

공진주와 비틀전단시험에 의한 성토지반의 전단파속도 추정에 관한 연구

Evaluation of Shear Wave Velocity of Engineering Fill by Resonant Column and Torsional Shear Tests

박종배¹ · 심영종² · 정종석³ · 박용부⁴

Jong-Bae Park¹, Young-Jong Sim², Jong-Suk Jung³ and Yong-Boo Park⁴

(Received September 4, 2011 / Revised October 17, 2011 / Accepted October 25, 2011)

요 약

국내 건축구조물의 내진설계기준에 의하면 현장탄성파시험으로 전단파속도를 측정하여 지반을 5종으로 분류하고 이에 의해 건축물에 작용하는 지진하중을 산정하고 있으나 공정상 성토지반에 대해서는 현장탄성파시험을 할 수 없다. 이에 실내에서 간편하게 현장의 상황을 고려하여 전단파속도를 추정할 수 있는 방법을 찾고자 공진주/비틀전단시험과 각종 현장 탄성파 시험결과를 비교·분석하였다. 분석결과 성토체의 구속압을 적절히 고려할 경우 현장 탄성파 시험결과와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 공진주/비틀전단시험에 의해 최대 전단탄성계수와 구속압의 영향평가를 실시한 결과 n 값이 0.434~0.561의 일반적 범위의 값을 나타내어 공진주/비틀전단시험으로도 현장지반 전단탄성계수를 유용하게 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 공진주 시험, 비틀전단 시험, 전단탄성계수, 감쇠비, 성토지반, 구속압

ABSTRACT

According to the seismic design criteria for structural buildings in Korea, the ground is classified into 5 types based on the average shear wave velocity measured from elastic wave tests on site and seismic load applied to the structure is estimated. However, elastic wave tests in site, however, on the engineering fill, cannot be performed during the construction period. Therefore, to evaluate shear wave velocity considering field conditions, resonant column (RC) and torsional shear (TS) tests are performed and compared with various elastic wave test results. As a result, if confining pressure for the tests using engineering fill are considered properly, we can obtain similar results comparing with those of elastic wave tests. In addition, by considering the effect of maximum shear modulus and confining pressure by RC/TS tests, n values shows typical values ranging from 0.434 to 0.561 so that utilization of RC/TS tests can be useful to infer shear modulus in field.

Keywords: Resonant column test, Torsional shear test, Shear modulus, Damping Ratio, Engineering Fill, Confining pressure

1. 서론

현재 국내 건축구조물의 내진설계기준(국토해양부, 2009)은 지반 상부 30m 평균전단파속도($V_{s,30}$)를 이용하여 공학적으로 지반을 분류하고, 각 지반종류에 따라 설계응답스펙트럼을 달리 적용하여 건축물에 작용하는 지진하중을 산정하고 있다. 내진설계기준에서 제시하고 있는 지반분류 방법은 표 1

과 같이 S_A , S_B , S_C , S_D , 와 S_E 의 5종으로 분류한다. 내진설계에 필요한 지반의 전단파속도를 측정하여 지반분류를 하고 아파트 등의 건축구조물에 작용하는 지진력을 계산한 후 구조물에 대한 내진 보강량을 결정하게 된다.

현장지반의 전단파속도 주상도를 도출하기 위해 크로스홀(crosshole), 다운홀(downhole), 부유식 음파검층(suspension PS logging), SASW(spectral analysis of surface waves; e.g., Joh,

본 연구는 한국토지주택공사의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한 현장 탄성파탐사 및 실내실험에 대해 많은 도움을 주신 한국과학기술원의 김동수 교수님과 희송지오텍 관계자 여러분들에게 깊은 감사를 드립니다.

- 1) 토지주택연구원 수석연구원(주저자: jbpark@lh.or.kr)
- 2) 토지주택연구원 책임연구원(교신저자: yjsim@lh.or.kr)
- 3) 토지주택연구원 책임연구원
- 4) 토지주택연구원 수석연구원

표 1. 내진설계기준 제시 지반분류(국토해양부, 2009)

지반 종류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	N 치	비배수전단강도 ($\times 10^{-3}$ MPa)
S _A	경암지반	1,500 초과	-	-
S _B	보통암 지반	760~1,500	-	-
S _C	매우 조밀한 토사 또는 연암지반	360~760	> 50	> 100
S _D	단단한 토사 지반	180~360	15~50	50~100
S _E	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

1996)와 MASW(multi-channel analysis of surface wave; e.g., Xia et al., 1999) 등과 같은 현장 탄성파탐사가 널리 사용되고 있다. 대부분의 경우 공사를 착공하기 전 지반조사 단계에서 지반주상도를 작성하기 위한 시추조사와 전단파속도 측정을 병행하여 실시하고 이를 설계에 반영하고 있다.

그런데, 문제는 택지정리를 위해 성토를 실시하는 경우 지반조사와 전단파속도 측정이 완료된 이후인 실공사 기간에 이루어지기 때문에 성토지반에 대한 전단파속도를 측정할 수 없다는 문제점이 있다. 따라서, 성토지반에 대해서 별도로 굴착장비와 시험장비를 들여와 별도로 시험을 하기에는 비용 및 공정상의 문제가 있을 뿐 아니라 이미 설계가 완료된 상태이기 때문에 추가 시험 후에 당초 설계와 다른 시험결과가 나올 경우 재설계를 하여야 하는 문제점이 발생한다.

이에 본 연구에서는 번거로운 현장실험 대신에 간편한 실내실험으로 성토지반의 전단파속도를 파악하는 방법으로써 실내 공진주 및 비틀전단시험(RC/TS Test)의 유효성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 파주와 행복도시 현장의 성토지반 부지를 선정하여 각종 현장 탄성파탐사를 실시(토지주택연구원, 2009)하고 성토지반에 대한 시료를 채취하여 실내에서 공진주/비틀전단시험을 수행하여 이를 현장 탄성파탐사 결과와 비교하였다.

성토재료는 비교적 균질하다고 할 수 있으나 성토지반의 전단파속도를 좌우할 수 있는 요인으로는 성토체의 다짐정도와 성토고에 따른 지중응력의 변화라고 볼 수 있다. 이에 대해 2곳의 현장에서 들밀도시험을 실시하여 현장밀도를 확인한 후 시료를 채취하여 지중응력 변화에 따른 실내 공진주 및 비틀전단시험을 실시하였다.

2. 실내 공진주 및 비틀전단시험(RC/TS Test)

2.1 공진주 및 비틀전단시험 개요

공진주 및 비틀전단(resonant column & torsional shear, RC/TS)시험은 저변형률($0.0001\% < \gamma < 0.001\%$) 및 중간변형률($0.001\% < \gamma < 0.5\%$)에서 전단탄성계수(G) 및 감쇠비(D)와 같은 지반의 비선형 동적변형특성을 가장 신뢰성 있게 평가할

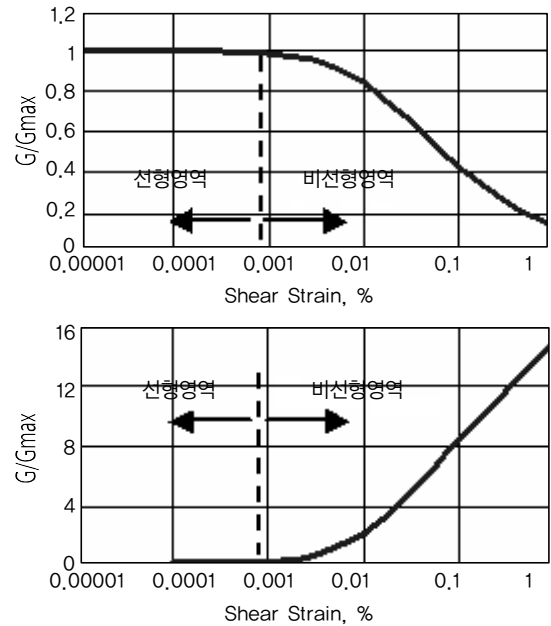


그림 1. 지반의 비선형 동적변형특성

수 있는 시험 기법으로 현재까지 널리 사용되고 있다.

본 시험에서 사용한 Stokoe type RC/TS 시험 시스템은 동일한 시편에서 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단시험을 수행하므로 두 시험 결과를 효과적으로 비교할 수 있는 장점과 더불어, 코일-자석 시스템을 이용하여 시료에 비틀력을 가함으로써 유압식이나 기계식으로 작동하는 대부분의 반복시험기와는 달리 시험 시스템의 순응도 문제없이 저변형률 영역에서 비틀전단시험을 수행할 수 있다. 공진주 및 비틀전단시험을 통해 구속압의 조건을 달리하면서 그림 1과 같이 흙의 비선형 동적변형특성[전단탄성계수(G), 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max}-\log\gamma$)과 감쇠비 곡선($D-\log\gamma$)]을 획득할 수 있다.

2.2 공진주 시험의 원리

공진주 시험 시스템의 개략적인 형상은 그림 2와 같다. 공진주 시험은 시편의 바닥을 고정시키고 정현파 비틀력을 주파수를 변화시켜가며 시료의 상단부에 작용시키고 주파수에 따른 시료의 변위를 가속도계(Accelerometer)를 통해 측정하여 그림 3과 같은 주파수 응답곡선을 획득하게 된다. 원통형 시료가 1차 모드에서 공진이 유발될 때의 탄성파 전달 이론을 바탕으로 하여 시료의 전단변형률에 따른 전단파속도, 전단탄성계수 및 감쇠비와 같은 동적물성치를 결정하게 된다 (Richart, Jr. et al., 1970).

전단변형률은 시료내부에서 중심축으로부터의 거리에 따라 변하게 되기 때문에, 등가반경을 이용하여 시료의 전단변형률 값을 대표 할 수 있는 대표 전단 변형률을 이용하게 된다. 본 연구에서는 ASTM의 규정에 의거하여 시료 반경의

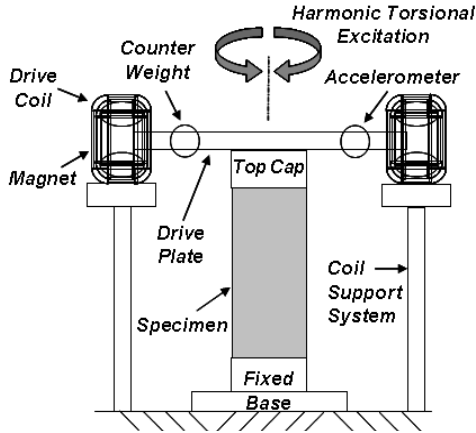


그림 2. 공진주 시험 시스템의 개략도

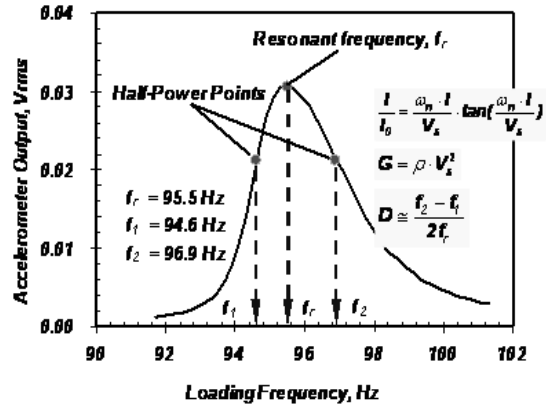


그림 3. 전형적인 주파수 응답곡선

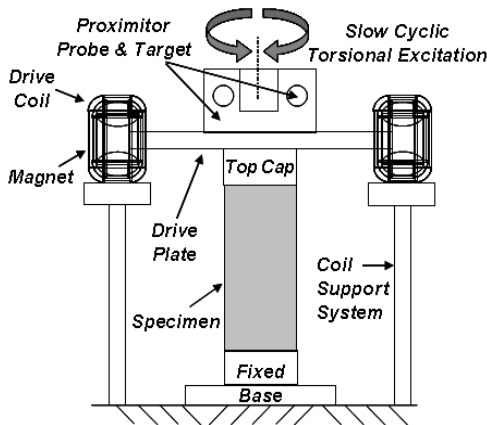


그림 4. 비틀전단 시험 시스템의 개략도

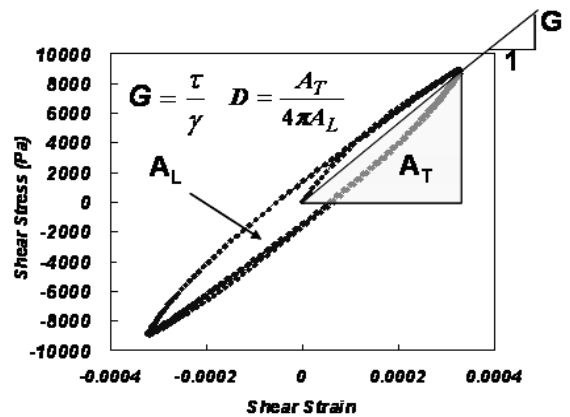


그림 5. 전형적인 응력-변형률 이력곡선

0.8배를 사용하였으며(ASTM D4015-92, 1995) 감쇠비는 자유진동 감쇠법을 사용하여 결정하였다.

2.3 비틀전단 시험의 원리

비틀전단 시험은 공진주 시험과 동일한 시험 시스템을 사용하여, 다른 시험방법에 의해 전단탄성계수 및 감쇠비를 결정하게 된다. 비틀전단 시험의 개략적인 현상은 그림 4와 같다. 10Hz 이하의 고정된 주파수의 반복 비틀력을 시료의 윗단부에 재하하며 간격측정기(Proximator)를 이용하여 시료의 비틀각을 측정하고, 코일에 가해지는 전압으로부터 비틀력 환산계수를 적용하여 비틀력을 결정하여 그림 5와 같은 응력-변형률 이력곡선을 구성한다. 가진 전압의 크기를 바꾸어 가며 각 전단변형률에서의 응력-변형률 이력곡선의 기울기로부터 전단탄성계수를 결정하게 되고, 또한 응력-변형률 이력곡선의 면적으로부터 감쇠비를 결정하게 된다. 그리고 동일한 가진 전압을 사용하며 하중주파수를 변화시키며 비틀전단 시험을 수행하여 하중주파수에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변화를 검토할 수 있다(Ishihara, 1996).

3. 현장 지반조건 및 실내시험을 이용한 지반의 동적물성치 획득

성토지반의 토질물성을 파악하기 위하여 파주현장에서 2곳 및 행복도시현장 2곳에서 시추조사 및 표준관입시험을 실시하고 시추공을 활용하여 시추공 탄성파시험인 크로스홀, 다운홀, 부유식 음파검층, SPT-업홀 방법을 수행하였고 표면파탐사인 SASW, MASW 및 HVAW(Park and Kim, 2001)를 실시하였다(토지주택연구원, 2009). 본 연구결과에서 크로스홀 시험과 다운홀 시험이 서로 유사한 결과를 나타냈으며 부유식 음파검층 기법은 토사지반보다는 암반지반에서 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하였다. 표면파 기법 비교 결과, 세 기법들의 결과가 매우 유사하게 도출되는 것을 확인할 수 있었으나 시추공 탐사법과 비교하였을 경우 과소산정 되었다. 본 연구결과는 실내실험 결과와 비교 분석을 수행하였다.

한편, 성토지반에서 채취한 성토재료를 현장에서 측정한다짐밀도와 함수비로 시료를 성형하여 공진주/비틀전단시험을 수행하였으며, 미소변형률($10^{-4}\%$)에서 중간변형률(0.1%)

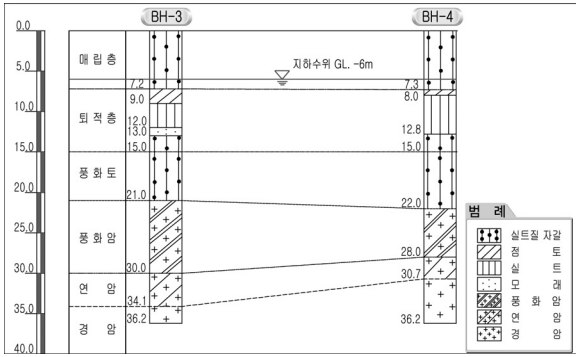


그림 6. 파주현장 지반주상도

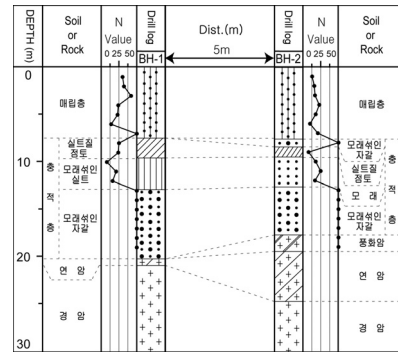


그림 7. 행복도시현장 지반조상도

표 2. 시험기법별 성토층 전단파속도 및 Vs,30(파주현장)

시험 기법		시험 종료심도 (지층명)	성토층 전단파속도(m/s)	Vs,30 (m/s)	지반 분류
시추공 탐사	크로스홀	32m (연암)	213	346.16	SD
	다운홀	35m (연암 하부)	196	269.33	SD
	SPT-업홀	34m (연암)	120	241.73	SD
	SPS-검층	35m (연암)	175	241.91	SD
표면파 탐사	SASW	16m (풍화토)	171	272.51	SD
	MASW	25m (풍화암)	169	279.23	SD
	HWAW	28m (풍화암)	170	262.89	SD

시추 주상도 : 매립층(0~7.2m), 퇴적층(7.2~15m), 풍화토(15~21m), 풍화암(21~30m), 연암(30~34.1m)

표 3. 시험기법별 성토층 전단파속도 및 Vs,30(행복도시현장)

시험 기법		시험 종료심도 (지층명)	성토층 전단파속도(m/s)	Vs,30 (m/s)	지반 분류
시추공 탐사	크로스홀	29m (경암)	239	415.43	SC
	다운홀	29m (경암)	210	346.26	SD
	SPT-업홀	21.5m (경암)	206	347.82	SD
	SPS-검층	26m (경암)	-	733.50	SC
표면파 탐사	SASW	28m (경암)	164	351.67	SD
	MASW	15m (충적층)	182	325.96	SD
	HWAW	28m (경암)	150	333.59	SD

시추 주상도 : 매립토층(0~7.6m), 충적층(7.6~20.3m), 연암(20.3~21m), 경암(21~30m)

이하의 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선 (G/G_{max})과 감쇠비 곡선($D-\log\gamma$)을 획득하였다.

3.1 현장지반 현황

국내 내진설계기준에 의하면 지표하 30m 깊이까지의 전단파속도를 측정하게 되어 있으므로 시추조사는 파주현장의 경우 36.2m까지, 행복도시현장은 30m까지 실시하였다(그림 6 및 7 참조). 지반주상도에서 성토층은 매립층으로 표시된 부분이며, 파주현장은 원지반에서 약 7.2m, 행복도시현장은 7.6m로 성토되었다.

3.2 현장 지반의 전단파속도 및 지반분류

표 2와 표 3은 각각 파주현장 및 행복도시현장에서 측정된 현장 탄성파시험결과(토지주택연구원, 2009)로 각 시험방법별 성토층의 평균전단파속도와 지표하 30m 평균전단파속도 ($V_{s,30}$) 및 지반분류 결과를 나타낸다.

현장 탄성파탐사에 의하면 성토층에서의 전단파속도는 시험방법별로 파주현장은 120~213m/s를 행복도시현장은 150~239m/s의 분포를 보였다. 현장시험방법 중 가장 정확성이 높은 것으로 알려진 크로스홀 시험법에 의하면 파주현장의 성토층은 213m/s를 행복도시현장은 239m/s를 나타내었다.

도로교설계기준(대한토목학회, 2008)에 의하면 전단파속도가 180~360m/s이면 N값이 15~50인 단단한 토사지반으로 규정하고 있어 시험한 성토층은 이에 해당하는 것으로 판단된다. 행복도시 현장에서 실시한 성토층에 대한 표준관입시험 결과는 9~50의 분포를 나타내었고 평균 N값은 15 정도를 나타내었다.

4. 공진주/비틀전단시험

4.1 시험수행 과정 및 시험조건

공진주/비틀전단시험을 수행하기에 앞서, 성토지반 시험 현장에서 채취해온 교란시료(그림 8)를 공진주/비틀전단시험 시스템에 맞게 성형(직경, 50mm, 높이 100mm)하기 위해, 5



그림 8. 채취 교란시료

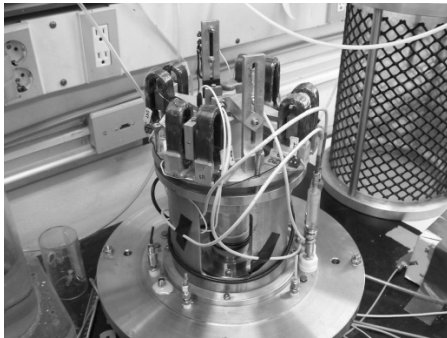


그림 9. RC/TS 시험 시스템 세팅

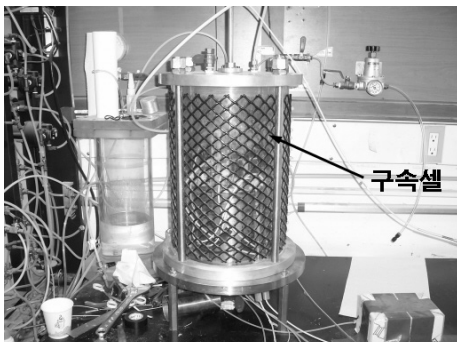


그림 10. 구속응력 재하

층 과소다짐법(under compaction method)을 적용하였다. 제작된 시험 시편을 시험기 본체에 거치한 후 공진주/비틀전단 시험 시스템을 제작하고(그림 9), 압축공기를 사용하여 등방의 구속응력을 재하하였다(그림 10). 다양한 깊이 및 구속응력에 대한 시험시편의 동적 변형특성을 평가하기 위해 8단계의 구속응력에서 시험을 반복적으로 수행하였다. 해당 깊이에서 시료가 경험하는 유효평균주응력은 파주 현장의 경우 들밀도시험으로부터 획득한 시료의 단위중량으로부터 계산하였고, 행복도시 현장의 경우 가정한 시료의 단위중량으로부터 계산하였다. 파주 현장 시료의 현장지반에서 평균주응력과 적용한 구속응력 크기를 표 4에 나타냈으며, 행복도시 현장은 정지토압계수(K_o)를 0.5로 가정하여 계산된 시료의 현장지반에서 경험하는 평균주응력과, 적용한 구속응력 크기를 표 5에 나타내었다.

공진주/비틀전단시험에서 재하할 구속응력은 식 (1)에 의하여 구할 수 있다.

$$\sigma'_m = \frac{1}{3} \sigma'_v (1 + 2K_o) = \frac{1}{3} \rho' gh (1 + 2K_o) \quad (1)$$

여기서, σ'_m 은 유효평균주응력, σ'_v 는 유효수직응력, K_o 는 정지토압계수, ρ' 는 습윤단위량, g 는 중력가속도, h 는 성토부 높이를 나타낸다.

현장들밀도시험에 의하여 구한 성토재료의 단위중량은 파주현장은 18.84kN/m³이고 행복도시현장은 20.5kN/m³이었

표 4. 성토시료의 시험 구속압(파주현장)

단위중량	깊이(m)	유효구속압
18.84kN/m ³	2	25kPa
	4	50kPa
	6	75kPa
	8	100kPa
	12	150kPa
	15	200kPa
	24	300kPa
	30	400kPa

표 5. 성토시료의 시험 구속압(행복도시현장)

단위중량	깊이(m)	유효구속압
20.5kN/m ³	1.8	25kPa
	3.7	50kPa
	5.5	75kPa
	7.3	100kPa
	11.0	150kPa
	14.7	200kPa
	22.0	300kPa
	29.3	400kPa

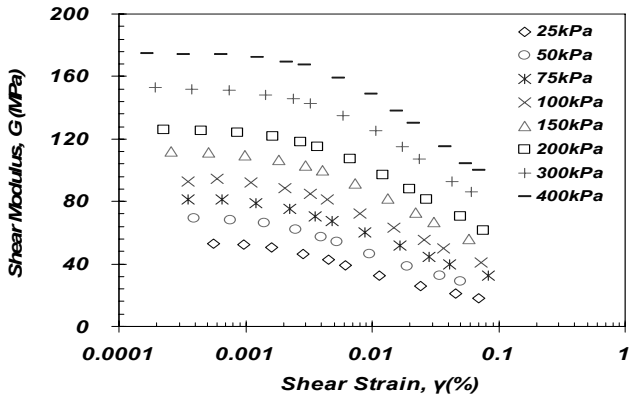
며 이를 이용하여 재하한 성토깊이별 구속압은 표 4 및 표 5와 같다.

시험내에 균일한 구속응력분포와 과잉간극수압이 제거되는 시간확보를 위하여 각 구속응력 단계에서의 6시간 동안의 압밀과정을 완료한 후, 공진주/비틀전단시험을 수행하였다. 먼저 비틀전단시험을 저변형률 단계부터 변형률 크기를 증가시키며 실시하였다. 이때 하중재하횟수는 11회로 하였고, 하중주파수는 0.5Hz로 하였다. 비틀전단시험이 완료된 후, 1시간 가량의 시험 강도 회복을 위한 휴지시간을 갖고 공진주시험을 저변형률에서 고변형률로 변형률 크기를 증가시키며 실

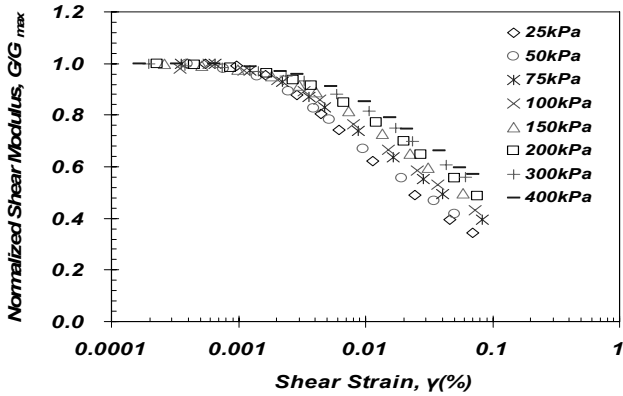
시하였다. 공진주파수는 일정한 입력전압에서 하중주파수를 바꾸어가면서 시료의 반응을 측정할 주파수응답곡선으로부터 결정한다. 공진주시험이 완료되면 다음 구속압 단계로 올려서 위와 같은 과정을 반복하며 시험을 계속하였다.

4.2 공진주/비틀전단시험에 의한 전단탄성계수의 획득

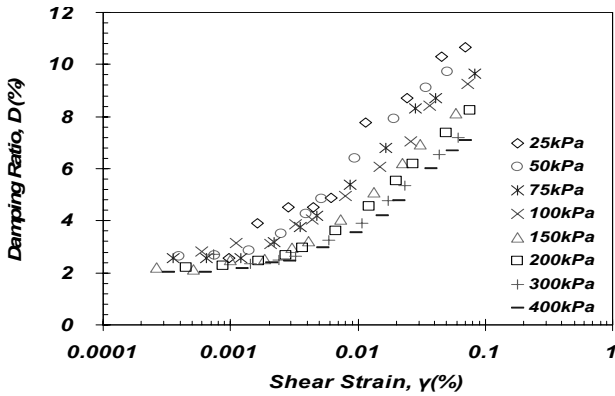
공진주/비틀전단시험을 통한 구속응력별 변형률 크기에 따른 전단탄성계수(Shear Modulus Reduction Curve, $G\text{-log}\gamma$) 감소곡선, 정규화 전단탄성계수 감소곡선(Normalized Shear Modulus Reduction Curve, $G/G_{max}\text{-log}\gamma$), 감쇠비 곡선($D\text{-log}\gamma$)을 그림 11~



(a) 전단탄성계수 감소곡선

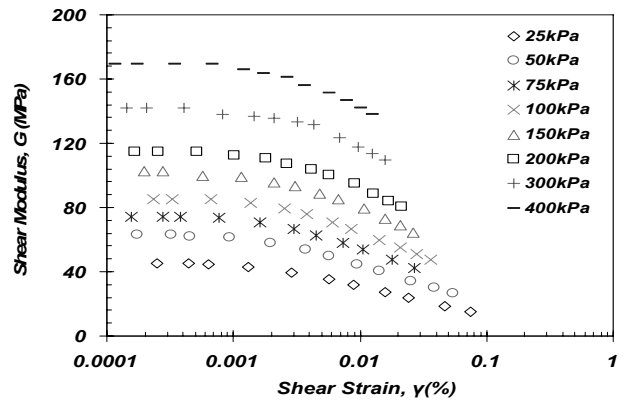


(b) 정규화 전단탄성계수 감소곡선

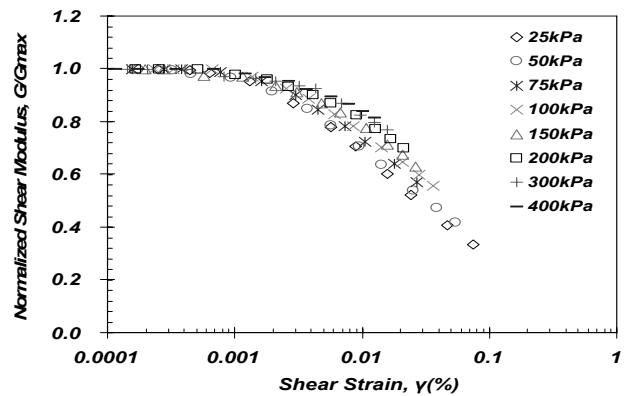


(c) 감쇠비 곡선

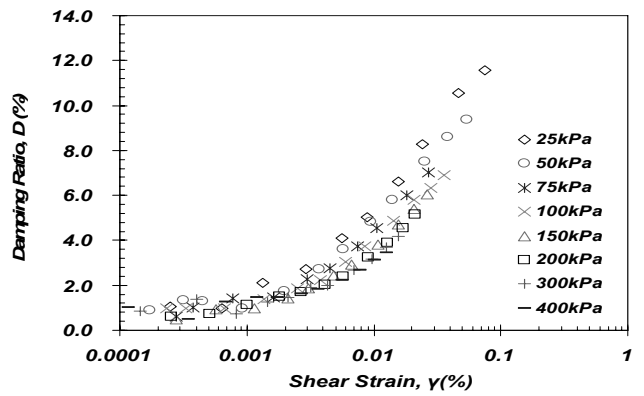
그림 11. 공진주시험 결과(파주현장)



(a) 전단탄성계수 감소곡선

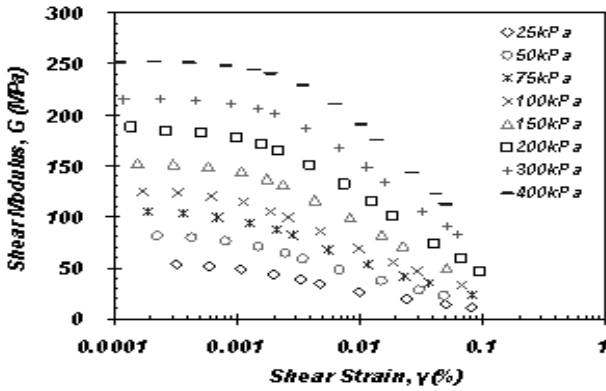


(b) 정규화 전단탄성계수 감소곡선

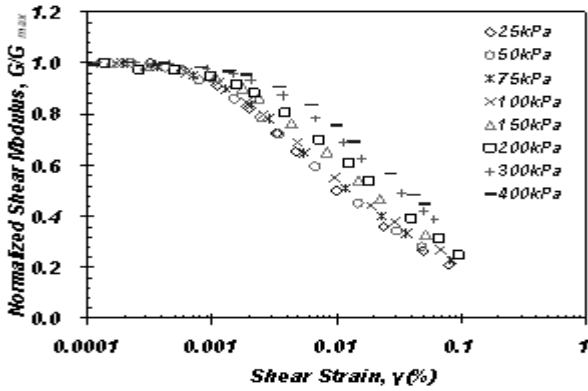


(c) 감쇠비 곡선

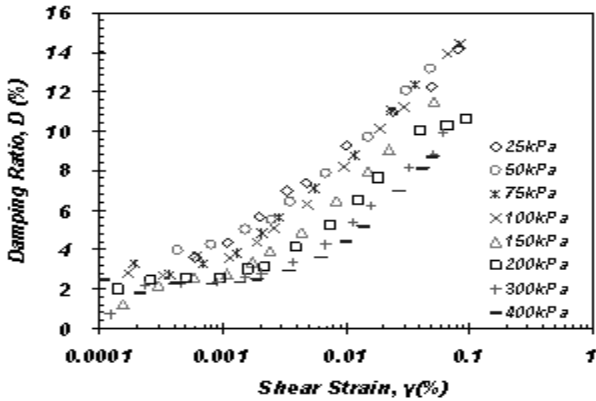
그림 12. 비틀전단시험 결과(파주현장)



(a) 전단탄성계수 감소곡선



(b) 정규화 전단탄성계수 감소곡선



(c) 감쇠비 곡선

그림 13. 공진주시험 결과(행복도시현장)

그림 13에 나타내었다. 파주현장의 실험결과 공진주시험과 비틀전단시험결과가 비슷하여 행복도시현장에서는 공진주시험만 실시하였다.

그림에서 보듯이, $10^{-4}\%$ ~ $10^{-1}\%$ 이하의 변형률 범위에서 신뢰성 있는 값을 제공하고 있다. 시험결과에서 나타난 바와 같이 전단탄성계수, 감쇠비와 같은 지반의 변형특성은 전단변형률의 크기에 큰 영향을 받는다. 전단변형률의 크기가 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하여 비선형 곡선을 형성하고 있다.

또한 구속응력이 증가함에 따라 전체 변형률 영역에서 전

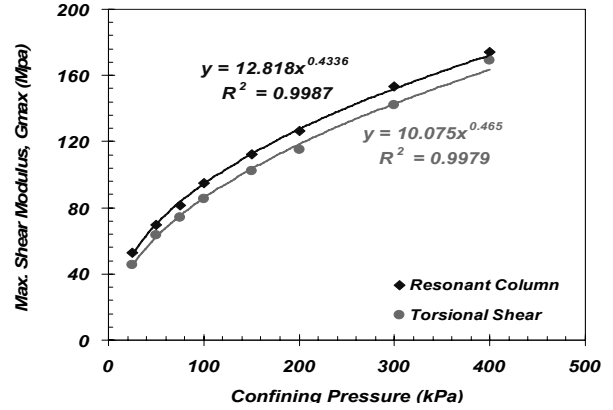


그림 14. 최대전단탄성계수의 구속압 영향 평가(파주현장)

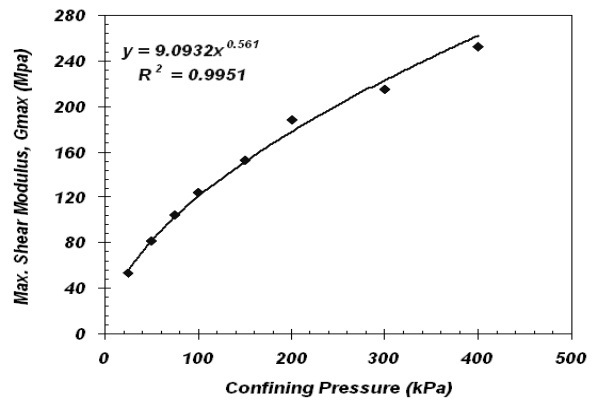


그림 15. 최대전단탄성계수의 구속압 영향 평가(행복도시현장)

단탄성계수 감소곡선은 위쪽으로, 감쇠비 곡선은 아래쪽으로 이동하고 있다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선 역시 큰 변화는 아니지만, 구속응력이 증가함에 따라 오른쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 구속응력이 증가함에 따라 비선형성이 시작되는 변형률(선형한계 전단 변형률)의 크기가 증가함을 의미한다.

본 시험 시료의 공진주시험과 비틀전단시험으로부터 획득한 최대 전단탄성계수의 구속압 영향 평가를 그림 14와 그림 15에 나타내었다. 지반의 구속압 영향 정도를 나타내는 구속압 영향 계수 n 값은 소성지수, 세립분 함유량, 간극비 등 다양한 요소에 대하여 영향을 받는다. 파주현장의 성토 비다짐 구간 시험 시료의 공진주시험을 통해 획득한 n 값은 0.434, 비틀전단시험을 통해 획득한 n 값은 0.465을 나타내었고 행복도시현장의 공진주시험에 의한 n 값은 0.561을 나타내어 일반적인 지반의 n 값 범위 안에 들어오는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 n 값은 실내에서 시험이 수행되지 않은 구속압의 현장지반 전단탄성계수를 추정하거나, 현장 시험 결과와 비교할 때, 유용하게 이용된다. n 값 이외에도 그림 14 및 그림 15에 나타나 있는 평균응력 1kPa에 해당하는 a 값(12.818, 10.075 및 9.0932)도 일반 조립토의 경우(Fernandez, 2000)에 해당하는 것으로 나타났다.

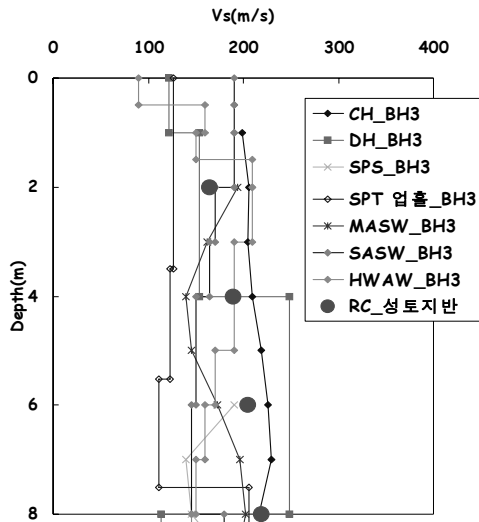


그림 16. 성토층의 현장 및 실내시험 결과(파주 성토현장)

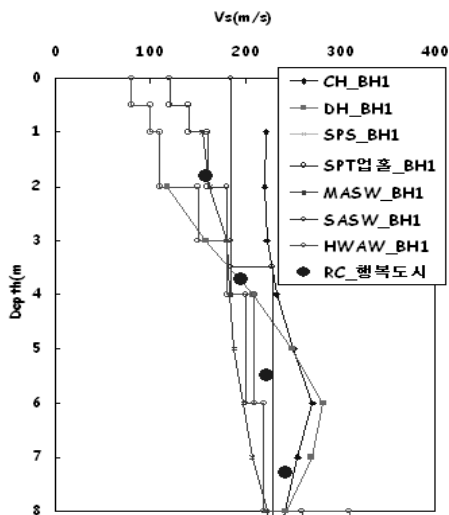


그림 17. 성토층의 현장 및 실내시험 결과(행복도시현장)

부로 내려갈수록 유사한 경향을 나타내었다. 이와 같이 성토재의 재료의 밀도를 파악하고 깊이별로 현장응력을 적절히 재현해 주면 실내 공진주/비틀전단시험으로도 현장탄성과 시험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

1. 성토재료에 대해 공진주/비틀전단시험을 실시한 결과 10⁻⁴%~10⁻¹% 이하의 변형률 범위에서 신뢰성 있는 값을 제공하는 것으로 나타났다.
2. 전단탄성계수, 감쇠비와 같은 지반의 변형특성은 전단 변형률의 크기에 큰 영향을 받으며 전단변형률의 크기가 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하여 비선형 곡선을 형성하였다.
3. 구속응력이 증가함에 따라 전체 변형률 영역에서 전단탄성계수 감소곡선은 위쪽으로, 감쇠비 곡선은 아래쪽으로 이동하고 있다. 이는 구속응력이 증가함에 따라 비선형성이 시작되는 변형률(선형한계 전단 변형률)의 크기가 증가함을 의미한다.
4. 성토시료에 대해 공진주/비틀전단시험으로부터 획득한 최대 전단탄성계수의 구속압 영향 평가를 실시한 결과 n값이 0.434~0.561, a값이 9.0932~12.818사이에 나타나 일반적인 지반의 n값과 a값 범위 안에 들어오는 것을 확인하였으며 실내시험으로 현장지반 전단탄성계수를 추정할 때 유용하게 이용될 수 있는 것으로 판단된다.
5. 성토층에서 실내 공진주/비틀전단시험과 현장탄성파시험결과를 비교한 결과 성토재의 재료의 밀도를 알아서 깊이별로 현장응력을 적절히 재현해 주면 실내시험으로도 현장탄성과 시험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

4.3 현장탄성파시험과 실내 공진주/비틀전단시험 시험 결과 비교

공진주/비틀전단시험에 의하여 구속압의 변화에 따른 전단속도의 그림 16과 그림 17은 성토층에서의 깊이별로 현장탄성파시험과 실내 공진주/비틀전단시험 결과를 나타낸 것이다. 깊이별로 전단파속도를 추정하기 위하여 현장에서 측정된 현장밀도를 사용하여 깊이별로 적절한 유효구속응력을 재현하였다(표 4 및 표 5 참조).

성토층에 대한 공진주/비틀전단시험에 의하면 파주현장은 깊이별로 160~220m/s를 행복도시현장은 180~240m/s의 전단파속도를 나타내었으며 전반적으로 현장탄성파시험에 의한 전단파속도와 유사한 값을 나타내었다(그림 16 및 그림 17 참조). 특히, 현장탄성파시험 중 비교적 정확하다고 알려진 크로스홀과 비교하였을 때 상부 2m까지는 오차가 다소 크지만 하

참고문헌

1. 국토해양부(2009), 「건축구조기준」, 대한건축학회.
2. 대한토목학회(2008), 「도로교 설계기준 해설」.
3. 토지주택연구원(2009), 「내진설계 시 합리적인 지반분류를 위한 전단파속도 측정 및 적용방안」, 토지주택연구원.
4. ASTM D-4015-92 (1995), “Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method”.
5. Fernandez, A.L. (2000), “Tomographic Imaging the State of Stress”, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta: 298.
6. Ishihara, K. (1996), *Soil behavior in earthquake geotechnics*, Clarendon press: 350.
7. Joh, S.H. (1996), “Advances in Data Interpretation Technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements”, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
8. Richart, Jr., F.E., J.R. Hall, Jr., and R.D. Woods (1970), “Vibrations

- of Soils and Foundations”, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
9. Xia, J., R.D. Miller, and C.B. Park (1999), “Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave”, *Geophysics*, 64: 691 ~ 700.
10. Park, H.C. and D.S. Kim (2001), “Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform”, *NDT&E International*, 34(7): 457 ~ 467.