3축 방향 지반운동이 작용하는 지반-구조물 상호작용계의 비선형 지진응답 해석

이진호^{1*} · 김재관² · 김정한³

¹한국철도기술연구원 고속철도연구본부, ²서울대학교 건설환경공학부, ³한국원자력연구원 종합안전평가부

Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Soil-Structure Interaction System Subjected to a Three-Directional Ground Motion

Jin Ho Lee^{1*}, Jae Kwan Kim² and Jung Han Kim³

¹High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 16105, Korea

²Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

³Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

Abstract

In this study, nonlinear earthquake responses of a soil-structure interaction (SSI) system which is subjected to a three-directional ground motion are examined. The structure and the near-field region of soil, where the geometry is irregular, the material properties are heterogeneous, and nonlinear dynamic responses are expected, are modeled by nonlinear finite elements. On the other hand, the infinite far-field region of soil, which has a regular geometry and homogeneous material properties and dynamic responses is assumed linearly elastic, is represented by three-dimensional perfectly matched discrete layers which can radiate elastic waves into infinity efficiently. Nonlinear earthquake responses of the system subjected to a three-directional ground motion are calculated with the numerical model. It is observed that the dynamic responses of a SSI system to a three-directional motion have a predominant direction according to the characteristics of the ground motion. The responses must be evaluated using precise analysis methods which can consider nonlinear behaviors of the system accurately. The method employed in this study can be applied easily to boundary nonlinear problems as well as material nonlinear problems.

Keywords : soil-structure interaction, perfectly matched discrete layer, earthquake response analysis, material nonlinearity

1. 서론

구조공학의 발달로 인해 장대 교량, 고층 빌딩과 같이 토목·건축 구조물은 점점 대형화되어 가고 있다. 또한, 산업의 발달로 인해 원자력발전소, 액체저장탱크 등과 같은 다양한 목적의 특수 구조물의 건설이 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 대형 구조물과 특수 구조물의 안전성을 확보하고 경제적인 설계 및 건설을 위해서는 이 구조 시스템의 거동 특성에 대한 정확한 이해가 필수적이다. 기존의 수많은 연구에서 확인된 바와 같이 이러한 구조물의 거동은 지반-구조물 상호작용에

의해 많은 영향을 받으므로, 이 시스템의 동적 거동 특성을 정확하게 예측하고 이해하기 위해서는 정밀한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하여야 한다.

지반-구조물 상호작용 해석 시에는 이 시스템의 두 가지 특성을 정확히 고려하여야 한다. 첫 번째로 지반-구조물 상호작용계는 지반과 구조물의 비선형 거동, 구조물과 지반 경계에서의 비선형 경계조건(구조물 기초의 부분적 들림, 미끄러짐, 분리 현상 등) 등이 발생하는 복잡한 비선형 시스템이라는 점이다(Roesset and Tassouals, 1982). 특히, 구조물의 대형화로 인해 지반에서 발생하는 응력이 증가해 지반의

* Corresponding author:

Tel: +82-31-460-5697; E-mail: ohnij2@krii.re.kr

Received June 16 2016; Revised August 5 2016;

Accepted August 6 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

비선형 거동이 발생할 가능성이 증가하고 있다. 이러한 비선형 거동은 시간영역에서 비선형 유한요소를 사용하여 고려할 수 있다. 두 번째 특성은 지반은 반무한 매질이고 이러한 매질에서의 지반-구조물 상호작용 해석(파전파 해석)은 반무한 영역으로의 에너지 방사를 정확히 고려할 수 있어야 한다는 점이다. 하지만, 반무한 지반에서의 에너지 방사는 주파수영역에서 정확히 묘사할 수 있다. 그러므로 지반-구조물 상호작용계의 비선형 시간이력해석은 이 두 가지 특성을 시간영역에서 동시에 고려하여야 하고, 결국 에너지 방사를 시간영역에서 얼마나 정확하고 효율적으로 묘사할 수 있는지에 의해 해석의 정확성과 효율성이 결정된다.

Fig. 1(a)는 전형적인 지반-구조물 상호작용계를 보여주고 있다. 일반적으로 지반은 Fig. 1(a)에 보인바와 같이 근역과 원역으로 구분된다. 지반의 근역은 구조물 기초와 인접한 지반 영역으로 그 형상과 재료 성질이 불규칙하고 비선형 거동이 발생하는 영역이다. 이 영역은 재료와 경계 비선형 거동을 고려할 수 있는 비선형 유한요소로 의해서 묘사할 수 있다. 반면, 지반의 원역은 지반의 무한한 영역으로, 규칙적인 형상과 균질한 재료 성질을 가지고 있고 선형 탄성 거동을 가정하는 영역이다. 원역의 역학적 모형은 무한 영역으로의 에너지 방사를 효과적으로 고려할 수 있어야 한다. 이를 위해 consistent transmitting boundary(Kausel, 1974), 경계 요소(Beskos, 1987; 1997), 무한요소(Astley, 2000; Seo *et al.*, 2007), high-order absorbing boundary condition (ABC)(Givoli, 2004), perfectly matched layer(PML)(Basu and Chopra, 2003; 2004)와 같은 다양한 모형이 개발되어 왔다.

비선형 해석을 위해서 지반 원역 모형은 시간영역에서 근역의 유한 요소와 쉽고 효율적으로 결합할 수 있어야 한다. 그러므로 원역 모형은 시간영역에서 local temporal operator에 의해서 표현이 되어야 한다. 앞에서 언급한 모형 중 consistent transmitting boundary, 경계요소, 무한요소는 시간영역에서 convolution integral의 형태를 가지는 global temporal operator이다.

그러나 high-order ABC나 PML과 같은 모형들은 그 인자들을 조정함으로써 local temporal operator 조건을 만족시킬 수 있다. High-order ABC는 보조 변수에 의해 시간영역에서 local operator의 형태로 표현될 수 있는 유리식을 이용하여 무한 영역의 동적 강성을 정확히 근사할 수 있다. 이 유리식 표현 때문에 high-order ABC의 인자들이 수치 모형의 거동에 어떠한 영향을 미치는지 증명할 수 있다(Rabinovich *et al.*, 2010). 한편, PML은 복소 좌표 변환에 기반한 인위적인 흡수 매질이다. 이 모형은 high-order

(a) Schematic view

(b) Numerical model

Fig. 1 Soil-structure interaction system subjected to a three-directional earthquake motion(Lee *et al.*, 2016)

ABC보다는 구현하기가 쉽고, 근역의 모서리도 어려움 없이 다룰 수 있다. 그러나 실제 계산에서 높은 정확도를 보장하는 인자를 결정하는 것은 경험에 의존할 수밖에 없다(Rabinovich *et al.*, 2010). 그러므로 지반-구조물 상호작용계의 비선형 시간이력해석을 위해서 high-order ABC나 PML 중 어떠한 모형이 더 좋은지를 단언하는 것은 힘들고, 이는 풀고자 하는 문제의 조건에 의해 결정된다.

최근, high-order ABC와 PML의 장점을 모두 만족시킬 수 있는 새로운 모형이 개발되었다(Guddati and Tassoulas, 2000; Guddati, 2006). 이 모형은 파동 방정식을 continued-fraction의 형태로 근사하므로 high-order ABC의 장점을 그대로 가질 뿐만 아니라, 무한 영역 조건을 적용하려는

경계의 법선 방향으로 변위가 선형으로 변하고 mid-point integration rule을 적용한 유한요소와 같은 형태를 가지므로 PML의 장점도 역시 가지고 있다. 이 모형은 법선 방향으로 h 의 길이를 가질 경우 $-2i/h$ 의 파수를 가지는 파동을 완벽하게 흡수할 수 있음이 수학적으로 증명되었다(단, 여기서 i 는 허수 단위). 즉, 실수의 파수를 가지는 진행파(propagating wave)를 흡수하기 위해서 이 모형은 순허수의 길이를 가지게 되는데, 이는 PML의 복소 좌표 변환과 유사한 개념이다. 특히, 이 모형은 유한차분의 틀에서 PML의 최적화된 형태로 알려져 있다(Asvadurov *et al.*, 2003). 그래서 개발 초창기에는 이 모형을 continued-fraction absorbing boundary condition이라고 불렀지만, 후에는 perfectly matched discrete layer(PMDL)로 명명하게 되었다. PMDL은 앞에서 언급한 high-order ABC와 PML의 장점을 모두 가지고 있으므로, 그 정확도를 사용자가 원하는 수준까지 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 유한요소법이나 유한차분법과 같은 영역 기반 수치 해석법과 쉽게 결합할 수 있다. 그러므로 PMDL은 다양한 파전과 문제에 적용되어 왔고, 최근에는 비선형 지반-구조물 상호작용계의 비선형 시간이력해석에 적용되기도 하였다(Lee *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2016).

이 연구에서는 기(既)개발된 3차원 PMDL을 이용한 시간이력 해석기법을 이용하여 3축 방향 지반운동이 작용하는 비선형 지반-구조물 상호작용계의 비선형 지진응답 해석을 수행하고자 한다. 3축 방향 지반운동에 의한 비선형 응답을 1축 또는 2축 방향 지반운동에 의한 응답과 비교하여 그 응답특성을 살펴보고자 한다.

2. 비선형 지반-구조물 상호작용 해석기법

3차원 PMDL을 이용한 지반-구조물 상호작용계의 운동 방정식은 시간영역에서 식 (1)과 같이 표현된다(Lee *et al.*, 2016).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{ib} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bi} & \mathbf{M}_{bb} + \mathbf{M}_{bb}^f & \mathbf{M}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{eb}^f & \mathbf{M}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_i \\ \ddot{\mathbf{U}}_b \\ \ddot{\mathbf{U}}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ii} & \mathbf{C}_{ib} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{bi} & \mathbf{C}_{bb} + \mathbf{C}_{bb}^f & \mathbf{C}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{eb}^f & \mathbf{C}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_i \\ \dot{\mathbf{U}}_b \\ \dot{\mathbf{U}}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{P}_b^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{bb}^f & \mathbf{K}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{eb}^f & \mathbf{K}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{U}_b \\ \mathbf{U}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{bb}^f & \mathbf{R}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{eb}^f & \mathbf{R}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_i \\ \mathbf{W}_b \\ \mathbf{W}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_{bb}^f & \mathbf{T}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_{eb}^f & \mathbf{T}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_i \\ \mathbf{X}_b \\ \mathbf{X}_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_i^{ext} \\ \mathbf{P}_b^{ext} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{M}$ 과 $\mathbf{C}$ 는 각각 구조물과 근역의 질량과 감쇠 행렬, $\mathbf{P}^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}})$ 는 구조물과 근역의 비선형 내부력, $\mathbf{M}^f$, $\mathbf{C}^f$, $\mathbf{K}^f$, $\mathbf{R}^f$, $\mathbf{T}^f$ 는 3차원 PMDL에 의해 표현된 원역의 시스템 행렬, $\mathbf{U}(t)$, $\dot{\mathbf{U}}(t)$, $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ 는 각각 변위, 속도, 가속도, $\mathbf{W}(t) = \int_0^t \mathbf{U}(\tau) d\tau$, $\mathbf{X}(t) = \int_0^t \mathbf{W}(\tau) d\tau = \int_0^t \int_0^\tau \mathbf{U}(\sigma) d\sigma d\tau$, $\mathbf{P}^{ext}(t)$ 는 외력, 아래첨자 i , b , e 는 각각 구조물과 근역에만 속하는 절점, 근역과 원역의 경계면에 속하는 절점, 원역에만 속하는 절점을 의미한다. 3차원 PMDL의 인자는 Lee 등(2016)에 제안된 방법에 의해 결정할 수 있고, 이로부터 원역의 시스템 행렬을 계산할 수 있다.

외력이 작용하지 않고 지진파만 작용하는 지반-구조물 상호작용계의 운동방정식은 식 (1)을 수정하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{ib} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bi} & \mathbf{M}_{bb} + \mathbf{M}_{bb}^f & \mathbf{M}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{eb}^f & \mathbf{M}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_i \\ \ddot{\mathbf{U}}_b \\ \ddot{\mathbf{U}}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ii} & \mathbf{C}_{ib} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{bi} & \mathbf{C}_{bb} + \mathbf{C}_{bb}^f & \mathbf{C}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{eb}^f & \mathbf{C}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_i \\ \dot{\mathbf{U}}_b \\ \dot{\mathbf{U}}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{P}_b^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{bb}^f & \mathbf{K}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{eb}^f & \mathbf{K}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{U}_b \\ \mathbf{U}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{bb}^f & \mathbf{R}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{eb}^f & \mathbf{R}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_i \\ \mathbf{W}_b \\ \mathbf{W}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_{bb}^f & \mathbf{T}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_{eb}^f & \mathbf{T}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_i \\ \mathbf{X}_b \\ \mathbf{X}_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bb}^f \ddot{\mathbf{U}}_b^* \\ \mathbf{M}_{eb}^f \ddot{\mathbf{U}}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{bb}^f \dot{\mathbf{U}}_b^* \\ \mathbf{C}_{eb}^f \dot{\mathbf{U}}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{bb}^f \mathbf{U}_b^* \\ \mathbf{K}_{eb}^f \mathbf{U}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{bb}^f \mathbf{W}_b^* \\ \mathbf{R}_{eb}^f \mathbf{W}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{T}_{bb}^f \mathbf{X}_b^* \\ \mathbf{T}_{eb}^f \mathbf{X}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{P}_b^* \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $\ddot{\mathbf{U}}_b^*(t)$, $\dot{\mathbf{U}}_b^*(t)$, $\mathbf{U}_b^*(t)$, $\mathbf{W}_b^*(t) = \int_0^t \mathbf{U}_b^*(\tau) d\tau$, $\mathbf{X}_b^*(t) = \int_0^t \mathbf{W}_b^*(\tau) d\tau = \int_0^t \int_0^\tau \mathbf{U}_b^*(\sigma) d\sigma d\tau$, $\mathbf{P}_b^*(t)$ 는 지진파가 입사하는 자유장의 응답이고, 이들은 1차원 파전파 해석을 통해 얻을 수 있다.

식 (1)과 (2)로부터 3축 방향 지반운동이 작용하는 비선형 지반-구조물 상호작용계의 비선형 지진응답을 시간영역해석을 통하여 얻을 수 있다.

3. 적용 예제

3축 방향 지반운동이 작용할 때 Fig. 2와 같이 유연한 층상 지반에 놓인 면진 원전 구조물의 비선형 지진응답해석을

Fig. 2 Base-isolated nuclear power plant containment and internal buildings(Lee *et al.*, 2016)

수행하였다. 구조물 콘크리트의 Young의 계수, 포아송 비, 밀도는 각각 33.049GPa, 0.2778, 2400kg/m³이다. 격납 구조물과 내부 구조물은 전단 변형을 고려할 수 있는 Timoshenko beam 요소로 나타내었는데, 집중 질량에 의해 관성 효과를 고려하였다. 단, 구조 모델을 단순화하기 위해 회전 관성의 영향을 고려하지 않았다. 구조 모델의 물성치는 Table 1과 같다. 구조계의 1차 고유 진동수가 33.05rad/s이기 때문에 1차 모드에 2%의 감쇠를 주기 위하여 0.001210 s의 계수를 가지는 강성 비례 감쇠를 사용하였다. 구조물이 놓이는 바닥판은 solid finite elements로 모델링하고, 바닥판의 상면을 구조물과 강체로 연결하기 위해 강체 연결(rigid link)을 사용하였다.

Fig. 2에 보인 바와 같이 지반은 강체 기반암 위에 두 개의 층으로 구성되어 있다. 첫 번째 층과 두 번째 층의 전단파 속도는 각각 600m/s와 1200m/s이다. 그러므로 등가 지반(Lee *et al.*, 2016)의 전단파 속도는 800m/s이다. 지층의 포아송 비와 밀도는 각각 1/3과 2000kg/m³이다. 지반의 비선형 거동을 모사하기 위해 Drucker-Prager model을 사용하였다. 마찰각은 30°이고, 첫 번째 층과 두 번째 층의

점착력은 각각 0.939MPa와 3.756MPa이다. 지반의 감쇠는 등가지반의 1차 모드에 대하여 5% 감쇠를 가지도록 0.00318 s의 계수를 가지는 비례 강성 감쇠를 사용하여 모사하였다.

면진 장치는 Fig. 2에 보인 바와 같이 총 9개가 격리받침 위에 설치되어 있다. 면진 장치의 거동은 bi-linear spring과 선형 감쇠기로 모사하였다. 이 면진 시스템의 유효 주기와 감쇠비가 각각 2s와 20%가 되도록 설계하였다(Building Seismic Safety Council, 2003; 2006). 수평방향으로의 최대 지반 가속도는 0.3g로 가정하고, 원전 시설물의 설계 응답 스펙트럼(U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1973)에 근거하여 bi-linear spring의 elastic stiffness와 post-elastic stiffness를 각각 278.5MN/m, 27.85MN/m로 결정하였다(Mayer and Naeim, 2001). 단, 이때, 탄성 계수와 post-elastic stiffness의 비는 10으로 가정하였다. 감쇠 계수는 5.312GN·s/m이다.

3축 방향 입력지반운동은 지진파 생성 프로그램인 SIMQKE(Gasparini and Vanmarcke, 1976)를 사용하여 원전 시설물의 설계 응답 스펙트럼(U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1973)을 만족하도록 생성하였다. 단, 최대

Table 1 Structural properties of containment and internal buildings

(a) Containment building

Node	Height from a base(m)	Nodal mass (ton)	Location between Node No.	Area (m ²)	Shear area (m ²)	Moment of inertia (m ⁴)
1	63.09	86.2	2 to 1	92.0	46.5	1726.2
2	60.50	961.6	3 to 2	92.0	46.5	6904.8
3	56.21	1120.4	4 to 3	92.0	46.5	12946.5
4	50.38	1369.9	5 to 4	92.0	46.5	16398.9
5	43.83	2091.1	6 to 5	130.1	65.0	24166.7
6	37.73	1905.1	7 to 6	130.1	65.0	24166.7
7	31.64	1905.1	8 to 7	130.1	65.0	24166.7
8	25.54	1905.1	9 to 8	130.1	65.0	24166.7
9	19.45	1905.1	10 to 9	130.1	65.0	24166.7
10	13.35	1905.1	11 to 10	130.1	65.0	24166.7
11	7.16	2086.6	12 to 11	130.1	65.0	24166.7
12(Base)	0	-				

(b) Internal building

Node	Height from a base(m)	Nodal mass (ton)	Location between Node No.	Area (m ²)	Shear area (m ²)	Moment of inertia (m ⁴)
13	28.35	372.0	14 to 13	17.7	6.5	34.5
14	18.59	553.4	15 to 14	72.5	33.4	1726.2
15	14.94	3873.7	16 to 15	161.7	55.7	7767.9
16	10.21	1705.5	17 to 16	182.1	67.8	11220.3
17	6.706	2853.1	18 to 17	205.3	135.6	10357.2
18	3.962	1138.5	19 to 18	237.8	144.9	10357.2
19	2.438	1260.1	12 to 19	185.8	122.6	9494.1

지반가속도는 수평방향은 0.3g, 수직방향은 0.2g가 되도록 하였다. 지반운동의 지속시간은 지진규모 7.0~7.5에 해당하도록 하고(American Society of Civil Engineers, 2000), 사다리꼴 형태의 지반운동 가속도이력 포락함수를 사용하였다. Fig. 3은 생성된 입력지반운동의 시간이력과 응답스펙트럼, 3차원 공간에서의 궤적을 보여주고 있다. 생성된 지반운동은 지반의 지표면 자유장 운동으로 입력되었다.

상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS(2011)를 사용하여 이 시스템의 비선형 지진응답해석을 수행하였다. 지반의 원역을 나타내는 PMDL은 사용자 요소를 사용하여 구현하였고, 근역을 모사하는 ABAQUS의 비선형 유한요소와 결합하였다. 시스템의 비선형성으로 인해 정적 해석과 동적 해석 결과의 선형 중첩이 불가능하다. 그러므로 구조물과 지반의 정적 하중을 우선 가한 후, 이 상태에서 Fig. 3의 입력 지반운동을 사용하여 동적 해석을 수행하였다. 동적 해석을 위해 Newmark constant average acceleration method(Guddati and Tassoulas, 2000)를 사용하였다. 단, 시간 간격은 0.001s이다.

Fig. 4는 격납건물과 내부구조물 최상단에서의 상대 변위(바닥판의 수평이동과 회전으로 인한 강체 운동 성분 제외)의 평면에서의 궤적을 보여주고 있다. 해석 결과로부터 면진 장치를

사용하여 시스템의 지진응답을 상당히 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 해석이 종료된 후 지반에서의 소성 변형율의 크기를 나타내고 있다. 비교를 위해 3축 방향 지반운동이 아닌 1축 방향(x 방향) 지반운동만 작용하였을 때의 소성 응답도 같이 도시하였다. Fig. 5에서 지반에서의 소성 응답은 특정 방향으로 우세함을 확인할 수 있다. 비록 해석 대상은 축대칭 시스템이지만, 입력 지반운동의 특성에 의해 응답이 우세하게 발현되는 방향이 존재함을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4에 도시된 격납건물의 상대 변위에서도 관찰할 수 있다.

격납건물과 내부구조물이 놓인 바닥판의 회전(rocking) 운동의 시간이력을 푸리에 분석하여 이 운동의 우세 진동수가 3.387Hz임을 확인하였다. Fig. 3의 3축 방향 지반운동이 작용하였을 때 3.387Hz의 고유 진동수를 가지는 단자유도 구조물의 spectral acceleration을 조사하였다. 단, 구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였다. 방위각의 변화에 따른 spectral acceleration의 변화는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 방위각이 140°일 때 spectral acceleration은 최대값을 가진다. 이는 Fig. 5에 보인 지진응답의 경향과 유사한 결과이다. 즉, 입력 지반운동의 특성에 의해 비선형

Fig. 3 Generated artificial accelerograms

지반-구조물 상호작용계의 지진응답 특성이 크게 영향을 받게 되는 것이다.

또한, 3축 방향 지반운동에 의한 소성 응답의 수준이 1축 방향 지반운동만 작용하였을 때보다 단순히 $\sqrt{2}$ 배 수준으로 증가하지 않음을 확인할 수 있다. 다축 방향 지반운동이 작용하는 선형 구조계의 최대 응답은 SRSS법(square-root-of-sum-of-squares rule)등으로 산정이 가능하지만, 비선형 구조계의 응답은 정밀한 지진응답해석을 통해 최대 응답을

산정하여야 한다.

이 논문에서는 2축 방향($x-y$ 방향) 지반운동이 작용하였을 때의 응답은 3축 방향 지반운동이 작용한 경우와 크게 차이가 나지 않아서 포함하지는 않았다. 이는 수직방향으로의 최대 지반가속도가 $0.2g$ 이므로 중력에 비하면 그리 크지 않은 수준이기 때문이다. 만약, 수직방향 지반운동의 세기가 증가한다면 3축 방향과 2축 방향 지반운동이 작용하였을 때의 응답 수준은 서로 차이가 발생할 것이다.

Fig. 4 Relative displacement responses

(a) When a three-directional ground motion is applied

(b) When a uni-directional(x-directional) ground motion is applied

Fig. 5 Magnitudes of the plastic strains

Fig. 6 Variation of spectral acceleration

4. 결 론

이 연구에서는 3차원 perfectly matched discrete layer (PMDL)을 이용하여 3축 방향 지반운동이 작용하는 지반-구조물 상호작용계의 비선형 지진응답 해석을 수행하였고, 3축 방향 지반운동에 의한 비선형 응답을 1축 또는 2축 방향 지반운동이 작용하였을 때의 응답과 비교하였다. 3축 방향 지반운동이 작용하는 경우에는 입력 지반운동의 특성에 따라 시스템의 응답이 우세하게 발현되는 방향이 존재하고 그 수준 또한 정밀한 지진응답해석을 통해 산정하여야 함을 확인할 수 있었다.

이 연구의 PMDL을 사용한 비선형 지진응답 해석기법은 다양한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석에 적용할 수 있을 것이다. PMDL은 그 정확도를 사용자가 원하는 수준으로 조정할 수 있고 유한요소법이나 유한차분법과 같은 영역 기반 수치 해석법과 쉽게 결합할 수 있기 때문에, 이 연구에서 고려한 지반 또는 구조계의 재료 비선형 거동뿐만 아니라, 기초의 들림, 비정착된 구조물의 미끄러짐 등 다양한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석에 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 자체사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- ABAQUS (2011) ABAQUS Documentation, Dassault Systems, Providence, RI, USA.
- American Society of Civil Engineers (2000) Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98.
- Astley, R.J. (2000) Infinite Elements for Wave Propagation: a Review of Current Formulations and an Assessment of Accuracy, *Int. J. Num. Methods Eng.*, 49, pp.951~976.
- Asvadurov, S., Druskin, V., Guddati, M.N., Knizhnerman, L. (2003) On Optimal Finite-Difference Approximation of PML, *SIAM J. Num. Anal.*, 41, pp.287~305.
- Basu, U., Chopra, A.K. (2003) Perfectly Matched Layers for Time-Harmonic Elastodynamics of Unbounded Domains: Theory and Finite-element Implementation, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 192, pp.1337~1375.
- Basu, U., Chopra, A.K. (2004) Perfectly Matched Layers for Transient Elastodynamics of Unbounded Domains, *Int. J. Num. Methods Eng.*, 59, pp.1039~1074.
- Beskos, D.E. (1987) Boundary Element Methods in Dynamic Analysis, *Appl. Mech. Rev.*, 40, pp.1~23.
- Beskos, D.E. (1997) Boundary Element Methods in Dynamic Analysis: Part II (1986-1996), *Appl. Mech. Rev.*, 50, pp.149~197.
- Building Seismic Safety Council (2003) NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, FEMA 451, National Institute of Building Sciences.
- Building Seismic Safety Council (2006) NEHRP Recommended Provisions: Design Examples, FEMA 451, National Institute of Building Sciences.
- Gasparini, D.A., Vanmarcke, E.H. (1976) Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra, R76-4, Dept. of Civil Engineering,

- Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge.
- Givoli, D.** (2004) High-order Local Non-reflecting Boundary Conditions: A Review, *Wave Motion*, 39, pp.319~326.
- Guddati, M.N.** (2006) Arbitrarily Wide-Angle Wave Equations for Complex Media, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 195, pp.65~93.
- Guddati, M.N., Tassoulas, J.L.** (2000) Continued-fraction Absorbing Boundary Conditions for the Wave Equation, *J. Comput. Acoust.*, 8, pp.139~156.
- Kausel, E.** (1974) Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media, Research Report R74-11, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Lee, J.H., Kim, J.K., Kim, J.H.** (2014) Nonlinear Analysis of Soil - Structure Interaction using Perfectly Matched Discrete Layers, *Comput. & Struct.*, 142, pp.28~44.
- Lee, J.H., Kim, J.H., Kim, J.K.** (2016) Perfectly Matched Discrete Layers for Three-Dimensional Nonlinear Soil-structure Interaction Analysis, *Comput. & Struct.*, 165, pp.34~47.
- Mayer, R.L., Naeim, F.** (2001) Design of Structures with Seismic Isolation, in: Naeim, F. (Eds), *The Seism. Des. Handbook*, 2nd edition, Springer, pp.723~755.
- Rabinovich, D., Givoli, D., Becache, E.** (2010) Comparison of High-order Absorbing Boundary Conditions and Perfectly Matched Layers in the Frequency Domain, *Int. J. Num. Methods Biomed. Eng.*, 26, pp.1351~1369.
- Roesset, J.M., Tassoulas, J.L.** (1982) Nonlinear Soil Structure Interaction: An Overview, in Datta, S.K. (Eds.), *Earthquake Ground Motion and Its Effects on Structures*, ASME, New York, pp. 41~57.
- Seo, C.-G., Yun, C.-B., Kim, J.-M.** (2007) Cuboidal Infinite Elements for Soil-Structure interaction Analysis in Multi-Layered Half-space, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 20, pp.39~50.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission** (1973) Regulatory Guide 1.60, Revision 1.

요 지

이 연구에서는 3축 방향 지반운동이 작용하는 지반-구조물 상호작용계의 비선형 지진응답 해석을 수행한다. 비선형 거동이 예상되는 구조물과 지반의 근역은 비선형 유한요소체에 의해 모형을 구성한다. 기하학적 형상과 재료 성질이 균일하고 선형 거동을 가정하는 원역지반은 무한 영역으로의 에너지 방사를 정확히 고려할 수 있는 3차원 perfectly matched discrete layer에 의해 수치 모형을 구성한다. 이와 같은 지반-구조물 상호작용계의 수치모형을 사용하여 3축 방향 지반운동이 작용하는 비선형 지진-구조물 상호작용계의 지진응답해석을 수행한다. 3축 방향 지반운동이 작용하는 경우에는 입력 지반운동의 특성에 따라 시스템의 응답이 우세하게 발현되는 방향이 존재하고 그 수준 또한 정밀한 지진응답해석을 통해 산정하여야 한다. 이 연구의 해석기법은 구조물과 지반의 재료 비선형 거동, 기초와 지반 경계면에서의 경계 비선형 거동 등 다양한 비선형 지반-구조물 상호작용 해석에 확장 적용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 지반-구조물 상호작용, Perfectly matched discrete layer, 지진응답해석, 재료 비선형