

공동주택 건설 시 성토지반의 전단파속도 산정 및 내진설계 합리화 연구

(LH) 박종배, 박용부, 오재호

연구지원 2023-00

공동주택 건설 시 성토지반의 전단파속도 산정 및 내진설계 합리화 연구

지은이 (LH) 박종배 · 박용부 · 오재호

발행인 김홍배

발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원

편 집 박종배 · 박용부

주소 (우)34047 대전광역시 유성구 엑스포로 539번길 99

전화/전송 042) 866-8428 / 866-8431

전자우편 jbpark@lh.or.kr

홈페이지 <http://lhi.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.

연구지원 2023-00

공동주택 건설 시 성토지반의 전단파속도 산정 및
내진설계 합리화 연구

Evaluation of Shear wave velocity of filled-up
ground and Rationalization of Seismic design
during apartment construction

참여연구진

연구총괄

박종배 LH 토지주택연구원 연구위원

참여연구진

박용부 LH 토지주택연구원 연구위원

오재호 LH 주택고양사업본부 주택공사부 차장

위탁용역기관

사단법인 **한국지반공학회** **이종섭** 교수 외 5인

연구심의위원(가나다순)

김범주 동국대학교 교수

김용범 LH 광주전남지역본부 차장

김일환 LH 주택구조설계부 부장

김효진 LH 건설안전연구실 선임연구위원

남문석 한국도로공사 연구위원

심영종 LH 건설안전연구실 연구위원

진규남 LH 건설안전연구실 실장

자문심의위원(가나다순)

이수형 철도기술연구원 연구위원

박두희 한양대학교 교수

연구 요약

□ 연구 배경 및 필요성

- 국내에서는 1997년에 제시된 내진설계기준(Ⅱ)부터 내진설계기준의 개념이 도입되었으며 20년 넘게 국내에서 적용되는데 이는 2018년에 개정되었다. 내진설계기준 일반(KDS 17 10 00 : 2018)도 개정되었으며 KDS 17 10 00에서 표준응답스펙트럼을 사용할 것을 강제하고 있다.
- 2018년 개정된 기준에 의한 내진설계는 지반의 전단파속도에 따라 S1~S6로 지반등급을 나누어 분류하고 있다. 이 과정에서 지반등급이 높으면 상부구조물의 내진보강량이 줄어들고 경제적이며 시공성이 증가하며 지반등급이 낮아지면 그 반대의 효과가 나타난다.

표 1. 지반의 분류(KDS 17 10 00)

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층평균전단파속도, $V_{s,soil}$ (m/s)
S_1	암반 지반	1 미만	-
S_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S_3	얕고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 필요한 지반		

- 지반등급이 높아질려면 토층평균전단파속도($V_{s,soil}$)가 커야 하는데, 현재 실무에서 사용하는 산정식(Yamazaki식, N=8로 가정)이 성토층의 전단파속도를 과소평가하는 것으로 판단되었음. 2009 LHI 연구(내진설계 시 합리적인 지반분류를 위한 전단파속도 측정 및 적용방안)에서 성토층과 생성과정이 비슷한

매립층에서 SPS로 실측한 전단파속도가 약 224~325m/s로 현재 실무기준인 181m/s보다 큰 것으로 나타났기 때문이다. 성토층에서 보수적인 산정식을 쓸 수 밖에 없는 이유는 성토층은 지반조사 후의 후속공정으로 이루어지기 때문에 현장에서 측정시험을 할 수 없었기 때문이며, 실무에서는 다소 보수적인 값을 채택하고 있다. 또 이 산정식의 문제는 입력변수로 N치만 사용하고, 지중응력을 고려하지 못하기 때문에 지반이 깊어질수록 증가하는 전단파속도를 구현해 내지 못하는 문제점도 있다. 따라서, 현장시험을 하지 못하는 성토층의 전단파속도를 성토고와 성토층 지중응력 등을 고려하여 합리적으로 산정할 수 있는 방안이 필요하였다.

□ 연구 내용

- 우리 공사는 건축물의 효율적인 건설을 위해 성토층의 전단파속도 산정 방법의 새로운 제안이 필요하다고 판단되어 다음과 같은 내용의 연구를 수행하여 성토층의 지반전단파속도 산정방안을 제시하고 이를 통해 내진설계 합리화 방안을 제시하였다.
- 연구의 주 내용으로 실제 현장의 성토층의 전단파속도를 실측하고, 현장에서 채취한 성토재료에 대하여 실내 전단파속도를 측정비교하여, 간편한 방법으로 전단파속도를 산정할 수 있는 방법을 찾고자 하였고, 성토하중의 증가로 인한 원지반의 전단파속도 증가를 분석하기 위해 현장험과 정밀 수치해석을 수행하였다.
- 시험 대상으로는 우리 공사의 건설공사 현장 중 3개소를 선정하여 조사를 수행하였다. 선정된 3개소 중 2개소(화성파, 파주)는 아파트 건설현장이며, 나머지 1개소는 세종 시의 성토 현장으로 표 1과 같은 실험 및 해석을 수행하였다.

[표 1] 각 시험 방법에 따른 방법

구분	현장 시험	실내 시험
현장/실내 시험	<ul style="list-style-type: none"> - 각 현장 성토부지에 부지에 대한 시추 조사 및 시추공 전단파 탐사 수행(다운홀, SPS-검층) - 성토 전 원지반의 전단파속도와 성토 하중에 따른 전단파속도 변화 거동 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 각 현장에서 채취한 시료들에 대하여 기본 물성 시험들을 진행함 - 최대·최소 건조밀도, 비중 등 기본물성
수치해석	<ul style="list-style-type: none"> - Abaqus 프로그램(Smith, 2009) 사용하여 수치해석 수행 - 현장/실내 시험으로부터 얻은 데이터를 수치해석에 입력하여 전단파속도 산정 	

□ 결론

성토층의 전단파속도와 성토로 인한 원지반의 전단파속도 증가에 대한 것을 규명하고 합리적으로 전단파속도를 산정하기 위하여 현장 및 실내실험과 수치해석 등을 수행한 결론은 다음과 같다.

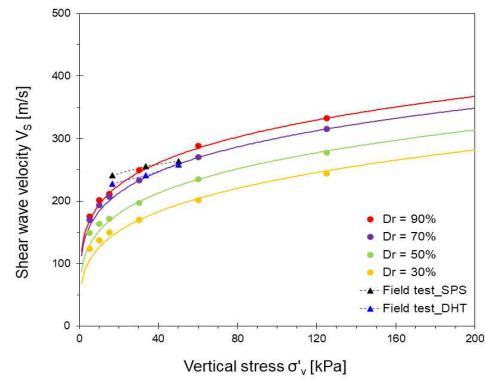
- 기존 LH 실무에서 사용하는 Yamazaki(N=8로 가정)식은 지중응력을 고려하지 못하기 때문에 성토층이 깊어짐에도 동일한 전단파속도(181m/s)를 나타내나, 현장 및 실내시험에 의해 구한 전단파속도는 깊이에 따라 전단파속도가 증가하고, 그 값 또한 Yamazaki(N=8로 가정)식으로 구한 값 보다 크게 나타났다.
- 성토층의 평균전단파속도를 현장 측정한 결과는 아래 표와 같으며 화성과 파주 성토층의 전단파속도가 세종 보다 다소 크게 나타난 것은 화성과 파주는 준공 시점으로 지반의 다짐과 안정화가 많이 되었고, 세종은 성토 후 2달 정도 밖에 지나지 않아 자중에 의한 다짐과 고결화가 충분치 않았기 때문으로 판단된다. 특히, 표토부근의 전단파속도는 작게 나타나 표토 부근이 고결화가 아직 안되었을 유추할 수 있고, 준공시점이 되면 세종도 전단파속도가 다른 현장과 유사한 수준으로 증가할 것으로 예상된다.

[표 2.] 현장 성토층 전단파속도 실측 결과

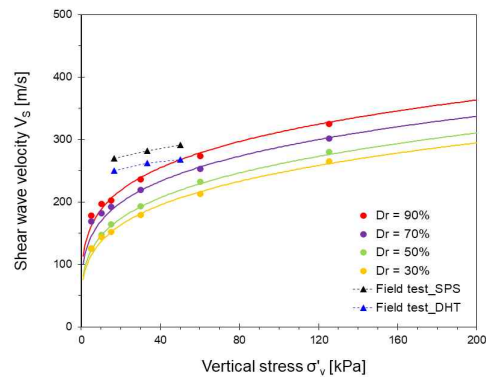
화성(3m 성토)		파주(3m 성토)		세종(5m 성토)	
SPS	다운홀	SPS	다운홀	SPS	다운홀
281m/s	260m/s	253m/s	243m/s	246m/s	221m/s

- 성토 전후에 기존 토층부에서의 전단파속도 현장측정값을 비교한 결과 성토로 인한 지중응력의 증가로 SPS 시험결과는 세 현장 평균 25%, 다운홀 시험결과는 13% 증가하는 것으로 나타났다.
- 최초 지반조사시의 전단파속도와 Yamazaki(N=8로 가정)을 성토층에 적용 시 화성과 파주는 S2 등급, 세종은 S3 등급(KDS 41 17 00)을 나타내었으나, 성토 후에 실측 한 결과는 세 현장 모두 S2 등급을 나타내었다. 따라서, 성토층과 성토 후의 원지반의 전단파를 합리적으로 산정하면 현장조건에 따라서 지반 등급 상향이 가능할 것으로 판단되었다.
- 수치해석 결과 성토 시에 성토고와 폭에 관계 없이 지중응력이 증가하는 양상을 보였으며, 이에 따라 전단파속도도 증가하는 양상을 보였으며, 실제 현장의 성토고를 반영하였을 때 전단파속도는 성토전보다 세 현장 평균 25% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 현장의 SPS와 다운홀시험과 유사한 값을 나타내므로 성토고에 따른 원지반의 전단파속도를 수치해석으로 적절히 산정할 수 있는 것으로 파악되었다. 본 보고서 6장에 수치해석에 의해 전단파속도를 산정하는 방법을 제시하였다.
- 실내실험결과 다짐도가 증가함에 따라 전단파속도가 비례적으로 증가하여 성토층을 다질수록 내진설계에 유리함을 알 수 있었다.
- 성토층에 대한 실내와 현장 전단파실험결과를 비교한 결과 화성의 현장전단파속도(SPS, DHT)는 90% 다짐도의 실내전단파속도와, 파주는 70%~90% 이상의 다짐도의 실내전단파속도와, 세종은 42~75% 다짐도의 실내전단파속도와

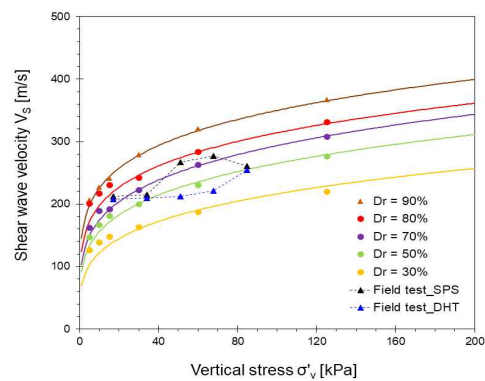
유사하게 나타났다. 세종 현장전단파속도(SPS, DHT)가 타현장에 비해 표토부근이 작게 나타난 것은 성토 후 두 달 이내 시험하여 자연다짐 및 고결화가 되지 않았기 때문으로 판단된다.



[그림 2] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (과주)



[그림 1] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (화성)



[그림 3] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (세종)

- 실내시험 결과를 분석하여 성토층의 다짐도별 전단파속도 추정 방법을 다음과 같이 제시하였다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_v}{kPa} \right)^\beta$$

여기서, σ'_v : 수직방향의 유효응력
 α, β : 실험적으로 결정되는 계수 및 지수

[표 3.] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (화성)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
α	75.9m/s	81.7m/s	100.2m/s	113.2m/s
β	0.256	0.252	0.229	0.220

[표 4.] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (과주)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
α	68.1m/s	87.5m/s	112.2m/s	119.5m/s
β	0.268	0.241	0.214	0.212

- N값과 지중응력을 고려하는 Brandenberg et al(2010) 식도 적절한 N값을 반영할 경우 실무에서의 사용이 가능리라 판단된다.
- 성토층과 성토 후 원지반의 전단파 속도를 본 연구에서 제시한 방법으로 산정할 경우 지반등급 또는 내진설계범주의 상향조정으로 상부구조물의 원가절감(내진설계범주 D→C 상향조정 시, 동당 96백만 원)과 설계비 및 설계기간(4개월) 감소 등의 설계 관련 업무의 개선이 이루어질 것으로 기대된다.



차 례

제1장 연구 개요	1
1.1 연구 배경 및 필요성	3
1.2 연구목표	5
1.3 연구내용	5
제2장 내진설계 개요	7
2.1 개요	9
2.1.1 내진설계 현황	9
2.1.2 국내 내진설계의 배경	9
2.1.3 내진설계의 절차	11
2.2 내진설계	12
2.2.1 지반조사	13
2.2.2 내진등급	13
2.2.3 내진성능목표	13
2.2.4 국내 지진구역 및 지진위험도	14
2.2.5 지반의 분류	15
2.2.6 설계응답스펙트럼가속도(KDS 41 17 00 4장)	17
2.3. 내진설계범주 등급별 차이점	26
2.3.1 내진설계범주 ‘D’ 에 대한 시스템 제한	26
2.3.2 내진설계범주 ‘D’ 에 대한 높이 제한	27
2.3.3 하중조합 및 설계 요구 사항	30
2.4 성토층 전단파속도 증가에 따른 기대효과(경제성 분석 등)	31
제3장 현장시험 및 실내시험 방법	37
3.1 시추조사	39

3.1.1 조사개요	39
3.1.1 조사원리 및 방법	39
3.2 표준관입시험(SPT)	41
3.2.1 시험개요	41
3.2.2 시험원리 및 방법	41
3.2.3 N값 보정	43
3.3 다운홀 기법(Downhole Test)	43
3.3.1 시험개요	43
3.3.2 시험원리 및 방법	44
3.4 부유식 음파 검층(Suspension PS logging)	50
3.4.1 시험개요	50
3.4.2 시험원리 및 방법	53
3.5 밀도검층(Density logging)	55
3.5.1 시험개요	55
3.5.2 시험원리 및 방법	55
3.6 동적 콘 관입 시험(Dynamic cone penetrometer test)	58
3.6.1 시험개요	58
3.6.2 시험원리 및 방법	60
3.7 벤더엘리먼트를 이용한 압밀시험(Oedometer test using bender elements) ..	
.....	61
3.7.1 시험개요	61
3.7.2 시험원리 및 방법	62
제4장 현장시험	65
4.1 현장시험 개요	67
4.2 실험 지역	68
4.3 화성 봉담 조사결과	70
4.3.1 시추조사	70

4.3.2 표준관입시험	72
4.3.3 다운홀 테스트	73
4.3.4 부유식 음파 검층	76
4.3.5 밀도검층	78
4.3.6 동적콘관입시험	80
4.3 파주 운정 조사결과	82
4.3.1 시추조사	82
4.3.2 표준관입시험	85
4.3.3 다운홀 테스트	86
4.3.4 부유식 음파 검층	89
4.3.5 밀도검층	91
4.3.6 동적콘관입시험	93
4.4 세종 연동면 조사결과	95
4.4.1 시추조사	95
4.4.2 표준관입시험	97
4.4.3 다운홀 테스트	98
4.4.4 부유식 음파 검층	101
4.4.5 밀도검층	104
4.4.6 동적콘관입시험	106
제5장 전단파속도 실내시험	109
5.1 기본물성	111
5.2 압밀시험 결과	111
5.2.1 시험 개요	111
5.2.2 시험 결과	113
5.2.3 결과 분석	117
5.2.4 결론	121
제6장 전단파속도 수치해석	124

6.1 수치해석 개요	125
6.1.1 기하학적 구조(Geometry)	125
6.1.2 재료(Material)	126
6.1.3 경계 조건(Boundary conditions)	129
6.1.4 탄성과 전파	129
6.2 수치해석 현장적용 결과	131
6.2.1 화성 봉담 현장	131
6.2.2 파주 운정 현장	136
6.2.3 세종 연동 현장	141
6.3 결론	147
6.3.1 성토고(H) 및 성토폭(D)에 의한 원지반의 응력증가량과 범위	147
6.3.2 성토에 의한 원지반의 전단파속도 변화	149
6.3.3 성토에 의한 응력증가량과 전단파속도 변화의 상관관계	152
제7장 현장 전단파속도 분석	162
7.1 토층 평균 전단파속도	164
7.1.1 토층 평균 전단파속도의 개요	164
7.1.2 성토 전후 심도 별 전단파속도 및 토층 평균 전단파속도	165
7.1.3 결론	167
7.2 지표면으로부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V30)	169
7.2.1 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V30)의 개요	169
7.2.2 지표면으로부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V30) 비교	170
7.2.3 결론	173
7.3 실내 및 현장시험을 이용한 전단파속도 비교	173
7.3.1 실내 및 현장시험 결과 비교 및 결론	173
제 8장 성토층 전단파속도 산정방안	179
8.1 경험식을 이용한 성토층 전단파속도 산정	181

8.1.1	Brandenberg 경험식 개요	181
8.1.2	현장시험 결과와 Brandenberg 경험식의 비교	182
8.2	성토층의 전단파속도 산정	184
8.2.1	압밀시험을 이용한 전단파속도 산정	184
8.2.2	매립형 탄성과 모니터링 장비를 이용한 검증	187
8.2.3	결론	189
제9장	내진설계 향상을 위한 로드맵(제언)	193
제10장	결 론	198
참고문헌	206



표 차 례

[표 1.1] 지반의 분류(KDS 17 10 00)	3
[표 2.1] 중요도에 따라 나눈 내진등급의 분류	13
[표 2.2] 평균재현주기를 갖는 설계지진과 요구되는 내진성능수준의 조합 분류	14
[표 2.3] 국내의 지진구역 및 지진구역계수	14
[표 2.4] 기존의 지반분류	16
[표 2.5] 새로 제안된 지반의 분류	17
[표 2.6] 구조물의 고유주기 범위에 따른 S_a 의 식	18
[표 2.7] 단주기 지반증폭계수	19
[표 2.8] 1초주기 지반증폭계수	19
[표 2.9] 단주기 설계스펙트럼 가속도()에 따른 내진설계 범주	23
[표 2.10] 주기 1초 설계스펙트럼 가속도()에 따른 내진설계 범주	24
[표 2.11] 내진설계범주 A~D에 해당하는 해석법	24
[표 2.12] 내진설계범주 D에 해당하는 해석법	25
[표 2.13] 항목별 높이(m) 제한	28
[표 2.14] 내진설계범주 A~D의 지진하중의 방향	30
[표 2.15] 아파트 각 층별 최적설계	31
[표 2.16] 아파트 각 층별 최적설계	33
[표 2.17] 아파트 각 층별 최적설계	33
[표 3.1] DCP 제원	59
[표 4.1] 시험항목	67
[표 4.2] 화성봉담 시추조사 현황	71
[표 4.3] 화성봉담 시추조사 현황	71

[표 4.4] 표준관입시험 조사현황	72
[표 4.5] 표준관입시험 조사결과	72
[표 4.6] 화성봉담 다운홀 테스트 수행 현황	73
[표 4.7] 다운홀 시험의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (화성 성토지반 HS-1)	75
[표 4.8] SPS 검층의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (화성 성 토지반 HS-1)	78
[표 4.9] 화성 봉담 밀도검층 수행 현황	79
[표 4.10] 사질토에서 DCPI와 조밀도 (Mohammadi et al., 2008)	81
[표 4.11] 파주운정 시추조사 현황	83
[표 4.12] 파주운정 시추조사 결과	83
[표 4.13] 표준관입시험 조사현황	85
[표 4.14] 표준관입시험 조사결과	86
[표 4.15] 파주운정 다운홀 테스트 수행 현황	87
[표 4.16] 다운홀 시험의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (파주 성토지반 PJ-1)	88
[표 4.17] 파주운정 SPS 검층 수행 현황	89
[표 4.18] SPS 검층의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (파주 성 토지반 PJ-1)	91
[표 4.19] 파주 운정 밀도검층 수행 현황	92
[표 4.20] 사질토에서 DCPI와 조밀도 (Mohammadi et al., 2008)	93
[표 4.21] 세종 연동면 시추조사 현황	96
[표 4.22] 세종 연동면 시추조사 결과	96
[표 4.23] 표준관입시험 조사현황	97
[표 4.24] 표준관입시험 조사결과	98
[표 4.25] 세종 연동면 다운홀 테스트 수행 현황	99
[표 4.26] 다운홀 시험의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (세종	

성토지반 SJ-1)	100
[표 4.27] 세종 연동면 SPS 검층 수행 현황	101
[표 4.28] SPS 검층의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (세종 성토지반 SJ-1)	103
[표 4.29] 세종 연동면 밀도검층 수행 현황	104
[표 4.30] 사질토에서 DCPI와 조밀도 (Mohammadi et al., 2008)	106
[표 5.1] 화성, 파주, 세종 현장시료의 최대·최소 건조밀도 (간극비) 및 비중 시험 결과	111
[표 5.2] 상대밀도 별 목표 간극비, 건조 밀도, 흙 무게 (80%는 세종 시료만 해당)	112
[표 5.3] 상대밀도별 응력-전단파속도 (화성 봉담, 높이비 1.3:1)	118
[표 5.4] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수 산정 값 (화성 봉담)	118
[표 5.5] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 β 지수 산정 값 (화성 봉담)	118
[표 5.6] 상대밀도별 응력-전단파속도 (파주 운정, 높이비 1.3:1)	119
[표 5.7] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수 산정 값 (파주 운정)	119
[표 5.8] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 β 지수 산정 값 (파주 운정)	119
[표 5.9] 상대밀도별 응력-전단파속도 (세종 연동, 높이비 1.3:1)	120
[표 5.10] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수 산정 값 (세종 연동)	121
[표 5.11] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 β 지수 산정 값 (세종 연동)	121
[표 6.1] 각 현장의 층별 기본 특성 입력 값	126
[표 6.2] 성토평= 20m, 성토고= 0~10m에 대한 수직응력 (화성)	133
[표 6.3] 성토평= 30m, 성토고= 0~10m에 대한 수직응력 (화성)	133
[표 6.4] 성토평= 50m, 성토고= 0~10m에 대한 수직응력 (화성)	134
[표 6.5] 성토평= 20m, 성토고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (화성)	135

[표 6.6] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (화성)	135
[표 6.7] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (화성)	136
[표 6.8] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (과주)	138
[표 6.9] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (과주)	139
[표 6.10] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (과주)	139
[표 6.11] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (과주)	140
[표 6.12] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (과주)	140
[표 6.13] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (과주)	141
[표 6.14] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (세종)	143
[표 6.15] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (세종)	144
[표 6.16] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (세종)	144
[표 6.17] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (세종)	145
[표 6.18] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (세종)	146
[표 6.19] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (세종)	146
[표 7.1] 토층 평균 전단파속도에 따른 지반의 분류 (KDS 17 10 00)	164
[표 7.2] 성토평 전후 탄성과 속도(VS) 및 토층 평균 전단파속도(VS,Soil) (화성)	166
[표 7.3] 성토평 전후 탄성과 속도(VS) 및 토층 평균 전단파속도(VS,Soil) (과주)	166

[표 7.4] 성토전후 탄성과 속도(VS) 및 토층 평균 전단파속도(VS,Soil) (세종)	167
[표 7.5] 탐사방법에 따른 성토 전후 토층 평균 전단파속도(VS,Soil) 증가율	167
[표 7.6] 국내 내진설계 기준의 지반분류 체계 (구조물기초설계 기준)	170
[표 7.7] 성토 전후 탄성과 속도(VS) 및 V30 (화성)	170
[표 7.8] 성토 전후 탄성과 속도(VS) 및 V30 (파주)	171
[표 7.9] 성토 전후 탄성과 속도(VS) 및 V30 (세종)	172
[표 7.10] 탐사방법에 따른 성토 전후 V30 증가율	173
[표 7.11] 각 시험현장의 성토기간 및 특징	177
[표 8.1] Brandenberg et al.(2010) 경험식의 재료 상수	181
[표 8.2] 현장 전단파속도 측정 결과와 경험식의 비교	182
[표 8.3] N값별 전단파속도의 경험적 추정식(도종남, 2011)	183
[표 8.4] 흙의 단위중량 추정표 (한국도로공사)	185
[표 8.5] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (화성)	187
[표 8.6] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (파주)	187
[표 8.7] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (세종)	187
[표 8.8] 매립형 장비로 측정된 성토고(H)에 따른 전단파속도 (세종) ·	188
[표 8.9] 세종 현장시료의 상대밀도 계산 결과	190
[표 10.1] 현장 성토층 전단파속도 실측 결과	201



그림 차례

[그림 2.1] 고베(Kobe) 지진 당시 사진	11
[그림 2.2] 재현주기 1000년 국가지진위험지도	15
[그림 2.3] 설계응답가속도스펙트럼	17
[그림 2.4] 지반운동에 대한 지하층의 영향	20
[그림 2.5] 수치해석 모델 예시 (a), (b)	21
[그림 2.6] 수치해석 모델 예시 (a), (b)	22
[그림 3.1] 시추조사 흐름도	40
[그림 3.2] 시추조사 모식도	40
[그림 3.3] 표준관입시험 모식도	42
[그림 3.4] 다운홀 테스트 모식도 및 취득자료	44
[그림 3.5] 다운홀 테스트 자료처리 흐름도	47
[그림 3.6] 다운홀 테스트에서 측정된 파형에서의 도달시간 발췌	48
[그림 3.7] 다운홀 테스트 산출 결과	49
[그림 3.8] 부유식 음파검층 모식도	52
[그림 3.9] 발진 및 수신방법 모식도	52
[그림 3.10] 음파검층 자료의 원자료(a) 및 필터링 후의 자료(b) (GeoVision, 2002)	55
[그림 3.11] 컴프턴 효과	56
[그림 3.12] 선 강도()와 지층밀도()의 관계	57
[그림 3.13] 밀도검층 모식도	58
[그림 3.14] DCP 개요도	59
[그림 3.15] DCP 관입시험 방법	60
[그림 3.16] 개선된 압밀시험기 모식도	61

[그림 4.1] 화성 봉담	68
[그림 4.2] 파주 운정	69
[그림 4.3] 세종 연동면제1장 서 론	69
[그림 4.4] 화성봉담 시추조사 위치도 및 현장사진	70
[그림 4.5] 화성봉담 시료사진	72
[그림 4.6] 화성봉담 다운홀 테스트 현장사진	73
[그림 4.7] 다운홀 테스트의 현장측정자료 (화성 봉담 HS-1)	74
[그림 4.8] 화성 봉담 부유식 음파검층 현장사진	76
[그림 4.9] PS 검층의 현장측정자료 (화성 봉담 HS-1)	77
[그림 4.10] 화성 봉담 밀도 검층 현장사진	79
[그림 4.11] 화성 봉담 밀도검층 결과	80
[그림 4.12] DCP 시험의 현장측정자료 (화성 봉담)	81
[그림 4.13] 파주 운정 시추조사 위치도 및 현장사진	82
[그림 4.14] 파주운정 시료사진	85
[그림 4.15] 파주운정 다운홀 테스트 현장사진	86
[그림 4.16] 다운홀 테스트의 현장측정자료 (파주 운정 PJ-1)	87
[그림 4.17] 파주 운정 부유식 음파검층 현장사진	89
[그림 4.18] SPS 검층의 현장측정자료 (파주 운정 PJ-1)	90
[그림 4.19] 파주 운정 밀도 검층 현장사진	92
[그림 4.20] 파주 운정 밀도검층 결과	93
[그림 4.21] DCP 시험의 현장측정자료 (파주운정)	94
[그림 4.22] 세종 연동면 시추조사 위치도 및 현장사진	95
[그림 4.23] 세종 연동면 시료사진	97
[그림 4.24] 세종 연동면 다운홀 테스트 현장사진	98
[그림 4.25] 다운홀 테스트의 현장측정자료 (세종 연동면 SJ-1)	99
[그림 4.26] 세종 연동면 부유식 음파검층 현장사진	101
[그림 4.27] SPS 검층의 현장측정자료 (세종 연동면 SJ-1)	102

[그림 4.28] 세종 연동면 밀도검층 현장사진	104
[그림 4.29] 세종 연동면 밀도검층 결과	105
[그림 4.30] DCP 시험의 현장측정자료 (세종 연동면)	107
[그림 5.1] 벤더엘리먼트와 연계한 압밀 시험	112
[그림 5.2] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 침하량 (화성 봉담 현장)	113
[그림 5.3] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 침하량 (과주 운정 현장)	113
[그림 5.4] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 침하량 (세종 연동 현장)	114
[그림 5.5] 상대밀도별 하중단계에 따른 전단파 신호 (화성 봉담 현장)	115
[그림 5.6] 상대밀도별 하중단계에 따른 전단파 신호 (과주 운정 현장)	115
[그림 5.7] 상대밀도별 하중단계에 따른 전단파 신호 (세종 연동 현장)	116
[그림 5.8] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 (화성 봉담) ..	117
[그림 5.9] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 (과주 운정) ..	119
[그림 5.10] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 (세종 연동) ..	120
[그림 5.11] 각 현장의 상대밀도별 수직 유효 응력에 따른 α 계수와 β 지수	121
[그림 6.1] 화성 봉담 현장의 2차원 모델	126
[그림 6.2] 재료 및 구역	128
[그림 6.3] 경계 조건	129
[그림 6.4] 탄성과 전파 발신 및 수신 지점 설정	129
[그림 6.5] 입력 펄스	130
[그림 6.6] 수신기에서 감지된 S파 신호	130
[그림 6.7] 성토평= 20m, 성토평고= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (화성)	131
[그림 6.8] 성토평= 30m, 성토평고= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (화성)	132
[그림 6.9] 성토평= 50m, 성토평고= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (화성)	132

[그림 6.10] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (파주)	137
[그림 6.11] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (파주)	137
[그림 6.12] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (파주)	138
[그림 6.13] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (세종)	142
[그림 6.14] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (세종)	142
[그림 6.15] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (세종)	143
[그림 6.16] 성토평, 성토평 변화에 대한 수직응력 변화 (화성)	147
[그림 6.17] 성토평, 성토평 변화에 대한 수직응력 변화 (파주)	148
[그림 6.18] 성토평, 성토평 변화에 대한 수직응력 변화 (세종)	149
[그림 6.19] 성토평, 성토평 변화에 대한 전단파속도 변화 (화성)	150
[그림 6.20] 성토평, 성토평 변화에 대한 전단파속도 변화 (파주)	151
[그림 6.21] 성토평, 성토평 변화에 대한 전단파속도 변화 (세종)	151
[그림 6.22] 성토평, 성토평 변화에 대한 수직응력과 전단파속도 상관관계 (화성)	153
[그림 6.23] 성토평, 성토평 변화에 대한 수직응력과 전단파속도 상관관계 (파주)	154
[그림 6.24] 성토평, 성토평 변화에 대한 수직응력과 전단파속도 상관관계 (세종)	154
[그림 6.25] 성토평 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도 (화성)	157
[그림 6.26] 성토평 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도 (파주)	158
[그림 6.27] 성토평 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도 (세종)	160

[그림 7.1] 전단파속도 현장측정자료 (화성)	168
[그림 7.2] 전단파속도 현장측정자료 (파주)	169
[그림 7.3] 전단파속도 현장측정자료 (세종)	169
[그림 7.4] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (화성)	174
[그림 7.5] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (파주)	175
[그림 7.6] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (세종)	175
[그림 8.1] 매립형 탄성과 모니터링 장비	188
[그림 8.2] 현장 측정결과와 실내시험 결과 비교	188
[그림 8.3] DCPI를 이용한 상대밀도 추정	189
[그림 8.4] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 및 침하량 (화성)	190
[그림 8.5] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 및 침하량 (파주)	191
[그림 8.6] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 및 침하량 (세종)	191

제 1 장

연구 개요

LANDS
INDUSTRIAL
INSTITUTE

제1장 연구 개요

1.1 연구 배경 및 필요성

○ 내진설계란 지진에 저항할 수 있도록 구조물을 설계하는 방법으로 건물의 붕괴를 막아 인명 피해를 막기 위한 목적으로 국내 건축물 내진설계기준은 1988년에 처음 시행되어 현재는 2017년에 개정된 기준으로 시행하고 있으며 내진설계 시 지반의 전단파속도 인자가 반드시 필요하며 전단파속도에 따라 <표 1.1>과 같이 지반 종류를 분류한다.

[표 1.1] 지반의 분류(KDS 17 10 00)

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층평균전단파속도, $V_{s, soil}$ (m/s)
S_1	암반 지반	1 미만	—
S_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
S_3	얕고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 필요한 지반		

○ 지반등급이 높으면 상부구조물의 내진보강량이 줄어들고 경제적이며 시공성이 증가하며, 지반등급이 낮아지면 그 반대의 효과가 나타남. 지반등급이 높아지려면 표 1.1에서와 같이 토층평균전단파속도($V_{s,soil}$)가 커야 하는데, 성토층의 전단파속도가 과소평가되는 경향이 있음.

○ 성토층은 현장전단파속도 측정(SPS 또는 Downhole) 시험이 완료된 한참 후에 시공하기 때문에, 성토층의 전단파속도는 실측을 하지 못하고, Yamazaki 식 [$V_s=89.1 \cdot N^{0.34}$]을 이용하여 추정하고 있는데, 이때 N값을 성토높이와 강도에

상관없이 일률적으로 8로 가정하고, 깊어질수록 증가하는 지중응력을 고려하지 못하여 성토층의 전단파속도는 깊이에 상관없이 181m/s 단일 값으로 사용하고 있음.

○ 2009 LHI 연구(내진설계 시 합리적인 지반분류를 위한 전단파속도 측정 및 적용방안)에서 성토층과 생성과정이 비슷한 매립층에서 SPS로 측정한 전단파속도가 약 244~325m/s 으로 현재기준 대비 높으며 깊어질수록 증가하는 것으로 나타나, 공정상 현장시험을 하지 못하는 성토층의 전단파속도를 성토고와 성토층 지중응력 등을 고려하여 합리적으로 산정할 수 있는 방안이 필요함.

○ 현행 낮게 산정되고 있는 성토층의 전단파속도가 제대로 평가되면, 지반증폭계수의 하향조정 등으로 내진설계범주의 조정할 수 있는 등 내진설계에서 유리하게 작용할 것으로 기대됨.

※S4 지반이라도 기초저면에서의 전단파속도 260m/s이면 지반증폭계수를 하향조정할 수 있다 : 건축물 내진설계기준

※기반암의 깊이가 20m를 초과하고 지반의 평균 전단파속도가 360m/s 이상인 경우 F_v 의 80%를 적용한다 : 건축물 내진설계기준

○ 또한, 국토교통부 제정 「구조물기초설계기준 해설」에 “탄성파시험이 수행된 지반조사 이후에 구조물이나 성토체의 시공에 의해 지반의 유효상재하중의 변화가 예상되는 경우는 유효상재하중의 변화를 고려하여 전단파속도의 크기를 수정하여 사용한다.” 라고 명시되어 있음. 즉, 성토로 유효상재하중이 증가하면 원지반의 구속응력과 전단파속도가 증가할 것이며 이로 인해 내진설계에서 더욱 유리하게 작용할 것으로 판단됨.

1.2 연구목표

- 내진설계 합리화 방안 제시
 - － 성토층의 지반전단파속도 산정방안 제시
 - － 성토하중으로 인한 원지반의 전단파속도 변화거동 파악
 - － 합리적인 내진설계 로드맵 제시

1.3 연구내용

- － 내진설계 이론 및 기준 조사
- － 성토층에서의 전단파속도 현장 측정 및 실내시험
- － 성토에 따른 전단파속도 수치해석
- － 성토에 따른 전단파속도 변화량 조사 분석(현장시험 결과 분석 등)
- － 실무 전단파속도 산정방안 제시 및 내진설계 지침 작성
- － 경제성 및 성과분석
- － 지반동적물성을 고려한 합리적인 내진설계 로드맵(제언 등) 제시

6• 성토층에서의 지반 전단파속도 측정 및 산정 방안

제 2 장

내진설계 개요

LANDSLIDE
HONESTY

&

제2장 내진설계 개요

2.1 개요

2.1.1 내진설계 현황

국내 최초 내진설계기준에 대한 내용은 1988년 ‘건축물의 구조기준 등에 관한 규칙’에 내진설계에 대한 사항이 포함되며 시작되었다. 작성 당시 해당 내용은 미국의 ATC-06(1978)에 바탕을 둔 것으로 알려졌다. 국내의 내진설계 기준은 후에 건축 구조설계기준(Korean building Code, KBC)이 고시되기 전까지 해당 내진설계기준을 적용하여 사용되었다. 그리고 KBC 2005는 IBC(International Building Code 2000)의 내진설계개념을 대폭 수용하여 작성하였다. 이에 대한 내용으로서는 재현주기 500년 지진 유효지반가속도로 표현되던 설계지진은 IBC 2000 이후 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)인 재현주기 2,400년 지진의 유효지반 가속도에 대한 $2/3$ 값이 설계지진으로 정의되도록 작성하였다.(김동수 외, 2016)

1990년대 후반 국내 내진 설계 규정과 시설물별 세부 사항의 체계화가 시작된 이래로 현재까지 국내에서의 내진 설계 및 내진 성능 평가는 연구와 실무 적용이 병행되고 있다. 최근 해외의 강진 발생으로 인한 인명 및 구조물 피해 사례들과 더불어 한반도 주변의 강진 발생으로 인한 국내의 지역적 지진 안전성에 관련된 다각적 경각심이 대두되고 있는 가운데, 지진 운동의 중요한 영향 인자인 지반에 대한 지역적 특성 규명 연구 및 이를 통한 방안 체계화가 되고 있다.

2.1.2 국내 내진설계의 배경

현재 국내 내진설계의 주요한 설계기법은 콘크리트 설계기준 및 강구조 설계기준 등을 포함한 하중기준의 주요 개념이 KBC 기준 틀 속에서, 미국에서 발전된 내용에 많은 부분을 참조하고 있다. 우리나라의 지진피해는 1936년 쌍계사 지진, 1978년

홍성지진은 규모 5.0 크기의 지진으로 조적조, 토담집 등에 피해를 주었으며 1996년 영월지진은 규모 4.5 정도의 지진으로 중앙지 중심으로 균열 발생 등의 경미한 지진 피해가 발생하였다. 다행히 2007년에 발생한 오대산지 지진동(지진파가 전달됨으로써 일어나는 진동)의 기간이 10초에 불과한 지진 규모가 4.8 정도의 지진이었다.

국내는 과거부터 지진에 대한 안전지대로 인식되었으며 원자력발전소(1972년), 건축물(1988년), 교량(1992년) 등의 주요 구조물에만 제한적으로 내진설계가 도입되어왔다. 그러나 일본의 효고 현 남부지진(1995년)을 기점으로 국내에도 지진에 대한 국가적 차원의 대비가 시작되었다. 그 결과로서 1997년 현 국토해양부에서 ‘내진 설계기준(Ⅱ)’을 제정하고 이후 국내설계기준에 내진설계가 적용되기 시작하였다.

당시 국민들의 지진에 대한 인식은 상대적으로 다른 나라에 비해 경각심이 적었으나, 국내는 지진 중약진대에 속해 있어 상대적으로 내진 설계에 대한 필요성 인지와 지진피해에 대한 경각심 또한 적었다. 이는 1995년 일본 고베(Kobe)시와 한신 지역에서 발생한 대지진의 막대한 인적, 물적 피해를 통해 간접경험으로 인한 우려로 내진설계기준이 조속히 제정되게 되었다.

국내 많은 대형주거단지는 복수의 아파트 건물들이 공유하는 연결된 지하층과 연결된다. 지하층의 폭(B)은 높이(H)에 비하여 매우 큰 것이 특징이다. 즉, B/H는 단일 건물에 비하여 상대적으로 크게 높다. 이와 같은 경우 지하층의 양 측면 경계에서 전달되는 에너지는 기초 저면을 통하여 전파되는 에너지에 비하여 작게 된다. 설계지반운동 산정 시 자유장 지표면의 운동을 적용하는 실무 practice는 B/H가 작은 구조물에는 적합하지만 B/H가 큰 경우에는 적합하지 않다. 따라서 다양한 매개변수를 연구를 통하여 B/H에 따른 설계지반운동 산정 방법에 대한 연구가 필요하다.

국내에서는 2016년에 모멘트 규모(M) 5.4의 경주 지진, 2017년 M = 5.3 포항 지진 등 인프라에 피해를 유발하는 수준의 지진이 발생하였다. 최근 들어 연속적으로 발생하는 지진으로 인프라에 대한 지진 안전성에 대한 우려가 증가하고 있는 실정이다.

국내에서는 1997년에 제시된 내진설계기준(Ⅱ)부터 내진설계기준의 개념이 도입되었으며 20년 넘게 국내에서 적용되었으며 2018년에 개정되었다. 내진설계기준 일

반(KDS 17 10 00 : 2018)도 개정되었으며 KDS 17 10 00 스펙트럼을 사용할 것을 강제하고 있다.

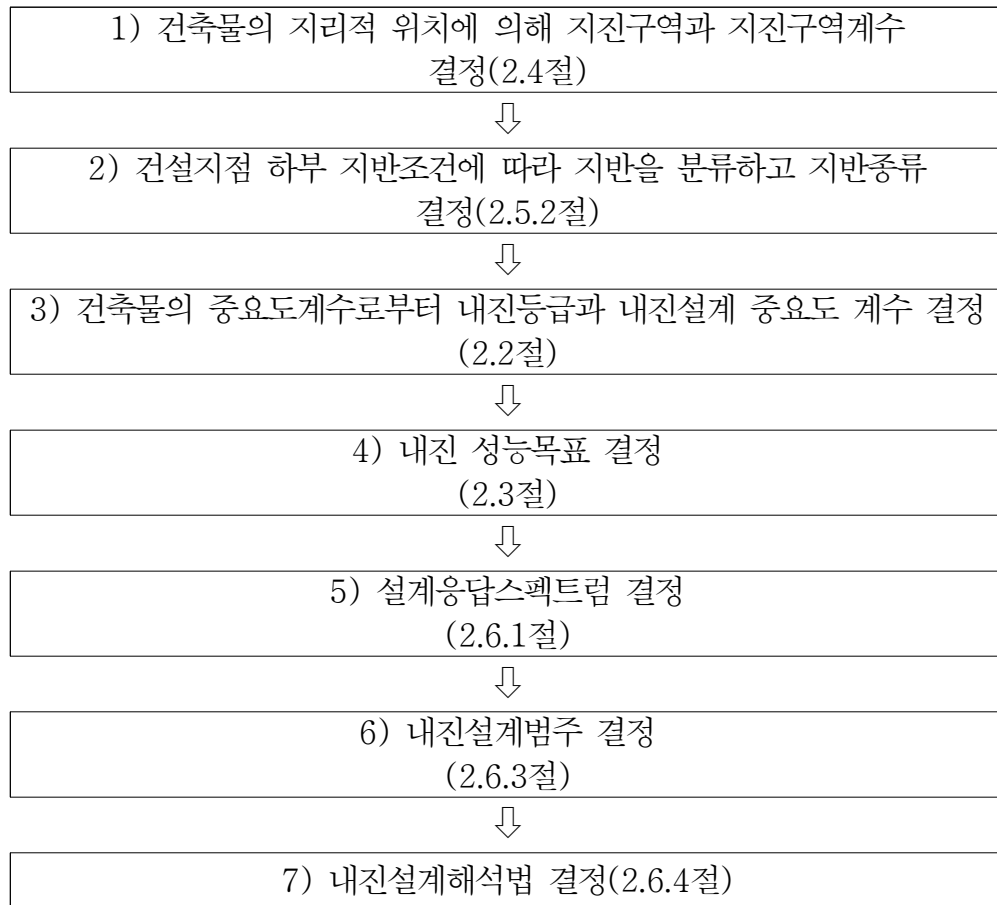
당시 작성된 내진설계기준(Ⅱ)에 명시되어있는 지반분류체계와 지반증폭계수 등 설계응답스펙트럼 작성법은 기반암 깊이가 100~300m에 이르는 깊이로서, 국내의 지리적 특성과는 달리 매우 깊고, 이는 장주기 특성을 보이는 미국 서부 해안지역의 지반 특성에 적합하도록 작성된 NEHRP 1997을 준용하여 작성된 것으로 확인된다.



[그림 2.1] 고베(Kobe) 지진 당시 사진

2.1.3 내진설계의 절차

건축물의 일반적인 내진설계 절차는 다음을 따른다. 다음 순서에 따라서 내진설계의 기준 및 설계방법을 설명하도록 하겠다.



*보정계수 : 내진설계범주 구하는 과정에서 산정된 전단파속도에 따라 보정될 수 있다.

2.2 내진설계

일반적으로 구조물은 기본적으로 낮은 지진위험도의 지진에 대하여 기능을 유지하고, 높은 지진 위험도의 지진에 대해서 붕괴를 방지함으로써 인명의 안전을 확보하는 것을 내진설계의 목표로 한다. 이 과정에서 높은 내진등급의 건축물은 중요도를 고려하여 상향된 지진위험도에 대하여 내진설계를 수행한다.

국내 설계기준은 국내 내진설계기준인 KDS 17 10 00을 기반으로 작성되며, 해당 기준을 토대로 건축물 내진 설계(KDS 41 17 00)를 고려하여 작성하게 된다. 해당 내진설계기준은 지진으로 인한 재해로부터 국민의 생명과 재산 및 기간시설을 보호

하는 것을 목적으로 하며, 체계적인 내진성능기준을 제시하고 시설물의 내진설계기준에서 이를 만족시키기 위한 내진설계의 기본적인 요건과 고려사항을 제시하도록 되어있다.

2.2.1 지반조사

지반조사는 지층의 구성, 각 지층의 동역학적 특성 파악 및 실내시험용 시료채취 등을 수행하는 현장시험과 채취된 시료를 이용한 실내시험을 포함하여야 하며, 내진설계는 지진에 대한 설계 지반운동을 결정하기 위하여 기반암을 확인할 수 있는 심도까지 시추를 수행한다. 기반암은 전단파속도 이상으로 한다.

본 연구에서는 화성 봉담, 과주 운정 및 세종 연동면 건설공사현장을 대상으로 성토지반 부지를 선정하여 다양한 탄성과 시험(하양식탄성과탐사, 부유식 PS검층(SPS))을 수행하였고 이를 통해 현장 지반의 전단파속도를 획득하였다.

2.2.2 내진등급

시설물의 내진등급은 중요도에 따라서 내진특등급, 내진Ⅰ등급, 내진Ⅱ등급으로 분류되는데 여기서 내진등급의 분류에 대한 내용은 다음 표 2.1에 정리하였다.

[표 2.1] 중요도에 따라 나눈 내진등급의 분류

내진특등급	지진 시 매우 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 매우 큰 영향을 줄 수 있는 시설의 등급 의미
내진Ⅰ등급	지진 시 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 시설의 등급을 의미
내진Ⅱ등급	지진 시 재난이 크지 않거나, 기능이 마비되어도 사회적으로 영향이 크지 않은 시설의 등급을 의미

2.2.3 내진성능목표

내진성능목표는 평균재현주기를 갖는 설계지진과 요구되는 내진성능수준의 조합으로 정의하며, 시설물은 내진설계 일반 KDS 17 10 00에서 규정한 내용 표 2.2와 같

이 최소 내진성능목표를 만족하도록 설계한다.

[표 2.2] 평균재현주기를 갖는 설계지진과 요구되는 내진성능수준의 조합 분류

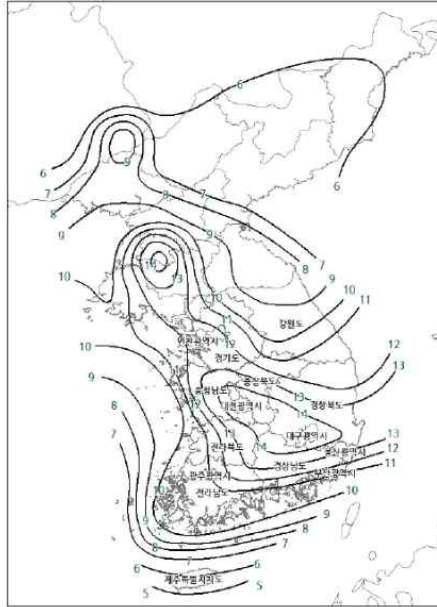
설계 지진	내진성능수준 평균재현주기	기능수행	즉시복구	장기복구/ 인명보호	붕괴 방지
	50년	내진Ⅱ등급			
	100년	내진Ⅰ등급	내진Ⅱ등급		
	200년	내진특등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅱ등급	
	500년		내진특등급	내진Ⅰ등급	내진Ⅱ등급
	1,000년			내진특등급	내진Ⅰ등급
	2,400년				내진특등급
	4,800년				내진특등급

2.2.4 국내 지진구역 및 지진위험도

국내 내진설계기준인 KDS 17 10 00에서 제시한 우리나라의 지진구역 및 지진위험도는 표 2.3에 정리하였다. 지진구역계수 z 는 평균재현주기 500년에 해당한다.

[표 2.3] 국내의 지진구역 및 지진구역계수

지진 구역	행정구역		지진구역계수
Ⅰ	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종	0.11g
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원, 남부	
Ⅱ	도	강원 북부, 제주	0.07g



[그림 2.2] 재현주기 1000년 국가지진위험지도

2.2.5 지반의 분류

1) 기존의 지반 분류

내진설계기준에 해당하는 지반의 분류가 변경되기 전의 기준을 다음과 같이 표에 나타내었다.(표 2.4) 표의 내용과 같이 기존의 지반 분류의 기준은 주로 $V_{S,30}(m/s)$ 에 해당하였으며, 이는 30m까지의 전단파속도를 토대로 평균값을 나타낸 값이며, 식 2.1을 통해 계산된다.

$$V_{S,30} = 30 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}} \right) \quad (\text{식 2.1})$$

여기서 d_i 와 V_{si} 는 각각 지표면 하부 30m까지의 번째 토층의 두께와 전단파속도(m/s)이다. 해당 식이 사용되게 된 배경은 2절에서 설명한 바와 같이 국내의 내진설계는 미국 서부 해안지역의 지반 특성에 적합하도록 작성된 NEHRP 1997을 준용하여 작성되었기 때문이다. 미국 서부 해안 지반의 특성으로는 기반암 깊이가

100~300m로 매우 깊고, 장주기 특성을 보이는데 이는 국내의 지반 특성과 큰 차이점을 가지고 있다는 특성을 가지고 있다.

[표 2.4] 기존의 지반분류

지반 분류	지반분류의 호칭	상부 30,40m에 대한 평균 지반 특성		
		$V_{S,30}(m/s)$	표준관입시험 (N)	비배수전단 강도(kPa)
S_A	경암지반	$V_{S,30}(m/s) > 1500$	—	—
S_B	보통암지반	$760 \leq V_{S,30}(m/s) < 1500$		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	$360 \leq V_{S,30}(m/s) < 760$	>50	>100
S_D	단단한 토사지반	$180 \leq V_{S,30}(m/s) < 360$	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사지반	$V_{S,30}(m/s) < 180$	<15	<50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

2) 기존의 지반 분류

새로 제안된 지반의 분류로는 기존의 분류는 3.3.1절에서 설명한 바와 같이 국내의 지반의 특성이 아닌 미국 서부의 기준을 참고하여 작성하였기 때문에 국내의 지반의 특성을 반영하지 못한다는 큰 단점을 가지고 있었다. 그러나 새로 제안된 지반의 분류는 국내의 지반의 특성을 먼저 분석하고 해당 결과를 통해 국내의 지반 특성에 맞춰 지반의 분류를 나눈다는 가장 큰 특징을 가진다. 이러한 이유로 인해 표 2.5와 같이 새로 지반의 분류가 제안되었으며, 가장 먼저 보이는 차이점으로는 $V_{S,30}(m/s)$ 이 아닌 $V_{S,soil}$ 을 쓴다는 점인데 $V_{S,soil}$ 의 계산법은 식 2.1과 달리 식 2.2와 같이 계산된다.

$$V_{S,soil} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (\text{식 2.2})$$

여기서, d_i = 기반암 깊이까지의 I번째 토층의 두께, m

V_{si} = 기반암 깊이까지의 I번째 토층의 전단파속도, m/s

[표 2.5] 새로 제안된 지반의 분류

지반 분류	지반분류의 호칭	분류 기준	
		기반암 깊이, H(m)	토층 평균 전단파속도 $V_{S,30}(m/s)$
s_1	암반 지반	1 미만	—
s_2	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
s_3	얕고 연약한 지반		260 미만
s_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
s_5	깊고 연약한 지반		180 미만
s_6	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반		

2.2.6 설계응답스펙트럼가속도(KDS 41 17 00 4장)

1) 설계응답스펙트럼의 정의

[그림 2.3] 설계응답가속도스펙트럼

응답스펙트럼은 각기 다른 고유진동수를 가진 1차원 시스템 각각의 지진동에 대한 응답시간이력의 최대값을 진동수-진폭 평면에 나열한 것이다. 이 과정에서 내진 설계에서 정의한 고유주기의 범위에 따라 S_a 를 구하게 되며 이 과정에서 구해지게

되는 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼이라 한다.

지진의 설계응답스펙트럼은 다음 식에 따라 구한 후 그림 2.3과 같이 작성하며, 스펙트럼가속도 S_a 의 식은 다음 표 2.6의 식과 이용하여 범위에 맞게 산정한다.

[표 2.6] 구조물의 고유주기 범위에 따른 S_a 의 식	
구조물의 고유주기(sec)	S_a 식
$T \leq T_0$	$S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS}$
$T_0 < T \leq T_S$	$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$
$T_S < T \leq T_L$	
$T > T_L$	$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}$

여기서, T : 구조물의 고유주기(초)를 나타내며, T_0, T_L, T_S 식은 식 2.3, 2.4, 2.5에 따른다.

$$T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS} \quad (\text{식 2.3})$$

$$T_S = S_{D1} / S_{DS} \quad (\text{식 2.4})$$

$$T_L = 5 \text{ 초} \quad (\text{식 2.5})$$

단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 S_{DS} , S_{D1} 은 식 2.6, 2.7에 의하여 산정하며 여기서 F_a, F_v 는 규정된 지반증폭계수로서 각각 단주기 증폭계수, 1초주기 증폭계수를 나타낸다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 \quad (\text{식 2.6})$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3 \quad (\text{식 2.7})$$

2.6.2절에 설명한 바와 같이 F_a, F_v 는 규정된 지반증폭계수로서 각각 단주기 증폭계수, 1초주기 증폭계수를 나타내며, 해당 지반증폭계수들의 지반종류별 입력 값은 해당 표 2.7~2.8에 나타내었다.

[표 2.7] 단주기 지반증폭계수 F_a

지반종류	지진지역		
	$S \leq 0.1$	$S=0.2$	$S=0.3$
S_1	1.12	1.12	1.12
S_2	1.4	1.4	1.3
S_3	1.7	1.5	1.3
S_4	1.6	1.4	1.2
S_5	1.8	1.3	1.3

* S는 설계스펙트럼 가속도 산정식에 적용된 값이다. 위 표에서 의 중간 값에 대하여는 직선보간한다.

[표 2.8] 1초주기 지반증폭계수 F_v

지반종류	지진지역		
	$S \leq 0.1$	$S=0.2$	$S=0.3$
S_1	0.84	0.84	0.84
S_2	1.5	1.4	1.3
S_3	1.7	1.6	1.5
S_4	2.2	2.0	1.8
S_5	3.0	2.7	2.4

* S는 설계스펙트럼 가속도 산정식에 적용된 값이다. 위 표에서 의 중간 값에 대하여는 직선보간한다.

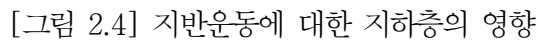
2) 지반증폭계수의 보정

지반증폭계수를 산정하는 과정에서 예외가 적용되는 케이스는 다음 아래의 경우와 같다. 이 경우, 지반등급에 의해 분류가 되었다 하더라도 지반분류에 의해 지반증폭계수를 산정하지 않고 다음 아래와 같이 지반증폭계수를 조정하여 산정할 수 있다.

① 기반암의 깊이가 20m를 초과하고 지반의 평균 전단파속도가 360m/s 이상인 경우 표 2.8에 규정된 의 80%를 설계에 적용하여 계산한다.

② 지반종류가 혹은 에 속하면서 기초저면에서의 전단파속도가 260m/s 이상인

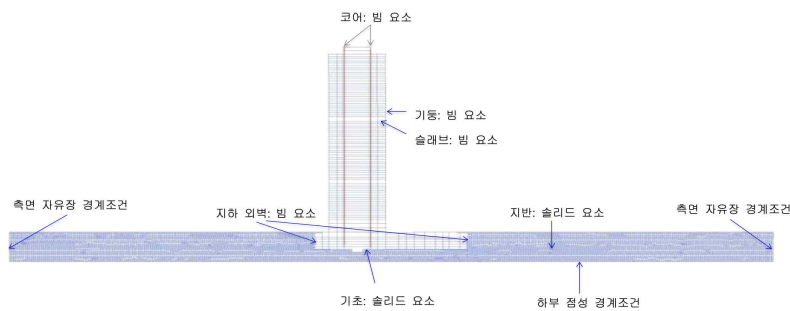
③ 구조물에 지진토압으로 작용하는 지반운동이 그림 2.4와 같이 지하구조물의 강성에 의해 제어되는 경우에 식 (2.8)과 같이 지반증폭계수가 감소될 수 있다고 명시되어있다.(건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00))



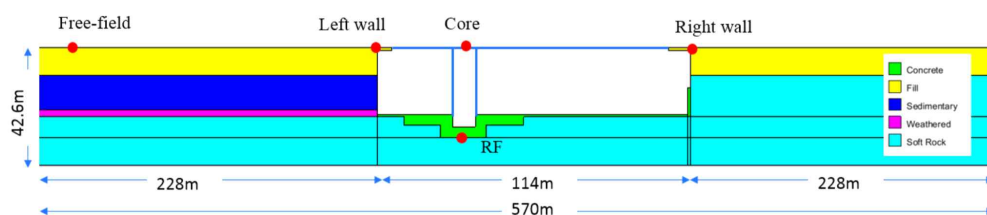
단, 평균 전단파속도는 지반응답해석의 전달함수로부터 역계산해서 산정하는 것은 허용되지 않으며 탄성과 주상도로부터 Time averaged $V_{s,soil}$ 으로 결정한다.(참고로 전단파속도가 360m/s 수준은 풍화암에 근접한 값이다.)

위 기준은 자유장변위(a)와 지진도압을 지하벽체에 작용하여 산정된 수평변위(b)의 비율을 적용하여 지반증폭계수를 산정하는 방법이다. 이는 아래의 이유로 적절하지 않다.

- 지진토압은 매우 큰 불확실성을 가지고 있으며 이를 통하여 수평변위(b)를 산정하는 것은 전 세계적으로 적용된 사례가 없는 신뢰도가 부족한 방법이다. 특히 지하층의 응답은 지진 토압뿐만 아니라 지하층으로부터 전파되는 상향파와 외벽에 작용하는 전단력의 영향도 받기에 수직응력인 토압만으로 변위를 산정하는 것은 적절하지 않다. 단, 지진토압은 지하구조물 벽체의 성능을 평가하는 데에는 활용될 수 있다.
- 지하층의 운동은 지하구조물 폭(B)과 높이(H) 비율의 영향과 지반과의 상대강성을 나타내는 유연도비(Flexibility ratio)의 영향을 크게 받는다. 이를 고려하지 않고 옹벽의 토압을 산정하기 위하여 산정된 경험식을 적용하는 것은 적절하지 않다.



(a) 구조물 수치해석 모델



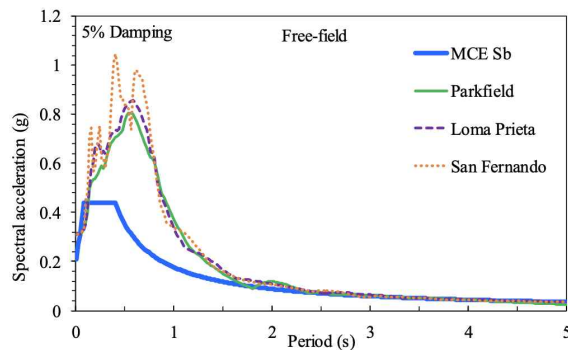
(b) 지반 수치해석 모델

[그림 2.5] 수치해석 모델 예시 (a), (b)

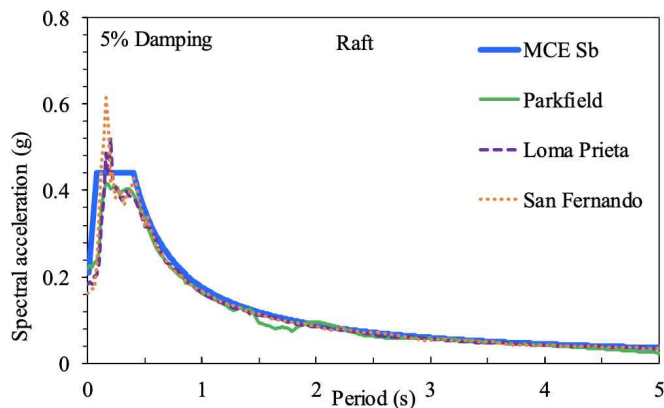
위 기준은 KBC 2016의 아래 기준과도 상이하다.

일반적으로 지반분류는 지표면을 기준으로 정한다. 다만, 지하층을 가진 구조물로서 직접기초를 사용하고 기초저면의 지반종류가 S_C 이상의 단단한 지반인 경우에는 기초저면을 지반분류의 기준면으로 사용할 수 있다.

KBC 2016기준에 의거하면 지하층을 모델링한 동해석을 수행하여 기초저면 벽체, 자유장 운동을 비교하여 기준면을 결정한 사례가 아래와 같이 있다.



(a) 자유장 지표면에서의 응답과 KBC 스펙트럼 비교



(b) 기초 저면에서의 응답과 KBC 스펙트럼 비교

[그림 2.6] 수치해석 모델 예시 (a), (b)

그림 2.6의 (a)와 같이 자유장 지표면에서의 응답스펙트럼 해석 결과 1초 이내의 영역에서 최대가속도가 1g로 커지나 그림 2.6의 (b)의 기초저면을 기준으로 한 응답스펙트럼 가속도가 최대가속도가 0.6g로 상당히 줄어드는 것으로 나타난다. 즉 기초저면의 기준으로 동적으로 할 경우 지진가속도가 약 40% 감소하며 구조물 내진설계에 상당히 유리하게 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

건축구조기준 2016(KBC 2016)에 의하면 ‘ F_v 값을 부지고유의 지진응답해석을 수행하여 결정할 수 있다 하더라도, 설계스펙트럼가속도를 이용하여 구한 값의 80% 이상이어야 한다.’라고 명시되어있다. 이러한 제한이 있기 때문에 최종적으로 설계스펙트럼가속도는 20%만 줄이면 효과가 있을 것으로 보인다.

3) 내진설계범주의 결정

모든 구조물은 2.6.2절에 따라 결정된 설계스펙트럼 가속도 및 γ 값을 사용하며, 표 2.7과 표 2.8로부터 내진설계범주를 결정한다. 표 2.9와 표 2.10에 따라 결정한 내진설계범주가 다를 경우 둘 중 높은 내진설계범주로 분류하여 설계하도록 한다.

[표 2.9] 단주기 설계스펙트럼 가속도(s_{DS})에 따른 내진설계 범주

s_{DS} 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.50 \leq s_{DS}$	D	D	D
$0.33 \leq s_{DS} < 0.50$	D	C	C
$0.17 \leq s_{DS} < 0.33$	C	B	B
$s_{DS} < 0.17$	A	A	A

[표 2.10] 주기 1초 설계스펙트럼 가속도(s_{D1})에 따른 내진설계 범주

s_{D1} 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.20 \leq s_{D1}$	D	D	D
$0.14 \leq s_{D1} < 0.20$	D	C	C
$0.07 \leq s_{D1} < 0.14$	C	B	B
$s_{D1} < 0.07$	A	A	A

4) 내진설계범주에 따른 해석법

해당 내용은 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)의 7장에 해당되는 내용이며, 자세한 내용은 해당 장에서 확인할 수 있다.

건물이 지진 시 받게 되는 최대 가속도(s_{DS}, s_{D1})와 그 건물의 용도 또는 중요성에 따른 내진등급에 따라 설계 시 다른 수준의 요구사항이 적용된다. 이를 위해 내진설계범주라는 개념을 도입하고 모든 건물을 A~D에 이르기까지 분류하고 있는데, D에 가까울수록 설계 시 높은 수준의 성능을 요구하게 된다. 이에 따라 내진설계범주 A~D에 따라 해석하는 방법이 다른데, 이는 표 2.10에 나타내었으며, 이 중 내진설계범주 D는 더 자세한 내진설계방법을 적용하기 때문에 해당 내용은 표 2.11에 정리하였다.

[표 2.11] 내진설계범주 A~D에 해당하는 해석법

내진설계 범주 등급	해석 방법
A B	KDS 41 17 00에서 정의한 등가정적해석법에 따라 해석
C	KDS 41 17 00에서 정의한 등가정적해석법에 따라 해석 단, 다음 중 하나에 해당하는 경우 설계기준에서 제시하는 동적해석법을 사용해야함 (1) 높이 70m 이상 또는 21층 이상의 정형구조물 (2) 높이 20m 이상 또는 6층 이상의 비정형구조물
D	표 2.11의 기준에 맞춰 내진설계 진행

[표 2.12] 내진설계범주 D에 해당하는 해석법

내진설계 범주 등급	구조물의 형태	내진설계 해석방법
D	1. 3층 이하인 경량골조구조와 각 층에서 유연한 격막을 갖는 2층 이하인 기타 구조로서 내진등급 II의 구조물	등가정적해석법 또는 동적해석법
	2. 상기 1항 이외의 높이 70m 미만의 정형구조물	
	3. 표 5.3-2에서 유형 1, 2, 3을 제외한 수직비정형성 또는 표 5.3-1의 유형 1을 제외한 평면비정형성을 가지면서 높이가 5층 또는 20m를 초과하지 않는 구조물.	
	4. 평면 또는 수직 비정형성을 가지는 기타 구조물 또는 높이가 70m를 초과하는 정형구조물	동적해석법

(1) 등가정적 해석법

등가정적 해석법은 복잡하고 다양한 변수를 검토해야하는 동적해석법을 대신하기 위해 동적해석법의 이론을 단순화하면서 지진하중을 정적인 횡력으로 보는 해석법이다. 지진의 거동을 수식으로 표현하기 때문에 동적해석법에 비해 투입되는 시간과 비용을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

(2) 동적해석법

동적해석법의 종류에는 총 세 가지의 종류가 있으며 다음과 같다.

- ① 응답스펙트럼해석법
- ② 선형시간이력해석법
- ③ 비선형시간이력해석법

동적해석법은 등가정적해석법과 달리 모델링을 통해 상황에 따라 2차원 또는 3차원의 모델을 사용할 수 있으며, 세 가지의 방법 중 한가지의 방법을 선택할 수 있다. 크게는 응답스펙트럼해석법, 그리고 시간이력에 따라 해석하는 방법인 시간이력해석법이 있는데, 시간이력해석법에는 크게 선형과 비선형으로 나뉜다. 시간이력 해석법은 시간에 대한 하중이력을 입력하여 응답을 도출하는 직접적인 해석법이다. 시간에

흐름에 따른 응답의 이력을 알 수 있지만, 모든 시간에 대해 계산하기 때문에 컴퓨터에 가해지는 부담이 크고 해석시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

① 응답스펙트럼 해석법 : 동적 해석 프로그램을 사용하여 구조체의 거동효과를 고려하는 방법으로, 시간이력해석법에 비하여 다소 오차가 발생하는 방법이지만 간편하게 구조의 동적 특성을 비교적 잘 파악할 수 있는 방법이다.

② 선형시간이력해석법 : 비선형시간이력해석법과 동일한 시간이력해석법이라는 공통점을 가지고 있으나, 해당 방법은 구조물의 비선형성 거동을 고려하지 않기 때문에 비선형시간이력해석법에 비해 비교적 시간이 짧게 걸린다는 장점이 있으나, 이러한 특성으로 인해 신뢰도가 비선형시간이력해석법에 비해 신뢰도가 떨어질 수 있다는 특징을 갖는다.

③ 비선형시간이력해석법 : 구조부재의 비선형성을 해석 모델에 직접 구현하고, 구조물이 갖는 실제 지진파를 사용하는 해석법이다. 다른 해석법에 비하여 지진을 받은 구조물의 변위, 속도, 가속도와 구조부재의 이력거동을 파악함에 있어 가장 정확하고 신뢰도가 높은 해석방법이다.

2.3. 내진설계범주 등급별 차이점

2절까지는 내진설계의 개요 및 기준에 대하여 설명하였다. 3절에서는 내진설계기준의 등급이 올라감에 따라 얼마나 보강철근 및 설계시간 등에서 이점을 얻을 수 있는지에 대해 설명하도록 하겠다.

2.3.1 내진설계범주 'D' 에 대한 시스템 제한

먼저 내진설계범주 중 'D'는 등급이 가장 낮은 만큼 설계에 있어 많은 항목이 요구된다. 이 절에서는 해당 등급의 고려사항에 대해 설명하고자 한다. 건축내진설계기

준(KDS 41 17 00)의 6.6절에는 내진설계범주 'D'에 대한 내용으로 다음과 같은 내용이 기재되어있는데, 이 과정에서 시스템 제한과 높이 제한으로 크게 두 가지로 나뉜다. 해당 내용은 건축내진설계기준 표 6.2-1 설계과정에서 시스템 제한 관련 내용이 수록되어있으며, 본 연구 보고서에서는 해당 표의 일부만 요약해서 표 2.12에 나타내었다.

1) 상호작용 효과

강성이 큰 비구조요소에 연결되어 있는 모멘트골조는 이러한 요소의 영향으로 인해 수직하중 및 지진력저항능력이 저해되지 않도록 설계하여야 한다. 설계 시 7.2.8.1에서 산정된 설계층간변위 에 해당하는 변형에서 구조시스템에 대한 이 요소의 영향을 고려하고 대비하여야 한다. 또한 어떤 구조물이 5.3에서 정의한 하나 혹은 그 이상의 비정형성을 갖는지 여부를 결정할 때에도 이 요소들의 영향을 반드시 고려하여야 한다.

2) 변형의 적합성

고려하는 방향의 지진력 저항시스템에 포함되지 않은 모든 구조요소는 7.2.7.1에 따라 결정된 설계층간변위 에 의하여 발생하는 모멘트와 전단력뿐만 아니라 수직하중에 저항할 수 있는 연성능력을 발휘하도록 설계한다. 허용응력설계법을 사용할 경우, 는 하중계수 0.7을 곱하지 않은 지진력에 대해 산정한다. 고려하는 방향의 지진력저항시스템에 포함되지 않은 부재에 발생하는 모멘트와 전단력은 인접한 강한 구조 및 비구조요소에 의한 강성 증가효과를 포함하여 산정한다.

2.3.2 내진설계범주 'D' 에 대한 높이 제한

항목별로 높이 제한의 차이에 대한 내용을 표 2.13에 나타내었다. 건축물 내진 설계(KDS 41 17 00)에는 더 많은 항목이 나와 있으나, 본 보고서에서는 내진설계범주별로 차이를 확연히 확인할 수 있는 항목 위주로 나타내었다.

내진설계범주 'D'등급은 보통 전단벽의 높이가 제한되어 특수 전단벽으로 설계해

아한다. 그러나 성토층의 전단파속도에 의해 내진설계범주가 D에서 C로 상향되면 보통 전단벽의 설계가 가능하다.

[표 2.13] 항목별 높이(m) 제한

기본 지진력저항시스템1)	설계계수			시스템의 제한과 높이(m) 제한		
	반응수정 계수 R	시스템 초과강도 계수 Ω_0	변위 증폭 계수 C_d	내진 설계 범주 A 또는 B	내진 설계 범주 C	내진 설계 범주 D
1. 내력벽시스템						
1-a. 철근콘크리트 특수전단벽	5	2.5	5	—	—	—
1-b. 철근콘크리트 보통전단벽	4	2.5	4	—	—	60
1-c. 철근보강 조적 전단벽	2.5	2.5	1.5	—	60	불가
1-d. 무보강 조적 전단벽	1.5	2.5	1.5	—	불가	불가
1-e. 구조용 목재패널을 덧댄 경골목구조 전단벽	6	3	4	—	20	20
1-f. 구조용 목재패널 또는 강판시트를 덧댄 경량철골조 전단벽	6	3	4	—	20	20
2. 건물골조시스템						
2-a. 철골 편심가새골조 (링크 타단 모멘트 저항 접합)	8	2	4	—	—	—
2-b. 철골 편심가새골조 (링크 타단 비모멘트 저항접합)	7	2	4	—	—	—
2-c. 철골 특수중심가새골조	6	2	5	—	—	—
2-d. 철골 보통중심가새골조	3.25	2	3.25	—	—	—
2-e. 합성 편심가새골조	8	2	4	—	—	—
2-f. 합성 특수중심가새골조	5	2	4.5	—	—	—
2-g. 합성 보통중심가새골조	3	2	3	—	—	—
2-h. 합성 강판전단벽	6.5	2.5	5.5	—	—	—
2-i. 합성 특수전단벽	6	2.5	5	—	—	—
2-j. 합성 보통전단벽	5	2.5	4.5	—	—	60
2-k. 철골 특수강판전단벽	7	2	6	—	—	—
2-l. 철골 좌굴방지가새골조 (모멘트 저항 접합)	8	2.5	5	—	—	—
2-m. 철골 좌굴방지가새골조 (비모멘트 저항 접합)	7	2	5.5	—	—	—
2-n. 철근콘크리트 특수전단벽	6	2.5	5	—	—	—
2-o. 철근콘크리트 보통전단벽	5	2.5	4.5	—	—	60
2-p. 철근보강 조적 전단벽	3	2.5	2	—	60	불가
2-q. 무보강 조적 전단벽	1.5	2.5	1.5	—	불가	불가

2-r. 구조용 목재패널을 덧댄 경골목구조 전단벽	6.5	2.5	4.5	—	20	20
2-s. 구조용 목재패널 또는 강판시트를 덧댄 경량철골조 전단벽	6.5	2.5	4.5	—	20	20
3. 모멘트-저항골조 시스템						
3-a. 철골 특수모멘트골조	8	3	5.5	—	—	—
3-b. 철골 중간모멘트골조	4.5	3	4	—	—	—
3-c. 철골 보통모멘트골조	3.5	3	3	—	—	—
3-d. 합성 특수모멘트골조	8	3	5.5	—	—	—
3-e. 합성 중간모멘트골조	5	3	4.5	—	—	—
3-f. 합성 보통모멘트골조	3	3	2.5	—	—	—
3-g. 합성 반강접모멘트골조	6	3	5.5	—	—	—
3-h. 철근콘크리트 특수모멘트골조	8	3	5.5	—	—	—
3-i. 철근콘크리트 중간모멘트골조	5	3	4.5	—	—	—
3-j. 철근콘크리트 보통모멘트골조	3	3	2.5	—	—	30
4. 특수모멘트골조를 가진 이중골조시스템						
4-a. 철골 편심가새골조	8	2.5	4	—	—	—
4-b. 철골 특수중심가새골조	7	2.5	5.5	—	—	—
4-c. 합성 편심가새골조	8	2.5	4	—	—	—
4-d. 합성 특수중심가새골조	6	2.5	5	—	—	—
4-e. 합성 강판전단벽	7.5	2.5	6	—	—	—
4-f. 합성 특수전단벽	7	2.5	6	—	—	—
4-g. 합성 보통전단벽	6	2.5	5	—	—	—
4-h. 철골 좌골방지가새골조	8	2.5	5	—	—	—
4-i. 철골 특수강판전단벽	8	2.5	6.5	—	—	—
4-j. 철근콘크리트 특수전단벽	7	2.5	5.5	—	—	—
4-k. 철근콘크리트 보통전단벽	6	2.5	5	—	—	—
5. 중간모멘트골조를 가진 이중골조시스템						
5-a. 철골 특수중심가새골조	6	2.5	5	—	—	—
5-b. 철근콘크리트 특수전단벽	6.5	2.5	5	—	—	—
5-c. 철근콘크리트 보통전단벽	5.5	2.5	4.5	—	—	60
5-d. 합성 특수중심가새골조	5.5	2.5	4.5	—	—	—
5-e. 합성 보통중심가새골조	3.5	2.5	3	—	—	—
5-f. 합성 보통전단벽	5	3	4.5	—	—	60
5-g. 철근보강 조적 전단벽	3	3	2.5	—	60	불가
6. 역추형 시스템						
6-a. 캔틸레버 기둥 시스템	2.5	2.0	2.5	—	—	10
6-b. 철골 특수모멘트골조	2.5	2.0	2.5	—	—	—
6-c. 철골 보통모멘트골조	1.25	2.0	2.5	—	—	불가
6-d. 철근콘크리트 특수모멘트골조	2.5	2.0	1.25	—	—	—

7. 철근콘크리트 보통 전단벽-골조 상호작용 시스템	4.5	2.5	4	-	-	60
8. 6의 역추형 시스템에 속하지 않으면서 강구조기준의 일반규정만을 만족하는 철골구조시스템	3	3	3	-	-	60
9. 6의 역추형시스템에 속하지 않으면서 철근콘크리트구조기준의 일반규정만을 만족하는 철근콘크리트구조 시스템	3	3	3	-	-	30
10. 지하외벽으로 둘러싸인 지하구조시스템	3	3	2.5			

1) 시스템별 상세는 각 재료별 설계기준 및 또는 신뢰성 있는 연구기관에서 실시한 실험, 해석 등의 입증자료를 따른다.

2.3.3 하중조합 및 설계 요구 사항

내진설계범주 등급에 따라 지진하중의 적용방법이 다르다. 해당 내용은 표 2.14에 나타내었다.

[표 2.14] 내진설계범주 A~D의 지진하중의 방향

내진설계 범주 등급	지진하중의 방향
A	-
B	설계지진력은 각 부재에 가장 큰 하중효과가 발생하는 방향으로 적용한다. 이러한 규정은 지진력을 직교하는 임의의 두 방향으로 각각 작용시켰을 때 만족하는 것으로 간주한다.
C	지진하중의 방향 B등급 규정을 만족하여야 하며, 특히 표 5.3-1에 규정된 평면비정형 유형 H-5에 해당하는 구조물의 설계부재력은 다음의 두 가지 방법 중 한 가지 방법을 이용하여 결정한다. (건축물 내진설계 KDS 41 17 00) (1) 한 방향 지진하중 100%와 그에 직교하는 방향의 지진하중 30%에 대한 하중효과의 절대값을 합하여 구하되, 두 가지 조합 중 큰 값을 택한다. (2) 직교하는 두 방향 하중효과의 100%를 제곱합제곱근(SRSS) 방법으로 조합한다.
D	구조물의 설계부재력은 다음의 두 가지 방법 중 한 가지 방법을 이용하여 결정한다. (1) 한 방향지진하중 %와 그에 직교하는 방향의지진하중 30%에 대한 하중효과의 절대값을 더하되, 두 조합 중 큰 값을 택한다. (2) 직교하는 두 방향 하중효과의 %를 제곱합제곱근(SRSS) 방법으로 조합한다.

2.4 성토층 전단파속도 증가에 따른 기대효과(경제성 분석 등)

2.3절까지는 내진설계의 과정을 설명하였으며, 내진설계로 얻을 수 있는 내진설계 범주의 각 등급별 해석방법 및 설계방법의 차이 등에 설명하였다. 본 절에서는 지반 등급과 내진설계의 상향으로 얻을 수 있는 기대효과에 대해 설명하고자 하며, 해당 세 가지 효과에 대해 1)~3)에 자세히 설명하였다. 설명에 앞서 세 가지의 각 항목 별 상세 기대효과를 나타내보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 원가 절감 : 골조, 철근 물량 및 성능기반설계 제반비용 절감
- ② 설계 개선 : 벽체두께 축소, 설계변경 부담완화 등 설계 최적화
- ③ 업무 개선 : 설계 프로세스 표준화, 체계화, 설계 통제력 강화

위 세 가지의 항목에 해당하는 기대효과를 효과적으로 설명하기 위해 기존 LH 아파트 현장의 데이터를 나타내었다. 해당 표(2.12)는 아파트의 각 층별에 대해 최적 설계의 두께 축소에 의한 값을 나타낸 것이며, 내진설계범주 등급이 'D'에서 'C'로 올라갈 경우 다음과 같이 최적설계의 두께에 변화가 있었다. 또한 해당 내용은 그림 2.6과 같이 줄어들게 되는 것으로 확인할 수 있다.(주택구조설계부 산정)

[표 2.15] 아파트 각 층별 최적설계

구 분	최적설계			벽두께 절감량 예시
	내벽 두께 축소	외벽 두께 축소	철근량	
16~20층	180→150	250→200	약 3% 감소 (내진설계범주 등급 D→C)	
21~25층	200→180	250→200		
26~30층	200→180	300→250		
비 고	약 25mm	약 50mm		

1) 원가 절감

본 절에서 주로 참고한 설계기준은 지반내진설계기준과 건축물 내진설계기준(KDS 17 10 00)을 참고하였으나, 원가절감 차원에서 건축물 기초구조 설계기준(KDS 41 19 00)을 보면 내진설계범주등급에 따라 다음과 같은 내용이 수록되어있다.

① 직접공사비 절감 (벽두께 및 철근량 감소)

지반등급 상향 또는 지반등급계수 보정에 따라 지진가속도가 감소하고, 그로 인해 내진보강에 필요한 철근의 양이 절감되어 전체 공사비용을 줄일 수 있다. 2.3.2절의 표 2.12의 등급별 높이 제한의 차이에 의하면 'D' 등급은 보통 전단벽은 높이가 60m로 제한되기 때문에 특수 전단벽으로 설계해야하는데, 특수 전단벽을 설계함에 따라 내진 보강을 위한 철근의 양이 더 필요할 것으로 보인다.

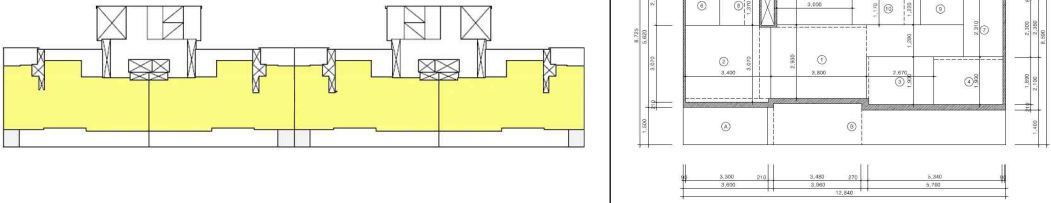
표 2.12의 내용과 같이 내벽 및 외벽의 두께를 축소하게 되면 철근량의 감소량은 전체의 약 3%에 해당한다고 한다. 이는 원가 절감 차원에서 확인해보면 59A를 기준하고 계산했을 때 최대 한 동당 9,600만원(100세대 기준)에 해당하는 예산을 절약할 수 있다는 것을 확인해 볼 수 있다. 예상 물량은 전체의 20~30%에 해당하는 예산이다

② 원가절감 산정 예시(59A 기준)

해당 예시는 LH 주택구조설계부가 산정한 내용으로서, 내진설계 프로세스 종합 개선방안에 작성한 내용이다. 원가절감 금액 검토자료로서 25층 아파트를 기준으로 하며 59A형의 형태이며 100세대 1개동 기준으로 작성하였다. 항목별로 콘크리트 절감 물량과 세대당 철근 절감 물량을 정리하여 표로 나타내었으며(표 2.16, 표 2.17) 내진설계범주 등급의 향상으로 인해 얼마까지의 예산을 절약할 수 있는지를 표로 보여주고 있다.

□ 세대당 콘크리트 절감 물량 : 7.66m³

[표 2.16] 아파트 각 층별 최적설계

* 25층, 59A형, 100세대 1개동 기준							
구분	길이 (mm)	개수	절감두께 (mm)	높이 (m)	층 수	시공물량 (m ³)	세대당 (m ³)
내벽	4,430	2	0.025	2.8	25	15.5	7.66
	5,200	1	0.025	2.8	25	9.1	
외벽	15,045	4	0.05	2.8	25	210.6	
	12,840	4	0.05	2.8	25	179.8	
	5,200	2	0.05	2.8	25	351.4	
합 계						766.4	

- 세대당 철근 절감 물량 : 0.18 Ton
- 59A-100호-25F 기준 세대당 철근량 약 6.33 Ton
 - 시스템, 지반분류 변경 시 전체철근 최대 3% 감소 가능(프로그램 해석결과)

□ 직접비 원가절감 금액 : 세대 당 최대 96만원

[표 2.17] 아파트 각 층별 최적설계

품명	규격	단위	단가			수량	금액(원)
			재료비	노무비	경비		
철근시공도 제작		ton	9000			0.18	1,620
철근 가공조립	복잡	ton	26,020	494,364	0	0.18	93,669
철근 하차 및 선별	(철근공장가공)	ton	0	9843	1,737	0.18	1,922

이형봉강 (SD500, 공장도)	H-10	ton	1,065,000	0	0	0.18	118,980
콘크리트	25-24-15	m3	66,250	0	0	7.66	497,050
레미콘치기 및 타설 (펌프차분) (52M)	(300m3이상 철근구조물, S=8~12)	m3	1,773	16,441	3,101	7.66	146,421
'CON'C 다지기 (VIBRATOR)		m3			29	7.66	222
합 계							960,044

2) 설계시간의 단축 및 설계비 절감(설계 개선)

건축 과정에 있어 시공 들어가기 전에 해당 지반이 안정한지 등의 과정을 설계를 통해 판단하고, 설계시간의 단축으로 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다.

① D등급의 경우 구조물의 형태에 따라서 등가정적해석법 또는 동적해석법을 필수로 해야 하는데, 이 경우 등가정적해석법은 동적해석법에 간단한 과정을 갖지만, 동적해석법을 해야 하는 경우 수치해석을 해야 하는 번거로움이 있기 때문에 설계에서 시공으로 가기까지 시간이 꽤 걸릴 수 있다는 점을 갖는다.

② 표 2.10에 의하면 C등급의 경우도 동적해석법을 수행해야 하는 경우가 있지만, D등급의 경우는 2차원 또는 3차원에 의해 동적해석법을 사용해야하기 때문에 C등급의 설계 시간보다는 많은 시간이 소요된다.

결론적으로 예시로 제안한 표 2.12와 같이 내진설계범주의 등급이 상향하게 되면 서 벽두께 축소로 인해 설계자유도가 향상됨으로서 설계에 걸리는 시간을 더욱 효율적으로 줄일 수 있을 것으로 보인다.

LH의 아산탕정 현장의 경우, 내진설계범주 등급이 'D'등급 진단을 받고, 내진성능 평가를 해야 할 경우 설계비는 1.3억이 추가되었고, 내진철근시공비는 1.1억이, 설계 기간은 4개월이 추가로 들었다. 이와 같이 전단파속도 합리적 산정으로 인한 내진설계 범주의 상향 조정으로 추가적인 내진 설계비용과 설계기간을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3) 공정 단축

내진설계범주 등급의 상향으로 인해 설계 방법 및 기간, 원가 절감이 되었고 이를 통해서 설계 프로세스가 비교적 단순화되어 효율적인 업무를 기대해 볼 수 있다는 점이다. 또한 설계 프로세스의 표준화는 효율적인 업무뿐만 아니라 비교적 체계적인 업무를 통해 보다 효과적인 결과를 기대해 볼 수 있는 것을 의미한다. 이 내용을 기반으로 내진설계범주 등급의 향상을 내진설계범주 등급별 항목별 높이 제한 표 (2.13)에 적용하여 확인해보면 다음과 같다.

① 2.3.2절에 의하면 D등급에 대한 높이 제한의 설명이 되어 있다. 해당 표(2.13)에 의하면 D등급은 내력벽시스템에서 특수 전단벽을 사용해야 하며, 보통 전단벽의 경우 60m의 높이까지 제한이 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 C등급은 보통 전단벽이 사용 가능하며, 조적 전단벽만 60m까지 제한이 있는 것을 확인할 수 있다. 실제로 특수 전단벽을 사용하기 위해서는 설계에서의 시간도 들기 때문에 D등급에서 C등급으로 올라가게 되면 설계, 시공 두 면에서 이점을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

② ①번에서 설명한 사항은 건물골조시스템의 철근콘크리트 벽에서도 동일하게 확인할 수 있다.

제 3 장

현장시험 및 실내시험 방법

LANDSLIDE
HIL

&

제3장 현장시험, 실내시험 및 수치해석 방법

3.1 시추조사

3.1.1 조사개요

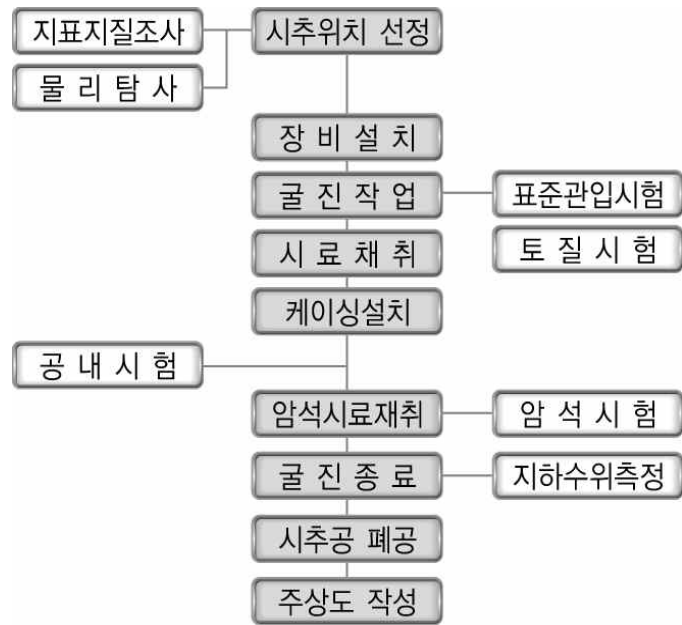
시추조사는 지표로부터 지하 깊은 곳을 직접 눈으로 볼 수 없기 때문에 시험공을 굴진하여 지반의 성상을 조사하고, 각종 실내시험에 사용할 교란 및 불교란 시료 또는 암석시료 채취 및 각종 원위치시험을 시행하여 조사 목적에 필요한 제반 자료를 제공하기 위해 수행된다. 시추조사 방법은 일반적으로 작업수를 사용하면서 드릴로드와 비트를 이용하여 지층의 연속적인 변화를 파악하기 위해 조사하는 회전수세식 방법, 작업수를 사용하지 않으면서 지층의 연속적인 변화를 파악하기 위해 조사하는 무수보링 방법 및 나선형 오거를 이용하여 천부심도 또는 연약지반의 교란된 토사시료를 채취하기 위한 오거보링 방법 등이 있다.

여러 시추조사 방법 중 가장 일반적으로 사용하는 방법으로는 회전수세식 시추조사 방법으로 굴진, 토사 및 암석시료 채취, 원위치 시험 등과 같은 모든 공정에 있어 무수보링 또는 오거보링에 비해 작업능률이 매우 높으며, 정확한 지층의 연속적인 변화 파악이 가능하기 때문이다.

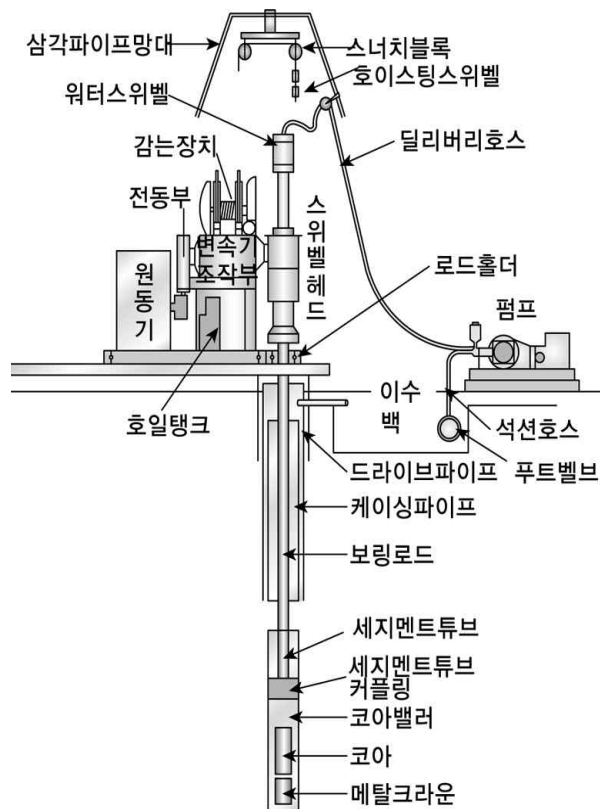
3.1.1 조사원리 및 방법

시추조사 방법으로는 회전수세식을 이용하였으며, 굴진 후 형성된 시추공은 현장 원위치시험에 이용 후 폐공하였다. 굴진은 NX(76mm) 구경으로 시행하였으며, 공벽 붕괴가 없는 지층까지 Casing을 삽입하여 공벽유지를 하였다.

토사구간에 대해서는 흙의 경연 및 다짐정도를 파악하기 위하여 표준관입시험을 시행하였으며, Split Barrel Sampler로 시료를 채취하였다. 그림 3.1 ~ 그림 3.2는 시추조사 흐름도, 시추조사 모식도를 각각 나타내었다.



[그림 3.1] 시추조사 흐름도



[그림 3.2] 시추조사 모식도

3.2 표준관입시험(SPT)

3.2.1 시험개요

표준관입시험(SPT, Standard Penetration Test)은 한국산업규격(KS F 2318)의 규정된 방법에 의거 $63.5 \pm 0.5\text{kg}$ 의 해머를 높이 $76 \pm 1\text{cm}$ 높이에서 자유낙하시켜 정해진 규격의 원통 분리형 시료채취기(Split Barrel Sampler)를 시추공 내에서 30cm 관입시키는 데 필요한 해머 타격 횟수(N값)를 측정하여, 그 결과로서 지반을 분류하거나 연경도를 평가하고, 나아가 지반 강도, 상대밀도, 내부마찰각 등 지반정수를 추정하며, 교란된 상태의 시료를 얻어 육안으로 확인할 수 있는 원위치 시험방법이다. 1902년 Gow가 원형을 고안하고, 1948년 Terzaghi가 지금의 이름을 붙인 표준관입시험(SPT)은 국제적인 표준화와 시험의 간편성, 시료채취 가능, 대량 축적된 데이터, N값의 광범위한 경험적 활용 등에 힘입어 현재까지 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 지반조사 방법이다.

3.2.2 시험원리 및 방법

표준관입시험은 시추조사와 병행하여 KS F 2318 규정에 따라 시행하였으며 아래와 같은 순서로 시험을 진행하였다.

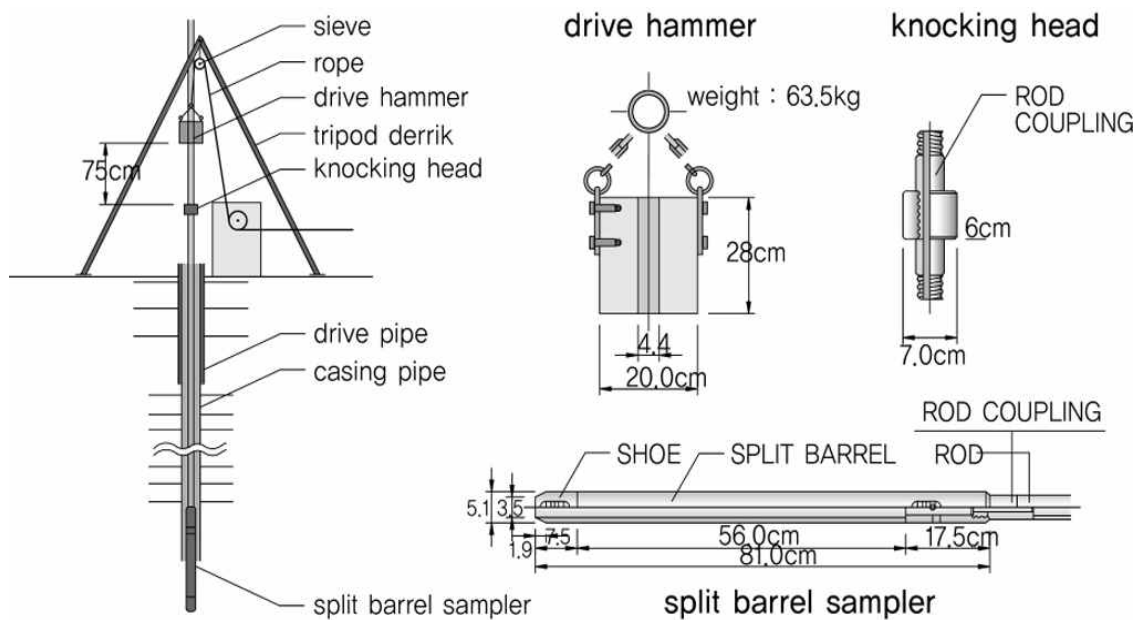
① 표준관입시험은 3m마다 1회씩 실시하였으며, 지층이 달라지는 구간에도 함께 적용하였다.

② 표준관입시험은 Casing의 끝단 심도를 확인하고 Split Barrel Sampler에 의하여 15cm씩 3회 실시하였으며, 처음 1회 15cm 관입은 타격준비로 간주한 예비타로 시험결과에 제외하고, 2회 타격에 30cm 관입될 때 까지 시행하였다. 단 1회 타격 시 타격회수가 50회가 넘을 경우는 50회 타격 시 관입된 관입심도를 기록하였다.

(예, 30cm 관입 시의 타격이 18타 이면 18/30, 50회 타격 시 20cm 관입되면

③ 관입시험 시 타격해머는 수직으로 자연낙하 시켰으며(높이 76cm, 중량 63.5kg) 자동타격기를 사용하여 시험을 진행하였다.

④ Split spoon sampler에 의해 채취된 교란시료는 시료병에 넣어 수분이 증발하지 않도록 밀봉하여 보관하고, 시료병에 시추번호, 시료번호, 관입깊이, 채취된 시료의 깊이 등을 기록하였다. 채취된 시료는 육안판별 및 물성시험 자료로 활용하였다. 그림 3.3은 표준관입시험의 모식도이다.



N value = blows/30cm, 50blows/cm

[그림 3.3] 표준관입시험 모식도

3.2.3 N값 보정

N값에 미치는 영향요인은 매우 다양하다. 가장 중요한 변수들 중에 하나는 각각의 SPT 해머 타격 시 드릴 로드 스템(Drill Rod Stem)에 전달되는 에너지의 양이다. 전달되는 에너지의 범위는 장비의 종류와 운영 조건에 따른 마찰과 기계적 저항력에 있어 손실되는 에너지에 의존하여 이론적인 최대 에너지의 30-90%가 될 수 있다. N값은 전달되는 에너지에 필연적으로 반비례한다(Schmertmann and Palacios 1979). 미국에서는 전달되는 에너지가 흔히 이론적 최대 에너지의 55-60%이기 때문에 Seed et al. (1984)은 N_{60} 을 표준으로서 추천하였으며, N_{60} 은 다음 식으로 계산된다.

$$N_{60} = N_m \frac{ER_m}{60} \quad (\text{식 2.1})$$

여기서, N_{60} : 측정된 타격 횟수
 ER_m : 측정된 전달되는 에너지 비(%)
 N_m : 에너지 비 60%에 대한 타격 횟수

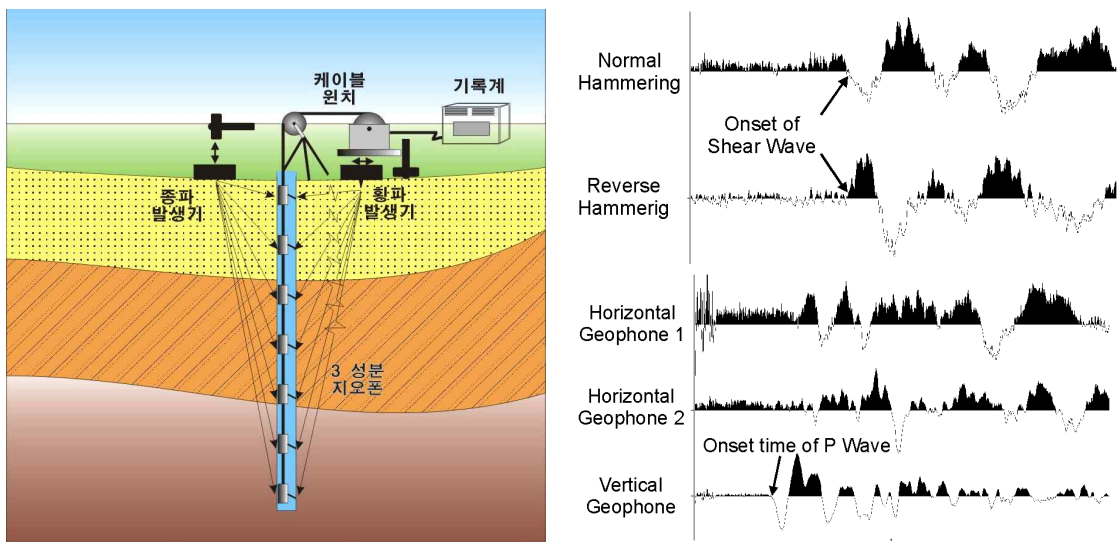
3.3 다운홀 기법(Downhole Test)

3.3.1 시험개요

다운홀 테스트는 지표에서 평판을 수직과 수평방향으로 가격하여 탄성파를 발생시키며, 매질의 탄성특성에 의해 전파되는 탄성파의 수직과 수평성분을 시추공 내에 위치한 3성분 지오폰에서 측정하며, 측정 자료에서 초동(First Arrival)을 발췌(Picking)한 후 이를 해석함으로써 시추공 주변 매질의 탄성과 속도구조를 규명하는 탐사법으로 그림 3.4의 (a)는 다운홀 테스트 모식도로 지표에서 해머 등으로 평판을 가격하여 발생된 종파와 전단파의 전파경로와 함께 시추공내의 공벽에 밀착되어 있는 3성분 지오폰에서 탄성파를 측정하는 모습을 도식적으로 보여주고 있다.

그림 3.4의 (b)는 시추공 내에 위치한 3성분 지오폰에서 측정된 탄성파에 대한 예

제로서 좌측 그림은 평판을 수직방향으로 가격하여 발생된 탄성파를 측정된 결과로 수직성분에서 종파가 관측되고 있으며, 우측 그림은 평판의 양면을 수평방향으로 가격하여 측정된 수평방향 성분으로 가격방향이 달라짐에 따라 측정 자료에 극성 역전 (Polarity Reversal) 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 다운홀 테스트에서는 종파 및 전단파 측정 시 심도가 증가함에 따라 주기가 증가되는 것을 확인을 하여야 하며, 이와 함께 수평방향 가격 시 측정된 수평방향 성분의 극성이 역전되는지를 반드시 확인하여야 한다.



(a) 다운홀 테스트 모식도

(b) 초동발체 및 전단파 신호의 예

[그림 3.4] 다운홀 테스트 모식도 및 취득자료

3.3.2 시험원리 및 방법

다운홀 테스트의 조사 방법은 다음과 같은 방법에 의하여 수행된다.

- (1) 시추조사 자료를 참조하여 측정간격을 결정
- (2) 탐사대상에 따라 적절하게 샘플링 간격 및 개수 등 측정변수 설정
- (3) 현장탐사

① 시추공에 스틸 케이싱이 되어 있는 경우 스틸 케이싱을 따라 전파되는 파가 측

정되는 파가 중첩이 되지 않도록 시추공과 송신원과의 거리 결정

② 나침반을 이용하여 수진기의 수평성분과 일치되게 전단파 송신원의 위치 결정

③ 종파 및 전단파 송신원 지점에서 발생된 탄성파의 흡수를 막기 위하여 성토층이나 표토층이 존재할 경우 이를 제거하고 평판이 지반에 잘 밀착되도록 지표면을 편평하게 정지작업 수행

④ 전단파 송신원 평판을 수진기의 수평성분 방향과 일치하게 지표에 설치

⑤ 종파 송신원 평판을 전단파 송신 작업에 방해되지 않는 지점에 설치

⑥ 줄자 등을 이용하여 종파와 전단파 송신원 위치와 지표위에 노출된 케이싱 길이 측정

⑦ 케이블을 각 수진기 및 장비에 연결

⑧ 샘플링 간격 및 개수, 스택 방법 및 개수, 송·수신점 위치 등 입력

⑨ 트리거 케이블을 해머 및 장비에 연결하고 수진기를 시추공에 삽입

⑩ 수진기를 시추공 상부에서 하부로 이동하며 측정하는 하향(Downhole) 탐사 시에는 수진기를 시추공 상부에 위치, 반대방향으로 측정하는 상향(Uphole) 탐사 시에는 수진기를 시추공 하부에 위치시킴

⑪ 해머 또는 중추 등을 수직방향으로 가격하여 종파를 송신, 수진기에서 진동 측정(하나의 종파 자료 획득)

⑫ 해머 등을 평판의 양쪽 옆면에 각각 수평방향으로 가격하여 전단파를 송신하며 수진기에서 진동 측정(두개의 전단파 자료 획득)

⑬ 신호가 미약할 시 여러 번 가격하여 이를 중합(Stack)함으로써 신호대 잡음비를 향상시켜 자료 획득

⑭ 양방향에 송신한 전단파의 측정자료가 180°의 위상차 즉, 극성 역전이 나타나 는지를 확인하고 극성 역전이 안 보이면 전단파 재송신

⑮ 수진기를 다음 측정 위치로 이동한 후 ⑪~⑭ 과정 반복

(4) 자료 처리 및 해석

① 측정된 탄성과 자료에서 종파의 경우 수직성분, 전단파의 경우 가격된 방향의 수평성분을 발췌하여 심도별 탄성과 단면 작성

② 종파 및 전단파 탄성과 단면으로부터 초동 발췌

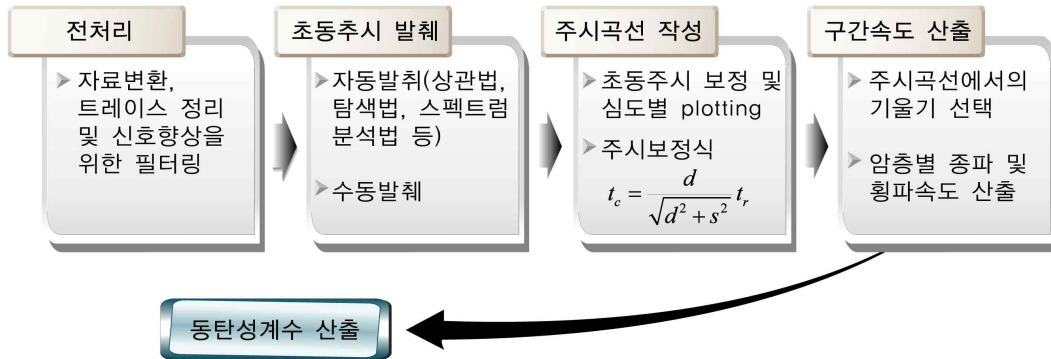
③ 발췌된 초동으로부터 주시곡선 작성

④ 주시곡선에 대한 검토를 통해 필요시 초동 재발췌

⑤ 주시곡선에 선형 적합(fitting) 등의 방법을 적용하여 구간별 종파 및 전단파 속도 산출

⑥ 탄성과속도와 밀도검층 등에서 구한 밀도 값을 이용하여 동탄성계수 산출 지형보정을 포함한 역산 수행

위와 같은 방법으로 탐사가 수행되며 획득한 자료의 처리 과정은 그림 3.5와 같이 먼저 트레이스를 심도별로 정리하고 탄성과 단면에서 초동을 발췌하여 주시곡선을 작성한 후, 주시곡선의 기울기로부터 구간속도를 산출하는 순서로 자료처리를 수행한다.



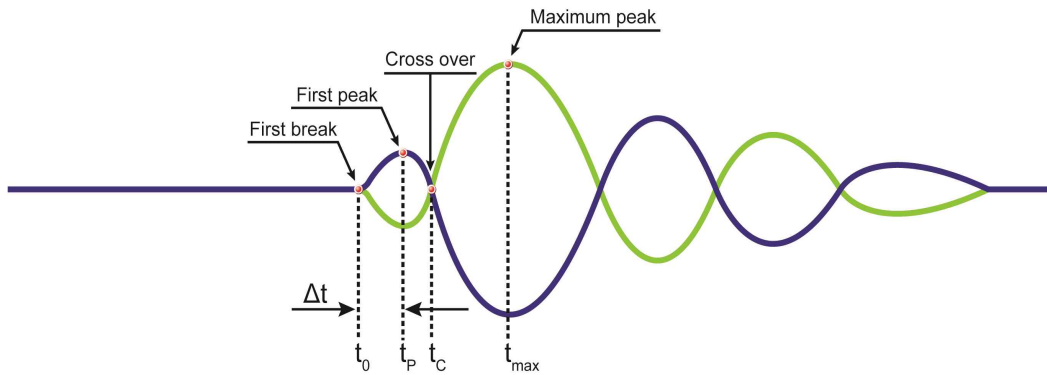
[그림 3.5] 다운홀 테스트 자료처리 흐름도

자료처리를 과정을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 측정된 자료에서 수직성분과 평판의 전단파와 가격방향과 동일한 방향의 수평성분을 추출하여 심도에 따른 탄성파속도 단면을 만든다. 만약 시추공 내에 위치한 3성분 지오폰의 수평방향 성분이 평판의 전단파와 가격방향과 동일한 방향에 위치한 경우에는 양방향에서의 측정 자료가 서로 극성이 다르게 나타난다. 하지만 3성분 지오폰 내에 나침반이 내장되어 있지 않아 임의의 방향에서 측정을 하기가 어려운 경우나, 시추공에 스틸 케이싱이 삽입되어 있어서 나침반이 제대로 작동을 하지 못하는 경우에는 전단파 송신원에 의한 탄성파가 지오폰의 두개의 수평성분에 나뉘어 측정되므로 극성역전이 제대로 나타나지 않아 도달시간을 발체하기가 어렵게 된다. 일반적으로 전단파의 진동은 전단파의 가격방향과 동일한 방향에서 최대의 진폭을 보이는 바, 측정된 두개의 수평방향 성분 S_1 과 S_2 를 회전이동 시켜서 에너지가 최대가 되는 각도를 구하면, 그때의 수평방향 성분이 전단파 가격방향의 성분이라 볼 수 있다. 회전 이동된 성분을 S'_1 과 S'_2 이라 하면, 전단파 가격방향 성분은 다음의 수식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} S'_1 \\ S'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} \quad (\text{식 3.2})$$

탄성과 속도 단면에서 측정 자료에 잡음이 많이 포함되어 있는 경우에는 뮤팅(Muting), 대역통과 필터(Bandpass Filter) 등의 자료처리를 적용하여 신호의 크기

를 향상시키며, 측정된 자료에서 가장 먼저 도달하는 종파와 전단파의 도달시간을 발체한다. 도달시간을 발체하는 방법에는 그림 3.6과 같이 탄성파의 진동이 처음으로 관측되는 초동(First Break)을 발체하는 방법과 이벤트의 파형에서 처음 나타나는 최대값(First Peak)을 발체하는 방법이 있다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 초동을 발체하는 방법은 파가 도달하는 시간을 발체하기 때문에 이론적으로는 정확한 방법이나 신호가 미약하여 잡음에 의해 신호의 왜곡이 주로 발생하는 심부에서는 초동을 제대로 발체하기 어려운 단점이 있다. 따라서 초동을 발체하기 어려운 경우에는 이벤트의 파형에서 처음 나타나는 최대 진폭에서의 시간을 발체하는 방법을 사용하기도 한다.



[그림 3.6] 다운홀 테스트에서 측정된 파형에서의 도달시간 발체

일반적으로 다운홀 테스트에서는 종파 및 전단파 송신원의 위치가 시추공 상부에 위치하지 않고 시추공 상부에서 일정 거리만큼 이격되어 있으므로 발체된 도달시간 으로부터 이격 거리에 의한 시간을 보정하여 주어야 하며 이를 정보정(NMO, Normal Move Out)이라 하며, 초동시간이 T_0 , 시추공과 송신원간의 거리가 s , 수진 기의 심도가 d 라고 할 때, 보정된 시간은 다음과 같다.

$$T_{correct} = d / \sqrt{d^2 + s^2} \times T_0 \quad (\text{식 3.3})$$

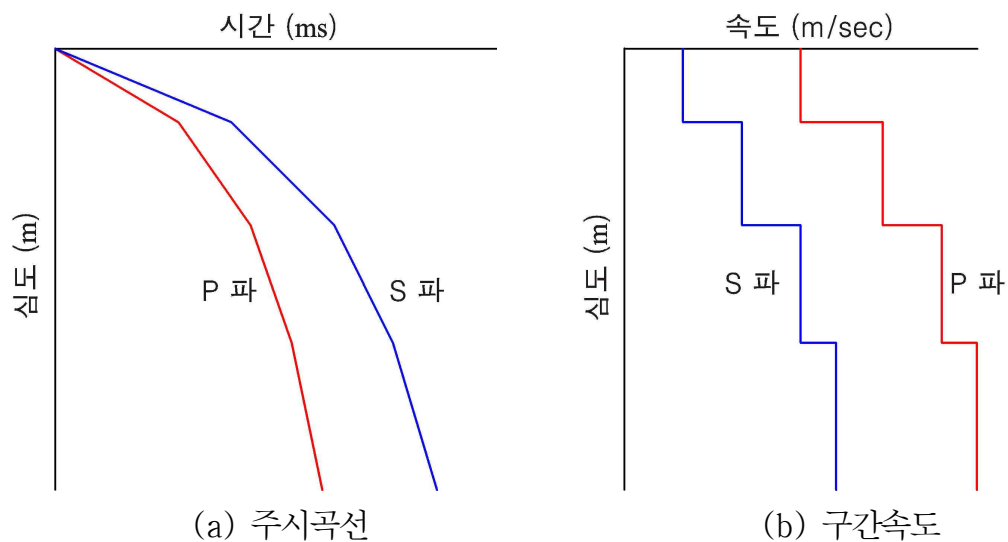
만약 도달시간을 초동대신 최초 최대값 T_{peak} 로 발체하는 경우에는 발체된 도달시 간에서 초동까지의 시간차이인 $\Delta T = T_{peak} - T_0$ 만큼을 빼주어야 하므로, 식 3.3

은 다음과 같이 표현된다.

$$T_{correct} = d / \sqrt{d^2 + s^2} \times (T_{peak} - \Delta T) \quad (\text{식 3.4})$$

이때는 초동의 탐지가 비교적 용이한 천부구간에서 구한다.

다음으로 보정된 도달시간 자료를 이용하여 심도에 따른 탄성파의 도달시간을 나타내는 주시곡선(Traveltime Curve)을 작성하며, 주시곡선에서 직선의 기울기가 탄성파 속도의 역수가 된다. 주시곡선에서 직선의 기울기는 임의의 심도구간을 선정하여 해당구간의 도달시간에 선형적합(Linear Fitting)을 적용하여 오차를 최소로 하는 선형 방정식의 기울기로부터 구한다. 이때 심도구간은 시추주상도에 나타난 지층 경계면을 사용하며, 동일 지층 내에서 도달시간의 기울기가 현격하게 달라지는 경우에는 기울기가 변화하는 심도에서 지층을 추가로 구성하여 심도구간을 선정한다. 그림 3.7은 다운홀 테스트를 통해 구한 주시곡선과 주시곡선의 기울기로부터 산출된 구간 속도를 보여주고 있다.



[그림 3.7] 다운홀 테스트 산출 결과

마지막으로 다운홀 테스트에서 종파와 전단파속도를 산출하면, 현장 밀도검층 등에서 구한 밀도 값을 이용하여 다음 수식과 같이 동탄성계수를 산출한다.

포아송비	$\sigma = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2}$
전단탄성계수	$G = \rho (V_s)^2$
영률	$E = 2G(1 + \sigma)$
체적탄성계수	$K = E/3(1 - 2\sigma)$

본 연구에서의 다운홀 테스트 자료처리는 심도별 파형의 도달시간 정보(초동) 결정은 초동지점 인식(First arrival)과 교차점(Cross over)을 이용하였으며, 탄성과 속도 산출 시에는 직접법(Direct method)과 수정간접법(Modified interval method)를 이용하였다.

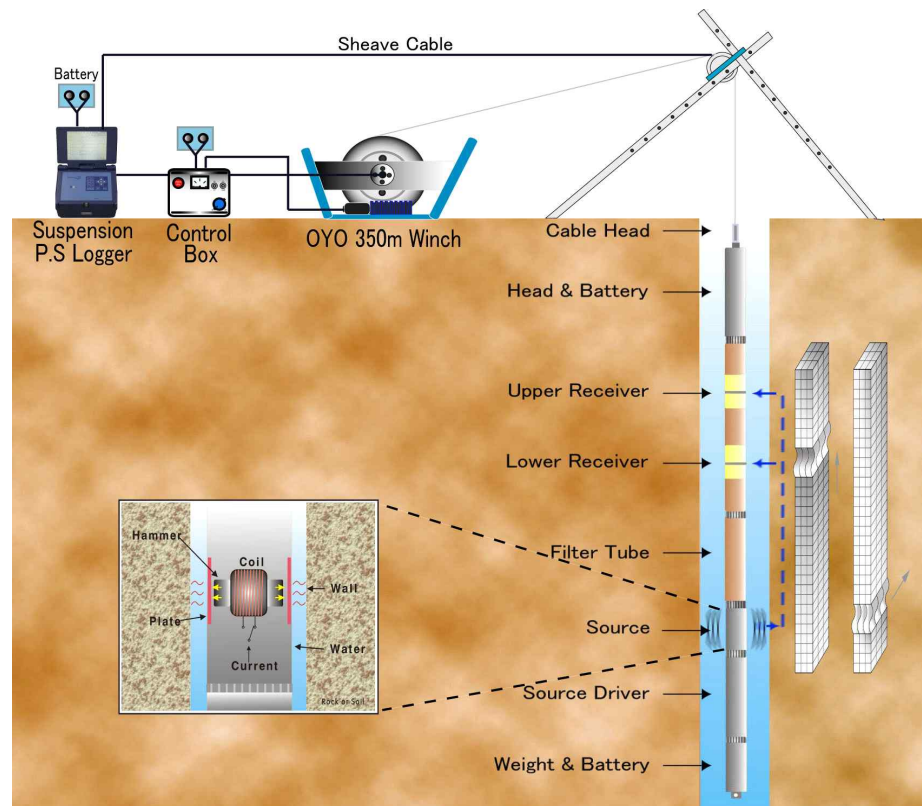
3.4 부유식 음파 검층(Suspension PS logging)

3.4.1 시험개요

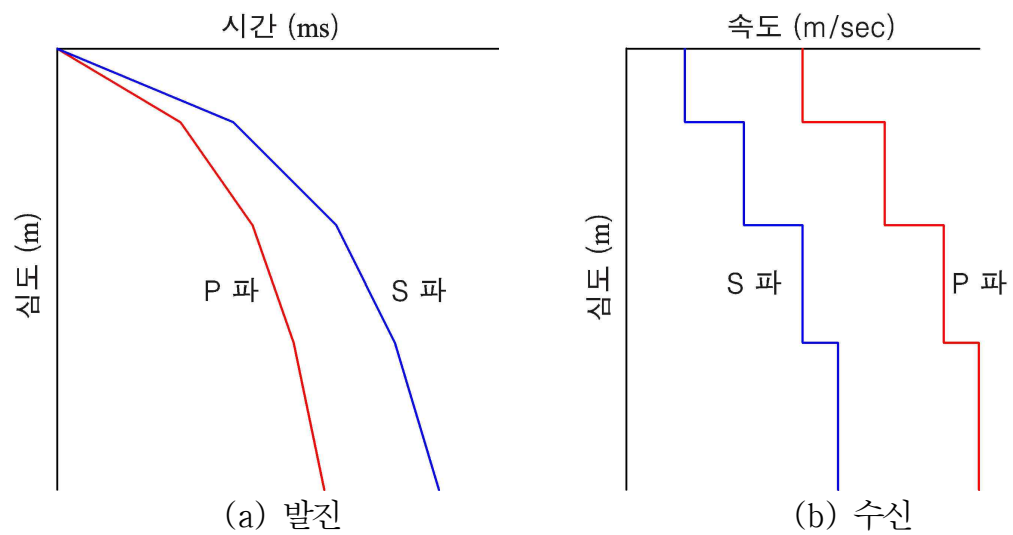
부유식 음파검층은 시추공 내에서 P파 및 S파의 속도분포를 측정하는 검층방법으로, 발진기와 수신기를 일련의 Probe에 연결하여 시추공 내의 각 심도별로 구간 전파시간을 측정함으로써 원지반의 P파 및 S파의 속도를 규명하는 탐사법이다(그림 3.8). 특히 종래의 지표발진, 공내 수신방식의 공내탄성파탐사 등으로는 해상탐사가 불가능한데 반하여, 부유식 음파검층법은 이를 개선하여 육상은 물론 해상까지도 적용이 가능한 방법이다. Kitsunetzki(1981)의 시험결과를 일본 OYO사가 상용화한 것이다. 음원과 수신기 사이에는 음원의 특성으로 발생하는 Tube파를 감쇠시키기 위하여 balloon filter가 장착되며 음원에서 발생된 에너지가 probe를 따라서 전파하는 특성을 방지하는 isolator의 역할도 수행한다.

발진방법은 그림 3.9 (a)와 같이 간접 발진형(indirect excitation type) 진원을 이용하게 된다. 원리는 probe에 내장된 코일을 감은 원통형 철심에 전류를 흘려보내 전자 해머가 공축과 직교방향으로 진동하게 한다. 원통형의 철심에 전류를 흘려보내는 방향을 변화시킴으로써 발진의 좌우 방향을 변화시킬 수 있다. 시추공 내부는 물로 채워져 있고, 철심이 공축에 직교하는 방향으로 움직이는 상태를 생각할 수 있는데, 이 때 철심에 순간적으로 전류를 흐르게 하면 전자해머가 한쪽 방향으로 움직이면서 그 방향의 물에 압력을 가하고, 반대쪽의 물은 부의 압력을 받게 된다. 이러한 원리는 공내수의 유동을 고려하지 않은 경우이지만 공내수의 움직임이 있는 경우에도 철심의 움직임이 순간적이라면 전자해머 주변의 물은 가속도운동이 되므로 정부(±)의 압력분포가 생긴다. 이러한 압력 분포가 주변의 지반에 전달되어 지반을 변형시킴으로써 P파와 S파를 발생시키게 된다.

위 발진방법에서 설명한 바와 같이 진원에서 발생된 파가 지반을 통해 전파하게 되면 이 파는 진원의 상부에 있는 2개의 수신부에 도달하게 된다.(그림 3.9 (b)) 부유식 음파검층법은 두 수신부에 도달하는 파의 시간차를 측정함으로써 파가 전파하는 구간의 P파 및 S파의 속도를 구하게 된다. 부유식 음파검층법은 수신기를 공벽에 밀착시키지 않는 비압착식으로 P파 및 S파를 수신할 수 있는 방법이다. 수신 장치부분의 밀도가 물의 밀도와 거의 같은 경우, 수신기의 움직임은 지반의 움직임과 거의 같게 된다. 즉 수신기 부분의 물의 움직임을 감지함으로써 부유식 음파검층은 비압착식 방법으로 P파 및 S파를 수신할 수가 있다. 수신기는 수직으로 움직이는 P파와, 수평으로 움직이는 S파를 수신하고 센서는 물의 비중과 거의 같은 비중통에 설치되어 있다.



[그림 3.8] 부유식 음파검측 모식도



[그림 3.9] 발진 및 수신방법 모식도

3.4.2 시험원리 및 방법

부유식 음파검층은 다음과 같은 방법에 의해 수행된다.

(1) 시험 수행 및 자료 획득

① 음파검층을 수행하는 시추공에 대한 각종 정보를 확인한다. 시추공의 크기와 깊이 및 굴착방법, 이수의 종류, 지하수위, 케이싱의 유무와 종류, 케이싱 직경, 케이싱 뒷면에 대한 grouting 여부, 시추코어가 있는 경우 사진이나 주상도 등이다. 이들 자료에서 자료취득이 가능한 구간이나 주요 반복구간의 설정과 자료취득 시 시추공의 안정성에 대하여 검토한다.

② 시추공 크기에 적당한 centralizer를 선택하여 probe에 장착한다. 음파검층에서 centralizer는 자료의 품질관리에 필수적이기 때문에 반드시 장착해야 한다. 특히, 연약지반의 시험 목적으로 굴착한 시추공은 시추공 붕락 방지를 위하여 케이싱을 삽입하며 시추공경과 probe와의 간극이 매우 작아 유연성이 높은 재질로 centralizer를 제작, 부착하여 자료를 취득해야 양질의 자료를 얻을 수 있다.

③ probe를 시추공에 삽입하고 심도를 설정한 다음, 시추공 바닥까지 probe를 내린다. 연약지반 조사에 적합한 음파검층 장비는 통상적으로 길이가 최소한 4~5m 정도이기 때문에 측정 가능한 구간이 실제 시추공 굴착심도보다 작은 점을 고려해야 한다.

④ 자료 측정 전에 각종 자료취득 사항과 시추공 환경을 header file에 자세히 기록한다. 이와 같은 기록은 실내의 자료처리에서 매우 중요하게 이용되기도 한다.

⑤ probe에 전원을 넣고, 자료취득에 필요한 각종 매개변수를 입력한 다음 probe을 정지시킨 상태에서 파형이 제대로 측정되는지를 확인한다. 이때 수신기

의 gain이나 stacking 또는 장비에 따라서는 최적의 주파수를 설정하여 양질의 자료취득이 가능하도록 한다. 자료의 측정간격은 자료처리와 음파검층의 적용 목적에 따라서 설정한다.

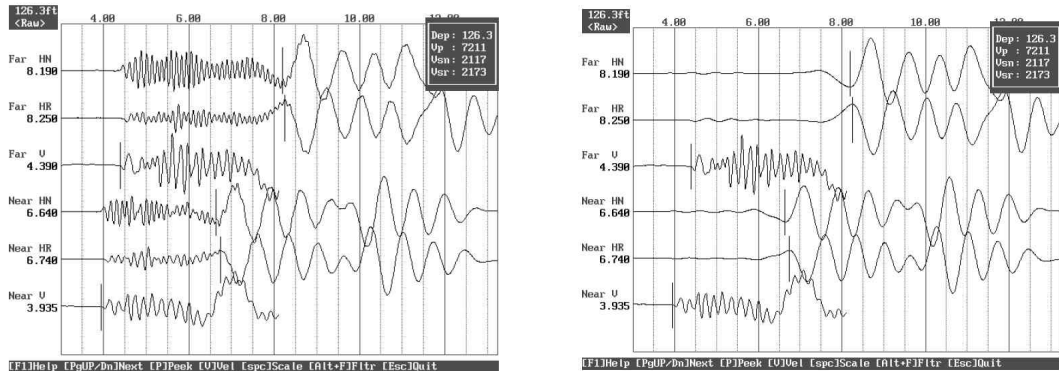
⑥ 자료취득에 필요한 절차가 종료되면 probe를 지표 방향으로 이동하면서 측정한다. OYO사의 부유형 PS검층장비는 연속 측정이 아니고 1 m 간격으로 측정하기 때문에 probe의 흔들림 등으로 인한 측정 자료의 품질 저하에 대하여 유의해야 한다.

⑦ 일단 자료 취득이 종료되면 현장에서 자료를 출력하여 자료의 품질을 검토한다. 자료의 품질이 실내 자료처리가 가능하다고 판단되면 자료취득을 종료한다. 일반적으로 동일한 gain으로 자료를 측정하고 자료를 검토한 후에 적절한 gain을 설정하여 자료를 취득하는 방식으로 2회 측정하는 것이 좋다. 전 구간 2회의 측정이 어려운 경우는 자료의 품질이 낮거나 중요한 구간에 대해서는 반복 측정하는 것이 추천된다.

(2) 자료처리 및 해석

각 수신기에서 측정된 자료는 초동 picking의 신뢰성과 정확성을 높이기 위하여 음원의 주 주파수 대역을 고려하여 필터링을 수행한다. 그림 3.10 (a)는 일본 OYO사의 PS검층기로 측정한 원자료이고 그림 3.10 (b)는 1kHz 저주파통과필터를 적용한 결과를 나타낸 것으로 전단파 초동 picking은 고주파성분이 제거되어 보다 쉽게 수행됨을 알 수 있다. 축 비대칭 음원을 이용하는 경우 그림 3.10 (a)와 같이 측정 자료의 위상 반전을 확인하여 측정 자료의 품질을 확인한다. 수신기는 발진기의 상부 쪽에 필터 케이블로 연결되어 있고, 2개의 수신기 사이의 간격의 1 m로 고정되어 있으므로 두 수신기 사이의 파의 도달 시간차를 구함으로써 두 수신기 사이의 구간 지반의 속도를 계산한다. 두 수신기 사이의 거리가 1 m로 고정되어 있으므로 두 수신기 사이의 도달시간 차이를 구하게 된다면 그 구간의 속도(V)는 도달시간 차이

(T)의 역수가 된다.



(a) 원신호

(b) 필터를 적용한 신호

[그림 3.10] 음파검층 자료의 원자료(a) 및 필터링 후의 자료(b) (GeoVision, 2002)

3.5 밀도검층(Density logging)

3.5.1 시험개요

밀도(감마-감마)검층은 시추결과 및 각종 시험 및 탐사등과 비교 분석하여 암반의 파쇄정도, 풍화대, 약층판정, 지층구분의 검토 등 지반구조를 추정한다. 또한 다운홀 시험(Downhole Test), 서스펜션 P.S 검층 등의 탄성과 속도를 구할 수 있는 실험들과 병행하여 구조물의 동적특성에 대한 분석 및 내진설계를 위한 지반의 동탄성정수(동포아송비, 동전단계수, 동영률 및 동체적계수)를 산출한다.

3.5.2 시험원리 및 방법

밀도(감마-감마)검층은 방사선의 일종인 감마선은 물질에 방사되면 상호작용(콤프톤 산란이나 광전효과 등)을 일으켜 그 에너지가 감소한다. 콤프톤 산란 현상은 물질의 밀도에 비례하는 것으로 알려져 있고, 이 현상을 이용하여 지층의 밀도를 구하는 것이 밀도검층이다. 즉, 시추공 내에 방사성물질(γ 선)과 검출기가 일체화 되

어있는 밀도검층 Probe를 강하시켜 방사선물질에 의해 방사된 선이 지층을 통과할 때 흡수, 산란된 γ 선을 검출해서 지층의 밀도를 얻을 수 있다.

컴프턴효과(Compton Effect)란 γ 선이 원자중의 전자와 충돌해서 에너지의 일부를 잃어버려 진로가 변하는 현상을 말한다(그림 3.11). 컴프턴효과는 γ 선과 물질중의 전자와의 상호작용 때문에 이에 따른 선 흡수계수(μ)는 전자의 컴프턴 단면적(σ_e)와 단위체적당 전자수와의 곱으로서 그림 3.11과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{\sigma_e \cdot N_0 \cdot \rho \cdot Z}{A} \quad (\text{식 3.5})$$

여기서, μ : 선 흡수계수

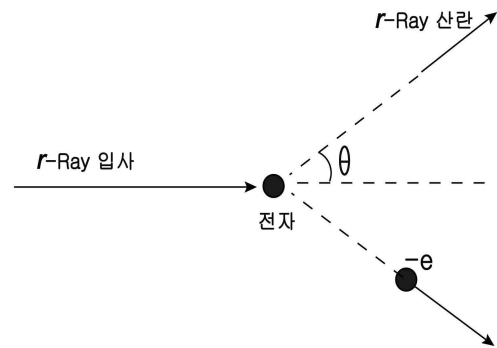
σ_e : 컴프턴 산란단면적

N_0 : Avogadro's number
(6.02×10^{23})

A : 원자량

Z : 원자번호

ρ : 밀도



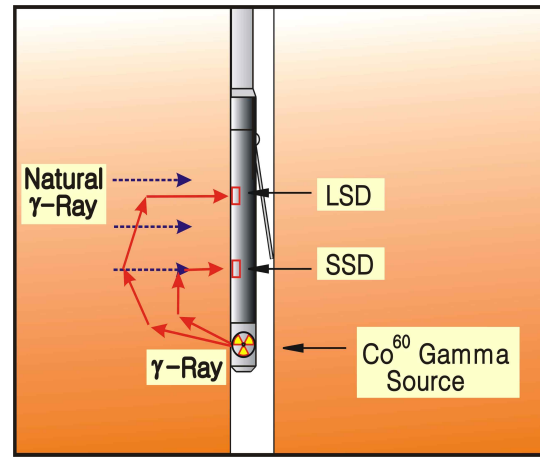
[그림 3.11] 컴프턴 효과

상기 식은 γ 선의 선흡수계수가 물질의 겉보기밀도에 비례하는 것을 나타나고 있다. 그림 3.12와 같이 공내에 γ 선방출원 및 검출기로부터 산란되는 γ 선은 주변의 지층을 구성하는 원자 때문에 산란을 일으켜 검출기로 들어간다.

카운트된 선 강도(I)와 지층밀도(ρ)사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다. 즉, 선 강도는 계수치(CPS)로 표시된다.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot d} \quad (\text{식 3.6})$$

여기서, I : 카운트되는 γ 선 강도
 I_0 : 방출원에 의해 투사되는 γ 선 강도
 μ_m : 질량흡수계수 (μ/ρ)
 μ : 선흡수계수
 ρ : 지층밀도
 d : 방출원과 검출기의 거리
 e : 자연대수의 밑



[그림 3.12] γ 선 강도(I)와 지층밀도(ρ)의 관계

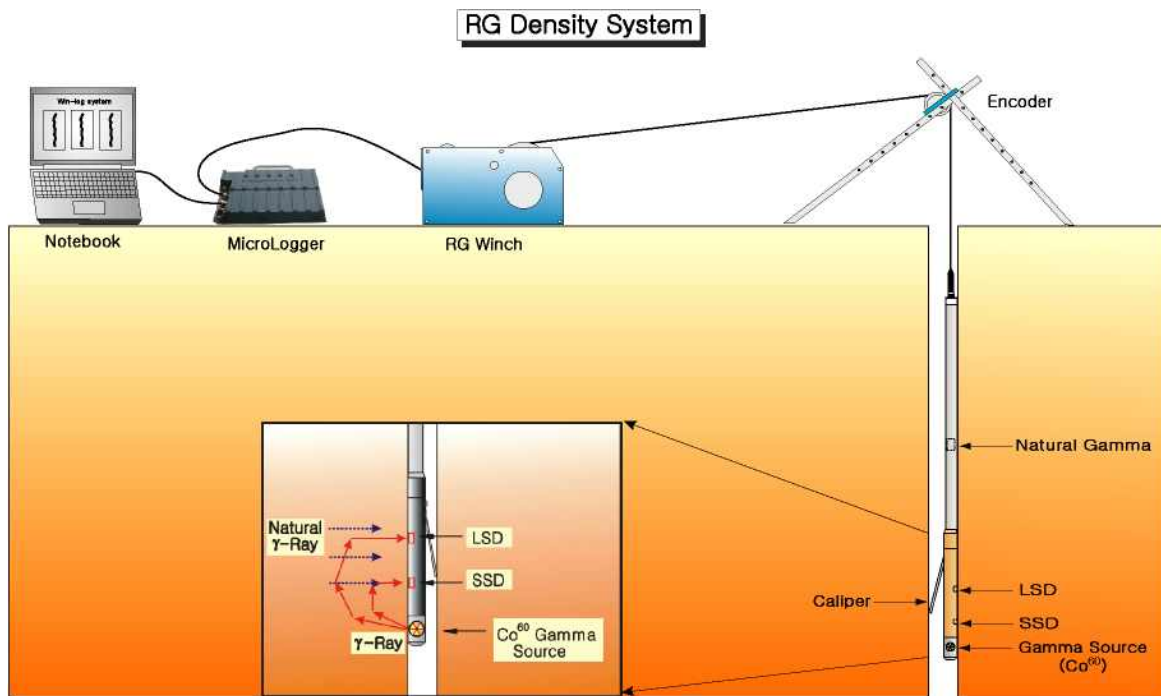
여기서, I_0 , μ_m , d 는 동일 측정계에서는 정수로 취급되기 때문에 I 를 측정함으로써 ρ (밀도)를 구할 수 있다.

실제 측정에서는 I_0 의 경시변화 및 공내수의 유무, 보호관의 유무나 종류 등에 의해 동일밀도에서도 I 가 변하기 때문에 미리 $I \sim \rho$ 관계를 교정시험에 의해 구해 놓고 교정곡선으로 겉보기밀도(ρ)를 구한다.

$$\rho = -\alpha \cdot \log I + \beta \quad (\text{식 3.7})$$

여기서, α, β : 교정곡선에 의해 계산된 정수를 의미한다.

실제 측정은 그림 3.13과 같이 실시한다. Probe와 공벽간의 간극의 영향을 최소화 하기 위해 방출원은 probe의 중심이 아닌 측면부근에서 setting하여 방출원이 공벽에 최대한 밀착하도록 금속제 스프링으로 Probe 전체를 공벽에 밀착시키도록 하였다. Probe를 시추공 내에 삽입하여 가장 하부에서부터 느린 속도로(3m/min) 끌어올리면서 연속적으로 측정한다. 방출원으로는 컴프톤산란이 지배적인 감마선 에너지 Co^{60} 을 사용한다. 실제 측정량으로는 감마선에너지(I)를 계수율로 표시하고 있다.

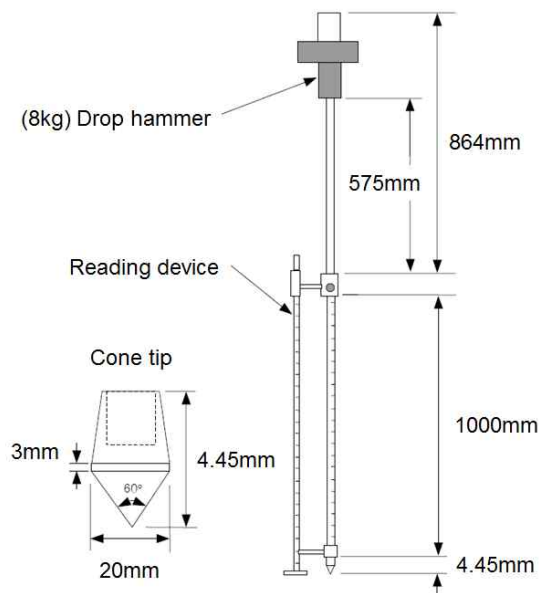


오는 관입에너지를 콘 선단부 까지 전달해주는 직경 1.58cm, 길이 1m의 하부롯드와 콘 선단부로 구성되며, 콘 선단부의 외경 및 선단각은 각각 2cm 및 60°이다. 동적 콘 관입기(DCP)의 제원은 표3.1과 같다.

기존의 동적 콘 관입기는 미국 주정부 교통부(DOT)와 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers) 등에서 다짐평가를 위해 이용되고 있으며, 일리노이 주와 노스 캐롤라이나 주, 그리고 아이오와 주와 미네소타 주의 교통부에서 기준 값을 제시하여 CBR과 연관 및 현장다짐 건조단위중량의 요구조건을 만족시키도록 하고 있다.

[표 3.1] DCP 제원

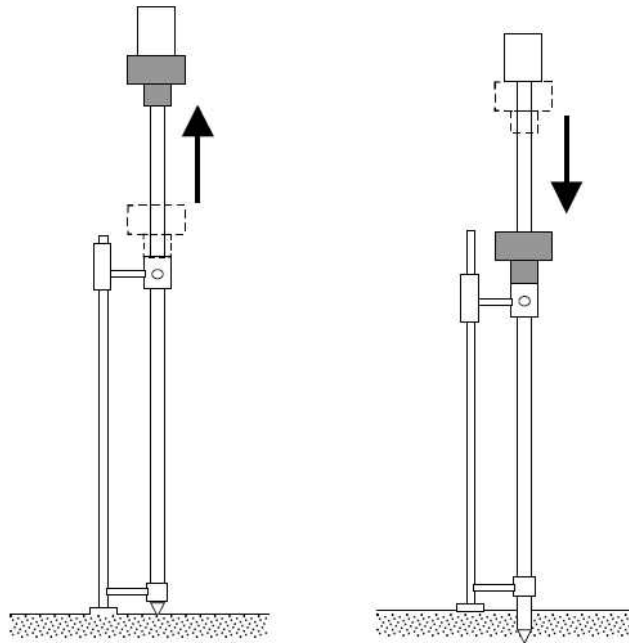
구성요소	제원
Hammer 질량	8kg
Cone tip 단면적	3.14cm ²
Cone tip 직경	2cm
Cone tip 선단부 각도	60°
Rod 길이	1m
Rod 직경	1.58cm
낙하고	57.5cm
관입에너지	45.08N.m



[그림 3.14] DCP 개요도

3.6.2 시험원리 및 방법

동적 콘 관입시험은 그림 3.15와 같이 질량 8kg의 해머를 57.5cm 높이에서 낙하시켜 콘을 관입시킴으로써 수행된다. 타격횟수에 따른 관입깊이를 기록하여 1회 타격 시 관입깊이에 해당하는 동적 콘 관입지수(Dynamic Cone Penetration Index, DCPI)를 계산하며(mm/blow). 이를 바탕으로 대상 지반의 강도특성을 평가한다.



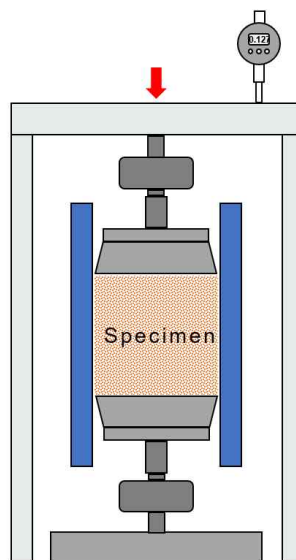
[그림 3.15] DCP 관입시험 방법

3.7 벤더엘리먼트를 이용한 압밀시험(Oedometer test using bender elements)

3.7.1 시험개요

압밀시험은 상재하중에 따라 발생하는 장기적인 침하를 예측할 수 있는 시험방법이다. 압밀시험은 전통적으로 직경 6cm, 높이 2cm인 황동 링으로 시료를 구속하여 수행된다. 개선된 압밀시험에서는 현장 상태와 유사하게 시료를 조성하기 위하여 직경 7.6cm과 10.0cm, 높이 7.6cm의 셀을 사용하여 결과를 도출하였다.

그림 3.16에서 보이듯이, 압밀 시험기는 다이얼게이지, 프레임, 로드셀, 상하단 캡, 셀, 하부 플레이트로 구성되어있다. 시료의 상단과 하단에는 벤더 엘리먼트를 설치하여 전단파속도를 측정할 수 있다. 시험체에 결속되는 프레임은 재하 되는 하중이 균일하게 작용할 수 있도록 연직성을 가지며, 다이얼게이지와 접촉되어 하중 단계별 침하량을 획득할 수 있다. 셀과 캡 사이에는 일정한 유격을 두어 마찰이 발생하지 않도록 하고 시료가 유실되지 않도록 필터 페이퍼를 거치하였다. 시료 하부에는 하부 플레이트가 존재하여 상부 프레임으로부터 재하 되는 하중이 연직방향으로 작용한다.



[그림 3.16] 개선된 압밀시험기 모식도

3.7.2 시험원리 및 방법

개선된 압밀시험은 셀 상부와 하부에 구속 조건이 없는 Floating ring 방식을 사용하였다. 이 방법은 시료와 셀 사이의 마찰을 최소화할 수 있고, 상부와 하부에 설치한 로드셀로부터 하중을 측정하여 검증하였다. 시료는 건조한 상태에서 시험을 수행하였으며, 목표 상대밀도는 느슨한 수준에서 조밀한 범위를 포함하여 30, 50, 70, 90%의 총 4가지 결과를 획득하였다. 세종 연동 현장의 시료는 30, 50, 70, 80, 90%의 총 5가지 결과를 획득하였다.

사용된 시료는 대상 지반에서 교란시료를 채취하여 5층 과소다짐법으로 재성형하였다. 시험은 최대 유효연직하중(σ_v')을 500kPa 수준의 범위까지 재하하였다. 하중단계는 0~500kPa 응력 범위에서 8단계로 나누어 0, 5, 10, 15, 30, 60, 125, 250, 500kPa로 수행하였으며, 제하단계는 역순의 7단계로 구성하였다. 하중 재하 후 침하량은 즉시침하가 지배적으로 작용하였고, 다짐의 영향성을 파악하기 위해 순차적으로 상재하였다.

결과는 목표 상대밀도에서 하중을 재하 하여 나타나는 침하량과 측정한 전단파속도를 모두 도시하여 상대밀도별 하중에 대한 전단파속도의 관계성을 분석하였다.

벤더엘리먼트를 이용한 압밀시험은 다음과 같은 방법에 의하여 수행되었다.

(1) 시험방법

- ① 목표 상대밀도로 압밀셀 내에 시료를 과소다짐법으로 재성형
- ② 상부캡 결속 및 연직, 수평성 확인, 프레임 결속, 다이얼 게이지 부착
- ③ 셀 하부에 거치된 유격블럭 제거, Floating ring
- ④ 하중 단계별 재하, 단계별 침하량과 전단파속도 측정
- ⑤ 하중 단계별 제하, 단계별 침하량과 전단파속도 측정
- ⑥ 시험 종료 후 하중 단계별 전단파속도 분석

(2) 전단파속도 측정

전단파속도는 파형 발생기(Agilent, 33220A)를 사용하여 20Hz, 10V_{pp}의 사각파를 상부의 벤더 엘리먼트로부터 발신하였다. 하부의 벤더 엘리먼트로부터 수신한 전단파를 멀티채널필터(Krohn-hite, 3944)를 사용하여 500Hz의 고주파를 제거하고, 신호를 증폭시켜 측정하였다.

(3) 자료 분석

개선된 압밀시험으로부터 획득한 하중-침하량 곡선과 전단파속도를 상대밀도별로 정리하여 비교분석하였다. 전단파속도는 획득한 신호에서 첫 번째 굴절 후 다시 기준선으로 회복하는 지점을 초동(First arrival time)으로 산정하였다.

제4장
현장시험

LAND
INDUSTRY
INSTITUTIONS
LAND
INDUSTRY
INSTITUTIONS
LAND
INDUSTRY
INSTITUTIONS

&

제4장 현장시험

4.1 현장시험 개요

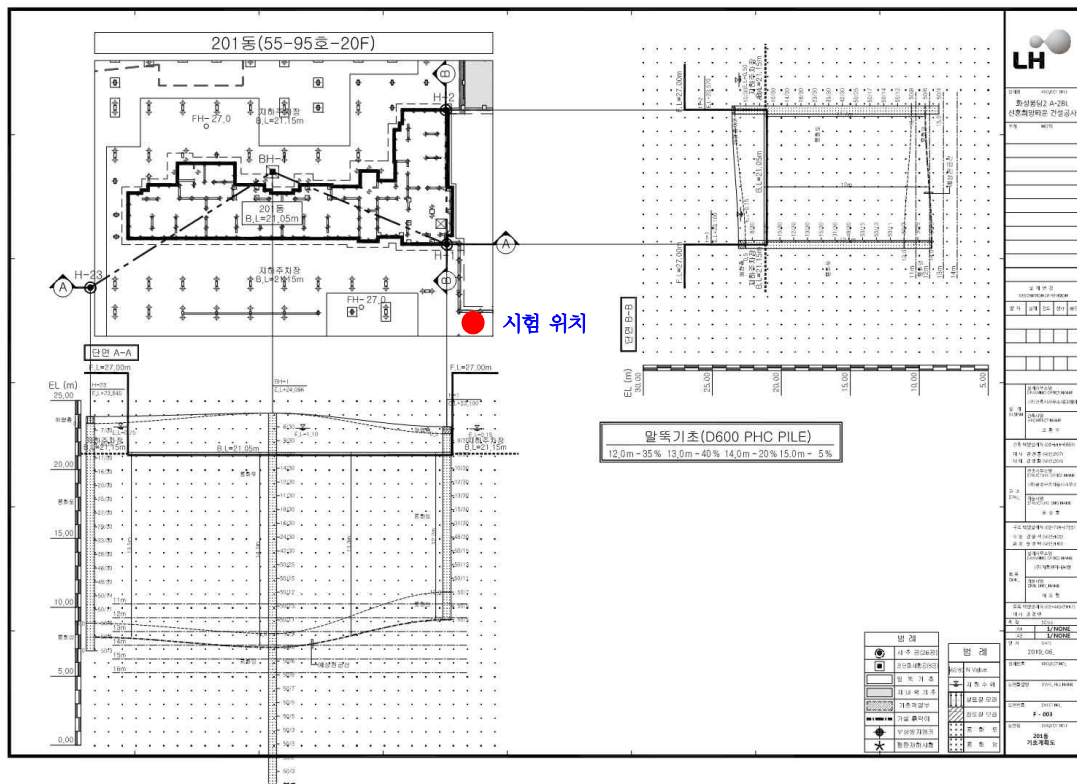
- 각 시험 부지에 대한 시추조사 및 시추공 전단파 탐사 수행(다운홀, SPS-검층)
- 성토 전 원지반의 전단파속도와 성토하중에 따른 전단파속도 변화 거동 파악
- 추정식을 이용하여 산정된 성토층의 전단파속도와 실제 측정된 전단파속도의 비교
- 각 시험구간의 SPT-N value를 이용한 전단파속도 추정 간편식 비교분석
- 수치해석을 이용하여 성토고(H), 성토폭(D) 변화에 따른 응력과 전단파속도 비교
- 벤더를 이용한 압밀 시험을 이용한 성토층 산정식 제안 및 매립형 탄성과 모니터링 장비를 이용한 검증

[표 4.1] 시험항목

시험항목		시험횟수	비 고
현장시험	시추조사 (표준관입시험)	3공	지반 정보 획득(N치 등)
	밀도검층	3공	지반 밀도 측정
	SPS	3공	성토지반 전단파속도 측정
	Downhole	3공	
	DCP	3공	지반의 강도(DCPI) 측정
실내시험	기본물성시험	3회	흙의 단위중량, 함수비, 토질분류 등
	벤더를 이용한 압밀시험	12회	전단파속도 측정

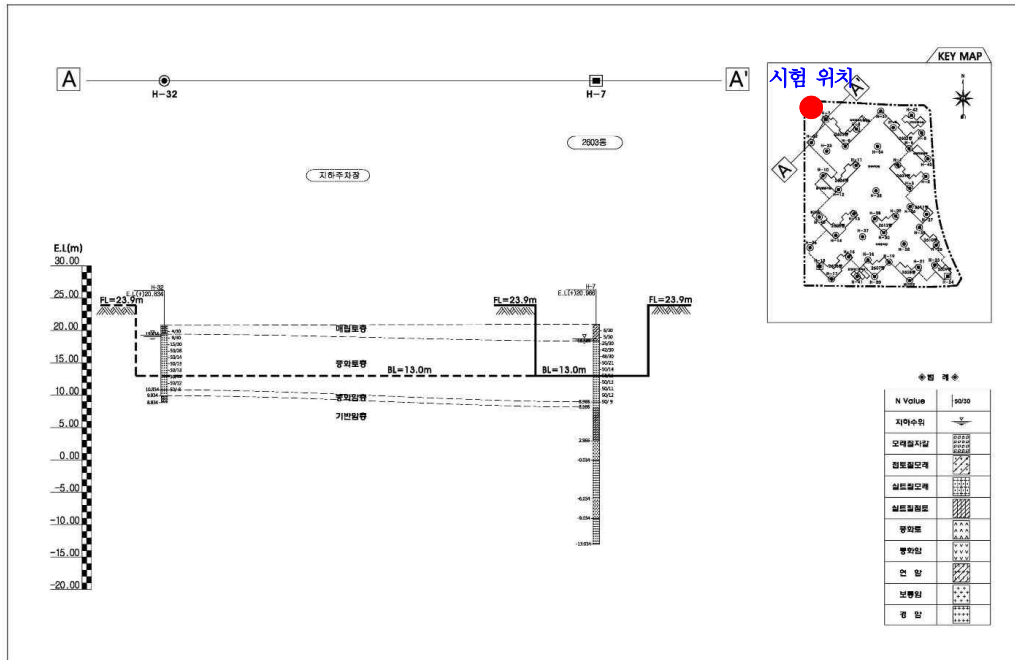
4.2 실험 지역

본 연구에서 현장조사를 수행한 위치는 LH 건설공사 현장 중 3개소를 선정하여 조사를 수행하였다. 선정된 3개소 중 2개소(화성 봉담, 파주 운정)는 아파트 건설현장으로 기초 및 성토 시공 전 지반조사 결과와 성토 후 현장에서 측정한 전단파속도를 비교하였으며, 나머지 1개소는 세종 연동면의 성토 현장으로 성토 전과 성토 후의 지반조사 결과 및 전단파속도를 비교하였다. 현장조사를 수행한 위치는 아래 그림 4.1과 같다.



[그림 4.1] 화성 봉담

- 지층단면도(A-A')



[그림 4.2] 파주 운정



[그림 4.3] 세종 연동면제1장 서론

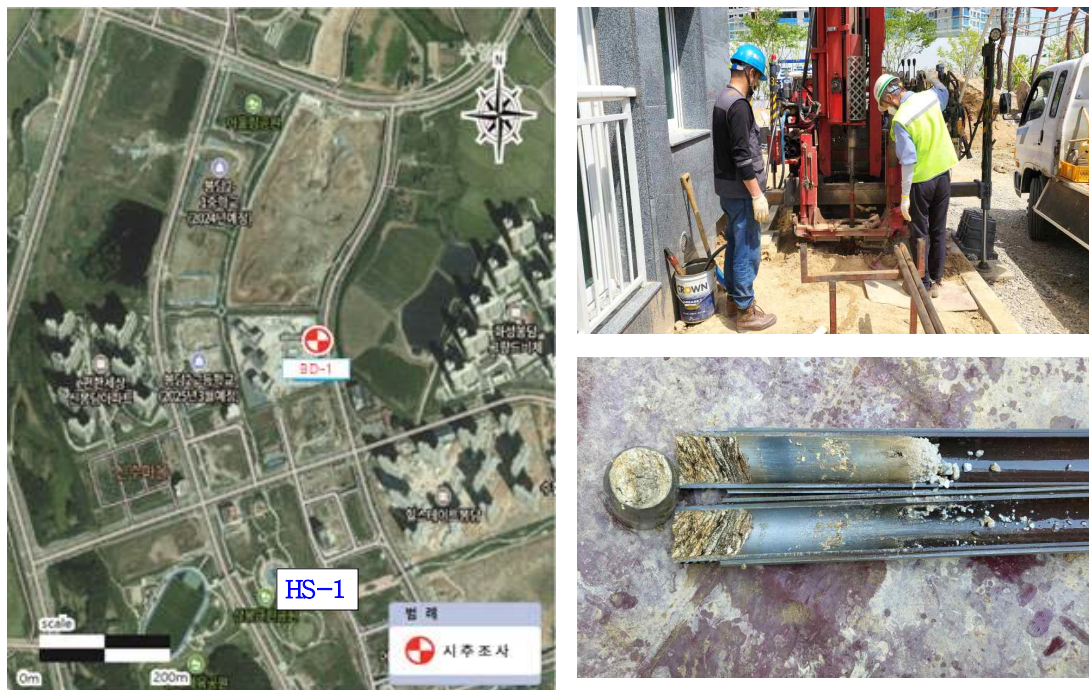
4.3 화성 봉담 조사결과

화성 봉담 현장은 건축물 시공 및 성토가 이미 완료된 현장으로, 비교 대상인 성토 전 원지반과 동일한 시추공에서의 시험수행이 어렵다. 따라서 현장상황을 고려하여 인접한 장소에서 현장시험을 수행하였으며, 각각의 시험별 결과를 정리하였다.

4.3.1 시추조사

1) 조사현황

화성 봉담(HS-1) 현장에서의 시추조사는 회전수세식 방법을 수행하였으며, 시추공의 목적에 맞게 현장시험 수행 및 시료를 채취하였다. 그림 4.4는 화성 봉담의 시추조사 위치도 및 현장 사진이며, 표 4.2는 시추조사 현황이다.



[그림 4.4] 화성봉담 시추조사 위치도 및 현장사진

[표 4.2] 화성봉담 시추조사 현황

조사위치	공번	굴진방법	굴진심도 (G.L. -m)	케이싱심도 (G.L. -m)	지하수위 (G.L. -m)
화성 봉담	HS-1	회전수세식	33.0	17.0	7.0

2) 조사결과

HS-1 시추공은 지표에서 GL.-33.0m까지 굴진을 수행하였으며 지층은 성토층, 풍화토층, 풍화암층 순의 지층분포를 갖는다.

성토층의 토성은 자갈 섞인 실트질 모래이며, 색조는 담갈색~암회색, N값은 2/30~5/30으로 매우느슨~느슨의 상대밀도를 갖는다.

풍화토층은 실트질모래 및 암편으로 분포한다. 풍화토층의 색조는 황갈색~암회색, N값은 12/30~50/12로 보통조밀~매우 조밀한 상대밀도를 갖는다.

풍화암층은 GL.-17.0m에서 16.0m의 층후를 확인하였으며, 흑운모 편마암의 풍화암이다. 색조는 암갈색~암회색이며 관입 타격 시 암편 및 실트질모래로 분해된다. HS-1시추공에 대한 시추조사결과를 표 4.3에 상세 기재하였다.

[표 4.3] 화성봉담 시추조사 현황

심도 (G.L. -m)	지층명 (통일분류)	지층상태	N값(회/cm) (TCR/RQD(%))	특이사항
0.0~6.8	성토층 (SM)	·자갈 섞인 실트질 모래(Ø1~10cm) ·담갈색~암회색 ·매우느슨~느슨, 습윤	2/30~5/30	·6.2~6.8m : 콘크리트 및 철근 혼재
6.8~17.0	풍화토 (SM)	·실트질 모래 및 암편 혼재 ·황갈색~암회색 ·보통조밀~매우조밀, 습윤	12/30~50/12	—
17.0~33.0	풍화암 (WR)	·흑운모편마암의 풍화암 ·암갈색~암회색 ·완전풍화~심한풍화 ·관입 타격시 암편 및 실트질 모래로 분해	50/9~50/2	·차별풍화에 의한, 경이 교호 ·부분적 암편상~세편상 코어회수

3) 시료사진



[그림 4.5] 화성봉담 시료사진

4.3.2 표준관입시험

1) 조사현황

본 조사에서의 표준관입시험은 시추조사와 병행하여 수행되었으며, 시험은 1.0m 간격으로 성토층, 풍화토층, 풍화암층에서 진행하였다. HS-1공에서 33회의 표준관입시험을 수행하였다. 표 4.4과 표 4.5에 표준관입시험 조사현황과 조사결과를 정리하였다.

[표 4.4] 표준관입시험 조사현황

공 번	좌표		굴진심도 (GL.-m)	최종타격 심도 (GL.-m)	타격간격 (m)	타격회수 (회)	지하수 위 (GL.- m)
	N	E					
HS-1	37°13'46. 89"	126°56'4 1.19"	33.0	33.0	1.0	33	7.0

[표 4.5] 표준관입시험 조사결과

지 층	통일분류	연경도	분포범위	평균
성토층	SM	매우느슨 ~느슨	2/30~5/30	3/30
풍화토층	SM	보통조밀 ~매우조밀	12/30~50/12	42/30
풍화암층	WR	매우조밀	50/9~50/2	50/5

4.3.3 다운홀 테스트

1) 조사현황

화성 봉담 현장의 다운홀 테스트는 HS-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -1.0~33.0m 까지 테스트를 진행하였으며, 조사간격은 1.0m이다. 탄성과 송신은 P파와 S파를 획득하기 위해 햄머 타격 시 수직 및 수평으로 타격 진행하였으며, 지오폰은 시추공에 설치 가능한 3성분 지오폰을 사용하였다. 그림 4.6은 HS-1의 시추공 위치도 및 다운홀 테스트 현장사진이며, 표 4.6는 다운홀 테스트 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.6] 화성봉담 다운홀 테스트 현장사진

[표 4.6] 화성봉담 다운홀 테스트 수행 현황

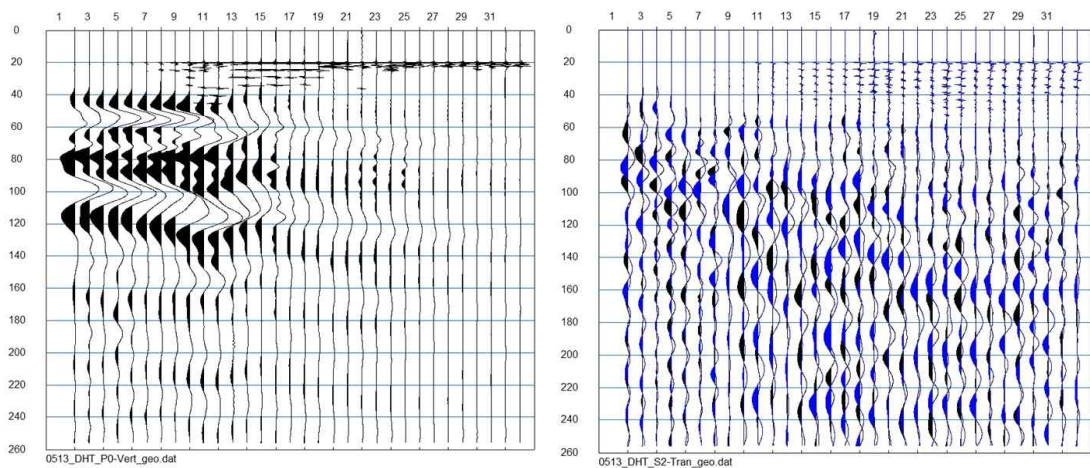
조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)
			시작	종료	
화성 봉담	HS-1	33.0	1.0	33.0	1.0

2) 조사결과

다운홀 테스트는 HS-1 시추공에서 수행되었으며, 조사심도는 G.L. -1.0~33.0m 으로 1.0m 간격으로 P파와 S파 자료를 획득하였다. 심도별 P파와 S파를 획득하여 성분별 탄성과 자료에서 초동을 발취 후 심도별 탄성과 속도값을 추출한다. 추출한 심도별 탄성과 속도를 해당 지층에 적용하여 지층별 평균 탄성과 속도를 획득하였다.

지층별 평균 P파 속도는 성토층(심도: 0.0~6.8m)은 699.7m/sec, 풍화토층(심도: 6.8~17.0m)은 1,107.4m/sec, 풍화암층(심도: 17.0~33.0m)은 2,019.1m/sec이다. 또한 지층별 평균 S파 속도는 성토층(심도: 0.0~6.8m)은 257.1m/sec, 풍화토층(심도: 6.8~17.0m)은 437.7m/sec, 풍화암층(심도: 17.0~33.0m)은 856.0m/sec으로 나타났다.

그림 4.7은 현장에서 깊이별로 획득한 파형을 나타내었으며, 표 4.7은 다운홀 테스트 결과와 밀도검층으로 획득한 밀도 값을 이용하여 산출한 동적물성치를 정리하여 나타내었다.



(a) P wave

(b) S wave

[그림 4.7] 다운홀 테스트의 현장측정자료 (화성 봉담 HS-1)

[표 4.7] 다운홀 시험의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (화성 성토지반 HS-1)

Depth (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson's ratio	GD (MPa)	ED (MPa)	KD (MPa)
1	518.4	249.9	0.349	108.3	292.2	321.7
2	566.1	262.5	0.363	119.5	325.9	396.5
3	623.2	268.0	0.387	124.6	345.5	507.6
4	698.0	277.3	0.406	133.4	375.2	667.3
5	773.1	281.6	0.423	135.4	385.6	840.0
6	838.3	301.8	0.426	147.6	420.9	941.9
7	888.0	370.4	0.395	250.0	697.2	1103.5
8	902.9	380.4	0.392	269.0	749.0	1156.7
9	992.8	409.2	0.398	324.1	905.9	1475.4
10	1064.3	428.5	0.403	331.6	930.7	1604.1
11	1120.6	443.3	0.407	390.8	1100.0	1976.8
12	1164.7	454.7	0.410	371.8	1048.6	1943.8
13	1199.3	463.6	0.412	383.0	1081.7	2052.8
14	1226.7	470.5	0.414	427.4	1208.5	2335.2
15	1248.5	476.0	0.415	279.4	790.8	1549.4
16	1266.0	480.5	0.416	292.1	827.2	1638.7
17	1234.2	422.8	0.434	277.5	795.6	1994.3
18	1966.3	834.6	0.390	1181.8	3285.6	4984.0
19	1991.5	846.5	0.390	938.6	2608.7	3943.0
20	2012.5	856.5	0.389	1347.8	3745.3	5643.8
21	2030.1	864.9	0.389	1303.4	3621.1	5443.0
22	2045.1	872.0	0.389	1481.7	4115.9	6173.7
23	2057.7	878.1	0.389	1499.9	4165.8	6237.4
24	2068.5	883.2	0.389	1508.7	4189.8	6263.8
25	2077.9	887.7	0.388	1521.9	4226.0	6309.9
26	2085.9	891.5	0.388	1543.6	4285.8	6391.9
27	2092.9	894.9	0.388	1719.7	4774.3	7113.4
28	2099.0	897.8	0.388	1633.4	4534.5	6750.8
29	2104.3	900.3	0.388	1489.5	4134.7	6150.8
30	2109.0	902.6	0.388	1258.3	3492.7	5192.6
31	2113.2	904.5	0.388	1639.3	4550.3	6761.3
32	2116.8	906.3	0.388	1539.4	4272.8	6345.5
33	2120.1	907.9	0.388	1544.7	4287.3	6364.4

4.3.4 부유식 음파 검층

1) 조사현황

부유식 음파(SPS) 검층의 경우 공내수를 에너지 전파의 매개체로 이용하므로 지하수위 상부에서는 자료 측정이 불가능하다. 따라서 성토 전 원지반에서의 지반조사는 지하수위 하부구간부터 1m씩 하강하며 측정을 하였다. 하지만 steel 케이싱을 암반층까지 굴착 한 후 공내수를 계속 주입하여 실험을 진행 할 경우 지하수위 상부의 성토층에서 측정이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 성토층에서의 원활한 부유식 음파검층을 위해 steel 케이싱을 사용하였다. 화성 봉담 현장의 부유식 음파 검층은 HS-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -1.0~30.0m 까지 테스트를 진행하였으며, 조사간격은 1.0m이다. 그림 4.8은 HS-1의 시추공 위치도 및 부유식 음파검층 현장사진이며, 표 4.8은 부유식 음파검층 수행 현황을 정리하여 나타내었다.

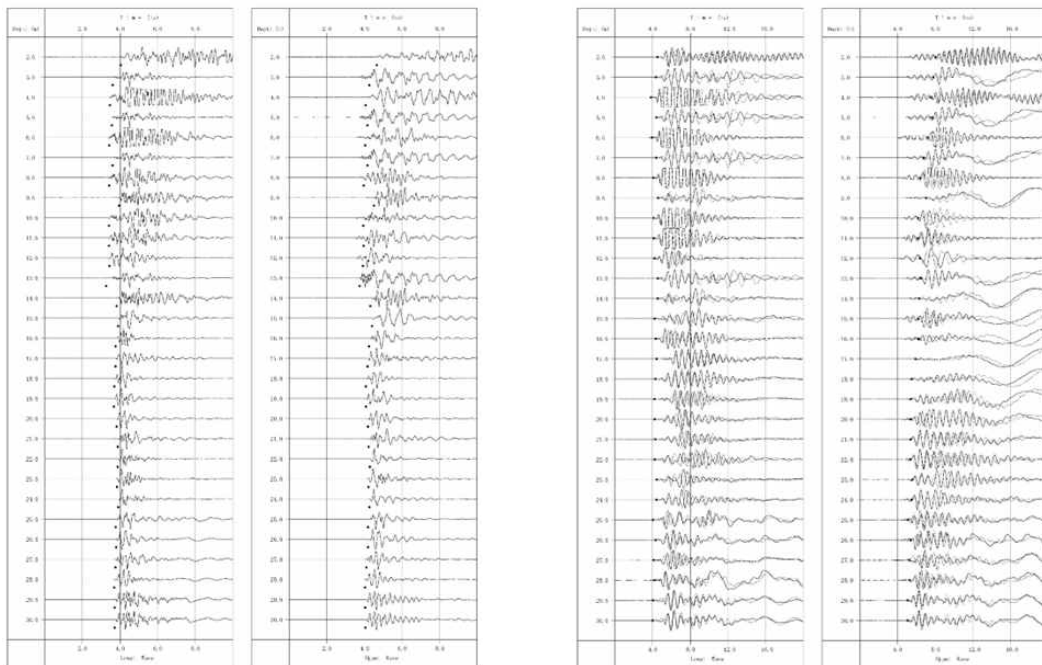


[그림 4.8] 화성 봉담 부유식 음파검층 현장사진

2) 조사결과

부유식 음파 검층은 HS-1 시추공에서 수행되었으며, 조사심도는 G.L. -1.0~30.0m 으로 1.0m 간격으로 P파와 S파 자료를 획득하였다. 심도별 P파와 S파를 획득하여 성분별 탄성과 자료에서 초동을 발체 후 심도별 탄성과 속도값을 추출한다. 추출한 심도별 탄성과 속도를 해당 지층에 적용하여 지층별 평균 탄성과 속도를 획득하였다.

지층별 평균 P파 속도는 성토층(심도 : 0.0~6.8m)은 1,620m/sec, 풍화토층(심도: 6.8~17.0m)은 1,980m/sec, 풍화암층(심도: 17.0~33.0m)은 2,700m/sec이다. 또한 지층별 평균 S파 속도는 성토층(심도 : 0.0~6.8m)은 290.0m/sec, 풍화토층(심도: 6.8~17.0m)은 500.0m/sec, 풍화암층(심도: 17.0~33.0m)은 890.0m/sec로 나타났다. 그림 4.9는 현장에서 깊이별로 획득한 파형을 나타내었으며, 표 3.7은 부유식 음파 검층 결과와 밀도검층으로 획득한 밀도 값을 이용하여 산출한 동적물성치를 정리하여 나타내었다.



(a) P wave

(b) S wave

[그림 4.9] PS 검층의 현장측정자료 (화성 봉담 HS-1)

[표 4.8] SPS 검층의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (화성 성토지반 HS-1)

Depth (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson's ratio	GD (MPa)	ED (MPa)	KD (MPa)
1	1547.0	270.1	0.484	126.5	375.4	3982.9
2	1597.0	282.0	0.484	140.0	420.0	4350.0
3	1534.0	291.0	0.481	150.0	440.0	3930.0
4	1637.0	267.0	0.486	120.0	360.0	4390.0
5	1689.0	304.0	0.483	160.0	470.0	4680.0
6	1621.0	302.0	0.482	160.0	470.0	4360.0
7	1786.0	415.0	0.471	310.0	910.0	5310.0
8	1855.0	436.0	0.471	340.0	1000.0	5700.0
9	1779.0	409.0	0.472	300.0	880.0	5260.0
10	1894.0	477.0	0.466	400.0	1170.0	5760.0
11	1808.0	493.0	0.460	430.0	1260.0	5230.0
12	2070.0	463.0	0.474	380.0	1120.0	7090.0
13	2070.0	527.0	0.465	490.0	1440.0	6930.0
14	1992.0	559.0	0.457	550.0	1600.0	6240.0
15	1976.0	495.0	0.467	440.0	1290.0	6420.0
16	2070.0	522.0	0.466	480.0	1410.0	6920.0
17	2427.0	662.0	0.460	780.0	2280.0	9450.0
18	2611.0	809.0	0.447	1220.0	3530.0	11080.0
19	2427.0	838.0	0.432	1300.0	3720.0	9160.0
20	2674.0	830.0	0.447	1280.0	3700.0	11570.0
21	2865.0	886.0	0.447	1460.0	4230.0	13330.0
22	2387.0	889.0	0.419	1470.0	4170.0	8630.0
23	2674.0	880.0	0.439	1440.0	4150.0	11390.0
24	2747.0	889.0	0.442	1470.0	4240.0	12080.0
25	2342.0	924.0	0.408	1590.0	4480.0	8100.0
26	2500.0	919.0	0.422	1570.0	4460.0	9520.0
27	2915.0	868.0	0.451	1400.0	4060.0	13910.0
28	2907.0	907.0	0.446	1530.0	4420.0	13660.0
29	3021.0	945.0	0.446	1660.0	4800.0	14750.0
30	2976.0	921.0	0.447	1580.0	4570.0	14380.0

4.3.5 밀도검층

1) 조사현황

화성 봉담 현장의 밀도검층은 HS-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -2.75~32.0m 이며, 조사간격은 0.01m 간격으로 자료를 획득하였다. 밀도검층의 시

작 수행심도는 2.75m인데, 이는 밀도검층 Probe와 Probe 하단부에 설치되는 방사능 Source 가지의 총 길이가 2.75m이기 때문에 밀도검층의 경우 지표면부터 2.75m까지의 자료는 측정이 불가능하다. 그림 4.10은 HS-1의 시추공 위치도 및 밀도검층 현장사진이며, 표 3.8은 밀도검층 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.10] 화성 봉담 밀도 검층 현장사진

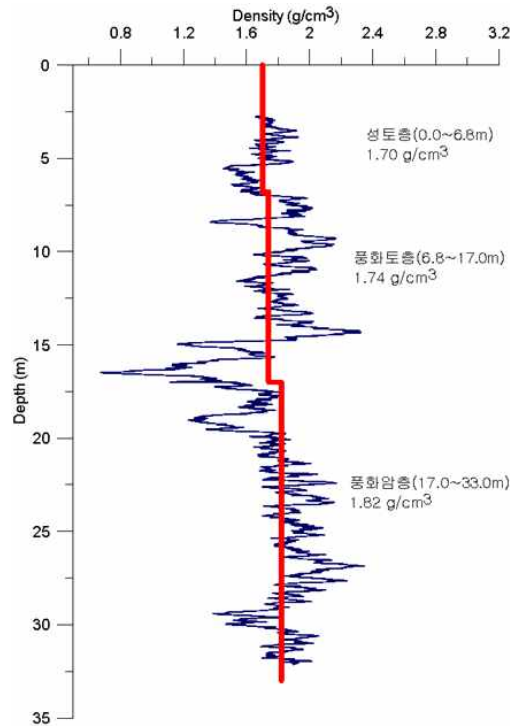
[표 4.9] 화성 봉담 밀도검층 수행 현황

조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)
			시작	종료	
화성 봉담	HS-1	33.0	2.75	32	0.01

2) 조사결과

HS-1 시추공의 지층구성은 상부로부터 성토층, 풍화토층 및 풍화암층 순으로 지층을 이루고 있으며, 성토층은 자갈 섞인 실트질 모래로 구성되어 있다.

산출된 지층별 평균 밀도 값은 자갈 섞인 실트질 모래의 성토층(심도: 2.7~6.8m)은 1.70g/cm^3 , 실트질 모래의 풍화토층(심도: 6.8~17.0m)은 1.74g/cm^3 , 풍화암층(심도: 17.0~32.0m)은 1.82g/cm^3 이다. 상부 성토층(심도: 0.0~2.7m)의 경우 밀도검층의 Probe의 길이보다 심도가 낮아 해당 지층에 대한 자료는 측정이 불가능하다. 그림 4.11은 지층별 평균 밀도 값을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.11] 화성 봉담 밀도검층 결과

4.3.6 동적콘관입시험

1) 조사현황

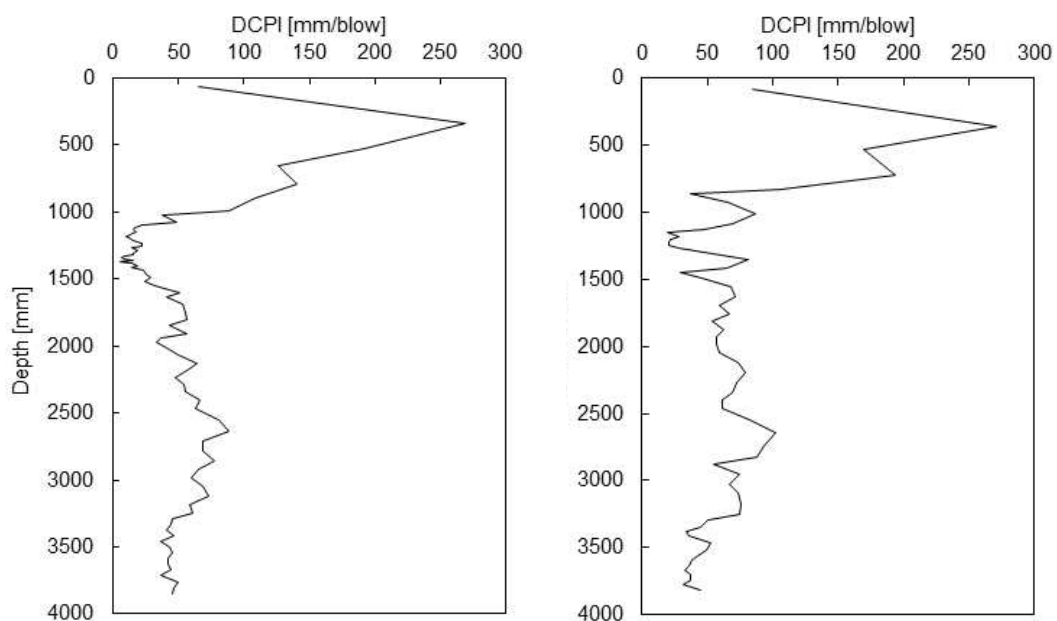
화성 봉담 현장의 동적관입시험(DCP)은 HS-1 시추공 주변 지반에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. 0.0~3.8m 이며, 성토지반에서 DCP 실험을 통하여 획득한 DCPI(Dynamic cone penetration index) 주상도를 자료를 획득하였다. Mohammadi 등(2008)은 실내 챔버실험을 통하여 사질토에서의 DCPI와 공학정수들에 대한 관계를 규명하였으며, DCPI값에 따른 사질토지반의 조밀한 정도를 표 3.9과 같이 나타내었다.

[표 4.10] 사질토에서 DCPI와 조밀도 (Mohammadi et al., 2008)

DCPI[mm/blow]	조밀도
< 5	Very dense
5 - 12	Dense
12 - 23	Medium
23 - 42	Loose
42 <	Very loose

2) 조사결과

DCP 시험은 자갈 섞인 실트질 모래로 구성되어 있는 성토층에서 시험을 수행하였으며, 총 2회 시험을 수행하였다. 지표근처에서는 낮은 구속압으로 인해 매우 느슨한 구간을 나타낸다. 그러나 심도 약 1100~1600 mm 구간에서 상대적으로 조밀한 구간이 나타났으며, 나머지 심도의 경우 DCPI 42 이상으로 매우 느슨한 구간이 나타났다.



[그림 4.12] DCP 시험의 현장측정자료 (화성 봉담)

4.3 파주 운정 조사결과

파주 운정 현장은 건축물 시공 및 성토가 이미 완료된 현장으로, 비교 대상인 성토 전 원지반과 동일한 시추공에서의 시험수행이 어렵다. 따라서 현장상황을 고려하여 인접한 장소에서 현장시험을 수행하였으며, 각각의 시험별 결과를 정리하였다.

4.3.1 시추조사

1) 조사현황

파주 운정(PJ-1) 현장에서의 시추조사는 회전수세식 방법을 수행하였으며, 시추공의 목적에 맞게 현장시험 수행 및 시료를 채취하였다. 그림 4.13은 파주 운정의 시추조사 위치도 및 현장 사진이며, 표 4.11은 시추조사 현황이다.



[그림 4.13] 파주 운정 시추조사 위치도 및 현장사진

[표 4.11] 파주운정 시추조사 현황

조사위치	공번	굴진방법	굴진심도 (G.L. -m)	케이싱심도 (G.L. -m)	지하수위 (G.L. -m)
파주 운정	PJ-1	회전수세식	33.5	12.0	5.8

2) 조사결과

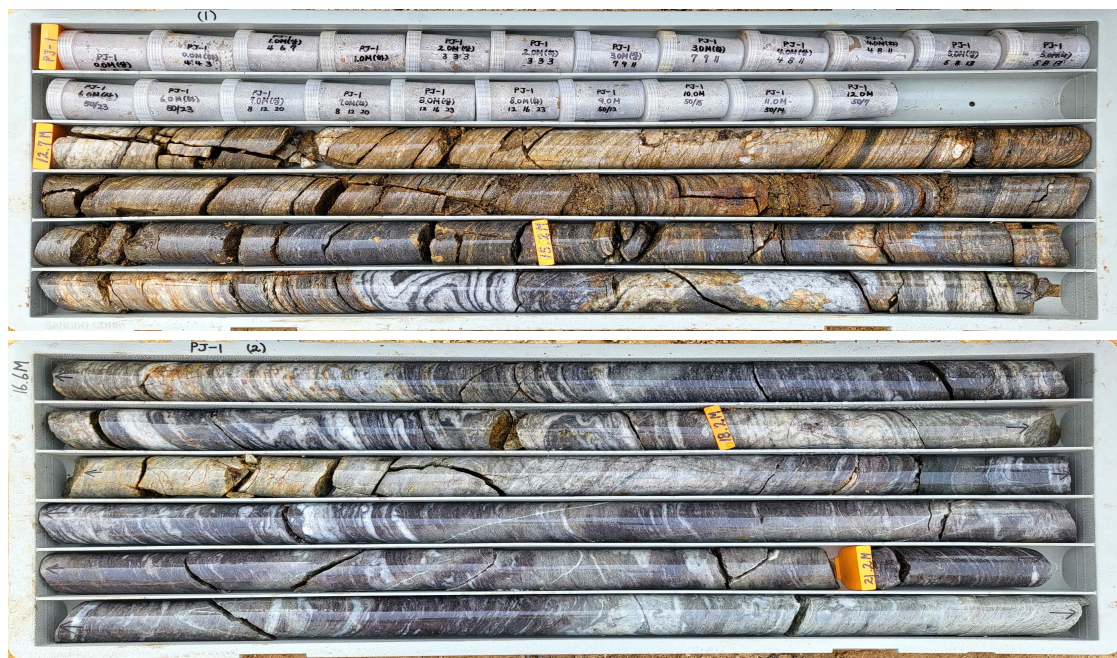
PJ-1 시추공은 지표에서 GL.-33.5m까지 굴진을 수행하였으며 지층은 성토층, 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층, 경암층 순의 지층분포를 갖는다. 성토층의 토성은 자갈섞인 실트질 모래이며, 색조는 황갈색, N값은 6/30~13/30으로 느슨~보통조밀의 상대밀도를 갖는다. 매립층의 토성은 자갈 섞인 점토질 모래이며, 색조는 암갈색~적갈색, N값은 19/30~20/30으로 보통조밀의 상대밀도를 갖는다. 풍화토층은 암편섞인 실트질 모래로 분포한다. 풍화토층의 색조는 암갈색, N값은 21/30~50/12로 보통조밀~매우 조밀한 상대밀도를 갖는다. 풍화암층은 GL.-12.0m에서 0.7m의 층후를 확인하였으며, 호상편마암의 풍화암이다. 색조는 암회색이며 관입 타격 시 암편 및 실트질모래로 분해된다. 연암층은 GL.-12.7m에서 5.5m의 층후를 확인하였으며, 암종은 호상편마암으로 풍화정도는 완전풍화~보통풍화, 강도는 매우약함~보통강함, 절리간격은 매우심한균열~보통균열로 분포한다. 경암층은 GL.-18.2m에서 15.3m의 층후를 확인하였으며, 암종은 호상편마암으로 풍화정도는 보통풍화~신선, 강도는 보통강함~매우 강함, 절리간격은 심한균열~약간균열로 분포한다. PJ-1시추공에 대한 시추조사결과를 표 4.12에 상세 기재하였다.

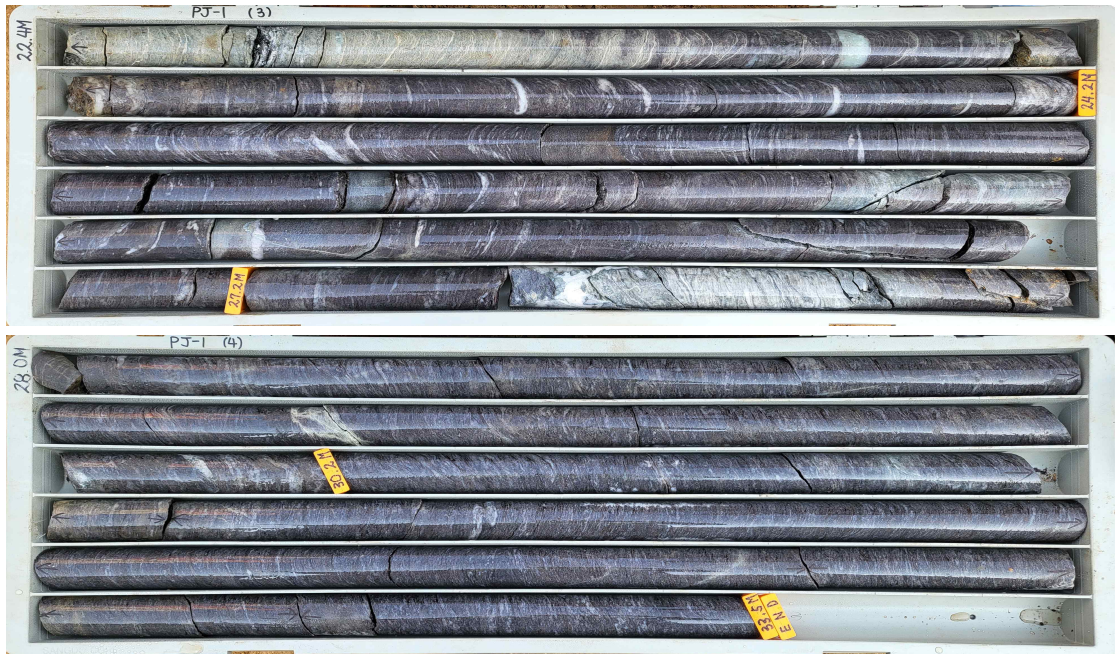
[표 4.12] 파주운정 시추조사 결과

심도 (G.L. -m)	지층명 (통일분류)	지층상태	N값(회/cm) (TCR/RQD(%))
0.0~3.0	성토층 (SM)	·자갈 섞인 실트질 모래(Ø1~10cm) ·황갈색 ·느슨~보통조밀, 습윤	6/30~13/30
3.0~4.5	매립층 (SC)	·자갈섞인 점토질 모래 ·암갈색~적갈색	19/30~20/30

		·보통조밀, 습윤 ·암편석인 실트질 모래 ·암갈색 ·보통조밀~매우조밀, 습윤	
4.5~12.0	풍화토 (SM)		21/30~50/12
12.0~12.7	풍화암 (WR)	·호상편마암의 풍화암 ·암회색 ·완전풍화 ·관입타격시 암편 및 실트질 모래로 분해	50/7
12.7~18.2	연암 (SR)	·호상편마암의 연암 ·담회색~회색 ·완전풍화~보통풍화 ·매우약함~보통 강함 ·매우심한균열~보통균열	(96~100/0~59)
18.2~33.5	경암 (HR)	·호상편마암의 경암 ·담회색~암회색 ·보통풍화~신선 ·보통강함~매우강함 ·심한균열~약간균열	(100/72~100)

3) 시료사진





[그림 4.14] 파주운정 시료사진

4.3.2 표준관입시험

1) 조사현황

본 조사에서의 표준관입시험은 시추조사와 병행하여 수행되었으며, 시험은 1.0m 간격으로 성토층, 매립층, 풍화토층, 풍화암층에서 진행하였다. PJ-1공에서 33회의 표준관입시험을 수행하였다. 표 4.13와 표 4.14에 표준관입시험 조사현황과 조사결과를 정리하였다.

[표 4.13] 표준관입시험 조사현황

공 번	좌표		굴진심도 (GL.-m)	최종타격 심도 (GL.-m)	타격간격 (m)	타격회수 (회)	지하수 위 (GL.- m)
	N	E					
PJ-1	37°42'32. 29"	126°43'1 3.64"	33.5	12.0	1.0	13	5.8

[표 4.14] 표준관입시험 조사결과

지 층	통일분류	연경도	분포범위	평균
성토층	SM	느슨 ~보통조밀	6/30~13/30	9/30
매립층	SC	보통조밀	19/30~20/30	20/30
풍화토층	SM	보통조밀 ~매우조밀	21/30~50/14	50/22
풍화암층	WR	매우조밀	50/7	50/7

4.3.3 다운홀 테스트

1) 조사현황

과주 운정 현장의 다운홀 테스트는 PJ-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -1.0~33.0m 까지 테스트를 진행하였으며, 조사간격은 1.0m이다. 탄성과 송신은 P 파와 S파를 획득하기 위해 햄머 타격 시 수직 및 수평으로 타격 진행하였으며, 지오폰은 시추공에 설치 가능한 3성분 지오폰을 사용하였다.

그림 4.15는 PJ-1의 시추공 위치도 및 다운홀 테스트 현장사진이며, 표 4.15는 다운홀 테스트 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.15] 과주운정 다운홀 테스트 현장사진

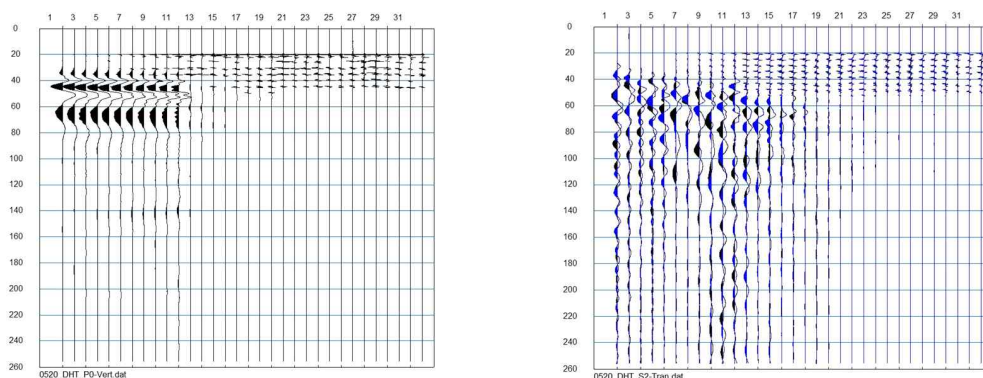
[표 4.15] 파주운정 다운홀 테스트 수행 현황

조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)
			시작	종료	
파주 운정	PJ-1	33.5	1.0	33.0	1.0

2) 조사결과

다운홀 테스트는 PJ-1 시추공에서 수행되었으며, 조사심도는 G.L. -1.0~33.0m 으로 1.0m 간격으로 P파와 S파 자료를 획득하였다. 심도별 P파와 S파를 획득하여 성분별 탄성과 자료에서 초동을 발췌 후 심도별 탄성과 속도값을 추출한다. 추출한 심도별 탄성과 속도를 지층에 적용하여 지층별 평균 탄성과 속도를 획득하였다.

지층별 평균 P파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.0m)은 569.4m/sec, 매립층(심도: 3.0~4.5m)은 783m/sec, 풍화토층(심도: 4.5~12.0m)은 1,134.1m/sec, 풍화암층(심도: 12.0~12.7m)은 1,760m/sec, 연암층(심도: 12.7~18.2m)은 2,149.46m/sec, 경암층(심도: 18.2~33.0m)은 3,206.6m/sec이다. 또한 지층별 평균 S파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.0m)은 242.7m/sec, 매립층(심도: 3.0~4.5m)은 322.1m/sec, 풍화토층(심도: 4.5~12.0m)은 452.4m/sec, 풍화암층(심도: 12.0~12.7m)은 697.5m/sec, 연암층(심도: 12.7~18.2m)은 1,049.0m/sec, 경암층(심도: 18.2~33.0m)은 1,584.4m/sec로 나타났다. 그림 4.16은 현장에서 깊이별로 획득한 파형을 나타내었으며, 표 4.16은 다운홀 테스트 결과와 밀도검층으로 획득한 밀도 값을 이용하여 산출한 동적물성치를 정리하여 나타내었다.



(a) P wave

(b) S wave

[그림 4.16] 다운홀 테스트의 현장측정자료 (파주 운정 PJ-1)

[표 4.16] 다운홀 시험의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (과주 성토지반 PJ-1)

Depth (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson's ratio	GD (MPa)	ED (MPa)	KD (MPa)
1	528.4	228.1	0.385	89.7	248.6	361.9
2	540.1	241.4	0.385	100.5	278.5	405.3
3	639.8	258.6	0.375	115.3	317.2	423.5
4	656.6	273.9	0.402	116.7	327.3	558.7
5	909.4	370.2	0.395	134.0	373.7	591.2
6	1011.3	403.4	0.401	244.7	685.6	1150.5
7	1080.6	424.7	0.405	290.6	816.8	1438.8
8	1127.2	438.7	0.409	322.1	907.4	1655.7
9	1158.9	448.1	0.411	343.7	969.7	1810.7
10	1181.0	454.7	0.412	358.6	1012.6	1920.2
11	1196.7	459.3	0.413	369.2	1043.3	1998.4
12	1183.0	537.7	0.414	376.7	1065.0	2055.0
13	1760.0	697.5	0.370	640.2	1753.9	2245.3
14	2115.0	1038.9	0.407	1077.3	3031.1	5422.6
15	2141.1	1044.4	0.341	2389.9	6409.7	6718.5
16	2161.6	1048.8	0.344	2415.3	6491.7	6930.6
17	2178.0	1052.3	0.346	2435.7	6557.1	7098.7
18	2151.6	1060.8	0.348	2452.0	6609.2	7234.6
19	3141.7	1543.8	0.339	2686.9	7197.9	7471.3
20	3159.2	1554.7	0.341	5690.8	15260.8	15980.1
21	3173.6	1563.7	0.340	5771.4	15469.9	16135.9
22	3185.7	1571.3	0.340	5838.4	15643.5	16264.3
23	3195.9	1577.7	0.339	5895.3	15790.7	16372.1
24	3204.5	1583.1	0.339	5943.5	15915.2	16463.4
25	3211.9	1587.7	0.339	5984.2	16020.6	16540.5
26	3218.2	1591.6	0.338	6019.0	16110.8	16607.4
27	3223.6	1595.1	0.338	6048.6	16187.4	16664.7
28	3228.3	1598.0	0.338	6075.3	16256.0	16712.2
29	3232.5	1600.6	0.338	6097.4	16313.3	16755.2
30	3236.1	1602.9	0.338	6117.2	16364.7	16793.5
31	3239.3	1604.9	0.337	6134.8	16410.1	16825.6
32	3242.1	1606.6	0.337	6150.2	16449.7	16854.7
33	3244.6	1608.2	0.337	6163.2	16483.5	16880.6

4.3.4 부유식 음파 검층

1) 조사현황

부유식 음파(SPS) 검층의 경우 공내수를 에너지 전파의 매개체로 이용하므로 지하수위 상부에서는 자료 측정이 불가능하다. 따라서 성토 전 원지반에서의 지반조사는 지하수위 하부구간부터 1m씩 하강하며 측정을 하였다. 하지만 steel 케이싱을 암반층까지 굴착 한 후 공내수를 계속 주입하여 실험을 진행 할 경우 지하수위 상부의 성토층에서 측정이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 성토층에서의 원활한 부유식 음파검층을 위해 steel 케이싱을 사용하였다. 파주 운정 현장의 부유식 음파 검층은 PJ-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -1.0~30.0m 까지 테스트를 진행하였으며, 조사간격은 1.0m이다. 그림 4.17은 PJ-1의 시추공 위치도 및 부유식 음파 검층 현장사진이며, 표 4.17은 부유식 음파검층 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.17] 파주 운정 부유식 음파검층 현장사진

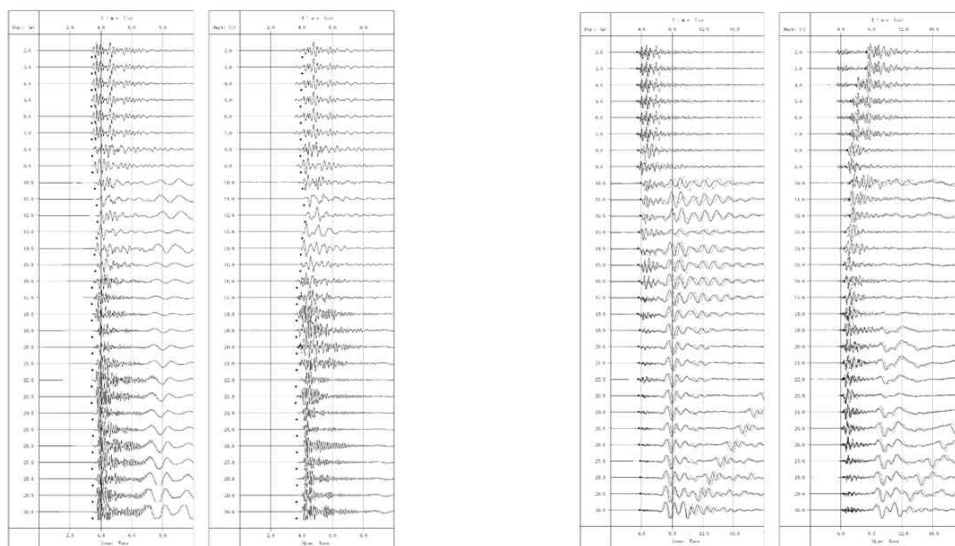
[표 4.17] 파주운정 SPS 검층 수행 현황

조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)	비고
			시작	종료		
파주 운정	PJ-1	33.0	1.0	30.0	1.0	Steel 케이싱

2) 조사결과

부유식 음파 검층은 PJ-1 시추공에서 수행되었으며, 조사심도는 G.L. -1.0~30.0m 으로 1.0m 간격으로 P파와 S파 자료를 획득하였다. 심도별 P파와 S파를 획득하여 성분별 탄성과 자료에서 초동을 발췌 후 심도별 탄성과 속도값을 추출한다. 추출한 심도별 탄성과 속도를 해당 지층에 적용하여 지층별 평균 탄성과 속도를 획득하였다.

지층별 평균 P파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.0m)은 1,581.3m/sec, 매립층(심도: 3.0~4.5m)은 1,786.0m/sec, 풍화토층(심도: 4.5~12.0m)은 2,088.5m/sec, 풍화암층(심도: 12.0~12.7m)은 3,135.0m/sec, 연암층(심도: 12.7~18.2m)은 3,425.8m/sec, 경암층(심도: 18.2~33.0m)은 4374.5m/sec이다. 또한 지층별 평균 S파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.0m)은 253m/sec, 매립층(심도: 3.0~4.5m)은 437m/sec, 풍화토층(심도: 4.5~12.0m)은 574.3m/sec, 풍화암층(심도: 12.0~12.7m)은 868.8m/sec, 연암층(심도: 12.7~18.2m)은 1,326.8m/sec, 경암층(심도: 18.2~33.0m)은 1,661.2m/sec로 나타났다. 그림 4.18은 현장에서 깊이별로 획득한 파형을 나타내었으며, 표 4.18은 부유식 음파 검층 결과와 밀도검층으로 획득한 밀도 값을 이용하여 산출한 동적물성치를 정리하여 나타내었다.



(a) P wave

(b) S wave

[그림 4.18] SPS 검층의 현장측정자료 (파주 운정 PJ-1)

[표 4.18] SPS 검층의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (파주 성토지반 PJ-1)

Depth (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson's ratio	GD (MPa)	ED (MPa)	KD (MPa)
1	1552	241.0	0.488	100.2	298.0	4020.2
2	1587	256.0	0.488	113.0	336.3	4536.3
3	1605	264.0	0.487	120.2	357.4	4458.7
4	1730	335.7	0.486	121.6	361.5	4332.8
5	1842	538.4	0.480	201.2	595.8	5076.1
6	1883	493.4	0.453	517.6	1504.5	5368.7
7	1880	511.4	0.463	434.7	1272.1	5752.0
8	2045	501.9	0.460	467.0	1363.7	5688.7
9	2004	511.8	0.468	449.8	1320.7	6868.1
10	2247	609.0	0.465	467.7	1370.6	6547.8
11	2353	655.9	0.460	662.3	1934.4	8133.0
12	2208	737.0	0.458	768.2	2239.9	8862.5
13	3135	868.8	0.437	1202.7	3457.4	9191.6
14	2747	1196.8	0.458	1671.4	4875.1	19534.0
15	3484	1230.3	0.383	3171.6	8771.7	12480.2
16	3802	1313.9	0.429	3351.6	9577.4	22408.7
17	3460	1407.5	0.432	3822.6	10949.4	26911.2
18	3636	1485.4	0.401	4386.6	12290.0	20659.7
19	4329	1508.0	0.400	5268.4	14749.7	24542.8
20	4167	1441.0	0.431	5429.9	15539.8	37507.2
21	4310	1466.0	0.432	4958.1	14200.9	34849.9
22	4292	1441.0	0.435	5131.7	14723.6	37513.0
23	4444	1626.0	0.436	4958.1	14244.5	37374.6
24	4484	1546.0	0.423	6312.9	17963.0	38738.9
25	4505	1595.0	0.433	5707.0	16351.1	40399.5
26	4329	1605.0	0.428	6074.5	17352.9	40360.2
27	4115	1692.0	0.420	6150.9	17472.5	36545.9
28	4386	1842.0	0.398	6835.8	19116.6	31318.0
29	4608	2165.0	0.393	8101.6	22569.8	35131.1
30	4525	2008.0	0.358	11191.9	30405.4	35778.2

4.3.5 밀도검층

1) 조사현황

파주 운정 현장의 밀도검층은 PJ-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -2.75~33.0m 이며, 조사간격은 0.01m 간격으로 자료를 획득하였다. 밀도검층의 시

작 수행심도는 2.75m인데, 이는 밀도검층 Probe와 Probe 하단부에 설치되는 방사능 Source 까지의 총 길이가 2.75m이기 때문에 밀도검층의 경우 지표면부터 2.75m까지의 자료는 측정이 불가능하다. 그림 4.19는 PJ-1의 시추공 위치도 및 밀도검층 현장사진이며, 표 4.19는 밀도검층 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.19] 파주 운정 밀도 검층 현장사진

[표 4.19] 파주 운정 밀도검층 수행 현황

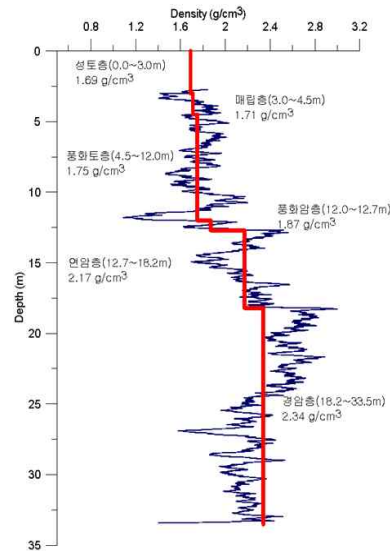
조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)
			시작	종료	
파주 운정	PJ-1	33.0	2.75	33	0.01

2) 조사결과

PJ-1 시추공의 지층구성은 상부로부터 성토층, 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층 및 경암층 순으로 지층을 이루고 있으며, 성토층은 자갈 섞인 실트질 모래로 구성되어 있다.

산출된 지층별 평균 밀도 값은 자갈 섞인 실트질 모래의 성토층(심도: 0.0~3.0m)은 1.69g/cm^3 , 자갈 섞인 점토질 모래의 매립층(심도: 3.0~4.5m)은 1.71 g/cm^3 , 암편섞인 실트질 모래의 풍화토층(심도: 4.5~12.0m)은 1.75g/cm^3 , 풍화암층(심도: 12.0~12.7m)은 1.87g/cm^3 , 연암층(심도: 12.7~18.2m)은 2.17g/cm^3 , 경암층(심도: 18.2~33.0m)은 2.34g/cm^3 이다. 상부 성토층(심도 : 0.0~2.7m)의 경우 밀도검층의 Probe의 길이보다 심도가 낮아 해당 지층에 대한 자료는 측정이 불가능하다. 그

림 4.20은 지층별 평균 밀도 값을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.20] 파주 운정 밀도검층 결과

4.3.6 동적콘관입시험

1) 조사현황

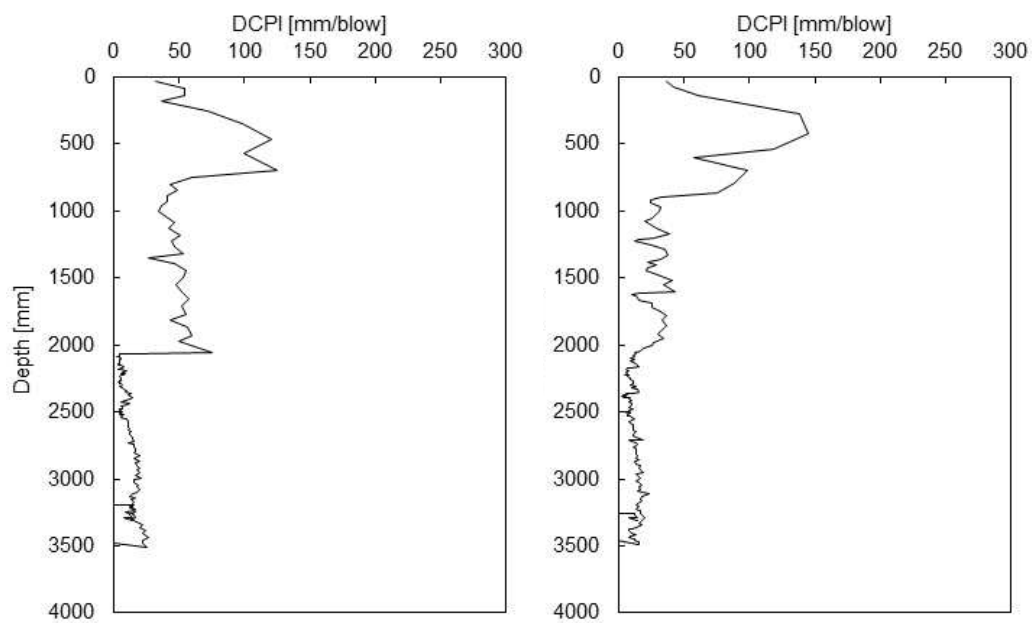
파주 운정 현장의 동적관입시험(DCP)은 PJ-1 시추공 주변 지반에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. 0.0~3.5m 이며, 성토지반에서 DCP 실험을 통하여 획득한 DCPI(Dynamic cone penetration index) 주상도를 자료를 획득하였다. Mohammadi 등(2008)은 실내 챔버실험을 통하여 사질토에서의 DCPI와 공학정수들에 대한 관계를 규명하였으며, DCPI값에 따른 사질토지반의 조밀한 정도를 표 4.20와 같이 나타내었다.

[표 4.20] 사질토에서 DCPI와 조밀도 (Mohammadi et al., 2008)

DCPI[mm/blow]	조밀도
< 5	Very dense
5 - 12	Dense
12 - 23	Medium
23 - 42	Loose
42 <	Very loose

2) 조사결과

DCP 시험은 자갈 섞인 실트질 모래로 구성되어 있는 성토층에서 시험을 수행하였으며, 총 2회 시험을 수행하였다. 지표 근처에서는 낮은 구속압으로 인해 매우 느슨한 구간을 나타낸다. 심도 약 700~2000 mm 구간 또한 매우 느슨한 구간이 나타났으며, 심도 약 2.0~3.5m 구간에서 상대적으로 조밀한 구간이 나타났다.



[그림 4.21] DCP 시험의 현장측정자료 (파주운정)

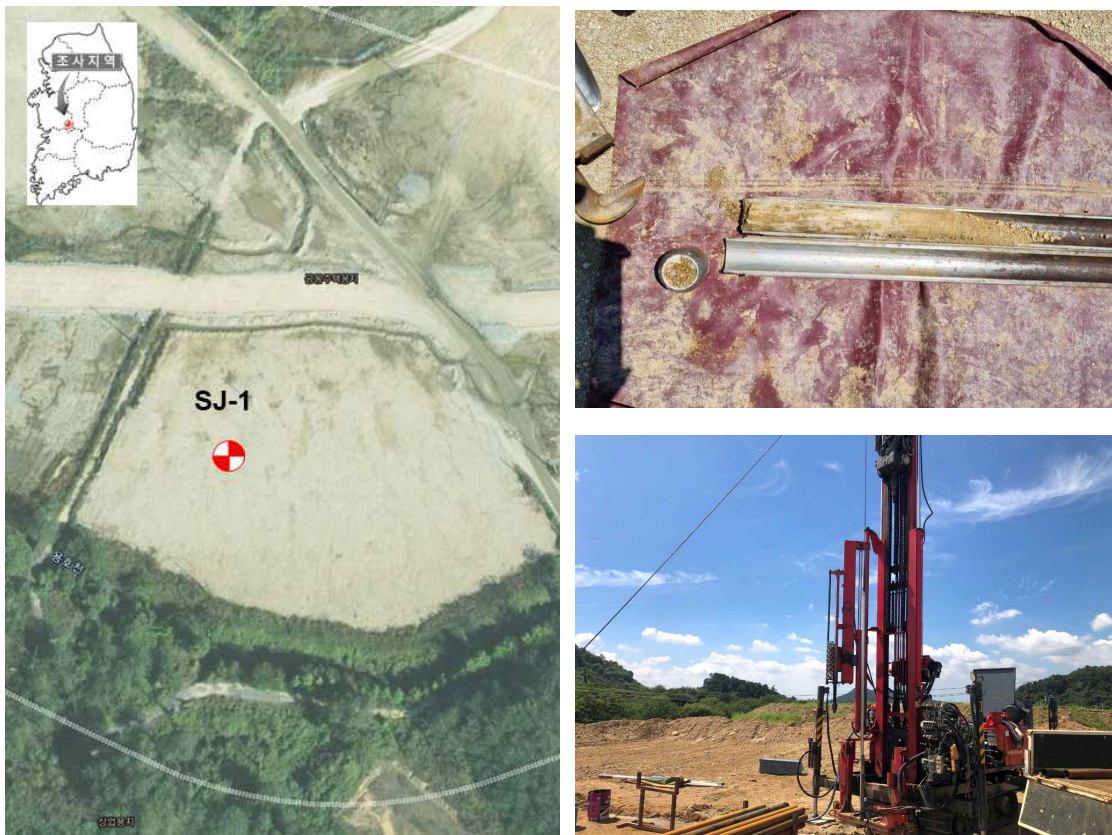
4.4 세종 연동면 조사결과

세종 연동면 현장은 성토가 완료된 비다짐 성토 현장으로, 비교 대상인 성토 전 원지반과 5m 이내의 위치의 시추공에서 시험을 수행하였다. 다른 시험현장과 달리 중장비 이동이 최소화된 사토장 구역의 현장이며, 각각의 시험별 결과를 정리하였다.

4.4.1 시추조사

1) 조사현황

세종 연동(SJ-1) 현장에서의 시추조사는 회전수세식 방법을 수행하였으며, 시추공의 목적에 맞게 현장시험 수행 및 시료를 채취하였다. 그림 4.22는 세종 연동면의 시추조사 위치도 및 현장 사진이며, 표 4.21은 시추조사 현황이다.



[그림 4.22] 세종 연동면 시추조사 위치도 및 현장사진

[표 4.21] 세종 연동면 시추조사 현황

조사위치	공번	굴진방법	굴진심도 (G.L. -m)	케이싱심도 (G.L. -m)	지하수위 (G.L. -m)
세종 연동면	SJ-1	회전수세식	33.0	18.8	5.5

2) 조사결과

SJ-1 시추공은 지표에서 GL.-33.0m까지 굴진을 수행하였으며 지층은 성토층, 매립층, 충적층, 풍화토층, 풍화암층 순의 지층분포를 갖는다. 성토층의 토성은 실트질 모래이며, 색조는 황갈색, N값은 5/30~6/30으로 매우느슨의 상대밀도를 갖는다. 매립층의 토성은 실트질 모래이며, 색조는 황갈색, N값은 6/30~8/30으로 느슨~보통조밀의 상대밀도를 갖는다. 충적층의 토성은 실트 섞인 자갈이며, 색조는 암회색, N값은 3/30~17/30으로 매우느슨~보통조밀의 상대밀도를 갖는다. 풍화토층은 암편섞인 실트질 모래로 구성되었고 색조는 암갈색~갈색, N값은 7/30~50/12로 느슨~매우 조밀한 상대밀도를 갖는다. 풍화암층은 12.2m의 층후를 확인하였으며, 흑운모화강암의 풍화암이다. 색조는 암갈색~암회색이며 관입 타격 시 암편 및 실트질 모래로 분해된다. SJ-1시추공에 대한 시추조사결과를 표 4.22에 상세 기재하였다.

[표 4.22] 세종 연동면 시추조사 결과

심도 (G.L. -m)	지층명 (통일분류)	지층상태	N값(회/cm) (TCR/RQD(%))
0.0~3.8	성토층 (SM, SW)	·실트질 모래 ·황갈색, 매우느슨, 습윤	5/30~6/30
3.8~6.0	매립층 (SM)	·자갈 섞인 실트질 모래 ·황갈색, 느슨~보통조밀, 습윤	6/30~8/30
6.0~11.0	충적층 (GP, GM)	·실트 섞인 자갈 ·암회색, 매우느슨~보통조밀, 습윤	3/30~17/30
11.0~19.8	풍화토층 (SM)	·암편섞인 실트질 모래 ·암갈색~갈색, 느슨~매우조밀, 습윤	7/30~50/12
19.8~33.0	풍화암층 (WR)	·흑운모화강암의 풍화암 ·암갈색~암회색, 완전풍화~심한풍화	50/9~50/1

3) 시료사진



[그림 4.23] 세종 연동면 시료사진

4.4.2 표준관입시험

1) 조사현황

본 조사에서의 표준관입시험은 시추조사와 병행하여 수행되었으며, 시험은 1.0m 간격으로 성토층, 매립층, 충적층, 풍화토층, 풍화암층에서 진행하였다. SJ-1공에서 33회의 표준관입시험을 수행하였다. 표 4.23과 표 4.24에 표준관입시험 조사현황과 조사결과를 정리하였다.

[표 4.23] 표준관입시험 조사현황

공 번	좌표		굴진심도 (GL.-m)	최종타격 심도 (GL.-m)	타격간격 (m)	타격회수 (회)	지하수 위 (GL.- m)
	N	E					
SJ-1	36°32'15. 66"	127°18'4 4.18"	33.0	33.0	1.0	33	5.5

[표 4.24] 표준관입시험 조사결과

지 층	통일분류	연경도	분포범위	평균
성토층	SM, SW	매우느슨	6/30~16/30	8/30
매립층	SM	느슨~보통조밀	7/30~18/30	13/30
충적층	GP, GM	매우느슨~보통조밀	3/30~17/30	10/30
풍화토층	SM	느슨~매우조밀	7/30~50/12	21/30
풍화암층	WR	완전풍화~심한풍화	50/9~50/1	50/6

4.4.3 다운홀 테스트

1) 조사현황

세종 연동면 현장의 다운홀 테스트는 SJ-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -0.5~32.0m 까지 테스트를 진행하였으며, 조사간격은 1.0m이다. 탄성과 송신은 P파와 S파를 획득하기 위해 햄머 타격 시 수직 및 수평으로 타격 진행하였으며, 지오폰은 시추공에 설치 가능한 3성분 지오폰을 사용하였다.

그림 4.24는 SJ-1의 시추공 위치도 및 다운홀 테스트 현장사진이며, 표 4.25는 다운홀 테스트 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.24] 세종 연동면 다운홀 테스트 현장사진

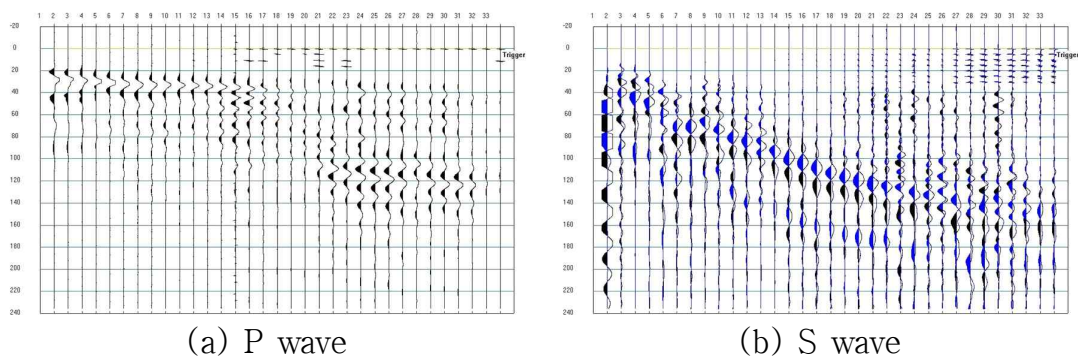
[표 4.25] 세종 연동면 다운홀 테스트 수행 현황

조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)
			시작	종료	
세종 연동면	SJ-1	33.0	0.5	32.0	1.0

2) 조사결과

다운홀 테스트는 SJ-1 시추공에서 수행되었으며, 조사심도는 G.L. -0.5~32.0m 으로 1.0m 간격으로 P파와 S파 자료를 획득하였다. 심도별 P파와 S파를 획득하여 성분별 탄성과 자료에서 초동을 발췌 후 심도별 탄성과 속도값을 추출한다. 추출한 심도별 탄성과 속도를 지층에 적용하여 지층별 평균 탄성과 속도를 획득하였다.

지층별 평균 P파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.8m) 716.6m/sec, 매립층(심도: 3.8~6.0m)은 1,006.6m/sec, 충적층(심도: 6.0~11.0m)은 1,452.0m/sec, 풍화토층(심도: 11.0~19.8m)은 1,706.2m/sec, 풍화암층(심도: 19.8~32.0m)은 2,327.4m/sec이다. 또한 지층별 평균 S파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.8m) 209.9m/sec, 매립층(심도: 3.8~6.0m)은 250.5m/sec, 충적층(심도: 6.0~11.0m)은 272.7m/sec, 풍화토층(심도: 11.0~19.8m)은 320.3m/sec, 풍화암층(심도: 19.8~33.0m)은 698.0m/sec이다. 그림 4.25는 현장에서 깊이별로 획득한 파형을 나타내었으며, 표 4.26은 다운홀 테스트 결과와 밀도검층으로 획득한 밀도 값을 이용하여 산출한 동적물성치를 정리하여 나타내었다.



[그림 4.25] 다운홀 테스트의 현장측정자료 (세종 연동면 SJ-1)

[표 4.26] 다운홀 시험의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (세종 성토지반 SJ-1)

Depth (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson's ratio	GD (MPa)	ED (MPa)	KD (MPa)
1.00	666.0	207.7	0.446	76.3	220.8	683.0
2.00	701.9	209.8	0.451	77.9	226.0	767.9
3.00	782.0	212.1	0.460	79.6	232.5	975.9
4.00	897.8	221.1	0.468	87.5	256.8	1326.0
5.00	1001.4	254.3	0.466	115.7	339.3	1640.5
6.00	1120.5	276	0.468	136.3	400.2	2065.3
7.00	1237.7	255.8	0.478	119.2	352.4	2632.8
8.00	1397.5	267.1	0.481	130.0	385.1	3385.9
9.00	1533.8	275.5	0.483	138.3	410.4	4103.0
10.00	1541.6	281.7	0.483	144.6	428.9	4138.3
11.00	1549.3	283.4	0.483	146.4	434.0	4179.3
12.00	1557.1	304.6	0.480	171.4	507.3	4249.5
13.00	1620.1	309.8	0.481	177.3	525.1	4611.4
14.00	1670.1	313.8	0.482	181.9	539.0	4909.1
15.00	1710.3	317	0.482	185.6	550.2	5155.1
16.00	1742.9	319.6	0.483	188.7	559.4	5358.9
17.00	1769.4	321.7	0.483	191.1	566.9	5527.5
18.00	1791.1	323.3	0.483	193.0	572.6	5667.7
19.00	1788.7	352.6	0.480	229.6	679.6	5603.0
20.00	2252.3	665.6	0.452	828.2	2405.3	8378.9
21.00	2272.5	670.2	0.452	839.7	2439.0	8534.4
22.00	2289.7	674.1	0.453	849.5	2467.8	8668.1
23.00	2304.2	697.4	0.450	909.2	2635.9	8712.9
24.00	2316.7	700.2	0.450	916.5	2657.4	8811.2
25.00	2327.4	702.6	0.450	922.8	2675.9	8895.7
26.00	2336.6	704.7	0.450	928.3	2692.1	8968.5
27.00	2344.6	706.6	0.450	933.4	2706.8	9031.8
28.00	2351.6	708.1	0.450	937.3	2718.5	9088.0
29.00	2357.7	709.5	0.450	941.0	2729.4	9136.7
30.00	2363.1	710.8	0.450	944.5	2739.5	9179.8
31.00	2367.9	711.8	0.450	947.1	2747.3	9218.7
32.00	2372.1	712.8	0.450	949.8	2755.1	9252.4

4.4.4 부유식 음파 검층

1) 조사현황

부유식 음파(SPS) 검층의 경우 공내수를 에너지 전파의 매개체로 이용하므로 지하수위 상부에서는 자료 측정이 불가능하다. 따라서 성토 전 원지반에서의 지반조사는 지하수위 하부구간부터 1m씩 하강하며 측정을 하였다. 하지만 steel 케이싱을 암반층까지 굴착 한 후 공내수를 계속 주입하여 실험을 진행 할 경우 지하수위 상부의 성토층에서 측정이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 성토층에서의 원활한 부유식 음파검층을 위해 steel 케이싱을 사용하였다. 세종 연동면 현장의 부유식 음파 검층은 SJ-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -1.0~30.0m 까지 테스트를 진행하였으며, 조사간격은 1.0m이다. 그림 4.26은 SJ-1의 시추공 위치도 및 부유식 음파 검층 현장사진이며, 표 4.27은 부유식 음파검층 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.26] 세종 연동면 부유식 음파검층 현장사진

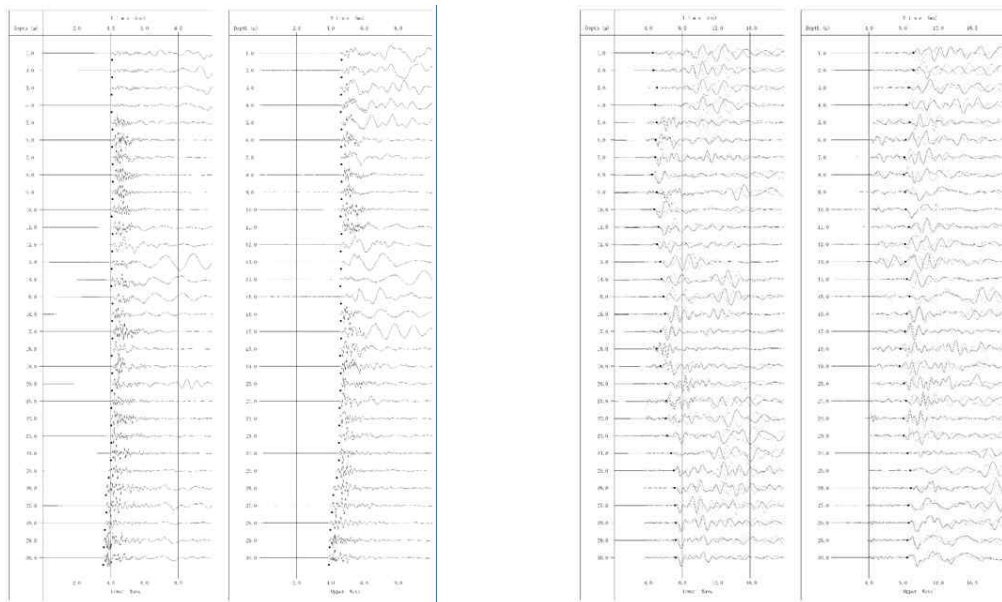
[표 4.27] 세종 연동면 SPS 검층 수행 현황

조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)	비고
			시작	종료		
세종 연동면	SJ-1	33.0	1.0	30.0	1.0	steel 케이싱

2) 조사결과

부유식 음파 검층은 SJ-1 시추공에서 수행되었으며, 조사심도는 G.L. -1.0~30.0m 으로 1.0m 간격으로 P파와 S파 자료를 획득하였다. 심도별 P파와 S파를 획득하여 성분별 탄성과 자료에서 초동을 발체 후 심도별 탄성과 속도값을 추출한다. 추출한 심도별 탄성과 속도를 해당 지층에 적용하여 지층별 평균 탄성과 속도를 획득하였다.

지층별 평균 P파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.8m) 1,760m/sec, 매립층(심도: 3.8~6.0m)은 1,860m/sec, 충적층(심도: 6.0~11.0m)은 1,900m/sec, 풍화토층(심도: 11.0~19.8m)은 1,930m/sec, 풍화암층(심도: 19.8~32.0m)은 2,430m/sec이다. 또한 지층별 평균 S파 속도는 성토층(심도: 0.0~3.8m) 231.3m/sec, 매립층(심도: 3.8~6.0m)은 275.3m/sec, 충적층(심도: 6.0~11.0m)은 290m/sec, 풍화토층(심도: 11.0~19.8m)은 363m/sec, 풍화암층(심도: 19.8~32.0m)은 712.2m/sec이다. 그림 4.27은 현장에서 깊이별로 획득한 파형을 나타내었으며, 표 4.28은 부유식 음파 검층 결과와 밀도검층으로 획득한 밀도 값을 이용하여 산출한 동적물성치를 정리하여 나타내었다.



(a) P wave

(b) S wave

[그림 4.27] SPS 검층의 현장측정자료 (세종 연동면 SJ-1)

[표 4.28] SPS 검층의 깊이별 탄성과 속도 및 동적 물성치 결과 (세종 성토지반 SJ-1)

Depth (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson's ratio	GD (MPa)	ED (MPa)	KD (MPa)
1	1757	212	0.493	80	240	5410
2	1799	215	0.493	80	240	5520
3	1736	267	0.488	130	390	5370
4	1848	277	0.489	140	420	6090
5	1852	261	0.490	120	360	5920
6	1873	288	0.488	150	450	6190
7	1931	295	0.488	160	480	6700
8	1894	271	0.490	140	420	6700
9	1887	305	0.487	170	510	6340
10	1908	276	0.489	140	420	6550
11	1890	282	0.489	150	450	6590
12	1965	309	0.487	180	540	7100
13	1795	345	0.481	220	650	5650
14	1912	340	0.484	210	620	6330
15	1965	331	0.485	200	590	6730
16	1931	403	0.477	300	890	6510
17	1912	356	0.482	230	680	6310
18	2020	364	0.483	240	710	7050
19	1938	456	0.471	380	1120	6370
20	1980	474	0.470	420	1230	6740
21	2045	441	0.476	360	1060	7240
22	2119	493	0.471	450	1320	7690
23	2146	523	0.468	510	1500	7920
24	2101	528	0.466	520	1520	7520
25	2083	527	0.466	520	1520	7410
26	2294	534	0.471	530	1560	9080
27	3012	673	0.474	850	2510	15920
28	3106	674	0.475	850	2510	16930
29	2865	770	0.461	1110	3240	13870
30	2941	797	0.460	1190	3480	14640

4.3.5 밀도검층

1) 조사현황

세종 연동면 현장의 밀도검층은 SJ-1 시추공에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. -2.75~32.5m 이며, 조사간격은 0.01m 간격으로 자료를 획득하였다. 밀도검층의 시작 수행심도는 2.75m인데, 이는 밀도검층 Probe와 Probe 하단부에 설치되는 방사능 Source까지의 총 길이가 2.75m이기 때문에 밀도검층의 경우 지표면부터 2.75m까지의 자료는 측정이 불가능하다. 그림 4.28는 SJ-1의 시추공 위치도 및 밀도검층 현장사진이며, 표 4.29는 밀도검층 수행 현황을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.28] 세종 연동면 밀도검층 현장사진

[표 4.29] 세종 연동면 밀도검층 수행 현황

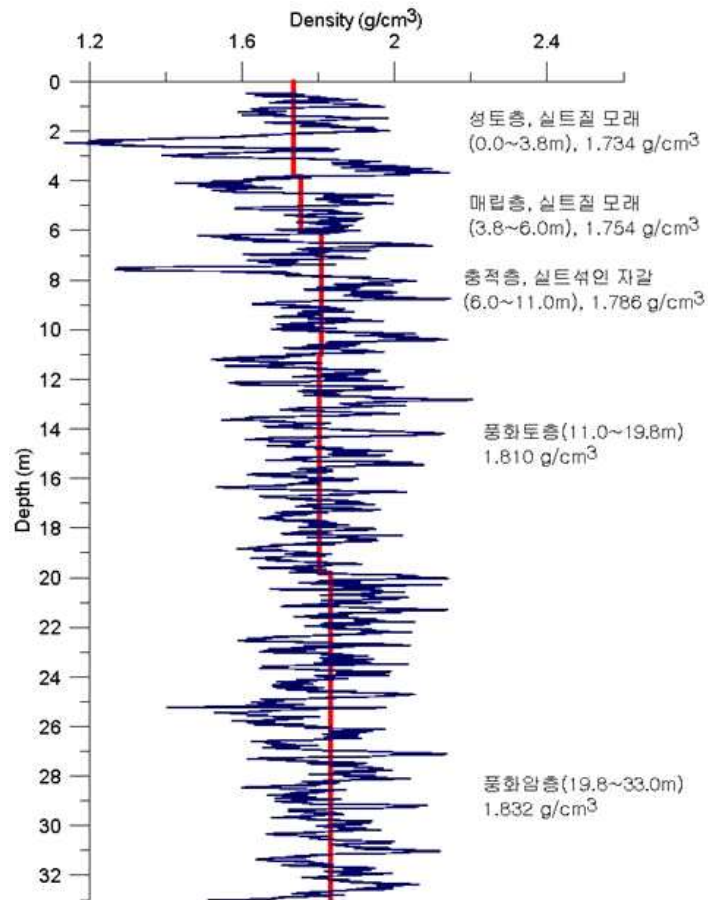
조사위치	공번	굴진심도 (G.L. -m)	조사심도(G.L. -m)		조사간격(m)
			시작	종료	
세종 연동면	SJ-1	33.0	2.75	32.5	0.01

2) 조사결과

SJ-1 시추공의 지층구성은 상부로부터 성토층, 매립층, 충적층, 풍화토층, 풍화암층 순으로 지층을 이루고 있다.

산출된 지층별 평균 밀도 값은 실트질 모래의 성토층(심도: 0.0~3.8m)은

1.734g/cm³, 실트질 모래의 매립층(심도: 3.8~6.0m)은 1.754g/cm³, 실트 섞인 자갈의 충적층(심도: 6.0~11.0m)은 1.786 g/cm³, 암편 섞인 실트질 모래의 풍화토층(심도: 11.0~19.8m)은 1.810g/cm³, 풍화암층(심도: 19.8~32.5m)은 1.832g/cm³ 이다. 그림 4.29는 지층별 평균 밀도 값을 정리하여 나타내었다.



[그림 4.29] 세종 연동면 밀도검층 결과

4.4.6 동적콘관입시험

1) 조사현황

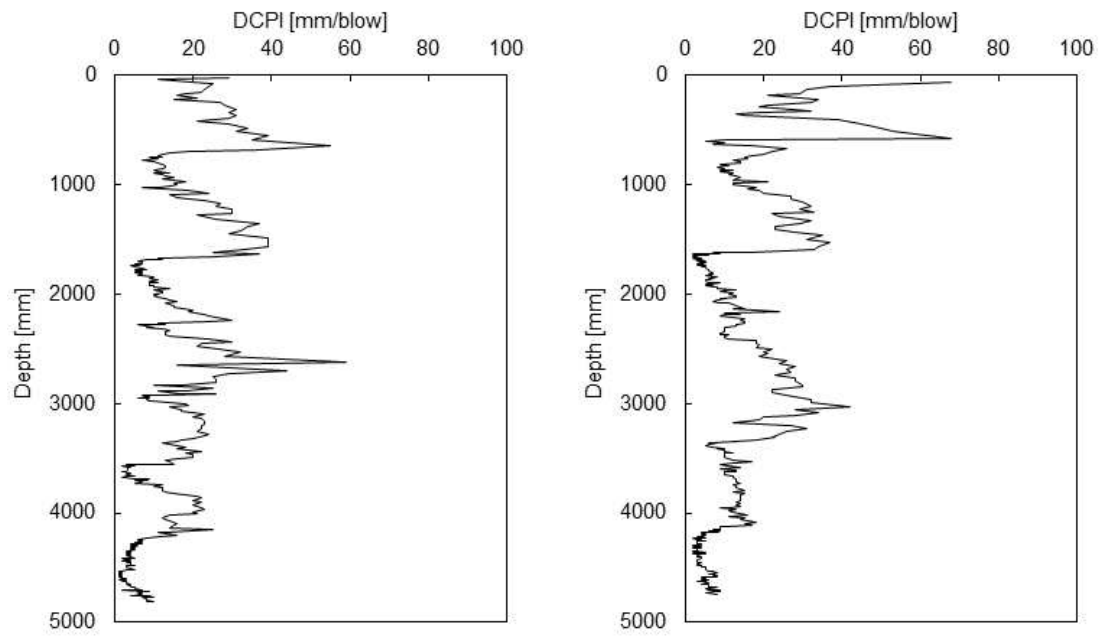
과주 운정 현장의 동적관입시험(DCP)은 SJ-1 시추공 주변 지반에서 수행되었다. 조사심도는 G.L. 0.0~4.8m이며, 성토지반에서 DCP 실험을 통하여 획득한 DCPI(Dynamic cone penetration index) 주상도를 자료를 획득하였다. Mohammadi 등(2008)은 실내 챔버실험을 통하여 사질토에서의 DCPI와 공학정수들에 대한 관계를 규명하였으며, DCPI값에 따른 사질토지반의 조밀한 정도를 표 4.30과 같이 나타내었다.

[표 4.30] 사질토에서 DCPI와 조밀도 (Mohammadi et al., 2008)

DCPI[mm/blow]	조밀도
< 5	Very dense
5 - 12	Dense
12 - 23	Medium
23 - 42	Loose
42 <	Very loose

2) 조사결과

DCP 시험은 느슨한 실트질 모래로 구성되어 있는 성토층에서 시험을 수행하였으며, 총 2회 시험을 수행하였다. 지표 근처에서는 낮은 구속압으로 인해 매우 느슨한 구간을 나타낸다. 심도에 따라 느슨한 구간, 중간단계 구간, 조밀한 구간이 반복되며, 심도 약 450mm 구간 이후부터 DCPI 5이하의 매우 조밀한 구간이 나타났다.



[그림 4.30] DCP 시험의 현장측정자료 (세종 연동면)

제 5 장

전단파속도 실내시험

LANDSLIDE
INSTITUTE

&

제5장 전단파속도 실내시험

5.1 기본물성

세 현장에서 채취한 시료들에 대하여 기본 물성 시험들을 진행하였으며, 국가표준 시험 (KS)에 근거하여 최대·최소 건조밀도 (간극비), 비중, 입도분포, 액·소성한계를 산정하여 흙을 분류하였다. 표 5.1은 세 현장시료의 최대·최소 건조밀도 (간극비) 및 비중이다.

[표 5.1] 화성, 파주, 세종 현장시료의 최대·최소 건조밀도 (간극비) 및 비중 시험 결과

물성치	화성	파주	세종
최대 건조밀도 (최소 간극비)	16.04 kN/m ³ (0.621)	15.78 kN/m ³ (0.648)	18.47 kN/m ³ (0.407)
최소 건조밀도 (최대 간극비)	11.78 kN/m ³ (1.206)	12.01 kN/m ³ (1.164)	14.39 kN/m ³ (0.807)
비중	2.65	2.65	2.65

5.2 압밀시험 결과

5.2.1 시험 개요

기본물성 시험 결과를 토대로 세 현장에서 채취한 시료들에 대하여 압밀 시험을 수행하였으며, 벤더엘리먼트 센서를 압밀셀에 부착하여 전단파속도를 측정 및 분석하였다. 세 현장에서 채취한 시료들은 5층 과소다짐법을 사용하여 상대밀도를 30%, 50%, 70%, 90%로 조성하였다. 세종 현장에서 채취한 시료는 동일한 다짐법으로 상대밀도 80%를 추가로 수행하였다. 하중 단계는 5, 10, 15, 30, 60, 125, 250, 500 kPa로 진행하였다. 압밀 시료의 높이비는 1:1.3으로 설정하였으며, 표 5.2는 조성된 시료들의 목표 간극비, 건조밀도, 흙의 무게이다.

[표 5.2] 상대밀도 별 목표 간극비, 건조 밀도, 흙 무게 (80%는 세종 시료만 해당)

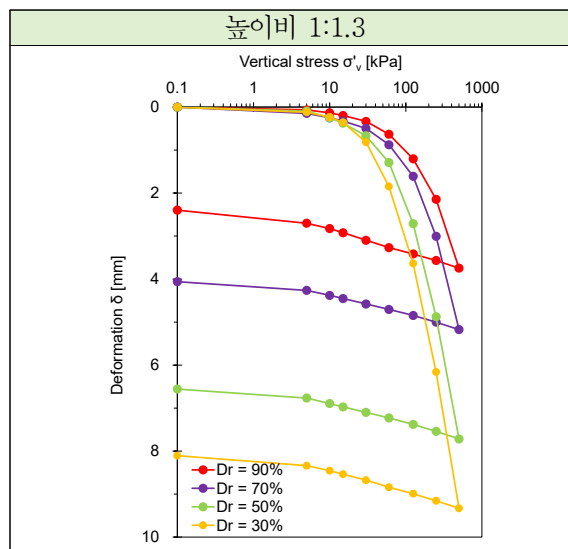
상대밀도 [%]		30	50	70	80	90
화성	목표 간극비	1.031	0.914	0.797	—	0.680
	건조 밀도 [kN/m ³]	12.80	13.59	14.47	—	15.48
	흙 무게 [g] [1:1]	449.96	477.47	508.57	—	544.00
	흙 무게 [g] [1:1.3]	779.02	826.65	880.49	—	941.82
파주	목표 간극비	1.009	0.906	0.803	—	0.700
	건조 밀도 [kN/m ³]	12.94	13.64	14.42	—	15.30
	흙 무게 [g] [1:1]	454.73	479.35	506.79	—	537.56
	흙 무게 [g] [1:1.3]	787.27	829.90	877.41	—	930.68
세종	목표 간극비	0.687	0.607	0.527	0.487	0.447
	건조 밀도 [kN/m ³]	15.41	16.18	17.02	17.48	17.97
	흙 무게 [g] [1:1]	541.58	568.54	598.33	614.42	631.40
	흙 무게 [g] [1:1.3]	937.64	984.31	1035.88	1063.75	1093.15



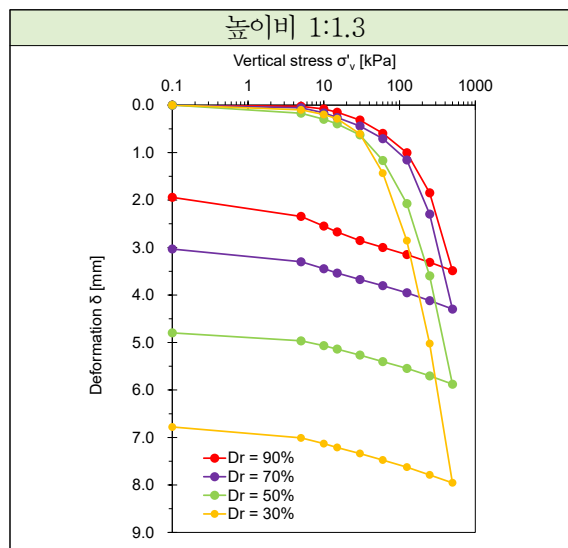
[그림 5.1] 벤더엘리먼트와 연계한 압밀 시험

5.2.2 시험 결과

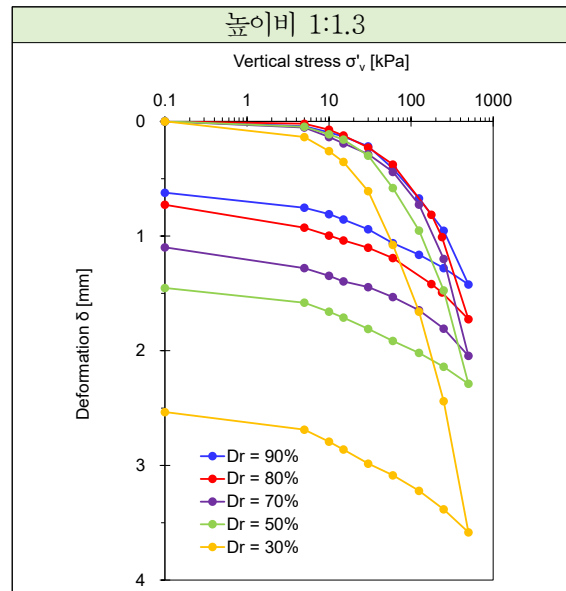
시료는 각 현장에서 채취되었으며, 상대밀도를 다르게 조성한 시료에 대하여 하중 단계 별로 수직유효응력, 침하량 및 전단파속도를 측정하였다. 그림 5.2, 5.3, 5.4는 높이비 1:1.3의 압밀셀을 사용하여 각 현장시료의 수직 유효응력에 따른 침하량 변화결과를 서로 다른 상대밀도에 대하여 비교하였다.



[그림 5.2] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 침하량 (화성 봉담 현장)

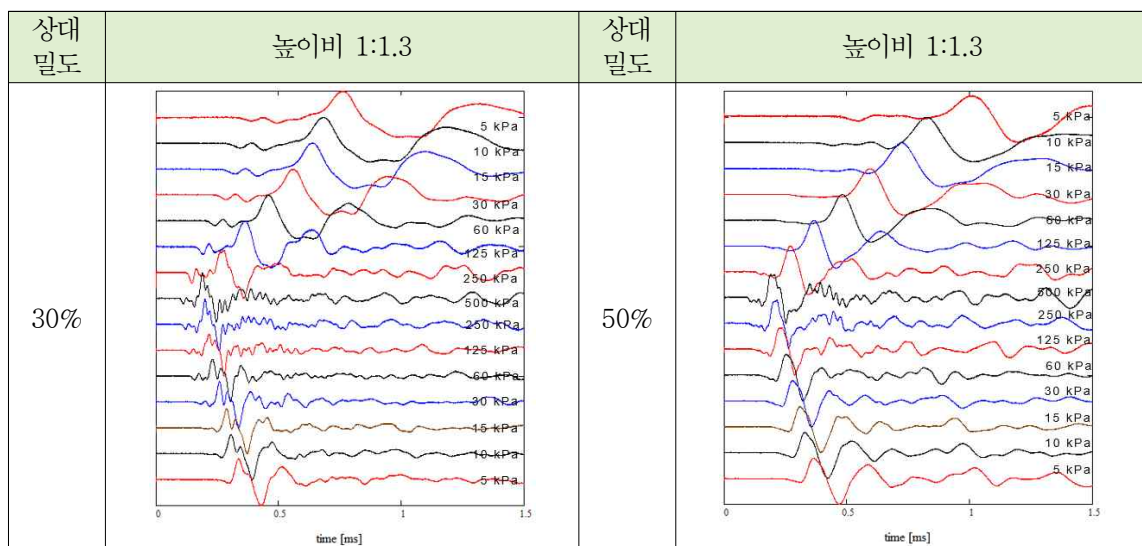


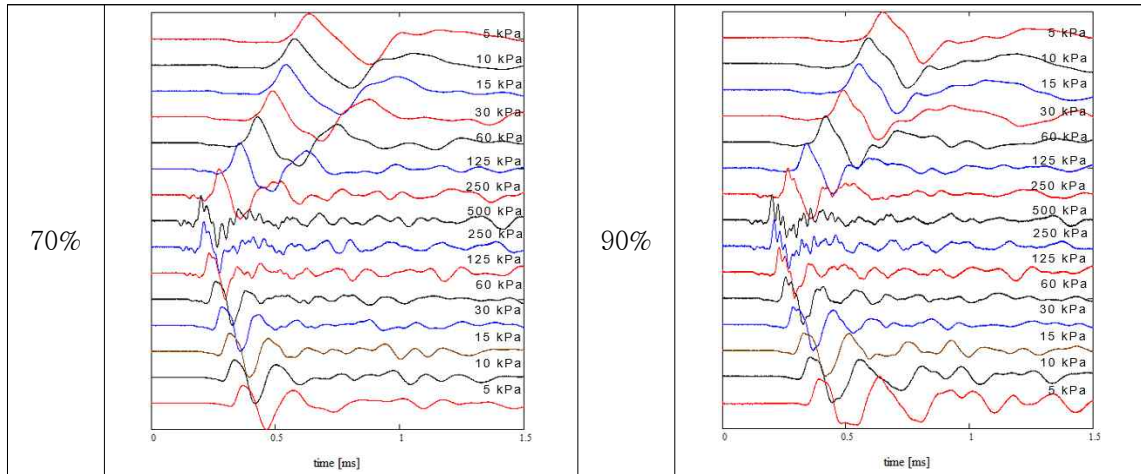
[그림 5.3] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 침하량 (파주 운정 현장)



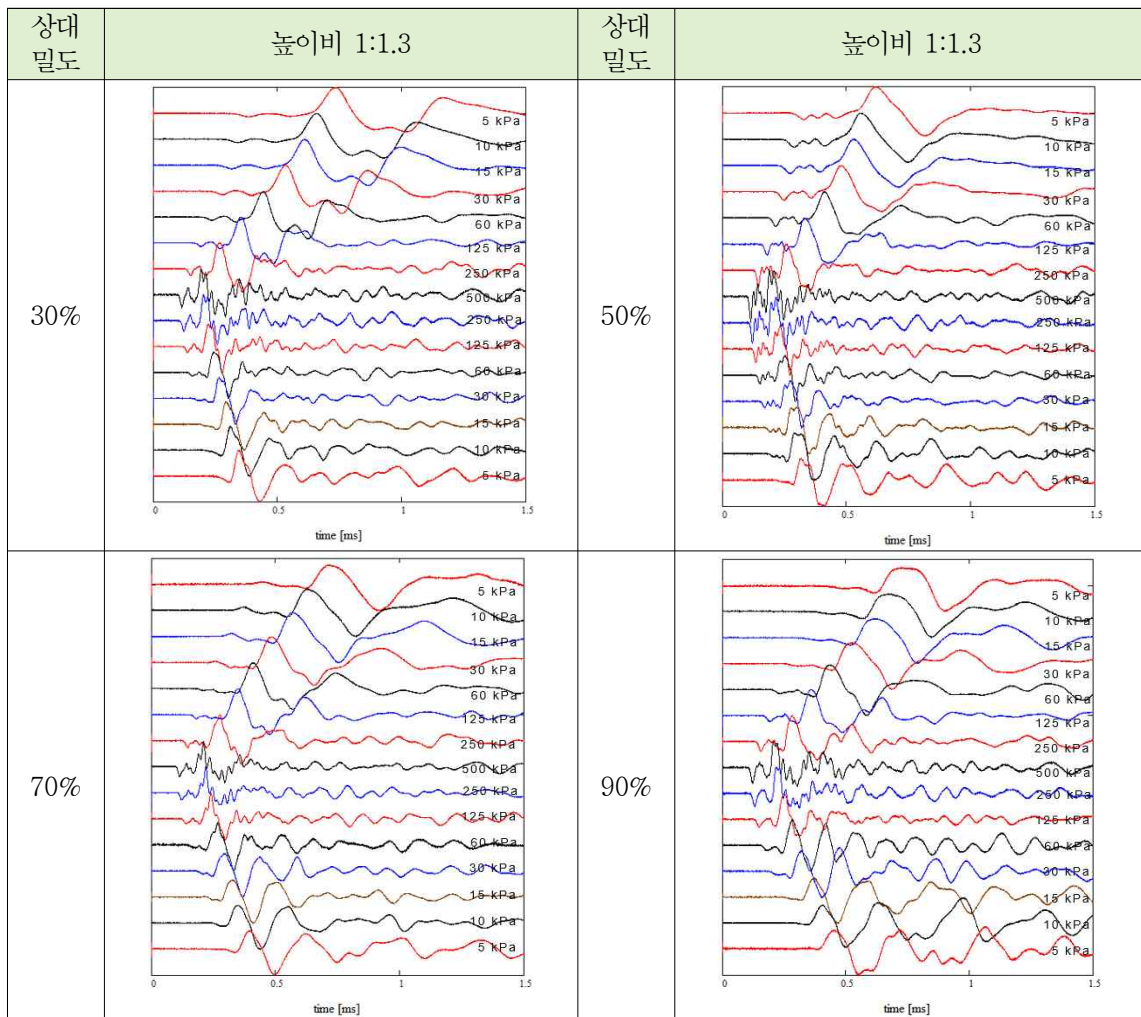
[그림 5.4] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 침하량 (세종 연동 현장)

그림 5.5, 5.6, 5.7은 각 현장에서 채취된 시료를 하중 단계별로 측정된 전단파 신호이다. 하중은 5 kPa을 시작으로 500 kPa 로딩 하였으며, 최대하중에 도달한 뒤 다시 5 kPa 까지 언로딩을 하며 압밀셀 상하부에 설치된 벤더를 통해 전단파를 측정하였다. 또한 상대밀도를 변화시키며 전단파의 초기도달시간을 측정하였다.

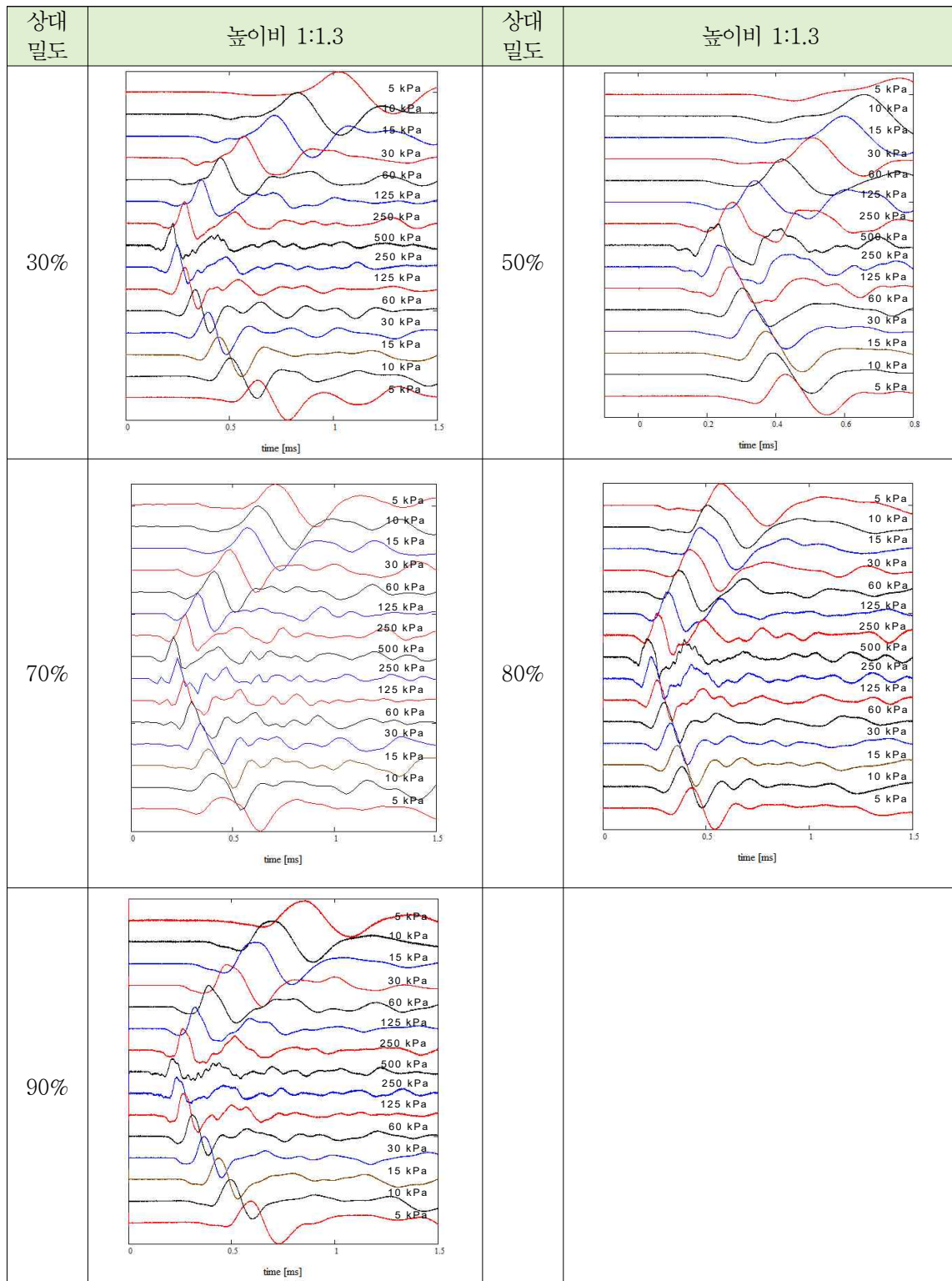




[그림 5.5] 상대밀도별 하중단계에 따른 전단파 신호 (화성 봉담 현장)



[그림 5.6] 상대밀도별 하중단계에 따른 전단파 신호 (파주 운정 현장)



[그림 5.7] 상대밀도별 하중단계에 따른 전단파 신호 (세종 연동 현장)

5.2.3 결과 분석

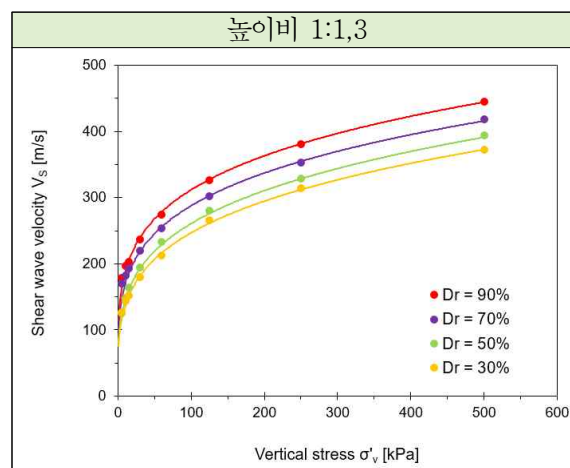
탄성파의 전파는 구조적 변화 없이 매질의 상태를 평가하는 데 사용된다. 이러한 탄성파 중 전단파는 전파 방향과 입자의 이동방향의 유효응력에 영향을 받으며 (Roesler, 1979; Knox et al., 1982; Yu and Richart, 1984), 압밀에서의 전단파는 수직방향으로 전파되므로, 전단파속도 (V_s)는 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^\beta \quad (\text{식 5.1})$$

여기서, σ'_v : 수직방향의 유효응력
 P_a : 유효응력과 같은 단위의 대기압
 α, β : 실험적으로 결정되는 계수 및 지수

α 계수는 입자들 사이의 접촉 거동, 입자의 재료적 특성, 그리고 패킹의 형태에 영향을 받으며, β 지수는 크기, 모양 그리고 구조 등의 입자의 접촉효과에 의해 제어 된다 (Santamarina et al., 2001; Lee et al., 2005)

그림 5.8은 화성 현장 시료에 대하여 높이비 1:1.3의 상대밀도별 수직 유효 응력과 전단파속도의 관계이며, 이를 서로 다른 상대밀도를 가지는 시료에 대해 응력에 따른 전단파속도를 표 5.3과 같이 나타냈다. 측정된 전단파속도를 바탕으로 상대밀도별로 시료의 α 계수 산정 값을 표 5.4에, β 지수 산정 값을 표 5.5에 나타내었다.



[그림 5.8] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 (화성 봉담)

[표 5.3] 상대밀도별 응력-전단파속도 (화성 봉담, 높이비 1.3:1)

상대밀도 [%]	30%	50%	70%	90%
응력 [kPa]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]
5	126.64	125.06	169.64	178.54
10	143.72	148.26	182.61	197.00
15	152.53	164.54	193.08	203.31
30	179.63	194.05	219.53	237.02
60	213.05	233.26	253.78	274.42
125	265.96	280.82	302.46	325.84
250	313.91	328.78	353.23	380.67
500	372.51	394.01	418.84	444.67

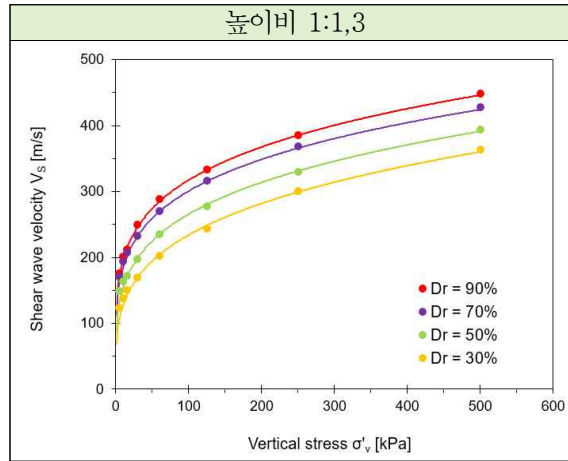
[표 5.4] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수 산정 값 (화성 봉담)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
높이비 1:1.3	75.9m/s	81.7m/s	100.2m/s	113.2m/s

[표 5.5] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 β 지수 산정 값 (화성 봉담)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
높이비 1:1.3	0.256	0.252	0.229	0.220

그림 5.9는 파주 현장 시료에 대하여 높이비 1:1.3의 상대밀도 별 수직 유효 응력과 전단파속도의 관계이며, 이를 서로 다른 상대밀도를 가지는 시료에 대해 응력에 따른 전단파속도를 표 5.6과 같이 나타냈다. 측정된 전단파속도를 바탕으로 상대밀도별로 시료의 α 계수 산정 값을 표 5.7에, β 지수 산정 값을 표 5.8에 나타내었다.



[그림 5.9] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 (파주 운정)

[표 5.6] 상대밀도별 응력-전단파속도 (파주 운정, 높이비 1.3:1)

상대밀도 [%]	30%	50%	70%	90%
응력 [kPa]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]
5	123.91	149.07	170.50	176.10
10	137.81	163.53	193.54	201.54
15	150.64	172.02	207.79	211.70
30	170.19	197.29	233.36	250.23
60	202.02	235.33	270.26	288.67
125	243.99	277.58	316.05	333.32
250	300.61	330.28	368.09	385.73
500	363.91	394.43	427.55	448.01

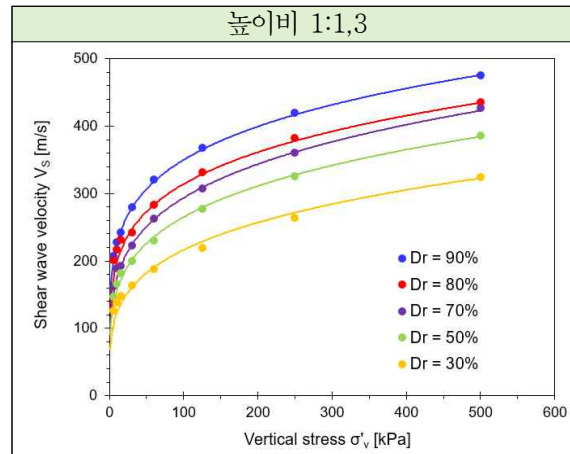
[표 5.7] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수 산정 값 (파주 운정)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
높이비 1:1.3	68.1m/s	87.5m/s	112.2m/s	119.5m/s

[표 5.8] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 β 지수 산정 값 (파주 운정)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
높이비 1:1.3	0.268	0.241	0.214	0.212

그림 4.10은 세종 현장 시료에 대하여 높이비 1:1.3의 상대밀도 별 수직유효응력과 전단파속도의 관계이며, 이를 서로 다른 상대밀도를 가지는 시료에 대해 응력에 따른 전단파속도를 표 5.9와 같이 나타냈다. 측정된 전단파속도를 바탕으로 상대밀도별로 시료의 α 계수 산정 값을 표 5.10에, β 지수 산정 값을 표 5.11에 나타내었다.



[그림 5.10] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 (세종 연동)

[표 5.9] 상대밀도별 응력-전단파속도 (세종 연동, 높이비 1.3:1)

상대밀도 [%]	30%	50%	70%	80%	90%
응력 [kPa]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]	전단파속도 [m/s]
5	126.49	147.24	162.55	201.42	206.87
10	138.81	166.59	189.03	217.02	227.48
15	147.86	181.64	192.36	230.87	241.95
30	163.57	200.00	222.38	242.04	279.51
60	187.99	230.49	263.39	283.54	320.32
125	219.67	277.06	307.89	331.78	367.91
250	264.35	325.31	361.08	382.81	420.35
500	324.52	386.54	426.89	436.02	475.56

[표 5.10] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수 산정 값 (세종 연동)

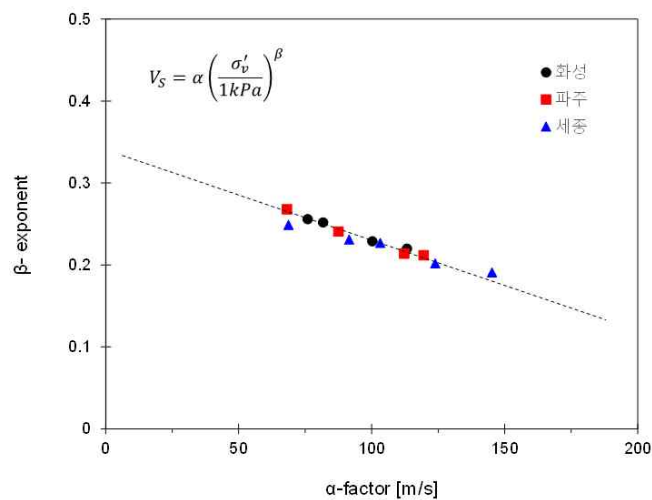
상대밀도	30%	50%	70%	80%	90%
높이비 1:1.3	68.7m/s	91.5m/s	103.2m/s	123.9m/s	145.2m/s

[표 5.11] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 β 지수 산정 값 (세종 연동)

상대밀도	30%	50%	70%	80%	90%
높이비 1:1.3	0.249	0.231	0.227	0.202	0.191

5.2.4 결론

본 과업에서는 실내시험을 통해 계산된 α 계수 및 β 지수를 이용하여 5 ~ 500 kPa 까지의 수직 응력에 따른 전단파 속도를 식 3.1을 이용하여 추세선 형태로 나타내었다. 추세선은 범위 내 모든 수직 응력에 대한 전단파속도를 나타내기 위함이므로, α 계수 및 β 지수를 이용한 전단파속도 함수(식 5.1)로 계산한 결과와 실내시험에서 측정된 실제 수직 응력에 따른 전단파속도와는 다소 차이가 있으나, 이는 무시해도 되는 정도로 고려된다. 각 현장의 시료로부터 계산된 상대밀도별 수직 응력에 따른 α 계수와 β 지수를 정리하여 그림 5.11과 같이 나타내었으며, 해당 결과는 직선적인 경향을 보여준다.



[그림 5.11] 각 현장의 상대밀도별 수직 유효 응력에 따른 α 계수와 β 지수

화성과 파주 현장의 시료의 경우 세종 현장의 시료에 비해 최소, 최대 간극비가 크기 때문에 동일한 수직 응력에서 더 큰 변형이 발생하는 모습을 보여주며, 같은 상대밀도와 유효 응력에서 전단파속도가 최대 20%까지 차이가 발생한다. 이는 화성과 파주 현장의 경우 아파트 건설현장으로 성토재료의 품질기준을 통과한 흙을 사용하였으나, 세종 현장의 경우 사토장으로서 기준에 적합한 성토재료가 아닌 재료를 성토에 사용하였기 때문에 발생한 문제라고 판단된다.

수직 응력이 5kPa 이상일 때, 화성과 파주 현장의 α 계수 및 β 지수를 이용한 성토층 전단파 산정 값의 오차는 10% 미만이다. 따라서 본 연구와 유사한 조건의 건설 현장에는 해당 현장의 상대밀도 및 화성과 파주 현장의 α 계수 및 β 지수를 이용하여 성토층 전단파속도를 산정하는 것이 합리적이라고 판단되며, 두 경우 모두를 계산하여 작은 값을 사용하는 안전 측 설계를 권장한다.

제 6 장

전단파속도 수치해석

LANDSLIDE INITIATION

&

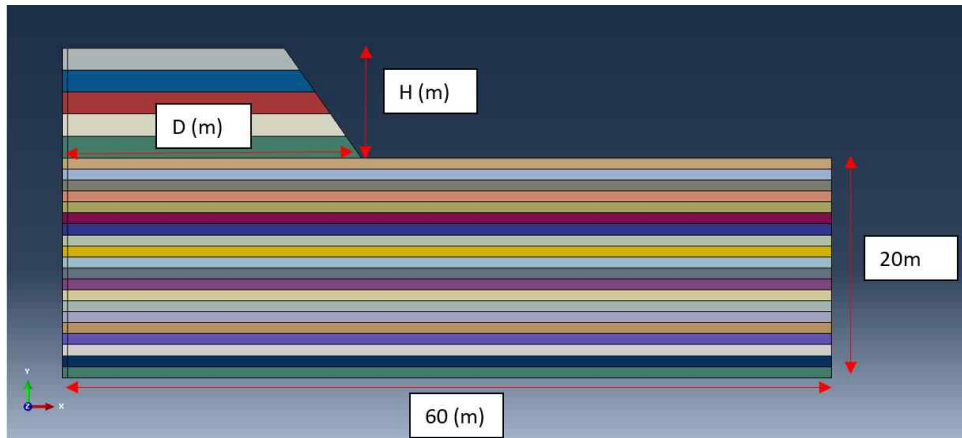
제6장 전단파속도 수치해석

6.1 수치해석 개요

유한요소법(FEM)은 공학 및 수학적 모델링 중 발생하는 편미분 방정식을 수치적으로 해석하는데 널리 사용되는 방법이다. 해석하기 위해 FEM은 큰 시스템을 유한 요소라고 하는 더 작고 단순한 부분으로 세분화한다. 이것은 공간 차원의 특정 공간 이산화에 의해 달성되며, 이는 개체의 메쉬(mesh) 구성에 의해 구현된다. 즉, 유한 개수의 점을 갖는 솔루션에 대한 수치영역을 뜻한다. 경계값 설정의 문제로 FEM 공식화(formulation)는 최종적으로 대수 방정식 시스템을 생성한다. 이 방법은 영역에 대해 알려지지 않은 함수를 근사화한다. 이러한 유한 요소를 모델링하는 간단한 방정식은 전체 문제를 모델링하는 더 큰 방정식 시스템으로 조합된다. 그 후 FEM은 변동 미적분학을 통해 관련 오류 함수를 최소화하여 솔루션을 근사화한다 (Logan, 2011). 이러한 FEM은 토질역학의 여러 문제에 적용되고 있으며, 사면 안정성 (Török et al., 2018), 성토(Loganathan et al., 1993), 지지력(Kotake et al., 2001), 동적거동(Li et al., 2003), 그리고 투수(Ouzaid et al., 2020) 등의 문제들을 해결하기 위해 활용된 바 있다

6.1.1 기하학적 구조(Geometry)

본 연구과제에서는 Abaqus 프로그램(Smith, 2009)을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 모델링은 기하학적 대칭 구조로서 전체 영역을 절반으로 모델링하였다. 세 현장은 그림 6.1에서처럼 동일한 2차원 기하학적 구조를 공유한다. 그림 6.1은 경계 효과(boundary effect)를 무시할 수 있을 만큼 충분히 큰 수치로 설정하였으며, 성토고 (0, 2, 4, 6, 8, 10m)와 성토 폭(20, 30, 50m) 해당하는 시뮬레이션 결과를 분석하였다.



[그림 6.1] 화성 봉담 현장의 2차원 모델

6.1.2 재료(Material)

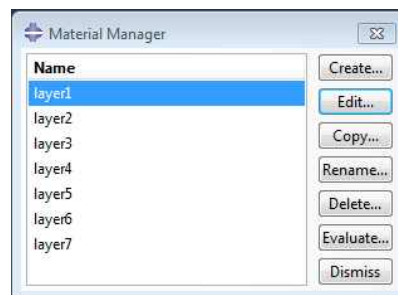
수치해석의 입력 값들을 표 6.1에 정리하였다. 표 6.1은 각 층의 두께, 건조밀도, 탄성계수, 포아송비를 포함한 기본 특성들을 나타낸다. 그림 6.2는 각 층별 재료의 특성을 보여주며, 구간은 균질한 솔리드 형태로 지정하였다.

[표 6.1] 각 현장의 층별 기본 특성 입력 값

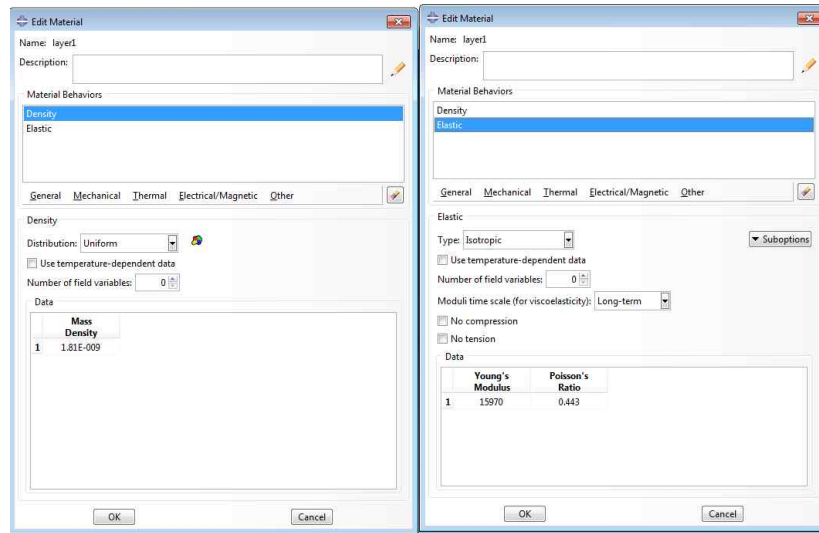
Layers			Thickness (m)	Dry density (kg/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio ()
화성	Embankment	Layer 1	2.00	1.66	292.2	0.349
		Layer 2	1.00	1.75	325.9	0.363
		Layer 3	0.43	1.67	345.5	0.387
	Layer 4		0.57	1.67	375.2	0.406
	Layer 5		1.00	1.67	385.6	0.423
	Layer 6		1.00	1.59	420.9	0.426
	Layer 7		1.00	1.79	697.2	0.395
	Layer 8		1.00	1.82	749.0	0.392
	Layer 9		1.00	1.90	905.9	0.398
	Layer 10		1.00	1.77	930.7	0.403
	Layer 11		1.00	1.95	1100.0	0.407
	Layer 12		1.00	1.76	1048.6	0.410
	Layer 13		1.00	1.75	1081.7	0.412
	Layer 14		1.00	1.89	1208.5	0.414
	Layer 15		1.00	1.21	790.8	0.415

	Layer 16		1.00	1.24	827.2	0.416
	Layer 17		1.00	1.52	795.6	0.434
	Layer 18		1.00	1.66	3285.6	0.390
파주	Embankment	Layer 1	2.00	1.81	248.6	0.385
		Layer 2	0.93	1.42	278.5	0.385
	Layer 3		0.07	1.89	317.2	0.375
	Layer 4		0.57	1.93	327.3	0.402
	Layer 5		1.00	1.90	373.7	0.395
	Layer 6		1.00	1.64	685.6	0.401
	Layer 7		1.00	1.88	816.8	0.405
	Layer 8		1.00	1.75	907.4	0.409
	Layer 9		1.00	1.80	969.7	0.411
	Layer 10		1.00	2.03	1012.6	0.412
	Layer 11		1.00	1.64	1043.3	0.413
	Layer 12		1.00	2.39	1065.0	0.414
	Layer 13		1.00	2.24	1753.9	0.370
	Layer 14		1.00	1.75	3031.1	0.407
	Layer 15		1.00	2.10	6409.7	0.341
	Layer 16		1.00	2.20	6491.7	0.344
	Layer 17		1.00	2.24	6557.1	0.346
	Layer 18		1.00	2.68	6609.2	0.348
세종	Layer 1		3.80	1.712	225	0.453
	Layer 2		2.20	1.886	365	0.466
	Layer 3		5.00	2.033	448	0.482
	Layer 4		8.8	2.168	666	0.482

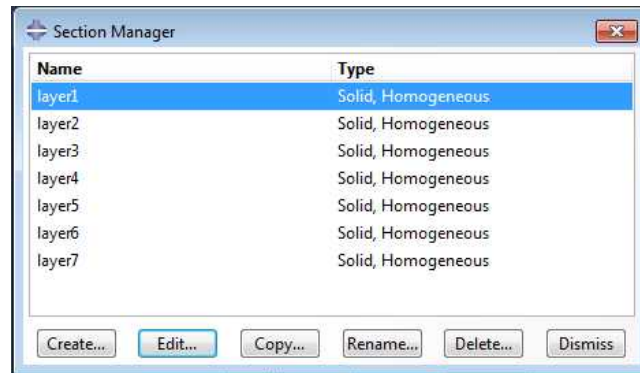
(a) 재료 관리창



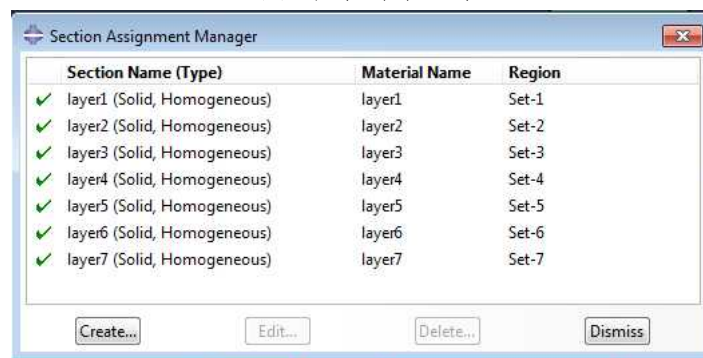
(b) 재료 특성



(c) 구역 관리창



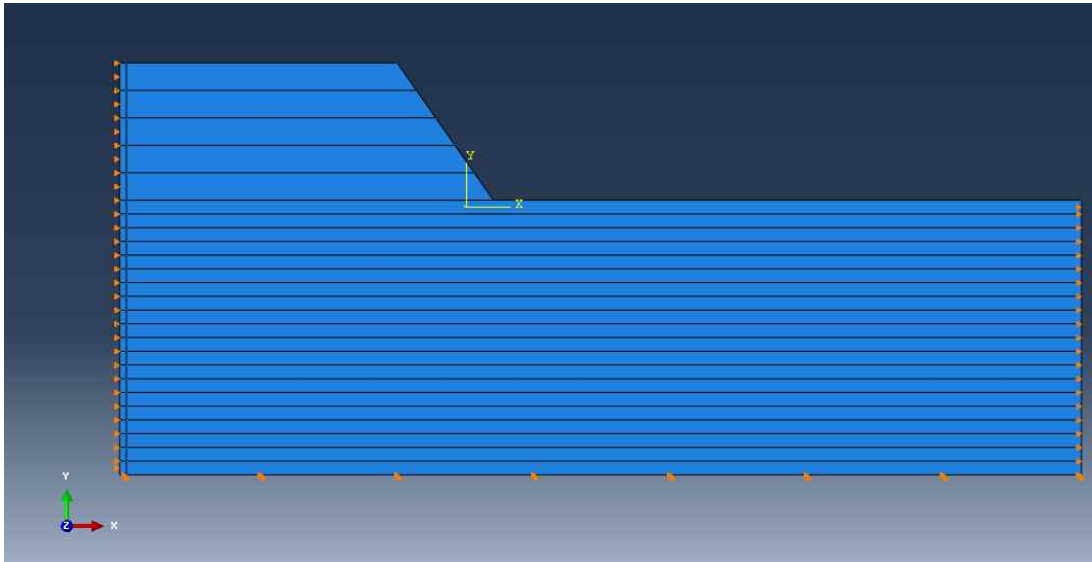
(d) 구역 배치 관리



[그림 6.2] 재료 및 구역

6.1.3 경계 조건(Boundary conditions)

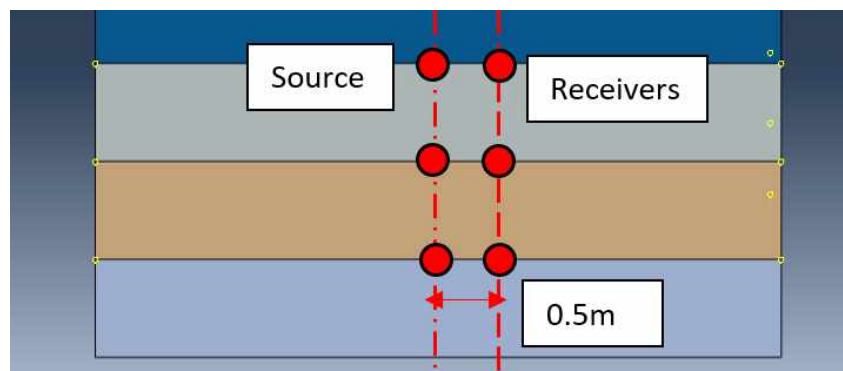
경계 조건을 그림 6.3과 같이 나타내었으며, 하부 경계 조건은 수직 및 수평 변위를 0으로, 측면 경계 조건은 수평 변위만을 0으로 설정하였다.



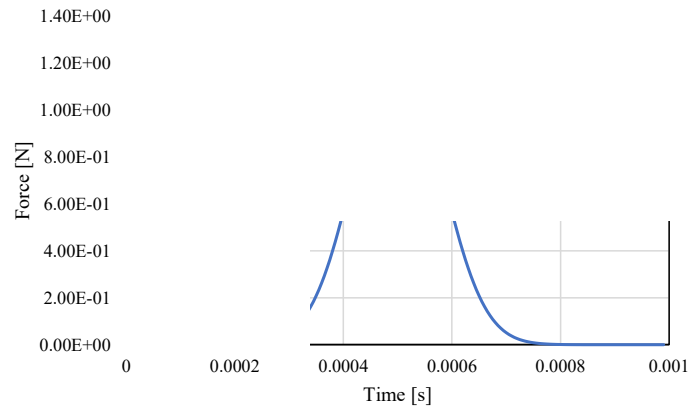
[그림 6.3] 경계 조건

6.1.4 탄성과 전파

탄성과 전파 시뮬레이션을 위해 발신 지점에서 해머 트리거 펄스가 입력되고 수신기는 그림 6.4와 같이 1m 깊이마다 배치하였다. 입력 펄스는 그림 6.5와 같이 정규 분포의 함수이며, 중력가속도는 -9.8m/s^2 이 y방향으로 적용되었다.



[그림 6.4] 탄성과 전파 발신 및 수신 지점 설정

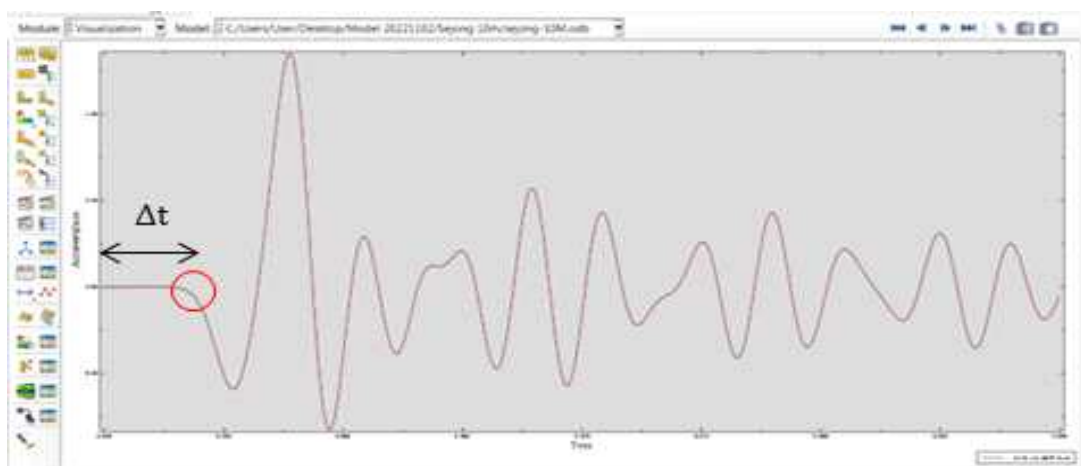


[그림 6.5] 입력 펄스

전단파 속도는 소스에서 매질을 통해 전달된 S파 신호를 수신기에서 감지하며, 가속도와 시간으로 플롯된 그림 6.6과 같이 나타난다. 그림 6.4의 표시된 빨간 원 지점과 같이 1차로 변화하는 점을 최초 도달시간으로 판단할 수 있다(Lee and Santamarina, 2003). S파 속도는 최초 도착(Δt)과 소스와 수신기 거리(0.5m로 고정) 사이의 거리를 사용하여 전단파속도를 구하게 된다(식 6.1).

$$V_s = \left(\frac{S}{\Delta t} \right) \quad (\text{식 6.1})$$

여기서, V_s : 전단파 속도
 S : 소스와 수신기의 거리
 Δt : S파의 최초 도착 시간



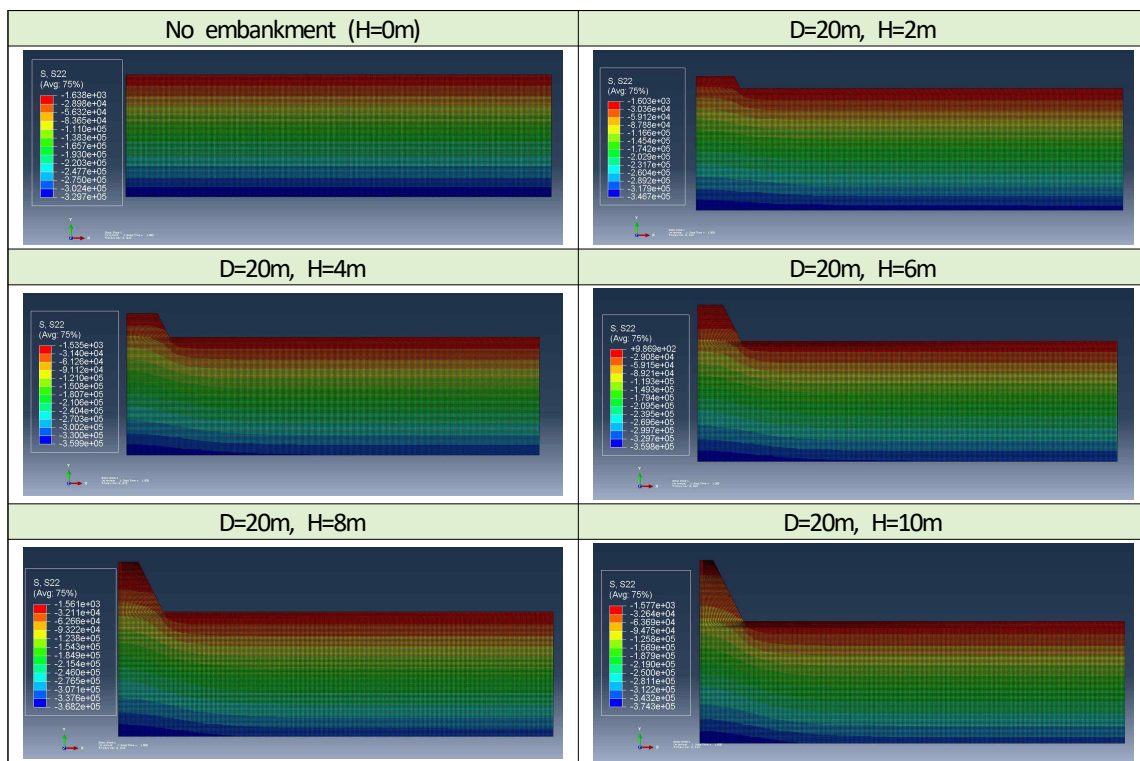
[그림 6.6] 수신기에서 감지된 S파 신호

6.2 수치해석 현장적용 결과

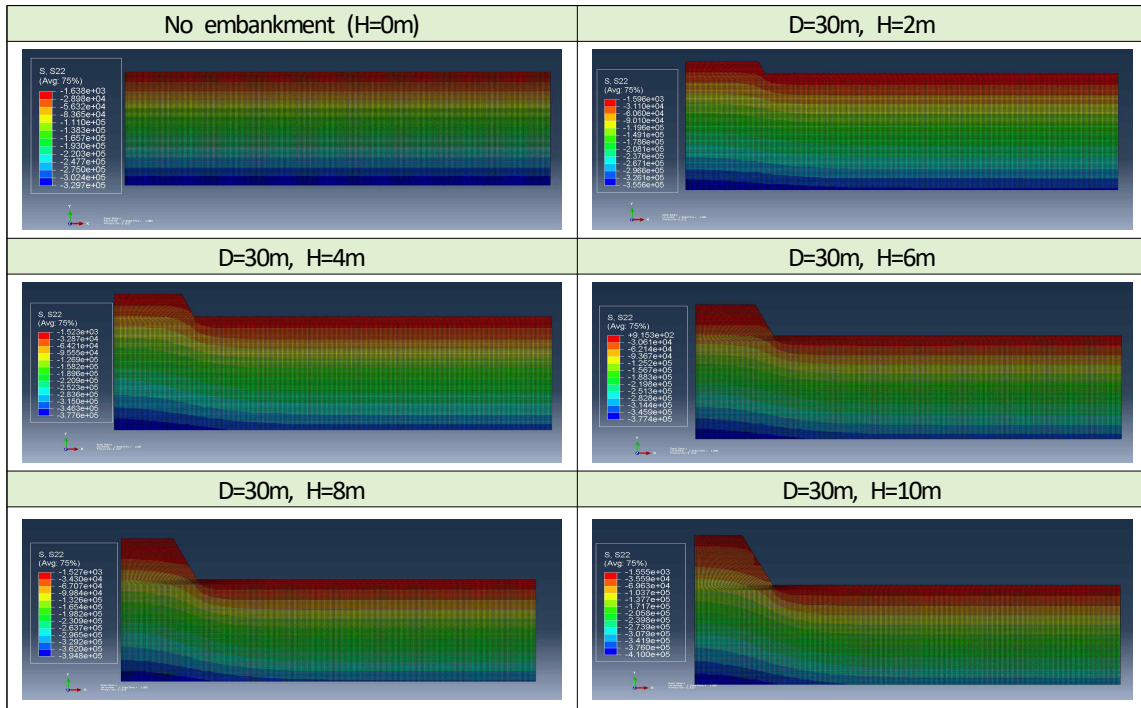
6.2.1 화성 봉담 현장

1) 수직 응력(Vertical stress)

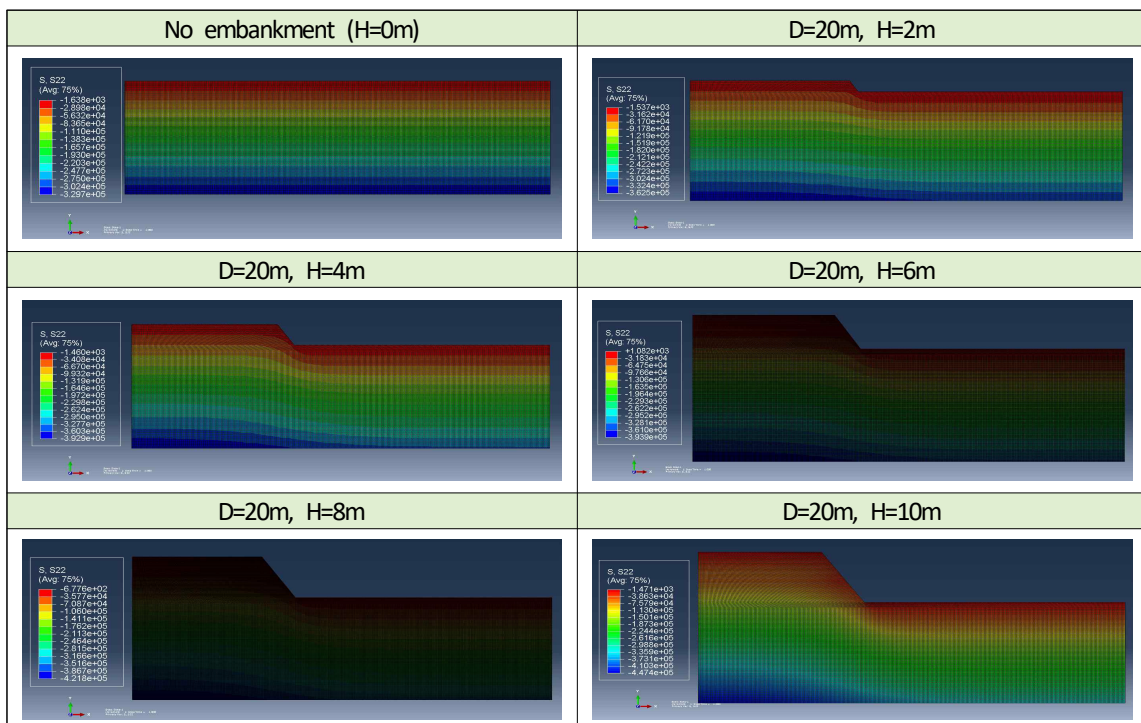
성토고와 성토폭에 따른 수직응력의 변화를 그림 6.7, 6.8, 6.9와 같이 나타내었다. 성토폭은 20, 30, 50m 로 설정하였으며, 각 성토폭에 따른 성토고를 0, 2, 4, 6, 8, 10m로 변경하며 수직응력 변화를 분석하였다. 또한, 성토층과 원지반의 심도별 수직응력을 표 6.2, 6.3, 6.4와 같이 나타냈다. 현장에서 파악된 토사층의 깊이를 근거로, 토사층에 해당하는 지반에 대해서 분석을 수행하였다.



[그림 6.7] 성토폭= 20m, 성토고= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (화성)



[그림 6.8] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (화성)



[그림 6.9] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (화성)

[표 6.2] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (화성)

Elevation (m)	D=20m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						29
6					30	45
4				31	47	53
2			34	50	56	73
0		36	52	65	86	100
-1	18	55	67	80	99	113
-2	34	68	82	95	113	126
-3	50	83	96	109	126	138
-4	67	100	110	124	137	152
-5	85	116	125	140	150	166
-6	104	134	141	156	167	181
-7	121	150	157	171	185	195
-8	140	168	175	188	201	210
-9	155	180	188	203	216	225
-10	174	196	204	219	230	240
-11	192	213	220	235	247	255
-12	204	228	235	247	257	265
-13	216	239	246	257	267	275
-14	231	254	259	270	280	288

[표 6.3] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (화성)

Elevation (m)	D=30m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						34
6					34	65
4				34	65	100
2			34	66	100	134
0		36	69	101	117	167
-1	18	52	85	117	148	182
-2	34	69	101	134	164	199
-3	50	85	117	152	182	217
-4	67	102	135	171	199	235
-5	85	120	152	188	218	252
-6	104	138	171	207	235	271
-7	121	155	189	224	254	287
-8	140	175	207	241	271	304
-9	155	192	225	259	288	321
-10	174	209	242	271	305	332

-11	192	227	259	283	317	343
-12	204	240	271	298	328	357
-13	216	251	283	314	343	375
-14	231	266	298	329	358	389

[표 6.4] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (화성)

Elevation (m)	D=50m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						34
6					34	65
4				34	65	100
2			34	66	100	135
0		36	69	101	118	168
-1	18	52	85	117	144	183
-2	34	69	101	135	159	200
-3	50	85	117	152	178	218
-4	67	102	136	171	195	236
-5	85	120	153	189	214	253
-6	104	138	172	207	230	272
-7	121	155	190	225	250	288
-8	140	175	208	242	267	306
-9	155	192	226	260	284	322
-10	174	209	243	272	301	333
-11	192	227	260	284	314	344
-12	204	240	272	299	324	359
-13	216	251	284	315	340	376
-14	231	266	299	331	354	391

2) 전단파 속도(Shear wave velocity)

성토평과 성토평에 따른 수직응력의 변화를 그림 6.6, 6.7, 6.8과 같이 나타내었다. 성토평은 20, 30, 50m 로 설정하였으며, 각 성토평에 따른 성토평을 0, 2, 4, 6, 8, 10m로 변경하며 수직응력 변화를 분석하였다. 또한, 성토평과 원지반의 심도별 전단파속도를 표 6.5, 6.6, 6.7과 같이 나타냈다. 현장에서 파악된 토사층의 깊이를 근거로, 토사층에 해당하는 지반에 대해서 분석을 수행하였다.

[표 6.5] 성토평= 20m, 성토평고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (화성)

Elevation (m)	D=20m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						190.7
6					190.7	219.9
4				192.8	212.9	229.2
2			211.8	208.3	218.3	225.4
0		220.4	215.3	226.5	223.7	223.2
-1	182.4	227.1	236.6	246.0	256.1	264.3
-2	199.6	248.6	256.1	266.6	274.6	289.0
-3	215.2	268.1	285.8	295.9	304.7	314.4
-4	256.1	311.3	333.1	345.6	353.3	360.8
-5	280.4	339.6	348.9	367.4	386.0	397.6
-6	308.5	365.4	375.5	403.3	419.4	427.5
-7	320.1	374.0	397.1	421.5	426.6	438.0
-8	328.9	387.2	403.2	428.5	438.4	456.9
-9	338.6	397.6	412.8	436.8	442.7	461.9
-10	343.1	400.7	418.4	439.8	454.5	471.8
-11	347.7	406.3	422.6	450.1	459.1	477.0
-12	357.4	424.4	432.8	454.5	467.6	488.9
-13	360.8	432.6	448.0	463.0	478.1	494.2
-14	362.6	440.2	454.0	468.4	481.6	498.9

[표 6.6] 성토평= 30m, 성토평고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (화성)

Elevation (m)	D=30m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						211.8
6					211.8	231.5
4				211.8	231.5	241.3
2			211.8	231.5	237.3	237.3
0		220.4	231.5	238.4	243.2	248.0
-1	182.4	249.6	259.6	267.4	275.4	278.2
-2	199.6	273.2	281.4	289.8	298.5	307.5
-3	215.2	286.7	295.3	304.2	316.4	322.7
-4	256.1	359.3	370.1	384.9	392.6	396.5
-5	280.4	365.2	383.4	402.6	410.7	423.0
-6	308.5	388.8	408.2	424.5	441.5	454.8
-7	320.1	415.6	436.4	458.2	466.5	481.3
-8	328.9	425.5	438.3	455.8	474.1	488.3
-9	338.6	436.5	449.6	463.1	481.6	491.2

-10	343.1	440.4	453.6	467.2	487.2	500.8
-11	347.7	447.0	464.9	476.5	497.8	507.9
-12	357.4	458.8	475.6	484.6	504.5	512.6
-13	360.8	461.0	479.4	493.4	510.5	518.0
-14	362.6	467.7	483.7	497.4	514.1	521.9

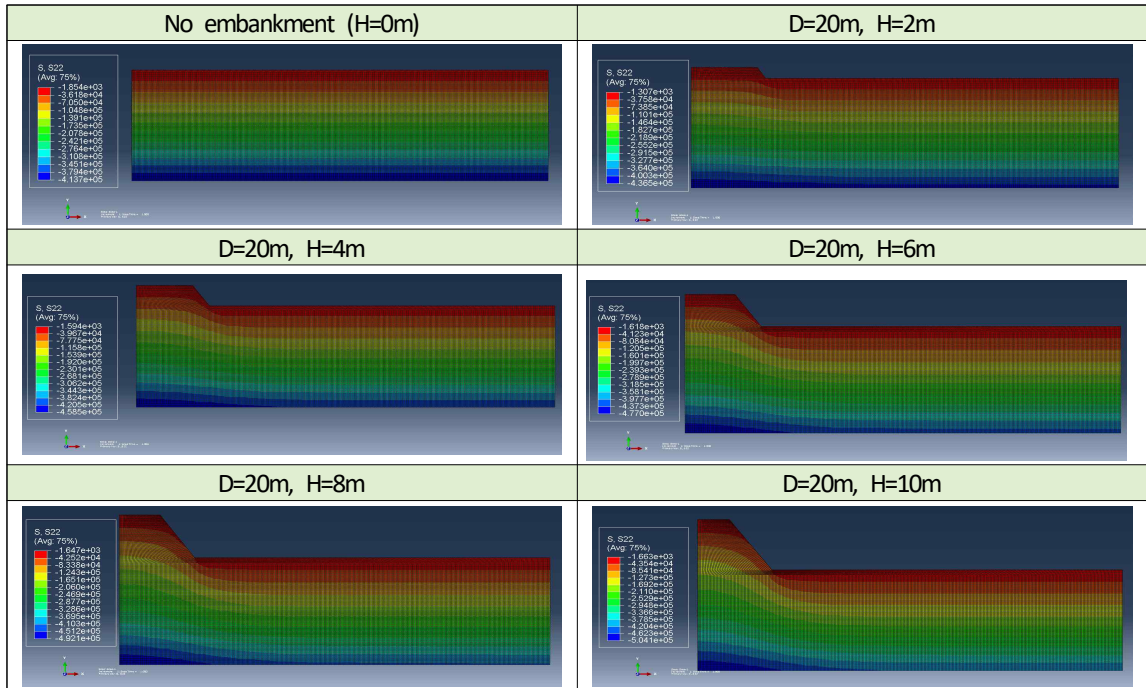
[표 6.7] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (화성)

Elevation (m)	D=50m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						211.8
6					211.8	231.5
4				211.8	231.5	241.3
2			211.8	231.5	237.3	238.2
0		220.4	231.5	238.4	243.7	249.5
-1	182.4	249.6	259.6	268.2	276.2	279.3
-2	199.6	273.2	282.8	290.7	299.4	309.0
-3	215.2	287.6	296.8	304.8	318.0	324.0
-4	256.1	341.1	360.8	376.4	384.1	390.7
-5	280.4	366.3	384.6	404.2	411.5	425.1
-6	308.5	390.7	409.0	426.2	443.3	457.5
-7	320.1	416.4	430.6	443.6	458.9	470.2
-8	328.9	427.7	439.6	456.7	475.0	480.2
-9	338.6	438.7	451.8	464.0	480.6	486.2
-10	343.1	441.7	455.4	469.5	487.2	494.8
-11	347.7	447.9	465.8	485.9	500.3	507.9
-12	357.4	457.8	475.0	496.1	508.5	515.2
-13	360.8	463.1	477.1	500.4	516.4	522.4
-14	362.6	467.4	484.8	505.4	520.6	528.7

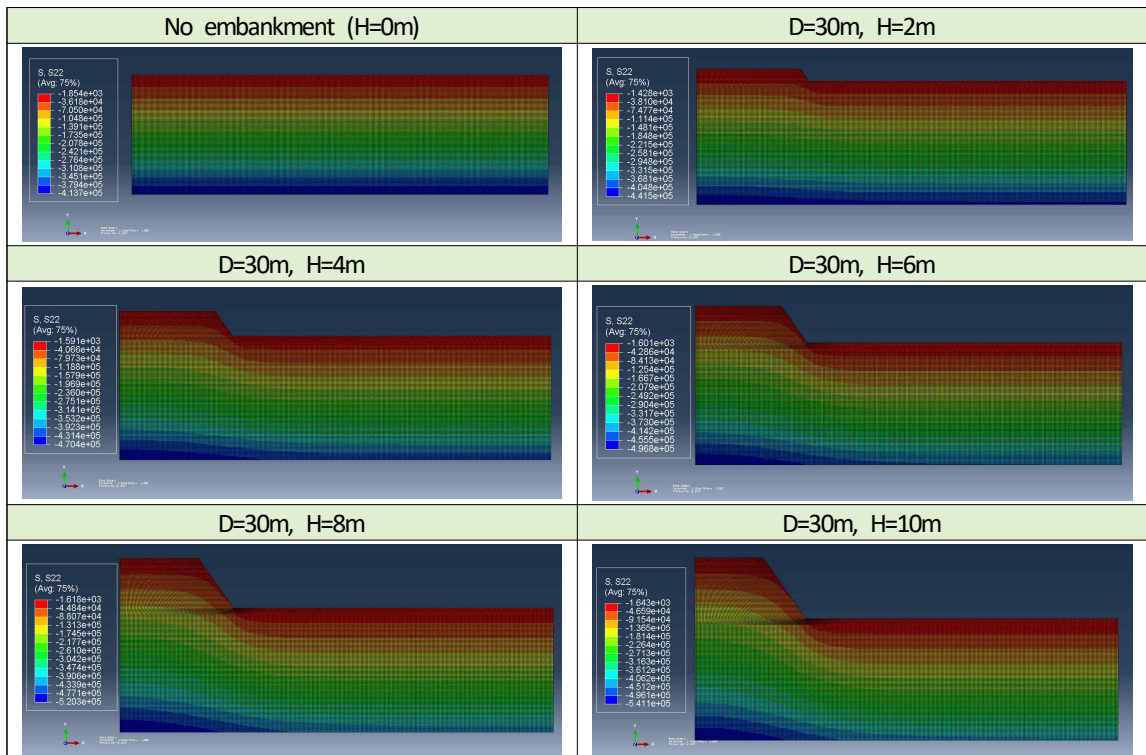
6.2.2 파주 운정 현장

1) 수직 응력(Vertical stress)

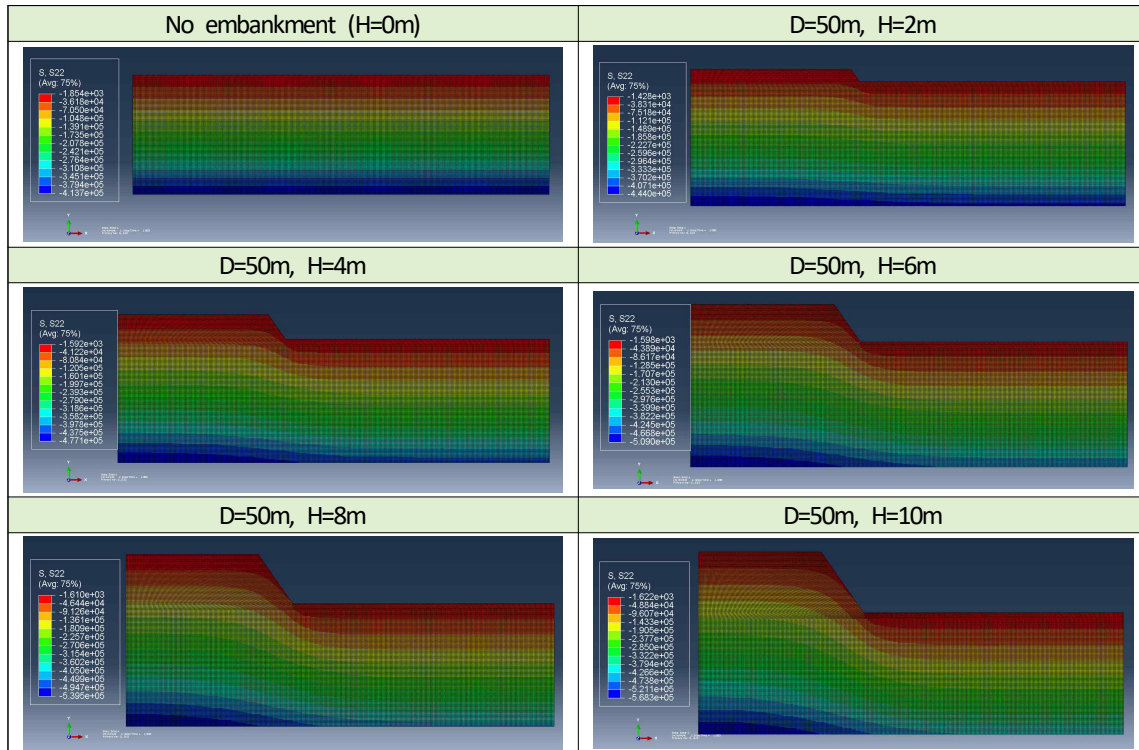
성토평과 성토평에 따른 수직응력의 변화를 그림 6.10, 6.11, 6.12와 같이 나타내었다. 성토평은 20, 30, 50m 로 설정하였으며, 각 성토평에 따른 성토평을 0, 2, 4, 6, 8, 10m로 변경하며 수직응력 변화를 분석하였다. 또한, 성토평과 원지반의 심도별 수직응력을 표 6.8, 6.9, 6.10과 같이 나타냈다. 현장에서 파악된 토사층의 깊이를 근거로, 토사층에 해당하는 지반에 대해서 분석을 수행하였다.



[그림 6.10] 성토평= 20m, 성토평고= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (파주)



[그림 6.11] 성토평= 30m, 성토평고= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (파주)



[그림 6.12] 성토평= 50m, 성토고= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (파주)

[표 6.8] 성토평= 20m, 성토고= 0~10m에 대한 수직응력 (파주)

Elevation (m)	D=20m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						36
6					37	68
4				37	71	99
2			37	72	104	129
0		34	69	103	132	155
-1	20	49	87	120	148	170
-2	39	71	106	138	164	186
-3	57	90	124	154	180	201
-4	74	106	139	169	194	214
-5	92	124	157	186	210	229
-6	110	141	173	201	224	242
-7	127	158	190	217	240	257
-8	147	177	208	234	256	273
-9	164	194	224	249	270	287

[표 6.9] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (파주)

Elevation (m)	D=30m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						36
6					37	70
4				37	72	105
2			37	72	108	140
0		34	68	104	139	173
-1	20	51	87	122	158	190
-2	39	70	105	141	176	211
-3	57	88	123	159	195	230
-4	74	105	140	175	210	244
-5	92	122	158	193	228	262
-6	110	139	175	210	246	280
-7	127	157	192	228	263	296
-8	147	176	212	247	281	314
-9	164	193	228	263	296	331

[표 6.10] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (파주)

Elevation (m)	D=50m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						36
6					37	71
4				37	73	107
2			37	73	109	142
0		34	69	105	141	175
-1	20	52	88	124	160	193
-2	39	71	107	143	179	212
-3	57	89	125	161	197	232
-4	74	106	142	178	213	247
-5	92	124	160	196	231	265
-6	110	141	177	213	248	283
-7	127	159	195	231	266	300
-8	147	179	215	250	285	319
-9	164	196	231	267	301	335

2) 전단파 속도(Shear wave velocity)

성토평과 성토평에 따른 수직응력의 변화를 그림 6.10, 6.11, 6.12와 같이 나타내었다. 성토평은 20, 30, 50m 로 설정하였으며, 각 성토평에 따른 성토평을 0, 2, 4,

6, 8, 10m로 변경하며 수직응력 변화를 분석하였다. 또한, 성토층과 원지반의 심도별 전단파속도를 표 6.11, 6.12, 6.13과 같이 나타냈다. 현장에서 파악된 토사층의 깊이를 근거로, 토사층에 해당하는 지반에 대해서 분석을 수행하였다.

[표 6.11] 성토평= 20m, 성토고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (파주)

Elevation (m)	D=20m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						189.0
6					189.6	193.3
4				189.6	197.6	202.9
2			189.6	197.9	205.7	221.2
0		183.9	191.2	199.5	215.6	232.1
-1	246.0	258.9	274.1	291.1	312.8	323.8
-2	338.9	346.3	367.3	381.8	412.4	441.5
-3	366.0	376.1	404.8	419.6	442.6	466.2
-4	385.0	401.8	424.3	436.5	464.4	486.6
-5	394.0	413.8	440.3	456.6	483.5	502.2
-6	402.1	428.8	450.7	465.8	493.5	518.4
-7	410.3	442.8	464.7	487.1	515.0	536.6
-8	416.0	453.7	483.5	501.6	530.5	547.5
-9	424.3	462.2	495.4	522.4	545.5	564.9

[표 6.12] 성토평= 30m, 성토고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (파주)

Elevation (m)	D=30m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						189.0
6					189.6	197.0
4				189.6	200.9	206.9
2			189.6	200.9	208.8	225.7
0		183.9	194.7	202.5	218.8	236.4
-1	246.0	263.1	278.9	295.6	319.2	328.7
-2	338.9	352.3	373.6	388.4	419.5	448.7
-3	366.0	383.8	411.0	427.3	440.1	475.7
-4	385.0	407.9	424.1	445.5	472.0	495.6
-5	394.0	421.4	429.7	464.5	488.4	511.9
-6	402.1	431.8	451.3	473.9	498.8	527.3
-7	410.3	441.2	449.9	495.5	510.2	545.9
-8	416.0	456.6	466.9	504.2	529.6	555.8
-9	424.3	469.7	480.9	519.3	545.5	572.5

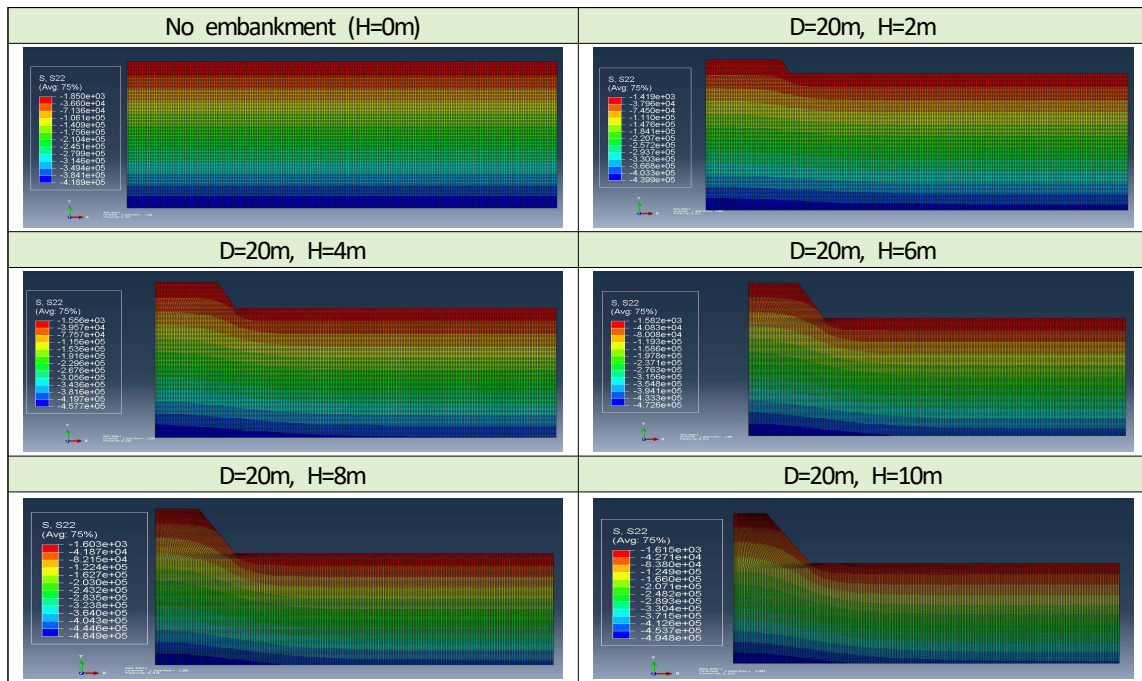
[표 6.13] 성토평= 50m, 성토고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (과주)

Elevation (m)	D=50m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						189.0
6					189.6	197.2
4				189.6	201.0	213.0
2			189.6	202.9	213.0	227.9
0		183.9	198.6	206.6	221.0	238.7
-1	246.0	265.7	281.6	298.5	322.4	338.5
-2	338.9	362.8	377.3	396.2	427.9	462.1
-3	366.0	395.3	415.1	435.8	453.3	480.5
-4	385.0	412.0	432.6	449.9	481.4	505.5
-5	394.0	425.6	452.6	469.1	497.3	522.2
-6	402.1	440.2	465.3	486.3	517.7	547.9
-7	410.3	450.6	473.4	500.5	532.5	560.3
-8	416.0	460.9	486.2	514.3	544.9	572.0
-9	424.3	472.7	495.7	524.6	555.6	580.3

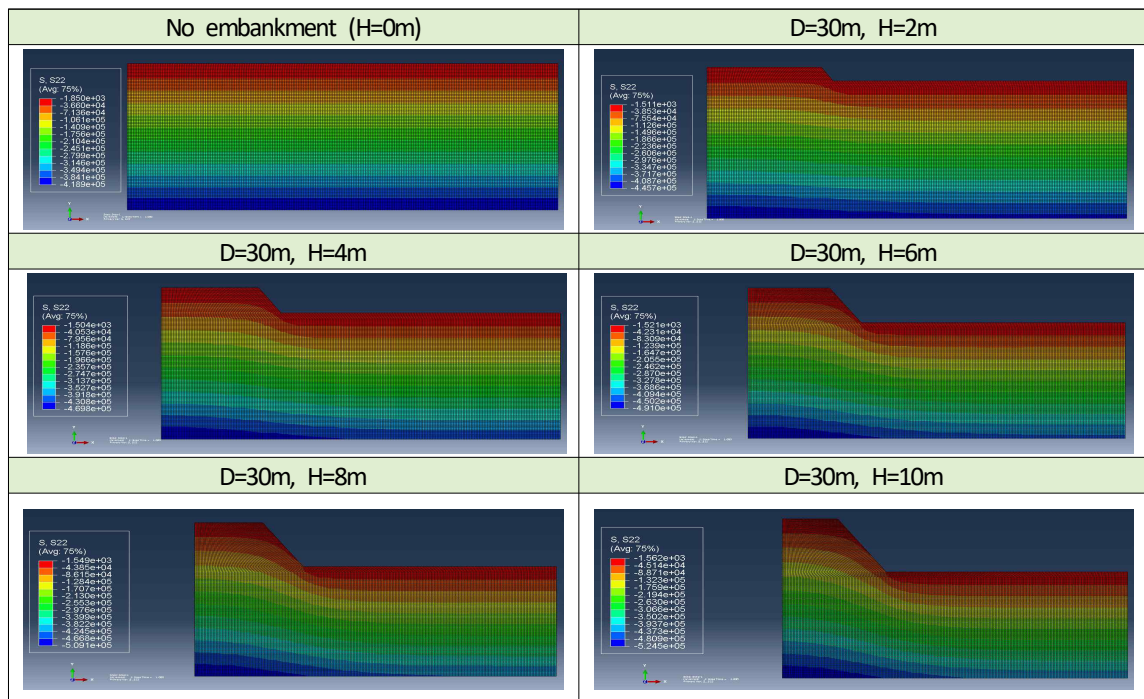
6.2.3 세종 연동 현장

1) 수직 응력(Vertical stress)

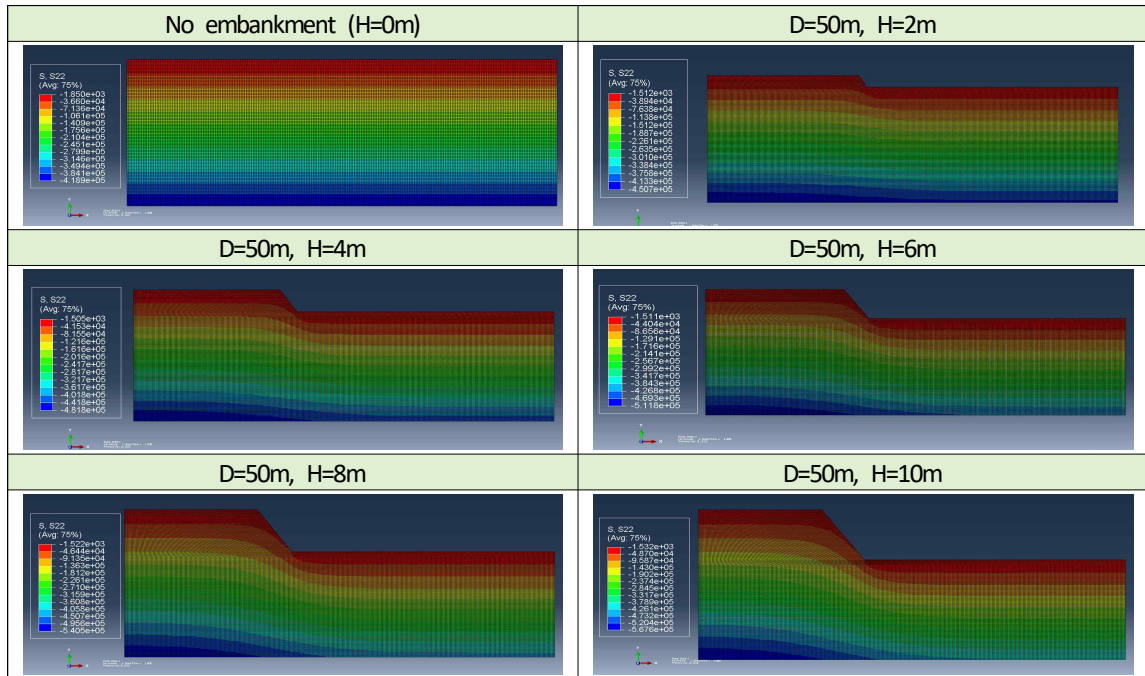
성토고와 성토평에 따른 수직응력의 변화를 그림 6.13, 6.14, 6.15와 같이 나타내었다. 성토평은 20, 30, 50m 로 설정하였으며, 각 성토평에 따른 성토고를 0, 2, 4, 6, 8, 10m로 변경하며 수직응력 변화를 분석하였다. 또한, 성토층과 원지반의 심도별 수직응력을 표 6.14, 6.15, 6.16과 같이 나타냈다. 현장에서 파악된 토사층의 깊이를 근거로, 토사층에 해당하는 지반에 대해서 분석을 수행하였다.



[그림 6.13] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (세종)



[그림 6.14] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (세종)



[그림 6.15] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 변화 (세종)

[표 6.14] 성토평= 20m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (세종)

Elevation (m)	D=20m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						30
6					32	62
4				34	65	87
2			35	67	95	117
0		36	69	99	124	141
-1	21	54	87	115	139	158
-2	40	73	105	133	156	174
-3	60	93	124	151	173	190
-4	80	113	143	168	189	206
-5	100	132	161	186	206	222
-6	120	151	180	203	222	239
-7	140	171	199	222	240	256
-8	162	192	218	240	259	273
-9	183	212	238	259	277	291
-10	204	233	258	278	295	309
-11	225	253	277	298	314	327
-12	247	274	297	317	333	346
-13	268	294	317	336	348	363
-14	289	315	337	355	370	382

[표 6.15] 성토평= 30m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (세종)

Elevation (m)	D=30m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						33
6					35	65
4				35	69	98
2			35	69	102	127
0		35	69	103	134	159
-1	21	54	88	121	151	176
-2	40	74	107	140	169	194
-3	60	94	127	159	188	211
-4	80	113	147	178	206	229
-5	100	133	166	197	224	246
-6	120	153	186	216	242	264
-7	140	174	206	235	261	282
-8	162	195	226	255	280	301
-9	183	216	247	275	299	320
-10	204	236	267	295	318	338
-11	225	257	287	314	337	353
-12	247	278	308	334	357	376
-13	268	299	328	353	376	394
-14	289	320	348	373	395	413

[표 6.16] 성토평= 50m, 성토평= 0~10m에 대한 수직응력 (세종)

Elevation (m)	D=50m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
10						0
8						35
6					35	69
4				35	69	103
2			35	69	103	137
0		35	69	103	137	171
-1	21	54	88	121	156	186
-2	40	73	107	141	175	209
-3	60	93	127	161	195	228
-4	80	113	147	181	215	248
-5	100	133	167	201	235	268
-6	120	153	187	221	254	287
-7	140	174	207	241	275	307
-8	162	195	229	262	296	328
-9	183	216	250	283	316	348
-10	204	238	267	304	337	368
-11	225	259	292	325	358	388

-12	247	280	313	346	378	409
-13	268	301	334	366	398	429
-14	289	322	355	387	418	448

2) 전단파 속도(Shear wave velocity)

성토고와 성토폭에 따른 수직응력의 변화를 그림 6.14, 6.15, 6.16과 같이 나타내었다. 성토폭은 20, 30, 50m 로 설정하였으며, 각 성토폭에 따른 성토고를 0, 2, 4, 6, 8, 10m로 변경하며 수직응력 변화를 분석하였다. 또한, 성토층과 원지반의 심도별 전단파속도를 표 6.17, 6.18, 6.19와 같이 나타냈다. 현장에서 파악된 토사층의 깊이를 근거로, 토사층에 해당하는 지반에 대해서 분석을 수행하였다.

[표 6.17] 성토폭= 20m, 성토고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (세종)

Elevation (m)	D=20m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						202.6
6					210.0	246.7
4				213.7	256.4	249.2
2			213.7	258.0	260.2	269.4
0		213.7	248.8	262.0	264.3	273.5
-1	200.0	238.1	258.8	265.2	273.4	282.2
-2	212.8	248.1	270.0	276.3	285.8	293.4
-3	230.2	259.2	279.4	285.2	292.0	297.6
-4	250.8	274.0	290.8	294.1	300.4	307.5
-5	260.2	283.0	293.7	300.1	308.2	313.0
-6	272.8	288.0	300.0	307.3	314.1	320.6
-7	284.1	295.0	305.4	310.5	321.3	327.2
-8	294.1	307.0	312.5	321.6	325.3	333.5
-9	303.0	318.0	325.9	329.4	334.7	340.7
-10	310.6	325.0	335.4	340.2	344.9	349.2
-11	312.9	337.0	342.5	347.1	350.2	353.7
-12	318.9	343.0	348.1	352.2	355.3	360.7
-13	330.1	350.0	354.3	358.7	363.3	367.8
-14	335.7	355.0	360.2	364.3	368.5	373.3

[표 6.18] 성토폭= 30m, 성토고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (세종)

Elevation (m)	D=30m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						211.0
6					213.7	257.0
4				213.7	258.8	265.1
2			213.7	258.8	264.0	277.8
0		213.7	258.8	264.7	280.9	284.9
-1	200.0	238.1	260.8	277.8	287.4	294.1
-2	212.8	250.0	275.1	289.0	295.6	299.2
-3	230.2	260.4	284.1	294.6	306.0	308.7
-4	250.8	280.3	294.6	301.2	307.9	312.6
-5	260.2	290.8	299.4	304.0	309.6	314.5
-6	272.8	303.7	303.0	310.7	314.5	318.5
-7	284.1	307.6	312.6	315.5	320.5	327.6
-8	294.1	313.4	317.5	323.5	328.5	335.8
-9	303.0	327.5	328.9	333.6	337.1	342.5
-10	310.6	335.8	342.5	343.5	348.2	353.1
-11	312.9	344.1	350.1	355.1	357.3	361.0
-12	318.9	354.6	359.7	360.3	363.0	366.6
-13	330.1	359.7	365.0	366.6	370.4	375.1
-14	335.7	365.0	370.4	375.1	378.1	380.8

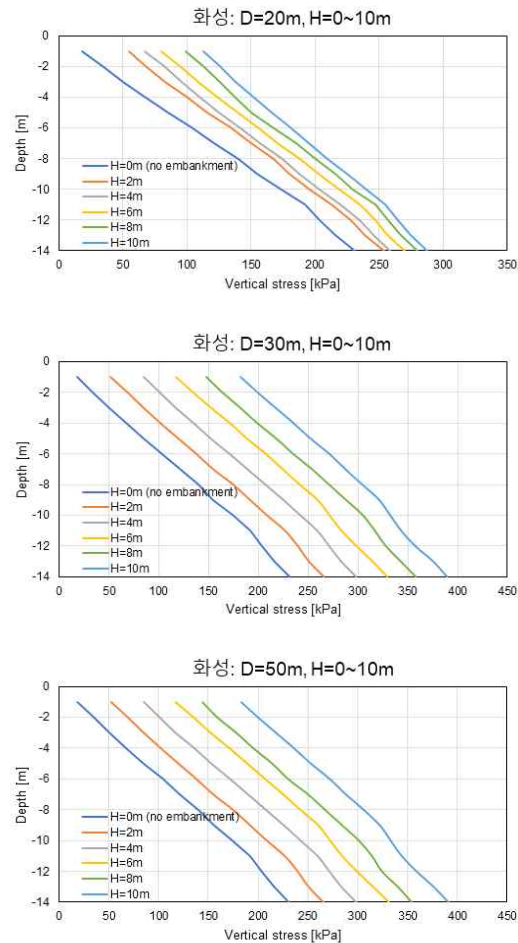
[표 6.19] 성토폭= 50m, 성토고= 0~10m에 대한 전단파속도(m/s) (세종)

Elevation (m)	D=50m, H=					
	0m	2m	4m	6m	8m	10m
8						213.7
6					213.7	258.8
4				213.7	258.8	273.1
2			213.7	258.8	266.6	283.3
0		213.7	258.8	267.4	286.5	287.7
-1	200.0	240.5	270.2	283.3	293.1	302.9
-2	212.8	255.0	285.7	294.8	301.5	310.1
-3	230.2	265.6	297.1	303.6	312.2	318.8
-4	250.8	283.1	305.6	310.2	318.0	324.8
-5	260.2	296.6	310.4	316.1	322.7	328.6
-6	272.8	306.5	316.1	320.9	325.6	333.1
-7	284.1	312.6	321.7	326.7	330.7	337.1
-8	294.1	320.4	325.6	330.6	334.7	343.0
-9	303.0	330.7	335.2	338.2	343.8	350.9
-10	310.6	340.1	345.9	350.3	352.7	359.5
-11	312.9	347.5	355.6	358.7	362.9	367.4
-12	318.9	358.7	363.3	365.9	368.6	375.3
-13	330.1	364.9	368.6	371.0	374.0	379.2
-14	335.7	368.6	371.8	374.8	376.8	382.3

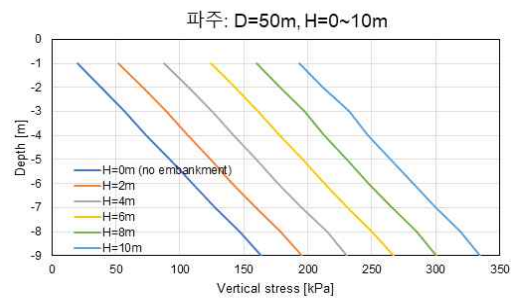
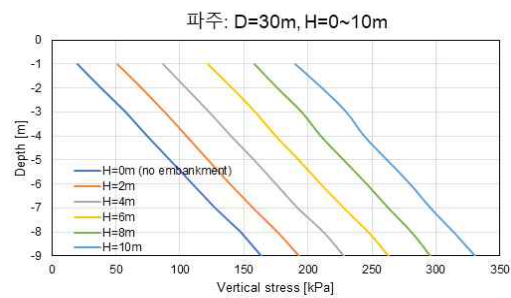
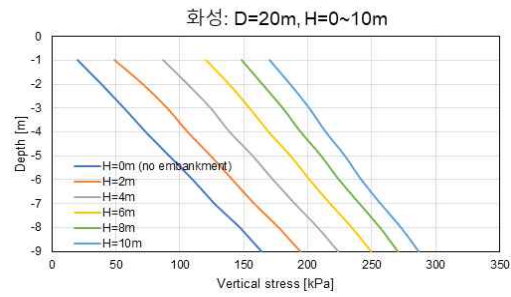
6.3 결론

6.3.1 성토고(H) 및 성토평(D)에 의한 원지반의 응력증가량과 범위

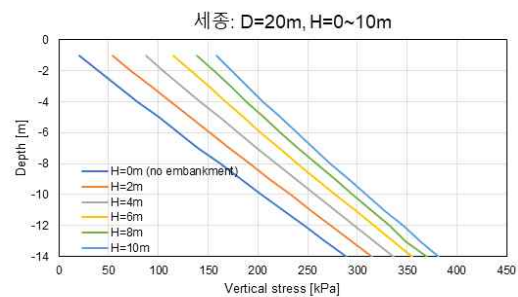
그림 6.16, 6.17, 6.18은 성토고와 성토평을 변화시키며 원지반의 심도 별 수직응력을 나타내었다. 응력증가는 성토고와 폭에 관계없이 직선형태의 증가 양상을 보여 준다. 그러나 성토평 30m 와 50m의 최종성토에서의 증가율에 비해 성토평 20m 구간에서는 다소 낮은 증가량을 보인다. 이는 성토평 30m 이상일 경우 유사한 증가형태를 보임을 확인할 수 있다.

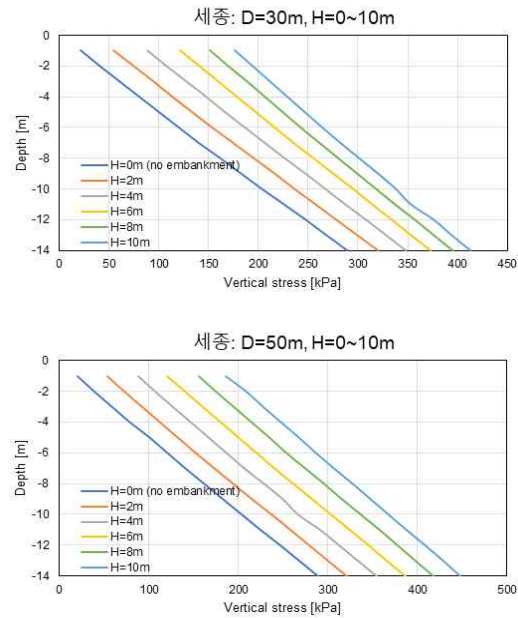


[그림 6.16] 성토평, 성토고 변화에 대한 수직응력 변화 (화성)



[그림 6.17] 성토폭, 성토고 변화에 대한 수직응력 변화 (파주)

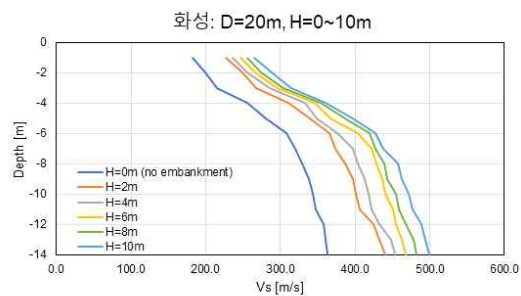


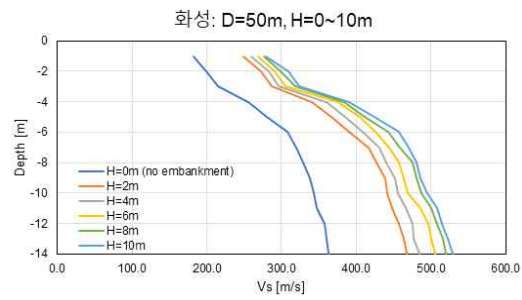
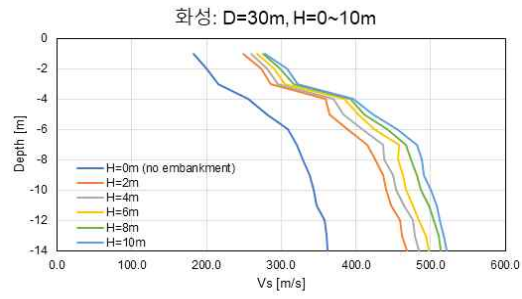


[그림 6.18] 성토평, 성토고 변화에 대한 수직응력 변화 (세종)

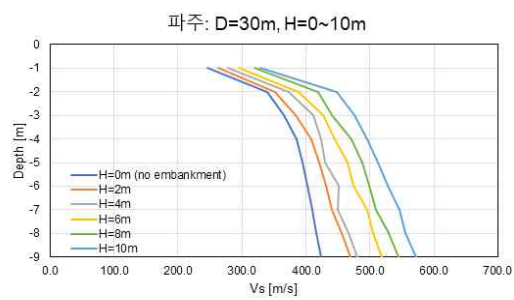
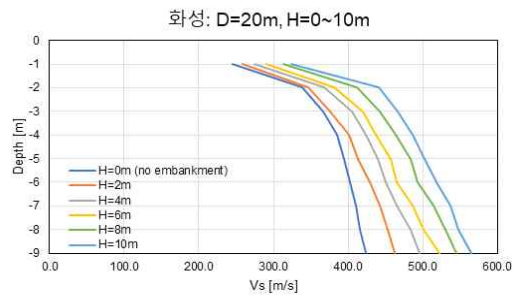
6.3.2 성토에 의한 원지반의 전단파속도 변화

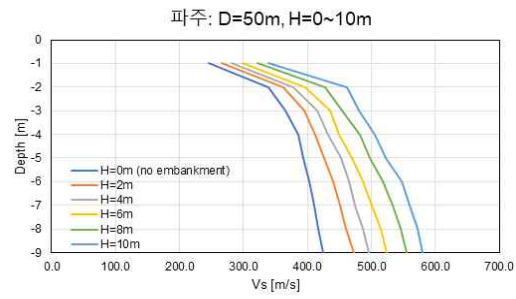
그림 6.19, 6.20, 6.21은 성토고와 성토평을 변화시키며 원지반의 심도 별 전단파속도를 나타내었다. 전단파속도 증가는 성토고와 폭에 관계없이 증가하는 양상을 보여준다. 그러나 성토에 의한 응력증가와 달리 처음 2m 성토 시 가장 큰 증가량을 보여준다. 그 이후 성토에서는 거의 유사한 증가량을 보여주며, 원지반 심도 6m 이후 증가율이 다소 감소하는 경향이 나타났다.



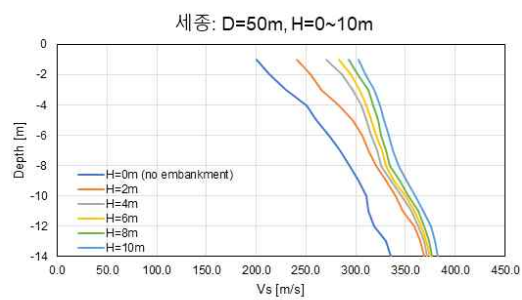
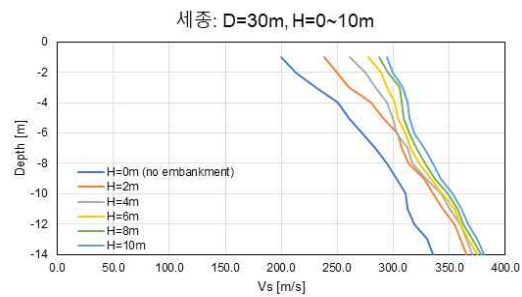
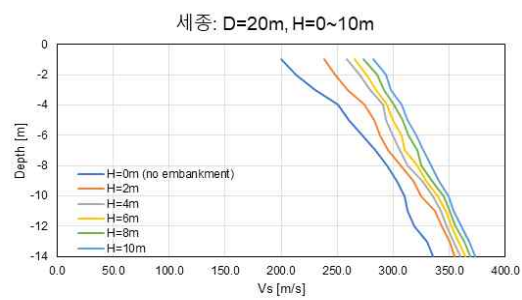


[그림 6.19] 성토평, 성토고 변화에 대한 전단파속도 변화 (화성)





[그림 6.20] 성토평, 성토고 변화에 대한 전단파속도 변화 (파주)



[그림 6.21] 성토평, 성토고 변화에 대한 전단파속도 변화 (세종)

6.3.3 성토에 의한 응력증가량과 전단파속도 변화의 상관관계

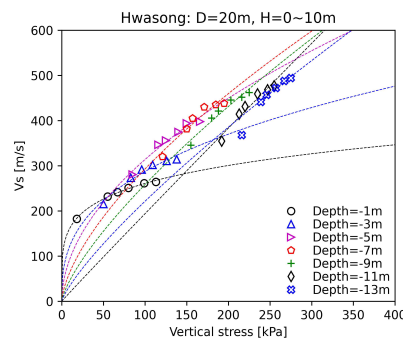
탄성파의 전파는 구조적 변화 없이 매질의 상태를 평가하는 데 사용된다. 이러한 탄성파 중 전단파는 전파 방향과 입자의 이동방향의 유효응력에 영향을 받으며 (Roesler, 1979; Knox et al., 1982; Yu and Richart, 1984), 압밀에서의 전단파는 수직방향으로 전파되므로, 전단파속도 (V_s)는 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

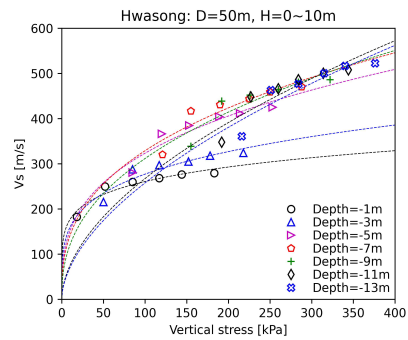
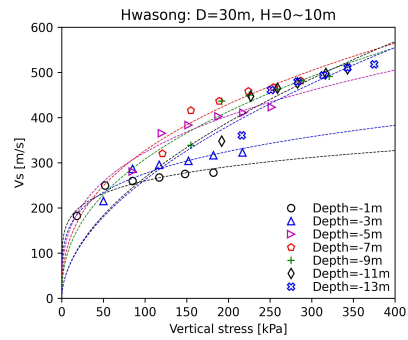
$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^\beta \quad (\text{식 6.1})$$

여기서, σ'_v : 수직방향의 유효응력
 P_a : 유효응력과 같은 단위의 대기압
 α, β : 실험적으로 결정되는 계수 및 지수

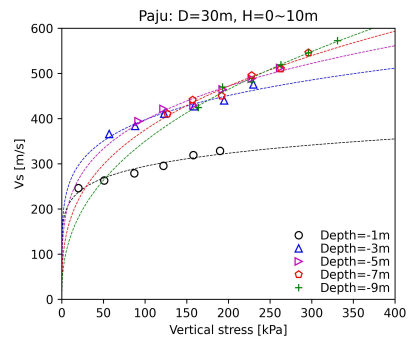
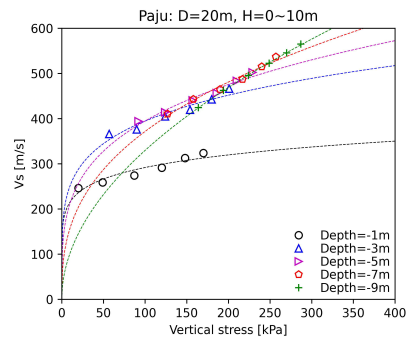
α 계수는 입자들 사이의 접촉 거동, 입자의 재료적 특성, 그리고 패킹의 형태에 영향을 받으며, β 지수는 크기, 모양 그리고 구조 등의 입자의 접촉효과에 의해 제어 된다 (Santamarina et al., 2001; Lee et al., 2005)

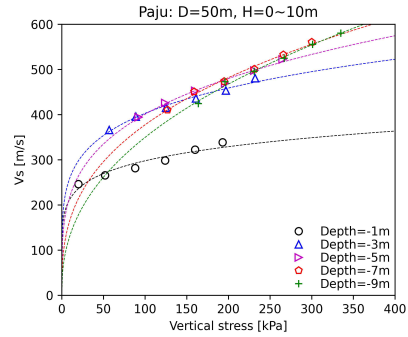
그림 6.22, 6.23, 6.24는 성토평(D)과 성토고(H)를 변화시키며 수직응력 변화에 따른 전단파속도 변화를 α 계수, β 지수 산정한 값을 실선으로 나타내었다. 원지반 심도 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13m를 나타내었으며, 각각의 원지반 심도에서 성토고(H)가 변함에 따라 증가하는 응력과 전단파속도 증가 양상을 보여준다. 화성과 세종 현장에서 초기성토(2m)에서 전단파 속도 증가량이 상대적으로 크게 변하는 구간이 존재하며, 과주현장의 경우 대체적으로 직선 형태로 증가하는 경향을 보인다.



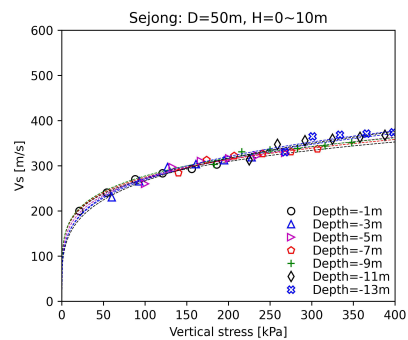
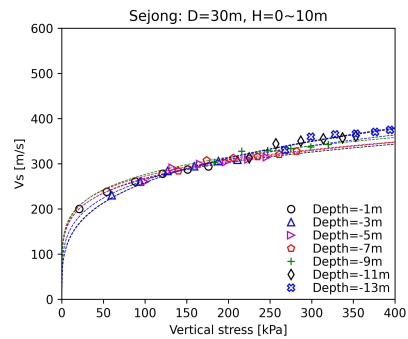
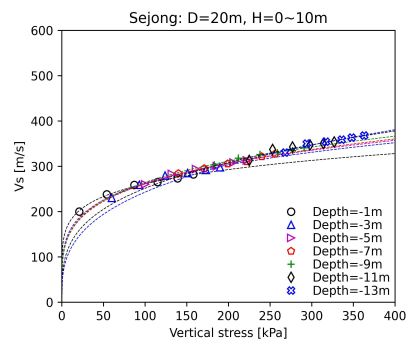


[그림 6.22] 성토폭, 성토고 변화에 대한 수직응력과 전단파속도 상관관계 (화성)





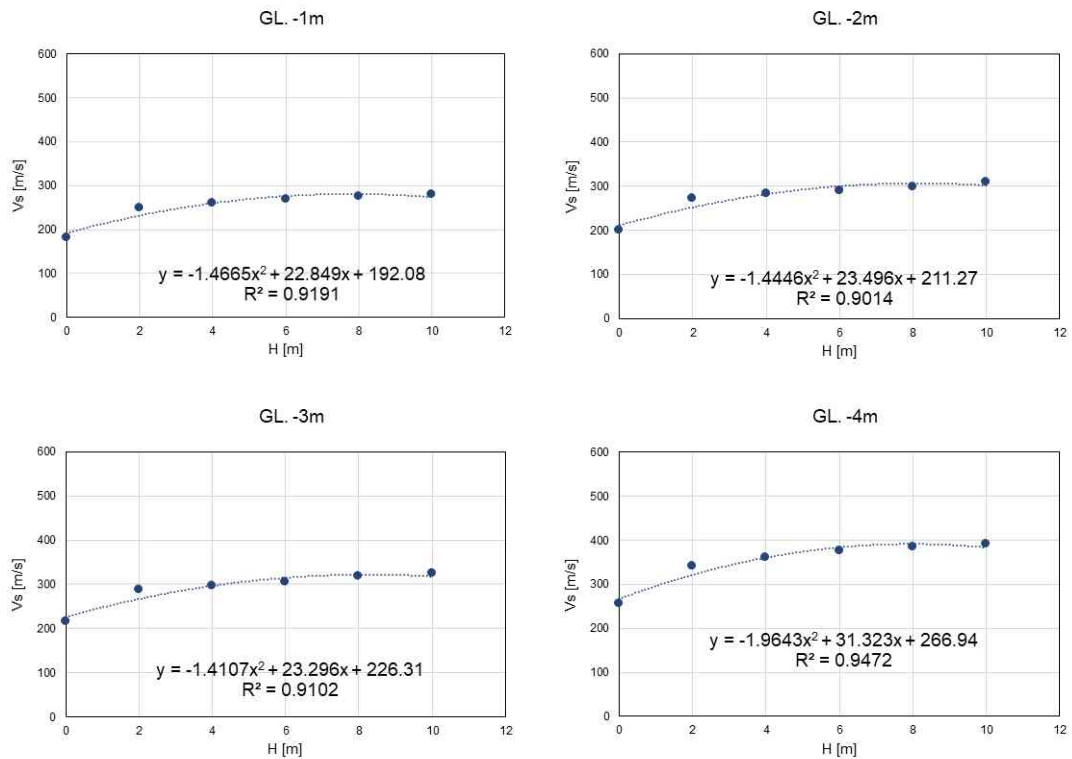
[그림 6.23] 성토평, 성토고 변화에 대한 수직응력과 전단파속도 상관관계 (파주)

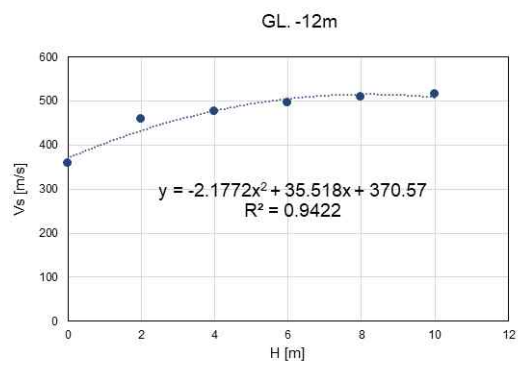
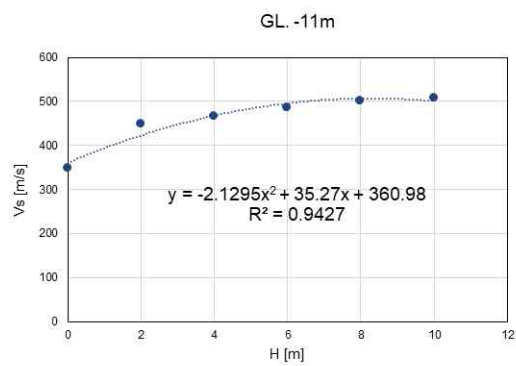
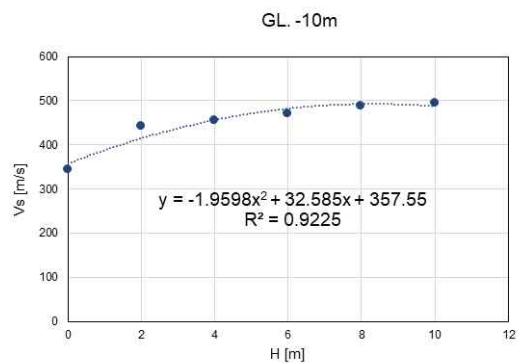
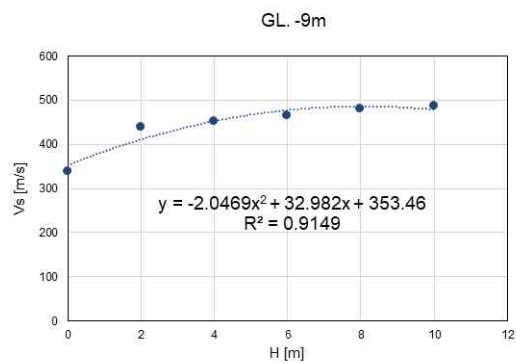
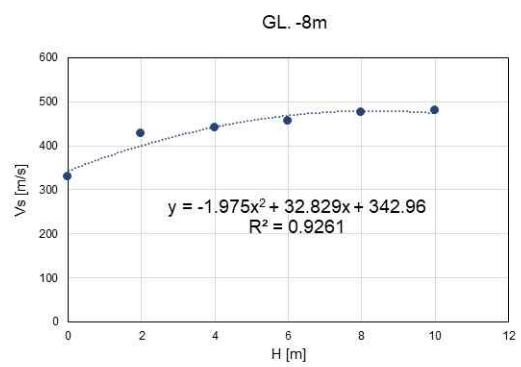
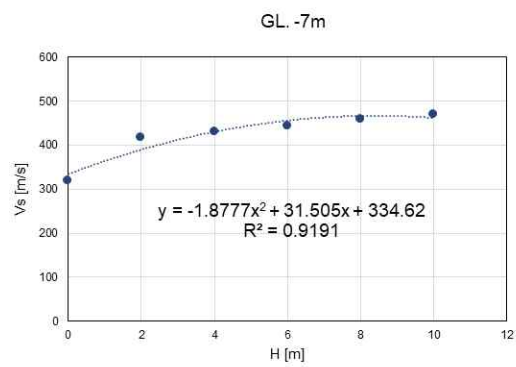
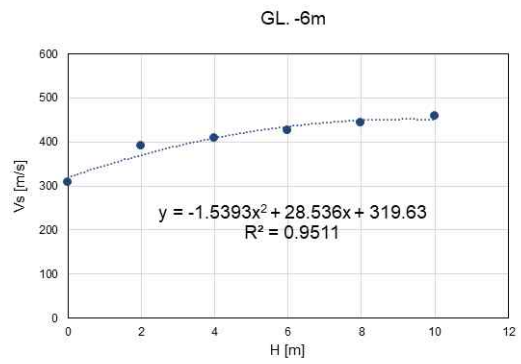
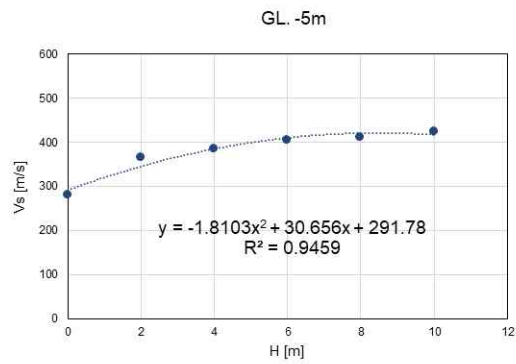


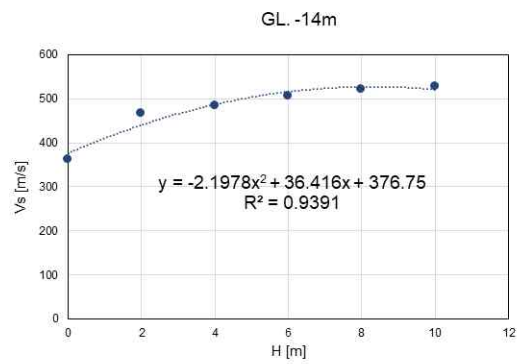
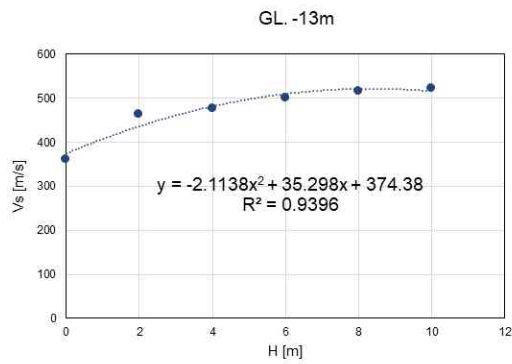
[그림 6.24] 성토평, 성토고 변화에 대한 수직응력과 전단파속도 상관관계 (세종)

6.3.4 성토고 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도

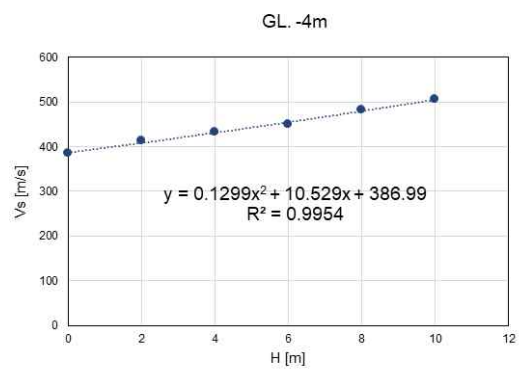
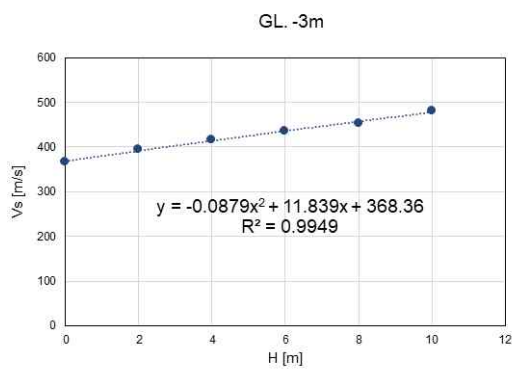
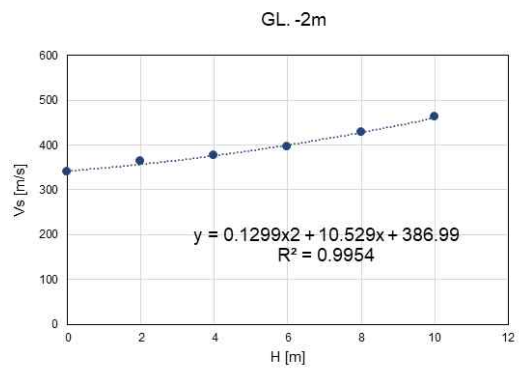
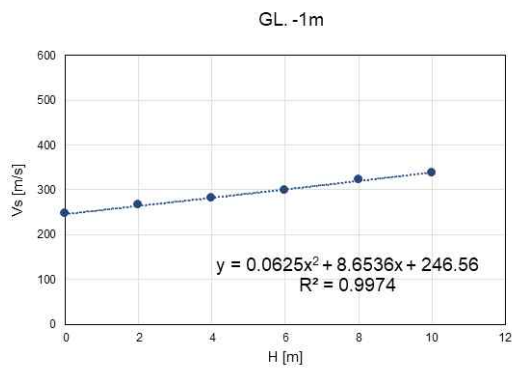
성토고(H) 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도(V_s)를 그림 6.25, 5.26, 5.27과 같이 나타내었다. 성토폭이 30m 이상부터는 성토폭에 따른 전단파속도 변화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 해석되었기 때문에, 50m 성토폭을 기준으로 성토고에 따른 전단파속도를 추정할 수 있는 식 또한 그래프와 같이 나타내었다. 그러나 현장시험과 수치해석 결과를 토대로 제안된 식이므로, 모든 원지반에 적용될 수는 없다. 이점을 고려하여 본 현장과 유사한 지반에 대해 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

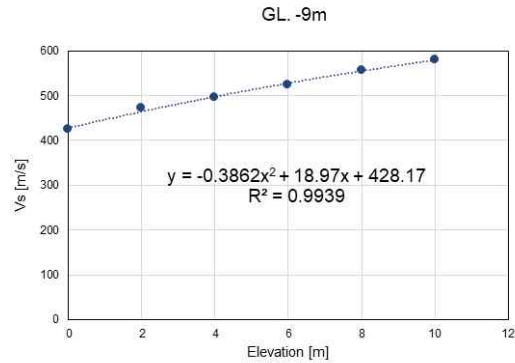
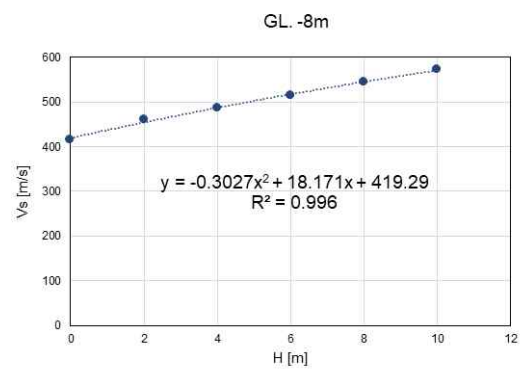
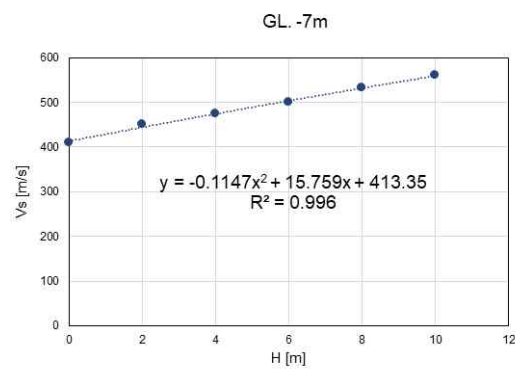
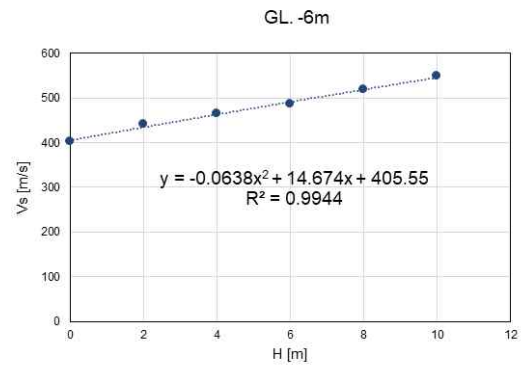
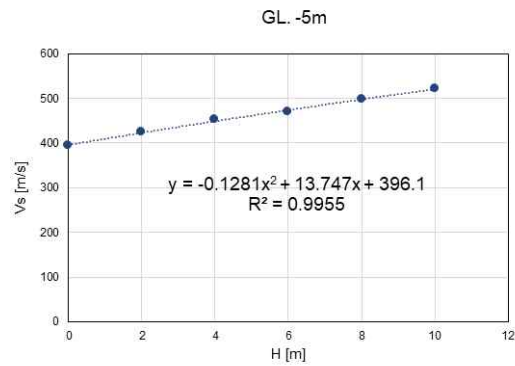




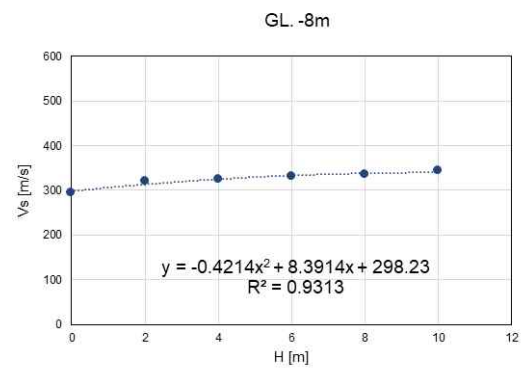
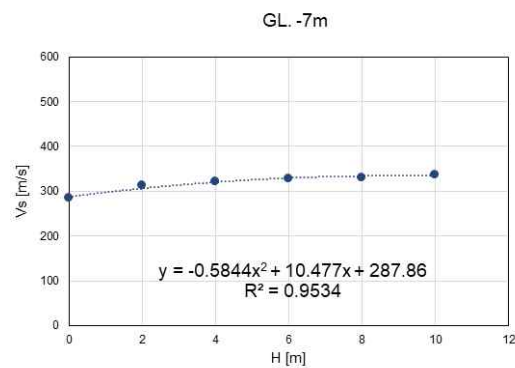
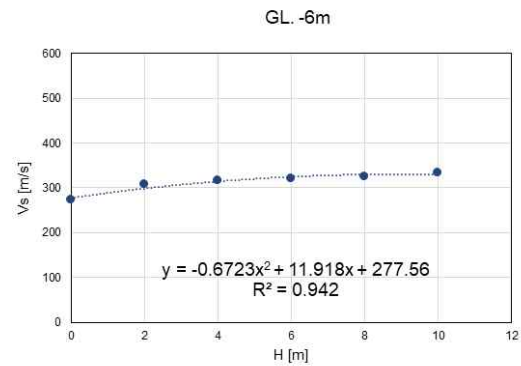
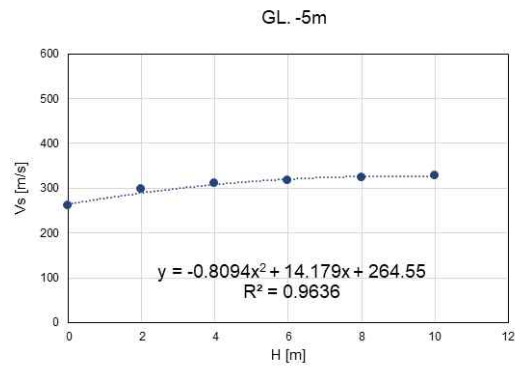
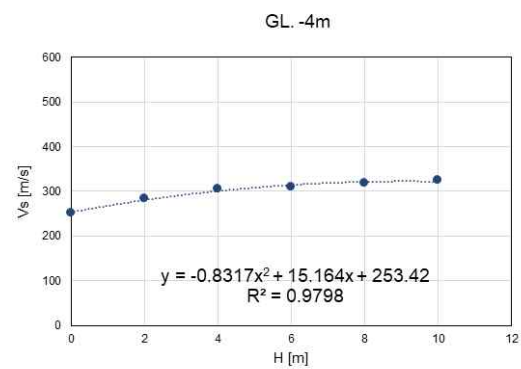
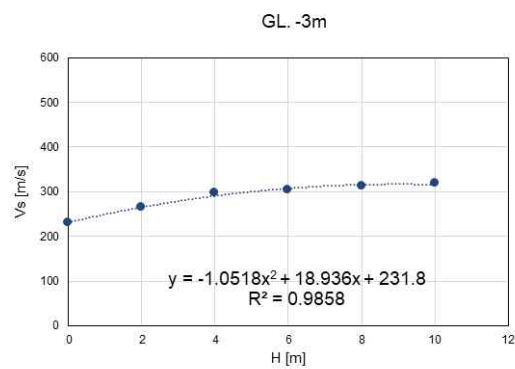
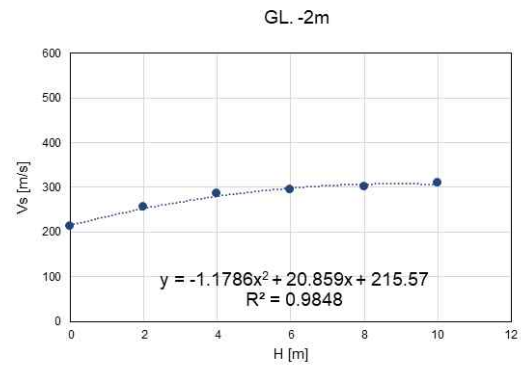
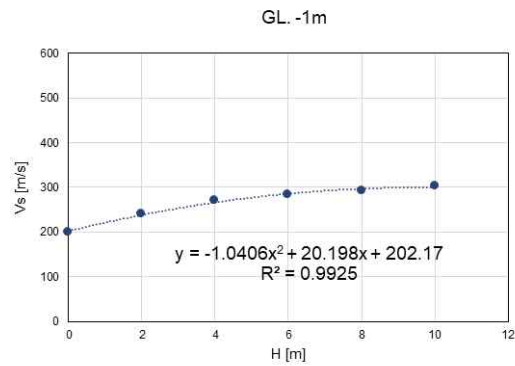


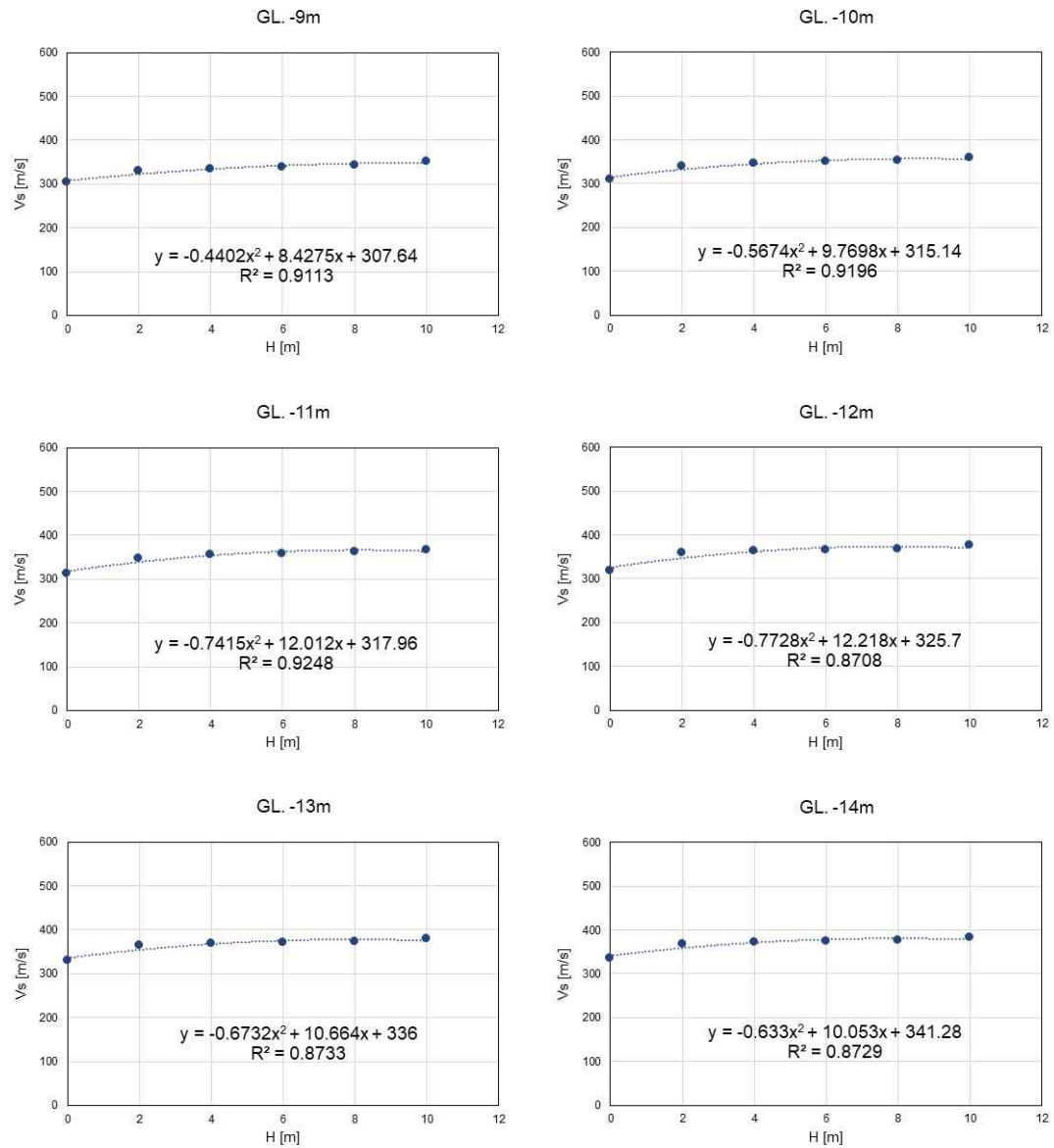
[그림 6.25] 성토고 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도 (화성)





[그림 6.26] 성토고 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도 (파주)





[그림 6.27] 성토고 변화에 대한 원지반의 심도 별 전단파속도 (세종)

제 7 장

현장 전단파속도 분석

LANDSLIDE
INSTITUTIONAL

&

제7장 현장 전단파속도 분석

7.1 토층 평균 전단파속도

7.1.1 토층 평균 전단파속도의 개요

지진에 의한 지반운동은 국지적 지반의 특성에 따라 달라지므로 지반의 특성을 반영할 수 있도록 지반을 분류하여 그에 따른 지반 증폭계수를 정의한다. 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 내진설계기준 공통적용사항에서는 지반을 표 7.1과 같이 S_1 , S_2 , S_3 , S_4 및 S_5 의 5종으로 분류하되, 부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반 S_6 을 포함하여 6종으로 분류하였다.

[표 7.1] 토층 평균 전단파속도에 따른 지반의 분류 (KDS 17 10 00)

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H(m)	토층 평균 전단파속도, $V_{S,Soil}$ (m/s)
S_1	암반 지반	1 미만	-
S_2	얇고 단단한 지반	1 ~ 20 이하	260 이상
S_3	얇고 연약한 지반		260 미만
S_4	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
S_5	깊고 연약한 지반		180 미만
S_6	부지 고유의 특정평가 및 지반응답해석이 필요한 지반		

· 기반암 깊이와 무관하게 토층 평균 전단파속도가 120m/s 이하인 지반은 S_5 지반으로 분류

여기서, 부지 고유의 특성평가가 요구되는 S_6 는 다음 경우에 속하는 지반에 해당한다.

- 액상화가 일어날 수 있는 흙, 예민비가 8 이상인 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용 시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
- 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반 (지층의 두께>3.0m)
- 매우 높은 소성을 갖는 점토지반 (지층의 두께>7m이고, 소성지수>75)

- 층이 매우 두껍고 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토 (지층의 두께>36m)
 - 기반암이 깊이 50m를 초과하여 존재하는 지반
- 지반분류에 필요한 지반특성은 다음과 같이 산정한다.

1. 기반암에 대한 정의: 기반암은 전단파속도 760m/s 이상을 나타내는 지층이다.

$$2. \text{토층 평균 전단파속도 } (V_{S, \text{Soil}}) = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

여기서, d_i 는 기반암 깊이까지의 i 번째 토층의 두께(m)이고, V_{si} 는 기반암 깊이까지의 토층의 전단파속도(m/s) 이다.

7.1.2 성토 전후 심도 별 전단파속도 및 토층 평균 전단파속도

이번 과업에서는 현장의 전단파측정은 성토가 완료된 후 수행하였으며, 성토 전후 시험 결과는 표 7.2, 7.3, 7.4에 나타내었다. 기존에 원지반에서 수행된 지반조사 보고서를 토대로 성토지반은 N값을 일률적으로 8로 가정한 Yamzaki 식을 이용하여 181m/s로 추정된 값을 사용하였다. SPS 검층은 시추공 내부의 공내수에 압력을 가하고 압력분포가 주변의 지반에 전달되어 지반을 변형시킴으로써 P파와 S파를 발생시키게 된다. 따라서 SPS 검층은 공내수가 필요한 시험이며, 일반적으로 지하수위 이하에서 시험이 수행된다. 성토 전 원지반의 경우 지하수위를 고려하여 지하수위 상부에서는 다운홀시험(DHT)을 수행하였으며 (회색 셀), 지하수위 하부는 SPS 검층을 통해 시험을 수행되었다. 성토 후 현장의 전단파속도 측정은 SPS 검층 및 다운홀 시험 두 가지 모두 1m를 제외한 심도에서 수행하였으며, SPS 검층의 경우 케이싱 하부를 막고 공내수를 공급한 뒤 시험을 수행하였다. 화성과 파주지역의 토사층의 두께는 성토 전후 차이가 존재하는데, 이는 현장 여건을 고려하여 성토 전 지반조사를 수행했던 위치에서 5~10m 떨어진 거리에서 시험을 수행하였기 때문이다.

[표 7.2] 성토 전후 탄성과 속도(V_s) 및 토층 평균 전단파속도($V_{s,Soil}$) (화성)

	원지반_(SPS)		성토 후_(SPS)		성토 후_(DHT)	
심도 (m)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)
1	181	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=317\text{m/s}$ (S2)	270.1	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=390\text{m/s}$ (S2)	249.9	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=359\text{m/s}$ (S2)
2	181		282.0		262.5	
3	181		291.0		268.0	
4	230		267.0		277.3	
5	253		304.0		281.6	
6	304		302.0		301.8	
7	321		415.0		370.4	
8	317		436.0		380.4	
9	354		409.0		409.2	
10	356		477.0		428.5	
11	373		493.0		443.3	
12	361		463.0		454.7	
13	402		527.0		463.6	
14	415		559.0		470.5	
15	470		495.0		476.0	
16	510		522.0		480.5	
17	541		662.0		422.8	
18	541		-	-	-	-
19	599		-	-	-	-

[표 7.3] 성토 전후 탄성과 속도(V_s) 및 토층 평균 전단파속도($V_{s,Soil}$) (파주)

	원지반_(SPS)		성토 후_(SPS)		성토 후_(DHT)	
심도 (m)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)
1	181	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=332\text{m/s}$ (S2)	241	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=412\text{m/s}$ (S2)	228.1	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=350\text{m/s}$ (S2)
2	181		256		241.4	
3	181		264		258.6	
4	234		335.7		273.9	
5	226		538.4		370.2	
6	306		493.4		403.4	
7	391		511.4		424.7	
8	398		501.9		438.7	
9	412		511.8		448.1	
10	462		609		454.7	
11	507		655.9		459.3	
12	503		737		537.7	
13	514		-	-	-	-
14	506		-	-	-	-
15	667		-	-	-	-

[표 7.4] 성토전후 탄성과 속도(V_s) 및 토층 평균 전단파속도($V_{s,Soil}$) (세종)

	원지반_(SPS)		성토 후_(SPS)		성토 후_(DHT)	
심도 (m)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)
1	181	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=239\text{m/s}$ (S3)	212	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=297\text{m/s}$ (S2)	207.7	건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00) $V_{s,Soil}=272\text{m/s}$ (S2)
2	181		215		209.8	
3	181		267		212.1	
4	181		277		221.1	
5	181		261		254.3	
6	177		288		276	
7	210		295		255.8	
8	250		271		267.1	
9	274		305		275.5	
10	245		276		281.7	
11	230		282		283.4	
12	274		309		304.6	
13	319		345		309.8	
14	249		340		313.8	
15	271		331		317	
16	295		403		319.6	
17	309		356		321.7	
18	318		364		323.3	
19	398		456		352.6	

7.1.3 결론

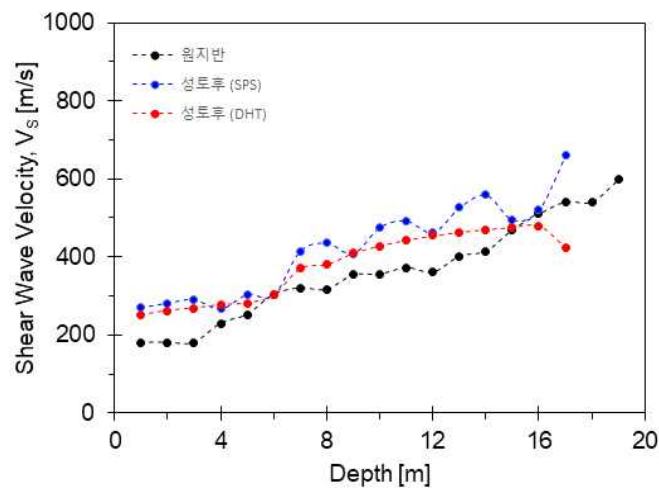
성토 후 토층 평균 전단파 속도($V_{s, Soil}$)는 세 시험 장소 모두 증가하는 경향을 보이며, 증가율은 표 7.5와 같다.

[표 7.5] 탐사방법에 따른 성토 전후 토층 평균 전단파속도($V_{s,Soil}$) 증가율

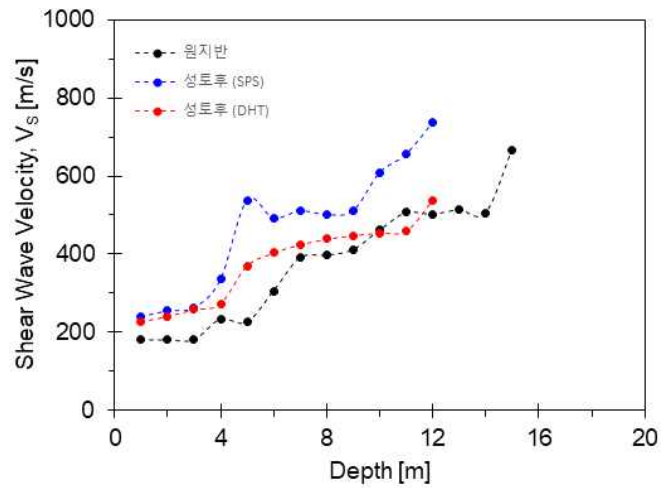
		성토 전 → 성토 후 (SPS)	성토 전 → 성토 후 (DHT)
전단파 속도 증가율(%)	화성	22.9	13
	파주	30.7	10.9
	세종	21.0	16.0

측정된 결과는 성토 후 SPS 검층으로 측정한 결과, 성토 후 다운홀 시험으로 측정한

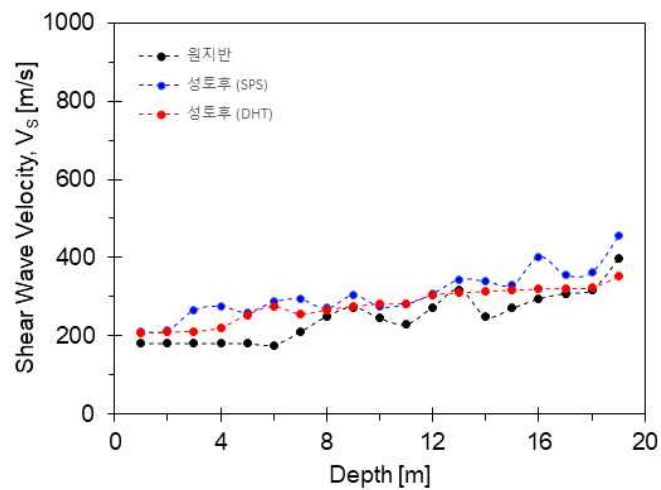
결과, 기존 원지반에서 측정된 결과 순으로 느려지며, 이를 그림 7.1, 7.2, 7.3에 나타냈다. 같은 공에서 수행된 시험임에도 불구하고 이러한 측정값의 차이는 다운 홀 기법에서의 전단파속도가 SPS 검층에서의 전단파의 속도에 비해 느리게 나타나는 원인에 관한 연구로 설명할 수 있다 (Stewart 등, 1984). 연구 결과 두 방법의 속도 차이는 첫째, 사용되는 송신 주파수와 송수신기의 다른 배치로 인한 측정되어지는 매질의 규모에서의 차이. 둘째, 각 탐사 시 사용되는 지오폰 장치의 오차와 자료 분석 시 발생하는 오차. 셋째, 두 탐사방법에서 이용되는 파의 서로 다른 전파특성인 것으로 제시하였다. SPS 검층에서 측정되는 전단파속도는 주파수 10~60kHz 정도의 파가 시추공 주변 1~2m 정도를 전파할 때의 속도이고, 다운 홀 탐사는 약 10~100Hz의 주파수 대역을 가진 파가 지표면으로부터 수십 미터를 전파하는 속도이며, 서로 다른 전파 특성을 보이기 때문이다. 이러한 점들은 지반설계 시 필수적으로 고려되어야 한다. 본 과업에서는 세 현장에서의 시험결과만을 나타내었으며, 성토 전후 전단파속도의 증가량을 명확하게 파악하기 위해서는 향후 좀 더 많은 시험 데이터베이스가 필요함을 알 수 있다.



[그림 7.1] 전단파속도 현장측정자료 (화성)



[그림 7.2] 전단파속도 현장측정자료 (파주)



[그림 7.3] 전단파속도 현장측정자료 (세종)

7.2 지표면으로부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V_{30})

7.2.1 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V_{30})의 개요

구조물의 내진 설계 및 내진 성능 평가 과정에서 가장 기본적인 단계는 바로 구조물에 작용하는 지진 지반 운동의 결정이다. 지진 지반 운동은 구조물의 내진 성능 수준에 따라 지역별 지진 재해 정도로 구분된 기준 지진 운동을 토대로 결정할 수 있다. 보통암 노두

조건으로 설정되어 있는 기준 지진 운동은 해당 부지의 지반 조건에 따른 증폭 정도 별로 구분되고, 비로소 부지의 지진 지반운동의 결정이 이루어진다. 즉, 기반암에 도달한 지진동은 그 상부의 토사층을 통과하면서 부지별 고유의 지질 조건 및 지반 동적 특성과 관련된 부지 효과에 따라 특정 주기 부근에서 증폭 또는 감쇠되어 지표면에서의 지진 지반 운동으로 표출된다. 부지 고유의 특성은 전단파속도로 대표될 수 있으며, 현재 내진 설계 기준들에서는 표 7.6과 같이 부지 특성 조건의 구분 지표로 지표면부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V_{30})를 제시하고 있다.

[표 7.6] 국내 내진설계 기준의 지반분류 체계 (구조물기초설계 기준)

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m에 대한 평균값		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험, N	비배수전단강도 s_u (kPa)
S_A	경암 지반	1500 초과	-	-
S_B	보통암 지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암 지반	360에서 760	>50	>100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	<15	<50
S_F	부지 고유의 특정평가 및 지반응답해석이 필요한 지반			

7.2.2 지표면으로부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V_{30}) 비교

이번 과업에서는 현장의 전단파측정은 성토가 완료된 후 수행하였으며, 성토 전후 지표면으로부터 지하 30m까지의 평균 전단파 속도를 표 7.7, 7.8, 7.9에 나타내었다.

[표 7.7] 성토 전후 탄성과 속도(V_s) 및 V_{30} (화성)

심도 (m)	원지반_(SPS)		성토 후_(SPS)		성토 후_(DHT)	
	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)
1	181	건축물 내진설계기준	270.1	건축물 내진설계기준	249.9	건축물 내진설계기준
2	181		282		262.5	

3	181	V30=396m/s (Sc)	291	V30=514m/s (Sc)	268	V30=482m/s (Sc)
4	230		267		277.3	
5	253		304		281.6	
6	304		302		301.8	
7	321		415		370.4	
8	317		436		380.4	
9	354		409		409.2	
10	356		477		428.5	
11	373		493		443.3	
12	361		463		454.7	
13	402		527		463.6	
14	415		559		470.5	
15	470		495		476	
16	510		522		480.5	
17	541		662		422.8	
18	541		809		834.6	
19	599		838		846.5	
20	595		830		856.5	
21	621		886		864.9	
22	618		889		872	
23	676		880		878.1	
24	686		889		883.2	
25	699		924		887.7	
26	741		919		891.5	
27	764		868		894.9	
28	769		907		897.8	
29	775		945		900.3	
30	781		921		902.6	

[표 7.8] 성토 전후 탄성과 속도(V_s) 및 V30 (과주)

	원지반_(SPS)		성토 후_(SPS)		성토 후_(DHT)	
심도 (m)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)
1	181	건축물 내진설계기준 V30=524m/s (Sc)	241	건축물 내진설계기준 V30=724m/s (Sc)	228.1	건축물 내진설계기준 V30=623m/s (Sc)
2	181		256		241.4	
3	181		264		258.6	
4	234		335.7		273.9	
5	226		538.4		370.2	
6	306		493.4		403.4	
7	391		511.4		424.7	
8	398		501.9		438.7	
9	412		511.8		448.1	
10	462		609		454.7	

11	507		655.9		459.3	
12	503		737		537.7	
13	514		868.8		697.5	
14	506		1196.8		1038.9	
15	667		1230.3		1044.4	
16	1198		1313.9		1048.8	
17	1258		1407.5		1052.3	
18	1316		1485.4		1060.8	
19	1409		1508		1543.8	
20	1450		1441		1554.7	
21	1482		1466		1563.7	
22	1551		1441		1571.3	
23	1696		1626		1577.7	
24	1770		1546		1583.1	
25	1852		1595		1587.7	
26	1923		1605		1591.6	
27	1852		1692		1595.1	
28	1770		1842		1598	
29	1667		2165		1600.6	
30	1504		2008		1602.9	

[표 7.9] 성토 전후 탄성과 속도(V_s) 및 V_{30} (세종)

심도 (m)	원지반_(SPS)		성토 후_(SPS)		성토 후_(DHT)	
	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)	V_s (m/s)	$V_{s,Soil}$ (m/s)
1	181	건축물 내진설계기준 $V_{30}=289\text{m/s}$ (S_D)	212	건축물 내진설계기준 $V_{30}=378\text{m/s}$ (S_C)	207.7	건축물 내진설계기준 $V_{30}=351\text{m/s}$ (S_D)
2	181		215		209.8	
3	181		267		212.1	
4	181		277		221.1	
5	181		261		254.3	
6	177		288		276	
7	210		295		255.8	
8	250		271		267.1	
9	274		305		275.5	
10	245		276		281.7	
11	230		282		283.4	
12	274		309		304.6	
13	319		345		309.8	
14	249		340		313.8	
15	271		331		317	
16	295		403		319.6	
17	309		356		321.7	
18	318		364		323.3	

19	398		456		352.6	
20	381		624		665.6	
21	378		631		670.2	
22	397		643		674.1	
23	460		673		697.4	
24	472		728		700.2	
25	415		727		702.6	
26	532		734		704.7	
27	500		753		706.6	
28	597		754		708.1	
29	692		770		709.5	
30	676		797		710.8	

7.2.3 결론

성토 후 지표면으로부터 지하 30m까지의 평균 전단파속도(V_{30})는 세 시험 장소 모두 증가하는 경향을 보이며, 증가율은 표 7.10과 같다. 화성과 파주 현장의 경우 성토 하중에 따라 지반종류가 달라지는 구간은 없는 것으로 나타났다. 그러나 세종 현장의 원지반 SPS 결과와 성토 후 SPS 결과는 단단한 토사 지반(S_D)에서 매우 조밀한 토사 지반 혹은 연암 지반(S_C)으로 지반분류가 변화하는 양상을 보였다.

[표 7.10] 탐사방법에 따른 성토 전후 V_{30} 증가율

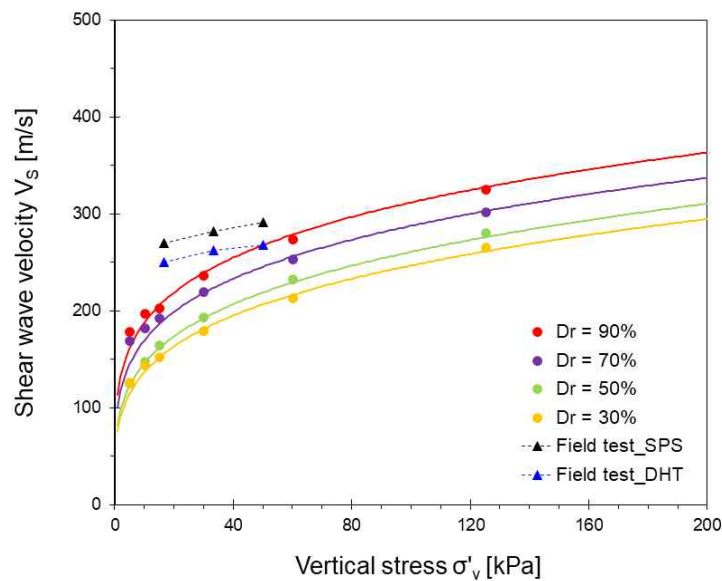
		성토 전 → 성토 후 (SPS)	성토 전 → 성토 후 (DHT)
전단파 속도 증가율(%)	화성	29.8	21.6
	파주	38.3	19.0
	세종	30.8	21.4

7.3 실내 및 현장시험을 이용한 전단파속도 비교

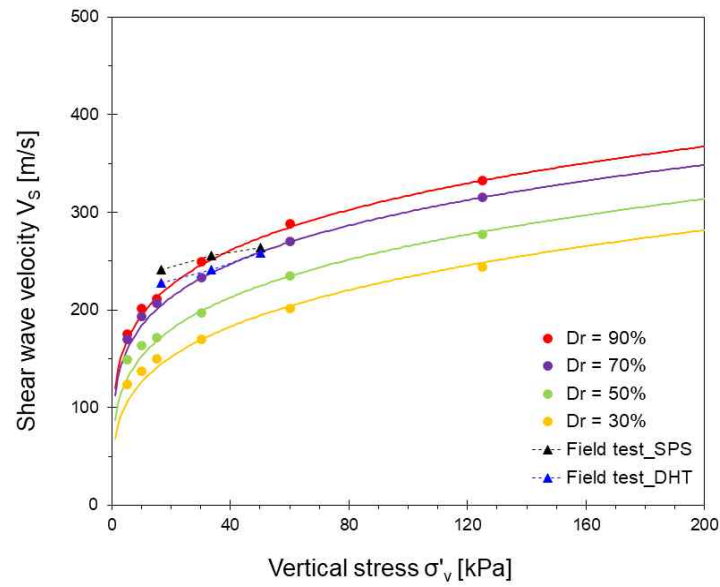
7.3.1 실내 및 현장시험 결과 비교 및 결론

SPS 검층 및 다운홀 시험(DHT)을 이용하여 세 현장의 토사층에서의 전단파속도를 측

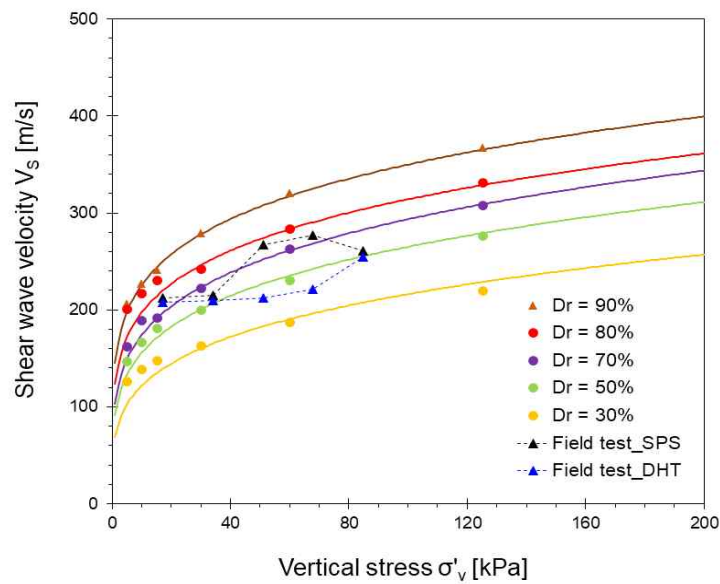
정하였으며, 현장 측정 결과를 벤더를 이용한 실내 압밀시험과 비교한 결과는 그림 7.4, 7.5, 7.6과 같다. 세 현장의 성토층의 전단파속도는 210 ~ 300m/s 로 다짐을 거의 안하거나 최소한으로 수행한 성토층의 전단파속도 결과로 보기에 다소 높은 값을 보여준다. 기존 원지반의 전단파속도측정은 SPS 검층을 주로 이용하여 측정되었으며, 비교를 위해 본 과업에서는 성토층에서의 SPS 검층 및 다운홀 시험을 수행하였다. 성토지반에서의 SPS 시험을 위한 수위 유지 방안으로서 steel casing을 암반층에 관입한 뒤 공내수를 주입하는 방법을 이용하였으며, 이로 인해 과다한 측정 결과가 도출되었다고 판단된다. 이를 보완하기 위해서는 표면과 기법 등의 추가적인 시험을 수행하여 전체 영역에 대한 전단파 속도 주상도를 획득해야 한다.



[그림 7.4] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (화성)



[그림 7.5] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (과주)



[그림 7.6] 실내 및 현장시험의 전단파 속도 비교 (세종)

다짐도별 실내측정 전단파속도와 현장 전단파속도(SPS, DHT)와 비교한 결과는 다음과 같다.

- 화성 현장전단파속도는 다짐도 90%의 실내전단파속도 이상으로 측정되었음.
- 파주 현장전단파속도는 다짐도 70 ~ 90%의 실내전단파속도 이상으로 측정되었음
- 세종 현장전단파속도는 다짐도 42 ~ 75%의 실내전단파속도 정도로 측정되었음.

본 연구에서는 화성 봉담, 파주 운정 및 세종 연동면 건설공사현장을 대상으로 성토지반 부지를 선정하여 다양한 탄성과 시험 (하향식탄성파탐사, 부유식 PS검층 (SPS))을 수행하였고, 이를 통해 현장 지반의 전단파속도 주상도를 획득하였다.

화성과 파주 현장에 비하여 사토장인 세종 현장은 상대적으로 낮은 토층 평균 전단파속도를 보여주었는데, 이는 여러 외부적인 요인으로 설명될 수 있다. 세 현장 중 화성현장이 균등하게 현장전단파속도가 크게 나타난 것은 되메우기식 성토를 하여 다짐기에 의한 층별 다짐이 이루어졌기 때문으로 판단된다.

일반적으로 비고결화된 흙의 전단파 속도는 유효응력의 함수로 표현할 수 있으며, 건설현장의 성토층의 경우 동적 및 정적 하중에 의한 유효응력 증가 및 지반 다짐이 발생할 수 있다. 가장 영향을 많이 주는 요소는 중장비 및 차량의 이동(동적 하중)으로 인한 다짐효과이다. 중장비 및 차량 이동과 같은 외부적인 요인으로 인해 다짐이 발생한 지반과 그렇지 않은 지반의 다짐도는 대략 20%의 차이를 보인 바 있으며, 이때 성토층의 입자 배열 및 구조의 변화로 인해 전단파속도가 증가하게 된다. (Oh 등, 2017)

다른 외부 요인으로서는 성토 시공 후 시간에 따른 성토고의 자중(정적 하중)으로 인한 다짐효과이다. 세종 현장은 사토장으로 성토 후 2달이라는 짧은 시간 안에 전단파측정이 이루어져 다른 두 현장에 비하여 표층부에서의 고결화가 충분치 않은 조건이었다.

실제로 세종 현장의 표층부(2m 이내)의 평균 전단파속도(SPS 측정값)는 214m/s의 속도를 나타내었으나, 자중이 작용하여 고결화가 이루어졌다고 판단되는 3m 깊이부터는 다른 현장과도 비슷한 260m/s 이상의 전단파속도를 나타내었다. 미고결 상태의 현장전단파속도가 증가할 수 있음을 원지반에 매립형 전단파속도 모니터링

센서를 설치하여 최종 성토 완료 후 대략 7일, 3개월 뒤 전단파 속도를 측정한 결과는 각각 215m/s에서 235m/s로 9% 정도 증가함을 통해 알 수 있었다.

[표 7.11] 각 시험현장의 성토기간 및 특징

시험 현장	성토 기간	현장 시험 일자	특징
화성	2021.07 ~ 2021.11	2022.05.12	뒤채움 다짐(1 ton 다짐장비) 및 성토 시공 후 충분한 시간 경과
파주	2022.03 ~ 2022.06	2022.05.20	성토 중 중장비 및 차량의 이동 통로로 사용되어 동적 하중이 작용
세종	2022.07 ~ 2022.08	2022.09.01	최소한의 다짐이 없으며, 중장비 및 차량의 이동이 최소화 됨

제 8장

성토층 전단파속도 산정방안

LANDSLIDE INSTITUTE

&

제8장 성토층 전단파속도 산정방안

8.1 경험식을 이용한 성토층 전단파속도 산정

실무부서에서는 지반조사 후 시공되는 성토부지에 대한 전단파속도는 추정식인 Yamazaki 식 [$V_s = 89.1 \cdot N^{0.34}$]을 이용하여 추정하고 있는데, 이때 N값을 성토 높이와 강도에 상관없이 일률적으로 8로 가정하여 성토층의 전단파속도는 181m/s 단일 값으로 사용하고 있다. 그러나 해당 경험식은 흙의 종류나 성토에 따른 응력변화를 고려하지 못하고 오로지 N값에만 의존한다. 따라서 현장시험 결과를 근거로 하여 보다 효율적인 전단파속도 경험식을 제시하며, 현장에서 직접 측정한 전단파속도와 상관성을 비교 분석하고자 한다.

8.1.1 Brandenberg 경험식 개요

Brandenberg et al.(2010)은 캘리포니아 교량 인근 지반 조사 자료를 기초로 표준관입시험(SPT) N치와 연직유효응력을 기초로 V_s 를 산정하는 경험식을 제안하였다. 제안된 식은 다음과 같다:

$$\ln(V_s) = \beta_0 + \beta_1(N_{60}) + \beta_2 \ln(\sigma'_v) \quad (\text{식 8.1})$$

여기서, V_s : 전단파속도
 σ'_v : 유효연직응력
 $\beta_0 = \beta_1 = \beta_2$: 재료상수

[표 8.1] Brandenberg et al.(2010) 경험식의 재료 상수

Soil type	β_0	β_1	β_2	σ	τ
Sand	4.045	0.096	0.236	$0.57 - 0.07 \ln(\sigma'_v) \text{ if } \sigma'_v \leq 200kPa$ $0.20 \text{ if } \sigma'_v > 200kPa$	0.217
Silt	3.783	0.178	0.231	$0.31 - 0.03 \ln(\sigma'_v) \text{ if } \sigma'_v \leq 200kPa$ $0.15 \text{ if } \sigma'_v > 200kPa$	0.227
Clay	3.996	0.230	0.164	$0.21 - 0.01 \ln(\sigma'_v) \text{ if } \sigma'_v \leq 200kPa$ $0.16 \text{ if } \sigma'_v > 200kPa$	0.227

8.1.2 현장시험 결과와 Brandenberg 경험식의 비교

세 현장의 현장 전단파시험 결과와 Brandenberg et al. (2010)에서 제시한 경험식을 표 7.2와 같이 비교하였다. 현장시험은 SPS검층 및 다운홀 시험(DHT)으로 측정된 심도별 전단파속도를 나타내었으며, 표준관입시험으로 얻어진 N_{60} 은 에너지 효율(75%)을 고려하여 N_{60} 으로 계산하였다. 경험식의 재료 상수는 현장 지반상태(실트질 모래)를 고려하여 모래로 분류하였으며, 연직유효응력(σ'_v)의 경우 밀도검층 결과에 중력가속도를 고려하여 흙의 단위 체적 중량(kN/m^3)으로 계산하였다.

[표 8.2] 현장 전단파속도 측정 결과와 경험식의 비교

시험지역	성토심도 (GL.-m)	현장시험 결과			Brandenberg 경험식		Yamazaki
		V_{S_SPS} (m/s)	V_{S_DHT} (m/s)	N_{60} (ER=75%)	σ'_v (kPa)	V_s (m/s)	V_s (m/s)
화성	1	270	250	2	16.66	134	181
	2	282	263	6	33.32	232	181
	3	291	268	6	49.98	256	181
파주	1	241	228	8	16.76	239	181
	2	256	241	16 (측정 값)	33.52	608	181
				8 (예상 값)	33.52	281	
	3	264	259	7	50.27	282	181
세종	1	212	208	6	16.99	198	181
	2	215	210	7	33.99	257	181
	3	267	212	7	50.98	283	181
	4	277	221	7	67.92	303	181
	5	261	254	10	84.97	426	181

8.1.3 결론

화성, 파주, 세종의 현장의 성토층의 심도별 유효응력은 매우 유사한 값을 보이며 유효응력 증가에 따라 전단파속도가 증가하는 경향을 보여준다. 일반적으로 N값이 증가할수록 전단파속도는 증가한다고 알려져 있으며, Brandenberg 경험식 같은 경우 N값에 의해 전단파속도가 큰 영향을 받게 된다. 그러나 파주 현장(GL.-2m 위치)과 같이 자갈이 혼재되어 있는 사질토 지반의 경우 동일한 부지 내에서도 N값이 크게 변할 수 있다.

표준관입시험 결과인 N값과 전단파속도와의 상관관계식 개발은 표 7.3과 같이 다양한 연구자들에 의해 제안되었으며, 그러나 각 추정 식들은 서로 다른 결과 값을 보여주며, 이러한 추정식의 차이는 지반설계 시 혼란을 초래할 수 있다. 이러한 내용들을 근거로 추정된 N값을 사용하여 지반의 전단파속도를 산정하기에는 다소 무리가 있다고 판단된다.

[표 8.3] N값별 전단파속도의 경험적 추정식(도종남, 2011)

제안자	전단파속도 추정식	토질조건
Imai and Yoshimura (1969)	$V_S=92.10 \cdot N^{0.329}$	전체토
Ohta and Goto (1978)	$V_S=86.9 \cdot N^{0.329}$	점성토
	$V_S=88.4 \cdot N^{0.333}$	사질토
	$V_S=75.3 \cdot N^{0.351}$	자갈층
	$V_S=85.34 \cdot N^{0.348}$	전체토
Okamoto (1980)	$V_S=125 \cdot N^{0.3}$	전체토
Imai (1982)	$V_S=97 \cdot N^{0.314}$	전체토
Imai and Tonouchi (1982)	$V_S=107 \cdot N^{0.274}$	점성토
	$V_S=87.8 \cdot N^{0.314}$	사질토
	$V_S=97 \cdot N^{0.314}$	전체토
Athanasopoulos (1994)	$V_S=107.6 \cdot N^{0.36}$	전체토
김동수 (2003)	$V_S=98.38 \cdot N^{0.29}$	전체토
Sun et al. (2006)	$V_S=65.64 \cdot N^{0.407}$	전체토
선창국 등 (2008)	$V_S=82.01 \cdot N^{0.319}$	사질토
	$V_S=78.63 \cdot N^{0.361}$	자갈층
	$V_S=75.76 \cdot N^{0.371}$	풍화토
	$V_S=107.94 \cdot N^{0.418}$	풍화암
	$V_S=65.64 \cdot N^{0.407}$	
정남훈 (2009)	$V_S=187.3 \cdot N^{0.128}$	점성토
	$V_S=128.3 \cdot N^{0.386}$	사질토
	$V_S=438.1 \cdot N^{0.110}$	풍화토

한국토지주택공사 (2009)	$V_S=144.7 \cdot N^{0.380}$	전체토
	$V_S=151.2 \cdot N^{0.225}$	점성토
	$V_S=173.9 \cdot N^{0.176}$	사질토
	$V_S=175.6 \cdot N^{0.161}$	자갈층
	$V_S=163.9 \cdot N^{0.210}$	풍화토
	$V_S=182.3 \cdot N^{0.229}$	풍화암

8.2 성토층의 전단파속도 산정

8.2.1 압밀시험을 이용한 전단파속도 산정

본 과업에서는 실내시험 결과를 근거로 성토층의 상대밀도 및 수직응력을 고려한 전단파속도 추정 방식을 제시하고자 한다. 실내시험은 기본물성 시험 결과를 토대로 세 현장에서 채취한 시료들에 대하여 압밀 시험을 수행하였으며, 벤더엘리먼트 센서를 압밀셀에 부착하여 전단파속도를 측정 및 분석하였다. 현장에서 채취한 시료들은 5층 과소다짐법을 사용하여 상대밀도를 30%, 50%, 70%, 90%로 조성하였다. 세종 현장에서 채취한 시료는 동일한 다짐법으로 상대밀도 80%를 추가로 수행하였다. 측정된 전단파속도를 바탕으로 상대밀도별로 시료의 α 계수, β 지수를 산정하여 전단파속도 추정식을 제공하고자 한다.

실내시험 결과를 이용한 현장의 성토층 전단파속도 추정방법은 다음과 같다.

① 들밀도 시험은 측정지반의 흙을 파내어 구멍을 뚫고 그 흙의 중량과 시험구멍의 체적으로 흙의 단위중량을 계산하는 방법이다. 시험구멍의 체적은 KS F 2311에서 제안된 방법으로 모래치환법을 이용하여 산정할 수 있다. 이 방법은 다양한 흙 구조물의 다짐 정도를 측정하는데 이용할 수 있으며, 현장 건조 단위 중량($\gamma_{d(field)}$)을 구할 수 있다. 현장 건조 단위 중량과 함수비의 관계를 이용하여 흙의 단위 중량을 구하는 식은 다음과 같다:

$$\gamma_{d(field)} = \frac{\gamma}{1 + \omega} \quad (\text{식 8.2})$$

여기서, $\gamma_{d(field)}$: 현장 건조 단위 중량
 γ : 흙의 단위 중량
 ω : 함수비

현장 및 실내 시험이 불가능한 경우 표 8.4를 근거로 흙의 단위중량에 중력가속도 (9.8m/s^2)를 곱하여 흙의 단위 체적 중량(kN/m^3)으로 계산한다.

[표 8.4] 흙의 단위중량 추정표 (한국도로공사)

종류		상태		단위체적중량(t/m ³) (지하수위 이상)	분류기호	
성 토	모래 섞인 자갈	다진것		2.0	GW, GP	
	모 래	다진것	입도가좋은것	2.0	SW, SP	
			입도가나쁜것	1.9		
	사질토	다진것		1.8	SM, SC	
	점성토	다진 것		1.7	ML, CL	
자 연 지 반	자갈	밀실한 것 또는 입도가 좋은것		2.0	GW, GP	
		밀실한 것 또는 입도가 나쁜것		1.8		
	자갈 섞인 모래	밀실한 것		2.1	GW, SC	
		밀실하지않은것		1.9		
	모 래	밀실한 것 또는 입도가 좋은것		2.0	GW, SC	
		밀실한 것 또는 입도가 나쁜것		1.8		
	사질토	밀실한 것		1.9	SM, SC	
		밀실하지않은것		1.7		
	점성토	경질의것		1.8	ML, CL	
		연질의것		1.6		
	실트	경질의것		1.6	ML	
		연질의것		1.4		
	점토	경질의것		1.7	CH, MH	
		연질의것		1.5		
	※ 한국도로공사: 도로설계요령 제2 권 p22					

② 심도에 따른 수직응력을 다음 식으로 계산한다.

$$\sigma_v = \gamma \cdot g \cdot z \quad (\text{식 7.3})$$

여기서, γ : 흙의 단위 중량 (t/m^3)
 g : 중력가속도 (9.8m/s^2)
 z : 심도 (m)
 σ_v : 수직응력 (kPa)

③ 상대밀도(D_r)

들밀도 방법은 측정지반의 흙을 파내어 구멍을 뚫고 그 흙의 중량과 시험구멍의 체적으로 흙의 단위중량을 계산하는 방법이다. 시험구멍의 체적은 KS F 2311에서 제안된 방법으로 모래치환법을 이용하여 산정할 수 있다. 이 방법은 다양한 흙 구조물의 다짐 정도를 측정하는데 이용할 수 있으며, 현장 건조 단위 중량($\gamma_{d(field)}$)을 구할 수 있다. 현장의 건조 단위 중량과 실내다짐시험으로부터 구한 최대, 최소 건조단위중량을 이용한 상대밀도 식은 다음과 같다:

$$D_r = \frac{\gamma_{d(field)} - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}} \cdot \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_{d(field)}} \cdot 100 \quad (\text{식 8.4})$$

여기서, $\gamma_{d(field)}$: 현장 건조 단위 중량
 γ_{dmax} : 실내다짐시험 결과로부터의 최대 건조단위중량
 γ_{dmin} : 실내다짐시험 결과로부터의 최소 건조단위중량

Mohammadi et al.(2008)은 DCP 시험으로부터 얻은 관입저항지수(DCPI)를 이용한 상대밀도 추정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$D_r = 189.93 / (DCPI)^{0.53} \quad (R^2 = 0.98) \quad (\text{식 8.5})$$

여기서, $DCPI$: DCP 관입 지수 (mm/blow)

④ 현장의 상대밀도를 고려하여 식 8.3으로 구해진 수직응력과 실내시험 결과로부터 얻은 α 계수와 β 지수를 이용하여 아래와 같이 전단파 속도를 추정한다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_v}{kPa} \right)^\beta \quad (\text{식 8.6})$$

여기서, σ'_v : 수직방향의 유효응력

α, β : 실험적으로 결정되는 계수 및 지수

[표 8.5] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (화성)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
α	75.9m/s	81.7m/s	100.2m/s	113.2m/s
β	0.256	0.252	0.229	0.220

[표 8.6] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (파주)

상대밀도	30%	50%	70%	90%
α	68.1m/s	87.5m/s	112.2m/s	119.5m/s
β	0.268	0.241	0.214	0.212

[표 8.7] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 α 계수, β 지수 산정 값 (세종)

상대밀도	30%	50%	70%	80%	90%
α	68.7m/s	91.5m/s	103.2m/s	123.9m/s	145.2m/s
β	0.249	0.231	0.227	0.202	0.191

8.2.2 매립형 탄성과 모니터링 장비를 이용한 검증

세종 현장은 이미 성토가 완료된 화성 및 파주 현장과 달리 성토를 진행하지 않은 현장에서 성토 후 시험을 수행하였다. 실내시험 결과 비교 및 성토하중에 전단파속도를 측정하기 위해 그림 8.1과 같이 원지반에 벤더 엘리먼트가 설치된 매립형 탄성과 모니터링 장비를 개발하여 성토 전에 설치하였다.

성토는 5단계 (0.5, 1.5, 3.5, 4.5, 5m)로 수행하였으며, 성토 단계별로 전단파속도 측정 및 수직응력을 계산하여 표 8.8 및 그림 8.2와 같이 나타내었다. 매립형 탄성과 모니터링 장비로 측정된 결과로부터 현장 성토층의 상대밀도는 대략 40% 정도로 추정할 수 있다. 성토 완료 후 지반의 전체적인 상대밀도를 파악하기 위해 DCPI 시험을 수행하였으며, 식

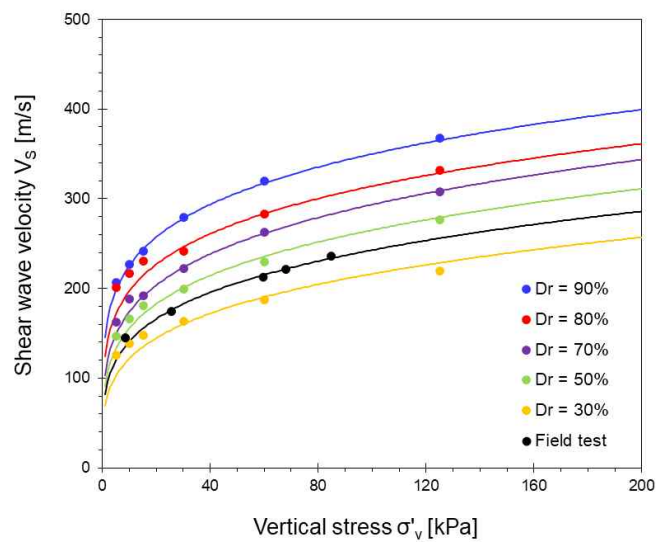
8.5를 이용하여 심도별 상대밀도를 그림 8.3에 나타내었다. 세종 현장의 성토층은 자갈이 많아 지반의 관입저항을 명확하게 파악하기 어렵다. 따라서 현장에서 기록된 야장을 근거로 자갈로 인해 관입저항이 과대평가된 지반을 제외한 구간의 평균값을 나타내었다. 이는 매립형 탄성과 모니터링 장비를 이용해 측정된 결과와 유사한 결과를 보여준다.



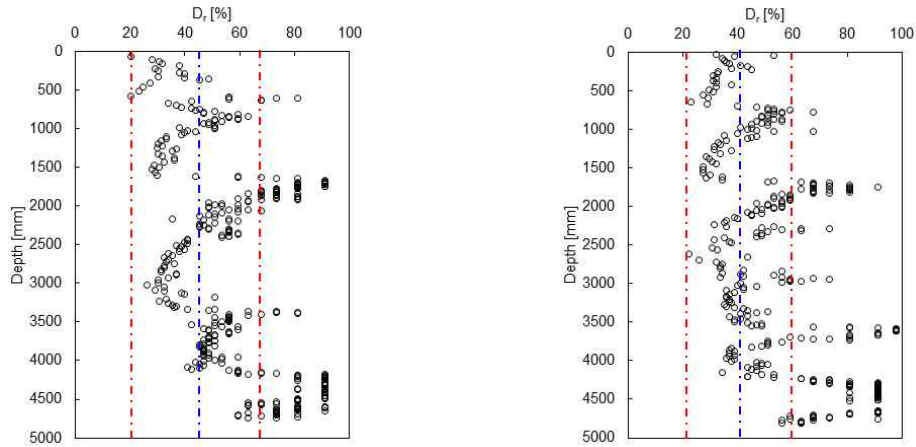
[그림 8.1] 매립형 탄성과 모니터링 장비

[표 8.8] 매립형 장비로 측정된 성토고(H)에 따른 전단파속도 (세종)

embankment, H(m)	Stress (kPa)	V_s (m/s)
0.5	8.4966	145
1.5	25.4898	174
3.5	59.4762	213
4.5	67.9728	221
5	84.966	236



[그림 8.2] 현장 측정결과와 실내시험 결과 비교



[그림 8.3] DCPI를 이용한 상대밀도 추정

추가로 자연 함수비 7%를 고려하여 식 8.2와 8.4를 사용하여 표 8.9와 같이 계산하였다. 계산된 상대밀도는 42.5%로, 매립형 탄성과 모니터링 장비와 DCPI로 추정된 상대밀도와 매우 유사하게 나타났다.

[표 8.9] 세종 현장시료의 상대밀도 계산 결과

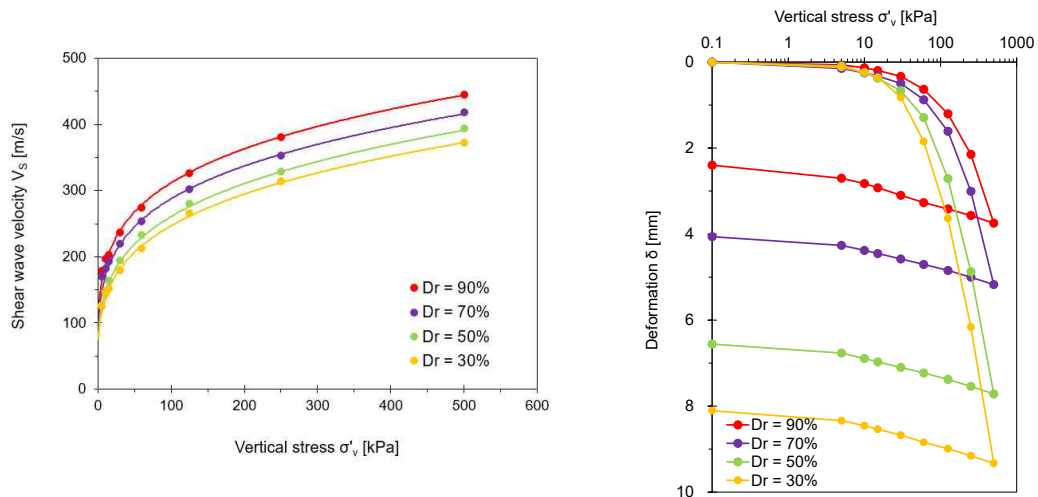
물성치	세종	상대밀도 (D_r)
최대 건조 단위중량 (γ_{dmax})	18.47 kN/m ³	42.5 %
최소 건조 단위중량 (γ_{dmin})	14.39 kN/m ³	
현장 건조 단위중량 ($\gamma_{d(field)}$)	15.88 kN/m ³	

8.2.3 결론

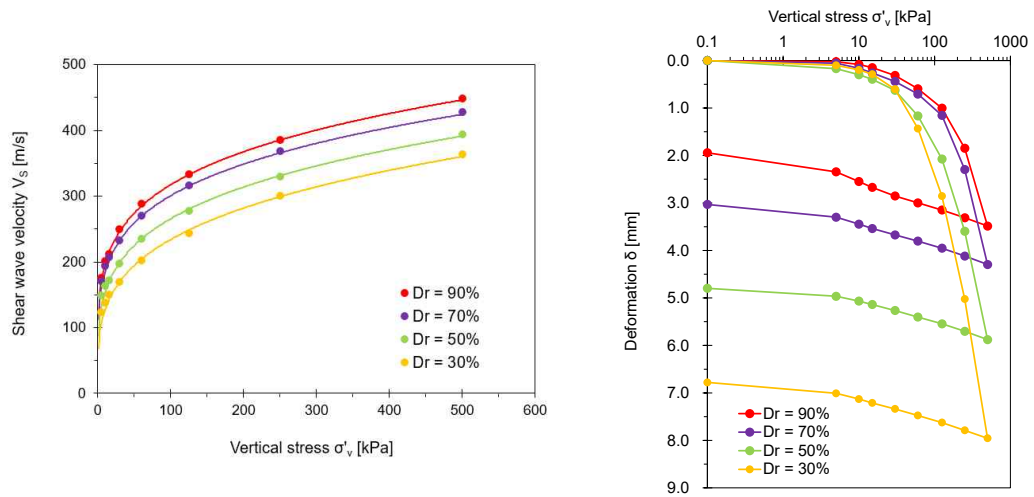
시험을 수행한 세 현장의 성토층은 토질분류법(unified soil classification system)에 근거하여 주로 SM으로 분류되며, 단위중량은 화성 (1.7 g/cm³), 과주 (1.71 g/cm³), 세종 (1.734 g/cm³) 으로 서로 유사한 결과를 보여준다. 또한, 비다짐 혹은 최소한의 다짐이 수행된 현장으로 표 8.4의 밀실 하지 않은 사질토에 해당한다. 그

러나 유사한 토질 특성을 가지고 있음에도 불구하고, 같은 상대밀도와 유효 응력에
서 전단파속도가 최대 20%까지 차이가 발생한다. 이는 각 현장의 시료의 간극비 차
이라고 판단된다(표 5.2). 화성과 파주 현장의 경우 아파트 건설 현장으로 성토재료
의 품질기준을 통과한 흙을 사용하였으나, 세종 현장의 경우 사토장이기 때문에 시
료의 차이가 발생한다. 따라서 그림 8.4, 8.5, 8.6의 침하량 곡선과 같이 화성과 파
주의 시료의 경우 세종에 비해 최대, 최소 간극비가 크기 때문에 동일한 수직응력에
서 더 큰 변형이 발생하는 모습을 보여준다.

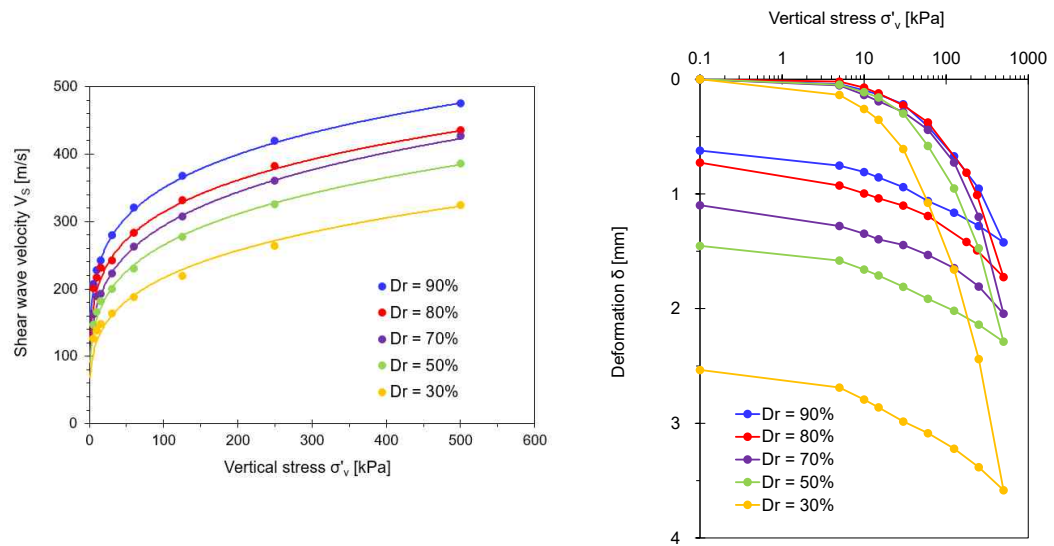
세종 현장에서는 압밀시험을 이용한 성토층 전단파속도 추정방법을 검증하기 위해
매립형 탄성과 모니터링 장비를 이용하여 성토고에 따른 전단파속도를 측정하였으
며, 심도를 수직응력으로 계산하여 압밀시험 결과와 비교하였다. 세종 현장의 경우
성토층은 상대밀도 40% 정도의 보여주며, 이는 DCPI 및 식 8.4를 이용하여 계산한
결과(표 8.9)와 유사한 결과 값으로 나타났다. 따라서 압밀시험을 이용한 전단파속
도 산정 방법을 근거로 현장의 상대밀도 및 수직응력을 계산하여 전단파속도를 추정
할 수 있을 것으로 판단된다. 추가로, 화성과 파주 현장의 경우 아파트 건설현장으로
성토재료의 품질기준을 통과한 흙을 사용하였기 때문에, 이와 유사한 성토재료를 사
용한 현장일 경우 화성, 파주의 자료(단위중량, α , β 계수)를 사용할 것을 추천한다.



[그림 8.4] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 및 침하량 (화성)



[그림 8.5] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 및 침하량 (과주)



[그림 8.6] 상대밀도별 수직유효응력에 따른 전단파속도 및 침하량 (세중)

제 9 장

내진설계 향상을 위한 로드맵(제언)

LANDSLIDE
INSTITUTIONS

&

구조물의 내진설계 향상을 위한 로드맵(제언)은 다음과 같다.

1) 지하층의 형상비(B/H)를 고려한 설계지반운동 산정 방법

국내 많은 대형 주거단지는 복수의 아파트 건물들이 공유하는 연결된 지하층과 연결된다. 지하층의 폭(B)은 높이(H)에 비하여 매우 큰 것이 특징이다. 즉, B/H는 단일 건물에 비하여 상대적으로 크게 높다. 이와 같은 경우 지하층의 양 측면 경계에서 전달되는 에너지는 기초 저면을 통하여 전파되는 에너지에 비하여 작게 된다. 설계지반운동 산정 시 자유장 지표면의 운동을 적용하는 실무 practice는 B/H가 작은 구조물에는 적합하지만 B/H가 큰 경우에는 적합하지 않다. 따라서 다양한 매개변수 연구를 통하여 B/H에 따른 설계지반운동 산정 방법에 대한 연구가 필요하다. 이를 통하여 설계 하중을 크게 감소할 수 있을 것으로 기대된다.

2) 지하층 토압 산정 및 지하층 방법

KDS 47 17 00 등 국내외 내진설계에서는 지하층의 내진설계에 있어서 Monobe-Okabe(1926, 1929) 또는 Seed and Whitman(1970) 등이 제안한 간편화된 토압식을 사용하여 이를 산정한다. Al Atik and Sitar(2007)은 기존의 방법의 신뢰도에 문제가 있음을 지적하였다. Monobe-Okabe(1926, 1929) 또는 Seed and Whitman(1970)의 방법은 옹벽에 대해서 개발된 식으로 지하층에는 적합하지 않을 수 있다. 대안으로 지하구조물의 형상비(B/H)를 고려할 수 있는 Wood(1973) 식을 사용할 수 있다. 단, 이 방법은 강체 지하구조물에 대해서 적용 시 주의가 필요하다. 지하층의 B/H와 상대강성을 나타내는 유연도비(Flexibility ratio)를 고려하여 토압을 산정하는 방법의 개발이 필요하다. 나아가 토압과 동적 구조물-지반 상호작용을 고려한 지하층 지진해석 가이드라인의 제시가 필요하다고 판단된다.

3) 아파트 자중을 고려한 원지반의 전단파속도 산정

성토하중에 의해서 원지반의 전단파속도가 증가하는 현상이 현장실험 및 수치 해석에 의해 규명되었으므로, 성토하중에 비하여 5 ~ 10배 이상 큰 아파트 자중이

지반에 가해졌을 때 전단파속도 증가량은 더 클 것으로 예상할 수 있으며, 이로 인해 내진설계에도 더 유리할 것으로 판단된다. 단, 아파트의 자중의 말뚝과 기초 판에 의해 지지되어 지지 메커니즘이 복잡하고, 현장 실측에 어려운 점이 많이 있음. 실무적으로 필요성 판단에 의해 후속 연구를 생각해 볼 수 있음.

제 10 장
결 론

LANDSLIDE
INSTITUTIONS
AND HUMANITY

&

성토층의 전단파속도와 성토로 인한 원지반의 전단파속도 증가에 대한 것을 규명하고 합리적으로 전단파속도를 산정하기 위하여 현장 및 실내실험과 수치해석 등을 수행한 결론은 다음과 같다.

1. 기존 LH 실무에서 사용하는 Yamazaki(N=8로 가정)식은 지중응력을 고려하지 못하기 때문에 성토층이 깊어짐에도 동일한 전단파속도(181m/s)를 나타내나, 현장 및 실내시험에 의해 구한 전단파속도는 깊이에 따라 전단파속도가 증가하고, 그 값 또한 Yamazaki(N=8로 가정)식으로 구한 값 보다 크게 나타났다.

2. 성토층의 평균전단파속도를 현장 측정된 결과는 아래 표와 같으며 화성과 파주 성토층의 전단파속도가 세종 보다 다소 크게 나타난 것은 화성과 파주는 준공시점으로 지반의 다짐과 안정화가 많이 되었고, 세종은 성토 후 2달 정도 밖에 지나지 않아 자중에 의한 다짐과 고결화가 충분치 않았기 때문으로 판단된다. 특히, 표토부근의 전단파속도는 작게 나타나 표토 부근이 고결화가 아직 안되었을 유추할 수 있고, 준공시점이 되면 세종도 전단파속도가 다른 현장과 유사한 수준으로 증가할 것으로 예상된다.

[표 10.1] 현장 성토층 전단파속도 실측 결과

화성(3m 성토)		파주(3m 성토)		세종(5m 성토)	
SPS	다운홀	SPS	다운홀	SPS	다운홀
281m/s	260m/s	253m/s	243m/s	246m/s	221m/s

3. 성토 전후에 기존 토층부에서의 전단파속도 현장측정값을 비교한 결과 성토로 인한 지중응력의 증가로 SPS 시험결과는 세 현장 평균 25%, 다운홀 시험결과는 13% 증가하는 것으로 나타났다.

4. 최초 지반조사시의 전단파속도와 Yamazaki(N=8로 가정)을 성토층에 적용 시

화성과 파주는 S2 등급, 세종은 S3 등급(KDS 41 17 00)을 나타내었으나, 성토 후에 실측 한 결과는 세 현장 모두 S2 등급을 나타내었다. 따라서, 성토층과 성토 후의 원지반의 전단파를 합리적으로 산정하면 현장조건에 따라서 지반등급 상향이 가능할 것으로 판단되었다.

5. 수치해석 결과 성토 시에 성토고와 폭에 관계 없이 지중응력이 증가하는 양상을 보였으며, 이에 따라 전단파속도도 증가하는 양상을 보였으며, 실제 현장의 성토고를 반영하였을 때 전단파속도는 성토전보다 세 현장 평균 25% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 현장의 SPS와 다운홀시험과 유사한 값을 나타내므로 성토고에 따른 원지반의 전단파속도를 수치해석으로 적절히 산정할 수 있는 것으로 파악되었다. 본 보고서 6장에 수치해석에 의해 전단파속도를 산정하는 방법을 제시하였다.

6. 실내실험결과 다짐도가 증가함에 따라 전단파속도가 비례적으로 증가하여 성토층을 다질수록 내진설계에 유리함을 알 수 있었다.

7. 성토층에 대한 실내와 현장 전단파실험결과를 비교한 결과 화성의 현장전단파속도(SPS, DHT)는 90% 다짐도의 실내전단파속도와, 파주는 70%~90% 이상의 다짐도의 실내전단파속도와, 세종은 42~75% 다짐도의 실내전단파속도와 유사하게 나타났다. 세종 현장전단파속도(SPS, DHT)가 타현장에 비해 표토부근이 작게 나타난 것은 성토 후 두 달 이내 시험하여 자연다짐 및 고결화가 되지 않았기 때문으로 판단된다.

※ 화성의 현장전단파속도가 다른 현장에 비하여 크고 균등한 값을 나타낸 것은, 화성은 되메우식 성토를 하여 다짐기를 이용한 층별 다짐을 하였기 때문으로 판단된다.

8. 실내시험 결과를 이용하여 성토층의 다짐도별 전단파속도 추정 방법을 제시하였으며, 다짐도에 대한 적절한 시공/품질 목표를 세우면 본문의 (식 5.1)을 이용하여

성토층의 전단파속도 산정이 가능하다.

이때, 본 연구와 유사한 성토재료를 현장에는 화성과 파주 시료의 α 계수 및 β 지수 (표 8.5 및 8.6)를 이용하여 성토층 전단파속도를 산정하고 둘 중 작은 값을 사용하는 안전측 설계를 권장한다.

또한, 성토층에 다짐을 하지 않았다면 70%의 다짐도로 전단파속도를 산정하고, 다짐을 하였다면 해당 다짐도로 산정하면 된다.

9. N값과 지중응력을 고려하는 Brandenberg et al(2010) 식도 적절한 N값을 반영할 경우 실무에서의 사용이 가능리라 판단된다.

10. 성토층과 성토 후 원지반의 전단파 속도를 본 연구에서 제시한 방법으로 산정할 경우 지반등급 또는 내진설계범주의 상향조정으로 상부구조물의 원가절감(내진설계범주 D→C 상향조정 시, 동당 96백만 원)과 설계비 및 설계기간(4개월) 감소 등의 설계 관련 업무의 개선이 이루어질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

L	A	N	D	I	N	G	T	E
H	O	U	S	I	T			
I	N	S	T	I				

&



참고문헌

- Brandenberg, S. J., Bellana, N., & Shantz, T. (2010). Shear wave velocity as function of standard penetration test resistance and vertical effective stress at California bridge sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 1026–1035.
- Do, J., Hwang, P., Chung, S., & Chun, B. (2011). Analysis on Relation of S-wave Velocity and N Value for Stratum in Chungcheong Buk-do. *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, 12(10), 13–22.
- Knox, R. A., & Halpern, D. (1982). Long range Kelvin wave propagation of transport variations in Pacific Ocean equatorial currents. *J. Mar. Res.*, 40(329), 39.
- Kotake, N., Tatsuoka, F., Tanaka, T., Siddiquee, M. S. A., & 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.
- Lee, J. S., & Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(9), 1063–1070.
- Li, X., Han, X., & Pastor, M. (2003). An iterative stabilized fractional step algorithm for finite element analysis in saturated soil dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(35–36), 3845–3859.
- Logan, D. L. (2016). *A first course in the finite element method*. Cengage Learning.

- Loganathan, N., Balasubramaniam, A. S., & Bergado, D. T. (1993). Deformation analysis of embankments. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(8), 1185–1206.
- Ouzaid, I., Benmebarek, N., & Benmebarek, S. (2020). FEM optimisation of seepage control system used for base stability of excavation. *Civil Eng J*, 6(9), 1739–1751.
- Roesler, S. K. (1979). Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(7), 871–880.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2001). *Soils and waves*. New York: J. Wiley & Sons.
- Smith, M. (2009). *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.9.
- Stewart, W. P., & Campanella, R. G. (1993). Practical aspects of in situ measurements of material damping with the seismic cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(2), 211–219.
- Török, Á., Barsi, Á., Bögöly, G., Lovas, T., Somogyi, Á., & 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.
- Yu, P., & Richart Jr, F. E. (1984). Stress ratio effects on shear modulus of dry sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(3), 331–345.