

자중효과를 고려한 말뚝의 좌굴하중

이준규* · 이광우** · 전영진*** · 권오일**** · 최용혁***** · 최정식*****

Lee, Joon-Kyu* · Lee, Kwang-Woo** · Jeon, Young-Jin*** · Kwon, O-Il**** · Choi, Yong-Hyuk***** · Choi, Jeong-Sik*****

Buckling Loads of Piles with Allowance for Self-Weight

ABSTRACT

This paper presents the buckling behavior of a pile considering its self-weight. The differential equation and boundary conditions governing the buckling of partially embedded piles in nonhomogeneous soils are derived. The buckling load and mode shape of the pile are numerically computed by the Runge-Kutta method combined with the Regula-Falsi algorithm. The obtained numerical solutions for buckling loads agree well with the results available from the literature. Numerical examples are given to analyze the buckling load and mode shape of the piles as affected by the self-weight, embedment ratio, slenderness ratio and boundary condition of the pile as well as the aspect ratio and rigidity ratio of the subgrade reaction. It is found that the self-weight of the pile leads to the reduction of the buckling load, indicating that neglecting the effect of self-weight may overestimate the buckling load of partially embedded piles.

Key words : Partially embedded pile, Self-weight, Buckling load, Mode shape, Numerical method

초록

이 논문은 말뚝체의 자중을 고려한 말뚝의 좌굴거동에 관한 연구이다. 비균질 지반에 설치된 부분매립 말뚝의 좌굴을 지배하는 미분방정식과 경계조건을 유도하였다. Runge-Kutta법과 Regula-Falsi법을 결합한 수치해석법을 적용하여 말뚝의 좌굴하중과 좌굴형을 산정하였다. 계산된 좌굴하중의 수치해와 문헌값은 잘 일치하였고, 수치예를 통해 말뚝의 자중, 매립비, 세장비, 경계조건 및 지반의 반력형상비, 지반강성비가 말뚝의 좌굴특성에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과, 말뚝의 자중은 말뚝의 좌굴하중을 감소시켰으며 이러한 자중효과의 무시는 부분매립 말뚝의 좌굴하중을 과대평가할 수 있음을 확인하였다.

검색어 : 부분매립 말뚝, 자중, 좌굴하중, 좌굴형, 수치해석법

1. 서론

말뚝의 축방향 안정성은 말뚝재료의 허용압축하중과 지반의 허용지지력 중 작은 값으로 결정한다. 국내의 경우 말뚝이 설치되는 지반의 허용지지력은 말뚝재료의 허용하중과 비교하여 작은 것이 보통이며 이에 따라 말뚝의 설계는 지반의 허용지지력에 의하여 결정되는 경우가 대부분이다(KGS, 2015). 그러나 최근에는 말뚝의 시공 및 관리기술의 향상으로 말뚝재료의 허용하중에 상당하는 지층까지 말뚝을 시공하여 말뚝재료를 최대한 활용하는 설계법도 적용되고 있으며, 이러한 장대말뚝의 경우 말뚝의 좌굴에 대한 안정성 검토는 필수적이다. 이는 작용하중이

* 중신회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · University of Seoul · jleegeo@uos.ac.kr)

** 중신회원 · 연세대학교 공학연구원 연구교수, 공학박사 (Yonsei University · kwangwoo.lee@yonsei.ac.kr)

*** 강원대학교 산업기술연구소 선임연구원, 공학박사 (Kangwon National University · civiljyj@kangwon.ac.kr)

**** 중신회원 · 벽산엔지니어링 플랜트사업본부 부장 (Byucksan Engineering · hector99s@bseng.co.kr)

***** 서울시설공단 도로시설처 차장 (Seoul Facilities Cooperation · worldcyh@sisul.or.kr)

***** 경기도청 건설본부 북부도로과 주무관 (Gyeonggi Provincial Government · jschoi1@gg.go.kr)

Received November 29, 2022/ revised January 5, 2023/ accepted January 24, 2023

말뚝의 허용압축하중보다 작아 축방향 하중에 의한 압축파괴에 대해서는 안정하더라도 횡방향 굽힘에 따른 좌굴파괴가 발생할 수 있기 때문이다(Prakash and Sharma, 1990). 특히, 연약한 점토나 지반내 액상화 및 세굴이 발생한 경우 좌굴에 의한 말뚝의 취약성은 크게 증가한다(Dash et al., 2010; Liang et al., 2015; Vogt et al., 2009).

기존 문헌에서 말뚝의 좌굴거동은 탄성지반에 놓인 보-기둥 이론에 기초하여 주로 연구되었다. 그 예로, Bjerrum(1957)은 회전 경계 조건을 갖는 말뚝의 좌굴하중에 대한 닫힌해(closed-form solution)를 산정하였고, Prakash(1987)는 에너지법을 적용하여 말뚝 좌굴하중의 수치해를 계산하였다. West et al.(1997)은 말뚝 좌굴하중의 군집패턴(clustering pattern)을 분석하였다. Gabr et al.(1997)과 Heelis et al.(2004)은 말뚝의 경계조건과 지반의 비균질성이 부분매립 말뚝의 좌굴특성에 미치는 영향을 조사하였다. Chen et al.(2015)은 첨점재앙이론(cusp catastrophe theory)을 이용하여 말뚝의 좌굴하중을 산정하였고, Lee et al.(2018)은 테이터 말뚝의 좌굴거동을 평가하였다. 한편, AASHTO(2020)에서는 부분매립 말뚝의 좌굴 해석법으로, 기둥-말뚝의 일체구조를 지반내 가상의 고정지점을 갖는 외팔기둥으로 변환하여 해석하는 등가캔틸레버법(equivalent cantilever approach)을 제시하고 있다. 이상의 문헌에서 말뚝의 좌굴에 관한 다양한 이론 및 연구결과가 논의되었으나 그 내용에 말뚝의 자중효과는 반영되어 있지 못하다. 그러나 이러한 가정은 말뚝길이 상대적으로 짧거나 완전매립되어 시공되는 말뚝에는 적합할 수 있으나 장대말뚝 또는 부분매립 말뚝의 경우 좌굴하중이 과대하게 평가될 수 있다.

이 논문에서는 자중효과를 고려한 비균질 지반에 부분매립된 말뚝의 좌굴거동을 평가할 수 있는 해석모델을 제안한다. 해당 말뚝-지반 시스템의 좌굴에 대한 지배방정식과 경계조건을 유도하고, 고유치(eigenvalue) 문제의 수치해석법을 통해 말뚝의 좌굴하중과 좌굴형을 산정한다. 계산된 수치해와 문헌값을 비교하고, 다양한 재료 및 기학적 변수들이 말뚝의 좌굴특성에 미치는 영향을 분석한다.

2. 말뚝-지반 시스템

Fig. 1(a)는 말뚝두부 O 를 원점으로 하는 직교좌표계 (x, y) 에 수직압축하중 P 가 작용하는 지반에 부분매립된 말뚝을 나타낸다. 말뚝은 반경 r 의 원형말뚝으로 단위체적당 중량극, 단위중량 γ 를 갖으며 이는 말뚝의 자중으로 작용한다. 말뚝의 길이와 매립길이는 각각 l 와 l_c 로 표기되며 말뚝의 매립비는 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = \frac{l_c}{l} \quad (1)$$

말뚝의 반경 r 은 단면적 A 의 함수인 Eq. (2)로 나타낼 수 있으며

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

말뚝의 단면2차모멘트 I 는 다음과 같이 표현된다.

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{A^2}{4\pi} \quad (3)$$

Fig. 1(b)는 지반의 횡방향 지반반력계수(coefficient of horizontal subgrade reaction) k 를 나타내며 이는 지반의 선형 탄성거동을 정량화하고 깊이방향으로 선형적으로 증가한다(West et al., 1997). 지표면과 말뚝선단에서 지반반력계수는 각각 k_s 와 k_t 이고, 지반의 비균질성은 다음과 같은 반력형상비 β 로 정의한다.

$$\beta = \frac{k_s}{k_t} \quad (4)$$

매립깊이 중앙의 지반반력계수 k_m 은 Eq. (5)와 같으며

$$k_m = \frac{1}{2}(k_s + k_t) \quad (5)$$

말뚝길이에 따른 지반반력계수는 지표면을 경계로 다음과 같이 구분된다.

$$\frac{x}{l} < 1 - \alpha, k = 0 \quad (6a)$$

$$\frac{x}{l} > 1 - \alpha, \quad (6b)$$

$$k = k_t \left[\frac{1 - \beta}{\alpha} \left(\frac{x}{l} - 1 \right) + 1 \right] = \frac{2k_m}{\beta + 1} \left[\frac{1 - \beta}{\alpha} \left(\frac{x}{l} - 1 \right) + 1 \right]$$

말뚝의 양단은 자유-자유, 회전-회전, 고정-고정으로 지지되며, 여기서 전자는 말뚝두부, 후자는 말뚝선단의 경계조건을 의미한다.

3. 수학적 정식화

Fig. 1(a)와 같이, 말뚝에 좌굴하중 B 보다 작은 압축하중 P 가 작용하면 말뚝은 안정상태를 유지하고, P 가 점차 증가하여 최종적으로 B 에 도달하면 말뚝은 좌굴형(mode shape)이라 부르는 곡선형태로 좌굴한다. Fig. 1(c)는 좌굴된 말뚝의 미소요소에 작용하는 힘들을 나타낸다. 말뚝 내부에서는 축력 N , 전단력 V 및 휨모멘트 M 의 합용력과 단위길이당 자중력 $F_w = \gamma A$ 가 발생한다. 이중 말뚝길이에 따른 N 과 F_w 는 Eq. (7)의 관계를 갖는다.

$$N = B + \int_0^x F_w dx = B + \gamma Ax \quad (7)$$

여기서 B 는 적분상수로 말뚝두부($x = 0$)의 좌굴하중이다. 또한, 말뚝 외부에서는 말뚝의 횡변위 y 에 저항하는 횡방향 지반반력 $R_k = k(2r)y$ 가 발생하며 이는 Eqs. (2) and (6)를 이용하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{x}{l} < 1 - \alpha, R_k = 0 \tag{8a}$$

$$\frac{x}{l} > 1 - \alpha, R_k = \frac{4k_m}{\beta + 1} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \left[\frac{1 - \beta}{\alpha} \left(\frac{x}{l} - 1 \right) + 1 \right] y \tag{8b}$$

이러한 작용력들에 대한 평형방정식은 $\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0$ 및 $\Sigma M = 0$ 으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{dN}{dx} - F_w = 0 \tag{9}$$

$$\frac{dV}{dx} + R_k = 0 \tag{10}$$

$$\frac{dM}{dx} + V - N \frac{dy}{dx} = 0 \tag{11}$$

Eqs. (9)-(11)에 Eqs. (7) and (8)을 대입하고 말뚝요소에 대한 횡변위 관계식(Gere and Timoshenko, 1997)인

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{EA^2}{4\pi} \frac{d^2 y}{dx^2} \tag{12}$$

를 이용하여 조합하면 다음과 같은 4계 상미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = -4\pi \left(\frac{B}{EA^2} + \frac{\gamma}{EA} x \right) \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{4\pi\gamma}{EA} \frac{dy}{dx} - \frac{16\sqrt{\pi}}{\beta + 1} \frac{k_m}{EA^{3/2}} \left[\frac{1 - \beta}{\alpha} \left(\frac{x}{l} - 1 \right) + 1 \right] y \tag{13}$$

여기서, E 는 말뚝의 탄성계수이다.

일반화된 말뚝의 좌굴분석을 위해 다음과 같은 무차원 변수를 도입한다.

$$\xi = \frac{x}{l}, \eta = \frac{y}{l}, \mu = \frac{\gamma l^3}{EA}, \lambda = \frac{k_m l^5}{EI}, \tag{14}$$

$$s = \frac{l}{\sqrt{I/A}}, b_i = \frac{B_i l^2}{EA^2} \tag{15}$$

여기서 (ξ, η) 는 무차원 직교좌표계, μ 는 자중변수, λ 는 지반강성비, s 는 세장비, b_i 는 좌굴하중변수, i 는 모드번호이다. Eq. (13)에 Eqs. (14)-(15)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 무차원 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^4 \eta}{d\xi^4} = -4\pi(b_i + \mu\xi) \frac{d^2 \eta}{d\xi^2} - 4\pi\mu \frac{d\eta}{d\xi} - \frac{8\lambda}{\alpha^5(\beta + 1)s} \left[\frac{1 - \beta}{\alpha}(\xi - 1) + 1 \right] \eta \tag{20}$$

이제, 말뚝양단의 경계조건을 유도한다. 자유지점인 말뚝의 두부($x = 0$) 및 선단($x = l$)에서 휨모멘트 M 및 전단력 V 는 0이므로 무차원 경계조건식은 다음과 같다.

$$\xi = 0 \text{에서 } \frac{d^2 \eta}{d\xi^2} = 0; \frac{d^3 \eta}{d\xi^3} + 4\pi b_i \frac{d\eta}{d\xi} = 0 \tag{21a}$$

$$\xi = 1 \text{에서 } \frac{d^2 \eta}{d\xi^2} = 0; \frac{d^3 \eta}{d\xi^3} + 4\pi(b_i + \mu) \frac{d\eta}{d\xi} = 0 \tag{21b}$$

회전지점($x = 0$ 및 $x = l$)에서 변위 y 와 M 은 0이므로 그 경계조건은 다음과 같다.

$$\eta = 0; \frac{d^2 \eta}{d\xi^2} = 0 \tag{22}$$

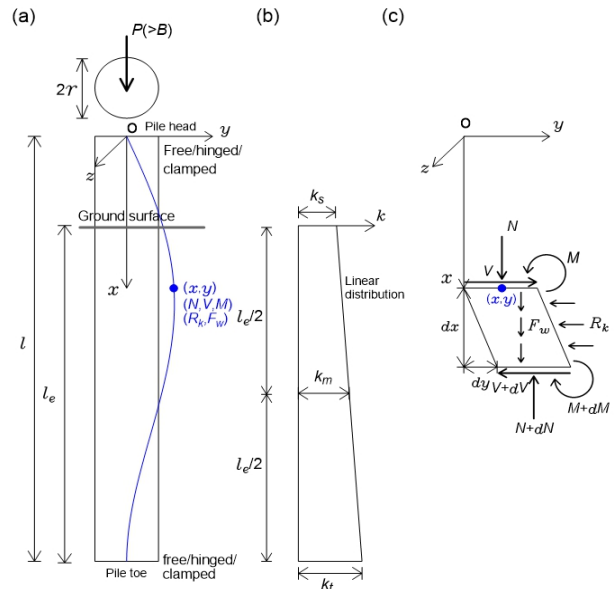


Fig. 1. Problem Definition: (a) Geometry of Pile, (b) Profile of Horizontal Subgrade Reaction, (c) Infinitesimal Element of Deformed Pile

고정지점($x = 0$ 및 $x = l$)에서 y 와 회전각 dy/dx 는 0이므로 그 경계조건은 다음과 같다.

$$\eta = 0; \frac{d\eta}{d\xi} = 0 \quad (23)$$

4. 수치해석법 및 검증

앞 절에서 이 연구에서 정의한 말뚝의 좌굴에 관한 무차원의 지배방정식과 경계조건을 유도하였다. 이에 대한 해를 구하기 위해 다음과 같은 수치해석법을 이용하였다(Lee et al., 2018; Lee, 2022). 먼저, 미분방정식의 초기치 문제에 대한 수치적분법인 Runge-Kutta법

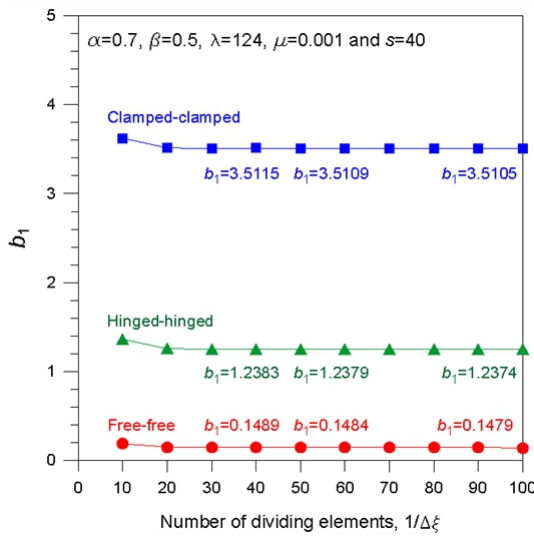


Fig. 2. Convergence Analysis

을 통해 말뚝의 좌굴형 $(\xi, \eta)_i$ 를 산정하였다. 다음, 비선형 방정식의 근사해법인 Regula-Falsi법을 이용하여 지배방정식의 고유치인 좌굴하중변수 b_i 를 결정하였다. 이와 같은 일련의 알고리즘을 컴퓨터 프로그램 FORTRAN으로 작성하였고, 이를 통해 실무에서 널리 적용되는 1차 모드($i = 1$)의 수치해를 도출하였다.

수치해석의 정확도를 확보하기 위해 수치해에 대한 수렴해석을 실시하였다. Fig. 2는 말뚝의 분할요소수 $1/\Delta\xi$ ($\Delta\xi$ 는 단위요소길이)에 대한 좌굴하중변수 b_1 의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 말뚝의 경계조건에 상관없이 b_1 값은 $1/\Delta\xi = 30 - 100$ 범위에서 유효숫자 4자리의 정도를 보였으며 이에 따라 모든 수치해석 시 $1/\Delta\xi = 50$ 을 적용하였다.

Table 1은 수치해석을 통해 얻은 자중효과를 고려하지 않은 말뚝에 대한 실제 좌굴하중 B_1 을 나타낸다. 여기서, 지반은 균질($k_s = k_t$)하고 말뚝은 완전매립($l = l_e$)된 조건이다. 해석모델의 검증을 위해 West et al.(1997)의 값을 함께 나타냈고, 말뚝의 세 경계조건에서 모두 두 값이 우수하게 근접하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2는 자중효과를 고려한 기둥의 좌굴하중변수 b_1 에 대한 본 연구의 수치해와 Lee and Lee (2020)의 결과를 비교한다. 여기서 적용한 말뚝의 제원은 Table 1의 값과 동일하다. 표에서 보듯이, 두 값은 자중변수 μ 와 경계조건에 상관없이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결과 및 토의

제안된 해석모델의 무차원 변수는 자중변수 μ , 매립비 α , 반력형상비 β , 지반강성비 λ 및 세장비 s 이며, 이 절에서는 이러한 변수가 말뚝의 좌굴하중변수 b_1 에 미치는 영향을 분석하였다. 변수연구에는 지반공학에서 실재하는 $0 \leq \mu \leq 10$, $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 2$,

Table 1. Comparison of Buckling Loads of Piles without Self-Weight Effect ($\mu = 0$)

Boundary condition	$k_s (= k_t)$ (MN/m ³)	Buckling load B_1^a (MN)		
		West et al.(1997)	Present study	Error ^b (%)
Free-free	1056.8	38.55	38.64	0.23
Hinged-hinged	1060.4	62.49	62.84	0.56
Clamped-clamped	596.46	58.87	59.31	0.75

^aInput values: $l = l_e = 3.2$ m ($\alpha = 1$), $r = 0.115$ m, $E = 29$ GPa for concrete

^bError = |existing solution-present solution|/existing solution $\times 100$

Table 2. Comparison of Buckling Load Parameter b_1 for Heavy Columns ($k_s = k_t = 0$)

Boundary condition	μ	b_1		
		Lee and Lee (2020)	Present study	Error (%)
Hinged-hinged	1.0	0.2630	0.2639	0.34
Clamped-clamped	2.5	1.8513	1.8607	0.51

$0 \leq \lambda \leq 500, 0 \leq s \leq 100$ 의 범위를 적용하였고 그 해석결과는 입력변수와 함께 Figs. 3~7에 도시하였다.

Fig. 3은 부분매립된 중량효과를 고려한 말뚝(이하, 중량말뚝)의 b_1 에 대한 자중변수 μ 의 영향을 나타낸다. 중량을 고려하지 않은 말뚝 ($\mu = 0$)이 가장 큰 b_1 을 갖으며 μ 가 증가할수록 b_1 은 선형적으로 감소한다. 이는 자중이 말뚝내 압축력으로 작용하여 좌굴하중을 감소시키는 결과를 가져오기 때문이다. 따라서, 말뚝의 축방향 안정성 검토 시 자중효과를 무시하는 말뚝의 좌굴하중이 과대하게 평가되어 말뚝의 비보수적 설계를 야기할 수 있다. 또한, 그림에서 자중변수 μ 는 한계자중변수 μ_{cr} 에서 $b_1 = 0$ 이 된다. 예로서 회전-회전 말뚝은 $\mu_{cr} = 2.305$ 에서 $b_1 = 0$ 이다. 이는 주어진 조건에서 말뚝이 μ_{cr} 의 자중을

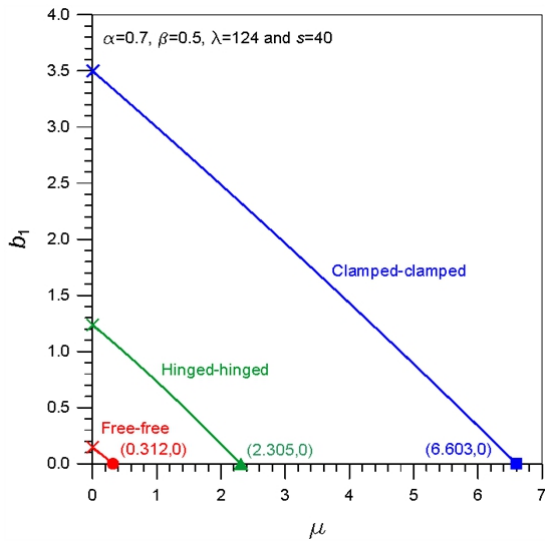


Fig. 3. Variation of b_1 with μ

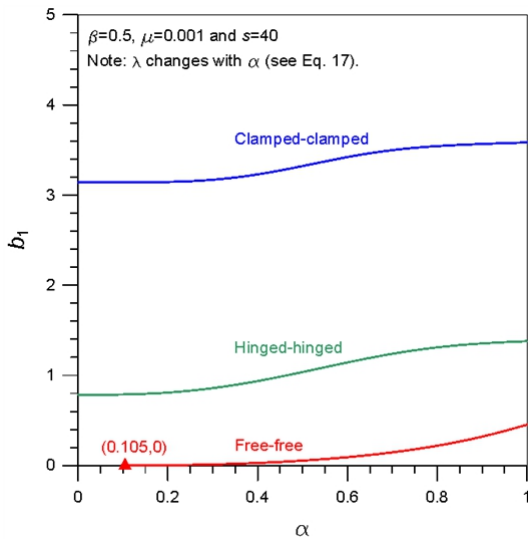


Fig. 4. Variation of b_1 with α

갖을 경우 외력이 아닌 자중만으로 좌굴되는 것을 의미한다. 즉, $\mu_{cr} < 2.305$ 일 때 말뚝은 외부의 작용하중을 지지할 수 있고 말뚝의 좌굴하중이 존재한다.

Fig. 4는 중량말뚝의 b_1 에 대한 매립비 α 의 영향을 나타낸다. 회전-회전 및 고정-고정 경계조건의 경우, 완전매립 말뚝($\alpha = 1$)에서 가장 큰 b_1 을 갖으며 α 가 감소함에 따라 b_1 은 감소하여 비매립 말뚝 ($\alpha = 0$, 즉 기둥)에서 가장 작은 b_1 을 갖는다. 이는 지반의 구속영역이 감소할수록 말뚝이 더 작은 외력에 좌굴한다는 것을 의미하며, 부분 매립 말뚝에 대한 좌굴 검토의 중요성을 시사한다. 한편, 자유-자유 경계조건의 경우 α 의 증가에 따라 b_1 이 감소하는 경향을 보이거나 α 가 한계매립비 $\alpha_{cr} = 0.105$ 에서 $b_1 = 0$ 이 된다. 이는 말뚝의 매립 비가 한계매립비보다 작으면, 앞서 기술한 바와 같이 말뚝이 외력이 아닌 자중($\mu = 0.001$)만으로 말뚝이 좌굴되는 것을 의미한다.

Fig. 5는 부분매립된 중량말뚝의 b_1 에 대한 반력형상비 β 의 영향을 나타낸다. 여기서 $\beta < 1$ 은 지반반력이 깊이에 따라 증가하는 경우이고 $\beta > 1$ 은 그 반대의 경우이다. 이는 점토지반의 경우 정규압 밀집도와 과압밀집도에 각각 해당한다(Rowe and Booker, 1981; Zdravkovic et al., 2003). 그림에서 보듯이, b_1 은 경계조건에 상관없이 β 가 증가할수록 완만히 증가한다. 또한, $\beta = 1$ 인 균일지반을 경계로 하여 $\beta < 1$ 에서 지반반력형상이 좌굴에 미치는 영향성이 $\beta > 1$ 에 비해 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 부분매립된 중량말뚝의 b_1 에 대한 지반강성비 λ 의 영향을 나타낸다. 지반강성이 존재하지 않은 경우($\lambda = 0$) b_1 은 가장 작은 값을 갖으며 λ 가 증가함에 따라 b_1 은 거의 선형적으로 증가한다. 한 예로서, 고정-고정 말뚝의 경우 λ 에 따른 b_1 의 증가율은 0.26%이다. 이러한 λ 의 증가에 따른 b_1 의 증가는 지반강성이 말뚝의 변위를 억제

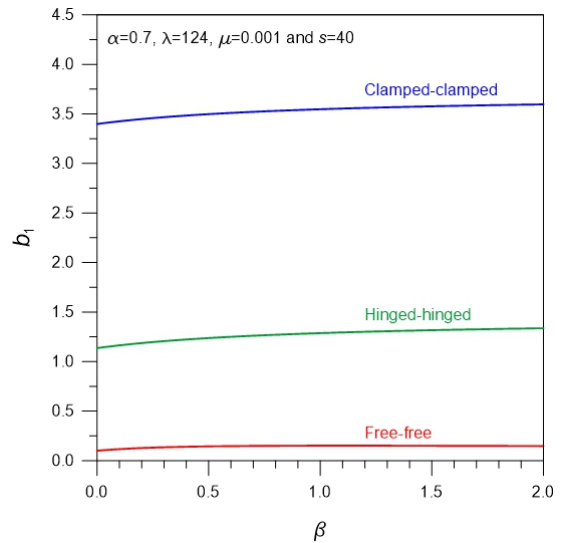


Fig. 5. Variation of b_1 with β

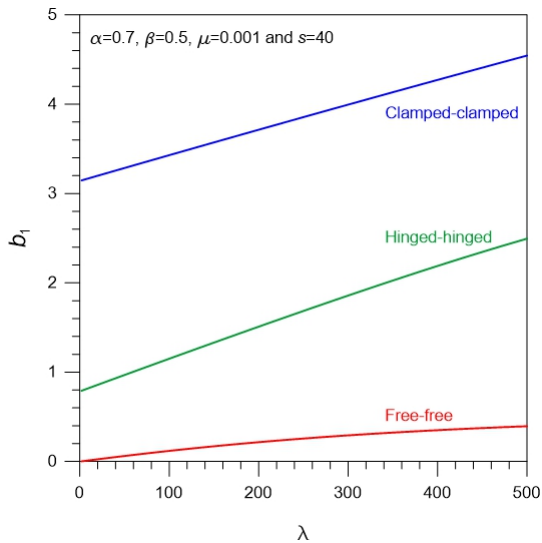


Fig. 6. Variation of b_1 with λ

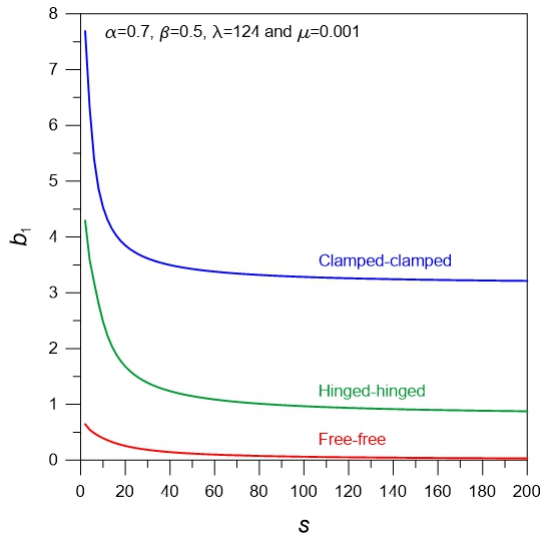


Fig. 7. Variation of b_1 with s

하는 요소로 작용해 큰 좌굴하중을 유도하기 때문이다. 또한, λ 에 따른 b_1 의 증가율은 자유-자유 경계조건이 다른 경계조건에 비해 작다.

Fig. 7은 부분매립된 중량말뚝의 b_1 에 대한 세장비 s 의 영향을 나타낸다. 말뚝의 강성은 세장비에 반비례하므로 s 가 증가하면 b_1 은 감소하나 감소율은 s 가 작을수록 크다. 특히, $s < 30$ 의 단주에서는 b_1 이 급격히 감소하여 좌굴하중에 대한 세장비의 영향이 크나 $s > 60$ 의 장주에서는 그 영향성은 무시할 수 있다. 이러한 경향은 경계조건에 상관없이 동일하다.

Figs. 3~7은 지금까지 살펴본 말뚝-지반 시스템의 재료 및 기하학적 변수의 영향과 더불어 말뚝의 경계조건을 설명한다. 모든 그림에서 좌굴하중변수 b_1 은 고정-고정, 회전-회전, 자유-자유 경계조건

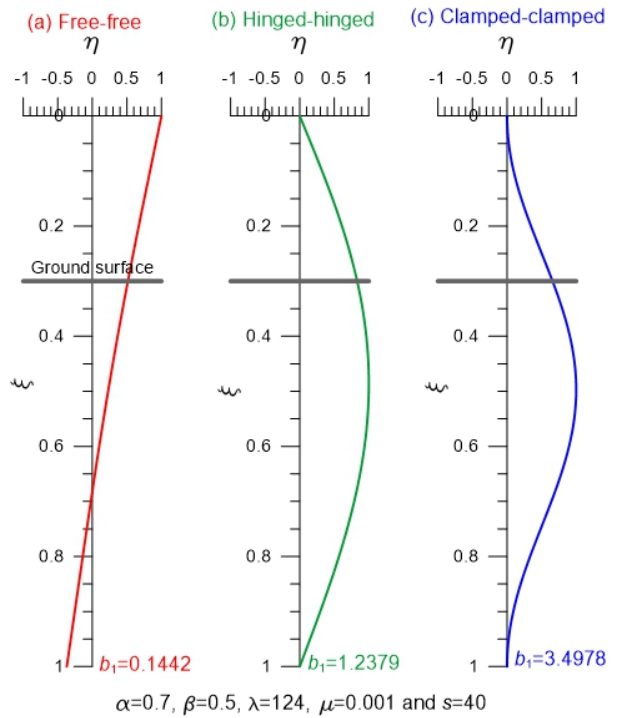


Fig. 8. Examples of Mode Shapes of Piles with Different Boundary Conditions

순으로 큰 것을 확인할 수 있으며, 한 예로서 Fig. 3의 세 경계조건(×로 표기)에 대한 b_1 은 각각 3.498, 1.238, 0.145의 값을 갖는다. 이로부터 말뚝지점의 구속정도가 클수록 말뚝의 좌굴하중이 크다는 사실을 알 수 있다. 실제 말뚝의 양단은 자유-자유와 고정-고정 사이의 구속조건에 놓이며 이 두 경계조건에서 얻은 좌굴하중은 각각 말뚝의 좌굴하중에 대한 하한치와 상한치이다.

Fig. 8은 부분매립 중량말뚝의 좌굴형(ξ, η)₁의 예를 나타낸다. 좌굴형은 경계조건에 크게 의존하여 자유지점의 경우 말뚝의 양단에서 횡방향 변위가 발생하고, 회전 및 고정지점의 경우 횡방향 변위가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 말뚝의 좌굴형은 좌굴된 말뚝의 최대변위의 위치와 크기 및 말뚝 양단의 변형형태 등의 정보를 제공한다.

6. 결론

이 논문은 자중효과를 고려한 비균질 지반에 부분매립된 말뚝의 좌굴거동에 대한 수치해석적 연구이며, 연구결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 얻은 비중량말뚝과 중량기둥의 좌굴하중 값은 문헌 값들과 잘 일치하였다. 이는 유도된 말뚝-지반시스템의 지배방

정식과 경계조건 및 제한된 고유치 문제에 대한 수치해석법의 타당성을 보여준다.

- (2) 말뚝재료의 자중은 말뚝의 좌굴하중을 감소시키므로 말뚝의 축방향 안정성 평가 시 자중효과의 고려는 필수적이다. 또한, 말뚝의 매립비 α 가 감소할수록 좌굴하중은 감소한다. 특히 $\alpha = 0.2 - 0.8$ 에서 그 감소율이 상대적으로 크며, 이는 부분매립 말뚝의 좌굴에 대한 불안정성 증가를 의미한다.
- (3) 지반강성비 λ 는 말뚝의 변위를 억제하는 요소로 λ 가 증가하면 말뚝의 좌굴하중은 증가한다. 또한, 지반의 반력형상비 β 의 좌굴하중에 대한 영향은 지반반력이 깊이에 따라 증가하는 지반의 경우 ($\beta < 1$)가 그 반대인 감소하는 경우 ($\beta > 1$)에 비해 말뚝 좌굴하중의 증가에 더 큰 영향을 미친다.
- (4) 말뚝의 세장비 s 가 클수록 말뚝의 강성은 감소하며 그 결과 말뚝의 좌굴하중은 감소한다. 특히, $s < 30$ 의 단주에서는 좌굴하중 감소에 대한 세장비의 영향이 크나 $s > 60$ 의 장주에서는 그 영향성은 무시할 수 있다.
- (5) 말뚝의 좌굴하중은 말뚝양단의 구속정도가 클수록 증가하며, 그 값은 자유-자유 경계조건에서 최소이고 고정-고정 경계조건에서 최대이다. 실제 말뚝의 좌굴하중은 이 두 경계조건 사이에 존재한다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었습니다. 제1저자는 노스캐롤라이나 대학교 교환교수로 초청해주신 John L. Daniels 교수님께 감사드립니다.

References

AASHTO (2020). *LRFD bridge design specifications*, 9th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.

Bjerrum, L. (1957). "Norwegian experience with steel piles to rock." *Geotechnique*, Vol. 7, No. 2, pp. 73-96.

Chen, Y. H., Chen, L., Wang, X. and Chen, G. (2015). "Critical buckling load calculation of piles based on cusp catastrophe theory." *Marine Geoscience and Geotechnology*, Vol. 33, No. 3, pp. 222-228.

Dash, S. R., Bhattacharya, S. and Blakeborough, A. (2010). "Bending-buckling interaction as a failure mechanism of piles in liquefiable soils." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 1-2, pp. 32-39.

Gabr, M. A., Wang, J. J. and Zhao, M. (1997). "Buckling of piles with general power distribution of lateral subgrade reaction." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 2, pp. 123-130.

Gere, J. M. and Timoshenko, S. P. (1997). *Mechanics of materials*, PWS Publishing Company, MA, USA.

Heelis, M. E., Pavlovic, M. N. and West, R. P. (2004). "The analytical prediction of the buckling loads of fully and partially embedded piles." *Geotechnique*, Vol. 54, No. 6, pp. 363-373.

Korean Geotechnical Society (KGS) (2015). *Korean foundation engineering code*, Korean Geotechnical Society (in Korean).

Lee, J. K. (2022). "Lateral free vibration of rectangular barrettes subjected to vertical loading." *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 140, No. 8, pp. 1-10.

Lee, J. K., Jeong, S. S. and Kim, Y. H. (2018). "Buckling of tapered friction piles in inhomogeneous soil." *Computers and Geotechnics*, Vol. 97, pp. 1-6.

Lee, J. K. and Lee, B. K. (2020). "Buckling lengths of heavy column with various end conditions." *Engineering Soild Mechanics*, Vol. 8, pp. 163-168.

Liang, F., Zhang, H. and Huang, M. (2015). "Extreme scour effects of the buckling of bridge piles considering the stress history of soft clay." *Natural Hazards*, Vol. 77, No. 2, pp. 1143-1159.

Prakash, S. (1987). "Buckling loads of fully embedded vertical piles." *Computers and Geotechnics*, Vol. 4, No. 2, pp. 61-83.

Prakash, S. and Sharma, H. D. (1990). *Pile foundations in engineering practice*, John Wiley and Sons, New York, USA.

Rowe, R. K. and Booker, J. R. (1981). "The behavior of footings resting on a non-homogeneous soil mass with a crust. Part I. Strip footings." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 250-264.

Vogt, N., Vogt, S. and Kellner, C. (2009). "Buckling of slender piles in soft soils." *Bautechnik*, Vol. 86, No. S1, pp. 98-112.

West, R. P., Heelis, M. E., Pavlovic, M. N. and Wylie, G. B. (1997). "The stability of end-bearing piles in a non-homogeneous elastic foundation." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 21, No. 12, pp. 845-861.

Zdravkovic, L., Potts, M. and Jackson, C. (2003). "Numerical study of the effect of preloading on undrained bearing capacity." *International Journal of Geomechanics*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-10.