

동적 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 지하수로 포화된
가로등방성 층상지반의 3차원 전달경계
3-Dimensional Transmitting Boundary for Dynamic
Soil-Structure Interaction Analysis in Water-Saturated
Transversely Isotropic Stratum

이진호* 김재관**
Lee, Jin Ho Kim, Jae Kwan

ABSTRACT

If a structure is founded on the ground saturated with pore water, then the ground should be modeled as a saturated two-phase porous medium for accurate earthquake response analysis. In this study, a 3-dimensional transmitting boundary is developed for modeling of far field using $u-U$ formulation for water-saturated transversely isotropic layered stratum. The developed transmitting boundary is verified by comparing the dynamic stiffness of rigid square foundation on water-saturated isotropic layered stratum with the case of using equivalent single-phase medium model.

1. 서론

유연한 지반위에 놓인 구조물의 동적 거동은 지반-구조물 상호작용의 영향을 받을 수 있어서 지반-구조물 상호작용은 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어져 왔다. 특히 강체 기반암을 가진 층상 지반에서의 강체 기초의 거동은 많은 연구자들의 관심을 끌어들였다. 이러한 지반은 크기가 유한한 근역과 무한한 원역으로 구분하여 모델링하는데 이러한 지반의 원역을 효과적으로 모델링하기 위해 많은 연구자들에 의해 전달 경계가 개발되었다.

분명히 지반에는 일정 깊이부터 지하수가 존재하고 지하수 아래의 지반은 지하수로 포화된 2상 매질로 모델링되어야 한다. 또한 지반은 장시간에 걸쳐 형성된 층상 구조이고 중력의 영향을 받기 때문에 등방성이라기보다는 가로등방성 매질로 가정하는 것이 더욱 현실적이다. 이와 같은 지반의 특성을 반영할 수 있는 축대칭 전달 경계가 개발되었다[1]. 이 연구에서는 3차원 동적 지반-구조

* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

물 상호작용 해석에 적용할 수 있는 3차원 전달 경계를 개발하였고 개발된 전달 경계를 사용하여 강체 정사각형 기초의 동적 거동 해석에 적용하였다.

2. 포화된 가로등방성 매질의 운동 방정식

포화된 2상 매질의 지배 방정식은 다음과 같다[2].

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \rho \ddot{\mathbf{u}} + n \rho_w \ddot{\mathbf{u}}^{ws} \quad (1a)$$

$$\nabla p + n \mathbf{f} \dot{\mathbf{u}}^{ws} + \rho_w \ddot{\mathbf{u}} + \rho_w \ddot{\mathbf{u}}^{ws} = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{1}{Q} \dot{p} + (\boldsymbol{\alpha} \nabla) \cdot \dot{\mathbf{u}} + (n \nabla) \cdot \dot{\mathbf{u}}^{ws} = 0 \quad (1c)$$

u - U 정식화에 의해 식 (1)로부터 다음의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{D} : \nabla \mathbf{u}) + Q [(\boldsymbol{\alpha} - n \mathbf{I}) \nabla] [(\boldsymbol{\alpha} - n \mathbf{I}) \nabla] \cdot \mathbf{u} + Q [(\boldsymbol{\alpha} - n \mathbf{I}) \nabla] (n \nabla) \cdot \mathbf{u}^w \\ - (1-n) \rho_s \ddot{\mathbf{u}} - n^2 \mathbf{f} (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{u}}^w) = 0 \end{aligned} \quad (2a)$$

$$Q (n \nabla) [(\boldsymbol{\alpha} - n \mathbf{I}) \nabla] \cdot \mathbf{u} + Q (n \nabla) (n \nabla) \cdot \mathbf{u}^w - n \rho_w \ddot{\mathbf{u}}^w - n^2 \mathbf{f} (\dot{\mathbf{u}}^w - \dot{\mathbf{u}}) = 0 \quad (2b)$$

3. Rayleigh 파 모드와 Love 파 모드에 대한 고유치 문제

강체 기반암을 가지고 지하수로 포화된 층상 지반의 거동은 Rayleigh 파 고유모드와 Love 파 고유모드의 조합으로 표현할 수 있다. 식 (2)는 Rayleigh 파 모드와 Love 파 모드의 운동 방정식으로 비연계화할 수 있고 유한요소의 개념을 이용하여 이산화할 수 있다. 한편 각 층의 경계에서는 고체와 유체의 변위, 응력, 간극수압이 연속이어야 한다. 또한, 지표면은 자유 표면이므로 응력과 간극수압이 0이어야 하고, 층상 지반의 바닥은 강체 기반암에 고정되어 있으므로 고체의 변위와 유체의 flux가 0이어야 한다. 비연계화된 운동 방정식과 앞에서 말한 연속 조건 및 경계 조건에 의해 각각 다음과 같은 고유치 문제를 구성할 수 있다.

$$[k^2 \mathbf{A} + ik \mathbf{B} + \mathbf{G} - \omega^2 \mathbf{M} + i \omega \mathbf{C}] \boldsymbol{\Delta} = \mathbf{0} \quad (\text{Rayleigh 파 모드}) \quad (3a)$$

$$[k^2 \mathbf{A} + \mathbf{G} - \omega^2 \mathbf{M} + i \omega \mathbf{C}] \boldsymbol{\Delta} = \mathbf{0} \quad (\text{Love 파 모드}) \quad (3b)$$

여기서 각각의 운동 모드에 대한 행렬은 참고문헌 1에 주어져 있다. 식 (3)으로부터 각각의 운동 모드에 대한 고유치와 고유벡터를 얻을 수 있고 이를 조합하여 강체 기반암을 가지고 지하수로 포화된 층상 지반의 거동을 표현할 수 있다.

4. 3차원 전달 경계

앞에서 구한 Rayleigh 파 모드와 Love 파 모드의 고유치와 고유벡터를 사용하여 지하수로 포화된 가로등방성 층상 지반의 원역을 모델링할 수 있는 전달 경계를 구할 수 있다. 이 연구에서는 지반

의 어느 한 수평 방향(일반적으로 y 축 방향)으로 field가 주기적이라는 가정으로 도입하여 3차원 전달 경계를 개발하였다[3]. 즉, 지반의 깊이 방향에 대해서는 $+x$ 축 방향(또는 $-x$ 축 방향)으로만 에너지를 전달하는 Rayleigh 파 모드와 Love 파 모드의 중첩에 의하여 지반의 운동을 나타내고, y 축 방향으로는 주기적인 지반의 특성에 의하여 Fourier series 전개에 대칭 모드와 역대칭 모드의 중첩에 의하여 지반의 운동을 나타내는 것이다.

5. 검증

개발된 전달 경계의 검증을 위하여 지하수로 포화된 등방성 층상 지반에 놓인 그림 1의 강체 정사각형 기초의 동적 강성을 계산하여 지반을 2상 매질이 아닌 등가 단상 매질로 모델링한 경우와 비교하였다. 지반의 투수계수가 아주 작고 흙 입자 자체의 압축성을 무시하면 지하수로 포화된 2상 매질 지반의 거동은 등가 단상 매질 지반으로 근사화할 수 있기 때문이다[1]. 강체 정사각형 기초 동적 강성을 정규화하고, 정적 강성을 표 1에 비교하였고 정규화된 강성 계수와 감쇠 계수를 정규화된 주파수에 대해 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 개발된 전달 경계를 사용한 결과는 기존의 등가 단상 매질을 사용한 경우와 아주 잘 일치하고 있고 이 연구에서 개발된 전달 경계 및 해석 기법이 정확함을 알 수 있다.

하지만 이와 같은 등가 단상 매질 모델은 언제나 사용할 수 있는 것은 아니다. 투수계수를 무시할 수 없는 사질토와 같은 지반이나 입자의 압축성을 무시할 수 없는 rock으로 구성된 지반의 경우에는 2상 매질로 모델링하여야 정확한 거동을 예측할 수 있다.

6. 결론

동적 지반-구조물 상호작용 해석에 적용할 수 있는 지하수로 포화된 가로등방성 층상 지반에 대한 3차원 전달 경계를 $u-U$ 정식화에 의해 개발하였고 그 정확성을 검증하였다. 개발된 전달 경계를 사용하여 지하수로 포화된 지반에 구조물이 위치한 경우 지하수의 영향을 고려한 3차원 지반-구조물 상호작용 해석을 효과적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

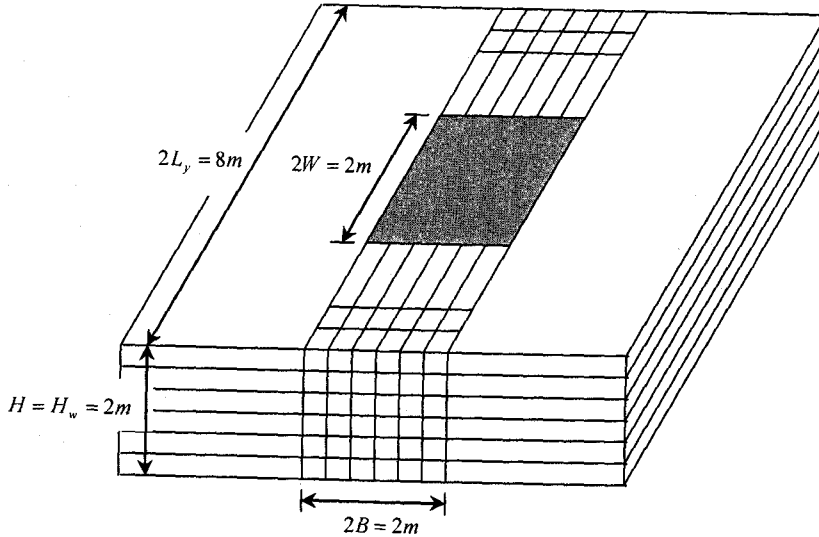
이 연구는 전력산업연구개발사업의 지원(과제명: 포화된 가로등방성 층상지반에서의 동적 지반-구조물 상호작용해석을 위한 3차원 초유한요소 및 스트립 초유한요소 개발)에 의해 이루어진 것이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. (주)대우건설, "포화된 가로등방성 층상지반에 설치된 LNG 저장탱크의 지진응답해석을 위한 축대칭 초유한요소의 개발", 서울대학교 지진공학연구센터, 2005.
2. Zienkiewicz, O. C. and Shiomi, T., "Dynamic Behavior of Saturated Porous Media: the

Generalized Biot Formulation and Its Numerical Solution", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8, 1984, pp. 71-96.

- 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 Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, 2000, pp. 1527-1546.



For soil

$$\rho_s = 2640 \text{ kg/m}^3$$

$$c_s = 152 \text{ m/sec}$$

$$\nu_s = 0.333$$

$$\beta_s = 0.05$$

$$n = 0.3$$

$$k_1 = k_3 = 1.02 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ sec/kg}$$

$$\alpha = 0.999$$

For pore water

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1439 \text{ m/sec}$$

For equivalent single-phase media

$$\rho_s = 2148 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1824 \text{ m/sec}$$

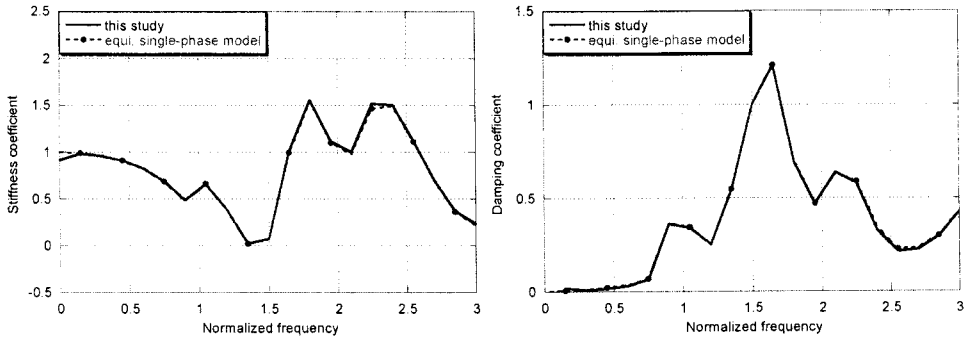
$$c_s = 152 \text{ m/sec}$$

$$\nu_s = 0.4957$$

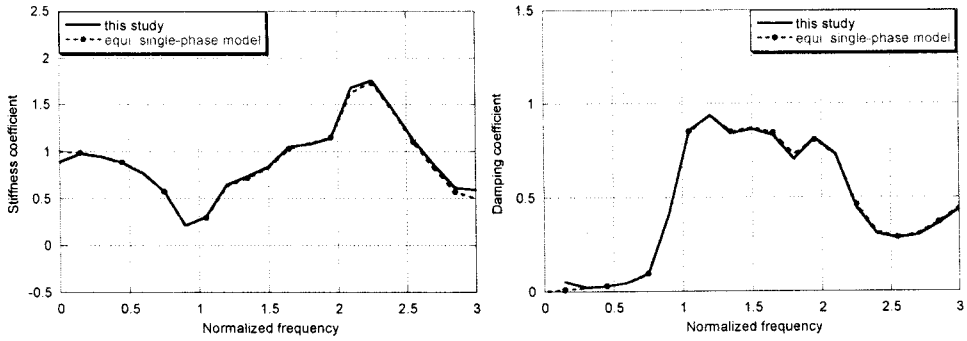
그림 1 강체 정사각형 기초

표 1 정적 강성

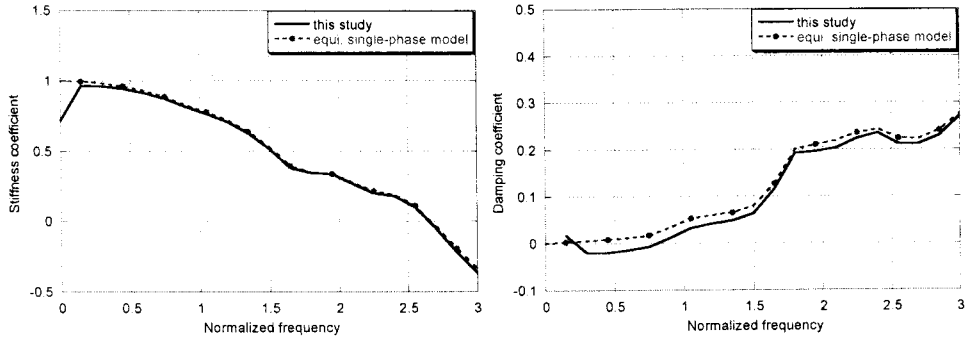
	K_{xx}^0 / GB	K_{yy}^0 / GB	K_{zz}^0 / GB	$K_{\alpha\alpha}^0 / GB^3$	$K_{\theta_y\theta_y}^0 / GB^3$	$K_{\alpha\alpha}^0 / GB^3$
2상 매질 모델	9.255	8.941	23.865	12.569	11.991	11.058
등가 단상 매질 모델	10.122	10.051	33.151	18.005	17.516	12.685



(a) Horizontal motion (x direction)

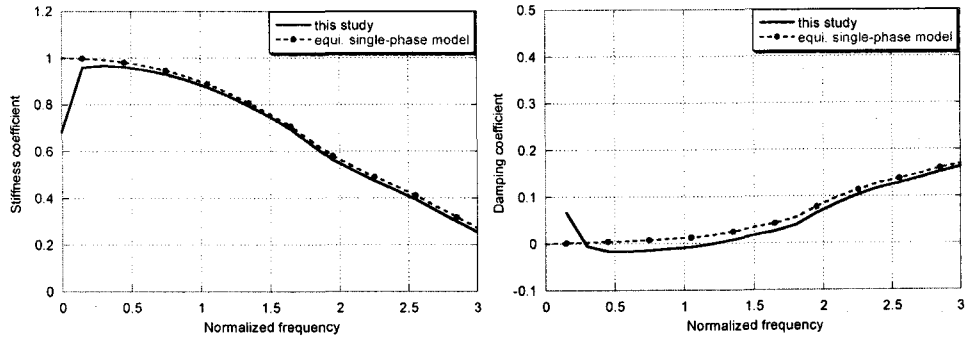


(b) Horizontal motion (y direction)

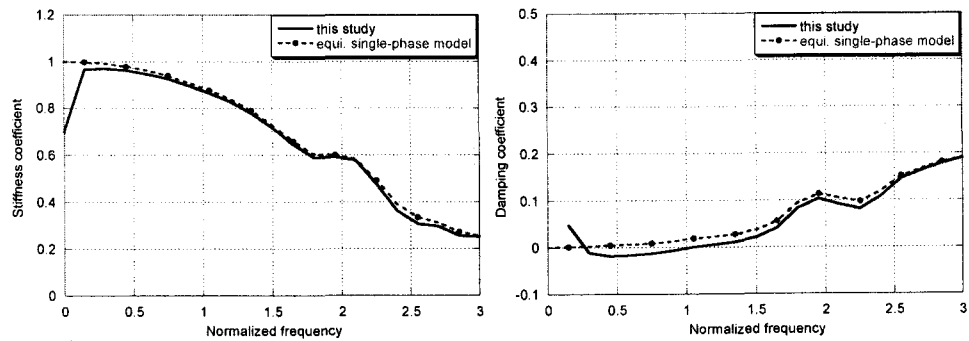


(c) Vertical motion

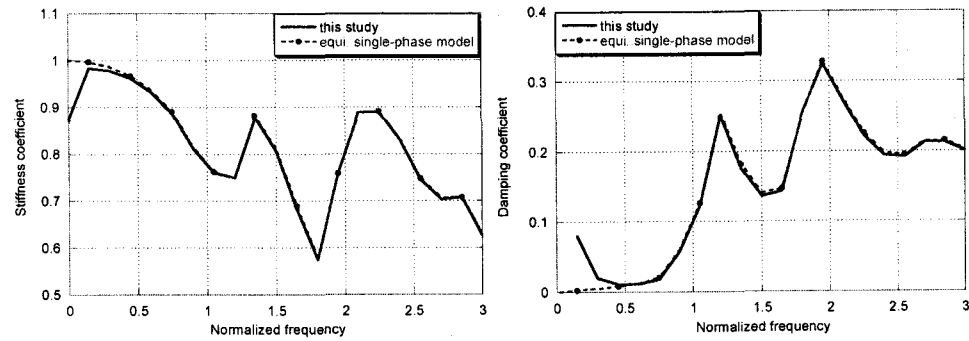
그림 2 강체 정사각형 기초의 동적 강성



(d) Rocking motion (x direction)



(e) Rocking motion (y direction)



(f) Torsional motion

그림 2 강제 정사각형 기초의 동적 강성 (계속)