

# 鐵筋콘크리트기둥의 信賴性 設計規準에 관한 研究

## A Study on Reliability Based Design Criteria for Reinforced Concrete Columns

趙 孝 男\*  
Cho, Hyo Nam  
閔 庚 周\*\*  
Min, Kyung Ju

### Abstract

This study is directed to propose a set of reliability based design provisions which gives more rational design for R.C. columns than the current WSD or USD standard design codes.

Cornell's MFOSM theory is used for the derivation of the algorithm for the evaluation of uncertainties associated with resistances, whereas the magnitude of the uncertainties associated with load effects are chosen primarily by considering our level of practice. And thus the uncertainties so obtained are applied for the reliability analysis and the derivation of reliability based design criteria.

A target reliability( $\beta_0=4.0$ ) is selected as an appropriate value by comparing the values used in foreign countries and by analyzing the reliability levels of our current USD and WSD design standards. Then, a set of load and resistance factors corresponding to the target reliability is proposed as a reliability based design provision, and furthermore a set of allowable stresses for reinforcing steel and concrete having same level of reliability with the corresponding LRFD criteria is also prepared for the current WSD design provision.

It may be concluded that the proposed LRFD reliability based design provisions and the corresponding allowable stresses give more rational design than the current code for R.C. columns and may be desirable to introduce into the current WSD and USD provision of R.C. column design.

### 要 旨

現行 콘크리트 標準示方書에서 WSD 또는 USD 로 設計되는 R.C. 기둥의 設計規準에서 보다 合理的인 設計가 될 수 있는 信賴性 設計規準을 提案하는 것이 本 研究의 核心이다.

Cornell 의 MFOSM 理論에 依해 R.C. 기둥 抵抗의 不確實量 算定 알고리즘을 誘導하여 抵抗의 不確實量을 算定했으며, 荷重의 不確實量은 우리의 實情을 考慮한 適切한 값을 選擇하여 信賴性

\*正會員·陸軍士官學校 副教授

\*\*正會員·檀國大學校 研究助教

解析 및 設計規準을 算定했다.

現行 WSD 와 USD 設計法의 信賴性 水準을 分析하고 外國의 경우와 比較 檢討함으로써, 우리 나라에 알맞는 目標信賴性指數  $\beta_0 = 4.0$  을 擇하여 LRFD 設計規準에 依한 抵抗-荷重係數를 提案했다. 또한 信賴性 設計와 같은 信賴性을 갖는 WSD 設計의 鐵筋과 콘크리트의 許容應力을 算定提案했다.

本 研究에서 提案한 信賴性 設計規準 및 許容應力은 一定한 信賴性을 주는 보다 合理的인 設計가 되게 하므로 現行 R.C. 기둥의 設計規準에 信賴性 設計 概念을 導入하는 것이 바람직하다고 본다.

## 1. 序 論

現行 鐵筋콘크리트기둥의 設計는 콘크리트 標準示方書에 規定되어 있는 許容應力設計法(WSD) 또는 極限強度設計法(USD)으로 할 수 있게 되어 있다. 이들은 從來의 ACI 318-63 및 ACI 318-71 示方書에서 根據하였으며 主로 ACI 318-63에 基礎를 둔 우리 나라 WSD와 USD의 安全率은 우리의 設計 및 施工技術에 對한 妥當性을 檢討하지 않고 採擇한 것이다. 이는 보와 道路橋의 既 研究 結果에서 立證된 바 있다<sup>(13)(14)</sup>.

信賴性에 關한 理論, 研究 動向, 分析方法等과 抵抗-荷重係數 算定法은 文獻(13)(14)에 詳述되어 있고, 또한 本 研究에서도 文獻(13)(14)의 理論을 使用하였으므로 重複되는 理論의 論述을 略하고, 本 研究에서 必要한 關係式만 誘導하였다.

기둥에 關한 信賴性研究로서는 R.C. 기둥의 不確實量 算定<sup>(4)</sup>, 鋼構造기둥의 信賴性 解析<sup>(8)</sup>, 알루미늄기둥의 信賴性 解析<sup>(9)</sup> 등이 된 바 있으며, 우리 나라에서도 中心軸荷重을 받는 R.C. 기둥의 信賴性 解析<sup>(15)</sup>에 對한 部分的인 考察이 있었으나 아직도 偏心荷重을 받는 R.C. 기둥에 對한 體系的인 研究는 찾아 볼 수 없다.

本 研究는 Leve II 二次모멘트法에 依한 信賴性 解析理論 中에서 Cormell의 MFOSM(Mean First Oder-Second Moment Method)의 正規變換모델<sup>(3)</sup>과 Lind-Hasoter<sup>(10)</sup>의 不變二次모멘트法인 最小距離法 中에서 Ellingwood<sup>(6)</sup> 등의 R.C. 構造物 信賴性規準의 誘導에 必要한 抵抗變數의 對數變換모델과 Shiraiishi 등이 使用한 全對數變換 近似解法<sup>(12)</sup>을 使用하여 現行 示方書에서 軸

荷重과 휨모멘트를 同時에 받는 R.C. 기둥의 WSD와 USD 設計法의 信賴性을 考察하고, 外國의 경우와 比較 檢討하여, 目標信賴性指數( $\beta_0$ : Target Reliability Index)를 設定하였으며 이에 따른 LRFD 設計規準으로 抵抗係數( $\phi$ )와 荷重係數( $r_c$ )를 提案함을 目的으로 한다.

또한 現在 實際 設計에 있어서는 許容應力設計法이 많이 使用되고 있으므로 信賴性設計와 비슷한 信賴性을 가지는 鐵筋과 콘크리트의 許容應力을 算定하는 데에도 그 目的이 있다.

不確實量 算定에 있어서 抵抗의 不確實量은 Ellingwood<sup>(6)</sup>가 提案한 方法을 利用하였으며, 荷重效果 및 荷重效果의 不確實量은 文獻(13), (14)와 Ellingwood의 NBC 110<sup>(8)</sup>을 利用해서 우리 實情을 考慮한 값을 選擇하여 考察하였다.

## 2. 不確實量 算定

### 2.1 平均 抵抗 및 抵抗의 不確實量

R.C. 기둥의 軸荷重-모멘트 相關圖(Column Interaction Diagram)는 그림(1)과 같이 圖示된다. 여기서 二面 R.C. 띠기둥의 軸荷重-모멘트 關係는 다음 式으로 表現된다<sup>(4)</sup>.

$$P = 0.85 f_c' b (\alpha_1 x) + A_s' (f_s' - 0.85 f_c') - A_s f_s \quad (1. a)$$

$$M = 0.85 f_c' b (\alpha_1 x) (h/2 - \frac{1}{2} \alpha_1 x) + A_s' (f_s' - 0.85 f_c') (h/2 - d') + A_s f_s (d' - h/2) \quad (1. b)$$

$$M = p \cdot e \quad (1. c)$$

이들 式(1)로부터 抵抗을 求하는 方法으로는  $P$ 를 定하고  $M$ 을,  $M$ 을 定하고  $P$ 를 計算하는 方法과 偏心  $e$ 를 定하여  $P$ 와  $M$ 을 求하는 方法

등이 있다<sup>(4)</sup>. 本 研究에서는  $e$ 를 確定量으로 取扱하여 軸荷重  $p$ 와 모멘트  $M$ 을 計算하였다. 이때 抵抗  $R$ 은,

$$R = [P^2 + (M/H)^2]^{1/2} \quad (2)$$

이 되고<sup>(4)</sup>, 抵抗의 不確實量  $\Omega_{Ru}$ 는,

$$\Omega_{Ru} = \sigma_{Ru} / \bar{R}_u \quad (3)$$

이며, 여기서  $\sigma_{Ru}$ 는 抵抗의 標準偏差로서 다음과 같이 求할 수 있다.

$$\sigma_{Ru}^2 \approx \Sigma \left( \frac{\partial R}{\partial R_i} \right)^2 \bar{R}_i^2 \delta_{R_i}^2 \quad (4)$$

式(4)에서 偏心  $e$ 가 均衡偏心  $e_b$ 보다 작을 때에는 기둥의 抵抗은 軸荷重에 依해 支配되므로 式(2)로부터,

$$\sigma_{Ru} = \sigma_{Pu} \quad (5)$$

가 되고,  $e \geq e_b$ 일 때는 기둥의 抵抗은 모멘트에 依해 支配되므로 式(2)로부터

$$\sigma_{Ru} = \sigma_{Mu} \quad (6)$$

가 된다.

平均抵抗  $\bar{R}$ 와 抵抗의 不確實量  $\Omega_R$ 은 다음과 같이 計算한다<sup>(5)</sup>.

$$\bar{R} = \bar{B} \cdot \bar{R}_u \quad (7)$$

$$\Omega_R^2 = \Omega_{Ru}^2 + (\sigma/\bar{B})^2 + A_j^2 \quad (8)$$

여기서,  $\bar{B}$ 는 모델 偏奇平均이고  $\sigma^2 = Var[R/R_u | R_u = m]$ 에서 求할 수 있으며,  $A_j$ 는 技術者의 經驗 및 判斷으로부터 決定되는 값으로서 R.C. 기둥의 特殊性때문에 適用된다.

## 2.2 抵抗 및 抵抗의 不確實量 計算式

抵抗 및 抵抗의 不確實量 算定은 크게 콘크리트의 壓縮力에 依해 支配되는 경우와 모멘트에 依해 支配되는 경우로 區分하여 式을 誘導하였다.

### 2.2.1 壓縮支配기둥

式(1)에서  $f$ 와  $x$ 가 未知數이나, 微小偏심이 일어나는 경우  $f$ 가 壓縮應力을 받게 되어 그림 2에서 보인 바와 같이  $f$ 와  $y$ 가 未知數가 된다. 이때 平均抵抗  $\bar{R}_u$ 는 그림 2와 같이 應力圖를 作成하여 平衡方程式을 풀면  $\bar{R}_u$ 를 求할 수 있고,  $\bar{R}_u$ 의 式을 式(4)에 代入하여  $\sigma_{Ru}$ 를 求할 수 있다. 이때  $A_s = A_s'$ 로 假定한다.

i) 荷重의 偏심이 작아 壓縮鐵筋의 變形도가  $\epsilon_s \geq f_y/E_s$ 인 경우

이때 平均抵抗  $R_u$ 는 그림 2로부터,

$$\bar{R}_u = 2(\bar{f}_y - 0.85\bar{f}_c')\bar{A}_s + 0.85\bar{f}_c' \bar{b}\bar{h}\bar{y}/\bar{\epsilon}_c + 0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' \bar{b}\bar{h} (1 - \bar{y}/\bar{\epsilon}_c) \quad (9)$$

가 되며, 여기서  $\bar{y}$ 는 그림 2에서 左側鉛端 콘크리트의 變形率이다.

이 경우 抵抗의 不確實量  $\Omega_{Ru}$ 는 式(9)를 式(3), (4)에 代入하여 求할 수 있으며, 本 研究에서는  $\bar{b}$ ,  $\bar{h}$  및  $\bar{A}_s$ 는 그 變動量이 적으므로 確定量으로 取扱하여  $\Omega_{Ru}$ 를 算定하였다.

$$\sigma_{Ru}^2 = [0.85\bar{f}_c' \{bh/\bar{\epsilon}_c + \bar{\alpha}_1 bh(1 - \bar{y}/\bar{\epsilon}_c) - 2A_s\}]^2 \delta_{f_c'}^2 + [0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' bh(1 - \bar{\alpha}_1)]^2 \delta_{\alpha_1}^2 + [2\bar{f}_y \bar{A}_s]^2 \delta_{y^2}^2 + [\bar{y} \cdot 0.85\bar{f}_c' bh/\bar{\epsilon}_c (1 - \bar{\alpha}_1)]^2 \delta_y^2 + [0.85\bar{f}_c' b\bar{y}(1 - \bar{\alpha}_1)/\bar{\epsilon}_c]^2 \delta_{\epsilon_c}^2 \quad (10)$$

여기서  $y$ 는 다음과 같은 式으로부터 求한다.

$$\bar{y} = \frac{\bar{\epsilon}_c \{0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' bh^2(1 - \bar{\alpha}_1)/2 - 0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' bhe - 2A_s(\bar{f}_y - 0.85\bar{f}_c')e\}}{0.85\bar{f}_c' bh \{e - \bar{\alpha}_1 e + \bar{\alpha}_1 h(1 - \bar{\alpha})/2\}} \quad (11)$$

이때  $\delta_y$ 는 式(11)에서 分子를  $F$ , 分母를  $G$ 라 놓으면 다음 式과 같다.

$$\sigma_y = \frac{1}{G^4} [ \{0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' bh\bar{\epsilon}_c(h/2 - \bar{\alpha}_1 h/2 - e) - F\}^2 \delta_{f_c'}^2 + F^2 \delta_{\epsilon_c}^2 + \{2(\bar{f}_y - 0.85\bar{f}_c')A_s e\}^2 \delta_{f_y}^2 + \{0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' bh(h/2 - \bar{\alpha}_1 h/2 - e)(\bar{\epsilon}_c G + F)\}^2 \delta_{\epsilon_c}^2 ] \quad (12)$$

ii)  $0 \leq \epsilon_s < f_y/E_s$ 인 경우

$$\bar{R}_u = \bar{E}_s A_s \bar{y} + (\bar{f}_y - 0.85\bar{f}_c') A_s + 0.85\bar{f}_c' b\bar{h}\bar{y}/\bar{\epsilon}_c + 0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' b\bar{h}\bar{y}(1 - \bar{y}/\bar{\epsilon}_c) \quad (13)$$

$$\sigma_{Ru}^2 = [\bar{E}_s A_s \bar{y}]^2 (\delta_{E_s}^2 + \delta_y^2) + \{[\bar{E}_s A_s + 0.85\bar{f}_c' b\bar{h}(1 - \bar{\alpha}_1)/\bar{\epsilon}_c]^2 + [A_s^2 (\bar{E}_s \bar{y}^2 + \bar{f}_y^2)]\}^2 \delta_{y^2}^2 + [0.85\bar{f}_c' \bar{\alpha}_1 bh(1 - \bar{y}/\bar{\epsilon}_c)]^2 \delta_{\alpha_1}^2 + 0.85\bar{f}_c' b\bar{h}[\bar{\alpha}_1 + \bar{y}/\bar{\epsilon}_c(1 - \bar{\alpha}_1)]^2 \delta_{f_c'}^2 \quad (14)$$

여기서  $\bar{y}$ 와  $\delta_y$ 는 i)의 경우와 같은 方法으로 그림 2에서  $s_1$ 을  $\bar{y}\bar{E}_s A_s$ 로 놓고 求할 수 있다.

iii) 塑性中心  $x$ 가  $x_b < x \leq h$ 인 경우

$$\bar{R}_u = \bar{\epsilon}_c (1 - \bar{d}/\bar{x}) \bar{E}_s A_s + A_s' (f_y - 0.85f_c') + 0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' b\bar{x} \quad (15)$$

$$\sigma_{Ru} = [\bar{\epsilon}_c (1 - \bar{d}/\bar{x}) \bar{E}_s A_s]^2 (\delta_{\epsilon_c}^2 + \delta_{E_s}^2) + [A_s' (\bar{f}_y - 0.85\bar{f}_c')]^2 \delta_{f_y}^2 + [0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' b\bar{x}]^2 \delta_{\alpha_1}^2 + [\bar{\epsilon}_c \bar{E}_s \bar{d} A_s / \bar{x}]^2 \delta_d^2 + [0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' b\bar{x} - 0.85\bar{f}_c' A_s']^2 \delta_{f_c'}^2 + [0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}_c' b\bar{x} + \bar{\epsilon}_c \bar{d} A_s \bar{E}_s / \bar{x}]^2 \delta_x^2 \quad (16)$$

여기서, 塑性中心  $\bar{x}$ 는 平衡方程式에 依해 式(1)

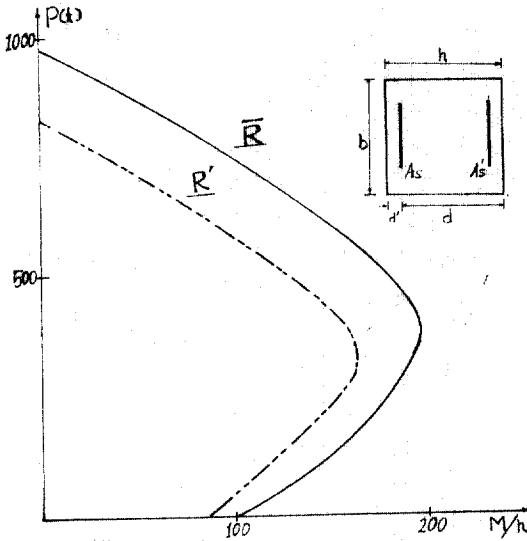


그림 1. P-M 相關圖

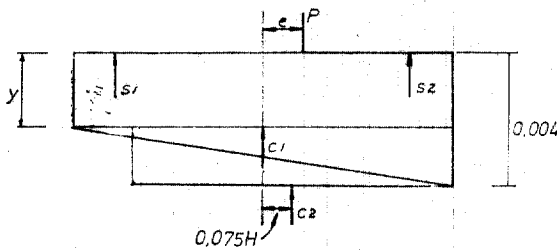


그림 2. 應力圖

로부터 다음과 같이誘導된다.

$$\Phi = 0.42\bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b \bar{x}^3 + 0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b (e - h/2) \bar{x}^2 + \{\bar{\epsilon}_c \bar{E}_s A_s (\bar{d}'' + e) + A_s \bar{f}'_c (e - \bar{d}'')\} \bar{x} - \bar{\epsilon}_c \bar{E}_s A_s \bar{d} (e + \bar{d}') = 0 \quad (17)$$

式 (17)에서 보여주는 바와 같이  $\bar{x}$ 는 三次式이며 陰函數이다. 따라서  $\delta_x$ 는 式(4)로부터 다음과 같이誘導된다.

$$\sigma_x^2 = \Sigma \left( \frac{\partial \Phi}{\partial R_i} \right)^2 R_i^2 \delta_i^2 = \Sigma \left( \frac{\partial \Phi / \partial R_i}{\partial \Phi / \partial \bar{x}} \right)^2 R_i^2 \delta_{R_i}^2 \quad (18)$$

$$\therefore \sigma_x^2 = \left[ \frac{1}{\partial \Phi / \partial \bar{x}} \right]^2 \cdot \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_1} \right)^2 \bar{\alpha}_1^2 \delta_{\alpha_1}^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial f'_c} \right)^2 \bar{f}'_c{}^2 \delta_{f'_c}^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial f_y} \right)^2 \bar{f}_y^2 \delta_{f_y}^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial E_s} \right)^2 \bar{E}_s^2 \delta_{E_s}^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial d} \right)^2 \bar{d}^2 \delta_d^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial d''} \right)^2 \bar{d}''^2 \delta_{d''}^2 \right] \quad (19. a)$$

$$\therefore \delta_x = \sigma_x / \bar{x} \quad (19. b)$$

여기서,

$$\partial \Phi / \partial \alpha_1 = 1.275 \bar{\alpha}_1^2 \bar{f}'_c b \bar{x}^2 + 1.7 \bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b (e - h/2) \bar{x} + \bar{\epsilon}_c \bar{E}_s A_s (e + \bar{d}'') + A_s \bar{f}'_c (\bar{d}'' - e)$$

$$\partial \Phi / \partial d' = -\bar{\epsilon}_c \bar{E}_s A_s (e + \bar{d}'')$$

$$\partial \Phi / \partial \alpha_1 = 0.85 \bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b \bar{x}^2 + 0.85 \bar{f}'_c b (e - h/2) \bar{x}^2$$

$$\partial \Phi / \partial f'_c = 0.425 \bar{\alpha}_1^2 b \bar{x}^3 + 0.85 \bar{\alpha}_1 b (e - h/2) \bar{x}^2$$

$$\partial \Phi / \partial f_y = A_s (e + \bar{d}'') \bar{x} + \bar{\epsilon}_c \bar{E}_s A_s (e + \bar{d}'') (\bar{x} - \bar{d})$$

$$\partial \Phi / \partial E_s = \bar{\epsilon}_c A_s (e - \bar{d}'') (\bar{x} - \bar{d}')$$

$$\partial \Phi / \partial d'' = \bar{\epsilon}_c \bar{E}_s A_s \bar{x} - A_s \bar{f}'_c \bar{x} - \bar{\epsilon}_c \bar{E}_s A_s \bar{d}$$

### 2.2.2 모멘트支配기등

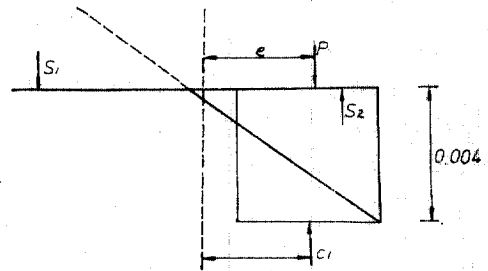


그림 3. 應力圖

그림 3에서와 같이 모멘트支配기등에서 抵抗  $\bar{R}_w$ 는 壓縮支配기등에서의 同一한 方法으로 求할 수 있다. 모멘트支配기등에서의 破壞는 引張 鐵筋이 破壞될 때 發生하므로 이때의 抵抗  $\bar{R}_w$ 는 그림 3에서  $s_1$ 과  $s_1$ 으로부터  $s_2$ 와  $C_1$ 의 合力의 中心까지의 距離를 곱하여 求한다.

iv)  $x < x_b$ 이고 壓縮鐵筋應力이  $f_y$ 일 때

그림 3에서 引張鐵筋이 받는 모멘트支配  $\bar{R}_w$ 는  $s_1$ 과 偶力 臂의 길이  $\bar{a}$ 의 곱으로 다음과 같이 求할 수 있다.

$$\bar{R}_w = \bar{f}_y A_s \bar{a} \quad (20)$$

$$\sigma_{Rw}^2 = [\bar{f}_y A_s \bar{a}]^2 (\delta_{f_y}^2 + \delta_a^2) \quad (21)$$

여기서,

$$\bar{a} = \frac{0.85 \bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b \bar{x} [\bar{d}'' + (\bar{d} - \bar{\alpha}_1 \bar{x}) / 2] + 2(\bar{f}_y - 0.85 \bar{f}'_c) A_s \bar{d}''}{0.85 \bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b \bar{x} + (\bar{f}_y - 0.85 \bar{f}'_c) A_s} \quad (22)$$

로 되며  $\delta_a$ 는 式(22)에서 分子를  $F$ , 分母를  $G$ 라 놓으면 다음과 같다.

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{G^2} [ \{ [0.85 \bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c \bar{x} (\bar{d}'' + (h - \bar{\alpha}_1 \bar{x}) / 2) - 1.7 \bar{f}'_c A_s \bar{d}''] \cdot G - F [0.85 \bar{f}'_c (\bar{\alpha}_1 \bar{x} - A_s)] \}^2 \delta_{f_y}^2 + \{ [0.85 \bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b \bar{d}'' \bar{x} + 2(\bar{f}_y - 0.85 \bar{f}'_c) A_s \bar{d}''] G \}^2 \delta_{d''}^2 ]$$

$$+ \{0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b \bar{x} d \cdot G/2\}^2 \bar{\delta}_x^2$$

$$+ \{0.85\bar{\alpha}_1 \bar{f}'_c b \bar{x} [\bar{d}'' + (h - 2\bar{\alpha}_1 \bar{x})/2] \cdot G$$

$$- F\}^2 (\bar{\delta}_x^2 + \bar{\delta}_s^2) \quad (23. a)$$

$$\therefore \bar{\delta}_x = \sigma_a / \bar{a} \quad (23. b)$$

여기서, 塑性中心  $\bar{x}$  는 平衡方程式으로부터 求할 수 있고  $\bar{\delta}_x$  는 式(18)을 使用하여 計算할 수 있다.

v) 壓縮鐵筋應力이  $f'_y$  보다 작을 경우

$$\bar{R}_s = \bar{f}'_y A_s \bar{a} \quad (24)$$

$$\sigma_{R_u} = [\bar{f}'_y A_s \bar{a}]^2 (\bar{\delta}_y^2 + \bar{\delta}_s^2) \quad (25)$$

여기서,  $\bar{a}$ ,  $\bar{\delta}_s$ ,  $\bar{x}$ ,  $\bar{\delta}_x$  는 iv)의 경우와 同一한 方法으로 壓縮鐵筋應力을 考慮하여 求하면 된다.

### 3. 信賴性 解析 및 LFRD 設計規準

緒論에서 밝힌 바와 같이 本研究에 適用한 信賴性 理論 및 解析 그리고 LFRD (Load & Resistance Factor Design) 設計規準은, 既 研究發表 論文인 文獻(13), (14), (17)에서 誘導한 알고리즘을 使用하였으므로 그 敘述을 略하고, 本研究에 必要한 WSD 및 USD 의 信賴性 解析法과 信賴性 設計에 準하는 許容應力設計法에서의 鐵筋과 콘크리트의 許容應力 算定式만 誘導했다.

#### 3.1 WSD와 USD의 信賴性 檢定

콘크리트 標準示方書에서의 設計法인 WSD와 USD 의 信賴性 解析은 公稱安全率  $n'$  를 算定하여 解析할 수 있다<sup>(14)</sup>. 이때  $n'$  는 公稱抵抗  $R'$  와 公稱荷重效果  $S'$  와의 比로 定義된다.

##### 3.1.1 WSD에서의 公稱安全率

R.C. 기둥의 許容應力設計法에서 鐵筋과 콘크리트 強度에 對한 公稱安全率은 一致하지 않는다. 따라서,  $n'$  는 다음의 3가지 경우로 區分하여 算定했다. 이때  $n'$  는 다음과 같다.

$$n' = R'/S' \quad (26)$$

i) 軸荷重을 받는 경우

式 (26)에서  $R'$  는 極限軸荷重,  $S'$  는 許容軸荷重이므로  $n'$  는,

$$n' = \frac{0.8[0.85\sigma_{f_c'} A_g + A_{st} + (\sigma_y - 0.85\sigma_{f_c'})]}{0.85[0.25\sigma_{f_c'} A_g + 0.4\sigma_y A_{st}]}$$

$$= \frac{0.8[1 + (m-1)\rho]}{0.25 + 0.4\rho m} \quad (27)$$

로 되며, 여기서

$$\rho = A_{st}/bd \text{ (鐵筋比)}$$

$$m = \sigma_y / 0.85\sigma_{f_c'} \text{ (應力比)}$$

軸荷重을 받는 경우 式(27)에서 보이는 바와 같이  $n'$  는  $\rho$  와  $m$  의 函數임을 알 수 있다.

ii)  $e_{min} \leq e < e_b$  인 경우

示方書 規準(9.13)으로부터 極限荷重 項에서  $n'$  는 式 (28. a)로 되며 極限모멘트 項의  $n'$  는 式 (28. b)로 할 수 있다.

$$n' = \sigma_u / \sigma_{aa} \quad (28. a)$$

$$n' = \sigma_{ch} / \sigma_{ca} \quad (28. b)$$

iii) 純粹모멘트만 받을 경우

純粹모멘트만 받을 경우 示方書 規準(9.17)으로부터  $n'$  는 다음과 같이 求한다.

$$n' = \sigma_y / \sigma_{sa} \quad (29)$$

#### 3.1.2 USD에서의 公稱安全率

極限強度設計規準

$$\phi'R' = r_D'S'_D + r_L'S'_L \quad (30)$$

에서  $n'$  는 式 (26)을 考慮하면,

$$n' = \frac{r_D' + r_L'\rho'}{(1+\rho')} \phi' \quad (31)$$

로 誘導된다. 式 (31)에서 보인 바와 같이  $n'$  는 公稱荷重比  $\rho'$  의 函數임을 알 수 있고, 여기서  $\rho' = S'_L/S'_D$  이다.

#### 3.2 平均-公稱比

現行 示方書 設計法으로 信賴性을 檢定하는 경우 公稱值를 平均値로 換算할 必要가 있다.

이때 中央安全率  $n_0$  는,

$$n_0 = \bar{R}/\bar{S} = \frac{\eta_R R'}{\eta_S S'} = \frac{\eta_R}{\eta_S} n' \quad (32)$$

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

$$\eta_R = \bar{R}/R'$$

$$\eta_L = \bar{L}/L' \quad \eta_D = \bar{D}/D'$$

$$\rho = \bar{L}/\bar{D} = \frac{\eta_L L'}{\eta_D D'} = \frac{\eta_L}{\eta_D} \rho' \quad (33)$$

## 4. 計算 및 考察

### 4.1 不確實量

$\Omega_{Ru}$  算定에 必要한 資料는 文獻(4), (6), (16), (17)을 參考하여 表 1을 使用했다.

抵抗의 變動量  $\Omega_{Ru}$  를 電算處理하여 圖示한 것이 그림 4, 5이다. 그림 4, 5에서 보인 바와 같이 壓縮支配기둥에서  $\Omega_{Ru}$  는 主로 鐵筋比와  $\delta_{f_c'}$  에 關係되고, 모멘트支配기둥에서  $\Omega_{Ru}$  는 主로  $\delta_{f_y}$  와  $\delta_d$  에 關係되는 값임을 알 수 있다. 特

表 1.

	$\bar{b}$	$\bar{h}$	$\bar{A}_{st}$	$\bar{d}$	$\bar{d}'$	$\bar{f}_y$	$\bar{f}_c$	$\epsilon_p$	$\alpha_1$	$\bar{E}_c$
$\bar{R}$ :	60cm	60cm	72cm <sup>2</sup>	54cm	6cm	3350kg/cm <sup>2</sup>	247kg/cm <sup>2</sup>	0.004	0.85	
$\delta_{Ri}$ :	0.04	0.04	0.03	0.07	0.07	0.09	0.15	0.16	0.13	0.05

히 均衡偏心 部近에서 낮은 값을 가지며  $e > e_s$  일 때에는 콘크리트의 變動量과 無關係를 알 수 있다.

되는  $\Omega_{SD}=0.1$ ,  $\Omega_{SL}=0.3$ 을 取하였다.

4.2 信賴性 檢定

4.2.1 平均-公稱比

平均-公稱 抵抗比  $\eta_R$ 은 表 1로써  $\bar{R}$ 을 計算하고, 表 1에서  $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ ,  $f_y=2800\text{kg/cm}^2$ 를  $\bar{f}_c$ 와  $\bar{f}_y$ 에 代入하여  $R'$ 를 計算하여  $\eta_R$ 을 偏心에 따라 計算한 結果 1.19정도의 값이었다. 이는 理論值이기 때문에 現場 콘크리트 養生의 良好度에 따라 상당히 減少할 것이다. 實際 研究에 使用한 값들은 0.95~1.14<sup>(6),(7),(15)</sup>를 取했다. 本 研究에서는 이들 研究의 平均値인 1.07을 取했다.

平均-公稱 死荷重比와 活荷重比는 文獻(13), (17)을 參考하여 各各 1.0과 1.1를 使用했다. 지금까지 論述한 統計値를 整理한 것이 表 2이다.

表 2 抵抗 및 荷重에 關한 統計値

抵 抗	死 荷 重	活 荷 重			
$\bar{R}/R'$	$\Omega_R$	$D/D'$	$\Omega_{SD}$	$L/L'$	$\Omega_{SL}$
1.07	0.17	1.0	0.1	1.1	0.3

4.2.2 示方書의 信賴性 檢定

WSD와 USD 設計法에 關한 信賴性 解析은 式

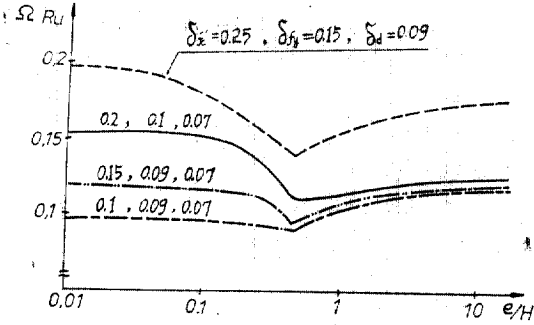


그림 4.  $\delta_{Ri}$ 에 따른  $\Omega_{Ru}$  값

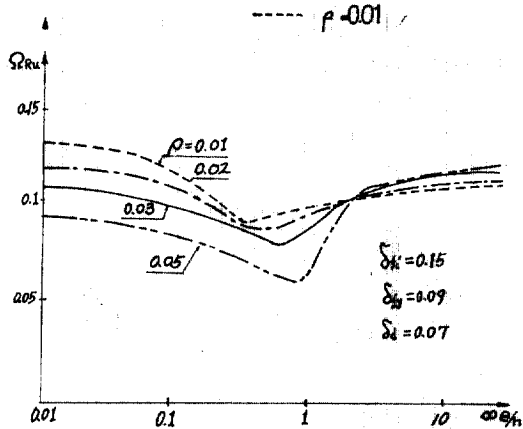


그림 5. 鐵筋比에 따른  $\Omega_{Ru}$  값

여기서  $\Omega_R$ 은 式 (8)에  $\Omega_{Ru}$ ,  $\sigma/\bar{B}$ ,  $\Delta_i$  값을 代入하여 求할 수 있다. 이때  $\Omega_{Ru}$ 는 平均的인 變動量에 의해 얻어진 0.12를 使用하고  $\sigma/\bar{B}$ 와  $\Delta_i$ 는 Ellingwood<sup>(4)</sup>와 같이 各各 0.061, 0.1를 使用하여  $\Omega_R=0.17$ 을 얻었다.

荷重效果의 不確實量은 文獻(6), (14), (17)을 參考하여 우리 나라의 實情에 適當하다고 判斷

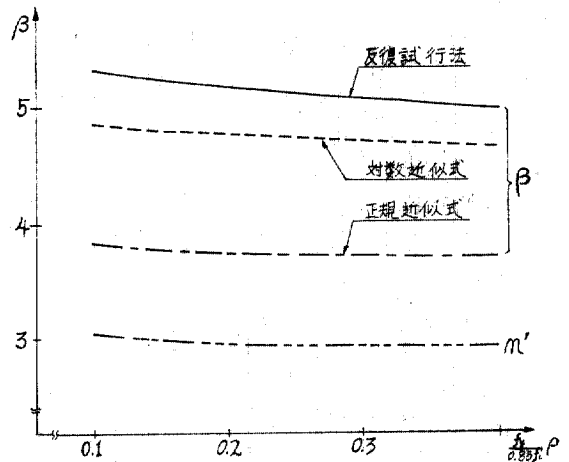


그림 6. WSD 軸荷重에서의 β 값

(27~33)으로부터  $n_0$ 를 求하고, 表 2를 使用하여 信賴性指數  $\beta$ 를 計算할 수 있다.

그림 6은 WSD 設計에서 軸荷重을 받는 경우의  $\beta$  值를  $f_y/0.85f'_c \cdot \rho$ 에 따라 計算한 것을 圖示한 것이며, 그림 7은 USD 設計에서 荷重比  $\rho$ 에 따라 計算한  $\beta$  值를 圖示한 것이다. WSD에서  $e_{min} \leq e < e_0$  일 경우와 純粹모멘트만 받는 경우는 모두  $\beta=4.34$ 였다.

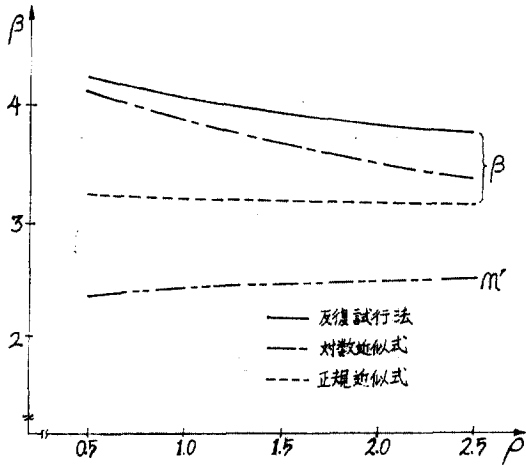


그림 7. USD의  $\beta$  값

### 4.3 LFRD 設計規準

#### 4.3.1 目標信賴性指數

前節에서 WSD와 USD 設計의 信賴性을 解析한 結果  $\beta$ 는 모두 4.1 以上이었다. 특히 WSD에서 軸荷重을 받는 경우 그림 6에서 보여주는 바와 같이  $\beta$ 가 5보다 큰 값으로서 非經濟적이고 合理性이 缺如되어 있음을 알 수 있었다.

外國의 경우 R.C. 띠기등의 目標信賴性指數  $\beta_0=3.5$ (Ellingwood)<sup>(6)</sup> 또는 3.4(Galambo)<sup>(7)</sup>로 取하고 있는데 比하여 우리 示方書에서 R.C. 띠기등의  $\beta$  值는 이에 比하여 상당히 높은 값을 알 수 있었다.

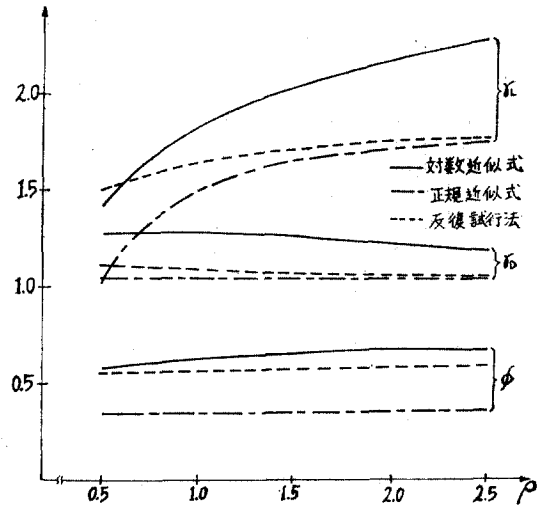


그림 8.  $\beta_0=4.0$  일 때  $\phi, \gamma_i$  값

本 研究에서는  $\beta_0$ 를 美國의 경우보다는 높고, 우리 示方書 USD와 近似한 下位值인  $\beta_0=4.0$ 로 取하는 것이 適當하다고 判斷된다.

#### 4.3.2 荷重—抵抗係數의 算定

目標信賴性指數  $\beta_0=4.0$ 과 表 2의 統計值를 使用하여 荷重係數  $\gamma_i$ 와 抵抗係數  $\phi$ 를 荷重比  $\rho$ 에 따라 計算한 結果를 圖示한 것이 그림 8이다.

그림 8에서 보여주는 바와 같이 對數近似式<sup>(16)</sup>에서는  $\phi, \gamma_i$ 가 다른 解法에 比하여 높은 값을 가지지만  $\rho$ 가 작을 때는  $\gamma_D$ 가 相對的으로 크기 때문에 安全한 設計가 되는 特徵이 있다.

本 研究에서는 보다 正確한 解析法이며, 對數近似式과 正規近似式과의 사이값을 가지는 反復試行法으로 算定한  $\phi, \gamma_i$  값을 取했다.

表 3은  $\beta_0=4.0$ 일 때의  $\phi, \gamma_i$  值로, 反復法에서  $\rho=1.0$ 일 때  $\phi=0.57, \gamma_D=1.07, \gamma_L=1.64$ 이다. 이들 값을 公稱值로 換算하면  $\phi'=\eta_R \cdot \phi=$

表 3.  $\beta_0=4.0$  일 때  $\phi, \gamma_i$  值

$\rho$	$n_0$		$\phi$		$\gamma_D$		$\gamma_L$	
	근사식	반복식	근사식	반복식	근사식	반복식	근사식	반복식
0.50	3.2848	2.2352	0.3352	0.5540	1.0467	1.1100	1.2101	1.4951
1.00	3.3911	2.3788	0.3442	0.5706	1.0335	1.0715	1.3011	1.6433
1.50	3.4762	2.4853	0.3509	0.5806	1.0258	1.0521	1.3489	1.7037
2.00	3.5404	2.5623	0.3556	0.5870	1.0210	1.0409	1.3779	1.7354
2.50	3.5895	2.6195	0.3590	0.5912	1.0177	1.0335	1.3972	1.7549

$1.07 \times 0.57 = 0.61$ ,  $\gamma_D' = \gamma_L = 1.07$ ,  $\gamma_L' = \gamma_L \gamma_L = 1.1 \times 1.64 = 1.80$  이 된다. 그러나 이렇게 해서 얻어진  $\phi'$ ,  $\gamma_L'$  値는 보나 슬래브 등의 解析에 따라 다른 값을 갖게 되어 設計에 있어 複雜하게 될 것이므로 文獻 (17)에서 밝힌 荷重係數에 R.C. 기둥의 荷重係數를 固定시키고 같은 信賴性을 갖는  $\phi'$ ,  $\gamma_L'$  를 計算한 結果  $\phi' = 0.61$ ,  $\gamma_D' = 1.1$ ,  $\gamma_L' = 1.8$  을 얻었다. 이 數値를 現行 USD의 荷重-抵抗係數와 比較해보면,  $\gamma_L'$  는 같고  $\phi'$  와  $\gamma_D'$  에서 各各 0.09와 0.4가 낮음을 알 수 있다.

#### 4.4 許容應力算定

$\beta_0 = 4.0$ ,  $\rho = 1.0$  에 對應하는  $n'$  는 式 (31)로부터  $n' = 2.33$  이 된다.

##### 4.4.1 軸荷重 設計 時의 許容應力

軸荷重을 받을 때 鐵筋과 콘크리트의 許容應力을 鐵筋比에 따라 計算한 값이 表 4이다. 이를 圖示한 것이 圖 9이다.

表 4.

$\sigma_{sa}/\sigma_y$	$\sigma_{ca}/\sigma_{ck}$				
	$\rho = 0.01$	0.02	0.03	0.04	0.05
0.34	0.2902	0.2872	0.2843	0.2814	0.2784

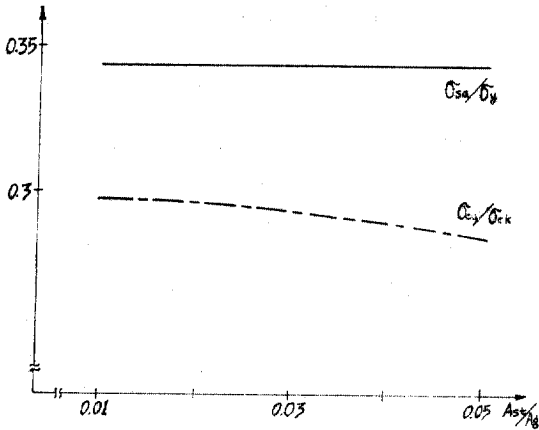


圖 9.

따라서 現行示方書規準(9.6)은 通常의 鐵筋比 0.02에서

$$P_a = 0.28\sigma_{ck}A_g + 0.34\sigma_yA_{st} \quad (34)$$

로 되며, 여기서 鐵筋比가 增加함에 따라  $\sigma_{ca}/\sigma_{ck}$ 가 減少하는데 이는  $A_{st}$ 로 인한 콘크리트 純斷面積의 減少때문이다.

##### 4.4.2 $e_{min} < e \leq e_b$ 일 때의 許容應力

軸荷重과 같은 方法으로 現行示方書 規準(9.13)은,

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aa}} + \frac{\sigma_{bx}}{0.43\sigma_{ck}} + \frac{\sigma_{by}}{0.43\sigma_{ck}} \leq 1 \quad (35)$$

로 調整되며 여기서  $\sigma_{aa}$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{aa} = 0.36(1 + \rho_a \cdot m)\sigma_{ck} \quad (35.a)$$

##### 4.4.3 모멘트만 받을 때의 許容應力

모멘트만 받을 때의 現行示方書 規準(9.17)은 다음과 같이 調整된다.

$$M_0 = 0.43\sigma_y(d-d')A, \quad (36)$$

## 5. 結 論

本 研究는 R.C. 기둥의 信賴性 解析 및 LFRD 型 設計 規準을 導入하여 現行 R.C. 기둥 設計 規準의 改正 方向을 提示하기 爲한 基礎研究로써 우리나라의 實情을 考慮한 不確實量을 擇하여 合理的인 信賴性 設計規準을 提案하였다.

本 研究結果로 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 抵抗의 不確實量은 보나 슬래브와 같이 한 가지式으로 表現할 수 없다. 壓縮支配기둥에서는 주로 콘크리트의 變動量과 鐵筋比에 關係되는 函數이고 모멘트 支配기둥에서는 주로 鐵筋 및  $d$ 의 變動量에 關係되는 函數로서 本 研究結果  $\Omega_R = 0.17$  을 얻었다. 荷重의 不確實量은 보와 같이  $\Omega_{SD} = 0.1$ ,  $\Omega_{SL} = 0.3$  으로 보는 것이 適當하다고 본다.

2) 示方書 設計規準에 依한 信賴性 解析 結果 WSD에서  $\beta = 4.34 \sim 5.1$ , USD에서  $\beta = 4.1$  이었다. 特히 WSD 軸荷重 設計規準에 있어 先進外國의 경우( $\beta_0 = 3.5$ ) 보다 훨씬 큰 값으로서 非合理的이고 非經濟的인 設計法임을 알 수 있었다. 우리나라에서는 우리의 實情을 考慮해 볼때  $\beta_0 = 4.0$  (보 :  $\beta_0 = 3.5$ , 슬래브 :  $\beta_0 = 3.0$ ) 으로 하는 것이 適當하다고 思料된다.

3)  $\beta_0 = 4.0$  으로 信賴性 解析 結果  $\phi' = 0.61$ ,  $\gamma_D' = 1.07$ ,  $\gamma_L' = 1.80$  이 되나, 荷重係數를 보에서와 같이  $\gamma_D' = 1.1$ ,  $\gamma_L' = 1.8$  로 再調整하여 같은 信賴性을 주는  $\phi'$  값을 求한 結果  $\phi' = 0.61$  이었다. 現行示方書의 安全水準 및 荷重-抵抗係數를 이와같이 調整하는 것이 바람직 하다고 본다.

4) 現行示方書의 許容應力 設計規準을 信賴



性設計와 같은水準으로設計될 수 있도록 하기爲하여, 示方書規準을本研究에서提示한式들로調整하는 것이바람직하다고 본다.

5) 本研究에서提案한方法은 R.C. 螺施기둥에서도  $\Omega_{R_u}$  값을計算하여適用할 수 있다.

### 參考文獻

1. Bjorhovde, R., Galambos, T.V. and Ravindra, M.K., "LRFD Criteria for Steel Beam-Columns," *Journal of the Structural Div., ASCE*, Vol. 104, No. ST 9, Sept. 1978, pp.1371~1387.
2. "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures", Vol. II, CEB-FIP International Recommendations, 3rd Ed., 1978.
3. Cornell, C.A., "A First-Order Reliability Theory for Structural Design", in Structural Reliability and Codified Design, *S.M. Study, No. 3, Solid Mechanics Div., Univ. of Waterloo, Waterloo, Ontario*, 1971, pp.87~111.
4. Ellingwood, B., "Statistical Analysis of RC Beam-Column Interaction", *Journal of the Structural Div., ASCE* Vol. 103, No. ST, 7, July 1977, pp.1377~1388.
5. Ellingwood, B., Galambos, T.V., Mac Greger, J.G. and Cornell, C.A., "A Probability Based Load Criterion for Structural Design", *Civil Engineering, ASCE*, July, 1981, pp.74~76.
6. Ellingwood, B., "Reliability Basis of Load and Resistance Factors for Reinforced Concrete Design", *NBS Building Science Series 110*, U.S. Dept. of Commerce, Feb. 1978.
7. Galambos, T.V., Ellingwood, B., Mac Gregor, J.G. and Cornell, C.A., "Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice", *Journal of the Structural Div., ASCE*, Vol. 108, No. ST 5, May 1982, pp.959~977.
8. Galambos, T.V. and Ravindra, M.K., "Load and Resistance Factor Design for Steel", *Journal for the Structural Div., ASCE*, Vol. 104, No. ST 9, Sept. 1978, pp.1337~1353.
9. Galambos, T.V., "Reliability of Aluminum Beam-Columns", *Journal of the Structural Div., ASCE*, Vol. 108, No. ST 4, April 1982, pp.709~727.
10. Hasofer, A.M. and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format", *Journal of the Engineering Mechanics Div., ASCE*, Vol. 100, No. EM 1, Feb. 1974, pp.111~121.
11. Loporati, E., "The Assessment of Structural Safety", *Series in Cement & Concrete Research*, Vol. 1, Research Studies Press, 1979.
12. 白石所人外 2人, "2次モーメント法による信頼性設計法に関する二, 三の考察", 日本土木學會論文報告集 第311號, 1981.7, pp.1~12.
13. 趙孝男, "R.C. 휨부재의 L.R.F.D 信頼性設計規準에 관한研究", 大韓土木學會論文集 第1卷 第1號, 1981年 12月, pp.21~32.
14. 趙孝男, "鐵筋콘크리트 道路橋 上部構造의 信頼性設計規準에 관한研究", 大韓土木學會論文集 第1卷 第10號, 1982年 10月, pp.87~99.
15. 鄭在哲, "鐵筋콘크리트柱의 信頼性 規準에 對한 研究", 大韓建築學會誌 第26卷 106號, 1982. 7, pp.67~70.
16. 李春植, 黃鶴周, 金秀一, "鐵筋콘크리트橋 上部構造의 確率論的 解析", 大韓土木學會誌, 第27卷 第5號, 1979.10, pp.129~139.
17. 申鉉默, 趙孝男, 鄭煥浩, "現行許容應力法으로設計되는 R.C. 휨部材의 信頼性과 安全率考察", 大韓土木學會論文集 第1卷 第1號, 1981年 12月, pp.33~42.

(授受: 1982. 11. 20)