

공진주 시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성

Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils

Using Resonant Column Tests

김동수^{*}
Kim, Dong-Soo

추연욱^{**}
Choo, Yun-Wook

The deformation characteristics of cohesionless soils in Korea were investigated using resonant column tests. Total 60 samples, which were sampled from sedimentary and residual soils and reconstituted using controlled particle-size distributions, were prepared. The confining pressure applied in the tests ranges from 20 kPa to 500 kPa. The test results were categorized into 3 groups including clean sands, silt and silty sand, and residual soils. Based on test results, the small-strain shear modulus(G_{max}) and damping ratio(D_{min}) were determined and the effects of confinement on G_{max} and D_{min} were characterized. The empirical correlations predicting G_{max} were suggested for 3 group soils. Nonlinear deformational characteristics of clean sands are significantly affected by confining pressure and the ranges and mean curves for G and D are suggested considering the range of confining pressure. The silt and silty sand and residual soils were weakly affected by confining pressure, so the representative ranges and curves, independent of confining pressure, were proposed.

1. 서론

반복하중이나 동하중을 받는 지반-구조물계의 설계에서 전단탄성계수 및 감쇠비로 표현되는 지반의 동적변형물성은 매우 중요한 변수이다. 선형 한계변형을 이하의 저변형을 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형율의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수(G_{max})로서 감쇠비는 최소값인 최소감쇠비(D_{min})로서 고려된다. 지진하중이 작용할 경우 변형율 크기가 커져서, 변형율 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 값의 결정이 중요해진다. 특히 등가선형 지반응답해석에서 전단탄성계수와 감쇠비의 변화가 중요한 설계입력변수가 된다(Schanabel, 1972). 지진해석시 중요한 입력변수가 되는 지반의 변형특성은 같이 다양한 영향인자를 갖기 때문에 많은 연구가 필요하고, 또한, 국내지반에 적용할 수 있는 연구결과의 획득과 변형특성에 영향을 미치는 주요한 인자들을 찾아 D/B 화는 작업은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

* 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 정회원

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

본 논문에서는 국내의 비점성지반에 적용 가능한 대표적인 변형특성을 제안할 수 있도록 국내 여러지역에서 실트, 모래등의 자연시료(퇴적토)를 채취하였고, 또한 국내에 존재하는 풍화토와 풍화암 대역에서 풍화시료를 채취하고 공진주 시험을 수행하였다. 이뿐 아니라, 비소성 사질토에 대한 보다 엄밀한 특성연구를 위하여 강모래를 체가름을 통하여 분리한 후 입자들을 조합하여 다양한 입도분포를 갖는 시험시료를 조제하여, 공진주 시험을 수행하였다. 20kPa에서 500kPa의 구속압 범위에서 수행된 총 60개의 공진주 시험결과를 사용하였다. 얻어진 시험결과를 바탕으로 국내에 존재하는 비점성지반에 대한 저변형을 영역의 변형특성과 고변형을 영역의 비선형 변형거동을 특징짓고, 이에 대한 영향 요소들을 평가하여 대표값들을 제안하였다.

2. 시험방법 및 시험시료

본 연구는 Stokoe식의 공진주 시험기를 이용하여 수행되었다. 본 시험기는 지반재료를 원통형으로 성형하여 바닥을 고정시키고, 상단부를 자유조건을 유지하면서 비틀력을 재하하는 방식을 취한다. 시험의 기본원리는 원통형시료가 비틀력에 의해 일차모드에서 공진이 유발되면, 이때 비틀변위를 측정하여 탄성과전단이론을 바탕으로 시료의 전단탄성계수와 변형율을 획득한다. 시료의 감쇠비는 자유진동감쇠법과 Half-Power bandwidth법을 이용하여 구한다(김동수, 1995).

본 논문에서 시험된 시료는 인천연안, 영종도, 전남광양, 경남낙동강, 부산연안, 전남신안, 전남여수 등지에서 채취된 퇴적토시료 23개, 인천, 부산, 경남통영, 전남장흥 등지의 풍화대역에서 채취된 풍화시료 14개, 입도분포를 인위적으로 조합하여 만든 입도조정시료 23개로 각 시료에 대하여 공진주시험을 수행하고 결과를 획득하였다. 퇴적토시료 및 풍화토시료는 교란시료로 채취되어 실험실로 운반되었다. 시험시료는 공진주시험 후 체분석(KSF 2301)과 액소성한계시험(KSF 2303, KSF 2304)을 수행하여 기본물성을 획득하였다. 입도조정시료는 강모래와 화강암 쇄석을 체가름 시험용 체를 이용하여 입자크기에 따라 분리한 후, 계획된 입도분포에 따라 중량비를 조합하여 시료를 제작하였다. 제작된 시료의 입도분포는 입자의 크기 및 입도분포영향을 볼 수 있도록, 통일분류법(USCS)으로 SP, SW로 분류되면서 입자크기가 커지도록 제작하였다. 시험된 모든 시료의 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 시험시편은 과소다짐법(under-compaction method)을 적용하여 제작한 후 공진주시험을 수행하였다. 과소다짐법은 다짐에 의한 시료성형법으로 여러 층으로 나누어 다지는 경우 동일한 다짐높이를 목표로 다지면 아래층이 더 조밀하게 다져지므로, 시료전체에 균일한 밀도를 확보하기 위하여 각층의 시료는 동일한 무게를 가지고 다음 층으로 갈수록 목표다짐높이가 작아지도록 하여 성형하는 방법이다. 시험시료는 직경 약 50mm, 높이 약 100mm로 성형하였고, 퇴적토 및 풍화토 시료는 현장함수비와 현장밀도에 준하여 시료를 성형하였다. 입도조정시료는 시험조건을 일정하게 유지하게 위해 함수비를 약 4%로 일정하게 조절하였고, 건조단위중량은 몇 개의 시료를 제외한 다른 시료들은 $1.77t/m^3$ 에 맞추었다. 구속응력은 공기압을 이용하여 등방조건으로 압밀하였고, 모래시료는 1시간 정도, 실트 시료는 4시간 동안 압밀하였다. 압밀이 끝난 후 다양한 변형율 크기에 따라 배수상태로 공진주시험을 수행하였고, 한 단계의 구속응력에서 시험이 끝나면, 다음의 큰 구속응력에 대하여 압밀하고 공진주시험을 수행하는 다단계시험(multi-stage testing)을 적용하여, 하나의 시료에 대하여 3~7개의 구속응력에 대하여 공진주 시험을 수행한 후 시험결과를 획득하였다. 모든 시험시료에 대한 자세한 기본물성과 시험조건은 김동수와 추연욱

(2001)의 논문에 수록하였다.

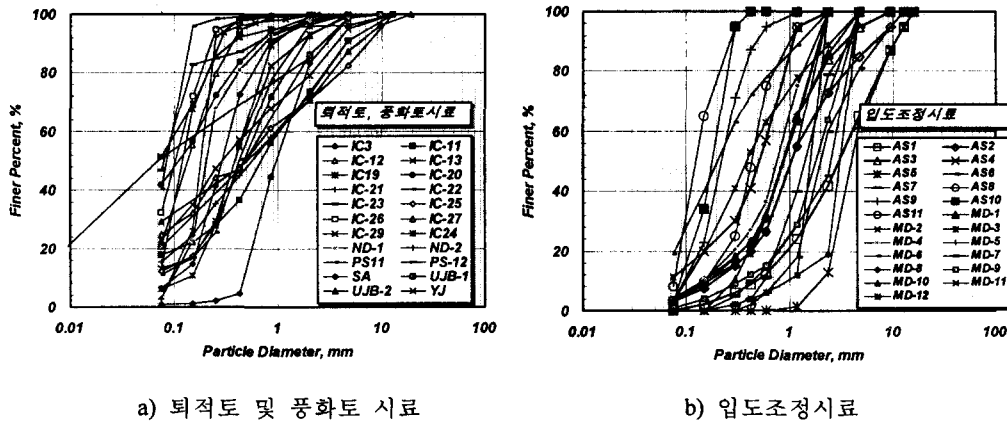


그림 1 시험시료의 입도분포곡선

3. 비점성지반의 동적변형특성

일반적으로 전단탄성계수와 감쇠비는 저변형율($10^{-4}\%$ 이하)과 고변형율($10^{-4}\%$ 이상)로 나누어 고려되며, 본 논문에서도 저변형율 특성과 고변형율의 비선형거동으로 나누어 결과를 정리하였다. 본 연구에서 수행된 공진주 시험결과를 기본물성 및 통일분류법과 연관지어 정리한 결과, 시험결과를 비슷한 특징이 보이는 실트 및 실트질모래, 깨끗한 조립질 모래, 풍화시료 등 3개의 그룹으로 분류하여 정리하였다. 자유진동감쇠곡선에 의해 구해지는 감쇠비는 사이클에 따라 점차 변형율이 감소하므로 이를 고려하여 감쇠시작 후 세 사이클에서의 변형율을 평균하여 대표 변형율로 보정하였으나, 공진주시험기 자체에서 발생하는 시스템감쇠특성은 보정하지 못하였다.

3.1 저변형율 영역의 동적변형특성

3.1.1 최대전단탄성계수

최대전단탄성계수는 간극비, 과압밀비, 구속응력, 지질학적 연도, 소성지수(PI) 등의 다양한 요소들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Hardin와 Black, 1968; Dobry와 Vucetic, 1987). Hardin과 Richart(1963)는 사질토의 경우 구속응력과 간극비의 영향을 주로 받는다고 발표하였고, Hardin(1978)은 최대전단탄성계수에 대한 실험식을 식 1과 같이 제안하였다.

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot OCR^k \cdot P_a^{1-n} \cdot (\sigma'_0)^n \quad (1)$$

여기서, A는 무차원계수, n은 구속압영향상수, F(e)는 간극비 함수, OCR은 과압밀비, k는 소성지수계수, P_a 는 대기압, σ'_0 는 평균유효응력이다.

최대전단탄성계수와 구속응력은 대수-대수관계에서 n의 경사를 갖는 직선관계임을 의미한다. 시료의 종류별 최대전단탄성계수의 구속응력에 대한 영향을 보면 그림 2~4와 같다. 사질토의 경우

OCR과 소성지수의 영향을 무시할 수 있고, 대기압, P_a 는 상수이므로, 식 1을 단순화 할 수 있다. 또한, 실제현장에서는 간극비의 결정에 어려움이 많이 존재하므로, 간극비 함수 $F(e)$ 를 포함하여 하나의 상수로 고려하고, 기울기로부터 결정된 n 값을 포함하여 식 1의 경험식을 간략화 하면 실용적으로 사용될 수 있다고 판단된다. 각 시료의 종류별로 구한 경험식은 식 2~4과 같이 제안하였고, 이 곡선들은 그림 2~4에 나타내었다.

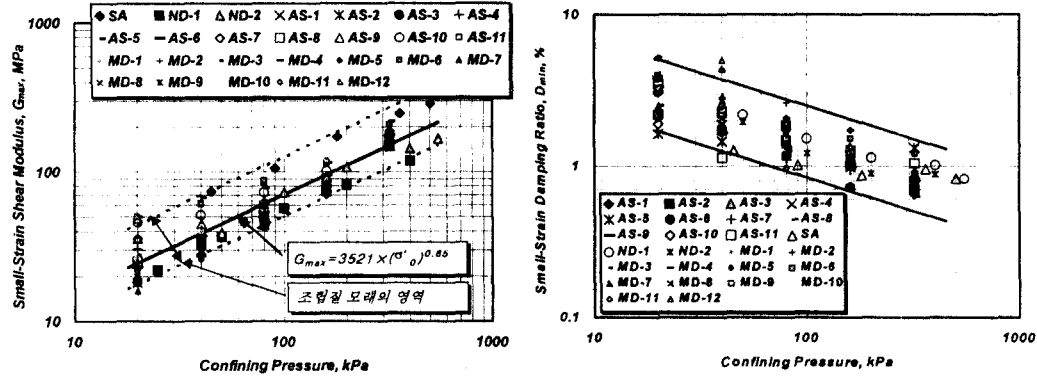


그림 2 조립질 사질토 시료의 구속응력에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})와 최소감쇠비(D_{min})

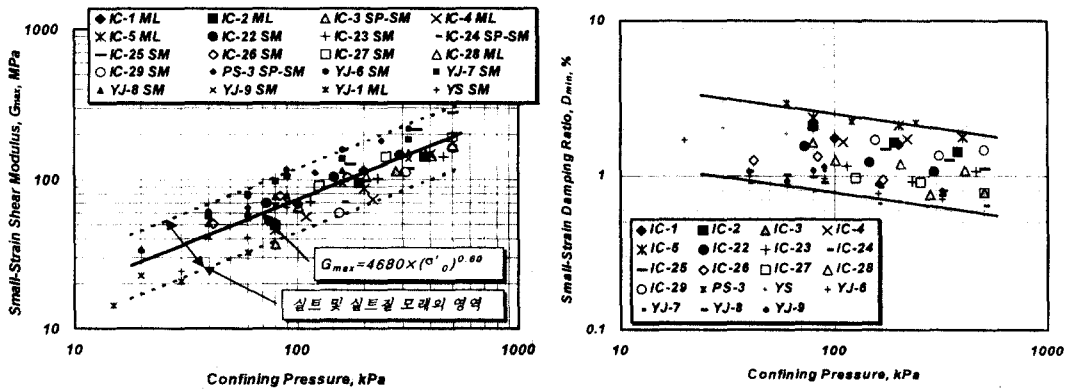


그림 3 실트 및 실트질 모래시료의 구속응력에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})와 최소감쇠비(D_{min})

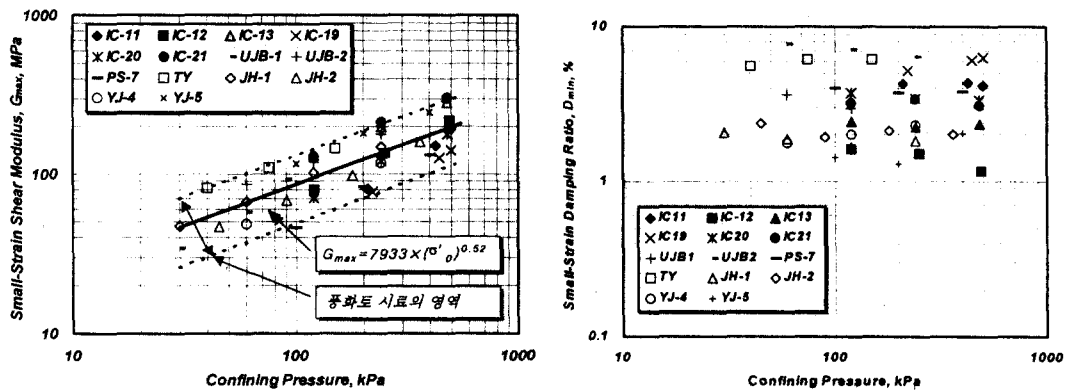


그림 4 풍화토 시료의 구속응력에 따른 최대전단탄성계수(G_{max})와 최소감쇠비(D_{min})

$$\text{조립질 사질토} \quad : \quad G_{\max} = 3521 \cdot (\sigma_0')^{0.65} \quad (2)$$

$$\text{실트 및 실트질 모래} \quad : \quad G_{\max} = 4680 \cdot (\sigma_0')^{0.60} \quad (3)$$

$$\text{풍화토} \quad : \quad G_{\max} = 7933 \cdot (\sigma_0')^{0.52} \quad (4)$$

여기서 G_{\max} 는 최대전단탄성계수(kPa), σ_0' 는 평균유효응력(kPa) 이다

3.1.2 최소감쇠비

시료의 종류별 최소감쇠비와 구속응력관계는 그림 2~4과 같다. 조립질 사질토시료는 구속응력의 영향을 받아 구속응력이 증가함에 따라 감쇠비가 감소 하였고, D_{\min} 값은 범위가 0.63%~3.92%의 분포였다. 또한 구속응력이 작은 20kPa에서는 시료별 감쇠비 값의 차이가 1.6%~3.92%의 분포를 가지나, 320kPa로 구속응력이 커진 경우 0.67%~1.32%로 줄어 들고 있다(그림 2). 실트 및 실트질 모래 시료는 최소감쇠비의 범위가 0.64%~2.96%이며, 구속응력의 영향을 다소 받아 구속응력이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하고 있으나, 그 영향은 조립질 사질토시료에 비해 적게 나타났다(그림 3). 반면, 풍화토 시료는 그림 4와 같이 1.5%~7.8%까지 다양한 값을 보이고 있는 반면 구속응력에 대해 그다지 영향을 받지 않고 있을 뿐 아니라, 소성지수나 #200체 통과량 등의 기본물성에도 영향을 받지 않고 있다.

3.2 비선형 변형특성

3.2.1 조립질 사질토

비소성 조립질 사질토(통일분류법으로 SP, SW등으로 분류되며 소성지수가 NP인 시료)의 비선형 거동은 그림 5에서처럼 구속응력의 지배적인 영향을 받아서 구속응력이 증가함에 따라 비선형의 경향이 줄어들며 곡선이 오른쪽으로 이동하고 있다.

구속응력이 중요한 인자이므로 같은 시험결과를 그림 6과 같이 구속응력 별로 나타내었다. 낮은 구속응력에서는 매우 넓은 분포를 보이고, 구속응력이 커질수록 곡선들이 좁게 모이면서 오른쪽으로 이동하고 있다. 조립질 모래시료에 대하여 각 구속응력 수준에서의 평균곡선과 ± 1 표준편차 곡선을 획득하여 제안하였다. 기존의 제안된 결과들과의 비교를 위하여 대표곡선을 그림 7과 같이 나타내었다. 구속응력이 증가함에 따라 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선은 선형영역이 증가하면서 오른쪽으로 이동하였다. 본 연구의 결과는 Seed-Idriss(1970)와 Vucetic-Dobry(1991) 곡선에 비하여 동일한 변형율에서 정규화 전단탄성계수는 큰 값을 보이고, 감쇠비는 작은 값을 보였다. 본 연구의 결과로부터 세립분의 양이 적은 조립질 모래(대표적으로 강이나 해안에서 채취된 모래)의 경우 구속응력의 영향이 뚜렷하여 해석이나 설계에 적용시 구속응력의 영향을 고려하여야 한다고 판단된다.

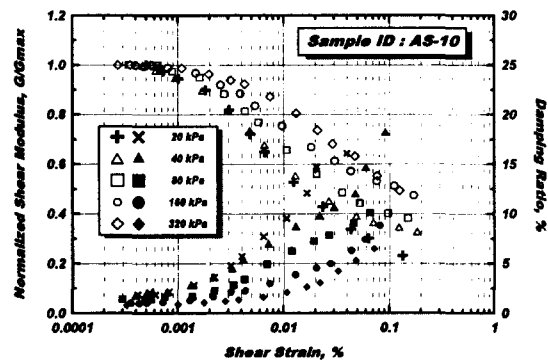


그림 5 대표적인 조립질 사질토의 시험결과

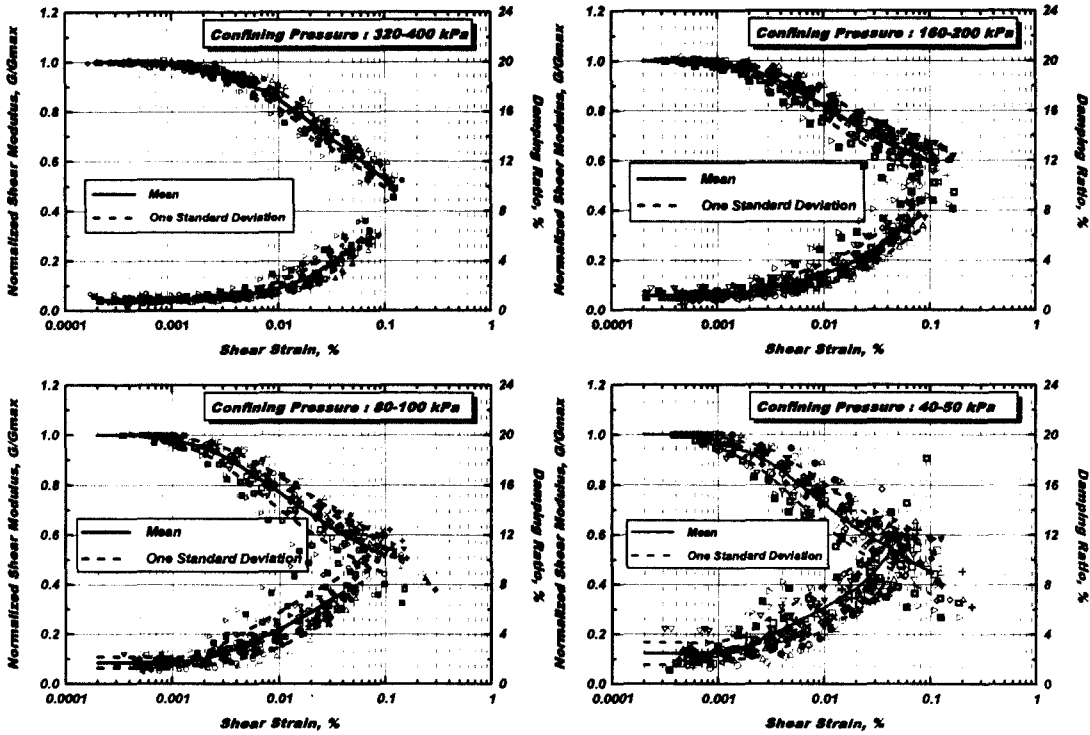


그림 6 조립질 사질토의 구속응력에 따른 정규화전단탄성계수와 감쇠비곡선

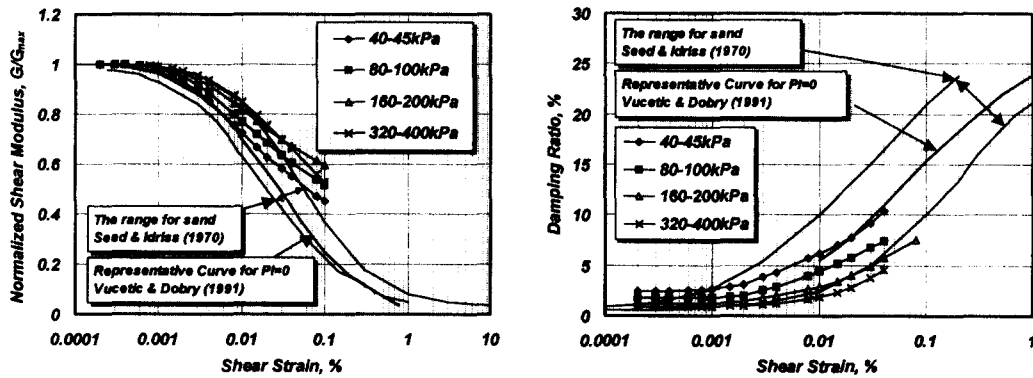


그림 7 조립질 사질토의 정규화 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 구속응력 별 대표곡선

3.2.2 실트 및 실트질 모래

실트 및 실트질 모래는 통일분류법으로 ML, SM, SP-SM 등으로 분류되는 시료로서, 세립분을 다소 포함하고 있어 조립질 모래와 소성지수를 갖는 점성토의 중간적인 특성을 보인다. 그림 8에서 처럼 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비 모두에서 구속응력의 영향을 확인할 수 있지만, 조립질 모래의 경우에 비해 영향정도가 작았다. 본 연구에서 실트 및 실트질 모래로 분류된 시료들의 소성

지수는 최소 NP에서 최대 2%의 값을 가진다. 시험결과는 구속응력에 영향이 적어 구속응력에 관계없이 모는 시험결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 구속응력에 따른 차이보다 시료에 의해 나타나는 분산정도가 크게 나타났고, 시험결과는 전체적으로 매우 넓은 폭으로 분포하였다. 종래의 연구결과와 비교하면, 정규화 전단탄성계수와 감쇠비의 시험결과 대부분이 Seed와 Idriss의 연구결과의 상한선의 오른쪽 밖으로 위치하고 있다. 또한, 시료들의 소성지수가 NP~2%범위에 있지만 결과들이 Vucetic과 Dobry의 연구결과의 소성지수 15%에 해당하는 결과보다도 더 오른쪽에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 두 연구자의 대표곡선이 실트 및 실트질 모래 지반에 대하여 적용하기에 무리가 있음을 확인할 수 있었다. 실트 및 실트질 모래시료의 경우 구속응력에 의한 구분이 의미가 없어서, 구속응력에 관계없이 전단탄성계수와 감쇠비에 대한 평균곡선과 ± 1 표준편차 곡선을 그림 9와 같이 제안하였다.

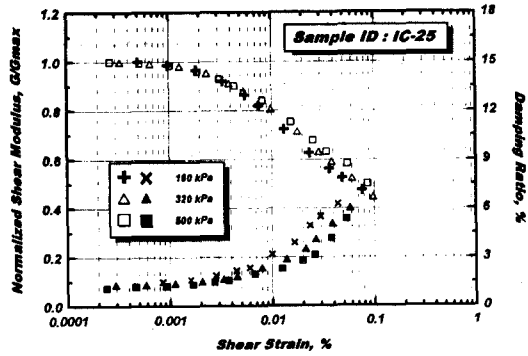


그림 8 대표적인 실트 및 실트질 모래시료의 시험결과 (IC-25)

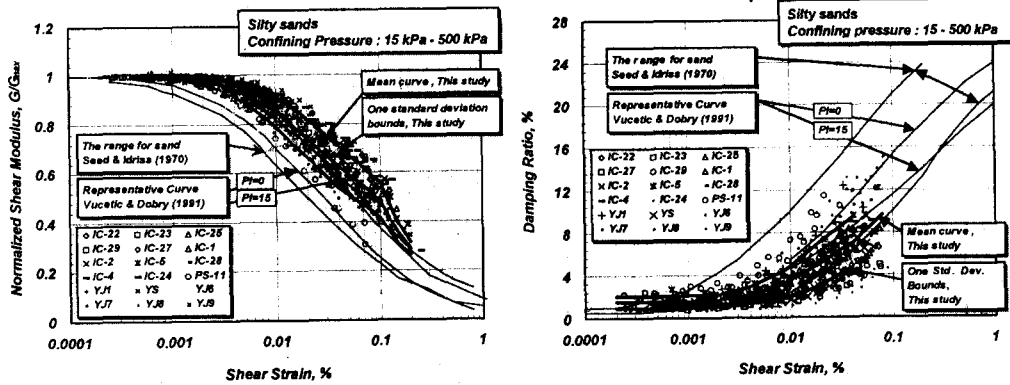


그림 9 실트 및 실트질 시료의 변형율크기에 따른 정규화 전단탄성계수와 감쇠비 곡선

3.2.3 풍화시료

풍화시료는 풍화잔적토와 풍화암 대역에서 채취되었지만 재성형(remold)이 가능한 입자크기 정도로 풍화된 시료를 포함하였다. 이들 시료는 점토나 사질토와는 다른 공학적 성질을 가지기 때문에 따로 분류하여 정리하였다. 풍화시료의 경우에도 구속응력의 영향이 작지만 존재함을 그림 10에서 확인할 수 있다.

시험된 모든 구속응력에 대한 결과를 그림 11에 나타내었다. 풍화토 시료는 비선형 현상이 일찍 시작되어 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 왼쪽에 위치해 있고, Seed와 Idriss의 연구결과의 범위와 잘 부합하게 분포하였다. 그림 10에서 확인했듯이 구속응력의 영향을 거의 받지 않아 모든 구속응력의 시험결과를 함께 표시하여도 결과의 범위가 크게 변하지 않고 있어, 구속응력에 관계없이 전단탄성계수에 대한 평균곡선과 ± 1 표준편차 곡선을 제안하였다(그림 11). 감쇠비의 결과에서

도 그림 11에서 확인할 수 있는 것과 같이, 비슷한 구속압에 대한 시험결과에서도 시료간에 매우 큰 차이를 보이고 있고, 비선형이 시작되는 선형한계 변형율의 값이나 비선형 영역에서의 감쇠비 값들이 기본물성과는 관계없이 다양하게 분포하고 있다.

본 연구에서 사용된 시료들은 풍화시료의 특성상, 현장의 깊은 곳에 위치하여 비교란시료로 채취하는데 어려움이 있으므로 대부분 교란시료로 채취되었고, 실험시 재성형(remolded)되어 사용되었다. 화강풍화토의 경우 교란-비교란의 영향이 크지 않다고 발표된 연구결과들이 있으나(정순용, 1997;고동희, 2001), 교란-비교란의 영향은 정규화 전단탄성계수보다는 감쇠비가 더 민감할 것으로 판단되어 비교란 시료를 중심으로 많은 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

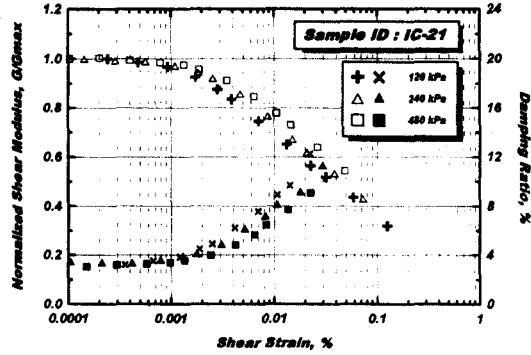


그림 10 대표적인 풍화토시료의 시험결과

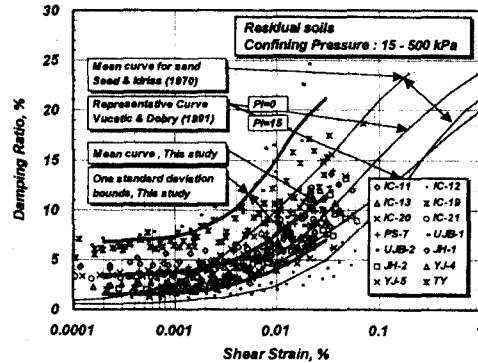
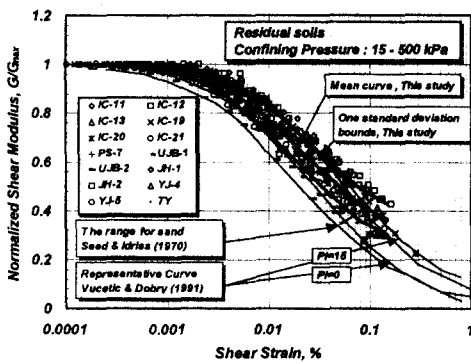


그림 11 풍화토 시료의 변형율크기에 따른 정규화 전단탄성계수와 감쇠비 곡선

4. 결론

본 논문에서는 국내 여러지역의 실트, 모래 등의 퇴적토 시료를 채취하고, 풍화토와 풍화암 대역에서 풍화시료를 채취한 후, 재성형하여 공진주 시험을 수행하였다. 또한, 강모래를 체가름을 통하여 분리한 후 입자들을 조합하여 다양한 입도분포를 갖는 시험시료를 조제하였다. 각 시료들을 다양한 구속응력단계로 등방압밀한 후 변형율 크기를 변화시키면서 공진주 시험을 수행하였다. 획득된 시험결과를 실트 및 실트질 모래, 조립질 사질토, 풍화토의 3개의 그룹으로 나누어 정리하였다. 각 3개의 그룹에 대한 최대전단탄성계수와 최소감쇠비에 대한 구속응력의 영향을 확인하였고, 최대전단탄성계수에 대한 실용적인 경험식을 제안하였다. 또한, 조립질 사질토와 실트 및 실트질 모래시료, 풍화토시료에 비선형 변형특성을 정리하여 영향요소를 분석하고, 각 그룹에 대한 대표영역과 대표곡선을 제안하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터 과제(2000G0103)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

6. 참고문헌

1. 고동희(2001), "미소변형 삼축시험과 공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화토의 변형특성 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원, pp. 71~88
2. 김동수 (1995), "공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성", 한국지반 공학회지, 제11권, 제1호, pp. 101~112.
3. 김동수, 추연욱(2001), "공진주 시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성", 한국지반공학 학회 논문집, 제17권, 제5호.
4. 정순용(1997), "비교란 및 정적다짐 화강풍화토의 응력-변형율관계에 대한 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원, pp. 41~47.
5. Dobry, R., and Vucetic, M.(1987), "State-of-the-art report: Dynamic Properties and Response of Soft Clay Deposits". Proc. Int. Symp. On Geotechnical Engineering of Soft Soils, Vol. 2, pp. 5187.
6. Hardin, B.O. (1978), "The nature of stress-strain behavior of soil", Proc. Geotech. Eng. Div. Specialty Conference on Earthquake Engineering Eng. and Soil Dynamics, Vol. 1, ASCE, Pasadena, June, pp. 3-90.
7. Hardin, B.O. and Richart, F.E.(1963), "Elastic Wave Velocities in Granular Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp. 3365.
8. Hardin, B.O. and Black, W.L.(1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol. 94, No. SM2, pp. 353369.
12. Seed, H. B. and Idriss, I. M., (1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamics Response Analysis," Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Sept., pp. 37.
13. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. [1972] "SHAKE: A computer program for earthquake response of horizontally layered soils", Report No. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
15. Vucetic, M. and Dobry, R.(1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 89107.