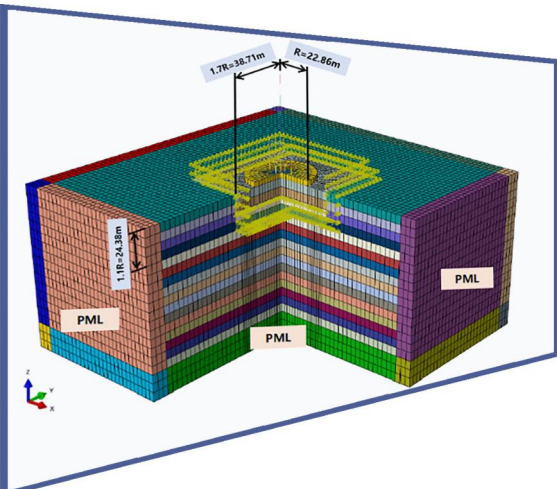


원전 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석 최신 연구 동향

Recent Studies of Soil-Structure Interaction Analysis of Nuclear Power Plant Structures



1. 서론

최근 한반도에 규모가 큰 지진이 발생함에 따라 원전 구조물과 같은 주요 구조물의 내진 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 원전 구조물은 지진에 의해 구조물이 크게 손상될 경우 방사능으로 인한 인명 피해가 발생할 수 있어 정확한 안전성 평가가 요구된다. 구조물의 안전성 평가를 위해 지진 응답 해석을 수행하는데, 단단한 암반이 아닌 부지에 건설된 경우에는 지반-구조물 상호작용에 대한 고려가 필요하다. 최근 국내외에서 지반-구조물 상호작용에 대한 기준이 표 1과 같이 강화되었으며 국내외에서 이와 관련된 다양한 연구가 수행되었다.

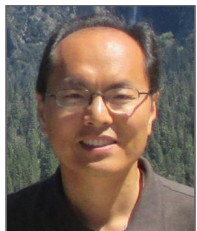
표 1 원전구조물의 내진설계시 지반-구조물 상호작용 해석 여부에 대한 국내외 기준 (김두기, 2021)

국가	기준
한국	- KEPIC(2005) 및 SRP 3.7.2(Rev. 2, 1989): 지반의 전단파 속도가 1,100 m/s(=3,500ft/s) 이상이면 SSI효과를 무시할 수 있음. - KEPIC(2010) 및 SRP 3.7.2(Rev. 2, 2007): 지반의 전단파 속도가 2,439 m/s(8,000ft/s) 이상이면 SSI효과를 무시할 수 있음.
미국	- Rev.2 (1989): 지반의 전단파 속도가 3,500 ft/s 이상이면 SSI효과를 무시할 수 있음. - Rev. 3 (2007): 지반의 전단파 속도가 8,000 ft/s 이상이면 SSI효과를 무시할 수 있음.
일본	- 수치기준 없음. - 기반암 노두 표면에 구조물이 설치되는 경우를 제외하고 일반적으로 SSI해석 수행.



최 유 리

한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정



정 형 조

한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

지반-구조물 상호작용 해석은 크게 직접법(Direct Method)과 부분구조법(Substructure Method)으로 구분할 수 있다. 직접법은 지반과 구조물 시스템을 분리하지 않고 한번에 해석하는 방법으로 비선형 시간영역 해석이 가능하다는 장점이 있으나, 지반과 구조물 모델 구축이 복잡하고 해석에 많은 시간이 소요된다(ASCE, 2017). 반면, 부분구조법은 일반적으로 진동수 영역에서 지반과 구조물 시스템을 분리하여 해석을 수행하기 때문에 모델 구축이 간단하고 직접법에 비해 경제적인 해석이 가능하다.

국내외의 다양한 소프트웨어를 사용하여 지반-구조물 상호작용 해석이 가능하다. 시간영역 해석의 경우, 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS, ANSYS 등을 통해 수행할 수 있으며, 진동수 영역 해석에는 ACS SASSI, KIESSI-3D 등의 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램을 활용할 수 있다.

지반-구조물 상호작용 해석 방법 및 수치 해석 사례를 김재민 등(2018)이 소개한 바 있으나, 3차원 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 중점적으로 다루었다. 본 글에서는 다양한 지반-구조물 상호작용 해석방법과 2018년 이후의 최신 연구 동향을 소개하고자 한다.

2. 지반-구조물 상호작용 해석방법

암반이 아닌 지반에 건설된 구조물은 구조물 자체의 동특성 이외에도 구조물을 지지하는 지반의 영향을 받는데, 이를 지반-구조물 상호작용이라 한다(임승현 등, 2013). 지반-구조물 상호작용 효과는 그림 1과 같이 관성 상호작용(Inertial Interaction)과 운동 상호작용(Kinematic Interaction)으로 구분한다. 전자는 동적 상호작용이라고 할 수 있으며, 후자는 준정적상호작용(Quasi-Static Interaction)이라고 할 수 있다(Kim, 2006). 특히 원전 구조물과 같이 높이가 낮고 강성이 큰 대형 토목 구조물은 지반의 방사운동을 유발하는 관성 상호작용이 크게 발생해 지반-구조물의 영향을 크게 받는다.

이에 따라, 원전 구조물의 내진 설계를 위한 지진 응답 해석을 수행할 때 지반-구조물 상호작용의 영향을 고려해야 안전한 설계가 가능하다. 지반-구조물 상호작용의 영향을 효과적으로 고려하기 위해 지반의 특성을 대표하는 상수를 이용하는 간단한 방법부터 지반을 유한요소로 매우 상세하게 모델링하여 해석하는 방법까지 다양한 연구가 수행되었다.

앞서 언급했듯이 지반-구조물 상호작용 해석은 부분구조법과 직접법으로 구분할 수 있다. 본 글에서는 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 소프트웨어 중심으로 간단하게 해석 방법에 대해 소개하고자 한다. 지반-구조물 상호작용 개념 및 해석방법에 대한 자세한 설명은 김재민 등(2018), 김두기(2021)에 기술되어 있다.

2.1 부분구조법

부분구조법은 지반-구조물 상호작용 해석을 단계별로 분리하여 수행하고, 그 결과를 종합하여 최종 응답을 구하는 방법이다(김두기, 2021). 부분 구조법을 통한 지반-구조

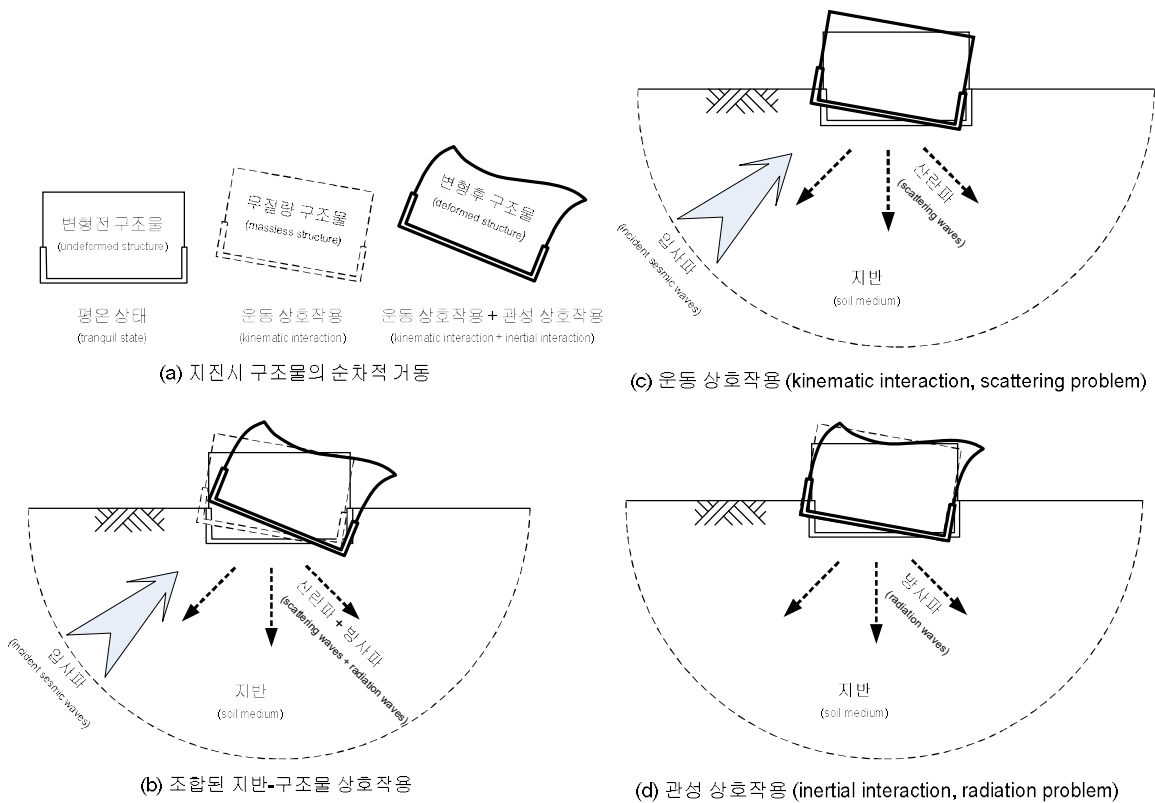


그림 1 구조물의 지반-구조물 상호작용(김두기, 2021)

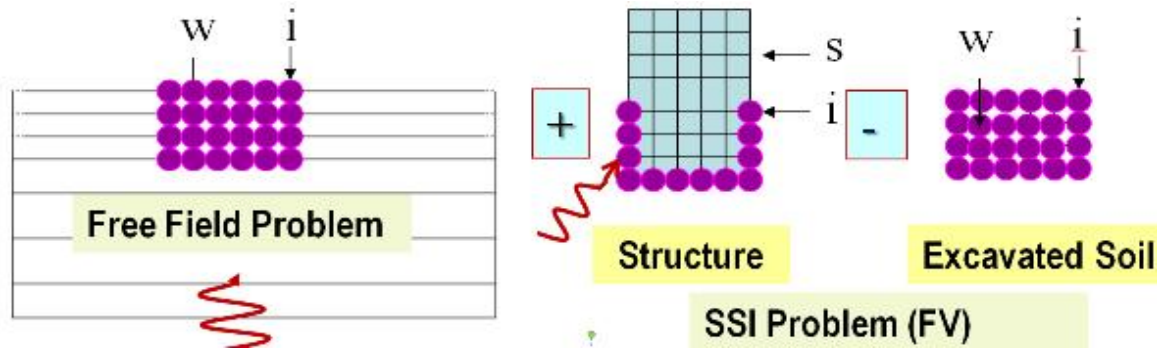


그림 2 유연체적법의 개념(Ghiocel, D., 2022)

물 상호작용 해석 시 지반 임피던스 함수를 산정하는 과정이 매우 중요하다. 따라서, 임피던스 함수에 대한 이론적 배경을 파악하고 적절히 계산하는 것이 필수적이다(KINS, 1994).

ACS SASSI 등의 프로그램을 활용하여 진동수 영역에서 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하는 방법이 있다. ACS SASSI는 U.C. Berkeley의 John Lysmer교수에 의해 개발된 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 SASSI의 고속 솔버 버전으로 대표적인 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램이다. 그림 2의 유연체적법(Flexible Volume Method)을 사용하여 진동수 영역에서 지반-구조물 연계 시스템의 운동방정식을 구성하여 해석을 수행한다(장승진, 2004). ACS SASSI를 통한 지반-구조물 상호작용 해석은 부지응답 해석, 임피던스 함수 해석 및 상호작용 응답 해석 순서로 수행된다.

2.2 직접법

직접법은 구조물과 일정한 범위의 근역 지반을 유한요소법(FEM), 유한차분법(FDM) 등을 사용하여 모델링하는 방법이다(김두기, 2021). 상용프로그램인 ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS 등을 활용하여 시간영역에서 해석을 수행할 수 있다. 이 방법은 지반-구조물 시스템의 비선형 특성을 고려할 수 있다는 장점이 있지만, 지반을 유한요소로 상세하게 모델링하여 해석하기 때문에 해석 시간이 길어 비경제적이다.

직접법 중 가장 간단한 방법은 지반 스프링과 댐퍼 상수를 이용하는 방법이 있다. 예를 들어, 원형 기초에 대한 지반 스프링(k_x)과 댐퍼 상수(c_x)는 다음 식을 사용해 계산할 수 있다(ASCE, 2017).

$$k_x = \frac{32(1-\nu)GR}{(7-8\nu)}, \quad c_x = 0.576k_x R \sqrt{\rho/G}$$

여기서, ν 는 포아송비, G 는 전단계수, R 은 원형 기초의 반지름, ρ 는 밀도이다.

이 방법은 해석에 소요되는 시간이 짧고 간단해 적용이 쉽지만 진동수 의존적 특성을 갖는 지반을 정확히 고려하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서, 원전 구조물과 같은 중요한 구조물에 적용할 때 주의가 필요하다.

반면, 앞서 언급했듯이 직접법은 범용 유한요소해석 프로그램을 통해 구현될 수 있다. 지반-구조물 시스템의 비선형성을 고려할 수 있다는 장점이 있어 정확한 지진 응답 해석이 필요할 때 사용된다. 하지만, 부분 구조법에 비해 훨씬 넓은 지반을 모델링하여 해석을 수행하기 때문에 해석 소요 시간이 길어 확률론적 해석과 같이 많은 횡수의 해석이 요구되는 연구에는 적용하기 어렵다.

3. 원전 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석 사례

국내외에서 원전 구조물을 대상으로 지반-구조물 상호작용에 대한 연구가 다양한 방법으로 활발하게 진행되고 있다. 크게 표 2와 같이 해석 방법을 구분할 수 있으며, 지반-구조물 상호작용 해석을 수행한 국내외 연구사례를 소개하면 다음과 같다.

3.1 SSI 전용 해석 프로그램 활용 방법

대표적인 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 SASSI는 부분구조법을 통해 진동수 영역에서 지반-구조물 상호작용 해석을 수행한다. 1차원 지반 모델을 통해 임피던스

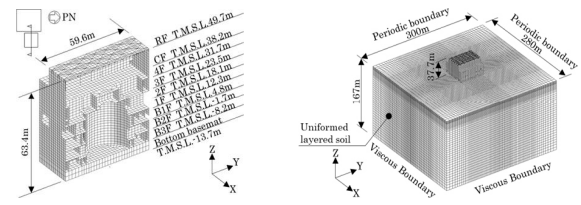
표 2 지반-구조물 상호작용 해석방법 비교

	부분구조법		직접법		
	SSI 전용 해석 프로그램		3차원 지반 해석방법	지반 상수 활용 방법	3차원 상세 해석방법
지반	1D 지반 모델 (임피던스 함수 사용)		3D 지반 모델	스프링, 댐퍼 상수	3D 지반 모델
구조물	선형	비선형 (Local relative displacement)	비선형 (다양한 이력모델 적용 가능)		
소프트웨어	SASSI	ACS SASSI	KEISSI + ABAQUS	구조 해석 프로그램	ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS 등
비고	구조물 비선형 고려 불가	이력모델 제한, Beam-stick모델 비선형 해석 불가	유효지진 하중 산정 필요	지반의 진동수 의존 특성 고려 불가	과도한 해석 시간 소요 (확률론적 해석 어려움)

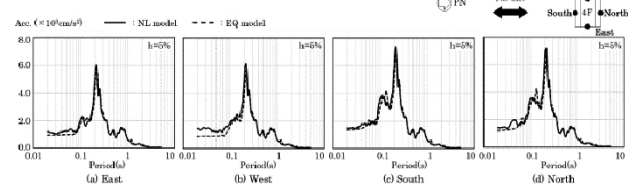
함수를 계산하고 이를 통해 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하기 때문에 지반의 진동수 의존적 특성을 효과적으로 고려할 수 있지만, 구조물의 비선형성을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 반면, ACS SASSI는 진동수 영역 해석 프로그램이지만 local iterative equivalent-linearization 기법을 통해 비선형 거동을 고려할 수 있다(Ghiocel, D., 2022).

이상훈 등(2007)은 원자력 발전소 구조물의 지진 공간 변동성을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석에 대한 연구를 ACS SASSI를 통해 보조조건기반 3차원 집중질량 보요소 모델을 사용하여 수행하였다. 반면 양기윤 등(2019)은 ACS SASSI를 사용해 그림 3과 같이 구조물을 3차원으로 모델링하여 다양한 조건 하에 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하였다. 구조물의 바닥 응답 스펙트럼과 기초에 대한 각 층의 상대 변위를 분석하여 매립 원전 구조물에 대한 규제 지침 및 설계 기준을 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

진동수 영역 해석 프로그램인 ACS SASSI에 내장된 option인 NON을 사용해 구조물의 등가선형 해석을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석도 가능하다. Yoshitaka 등(2022)은 그림 4(a)의 일본 카시와자키 카리와 원자력발전소의 격납건물을 대상으로 등가선형 3차원 지반-구조물 상호작용 해석을 수행했다. option NON을 활용하여 전단벽의 등가



(a) 구조물 3차원 해석 모델



(b) 등가선형과 비선형 해석 결과 비교

그림 4 등가선형 3차원 해석(Yoshitaka et al., 2022)

선형 해석을 수행하였으며, 이를 그림 4(b)와 같이 비선형 해석 결과와 비교를 통해 해석 방법을 검증하였다. 그 결과, 비선형 해석 방법과 응답이 대체로 일치하는 것으로 나타나 그 유효성을 확인했다.

3.2 3차원 지반 해석방법

진동수영역 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램을 통해 유효 지진 하중을 산정하여 3차원 유한요소해석 모델에 적용하여 시간영역에서 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 수행할 수 있다(김재민(2016), 임재성(2022)). 이혁주 등(2023)은 KIESSI-3D와 ABAQUS를 사용해 국내 표준형 원전 구조물을 대상으로 비선형 시간영역 지반-구조물 상호작용 해석을 수행했다. 부분 구조법을 이용한 지반-구조물 상호작용 해석을 위해 정밀한 유효지진 하중 산정이 가능한 경계반력법(Boundary Reaction Method, BRM)과 방사 감쇠 문제 해결을 위한 에너지흡수경계조

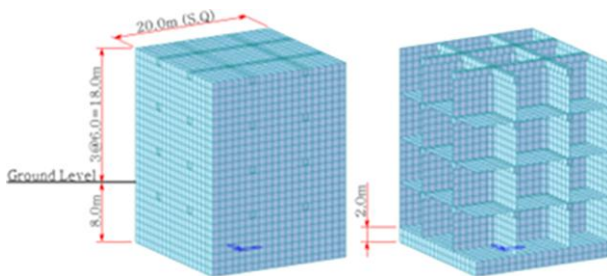


그림 3 매립 구조물 모델(양기윤 등, 2019)

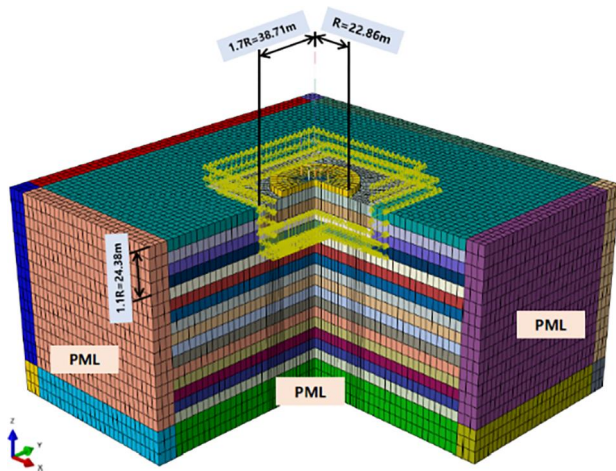


그림 5 BRM과 PML을 결합한 지반-구조물 상호작용 모델 (이혁주 등, 2023)

건(Absorbing Boundary Condition, ABC) 중 가장 효과적인 방법인 PML(Perfectly Matched Layer)을 이용하였다.

그림 5와 같이 모델을 구축하고 시간영역에서 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 수행했다. 구조물이 선형으로 거동하는 입력 지진 PGA = 0.001g 수준의 낮은 지진에 대한 응답을 KIESSI-3D를 통한 선형 진동수영역 해석 결과와 비교를 통해 해석 모델을 검증했다. 이 연구를 통해 BRM과 PML을 결합한 해석법이 원전 구조물의 비선형 시간영역 지반-구조물 상호작용 해석에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하고 PML 계수 조정 과정이 매우 중요함을 확인했다.

3.3 지반 상수 활용 방법

직접법을 통한 해석방법 중 지반 상수를 활용한 해석방법은 간단하게 적용이 가능해 많이 사용된다. 지반 스프링 및 댐퍼 상수는 간단한 식을 통해 계산할 수 있으며, 구조물 기초에 적용하여 OpenSees, SAP2000등의 다양한 구조 해석 프로그램을 통해 해석 가능하다.

Phillip H. 등(2019)은 원전 구조물의 비선형 해석을 수행하기 위한 단순화된 지반-구조물 상호작용 모델을 제안했다. 3차원 구조물 모델을 통해 고정 기초에서의 동적 특성을 얻고 이를 기반으로 그림 6과 같은 단순화된 구조물 모델을 구축했다. 지반은 스프링과 댐퍼로 모델링되었으며, 이는 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 CLASSI를 통해 얻은 임피던스를 기반으로 계산했다. 3차원 상세 모델

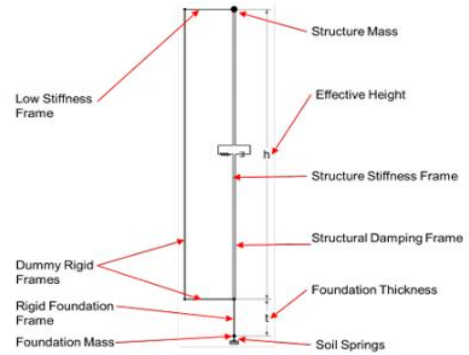


그림 6 단순한 지반-구조물 상호작용 해석모델(Phillip et al., 2019)

표 3 해석 결과 비교(Phillip et al., 2019)

SSI Model	Fndn. Translation (ft)	Fndn. Rotation (rad)	Structure Translation (ft)
Simple	0.1249	5.251E-04	0.2094
Detailed	0.1142	4.720E-04	0.1872
Difference	9%	11%	12%

과 단순화된 해석 모델을 통한 결과를 표 3과 같이 비교했다. 그 결과, 상세 모델과 약 10%내외의 차이를 보이며 단순화된 모델을 통해 합리적인 해석 결과를 도출할 수 있다고 판단했다.

3.4 3차원 상세 해석방법

구조물과 지반을 3차원 유한요소로 모델링해 시간영역에서 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하는 직접법은 해석에 긴 시간이 소요돼 비경제적이라는 평가를 받았다. 하지만, 최근 컴퓨팅 기술의 발전으로 해석 속도가 빨라지면서 지반과 구조물의 비선형성을 고려할 수 있는 방법으로 지반-구조물 상호작용 해석에 널리 사용되고 있다. 3D 시간영역 해석방법은 ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS 등 다양한 해석 프로그램으로 수행될 수 있다.

Fernanda 등(2020)은 ANSYS를 사용하여 지반-구조물 상호작용 응답에 대한 다양한 매개변수의 영향을 아르헨티나에 위치한 그림 7의 CAREM-25 원자력 발전소를 대상으로 수치해석을 수행하여 분석하였다. 두가지 지반 프로파일을 사용하여 지반과 구조물의 최대 가속도, 변위 등의 응답을 비교하고 분석했다. 또한, 구조물-지반-구조물 상호작용 해석을 통해 터보 그룹 건물의 근접성이 원자로 건물의 동적 응답에 미치는 영향이 무시할 수 있을 정도임을 확인했다.

Van Nguyen 등(2020)은 그림 8과 같이 원전 구조물의 3차원 비선형 지반-구조물 상호작용 해석을 ABAQUS를

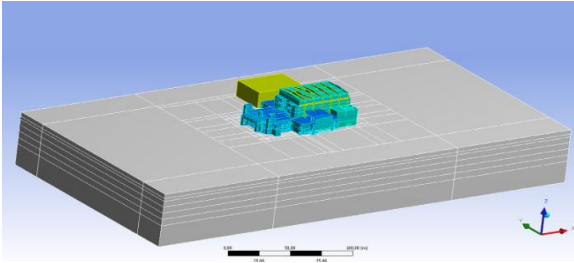


그림 7 Full coupled model(Fernanda *et al.*, 2020)

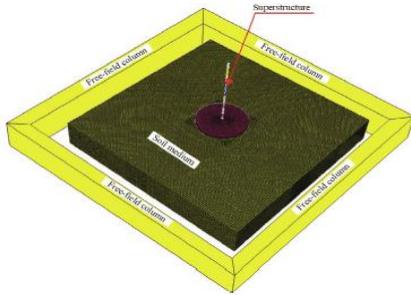


그림 8 3차원 해석 모델(Van Nguyen *et al.*, 2020)

사용하여 수행하였다. 구조물은 원전 구조물 기반의 beam-stick 모델을 사용하였으며, 지반은 파동의 전파를 흡수하기 위해 지반의 측면 경계에 viscous dashpot을 설치하였다. 선형 지반-구조물 상호작용 해석 결과를 SASSI와 비교하여 구축된 3차원 지반-구조물 상호작용 해석 모델을 검증하였다. 이를 통해 3개의 입력지진과 4개의 지반 프로파일에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 비교/분석하였다. 지반-구조물상호작용과 지진의 진동수 성분은 원전 구조물의 거동에 매우 민감하다는 결론을 내렸다.

4. 결론

본 글에서는 원전 구조물의 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진 응답 해석 방법, 사용가능한 소프트웨어와 각 해석 방법을 활용한 최신 연구 내용을 소개하였다.

최근 컴퓨팅 기술 발전으로 인해 국내외에서 지반을 3차원 유한요소로 모델링하여 원전 구조물의 지반-구조물상호작용 해석을 수행한 사례가 많았다. 하지만 여전히 확률론적 해석과 같이 많은 횡수의 해석이 요구되는 경우에는 적용하기 어렵다. 이에 따라 지반-구조물 상호작용 시스템을 간략화 하여 해석하는 방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단하였다.

참고문헌

1. 김두기. (2021). 구조동역학, 5판, 도서출판 구미서관
2. 김재민, 이은행. (2018). 비선형 지반-구조물 상호작용 해석 방법, 한국전산구조공학회 학회지, 31(3), 13-22.
3. 양기윤, 송종걸, 김재석. (2019). 원전 구조물과 지반의 동특성을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석에서의 문헌효과 평가. 콘크리트학회 논문집, 31(5), 437-447.
4. 이상훈, 고정훈, 최동호. (2007). 원자력 발전소 구조물의 지진공간 변동성을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석. 대한토목학회 학술대회, 695-698.
5. 이은행, 김재민, 이상훈. (2015). 경계반력법을 이용한 지진격리 원전구조물의 비선형 지반-구조물 상호작용 해석. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 19(1), 37-43.
6. 이혁주 임재성, 문일환, 김재민. (2023). 원전구조물의 비선형 시간영역 SSI 해석을 위한 경계반력법에 의한 유효지진하중과 PML의 적용, 한국지진공학회 논문집, 27(1), 25-35.
7. 임승현, 정형조, 김민규, 최인길. (2013). 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 지진격리시스템이 적용된 원전 격납건물의 지진 취약도 평가, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 17.2, 53-59.
8. 임재성, 김재민. (2022). 등가선형응답과 영역축소법(DRM)을 결합한 원전 격납구조물의 시간영역 지반-구조물 상호작용해석 사례. 대한토목학회 학술대회, (), 382-383.
9. ASCE 4-16. (2017). Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, American Society of Civil Engineers. Reston, VA. c2017.
10. Fernanda de Borbón, Martín Domizio, Daniel Ambrosini, Oscar Curadelli. (2020). Influence of various parameters in the seismic soil-structure interaction response of a nuclear power plant., Engineering Structures, 217, 110820.
11. Ghiocel, D. (2022). ACS SASSI Version 4 (IKTR0) User Manual.
12. Kim, W.H. (2006), "Evaluation of a Simplified Criterion for SSI Analysis", Master's Thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
13. KINS (1994) 지반-구조물 상호작용 해석방법에 관한 연구 (II) - 제1권
14. Philip, H., Juan, J. C., Robert, K., David, N. (2019). Nonlinear Response of a Structure with Significant Soil-Structure Interaction Effects for Application to Seismic

Fragility Evaluation.

15. Van Nguyen, D., Kim, D., Nguyen, D. D. (2020). Nonlinear seismic soil-structure interaction analysis of nuclear reactor building considering the effect of earthquake frequency content. In Structures 26, 901-914.
16. Yoshitaka Ichihara, Naohiro Nakamura, Kunihiko Nabeshima, Byunghyun Choi, Akemi Nishida. (2022). BASIC STUDY ON SEISMIC RESPONSE OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION SYSTEM USING EQUIVALENT LINEAR THREE-DIMENSIONAL FEM ANALYSIS OF REACTOR BUILDING., Journal of Structural Engineering B, 68, 271-283. 