동적원심모형 시험을 이용한 부지응답해석 검증시 입력 지진의 결정

Appropriate Input Earthquake Motion for the Verification of Seismic Response Analysis by Geotechnical Dynamic Centrifuge Test

이진선^{1)*}

Lee, Jin-Sun¹⁾

¹⁾원광대학교 토목환경공학과

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

/ A B S T R A C T /

In order to verify the reliability of numerical site response analysis program, both soil free-field and base rock input motions should be provided. Beside the field earthquake motion records, the most effective testing method for obtaining the above motions is the dynamic geotechnical centrifuge test. However, need is to verify if the motion recorded at the base of the soil model container in the centrifuge facility is the true base rock input motion or not. In this paper, the appropriate input motion measurement method for the verification of seismic response analysis is examined by dynamic geotechnical centrifuge test and using three-dimensional finite difference analysis results. From the results, it appears that the ESB (equivalent shear beam) model container distorts downward the propagating wave with larger magnitude of centrifugal acceleration and base rock input motion. Thus, the distortion makes the measurement of the base rock outcrop motion difficult which is essential for extracting the base rock incident motion. However, the base rock outcrop motion generated by using deconvolution method is free from the distortion effect of centrifugal acceleration.

Key words: Site repose analysis, Site amplification, Centrifuge test, Earthquake motion, Deconvolution

1. 서 론

기반암으로부터 전파되는 지진파는 상부로 전파됨에 따라 에너지 보존 법칙에 의해 지진운동 크기가 증가되는 현상을 보이게 된다. 이러한 현상을 부지증폭(Site amplification)현상이라 지칭하며, 이를 해석하기 위한 일련의 과정을 부지응답해석(Site response analysis)이라 정의한다. 부지응답해석은 수평 다층 무한탄성지반에서의 파동 전달해석으로 최초 Kanai, Rosset and Whitman, Lysmer et al., Rosset and Whitman[1-4]에 의하여 지반을 선형 탄성체로 해석하는 기법이 소개되었다. 이 후 Schnabel et al.은 다층지반을 등가의 집중질량을 가지는 1차원 다자유도계로 해석하는 SHAKE[5]프로그램을 공개하여 현재까지 부지응답해석을 위한 기본적인 프로그램으로 사용되어짐에 따라, 부지응답해석은 종종 SHAKE해석으로 지칭되기도 한다. SHAKE해석은 지진지속시간 중 전단변형을 변화에 따

른 지반의 비선형거동을 대표할 수 있는 등가 변형율과 이에 상응하는 전단 탄성계수, 감쇠비를 적용하여 주파수영역 선형해석을 시행하는 등가선형(Equivalent linear)방법으로, 개발당시 컴퓨터의 사양으로 수행될 수 있는 최선의 동적 비선형해석 방법이었다. 1972년 공개된 최초 버전은 강도정수 또는 구속압을 이용하여 지반의 최대 전단탄성계수를 산정하였으나, 1980년대 이후 현장 탄성과 실험이 폭넓게 보급됨에 따라 지반의 전단파속도를 직접 입력변수로 사용하는SHAKE91이 공개되었다[6]. 이후 윈도우즈 환경에서 실행이 가능한ProSHAKE등이 개발되어 널리 사용되어지고 있다.

2000년대 이후 컴퓨터 사양 및 운영체제의 비약적인 발전에 힘입어 SHAKE에서 사용되는 등가정적해석 기법의 오류를 보완하기 위해서 지진 시 지반의 비선형 거동을 시간영역에서 양해법(Explicit method)을 사용하는 해석 프로그램들이 보급되기 시작하였다.

실제 사례에서 부지증폭현상의 중요성이 부각된 것은 1985년 Mexico city지진이다. 고대의 호수를 매립하여 형성된 Mexico city의 하부지반은 대부분 점토지반으로 구성되어있음에 따라, 1985년 지진시 인접 암반지역에 비하여 지표면 자유장 가속도 계측기록이 매우 크게 증폭되어 계측되었

*Corresponding author: Lee, Jin-Sun

E-mail: blueguy@wku.ac.kr

(Received 11 June 2013; Accepted 16 July 2013)

으며, 부지응답 효과로 단주기 지진이 지표면 자유장에서 장주기 지진으로 변형되어 고층 건물이 매우 큰 피해를 보는 결과를 초래하였다[7]. 이와 같은 결과는 이후 여러 연구자들이 상세부지조사와 부지응답해석프로그램을 이용한 부지응답해석 검증을 실시하는 계기가 되었다. 특히, Idriss는 동일한 지반조건으로 시행된 SHAKE해석 일지라도 계측 위치에 따른 상이한 입력지진 선택에 따라 그 결과가 크게 달라짐을 Loma Prieta 지진 계측기록을 이용하여 증명하였으며, 이러한 평가를 위하여 암반노두와 지표면 자유장 지진계측기록을 동시에 획득 가능한 지역을 확보하는 것은 매우 어려운 일임을 보고하였다[8].

실지진 계측기록 확보의 어려움과는 다르게, 최근 여러 연구기관에서 수행하고 있는 동적원심모형시험은 부지증폭현상 검증을 위한 데이터를 비교적 손쉽게 획득할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 기반암 가속도와 지표면 가속도를 연직 단면내에서 동시에 계측 가능하며, 시험자가 원하는 지진파를 입력지진으로 사용 가능하다. 따라서, 동적원심모형 시험결과는 현재 보급되고 있는 부지응답해석 프로그램의 검증을 위한 최적의 기준자료로 활용 가능하다.

부지응답해석 프로그램의 검증을 위해서는 입력지진 계측지점의 경계조건을 명확히 정의하여 사용하여야 한다. 그러나, 현재까지 대부분의 사용자들이 이에 대한 명확한 이해 없이 해석 또는 검증을 시행함에 따라 예기치 않는 해석 오차를 얻게 되는 경우가 보고되고 있다[9]. 따라서 본 논문에서는 동적원심모형시험을 이용한 부지응답해석 검증시 실험 계측자료로부터 부지응답 해석을 시행하기 위한 올바른 입력지진 획득 방법에 대하여 논하고자 한다.

2. 지진계측 기록의 정의 및 기반암 경계조건

2.1 지진계측 기록

지반 또는 암반상 임의의 지점에서 계측된 지진 운동계측기록은 상향 전파되는 입사파(Upward incident wave)와 하향 전파되는 반사파(Downward reflected wave)의 합으로 나타나게 된다. 또한, 지진운동 계측기록은 계측 위치의 경계조건에 따라 노두운동(Outcrop motion)과 층내운동(In-layer, Within motion)으로 구분된다. 노두운동은 지표면과 같이 입사파(Incident wave)의 전반사(Full reflection)가 발생하는 경계조건에서 계측된 운동으로 입사파와 하향 반사파는 동일한 크기와 위상을 가지게 된다. 이러한 특성을 이용하면 노두계측치의 1/2값은 계측지점에서의 입사파 또는 반사파의 합을 나타내게 된다. 반면, 층내운동은 시간 t_1 에서 계측지점을 상향전파하고 있는 입사파와 이전 시간에 계측지점을 상향 통과 후 지표면에서 전반사 되어 시간 t_1 에서 계측지점을 하향 통과하고 있는 하향 반사파의 합으로 이루어진다. 따라서, 층내운동 기록은 전파거리, 위상 및 크기가 서로 다른 두 개의 파의 합이 되며, 이로 부터 입사파 또는 반사파의 합을 독립적으로 추출하는 것은 불가능하게 된다(Fig. 1)

일반적으로 Fig. 1과 같은 지층구조에서 기반암경계면(Base rock boundary)은 층내운동 계측지점이 되므로 계측기록으로부터 입사파를 추출하는 것은 불가능하다. 따라서, 대부분의 시간영역 부지응답해석시 사용되는 기반암 입사파는 Fig. 1의 암반노두(Free field, Rock outcrop)에서

의 1/2 계측 기록을 추정치로 사용하고 있다. 이 경우 지진파는 기암반경계에서 기반암 노두까지 연직전파가 매우 빠르게 일어나며 전파경로에 따른 감쇠가 매우 적게 일어난다는 가정이 포함되어야 한다. 반면, SHAKE91은 주파수영역에서 암반노두운동과 기반암경계면 층내운동간의 전달함수를 사용하여 암반노두 계측기록으로부터 기반암경계면 입사파를 도출할 수 있다. 만약, 지표면 자유장 인근지역에서 암반 노두계측기록을 확보할 수 없는 경우, SHAKE91과 같은 주파수영역 부지응답 해석프로그램을 이용하여 지표면 자유장 계측기록(Free field, Outcrop)으로부터 암반노두(Free field, Rock outcrop)운동 또는 층내운동(Base rock⁽¹⁾, Within)기록을 역산하는 방법을 사용하기도 하며 이를 Deconvolution이라 한다.

2.2 기반암 경계조건

시간영역 부지응답해석시 입력지진이 작용하는 기반암은 하향 반사파의 무한전파가 가능한 반무한 탄성암반(Elastic half space, Elastic base, Compliant base) 또는 하향 반사파의 전반사(Full reflection)가 일어나는 강제암반(Rigid base, Fixed base)으로 정의 가능하다. 각각의 경우에 대하여 입력지진은 기반암 입사파와 기반암 층내운동이 사용되어야 한다[10].

우선, 기반암이 깊이 H 에 위치하는 반무한 탄성암반으로 경계조건이 설정된 경우, 시간 t_i 에서 부지응답 해석으로 얻어지는 기반암경계면 층내운동은 입력 지진기록인 기반암 입사파와 부지응답 해석결과로 나타나는 하향 반사파의 합으로 식 (1)과 같다.

$$U_R(t_i, H) = \hat{u}^\uparrow(t_i, H) + u^\downarrow(t_i, H) \quad (1)$$

여기서, $U_R(t_i, H)$: 시간 t_i , 깊이 H 에서 기반암 층내운동

$\hat{u}^\uparrow(t_i, H)$: 기반암 입사파(입력지진)

$u^\downarrow(t_i, H)$: 하향 반사파(부지응답 해석결과)

반무한 탄성암반 경계조건에서 하향 반사파는 하부 암반으로 무한전파가 일어나며 소멸되므로, 시간 t_{i+1} 에서 입력 지진운동은 식(1)과 무관하

Fig. 1. Definition of the earthquake motion

계 입력지진기록인 $\tilde{u}^\uparrow(t_{i+1}, H)$ 만 작용하게 된다.

반면, 기반암이 강제압반으로 설정된 경우, 시간 t_i 에서 부지응답 해석으로 얻어지는 기반암 경계면 층내운동은 입력 지진기록인 기반암 입사파와 하향반사파의 합, 그리고 부지응답 해석결과로 얻어지는 하향반사파의 합으로 식 (2)와 같다. 이때, 부지응답 해석에 의한 하향반사파는 강제압반의 고정단 경계조건에서 위상이 역전되며 전반사가 발생하게 되므로 음의 부호를 가지게 된다.

$$U_R(t_i, H) = \tilde{u}^\uparrow(t_i, H) + \tilde{u}^\downarrow(t_i, H) - u^\downarrow(t_i, H) \quad (2)$$

여기서, $\tilde{u}^\uparrow(t_i, H)$: 기반암 입사파(입력지진)

$\tilde{u}^\downarrow(t_i, H)$: 하향반사파(입력지진)

$u^\downarrow(t_i, H)$: 하향반사파(해석결과)

만약, 부지응답해석이 실제 현상을 완벽하게 재현할 수 있다면, 입력 지진의 하향반사파($\tilde{u}^\downarrow(t_i, H)$)와 해석결과로 얻어지는 하향반사파($u^\downarrow(t_i, H)$)는 동일하게 되어 소멸되므로 반무한 탄성압반의 경우와 동일한 경계조건이 된다.

반면, 부지응답해석이 현장에서 발생하는 실제현상을 완벽하게 재현하지 못할 경우 소멸되지 못하는 하향반사파는 경계면에서 전반사되어 시간 t_{i+1} 에서 입력지진은 식 (3)과 같은 입력지진 오차(Δ)를 포함하게 된다.

$$\tilde{u}^\uparrow(t_{i+1}, H) + \Delta \quad (3)$$

여기서, $\Delta = \tilde{u}^\downarrow(t_i, H) - u^\downarrow(t_i, H)$: 입력지진 오차

이렇게 발생하는 입력지진운동의 오차는 시간영역에서 해석이 진행될 수록 누적되며, Mejia와 Dawson은 상기 오차 누적현상을 실제와 다른 전단탄성계수를 가지는 모형부지에 대해서 부지응답 해석프로그램인 FLAC과 SHAKE를 이용하여 증명하였다[9].

일반적으로 지반은 균질하지 않고, 현재까지 개발된 지반의 수치거동 모델은 동적 거동시 완벽하게 실제 지반을 재현하지 못함에 따라, 기반암을 강제압반으로 모델링하여 시간영역 부지응답해석을 수행하는 것은 필연적인 입력지진 오차를 유발하게 된다. 따라서, 시간영역 부지응답해석의 경우 반무한 탄성압반 경계조건을 적용하는 것이 바람직하며, 입력지진으로 사용되는 기반암 입사파는 압반도두 운동 계측치의 1/2 기록을 사용하여야 한다.

3. 동적 원심모형 시험

3.1 시험 장치의 구성

동적 원심모형시험에 사용되는 토조는 측벽에서 지진파의 반사를 억제하기 위하여 지진운동을 흡수할 수 있는 장치가 설치되어야 한다. 초창기 진

Fig. 2. Schematic diagram of ESB box in KOCED geotechnical dynamic centrifuge facility

(a) Schematic diagram

(b) Dynamic mechanical system

Fig. 3. Dynamic excitation system in KOCED geotechnical dynamic centrifuge facility

동대시험의 경우 강제토조(Rigid wall container)가 사용되었으나, 최근에는 토조 내부에 지진에너지가 축적되는 문제를 해결하기 위한 라미나박스(Larminar container) 또는 등가전단보 ESB(Equivalent shear beam)로 구성된 토조가 사용되고 있다. 라미나박스는 이론적으로 경계면에서 횡방향 전단저항강성이 발생하지 않으며 ESB는 주변 지반과 비교적 유사한 횡방향 전단저항강성을 발현하게 된다[10]. 본 논문에서는 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터에서 수행된 동적원심모형 시험 결과를 사용하여 부지응답해석을 검증하였으며, KOCED 지오센트리퓨지 실험센터에서 사용되는 토조는 ESB로 제작되어 있다. 측벽은 듀랄루민판 사이에 볼 베어링과 고무판(Rubber separator)이 설치된 구조이다(Fig. 2).

ESB박스 하단에는 유압 진동대가 강결되며, 진동대는 동적원심 모형시험기 선단에 설치된 Balanced counter weight를 반력으로 사용하도록 구성되어 있다(Fig. 3a). 전체 구조계는 Fig. 3b와 같이 스프링과 댐퍼를 가지

계 되므로 진동대의 응답은 고유의 전달함수(Transfer function)을 나타내게 된다. 따라서, 유압 Actuator로 입력된 지진운동(Actuator command motion)과 ESB하단의 지진운동은 일치하지 않고 전달함수에 의하여 결정되는 특성을 가진다[12]. 그러므로, 동적원심모형시험 결과를 시간영역 수치해석에 적용하기 위해서는 ESB하단에서 전파되는 입사파를 직접 계측하여 입력지진으로 적용하는 것이 바람직 하다. KOCED ESB박스에서 입사파의 계측이 가능한 지점은 암반노두에 해당하는 ESB박스 최상단(Fig. 2 ①, Fig. 1 Free field(Rock outcrop))이며, ESB박스 하단 측면(Fig. 2 ②)에서의 계측기록은 기반암 층내운동(Fig. 1 Base rock⁽²⁾(Within))을 나타내게 된다. 현재 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터에서는 입력지진운동으로 ESB박스 하단 측면에서의 가속도 계측기록을 제공하고 있다.

만약, ESB하단으로부터 전파되는 입력 지진파가 왜곡 없이 ESB경계면(Ball bearing and rubber separator)을 넘어 전파될 수 있을 정도의 파장을 가지고 있고, ESB박스 측면을 통한 연직 전파시 매우 빠른 속도로 전파되어 입사파와 하향 반사파의 위상차이가 거의 발생하지 않고, 전파거리에 따른 감쇠가 무시할 수 있는 수준이라면, KOCED에서 제공하는 ESB박스 하단 측면 계측기록은 기반암 노두운동과 큰 차이가 없을 것으로 가정할 수 있다. 이로부터 입력지진의 기반암 입사파 운동은 ESB박스 하단 측면(Fig. 2 ②)에서의 계측기록의 1/2를 취하여 획득 가능하다.

3.2 지반조건 및 입력지진

지반은 상대밀도 85%, 단위중량 15.21 kN/m^3 , 내부마찰각 43° 인 건조 상태의 규사를 이용하여 사질토 지반을 묘사하였다. 원심가속도 20g 및 40g에서 획득된 깊이별 전단파속도 주상도는 구속압에 따라 증가하는 형태로 Fig. 4(a)와 같으며, 규사의 동적 비선형 특성은 Fig. 4(b), (c)와 같이 나타난다. 전단파속도 주상도는 원심가속 중 벤더엘레먼트로 계측된 결과이며, 동적 비선형 특성은 동일 밀도에서 조성된 건조모래 시편에 대하여 공진주시험으로 획득된 결과이다. 본 논문에서 부지응답해석 검증에 사용된 시험은 20g 및 40g의 원심가속도에서 수행되었으며, 원심가속도 20g 및 40g하에서 폭과 너비가 각각 9.8m, 19.6m 깊이 12m, 24m인 지반을 재현하게 된다. 입력지진으로 사용된 지진파는 원심가속도에 따라 필터링된 Northridge 지진(미국, Northridge, 01/17/94; 스테이션: Pacoima dam, upper left abut 104(CDMG station 24207))과 Kobe 지진(일본, Kobe, 95/01/16; 스테이션: KJMA090)이 Actuator 입력운동으로 적용되었다. 실험시 지반운동의 계측은 가속도계를 이용하여 지표면 자유장 및 깊이별 계측이 이루어 졌다. 실험 절차 및 결과에 대한 자세한 사항은 Kim et. al.에 상세히 기술되어 있다[13].

4. 부지응답 해석

4.1 유한차분모델

본 논문에서는 부지응답해석기법의 검증을 위하여, 양해법을 이용한 유한차분 해석프로그램인 FLAC-3D ver5.0을 사용하였다. 해석에 사용된 컴퓨터는 Intel사의 Xeon X5690 CPU(3.47 GHz) 2기를 탑재하고 있다.

(a) Shear wave velocity profile

(b) Shear strain-shear modulus degradation curve

(c) Shear strain-damping ratio curve

Fig. 4. Shear wave velocity profile and degradation curves of shear modulus and damping ratio.

지반은 육면체 솔리드 요소(Solid element)로 한변의 최대크기(Δl)는 지진파의 파장(λ)를 고려하여 식 (4)와 같이 결정된다[14].

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10}, \quad f \leq \frac{v_s}{10 \times \Delta l} \quad (4)$$

본 논문에서는 Solid 요소의 최대 모서리 길이를 원심가속도 20g 및 40g에 대하여 공히 65cm로 지반을 격자 모델링함에 따라, 최소 127m/sec, 154m/sec의 전단파속도(v_s)를 가지는 상부층에서 19.5Hz, 24Hz 이하의 지진파가 전파 가능도록 구성되었다. 이는 본 해석에 사용된 Kobe 및 Northridge 지진파의 에너지대역을 충분히 전달할 수 있는 크기이다. 해석

에 사용된 솔리드 요소는 원심가속도 20g, 40g하에서 각각 3,375 및 27,000개 이다(Fig. 5). 수평방향 경계조건은 모델경계면에서 지진파의 소산을 묘사하기 위하여 무한요소인 자유장요소(Free field element)를 사용하였으며, 시간영역 양해법에 의한 수치적분이 가능하도록 연직, 수평

Dash pot을 가지고 있다[15].

4.2 하부지반의 경계조건 및 기반암 입력지진 운동

Fig. 4에 나타난 지반의 비선형성 거동특성은 깊이별 구속압을 고려하여 Hardin-Drnevich모델[16]로 정의하였다. Hardin-Drnevich모델은 식 (5)와 같이 구성되며, 참조전단변형율(γ_r)은 Fig. 4(b)의 $0.5 G_{max}$ 에 대응하는 전단변형율을 구속압에 따라 사용하여야 한다.

$$\tau = \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right) \left(\frac{\tau_{max}}{1 + \gamma/\gamma_r} \right) \quad (5)$$

여기서, τ : 전단응력,

γ : 전단변형율,

γ_r : 참조전단변형율(reference shear strain)

이와 같이 정의된 지반의 비선형 응력-변형율 관계는 Rayleigh감쇠와 같은 별도의 재료감쇠를 사용하지 않아도 반복하중에 대하여 입력하중 주

Fig. 5. 3-Dimensional finite difference model of KOCED ESB Box

Fig. 6. Typical acceleration time histories of base rock outcrop motion(measured, deconvoluted)

Fig. 7. Acceleration response spectra of base rock outcrop motion(measured, deconvoluted)

파수의 영향을 받지 않는 Hysteretic damping을 나타낼 수 있다.

기반암 경계조건은 식 (3)의 입력지진 오차를 배제하기 위하여 반무한 탄성암반으로 가정하였다. 기반암 경계조건이 반무한 탄성암반으로 모델링됨에 따라, 입력지진운동은 기반암 입사파가 사용되어야 한다. 이에 따라 본 논문에서는 아래 두 가지 기법을 적용하여 기반암 입사파를 도출하였다.

- 1) ESB하단 측면에서 계측된 가속도 이력을 기반암 노두운동으로 가정 (Fig. 2 ㉔)
- 2) 지표면 자유장 가속도 계측기록으로부터 기반암 노두운동을 도출 (Deconvolution)

상기 (i) 번 기법은 전제조건으로 앞서 3절에서 설명된 바와 같이 ESB박스 측면을 통하여 전파되는 하향 반사파의 왜곡이 크지 않아야 한다. 그러나, 원심가속도가 증가함에 따라 연직 전파거리가 길어지게 되고, 입력지진 가속도의 증가에 따라 인접 지반운동의 영향이 ESB에 전달되는 문제를 야기하게 된다. 반면, (ii) 번 기법은 SHAKE91를 이용한 등가선형해석을 수행함에 따라 등가 전단변형율가정 등의 필연적인 오류가 내포된 기반암 입사파가 도출된다. Fig. 6, 7은 각각 두 가지 기법으로 도출된 기반암 노두운동

동의 대표적인 시간이력곡선과 응답스펙트럼이며, 주파수대역 에너지가 다르게 분포하고 있음을 알 수 있다.

4.3 부지응답해석 결과

부지응답 해석은 동일한 지반조건에 대하여 앞서 기술된 두 가지 기반암 노두운동을 사용하여 시행되었으며, 해석결과로 얻어진 지표면 자유장 운동과 동적원심모형시험 계측치의 오차 비교를 실시하였다. 부지응답해석에 사용된 FLAC-3D와 Deconvolution에 사용된 SHAKE91은 서로 다른 해석기법(시간, 주파수영역)을 사용함에 따라 지표면 자유장 가속도 계측 기록으로부터 도출(Deconvolution)된 기반암 노두운동기록을 입력지진으로 사용하는 독립 검증이 가능하다.

4.3.1 입력지진 : ESB하단 측면계측 가속도 이력

Fig. 8과 Fig. 9는 원심가속도 20g, 40g에서 수행된 동적원심모형 시험과 부지응답해석으로 얻어진 지표면 자유장 가속도 시간이력 및 5% 감쇠비 응답스펙트럼을 비교하고 있다. 원심가속도 20g에서는 실험과 부지응

Fig. 8. Typical acceleration time histories of free field motion(input motion : measured acc.)

Fig. 9. Typical acceleration response spectra of free field motion(input motion : measured acc.)

Fig. 10. Peak ground acceleration difference between geotechnical dynamic centrifuge test and seismic response analysis by explicit time integration method results(input motion: measured acc.)

답해석 결과가 비교적 일치하는 가속도 시간이력을 나타내고 있으나, 40g에서는 부지응답해석시 부지증폭현상이 과대 평가됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 입력지진 가속도에 따른 동적원심모형 시험과 부지응답해석의 지표면 자유장 최대가속도(PGA, Peak ground acceleration) 오차를 나타낸 그래프이다. 오차는 원심가속도와 입력지진 가속도가 커질수록 증가함을 알 수 있으며, 이는 앞서 4.2절에서 언급한 바와 같이 ESB박스 측면을 통하여 연직 전파되는 하향 반사파의 왜곡이 심화되기 때문이다.

4.3.2 입력지진 : 지표면 자유장 가속도 계측기록으로부터 도출 (Deconvolution)

Fig. 11과 Fig. 12는 원심가속도 20g, 40g에서 수행된 동적원심모형 시험과 Deconvolution된 기반암노두운동을 입력지진으로 부지응답해석된 지표면 자유장 가속도 시간이력 및 5% 감쇠비 응답스펙트럼을 비교하고 있으며, Fig. 13은 입력지진 가속도에 따른 오차변화를 나타낸다. Fig. 13으로부터 Deconvolution된 기반암노두운동을 입력지진으로 사용시 원심가속도 증가에 따라 ESB박스 측면으로 연직 전파시 발생하는 하향 반사파의 오차를 제거할 수 있으나, 입력지진 가속도 증가에 따른 오차는 크게 감

Fig. 11. Acceleration time histories of free field motion(input motion : deconvoluted acc.)

Fig. 12. Acceleration response spectra of free field motion(input motion : deconvoluted acc.)

Fig. 13. Peak ground acceleration difference between geotechnical dynamic centrifuge test and seismic response analysis by explicit time integration method results(input motion: deconvoluted acc.)

Fig. 14. Typical pseudo spectral acceleration difference between geotechnical dynamic centrifuge test and seismic response analysis by explicit time integration method results

소시키지 못함을 알 수 있다. 이는 지진시 지반의 비선형거동을 수치해석으로 모델링함에 있어 SHAKE91의 Deconvolution시 발생하는 등가전단변형률 가정보류와 FLAC-3D를 이용한 부지응답해석시 전단변형률이 증가함에 따라 Hardin-Drnevich모델이 실제 지반보다 감쇠비를 크게 평가[17]하여 부지증폭현상효과를 경감시킴에 따르는 것으로 사료된다.

4.3.3 스펙트럼 오차

본 논문에서는 Fig. 14와 같이 나타나는 원심모형시험과 부지응답해석의 스펙트럴 가속도 차이를 식 (6)과 같이 정의하여 살펴 보았다.

$$SE = \sum_{i=1}^{n_p} (\ln Sa_i^{[1]} - \ln Sa_i^{[2]})^2 \quad (6)$$

여기서, SE : 스펙트럴 가속도 오차 제곱의 합(Spectral Error)

(a) input motion : measured acc.

(b) input motion : deconvoluted acc.

Fig. 15. Spectral acceleration error with base rock input acceleration

$\ln Sa_i^{[1]}, \ln Sa_i^{[2]}$: 센트리퓨지 및 수치해석의 자유장 스펙트럴 가속도
 n_p : 데이터의 수

Fig. 15는 입력지진 가속도에 따른 스펙트럴 가속도오차(SE)를 나타내고 있다. 이로부터 Deconvolution된 기반암 노두운동을 입력지진으로 사용할 경우 부지응답해석시 주파수대역 오차를 효율적으로 제거할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 동적원심모형시험결과를 이용한 부지응답 해석프로그램의 검증시 입력지진 경계조건 및 계측방법이 부지응답해석에 미치는 영향을 살펴 보았다. 이를 위하여 원심가속도 20g 및 40g에서 시행된 동적원심모형시험결과를 유한차분해석 프로그램인 FLAC-3D를 사용하여 비교 하였으며, 기반암 경계조건은 경계조건에 따른 입력지진 오차누적을 제거하기 위하여 반무한 탄성암반경계조건을 적용하였다.

이때, 부지응답해석에 사용된 입력지진은 ESB박스 하단 측면 계측운동과 지표면 자유장 계측기록으로부터 등가선형해석프로그램인 SHAKE91으로 도출된(Deconvolution) 운동을 기반암 노두운동으로 사용하였다. 최종적으로 상기 두 개의 입력지진을 사용한 부지응답해석 결과로부터 동적원심모형 시험에서 기반암 노두운동 계측시 발생 가능한 오차원인을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

1) 원심가속도가 증가함에 따라 ESB측면으로 전파되는 지진파의 연직 전

파괴리는 증가되며, 이에 따른 하향반사파의 왜곡은 기반암 노두운동의 계측 오류를 유발할 수 있다.

- 2) 입력지진가속도가 증가함에 따라 지반운동의 영향이 ESB에 전달되어 기반암 노두운동 계측 오류를 유발할 수 있다.

따라서, 원심모형시험을 이용한 부지응답 해석프로그램의 검증을 위해서는 기반암입력지진을 지표면 자유장 계측기록으로부터 도출(Deconvolution)하여 원심가속도의 영향을 제거 가능하나, 입력지진 가속도의 증가에 따른 오차 제거를 위해서는 별도의 계측기법을 도입해야함을 알 수 있다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2012학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행됨

/ REFERENCES /

1. Kanai K, Relation between the nature of surface layer and the amplitude of earthquake motions. Bulletin, Tokyo Earthquake Research Institute, 1951;30:31-37.
2. Rosset JM, Whitman RV. Theoretical background for amplification studies. Research Report No. R69-15, Soils Publication No. 231, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; c1969; p.21-43.
3. Lysmer J, Seed HB, Schnabel PB, Influence of base-rock characteristics on ground response. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971;61(5):1213-1232.
4. Duke CM, Leeds DJ. Site characteristics of southern california strong-motion earthquake stations. Special Publication 38, Report No. 62-55(Reprinted), Dept. of Engineering, University of California, Los Angeles; c1972; p.4-17.
5. Schnabel PB, Lysmer J, Seed HB, SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12, EERI, UC Berkeley; c1972; p.3-4.
6. Idriss IM, Sun JI, User's manual for SHAKE91, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis, California; c1992; p.1-2.
7. Vucetic M, Dobry R. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991;111GT(1):89-107.
8. Idriss IM. Assessment of site response analysis procedures. Report No. NIST GCR 95-667, NIST; c1995; p.16-17.
9. Mejia LH, Dawson EM, Earthquake deconvolution for FLAC, Proceedings of 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Madrid, Spain, ISBN 0-9767577-0-2; c2006; p.4-10.
10. Lee SH, Choo YW, Kim DS. Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013;44:102-114.
11. Ilankatharan M, Kutter BL. Modeling input motion boundary conditions for simulations of geotechnical shaking table tests. Earthquake Spectra, 2010;26(2):349-369.
12. Joyner WB, Chen ATF. Calculation of Nonlinear Ground Response in Earthquakes, Bulletin of Seismological Society of America, 1975; 65(5):1315-1336.
13. Kim DS, Lee SH, Choo YW, Rames D. Self-balanced earthquake simulator on centrifuge and dynamic performance verification. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013;17(4):651-661.
14. Kuhlemeyer RL, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems. Journal of Soil Mech. & Foundations, Div. ASCE, 1973;99SM(5):421-427.
15. Lysmer J, Kuhlemeyer RL. Finite dynamic model for infinite media, Journal of Engineering Mechanics, 1969;95EM(4):859-877.
16. Hardin BO, Drnevich VP. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1972;98(7):667-691.
17. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, Oxford University Press Inc, New York, ISBN 0-19-856224-1; c1995; p.36-37.