

# 공진주/비틀 전단(RC/TS)시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성

Deformational Characteristics of Dry Sand Using Resonant  
Column/Torsional Shear Testing Equipment

김 동 수\*  
Kim, Dong - Soo

---

## Abstract

Deformational characteristics of soils, often expressed in terms of shear modulus and material damping ratios, are important parameters in the design of soil-structure systems subjected to cyclic and dynamic loadings. In this paper, deformational characteristics of dry sand at small to intermediate strains were investigated using resonant column/torsional shear(RC/TS) apparatus. Both resonant column(dynamic) and torsional shear(cyclic) tests were performed in a sequential series on the same specimen. With the modification of motion monitoring system, the elastic zone, where the stress-strain relationship is independent of loading cycles and strain amplitude, was verified and hysteretic damping was found even in this zone. At strains above cyclic threshold, shear modulus increases and damping ratio decreases with increasing number of loading cycles. Moduli and damping ratios of dry sand are independent of loading frequency and values obtained from pseudo-static torsional shear tests are identical with the values from the dynamic resonant column test, provided the effect of number of loading cycles is considered in the comparison. Therefore, deformational characteristics determined by RC/TS tests may be applied in both dynamic and static analyses of soil-structure systems.

## 요 지

동적하중을 받는 지반-구조물 시스템의 설계를 위해 전단탄성계수와 감쇠비로 표현되는 지반의 변형특성의 결정은 매우 중요하다. 본 논문에서는 공진주/비틀전단시험기를 이용하여 저 변형률 및 중간 변형률하에서 건조사질토의 변형특성을 연구하였다. 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단시험을 동일한 공시체를 이용하여 실시하였다. 진동측정시스템을 개량하여 응력-변형관계가 하중반복회수와 전단변형률의 크기에 영향을 받지않는 선형영역을 찾았으며

---

\*정회원 한국과학기술원 토목공학과 조교수

이 영역에서 이력감쇠가 존재함을 나타내었다. 반복한계변형률 이상에서는 하중반복회수에 따라 전단탄성계수는 증가하고 감쇠비는 감소하였다. 사질토의 전단탄성계수와 감쇠비는 진동주파수에 영향을 받지 않으며 의사정적시험인 비틀전단시험에서 변형특성과 동적시험인 공진주 시험에서 얻은 값은 비교시 하중반복회수의 영향을 고려하면 동일하다. 그러므로 공진주/비틀전단시험을 통해 얻은 변형특성은 지반-구조물시스템의 동적해석은 물론 정적해석에서도 적용할 수 있다.

## 1. 서 론

과거에는 지반 동역학에 관한 연구가 지진문제에 국한되었지만 인간의 산업활동이 고도화됨에 따라 도심지에서 차량하중에 의해 유발되는 교통진동, 도심재개발로 인한 건설진동등에 의한 민원이 다발하고 있으며, 원자력 발전소, 첨단산업시설 등 진동에민 구조물의 안전한 설계에 대한 필요성이 증가하고 있다. 동적하중을 받는 토목구조물의 설계를 위해 지반-구조물 상호작용에 관한 연구가 필요하며 이를 위해 전단탄성계수 및 감쇠비로 표현되는 지반의 변형특성의 결정은 매우 중요하다. 최근들어 정적시험에서 계측의 정확도 증가로 인하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 통념적 차이가 줄어들고, 하중이, 정적 혹은 동적, 어떤 방식으로 유발되는 변형률의 크기가 지반의 거동을 예측하는 중요한 변수임이 인식되고 있다<sup>(6, 7, 11, 13, 16)</sup>. 그러므로 저변형률 ( $10^{-3}\% < \gamma < 10^{-2}\%$ ) 및 중간 변형률( $10^{-2}\% < \gamma < 10^{-1}\%$ ) 하에서의 신뢰성 있는 지반변형특성의 측정은 토목구조물의 동적해석 뿐아니라 정적해석에서도 중요한 역할을 한다.

저변형률하에서 지반의 선형거동을 측정하기 위하여 현장시험법(cross-hole 방법, down-hole 방법, 표면파기법 등)이 자주 사용되나 비선형 거동 및 감쇠비 측정이 불가능하여 변형률 변화에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 측정을 위해서는 실내시험이 필요하다. 대표적인 실내시험으로는 공진주시험 및 비틀전단시험이 널리 사용된다. 이들 실험에서는 전기적 코

일-자석 상호작용으로 비틀력을 가함으로 저 변형률 및 중간 변형률 하에서의 지반의 변형특성을 효과적으로 연구할 수 있다<sup>(5, 9, 11, 12, 14)</sup>.

지반-구조물 시스템에 작용하는 반복하중에 의해 발생하는 지반의 변형은 종종 선형영역을 초과하게 되고 이때 하중반복회수는 지반의 변형특성에 영향을 미치는 중요한 변수가 된다. 과거에 많은 연구가들이 이에 대한 연구를 수행하였으나<sup>(3, 9, 10, 16)</sup>, 대부분의 반복시험(cyclic test)은 상대적으로 큰 변형률( $\gamma > 10^{-2}\%$ )하에서 수행되었고, 동적시험(dynamic test)은 비교적 저 변형률하에서 수행되었으나 하중회수의 변화에 따른 응력-변형곡선을 측정할 수 없었다. 그러므로 정밀한 응력-변형곡선 측정의 어려움이 지반의 선형거동 및 소성영역으로의 천이과정 연구에 많은 문제점을 야기시켰다.

지반-구조물 시스템에 작용되는 동적하중들은 각기 다른 주파수 범위를 갖고 있다. 해양 구조물에 작용하는 파랑하중같은 저주파수 영역에서 기계기초에서 발생하는 고주파수 하중영역까지 존재한다. 또한 지반의 변형특성을 구하기 위해 사용되는 실내 및 현장시험법들도 각기 다른 주파수 특성을 갖고 있다. 예를 들면 공진주시험은 20Hz에서 150Hz 범위에서 구한 공시체의 공진주파수로 변형특성을 구하며, 비틀전단시험은 10Hz 미만의 저주파수영역에서 응력-변형관계를 얻고 cross-hole방법, 표면파기법등 현장시험에서는 고주파수영역의 신호를 이용하여 지반의 변형특성을 구한다. 만약 지반의 변형특성이 진동주파수의 영향을 받는다면 각종 시험방법에서 구한 값들은 각기

다를 것이므로 지반-구조물 시스템의 설계시 이에 대한 영향을 고려하여 실제 시스템의 동적 주파수의 값으로 환산하여 이용하여야 한다.

본 연구에서는 Stokoe식의 공진주/비틀전단(RC/TS)시험기를 이용하여 저변형률 및 중간 변형률 하에서의 지반의 변형 특성을 연구하였다. 진동 계측시스템을 개량하여 저 변형률 하에서 정밀한 응력-변형 관계를 얻었으며 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단 시험을 동일한 공시체로 수행하여 넓은 전단 변형률 영역(10%~10%)에서 비교하였다. 선형거동 및 소성거동을 유발하는 한계변형률(threshold strain)의 변화 및 하중반복회수와 진동주파수가 변형특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 본 연구는 두개의 동반 논문으로 구성되어 있으며 건조사질토의 변형특성에 관한 연구와 점성토의 변형특성에 관한 연구로 나누어 게재 하였다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 실험기구 및 측정방법

#### 2.1.1 공진주 시험

본 실험에서는 Stokoe식의 고정단-자유단 방식 공진주 실험기를 사용하였다. 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 진동시스템(drive system)을 공시체의 상부와 연결시켜 진동시 진동판에 부착된 가속감지기(accelerometer)로 가속도를 측정한다. 그림 1은 Stokoe식 공진주 실험기의 개요도이다.

공진주 시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀가진(torsional excitation)을 가하여 1차모드의 공진주파수와 진동의 크기를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기를 이용하여 전단파 속도, 전단탄성계수 및 전단변형률을 구한다. 자세한 측정방법은 참고문헌(1, 2)에 나타나 있다.

공진주 시험에서 감쇠비는 자유진동 감쇠방법(free-vibration decay method), 또는 해프

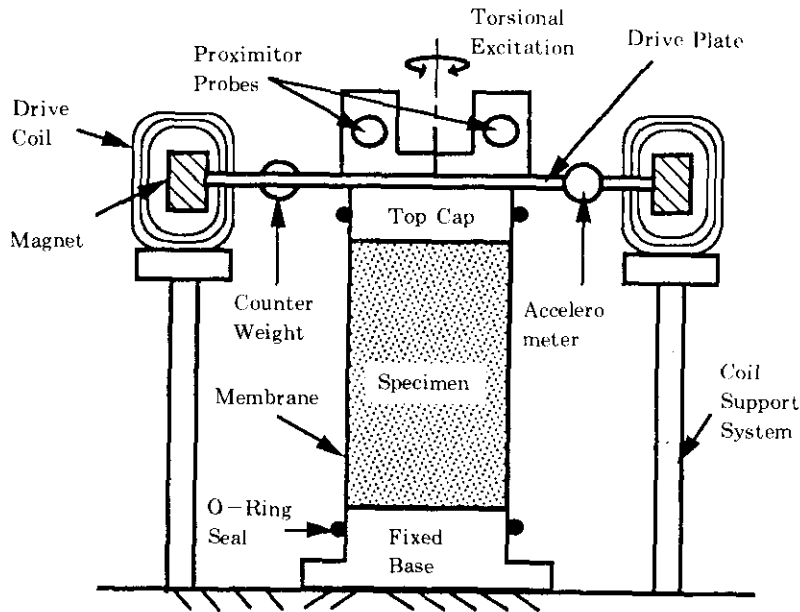


그림 1 Stokoe식 공진주/비틀전단시험기 개요도

파워 밴드 간격방법(half-power band width method)을 이용하여 구한다. 첫째 방법은 공시체가 공진 주파수로 정현진동할 때 가진력을 차단하여 자유진동 감쇠곡선을 구하고 각 사이클의 진폭을 측정하여 대수적감소(logarithmic decrement)를 구한 후 감쇠비를 얻는다. 두번째 방법에서는 공진주파수 주위의 주파수 반응곡선(frequency response curve)의 간격을 이용하여 감쇠비를 얻는다. 자세한 측정방법은 참고문헌(1, 11, 13)에 나타나 있다.

저변형률하에서 자유진동 감쇠방법으로 감쇠비 측정시 주위잡음(background noise)이 측정결과에 상당한 영향을 미치나, 주파수 반응곡선에는 그다지 큰 영향을 주지 않는다. 반면에 고변형률하에서는 주파수 반응곡선이 대칭성을 상실하여 해프 파워 밴드 간격방법에서 상당한 오차를 유발한다. 그러므로 저변형률하에서는 두방법을 같이 사용하였고, 고변형률하에서는 자유진동 감쇠방법을 이용하여 감쇠비를 구하였다.

## 2.1.2 비틀 전단시험

비틀 전단시험에서는 공진주 시험기와 동일한 시험기를 사용하여 작동방법을 달리하며 지반의 변형특성을 구한다. 그림 1과 같이 공시체를 바닥에 고정시키고 공시체 상부와 연결된 진동시스템에 10Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여 공진주파수를 구하는 대신 공시체에 가해진 비틀력-비틀각(torque-twist)관계를 측정하여 응력-변형 이력곡선(hysteresis loop)을 구한다. 간격측정기(proximator)를 이용하여 비틀각을 구하고, 가진전압으로 비틀력을 얻도록 시험기를 검증(calibration)하였다. 그림 2와 같이 이력곡선의 두 끝점을 연결한 직선의 기울기로 전단탄성 계수를 구하고 이력곡선의 면적을 이용하여 감쇠비를 구한다.

## 2.1.3 공진주/비틀전단 시험기의 장점

Stokoe 식의 공진주/비틀전단 시험기는 몇

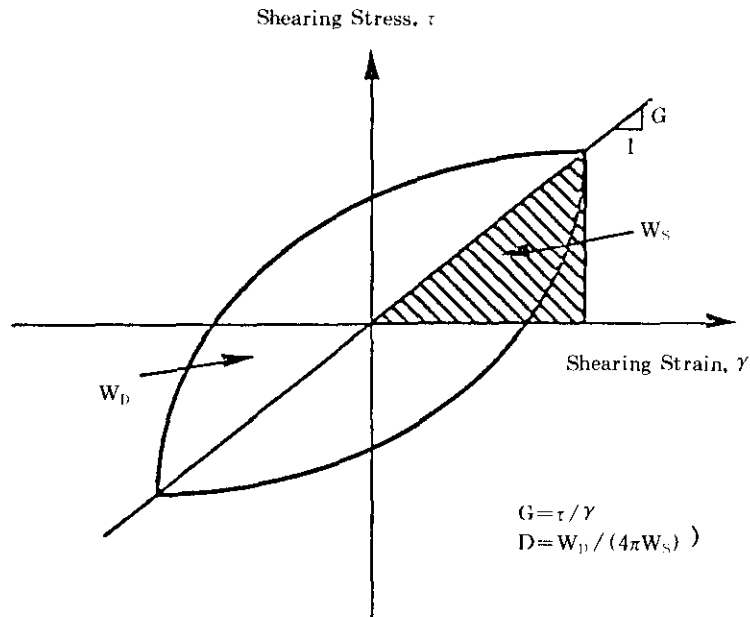


그림 2 비틀전단시험에서 전단탄성계수와 감쇠비 측정

가지의 장점이 있다. 우선 공진주시험과 비틀전단시험을 동일한 공시체를 이용하여 수행하므로 두 시험결과를 효과적으로 비교할 수 있다. 두번째로 저변형률하에서 비틀전단시험을 수행할 수 있다. 유압식이나 기계식으로 작동하는 대부분의 반복시험기(cyclic testing equipment)와는 달리 코일-자석 상호작용으로 비틀력을 시료에 가함으로 순응도(compliance)문제 없이 비틀전단시험을 공진주시험과 같은 저변형률하에서 수행할 수 있다. 세째로 비틀전단시험에서 진동주파수를 10 Hz부터 10Hz사이의 영역에서 자유로이 바꿀수 있어, 주파수 변화에 따른 지반의 변형특성을 효과적으로 연구할 수 있다. 네째로 컴퓨터와 계측기의 상호호환(interfacing)을 이루어 실험의 수행에서부터 자료분석, 최종결과까지 실험의 자동화를 이루었다.

## 2.2 시험시료

본 실험에서 사용된 시료는 통일분류법에 의하면 세립성분이 거의 없는 입도분포가 불량한 건조모래(SP)이다. 시료의 비중은 2.7이고 최대 및 최소 건조단위중량은 각각 16.75 KN/m<sup>3</sup>과 14.23 KN/m<sup>3</sup>이었고, 이 경우 최대 및 최소 간극비는 각각 0.84와 0.56이었다. 공시체는 고정낙하장치를 이용하여 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하였고 간극비는 0.7이었다.

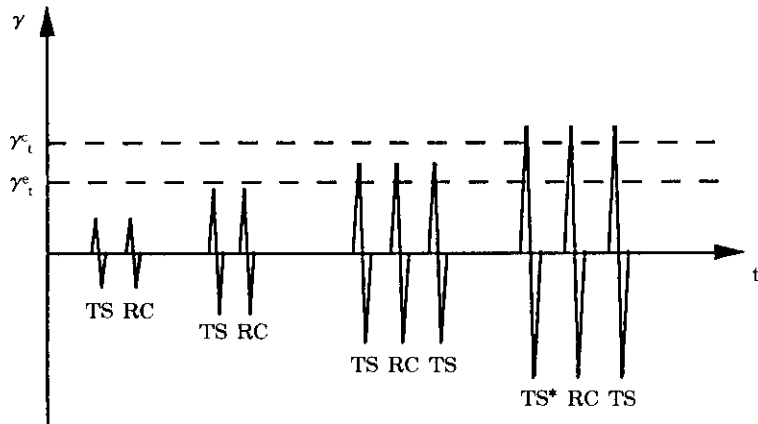
## 2.3 시험절차

동일한 공시체로 공진주(RC)시험과 비틀전단(TS)시험을 함께 수행하기 위하여 그림 3과 같은 시험절차를 적용하였다. 우선 가능한 최소전단변형률(대략  $2 \times 10^{-3}\%$ )하에서 10회 사이클 TS시험을 진동주파수 0.5Hz에서 수행한다. 선행변형(prestraining)을 유발시키지 않도록 TS시험과 동일한 변형률 혹은 약간 작은 변형률하에서 RC시험을 수행한다. 선형한계변형률(elastic threshold strain)이내에서 변형률의 크기를 증가시키며 두 시험을 계속한다.

TS시험에서 전단변형률이 선형한계변형률을 초과하면 RC시험 후에 10회 사이클 TS시험을 다시 수행하여 많은 재하회수 경험후에(RC시험에서 최소 1000회 이상 경험) 지반의 변형특성의 변화 양상을 연구한다. 전단변형률이 증가하여 전단탄성계수가 하중반복회수에 영향을 받기 시작하는 반복한계변형률(cyclic threshold strain)을 초과하면 TS시험에서 10회 이상(대략 30회 정도)의 반복하중을 가하여 초기재하곡선(virgin loading curve)부터 하중반복회수에 따른 변형특성의 변화를 얻는다. 또한 진동주파수가 변형특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 전단변형률 10<sup>-3</sup>%와 10<sup>-2</sup>%에서 진동주파수를 변화시키며 TS시험을 수행하였다. 사용된 진동주파수는 0.05, 0.1, 0.5, 1.5와 10Hz 등이다. 한 구속압에서 실험이 끝난 후 구속압을 다음 단계로 올려서 같은 순서로 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 구속압을 21, 35, 70, 140 KPa의 순서로 증가시켰다.

## 3. 전단변형률에 따른 이력곡선의 변화

초기 재하곡선부터 10회 하중재하까지 이력곡선의 변화를 각기 다른 전단변형률 하에서 구하여 그림 4에 나타내었다. 과거에는 저변형률하에서 정확한 응력-변형 곡선을 구할 수 없었으나 TS시험의 진동계측시스템을 개량하여 정밀도를 향상시켰다<sup>(12)</sup>. 그림 4(a)는 최대 변형률  $5 \times 10^{-4}\%$ 에서 10회 사이클 이력곡선을 나타내었다. 10개의 이력곡선이 마치 한개의 이력곡선처럼 보이고 변형특성이 하중재하회수에 관계없음을 알 수 있다. 최대변형률  $4 \times 10^{-3}\%$ 에서는 이력곡선의 기울기의 변화는 없지만 첫째 사이클에서 구한 이력곡선의 면적이 다른 이력곡선보다 큼을 알 수 있다(그림 4b). 이는 감쇠비가 전단탄성계수보다 작은 변형률에서부터 하중재하회수에 영향을 받음을 나타낸다. 최대변형률이  $1.4 \times 10^{-2}\%$ 로 증가하면(그림 4c) 재하회수가 증가함에 따라 이력곡선의 기울기는 증가하고 면적은 감소하는 경화



$\gamma_e$  = elastic threshold strain  
 $\gamma_c$  = cyclic threshold strain

TS = torsional shear test: 10 loading cycles are applied during each test.  
 TS\* = torsional shear test: 20-50 loading cycles are applied during each test.  
 RC = resonant column test

그림 3 사질토의 변형특성 측정을 위한 실험절차

(hardening)현상을 보이며 최대변형률이  $3.6 \times 10^{-2}\%$ 인 그림 4d에서는 이 현상이 뚜렷이 나타난다.

소성이론에 의하면 시료에 가해진 하중이 항복면(yield surface)을 넘어서면 경화현상에 의해 항복면이 팽창하고 일단 팽창된 항복면 내에서는 응력-변형관계가 다시 탄성거동을 함을 알 수 있다<sup>(4)</sup>. 그림 5는 RC시험을 수행한 후 최대변형률  $3.6 \times 10^{-2}\%$ 에서 TS시험을 다시 수행하여 얻은 10회 하중재하까지의 이력곡선이다. (RC시험을 수행하는 동안 최소 1000회 정도의 반복하중이 가해진다) 그림 4d와 비교하면 같은 비틀력을 시료에 가하였지만 이력곡선이 경화현상없이 하중재하회수에 무관함을 알 수 있다. 이는 초기의 항복면이 RC시험 동안 반복하중에 의해 팽창하여 이전의 응력이력(stress history)을 잃은 새로운 항복면이 설정되고 팽창된 항복면 내에서는 다시 선형거동을 함을 알 수 있다.

#### 4. 하중반복회수가 변형특성에 미치는 영향

##### 4.1 전단탄성계수에의 영향

그림 6은 하중재하회수별 전단변형률-전단탄성계수의 관계를 나타내었다. 첫번째와 열번째 사이클에서 얻은 TS시험결과, RC시험결과, RC시험 후 첫째 사이클 TS시험결과를 함께 포함시켰다. TS시험에서 얻은 전단탄성계수는 느린 속도의 하중을 가하여 관성력의 영향없이 구하므로 의사정적(pseudo-static) 탄성계수로 간주할 수 있는 반면에 RC시험에서의 전단탄성계수는 주파수 반응곡선에서 구해지는 동적탄성계수이다. 전단변형률  $10^{-3}\%$ 이하에서는 전단탄성계수가 변형률의 크기에 영향을 받지 않는 선형거동을 보이며, 흥미롭게도 RC시험과 TS시험의 결과가 일치한다. 과거에는 동적시험에서 구한 탄성계수가 정적시험에서 구한

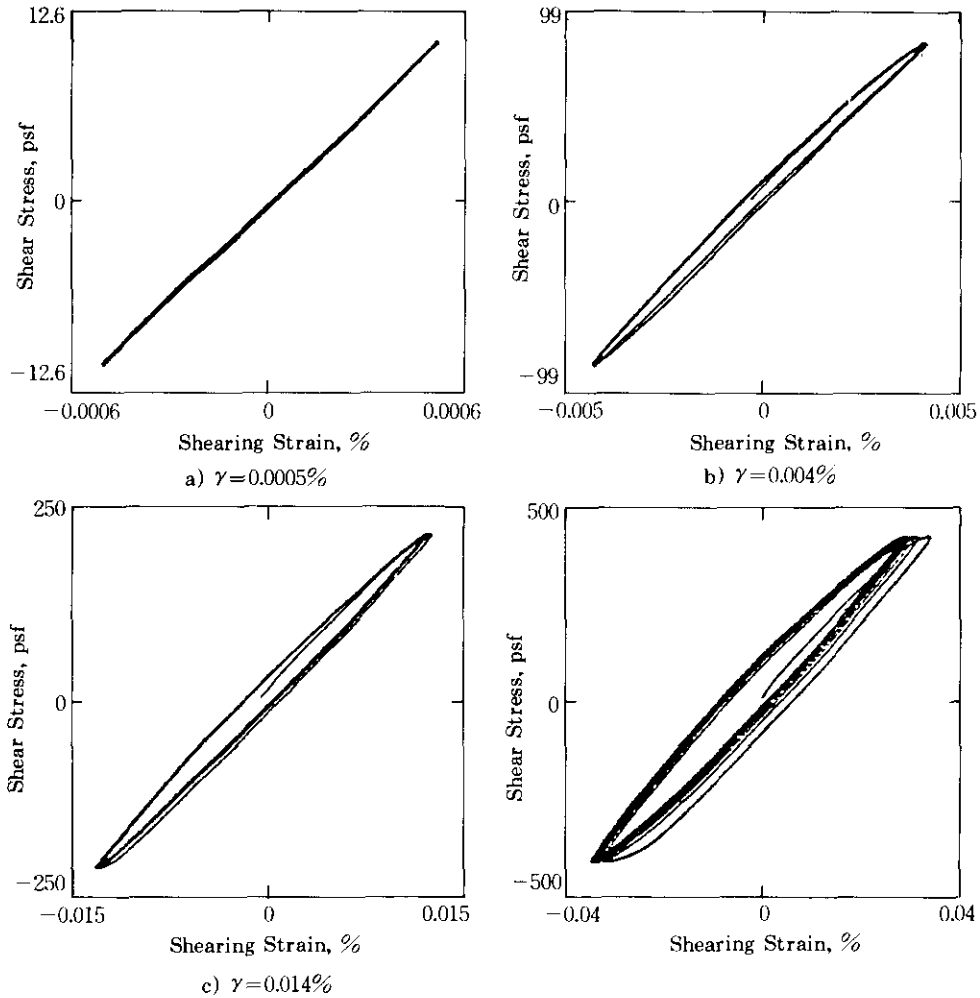


그림 4 변형률에 따른 초기재하곡선부터 10회 하중재하까지 이력곡선의 변화

값보다 훨씬 크다는 그릇된 통념이 존재하였지만 정적 혹은 반복시험에서 계측시스템의 정밀도를 증가시키면 사질토의 경우 주어진 변형률 하에서 동일한 값을 얻을 수 있다.

지금까지는 저변형률하에서 반복시험을 통한 정밀한 이력곡선을 측정하기 힘들어서 RC 시험이 저변형률하의 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )를 구하는 주된 실내시험법으로 이용되어 왔다. 최근 김동수와 Stokoe(1994)는 TS시험의 진동계측 시스템을 향상시켜 전단변형률  $2 \times 10^{-5}\%$ 까지의 저변형률 하에서 전단탄성계수를 구하였으며 반복시험에서 구한 탄성계수도 선

형한계변형률 이하에서 변형률의 크기에 관계 없이 일정한 값을 보임을 나타내었다.

선형한계변형률( $\gamma'_c$ )과 반복한계변형률( $\gamma'_r$ ) 사이의 영역에서는 전단탄성계수가 변형률의 증가에 따라 감소하지만 하중반복회수와 진동주파수에는 영향을 받지 않는 천이구간(transition zone)이 존재한다. 그러나 반복한계변형률 이상에서는 하중반복회수가 증가함에 따라 전단탄성계수가 증가하는 반복경화(cyclic hardening) 현상이 발생하고 첫째와 열번째 사이클 TS시험결과 및 RC시험결과가 각기 다른 값을 보인다. 이 현상은 변형률의 크기가 중

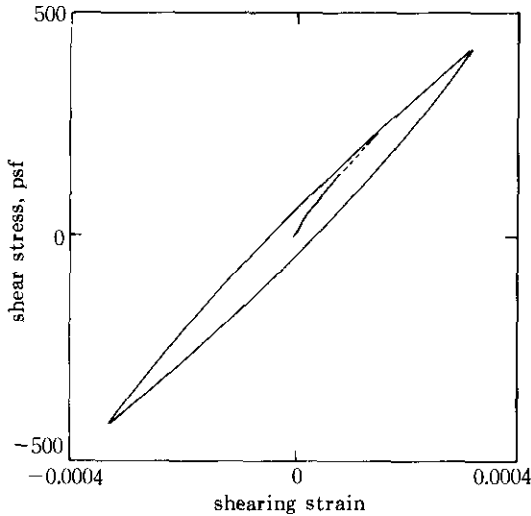


그림 5 변형률 0.036%에서 RC시험후에 구한 10회 하중재하 이력곡선

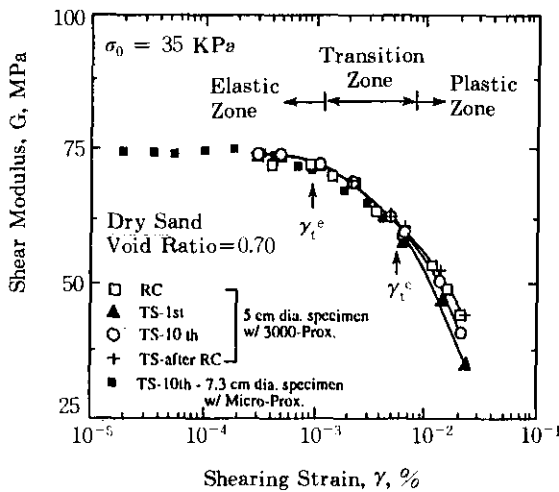
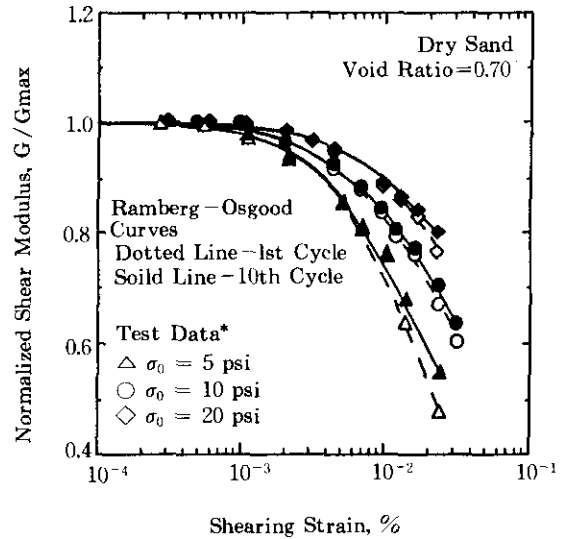


그림 6 하중재하회수에 따른 전단변형률-전단탄성계수의 관계

가함에 따라 심화된다. 그러나 하중반복이 1000회 이상 유발되는 RC시험 후에 수행한 TS시험결과는 RC시험결과와 일치함을 알 수 있다.

구속압의 변화에 따른 반복하중의 영향을 효과적으로 관찰하기 위하여 첫번째와 10번째 사이클 TS시험에서 구한 정규화 전단탄성계수 ( $G/G_{max}$ )와 변형률의 관계를 그림 7에 나타내

었다. 그림 7에서 선형 및 반복 한계변형률이 명확히 구분될 수 있으며 이들 한계변형률은 구속압에 따라 증가함을 알 수 있다. 실험결과를 Ramberg-Osgood 방정식을 이용하여 fitting하였고 Ramberg-Osgood 곡선에서  $G/G_{max}$  값이 0.98인 점을 잡아 선형한계변형률을 결정하였다. RC와 TS시험에서 구한 사질토의 선형한계변형률의 구속압에 대한 변화를 그림 8에 나타내었다. 사질토의 선형한계변형률은 실험의 종류에 관계없이 구속압이 21 KPa에서 140 KPa로 증가함에 따라  $9 \times 10^{-4}\%$ 에서  $2.4 \times 10^{-3}\%$  범위에서 증가함을 알 수 있으며 이는 Ni(1981)의 실험결과와 일치한다.



\* Solid symbol is tenth loading cycle and open symbol is first loading cycle

그림 7 구속압에 따른 건조사질토의 정규화 전단탄성계수-전단변형률의 관계(Ramberg-Osgood 곡선 포함)

반복한계변형률( $\gamma_t^c$ )을 정량적으로 관찰하기 위해 Ramberg-Osgood 곡선에서 첫번째 사이클과 10번째 사이클에서 얻은 전단탄성계수의 차이가 2% 또는 4%되는 전단변형률을 반복한계변형률로 정의하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 구속압의 증가에 따라 반복한계변형률이  $3.5 \times 10^{-3}\%$ 에서  $2 \times 10^{-2}\%$ 로 증가함을 알



수 있다. 낮은 구속압에서는  $10^{-2}\%$  미만의 변형률 하에서도 전단탄성계수가 하중반복회수 영향을 받으나 69 KPa 이상의 높은 구속압에서는  $10^{-2}\%$  이상의 변형률에서 영향을 받을 수 있다. Dobry<sup>(8)</sup>는 Mindlin-Deresiewicz의 미소역학(micromechanics) 이론을 이용하여 입자의 재배열로 체적변화를 유발하는 한계 변형률을 정의하였고 지진시 간극수압증가 및 액상화 포텐셜 연구에 응용하였다. 본 연구에서 구한 반복한계변형률은 Dobry의 한계변형률과 거의 일치한다.

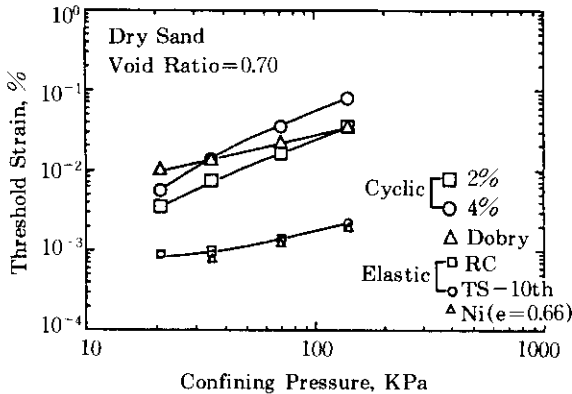


그림 8 구속압에 따른 건조사질토의 선형 및 한계변형률의 변화

#### 4.2 감쇠비에의 영향

그림 9는 하중재하회수별 전단변형률-감쇠비의 관계를 나타내었다. 첫번째와 10번째 사이클에서 얻은 TS시험결과, RC시험결과, RC 시험 후 첫번째 사이클 TS시험결과를 같이 포함하였다. 금속감쇠시료를 이용하여 RC/TS 시험기에서 발생하는 감쇠비를 측정하고<sup>(11)</sup>, 이를 실측감쇠비에서 보정하여 사용하였다.

선형한계변형률 이하에서 감쇠비는 하중반복회수 및 변형률의 크기에 관계없이 일정한 값을 갖으며 진동주파수 및 측정방법이 상이한 RC시험과 TS시험에서 구한 감쇠비가 동일함을 보여준다. 또한 이 영역에서는 비록 작은 양

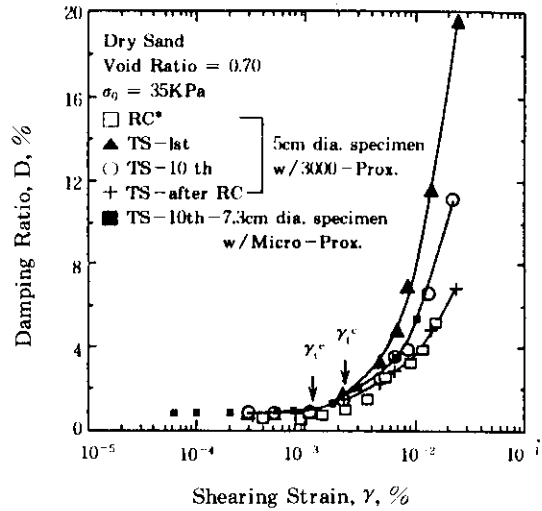


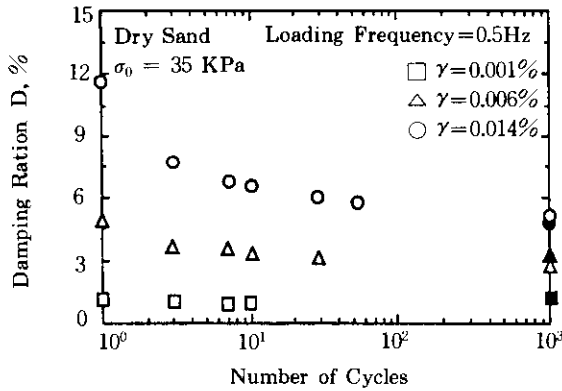
그림 9 하중재하회수에 따른 전단변형률-감쇠비의 관계

의 감쇠비이지만 전단변형률  $6 \times 10^{-5}\%$ 까지의 저 변형률하에서 TS시험을 통해 구한 이력감쇠(hysteretic damping)가 존재한다. 금속시료를 이용하여 0.5Hz에서 TS시험을 수행하면 이력감쇠가 거의 존재하지 않으므로( $10^{-2}\%$  미만), 사질토에서 얻은 감쇠비는 실험기에서 발생한 기기감쇠가 아닌 실제 재료의 성질임을 알 수 있다.

감쇠비의 경우 선형한계변형률( $\gamma_i^e$ )과 반복한계변형률( $\gamma_i^c$ )사이의 전이구간이 전단탄성계수의 경우보다 좁으며 작은 변형률에서부터 하중반복회수에 영향을 받는다. 반복한계변형률 이상에서는 첫번째 사이클에서 얻은 감쇠비가 10번째 사이클의 값보다 크며 RC시험에서 얻은 감쇠비는 10번째 사이클 값보다 작고, 변형률의 크기가 증가할수록 차이가 증가한다. 그러나 RC시험 후에 수행한 TS시험결과는 RC시험에서의 값과 동일하다.

하중반복회수에 따른 영향을 효과적으로 관찰하기 위하여 각기 다른 변형률하에서 반복회수에 따른 감쇠비의 변화를 그림 10에 나타내었다. RC시험에서의 반복회수는 1000번으로 가정하였다. 전단변형률  $10^{-3}\%$ 의 저변형률에서는 TS시험에서 구한 감쇠비는 반복회수에 영

향을 받지않고 일정한 값을 가지나 전단 변형률  $6 \times 10^{-3}\%$ 에서는 감쇠비가 하중반복회수에 따라 감소하고 이 현상은 전단변형률  $1.4 \times 10^{-2}\%$ 에서 더 명확히 나타난다. 그러나 많은 하중반복회수 후에는 RC시험에서 자유진동감쇠법으로 구한 감쇠비와 TS시험에서 이력곡선의 면적으로 구한 값이 동일함을 알 수 있다.



\*Number of cycles in RC test is assumed to be 1000. Solid symbols are damping from RC tests.

그림 10 각기 다른 변형률하에서 하중반복회수에 따른 감쇠비의 변화

## 5. 진동 주파수가 변형특성에 미치는 영향

### 5.1 전단탄성계수에서의 영향

변형률 크기에 따른 RC시험과 TS시험에서 구한 전단탄성계수의 변화를 그림 6에 나타냈었다. 비록 두 시험에서 사용한 진동주파수에 큰 차이가 있지만 동일한 하중반복회수에서는 전체 변형률 영역에서 두 시험 결과가 일치함을 명백하게 알 수 있다. 몇몇 연구자들이 RC 시험을 통해 사질토의 변형특성을 연구하고 그 결과를 TS시험에서의 결과와 비교하였으며 두 시험 결과가 일치함을 보여주었다.<sup>(3, 5, 10)</sup> 그러나 그들의 TS시험은 변형률의 범위가  $10^{-2}\%$  이상의 고 변형률하에서 수행되었으며 RC시험을 동시에 수행할 수 있는 혼합시스템(hybrid

system)이 아니었고 TS시험에서 진동주파수의 변화를 고려하지 않았다.

본 연구에서는 진동 주파수의 영향을 상세히 연구하기 위하여 TS시험에서 진동 주파수를  $5 \times 10^{-2}$ Hz에서 10Hz사이로 변화시키며 시험하였다. 그림 11은 각기 다른 변형률하에서 진동 주파수에 따른 전단탄성계수의 변화를 나타낸다. 변형률의 크기가 증가함에 따라 전단탄성계수가 감소하지만 주어진 변형률 하에서는 진동주파수에 영향없이 일정함을 알 수 있다. 그러므로 사질토의 전단탄성계수는 진동 주파수에 영향을 받지 않으며 동적시험인 RC시험 결과와 의사정적시험인 TS시험결과를 하중반복회수의 영향을 고려하여 비교하면 동일한 결과를 가짐을 알 수 있다.

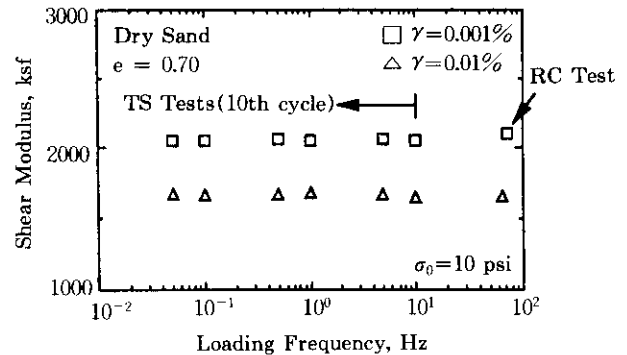
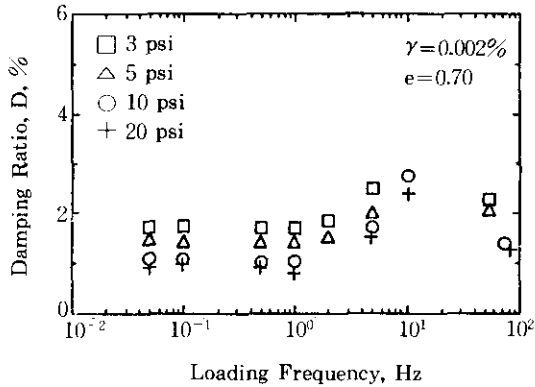


그림 11 각기 다른 변형률하에서 진동주파수에 따른 전단탄성계수의 변화

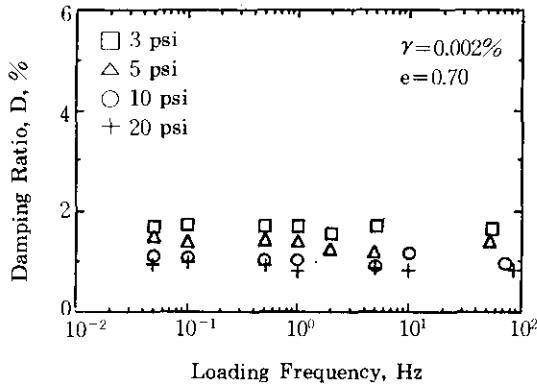
### 5.2 감쇠비에의 영향

그림 12는 진동 주파수에 따른 사질토의 감쇠비의 변화를 보여준다. 그림 12a에 의하면 1Hz미만의 주파수에서 측정된 감쇠비는 진동 주파수의 영향을 받지 않으나 그 이상의 주파수에서는 감쇠비가 주파수에 따라서 증가한다. 그러나 금속검중시편을 이용하여 각각의 주파수에서 구한 기기감쇠비를 측정된 감쇠비에서 보정해주면 그림 12b와 같이 사질토의 감쇠비는 진동주파수에 관계없이 일정한 값을 갖는

다. 그러므로 사질토의 감쇠비는 진동주파수에 영향을 받지 않으며 RC시험과 TS시험결과는 일정한 하중반복회수에서는 동일한 값을 갖는다.



a) Variation of Uncorrected Damping Ratio



b) Variation of Corrected Damping Ratio

그림 12 진동주파수에 따른 비보정감쇠비와 보정감쇠비의 변화

## 6. 결 론

본 연구에서는 Stokoe식의 공진주/비틀전단 시험기를 이용하여 저 변형률 및 중간 변형률하에서 사질토의 변형특성(전단탄성계수 및 감쇠비)을 실험적으로 고찰하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 비틀전단시험으로 저 변형률하에서 정밀

한 응력-변형 이력곡선을 구하여 변형특성이 전단변형률과 하중반복 회수에 영향을 받지 않는 선형영역을 찾았으며 전단탄성계수에 대한 선형한계 변형률은 구속압이 21KPa에서 140KPa로 증가함에 따라  $9 \times 10^{-4}\%$ 에서  $2.4 \times 10^{-3}\%$ 로 증가하였다.

- 2) 비록 적은 양이지만 전단변형률  $6 \times 10^{-3}\%$ 까지의 저 변형률하에서 비틀전단 시험을 통해 구한 사질토의 이력감쇠가 1% 내외에서 존재한다.
- 3) 전단탄성계수가 하중 반복회수에 영향을 받기 시작하는 반복한계변형률은 구속압이 21KPa에서 140KPa로 증가함에 따라  $3.5 \times 10^{-3}\%$ 에서  $2 \times 10^{-2}\%$ 로 증가하였으며 사질토에서 반복한계변형률은 선형한계변형률보다 4~10배 큼을 알 수 있다. 또한 선형 및 반복 한계변형률 사이에는 변형특성이 하중반복회수에 영향을 받지 않으나, 전단변형률의 증가에 따라 전단탄성계수가 감소하고 감쇠비가 증가하는 전이영역이 존재한다.
- 4) 반복한계변형률 이상에서는 하중반복회수에 따라 전단탄성계수는 증가하고 감쇠비는 감소한다. 공진주시험 동안 무수한 반복하중의 작용으로 경화현상이 완료되면 사질토의 변형특성은 하중반복회수에 영향을 받지 않으며 공진주시험과 비틀전단 시험에서 구한 전단탄성계수와 감쇠비는 동일하다.
- 5) 사질토의 변형특성은 진동 주파수에 영향을 받지 않으며, 하중반복회수를 고려하여 비교하면 진동주파수 및 측정방법이 상이한 동적 공진주시험결과와 의사정적 비틀전단시험결과가 일치한다.

## 참 고 문 헌

1. 김동수, 정충기, 홍성영(1994), "공진주시험기를 이용한 국내노상토의 동적물성치", 한국지반공

- 학회지, 제10권, 제2호, pp.85-95.
2. 송정락, 김수일(1987), "모래밀도가 동적특성에 미치는 영향", 대한토질공학학회지, 제3권, 제2호, pp.7-16.
  3. Alarcon, A., Chameau, J.L., and Leonards, G. A.(1986). "New Apparatus for Investigating the Stress-Strain Characteristics of Sands." *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 9, No. 4, pp.204-212.
  4. Atkinson, J.H. and Bransby, P.L.(1978). "The mechanics of Soils: An Introduction to Critical State Soil Mechanics." McGRAW-HILL Book Co., pp 375.
  5. Bolton, M.D. and Wilson, J.M.R.(1989) "An Experimental and Theoretical Comparison Between Static and Dynamic Torsional Shear Tests." *Geotechnique* 39, No. 4, pp 585-599.
  6. Briaud J.-L. and Gibbens R.M.(1994) "Predicted and Measured Behavior of Five Spread Footings on Sand", *Geotechnical Special Publication No. 41*, ASCE, pp. 253.
  7. Burland, J.B.(1989), "Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture: "Small is Beautiful"-the Stiffness of Soils at Small Strains," *Canadian Geotech. Journal*, 26, pp.499-516.
  8. Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R. M., and Powell D.(1982), "Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Methods." *National Bureau of Standards*, pp.150.
  9. Drnevich, V.P. and Richart, F.E., Jr.(1970). "Dynamic Prestraining of Dry Sand." *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM2, pp.453-469.
  10. Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. (1978), "Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading." *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, March, pp.39-56.
  11. Kim D.-S.(1991). "Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains From Cyclic Tests." Ph.D Dissertation, University of Texas, August.
  12. Kim, D.S. and Stokoe, K.H.,II(1994) "Torsional Motion Monitoring System for Small-Strain(10<sup>-5</sup> to 10<sup>-3</sup>%) Soil Testing," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 17, No. 1, March, pp.17-26.
  13. Kim, D.S., Stokoe, K.H.,II, and Roesset, J.M. (1991). Haracterization of Material Damping of Soils Using Resonant Column and Torsional Shear Tests." *Preceedings, 5th International Conf. on SDEE, Univ. of Karlsruhe, Germany, Sep.*
  14. Ni S.-H.(1987), "Dynamic Properties of Sand Under True Triaxial Stress States from Resonant Column/torsional Shear Tests."Ph. D.Dissertation, The University of Texas at Austin, 421 pp.
  15. 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.*
  16. Woods R.D.(1991). "Field and Laboratory Determination of Soil Properties at Low and High Strains." *Proceedings: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, March*, pp 1727-1741.

(접수일자 1994. 12. 30)