

공동기초상 복합 전단벽 구조물의 모델링 기법
**Modeling Techniques of the Complex Shear Wall Structure on
a Common Foundation**

김종수*
Kim, Jong-Soo

이상훈*
Lee, Sang-Hoon

송재철**
Song, Jae-Cheol

ABSTRACT

The super-structure in a soil-structure interaction analysis is commonly idealized as lumped parameter system. In this study, the complex shear wall structure is modeled using three different kinds of modeling techniques: 1) full FEM comparatively as an exact solution, 2) equivalent shear spring model assuming mainly shear deformations of the wall, 3) equivalent beam-stick model made by independent static analysis. Dynamic characteristics due to three different modeling methods are compared and investigated before performing structural response analysis. The beam-stick model in comparison to shear spring model gives closer dynamic responses when compared with the full FEM, even though it requires additional unit load static analyses.

1. 서론

최근 구조물의 내진해석에서 지반-구조물 상호작용의 의미에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 실제로 원자력발전소 구조물의 내진해석시 지반-구조물 상호작용은 필수적으로 고려되어야 할 사항이며, 지반-구조물 상호작용 해석시 예견되는 적합한 해석 및 설계 절차들이 개발되고 있다. 해석에 필요한 지반 및 상부구조물 전체를 유한요소로 모델링하는 경우 막대한 해석시간 및 노력이 요구되므로, 보다 효율적인 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하기 위하여 다른 방법을 통한 동적해석을 위한 모델링 기법이 고려되어야 한다. 일반적으로 지반-구조물 상호작용 해석시 동적응답은 입력운동, 지반상태, 기초형상, 및 상부구조물 등에 의하여 영향을 받게 된다.

* 한국전력기술(주) 책임기술원

** 한국전력기술(주) 기술원

따라서 이러한 요소들이 해석시 얼마나 정확히 고려될 수 있는가는 상당히 중요한 문제이다. 최근에 널리 사용되고 있는 지반-구조물 상호작용 해석용 프로그램들의 대부분은 부분구조법을 채택하고 있는데, 이 방법은 지반 및 구조물의 모델링 및 해석을 독립적인 모듈로 수행하므로 지반 및 상부구조물 각각을 비교적 상세하게 표현할 수 있는 장점이 있다. 이러한 해석프로그램의 하나인 SASSI 프로그램은 상부구조물을 유한요소 또는 집중질량 시스템으로 모델링할 수 있으며, 구조물과 지반이 연계되는 모든 지표면 하부영역에서 나타나는 구조물 기초 및 지반의 상호작용을 고려할 수 있는 유연체적법(flexible volume method)을 적용하고 있다. 따라서 상부구조물과 상호작용이 발생하는 지반체적내에 할당되는 총 절점은 해석에 필요한 시간 및 기억용량에 직접적인 영향을 준다. 현재 한국형 차세대 표준발전소로 개발되고 있는 원자력발전소 구조물은 종래의 원자력 발전소와는 달리 대형 공동기초상에 건설될 예정이므로 지반체적과 상부구조물의 총절점의 증가는 피할 수 없는 현상이다. 과전달 효과에서 두 인접한 절점간에 요구되는 최소거리때문에 기초와 지반의 공동체적내에서 정의되고 있는 연결절점의 수를 최소화하는 데는 한계가 있으므로 상부구조물은 설계의 편의성 및 해석시간의 단축을 위하여 집중질량 시스템으로 이상화된다.

본 연구에서는 예제해석을 통하여 지반-구조물 상호작용 해석을 위하여 공동기초상에 놓여있는 상부구조물의 모델링 방법을 변화시키는데 따른 동적특성을 비교하고, 동적응답을 분석한다. 유한요소 모델의 동적응답은 상대적으로 정확한 값으로 간주되고, 두 집중질량 시스템, 즉, 1) 벽의 전단변형을 주로 고려한 등가 전단스프링(shear spring) 모델, 2) 정적해석을 통한 등가 보요소 모델(beam-stick model), 이 연구되고 층응답스펙트럼의 형태로 유한요소 모델의 응답과 비교된다. 예제해석을 위하여 단순화된 전단벽 구조물이 선정되었으며, 지반-구조물 상호작용 해석을 수행한 후 모든 층에서 응답스펙트럼을 계산한다. 이때, 두 집중질량 모델이 실제 복합구조물의 응답을 어떻게 나타내는지 검토한다. 단순화시킨 예제해석을 통하여 얻은 결론은 실무에 적절한 도움을 제공하고, 앞으로 보다 복잡한 구조물에도 확대 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 모델링 방법의 검토

지반-구조물 상호작용 해석에서 상부구조물은 여타 동적해석과 마찬가지로 집중질량 시스템으로 모델링 된다. 그러나, 복합구조물에서 집중질량 시스템은 실제 구조물의 동적특성을 항상 정확히 표현하는 것은 아니다. 구조물의 모델링 기법에서 기인하는 문제들 가운데 하나는 실제 거동을 고려하는데 적용되는 가정조건이다. 그러나, 간편하고 편리한 방법으로 구조물을 해석하고

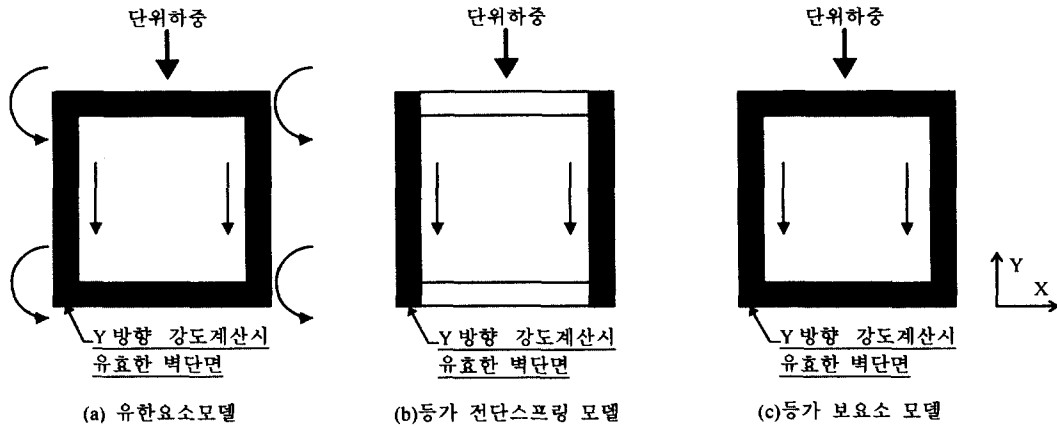


그림 1. Y 방향 강도계산시 유효한 벽단면

설계할 수 있기 위하여 구조물의 거동에 대한 가정이 이루어 지지만 실제거동과 차이가 있을 수 있음은 물론이다.

2.1 등가 전단스프링 모델

전단벽 구조물의 강도 계산에서 각 방향의 스프링 상수는 그림 1-(b)에 보인 바와 같이 같은 평면상에 놓인 전단벽에 의해서만 기여된다는 가정하에 강도의 일부분은 무시된다. 그러므로, 전단벽 구조물의 강도는 간단히 (1)식으로 계산될 수 있다.

$$K = \frac{1}{D_t} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } D_t = \frac{h^3}{12EI} + \frac{h}{GA} \quad (2)$$

단위하중에 의한 구조물의 변형은 (2)식에서와 같이 휨 및 전단에 의한 처짐으로 간주된다. 원자력발전소 구조물의 모든 전단벽 구조물의 강도는 윗식에 따라 계산된다. 이렇게 계산된 스프링 상수는 평행한 방향에 위치한 전단벽 구조물에 대해서만 적용된다. 직각방향으로 놓인 전단벽에 의한 거동효과는 당연히 무시된다. 이러한 가정은 구조물의 실제 거동을 묘사하는데 장애요인이 되고 있다. 그러나 이 방법은 단지 구조물의 기하학적 형태를 구성하기만 하면 모든 집중질량 요소들이 쉽게 계산될 수 있으므로 동적해석 모델을 구성하는데 폭넓게 사용되고 있다.

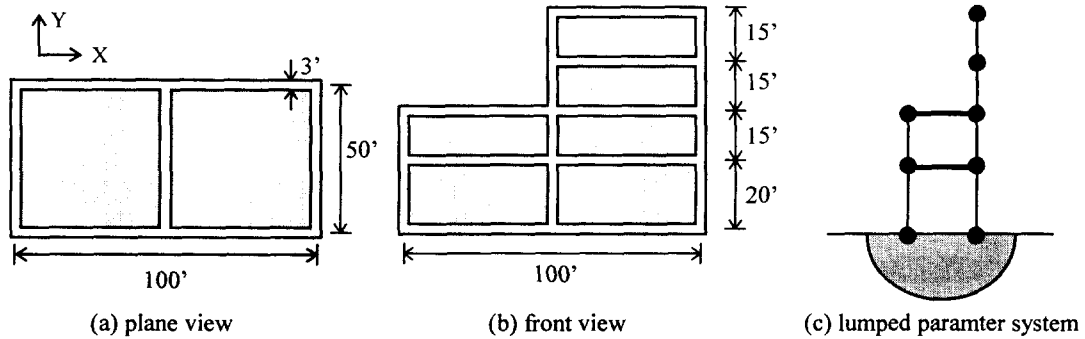


그림 2. 예제해석에 사용된 복합구조물

2.2 등가 보요소 모델

전단스프링 방법에 의한 강도계산은 구조물의 바람직하지 못한 거동 뿐만 아니라 약간의 강도 저하현상도 초래할 수 있다. 한편, 여기서는 전단벽 구조물의 강도를 계산하는 다른 방법이 제시된다. 각 전단벽의 강도는 요구되는 보요소 지점에서 단위하중을 작용한 정적해석을 수행하여 계산된다. 그림 1-(c)는 전단벽의 강도를 계산하는데 유효한 벽의 단면을 그림으로 보인 것이다. 구체적인 절차는 다음과 같다.

- 완전한 유한요소 모델을 구성한다. 일반적으로 정적해석을 위하여 작성된 유한요소 모델을 그대로 사용할 수 있다.
- 슬래브 및 주요지점에서 집중질량을 계산한다. 이 작업은 전단스프링 방법에서 적용한 방법과 동일하게 이루어 질 수 있다.
- 구조물에서 요구되는 자유도를 정의한다.
- 요구되는 자유도 방향으로 단위하중을 작용한 정적해석을 수행한다.
- 해석으로 얻어진 변형을 이용하여 등가의 강도를 계산한다.

구조물에서 요구되는 자유도의 갯수만큼 위의 절차에 따른 정적해석을 수행한다. 이때, 보요소 모델에서 단위하중을 작용하는 것과 같은 효과를 얻기 위하여 요구되는 자유도에 대한 단위하중의 적절한 분포가 이루어져야 한다. 이 방법에 의하여 산정된 전단벽 구조물의 강도는 전단스프링 방법에서 구해진 값보다 항상 크다는 사실을 쉽게 알 수 있다.

3. 해석모델 및 입력운동

이상과 같이 설명된 모델의 동적 특성 및 응답을 비교하고 분석하기 위하여 2층과 4층 복합

건물로 구성되어 있는 단순화된 복합구조물을 선정하였다. 2층과 4층 건물의 높이는 각각 35ft와 65ft이며, 각 건물의 평면은 3ft 두께로 된 50ft 정방형 건물이다(그림 2). 여기서 평면의 강도는 무한하여 각 슬래브의 거동은 오직 수평방향으로만 발생한다고 가정된다(Y 방향). 복합구조물은 또한 유한요소로도 모델링되며, 이 모델은 등가 강도계산뿐만 아니라 구조물의 실제 응답 해석용으로 사용된다. 모델링 기법의 분석을 위하여 두 가지 형태의 집중질량 시스템이 준비된다.

입력운동으로서 인공가속도 시간이력함수가 수평방향에서 정의되었다. 최대가속도는 1g이며, 시간간격은 0.005 초로서 24 초의 지속시간을 갖는다. 그림 3은 Y 방향으로 작용하는 입력운동의 지진도를 보인 것이며, 해당 응답스펙트럼은 2%감쇠인 경우 미국원자력규제위원회의 RG 1.60의 설계스펙트럼과의 비교를 그림 4에서 보이고 있다. 진동수의 이동에 의한 불규칙한 응답현상을 극소화하기 위하여 인공가속도시간이력의 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼에 가능한 가깝게 나타나도록 조정되었다.

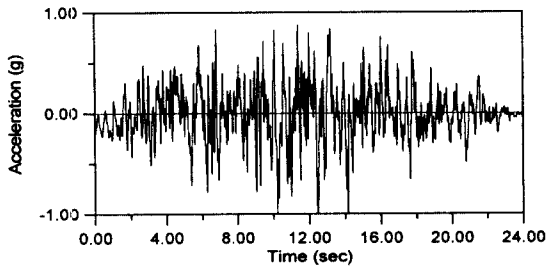


그림 3. 입력운동의 시간이력

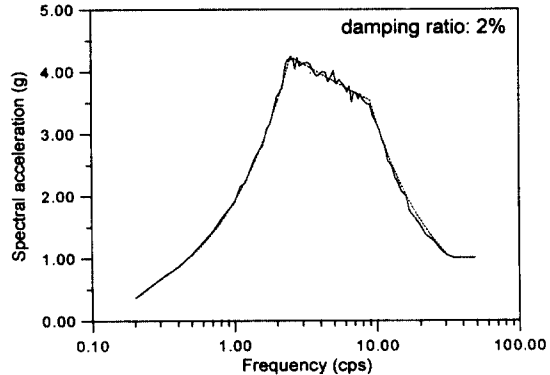


그림 4. 입력운동의 응답스펙트럼

4. 지반-구조물 상호작용 해석 및 결과분석

지반-구조물 상호작용 해석용 프로그램인 SASSI[1]는 유한요소와 유연체적법을 적용하고 있어 구조물의 매입효과, 지반의 채움, 깊이에 따른 입력운동의 공간 변이 등과 같은 주요 요소들을 지반-구조물 상호작용 해석시 고려할 수 있도록 하고 있다. 지반상태는 2,000ft/sec의 전단파 속도를 갖는 연암이며, 탄성반무한체로 모델링 되었다.

건물의 각 부분은 유한요소와 해석 유형에 따라 집중질량 시스템으로 모델링 되었으며, 집중질량 시스템은 그림 2에서 보인 바와 같이 절점을 따라 강체연결되어 있다. 유한요소 모델의 동적응답을 정확한 값으로 가정하였다. 단위하중에 의한 정적해석으로 부터 구성된 등가 보요소

도표 1. 스프링 모델과 보요소 모델의 벽강도

위치	0'-20'	20'-35'	35'-50'	50'-65'
스프링 모델	5,270,625	7,229,939	4,819,959	4,819,959
보요소 모델	5,552,471	7,993,605	5,149,331	5,149,331

도표 2. 세모델의 지반-구조물 시스템 진동수

모델 구분	진동수 (cps)
유한요소 모델	13.57
스프링 모델	14.16
보요소 모델	14.55

도표 3. 세모델의 동적응답 및 비율

위치(ft)	유한요소모델		스프링 모델				보요소 모델			
	Rspns	Peak	Rspns		Peak		Rspns		Peak	
0	4.79	1.05	4.79	0%	1.08	2.9%	4.79	0%	1.05	0%
20	9.27	1.41	18.28	97.2%	1.78	26.2%	11.71	26.3%	1.43	1.4%
35	12.75	1.77	26.76	110.0%	2.33	31.6%	16.23	27.4%	1.81	2.3%
50	18.49	2.45	34.22	85.1%	2.96	20.8%	20.32	9.9%	2.30	-6.1%
65	19.92	2.61	37.64	88.9%	3.26	24.9%	22.19	11.4%	2.52	-3.4%

모델의 강도는 예상했던 바와 같이 전단스프링 모델 보다 크며, 구체적인 값을 도표 1에서 보이고 있다. 보요소 모델의 강도는 기존 전단스프링 모델의 강도에 비하여 5.4%에서 10.6%까지 증가하였다. 본 연구에서 선정된 구조물이 단순한 구성으로 이루어졌다는 사실을 감안할때, 이 효과는 보다 복잡한 구조물의 경우에는 더욱 차이가 날 것으로 판단된다.

지반-구조물 시스템의 진동수는 계산된 전달함수곡선의 최대값으로 부터 결정되었다. 기본모드 이상의 고차모드들은 해석모델에서 기본모드의 기여도가 매우 지배적인 까닭에 전달함수곡선에서 뚜렷하게 구분되지 않았다. 도표 2는 전달함수곡선으로 부터 구한 시스템의 기본진동수를 정리한 것이다. 지반-구조물 시스템의 진동수 특성은 거의 같게 나타났으며, 수치적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 전단스프링 모델의 진동수는 보요소 모델의 진동수 보다 유한요소모델의 진동수에 더 가깝게 일치하였다. 이 사실은 구조물의 강도계산 결과로 부터 쉽게 유추될 수 있다. 이에 따라 집중질량으로 변환된 시스템은 초기에 설정된 가정사항 등의 이유로 유한요소 모델보다 강도가 약간 증가 되는 특성을 지닌다. 한편, 두 집중질량 시스템에서 진동수의 뚜렷한 차이가 보이지 않는 현상은 본 연구에서 선정된 지반-구조물 시스템에 큰 영향을 줄 정도로 중요한 사항이 아니다.

각 층에서 층응답 스펙트럼과 최대 가속도를 구하여 비교 분석하였다. 층응답 스펙트럼에서 적용된 감쇠는 2%이며, 층응답 스펙트럼 곡선은 0.1Hz에서 100Hz까지 100개의 통제진동수로 구성된다. 바닥위치(그림 5)에서 층응답 스펙트럼은 자유장의 입력운동이 상부구조물의 입력으로

거의 비슷한 형태로 전달되었음을 보였다. 세 모델로 부터 얻은 최대응답 및 최대가속도를 도표 3에 정리하였다. 세 모델의 각 지점에서 층응답 스펙트럼의 차이는 확연히 나타난다. 지반-구조물 상호작용 해석을 위하여 적용된 스프링 모델의 전체적인 응답은 그림 6에서 보인 바와 같이 유한요소 모델의 응답에 비하여 지나치게 보수적이다. 비록 두 모델의 시스템의 진동수는 거의 일치하지만, 유한요소 모델에 대한 스프링 모델의 최대응답은 거의 두 배에 가깝다. 스프링 모델의 최대가속도 역시 각 층에서 유한요소 모델보다 20%이상 높았으며, 이는 유한요소 모델 응답과 상당히 잘 일치하는 보요소 모델보다도 역시 높은 수치이다. 본 해석으로 부터 지반-구조물 상호작용 해석을 위하여 스프링 요소를 사용한 상부구조물은 지반-구조물 시스템의 동적특성은 인정될 수 있다 하더라도 동적응답은 좋지 못한 결과를 줄 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

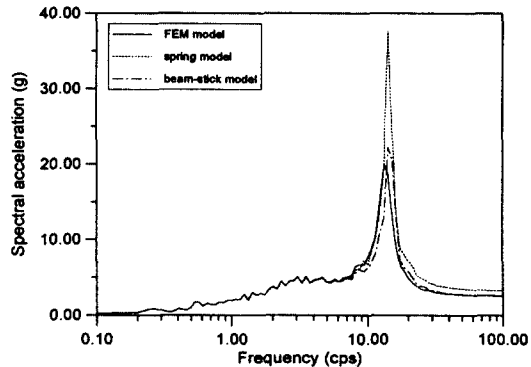
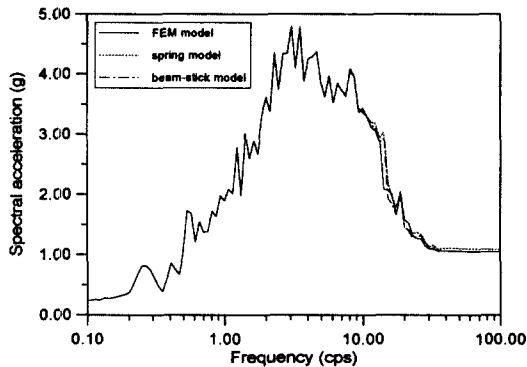


그림 5. 층응답스펙트럼의 비교 (elevation: 0ft) 그림 6. 층응답스펙트럼의 비교 (elevation: 65ft)

일반적으로 공동기초상에 건설되는 대형 구조물의 효과적인 해석을 위해서 상부구조물을 집중 질량 시스템으로 모델링 한다. 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용 해석을 위해서 상부구조물을 효과적으로 모델링하는 방법에 대한 검토를 하기위하여 두 집중질량 시스템의 동적특성 및 응답을 상호 비교 하였다. 비교의 단순화를 위하여 슬래브는 단일 수평방향으로만 거동하는 복합 구조물을 대상 구조물로 선정하였다. 두 집중질량 시스템의 지반-구조물 시스템의 진동수는 유한요소 모델의 것과 잘 일치하였다. 동적응답있어서 스프링 모델은 유한요소 모델에 비하여 상당히 보수적인 응답을 보였으나, 보요소 모델은 유한요소 모델과 가까운 응답을 보였다. 보요소 모델링 기법은 요구되는 강도계산을 위하여 추가적인 정적해석을 수행하여야 하는 수고가 있지만

보다 복잡한 복합구조물에 적용되었을 때, 만족할 만한 근사 동적특성 및 응답을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 모델링 기법 자체에 의한 응답특성만을 분석하였으나 등가 보요소 모델을 작성하기 위한 단위하중의 정적해석과 이로 부터 유도되는 보요소 단면특성의 계산과정에 대한 보다 상세한 연구가 추가로 요구된다.

참고문헌

1. Lysmer, J., Tabatabaie-Raissi, M., Tajirian, F., Vahdani, S., and Ostadan, F. 1981. SASSI-A System for Analysis of Soil-Structure Interaction. Report No. UCB/GT/81-02, Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley, CA.
2. Kim, J.S., Lee, S.H., Lee, L.H. 1995, "Parametric Study of the Embedment and Layering Effects on Soil-Structure Interaction Analysis", Trans. of the 13th International Conference on SMIRT, Vol 3, Div-K, pp91-96, Porto Alegre, Brazil.
3. Holmes, N.A. 1991. DYNAS-Dynamic Analysis of Structures, Program No. 09.7.090-9.8, Sargent & Lundy, Chicago, ILL.