

다양한 실내시험을 이용한 지반의 탄성계수 평가 Evaluation of Modulus of Soils Using Various Laboratory Tests

권기철¹⁾, Gi-Chul Kweon · 김동수²⁾, Dong-Soo Kim

¹⁾ 동의대학교 토목공학과 전임강사, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Dongeui University

²⁾ 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., KAIST

SYNOPSIS : It is very important to evaluate the reliable nonlinear modulus characteristics of soils not only in the analysis of geotechnical structures under working stress conditions but also for the soil dynamic problems. For the evaluation of modulus characteristics of soils, various tests have been mostly employed in laboratory. However, different testing techniques are likely to have different ranges of reliable strain measurements, different applied stress level, and different loading frequencies, and the modulus of soils can be affected by these variables. For reliable evaluation, therefore, those effects on the modulus need to be considered, and measured values should be effectively adjusted to actual conditions where the soil is working. In this paper, to evaluate the modulus characteristics of soils, laboratory testing such as free-free resonant column (FF-RC), resonant column (RC), torsional shear (TS), static TX, and cyclic M_R tests were performed. The effects of strain amplitude, loading frequency, loading cycles, confining pressure, density, and water content on modulus were investigated. It is shown that the FF-RC test, which is simple and inexpensive testing technique, can provide a reliable estimation of small strain Young's modulus (E_{max}), and the modulus evaluated by various laboratory tests are comparable to each other fairly well when the effects of these factors are properly taken into account.

Key words : nonlinear modulus of soils, laboratory tests, FF-RC, RC/TS, modulus reduction curve, factors affecting modulus of soils.

1 서론

토목구조물의 동적해석 뿐 아니라 공용상태 구조물 기초의 변형해석을 위해서는 미소변형률 및 중간 변형률 영역을 포함한 지반의 신뢰성 있는 비선형 탄성계수의 평가가 매우 중요하다(Burland, 1989). 지반 재료의 탄성계수는 변형률 크기, 구속응력, 함수비, 하중주파수, 하중 반복회수 등 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 따라서 지반의 탄성계수를 하나의 값으로 제시하기는 불가능하다. 다만 지반의 거동이 좁은 범위에서 결정되어 있는 특정한 해석의 경우에는 지반이 거동하는 조건들을 고려하여 하나의 탄성계수(선형탄성계수)를 사용하기도 한다. 물론 동일한 지반이라 할지라도 지반의 거동 조건이 변화되면(하중 및 변형률 크기 또는 또는 해석 방법의 변화) 적용하는 탄성계수를 변화된 조건에 맞추어 새롭게 결정해야 한다.

지반의 탄성계수 결정에는 역학적이고 논리적인 실내시험이나 현장시험 뿐 아니라 상관관계에 근거한 간접적인 방법 등, 매우 다양한 방법이 적용되고 있다. 그러나 여러 시험방법의 시험조건이 서로 달

라, 다양한 시험방법에서 결정되는 탄성계수는 서로 다른 값을 갖게 될 것이다(권기철, 1999). 따라서 시험조건과 해석대상 지반의 거동특성을 고려하지 않고, 특정한 조건에서 결정된 탄성계수를 별도의 검토 없이 해석에 사용한다면 많은 오차를 유발할 수 있다.

최근에 들어서 지반의 탄성계수 결정을 위한 다양한 시험기법이 국내에 소개되고 있고, 현장시험과 실내시험에서 결정된 탄성계수를 영향요소를 고려하여 결합함으로써 대상 지반의 탄성계수 특성을 체계적으로 평가하는 기법이 제안되고 있다(한국지반공학회, 1997). 그러나, 여러 시험방법에서 결정되는 탄성계수의 명확한 특성 규명과 국내 지반의 탄성계수에 대한 영향요소 연구가 부족하여 해석 및 설계에 필요한 신뢰성 있는 탄성계수 결정에 어려움이 있다. 본 연구에서는 동적, 정적 및 반복재하시험을 포함하는 여러 실내시험을 노상토, 보조기층 재료 그리고 준설모래에 대하여 시험을 수행하였다. 시험결과로부터 여러 실내시험에서 결정되는 탄성계수의 특성, 신뢰성 있는 시험범위 그리고 국내 지반의 탄성계수에 대한 영향요소(변형률 크기, 하중주파수, 간극비, 구속응력, 함수비 등)를 검토하였다.

2 시험장치

탄성계수를 결정하는 실내시험은 크게 동적시험, 반복재하시험, 정적시험으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 동적시험으로 현장공진주시험(FF-RC)과 공진주시험(RC), 반복재하시험으로 비틀전단시험(TS)과 M_R 시험을, 그리고 정적 삼축압축시험(TX)을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 시험의 주요 특징은 표 1과 같다.

표 1 본 연구에서 적용한 실내시험의 주요 특징

시험종류	FF-RC	RC	TS	M_R	TX	
측정항목	공진주파수(주파수반응곡선)		응력-변형률 곡선			
측정 가능한 지반물성치	E_{max}	○	-	-	$\Delta^{1)}$	
	G_{max}	○	○	○	-	
	$E - \epsilon$	-	-	-	$\Delta^{2)}$	$\Delta^{2)}$
	$G - \gamma$	-	○	○	-	-
	D_{min}	○	○	○	-	-
	$D - \gamma$	-	○	○	-	-
주요 장점	- 시험장치 저렴 - 시험이 간편	- 비선형성 평가	- 비선형성 평가 - 하중주파수 영향 평가	노상 및 보조기층 재료의 탄성계수를 신뢰성 있게 평가	- 매우 친숙 - 강도물성치의 동시 평가	
주요 단점	비선형성 평가 곤란	시험이 다소 어려움	시험이 다소 어려움	- 시험장치 고가 - 시험이 어려움	단부오차 제거가 매우 어려움	

주1) 미소변형률 영역의 탄성계수 평가를 위해서는 별도의 측정장치 필요

주2) 일반적으로 중간변형률 이상에서(0.01% 이상) $E - \epsilon$ 결정 가능

본 연구에서 적용한 RC/TS 시험장치는 Stokoe 방식으로 고정단-자유단 + 추가 질량체의 경계조건에서의 주파수반응곡선(RC 시험)과 응력-변형 이력곡선(TS 시험)을 구하여 변형률 크기에 따른 전단탄성계수를 결정하였다. 본 시험장치는 동일한 공시체에 대하여 동적시험인 RC시험과 반복재하시험인 TS 시험을 동시에 수행할 수 있다. 특히 TS시험에서는 하중주파수의 조절이 자유로와 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향 검토에 매우 유용하다. 정적삼축압축시험은 Geonor사의 변형률 조절방식의 하중프레임에 Wykeham사의 삼축셀을 적용하였으며, 하중과 변형은 삼축셀 외부에서 측정하였다. 반복재하시험 M_R 시험은 MTS사의 318 모델을 사용하였으며, 하중은 삼축셀 내부에서, 변형은 삼축셀 외부에서 측정하였

다. 시편의 제작 방법, 하중조합, 결과처리 방법 등은 AASHTO T294-92I 시험법에 따라서 시험을 수행하였다.

현장공진주시험(Free-Free Resonant Column Test; FF-RC)은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 경계조건에서의 탄성과전달이론에 근거하여, 시편에 발생시킨 응력과(압축과 또는 전단과)에 대한 공진 특성으로부터 미소변형을 영역의 최대 Young 계수와 최대전단탄성계수를 결정할 수 있고, 아울러 포아송비와 감쇠비도 결정할 수 있는 동적인 시험방법이다(Veghela 등, 1995). 본 시험은 시험장치가 매우 간단하고, 시험 결과가 숙련도에 무관하게 일정하게 결정되며, 직경 150mm 이상의 공시체에 시험이 가능한 장점이 있다(권기철, 1999). 시험장치는 탄성과 발생장치(강철 구슬 또는 instrumented hammer), 진동측정장치(가속도계, 신호분석기), 구속응력 재하장치로 구성된다(그림 1). 성형된 공시체는 공시체 길이의 1/2지점에 떠를 사용하여 공기중에 매달고(양단자유조건을 만족시키기 위함), 구속응력을 재하한 후 시편의 한쪽에 감지기(가속도계)를 설치하고 또 다른 면에서 탄성과를 유발시킨다. 이때 측정되는 감지기의 신호를 FFT를 통하여 주파수영역에서 보면 그림 2와 같은 신호를 획득하게 된다. 그림 2와 같은 결과로부터 최대탄성계수와 감쇠비를 결정한다. 결과 해석의 자세한 기법은 참고문헌(김동수 등, 1997; 권기철, 1999)에 상세히 설명되어 있다.

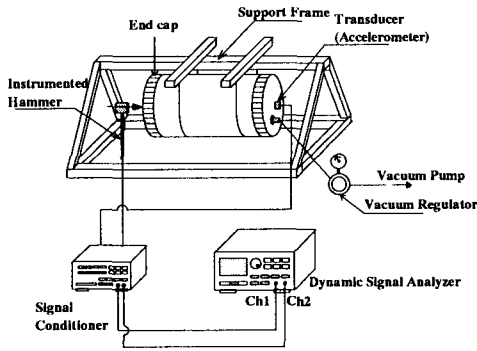


그림 1 현장공진주시험 개요도

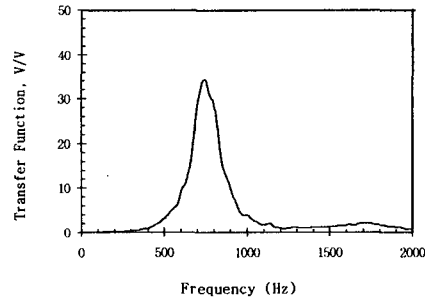


그림 2 현장공진주시험 결과의 대표적 일례

3 시험시료 및 시험절차

본 연구에서는 노상토 시료 7종, 보조기층 시료 7종 그리고 공기중 건조상태의 준설모래에 대한 시험을 수행하였다. 시험시료의 기본 특성, 시료성형 방법, 시험항목 등은 표 2와 같다.

표 2 시험시료의 기본 특성 및 시료성형 방법

구분	통일분류	시료성형 조건	시험항목	주요 시험변수 ¹⁾
노상토 (7종)	SM, SW, SP-SM	정적다짐 - $\gamma_{d,max}$ 의 95% - 함수비 변화	FF-RC, RC, TS, TX, M _R	①, ②, ④, ⑤, ⑥
보조기층 (7종)	GP, GW	진동다짐 - $\gamma_{d,max}$ 의 95% - 최적함수비	FF-RC, RC, TS, TX, M _R	①, ②, ④, ⑤
준설모래 (1종)	SM	낙사법 - 밀도변화 - 공기중 건조	RC, TS	①, ②, ③, ④

주 1) ① 변형률 크기, ② 구속응력, ③ 밀도(간극비), ④ 하중주파수, ⑤ 하중반복회수, ⑥ 함수비

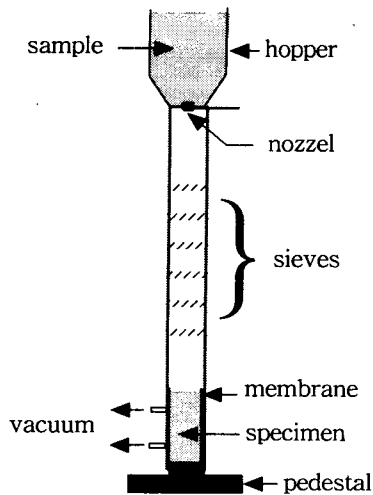


그림 3 모래시료 낙사장치

준설 모래시료의 함수비는 장기간 공기중에서 건조한 상태로 2% 이하의 상태를 유지하고 있었다. 시료의 성형은 마지막 체 통과 후의 낙하 높이가 300mm~500mm가 되도록 하고, 첫 번째 체는 시료의 최대입경보다 크고 D_{50} 의 5~15배 범위인 #8체를 두고 그 아래에 #6체를 5개 설치한 낙사장치(그림 3)를 적용하였다. 시편의 밀도(간극비)는 낙사 높이가 일정한 상태에서 노즐의 크기를 조절하는 방법으로 조절하였다(Miura 등, 1982).

노상토 시료와 보조기층 시료의 성형방법은 AASHTO T294-92I 시험법에 따라 정적다짐방법과 진동다짐방법을 각각의 시료에 대하여 적용하였다. 모든 시험에서 시편과 단부 캡과의 일체를 도모하고, 단부오차(bedding error)를 줄이고자 시편의 양 단부를 석고로 처리한 후 시험을 수행하였다. 시험의 구속속력과 하중조합 순서는 AASHTO T294-92I 시험법에서 제안하는 절차를 따랐다.

4 시험 결과 (탄성계수에 대한 영향요소)

4.1 변형률 크기의 영향

그림 4는 공진주시험에서 평가된 변형률 크기에 따른 탄성계수 변화의 일례이다. 지반동역학 분야에서 널리 알려져 있듯이, 변형률 크기가 증가하면 탄성계수는 일정 변형률 크기(탄성한계변형률; ϵ_i^c)까지는 일정하고 그 이후에는 탄성계수가 변형률의 증가에 따라서 급격히 감소하는 비선형 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 적용된 각 시험이 수행되는 변형률 크기의 범위를 개략적으로 나타내면 그림 5와 같다. 여러 시험이 변형률 크기를 제외한 나머지 모든 조건이 동일하여도 각 시험이 수행되는 변형률 크기를 고려하지 않고 비교한다면 각 시험에서 결정되는 탄성계수는 큰 차이를 갖게 될 것이다. 또한, 현장공진주시험과 탄성파의 속도를 측정하는 cross-hole, down-hole, SASW 등과 같은 동적인 시험이 수행되는 변형률 범위는 선형한계변형률 이하의 탄성영역이므로, 중간변형률 이상에서 일반적으로 시험이 수행되는 정적인 삼축압축시험에서 결정되는 탄성계수보다 상당히 큰 값으로 결정될 것이다. 그러나 동적시험이라 할지라도 정적인 시험과 유사한 변형률 범위에서 시험이 수행된다면(예; 변형률이 큰 범위에서의 공진주시험) 정적시험에서 결정되는 탄성계수와 유사한 값으로 결정될 것이다. 이와 마찬가지로 정적시험에서 미소변형률 영역에서 신뢰성 있는 탄성계수가 결정된다면 탄성파를 이용하는 동적

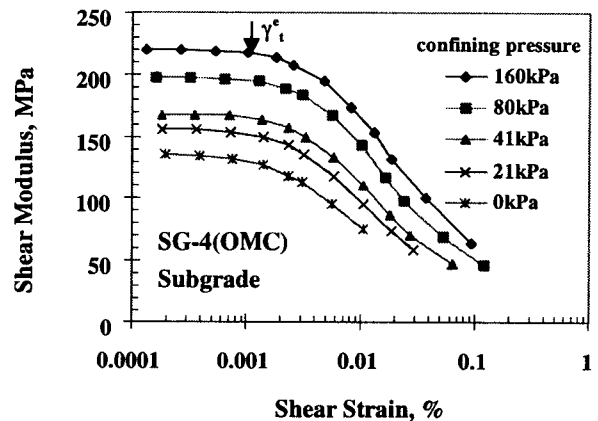


그림 4 변형률 크기에 따른 탄성계수 변화 일례

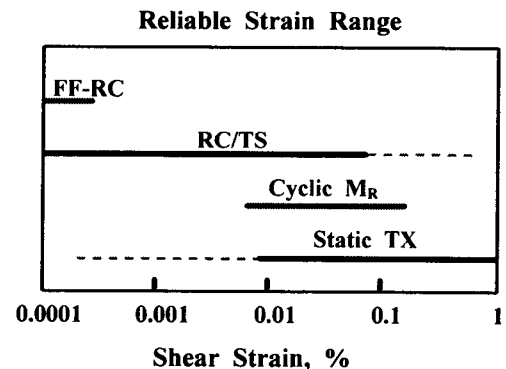


그림 5 신뢰성 있는 시험이 수행되는 변형률 범위

시험에서 결정된 탄성계수와 유사한 값을 갖게 될 것이다(Tatsuoka 등, 1991; 김동수 등, 1997; 권기철, 1999). 즉, 동적인 시험과 일반적인 정적시험에서 결정되는 탄성계수 차이의 주요 원인은 시험이 동적, 정적으로 수행되는 차이가 아니라 시험이 수행되는 변형률 크기의 차이로 이해하는 것이 합당할 것이다.

각 변형률 크기에서의 탄성계수를 미소변형률 영역(선형탄성영역)의 탄성계수(최대탄성계수)로 나눈 정규화탄성계수와 변형률의 관계(정규화탄성계수감소곡선)로 나타내면 시료의 교란에 관계없이 일정하게 결정되는 것으로 알려져 있다(김동수, 1991). 또한 정규화탄성계수 감소곡선은 지반의 종류에 따라서 좁은 범위에서 결정되고, 탄성계수에 대한 많은 영향요소들 중에서 일부의 요소들은 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1984; Vucetic, 1994). 본 연구에서는 구속응력, 밀도, 함수비 등의 영향요소에 대해서는 최대탄성계수와 정규화탄성계수감소곡선에 대한 영향을 분리하여 검토하고자 한다.

4.2 모래시료에서 구속응력과 밀도의 영향

그림 6은 최대탄성계수에 대한 구속응력과 밀도의 영향을, 그림 7은 정규화탄성계수감소곡선에 대한 영향을 나타내고 있다. 건조사질토에 대한 다른 연구결과(Hardin 등, 1972; 김동수, 1991)들과 같이 최대탄성계수에 대한 구속응력과 밀도(간극비)의 영향은 대단히 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 구속응력은 최대탄성계수 뿐 아니라 정규화탄성계수감소곡선에도 영향을 주고 있다. 구속응력의 증가에 따라 탄성영역이 증가하고, 동일한 변형률 크기에서 탄성계수의 감소정도가 작게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 점성이 거의 없는 사질토 지반에 대한 다른 연구들(Iwasaki 등, 1976)과 잘 일치하는 것이다. 이에 반하여 밀도의 변화는 정규화탄성계수감소곡선에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 나타나고 있다. 아직까지는 시료의 개수가 작고 시험이 수행된 변형률 범위가 충분치 못하여 지속적인 연구가 필요한 부분이다.

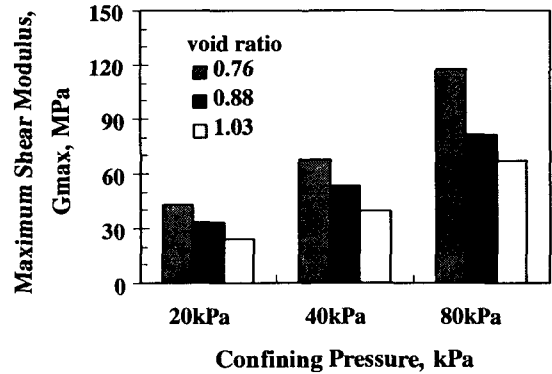
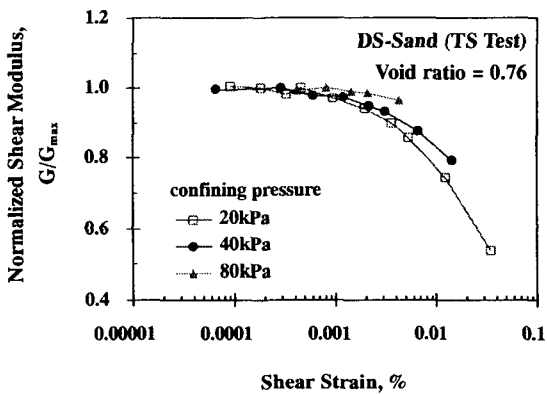
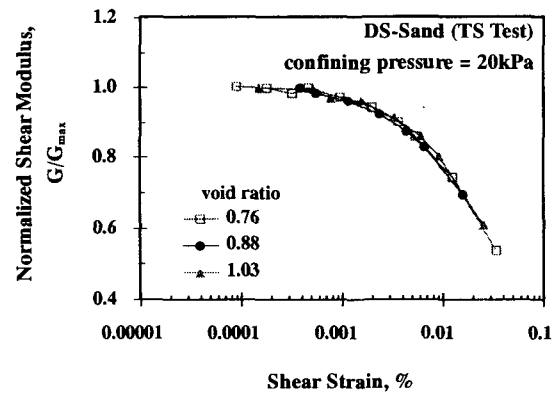


그림 6 탄성계수에 대한 구속응력과 밀도의 영향 (건조 모래)



(a) 구속응력의 영향



(b) 밀도(간극비)의 영향

그림 7 정규화탄성계수에 대한 구속응력과 밀도의 영향 (건조 모래)

4.3 점성이 다소 있는 노상토에 대한 함수비와 구속응력의 영향

그림 8과 그림 9는 소성지수가 2.9%로 약간의 점성이 있는 노상토의 공진주시험에서 결정된 함수비와 구속응력에 따른 최대탄성계수와 정규화탄성계수감소곡선의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 최대탄성계수는 함수비와 구속응력 모두에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 국내 노

상토에 대해서는 축차응력(변형률 크기)뿐 아니라 구속응력 영향에 대한 고려가 필수적이고, AASHTO에서 제시하는 바와 같은 함수비 변화를 고려한 탄성계수 결정이 필요함을 확인 할 수 있다. 구속응력은 건조 사질토의 경우와 동일한 양상으로 정규화탄성계수감소곡선에 영향을 주는 것으로 나타났다. 그러나 함수비의 정규화 탄성계수 감소곡선에 대한 영향은 대단히 적어 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

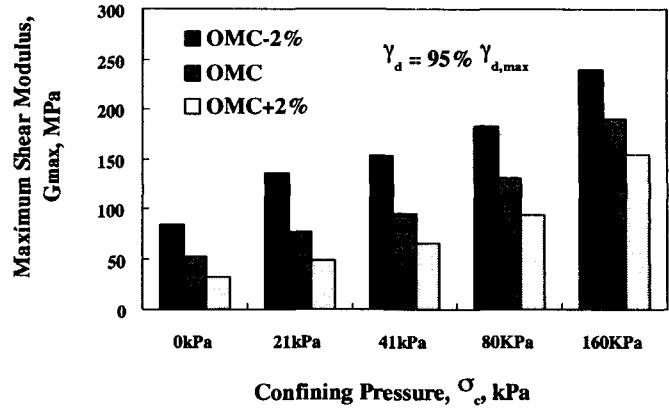
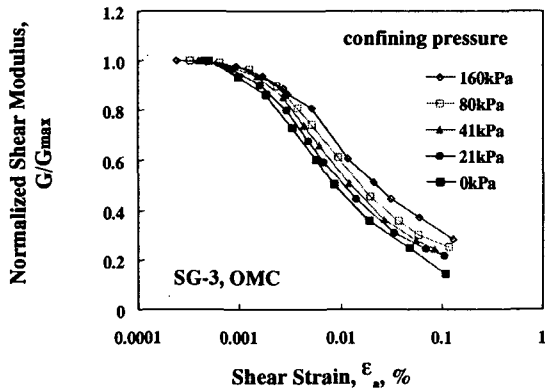
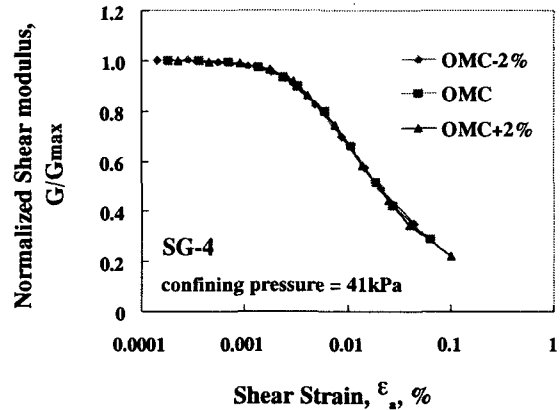


그림 8 탄성계수에 대한 구속응력과 함수비의 영향 (노상토)



(a) 구속응력의 영향



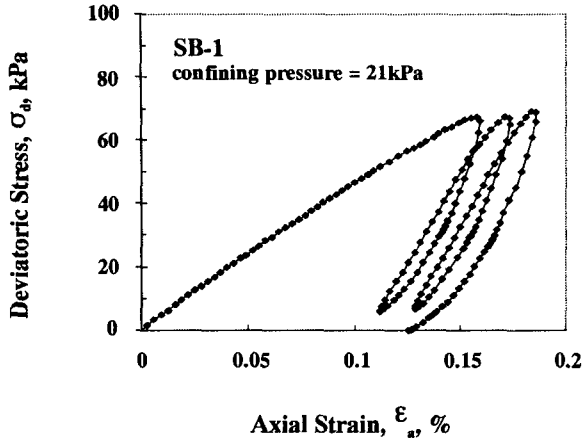
(b) 함수비의 영향

그림 9 정규화탄성계수에 대한 구속응력과 함수비의 영향 (노상토)

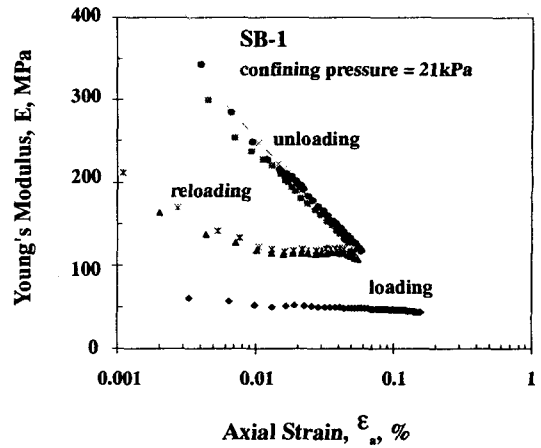
4.4 하중 반복회수의 영향

그림 10은 보조기층 재료에 대한 정적삼축압축시험을 통하여 획득한 전형적인 하중 반복회수에 따른 탄성계수-변형률 관계이다. 이러한 결과는 노상토 시료에 대해서도 매우 유사한 결과를 획득하였다. 하중반복회수가 탄성계수에 미치는 영향을 살펴보면, 첫 번째 재하단계를 제외한 재재하-역재하단계에서 결정된 탄성계수는 반복재하 회수에 거의 영향을 받지 않고 일정한 값으로 결정되었다. 이러한 결과는 건조 사질토의 경우 하중 반복회수의 영향을 받는다는 일반적인 연구(김동수, 1995)와 상반되는 것인데, 정적 삼축압축시험의 정확성이 하중 반복회수의 영향을 엄밀히 평가하기에는 다소 부족하고, 본 연구에서 적용한 하중 반복회수가 작기 때문인 것으로 생각된다.

처음 하중재하 단계에서는 재재하-역재하단계보다 상당히 많은 단부오차를 포함하게 되고, 항복면이 확장되면서 소성변형과 탄성변형이 동시에 유발되므로, 소성변형이 매우 작고 탄성변형이 대부분인 역재하-재재하 단계에서의 탄성계수보다 작게 평가된 것으로 판단된다. 이와 함께 재재하 단계와 역재하 단계에서 결정되는 탄성계수의 차이는 시험과정 중에 시편이 경험하는 평균주응력이 변화하기 때문인 것으로 판단된다(권기철, 1999). 첫 번째 재하단계에서의 소성변형과 단부오차는 두 번째 재재하 단계부터는 충분히 작아지는 것으로 판단된다. 따라서 삼축압축시험에서 변형률 크기에 따른 탄성계수를 평가하고자 하는 경우에는 재재하-역재하 단계를 포함하는 시험을 수행하고 재재하 단계에서 얻어진 응력-변형률 관계로부터 탄성계수를 평가하는 것이 합당한 것으로 생각된다.



(a) 응력-변형률 관계



(b) 변형률 크기에 따른 탄성계수

그림 10 하중반복회수에 따른 탄성계수의 변화 (보조기층 재료, 정적삼축압축시험)

4.5 하중주파수의 영향

선형한계변형률 크기 이하에서 하중주파수를 달리한 비틀전단시험결과 점성이 없는 보조기층 재료와 건조사질토의 경우에는 탄성계수가 하중주파수의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이에 반하여 약간의 점성이 있었던 노상토의 경우에는 하중주파수가 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 것으로 나타났다(그림 11). 시험이 수행된 하중주파수의 범위에서는 탄성계수가 하중주파수의 대수적 증가에 비례해서 증가(반대수 그래프에서 직선의 관계)하는 것으로 나타났다. 또한 하중주파수의 영향 정도는 소성지수가 증가할 수록 증가하는 경향이 있어(그림 12) 점성토의 경우에는 하중주파수의 영향이 상당히 크게 나타날 것으로 예상된다.

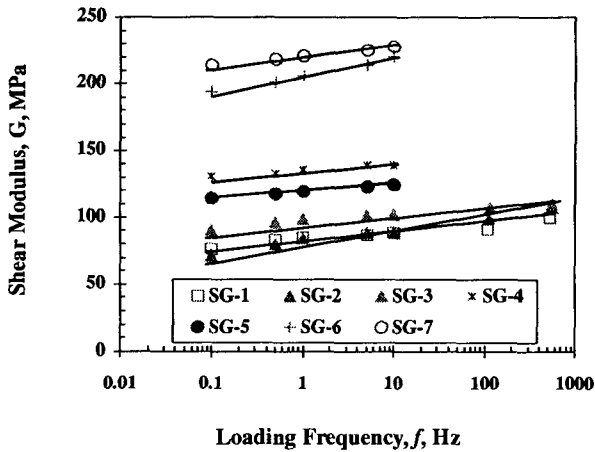


그림 11 하중주파수의 영향 (노상토)

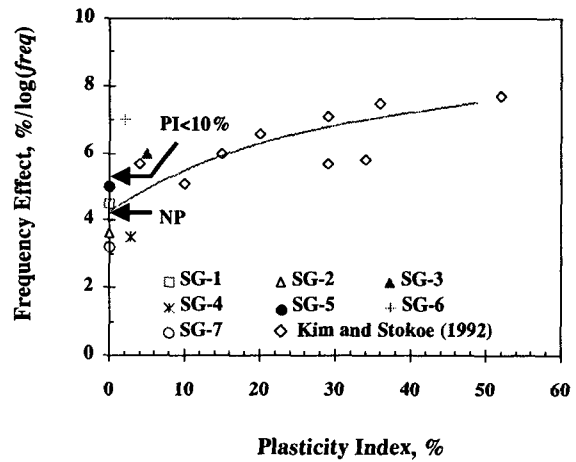


그림 12 하중주파수 영향정도와 PI의 관계

4.6 여러 시험에서 결정되는 탄성계수의 비교

노상토 시료에서 RC, TS, FF-RC, M_R, TX 등, 여러 시험에서 결정된 탄성계수의 일례를 변형률 크기에 따라 그림 13에 나타내었다. 그림 13에서 각각의 시험에 사용된 공시체의 함수비와 건조단위중량은 매우 유사하고, 동일한 구속응력, 그리고 하중주파수의 영향을 고려하여 일정한 하중주파수(5Hz)에서의 값으로 보정한 후 나타낸 것이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, 여러 시험에서 결정된 탄성계수가 변형률 크기에 따라서 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5 결론

- 1) 매우 다양한 요소가 탄성계수에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 본 연구의 대상이었던 노상토, 보조기층 재료, 준설편모래의 경우에는 변형을 크기, 구속응력, 밀도의 영향이 큰 것으로 나타났고, 약간의 점성이 있는 노상토에서는 함수비와 하중주파수의 영향이 있었다. 이에 반하여 점성이 없는 준설편모래와 보조기층 재료에서는 하중주파수의 영향이 없었다.
- 2) 정적 삼축압축시험에서 평가된 하중반복횟수의 영향은, 재하회수 5회 이내에서는 영향이 거의 없었고, 초기 재하단계보다는 재하 단계에서 변형을 크기에 따른 탄성계수를 결정하는 것이 보다 신뢰성이 있는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구대상의 시료에서는 정규화탄성계수감소곡선이 구속응력에는 영향을 받지만 함수비와 밀도의 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 여러 시험에서 얻어지는 탄성계수는 각 시험 조건의 차이에 따라 서로 다른 값으로 결정되었다. 그러나, 탄성계수에 대한 영향요소를 고려한 후 여러 시험에서 결정되는 탄성계수를 비교하면 서로 유사한 값을 얻을 수 있었다. 따라서, i) 현장공진주시험 또는 공내하향탄성파시험 등과 같은 시험에서 결정되는 최대 탄성계수와 정규화탄성계수감소곡선과 결합하면 전체 변형률 영역에서의 탄성계수 평가도 가능함을 확인하였고, ii) 신뢰성 있는 해석을 위해서는, 시험조건의 특성을 명확히 규명하고 시험조건과 실제 현장조건의 차이를 영향요소를 고려하여 보정하는 것이 중요하다.
- 5) 신뢰성 있는 탄성계수 평가를 위해서는 국내지반의 탄성계수에 대한 영향요소 연구가 계속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

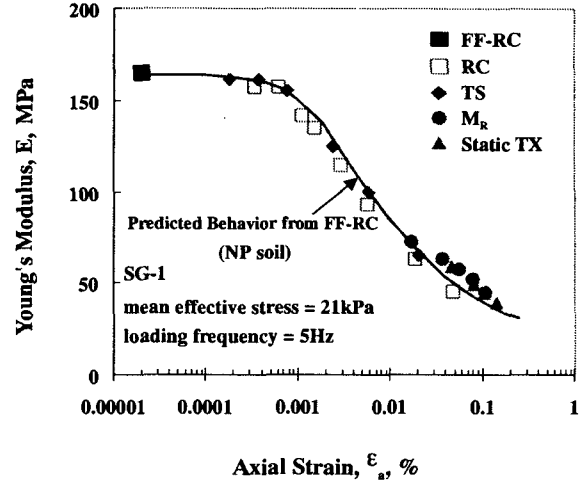


그림 13 여러 시험에서 결정되는 탄성계수 비교

참고문헌

1. 권기철, (1999), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법", 박사학위논문, 한국과학기술원.
2. 김동수, (1995), "공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성", 한국지반공학회 지, 제11권, 제1호, pp. 101-112.
3. 김동수, 권기철, 정순용, 박재영 (1997), "실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가" 한국지반공학회, 제13권, 제5호, pp. 89-100.
4. 한국지반공학회, (1997), "진동 및 내진설계; 지반공학 시리즈 8".
5. Burland, J. B.(1989), "Ninth Lauritis bjerrum Mwmorial Lecture : Small is Beautiful - The Stiffness of Soils at Small Strains", *Canadian Geotechnical Journal*, 26, pp.499-516.
6. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P., (1972), "Shrae Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves," *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692.
7. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Takagi, Y. (1976), "*Dynamic Shear Damping Properties of Sands for Wide Strain Range*," Report of Civil Engineering Institute, No. 1085, Ministry of Construction, Tokyo, Japan.
8. Miura, S. and Toki, S., (1982), "A Sample Preparation Method and its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand", *Soil and Foundation*, Vol. 22, No. 1, pp. 61-77.
9. Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991), "Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests," Key Note Lecture for Session No. 1, *The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, December.
10. Vucetic, M. (1994), "Cyclic Threshold Shear Strains in Soils," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 12, pp. 2208-2228.