

비선형 지반-구조물 상호작용해석을 위한 새로운 복합법

A New Hybrid Method for Nonlinear Soil-Structure Interaction Analysis

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

국문요약

이 논문에서는 비선형 지반-구조물 상호작용해석을 위한 새로운 시간-주파수영역 복합법을 제시하였다. 제안한 방법은 등가선형 지반-구조물 상호작용해석 프로그램과 범용 비선형 유한요소해석 프로그램을 동시에 사용하는 실용적인 방법이다. 이 방법에서는 먼저 주파수영역에서 등가선형 지반-구조물 상호작용해석을 수행하여 유한요소 영역의 경계면에서 응답을 구한 다음, 이를 범용 비선형 유한요소해석 프로그램에 의한 비선형 동적해석의 시간의존 경계조건으로 입력한다. 제안된 방법의 검증을 위하여 2차원 지하철 정거장 구조물에 대한 지진해석을 수행하였다. 이를 위하여 등가선형 지반-구조물 상호작용해석 프로그램 KIESSI-2D와 비선형 유한요소해석 프로그램 ANSYS를 사용하였다. 수치적인 해석결과로부터 이 연구에서 제안한 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

주요어 : 동적 비선형해석, 지반-구조물 상호작용, 복합법

ABSTRACT

This paper presents a novel hybrid time-frequency-domain method for nonlinear soil-structure interaction (SSI) analysis. It employs, in a practical manner, a computer code for equivalent linear SSI analysis and a general-purpose nonlinear finite element program. The proposed method first calculates dynamic responses on a truncated finite element boundary utilizing an equivalent linear SSI program in the frequency domain. Then, a general purpose nonlinear finite element program is employed to analyze the nonlinear SSI problem in the time domain, in which boundary conditions at the truncated boundary are imposed with the responses calculated in the previous frequency domain SSI analysis. In order to validate the proposed method, seismic response analyses are carried out for a 2-D underground subway station in a multi-layered half-space. For the analyses, an equivalent linear SSI code KIESSI-2D is coupled to ANSYS program. The numerical results indicate that the proposed methodology can be a viable solution for nonlinear SSI problems.

Key words : nonlinear dynamic analysis, soil-structure interaction, hybrid method

1. 서론

지반-구조물 상호작용문제의 해를 구하기 위한 기술개발은 70년대 초반부터 본격적으로 시작되어, 지난 30여년 동안 많은 기법과 이론들이 개발되었다. 이들 중 대표적인 방법으로서 점성경계법^{(1),(2)}, 전달경계법⁽³⁾⁻⁽⁵⁾, 임피던스행렬법⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾, 무한요소법⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁴⁾, 경계요소법⁽¹⁵⁾⁻⁽²¹⁾, 시간영역 부분구조법⁽²²⁾⁻⁽²⁵⁾ 등이 있다. 이들 방법중에서 특히 경계요소법과 시간영역 부분구조법은 비선형성과 지반-구조물 상호작용을 동시에 고려하여 해석하는데 매우 유용한 방법이다.

그러나 비선형 지반-구조물 상호작용문제를 해석하기 위하여 개발된 엄밀해법은 대부분 수학적으로 복잡하고 기존의 해석프로그램을 직접 사용할 수 없으므로, 실무에서 비선형 지반-구조물 상호작용해석을 수행하는 것은 대단히 어려운 실정이다.

한편 엄밀해법의 대안으로서 이론적인 측면에서 덜 엄밀하지만 개념과 적용절차가 보다 단순한 복합법(hybrid method)이 사용되기도 한다. 이 방법은 지반-구조물 상호작용을 쉽

게 모델링할 수 있는 주파수영역해석법에 의한 SSI 해석용 프로그램과 비선형성을 효과적으로 고려할 수 있는 시간영역 유한요소해석법에 의한 해석프로그램을 복합적으로 사용하여, 비선형 지반-구조물 상호작용해석을 수행하는 방법이다.^{(26),(27)} 복합법은 다시 해석방법에 따라 크게 두가지로 구분된다. 첫번째 방법은 비교적 오래전부터 사용되고 있는 기법으로서 HFTD 방법(Hybrid Frequency-Time-Domain method)으로서 핵심적인 해석은 주파수영역에서 수행된다. 이때 비선형거동에 의한 복원력의 차이는 먼저 시간영역에서 계산하고 이를 주파수영역으로 변환하여 다음 단계 해석에서 하중으로 작용시킨다. 두 번째 방법은 HTFD 방법(Hybrid Time-Frequency-Domain method)으로서 비교적 최근에 개발된 기법이다. 이 방법에서는 HFTD 방법과 반대로 핵심적인 해석을 시간영역에서 수행하고, 지반-구조물 상호작용에 의한 상호작용력의 오차를 주파수영역에서 구하고 이를 시간영역으로 변환하여 하중으로 작용시키는 방법이다. 상기 두가지 복합법은 모두 한번에 해석결과를 얻을 수 없기 때문에 HFTD 방법에서는 비선형복원력의 오차가 작아질 때 까지 해석을 반복하고, HTFD 방법에서는 상호작용력의 오차가 작아질 때 까지 해석을 반복한다. 따라서 이 같은 복합법에서는 해의 수렴여부와 수렴속도가 대단히 중요한 문제가 된다.⁽²⁸⁾ 일반적으로 HTFD 방법이 HFTD 방법에 비해 해 수렴의 안정성과 수렴속도가 훨씬 우수하다.⁽²⁷⁾

* 정회원 · 여수대학교 건설환경공학부, 부교수(대표저자 : jm4kim@yosu.ac.kr)

** 정회원 · 한국유지관리(주), 대표이사

*** 정회원 · 한양대학교 건설교통학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 11. 23 / 심사종료일 : 2003. 1. 6)

이 논문에서는 비선형 지반-구조물 상호작용해석을 위한 새로운 HTFD 방법을 제시하고, 제안 방법의 타당성과 적용성을 보이고자 한다.

2. 기존의 비선형 지반-구조물 상호작용해석법

2.1 문제의 정의

그림 1에 도시한 원역지반에서 입사하는 지진입력에 대한 지반-구조물 상호작용해석문제의 시간영역 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁴⁾

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

여기서 $[M]$, $[C]$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬이다. 그리고 하첨자 s는 구조물과 근역지반, b는 근역지반과 원역지반의 경계면에서 자유도를 나타내고, $\{r_b(t)\}$ 는 경계면에서 상호작용력벡터이며, $\{p_b^{eqk}(t)\}$ 는 유효지진하중벡터로서 다음과 같이 원역지반의 임피던스행렬 $[S_{bb}^g(\omega)]$ 와 원역지반에서 산란응답 $\{U_b^g(\omega)\}$ 로부터 구할 수 있다.

$$\{p_b^{eqk}(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S_{bb}^g(\omega)] \{U_b^g(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega \quad (2)$$

위의 유효지진하중벡터와 유사하게 상호작용력벡터 $\{r_b(t)\}$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\{r_b(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S_{bb}^g(\omega)] \{U_b(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega \quad (3)$$

또는 다음과 같이 시간축에서 Convolution 적분형태로 나타

낼 수 있다.^{(23)-(25),(29),(30)}

$$\{r_b(t)\} = \int_0^t [S_{bb}^g(t-\tau)] \{u_b(\tau)\} d\tau \quad (4)$$

여기서

$$[S_{bb}^g(t)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S_{bb}^g(\omega)] e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

2.2 등가선형해법

식 (1)에서 복원력벡터 $\{p(t)\}$ 는 다음과 같이 등가선형감쇠행렬 $[\Delta C]$ 와 등가선형강성행렬 $[\bar{K}]$ 를 이용하여 근사할 수 있다.

$$\{p(t)\} \cong \{\bar{p}(t)\} = [\Delta C] \{\dot{u}(t)\} + [\bar{K}] \{u(t)\} \quad (6)$$

이와 같은 등가선형화방법을 이용하면 식 (1)의 운동방정식은 주파수영역에서 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} [\bar{S}_{ss}(\omega)] & [\bar{S}_{sb}(\omega)] \\ [\bar{S}_{bs}(\omega)] & [\bar{S}_{bb}(\omega)] + [S_{bb}^g(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{U}_s(\omega)\} \\ \{\bar{U}_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P_b^{eqk}(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $\{\bar{U}(\omega)\}$ 는 등가선형응답이며 $[\bar{S}(\omega)]$ 는 등가선형동적강성행렬로서 다음과 같다.

$$[\bar{S}(\omega)] = ([K] + [\bar{K}]) + i\omega([C] + [\Delta C]) - \omega^2[M] \quad (8)$$

2.3 주파수영역해법과 시간영역해법을 동시에 이용한 복합법

앞의 제2.1절에 기술한 엄밀해법은 이론과 전산코드의 개발에 많은 노력이 필요할 뿐만 아니라 사용자가 너무 어렵다는 인식을 가지게 되어 실용적이지 못할 수 있다. 엄밀해법에 대한 대안으로서 시간영역해석법과 주파수영역해석법

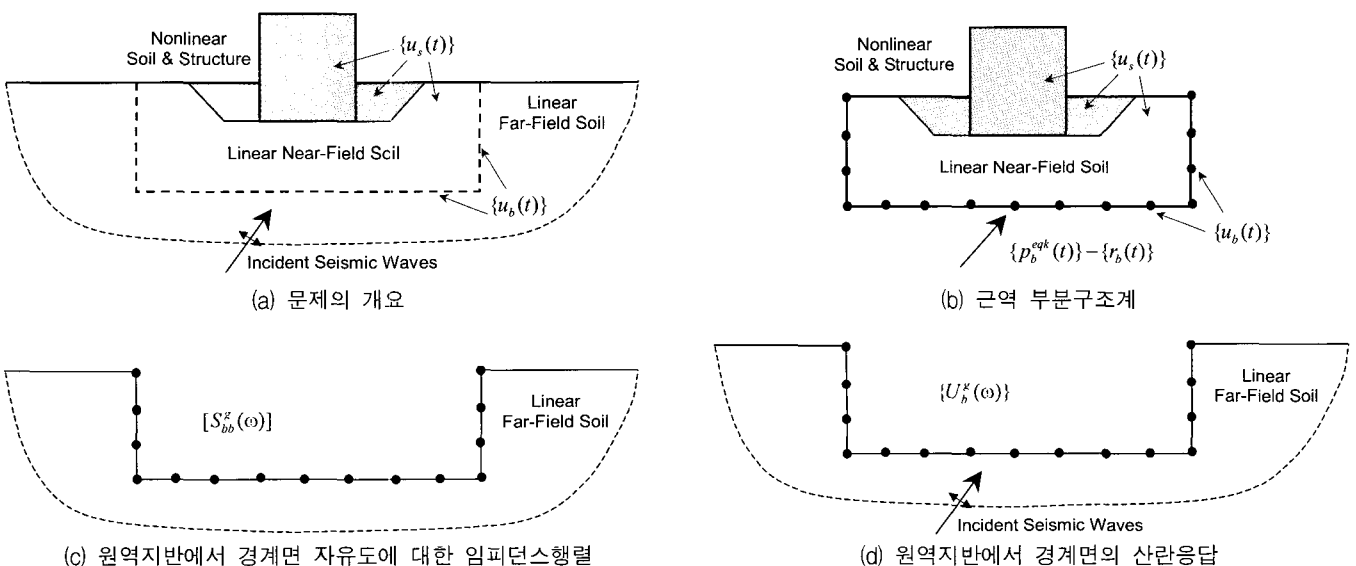


그림 1 지진하중이 작용되는 비선형 지반-구조물 상호작용문제

을 선택적으로 동시에 사용하는 복합법이 있다.⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾

현재 개발되어 있는 복합법은 크게 주파수영역에서 해석을 수행하는 HFTD 방법과 시간영역에서 해석을 수행하는 HTFD 방법이 있다. HFTD 방법에서는 문제의 최종적인 해를 다음과 같이 주파수영역에서 반복계산을 통해 구한다.^{(26),(28)}

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] + [S_{bb}^g(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_s^{(i)}(\omega)\} \\ \{U_b^{(i)}(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\{\Delta P_s^{(i)}(\omega)\} \\ \{P_b^{eqk}(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $\{\Delta P_s^{(i)}(\omega)\}$ 는 비선형영역에서 복원력 오차의 Fourier 변환으로서 이전 단계에서 구한 시간영역응답을 기초로하여 다음과 같이 계산된다.

$$\{\Delta P_s^{(i)}(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\{p_s^{(i-1)}(t)\} - [\bar{K}_{ss}] \{\bar{u}_s^{(i-1)}(t)\} - [\Delta C_{ss}] \{\dot{\bar{u}}_s^{(i-1)}(t)\} \right) e^{-i\omega t} dt \quad (10)$$

한편, HTFD 방법에서 상호작용력 $\{r_b(t)\}$ 를 다음과 같이 근사한다.⁽²⁷⁾

$$\{r_b(t)\} = [M_{bb}^{ref}] \{\ddot{u}_b(t)\} + [C_{bb}^{ref}] \{\dot{u}_b(t)\} + [K_{bb}^{ref}] \{u_b(t)\} + \{PSF_b(t)\} \quad (11)$$

여기서 $[M_{bb}^{ref}]$, $[C_{bb}^{ref}]$, $[K_{bb}^{ref}]$ 는 $[S_{bb}^g(\omega)]$ 로부터 근사하며, $\{PSF_b(t)\}$ 는 원역과 근역 경계면에서 상호작용력의 보정치라고 생각할 수 있다. 따라서 식 (1)에 나타난 운동방정식은 다음과 같이 시간영역에서 정의되며 이의 해를 반복계산을 통해 구한다.⁽²⁷⁾

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] + [M_{bb}^{ref}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_s^{(i)}(t)\} \\ \{\ddot{u}_b^{(i)}(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] + [C_{bb}^{ref}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_s^{(i)}(t)\} \\ \{\dot{u}_b^{(i)}(t)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{p_s(t)\} \\ [K_{bb}^{ref}] \{u_b^{(i)}(t)\} + \{p_b(t)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{p_b^{eqk}(t)\} - \{PSF_b^{(i)}(t)\} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)의 우변에 있는 이전 단계에서 구한 주파수응답을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\{PSF_b^{(i)}(t)\} = \{r_b^{(i-1)}(t)\} - [M_{bb}^{ref}] \{\ddot{u}_b^{(i-1)}(t)\} - [C_{bb}^{ref}] \{\dot{u}_b^{(i-1)}(t)\} - [K_{bb}^{ref}] \{u_b^{(i-1)}(t)\} \quad (13)$$

여기서

$$\{r_b^{(i-1)}(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S_{bb}^g(\omega)] \{U_b^{(i-1)}(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega \quad (14)$$

$$\{U_b^{(i-1)}(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{u_b^{(i-1)}(t)\} e^{-i\omega t} dt \quad (15)$$

일반적으로 HTFD 방법이 HFTD 방법에 비해 훨씬 안정

적으로 빨리 수렴한다.⁽²⁷⁾ 이는 국부적인 비선형성을 식 (9)에서와 같이 등가하중으로 근사하는 방법보다는 식 (12)에서와 같이 시간영역에서 직접 고려하는 것이 해의 안정성과 정확도를 높이는 데 중요하다는 것을 의미한다. 아울러 국부적인 비선형성이 근역과 원역지반의 경계면응답에 미치는 영향이 매우 작다는 것을 의미하기도 한다.

3. 새로운 HTFD 방법

본 연구에서는 사용자에게 보다 친숙한 지반-구조물 상호작용을 고려한 비선형해석을 위하여 지반-구조물 상호작용 해석 문제를 다른 각도에서 접근해 보았다. 먼저 비선형응답 $\{u(t)\}$ 와 등가선형응답 $\{\bar{u}(t)\}$ 의 차이를 $\{\delta u(t)\}$ 라 하자. 즉,

$$\{u(t)\} = \{\bar{u}(t)\} + \{\delta u(t)\} \quad (16)$$

그리고 복원력에 대해서도 위와 유사하게 다음과 같이 구분하자.

$$\{p(t)\} = \{\bar{p}(t)\} + \{\delta p(t)\} \quad (17)$$

여기서 경계면에서 복원력 오차 $\{\delta p(t)\}$ 는 경계면 주변의 지반이 선형이라면 0이 된다. 따라서 비선형응답과 등가선형응답의 차이인 $\{\delta u(t)\}$ 에 대한 주파수영역 방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{bmatrix} [\bar{S}_{ss}(\omega)] & [\bar{S}_{sb}(\omega)] \\ [\bar{S}_{bs}(\omega)] & [\bar{S}_{bb}(\omega)] + [S_{bb}^g(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta U_s(\omega)\} \\ \{\Delta U_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\{\Delta P_s(\omega)\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

여기서 $\{\Delta U(\omega)\}$ 와 $\{\Delta P_s(\omega)\}$ 는 각각 $\{\delta u(t)\}$ 와 $\{\delta p_s(t)\}$ 의 Fourier 변환이다.

식 (18)에 나타난 지반-구조물 상호작용해석문제는 파동방사문제로서 하중작용점 ($\{\Delta P_s(\omega)\}$)가 작용되는 점으로서 비선형 영역에 위치한 절점으로부터 거리가 멀어짐에 따라 응답이 급격하게 감소하는 특성이 있다. 즉,

$$\lim_{\|x\| \rightarrow \infty} \frac{\|\Delta U_b\|}{\|U_b\|} = 0 \quad \text{또는} \quad \lim_{\|x\| \rightarrow \infty} U_b(\omega) = \bar{U}_b(\omega) \quad (19)$$

여기서 $\|x\|$ 는 하중작용점으로부터 거리이며 $\|\cdot\|$ 는 메트릭 노름(metric norm)을 의미한다.

한편, 식 (12)를 구조물과 근역지반의 자유도(하첨자 s로 표기)에 대하여 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} & [M_{ss}] \{\ddot{u}_s(t)\} + [C_{ss}] \{\dot{u}_s(t)\} + \{p_s(t)\} \\ & = -[M_{sb}] \{\ddot{u}_b(t)\} - [C_{sb}] \{\dot{u}_b(t)\} - [K_{sb}] \{u_b(t)\} \end{aligned} \quad (20)$$

이제, 비선형영역으로부터 거리 $\|x\|$ 가 충분히 크다면 식 (19)

에 나타낸 바와 같이 경계면에서 응답($U_b(\omega)$)은 등가선형 응답($\bar{U}_b(\omega)$)으로 근사할 수 있다. 따라서 식 (20)은 다음 식으로 나타난다.

$$[M_{ss}]\{\ddot{u}_s(t)\} + [C_{ss}]\{\dot{u}_s(t)\} + \{p_s(t)\} = -[M_{sb}]\{\ddot{u}_b(t)\} - [C_{sb}]\{\dot{u}_b(t)\} - [K_{st}]\{\bar{u}_b(t)\} \quad (21)$$

위의 식 (21)에 나타낸 운동방정식은 근역지반과 원역지반의 경계면에서 응답이 등가선형응답인 시간영역해석문제라고 할 수 있다. 따라서 경계면에서 등가선형응답을 주파수영역해석법을 사용하는 SSI 해석 프로그램을 이용하여 먼저 구한 다음, 이를 Fourier 역변환하여 시간영역 비선형해석시 경계조건으로 입력하여 해석을 수행하면, 식 (1)의 비선형응답을 구하는 것이 됨을 알 수 있다. 이와 같은 해석법은 식 (21)의 비선형해석을 범용 유한요소해석 프로그램(ABAQUS, ANSYS, DIANA 등)을 사용하여 수행할 수 있으므로 실무에 직접 적용할 수 있는 대단히 실용적인 방법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 등가선형 지반-구조물 상호작용해석을 위하여 그림 2와 같은 KIESSI-2D 프로그램⁽³¹⁾을 사용하였으며 범용 유한요소해석 프로그램으로 ANSYS⁽³²⁾를 사용하였다.

4. 제안한 HTFD 방법의 검증

이 연구에서는 그림 3과 같이 일본 고베시에 위치한 지하철 정거장의 대표적 단면에 대하여 2차원 지진응답해석을

수행하고 구조물의 파괴모드를 고찰하였다. 이 지하철 정거장은 1995년 1월 고베시를 강타한 효고현남부 대지진시 큰 손상을 입은 구조물이다.⁽³²⁾ 이 정거장 구조물은 직사각형 철근콘크리트 박스형식으로 구성되어 있으며, 그림 3과 같이 두 개의 내부기둥이 슬랩을 지지하고 있다. 이 기둥의 종방향(지하철 주행방향) 설치간격은 5m이고, 기둥의 단면폭은 상부기둥에 대해서는 1.4m, 하부기둥에 대해서는 1.5m이다. 이 지하철 정거장 구조물의 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 250kgf/cm²로서 탄성계수는 23GPa이고 포아송비는 0.20이며, 질량밀도는 2400kg/m³이다. 그리고 지반의 물성치는 An & Maekawa(1997)에 의해 제시된 표 1과 같은 값을 사용하였다.

해석에 사용된 입력지진파는 그림 4와 같다. 이는 1995년 1월 일본 고베시의 효고현남부 대지진시 Port Island에서 계측된 가속도기록으로서 시간간격은 0.01초이며, 최대가속도는 0.56g이다. 이 연구에서는 이 가속도 기록을 원역지반 자유장의 지표면에 입력하였다.

이 논문에서 제안한 복합법을 사용하여 시간영역 지진응답 해석을 수행하기 위하여 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 KIESSI-2D와 범용 유한요소해석 프로그램 ANSYS를 사용하였다. ANSYS에 사용된 유한요소는 8절점 PLANE82이다. 그림 5(a)는 KIESSI-2D 해석을 위한 유한요소와 무한요소 해석모형을 나타내고 있으며, 그림 5(b)는 ANSYS 해석을 위한 유한요소 해석모형이다. 해석시 기둥에 대해서는 실제 지하철 구조물의 중앙기둥 설치간격과 종방향 기둥폭을 고

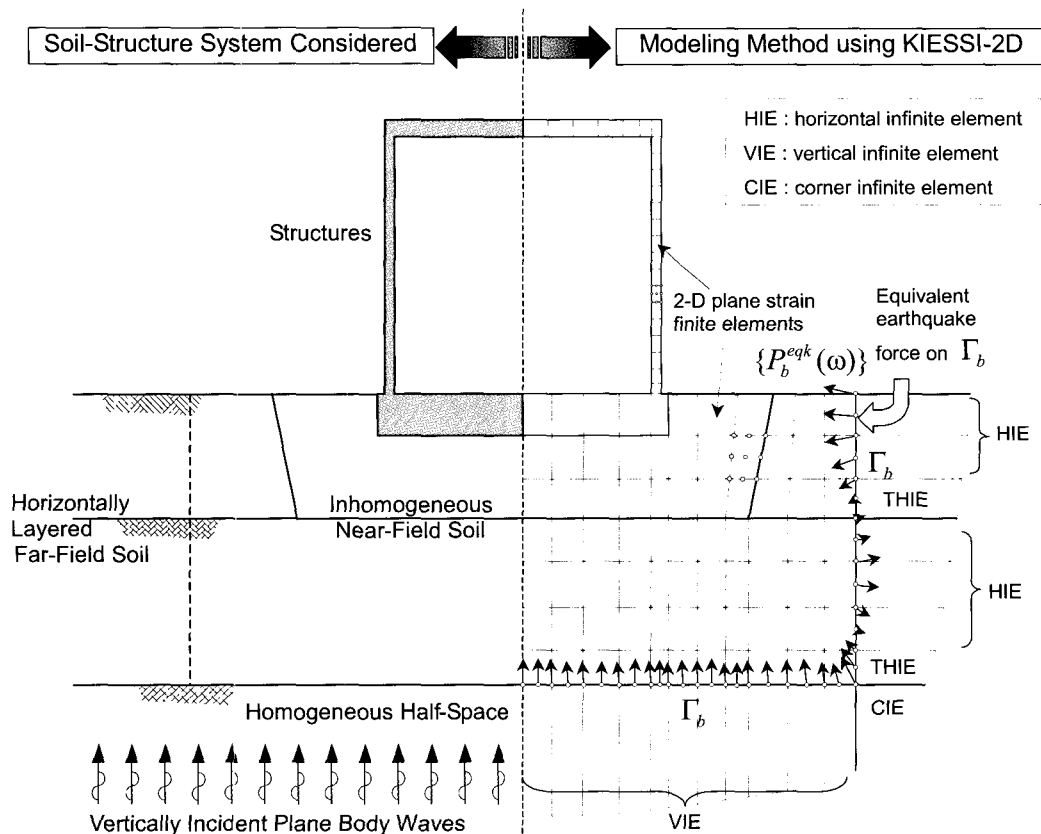


그림 2 KIESSI-2D에 의한 등가선형 지반-구조물 상호작용해석의 개요

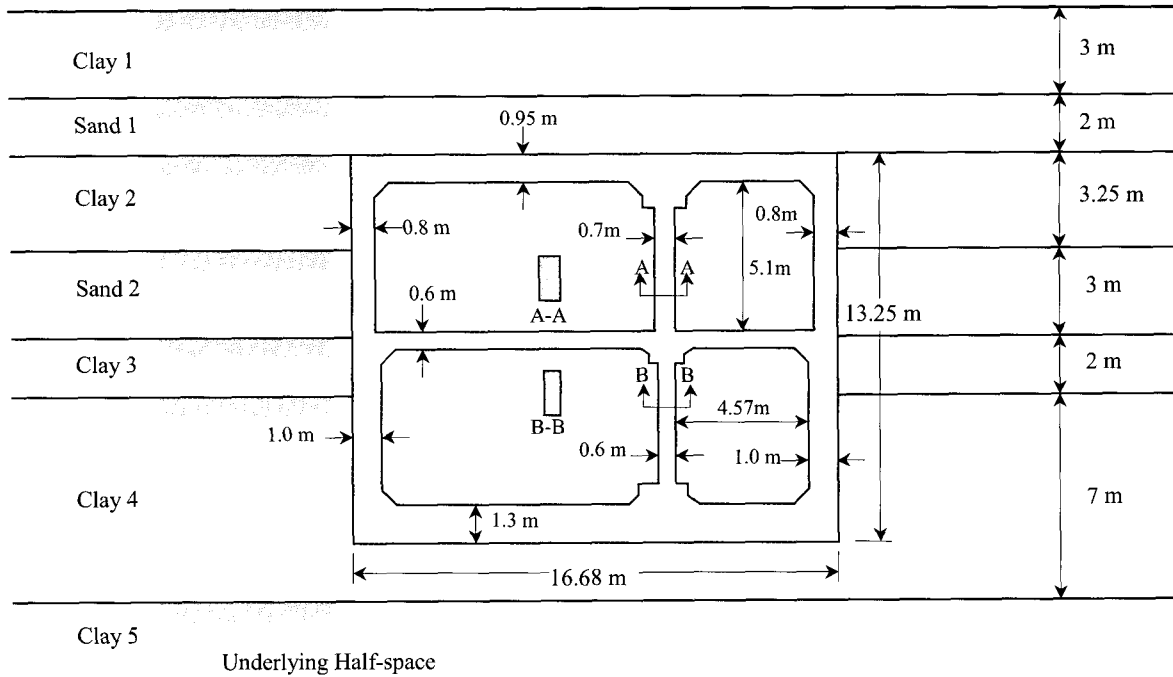


그림 3 일본 고베시 지하철 정거장 구조물

표 1 일본 고베시 지하철 정거장 구조물 예제의 주변 지반 물성치

지층	전단파속도 (m/sec)	질량밀도 (kg/m ³)	감쇠비 (%)	포아송비
Clay 1	205	1800	2.0	0.45
Sand 1	246	2000	2.0	0.45
Clay 2	257	2000	2.0	0.45
Sand 2	229	2000	2.0	0.45
Clay 3	301	2000	2.0	0.45
Clay 4	345	2000	2.0	0.45
Clay 5	411	2000	2.0	0.45

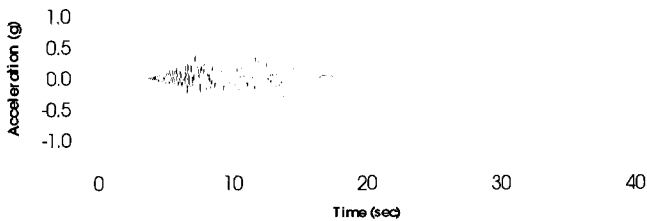
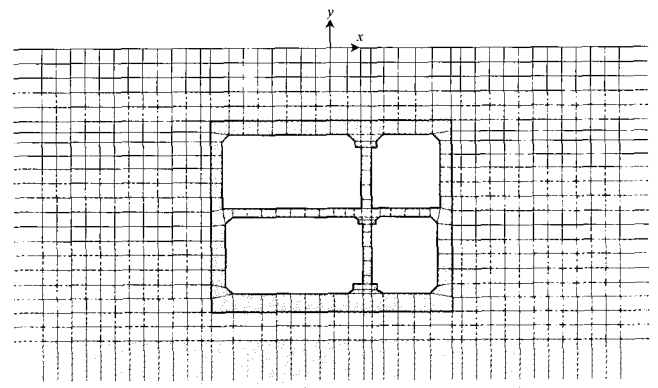


그림 4 지표면 통제운동으로 사용된 가속도(1995년 고베지진, Port Island, PGA=0.56g)

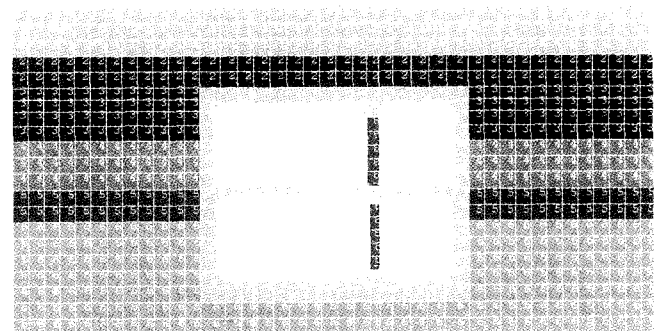
려하여 70kgf/cm²로 보정하여 사용하였다.

먼저 등가선형 지진응답해석을 수행하고 상부 중간기둥의 중심에서 구한 KIESSI-2D 결과와 KIESSI-2D & ANSYS 복합법에 의한 결과의 가속도응답스펙트럼을 그림 6에 비교하여 나타냈다. 이 비교에서 알 수 있듯이 본 연구의 복합법이 선형 지진응답해석에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

이제 예제구조물에서 철근콘크리트 단면의 재료비선형성을 고려하고 복합법을 사용하여 시간영역에서 비선형 지진응답해석을 수행하였다. 철근과 콘크리트의 비선형성을 고려하기 위하여 RC 부재의 비선형 휨모멘트-회전각 관계^{(34),(35)}를 구하고, 이를 균질한 비선형 등방재료로 모사하는 응력-변형도



(a) KIESSI-2D 해석모형



(b) ANSYS 해석모형

그림 5 일본 고베시 지하철 정거장의 지진해석 모형

관계⁽³⁶⁾를 사용하였다. 해석결과 그림 7과 같이 t=14.67sec일 때 최대소성변형이 발생하였다. 이 소성변형율은 잔류변형율로서 구조물 손상의 척도라고 할 수 있다. 이로부터 이 구조물은 지진에 의하여 중간기둥의 상단과 하단에 비선형거동에 의한 손상이 많이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 아울러 잔류변형율의 분포형태가 그림 8에 나타난 유사 구조물의 실제 파괴현상⁽³²⁾과 매우 유사함을 알 수 있다.

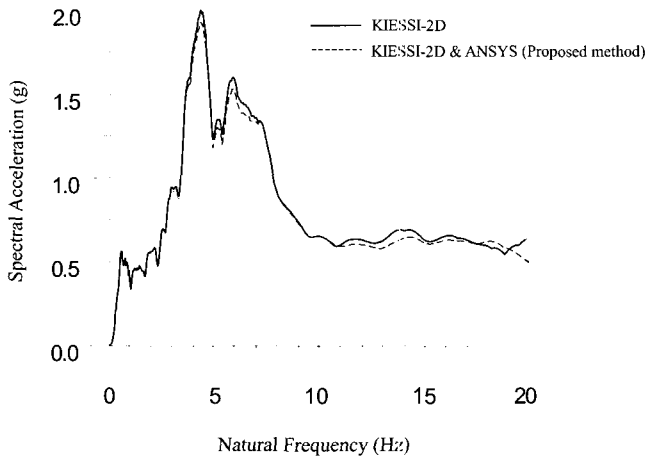


그림 6 등가선형해석에 의한 가속도 응답스펙트럼 비교(5% 감쇠비)

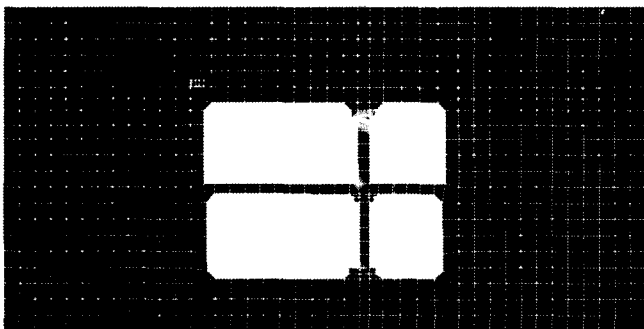


그림 7 구조물의 비선형거동에 의한 잔류변형을 분포도(t=14.67sec)



그림 8 예제와 유사한 지하철 정거장의 1995년 고베지진시 실제 파괴 양상

5. 결 론

이 논문에서는 비선형 지반-구조물 상호작용해석을 위한 새로운 복합법을 제시하였다. 제안한 방법은 등가선형 지반-구조물 상호작용해석 프로그램과 범용 비선형 유한요소해석 프로그램을 동시에 사용하는 실용적인 방법이다. 이 방법은

먼저 주파수영역에서 등가선형 지반-구조물 상호작용해석을 수행하여 유한요소 영역의 경계면에서 응답을 구한 다음, 이를 범용 비선형 유한요소해석 프로그램에 의한 비선형 동적 해석의 경계조건으로 입력하는 방법이다. 제안된 방법의 검증을 위하여 2차원 지하철 정거장 구조물에 대한 선형 및 비선형 지진응답해석을 수행하였으며, 해석결과로부터 이 논문에서 제안한 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업(과제번호: 1999-1-311-001-3)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, "Finite dynamic model for infinite media," *J. of Eng. Mechanics Div., ASCE*, Vol. 95, 1969, pp. 859-877.
2. White, W., Valliappan, S., and Lee, I. K., "Unified boundary for finite dynamic model," *J. of Eng. Mechanics Div., ASCE*, 1977, Vol. 103.
3. Kausel, E., "Forced Vibration of Circular Foundations on Layered Media," *Ph.D. Thesis*, MIT, Cambridge, MA, USA, 1974.
4. Tassoulas, J. L. and Kausel, E., "Elements for the numerical analysis of wave motion in layered strata," *Int'l J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 19, 1983, pp. 1005-1032.
5. Kim, J. K., Koh, H. M., Kwon, K. J. and Yi, J. S., "A three-dimensional transmitting boundary formulated in Cartesian co-ordinate system for the dynamics of non-axisymmetric foundations," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 29, 2000, pp. 1527-1546.
6. Wolf, J. P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1985.
7. Chen, C-H. and Penzien, J., "Dynamic modelling of axisymmetric foundations," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 14, 1986, pp. 823-840.
8. Liou, G-S., "Analytical solutions for soil-structure interaction in layered media," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 667-686.
9. Apsel, T. J. and Luco, J. E., "Impedance functions for foundations embedded in a layered medium: An integral equation approach," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 15, 1987, pp. 213-231.
10. Medina, F. and Penzien, J., "Infinite elements for elastodynamics," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 10, 1982, pp. 699-709.
11. Rajapakse, R. K. N. D. and Karasudhi, P., "An efficient

- elastodynamic infinite element," *Int'l J. of Solids and Structures*, Vol. 22, 1986, pp. 643-657.
12. Yang, S.-C. and Yun, C.-B., "Axisymmetric infinite element for soil-structure interaction analysis," *Engineering Structures*, Vol. 14, 1992, pp. 361-370.
 13. Zhao, C. and Valliappan, S., "A dynamic infinite element for three-dimensional infinite-domain wave problems," *Int'l J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 36, No. 15, 1993, pp. 2567-2580.
 14. Yun, C.-B., Kim, J.-M., and Hyun, C.-H., "Axisymmetric elastodynamic infinite elements for multi-layered half-space," *Int'l J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 38, 1995, pp. 3723-3743.
 15. Karabalis, D. L. and Beskos, D. E., "Dynamic response of 3-D rigid surface foundations by time-domain boundary element method," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 12, 1984, pp. 73-93.
 16. Ahmas, S. and Banerjee, P. K., "Time-domain transient elastodynamic analysis of 3-D solids by BEM," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, 1988, pp. 1709-1728.
 17. Estof, O. and Kausel, E., "Coupling of boundary and finite elements for soil-structure interaction problems," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 1065-1075.
 18. Wang, S. and Schmid, G., "Dynamic structure-soil-structure interaction by FEM and BEM," *Computational Mechanics*, Vol. 9, 1992, pp. 347-357.
 19. Gaul, L. and Schanz, M., "A comparative study of three boundary element approaches to calculate the transient response of viscoelastic solids with unbounded domains," *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, Vol. 179, 1999, pp. 111-123.
 20. Kim, M. K., Lim, Y. M., and Rhee, J. W., "Dynamic analysis of layered half planes by coupled finite and boundary elements," *Engineering Structures*, Vol. 22, 2000, pp. 670-680.
 21. 김문겸, 임윤목, 조석호, 정대회, "동적기본해의 역FFT에 의한 비선형 지반-말뚝-구조계의 시간영역 비선형 지진 응답해석", 2002년 춘계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 2002, pp. 125-132.
 22. Wolf, J. P. and Oberhuber, P., "Non-linear soil-structure analysis using dynamic stiffness or flexibility of soil in the time-domain," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 13, 1985, 195-212.
 23. Paronesso, A. and Wolf, J. P., "Recursive evaluation of interaction forces and property matrices from unit-impulse response functions of unbounded medium based on balancing approximation," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1988, pp. 609-618.
 24. Wolf, J. P. and Motosaka, M., "Recursive evaluation of interaction forces of unbounded soil in the time domain from dynamic stiffness coefficients in the frequency domain," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 365-376.
 25. Kim, D.-K. and Yun, C.-B., "Time-domain soil-structure interaction analysis in two-dimensional medium based on analytical frequency-dependent infinite elements," *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 47, No. 7, 2000, pp. 1241-1261.
 26. Kawamoto, J. D., "Solution of nonlinear dynamic structural system based on a hybrid frequency-time-domain approach," *Research Report R83-5*, MIT, Dept. of Civil Eng., Cambridge, MA, 1983.
 27. Bernal D. and Youssef, A., "A hybrid time frequency domain formulation for non-linear soil-structure interaction," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 673-685.
 28. Dardre, G. R. and Wolf, J. P., "Criterion of stability and implementation of hybrid frequency-time-domain procedure for nonlinear dynamic analysis," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 16, 1988, pp. 569-581.
 29. Hayashi, Y. and Katukura, H., "Effective time-domain soil-structure interaction analysis based on FFT algorithm with causality condition," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 19, 1990, pp. 693-708.
 30. Hayashi, Y. and Katukura, H., "An efficient time-domain soil-structure interaction analysis based on dynamic stiffness of an unbounded soil," *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, Vol. 21, 1992, pp. 787-798.
 31. 김제민, 윤정방, 김두기, "유한요소-무한요소를 사용한 2차원 지반-구조물계의 주파수영역 지진응답해석법," 한국전산구조공학회 논문집, 제10권, 제2호, 2000, pp. 231-244.
 32. An, X. and Maekawa, K., "Failure of underground RC frame subjected to seismic actions," *J. Materials, Conc. Struct., Pavements*, JSCE, Vol. 36. No. 571, 1997, pp. 251-267.
 33. SAS IP. Inc., *ANSYS User's Manual -- Version 5.6*, 1999.
 34. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
 35. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.
 36. 정연주, 유영찬, "소성거동을 고려한 RC 구조물의 간략화 해석모델에 관한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제13권, 제3호, 2000, pp. 361-371.