한국지반공학회논문집 제32권 12호 2016년 12월 pp. 15 ~ 22
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.32, No.12, December 2016 pp. 15 ~ 22

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2016.32.12.15

모래지반에서 쐐기모델을 이용한 단말뚝의 극한수평저항력 산정

Evaluation of Ultimate Lateral Resistance for Single Pile Using Strain Wedge Model in Sand

김 지 성[1] Kim, Ji-Seong
강 기 천[2] Kang, Gi-Chun

Abstract

The magnitude of the lateral resistance that resists the lateral movement of the pile is controlled by the amount of the pile movement and the strength and stiffness of soil. In this paper, we proposed an equation which produces the ultimate lateral resistance of the laterally loaded single pile in sand using the strain wedge model of the soil deformation. The ultimate lateral resistance in strain wedge model is composed of earth pressure of wedge rear, the shear resistance on the side of the wedge, and the frictional resistance between pile and ground. The ultimate lateral resistance determined by the proposed equation was compared with the Ashour, F.D.M., field test in sand. As a result, the error of the proposed equation and Ashour theory, field test, F.D.M were respectively 1.03%, 0.40～3.32%, 6.02%.

요 지

본 연구에서는 Strain wedge 해석모델을 이용하여 수평하중이 작용하는 단말뚝의 극한수평저항력 산정식을 제안하였다. 저항특성은 쐐기 후면부의 수평저항토압, 쐐기 측면부의 전단저항, 그리고 말뚝과 지반의 마찰저항으로 구분하였고, 이들의 합으로써 극한수평저항력을 산정하였다. 제안된 식을 기존의 쐐기 이론과 현장실험, 유한차분법과비교분석하였다. 그 결과 제안식의 값이 기존의 쐐기 이론과 1.03%, 현장실험과는 0.40～3.32%, 유한차분법과는 6.02%의 차이를 보였다.

Keywords : Laterally loaded pile, Ultimate lateral resistance, Strain wedge model

1. 서 론

수평하중이 작용하는 구조물의 말뚝기초 두부에는 연직하중 뿐만 아니라 수평하중, 모멘트도 동시에 작용하게 된다. 이때 발생된 말뚝 두부의 수평변위 또는 모멘트에 의해 말뚝기초는 종국에는 파괴에 도달하게 된다. 이와 같이 상부구조물에 작용된 수평하중은 말뚝으로 전이되고 이때 전이된 하중에 의하여 말뚝 두부에서는 과다한 수평변위와 모멘트로 인하여 말뚝기초 파괴의 주요 원인으로 작용하게 된다. 이는 다시 상부구조물의 불안전 요소로 영향을 미치므로 크나큰 재난으로 이어질 수 있다. 그러므로 신뢰할 수 있는 말뚝의 수평저

1 정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 연구원 (Member, Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, Korea Infrastructure Safety Corporation)
2 정회원, 경상대학교 토목공학과 공학연구원 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Engrg. Research Institute, Gyeongsang National Univ., gkang@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2016 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

항력을 산정하는 것은 중요하다.

수평하중을 받는 단말뚝의 거동 특성에 관한 이론적 연구들은 활발히 진행되고 있고 최근 SW(Strain wedge) 모델에 대한 연구들이 이루어지고 있다. SW 모델에 관한 연구는 Brown et al.(1988)이 수평하중이 작용하는 무리말뚝에서 말뚝 상호간의 간섭에 의한 하중 저감 효과를 설명하기 위하여 쐐기 이론을 접목하였고, Ashour et al.(1998, 2003)은 수평하중이 작용하는 단말뚝의 하중-변형 거동 특성을 쐐기 이론을 접목하여 해석한 결과를 발표하였다. 그리고, Wang and Reese(1986)는 말뚝에 작용하는 수평 하중에 대한 저항 영역을 쐐기 모델로 가정하여 극한상태의 수평저항력을 산출하는 식을 제안하였다.

하지만 Brown et al.(1988)은 말뚝 형상, 깊이, 작용하는 하중의 크기 등 말뚝의 저항 영역에 영향을 미치는 여러 가지 요소들을 고려한 역학적인 거동 해석을 위한 모델을 제시한 것이 아니라, 단지 무리말뚝의 중첩의 원리만을 설명하기 위한 모델로서 제시한 것이다. 실제 수평하중이 작용하는 말뚝에서 초기의 수평저항 영역은 말뚝 두부의 변위에 따라 그 영역이 점차 확장되는 거동 형태를 나타낸다. 따라서 말뚝과 지반의 파괴면이 이루는 경사각도 지반의 내부마찰각의 함수이기 보다는 말뚝 두부의 변위에 따른 함수임을 알 수 있다. 하지만 Ashour(1998, 2003)가 제시한 해석 모델에서는 수평저항력을 내부마찰각의 함수로 제시를 하였다. 또한 쐐기의 변형영역은 말뚝의 회전절점에서부터 시작되지만 이에 대한 고려가 되어 있지 않다.

Wang and Reese(1986)는 쐐기의 형상을 결정하는데 필수적인 요소인 쐐기 측면 날개각, 말뚝과 지반이 이루는 경사각, 그리고 쐐기의 깊이가 결정되는 회전절점 등 모든 요소가 지반을 구성하는 재료의 배수마찰각의 함수로 표현되었다. 즉, 지반의 종류에 따라 모두 일정한 형상을 나타내는 결과를 초래하게 된다.

따라서 본 연구에서는 말뚝두부의 변위를 고려한 극한수평저항력을 산정하기 위해 Bae et al.(2008, 2009, 2016)에 의해 규명된 내용을 바탕으로 극한수평저항력을 산정하였다. 이때 저항특성은 쐐기 후면부의 수평저항토압, 쐐기 측면부의 전단저항, 그리고 말뚝과 지반의 마찰저항으로 구분하였다. 또한 각각의 저항특성에 맞는 토압계수를 적용하기 위한 검증을 실시하였다. 최종 산정된 극한수평저항력과 기존의 연구들과의 비교를 통해 사용성을 검증 하였다.

2. 쐐기모델 해석

수평하중이 작용하는 단말뚝 배면지반의 파괴는 작용하는 하중의 크기, 말뚝의 매설 깊이, 말뚝 강성, 지반조건, 그리고 수평하중에 의한 말뚝의 회전변위 등에 따라 서로 다른 결과를 나타낸다. 이때 발생되는 평면파괴영역은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 모두 그 크기가 다르게 나타난다.

파괴영역은 일정한 양상으로 가정할 수 있으므로 말뚝을 변형이 없는 강성으로 가정한다면 이때 발생되는 평면파괴영역은 말뚝의 회전변위에 대한 함수로서 말뚝의 회전각이 증가할수록 평면파괴영역의 크기도 변화하게 된다. 발생된 평면파괴영역 Fig. 1(a)는 Ashour (1998, 2003), Wang and Reese(1986)의 가정에 의해 Fig. 1(b)와 같이 동일한 면적의 쐐기 면적으로 환산한 후 이를 적용하여 말뚝의 저항 거동 특성을 해석한다.

2.1 쐐기 모델 해석을 위한 가정조건

수평하중이 작용하는 무리말뚝 배면지반의 거동 특성을 해석하기 위한 가정조건은 다음과 같다.

① 지반은 등방균질이다.

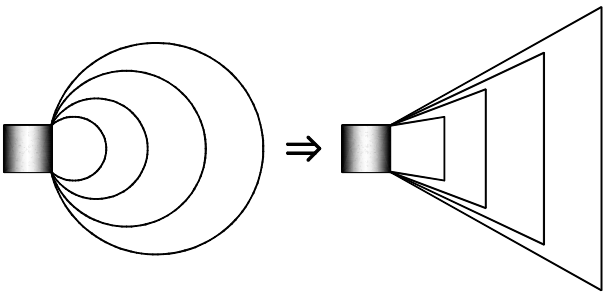
② 말뚝 배면지반의 파괴는 지표에서부터 발생하여 순차적으로 지중으로 발생하는 것으로 가정한다.

③ 쐐기 측면부의 전단저항은 상재하중으로 인한 영향을 무시한다.

④ 말뚝과 지반의 마찰계수(ϕ')는 $\frac{2}{3}\phi$를 적용한다 (Duncan, 2000).

⑤ 발생된 쐐기 내부의 지반변형에 의한 저항은 무시한다.

⑥ 말뚝의 회전절점 이하에서는 말뚝 및 지반의 변형



(a) Stress bulb (b) Strain wedge

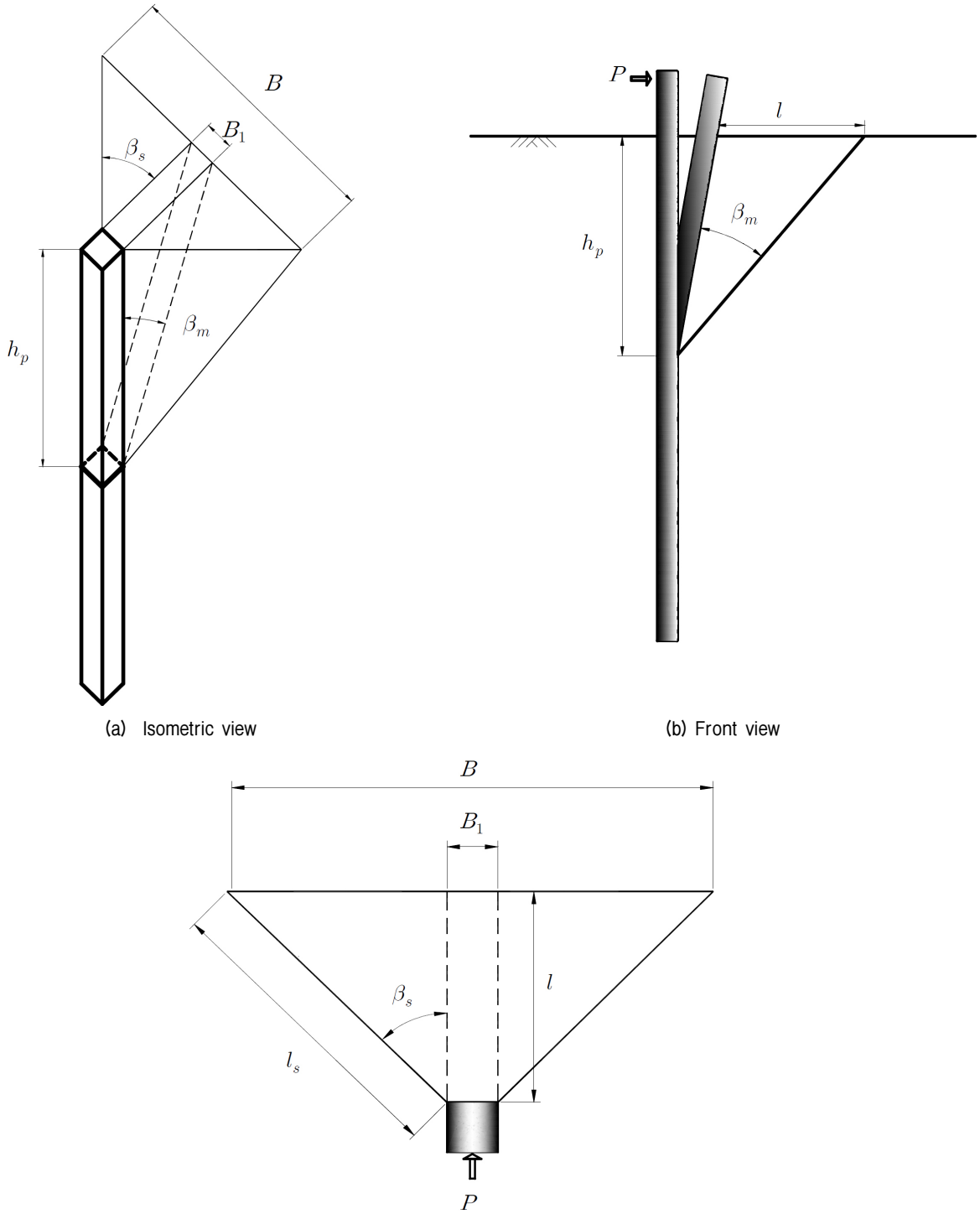
Fig. 1. Hypothesis of strain wedge of stress bulb (Ashour, 1998)

이 발생하지 않는 것으로 가정하다.

⑦ 힘의 평형조건을 만족한다.

2.2 말뚝 배면지반의 쐐기 형상 결정

지반에 매설돼 있는 사각형 단말뚝($B_1 \times B_1$)에 수평하중이 가해지면 말뚝 배면에서는 Fig. 2와 같이 쐐기 모형의 파괴 형상이 나타난다. 말뚝과 쐐기 파괴 면이 이루는 쐐기 파괴각(β_m), 말뚝의 변위가 더 이상 일어나지 않는 곳까지의 회전절점 깊이(h_p), 지표면에서 말뚝과 지반 변형영역이 이루는 경사각을 쐐기 날개각(β_s)라 정의했고, 이 값들은 김지성과 배종순(2016)에 의해 식 (1),



(a) Isometric view

(b) Front view

(c) Top view

Fig. 2. Strain wedge model

(2), (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)은 회전절점의 깊이를 말뚝 두부 변위(δ)에 따른 함수로 나타내었다. 이 때 말뚝 두부의 최대 변위는 말뚝 두부회전 θ=2°일 때 극한에 도달한다는 Davidson(1982)의 이론을 적용하여 극한상태의 두부변위를 계산하여 그때의 회전절점 깊이를 나타낸 것이다.

$$h_p = (5.4834 \ln(\delta) + 6.066) B_1 \quad (1)$$

여기서 B_1은 말뚝의 폭을 나타낸 것이다. 식 (2)는 쐐기 파괴각을 지반의 상대밀도로 나타낸 것이다. 쐐기 파괴각은 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 결정하였고 이 역시 말뚝 두부회전 θ=2°일 때 극한상태의 두부변위를 계산하여 그때의 쐐기 파괴각을 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\beta_m = -0.0012 D_r^2 + 0.2829 D_r + 15.449 \quad (2)$$

$$\beta_m = \tan^{-1}\frac{l}{h_p} \quad (3)$$

여기서, Dr은 지반의 상대밀도를 나타내며, 모래지반의 다짐상태 정도를 나타낸다.

식 (4)는 쐐기 날개각을 지반의 상대밀도로 나타낸 것이다. 이 역시 말뚝 두부회전 θ=2°일 때 극한상태의 두부변위를 계산하여 나타내었다.

$$\beta_s = -0.0021 D_r^2 + 0.3325 D_r + 26.051 \quad (4)$$

식 (1), (2), (4)가 결정이 되면 식 (5), (6)과 같이 쐐기 폭(B), 쐐기 경사길이(l_s) 값이 산정이 되어 쐐기 모형을 결정할 수 있게 된다.

$$B = 2l \tan\beta_s + B_1 \quad (5)$$

$$l_s = \frac{l}{\cos\beta_s} \quad (6)$$

3. 쐐기 모델을 이용한 단말뚝의 수평저항력 산출

3.1 힘의 평형

Fig. 3은 수평하중이 작용하는 단말뚝 배면지반의 쐐기 저항 영역에서 임의의 깊이에서의 미소요소에 발생되는 힘의 평형 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 3에서 미소요소에 외력 dP가 작용했을 때 말뚝의 수평저항력은 쐐기 후면부에서 발생되는 수평저항토압 dQ, 쐐기 측면부의 전단저항 $d\Gamma_{s1}$, 말뚝 측면과 지반의 마찰저항 $d\Gamma_a$의 조합으로 나타내고 말뚝 두부에 가해지는 수평하중 P에 대응하여 나타나는 내력을 R이라 하면 R을 말뚝에 가해지는 수평하중 P에 대응하여 발휘되는 말뚝의 수평저항력이라 정의하고 아래의 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$dP = dQ + 2d\Gamma_{s1} + 2d\Gamma_a \quad (7)$$

$$\int_0^{h_p} dP = \int_0^{h_p} dQ + \int_0^{h_p} 2d\Gamma_{s1} + \int_0^{h_p} 2\, d\Gamma_a \quad (8)$$

$$P = R = Q + 2\Gamma_{s1} + 2\Gamma_a \quad (9)$$

식 (7), (8), (9)에서

dQ : 쐐기의 미소구간에서 후면부에 발생되는 수평저항토압(N)

$d\Gamma_{s1}$: 쐐기의 미소구간에서 날개부에 발생되는 전단저항(N)

$d\Gamma_a$: 미소구간에서 말뚝과 지반 사이에서 발생되는 마찰저항(N)

P : 말뚝 두부에 가해지는 수평하중(N)

R : 말뚝의 수평저항력(N)

Fig. 4는 Fig. 5의 지표에서 임의의 깊이에 생기는 쐐기 요소이다. 쐐기 요소의 형상을 결정하기 위해 미소

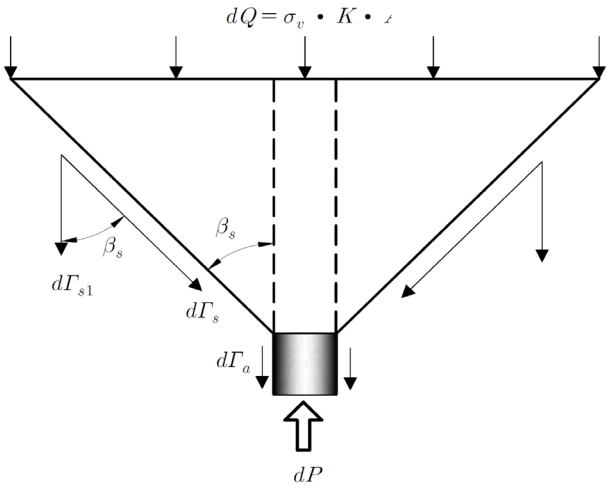


Fig. 3. Load equilibrium in single pile

영향거리 l_x, 미소 영향 폭 B_z, 미소 날개거리 l_{sx}는 식 (10), (11), (12)와 같이 구할 수 있다.

$$l_x = (h_p - y)\tan\beta_m \tag{10}$$

$$B_z = B_1 + 2l_x \tan\beta_s = B_1 + 2(h_p - y)\tan\beta_m \tan\beta_s \tag{11}$$

$$l_{sx} = \frac{l_x}{\cos\beta_s} = \frac{(h_p - y)\tan\beta_m}{\cos\beta_s} \tag{12}$$

쐐기 미소요소에서의 수평저항력은 식 (13)과 같고 쐐기 날개부의 전단저항 값과 말뚝과 지반사이의 마찰저항은 두개씩 존재하기에 각각 2를 곱해 계산하였다.

$$\begin{aligned} dp &= dQ + 2\,d\Gamma'_s + 2\,d\Gamma_a \\ &= B_z\,dy\,\gamma\,y\,K_1 + 2l_{sx}\,dy\,\gamma\,y\,K_2\tan\phi\cos\beta_s \\ &\quad + 2dy\,B_1\,\gamma\,y\,K_3\tan\phi' \end{aligned} \tag{13}$$

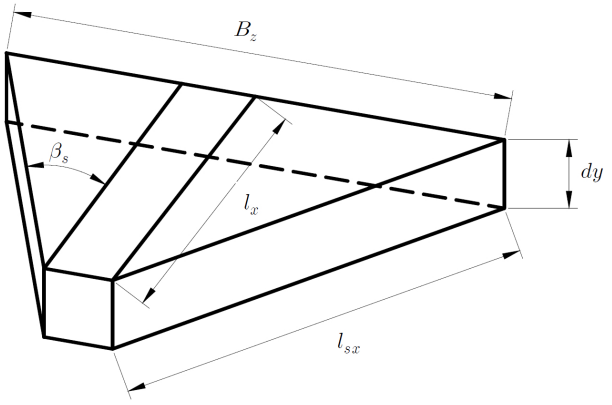


Fig. 4. Strain wedge element in single pile

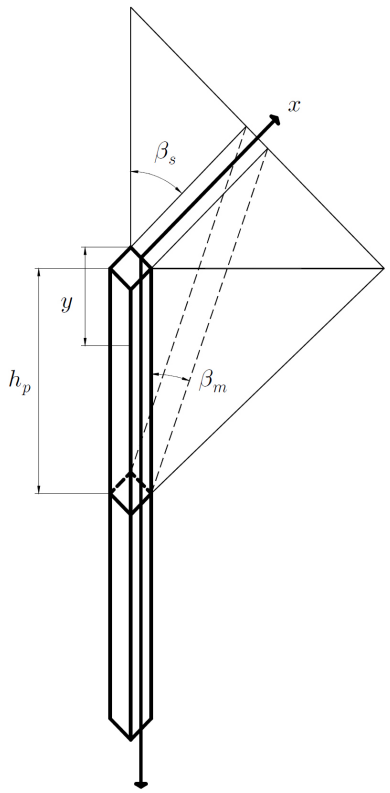


Fig. 5. Strain wedge model in single pile

3.2 쐐기 후면부의 수평저항토압

쐐기 후면부의 수평저항토압 Q를 구해보면

$$dQ = \{B_1 + 2(h_p - y)\tan\beta_m \tan\beta_s\}\gamma\,K_1\,y\,dy \tag{14}$$

여기서, β_m과 β_s는 식 (2), (3)으로부터 구해진 값으로서 Constant이며, $\tan\beta_m \tan\beta_s = T_1$이라 두면 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} dQ &= \{B_1 + 2(h_p - y)\,T_1\}\gamma\,K_1\,y\,dy \\ &= B_1\,\gamma\,K_1\,y\,dy + 2h_p\,T_1\,\gamma\,K_1\,y\,dy - 2\,T_1\,\gamma\,K_1\,y^2\,dy \end{aligned} \tag{15}$$

식 (15)를 지표면부터 회전절점까지 적분구간으로 두면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\int_0^{h_p} dQ \\ &= \frac{1}{2}B_1\,\gamma\,K_1\,h_p + T_1\,\gamma\,K_1\,h_p^3 - \frac{2}{3}T_1\,\gamma\,K_1\,h_p^3 \\ &= \frac{1}{2}B_1\,\gamma K_1\,h_p + \frac{1}{3}T_1\,\gamma\,K_1\,h_p^3 \end{aligned} \tag{16}$$

그러므로 단말뚝 배면지반의 수평저항토압 Q는 식 (17)과 같다.

$$Q = \left(\frac{1}{2}B_1 + \frac{1}{3}T_1\,h_p\right)h_p\,\gamma\,K_1 \tag{17}$$

3.3 쐐기 날개부의 전단저항

쐐기 날개부의 전단저항 Γ_{s1}을 구해보면

$$\begin{aligned} d\Gamma_{s1} &= l_{sx}\,dy\,\gamma\,K_2\,y\tan\phi\cos\beta_s \\ &= \frac{(h_p - y)\tan\beta_m}{\cos\beta_s}dy\,\gamma\,K_2\,y\tan\phi\cos\beta_s \\ &= (h_p - y)\tan\beta_m\tan\phi\,\gamma\,K_2\,y\,dy \end{aligned} \tag{18}$$

여기서, β_m과 ϕ는 Constant 이므로 $\tan\beta_m \tan\phi = T_2$라 두면

$$d\Gamma_{s1} = h_p\, T_2\, \gamma\, K_2\, y\, dy - T_2\, \gamma\, K_2\, y^2\, dy \tag{19}$$

식 (19)와 같이 나타내며, 식 (19)를 지표면부터 회전절점까지 적분구간으로 두면 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{h_p} 2d\Gamma_{s1} = T_2\, \gamma\, K_2\, h_p^3 - \frac{2}{3} T_2\, \gamma\, K_2\, h_p^3 \tag{20}$$

그러므로 쐐기 날개부의 전단저항 Γ_{s1}는 식 (21)과 같이 구할 수 있다.

$$\Gamma_{s1} = \frac{1}{3} T_2\, \gamma\, K_2\, h_p^3 \tag{21}$$

3.4 말뚝과 지반의 마찰저항

말뚝과 지반사이의 마찰저항 Γ_a는

$$d\Gamma_a = B_1\, dy\, \gamma\, y\, K_3 \tan\phi' \tag{22}$$

식 (22)를 지표에서 회전절점까지 적분을 하면 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{h_p} 2d\Gamma_a = B_1\, \gamma\, K_3 \tan\phi'\, h_p^2 \tag{23}$$

그러므로 말뚝과 지반사이의 마찰저항 Γ_a는 식 (24)와 같이 구할 수 있다.

$$\Gamma_a = B_1\, \gamma\, K_3 \tan\phi'\, h_p^2 \tag{24}$$

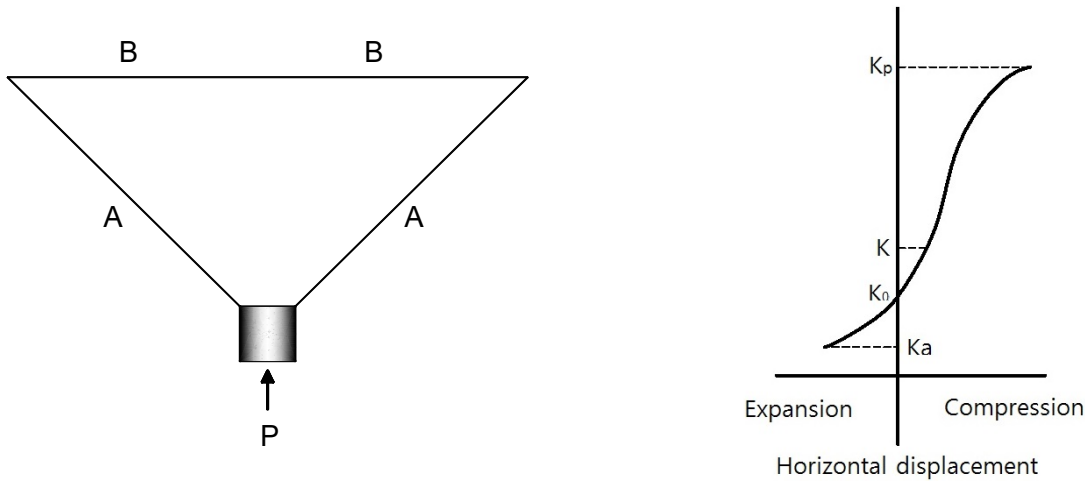
3.5 쐐기의 수평저항력

이상 에서와 같이 수평하중이 작용하는 단말뚝 배면지반에서 발생되는 쐐기의 수평저항력(R)은 식 (17), (21), (24)의 합으로써 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\therefore R = \left(\frac{B_1}{2} + \frac{T_1 h_p}{3}\right) h_p^2\, \gamma\, K_1 + \frac{1}{3} T_2\, h_p^3\, \gamma\, K_2 + B_1 \tan\phi'\, h_p^2\, \gamma\, K_3 \tag{25}$$

3.6 토압계수 결정

Fig. 6(a)에서 말뚝에 수평하중이 작용하면 말뚝과 말뚝 배면지반에서 발생된 쐐기는 B영역으로 변형이 진행된다. A영역은 지반의 이완이 발생하게 되고 쐐기 측면에 작용하는 토압은 주동토압이 발생하기 때문에 쐐기 날개부의 전단저항 계산에서 토압계수는 주동토압계수 K_a를 적용함이 바람직하다. 쐐기 후면부에서는 외력 P에 의하여 말뚝과 발생된 쐐기는 B영역으로 변형이 진행되고 B영역의 지반은 압축을 받아 수동 토압이 발생하게 된다. 쐐기 후면부의 수평토압 계산에서의 토압계수는 수동토압계수 K_P를 적용하여야 한다. 하지만



(a) SW deformation (b) Earth pressure coefficient

Fig. 6. Concept of earth pressure coefficient

Fig. 6(b)에서와 같이 수동토압계수 K_P는 지반의 변형이 극한상태에 도달하였을 때를 의미한다. 실제 말뚝 두부의 변위에 따라 말뚝 배면지반의 상태는 압축의 상태에 있으나 극한 상태에 도달하지는 못한 상태이므로 수동토압계수 K_P를 적용하는 것은 다소 무리가 따른다 (Kim, 2007).

토압계수를 결정하기 위해 김지성, 배종순(2016)의 모형실험결과와 단말뚝의 수평저항력 산정식 (25)에 수동토압계수, 정지토압계수(K_0)를 이용하여 구한 결과를 비교 분석하여 역해석을 실시하였고, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

모형실험과 Davidson(1982)이 제시한 말뚝 두부회전 θ=2°인 지점(극한상태)에서의 제안식 비교 결과 수동토압계수를 대입한 결과보다 정지토압계수를 대입한 결과가 더 잘 일치하고 있다. 쐐기 후면부의 수평 토압 계산시 토압계수는 정지토압을 적용하는 것이 바람직하며 말뚝과 지반의 마찰저항에서 말뚝에 작용하는 토압계수는 정지토압계수를 적용한다.

그러므로 수평하중이 작용하는 단말뚝의 극한수평저항력(R)은 식 (26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\therefore R=\left(\frac{B_1}{2}+\frac{T_1\,hp}{3}\right)h_p^2\,\gamma\,K_0+\frac{1}{3}\,T_2\,h_p^3\,\gamma\,K_a + B_1\tan\phi'\,h_p^2\,\gamma\,K_0 \quad (26)$$

4. 제안식의 비교 검토

Fig. 8은 수평하중이 작용하는 말뚝의 극한수평저항력 산정식 (26)을 이용하여 구한 결과와 기존의 쐐기 이론인 Ashour(1998)와 유한차분해석, 현장실험(Meyer, 1979) 결과를 비교 분석한 그림이다. 말뚝과 지반의 물성치는 Table 1과 같고 극한 수평저항력 산정식 (26)에 사용된 계수 값들은 Table 2와 같이 정리하였다. 현장시험 장소

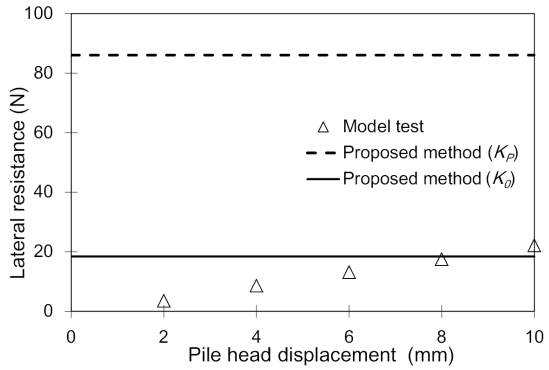


Fig. 7. Comparison of earth pressure coefficient in K_0 and K_p

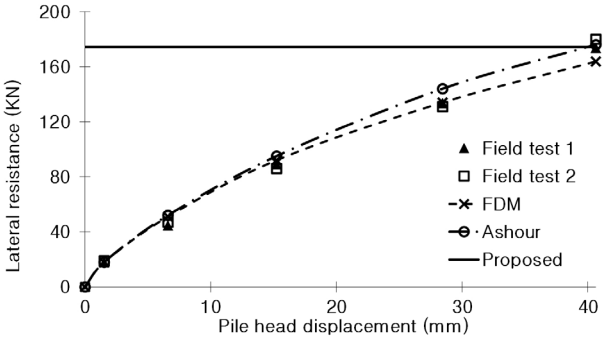


Fig. 8. Lateral resistance comparison of proposed method versus Ashour and other methods

Table 1. Soil and pile properties

Soil			Pile		
Relative density	Internal friction (°)	Specific weight (KN/m^3)	Length (m)	Breadth (m)	EI (MN·m^2)
Loose	37	18.06	17.5	0.36	28.0716

Table 2. Coefficient for Ultimate lateral resistance

Classification	Equation
Deep of rotation point	$h_p=(5.4834\ln(\delta)+6.066)B_1$
Failure angle	$\beta_m=-0.0012\,D_r^2+0.2829\,D_r+15.449$
Wing angle	$\beta_s=-0.0021\,D_r^2+0.3325\,D_r+26.051$
Constant T_1	$T_1=\tan\beta_m\tan\beta_s$
Constant T_2	$T_2=\tan\beta_m\tan\phi$
Coefficient of earth pressure at rest	$K_0=1-\sin\phi$
Coefficient of active earth pressure	$K_a=\tan^2(45-2/\phi)$

는 Bailly에 위치한 원자력 발전소이며 현장 두 곳에서의 실험값을 비교하였다. 비교결과 현장 1과의 오차는 0.4%, 현장 2와의 오차는 3.32%로 유사하게 나타났으며, 유한차분법보단 6.02%크게 나타났다. 기존의 쐐기 이론인 Ashour(1998)와는 1.03% 차이로 유사하게 나타났다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 극한수평저항력 산정식을 실제 설계 적용에 있어 안전하고 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 생각한다.

5. 결 론

본 논문에서는 수평하중이 작용하는 단말뚝의 극한수평저항력을 산출하기 위하여 strain wedge 모델을 적용하였고 그 결과는 다음과 같다.

(1) Strain wedge 모델에서 저항특성은 쐐기 후면부의 수평저항토압, 쐐기 측면부의 전단저항, 그리고 말뚝과 지반의 마찰저항으로 구분하였고, 이들의 합력을 극한수평저항력이라 표현하였다. 이를 바탕으로 수평하중이 작용하는 단말뚝의 극한수평저항력 산출식을 식 (26)과 같이 제안하였다.

(2) 수평하중이 작용하는 단말뚝에서 제안식을 이용하여 말뚝의 극한수평저항력을 산출하였고, 수동토압계수를 대입한 결과보다 정지토압계수를 대입한 결과가 더 잘 일치하여 쐐기 후면부의 수평 토압 계산 시 토압계수는 정지토압을 적용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

(3) 이를 기존 수평지지력 이론인 Ashour, 유찬차분법, 현장실험과 비교 검토하였다. 그 결과 현장이론과는 (0.4～3.32%)의 오차가 났으며 Ashour의 쐐기 이론과는 (1.03%), 유한차분법과는 (6.02%)의 오차가 나타나 실제 설계 적용에 있어 안전하게 사용할 수 있을 것이다.

참고문헌 (References)

1. Ashour, M., Norris, G., and Pilling, P. (1998), “Lateral Loading of a Pile in Layered Soil using the Strain Wedge Model”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* ASCE, Vol.124, No.4, pp.303-315.
2. Ashour, M. and Norris, G. (2003), “Lateral Loaded Pile Response in Liquefiable Soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.6, pp.404-414.
3. Bae, J. S. and Kim, S. H. (2008), “Behavior of Back Ground of the Laterally Loaded Single Pile”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.8, pp.53-60.
4. Bae, J. S., Kim, J. S., and Kim, S. H. (2009), “Behavior of Back Ground of the Laterally Loaded Single Pile II”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.11, pp.61-73.
5. Brown, D. A., Morrison, C., and Reese, L. C. (1988), “Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.11, pp.1261-1276.
6. Chang, Y. L. (1937), “Lateral Pile-Loading Tests”, *ASCE,* Vol.102, pp.272-278.
7. Duncan, J. M. (2000), “Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.126, No.4, pp.307-316.
8. Davidson, H. L., Cass, P. G., Khilji, K. H., and Mcquade, P. V. (1982), *Laterally loaded drilled pier research*, Report EL 2197, EPRI, pp.324.
9. Kim, J. S. and Bae, J. S. (2016), “Behavior of Back Ground of the Laterally Loaded Pile Group”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.1, 2016, pp.5-18.
10. Kim, S. H. (2007), “*Lateral Resistance Analysis of Single Pile using Wedge Model in Sand Ground*”, Ph. D. Thesis, Gyeongsang Nation University, pp.135-136.
11. Matlock, H. and Reese, L. C. (1960), “Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.86, No.SM5, pp.63-91.
12. Meyer, B. J. and Reese, L. C. (1979), *Analysis of Single Piles under Lateral Loading*, Texas State Department of Highways and Public Transportation Research Report 244-1, Austin, Texax, pp. 107-132.
13. Wang, S. T. and Reese, L. C. (1986), “*Study of Design Methods for Vertical Drilled Shaft Retaining Walls*”, Texas State Department of Highways and Public Transportation, Austin, Texas, pp.84-103.

Received : April 11th, 2016
Revised : May 16th, 2016
Accepted : November 14th, 2016