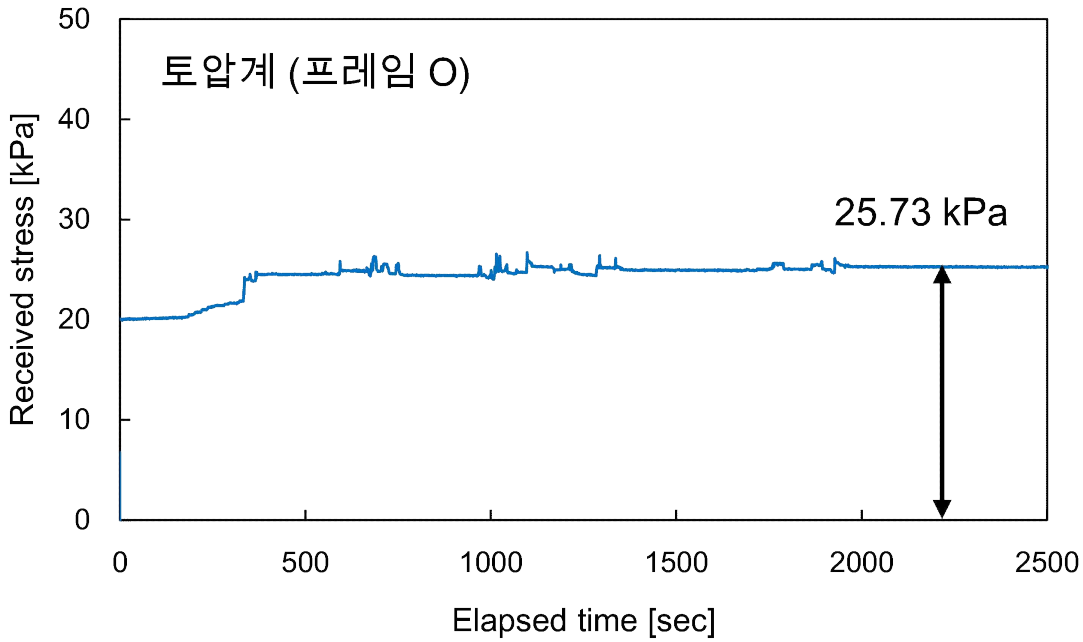
Test 0 [수직 토압: 토피고 0.85m, 프레임 O]

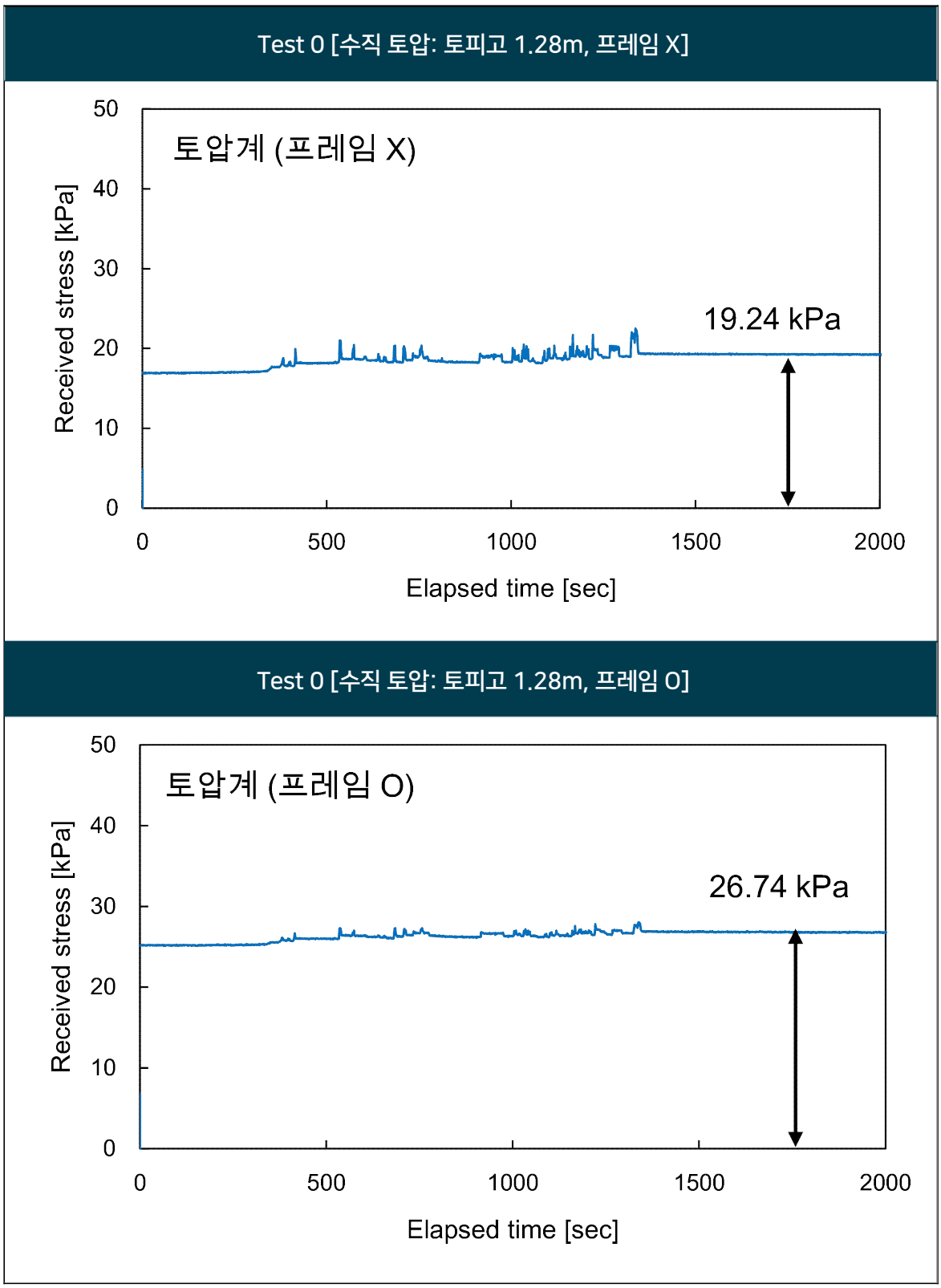


Test 0 [수직 토압: 토피고 1.28m, 프레임 X]



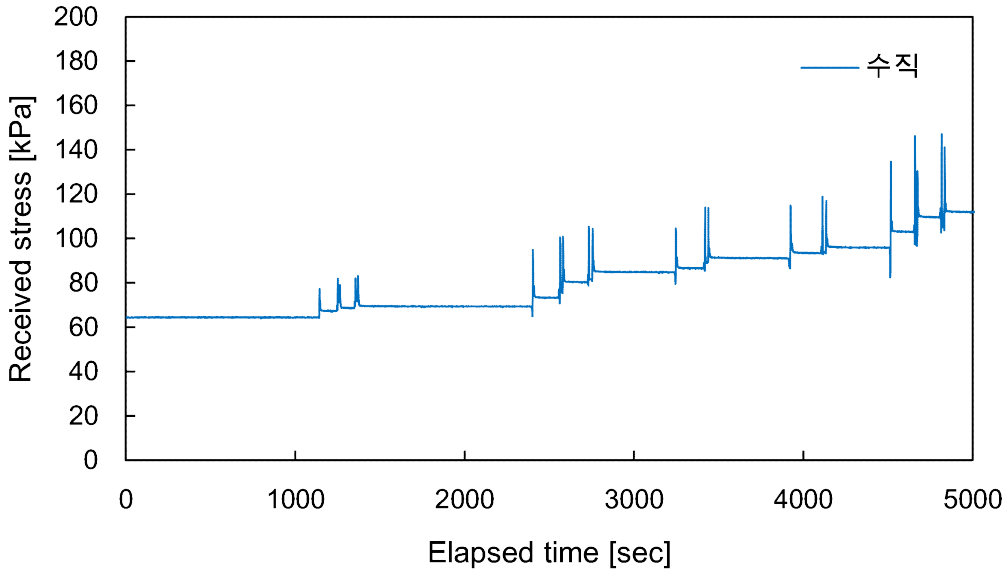
Test 0 [수직 토압: 토피고 1.28m, 프레임 O]



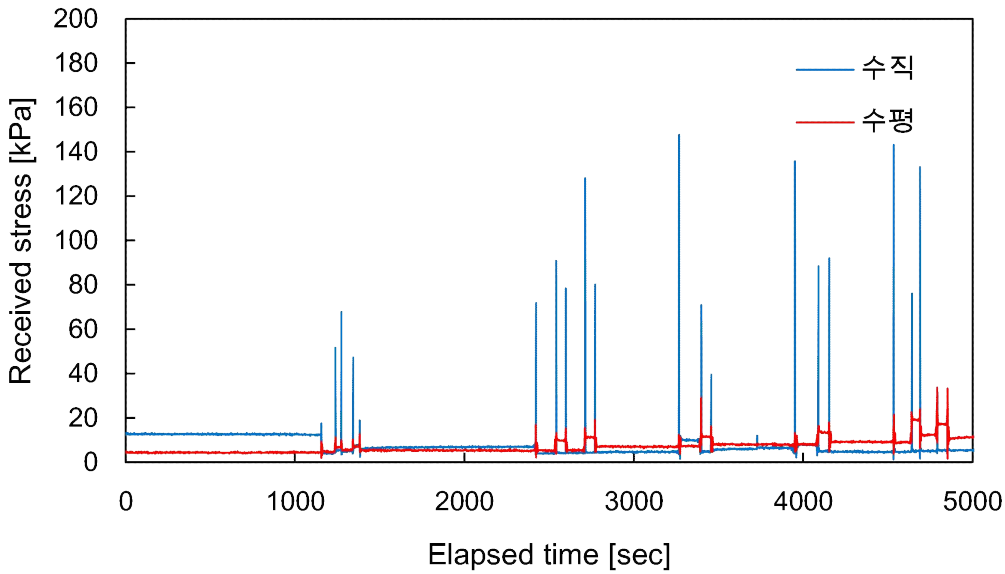

Test 0 [수직 토압: 토피고 1.28m, 프레임 X]
토압계 (프레임 X)
19.24 kPa
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]
0
10
20
30
40
50
0
500
1000
1500
2000
Test 0 [수직 토압: 토피고 1.28m, 프레임 O]
토압계 (프레임 O)
26.74 kPa
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]

10톤 롤러 횡방향 주행

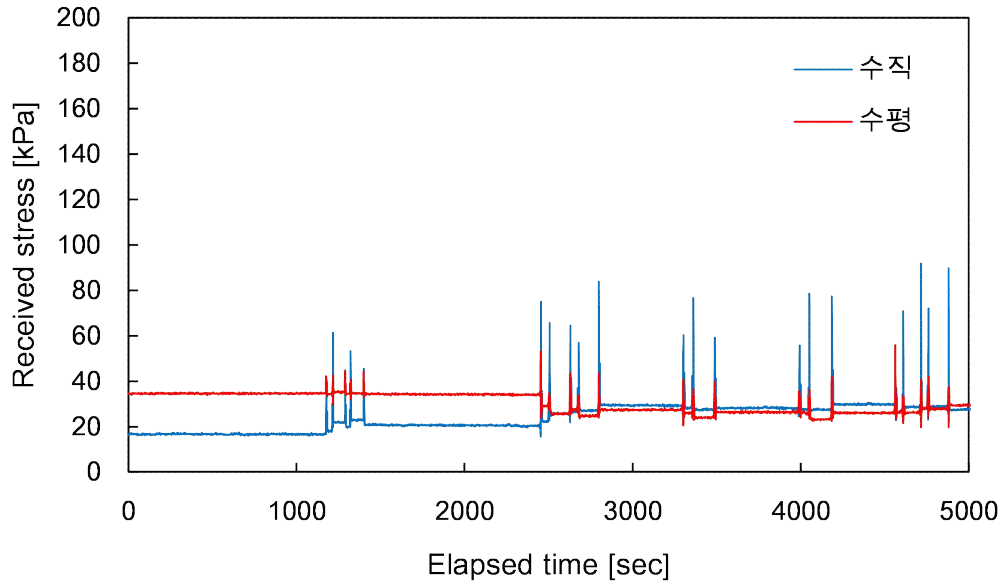
Test 1 [수직 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



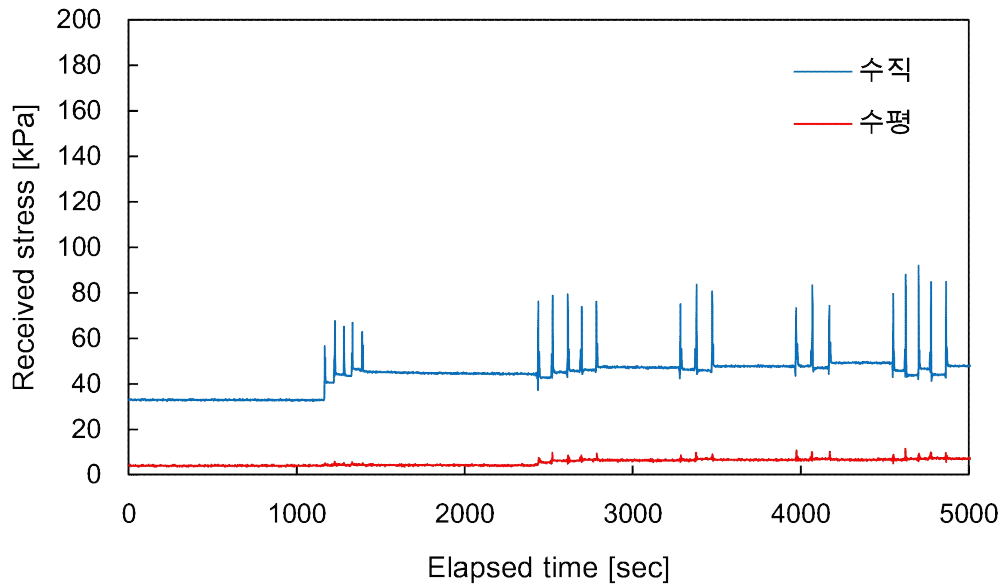
Test 1 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 0.3m, 모래기초, 90도]

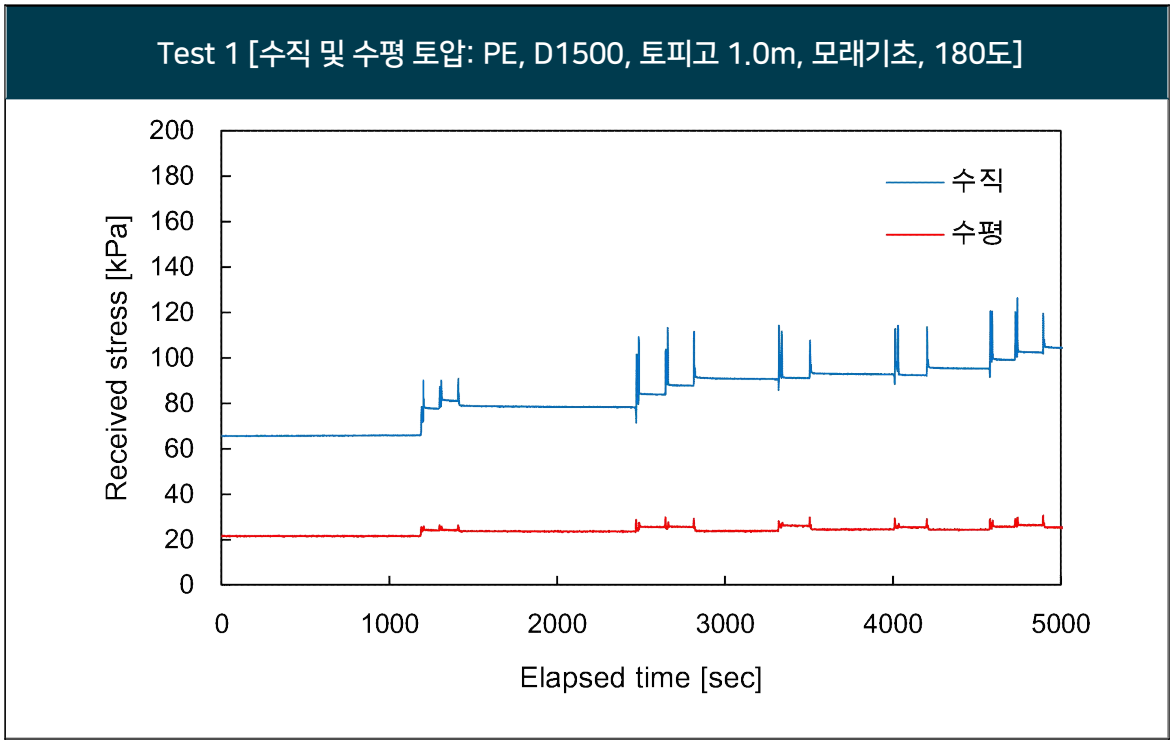


Test 1 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

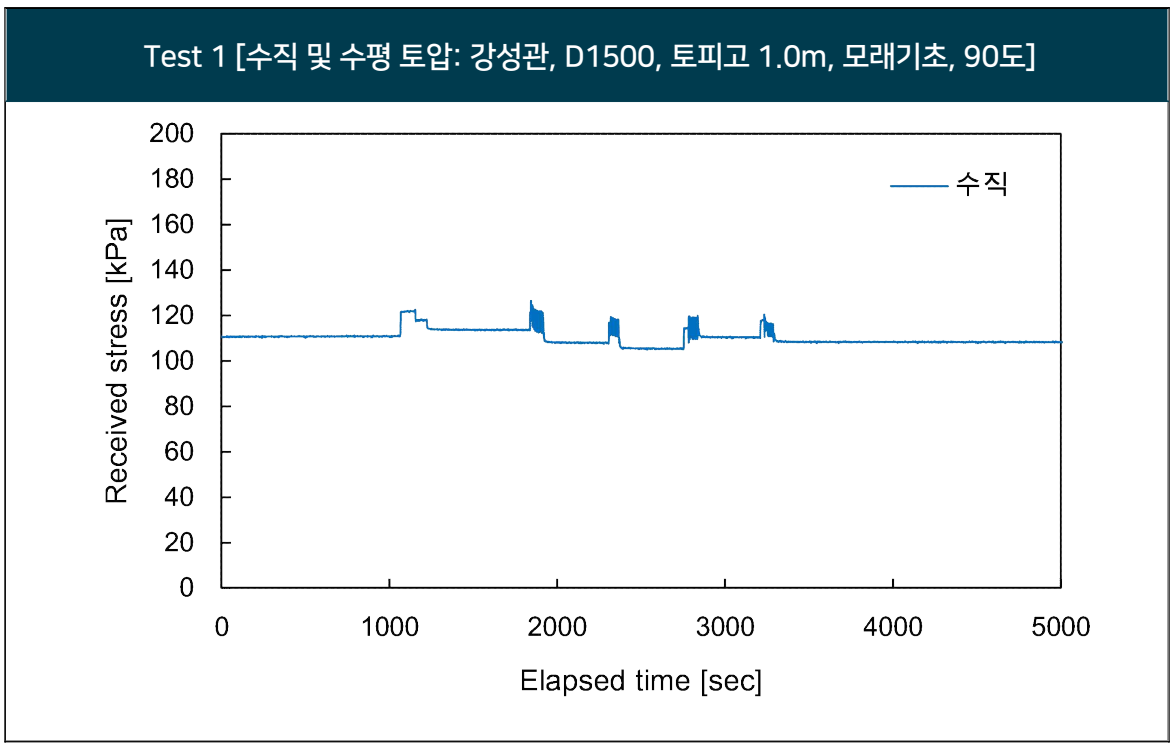


Test 1 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 0.6m, 모래기초, 90도]

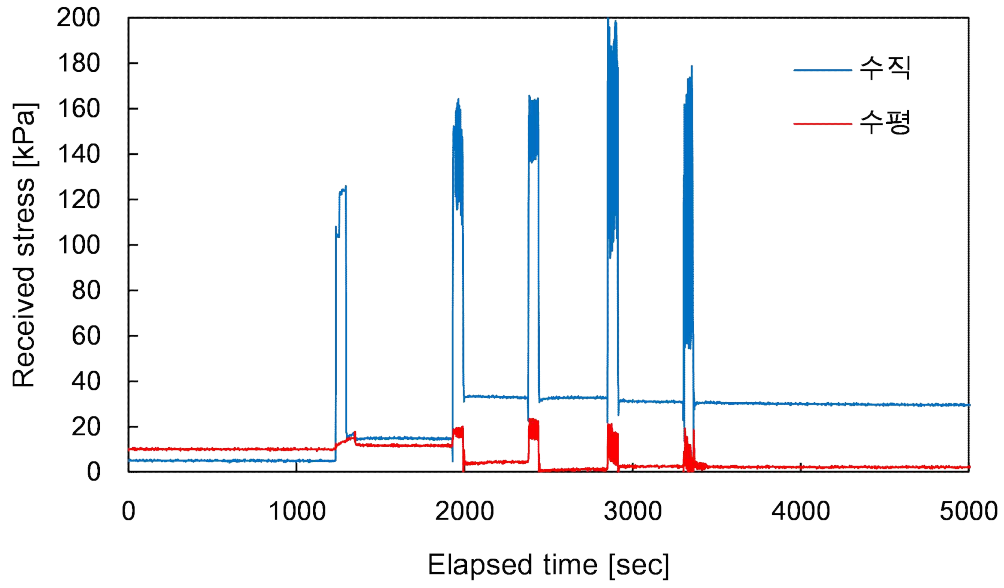




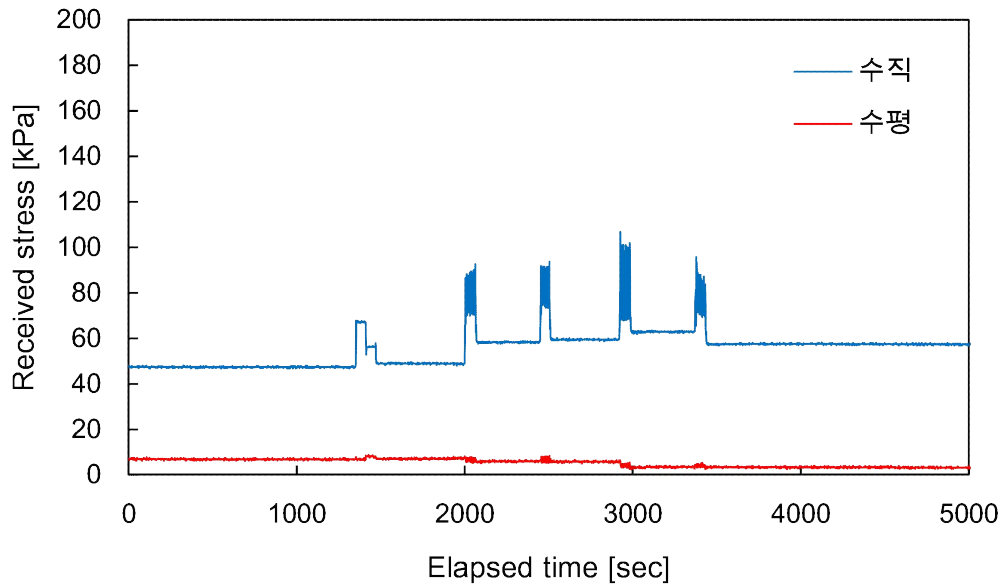
10톤 롤러 횡방향 제자리 가진



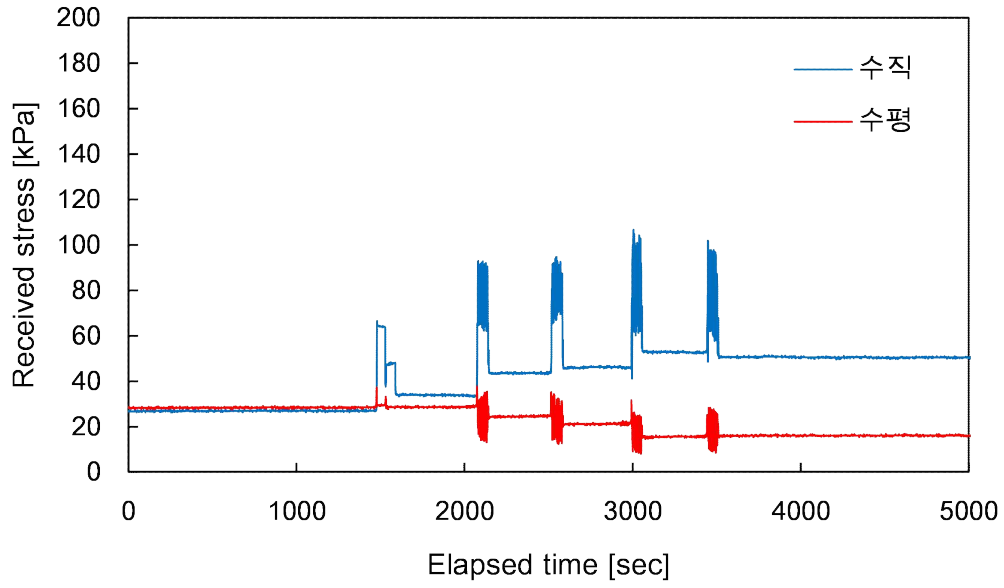
Test 1 [수직 토압: 강성관, D600, 토피고 0.3m, 모래기초, 90도]



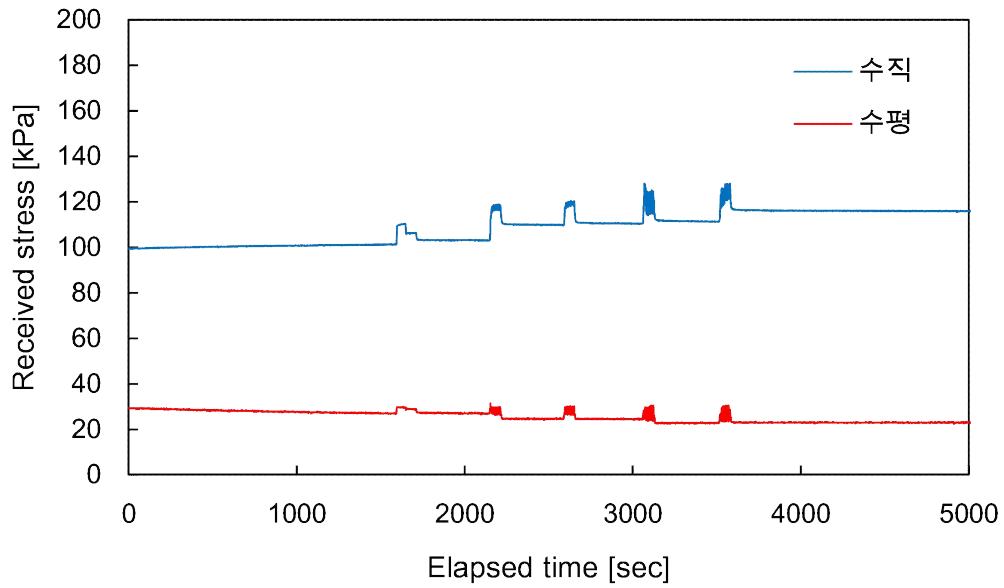
Test 1 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



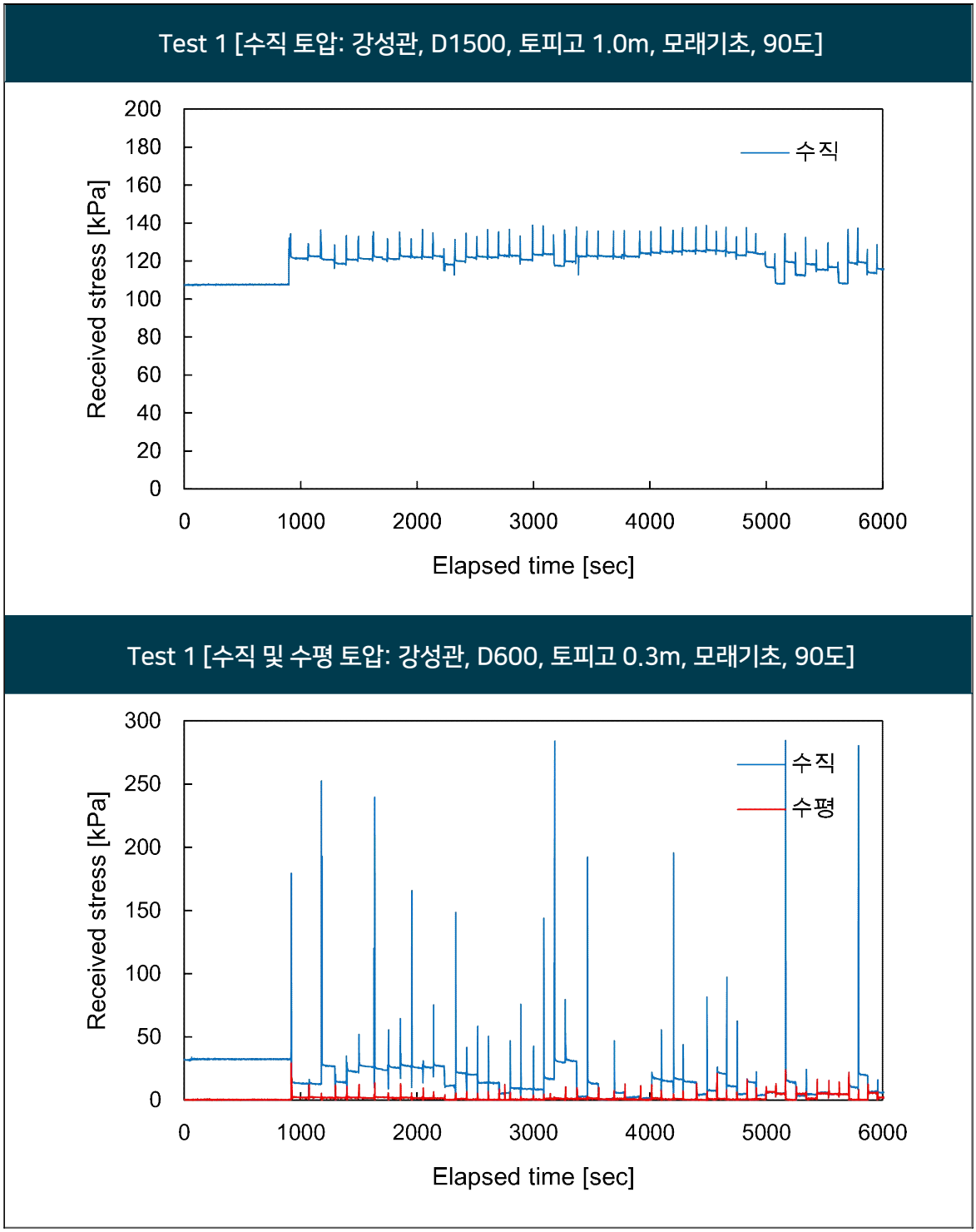
Test 1 [수직 토압: 강성관, D600, 토피고 0.6m, 모래기초, 90도]



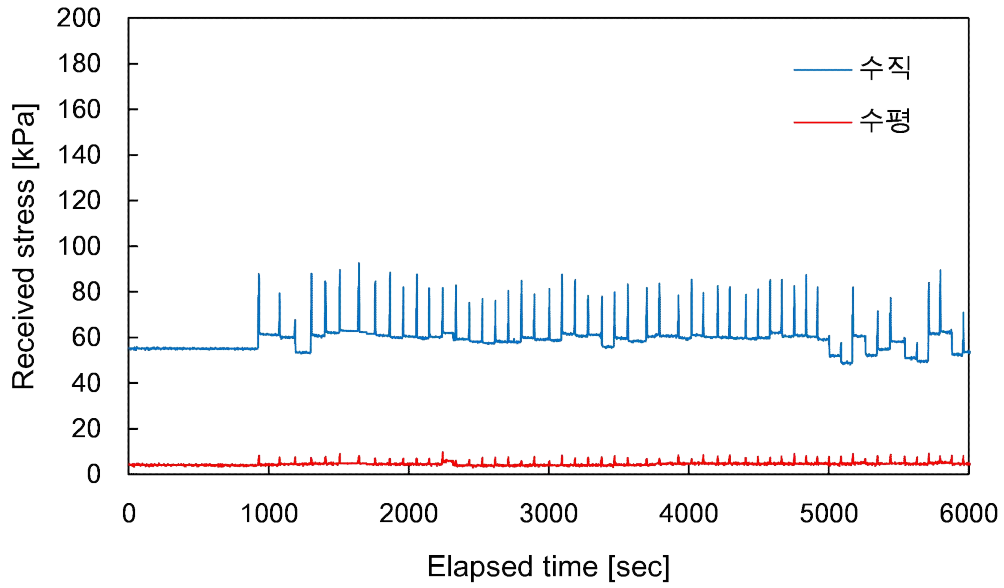
Test 1 [수직 및 수평 토압: PE, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



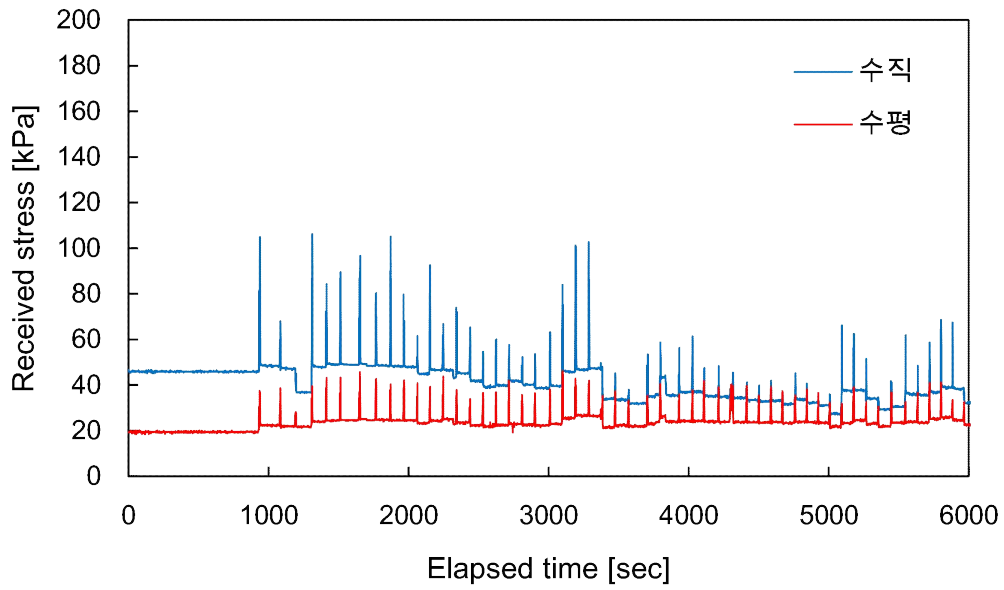
25톤 덤프트럭 횡방향 주행

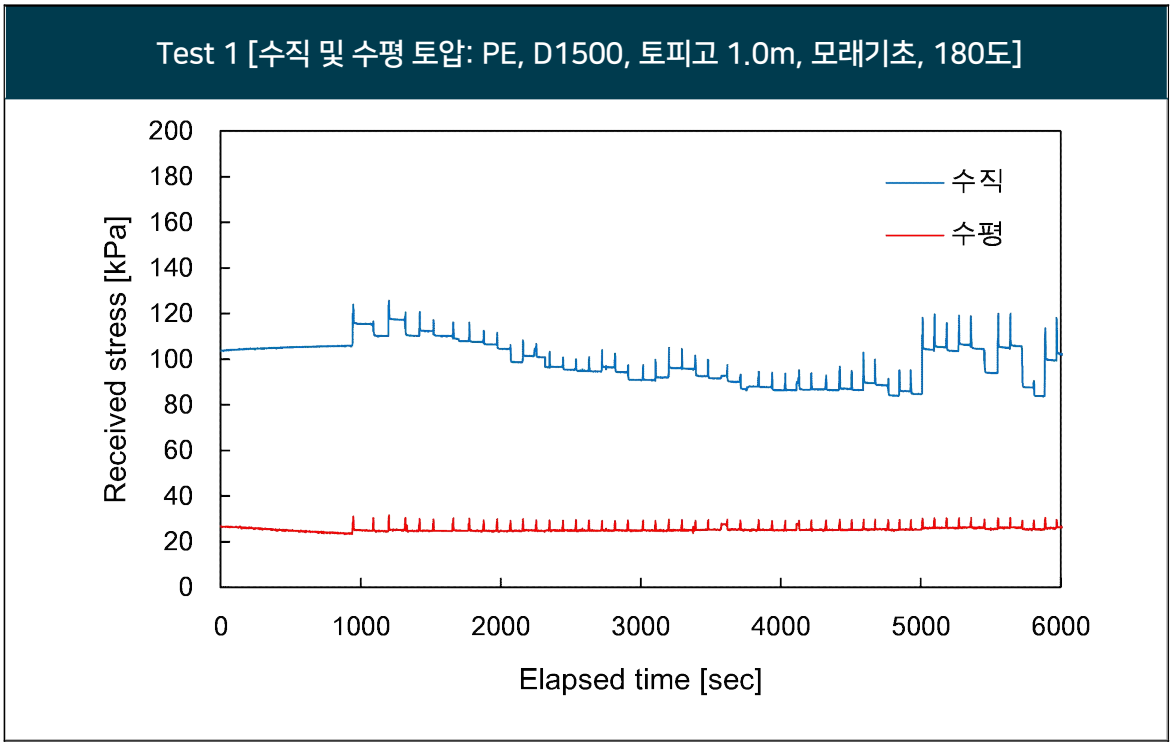


Test 1 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

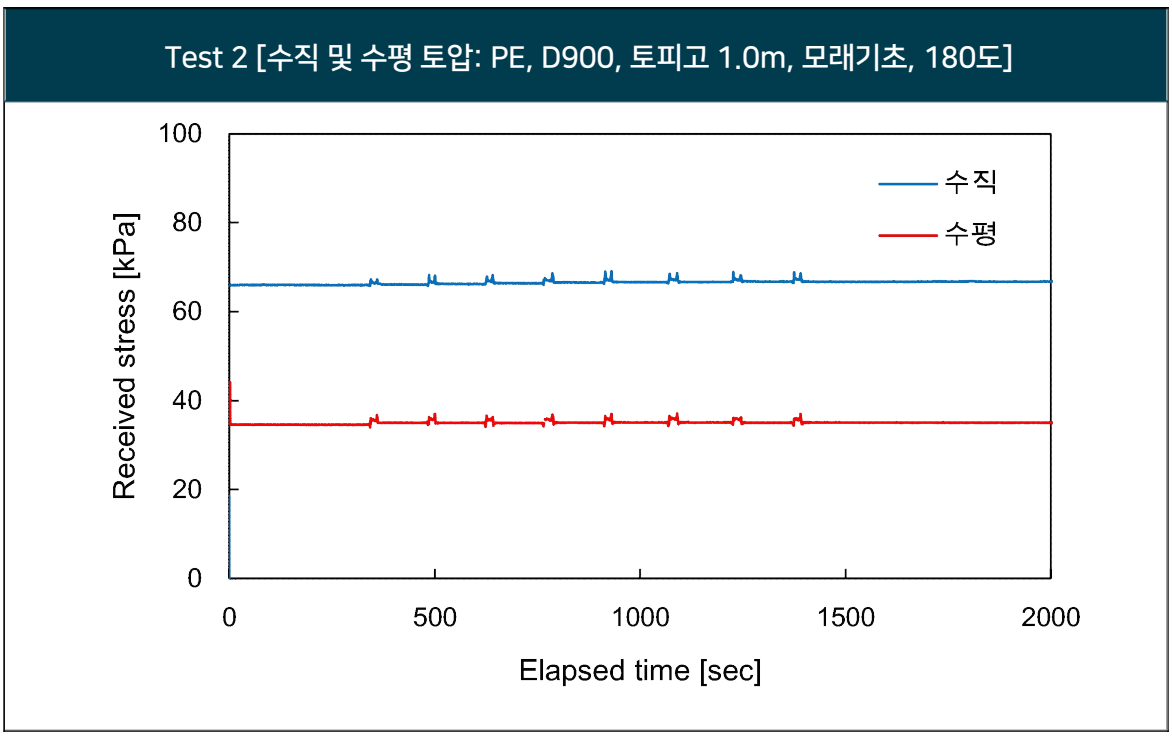


Test 1 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 0.6m, 모래기초, 90도]

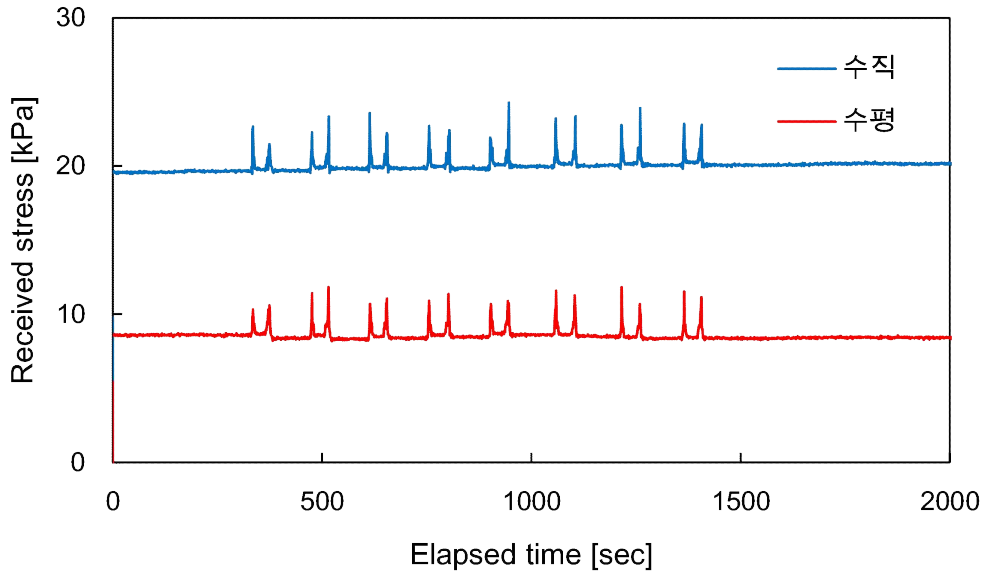



Test 1 [수직 및 수평 토압: PE, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Received stress [kPa]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
Elapsed time [sec]
수직
수평

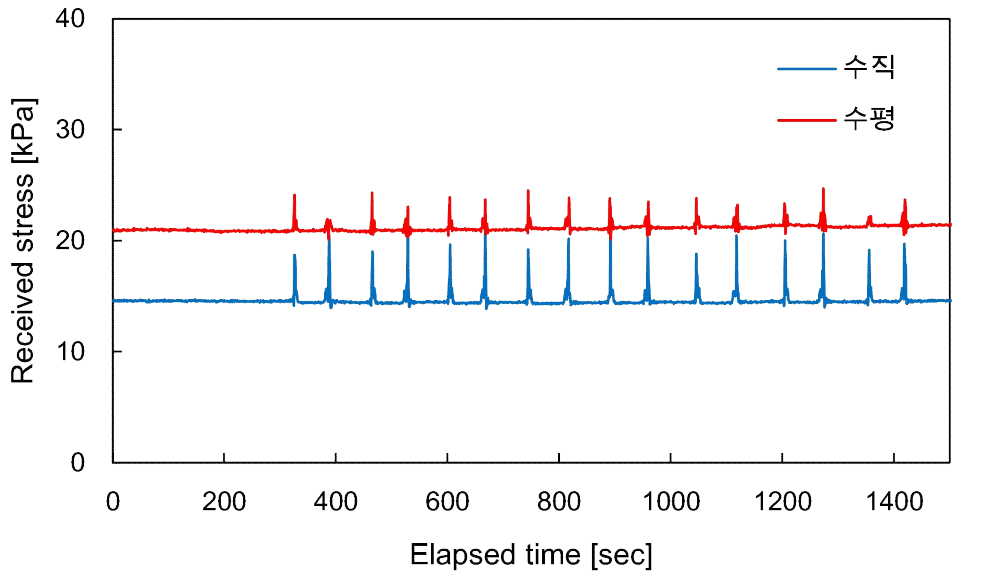
10톤 롤러 횡방향 주행


Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Received stress [kPa]
100
80
60
40
20
0
0
500
1000
1500
2000
Elapsed time [sec]
수직
수평

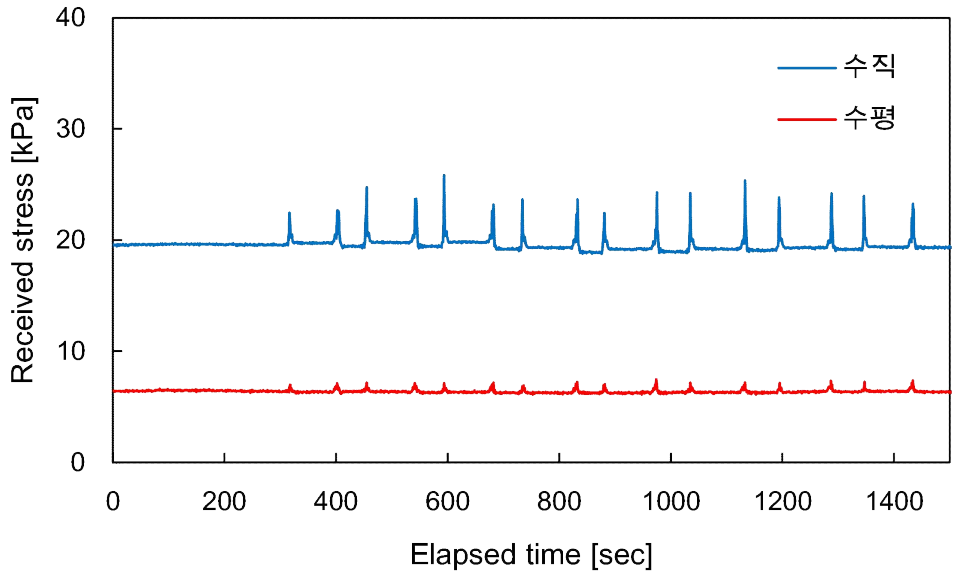
Test 2 [수직 및 수평 토압: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



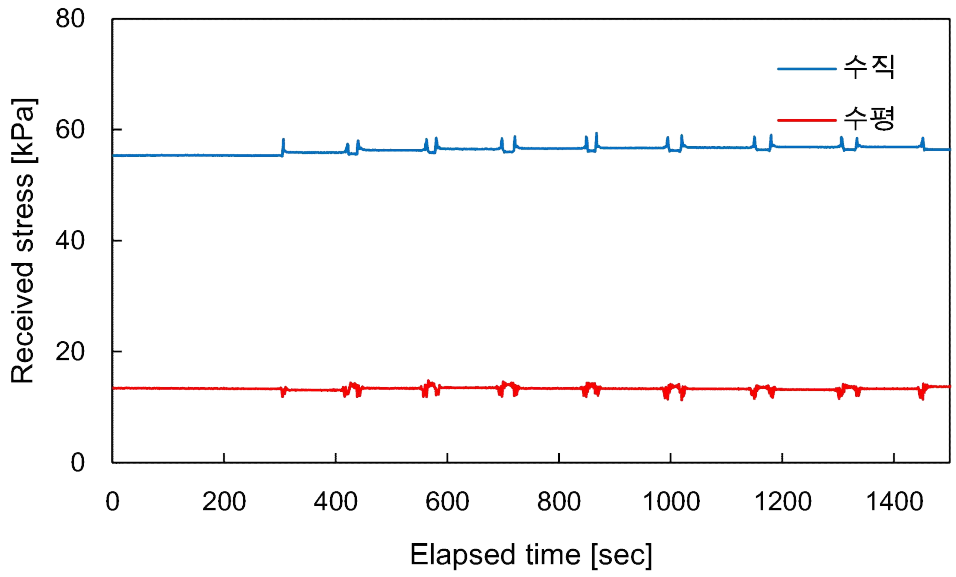
Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]

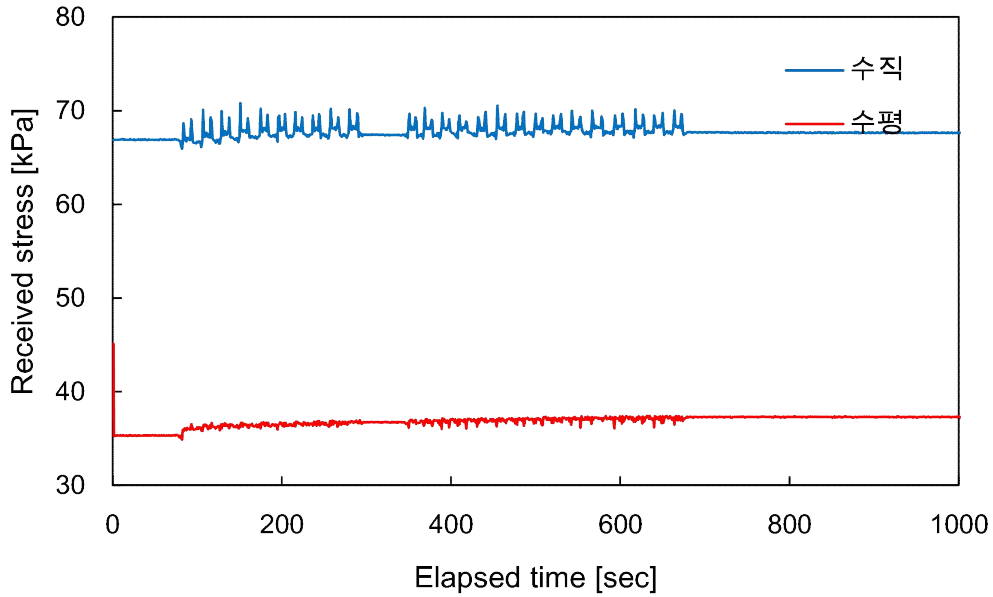


Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

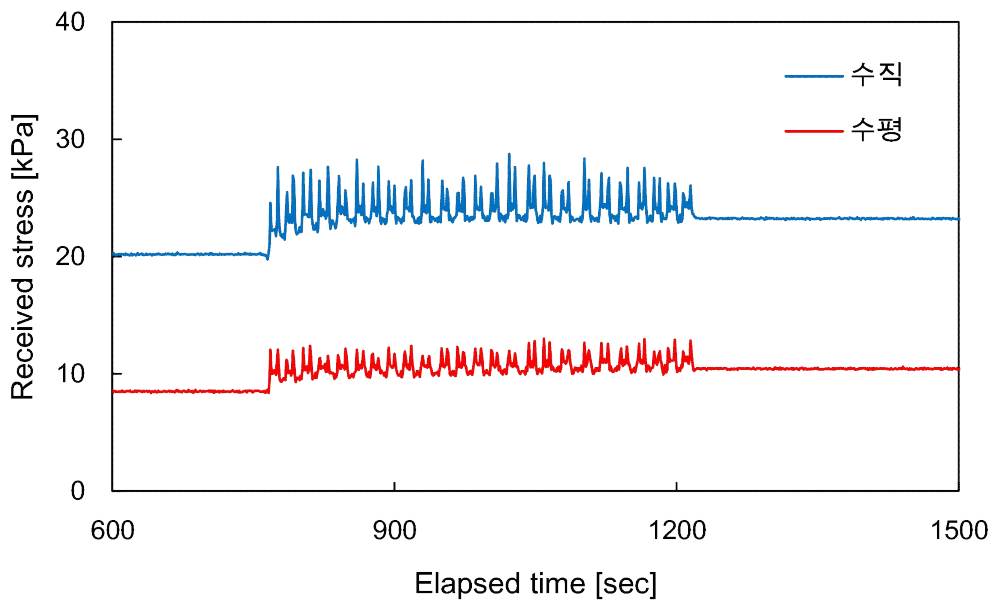


10톤 롤러 종방향 주행

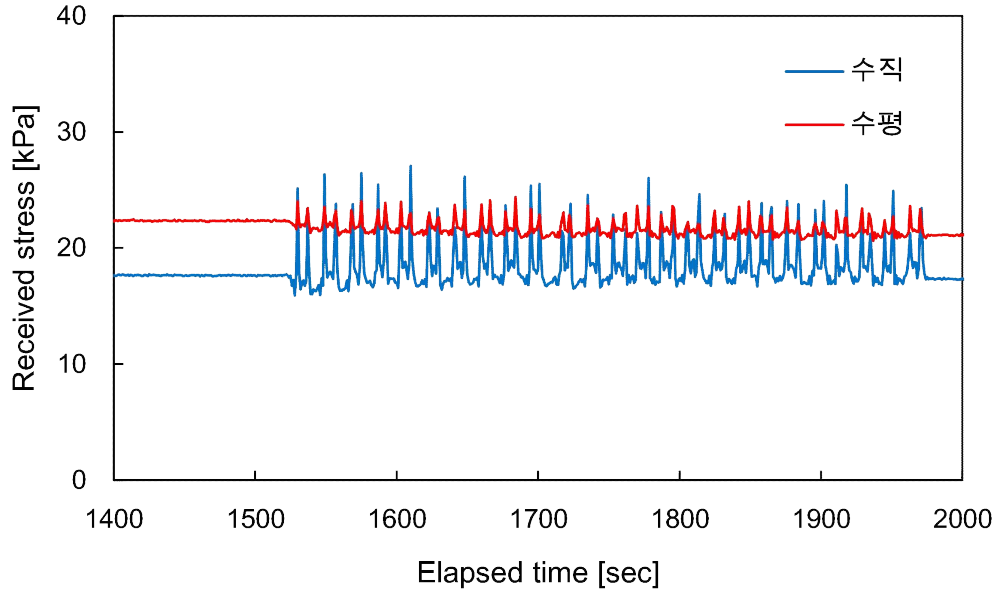
Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



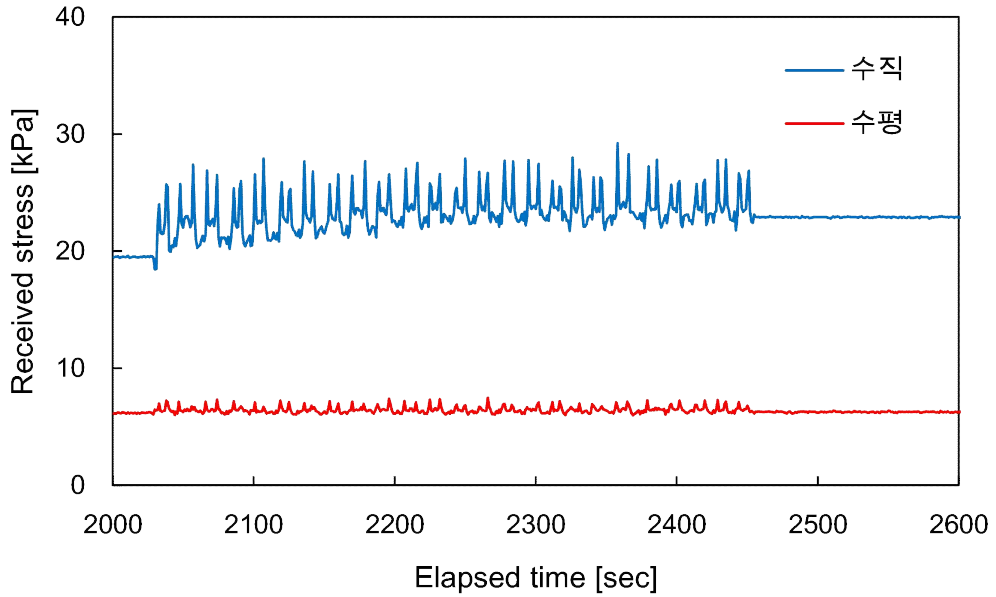
Test 2 [수직 및 수평 토압: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

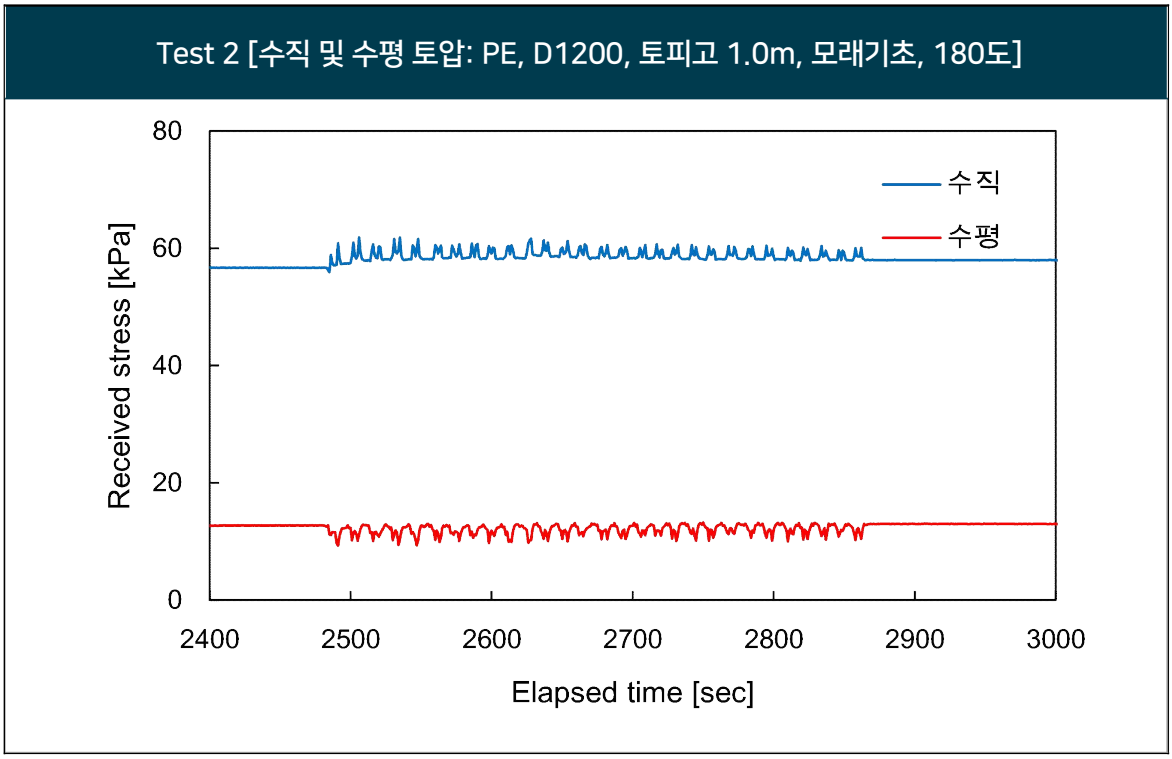


Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

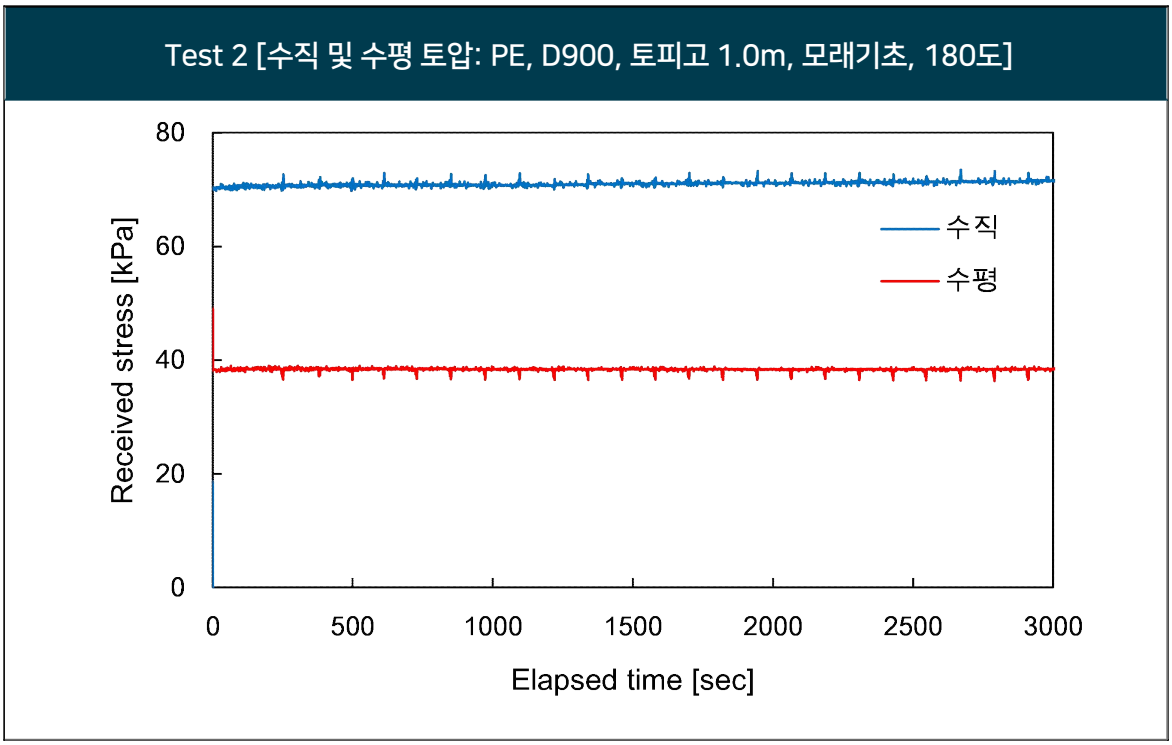


Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]

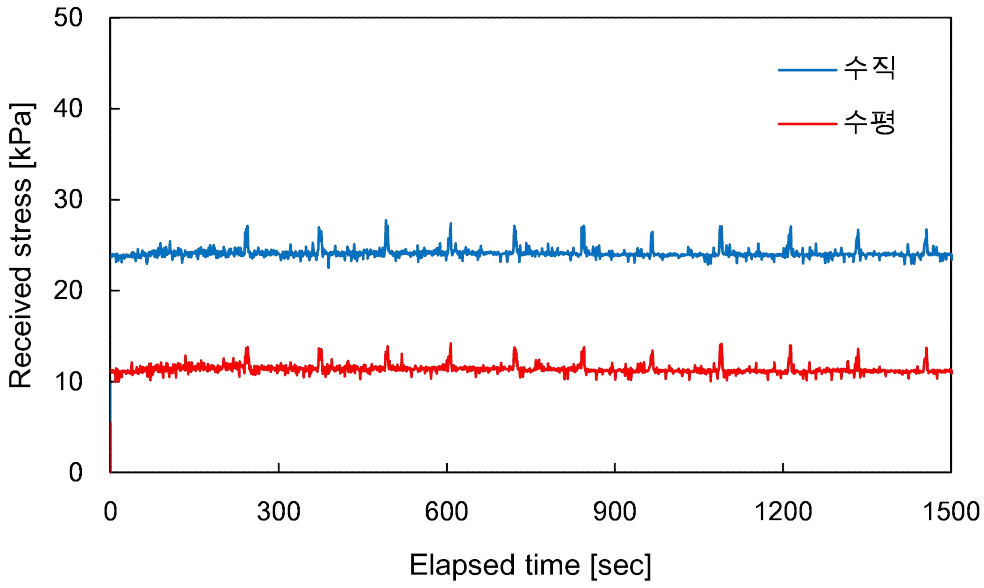



Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Received stress [kPa]
80
60
40
20
0
2400
2500
2600
2700
2800
2900
3000
Elapsed time [sec]
수직
수평

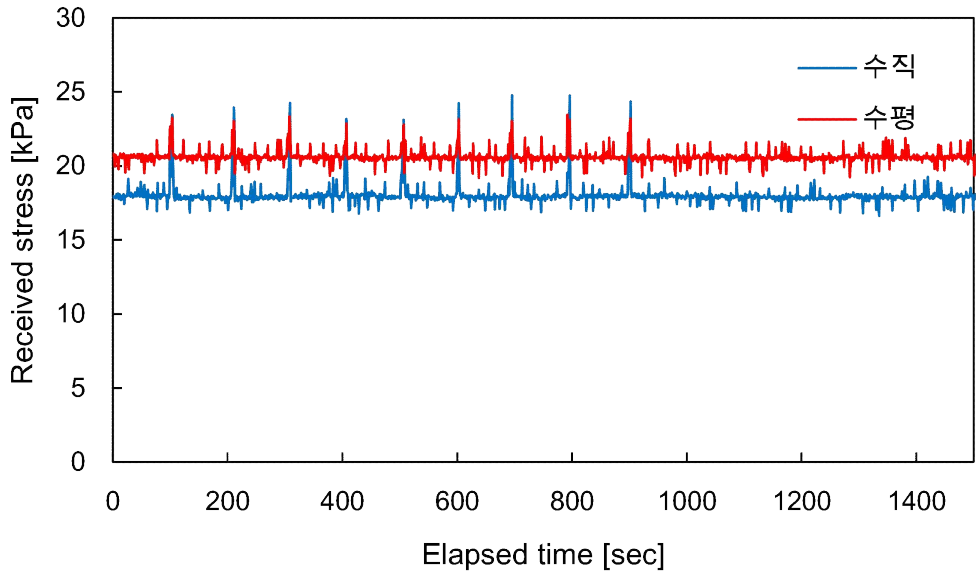
25톤 덤프 횡방향 주행


Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Received stress [kPa]
80
60
40
20
0
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Elapsed time [sec]
수직
수평

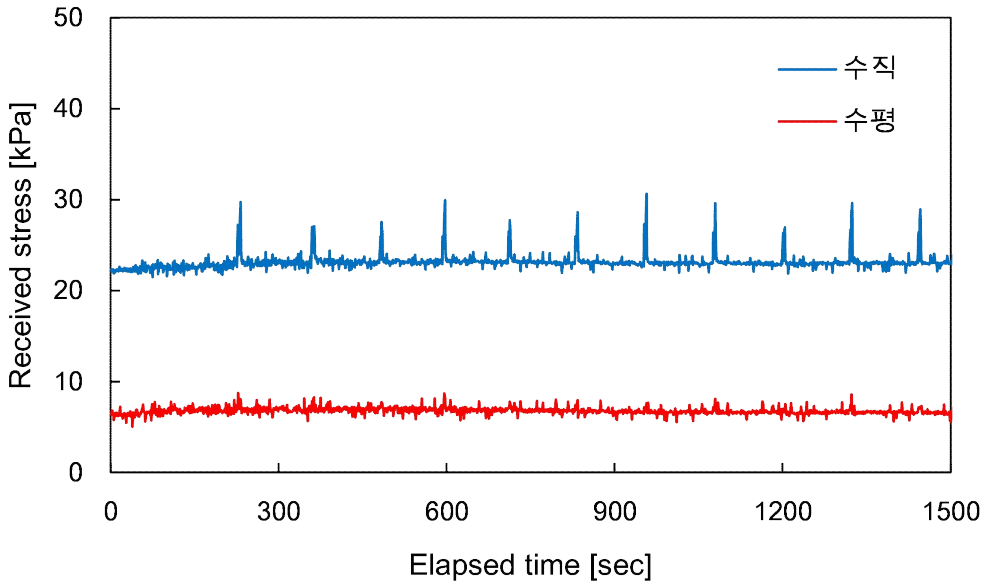
Test 2 [수직 및 수평 토압: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



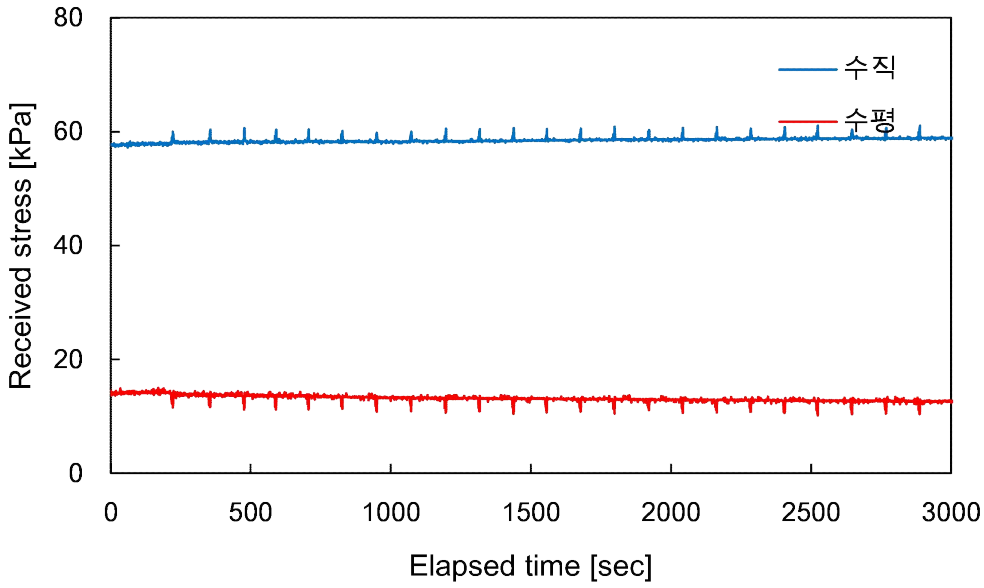
Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



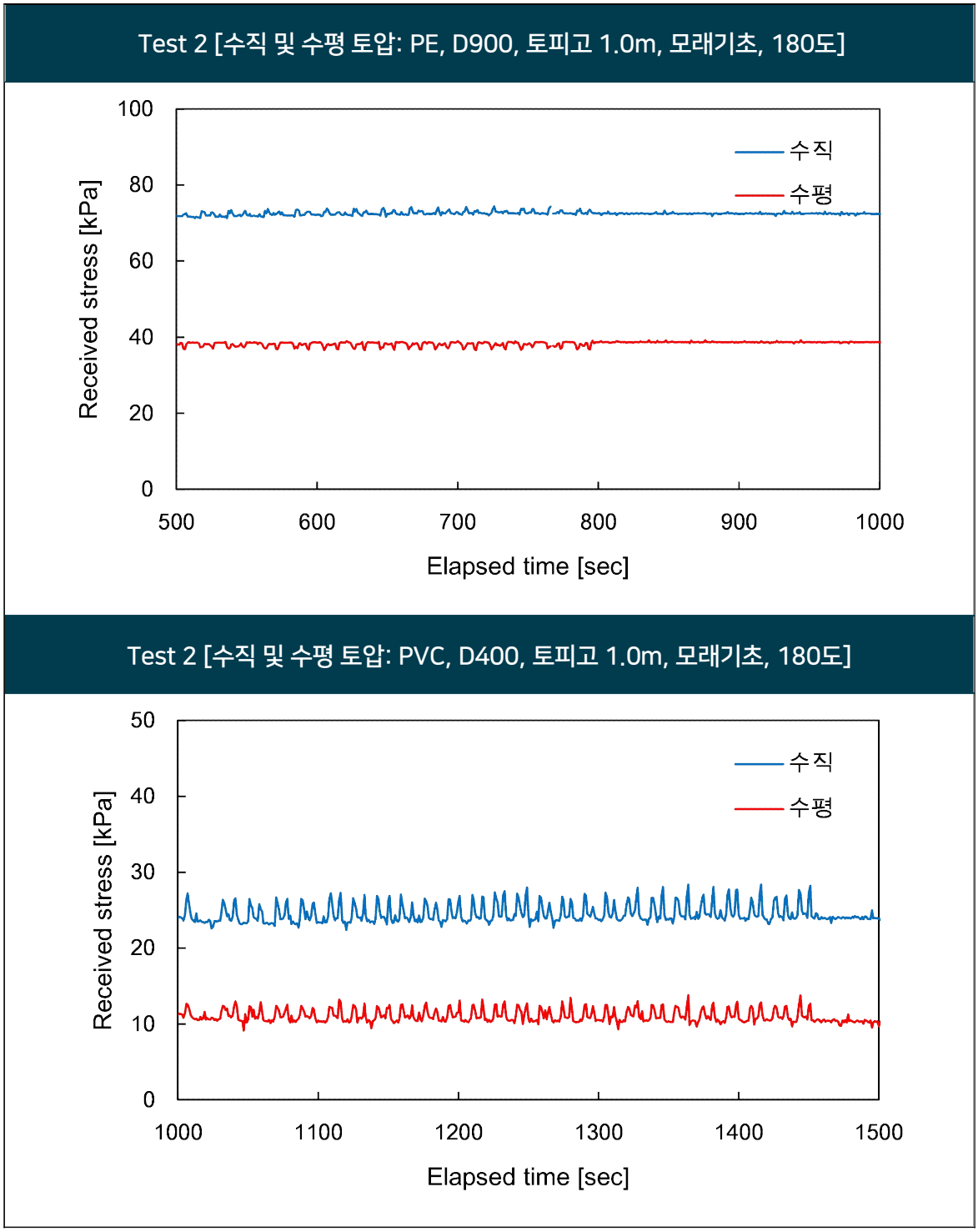
Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]



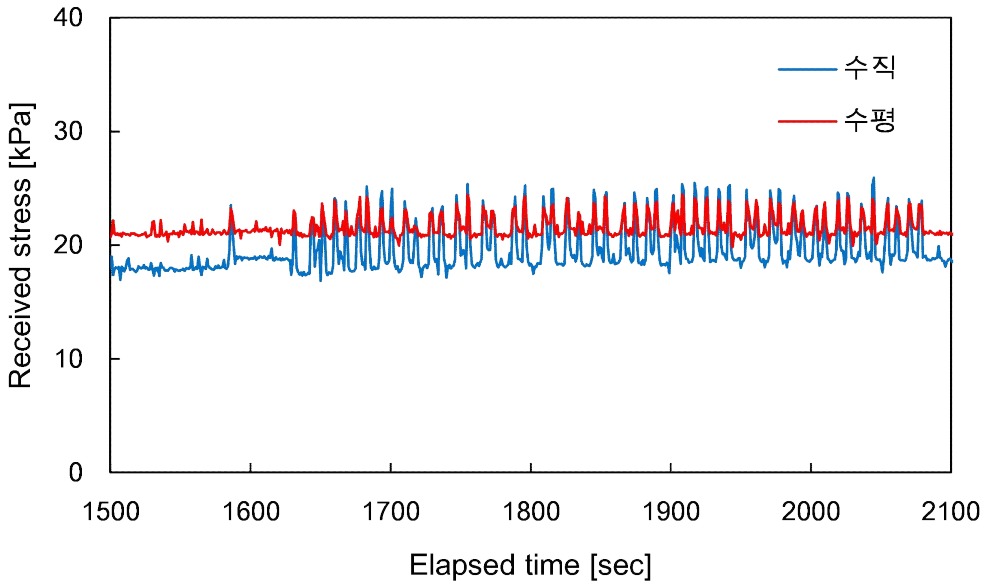
Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



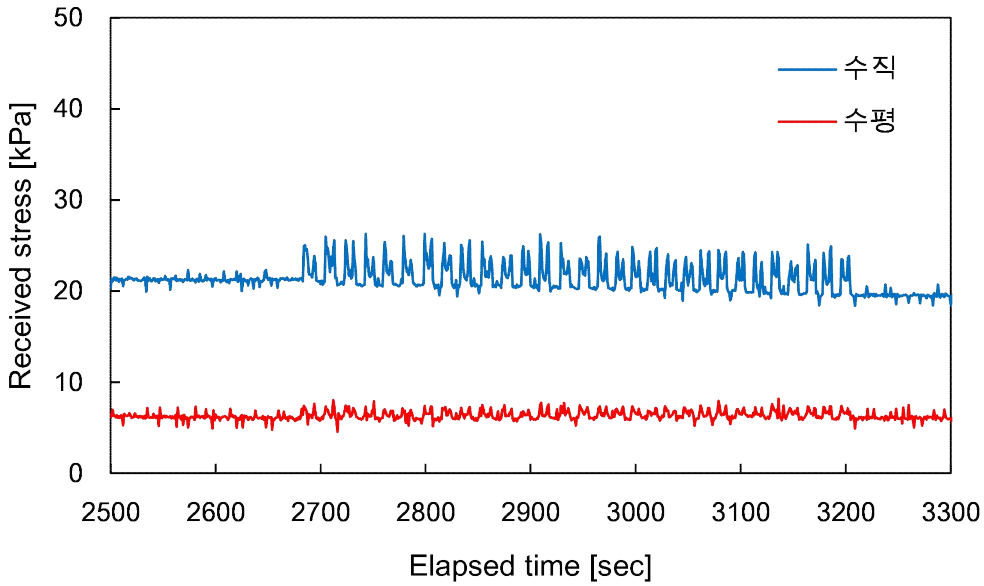
25톤 덤프 종방향 주행

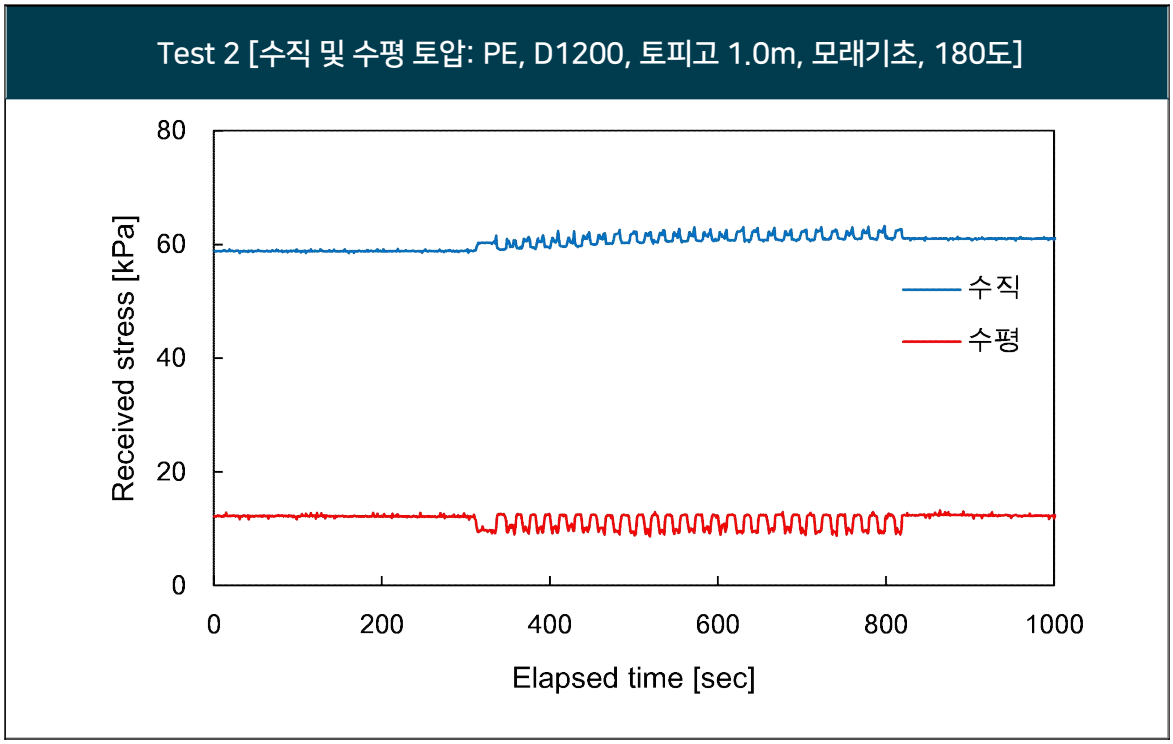

Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Received stress [kPa]
100
80
60
40
20
0
500
600
700
800
900
1000
Elapsed time [sec]
수직
수평
Test 2 [수직 및 수평 토압: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Received stress [kPa]
50
40
30
20
10
0
1000
1100
1200
1300
1400
1500
Elapsed time [sec]
수직
수평

Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

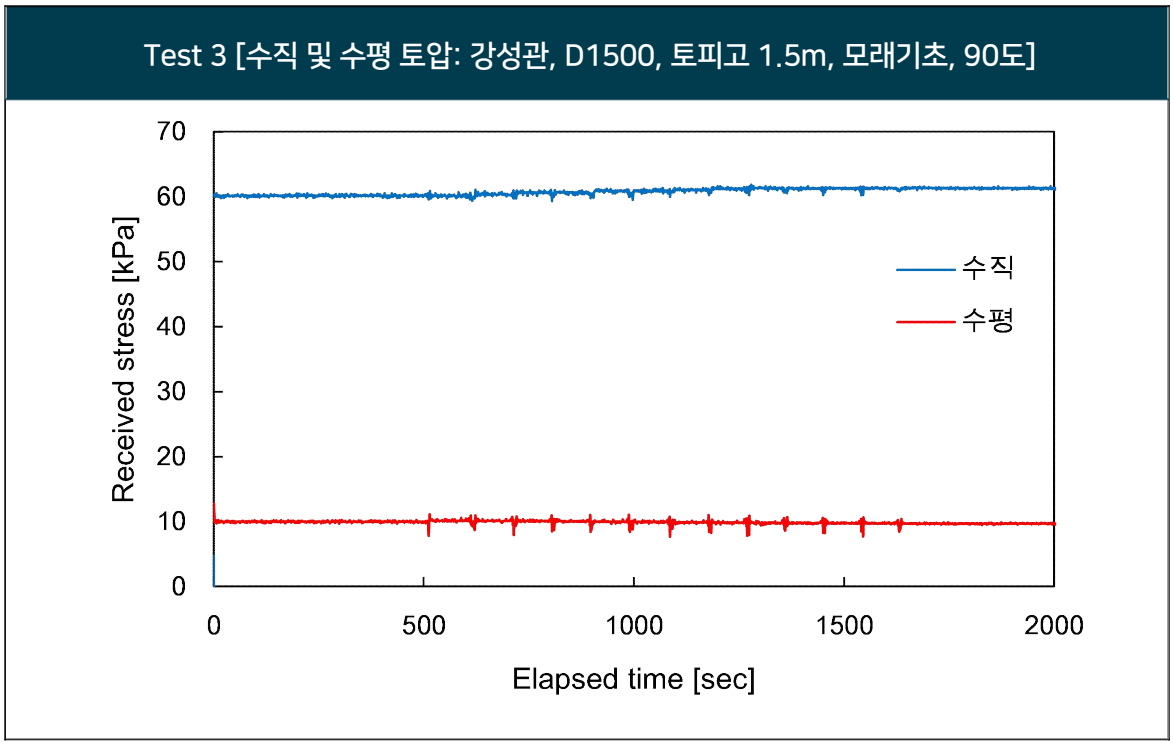


Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]

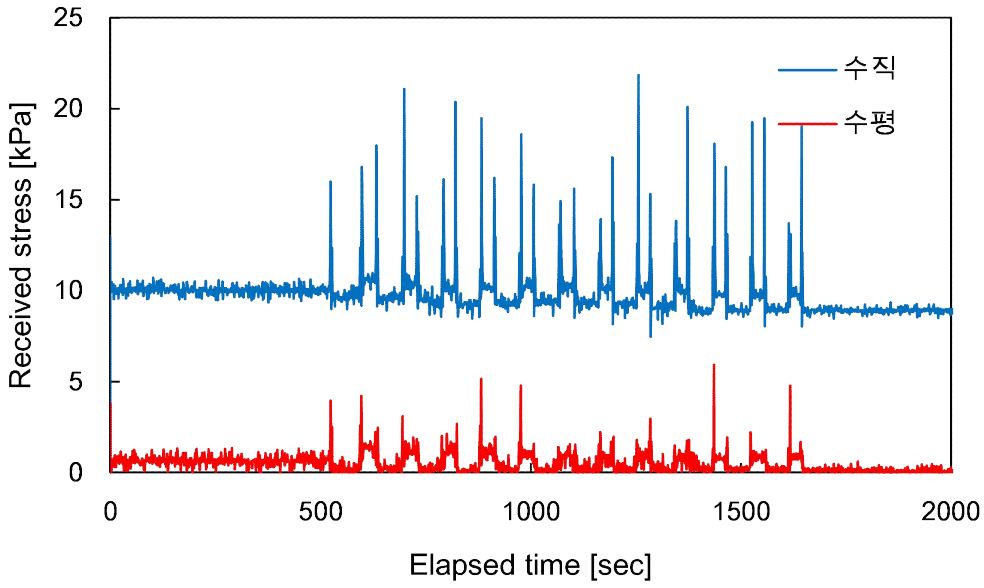



Test 2 [수직 및 수평 토압: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Received stress [kPa]
0
20
40
60
80
0
200
400
600
800
1000
Elapsed time [sec]
수직
수평

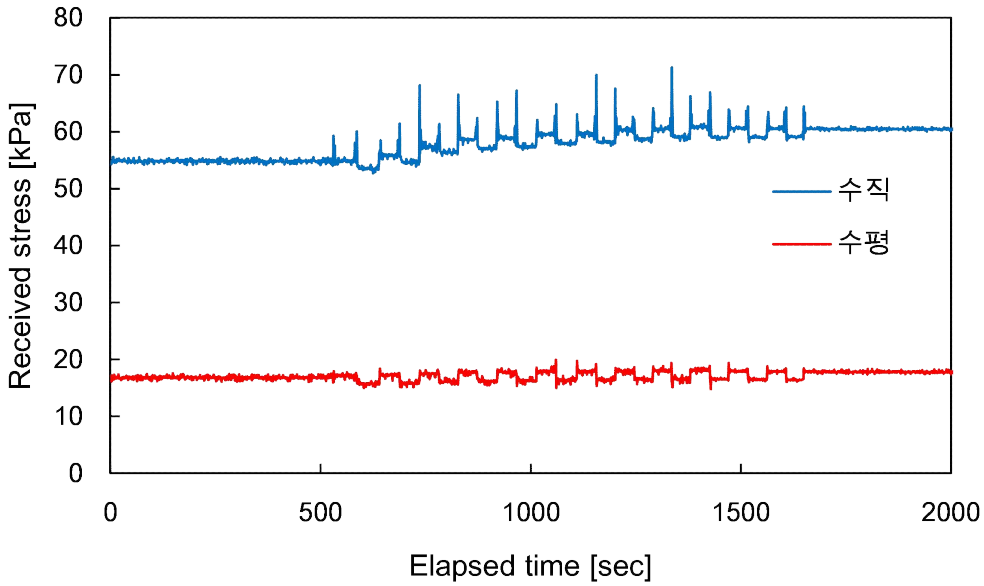
10톤 롤러 횡방향 주행


Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
0
10
20
30
40
50
60
70
0
500
1000
1500
2000
Elapsed time [sec]
수직
수평

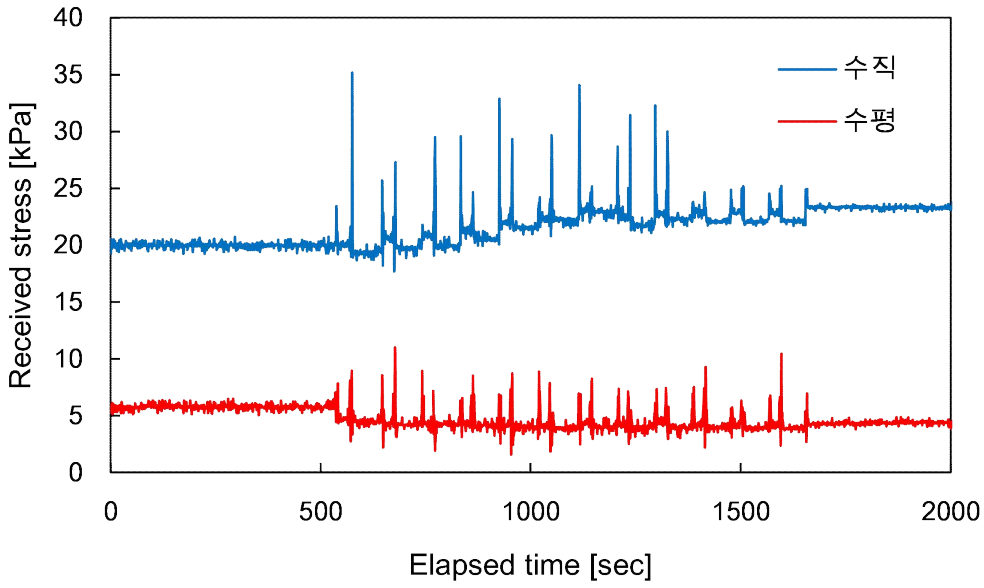
Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



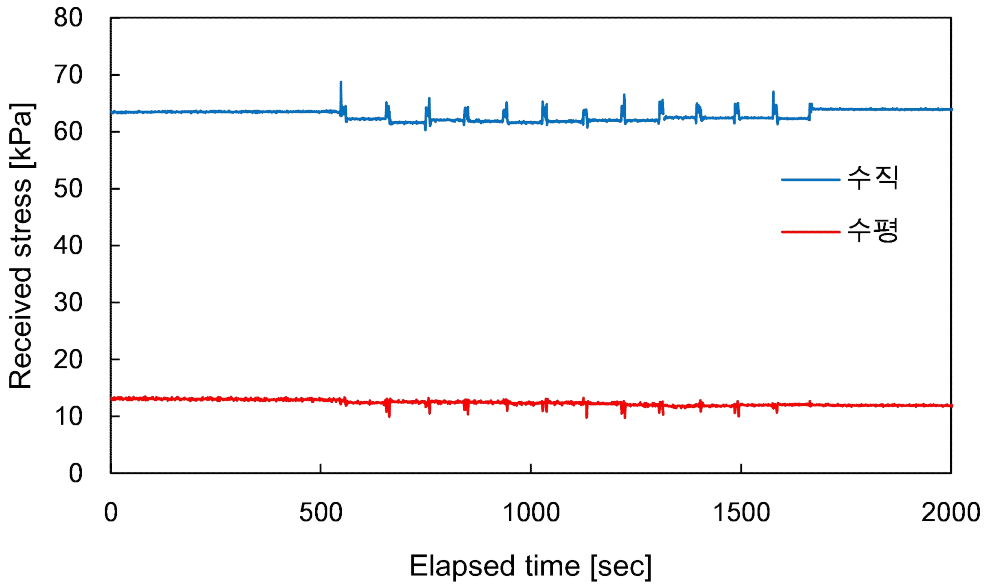
Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

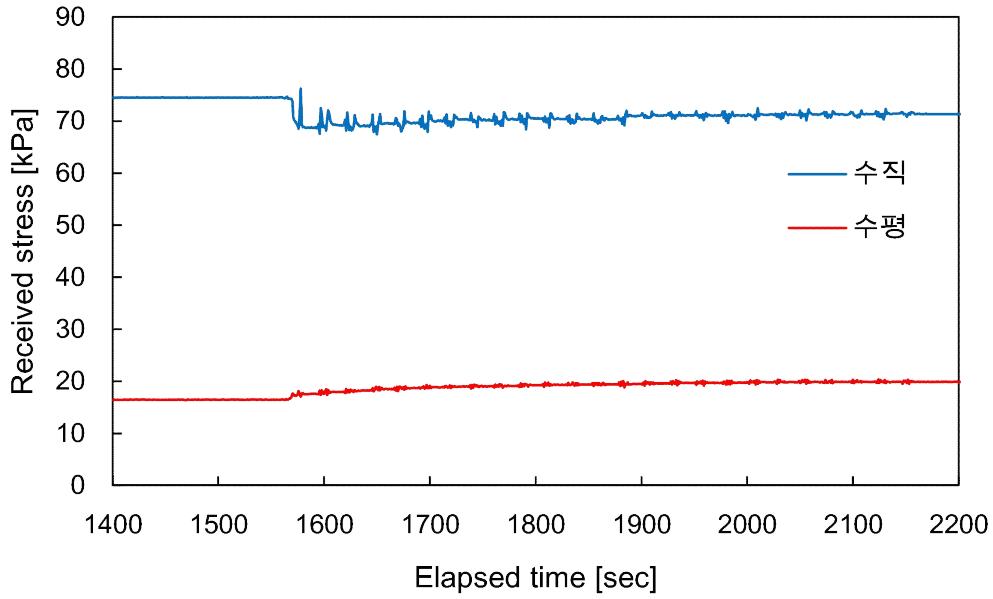


Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

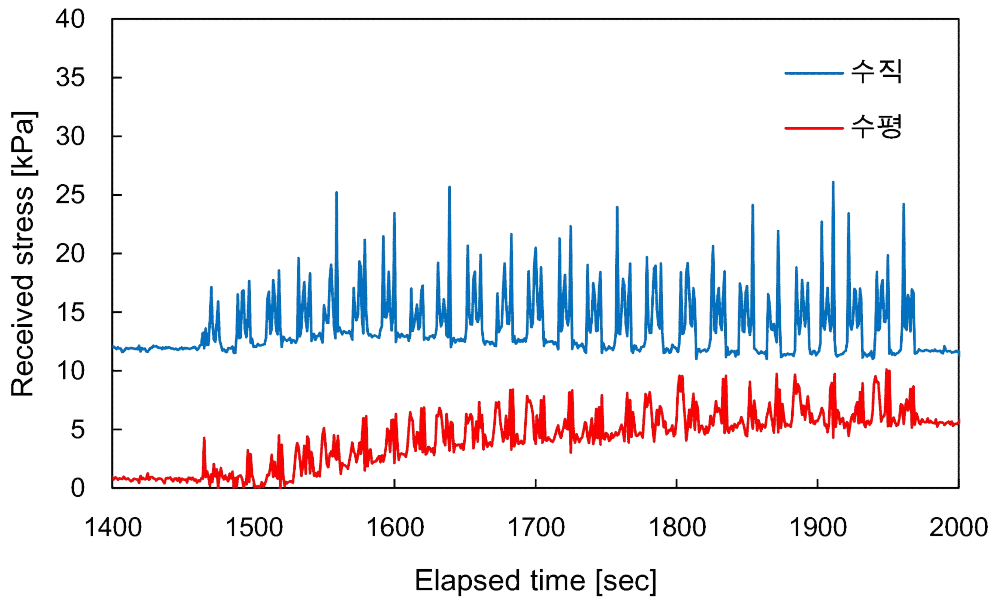


10톤 롤러 종방향 주행

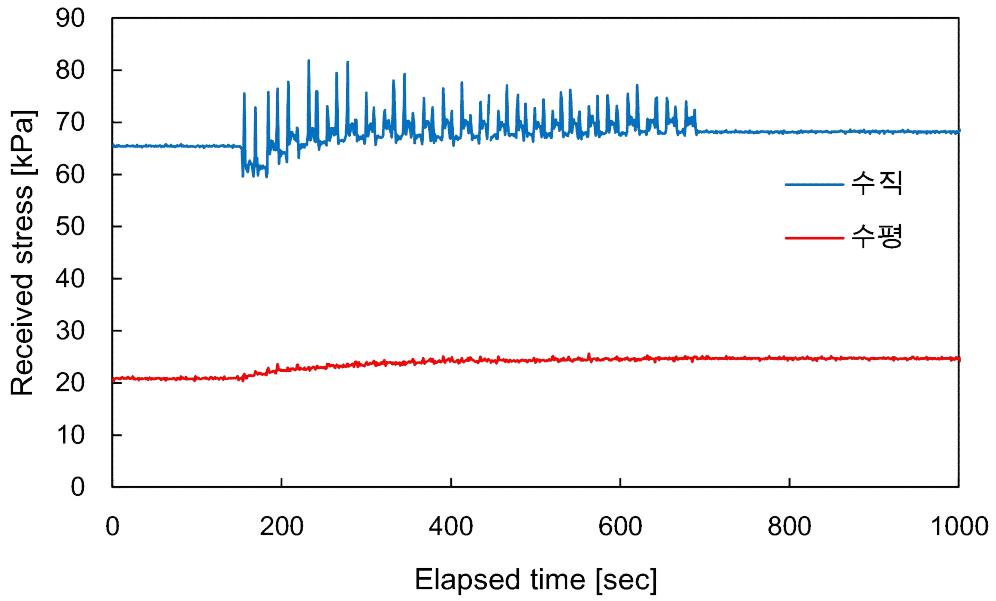
Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]



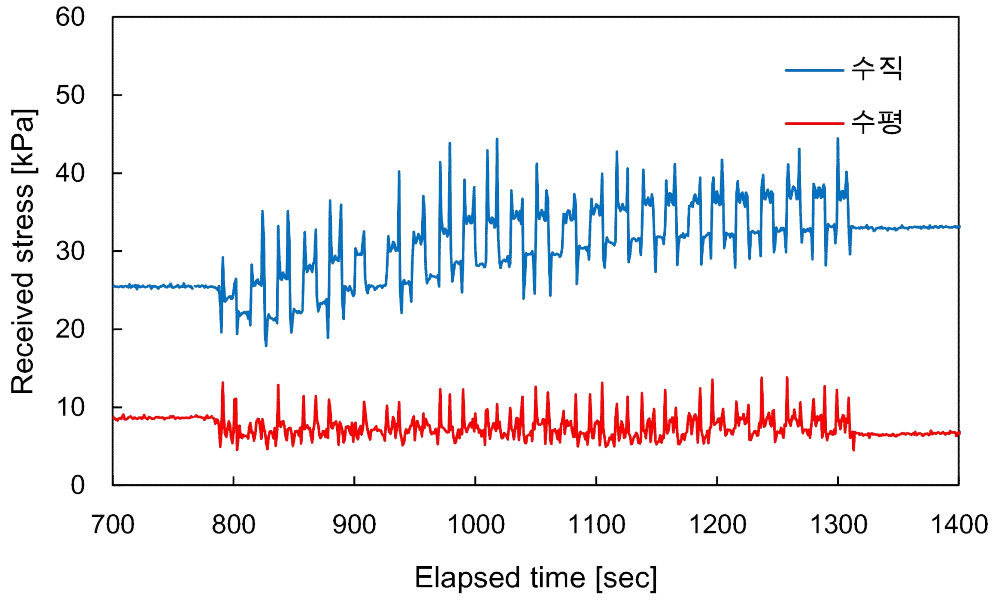
Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

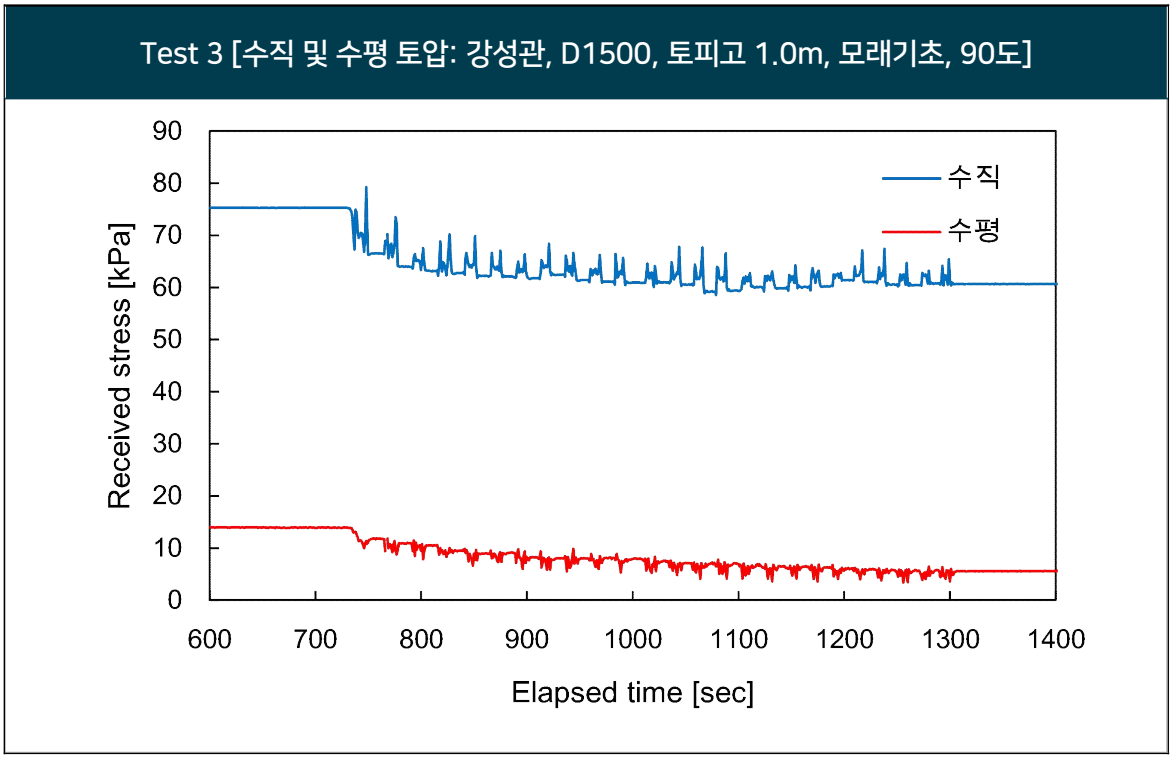


Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

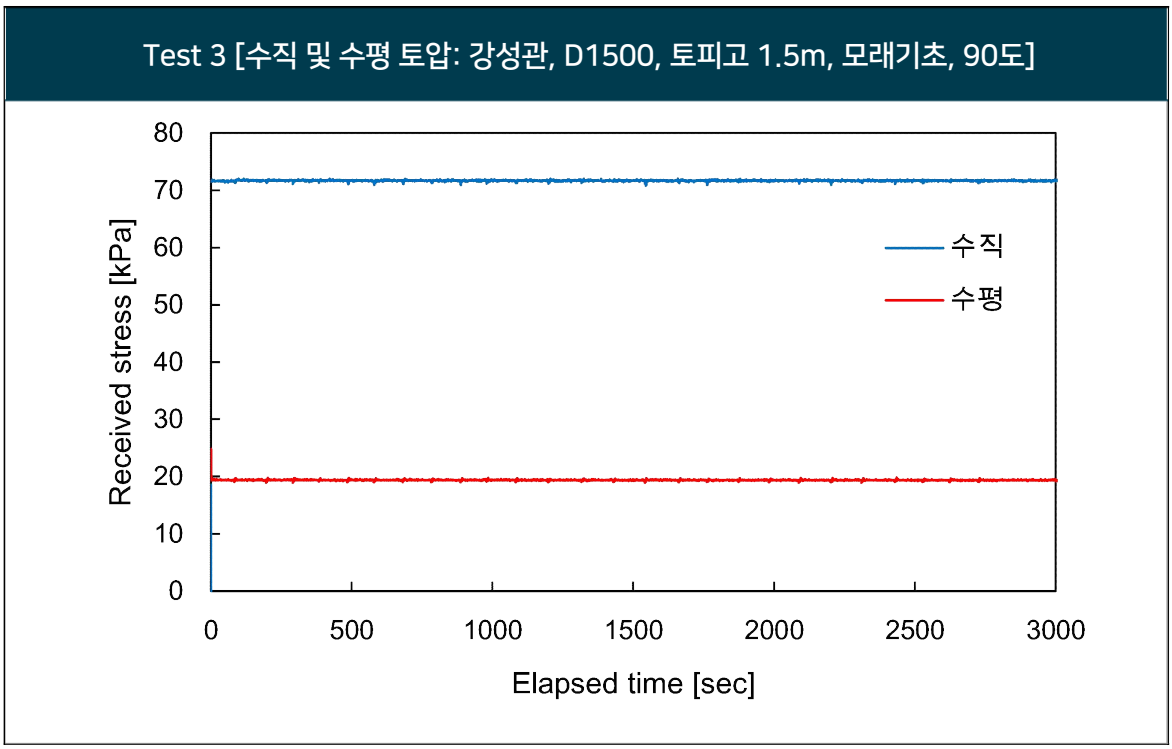


Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

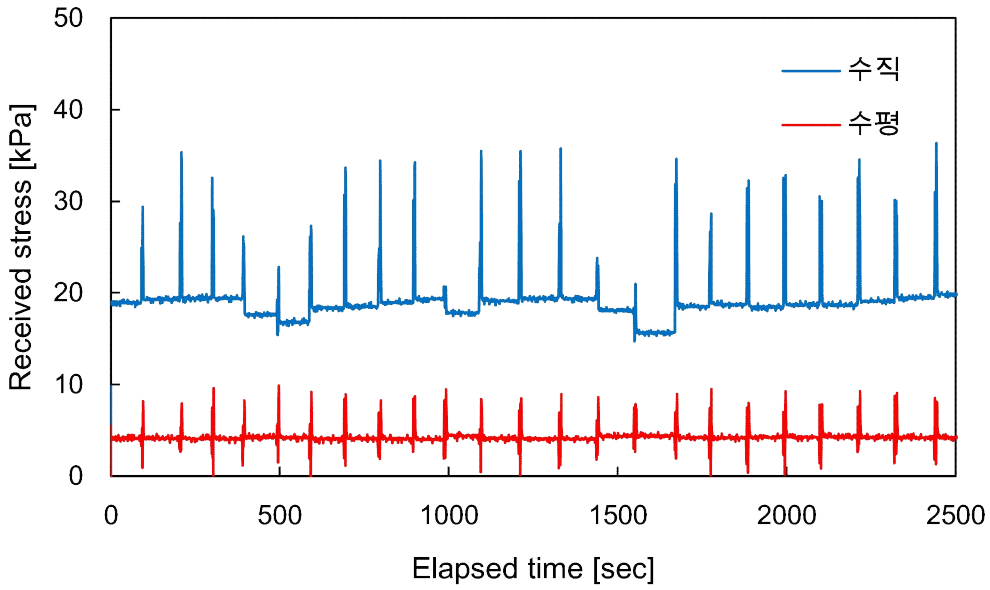



Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]
수직
수평
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400

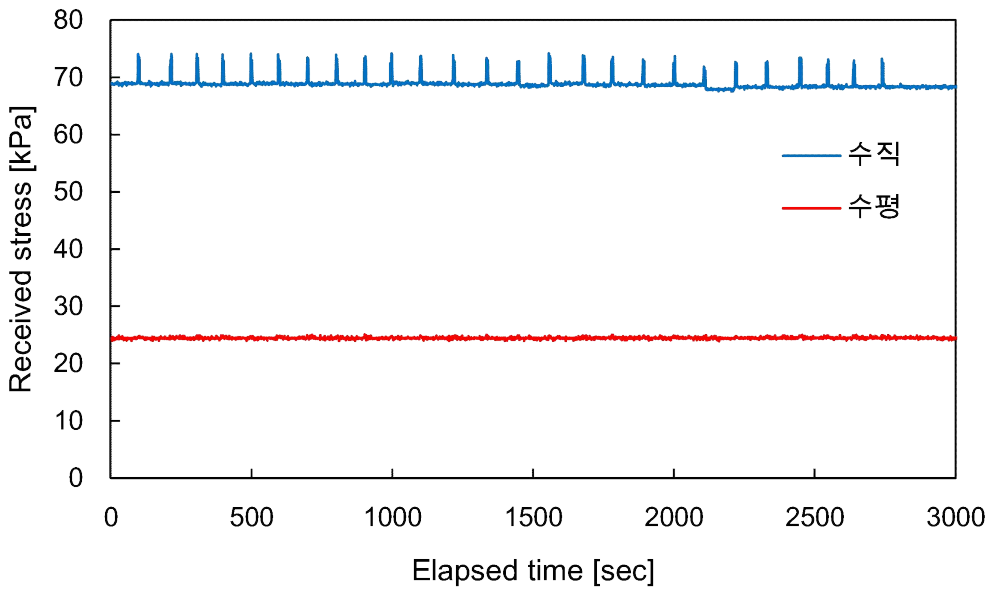
25톤 덤프 횡방향 주행


Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]
수직
수평
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
500
1000
1500
2000
2500
3000

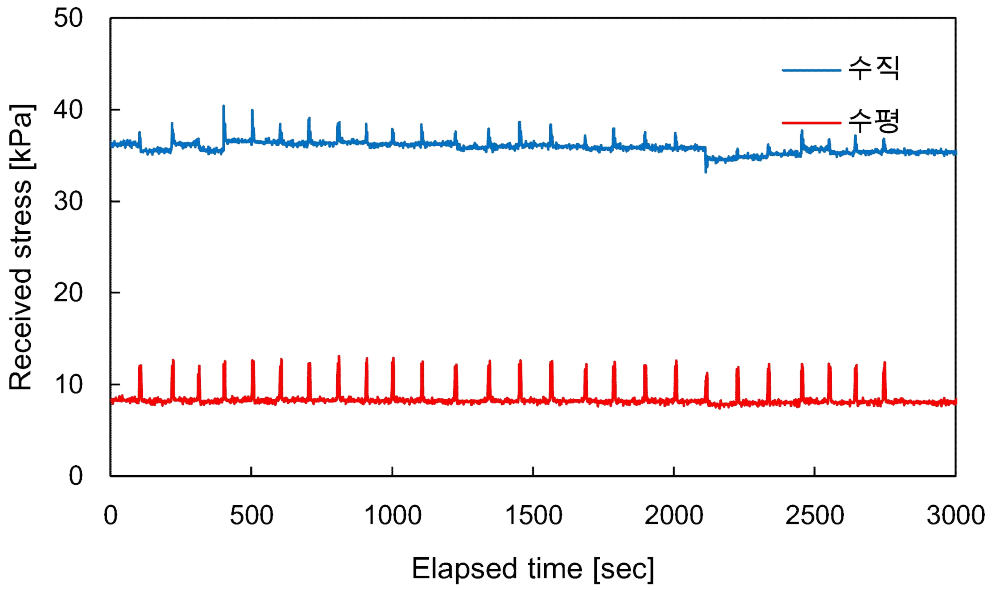
Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



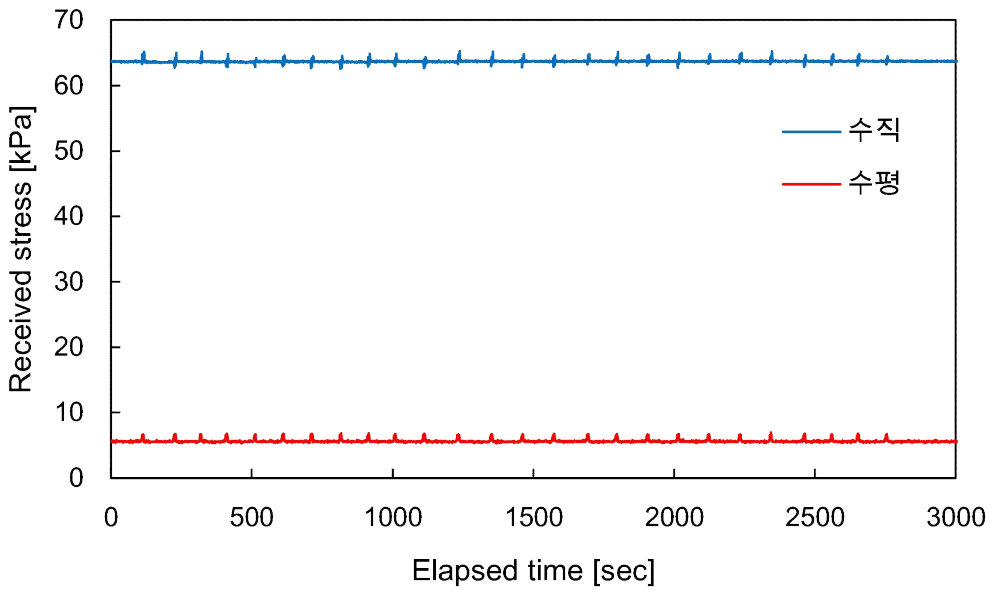
Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



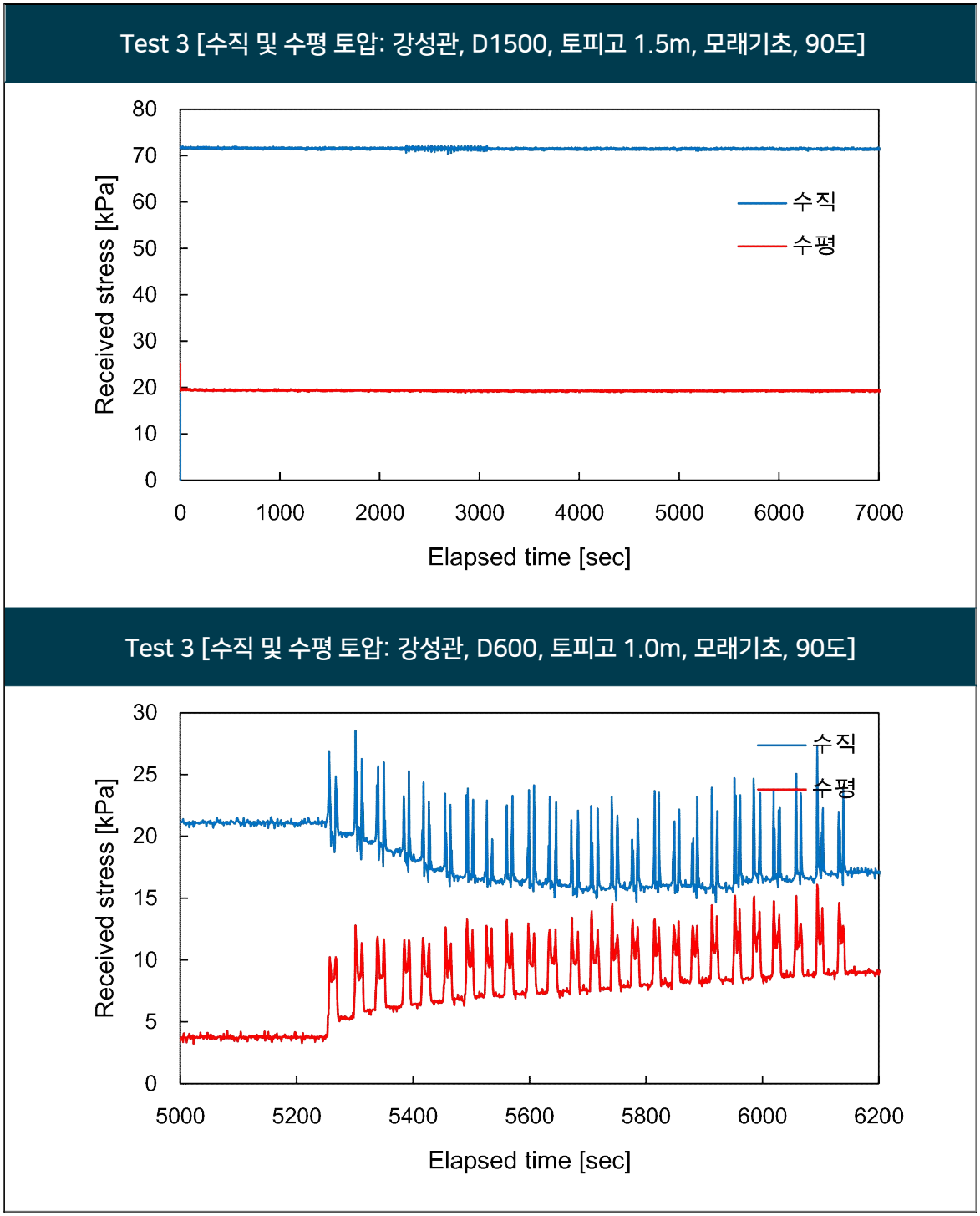
Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



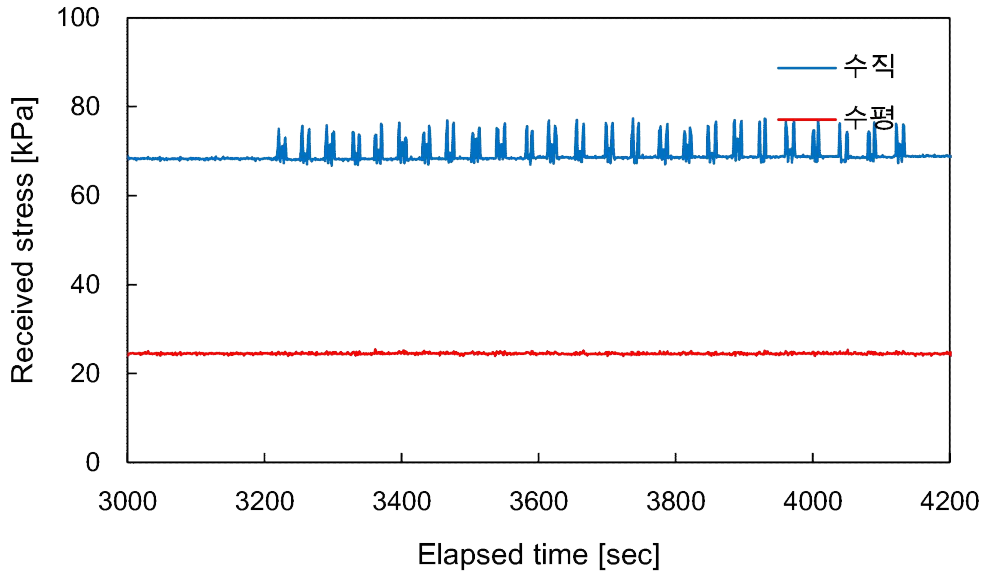
Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



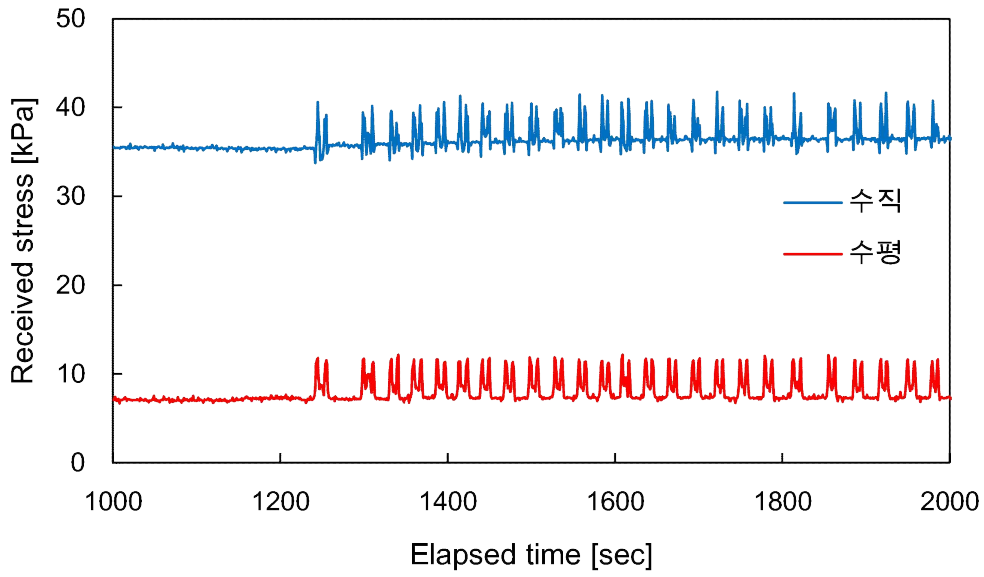
25톤 덤프 종방향 주행

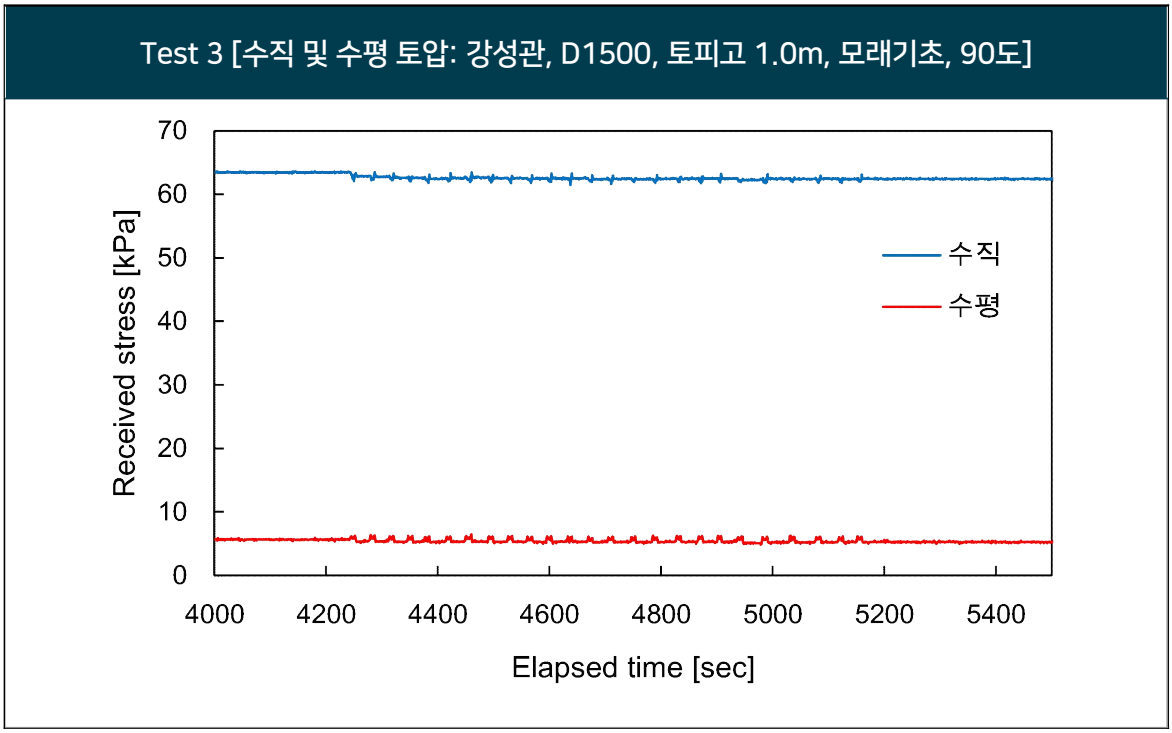

Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]
수직
수평
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]
수직
수평
0
5
10
15
20
25
30
5000
5200
5400
5600
5800
6000
6200

Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

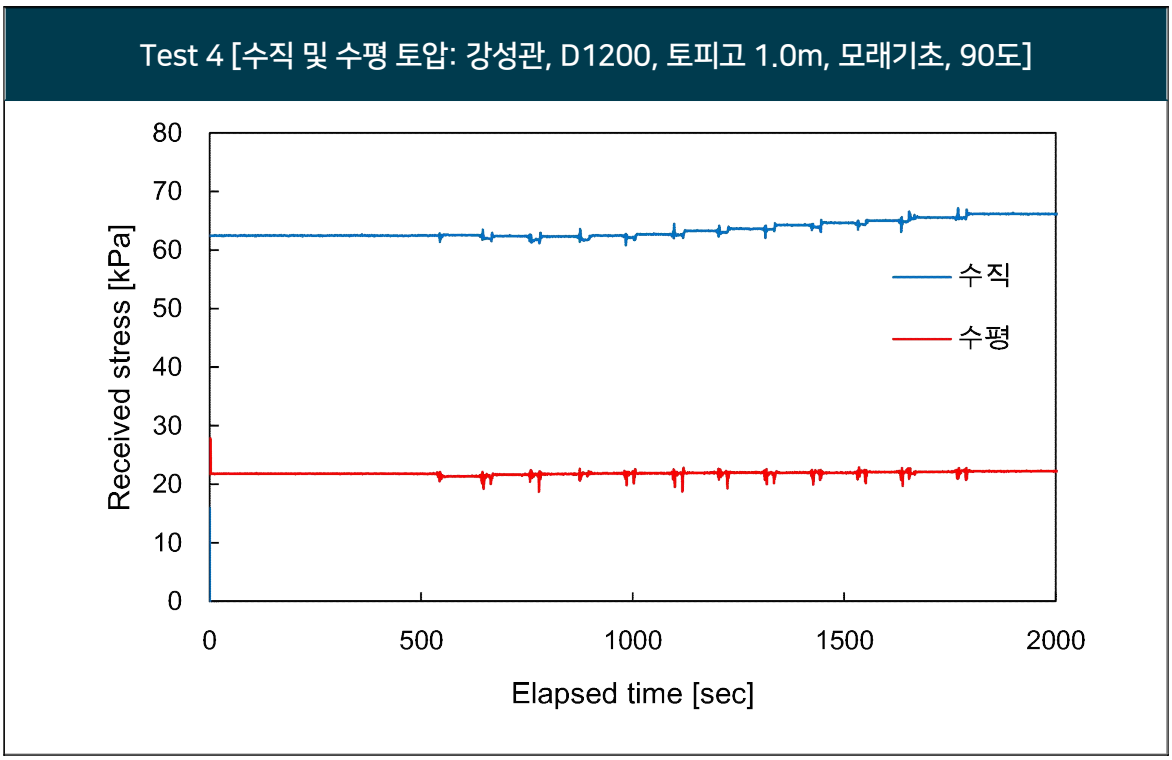


Test 3 [수직 및 수평 토압: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

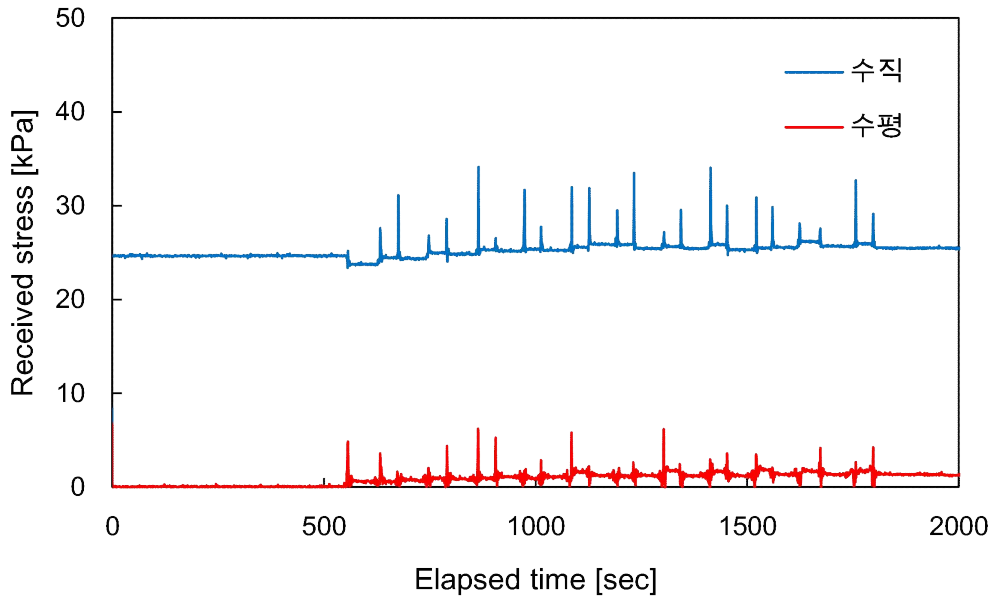



Test 3 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
70
60
50
40
30
20
10
0
4000
4200
4400
4600
4800
5000
5200
5400
Elapsed time [sec]
수직
수평

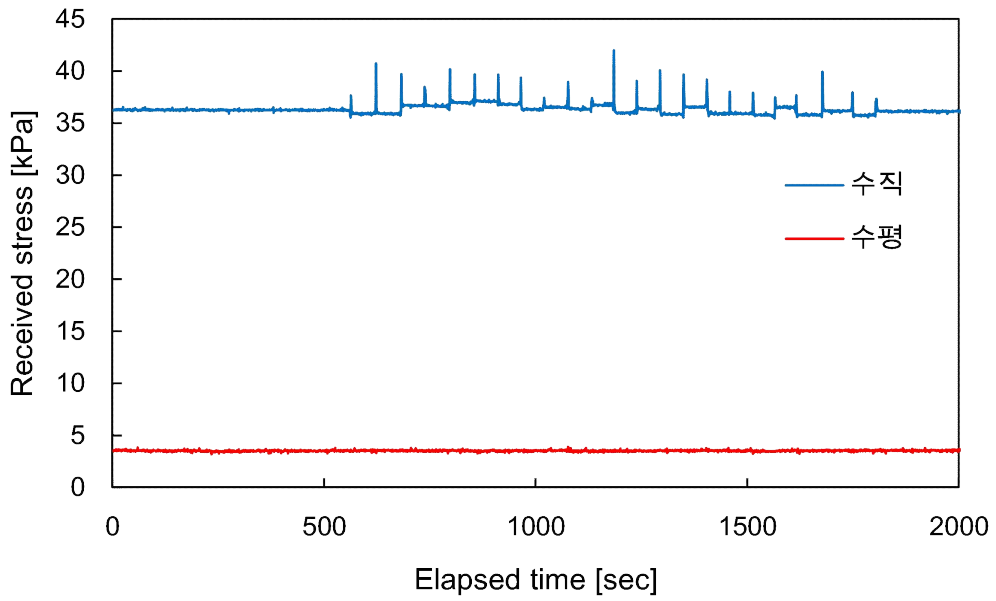
10톤 롤러 횡방향 주행


Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
500
1000
1500
2000
Elapsed time [sec]
수직
수평

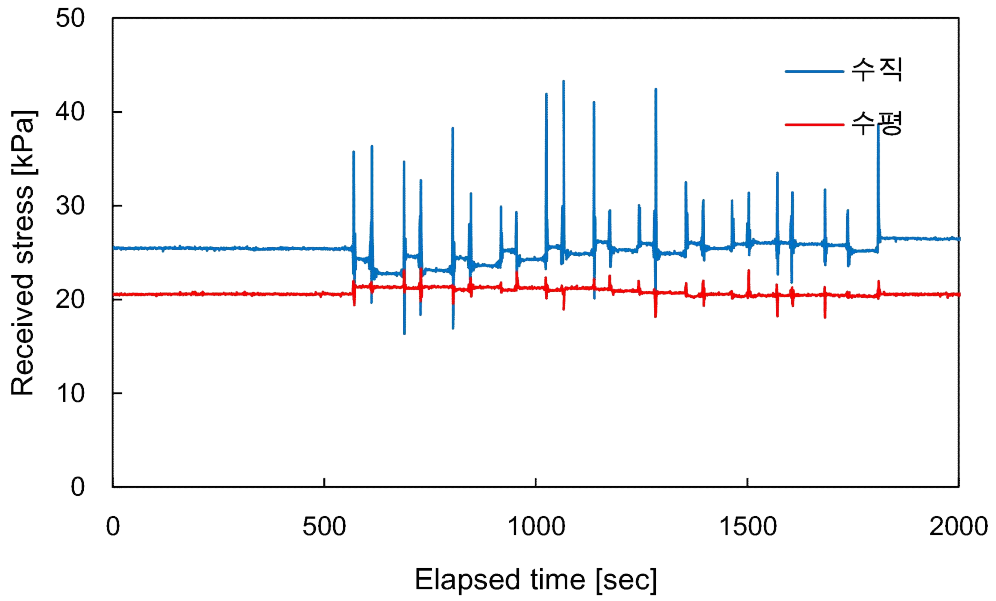
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



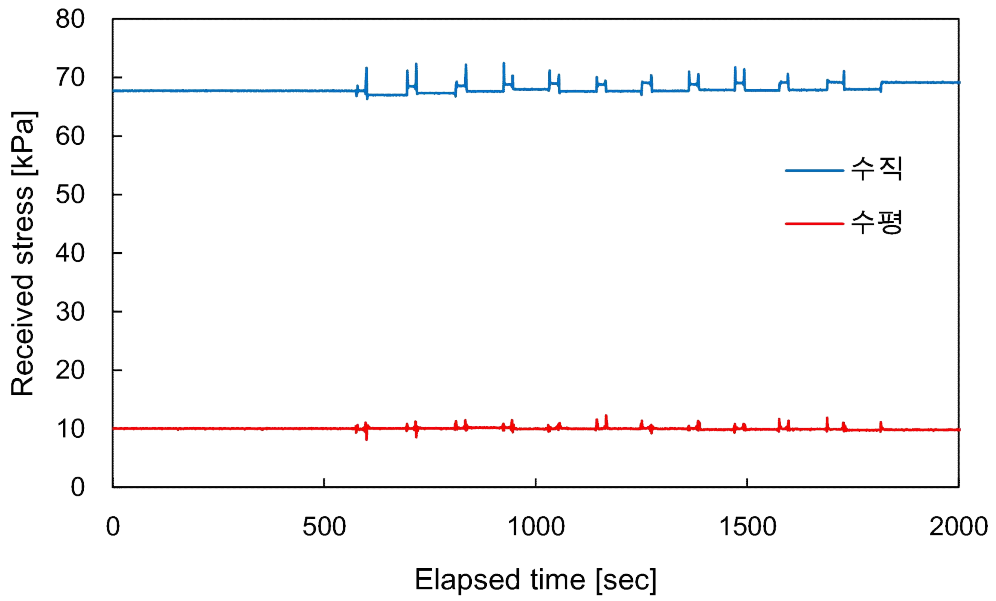
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



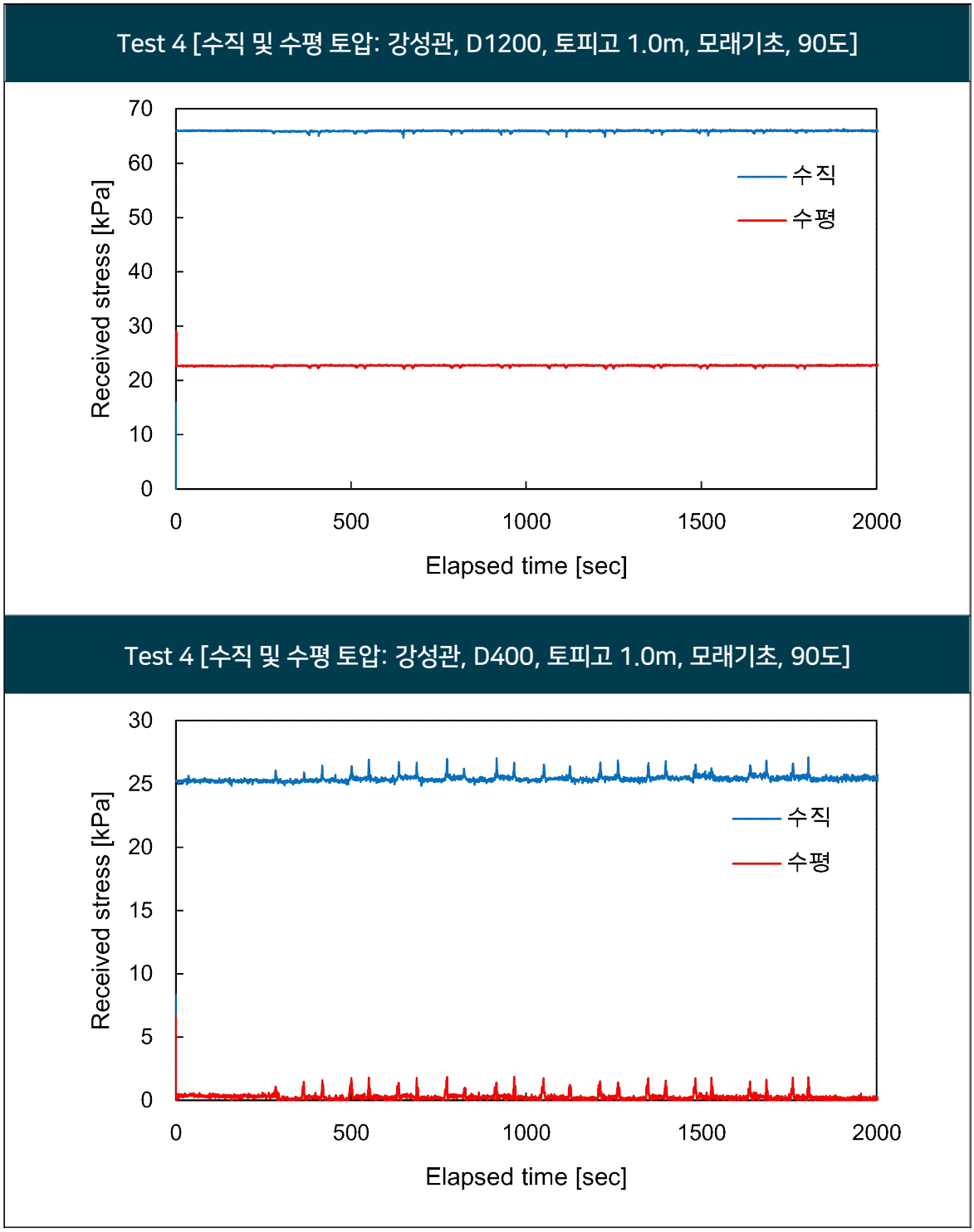
Test 4 [수직 및 수평 토압: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



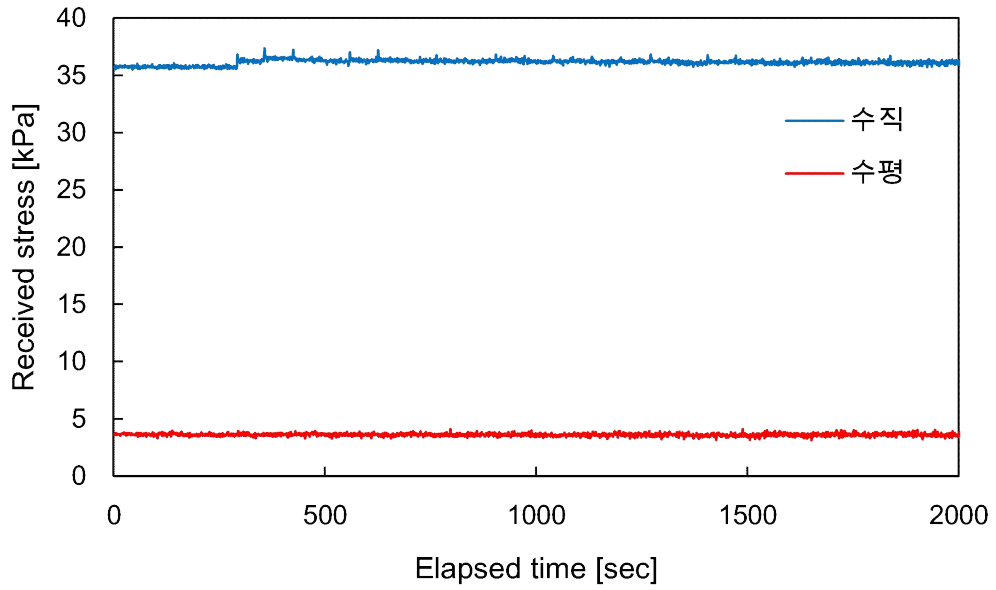
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



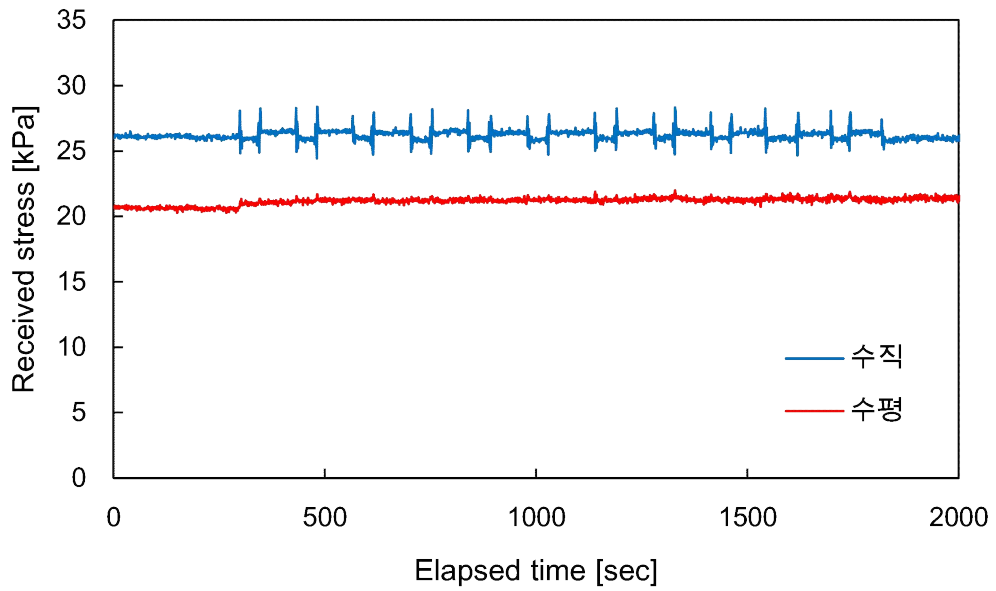
10톤 롤러 횡방향 주행 (진동 X)

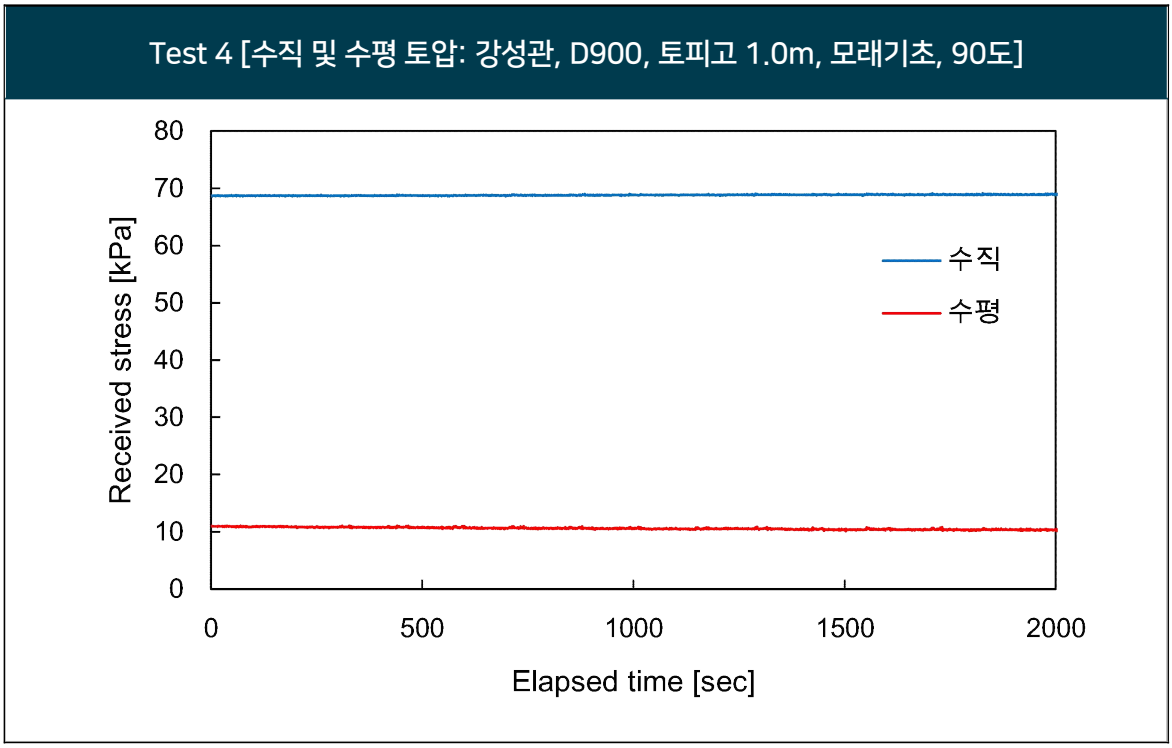


Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

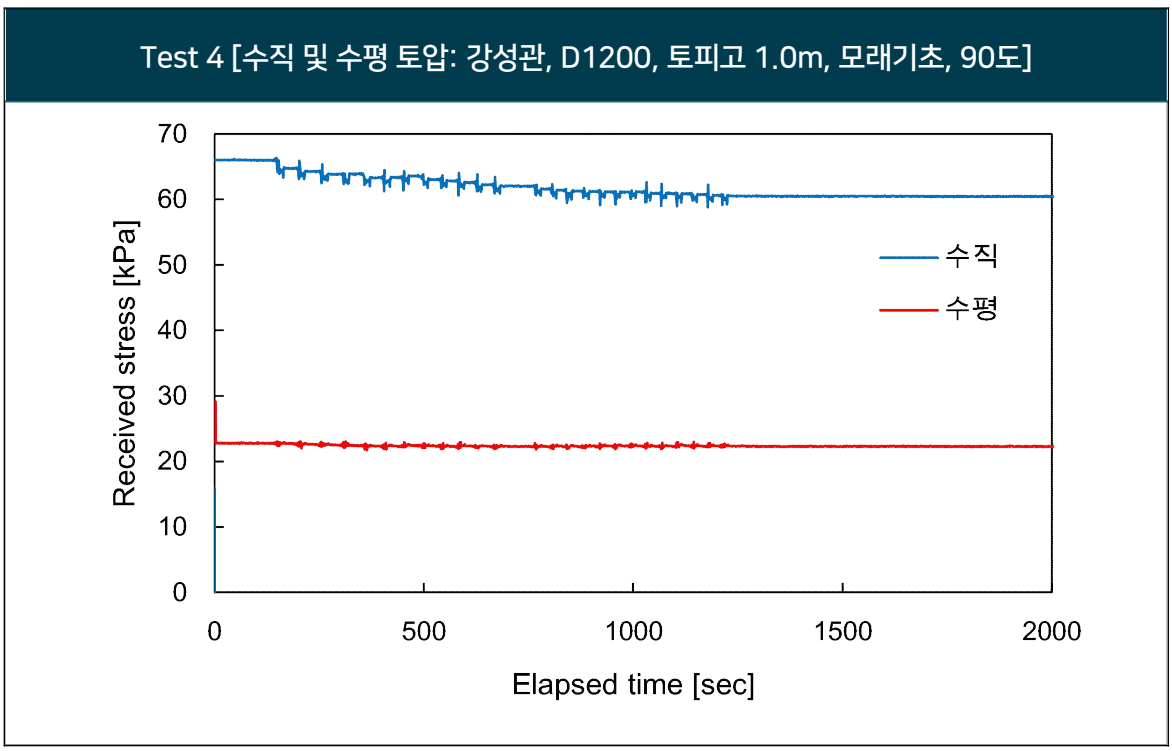


Test 4 [수직 및 수평 토압: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

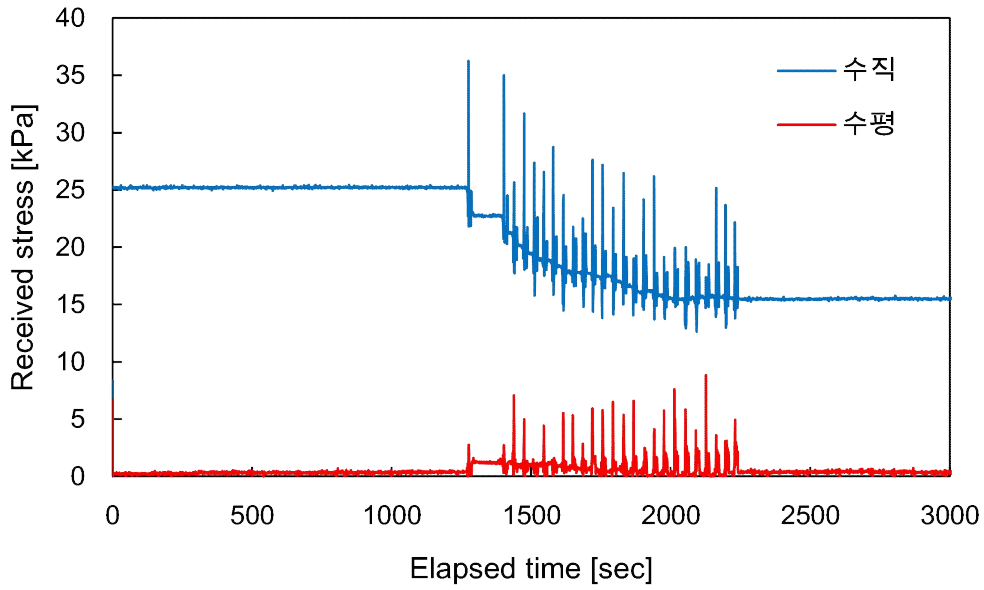



Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
500
1000
1500
2000
Elapsed time [sec]
수직
수평

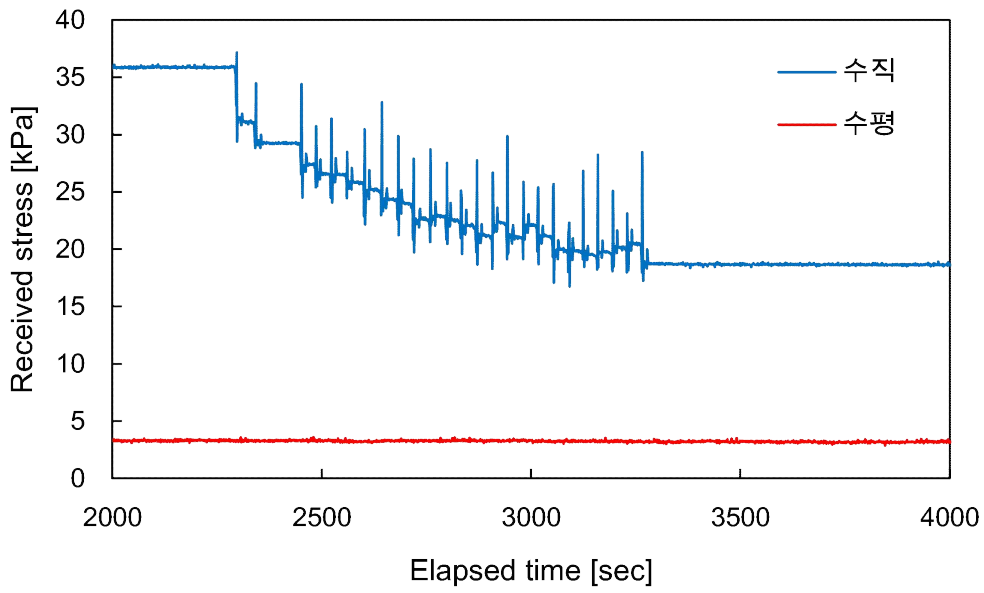
10톤 롤러 종방향 주행


Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
70
60
50
40
30
20
10
0
0
500
1000
1500
2000
Elapsed time [sec]
수직
수평

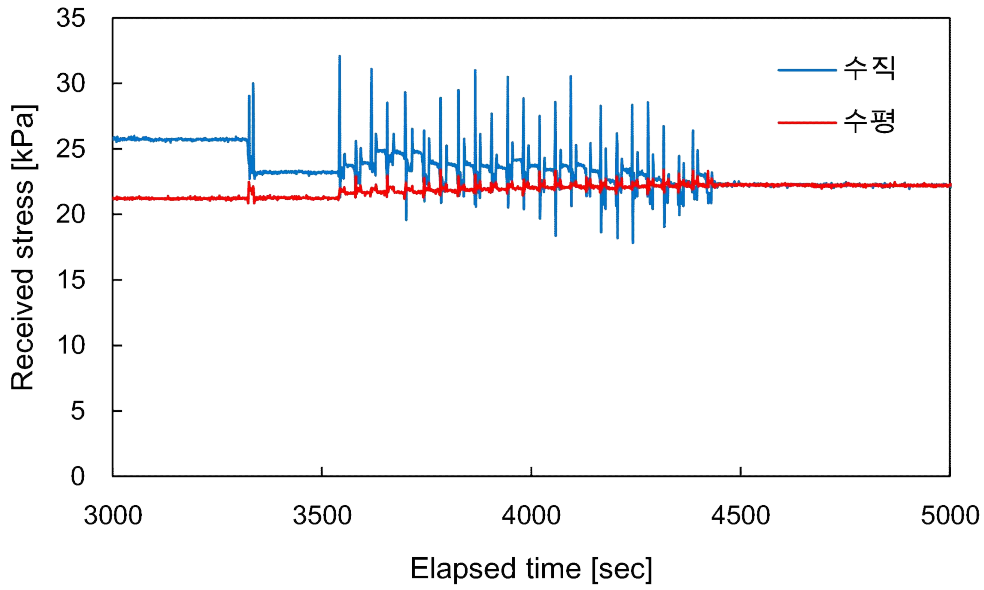
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



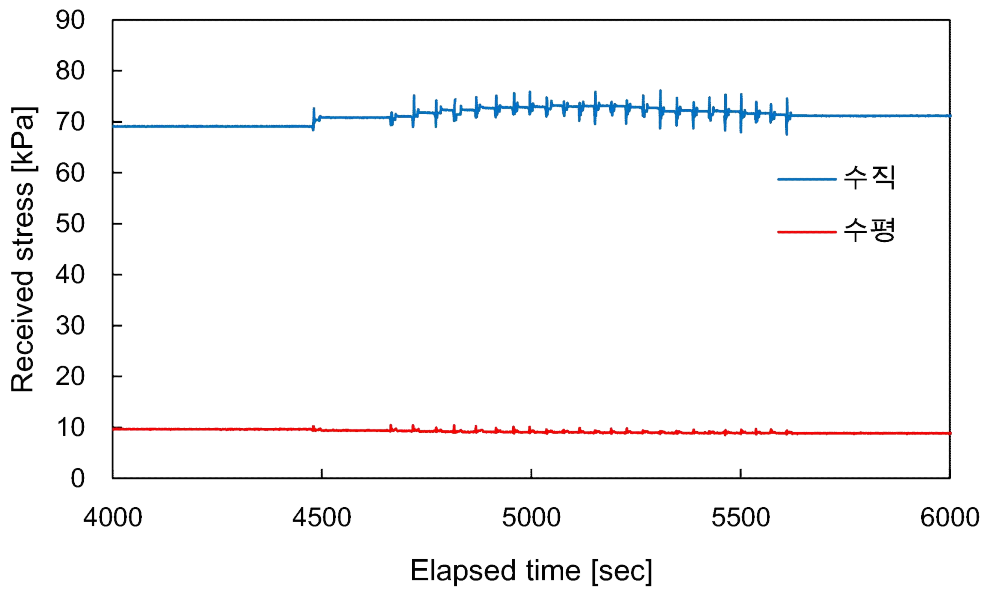
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



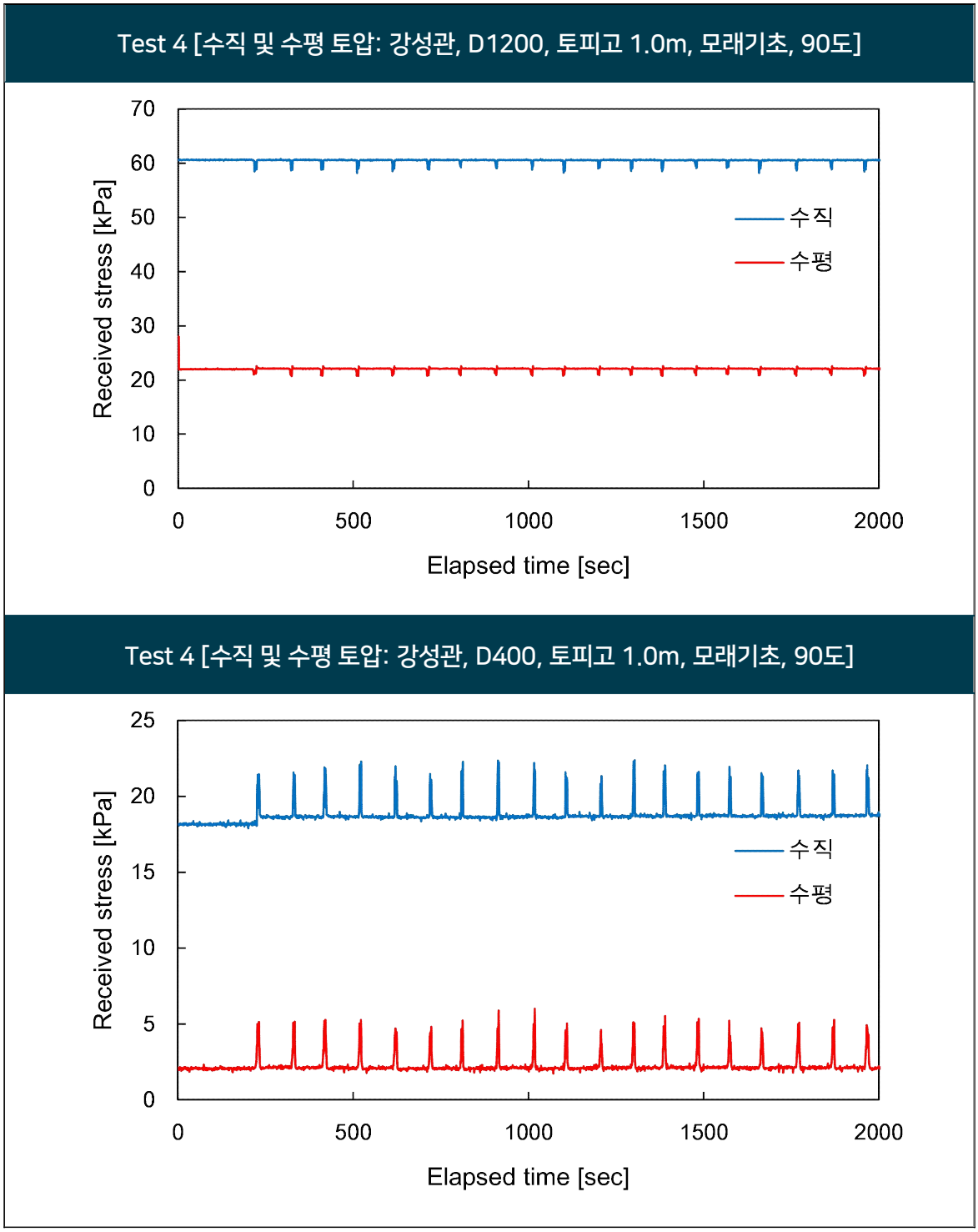
Test 4 [수직 및 수평 토압: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



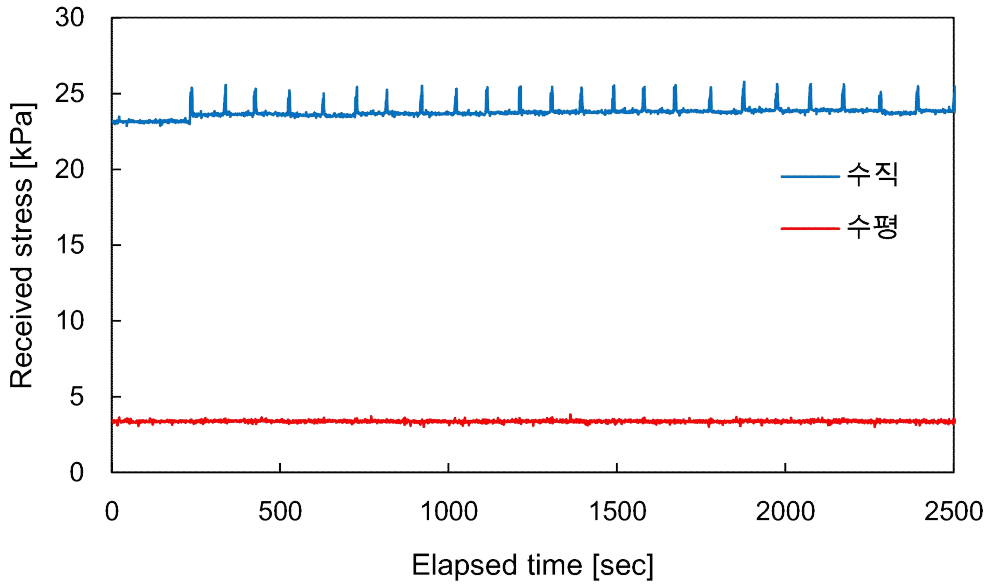
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



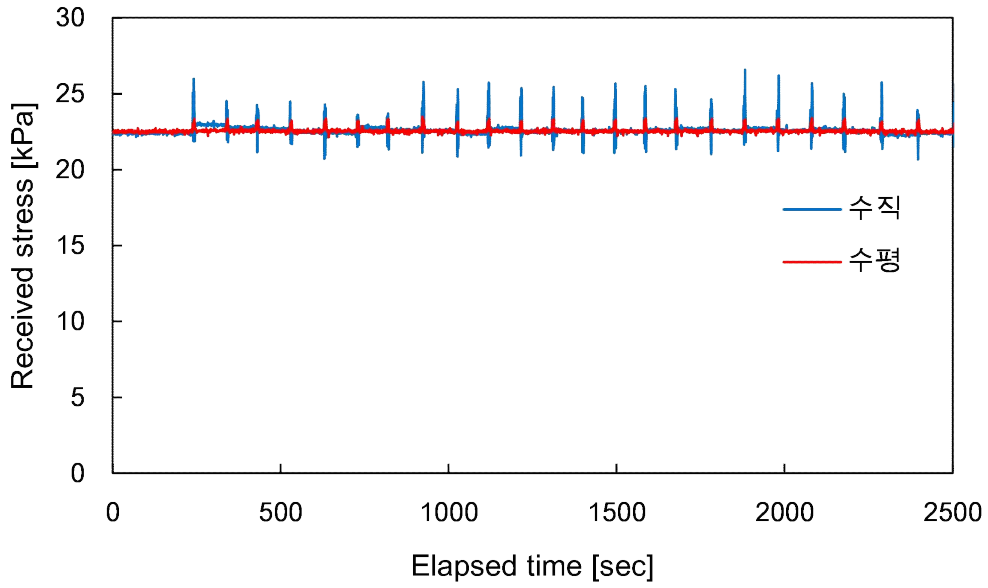
25톤 덤프 횡방향 주행

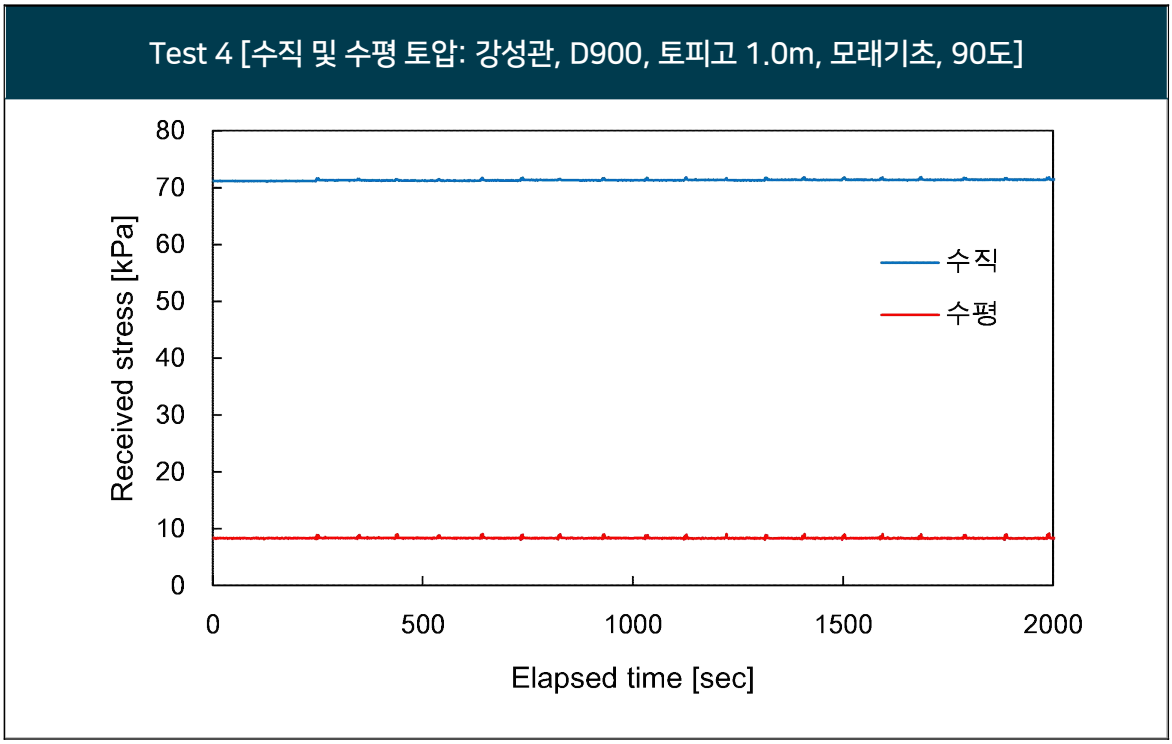

Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
70
60
50
40
30
20
10
0
0
500
1000
1500
2000
Elapsed time [sec]
수직
수평
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
25
20
15
10
5
0
0
500
1000
1500
2000
Elapsed time [sec]
수직
수평

Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

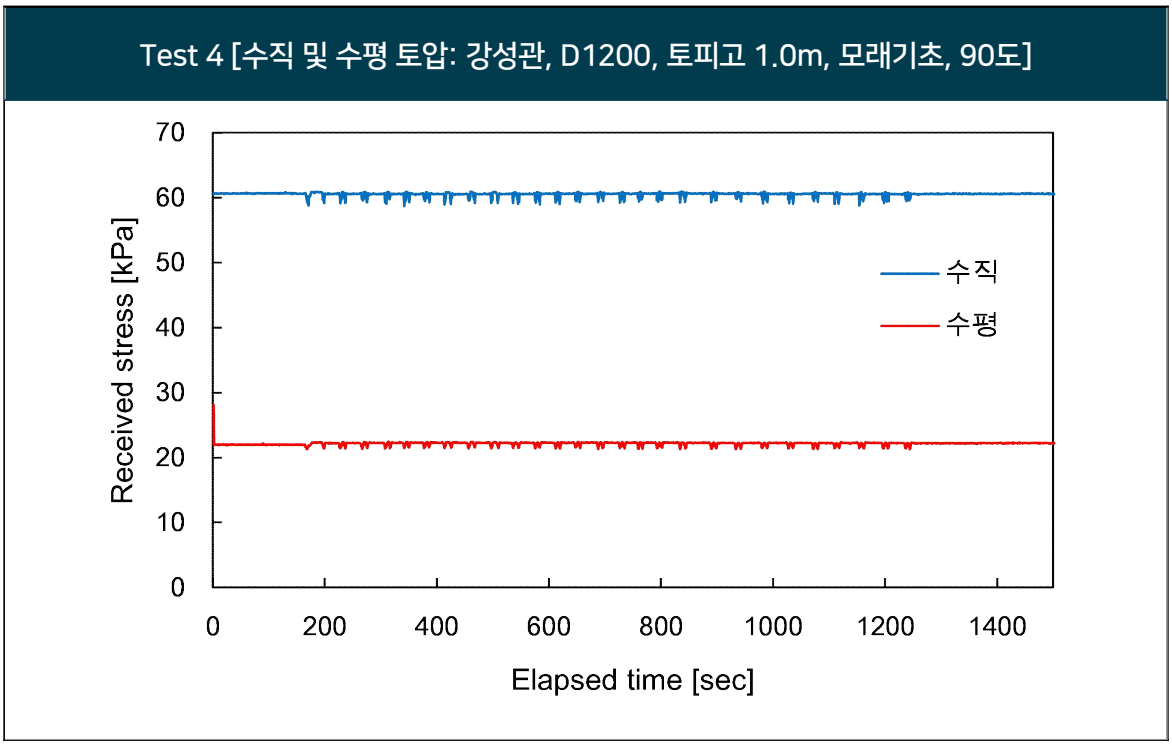


Test 4 [수직 및 수평 토압: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

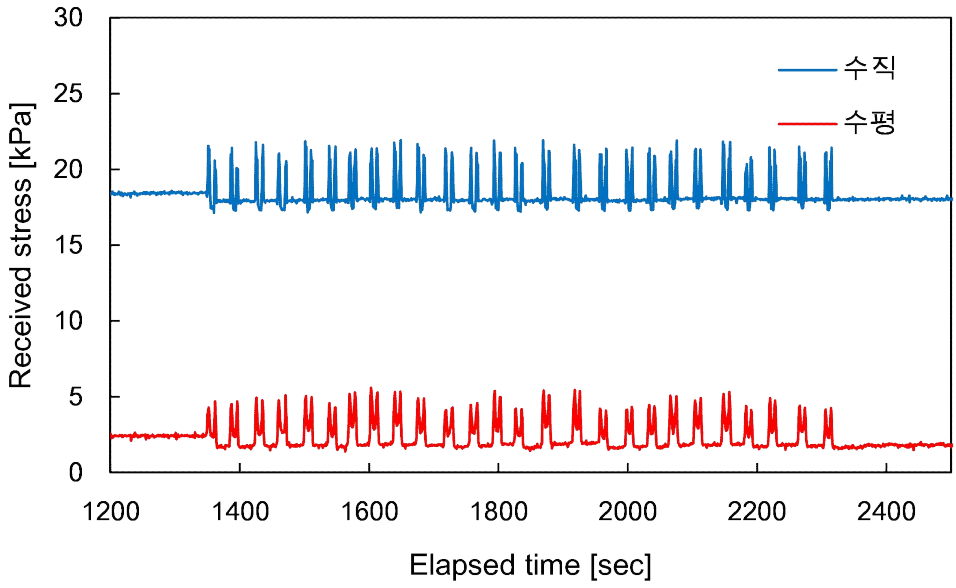



Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]
수직
수평
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
500
1000
1500
2000

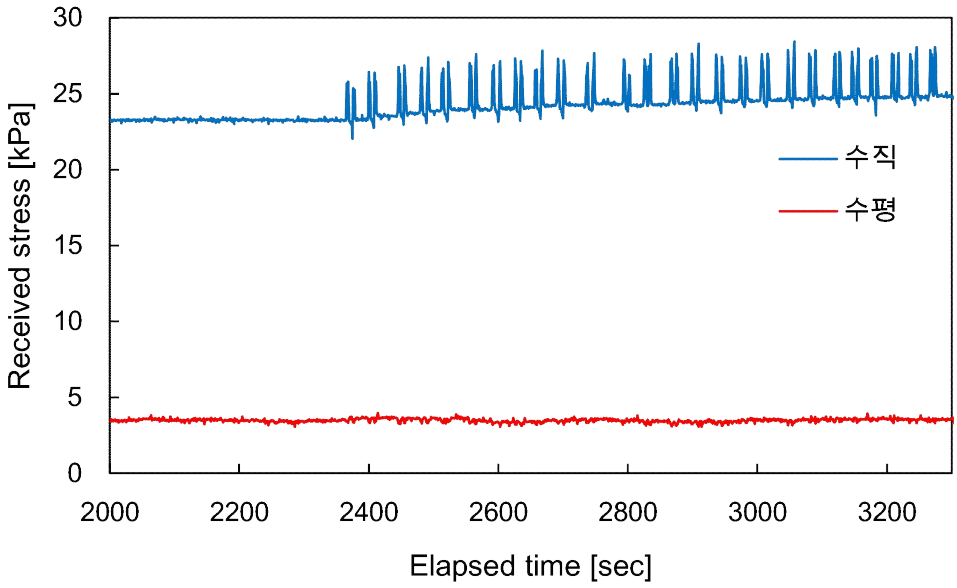
10톤 롤러 종방향 주행


Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
Received stress [kPa]
Elapsed time [sec]
수직
수평
0
10
20
30
40
50
60
70
0
200
400
600
800
1000
1200
1400

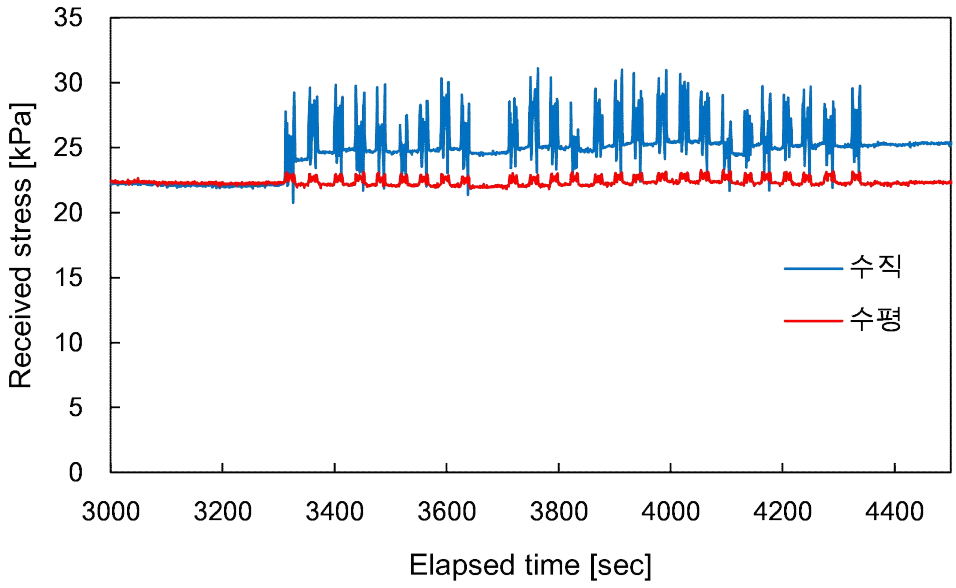
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



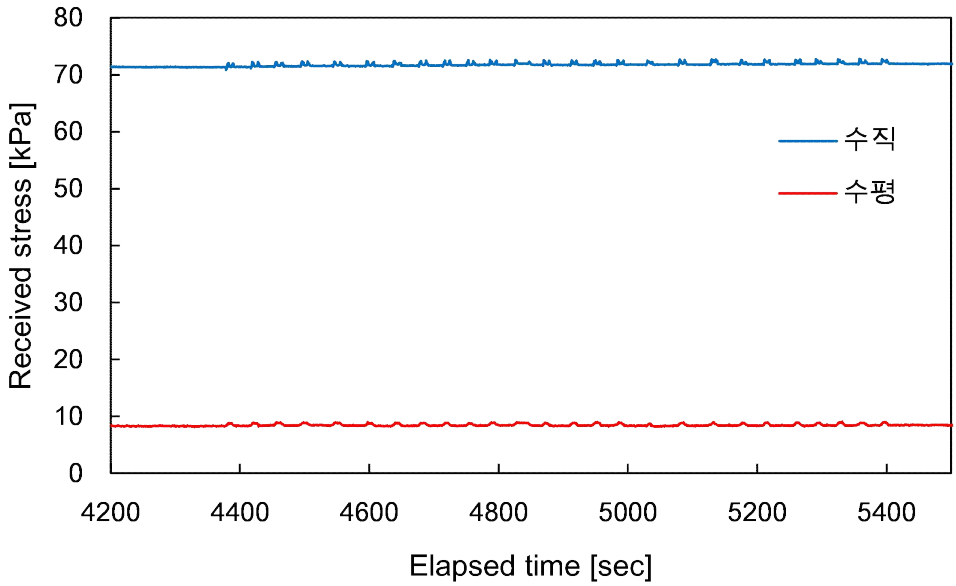
Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



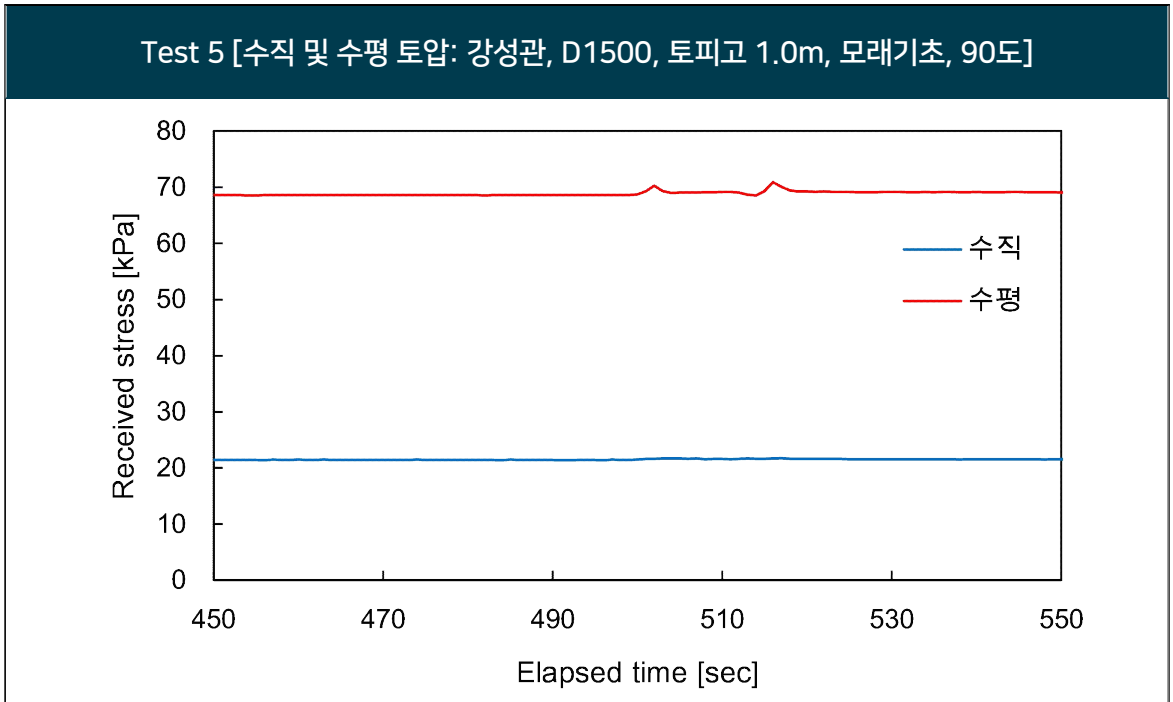
Test 4 [수직 및 수평 토압: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

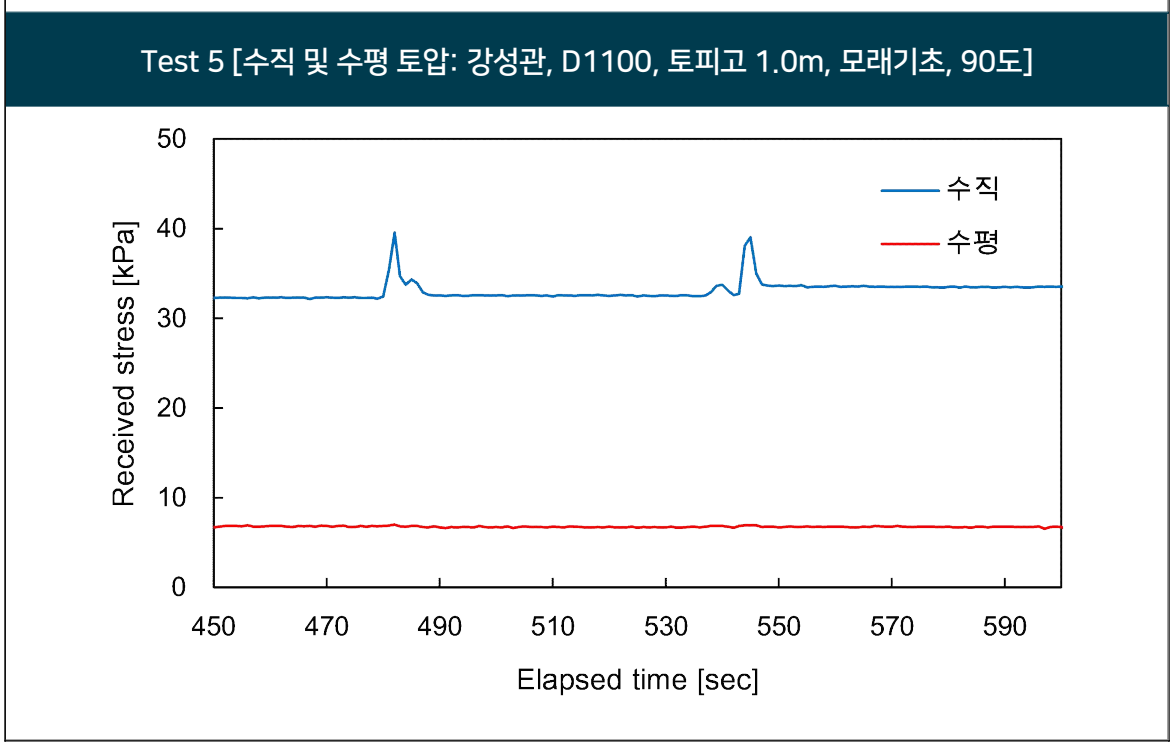


Test 4 [수직 및 수평 토압: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

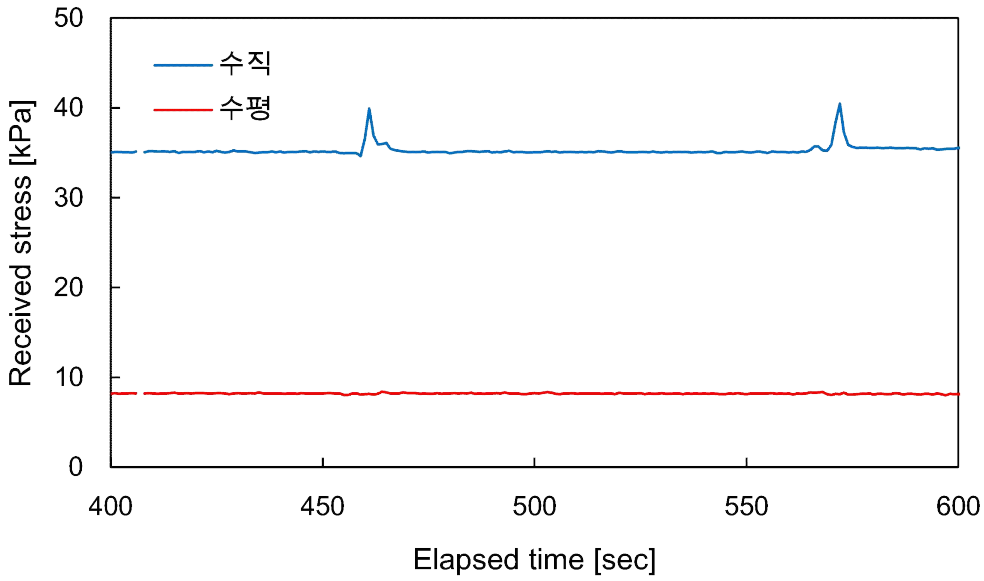


10톤 롤러 종방향 주행 (진동 X)

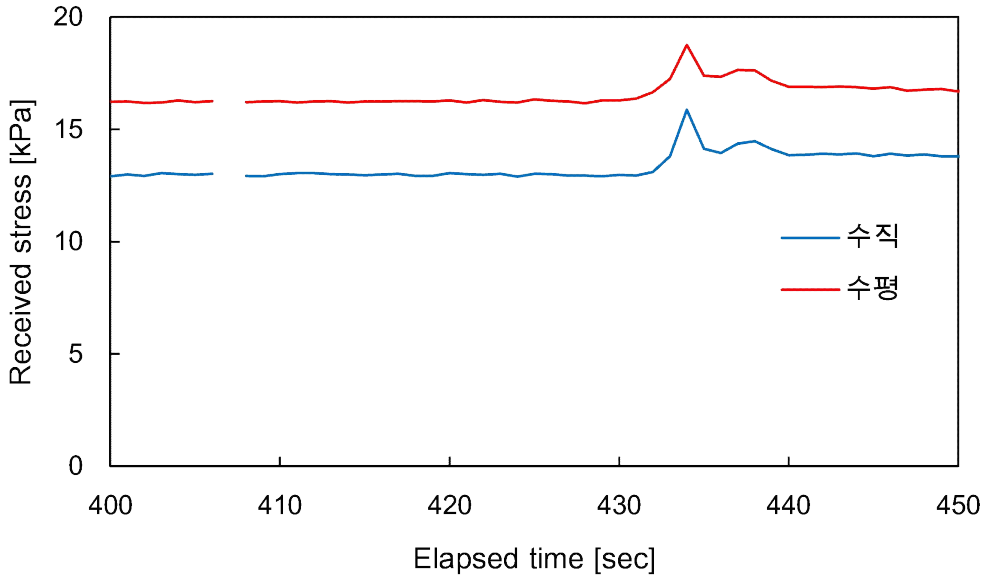




Test 5 [수직 및 수평 토압: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

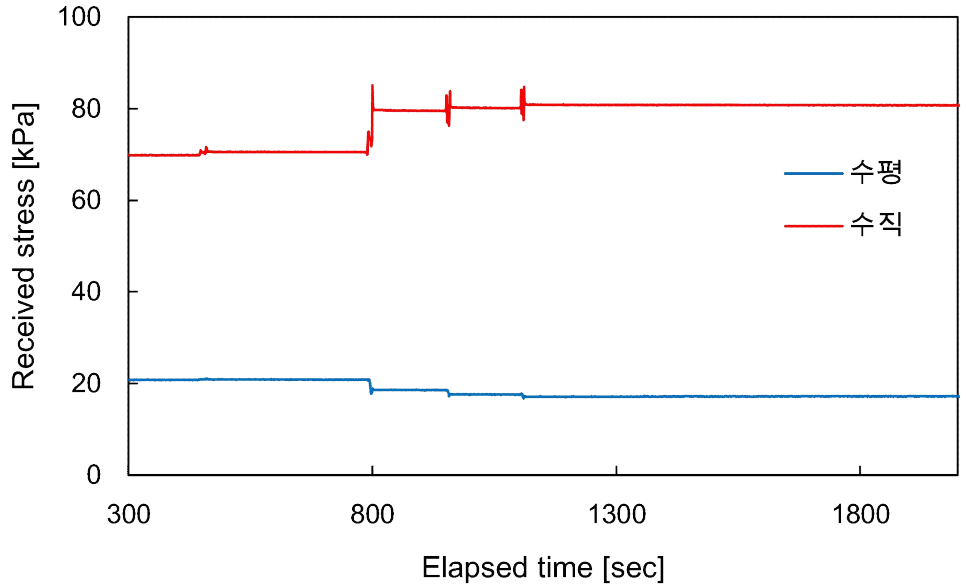


Test 5 [수직 및 수평 토압: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

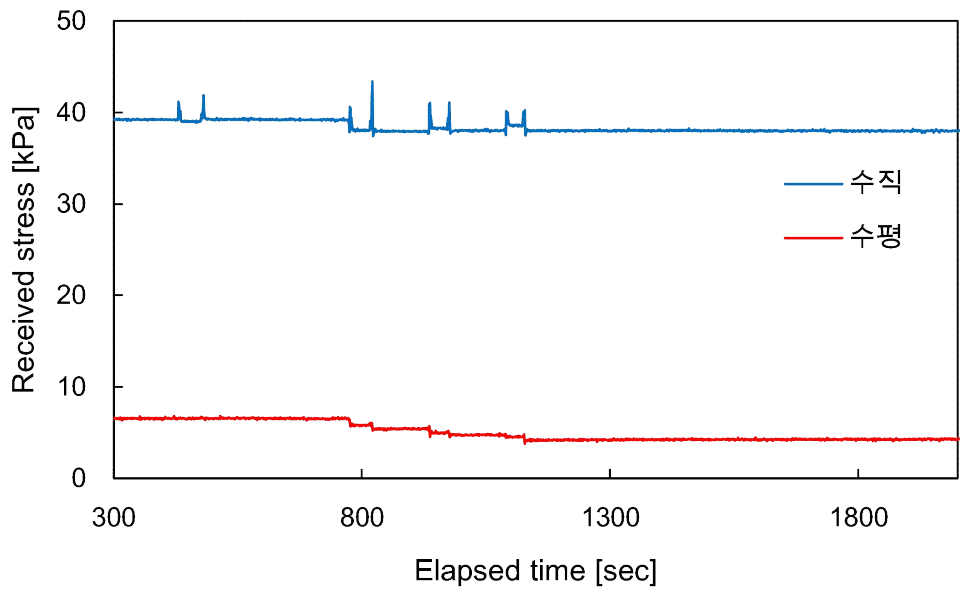


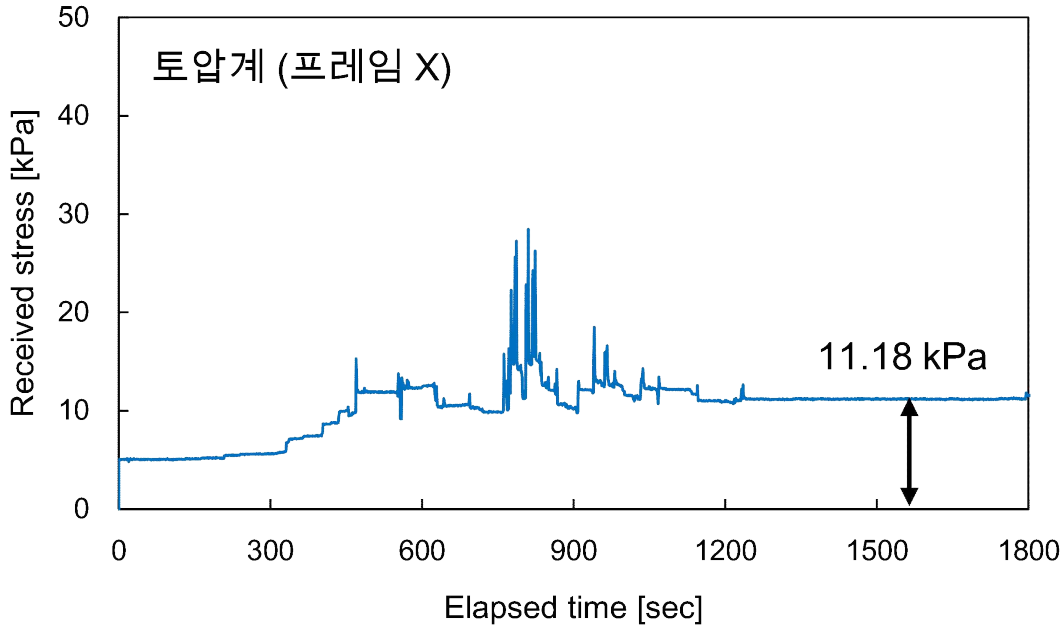
10톤 롤러 종방향 주행

Test 5 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1500, 토피고 1.3m, 모래기초, 90도]

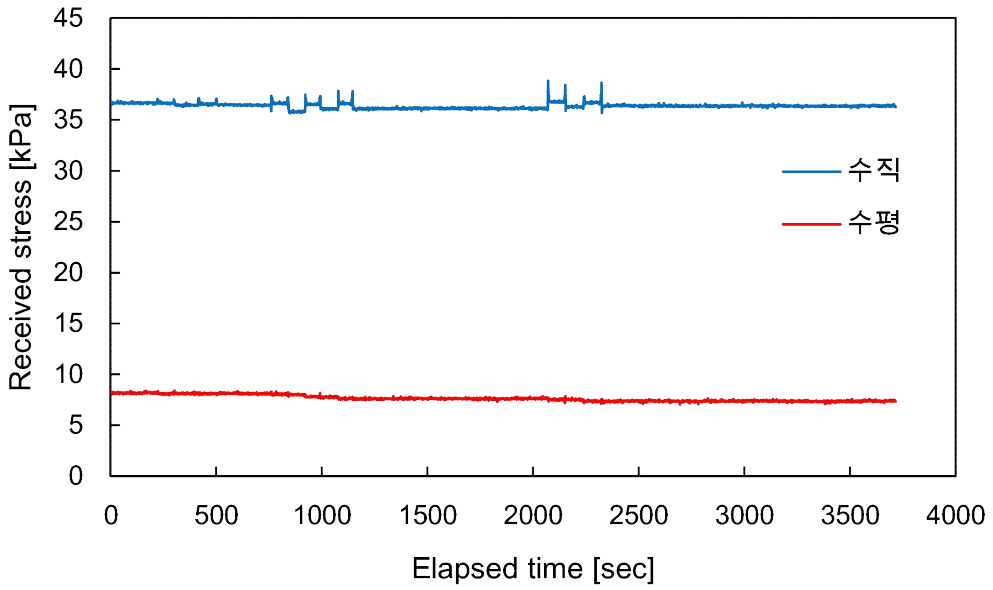


Test 5 [수직 및 수평 토압: 강성관, D1100, 토피고 1.3m, 모래기초, 90도]

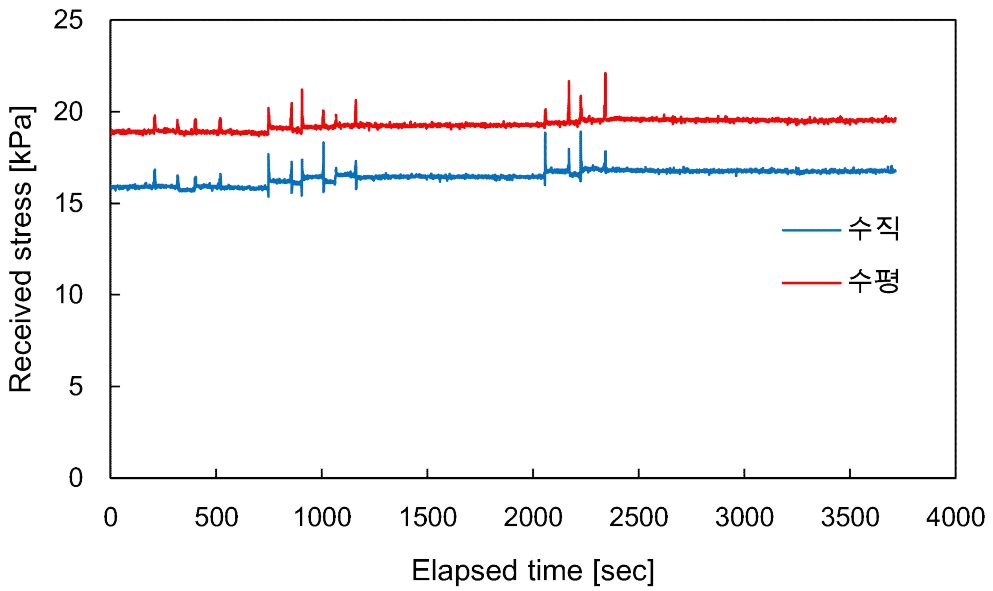



토압계 (프레임 X)
Received stress [kPa]
50
40
30
20
10
0
11.18 kPa
0
300
600
900
1200
1500
1800
Elapsed time [sec]

Test 5 [수직 및 수평 토압: 강성관, D900, 토피고 1.3m, 모래기초, 90도]

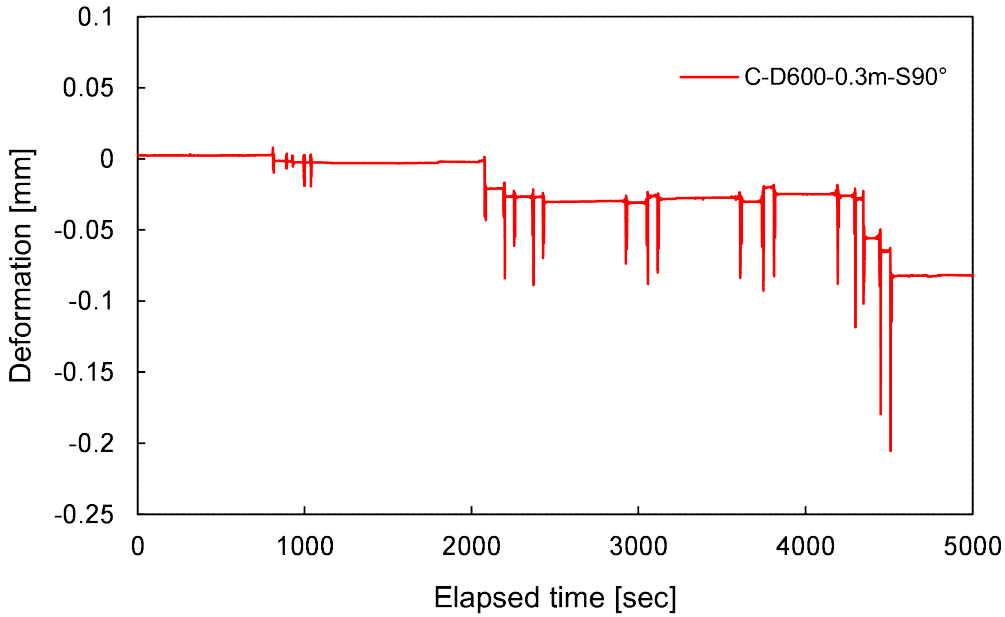


Test 5 [수직 및 수평 토압: PE, D600, 토피고 1.3m, 모래기초, 180도]

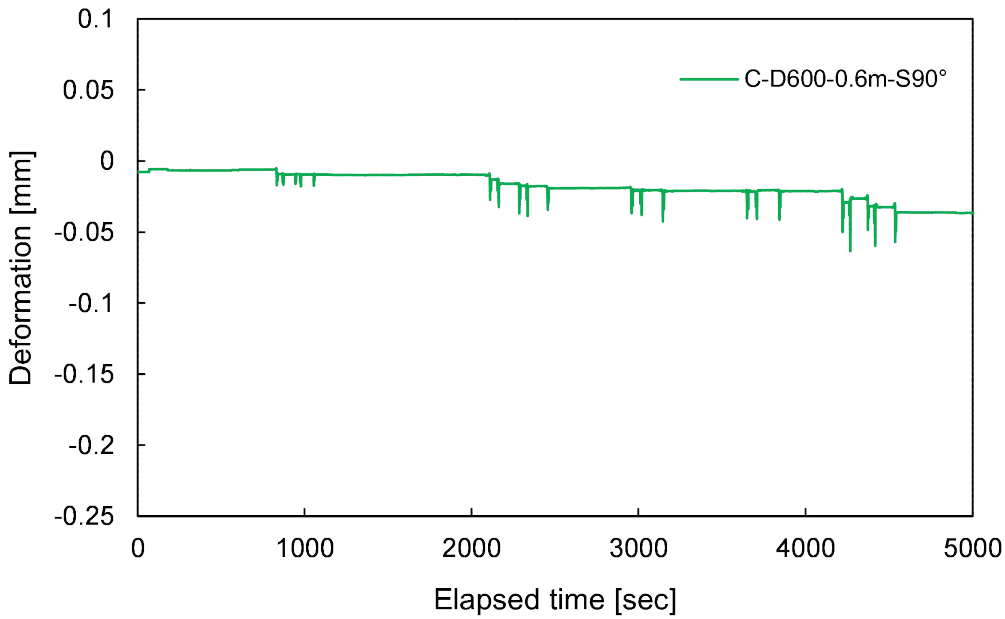


10톤 롤러 횡방향 주행

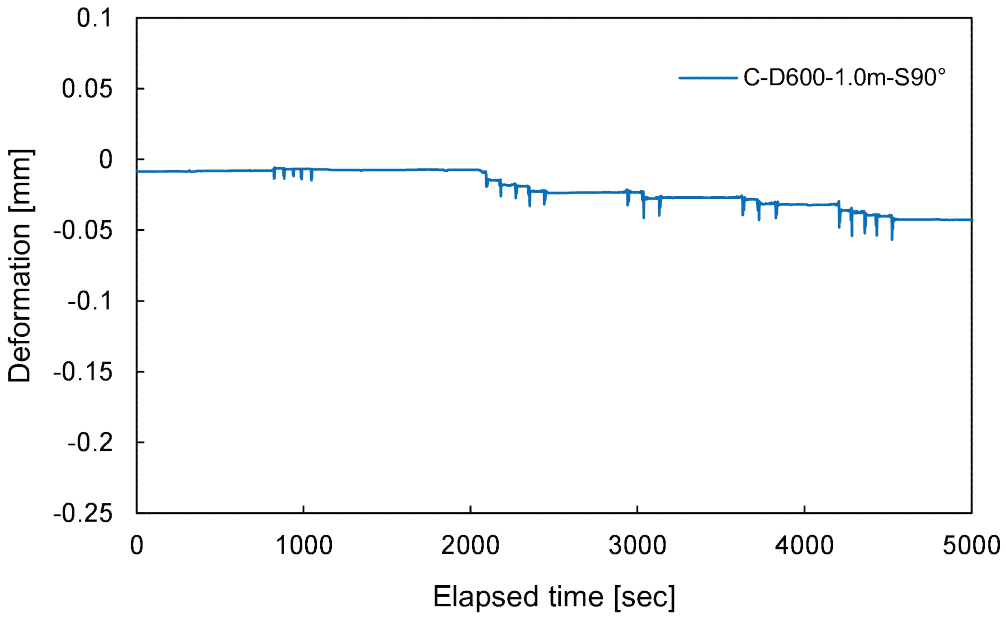
Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 0.3m, 모래기초, 90도]



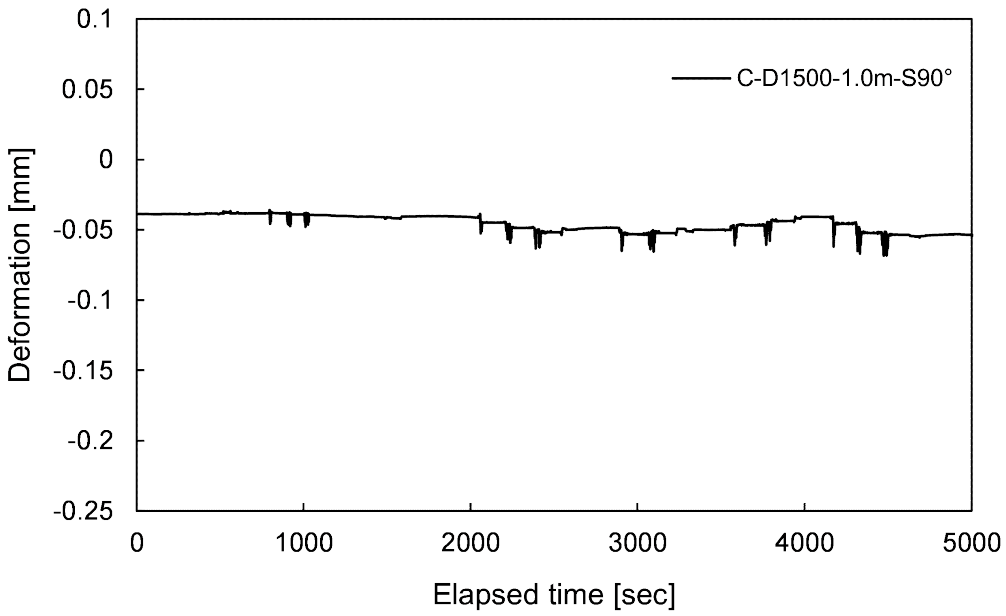
Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 0.6m, 모래기초, 90도]

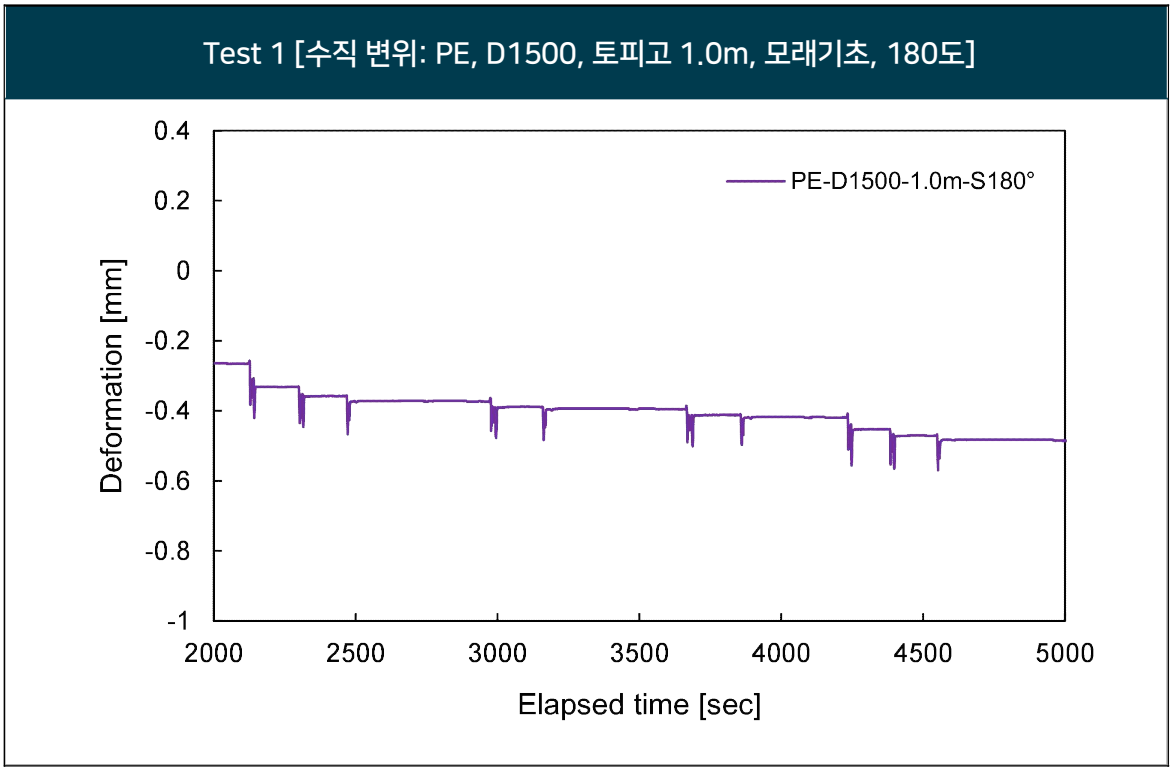


Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

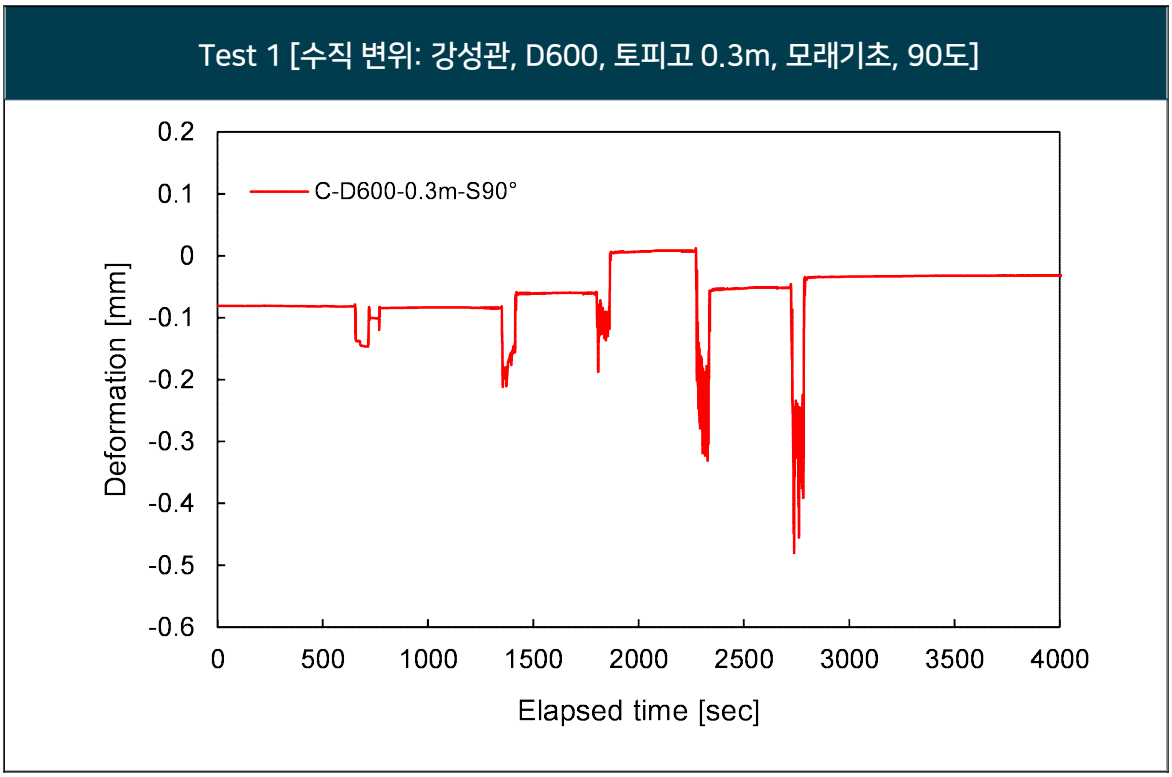


Test 1 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

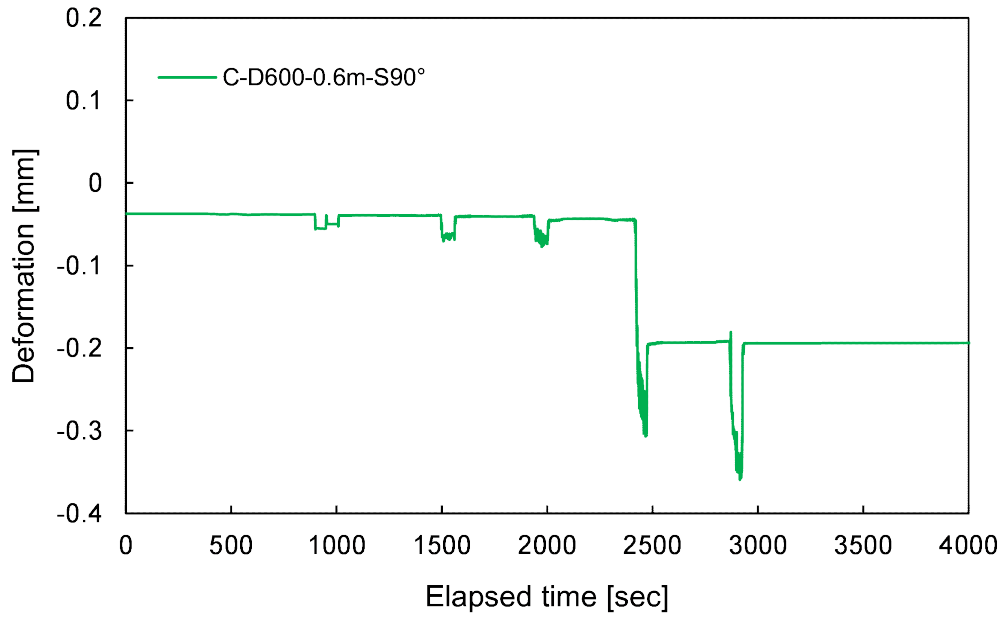




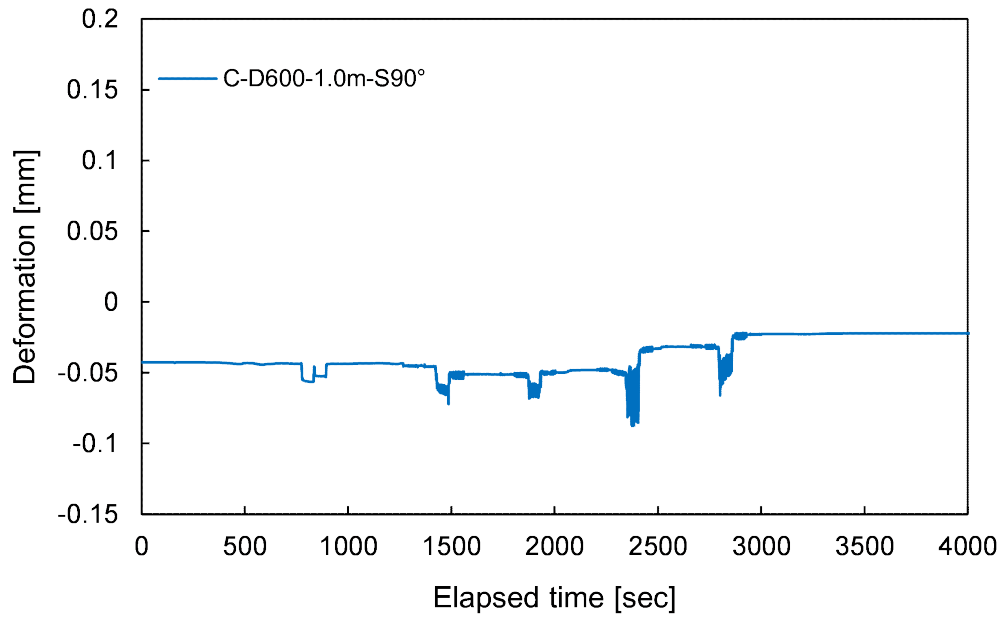
10톤 롤러 횡방향 제자리 가진



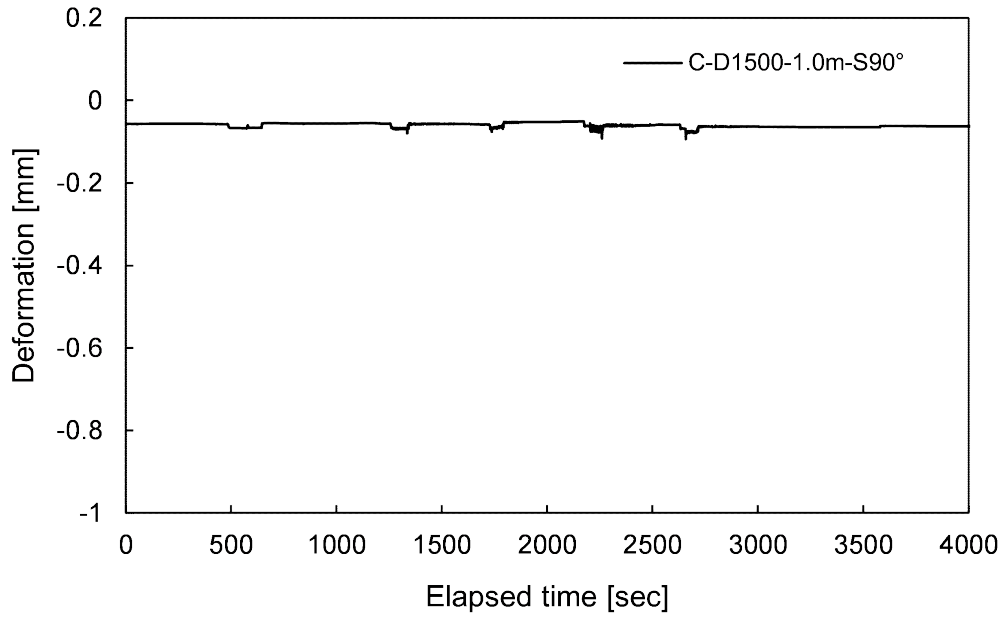
Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 0.6m, 모래기초, 90도]



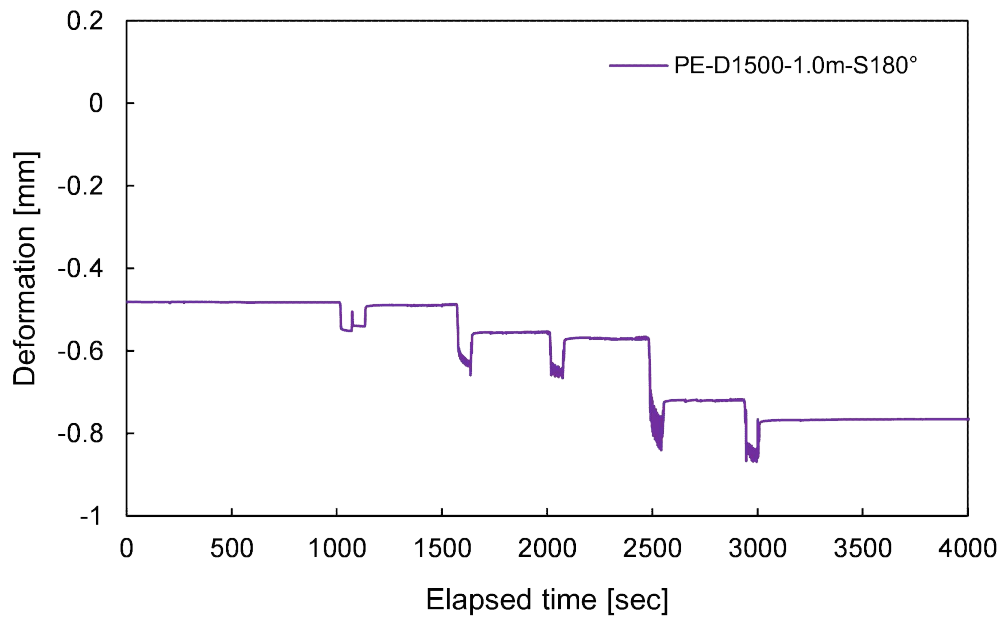
Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



Test 1 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

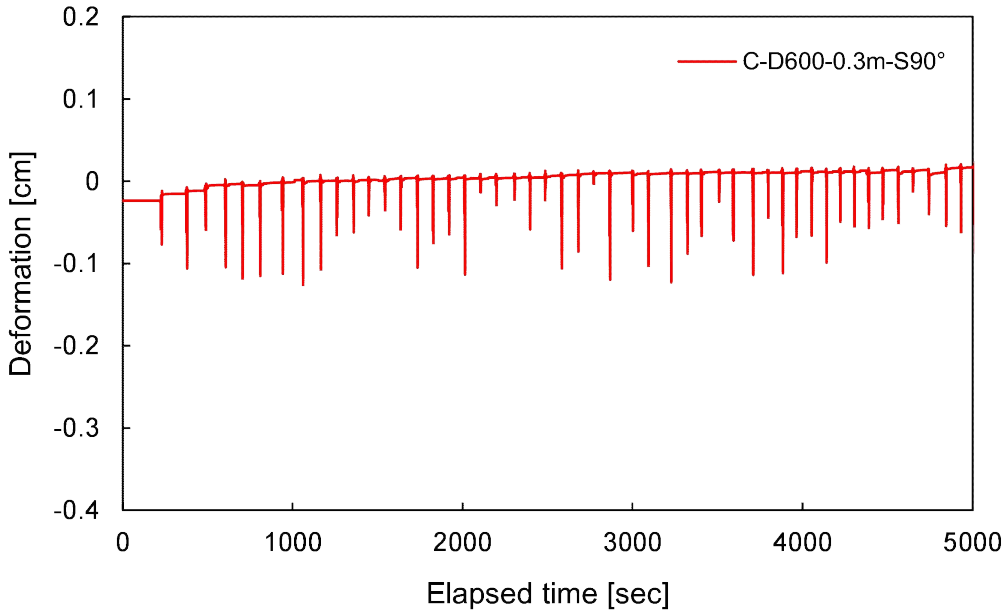


Test 1 [수직 변위: PE, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

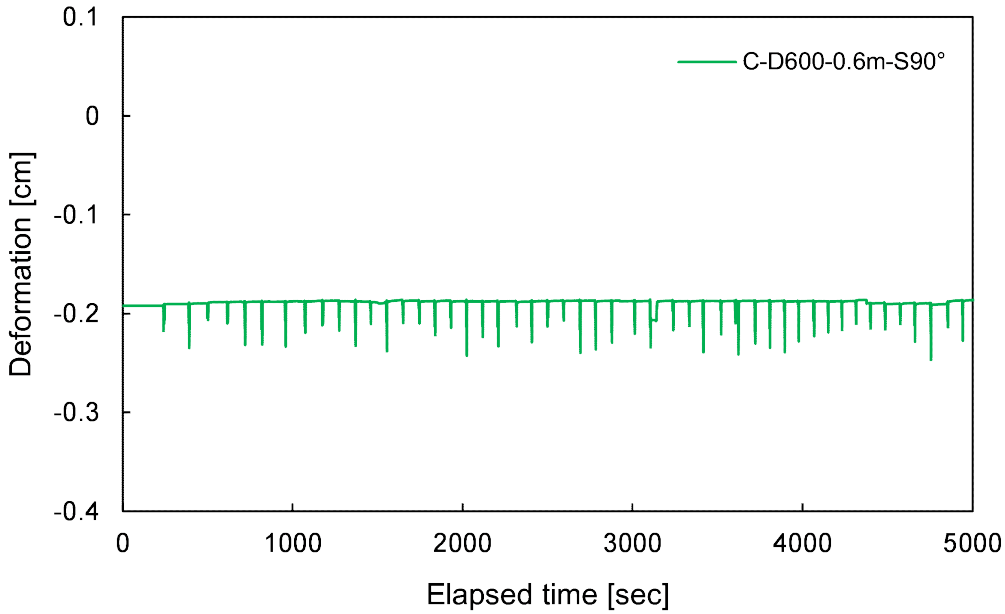


25톤 덤프 횡방향 주행

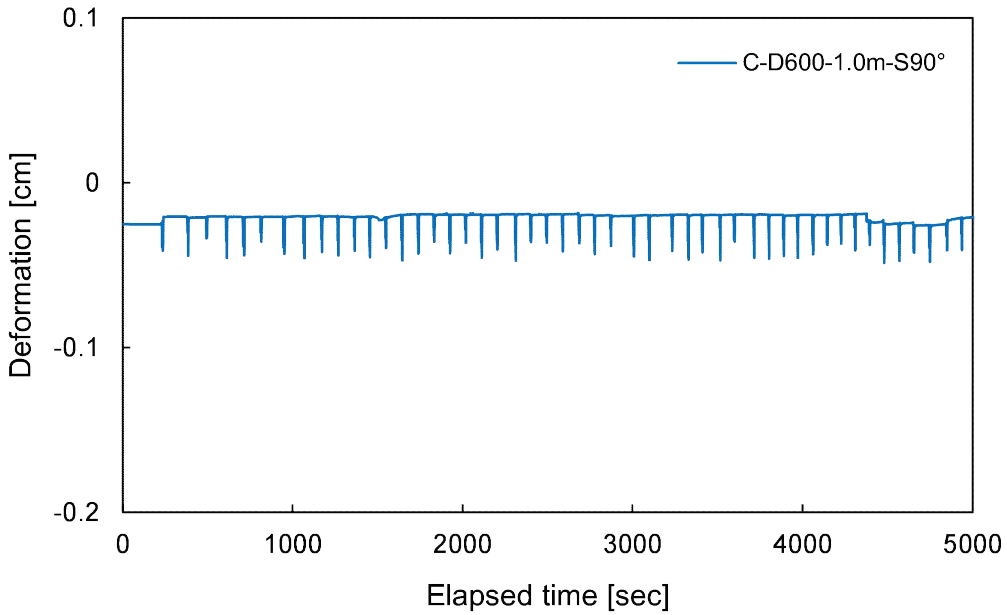
Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 0.3m, 모래기초, 90도]



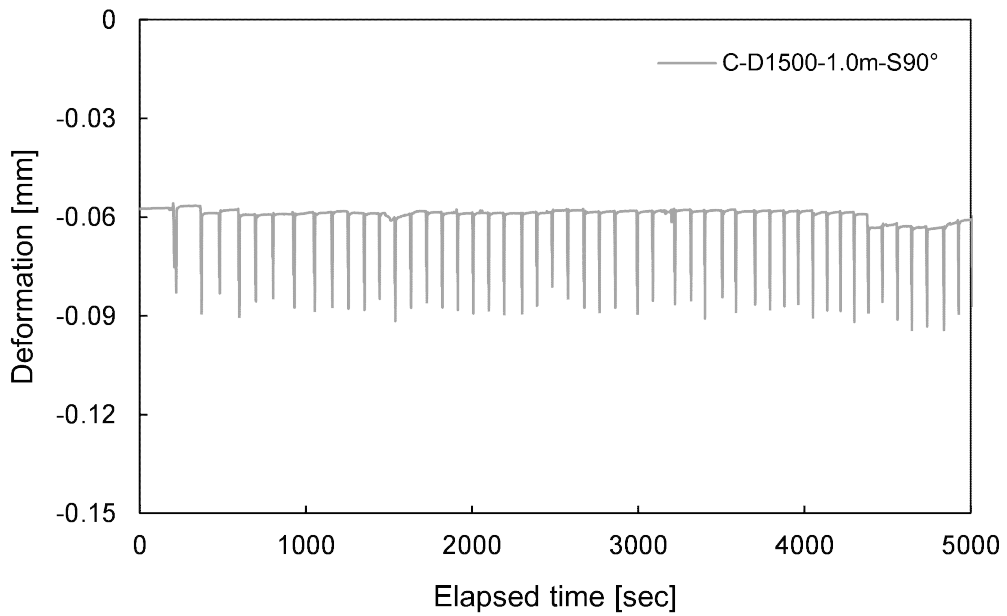
Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 0.6m, 모래기초, 90도]

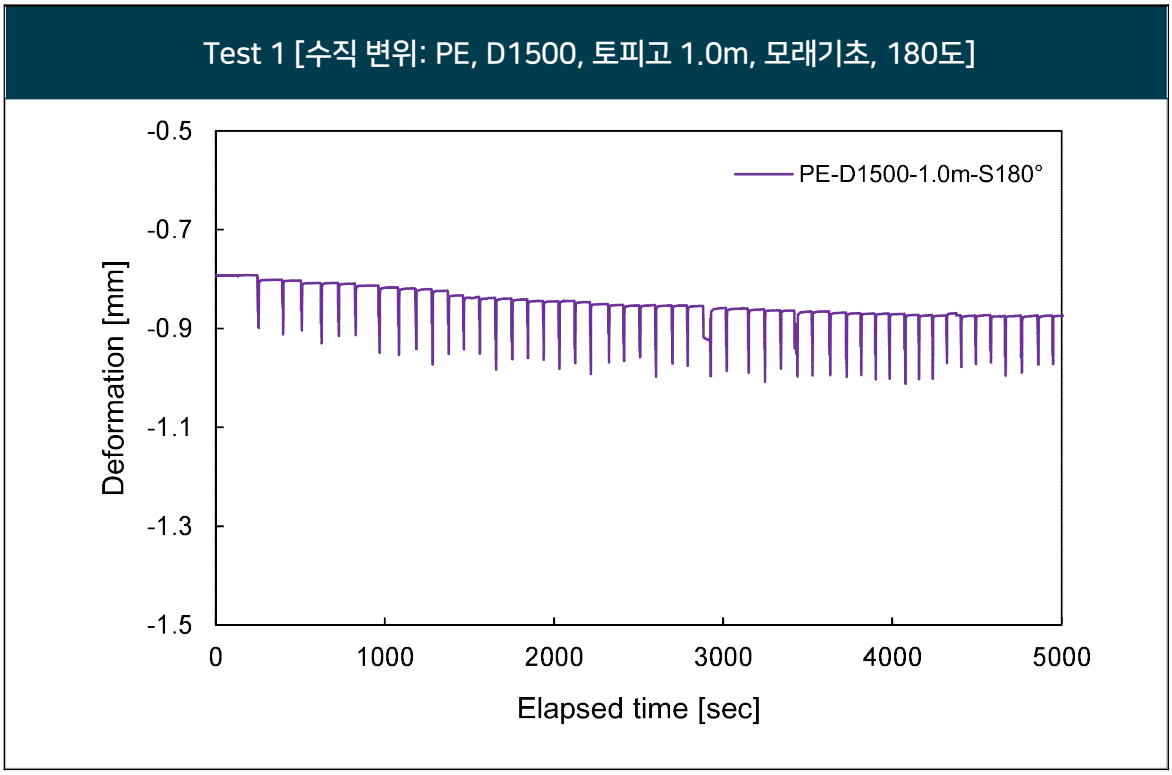


Test 1 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

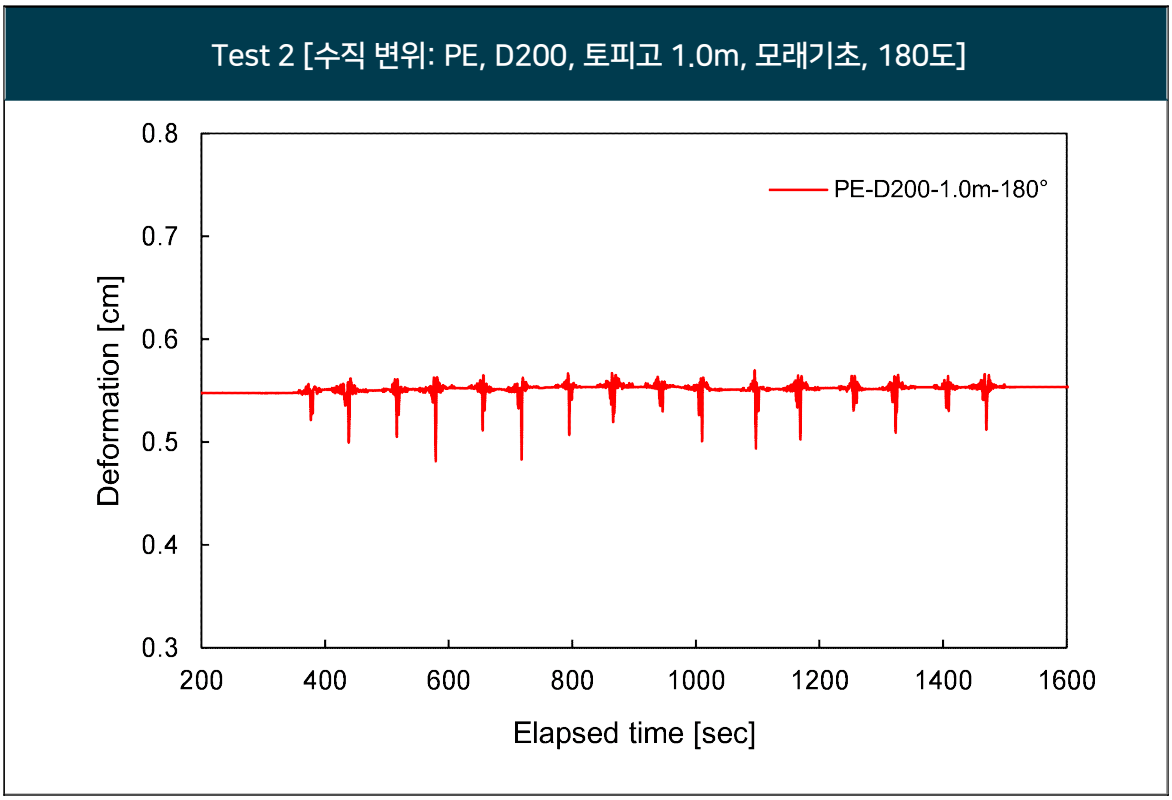


Test 1 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

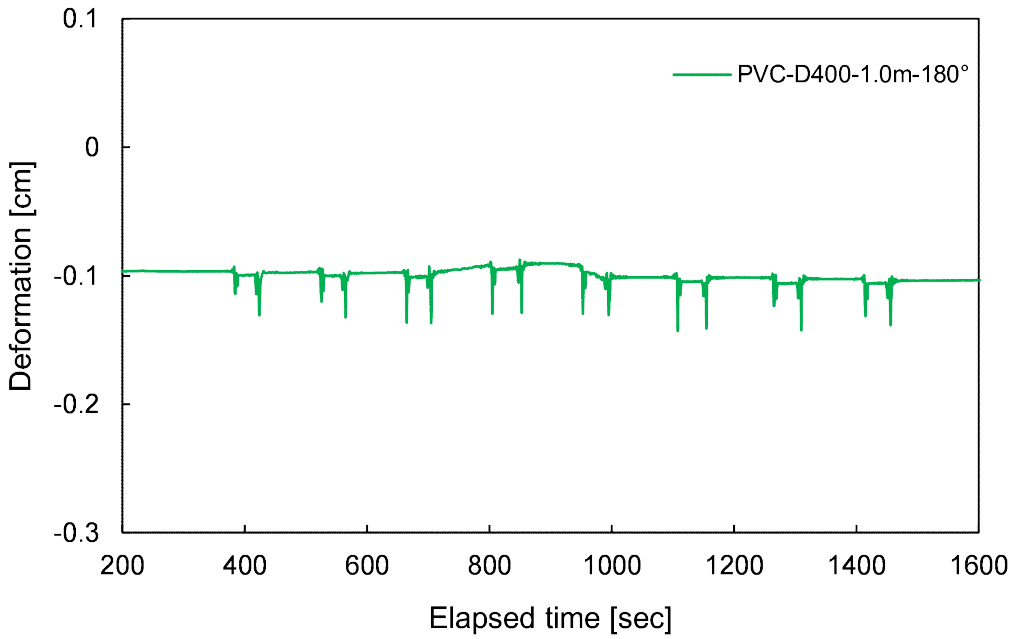



Test 1 [수직 변위: PE, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PE-D1500-1.0m-S180°
Deformation [mm]
-0.5
-0.7
-0.9
-1.1
-1.3
-1.5
0
1000
2000
3000
4000
5000
Elapsed time [sec]

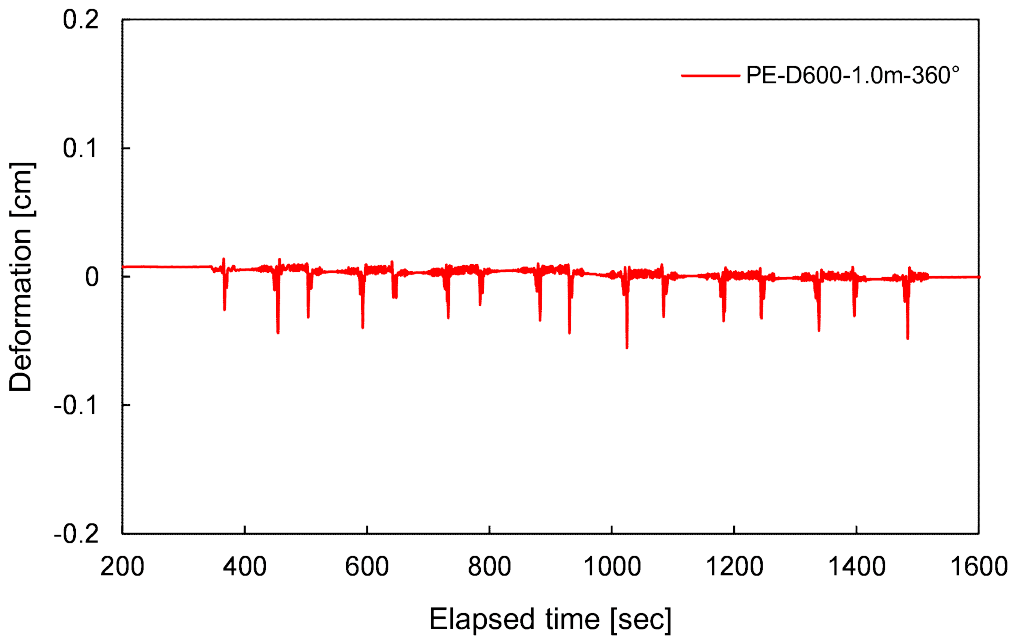
10톤 롤러 횡방향 주행


Test 2 [수직 변위: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PE-D200-1.0m-180°
Deformation [cm]
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
Elapsed time [sec]

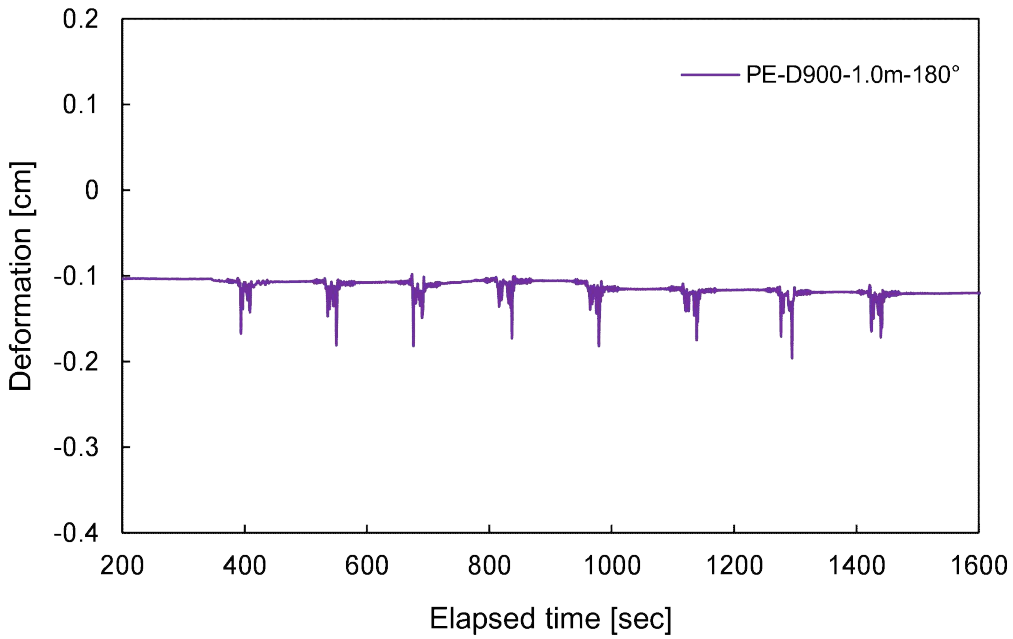
Test 2 [수직 변위: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



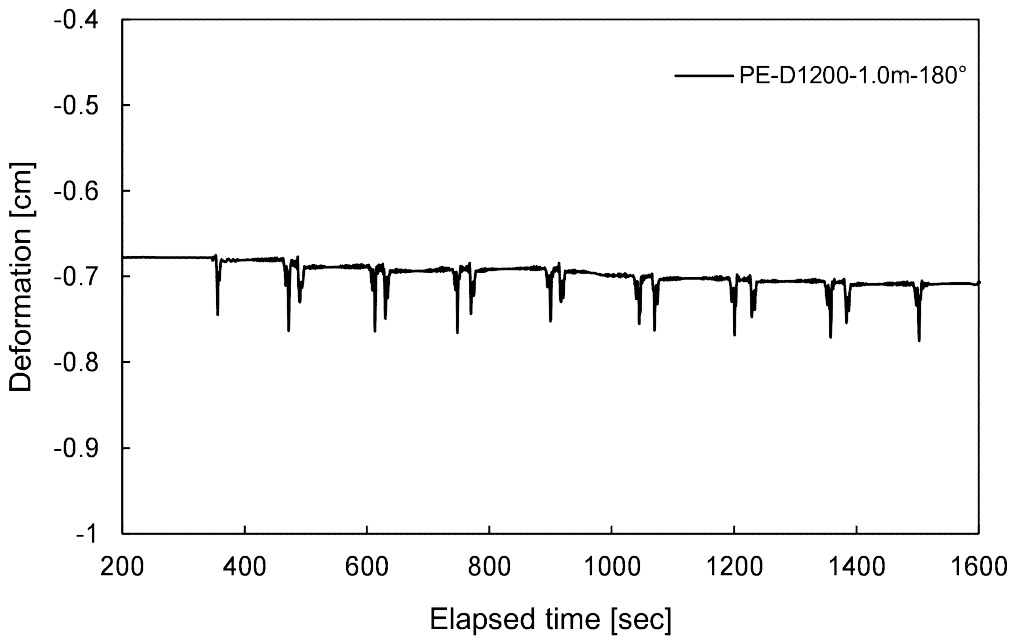
Test 2 [수직 변위: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]



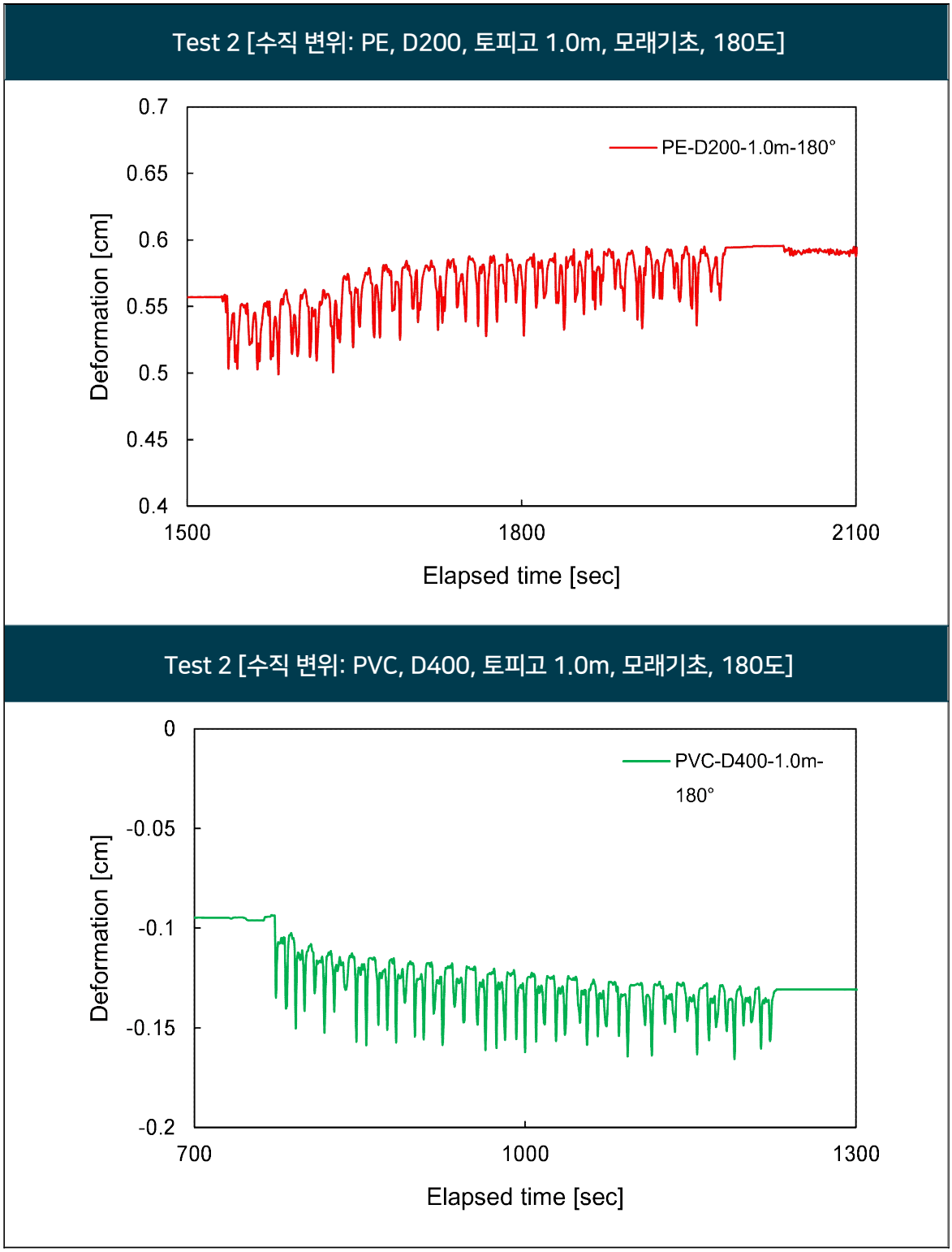
Test 2 [수직 변위: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



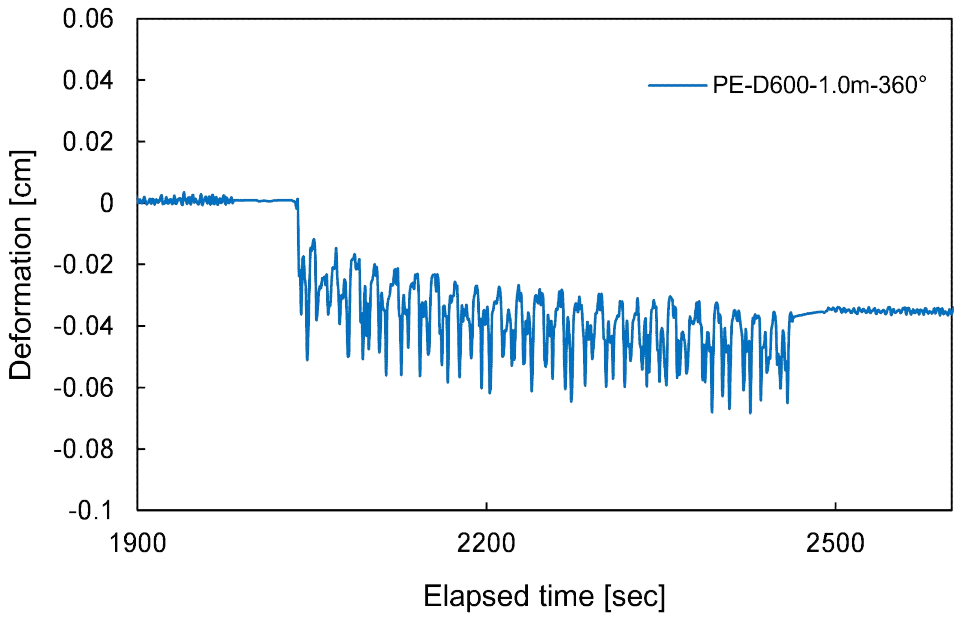
Test 2 [수직 변위: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



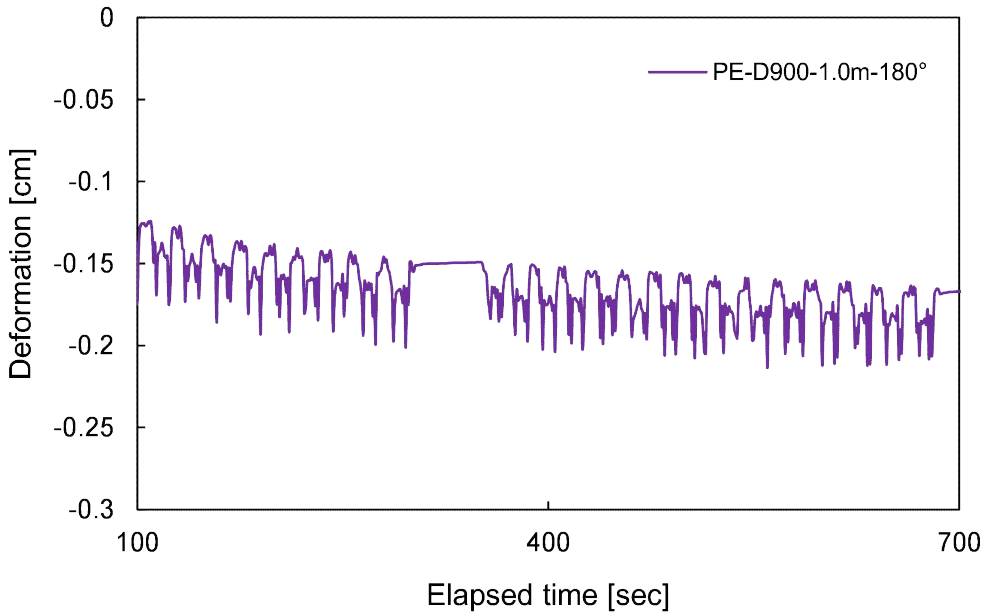
10톤 롤러 종방향 주행

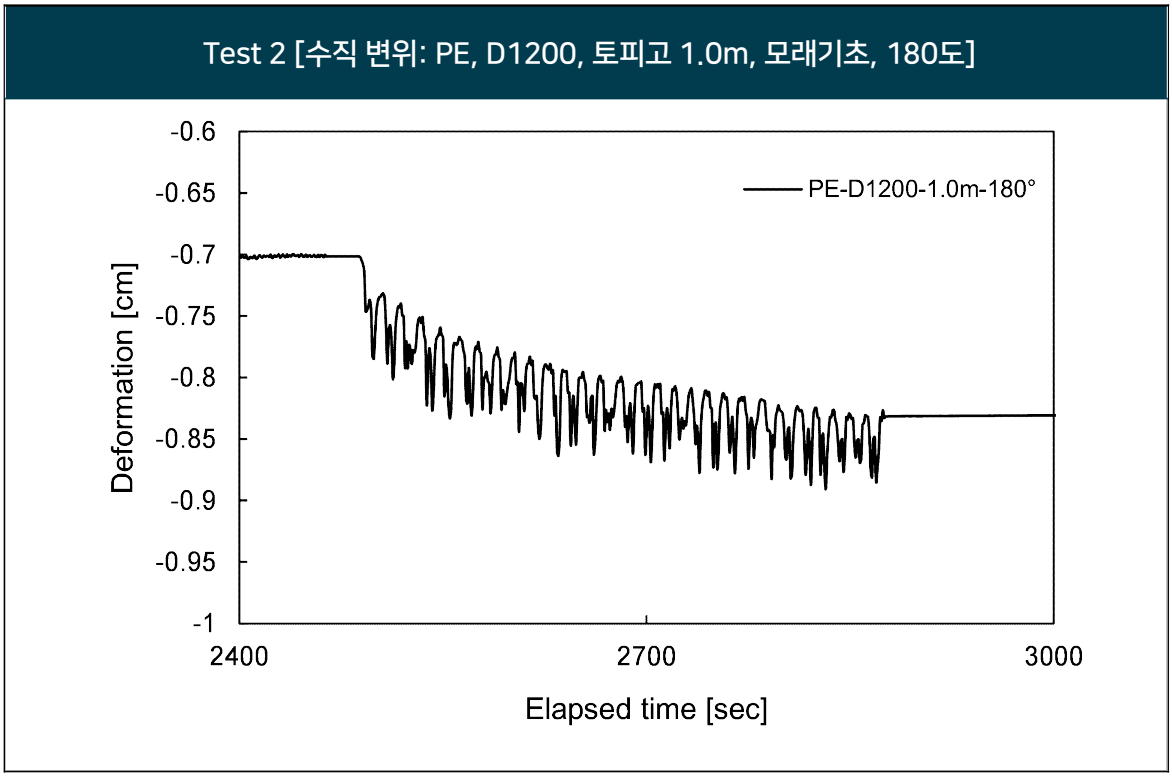

Test 2 [수직 변위: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PE-D200-1.0m-180°
Deformation [cm]
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
1500
1800
2100
Elapsed time [sec]
Test 2 [수직 변위: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PVC-D400-1.0m-180°
Deformation [cm]
0
-0.05
-0.1
-0.15
-0.2
700
1000
1300
Elapsed time [sec]

Test 2 [수직 변위: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]

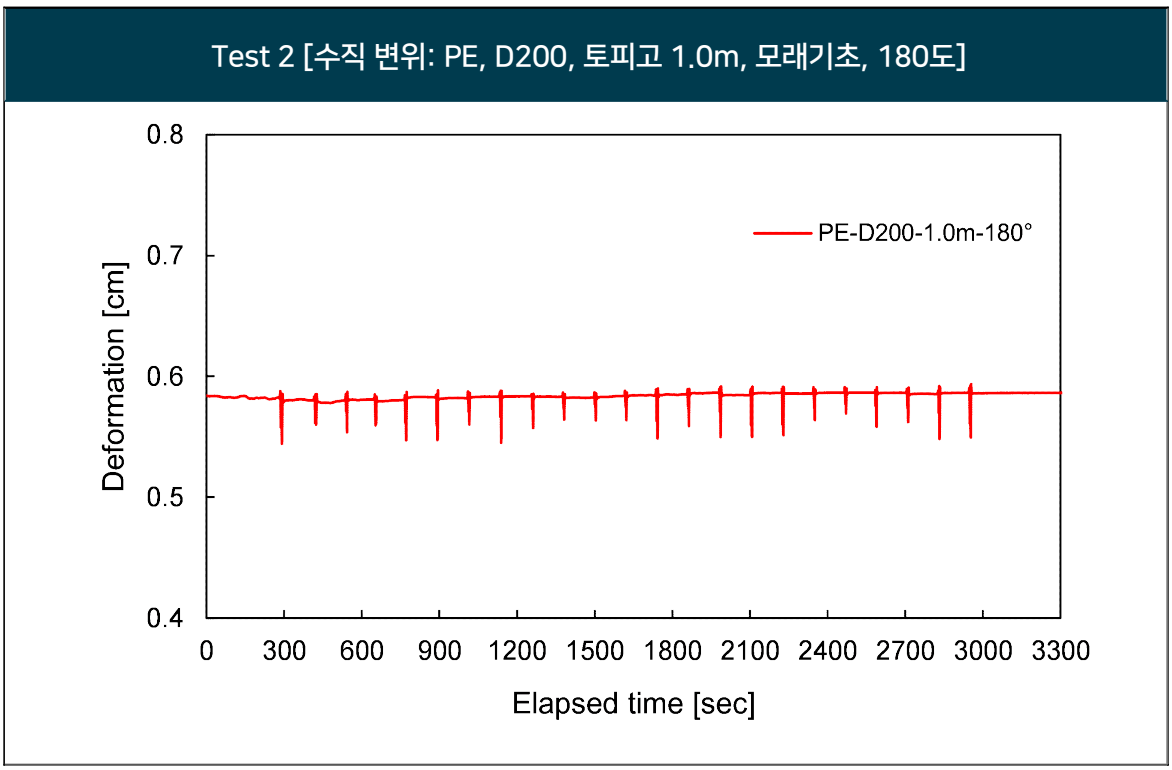


Test 2 [수직 변위: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

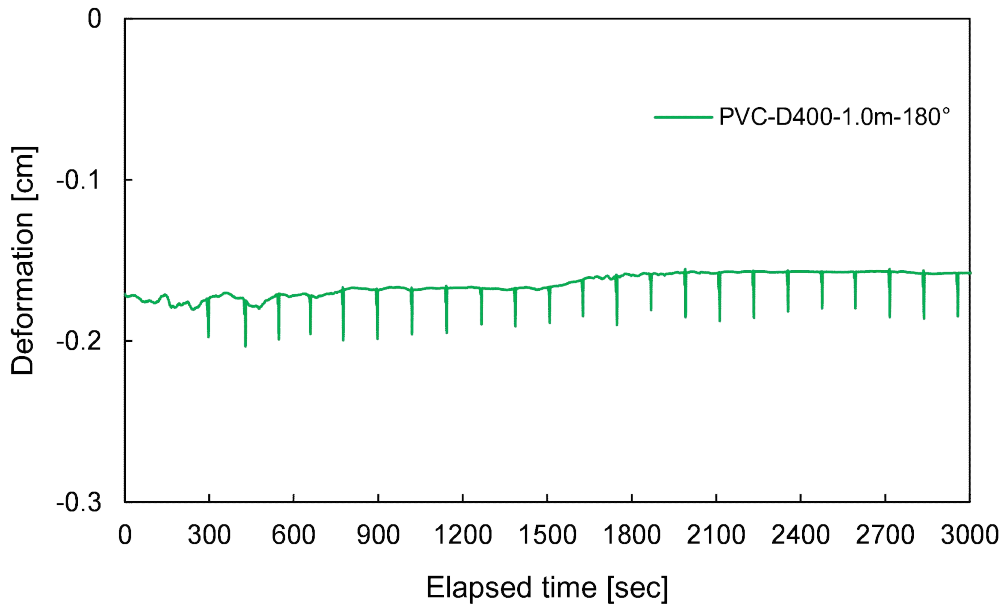



Test 2 [수직 변위: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PE-D1200-1.0m-180°
Deformation [cm]
-0.6
-0.65
-0.7
-0.75
-0.8
-0.85
-0.9
-0.95
-1
2400
2700
3000
Elapsed time [sec]

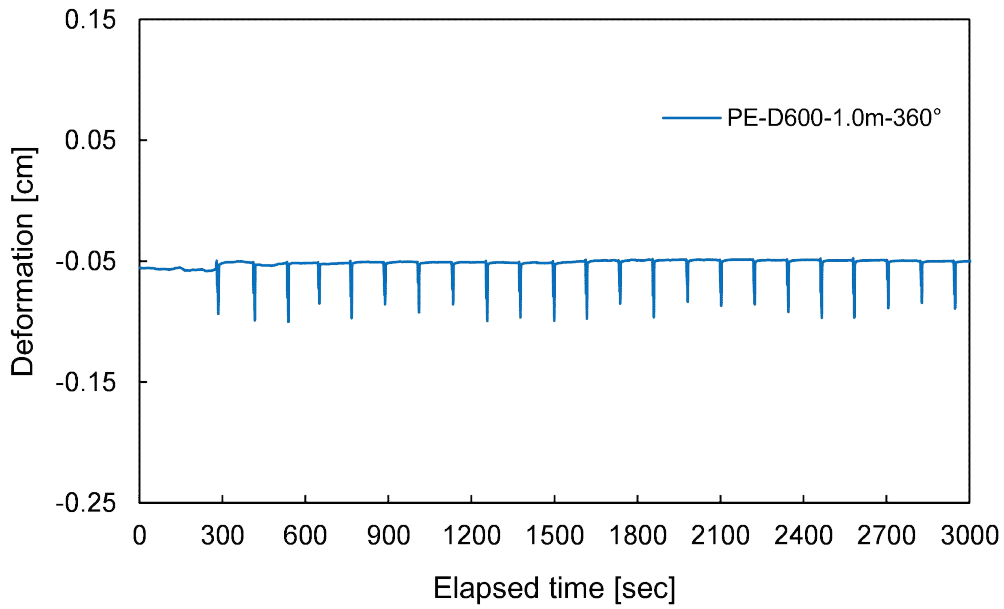
25톤 덤프 횡방향 주행


Test 2 [수직 변위: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PE-D200-1.0m-180°
Deformation [cm]
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0
300
600
900
1200
1500
1800
2100
2400
2700
3000
3300
Elapsed time [sec]

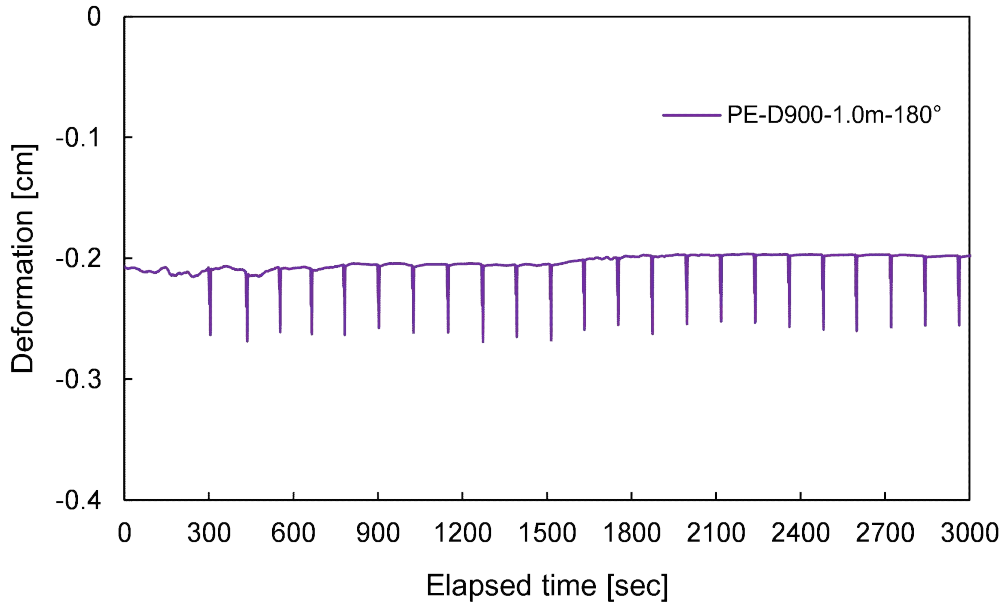
Test 2 [수직 변위: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



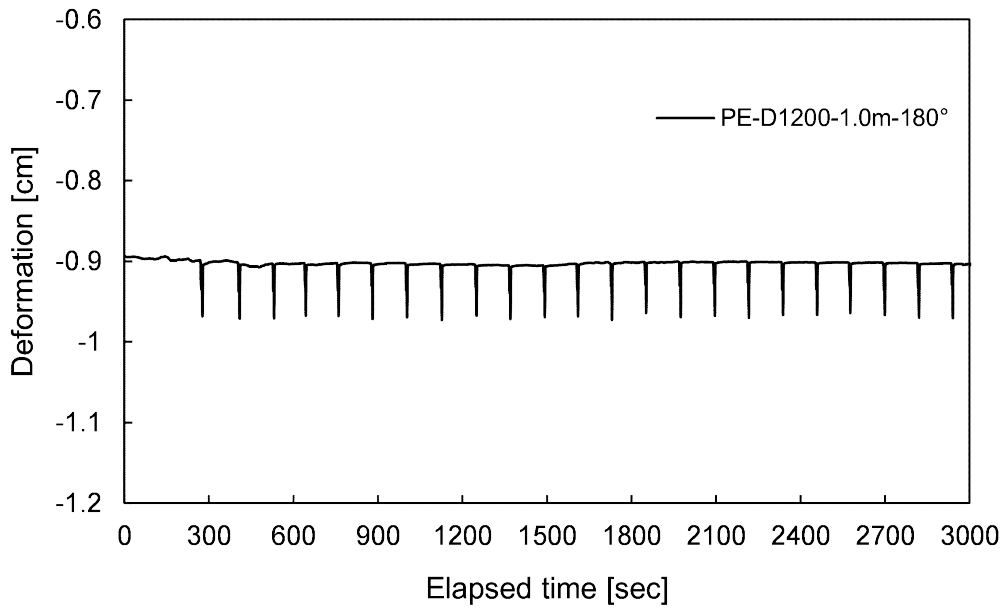
Test 2 [수직 변위: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]



Test 2 [수직 변위: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

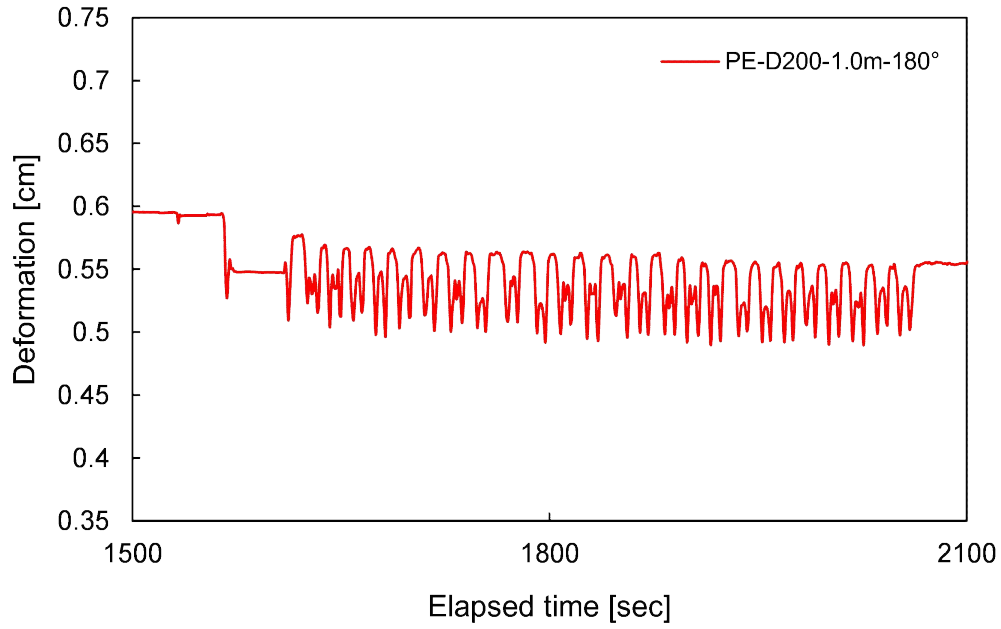


Test 2 [수직 변위: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

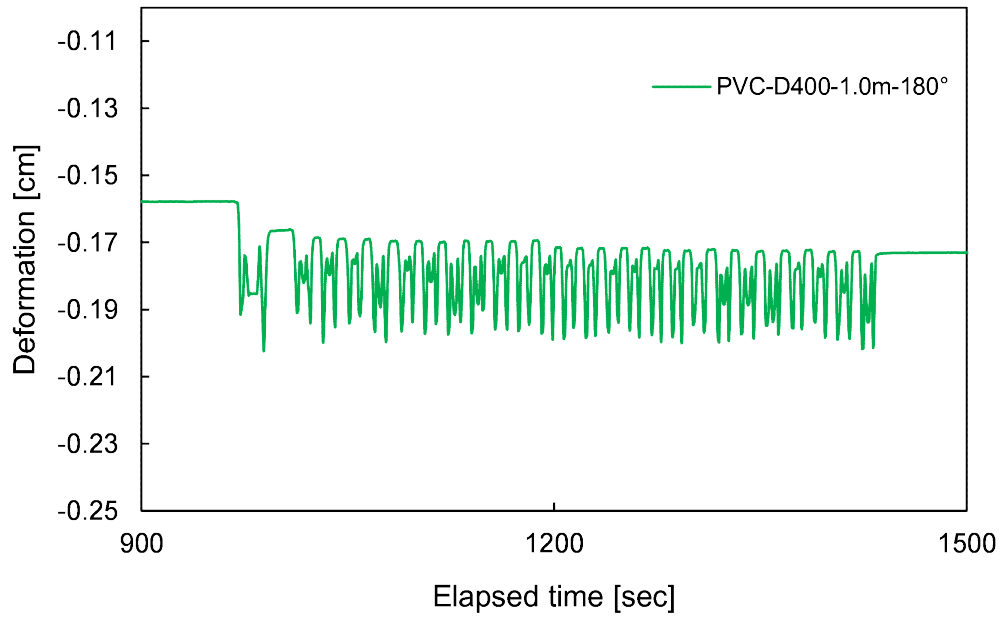


25톤 덤프 종방향 주행

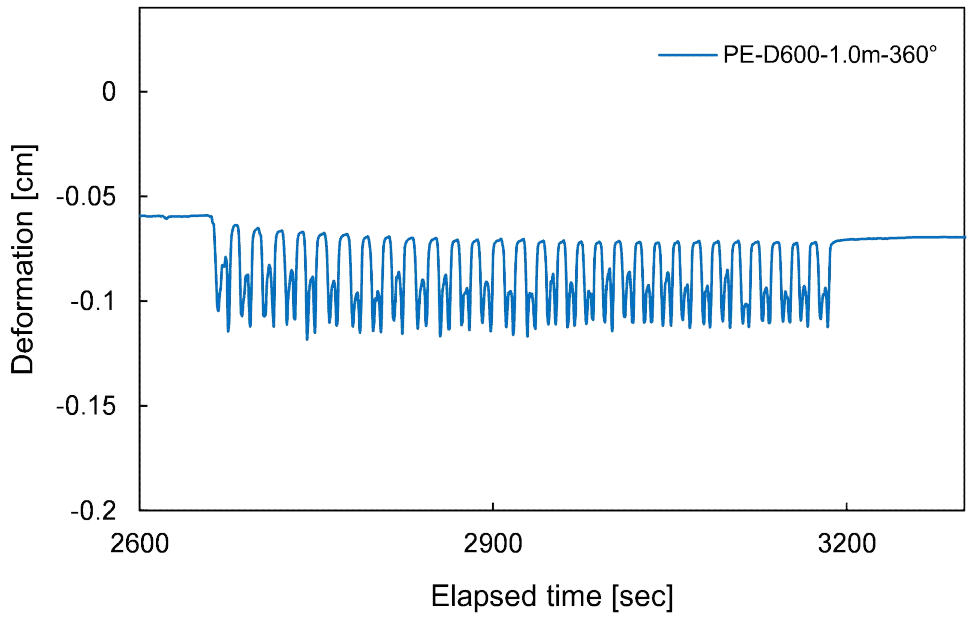
Test 2 [수직 변위: PE, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



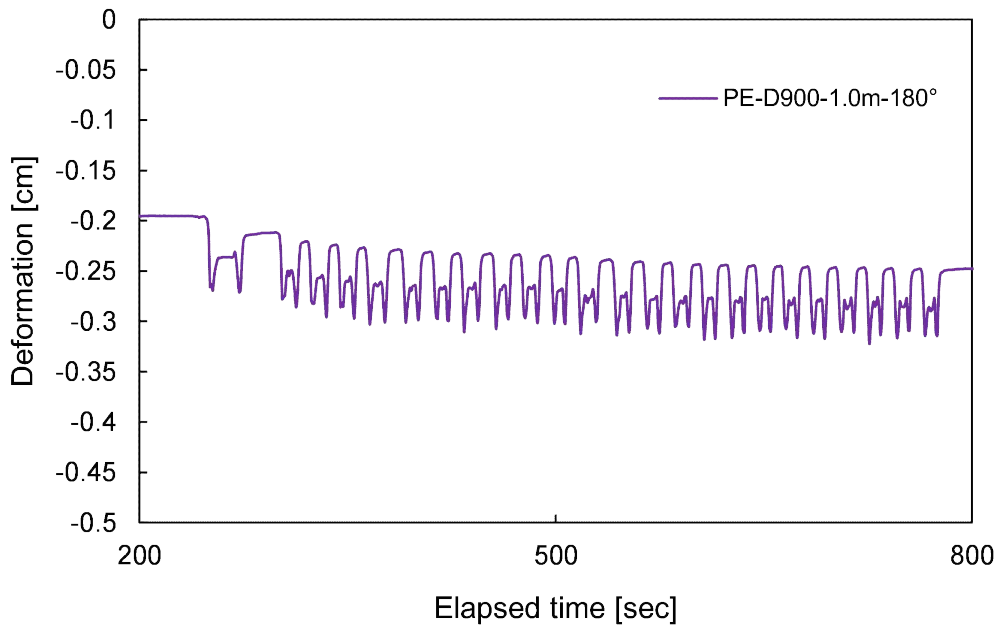
Test 2 [수직 변위: PVC, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

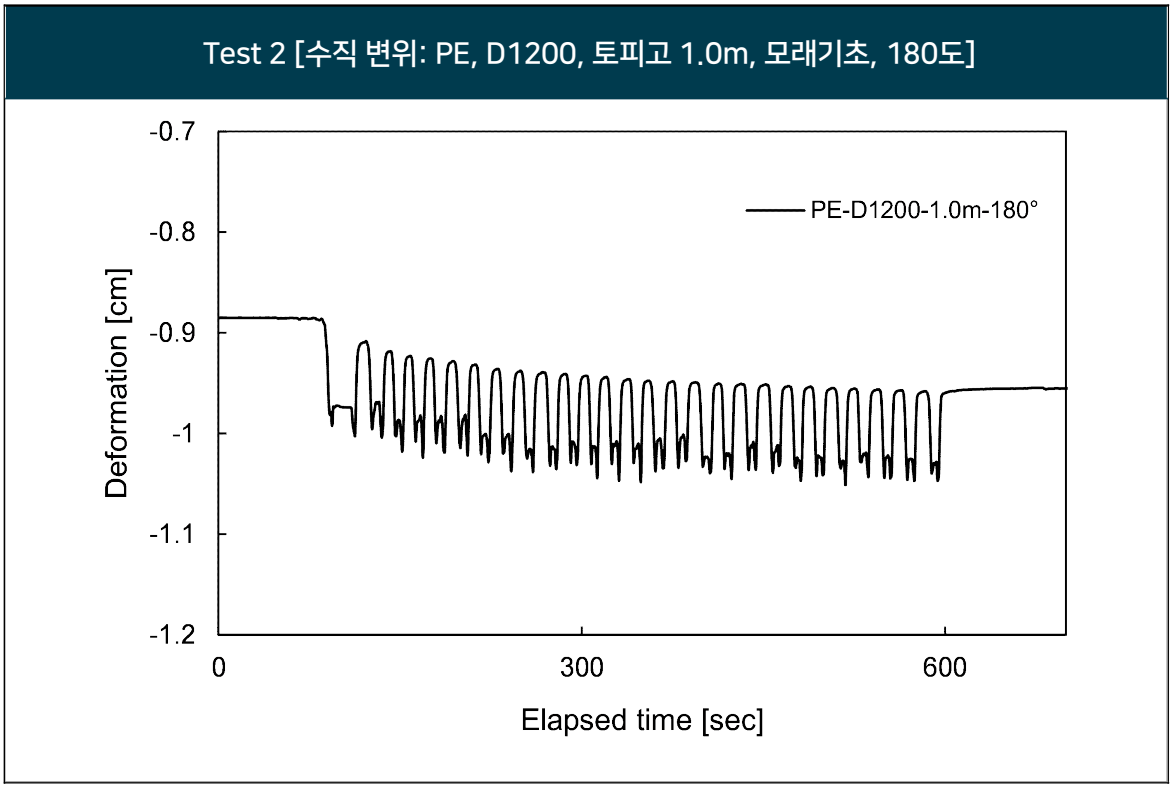


Test 2 [수직 변위: PE, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 360도]

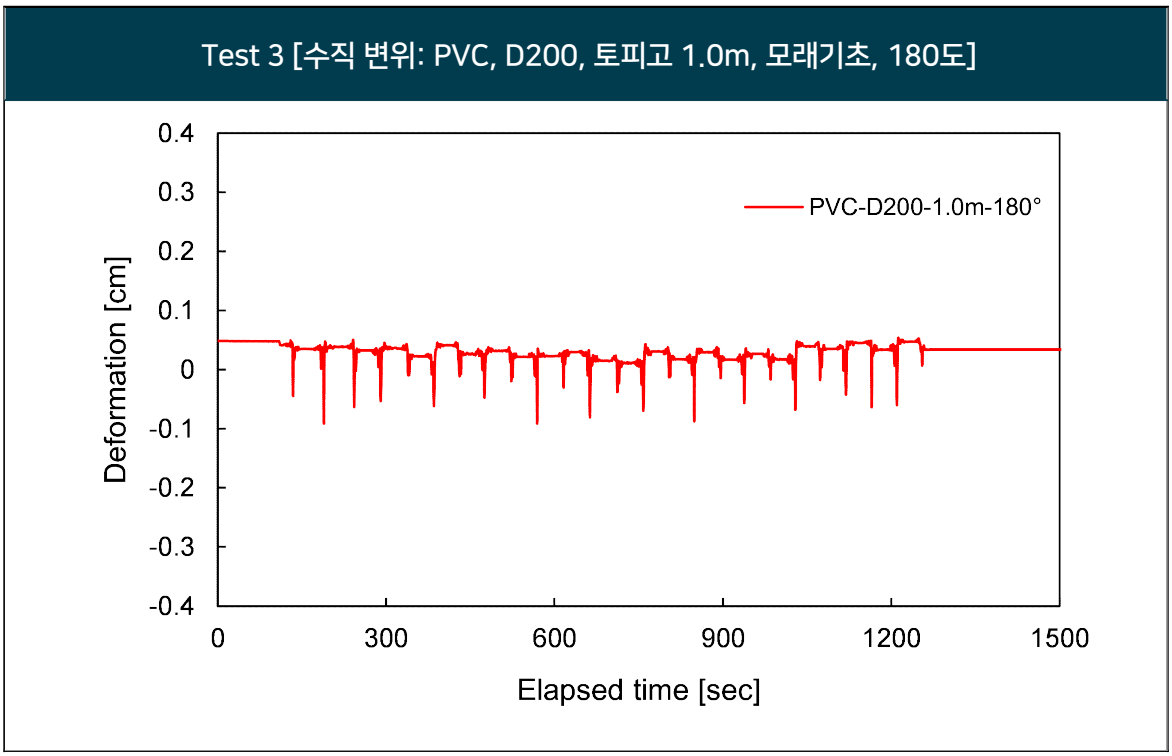


Test 2 [수직 변위: PE, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

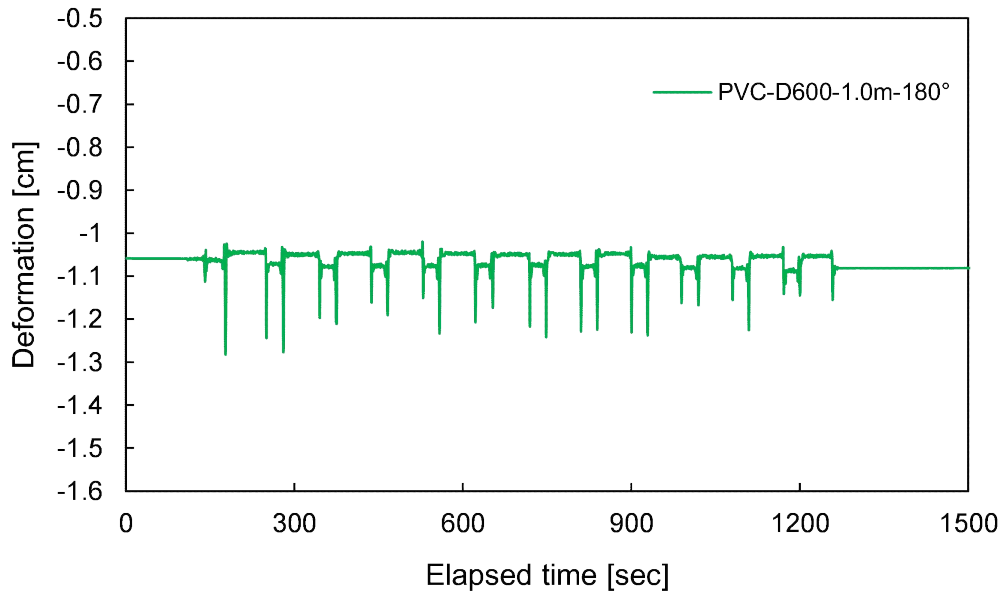



Test 2 [수직 변위: PE, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PE-D1200-1.0m-180°
Deformation [cm]
-0.7
-0.8
-0.9
-1
-1.1
-1.2
0
300
600
Elapsed time [sec]

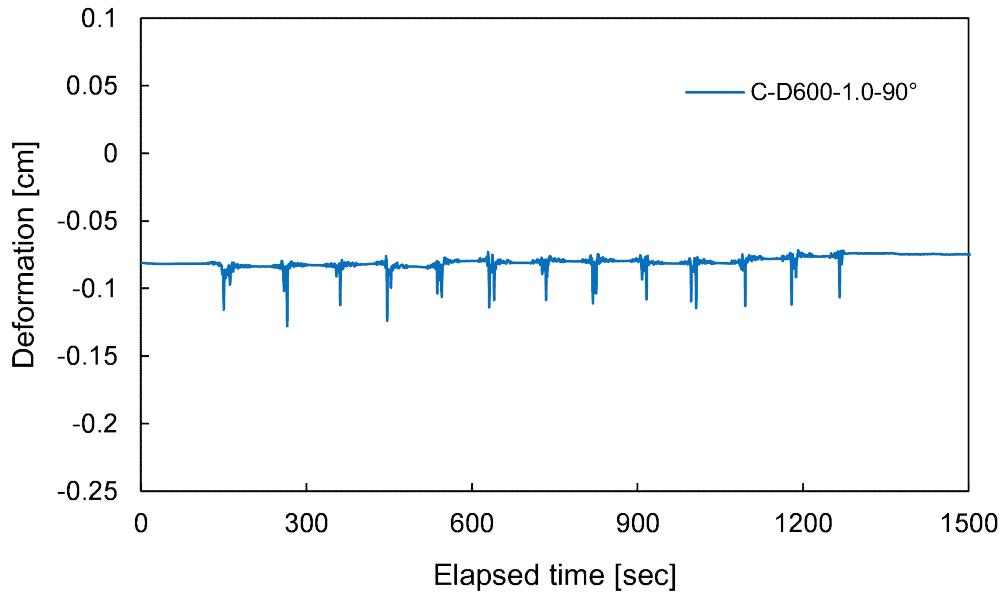
10톤 롤러 횡방향 주행


Test 3 [수직 변위: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PVC-D200-1.0m-180°
Deformation [cm]
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
0
300
600
900
1200
1500
Elapsed time [sec]

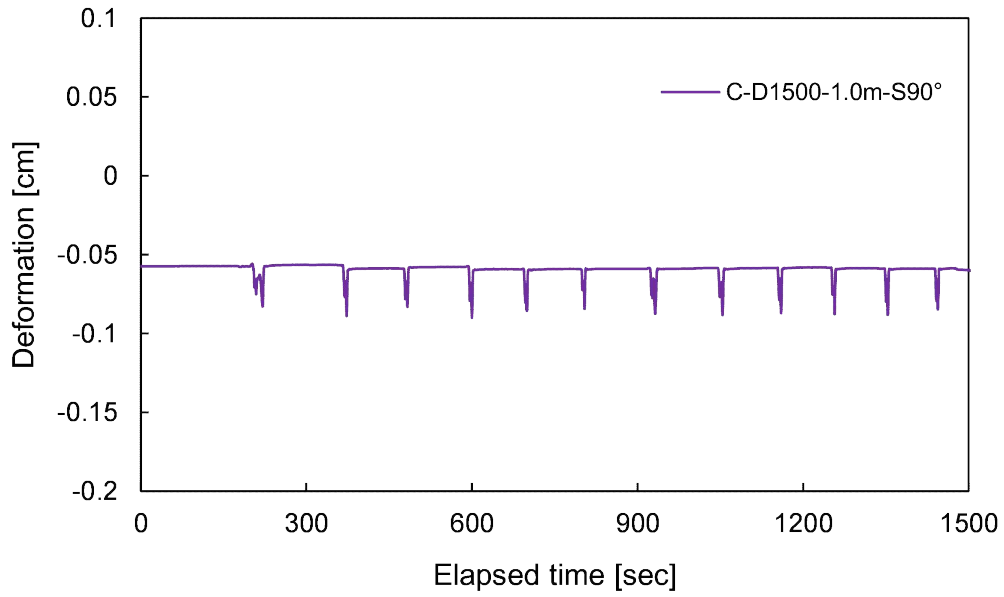
Test 3 [수직 변위: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



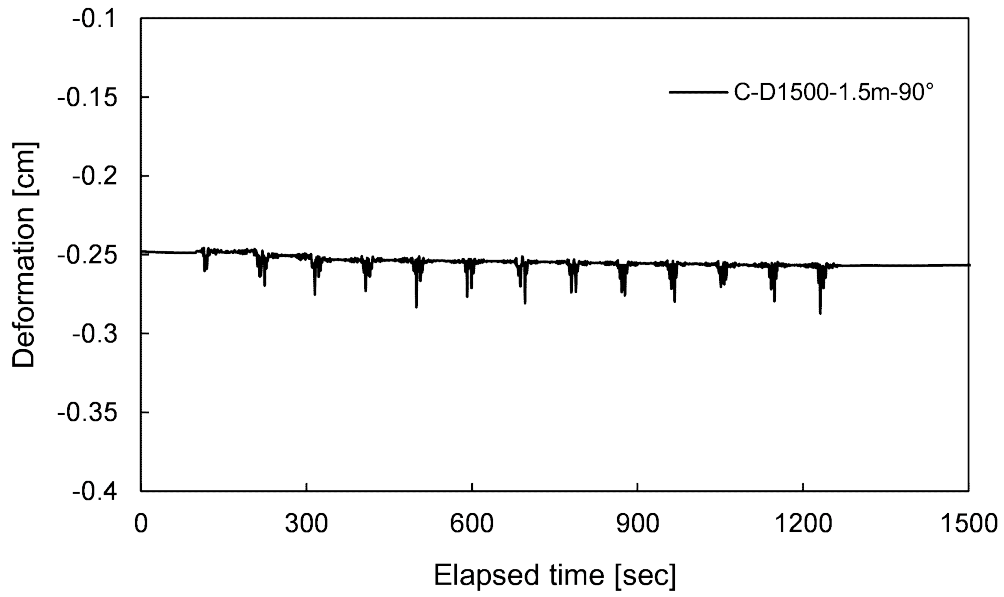
Test 3 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



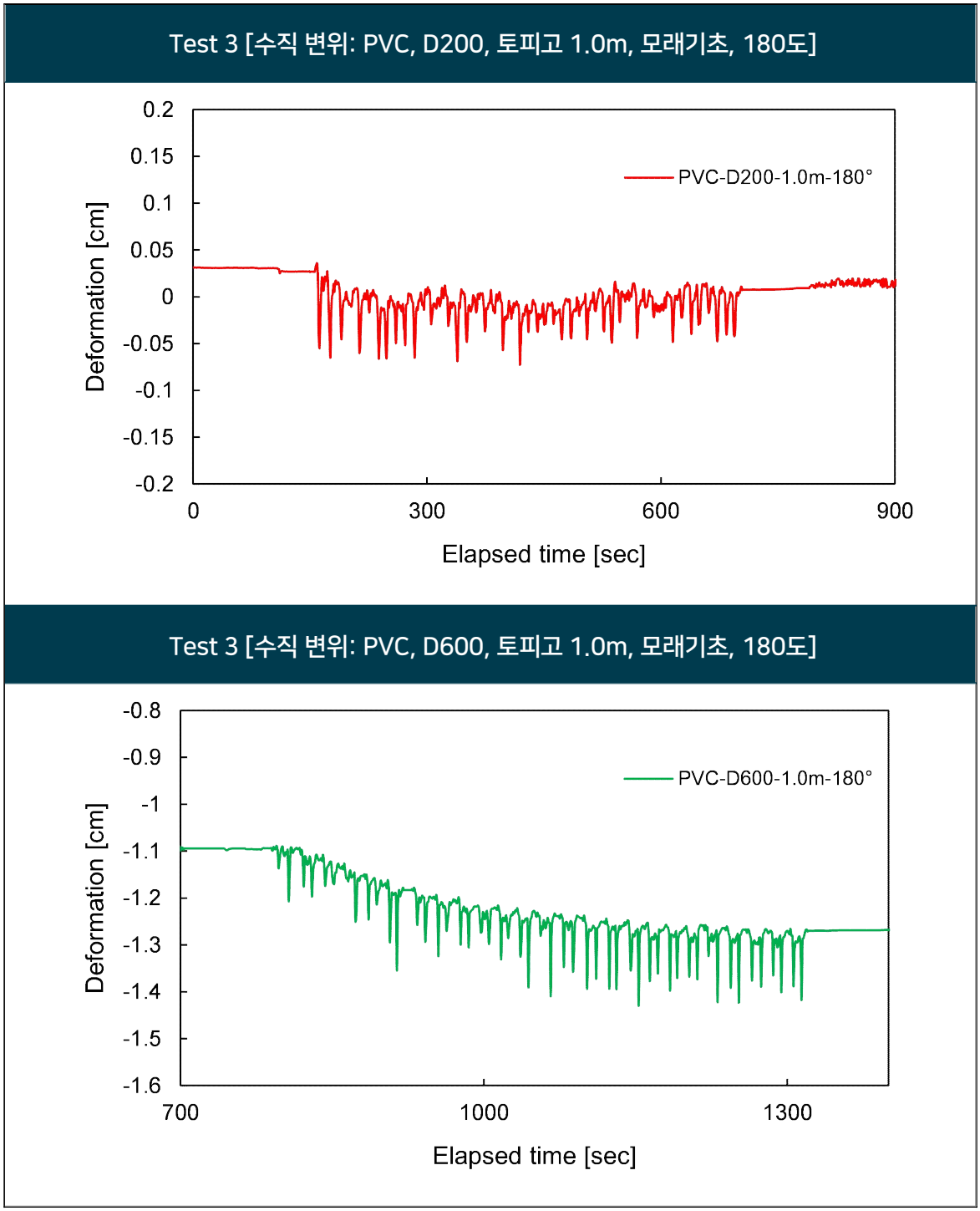
Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



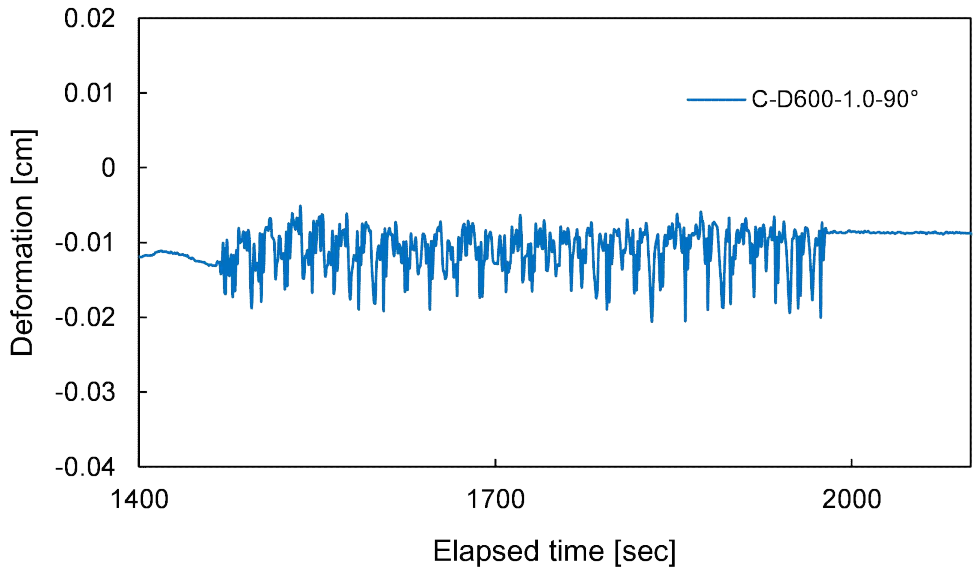
Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]



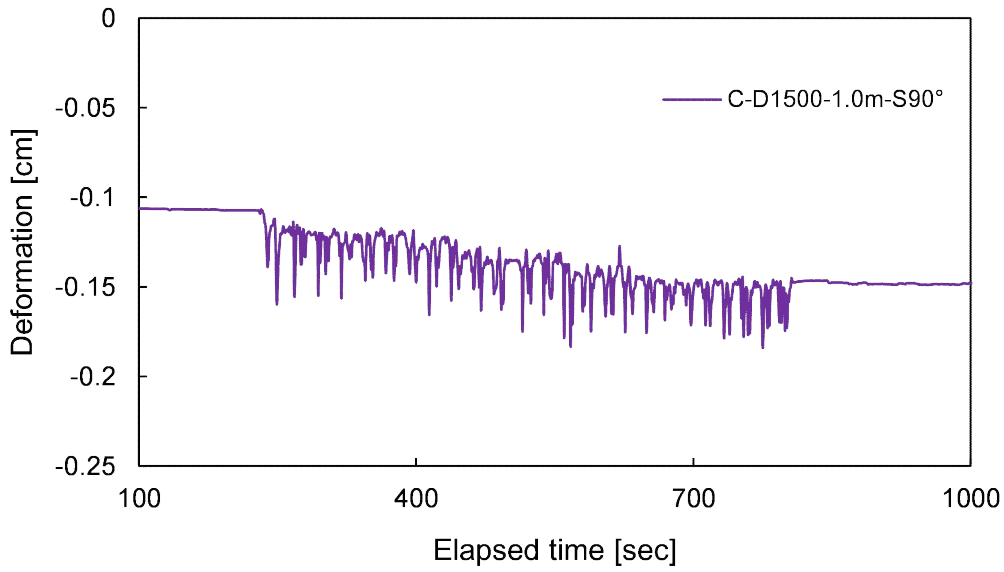
10톤 롤러 종방향 주행

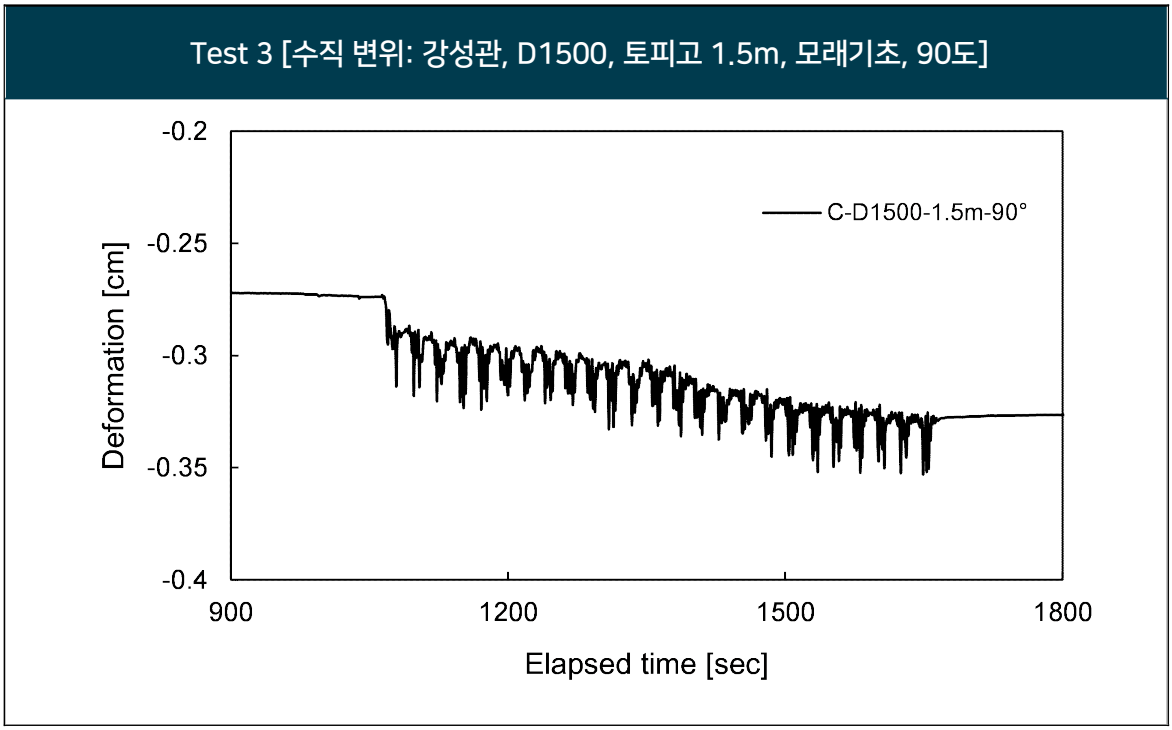

Test 3 [수직 변위: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Deformation [cm]
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
-0.15
-0.2
PVC-D200-1.0m-180°
0
300
600
900
Elapsed time [sec]
Test 3 [수직 변위: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Deformation [cm]
-0.8
-0.9
-1
-1.1
-1.2
-1.3
-1.4
-1.5
-1.6
PVC-D600-1.0m-180°
700
1000
1300
Elapsed time [sec]

Test 3 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

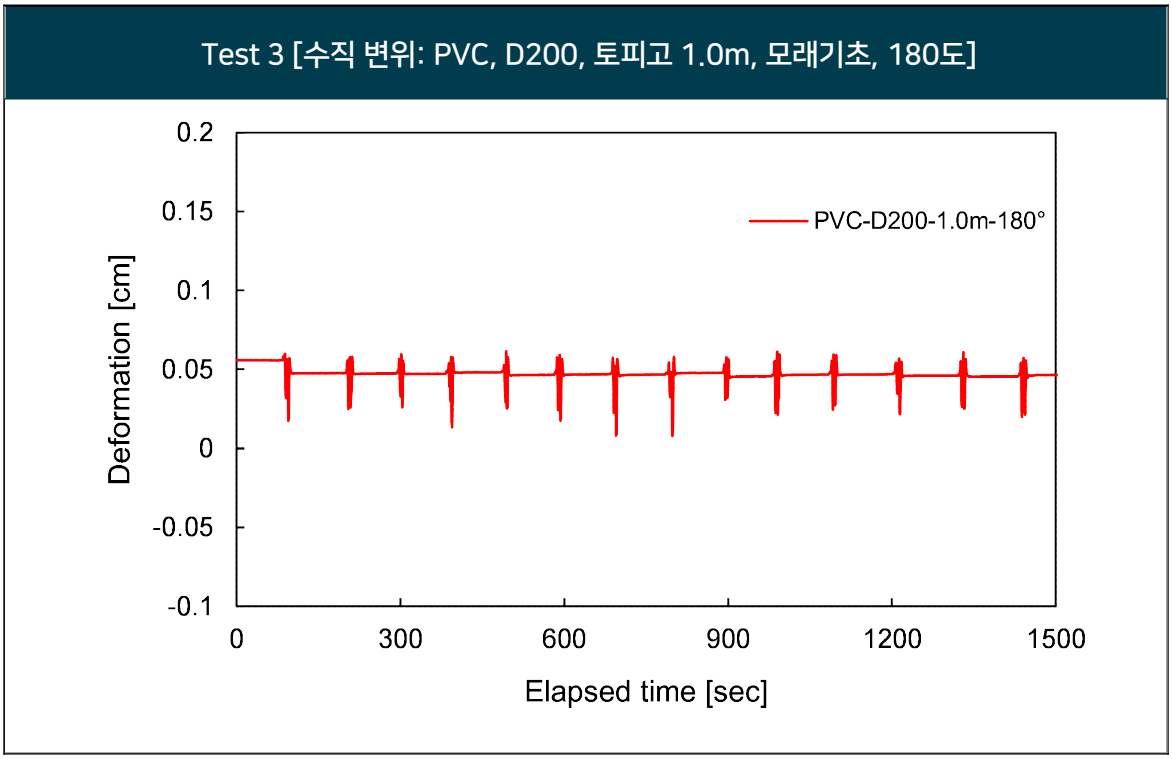


Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

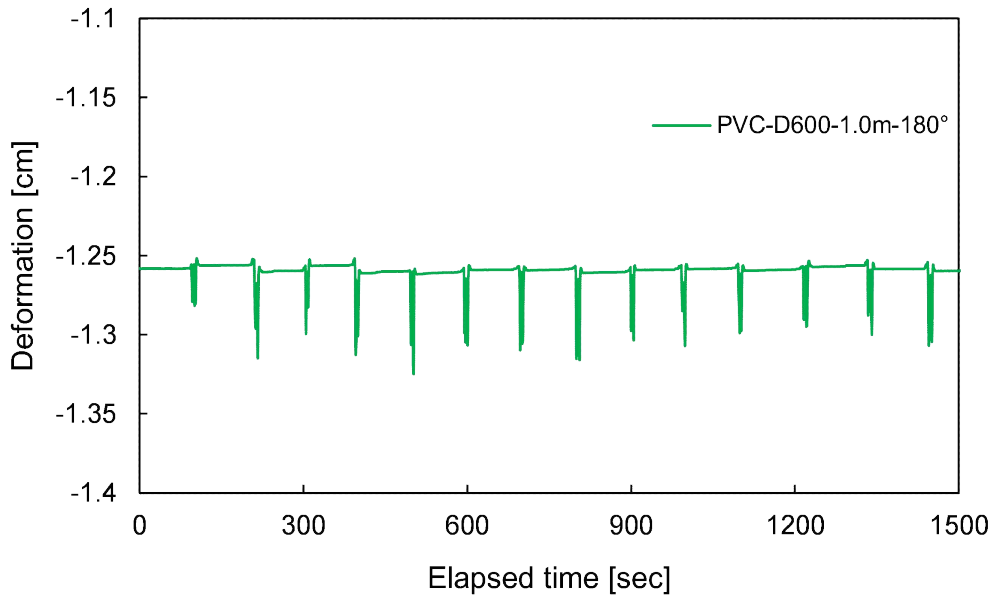



Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]
C-D1500-1.5m-90°
Deformation [cm]
-0.2
-0.25
-0.3
-0.35
-0.4
900
1200
1500
1800
Elapsed time [sec]

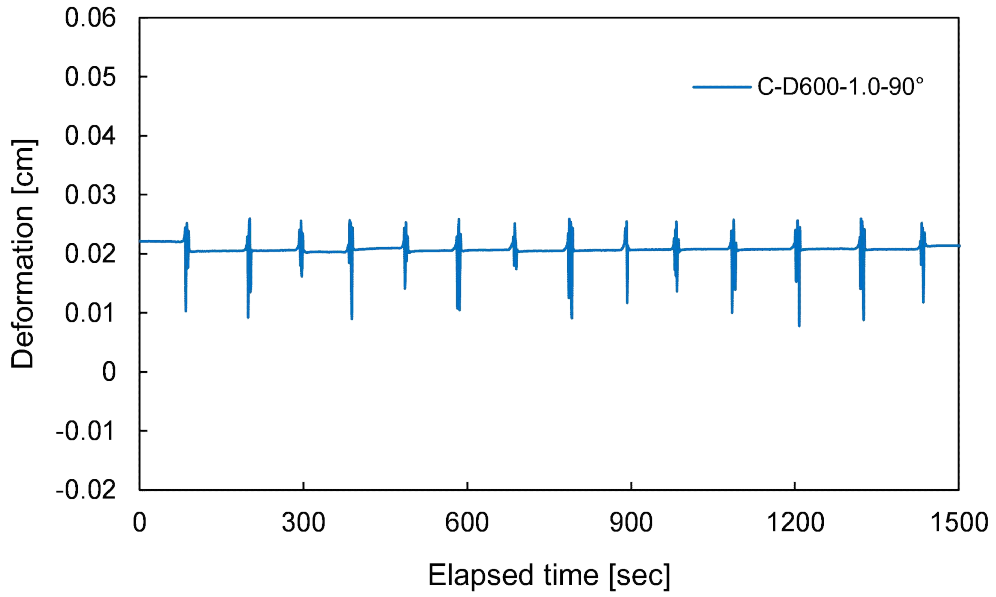
25톤 덤프 횡방향 주행


Test 3 [수직 변위: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
PVC-D200-1.0m-180°
Deformation [cm]
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
0
300
600
900
1200
1500
Elapsed time [sec]

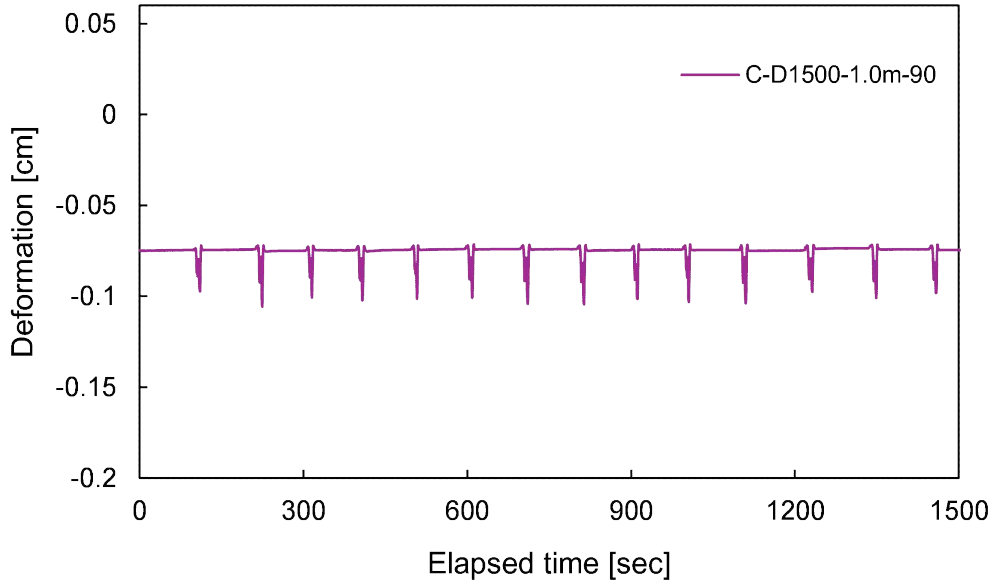
Test 3 [수직 변위: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



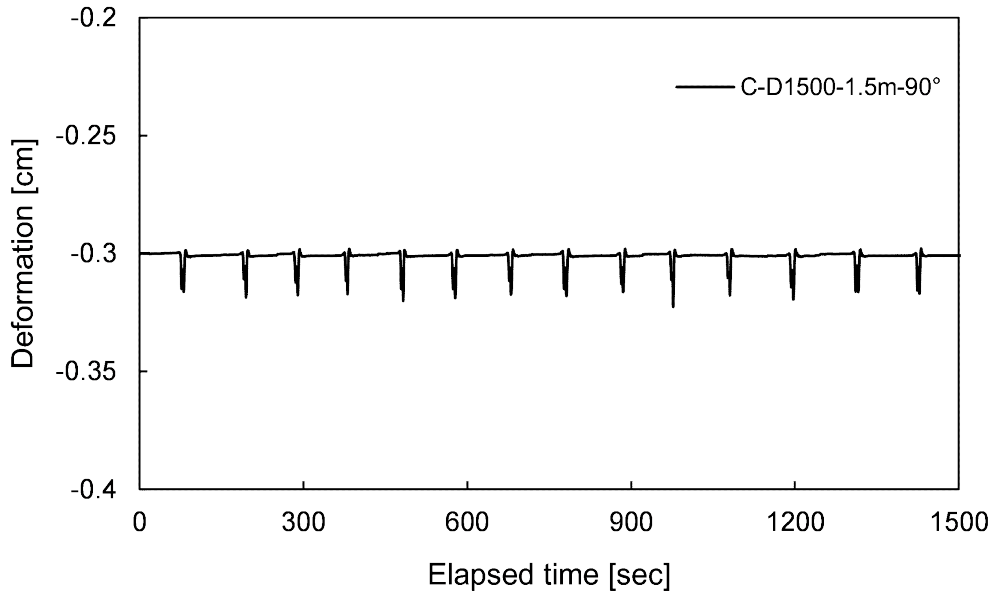
Test 3 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



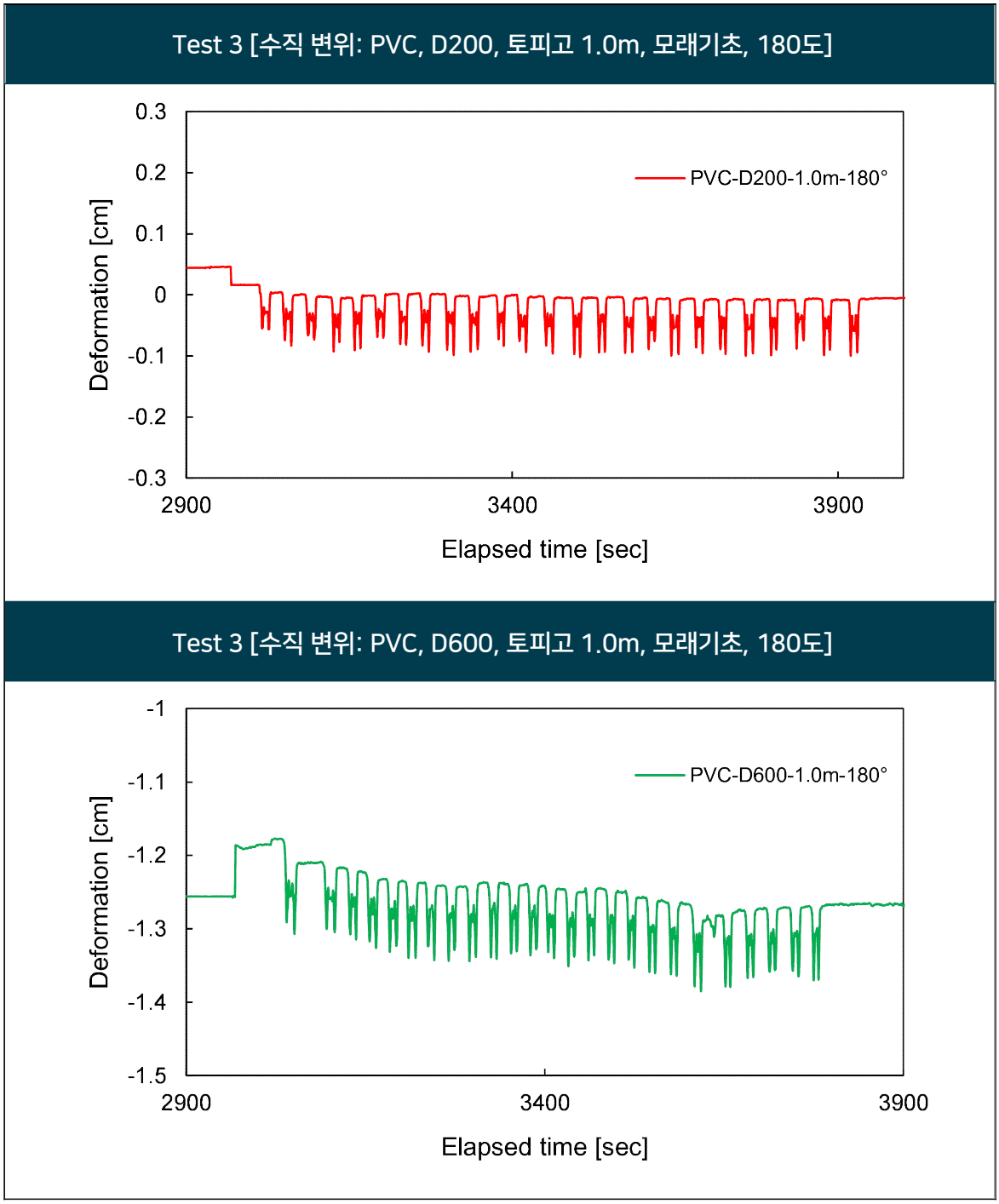
Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



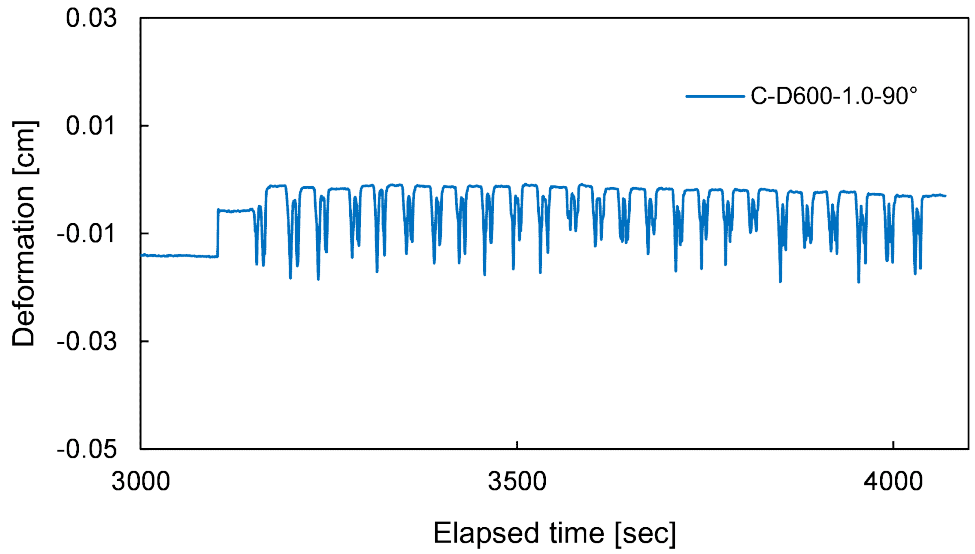
Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]



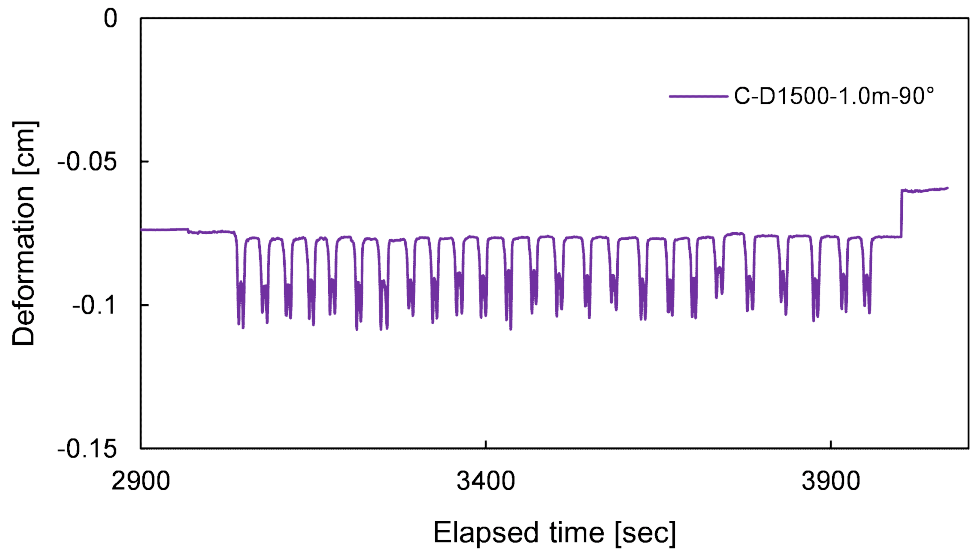
25톤 덤프 종방향 주행


Test 3 [수직 변위: PVC, D200, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Deformation [cm]
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
2900
3400
3900
Elapsed time [sec]
PVC-D200-1.0m-180°
Test 3 [수직 변위: PVC, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]
Deformation [cm]
-1
-1.1
-1.2
-1.3
-1.4
-1.5
2900
3400
3900
Elapsed time [sec]
PVC-D600-1.0m-180°

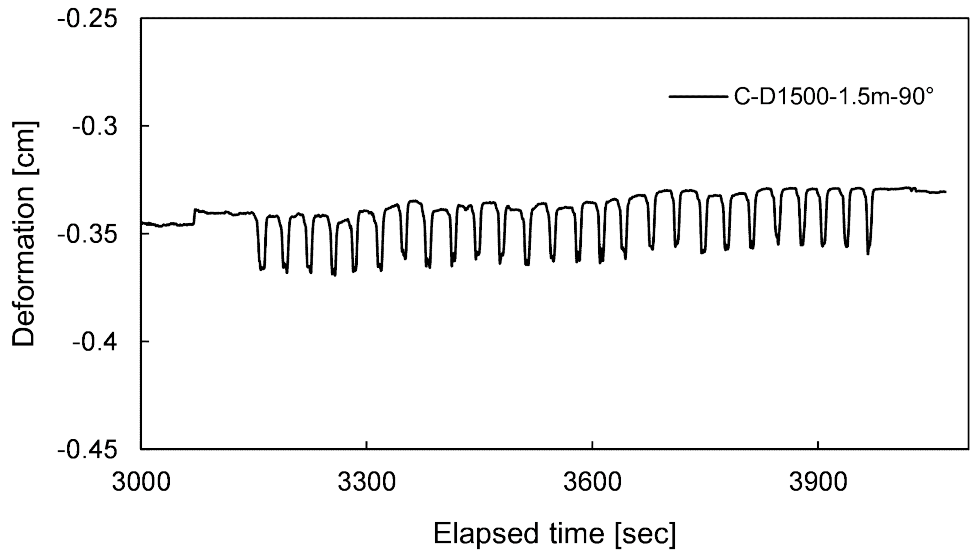
Test 3 [수직 변위: 강성관, D600, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

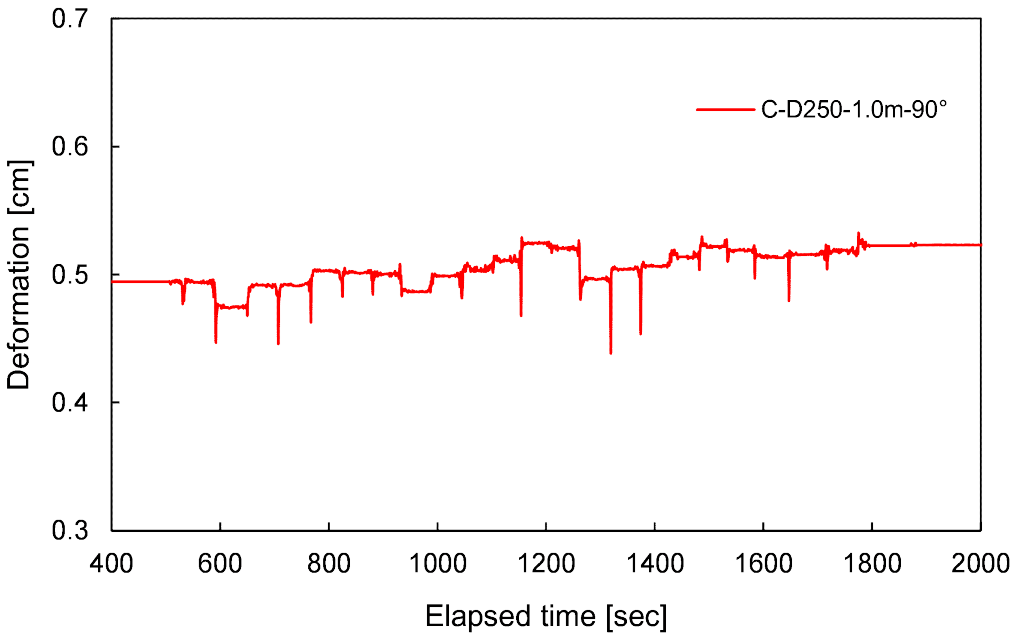


Test 3 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.5m, 모래기초, 90도]

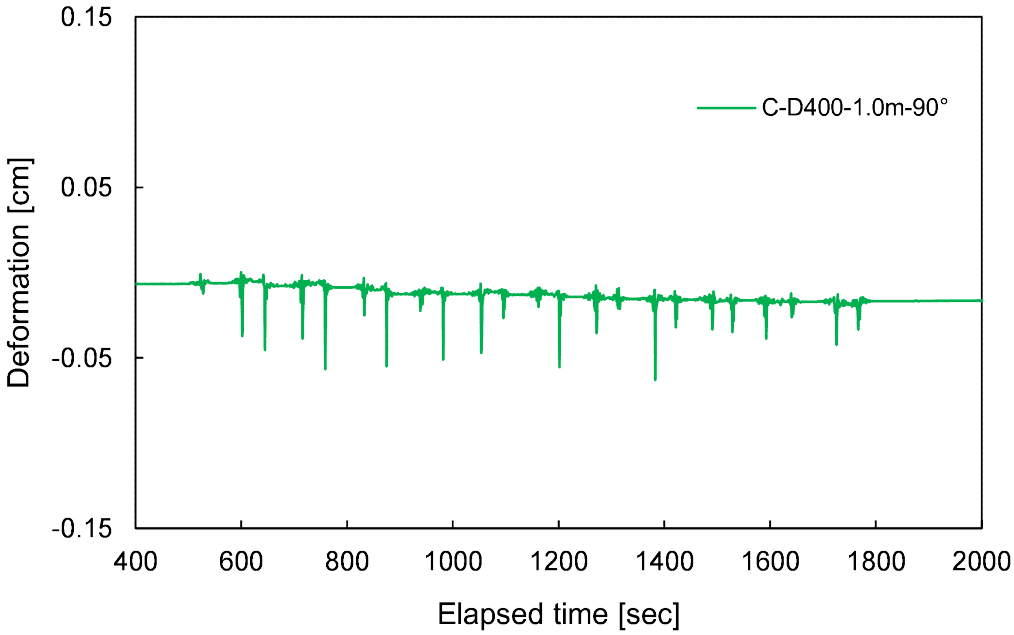


10톤 롤러 횡방향 주행

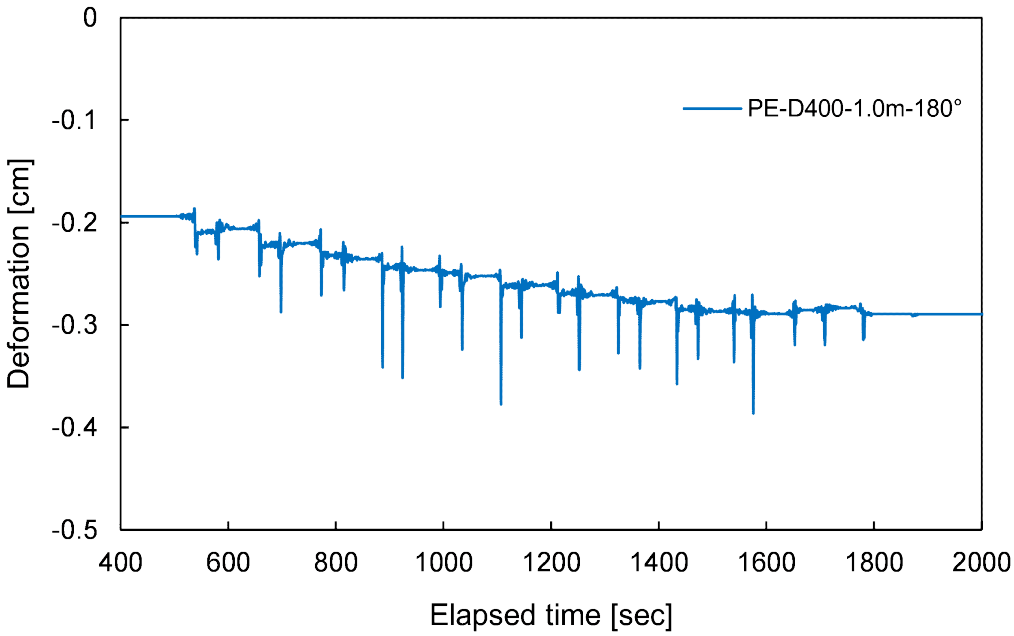
Test 4 [수직 변위: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



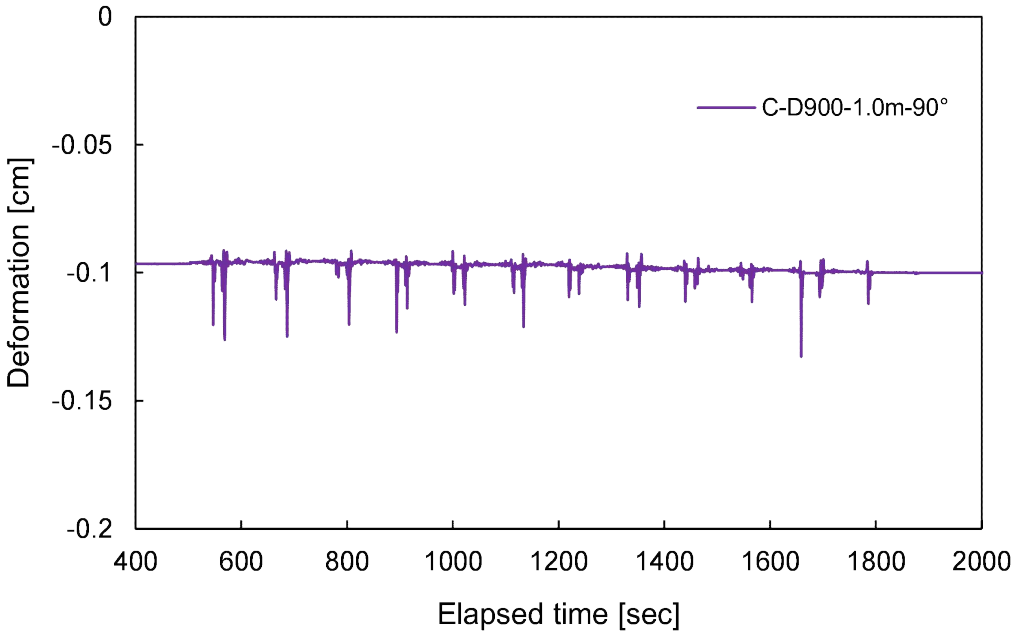
Test 4 [수직 변위: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



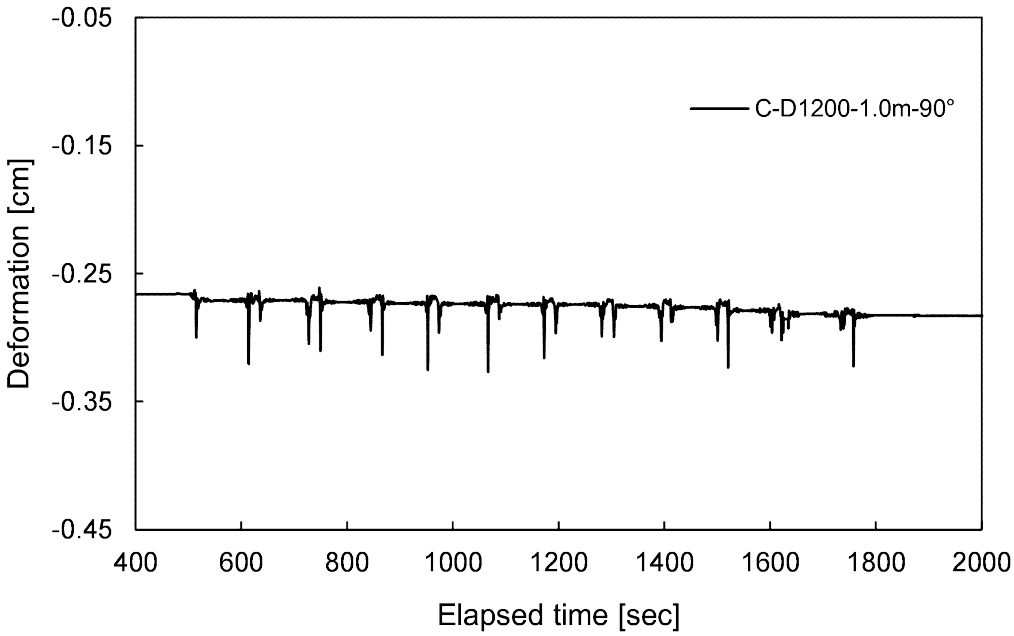
Test 4 [수직 변위: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



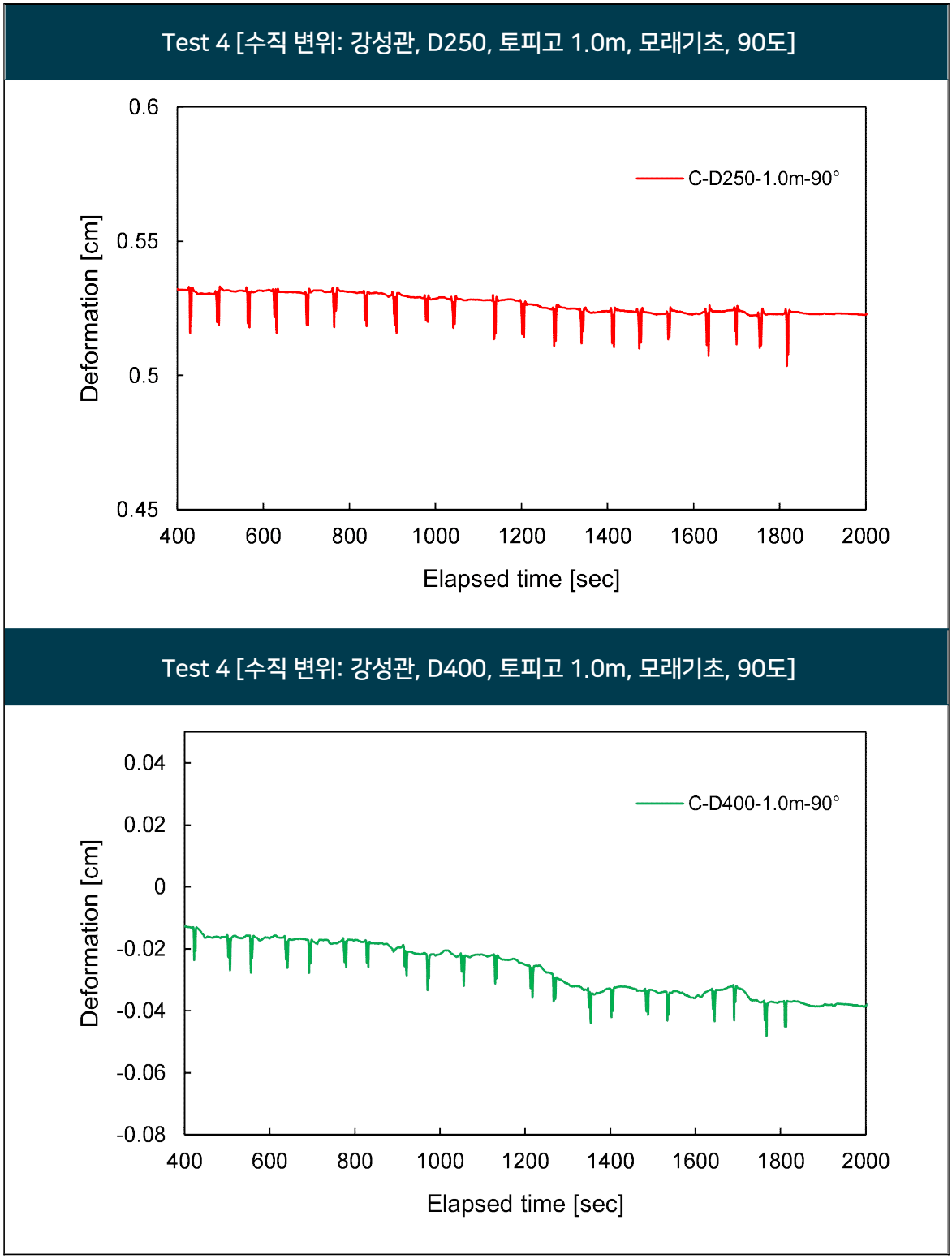
Test 4 [수직 변위: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



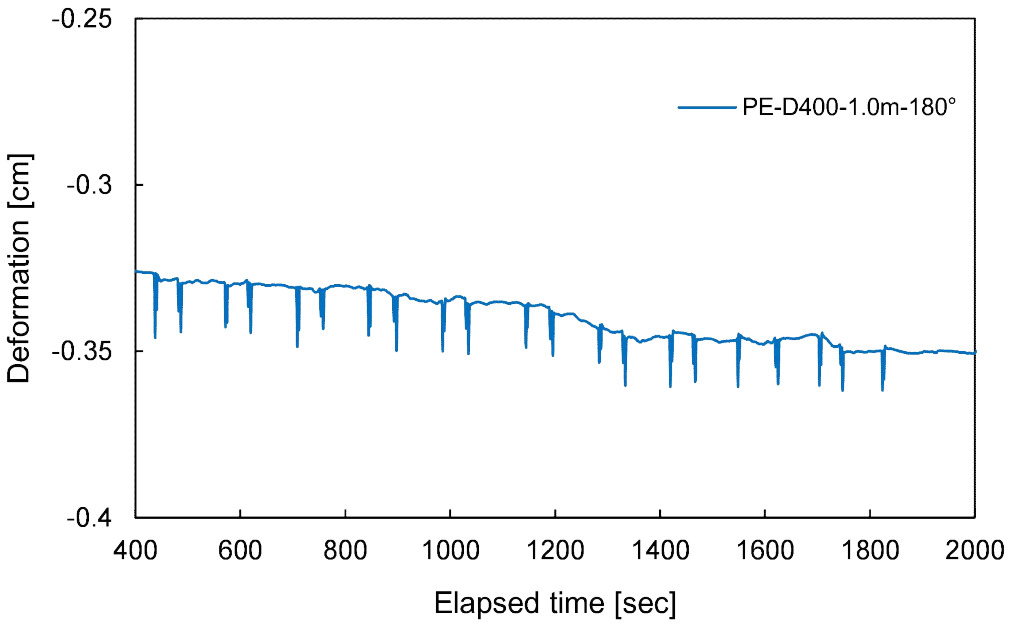
Test 4 [수직 변위: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



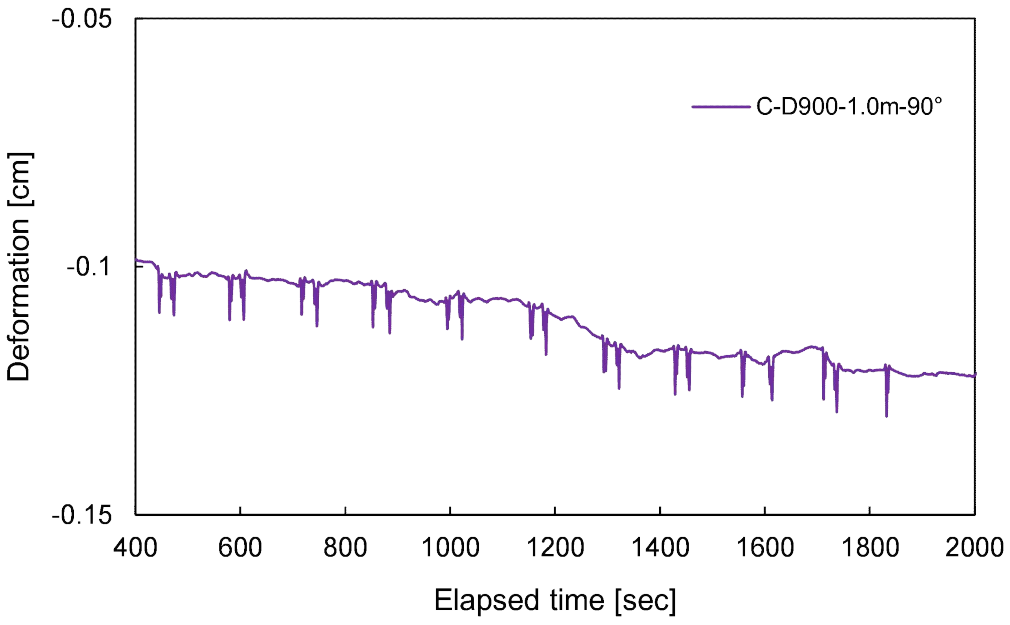
10톤 롤러 횡방향 주행 (진동 X)

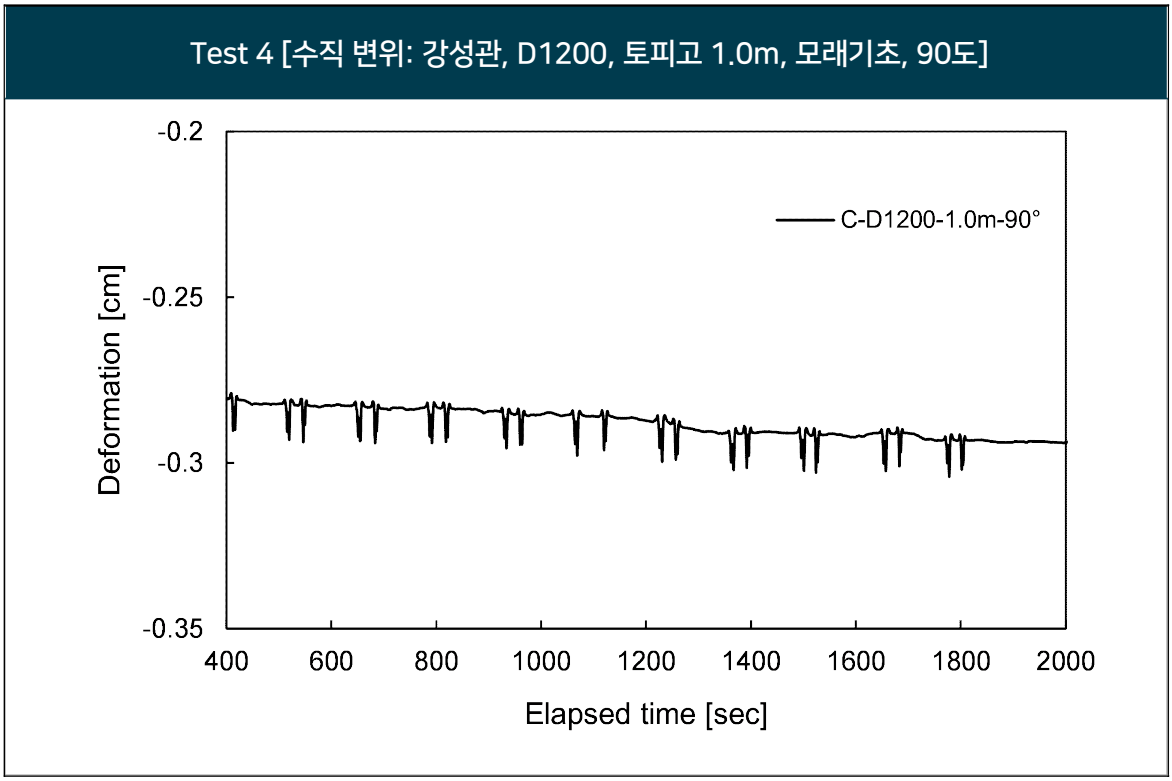


Test 4 [수직 변위: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

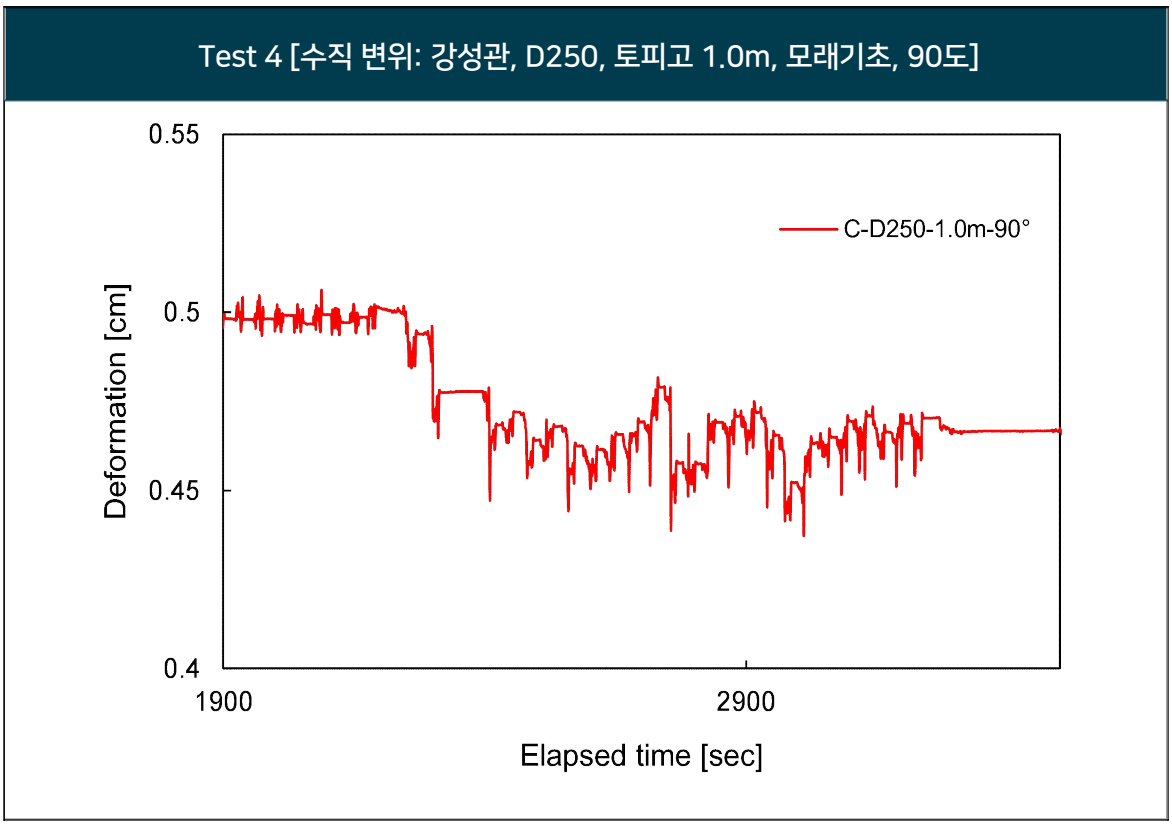


Test 4 [수직 변위: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

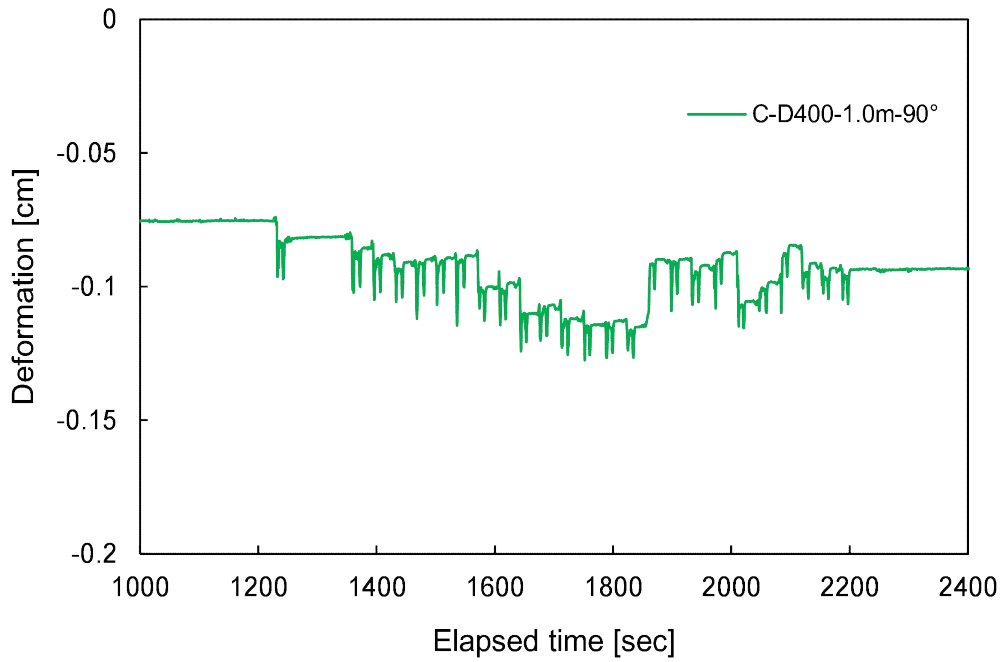



Test 4 [수직 변위: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
C-D1200-1.0m-90°
Deformation [cm]
-0.2
-0.25
-0.3
-0.35
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Elapsed time [sec]

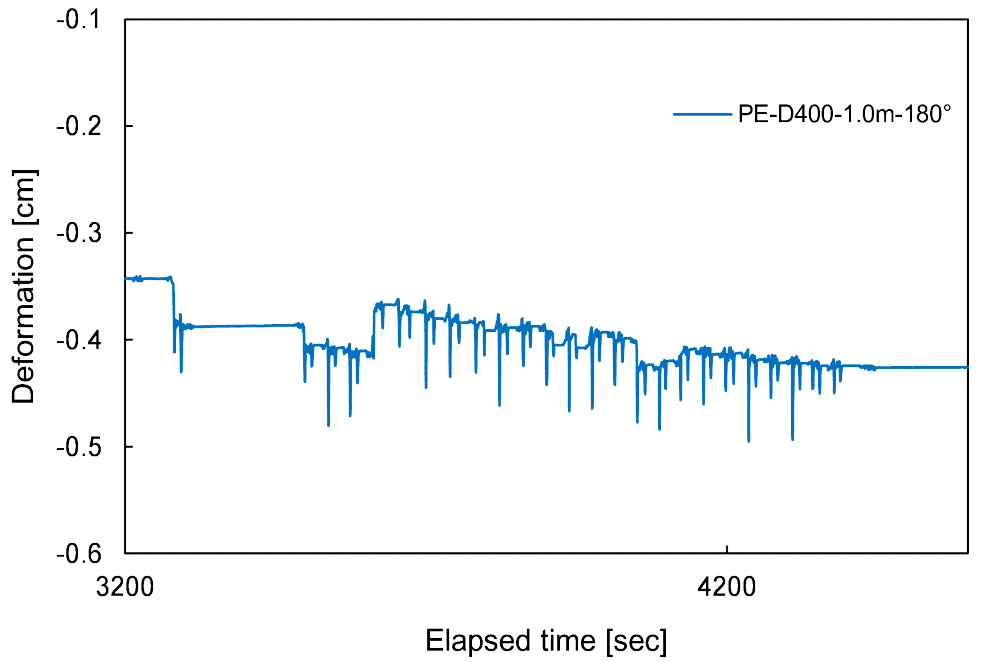
10톤 롤러 종방향 주행


Test 4 [수직 변위: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
C-D250-1.0m-90°
Deformation [cm]
0.55
0.5
0.45
0.4
1900
2900
Elapsed time [sec]

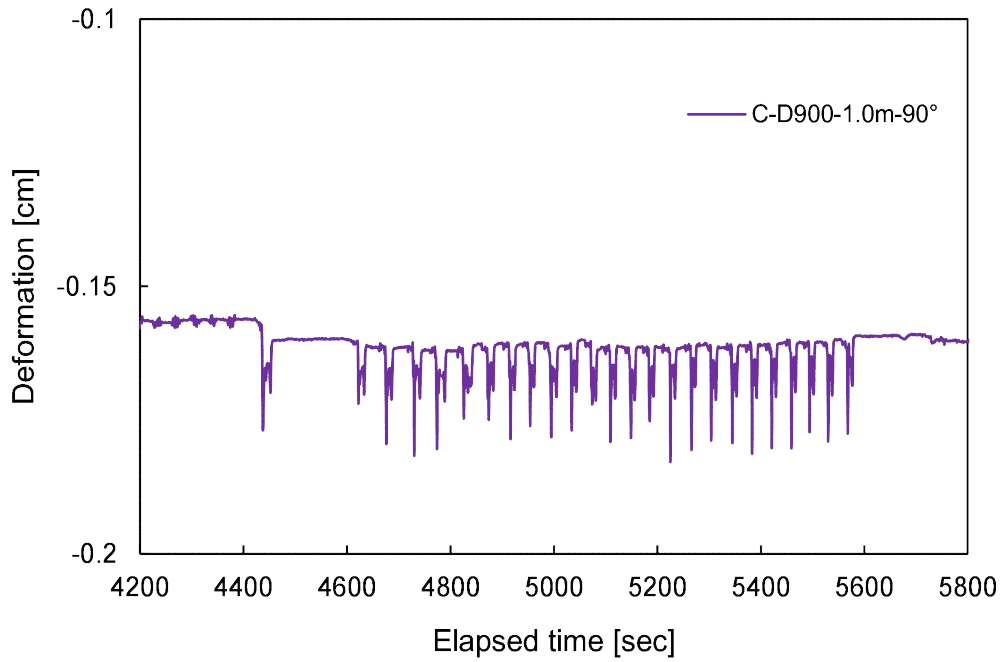
Test 4 [수직 변위: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



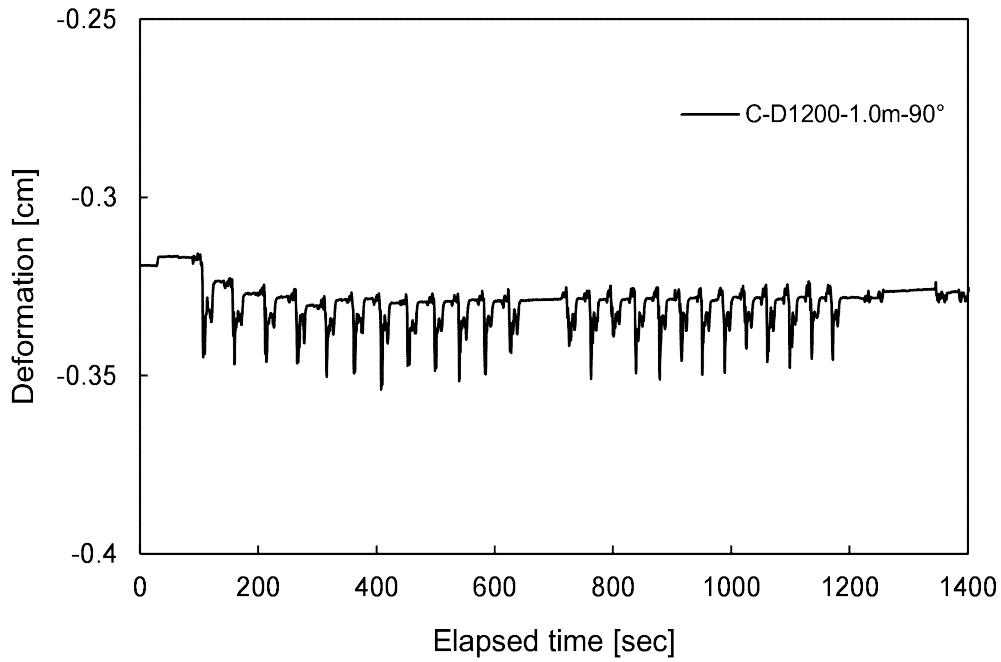
Test 4 [수직 변위: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



Test 4 [수직 변위: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

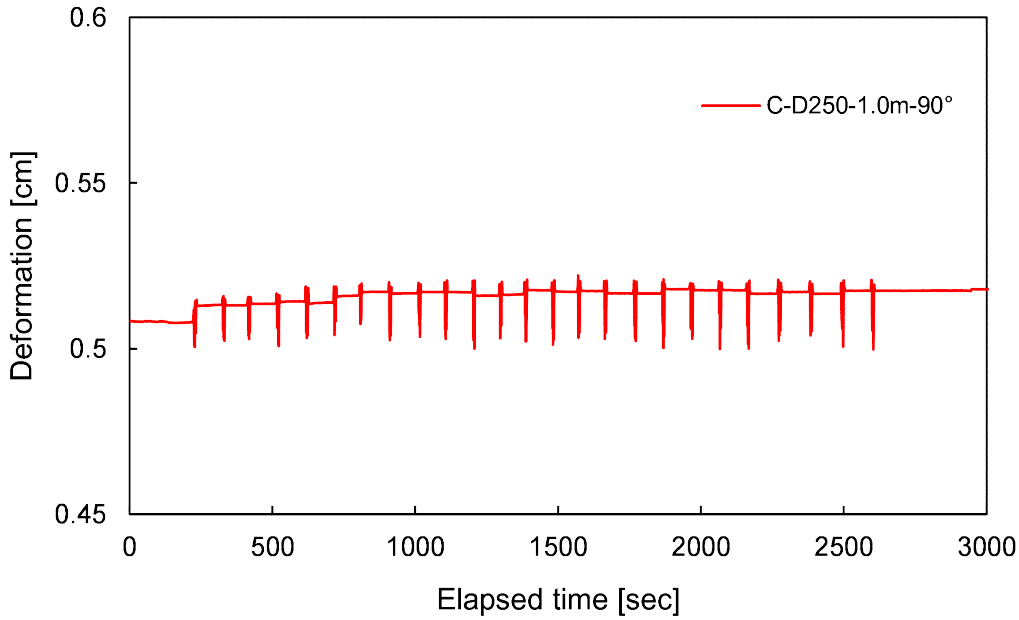


Test 4 [수직 변위: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

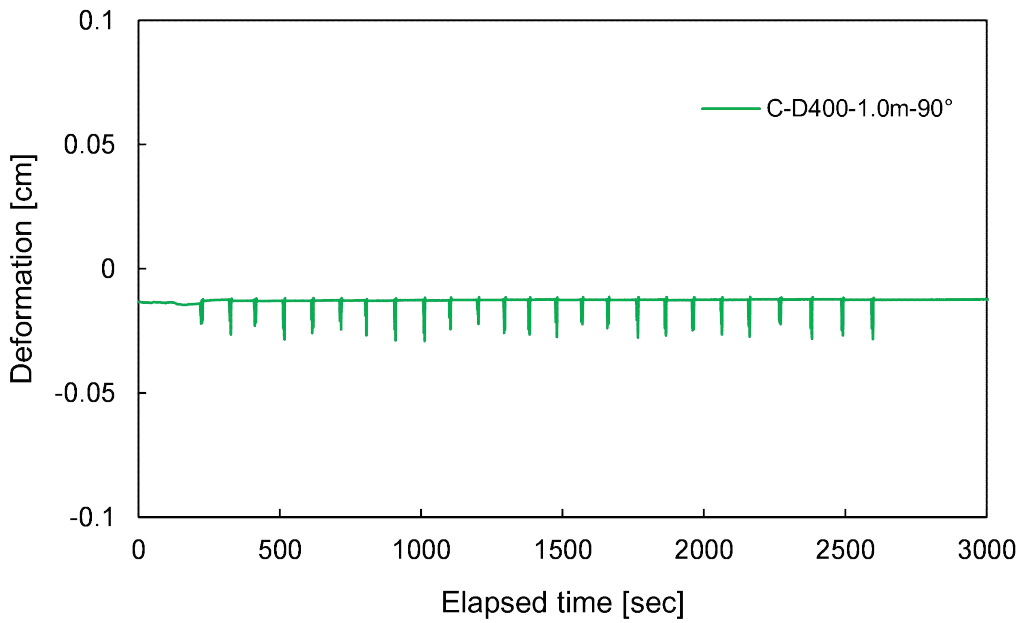


25톤 덤프 횡방향 주행

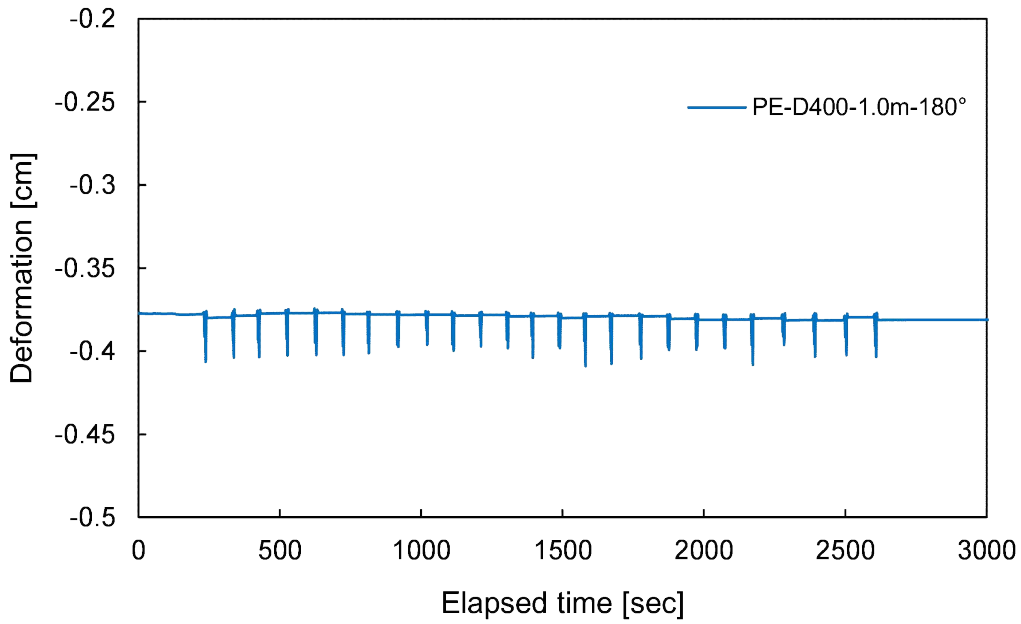
Test 4 [수직 변위: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



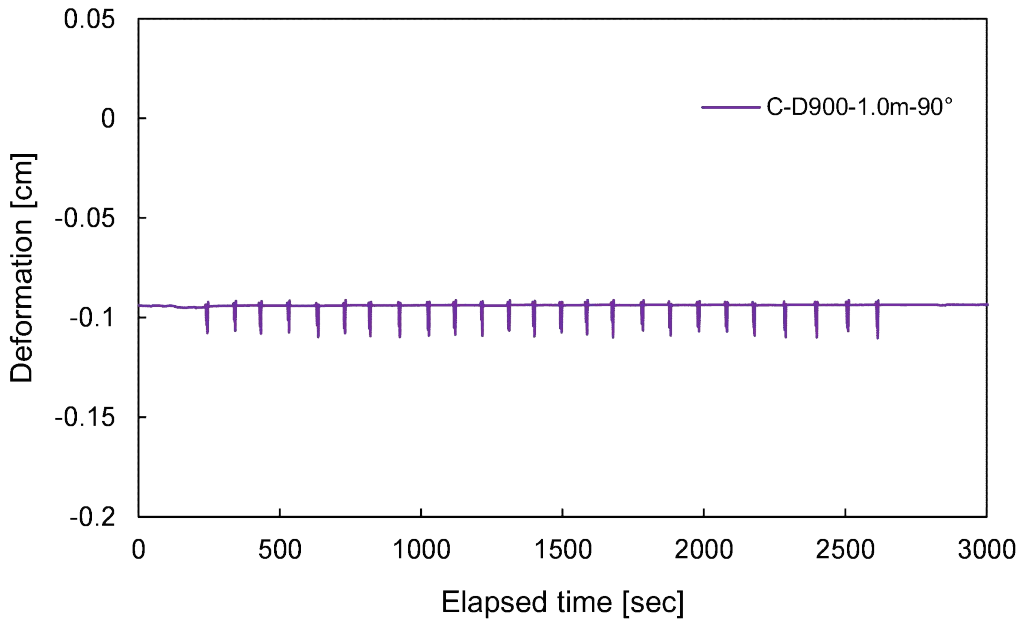
Test 4 [수직 변위: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

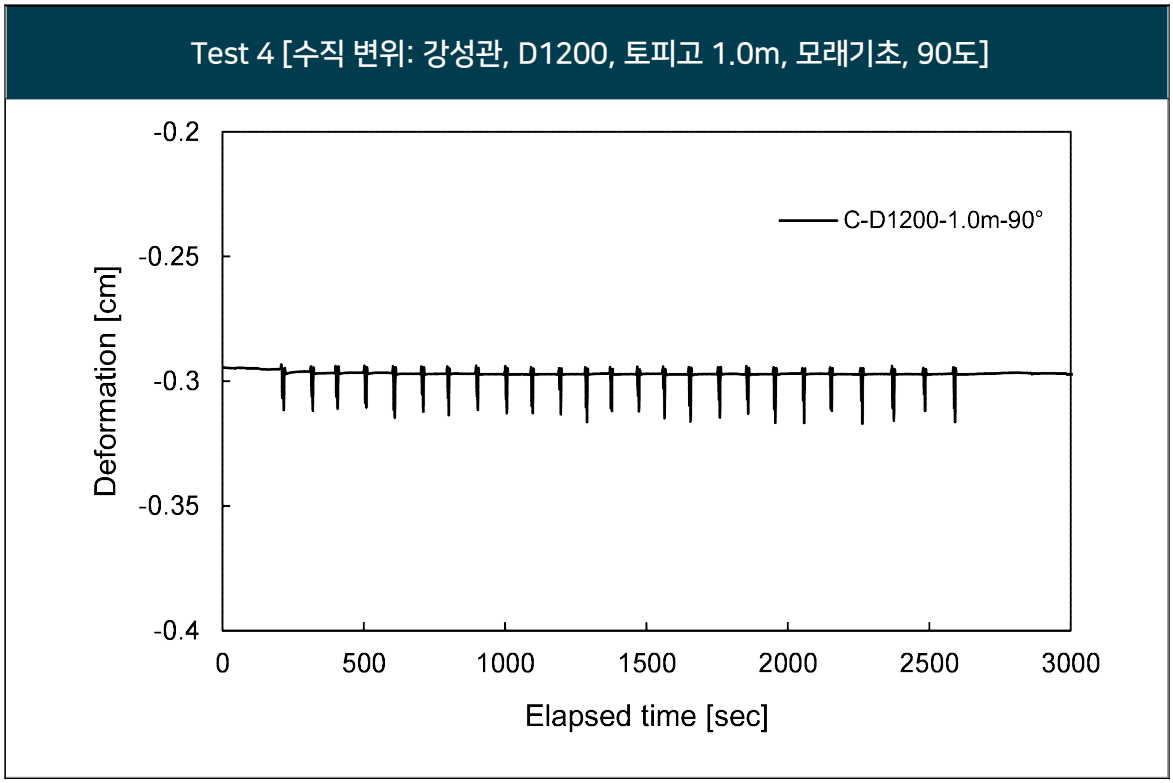


Test 4 [수직 변위: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]

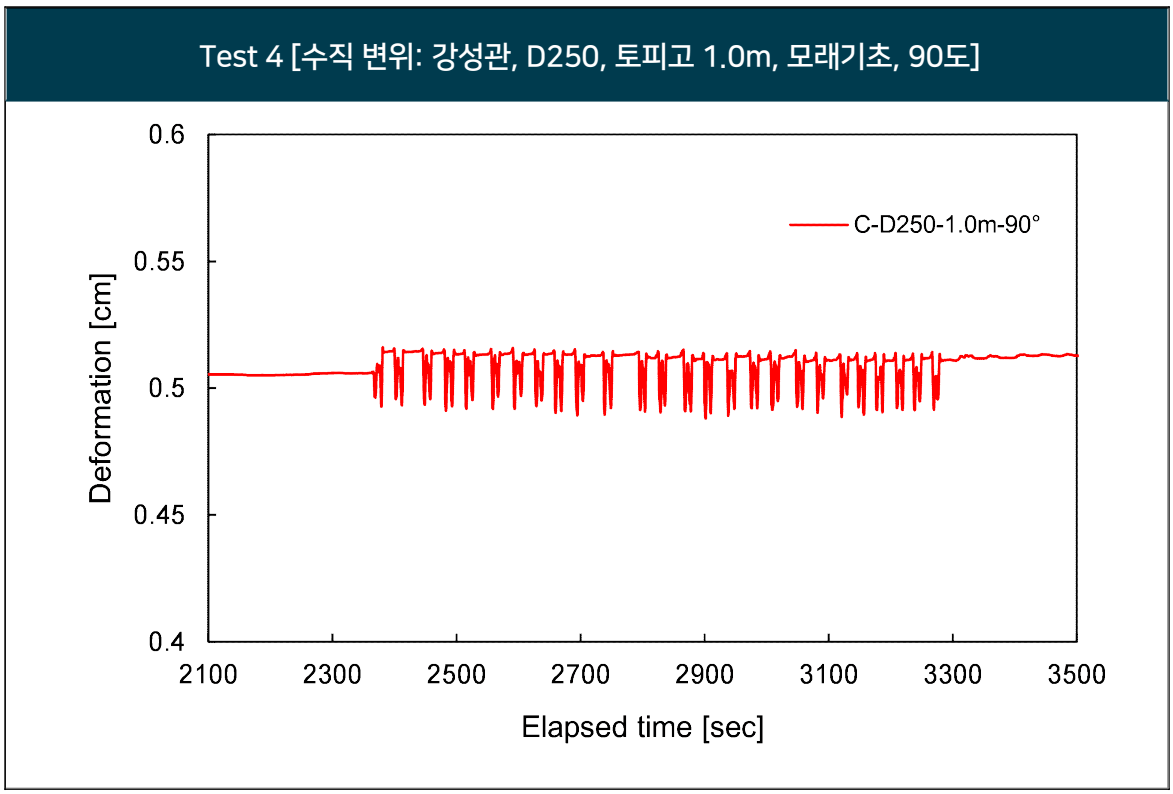


Test 4 [수직 변위: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]

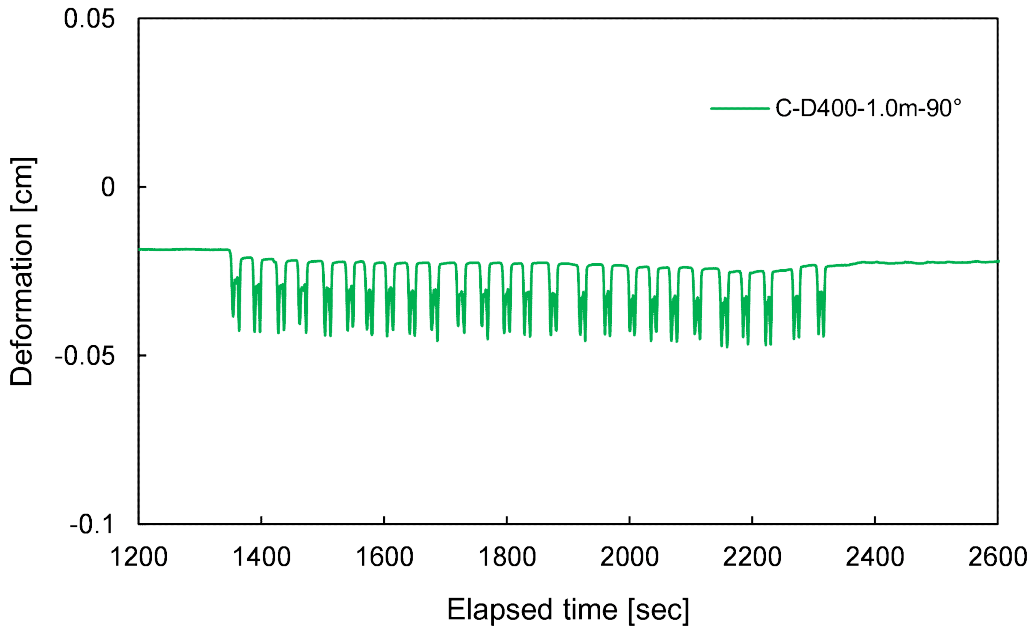



Test 4 [수직 변위: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
C-D1200-1.0m-90°
Deformation [cm]
-0.2
-0.25
-0.3
-0.35
-0.4
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Elapsed time [sec]

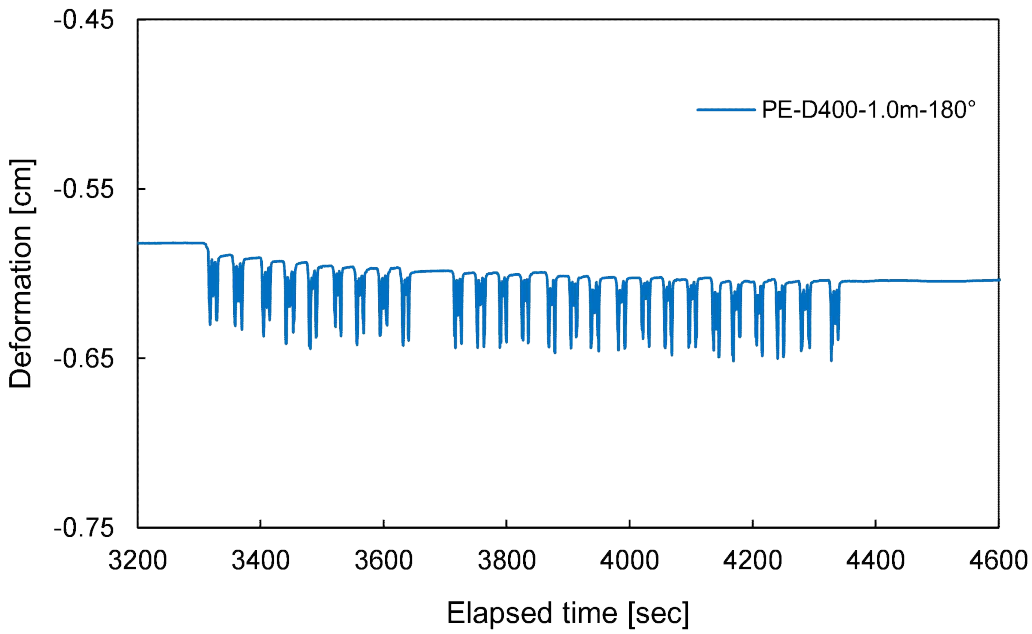
25톤 덤프 종방향 주행


Test 4 [수직 변위: 강성관, D250, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]
C-D250-1.0m-90°
Deformation [cm]
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
2100
2300
2500
2700
2900
3100
3300
3500
Elapsed time [sec]

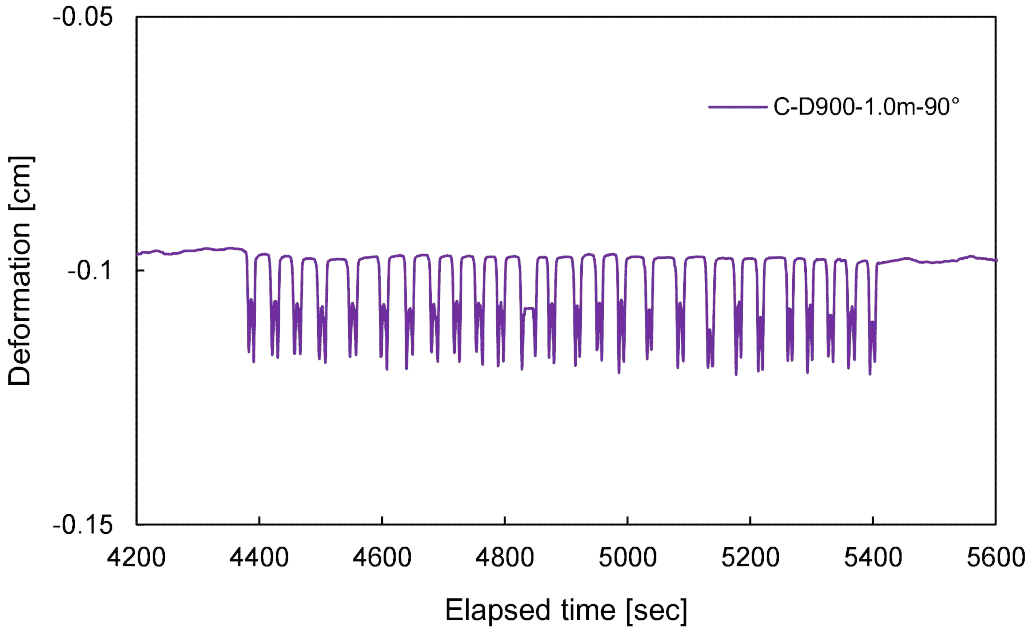
Test 4 [수직 변위: 강성관, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



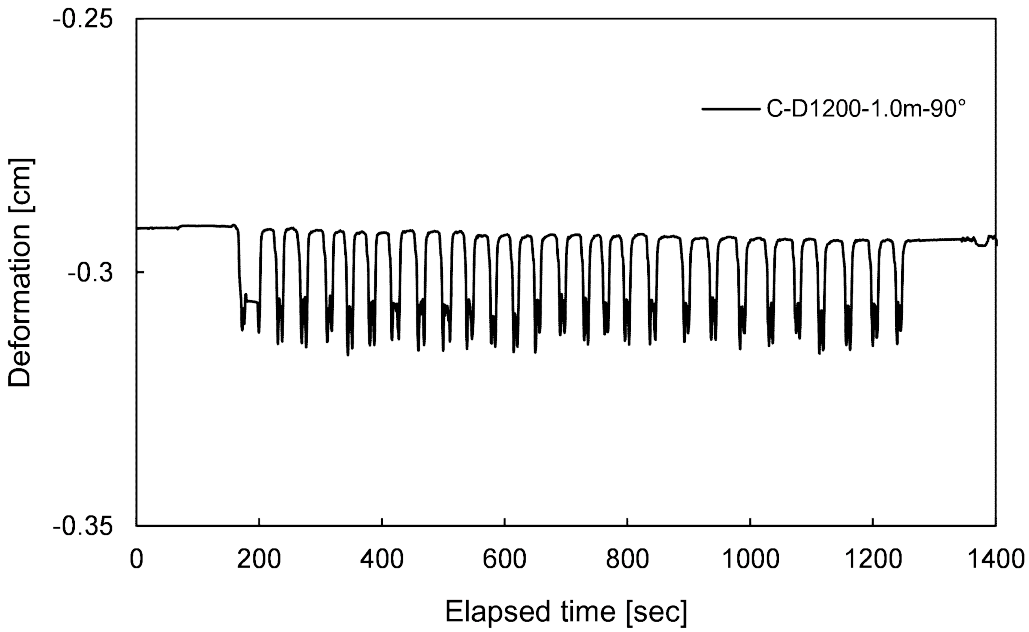
Test 4 [수직 변위: PE, D400, 토피고 1.0m, 모래기초, 180도]



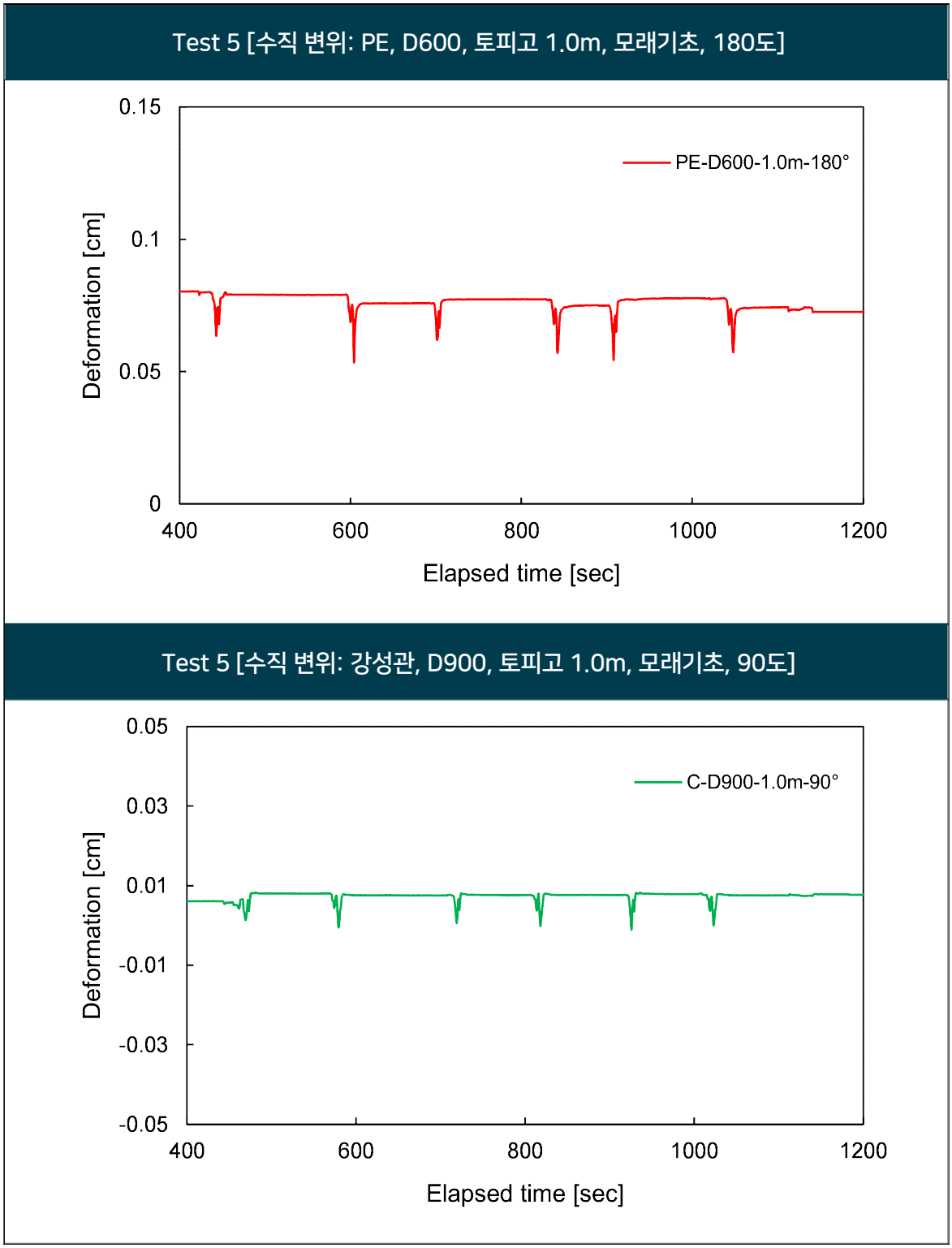
Test 4 [수직 변위: 강성관, D900, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



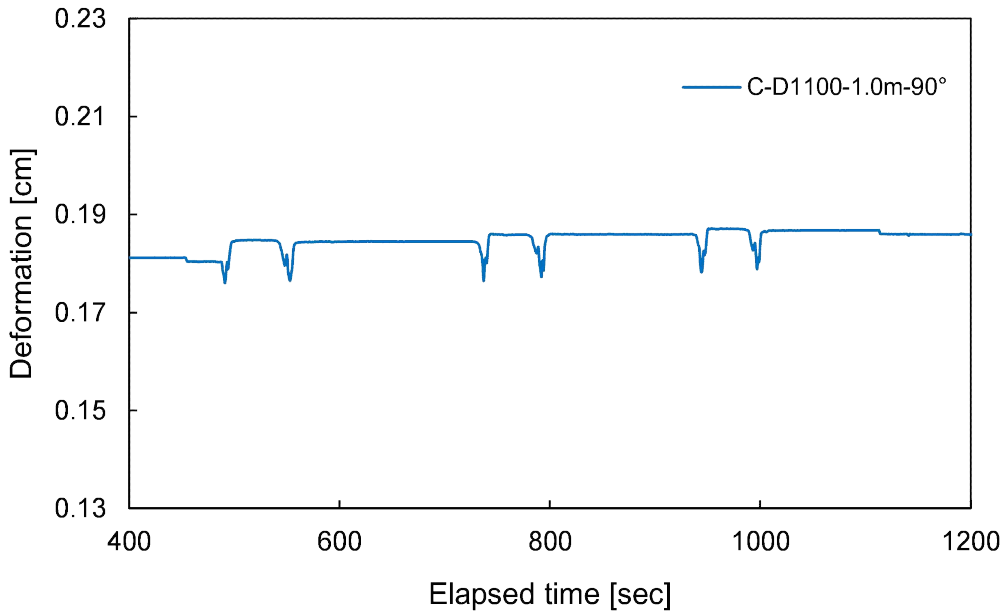
Test 4 [수직 변위: 강성관, D1200, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



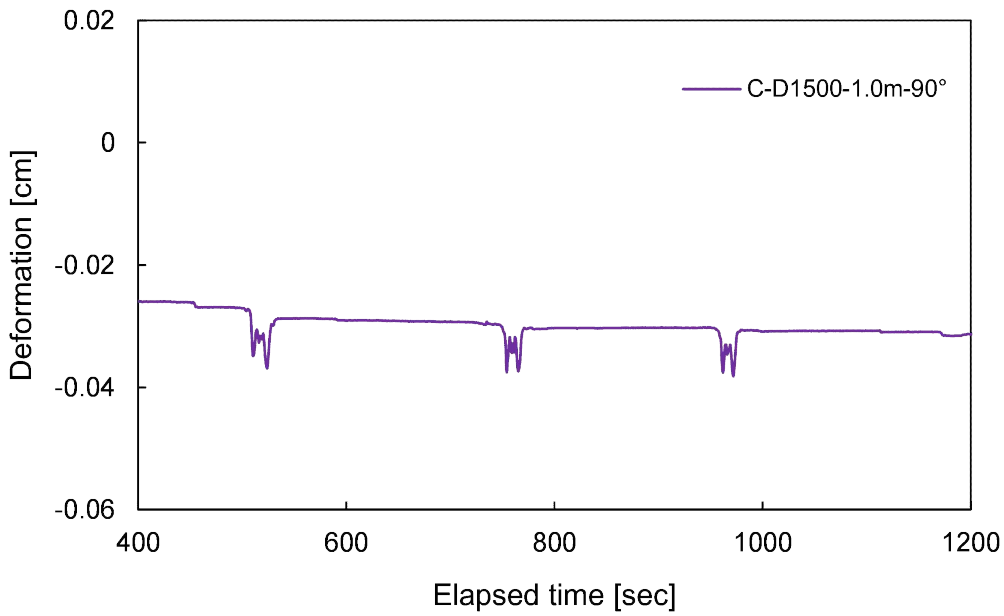
10톤 롤러 종방향 주행 (진동 X)



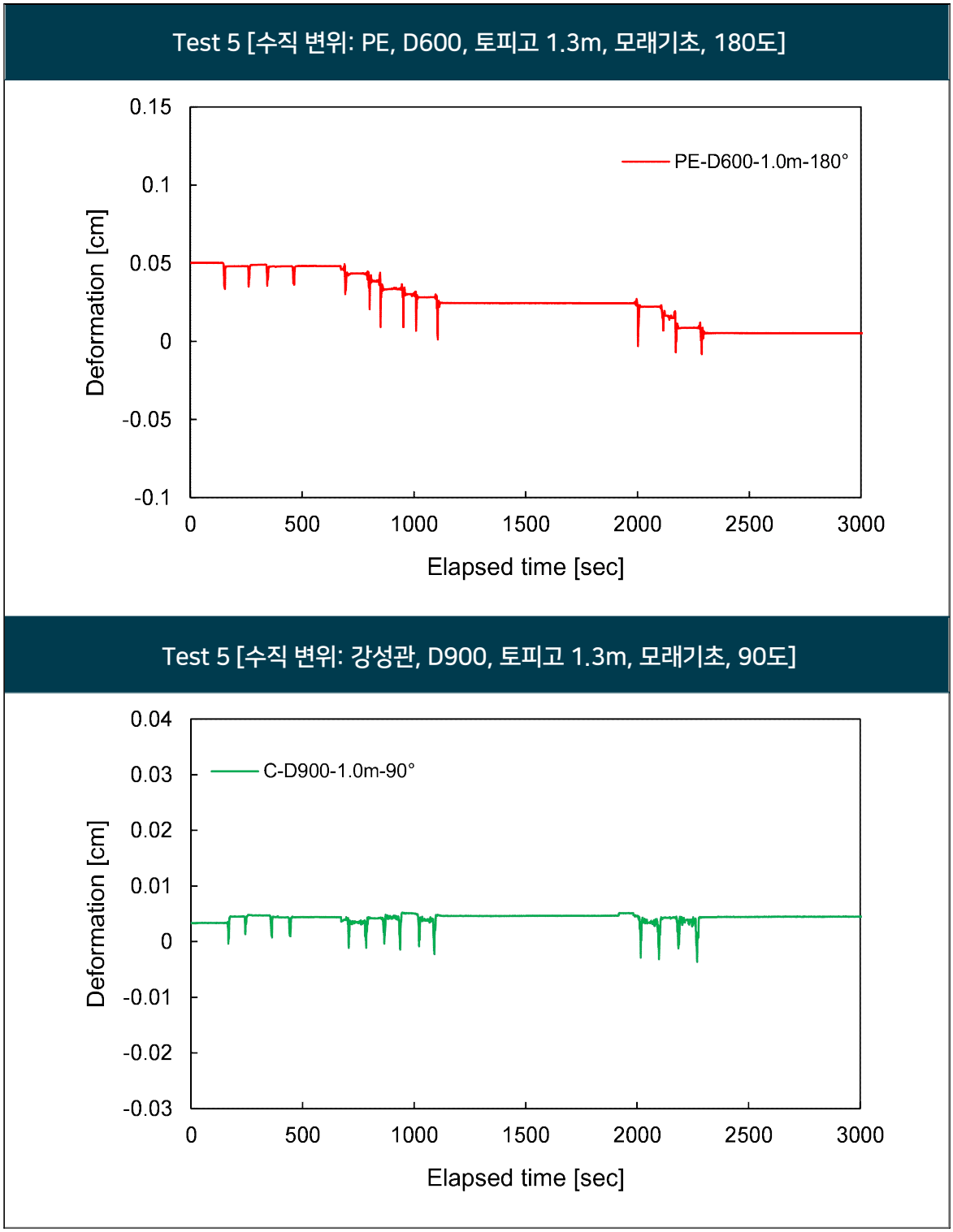
Test 5 [수직 변위: 강성관, D1100, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



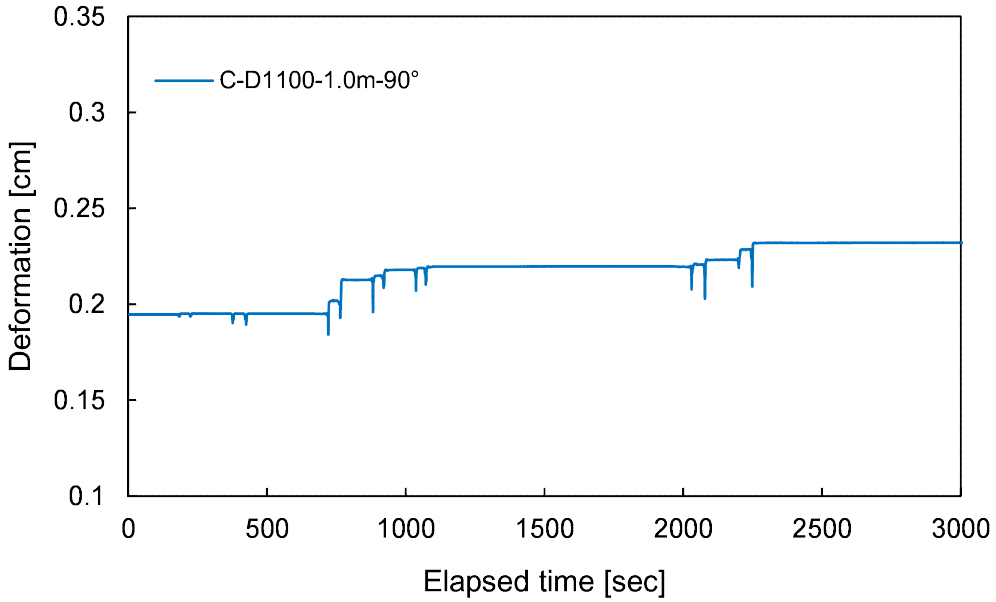
Test 5 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.0m, 모래기초, 90도]



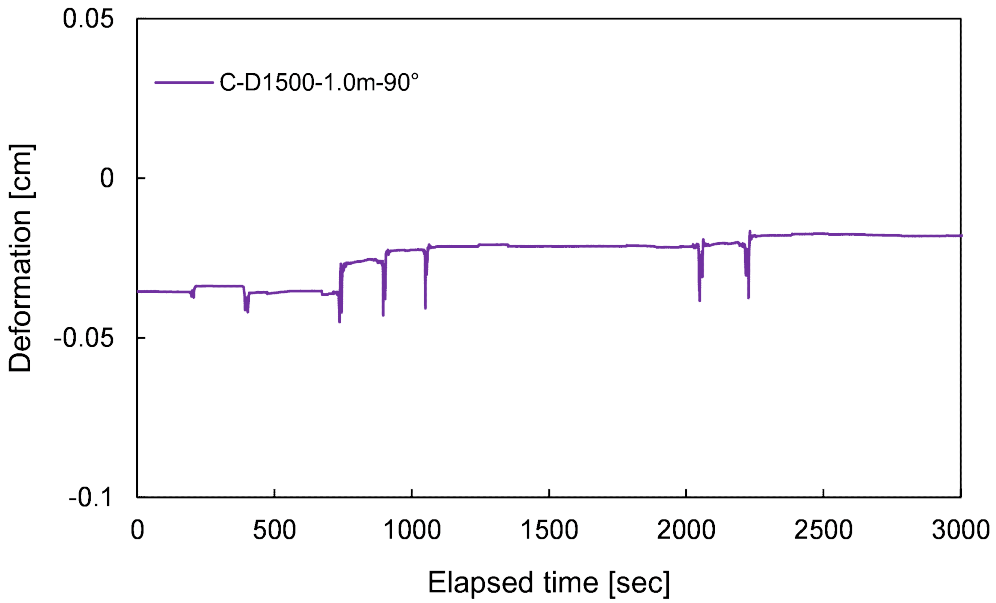
10톤 롤러 종방향 주행


Test 5 [수직 변위: PE, D600, 토피고 1.3m, 모래기초, 180도]
PE-D600-1.0m-180°
Deformation [cm]
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Elapsed time [sec]
Test 5 [수직 변위: 강성관, D900, 토피고 1.3m, 모래기초, 90도]
C-D900-1.0m-90°
Deformation [cm]
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Elapsed time [sec]

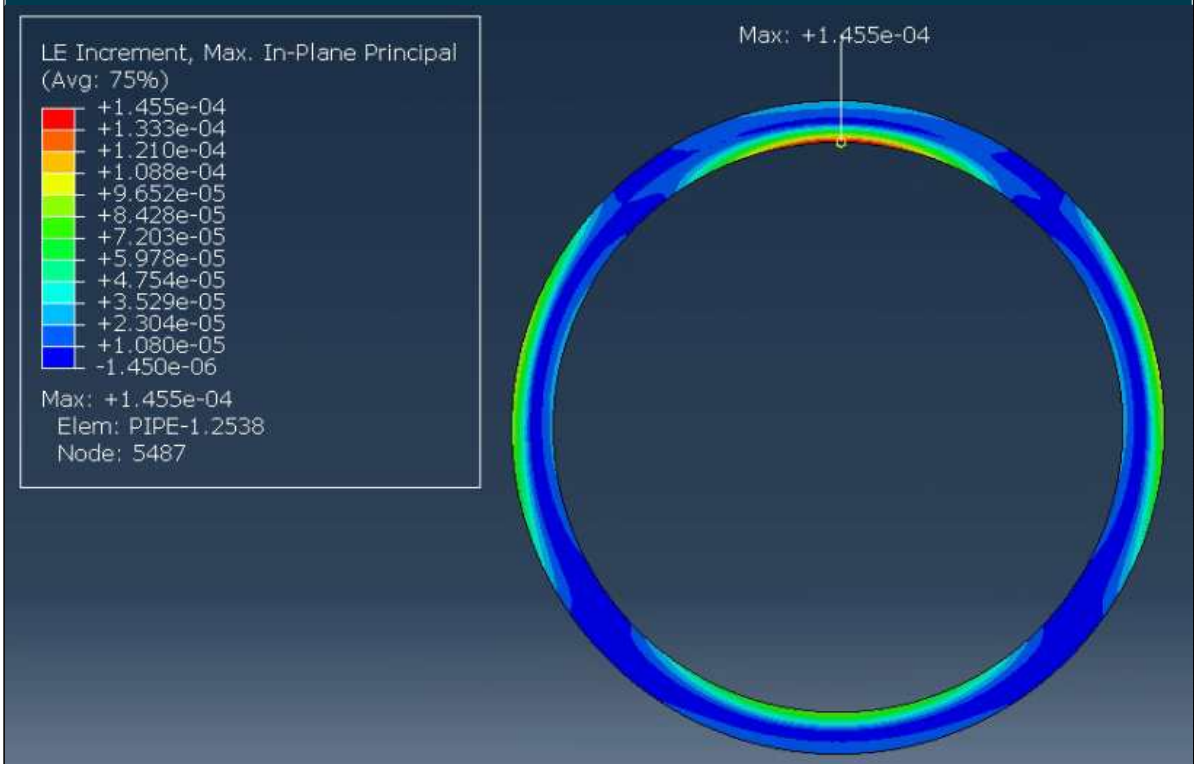
Test 5 [수직 변위: 강성관, D1100, 토피고 1.3m, 모래기초, 90도]



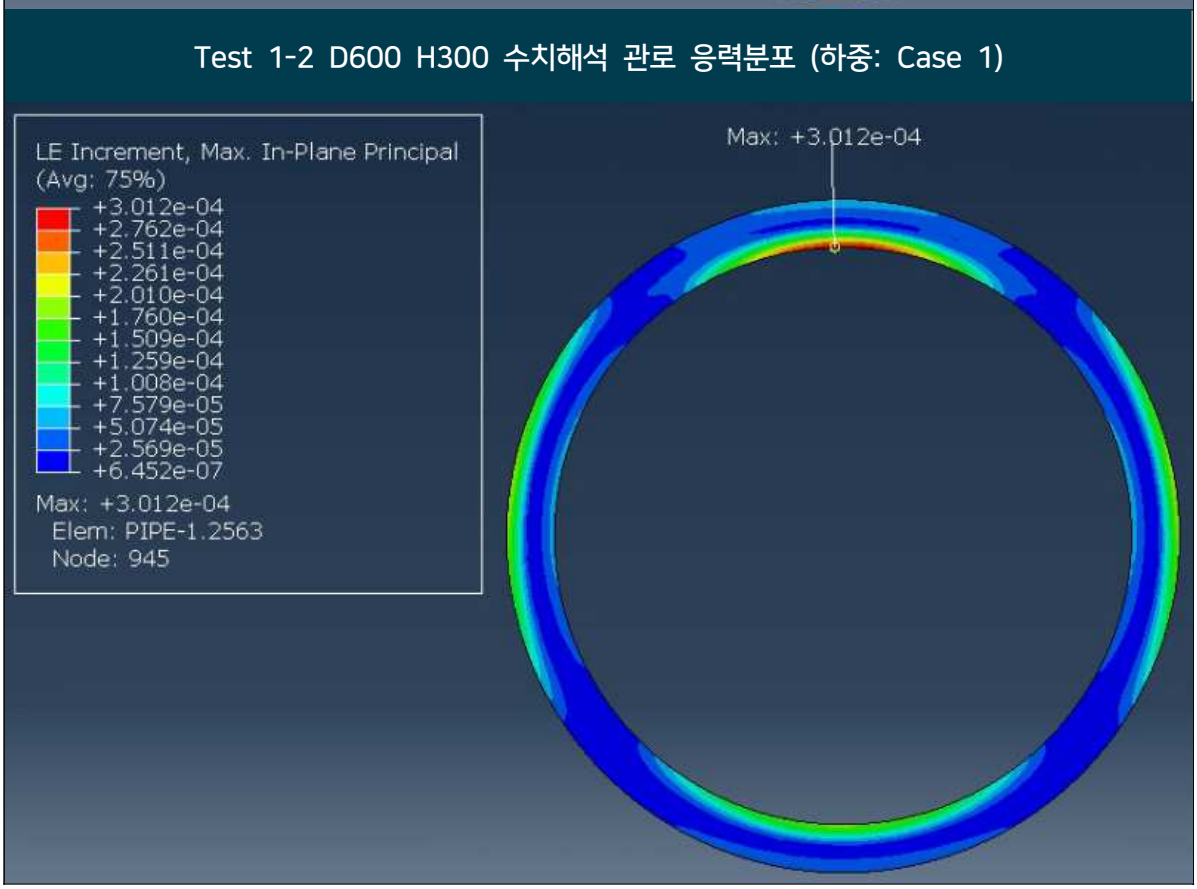
Test 5 [수직 변위: 강성관, D1500, 토피고 1.3m, 모래기초, 90도]



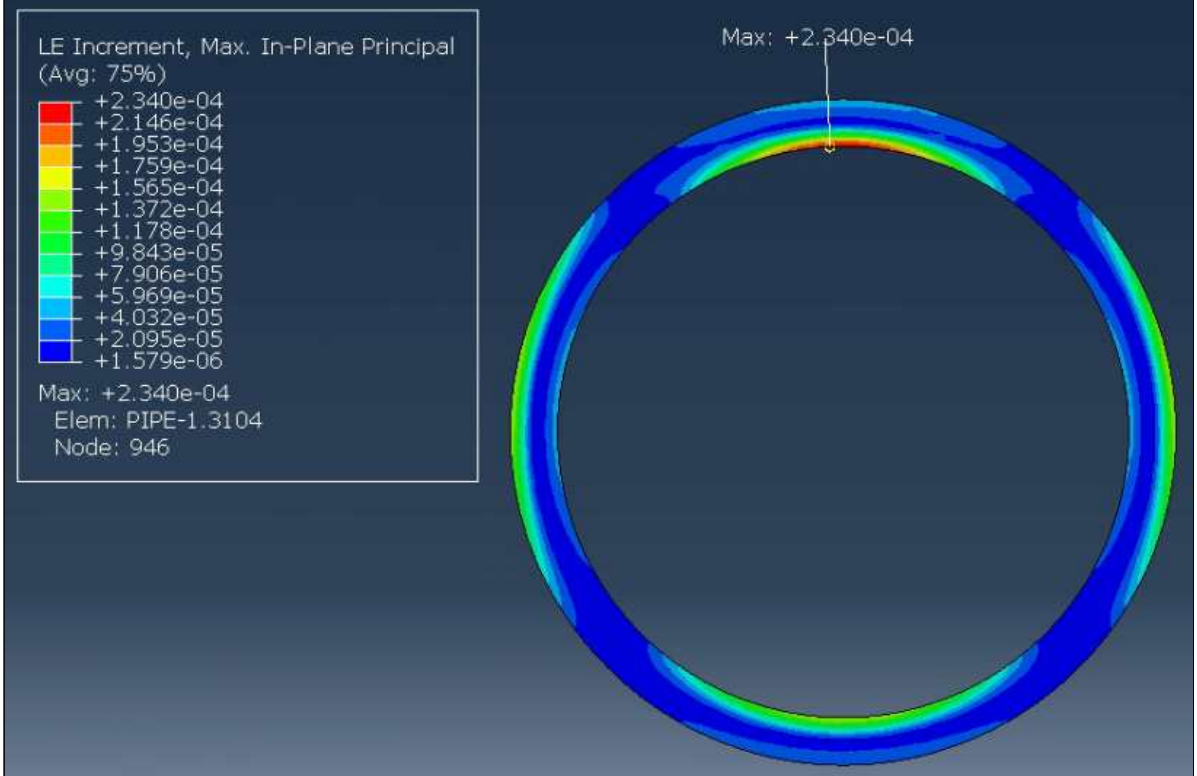
Test 1-1 D1500 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



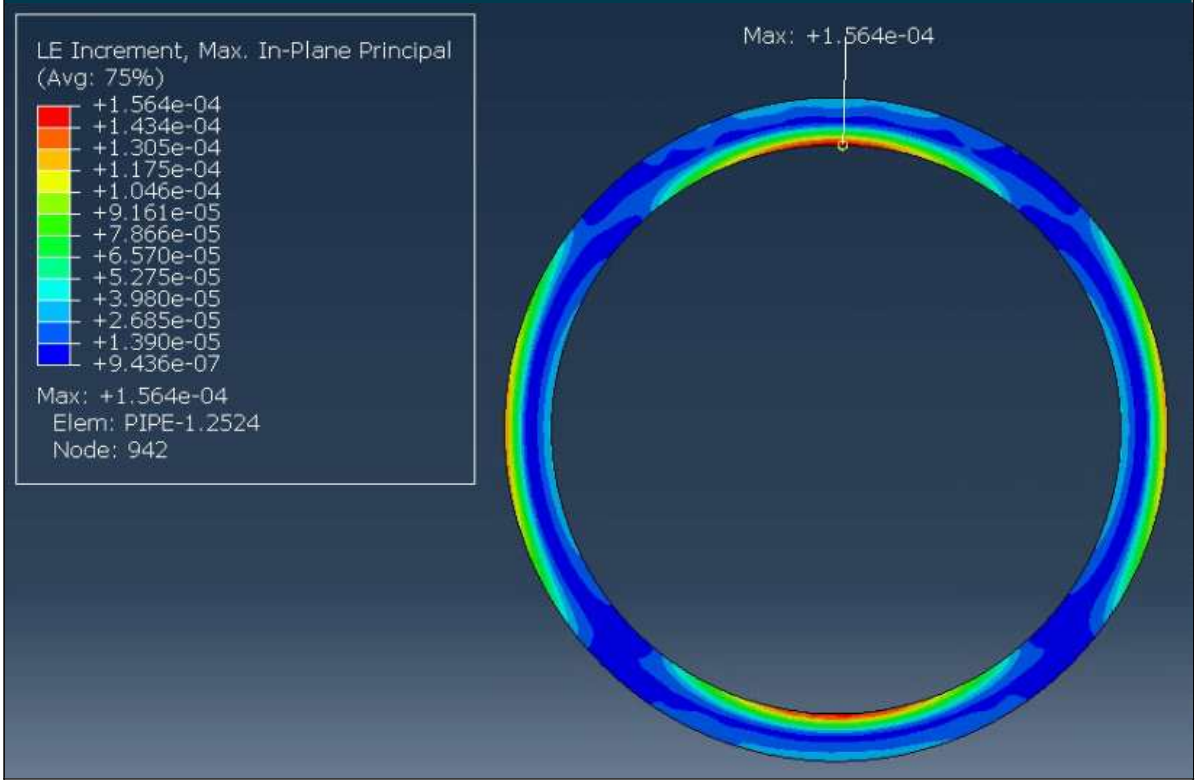
Test 1-2 D600 H300 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



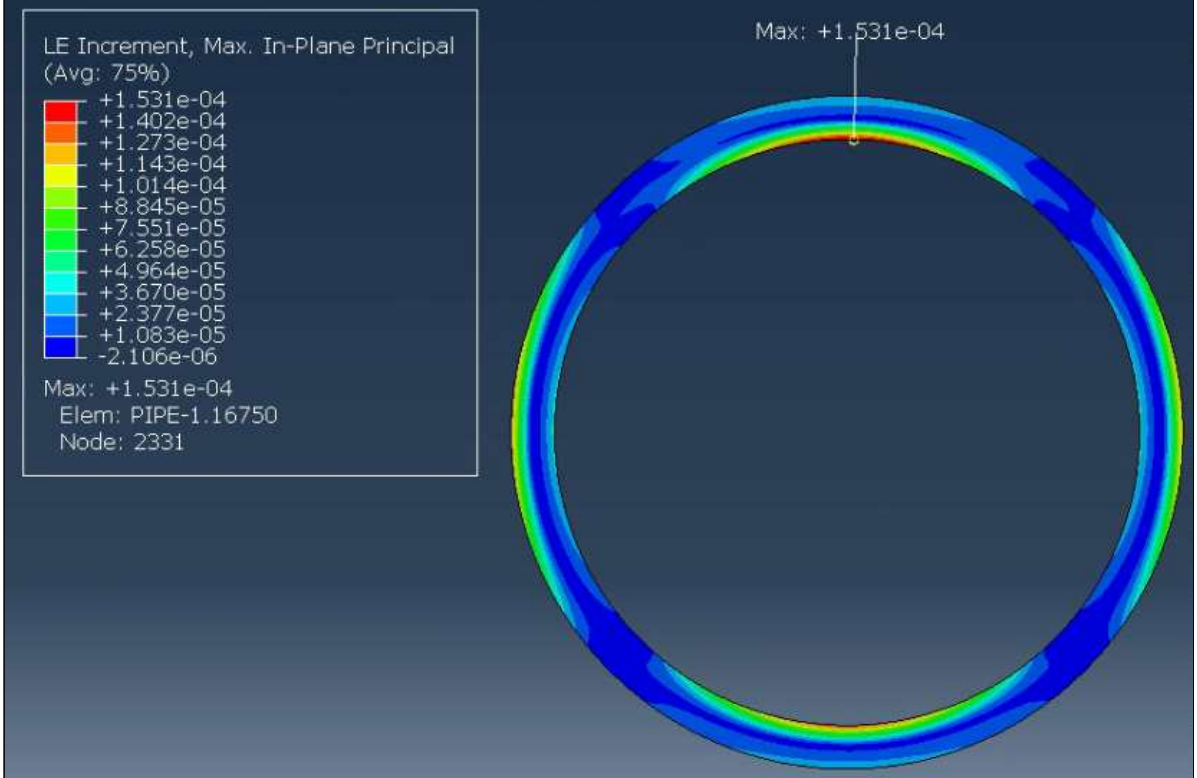
Test 1-3 D600 H600 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



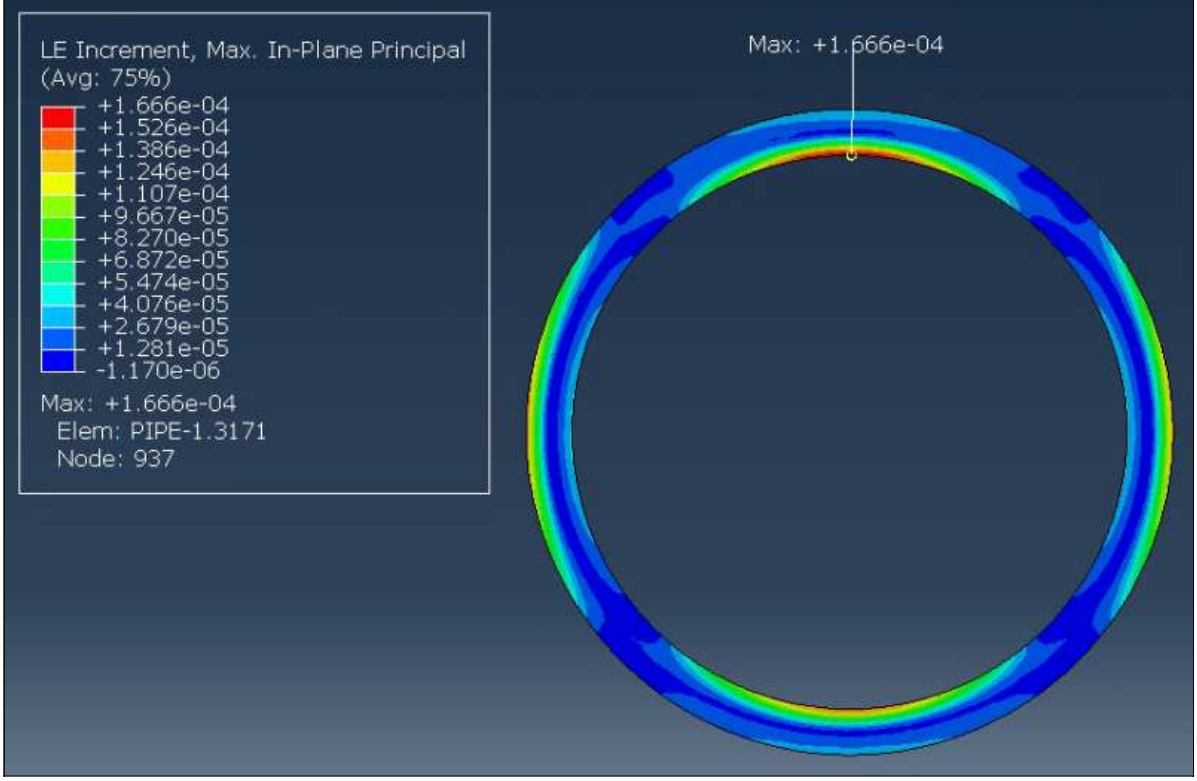
Test 1-4 D600 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



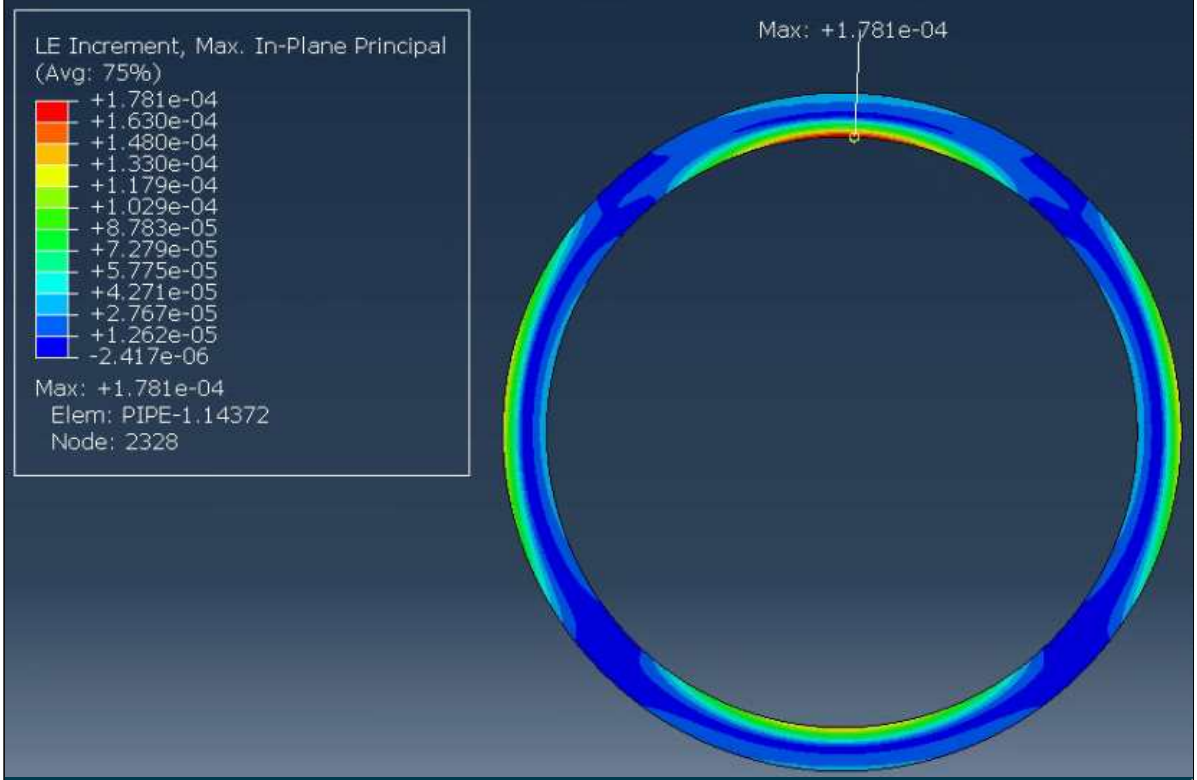
Test 3-1 D1500 H1500 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



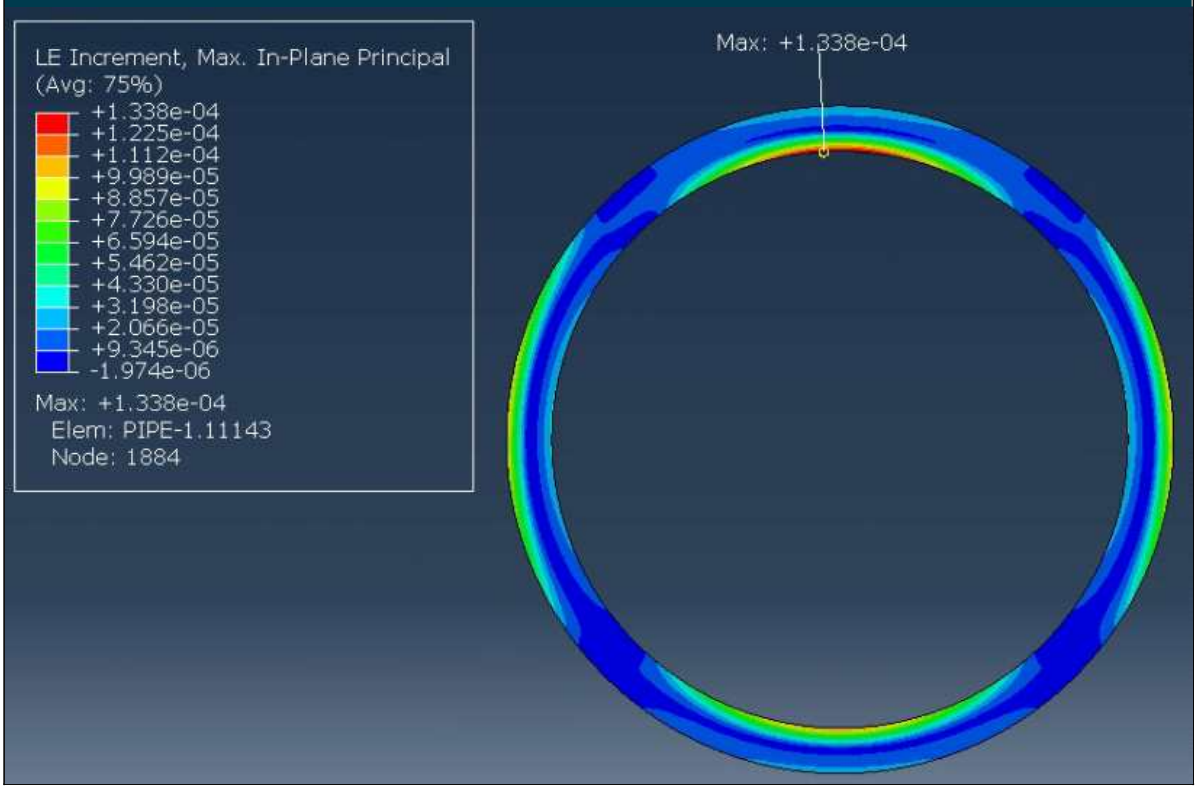
Test 3-2 D600 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



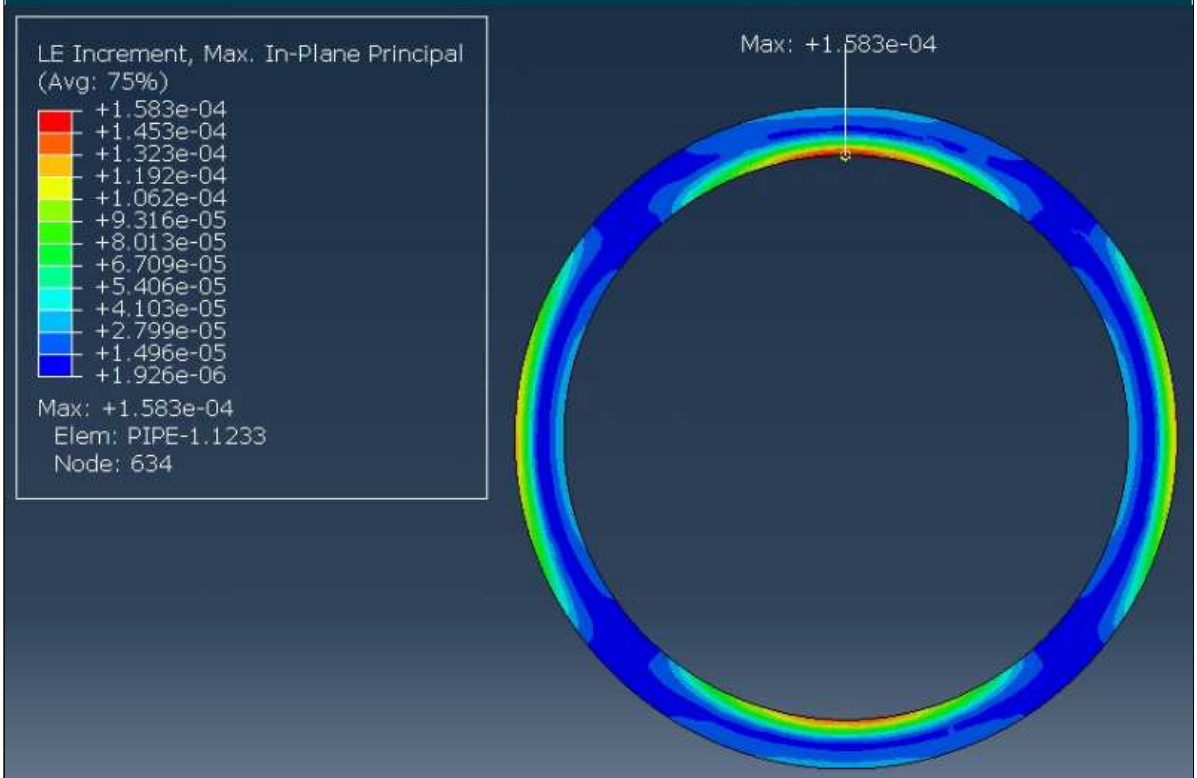
Test 3-5 D1500 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



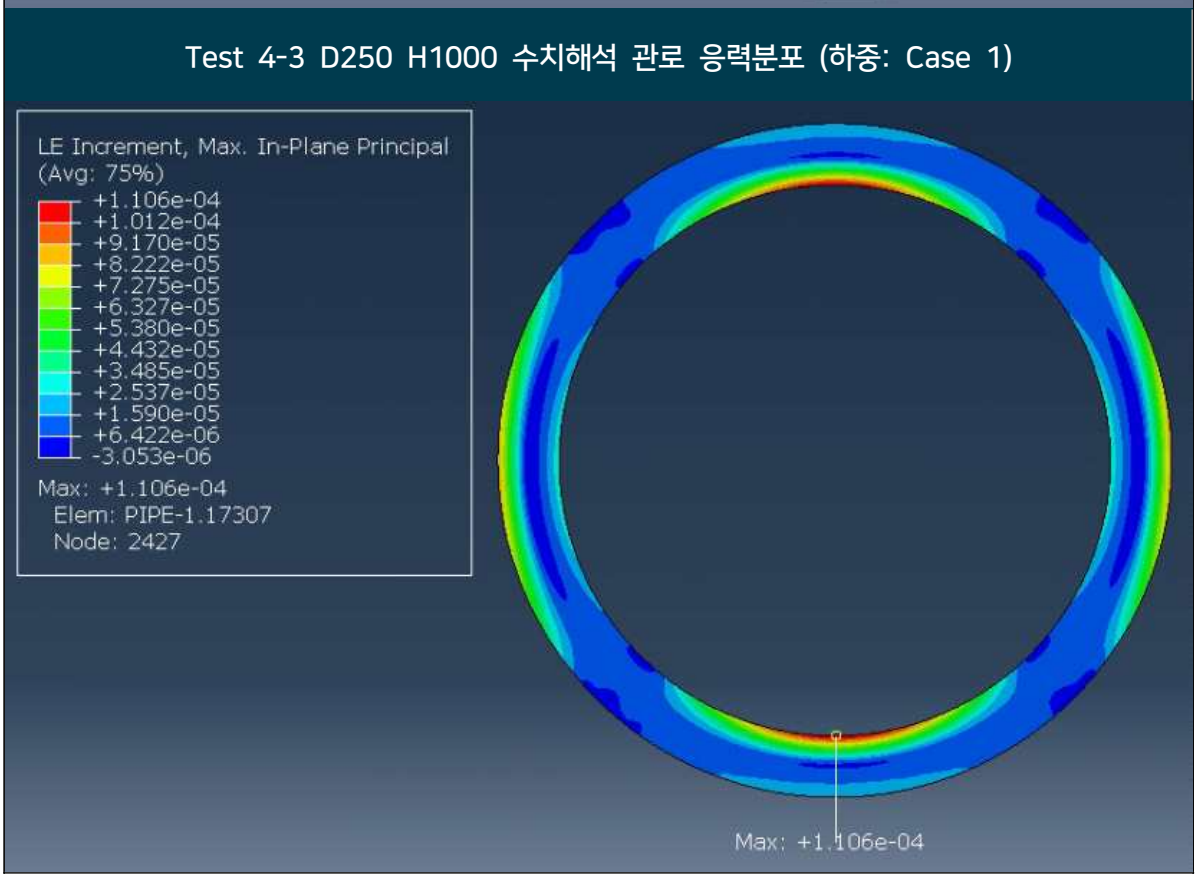
Test 4-1 D1200 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



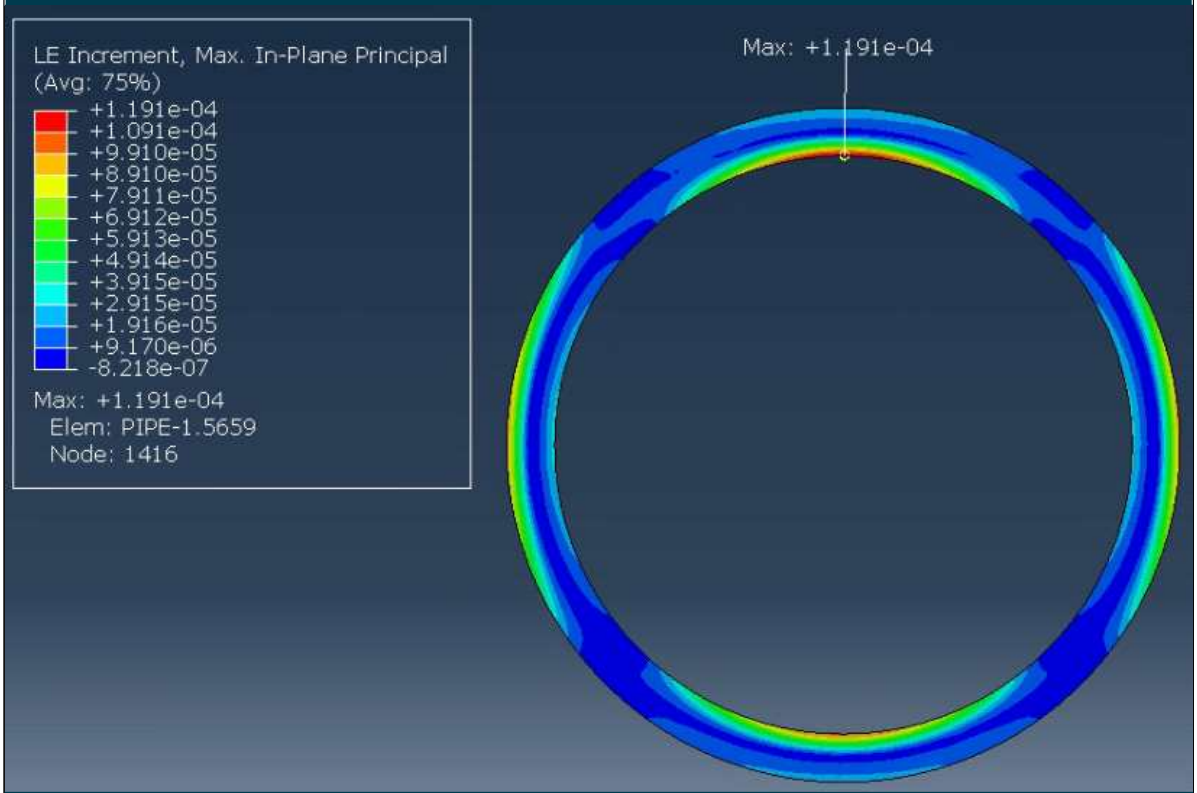
Test 4-2 D400 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



Test 4-3 D250 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



Test 4-5 D900 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)



Test 5-1 D1100 H1000 수치해석 관로 응력분포 (하중: Case 1)

