

지반-구조물 상호작용의 비선형 시간영역해석을 위한 실용적 복합기법

A Practical Hybrid Approach for Nonlinear Time-Domain Analysis of Soil-Structure Interaction

김재민* 최준성** 이종세***
Kim, Jae-Min Choi, Jun-Sung Lee, Jong-Seh

ABSTRACT

This paper presents a new hybrid approach for nonlinear dynamic analysis of the soil-structure interaction system in the time domain. It employs, in a practical manner, a linear SSI program and a general-purpose nonlinear finite element program. In order to demonstrate the validity and applicability of the proposed method, seismic response analyses are carried out for a free-field problem and a 2-D subway station. The results indicate that the proposed methodology gives reasonable solution for the linear/nonlinear SSI problem utilizing a general-purpose finite element program. Some further studies will endorse the applicability of the method to various soil-structure interaction problems.

1. 서론

지반과 구조물의 동적 상호작용을 고려한 동적해석법은 1970년대 초반부터 본격적으로 연구되기 시작하여 현재까지 30여년간 FLUSH^[1], CLASSI^[2], SASSI^[3], HASSI^[4] 등의 전산코드가 개발되어 사용되고 있다. 국내에서도 KIESSI^[5,6]등이 독자적으로 개발되고 있다. 이들 지반-구조물 상호작용 (SSI) 해석용 프로그램은 모두 지반에서 주파수종속적인 파동전파현상을 효과적으로 묘사하기 위하여 주파수영역해석법을 사용하고 있다. 따라서 이들 프로그램에 의한 해석은 선형문제에 국한되며, 구조물 및 지반의 비선형성은 반복적인 선형해석에 의한 등가선형화기법을 사용하여 근사적으로 고려될 수 있다. 이와 같은 해석법은 Lotung과 Hualien 국제공동연구를 통하여 정확성과 적용성이 검증된 바 있다^[7,8]. 한편 내진설계분야에서 비선형해석의 중요성이 점점 증가하고 지반-구조계의 재료 및 경계조건에 대한 관심이 커지면서, 비선형해석이 가능한 시간영역에서 SSI 해석법이 최근 10여년 사이에 활발히 연구되고 있다^[9-14]. 그러나 SSI 해석 이론이 복잡하고

* 여수대학교 건설환경공학부 조교수, 정회원
** 한양대학교 토목공학과 박사후연구원, 정회원
*** 한양대학교 토목공학과 부교수, 정회원

전산코드도 사용자에게 편리하게 개발되어 있지 않아서, SSI 해석기술의 발전에도 불구하고 현장 엔지니어는 원자력발전소와 같은 특수구조물의 설계를 제외하고는 SSI 를 고려하고 있지 않고 있는 것 또한 현실이다.

본 연구에서는 구조물의 비선형성과 SSI 를 동시에 고려하기 위한 복합법(hybrid method)을 제안하였다. 이 기법은 최종단계에서 범용 유한요소해석 프로그램을 사용함으로써 현장 엔지니어가 복잡한 문제를 쉽게 접근할 수 있도록 하였다. 그러나 SSI 가 기본적으로 매우 복잡한 현상이기 때문에 전적으로 범용 프로그램을 사용하는 것이 비현실적이라고 판단하여 전처리 과정으로 SSI 해석용 프로그램을 사용하도록 하였다. 지중 지하철역의 선형지진응답해석을 통하여 제안한 기법의 정확성을 검증하고 구조물의 국부적인 비선형거동을 포함한 비선형해석을 수행하여 제안기법의 적용성을 보였다. 제안된 기법의 현장 적용을 위해서는 추가적으로 많은 Case Study 등이 필요하며 이를 통하여 제안기법의 적용범위와 적용지침의 개발도 필요하다고 사료된다.

2. 지반-구조물 상호작용의 비선형 시간영역해석을 위한 복합기법

2.1 주파수중속 동적강성행렬에 기초한 엄밀해법 (기존의 방법)

원역지반에서 입사하는 지진입력에 대한 구조물 및 근역지반 만의 시간영역에서 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_s\} \\ \{\ddot{u}_b\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_s\} \\ \{\dot{u}_b\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_b\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{r_s^{non}(t)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{p_b(t)\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 하첨자 s 는 구조물과 근역지반, b 는 지반의 근역과 원역의 경계면에서 자유도를 나타내고 $\{p_b(t)\}$ 는 반력벡터이며 $\{r_s^{non}(t)\}$ 는 구조물의 비선형성에 의한 추가 복원력벡터이다. 식(1)을 Fourier 변환하여 주파수영역에서 운동방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{U}_s(\omega)\} \\ \{\bar{U}_b(\omega)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{R_s^{non}(\omega)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P_b(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $[S(\omega)] = [K] + i\omega[C] - \omega^2[M]$ 로서 동적강성행렬이고 $i = \sqrt{-1}$ 이며 $\bar{U}(\omega)$ 는 주파수영역해석에 의한 선형응답이다. 그리고 식(2)에서 $\{P_b(\omega)\}$ 는 동적상호작용의 영향이 포함된 반력으로서 $\{P_b(\omega)\} = -[\tilde{S}_{bb}(\omega)]\{\bar{U}_b(\omega)\} - \{\bar{U}_b^g(\omega)\}$ 이다. 따라서 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] + [\tilde{S}_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{U}_s(\omega)\} \\ \{\bar{U}_b(\omega)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{R_s^{non}(\omega)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P_{eqk}(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\{P_{eqk}(\omega)\} = [\tilde{S}_{bb}(\omega)]\{\bar{U}_b^g(\omega)\}$ 이고 $\{\bar{U}_b(\omega)\}$ 는 그림 1(b)에 나타난 굴착지반의 응답이며 $[\tilde{S}_{bb}(\omega)]$ 는 경계면 b 에 대한 원역의 영향을 나타내는 임피던스행렬이다. 일반적으로 $[\tilde{S}_{bb}(\omega)]$ 는 주파수중속성이 매우 강하며 다음과 같이 나타낼 수 있다^[13].

$$[\tilde{S}_{bb}(\omega)] = [\tilde{K}_{bb}] + i\omega[\tilde{C}_{bb}] + [\tilde{S}_r(\omega)] \quad (4)$$

이제 식(4)를 식(3)에 대입하고 이를 역 Fourier 변환하면 아래와 같은 시간영역에서 운동방정식을 얻을 수 있다^[13,14].

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_s\} \\ \{\ddot{u}_b\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] + [\tilde{C}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_s\} \\ \{\dot{u}_b\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] + [\tilde{K}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_b\} \end{Bmatrix} + \left\{ \begin{array}{l} r_s^{non}(t) \\ \int_0^t [\tilde{S}_r(t-\tau)] \{u_b(\tau)\} d\tau \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \{0\} \\ \{p_{eqk}(t)\} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $[\tilde{S}_r(t)] = F^{-1}([\tilde{S}_r(\omega)])$, $\{p_{eqk}(t)\} = F^{-1}(\{P_{eqk}(\omega)\})$ 로서 $F^{-1}(\cdot)$ 는 역 Fourier 변환을 나타낸다. 식(5)의 해는 Newmark- β 법과 같은 직접시간적분법을 사용하여 구할 수 있다^[13,14].

2.2 주파수영역해와 범용 유한요소 프로그램을 이용한 복합법 (제안방법)

앞의 제 2.1 절에 설명한 엄밀해법은 식(4)와 식(5)로부터 추측할 수 있듯이 이론과 전산코드의 개발이 매우 어려울 뿐 만 아니라 사용자가 너무 어렵다는 인식을 가지게 되어 실용적이지 못할 수 있다. 본 연구에서는 사용자에게 보다 친숙한 SSI를 고려한 비선형해석을 위하여 지반-구조물 상호작용해석 문제를 다른 각도에서 접근해 보았다. 이를 위하여 먼저 식(1)의 운동방정식에서 첫째항을 정리하면 다음과 같다.

$$[M_{ss}]\{\ddot{u}_s\} + [C_{ss}]\{\dot{u}_s\} + [K_{ss}]\{u_s\} + \{r_s^{non}(t)\} = -[M_{sb}]\{\ddot{u}_b\} - [C_{sb}]\{\dot{u}_b\} - [K_{sb}]\{u_b\} \quad (6)$$

위의 식(6)은 경계면에서 상호작용이 고려된 응답($\{\ddot{u}_b\}$, $\{\dot{u}_b\}$, $\{u_b\}$)을 알고 있으면 식(5)의 복잡한 문제가 경계조건이 시간에 따라 변하는 통상적인 동적해석문제로 치환이 가능함을 의미한다. 본 연구에서는 식(6) 우변의 상호작용이 고려된 경계응답을 등가선형물성을 사용한 SSI 해석용 프로그램을 이용하여 구하고, 이를 범용 유한요소해석프로그램에 의한 비선형해석서 경계조건으로 입력하는 실용적인 방법을 제안한다. 이 제안기법에 포함된 이론적인 근사는 다음과 같다: $\{u_b(t)\} \cong F^{-1}(\{\bar{U}_b(\omega)\})$, $\{\dot{u}_b(t)\} \cong F^{-1}(\{i\omega \bar{U}_b(\omega)\})$, $\{\ddot{u}_b(t)\} \cong F^{-1}(\{-\omega^2 \bar{U}_b(\omega)\})$. 이 근사식은 선형문제에 대해서는 정확한 식이 되고 비선형문제에 대해서는 근사적인 식이 된다. 이 복합법에 의한 해석절차를 정리하면 그림 2와 같다.

3. 예제해석

3.1 지하철역사의 선형 지진응답해석

본 연구에서 제안한 복합법의 검증을 위하여 그림 3(a)와 같은 일본 고베시 가와시마 지하철역^[15]에 대한 지진응답해석을 수행하였다. 이 지하철역은 고베시를 강타한 1995년 1월 효고현남부 대지진시 큰 손상을 입은 구조물이다. 이 역사 구조물은 직사각형 철근콘크리트 박스형식으로 구성되었으며 그림 3(a)와 같이 2개의 내부기둥이 구조물을 지지하고 있다. 이 기둥의 종방향(지하철 주행방향) 설치간격은 5m 이고 기둥의 단면폭은 1.4m 이다. 철근콘크리트의 탄성계수는 25

GPa 이고 포아송비는 0.20 이며 질량밀도는 2.4 Mg/m^3 이다. 그리고 지반의 물성치는 표 1 과 같다. 지진응답해석은 수직으로 입사하는 SV-파에 의한 수평지진입력에 대하여 수행하였고 통제운동은 자유장의 지표면에 입력하였으며, 지진가속도는 그림 3(b)에 나타난 일본 효고현남부 지진시 Port Island 지표면에서 계측된 $\text{PGA}=0.56\text{g}$ 인 기록을 사용하였다.

지진응답해석은 그림 3(c)와 같은 해석모형을 작성하고 KIESSI-2D^[6]를 이용하여 선형지진응답을 구하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 복합법의 기본 가정이 타당함을 보이기 위하여 그림 3(c)와 같이 구조물의 기둥과 슬랩에 항복이 일어날 수 있는 부분의 강성을 1/2 로 줄이고 감쇠비를 10%로 크게 한 경우의 선형응답도 구하였다.

구조물 중심에서 18m 떨어진 지반(그림 3(c)에서 A-A)에서 수평가속도의 깊이에 따른 최대값을 자유장응답의 결과와 비교하여 그림 3(d)에 나타냈다. 이 비교로부터 지반-구조물 상호작용이 고려된 응답은 자유장응답과는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 구조물의 부분적인 강성 또는 감쇠변화는 구조물에서 일정 거리 떨어진 지반에는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있어서 본 연구에서 제안하는 복합법의 기본 가정이 적절함을 알 수 있다.

3.2 복합법에 의한 자유장지반의 선형 지진응답해석

본 연구에서 제안한 복합법의 검증을 위하여 그림 4(a)와 같은 자유장문제의 지진응답해석을 수행하였다. 지반의 제원은 표 2 와 같고 해석에 사용된 범용 유한요소 프로그램은 ANSYS^[16]이며 해석모형은 그림 4(a)와 같다. 이때 사용된 지진입력은 그림 4(b)에 보인 최대가속도가 0.026g 인 대만 Hualien 에서 계측된 지진가속도 시간이력이다. 복합법을 통한 시간영역에서 구한 선형동적응답을 주파수영역해법에 의해 구한 자유장응답과 비교하여 그림 4(c)와 4(d)에 응답스펙트럼으로 비교하였다. 그림 4 에서 알 수 있듯이 두 결과가 매우 잘 일치하고 있어서 본 연구의 복합법이 타당함을 알 수 있다.

3.3 복합법에 의한 지하철역사의 비선형 지진응답해석

지반과 지하 콘크리트 구조물의 재료 비선형성을 고려하기위해 복합법을 사용하여 시간영역 상에서 지진응답해석을 수행하였다. 해석대상구조물과 입력지진은 제 3.1 절의 예제와 같다. 비선형 해석을 위하여 ANSYS 프로그램을 사용하였고, 콘크리트의 재료비선형을 고려하기 위해 그림 5(a)와 5(b)에 나타난 응력-변형도곡선을 사용하였으며, 해석모형은 그림 5(c)와 같다. 해석결과 그림 5(d)와 같이 $t=14.38\text{sec}$ 일때 상부 중간기둥에 최대 소성변형이 발생하였다. 이 결과는 이 구조물의 실제 붕괴모우드(상부 중간기둥의 전단파괴로부터 시작된 것으로 분석됨^[15])와 매우 유사하다. 이 예제해석을 통하여 본 연구에서 제안한 복합법이 실제 구조물의 비선형해석에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 요약 및 추후연구과제

본 연구에서는 SSI 해석용 프로그램과 범용 유한요소해석 프로그램을 복합적으로 사용하여 구조물의 비선형성과 SSI 효과를 동시에 고려하여 동적응답을 구하는 실용적 기법을 제시하였다. 자유장지반에 대한 선형해석과 지하철구조물의 비선형해석을 통하여 제안기법의 타당성과 적용성을 보였다. 이 기법은 추후 다양한 문제에 대한 Case Study를 통하여 사용범위와 해석시 유의할 지침이 개발된다면 현장 엔지니어에게 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업(과제번호: 1999-1-311-001-3)에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C. F. and Seed, H. B. (1975), "FLUSH - A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems," *Report No. EERC 75-30*, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA.
2. ASD International, Inc. (1985), "CLASSI-ASD : Computer Program for 3-D/Multiple-Foundation Analysis", Version 2.
3. Lysmer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, H., Vahdani, S. and Tajirian, F. (1988), "SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction", *Univ. of California*, Berkeley, CA.
4. Penzien, J., Chen, C.-H., Lee, Y.-J. and Jean, W.-Y. (1989), "Computer Program HASSI-8 : Hybrid Analysis of Soil-Structure Interaction," *Eastern International Engineers, Inc.*
5. 윤정방, 김재민, 박경래, 최준성 (1998), "유한요소 및 무한요소를 사용한 수직입사 지진파에 의한 축대칭 지반-구조계의 진동해석," 대한토목학회 논문집, 제 18 권, 제 1-1 호, pp. 25-39.
6. 김재민, 윤정방, 김두기 (2000), "유한요소와 무한요소를 사용한 2 차원 선형 지반-구조물계의 지진응답해석법," 한국전산구조공학회 논문집, 제 13 권, 제 2 호, pp. 231-244.
7. Chen, C.-H., Lee, Y.-J., Jean, W.-Y., Katayama, I., Penzien, J. (1990), "Correlation of predicted seismic response using hybrid modeling with EPRI/TPC Lotung experimental data," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 993-1024.
8. Choi, J.-S., Yun, C.-B. and Kim, J.-M. (2000), "Earthquake response analysis of the Hualien soil-structure interaction system based on updated soil properties using forced vibration test data," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. (in press)
9. Wolf, J.P. (1988), "Dynamic Soil-Structure Interaction in Time Domain," Prentice-Hall, New York, NY.
10. Ahmad, S. and Banerjee, P.K. (1988), "Time domain transient elastodynamic analysis of 3-D solids by BEM," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, pp. 1709-1728.
11. Hayashi, Y. and Takahashi, I. (1992), "An efficient time-domain soil-structure interaction analysis based on the dynamic stiffness of an unbounded soil," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, pp. 787-798.
12. 최준성 (1994), "지반-구조물 상호작용의 시간영역해석을 위한 무한경계요소," 석사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과.

13. Paronesso, A. and Wolf, J.P. (1998), "Recursive evaluation of interaction forces and property matrices from unit-impulsive response functions of unbounded medium based on balancing approximation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 609-618.
14. Kim, D.-K. and Yun, C.-B. (2000), "Time-domain soil-structure interaction analysis in two dimensional medium based on analytical frequency-dependent infinite elements," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 47, No. 7, pp. 1241-1261.
15. An, X. and Maekawa, L. (1997), "Failure analysis of underground RC frame subjected to seismic actions," *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, JSCE, Vol. 36, pp.251-267.
16. SAS IP, Inc. (1996), ANSYS Users Manual, Release 5.3.

표 1. 일본 고베시 가미사와 지하철역 주변의 지반물성치

지층	전단파속도 (m/sec)	질량밀도 (Mg/m ³)	이력감쇠비 (%)	포아송비
Clay 1	205	1.8	2.0	0.45
Sand 1	246	2.0	2.0	0.45
Clay 2	257	2.0	2.0	0.45
Sand 2	229	2.0	2.0	0.45
Clay 3	301	2.0	2.0	0.45
Clay 4	345	2.0 </td <td>2.0</td> <td>0.45</td>	2.0	0.45
Clay 5 (Half-space)	411	2.0	2.0	0.45

표 2. 자유장해석문제의 지반 물성치

지층	전단파속도 (m/sec)	질량밀도 (Mg/m ³)	이력감쇠비 (%)	포아송비
Layer 1	333	2.0	2.0	0.3
Layer 2 (Half-space)	476	2.0	2.0	0.3

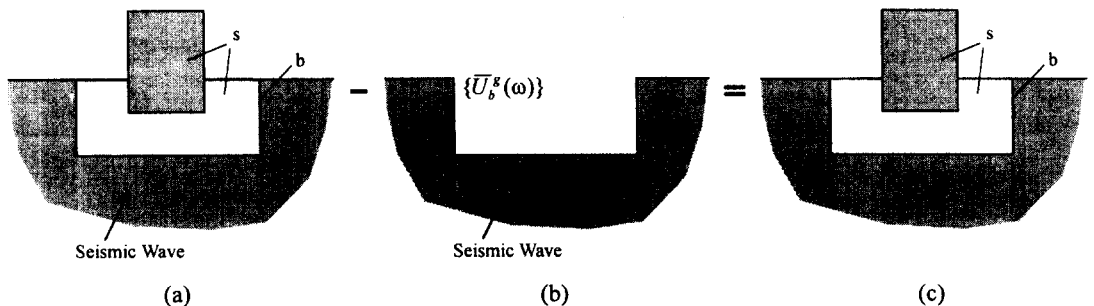


그림 1. 지반-구조물 상호작용계의 지진응답해석문제

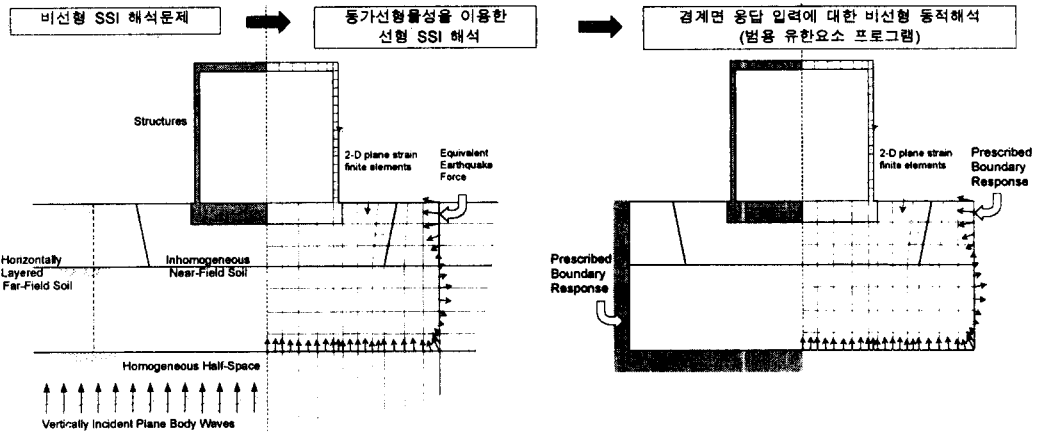


그림 2. 본 연구에서 제안하는 복합법에 의한 해석절차

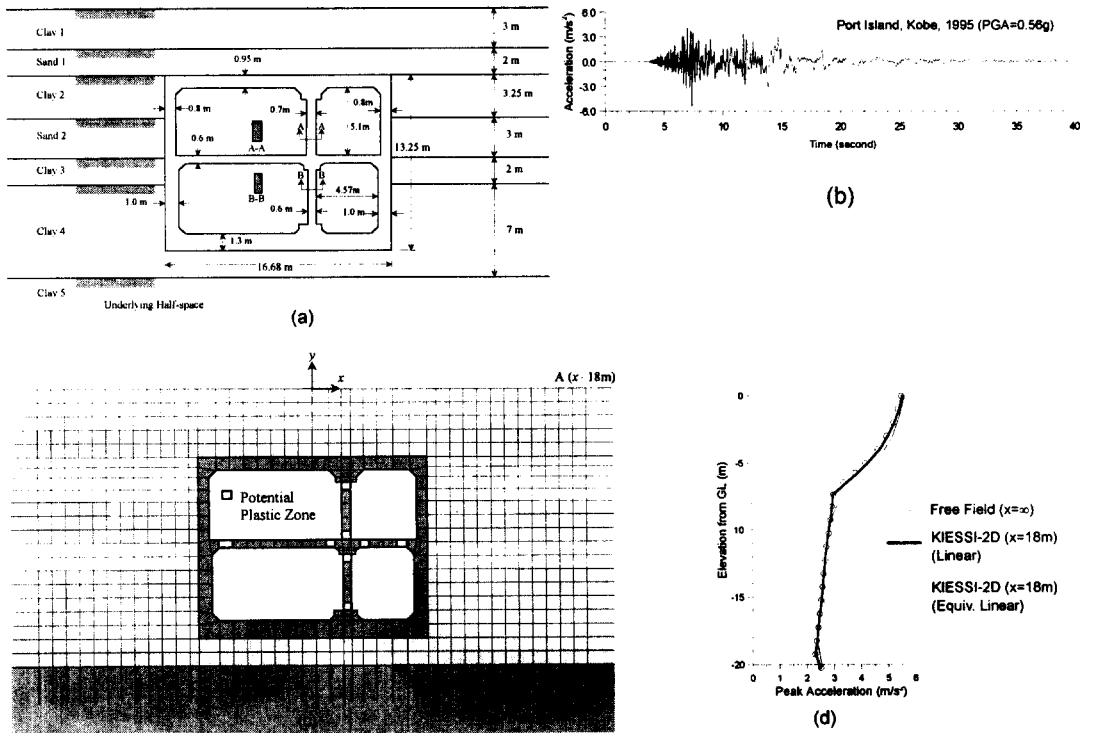
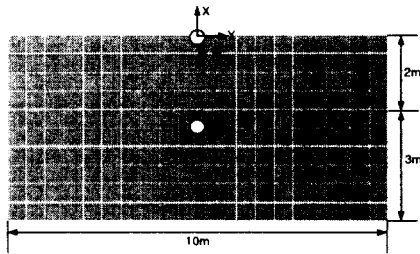
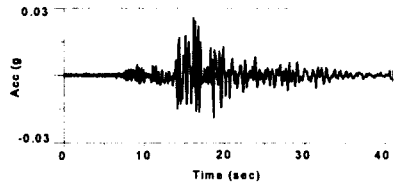


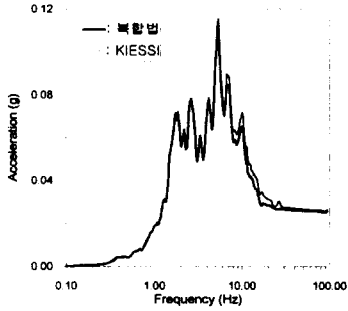
그림 3. 일본 고베시 가미사와 지하철역의 선형 지진응답해석



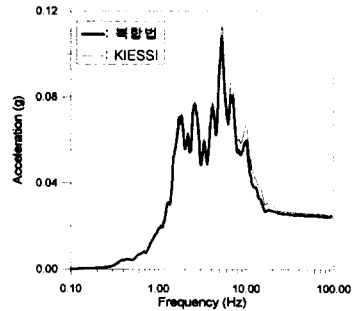
(a) ANSYS 해석모형



(b) 입력가속도

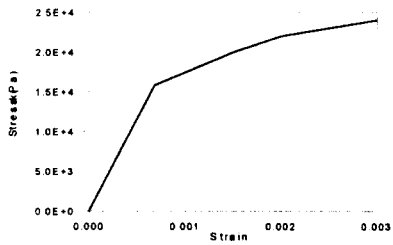


(c) A 점의 응답

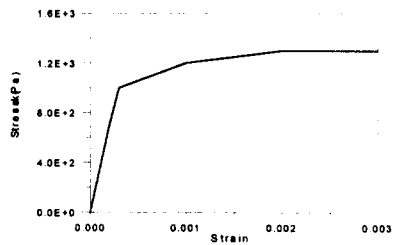


(d) B 점의 응답

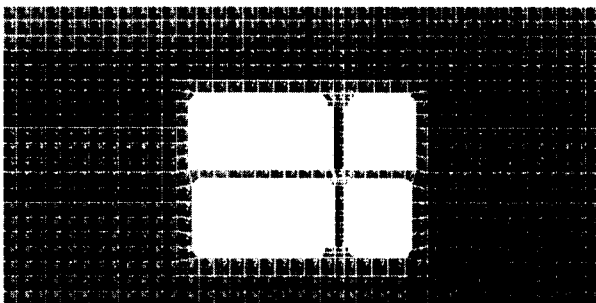
그림 4. 자유장문제의 선형 지진응답해석



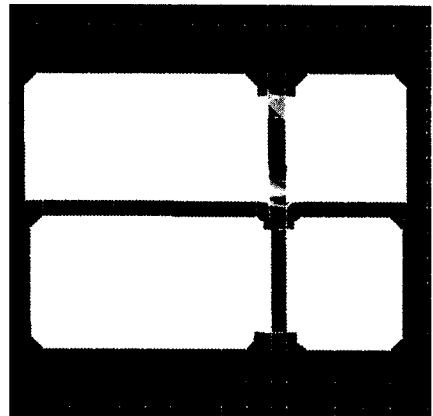
(a) 구조물의 슬랩 및 벽체의 비선형특성



(b) 중간기둥의 비선형특성



(c) ANSYS 해석모형



(d) 구조물의 소성변형도 (t=14.38sec)

그림 5. 일본 고베시 가미사와 지하철역의 비선형 지진응답해석