

앵커식 널말뚝벽의 설계용 도표와 간편식

- 고정지지 널말뚝의 등가보 해석을 사용하여 -

Design Charts and Simplified Formulae for Anchored Sheet Pile Wall

- Using Equivalent Beam Analysis for Fixed End Supported Wall -

김 기 응*¹ Kim, Khi-Woong
원 진 오*² Yang, Woo-Shik
백 영 식*³ Paik, YoungShik

Abstract

The major design parameters of the anchored sheet-pile wall include the determination of required penetration depth, the force acting on the anchor, and the maximum bending moment in the piling. Blum solved the fixed earth supported wall using the equivalent beam method, assuming that the wall can be separated into upper and lower parts of the point of contraflexure. Design charts help designer by simplifying the design procedure. But they have some difficulties under some Geotechnical and geometrical conditions. For example, the conventional design charts can compute design parameters only when the ground water table exists above the dredge line.

In this paper, the design charts which can be used for the ground water table existing under the dredge line are presented. And simplified formulae are developed by regression analysis. It is found that simplified formulae are not only very useful for the practice of design but also they can evaluate the result of numerical methods or design charts.

요 지

앵커식 고정지지 널말뚝의 설계요소는 널말뚝의 최소 근입깊이, 앵커가 부담하여야 할 장력 및 널말뚝이 받는 최대 휨 모멘트이다. 널말뚝 설계는 Rankine의 토압이론을 근거로 가정한 토압분포를 적용하여 변곡점을 중심으로 위쪽과 아래 쪽을 나누어 단순보로 보는 Blum의 등가보법이 흔히 쓰이고 있다. 설계용 도표가 개발되어 있으나 기하학적 조건과 지반 조건의 제약으로 실무적으로 이용하기에 불편함이 있다. 본 논문에서는 이러한 불편함을 해소하기 위해 설계용 도표를 개발하였다.

또한 다양한 설계조건에 대하여 컴퓨터 프로그램으로 생성된 출력자료를 회귀분석하여 설계용 간편식을 제시하였다. 간편식은 설계과정을 단순화하고 오류를 줄이며 필산의 결과에 대한 검산으로도 활용할 수 있다.

Keywords : Sheet-pile wall, Equivalent beam method, Fixed earth supported method, Design charts, Simplified formula

*1 정회원, 시립 인천전문대학 공학부 토목과 교수

*2 정회원, 동신대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*3 정회원, 경희대학교 공과대학 토목건축공학부 교수

1. 서론

널말뚝은 보통 흙막이 구조물의 연속벽으로 설계되어 최소의 근입깊이와 경제적인 단면으로 최대 휨모멘트에 저항하는 것을 목적으로 한다. 지반조건에 따라 널말뚝에 작용하는 토압분포가 달라지게 되는데, 설계과정은 이론적으로 정립되어 있어 실무적으로 많이 이용되고 있다.(Das,1995) 자립식과 자유지방식의 널말뚝에 대하여 보다 간편한 설계를 위해 널말뚝 설계요소 중 앵커장력과 근입깊이, 최대 휨모멘트를 구할 수 있는 설계용 도표가 개발되어 있다.(PileBuck,1987, Cernica,1995) 그러나, 앵커위치와 단위중량비가 제한적이라서 현장 조건과 도표가 일치하지 않는 경우 실무적으로 이용하기에 그리 효율적이라고 할 수 없다. 앵커식 고정지지 널말뚝의 경우는 지하수 영향이 없는 경우에 대하여 최근에 도표가 개발되었으나(김기웅,1995) 지하수위를 고려한 경우의 도표는 아직 개발되지 않았다. 본 논문에서는 지하수위를 고려한 고정지지 널말뚝 설계용 도표를 개발하고, 또한 설계요소를 간편식으로 표현하였다. 간편식은 다양한 설계조건에서도 적용이 가능하며 설계과정을 단순화하여 널말뚝을 설계하는데 도움을 줄 수 있다.

고정지지 방식의 널말뚝 벽체의 작용하는 토압분포와 벽체의 변형곡선은 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 널말뚝은 굴착선 아래에서 회전에 대해 구속되어 있으며, C점에 변곡점이 존재한다고 가정한다. 널말뚝은 DE구간에서 모멘트에 대해 구속력을 지닐 수 있도록 충분히 근입되어야 하므로 주로 사질토 지반의 경우에만 적용이 된다.

Blum(1931)은 흔히 등가보법이라고 알려져 있는 내부 마찰각 ϕ 와 변곡점까지의 거리 x 의 상관관계를 이용한

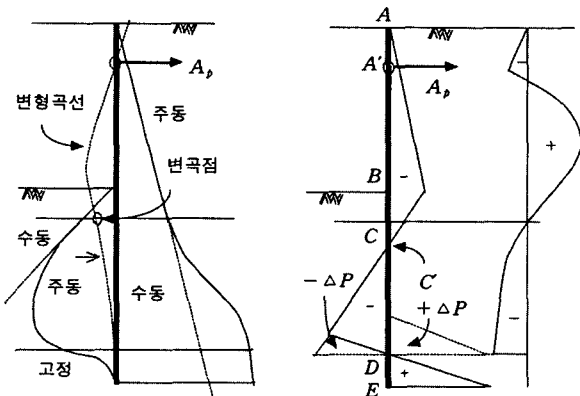


그림 1. 고정지지 널말뚝의 토압분포

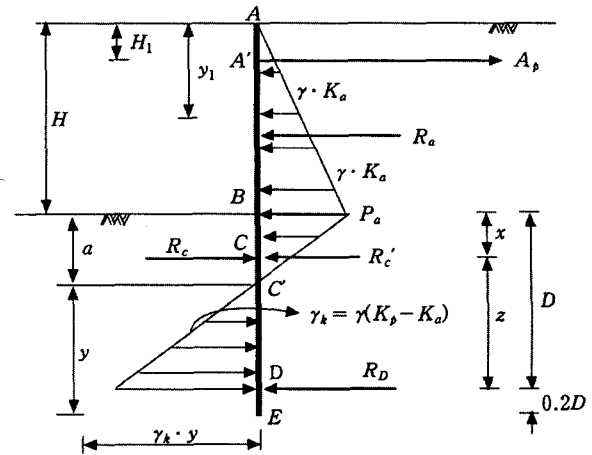


그림 2. Blum의 등가보법

간편한 설계법을 발표하였다. 그림 2는 Blum의 등가보 해석법에 의한 토압분포를 보여주고 있다. 등가보법은 변곡점을 힌지로 가정하기 때문에 변곡점에서 휨모멘트가 0이 된다.

힌지 윗부분과 아랫부분을 구분하고, 위쪽을 단순보로 취급하면 반력 R_c , 앵커장력 A_p , 최대휨모멘트 M_{max} 을 구할 수 있다. 힌지 아랫부분은 R_c' 와 R_d 가 지점반력으로 작용하는 단순보 해석을 하여 널말뚝의 근입깊이를 구할 수 있게 된다.

지하수위가 널말뚝 하단 아래쪽에 있는 경우는 지하수의 영향을 무시할 수 있다. 이에 대한 설계용 도표와 간편식은 최근에 연구되어 발표되었으며 간편식은 식(1a) ~ 식(1b)과 같다.(김기웅,1995 ; 양우식,1998)

$$A_p = a_1 \cdot \gamma H^2 K_a^{a_2} \tag{1a}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.373 + 0.267 \eta \\ a_2 &= 1.593 - 0.39 \eta \end{aligned}$$

$$D = b_1 \cdot H K_a^{b_2} \tag{1b}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= 3.173 - 0.706 \eta \\ b_2 &= 1.391 + 0.049 \eta \end{aligned}$$

$$M_{max} = c_1 \cdot \gamma H^3 K_a^{c_2} \tag{1c}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.216 - 0.168 \eta \\ c_2 &= 1.886 + 0.59 \eta \end{aligned}$$

2. 지하수위 영향을 받는 고정지지 널말뚝

지하수위가 있는 경우는 지하수면의 위쪽과 아래쪽의

토압분포가 달라지게 된다. 설계요소를 구하는 수식을 유도하는 과정에서 단위중량비를 $\gamma'/\gamma = m$ 으로, 토압계수비를 $K_b/K_a = n$ 으로 정의하였다. 앵커장력을 $A_p = T \cdot \gamma H^2 K_a$ 로, 근입깊이는 $D = (z + \delta) H$ 로, 최대 휨모멘트는 $M_{max} = M \cdot \gamma H^3 K_a$ 로 표현할 수 있음을 증명하였다. 앵커장력비(T), 근입깊이비(D/H), 휨모멘트비(M)가 구해지면 γ, H, K_a 를 대입하여 근입깊이(D), 앵커장력(A_p), 최대 휨모멘트(M_{max})를 구할 수 있게 된다.

지하수위를 고려하는 경우 지하수위의 위치에 따라 토압분포가 변하므로, 지하수위가 굴착선 위에 있는 경우(그림 3), 굴착선과 변곡점 사이에 있는 경우(그림 6), 변곡점 아래에 있는 경우(그림 7)로 나누어 해석하였다.

2.1. 지하수위가 굴착선 위에 있을 경우

지하수위가 굴착선 위쪽에 있는 경우의 토압분포가 그림 3에 나타나 있다. C점과 D점 사이를 단순보로 취급하여 C점에서 모멘트 합을 $\Sigma M_c = 0$ 으로 놓으면,

$$\Sigma M_c = A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3 - A_4 y_4 + A_p y_p = 0 \quad (2)$$

과 같이 되고 이 식을 $T (= A_p / \gamma H^2 K_a)$ 에 관해 정리하면,

$$T = \frac{3a^2(1 + \delta - \frac{2}{3}a)}{6(1 - \eta + \delta)} + \frac{(1 - \alpha + \delta)^2 \{3\alpha + m(1 - \alpha + \delta)\} - mn\delta^3}{6(1 - \eta + \delta)} \quad (3)$$

A~C구간사이에 수평력의 합을 0으로 놓고 반력 R_c 를 구하면

$$\Sigma H = A_1 + A_2 + A_3 - A_4 - A_p - R_c = 0 \quad (4)$$

위 식에 토압의 크기를 대입하고 $F (= R_c / \gamma H^2 K_a)$ 에 대한 식으로 정리하면,

$$F = \frac{1}{2} a^2 + \alpha(1 - \alpha + \delta) + \frac{1}{2} m(1 - \alpha + \delta)^2 - \frac{1}{2} mn\delta^2 - T \quad (5)$$

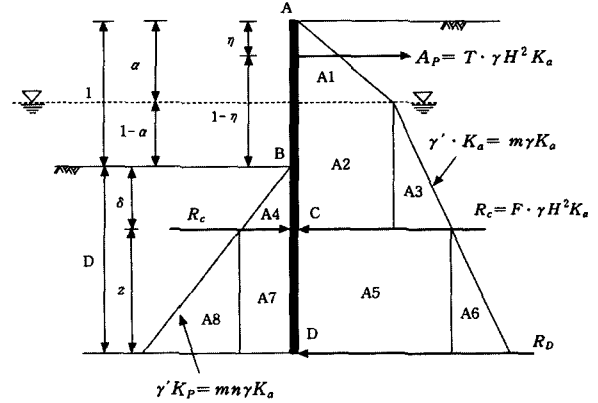


그림 3. 지하수위가 굴착선 위에 존재할 경우 토압분포

C~D구간에서는 D점에서 모멘트를 취하여 $\Sigma M_D = 0$ 으로 놓으면,

$$\Sigma M_D = A_5 y_5 + A_6 y_6 - A_7 y_7 - A_8 y_8 + R_c' y_c = 0 \quad (6)$$

위 식을 z에 관한 2차 방정식으로 정리하여 해를 구하여 전체 근입깊이 D는

$$D = (z + \delta) \cdot H \quad (7)$$

가 된다.

최대 휨모멘트는 모멘트 발생지점이 지하수면 위에 있는 경우와 지하수면 아래에 있는 경우도 나누어 구한다.

1) 최대 휨모멘트 발생지점이 지하수면 위에 있는 경우 그림 4에서 전단력 S가 0인 지점에서 모멘트를 취해보면,

$$\frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \beta^2 - T \cdot \gamma H^2 K_a = 0 \quad (8)$$

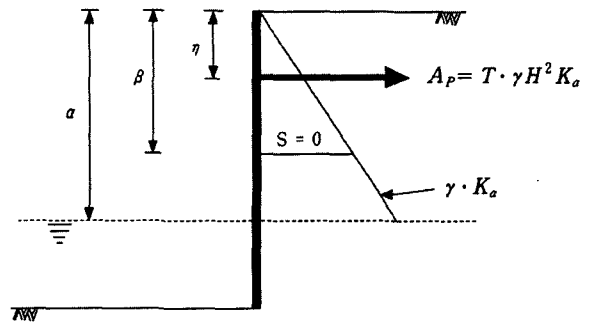


그림 4. 최대 휨모멘트가 지하수면 위에서 발생하는 경우

식(8)을 풀면

$$\beta = \sqrt{2T} \quad (9)$$

식(9)를 식(8)에 대입하여

$$M_{\max} = T \cdot \gamma H^2 K_a (\beta - \eta) H - \frac{1}{6} H^3 K_a \beta^3 \quad (10)$$

휨모멘트비에 대해 정리하면

$$M = \frac{M_{\max}}{\gamma H^3 K_a} = T \cdot (\beta - \eta) - \frac{1}{6} \beta^3 \quad (11)$$

2) 최대 휨모멘트 발생지점이 지하수면 아래에 있는 경우

1)의 원리와 같이 전단력이 0인 지점까지 거리와 최대 휨모멘트를 구하면,

$$\beta = \frac{-2\alpha(1-m)}{2m} + \frac{\sqrt{4\alpha^2(1-m)^2 - 4m\{(m-1)\alpha^2 - 2T\}}}{2m} \quad (12)$$

$$M = \frac{M_{\max}}{\gamma H^3 K_a} = T(\beta - \eta) - \frac{1}{6} \{3\alpha\beta(\beta - \alpha) + \alpha^3 - m(\beta - \alpha)^3\} \quad (13)$$

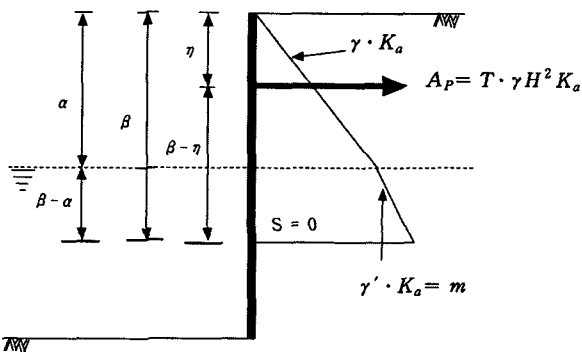


그림 5. 최대 휨모멘트가 지하수면 아래에서 발생하는 경우

2.2 지하수위가 굴착선과 변곡점 사이에 있는 경우

지하수위가 굴착선과 변곡점 사이에 있는 경우는 C'점에서 모멘트를 취하여 T에 관해 정리하여

$$T = \frac{T_1 + T_2 + T_3 - T_4}{6(1 - \eta + \delta)} \quad (14)$$

$$T_1 = m(1 - n)(\delta - \alpha + 1)^3$$

$$T_2 = 3(\delta - \alpha + 1)^2 \{ \alpha - n(\alpha - 1) \}$$

$$T_3 = 3\alpha(\alpha\delta - 2 + \alpha)$$

$$T_4 = n(\alpha - 1)^2(3\delta - 2\alpha + 2)$$

반력을 구하기 위해 A~C' 구간의 수평력의 합을 0으로 놓으면, F는

$$F = \frac{1}{2} \alpha^2 + (\delta - \alpha + 1) \{ \alpha - n(\alpha - 1) \} + \frac{1}{2} m(1 - n)(\delta - \alpha + 1)^2 - \frac{1}{2} (\alpha - 1)^2 n - T \quad (15)$$

근입깊이의 산정을 위해 E점에서 모멘트를 취하면,

$$\Sigma M_E = A_7 \cdot y_7 + A_8 \cdot y_8 - A_9 \cdot y_9 - A_{10} \cdot y_{10} + F_z \cdot H = 0 \quad (16)$$

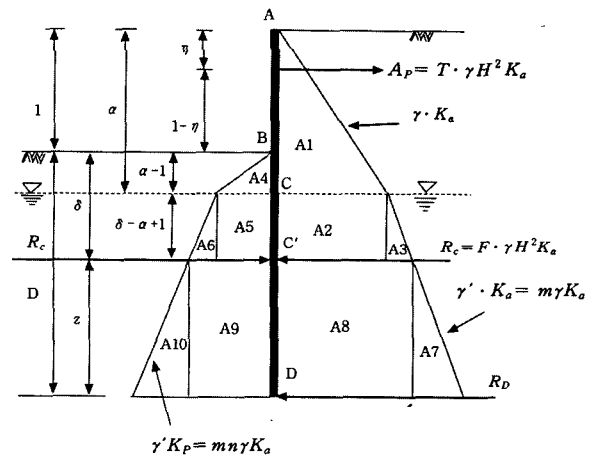


그림 6. 사질토에서 지하수위가 굴착선과 변곡점 사이에 있는 경우

위 식을 z에 관한 2차 방정식으로 정리하여 해를 구하여 전체 근입깊이 D는

$$D = (z + \delta) \cdot H \quad (17)$$

최대 휨모멘트 발생지점은 항상 지하수위면 위쪽이므로, 최대 휨모멘트는 식(11)과 같다.

2.3 지하수위가 변곡점과 저면 사이에 있는 경우

지하수위가 변곡점과 저면 사이에 있는 경우는 C'점에
서 모멘트를 취하여 T에 관해 정리하면,

$$T = \frac{(1+\delta)^3 - n\delta^3}{6(1-\eta+\delta)} \quad (18)$$

반력을 구하기 위해 A~C' 구간의 수평력의 합을 0으로
놓으면, F는

$$F = \frac{1}{2}(1+\delta)^2 - \frac{1}{2}n\delta^2 - T \quad (19)$$

근입깊이의 산정을 위해 D점에서 모멘트를 취하면,

$$A_3 y_3 + A_4 y_4 + A_7 y_7 + A_8 y_8 - A_5 y_5 - A_6 y_6 - A_9 y_9 - A_{10} y_{10} + R_c' z H = 0 \quad (20)$$

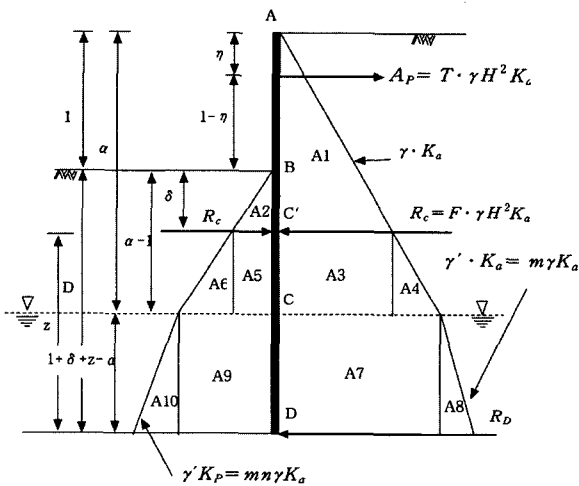


그림 7. 사실토에서 지하수위가 변곡점 아래에 있을 경우

식(20)을 z에 관한 2차 방정식으로 정리하여 해를 구하
여 전체 근입깊이 D는

$$D = (z + \delta) \cdot H \quad (21)$$

최대 휨모멘트 발생지점은 항상 지하수면 위쪽이므로,
최대 휨모멘트는 식 (11)과 같다.

3. 설계용 도표

지하수위가 변하는 세 가지 경우에 대한 각각의 Tie
Ratio, Depth Ratio, Moment Ratio에 대한 식을 위에서 구

하였다. 기존에 개발된 도표는 자유지진인 경우 앵커 위치
가 $\eta=0.25$ 인 경우에만 개발되어 있다. 본 논문에서는 지
하수면의 위치에 따라 앵커위치가 $0.1H$ ($\eta=0.1$)와 $0.2H$
($\eta=0.2$), $0.3H$ ($\eta=0.3$)인 경우에 대하여 각각 고정지
지 널말뚝에서의 앵커장력비(tie ratio), 근입깊이비(depth
ratio), 휨모멘트비(moment ratio)를 도표화했다.

도표를 개발하기 위해 Quick Basic을 이용한 컴퓨터 프로
그램을 개발하고, 프로그램을 수행하여 계산한 결과를 정리
하여 단위중량비 $m=0.5$ 일 때, 지하수면의 위치가 굴착면 위
쪽인 경우와 아래에 있는 경우로 구분하고, $\eta=0.1$ 과 $\eta=0.2$
 $\eta=0.3$ 인 경우에 대하여 흙의 내부마찰각 ϕ 와 앵커장력비
($\frac{A_p}{\gamma H^2 K_a}$), 근입깊이비($\frac{D}{H}$), 휨모멘트비($\frac{M_{max}}{\gamma H^3 K_a}$)의
관계를 그림 8 ~ 그림 16과 같이 설계용 도표로 제시하였
다.

널말뚝 설계용 도표를 사용할 때 토성지수 및 단면조건이
도표와 일치하지 않는 경우는 다음과 같이 처리하면 된다.

- ① 흙의 단위중량비와 앵커위치는 보간법을 적용한다.
- ② 지반이 불균질한 경우는 토층의 두께를 감안한 가중평
균 산출법으로 흙의 내부마찰 각 평균치를 적용한다.
- ③ 지표면 위에 등분포 하중이 작용하는 경우는 하중의 크
기를 토층의 두께로 환산하고 환산토층의 높이를 굴착
깊이 H, 앵커위치 ηH , 지하수위 aH 에 더해준 값을 적
용하면 안전측 설계가 된다.

4. 간편식 개발을 위한 회귀분석

설계도표는 실무적인 다양한 설계조건을 반영하는데
보간법을 사용해야 하는 번거로움과 특정조건에서만 사
용이 가능하다는 제약이 따르는 문제점을 안고 있다. 설계
도표에서 나타난 곡선의 양상이 일정한 패턴을 보이고 있
으므로 이를 간편한 수식으로 표현이 가능하다는 전제하
에 토질정수와 기하학적 조건, 지하수위 위치와 같은 요소
들을 독립변수로 하고 설계요소를 종속변수로 하는 회귀
분석을 하였다. 회귀분석용 프로그램은 윈도우용 SPSS
V7.5를 사용하였다.

4.1 상관관계 분석

도표의 개발 및 회귀분석을 위한 데이터는 입력 자료의
범위를 정하여 computer program을 통해 생성하였다. 프
로그램은 Quick - Basic을 사용했으며 입력자료는 현실적

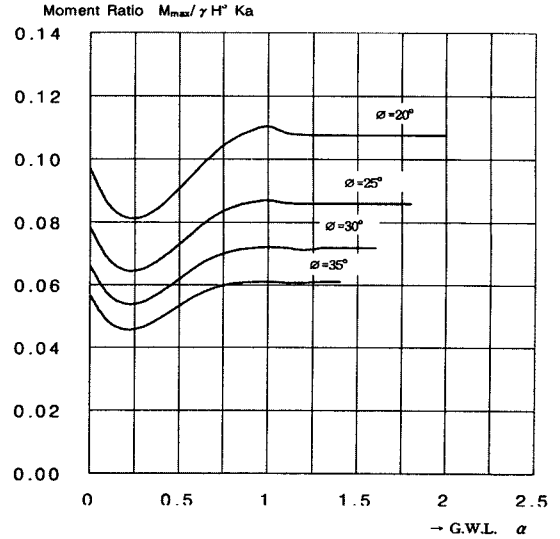
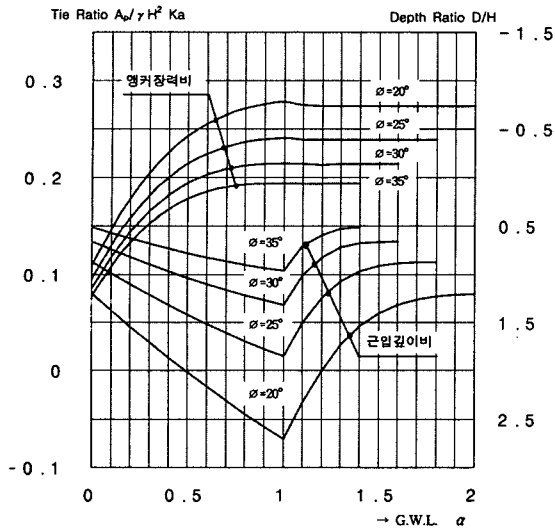


그림 8. $m=0.4, \eta=0.1$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

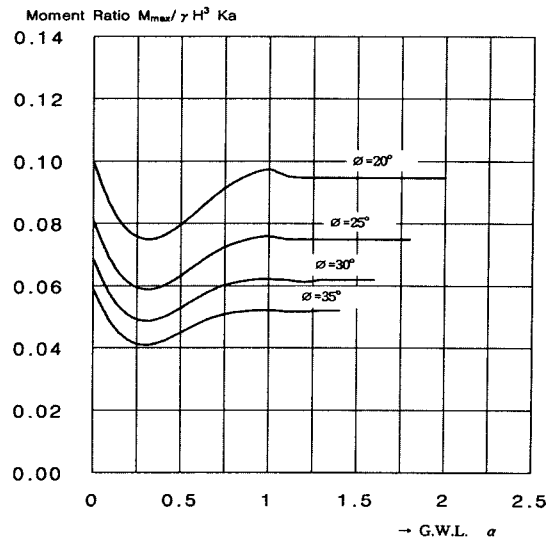
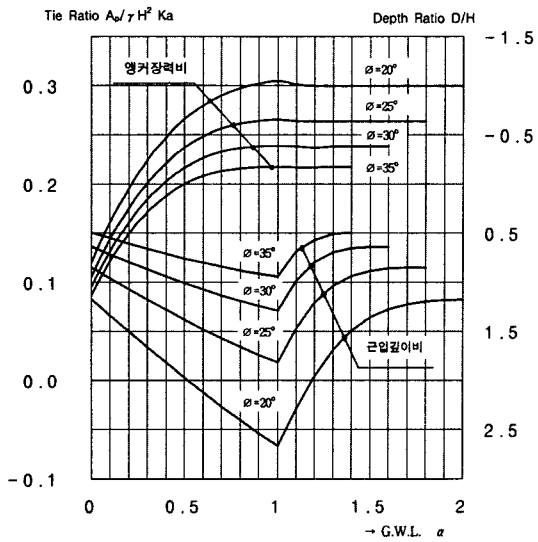


그림 9. $m=0.4, \eta=0.2$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

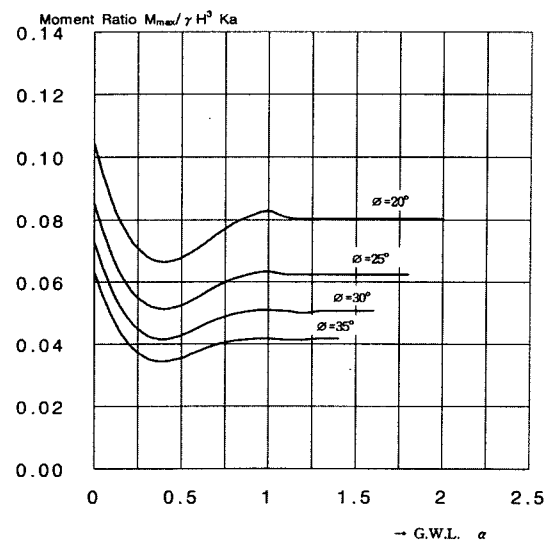
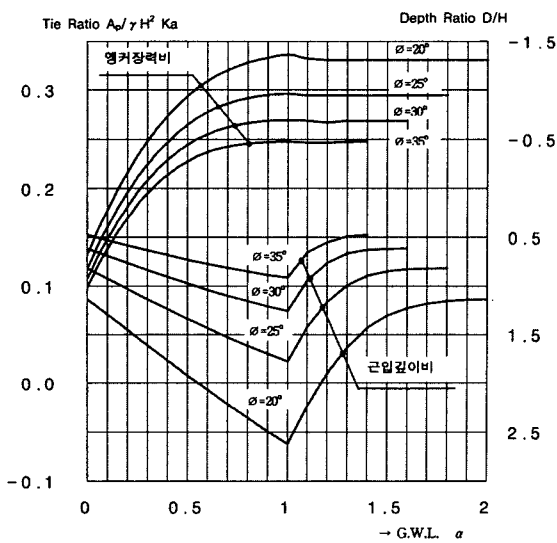


그림 10. $m=0.4, \eta=0.3$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

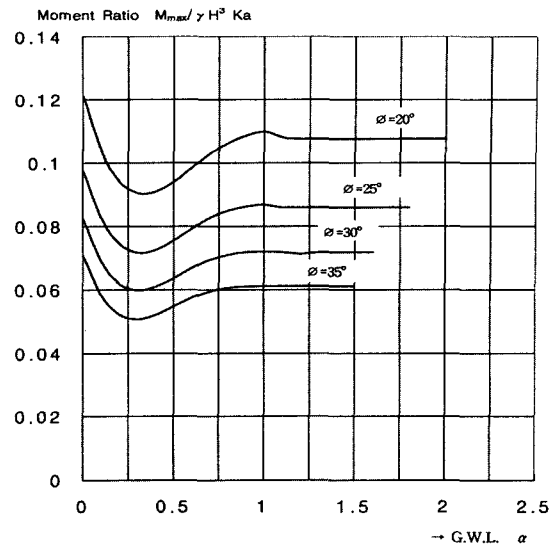
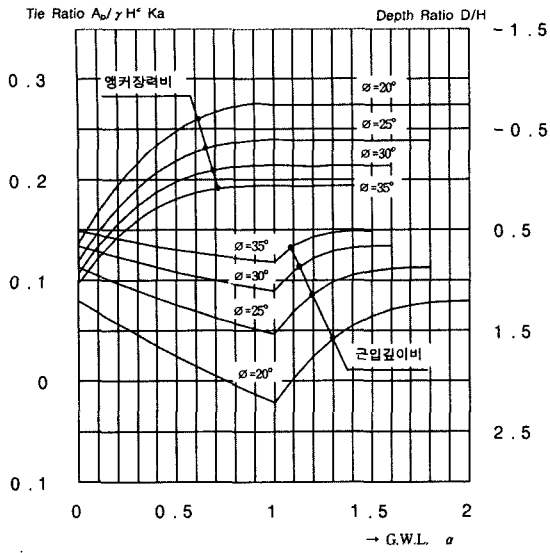


그림 11. $m=0.5, \eta=0.1$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

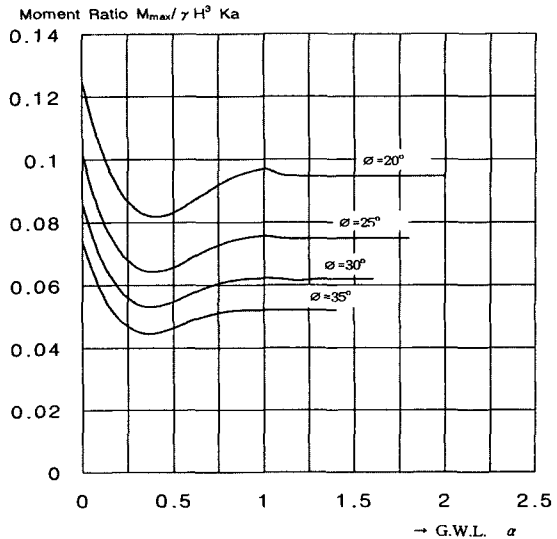
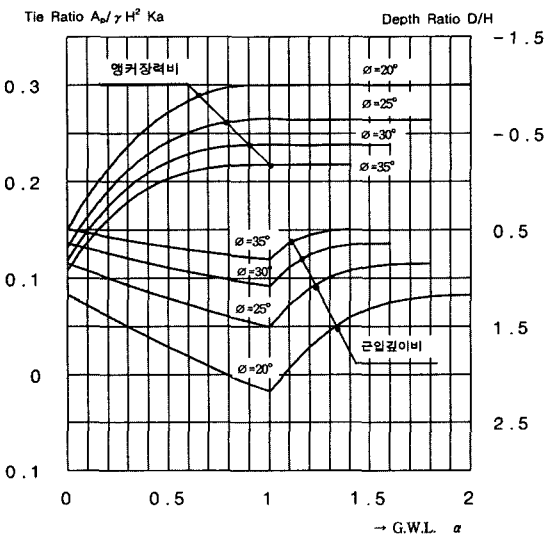


그림 12. $m=0.5, \eta=0.2$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

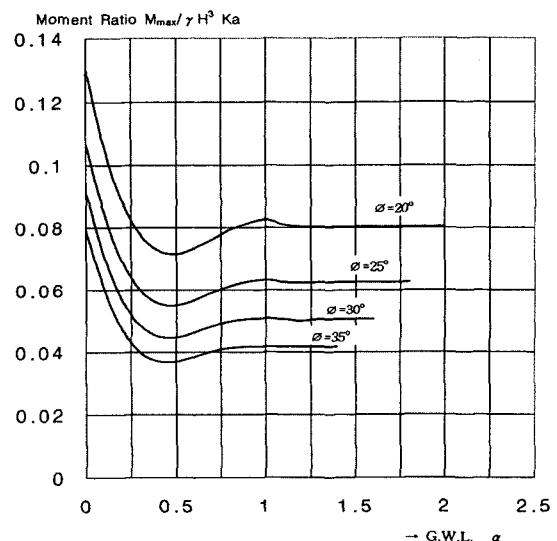
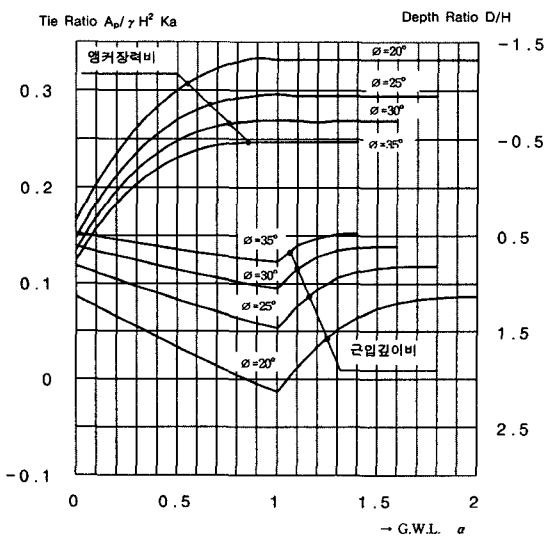


그림 13. $m=0.5, \eta=0.3$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

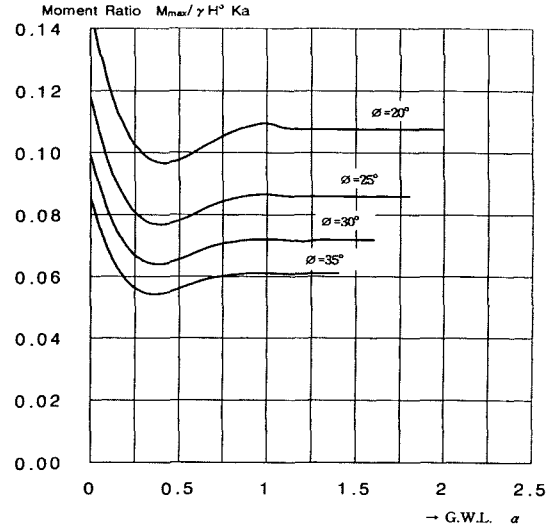
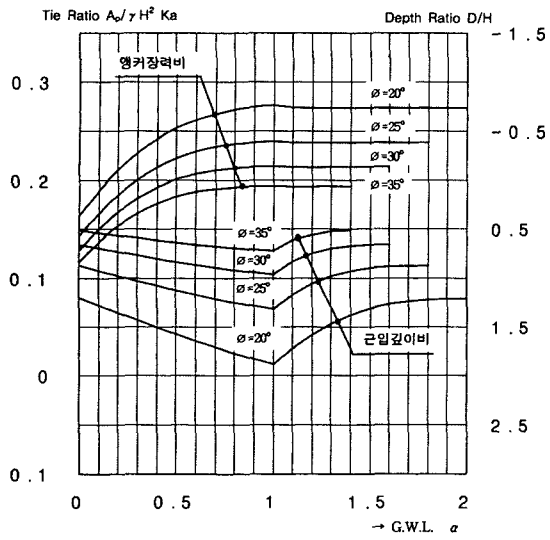


그림 14. $m=0.6, \eta=0.1$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

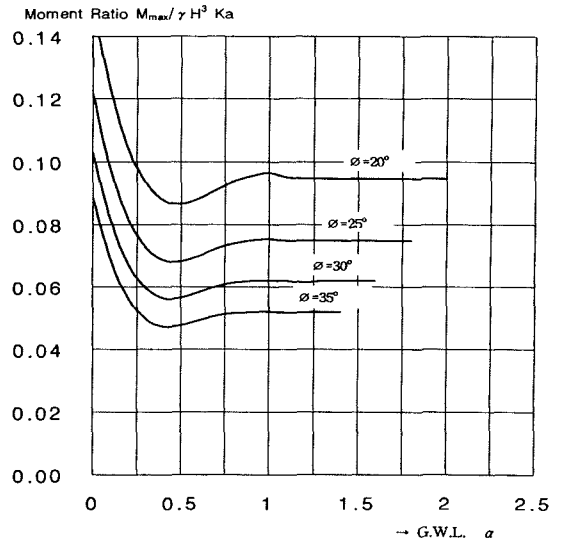
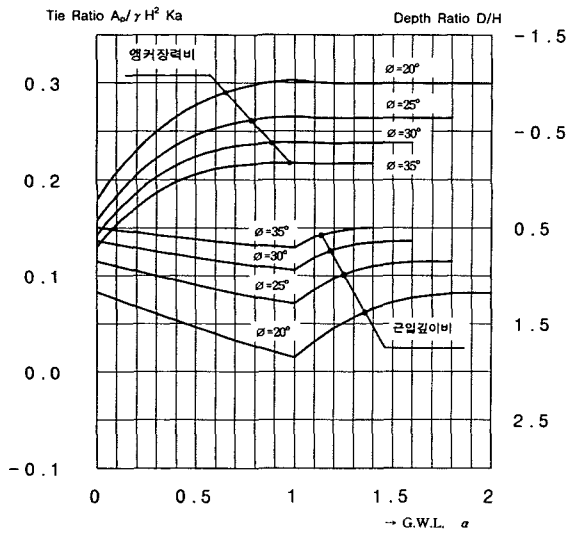


그림 15. $m=0.6, \eta=0.2$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

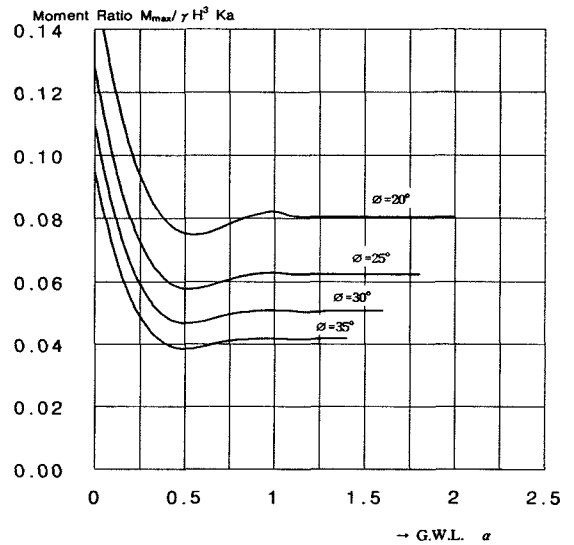
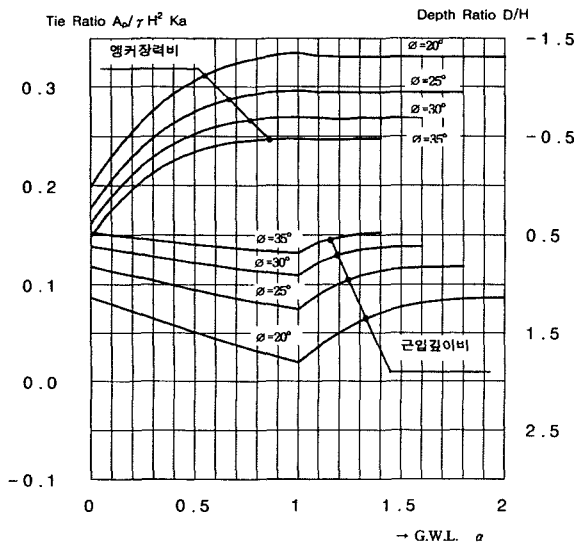


그림 16. $m=0.6, \eta=0.3$ 일 경우 널말뚝 설계용 도표

표 1. 입력 데이터 범위

	초기값	최종값	단계
흙의 내부마찰각 ϕ	20	37	1
지하수위 α	0	2.2	0.1
앵커의 위치 η	0	0.4	0.05
단위중량비 m	0.4	0.6	0.05

표 2. Tie ratio와 설계 요인과의 상관관계

		상관계수				
		T	α	n	η	m
상관 계수	앵커장력비 T	1	0.670	-0.357	0.544	0.092
	지하수위 α	0.670	1	0	0	0
	토압계수비 n	-0.357	0	1	0	0
	앵커 위치 η	0.544	0	0	1	0
	단위중량비 m	0.092	0	0	0	1

으로 발생빈도가 높은 값을 택하여 표 1과 같은 범위를 채택하였다.

표 2는 앵커장력비 T와 지하수위 α , 앵커깊이 η , 단위중량비 m , 토압계수비 n 에 대한 상관분석을 하여 구한 상관계수를 보여주고 있다. 표 2에 나타난 바와 같이 α , η , m , n 은 각각 서로 완전히 독립적이며, 단지 앵커장력비와 상관관계를 맺고 있다는 것을 보여주고 있다. 널말뚝의 근입깊이와 최대휨모멘트 역시 같은 양상으로 나타났다.

흙의 단위중량비는 다른 변수들에 비하여 설계요소와의 상관성이 상대적으로 낮으나 간편식의 신뢰도를 높이기 위해 변수를 제거하지 않고 사용하였다.

4.2 모형식 추정

회귀분석을 하기 위해선 우선 실제 값에 근접하는 모형식을 설정해 주어야 한다. 모형식은 선형과 비선형 모두 모형화 해보았으나 실제 데이터에서 지하수위 위치와 앵커 위치, 내부마찰각, 단위중량비 값들을 비선형으로 가정하였을 때 좋은 관계를 보였다. 상관성이 우수하고 실무적으로 사용하기에 편리해야 하는 두 가지 점을 감안하여 아래와 같은 비선형 모델을 택하였다.

$$Tie\ Ratio\ T = (a_{11} + a_{12}\alpha + a_{13}\eta + a_{14}m) \cdot n^{(a_{21} + a_{22}\alpha + a_{23}\eta + a_{24}m)} \quad (22a)$$

$$Depth\ Ratio\ D/H = (b_{11} + b_{12}\alpha + b_{13}\eta + b_{14}m) \cdot n^{(b_{21} + b_{22}\alpha + b_{23}\eta + b_{24}m)} \quad (22b)$$

$$Moment\ Ratio\ M = (c_{11} + c_{12}\alpha + c_{13}\eta + c_{14}m) \cdot n^{(c_{21} + c_{22}\alpha + c_{23}\eta + c_{24}m)} \quad (22c)$$

표 3은 식 22a ~ 식 22c를 사용하여 Tie Ratio, Depth Ratio, Moment Ratio의 데이터를 비선형 회귀분석을 하였을 때 지하수위에 따라 구별하여 나타난 상관계수 R과 결정계수 R^2 값이다. 표 3에서 보는 바와 같이 지하수면의 위치를 위쪽과 아래쪽으로 구분한 경우의 상관계수와 결정계수는 매우 높게 나타나고 있어 실용적 가치가 있다고 판단된다. 다만, 최대휨모멘트비의 경우는 앵커장력비와 근입깊이비에 비하여 상대적으로 작은 값으로서 사용에 신중을 기하여야 할 것으로 보인다.

표 3. 지하수위 변화에 따른 상관계수 및 결정계수

설계요소	Tie Ratio(T)		Depth Ratio(D/H)		Moment Ratio(M)	
	굴착선 위	굴착선 아래	굴착선 위	굴착선 아래	굴착선 위	굴착선 아래
R	0.985	0.992	0.992	0.965	0.971	0.914
R^2	0.970	0.985	0.985	0.931	0.943	0.835

5. 설계용 간편식

간편식을 개발하기 위해 우선 토압분포를 지하수위가 굴착선 위와 아래에 있는 경우로 나누어 가정하였다. 가정된 토압분포로부터 Tie Ratio, Depth Ratio, Moment Ratio를 계산하는 과정을 유도 정리하였다. 회귀분석을 통해 구한 식은 널말뚝 설계 시 앵커장력, 근입깊이, 최대 휨모멘트를 구하는 간편식으로 이용될 수 있다. 지하수위가 굴착선 위와 아래에 있는 경우에 토압분포가 달라지므로 회귀식 또한 굴착선에 따라 다르게 나타날 수 있다.

식 22a ~ 식 22c를 정리하여 얻은 간편식의 기본 형태는 다음과 같다.

$$A_p = \gamma H^2 K_a \cdot T = \gamma H^2 K_a \cdot A_1 (K_a^{-2})^{A_0} \quad (23a)$$

$$D = H \cdot (D/H) = H \cdot B_1 (K_a^{-2})^{B_0} \quad (23b)$$

$$M_{max} = \gamma H^3 K_a \cdot M = \gamma H^3 K_a \cdot C_1 (K_a^{-2})^{C_0} \quad (23c)$$

식(23a)~식(23c)을 정리하면 다음과 같다.

$$A_p = A_1 \cdot \gamma H^2 K_a^{A_2} \quad (24a)$$

$$D = B_1 \cdot H K_a^{B_2} \quad (24b)$$

$$M_{\max} = C_1 \cdot \gamma H^3 K_a^{C_2} \quad (24c)$$

여기에서,

$$A_1 = a_{11} + a_{12} \cdot \alpha + a_{13} \cdot \eta + a_{14} \cdot m \quad (25a1)$$

$$A_2 = a_{21} + a_{22} \cdot \alpha + a_{23} \cdot \eta + a_{24} \cdot m \quad (25a2)$$

$$= -2A_0^2 + 1$$

$$B_1 = b_{11} + b_{12} \cdot \alpha + b_{13} \cdot \eta + b_{14} \cdot m \quad (25b1)$$

$$B_2 = b_{21} + b_{22} \cdot \alpha + b_{23} \cdot \eta + b_{24} \cdot m \quad (25b2)$$

$$= -2B_0$$

$$C_1 = c_{11} + c_{12} \cdot \alpha + c_{13} \cdot \eta + c_{14} \cdot m \quad (25c1)$$

표 4. 설계용 간편식의 계수

지하수위	설계요소		간편식 계수							
	앵커 장력	항 첨자 기호	상수	α	η	m	상수	α	η	m
	근입깊이		11	12	13	14	21	22	23	24
	최대 휨모멘트		11	12	13	14	21	22	23	24
굴착면 위	$A_p(t/m)$	a	-0.0236	0.4235	0.0282	0.3333	0.0041	-0.3340	0.5083	-0.3223
	$D(m)$	b	1.7808	4.2554	-0.7277	3.1854	-0.2560	-0.1287	-0.0812	-0.9472
	$M_{\max}(t \cdot m/m)$	c	0.3107	-0.0719	-0.3186	-0.0586	-0.8819	0.0927	0.4054	0.5575
굴착면 아래	$A_p(t/m)$	a	40.0731	0.0230	0.2297	-39.7095	-0.2887	-0.0315	0.2989	-0.0006
	$D(m)$	b	10.0683	1.5119	-0.4657	-10.6707	-0.4015	-0.6018	-0.1438	0.4462
	$M_{\max}(t \cdot m/m)$	c	0.2229	0.0208	-0.3005	-0.0016	-0.4262	-0.0634	-0.0182	0.0030

표 5. 필산에 대한 회귀식의 비

설계조건			필산에 의한 결과 (Calculation)			간편식을 사용 결과 (Equation)			필산과 간편식의 비 Equation Calculation		
내부 마찰각	지하 수위	앵커 위치	A_p (Cal)	D (Cal)	M_{\max} (Cal)	A_p (Eq)	D (Eq)	M_{\max} (Eq)	$\frac{A_p(Eq)}{A_p(Cal)}$	$\frac{D(Eq)}{D(Cal)}$	$\frac{M_{\max}(Eq)}{M_{\max}(Cal)}$
25	0.4	0.15	5.541	7.635	9.829	5.490	7.261	12.561	1.009	1.052	0.783
25	0.7	0.25	6.971	8.637	10.076	7.119	8.309	10.520	0.979	1.040	0.958
25	1.0	0.15	6.468	9.854	12.246	6.950	9.600	10.976	$B_1 = 6$ $B_2 =$ 0.931	1.027	1.116
25	1.2	0.25	7.196	10.224	9.729	7.799	9.973	8.739	0.923	1.025	1.113
28	0.4	0.15	4.665	6.202	7.906	4.647	6.049	9.896	1.004	1.025	0.799
28	0.7	0.25	5.867	6.980	8.009	5.957	6.847	8.423	0.985	1.019	0.951
28	1.0	0.15	5.392	7.938	9.644	5.613	7.854	8.761	0.961	1.011	1.101
28	1.2	0.25	6.025	8.166	7.430	6.275	8.095	7.074	0.960	1.009	1.050
31	0.4	0.15	3.918	5.093	6.349	3.917	5.015	7.749	1.000	1.016	0.819
31	0.7	0.25	4.928	5.705	6.350	4.962	5.613	6.704	0.993	1.016	0.947
31	1.0	0.15	4.487	6.465	7.567	4.508	6.392	6.952	0.995	1.011	1.089
31	1.2	0.25	5.040	6.591	5.633	5.020	6.534	5.694	1.003	1.009	0.989
34	0.4	0.15	3.298	4.236	5.131	3.291	4.143	6.038	1.002	1.022	0.850
34	0.7	0.25	4.148	4.718	5.069	4.118	4.585	5.313	1.007	1.029	0.954
34	1.0	0.15	3.746	5.324	5.977	3.605	5.181	5.492	1.039	1.028	1.088
34	1.2	0.25	4.231	5.379	4.295	3.999	5.253	4.564	1.058	1.024	0.941

$H = 6.0m, m = \gamma/\gamma = 0.5$

$$C_2 = c_{21} + c_{22} \cdot \alpha + c_{23} \cdot \eta + c_{24} \cdot m \quad (25c2)$$

$$= -2 C_0 + 1$$

식(25a1) ~ 식(25c2)에 나타나 있는 간편식의 계수는 회귀분석 결과에 따라 표 4에 나타내었다. 지하수면 위치에 따라 지하수위가 굴착면 위쪽에 있는 경우와 지하수위가 굴착면 아래쪽에 있는 경우로 나누어 제시하였다.

식(24a) ~ 식(24c)의 널말뚝 설계용 간편식에 대한 표4의 계수 사용법을 예시하면, 지하수위가 굴착선 위쪽에 있는 경우의 앵커의 장력은 다음과 같이 표현된다.

$$A_p = A_1 \cdot \gamma H^2 K_a^{A_2} \quad (24a)$$

여기에서

$$A_1 = -0.0236 + 0.4235 \alpha + 0.0282 \eta + 0.3333 m$$

$$A_2 = 0.0041 - 0.3340 \alpha + 0.5083 \eta - 0.3223 m$$

6. 간편식의 고찰

6.1 필산과 간편식의 비교

간편식의 신뢰성을 검토하기 위해 설계조건이 다른 예제를 만들고, 필산과 간편식을 통해 얻어진 값을 비교 검토하였다.

흙의 단위중량비는 일반적인 경우에 해당하는 $m = \gamma' / \gamma = 0.5$ 로 보고 굴착깊이 $H=6.0m$ 인 경우에 대하여 흙의 내부마찰각과 지하수위, 앵커위치를 변화시켜 가며 간편식으로 계산한 앵커장력, 근입깊이, 최대 휨모멘트 값을 필산에 의해 계산한 값에 대한 비(比)로 표 5에 표시하였다.

표 5에서 보는 바와 같이 필산과 간편식을 사용한 결과가 상당히 비슷한 값을 보여주고 있다. 실제 널말뚝 설계에서 계산결과에 안전율을 적용하는 점을 감안하면 오차는 그리 크지 않다고 볼 수 있다. 또한 널말뚝 설계에서 사용하는 Rankine 토압이론의 적합성과 가정한 토압분포의 신뢰성을 감안하면 계산결과의 이러한 오차는 상대적으로 작다고 할 수 있다.

6.2 지하수위가 설계요소에 미치는 영향

지하수면의 위치는 널말뚝에 작용하는 토압분포에 큰 영향을 미친다. 지하수위에 따른 근입깊이의 변화를 그림

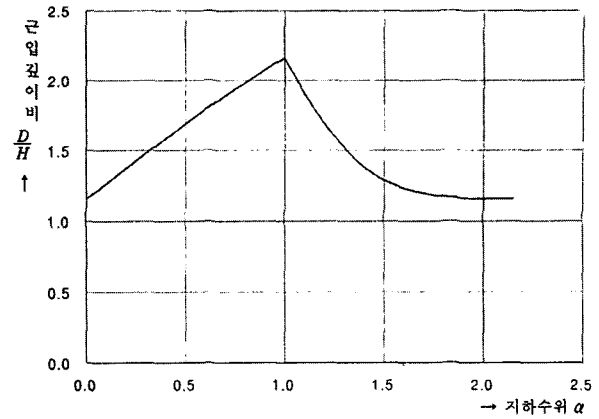


그림 17. 지하수위에 따른 널말뚝 근입깊이의 변화

17에 나타내었다. 그림 17에서 보는 바와 같이 지하수위가 널말뚝 상단 ($\alpha = 0$)에서 굴착면 ($\alpha = 1$)까지 증가함에 따라 근입깊이는 선형으로 비례하여 증가한다.

그러나 굴착면에서부터 널말뚝 저면까지 ($\alpha > 1.0$) 지하수위가 변화할 때는 근입깊이가 비선형적으로 감소하다가, 다시 증가하여 지하수위가 널말뚝 상단에 일치하는 경우 ($\alpha = 0$)의 값에 수렴하고 있다. 또한 널말뚝의 근입깊이는 지하수위가 굴착면과 일치할 때 ($\alpha = 1.0$) 최대값이 된다.

따라서 지하수위가 굴착선 아래에 있는 경우에 안전측 설계를 하고자 할 때는 지하수위가 굴착선과 같은 경우 ($\alpha = 1$)로 보면 된다. 차수벽을 별도로 설치하지 않고 널말뚝의 차수효과가 없거나 하부지반의 투수성이 큰 경우에는 널말뚝을 타입하고 터파기를 하는 동안 지하수위가 하강할 것이다. 특히 공사 중 지하수면의 위치를 확인하기 어려운 경우 이러한 안전측 설계방법은 더욱 타당성을 갖게 된다.

이와 같은 안전측 설계에 사용할 널말뚝 근입깊이 산정식은 다음과 같이 된다.

$$D = B_1 H K_a^{B_2} \quad (26)$$

$$B_1 = 6.0362 - 0.7277 \eta + 3.1854 m$$

$$B_2 = -0.3847 - 0.0812 \eta - 0.9472 m$$

7. 결론

사질토 지반에 관입된 앵커식 고정지지 널말뚝의 설계용 도표 및 간편식을 개발하고, 흙의 물리적 성질과 널말뚝의 기하학적 조건 등이 널말뚝 설계요소에 미치는 영향을

분석 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지하수면이 널말뚝 상단에서 하단까지 변화하는 경우 토압분포를 설정하고 설계요소 (앵커장력, 근입깊이, 최대 휨모멘트)를 구하는 수식을 유도 정리하였다.
- 2) 지하수면이 널말뚝 상단에서 하단까지 변화하는 경우에 대하여 고정지지 널말뚝의 설계용 도표를 제시하였다.(그림 8 ~ 그림 16)
- 3) 앵커식 널말뚝 설계용 간편식을 아래와 같이 제안한다.

$$A_p = A_1 \cdot \gamma H^2 K_a^{A_2}$$

$$A_1 = a_{11} + a_{12} \cdot \alpha + a_{13} \cdot \eta + a_{14} \cdot m$$

$$A_2 = a_{21} + a_{22} \cdot \alpha + a_{23} \cdot \eta + a_{24} \cdot m$$

$$D = B_1 \cdot H K_a^{B_2}$$

$$B_1 = b_{11} + b_{12} \cdot \alpha + b_{13} \cdot \eta + b_{14} \cdot m$$

$$B_2 = b_{21} + b_{22} \cdot \alpha + b_{23} \cdot \eta + b_{24} \cdot m$$

$$M_{\max} = C_1 \cdot \gamma H^3 K_a^{C_2}$$

$$C_1 = c_{11} + c_{12} \cdot \alpha + c_{13} \cdot \eta + c_{14} \cdot m$$

$$C_2 = c_{21} + c_{22} \cdot \alpha + c_{23} \cdot \eta + c_{24} \cdot m$$

간편식계수 a_{11} , a_{12} , ~ c_{23} , c_{24} 는 표 4에 제시되어 있다.

- 4) 지하수면이 굴착면 아래쪽에 있는 경우, 고정지지 널말뚝의 근입깊이를 안전측으로 설계하고자 할 때는 지하수위가 굴착면과 일치하는 경우로 보면 된다.

- 5) 고정지지 널말뚝의 설계 방법을 ①설계과정에 따라 계산하는 방법(필산) ②설계용 도표를 이용하는 방법 ③ 간편식을 이용하는 방법으로 다양화했다.
- 6) 간편식을 이용할 경우 설계과정의 착오를 줄여주고 필산 결과에 대한 검산으로 이용할 수도 있어 널말뚝 설계를 간편화하는데 기여할 것이다.

참고문헌

1. 김기웅, 박창화, "사질토 지반 앵커식 고정지지널말뚝 설계를 위한 도표", 인천전문대학 논문집, 제23집, 1995.
2. 양우식, 김기웅, "사질토 지반 앵커식 고정지지 널말뚝 설계용 간편식". 한국농공학회지, 제40권 6호, 1998.
3. Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, 3rd, ed., 1982.
4. Das, B. M., *Principles of Foundation Engineering*, PWS Publishing Co., a Division of International Thomson Publishing Inc., 1995.
5. Blum, H., *Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken*, W. Ernst and Sohn, Berlin, Germany, 1931.
6. Cernica, J. N., *Geotechnical Engineering Foundation Design*, John Wiley & Sons, inc, 1995.
7. Nataraj, M. S., and P. G. Hoadly, "Design of Anchored Bulkheads in Sand", ASCE J. Geotechnical Eng. Div. Vol 110, 1984.
8. Pile Buck, *Steel Sheet Piling Design Manual*, Pile Buck®, 1987.
9. Stock, J. F., "Development of Design Curves for Cantilever and Anchored Sheet Piles", Masters of Science Thesis, Youngstown State Univ., 1992.
10. Tsinker, G. P., "Anchored Sheet Pile Bulkheads: Design Practice", ASCE J. Geotechnical Eng. Div. Vol 109, 1983.
11. Turabi, D. A., and A. Balla,, "Distribution of Earth Pressure on Sheet-Pile Walls", ASCE J. Geotechnical Eng. Div. Vol. 94, 1968.

(접수일자 1999. 5. 3)