한국전산구조공학회
1991년도 가을학술발표회 논문집

신뢰성이론에 의한 말뚝기초의 안정해석 및 설계규준
Reliability Based Stability Analysis and Design Criteria for pile Foundation

이 층 빈*, 김 영 인**, 박 철 수***, 이 정 식****, 신 형 우*****
Lee, Cheung Bin Kim, Young In Park, cheol Soo Lee, Jung Sik Shin, Hyung Woo

ABSTRACT

This study a reliability based design criteria for the Pile foundation, Which is common type of bridge founfation, and also proposes the theoretical bases limit state equations of stalbility analvsis of Pile foundation and the uncertainty measuring algorithms of eash equation are also derived by MFOSM using the pile reations of displacement method, Terzaghi's bearing capacity formula, and chang's lateral load formula, The Level of uncertainties comesponding to these algorithms are proposed approprite values considering our actuality. It may be asserted that the proposed LRFD reliabilty based design criteria for the pile foundation may have to be incorporated in to the current Highway Bridge Design codes as a design provision corresponding to the USD(or LFD) provisions of the current Highway Bridge Design Code.

1. 서 론

교량말뚝기초 설계시 고려해야할 사항은 여러가지가 있지만, 그 중에서 특히 중요한 것은상부구조물에서 전달되는, 기초지반의 지지력 및 침하량등이다. 교량말뚝기초의 수명기간내에 발생한 최대재하조건을 확정적으로 추정하기란 거의 불가능하며 특히 흙의 종류에 따른 각각의 특성들, 즉 흙의 단위중량, 내부마찰각, 점착력등은 확정량으로 보기에는 너무나 많은 불확실량이 있고 현재 우리나라의 교량말뚝기초의 설계는 허용응력설계법(WSD)으로 주로 하중 및 저항의 불확실량을 고려하지 않은 재래식설계법인 일본의 도로교표준시방서에 근거하였고, 기초의 안정에 대한 안전율을 어떤 이론적인 근거가 없이 주로 설계자의 판단 및 경험에 의존하여 책정되어 있으므로 현행 확정론적 설계규준들의 모순을 지양하는 확률이론에 기초를 둔 설계법의 개발이 시급히 요구된다하겠다[1].

본 연구에서는 선진국의 추세에 따라 우리나라에서도 교량말뚝기초의 신뢰성설계규준을 도입하기 위해 광양제철건설현장에서 실시된 말뚝 재하실험 결과와 토성재료를 토대로 한 정역학적 극한지지력 공식을 이용하여 저항의 불확실량을 개발하고, 우리 현실에 맞는 목표신뢰성지수에 따라 하중 및 저항계수의 알고리즘을 AFOSM의 반복시행해석[2]으로 개발적용하며, 우리 현실에 적합한 교량말뚝기초에 대한 안정해석 및 말뚝본체 설계규준을 LRFD규준[3),4)]에 의하여 제안하므로서 현행 도로교표준시방서의 교량말뚝기초에 대한 공칭안전율을 검토하고, 또한 우리나라의 현실을 고려한 불확실량 수준의 선택과 목표신뢰성지수에 따른 공칭안전율을 제시하는데 연구의 목적을 두고 있다.

2. 말뚝기초의 신뢰성해석 모델

2.1 안정해석

말뚝기초의 안정해석에 있어서 저항R은 도로교시방서에서 사용하는 Terzaghi의 극한지지력식으로 해석하고 극한수평지지력은 Chang의 공식을 사용한다. 그리고 하중효과 S를 상시와 지진시로 구분하여 각 단열말뚝머리에 작용하는 축방향력(연직하중)S_v, 축직각방향력(수평하중) S_H, 및 전도모멘트 S_M를 구하는 변위법으로 해석한다.

따라서 2차모멘트법에 의한 상대성이론인 MFOSM로 나타내며 한계상태 방정식은 다음과 같이 된다

1) 상시

$$\phi_V \bar{R}_V = \gamma_{Sj} \bar{S}_{vj} = \gamma_{VL} \bar{S}_{VD} + \gamma_{VL} \bar{S}_{VL} \quad \cdots\cdots (1)$$

2) 지진시

$$\phi_V \bar{R}_V = \gamma_{VD} \bar{S}_{VD} + \gamma_{VL} \bar{S}_{VL} \quad \cdots\cdots (2a)$$

$$\phi_H \bar{R}_H = \gamma_{sj} \bar{S}_{Hj} = \gamma_{HD} \bar{S}_{HD} + \gamma_{HL} \bar{S}_{HL} \quad \cdots\cdots (2b)$$

2.2 말뚝본체설계

말뚝기초는 지지말뚝과 마찰말뚝으로 구분되는

* 정회원, 순천공업전문대토목과, 공학박사.
** 정회원, 조선대학교 공과대학 교수.
*** 정회원, 순천공업전문대학 토목과 교수
**** 정회원, 순천공업전문대학 토목과 교수
***** 정회원, 조선대학교 대학원 석사과정 졸업

· 점성토인 경우

평균, $\bar{f}_s = 2\pi r \Sigma \bar{c}\bar{h}_i$ .... (13a)

변동계수, $\Omega_{fs} = \sqrt{\Omega_c^2 + \Omega_{hi}^2}$ .... (13b)

2) 수평지지력

보통의 긴 말뚝에서는 말뚝이 축직각방향력(수평력)을 받으면 지반이 지표면에서 축차파괴를 하며 하중의 증가에 따라 순차변위가 진행하고, 일반적으로 명확한 항복점은 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 도로교시방서에 사용하는 말뚝기초의 수평저항력을 지중에 매입한 말뚝과 돌출한 말뚝으로 나뉘어 생각한다.[8)]

a) 지중매립말뚝

도로교시방서에서는 지중에 매입한 말뚝기초에 대한 공칭수평저항력은 다음과 같이 나타내고 있다.

$$R'_H = \frac{KD}{\beta}\,\delta a \quad \cdots\cdots (14)$$

여기서 $\beta = KD/EI$

따라서 확률변수로 k, β, δa를 취하면, 평균($\bar{R}_H$)와 변동계수(Ω_{RH})는 다음과 같이 된다.

$$\text{평균}: \bar{R}_H = \frac{\bar{K}\bar{D}}{\beta}\,\bar{\delta}a \quad \cdots\cdots (15a)$$

$$\text{변동계수}: \Omega_{RH} = \sqrt{\Omega^2{}_k + \Omega_{Sa} + \Omega\beta^2} \quad \cdots\cdots (15b)$$

여기서, $\Omega\beta = \frac{1}{4}\sqrt{\bar{E}^2\Omega^2{}_E + \bar{I}^2\Omega^2{}_I + \Omega^2{}_K}$

b) 지상돌출말뚝

도로교시방서에서는 지상에 돌출한 말뚝의 공칭수평저항력을 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\bar{R}'_H = \frac{4\ EI\ \beta^3}{1+\beta\cdot h}\,\delta a \quad \cdots\cdots (16)$$

따라서, E, I, δa, β를 확률변수로 취하면 평균 ($\bar{R}_H$)와 변동계수(Ω_{RH})는 다음과 같이 된다.

$$\text{평균}: \bar{R}_H = \frac{4\bar{E}\bar{I}\ \bar{\beta}^3}{1+\beta\cdot h} \quad \cdots\cdots (17a)$$

$$\text{변동계수}: \Omega_{RH} = \sqrt{\Omega^2{}_E + \Omega^2{}_I + \Omega^2\delta_a + \frac{9\ \Omega\beta^2}{(1+\bar{\beta}h)^2}} \quad \cdots\cdots (17b)$$

여기서, $\Omega\beta = \frac{1}{4}\sqrt{\bar{E}^2\Omega^2{}_E + \bar{I}^2\Omega^2{}_I + \Omega^2{}_K}$

3.1.2 말뚝본체 설계

1) 압축

도로교시방서에서는 전 길이를 지중에 매립한 말뚝의 방향압입력은 원칙적으로 단주로 설계하고, 축방향인발력은 인장부재로 설계된다. 따라서 본 연구에서는 R.C말뚝, P·C말뚝의 단면내하력모델로 다음과 같이 해석한다.

a) R.C말뚝

R.C말뚝의 압축파괴가 되는 공칭압축강도 R′는 다음과 같이 된다.

$$R' = 0.85\sigma_{ck}(\bar{A}g - \bar{A}_{st}) + \bar{\sigma}_y\bar{A}_{st} \quad \cdots\cdots (18)$$

따라서 식(18)에서 σ_{CK} σ_y, Ag, A_{st}를 확률변수로 취하면 평균 ($\bar{R}$)와 변동계수(Ω_R)는 다음과 같이 된다.

$$R = 0.85\sigma_{ck}(\bar{A}g - \bar{A}_{st}) + \bar{\sigma}_y\bar{A}_{st} \quad \cdots\cdots (19a)$$

$$\Omega_R = \sqrt{\Omega^2\delta_{st} + \Omega\delta^2{}_y + \delta A^2{}_{st} + \frac{Ag^2\Omega_{Ag}{}^2 + \bar{A}_{st}{}^2\Omega_{A}{}^2{}_{st}}{(Ag+A_{st})^2}} \;/\; R \quad \cdots\cdots (19b)$$

b) P.C말뚝

P.C말뚝의 압입파괴와 인발파괴로 생각하면 본 연구에서는 압입에 대한 공칭압축강도 R′는 다음과 같이 된다.

$$R' = (0.85\sigma_{ck} - 0\ .6\sigma_{pc})Ag \quad \cdots\cdots (20a)$$

따라서 식(20)에서 σ_{ck}, σ_{pc} Ag를 확률변수로 취하면 평균($\bar{R}$)와 변동계수(Ω_R)는 다음과 같이 된다.

$$\bar{R} = (0.85\bar{\sigma}_{CK} - 0.6\bar{\sigma}_{pc})\bar{A}g \quad \cdots\cdots (21a)$$

$$\Omega_R = \sqrt{\frac{0.7225\bar{\sigma}_{ck}{}^2\Omega\sigma_{CK} + 0.36\bar{\sigma}_{pc}{}^2\Omega\sigma^2{}_{PC}}{(0.85\bar{\sigma}_{CK} - 0.6\bar{\sigma}_{pc})^2}} + \Omega_{Ag}{}^2 \quad \cdots\cdots (21b)$$

2) 휨(flexure)

도로교시방서에서는 축직각방향력(수평력)에 의한 말뚝 각부의 휨모멘트는 말뚝본체를 탄성지반상의 보로 해석하는데, 본 연구에서는 R.C말뚝과 P.C말뚝의 휨에 대한 단면내하력을 다음과 같이 해석 한다.

a) R.C말뚝

R.C말뚝의 휨에대한 공칭휨강도 M′는 다음과 같이 된다.

$$M' = \mathrm{Sin}\varphi[\sigma_B(2tr^2 + \frac{t^2}{6}) + \sigma_y \cdot \frac{2As\gamma_s}{\pi}] \quad \cdots (22)$$

식(20)에서 확률변수를 σ_B, σ_y, A_s, t로 취하면 평균($\bar{M}$)와 변동계수(Ω_M)는 다음과 같이 된다.

$$\bar{M} = \bar{M}_1 + \bar{M}_2 \quad \cdots\cdots (23a)$$

여기서 $\bar{M}_1 = \sin\sigma_B((2\bar{t}r^2 + \frac{t^2}{6})$

$$\bar{M}_2 = \sigma_y\ \frac{3As\gamma_s}{\pi}\ \sin\varphi$$

$$\Omega_R = \sqrt{\bar{M}_1{}^2\Omega_{M1} + M_2\Omega_{M2}{}^2} \;/\; \bar{M} \quad \cdots\cdots (23b)$$

여기서, $\Omega_{M1} = \sqrt{\Omega\sigma_R{}^2 + \frac{(2r^2 + \frac{\pi}{\sigma})^2}{(2tr^2 + \frac{t^2}{6})^2}\,t^2\Omega_t{}^2}$

데 본 연구에서는 지지말뚝의 축방향압입력에 의한 압축파괴에 대해서 R.C말뚝, P.C말뚝 및 강관말뚝을 대상으로 압축과 힘에 대한 극한내하력식을 저항R로 표시하고 하중효과S는 축방향력 S_V, 축직각방향력 S_H및 전도모멘트 S_M로 구분하여 표시하면, 말뚝본체 설계에 대한 한계상태방정식은 다음과 같이 된다.

1) 압축(인장)

상시 $\bar{\phi}_R\bar{R}=\gamma_{VD}\bar{S}_{VD}+\gamma_{VD}\bar{S}_{VL}$ ………………… (3a)

지진시 $\bar{\phi}_R\bar{R}=\gamma_{Vj}\bar{S}_{Vj}+\gamma_{Hj}\bar{S}_{Hj}$ ………………… (3b)

2) 힘

상시 $\phi_M M=\gamma_{VD}\bar{S}_{VD}+\gamma_{VL}\bar{S}_{VL}$ ……………… (4a)

지진시 $\phi_M\bar{M}=\gamma_{Vj}\bar{S}_{Vj}+\gamma_{H}\bar{S}_{Hj}$ ……………… (4b)

3. 불확실량 산정

3.1 저항

일반적으로 저항 R은 여러가지 기본변수의 함수로 되어 있고, 따라서 이들 함수를 평균에 대해 Taylor 급수전개하면 다음과 같이 각각 평균과 분산이 구해진다.

$$E[X]= g_X(\bar{x}_1,\ \bar{x}_2,\ \cdots,\ \bar{x}_n) \quad \cdots\cdots (5a)$$

$$\sigma_X{}^2=\Sigma(\frac{\partial g}{\partial x_i})^2\sigma_{Xi}{}^2+\sum_i\sum_j\rho_{ij}(\frac{\partial g}{\partial x_i})(\frac{\partial g}{\partial x_j})\sigma_{xi}\sigma_{xj} \quad \cdots (5b)$$

여기서 ρ_{ij}는 x_i, x_j의 상관계수인데, MFOSM법에서는 기본변수들이 통계적으로 서로 독립으로 보는것이 상례이므로 $\rho_{ij}\simeq 0$이 된다. 따라서 분산계수 Ω_{RM}는 다음과 같이 된다.

$$\Omega_R=R_M{}^2\Sigma(\frac{\partial\bar{R}_M}{\partial R_i})^2 R_i\partial_{Ri}{}^2 \quad \cdots\cdots (5c)$$

따라서 본 연구에서는 저항의 불확실량을 산정하기 위해 기본내하력의 산정식을 LRFD Format[3),4),5)]에서 추정 분석한 공식을 사용하면 설계계수의 평균치와 변동계수에 대하여 분석하면 다음과 같이 된다.

3.1.1 안정해석

1) 연직지지력

a) 군말뚝인 경우

군말뚝의 연직지지력에 대한 불확실량은 도로교시방서의 극한지지력 공식을 사용하면, 공칭극한지력 R′는 선단지지력(R_p)와 주변마찰력(R_F)도 다음과 같이 된다.[6),7),8)]

$$R'=R_P+R_F=q_dA+S\cdot D_f\cdot L \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서

$$q_d=\alpha CN_c+0.5\,\beta\gamma_1 BN_r+\gamma_2 D_f N_Q \quad \cdots\cdots (7)$$

식(6)에서 g_d A, S, D_f,L를 확율변수로 취하면 식(5)에 의해 평균($\bar{R}$)와 변동계수(Ω_R)은 다음과 같이된다.

$$\bar{R}=\bar{R}_P+\bar{R}_f=\bar{q}_d\cdot\bar{A}+\bar{S}\cdot\bar{D}_f\cdot\bar{L} \quad \cdots\cdots (8a)$$

$$\Omega_R=\sqrt{(\bar{q}_d\cdot\bar{A})^2(\Omega_{qd}{}^2+\Omega_A{}^2)-(\bar{S}\cdot\bar{D}_f\cdot\bar{L}\,(\Omega_S{}^2+\Omega_{DN}{}^2+\Omega_L{}^2))}/\bar{R} \quad \cdots\cdots (8b)$$

극한 지지력공식 q_d에 대해 $\gamma_1,\gamma_2,C,B,D_f,N_c,N_r,N_q$를 확률변수로 취하면 이에 대한 평균과 변동계수는 다음과 같이된다.

$$\bar{q}_d=\alpha\bar{C}\bar{N}_c+0.5\beta\bar{\gamma}_1\bar{B}\bar{N}_r+\bar{\gamma}_2\bar{D}_f\bar{N}_q \quad \cdots\cdots (9a)$$

여기서

$$\bar{Q}_c=\alpha\bar{C}\bar{N}_c,\qquad \bar{Q}_r=0.5\rho\bar{\gamma}\bar{B}\bar{N}_r,\qquad \bar{Q}_q=\bar{\gamma}_2\bar{D}_f\bar{N}_q$$

$$\Omega_{Qd}{}^2=\sqrt{\bar{Q}_c{}^2+\Omega_{Qc}{}^2+\bar{Q}^2{}_r\Omega Q_r{}^2+Q_q{}^2\Omega_{Qq}{}^2}/\bar{q}_d \quad \cdots\cdots (9b)$$

여기서, $\Omega_{Qc}=\sqrt{\Omega_c{}^2+\Omega_{NC}{}^2}$

$\Omega_{Qr}=\sqrt{\Omega_1{}^2+\Omega_B{}^2+\Omega_{Nr}{}^2}$

$\Omega_{Qq}=\sqrt{\Omega_r{}^2+\Omega_{Df}{}^2+\Omega_{Nq}{}^2}$

b) 단일말뚝인 경우

도로교시방서에서는 단일말뚝의 극한지지력을 보편적으로 Terzaghi공식을 사용하고 있는데 본 연구에서는 공칭극한지지력 R′를 선단지지력(R_P)과 주변마찰력(R_F)으로 나타내면 다음과 같이된다[6),7),8)].

$$R'=R_P+R_F=q_dA_P+ULf_S \quad \cdots\cdots (10)$$

단, $q_d=\alpha CN_c+0.5\beta\gamma_1 BN_f+\gamma_2 D_f N_Q$

따라서 식(10)에서 q_d,A_p,L,f_s를 확률별수로 취하면 평균($\bar{R}$)와 변동계수(Ω_R)는 다음과 같이 된다.

$$\bar{R}=\bar{R}_p+\bar{R}_F=\bar{q}_d\bar{A}_p+U\bar{L}\bar{f}_s \quad \cdots\cdots (11a)$$

단, $\overline{R}=\overline{q_d}\ \overline{A_p}{}^2,\ \overline{R_F}=U\ \overline{L}\ \overline{f_s}$

$$\Omega_R=\sqrt{\overline{R}_p{}^2\Omega_{RP}{}^2+\overline{R}_F{}^2\Omega_{RF}{}^2}/\overline{R}$$
$$=\sqrt{(q_pA_p)^2(\Omega_{qd}{}^2+\Omega_{AP}{}^2)+(U\bar{L}\bar{f}_s)^2\ (\Omega_L{}^2+\Omega f_s{}^2)}\ /\overline{R} \quad \cdots\cdots (11b)$$

단, $\Omega_{RP}=\sqrt{\Omega_{qd}{}^2+\Omega_{AP}{}^2},\ \Omega_{RF}=\sqrt{(\Omega_L{}^2+\Omega f_s{}^2)}$

식(11)에서 말뚝의 주변마찰력 f_s는 점성토와 사질토에 따라 다르며, 이에 대한 평균 및 변동 계수는 다음과 같이 된다.

· 사질토인 경우

평균 $\bar{f}=\bar{r}\ \bar{k}_p\ \bar{z}\ \tan\bar{\phi}$ ……………… (12a)

변동계수, $\Omega_{fs}=\sqrt{\Omega_r{}^2+\Omega_{kp}{}^2+\Omega_Z{}^2+\Omega\phi^2}$ (12b)

$$\Omega_{M2}=\sqrt{\Omega\sigma_y^2+\Omega_{AS}^2}$$

b) P.C말뚝

P.C말뚝의 힘에 대한 공칭힘강도 M′는 다음과 같이 된다.

$$M'=2r^2t\sigma_{cu}(\sin\alpha-\alpha\sin\alpha)$$
$$+\ \frac{A_p\sigma_{pe}\gamma}{\pi}\ [(\pi-\alpha)\cos\alpha+\sin\alpha]$$
$$+\ \frac{A_p(\sigma_p-\sigma_{pe})\gamma}{2\pi(1+\cos\alpha)}\ [2(x-\alpha)\cos^2\alpha+\frac{3}{2}\sin2\alpha+(\pi-\alpha)] \quad \cdots\cdots (24)$$

확률변수를 $\sigma_{cu},\sigma_p,\sigma_{pe},A_p,t$로 취하면 평균($\overline{M}$)와 변동계수는 다음과 같이 된다.

$$\overline{M}=\overline{M}_1+\overline{M}_2+\overline{M}_3 \quad \cdots\cdots (25a)$$

여기서 $\overline{M_1}=2r^2t\sigma_{cu}(\sin\alpha-\alpha\cos\alpha)$

$$\overline{M_2}=\frac{A_p\sigma_{pe}\gamma}{\pi}\ [(\pi-\alpha)\cos\alpha+\sin\alpha]$$

$$\overline{M_3}=\frac{A_p(\sigma_{pe})_r}{2x(1+\cos\alpha)}\ [2(x-\alpha),\ \cos^2\alpha+\frac{3}{2}\sin 2\alpha+(\pi-\alpha)]$$

$$\Omega_M=\sqrt{\overline{M}_1\Omega_{M1}^2+\overline{M}_2^2{}_M{}^2{}_2+\overline{M}_3^2\Omega_{M3}^2}\ /\overline{M} \quad \cdots (25b)$$

여기서, $\Omega_{M1}=\sqrt{\Omega\sigma_{cu}^2+\Omega_t^2}$

$$\Omega_M^2=\sqrt{\Omega_{AP}^2+\Omega\sigma_{pe}^2}$$

$$\Omega_{M3}=\sqrt{\Omega_{AP}^2+\frac{\sigma_P^2\Omega\sigma^2{}_p+\sigma_{pe}^2\Omega\sigma_{pe}^2}{(\sigma_p-\sigma_{pe})^2}}$$

3.2 하중효과

말뚝머리와 Footing저면의 연결이 고정이고 경사말뚝을 가지고 있지 않으며 말뚝위치가 대칭일 때 원점에 작용하는 연직하중(Sv′), 수평하중(S_H), 전도모멘트 (S_M)로 하중를 산정하고 있는데 본 연구에서 사용하는 공칭말뚝머리 반력은 다음과 같이 된다.

$$S_v'=nK_v\delta_y \quad \cdots\cdots (26a)$$
$$S_H'=-n(K_1\delta_X-K_2\alpha) \quad \cdots\cdots (26b)$$
$$S_M'=(K_vxi^2+nK_4)\alpha-nK_3\delta_x \quad \cdots\cdots (26C)$$

3.2.1 연직하중(S_v')

확률변수를 K_v,δ_y로 취하면 평균($\overline{S}v$)와 변동계수(Ω_{SV})는 다음과 같이 된다.

$$\overline{S}=n\overline{K}_v,\overline{\delta}_y \quad \cdots\cdots (27a)$$
$$\Omega_{sa}=\sqrt{\Omega_{KV}^2+\Omega\delta_y^2} \quad \cdots\cdots (27b)$$

3.2.2 수평하중(S_H)

확률변수를 $K_1,K_2,\alpha_y,\delta_x$로 취하면 평균($\overline{S}_H$)와 변동계수($\Omega_{SH}$)는 다음과 같이 된다.

$$\overline{S}_H=-n(\overline{K}_1\overline{\delta}_K-\overline{K}_2\overline{\alpha}) \quad \cdots\cdots (28a)$$
$$\Omega_{SM}=\sqrt{\frac{\overline{k}_1^2\overline{\delta}^2{}_x(\Omega_{K1}^2+\Omega\delta_x^2)+\overline{K}_2^2\overline{\alpha}^2(\Omega_{K2}^2+\Omega\alpha^2)}{(K_1\delta_A-K_2\alpha)^2}} \quad \cdots (28b)$$

3.2.3 전도모멘트 (S_M)

확률변수를 K_v, K_3, K_4, α, δ_A로 취하면 평균(S_M)와 변동계수(Ω_{SH})는 다음과 같이 된다.

$$\overline{S}_M=\overline{S}_{M1}+\overline{S}_{M2} \quad \cdots\cdots (29a)$$

여기서, $\overline{S}_{M1}=(\overline{K}_1xi^2+n\overline{k}_4)\overline{\alpha}$

$$\overline{S}_{M2}=-n\overline{k}_3\overline{\delta}_x$$
$$\Omega_{SM}=\sqrt{\overline{S}_{M1}^2\Omega_{SM1}^2+\overline{S}_{M2}^2\Omega_{SM2}^2}\ /\ \overline{S}_M \quad \cdots\cdots (29b)$$

여기서, $\Omega_{SM1}=\sqrt{\frac{x_i^4\overline{K}_V\Omega k_v^2+n^2\overline{K}_4^2\Omega_{k4}^2}{(K_vXi^2+nK_1^2}+\Omega\alpha^2}$

$$\Omega_{SM2}=\sqrt{\Omega_{k3}^2+\Omega\delta_x^2}$$

4. 신뢰성해석 및 설계규준

4.1 신뢰성해석(부분대수변환근사법)

AFOSM를 이용하여 표준화 공간의 원점에서 한계상태면까지의 최소거리로서 좀더 정확한 값을 얻을 수 있는 기법으로서 부분하중효과를 전체하중효과로 취하여 변환시키면 다음과 같이 된다.[4)5)8)]

$$\phi n_0=\gamma s(\text{또는 } \phi=\gamma s/n_0) \quad \cdots\cdots (30)$$

여기서 $\phi=\exp(-\alpha_R\beta\Omega_R)$ $\cdots\cdots$ (31.a)

$$\gamma_s=1+\alpha s\beta\Omega_s \quad \cdots\cdots (31.b)$$

이 때, 파괴점에서의 단위구배벡터 α_i는

$$\alpha_R=\frac{\phi n_0\Omega_R}{\sqrt{\phi^2n_0^2\Omega_R^2+\Omega_s^2}}=\frac{\gamma_s\Omega_R}{\sqrt{\gamma_s^2\Omega_R^2+\Omega_s^2}} \quad \cdots\cdots (32.a)$$

$$\alpha_S=\frac{\Omega_S}{\sqrt{\phi^2n_0^2\Omega_R^2+\Omega_s^2}}=\frac{\Omega_s}{\sqrt{\gamma_s^2\Omega_R^2+\Omega_s^2}} \quad \cdots\cdots (32.b)$$

여기서 $\Omega_V=\sqrt{\Omega_{vP}^2+\rho^2\Omega_{VL}^2/(1+\rho)}$이다.

따라서 부분대수 변천근사법의 신뢰성지수 β에 대한 수치해는 式(30), (31), (32)를 다음과 같이 변형시키면 복잡한 반복시행을 행하지 않고서도 근사법으로 β를 구할 수 있다. 式(32.b)를 式(31.b)에 代入하여 γ_s에 관하여 정리하면,

$$\beta=\frac{\gamma_2-1}{\Omega_s^2}\ \sqrt{\gamma_s^2\Omega_R^2+\Omega_s^2} \quad \cdots\cdots (33)$$

그리고 식(33)의 γ_S는 다음 식으로 부터 구할 수 있다.

$$\gamma_S=m+\sqrt{m^2+c} \quad \cdots\cdots (34)$$

여기서, $m=\dfrac{k-(2b+1)}{2(k-b)}$

$$c=\frac{\ln n_o+b+1}{k-b}$$

단, ($b\fallingdotseq k$임)

식(34)로 γ_S를 구하여 식(33)에 대입하면 근사적으로 β를 구할수 있다. 이 때 $b\fallingdotseq0.4$이다.

4.2 신뢰성 설계규준 (부분대수변환근사법)

전절 4.1에서 상술한 AFOSM법, 즉 Lind-Hasofer의 불변 2차모멘트법에 의해 식(32.b)를 식(31.)에 대입하여 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$\gamma_S = 1 + \frac{\Omega_s^2 \beta_0}{\sqrt{\gamma_S^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad \cdots\cdots (35)$$

따라서 γ_S를 적당히 가정하여 식(35)만을 반복시킴으로써 $\phi \cdot \gamma_i$는 다음 식으로부터 얻을수 있다.

$$\phi = \exp\left(-\frac{\gamma_S \Omega_R^2 \beta_0}{\sqrt{\gamma_S^2 \Omega_R^2 + \Omega_{S42}}}\right) \quad \cdots\cdots (36.a)$$

$$\gamma_D = 1 + \frac{\Omega_{SD}^2 \beta_0}{(1+\rho)\sqrt{\gamma_S^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad \cdots\cdots (36.b)$$

$$\gamma_i = 1 + \frac{\rho \Omega_{SL}^2 \beta_0}{(1+\rho)\sqrt{\gamma_R^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad \cdots\cdots (36.c)$$

따라서 부분대수표준화 변화 으로서 식(35)을 다음과 같이 변형하여 근사법으로 γ_S를 얻을수 있다.

$$\gamma_S = 1 + \frac{\Omega_S^2 \beta_0}{\sqrt{\lambda \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad \cdots\cdots (37)$$

식 (37)로부터 γ_S를 구하여 식(36)에 대입하면 근사적으로 $\phi \gamma_1$를 구할수 있다. 이 때, $\lambda = 1.8$정도가 최소오차를 주는 값이다.

4.3 시방서의 신뢰성검정

도로교시방서의 설계기준인 강도설계법(USD)은 문헌(18)에서 밝힌바와 같이 공칭안전율 n′를 다음과 같이 해석할 수 있다.[4),5),8)]

$$n' = \frac{(\gamma_D' + \rho' \gamma_L')}{(1+\rho')\phi'} \quad \cdots\cdots (38)$$

여기서, $\rho' = S_L'/S_D'$(공칭하중비)

현행시방서에 대해 안전응력설계 인 경우 구조신뢰성을 해석할 때나 또는 시방서의 Calibration 으로부터 신뢰성설계규준을 추정하는 경우 n′로부터 β를 구할 필요가 있다. β는 중앙안전율 n_0의 함수이므로 n′는 n_0로 바꿔야 하는데 이는 공칭하중비 η를 이용하면 된다.

$$\eta_0 = \bar{R} / \bar{S} = \frac{\eta_R R' \eta_R}{\eta_S S'} = \frac{\eta_R}{\eta_S} n' \quad \cdots\cdots (39)$$

여기서, $\eta_R = \eta \bar{R}/R'$

$$\eta_S = (1+\rho)/(\eta_L + \rho)$$

$$\rho = \bar{L}/\bar{D} = \frac{\eta_c L'}{\eta_D D'} = \frac{\eta_L}{\eta_0} \rho'$$

5. 계산 및 고찰

5.1 불확실량의 산정

교량말뚝기초에 대한 안정해석 및 말뚝본체설계의 저항 및 하중효과 불확실량(평균-분산, 변동계수)는 전절3에 제시한 공식을 이용하여 문헌(4), (7), (8)의 일부자료 데이타 통계치에 의해 표-1, 표-2과 같은 결과를 얻었다.

표-1 교량말뚝기초에 대한 저항의 불확실량

	(I) 안정해석				(II) 말뚝본체설계					
	연직지지력		수평지지력		R·C말뚝		P·C말뚝		강관말뚝	
	군말뚝	단일말뚝	지중매립	지상돌출	압축	휨	압축	휨	압축기	휨
$\bar{R}/R'$	1.26	1.54	1.50	1.53	1.02	1.12	1.12	1.07	1.07	1.27
Ω_R	0.27	0.21	0.37	0.43	0.17	0.18	0.14	0.13	0.13	0.16

표-2. 교량말뚝기초에 대한 하중효과의 불확실량

	(I) 안정해석			(II) 말뚝본체설계		
	연직하중	수평하중	전도모멘트	연직하중	수평하중	전도모멘트
$\bar{S}_i/\bar{S}_i$	0.95	1.15	1.07	1.00	1.02	
Ω_{Si}	0.15	0.20	0.24	0.12	0.37	

5.2 도로교시방서의 신뢰성검정

교량말뚝기초의 안정해석 및 말뚝본체설계를 전절·4의 부분대수변환근사법으로 β값을 나타낸 것이 표-3.4이다.

표-3에서 보여주고 있는바와 같이 안정해석에 있어서 단일말뚝의 연직지지력의 β값에 대단히 높게되고, 수평지지력에 대한 β는 낮으며 특히 수평지지력(지상돌출)에서는 1.8~2.1로 대단히 낮음을 알수 있다.

그런데 교량말뚝기초의 파괴시 피해정도는 수평지지력, 연직지지력의 순서가 되므로 우리의 기술수준 및 현실을 고려하면 신뢰성지수 β값이 상당히 큰 값을 나타냄으로써 안전한 설계가 될것이고 비경제적임을 알 수 있는바 표-3에서 보는 바와 같이 목표신뢰성지수 β_0값이 교량말뚝기초의 연직지지력에서는 $\beta_0 = 3.5$(군말뚝), $\beta_0 = 4.5$(단일말뚝) 수평지지력에서는 $\beta_0 = 3.0$으로 택하는 것이 바람직하다고 사료된다.

한편 (표-3)에서와 같이 말뚝본체설계시의 β값을 R·C, P·C, 강관말뚝에 대한 압축 및 휨으로 계산하였고 이 때 현행 WSD의 공칭안전율 n′=3.0(상시) n′=2.0(지진시)로 각각 계산하였다. 따라서 말뚝본체설계의 목표신뢰성지수 β_0는 하중비 $\rho = 0.5 \sim 1.0$에서 압축과 휨의 $\beta = 4.9$(상시) $\beta_0 = 3.0$(지진시) 정도가 우리의 설계 및 시공수준을 고려할때 적절하다고 판단된다.

표-3 교량말뚝기초의 신뢰성지수β값의 비교

	연직지지력		수평지지력	
	군말뚝	단일말뚝	지중매립	지상돌출
β	4,88~4,83	7,15~6,99	2,88~2,69	2,53~2,37

2) 말뚝본체설계

	R·C말뚝		P·C말뚝		강관말뚝	
	상시	지진시	상시	지진시	상시	지진시
압축	6.34-6.13	3.52-2.97	8.23-7.84	4.62-3.82	8.47-8.08	4.57-2.73
휨	6.51-6.31	3.83-3.28	8.47-8.08	4.57-3.73	8.03-7.76	4.87-4.15

표－4 교량말뚝기초의 안정해서 및 말뚝본체설계에 대한 설계기준의 비교

구분	연직지지력(I)		수평지지력(II)		상 시 (I)						지 진 시 (III)					
$n'\phi'$	군말뚝	단일말뚝	지중매립	지상돌출	압 축			휨			압 축			휨		
					R·C	P·C	강관	R·C	P·C	강관	R·C	P·C	강관	R·C	P·C	강관
n'	2.06	1.72	2.80	2.86	2.04	1.66	1.68	1.93	1.67	1.58	2.02	1.72	1.6	1.88	1.76	1.58
ϕ'	0.53	0.64	0.52	0.44	0.55	0.67	0.67	0.58	0.67	0.71	0.72	0.86	0.92	0.77	0.82	0.91

I : 1.05D+1.15L　　II : 1.05D+2.30L　　III : 1.05D+1.80L

5.3 설계규준의 비교

표－1·2의 저항 및 하중효과의 불확실량을 사용하여 말뚝머리와 후팅연결이 강결(사항무)인 경우에 대해 교량 말뚝기초의 안정해석 및 말뚝본체설계의 공칭안전율(n')와 공칭하중 저항계수 (ϕ', γ_{si}')를 산정하여 나타낸 것이 표－4이다.

표－4은 Ellingwood나 문헌(5)의 LRFD에서 사용한 오차최소화방법에 의하지 않고 Level－1형 설계규준으로 ϕ_{is} γ_{Si}를 구하였는데, 이때 교량기초에 대한 안정해석의 공칭하중계수 γ_{si}'를 연직지지력에 대해 $\gamma_{VD}=1.05$, $\gamma_{VL}=1.15$, 수평지지력에 대해 $\gamma_{HD}=1.05$, $\gamma_{VL}=1.30$ 으로 말뚝본체설계에 대해 $\gamma_{MD}=1.05$, $\gamma_{ML}=1.80$으로 통일하여 공칭저항계수 ϕ'_i를 재조정하고, 조정하여 나타낸 것이다.

이러한 결과를 고려할때 현행 도로교시방서의 공칭안전율이 높게 책정되어 공칭하중계수가 상당히 높게 나타남을 알 수 있으며 신뢰성설계규준의 합리성을 확인할 수 있다.

따라서 도로교시방서에서는 말뚝기초설계에 WSD법만을 규정하고 있으므로 신뢰성이론에 의한 설계규준의 도입에 앞서 현행 교량말뚝기초설계의 개정방향을 제시하기 위한 기초연구로서 LRFD을 사용한 강도설계규준의 도입이 시급하다.

6. 결　론

본 연구에서는 교량말뚝기초의 안정해석 및 말뚝본체설계에 대한 설계규준을 신뢰성이론인 LRFD설계규준에 의하여 제시하므로서 현행도로교시방서의 안전율을 검토하여 우리의 현실을 고려할 불확실량수준 및 목표신뢰성지수에 의해 설계규준의 저항 및 하중효과를 결정하고 또 공칭안전율을 제시하여 다름과 같은 결론을 얻었다.

1) 교량말뚝기초의 설계규준에 사용할 목표신뢰성지수는 정확한 통계자료 및 신뢰성 해석방법이 연구되기전에는 본 연구에서 산정한 값을 사용함이 바람직하다 본다.

안정해석, 연직지지력 : $\beta_0=3.5$(군말뚝), $\beta_0=4.5$(단일말뚝) 수평지지력 : $\beta_0=3.0$

말뚝본체설계, 압축, 휨 $\beta_0=4.0$(상시), $\beta_0=3.0$(지진시)

2) 강도설계법의 도입시에는 본 연구에서 제안하는 LRFD계규준과 같이 강도설계방정식 및 공칭안전율은 표－4의 값을 취하는 것이 바람직하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1) Koerner, R.M., "Construction and geotechincal Method in Foundation Engineering", "MeGraw-Hill Book. Co. 1984, pp. 1－57

2) Lind, N. C and Hasofer, A. M., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format.", Journal of the Engineering Mechanics Div, ASCE, Vol. 100, No. EM1, Fed, 1974, pp.11－121.

3) Cornell, C. A., "A First-order Reliability Theory for Structural Design", in Structural Reliabilty and Codified Design, S. M. Study No. 3, Solid Mechaniscs Dial., Univ, of waterloo, ontaril, 1971, pp. 87－111.

4) 조효남, "철근콘크리트 도로교 상부구조의 신뢰성설계규준에 관한 연구", 대한토목학회논문지, 제2권, 제3권, 1982, 9월, pp.87－99.

5) 이증빈, "강도로교의 신뢰성 설계규준에 관한 연구", 대한토목학회 논문지, 제5권 제1호, 1985, 3. pp.43～53.

6) 건설부, "도로교표준시방서" 건설부, 1985. pp. 977－1133.

7) 포항종합제철(주), "광양제철소 기초항 항타 및 재하시험 보고서", 1984. 12.

8) 신형우, "교량기초의 안정해석에 대한 신뢰성해석 및 설계규준에 관한 연구", 조선대학교대학원, 석사학위논문, 1990