

지반-구조물-설비 상호작용을 고려한 지진응답 특성에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on Seismic Response Characteristics Considering Soil-Structure-Equipment Interaction

오현준¹⁾ · 김유석^{2)*}

Oh, Hyeon-Jun¹⁾ · Kim, Yousok^{2)*}

¹⁾홍익대학교 건축공학과 박사과정, ²⁾홍익대학교 건축공학부 교수

¹⁾Ph.D. Candidate, School of Architectural Engineering, Hongik University, ²⁾Associate Professor, School of Architectural Engineering, Hongik University

/ A B S T R A C T /

Non-structural elements, such as equipment, are typically affixed to a building's floor or ceiling and move in tandem with the structure during an earthquake. Seismic forces acting upon non-structural elements traverse the ground and the building's structure. Considering this seismic load transmission mechanism, it becomes imperative to account for the interactions between soil, structure, and equipment, establishing seismic design procedures accordingly. In this study, a Soil-Structure-Equipment Interaction (SSEI) model is developed. Through seismic response analysis using this model, how the presence or absence of SSEI impacts equipment behavior is examined. Neglecting the SSEI aspect when assessing equipment responses results in an overly conservative evaluation of its seismic response. This emphasizes the necessity of proposing an analytical model and design methodology that adequately incorporate the interaction effect. Doing so enables the calculation of rational seismic forces and facilitates the seismic design of non-structural elements.

Key words: Nonstructural elements, Soil-Structure-Equipment Interaction (SSEI), Floor Response Spectrum (FRS), Earthquake response analysis

1. 서론

국내의 지진피해 사례를 통해서 비구조요소의 파손 및 탈락으로 인한 직접적인 인명 피해 및 피난통로 폐쇄로 인한 2차 피해 발생 사례가 보고되고 있다[1, 2]. 이와 같은 비구조요소 및 설비 등의 지진피해 사례는 구조물의 내진설계 여부와 관계없이, 즉 현행 내진설계 기준을 만족하는 건축물에서도 빈번히 발생하고 있다.

비구조요소(설비)는 일반적으로 건물의 바닥이나 천장 등에 부착되어 지진 발생 시 구조물과 함께 거동한다. 비구조요소에 입력되는 지진하중의 전달 매커니즘은 지진 발생 시 기반암에 의한 운동이 표층층의 탁월주기에 의하여 1차 증폭되고, 지표면에서의 자유장 운동이 구조물의 동특성에 따라서 증폭된 후, 최종적으로 비구조요소의 동특성에 따라 응답이 증폭된다

(Fig. 1)[3]. 이러한 하중 전달 매커니즘의 관점으로 볼 때 비구조요소의 합리적이고 경제적인 내진설계를 위해서는 지반-구조물-비구조요소의 상호작용 효과에 관한 고찰 및 이를 반영한 내진설계 절차의 수립이 필요하다.

비구조요소의 거동은 요소 자체의 에너지 흡수, 감쇠 및 비선형 거동뿐만 아니라 지진동 및 구조물의 동특성 등의 영향을 받으며[4], 구조물의 지진 응답 및 동특성은 지반의 특성에 따라서 변동하게 된다[5-8]. 현행 구조설계에서는 일반적으로 지반 조건을 고정단(fixed base)으로 가정하여 해석 및 설계를 수행하고 있으나 선행 연구를 통해서 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 고려하는 경우 구조물의 응답이 변하는 것이 확인되었으며[5, 6], [9], 구조물의 지진 시 응답 변화는 결과적으로 비구조요소의 응답 및 동특성의 변화를 발생시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 지반-구조물-비구조요소 상호작용(Soil-Structure-Equipment Interaction, SSEI) 모델의 구축 및 이를 이용하여 산출된 지진 응답해석 결과를 통해서 각 상호작용 유무에 따른 비구조요소의 응답 차이를 검토함으로써 비구조요소의 내진설계에 있어서 각 시스템 간의 상호작용 고려 필요성에 대해서 고찰하였다.

*Corresponding author: Kim, Yousok

E-mail: yskim1220@hongik.ac.kr

(Received September 19, 2023; Revised September 22, 2023; Accepted September 22, 2023)

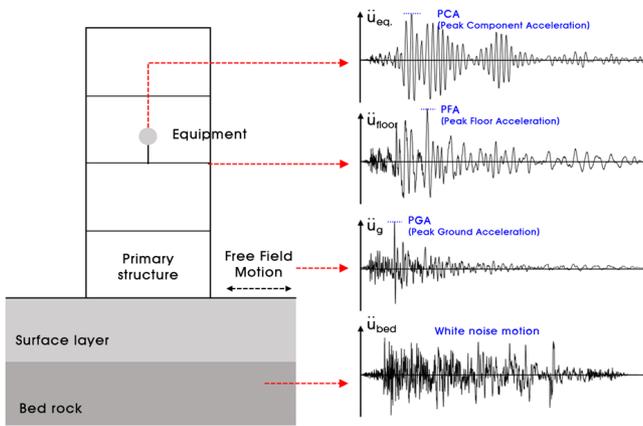


Fig. 1. Conceptual diagram of acceleration amplification for systems

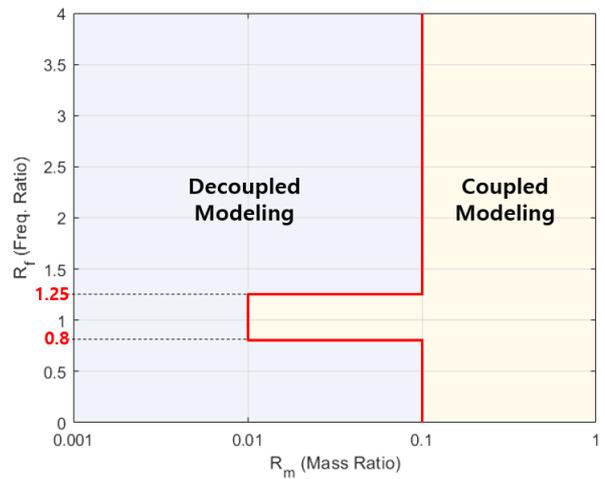


Fig. 2. Dynamic coupling model criteria

2. 선행 연구 및 현행 기준 분석

2.1 선행 연구

원자력 분야에서 비구조요소(설비)의 지진 응답을 산정하기 위해서 많은 연구가 수행되었으며, 대표적인 방법으로 연계 시스템(coupled system) 해석과 비연계 시스템의 해석 방법인 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum, FRS)이 있다.

연계 시스템 방법은 구조물과 비구조요소를 동시에 모델링하므로 해석 모델 구축이 복잡하고, 해석 대상이 대형화될수록 해석 시간이 오래 소요되기 때문에 FRS 방법을 주로 이용하고 있다. FRS 방법은 구조물과 비구조요소를 분리시켜 각각 해석하는 방법으로, 구조물의 가속도 응답을 비구조요소의 지진 하중으로 입력하여 지진응답해석을 수행하는 방식이다. 그러나 각 시스템을 별도로 해석하기 때문에 상호작용을 고려할 수 없으며, 일부 조건(공진 진동수)에서 실제 응답에 비해 매우 보수적인 결과가 도출되는 한계 및 이에 따른 신뢰성 부족이 지적되고 있다[10-16].

이로 인하여 비구조요소의 적절한 응답을 산출하기 위해서 U.S NRC, ASCE 4-98, Gupta(1984) 및 Fouquiau et al.(2018)에서는 구조물의 고유진동수 및 지진응답 해석 오차 등을 이용하여 연계 및 비연계 시스템을 적용할 수 있는 범위를 Fig. 2와 같이 제안하였다[16-19].

한편 지반-구조물 상호작용(SSI)에 대한 연구는 1970년대 이후 지속적으로 수행되었으며, 지반의 효과에 따른 구조물의 응답 변화를 주로 검토하였다[20-27]. 일반적으로 지반-구조물 상호작용 효과를 고려하면 구조물을 포함한 전체 시스템의 주기 및 감쇠가 증가하여 밀면전단력을 감소시키기 때문에, 보수성과 해석 시간 등을 고려하여 지반 조건을 고정단으로 가정하여 설계를 수행하고 있다. 그러나 단주기 건물(단주기 영역)의 경우는 장주기화로 인하여 고정단에 비해 밀면 전단력이 증가하는 상반된 결과가 보고되고 있다[6-8]. 또한 구조물의 장주기화로 인하여 동특성이 변화하게 되므로, 공진 진동수가 변동하게 되어 설계에서 고려되지 않은 비구조요소의 거동을 나타낼 수도 있다.

이와 같은 연구 결과를 바탕으로 비구조요소의 내진설계에 있어서 SSI 및 SEI 고려의 필요성이 부각되어 지반-구조물-비구조요소의 상호작용(SSEI)을 고려한 연구가 수행되었다. Kostov(1995)와 Wen et al.(2017)

은 각각 원자력 발전소와 지하 변전시설에 SSEI를 고려한 유한요소해석 모델을 수립하였으며, 지진동, 지반 특성, 묻힘 깊이 등의 해석변수 변경에 따른 비구조요소의 응답 차이를 검토하였다[28, 29]. Zhang and Jiang (2017-a, b), Jiang et al.(2020)에서는 지반-구조물-비구조요소 상호작용을 모사한 4층의 진동대 실험을 수행하였다. 이를 통해서 SSI를 고려한 조건에서 구조물 및 비구조요소의 지진 응답(최대가속도, 에너지 등)이 감소함을 확인하였으나, 일부 지진동에서는 응답 저감 효과가 미미한 결과도 출되었다[30-32].

2.2 현행 기준

국내 내진설계기준(KDS 41 17 00, 2019)에서 비구조요소의 설계지진력 산정은 ASCE 7-16에서 제시하고 있는 방법을 준용하고 있으며, 크게 등가정적하중과 동적해석법으로 분류하고 있다[7, 33]. 여기서 동적해석법은 응답이력해석 등 복잡한 해석을 수반하므로, 구조물의 해석없이 한정된 정보만을 이용하여 산정이 가능한 등가정적하중을 주로 활용하고 있다(식(1)).

$$F_p = \frac{0.4\alpha_p S_{DS} W_p}{R_p / I_p} (1 + 2 \frac{z}{h}) \quad (1)$$

여기서, F_p 는 비구조요소 질량 중심에 작용하는 수평설계지진력, S_{DS} 는 단주기에서의 설계스펙트럼가속도, α_p 는 비구조요소의 증폭계수(1.0 또는 2.5), R_p 는 비구조요소의 반응수정계수(1.0 ~ 3.5), I_p 는 비구조요소의 중요도계수(1.0 또는 1.5), W_p 는 비구조요소의 중량, h 는 구조물의 밀면으로부터 지붕층의 평균 높이, z 는 비구조요소가 설치되는 높이를 의미한다.

ASCE 7-22에서는 다양한 연구 결과를 바탕으로 기존 산정식에서 구조물의 동특성을 반영하여 식(2)로 개정되었다[8, 34]. 이때 H_f 는 식(3)을 이용하며, 구조물의 고유주기 정보가 없는 경우에는 식(4)를 이용할 수 있다.

$$F_p = 0.4 S_{DS} I_p W_p \frac{H_f}{R_\mu} \frac{C_{AR}}{R_{po}} \quad (2)$$

$$H_f = 1 + \frac{1}{T_a} (z/h) + [1 - (\frac{0.4}{T_a})^2] (z/h)^{1.0} \quad (3)$$

$$H_f = 1 + 2.5 \frac{z}{h} \quad (4)$$

여기서, H_f 는 건축물 높이에 대한 증폭 계수, T_a 는 약산식에 의한 건축물의 고유주기, R_μ 는 건축물의 연성감소계수, C_{AR} , R_{po} 는 각각 비구조요소의 공진연성계수와 강도계수를 의미한다.

위에서 제시된 식을 비구조요소 지진력 전달 매커니즘 형태로 정리하기 위해서 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), 최대층가속도(Peak Floor Acceleration, PFA) 및 비구조요소 최대가속도(Peak Component Acceleration, PCA)를 이용하여 정리하면 식(5)과 같이 표현할 수 있으며, 이를 이용하여 식(1)과(2)를 각각 식(6)과(7)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_p}{W_p} = PGA \times \frac{PFA}{PGA} \times \frac{PCA}{PFA} \times I_p \quad (5)$$

$$\frac{F_p}{W_p} = 0.4S_{DS} \times (1 + 2 \frac{z}{h}) \times \frac{a_p}{R_p} \times I_p \quad (6)$$

$$\frac{F_p}{W_p} = 0.4S_{DS} \times \frac{H_f}{R_\mu} \times \frac{C_{AR}}{R_{po}} \times I_p \quad (7)$$

여기서 $0.4S_{DS}$ 는 설계가속도응답스펙트럼에서 주기가 0일 때의 값으로, 즉, 최대지반가속도(PGA)를 의미하며, PFA/PGA는 구조물의 주기 및 연성능력에 관계없이 비구조요소의 설치층의 비율에 따라 층증폭항이 고려되었으나, 이후에는 식(3)과 같이 구조물의 동특성을 고려하도록 수정되었다[8, 10]. 또한 비구조요소 증폭(PCA/PFA)은 a_p/R_p 와 C_{AR}/R_{po} 를 이용하여 비구조요소의 동적 및 비탄성 거동에 따른 효과를 반영하고 있다[8, 34].

기준(KDS 41 17 00, ASCE 7-16, 7-22)에서 제시한 등가정적해석 방법은 각 시스템(지반, 구조물, 비구조요소)을 분리시켜 별도로 해석을 수행하는 순차적 해석(cascading analysis) 방식에 근거하고 있다[7], [33, 34]. 이는 각각의 시스템 간의 상호작용을 고려할 수 없으므로, 실제 현상을 제대로 반영하는데 한계가 있다. 또한 비구조요소의 응답에 지반의 영향이 존재하나 식의 단순화를 위하여 지반-구조물 상호작용을 무시하였으며, 비구조요소의 질량이 구조물의 응답에 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 작을 경우에만 적용할 수 있으므로, 일부 조건에서 신뢰성이 부족한 결과가 도출될 수 있다[8], [14-16].

따라서 본 연구에서는 각 시스템을 이상화하여 단순화된 해석 모델링을 수립하고 이에 대한 비선형 응답이력해석을 통해 지반-구조물-비구조요소 상호작용이 비구조요소에 미치는 영향을 검토하고, 내진설계에 상호작용의 필요 여부를 확인하였다.

3. 해석 모델 구축 및 해석 방법

3.1 해석 모델

지반-구조물 상호작용(SSI) 모델은 Meek and Wolf(1993) 및 Wolf (1994)에서 제안한 Cone 모델을 이용하였다[20, 21]. 해당 모델은 FEM 모델에 비하여 정확도는 상대적으로 떨어지나 경제적이고 실용적인 이유로 SSI 효과에 관한 다양한 연구에서 적용되고 있다[22-25]. Cone 모델은 기초 아래의 지반을 균질한 반무한장으로 가정하고 있으며, 이를 단순화하여 지반을 3자유도계(3-DOF)로 모델링하고 있다[26, 27]. 구조물-비구조요소 상호작용(SEI) 해석은 UCB/EERC-81/05(1981) 및 Gupta and Tembulkar(1984)에서 고려한 모델을 이용하였으며, 구조물 및 비구조요소는 각각 단자유도계(SDOF)로 모델링하였다[16, 35].

각각의 상호작용 모델을 결합하여 식(8)과 같이 지반-구조물-비구조요소 상호작용을 고려한 운동방정식으로 나타내었으며, 질량, 감쇠 및 강성 행렬의 각 성분에 해당하는 값은 식(9)-(21)에 해당한다. 운동방정식은 지반 3-DOF, 구조물 1-DOF, 그리고 설비 1-DOF로 구성된다.

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = [M] \{r\} \ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_g & & & \\ & I_s + I_f + M_b & & \\ & & M_f & \\ & & & M_s \\ & & & & M_e \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_g & -C_g & & & \\ & C_g + h^2 C_s & h C_s & -h C_s & \\ & & C_f + C_s & -C_s & \\ & & & C_s + C_e & -C_e \\ \text{sym.} & & & -C_e & C_e \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & K_b + h^2 K_s & h K_s & -h K_s & \\ & & K_f + K_s & -K_s & \\ & & & K_s + K_e & -K_e \\ \text{sym.} & & & -K_e & K_e \end{bmatrix}$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량(mass), 감쇠(damping) 및 강성(stiffness) 행렬을 나타내며, $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$, $\{r\}$, \ddot{u}_g 는 가속도(acceleration), 속도(velocity), 변위(displacement), 영향 벡터(influence vector) 및 지반 가속도(ground motion)를 의미한다. 또한, 지반-구조물-비구조요소 상호작용에 따른 영향 벡터는 $r = \{0, 0, 1, 1, 1\}^T$ 로 정의하였다[21, 27]. 아래 첨자 ϕ , θ , f 는 지반에 해당하는 응답으로 순서대로 dummy, 회전, 병진의

성분을 의미하며, s, e는 구조물, 비구조요소 성분에 해당한다.

$$m_\varphi = \frac{9\pi^2}{128} \rho_s r^5 (1 - \nu_s) \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 \tag{10}$$

$$M_\theta = 0.3\pi(\nu_s - 0.33)\rho_s r^5 \quad (1/3 \leq \nu_s < 1/2) \tag{11}$$

$$I_s = \frac{M_s r^4}{4} \tag{12}$$

$$I_f = \frac{M_f r^4}{4} \tag{13}$$

$$M_s = \bar{m} \rho_s r^2 h \tag{14}$$

$$M_f = m_{fs} M_s \tag{15}$$

$$c_\theta = \rho_s V_p \frac{\pi r^4}{4} \tag{16}$$

$$c_f = \rho_s V_s \pi r^2 \tag{17}$$

$$k_\theta = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu_s)} \tag{18}$$

$$k_f = \frac{8Gr}{2-\nu_s} \tag{19}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu_s)}{1-2\nu_s}} \quad (\nu_s < 1/3) \tag{20}$$

$$V_p = 2V_s \quad (1/3 \leq \nu_s < 1/2) \tag{21}$$

$$G = \rho_s V_s^2 \tag{21}$$

여기서, m_φ 는 dummy 성분에 대한 질량 관성 모멘트, ρ_s 는 지반의 밀도, r 은 기초의 반경, ν_s 는 지반의 프아송비, V_s 는 지반의 전단파속도, V_p 는 지반의 종파속도, M_θ 는 지반의 프아송비 값에 따라 추가되는 질량 관성 모멘트이며, I_s 는 구조물의 질량 관성 모멘트, M_s 는 구조물의 질량, I_f 는 기초의 질량 관성 모멘트, M_f 는 기초의 질량, \bar{m} 는 구조물-지반 질량비, h 는 구조물의 전체 높이, m_{fs} 는 기초-구조물 질량비를 의미한다. 또한, c_θ 및 c_f 는 각각 지반의 회전 및 병진 감쇠이며, k_θ 및 k_f 는 지반의 회전 및 병진 강성이며, G 는 지반의 전단 강성이다 [21], [26, 27].

3.2 해석 방법

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용(SSI) 및 구조물-비구조요소 상호작용(SEI) 유무에 따른 비구조요소의 응답 차이를 검토하기 위해서 Fig. 3

과 같이 4가지 해석 모델을 수립하였다.

지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 모델은 고정단 조건(fixed base, FB)으로 설정하였으며(Fig. 3-(a), (b)), 상호작용을 고려한 모델(SSI)은 sway와rocking 스프링을 이용한Cone 모델을 적용하였다(Fig. 3-(c), (d)). 구조물-비구조요소 상호작용을 고려하지 않은 비연계 모델(decoupled

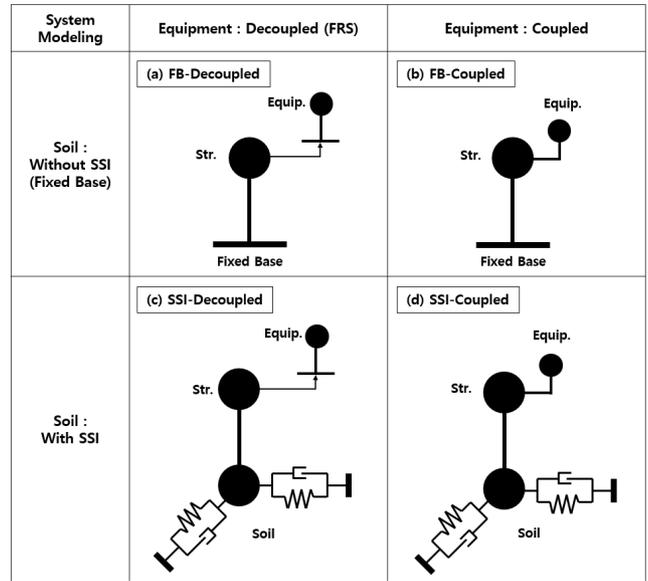


Fig. 3. Analysis cases

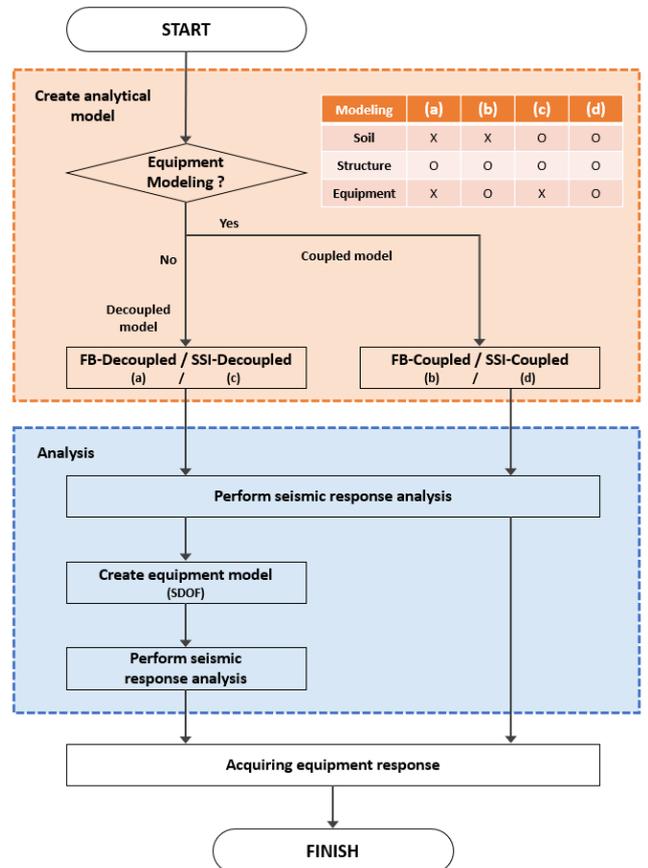


Fig. 4. Flow chart of seismic response analysis

model)은 비구조요소를 포함하고 있지 않으나 비구조요소의 질량은 구조물의 질량에 가산하였다(Fig. 3-(a), (c)). 한편, 연계 모델(coupled model)은 Fig. 3-(b), (d)와 같이 구조물과 비구조요소를 모두 포함하고 있다.

따라서, FB-Decoupled는 현행 내진설계에서 수행되는 방식과 유사한 가장 단순한 모델(지반-구조물의 상호작용 및 구조물-설비의 상호작용 미고려)이라고 할 수 있다. 한편, SSI-Coupled 모델은 위의 2가지 상호작용을 모두 고려한 모델로서 지진 시 비구조요소의 실제 거동을 가장 유사하게 구현할 수 있는 모델이라고 할 수 있다.

위의 4가지 해석 모델에 대하여 지진 응답 해석을 수행하였으며 각 해석 모델에 대한 비구조요소의 응답 산출 과정은 Fig. 4와 같다[36].

연계 모델(coupled model)은 구조물과 비구조요소를 일체형으로 모델링하므로 비구조요소의 응답을 한 번의 해석으로 산출할 수 있다. 그러나, 비연계 모델에서는 비구조요소를 포함하고 있지 않으므로 구조물의 가속도 응답 산출 후, 이 응답을 비구조요소(단자유도계 모델)의 입력 하중으로 지진응답해석을 수행하여 비구조요소의 가속도 응답을 산출한다. 즉, 비연계 모델에 있어서 비구조요소의 응답 산출 과정은 층응답스펙트럼법(Floor Response Spectrum methods, FRS)과 동일한 방법이라고 할 수 있다.

3.3 주요 해석 변수

본 연구에서는 지반-구조물-비구조요소 상호작용에 의한 효과를 검토하기 위하여 각 시스템의 주요 변수를 설정하고 매개변수 해석(parametric analysis)을 수행하였다.

3.3.1 지반 및 기초의 주요 변수

지반 및 기초의 해석 변수는 Veletsos and Nair(1975), Bielak(1975) 및 Stewart et al.(1999)의 연구를 기반으로 지반-구조물 상호작용에 영향을 주는 주요 인자를 대상으로 하였으며[5], [37-39], 이 중에서 SSI 효과에 가장 큰 영향을 미치는 해석 변수는 지반-구조물 강성비(a_0)(식 (22))와 구조물의 세장비(sr)(식 (23))로 분류된다. 여기서, w_{fix} 는 구조물의 각진동수이다.

$$a_0 = \frac{w_{fix} h}{V_s} \quad (22)$$

$$sr = \frac{h}{r} \quad (23)$$

a_0 의 범위는 고정단 조건(fixed condition)의 경우에는 0, 연약 지반일수록 값이 증가하게 되며 일반적으로 3 이하의 값을 적용한다. 본 연구에서는 a_0 의 값으로 0, 1, 3을 적용하였으며, sr 은 1을 적용하였다[23], [39, 40].

구조물-지반 질량비(\bar{m})와 기초-구조물 질량비(m_{fs})는 각각 0.5와 0.1을 적용하였으며 지반의 밀도(ρ_s)는 18 kN/m³/g, 지반의 프아송비(ν_s)는 0.4를 적용하였다[5], [40-42].

3.3.2 구조물의 주요 변수

구조물의 주기(T_{fix})는 0.1초부터 0.1초 간격으로 3.0초까지로 설정하였으며, 고정단 조건에서 비구조요소의 질량(M_e)이 고려되지 않은 구조물만의 질량(M_s)으로 산정된 주기를 의미한다. 구조물의 감쇠비는 5%를 적용하였다.

3.3.3 비구조요소의 해석 변수

비구조요소의 질량(M_e)과 주기(T_e)는 각각 구조물-비구조요소 질량비(R_m)와 구조물-비구조요소 진동수비(R_f)를 이용하여 산정하였다(식 (24)). R_m 이 증가함에 따라 구조물-비구조요소 상호작용(SEI) 효과가 일반적으로 증대되는 것으로 보고되고 있으며[14], 본 연구에서 질량비는 0.001(0.1%), 0.01(1.0%), 0.1(10%)로 설정하였다[15-19].

일반적으로 구조물과 비구조요소의 고유주기가 일치하는 경우($R_f = 1.0$), 공진(resonance)에 의하여 비구조요소의 응답이 증가하나, 지반-구조물 상호작용 효과 등 시스템 주기의 증가에 따른 공진 주기가 변동될 수 있다. 이를 고려하여 진동수비를 0.1부터 3.0까지로 설정하였으며, 비구조요소의 감쇠비(ζ_e)는 2, 5, 10%를 적용하였다[14], [33, 34], [43].

$$R_m = \frac{M_e}{M_s}, \quad R_f = \frac{f_e}{f_{fix}} = \frac{T_{fix}}{T_e} \quad (24)$$

3.4 입력 지진동

지반-구조물-비구조요소 상호작용(SSEI)을 고려한 비구조요소의 응답을 산출하기 위해 비선형 동적 해석에 사용된 지진동은 21개로 이들의 응답 스펙트럼 및 기본 정보를 Fig. 5와 Table 1에 나타내었다.

일반적으로 지반과 구조물의 강성 차이가 큰 연약지반에 위치한 구조물일수록 지반-구조물 상호작용(SSI)의 효과가 크게 발생하므로[23], [39, 40],

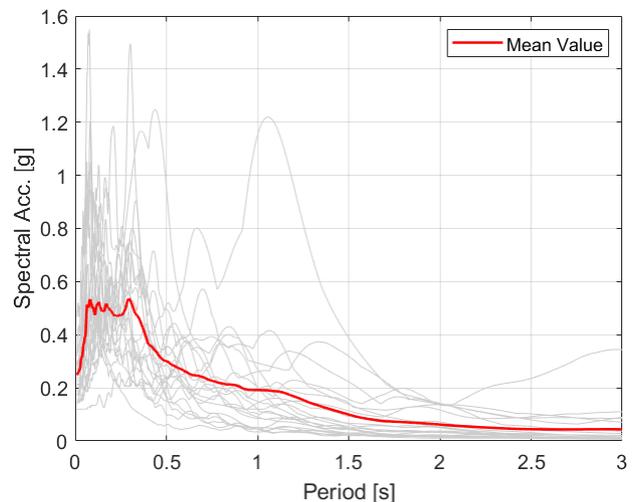


Fig. 5. Acceleration response spectrum of ground motion

Table 1. Information of ground motions

Event (Year) – Station	Mw	Soil Type	Drup [km]	PGA [g]	Arias intensity	Tp
Imperial Valley (1979) - Compuertas	6.5	C	32.6	0.187	0.102	0.05
Imperial Valley (1979) - Compuertas	6.5	C	32.6	0.147	0.070	0.123
Imperial Valley (1979) - El Centro Array #12	6.5	C	18.2	0.145	0.129	0.201
Loma Prieta (1989) - Agnews State Hospital	6.9	C	28.2	0.170	0.183	0.264
Loma Prieta (1989) - Gilroy Array #4	6.9	C	16.1	0.419	0.365	0.439
Loma Prieta (1989) - Sunnyvale - Colton Ave	6.9	C	28.8	0.207	0.152	0.126
Loma Prieta (1989) - APEEL 2 - Redwood City	6.9	D	47.9	0.274	0.147	1.057
Loma Prieta (1989) - Foster City - 355 Menhaden	6.9	D	51.2	0.119	0.080	0.622
Superstitt Hills(B) (1987) - 5062 Salton Sea	6.5	D	27.1	0.140	0.112	0.126
Morgan Hill (1984) - Gilroy Array #2	6.2	C	15.1	0.213	0.155	0.139
Kobe (1995) - Kakogawa	6.9	D	26.4	0.240	0.155	0.081
Kobe (1995) - Kakogawa	6.9	D	26.4	0.324	0.207	0.082
Kobe (1995) - Shin-Osaka	6.9	D	15.5	0.225	0.218	0.332
Kobe (1995) - Shin-Osaka	6.9	D	15.5	0.233	0.211	0.297
Northridge (1994) - Canoga Park	6.7	C	15.8	0.392	0.339	0.302
Northridge (1994) - LA - N Faring Rd	6.7	C	23.9	0.280	0.185	0.314
Northridge (1994) - LA - N Faring Rd	6.7	C	23.9	0.264	0.202	0.101
Northridge (1994) - LA - Fletcher Dr	6.7	C	29.5	0.172	0.127	0.177
Northridge (1994) - LA - Fletcher Dr	6.7	C	29.5	0.244	0.206	0.257
Northridge (1994) - LA - Centinela St	6.7	C	30.9	0.449	0.152	0.078
Northridge (1994) - LA - Centinela St	6.7	C	30.9	0.319	0.225	0.064

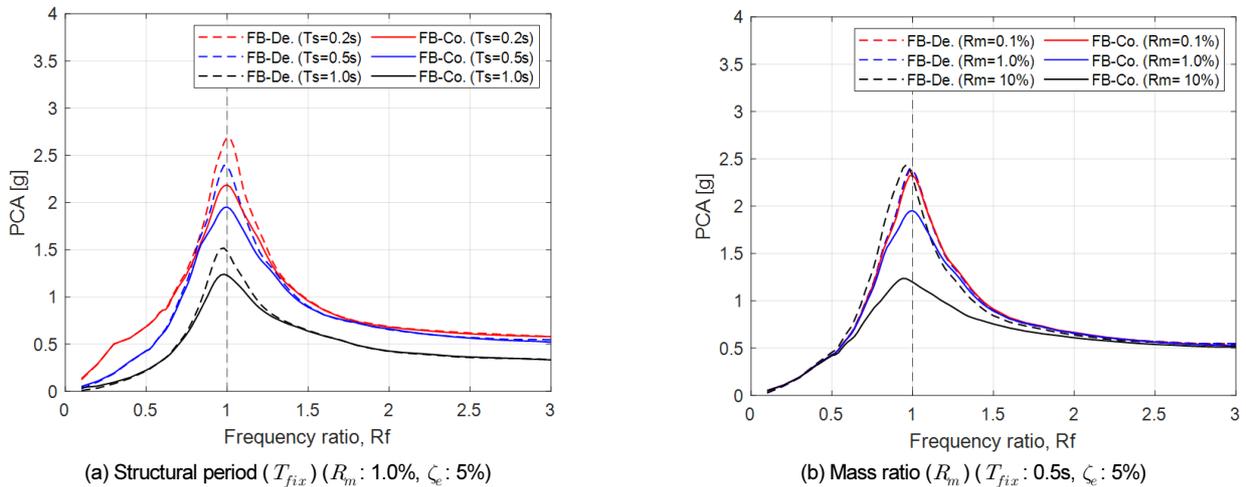


Fig. 6. Effect of structure-equipment interaction (fixed base)

USGS의 지반분류 체계 상 상대적으로 연약 지반에 속한 C($180\text{ m/s} < V_s \leq 360\text{ m/s}$)와 D($V_s \leq 180\text{ m/s}$)에서 계측된 지진동을 선정하였다.

또한, 진앙지 근처(near fault)에 위치한 관측소에서 계측된 지진동에서는 급격하게 커진 속도 응답이 관찰되며, 이에 따라 directivity effect와 filing step 현상이 발생한다[44, 45]. 본 연구는 지반-구조물 상호작용의 고려 유무에 따른 비구조요소 일반적 경향 분석을 목적으로 하므로, 입력 지진동은 원역 지반(진앙지 기준 약 10km 이상 위치한 지역)에서 계측된 규모(M_w) 6.0 이상의 지진동을 선정하여 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과

4.1 FB-Decoupled vs. FB-Coupled

본 절에서는 SSI 적용에 따른 비구조요소 응답의 영향을 검토하기에 앞서 SSI를 고려하지 않은 고정단 조건(FB)에서 구조물-비구조요소 상호작용을 고려하지 않은 경우(FB-Decoupled)와 고려한 경우(FB-Coupled)에 대한 결과를 비교하였다(Fig. 6).

해석 결과는 진동수비(R_f)에 따른 비구조요소의 최대가속도(PCA)로

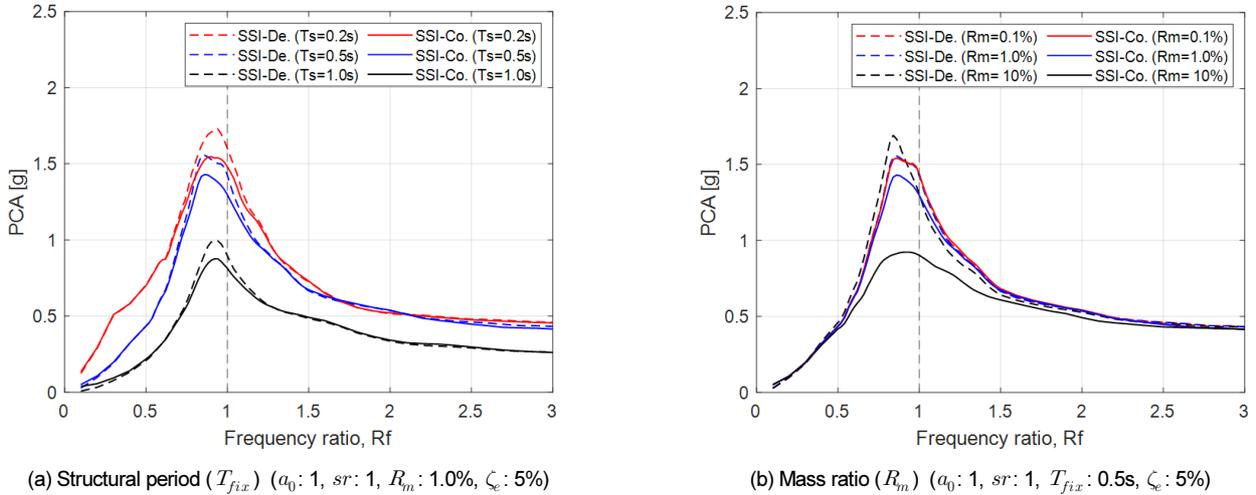


Fig. 7. Effect of structure-equipment interaction (SSI)

비교하였으며, 21개의 입력 지진동에 대한 평균값으로 나타내었다. 또한 각 그래프에서 파선의 결과는 FRS 방법으로 산정된 비연계(decoupled) 모델의 결과를 나타내며, 실선은 연계(coupled) 모델의 해석 결과를 의미한다.

Fig. 6-(a)에서는 구조물의 주기(T_{fix})가 0.2, 0.5, 1.0s에 대해서 구조물-비구조요소 상호작용 유무에 따른 PCA 응답을 비교하고 있다. 평가 지진동의 응답스펙트럼으로부터 단주기 성분이 탁월하다는 것을 확인할 수 있으며(Fig. 5), 이에 따라 구조물의 주기가 짧을수록 응답이 크게 나타나고 있다. 그러나, 구조물의 주기와 관계없이 구조물-비구조요소의 진동수비(R_f)가 1.0인 부근에서 응답이 증폭되고 있으며[46], 비연계 해석 결과(파선)가 연계 해석 결과(실선)를 상회하고 있다. 이는 구조물-비구조요소 상호작용을 고려하는 경우 구조물의 최대 가속도(PFA)가 감소하게 되며 이에 따라 비구조요소의 응답(PCA)이 감소한 결과라고 할 수 있다[14].

비연계 해석의 주기(T_e)는 구조물의 질량과 함께 비구조요소의 질량을 고려하기 때문에($M_s + M_e$), 구조물만의 질량(M_s)으로 구성된 주기(T_{fix})보다 증가한다(식(25)). 따라서 Fig. 6-(b)의 구조물-비구조요소의 질량비(R_m) 변화에 따른 응답을 보면 최대 응답이 발생하는 R_f 의 값이 1.0보다 작은 쪽(왼쪽)으로 소폭 이동한 것을 볼 수 있으며 R_m 이 10%인 경우에 가장 큰 이동폭을 보이고 있다. 한편, 질량비가 매우 작은 0.1%에서의 응답은 SEI 유무와 관계없이 거의 동일한 결과를 나타내고 있으나, 질량비가 커질수록 구조물-비구조요소의 상호작용 고려 유무에 따른 응답 차이가 증가함을 알 수 있다. 즉, 상호작용 효과를 고려하지 않은 비연계 모델에서 비구조요소의 가속도 응답이 크게 평가되고 있다. 따라서 비구조요소의 질량비가 큰 경우, 상호작용을 고려하지 않는 일반적인 FRS 방법을 적용하게 되면 비구조요소의 응답이 과대평가됨을 나타내고 있다[15-18].

$$T_{fix} = 2\pi \sqrt{\frac{M_s}{K}}, \quad T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M_s + M_e}{K}} \quad (25)$$

4.2 SSI-Decoupled vs. SSI-Coupled

본 절에서는 SSI를 고려한 조건에서 구조물-비구조요소의 상호작용

(SEI) 유무에 따른 비구조요소의 최대가속도(PCA)응답을 비교하였다. 각 해석 결과는 21개의 개별 지진동에 대한 평균값으로 나타내었다(Fig. 7).

고정단 조건(fixed base)에서는 지반을 무한 강성 조건(rigid)으로 가정하고 있으나, 실제 조건에서 지반의 강성은 유한한 값을 가지므로 고정단 조건에서의 시스템 주기(T_{fix})에 비하여 유한강성 지반을 포함한 전체 시스템의 주기는 증가한다(식(26)). 이와 같은 주기의 변화는 Fig. 8에서와 같이 SSI 효과가 크게 나타나는 무른 지반일수록 뚜렷이 나타난다[23], [39, 40], [42].

$$T_{SSI} = T_{fix} \sqrt{1 + \frac{k_s}{k_f} + \frac{k_s h^2}{k_0}} \quad (26)$$

고정단 조건(Fig. 6-(a))과 지반-구조물 상호작용(SSI)을 고려한 경우(Fig. 7-(a))의 비구조요소 응답(PCA)을 비교한 결과, 지반조건과 관계없이 비연계 해석의 결과가 연계 해석 결과를 상회하는 결과를 나타내고 있다. 그러나 SSI를 고려한 경우 최대응답이 발생하는 R_f 의 값이 1보다 작은 쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있으며, 이것은 앞서 기술한 바와 같이 SSI를 고려함에 따라서 시스템의 주기가 증가한 결과라고 할 수 있다.

한편, 비구조요소의 응답은 SSI를 고려할 경우, 고정단 조건에서의 응답에 비해서 감소하는 경향을 나타내고 있으며 무른 지반일수록 감소 폭이 커짐을 알 수 있다. 즉, Fig. 9를 통해서 지반-구조물 강성비(a_0)가 증가할수록 그 영향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 동일한 조건의 구조물일지라도 지반과의 상호작용효과 고려 유무에 따라서 구조물에 설치되는 비구조요소의 응답이 크게 달라질 수 있음을 나타낸다.

Fig. 7-(b)에서는 SSI 조건에서 질량비(R_m)에 따른 비구조요소의 응답(PCA)을 비교하였다. R_m 이 작은(0.1%) 경우에는 연계 및 비연계 모델의 응답 차이가 미미하여 SEI 효과를 무시할 수 있으나, 질량비가 증가함에 따라 SEI 효과가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 이는 고정단 조건에서 관찰된 결과와 유사한 결과라고 할 수 있다.

그러나 고정단 조건에 비하여 SSI에서 시스템의 장주기화 현상이 크게 나타나므로(Fig. 8) 공진이 발생하는 진동수비가 1.0에서 작아지는 방향으

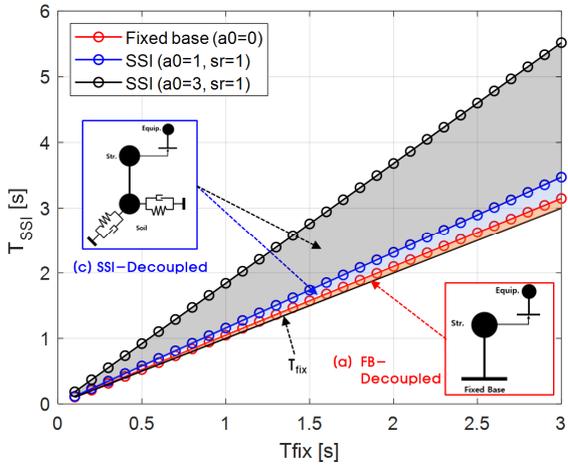


Fig. 8. System periods (decoupled, R_m : 10%)

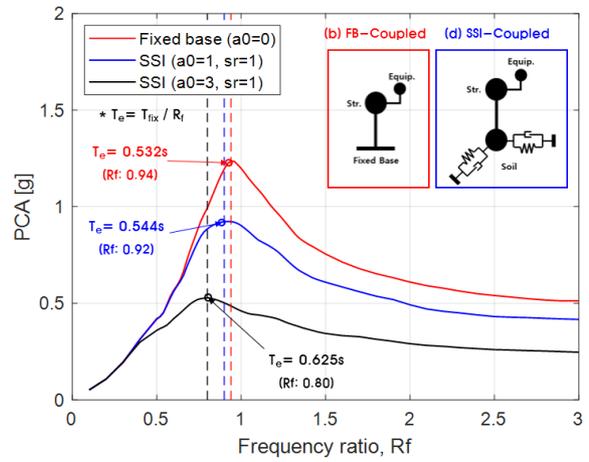
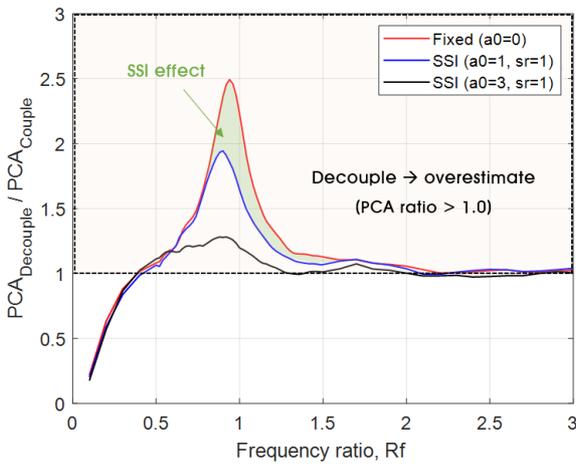
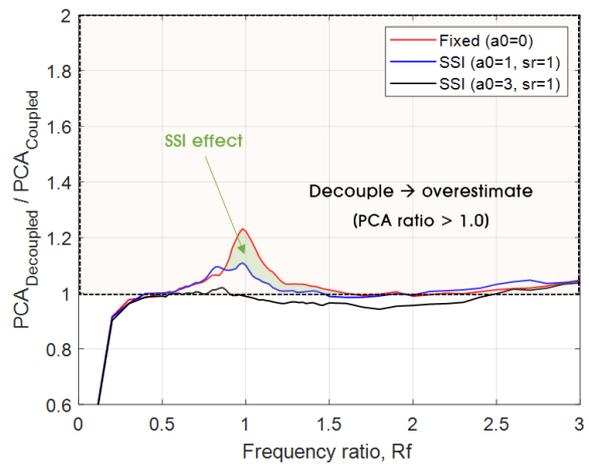


Fig. 9. Peak components acceleration from the SSI effects (coupled, T_{fix} : 0.5s, R_m : 10%, ζ_c : 5%)



(a) T_{fix} : 1.0s, R_m : 10%, ζ_c : 5%



(b) T_{fix} : 0.5s, R_m : 1.0%, ζ_c : 5%

Fig. 10. SSI effects on equipment responses (PCA ratio)

로 큰 폭으로 이동하였으며, 그 영향으로 비구조요소의 최대가속도가 크게 감소하였다.

위와 같은 결과를 종합해보면 실제 현상이라고 할 수 있는 지반-구조물 상호작용 조건에서는 시스템 및 비구조요소의 동특성 및 응답이 변하게 되므로, 상호작용을 고려하지 않은 설계에서 의도되지 않은 비구조요소의 거동(응답의 증폭 또는 감소)을 나타낼 수 있다.

5. 지반-구조물(SSI) 및 구조물-비구조요소(SEI) 상호작용에 따른 영향

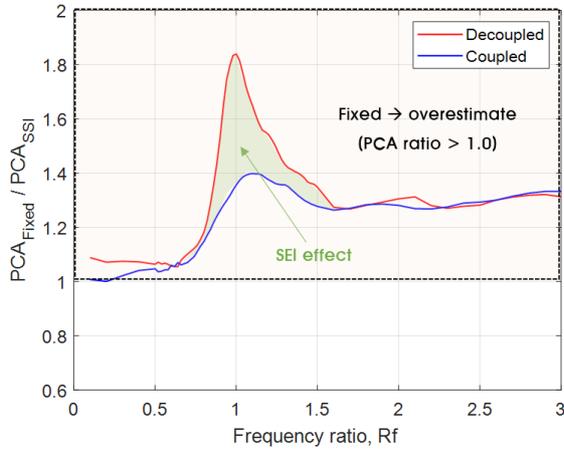
현행 비구조요소의 내진설계에서 일반적으로 적용되고 있는 고정단 및 비연계 해석 조건(FB-Decoupled)에서는 상호작용이 발생하는 실제 현상(SSI-Coupled)보다 보수적인 응답이 도출되는 것을 확인하였다. 본 절에서는 상호작용 유무에 따른 비구조요소의 가속도 응답(PCA)의 비율을 통해서 각 해석 조건에 따른 보수성을 검토하였다.

먼저 SSI 유무에 따른 연계 및 비연계 시스템 간의 보수성을 검토하기 위

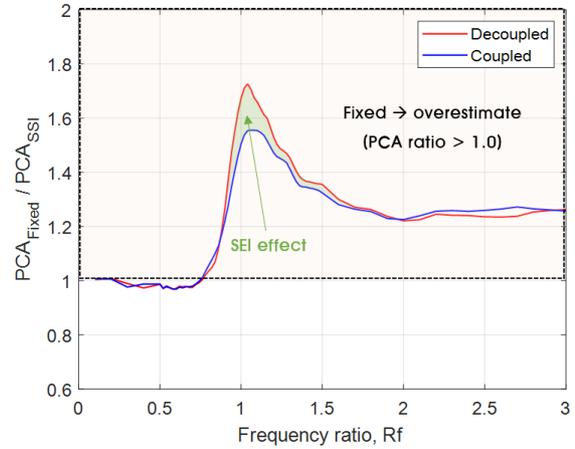
하여 비연계 시스템의 응답($PCA_{Decoupled}$)을 연계 시스템의 응답($PCA_{Coupled}$)으로 정규화하여 나타내었다(Fig. 10). 즉, $PCA_{Decoupled}/PCA_{Coupled}$ 의 비율이 1.0 보다 큰 경우는 비연계 시스템이 연계 시스템에 대비하여 보수적으로 평가하고 있음을 의미한다. 그리고, 그래프에 표시된 면적은 SSI 효과에 의해서 감소된 응답을 나타낸다.

Fig. 10에는 구조물의 주기가 1.0초와 0.5초인 경우와 질량비(R_m)가 10%와 1%인 경우에 대한 검토 결과를 나타내고 있다. Fig. 10을 통해서 SSI의 적용과 관계없이 연계 해석에 의한 가속도 응답에 비해서 비연계 해석의 결과가 대체적으로 크게 나타났으며, 고정단 조건의 해석모델에서 그리고 질량비가 큰 경우에 SEI에 따른 보수성이 매우 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 10-(b)의 일부 구간에서 지반-구조물 강성비(a_0)가 3인 경우에 연계 시스템의 응답이 역전되는 경우가 존재하나, 이는 구조물-비구조요소 질량비(R_m)가 작고, SSI 효과가 매우 큰 한정적인 조건에 해당한다.

SEI 유무에 따른 고정단 및 SSI 조건 간의 보수성을 검토하기 위하여 고정단에서의 응답(PCA_{Fixed})을 SSI 조건의 응답(PCA_{SSI})으로 정규화하여 비교하였다(Fig. 11). 여기서 PCA_{Fixed}/PCA_{SSI} 의 비율이 1.0 이상은 고정



(a) $T_{fix} : 1.0s, R_m : 10\%, \zeta_e : 5\%$ (SSI - $a_0 : 1, sr : 1$)



(b) $T_{fix} : 0.5s, R_m : 1.0\%, \zeta_e : 5\%$ (SSI - $a_0 : 1, sr : 1$)

Fig. 11. SEI effects on equipment responses (PCA ratio)

단에서의 응답이 SSI보다 보수적인 결과임을 나타낸다. 여기서, 그래프에 표시된 면적은 SEI 효과에 의해서 감소된 응답을 나타낸다.

Fig. 11을 통해서 SEI 고려 유무와 관계없이 고정단 모델의 응답이 SSI ($a_0=1$) 모델에 비하여 보수적으로 나타나고 있으며 비연계 해석 모델에서 더 큰 보수성이 관찰된다. 또한 Fig. 11-(b)의 R_m 이 작은 경우에도 SEI 효과(면적 차이)는 다소 감소하였으나 지반 조건에 따른 보수성은 크게 발생하는 결과를 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 지반-구조물-비구조요소 상호작용을 고려하기 위해서 각 시스템을 단자유도계로 이상화하여 지진응답해석을 수행하였으며, 지반-구조물(SSI) 및 구조물-비구조요소 상호작용(SEI) 고려 유무와 주요 변수에 따른 비구조요소의 응답 변화를 비교하였다. 해석 결과의 비교 분석을 통해서 도출된 내용은 다음과 같다.

- 1) 고정단 조건에서 SEI 유무에 따른 비구조요소의 가속도 응답은 비연계 시스템의 응답이 연계 시스템에 비하여 크게 산출되었다.
- 2) SSI 조건에서도 고정단 조건과 유사한 경향이 도출되었으나 SSI 효과로 시스템의 고유주기가 증가하여 구조물과 비구조요소 간의 공진 진동수가 감소하였으며 이러한 현상은 무른 지반일수록(a_0 가 증가할수록) 뚜렷하게 나타났다.
- 3) 지반-구조물 상호작용 유무와 관계없이 구조물-비구조요소의 질량비(R_m)가 작을 경우에는 연계 및 비연계 해석 결과에 큰 차이가 없었으나 질량비가 증가할수록 비연계 해석 결과가 연계 해석 결과를 큰 폭으로 상회하였다.
- 4) 구조물-비구조요소의 상호작용 유무에 따른 보수성은 SSI를 고려한 모델에 비하여 고정단 모델에서 더욱 크게 나타났다.
- 5) 지반 조건에 따른 보수성은 연계 시스템에 비하여 비연계 조건에서 더욱 크게 나타났다.

- 6) 상호작용 고려에 의한 시스템의 장주기화는 비구조요소의 최대 응답이 발생하는 진동수비의 변화를 초래함으로써 고정단 조건 및 비연계 해석에서 예측되지 않았던 주기 대역에서 응답이 증폭될 가능성이 있음을 확인하였다.

이상의 결과로부터 비구조요소에 지반-구조물-비구조요소 상호작용(SSEI)을 고려하지 않을 경우, 지진력이 매우 보수적으로 평가되는 것을 확인하였으며, 비구조요소의 합리적인 지진력 산출 및 내진설계를 위해서는 상호작용 효과를 적절히 고려할 수 있는 해석모델 및 설계 방법의 제안이 요구된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20181510102380).

/ REFERENCES /

1. Applied Technology Council (ATC). Reducing the Risks of Non-structural Earthquake Damage – A Practical Guide(FEMA E-74): Washington, D.C.; c2012.
2. Lee SH, Cho TG, Lim HT, Choi BJ. Damage of Gyeongju 9.12 Earthquakes and Seismic Design Criteria for Nonstructural Elements, EESK J Earthquake Eng. 2016 Dec;20(7):561-567.
3. Lee CH, Jun SC. Review of equivalent static and dynamic methods for seismic design of non-structural components, Magazine of the Korean Society of Steel Construction. 2020 Feb;32(1):8-16.
4. Newmark NM. Earthquake response analysis of reactor structures. Nuclear Engineering and Design, 1972 Jul;20(2):303-322.
5. NEHRP Consultants Joint Venture. Soil-structure interaction for building structures(NIST GCR 12-917-21): A partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for

- Research in Earthquake Engineering, Washington D.C.; c2012.
6. Federal Emergency Management Agency (FEMA). A Practical guide to soil-structure interaction(FEMA P-2091): Washington, D.C.; c2020.
 7. American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures(ASCE/SEI 7-16): Reston; c2017.
 8. Applied Technology Council (ATC). Recommendations for Improved Seismic Performance of Nonstructural Components(NIST GCR 18-917-43): National Institute of Standards and Technology; c2017.
 9. Federal Emergency Management Agency (FEMA). Recommended provisions for improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440. Washington, D.C.; c2005.
 10. Lizundia B. Proposed nonstructural seismic design force equations. 2019 SEAOC Convention proceedings, 2019 Aug 28-31, Squaw Creek, California: c2019.
 11. Villaverde R. Earthquake resistant design of secondary structures : A report on the state of the art. 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996 Jun 23-28, Acapulco, Mexico: c1996.
 12. Chen Y, Soong TT. Seismic response of secondary systems. *Engineering Structures*. 1988 Oct;10(4):218-228.
 13. Singh MP. Seismic design of secondary systems. *Probabilistic engineering mechanics*. 1988 Sep;3(3):151-158.
 14. Bae CH, Lee CH, Jun SC. Evaluation of Seismic Design Parameters for Nonstructural Components Based on Coupled Structure-Nonstructural 2-DOF System Analysis. *EESK J Earthquake Eng*. 2022 May;26(3):105-116.
 15. Cho SG, Gupta A. Generation of floor response spectra considering coupling effect of primary and secondary system. *EESK J Earthquake Eng*. 2020 Jul;24(4):179-187.
 16. Gupta AK, Tembulkar JM. Dynamic decoupling of secondary systems. *Nuclear Engineering and Design*. 1984 Sep;81(3):359-373.
 17. U. S. Nuclear Regulatory Commission. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants (NUREC 75-087): Washington, D.C.; c1975.
 18. American Society of Civil Engineers. Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary(ASCE 4-98): Reston; c2000.
 19. Fouquiau PV, Barbier F, Chatzigogos CT. New dynamic decoupling criteria for secondary systems, 16th European Conference on Earthquake Engineering, 2018 Jun 18-21; Thessaloniki, Greece: c2018.
 20. Meek JW, Wolf JP. Why cone models can represent the elastic half-space. *Earthq. Eng. Struct. Dyn*, 1993 Sep;22(9):759-771.
 21. Wolf JP. Foundation vibration analysis using simple physical models. 1st ed, Prentice Hall Englewood Cliffs NJ; c1994, 423 p.
 22. Ghannad MA, Ahmadnia A. The effect of soil-structure interaction on inelastic structural demands. *European Earthquake Engineering*. 2006;20(1):23-35.
 23. Ghannad MA, Jahankhah H. Site-dependent strength reduction factors for soil-structure systems. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*. 2007 Feb;27(2): 99-110.
 24. Nakhaei M, Ghannad MA. The effect of soil-structure interaction on damage index of buildings. *Engineering Structures*. 2008 Jun; 30(6):1491-1499.
 25. Wolf JP, Deeks AJ. *Foundation Vibration Analysis : A Strength-of-Materials Approach*, Elsevier Oxford; c2004, 240 p.
 26. Khoshnoudian F, Ahmadi E. Effects of inertial soil structure interaction on inelastic displacement ratios of SDOF oscillators subjected to pulse-like ground motions. *Bull Earthquake Eng*. 2015 Jun;13:1809-1833.
 27. Ahmadi E, Khoshnoudian F, Hosseini M. Importance of soil material damping in seismic responses of soil-MDOF structure systems. *Soils and Foundations*. 2015 Feb;55(1):35-44.
 28. Kostov M. Seismic soil-structure-equipment interaction analysis of unit 5/6, Kozloduy NPP: International Atomic Energy Agency: Vienna; c1995.
 29. Wen B, Zhang L, Niu D, Zhang M. Soil-structure-equipment interaction and influence factor in an underground electrical substation under seismic loads. *Appl. Sci*. 2017 Oct;7(10):1044.
 30. Zhang C, Jiang N. A shaking table real-time substructure experiment of an equipment-structure-soil interaction system. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017 Oct;9(10):1-12.
 31. Zhang C, Jinang N. Effects of equipment-structure-soil interaction on seismic response of equipment and structure via real-time dynamic substructuring shaking table testing. *Shock and Vibration*. 2017 Nov;2017(1):1-13.
 32. Jiang N, Luo L, Bi J. Effects of soil on the energy response of equipment-structure systems with different connection types between the equipment and structure. *Struct Design Tall Spec Build*. 2020 Jun;29(9):e1735.
 33. Korea Construction Standard Center. Seismic Building Design Code (KDS 41 17 00); c2019.
 34. American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures(ASCE/SEI 7-22): Reston; c2022.
 35. Kiureghian AD, Sackman JL, Noir-Omid B. Dynamic response of light equipment and structures(Report No. UCB/EERC-81/05): Earthquake Engineering Research Center: Berkeley: c1981.
 36. Chopra AK. *Dynamics of Structures*. 4th ed, Prentice Hall; c2014.
 37. Veletsos AS, Nair VV. Seismic interaction of structures on hysteretic foundations. *Journal of Structural Engineering*. 1975 Jan;101(1):109-129.
 38. Bielak J. Dynamic behavior of structures with embedded foundations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1974;3(3):259-274.
 39. Stewart JP, Seed RB, Fenves GL. Seismic soil-structure interaction in buildings. II : empirical findings. *J Geotech Geoenviron Eng*. 1999 Jan;125(1):38-48.
 40. Ganjavi B, Hajirasouliha I, Bolourchi A. Optimum lateral load distribution for seismic design of nonlinear shear-buildings considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2016 Sep;88:356-368.

41. Ganjavi B, Hao H. A parametric study on the evaluation of ductility demand distribution in multi-degree-of-freedom systems considering soil-structure interaction effects. *Engineering Structures*. 2012 Oct;43:88-104.
42. Veletsos AS, Meek JW. Dynamic behavior of building-foundation systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1974; 3(2):121-138.
43. US Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, c2014.
44. Kalkan E, Kunnath S. Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings. *Earthquake Spectra*. 2006 May; 22(2):367-390.
45. Ghannad MA, Amiri A, Ghahari SF. Effects of Soil-Structure Interaction on Response of Structures Subjected to Near-Fault Earthquake Records. 2008 Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, 2008 Jul 8-11, Reggio Calabria, Italy: c2008.
46. Oh SH, Kim JC. A Study on the Acceleration Response Amplification Ratio of Buildings and Non-structural Components Considering Long-Period Ground Motions. *EESK J Earthquake Eng*. 2023 Jan;27(1):1-12.