

실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가

Evaluation of Nonlinear Deformational Characteristics of Soils from
Laboratory and Field Tests

김 동 수* ¹	정 순 용* ²
Kim, Dong-Soo	Jeong, Soon-Yong
권 기 철* ²	박 재 영* ³
Kweon, Gi-Chul	Park, Jae-Young

Abstract

It is very important to evaluate the reliable nonlinear deformational characteristics of soils not only in the analysis of geotechnical structures under working stress conditions but also for the soil dynamic problems. Field testings such as crosshole and pressuremeter tests can be used to determine the modulus of soils under in-situ conditions, but it is not possible to determine the modulus over the entire strain amplitude range. Laboratory methods such as resonant column/torsional shear test can be used to determine the modulus over the whole strain amplitude range, but it is very difficult to obtain the representative undisturbed samples on the site. For the reliable evaluation of nonlinear deformation characteristics of soils on a typical site, small strain modulus obtained from field tests and normalized modulus reduction curve determined by laboratory tests need to be combined. In this paper, laboratory and field tests were performed at a site which consisted of granite weathered residual soils to evaluate the nonlinear deformational characteristics of soils such as the effects of strain amplitude, loading frequency, confining pressure and sample disturbance. It has been shown that when the effects of these factors are properly taken into account, the stiffness values evaluated by various field and laboratory tests are comparable to each other fairly well. Finally, the procedure to evaluate the nonlinear deformational characteristics of the site was proposed.

요 지

토목구조물의 동적해석 뿐만아니라 공용상태 구조물 기초의 변형해석을 위해서는 지반의 신뢰

*¹ 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, KAIST

*² 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Ph. D Student, Dept. of Civil Engineering, KAIST

*³ 정회원, 삼성건설 연구부문 연구주임.

성 있는 비선형 변형특성 평가가 매우 중요하다. 변형특성 평가를 위한 현장시험으로는 저변형률 하에서 지반의 탄성계수를 결정할 수 있는 크로스홀시험이나 중간변형률 영역에서 변형률 크기에 따른 탄성계수 결정이 가능한 공내재하시험이 사용되나 전 변형률 영역에서의 탄성계수 변화를 측정하지 못하고, 하중주파수의 영향, 구속압의 영향 등을 엄밀히 평가하지 못하는 단점이 있다. 공진주/비틀전단시험과 같은 실내시험에서는 저변형률 및 중간변형률을 포함하는 전 변형률 영역에서의 탄성계수 측정이 가능하나 불교란시료의 채취와 시료의 대표성 확보가 매우 어려운 단점이 있다. 따라서 보다 엄밀한 현장지반의 변형률 크기에 따른 탄성계수 결정을 위하여는 각각의 실내시험과 현장시험에서의 신뢰성 있는 변형률 측정범위, 작용되는 응력의 크기, 시험이 수행되는 하중주파수 차이 등을 효과적으로 결합하여 사용하여야 한다. 본 논문에서는 지반의 비선형 변형특성을 현장 및 실내시험 결과를 효과적으로 결합하여 사용하는 방법을 제시하고, 화강풍화토 지반에서 현장시험으로 크로스홀과 공내재하시험을, 실내시험으로는 공진주/비틀전단시험을 수행하여 현장지반의 변형특성을 결정하고, 각 시험법들의 장·단점과 신뢰성 있는 시험범위를 검토하였다. 마지막으로, 현장지반의 비선형 변형특성 평가 절차를 제시하였다.

Keywords : Nonlinear deformational characteristics, Resonant column, Torsional shear, Crosshole, Pressuremeter

1. 서론

최근들어 정적시험에서의 계측의 정확도 증가로 인하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 통념적 차이가 줄어들고, 하중이 정적, 혹은 동적, 어떤 방식으로 유발되든 변형률의 크기가 지반의 거동을 예측하는 중요한 변수임이 인식되고 있다(김동수, 1995; Dobry 등, 1987). 또한 공용상태의 계측을 통하여 실제 구조물에서 지반이 거동하는 변형률의 범위가 0.1-1% 이하임이 밝혀지고 있다(Burland, 1989). 그러므로 공용상태 구조물 지반의 변형해석을 위해서는 저변형률($10^{-5}\% < \gamma < 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$) 하에서의 신뢰성 있는 탄성계수 결정이 매우 중요하고, 신뢰성 있는 지반 변형특성의 측정에는 토목구조물의 동적해석 뿐만아니라 정적해석에서도 중요한 역할을 한다.

현장시험으로는 저변형률 하에서 지반의 탄성계수를 결정할 수 있는 크로스홀시험이나 중간변형률 영역에서 변형률 크기에 따른 탄성계수 결정이 가능한 공내재하시험이 사용되나 전 변형률 영역에서의 탄성계수 변화를 측

정하지 못하고, 하중주파수의 영향, 구속압의 영향 등을 엄밀히 평가하지 못하는 단점이 있다. 공진주/비틀전단시험과 같은 실내시험에서는 저변형률 및 중간변형률을 포함하는 전 변형률 영역에서의 탄성계수 측정이 가능하나 불교란시료의 채취와 시료의 대표성 확보가 매우 어려운 단점이 있다. 따라서 보다 엄밀한 현장지반의 변형률 크기에 따른 탄성계수 결정을 위하여는 각각의 실내시험과 현장시험에서의 신뢰성 있는 변형률 측정범위, 작용되는 응력의 크기, 시험이 수행되는 하중주파수 차이 등을 고려하고, 각 시험 결과를 효과적으로 결합하여 사용하여야 한다.

본 논문에서는 현장지반의 비선형 변형특성을 현장 및 실내시험 결과를 효과적으로 결합하여 평가하는 방법을 제시하고, 화강풍화토 지반에서 현장시험으로 크로스홀과 공내재하시험을, 실내 시험으로 공진주/비틀전단시험을 수행하여 현장지반의 변형특성을 결정하고, 각 시험법들의 장·단점과 신뢰성 있는 시험범위를 검토하였다. 또한, 본 논문에서 변형특성을 검토하고자하는 지반은 화강풍화토로서, 입자파쇄 특성으로 인하여 불교란시료의 채취

가 어려워 이에 대한 변형특성 연구가 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 개발된 불교란시료 채취장치를 사용하여 채취된 불교란시료와 교란된 화강풍화토 시료에 대하여 실내시험을 수행하여 시료의 교란이 변형특성에 미치는 영향에 대한 기초적인 연구를 병행하였다.

2. 지반의 변형특성 평가기법

공용상태 구조물 지반의 변형해석에 필요한 변형률 크기에 따른 탄성계수 결정 방법은 건설되는 구조물의 중요도, 시험장비의 가용성, 지반조사 비용 등을 고려하여 지반조사기법의 조합이 결정되며, 현장 및 실내시험을 모두 수행하고 두 시험결과를 효과적으로 결합하여 사용하는 방법, 현장시험 또는 실내시험만으로 평가하는 방법, 그리고 경험에 의한 방법으로 나누어 볼 수 있다. 본 논문에서는 각 경우의 평가방법 중, 원자력발전소와 같은 중요 구조물의 안전성 평가를 위하여 사용되는 가장 신뢰성 있는 방법으로, 현장시험인 크로스홀시험 등에서 획득한 깊이별 전단파속도(전단탄성계수)와 실내시험인 공진주/비틀전단시험 또는 LDT를 적용한 삼축압축시험 등에서 결정된 변형률 크기에 따른 지반의 비선형거동을 결합하여 현장지반의 변형특성을 평가하는 기법에 대하여 검토하고자 한다. 단계별 평가방법을 정리하면 다음과 같다(김동수, 1997).

- ① 현장시험을 통하여 대상지반의 깊이별 전단파속도(V_s) profile을 결정한다. 이때, 크로스홀 시험, 다운홀시험, SASW시험 등이 사용될 수 있다.
- ② 대상지반을 층으로 나누고 각층의 질량밀도를 추정하여 현장시험에서 결정된 전단파속도로부터 저변형률 최대전단탄성계수(G_{max})를 결정한다.
- ③ 각층의 중앙에서 불교란시료를 채취한다. 이때 시료에 교란이 발생되지 않도록 시료 채취 및 운반시 주의하여야 한다. 불교란시료의 채취가 매우 어려운 경우에는 교란시

료로 채취한다. 교란시료로 채취된 경우에는 함수비와 건조단위중량을 현장의 조건과 동일하도록 시료를 성형하여 시험을 수행한다.

- ④ 실내 공진주/비틀전단시험을 수행하여 변형률 크기에 따른 탄성계수를 얻는다.
- ⑤ 실내시험 결과로 부터 구속압, 하중반복횟수, 하중주파수 등의 영향을 고려하여 각 층에 대표적인 변형률 크기에 따른 정규화전단탄성계수(G/G_{max}) 관계를 도출한다.
- ⑥ 현장에서 구한 최대전단탄성계수(G_{max})와 실내시험에서 구한 비선형관계($G/G_{max} - \log \gamma$)를 결합하여 현장지반 각층에서의 변형률 크기에 따른 전단탄성계수를 식 (1)과 같이 결정한다.

$$G_{field} = (G/G_{max})_{\gamma, lab} \times (G_{max})_{field} \quad (1)$$

3. 시험장치

본 연구에서는 현장시험으로 크로스홀시험과 공내재하시험을, 실내시험으로는 공진주/비틀전단 시험을 실시하여 지반의 변형률 크기에 따른 비선형 변형특성을 검토하였다.

3.1 공진주/ 비틀전단시험

본 연구에서는 Stokoe식 공진주/비틀전단 시험기를 사용하였다. 공진주시험의 기본원리는 원통 형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 1차 모드의 공진주파 수(f)와 진동의 크기(A)를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파 속도(V_s), 전단탄성계수(G), 감쇠비(D) 및 전단변형률(γ)을 구한다(김동수, 1995).

비틀전단시험에서는 공진주시험기와 동일한 시험기를 사용하고, 작동방법을 달리하여 지반 변형특성을 구한다. 공시체를 바닥에 고정시키고 공시체 상부와 연결된 진동 시스템에 10Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여

공시체에 가해진 비틀력-비틀각(torque-twist) 관계를 측정하여 응력-변형 이력곡선(hysteresis loop)을 구한다. 응력-변형 이력곡선으로부터 전단변형율, 전단탄성계수, 감쇠비를 결정한다(김동수, 1995).

3.2 공내재하시험(PMT)

공내재하시험은 가해진 압력에 따른 공동변형률을 측정하는 시험으로, 공동변형률의 측정 방식에 따라 크게 부피변화를 측정하는 방식과 원주방향 변형을 직접 측정하는 방식으로 나누어지고, 각각의 방식에 따른 시험기기 보정을 실시하여야 한다(Clarke, 1995). 본 연구에서 사용한 공내재하시험기는 선굴착(PBP)방식 및 부피변화로부터 공동변형률을 측정하는 TEXAM PMT로 멤브레인 자체의 압력에 대한 저항성(멤브레인 강성)과 압력에 따른 시험기기 시스템(탐침, 압력관, 하중측정장치 등 모든 것을 포함)의 팽창성에 대한 보정을 실시하여 사용하였다(박재영, 1997). 최근에는 공내재하시험으로부터 지반의 변형률 크기에 따른 전단탄성계수를 구하기 위한 연구가 활발히 이

루어지고 있다(Belloti 등, 1989; Robertson 등, 1986). 본 연구에서는 현장지반에 공내재하시험기의 탐침(probe) 설치에 의한 지반교란의 영향을 최소화하기 위하여 Belloti 등(1989)과 Robertson 등(1986)이 제안한 역재하-재재하 곡선에서의 전단탄성계수를 구하는 방법을 사용하였다.

3.3 크로스홀시험

크로스홀시험은 지반에 두 개 이상의 시추공을 뚫어 한쪽은 발진자(source)로, 나머지 시추공은 감지기(receiver)로 구성하여, 발진자에서 유발되는 진동이 지반을 통과하여 감지장치까지 도달되는 파의 전파속도를 깊이별로 측정하여, 깊이별 지반 물성치를 추정하는 기법이다. 본 연구에서는 발진자로 사용되는 시추공의 소정의 깊이까지 관내토를 제거하고, 그림 1과 같이 관내토의 표면을 봉을 사용하여 타격하는 방법으로 탄성파를 발생시켰다.

두 개의 감지기측 시추공에 발진자와 같은 깊이로 고정된 진동감지장치(3방향 진동감지기)를 설치하여 발진자에서 발생된 탄성파를

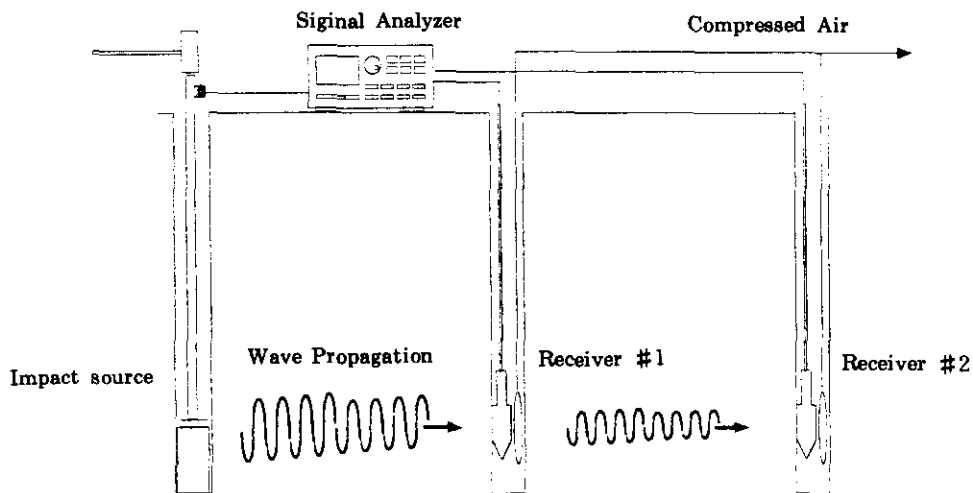


그림 1. 크로스홀 시험 개념도

측정하였다. 발진자와 감지기에서의 신호를 동시에 signal analyzer로 측정하면 시추공과 시추공 사이의 파의 도달시간을 측정할 수 있고, 시추공 사이의 거리와 측정된 전단파 도달시간으로부터 전단파속도(V_s)를 결정한다. 이때 저변형을 전단탄성계수를 전단파속도와 현장지반의 질량밀도로부터 식 (2)를 사용하여 결정한다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

여기서 G_{max} = 저변형을 전단탄성계수, ρ = 흙의 질량밀도, V_s = 전단파속도이다

4. 대상현장 및 시험절차

본 연구에서는 대전시 금고동 쓰레기 매립장 비탈사면에서 현장시험을 수행하고, 동일 현장에서 실내시험을 위한 교란 및 불교란 시료를 채취하였다. 대상 현장은 화강풍화토 지반으로, 화강풍화토의 민감한 입자구조로 인하여 불교란 시료의 채취가 매우 어렵고, 매우 좁은 범위에서도 풍화정도가 매우 상이하여 채취된 시료에 대한 실내시험 만으로는 현장지반의 변형특성 규명이 어려운 지반이다.

4.1 시험시료의 기본물성

교란된 화강풍화토시료에 대하여 기본토성 시험으로, 표준 다짐시험, 체가름시험, 액소성한계시험, 비중시험, 수세식 #200 통과량시험을 실시하였다. 입도시험은 시료를 건조한 후 0.5kg의 건조시료를 비닐 봉지에 담고 1.5m 높이에서 30회 자유낙하시켜 화강풍화토를 일정하게 파쇄시킨 후 시험을 실시하는 자유낙하법(free-fall method)을 적용하였다(Lee 등, 1995). 시험결과 대상지반은 통일분류로 SP-SM으로 나타났고, 현장함수비는 12.3%, 최적함수비는 12.0%, 비중은 2.67, 소성지수는 NP로 나타났다.

4.2 불교란시료 채취 및 교란시료 성형

본 연구의 대상인 금고동 화강풍화토 지역은 매우 좁은 범위에서도 풍화정도가 매우 상이하여, 대상지반의 대표적인 시료선정이 어려워, 육안으로 판단하기에 풍화정도가 차이나는 2개소에서 불교란시료를 채취하였다. 불교란시료를 사용하여 평가된 현장지반의 간극비는 불교란시료 #1에서 0.571, #2에서 0.780으로 나타났다. 화강풍화토는 충격이나 인장에 취약하므로 시료를 채취하는 과정에서 특별한 주의가 필요하다. 이러한 특성을 고려하여 그림 2와 같은 불교란시료 채취기를 제작하여 직경 71mm 높이 142mm의 불교란시료를 채취하였다(정순용, 1997). 불교란시료 채취는 하나의 시료 채취에 약 2시간 이상의 장시간이 소요되나, 시험실에서 시료추출이 매우 용이하게 설계되었고, 시료추출 후 바로 시험 세팅이 가능하며 채취시료가 매우 훌륭한 불교란 상태를 유지하고 있었다.

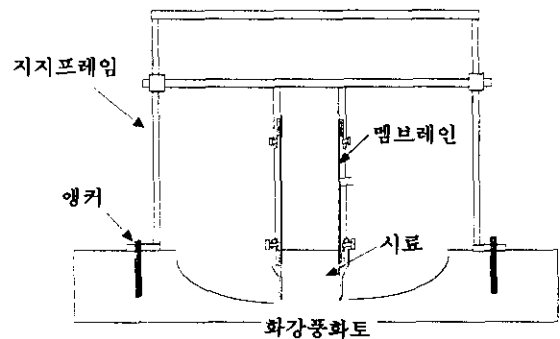


그림 2. 불교란시료 채취기

교란시료는 정적다짐으로 직경 71mm의 시료를 성형하였고, 이때의 함수비는 현장지반의 평균 함수비인 12.3%, 간극비는 #2 불교란시료에서 평가된 0.780과 유사한 상태가 되도록 조절하였다. 정적다짐방법은 시험에 적용할 시료의 건조밀도를 다짐에너지에 관계없이 부피로 조절하여 성형하는 방법으로, 5층 다짐으로

성형하였고, 시료의 부피를 유압계으로 눌러서 압축하여 10분간 유지시킨 후 시료를 추출하였다.

4.3 실내시험 절차

불교란 화강풍화토 시료는 시료채취기에서 추출 즉시 시료의 무게와 부피 그리고 함수비를 측정하여 시료의 건조밀도를 계산하고, 시험기에 거치한 후 구속응력을 1시간 동안 가하고 시험을 실시하였다. 교란시료는 정적다짐방법으로 성형된 시료를, 시험기에 설치한 후, 12시간 동안 대기압상태에서 유지시키고, 구속응력을 가한 후 다시 1시간을 기다려 구속응력이 시료 내에 균일하게 작용할 때 공진주/비틀전단시험을 실시하였다. 공진주/비틀전단시험에서 시료의 단부오차(bedding error)를 줄이고자 석고로 단부처리를 실시하였다.

시료를 공진주/비틀전단시험기에 설치하고 시험준비가 완료되면 0.2kg/cm² 구속응력에서 하중주파수를 0.5Hz로 비틀전단시험을 실시한다. 변형률 크기에 따른 비틀전단시험이 완료되면 고변형률 공진주시험을 실시하였다. 한 단계 구속응력 상태에서의 시험이 완료되면, 구속응력을 다음 단계로 증가시키고 동일한 방법으로 시험을 반복하였다. 비틀전단시험에서 하중주파수의 영향을 검토하기 위하여, 선

형한계변형률 이하에서 입력전압을 일정하게 하고 하중주파수를 0.05Hz, 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz, 10Hz로 증가시키면서 시험을 실시하였다.

4.4 현장시험 절차

금고동 현장에 대한 현장시험으로는 공내재하시험과 크로스홀시험을 수행하였다. 현장시험을 위한 시추공 관입은 공내재하시험기의 probe 외경보다 미소하게 큰 얇은 강관(두께 1.0mm, 외경 76.3mm)을 이용하여 향타하였으며, 향타시 강관 내부의 흙을 핸드오거를 이용하여 제거하면서 강관을 관입시 주변 지반의 교란을 최소화하였다. 약 1.5m 깊이로 강관을 관입하여 시추공을 형성하고, 이중 3개의 시추공을 그림 3에 나타난 바와 같이 조합하여 각각의 경우에 대하여 크로스홀 시험을 수행하였다. 크로스홀시험은 각 경우별로 0.3m, 0.6m, 0.9m 및 1.2m의 깊이에 대해 수행하였으며, 그림 4에서 S는 발진자, R는 감지기를 나타낸다.

크로스홀시험이 완료되면 관입된 강관을 유압잭을 이용하여 인발한 후 매끈하게 형성된 시추공 내부에 probe를 관입하여 공내재하시험을 수행하였다. 공내재하시험은 그림 3에 나타난 시추공 #1과 #2에서 실시하였고, probe

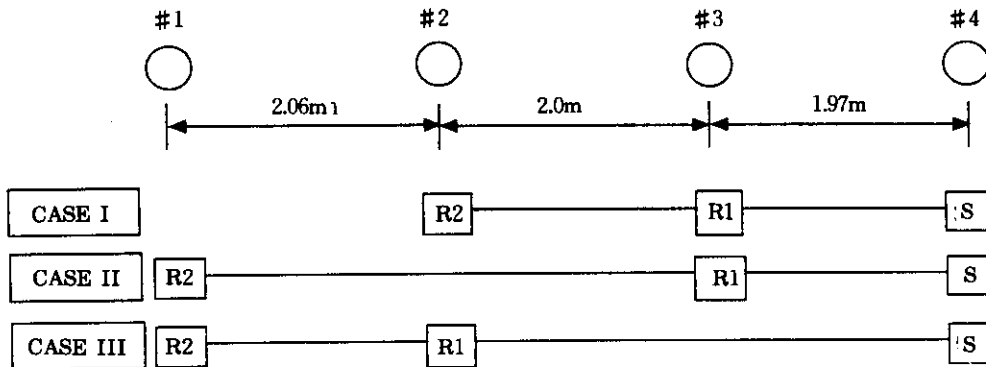


그림 3. 현장시험을 위한 시추공 배치

의 중앙부에서 지표면까지의 깊이는 0.9m로 측정되었으며, 역재하-재재하 단계는 전단변형률 9.5%, 18.2% 및 28.3%가 되는 변형률 크기에서 적용하였다. 공내재하 시험은 변위조절법으로 수행하였으며, 하중 측정은 각각의 변형률 단계에서 30초간 안정화시킨 후 측정하였고, 역재하-재재하에 단계를 완료하는데는 약 1시간이 소요되었다.

5. 실내시험을 통한 변형특성 평가

실내시험에서는 구속압의 영향, 하중주파수의 영향과 전 변형률 범위에서의 결정된 탄성계수로부터 정규화된 탄성계수 변화를 교란시료와 불교란시료에 대하여 검토하였다.

5.1 하중주파수 및 구속압의 영향

서로다른 하중주파수에서의 비틀전단시험결과 본 연구에서 적용한 대상지반의 탄성계수는 하중 주파수의 영향을 받는 것으로 나타났으며(그림 4), 불교란시료가 교란시료에 비하여 그 영향정도가 미소하게 크게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다.

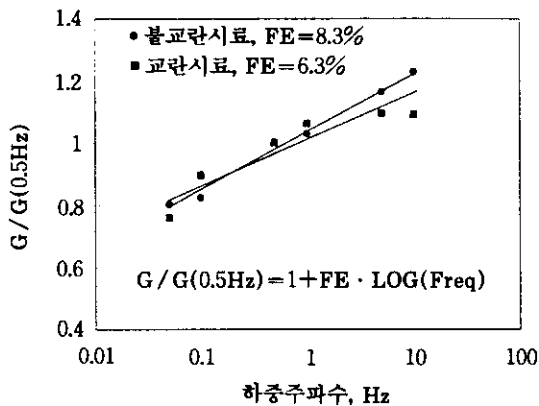
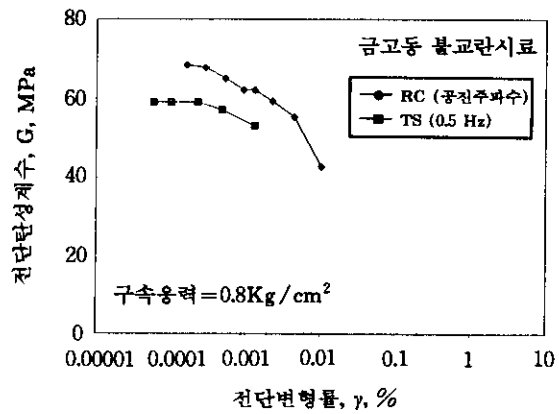


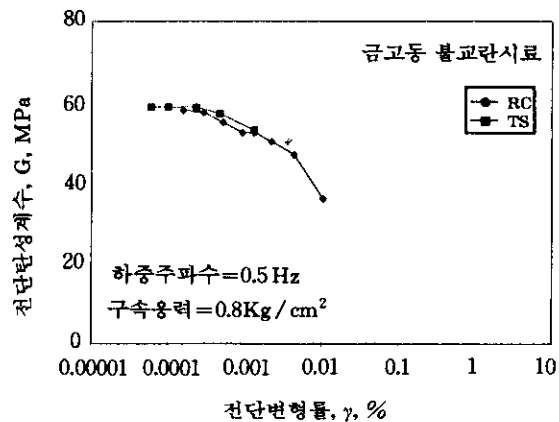
그림 4. 하중주파수의 영향

동일한 구속압력에서 실시된 동적시험인 공진시험과 반복재하시험인 비틀전단시험에서 결정된 탄성계수를 변형률 크기에 따라 직접적

으로 비교하면 서로 차이가 있는 것으로 나타나고 있다(그림 5(a)). 그러나 각 시험이 수행되는 하중주파수 차이를 고려하여 모든 시험결과를 비틀전단 시험이 수행되는 하중주파수 0.5Hz에서의 탄성계수로 그림 4의 결과를 적용하여 보정한 후 비교하면, 그림 5(b)에 나타낸 바와 같이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 정적물성치와 동적물성치는, 변형률의 크기, 하중주파수 등을 고려할 경우 차이가 없음을 알 수 있다.



(a) 하중주파수 영향 고려 전



(b) 하중주파수 영향 고려 후

그림 5. 하중주파수의 영향을 고려한 전·후의 각 시험결과 비교 일례

화강풍화토 시료의 구속응력의 대수적 증가에 따른 저변형률 전단탄성계수(G_{max})의 대수적 증가 정도는 교란시료의 경우 0.49, 불교란시료의 경우 0.43으로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

5.2 변형률 크기에 따른 탄성계수

금고동 현장의 동일한 위치에서 채취한 교란 및 불교란시료에 대한 실내시험결과를 동일한 구속응력에서 하중주파수의 영향을 고려하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보듯이 변형률 크기에 따른 탄성계수는 불교란시료의 채취 위치에 따라, 시료의 교란과 불교란에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나, 그림 7에 나타낸 변형률 크기에 따른 정규화된 전단탄성계수는 교란시료와 2개소에서 채취된 불교란시료에서 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 대부분의 지반 재료에서 정규화된 전단탄성계수의 변화가 시료교란에 영향을 받지 않는다는 결과와 부합되는 것으로 변형률 크기에 따른 정규화된 전단탄성계수의 변화는 교란시료에 대한 시험으로 평가하여도 무방한 것으로 판단된다. 그러므로 현장시험을 통해 구해진 최대전단탄성계수와 교란시료를 사용한 실내시험에서의 결정된 정규화 전단탄성계수의 감소추이를 결합하여 실제현장지반의 비선형 거동을 평가하는, 2절에서 서술한 단계의 식 (1)을 합리적으로 적용가능한 것으로 판단된다.

그림 6 및 그림 7에 나타나듯이 변형률 크기가 매우작은 영역에서는 탄성계수가 변형률 크기에 무관하게 일정한 값을 나타내고 어느 변형률 크기(선형한계변형률; 지반 종류에 따라서 대략 $10^{-4} \sim 10^{-2} \%$ 변형률 사이에서 결정됨) 이후 부터는 변형률이 증가하면서 탄성계수가 감소하는 비선형 거동을 한다. 따라서, 동적인 지반해석 뿐 아니라 공용상태의 토목구조물 기초의 합리적인 변형특성 해석을 위하여는 이러한 변형률 크기에 따른 탄성계수의 변화를 고려하는 비선형 해석을 수행하여야 할 것으로

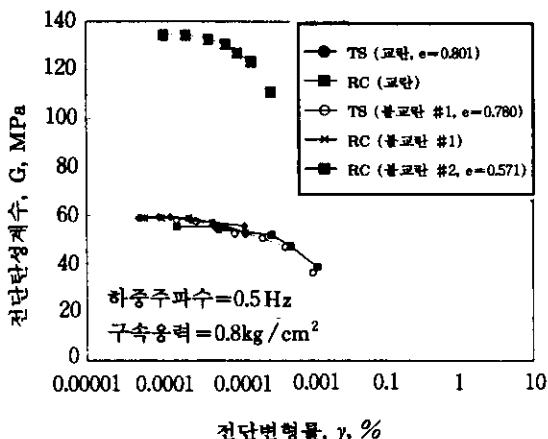


그림 6. 교란, 불교란 시료의 변형률 크기에 따른 전단탄성계수

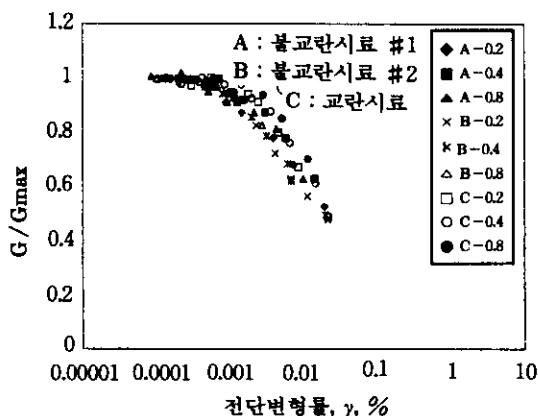


그림 7. 교란, 불교란 시료의 정규화된 전단탄성계수

판단된다. 본 연구에서 적용된 화강풍화토시료의 선형영역과 비선형영역을 구분짓는 변형률 크기, 즉 선형한계변형률(γ_e , elastic threshold strain)은 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-3} \%$ 의 범위에 있는 것으로 나타났다.

6. 현장시험을 통한 변형특성 평가

6.1 공내재하시험 결과

금고동 현장에서 실시된 공내재하시험의 대표적인 결과를 그림 8에 나타내었다. 지반의 파괴후 하중감소시 하중이 음의 값으로 저하되

는 이유는 급격한 하중감소로 인한 공내재하시험기 내부에 발생하는 흡인력(suction)에 기인하는 것으로 보여진다. 그림 8에 나타난 공내재하시험 결과로부터 변형률 크기에 따른 탄성계수를 결정하기 위하여, 본 연구에서는 Belloti 등(1989)이 제안한 방법을 적용하여 probe 설치에 의한 지반 교란의 영향을 최소화 할 수 있는 역재하-재재하곡선을 사용하였고, 역재하 단계의 구속응력과 probe 설치전 현장지반 초기 구속응력과의 차이를 보정하여 탄성계수를 결정하였다(박재영, 1997). 시험이 수행된 위치에서 현장지반의 평균주응력은 불교란시료로부터 평가된 대상지반의 단위중량, 파괴삼축압축시험에서 결정된 내부마찰각을 Jaky 공식($K_0=1-\sin\Phi$)에 적용하여 결정된 정지토압

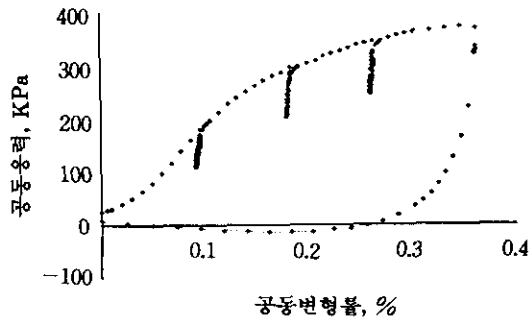


그림 8. 공내재하시험에서의 대표적인 공동변형률-공동응력 결과

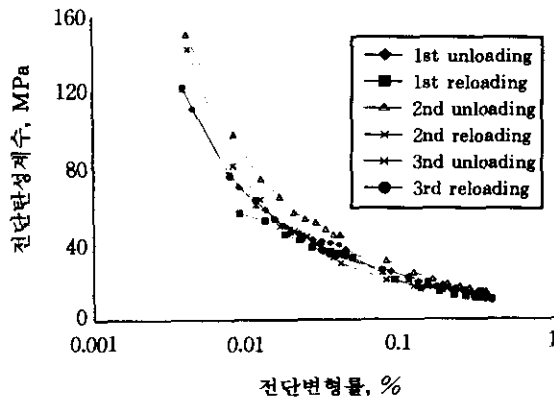


그림 9. 보정된 역재하-재재하 곡선에서의 전단변형률과 전단탄성계수 곡선

계수를 사용하여 계산하였으며, $0.16\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 평가되었다.

응력수준에 대한 영향정도는 불교란시료에 대한 공진주/비틀전단시험에서 결정된 $n=0.43$ 을 사용하였다. 응력수준 및 공동주위의 평균적인 변형률을 고려하여 보정된 역재하-재재하 곡선의 전단변형률과 전단탄성계수 곡선을 그림 9에 나타내었다.

6.2 크로스홀시험 결과

크로스홀시험으로 획득되는 감지기 #1, #2에서의 전형적인 시간영역 신호를 그림 10에 나타내었다. 각 시험깊이와 그림 3에 나타난 시험경우에서 측정된 전단파속도와 미소변형 전단탄성계수를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 미소변형 전단탄성계수는 전단파속도로부터 식 (2)를 사용하여 결정하였고, 식 (2)에서 흙의 질량밀도는 채취된 불교란시료에서 결정된 값을 깊이 따라 일정하다고 가정하여 사용하였다. 또한 크로스홀시험에서 획득한 그림 10과 같은 시간이력 자료를 주파수영역에서 분석하여 탁월주파수가 80Hz임을 얻을 수 있었다(이진선, 1997).

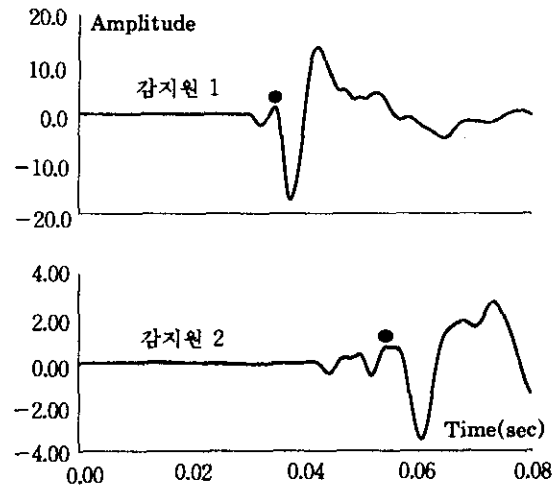


그림 10. 대표적인 크로스홀시험 결과

표 1. 크로스홀시험 결과

시험깊이 (m)	전단파속도, V_s (m/sec)			저변형률 최대전단탄성 계수, G_{max} (MPa)			
	case I	case II	case III	case I	case II	case III	평균
0.3	192.3	182.3	182.3	72.77	65.40	67.81	67.86
0.6	196.1	192.4	200.0	75.68	72.85	78.72	75.75
0.9	200.0	200.1	208.8	78.72	78.80	85.80	81.11
1.2	219.8	204.2	208.8	95.08	82.06	85.80	87.65

7. 현장 및 실내시험 결과 비교

금고동 현장의 동일한 위치에서 채취한 교란 및 불교란시료에 대한 실내시험결과와 현장시험에서 획득된 탄성계수를, 하중주파수의 영향, 구속압의 영향을 고려하여 변형률 크기에 따라 나타내면 그림 11과 같다. 하중주파수는 비틀전단시험이 수행된 0.5Hz에서, 구속압력은 공내재하시험이 수행된 깊이 0.9m에서의 평균주응력인 0.16kg/cm^2 에서 각 시험결과를 비교하였다. 하중주파수의 영향정도는 비틀전단시험에서 평가된 결과를 적용하였으며, 공내재하시험은 하중을 단계적으로 증가시킨 정적시험방법으로 하중주파수를 0.01Hz로 가정하여 평가하였고(한국건설기술연구원, 1992), 크로스홀시험에서는 본 연구에서 사용한 발전자의 탁월주파수인 80Hz를 시험이 수행된 하중주파수로 평가하여 비교하였다. 또한, 크로스홀시험은 선형영역에서 이루어지는 동적시험 방법으로, 시험이 수행되는 변형률 크기를 선형한계변형률보다 작은 0.00002%로 가정하였다.

그림 11에 나타난 결과로부터, i) 현장시험인 크로스홀시험과 공내재하시험의 경우 시험이 수행된 변형률 크기 차이를 고려하면 비교적 잘 일치함을 알 수 있으나, ii) 현장시험만으로는 선형한계변형률(γ_c)의 결정이 곤란하여 전변형률 영역에서의 탄성계수 결정이 어려우며, iii) 불교란시료에 대한 실내시험 결과는 채취된 위치에 따라서 차이가 있는 것으로 나타나, 시료의 대표성 확보가 매우 중요함을

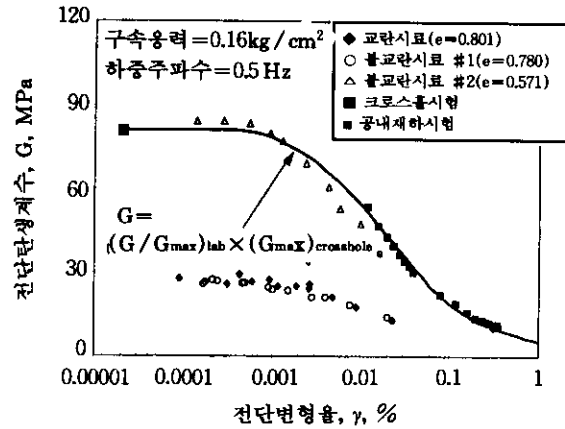


그림 11. 현장 및 실내시험에서 평가된 금고동 현장지반의 변형특성

알 수 있고, 불교란시료에 대한 실내시험만으로 엄밀한 현장지반의 변형특성 평가는 어려움을 아울러 확인 할 수 있다. 따라서, iv) 현장지반의 변형특성 평가를 위하여는 대상 현장물성치의 대표성을 갖는 현장시험결과와 전 변형률 영역에서의 탄성계수 결정이 가능한 실내시험결과를 효과적으로 결합하여 평가하여야 함을 알 수 있다.

8. 현장시험과 실내시험 결과를 결합한 대상지반의 변형특성 평가

2절에서 제시한 현장지반의 변형특성 평가 절차에 따라 본 연구에서 시험한 금고동 대상지반의 변형특성을 아래와 같이 평가할 수 있다. 실내시험으로부터 대상지역의 하중주파수에 대한 영향정도와 전 변형률 영역에서 정규화된 탄성계수 변화를 결정하고, 크로스홀시험에서 깊이별 전단탄성계수를 결정한다. 현장시험에서 결정된 탄성계수를 실내시험에서 결정된 하중주파수의 영향에 따라 평가하고자하는 하중주파수의 탄성계수로 보정하고, 실내시험에서 결정된 정규화탄성계수 감소곡선과 식 (1)을 사용하여 결합함으로써 현장지반의 비선형 탄성계수를 변형률 크기에 따른 그림 12와 같이 평가 할 수 있다. 본 연구에서는 단지 깊이 1.

2m 까지의 매우 얇은 깊이에서의 현장지반의 변형특성을 평가하였으나, 향후 실제 상황에서 깊이별 변형특성 평가에 동일하게 적용 가능할 것으로 판단된다.

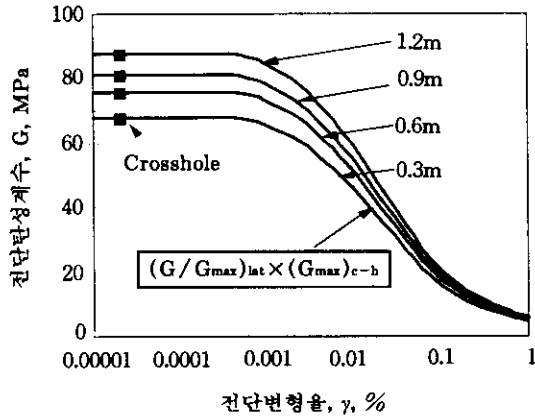


그림 12. 현장시험과 실내시험을 결합한 변형특성 평가

9. 결 론

- 1) 현장시험과 실내시험을 효과적으로 결합한 현장지반의 비선형 변형특성 평가 절차를 제시하고, 금고동 현장을 대상으로 제시된 방법의 유용성을 확인하였다.
- 2) 현장시험으로 공내재하시험과 크로스홀시험, 실내시험으로 공진주/비틀전단시험을 통하여 각 시험의 특성과 신뢰성 있는 시험 범위를 확인하였다.
- 3) 현장시험으로 수행된 동적시험인 크로스홀시험과 반복재하시험인 공내재하시험, 실내시험으로 실시된 동적시험인 공진주시험에서 결정된 탄성계수는 각 시험이 수행된 변형률 크기와 시험의 하중주파수를 고려하는 경우 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로 정적물성치와 동적물성치는 변형률의 크기, 하중재하속도 등을 고려할 경우 차이가 없음을 알 수 있고, 각 시험의 결과를 효과적으로 결합 가능함을 확인 할 수 있었다.

4) 교란시료와 불교란시료의 변형률 크기에 따른 정규화된 탄성계수 변화는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 현장시험을 통해 구해진 최대전단탄성계수와 교란시료를 사용한 실내시험에서의 결정된 정규화된 탄성계수 감소추이를 결합하여 현장지반의 비선형 거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

5) 크로스홀시험과 공내재하시험을 이용한 현장시험에서는 현장지반을 대표할 수 있는 탄성계수를 획득할 수 있었으나, 하중주파수 영향과 변형률 크기에 따른 전 변형률 영역에서의 탄성계수 결정이(특히 선형한계변형률의 결정 불가능) 곤란하였고, 실내시험에서는 전 변형률 영역에서의 탄성계수 변화 결정이 가능하였으나 채취된 시료의 현장 대표성 확보가 어려웠다. 따라서 현장시험에서 선형영역의 탄성계수를 결정하고 실내시험에서 결정된 변형률 크기에 따른 정규화탄성계수 감소곡선을 효과적으로 결합하여 현장지반의 비선형 탄성계수를 결정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 KEERC의 연구비지원(97K3-13 01-02-03-3)과, 한국과학재단의 연구비 지원(95-0600-01-01-3)으로 수행된 연구결과 일부로 감사를 표합니다. 또한 시험장소를 제공해주시고, 시료채취 및 현장시험 등에 여러모로 협조해주신 한밭개발공사 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국과학재단 (1996), "대형역사 구조물의 건설 및 열차운행에 관한 지반-구조물복합계의 해석 기술 개발," 95-0600-01-01-3.
2. 김동수 (1995), "공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성," 한국지

- 반 공학회지, 제11권, 제1호, pp. 101-112.
3. 김동수, 권기철, 박재영, 정순용 (1997), "화강풍화토의 변형특성", '97 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 65-72.
 4. 박재영 (1997), "공내재하시험을 이용한 지반의 미소변형 진단탄성계수 측정", 한국과학기술원, 석사학위논문.
 5. 이승래, 김동수, 정순용, 권기철 (1996), "교란 및 불교란 화강풍화토의 변형특성", 대한토목학회 학술발표회(I), pp. 399-402.
 6. 이진선 (1997), "진동원에 따른 지반진동의 감쇠 특성", 한국과학기술원, 석사학위논문.
 7. 정순용 (1997), "비교란 및 정적다짐 화강풍화토의 응력-변형율관계에 대한 연구", 한국과학기술원, 석사학위논문.
 8. 한국건설기술연구원 (1992), 정적 반복재하식 MR 시험법, 한국건설기술연구원, 건기연 92-GE-113.
 9. 한국지반공학회 (1997), 진동 및 내진설계, 구미서관, pp.55-94.
 10. Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Robertson, P.K.and Peterson, R.W.(1989), "Interpretation of Moduli from Self-Boring Pressuremeter Tests in Sand," Geotechnique 39, No.2, pp.269-292.
 11. 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.
 12. Clarke, B.G., (1995), "Pressuremeters in Geotechnical Design," Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman & Hail.
 13. Lee, I.K.and Coop, M.R.(1995), "The Intrinsic Behaviour of a Decomposed Granite Soil," Geotechnique 45, No.1, pp.117-130.
 14. Robertson, P.K.and John, M.O.Hughes (1986), "Determination of Properties of Sand from Self-boring Pressuremeter Tests," The Pressuremeter and Its Marine Applications: Second International Symposium, ASTM STP 950, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103, pp. 283-302.
 15. Seed, H. B. and Idriss, I.M.(1970), "Soil Moduli and Damping Factros for Dynamics Response Analysis," Report No.EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Sept., pp.37.
 16. 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.

(접수일자 1997. 6. 30)