

# 원심 모형 시험을 위한 동적 현장 지반 모사 기법 연구(대만 화련 지반)

## Simulation of Dynamic in-situ Soil Properties for the Centrifuge Test (Hualien Site in Taiwan)

하정곤<sup>1)</sup> · 이세현<sup>2)</sup> · 추연욱<sup>3)</sup> · 김세희<sup>4)</sup> · 김동수<sup>5)</sup>

Ha, Jeong Gon · Lee, Sei Hyun · Choo, Yun Wook · Kim, Se Hee · Kim, Dong Soo

**국문 요약** >> 본 연구는 원심 모형 시험을 위한 동적 현장 지반의 모사 기법을 제안하였다. 현장지반 모사를 위해서 현장 지반의 층상 구조 및 전단파 속도 주상도에 대한 자료를 바탕으로 모형시료를 조성하고, 구속압 별 공진주 시험을 수행하였다. 그리고 공진주 시험을 통하여 지반의 특성계수와 구속압 영향계수를 구하고, 모형 지반의 전단파 속도를 예측하였다. 이를 현장의 전단파 속도 주상도와 비교하여 시료 조건을 결정하였다. 그리고 결정된 시료 조건을 바탕으로 원심모형시험 모델을 제작하고, 인-플라이트 상태에서 벤더 엘리먼트 시험을 수행하여 제안된 기법의 타당성을 검증하였다. 그리고 대형지진시험이 수행된 적이 있는 대만 화련의 현장 지반을 대상으로 축소 모델링 기법을 적용하였다.

**주요어** 지반 모사, 원심 모형 시험, 전단파 속도, 동적 지반 물성, 화련 대형지진시험

**ABSTRACT** >> The simulation of the field dynamic soil properties for soil modeling in the centrifuge test is important. In this study, the process of soil modeling based on the shear wave velocity profile is developed. From the resonant column test in each confining pressure, the shear wave velocity profile is expected and the modeling condition is determined by comparing it with that in the field. During the dynamic centrifuge test, the bender element test is performed for measuring the in-flight shear wave velocity profile, and the applicability of the proposed method was verified. This modeling method is applied to the centrifuge test of the Hualien Large-Scale Seismic test.

**Key words** Soil Modeling, Centrifuge Test, Shear wave velocity profile, Dynamic soil properties, Hualien large-scale seismic test

### 1. 서론

동적 원심모형시험은 모형 구조물을 고속으로 회전시켜 현장의 응력 조건을 재현하는 모형시험 기법으로 일반적인 축소 모형실험의 한계를 보완하면서, 효과적으로 원형구조물의 지진 시 거동을 연구 할 수 있는 시험 방법이다. 이러한 동적 원심모형시험에서 위한 축소 모형 구조물 제작 시에 현장의 지반 조건을 유사하게 모사하는 것은 매우 중요한 일이다. 모형지반 조성을 위해서는 현장의 시료를 채취

하는 것이 이상적이다. 그러나 현장 지반 재료를 구하는 데 어려움이 있고, 축소 모델링을 위한 상사법칙에 따른 입경 크기와 입도 분포의 영향에 대한 고려가 쉽지 않아 현재에도 지반 모델링 기법에 관한 많은 논의가 진행 중에 있다 (Bolton and Lau<sup>(1)</sup>).

지반의 특성을 나타내는 변수는 밀도, 간극비 등 매우 다양하다. 그 중에서도 지반의 층상 구조, 전단파 속도 주상도, 정규화 탄성계수와 지반 재료 감쇠비는 지반의 지진 시 응답 해석 및 지반-구조물 상호작용 (Soil-Structure Interaction, SSI) 해석에 이용되는 중요한 입력 변수로 이용된다. 따라서 동적 원심모형시험에서 SSI 연구를 위한 축소 모형 모델링 시에 전단파 속도 주상도와 지반의 비선형 거동 특성을 적절히 모사하는 것은 매우 중요하다(Zhang et al.<sup>(2)</sup>). 그러나 현재 전단파 속도를 초점으로 한 모형 지반 조성 기법은 명확하게 제시되지 않고 있다.

본 연구에서는 대만 화련에서 대형 지진 시험을 위하여 선행된 지반 조사 결과를 바탕으로 사질토와 자갈지반 등

<sup>1)</sup> 정희원·한국과학기술원, 박사과정

<sup>2)</sup> 정희원·한국원자력안전기술원, 선임연구원

<sup>3)</sup> 정희원·한국과학기술원, 연구교수

<sup>4)</sup> 한국과학기술원, 석사과정

<sup>5)</sup> 정희원·한국과학기술원, 교수

(교신저자: dskim@kaist.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2012. 5. 15 / 게재확정일 : 2012. 7. 13)

© 2012EESK www.eesk.or.kr

현장의 주요 지반에 대한 모델 지반 조성 기법을 제안하였다. 우선, 모형 지반 시편에 대한 공진주 시험을 실시하여 구속압 단계별 최대 전단탄성계수 변화를 측정하고 이로부터 모형 지반의 전단파 속도 주상도를 예측하여 지반 조성 조건을 결정하였다. 결정된 조건을 바탕으로 모형 지반을 조성하고, 동적 원심모형시험을 수행하였다. 인-플라이트 상태에서 수행된 벤더 엘리먼트 시험 결과와 공진주 시험을 통한 예측 전단파 속도 주상도의 비교를 통해서 조성된 모형 지반 조성 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

## 2. 동적 현장 지반 모사 기법

주요 구조물의 내진 설계 시, 지반-구조물 상호작용(SSI)을 고려하는 것은 매우 중요하다. SSI 해석을 위하여는 지반의 전단파 속도 주상도, 전단 탄성계수 감소곡선, 감쇠비 곡선 등 지반의 동적 변형 특성이 중요한 영향 요소이자 입력변수이므로, 동적 원심모형시험에서 이들 지반 계수를 적절하게 반영하도록 모형지반을 조성하고, 인-플라이트 상태에서 평가하는 것은 중요한 요소 기술이다.

동적 원심모형시험에서는 동일한 지반 재료를 사용할 수 없는 경우가 많으며 모든 동적 변형특성을 동일하게 조성하기는 어렵다. 전단파 속도 주상도와 비선형 변형특성 중 SSI 해석에 전단파 속도가 주된 영향을 미치리라 예상되므로 본 연구에서는 전단파 속도 주상도를 모형지반 조성 조건의 중요한 변수로 결정하였다. 모형 지반의 깊이 별 전단파 속도는 현장 지반의 층상 구조 및 전단파 속도에 따라 시료 구성비를 달리하여 모형 지반 시편을 조성하고, 제작된 시편들에 대하여 구속압별 공진주 시험을 수행하여 유추할 수 있다.

공진주 시험은 지반재료를 원통형으로 성형하여 바닥을 고정시키고, 상단부를 자유조건으로 유지하면서 비틀력을 재하하는 시험으로, 공진을 유발하여 시료의 전단탄성계수와 변형률을 획득할 수 있다. 본 연구에서는 Stokoe식 공진주 시험기를 이용하였다(김동수와 추연욱<sup>(3)</sup>).

공진주 시험을 통해서 얻는 최대전단탄성계수는 응력-변형률 관계가 선형으로 나타나는 초기 변형률에서의 값으로, 일반적으로 변형률  $10^{-3}\%$  이하에서의 전단탄성계수이다(김동수와 추연욱<sup>(3)</sup>, Santagata<sup>(4)</sup>). 최대 전단 탄성계수는 식 (1)과 같이 지반의 밀도와 전단파 속도로 표현이 가능하다.

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

여기서,  $G_{\max}$  = 최대 전단 탄성계수,  $\rho$  = 지반의 밀도,

$V_s$  = 지반의 전단파 속도이다.

공진주 시험에서 최대 전단 탄성계수는 간극비, 과압밀비, 구속응력 등 다양한 요소들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Hardin and Black<sup>(5)</sup>, Dobry and Vucetic<sup>(6)</sup>). Hardin and Black<sup>(5)</sup>이 제안한 최대전단탄성계수의 실험식을 단순화 시키면 식 (2)와 같다.

$$G_{\max} = A(\sigma'_m)^n \quad (2)$$

여기서,  $A$  = 지반의 강성 특성 계수,  $\sigma'_m$  = 평균 유효 응력,  $n$  = 구속압 영향 계수이다.

여기서  $A$ 와  $n$ 은 각각 구속응력을 달리한 실내시험 결과로부터 대수-구속 응력과 대수-최대전단탄성계수 관계의 절편과 기울기로부터 계산이 가능하다. 이는 구속압에 대한 전단탄성계수 증가를 거듭제곱 추세선 식으로부터 구할 수 있음을 나타낸다.

지반의 전단탄성계수는 평균유효응력(Mean Effective Stress,  $\sigma'_m$ )에 영향을 받는다고 알려져 있다(김동수 등<sup>(7)</sup>). 일반적으로 공진주 시험에서는 등방의 구속압이 가해지고 현장지반의 평균유효 응력은 현장 지반에서 일정 깊이의 상재하중에 의한 수직응력과 수평응력으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma'_m = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) = \frac{1}{3}(\sigma'_v + 2\sigma'_h) \quad (3)$$

여기서  $\sigma'_m$  = 평균유효응력,  $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$  = 각 주응력축에 해당하는 유효응력,  $\sigma'_v$  = 지반의 상재하중에 의한 수직응력,  $\sigma'_h$  = 지반의 상재하중에 의한 수평응력이다.

식 (4)와 같이 흙의 자중에 의한 수직응력은 밀도와 중력 가속도, 높이의 곱으로 나타내며, 깊이  $h$ 에서 지반의 수평응력은 정지토압계수와 수직응력의 곱으로 표현이 가능하다.

$$\sigma_v = \rho gh \quad (4)$$

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad (5)$$

여기서,  $K_0$  = 정지토압계수,  $\rho$  = 단위 중량,  $g$  = 중력가속도이다.

식 (4), 식 (5)를 평균 유효 응력 식 (3)에 대입하고, 정지토압계수( $K_0$ )를 0.5로 가정하여 계산하면, 식 (6)과 같은 관계를 얻을 수 있다. 이를 깊이  $h$ 에 대하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\sigma'_m = \frac{1}{3}(\sigma'_v + 2K_0\sigma'_v) = \frac{2}{3}\sigma'_v = \frac{2}{3}\rho gh \quad (6)$$

(여기서,  $K_0 = 0.5$  로 가정)

$$h = \frac{3\sigma'_m}{2\rho g} \quad (7)$$

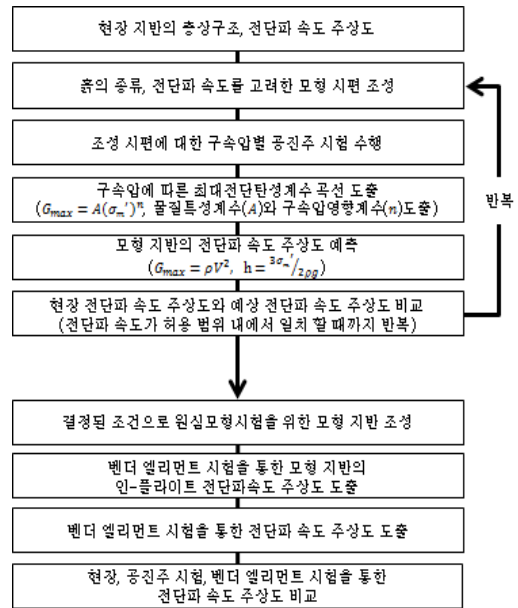
식 (7)을 사용하면 공진주 시험시 구속압(평균 유효 응력) 조건을 현장 지반에서 같은 응력 상태를 가지는 지반의 깊이로 환산이 가능하다. 위의 과정을 통하여 공진주 시험을 통해서 얻은 각 시료별 구속압 증가에 따른 최대 전단 탄성 계수 증가 경향은 깊이에 따른 전단파 속도 주상도로 변환된다. 그리고 구해진 모형 지반의 전단파 속도 주상도를 현장의 전단파 속도 주상도와 비교하여 원심모형시험을 위한 축소 모형지반을 조성할 수 있다. 이때, 모형지반의 조성을 바꾸어가며 공진주 시험을 실시하여 현장지반의 전단파 속도 증가 경향, 즉, 지반의 특성계수( $A$ )와 구속압 영향계수( $n$ )를 비교하여 최적의 조성비율을 결정한다

동적 원심모형시험을 수행하는 도중, 깊이별로 매설된 벤더 엘리먼트를 이용하여 크로스홀 시험을 수행하면 모형지반의 전단파 속도 주상도를 구할 수 있다. Ng의 원심가속도장에서 모형 지반의 깊이는 상사 법칙을 적용하여 원형 지반의 깊이로 대응이 가능하며, 이를 통해서 시험 대상 지반의 전단파 속도 주상도를 도출 할 수 있다. 최종적으로 현장, 공진주 시험을 통한 예측값, 인-플라이트 상태의 전단파 속도를 같이 비교하여서 모형 지반 조성의 신뢰성을 확인할 수 있다.

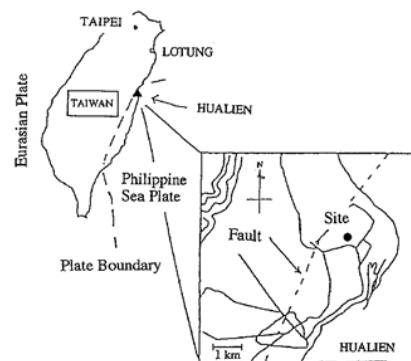
정규화 전단 탄성계수와 감쇠비 곡선 등의 지반의 비선형 거동 특성은 현장 시료를 채취하여 수행한 실내 시험 결과와 결정된 조성 조건의 모형지반에 대한 공진주 시험 결과를 비교하여 고려할 수 있다. 그림 1은 앞서 설명한 원심모형시험을 위한 모형 지반 조성 방법의 순서도를 나타낸다. 본 연구에서는 대만 화련의 대형 지진 시험 현장을 대상으로 SSI 해석을 위한 모형 지반 조성 기법의 타당성을 검증하였다.

### 3. 동적 현장 지반 모사 기법

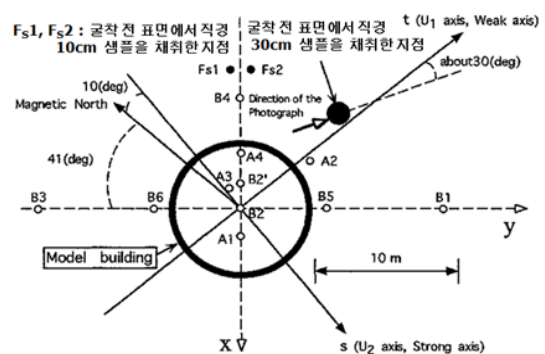
대형 지진 모사 시험이 수행된 화련 지역은 대만의 북동부에 위치하고 있다(그림 2). 대형 지진 모사 시험을 위하여 현장 상부 지반층에 대하여 시추, 관입 시험, 전단파 속도 측정 등의 현장시험과 비교란 시료 채취 후 진동 삼축 시험 등의 실내 실험이 이루어 졌다(CRIEPI<sup>(8)</sup>). 그림 3은 시추



〈그림 1〉 원심모형시험을 위한 모형지반조성 방법



〈그림 2〉 대만 화련의 위치(CRIEPI<sup>(8)</sup>)



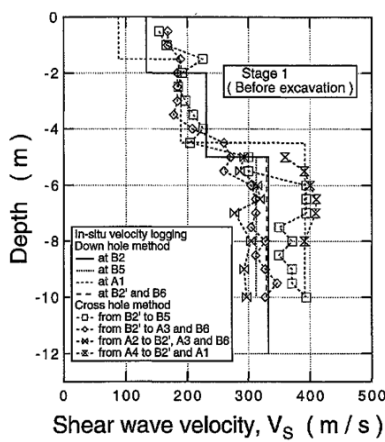
〈그림 3〉 시추 위치 및 현장 지반 조사 위치(CRIEPI<sup>(8)</sup>)

및 현장 지반 조사가 이루어진 위치를 나타내고 있다. 시추 결과 상부 5m는 느슨한 사질토 지반이며, 사질토 하부에는 10cm에서 20cm의 직경을 가지는 자갈로 이루어진 고결되지 않은 역암질 지반이 분포한다.

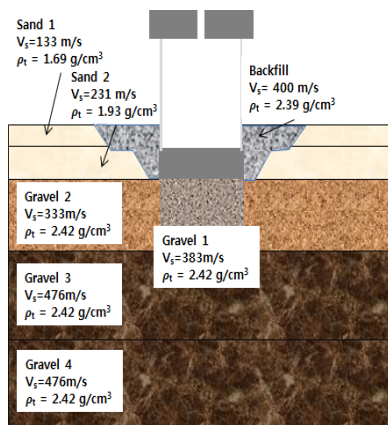
원전 격납 구조물 모형이 건설되기 전에 구조물 주변에서 지반의 전단파 속도 측정을 위한 다운홀 시험이 수행되었다.

〈표 1〉 화련 지반의 종류 및 각 층에 대한 기초 물성(CRIEPI<sup>(8)</sup>)

지반 층	깊이(m)	두께(m)	전단파 속도(m/s)	밀도(t/m <sup>3</sup> )	포아송비
모래층 1	0 ~ 2	2.0	133	1.69	0.38
모래층 2	2 ~ 5	3.0	231	1.93	0.48
자갈층 1	5 ~ 6.5	1.5	333	2.42	0.47
자갈층 2	6.5 ~ 12	5.5	333	2.42	0.47
자갈층 3	12 ~ 20	8.0	476	2.42	0.47
자갈층 4	20 ~ 46	26.0	476	2.42	0.47
자갈층 4	46 ~ 70.6	24.6	550	2.42	0.47
자갈층 4	70.6 ~ 100	29.4	510	2.42	0.47
뒷채움재	0 ~ 5	5	400	2.39	0.48



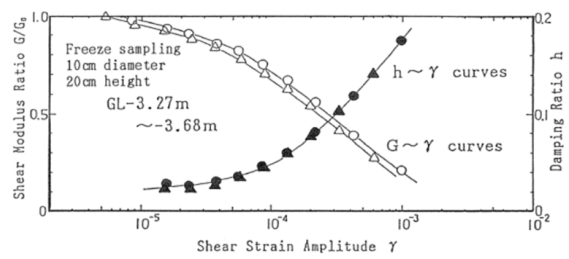
〈그림 4〉 다운홀과 크로스홀 시험을 통해서 얻어진 전단파 속도 주상도 (CRIEPI<sup>(8)</sup>)



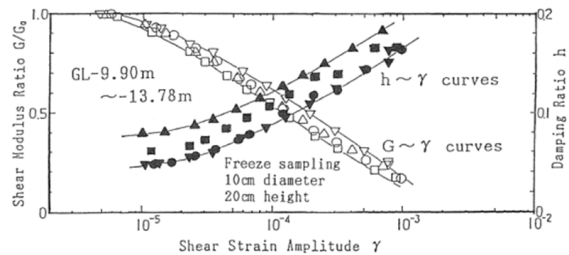
〈그림 5〉 수치해석을 위한 통합 지반 모델(CRIEPI<sup>(8)</sup>)

지표에서 133m/s의 전단파 속도가 하부 50m 깊이에서는 약 550m/s까지 증가하였다. 표 1은 지표부터 하부 자갈층까지 화련 지역의 지반층에 대한 현장 시험 결과를 요약하였다.

그림 4는 다운홀과 크로스홀 시험을 통해서 얻어진 전단파 속도 주상도를 나타내고, 이를 바탕으로 CRIEPI<sup>(8)</sup>에서는 수치해석을 위한 통합 지반 모델을 그림 5와 같이 제시하였다. 화련 지역의 지하수는 지표면 2m 아래부터 자리 잡고 있다.



(a) 모래층 (-3.27 ~ -3.68)



(b) 자갈층 (-9.00 ~ -13.78)

〈그림 6〉 모래층과 자갈층에 대한 진동 삼축 시험 결과(CRIEPI<sup>(8)</sup>)

화련 지반의 변형률에 따른 비선형 특성을 파악하기 위하여 진동 삼축 압축 시험을 수행하였다. 현장에서 지름 10cm와 30cm 두 가지 크기의 시편을 교란을 막기 위해 얼려서 채취하여, 실제 지반에 해당하는 유효 응력을 가하여 시험을 수행하였다. 삼축 압축 시험을 통해서 얻어진 탄성 계수와 축 변형률로부터 전단 탄성 계수와 변형률을 구하는 방법은 식 (8), 식 (9)와 같다. 모래층과 자갈층에 대한 대표 진동 삼축 시험 결과를 그림 6에 나타내었다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{8}$$

$$\gamma = (1+\nu)\epsilon_a \tag{9}$$

여기서,  $G$  = 전단 탄성계수,  $E$  = 재료의 탄성계수,  $\gamma$  = 전단 변형률,  $\nu$  = 포아송비,  $\epsilon_a$  = 축 변형률이다.

〈표 4〉 질량비를 달리하여 제작된 자갈 시편들의 정보

시료 종류	시험명	A	n	R2
사질토층	Sand	5.84	0.65	1.00
자갈층	NG	34.28	0.32	0.99
	G20	56.72	0.29	1.00
	G40	44.20	0.39	1.00
	G55	54.92	0.49	0.98
화련 현장 크로스홀 시험	사질토층(0-5m)	8.44	0.62	0.59
	자갈층(5m 이하)	38.89	0.38	0.56

## 4. 공진주 시험을 이용한 모형 지반 조성 조건 결정

### 4.1 모형 지반 시편 조성 및 공진주 시험 계획

사질토층, 자갈층, 뒷 채움재, 크게 세 가지 지반층으로 나뉘는 화련 지반을 모사하기 위하여 각 지반에 대한 모형 시편을 조성하여 공진주 시험을 수행하였다. 특히 자갈층은 기반암부터 모형 구조물 바로 아래까지를 차지하며, 지반의 증폭 현상 및 지반-구조물 상호작용에 매우 큰 영향을 미치는 지반층으로, 시료조건을 다양하게 하여 공진주 시험을 수행하고 가장 적절한 지반 조성 조건을 도출하였다.

#### 4.1.1 사질토층

화련의 사질토층은 밀도 약  $1.8t/m^3$ , 전단파 속도 약 200 m/s 정도의 특성을 지니고 있다. 사질토층의 모사를 위하여 실리카 모래를 활용하였다. 실리카 모래는 KAIST 원심모형시험 센터에서 사질토층 모사를 위하여 많이 이용되는 분쇄석이다(이세현 등<sup>9)</sup>). 실리카 모래를 약  $1.8t/m^3$ 의 밀도로 다져서 모형 지반 시편을 제작 하였다. 모래층은 지표 근처에 위치하므로 20kPa씩 단계적으로 증가 시키며 100kPa까지 구속압 별로 공진주 시험을 수행하였다. 표 2는 제작된 사질토 시편의 정보를 표시한 것이다.

#### 4.1.2 자갈층

화련 지역의 자갈층은 깊이가 깊어질수록 전단파 속도 333m/s부터 476m/s까지 증가하는 경향을 보인다. 따라서 자갈층은 사질토 지반에 비하여 강성이 강하기 때문에 풍화토를 다져서 제작하였다. 그러나 풍화토만을 다져서는 모사하기에는 지반 강성의 한계가 있고, 자갈과 흙이 섞인 자갈층의 구속압 영향 특성을 잘 반영하지 못하므로 약 2-3mm 크기의 콩자갈을 풍화토와 섞어서 다짐으로 자갈층을 모사하였다. 풍화토와 콩자갈의 질량비를 달리하여서 시편을 조성하고, 각각에 대한 공진주 시험을 수행하여 현장지반의 자갈층과 가장 유사한 모형 지반의 조성조건을 도출하고자

〈표 2〉 사질토 시편 정보

모델명	전체 단위중량(rt)	GS (가정)	e	구속압
Sand	1.8	2.65	0.66	20,40,60,80,100

〈표 3〉 질량비를 달리하여 제작된 자갈 시편들의 정보

모델명	풍화토비	자갈비	전체 단위중량(rt)	GS (가정)	구속압
NG	1	0	2.00	2.65	25,50,100, 200, 400
G20	0.77	0.23	2.15	2.65	
G40	0.6	0.4	2.30	2.65	
G55	0.45	0.55	2.40	2.65	

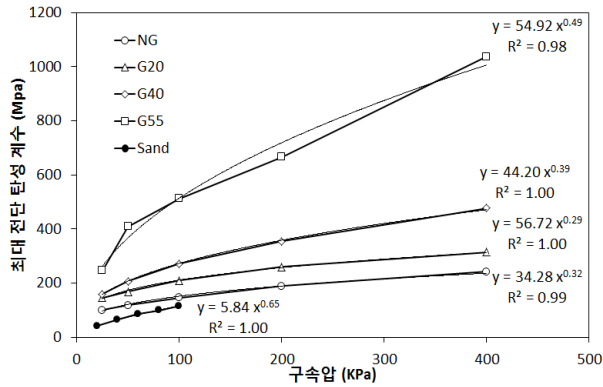
하였다. 이때 다짐 정도는 모든 시료에 대하여 최대 다짐으로 조성하였다. 구속압은 단계별로 증가시키며 최대 400kPa까지 가하였다. 표 3은 질량비를 달리하여 제작된 시편들의 정보를 표시하였다.

#### 4.1.3 뒷 채움재

뒷 채움재는 구조물 건설 후에 구조물 주변의 굴착 된 부분에 대하여 채워진 지반층을 말한다. 수치해석을 위한 통합 지반모델에서는 지하수위 위와 아래 모두 뒷채움재의 전단파 속도를 400 m/s로 제시하였다. 이는 자갈층의 평균 전단파 속도와 유사하다. 따라서 자갈층과 유사한 강성을 지니고 있다고 판단하여, 자갈층에 대한 공진주 시험 결과를 바탕으로 시료를 조성하였다.

## 4.2 구속압에 따른 최대 전단 탄성 계수 변화

사질토 모형 시편과 자갈층 모형 시편에 대한 구속압에 따른 전단 탄성 계수 그래프를 그림 7에 나타내었다. 각 증가 경향 그래프에 대한 거듭제곱 추세선을 동시에 도시하였고, 추세선 식과 결정계수 R 제곱값을 표시하였다. 이를 이용하여 각 시료별 구속압 영향계수(n)와 지반의 특성계수



〈그림 7〉 구속압에 따른 전단 탄성 계수 그래프

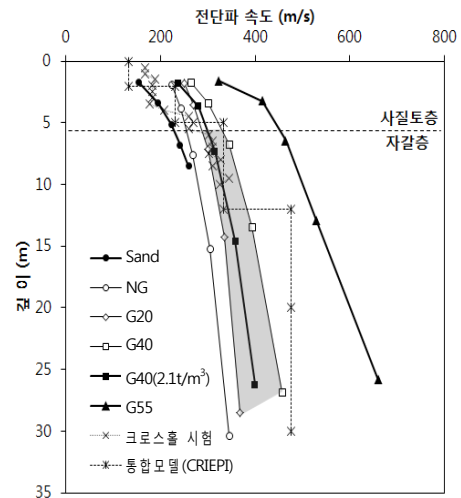
(A)를 결정하였다.

공진주 시험으로부터 구해진 각 시료별 구속압 영향 계수 (n)와 지반의 특성계수(A)를 표 4에 나타내었다. 현장 크로스홀 시험 결과로부터 얻어진 전단파 속도 주상도와 층상 정보를 이용하여 깊이별 평균유효응력과 최대전단탄성계수 값을 도출하였다. 이로부터 평균 유효 응력 증가에 따른 최대 전단 탄성 계수 그래프를 그리고 그에 따른 계수 A와 n을 구하여 표 4에 함께 나타내었다. 우선 사질토층 시료와 자갈층 시료들은 특성계수와 구속압 영향계수에서 큰 차이를 보였다. 자갈층 시료들에 비하여 상대적으로 강성이 약한 사질토 시료의 특성계수는 작게 나타났으며, 구속압 영향계수는 매우 크게 나타났다. 자갈층 시료의 공자갈 혼합비에 따른 두 변수의 변화를 살펴보면, 자갈의 함유량이 증가 할수록 특성계수도 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 구속압 영향계수의 경우에도 공자갈 함유량이 적을 때는 약 0.3 정도로 나타났으나, 공자갈 함유량이 증가 할수록 커지는 경향을 나타냈다.

### 4.3 모형지반의 깊이별 전단파 속도 주상도 예측

대만 화련에서 수행된 대표적 크로스홀 결과와 CRIEPI 보고서에서 제시된 수치해석을 위한 지반 통합 모델의 전단파 속도 주상도를 공진주 시험으로부터 예측된 모형지반의 전단파 속도 주상도와 함께 그림 8에 나타 내었다. Sand 시료에 대한 전단파 속도 예측결과는 깊이 약 5m까지의 사질 토 지반에서 현장 크로스홀 결과와 유사한 전단파 속도와 증가 경향을 보였다.

주요 지층인 자갈층 모형 지반의 전단파 속도 주상도는 NG, G20, G40, G55로 공자갈 함유량이 증가할수록 전체적으로 크게 나타났으며, 구속압 영향계수가 커지면서 깊이에 따른 전단파 속도의 증가 폭도 커지는 것을 알 수 있다. 현장 크로스홀 시험에서 나타난 자갈층의 전단파 속도 분포



〈그림 8〉 공진주 시험을 이용한 전단파 속도 주상도 예측

는 G20과 G40 시료로부터 예측된 전단파 속도 주상도 사이(음영부분)에 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 더욱 정확한 자갈층 모사를 위해서 밀도 감소에 의한 강성 저감 효과를 고려하여, 최대 다짐으로 조성했던 G40시료의 단위 중량을 2.1t/m<sup>3</sup>으로 낮추어 공진주 시험을 수행하고 결과를 같이 비교하였다. 공자갈의 질량비가 40%이고 2.1t/m<sup>3</sup>로 다져진 시편으로부터 도출된 전단파 속도 주상도는 약 5m 이하의 자갈층에 대한 현장 크로스홀 시험 결과와 유사하게 나타났다. 약 12m이후에서 공진주 시험을 통한 예측결과와 수치해석을 위한 통합모델 사이에서 차이가 나타나지만, 자갈층의 구성이 크게 바뀌지 않았으므로 현장 크로스홀 시험 결과의 경향을 고려하여 모형 지반 조성 조건을 결정하는 것이 적절하다고 판단하였다. 마지막으로 G55 시료의 경우에는 특성계수가 크고, 낮은 구속압에서 전단파 속도가 크기 때문에 얕은 깊이에서도 큰 강성을 보이는 뒷채움재를 모사하기 타당하다고 판단되었다.

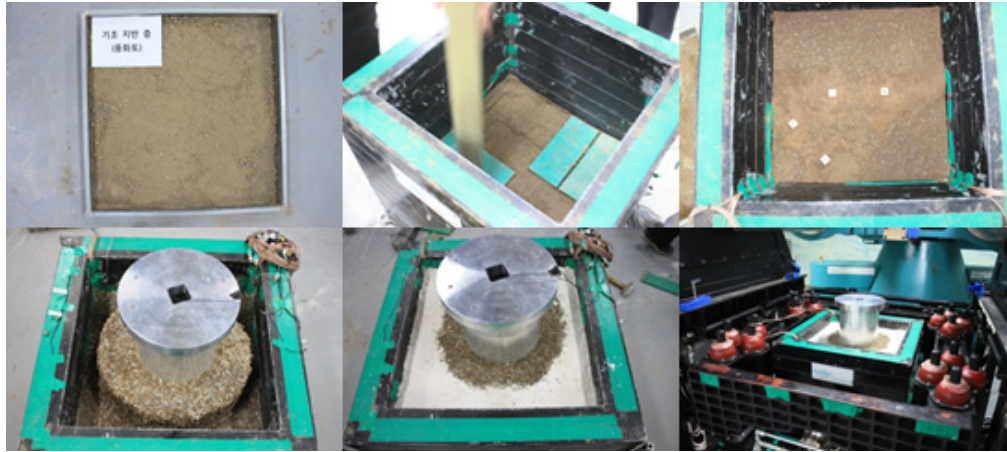
## 5. 동적 원심 모형 지반 조성 및 전단파 속도 비교

### 5.1 동적 원심 모형 지반 조성

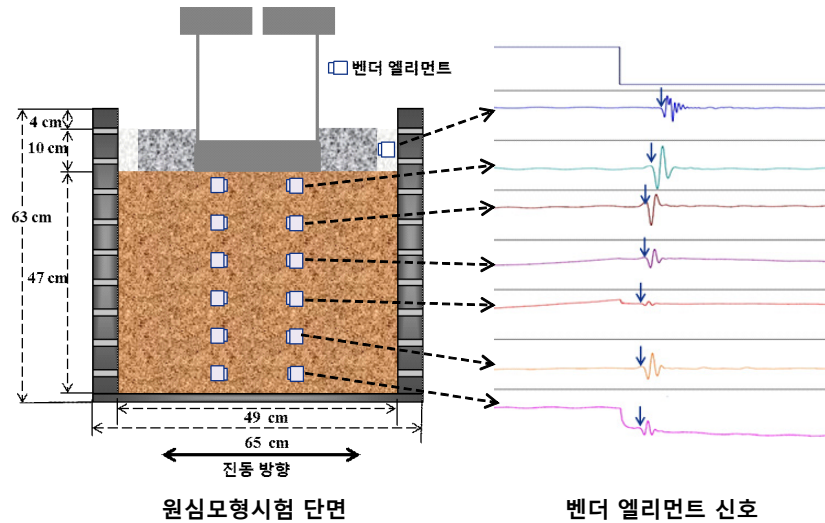
결정된 모형 지반 시료 조건을 바탕으로 상부 모래층은 실리카 모래를 함수비 13%로 유지하여서 밀도 1.8t/m<sup>3</sup>으로 다져서 모형 지반을 조성하였다. 자갈층은 약 3mm 크기의 공자갈과 풍화토를 4:6을 섞어서 밀도 2.1t/m<sup>3</sup>으로 다져서 조성하였다. 뒷채움재는 공자갈과 풍화토를 5.5:4.5의 비율로 섞은 후 2.2t/m<sup>3</sup>으로 다져서 조성하였다.

시료는 자갈층부터 층 다짐 하여서 조성하였다. 조성 과정에서 지반층에 벤틀리 엘리먼트 쌍을 약 120mm간격으로 6





〈그림 9〉 원심모형시험 모델 제작 과정



〈그림 10〉 조성 모형 단면과 벤더엘리먼트 실험에서의 깊이별 전단파 초동 결정

쌍을 설치하여서 원심모형시험 중에 벤더 엘리먼트 시험을 통한 지반의 전단파 속도 추상도를 측정하도록 하였다. 자갈층 조성후 원적격납 구조물 모형을 올린 후에 뒷채움재를 조성하였고, 마지막으로 주변 사질토층을 다짐하였다. 뒷채움재에는 자갈 비율이 높고, 영역이 좁은 조건으로 인하여 벤더 엘리먼트를 매설하지 못하였으나, 사질토 층에도 1쌍의 벤더 엘리먼트를 매설하였다. 그림 9에 원심모형시험을 위한 모델 제작과정을 나타내었다.

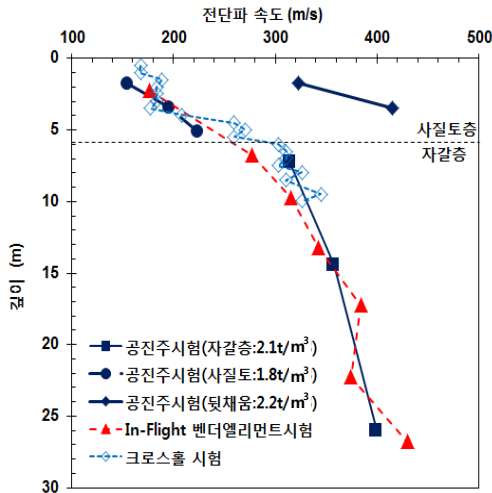
본 연구에서 수행된 동적 원심모형시험은 KAIST에 위치한 KOCED 원심모형시험기와 진동대를 이용하였다. (Kim et al.<sup>(10)</sup>)

### 5.2 전단파 속도 비교

벤더 엘리먼트 시험이란 한쌍의 벤더 엘리먼트를 양단에 캔틸레버 형식으로 부착하고 전단파의 가진 및 도달의 측정

이 가능하도록 하여 시험시편의 전단파 속도를 측정하기 위해 이용되고 있다. 여러 쌍의 벤더 배열을 깊이별로 매설하고, 각 깊이별 전단파 속도를 측정하면 원심모형시험으로 깊이별 전단파 속도 추상도를 확보할 수 있다. 그림 10은 조성된 원심 모형시험 단면과 원심모형시험 시 수행된 벤더 엘리먼트 시험 결과로부터 전단파 속도 추상도를 결정하기 위하여 신호의 초동을 잡는 모습을 나타내었다.

현장에서 수행된 크로스홀 시험 결과, 모형 시편에 대한 공진주 시험을 통해서 얻어진 전단파 속도 추상도, 제작된 원심모형시험 지반의 50g 시험 시 수행된 벤더 엘리먼트 시험 결과로부터 얻어진 전단파 속도 추상도를 그림 11에 비교하였다. 지표면부터 지하 5m까지는 구조물 주변의 뒷채움재와 외곽의 사질토 지반으로 이루어져 있다. 사질토층의 전단파 속도는 현장 시험 결과, 공진주 시험과 벤더 엘리먼트 시험이 약 200m/s로 유사하게 나타났다. 뒷채움재의 경



〈그림 11〉 전단파 속도 주상도 비교

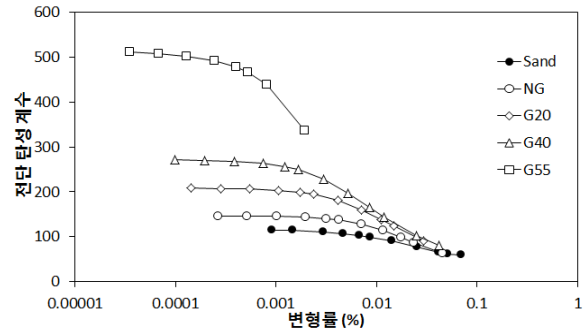
우 지표에서는 공진주 시험 결과가 현장보다 작으나 약 5m 깊이에서는 현장과 유사한 약 400m/s 정도의 전단파 속도를 보였다. 모형 지반에서는 뒷채움재의 크기가 작고, 자갈의 함유량이 많기 때문에 벤더 엘리먼트 시험이 수행되지 못하여 비교가 불가능 하였다. 주요지층인 자갈층의 경우에는 현장 크로스홀 시험, 공진주 시험 예측값, 벤더 엘리먼트 시험 결과가 유사하였다. 즉, 공진주 시험을 통하여 예측한 전단파 속도 주상도와 벤더 엘리먼트 시험을 통해 얻어진 전단파 속도 주상도와, 그리고 현장의 크로스 홀 시험으로부터 도출된 전단파 속도 주상도까지 모두 유사하게 나타남을 볼 수 있다. 이를 통하여 공진주 시험을 활용하여 현장 지반의 전단파 속도 주상도를 원심모형실험에서 적절히 모사 할 수 있음을 확인하였다.

## 6. 모형 지반과 현장 지반의 비선형 특성 비교

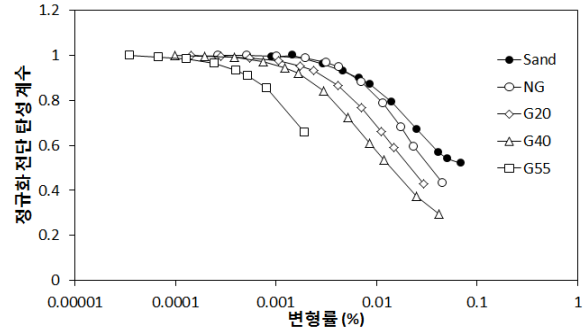
변형률에 따른 전단 탄성계수, 감쇠비 곡선 등 지반의 동적 물성은 지진 시 지반의 비선형 거동 판단에 영향을 미친다. 각 모형 시편에 대한 공진주 시험을 통하여 동적 물성을 구하였고, 사질토 시료와 모든 자갈층 시료에 대한 결과를 구속압 100kPa에서 비교하였다.

### 6.1 전단 탄성계수

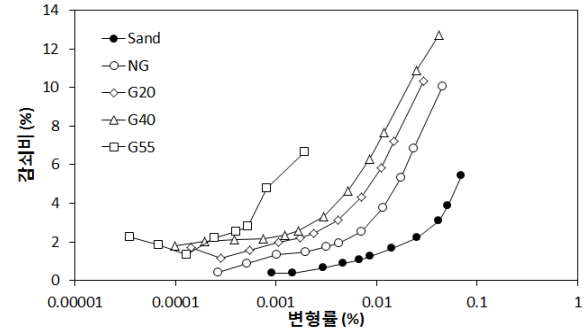
전단 탄성계수는 지반의 강성을 나타내는 변수로서 변형률이 증가 할수록 감소하는 특성을 가지고 있다. 그림 12(a)은 사질토 지반과 자갈층 지반에서 이용된 구속압 100kPa에서 변형률에 따른 각 시편의 전단 탄성계수 감소 곡선을 나타낸다. 사질토층에 비하여 자갈층 시료들이 전반적으로 큰 전단 탄성계수를 가지며, 자갈 비율이 증가 할수록 최대



(a) 전단 탄성계수 감소 곡선



(b) 정규화 전단탄성 계수 곡선



(c) 감쇠비 곡선

〈그림 12〉 변형률에 따른 모형 시편의 비선형 특성(구속압 : 100kpa)

전단 탄성계수가 커지는 경향을 나타낸다.

전단 탄성계수의 감소 경향을 정규화하여 비교하기 위해서 변형률에 따른 정규화 탄성 계수 곡선을 그림 12(b)에 나타냈다. 사질토 지반에서 약 0.008%의 탄성 한계 변형률은 자갈층 G55에서는 약 0.0002%로 작게 나타났다. 즉, 자갈의 함유량이 커질수록 시료의 탄성 한계 변형률이 작아지는 경향을 보였다.

### 6.2 감쇠비 곡선

그림 12(c)은 변형률에 따른 시료별 감쇠비 곡선이다. 최소 감쇠비는 자갈의 함유량이 증가할수록 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 사질토 층에서는 약 0.5%의 최소 감쇠비가 나타나고 자갈층 시료 G55에서는 약 2%정도가 나타났다. 변형률 크기에 따라 증가하는 폭 역시 사질토 시료보다 자갈층 시료에서 더 크게 나타났으나 자갈층 시료 사이에서



는 큰 차이가 나타나지 않았다.

동적 원심 모형 시험 수행을 위한 모형지반 조성시 모든 지반계수를 동일하게 모사하는 것이 이상적이나, 실험적 한계가 있으므로 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 공진주 시험을 이용하여 최적의 지반 조성조건을 결정하고 현장 지반과 모형지반의 예상되는 지반의 전단파 속도 주상도를 맞추는 것에 초점을 맞추었다. 따라서, 지반의 비선형 특성인 G/Gmax곡선과 감쇠비 곡선에서는 차이가 발생할 수 있으며, 이를 결과 분석 시 고려하기 위하여 함께 비교하였다.

그림 13은 각 지반층 별로 화련 대형 지진 시험 시 수행된 진동 삼축 시험 결과와 동적 원심모형시험을 위한 모형 지반의 공진주 시험 결과를 통해서 구해진 지반의 비선형 물성을 비교한 그래프이다.

그림 13(a)에서 볼 수 있듯이 사질토층에서는 모형 지반의 정규화 전단 탄성 계수 곡선이 화련 지반의 정규화 탄성 계수보다 동일 변형율에서 크게 나타났으며, 감쇠비 곡선의 경우 모형 지반에 대한 공진주 시험 결과가 작게 나타났다.

본 모형 시험에서 대부분의 모델지반을 차지하는 자갈층 지반의 경우에는 정규화 탄성 계수가 동적 원심 모형 시험

에서 현장의 지반을 잘 모사하였다. 그림 13(b)에 나타난 바와 같이 정규화 탄성 계수 곡선의 감소 경향이 유사하다. 감쇠비 곡선도 증가 경향은 두 시험 모두 비슷하게 나타났으나 최소 감쇠비는 모형 지반이 약 2%정도 작게 나타났다. 재료 감쇠비가 작으므로 지반 증폭 시 현장 시험에서보다 동적 원심 모형 시험에서 증폭 정도가 더 크게 나타날 가능성이 있다고 판단되었다.

마지막으로 그림 13(c)와 같이 뒷채움재의 경우에는 정규화 전단 탄성계수와 감쇠비 곡선 모두 유사하게 나타났다.

### 7. 결론

본 연구에서는 원심모형시험을 위한 축소 모델 제작 시 현장의 동적 특성을 반영하는 지반 모사 기법을 제안하였다. 현장의 층상 구조와 전단파 속도를 중심으로 모형 시험을 조성하고 구속압별 공진주 시험을 수행하여 모형 지반의 전단파 속도 주상도를 예측하여 현장과 비교하여 시료 조성 조건을 결정한다. 이를 통해서 현장과 유사한 전단파 속도 주상도를 가지는 모형 지반 조성이 가능하며, 원심모형시험 시 벤더 엘리먼트 시험을 수행하여 모형 지반의 실제 전단파 속도 주상도를 도출하여 검증 할 수 있다. 또한 공진주 시험을 통하여 지반의 비선형 특성도 측정하여 현장 시료의 특성과 비교할 수 있을 뿐 아니라 원심모형시험에 대한 수치해석 시 입력 변수로 활용된다.

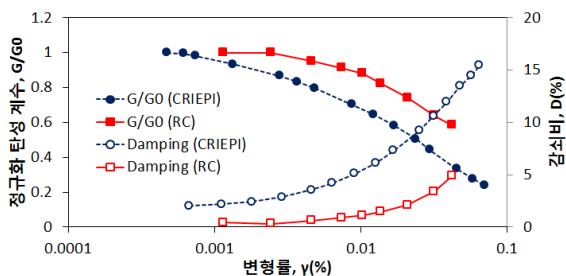
대형지진시험이 수행된 대만 화련 지반에 대하여 제시된 기법을 활용하여 지반을 조성하여 시험을 수행하였다. 이를 통해서 기법의 적용 가능성 및 타당성을 검증하였다. 전단파 속도와 주상도의 경우에는 대만 화련 현장과 공진주 시험, 벤더 엘리먼트 시험 결과가 모두 유사하게 나타나 전단파 속도를 중심으로 한 본 기법의 타당성을 보여주었다. 이를 통하여 향후 다양한 경우에 대하여 동적 현장 지반 모사 기법을 활용하여 원심모형시험을 수행한다면 더욱 신뢰성 있는 지반의 동적 거동을 모사 할 수 있을 것이라 판단된다.

### 감사의 글

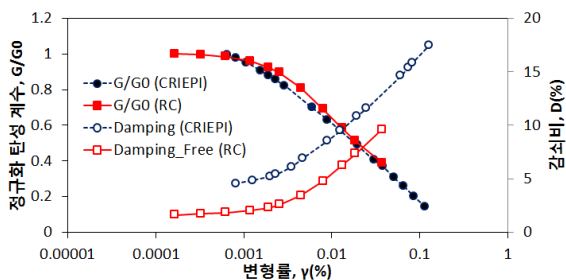
본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임. (No. 2010T100101048)

### 참고 문헌

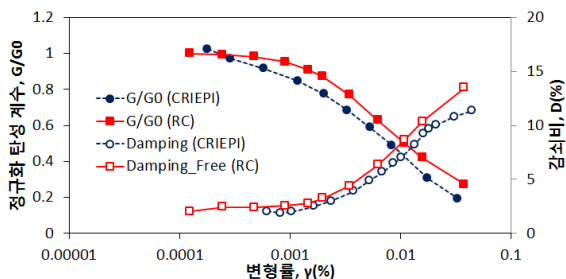
1. M.D. Bolton and C.K.Lau, "Scale effects arising from



(a) 사질토층 지반



(b) 자갈층 지반



(c) 뒷채움재

〈그림 13〉 모형 지반과 현장 지반의 동적 물성 비교

- particle size”, Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling (Centrifuge88), 127-132, 1988.
2. J.Zhang, R.D.Andrus and C.H.Juang, “Normalized shear modulus and material damping ratio relationships,” J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 4, 453-464, 2005.
  3. 김동수, 추연욱, “공진주 시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성,” 한국지반공학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 115-129, 2001.
  4. M.Santagata, “Effects of stress history on the stiffness of a soft clay,” Conference Deformational Characteristics of Geomaterials, Atlanta, 95-123, 2008.
  5. B.O.Hardin, and W.L.Black, “Vibration modulus of normally consolidated clay”, Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol. 94, No. 2, 353-379, 1968.
  6. M.Vucetic, and R.Dobry, “Effect of soil plasticity on cyclic response,” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, 89-107, 1991.
  7. 김동수, 서원석, 권기철, “반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가,” 한국지반공학회논문집, 제21권, 제6호, 67-79, 2005.
  8. Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI). The Hualien Large Scale Seismic Test for Soil-Structure Interaction Research (Proposal on Strain Dependency of Stiffness Ratio and Damping Ratio of Soils for Dynamic Simulation Analysis), 42, 1998.
  9. 이세현, 추연욱, 김동수, “지반구조물의 내진성능평가를 위한 동적 원심모형시험 모델링 기법 연구,” 한국지진공학회, 2011년 추계워크샵 논문집, 569-608, 2011.
  10. Kim, Dong-Soo, Kim, Nam-Ryong, Choo, Yun-Wook and Cho Gye-Chun, “A newly developed state-of-the-Art geotechnical centrifuge in Korea,” KSCE Journal of Civil Engineering, Accepted, 2012. DOI 10.1007/s12205-013-1350-5