

지반 동적거동모델에 따른 부지응답해석 영향연구

Effect of Cyclic Soil Model on Seismic Site Response Analysis

이진선[†] · 노경도¹⁾

Jinsun Lee · Gyeongdo Noh

Received: September 2nd, 2015; Revised: September 14th, 2015; Accepted: October 28th, 2015

ABSTRACT : Nonlinear soil behavior before failure under dynamic loading is often implemented in a numerical analysis code by a mathematical fitting function model with Masing's rule. However, the model may show different behavior with an experimental results obtained from laboratory test in damping ratio corresponding secant shear modulus for a certain shear strain rage. The difference may come from an unique soil characteristics which is unable to implement by using the existing mathematical fitting model. As of now, several fitting models have been suggested to overcome the difference between model and real soil behavior but consequence of the difference in dynamic analysis is not reviewed yet. In this paper, the effect of the difference on site response was examined through nonlinear response history analysis. The analysis was verified and calibrated with well defined dynamic geotechnical centrifuge test. Site response analyses were performed with three mathematical fitting function models and compared with the centrifuge test results in prototype scale. The errors on peak ground acceleration between analysis and experiment getting increased as increasing the intensity of the input motion. In practical point of view, the analysis results of accuracy with the fitting model is not significant in low to mid input motion intensity.

Keywords : Site response analysis, Numerical analysis, Nonlinear behavior of soil, Damping ratio, Shear modulus

요 지 : 전단파괴 이전 지반의 동적비선형거동특성은 일반적으로 함수형 피팅모델과 Masing 법칙을 이용하여 수치해석프로그램에 사용된다. 그러나 대부분의 함수형 피팅모델은 특정 전단변형률 영역에서 실험결과 대비 전단탄성계수와 감쇠비의 오차를 유발하는 것이 일반적인 현상이다. 이러한 오차의 원인은 현재 피팅모델로 표현하기 어려운 지반재료의 고유 특성에 기인할 수 있다. 지금까지 상기 문제를 해결하기 위하여 몇몇 피팅모델이 제안되었으나, 오차의 영향이 지진 시 부지응답해석에 미치는 영향은 아직까지 구체적으로 검토된 바는 없다. 본 논문에서는 상기 영향 검토를 응답이력해석을 통하여 실시하였다. 세 개의 서로 다른 함수형 피팅 모델을 이용하여 부지응답해석을 시행하였으며, 그 결과는 동적원심모형시험 결과의 원형 계측치를 기준으로 검증을 실시하였다. 실험과 해석 간의 오차는 입력지진 크기가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있었다. 저-중간 강도의 입력지진 범위에서 함수형 피팅모델에 따른 해석의 정확도 차이는 실용적인 측면에 있어서 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있었다.

주요어 : 부지응답해석, 수치해석, 동적비선형거동, 감쇠비, 전단탄성계수

1. 서 론

현재 지반구조물의 국내 내진설계 기준은 국부적인 안정 검토(부재설계)의 경우 허용응력설계법, 전체 구조물의 안정조건은 한계상태 평형이론에 기반한 유사정적설계(Pseudo static design)를 기반으로 시행되고 있다. 허용응력설계법의 문제점은 하중의 불확실성을 재료 강도의 안전율만으로는 적절히 대처할 수 없다는 점과 재료의 허용응력과 재료 강도의 비로서 확보하고자 하는 안전율이 구조물의 안전을 적절히 반영하지 않는 데 있다. 유사정적설계법은 지진 시 강체운동에 의한 구조물의 영구변위를 허용하지 않는 것이 원칙이며, 일부 변위예측을 위하여 제안된 기법들(Yingwei &

Prakash, 2000; Newmark, 1965) 또한 단순 역학이론으로 유도된 간략식으로 신뢰성 있는 결과를 산출한다고 보기 어렵다.

반면, 최근 내진설계 분야에서 대두되고 있는 성능기반 설계법(Performance based design)은 구조물의 사용자, 소유자 또는 설계자가 목표성능(Performance goal)을 정의하고, 예상되는 지진운동에 대하여 일정량의 영구변위를 허용하는 선에서 목표성능을 달성할 수 있도록 하는 것을 설계목표로 한다. 지반구조물의 내진설계에 있어 성능기반 내진설계 기법이 조명받기 시작한 것은 1995년 한신대지진(고베지진, 1995.1.17, 리히터규모 7.3) 이후라 할 수 있다(Iai, 2001). 한신대지진 당시 막대한 피해를 입은 고베항 안벽구조물 피

[†] Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University (Corresponding Author : blueguy@wku.ac.kr)

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

해조사 결과, 기존의 설계방법으로 한신대지진과 같은 규모 (Level II 지진)에 대한 항만구조물의 설계가 불가함이 밝혀짐에 따라 일본에서는 이를 극복하기 위한 방안으로 성능기반 내진설계법 도입이 추진되었다(Nozu et al., 2004).

성능기반 내진설계기법을 도입하기 위해서는 동적해석을 시행하여 지진 시 영구변위를 신뢰성 있게 예측하여 이를 성능목표와 비교할 수 있어야 한다. 이를 위해 세계 각국에서는 신뢰성 있는 영구변위 예측연구가 활발히 시행 중에 있으며(Kalkan & Luco, 2011), 이를 위해서 다음의 조건들이 선행되어야 한다.

- (1) 사업부지 내 향후 발생 가능한 지진의 예측
 - 결정론적, 확률론적(DSHA : Deterministic Seismic Hazard Analysis, PSHA : Probabilistic Seismic Hazard Analysis) 지진재해 분석을 통한 설계지진의 결정
- (2) 검증된 수치해석 기법의 도입
 - 영구변위 예측을 위한 시간영역 비선형 수치해석의 도입

1960년대 이후 널리 사용되고 있는 선형 및 등가선형해석 기법은 지진 시 지반의 비선형 응력-변형률 거동을 등가의 선형재료로 단순 모델하여 주파수 영역에서 동적응답을 해석하는 기법이다. 따라서 지반의 전단변형에 따른 간극 변화 등 지반재료 고유의 동적거동특성을 반영하지 못하는 한계를 내포하고 있다. 이로 인하여 지진 종료 후 영구(잔류) 변위가 발생되지 않아 성능기반 내진설계에 적합하지 않은 해석기법이라 할 수 있다. 또한 지진응답에 영향을 미치는 지진파의 여러 특성 중 주파수 성분, 주기, 최대가속도 등 일부 요소만 해석에 유의미한 영향이 있어 진동 반복회수, 에너지 분포(Alias, Housner, RMS intensity 등), 속도 충격파 (Velocity pulse) 등의 영향평가를 위해서는 시간영역 직접적분법을 적용한 비선형 응답이력해석(이하 RHA, Response History Analysis)을 수행하여야 한다. 따라서 성능기반 내진설계의 도입을 위해서는 지진 후 영구변위 예측 및 지진파의 특성이 반영 가능한 해석기법이 도입되어야 하며, 이때 해석기법이 갖추어야 할 조건은 다음과 같다.

- (1) 지반재료의 동적비선형 응력-변형률 모델 제공
 - 전단파괴 이전 변형률 영역에서 비선형 거동 및 반복 하중에 대한 이력감쇠(Hysteretic damping)발생
- (2) 전단변형에 따른 간극변화 모델 제공
 - 액상화, 동적경화(Cyclic hardening) 및 연화(Cyclic degradation) 현상 발생

현재 상기 조건을 만족시키는 RHA는 대부분 시간영역 직접적분법을 적용하고 있으며, 양해법(Explicit method) 또는 음해법(Implicit method)을 이용하여 시간 순차적으로 동적응답을 계산한다(Dokainish & Subbaraj, 1989; Subbaraj & Dokainish, 1989). 이때 지반의 동적비선형 거동은 전단 파괴 이전과 파괴 이후의 변형률 영역에서 각각 Masing 법칙을 적용한 함수형 비선형 모델과 소성 거동모델을 적용할 수 있다. 일부 지반모델의 경우 전단변형률 전 영역에 걸친 소성 경화/연화 모델을 사용하기도 하나, 모델 구성을 위한 필요변수가 과다해지는 단점을 가지고 있다(Prevost, 1982).

반복하중에 대한 지반재료의 거동을 수치 모델화하는 데 있어서 단순하중(Monotonic loading)에 대한 응력-변형률 관계를 기준으로 이력 감쇠를 계산 시 실험결과와 감쇠비의 차이가 발생하게 된다. 이는 함수형 피팅모델의 정확도 및 지반재료의 특성에 일부 기인하는 것으로 추정되고 있으며, 둘 사이의 차이를 극복하기 위한 여러 모델이 제안되었으나 모델선택이 지진응답에 미치는 영향은 아직까지 명확하게 규명되지 않은 부분이다. 따라서 본 논문에서는 비선형 RHA 결과에 영향을 미치는 주요 요소 중 지반의 비선형모델 선택에 따른 영향 정도를 살펴보고자 한다. 이를 위하여 동적 원심모형시험의 원형을 기준으로 수치해석 모델을 구성하고 실험계측 결과를 기준으로 모델별 동적거동 영향을 평가하였다.

2. 연구동향

부지응답해석의 신뢰성에 대한 연구는 지난 수 십여 년간 지속된 연구분야이다. 초기에는 SHAKE91으로 대표되는 등가선형해석의 신뢰성에 대한 연구가 대부분이었다. 대표적인 연구사례로는 Northridge 지진의 암반 노두와 지표면 자유장 계측기록을 이용한 검증사례가 있다(Idriss, 1993). 이후 대부분의 연구는 등가선형해석으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 없는 사례 해결에 집중되었으며, 이를 위하여 많은 연구와 결과물(해석프로그램)이 제안되었다. 대표적인 연구 사례와 프로그램에 대한 검증은 Stewart 등의 연구가 대표적이며, 등가선형해석 시 발생하는 등가전단변형률의 문제, 이력감쇠의 Rayleigh damping 모델 시 주파수 종속문제 등이 해결해야 할 주된 문제점으로 언급되고 있다(Stewart et al., 2008).

현시점에서 비선형 RHA가 액상화 등 지반재료 고유의 거동특성을 포함하여 실제에 가장 근접한 결과를 나타낼 수 있다는 사실은 대부분의 연구자들이 공감하는 사실이며, Deconvolution 등 특별한 목적을 제외하면 시간영역 비선

형해석과 등가선형해석 간의 차이(해석의 난이도, 소요시간 등)는 사실상 빠르게 소멸되고 있다고 할 수 있다. 다만 실험결과로 얻어진 지반의 동적비선형 거동특성을 직접 사용하는 등가선형해석과는 다르게 비선형 RHA는 수치거동모델로 근사화하여 적용함에 따라 발생하는 실험-모델 간 오차의 영향은 반드시 규명되어야 할 사항이다.

비선형 RHA에서 가장 많이 사용되는 지반의 비선형모델은 Hardin이 제안한 쌍곡선함수(Hardin & Drnevich, 1972)가 대표적이며, 이외에도 지반의 비선형성을 표현할 수 있는 여러 종류의 “S, Sigmoidal”형 함수들이 제안되었다(Streeter et al., 1974; Purzin & Shiran, 2000). 그러나 대부분의 연구가 실내실험결과와 비선형 모델 간의 차이에 직접 초점을 맞추고 있어 비선형 모델에 따른 비선형 RHA(부지응답해석) 영향 정도를 심도 있게 연구한 결과는 찾아보기 어려운 실정이다. 최근 Phillips와 Hashash는 점성감쇠식과 Masing 법칙의 보정기법을 제안, 각각 1차원 등가선형해석과 비선형 해석에 적용하여 그 영향을 살펴본 바 있다(Phillips & Hashash, 2009).

본 논문에서는 기존 제안된 지반의 동적비선형거동 모델의 시간영역 비선형 부지응답해석에 미치는 영향을 파악하기 위하여 동적원심모형 시험으로 얻어진 건조 사질토 지반의 부지응답실험을 실시하였다. 동적원심모형 시험은 현지점에서 상세부지조사를 포함하여 가장 이상적인 지진 응답 해석결과를 획득할 수 있는 시험기법으로 본 논문의 연구결과는 향후 지반구조물의 비선형 RHA를 위한 지반모델 선정에 중요한 참고자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 비선형 지반거동 - 실험과 모델

지반의 동적비선형 거동특성은 공진주 또는 비틀 전단시험 등 실내실험으로부터 획득하는 것이 일반적인 방법이다. 이렇게 획득된 거동특성은 정규화 전단탄성계수(G/G_{max}) 감소 곡선과 감쇠비 감소 곡선으로 표현하게 되며 대부분의 수치거동모델은 전단탄성계수 감소 곡선을 기준으로 피팅하여 완성된다. 이렇게 피팅된 함수는 응력-변형률 곡선의 할선 전단탄성계수(Secant shear modulus)를 나타내며, 이로부터 재료의 초기재하곡선($\tau = f(\gamma)$, Initial loading curve, backbone curve)을 구성할 수 있다(Fig. 1). 이렇게 구성된 초기재하곡선으로부터 반복하중에 대한 Masing 법칙(Pyke, 1979)을 적용하면 Fig. 1과 같은 이력곡선(Hysteresis loop)이 형성되므로 이로부터 지반의 감쇠비는 Eq. (1)과 같이 계산 가능하다.

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (1)$$

상기 방법으로 얻어진 전단변형률에 따른 지반의 감쇠비는 실내실험으로 얻어진 감쇠비와 비교하면 일반적으로 Fig. 2와 같은 양상을 나타낸다(Fig. 2). 대표적인 차이를 설명하면 선형탄성거동 영역에서 최소감쇠비 재현이 불가하여 실제보다 적은 감쇠비를 나타내게 되며, 변형률이 증가함에 따라 실제보다 큰 감쇠비를 나타내게 된다. 이는 함수형 피팅모델의 정확도 및 지반재료의 특성에 일부 기인하는 것으로 현재까지 추정되는 원인을 정리하면 다음과 같다.

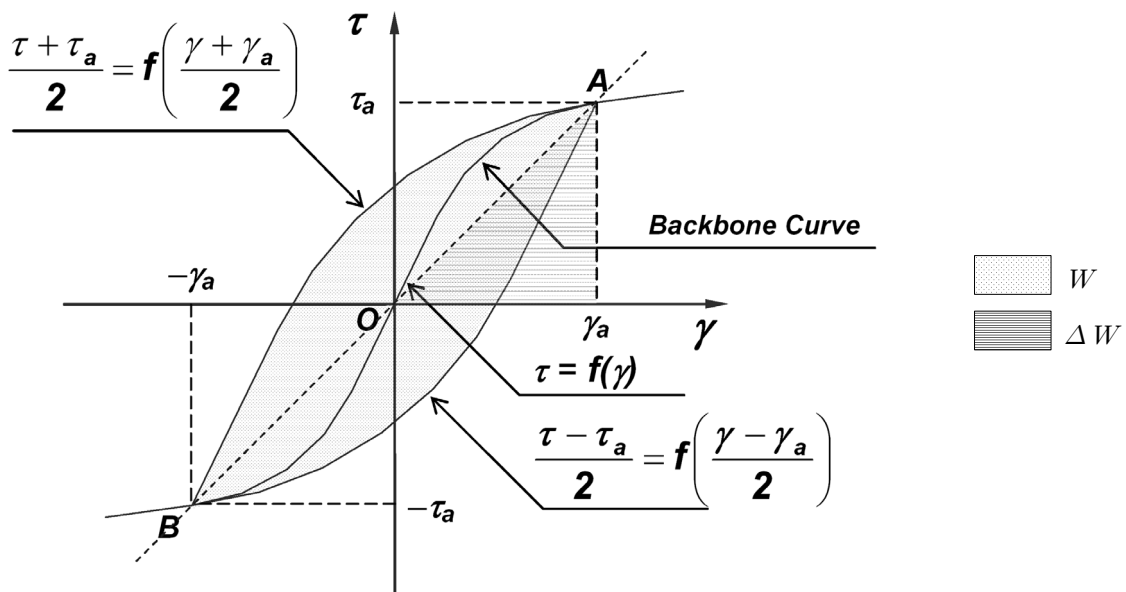


Fig. 1. Definition of masing rule (τ_a, γ_a = reversal stress and strain, respectively)

(i) 최소감쇠비

- 선형탄성 영역(전단변형률 약 $1 \times 10^{-3}\%$ 이하)에서 반복 하중에 대한 비선형모델의 에너지 감소는 발생할 수 없음
- 실내실험의 경우 선형탄성 영역에서도 1~3% 정도의 최소감쇠비 발생

(ii) 중~고변형률 영역(전단변형률 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}\%$)에서 감쇠비 차이

- 실내실험 - 비선형 모델 간 감쇠비 산정방식 차이
 - Logarithmic decrement(실험), Hysteretic damping calculation(실험, 모델)
- 실내실험기의 시스템 감쇠비 보정문제

이 중 최소감쇠비 차이는 비선형 RHA 시 Rayleigh 감쇠 등의 추가로 인위적인 최소감쇠비 발생이 가능하나, 주파수에 따른 감쇠비 변화 영향은 고려되어야 한다(Park & Hashash, 2004). 그러나 중~고변형률 영역에서 발생하는 실내실험과의 감쇠비 차이는 명확한 규명이 되지 않아 추후 연구가 필요한 사항이다.

4. 동적원심모형 실험

지반은 동일지반이라도 구속응력이 달라짐에 따라 다른 거동을 보이는 특징이 있다. 따라서 실험 시 현장 응력상태의 모사는 매우 중요한 사항이나, 실제로 현장의 깊이별 응력상태를 축소모형을 통하여 재현하는 것은 매우 어려운 일이다. 이를 극복하기 위하여 고안된 원심모형 실험은 1/N 크기 축소모형에 원심력을 가하여 회전중심에서 원주방향으로 N배에 해당하는 중력가속도를 적용하여 현장의 응력상태를 모사하는 실험이다. 원형과 축소모형 간 물리량의 비가 동일하다면 같다고 볼 수 있는 기본적인 상사법칙의 원리는 Fig. 3과 같으며, Table 1은 상사법칙에 사용되는 각

Table 1. Scaling factors in centrifuge test

Properties	Scaling factor	Properties	Scaling factor
Stress	1	Force, Load	N^{-2}
Density	1	Mass	N^{-3}
Length, Displacement	N^{-1}	Diffusion time	N^{-2}
Gravity	N	Stress wave	1
Strain	1	Acceleration	N

Note : N = number of g's

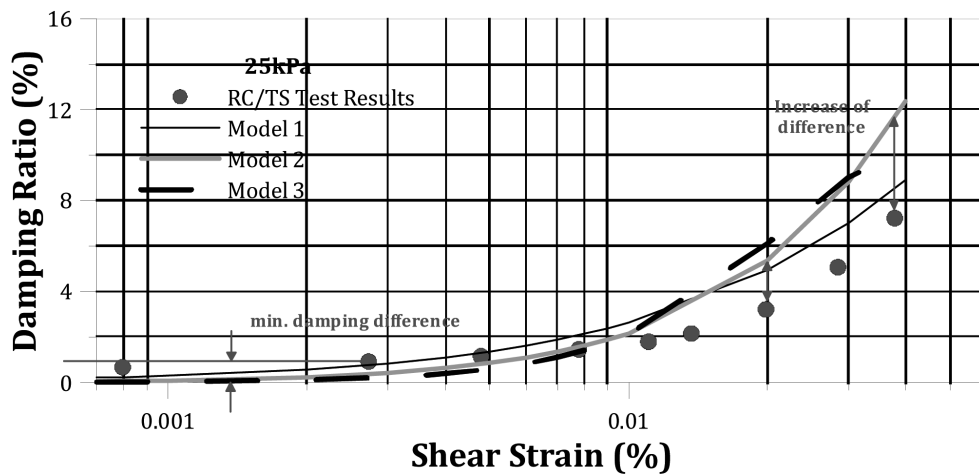


Fig. 2. Difference in damping ratio between experimental data and model behavior

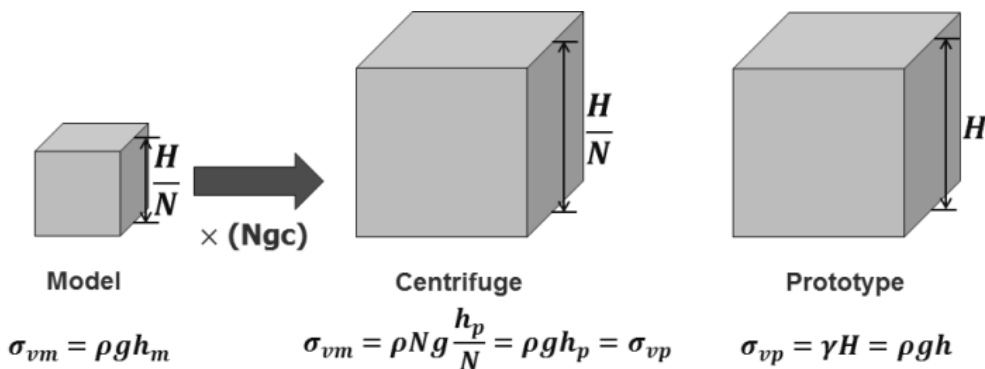


Fig. 3. Fundamental concept in scaling law

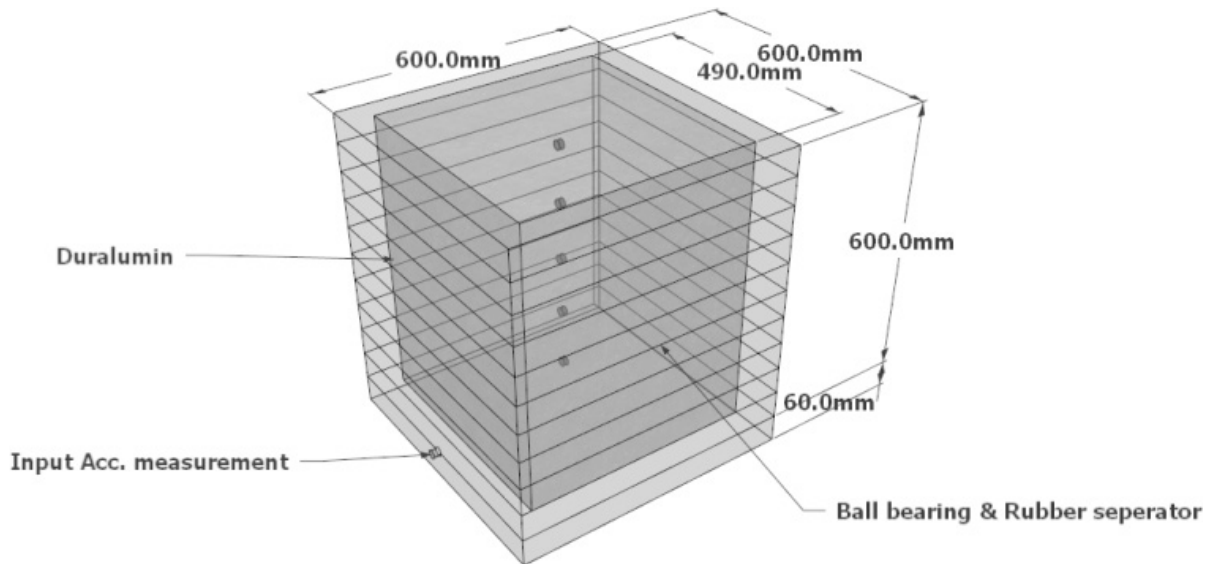


Fig. 4. Schematic diagram of ESB box (Model scale)

Table 2. Accelerometer specifications used in centrifuge test

Frequency range ($\pm 5\%$)	1 to 10,000 Hz
Frequency range ($\pm 10\%$)	0.7 to 17,000 Hz
Frequency range (± 3 dB)	0.35 to 30,000 Hz
Resonant frequency	≥ 70 kHz

물리량의 상사계수이다(Schofield, 1980).

본 논문에서는 지반의 동적비선형거동 모델별 부지응답 해석 영향을 파악하기 위하여 KOCED(Korea Construction Engineering Development) 지오센트리퓨지 실험센터에서 수행된 동적원심모형 시험 결과를 사용하였다. 지진 시 지반의 무한 경계 조건을 구현하기 위하여 ESB(Equivalent Shear Beam) 박스 내부에 지반을 조성하였고, 사용된 ESB 박스의 내부크기는 490×490×630mm(가로, 세로, 높이)이고, 측벽은 듀랄루민판 사이가 볼 베어링과 고무판(Rubber separator)으로 연결된 구조로 원심가속도 20g, 40g 하에서 가로/세로 9.8m, 깊이 12m와 19.6m, 24m인 지반을 각각 재현 가능하다(Fig. 4).

지반은 상대밀도 85%, 단위중량 15.21kN/m³, 내부마찰각 43°인 건조 규사를 이용하여 모사하였다. 시험은 원심가속도 20g 하에서 수행되었으며, 가속도계를 이용하여 지표면 하 깊이별 가속도를 측정하였다. 가속도계의 주파수 대역폭에 대한 사양은 Table 2에 나타나 있다. 깊이별 지반의 전단파 속도는 실험대상 원심가속도 하에서 벤더엘레먼트를 이용하여 수평공내탄성파탐사(Cross hole)법으로 계속되었다. 측정된 전단파속도 주상도는 Fig. 5와 같으며 사질토의 특성상 구속압에 따라 증가하는 양상을 보여준다. 입력지진으로 사용된 지진파는 Northridge 지진(미국, Northridge, 01/17/94; 스

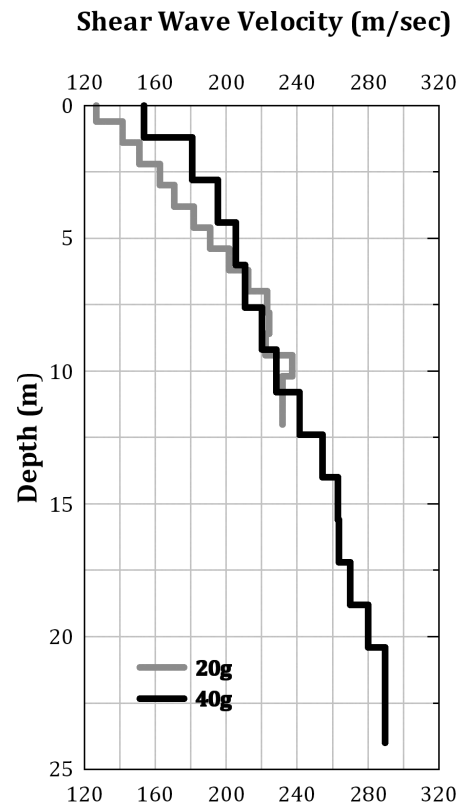


Fig. 5. Shear wave velocity profile of the model site under centrifugal acceleration (20 and 40 g)

테이션 : Pacoima dam, upper left abut 104(CDMG station24207)) 과 Kobe 지진(일본, Kobe, 95/01/16; 스테이션 : KJMA090)을 전체 실험 시스템의 안정성 확보를 위하여 Band-pass 필터를 적용하여 사용하였다. 필터링은 원 지진파의 주기 및 주파수대역이 크게 차이나지 않는 범위에서 이루어졌으며, Fig. 6은 필터링 전 Kobe, Northridge 지진의 시간이력곡선

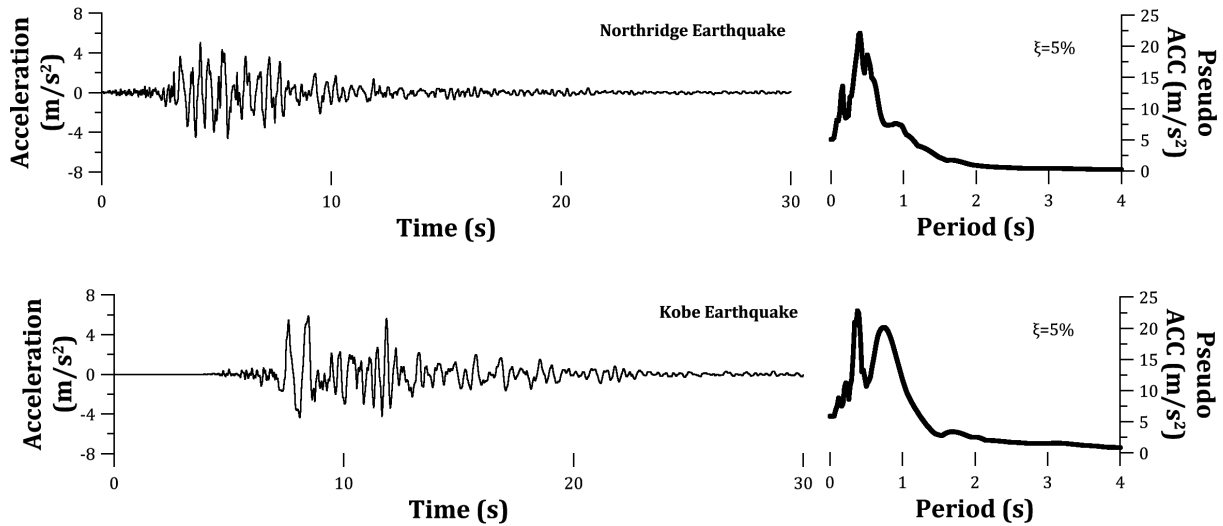


Fig. 6. Characteristics of the input earthquake motions

과 응답스펙트럼을 나타내고 있다.

입력지진은 ESB 하단부에 가진 되었다. 실험은 입력지진 최대가속도를 증가시키며 단계별로 시행되어 원심가속도 20g 하에서 총 24회, 40g 하에서 총 14회 실험이 이루어졌다. 모형지반의 지진응답은 지표면 자유장을 포함하여 깊이별로 매설된 가속도계(Table 2)를 이용하여 계측되었으며, 계측된 모든 결과는 상사법칙을 적용한 원형의 가속도 응답으로 본 논문에서 제시되어 있다.

5. 수치해석

본 연구에선 비선형 지반거동모델에 따른 비선형 RHA 영향을 파악하기 위하여 유한차분법(Finite difference method)을 적용한 범용 2차원 수치해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용하였다. FLAC 2D는 시간영역 직접적분법을 적용하여 관성력을 포함한 연속체의 외력에 대한 응답을 계산할 수 있으며, 지반 내 지하수 침투해석을 동시에 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 본 연구에서 시행하고자 하는 지반의 동적해석은 재료 및 기하비선형, 비정상하중(Transient) 및 대변형 문제를 포함함으로써 인하여 강성행렬(Global stiffness matrix)을 구성하지 않고 수치적으로 풀이할 수 있는 유한차분해석프로그램을 선정하였다.

선정된 해석기법은 비선형 해석 시 양해법(Explicit method)을 적용하므로 운동방정식의 해가 안정적으로 수렴하기 위한 최소해석 간격으로 시간적분을 시행하여야 한다. 이로 인하여 해석에 소요되는 시간이 길어진다는 단점을 가지고 있으나, 반대로 지진과 같은 비정상(Transient) 하중에 대하여 안정된 해석결과를 도출할 수 있는 장점이 되기도 한다

(Dokainish & Subbaraj, 1989).

본 논문에서 사용된 수치해석 모델은 원심모형시험의 원형 크기로 구성되었으며 가진방향에 대하여 2차원 모델링을 실시하였다. 시간영역 직접적분을 이용한 해석 시, 유한차분 격자(Grid)의 크기에 따라 인접 격자로 전달되는 파동의 주파수 대역이 달라지게 된다(Kuhlemeyer & Lysmer, 1973). 따라서 주파수에 따른 유한차분 격자의 최소 크기는 Eq. (1)과 같이 정의된다. 본 논문에서는 한 변의 길이를 최소 30cm로 지반을 격자 모델링 하였고, 이는 최대 16Hz 이하의 파동이 전파 가능하여 원심모형시험에서 적용한 지진의 주파수대역을 대부분 전달할 수 있는 대역이다. 전체 모델은 원심가속도 20, 40g에 대해서 각각 170, 680개의 격자로 구성되었으며, 가로 10, 20, 세로 17, 34개로 분할하였다.

$$f \leq \frac{V_s}{10 \times \Delta l}, \quad \Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (2)$$

여기서 Δl : 직사각형 요소의 대각길이

λ, f : 전파 가능한 파장 및 주파수

v_s : 매질의 전단파속도

수평전파되는 지진파의 반사를 막기 위한 ESB의 수치경계조건으로 수평경계면에 Lysmer가 제안한 자유장 요소(Free field element)를 적용하였다. Lysmer가 제안한 무한요소는 시간영역 직접적분법 시 적용할 수 있도록 고안되었으며, 경사각을 가지고 입사되는 파동에 대하여 적절한 감쇠가 이루어지지 못하는 단점을 가지고 있다(Lysmer & Kuhlemeyer, 1969). 하단경계는 지표면 자유장으로부터 전달된 반사파의 흡수가 가능하도록 점성감쇠장치로 이루어진 반무한 탄

성압반으로 모델링 되었다(Lee, 2013)(Fig. 7).

소성파괴 이전 지반의 동적비선형거동은 함수형 피팅 모델과 Masing Rule을 적용하여 모사 가능하다. FLAC 2D에서는 총 4개의 정규화 전단탄성계수 피팅모델을 제공하며 본 논문에서는 이들 중 건조 규사의 비선형성을 가장 잘 나타낼 수 있는 3개의 피팅모델(Model 1, 2, 3)을 사용하였다(Table 3). Model 1은 쌍곡선함수이며, Model 2, 3은 지수 그리고 Model 4는 로그함수로 함수의 형상에 변화를 줄 수 있는 변수는 1~4개로 구성되어 있다. 비교적 저변형률 영역에서 피팅모델별 차이는 크지 않으나, 전단변형률이 증가할수록 모델별 차이가 커지는 특징을 보인다(Fig. 8). 일반적인

로 피팅모델은 매개변수가 증가할수록 비교적 정확한 피팅 결과를 나타낼 수 있으나, 이는 미소~중변형률 영역(전단변형률 : $10^{-3} \sim 0.1\%$)에 국한된 사항으로 함수별 고유의 형상으로 인한 지반종류별 피팅 결과 차이가 발생할 수 있으며, 중~대변형률 영역(0.1~1%)에서 나타나는 감쇠비 곡선의 형상 차이가 비선형 RHA에 미치는 영향은 해석을 통하여 파악할 필요가 있다. 본 논문에서 적용하지 않은 Model 4는 전단탄성계수 변화율이 0이 되는 두 개의 참조변형률(Reference strain, L_1, L_2) 중 고변형률 참조점 선정이 불가하여 본 연구에서 제외하였다.

구속압을 달리하며 공진주/비틀 전단시험(RC, Resoant Column/

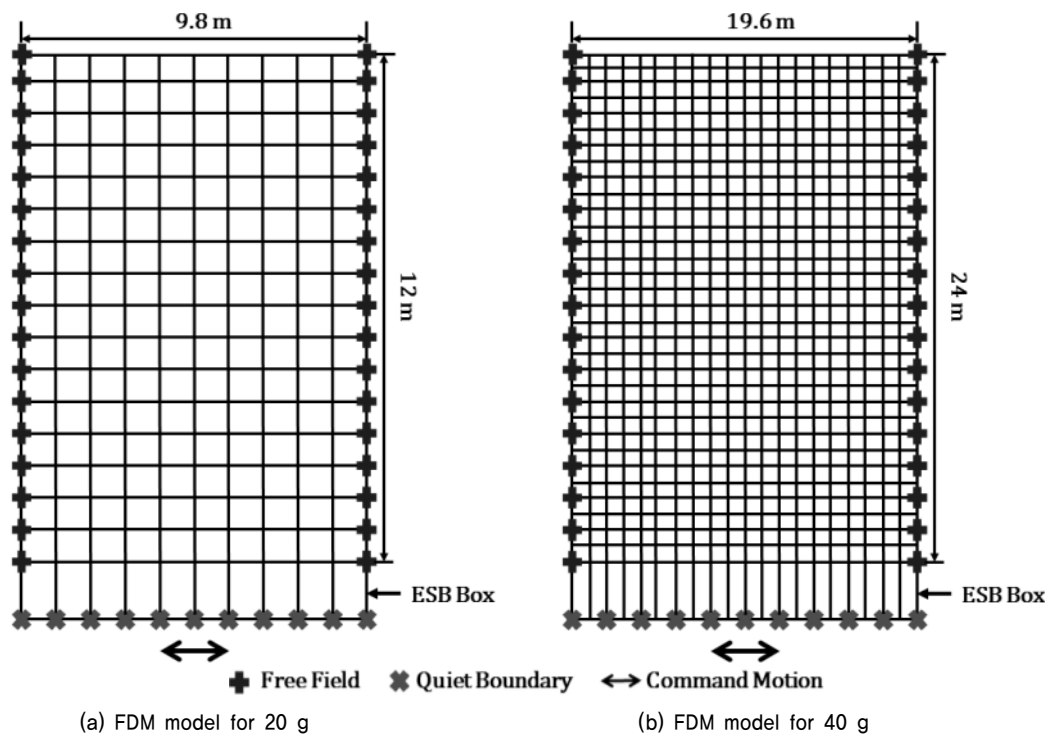


Fig. 7. Numerical model and boundary condition (prototype scale)

Table 3. Mathematical fitting function models for cyclic soil behavior in FLAC analysis

Model No.	Equation	Note
Model 1	$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}}$	Hyperbolic (Hardin & Drnevich, 1972)
Model 2	$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{a}{1 + \exp\left(-\left(\frac{\log_{10}\gamma - x_0}{b}\right)\right)}$	Sigmoidal (Itasca, 2011) (parameters : a, x_0, b)
Model 3	$\frac{G}{G_{\max}} = y_0 + \frac{a}{1 + \exp\left(-\left(\frac{\log_{10}\gamma - x_0}{b}\right)\right)}$	Sigmoidal (Itasca, 2011) (parameters : a, x_0, y_0, b)
Model 4	$\frac{G}{G_{\max}} = s^2(3 - 2s), s = \frac{L_2 - L}{L_2 - L_1}, L = \log_{10}\gamma$	Logarithmic (Itasca, 2011) (parameters : L_2, L_1)

γ : Shear strain, γ_{ref} : Reference strain[9], G : Shear modulus, G_{\max} : Max. shear modulus
 L_2, L_1 : The values at which the tangent slope becomes zero

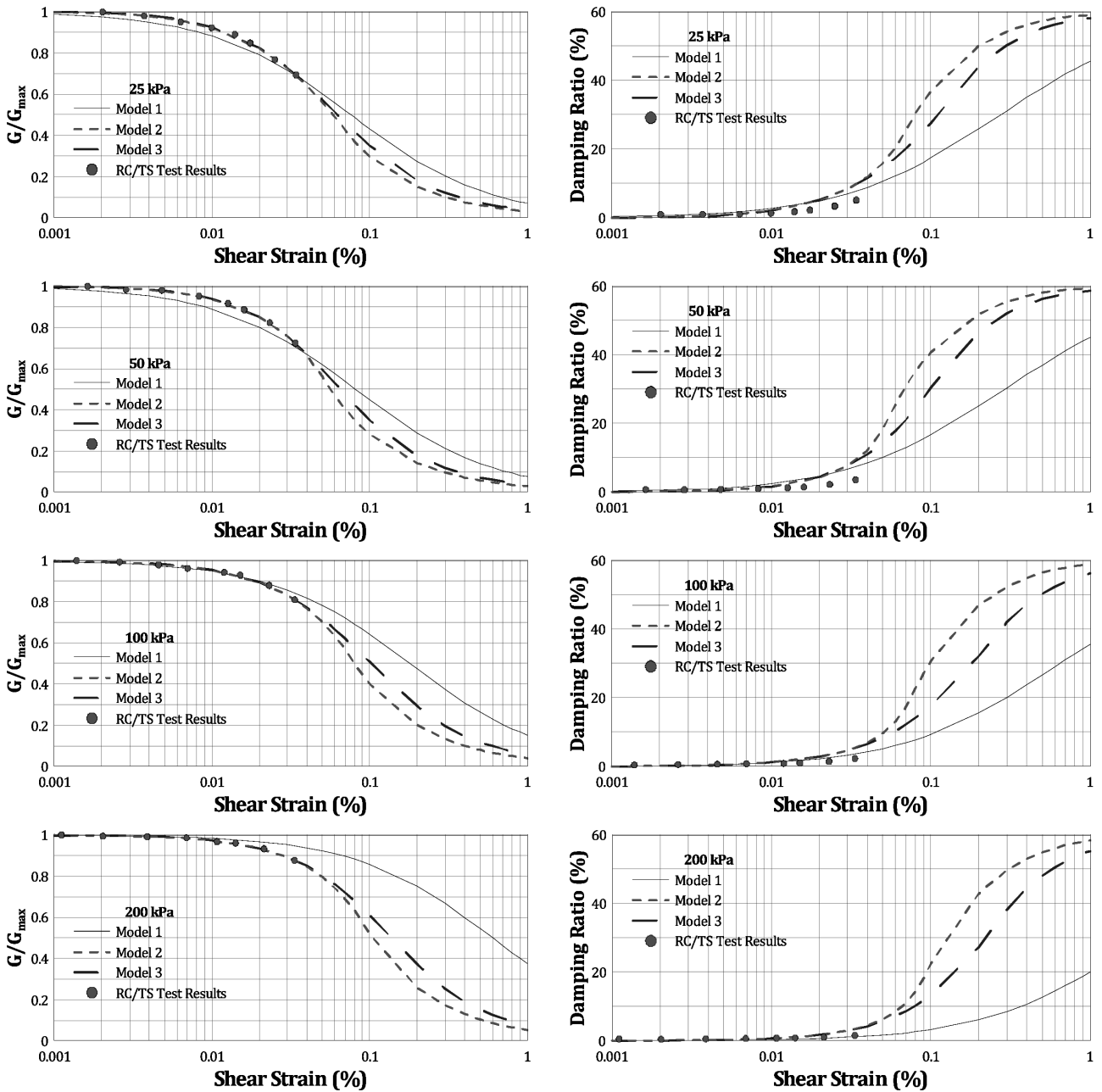


Fig. 8. Shear modulus and damping ratio fitting results of dry silica sand

TS, Torsional Shear)을 실시하여 획득한 건조규사의 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 피팅 된 모델을 Fig. 8에 도시하였다. 여기서 Model 1의 매개변수인 참조변형률(γ_{ref})은 $G/G_{max}=0.5$ 를 기준으로 산정하는 것이 원칙이나, 실내실험으로 획득 가능한 변형률 범위를 벗어나므로 전단탄성계수 감소 추이로부터 추정하여 사용하였다. Model 2, 3의 경우 전단변형률이 증가할수록 감쇠비의 크기가 실험결과보다 급격히 증가함을 알 수 있다. 지반의 소성파괴 기준은 수평 지반의 자유장 응답해석임을 고려하여 적용하지 않았다. 미소변형률 영역에서 반복하중에 의한 지반의 최소감쇠비를 발생시키기 위하여 질량과 강성 모두에 비례하는 Rayleigh

감쇠를 추가하였으며, Rayleigh 감쇠의 주파수종속 특성을 고려하여 비교적 일정한 감쇠비를 발생시키기 위한 중심주파수(Center frequency)는 원심가속도 20, 40g에 대해서 각각 모델 지반의 1차 공진주파수와 동일한 4.5, 2.25Hz로 설정하였다.

이렇게 구성된 수치모델은 우선 1g 중력장, 고정단 경계 조건하 정적평형으로 지중 초기응력을 계산 후 모든 유한차분 격자에 대하여 내장루틴을 작성하여 구속압에 따른 비선형 피팅모델을 재설정하여 최종 정적평형상태를 유지하였다. 동해석에 앞서 고정단 경계조건의 제거와 자유장 요소의 정의 그리고 기하비선형 고려를 위한 라그랑지안 좌표계

변환을 실시하였다. 입력지진 경계조건은 반사파에 의한 입력지진파 왜곡을 최소화하기 위하여 반무한 탄성경계조건을 적용하였다(Lee, 2013; Mejia & Dawson, 2006). 이때 입사파는 Eq. (3)을 이용하여 응력이력으로 변환되어 최하단 격자에 작용하게 된다.

$$\tau(t) = 2(\rho v_s) \dot{u}(t) \quad (3)$$

- 여기서 $\tau(t)$: 전단응력시간이력
 ρ : 매질의 밀도(가진위치)
 v_s : 매질의 전단파속도(가진위치)
 $\dot{u}(t)$: 입력지진운동속도이력

6. 수치해석 결과분석

6.1 지표면 자유장 가속도 시간이력

지반모델별 비선형 RHA 영향분석은 지표면 자유장 가속도 계측기록을 기준으로 시행하였다. 세 개의 지반모델 사용결과 모두 동적원심모형 시험 계측값과 비교적 유사한 가속도 시간이력을 나타내었으나, 입력지진의 크기가 커짐에 따라 즉 지반이 겪게 되는 변형률이 증가함에 따라 해석오차가 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 9는 대표적인 해석결과로 지표면 자유장 가속도 시간이력을 도시하였다. 지반모델별 차이는 대부분 응답가속도가 커지는 시점에 나타나며, Model 2를 제외한 나머지 두 개의 모델은 동적원심모형

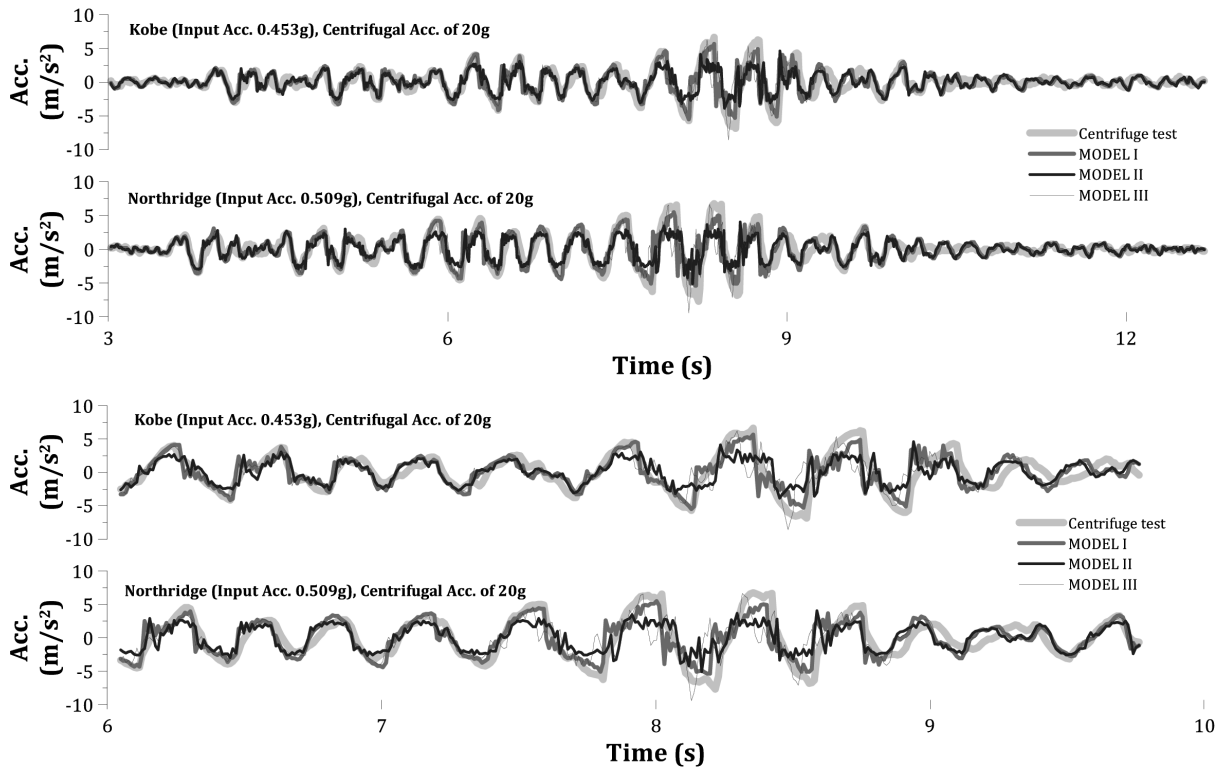


Fig. 9. Typical comparison of time histories between the centrifuge test and nonlinear RHA with mathematical fitting function models

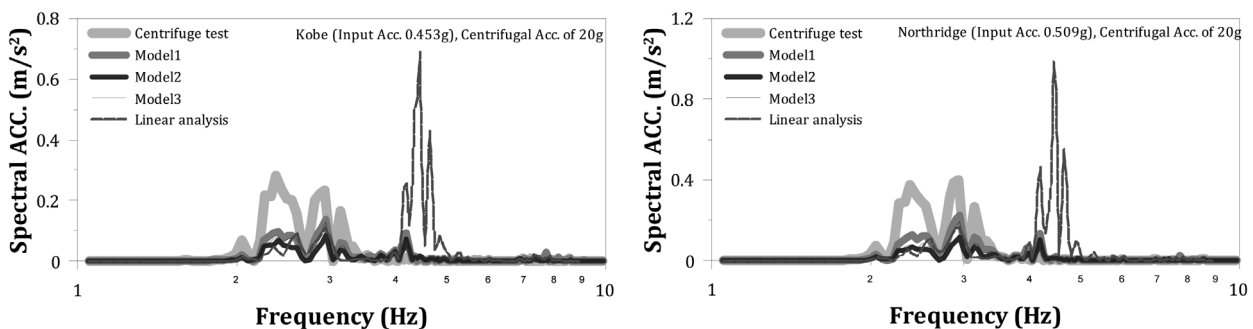


Fig. 10. Typical comparison of spectral acceleration between the centrifuge test and nonlinear RHA with mathematical fitting function models

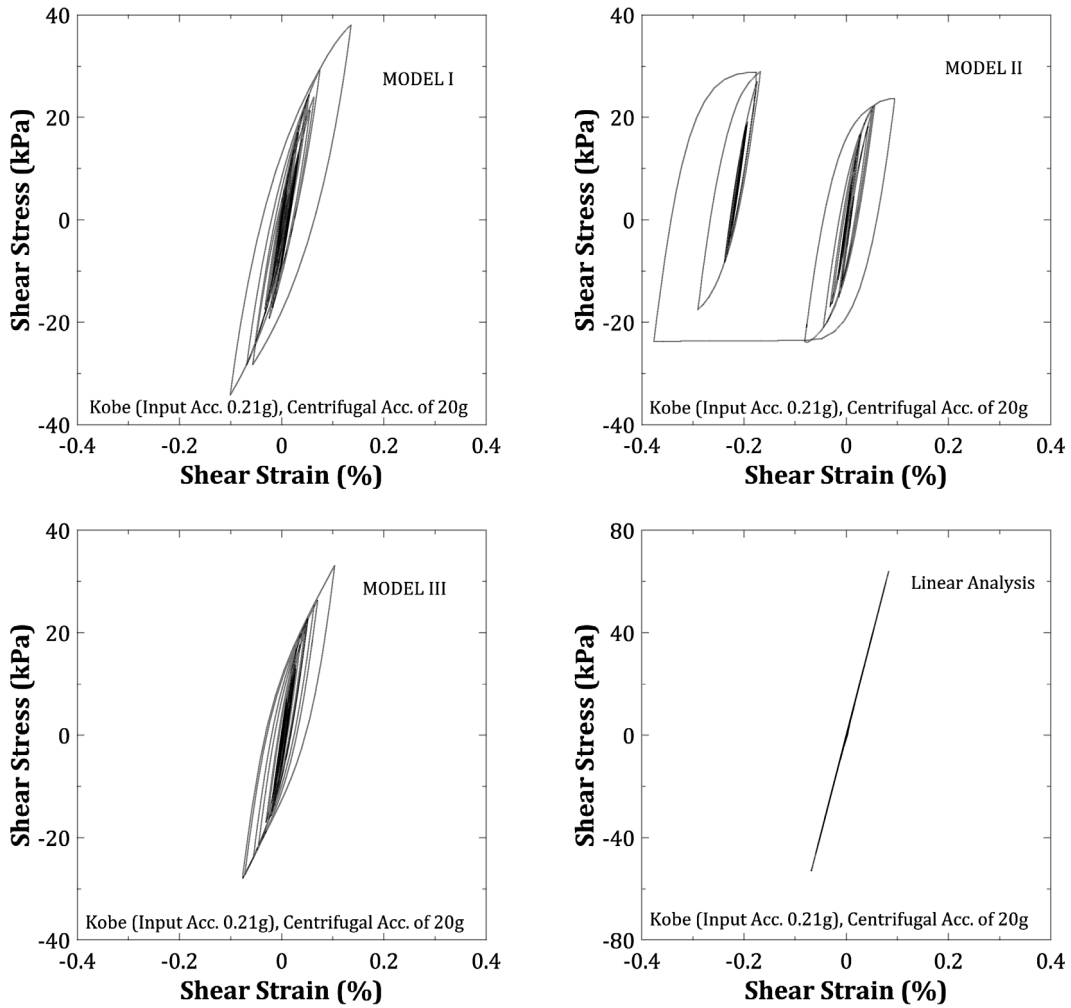


Fig. 11. Typical comparison of hysteresis loop from RHA with mathematical fitting function models

시험과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 지표면 자유장 가속도 시간이력의 응답스펙트럼으로 선형해석의 경우 비선형해석과 달리 지반의 1차 공진주파수인 4.5Hz 주파수 대역의 에너지가 탁월함을 보여주고 있다. 이는 지반의 비선형 거동에 따른 공진주기의 연장효과를 반영하지 못하는 이유이다. 비선형 RHA에 사용된 모델별 스펙트럼의 차이는 유의미하지 않으나, 모든 경우 동적원심모형 시험결과와 비교 시 2Hz 대역의 에너지 증폭이 상대적으로 적게 발생함을 알 수 있다. 이는 Fig. 8의 감쇠비 비교곡선으로 추정 시 피팅모델로 발생하는 이력감쇠의 크기 추이가 고변형률 영역으로 갈수록 실험값 대비 증가하는 특성에 기인한다고 할 수 있다.

6.2 응력-변형률 곡선

지반의 응력-변형률 곡선의 형상은 비선형 RHA 시 접선 탄성계수의 변화로 운동방정식에 반영되어 지진응답해석 결과에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 원심가속도

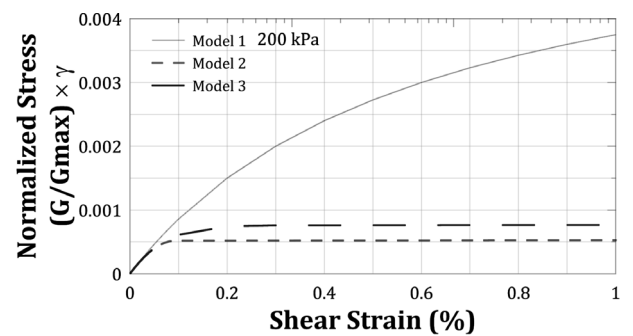


Fig. 12. Strain-stress relationship of dry silica sand with mathematical fitting function models

20g 모델의 중앙부(깊이 6m)에서 모델별 응력-변형률 관계를 Fig. 11에 도시하였다. 선형모델을 제외한 세 개의 비선형 모델 모두 지반의 비선형거동에 따른 이력감쇠를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 모델에 따른 이력곡선의 형상에 차이가 발생함을 알 수 있다. 특히 Model 2의 경우 전단파괴 형태의 소성흐름이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 12에 도시된 바와 같이 전단변형률 0.1% 인근에서 접

선탄성계수가 0에 수렴하기 때문에 동일 전단변형률에서 모델별 정규화 전단탄성계수 차이(Fig. 8) 대비 접선탄성계수 차이의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 이에 따라 현재 시행 중인 미소변형률 영역의 실내시험보다 큰 변형률 영역에서 지반거동특성을 신뢰성 있게 획득하여 적합한 피팅모델을 선정할 필요가 있으며, 시간이력 비선형해석프로그램을 이용한 지반구조물의 성능기반설계는 지반모델 선택에 따라 성능목표(잔류변위)의 평가에 차이가 날 수 있음을 충분히 예상할 수 있다. 또한 지반을 선형탄성재료로 모델링한 경우 비선형 지반 특성을 반영하지 못할뿐더러 지진 시 지반의 응답을 정확히 예측하지 못하게 된다.

6.3 입력하중-해석오차 상관관계

본 절에서는 입력지진가속도 크기변화에 따른 모델별 해석오차 추이를 살펴보았다. 오차의 기준은 원심모형시험 시 계측된 최대 지표면 자유장 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)로 정의하여 이에 상응하는 수치해석 결과의 차로 평가하였다. Fig. 13은 평가결과이며 해석결과치가 그

래프상 1:1선에 위치 시 실험과 동일한 최대가속도가 나타난다고 할 수 있다. 원심가속도와 입력지진파형을 달리하여 시행된 총 4가지 경우에 대해서 공히 4개의 매개변수를 사용하는 Model 3의 해석결과가 실험과 유사한 결과를 나타내었으며, 입력지진의 크기가 커질수록 3개의 매개변수를 사용하는 Model 2의 오차는 증가하였다. 실내실험결과만을 비교 시(Fig. 8) 매개변수가 많을수록 더 정확한 피팅이 가능하나, 부지응답해석결과와의 오차는 실내실험의 변형률 범위(0.1% 이하)를 벗어나는 영역의 거동차이로 인한 오차가 발생함을 알 수 있다. 또한 Model 2의 오차증가는 Fig. 12에서 살펴본 바와 같이 접선탄성계수의 급격한 감소로 유발되는 변형률 증가에 기인한 것으로 판단된다. 반면 현재 상용 비선형 RHA 프로그램에 가장 많이 사용되고 있는 Model 1(Hardin & Drnevich, 1972)은 1개의 매개변수를 사용함에도 불구하고 만족할 만한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

현시점에서 지반의 미소~고변형률 영역(전단변형률 : $10^{-3} \sim 1\%$) 전반에 걸친 지반의 거동을 단일 실험기법으로 획득하는 것은 불가능함에 따라, 대부분의 지반모델의 피팅은

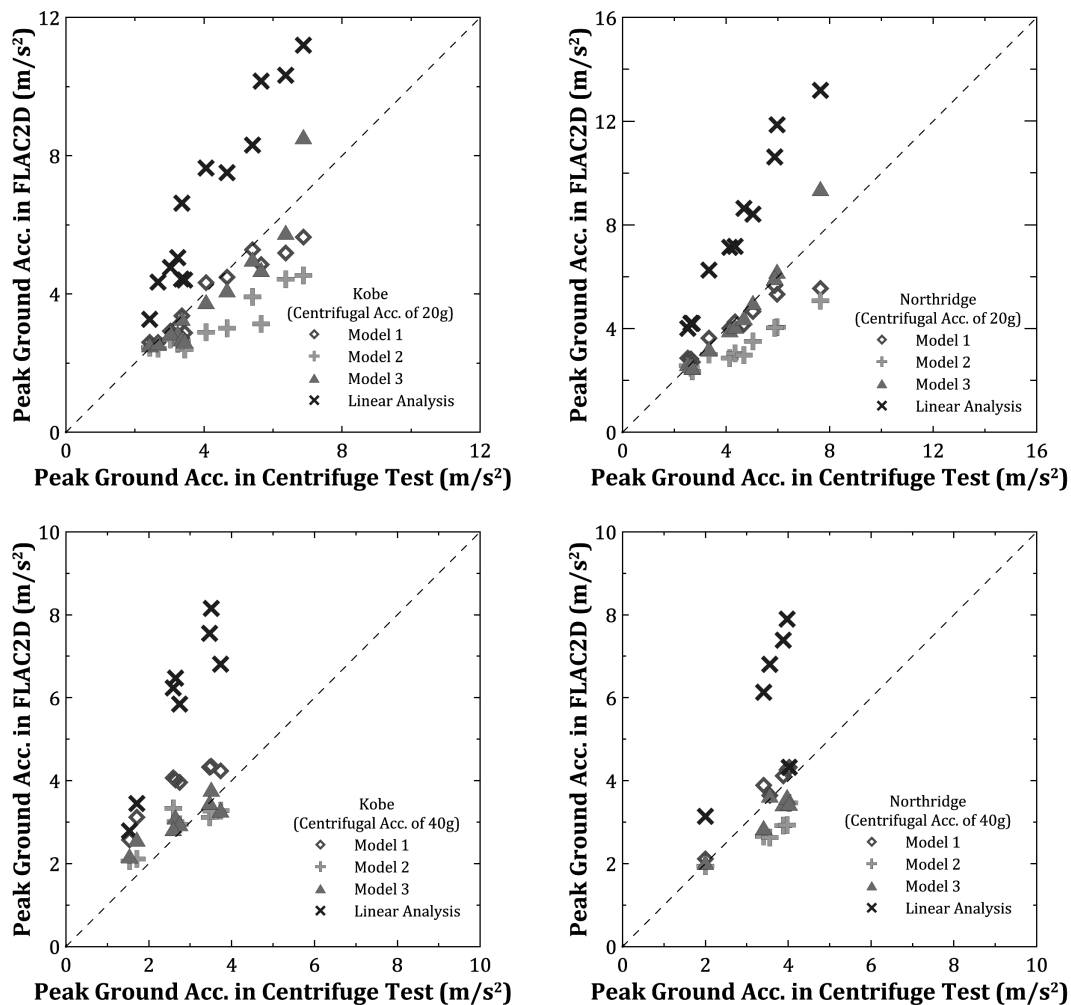


Fig. 13. Comparisons of peak ground acceleration between the centrifuge test and nonlinear RHA with mathematical fitting function models

미소~중변형률 영역(전단변형률 : $10^{-3} \sim 0.1\%$)에서 이루어지는 것이 대부분이다. 하지만 실험-해석간의 오차는 중~고변형률 영역에서 발생하는 지반거동의 오차에 기인할 수 있으므로, 이 영역의 거동을 잘 묘사할 수 있는 모델의 선정이 중요하다고 할 수 있다. 또한 선형해석은 이력감쇠를 반영하지 못함에 따라 입력지진 크기가 증가함에 의해 해석오차가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

7. 결 론

성능기반 내진설계를 도입하기 위해서는 비선형 RHA 결과에 대한 신뢰성이 확보되어야 한다. 해석이 진행됨에 따라 변화하는 재료의 응력-변형률 관계, 이전단계 응답 결과의 반영이 이루어져야 하는 비선형 RHA는 전단파괴 이전 지반의 비선형 수치거동모델 영향평가가 필요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 정밀하게 시행된 실내시험과 동적원심모형 시험결과를 바탕으로 지진 시 부지응답 영향평가를 시행하였다. 본 연구에 사용된 지반의 비선형 수치거동모델은 모두 수확합수를 이용한 비선형 피팅모델로 1~4개의 매개변수를 필요로 하며, 반복하중에 대한 거동은 Masing rule을 따른다. 미소~중변형률 영역에서 실내실험결과와 비교 시 매개변수가 많은 모델이 더 정확한 피팅결과를 나타내나, 비선형 RHA 결과에는 큰 상관관계를 나타내지 않았다. 특히 현재 상용 비선형 RHA 프로그램에 가장 많이 사용되고 있는 Model 1은 1개의 매개변수를 사용함에도 불구하고 만족할 만한 결과를 나타낼 수 있었다. 전체적으로 비선형 RHA 해석의 결과는 선형해석에 비하여 동적원심모형 시험과 유사한 결과를 보여주며, 비선형 지반모델에 따른 차이는 우려할 수준은 아니나 입력지진가속도의 크기가 증가할수록 커지는 양상을 나타낸다. 또한 좀 더 정밀한 부지응답 해석을 위해서는 미소변형률 영역이 아닌 중~고변형률 영역의 지반거동특성을 대상으로 한 지반의 비선형 수치거동모델 피팅이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행되었습니다.

References

1. Dokainish, M. A. and Subbaraj, K. (1989), A survey of direct

time-integration methods in computational structural dynamics-I, Explicit methods, Computers and Structures, Vol. 32, No. 6, pp. 1371~1386.

2. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), Shear modulus and damping in soils: design equation and curves Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. 7, pp. 667~691.

3. Iai, S. (2001), Seismic performance-based design of port structures and simulation techniques, In International Workshop on Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering, pp. 1~12.

4. Idriss, I. M. (1993), Assessment of Site Response Analysis Procedure, NIST, GCR, pp. 95~667.

5. Itasca (2011), FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D Version 4.0 dynamic analysis manual, Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN., pp. 52~59.

6. Kalkan, E. and Luco, N. (2011), Special issue on earthquake ground-motion selection and modification for nonlinear dynamic analysis of structures. Journal of structural engineering ASCE, Vol. pp. 137~277.

7. Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J. (1973), Finite element method accuracy for wave propagation problems, J Soil Mech Found Eng, Div ASCE, Vol. 99, No. 5, pp. 421~427.

8. Lee, J. S. (2013), Appropriate input earthquake motion for the verification of seismic response analysis by geotechnical dynamic centrifuge test, EESK, J Earthquake Eng, Vol. 17, No. 5, pp. 209~217.

9. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. (1969), Finite dynamic model for infinite media, J Eng Mech, Vol. 95, No. 4, pp. 859~877.

10. Masing, G. (1926), Eigenspannungen und verfestigung beim messing, In: Proceedings of the second international congress of applied mechanics, pp. 332~335.

11. Mejia, L. H. and Dawson, E. M. (2006), Earthquake deconvolution for FLAC, Proceedings of 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Madrid, Spain, ISBN 0-9767577-0-2, pp. 4~10.

12. Newmark, N. M. (1965), Effects of earthquakes on dams and embankments, Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pp. 139~160.

13. Nozu, A., Ichii, K. and Sugano, T. (2004), Seismic design of port structures, J. of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 195~208.

14. Park, D. and Hashash, M. A. (2004), Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis, J of earthquake engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 249~274.

15. Phillips, C. and Hashash, Y. M. A. (2009), Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses, Soil dynamics and earthquake engineering, Vol. 29, pp. 1143~1158.

16. Prevost, J. H. (1982), Two-surface versus multi-surface plasticity theories: a critical assessment, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 6, pp. 323~338.

17. Purzin, A. M. and Shiran, A. (2000), Effects of the constitutive relationship on seismic response of soils. part I. Constitutive modelling of cyclic behavior of soils, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 19, pp. 305~318.

18. Pyke, R. M. (1979), Nonlinear soil models for irregular cyclic loadings, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 105, No. 6, pp. 715~726.

19. Schofield, A. N. (1980), Cambridge geotechnical centrifuge operations, Twentieth Rankine Lect Géotech, Vol. 30, No. 3, pp. 227~268. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1980.30.3.227>.

20. Streeter, V. L., Wylie, E. B. and Richart, F. E. (1974), Soil motion computations by characteristics method, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 100, pp. 247~263.
21. Stewart, J. P., Hashash, Y. M. A., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z. and Yang, Z. (2008), Benchmarking of nonlinear geotechnical ground response analysis procedures, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, Peer Report*. pp. 1~175.
22. Subbaraj, K. and Dokainish, M. A. (1989), A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics-II, *Implicit methods, Computers and Structures*, Vol. 32, No. 6, pp. 1387~1401.
23. Yingwei, W. U. and Prakash, S. (2000), Seismic displacements of rigid retaining walls on submergence, *12th World conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 0562*.