한국전산구조공학회
2001년도 봄 학술발표회 논문집

근역지반의 비선형성을 고려한 시간영역 지반-구조물 상호작용 해석기법의 개발

Soil-Structure Interaction Analysis Method in Time Domain considering Near-Field Nonlinearity

김 문 겸* 임 윤 묵** 김 태 욱*** 박 정 열****
Kim, MoonKyum Lim, YunMook Kim, TaeWook Park, JeongYeol

ABSTRACT

In this study, the nonlinear soil structure interaction analysis method based on finite element and boundary element method is developed. In the seismic region, the nonlinearity of near field soil has to be considered for more exact reflection of soil-structure interaction effect. Thus, nonlinear finite element program coupled with boundary elements is developed for nonlinear soil-structure interaction analysis. Using the developed numerical algorithm, the nonlinear soil-structure interaction analysis is performed and responses due to dynamic forces and seismic excitation are investigated. The developed method is verified by comparing with previous studies.

1. 서 론

지진과 같은 대규모 자연재해 발생시 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 합리적인 지진해석 방법에 의거한 내진설계 절차의 확립이 필수적으로 요구되며 이는 곧 지진 발생시 지반-구조물 상호작용에 대한 실질적인 이해 및 합리적인 모형화를 의미하게 된다. 현재까지의 연구결과를 살펴볼 때, 지반-구조물 상호작용계 해석은 크게 주파수 영역과 시간영역 해석으로 구분될 수 있는데 주파수 영역 해석의 경우 반무한 구조계에서의 감쇠특성을 효과적으로 반영할 수 있다는 장점에도 불구하고 지반과 구조물의 거동을 선형탄성으로 가정해야 한다는 점에서 그 한계성이 지적되어 왔다.(1)

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수 ** 정회원, 연세대학교 토목공학과 조교수
*** 학생회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 **** 연세대학교 토목공학과 석사졸업

물론 지반의 비선형성을 완전하게 고려한다는 것은 현재로서는 매우 어려운 일이나 구조물의 비선형 거동에 대한 고려 및 비선형 해석의 필요성 여부를 판정하는 것은 매우 중요한 문제이기에, 최근 들어서는 시간영역 해석시 지적되는 해석시간의 증가에도 불구하고 비선형 해석의 필요성이 부각되기 시작했다.[(2)] 이를 위해 본 연구에서는 전체 구조계를 원역과 근역으로 구분한 후, 반무한 지반에 대해서는 경계요소법을 적용하고 역 FFT를 통해 시간영역에서의 강성도 행렬을 도출해내는 반면, 구조물에 대해서는 구조물과 구조물 주변 지반의 비선형성을 고려한 유한요소법의 적용을 통해 시간영역에서의 강성도 행렬을 도출하였다. 각각의 강성도 행렬을 조합하고 이를 Newmark 시간 적분법을 이용하여 직접적분을 수행함으로써 근역지반의 비선형성을 고려할 수 있는 지반-구조물 상호작용 해석기법을 개발하였다. 본 연구에서는 먼저 동적하중 및 지진하중에 대해 개발된 비선형 유한요소 해석기법을 검증하였으며 전체 지반-구조물 상호작용 해석 결과와 기존 연구결과와의 비교를 통해 개발된 상호작용 해석기법의 적용성 및 타당성을 검증하였다. 추후에는 근역지반의 물성변화 및 지반강성의 변화 등에 따른 지반-구조물 상호 작용계의 응답특성 변화 등을 살펴보고자 한다.

2. 지반-구조물 상호작용계의 모형화 및 운동방정식

지반-구조물 상호작용을 해석하는 데 있어서 전체 구조계에 적용될 수 있는 모형화와 해석기법은 크게 직접법과 부구조법으로 구분될 수 있는데 본 연구에서는 구조물 및 구조물과 인접한 근역지반의 비선형성을 모형화하기 위하여 직접법을 적용하였다. 직접법에 의한 해석은 그림 1과 같이 전체 지반-구조물 상호작용계내의 구조물과 지반을 직접 모형화한 것으로서 지반영역은 구조물과 지반경계면에서 발생된 응력파가 전달되지 않을 정도의 거리를 갖게끔 가상적인 외부경계까지를 포함하도록 설정되었다.

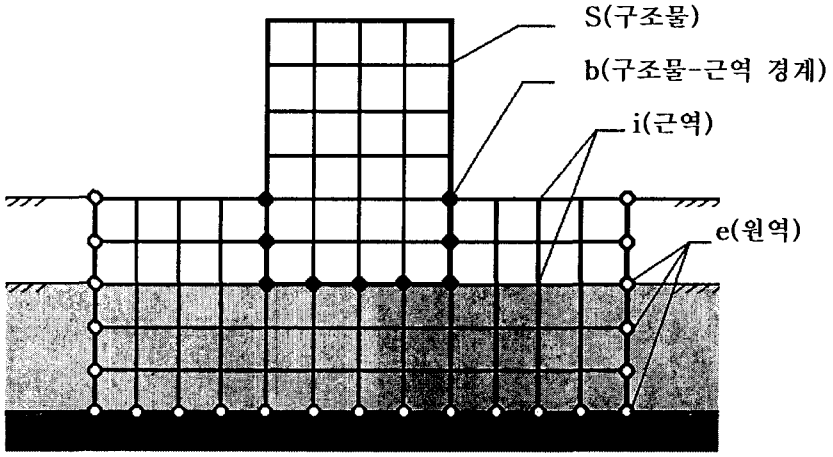


그림 1. 전체 지반-구조물 상호작용계

전체 상호작용계의 운동방정식은 구조동역학에서의 일반적인 운동방정식과 유사하나 외부경계 자체를 구조물에 의하여 영향을 받지 않도록 멀리 설정하였으므로 외부경계면에서의 응답은

자유장 응답과 동일하게 된다. 이러한 특성을 이용하면 전체 상호작용계의 운동방정식은 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.[3]

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] & \\ [M_{bs}] & [M^s_{bb}]+[M^g_{bb}] & [M_{bi}] \\ & [M_{ib}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}^t_s\} \\ \{\ddot{u}^t_b\} \\ \{\ddot{u}^t_i\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] & \\ [C_{bs}] & [C^s_{bb}]+[C^g_{bb}] & [C_{bi}] \\ & [C_{ib}] & [C_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}^t_s\} \\ \{\dot{u}^t_b\} \\ \{\dot{u}^t_i\} \end{Bmatrix} + \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] & \\ [K_{bs}] & [K^s_{bb}]+[K^g_{bb}] & [K_{bi}] \\ & [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u^t_e\} \\ \{u^t_b\} \\ \{u^t_i\} \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ [M_{ie}]\{\ddot{u}^f_e\}+[C_{ie}]\{\dot{u}^f_e\}+[K_{ie}]\{u^f_e\} \end{Bmatrix}$$

여기서 $\{u(t)\},\{\dot{u}(t)\},\{\ddot{u}(t)\}$는 시간의 함수로서 각각 절점에서의 변위, 속도, 가속도를 나타내며, 행렬 $[M],[C],[K]$는 각각 질량행렬, 감쇠행렬 그리고 정적강성행렬을 나타낸다. 또한 아래첨자 **s**와 **b**는 각각 구조물의 자유도와 지반-구조물 경계면의 자유도를 나타내며, **i**와 **e**는 각각 지반의 내부영역 자유도와 외부경계면의 자유도를 나타낸다. 위첨자 **s**와 **g**는 구조물과 지반을, **t**는 전체 지반-구조물 계를 나타낸다. 식 (1)을 주파수영역으로 변환시킨 후 지반의 내부영역절점 **i**의 모든 자유도를 줄이고 자유장에서의 동적강성도행렬을 지반 및 굴착지반부의 동적강성도행렬로 표현하게 되면 전체 지반-구조물 상호작용계의 운동방정식은 다음 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S^s_{ss}(\omega)] & [S^s_{sb}(\omega)] \\ [S^s_{bs}(\omega)] & [S^s_{bb}(\omega)]+[S^g_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u^t_s(\omega)\} \\ \{u^t_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S^f_{bb}(\omega)]\{u^f_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S^g_{bb}(\omega)]\{u^g_b(\omega)\} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

식 (2)를 시간영역으로 다시 변환하면 최종적으로 식 (3)과 같은 지반-구조물 상호작용계의 시간영역 운동방정식을 유도할 수 있으며 이 식을 이용하여 시간영역에서 Newmark 직접적분법을 통해 비선형해석을 수행할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}^t_s(t)\} \\ \{\ddot{u}^t_b(t)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_s(t)\} \\ \{P_b(t)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{-R_b(t)\} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

여기서 $\{P\}$는 근역부분의 비선형성을 나타내는 하중벡터이며, $\{R_b(t)\}$는 동적하중으로 인해 외부경계에 작용하는 내부하중으로서의 상호작용력 벡터이다. 상호작용력 $\{R_b(t)\}$를 시간영역상에서 도출해내기 위해서는 $[S^g_{bb}(t)]$와 지반의 상대변위 $\{u_b(t)\}$에 대해 convolution 적분을 수행해야 하는데, 실질적으로 $[S^g_{bb}(t)]$를 산정하기 위해서는 주파수영역에서 산정된 원역지반의 동적 강성도행렬에 대해서 ω가 무한대일 때의 점근해를 갖는 singular part와 나머지 부분인

regular part로 구분하여 적분을 수행해야 하며 시간영역에서의 상호작용력을 수치적으로 산정하기 위해서 다시 Fourier 역변환을 가해주어야 한다. 최종적인 식은 (4)와 같다.

$$\{R_b(t)\} = [K^g_{bb}]\{u_b(t)\} + [C^g_{bb}]\{\dot{u}_b(t)\} + \int_0^t [S^g_{r,bb}(t-\tau)]\{u_b(\tau)\}d\tau \tag{4}$$

3. 근역의 비선형성을 고려한 Newmark 시간적분법

Newmark 직접 시간적분법에 의한 비선형계에서의 시간적분과정은 초기값을 정하고 단계를 증가시켜가면서 미지값을 기지값으로 만들어 최종결과치를 얻어내는 과정으로서 구체적으로는 다음과 같다.[4] 먼저 초기가속도를 설정하고, 해석시간간격 Δt를 선택한 후 Newmark 상수 β, γ를 이용하여 속도와 가속도에 적용될 계수 $\mathbf{a}, \mathbf{b}$를 산정한다. 산정된 $\mathbf{a}, \mathbf{b}$를 이용하여 하중의 증분 $\Delta\bar{\mathbf{p}}_i$를 식 (5)와 같이 나타내고, 시간단계 i에서의 접선기울기 $\mathbf{k}_i$를 식 (6)에 의해 구한다.

$$\Delta\bar{\mathbf{p}}_i = \Delta\mathbf{p}_i + \mathbf{a}\dot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{b}\ddot{\mathbf{u}}_i \tag{5}$$

$$\bar{\mathbf{k}}_i = \mathbf{k}_i + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{c} + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2}\mathbf{m} \tag{6}$$

식 (5)와 (6)을 이용하여 속도의 증분과 가속도의 증분을 식 (7), 식 (8)과 같이 구하게 되면 다음 시간단계에서의 변위, 속도, 가속도를 결정할 수 있으며 각 시간단계내에서의 강성도는 여러 차례의 반복계산을 통하여 산정될 수 있다.

$$\Delta\dot{\mathbf{u}}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta\mathbf{u}_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{\mathbf{u}}_i + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\ddot{\mathbf{u}}_i\right) \tag{7}$$

$$\Delta\ddot{\mathbf{u}}_i = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2}\Delta\mathbf{u}_i - \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_i - \frac{1}{2\beta}\ddot{\mathbf{u}}_i \tag{8}$$

4. 해석 프로그램의 검증 및 수치해석

4.1 비선형 유한요소 해석 프로그램의 검증

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용계 내 근역지반의 비선형성을 고려하기 위해 구조물과 근역지반의 모형화에 비선형 유한요소 해석기법을 적용하였다. 본 연구에서 개발된 비선형 유

한요소해석 프로그램은 절점이 4개인 사각형 평면요소를 기본으로 구성되어 있으며 재료적인 비선형성을 고려하였고, 항복 이후에 나타나는 재료의 거동을 실질적으로 반영하기 위해서 구조물에 대해서는 Tresca 항복기준을, 지반에 대해서는 Mohr-Couloumb 항복기준을 적용하였다. 개발된 해석 프로그램의 합리적인 적용성 및 타당성을 검증하기 위해서 그림 2와 같이 폭 8m, 높이 12m인 구조물을 대상으로 그림 3과 같은 다양한 하중에 대한 A점에서의 시간응답이력을 도출하였으며 상용프로그램인 ANSYS의 선형 해석결과 및 비선형 해석결과와 비교하였다. 요소의 한 변의 길이는 0.2m, 항복응력은 0.01ton/m^2 로 설정하였고 탄성계수는 3.06 x 10^6 ton/m^2, 포아송비는 0.25, 밀도는 2.0ton/m^3 이다. 충격하중에 대한 해석결과인 그림 4를 통해 ANSYS의 비선형 해석결과와 개발된 프로그램의 해석결과가 잘 일치한다는 사실을 알 수 있으며 ANSYS의 선형 해석결과와 비교했을 때 주기가 미소하게 증가한다는 점과 영구변위가 발생된다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 수평방향 가속도하중에 대한 해석결과 및 지진하중에 대한 해석결과 비교를 나타내고 있는 그림 5와 6을 통해서 재확인할 수 있으며 따라서 개발된 비선형 유한요소 해석기법은 재료적인 비선형성을 비교적 정확하게 반영하고 있는 동시에 그 적용성과 타당성이 합리적으로 입증되었다고 이야기할 수 있다.

표 1. 해석대상의 제원 및 물성

내 용			물성치
상부 구조물	탄성계수	E_B	3.06 x 10^6 ton/m^2
	포아송비	ν_B	0.25
	밀 도	ρ_B	2.0 ton/m^3
	높 이	H	12.0 m
	폭	W	8.0 m

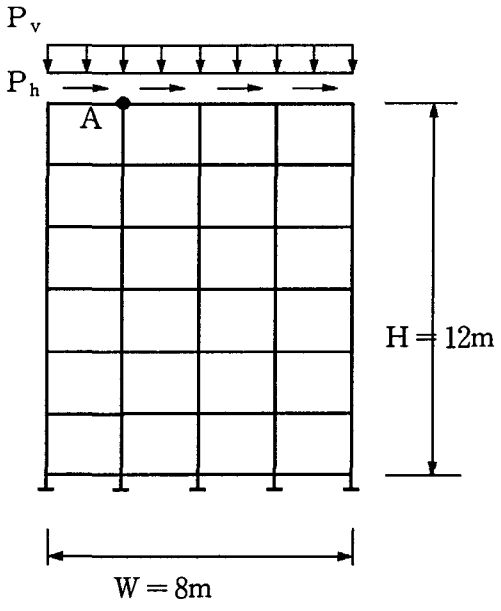


그림 2. 해석대상 구조물

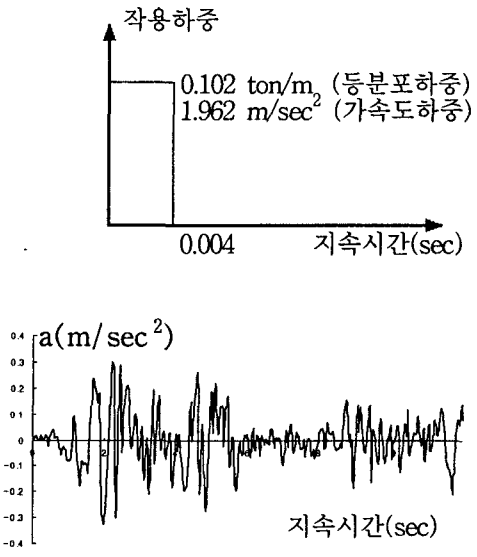
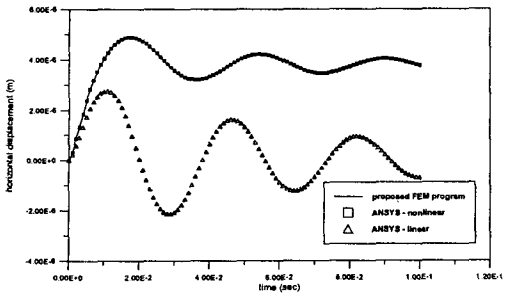
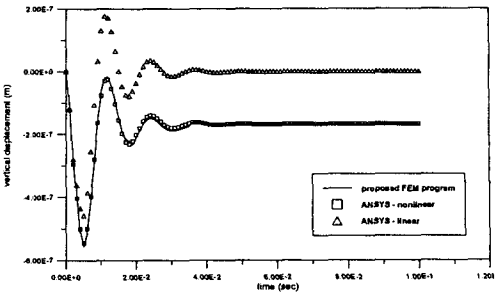


그림 3. 작용 하중조건

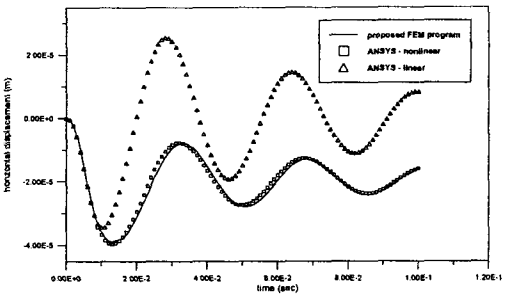


(a) A점의 수평변위

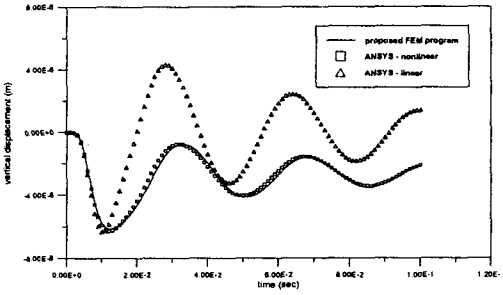


(b) A점의 수직변위

그림 4. 분포하중에 대한 A점의 해석결과 비교

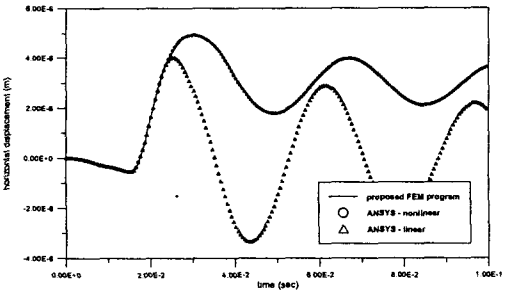


(a) A점의 수평변위

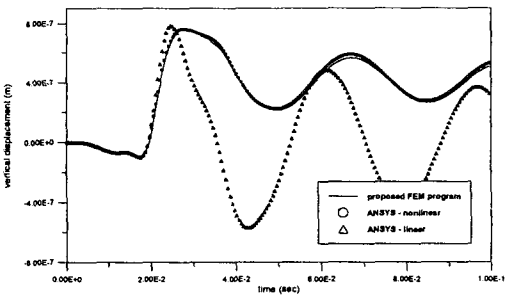


(b) A점의 수직변위

그림 5. 수평 가속도하중에 대한 A점의 해석결과 비교



(a) A점의 수평변위



(b) A점의 수직변위

그림 6. 수평 지진하중에 대한 A점의 해석결과 비교

4.2 비선형 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램의 검증

근역지반의 비선형성을 고려한 비선형 유한요소 해석기법과 역 FFT를 이용한 경계요소 해석기법의 조합을 통해 개발된 시간영역 비선형 지반-구조물 상호작용 해석기법의 합리적인 적용성 및 타당성을 검증하기 위해 그림 7과 같이 균일반무한 지반 상에 1m 크기의 사각형 요소로 단순화시킨 구조물을 위치시킨 후 구조물의 상부에 등분포의 동적하중을 가하였다. 해석대상의 제원 및 재료물성은 표 1과 같고 균일반무한 지반은 선형 경계요소로 모형화하였으며 반무한지반의 포아송비 및 밀도는 상부구조물과 동일하게 설정하였다. 작용하중은 그림 3과 같은 0.102 ton/m의 충격하중을 사용하였으며 구조물과 지반의 강성이 동일한 경우와 구조물의 강성에 비해 지반의 강성이 현저하게 작은 경우로 구분하여 해석을 수행한 후 이를 각각 그림 8과

그림 9로 나타냈다. 또한 비선형 상호작용 해석결과를 통해 도출된 A점의 수평 및 수직변위를 선형 해석결과 및 von Estorff의 해석결과와 비교하였다.[5] 지반의 탄성계수가 상대적으로 작은 그림 9의 경우 비선형 거동 특성이 보다 빨리 나타나고 최대 및 최소변위가 선형해석결과에 비해 차이가 발생된다는 사실을 확인할 수 있다. 즉 구조물에 비해 상대적으로 강성이 작은 지반의 경우 이러한 강성의 차이로 인해 전체 상호작용계의 거동이 선형해석시의 거동과는 차이를 나타내게 된다. 또한 그림 8과 9를 전체적으로 살펴볼 때 비교대상인 von Estorff의 해석결과와 본 해석프로그램을 이용한 선형 해석결과가 비교적 잘 일치한다는 점과 함께 비선형 해석결과와 선형 해석결과와의 차이점 - 주기의 증가 , 최대 및 최소변위의 미묘한 차이- 등을 확인할 수 있다. 현재까지의 해석결과만을 가지고 근역지반의 비선형성이 전체 상호작용계에 주는 영향을 명확하게 결론내릴 수는 없으나 그림 9에서 보는 바와 같이 상대적으로 연약한 지반에 위치하는 구조물의 경우 선형해석만으로는 현상적인 접근이 어렵다는 것을 유추할 수 있다. 결론적으로 개발된 시간영역 비선형 유한요소-경계요소 조합 해석기법은 지반-구조물 상호작용계 내에서 근역지반의 비선형성을 비교적 합리적으로 반영할 수 있으며 그 적용성 및 타당성 역시 어느 정도 갖추고 있음을 입증하였다.

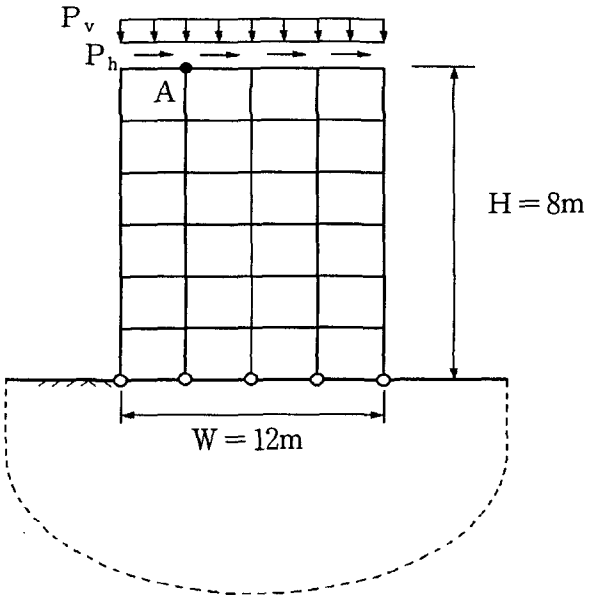
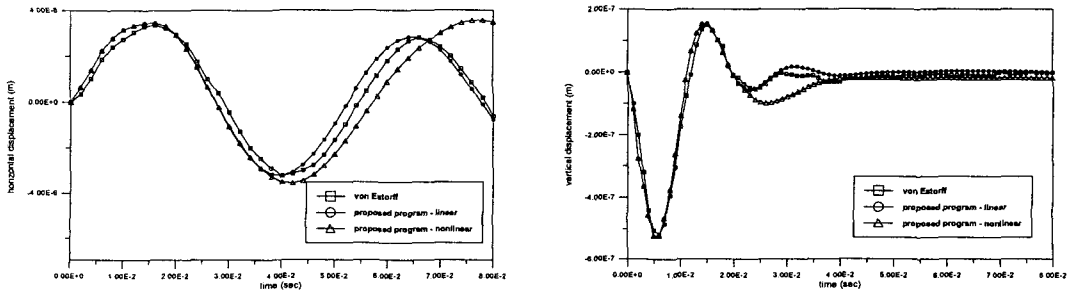
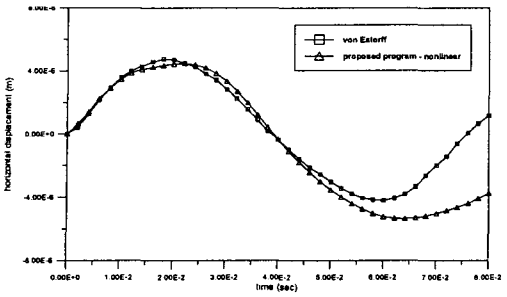


그림 7. 균일반무한 지반상의 구조물

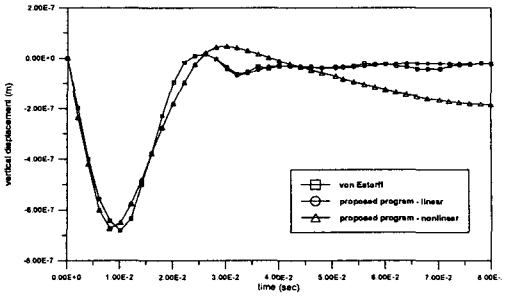


(a) A점의 수평변위 (b) A점의 수직변위

그림 8. 지반탄성계수가 구조물의 탄성계수와 동일한 경우($E_S = E_B$)



(a) A점의 수평변위



(b) A점의 수직변위

그림 9. 지반탄성계수가 구조물의 탄성계수에 비해 상대적으로 작은 경우($3E_S = E_B$)

5. 결 론

본 연구에서는 역 FFT를 적용시킨 경계요소법과 근역지반의 비선형성을 고려한 유한요소법의 조합을 통해 전체 지반-구조물 상호작용계내에서 근역지반의 비선형성을 고려할 수 있는 비선형 지반-구조물 상호작용 해석기법을 개발하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 개발된 비선형 유한요소 해석기법을 이용한 수치해석 결과 근역지반 및 구조물의 비선형성을 비교적 합리적으로 반영할 수 있다는 것을 규명하였으며 역 FFT를 이용한 경계요소법과의 조합을 통해 시간영역 지반-구조물 상호작용 해석에 대한 해석기법의 적용성과 합리적인 타당성을 입증하였다.

(2) 기존의 선형해석으로는 영구변위의 발생 및 지반 비선형성이 전체 구조계에 미치는 영향을 확인할 수 없으므로 상대적으로 연약한 지반에 대해서는 근역지반의 비선형성을 고려한 전체 지반-구조물 상호작용 해석을 통해 응답특성을 도출하는 것이 보다 합리적일 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Wolf, J.P., **Soil-Structure Interaction Analysis in Time Domain**, Prentice-Hall, 1988
2. 김문겸, 임윤묵, 이종우, "유한요소-경계요소 조합에 의한 다층 지반-구조물 상호작용해석", 대한토목학회 논문집, 제18권 제 I -13호, 1998, pp.323~333.
3. Wolf, J.P. and Song, C., **Finite-Element Modelling of Unbounded Media**, John Wiley & Sons Ltd, 1996.
4. Owen, D.R.J. and Hinton, E., **Finite Elements in Plasticity**, Pineridge Press Limited, 1980.
5. von Estorff, P., "Dynamic Responses of Elastic Blocks by Time Domain BEM and FEM," Computers and Structures, Vol.38, No.3, 1991, pp.287~300