

사영에 의한 반무한지반의 비선형해석

A Method for Nonlinear Dynamic Response Analysis of Semi-infinite Foundation Using Mapping

이 춘 길¹ Lee, Choon-Kil

Abstract

A special finite difference method for nonlinear dynamic response analysis of semi-infinite foundation soil using mapping which transforms semi-infinite domain into finite domain is presented here. For the region of engineering interest, mapping is isometric, and for far field, shrink mapping which transforms infinite interval into finite interval is adopted. At first, the responses of semi-infinite foundation soil with linear constituting model are computed, and compared with theoretical results and those of existing method. Good agreements are obtained among the results of the proposed method, Lamb's theory and FEM with extensive mesh model. Then the responses of infinite foundation soil are computed by the present method, using small and large mesh model. The results of small and large mesh models agree well with each other, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

요 지

반무한 영역을 유한영역에 사영한 다음 반무한지반의 비선형동적응답해석에 대한 특수한 유한 차분법을 제안하였다. 해석대상의 주요 부분은 동일 길이로 하고, 주변은 축소, 사영함으로써 무한영역을 유한영역으로 변환 후 차분하였다. 우선 반무한 지반의 선형모델의 응답으로서 계산값과 이론값의 결과를 비교하였다. 선형모델에 대한 제안법의 계산결과는 Lamb의 해석결과와 양호하게 일치했다. 또 간단한 모델에 의한 선형, 비선형해석도 소규모 mesh에 의한 응답결과와 대규모 mesh에 의한 응답결과는 일치하고 제안법의 유효성을 나타내었다.

Keywords : Finite difference method, Mapping, Nonlinear response analysis, Semi-infinite foundation soil

1. 서 론

컴퓨터의 급격한 발전에 따라 구조물과 구조물을 지지하는 지반의 설계는 유한요소법과 경계요소법의 이산화방법이 널리 이용되고 있다. 특히 최근에 성능설계에 따른 지진발생시 한계성능을 규명하기 위해 비선형 해석의 필요성이 증가하고 있지만 그 경우 경계요소에 의한 경계만을 이산화 하지 않고 유한요소법과 차분법 등의 영역전체를 이산화 하는 방법이 적합하다. 그러

나 지반은 구조물의 스케일로 보면 거의 반무한으로 보기 때문에 영역전체를 이산화로 다루기에는 적절하지 않다. 반무한 지반에 관해서는 광범위한 영역을 유한요소등으로 mesh분할하고, 경계에 근이적인 에너지 일산 경계(transmitting boundary)를 적용하며, 구조물 근역은 유한요소법으로 나타내며, 구조물 원역에 대해서는 시간영역 경계요소법을 이용, 유한요소법과 시간영역 경계요소법을 조합한 방법이 제안되어 사용되고 있다 (wolf 1988.1996). 하지만, 전자에서는 유한요소의 자

¹ 정회원, 한국도로교통기술원 박사후 연수자 (Member, Highway & Transportation Technology Institute, Post. Doc, mfp2dks1@hanmail.net)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

유도가 상당히 커지고, 후자는 경계요소법 해석부분은 선형이어야 할 필요가 있고 구조물주위 뿐만 아닌 광범위하게 비선형이 발생 할 경우에는 적용 할 수가 없다. 최근에 정도가 높은 PML(Perfectly Matched Layer)경계(Berenger 1994; Hastings, F.D, Schneider J.D, Brdschat S.L. 1996)가 개발되었지만 재료비선형에 의한 강성이 시간적, 장소적으로 변화하는 경우, 대응하는데 아직 어려움이 있다. 여기에서는 반무한 영역을 유한영역으로 사상(mapping)하는 방법(Shiojiri 1994; 塩尻弘雄 1986; Watanabe 1998; Nakagawa 1986)을 확장함으로서 폭넓은 범위에서 비선형이 발생하는 경우의 응답을 제한된 mesh정밀도를 저하시키지 않고 계산할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 해석법

2.1 1차 파동방정식에 대한 사상

$l > 0, L > l, p > 0$ 일때 다음의 식을 만족하는 관수 $a(\xi), \xi \in J = (-L, L)$ 을 생각 할 수 있다.

다만 $a(\xi)$ 는 식 (1), (2), (3)을 만족하는 것으로 한다.

$$\xi \in I_\xi, I_\xi = \{\xi \mid |\xi| \leq l\} \text{에 대해서 } a(\xi) = 1 \quad (1)$$

$$\xi \in J', J' = \{\xi \mid l < |\xi| < L\} \text{에 대해서 } 0 < a(\xi) < 1 \quad (2)$$

$$|\xi| = L \text{근역에서 } a(\xi) = 0(L - |\xi|)^{1+p} \quad (3)$$

위의 식을 이용하여 다음의 사상 $G: \xi \rightarrow x = \int_0^\xi dT/a(T)$ 을 생각할 수 있다.

사영 G 는 J 를 $R^1 = (-\infty, \infty)$ 에 사상한다. I_ξ 는 $I_x = \{x \mid |x| \leq l\}$ 에 등장(Isometric)으로 사상되고, J' (유한구간)은 $R' = \{x \mid l < |x| < \infty\}$ (무한구간)에 사상된다. 이하에 $u = u(x, t)$ 에 대한 1층 스칼라 쌍곡선방정식을 생각할 수 있다.

$$\partial u / \partial t + c \partial u / \partial x = 0 \quad x \in R^1 \text{ 및 } t > 0 \quad (4)$$

$$u(x, 0) = u_0(x) \text{ (초기조건)} \quad x \in R^1 \quad (5)$$

여기서 $u_0(x)$ 는 무한원으로 0로 한다. x 에 $G[\xi]$ 를 대입하고 식 (4)와 등가한 $v(\xi, t)$ 에 대해서 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\partial v / \partial t + c a(\xi) \partial v / \partial \xi = 0, \xi \in J \text{ 및 } t > 0 \quad (6)$$

$$v(\xi, 0) = v_0(\xi), \xi \in J \text{ (초기조건)} \quad (7)$$

$$v(\xi, t) = 0, \xi = \pm L \text{ (경계조건)} \quad (8)$$

여기서 $v(\xi, t) = u(G[\xi], t)$ 및 $v_0(\xi) = u_0(G[\xi])$. 식 (6)은 1층 쌍곡선방정식에 대한 차분법에서 시간점 $t = t_n$ 에 대해 유한구간 $[-L, L]$ 의 mesh 폭 h 의 등간극의 격자점 ξ^j 상에서 구해진다. v_n 을 그 해라고 하면 $v_n(\xi^j, t_n)$ 은 $x^j = G[\xi^j], t = t_n$ 에 있어서의 해이다. I_ξ 내에서는 등축 사상이고 실제에는 변환이 필요치 않다. 축소사상부분인 J' 는 그쪽으로 입사하는 파를 흡수하는 영역이라 말할 수 있다. 다차원으로의 응용에서는 $x_k (k=1, \dots, n)$ 로서 각 x_k 를 $G[\xi_k]$ 로 치환하고 $\partial / \partial x_k$ 를 $a(\xi_k) \partial / \partial x_k$ 로 치환하면 된다.

2.2 지반의 비선형해석으로의 적용

2차원 면내운동방정식은 다음과 같은 식 (9)로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 ρ 는 밀도, U 와 W 는 수평변위, 연직변위이고 σ_x, σ_z, τ 는 면내응력 텐서(Tensor)성분을 의미한다. 여기에서 등방성을 가정한다면 구성식은 속도형으로 다음과 같은 식 (10), (11), (12)으로 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial w}{\partial z} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right\} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (12)$$

여기에서

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \tau_z}{\partial z} \right\} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial t} = \mu_x \frac{\partial v}{\partial x} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \tau_z}{\partial t} = \mu_z \frac{\partial v}{\partial z} \quad (15)$$

그러나 정식화는 비슷하여 이후는 면내문제 대해서만 언급하고자 한다. 식 (9)~(12)방정식은 다음과 같이

1층방정식으로 치환할 수 있다.

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = A_x \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + A_z \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \quad (16)$$

여기에서 $\vec{u} = (u, w, \sigma_x, \tau, \sigma_z)^T$, A_x, A_z 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho} & 0 \\ \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho} \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

다음으로 이하와 같이 축소사상을 도입한다.

$$x = G(x') \equiv \int_0^{x'} \frac{dx'}{a(x')}, \quad |x'| \leq Lx \quad (18)$$

$$z = H(z') \equiv \int_0^z \frac{dz'}{b(z')}, \quad -Lz \leq z' \leq 0 \quad (19)$$

여기에서

$$\begin{aligned} a(x) &= 1, |x'| \leq lx \text{ (Isometric)} \\ a(x) &= 1 - 1/2(lx - |x'|)^2, lx < |x'| \leq 1/2(Lx + lx) \text{ (Shrink)} \\ a(x) &= 1/2(Lx - |x'|)^2, 1/2(Lx + lx) < |x'| \leq Lx \text{ (Shrink)} \\ b(z) &= 1, |z'| \leq lz \text{ (Isometric)} \\ b(z) &= 1 - 1/2(lz - |z'|)^2, lz < |z'| \leq 1/2(Lz + lz) \text{ (Shrink)} \\ b(z) &= 1/2(Lz - |z'|)^2, 1/2(Lz + lz) < |z'| \leq Lz \text{ (Shrink)} \end{aligned} \quad (20)$$

등가한 방정식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = B_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + B_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{여기에서 } \vec{v} &= (u', w', \sigma'_x, \tau', \sigma'_z)^T \\ B_x &= a(x) A_x(G(x'), H(z')) \\ B_z &= b(x) A_z(G(x'), H(z')) \end{aligned} \quad (23)$$

$\vec{v} = (u', w', \sigma'_x, \tau', \sigma'_z)^T$ 는 변환된 좌표계로 나타낸 속도와 응력 텐서성분을 의미한다. 식 (22)를 균등한 차분 mesh상에서 양해법의 일종인 1차원Lax-Wendoroff식에 의해 얻을 수 있다. 시점 $n+1$ 의 차분해 \vec{v}_{n+1} 는 시점 n 의 해 $\vec{v}_{n+1} = L_x L_z \vec{v}_n$ 에 의해 얻어진다.

여기에서 L_x, L_z 는 각각 $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = B_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x}$, $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = B_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z}$ 을 적분하는 1차원 2단계 Lax-Wendoroff 연산자로 구체적으로 식 (24)~(27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i-\frac{1}{2}, k}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left(\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k}^n + \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i-1, k}^n \right) + \frac{\Delta t a \left(1 - \frac{1}{2}\right)}{2h} [B_x]_{i-\frac{1}{2}, k}^n \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i-1, k}^n \quad (24)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k}^{n+1} = \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k}^n + \frac{\Delta t a(i)}{h} [B_x]_{i, k}^{n+\frac{1}{2}} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i+\frac{1}{2}, k}^{n+\frac{1}{2}} - \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i-\frac{1}{2}, k}^{n+\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left(\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k}^n + \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k-1}^n \right) - \frac{\Delta t b \left(k - \frac{1}{2}\right)}{2h} [B_z]_{i, k-\frac{1}{2}}^n \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k}^n - \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k-1}^n \quad (26)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k}^{n+1} = \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k}^n - \frac{\Delta t b(k)}{h} [B_z]_{i, k}^{n+\frac{1}{2}} \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \begin{Bmatrix} u \\ w \\ \sigma_x \\ \tau \\ \sigma_z \end{Bmatrix}_{i, k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \quad (27)$$

여기에서 계수매트릭스 $[B_x], [B_z]$ 는 식 (23)의 B_x, B_z 의 이산시점, 공간 mesh의 격자점상의 값인 매트릭스로서 각각 위첨자는 시점을, 아래첨자는 수평방향, 연직방향의 mesh점을 나타낸다. 하부에서의 지진입력은 다음과 같이 취급할 수 있다. 지표에서 k_0 번째 mesh 이후의 깊이는 선형이고, 중첩일의 원리가 적용가능하고 상승파와 하강파를 나누어서 생각할 수 있다. 입력파인 상승파는 이번 수평방향에는 기지수로 첨자 l 를 붙인다. $k < k_0$ 에서는 상승파성분과 하강파성분의 합을 나타내고, $k \geq k_0$ 에서는 하강파 성분만을 나타냄으로서 정식화한다. $k = k_0$ 로서는 식 (28)~(37)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = k - \frac{1}{2} \text{ 대해서}$$

$$u_{i, k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (u_{i, k}^n + u_{i, k-1}^n + u_{l, k_0}^n) - \frac{b \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2h} \frac{1}{\rho_{i, k-\frac{1}{2}}} (\tau_{i, k}^n - \tau_{i, k-1}^n + \tau_{l, k_0}^n) \quad (28)$$

$$w_{i, k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (w_{i, k}^n + w_{i, k-1}^n + w_{l, k_0}^n) - \frac{b \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2h} \frac{1}{\rho_{i, k-\frac{1}{2}}} (\sigma_{i, k}^n - \sigma_{i, k-1}^n + \sigma_{l, k_0}^n) \quad (29)$$

$$\sigma_{i, k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (\sigma_{i, k}^n + \sigma_{i, k-1}^n + \sigma_{l, k_0}^n) - \frac{b \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta t}{2h} \lambda_{i, k-\frac{1}{2}} (w_{i, k}^n - w_{i, k-1}^n + w_{l, k_0}^n) \quad (30)$$

$$\sigma_{z_{i,k-\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(\sigma_{z_{ik}}^n + \sigma_{z_{i,k-1}}^n + \sigma_{z_{ik}}^n) - \frac{b(k-\frac{1}{2})\Delta t}{2h}(\lambda + 2\mu)_{i,k-\frac{1}{2}}^n (w_{i,k}^n - w_{i,k-1}^n + w_{i,k}^n) \quad (32)$$

k대해서

$$u_{i,k}^{n+1} = u_{i,k}^n - \frac{b(k)\Delta t}{h} \frac{1}{\rho_{i,k}} \left(\tau_{i,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + \tau_{i,k_0+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \tau_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (33)$$

$$w_{i,k}^{n+1} = w_{i,k}^n - \frac{b(k)\Delta t}{h} \frac{1}{\rho_{i,k}} \left(\sigma_{z_{i,k+\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} + \sigma_{z_{i,k_0+\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} - \sigma_{z_{k-\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (34)$$

$$\sigma_{x_{ik}}^{n+1} = \sigma_{x_{ik}}^n - \frac{b(k)\Delta t}{h} \lambda_{i,k}^{n+\frac{1}{2}} \left(w_{i,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + w_{i,k_0+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - w_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (35)$$

$$\tau_{i,k}^{n+1} = \tau_{i,k}^n - \frac{b(k)\Delta t}{h} \lambda_{i,k}^{n+\frac{1}{2}} \left(u_{i,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i,k_0+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - u_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (36)$$

$$\sigma_{z_{ik}}^{n+1} = \sigma_{z_{ik}}^n - \frac{b(k)\Delta t}{h} (\lambda + \nu)_{i,k}^{n+\frac{1}{2}} \left(w_{i,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + w_{i,k_0+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - w_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (37)$$

이상과 같이 상승파 입력을 나타낼 수 있다.

3. 수치해석

제안한 방법에 의해 2차원 반무한 지반의 해석을 실시하였다. 사상된 영역에서의 모델을 그림 1, 2에 나타내었다. 그림 1은 일정한 지반모델이고, 그림 2는 표면근방 중앙에 기초를 가지고 있는 모델이다. 여기에서 IEND, KEND는 수평방향, 연직방향의 mesh수, IABSL, IABSR, KABSBS는 축소사상을 이행하는 mesh수이다. 모든 모델에 무차원 mesh 폭 $h=1$, $IABSL=IABSR=KABSBS=10$ 으로 가정 하였다. 비선형모델에는 Wen(Wen 1976)의 범용 비선형모델을 이용하는 것을 전제로 한다. 이번 수치해석에서 변형을 전단변형과 체적변형으로 나누고, 체

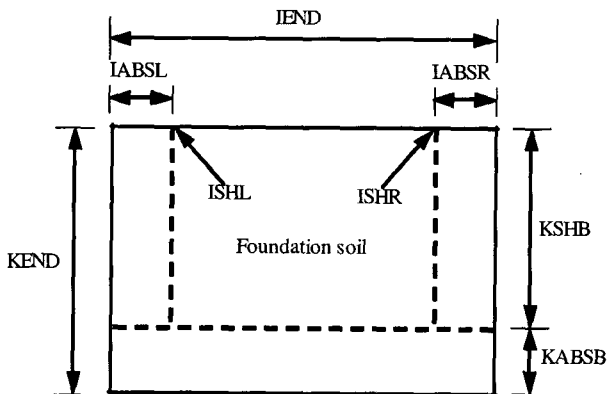


Fig. 1. Semi-infinite soil model for transformed infinite domain (IABSR, IABSL, and KABSBS are shrink mapping domains)

적탄성률을 일정하게 하고 전단응력과 전단변형간의 구성식으로만 비선형모델을 적용하는 것으로 한다.

요약하자면 체적탄성계수 $k_0 = (3\lambda_0 + 2\mu_0)/3$ 는 일정하고, γ 를 전단변형으로 α, β, n 를 정수로서 $\dot{\tau} = \mu_0\gamma - (\alpha\tau^n|\dot{\gamma}| + \beta|\tau^n\dot{\gamma}|)$, 즉, 순간정수는 $\mu = \mu_0 - \left(\alpha\tau^n \frac{|\dot{\gamma}|}{|\dot{\gamma}|} + \beta|\tau^n| \right)$, $\lambda = k_0 - 2/3\mu$ 로 주어지는 것으로 한다.

우선 선형문제에 적용함에 있어 시간증분 $\Delta t = 0.001$ 로 계산을 하였다. 지반의 무차원밀도, 무차원 선형라메(Lamb's)정수를 각각 $\rho = 1, \lambda_0 = 15000, \mu_0 = 10000$ 로 가정하였다.

Ricker Wavelet $a/2\sqrt{\pi} [(1-2a^2t^2)]e^{-a^2t^2}$ $a = 2\pi$, 탁월진동수2)를 일정지반표면중앙에 가했을 경우 지표의 면외 방향속도를 해석해(力武常次, 左脳良輔, 萩原幸男 1980)등과 비교한 결과를 그림 3, 4에 나타냈다. 그림

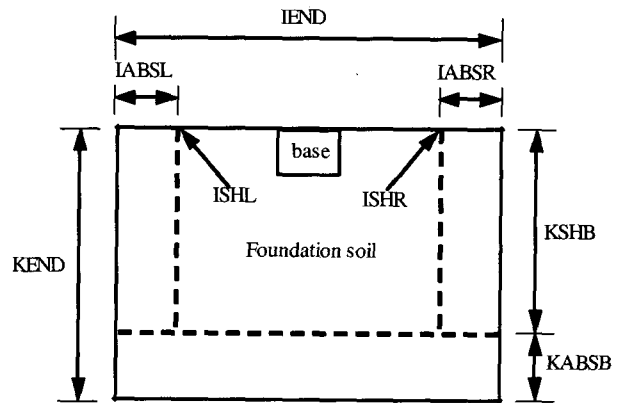


Fig. 2. Base and Semi-infinite soil model for transformed infinite domain (IABSR, IABSL, and KABSBS are shrink mapping domains)

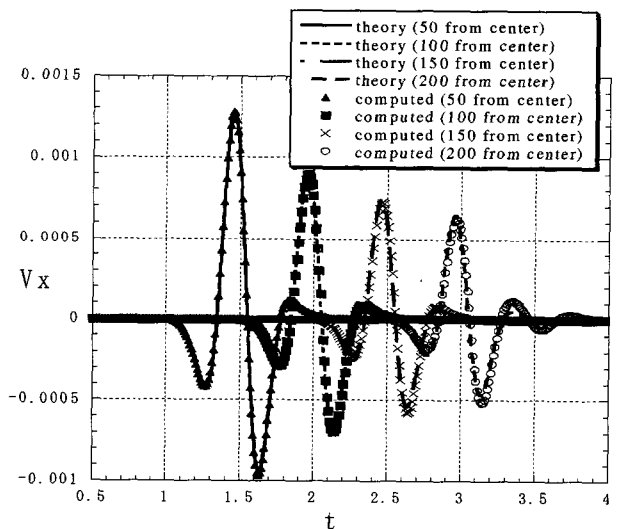


Fig. 3. Comparison of the result of proposed and Lamb's theory (horizontal velocity response, mesh 430*200)

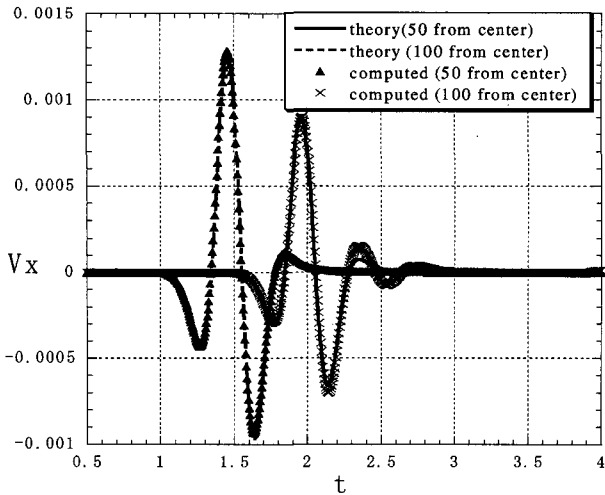


Fig. 4. Comparison of the result of proposed and Lamb's theory (horizontal velocity response, mesh 231*121)

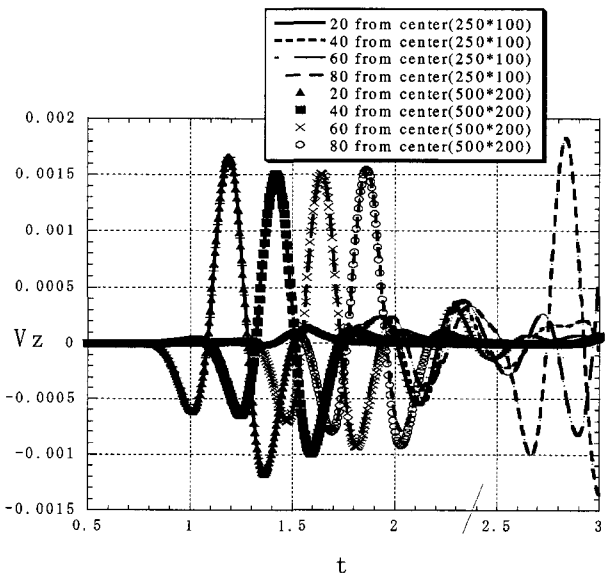


Fig. 5. Comparison of the result of FEM with different mesh (vertical velocity response)

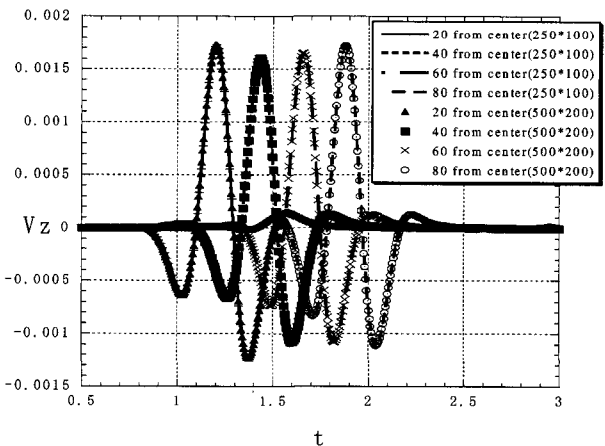


Fig. 6. Comparison of the proposed method with different mesh (vertical velocity response)

3은 IEND=430, KEND=200의 경우이고, 그림 4는 IEND=231, KEND=121의 경우이다. 그림 4에서는 이산화영역이 작아서 중앙으로부터 100mesh 밖에 계산하지 않았지만 해석해와 양호하게 일치하고 있다.

그림 5, 6은 일정지반표면에 연직방향으로 Ricker Wavelet를 가한 경우의 지표연직속도응답을, 각각 통상경계조건의 FEM법과 제안법으로 mesh 영역의 치수를 바꾸어(수평500, 연직250, 및 수평250, 연직125) 계산한 결과이다. 제안법에서는 mesh 크기에 의한 응답은 변함없지만 통상경계조건에서는 반사파의 존재에 의해 크기에 강한 영향을 받았다. 그림 7은 그림 2 모델로 mesh부분의 크기를 바꾼 경우(IEND=51, KEND=70, 및 IEND=231, KEND=121, IEND=431, KEND=221)주기1.0 수평속도 진폭1.0 정현 반파입사에 대한 면내모델의 수평응답이다. 입사는 표면에서 20mesh에 입사되는 것으로서 계산을 하였다. 기초부는 폭6, 깊이4mesh로서, 밀도강성과 함께 지반의 6배 선형구조로 가정하고 있다. 기초중앙 표면의 수평응답과 자유지반(변형된 무한원점)의 응답이 나타나지만 응답은 지반모델영역크기에 거의 무관계이다.

그림 8은 위와 조건과 같은 조건으로 지반에 비선형 모델을 이용한 경우 기초표면응답이다. 선형응답과 비교하면 진폭이 저하하고 응답시간도 늦지만, 선형모델과 같은 지반모델 크기에서의 의존성은 거의 없다. 그림 9는 2종류 mesh(IEND=231, KEND=121, 및 IEND=431, KEND=221)를 기초주변의 수평20mesh, 연직20mesh만 비선형모델을 채용하고 외부는 선형으로 한 경우 주기 1.0 정현파 입사에 대한 기초표면응답이다. mesh부분의 크기에 의한 영향은 없지만 자유지반응답이 비선형모델과 다를 뿐만 아니라 기초의 응답자체도 무한원까지 비선형모델을 사용한 경우와 다르게 나타났다. 극히 광범위한 지반에 비선형성이 발생한 경우에는 부분구조법(Substructure Method)의 적용에 있어서 주의가 요구될 수가 있다.

4. 결론

반무한 지반의 비선형해석에 대한 특수한 차분법 개발을 시도 하였다. 반무한 영역을 유한영역에 사상한 다음 차분법으로 근접시킨 방법이다. 선형계산의 결과는 해석해와 양호하게 일치했다. 또 간단한 모델에 의한 선형, 비선형해석도 소규모 mesh에 의한 응답결과와 대규

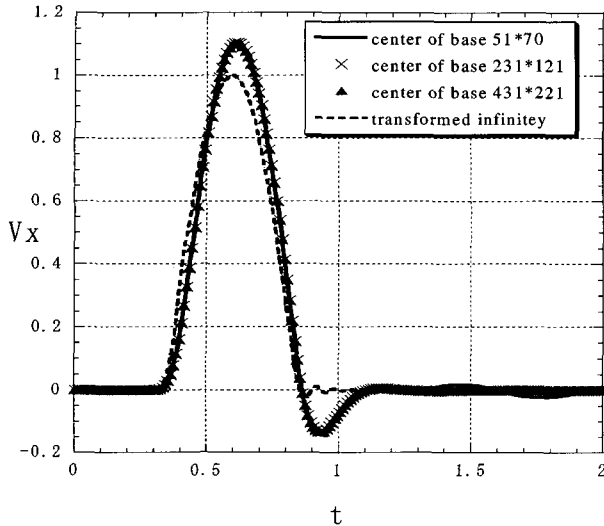


Fig. 7. Response of horizontal velocity to incident wave(linear model)

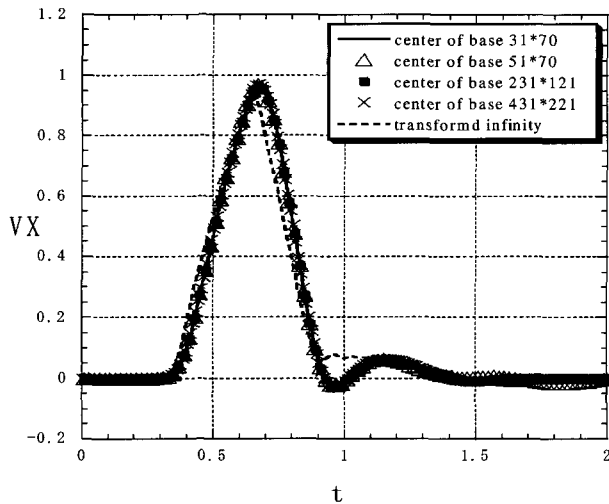


Fig. 8. Response of horizontal velocity to incident wave(nonlinear model)

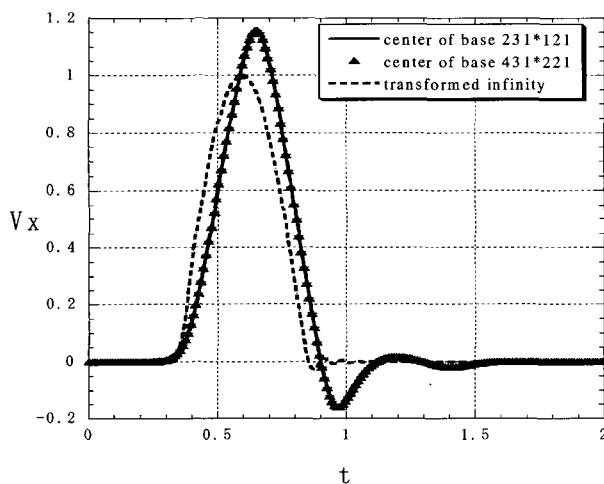


Fig. 9. Response of horizontal velocity to incident wave(linear and nonlinear model)

모 mesh에 의한 응답결과는 일치하고 제안법의 유효성을 나타내었다. 이후는 보다 일반적인 문제로의 적용을 시도할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 일본대학교 이공학부 학술프런티어(환경, 방재도시)에 관한 연구)에 의해 지원되었습니다.

참고 문헌

1. 塩尻弘雄 (1986), 水と岩盤との相互作用を考慮した構造物の地震応答解析法の研究, 電力中央研究所報告, pp.99-102.
2. 力武常次, 左脳良輔, 萩原幸男 (1980), 物理数学 II 地球科学を主体として(応用編), 学会誌刊行センター.
3. Berenger, J.P (1994), "A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves", *Journal of Computational Physics*, 114, pp.185-200.
4. Hastings, F.D., Schneider, J.D., and Brdschat, S.L. (1996), "Application of the perfectly mactched layer (PML) Absorbing boundary condition to elastic wave propagation", *Journal. Acoust. soc. Am.* 100(5), pp. 3061-3069.
5. Nakagawa, T.T. (1986), "The near-field difference solution for wave propagation problems in infinite media", *Studies in Mathematics and Its Applications*, Kinokuniya/North-Holland Publishing Co., 18, pp.561.
6. Shiojiri, H., Nakagawa, T.T. (1994), "Soil-Structure-Interaction:Numerical Analysis and Modelling", *The Chapter 6 Earthquake Response of Dams*, E&FN SPON, pp.202-230.
7. Wolf, J.P (1988), "oil-Structure-Interaction Analysis in time Domain", *Prentice-Hall*.
8. Wolf, J.P (1996), Chongmin Song, Finite-Element Modelling of Unbounded Media, John Wiley&Sons.
9. Watanabe, H., Cao, Z. (1998), "Upstream Boundary of Reservoir in Dynamic Analysis", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.124, No.4, pp.468-470.
10. Wen, Y.K. (1976), "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems", *Journal of The Engineering Mechanics Division*, pp. 249-263.

(접수일자 2004. 12. 13, 심사완료일 2006. 4. 19)