

대형말뚝기초의 축하중 거동에 대한 수치해석기반 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Axially Loaded Large-scale Pile Foundations

허정원¹⁾, Huh, Jungwon, 박재현²⁾, Park, Jaehyun, 이주형³⁾, Lee, Juhyung, 하성한⁴⁾, Ha, Sunghan, Kwak기석⁵⁾, Kwak, Kiseok, 정문경⁶⁾, Chung, Moonkyung

¹⁾ 전남대학교 건설환경공학부 부교수, Associate Prof., Civil and Env. Div., Chonnam Nat'l Univ.

²⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotech. Div., KICT

(e-mail: jaehyeon@kict.re.kr)

³⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotech. Div., KICT

⁴⁾ 전남대학교 건설환경공학부 석사과정, M.D. Candidate, Civil and Env., Chonnam Nat'l Univ.

⁵⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotech. Div., KICT

⁶⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotech. Div., KICT

SYNOPSIS : Reliability analyses were performed to quantify the risk in axially loaded large-scale pile foundations in consideration of pile-soil interaction and uncertainties on various design variables. The finite difference method based on an equivalent soil spring model and a load transfer method and Monte Carlo simulation method are integrated in the framework of reliability analysis. The applicability and efficiency of the proposed method in the safety assessment of axially loaded pile-soil system was verified using a realistic example. Since the proposed method can explicitly consider uncertainties in various design variables, and quantify failure probability of a pile foundation, it can be used to estimate risk, to obtain basic informations for life cycle cost analysis, and to develop code requirements for a reliability-based design of pile foundations.

Keywords : LRFD, resistance factor, FORM, driven steel pipe pile

1. 서론

국내·외 연구자들에 의해 말뚝구조물에 대한 확률론에 기초한 신뢰성해석 및 신뢰성설계 기법의 연구가 활발히 진행되었으나, 그들의 대부분은 실제 말뚝거동을 비교적 명확히 고려할 수 있는 유한요소법이나 유한차분법에 기초한 것이 아니라 명시적인 해석해로 주어지는 문제에 대한 신뢰성해석을 다루었다(허정원, 정상섭, 2004). 본 연구에서는 이러한 연구들과 차별화되는 말뚝-지반계의 역학거동과 작용하중, 말뚝 및 지반의 저항력에 관련된 설계인자들의 불확실성을 명확히 고려한 축하중 말뚝의 실질적이고 효율적인 위험도 평가를 위해서, (1) 말뚝-지반의 상호작용을 고려하는 등가 지반스프링 모델 및 하중전이법에 기초한 유한차분 말뚝해석법과 (2) 말뚝 및 지반의 저항변수와 하중변수가 내재하고 있는 불확실성을 명확히 고려하여 그 위험도를 평가하는 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 결합한 말뚝 신뢰성 해석 기법을 제안하였다.

2. 보-기둥 모델에 의한 축하중을 받는 말뚝의 유한차분해석

Terzaghi의 전통적인 1차원 이론이나 또는 실험적 상관성을 사용하는 기존 말뚝 침하량의 산정과 해

석기법은 최근 컴퓨터기술의 진보에 따라 대표적인 3가지 방법인 하중-전이법, 탄성론법 및 유한요소법을 이용하여 보다 정도 높은 말뚝의 변위해석으로 변화하고 있다. 본 연구에서는 실무적인 적용의 편리성과 계산의 효율성을 고려하여 하중-전이법에 기초한 해석기법을 적용하였다. 다음 그림 1에 보이는 바와 같이 하중-전이법에서 말뚝주변의 흙은 말뚝길이 방향의 연속되는 스프링과 말뚝선단에서 하나의 집중 스프링으로 대체된다. 지반의 비선형성을 고려하는 다양한 (t-z)곡선과 (q-z)곡선 모델들은 계층장치를 부착한 축 하중 상태하의 말뚝에 대한 현장 실험 자료와 연속체 및 지반역학의 원리에 기초하여 제시되었다. 이러한 선형탄성 말뚝과 비선형지반에 대한 지배 미분방정식은 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서, E는 말뚝재료의 탄성계수, A는 말뚝 단면적, x는 지반깊이방향의 좌표, z는 축 변위, R은 말뚝과 지반의 접촉면의 유효반경, 그리고 t(x,z)는 말뚝에서의 위치와 말뚝변위의 함수인 단위 주면마찰이다.

$$EA \frac{d^2z}{dx^2} - 2\pi R t(x,z) = 0 \quad (1)$$

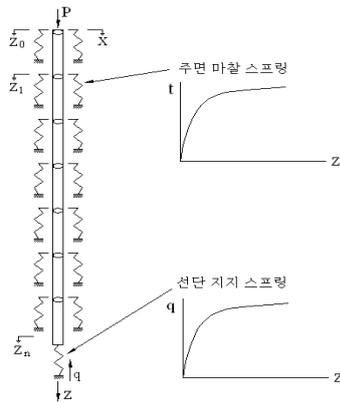


그림 1. 축하중말뚝 모델

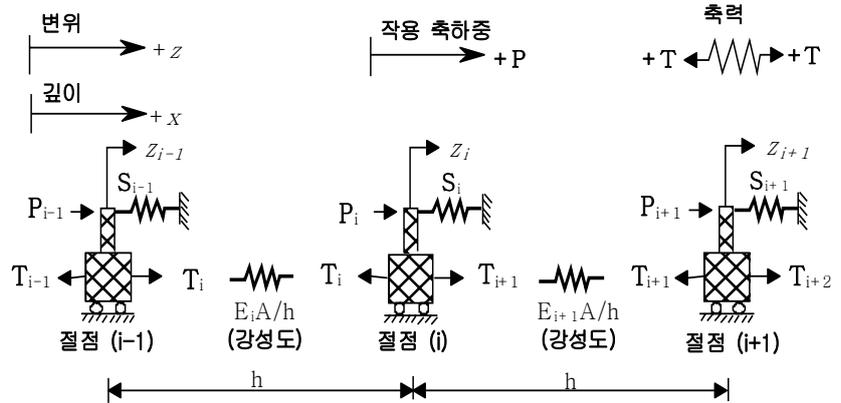


그림 2. 축하중 말뚝의 이산화모델

축 하중을 받는 말뚝에 대한 연속체 모델의 수치해석을 위하여, Matlock et al.(1981)이 적용한 유한차분법과 회기법을 이용하였다. 이 방법은 그림 2와 같이 일련의 스프링으로 연결된 유한개의 요소로 모델링 할 수 있다. 각 절점들은 말뚝의 축 방향 강성(EA/h)을 나타내는 스프링으로 연결되어 있으며, 여기서 h는 요소의 길이이다. 외부하중 P와 지반의 스프링 S는 모든 절점에 위치하는 것으로 볼 수 있다. 이때 말뚝의 변위(z)는 +x 방향으로 발생하면 양의 값을 가지며 축력(T)은 인장력이 양의 값을 갖는 것으로 모델링하였으며, T_i는 요소의 절점 (i)와 절점 (i-1) 사이의 축방향 내부 부재력을 나타낸다.

3. 대형말뚝기초의 위험도 평가기법

3.1 불확실성 및 확률변수

말뚝의 신뢰성해석에 직접적인 영향을 주는 불확실성의 요소는 하중의 불확실성과 말뚝특성 및 지반 특성의 불확실성을 포함하는 말뚝-지반계에 대한 저항력의 불확실성으로 크게 분류할 수 있다. 말뚝특성의 불확실성은 말뚝의 제작과정과 말뚝 향타에 의한 영향에 주로 기인하는 것으로, 본 연구에서는 말뚝재료의 탄성계수(E), 설계기준 축강도(σ_{ck}), 허용휨강도(σ_{allow}), 허용전단강도(σ_{allow}), 단면적(A), 그리고 관성모멘트(I_y)를 확률변수로 고려하였다. 주면마찰력에 대한 지반특성을 달리하는 수직방향의 개별 지층을 일련의 선형 및 비선형 지반스프링으로 이루어진 집합체로 분리하여 고려하였으며, 동일 지층내에서 다른 깊이의 지반특성치는 일정하거나 선형적으로 증가 또는 감소하는 것으로 고려하였다. 단 각 지층별 지반특성에 대한 변동성은 일정한 것으로 가정하였다(Vanmarcke, 1977).

지반의 하중-변위 관계에 대한 비선형성을 고려하는 경우에는 지반스프링을 말뚝변위의 함수인 단위

주면마찰지지력(t - z) 곡선, 단위 선단지지력(q - z) 곡선, 그리고 단위 수평지지력(p - y) 곡선의 하중전이함수로 정의해야 한다. 다양한 하중전이 함수모델인 (t - z) 곡선과 (q - z) 곡선 모델들 중, 본 연구에서는 API(American Petroleum Institute, 1993)에서 해양구조물 하부기초 설계시 축하중 말뚝의 공용성 평가를 위하여 제시한 하중전이곡선을 적용하였다(그림 3). 이 하중전이곡선은 최대값으로 표준화되어 있는 것으로 실제 적용할 때는 단위 주면마찰지지력(f_s)과 단위 선단지지력(q_p)을 곱하여 사용한다. 하중전이곡선의 형태는 일정한 것으로 가정하고 지반의 각 지층별 불확실성은 f_s 와 q_p 를 확률변수로 고려함으로써 지층별 하중전이함수에 대한 변동성을 도입하였다. 또한 단위 수평지지력(p - y) 곡선에 대한 하중전이함수 모델에서의 불확실성도 동일한 개념을 적용하였다.

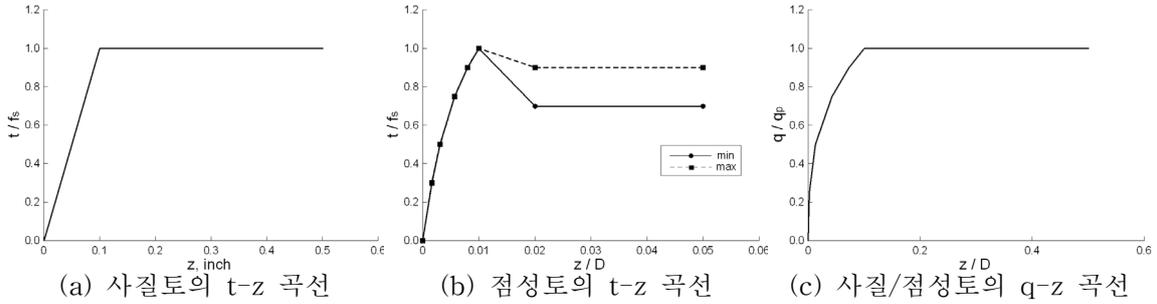


그림 3. API 규준에 따른 말뚝의 축하중 전이곡선(API, 1993)

3.2 한계상태함수 결정

말뚝 기초의 파괴모드로서 (1) 대상 지반/말뚝의 과도한 침하 및 수평변위, (2) 극한하중에 의한 압축, 휨 또는 좌굴과 관련된 말뚝의 구조파괴, 그리고 (3) 말뚝-지반계의 지지능력에 대한 파괴 등으로 분류할 수 있으며 이들에 대한 한계상태함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

(1) 수직침하 및 수평변위에 대한 한계상태함수

$$g_z = z_{allow} - z \quad (2)$$

여기서, z_{allow} 는 설계시방서 등에 규정된 사용성 한계침하량(말뚝두부에서의 허용침하량) 및 사용성 한계수평변위(말뚝두부에서의 횡방향 허용변위량)이며 z 는 말뚝두부의 실제 발생 수직 또는 수평변위로 유한차분해석을 통하여 얻어지는 값이다.

(2) 말뚝의 압축강도 성능함수

축하중을 받는 말뚝의 압축강도에 대한 파괴 성능함수는 식 (3)으로 정의하였다. 또한 횡하중을 받는 말뚝의 휨 인장강도에 대한 파괴 성능함수는 말뚝에서 발생하는 최대 휨모멘트가 극한허용모멘트 M_{allow} 를 초과하는 경우에 파괴로 규정하고, 식 (4)로 정의하였다.

$$g_\sigma = \sigma_{ck} - \sigma_c = \sigma_{ck} - \frac{T_c}{A} \quad (3)$$

$$g = M_{allow} - M = \frac{\sigma_{allow} I}{r} - M \quad (4)$$

여기서 T_c 와 M 은 말뚝에 발생하는 최대 압축력과 최대 휨모멘트로 유한차분해석을 통해 얻어지며, r 은 말뚝의 반경, σ_{ck} 와 σ_{allow} 는 각기 설계기준 압축강도와 허용휨강도, 그리고 A 와 I 는 말뚝의 단면적과 관성모멘트이다.

(3) 지반저항 성능함수

축하중 말뚝-지반계에서 지반저항에 대한 한계상태함수는 지반의 극한지지력이 실제 지반에서 발생한 총 주면마찰 반력과 선단지지 반력을 합한 값 보다 작은 경우를 파괴로 정의하며 아래와 같이 표현 된다.

$$g_Q = Q_{ult} - Q_{req} = (Aq_p + LA_s f_s) - (Q_p + Q_s) \quad (5)$$

여기서 A, L 및 A_s 는 각각 말뚝선단의 단면적, 말뚝의 총 길이 및 단위 길이당 말뚝주면의 면적이며, q_p 와 f_s 는 단위 선단지지력(kN/cm²)과 단위 주면마찰지지력(kN/cm²)으로 확률변수로 고려되며, Q_p 와 Q_s 는 실제 유한차분해석을 통하여 계산되는 말뚝의 선단지지 반력(kN)과 총 주면마찰지지 반력(kN)이다.

4. 신뢰성 해석

4.1 MCS를 이용한 신뢰성 해석

말뚝-지반계의 다양한 설계변수들의 변동성과 불확실성을 명확하게 고려하여 실제 말뚝기초의 위험도를 정량적으로 평가할 수 있는 지반반력법에 기초한 유한차분해석법과 MCS기법을 결합한 말뚝 신뢰성 해석 기법을 개발하였다. MCS는 양함수의 한계상태함수는 물론 본 연구에서 적용하는 지반반력법에 기초한 유한차분해석법과 같은 음함수형태의 한계상태함수를 가지는 실질적이고 복잡한 문제에 대해서도 적용 가능한 방법이다. 이 방법은 먼저 입력변수 값들의 실질적인 조합을 모의실험하기 위하여 입력변수들의 확률분포를 가지는 일련의 인위적 난수집합들을 발생시킨 후 얻어진 하나의 확률입력변수들의 집합에 대하여 확정적 해석방법(유한차분해석)을 이용하여 한계상태함수에 대응하는 파괴상태를 평가한다. 이 과정을 원하는 횟수만큼 반복하여 얻어진 모의실험 결과를 토대로 파괴확률이나 또는 응답의 통계특성치를 산정한다. 개발된 해석기법의 적용성과 신뢰성을 평가하기 위하여 실무적인 수치해석 예제를 고려하였다.

4.2 해석예제

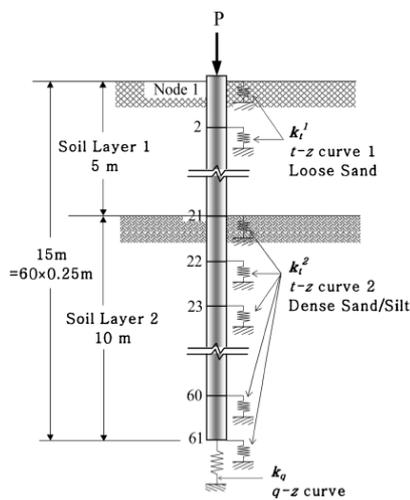


그림 4. 해석예제

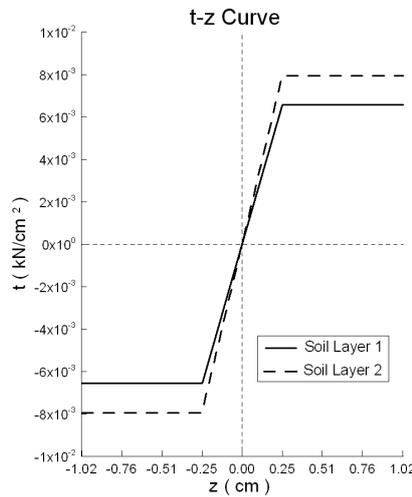


그림 5. API규준에 따른 t-z곡선

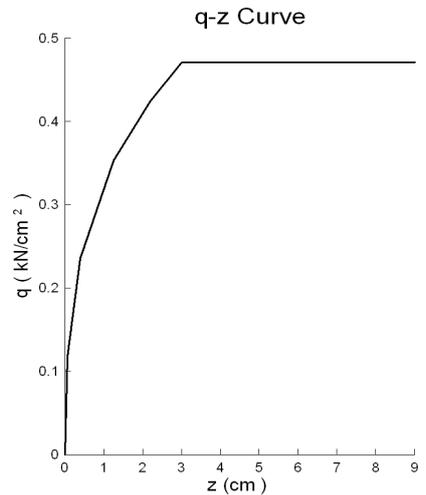


그림 6. API규준에 따른 q-z 곡선

축하중을 받는 말뚝의 신뢰성해석에서 고려한 수치예제에서는 그림 4에 보이는 지반으로부터 15m 깊이까지 타입되어 축하중을 받는 직경이 30cm인 원형단면의 콘크리트 기성말뚝을 고려하였다.

사용 콘크리트의 평균 설계기준 압축강도는 $2.746kN/cm^2$ ($280kgf/cm^2$)이고 평균 탄성계수는 2462

kN/cm^2 이다. 지표면으로부터 5m까지의 지층은 느슨한 모래로 구성된 사질토층으로 5m에서 15m까지의 지층은 조밀한 모래-실트로 구성된 사질토층으로 구성되었으며, 표 1에 보이는 API규준에 대한 설계계수를 평균값으로 사용하여 각 지반의 특성을 대표하는 2종류의 t-z 곡선과 말뚝선단에서의 q-z 곡선을 그림 7과 8에 제시하였다. 말뚝두부에서 작용하는 설계하중으로 말뚝-지반계의 극한지지력에 대하여 안전율 1.74를 적용한 800kN의 수직 축하중을 고려하였다. 유한차분해석법의 정확도 검증과 신뢰성해석결과와의 비교를 위해 표 2의 확률 설계변수의 평균값을 사용한 확정적해석을 수행하여 그 결과를 표 3에 제시하였고, 이는 범용 파일프로그램 APILE의 결과와 일치함을 확인하였다(정상삼 등, 2001). 개발된 MCS 기반 말뚝 신뢰성해석 프로그램을 이용하여 신뢰성해석을 수행하였으며, 각 한계상태의 1,000,000회 시뮬레이션에 대한 파괴확률과 대응 신뢰도지수를 표 3에 나타내었다.

표 1. API 규준의 사질토에 대한 설계변수

지층	상대 밀도	흙 분류	말뚝-지반 마찰각	지지력 계수(N_q)	단위 주면마찰지지력		단위 선단지지력	
					tonf/m ²	kN/cm ²	tonf/m ²	kN/cm ²
1	느슨	모래	20(deg)	12	6.7	6.571×10^{-3}	290	0.2844
2	조밀	모래-실트	25(deg)	20	8.1	7.944×10^{-3}	480	0.4707

표 2. 말뚝 신뢰성평가에 고려한 확률변수의 통계특성치

구분		확률변수		평균값	변동계수	분포형태
콘크리트 말뚝	재료특성	E (탄성계수)	kN/cm^2	2462	0.06	Log-Normal
		σ_{ck} (설계기준강도)	kN/cm^2	2.746	0.1	Normal
	단면특성	A (단면적)	cm^2	706.9	0.05	Log-Normal
지반	지층 1	f_s (단위주면마찰지지력)*	kN/cm^2	6.571×10^{-3}	0.2	Log-Normal
	지층 2	f_s (단위주면마찰지지력)*	kN/cm^2	7.944×10^{-3}	0.2	Log-Normal
		q_p (단위선단지지력)*	kN/cm^2	0.4707	0.2	Log-Normal
축하중		P (축하중)	kN	800	0.15	Type I(EVD)

*API 규준에서 사질토에 대한 설계계수

표 3. 신뢰성해석 결과

구분	한계상태함수	말뚝두부의 수직침하	말뚝의 압축강도	지반저항
확정적 해석	허용량 (A)	1 (cm)	2.746 (kN/cm ²)	1391 (kN)
	발생량 (O)	0.415 (cm)	1.121 (kN/cm ²)	800 (kN)
	안전율 (S.F=A/O)	SF \approx 2.41	SF \approx 2.50	SF \approx 1.74
신뢰성 해석 (MCS)	파괴확률	$p_f = 0.018648$	$p_f = 0.000031$	$p_f = 0.093097$
	대응 신뢰도지수	$\beta \approx 2.083$	$\beta \approx 4.005$	$\beta \approx 1.322$
	No. of Simulation	1,000,000	1,000,000	1,000,000
	신뢰구간	오차율	1.45 %	35.9 %
95%	파괴확률	0.018648 ± 0.000271	0.000031 ± 0.000011	0.093097 ± 0.000581

누적 파괴확률은 시뮬레이션 횟수가 최대 1,000,000회로 증가함에 따라 파괴확률이 수직침하, 말뚝의 압축강도 및 지반저항 성능함수에 대하여 각각 1.86%, 0.0031% 그리고 9.31%로 수렴하고 있으며, 대응하는 신뢰도지수는 각기 2.083, 4.005, 그리고 1.322이다. 표 3에 제시된 확정적 해석결과의 안전율은 안전에 대한 정량적 지표를 제시하는 것이 아니며 또한 설계변수들의 불확실성에 대한 고려가 이루어지지 않았다. 이에 반해 신뢰성해석의 파괴확률과 신뢰도지수는 말뚝기초의 설계변수들이 가지고 있는 불확

실성을 명확히 고려하였으며, 각 성능조건에 대한 말뚝의 안전도 또는 파괴에 대한 정량적 수치를 제공한다. 세 파괴모드 중 지반저항과 말뚝 침하에 대한 파괴확률이 말뚝의 압축강도에 대한 파괴확률 보다 상당히 높은 값을 나타내어, 지반의 저항강도와 수직침하가 축하중 말뚝-지반계의 지배적인 파괴모드인 것으로 판단된다.

5. 결론

말뚝-지반계의 사실적 역학거동과 작용하중, 말뚝 및 지반의 저항력에 관련된 설계인자들의 불확실성을 명확히 고려할 수 있는 실질적이고 효율적인 말뚝구조물 신뢰성해석기법의 구현을 위해서 (1) 말뚝-지반의 상호작용을 고려하는 등가 지반스프링 모델 및 하중전이법에 기초한 유한차분 말뚝해석법과 (2) 확률변수의 변동성·불확실성을 고려하여 정량적 위험도를 평가할 수 있는 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 결합한 MCS기반 축하중 말뚝-지반계 신뢰성해석 기법을 개발하였다. 수치예제에서는 축하중을 받는 말뚝의 정량적 파괴확률을 평가하였다. 세 파괴모드 중 지반의 저항강도와 수직침하가 축하중 말뚝-지반계의 지배적인 파괴모드인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 정상섬, 원진오, 허정원(2001) 말뚝-캡 강성을 고려한 군말뚝 기초의 해석, 2001년 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 363-370
2. 허정원, 정상섬(2004) 단독말뚝구조물의 확률론적 신뢰성해석, 2004년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 410-415
3. API(1993) **API Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design**, Report RP-2A
4. Matlock, H., Borgard, D., and Lam, I.P.(1981) **BMCOL76: A Computer Program for the Analysis of Beam-Columns under Static Axial and Lateral Loading**, Ertec, Inc.
5. Vanmarcke, E.H.(1977) Probabilistic Modeling of Soil Profiles, **J. of Geotech. Eng'g. Div., ASCE**, Vol. 103, No. GT11, pp. 1227-1246