

# 지반-구조물 상호작용계의 계수추정 및 비선형 지진응답해석 Parameter Identification and Nonlinear Seismic Analysis of Soil-Structure Interaction System

윤정방<sup>1</sup>  
Yun, Chung-Bang

최준성<sup>2</sup>  
Choi, Jun-Seong

김재민<sup>3</sup>  
Kim, Jae-Min

김문수<sup>4</sup>  
Kim, Moon-Soo

## ABSTRACT

This paper presents the result of an international cooperative research on the post-correlation analysis of forced vibration tests and the prediction of earthquake responses of a large-scale seismic test structure. Through the post-correlation analysis, the properties of the soil layers are revised so that the best correlation in the responses may be obtained compared with the measured force vibration test data. Utilizing the revised soil properties as the initial linear values, the seismic responses are predicted for an earthquake using the equivalent linearization technique based on the specified strain dependent characteristics of the shear moduli and damping ratios. It has been found that the predicted responses by the equivalent nonlinear procedure are in excellent agreement with the observed responses, while those using the initial linear properties are fairly off from the measured results.

## 1. 서론

본 논문에서는 국제공동연구로 수행중에 있는 대형지진시험구조물의 강제진동해석에 관한 상관해석과 지진응답해석에 관해 연구하였다. 지반-구조물 상호작용해석을 위하여 구조물과 근역지반은 유한요소로 모형화하고 원역지반은 무한요소로 모형화하는 직접법을 사용하였으며, 지진응답은 부분구조법에 근거한 파 입력기법을 사용하여 해석하였다(Zhao 1993, Yun 1995a, Yun 1995b). 강제진동시험에 대한 체계적인 상관해석 절차를 개발하였는데, 이때에 건설단계별 지반의 정적응력해석 결과, 뒷채움전 강제진동의 예측결과 및 지질시험결과를 바탕으로 지반물성치의 보정이 필요한 지반영역을 정하였다. 지반물성치의 보정은 예측한 지진응답과 계측치와의 차이를 최소화하는 방법으로 수행되었는데, 이때에 steepest descent 기법을 사용하였다. 일차적으로 자유장해석을 수행하여 지표면에서 정의된 통제지진운동에 대한 근역지반과 원역지반의 경계면의 응답을 구하고, 이로부터 등가지진하중을 구하여 지반-구조계의 지진응답을 해석하였다. 위의 자유장해석과 지반-구조계의 해석에서는 지반의 비선형거동의 영향을 등가선형화기법으로 고려하였다. 최종적으로 구한 물성치를 이용하여 예측한 지진응답이 실측치와 잘 일치함을 알 수 있었는데, 지반의 비선형성의 영향이 상당히 커서 지반의 강성계수(전단파속도)가 초기값에 비하여 약 30%가량 감소함을 알 수 있었다.

<sup>1</sup> 한국과학기술원 토목공학과 교수

<sup>2</sup> 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

<sup>3</sup> 미국 Univ. of California-Irvine Post Doctoral 연구원

<sup>4</sup> 한국원자력안전기술원 선임연구원

## 2. 강제진동시험결과에 대한 상관분석

### 2.1 강제진동시험

지질조사와 현장시험 결과에 근거하여 지반과 구조물의 물성치를 규정한 통일모형이 설정되었다. 통일모형은 그림 1에서 보여진것처럼 상부에 두개 층의 뒷채움 영역과 사질토층이 있으며, 그 아래로 수평의 자갈층과 자갈층으로 이루어진 반무한지반으로 구성되어있다. 강제진동시험이 뒷채움 이전과 이후에 대해서 수행되었으며, 하중은 구조물의 바닥과 지붕면에 설치된 가진기에 의해 가진되었다. 그림 1에서 보인 몇지점에서 응답이 예측되었으며, 가진력의 크기는 지반과 구조물을 선형으로 거동한다고 가정할 수 있을만큼 충분히 작게 설정되었다.

### 2.2 예비조사

일차적으로 구조물과 지반의 통일모형을 사용하여 강제진동응답을 예측하여, 시험결과와 비교한 결과, 통일모형의 강성이 전반적으로 과대하게 평가된것으로 판단되었다. 건설단계별 지반의 정적응력을 유한요소법을 사용하여 해석하여 지중의 몇몇 지점에서 유효구속압을 계산한후, 그 결과와 지질시험자료의 분석으로부터 지반의 물성치를 보정할 5개의 지반영역을 정하였다. 이들은 그림 2에서 보인것처럼 Backfill-1, Backfill-2, Gravel-1, Gravel-2와 Gravel-4 영역이다. 각 지반영역에 대한 전단파속도의 상한값을 Gravel-4를 제외하고는 통일모형의 값들로 취하였으며, 하한값을 지질학적인 시험시험자료로부터 결정하여, 표 2에 보였다. 구조물의 벽체는 건설도중에 벽체의 상부에 일시적으로 설치된 개구부로 인해 강성의 저하가 일어난것으로 판단되어서, 뒷채움 이전에 실시된 강제진동시험의 결과에 근거하여 Luco가 추정했던 벽체의 강성값을 사용하였다 (Luco 1994).

### 2.3 지반계수의 추정

뒷채움 이후의 지반에 대하여, 전절에서 규정한 5개 지반영역의 전단파속도를 다음식과 같이 추정오차를 최소화하는 기법을 사용하여 결정하였다.

$$J = \sum_j \sum_i (T_j(\omega_i) - \tilde{T}_j(\omega_i; \mathbf{x}))^2 \quad (2.1)$$

여기서  $T_j(\omega_i)$ 는 응답성분  $j$ 에 관해 예측된 전달함수이고,  $\tilde{T}_j(\omega_i; \mathbf{x})$ 는 추정된 전단파속도  $\mathbf{x}$ 를 사용하여 계산된 전달함수이다. 전단파속도의 추정은 구조물 바닥면에 수평가진(그림 1)을 가한 경우에서 구조물바닥의 수직운동(V3)과 구조물지붕의 수평운동(H15)에 대한 두개의 전달함수를 사용하여 수행하였다. 구조물지붕 가진에 의한 응답대신에 구조물바닥면 가진에 의한 응답을 사용한 이유는, 후자의 경우가 표 1에서 보인것처럼 전자의 경우보다 방향성이 약하여 두 주축간 최대주파수의 차이가 더 작은값을 나타내고 있기 때문이다. H15와 V3에 대한 전달함수에 근거하여, 추정오차  $J$ 를 산출할 7개의 주파수( $\omega_i$ )를 그림 4에서 보인것처럼 최대응답의 주파수를 중심으로 선택하였는데, 그 값은 5.0, 6.0, 6.5, 7.0, 8.0, 9.0과 11.0 Hz이다. Steepest descent 기법을 사용하면 보정된 지반계수벡터  $\mathbf{x}_{k+1}$ 이 그림 3과 식 2.2와 같이 구해질 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \mathbf{g}_k \quad (2.2)$$

여기서  $\mathbf{g}_k$ 는 추정오차  $J$ 에 관한 기울기벡터이고,  $\alpha_k$ 는 수렴속도를 제어하는 양의 상수이다. 그림 5와 6은 반복과정에 의해 추정된 오차의 추이와 미지계수의 수렴형태를 보이고 있다. 40회의 반복계산후에 최종값이 결정되었으며, 그 결과를 표 3에서 통일모형과 비교하였다. 보정된 지반 물성을 사용하여 여러 응답성분에 대해 전달함수를 계산하였는데, 그 결과는 그림 7에 보인 바와같이 예측결과와 매우 잘 일치하는 반면에, 통일모형을 사용한 응답은 매우 벗어남을 보여주고

있다.

### 3. 지진응답 해석

강제진동시험결과에 근거한 보정된 물성치를 사용하여 남북방향의 최대가속도가 0.1 g인 1995년 5월 1일 발생한 지진에 대한 지진응답을 구하였다. 첫번째로, 자유장 해석을 수행하여 근역지반과 원역지반의 경계면을 따라 등가지진하중을 계산한 후, 그 결과를 이용하여 지진응답을 해석하였다. 자유장해석과 지진해석시에는 지반의 비선형거동 영향을 등가선형화기법을 사용하여 고려하였다.

#### 3.1 비선형 자유장해석

자유장해석에서 지반은 평행층상의 반무한영역으로 고려되었으며, 지진파는 그림 8에서 보인것처럼 무한원 방향에서 입사하는 평면파로 가정하였다. 이때, 각 층에서의 동적 평형 방정식은 동적강성행렬기법(Wolf 1985)을 사용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{K}_m(\omega) \mathbf{u}_{(m)}(\omega) = \mathbf{f}_{(m)}(\omega) \quad (m = 1, 2, \dots, n) \quad (3.1)$$

여기서,  $\mathbf{K}_m$ 은  $m$  번째 층의 주파수종속적인 동적강성행렬이고  $\mathbf{u}_{(m)}$ 과  $\mathbf{f}_{(m)}$ 은 각각  $m$  번째 층의 상부경계면위의 변위와 응력벡터이다. 그리고,  $n$ 은 반무한영역을 포함한 층상의 수이다. 위와같은 식에서부터, 전 자유장계에 대한 동적평형방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{K}_{total}(\omega) \mathbf{u}_{total}(\omega) = \mathbf{f}_{total}(\omega) \quad (3.2)$$

따라서, 어떤 층경계면 위에서 통제운동이 주어지면 다른 층의 경계면에서의 운동은 식 (3.2)로부터 계산될 수 있다. 현 해석기법이 주파수영역이므로 지반의 비선형거동을 고려하기위해서 등가선형화기법을 사용하였다. 상부 3개 층의 지반물성치는 구조물-지반 상호작용의 영향이 작다고 판단되는 원역지반 (Sand 1, Sand 2, Gravel 3 영역)의 값(통일모형)을 사용하였고, 그 하부의 Gravel 4는 강제진동시험 응답을 사용하여 보정된 값을 사용하였다. 지진가속도는 시험구조물 인근 9개 지점 (A13, A14, A15, A23, A24, A25, A33, A34, A35)에서 계측된 기록(그림 9)을 사용하였는데, 그림 10에서 보인것처럼 지진기록의 Fourier amplitude spectra의 평균을 취하여 남북과 동서방향성분에 대한 두개의 통제지진운동을 산정하였다. 이는 지진기록들이 유사한 응답스펙트럼을 주지 못하기 때문이며, 산정된 가속도 시간이력을 그림 11에 보였다. 통제운동의 최대가속도는 남북방향성분에서 0.1g이고 동서방향성분에서 0.07g이다. 등가선형화방법으로 자유장해석을 수행할 때에, 각 지반요소의 중점에서 octahedral 변형도를 계산하였으며, 유효전단변형도를 각 요소에대해 최대 octahedral 전단변형도의 60%로 취하였다. 여러 지반영역에 대해서 토질실험을 통하여 규명된 변형도에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 값은 그림 12와 13과 같다. 완전한 수렴에 도달할 때까지 5번의 등가선형해석이 요구되었다. 각 지반영역별 최종의 등가선형 물성치는 표 4에 보인것처럼 초기선형값의 70 ~ 80 % 수준으로 감소되어 나타났으며, 이들값을 지진응답해석에서 원역지반의 물성치로서 사용하였다.

### 3.2 지진해석기법

지진응답해석은 다음의 파동방사 방정식을 사용하여 구해질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{nn}(\omega) & \mathbf{K}_{ni}(\omega) \\ \mathbf{K}_{in}(\omega) & \mathbf{K}_{ii}(\omega) + \overline{\mathbf{K}}_{ii}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_n(\omega) \\ \mathbf{u}_i(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_i(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

여기서 하첨자  $n$  과  $i$  는 각각 근역지반에서의 자유도와 근역과 원역지반사이의 경계면  $\Gamma_i$ 에서의 자유도를 나타내며,  $\mathbf{K}_{ii}$ 는 근역지반에 대해서 유한요소의 정식화를 사용하여 경계면  $\Gamma_i$ 을 따라 구해진 동적 강성행렬이다. 그리고  $\overline{\mathbf{K}}_{ii}$ 는 원역지반영역에 대한 무한요소의 정식화를 통해 얻어진 동적강성 행렬이고,  $\mathbf{f}_i$ 는 그림 14에서 보여진것처럼 경계면  $\Gamma_i$ 을 따라 구해진 등가지진하중으로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\mathbf{f}_i(\omega) = \overline{\mathbf{K}}_{ii}(\omega) \overline{\mathbf{u}}_i(\omega) - \mathbf{A} \overline{\mathbf{s}}_i(\omega) \quad (3.4)$$

여기서,  $\overline{\mathbf{u}}_i$ 와  $\overline{\mathbf{s}}_i$ 는 비선형 자유장해석으로부터 얻어진  $\Gamma_i$ 에서의 변위와 응력이고,  $\mathbf{A}$ 는 응력을 절점하중으로 전환시키는 변환행렬이다.

### 3.3 비선형 지진응답 해석

일반적으로 비선형거동은 지진에 의한 지반-구조물 상호작용효과로 인해 원역지반보다는 근역지반에서 더 분명히 나타난다. 본 연구에서는 이와같은 이유에 근거해서 지반-구조물 상호작용효과로 인한 비선형거동을 근역지반에서만 고려하였으며, 자유장해석의 경우와 같이 등가선형화기법을 사용하였다. 구조물과 근역지반의 초기물성치는 강제진동에 대한 상관해석을 통해 보정된 물성치를 사용하였으며, 원역지반에 대하여는 자유장해석을 통해 얻어진 결과를 사용하였다. 완전한 수렴에 도달하기까지는 4회의 등가선형해석이 요구되었다. 근역지반영역에서 지반물성치에 관한 등가선형화 지반물성은 표 4에 나타낸바와 같이, 초기 선형값의 65~75% 수준으로 감소하였음을 알 수 있었다. 비선형효과는 지반과 구조물의 상호작용에 의한 비선형보다는 지진 자체에 의한 근역지반의 비선형 거동이 주가되어 발생된것으로 분석되었는데, 이는 구조물의 인접지반에서 변형도가 일정하게 분포되어 나타난 것에 근거한 것이다. 계측기가 설치되어 있는 몇개의 지점에서 계산된 응답을 사용하여 총응답스펙트럼을 산정하였으며, 그 결과를 계측된 응답과 그림 15와 16에서 비교하였다. 지반의 비선형거동을 고려하여 얻어진 총응답스펙트럼은 계측된 응답과 매우 잘 일치하는 반면, 초기 선형물성을 사용한 응답은 큰 차이가 있는 결과를 보여 비선형거동의 고려가 매우 중요함을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약하여 나타낼 수 있다.

- (1) 보정된 물성을 사용하여 수행된 강제진동해석을 여러지점에서 계측된 응답성분의 결과와 비교할 때, 잘 일치함을 보였다.
- (2) 구조물 주변의 9개지점에서 계측된 지진기록에 대한 Fourier amplitude spectra 의 평균을 취하는 방법으로 남북과 동서방향성분에 대해서 통제지진운동을 산정하였는데, 이 통제운동이 자유장응답해석과 지진응답해석에서 매우 효과적인것으로 나타났다.
- (3) 지반의 비선형거동을 고려하여 얻어진 총응답스펙트럼은 계측된 결과와 매우 잘 일치한 반면, 초기 선형물성치를 사용한 응답 결과는 상당한 차이를 보이고 있어서, 지반 비선형 거동의 영향이 중요함을 알 수 있었다.

참고문헌

- J.E. Luco and F.C.P. Barros, "Identification of structural and soil properties from forced vibration tests of the Hualien containment model prior to backfill," *Research Report, Dept. of Applied Mechanics and Eng. Sci., University of California, San Diego, California, 1994.*
- Wolf, J. P., *Dynamic soil-structure interaction*, Prentice-Hall, 1985.
- Yun, C.B. and Kim, J.M., Axisymmetric Elastodynamic Infinite Elements for Multi-Layered Half-Space, *International Journal for Numerical Methods Engineering*, 1995a.
- Yun, C.B., Kim, J.M., and Park, K.-L., "Earthquake response analysis of the Hualien large scale seismic test structure", *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, 1995b, 16(1), pp. 13-21.
- Zhao, C. And Valliapan, S., "An efficient wave input procedure for infinite media," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol.9, 1933, pp. 407-415.

표 1. 강제진동시 지붕에서 계측된 전달함수의 특성

Test Cases	Excitation Positions	Principal Direction	Peak Freq. (Hz)	Peak Ampl. ( $\mu\text{m}/\text{KN}$ )
Before Backfill	Roof	D <sub>1</sub>	4.1	29.7
		D <sub>2</sub>	4.6	24.3
	Base	D <sub>1</sub>	4.2	8.1
		D <sub>2</sub>	4.6	6.3
After Backfill	Roof	D <sub>1</sub>	6.1	6.8
		D <sub>2</sub>	6.3	6.5
	Base	D <sub>1</sub>	6.5	0.99
		D <sub>2</sub>	6.6	1.01

표 2. 전단파속도의 범위 (m/sec)

Parameters	Unified model	Bounds	
		Lower	Upper
Backfill-1 (V <sub>s</sub> )	400	300	400
Backfill-2 (V <sub>s</sub> )	400	300	400
Gravel-1 (V <sub>s</sub> )	383	333	383
Gravel-2 (V <sub>s</sub> )	333	250	333
Gravel-4 (V <sub>s</sub> )	476	428	600

표 3. 보정된 지반의 강성계수

Parameters (V <sub>s</sub> in m/sec, E in Gpa)	Unified	Updated
Sand-1 (V <sub>s</sub> )	133	133
Sand-2 (V <sub>s</sub> )	231	231
Backfill-1 (V <sub>s</sub> )	400	303
Backfill-2 (V <sub>s</sub> )	400	353
Gravel-1 (V <sub>s</sub> )	383	356
Gravel-2 (V <sub>s</sub> )	333	280
Gravel-3 (V <sub>s</sub> )	333	333
Gravel-4 (V <sub>s</sub> )	476	503
Roof & Base (E)	2.88	2.88
Shell (E)	2.88	2.07

표 4. 등가선형지반물성

Regions (V <sub>s</sub> in m/sec)	감쇠비 (%) 남북(동서)	전단파속도(m/sec) 남북(동서)
Sand-1	3.7 (3.0)	105.1 (113.1)
Sand-2	3.6 (3.1)	184.8 (194.0)
Backfill-1	4.6 (3.3)	192.7 (219.7)
Backfill-2	4.5 (3.5)	229.5 (247.1)
Gravel-1	5.0 (4.7)	256.3 (265.2)
Gravel-2	5.2 (4.9)	198.8 (203.6)
Gravel-3	5.2 (4.9)	236.4 (242.1)
Gravel-4	3.5 (3.6)	417.5 (407.4)

주 : 괄호밖은 남북성분이고, 괄호안은 동서성분이다.

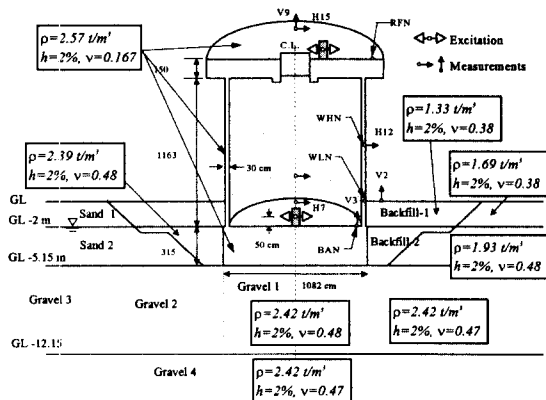


그림 1. 확연대형지진시험구조물의 모형과 계측기의 위치

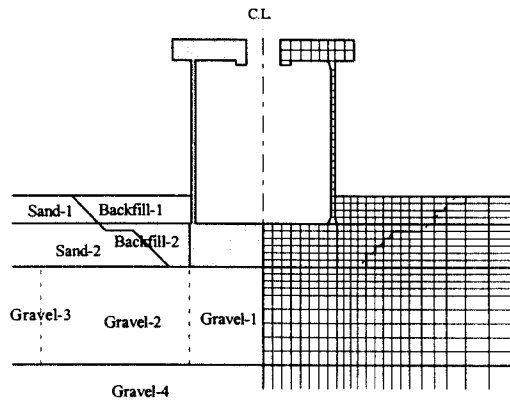


그림 2. 지반-구조물 상호작용해석을 위한 유한요소

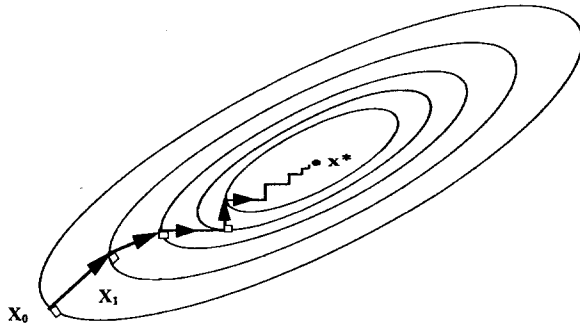


그림 3. Steepest descent 기법

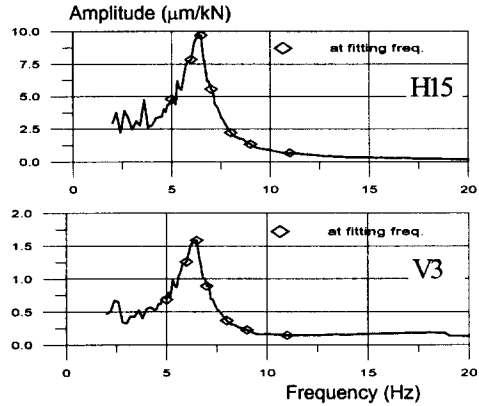


그림 4. 전달함수와 상관해석에 사용된 주파수

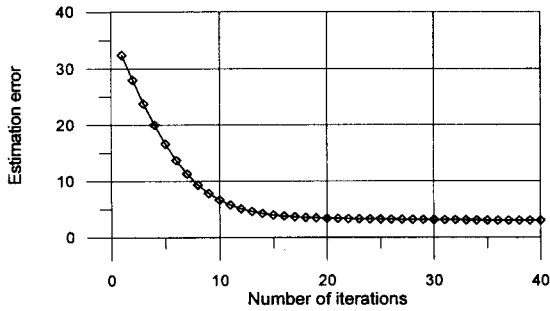


그림 5. 추정오차의 추이

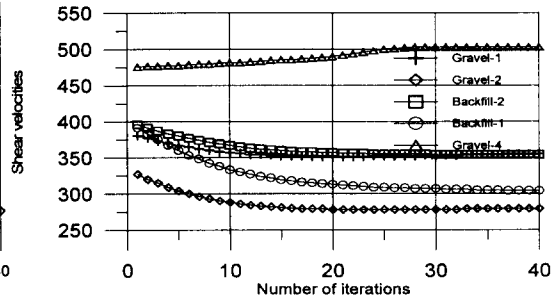


그림 6. 미지계수추정의 수렴형태

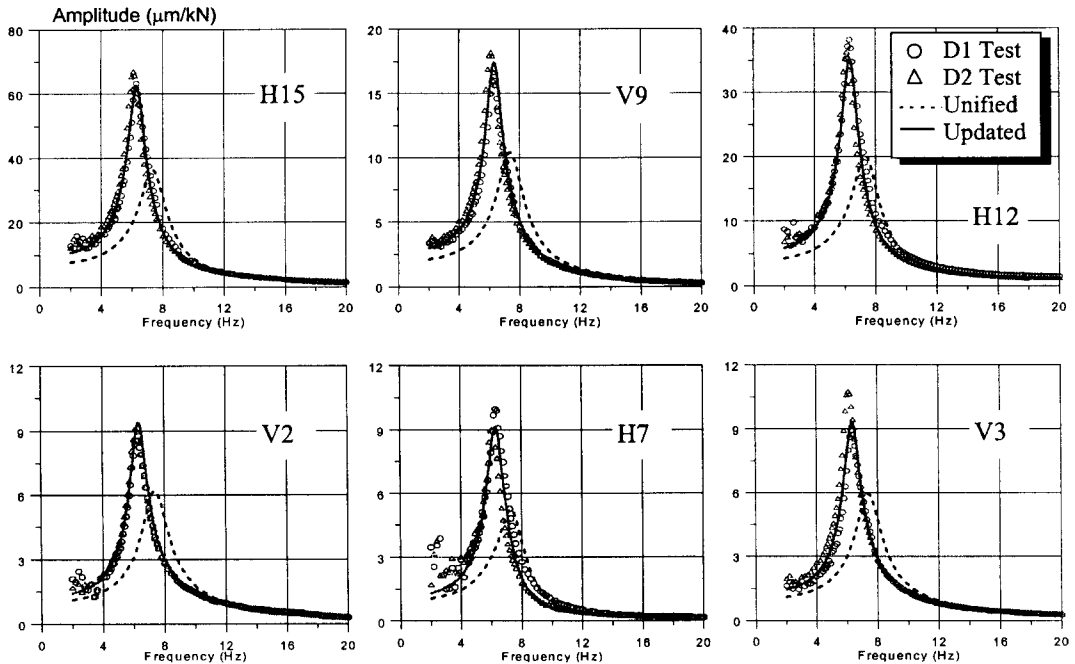


그림 7. 구조물의 지붕수평가진에 대한 전달함수의 비교

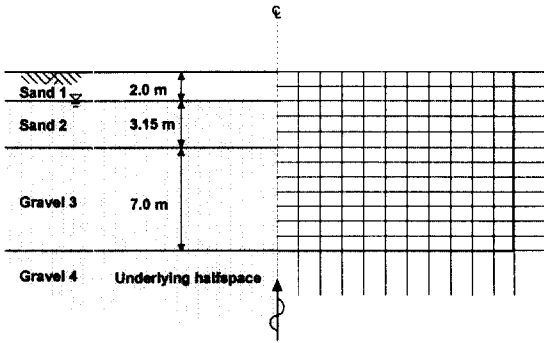


그림 8. 자유장해석을 위한 유한요소모형

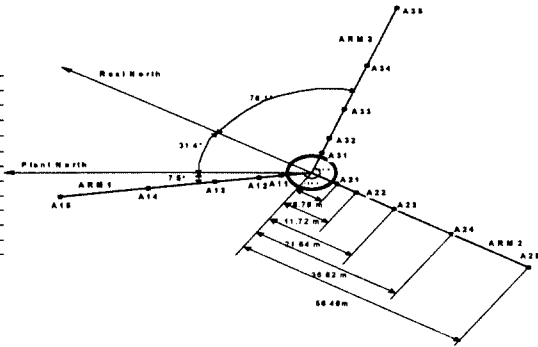


그림 9. 지표면위의 지진계측점

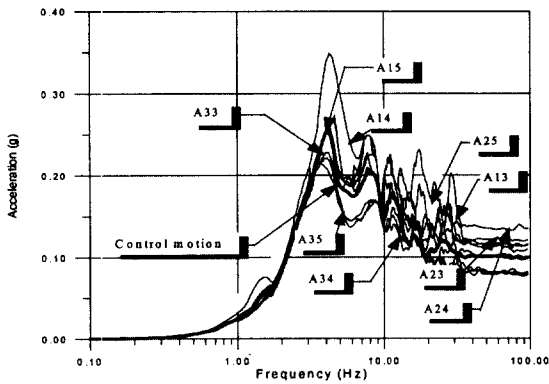


그림 10. 계측된 응답스펙트럼과 통제운동(남북방향)

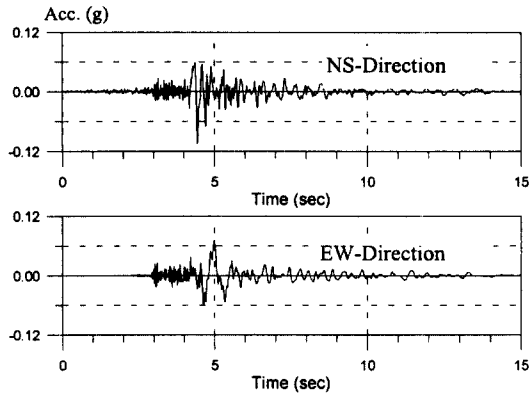


그림 11. 자유장해석에 사용된 통제운동

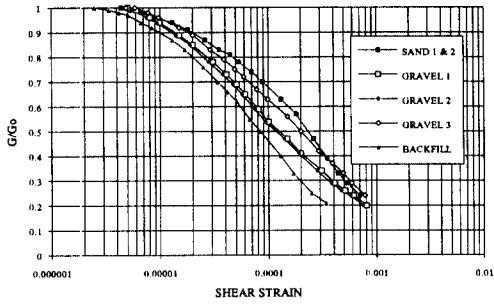


그림 12. 전단변형도에 따른 전단탄성계수

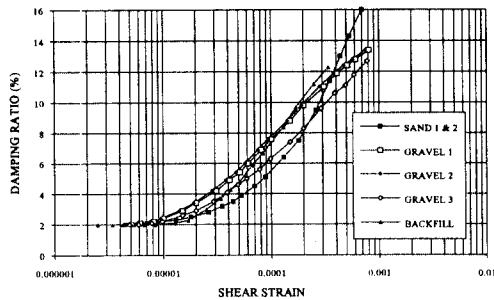


그림 13. 전단변형도에 따른 지반의 감쇠비

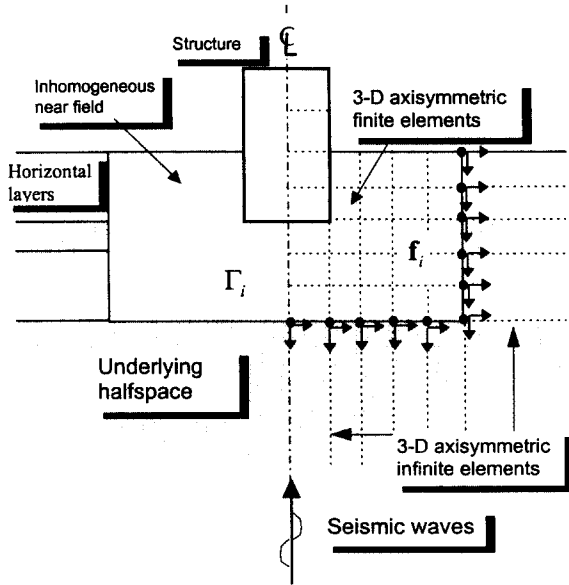


그림 14. 근역지반과 원역지반 사이의 경계면에 작용하는 등가지진하중

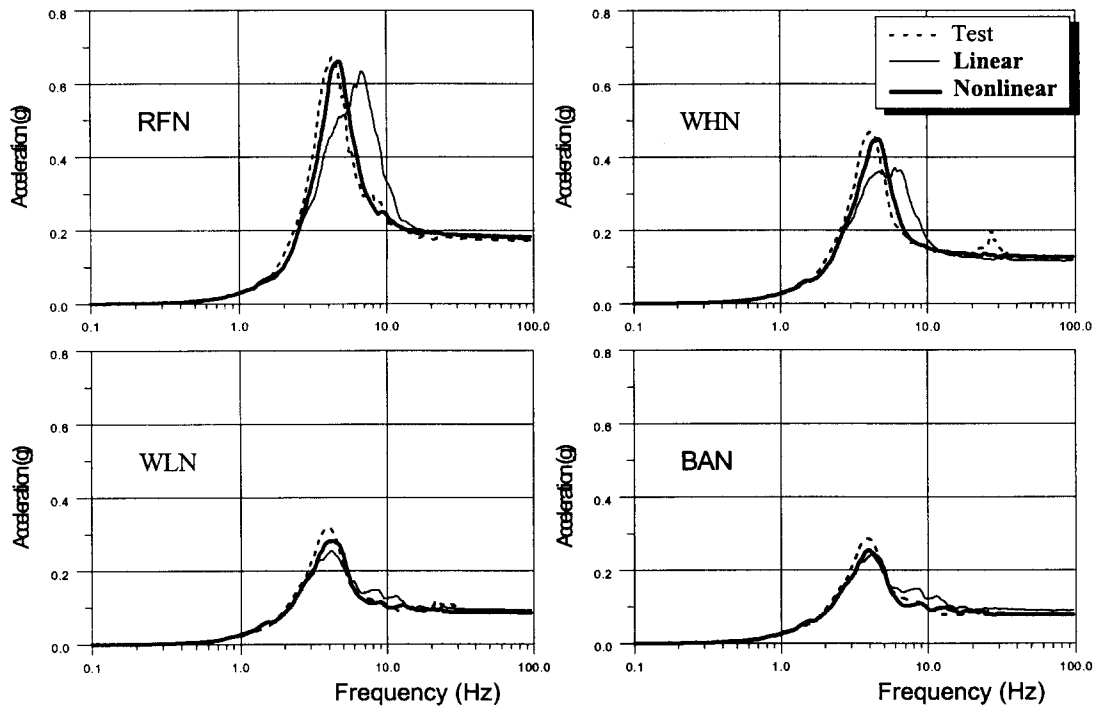


그림 15. 남북방향성분의 응답 스펙트럼

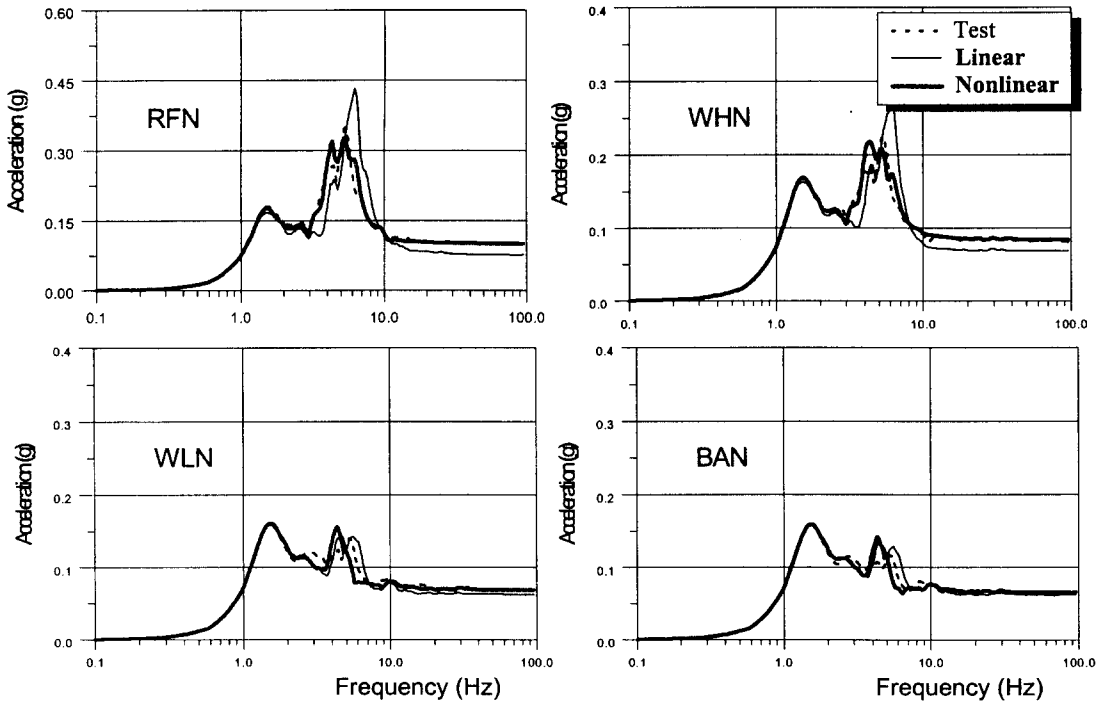


그림 16. 동서방향성분의 응답 스펙트럼