

지하수로 포화된 가로등방성 층상지반에 설치된
강체 원형 기초의 동적 거동

Dynamic Behavior of Rigid Circular Foundation in
Water-Saturated Transversely Isotropic Layered Stratum

이진호* 박정준** 김재관*** 진병무****
Lee, Jin Ho Park, Jung Jun Kim, Jae Kwan Jin, Byeong Moo

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, an axisymmetric transmitting boundary hyperelement is developed for modeling of far field of the ground using $u-U$ formulation for water-saturated transversely isotropic layered stratum. The developed hyperelement is verified by comparing the dynamic stiffness of rigid circular 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 전달 경계가 개발되었다.

분명히 지반에는 일정 깊이부터 지하수가 존재하고 지하수 아래의 지반은 지하수로 포화된 2상 매질로 모델링되어야 한다. 이러한 지반의 특성을 고려할 수 있는 전달 경계가 개발되었지만 그 적용에 한계가 있다. 또한 지반은 장시간에 걸쳐 형성된 층상 구조이고 중력의 영향을 받기 때문에 등방성이라기보다는 가로등방성 매질로 가정하는 것이 더욱 현실적이다. 이 연구에서는 이와

* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수
**** 정회원 · (주)대우건설 기술연구소, 선임연구원

같이 지하수로 포화된 가로등방성 층상 지반의 원역을 모델링할 수 있는 축대칭 전달 경계를 $u-U$ 정식화에 의해 개발하고 이를 강체 원형 기초의 동적 거동 해석에 적용하였다. 개발된 전달 경계의 정확성을 검증하기 위해 지반을 기존의 등가 단상 매질로 가정하여 해석한 경우와 비교하였다.

2. 포화된 가로등방성 매질의 운동 방정식

포화된 2상 매질의 지배 방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

3. Rayleigh 파 모드와 Love 파 모드에 대한 고유치 문제

식 (2)는 Rayleigh 파 모드와 Love 파 모드의 운동 방정식으로 비연계화할 수 있고 유한요소의 개념을 이용하여 고유치 문제를 얻을 수 있다. 강체 기반암을 가지고 지하수로 포화된 층상 지반을 생각해 보자. 각 층의 경계에서는 solid와 fluid의 변위, 응력, 간극수압이 연속이어야 한다. 지표면은 자유 표면이므로 응력과 간극수압이 0이어야 하고, 층상 지반의 바닥은 강체 기반암에 고정되어 있으므로 solid의 변위와 fluid의 flux가 0이어야 한다. 비연계화된 운동 방정식과 앞에서 말한 연속 조건 및 경계 조건은 각각 다음과 같은 고유치 문제를 구성한다.

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

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

여기서 각각의 운동 모드에 대한 행렬은 참고문헌 1에 주어져 있다. 식 (3)으로부터 각각의 운동 모드에 대한 고유치와 고유벡터를 얻을 수 있다.

4. 축대칭 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 강체

원형 기초의 동적 해석에 적용할 수 있는 축대칭 전달 경계를 개발하였다. 이를 위해 축대칭 좌표계에서의 solid와 fluid의 변위를 비연계화된 Rayleigh 파 모드와 Love 파 모드의 운동 방정식을 만족시키는 운동 모드를 사용하여 변수 분리법에 의하여 표현한다. 그러므로 식 (3)의 고유치와 고유벡터를 사용하여 축대칭 좌표계에서 공간적으로 반이산화된 진동모드와 진동수를 구할 수 있다. 각각의 진동모드로부터 $r = r_0$ 에 위치한 원통형 경계에서의 등가 절점력을 구할 수 있고, 모드 조합에 의해 Fourier number m 에 대한 축대칭 전달 경계를 구할 수 있다.

$$\mathbf{R} = r_0 \left\{ \mathbf{A}\Psi\mathbf{K}^2 + (\mathbf{D} - \mathbf{E} + m\mathbf{N})\Phi\mathbf{K} - \left[\frac{m(m+1)}{2} \mathbf{L} + m\mathbf{Q} \right] \Psi \right\} \mathbf{W}^{-1} \quad (4)$$

여기서 각각의 행렬은 참고문헌 1에 주어져 있다.

5. 검증

개발된 전달 경계의 검증을 위하여 지하수로 포화된 등방성 층상 지반에 놓인 그림 1의 강체 원형 기초의 동적 강성을 계산하여 지반을 2상 매질이 아닌 등가 단상 매질로 모델링한 경우와 비교하였다. 강체 원형 기초 동적 강성을 정규화하고 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.

6. 결론

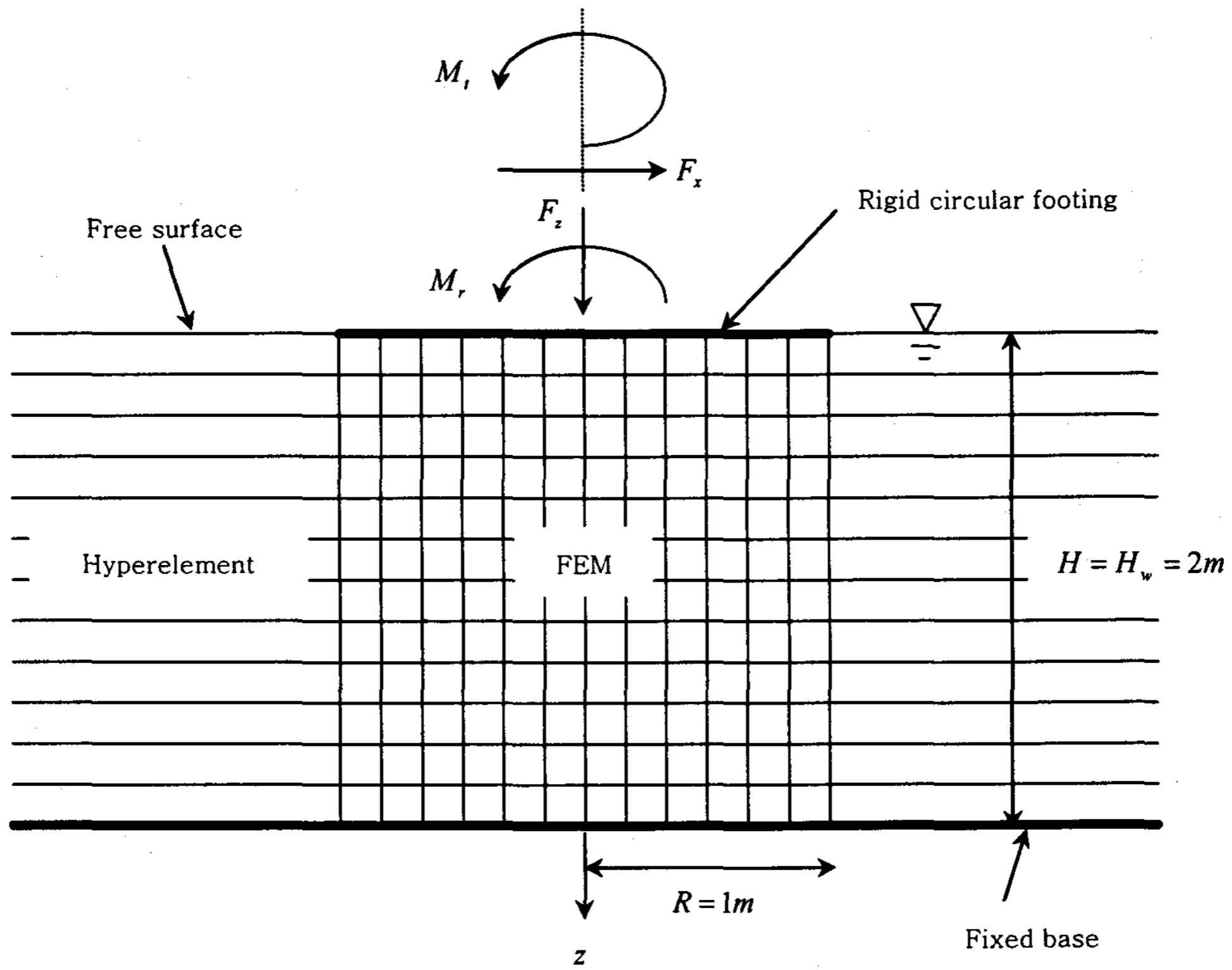
지하수로 포화된 가로등방성 층상 지반에 위치한 강체 원형 기초의 동적 해석을 위한 축대칭 전달 경계를 $u-U$ 정식화에 의해 개발하였고 그 정확성을 검증하였다. 개발된 전달 경계를 사용하여 지하수로 포화된 지반에 구조물이 위치한 경우 지하수의 영향을 고려한 지반-구조물 상호작용 해석을 효과적으로 적용할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 (주)대우건설의 지원(과제명: 포화된 가로등방성 층상지반에 설치된 LNG 저장탱크의 지진응답해석을 위한 축대칭 초유한요소의 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.



For soil

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

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

$$\nu_s = 0.333$$

$$\beta_s = 0.05$$

$$n = 0.03$$

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

$$\alpha = 0.999$$

For pore water

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

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

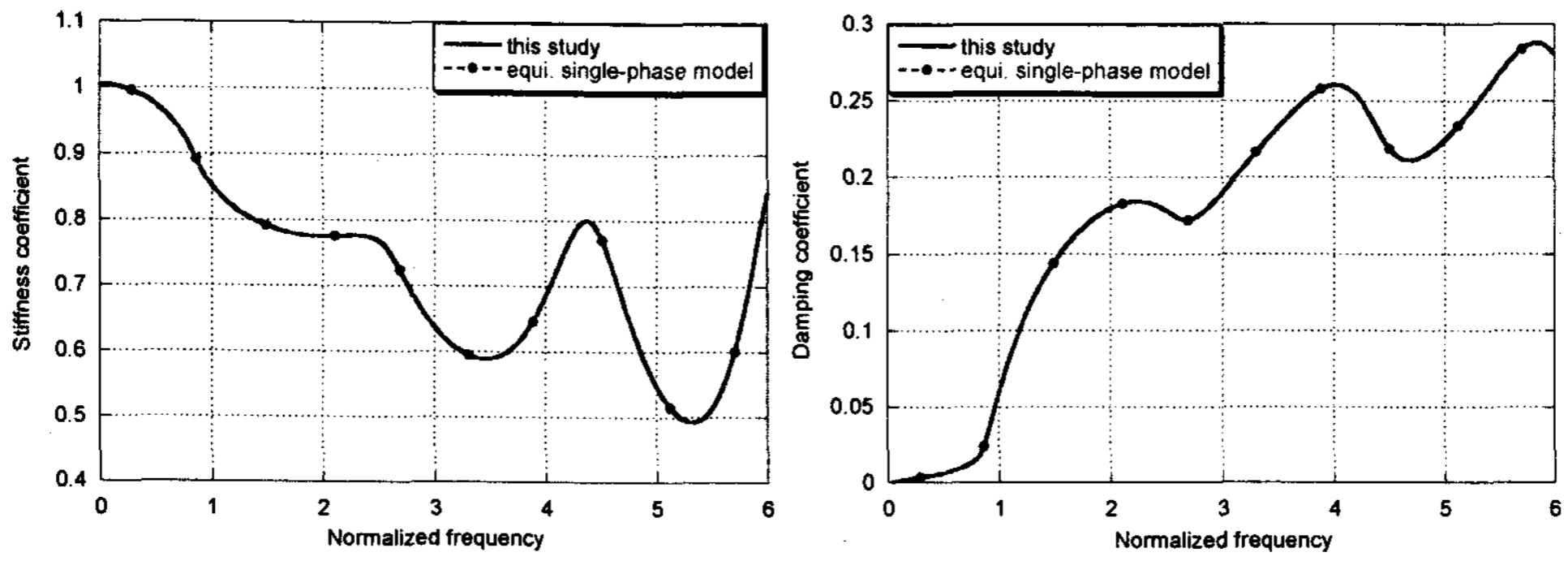
For equivalent single-phase media

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

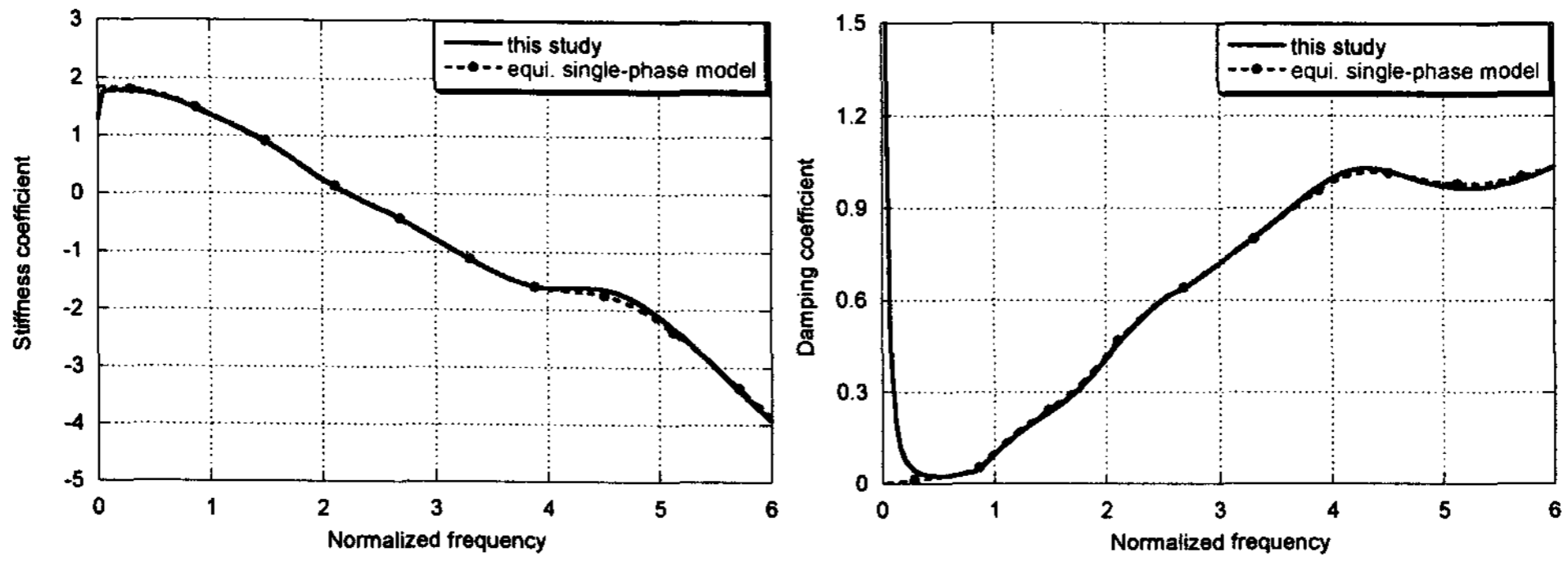
$$c_s = 152 \text{ m/sec}$$

$$\nu_s = 0.4957$$

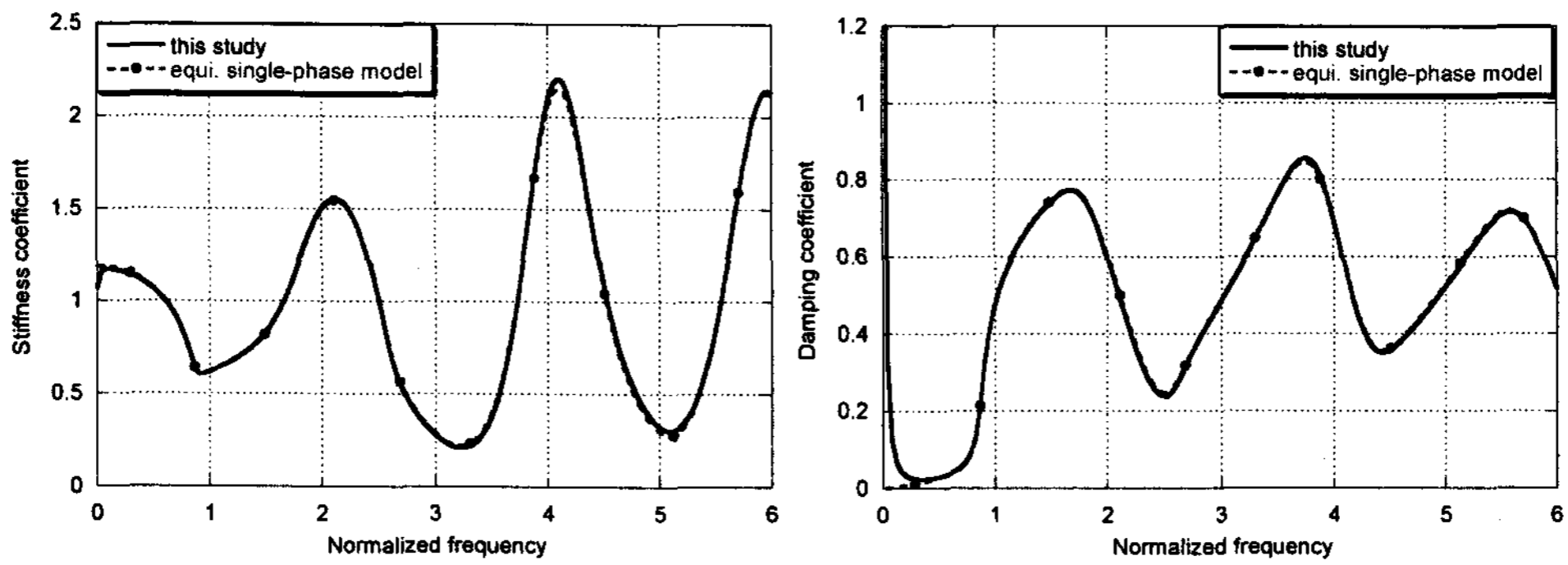
그림 1 강체 원형 기초



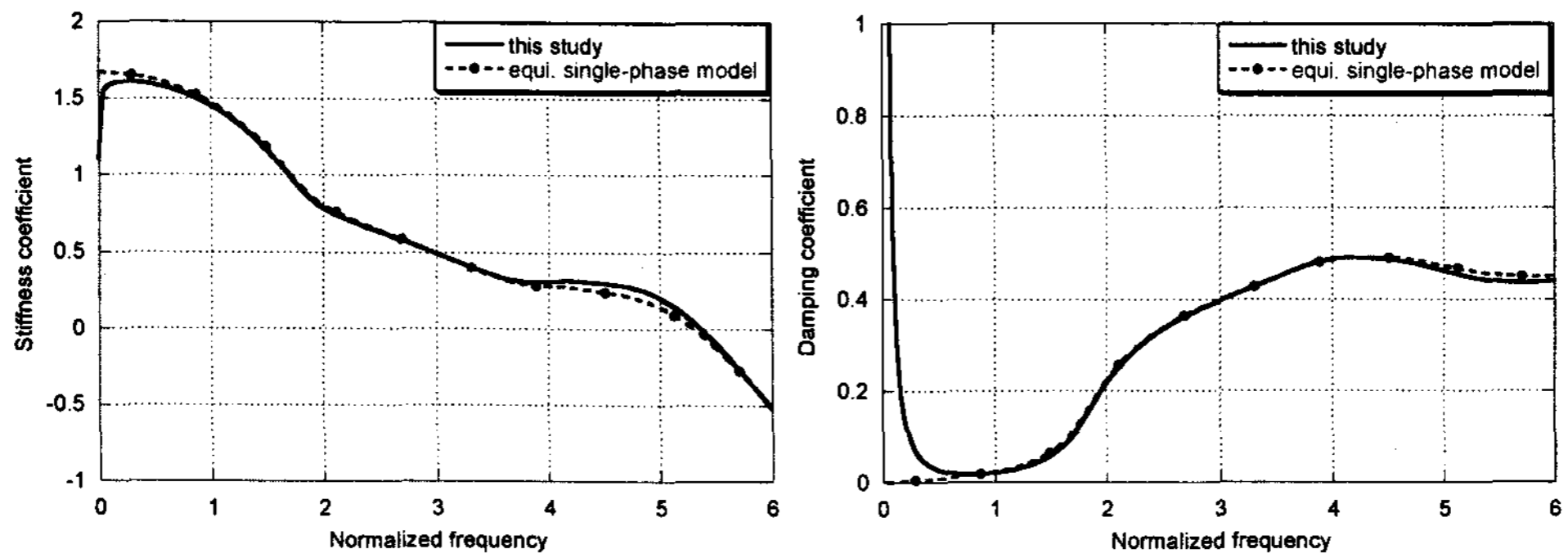
(a) Torsional motion



(b) Vertical motion



(c) Horizontal motion



(d) Rocking motion

그림 2 강체 원형 기초의 동적 강성