제 7 장 도식해법을 이용한 억지말뚝의 거동해석법

본장에서는 억지말뚝의 거동해석을 보다 손쉽게 할 수 있도록 하기 위하여 도식해법을 이용한 억지말뚝의 거동해법을 제안 하고자 한다.[39)]

이를 위하여 기본미분방정식을 적합조건과 경계조건을 이용하여 해를 구하고 말뚝의 구속조건에 대하여 각각 활동면 상부에서의 말뚝의 변위, 모멘트, 전단력 그리고 회전각 등을 구하는 도표를 작성하였다.

7.1 기본미분방정식

말뚝의 안정에 관하여는 그림 6.1(a)에 표시된 바와 같이 활동면상의 토괴에 의하여 말뚝이 $P_m(\overline{Z})$의 측방토압을 받는다고 생각하면 주동말뚝에 대하여 이용하는 수평력을 받는 말뚝의 해석법이 적용될 수 있었다.[63,64,159,160)] 단, 수동말뚝의 경우는 활동면상의 말뚝에 작용하는 측방토압은 분포하중이 된다.

측방토압을 분포하중으로 취급한 경우 말뚝에 관한 기본방정식은 활동면아래 말뚝에 작용하는 지반반력이 말뚝의 변위에 비례하는 것으로 가정하여 식 6.1을 다음식과 같이 간략하게 표현하였다.

$$E_pI_p\frac{d^4y_1}{d\overline{z}^4} = P'(\overline{z}) \quad (-H' \le \overline{z} \le 0) \qquad (7.1(a))$$

$$E_pI_p\frac{d^4y_2}{d\overline{Z}^4} = -E_sy_2(\overline{z} \ge 0) \qquad (7.1(b))$$

여기서 $\overline{z} = z - h$, z는 지표면으로 부터의 깊이, H 및 H'는 각각 활동면에서 지표면 및 말뚝머리 까지의 거리, L_p는 말뚝길이, y_1 및 y_2는 각각 활동면 상하의 말뚝의 변위, E_pI_p는 말뚝의 휨강성, E_s는 지반계수이다.

활동면상부 지층의 측방토압 $P'(\overline{z})$는 말뚝1개당의 측방토압으로 깊이 Z에 대하여 $f_1+f_2\overline{z}$의 직선분포로 작용한다. 식 (7.1)에 대한 미분방정식 해를 구하면 말뚝의 변위에 대한 일반해는 다음과 같이된다.

$$y_1 = a_0 + a_1\bar{z} + a_2\bar{z}^2 + a_3\bar{z}^3 + f(\bar{z}) \quad (7.2(a))$$

$$y_2 = e^{-\beta\bar{z}}(A\cos\beta\bar{z} + B\sin\beta\bar{z}) \quad (7.2(b))$$

여기서 a_0, a_1, a_2, a_3, A, B 는 적분상수로 말뚝의 머리와 선단에서의 구속조건 및 파괴면에서 말뚝의 연속조건에 의하여 결정된다. 말뚝머리의 구속조건으로는 자유(변위 및 회전 모두가능), 회전구속(변위만 가능), 힌지(회전만 가능) 및 고정(변위와 회전 모두 불가능)의 4종류를 생각할 수 있다. β는 $\sqrt[4]{E_s \backslash 4E_pI_p}$ 이다.

만일 활동면위의 지반이 단지 단일지층으로 구성되었다면 식(7.1)에서 첫번째식의 $P'(z)$는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$P'(z) = f_1 + f_2\bar{z} \quad (7.3)$$

여기서 f_1과 f_2는 (6.4)식의 좌표변환으로 얻어질 수 있는 상수이다. 그러므로 식 (7.2(a))은 다음과 같이 변환된다.

$$y_1 = a_0 + a_1\bar{z} + a_2\bar{z}^2 + a_3\bar{z}^3 + \frac{f_1}{24E_pI_p}\bar{z}^4 + \frac{f_2}{120E_pI_P}\bar{z}^5 \quad (7.4)$$

(7.4)식을 $\bar{z}$로 미분하면

$$\frac{dy_1}{d\bar{z}} = a_1 + 2a_2\bar{z} + 3a_3\bar{z}^2 + \frac{f_1}{6E_pI_p}\bar{z}^3 + \frac{f_2}{24E_pI_p}\bar{z}^4 \quad (7.5(a))$$

$$\frac{d^2y_1}{d\bar{z}^2} = 2a_2 + 6a_3\bar{z} + \frac{f_1}{2E_pI_p}\bar{z}^2 + \frac{f_2}{6E_pI_p}\bar{z}^3 \quad (7.5(b))$$

$$\frac{d^3y_1}{d\bar{z}^3} = 6a_3 + \frac{f_1}{E_pI_p}\bar{z} + \frac{f_2}{2E_pI_p}\bar{z}^2 \quad (7.5(c))$$

식 (7.2(b))는 $\bar{z}$로 미분하면

$$\frac{dy_2}{d\bar{z}} = -\beta e^{-\beta\bar{z}}[(A-B)\cos\beta\bar{z} + (A+B)\sin\beta\bar{z}] \tag{7.6(a)}$$

$$\frac{d^2y_2}{d\bar{z}^2} = 2\beta^2 e^{-\beta\bar{z}}(A\sin\beta\bar{z} - B\cos\beta\bar{z}) \tag{7.6(b)}$$

$$\frac{d^3y_2}{d\bar{z}^3} = 2\beta^3 e^{-\beta\bar{z}}[(A+B)\cos\beta\bar{z} - (A-B)\sin\beta\bar{z}) \tag{7.6(c)}$$

표 7.1 말뚝의 탄성방정식

구 분		이 론 식
활동면 상 부	처짐곡선	$y_1 = a_0 + a_1\bar{z} + a_2\bar{z}^2 + a_3\bar{z}^3 + \frac{f_1}{24E_pI_p}\bar{z}^4 + \frac{f_2}{120E_pI_P}\bar{z}^5$
	말뚝두부 변위	$\delta_{\bar{z}=-H'} = a_0 - a_1H' + a_2H'^2 - a_3H'^3 + \frac{H'^4}{24E_pI_p}f_1 - \frac{H'^5}{120E_pI_p}f_2$
	회전각	$\theta_1 = a_1 + 2a_2\bar{z} + 3a_3\bar{z}^2 + \frac{\bar{z}^3}{6E_pI_p}f_1 + \frac{\bar{z}^4}{24E_pI_p}f_2$
	모멘트	$M_1 = 2E_pI_pa_2 + 6E_pI_Pa_3\bar{z} + \frac{\bar{z}^2}{2}f_1 + \frac{\bar{z}^3}{6}f_2$
	전단력	$S_1 = 6E_pI_pa_3 + \bar{z}f_1 + \frac{\bar{z}^2}{2}f_2$
활동면 하 부	처짐곡선	$y_2 = e^{-\beta\bar{z}}(A\cos\beta\bar{z} + B\sin\beta\bar{z})$
	활동면 변위	$\delta_{\bar{z}=0} = A$
	회전각	$\theta_2 = -\beta e^{-\beta\bar{z}}\{(A-B)\cos\beta\bar{z} + (A+B)\sin\beta\bar{z}\}$
	모멘트	$M_2 = 2E_pI_p\beta^2 e^{-\beta\bar{z}}(A\sin\beta\bar{z} - B\cos\beta\bar{z})$
	전단력	$S_2 = 2E_pI_p\beta^3 e^{-\beta\bar{z}}\{(A+B)\cos\beta\bar{z} - (A-B)\sin\beta\bar{z}\}$

활동면 상, 하부의 변위 곡선식, 즉 식(7.4)와 식(7.2(b))에 각각 $\bar{z} = -H'$ 와 $\bar{z} = 0$ 을 대입하면 말뚝두부변위와 활동면변위의 식이 얻어진다. 그리고 식(7.5)와 식(7.6)을 이용하여 활동면 상, 하부의 회전각, 모멘트, 전단력을 각각 구할 수 있다.

이와같이 구해진 말뚝의 탄성방정식을 정리하면 표 7.1과 같다. 또한, 말뚝두부 및 선단의 구속조건에 따른 경계조건과 연속조건은 표 7.2에 나타낸바와 같다.

표 7.2 경계조건 및 연속조건

조 건	위 치	$\bar{z}$	두부자유	두부회전구속	두부힌지	두부고정
경 계	말뚝두부	$-H'$	$M_1 = 0$ $S_1 = 0$	$\theta_t = 0$ $S_1 = 0$	$y_1 = 0$ $M_1 = 0$	$y_1 = 0$ $\theta_t = 0$
연 속	활 동 면	0	$y_1 = y_2$ $\theta_1 = \theta_2$ $M_1 = M_2$ $S_1 = S_2$	$y_1 = y_2$ $\theta_1 = \theta_2$ $M_1 = M_2$ $S_1 = S_2$	$y_1 = y_2$ $\theta_1 = \theta_2$ $M_1 = M_2$ $S_1 = S_2$	$y_1 = y_2$ $\theta_1 = \theta_2$ $M_1 = M_2$ $S_1 = S_2$
경 계	말 뚝 선 단	$\bar{z}$	힌 지 $y_2 = 0$ $M_2 = 0$	힌 지 $y_2 = 0$ $M_2 = 0$	힌 지 $y_2 = 0$ $M_2 = 0$	힌 지 $y_2 = 0$ $M_2 = 0$

표 7.2에서 말뚝선단은 견고한 암반층까지 관입되는 것으로 생각하여 힌지로 가정하였다. 표 7.2에서 활동면에서의 연속조건을 식(7.2)에 대입하면 다음과 같은 (7.7)식을 얻는다.

$$
\begin{aligned}
a_0 &= A \\
a_1 &= -\beta(A - B) \\
a_2 &= -\beta^2 B \\
3a_3 &= \beta^3 (A + B)
\end{aligned}
\qquad (7.7)
$$

7.2 일반해

7.2.1 적분상수 a_0, a_1, a_2, a_3, A, B

말뚝두부의 구속 조건별 적분상수 a_0, a_1, a_2, a_3, A, B를 구하는 식은 다음과 같다.

(1) 두부자유 조건시

말뚝두부($\bar{z} = -H'$)에서 휨모멘트와 전단력은 0 이므로

$$[M]_{\bar{z}=-H'} = -E_pI_p\left[\frac{d^2y_1}{d\bar{z}^2}\right]_{\bar{z}=-H'} = 0$$

$$[S]_{\bar{z}=-H'} = -E_pI_p\left[\frac{d^3y_1}{d\bar{z}^3}\right]_{\bar{z}=-H'} = 0 \tag{7.8}$$

식(7.7)과 식(7.8)의 6가지 조건을 사용하여 식(7.2)과 식(7.4)의 적분상수를 각각 구하면 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{H'}{12E_pI_p\beta^3}[3(2+\beta H')f_1 - H'(3+2\beta H')f_2]$$

$$a_1 = \frac{-H'}{12E_pI_p\beta^2}[6(1+\beta H')f_1 - H'(3+4\beta H')f_2]$$

$$a_2 = \frac{(H')^2}{12E_pI_p}(3f_1 - 2H'f_2)$$

$$a_3 = \frac{H'}{12E_pI_p}(2f_1 - H'f_2) \tag{7.9}$$

$$A = \frac{H'}{12E_pI_p\beta^3}[3(2+\beta H')f_1 - H'(3+2\beta H')f_2]$$

$$B = \frac{-(H')^2}{12E_pI_p\beta^2}(3f_1 - 2H'f_2)$$

(2) **두부 회전구속 조건시**

말뚝두부에서 회전각과 전단력은 0 **이므로**

$$[\theta]_{\bar{z}=-H'} = [\frac{dy_1}{d\bar{z}}]_{\bar{z}=-H'} = 0$$

$$[S]_{\bar{z}=-H'} = -E_pI_p[\frac{d^3y_1}{d\bar{z}^3}]_{\bar{z}=-H'} = 0 \qquad (7..10)$$

식(7.7)**과 식**(7.10)**의** 6**가지 조건을 사용하여 식**(7.2)**와 식**(7.4)**의 적분 상수를 각각 구하면 다음과 같다**.

$$a_0 = \frac{H'}{48E_pI_p\beta^3(1+\beta H')}[4(2\beta^2(H')^2+6\beta H'+3)f_1 - H'(5\beta^2(H')^2+12\beta H'+6)f_2]$$

$$a_1 = \frac{-(H')^2}{24E_pI_p\beta(1+\beta H')}[4(3+2\beta H')f_1 - H'(6+5\beta H')f_2]$$

$$a_2 = \frac{H'}{48E_pI_p\beta(1+\beta H')}[4(2\beta^2(H')^2-3)f_1 - H'(5\beta^2(H')^2-6)f_2] \qquad (7.11)$$

$$a_3 = \frac{H'}{12E_pI_p}(2f_1 - H'f_2)$$

$$A = \frac{H'}{48E_pI_p\beta^3(1+\beta H')}[4(2\beta^2(H')^2+6\beta H'+3)f_1 - H'(5\beta^2(H')^2+12\beta H'+6)f_2]$$

$$B = \frac{-H'}{48E_pI_p\beta^3(1+\beta H')}[4(2\beta^2(H')^2-3)f_1 - H'(5\beta^2(H')^2-6)f_2]$$

(3) 두부힌지 조건시

말뚝두부에서 처짐과 휨모멘트가 0 이므로

$$[y]_{\bar{z}=-H'} = [y_1]_{\bar{z}=-H'} = 0$$

$$[M]_{\bar{z}=-H'} = -E_pI_p\left[\frac{d^2y_1}{d\bar{z}^2}\right]_{\bar{z}=-H'} = 0 \tag{7.13}$$

식(7.7)과 식(7.13)의 6가지 조건을 사용하여 식(7.2)와 식(7.4)의 적분 상수를 각각 구하면 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{(H')^3}{120E_pI_p\beta[1+2(1+\beta H')^3]}[15(2+\beta H')(3+\beta H')f_1 - H'(7\beta^2(H')^2+27\beta H'+30)f_2]$$

$$a_1 = \frac{-(H')^2}{120E_pI_p\beta[1+2(1+\beta H')^3]}[15(2\beta^3(H')^3+5\beta^2(H')^2-6)f_1 - H'(14\beta^3(H')^3 + 27\beta^2(H')^2-30)f_2] \tag{7.14}$$

$$a_2 = \frac{(H')^2}{120E_pI_p[1+2(1+\beta H')^3]}[15(\beta^3(H')^3-\beta H'-6)f_1 - H'(7\beta^3(H')^3-30\beta(H')-30)f_2]$$

$$a_3 = \frac{\beta(H')^2}{120E_pI_p[1+2(1+\beta H')^3]}[5(5\beta^2(H')^2+12\beta H'+6)f_1 - H'(9\beta^2(H')^2+20\beta(H')+10)f_2]$$

$$A = \frac{(H')^3}{120E_pI_p\beta[1+2(1+\beta H')^3]}[15(2+\beta H')(3+\beta H')f_1 - H'(7\beta^2(H')^2+27\beta H'+30)f_2]$$

$$B = \frac{-(H')^2}{120E_pI_p\beta^2[1+2(1+\beta H')^3]}[15(\beta^3(H')^3-6\beta H'-6)f_1 - H'(7\beta^3(H')^3-30\beta H'-30)f_2]$$

(4) **두부고정 조건시**

말뚝두부에서 처짐과 회전각은 0 **이므로**

$$[y]_{\bar{z}=-H'} = [y_1]_{\bar{z}=-H'} = 0$$

$$[\theta]_{\bar{z}=-H'} = \left[\frac{dy_1}{d\bar{z}}\right]_{\bar{z}=-H'} = 0 \tag{7.15}$$

식(7.7)**과 식**(7.15)**의** 6**가지 조건을 사용하여 식**(7.2)**와 식**(7.4)**의 적분 상수를 각각 구하면 다음과 같다**.

$$a_0 = \frac{(H')^4}{120E_pI_p(1+\beta H')[2+(1+\beta H')^3]}[5(3+\beta H')^2 f_1 - H'(2\beta^2(H')^2 + 9\beta H' + 12)f_2]$$

$$a_1 = \frac{-(H')^3}{120E_pI_p(1+\beta H')[2+(1+\beta H')^3]}[10(\beta^3(H')^3 + 3\beta^2(H')^2 - 6)f_1 - H'(4\beta^3(H')^3 + 9\beta^2(H')^2 - 15)f_2]$$

$$a_2 = \frac{\beta(H')^3}{120E_pI_p(1+\beta H')[2+(1+\beta H')^3]}[5(\beta^3(H')^3 - 9\beta H' - 12)f_1 - H'(2\beta^3(H')^3 - 12\beta H' - 15)f_2]$$

$$a_3 = \frac{\beta^2(H')^3}{120E_pI_p[2+(1+\beta H')^3]}[10(2+\beta H')f_1 - H'(5+3\beta H')f_2] \tag{7.16}$$

$$A = \frac{(H')^4}{120E_pI_p(1+\beta H')[2+(1+\beta H')^3]}[5(3+\beta H')^2 f_1 - H'(2\beta^2(H')^2 + 9\beta H' + 12)f_2]$$

$$B = \frac{-(H')^3}{120E_pI_p\beta(1+\beta H')[2+(1+\beta H')^3]}[5(\beta^3(H')^3 - 9\beta H' - 12)f_1 - H'(2\beta^3(H')^3 - 12\beta H' - 15)f_2]$$

상기에서와 같이 말뚝의 구속조건별로 구한 적분상수는 식(7.9), (7.11), (7.14) **그리고 식**(7.15)**와 같다**. **이 적분상수를** $K_1 f_1 + K_2 f_2$ **형태의 식으로 변환하여** K_1**과** K_2**를 구하는 식을 정리하면 표** 7.3**과 같다**. **여기서** f_1 **과** f_2**는 측방토압식의 좌표변환으로 얻어질 수 있는 상수 이고**, K_1**과** K_2**는 사면안정거동해석을 위한 일반식들을 해석의 편의상** f_1**에 관련된 항과** f_2**에 관련된 항으로 구분하여 표시 하였다**.

7.2.2 변위 δ

표 7.1 의 변위식에 식(7.9), (7.11), (7.14) 그리고 식(7.15)의 적분상수를 대입하고 $K_1 f_1 + K_2 f_2$ 형태의 식으로 변환하여 K_1과 K_2를 구하는 식을 정리하면 말뚝두부변위와 활동면 상, 하부변위는 각각 표 7.4 및 7.5 와 같이 나타나고 활동면 변위 $\delta_{\bar{z}=0}$는 적분상수 A 값과 같다.

말뚝두부조건이 힌지와 고정일때 말뚝두부 변위는 표7.4에 나타낸바와 같이 0 이다.

7.2.3 회전각 θ

표 7.1의 회전각식에 식(7.9), (7.11), (7.14), 그리고 식(7.15)의 적분상수를 대입하고 $K_1 f_1 + K_2 f_2$ 형태의 식으로 변환하여 K_1과 K_2를 구하는 식을 정리하면 말뚝두부 및 활동면 상, 하부 회전각은 각각 표 7.6 및 7.7과 같이 나타나고 활동면 회전각 $\theta_{\bar{z}=0}$ 은 적분상수 a_1과 같다.

말뚝두부조건이 회전구속과 고정일때 말뚝두부의 회전각은 표 7.6에 나타낸바와 같이 0이다

7.2.4 모멘트 M

표 7.1의 모멘트식에 식(7.9), (7.11), (7.14) 그리고 식(7.15)의 적분상수를 대입하고 $K_1 f_1 + K_2 f_2$ 형태의 식으로 변환하여 K_1과 K_2를 구하는 식을 정리하면 활동면 상, 하부의 최대휨모멘트 $M_{1,\max}$,$M_{2,\max}$ 와 활동면 상, 하부 모멘트 M_1, M_2는 각각 표 7.8 및 7.9와 같이 나타난다.

각각의 두부구속조건에 따라 활동면 상, 하부의 최대 휨모멘트가 일어나는 깊이 $\bar{z}$는 다음과 같이 구할 수 있다.

(1) 두부자유시

활동면 상부의 최대휨모멘트 $M_{1,\max}$는 $\bar{z}=0$ 에서 발생한다. 그리고 활동면 하부의 최대휨모멘트 $M_{2,\max}$는 전단력이 0 이 되는 점에서 발생한다.

즉 $$[S]_{\bar{z}=\bar{z}_2} = -E_p I_p \left[\frac{d^3 y_2}{d\bar{z}^3}\right]_{\bar{z}=\bar{z}_2} = 0 \quad (7.17)$$

여기서 $\overline{z_2} = \infty$**혹은** $\frac{1}{\beta}\tan^{-1}(\frac{A+B}{A-B})$ (7.18)

표 7.8**에서 사용된** $\overline{z_2}$**는 여러가지** $\overline{z_2}$**값중에서 첫번째 값이고**, **이값은 식**(7.17)**에 나타낸 것처럼 반복하여 구하여진 값이다**.

만일 활동면 하부에서의 말뚝처짐 y_2**가** $\overline{z_3}$**에서** 0 **이라면 다음과 같은 방정식이 식**(7.2)**의 두번째식으로 부터 얻어진다**.

$$e^{-\beta\overline{z_3}}(A\cos\beta\overline{z_3} + B\sin\beta\overline{z_3}) = 0 \qquad (7.19)$$

그러므로 $\overline{z_3}$, **즉** y_2**가** 0 **이 되는 깊이는 식**(7.20)**과 같다**.

$$\overline{z_3} = \infty \text{혹은} \frac{1}{\beta}\tan^{-1}(-\frac{A}{B}) \qquad (7.20)$$

한편, **활동면 하부의 처짐각식에** $\overline{z}$**대신** $\overline{z_4}$**를 대입하여 처짐각이** 0 **이되는 깊이** $\overline{z_4}$**를 얻을 수 있다**.

따라서 $\overline{z_4} = \infty$**혹은** $\frac{1}{\beta}\tan^{-1}(-\frac{A-B}{A+B})$ (7.21)

여기서 $\overline{z_3}$, $\overline{z_4}$ **또한 반복하여 구하여진 값이다**.

(2) **두부 회전구속시**

활동면 상부의 최대휨모멘트 $M_{1,}\mathrm{max}$**는 말뚝두부**, **즉** $\overline{z} = -H'$ **에서 발생하고**, **활동면 하부의 최대휨모멘트** $M_{2,}\mathrm{max}$**는 식**7.18**과 같은 깊이** $\overline{z_2}$**에서 발생한다**.

(3) **두부힌지시**

활동면 상부의 최대휨모멘트 $M_{1,}\max$ **는** $[S]_{\bar{z}=\bar{z}_1}=0$ **으로 부터 얻어진 깊이** $\bar{z}_1=\frac{-f_1\pm\sqrt{f_1^2-12E_pI_pa_3f_2}}{f_2}$**에서 발생하고, 활동면 하부의 최대휨모멘트** $M_{2,}\max$ **는** $\bar{z}=0$**에서 발생한다.**

(4) **두부 고정시**

활동면 상부의 최대휨모멘트 $M_{1,}\max$ **는 말뚝두부, 즉** $\bar{z}=-H'$**에서 발생하고, 활동면 하부의 최대휨모멘트** $M_{2,}\max$ **는** $\bar{z}=0$**에서 발생한다.**

7.2.5 전단력 S

표 7.1**의 전단력식에 식**(7.9), (7.11), (7.14) **그리고 식**(7.15)**의 적분상수를 대입하고** $K_1f_1+K_2f_2$**형태의 식으로 변환하여** K_1**과** K_2**를 구하는 식을 정리하면 활동면 상, 하부의 전단력식은 표** 7.10**과 같이 나타난다.**

표7.6 말뚝두부 회전각 θ_1

구 분	두부조건	$(K_{\theta_1})_t$, $(K_{\theta_2})_t$ 식
말뚝두부회전각 θ_t $\theta_1 = (K_{\theta_1})f_1 + (K_{\theta_2})f_2$	**두부자유**	$(K_{\theta_1})_t = -\dfrac{\beta H'\{(\beta H')^2 + 3(\beta H') + 3\}}{6E_pI_p\beta^3}$ $(K_{\theta_2})_t = \dfrac{(\beta H')^2\{3(\beta H')^2 + 8(\beta H') + 6\}}{24E_pI_p\beta^2}$
	두부회전 구속	$(K_{\theta_1})_t = 0$ $(K_{\theta_2})_t = 0$
	두부힌지	$(K_{\theta_1})_t = \dfrac{(\beta H')^2\{(\beta H')^4 + 6(\beta H')^3 - 15(\beta H')^2 + 24(\beta H') + 18\}}{24E_pI_p\beta^3\{1 + 2(1 + \beta H')^3\}}$ $(K_{\theta_1})_t = -\dfrac{(\beta H')^3\{3(\beta H')^4 + 16(\beta H')^3 + 33(\beta H')^2 + 45(\beta H') + 30\}}{120E_pI_p\beta^4\{1 + 2(1 + \beta H')^3\}}$
	두부고정	$(K_{\theta_1})_t = 0$ $(K_{\theta_2})_t = 0$

표7.7 활동면 상,하부 회전각 θ_1, θ_2

구 분	두부조건	위 치	K_{θ_1} , K_{θ_2} 값
활동면 상 하부 회전각 $\theta = K_{\theta}f_1 + K_{\theta}f_2$	두부자유	활동면 상부	$K_{\theta_1} = \dfrac{[(\beta\bar{z})^3 + 3(\beta H')(\beta\bar{z})^2 + 3(\beta H')^2(\beta\bar{z}) - 3(\beta H')(1+\beta H')]}{[6E_pI_p\beta^3]}$ $K_{\theta_2} = \dfrac{[(\beta\bar{z})^4 + 6(\beta H')^2(\beta\bar{z})^2 - 8(\beta H')^3(\beta\bar{z}) + 2(\beta H')^2(3+4\beta H')]}{[24E_pI_p\beta^4]}$
		활동면 하부	$K_{\theta_1} = -e^{-\beta\bar{z}}\dfrac{(\beta H')[(2+2(\beta H'))\cos\beta\bar{z} + 2\sin\beta\bar{z}]}{4E_pI_p\beta^3}$ $K_{\theta_2} = e^{-\beta\bar{z}}\dfrac{(\beta H')^2[(3+4(\beta H'))\cos\beta\bar{z} + 3\sin\beta\bar{z}]}{12E_pI_p\beta^4}$
	두부회전구속	활동면 상부	$K_{\theta_1} = [8(1+\beta H')(\beta\bar{z})^3 + 24(\beta H')(1+\beta H')(\beta\bar{z})^2 + 8(\beta H')(2(\beta H')^2 - 3)(\beta\bar{z})$ $- 8(\beta H')^2(3+2\beta H')]/[48E_pI_p\beta^3(1+\beta H')]$ $K_{\theta_2} = [(1+\beta H')(\beta\bar{z})^4 - 6(\beta H')^2(1+\beta H')(\beta\bar{z})^2 - (\beta H')^2(5(\beta H')^2 - 6)(\beta\bar{z})$ $+ (\beta H')^3(6+5\beta H')]/[24E_pI_p\beta^4(1+\beta H')]$
		활동면 하부	$K_{\theta_1} = -e^{-\beta\bar{z}}\dfrac{(\beta H')[\{4(\beta H')^2 + 6(\beta H')\}\cos\beta\bar{z} + \{6(\beta H') + 6\}\sin\beta\bar{z}]}{12E_pI_p\beta^3(1+\beta H')}$ $K_{\theta_2} = e^{-\beta\bar{z}}\dfrac{(\beta H')^2[\{10(\beta H')^2 + 12(\beta H')\}\cos\beta\bar{z} + \{12(\beta H') + 12\}\sin\beta\bar{z}]}{48E_pI_p\beta^4(1+\beta H')}$

표7.8 활동면 상,하부의 최대휨모멘트 $M_1, \max, M_2 \max$

구　분	두부조건	위 치	$(K_{M_1})_{\max}$, 값
최 대 휨 모 멘 트 $M_{\max} = (K_{M_1})_{\max} f_1 + (K_{m_2})_{\max} f_2$	두부자유	활동면 상부	$(K_{M_1})_{\max} = -\dfrac{H'^2}{2}$ $(K_{M_2})_{\max} = \dfrac{H'^2}{3}$
		활동면 하부	$(K_{M_1})_{\max} = -e^{-\beta\overline{z_2}} \dfrac{[3\beta H'\{2+(\beta H')\}\sin\beta\overline{z_2} + 3(\beta H')^2\cos\beta\overline{z_2}]}{6\beta^2}$ $(K_{M_2})_{\max} = e^{-\beta\overline{z_2}} \dfrac{(\beta H')^2[\{3+2(\beta H')\}\sin\beta\overline{z_2} + 2\beta H'\cos\beta\overline{z_2}]}{6\beta^3}$
	두부회전 구속	활동면 상부	$(K_{M_1})_{\max} = \dfrac{(\beta H')\{(\beta H')^2 + 3(\beta H') + 3\}}{6\beta^2(1+\beta H')}$ $(K_{M_2})_{\max} = -\dfrac{(\beta H')^2\{3(\beta H')^2 + 8(\beta H') + 6\}}{24\beta^3(1+\beta H')}$
		활동면 하부	$(K_{M_1})_{\max} = -e^{-\beta\overline{z_2}}(\beta H') \dfrac{[\{2(\beta H')^2 + 6\beta H' + 3\}\sin\beta\overline{z_2} + \{2(\beta H')^2 - 3}{6\beta^2(1+\beta H')}$ $(K_{M_2})_{\max} = e^{-\beta\overline{z_2}}(\beta H')^2 \dfrac{[\{5(\beta H')^2 + 12\beta H' + 6\}\sin\beta\overline{z_2} + \{5(\beta H')^2 - 6\}\mathrm{co}}{24\beta^3(1+\beta H')}$

표7.8 **활동면 상,하부의 최대휨모멘트** $M_1, \max, M_2 \max$ (**계속**)

구 분	두부조건	위 치	$(K_{M_1})_{\max}$, 값
최 대 휨 모 멘 트 $M_{\max} = (K_{M_1})_{\max} f_1 + (K_{m_2})_{\max} f_2$	**두부힌지**	**활동면 상부**	$(K_{M_1})_{\max} = -[(\beta H')^2\{(\beta H')^3 - (\beta H') - 6\} + (\beta H')^2(\beta\overline{z_1})\{5(\beta H')^2 + 12$ $+ (\beta\overline{z_1})^2\{2(\beta H')^3 + 6(\beta H')^2 + 6(\beta H') + 3\}]/[4\beta^2\{1 + 2(1 + ($ $(K_{M_2})_{\max} = [(\beta H')^3\{7(\beta H')^3 - 30(\beta H') - 30\} + 3(\beta H')^3(\beta\overline{z_1})\{9(\beta H')^2 +$ $- 10(\beta\overline{z_1})^3\{2(\beta H')^3 + 6(\beta H')^2 + 6(\beta H') + 3\}]/[60\beta^3\{1 + 2(1$
		활동면 하부	$(K_{M_1})_{\max} = \dfrac{[(\beta H')^2\{-(\beta H')^3 + 6(\beta H') + 6\}]}{[4\beta^2\{1 + 2(1 + (\beta H'))^3\}]}$ $(K_{M_2})_{\max} = \dfrac{[(\beta H')^3\{7(\beta H')^3 - 30(\beta H') - 30\}]}{[60\beta^3\{1 + 2(1 + (\beta H'))^3\}]}$
	두부고정	**활동면 상부**	$(K_{M_1})_{\max} = -\dfrac{[(\beta H')^2\{(\beta H')^4 + 6(\beta H')^3 + 15(\beta H')^2 + 24(\beta H') + 18\}]}{[12\beta^2(1 + \beta H')\{2 + (1 + (\beta H'))^3\}]}$ $(K_{M_2})_{\max} = \dfrac{[(\beta H')^3\{3(\beta H')^4 + 16(\beta H')^3 + 33(\beta H')^2 + 45(\beta H') + 30\}]}{[60\beta^3(1 + \beta H')\{2 + (1 + (\beta H'))^3\}]}$
		활동면 하부	$(K_{M_1})_{\max} = -\dfrac{[(\beta H')^3\{(\beta H')^3 - 9(\beta H') - 12\}]}{[12\beta^2(1 + \beta H')\{2 + (1 + (\beta H'))^3\}]}$ $(K_{M_2})_{\max} = \dfrac{[(\beta H')^4\{2(\beta H')^3 - 12(\beta H') - 15\}]}{[60\beta^3(1 + \beta H')\{2 + (1 + (\beta H'))^3\}]}$

표7.9 활동면 상,하부 모멘트 M_1, M_2

구 분	두부조건	위 치	K_{M_1} , 값
활동면 상 하부 모멘트 $M = K_M f_1 + K_M f_2$	두부자유	활동면 상부	$K_{M_1} = \dfrac{[(\beta\bar{z})^2 + 2(\beta H')(\beta\bar{z}) + (\beta H')^2]}{[2\beta^2]}$ $K_{M_2} = \dfrac{[(\beta\bar{z})^3 - 3(\beta H')^2(\beta\bar{z}) - 2(\beta H')^3]}{[6\beta^3]}$
		활동면 하부	$K_{M_1} = e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')[(2 + (\beta H'))\sin\beta\bar{z} + \beta H' \cos\beta\bar{z}]}{[2\beta^2]}$ $K_{M_2} = -e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')^2[(3 + 2(\beta H'))\sin\beta\bar{z} + 2\beta H' \cos\beta\bar{z}]}{[6\beta^3]}$
	두부회전구속	활동면 상부	$K_{M_1} = \dfrac{[3(1+\beta H')(\beta\bar{z})^2 + 6(\beta H')(1+\beta H')(\beta\bar{z}) + (\beta H')(2(\beta H')^2 - 3)]}{[6\beta^2(1+\beta H')]}$ $K_{M_2} = \dfrac{[4(1+\beta H')(\beta\bar{z})^3 - 12(\beta H')^2(1+\beta H')(\beta\bar{z}) - (\beta H')^2(5(\beta H')^2 - 6)]}{[24\beta^3(1+\beta H')]}$
		활동면 하부	$K_{M_1} = e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')[\{2(\beta H')^2 + 6(\beta H') + 3\}\sin\beta\bar{z} + \{2(\beta H')^2 - 3\}\cos\beta\bar{z}]}{6\beta^2(1+\beta H')}$ $K_{M_2} = -e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')[\{5(\beta H')^2 + 12(\beta H') + 6\}\sin\beta\bar{z} + \{5(\beta H')^2 - 6\}\cos\beta\bar{z}}{24\beta^3(1+\beta H')}$

표7.9 활동면 상,하부 모멘트 M_1, M_2(계속)

구 분	두부조건	위 치	K_{M_1}, 값
활동면 상 하부 모멘트 $M = K_M f_1 + K_M f_2$	두부힌지	활동면 상부	$K_{M_1} = [2\{1+2(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z})^2 + (\beta\bar{z})^2\{5(\beta H')^2 + 12\beta H' + 6\}(\beta\bar{z})$ $+ (\beta H')^2\{(\beta H')^3 - \beta H' - 6\}/[4\beta^2\{1+2(1+\beta H')^3\}]$ $K_{M_2} = [10\{1+2(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z})^3 - 3(\beta\bar{z})^3\{9(\beta H')^2 + 20\beta H' + 10\}(\beta\bar{z})$ $- (\beta H')^3\{7(\beta H')^3 - 30\beta H' - 30\}]/[60\beta^3\{1+2(1+\beta H')^3\}]$
		활동면 하부	$K_{M_1} = e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^2[\beta H'(2+\beta H')(3+\beta H'))\sin\beta\bar{z} + \{(\beta H')^3 - 6\beta H' - 6\}\cos\beta\bar{z}]}{4\beta^2\{1+2(1+\beta H')^3\}}$ $K_{M_2} = -e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^3[\{7(\beta H')^3 + 27(\beta H')^2 + 30(\beta H')\}\sin\beta\bar{z} + \{7(\beta H')^3 - 30\beta H' -}{60\beta^3\{1+2(1+\beta H')^3\}}$
	두부고정	활동면 상부	$K_{M_1} = [6(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z})^2 + 6(\beta H')^3\{(\beta H')^2 + 3\beta H' + 2\}(\beta\bar{z})$ $+ (\beta H')^3\{(\beta H')^3 - 9\beta H' - 12\}]/[12\beta^2(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}]$ $K_{M_2} = [10(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z})^3 - 3(\beta H')^4(3\beta H' + 5)(1+\beta H')(\beta\bar{z})$ $- (\beta H')^4\{2(\beta H')^3 - 12\beta H' - 15\}]/[60\beta^3(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}]$
		활동면 하부	$K_{M_1} = e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^3[\{\beta H'(3+\beta H')^2\}\sin\beta\bar{z} + \{(\beta H')^3 - 9\beta H' - 12\}\cos\beta\bar{z}]}{12\beta^2(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}$ $K_{M_2} = -e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^4[\{2(\beta H')^3 + 9(\beta H')^2 + 12\beta H'\}\sin\beta\bar{z} + \{2(\beta H')^3 - 12\beta H' - 15}{60\beta^3(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}$

표7.10 활동면 상,하부의 전단력 S_1, S_2

구 분	두부조건	위 치	K_{S_1} , 값
활동면 상 하부 전단력 $S = K_S f_1 + K_S f_2$	두부자유	활동면 상부	$K_{S_1} = \dfrac{[(\beta\bar{z}) + (\beta H')]}{[\beta]}$ $K_{S_2} = \dfrac{[(\beta\bar{z})^2 - (\beta H')^2]}{[2\beta^2]}$
		활동면 하부	$K_{S_1} = e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')[2\cos\beta\bar{z} - (2 + 2\beta H')\sin\beta\bar{z}]}{6\beta}$ $K_{S_2} = e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')^2[-3\cos\beta\bar{z} + (3 + 4\beta H')\sin\beta\bar{z}]}{6\beta^2}$
	두부회전구속	활동면 상부	$K_{S_1} = \dfrac{[(\beta\bar{z}) + (\beta H')]}{[\beta]}$ $K_{S_2} = \dfrac{[(\beta\bar{z})^2 - (\beta H')^2]}{[2\beta^2]}$
		활동면 하부	$K_{S_1} = e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')[\{6(\beta H') + 6\}\cos\beta\bar{z} - \{(4(\beta H')^2 + 6\beta H')\sin\beta\bar{z}]}{6\beta(1 + \beta H')}$ $K_{S_2} = e^{-\beta\bar{z}} \dfrac{(\beta H')^2[-\{12(\beta H') + 12\}\cos\beta\bar{z} + \{(10(\beta H')^2 + 12\beta H')\sin\beta\bar{z}]}{24\beta^2(1 + \beta H')}$

표7.10 활동면 상,하부의 전단력 S_1, S_2(계속)

구 분	두부조건	위 치	K_{S_1}, 값
활동면 상 하부 전단력 $S = K_S f_1 + K_S f_2$	두부힌지	활동면 상부	$K_{S_1} = \frac{[4\{1+2(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z}) + (\beta H')^2\{5(\beta H')^2 + 12\beta H' + 6\}]}{[4\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}]}$ $K_{S_2} = \frac{[10\{1+2(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z})^2 - (\beta H')^3\{9(\beta H')^2 + 20\beta H' + 10\}]}{[20\beta^2\{1+2(1+\beta H')^3\}]}$
		활동면 하부	$K_{S_1} = e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^2[\{5(\beta H')^2 + 12\beta H' + 6\}\cos\beta\bar{z} - \{2(\beta H')^3 + 5(\beta H')^2 - 6\}\sin\beta\bar{z}]}{4\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}}$ $K_{S_2} = -e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^3[\{27(\beta H')^2 + 60(\beta H') + 30\}\cos\beta\bar{z} + \{14(\beta H')^3 + 27(\beta H')^2 - 3}{60\beta^2\{1+2(1+\beta H')^3\}}$
	두부고정	활동면 상부	$K_{S_1} = \frac{[2\{2+(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z}) + (\beta H')^3(1+\beta H')]}{[2\beta\{2+(1+\beta H')^3\}]}$ $K_{S_2} = \frac{[10\{2+(1+\beta H')^3\}(\beta\bar{z})^2 - (\beta H')^4(5+3\beta H')]}{[20\beta^2\{2+(1+\beta H')^3\}]}$
		활동면 하부	$K_{S_1} = e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^3[\{6(\beta H')^2 + 18\beta H' + 12\}\cos\beta\bar{z} - \{2(\beta H')^3 + 6(\beta H')^2 - 12\}\sin}{12\beta(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}$ $K_{S_2} = -e^{-\beta\bar{z}} \frac{(\beta H')^4[\{9(\beta H')^2 + 24\beta H' + 15\}\cos\beta\bar{z} - \{4(\beta H')^3 + 9(\beta H')^2 - 15\}\sin}{60\beta^2(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}$

표7.7 활동면 상,하부 회전각 θ_1, θ_2(계속)

구 분	두부조건	위 치	K_{θ_1} , K_{θ_2} 값
활동면 상 하부 회전각 $\theta = K_\theta f_1 + K_\theta f_2$	두부힌지	활동면 상부	$K_{\theta_1} = [20\{1+2(1+\beta H')^3\}(\beta\overline{z})^3 + 15(\beta H')^2\{5(\beta H')^2 + 12\beta H' + 6\}(\beta\overline{z})^2$ $+ 30(\beta H')^2\{(\beta H')^3 - \beta H' - 6\}(\beta\overline{z}) - 15(\beta H')^2\{2(\beta H')^3 + 5(\beta H')^2 - 6\}]$ $/[120E_pI_p\beta^3\{1+2(1+\beta H')^3\}]$ $K_{\theta_2} = [5\{1+2(1+\beta H')^3\}(\beta\overline{z})^4 - 30(\beta H')^3\{9(\beta H')^2 + 20\beta H' + 10\}(\beta\overline{z})^2$ $- 2(\beta H')^3\{7(\beta H')^3 - 30\beta H' - 30\}(\beta\overline{z}) + (\beta H')^3\{14(\beta H')^3 + 27(\beta H')^2 - 30\}]$ $/[120E_pI_p\beta^4\{1+2(1+\beta H')^3\}]$
		활동면 하부	$K_{\theta_1} = -e^{-\beta\overline{z}}\dfrac{(\beta H')^2[\{2(\beta H')^3 + 5(\beta H')^2 - 6\}\cos\beta\overline{z} + \{5(\beta H')^2 + 12\beta H' + 6\}\sin\beta\overline{z}]}{8E_pI_p\beta^3\{1+2(1+\beta H')^3\}}$ $K_{\theta_2} = e^{-\beta\overline{z}}\dfrac{(\beta H')^3[\{14(\beta H')^3 + 27(\beta H')^2 - 30\}\cos\beta\overline{z} + \{27(\beta H')^2 + 60\beta H' + 30\}\sin\beta\overline{z}]}{120E_pI_p\beta^4\{1+2(1+\beta H')^3\}}$
	두부고정	활동면 상부	$K_{\theta_1} = [20(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}(\beta\overline{z})^3 + 30(\beta H')^3\{(\beta H')^2 + 3\beta H' + 2\}(\beta\overline{z})^2$ $+ 10(\beta H')^3\{(\beta H')^3 - 9\beta H' - 12\}(\beta\overline{z}) - 10(\beta H')^3\{(\beta H')^3 + 3(\beta H')^2 - 6\}$ $/[120E_pI_p\beta^3(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}]$ $K_{\theta_2} = [5(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}(\beta H')^4 - 3(\beta H')^4(3\beta H' + 5)(1+\beta H')(\beta\overline{z})^2$ $- 2(\beta H')^4\{2(\beta H')^3 - 12\beta H' - 15\}(\beta\overline{z}) + (\beta H')^4\{4(\beta H')^3 + 9(\beta H')^2 - 15\}$ $/[120E_pI_p\beta^4(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}]$
		활동면 하부	$K_{\theta_1} = -e^{-\beta\overline{z}}\dfrac{(\beta H')^3[\{2(\beta H')^3 + 6(\beta H')^2 - 12)\}\cos\beta\overline{z} + \{6(\beta H')^2 + 18\beta H' + 12\}\sin\beta\overline{z}]}{24E_pI_p\beta^3(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}$ $K_{\theta_2} = e^{-\beta\overline{z}}\dfrac{(\beta H')^4[\{4(\beta H')^3 + 9(\beta H')^2 - 15)\}\cos\beta\overline{z} + \{9(\beta H')^2 - 15\}\sin\beta\overline{z}]}{120E_pI_p\beta^4(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}$

7.3 억지말뚝의 해석용 도표

7.3.1 개요

7.2절에서 구한 말뚝의 두부구속 조건별 일반해들은 K_1과 K_2와 같이 복잡한 수식들로 구성되어 있으므로 손으로 직접 계산하는데에는 상당한 시간과 어려움이 따른다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 K_1과 K_2값을 손쉽게 구하는 도표를 본절에서는 제시하고자 한다.

억지말뚝의 거동에 관한 이론해에 기초한 K_1, K_2값을 구하는 도표를 말뚝두부 회전구속조건에 대하여 정리하여 보면 그림 7.1 - 그림 7.17과 같다. 즉 적분상수 a_0, a_1, a_2, a_3, ,A 및 B를 구하기 위한 K_1, K_2값은 그림 7.1 - 그림 7.6에 표시하였다. 변위에 대한 K_1, K_2값은 그림 7.7 - 그림 7.9에 나타 내었고, 회전각에 대한 K_1, K_2값은 그림 7.10 - 그림 7.11에 표시 하였다. 모멘트에 대한 K_1, K_2값은 그림 7.12 - 그림 7.15에 수록 하였다. 또한 전단력에 대한 K_1, K_2값은 그림 7.16 - 그림 7.17에 나타 내었다.

말뚝두부의 구속조건에 대하여 두부 자유, 두부힌지, 두부고정조건의 경우는 부록에 수록 하였다.

본장에서 제시된 도표에서 $\beta H'$와 $\beta \bar{z}$의 범위는 0 - 10 까지의 범위로 하였다. 또한 말뚝의 종류와 특성은 표 7.11과 같이 현장에서 사용하고 있는 재원들을 그대로 사용하므로써 현장에서의 실용성을 높일 수 있도록 하였다.

따라서, 본 도표에 사용된 $\beta H'$와 $\beta \bar{z}$의 범위는 표 7.11을 기준으로 할 경우 사용 가능할 것이다. 즉, 활동면 상부의 길이 H' 와 활동면 하부의 길이 $\bar{z}$는 $0 \leqq H'$와 $\bar{z} \leqq$상한치 a의 범위에 있을때만이 적용이 가능하므로 상한치 a는 β값에 의하여 정해지는 값으로 표시 하였다.

다시말하자면 본 도표를 사용하여 K_1, K_2값을 구하는 방법은 $\beta H'$와 $\beta \bar{z}$값을 알고 있을때 이 값에 해당하는 종축값을 읽고, 이 종축값을 종축의 K_1, K_2를 제외한 항으로 나누어 K_1, K_2를 구하게 된다.

한편 말뚝의 거동에 대한 개략도는 그림 7.18과 같다.

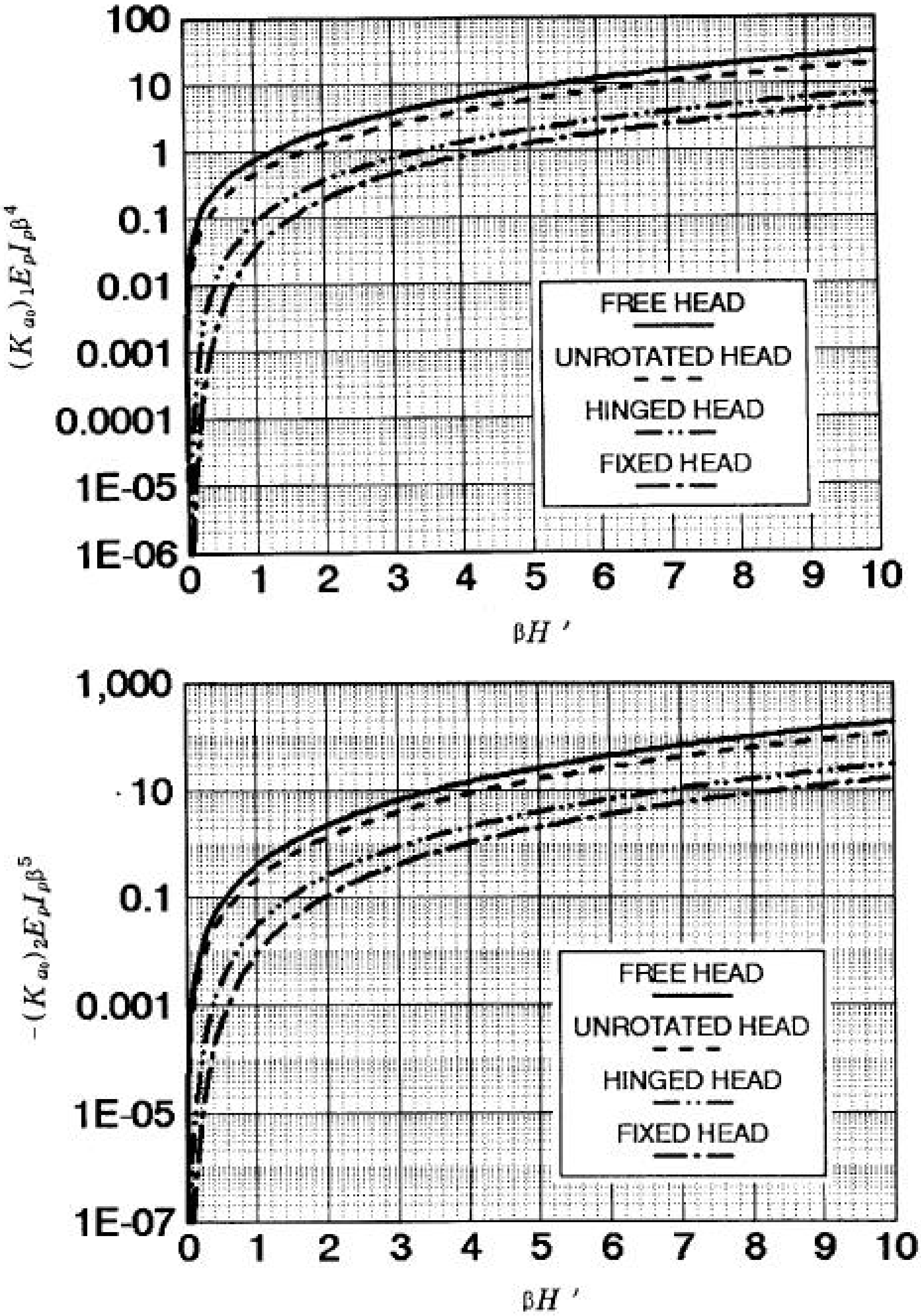


그림 7.1 적분상수 a_0 에관한 $(Ka_0)_1$ 과 $(Ka_0)_2$

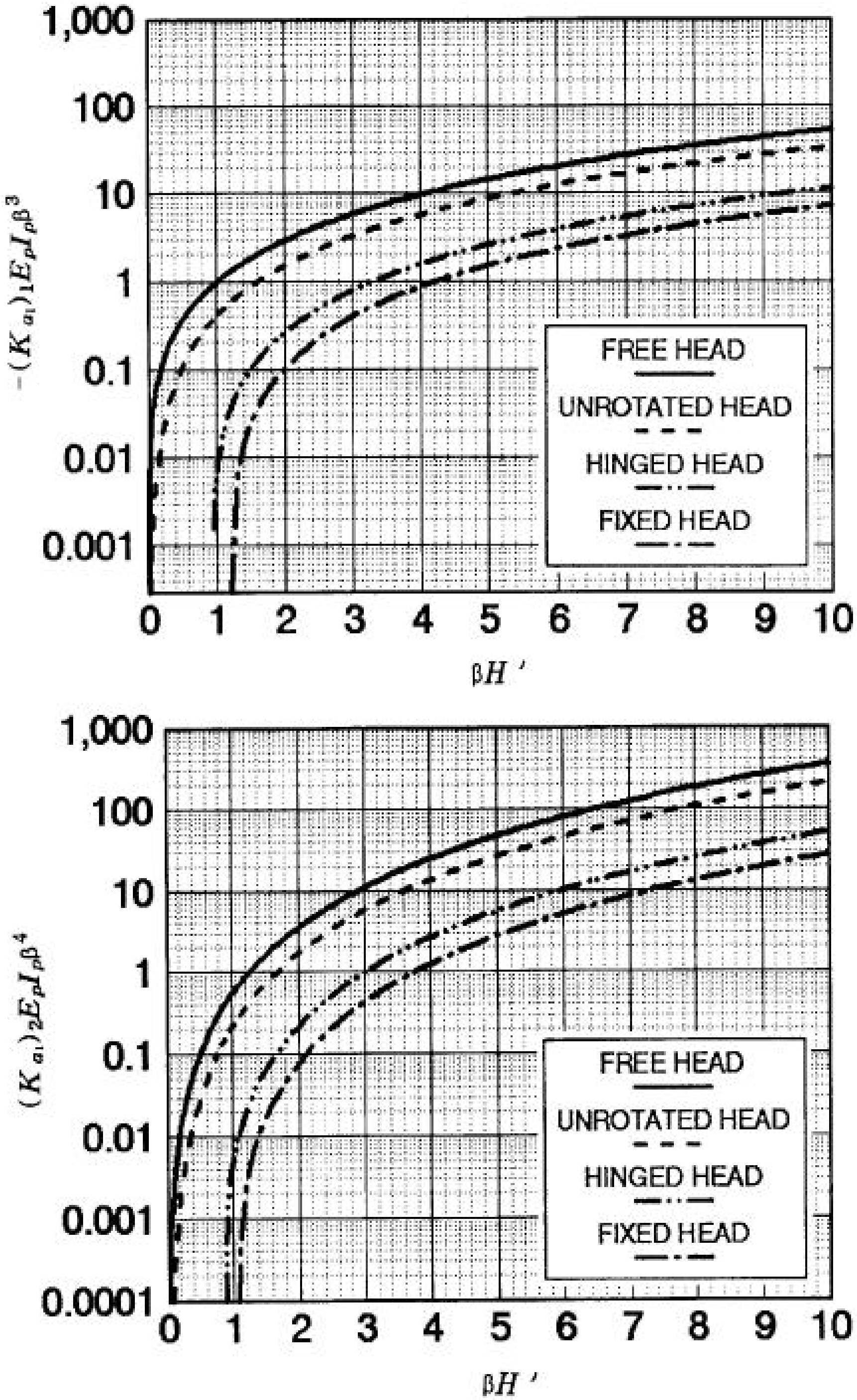


그림 7.2 **적분상수** a_1 **에관한** $(K_{a_1})_1$ **과** $(K_{a_1})_2$

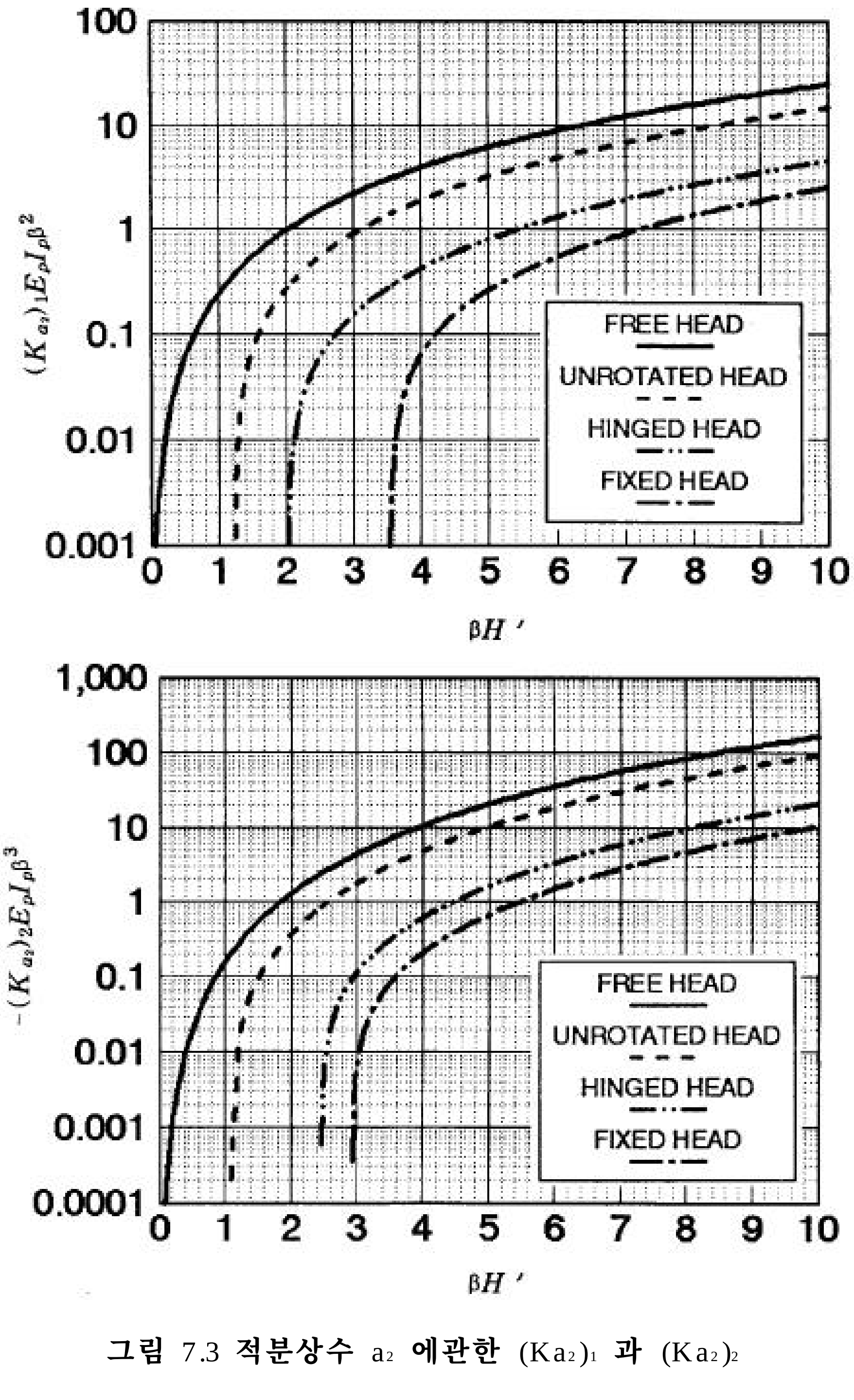


그림 7.3 **적분상수** a_2 **에관한** $(Ka_2)_1$ **과** $(Ka_2)_2$

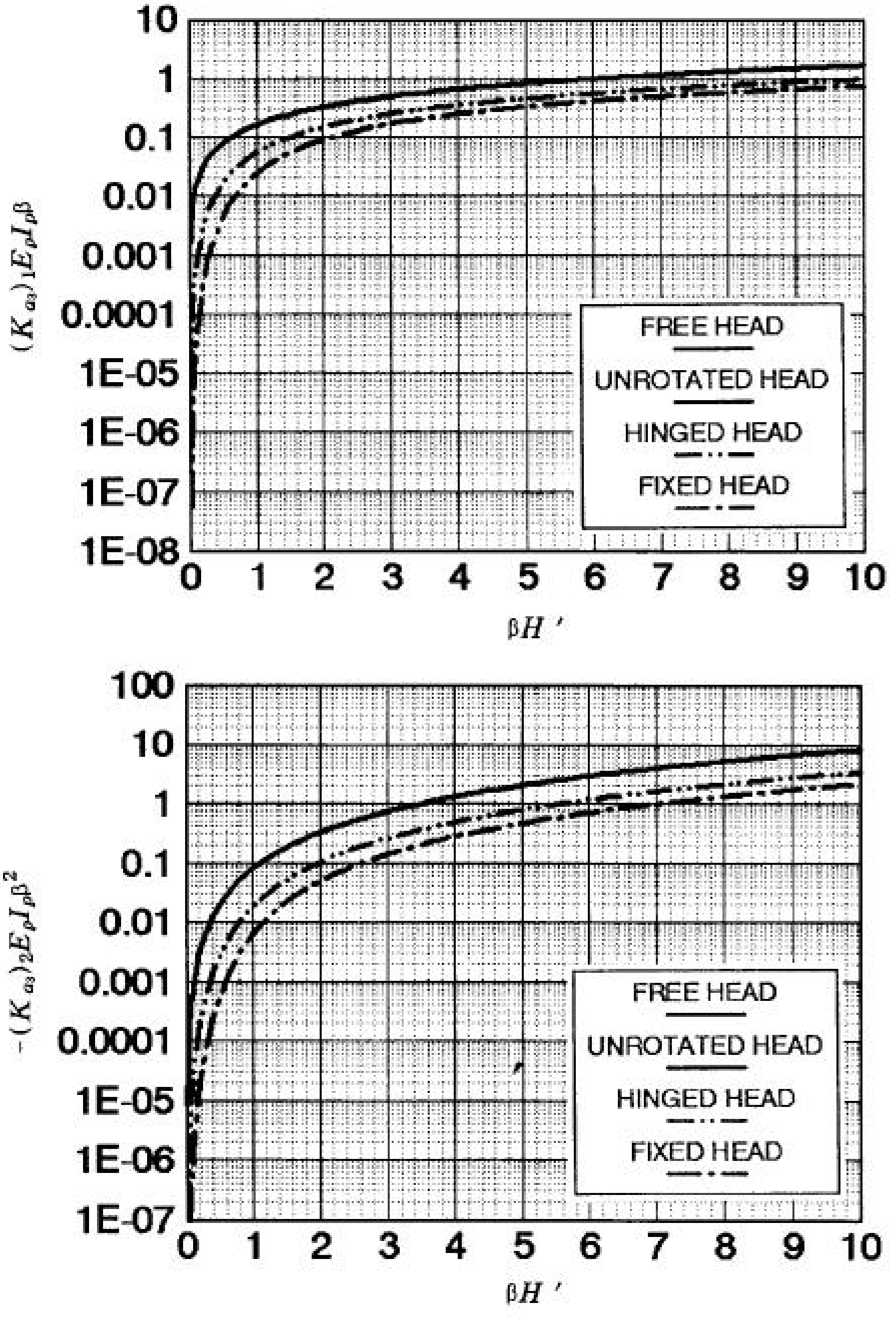


그림 7.4 **적분상수** a_3 **에관한** $(Ka_3)_1$ **과** $(Ka_3)_2$

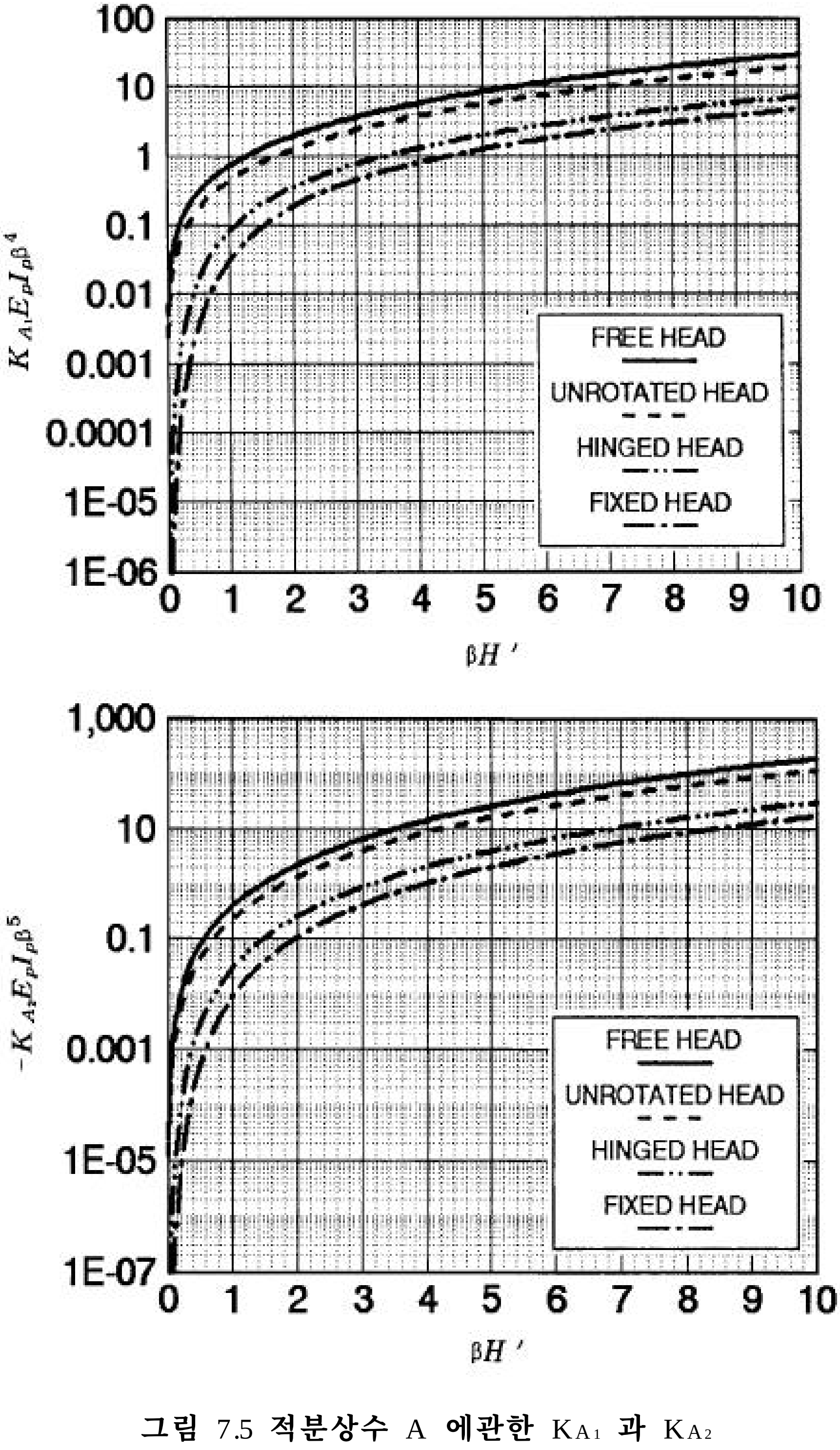


그림 7.5 **적분상수** A **에관한** K_{A1} **과** K_{A2}

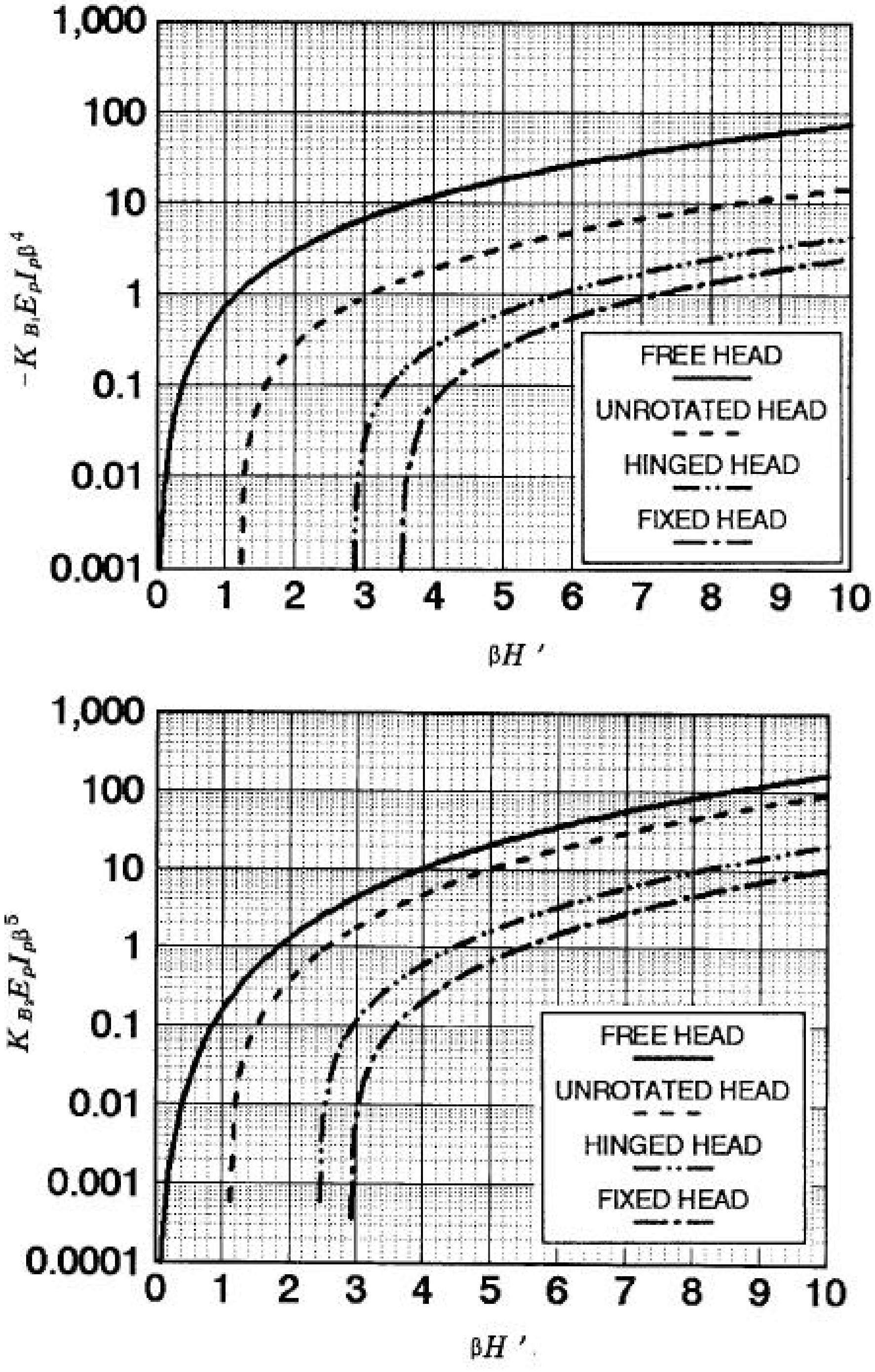
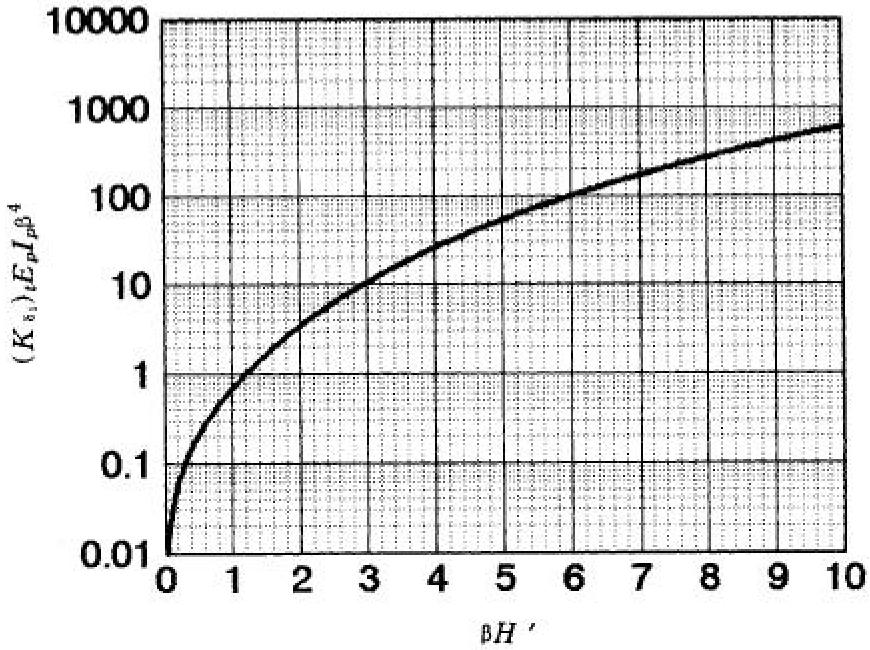


그림 7.6 **적분상수** B **에관한** K_{B1} **과** K_{B2}



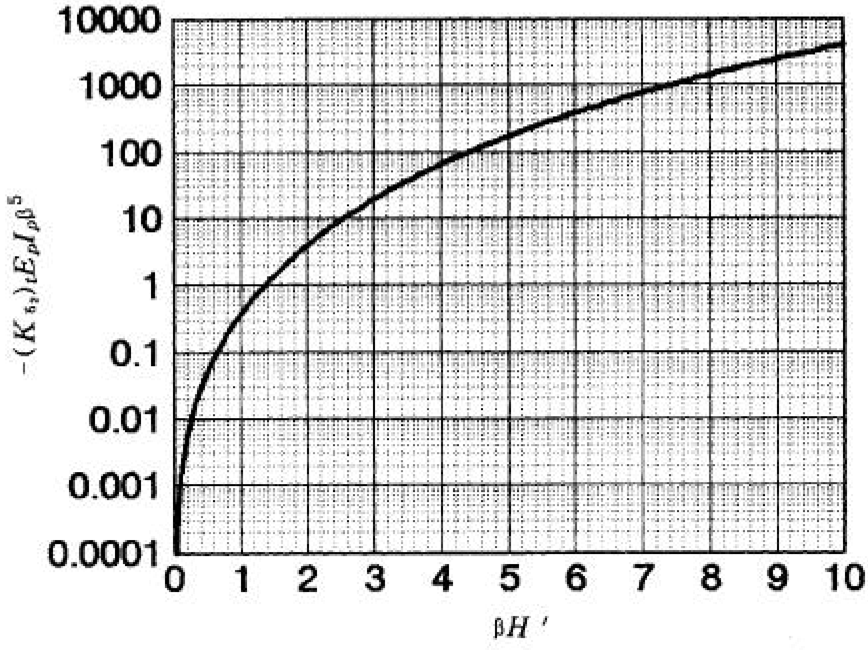


그림 7.7 **말뚝두부 변위** δ_t**에 관한** $(K\delta_1)_t$ **과** $(K\delta_2)_t$

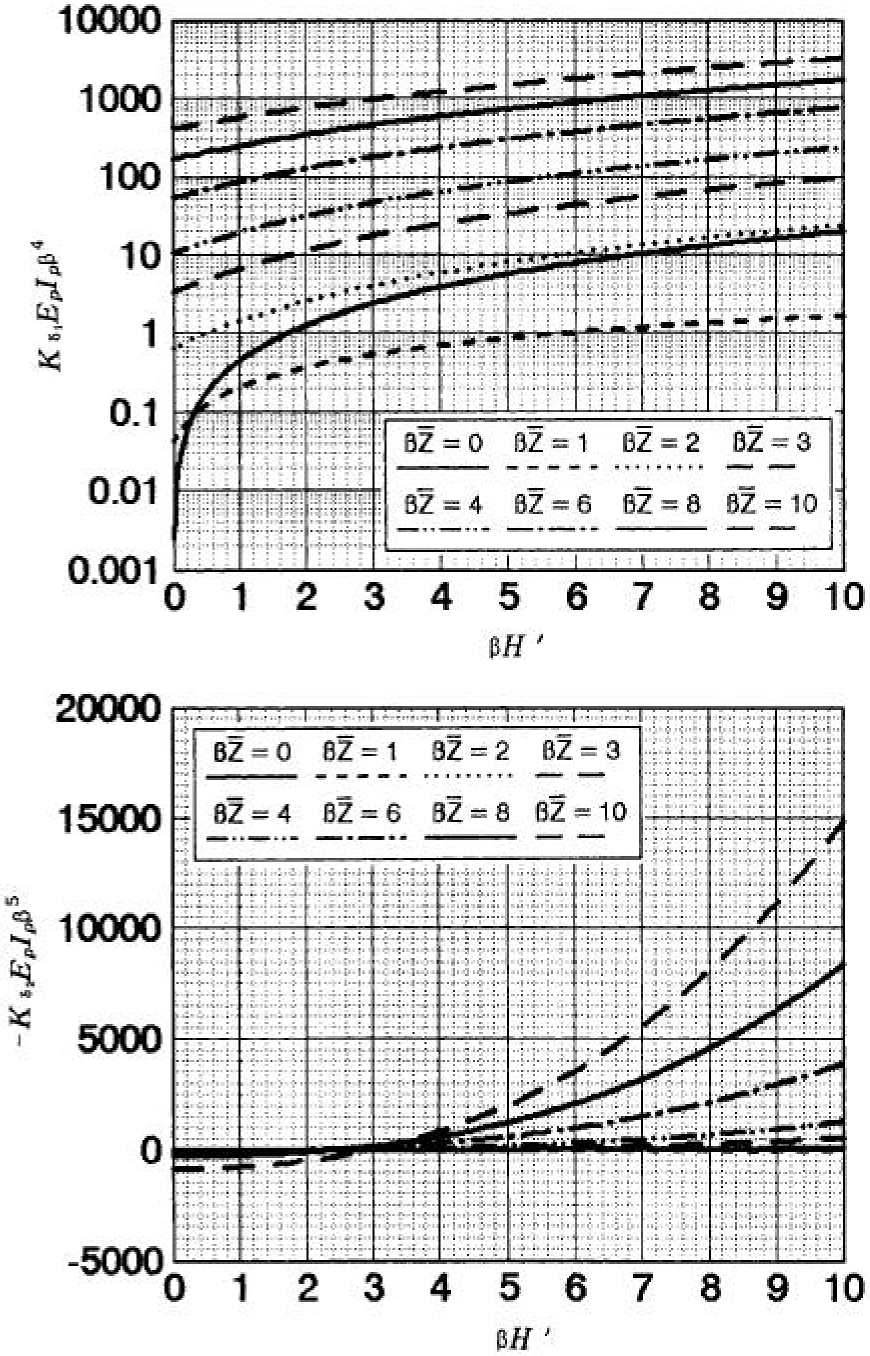


그림 7.8 활동면상부 변위 δ에 관한 $K\delta_1$ **과** $K\delta_2$

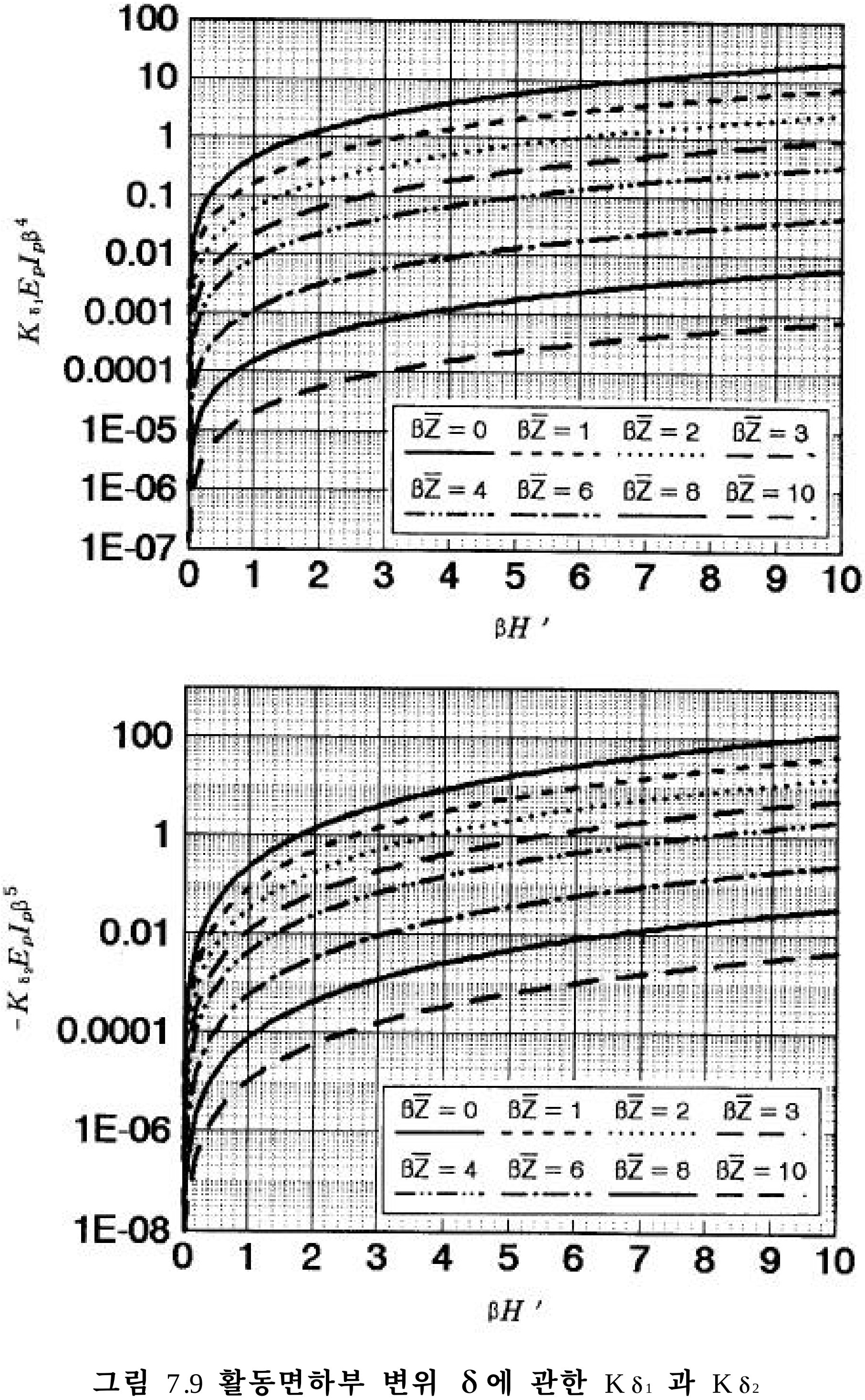


그림 7.9 **활동면하부 변위 δ에 관한** K_{δ_1} **과** K_{δ_2}

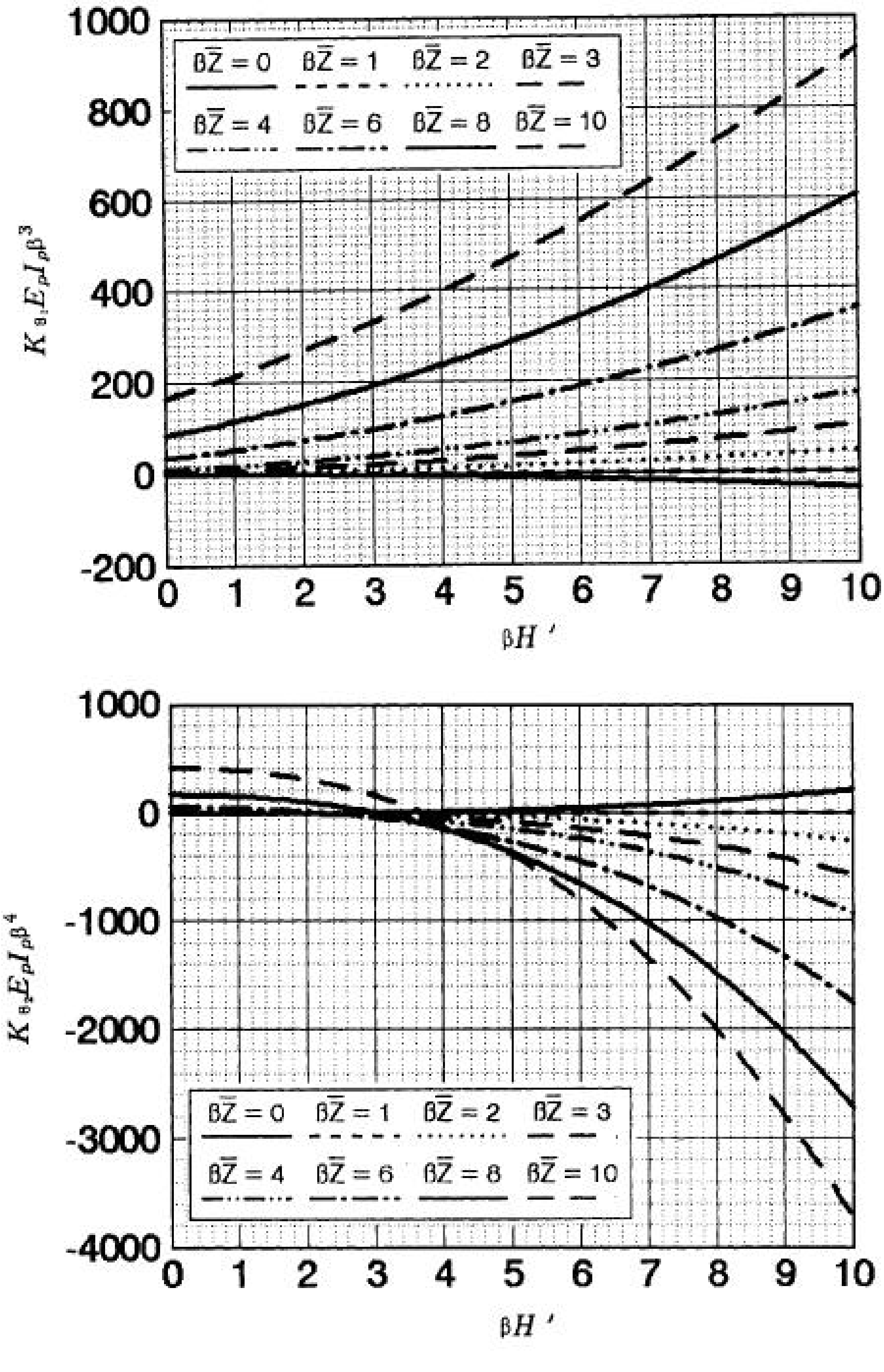


그림 7.10 **활동면상부 회전각 θ에 관한** $K_{\theta 1}$ **과** $K_{\theta 2}$

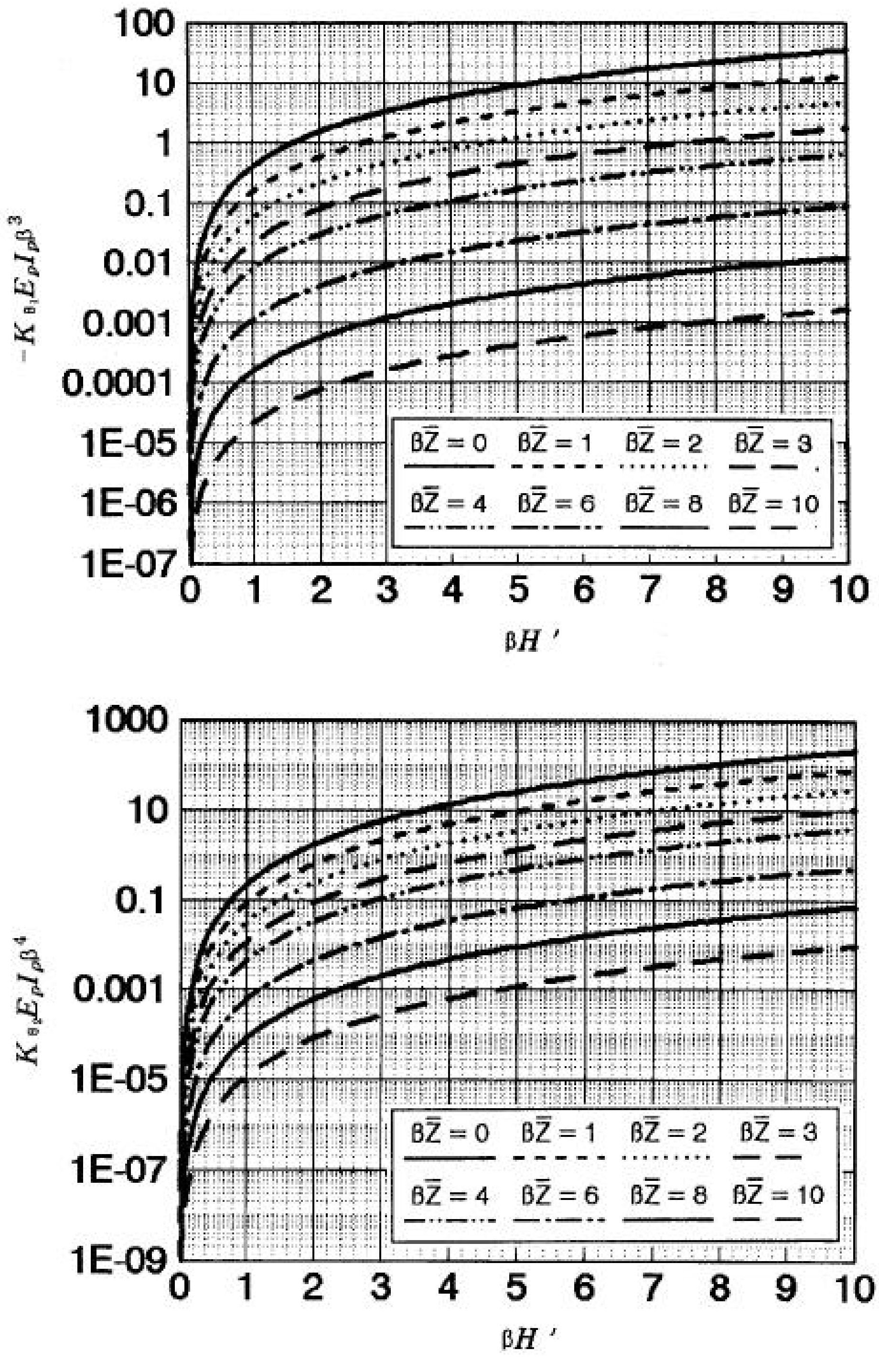
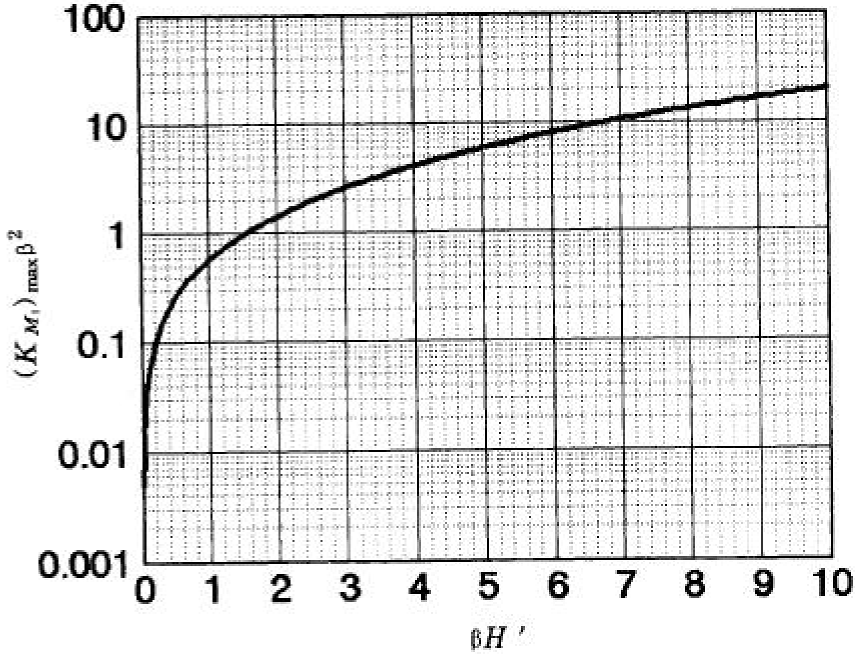


그림 7.11 **활동면하부 회전각** θ**에 관한** $K_{\theta 1}$ **과** $K_{\theta 2}$



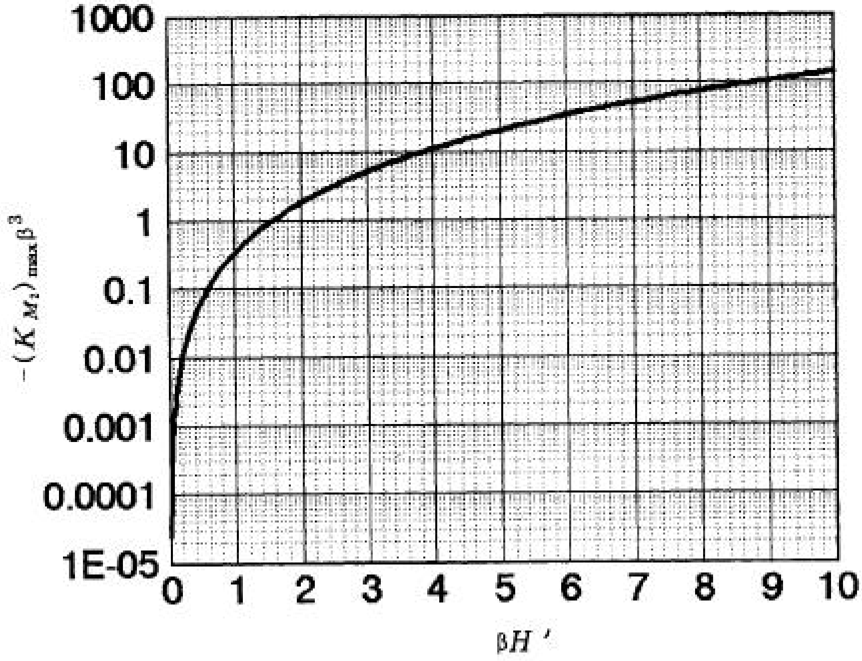


그림 7.12 **활동면상부 최대휨모멘트** M_{max}**에 관한** $(K_{M_1})_{max}$ **과** $(K_{M_2})_{max}$

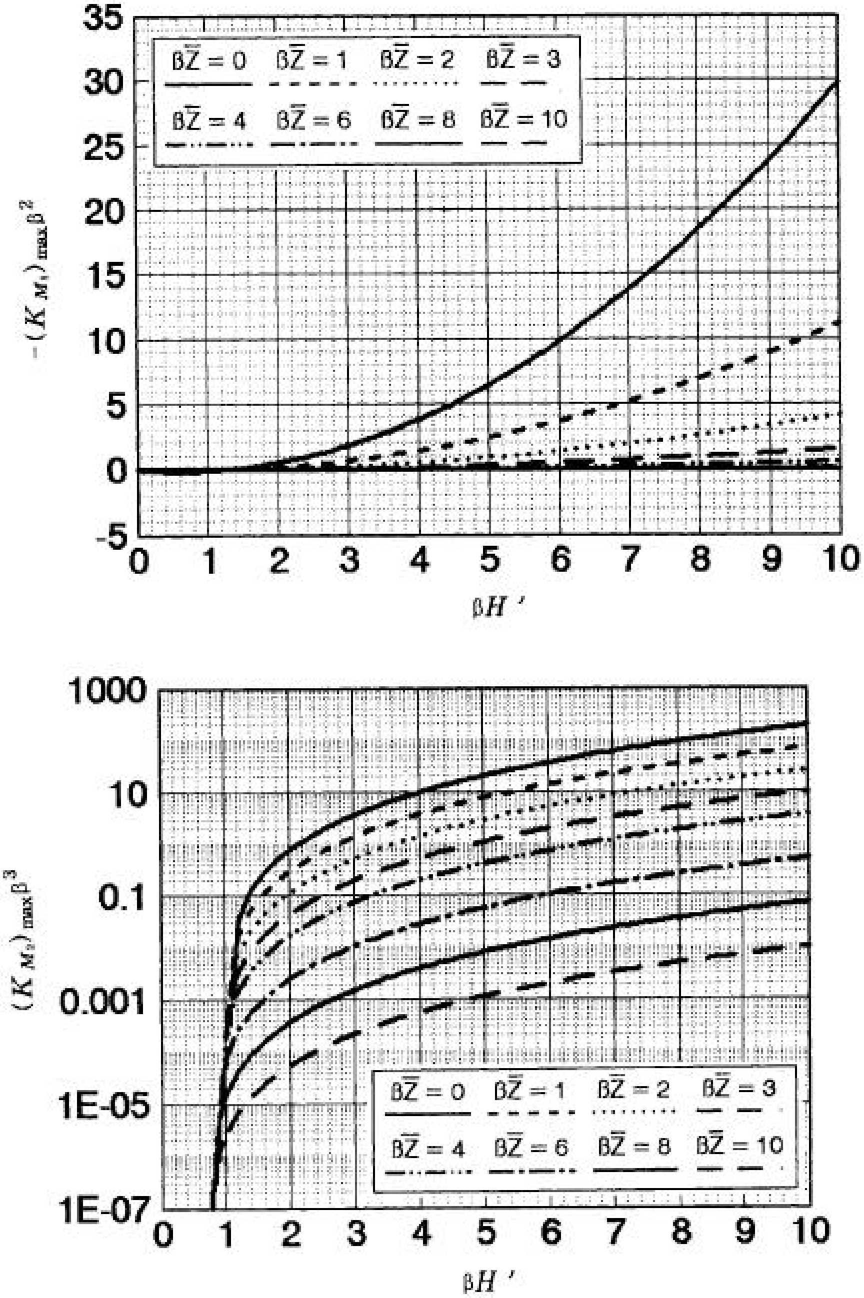


그림 7.13 **활동면하부 최대휨모멘트** M_{max}**에 관한** $(K_{M1})_{max}$ **과** $(K_{M2})_{max}$

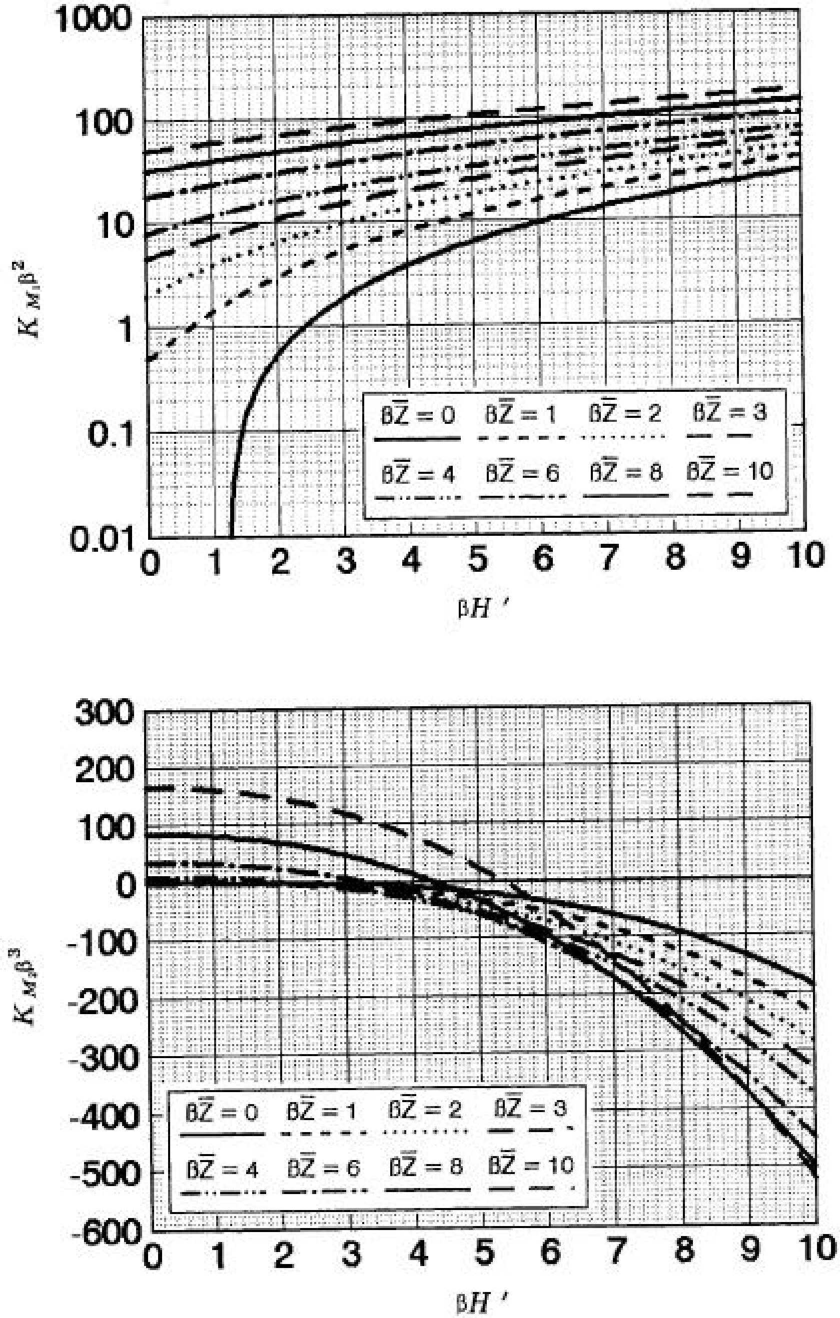


그림 7.14 **활동면상부 휨모멘트** M**에 관한** K_{M1} **과** K_{M2}

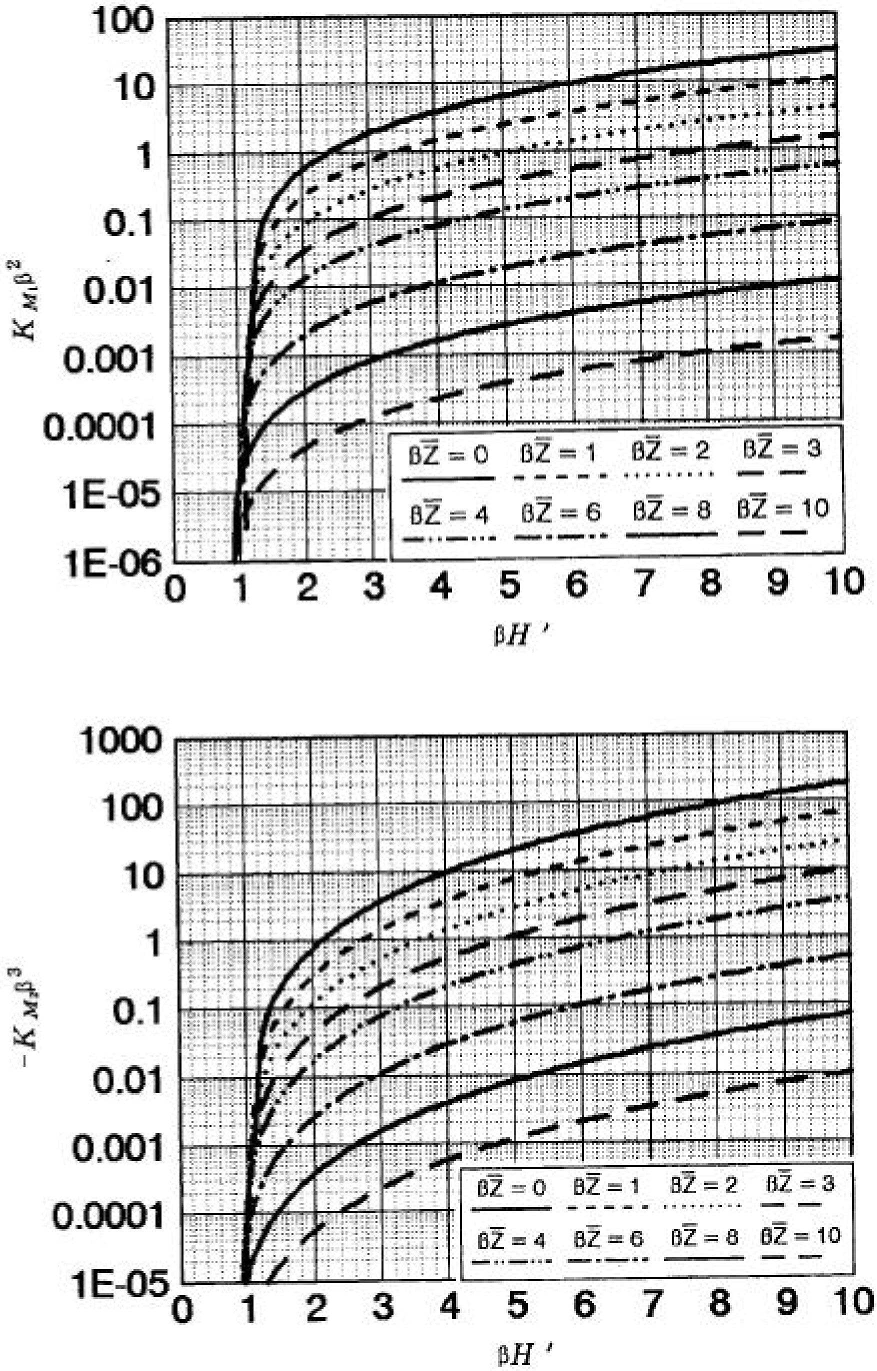


그림 7.15 **활동면하부 휨모멘트** M**에 관한** K_{M1} **과** K_{M2}

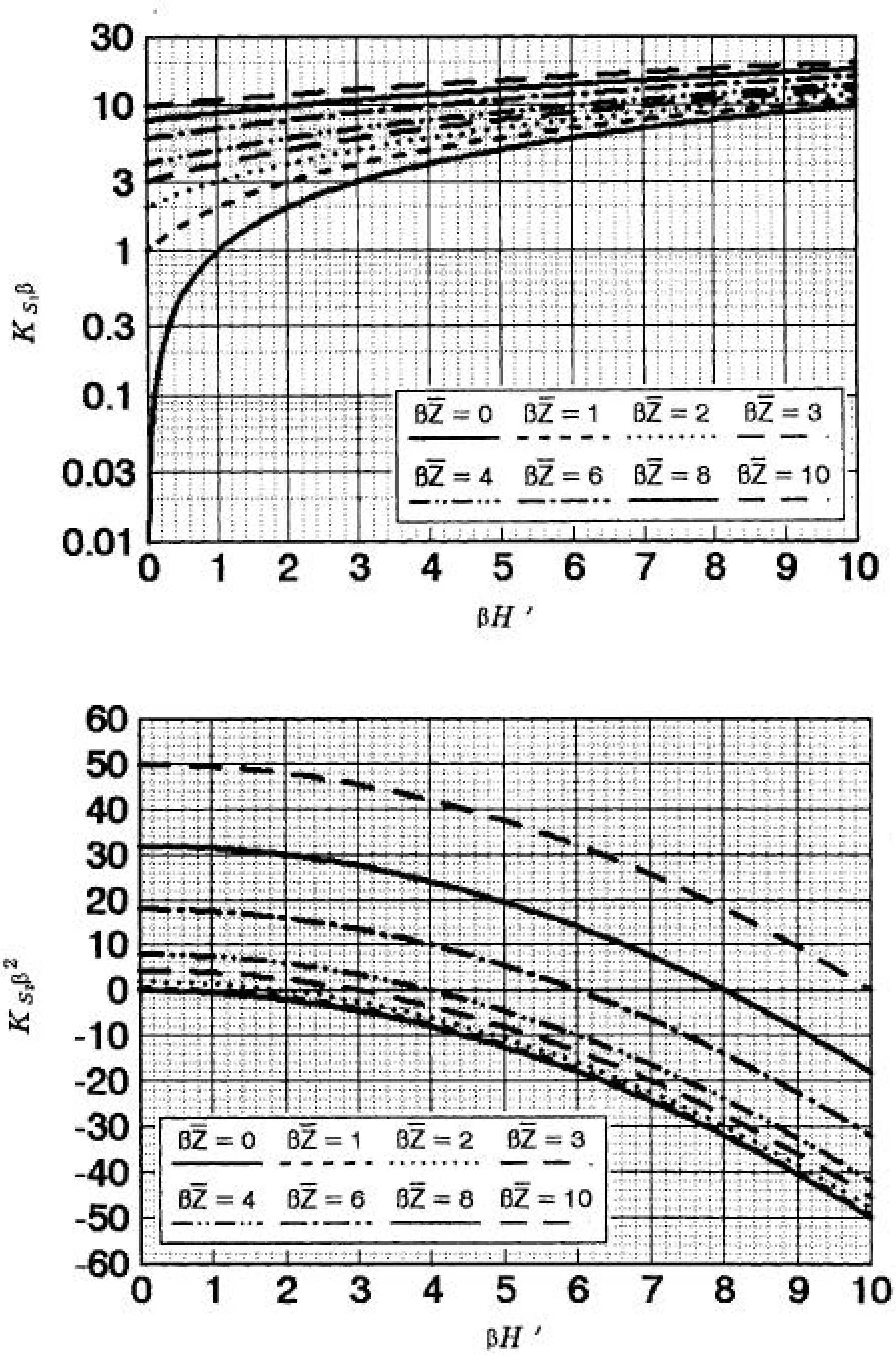


그림 7.16 **활동면상부 전단력** S**에 관한** K_{S1} **과** K_{S2}

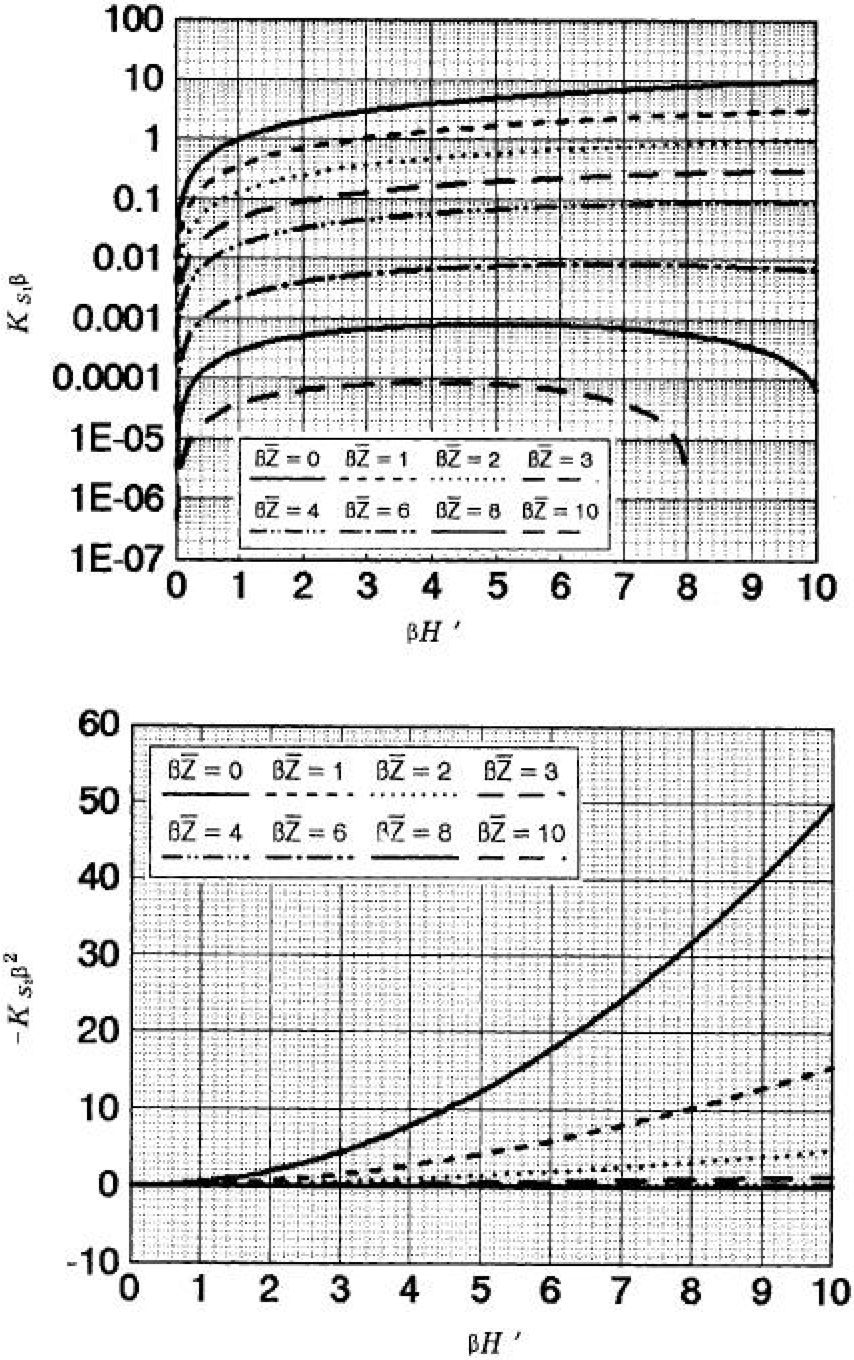


그림 7.17 활동면하부 전단력 S에 관한 K_{S1} 과 K_{S2}

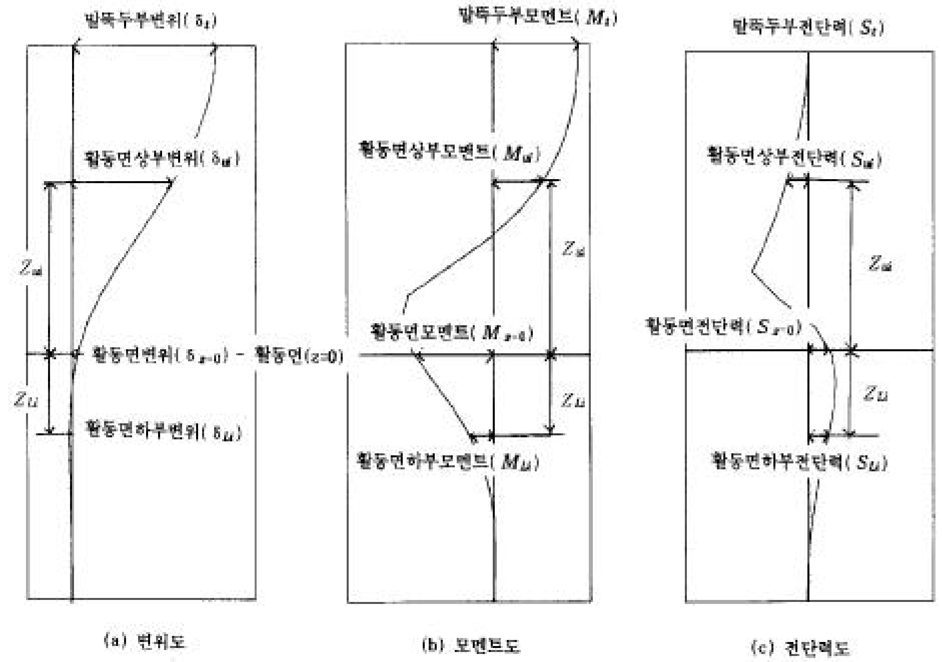


그림 7.18 말뚝거동의 개략도

표 7.11 말뚝의 종류별 특성

말뚝 종류	탄성계수(kg/㎠)	직경 D(cm)	두께 t(cm)	단면2차 모멘트 I(cm^4)	지반반력계수 K_h(kg/㎤)	β(m^{-1})	H' 및 $\bar{z}$의 상한치 m(m)
RC 말뚝	Ec = 3.5 * 10^5 Es = 2.1 * 10^6	20 - 600	5 - 9	7,360 - 483,000	0.1 - 5.0	0.173 - 0.992	10.08 - 57.8
PC 말뚝	Ec = 4.0 * 10^5 Ep = 2 * 10^6	30 - 180	6 - 18	34,600 - 30,400,000	0.1 - 5.0	0.078 - 0.721	13.86 - 126.2
현장타설 말뚝	Ec = 240,000	30 - 200	-	39,800 - 78,500,000	0.1 - 5.0	0.072 - 0.792	12.62 - 138.88
현장타설 말뚝	Ec = 270,000	30 - 200	-	39,800 - 78,500,000	0.1 - 5.0	0.070 - 0.769	13 - 142.85
강 말 뚝	Es = 2.1 * 10^6	H-175 ~ H-400	φ267.4 ~ φ1016	2,880 - 2,000,000	K_hD = 2-900	0.088 - 0.954	10.4 - 113.63

7.4 도식해법의 해석사례

7.4.1 개요

본 절에서 사용되는 해석단면은 아파트 신축부지의 절개사면에서 강우로 인해 사면 및 흙막이벽의 붕괴사고가 발생하여 복구대책이 마련된 현황을 대상으로 하였으며 5장에서 설명된 바 있는 현장실험이 수행된 동일한 현장단면을 대상으로 하였다.

따라서, 본 절에서 사용된 해석단면 및 지층의 개요는 그림 5,1과 같다. 이외의 단면에 대한 설계사항은 5장을 참조할 수 있다. 단, 해석을 실시하기 위하여 지하수위는 우기시 강우를 고려하여 지표면에 있는것으로 가정하였으며 산사태는 풍화토와 풍화암의 경계면에서 일어난 것으로 가정하였다. 지반반력은 6장의 억지말뚝의 설계법에서 제시된 바와 같이 가상활동면 상부의 지반계수 E_s값을 고려할 수 없는 경우의 지반변형이 심각한 것으로 가정하였다.

7.4.2 말뚝거동의 해석

활동면에 설치된 말뚝의 안정해석을 앞절에서 제안된 도표들을 이용하여 해석과정을 다음과 같이 정리 하였다.

① 식 (6.2)를 이용하여 측방토압 P(z)를 산정한다.

P(z)= 1.659+1.848×z

② 말뚝의 안전율이 1보다 크게되는 측방토압 부가계수 α_m 을 구한다.

α_m = 0.05589

③ 수정된 측방토압 $P_m(z)$ 를 구한다.

$P_m(z) = \alpha_m P(z)$ = 0.05589(1.659+1.848) $\times z$ = 0.09272+0.10328×z

따라서 $f_1 = 0.09272$ $f_2 = 0.10328$ 값이 얻어진다.

이와같이 값들이 구하여지면 도표를 이용할 수 있도록 필요한 값들을 다음과같이 구한다.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4E_pI_p}} = 0.348m^{-1}$$

$$\beta^2 = 0.121104m^{-2}$$

$$\beta^3 = 0.004214m^{-3}$$

$\beta H' = 3.9011 \qquad H' = 11.21$

$E_p I_p \beta = 1490.832 \ \text{ton.m}$

$E_p I_p \beta^2 = 518.8095 \ \text{ton}$

$E_P I_p \beta^3 = 180.5457 \ \text{t/m}$

$E_P I_p \beta^4 = 62.8299 \quad t/m^2$

$E_P I_p \beta^5 = 21.8648 \quad t/m^3$

④ 말뚝을 활동면상부와 하부로 구분하여 각각 활동면으로 부터 상부와 하부의 깊이를 구한다.

즉, H'**과** $\bar{z}$ **를구하여** $\beta H'$ **와** $\beta\bar{z}$**를 구한다.**

⑤ 각각의 해당도표를 참조하여 χ**축의** $\beta H'$(**여기서** 3.9011)**과** $\beta\bar{z}$ **값에 상응하는 도표**(**단, 불필요시 제외**)**를 선택하여** y**축의 좌표를 읽어** K_1**과** K_2 **를 구한다.**

⑥ K_1**과** K_2 **가 결정되면** $K_1f_1+K_2f_2$ **형태의 식에 의해 말뚝의 적분상수, 모멘트, 전단력 그리고 회전각을 구한다.**

상기와 같은 순서에 의해 그림 6.2 **와같은 사면에 설치된 억지말뚝의 적분상수를 구하여보면 표** 7.12**와 같이 또한 심도별 말뚝의 변위, 모멘트, 전단력 그리고 회전각을 제시된 도표를 이용하여 구하여보면 표** 7.13 **과같다.**

표 7.12 **적분상수** a_0, a_1, a_2, a_3, A **및** B

구 분	K_1값	K_2값	$K_1f_1+K_2f_2$
a_0	0.06001	-0.38139	-0.033825
a_1	-0.03096	0.20489	0.018290
a_2	0.00351	-0.02510	-0.002267
a_3	0.00044	-0.00244	-0.000212
A	0.06001	-0.38139	-0.033825
B	-0.02897	0.20738	0.018730

표 7.13 말뚝의 심도별 변위, 모멘트, 전단력 및 회전각

깊이 (m)	변 위(cm) $K_{\delta 1}f_1 + K_{\delta 2}f_2$	모멘트(t.m) $K_{M1}f_1 + K_{M2}f_2$	전단력(ton) $K_{S1}f_1 + K_{S2}f_2$	회전각(rad) $K_{\theta 1}f_1 + K_{\theta 2}f_2$
0	-24.66	-50.4673	0	0
4	-9.31	-49.8705	-2.0958	-0.04344
5	-5.53	-47.3167	-2.8798	-0.03206
6	-2.87	-44.1319	-3.5615	-0.02132
7	-1.23	-40.2672	-4.1408	-0.01150
8	-0.54	-35.9276	-4.6151	-0.00267
9	-0.67	-31.0781	-4.9898	0.00522
10	1.54	-25.9330	-5.2621	0.01187
11.21	3.38	-19.4401	-5.4508	0.01828
12	2.56	-14.8956	-4.0745	0.01391
13	1.81	-10.6712	-2.8192	0.00987
14	1.27	-7.5803	-1.9440	0.00696
15.69	0.7	-4.2811	-1.0341	0.00388
16	0.63	-3.8595	-0.9203	0.00348
17.19	0.41	-2.5900	-0.5906	0.00230

7.5 요약

본 장에서는 산사태억지말뚝이 설치된 사면의 안정성 해석을 간편히 수행 하기 위하여 수동말뚝에 제안된 측방토압 산정식을 이용하여 도식해법에 의한 말뚝의 안정해석법을 제시하였다.

사면활동면을 기준으로 상부에는 말뚝전면에 측방토압을 받게하고 활동면 하부에는 지반반력만 받게 하는 상태에서 탄성보의 기본미분방정식을 응용하였다.

먼저 사면안정 말뚝의 해석을 위한 적분상수, 말뚝의 변위, 회전각, 모멘트, 전단력등을 구하는 일반식들을 $K_1 f_1 + K_2 f_2$ 와 같은 일반화된 형태의 식으로 제시 하였으나 이 식들은 매우 복잡하므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 K_1과 K_2값을 구하는 도표를 만들어 제시함으로써 억지말뚝을 이용한 사면안정설계시 말뚝의 거동을 손쉽게 해석하는 도식해석기법을 확립하였다.

현장사례를 통하여 본 도식해법의 적용방법을 순차적으로 적용하므로써 도식해석법의 활용성을 검증 할 수 있었다.