

사질토 지반 앵커식 고정지지 널말뚝 설계용 간편식

Simplified Formula for Design of Fixed Earth Supported Sheet-Pile Wall in Sand

양 우 식* · 김 기 웅**
Yang, Woo Shik · Kim, Khi Woong

Abstract

Stock(1992) had developed the graph for solving the penetration depth, tieforce of anchor and maximum bending moment of sheet-pile wall for cantilever and free earth supported anchored wall. Kim(1995) had developed graph for design of fixed earth supported anchored wall.

In this paper, the simplified formulas for calculating the penetration depth, tieforce of anchor and maximum bending moment of sheet-pile wall was developed for fixed earth supported anchored wall in sand.

The developed formulas may be helpful for design or sheet pile wall.

I. 서 론

널말뚝의 설계에서는 널말뚝 근입깊이의 산정과 휨모멘트에 저항하는 널말뚝의 최소 단면계수의 산정이 주된 설계요소이다. 근입깊이는 널말뚝의 회전과 변위 및 주동토압과 수동토압의 분포 형태와 크기에 따라 결정된다. 앵커로 지지되는 널말뚝의 경우는 앵커가 부담해야 할 장력과 앵커의 위치 또한 중요한 설계요소가 된다.

널말뚝의 대표적 형태로서는 자립식 널말뚝과 앵커나 타이로드를 이용한 앵커식 널말뚝, 터파기 공사에서 양쪽 굴착면을 지지하는 버팀대식 널말뚝이 있다. 앵커식 널말뚝의 해석은 하부지

반에 근입된 부분을 자유지지로 보는 방법과 고정지지로 보는 방법이 있다. 근입깊이가 비교적 깊고 하부지반이 비교적 견고한 경우는 널말뚝의 하부를 고정지지로 보는 것이 타당하다. 역학적으로 부정정인 구조물을 변곡점을 기준으로 상부와 하부를 나누어 단순보 해석을 하는 것이 보통이며 이 방법은 해석결과가 비교적 안전측에 속한다고 알려져 있다.

이론적으로 널말뚝을 해석하는 과정은 이미 잘 밝혀져 있으며 설계를 보다 간편하게 하기 위하여 캔틸레버식 널말뚝과 자유지지 앵커식 널말뚝의 근입깊이와 앵커의 장력, 최대 휨모멘트를 구하는 도표가 개발되어 있다(Stock,1992).⁹⁾ 그러

* 동신대학교 공과대학
** 인천전문대학 공학부

키워드 : 널말뚝, 근입깊이, 앵커, 앵커식 고정지지

나 고정지지 널말뚝의 도표는 개발되지 않고 있다가 근래에 이르러 발표된 바 있다(김기웅, 1995).¹¹⁾

설계용 도표는 다음과 같이 계수와 흙의 단위 중량, 굴착깊이, 주동토압계수를 곱하여 설계요소를 계산하는 방법이다.

$$\text{근입깊이 } D = x_1 \cdot H$$

$$\text{앵커의 장력 } A_p = x_2 \cdot \gamma H^2 K_a$$

$$\text{최대 휨모멘트 } M_{\max} = x_3 \cdot \gamma H^3 K_a$$

여기서, 계수 x_1, x_2, x_3 는 사질토 지반의 경우 토압계수비 (K_p/K_a)를 이용하여 도표로부터 구하고, 점성토 지반의 경우 점성비 ($\frac{2q_u - q}{\gamma_b K_a H}$)를 이용하여 구한다.

앵커식 널말뚝의 경우, 자유지지 널말뚝에 대하여 앵커의 위치가 굴착깊이의 0.25배인 경우만 도표가 개발되어 있다. 따라서 앵커의 위치가 0.25H가 아닌 경우에 설계요소를 계산할 수 있는 도표의 필요성이 제기된다.

또한 도표를 이용한 방법은 계산과정을 단순화시켜 줌으로써 계산상의 오류를 방지하고 시간을 절약하는 의미를 갖고 있다. 그러나 토압계수비 또는 점성비를 계산하고 도표를 읽어 계수를 구한 다음 설계요소를 계산해 내는 절차를 거쳐야 하므로 설계과정이 매우 단순하다고 하기 어렵다. 이러한 점 때문에 간편한 설계과정을 위한 단순한 식을 개발하였다.

II. 널말뚝 설계 간편식

1. 이론적 배경

고정지지널말뚝의 설계용 간편식을 유도하기 위하여 널말뚝의 근입깊이와 앵커의 장력 및 최대 휨모멘트 계산과정을 정리하였다. 사질토지반에 설치된 앵커식 고정지지널말뚝에 작용하는 토

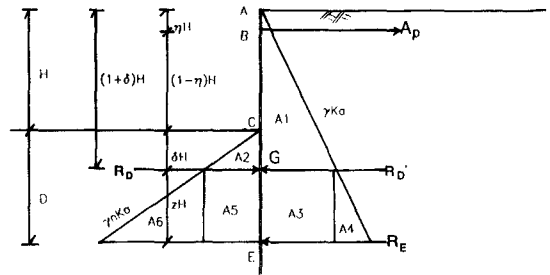


Fig. 1. Earth pressure distribution using by equilibrium beam solution acting on fixed earth supported sheet pile wall in sand

압분포도가 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 1은 E점 아래쪽은 널말뚝이 지반에 고정되어 있고, D점을 변곡점으로 보는 일반적인 등가보법에 의한 토압분포를 지하수면이 없는 경우에 대하여 나타낸 것이다.

널말뚝에 작용하는 토압에 대한 해석은 부정정 해석을 해야하는 불편함이 있다. 따라서 등가보법 해석에서는 널말뚝 A~G구간과 G~E구간을 나누어 단순보로 해석하는 방법이 일반적으로 쓰이고 있다. 수동토압계수를 주동토압계수의 비로 표시하여

$$K_p = n \cdot K_a \text{ 또는 } n = K_p/K_a \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 1과 같이 연직방향 거리를 굴착깊이 H의 함수로 표시할 수 있다.

A점에서 G점 사이의 널말뚝 매면에 작용하는 주동토압을 A_1 , 전면의 수동토압을 A_2 라 하고 G점에서 작용점까지의 거리를 각각 y_1, y_2 라 하면

$$A_1 = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a (1 + \delta)^2, \quad y_1 = \frac{1}{3} (1 + \delta) H \dots\dots (2)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \cdot n \delta^2, \quad y_2 = \frac{1}{3} \delta H \dots\dots\dots (3)$$

G점에서 E점 사이의 주동토압은 A_3, A_4 및 수동토압 A_5, A_6 과 E점에서 작용점까지의 거리

y_3, y_4, y_5, y_6 은

$$A_3 = \gamma H^2 K_a \cdot (1 + \delta) z, \quad y_3 = \frac{1}{2} z H \quad \dots\dots (4)$$

$$A_4 = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \cdot z^2, \quad y_4 = \frac{1}{3} z H \quad \dots\dots (5)$$

$$A_5 = \gamma H^2 K_a \cdot \delta n z, \quad y_5 = \frac{1}{2} z H \quad \dots\dots (6)$$

$$A_6 = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \cdot z^2 n, \quad y_6 = \frac{1}{3} z H \quad \dots\dots (7)$$

등가보법의 원리를 적용하여 A~G구간과 G~E구간을 분리하고 단순보로 본다.

G점에서 A~G구간에서 모멘트의 합은 0임으로

$$A_p(1 - \eta + \delta)H - A_1 y_1 + A_2 y_2 = 0 \quad \dots\dots (8)$$

여기에서, A_p 는 앵커의 장력(f/m^2)이며 앵커의 장력비로 표시할 수도 있다. 즉

$$A_p = T \cdot \gamma H^2 K_a \quad \text{또는} \quad T = A_p / \gamma H^2 K_a \quad \dots (9)$$

여기에서, γ 는 흙의 단위중량(f/m^3)이고 H(m)는 굴착깊이이다.

위와 같이 치환하고 식 (8)에 식 (2), 식 (3)을 대입하여 T에 대해 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{(1 + \delta)^3 - n\delta^3}{6(1 - \eta + \delta)} \quad \dots\dots (10)$$

또한 널말뚝 근입깊이 계산을 위하여 G점의 반력 R_D 를 먼저 구한다. A~G구간에서 수평력의 합이 0이므로

$$A_p + R_D - A_1 + A_2 = 0 \quad \dots\dots (11)$$

위 식에서 $R_D = F \cdot \gamma H^2 K_a$ 로 치환하고 식 (2), 식 (3) 및 식 (9)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$F = \frac{1}{2}(1 + \delta)^2 - \frac{1}{2}n\delta^2 - T \quad \dots\dots (12)$$

근입깊이 산정을 위하여 E점에서 G~E구간에 작용하는 토압에 대한 모멘트 합을 0으로 놓으면

$$R_D' zH + A_3 y_3 + A_4 y_4 - A_5 y_5 - A_6 y_6 \quad \dots\dots (13)$$

식 (13)에 식 (4), 식 (5), 식 (6), 식 (7) 및 식 (12)를 대입하여 정리하면 z에 관한 2차 방정식 식 (14)를 얻는다.

$$(n - 1)z^2 + 3(\delta n - \delta - 1)z - 6F = 0 \quad \dots\dots (14)$$

z에 관한 2차 방정식의 해를 구하여 널말뚝의 근입깊이를 다음 식으로 구한다.

$$D = (z + \delta) \cdot H \quad \text{또는} \quad D/H = z + \delta \quad \dots\dots (15)$$

널말뚝에 작용하는 최대 휨모멘트는 널말뚝 단면의 크기와 널말뚝 재료형식을 결정하는데 이용된다.

최대 휨모멘트는 B-C구간에서 전단력이 0인 점에서 발생하므로, 지표면에서 M_{max} 가 발생하는 지점까지의 거리를 βH 라 하고

$$M_{max} = T \cdot \gamma H^2 K_a \cdot (\beta - \eta)H$$

$$- \frac{1}{2} \gamma (\beta H)^2 K_a - \frac{1}{3} \beta H$$

$$\frac{M_{max}}{\gamma H^3 K_a} = T(\beta - \eta) - \frac{1}{6} \beta^3 \quad \dots\dots (16)$$

여기에서 전단력이 0인 조건을 이용하여

$$T \cdot \gamma H^2 K_a - \frac{1}{2} \gamma (\beta H)^2 K_a = 0 \quad \text{풀면}$$

$$\beta = \sqrt{2T} \quad \dots\dots (17)$$

식 (17)을 식 (16)에 대입하여 최대 휨모멘트

를 구할 수 있다.

2. 회귀분석

위 절에서 유도된 식을 풀기 위해 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 프로그램을 통하여 얻고자 하는 널말뚝의 근입깊이는 식 (15)와 같이 굴착깊이 H 의 함수로 얻어지며, 앵커의 장력 A_p 는 식 (9)와 같이 $\gamma H^2 K_a$ 의 함수로 얻어지고, 널말뚝의 최대 휨모멘트는 식 (16)과 같이 $\gamma H^3 K_a$ 의 함수로 얻어지게 된다. 이는 앵커의 장력과 $\gamma H^2 K_a$, 근입깊이와 H , 최대휨모멘트와 $\gamma H^3 K_a$ 가 완전 선형관계라는 것이 수식을 유도하는 과정에서 증명되었다.

따라서 앵커의 장력비, 근입깊이비, 최대휨모멘트비는 토압계수비 $n = K_p/K_a$ 와 앵커의 위치 η 의 함수로 표현이 가능해진다. 유도된 수식을 풀기 위해 Quick-Basic을 사용하여 컴퓨터 프로그램을 작성하였다. 흙의 전단저항각과, 앵커의 위치를 변화시키면서 프로그램을 수행하여 $\frac{A_p}{\gamma H^2 K_a}$, $\frac{D}{H}$, $\frac{M_{max}}{\gamma H^3 K_a}$ 값을 생성하였다. 독립변수인 흙의 전단저항각은 주동 및 수동토압계수와 변곡점의 위치 등에 영향을 미치는데 관계적으로 쓰이고 있는 토압계수비 K_p/K_a 를 사용하여 회귀분석하였다. 앵커위치를 독립변수로 보았을 때 종속변수인 설계요소와의 관계는 곡선추정에 의해 선

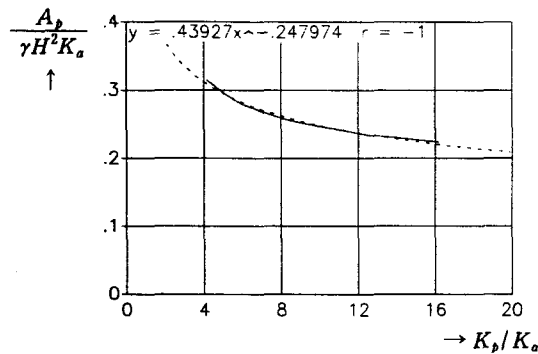


Fig. 2. Regression curve for K_p/K_a Vs $\frac{A_p}{\gamma H^2 K_a}$, $\eta = 0.25H$

형에 가까운 것으로 나타났으나, 토압계수비를 독립변수로 보았을 때는 비선형으로 나타났고 지수로 보았을 때의 상관성이 우수하게 나타났다.

이러한 회귀분석 과정에서 얻어진 도표와 회귀방정식은 앵커위치에 따라 달라지게 된다. 회귀분석 결과의 한 예를 들어 앵커의 위치가 0.25H인 경우에 대하여 Fig. 2~Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 2~Fig. 4에서 보는 바와 같이 3가지 설계요소 모두가 상관성이 우수하게 나타났으며 앵커의 장력은 다음 식과 같이 표현된다.

$$A_p = \gamma H^2 K_a \cdot a_1 (K_p/K_a)^{a_0} \dots\dots\dots (18)$$

널말뚝 근입깊이는 다음 식으로 표현된다.

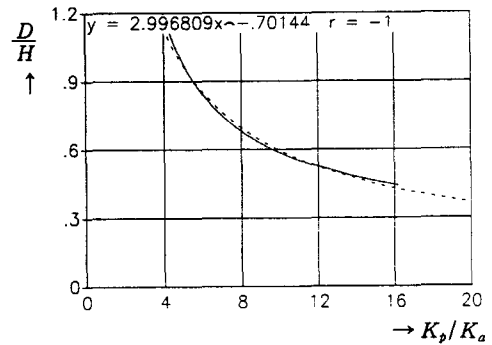


Fig. 3. Regression curve for K_p/K_a Vs $\frac{D}{H}$, $\eta = 0.25H$

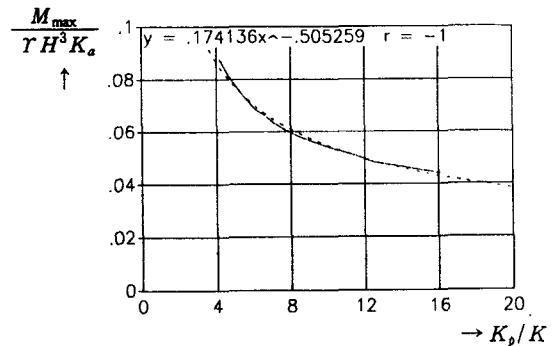


Fig. 4. Regression curve for K_p/K_a Vs $\frac{M_{max}}{\gamma H^3 K_a}$, $\eta = 0.25H$

$$D = H \cdot b_1 (K_p / K_a)^{b_0} \dots\dots\dots (19)$$

최대휨모멘트는 다음 식으로 표현된다.

$$M_{\max} = \gamma H^3 K_a \cdot c_1 (K_p / K_a)^{c_0} \dots\dots\dots (20)$$

식 (18)~식 (20)의 계수 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 에 대하여 앵커의 위치 η 와의 관계를 규명하기 위하여 각 계수에 관한 선형 회귀분석을 한 결과 상관성이 우수하게 나타났고 회귀방정식의 계수는 다음과 같다.

$$a_1 = 0.372544 + 0.266976\eta \dots\dots\dots (21)$$

$$a_2 = -0.296558 + 0.195056\eta \dots\dots\dots (22)$$

$$b_1 = 3.173148 - 0.705986\eta \dots\dots\dots (23)$$

$$b_0 = -0.695542 - 0.024344\eta \dots\dots\dots (24)$$

$$c_1 = 0.216205 - 0.167853\eta \dots\dots\dots (25)$$

$$c_0 = -0.432894 - 0.295032\eta \dots\dots\dots (26)$$

3. 간편식

식 (18)~식 (20)과 식 (21)~식 (26)을 정리하면 흙의 단위중량, 굴착깊이, 주동토압계수를 사용한 널말뚝 설계요소 3가지를 간편하게 구하는 식을 얻을 수 있다.

식 (18)을 정리하여

$$A_p = \gamma H^2 K_a \cdot a_1 (K_p / K_a)^{a_0} = a_1 \gamma H^2 K_a^{-2a_0+1}$$

가 되고, $a_2 = -2a_0 + 1$ 라고 놓으면

$$A_p = a_1 \gamma H^2 K_a^{a_2} \dots\dots\dots (27)$$

여기에서 $a_1 = 0.373 + 0.267\eta$,
 $a_2 = 1.593 - 0.39\eta$

식 (19)을 정리하여

$$D = H \cdot b_1 (K_p / K_a)^{b_0} = b_1 H K_a^{-2b_0}$$

가 되고, $b_2 = -2b_0$ 라고 놓으면

$$D = b_1 H K_a^{b_2} \dots\dots\dots (28)$$

$$b_1 = 3.173 - 0.706\eta, \quad b_2 = 1.391 + 0.049\eta$$

식 (20)을 정리하여

$$M_{\max} = \gamma H^3 K_a \cdot c_1 (K_p / K_a)^{c_0} = c_1 \gamma H^3 K_a^{-2c_0+1}$$

가 되고, $c_2 = -2c_0 + 1$ 라고 놓으면

$$M_{\max} = c_1 \gamma H^3 K_a^{c_2} \dots\dots\dots (29)$$

여기에서 $c_1 = 0.216 - 0.168\eta$,
 $c_2 = 1.866 + 0.59\eta$

식 (27)~식(28)의 형태는 그 동안 사용해 온 주동토압 공식과 상당히 근사한 모양을 갖추고 있어 기억하기 편하고, 친근감을 주게 될 것이다.

III. 간편식의 검산

회귀분석으로 얻어진 간편식에 대한 검산을 위해 2가지의 예제를 통해 비교 분석하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 간편식을 사용하여 계산한 값은 필산으로 계산한 결과와 거의 일치하고 있어 실용적으로 사용하는데 무리가 없다고 판단된다.

Table 1. Design example

| | H=5m, $\eta=0$ $\gamma=1.80\text{f/m}^3, \phi=25^\circ$ | | H=5m, $\eta=0.15$ $\gamma=1.80\text{f/m}^3, \phi=28^\circ$ | |
|--------------------|--|-------------------------------|---|-------------------------------|
| | Simpl- ified formula | Equilibrium beam method | Simpl- ified formula | Equilibrium beam method |
| A_p (f/m) | 3.986 | 3.983 | 3.882 | 3.818 |
| D(m) | 4.526 | 4.448 | 3.690 | 3.659 |
| M_{\max} (f·m/m) | 9.044 | 8.767 | 5.870 | 5.865 |

간편식을 사용할 경우 필산에 의한 결과와 약간의 오차가 발생하므로, 안전측 설계를 하고자 할 때는 안전율을 보수적인 값으로 선택하는 것이 바람직하다고 생각된다. 따라서 설계시 보편적으로 적용하고 있는 허용안전율을 가설구조물의 경우는 1.2~1.3 중에서 1.3을, 영구구조물의 경우는 1.4~1.5 중에서 1.5를 적용할 것을 추천한다.

IV. 결 론

고정지지 널말뚝 설계요소에 대하여 회귀분석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 앵커의 장력은 $\gamma H^2 K_a$, 널말뚝 근입깊이 (D)는 HK_a , 최대휨모멘트(M_{max})는 $\gamma H^3 K_a$ 의 함수로 표현할 수 있다.

2) 지하수면이 없는 경우에 대하여 고정지지 널말뚝 설계요소를 구하는 간편식을 다음과 같이 개발하였다.

여기서, η = 상단에서 앵커까지 거리/굴착깊이

| | Simplified formula | Coefficient |
|---------------------|--------------------------------------|--|
| Anchor force | $A_p = a_1 \gamma H^2 K_a^{a_2}$ | $a_1 = 0.373 + 0.267\eta$ $a_2 = 1.593 - 0.39\eta$ |
| Penetration depth | $D = b_1 H K_a^{b_2}$ | $b_1 = 3.173 - 0.706\eta$ $b_2 = 1.391 + 0.049\eta$ |
| Max. bending moment | $M_{max} = c_1 \gamma H^3 K_a^{c_2}$ | $c_1 = 0.216 - 0.168\eta$ $c_2 = 1.866 + 0.59\eta$ |

3) 위에서 제안한 간편식을 사용하여 널말뚝 설계를 할 때 필산에 의한 방법과의 오차는 근소하여 신뢰성이 인정된다. 다만, 안전측 설계를 할 때는 오차를 감안하여 안전율을 보수적인 값으로 선택할 것을 추천한다.

4) 간편식을 이용한 널말뚝 설계는 계산과정의 오차와 시간을 절약할 수 있으며, 검산으로 이용될 수 있어 합리적이고 경제적인 설계에 기여할 것으로 기대된다.

이 논문은 동신대학교 교내 학술연구조성비의 지원에 의해 수행된 것임

참 고 문 헌

1. 김기웅, 박창화, '사질토 지반 앵커식 고정지 널말뚝 설계를 위한 도표', 인천전문대학 논문집, 제23집, 1995.
2. Bowles, J. E., Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill, Inc., 1982.
3. Cernica, J. N., Foundation Design, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
4. Das, B. M., Principles of Foundation Engineering, Wadsworth, Inc., 1984.
5. Hanna, T. H., and I. I. Kurdi, 'Studies on Anchored Flexible Retaining Walls in Sand', ASCE J. of Geotech. Eng. Div. Vol. 100, 1974.
6. Kay, J. N., and M. I. Qanar, 'Evaluation of Tie-Back Anchor Response', ASCE J. Geotech. Eng. Div. Vol. 104, 1978.
7. Nataraj, M. S., and D. G. Hoadley, 'Design of Anchored Bulkhead in Sand', ASCE J. Geotech. Eng. Div. Vol. 110, 1984.
8. Rowe, P. W., 'Anchored Sheet-Pile Walls', Proc. Inst. Civ. Eng. vol. 1, Pt. 1, 1952.
9. Rowe, P. W., 'Anchored Sheet-Pile Walls', Proc. Inst. Civ. Eng., 1962.
10. Stock, J. F., 'Development of Design Curves for Cantilever and Anchored Sheet Piles', Master of Science Thesis, Youngstown Univ., 1992.
11. Turabi, D. A., and A. Balla, 'Distribution of Earth Pressure on Sheet-Pile Walls', ASCE J. Geotech. Eng. Vol. 94, 1968.