

지진하중을 받는 파일기초의 횡방향 동적 거동해석

Dynamic Analysis of Lateral Pile under Seismic Loading

李 寅 模*

Lee, In-Mo

李 弦 鍾**

Lee, Hyun-Jong

Abstract

Dynamic analysis of lateral pile under seismic loading is performed in this paper. As an analytical model, the Beam-on-Winkler Foundation Model is used for this study because of its simplicity and acceptable accuracy. The method suggested by Kagawa and Kraft, which can account for non-linear effects, is used for the dynamic P-y relationship. This relationship is found to be the most important factor in analysis. Group pile effects are also considered approximately.

The results of dynamic analysis show that a pile without supporting mass follows the soil movement; in the case of a pile with supporting mass, the relative displacement between the soil and the pile occurs. When designing piles, it must be considered that piles have to resist the curvatures originated by the soil movement.

要 旨

본 연구에서는 지진하중을 받는 파일기초의 횡방향 동적 거동해석이 수행되었다. 해석모델은 간편하면서도 비교적 정확한 Beam-on-Winkler Foundation 모델을 사용하였다. 동적 P-y 관계는 지반의 비선형 효과를 고려할 수 있는 Kagawa와 Kraft가 제안한 방법을 사용하였으며, 이 관계는 해석결과에 가장 큰 영향을 미친다. 또한, 파일의 군 효과도 근사적으로 고려하였다.

해석결과로는 파일이 지지하는 상부구조물이 없을 경우에는 파일의 거동은 지반의 거동과 일치하였다. 그러나 상부구조물이 있을 경우에는 파일과 지반사이에 상대변위가 발생하였다. 또한 파일의 내진설계시에는 지반의 거동으로 인하여 파일에 거리는 휨모멘트를 견딜 수 있게 설계하여야 한다.

* 정회원, 고려대학교 공과대학 토목공학과, 조교수

** 한국도로공사 도로연구소, 연구원

1. 서 론

지진이 발생했을때 파일에 의해 지지된 상부 구조물은 심각한 손상을 받을 수 있다. 따라서, 지반-파일-구조물 시스템의 동적 거동해석은 최근 흥미있는 연구과제가 되어왔다. 지반-파일 시스템의 실제거동을 해석하기 위해서는 토질정수(Soil Property)의 변화, 토질의 비선형 응력-변형률 관계, 지반의 깊이에 따른 지반 자체의 변위, 3차원적 특성 등이 고려되어야 하며, 위의 조건을 모두 만족시킬 수 있는 해석방법은 BWFM(Beam-On-Winkler Foundation Method)과 유한 요소법(Finite Element Method)이다. 최근의 해석 경향은 경제적이면서, 지반의 복잡한 비선형 특성을 고려할 수 있는 BWFM을 많이 사용한다.

본 연구에서는 Kagawa와 Kraft¹⁾가 제안한 파일과 지반의 동적 하중-처짐 관계를 이용하여, Beam-on-Winkler Foundation Model로 지반-파일 시스템을 모델링(Modeling)하여 직접적분법으로 해석을 실시한뒤, 모드중첩법(Mode Superposition Method)에 의한 해석과 비교, 검토하였다. 또한 파일의 균 효과는 근사적 방법인 등가 피어개념(Equivalent Pier Concept)과 Poulos와 Davis가 제안한 정적 균 효과 산정법을 이용하여 해석시 고려 하였으며, 개인용 소형 컴퓨터에서 해석이 가능한 프로그램을 개발하였다.

2. 단 파일의 동적 횡방향 하중-처짐 관계

2.1 지반-파일 시스템의 동적 하중-처짐 관계

BWFM에 의한 파일의 거동해석에 있어서는 보통, 지반과 파일의 상호작용 효과를 Fig-1과 같이 스프링과 Dashpot으로 대치하여 나타내며, 이 P-y 관계는 탄성체로부터 구할 수 있다.²⁾

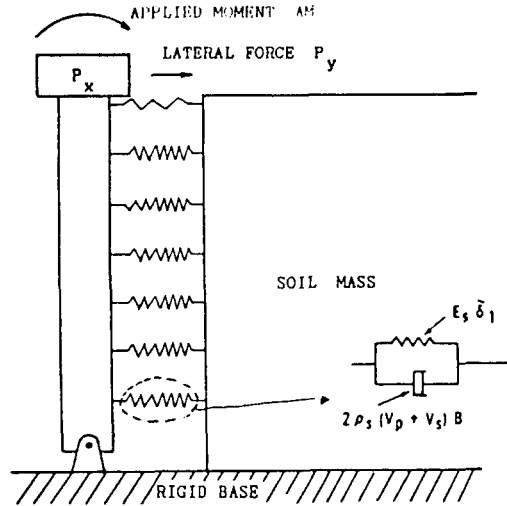


Fig. 1. Beam-on-Winkler Foundation Model

파일의 단위길이당 지반의 반력을 P라 하고, 지반의 변위에 대한 파일의 상대적 변위를 y라 했을때, 이 P-y 관계는 아래 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.¹⁾

$$\frac{P}{E_s^* y} = \delta_1 + i\delta_2 (= \delta)$$

여기서 E_s^* 는 지반의 복소 탄성계수(Complex Young's Modulus)로써 $E_s(1+2i\beta)$ 이다. β 는 지반의 감쇠계수(Damping Ratio)이다. 무차원 계수 δ_1 과 δ_2 는 각각 지반-파일 스프링과 에너지 소멸을 나타내는데 다음 요소들의 함수이다: 1) 파일의 유연도계수(Pile Flexibility Factor), K_r ; 2) 하중주기(Exciting Frequency); 3) 지반의 감쇠; 4) 하중조건(지진하중, 교변하중 등).

위의 (1)식은 다음과 같은 두가지 유형의 에너지 흡수 메카니즘(Energy Absorbing Mechanisms)을 포함하고 있다: (1) E_s^* 의 허수부분(Imaginary Part)에 포함되어 있는 재료감쇠(Material Damping); (2) δ 의 허수부분에 포함되어 있는 Radiation Damping 등

2.2 비선형 P-y 관계

앞의 (1) 식에서 구한 $P-y$ 관계는 지반을 탄성체로 가정하고 구한 식이다. 그러나 실제 지반은 비탄성체이며, 이것을 고려하기 위해

Kagawa와 Kraft¹⁾는 (1)식을 (2)식과 같이 변환하였다.

$$P = E_s \delta_1 \hat{y} + 2 \rho_s B (V_p + V_s) \frac{d\hat{y}}{dt} \quad (2)$$

여기서, δ_1 = 지반의 길이에 따라 변하는 평균 지반-파일 스프링 계수

ρ_s = 지반의 밀도(Mass Density),
 γ/g

B = 파일의 등가 폭(Equivalent Width of Pile)

V_p, V_s = 지반의 압축, 전단파 속도

지반조건이 탄성이고, 등방성일때 δ_1 은 Fig-2에서 구할 수 있다. 또한, δ_1 은 파일의 강성과 직경, 지반의 강성에 따라 값이 달라진다.

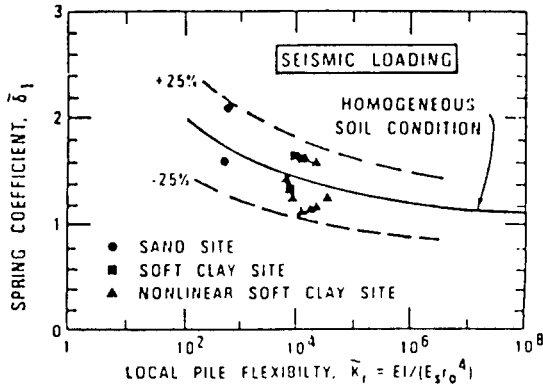


Fig. 2. Effective Soil-Pile Spring Coefficient

만약 지반조건이 비균질성(Heterogeneous) 일 지라도 \bar{K}_l 의 값을 지반의 평균 E_s 값으로 계산했을 때는 δ_1 을 균질성으로 간주하여 구할 수 있다.²⁾ 식 (2)에서 첫번째 항은 지반-파일 시스템의 순수강성을 나타낸다. 두번째 항은 식 (1)의 허수부(Radiation Damping)를 근사적으로 P파와 S파를 흡수하는 Dashpot을 사용한 파일로부터의 파동에너지를 소멸로 대치한 것이다. 지반의 재료감쇠(Material Damping)는 비선형 지반-파일 스프링에 의한 Hysteresis Loop으로 나타내어진다. 식 (3)의 P- \hat{y} 관계식에 지반의 비선형특성을 포함시키기 위하여 Fig-3과 같은 지반의 비선형 응력-변형률 관계를 이용할 수 있으며, 그림에서 Backbone Curve는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = G_{\max} F\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \gamma \quad (3)$$

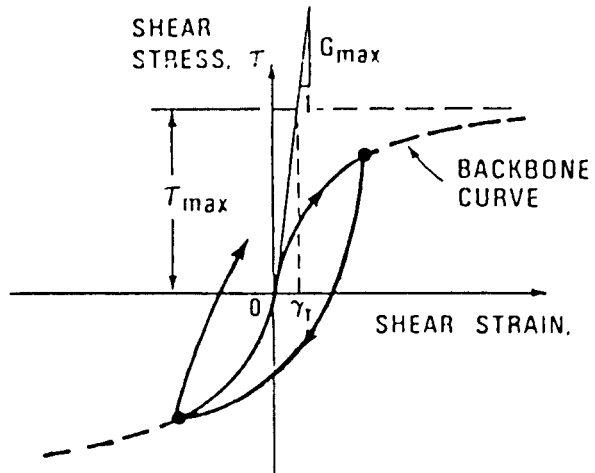


Fig. 3. Nonlinear Stress-Strain Relationship of Soil

여기서, G_{\max} = 최소 전단변형률에서의 전단계수

γ_r = 최소 전단변형률(Reference Shear Strain)

F = 사용되는 모델에 따른 함수

위의 식 (2)와 (3)을 조합하여 아래와 같은 비선형 P- \hat{y} 관계식을 구할 수 있다.

$$P = 2(1+\nu) G_{\max} F\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \delta_1 \hat{y} + 2 \rho_s$$

$$B (V_p + V_s) \frac{d\hat{y}}{dt} \quad (4)$$

윗식에서 P 의 값을 \hat{y} 의 함수로 나타내기 위해서는 함수 F 를 지진하중에 대한 지반의 응력-변형률 관계를 대표할 수 있는 적당한 모델을 사용하여 대치하여야 한다.

2.3 지진에 의한 간극수압 상승효과

지진이 발생하면 일반적으로 포화된 지반에는 간극수압이 상승하게 되고, 이로 인하여 전단강도가 감소하게 된다. 파일주위의 지반이 지진에 의해 간극수압이 상승하게 되면 지반-파일 시스템의 고유주기는 감소하게되며 파일의 변위가 증대되고, 심한 경우 큰 파일변위(Large Pile Movements)와 P- δ 효과에 의해 상부구조물의 파괴가 발생하기도 한다. 그러나 본 연구에서는 이런 복잡한 간극수압의 상승효과는 고려하지 않고 해석을 실시하였다.

2.4 본 연구에 적용한 P- \hat{y} 관계

Seed^{4,5)}는 지반의 비선형 응력-변형률 관계를 Bilinear 모델이나 등가 선형모델(Equivalent Linear Model)을 사용하여도 만족스러운 해석결과를 얻을 수 있다고 한다. 또한 대부분의 경우, 지반이 지진에 의해 변형이 발생할 때 지반 자체의 최대 전단변형률 γ_{max} 과 유효 전단변형률 γ_{eff} 의 비 즉, $\gamma_{eff}/\gamma_{max}$ 는 0.5-0.7 사이이며 보통, 약 0.65 정도이다.⁵⁾ 본 연구에서는 동일한 지진하중에 대하여 지반자체의 유효 전단변형률과 지반-파일 시스템의 유효 전단 변형률이 동일하다고 가정하고 해석을 실시하였다. 그러면 지반자체의 γ_{eff} 는 프로그램 "SHAKE"⁵⁾를 이용하여 구할 수 있고, γ_{eff} 에 대응하는 전단계수 G 는 Seed와 Idriss가 제안한 식들을 이용하여 구할 수 있다. 따라서, 식 (4)에서 $G_{max} F(\frac{\gamma}{\gamma_r})$ 는 유효 전단변형률에서의 전단계수와 동일하며 식 (4)는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P = 2(1+\nu) G \bar{\delta}_1 \hat{y} + 2\rho_s B (V_p + V_s) \frac{d\hat{y}}{dt} \quad (5)$$

위의 (5)식은 지반의 비선형 효과를 고려한 선형 P- \hat{y} 관계식이며 해석이 훨씬 용이하다.

3. 지반-파일 시스템의 동적 거동해석

3.1 해석 모델

구조물을 지지한 지반-파일 시스템을 Fig-1과 같이 모델화 하였다. 파일의 단면은 일정하고, 파일의 끝은 단단한 지반위에 놓여있는 선단지지(End-Bearing) 파일을 나타내는데 우리나라의 파일기초형태중 가장 흔한 경우이므로 실제조건과 잘 부합된다. 해석모델의 주요 가정은 다음과 같다: 1) 지반은 비선형 탄성체이고 등방성이다; 2) 수직방향의 지반거동은 파일의 횡방향 거동에 작은 영향을 미친다; 3) 지반-파일의 접촉면에서의 수직방향 전단응력

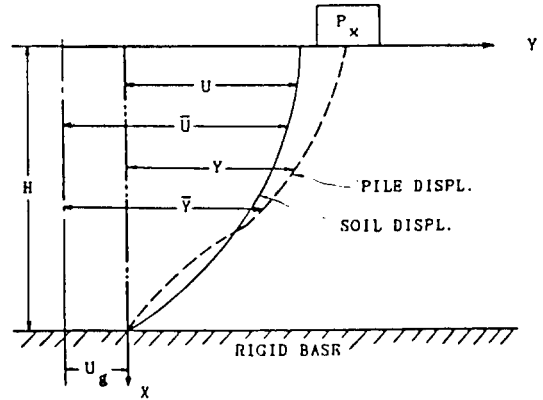


Fig. 4. Free Body Diagram of Soil-Pile System
은 파일의 횡방향 거동에 영향을 주지 않는다; 5) 지진에 의한 지반의 간극수압 상승효과는 무시한다.

3.2 지반-파일 시스템의 동적 평형방정식

위의 가정에 의하여 파일의 미소요소(Finite Element)에 작용하는 힘들의 동적 평형방정식은 아래와 같다.⁶⁾ (Fig-4)

$$\frac{\partial V}{\partial x} dx + \bar{m} \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial t^2} dx + C \frac{\partial \hat{y}}{\partial t} dx + K \hat{y} dx = 0 \quad (6)$$

여기서, K 는 수평방향의 지반반력계수, \bar{m} 은 파일의 단위 길이당 밀도, V 는 깊이 x 에서의 전단력이며 \bar{y} 는 파일의 절대변위, y 는 파일의 상대적 변위, $\hat{y} = y - u$, u 는 지반의 상대적 변위이고, u_g 는 파일 끝에서의 지반변위이다. 그러면 위의 식 (6)에 $V = E_p I_p \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$, $\bar{y} = y + u_g$, $\bar{u} = u + u_g$ 를 대입하면 아래의 (7)식이 된다.

$$E_p I_p \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C \frac{\partial}{\partial t} (y - u) + K(y - u) = -\bar{m} \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \quad (7)$$

여기서, $C = 2\rho_s B (V_p + V_s)$

$$K = 2(1+\nu) G \bar{\delta}_1$$

3.3 경계 조건

위의 모델에서 파일은 암반위에 지지되어 있다고 가정하였으므로 파일과 암반의 연결형태

는 현지연결로 볼 수 있다. 따라서 파일의 하단에서는 변위와 모멘트가 발생하지 않는다. 파일의 상단에 걸리는 전단력은 상부구조물의 하중에 지반의 가속도를 곱한 것과 파일에 걸리는 정적 횡하중의 합이다. 또한, 상부구조물과의 연결조건에 의해 고정인 경우(Fixed Connection)에는 파일상단의 발생모멘트는 외부 작용모멘트와 같다.

3.4 지반-파일 시스템의 동적 해석기법

(7)식에서 첫번째 항은 파일의 강성을 나타내는 항으로써, 이것은 유한차분법(Finite Difference Method)을 사용하여 강성행렬로 변환시킬 수 있다. 그러면, 지진하중을 받는 지반-파일 시스템의 운동방정식은 아래의 (8)식과 같은 일반적인 운동방정식 형태로 변환시킬 수 있다.

$$[M]\ddot{y} + [C]\dot{y} + [K]y = \{F\} \quad (8)$$

여기서, $[M]$ 은 자중행렬(Mass Matrix), $[C]$ 은 감쇠행렬(Damping Matrix)이고, $[K]$ 는 강성행렬(Stiffness Matrix), $\{F\}$ 는 하중벡터(Force Vector)이다.

본 연구에서는 먼저 직접적분법으로 해석을 실시한 다음, (8)식에서 감쇠행렬을 없애고, 모드중첩법으로 해석을 실시하여, 두 경우를 비교하였다. 또한 위의 (8)식에서 지반의 상대변위 u 를 알아야만 하중벡터 $\{F\}$ 를 구성할 수 있는데 지반의 상대변위 u 는 "SHAKE"⁵⁾에서 먼저 구해 하중벡터를 구성하고, 해석을 실시하였다.

4. 지반-파일 시스템의 군 효과

일반적으로, 파일의 동적 군 효과(Dynamic Group Effects)는 주로, 하중주기(Exiting Frequency)와 파일간의 간격, 파일의 Slenderness Ratio의 함수이다.³⁾

4.1 등가 피어개념(Equivalent Pier Concept)

여러개의 파일이 동일한 변위(Displacement)가 발생하는 경우, 즉 여러개의 파일이 일체가 되어있는 경우에는, 군 파일을 하나의 등가 피어로 대체하여 처짐등을 계산할 수 있으며, 이 개념은 주로 정적인 하중에 대한 근사적 해석법으로 사용되어져 왔다. Novak⁸⁾의 실험결과에 의하면 등가 피어개념으로 구한 군 파일의 강성(Stiffness)은 실험결과와 잘 맞으며, 감쇠는 이론치가 실험치 보다 약 2배 정도 과대하다고 한다.

4.2 Kagawa의 이론적 연구

Kagawa³⁾는 지반을 선형 탄성체로 보고 군 파일의 거동해석을 주파수 영역에서 실시하였다. 파일의 군 효과에 가장 큰 영향을 주는 요소는 주파수 비(Frequency Ratio)로써 군 파일의 거동해석은 시간영역에서는 어렵다고 하였다. 따라서 지반-파일 스프링의 비선형 효과를 고려한 군 파일의 동적 거동해석은 앞으로의 과제이다.

본 연구에서는 근사적 해석방법의 하나인 등가 피어 개념을 이용한 해석과 Poulos와 Davis⁷⁾가 제안한 방법으로 해석을 실시하여 두 경우를 비교하였다.

5. 예제 해석

[예제-1] 고유 진동수(Natural Frequency)를 본 연구에서 구한 값과 Chandrasekaran과 Prakash⁹⁾가 제안한 방법으로 구한 값과 비교하였다. 직경이 1ft, 두께는 0.197ft, 자중은 1.42kips, $EI = 12740k-ft^2$, 길이가 20ft, 축하중이 50kips인 파일에 대해 지반반력계수가 지반의 깊이에 따라 증가하는 경우($K = nhx$)와 일정한 경우($K = const$)에 대해 해석을 실시하였다. 단순히 두 방법의 해석결과를 비교하기 위한 것이므로 임의의 지반반력계수들을 선택하였으며, 지반반력계수와 파일의 강성을 고려하여 전체 지반-파일 시스템의 강성행렬(Stiffness Matrix)을 형성하였다. 자중행렬(Mass Matrix)은 파일의 한 요소(Element)의 밀도(Weight Density)로써 구성된다. 해석 결과는

Table-1에 있고, 해석결과 약간의 오차가 발생한 이유는 Prakash의 방법은 파일의 자중을 무시하여 해석하였고, 도표상에서 값을 읽어 해석하므로 이때의 오차로 볼 수 있다, 따라서, 약간의 오차는 있으나 대체적 경향이 일치함을 알 수 있고, 지반반력계수의 값이 클수록-지반의 강성이 증가할수록-지반-파일 시스템의 고유진동수는 증가하였다.

Table-1. Results of Example-1

지반반력계수 [kip/ft ²]	지반-파일 시스템의 고유진동수 [cps]	
	본 연구	Prakash의 방법
n _h =5	1.832	1.369
n _h =10	1.883	1.855
n _h =20	1.967	2.283
K=200	2.689	3.548
K=300	3.010	4.131

주: 여기서 x는 지표면에서 지점까지의 깊이이다.

[예제-2] 일반적으로 직접적분법에 의한 해석은 모드중첩법에 의한 해석보다 해석시간이 많이 소요된다. 본 예제해석의 목적은 직접적분법에 의한 해석과 모드중첩법에 의한 해석의 결과가 어느 정도의 오차가 생기는가에 대해 알아보고 지반-파일 시스템의 감쇠계수의 영향에 대해 알아보는데 있다. 파일의 제원은 예제1과 동일하고 해석을 위해 선택된 지반의 조건은 Fig-5와 같고, 상부구조물이 없을 경우(축하중이 없는 경우)의 Pasadena 지진(Fig-6) 데이터를 사용하여 5%, 7%의 감쇠계수에 대한 모드중첩법과 직접적분법에 의한 해석결과를 비교하였다. (Fig-7) 위의 해석결과에서 초기에는 두 결과가 잘 일치하였으나 시간이 경과 할 수록 직접적분법에 의한 상대변위가 크게 발생하였다. 이는 수치적분시의 누적된 오차에 기인한 것으로 볼 수 있다. 또한 각각의 감쇠계수에 대한 결과는 거의 차이가 없었음을 알 수 있고, 이 결과는 상대변위가 상당히 작을 때 감쇠의 영향은 아주 작음을 알 수 있다.

[예제-3] 파일과 지반의 조건은 예제-2와

S A N D	$\nu = 0.3$ $\tau = 95$ pcf
	$\nu = 0.3$ $\tau = 95$ pcf
	$\nu = 0.3$ $\tau = 65$ pcf
	$\nu = 0.3$ $\tau = 65$ pcf
CLAY	$\nu = 0.5$ $\tau = 55$ pcf

//////// RIGID BASE //////////

Fig. 5. Example Site

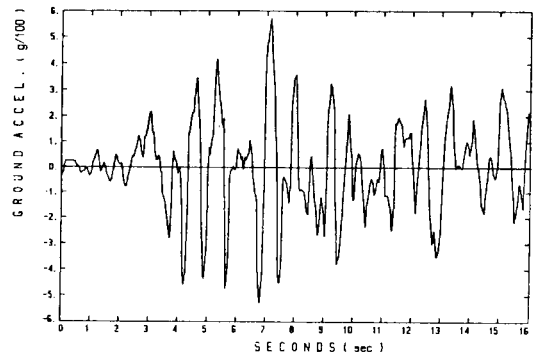


Fig. 6. Ground Motion of Pasadena Earthquake. 1952 Max. Accel. = 0.057g

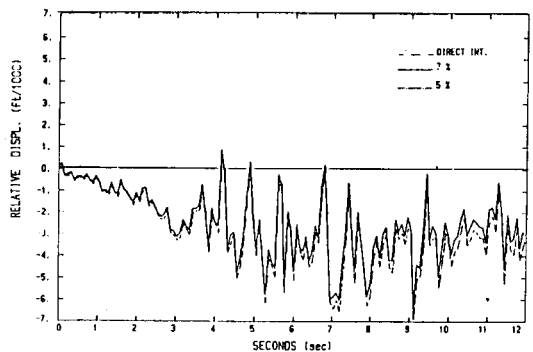


Fig. 7. Mode Superposition Method v.s. Direct Integration Method

동일하고 피어(Pier)의 제원은 직경이 3ft, 자중이 30kips이다. 해석 결과는 Fig-8에 있다. 상부구조물이 없을 경우에는 단 파일(Single Pile)과 지반의 거동은 완전히 일치하며, 피어(Pier)와 같이 자중과 강성이 큰 경우에는 거

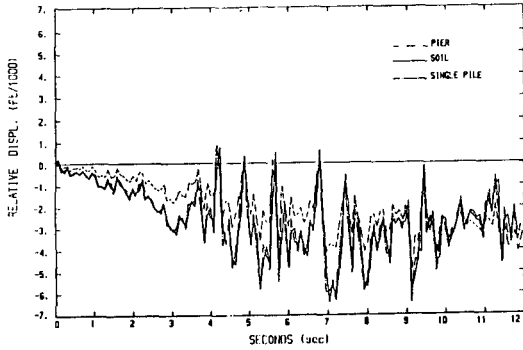


Fig. 8. Soil Displacement v.s. Pile Displacement

동이 다르게 나타났다. (상대변위가 발생하였다.)

[예제-4, 5] 여기서는 실제 우리나라에 시공된 파일기초의 지진에 대한 동적 거동해석을 실시하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램으로 해석할때 입력된 지진하중은 Pasadena Earthquake(1952)을 최대 가속도가 0.12g 되도록 하여 사용하였다. Chandrasekaran과 Prakash가 제안한 방법으로 해석할 때에는 설계용 스펙트럼을 사용하였는데, 엄밀히 두 해석 결과를 비교하기 위해서는 스펙트럼을 역으로 인공지진파(Artificial Earthquake)로 바꾸어 해석을 실시하여야 하나, 본 해석에서는 이를 무시하고, 앞에서 언급한 Pasadena 지진을 입력하중으로 하여 해석을 실시하였다.

비교적 N 치가 큰 양호한 지반(예제-4)과, N 치가 작은 불량한 지반(예제-5)을 택해 예제해석을 실시하였다. 두 경우 모두 해석수행시 입력된 하중이 다르므로 직접비교는 불가능하나 대체적 거동경향을 알 수 있다. 해석 결

Table-2. Results of Example-4 and Example-5

예제-4			
구 분		고유 진동수 [Cycle/Sec]	최대 상대변위 [cm]
단 파일	본 연구	3.59	0.67
	Prakash 방법	3.80	0.50
군 파일	등가 피어개념	-	1.58
	Poulos & Davis	-	1.13
	Prakash 방법	1.9	1.23

과는 Table-2에 있다. Table-2에서 보면 지반이 연약할수록 파일과 지반의 상대변위는 증가하였고, 고유진동수는 줄어들었다. 또한, 파일간의 군 효과가 파일변위에 상당히 큰 영향을 미쳤다.

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 지진하중을 받는 지반-파일 시스템의 횡방향 동적 거동에 대한 이론적 연구 및 이의 해석을 수행할 수 있는 비교적 간단한 프로그램을 개발하였다. 또한, 여러가지 예제해석도 실시하였으며 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 파일기초의 동적 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 동적 지반반력계수(Dynamic Subgrade Reaction Modulus)이다.
- 2) 본 연구에서 구한 고유 진동수(Natural Frequency)와 Chandrasekaran과 Prakash가 제안한 방법으로 구한 고유 진동수는 대체적 경향이 잘 일치하였고, 지반반력계수의 값이 증가할수록 고유 진동수가 증가하였다. (Table-1)
- 3) 상부구조물이 없을 경우에는 단 파일(Single Pile)과 지반의 거동이 일치하였고, 피어(Pier)와 같이 자중과 강성이 큰 경우에는 거동이 달랐다.
- 4) 본 연구에서는 파일의 군 효과를 근사적으로 고려하여 해석을 실시하였는데, 파일의 군 효과는 해석결과에 상당히 큰 영향을 미치므로 이를 보다 정확히 고려할 수 있는 연구가 요망된다.

예제-5			
구 분		고유 진동수 [Cycle/Sec]	최대 상대변위 [cm]
단 파일	본 연구	3.38	1.13
	Prakash 방법	2.80	0.80
군 파일	등가 피어개념	-	1.51
	Poulos & Davis	-	2.45
	Prakash 방법	-	1.68

5) 상부구조물이 있을 경우에는 파일과 지반의 상대변위가 발생하였지만, 파일기초 및 상부구조물에 큰 영향을 주지는 못할 것으로 사료되며, 이 보다는 파일에 걸리는 휨 모멘트가 파일기초의 안정성 문제에 더욱 큰 영향을 줄 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 아산사회복지사업재단의 1986 년 연구비지원에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 포함다.

참 고 문 헌

1. Kagawa, T., and Kraft, L.M., Jr., "Lateral Load-Deflection Relationships of Piles Subjected to Dynamic Loadings," Soils and Foundations, Vol.20, No. 4, 1980, pp.19-36
2. Kagawa, T., and Kraft, L.M., "Lateral Pile Response During Earthquakes," Jr. of The Geo. Eng. Div., ASCE, Vol.107, No. GT 12, 1981, pp.1713-1731
3. Kagawa, T., "Seismic Soil-Pile-Structure Interaction : Pile Groups," Report to the National Science Foundation, McClelland Engineering, Inc., NTIS, No.PB 82-171471, 1981
4. Idriss, I.M., and Seed, H.B., "Seismic Response of Horizontal Soil Layers," Jr. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.94, No. SM 4, 1968, pp.1003-1031
5. Schnabel, P.B., and Lysmer, J., Seed, H.B., "SHAKE : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972
6. Berrones, R.F., and Whitman, R.V., "Seismic Response of End-Bearing Piles," Jr. of the Geo. Eng. Div., ASCE, Vol.108, No.GT 4, 1982, pp.554-569
7. Poulos, H.G., and Davis, E.H., Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley and Sons, Inc., 1980
8. Novak, M., and Sharnouby, R.E., "Evaluation of Dynamic Experiments of Pile Group," Jr. of the Geo. Eng. Div., ASCE, Vol.100, No.6, 1984, pp.19-36
9. Prakash.S., and Chandrasekaran.V., "Free Vibration Characteristics of Piles," Proceeding of The IX International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, 1977, pp.333-337

(접수일자 1988.2.13)