

모래지반에서 썬기모델을 이용한 단독말뚝의 수평저항력 해석

Lateral Resistance Analysis of Single Pile Using Strain Wedge Model in Sand

배 종 순¹ Bae, Jong-Soon
김 지 성² Kim, Ji-Seong
김 성 호³ Kim, Sung-Ho

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 lateral resistance of the laterally loaded single pile using the strain wedge model of the soil deformation. The results of this equation is compared with results of model test, field test, p-y curve and other methods. It is found that the result of proposed equation is smaller than the result of model test. The results of loading test considerably coincide with those of proposed equation; however, a few of deviations are generated as the displacement of pile head increases. Moreover, coincidences exist between the results of the proposed equation and those of finite difference method.

요 지

본 연구에서는 Strain Wedge 해석모델을 이용하여 수평하중이 작용하는 단독말뚝의 수평저항력 산출식을 제시하였고, 이를 모형실험, 현장 실험의 결과와 기존의 문헌에서 제시된 수평저항력 산정식과 비교·분석하였다. 그 결과 모형 실험의 시험 결과보다 조금 작게 나타났고, 현장 재하실험 결과와는 말뚝 두부의 변위가 작을 경우 상당히 잘 일치하고 있으나, 말뚝 두부의 변위가 증가할 수록 결과 값의 차가 조금씩 발생하였다. 그리고 기존의 산출식과 비교 검토한 결과 유한차분법과 잘 일치하였다.

Keywords : Laterally loaded pile, Lateral resistance, Strain wedge model

1. 서 론

구조물이 토압, 풍압, 파력, 지반거동에 의한 측방토압 등을 받게 되면 말뚝에는 연직력 뿐만 아니라 수평하중도 받게 된다. 특히 지진에 의하여 발생하는 수평하중은 매우 크고, 해안 구조물의 경우에 있어서 파도에 의하여 발생하는 수평하중은 말뚝의 거동에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 수평하중으로 인해 발생하

는 말뚝기초의 과도한 변위나 파괴는 상부구조물에 영향을 미치므로 수평하중을 받는 말뚝의 해석과 설계는 매우 중요한 사항 중의 하나로 인식되고 있다.

수평하중을 받는 단독말뚝의 거동 특성에 관한 이론적 연구들은 활발히 진행되고 있다. 하지만 여러 가지 불분명한 요소, 즉 말뚝-흙 경계요소의 불확실성, 지반의 비균질성, 지하수 변동에 따른 미세 토립자들의 이동 등으로 인하여 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 최

1 정회원, 경상대학교 토목공학과 교수, 경상대학교 공학연구원 연구원 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ., Researcher, Eng. Research Institute)

2 경상대학교 토목공학과 박사과정, 경상대학교 공학연구원 연구원 (Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ., Researcher, Eng. Research Institute, sea166@naver.com, 교신저자)

3 정회원, 청경E&D 이사 (Member, Director of Chunggyung E&D)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

근 연구들에 의하면 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 SW(Strain wedge)모델을 제시하였다.

SW 모델에 관한 연구는 Brown 등(1988)이 수평하중이 작용하는 무리말뚝에서 말뚝 상호간의 간섭에 의한 하중 저감효과를 설명하기 위하여 썩기 이론을 접목하였고 Ashour 등(1999, 2004)과 Ashour & Norris(2003)는 다층지반에 매설된 말뚝에 수평하중이 작용할 경우 하중-변형 거동 특성을 썩기 이론을 접목하여 해석한 결과를 발표하였다. 그리고, Wang - Reese(1999)는 말뚝에 작용하는 수평 하중에 대한 저항 영역을 썩기 모델로 가정하여 극한상태의 수평저항력을 산출하는 식을 제안하였다. 하지만 Brown(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. 그리고 Ashour 등(1999, 2004)가 제시한 해석 모델에서는 말뚝과 지반의 파괴면이 이루는 경사각으로 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 내부미찰각의 함수이기 보다는 말뚝 두부의 변위에 따른 함수임을 알 수 있고, 썩기의 변형영역은 말뚝의 회전절점에서부터 시작되지만 이에 대한 고려가 되어있지 않다. 그리고 대부분 제시된 SW모델은 토압론을 이론적 근거로 한 이론적 제시일 뿐 이에 대한 실험적인 검증은 확인이 되지 않은 상태다. 따라서 SW 모델에 관한 모형 실험(배중순 2008, 2009)을 통해 이에 대한 실험적인 검증 및 배면지반의 저항거동특성을 규

명하였다. 본 연구에서는 규명된 사실을 바탕으로 말뚝에 수평하중이 작용할때 말뚝의 수평저항력과 파괴 형상을 썩기 모델로 가정하여 이에 가장 부합되는 썩기 형상을 결정하며 결정된 썩기 형상으로 수평 저항 요소를 고려한 수평저항력 산출식을 도출하고, 도출된 수평저항력 산출식을 기존의 자료들과 비교분석하여 그 효율성을 검증하고자 한다.

2. SW(Strain Wedge) 모델 해석

수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 파괴는 작용하는 하중의 크기, 말뚝의 지중 매설 깊이, 말뚝 강성, 지반 조건, 그리고 수평하중에 의한 말뚝의 회전변위 등에 따라 서로 다른 결과를 나타낸다. 하지만 이때 발생하는 응력구군은 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 모두 그 크기가 다르게 나타나지만 그 형상은 거의 일정한 양상으로 가정할 수 있다. 이때 말뚝을 변형이 없는 강성으로 가정한다면 응력구군은 말뚝의 회전변위에 대한 함수로서 말뚝의 회전각이 증가할수록 응력구군의 크기도 변화하게 된다. 따라서 발생된 응력구군은 앞 연구자들(Ashour 등 1999, 2004 ; Ashour & Norris 2003 ; Wang-Reese 1999)의 가정에 의해 그림 1(b)와 같이 동일한 면적의 썩기 면적으로 환산한 후 이를 적용하여 말뚝의 저항 거동 특성을 해석한다.

2.1 썩기 모델 해석을 위한 가정조건

수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 거동 특성을 해석하기 위한 가정조건은 각 지층에서의 지반은 등방

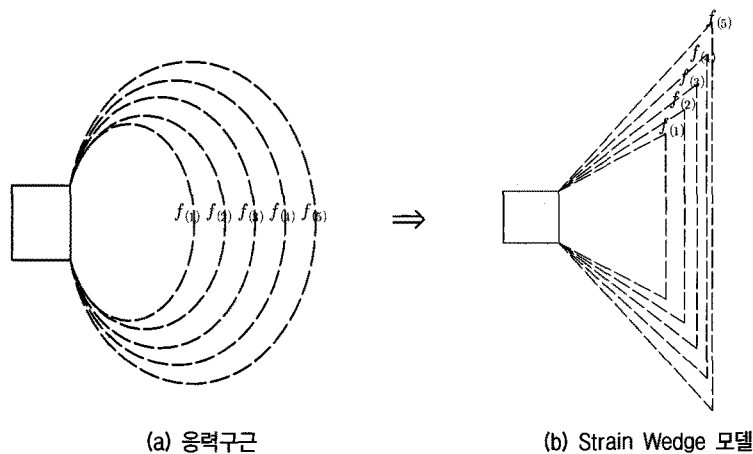


그림 1. Strain Wedge 모델의 응력구군 가정

균질이며 말뚝 배면지반의 파괴는 지표에서부터 발생하여 순차적으로 지중으로 발생하는 것으로 가정한다. 썩기 측면부의 전단저항은 상재하중으로 인한 영향을 무시하며 말뚝과 지반의 마찰계수는 $\frac{2}{3}\phi$ 를 적용한다. 발생된 썩기 내부의 지반변형에 의한 저항은 무시하고 말뚝의 회전절점 이하에서는 말뚝 및 지반의 변형이 발생하지 않는 것으로 가정한다. 힘의 평형조건을 만족하며 원형 말뚝인 경우 동일한 면적을 가진 정사각형 말뚝 쪽으로 간주하여 해석한다.

2.2 말뚝 배면지반의 썩기 형상 결정

2.2.1 말뚝과 썩기 파괴면이 이루는 경사각(β_m)과 말뚝의 회전절점(h_p) 결정

수평하중이 작용하는 말뚝의 배면지반 파괴는 그림 2

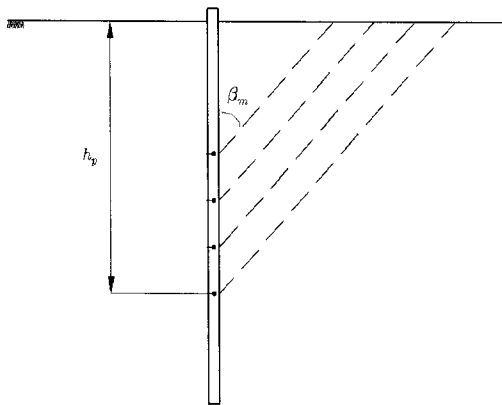


그림 2. 말뚝의 회전절점과 경사각

와 같은 진행성 썩기 파괴의 형태를 나타내고 있다. 여기서 말뚝과 썩기 파괴면이 이루는 경사각을 β_m 이라 하며 이때 β_m 은 지반의 상대밀도 즉, 지반의 내부마찰각 ϕ 의 함수이며, 식(1)과 같이 표현한다.

$$\beta_m = f(\phi) \quad (1)$$

그리고 수평하중이 작용하는 말뚝에서 하중에 의하여 발생하는 말뚝의 회전절점은 말뚝 두부의 변위에 대한 함수로 표현되며, 아래의 식(2)와 같다.

$$h_p = f(\delta) \quad (2)$$

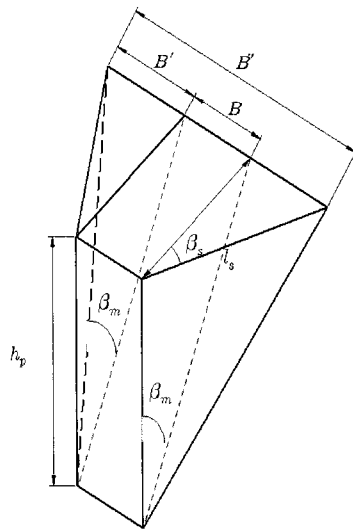
즉, 그림 2와 같이 말뚝 두부의 변위 δ 가 증가할수록 말뚝 배면지반에서 발생하는 썩기 영역은 확장되고, 말뚝의 회전절점도 아래로 더 확장되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 회전절점의 위치는 식(3)와 같다. (배중순, 김성호 2008)

$$h_p = (0.1899 \cdot \ln(\delta) + 0.2101)L_0 \quad (3)$$

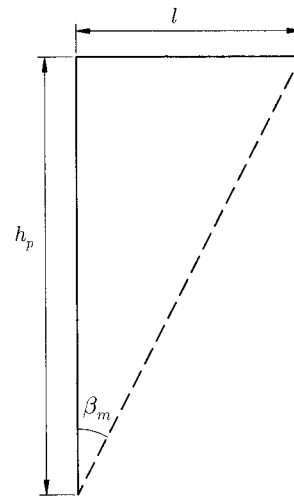
여기서 L_0 : 지중에 매설된 말뚝의 매설 길이

2.2.2 말뚝 배면지반의 썩기 영향 거리(l)와 썩기 경사각(β_s), 썩기 폭길이(B'') 결정

수평하중이 작용하는 말뚝에서 말뚝 배면지반에서 발생하는 썩기의 영역을 입체화 한 것은 그림 3과 같다. 그림 3(a)에서 썩기의 영향거리 l 은 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 말뚝 회전절점에 대한 함수로 표현이 가능하



(a) Strain Wedge의 입체형상



(b) Strain Wedge 단면

그림 3. Strain Wedge 모델

며, 식(4)와 같다. 여기서 말뚝 회전절점은 말뚝 두부의 변위에 대한 함수이므로, 썩기의 영향거리 l 도 말뚝 두부의 변위에 대한 함수로 표현할 수 있다

$$\tan\beta_m = \frac{l}{h_p}$$

$$\therefore l = h_p \cdot \tan\beta_m \quad (4)$$

그리고 그림 3에서 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 썩기 영향 폭 B'' 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B'' = B + 2B' \quad (5)$$

식(5)에서 썩기 날개 부분의 폭길이 B' 는 말뚝 변위에 따라 변하는 값이다. 식(4)에 의해서 B' 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan\beta_s = \frac{B'}{l}$$

$$\therefore B' = l \cdot \tan\beta_s \quad (6)$$

따라서, 썩기 영향 폭 B'' 는 다음과 같이 된다.

$$B'' = B + 2l \cdot \tan\beta_s \quad (7)$$

그리고 그림 3의 수평하중이 작용하는 말뚝의 배면지반에서 발생하는 썩기 변형영역 날개부의 경사길이 l_s 는 식(8)과 같다.

$$\cos\beta_s = \frac{l}{l_s}$$

$$\therefore l_s = \frac{l}{\cos\beta_s} \quad (8)$$

2.3 썩기모델을 이용한 말뚝의 수평저항력 산출

2.3.1 썩기 요소 분할

그림 4는 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 썩기 변형영역을 일정한 깊이의 요소로 분할한 그림이다. 그

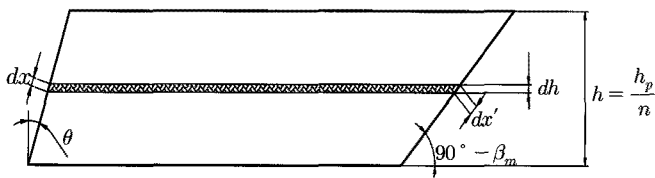


그림 5. Strain Wedge의 요소

림에서 수평하중의 작용에 의하여 말뚝 두부의 변위 δ 가 발생하면 각각의 요소에서는 그림 5(a)와 같이 말뚝과 썩기의 경계면에서 말뚝의 회전각 θ 만큼, 그리고 썩기 파괴면에서는 썩기 파괴면과 말뚝이 이루는 경사각 β_m 만큼의 경사가 발생하게 된다. 여기서 썩기 요소의 높이가 미소 높이 dh 일 때 말뚝과 썩기 경계면의 경사길이 dx 와 썩기 파괴면의 경사길이 dx' 는 다음과 같다.

$$dx = \frac{dh}{\cos\theta} \quad (9)$$

$$dx' = \frac{dh}{\sin(90^\circ - \beta_m)} \quad (10)$$

여기서 θ 는 미소값을 나타내므로, $\cos\theta \approx 1$ 의 값을 지닌다. 따라서 식(9)는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dx \approx dh \quad (11)$$

식(10)에서 썩기 파괴면의 경사길이 dx' 는 연직면과 $90^\circ - \beta_m$ 의 각을 이루고 있다. 여기서 β_m 은 말뚝의 형상에 상관없이 최대 35° 를 초과하지 않는다. 따라서 식(10)에서 $\sin(90^\circ - \beta_m)$ 의 값은 최소 0.82이상의 값을

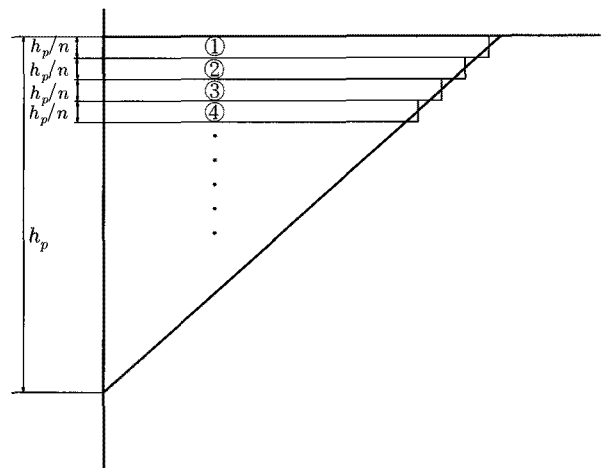
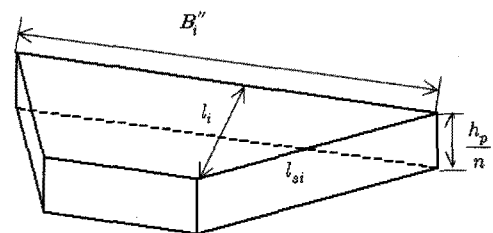


그림 4. Strain Wedge의 요소 층



지나게 되며 썩기모델의 간편해석을 위하여 식(10)에서 dx' 와 dh 의 관계를 식(12)와 같이 가정한다.

$$dx' \approx dh \quad (12)$$

따라서 그림 4의 어느 깊이 h 의 한 요소는 그림 5(b)와 같은 형태로 가정하며 요소의 상부와 하부의 경사길이 l_s , 썩기 후면의 폭 길이 B , 썩기 영향길이 l 은 같다.

2.3.2 힘의 평형

그림 6은 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 썩기 저항 영역에서 각각의 요소에서 발생하는 힘의 평형 관계를 나타낸 그림이다. 그림 6에서 각 요소에 작용하는 외력 Q_i 에 대응하는 내력 R_i 는 썩기 후면부에서 발생하는 수평저항토크 σ_{hi} , 썩기 측면부의 전단저항 τ_{si}' , 말뚝 측면과 지반의 마찰저항 τ_{ai} 의 조합으로, 식(13)과 같다. 따라서 말뚝 두부에 가해지는 수평하중 Q 에 대응하여 나타나는 내력합을 R 이라 하면, 이때 R 을 말뚝에 가해지는 수평하중 Q 에 대응하여 발휘되는 말뚝의 수평저항력이 되고, 식(14)와 같다.

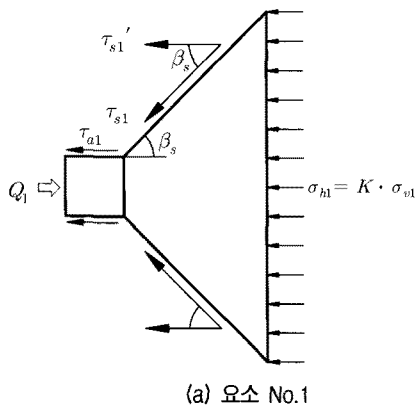
$$Q_i = R_i \quad (13)$$

$$= \sigma_{hi}A_{Bi} + \tau_{si}'2A_{Si} + \tau_{ai} \cdot 2B$$

$$Q = R = \sum \sigma_{hi}A_{Bi} + 2 \sum \tau_{si}'A_{Si} + 2 \sum \tau_{ai}B \quad (14)$$

여기서

- σ_{hi} : 썩기의 한 요소 후면부에 발생하는 수평저항토크(N)
- τ_{si}' : 썩기의 한 요소 날개부에서 발생하는 전단저항(N)
- τ_{ai} : 말뚝과 지반의 마찰저항(N)
- Q : 말뚝 두부에 가해지는 수평하중(N)



(a) 요소 No.1

- R : 말뚝의 수평저항력(N)
- A_{Bi} : 썩기 한 요소 후면부의 면적
- A_{Si} : 썩기 한 요소 측면의 면적

으로 나타낸다.

(1) 썩기 후면부의 수평저항토크, P_h

그림 6에서 수평하중이 작용하는 말뚝의 배면지반 썩기 후면부에서 발생하는 수평저항토크는 다음과 같다.

$$P_{hi} = \sigma_{hi} \cdot A_{Bi} = K \cdot \sigma_{vi} \cdot A_{Bi} \quad (15)$$

여기서

- K : 토압계수
- σ_v : 수직응력(요소 단면 중간점까지의 높이로 사용)

으로 나타낸다. 여기서 썩기 각 요소의 썩기 후면부의 면적 A_{Bi} 는 다음과 같이 된다.

그림 4에서 ①번 썩기 후면부의 면적 A_{B1} 는

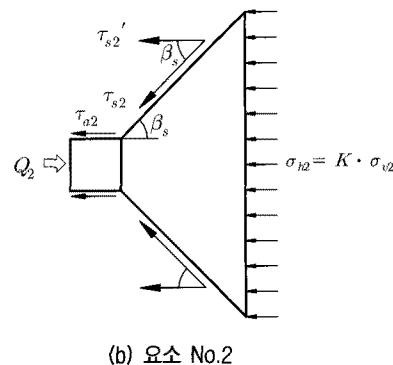
$$A_{B1} = \frac{h_p}{n} \times B_1'' \quad (16)$$

과 같고, 썩기 후면부의 각 요소에서 발생하는 수평저항토크는 다음과 같이 된다.

$$P_{hi} = K \cdot \gamma_t \left(\frac{h_p}{n} \right)^2 \left(\frac{2i-1}{2} \right) \left[B + 2h_p \left(1 - \frac{i}{n} + \frac{1}{2n} \right) \tan \beta_n \cdot \tan \beta_s \right] \quad (17)$$

따라서 썩기 후면부에서 발생하는 전체 수평저항토크는 다음과 같다.

$$P_h = \sum P_{hi} \quad (18)$$



(b) 요소 No.2

그림 6. 하중 요소

(2) 썰기 날개부의 전단저항, T_s

그림 6에서 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 썰기 각 요소의 측면부에서 발생하는 전단저항 T_{si} 는 다음과 같다. (지반은 사질토로 간주하여 점착력은 0으로 본다.)

$$\begin{aligned} T_{si} &= A_{s_i} \cdot \sigma_{vi} \cdot \tan\phi \\ &= A_{s_i} \cdot \sigma_{vi} \cdot K \cdot \tan\phi \end{aligned} \quad (19)$$

여기서

- T_{si} : 썰기 측면의 전단저항
- K : 토압계수
- ϕ : 썰기의 내부마찰각

와 같으며, 썰기 각 요소의 측면 면적 A_{s_i} 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{s_i} &= \frac{h_p}{n} \times l_{s_i} \\ &= \frac{h_p l_i}{n \cos\beta_s} \left(1 - \frac{i}{n} + \frac{1}{2n}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

따라서 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반 썰기 각 요소의 측면에서 발생하는 전단저항력은 다음과 같이 된다.

$$T_{si} = \frac{\gamma_t h_p}{\cos\beta_s} \left(\frac{h_p}{n}\right)^2 \left(i - \frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{i}{n} + \frac{1}{2n}\right) K \cdot \tan\beta_m \cdot \tan\phi \quad (21)$$

식(21)에 의해서

$$T_s = \sum_1^n T_{si} \quad (22)$$

식(22)에서 구해진 썰기 영역의 측면 전단저항력은 그림 6과 같이 썰기 파괴면의 경계면에서 발생된 전단저항력이다. 여기서 발생된 측면 전단력은 힘의 평형 원리를 적용하면 썰기의 측면각 β_s 만큼 힘은 기울어져 작용하게 된다. 따라서 식(22)에서 구한 T_s 는 식(23)과 같이 수정된다.

$$T_s' = T_s \cdot \cos\beta_s \quad (23)$$

식(23)에 의하여 식(22)는 식(24)와 같이 수정된다. 따라서 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반 썰기 영역의 측면 전단저항력은 다음과 같다.

$$T_s' = \gamma_t h_p \left(\frac{h_p}{n}\right)^2 \left(i - \frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{i}{n} + \frac{1}{2n}\right) K \cdot \tan\beta_m \cdot \tan\phi \quad (24)$$

(3) 말뚝-지반의 마찰저항, T_a

그림 6에서 말뚝의 측면과 지반의 마찰저항에 의한 마찰저항력 T_a 는 다음과 같다.

$$T_{ai} = B \cdot K \cdot \sigma_{vi} \cdot \tan\phi' \quad (25)$$

여기서

- T_{ai} : 각 요소의 말뚝-지반 마찰저항
- B : 말뚝의 직경 또는 폭
- K : 토압계수
- σ_{vi} : 각 요소의 수직응력
- ϕ' : 마찰 저항각(= $2\phi/3$)

을 나타낸다. 여기서 각 요소에서 발생하는 마찰저항력 T_{ai} 을 구한 결과는 다음과 같다.

$$T_{ai} = B \cdot K \cdot \gamma_t \cdot \frac{h_p}{n} \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \tan\phi' \quad (26)$$

따라서 수평하중이 작용하는 말뚝과 지반의 마찰저항을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_a &= \sum T_{ai} \\ &= B \cdot K \cdot \gamma_t \cdot \frac{h_p}{n} \cdot \tan\phi' \sum \left(i - \frac{1}{2}\right) \end{aligned} \quad (27)$$

(4) 썰기의 수평저항력

수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반에서 발생하는 썰기의 수평저항력은 썰기 후면부의 수평저항토압 P_h , 썰기 측면부의 전단저항 T_s , 말뚝-지반간의 마찰저항 T_a 로 구분된다. 이때 각 요소들의 합 즉, 식(18), 식(24), 식(27)의 합이 썰기의 수평저항력으로 대변되며, 그 결과는 식(28)과 같으며, 식(28)을 수평하중이 작용하는 말뚝에서 말뚝 두부의 변위를 고려한 수평저항력 산출 식으로 정의한다.

$$\begin{aligned} R &= P_h + 2T_s' + 2T_a \\ &= K\gamma_t \left(\frac{h_p}{n}\right)^2 \cdot \left[B \sum \frac{2i-1}{2} + 2h_p \tan\beta_m \sum \left(\frac{2i-1}{2}\right) \left(\frac{2n-2i+1}{2n}\right) \right. \\ &\quad \left. + 2h_p \tan\beta_m \tan\phi \sum \left(\frac{2i-1}{2}\right) \left(\frac{2n-2i+1}{2n}\right) \right. \\ &\quad \left. + 2B \frac{n}{h_p} \tan\phi' \sum \frac{2i-1}{2} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

식(28)을 식(29)와 같이 정리하며, 이때의 각 계수들을 수평저항계수 L_{σ_h} , 측면 전단저항계수 L_{τ} , 그리고 말뚝-지반의 마찰저항계수 L_{τ_a} 라 하며, 그 값들은 식(30), (31), (32)과 같다.

$$R = P_h + 2T_s' + 2T_a$$

$$= \frac{L_{\sigma_h}}{n^2} \sum_{i=1}^n \left[N_i \left\{ B + 2h_p \left(1 - \frac{N_i}{n} \right) \cdot \tan\beta_m \cdot \tan\beta_s \right\} \right]$$

$$+ \frac{L_{\tau_a}}{n^2} \sum_{i=1}^n N_i \left(1 - \frac{N_i}{n} \right) + \frac{B}{n} L_{\tau_a} \sum_{i=1}^n N_i \quad (29)$$

$$L_{\sigma_h} = K \cdot \gamma_t \cdot h_p^2 \quad (30)$$

$$L_{\tau_a} = K \cdot \gamma_t \cdot h_p^3 \cdot \tan\beta_m \cdot \tan\phi \quad (31)$$

$$L_{\tau} = K \cdot \gamma_t \cdot h_p \cdot \tan\phi' \quad (32)$$

$$N_i = \frac{2i-1}{2} \quad (33)$$

(5) 토압계수 결정

수평저항계수에 적용될 토압계수를 결정하기 위하여 모형실험결과와 식(29)에서 토압계수를 수동토압계수, 주동토압계수를 이용하여 구한 결과와 비교 분석하여 역해석을 실시하였고, 그 결과는 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 모형실험 결과 지반의 상대밀도 변화에 상관없이 말뚝 두부의 변위에 따른 수평저항력은 식(29)에서 수평저항계수 L_{σ_h} 의 토압계수를 수동토압계수 K_p 를 대입한 결과보다 정지토압계수 K_0 를 대입한 결과와

매우 잘 일치하고 있다. 따라서 식(29)에 정지토압계수 K_0 를 적용하는 것이 바람직하다 생각된다. 그리고 말뚝과 지반의 마찰저항에서 말뚝에 작용하는 토압계수는 정지토압계수 K_0 를 적용한다. 이상의 내용에서 수평저항계수 L_{σ_h} , 측면 전단저항계수 L_{τ} , 말뚝-지반의 마찰저항계수 L_{τ_a} 는 식(34), 식(35), 식(36)과 같이 표현된다.

$$L_{\sigma_h} = K_0 \cdot \gamma_t \cdot h_p^2 \quad (34)$$

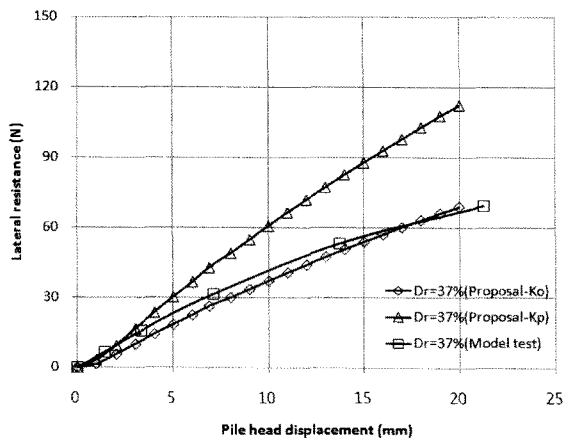
$$L_{\tau_a} = K_0 \cdot \gamma_t \cdot h_p^3 \cdot \tan\beta_m \cdot \tan\phi \quad (35)$$

$$L_{\tau} = K_0 \cdot \gamma_t \cdot h_p \cdot \tan\phi' \quad (36)$$

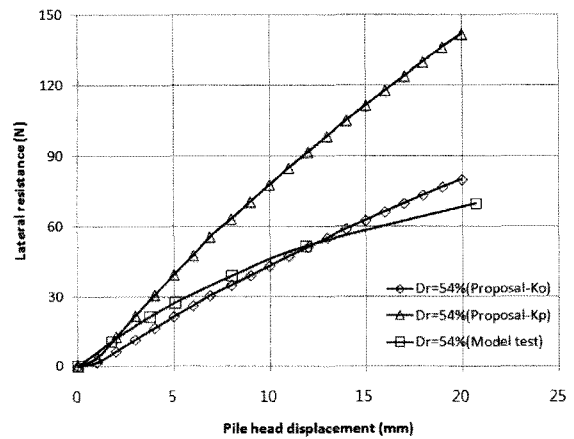
2.4 제안식의 비교 검토

그림 8은 수평하중이 작용하는 말뚝의 수평저항력 산출 제안식(29)에서 구한 하중-변위 관계곡선 결과와 배종순 등(2008)의 모형실험을 통해 구해진 하중-변위 관계곡선의 결과를 비교 분석한 그림이다. 그림에서 보면, 지반의 상대밀도가 느슨한 경우 제안식을 이용하여 구한 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 지반의 상대밀도가 보통, 조밀한 경우 말뚝 두부의 변위가 작을 경우에는 제안식을 이용하여 구한 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치하고 있으나, 말뚝 두부의 변위가 증가할수록 제안식이 실험결과 값보다 모두 조금씩 작게 나타나고 있다.

그림 9는 제안식을 이용하여 구한 결과와 현장말뚝 수평재하시험(대림산업 1999)을 통하여 구한 결과, 기존의 수평지지력 산출식인 Chang의 방법, 유한차분해



(a) $D_r = 37\%$



(b) $D_r = 54\%$

그림 7. 토압계수 K_0 와 K_p 의 관계

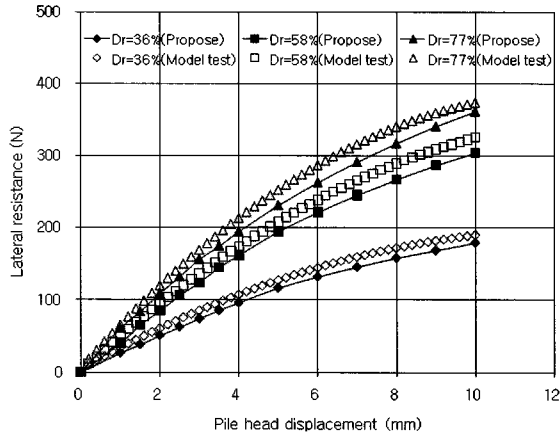


그림 8. 제안식과 모형실험 결과 값의 비교

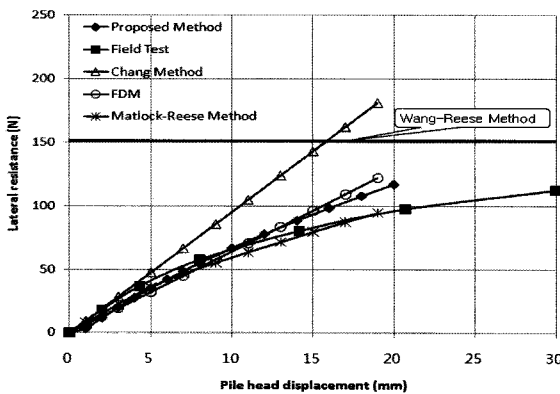


그림 9. 제안식과 현장실험 결과 값의 비교

식, Matlock-Reese가 제안한 $p-y$ 곡선법, Wang-Reese가 제안한 방법을 이용하여 구한 결과를 비교 분석한 그림이다.

그림 9에서 현장실험과 제안식은 초기 변위에서는 비교적 잘 일치하나 변위가 증가할 수록 그 값이 점점 차이가 났고 비교적 제안식과 유한차분해석법은 잘 일치하는 것으로 나타났으나 조금은 오차를 나타내고 있다. 이는 현장지반의 조건을 말뚝을 해석하기 위한 적정 조건으로 변환시 모두 충족시키지 못하기 때문이라 생각되며 현장실험의 경우 다층지반으로 형성이 되어 있어 오차가 크게 나타나고 있다. 하지만 말뚝 두부의 일정변위에 대한 Wang-Reese가 제안한 극한값보다 본 제안식이 작게 나타나고 있어 실제 설계 적용에 있어 안정 측에 있음을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 수평하중이 작용하는 단독말뚝의 수평저항력을 산출하기 위하여 strain Wedge모형을 적용

하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) SW 모델에서 저항특성은 썩기 후면부의 수평저항 토압, 썩기 측면부의 전단저항, 그리고 말뚝과 지반의 마찰저항으로 구분하였고, 이들의 합력을 수평저항력이라 표현하였다. 이를 바탕으로 수평하중이 작용하는 단독말뚝의 수평저항력 산출식을 식(29)와 같이 제시하였다.
- (2) 수평하중이 작용하는 단독말뚝에서 제안식을 이용하여 말뚝의 수평저항력을 산출하였고, 이를 모형실험, 현장 재하실험의 결과 그리고 기존의 말뚝 수평저항력 산출식과 비교 검토하였다. 그 결과 모형실험의 시험 결과보다 조금 작게 나타났고, 현장 재하실험 결과와는 말뚝 두부의 변위가 작을 경우 상당히 잘 일치하고 있으나, 말뚝 두부의 변위가 증가할수록 결과 값의 차가 조금씩 발생하였다. 그리고 기존의 산출식과 비교 검토한 결과 유한차분법과는 잘 일치하였다.

참고 문헌

1. 배종순, 김성성, 김성호 (2009), “수평하중이 작용하는 단독말뚝의 배면지반의 저항거동 특성 II”, *한국지반공학회는논문집*, 제25권, 11호, pp.61-73.
2. 배종순, 김성호 (2008), “수평하중이 작용하는 단독말뚝의 배면지반의 저항거동 특성”, *한국지반공학회는논문집*, 제24권, 8호, pp.53-60.
3. M. Ashour, P. Pilling, and G. Norris, (2004), “Lateral Behavior of Pile Groups in Layered Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.6, pp.580 -592.
4. M. Ashour, and G. Norris, (2003), “Lateral Loaded Pile Response in Liquefiable Soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.6, pp.404-414.
5. Wang and Reese, L.C.(1999), *Geotechnical Engineering Circular No. 4, Ground Anchor and Anchored Systems*, Federal Highway Administration, pp.272-278.
6. M. Ashour, G. Norris, and P. Pilling, (1999), “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.
7. 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
8. 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
9. Chang, Y. L., (1937), “Lateral Pile-Loading Tests”, ASCE, Vol.91, pp.272-278
10. 대림산업 주식회사 용인기술연구소 (1999), 남강댐 계통 광역상수도(2단계)사업 제 1공구 시설공사, 말뚝의 수평재하시험 보고서

(접수일자 2010. 5. 6, 심사완료일 2010. 10. 22)