

동적 하중을 받는 말뚝기초의 지반반력에 관한 연구

A Study on Soil Reaction of Pile Foundation
Subjected to Dynamic Loading

김 영 수^{*1}
Kim, Young-Su
이 송^{*2}
Lee, Song
백 영 식^{*3}
Paik, Young-Shik

Abstract

To investigate the effects of soil properties of the soft zone around a pile subjected to the horizontal harmonic vibration, the parametric study is performed. The determination of the soil reaction or stiffness of the Winkler springs representing the soil around a pile is performed by dividing the soil profile into a number of homogeneous obtained from this study are as follows:

- 1) The real and imaginary parts of the stiffness show clear variations for the different shear modulus ratios, poisson's ratios, and distance ratios to outer boundary as the dimensionless frequency increases. The differences are more pronounced for the imaginary part of the stiffness.
- 2) The stiffness of soil shows clear decrease. The real parts of the stiffness show larger as the frequency increases. On the other hand, the imaginary parts of the stiffness show smaller.

요 지

수평방향의 조화진동을 받는 말뚝주변의 지반특성에 관한 각종 계수들의 효과를 연구하였다. 그리고 비선형 해석을 위하여 말뚝주변의 흙을 성질이 같은 여러개의 동심고리 모양으로 나누어 지반반력 또는 흙의 강성을 계산하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강성의 실수와 허수부분은 무차원 주파수가 증가함에 따라 전단 계수비, 포아송비, 그리고 외부영역까지의 거리의 비에 대하여 큰 변화를 나타냈고 그 차이는 강성의 허수부분에 더 현저하게

*1 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과, 부교수
*2 정회원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과, 조교수
*3 정회원, 경희대학교 공과대학 토목공학과, 교수

나타났다.

2) 흙의 강성의 외부영역까지의 거리가 증가할수록 현저하게 감소하였는데 강성의 실수부분은 주파수가 작을수록 크게 나타났다. 반면에 허수부분은 작게 나타났다.

1. 서 론

지진, 바람, 기계작동 그리고 다른 동적하중의 효과에 대한 구조적 응답(structural response)은 자반과 구조물의 상호작용(soil-structural interaction)에 의하여 영향을 받는 것으로 나타났다.^{1, 3, 7, 11)}

지반과 구조물의 상호작용에 대한 동적해석을 고려한 지금까지의 많은 연구들^{2, 4, 9, 10, 12)}은 말뚝기초와 흙 사이에 결합(bond)이 완전하고 흙의 거동은 탄성 또는 점탄성 법칙에 의하여 지배를 받는다고 가정하였으나 말뚝기초와 흙사이의 결합은 완전하지 않고 기초에 인접한 지역의 흙일수록 변형이 크고 비선형 거동을 하게 된다.^{1, 8)}

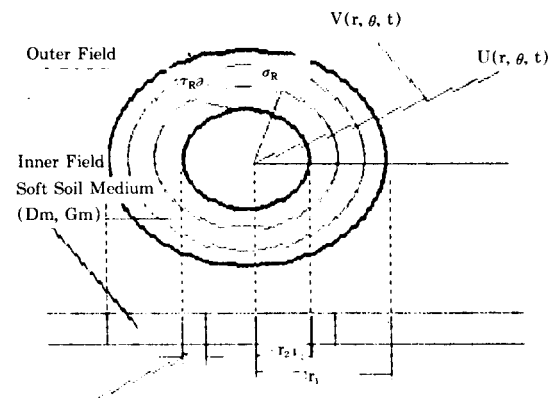
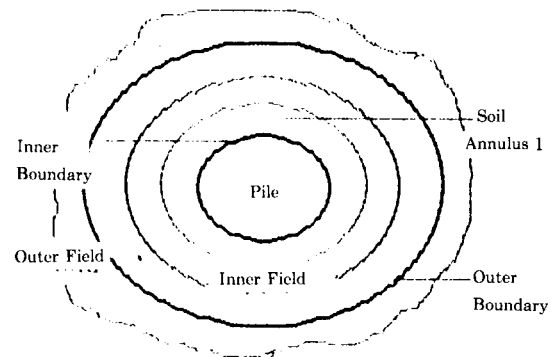
Novak은 Slippage와 비선형 거동에 대한 정확한 해석은 매우 어렵기 때문에 근사적인 이론을 사용하였다. 그리고 Slippage와 비선형 효과를 개략적으로 설명하기 위하여 지반속에 묻힌 원주체가 서로 다른 내부의 외부영역에 의해 둘러싸였다고 가정하였다.¹³⁾

본 연구에서는 Novak이 제시한 이론을 바탕으로 수평방향의 조화운동(harmonic motion)에 대하여 지반의 동적 거동에 영향을 미치는 여러가지 계수들에 대한 연구와 내부의 영역을 방사형의 방향에 대한 흙의 동적특성의 변화를 설명하기 위하여 즉 비선형 해석을 위하여 말뚝 주위의 흙을 성질이 같은 여러 개의 동심고리모양으로 나누어 Seed와 Idriss가 점성토와 사질토에 대하여 제안한 감쇠비-변형률(damping ratio-strain) 곡선, 동적 전단 계수-변형(dynamic shear modulus-strain)곡선⁶⁾을 이용하여 지반의 동역학적 특성치를 산출하여 해석을 하였다.

2. 동적 거동해석의 기본 이론

2.1 지반의 강성값(soil stiffness)

말뚝주변의 흙에 대한 강성값의 결정은 자반의 그림 1과 같이 무한히 펼쳐있는 많은 균질한 흙의 절편으로 나누어 다음과 같은 가정하에서 수행된다.



Displacement $U_m(r_1, \theta=0, t)$

그림 1 Notation and displacements of soil annulus mode 1 inner field

(1) 각 고리의 흙의 성질은 균질하고 등방이며 점탄성이다.

(2) 말뚝의 단면은 강성(rigid)이고 질량이 없는 원반(disk)이다.

(3) 원반과 흙의 접촉면에서 slippage와 분리되는 효과는 원반둘레의 흙고리에 대한 감소된 전단계수와 증가된 감쇠비에 의하여 나타났다.

(4) 진동은 조화운동이다.

이와 같은 가정으로 운동은 점탄성 영역의 방정식에 의하여 지배받는다.

Hysteretic 재료감쇠는 Lamé's 상수 λ, G 그리고 허수성분 λ', G' 로 설명될 수 있다. 그러므로 점탄성 영역의 운동 방정식은 원주 좌표축으로 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} & [(\lambda+2G)+i(\lambda'+2G')] \frac{\partial \Delta}{\partial r} - \\ & \frac{2(G+iG')}{r} \frac{\partial \omega z}{\partial \theta} + 2(G+iG') \frac{\partial \omega \theta}{\partial z} \\ & = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ & [(\lambda+2G)+i(\lambda'+2G')] \frac{\partial \Delta}{r \partial \theta} - 2(G+iG') \\ & \frac{\partial \omega r}{\partial z} + 2(G+iG') \frac{\partial \omega z}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \\ & [(\lambda+2G)+i(\lambda'+2G')] \frac{\partial \Delta}{\partial z} - \frac{2(G+iG')}{r} \\ & \frac{\partial}{\partial r} (r\omega) + \frac{2(G+iG')}{r} \frac{\partial \omega r}{\partial \theta} \\ & = \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} (1)$$

여기서 상대 체적 변화

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\partial \omega}{\partial z} \quad (2)$$

그리고 Rotational Vector의 성분은

$$\left. \begin{aligned} \omega r &= 1/2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ \omega \theta &= 1/2 \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial r} \right) \\ \omega z &= 1/2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rV)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \right\} (3)$$

마지막으로 U, V, W는 점(r, θ , z)에서 운동의 성분이고 t는 시간, ρ 는 밀도, i는 $\sqrt{-1}$ 이다.

Rotational Vector의 성분은 다음 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \omega r}{\partial r} + \frac{\omega r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega \theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \omega z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

경계면으로부터 파의 굴절과 반사에 의하여 생기는 어려움을 피하기 위하여 내부는 질량이 없는 것으로 고려한다.(즉 $\rho=0$)

이 가정은 경계가 실제로 가상적이기 때문에 바람직하다. 식 (1)을 내부와 외부에 적용하므로써 각각의 고리의 강성값과 외부영역의 강성값이 얻어진다. 이것들을 병렬로 연결하여 지반의 강성값을 구한다.

2. 수평 진동에 대한 지반의 강성값

수평의 경우에 내부와 외부영역 사이의 경계면은 원이라는 가정하에 근사해가 공식으로 나타내진다.

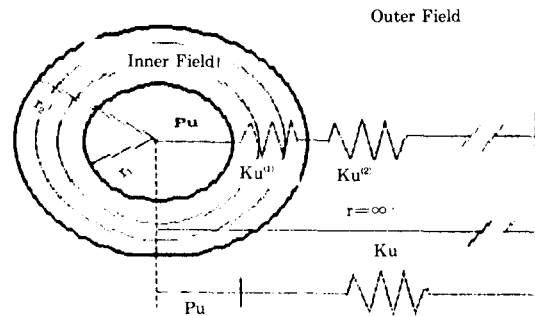


그림 2 Notation for calculation of horizontal stiffness

가. 내부영역

평면변형인 경우에 변위, U, V는 두 Potential 함수 ψ_1, ψ_2 과 실수 G로서 (5)식과 같이 표현될 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} 2GU &= 4(1-\nu)\psi_1 - \frac{\partial}{\partial r} (r\psi_1) \\ 2GU &= 4(1-\nu)\psi_2 - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (r\psi_1) \end{aligned} \right\} (5)$$

Potential 함수는 다음과 같은 적합조건 식 (6), 식 (8)을 만족해야 한다.

$$\Delta^2 = (\psi_1, \psi_1) = 0 \quad (6)$$

여기서

$$\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \theta^2} - \frac{\psi_1}{r^2} \frac{\partial \psi_2}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial \theta^2} - \frac{\psi_2}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

다음과 같이 가정하여

$$\psi_1(r, \theta) = \psi_1(r) \cos \theta$$

$$\psi_2(r, \theta) = \psi_2(r) \sin \theta \quad (9)$$

식 (8)에서 다음과 같은 해 식 (10)을 얻는다.

$$\psi_1(r) = A_1 \ln(r) + A_2 + A_3 r^2 + A_4 r^{-2}$$

$$\psi^2(r) = -A_1 \ln(r) + A_2 + A_3 r^2 + A_4 r^{-2} \quad (10)$$

여기서, A_1 는 적분상수이고 식 (10)에서 r 대신 r/r_1 을 대입하면 식 (11)이다.

$$\psi_1(r, \theta) = (A_1 \ln(r/r_1) + A_2 + A_3 (r/r_1)^2 + A_4 (r_1/r)^2) \cos \theta$$

$$\psi_2(r, \theta) = (-A_1 \ln(r/r_1) - A_2 + A_3 (r/r_1)^2 + A_4 (r_1/r)^2) \sin \theta \quad (11)$$

식 (11)을 식 (5)에 대입하면 식 (12)와 같다.

$$2GU = [A_1((3-4\nu)\ln(r/r_1) - 1) + (3-4\nu)A_2 + (1-4\nu)A_3(r/r_1)^2 + (5-4\nu)A_4(r_1/r)^2] \cos \theta \quad (12)$$

$$2GV = [-A_1(3-4\nu)\ln(r/r_1) - 1 + (3-4\nu)A_2 + (5-4\nu)A_3(r/r_1)^2 + (5-4\nu)A_4(r_1/r)^2] \sin \theta$$

수평강성값을 구하는데 적절한 경계조건은 다음과 같다.

$$U(r=r_1, \theta=0) = 0.01,$$

$$V(r=r_1, \theta=\pi/2) = -0.01$$

그리고

$$U(r=r_1, \theta), V(r=r_1, \theta) = 0 \quad (13)$$

이 경계조건을 적용하여 상수 A_1, A_2, A_3, A_4 를 구하면 다음과 같은 식 (4)이다.

$$A_1 = \frac{2G[2 + (3-4\nu)^2 \ln(r_2/R)]}{(3-4\nu)\ln(r_2/R)[1 + (3-4\nu)^2 \ln(r_2/R)]}$$

$$A_2 = G \frac{[3-4\nu)(\frac{r_2^2}{R^2} - 1) - (5-4\nu)(\frac{R^2}{r_2^2} - 1)]}{(3-4\nu)(\frac{r_2^2}{R^2} - 1)(\frac{R^2}{r_2^2} - 1)[1 + (3-4\nu)^2 \ln(r_2/R)] + \frac{2G}{3-4\nu}}$$

$$A_3 = \frac{G}{(\frac{R^2}{r_2^2} - 1)[1 + (3-4\nu)^2 \ln(r_2/R)]}$$

$$A_4 = \frac{(3-4\nu)G}{(5-4\nu)(\frac{R^2}{r_2^2} - 1)[1 + (3-4\nu)^2 \ln(r_2/R)]} \quad (14)$$

응력과 변형의 구성방정식은 원주 좌표축식 (15)와 같이 표현된다.

$$\sigma_{rr} = 2G(\epsilon_{rr} + \frac{\nu \epsilon}{1-2\nu})$$

$$\tau_{r\theta} = 2G \epsilon_{r\theta} \quad (15)$$

여기서

$$\epsilon_{rr} = \frac{\partial U}{\partial r}$$

$$\epsilon_{r\theta} = 1/2(\frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta})$$

$$\epsilon = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad (16)$$

내부영역 즉 i 번째 흠고리의 중앙부의 변형률 γ_1 는 반경이 r_1 (말뚝 중심에서 i 번째 흠고리 중앙부까지의 거리)되는 지점의 수평변위 U_1 의 식 (12)에서 구한다.

각각의 흠고리의 중앙부에서의 변형률을 구하여 감쇠비-변형율, 동적탄성계수-변형률곡선으로부터 전단계수와 감쇠비를 구하여 반경이 r_1 인 원주에 작용하는 지반 반력 Pu 는 식 (15)에서 응력 σ_r 과 $\tau_{r\theta}$ 를 이용하여 식 (17)과 같이 구한다.

$$Pu = - \int_0^{2\pi} (\sigma_r(r_1) \cos \theta - \tau_{r\theta}(r_1) \sin \theta) r_1 d\theta$$

$$= -4\pi(1-\nu)A_1 \quad (17)$$

i 번째 흠고리의 강성값은 다음과 같다.

$$K_{ui}^{(0)} = \frac{Pu}{U_1} \quad (18)$$

나. 외부영역

수평진동에서 수직변위 $W=0$ 그리고 흠 매체의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[(\lambda + 2G) + i(\chi + 2G')] \frac{\partial}{\partial r} \Delta(t) - 2(G + iG')$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \omega_z(t)$$

$$= \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} U(t)$$

$$[(\lambda + 2G) + i(\chi + 2G')] \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}$$

$$\begin{aligned} \Delta(t) - 2(G + iG') \frac{\partial}{\partial r} \omega z(t) \\ = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} V(t) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta(t) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rU(t)] + \frac{1}{r} \frac{\partial V(t)}{\partial \theta} \\ \omega z(t) &= \frac{1}{2r} \left(\frac{\partial}{\partial r} [rV(t)] - \frac{1}{r} \frac{\partial U(t)}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

그리고 $U(t)$ 와 $V(t)$ 는 ω 의 조화 운동이고
 $U(t) = Ue^{i\omega t}$ $V(t) = Ve^{i\omega t}$ (21)

식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} [(\lambda + 2G) + (1 + iD_1) \frac{\partial \Delta}{\partial r} - 2G(1 + iD_s)] \frac{1}{r} \\ \frac{\partial \omega z}{\partial \theta} = -\rho \omega^2 U \\ [(\lambda + 2G) + (1 + iD_1) \frac{\partial \Delta}{\partial \theta} - 2G(1 + iD_s)] \frac{1}{r} \\ \frac{\partial \omega z}{\partial r} = -\rho \omega^2 V \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 U, V, Δ 는 Amplitudes 그리고 $D_1 = \lambda + 2G' / (\lambda + 2G)$, $D_s = G' / G$, Potential 함수 Φ 와 ψ 를 다음과 같이 정의하도록 한다.

$$\begin{aligned} U &= \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \\ V &= \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 Φ 와 ψ 는 제각기 길이방향과 전단파에 관계된다.

Potential 함수를가지고 식 (22)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V^2 \Phi - \Phi - q^2 \Phi &= 0 \\ V^2 \psi - \psi - s^2 \psi &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

여기서

$$V^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} q &= \frac{\omega i}{V_{iv} \sqrt{(1 + iD_1)}} \\ V_{iv} &= \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \end{aligned} \quad (26)$$

여기서

$$S = \frac{\omega i}{V_{sv} \sqrt{(1 + iD_1)}}$$

Φ 와 ψ 에 대한 해는 다음과 같은 형식으로 구해질 수 있다.

$$\Phi = R_1(r) \Phi_1(r), \quad \psi = R_2(r) \Phi_2(r) \quad (27)$$

식 (27)을 식 (24)에 대입하면 Φ 와 ψ 는 다음과 같이 된다.

$$\Phi = [A_1 K_m(qr) + B_1 I_m(qr)] [A_2 \sin(m\theta) + B_2 \cos(m\theta)] \quad (28)$$

$$\psi = [A_3 K_m(qr) + B_3 I_m(qr)] [A_4 \sin(m\theta) + B_4 \cos(m\theta)] \quad (29)$$

응력과 변위는 수평거리 r 에 따라 소멸되기 때문에 상수 B_1 과 B_3 는 0이다. 수평작용이 원주에 작용할 때 흙 영역에서 감소된 응력과 변위 조건은 $m=1$ 그리고 $A_2=A_4=0$ 을 요구한다. 그러므로 Potential 함수 Φ 와 ψ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi &= AK_1(qr) \cos \theta \\ \psi &= BK_1(Sr) \sin \theta \end{aligned} \quad (30)$$

식 (30)에 의하여 주어진 Potential 함수를 가지고 변위, U 와 V 그리고 응력, σ_r 과 $\tau_{r\theta}$ 는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} U &= \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \\ &= \cos \theta \left[-A \left(K_k \frac{1}{r} (qr) + q K_0(qr) \right) + B \frac{1}{r} K_k(sr) \right] \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \\ &= \sin \theta \left[-A K_t \frac{1}{r} (qr) + \left(B \frac{1}{r} K_t(sr) + SK_0(Sr) \right) \right] \end{aligned} \quad (32)$$

마지막으로 외부영역에 있어서 응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (\lambda + 2G)(1 + iD_1) V^2 \Phi - 2G(1 + iD_a) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{i}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} + \frac{i}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \\ &= \cos \theta \left(A(\lambda + 2G)(1 + iD_1) q^2 K_1(qr) + 2AG(1 + iD_a) \left(\frac{q}{r} K_0(qr) + \frac{1}{r^2} K_t(qr) \right) - 2BG(1 + iD_a) \left(\frac{S}{r} K_0(Sr) + \frac{2}{r^2} K_t(Sr) \right) \right) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} &= G(1 + iD_a) \left(-\frac{2}{r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) \\ &= G \sin \theta (1 + iD_a) \left[A \left(2 - \frac{q}{r} K_0(qr) + \frac{4}{r^2} K_t(qr) \right) - B \left(S^2 K_t(Sr) + 2 \frac{S}{r} K_0(Sr) + \frac{4}{r^2} K_t(Sr) \right) \right] \end{aligned} \quad (34)$$

더구나 $r=r_2$ 의 원형 경계면에서의 수평 변위는 다음을 만족해야 한다.

$$U(r=r_2, \theta=0) = -V(r=r_2, \theta = \frac{\pi}{2}) \quad (35)$$

식 (35)를 식 (31)과 식 (32)에 대입하면

$$B = \frac{2K_1(qr_2) + qr_2 K_0(qr_2)}{2K_1(Sr_2) + Sr_2 K_0(Sr_2)} A \quad (36)$$

여기서 a_0^* 와 b_0^* 를 다음과 같이 놓자.

$$a_0^* = S r_2 = \frac{a_0 i}{\sqrt{(1+iD)}}, \quad (37)$$

$$b_0^* = qr_2 = \frac{a_0 i}{\eta \sqrt{(1+iD)}}$$

여기서 $\eta = V$, $V_a = 2(1-\nu)/(1-2\nu)$ 그리고 $\nu =$ 포아슨 비, 원주의 수평변위는 다음과 같은 식 (38)로 표현될 수 있다.

$$U(r=r_2, \theta=0) = -qK_0(b_0^*)k_1(b_0^*) + SK_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + q S r_2 K_0(b_0^*)K_0(a_0^*) \frac{A}{2K_1(a_0^*) + S r_2 K_0(a_0^*)} \quad (38)$$

그러므로 지반 반력 P_u 는 식 (39)이다.

$$P_u = - \int_0^\pi (\sigma_r(r=r_2)\cos\theta - \tau_{r\theta}(r=r_2)\sin\theta) r_2 d\theta$$

$$= -\pi G r_2 \left(\frac{\omega}{v_s}\right)^2 \frac{4K_1(b_0^*)K_1(a_0^*) + Sr_2 K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + qr_2 K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)}{2K_1(a_0^*) + S r_2 K_0(a_0^*)} A \quad (39)$$

외부 영역의 지반 강성값은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_u^{(2)} = \pi G a_0^2 T \quad (40)$$

여기서 T 는 무차원 Factor로서 식 (41)과 같다.

$$T = -4K_1(b_0^*)K_1(a_0^*) + \frac{a_0^* K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + b_0^* K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)}{b_0^* K_0(b_0^*)K_1(a_0^*) + a_0^* K_1(b_0^*)K_0(a_0^*)} + b_0^* a_0^* K_0(b_0^*)k_0(a_0^*) \quad (41)$$

C. 지반의 강성값(soil stiffness)

수평 진동에 대한 말뚝 주변 흙의 강성값은 다음과 같이 구한다.

$$K_u = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{ui}^{(2)}}} \frac{1}{K_u^{(2)}} \quad (42)$$

3. 하나의 흙고리에 대한 계수 연구

3.1 내부영역의 전단계수의 효과

내부영역의 전단계수의 효과를 알아보기 위하여 외부영역까지의 반경(R_2)을 1.25ft로 외부영역의 전단계수(G_2) 1.0 psf, 감쇠비(D_2) 0.05, 포아슨비(P_{O_2}) 0.25 그리고 밀도(ρ_2)는 1.0 lbs-sec²/ft²로 가정하였다. 그리고 내부영역에 대하여 감쇠비(D_1) 0.1, 포아슨비(P_{O_1}) 0.25, 밀도(ρ_1)는 1.0 lbs-sec²/ft⁴로 가정하였다.

지반의 강성값은 무차원 주파수(dimensionless frequency) a_0 의 함수로서 그림 3에서와 같이 전단계수의 비(G_2/G_1) 0.5 그리고 1.0에 대하여 나타낸다. 여기서 강성값의 실수부와 허수부에서 분명히 전단계수의 비에 따라 변화를 보인다. 즉 전단계수의 비가 적을 때 강성값은 더 크게 나타났다. 이와같은 현상은 허수부분이 더 현저하다.

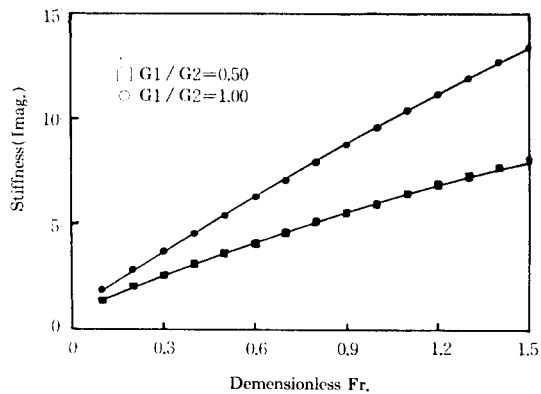
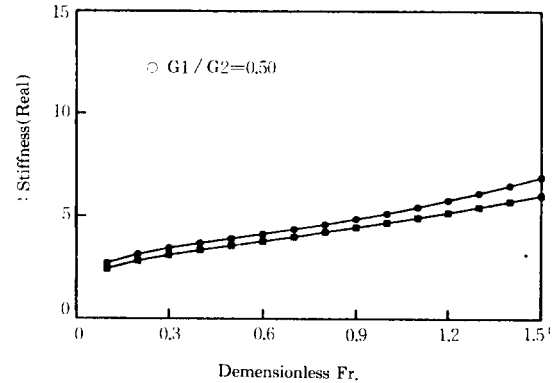


그림 3. Soil stiffness to in-plane excitation ($\rho_1=1.0$)

3.2 내부영역의 포아슨비의 효과

지반 강성값에 대한 포아슨비의 효과를 알아보기 위하여 외부 영역까지의 반경(R_2)을 1.25ft, 외부영역의 전단계수(G_2) 1.0 psf, 감쇠비(D_2) 0.05, 밀도(ρ_2) 1.0 lbs-sec²/ft⁴ 포아슨비 (P_{O_2}) 0.25 그리고 내부영역의 전단계수(G_1) 0.5 psf, 감쇠비(D_1) 0.1, 밀도(ρ_1) 1.0 lbs-sec²/ft⁴로 가정하였다.

그림 4에서와 같이 실수 강성값은 a_0 값이 증가함에 따라 포아슨비 P_{O_2}/P_{O_1} 가 큰 경우에 감소하고 반면에 허수 강성값은 증가한다.

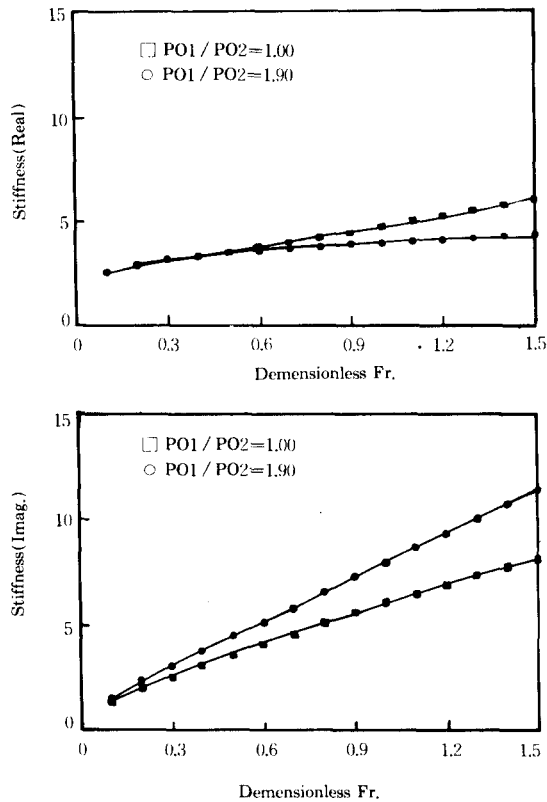


그림 4. Soil stiffness to in-plane excitation

3.3 내부영역의 크기의 효과

지반 강성값에 대한 내부영역의 반경의 효과를 검토하기 위하여 외부영역의 전단계수(G_2) 1.0 psf, 감쇠비(D_2) 0.05, 포아슨비(P_{O_2}) 0.25, 밀도(ρ_2) 0.001 lbs-sec²/ft⁴로 가정하였다. 그림 5

, 그림 6에서 보는 바와 같이 외부영역까지의 반경이 증가함에 따라 실수와 허수 강성값 모두 작게 나타난다. 특히 허수 강성값이 그 정도가 작게 나타났다.

3.4 내부영역의 밀도와 효과

내부영역의 밀도의 효과를 알아보기 위하여 외부영역까지의 반경(R_2)을 1.25ft, 전단계수(G_2) 1.0 psf, 감쇠비(D_2) 0.05, 포아슨비(P_{O_2}) 0.25, 밀도(ρ_2) 1.0, 0.001 lbs-sec²/ft⁴ 그리고 내부영역에 대하여 전단계수(G_1) 0.5 psf, 감쇠비(D_1) 0.1, 포아슨비(P_{O_1}) 0.25로 가정하였다. 그림 6에서 나타내는 것과 같이 내부영역의 밀도가 작을 때 a_0 값이 증가함에 따라 강성값은 변화가 거의 없었고 그림 5와 같이 내부영역의 밀도가 클 때는 외부영역까지의 거리가 가까울수록 증가하였다.

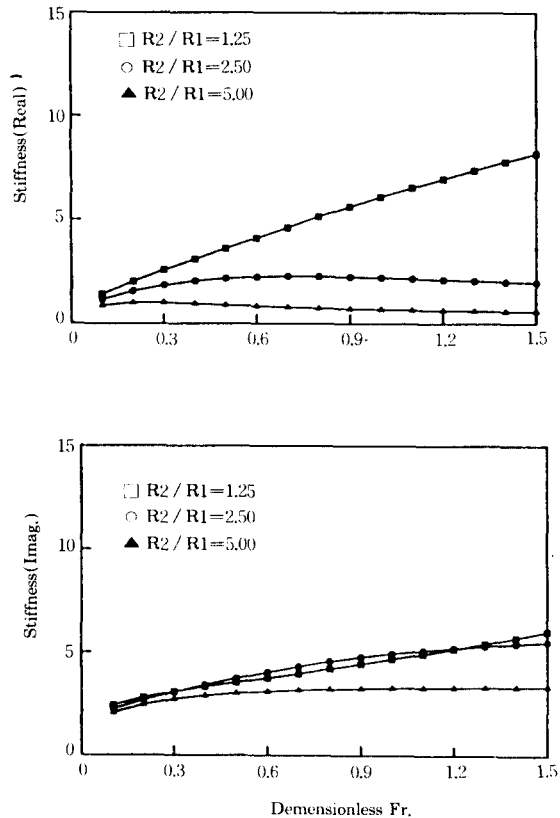


그림 5. Soil stiffness to in-plane excitation ($\rho_1=1.0$)

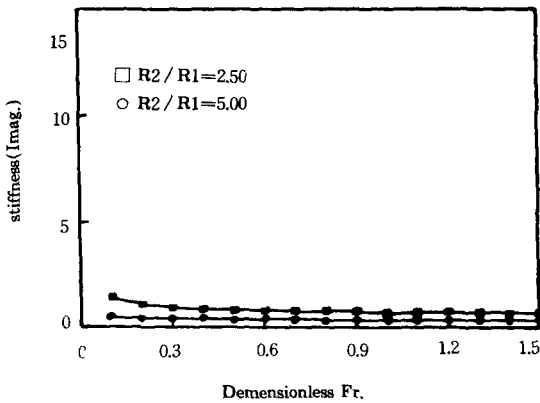
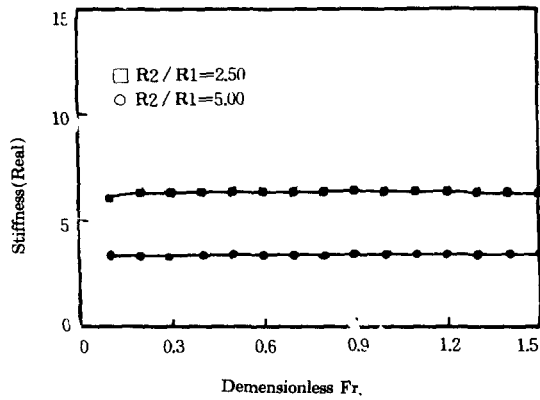


그림 6. Soil stiffness to in-plane exoitation ($\rho_1=0.001$)

4. 여러개의 흙고리(soil annulus)에 대한 계수 연구

4.1 외부영역까지의 거리의 효과
외부영역까지의 거리의 효과에 대하여 알아보

기 위하여 입력값은 표 1과 같이 가정하였다. 외부영역의 반경은 내부영역의 반경에 1.2배를 하였다. 그리고 이 연구는 주파수를 0.1, 0.2, 0.5 그리고 1.0으로 하여 주파수영역에서 수행되었다.

그림 7에서 보는 바와 같이 실수 강성값은 주파수가 작을수록 크게 나타났고 외부영역까지의 거리가 증가할수록 크게 나타났고 반면에 허수 강성값은 주파수가 클수록 크게 나타났다. 한편 외부영역까지의 거리가 증가함에 따라 실수 강성값과 허수 강성값은 모두 감소하였다.

4.2 외부영역까지의 고정거리에 대한 고리의 크기 효과

외부영역까지의 고정거리에 대한 고리의 크기 효과에 대하여 조사하기 위하여 외부영역까지의 거리를 말뚝반경에 1.2, 1.3, 1.4배로 말뚝반경의 약 10배인 경우에 고리를 14개, 10개 그리고 8개로 가정하였다.

각 경우에 대하여 주파수를 0.1, 0.2, 0.5 그리고 1.0으로 하여 수행하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 고리의 수가 증가할수록 실수, 허수, 강성값은 모두 감소하였고 한편 주파수가 클 때가 실수 강성값은 크게 나타났고 반대로 허수 강성값은 작게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서 점탄성 이론을 이용하여 동적하중 하에서 말뚝기초 주변 흙의 동적특성의 변화를

표 1. Study cases for effect of boundary diatance

Annulue No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Case	Radius of Annuius(ft)									
1	1.00	1.20	1.44	1.73	2.07	2.49	2.99	3.58	4.30	5.16
2	1.00	1.20	1.44	1.73	2.07	2.49	2.99	3.58	4.30	5.16
	6.19	7.43	8.92	10.70						
3	1.00	1.20	1.44	1.73	2.07	2.40	2.99	3.58	4.30	5.16
	6.19	7.43	8.92	10.70	12.84	15.41				
4	1.00	1.20	1.44	1.73	2.07	2.49	2.90	3.58	4.30	5.16
	6.19	7.43	8.92	10.70	12.84	15.41	18.40	22.19		
5	1.00	1.20	1.44	1.73	2.07	2.49	2.99	3.58	4.30	5.16
	6.19	7.43	8.92	10.70	12.84	15.41	18.49	22.10	20.62	31.95

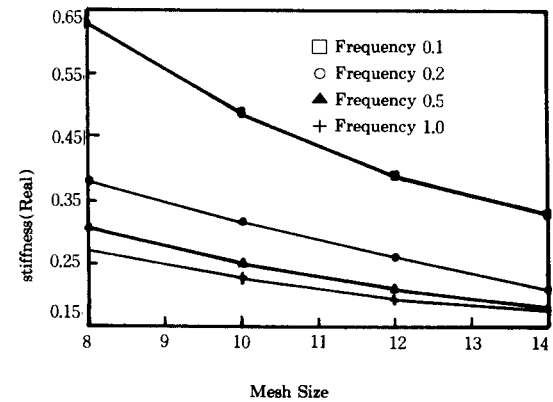
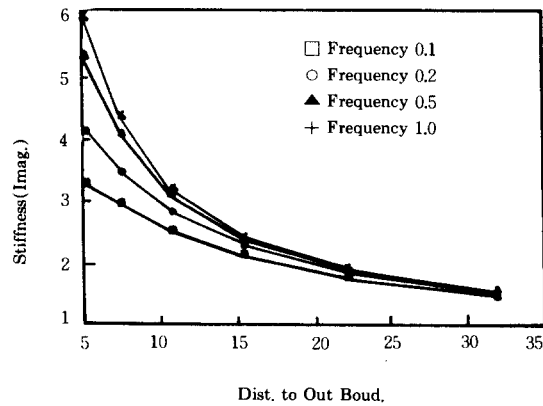
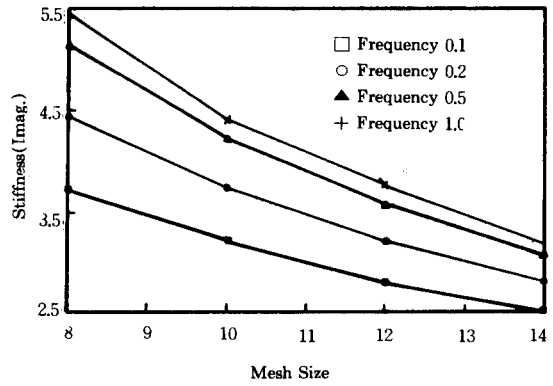
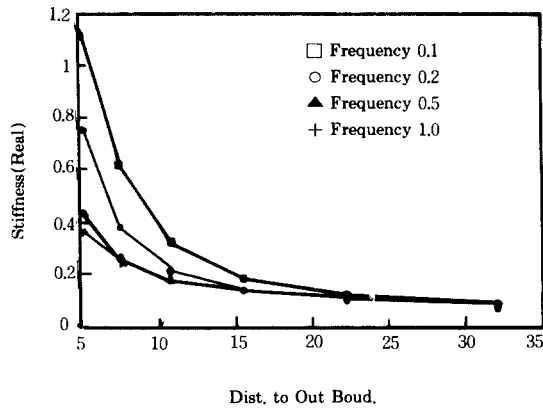


그림 7. Effect of distance to outside boundary

그림 8. Effect of mesh size for eixed distance

표 2. Study cases for effect of mesh. size

Annulue No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Case	Radius of Annuius(ft)								
1	1.00	1.20	1.44	1.73	2.07	2.49	2.99	3.58	4.30
	5.16	6.19	7.43	8.92	10.70				
2	1.00	1.30	1.69	2.20	2.88	3.71	4.83	6.27	6.16
	10.60								
3	1.00	1.40	1.96	2.74	3.84	5.38	7.53	10.54	

설명하기 위하여 비선형 해석을 하고 지반의 동적거동을 해석하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 지표면으로부터 임의의 깊이에서 말뚝에 작용하는 비선형 지반 강성값을 얻기 위하여 여러가지 경우에 대해서 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 지반의 강성값은 흙의 성질과 Soft Zone의 크기에 아주 민감함을 나타냈다.
2. 지반의 강성값은 무차원 주파수가 증가함에 따라 증가하였고 흙의 특성 즉 전단계수, 포아슨비, 그리고 외부영역까지의 거리에 따라 허수 강성값이 실수 강성값보다 더 크게 증가하였다.
3. 밀도가 적을 때, 무차원 주파수가 증가함에

따라 외부영역까지의 거리는 실수나 허수 강성값에 영향을 미치지 않았다.

4. 강성값은 외부영역까지의 거리가 증가할수록 현저하게 감소하였는데, 실수 강성값은 주파수가 작을수록 크게 나타났다. 반면에 허수 강성값은 그렇지 않았다.

5. 강성값은 고리의 수가 증가할수록 감소하였고 주파수가 클 때 실수 강성값은 크게 나타났으며 허수 강성값은 반대의 현상이 나타났다.

감사의 말

본 연구는 1990년도 학술진흥재단의 연구과제로 선정되어 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

References

1. Angelides, D.C. Roesset, J.M. (1980). "Nonlinear Dynamic Stiffness of Piles", Research Report R80-13. Dept. of Civil Engineering, M.I.T.
2. Baguelin, R.F. Said, Y.H. (1972). "Theoretical Study of Lateral Reaction Mechanism of Piles", Geotechnique, Vol. 27, No.3, pp.405-434.
3. Baka, J.E. (1983). "Dynamic Response of Vertically Loaded Small Soale Piles in Sand", Geotechnical Engineering Center Report GR83-2. The University of Texas at Austin, Texas.
4. Beredugo, Y.O novak, M (1972). "Coupled Horizontal and Rocking Vibration of Embedded Footings", Canadian Geotechnical Journal. Vol. 9, No, pp.477-497.
5. Gladwell, G.M.L. (1980) "Contact Problems in The Classical Theory of Elasticity". Sijthoff and Noordhoff.
6. Hardin, B.O., Drevich, V.P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Asce, Vol. SM7, July, pp.667-692.
7. Hindy, A. Novak, Mm. (1980), "Earthquake Response of buried insulated pipes", Journal of The Engineering Mechanics Division, ASCE, pp.1135-1149.
8. Jakub, Moshe, (1977), "Nonlinear Stiffness of Foundations", M.I.T., Research Report R77-35, Department of Civil Engineering, MIT, sept.
9. Matlook, et al. (1978), "Simulation of Lateral Pile Behaviour Under Earthquake Motion", Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, Specially Conference On Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, California, 11, 704-719.
10. Novak, M. (1974), "Dynamic Stiffness and Damping of Piles", Canadian Geotechnical Journal, Vol. pp.574-598.
11. Novak, M., Aboul-Ella, F. (1978), "Stiffness and Damping of Pipes in Layered Media", Proceedings of The Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Specially Conference, Pasadena, California, June, 19-21, pp.704-719.
12. Novak, M., Nogami, T Aboul-Ella, F. (1978), "Dynamic Soil Reactins for Plane Strain Case", Journal of The Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 104, No. EM4.
13. Novak, M. Sheta, Mohammed. (1980), "Approximate Approach to Contact Effects of Piles "Proceedings of Session Sponsored by Engineering Division at the ASCE National Convention, Oct, 30.
14. Seed, H.,B., et al. (1970), "Soil Moduli and Damping for Dynamic Response Analysis", Report, No. ERRC 70-10. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkely, California, December. 1970.

(접수일자 1990. 10. 15)