

사질토 지반에 놓인 지진하중을 받는 말뚝 기초 시스템의 고유 진동수 예측

Prediction of the Natural Frequency of Pile Foundation System in Sand during Earthquake

양 의 규¹ Yang, Eui-Kyu

권 선 용² Kwon, Sun-Yong

최 정 인³ Choi, Jung-In

김 명 모⁴ Kim, Myoung-Mo

Abstract

It is important to calculate the natural frequency of a piled structure in the design stage in order to prevent resonance-induced damage to the pile foundation and analyze the dynamic behavior of the piled structure during an earthquake. In this paper, a simple but relatively accurate method employing a mass-spring model is presented for the evaluation of the natural frequency of a pile-soil system. Greatly influencing the calculation of the natural frequency of a piled structure, the spring stiffness between a pile and soil was evaluated by using the coefficient of subgrade reaction, the p-y curve, and the subsoil elastic modulus. The resulting natural frequencies were compared with those of 1-g shaking table tests. The comparison showed that the natural frequency of the pile-soil system could be most accurately calculated by constructing a stiffness matrix with the spring stiffness of the Reese (1974) method, which utilizes the coefficient of the subgrade reaction modulus, and Yang's (2009) dynamic p-y backbone curve method. The calculated natural frequencies were within 5% error compared with those of the shaking table tests for the pile system in dry dense sand deposits and 5% to 40% error for the pile system in saturated sand deposits depending on the occurrence of excess pore water pressure in the soil.

요 지

말뚝 구조물의 동적 거동을 분석하고 지진파에 대한 공진 안정성을 확보하기 위해서는 고유 진동수를 합리적으로 산정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 간단한 질량 - 스프링 모델을 이용하여 지진 하중을 받는 말뚝 구조물의 고유 진동수를 간편하면서도 효율적으로 예측할 수 있는 방법을 모색하였다. 고유진동수 산정 결과에 큰 영향을 미치는 지반-말뚝 간 스프링 강성을 지반반력상수와 p-y 곡선 그리고 지반 탄성계수 등을 이용하여 결정하고, 이들을 이용하여 계산한 고유진동수를 1g 진동대 실험에서 측정한 고유진동수와 비교한 결과, 지반반력상수를 이용한 Reese(1974) 방법과 동적 p-y 중추 곡선을 이용한 Yang(2009)의 방법을 이용하여 스프링 강성을 산정하는 것이 가장 우수한 결과를 나타내었는데, 건조토에 위치한 말뚝구조물에서는 5% 이내의 오차를 보였으며, 포화토에 위치한 말뚝 구조물의 경우에는 진동 중에 과잉간극수압의 발생여부에 따라 5%에서 40% 사이의 오차를 나타내었다.

Keywords : 1-g shaking table tests, Mass-spring model, Natural frequency, Pile-soil system, Spring coefficient

1 정회원, 서울대학교 공학연구소 박사후 연구원 (Member, Post Doc. Researcher, Eng. Research Institute, Seoul National Univ.)

2 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ.)

3 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ.)

4 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., geotech@snu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

입력 하중의 가속도 진동수 성분이 구조물의 고유 진동수 성분과 일치할 때 발생하는 공진 현상은, 지반 구조물에 심각한 피해를 초래할 수 있다. 따라서 말뚝 기초물의 내진 설계 시 고유 진동수를 사전 예측하고, 가능하다면 설계 지진파에 대한 공진 안정성을 확보하는 일이 매우 중요하다. 또한 고유진동수를 합리적으로 결정하면 주파수 영역에서 수치해석을 수행할 수 있고, 다양한 동해석 방법으로 말뚝의 동적 거동을 분석할 수 있다. 말뚝 구조물의 고유진동수는 FEM(Finite Element Method), FDM(Finite Difference Method)등의 수치 해석 방법을 이용하거나, 또한 Prakash와 Chandrasekaran(1977)이 제안한 수계산 방법에 의해서도 예측할 수 있는데, 수치해석 방법은 지반의 탄성계수와 지반-말뚝 간 경계 요소(interface element)가 합리적으로 입력되었을 경우 말뚝 구조물의 고유 진동수를 비교적 정확하게 예측할 수 있지만, 지반의 탄성계수와 경계 요소의 입력 값을 합리적으로 결정하는 일이 매우 어렵고, 이 입력 값들의 정밀도에 따라 고유 진동수 산정 결과도 크게 달라진다. 또한 메쉬가 복잡할 경우에는 상당히 긴 해석 시간이 요구된다. 한편 수계산 방법을 이용하면 말뚝의 특성 값으로부터 고유 진동수를 쉽게 산정할 수 있지만, 복잡한 구조물 시스템을 특성 값 하나로 단순화시켜 계산하기 때문에 경우에 따라서 크게 부정확한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 간단한 질량 - 스프링 모델을 이용하여 지진 하중을 받는 말뚝 구조물의 고유 진동수를 간편하면서도 효율적으로 예측할 수 있는 방법을 모색

하였다. 고유진동수 산정 결과에 큰 영향을 미치는 지반-말뚝 사이의 스프링 강성을 다양한 방법으로 산정하고, 이들을 이용하여 계산한 고유진동수를 1g 진동대 실험에서 측정한 고유진동수와 비교하여, 지진 하중을 받는 사질토 지반에 가장 적합한 스프링 강성 산정 방법을 결정하고자 하였다.

2. 고유 진동수 예측 방법

2.1 말뚝 시스템 모델링

암반에 근입된 말뚝 구조물의 고유 진동수를 예측하기 위하여 본 연구에서는 말뚝을 그림 1에서와 같이 4개의 빔 요소로 모사하였다. 모델을 단순화시키기 위하여 지층의 개수를 3층으로 가정하였으며, 각 지층의 지반 반력은 서로 다른 강성의 스프링으로 모사하여 각 절점에 위치시켰다. 말뚝의 질량은 지층 분할에 따라 3개의 집중 질량으로 가정하였으며, 상부 질량 역시 1개의 집중 질량으로 나타냈다. 일반적으로 감쇠비가 고유 진동수에 미치는 영향은 매우 작으므로(김재관, 이동근(2005)) 모델링의 단순화를 위해 감쇠는 없는 것으로 가정하였다.

2.2 운동 방정식

말뚝의 집중 질량 및 상부 구조물 집중 질량으로 구성된 질량행렬 M 과 말뚝요소의 휨 강성 및 지반 반력으로 구성된 강성행렬 K 로부터 식 (1)과 같은 운동방정식을 세울 수 있다.

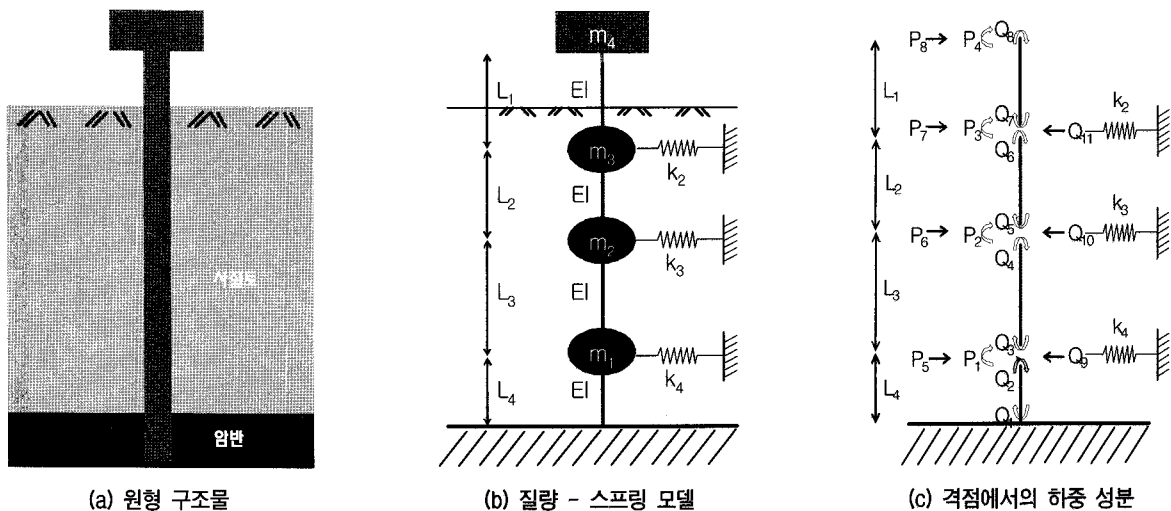


그림 1. 말뚝 시스템 모델링

에 가장 적합한 스프링 강성 산정 방법을 결정하였다.

3.2 p-y 곡선으로 산정한 스프링 강성

3.1 지반 반력 상수로 산정한 스프링 강성

Terzaghi(1955)와 Reese(1974)는 사질토 지반에서 지반 반력이 깊이에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하고, 지반 반력의 증가율을 의미하는 지반 반력 상수를 표 1과 같이 제안하였다. 지반의 스프링 강성은 그림 2 (a)에서 보는 것과 같이 지반 반력 상수(n_h)에 스프링이 위치하는 깊이(z)와 각 지층 두께(h)를 곱하여 산정할 수 있다.

일반적으로 지반 반력은 말뚝의 횡방향 변위에 대하여 비선형적으로 증가하며, 이와 같은 지반 반력의 비선형성은 p-y 곡선으로 대표할 수 있다. 실무에서는 p-y 곡선을 이용하여, 예측되는 변위에서의 지반 반력을 결정하고, 이때의 할선 기울기를 이용하여 등가 선형 스프링 계수를 산정한다. 따라서 현재 내진설계에 적용되고 있는 API(1987), Reese(1974)의 p-y 곡선을 이용하여, 도로교 시방서 기준에 따라 말뚝 지름 1% 변위에서의 할

표 1. 지반 반력 상수

제안자	지하수위 아래			지하수위 위		
	느슨	중간	조밀	느슨	중간	조밀
Terzaghi (1955) (t/ft^3)	4	14	34	7	21	56
Reese (1974) (MN/m^3)	5.4	16.3	34	6.8	24.4	61

표 2. p-y 곡선(사질토)

제안자	p-y 곡선 식	주석
Reese (1974)	$p_a = k_h y_a \frac{z}{D}$, $p_b = p_u \frac{B}{A}$, p_u 는 p_{us} 와 p_{ud} 중 작은 값, A, B =경험 값, $y_a = D(p_b/zk_h)^{n/m-1} (D/y_b)^{1/m-1}$, $y_b = D/60y_u = 3D/80$	말뚝 두부 정적, 반복하중 재하 실험으로 산정
API (1987)	$p = Ap_u \tanh\left(\frac{kz}{Ap_u} y\right)$, 여기서 p_u 는 $(C_1 z + C_2 D)\gamma z$ 와 $C_3 D\gamma z$ 중 작은 값, C_1, C_2, C_3 는 상수, A 는 하중 재하방식에 따른 상수	
NCHRP (2001)	$p_d = p_s (\alpha + \beta a_0^2 + \kappa a_0 (\frac{\omega y}{d})^n)$, $p_d < p_u$, 여기서 p_s 는 정적 지반반력, α, β, κ, n 은 상수, ω 는 하중재하주기, a_0 는 무차원 진동수	수치해석으로 산정
Yang (2009)	$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_u}}$, 여기서 $p_u = ADK_p \gamma z^n$, $k_{ini} = \frac{Kp_u}{p_u - K \frac{D}{100}}$, $K = aP_a (\frac{\sigma}{P_a})^{0.5}$, P_a 는 대기압, D =말뚝 지름, A, n, a 는 상수	1g 진동대 실험으로 산정

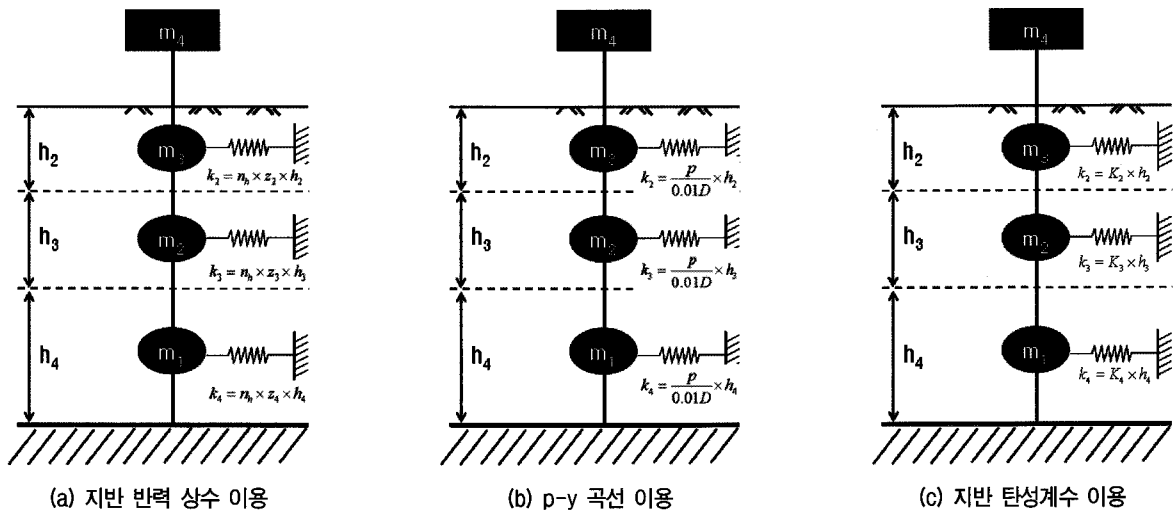


그림 2. 스프링 강성 산정 방법

선 기울기를 산정하고, 그림 2의 (b)에서와 같이 등가 선형 스프링 계수를 산정하였다.

그러나 상기의 p-y 곡선(API, Reese 등)은 말뚝 두부에 정적인 하중 혹은 반복하중을 가하여 실험적으로 제안된 p-y 곡선으로서, 여러 연구자들에 의해(Dou와 Byrne, 1996; Ting 등, 1987) 진동하중 조건에 적절하지 않다고 밝혀진 바 있다. 따라서 이에 더하여 지반 진동 조건하에서 실험적으로 제안된 동적 p-y 중추 곡선(Yang, 2009)과 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program, 2001)의 동적 p-y 곡선을 이용하여 스프링 강성을 산정하였다. 본 연구에서 사용한 p-y 곡선을 정리하면 표 2와 같다.

3.3 지반의 탄성계수로 산정한 스프링 강성

Carter(1984)는 지반의 탄성 계수와 지반-말뚝 간 상대 강성을 이용하여, 지반 반력 계수를 예측할 수 있는 식 (10)과 (11)을 제안한 바 있다. 이 Carter의 방법을 이용하여 스프링 강성을 그림 2의 (c)에서와 같이 산정하였다.

$$K = \frac{1.0E_s}{1-u_s^2} \left[\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right]^{1/12} \quad (10)$$

$$E_s = 2\rho V_s^2(1+u_s) \quad (11)$$

여기서 E_s 는 지반의 탄성계수, V_s 는 전단파 속도, u_s 는 포아송비, D 는 말뚝의 지름, $E_p I_p$ 는 말뚝의 휨강성을 나타낸다. 식 (11)에서, 지반의 전단파 속도는 벤틀러 엘레먼트 실험으로부터 결정하였다. 그림 3은 다양한 상대밀도와 구속압 조건에서 벤틀러 엘레먼트 실험을 수행하여 구한 최대 전단탄성계수이다. 그림 3의 결과들을 식 (12)를 이용하여 회귀분석하고 주문진 표준사의 최대 전단

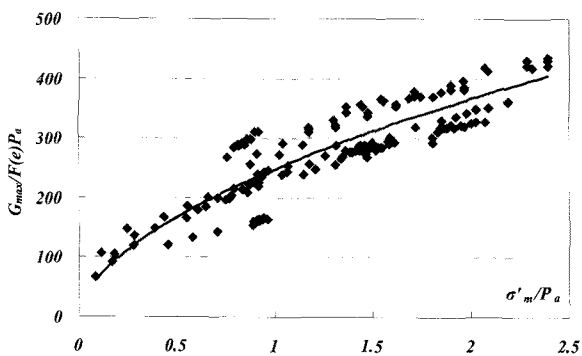


그림 3. 벤틀러 엘레먼트 실험 결과

탄성계수에 대한 경험식을 만들어냈으며, 식 (13)을 통해 깊이 별 전단파 속도를 결정하였다.

$$G_{\max} = AF(e)(OCR)^k P_a^{1-n} (\sigma'_m)^n \quad (12)$$

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (13)$$

식 (12)와 (13)에서 P_a 는 대기압, σ'_m 은 평균주응력, ρ 는 지반의 밀도를 의미하며 $F(e)$ 는 Hardin(1978)이 제시한 간극비에 대한 함수로 식 (14)와 같다. 회귀분석 결과, 상수 A와 계수 n은 각각 247.73과 0.567로 결정되었다.

$$F(e) = 1/(0.3 + 0.7e^2) \quad (14)$$

4. 고유 진동수 예측 결과

앞서 기술한 방법으로 말뚝 구조물의 고유 진동수를 산정하고, 기존 문헌에 발표된 유민택 등(2009)과 Han 등(2007)의 1g 진동대 실험 결과와 비교하여, 본 연구에서 사용한 예측 방법의 적합성을 평가하였으며, 지진 하중을 받는 사질토 지반에 가장 적합한 스프링 강성 산정 방법을 결정하였다.

4.1 1g 진동대 실험

그림 4는 유민택 등(2009)이 건조 사질토 지반 조건에서 수행한 1g 진동대 실험의 단면을 나타낸다. 이 실험에서는 스트레인 게이지를 이용하여 말뚝 깊이 별 모멘트 분포를 재측하였고, 가속도계를 이용하여 자유장에서의 지반 가속도와 상부 하중의 가속도를 측정하였다. 그리고 LVDT를 이용하여 상부 하중의 변위와 지반

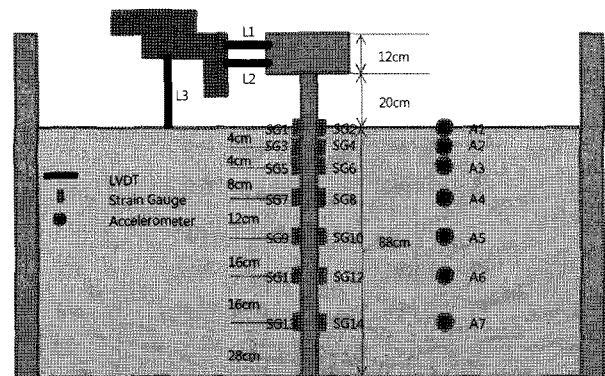


그림 4. 건조 사질토 실험 단면(유민택 등, 2009)

침하를 측정하였다.

토조 내 지반은 상대밀도 80%의 건조 사질토 단일 지반으로 조성되었으며, 지반 조성에 사용된 주문진 표준사의 기본 물성은 표 3에 나타낸 바와 같다.

실험에는 3가지 크기의 모형 말뚝이 사용되었으며, 모형말뚝으로 사용된 알루미늄 관의 직경, 반지름, 휨강성, 그리고 근입 깊이를 상부 하중의 질량 및 위치와 함께 표 4에 정리하였다.

유민택 등은 모형 말뚝의 고유 진동수를 측정하기 위해, 입력 지진 가속도가 0.01g로 매우 작은 경우와 국내의 일반적인 설계 지진 가속도 범위인 0.1g와 0.2g인 경우에 대하여 진동실험(Sweep test)을 수행하였다. 각 입력 가속도 수준에서 산정된 고유 진동수 결과는 표 4에 나타낸 바와 같다. 입력 가속도 진폭이 커질수록 지반의 변형이 상대적으로 크게 발생하고, 이로 인해 지반의 탄성계수가 감소하였기 때문에 고유 진동수는 감소하는

것으로 나타났다.

그림 5는 Han 등(2007)이 포화 사질토 지반 조건에서 수행한 1g 진동대 실험의 단면을 나타낸다. 이 실험에서는 스트레인게이지, 가속도계, 그리고 LVDT 이외에도 지반에 발생하는 과잉간극수압을 측정하기 위한 간극수압계가 사용되었다. 모형 지반은 주문진 표준사를 이용하여 과잉간극수압이 발생하지 않는 상대밀도 80%에 두께 20cm인 조밀한 포화 사질토 지반과 그 위에 놓인 상대밀도 20%에 두께 30cm인 느슨한 포화 사질토 지반의 2층 지반으로 조성되었다. 모형 말뚝으로는 폭 6.0cm, 두께 0.4cm의 철제 플레이트가 사용되었으며, 제원은 표 5에 나타낸 바와 같다.

Han 등은 표 6과 같은 실험을 통하여 말뚝 구조물의 고유 진동수를 결정하였다. 정현파의 입력 가속도 진폭을 0.015g로 매우 작게 한 상태로 다양한 진동수에 대하여 실험을 수행함으로써 과잉간극수압이 발생하지 않

표 3. 주문진 표준사 물성치

USCS	G_s	최대건조단위중량	최소건조단위중량	D_{50}	균등계수
SP	2.65	$1.66t/m^3$	$1.33t/m^3$	0.58mm	1.68

표 4. 모형 말뚝 제원 및 고유 진동수 계측 결과 (건조 사질토)

실험번호	근입깊이 (cm)	상부질량 높이(cm)	말뚝직경 및 두께(cm)	휨강성 (kgf.cm ²)	상부하중 (kg)	말뚝질량 (kg)	실험 결과 (Hz)	
							입력 가속도	고유 진동수
1	110	30.75	3.5 (0.3)	2693199	10.0	1.146	0.01g	12.8
							0.1g	12.0
							0.2g	11.0
2	88	25.00	2.8 (0.2)	960305	5.1	0.498	0.01g	14.7
							0.1g	13.7
							0.2g	12.4
3	57	15.85	1.8 (0.1)	133889	1.4	0.105	0.01g	19.5
							0.1g	18.2
							0.2g	16.7

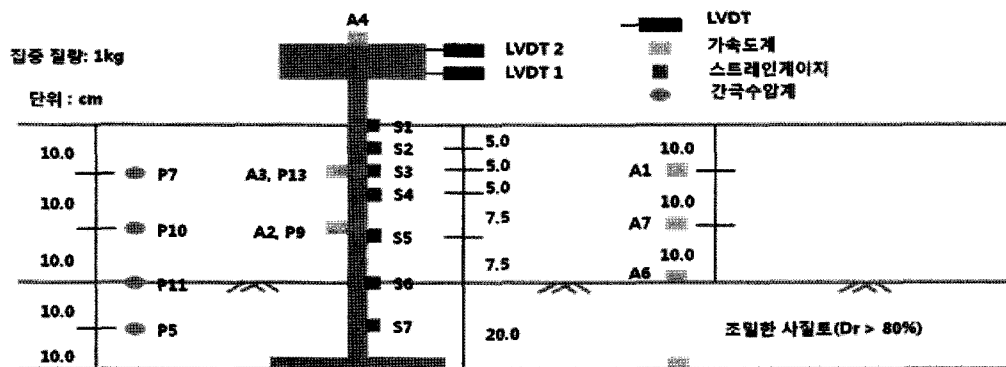


그림 5. 포화 사질토 실험 단면(Han 등(2007))

표 5. 모형 말뚝 제원 및 고유 진동수 계측 결과(포화 사질토)

근입깊이 (cm)	상부질량 높이(cm)	말뚝 폭 및 두께(cm)	휨강성 (kgf.cm ²)	상부하중 (kg)	말뚝질량 (kg)	실험 결과(Hz)		
						입력 가속도	조건	고유 진동수
50	10	6.0 (0.4)	58990	1.0	1.13	0.015g	비액상화	15.0
						0.2g	액상화	3.0-4.0

표 6. 포화 사질토 실험 조건

입력 가속도 진폭	입력 가속도 진동수 (Hz)	주석
0.015g	5, 10, 15, 20, 25, 30, 31, 32, 35	과잉간극수압 발생 ×
0.2g	3, 4, 5, 6, 10, 15, 20	과잉간극수압 발생 ○

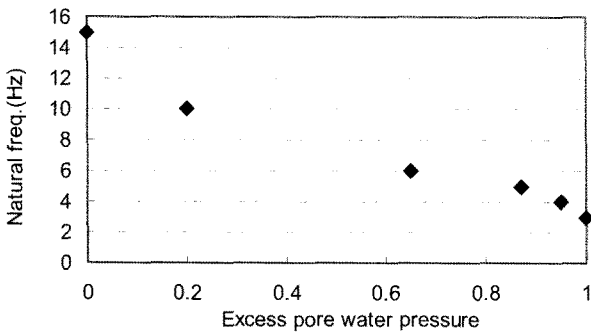


그림 6. 과잉 간극 수압 크기 별 고유 진동수 산정 결과(Han 등 (2007))

는 조건에서의 고유 진동수를 결정하였고, 가속도 진폭을 0.2g로 증가시켜 실험을 수행함으로써 느슨한 포화 사질토 지반에서 발생한 과잉간극수압 비에 따른 고유 진동수의 변화를 측정하였다.

포화 사질토 지반에서 과잉간극수압의 크기에 따라 계측된 고유 진동수 결과는 그림 6과 같다. 과잉간극수압이 증가할수록 말뚝 주위 지반의 강성이 감소하기 때문에 말뚝 시스템의 고유 진동수는 감소하는 것으로 나타났다.

4.2 고유 진동수 예측 결과와 실험 결과의 비교

지반-말뚝 간 스프링 강성을 산정하는데 p-y 곡선을 이용할 경우, API와 Reese의 반복 p-y 곡선을 작성하는데 필요한 내부 마찰각은 삼축실험으로부터 결정하였

고(조밀한 지반 : 41°, 느슨한 지반 : 33°), 지반 반력 상수는 API(1987)와 Reese(1974)의 추천 값을 사용하였다. NCHRP p-y 곡선을 작성하기 위해 필요한 다양한 계수 값들은 벤더 엘레먼트 실험으로 산정한 모형 지반의 전단파 속도로부터 결정하였으며, Carter(1984)의 방법을 적용하기 위해 필요한 지반의 탄성계수 역시 벤더 엘레먼트 실험 결과를 이용하여 결정하였다.

표 7에는 건조 사질토 지반 조건에서, 서로 다른 모형에 대하여 다양한 방법으로 산정한 고유 진동수 예측값을 실험값(유민택 등(2009))과 비교하여 나타내었다. 이 표에서, 실험으로 계측한 고유 진동수는 진동 가속도 크기에 따라 약간씩 변화하므로 그 크기를 범위로 나타내었다. 지반-말뚝 간 스프링 설치 위치에 따라 질량행렬과 강성행렬이 다르게 산정되고, 이는 고유 진동수 예측 결과에 영향을 미칠 수 있는데, 횡방향 하중을 받는 말뚝은 임계 깊이(Infinite depth)이내의 거동이 중요하므로, 그림 7에서와 같이 임계 깊이까지 동일 간격으로 3개의 스프링을 설치하고 해석을 수행하였다.

이 표에서 보면, Prakash 등이 제안한 수계산 방법으로 산정한 고유 진동수는 실험 결과와 약 3배 정도의 차이를 보인다. 반면 본 연구에 이용한 방법으로 산정한 고유 진동수는 전체적으로 크게 개선된 결과를 보이나, 예상했던 바와 같이 지반-말뚝 간 스프링 강성 산정 방법에 따라 얼마간의 차이를 보인다. 이 중에서 Reese(1974)의 지반반력상수와, Yang(2009)의 p-y 중추 곡선을 이

표 7. 고유 진동수 산정 결과(건조 사질토 - 임계 깊이까지 동일 간격으로 3개의 스프링 설치)

실험번호	실험 값		선행 수계산 방법 (Prakash)	본 연구에서 제시한 방법에 따른 계산 값						
	입력 가속도	고유 진동수		지반반력상수		p-y 곡선				탄성계수 Carter
				Terzaghi	Reese	API	Reese	Yang	NCHRP	
1	0.01g~0.2g	12.8~11.0	34.2	9.5	11.3	10.0	9.6	10.7	10.5	9.1
2	0.01g~0.2g	14.7~12.4	39.0	10.9	12.9	11.5	11.0	12.5	12.3	10.3
3	0.01g~0.2g	19.5~16.7	50.2	14.8	17.7	15.6	14.8	17.5	16.7	14.0

용하여 스프링 강성을 산정하였을 경우에 실험결과에 가장 근접한 결과를 나타내었다. 입력 가속도가 0.01g로 아주 작을 경우에는 Reese와 Yang의 결과가 실험 결과와 비교하여 10% 정도 작으며, 입력 가속도가 0.1g와 0.2g 일 경우에는, 실험 결과 범위 안에 들거나 5% 정도의 오차를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 이 방법들을 이용하면 국내의 내진 설계기준에 해당하는 입력 가속도 수준의 범위에서 고유 진동수를 실제에 가깝게 예측할 수

있을 것으로 판단된다.

스프링 설치 위치에 따른 고유 진동수 산정 결과의 변화를 알아보기 위하여, 그림 8에서와 같이 스프링 설치 위치를 달리하여 해석을 수행하였다. 그림 8(a)는 임계 깊이까지 동일 간격으로 2개의 스프링을 설치하고, 임계 깊이 이하 지층의 중앙에 1개의 스프링을 설치한 경우이고, 그림 8(b)는 임계 깊이 이내의 스프링을 등간격 대신에 임계 깊이의 10%, 30%, 60% 위치에 설치한 경우이며, 그림 8(c)는 전 지반을 10층 균등 분할한 경우이다. 이상의 경우들에 대하여 Reese(1974)의 지반반력상수와, Yang(2009)의 p-y 중추 곡선을 이용하여 산정한 고유 진동수를 표 8에 나타내었다. 표 8의 결과를 3개의 스프링을 등 간격으로 설치하여 구한 표 7의 결과와 비교하여 보면 각 결과의 수치적 차이는 크지 않으나, 임계 깊이 이내에 설치된 스프링의 개수를 줄여서 임계 깊이 이하에 스프링을 설치하기 보다는, 임계 깊이 이내에 설치된 스프링의 개수를 증가시키는 것이 더 나으며, 임계 깊이 내에서의 스프링 설치 위치를 달리하거나 스프링의 개수를 3개 이상으로 늘리는 경우에 고유 진동수 예측 결과가 향상되지 않음을 알 수 있다.

2층 지반으로 조성된 포화 사질토 조건에서는(Han 등

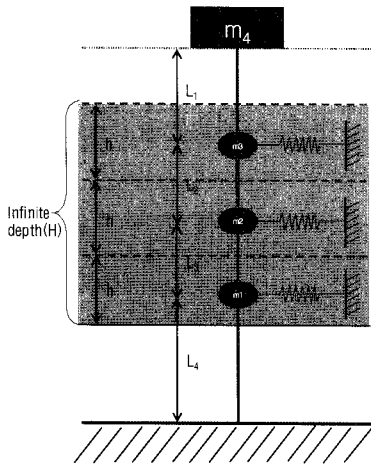
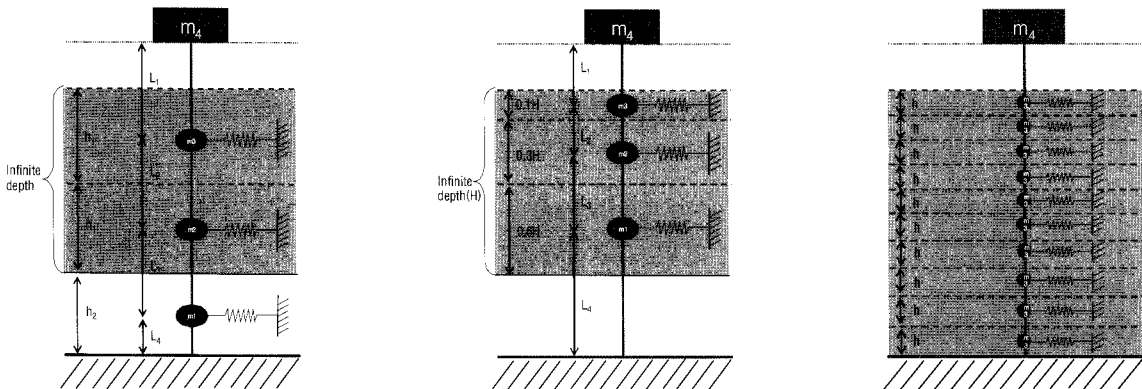


그림 7. 지반-말뚝 사이의 스프링 설치 방법



(a) 임계 깊이 내 동일 간격 2개 스프링 + 임계 깊이 이하 1개 스프링 설치 (b) 임계 깊이 내 10%/30%/60% 위치에 스프링 설치 (c) 균일 간격으로 10개 스프링 설치

그림 8. 스프링 설치 위치

표 8. 스프링 설치 방법에 따른 고유 진동수 산정 결과(건조 사질토 - 실험번호 1)

실험 값		본 연구에서 제시한 방법에 따른 계산 값			
입력 가속도	고유 진동수	Reese 지반반력상수		Yang p-y 곡선	
		스프링 설치 방법	고유 진동수	스프링 설치 방법	고유 진동수
0.01g ~ 0.2g	12.8 ~ 11.0	임계 깊이 내 균등 2개 + 이하 1개	11.0	임계 깊이 내 균등 2개 + 이하 1개	10.3
		임계 깊이 내 10/30/60% 위치	11.0	임계 깊이 내 10/30/60% 위치	10.6
		10개 등 간격	11.2	10개 등 간격	10.8

(2007)), 모형 말뚝의 임계 깊이가 하부 조밀한 지층에 위치하는 것으로 나타났다. 단일 지반에서와 같이 임계 깊이를 기준으로 스프링의 위치를 결정할 경우, 상대 밀도가 서로 다른 두 지반이 동시에 위치한 지층에서 스프링의 강성을 합리적으로 결정하기 어려웠기 때문에, 느슨한 상부 지층을 균일하게 2개층으로 분할하고 조밀한 하부 지층은 하나의 지층으로 하여 해석을 수행하였다. 지반-말뚝 간 스프링 강성은 먼저 건조토 조건과 동일한 방법으로 산정한 후, 과잉간극수압의 크기에 따라 표 9에 제시된 감소계수를 적용하여 재 산정 하였다.

표 10은 위와 같은 방법으로 예측한 고유 진동수를 실험으로부터 얻은 고유 진동수(Han 등(2007))와 비교한 결과이다. 과잉간극수압이 발생하지 않았을 경우($r_u = 0$), 건조 사질토 경우와 동일하게 Reese(1974)의 지반반력상수와 Yang(2009)의 p-y 중추 곡선을 이용하거나, API(1987)의 p-y 곡선을 이용하여 스프링 강성을 산정하였을 때, 고유 진동수 예측 결과와 실험결과가 5% 정도의 차이를 보임으로써 가장 좋은 결과를 나타내었다. 과잉간극수압이 발생하였을 경우에는 Terzaghi(1955)의 지반반력상수를 이용하여 지반-말뚝 간 스프링 강성을 산정하고, Liu와 Dobry(1995)의 방법으로 과잉간극수압에 따른 지반 강성 감소 효과를 고려하였을 때 가장 비슷한 결과를 나타내었으나, 40% 정도까지의 오차를 나타내었다. 과잉간극수압이 발생하였을 경우 큰 오차가 발생

하는 이유는 진동 중 과잉간극수압이 지속적으로 변화하기 때문에, 특정 시점에서의 과잉간극수압 비와 고유 진동수를 예측할 때 실험 오차가 발생했을 가능성과, 고유 진동수 예측 과정에서, 과잉간극수압에 따른 지반 강성의 감소 효과를 고려해 주는 과정에서 발생한 오차 때문이라고 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 간단한 질량 - 스프링 모델을 이용하여 지진 하중을 받는 말뚝 구조물의 고유 진동수를 간편하면서도 효율적으로 예측할 수 있는 방법을 모색하였다. 고유진동수 산정 결과에 큰 영향을 미치는 지반-말뚝 사이의 스프링 강성을 다양한 방법으로 산정하고, 이들을 이용하여 계산한 고유진동수를 1g 진동대 실험에서 예측한 고유진동수와 비교하여, 지진 하중을 받는 사질토 지반에 가장 적합한 스프링 강성 산정 방법을 결정하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 균질한 건조 사질토 지반에서 1g 진동대 실험을 수행하여 얻은 고유 진동수(유민택 등, 2009)를 계산값과 비교해보면, Reese(1974)의 지반반력상수와 Yang(2009)의 p-y 중추곡선으로 지반-말뚝 간 스프링 강성을 구하고 고유 진동수를 산정하는 것이 약 5%

표 9. 과잉간극수압 비에 따른 지반 저항 감소 계수

연구자	감소 계수	산정 방법
① Liu and Dobry (1995)	$1 - r_u$	원심모형실험 + 정재하실험
② Feng and Wang (2006)	$1 (0 \leq r_u \leq 0.2)$ $1.25r_u (0.2 \leq r_u \leq 0.8)$ $0.25(0.8 \leq r_u \leq 1.0)$	1g 진동대실험 + 등가정적해석
③ Yang (2009)	$1 - 0.84r_u$	1g 진동대실험 + 등가정적해석

표 10. 고유 진동수 산정 결과(포화 사질토)

r_u	실험	지반반력상수						p-y 곡선						탄성계수					
		Terzaghi			Reese			API			Reese			Yang			Carter		
		①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
0	15	10.5	10.5	10.5	14.0	14.0	14.0	13.9	13.9	13.9	12.9	12.9	12.9	13.7	13.7	13.7	12.7	12.7	12.7
0.2	10	10.0	10.5	10.0	13.4	14.0	13.5	13.3	13.9	13.4	12.4	12.9	12.5	13.1	13.7	13.2	12.1	12.7	12.2
0.65	6	8.2	8.7	8.7	11.3	11.8	11.9	11.2	11.8	11.9	10.4	10.9	11.0	10.9	11.5	11.6	10.1	10.6	10.7
0.87	5	6.5	7.6	7.7	9.0	10.5	10.6	9.0	10.4	10.6	8.4	9.7	9.9	8.6	10.1	10.3	8.1	9.4	9.6
0.95	4	5.5	7.6	7.2	7.2	10.5	10.0	7.3	10.4	9.9	6.9	9.7	9.3	6.9	10.1	9.6	6.5	9.4	8.9
1	3	3.9	7.6	6.8	3.9	10.5	9.5	3.9	10.4	9.4	3.9	9.7	8.8	3.9	10.1	9.1	3.9	9.4	8.5

주) ① Liu와 Dobry의 방법, ② Feng과 Wang의 방법, ③ Yang의 방법(과잉간극수압 비에 따른 지반 저항 감소 계수)

정도의 차이를 보여 가장 우수한 결과를 나타냈다.

- (2) 포화 사질토 지반에서 1g 진동대 실험으로 얻은 고유진동수(Han 등(2007))는 계산 결과와 비교하여 진동 중 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따라 약 5%에서 40% 정도의 차이를 나타내었다.
- (3) 실험으로 얻은 고유진동수와 계산 결과를 비교하여 종합해볼 때, Reese(1974)의 지반반력상수와 Yang(2009)의 p-y 중추곡선으로 지반-말뚝 간 스프링 강성을 구하고 본 논문에서 사용한 방법을 이용하면, 국내의 내진설계 기준에 해당하는 입력 가속도 수준에서 건조한 지반이나 과잉간극수압이 발생하지 않는 포화토 지반에 놓인 말뚝 구조물의 고유 진동수를 실제에 가깝게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10004-0(2009)).

참고 문헌

1. 김재관, 이동근 (2005), *구조동역학제 2판*, (주)피어슨에듀케이션 코리아, pp.486.
2. 유민택, 최정인, 김성렬, 김명모 (2009), "1-g 진동대 모형실험의 가진주파수에 대한 상사법칙 개발", *한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집*, pp. 23-30.
3. American Petroleum Institute (1987), "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms", *API Recommended Practice 2A(RP-2A)*, 17th edn.
4. Carter, D.P. (1984), "A non-linear soil model for predicting lateral pile response", *Rep. No. 359*, Civil Engineering Dept. Univ. of Auckland, New Zealand.
5. Dou, H., and Byrne, P.M. (1996), "Dynamic response of single piles and soil-pile interaction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp.80-96.
6. Feng, S. and Wang, J. (2006), "Research on lateral resistance of pile in saturated sand under shake loading", *Proceedings of Sessions of GeoShanghai*, pp.490-497.
7. Han, J.T., Kim, S.R., Hwang, J.I., and Kim, M.M. (2007), "Evaluation of the dynamic characteristics of soil-pile system in liquefiable ground by shaking table tests", *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Greece Thessaloniki, Paper No.1340.
8. Hardin, B.O. (1978), "The nature of stress-strain behavior of soils", *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE Pasadena, California, Vol.1, pp.3-89.
9. Liu, L. and Dobry, R. (1995), "Effect of liquefaction on lateral response of piles by centrifuge model tests", *National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) Bulletin*, Vol.9, No.1, January, pp.7-11.
10. National Cooperative Highway Research Program (2001), "Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups", *NCHRP Report 461*, Transportation Research Board - National Research Council.
11. Prakash, S. and Chandrasekaran, V. (1977), "Free vibration characteristics of piles", *Proc. Ninth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engin., Tokyo*, Vol.2. pp.333-336.
12. Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974), "Analysis of laterally loaded piles in sand", *Proceedings of the VI Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 2(OTC 2080), pp.473-685.
13. Ting, J.M., Kauffman, C.R., and Lovicsek, M. (1987), "Centrifuge static and dynamic lateral pile behaviour", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.198-207.
14. Yang, E.K. (2009), "Evaluation of dynamic p-y curves for a pile in sand from 1g shaking table tests", Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea, 2009.

(접수일자 2009. 9. 3, 심사완료일 2010. 1. 8)