

## 화강풍화토의 변형특성

### Deformational Characteristics of Granite Weathered Residual Soils

김동수<sup>1)</sup>, Dong-Soo Kim, 권기철<sup>2)</sup>, Gi-Chul Kweon, 박재영<sup>3)</sup>, Jae-Young Park, 정순용<sup>2)</sup> Soon-Yong Jeong

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, KAIST

<sup>2)</sup> 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Ph.D Student, Dept. of Civil Engineering, KAIST

<sup>3)</sup> 삼성물산 건설부문 연구주임

**SYNOPSIS** : In Korea, granite is abundant and occupies around one-third of the country, and granite weathered residual soils are widely distributed. Undisturbed sampling of this soil has been extremely difficult because of its particle structure, and this difficulty have kept the researchers from investigating the deformational characteristics of granite weathered residual soil. In this paper, laboratory testing such as resonant column/torsional shear test and, triaxial testing using LDT, and field testing such as crosshole and pressuremeter tests are performed for determining the effects of strain amplitude, loading frequency, confining pressure and sample disturbance on the deformational characteristics of granite weathered residual soils. It is shown that when the effects of these factors are properly taken into account, the stiffness values evaluated by various field and labrotary tests are comparable to each other fairly well. The stiffness of statically compacted specimens using disturbed sample was lower than that of undisturbed one obtained by special sampling device at Kumgodong site. However the normalized modulus recuction curves ( $G/G_{max}$ ) of three granite weathered residual soils are comparable to each other and matched well with Seed-Idriss (1970) curve for NP soils.

**Key words** : granite weathered residual soils, deformational characteristics, resonant column, torsional shear, local deformation transducer, crosshole, pressuremeter

## 1 서 론

화강풍화토는 국내지반의 1/3 이상을 구성하는 잔적토로서, 건설현장에서 매우 빈번하게 접하게 된다. 화강풍화토는 일반적으로 자갈질 또는 모래질 흙으로 분류되나 거동특성은 이들과는 상이한 점이 많고, 모암성질, 입자파쇄, 풍화정도, 함수비등에 따라 매우 상이한 거동 특성을 보인다. 또한 민감한 입자구조로 인하여 불교란시료 채취가 매우 어려워 현장지반의 변형특성 규명이 어려운 실정이다(정순용, 1997 ; Lee and Coop, 1995).

최근 저변형을 하에서 정밀한 응력-변형을 관계 측정의 중요성이 날로 증가되고 있으며, 동적변형계수와 정적변형계수 사이의 차이점이 줄어들고, 변형이 정적·동적, 어떤 하중에 의해 유발되든 변형을 크기가 지반의 거동을 예측하는 중요한 요소로 인식되고 있다(Burland, 1989). 지반의 변형특성을 측정하기 위하여 현장에서는 탄성파시험과 공내재하시험이 자주 사용되고 있으며, 실험실에서는 삼축압축시험, 공진주시험, 비틀전단시험 등이 최근 자주 사용된다. 그러나 각 측정방법마다 신뢰성 있는 변형을 측정법

위, 작용되는 응력의 크기, 하중속도 등이 다르고, 지반의 변형특성은 이들의 영향을 받는다. 따라서 넓은 변형율 영역 ( $10^{-4}\%$ ~ $1\%$ )에서 변형특성을 신뢰성 있게 구하기 위하여는 변형율 크기 및 하중속도가 변형특성에 미치는 영향을 연구하여 이들을 효율적으로 고려하여 비교하여야 한다(김동수, 1995).

본 연구에서는 현장 및 실내시험을 통하여 화강풍화토의 변형특성에 관하여 연구하였다. 우선 크로스홀 시험을 수행하여 현장의 전단파 속도를 결정하고, 같은 시추공에서 공내재하시험을 수행하여 하중역재하/재재하(Unloading/Reloading) 곡선을 이용한 변형율 크기에 따른 전단탄성계수의 변화를 구하였다. 실내에서는 공진주/비틀전단시험을 수행하여 변형율 크기 및 하중주파수에 따른 화강풍화토의 변형특성을 연구하였고, 국부변형측정기(LDT)를 제작하여 삼축압축시험을 수행하였다. 비교란 시료채취기를 개발하여 실내시험을 위한 비교란 시료를 현장에서 채취하였고, 교란시료는 정적시료 다짐기를 이용하여 성형하여, 시료의 교란이 화강풍화토 변형특성에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2 시험장치

### 2.1 공진주/비틀전단시험

본 연구에서는 Stokoe식 공진주/비틀전단시험기를 사용하였다. 공진주시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 1차 모드의 공진주파수( $f_r$ )와 진동의 크기( $A_r$ )를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파 속도( $V_s$ ), 전단탄성계수( $G$ ) 및 전단변형율( $\gamma$ )을 구한다(김동수, 1995).

비틀전단시험에서는 공진주 시험기와 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(김동수, 1995).

### 2.2 LDT를 사용한 삼축압축시험

외부변형측정장치를 이용한 일반적인 삼축압축시험에서는 시료의 양쪽 단부에서 발생하는 단부효과(bedding error) 때문에 미소변형율 영역의 탄성계수 측정이 어려워, LDT(Local Deformation Transducer)를 이용한 삼축셀 내부에서의 신뢰성있는 미소변형 측정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Tatsuoka et al. 1991). LDT는 얇은 인칭동판(본 연구에서는 길이:120mm, 폭:4mm, 두께:0.3mm 사용)의 중앙에 4개의 strain gauge(Kyowa사 KFG-2N-C1-16L3M2R 사용)를 full-bridge 형태로 부착하여 제작하였다. 시료의 수직변위는 LDT를 시료의 양쪽에 양단힌지(hinge) 조건으로 설치하여 LDT의 인칭동판에 발생하는 변형율(출력신호)로부터 측정한다. 본 연구에서는 UCAM-70A(data logger)을 사용하여 LDT의 출력신호를 획득하였고, 삼축셀 외부에 설치된 load cell을 사용하여 하중을 측정하였다.

### 2.3 공내재하시험 (PMT)

공내재하시험이란 시추공에 probe를 넣어 벽면에 균일한 압력을 가하여 이때의 압력과 부피변화를 측정하여 지반물성치를 결정하는 방법이다. 본 연구에서 사용한 공내재하시험기는 ROCTEST사 TEXAM PMT로, 부피변형을 측정하는 선굴착 공내재하시험(PBP) 형태이며 하중과 변형 조절이 모두 가능하고, 최대하중은 10,000KPa이다.

최근에는 공내재하시험으로부터 지반의 변형율 크기에 따른 전단탄성계수를 구하기 위한 연구가 활발히

이루어지고 있다(Belloti 등, 1989 ; Robertson, 1986). 본 연구에서는 공내재하시험기의 probe 설치에 의한 지반교란의 영향을 최소화 시키며 현장지반의 응력-변형을 관계를 추정할 수는 역재하-재재하 곡선을 사용하여 변형을 크기에 따른 전단탄성계수를 측정정하였다.

## 2.4 크로스홀시험

크로스홀시험은 지반에 두 개 이상의 hole을 뚫어 한쪽은 발진자(source)로, 나머지 hole은 감지원(receiver)으로 구성하여, 발진자에서 유발되는 진동이 지반을 통과하여 감지장치까지 도달되는 파의 전파속도를 깊이별로 측정하여, 깊이별 지반의 전단파속도를 측정하는 기법이다. 본 연구에서는 발진자로 사용되는 hole의 관내도를 실험 깊이까지 제거하고, 관내도의 표면을 붓을 사용하여 타격하는 방법으로 탄성파를 발생시켰다. 두 개의 감지원측 hole에 발진자와 같은 깊이로 고정된 진동감지장치(3방향 진동 감지기)를 설치하여 발진자에서 발생한 탄성파를 측정하였다. 발진자와 감지원에서의 신호를 동시에 signal analyzer로 측정하면 hole과 hole 사이의 전단파 도달시간을 측정할 수 있다.

## 3 시험시료 및 시험절차

### 3.1 시험시료의 기본물성

본 연구에서는 3종의 화강풍화토 시료를 사용하였다. 연세대학교 공과대학 증축현장(연세대시료)에서는 2m 깊이에서, 한국일보사옥 신축현장(한국시료)에서는 15m 깊이에서 교란시료를 채취하였다. 대전시 금고동 쓰레기매립장(금고동시료)은 1m 깊이에서의 교란시료와 과기원에서 개발한 불교란시료 채취장치로 불교란 시료를 채취하였다.

교란된 화강풍화토시료에 대하여 기본토성시험으로, 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 and Coop, 1995). 기본물성 시험결과는 표 1에 나타내었다.

표 1 화강풍화토 기본 물성시험 결과

### 3.2 불교란시료채취 및 교란시료 성형

화강풍화토는 충격이나 인장에 취약하므로 시료를 채취하는 과정에서 특별한 주의가 필요하다. 이러한 특성을 고려하여 그림 1과 같은 불교란시료 채취기를 제작하여 직경71mm 높이 142mm의 불교란시료를 채취하였다(정순용, 1997). 불교란시료 채취는 하나의 시료 채취에 약 2시간 이상의 장시간이 소요되나, 시험실에서 시료추출이 매우 용이하게 설계되었고, 시료추출후 바로 시험세팅이 가능하며 채취시료가 매우 훌륭한 불교란 상태를 유지하고 있었다.

구분		연대시료	금고동시료	한국시료
통일분류법분류		GW	SP	GW
현장 상태	현장 함수비(%)	12.34	14.69	-
	현장 간극비	0.571	0.780	-
# 200 통과량	(건조법) <sup>①</sup>	3.93	6.52	4.71
	(수세법)	19.13	19.57	8.32
다짐 시험 <sup>②</sup>	최적함수비(%)	12.0	21.5	10.0
	최대건조밀도 ( $\gamma_{dmax}$ , t/m <sup>3</sup> )	1.95	1.52	1.94
비중(Gs)		2.67	2.67	2.63
Attenberg한계		NP	NP	NP

- ① 자유낙하법(free-fall method)
- ② 습윤법, 반복법

실내시험에 사용하는 화강풍화토 교란시료는 정적다짐으로 시료를 성형하였고, 이때의 함수비와 건조밀도는 현장의 조건과 유사한 상태가 되도록 조절하였다. 정적다짐시험기는 유압잭의 용량이 10ton으로 설계되었으며, 시료크기는 직경 71mm를 적용하였다. 정적다짐방법은 시험에 적용할 시료의 건조밀도를 다짐에너지에 관계없이 부피로 조절하여 성형하는 방법으로, 건조시료에 물을 끌고루 분무기로 첨가하여 함수비를 조절한 후 일정한 시료의 부피에 목표로하는 건조밀도에 상당하는 시료중량을 계량하여 다짐몰드에 넣고, 정해진 부피까지 시료를 압축하는 방법이다. 시료는 5층 다짐으로 성형하였고, 시료의 부피를 유압잭으로 눌러서 압축하여 10분간 유지시킨 후 시료를 추출하였다.

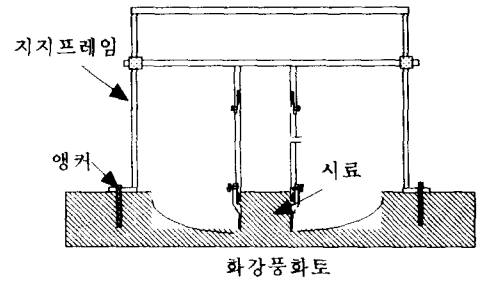


그림 1 불교란시료 채취기

### 3.3 시험절차

불교란 화강풍화토 시료는 시료채취기에서 탈영 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, 12 시간동안 대기압상태에서 유지시키고, 구속응력을 가한 후 다시 1시간을 기다려 구속응력이 시료 내에 균일하게 작용할 때 공진주/비틀전단시험 및 LDT를 사용한 삼축압축시험을 실시하였다.

시료를 공진주/비틀전단시험기에 설치하고 시험준비가 완료되면 구속응력을 등방으로  $0.2\text{kg/cm}^2$ 으로 재하하고 1시간 동안 기다린 후 하중주파수는  $0.5\text{Hz}$ 로 비틀전단시험을 실시한다. 이때, 저주파 필터(low pass filter)의 cut-off 주파수는 하중주파수의 10배 이상으로 하였으며, 간격측정기 신호와 입력하중 신호 모두를 필터를 통과시켜 아날라이저에서 신호획득하였다. 입력하중크기는  $100\text{mV}$ ,  $200\text{mV}$ ,  $400\text{mV}$ ,  $700\text{mV}$ ,  $1\text{V}$ ,  $2\text{V}$ ,  $4\text{V}$ ,  $10\text{V}$ 로 증가시키면서 시험한 후 시료의 손상여부를 확인하기 위하여 마지막으로  $200\text{mV}$ (또는  $400\text{mV}$ ) 입력신호로 비틀전단시험을 실시하였다. 비틀전단시험이 완료되면 고변형을 공진주시험을 실시하였다. 이때의 공진주시험은 입력전압의 크기를 비틀전단시험과 마찬가지로  $100\text{mV}$ 에서  $10\text{V}$ 까지 증가시키면서 실시한다. 이러한 과정으로 한 단계 구속응력 상태에서의 시험이 완료되면, 구속응력을  $0.4\text{kg/cm}^2$ 으로 증가시키고 1시간 동안 시간변화에 따른 저변형을 공진주시험을 실시하고, 구속응력  $0.2\text{kg/cm}^2$ 에서와 같은 순서로 입력전압  $700\text{mV}$ 의 비틀전단시험까지 실시한 후, 비틀전단 시험에서 하중주파수의 영향을 검토하기 위하여, 입력전압을  $1\text{V}$ 로 일정하게 유지한 상태에서 하중주파수를  $0.05\text{Hz}$ ,  $0.1\text{Hz}$ ,  $0.5\text{Hz}$ ,  $1\text{Hz}$ ,  $5\text{Hz}$ ,  $10\text{Hz}$ 로 증가시키면서 시험을 실시하였다. 하중주파수 변화에 대한 시험이 완료되면, 하중주파수를  $0.5\text{Hz}$ 로 일정하게 유지한 상태에서 입력전압을  $2\text{V}$ ,  $4\text{V}$ ,  $10\text{V}$ 로 증가시키며 비틀전단시험을 실시하였다. 비틀전단시험이 끝나면 구속응력  $0.2\text{kg/cm}^2$ 의 경우와 동일한 입력하중 크기 순서로 공진주시험을 실시하였다. 구속응력  $0.4\text{kg/cm}^2$  단계의 시험이 완료되면, 구속응력을  $0.8\text{kg/cm}^2$ 으로 올리고 구속응력  $0.2\text{kg/cm}^2$ 에서와 같은 순서로 시험을 반복하였다.

LDT를 적용한 삼축압축시험은 변형률속도를  $0.01\%/min$ 로, 구속압력은 공진주/비틀전단시험과 동일한  $0.2$ ,  $0.4$ ,  $0.8\text{kg/cm}^2$ 을 적용하였다. 구속압력  $0.2\text{kg/cm}^2$ 에서 변형률 크기  $0.3\%$ 까지 하중을 재하/역재하하고, 다음 단계의 구속압력으로 증가시켜  $0.2\text{kg/cm}^2$ 에서와 동일한 방법으로 시험을 실시하였다.

급고동 현장에대한 현장시험으로는 공내재하시험과 크로스홀 시험을 수행하였다. 현장시험을 위한 시추공 관입은 공내재하시험기의 probe와 크기가 같은 얇은 강관을 이용하여 향타하였으며, 향타시 강관 내부의 흙을 핸드오거를 이용하여 제거하면서 강관을 관입하여 주변 지반의 교란을 최소화하였다. 약  $1.5\text{m}$  깊이로 강관을 관입하여 시추공을 형성한 뒤 크로스홀시험을 수행하였다. 크로스홀시험이 완료되면 관입된 강관을 유압잭을 이용하여 인발한 후 매끈하게 형성된 시추공 내부에 probe를 관입하여 공내재하시험을 수행하였다. 역재하/재재하단계는 전단변형률  $9.5\%$ ,  $18.2\%$  및  $28.3\%$ 가 되는 변형률 크기에서 적용하였고, probe의 중앙부에서 지표면까지의 깊이는  $0.9\text{m}$ 로 측정되었다.

## 4 시험결과

### 4.1 실내시험 결과

실내시험을 통하여 결정된 변형을 크기에 따른 탄성계수 변화에 대한 전형적인 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 나타나듯이 변형을 크기가 매우작은 영역에서는 탄성계수가 변형을 크기에 무관하게 일정한 값을 나타내고 어느 변형을 크기 이후 부터는 변형율이 증가하면서 탄성계수가 감소한다. 이러한 변형을 크기에 무관하게 일정한 탄성계수를 갖는 부분을 선형영역이라 하고, 탄성영역의 한계가 되는 변형율을 선형한계변형율( $\gamma_e^t$ , elastic threshold strain)이라 칭한다.

금고동 시료와 연대시료의 전단탄성계수는 하중주파수에 영향을 받는 것으로, 한국시료는 하중주파수에 영향을 받지않는 것으로 나타났다(표 2). 하중주파수의 영향은 시료가 포함하는 세립분의 양과 관계된 것으로, 표 1에서 보면 연대시료와 금고동시료의 수세법으로 시험한 #200통과량이 각각 19.13%, 19.57%로 8.32%인 한국시료에 비하여 2배이상 함유하고 있다. 그러나 자유낙하법에 의한 시험결과는 연대시료의 #200통과량이 가장 적은 것으로 평가되어, 화강풍화토 교란시료의 #200체 통과량의 전단변형특성에 대한 영향은 수세법에 의한 방법으로 평가되어야 합당한 것으로 나타났다. 구속응력 증가에 따른 화강풍화토 시료의 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )의 변화는 구속압의 증가에 따라  $G_{max}$ 이 증가하고,  $G_{max}=f(e)*(P/P_a)^n$ 의 일반적인 모델에서 n 값은 0.35 - 0.58 범위의 값으로 나타났다(표 2). 하중주파수의 영향으로 시험이 수행되는 주파수가 서로다른 동적시험인 공진주시험, 반복재하시험인 비틀전단시험, 정적시험인 LDT 시험에서 탄성계수를 서로 다르게 평가하고 있으나(그림 2), 하중주파수 차이와 변형율 크기를 고려하여 비교하면 서로 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다(그림 3). 그러므로 정적물성치와 동적물성치는 변형율 크기 및 하중주파수 차이 등을 합리적으로 고려할 경우 차이가 없음을 알 수 있다.

표 2 하중주파수 및 구속압 영향

시료명		하중주파수 영향 (%)	구속압 영향 (n)
금고동 시료	불교란	8.3	0.43
	교란	6.3	0.49
연대시료		2.7	0.35
한국시료		-	0.58

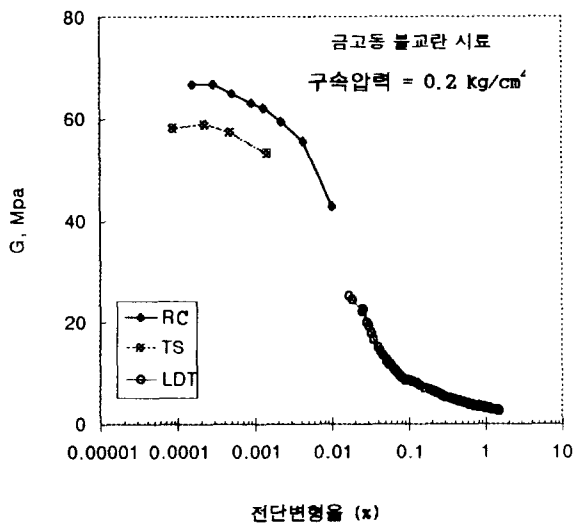


그림 2 전형적인 변형율 크기에 따른 탄성계수

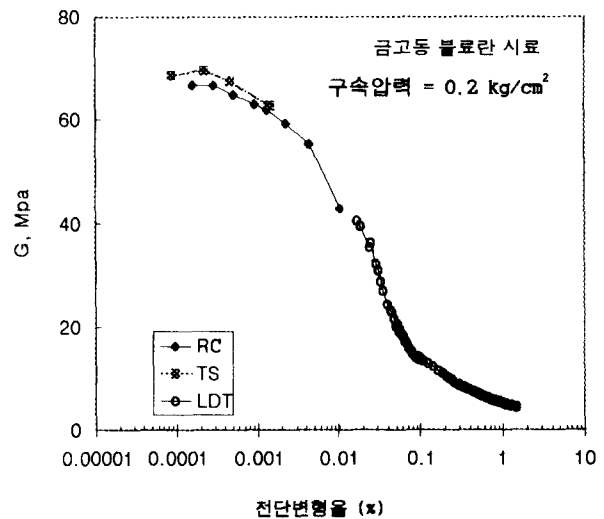


그림 3 하중주파수의 영향을 고려한 각 시험결과의 비교

## 4.2 현장시험 결과

금고동 현장에서 실시된 공내재하시험과 크로스홀시험의 대표적인 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 4에 나타난 공내재하시험 결과로부터 변형률 크기에 따른 탄성계수를 결정하기 위하여, 본 연구에서는 Belloti 등(1989)이 제안 한 방법을 적용하여 probe 설치에 의한 지반교란의 영향을 최소화 할 수 있는 역재하-재재하 곡선을 사용하였고, 역재하 단계의 구속응력과 probe 설치전 현장지반 초기 구속응력과 차이를 보정하여 탄성계수를 결정하였다. 크로스홀 시험에서는 두 개의 감지원측에 같은 깊이로 고정된 3방향 진동감지기에서 측정된 그림 5와 같은 신호로부터 각 hole에 도달하는 전단파의 도달시점을 찾아, 두 hole 사이의 파의 도달시간을 측정하고, 두 hole 사이의 거리를 이용하여 전단파속도를 결정한다. 전단탄성계수는 결정된 전단파속도와 현장지반의 질량밀도로부터 결정하였다.

크로스홀시험은 탄성영역에서 이루어지는 동적시험 방법으로, 시험이 수행되는 변형률 크기를 선형한 계변형률보다 작은 0.00002%로 가정하여 공내재하시험에서 결정된 탄성계수와 변형률 크기에 따라 비교하면 그림 6과 같이 나타난다.

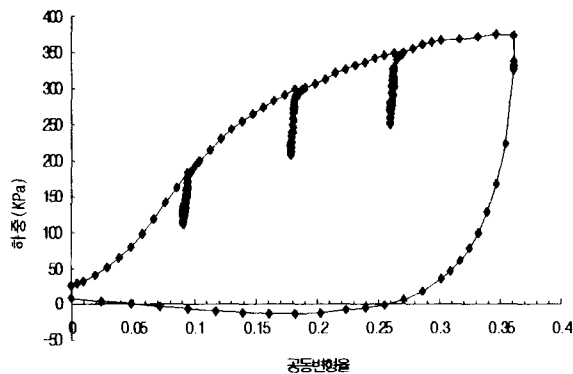


그림 4 대표적인 공내재하시험 결과

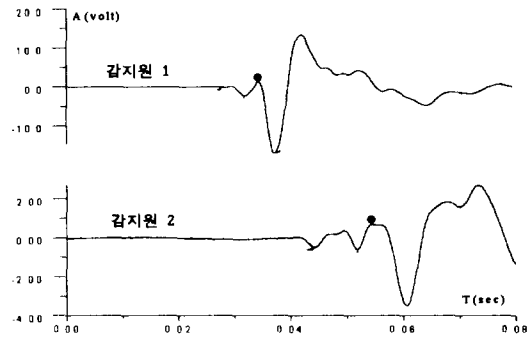


그림 5 대표적인 크로스홀시험 결과

## 4.3 현장 및 실내시험 결과 비교

현장시험과 실내시험에서 결정된 탄성계수를 동일한 구속응력에서 하중주파수의 영향을 고려하여 변형률 크기에 따라서 나타내면 그림 7과 같이 나타난다. 그림 7에서 보듯이 실내시험에서 나타난 불교란시료와 교란시료의 변형률 크기에 따른 탄성계수는 불교란시료의 경우가 더 크게 나타나고, 불교란시료에 대한 실내시험 결과가 현장시험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 실내시험으로부터 화강풍화토 지반의 변형률 크기에 따른 탄성계수를 평가하기 위하여는 불교란시료의 채취가 반드시 필요한 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 적용한 불교란시료채취 장치로 부터 현장지반의 변형특성 평가를 위한 불교란시료의 채취가 가능함을 알 수 있다.

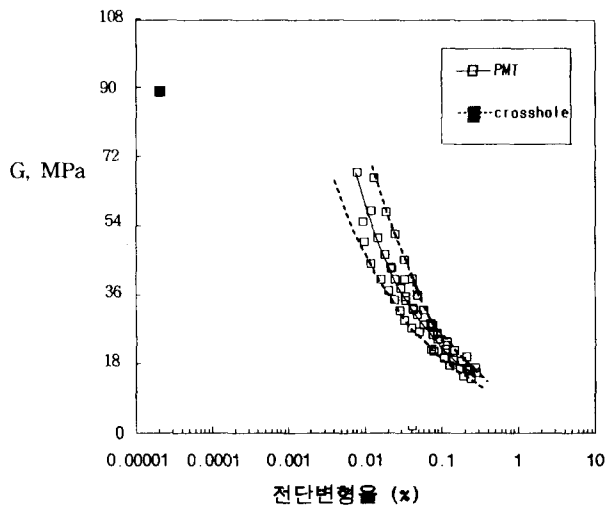


그림 6 변형률 크기에 따른 공내재하시험과 크로스홀시험 결과 비교

일반적으로 정규화된 전단탄성계수는 구속압력과 시료의 교란에 무관하게 서로 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 선형한계변형을 이하에서 결정되는 최대전단탄성계수와 교란시료를 사용한 실내시험에서의 결정된 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수의 감소추이를 결합하여 실제현장지반의 비선형 거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 적용된 3종의 시료 모두 변형률 크기에 따른 정규화된 전단탄성계수는 서로 근사적으로 일치하고 있으며, 비소성(NP) 흙에 대한 Seed-Idriss(1970) 연구 결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다(그림 8). 본 연구의 결과를 바탕으로 임시적으로는 비소성(NP) 흙에 대하여 Seed-Idriss(1970)가 제안한 연구결과를 국내 화강풍화토에 적용할 수 있을 것으로 판단되나, 풍화정도 및 입도분포 등에 따른 보다 많은 시료에 대한 시험을 통하여 국내 비소성(NP) 지반의 대표적인 변형률 크기에 따른 정규화된 전단탄성계수의 변화를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

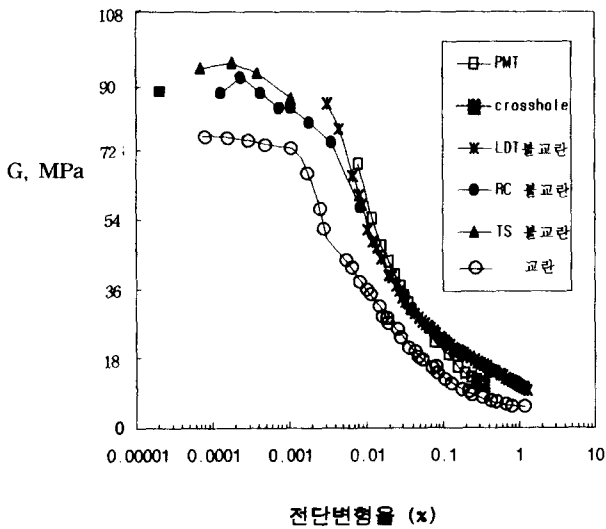


그림 7 현장 및 실내시험에서 평가된 금고동 현장의 변형특성

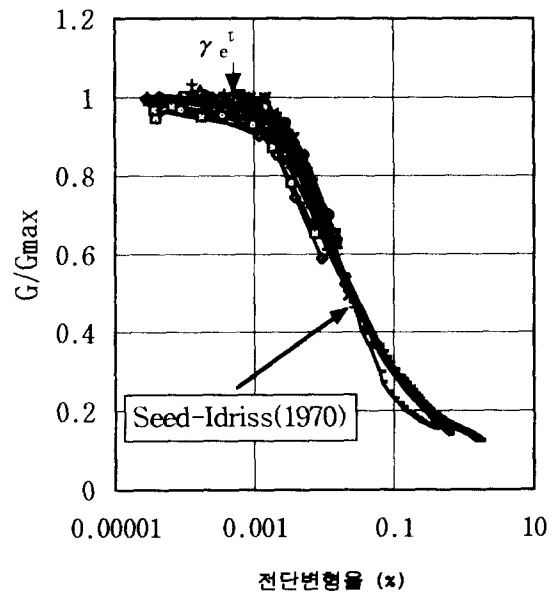


그림 8 변형률 크기에 따른 정규화된 전단탄성계수

## 5 결론

- 1) 현장시험으로 공내재하시험과 크로스홀시험, 실내시험으로 공진주/비틀전단시험과 LDT를 적용한 삼축압축시험을 통하여 국내 화강풍화토 지반의 변형특성을 검토하였다.
- 2) 현장시험과(동적시험인 크로스홀시험 및 반복재하시험인 공내재하시험) 불교란시료에 대한 실내시험(동적시험인 공진주시험, 반복재하시험인 비틀전단시험 및 정적시험인 LDT를 적용한 삼축압축시험)에서 결정된 탄성계수는 각시험이 수행된 변형률 크기와 시험의 하중재하속도를 고려하여 비교할 경우 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로 정적물성치와 동적물성치는 변형률의 크기, 하중재하속도 등을 고려할 경우 차이가 없음을 알 수 있고, 본 연구에서 적용된 각 시험방법이 합리적으로 수행됨을 확인 할 수 있었다.
- 3) 화강풍화토에 대한 교란시료와 불교란시료의 변형률 크기에 따른 정규화된 탄성계수 변화는 서로 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 일반적인 연구결과에 부합되는 것으로서, 현장시

험을 통해 구해진 최대전단탄성계수와 교란시료를 사용한 실내시험에서의 결정된 정규화된 탄성계수의 감소추이를 결합하여 현장지반의 비선형 거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

- 4) 본 연구에서 적용된 3종의 화강풍화토 지반의 변형율 크기에 따른 정규화 전단탄성계수는 서로 차이가 거의 없는 것으로 나타났고, 비소성(NP) 흙에 대한 Seed-Idriss(1970) 연구결과와 일치하는 값을 주고 있다. 향후, 보다 많은 시험을 통하여 국내 화강풍화토의 대표적인 변형율 크기에 따른 정규화된 탄성계수의 변화를 제안할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 임시적으로는 비소성(NP) 흙에 대하여 Seed-Idriss(1970)가 제안한 연구결과를 국내 화강풍화토에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

**감사의 글** : 본 논문은 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행된 “대형복합역사 구조물의 건설 및 열차 운행에 관한 지반-구조물복합계의 해석기술개발(95-0600-01-01-3)” 연구과제 수행결과의 일부로 감사를 표합니다. 또한 시험장소를 제공해주시고, 시료채취 및 현장시험 등에 여러모로 협조해주신 한밭개발공사 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김동수(1995), “공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성,” 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp. 101-112..
2. 김용진, 이인모, 이인근(1994), “구성석을 이용한 다짐화강토의 공학적 특성(I),” 한국지반공학회지, 제10권, 제3호, pp. 55-78.
3. 박재영(1997), “공내재하시험을 이용한 지반의 미소변형 전단탄성계수 측정,” 한국과학기술원, 석사학위논문.
4. 이승래, 김동수, 정순용, 권기철, (1996), “교란 및 불교란 화강풍화토의 변형특성,” 대한토목학회 학술발표회(I), pp. 399-402.
5. 정순용(1997), “비교란 및 정적다짐 화강풍화토의 응력-변형율관계에 대한 연구,” 한국과학기술원, 석사학위논문.
6. 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.
7. 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.
8. Lee, I. K. and Coop, M. R., (1995), “The Intrinsic Behaviour of a Decomposed Granite Soil,” *Geotechnique* 45, No. 1, pp. 117-130.
9. 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.
10. 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.