

지하층-지반 운동학적 상호작용을 고려한 기초저면의 설계지반운동 산정

Extracting Foundation Input Motion Considering Soil-Subterranean Level Kinematic Interaction

Shamsher Sadiq¹⁾ · 윤 지 남²⁾ · 김 주 형³⁾ · 박 두 희[†]

Shamsher Sadiq · Jinam Yoon · Juhyong Kim · Duhee Park

Received: October 8th, 2018; Revised: October 11th, 2018; Accepted: October 16th, 2018

ABSTRACT : Most of tall building systems are composed of above-ground structure and underground structure used for parking and stores. The underground structure may have a pronounced influence on tall building response, but its influence is still not well understood. In a widely referred report on seismic design of tall buildings, it is recommended to model the underground structure ignoring the surrounding ground and to impose input ground motion calculated considering the underground structure-soil kinematic interaction between at its base. In this study, dynamic analyses are performed on 1B and 5B basements. The motions at the base are calculated to free field responses. The motions are further compared to two procedures outlined in the report to account for the kinematic interaction. It is shown that one of the procedure fits well for the 1B model, whereas both procedures provide poor fit with 5B model analysis result.

Keywords : Tall building-underground structure interaction, Kinematic interaction, Transfer function, Embedment effect, Base slab averaging

요 지 : 대부분의 초고층 건물은 지상 구조물과 주차와 상가 용도 등으로 사용되는 복수층의 지하 구조물로 구성된다. 지하층은 초고층 건물의 지진응답에 큰 영향을 줄 수 있지만 내진설계에서 이의 영향이 명확하게 규명되지 않았다. 국외에서 가장 널리 사용되는 고층 구조물 내진설계 지침서에서는 지하층은 모델링하되 주변 지반은 모사하지 않으며 지하층-지반 운동학적 상호작용을 고려하여 계산된 기초 저면의 운동을 적용할 것을 권장하고 있다. 본 연구에서는 지하 1층과 5층 구조물에 대한 동적 해석을 수행하여 지하층 저면에서의 운동을 계산하였으며 자유장 운동과 비교하였다. 수치해석 결과를 내진설계 지침서에 제시된 상호작용을 고려하는 두가지 방법과 비교한 결과, 지하 1층의 경우 이 중 한가지 방법이 해석결과와 잘 맞지만 지하 5층의 경우 지침서에 제시된 방법은 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

주요어 : 고층 구조물-지하 구조물 상호작용, 운동학적 상호작용, 전달함수, 관입깊이 영향, 기초저면 평균

1. 서 론

현대 도시에서 초고층 건물은 주거 전용, 주상복합, 오피스 등의 다양한 용도로 사용되고 있으며 도심지의 공간 부족으로 인해 국내외에서 널리 시공되고 있다. 이러한 초고층 건물은 주차와 상가 공간 등을 지하에 배치하여 지하 구조물의 층수 및 규모 또한 증가하고 있다. 국내의 초고층 건물에는 대부분 지하 5층 이상의 하부 구조물이 사용되고 있다. 하부 구조물은 지상 구조물의 지진 응답에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 이를 적절히 평가해야 한다.

기존 내진설계 및 해석에서는 지하층을 무시하고 지상 구

조물이 지표면에 고정단 형태로 연결되었다고 가정하여 평가하였지만 이는 다양한 문헌에서 적절하지 않은 것으로 보고되었다(Stewart et al., 2012). 이외에 Stewart et al.(2012)에서는 지하층을 모델링하되 지반은 모사하지 않는 방법, 주변 지반을 스프링으로 대체하거나 깊이 별로 변이하는 지반운동을 가해주는 방법 등이 소개되었다. 하지만 해석 모델 간의 차이에 대해서는 분석된 사례가 제한적이다. 무엇보다 Stewart et al.(2012)은 지하층이 5층을 초과하는 깊은 지하 구조물에 대해서는 평가하지 않았다.

본 연구에서는 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 제시한 해석 절차

1) Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

2) Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

3) Research Fellow, Ph.D., Multi-Disaster Mitigation Research Group, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (Corresponding Author : dpark@hanyang.ac.kr)

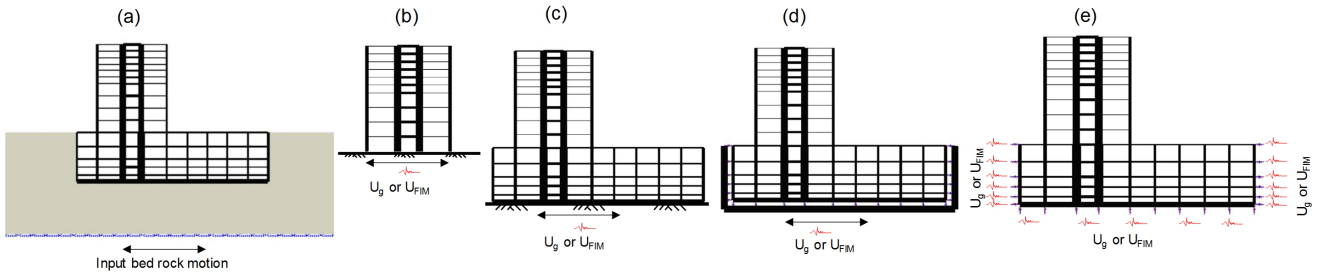


Fig. 1. Modeling approaches (a) Direct model, (b) Fixed base at surface (Case 1), (c) Fixed-base at subterranean level (Case 2), (d) Rigid bathtub (Case 3), (e) Spring-dashpot with depth variant excitation (Case 4)

(Stewart et al., 2012)인 해석해를 이용하여 지하층의 운동학적 상호작용을 고려한 지상 구조물의 설계지반운동을 산정하는 방법의 적용성을 평가하였다.

2. NIST 해석 절차

NIST 해석 절차에서는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 고려하여 고층 구조물의 응답을 평가하는 여러 모델을 소개하였다. Fig. 1에 각각의 모델을 도시하였으며 각 모델의 특징을 아래에 정리하였다.

Case 1 (Fig. 1b): 하부 구조물을 고려하지 않으며 지상 구조물의 1층 저면이 지표면에 고정되어 있다고 가정한다. 자유장 지표면의 설계지반운동(u_g)을 사용한다.

Case 2 (Fig. 1c): 지상 구조물과 하부 구조물의 전체를 모델링 한다. 하부 구조물 기초가 지반에 고정단 형태로 연결된다. 기초 저면에 스프링을 사용할 수도 있다. 자유장 운동은 지표면 운동이나 운동학적 상호작용을 고려한 운동(u_{FIM})를 사용할 수 있다. u_{FIM} 의 산정방법은 아래에 상세하게 설명하였다.

Case 3 (Fig. 1d): 지상 구조물과 하부 구조물 전체를 모델링 한다. 지반의 연성과 감쇠 특성은 하부구조물에 연결된 스프링과 대쉬포트에 의해 모사한다. 측면의 수평 하부에는 연직 스프링과 대쉬포트를 사용한다. 스프링은 Bathtub 이라고 불리는 강성 토조에 연결한다. 입력지반운동으로는 u_g 또는 u_{FIM} 을 사용할 수 있다. 여기서 주의할 것은 Bathtub은 강체이므로 하부에 가해주는 운동이 전체를 동시에 흔들어 준다는 점이다. u_g 를 사용하는 경우 응답을 과대예측할 수 있다.

Case 4 (Fig. 1e): 지상 구조물과 하부 구조물 전체를 모델링 한다. 지반의 연성과 감쇠 특성은 하부구조물에 연결된 스프링과 대쉬포트로 모사한다. 수평 하부에는 연직 스프링과 대쉬포트를 사용한다. 측면 스프링에는 깊이에 따라서 변이하는 운동을 재하한다. 스프링에는 가속도를 두

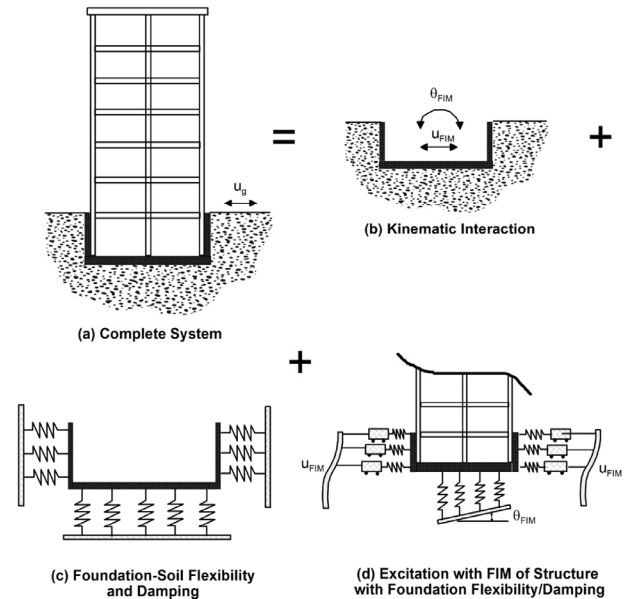


Fig. 2. Schematic illustration of substructure approach to solution to account for soil-structure-interaction

번 적분하여 계산된 변위를 적용한다.

NIST 해석 절차에 따르면 Case 1은 부정확성의 이유로 적절하지 않으며 Case 2를 사용할 것을 권장하고 있다. Case 3과 Case 4는 실제 적용의 어려움으로 인해 실무에서 거의 사용되지 않는다.

Case 2는 자유장 지표면 운동 u_g 또는 SSI를 고려한 운동 u_{FIM} 을 사용할 수 있으며 Case 3과 Case 4는 모두 u_{FIM} 을 사용한다. u_{FIM} 의 의미에 대한 개념도는 Fig. 2에 도시하였다. 이 모델에서 지상 구조물과 지하 구조물을 포함한 전체 시스템의 지하층은 운동학적 상호작용을 고려하여 추출된 u_{FIM} 운동과 이를 사용하는 해석 과정을 나타낸다. Fig. 2에서와같이 지하층은 내부가 비어있는 π 자형 Bathtub 형상이다. NIST procedure에서는 π 자형 지하층과 지반과의 운동학적 상호작용 모사 시 두가지를 고려해야 한다고 기술하고 있다. 첫번째는 기초 슬래브 평균화(base slab averaging), 두번째는 관입깊이 영향(embedment effect)이며 각각에 대한 전달함수를 제안하였다. 기초 슬래브 평균화는 지반운

동이 연직방향으로 입사하지 않는 경우 발생하는 도달 시간차와 모든 지진파에 내재된 공간적 비상관성 등 입사파와 강성이 큰 기초와의 복잡한 상호작용을 고려하기 위하여 사용되며, 관입깊이 영향은 깊이가 증가할수록 감소하는 지반운동을 모사하기 위하여 사용된다.

NIST 해석 절차는 운동학적 상관관계를 구하는 방법으로 H_u 모델과 RRS 모델의 2가지를 제시하였다. 먼저 H_u 모델에서 전달함수 구하는 방법은 다음과 같다. 기초 슬래브 평균화에 사용되는 전달함수는 Veletsos & Prasad(1989)와 Veletsos et al.(1997)이 원형 강체 기초에 대하여 제안하였으며 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$H_{u,bsa} = \left\{ \frac{1}{b_0^2} \left[1 - \exp(-2b_0^2) \left(I_0(2b_0^2) + I_1(2b_0^2) \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

여기서 I_0 와 I_1 은 수정된 Bessel 함수이며, $b_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi}} K_a a_0^k$, $a_0^k = \frac{\omega B_A^e}{V_s}$ 이다. B_A^e 는 유효기초폭이며, ω 는 각주파수이다. K_a 는 Stewart et al.(2003)이 제안한 상관성 변수이며 Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$K_a = 0.00065V_s, \quad 200 < V_s < 500 \text{ m/s} \quad (2)$$

여기서 V_s 는 지반의 전단파 속도이다.

Day(1978)와 Kausel et al.(1978)은 관입깊이(D) 효과를 고려하기 위한 전달함수를 Eq. (3)과 같이 제안하였다.

$$H_{u,emb} = \cos\left(\frac{D}{B_A^e} a_0^k\right), \quad \frac{\omega D}{V_s} < 1.1$$

$$H_{u,emb} = 0.45, \quad \frac{\omega D}{V_s} > 1.1 \quad (3)$$

운동학적 상호작용을 모사하기 위하여 사용되는 전달함수는 기초 슬래브 평균화와 관입깊이 효과를 각각의 전달함수의 곱으로 계산한다.

$$H_u = H_{u,bsa} \times H_{u,emb} \quad (4)$$

H_u 방법에서 전달함수는 기초 저면 깊이에서의 자유장 운동에 곱해져서 기초 저면의 운동을 산정하게 된다.

$$u_{FIM} = u_g \times H_u \quad (5)$$

여기서 u_{FIM} 은 운동학적 상호작용을 고려한 기초 저면 운동, u_g 는 지표면에서의 자유장 운동이다.

위의 모델은 이론적으로 도출되었으나 입사각도와 비상관성 등에 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 특히 전달함수는 고주파수에서 매우 작게 계산되어서 입력 지반운동의 고주파수 운동이 크게 감소되므로 결과가 과소계상되는 경향을 나타낸다.

NIST 해석 절차에서는 H_u 모델 이외에 FEMA 440(2005)에 기반한 경험적으로 전달함수를 계산하는 RRS 모델을 제시하였다. 이 모델 역시 H_u 모델과 마찬가지로 기초슬래브 평균화와 관입깊이의 영향에 대해 각각 RRS_{bsa} 와 RRS_{emb} 로 분류하여 Eq. (6)~(7)과 같이 제시하였다.

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{141100} \left[\frac{2(B_A^e/0.3048)}{T} \right]^{1.2}, \quad T > \frac{1}{f_L}$$

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{141100} \left[2(B_A^e/0.3048)f_L \right]^{1.2}, \quad T \leq \frac{1}{f_L} \quad (6)$$

$$RRS_{emb} = \cos\left(\frac{2\pi D}{T \cdot V_s}\right), \quad T > \frac{1}{f_L}$$

$$RRS_{emb} = \cos\left(\frac{2\pi D \cdot f_L}{V_s}\right), \quad T \leq \frac{1}{f_L} \quad (7)$$

여기서 T 는 주기이며, f_L 은 한계주파수이다.

RRS 모델의 전달함수는 아래와 같이 RRS_{bsa} 와 RRS_{emb} 의 곱으로 계산된다.

$$RRS = RRS_{bsa} \times RRS_{emb} \quad (8)$$

3. 운동학적 상호작용 평가를 위한 수치해석

지하층의 응답특성과 NIST 해석 절차의 u_{FIM} 산정 방법의 적절성을 평가하기 위하여 2가지 지하 구조물에 대한 수치해석을 수행하였으며 개요도는 Fig. 3에 도시하였다. 깊이 6m와 24m의 지하 1층과 5층 구조물은 각각 1B, 5B 모델로 명명하였다. 지하 구조물의 폭은 94.3m이며 이는 실제 국내에 시공된 고층 구조물의 지하층을 모사한 것이다. 2차원 동적해석에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 해석 영역은 연직방향으로 50m이며 수평방향으로 394.3m이다. 하부경계는 수직방향으로 고정되었으며 하향 지진파를 흡수하기 위하여 Lysmer & Kuhlemeyer (1969)의 점성 대쉬포트를 적용하였으며, 양쪽 측면경계의

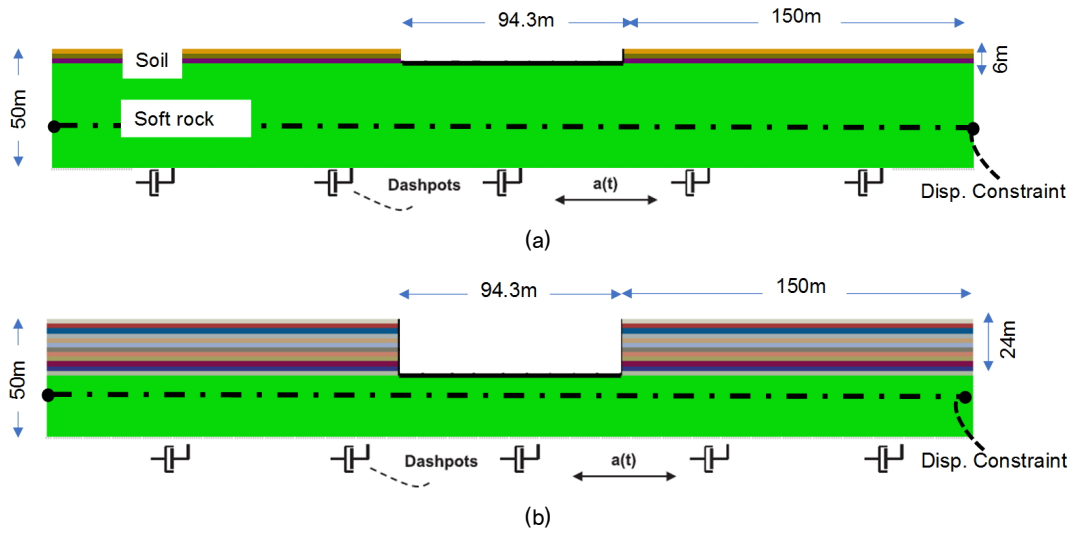


Fig. 3. Two basement models: (a) 1 level basement model, (b) 5 level of basement model

마주 보는 질점에는 ABAQUS의 복수지점구속(Multi-point Constraint, MPC) 기능을 사용하여 동일한 수평 자유도를 가지도록 상호 연결 고정하였다. 이 경계조건은 수평방향으로 무한한 지반을 모사하기 위하여 사용되며 자유장 경계조건과 동일한 것으로 알려져 있다. 4절점 축소된 적분요소(CPE4R)와 2절점 빔 요소(B21)를 지반과 구조물에 각각 사용하였다. 지반과 구조물은 탄성 거동으로 가정되 지반은 아래에 상세하게 설명할 등가선형 물성을 적용하였다. 구조요소와 지반요소 사이의 접점은 해석해와 비교하

기 위해 의도적으로 구축하였다.

지하층 슬래브의 두께는 0.2m이며 벽체의 두께는 0.8m으로 각각의 휨강성(EI)은 1.72E10과 1.1E9 Pa m³이다. 압축강도 f_c 은 30MPa을 적용하였다. 1B와 5B 모델의 기초저면은 토층-암반 경계에 위치한다고 가정하였으며 해석에 사용한 전단파속도 지반주상도는 Fig. 4(a)에 도시하였다. 기반암 심도 6m와 24m는 MPSS(2017) 기준으로 각각 S₂와 S₄ 등급으로 분류된다. 해석에 사용한 지진파는 1994년 미국 캘리포니아에서 발생한 Northridge 지진에서 계측된 기

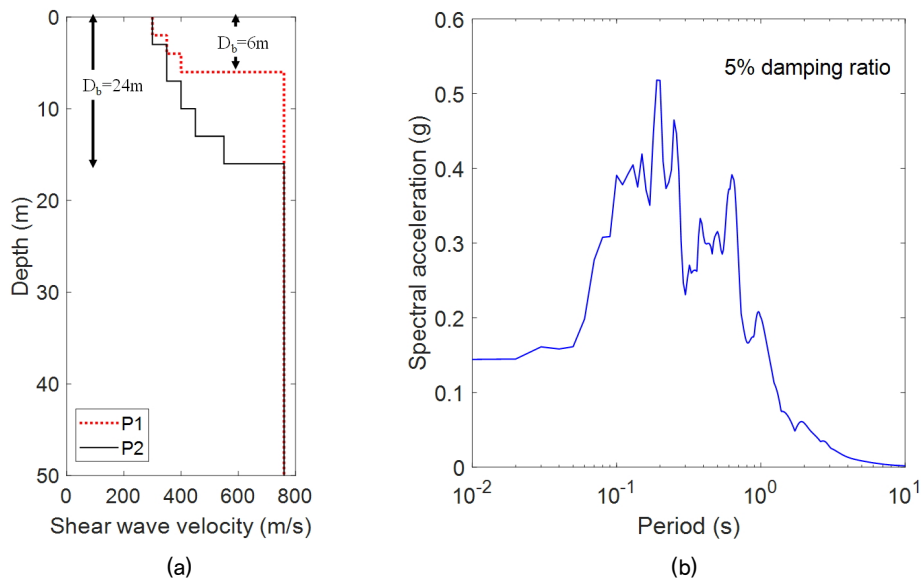


Fig. 4. Selected soil profile and input rock out crop motion

Table 1. Characteristics of selected rock outcrop motion for time history analysis

Earthquake name	Year	Station name	Magnitude	Mechanism	Rupture distance (km)	V_{s30} (m/s)
Northridge	1994	Vasquez Rocks Park	6.69	Reverse	24	996

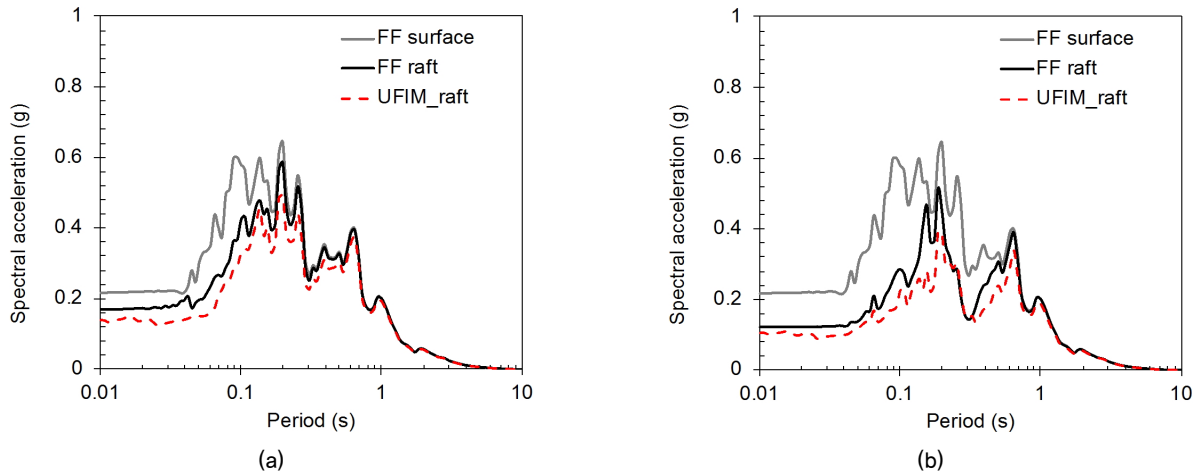


Fig. 5. Comparison of free-field surface, raft, and u_{FIM} motions: (a) 1B, (b) 5B

록이며 이의 가속도응답스펙트럼은 Fig. 4(b)에 도시하였으며 상세정보는 Table 1에 정리하였다.

지반의 비선형성은 SSI에 중요한 영향을 미치므로 이를 고려하여 동적 해석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 1차원 부지응답해석을 수행하여 지층별 등가선형 물성을 추출하였으며 이를 2차원 해석에 적용하였다. 1차원 부지응답해석은 DEEPSOIL 6.1(Hashash et al., 2016)을 사용하였으며 토층에는 전단강도 보정이 적용되는 General Quadratic Hyperbolic(GQ/H)(Groholski et al., 2016)을 사용하였고, 점탄성모델이 암반에 사용되었다. 토층에는 Non-Masing 법칙을 사용하여 목표 비선형 곡선을 정확하게 맞추는 MRDF 모델(Phillips & Hashash, 2009)을 사용하였다. 기준 비선형 곡선으로는 Darendeli(2001) 모델이 사용되었으며, 사질토라고 가정하여 과압밀비(OCR)는 1.0, 정지토압계수(K_0)는 0.5, 소성지수(PI)는 0, 반복횟수(N)와 주파수는 각각 10과 1.0을 적용하였다. 유효변형률계수는 0.65를 사용하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 5는 1B와 5B 모델에서 자유장과 지하 구조물에서 계산된 응답을 비교하여 보여준다. 1B의 경우 심도가 6m에 불과하여 자유장 운동이 지표면과 기초에서의 운동과 유사한 것을 확인할 수 있다. 운동학적 상호작용을 고려하는 u_{FIM} 의 경우 자유장 기초저면 깊이에서의 운동과 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 그 차이는 최대 22%로 계산되었다. 5B 모델의 경우, 심도가 24m에 달하므로 지표면의 운동에 비하여 자유장 기초 저면 깊이에서의 운동은 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 운동학적 상호작용을 고려하는 경우, 기초 저면 u_{FIM} 은 동일한 깊이에서의 자

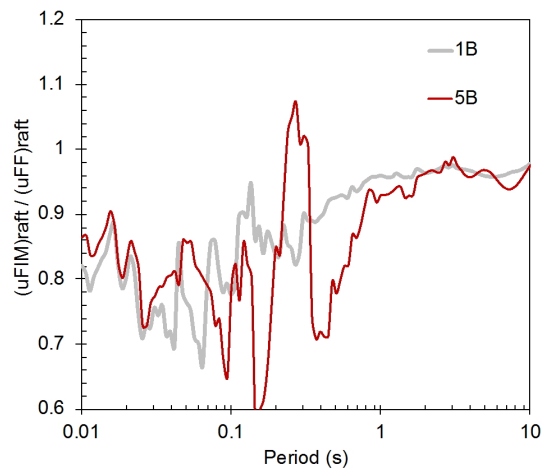


Fig. 6. Ratio of u_{FIM} at raft with free field motion at the depth of raft for 1B and 5B models

유장 운동과 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 기초 저면에서의 u_{FIM} 과 자유장 운동을 비교하고 있다. 1B와 5B 간의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 0.1 s까지는 u_{FIM} 이 자유장 운동보다 작으며 주기가 증가할수록 점진적으로 증가하여 1 s 이상에서는 1에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 운동학적 상호작용은 0.1 s 미만에서 가장 중요한 영향을 미치며 장주기에서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 1B와 5B의 0.1 s까지의 평균 비율은 각각 0.78과 0.81로 1B에서 감소폭이 더욱 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 7과 8은 각각 1B와 5B에서 H_u 와 RRS 모델의 전달 함수와 본 연구에서 수치해석에 의해 계산된 전달함수를 비교하고 있다. 전술한 바와 같이 전달함수는 운동학적 상호작용을 고려한 기초 저면의 운동과 자유장 지표면의 운동의 비율을 나타낸다. Fig. 7에 도시한 1B 모델의 경우, H_u 방법은 비상관성과 입사파의 도착 시간차를 고려하기 때문

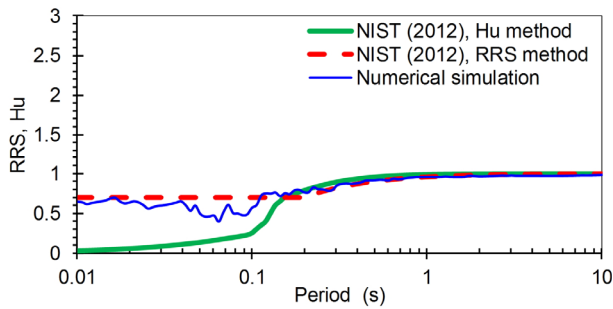


Fig. 7. Comparison of transfer functions presented in NIST procedure and numerical simulation for 1B model

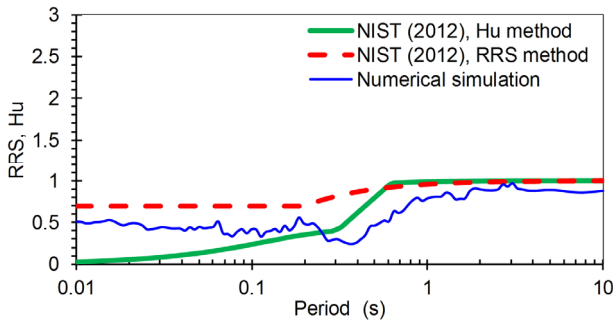


Fig. 8. Comparison of transfer functions presented in NIST procedure and numerical simulation for 5B model

에 *RRS* 모델에 비하여 전달함수가 저주기에서 극히 작은 것을 확인할 수 있다. 보수적인 것으로 알려진 *RRS* 모델의 경우 수치해석 결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 비상관성과 지진파 지연 효과를 고려하는 것은 불확실성이 크므로 *RRS* 모델을 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

Fig. 8에 도시한 5B 모델의 경우, *RRS* 모델도 수치해석 결과에 비해 매우 큰 값을 예측하는 것으로 나타났다. 즉, *RRS* 모델을 사용하는 경우 매우 보수적인 결과가 도출됨을 의미한다. 이는 깊이가 증가함에 따라 *RRS* 모델 전달함수의 RRS_{emb} 는 변화가 제한적이기 때문이다. 따라서 *RRS* 방법은 층수가 많은 지하층의 운동학적 상호작용을 예측하는 데에는 적절하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 운동학적 상호작용을 고려한 고층 구조물 지하층 저면에서의 설계지반운동을 산정하는 방법의 적용성을 수치해석 결과와 비교, 평가하였다. 평가에 사용된 방법은 국외에서 대표적으로 널리 활용되는 두가지 방법으로 해석해에 의한 H_u 모델과 경험적 방법인 *RRS* 모형이다. 평가 결과, 지하 1층(1B) 모델의 경우 *RRS* 방법이 수치해석

결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 하지만 지하 5층(5B) 모델의 경우 현격한 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 실제 현상과는 달리 깊이의 증가에 따른 *RRS*의 감소 폭이 제한적이기 때문인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 지하층-지반의 운동학적 상호작용만을 평가하였지만 고층 구조물에는 지상 구조물의 관성학적 상호작용도 영향을 줄 수 있다. 추후 연구에서는 운동학적 상호작용과 관성학적 상호작용에 대한 복합적인 평가가 진행될 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회 실용화형 융합연구단사업(CRC-16-02-KICT, 개방형 플랫폼 기반 초고층, 복합시설 재난/재해 대응 통합 CPS 구축 - 지진, 화재, 침수를 중심으로)의 위탁연구과제로 수행한 연구 결과의 일부입니다. 지원에 감사드립니다.

References

1. Darendeli, M. B. (2001), Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves.
2. Day, S. (1978), Seismic response of embedded foundations, American Society of Civil Engineers.
3. FEMA 440 (2005), Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Applied Technology Council (ATC-55 Project), Redwood City, California.
4. Groholski, D. R., Hashash, Y. M., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J. and Stewart, J. P. (2016), Simplified model for small-strain nonlinearity and strength in 1D seismic site response analysis, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 142, No. 9, pp. 04016042.
5. Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A. and Park, D. (2016), DEEPSOIL 6.1, User Manual. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana.
6. Kausel, E., Whitman, R. V., Morray, J. P. and Elsabee, F. (1978), The spring method for embedded foundations, Nuclear Engineering and design, Vol. 48, No. 2~3, pp. 377~392.
7. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. (1969), Finite dynamic model for infinite media, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 95, No. 4, pp. 859~878.
8. MPSS (2017), Ministry of Public Safety and Security Seismic Design Common Applications (In Korean).
9. Phillips, C. and Hashash, Y. M. (2009), Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 29, No. 7, pp. 1143~1158.
10. Stewart, J., Crouse, C. B., Hutchinson, T. C., Lizundia, B., Naeim, F. and Ostadan, F. (2012), Soil-structure interaction for

- building structures (No. Grant/Contract Reports (NISTGCR)-12-917-21).
11. Stewart, J. P., Kim, S., Bielak, J., Dobry, R. and Power, M. S. (2003), Revisions to soil-structure interaction procedures in NEHRP design provisions, *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 3, pp. 677~696.
 12. Veletsos, A. S. and Prasad, A. M. (1989), Seismic interaction of structures and soils: stochastic approach, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 4, pp. 935~956.
 13. Veletsos, A. S., Prasad, A. M. and Wu, W. H. (1997), Transfer functions for rigid rectangular foundations, *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 26, No. 1, pp. 5~17.