

## Hyperelement를 사용한 축대칭 구조물의 지진 응답 해석

장 승필, 김 재판, 진 병무  
서울 대학교

### 요약

본 논문에서는 현재 수행 중인 Hualien 대형내진모델시험 프로젝트의 연구 과제 중의 강제 진동 해석 및 지진 응답 해석을 수행하기 위해서 Hyperelement를 사용한 지반-구조물 상호작용 해석에 대한 절차 및 방법을 연구하였다. Hualien 대형내진모델시험에서 이미 수행된 뒤편 후 강제 진동 시험의 예측 및 예측후 해석을 수행하였고, 지진 응답 해석을 위해서는 Hualien 부지에서의 자유장해석을 통하여 입력 지반 운동을 결정하여 구조물에서의 지진 응답을 구하였다.

### 1. Hyperelement 해석법

Hyperelement에 의한 해석법은 Wass(1972)와 Kausel(1974)이 개발한 전달 경계와 Kausel, Roesset 및 Tassoulas(1977)와 Kausel (1983)이 개발한 원형 및 환형(ring)Hyperelement에 기초하고 있으며, Kim과 Tassoulas(1987)는 축대칭 Hyperelement를 결합하여 분리된 기초간의 상호작용을 규명하였다.

각 Hyperelement의 재료 특성은 서로 다를 수 있으므로 방위각 방향으로 균질하나 반경 방향 및 연직 방향으로 비균질한 재료 특성을 갖는 지반도 쉽게 모델링할 수 있다. Hyperelement내에서의 운동은 진동 모드와 특수 해에 의해서 표현되던 연직방향으로는 선형 형상 함수에 의해서 이산화 되고 있으나, 수평 방향으로의 연속적이다. 따라서 Hyperelement의 수평 방향 크기에는 제한이 없다. 이 방법은 표면 기초 뿐만 아니라, 축력이 있는 문헌 강체 기초 문제에도 적용될 수 있으며 일반적인 3차원 문제에도 확장될 수 있다.

### 2. Hyperelement에 의한 뒤편 후의 강제 진동 해석

#### 2.1 지반과 구조물의 모델링

지반의 동적 강성 행렬을 구하기 위하여, 지반은 기저 암반 위에 놓여 있는 수평 층상으로 모델링하였다. 지반은 CRIEPI에서 제안한 통일 지반 모델(UMCB)과 이를 기준으로 강제 진동 해석을 수행한 결과로부터 수정 모델(MMCB)을 결정하였다. (표1, 그림1 참고)

시험 구조물은 그림1에 나타낸 바와 같은 원통형 철근 콘크리트 구조물이며 기초 슬래브와 지붕 슬래브는 강체로 가정하고, 벽체는 전단 변형을 고려한 Beam-stick 모델을 사용하였다. 이 모델의 고정 지반 고유 진동수는 첫번째모드에 대해서 9.06Hz이다.

#### 2.2 강제 진동 해석 결과

강제 진동 해석은 지붕 슬래브와 바닥 슬래브에 수평 방향의 하중을 작용시켰을 때의 구조물의 지붕(H15)과 바닥 슬래브 (H7)에서의 응답을 구하였다. 해석 결과는 진동수 영역에서 공진응답곡선과 위상차곡선을 실측치와 비교하여 그림2와 그림3에 나타내었다.

그림2, 그림3의 결과를 살펴보면 공진응답곡선의 첨두가 2개가 관측되는 것을 볼 수 있는데, 이는 낮은 진동수 영역에서 표면파가 무한영역으로의 전파가 일어나지 않고 경계(기저 암반)에서 파의 반사가 일어난 영향으로 생각된다. 이러한 영향을 고려하기 위해서 진동수에 따라 기저 암반까지의 깊이가 다른 모델(UMCBV)의 강제 진동 해석을 수행하였고 그 결과를 함께 나타내었다.

### 3. 자유장해석

일반적으로 입력 지반 운동은 자유장에서의 관측된 기지값으로부터 다른 위치에서의 미지값을 구하는 Deconvolution 혹은 convolution 과정에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 지반운동이 수직 방향으로 전파하는 전단파에 의해서 발생한다고 가정하여 입력 지반 운동을 다음과 같은 절차를 통하여 구하였다.

자유장의 모델링은 지반의 Hyperelement 모델과 적합한 N개의 수평층으로 나눈다. 각 수평층에서의 변위가 선형 변화를 할때 j번째 지층에서의 진동수 영역에서의 평형 방정식은 다음과 같다.

$$(G_j - \omega^2 M_j) \begin{Bmatrix} u_j \\ u_{j+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\tau_j \\ \tau_{j+1} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $G_j = \frac{\mu_j}{h_j} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $M_j = \frac{\rho_j h_j}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$

$u_j, u_{j+1}$  : 깊이  $z = z_j, z = z_{j+1}$ 에서의 수평 방향 변위

$\tau_j, \tau_{j+1}$  : 깊이  $z = z_j, z = z_{j+1}$ 에서의 전단 응력

$\mu_j, h_j, \rho_j$  : j번째 층의 전단 탄성계수, 두께 및 밀도

이는 기저 압반 위에 놓인 지층을 N개의 층을 갖는 전단 빌딩(Shear building)으로 모델링한 것이다. 이때 전체 지층에 대한 강성 행렬은

$$K = G - \omega^2 M \quad (2)$$

이고, 기저 압반의 운동을  $u_b$ , 각 층에서의 상대 운동을  $u_r$ 이라 하면 다음과 같은 운동 방정식을 얻는다.

$$(G - \omega^2 M)(u_r) = \omega^2 M(1)u_b \quad (3)$$

기저 압반의 운동  $u_b$ 에 대한 각 층에서의 상대 운동  $u_r$ 은 식(3)의 해를 구하면

$$(u_r) = (G - \omega^2 M)^{-1} \omega M(1) \quad (4)$$

Deconvolution 과정에 의하여 지표에서 관측된 운동을  $u_g$ 라 하면 기저 압반의 운동  $u_b$ 는 다음과 같다.

$$u_b = \frac{u_g}{1 + u_r^1} \quad (5)$$

각 층에서의 운동  $u_i^j = u_b(1 + u_r^j)$ 은 다음과 같다.

$$u_i^j = \frac{1 + u_r^j}{1 + u_r^1} u_g \quad (6)$$

각 층에서 작용하는 절점에서의 힘은 다음과 같다.

$$P_{z,j} = -\frac{\pi R G_{j-1}}{2} (-u_{j-1} + u_j) - \frac{\pi R G_j}{2} (-u_j + u_{j+1}) \quad (7)$$

자유장해석에 사용된 통제운동은 1994년 1월 20일에 Hualien 부지(Array A15)에서 발생한 지진의 L방향 성분이며, 그 해석결과를 관측된 가속도 시간이력과 응답 스펙트럼을 비교하여 그림4에 나타내었다.

### 4. 지진 응답 해석 및 결과

#### 4.1 지진 응답 해석 절차

자유장 해석 : 구조물로부터 충분히 떨어진 점에서의 통제 운동을 정의하고, 전달 경계의 지반을 모델로 자유장 해석을 수행하여 각 층에서의 운동과 기저 압반에서의 운동을 구한다. 기저 압반에서의 운동으로부터 각 Hyperelement의 지반을 모델로 하여 자유장 해석을 수행한다. 이로부터 각각의 Hyperelement 에서의 자유장 운동  $u^{jF}$  과 이에 대응하는 Hyperelement 각 층에서의 절점 하중  $P^{jF}$  을 구한다.

자유장 해석을 수행하여 Hyperelement에서의 자유장의 절점변위와 절점하중으로부터 각 요소에 대하여 다음과 같은 평형 방정식이 성립된다.

$$[R^j] \{u^j\} = [R^j] \{u^{jF}\} - \{P^{jF}\} \quad (8)$$

여기서  $R^j$ 는 Hyperelement 요소의 동적강성행렬이며,  $u^{jF}$ ,  $P^{jF}$ 는 지반이 각 Hyperelement와 같은 재료상수를 갖는 자유장일때, 자유장 해석을 수행하여 구한 자유장의 절점변위 및 절점하중이다.

#### 4.2 지진 응답 해석 결과

지진 응답 해석은 강제 진동 시험과 마찬가지로 구조물과 지반의 모델에 따라 각각의 경우에 대하여 수행하였다. 강제 진동 해석과 다른 점은 구조물의 물성 감쇠비를 지진 응답의 경우에는 2%를 사용하여 해석을 하였다는 점이다. 지진 응답 해석을 위해서 사용한 통제 운동으로는 Array A15의 L방향 지진 가속도 시간 이력이고, 이에 대한 응답은 구조물의 지붕 슬래브 하부(RF)와 바닥 슬래브의 상부(BA)에서 구하였다.

그림5과 그림6은 각 위치에서 관측된 가속도 시간 이력과 해석 모델에 따라 계산한 가속도 시간 이력을 비교하였다. 그림7과 그림8에는 해석 모델에 따라 계산된 가속도 응답 스펙트럼을 관측된 가속도 응답 스펙트럼과 비교하여 나타내었고, 각 해석 모델에서 구한 최대 가속도는 표2에 나타내었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 Hyperelement를 이용하여 비균질한 지반에서의 지반-구조물 상호작용 해석 방법을 정립하였고, 이를 토대로 축대칭 구조물에 대해서 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하는 전산 프로그램을 개발하였다.

Hyperelement에 의한 지반의 모델링은 비균질성을 고려한 모델링으로는 매우 간편하고, 수평 방향으로의 해석 해를 사용하기 때문에 짧은 시간 내에 해석을 수행할 수 있다. 그러므로, 지반-구조물 상호작용 해석을 하는데 있어서 효율적이고 실용적인 방법이라고 할 수 있다.

개발된 전산 프로그램을 이용하여, 시험 구조물의 뒤채움후 강제 진동 시험과 아울러 지진 응답 해석을 수행하였다. 해석 결과를 살펴보면, 실제 측정값보다 다소 높은 진동수에서 최대 응답이 나타나는데, 이에 대한 연구는 현재 수행 중에 있다.

### 6. 알림

본 연구는 한국 원자력 안전기술원의 위탁 용역 과제 의 일부로서 수행되었다.

#### 참고 문헌

1. Kausel, E., and Roesset, J. M. "Semianalytic Hyperelement for Layered Strata," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No.4, Apr., 1977, pp. 569-588.
2. Wass, G., "Linear Two-Dimensional Analysis of Soil Dynamics Problems in Semi-Infinite Layered Media," thesis presented to the University of California, at Berkeley, California, in 1972, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
3. Kausel, E., "Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media," Research Report R74-11, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1974.

4. Tassoulas, J.L., and Kausel, E., "Elements for the Numerical Analysis of Wave Motion in Layered Strata," International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, 1983, pp. 1005-1032.
5. Kim, J.K., and Tassoulas, J.L., "Interaction between Concentric Annular and Circular Foundations," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 113, No. 6, 1987, pp. 555-567.

분류	구조물 모델링	지반 모델링	기저암반까지의 깊이
UMCB	수정모델	그림1의 좌측	45.0m
MMCB	수정모델	그림1의 우측	45.0m
UMCBV	수정모델	UMCB와 동일	진동수에 반비례

모형 위치	관측값	모델		
		UMCB	MMCB	UMCBV
RF	70.72	81.21	97.08	105.03
BA	26.78	26.83	27.67	25.55

표1. 강제진동해석과 지진응답해석을 위해 사용한 모델

표2. 최대 가속도(gal)

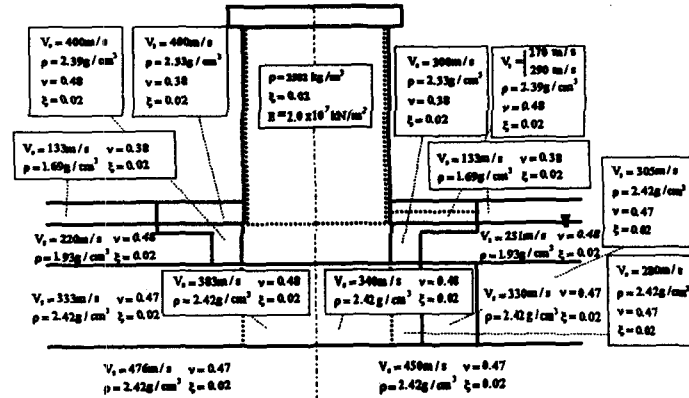


그림1. 지반과 구조물 모델 (좌측: 통일모델 UBCB, 우측: 수정모델 MMCB)

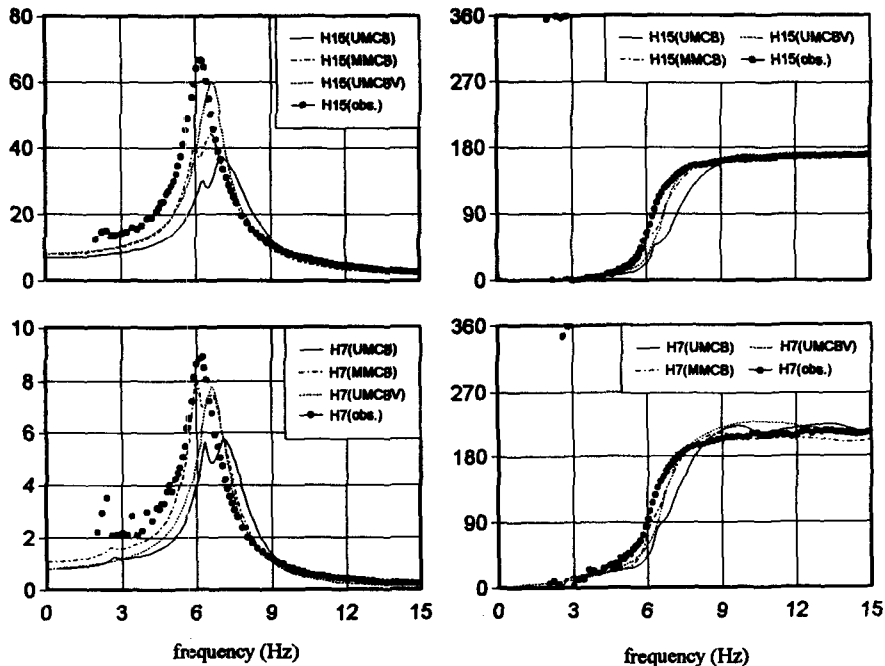


그림2. 지붕 슬래브에서 가진시 뒤편에서의 공진응답곡선과 위상차곡선

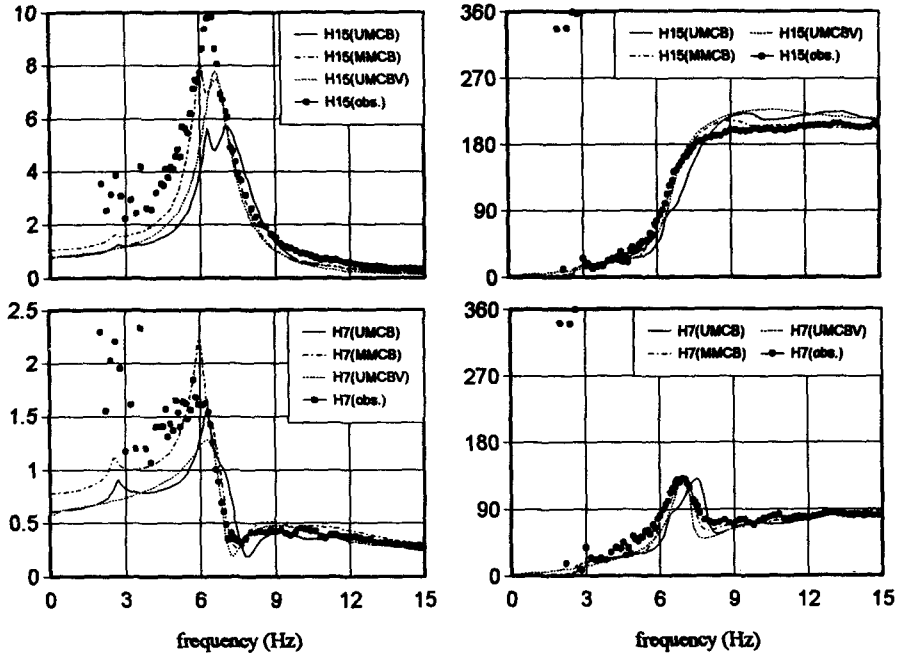


그림3. 바닥 슬래브에서 가진시 뒤채움 후의 공진응답곡선과 위상차곡선

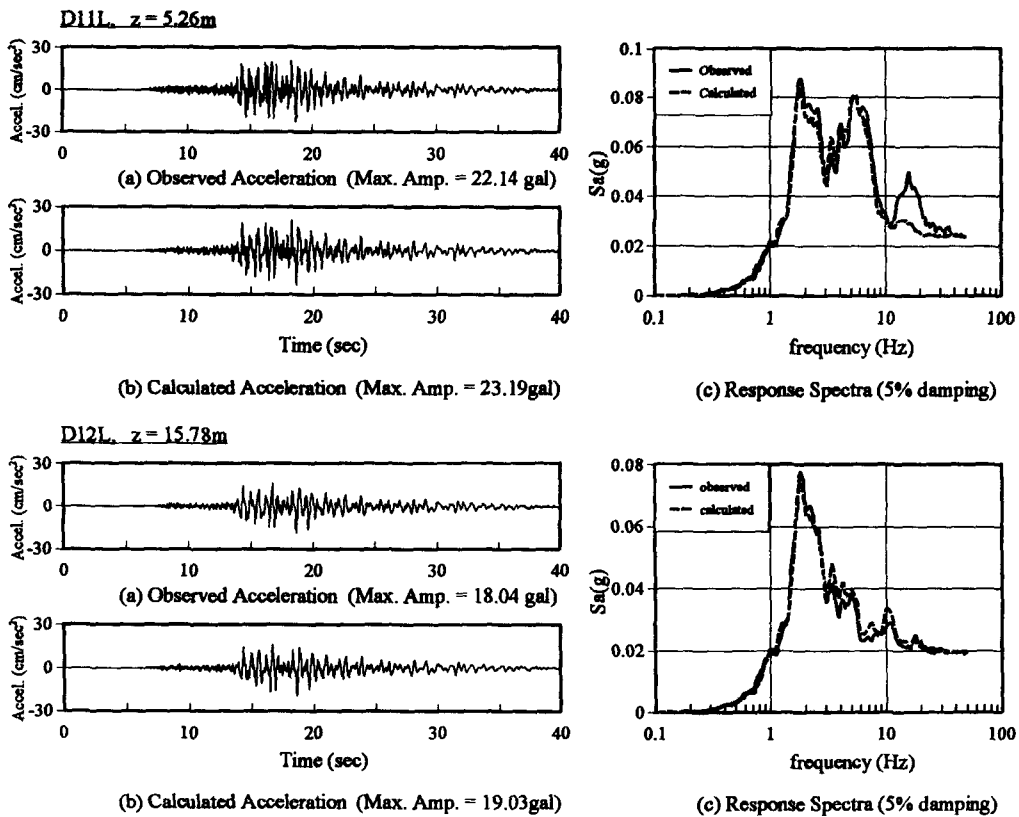


그림4. 자유장운동의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼의 비교 (계속)

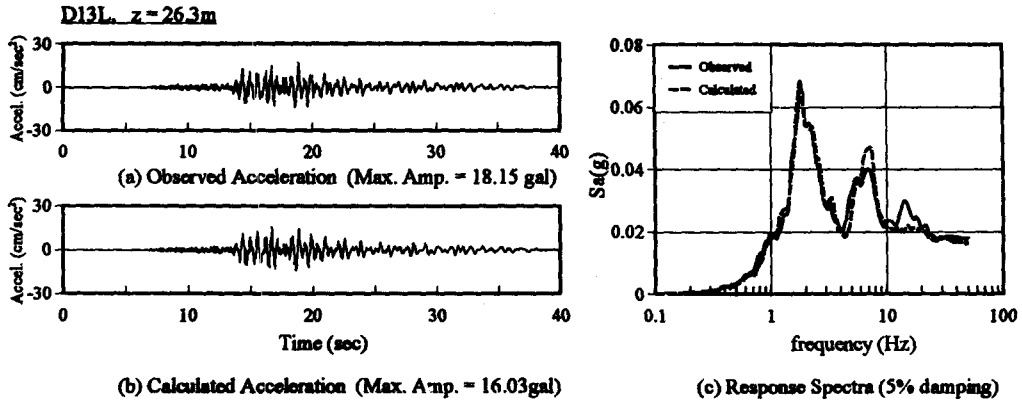


그림4. 자유장운동의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼의 비교

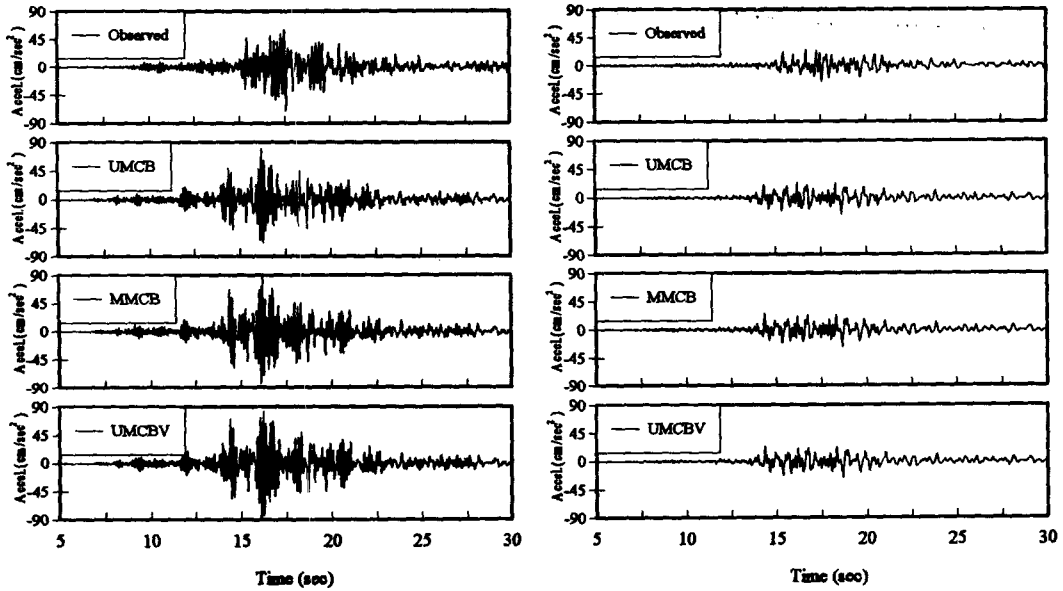


그림5. 가속도 시간이력의 비교(지붕슬래브RF)

그림6. 가속도 시간이력의 비교(바닥슬래브BA)

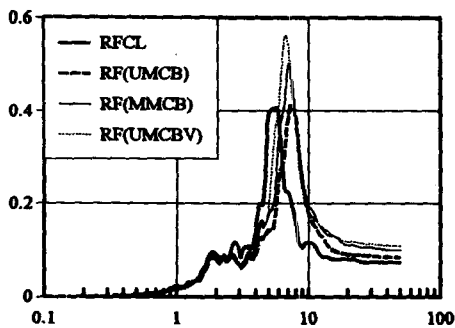


그림7. 가속도 응답스펙트럼의 비교(지붕슬래브RF)

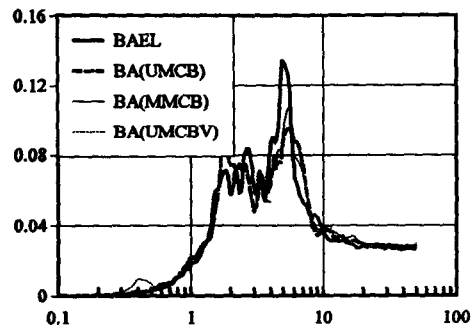


그림8. 가속도 응답스펙트럼의 비교(바닥슬래브BA)