

지반-구조물 상호작용계의 강성계수추정 및 비선형지진해석

Parameter Identification and Nonlinear Seismic Analysis of Soil-Structure Interaction System

윤 정 방* 최 준 성** 김 재 민*** 김 문 수****
Yun, Chung Bang Choi, Jun Seong Kim, Jae Min Kim, Moon Soo

국문요약

본 논문에서는 국제공동연구인 대형지진시험구조물의 강제진동시험결과에 대한 상관해석과 지진응답해석에 관해 연구하였다. 지반-구조물 상호작용해석을 위하여 구조물과 근역지반은 유한요소로 모형화하고 원역지반은 무한요소로 모형화하는 직접법을 사용하였으며, 지진응답은 부분구조법에 근거한 과 입력기법을 사용하여 해석하였다. 시험후 상관해석을 통해 각 지반영역의 물성이 강제진동 시험에서 계측된 구조물 응답과 일치하도록 보정하였다. 보정된 지반물성을 초기 선형값으로 사용하고 등가선형화기법을 적용하여 지진에 관한 구조물의 응답을 예측하였다. 지반의 비선형거동을 고려하여 얻어진 구조물 응답은 계측된 결과와 매우 잘 일치한 반면, 초기 선형물성치를 사용한 응답결과는 상당한 차이를 보이고 있어서, 지반 비선형 거동의 영향이 중요함을 알 수 있었다.

주요어 : 지반-구조물 상호작용, 등가선형화, 무한요소, 비선형지진해석, 대형지진시험, 동적해석

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. The dynamic analysis is carried out using the axisymmetric finite element method incorporating infinite elements for the far field soil region. 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. 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 linear properties are fairly off from the measured results.

Key words : soil-structure interaction, equivalent linearization, infinite element, nonlinear seismic analysis, large scale seismic test, dynamic analysis

1. 서 론

강진시 지반과 구조물의 상호작용의 영향분석과 조사와 이를 해석하기 위해 사용된 전산프로그램의 검

증에 관한 국제 공동연구가 한국, 일본, 대만, 미국, 프랑스 5개국이 참여한 가운데 수행되었다. 원자력발전소 격납구조물의 1/4 크기인 대형지진시험구조물이 지진 위험도가 매우 높은 곳 중에 하나인 대만의 화련에 건설되었다.⁽¹⁾⁽²⁾

해석모형인 지반과 구조물의 물성치 보정을 위해 일련의 강제진동해석이 수행되었으며, 몇개의 지진에

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 정회원 · 미국 California-Irvine Post Doctoral 연구원
**** 정회원 · 한국원자력 안전기술원 선임연구원

대해서 지반과 구조물의 응답이 계측되었다. 마지막으로 각국의 참여자에 의해 주변지반과 구조물의 지진 응답에 관한 예측해석이 수행되었으며, 그 결과가 계측된 응답과 비교되었다. 본 논문에서는 대형지진시험 구조물의 강제진동시험 결과에 대한 상관해석과 지진 응답해석에 관해 연구하였다. 지반-구조물 상호작용해석을 위하여 구조물과 근역지반은 유한요소로 모형화하고 원역지반은 무한요소로 모형화하는 직접법을 사용하였으며, 지진응답은 부분구조법에 근거한 과 입력기법을 사용하여 해석하였다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 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 descent기법을 사용하였다. 지진응답해석에서는, 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 26 %가량 감소함을 알 수 있었다.

2. 강제진동시험결과에 대한 시험후 상관해석

2.1 강제진동시험

지질조사와 현장시험 결과에 근거하여 지반과 구조물의 물성치를 규정한 통일모형이 설정되었다.⁽⁶⁾ 통일모형은 그림 1에서 보여진 것처럼 상부에 두개 층의 뒷채움 영역과 사질토층이 있으며, 그 아래로 수평의 자갈층과 자갈층으로 이루어진 반무한지반으로 구성되어 있다. 강제진동시험이 뒷채움 이전과 이후에 대해 수행되었으며, 하층은 구조물의 바닥과 지붕면에 설치된 가진기에 의해 가진되었다. 그림 1에서 보인 몇지점에서 응답이 계측되었으며, 가진력의 크기는 지반과 구조물을 선형으로 저동한다고 가정할 수 있을 만큼 충분히 작게 설정되었다. 지반조건이 비균질하기 때문에 두개의 서로 다른 기본 공진주파수가 뒷채움 흡이전과 이후에 대해 두개의 주축에서 나타났는데 이는 지반과 구조물의 동적특성이 이방성을 지니고

있다고 판단된다. 그러나 뒷채움 이후부터는 계측된 응답의 방향성이 크게 줄어들었는데 이것은 뒷채움 흡의 균질성이 구조물의 응답에 큰 영향을 미치기 때문인것으로 여겨졌다 (표 1참조).

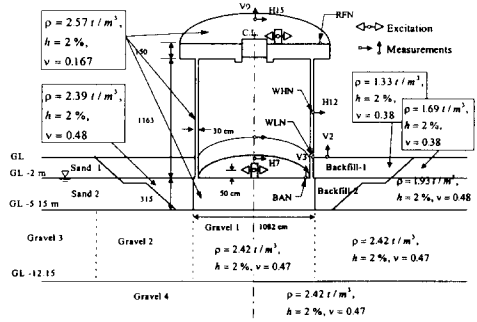


그림 1 화력대형지진시험구조물의 모형과 계측기의 위치

표 1 강제진동시 구조물 지붕에서 계측된 전달함수의 특성

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

2.2 예비조사

일차적으로 구조물과 지반의 통일모형을 사용하여 강제진동응답을 예측하여, 시험결과와 비교한 결과, 통일모형의 강성이 전반적으로 과대하게 평가된 것으로 판단되었다.⁽⁷⁾ 건설단계별 지반의 정적응력을 유한요소법을 사용하여 해석하여 지중의 몇몇 지점에서 유효구속압을 계산한 후, 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 그림 3에서 보인 지질학적인 시험자료로부터 결정하여, 표 2에 보였다.⁽⁸⁾ 구조물의 벽체는 건설도중에 벽체의 상부에 일시적으로 설치된 개구부로 인해 강성의 저하가 일어난 것으로 판단되어서, 뒷채

움 이전에 실시된 강제진동시험의 결과에 근거하여 Luco가 추정했던 벽체의 강성값을 사용하였다.⁽⁹⁾

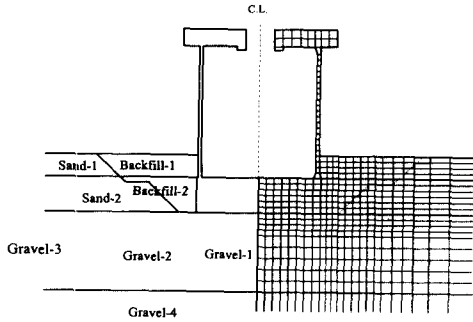


그림 2 지반-구조물 상호작용해석을 위한 유한요소

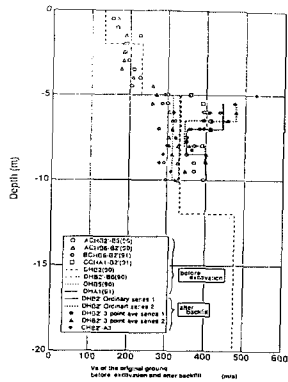


그림 3 CRIEPI에 의해 측정된 전단파 속도

표 2 전단파속도의 범위 (m/sec)

미지계수	통일모형	범위	
		하한	상한
Backfill-1 (V_s)	400	300	400
Backfill-2 (V_s)	400	300	400
Gravel-1 (V_s)	383	333	383
Gravel-2 (V_s)	333	250	333
Gravel-4 (V_s)	476	428	600

2.3 지반계수의 추정

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

$$J = \sum_j \sum_i (T_j(\omega_i) - \hat{T}_j(\omega_i; \mathbf{x}))^2 \quad (1)$$

여기서 $T(\omega_j)$ 는 응답성분 j 에 관해 계측된 전달 함수 이고, $\hat{T}_j(\omega_j; \mathbf{x})$ 는 추정된 전단파속도 \mathbf{x} 를 사용하여 계산된 전달함수이다. 전달파속도의 추정은 구조물 지붕에 수평가진(그림 1)을 가한 경우에서 구조물바닥의 수평운동(H7)과 구조물지붕의 수평운동(H15)에 대한 두 개의 전달함수를 사용하여 수행하였다. 구조물바닥가진에 의한 응답대신에 구조물지붕가진에 의한 응답을 사용한 이유는, 전자의 경우가 후자의 경우보다 시험자료의 계측결과가 훨씬 좋게 나타나고 있기 때문이다. H15와 H7에 대한 전달함수에 근거하여, 추정오차 J 를 산출할 7개의 주파수(ω_i)를 그림 5에서 보인 것처럼 최대응답의 주파수를 중심으로 선택하였는데, 그 값은 4.6, 5.6, 6.1, 6.6, 7.6, 8.6과 10.6 Hz 이다. Steepest descent 기법을 사용하면 보정된 지반계수벡터 \mathbf{x}_{k+1} 이 그림 4와 식 (2)와 같이 구해질 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k \mathbf{g}_k \quad (2)$$

여기서 \mathbf{g}_k 는 추정오차 J 에 관한 기울기벡터이고, α_k 는 수렴속도를 제어하는 양의 상수이다. 그림 6과 7은 반복과정에 의해 추정된 오차의 추이와 미지계수의 수렴형태를 보이고 있다. 40회의 반복계산후에 최종값이 결정되었으며, 그 결과를 표 3에서 통일모형과 비교하였다. 보정된 지반물성을 사용하여 여러 응답성분에 대해 전달함수를 계산하였는데, 그 결과는 그림 8과 9에 보인 바와 같이 계측결과와 매우 잘 일치하는 반면에, 통일모형을 사용한 응답은 매우 벗어남을 보여주고 있다.

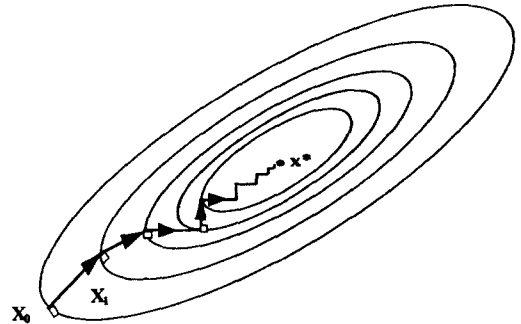
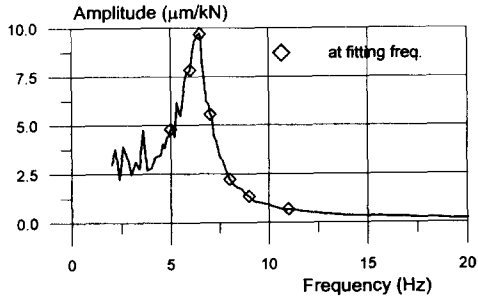
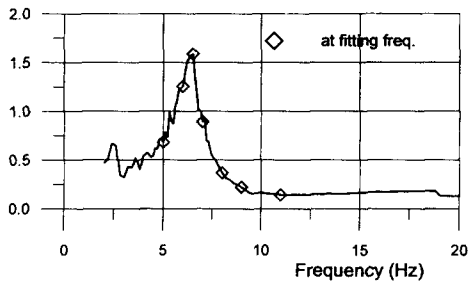


그림 4 Steepest descent 기법



(a) H15



(b) V3

그림 5 전달함수와 상관해석에 사용된 주파수

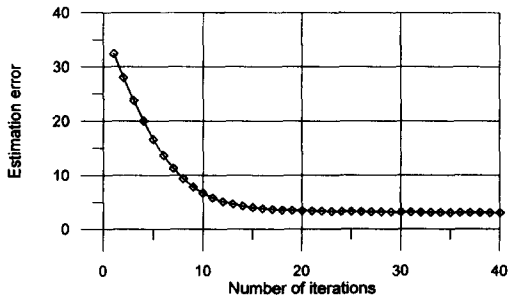


그림 6 추정오차의 추이

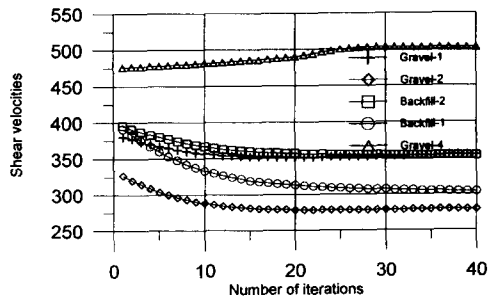
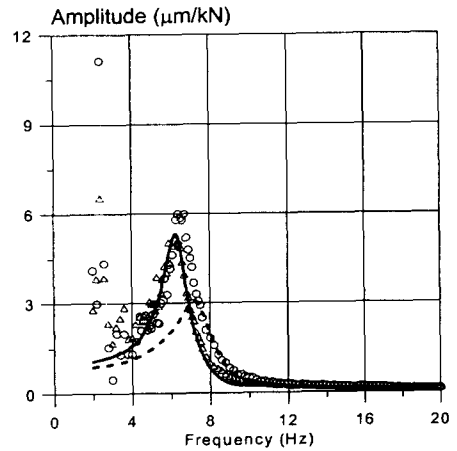


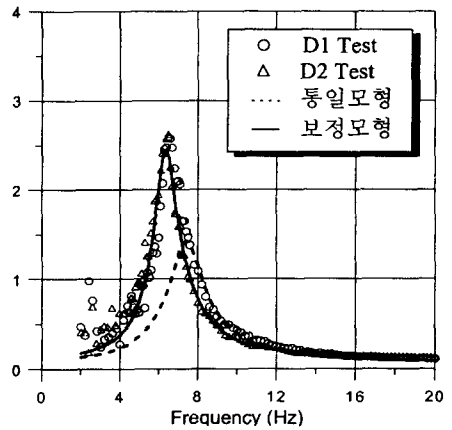
그림 7 미지계수추정의 수렴형태

표 3 보정된 지반의 강성계수

Parameters (V_s in m/sec, E in Gpa)	통일모형	보정모형
Sand-1 (V_s)	133	133
Sand-2 (V_s)	231	231
Backfill-1 (V_s)	400	303
Backfill-2 (V_s)	400	353
Gravel-1 (V_s)	383	356
Gravel-2 (V_s)	333	280
Gravel-3 (V_s)	333	333
Gravel-4 (V_s)	476	503
Roof & Base (E)	2.88	2.88
Shell(E)	2.88	2.07



(a) H12



(b) V9

그림 8 구조물의 바닥수평가진에 대한 전달함수의 비교

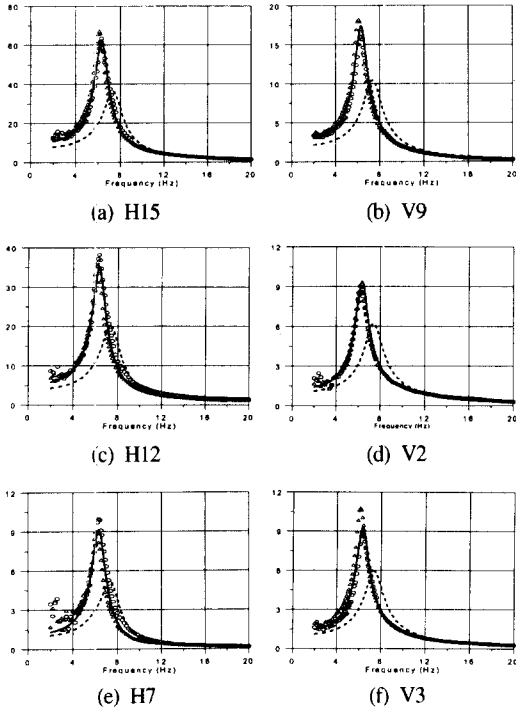


그림 9 구조물의 지붕수평기진에 대한 전달함수의 비교

3. 지진응답 해석

강제진동시험결과에 근거한 보정된 물성치를 사용하여 남북방향의 최대가속도가 0.1g인 1995년 5월 1일 발생한 지진에 대한 지진응답을 구하였다. 첫번째로, 자유장 해석을 수행하여 근역지반과 원역지반의 경계면을 따라 등가진하중을 계산한 후, 그 결과를 이용하여 지진응답을 해석하였다. 자유장해석과 지진해석 시에는 지반의 비선형거동 영향을 등가선형화기법을 사용하여 고려하였다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

3.1 비선형 자유장해석

자유장해석에서 지반은 평행층상의 반무한영역으로 고려되었으며, 지진파는 그림 10에서 보인 것처럼 무한원 방향에서 입사하는 평면파로 가정하였다. 이때, 각 층에서의 동적 평형 방정식은 동적강성행렬기법⁽¹³⁾을 사용하여 다음과 같이 구해진다.

$$K_m(\omega)u_{(m)}(\omega) = f_{(m)}(\omega) \quad (m = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

여기서, K_m 은 m 번째 층의 주파수종속적인 동적강성행렬이고 $u_{(m)}$ 과 $f_{(m)}$ 은 각각 m 번째 층의 상부경계면위의 변위와 응력벡터이다. 그리고, n 은 반무한영역을 포함

한 층상의 수이다. 위와 같은 식에서부터, 전 자유장계에 대한 동적평형방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{total}(\omega)u_{total}(\omega) = f_{total}(\omega) \quad (4)$$

따라서, 어떤 층경계면 위에서 통제운동이 주어지면 다른 층의 경계면에서의 운동은 식 (4)로부터 계산될 수 있다. 현 해석기법이 주파수영역이므로 지반의 비선형거동을 고려하기 위해서 등가선형화기법을 사용하였다. 상부 2개층의 지반물성치는 구조물-지반 상호작용의 영향이 작다고 판단되는 원역지반 (Sand 1, Sand 2 영역)의 값(통일모형)을 사용하였고, 그 하부의 Gravel 3, Gravel 4는 강제진동시험 응답을 사용하여 보정된 값을 사용하였다. 지진가속도는 시험구조물 인근 9개지점 (A13, A14, A15, A23, A24, A25, A33, A34, A35)에서 계측된 기록 그림 11을 사용하였는데, 그림 12에서 보인 것처럼 지진기록의 Fourier amplitude spectra의 평균을 취하여 남북과 동서방향 성분부에 대한 두개의 통계지진운동을 산정하였다. 이는 지진기록들이 유사한 응답스펙트럼을 주지 못하기 때문이며, 산정된 가속도 시간이력을 그림 13에 보였다. 통제운동의 최대가속도는 남북방향성분에서 0.1g이고 동서방향성분에서 0.07g이다. 등가선형화방법으로 자유장해석을 수행할 때에, 각 지반요소의 중점에서 octahedral 변형도를 계산하였으며, 유효전단 변형도를 각 요소에 대해 최대 octahedral 전단변형도의 66%로 취하였다. 여러 지반영역에 대해서 토질실험을 통하여 규명된 변형도에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 값은 그림 14와 15와 같다. 완전한 수렴에 도달할 때까지 5번의 등가선형해석이 요구되었다.⁽¹⁴⁾⁽⁸⁾ 각 지반영역 별 최종의 등가선형 물성치는 표 4에 보인 것처럼 초기선형값의 74~93 % 수준으로 감소되어 나타났다. 이들 값을 지진응답해석에서 원역지반의 물성치로서 사용하였다.

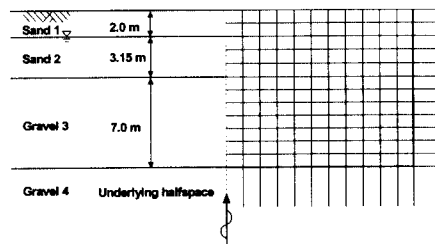


그림 10 자유장해석을 위한 유한요소모형

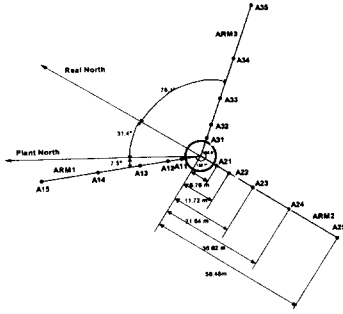


그림 11 지표면위의 지진계측점

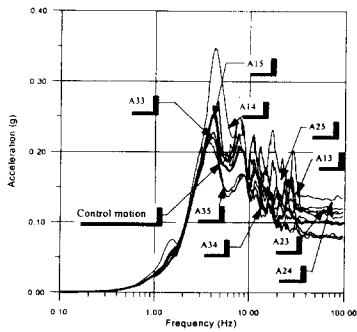


그림 12 계속된 응답스펙트럼과 통제운동 (남북방향)

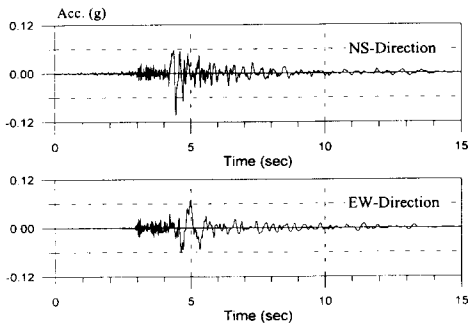


그림 13 자유장해석에 사용된 통제운동

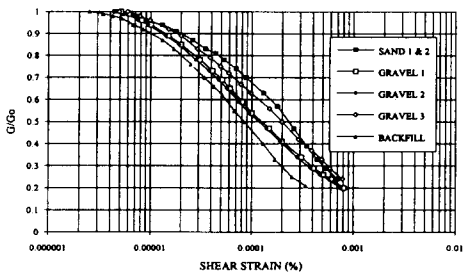


그림 14 전단변형도에 따른 전단탄성계수

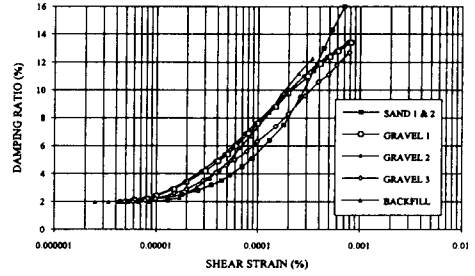


그림 15 전단변형도에 따른 지반의 감쇠비

표 4 등가선형지반물성

지반영역	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

3.2 지진해석기법

지진응답해석은 다음의 과도방사 방정식을 사용하여 구해질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{nn}(\omega) & K_{ni}(\omega) \\ K_{in}(\omega) & K_{ii}(\omega) + \bar{K}_{ii}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_n(\omega) \\ \mathbf{u}_i(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_i(\omega) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 하첨자 n 과 i 는 각각 근역지반에서의 자유도와 근역과 원역지반사이의 경계면 Γ_i 에서의 자유도를 나타내며, \bar{K}_{ii} 근역지반에 대해서 유한요소의 정식화를 사용하여 는 경계면 Γ_i 을 따라 구해진 동적강성행렬이다. 그리고 \bar{K}_{ii} 는 원역지반영역에 대한 무한요소의 정식화를 통해 얻어진 동적강성 행렬이고, \mathbf{f}_i 는 그림 16에서 보여 진 것처럼 경계면 Γ_i 을 따라 구해진 등가지진하중으로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\mathbf{f}_i(\omega) = \bar{K}_{ij}(\omega) \bar{\mathbf{u}}_j(\omega) - \bar{\mathbf{A}} \mathbf{s}_i(\omega) \quad (6)$$

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

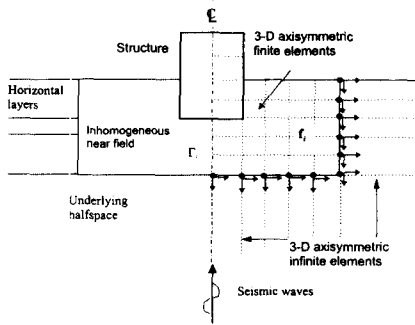


그림 16 근역지반과 원역지반 사이의 경계면에 작용하는 등가지진하중

3.3 비선형 지진응답 해석

일반적으로 비선형거동은 지진에 의한 지반-구조물 상호작용효과로 인해 원역지반보다는 근역지반에서 더 분명히 나타난다⁽¹⁵⁾. 본 연구에서는 이와같은 이유에 근거해서 지반-구조물 상호작용효과로 인한 비선형 거동을 근역지반에서 고려하여 근역지반의 octahedral 전단변형도를 산정하였다. 그 결과 산정된 전단변형도의 값이 각 층의 근역지반과 원역지반에 대해 유사한 값을 나타내었다. 이것은 지반과 구조물의 상호작용에 의한 비선형성이 매우 미소하기 때문에 발생한 것으로 판단되며, 이같은 결론에 착안하여 본 논문에서는 근역지반의 전단변형도를 각 층에 대해 비선형 자유장해석을 통해 구해진 전단변형도와 같다고 가정하여 내부영역의 비선형물성을 산정하였다. 산정된 비선형 물성 중 가장 큰 특징은 Gravel 1, Gravel 2, Gravel 3의 비선형성이 두드러진 것으로 초기 선형값의 74% 수준으로 전단파 속도가 감소되었다. 화력구조물의 지진응답이 지표면에서 계측된 지진기록에 비해 비선형성이 크게 발생한 주요한 이유중의 하나가 구조물 바로아래 지반영역인 Gravel 1, Gravel 2, Gravel 3의 비선형성이 크게 작용한 것으로 판단된다. 지반물성치에 관한 등가선형화 지반물성은 표 4에 나타내었다. 계측기가 설치되어 있는 몇개의 지점에서 계산된 응답을 사용하여 층응답스펙트럼을 산정하였으며, 그 결과를 계측된 응답과 그림 17과 18에서 비교하였다. 지반의 비선형거동을 고려하여 얻어진 층응답스펙트럼은 계측된 응답과 매우 잘 일치하는 반면, 초기 선형 물성을 사용한 응답은 큰 차이가 있는 결과를 보여 비선형거동의 고려가 매우 중요함을 알 수 있었다. 전체적으로, 예측된 응답의 특징은 계측결과와 비교하여 기본주파수가 과다평가되었으며, 최대응답의 크기가 작게 나타나는 경향을 보였다. 이같은 불일치의 원인

은 사용된 통제운동이 지니고 있는 오차와 지진이 일어나는 동안 구조물과 지반의 분리효과 등과 같은 영향을 충분히 고려하지 못해 발생된 것으로 판단된다.

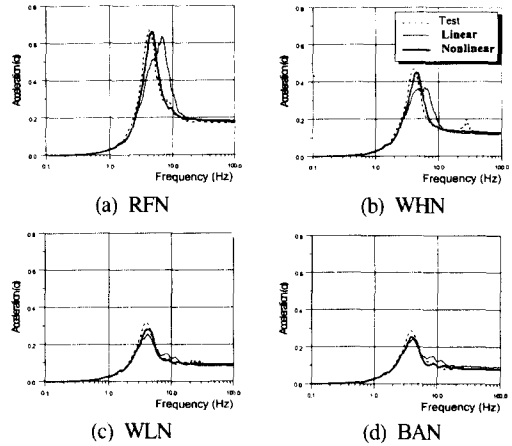


그림 17 남북방향성분의 층응답 스펙트럼

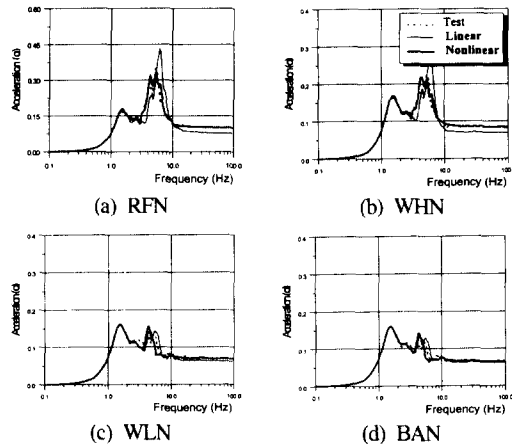


그림 18 동서방향성분의 층응답 스펙트럼

4. 결론

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약하여 나타낼 수 있다.

- (1) 두개의 강제진동에 의한 응답성분 (H15 와 H7)에 근거하여 보정된 지반 물성은 전반적으로 통일모형의 것보다 더 작게 산정되었다.
- (2) 보정된 물성을 사용하여 수행된 강제진동해석을 여러지점에서 계측된 응답 성분의 결과와 비교할 때, 잘 일치함을 보였다.
- (3) 구조물 주변의 9개지점에서 계측된 지진기록에 대

한 Fourier amplitude spectra 의 평균을 취하는 방법으로 남북과 동서방향성분에 대해서 통계지진 운동을 산정하였는데, 이 통계운동이 자유장응답 해석과 지진응답해석에서 매우 효과적인것으로 나타났다.

- (4) 등가선형화기법을 사용하여 계산된 자유장해석과 지진응답해석의 결과는 전단탄성계수의 값이 초기 선형값과 비교하여 74~93% 수준으로 감소할 만큼 지반의 비선형거동이 매우 중요하게 작용하였음을 보여주었다.
- (5) 지반의 비선형거동을 고려하여 얻어진 층응답스펙트럼은 계측된 결과와 매우 잘 일치한 반면, 초기 선형물성치를 사용한 응답 결과는 상당한 차이를 보이고 있어서, 지반 비선형 거동의 영향이 중요함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처 원자력연구개발사업 지원으로 한국원자력안전기술원이 수행중인 "원자력 안전규제 기술개발(원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가 기술 개발 (IV))" 과제의 세부과제로 수행된 것임을 밝히며, 이의 재정적 및 기술적 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Tang, H.T., et al., "The Hualien large-scale seismic test for soil-structure interaction research," *Proc. 11th SMiRT*, 1991, K1, pp. 67-74.
2. Morisita, H., Tanaka, H., Nakamura, N., Kobayashi, T., Kan, S., Yamaya, H., and Tang, H.T., "Forced vibration test of the Hualien large scale SSI model," *Proc. 12th SMiRT*, Japan, 1993, pp. 37-42.
3. Zhao, C, and Valliapan, S., "An efficient wave input procedure for infinite media," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol.9, 1993, pp. 407-415.
4. Yun, C.B., and Kim, J.M., "Axisymmetric elastodynamic infinite elements for multi-layered half-space," *International Journal for Numerical Methods Engineering*, 1995.
5. 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*, 1995, 16(1), pp. 13-21.
6. CRIEPI, "The unified model of the ground for FVT-2 analysis," *Hualien LSST Meeting*, Taiwan, 1993.
7. Yun, C.B., and Kim, J.M., "Direct method of soil-structure interaction analysis for earthquake loadings (II)," *Research Report*, Dept. of Civil Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology, (in Korean), 1994.
8. CRIEPI, *Status Report on Geotechnical Investigation at Hualien Site*, Hualien LSST Meeting, Taiwan, 1993.
9. Luco, J.E., and Barros, F.C.P., "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.
10. Seed, H.B., and Idriss, I.M., "Influence of soil conditions and ground motions during earthquakes," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 95, No. SM1, Proc. Paper 6347, 1969, pp. 99-137.
11. Kausel, E., Roesset, J.M., and Christian, J.T., "Nonlinear behavior in soil-structure interaction," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 102, No. GT11, 1976, pp. 1159-1170.
12. Chen, C.H., Lee, Y.J., Jean, W.Y., Katayama, I., and Penzien, J., "Correlation of predicted seismic response using hybrid modelling with EPRI/TPC lotung experimental data," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19, 1990.
13. Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice-Hall, 1985.
14. Hardin, B.O., and Srmovich, V.P., "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves," *J. of the Geotechnical*

Engineering Div., ASCE, Vol.98(SM7),1972, pp. 667- 692.

15. Katayama, I., "Studies on fundamental problems

in seismic design analyses of critical structures and facilities," *Research Report*, Japan. 1990, pp. 55-95.