

螺旋기둥의 信賴性 設計規準에 관한 研究

A Study on Reliability Based Design Criteria for Spiral R.C. Columns

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

Abstract

This study investigates reliability based design criteria for the spiral R.C. columns, and proposes practical algorithm which is based on Ellingwood's algorithm for the reliability analysis and the derivation of reliability based design criteria.

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 ($\beta_0=3.5$) 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 spiral R.C. columns.

要 旨

本 研究는 螺旋기둥의 信賴性 設計規準을 考察하고, Ellingwood가 提案한 信賴性 解析과 信賴性 設計規準 算定 알고리즘으로부터 實用的인 알고리즘을 誘導하였다.

Cornell의 MFOSM 理論에 의해 螺旋기둥의 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 고려한 적절한 값을 擇하여 信賴性 解析 및 信賴性 設計規準을 算定했다.

現行 WSD와 USD 設計法의 信賴性 水準을 分析하고 外國의 경우와 比較 檢討함으로써, 우리 實

* 正會員·陸軍士官學校 教授
** 正會員·檀國大學校 研究助教

情에 적당한 目標信賴性指數 $\beta_0=3.5$ 를 擇하여 LRFD 設計規準에 의한 荷重-抵抗係數를 提案했으며, 信賴性設計와 비슷한 信賴性을 갖는 WSD의 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 됨을 알 수 있었다.

1. 序 論

構造物의 信賴性을 解析하거나 信賴性 設計規準을 算定할 때 그 理論的 근거가 되는 것은 Cornell의 2次모멘트理論이다⁽²⁾. 이 2次모멘트理論은 Cornell의 正規變換모델⁽³⁾, Rosenbruth Esteva의 對數正規變換모델⁽⁴⁾ 및 Lind-Hasofer의 AFOSM(Advanced First Oder-Second Moment)法⁽¹³⁾을 이용한 Ellingwood의 部分對數正規變換모델⁽⁷⁾ 등 다양한 技法이 있다⁽¹⁴⁾. 信賴性 設計規準인 荷重-抵抗係數 算定에도 正規變換近似式, 對數正規變換모델로부터 近似化하여 誘導한 Galambos의 近似式⁽¹⁰⁾과 Shilaishi의 近似式⁽¹⁵⁾ 및 Ellingwood의 部分對數變換反復法 등이 있다⁽¹⁷⁾.

本 研究에서는 Ellingwood⁽⁶⁾, Hanes⁽¹¹⁾ 등이 R.C.構造物의 信賴性 設計規準 開發에 적용한 部分對數變換모델을 간소화시키고, 이로부터 Taylor 級數로 線型近似化시켜 既存의 복잡한 反復試行法을 解析的으로 간단하고도 비교적 精確하게 信賴性指數를 求할 수 있는 部分對數變換近似式을 誘導하였다. 또한, 部分對數變換모델로부터 荷重-抵抗係數 算定法도 荷重-抵抗係數(γ_i , ϕ) 및 中央安全率(n_0) 등을 反復試行에 의하여 算定하던 既存의 方法으로부터 n_0 와 ϕ 에 無關하게 荷重係數만을 反復試行함으로써 γ_i 와 ϕ 등을 算定할 수 있음을 보이고, 近似式을 誘導하였다.

本 研究는, 本 研究에서 誘導한 近似式을 反復法과 比較 檢討하고 이를 螺旋기둥에 적용했으며, 目標信賴性指數(β_0 : Target Reliability Index)를 外國의 水準과 우리 나라 示方書의 信賴性 水準을 綜合하여 決定하고, 荷重-抵抗係數를 算定 提案하는데 目的이 있다. 또한, 실제 設計에 있어 許容應力設計法이 많이 사용되고 있으므로 信賴性 設計와 비슷한 設計規準이 될 수 있

는 鐵筋과 콘크리트의 許容應力을 算定하였다.

不確實量 算定에 있어서 抵抗의 不確實量은 Ellingwood가 提案한 方法을 이용했으며, 荷重效果 및 荷重效果의 不確實量은 文獻(17), (18)과 Ellingwood의 NBC 110⁽⁶⁾ 등을 이용해서 우리의 實情을 고려한 비교적 安全側의 設計가 될 수 있는 값을 선택하여 考察했다.

2. 不確實量

螺旋기둥의 平均抵抗 \bar{R} 은 그림 1로부터 偏心量 e 가 定해지면 다음 式들로부터 求할 수 있다.

$$\bar{P}_u = \bar{F}_c + \sum \bar{F}_i \quad (1)$$

$$\bar{M}_u = \bar{F}_c \bar{y}_c + \sum \bar{F}_i \bar{y}_i \quad (2)$$

$$e = \bar{M}_u / \bar{P}_u \quad (3)$$

여기서, \bar{F}_c : 콘크리트의 壓縮力

\bar{F}_i : 각 鐵筋의 抵抗力

\bar{y}_i : 斷面의 圖心으로부터 각 鐵筋圖心까지의 거리

\bar{y}_c : 斷面의 圖心으로부터 콘크리트抵抗中心까지의 거리

壓縮荷重에 의해 支配되는 기둥抵抗의 分散係數 Ω_{R_u} 는 式(1)로부터, 모멘트에 의해 支配되는 기둥抵抗의 分散係數 Ω_{R_u} 는 式(2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다⁽⁶⁾.

$$\Omega_{R_u}^2 \approx \frac{1}{R_u^2} \sum \left(\frac{\partial \bar{R}_u}{\partial R_i} \right)^2 \bar{R}_i^2 \delta_{R_i}^2 \quad (4)$$

平均抵抗 \bar{R} 과 抵抗의 不確實量 Ω_R 은 다음 式으로부터 얻을 수 있다⁽⁵⁾.

$$\bar{R} = \bar{B} \cdot \bar{R}_u \quad (5)$$

$$\Omega_R^2 = \Omega_{R_u}^2 + (\sigma/\bar{B})^2 + \Delta_j^2 \quad (6)$$

여기서, \bar{B} 는 모델 偏奇平均이고 $\sigma^2 = \text{Var}[R/R_u | R_u = m]$ 으로부터 구할 수 있으며, Δ_j 는 技術者의 經驗 및 判斷으로 얻어지는 값으로 文獻(5)와 같이 각각 0.06, 0.1을 사용했다.

2.1 抵抗 및 抵抗의 不確實量 算定式

螺旋기둥의 抵抗 \bar{R} 은 式(1)~(3)으로 求할

수 있으나 解析的인 方法으로 구할 수 없고 數值的으로 反復하여 얻을 수 있다. 이를 위해 壓縮力에 의해 支配되는 기둥과 모멘트 支配기둥으로 나누어 \bar{R} 과 Ω_{Rv} 를 算定했다.

抵抗 \bar{R} 은 기둥 斷面을 構成하고 있는 諸要素들의 函數로 다음과 같이 表現된다⁽¹²⁾.

$$\bar{R} = f(\bar{f}_y, \bar{f}_c', \bar{A}_s, \bar{h}, \bar{d}', \bar{E}_s, \bar{\epsilon}_s, e \text{ etc.}) \quad (7)$$

文獻(18)에서와 같이 偏心量 e 가 주어지면 塑性中心 x 를 가정하여 式(7)과 式(1)~(3)으로부터 \bar{R} 을 얻을 수 있고 이로부터 Ω_{Rv} 를 계산할 수 있다. 이때, δ_h 와 δ_{A_s} 는 그 量이 작으므로 無視했으며, 이는 모델 偏奇로써 補完하는 것이 一般的이다.

2.2 壓縮支配기둥의 Ω_{Rv}

偏心量이 均衡偏心보다 작을 때 ($e \leq e_b$) 기둥의 파괴는 콘크리트의 壓縮破壞일 것이므로 $R_u = \bar{P}_u$ 가 되며, Ω_{Rv} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Omega_{Rv}^2 = & \frac{1}{\bar{R}_u^2} \left[\left(\frac{\partial \bar{F}_i}{\partial f_y} \right)^2 \bar{f}_y^2 \delta_{f_y}^2 \right. \\ & + \left(\frac{\partial \bar{F}_c}{\partial f_c'} \right)^2 \bar{f}_c'^2 \delta_{f_c'}^2 \\ & + \left(\frac{\partial \bar{F}_i + \sum \partial \bar{y}_i}{\partial d'} \right)^2 \bar{d}'^2 \delta_{d'}^2 \\ & + \left(\frac{\partial \bar{F}_c}{\partial \alpha_1} \right)^2 \bar{\alpha}_1^2 \delta_{\alpha_1}^2 \\ & + \left(\frac{\partial \bar{F}_i}{\partial \bar{\epsilon}_c} \right)^2 (\bar{\epsilon}_c^2 \delta_{\bar{\epsilon}_c}^2 + \bar{E}_s^2 \delta_{E_s}^2) \\ & \left. + \left(\frac{\partial \bar{F}_i + \partial \bar{F}_c}{\partial x} \right)^2 \bar{x}^2 \delta_x^2 \right] \quad (8) \end{aligned}$$

이 때, δ_x 는 文獻(18)과 類似한 方法으로 구할 수 있다.

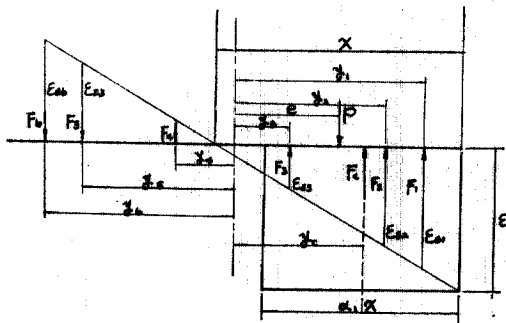


그림 1. 應力圖

2.3 모멘트 支配기둥의 Ω_{Rv}

모멘트荷重에 의해 支配되는 기둥 ($e > e_b$)인 경우 $R_u = \bar{M}_u$ 로 놓고 文獻(18)에서와 같은 方法으로 Ω_{Rv} 를 구할 수 있으나 원형기둥임을 고려하면 좀 더 복잡하게 된다. 모멘트 支配기둥에서의 파괴는 引張鐵筋이 파괴될 때 發生할 것이므로, \bar{R}_u 는 引張力을 받는 鐵筋들과 그로부터 壓縮力中心까지의 거리의 곱으로 나타낼 수 있다. 斷面の 圖心으로부터 壓縮抵抗力의 中心까지의 거리를 a 라 하고 壓縮力을 받는 鐵筋力을 F_{is} 라 하면 a 는,

$$\bar{a} = \frac{\sum \bar{F}_{is} \bar{y}_i + \bar{M}_c}{\sum \bar{F}_{is} + \bar{F}_c} \quad (9)$$

로 된다.

\bar{R}_u 및 Ω_{Rv} 는 引張力을 받는 鐵筋力들을 F_{is} 라 하면 다음 式으로부터 구할 수 있다.

$$\bar{R}_u = \sum \bar{F}_{is} (\bar{y}_i - \bar{a}) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Omega_{Rv}^2 = & \frac{1}{\bar{R}_u^2} \left[\left(\frac{\partial \bar{F}_{is}}{\partial \bar{R}_i} \right)^2 \bar{R}_i^2 \delta_{R_i}^2 \right. \\ & + \left(\frac{\sum \bar{F}_{is} \cdot \partial \bar{y}_i}{\partial \bar{y}_i} \right)^2 \bar{y}_i^2 \delta_{y_i}^2 \\ & \left. + \left(\frac{\sum \bar{F}_{is} \partial \bar{a}}{\partial a} \right)^2 \bar{a}^2 \delta_a^2 \right] \quad (11) \end{aligned}$$

이 때, δ_a 는 文獻(18)과 같은 方法으로 구할 수 있다.

3. 信賴性解析

構造物의 信賴性指數 β 를 구하는 方法은 荷重 및 抵抗分布의 假定, 標準化變換方法 그리고 荷重을 全體荷重 또는 部分荷重으로 고려하는 경우 등에 따라 多様な 技法이 있다. β 는 近似的으로 MFOSM (Mean First Order Second Moment) 法을 이용하여 Cornell은 正規分布型函數로, Esteva 등은 對數正規分布型函數로 가정하여 구하였으며, Ellingwood는 Lind-Hasofer의 最小距離法을 이용하여 部分對數變換모델로부터 β 를 구하였다. 이들 解析技法 및 關係式들은 文獻(17)에 詳述되어 있으므로 敘述을 생략하고, 本研究에서 誘導한 部分對數變換 信賴性解析法의 單純化 및 近似式에 對하여 소개하고자 한다.

3.1 部分對數變換解析法

荷重을 死荷重과 活荷重으로 분리하면 $S = S_D + S_L$ 이 되며, 이 때 β 는 Lind-Hasofer의 最小

距離法에 의하여 標準化空間의 原點에서 限界狀態面까지의 最小距離로서 좀 더 正確한 값을 얻을 수 있다⁽¹²⁾. Ellingwood는 抵抗을 標準對數正規變換시키고 荷重效果를 死荷重效果와 活荷重效果로 분리하여 標準正規變換시켜 β 를 구하는 방법을 보였으며⁽⁶⁾, 이에 대한 解析法은 文獻(17)에 叙述되어 있다.

그러나, 部分荷重效果를 全體荷重效果로 취하여 다음과 같이 變換시키면 좀 더 單純化시킬 수 있다.

$$\phi n_0 = \gamma_s \text{ (또는 } \phi = \gamma_s / n_0 \text{)} \quad (12)$$

여기서,

$$\phi = \exp(-\alpha_R \beta \Omega_R) \quad (13. a)$$

$$\gamma_s = 1 + \alpha_S \beta \Omega_S \quad (13. b)$$

이때,

$$\alpha_R = \frac{\phi n_0 \Omega_R}{\sqrt{\phi^2 n_0^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} = \frac{\gamma_s \Omega_R}{\sqrt{\gamma_s^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (14. a)$$

$$\alpha_S = \frac{\Omega_S}{\sqrt{\phi^2 n_0^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} = \frac{\Omega_S}{\sqrt{\gamma_s^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (14. b)$$

여기서, $\Omega_S = \sqrt{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2} / (1 + \rho)$ 이다. *

이들 式으로부터 β 를 구하는 方法은 $n_0, \rho, \Omega_R, \Omega_{SD}, \Omega_{SL}$ 등이 주어지면 Ω 를 계산하고, 近似的으로 ϕ, γ_i 를 가정하여 式(14), (13), (12)를 反復試行하여 구할 수 있다. 이 方法은 文獻(17)에서 보인 解析法보다 간편함을 알 수 있다.

3.2 部分對數變換近似式

式(12), (13), (14)를 다음과 같이 變形시키면 복잡한 반복시행을 行하지 않고서도 近似的으로 β 를 구할 수 있다. 式(14. b)를 式(13. b)에 代入하여 β 에 관하여 정리하면,

$$\beta = \frac{\gamma_s - 1}{\Omega_S^2} \sqrt{\gamma_s^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2} \quad (15)$$

이 되어 γ_s 의 函數로 된다. 한편, 式(12)~(14)로부터 γ_s 의 項으로 정리하면,

$$k \gamma_s^2 - k \gamma_s + \ln \gamma_s - \ln n_0 = 0 \quad (16)$$

여기서, $k = \Omega_R^2 / \Omega_S^2$

이 된다. 式(16)의 3제항을 Taylor 級數로 線形近似化시켜 γ_s 에 관하여 정리하면 γ_s 는 다음 式으로부터 구할 수 있다.

$$\gamma_s = m + \sqrt{m^2 + c} \quad (17. a)$$

여기서,

$$m = \frac{k - (2b + 1)}{2(k - b)} \quad (17. b)$$

$$c = \frac{\ln n_0 + b + 1}{k - b} \quad (17. c)$$

(단, $b \approx k$)

式(17)로 γ_s 를 구하여 式(15)에 代入하면 近似的으로 β 를 얻을 수 있다. 이는 $\ln \gamma_s$ 의 3차항 이상을 線形化하였으므로 거의 精確한 信賴性指數를 얻을 수 있을 것이다. 이 때, γ_s 는 1.2~1.5임을 고려하면 式(17)에서 最小誤差를 주는 b 값은 약 0.4이다.

3.3 示方書의 信賴性 檢定

示方書의 設計規準인 許容應力設計法(WSD)과 極限強度設計法(USD)은 文獻(18)에서 밝힌 바와 같이 公稱安全率 n' 를 구하여 解析할 수 있으며, WSD에서 n' 는 載荷荷重의 偏心에 따라 다르므로 이들에 대한 각각의 n' 를 구할 필요가 있다. 이 때 公稱安全率 n' 는

$$n' = R' / S' \quad (18)$$

로부터 구할 수 있고, USD에서 n' 는 다음 式으로부터 구할 수 있다.

$$n' = \frac{(\gamma_D' + \rho' \gamma_L')}{(1 + \rho') \phi'} \quad (19)$$

여기서, $\rho' = S_L' / S_D'$ (公稱荷重比)

現行 示方書에 대해 完全應力設計인 경우 構造 信賴性을 解析할 때나 또는 示方書의 Calibration으로부터 信賴性設計規準을 推定하는 경우 n' 로부터 β 를 구할 필요가 있다. β 는 中央安全率 n_0 의 函數이므로 n' 는 n_0 로 바뀌어야 하는데 이는 平均-公稱比 η_i 를 이용하면 된다.

$$n_0 = \bar{R} / \bar{S} = \frac{\eta_R R'}{\eta_S S'} = \frac{\eta_R}{\eta_S} n' \quad (20)$$

여기서, $\eta_R = \bar{R} / R'$

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

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

4. 信賴性 設計規準

信賴性 設計規準은 對象 構造物의 安全性을 確保하기 위해 적절한 目標信賴性指數(β_0 : Target Reliability Index)를 결정하고 이로부터 抵抗係數(ϕ)와 荷重係數(γ_i)를 算定하는 것이다. 즉 荷重係數를 設計荷重에 곱하고, 抵抗係數를

部材의 抵抗에 棼합으로써 構造物의 安全性을 確保하는 것이다.⁽¹⁶⁾

ϕ 와 γ_i 를 구하는 방법은 前章에서 밝힌 β 를 구하는 방법과 同一하다. 다만 이들의 차이점은 信賴性 解析時 β 는 n_0 로부터 얻을 수 있으나 信賴性 設計規準에서는 β_0 를 定하여 이로부터 ϕ 및 γ_i 를 구한다는 점이다.

2次모멘트法에 의한 β 解析法으로부터 ϕ 와 γ_i 를 구하는 다양한 技法이 文獻(7), (10), (15), (17) 등에 詳述되어 있으므로 이들에 대한 叙述을 생략하고, 本 研究에서 誘導한 部分對數變換에 의한 ϕ, γ_i 를 구하는 방법을 소개한다.

4.1 部分對數變換 解析法

3.1節의 式들을 그대로 이용 β 대신 β_0 를 代하여 ϕ, γ_i 를 구할 수 있으며, 이 때 反復알고리즘은 3.1에서 밝힌 것과 同一하다.

그러나, ϕ 와 γ_i 를 구하는 데에도 式(14. b)를 式(13. b)에 代하여 다음과 같이 單純化시킬 수 있다.

$$\gamma_s = 1 + \frac{\Omega_s^2 \beta_0}{\sqrt{\gamma_s^2 \Omega_R^2 + \Omega_s^2}} \quad (21)$$

式(21)을 고찰해보면 全體荷重係數 γ_s 는 ϕ 나 n_0 와 無關함을 알 수 있다. 따라서, γ_s 를 적당히 가정하여 式(21)만을 反復시키므로써 n_0 와 ϕ 에 관계 없이 γ_s 를 구할 수 있고, γ_s 의 값이 결정되면 ϕ, γ_i 는 다음 式으로부터 얻을 수 있다.

$$\phi = \exp\left(-\frac{\gamma_s \Omega_R^2 \beta_0}{\sqrt{\gamma_s^2 \Omega_R^2 + \Omega_s^2}}\right) \quad (22. a)$$

$$\gamma_D = 1 + \frac{\Omega_{SD}^2 \beta_0}{(1+\rho) \sqrt{\gamma_s^2 \Omega_R^2 + \Omega_s^2}} \quad (22. b)$$

$$\gamma_L = 1 + \frac{\rho \Omega_{SL}^2 \beta_0}{(1+\rho) \sqrt{\gamma_s^2 \Omega_R^2 + \Omega_s^2}} \quad (22. c)$$

既存의 反復法과 式(21), (22)를 比較해 보면 本 研究에서 誘導한 反復法이 훨씬 容易하다는 것을 알 수 있다.

4.2 部分對數變換近似式

部分對數變換에서 γ_s 는 n_0 를 알 수 없으므로 式(17)로부터 γ_s 를 얻을 수 없고, 式(21)을 다음과 같이 變形하여 近似的으로 γ_s 를 얻을 수 있다.

$$\gamma_s = 1 + \frac{\Omega_s^2 \beta_0}{\sqrt{\lambda \Omega_R^2 + \Omega_s^2}} \quad (23)$$

式(23)으로부터 γ_s 를 구하여 式(22)에 代하

면 反復하지 않고서도 近似的으로 ϕ, γ_i 를 구할 수 있다. 이 때 式(23)에서 $\lambda=1.8$ 정도가 最小 誤差를 주는 값이다.

5. 計算 및 考察

5.1 不確實量

5.1.1 抵抗

平均-公稱抵抗比(η_R)는 콘크리트의 養生程度에 따라 많은 차이를 보일 것이나 콘크리트의 良好한 養生($\bar{f}_c=1.01f_c'$)과 不良養生($\bar{f}_c=0.8f_c'$), 平均 鐵筋強度($\bar{f}_s=1.2f_s'$)⁽⁶⁾ 및 表 1로부터 軸荷重과 모멘트를 구하여 圖示한 것이 그림 2이다. 그림 3은 良好한 養生과 不良養生일 때의 η_R 를 偏心比(e/h)에 따라 나타낸 것이다. 그림 3에서 콘크리트의 不良養生일 때 η_R 는 壓縮支配기동인 경우 약 0.93 정도이며 偏心量이 점점 증가함에 따라 계속 증가하여 모멘트支配기동인 경우 약 1.12이었고, 콘크리트의 養生이 良好할 경우 $\eta_R=1.07\sim 1.16$ 이었다. 여기서 特記할 점은 콘크리트의 養生 정도가 軸荷重에는 상당한 영향을 미치나, 모멘트支配기동에서는 많은 영향을 미치지 못하며 η_R 값은 文헌(18)과 비

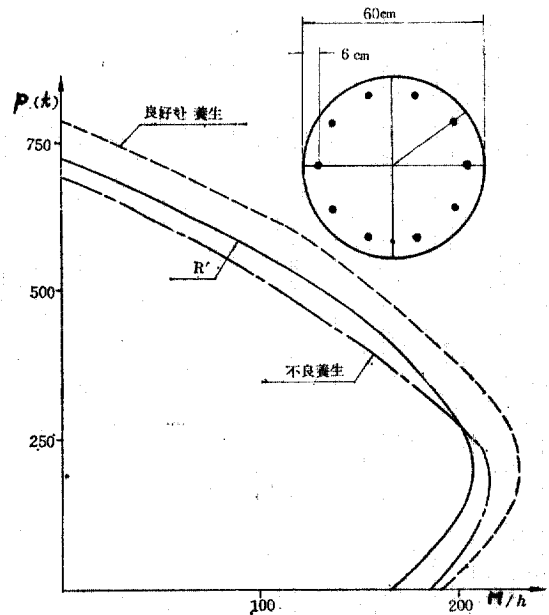


그림 2. P-M 相關圖

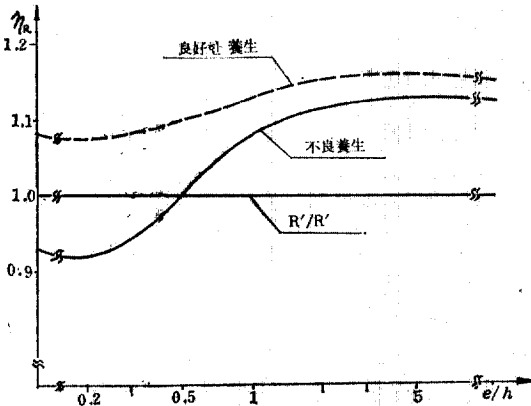


그림 3. e/h 에 따른 平均-公稱抵抗比

교해 보면 〔비슷한 수준임을 알 수 있다. 이는 콘크리트의 養生 정도가 部材의 휨抵抗에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다.

本 研究에서 $\eta_R=1.02$ 로 취하였다.

抵抗의 變動係數 Ω_{Ru} 의 算定에 필요한 δ_{fy} , δ_{fc}' , δ_{d}' 는 文獻(6), (17), (19)를 참고하였고, 外的 變動數들에 대한 \bar{R}_i 및 δ_{Ri} 는 文獻(5)를 用하여 表 1과 같은 값을 用했다.

表 1을 式(4)~(11)에 적용하여 電算處理한 결과를 나타낸 것이 그림 4, 5이다. 그림 4는 鐵筋比(ρ_g) 0.03일 때 Ω_{Ru} 을 e/h 에 따라 나타낸 것으로서 Ω_{Ru} 는 壓縮支配기등에서 주로 δ_{fc}' 에 의해 支配되고, 모멘트支配기등에서는 δ_{fy} , δ_{d}' 에 의해 支配됨을 보여주었다. 그림 5는 $\delta_{fc}'=0.2$, $\delta_{fy}=0.11$, $\delta_{d}'=0.04$ 일 때 鐵筋比를 變化시켜 Ω_{Ru} 를 나타낸 그림으로서 Ω_{Ru} 는 ρ_g 가 클수록 壓縮支配기등에서 낮은 값을 나타내며, 모멘트支配기등에서 약간 큰 값을 나타냈다. 이들 結果는 文獻(18)의 띠기등과 類似함을 보여주었으며, 特히 中心軸荷重에서 最大値를 가지므로

表 1. 確率變動數

	$\bar{\rho}_g$	\bar{e}_c	\bar{h}	$\bar{\alpha}_1$	\bar{E}_c	\bar{f}_y	f_c'	\bar{d}'	
\bar{R}_i	0.03%	0.004	60 cm	0.85	2.1×10^6 kg/cm ²	3350 kg/cm ²	210kg/cm ²	6 cm	
δ_{Ri}	0.03	0.16	0.02	0.13	0.05	0.11	0.2	0.04	文獻 (6)
						0.15	0.21	0.086	文獻 (19)
						0.124	0.2	0.087	文獻 (17)

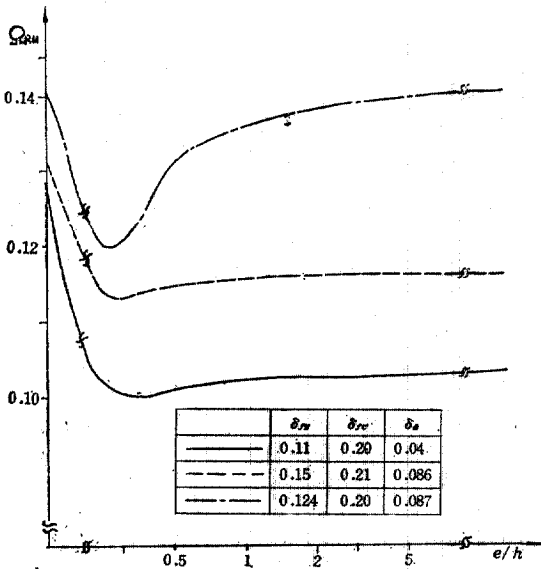


그림 4. δ_{Ri} 에 따른 Ω_{Ru} 값

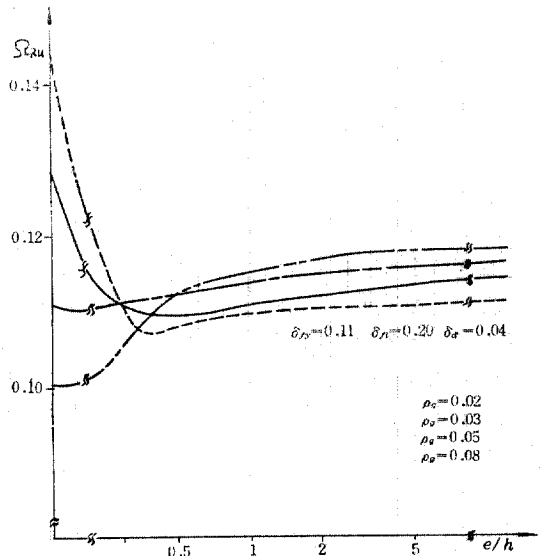


그림 5. 鐵筋比(ρ_g)에 따른 Ω_{Ru} 값

R.C.기둥의 Ω_{Rn} 를 구하고자 할 때는 偏心에 따라 복잡한 演算과정을 略하고, 中心軸荷重에서의 Ω_{Rn} 값을 R.C.기둥의 Ω_{Rn} 값으로 사용해도 될 것이다.

抵抗의 不確實量 Ω_R 은 式(6)으로부터 0.154~0.184가 되었고, 本 研究에서는 此기둥과 같이 0.17을 사용했다.

5.1.2 荷重效果

荷重效果에 대한 平均-公稱比 및 不確實量은 既存의 研究들로부터 表 2와 같은 결과를 얻었다.

表 2. R.C.기둥에 관한 統計值

文 獻	抵 抗		死 荷 重		活 荷 重	
	R/R'	Ω_R	D/D'	Ω_{SD}	L/L'	Ω_{SL}
文 獻 (1)	—	—	1.0	0.07	0.7	0.3
" (6)	0.97~1.13	0.17	1.0	0.1	varies	0.26
" (9)	0.95	0.14	1.05	0.1	varies	0.25
" (4)	—	0.14~0.22	1.0	0.13	varies	0.33
siu. et al.	1.14	0.16	1.0	0.07	0.7	0.3
本 研 究	1.02	0.17	1.0	0.1	1.1	0.3

表 2에서 보는 바와 같이 平均-公稱死荷重比 ($\eta_D = \bar{D}/D'$)는 1.0~1.05, 平均-公稱活荷重比 ($\eta_L = \bar{L}/L'$)는 0.7~1.1, 死荷重效果의 不確實量 $\Omega_{SD} = 0.07 \sim 0.13$, 活荷重效果의 不確實量 $\Omega_{SL} = 0.25 \sim 0.33$ 이었다. 本 研究에서는 $\eta_D = 1.0$, $\eta_L = 1.1$, $\Omega_{SD} = 0.1$, $\Omega_{SL} = 0.3$ 을 사용했다.

여기서 留意할 점은 $\eta_D, \eta_L, \Omega_{SD}, \Omega_{SL}, \rho$ 등은 큰 값을 取할수록 安全한 設計가 될 수 있게 하는 값들이며 그만큼 非經濟的인 設計가 된다. 우리 나라에서는 이들에 관한 研究가 거의 全無한 상태이므로 不確實性을 고려하여 比較的 큰 값을 사용하는 것이 一般的이다.

5.2 部分對數變換正解法과 近似式의 比較

그림 6은 β 값을 部分對數變換正解法과 近似式으로 구하여 그들의 相對誤差를 나타낸 그림이다. 그림 6에서 대체로 $n_0 > 2.5$ 이고 $\rho > 2.0$ 일 때 $\pm 1\%$ 이상의 誤差을 보이나, R.C.構造物의 ρ 가 一般的으로 0.5~1.5이며, n_0 가 2.0 內외의 값을 고려하면 $\pm 0.5\%$ 以下의 誤差임을 알 수 있어 正解法에 相當히 近似함을 알 수 있다. 따라서, 本 研究에서 誘導한 近似式을 이용

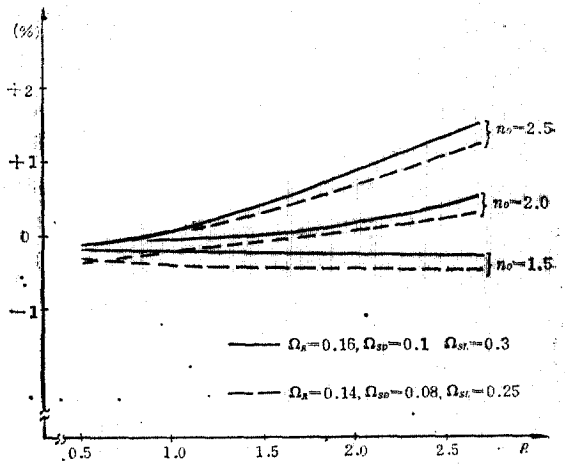


그림 6. 正解法과 近似式의 β 값의 相對誤差

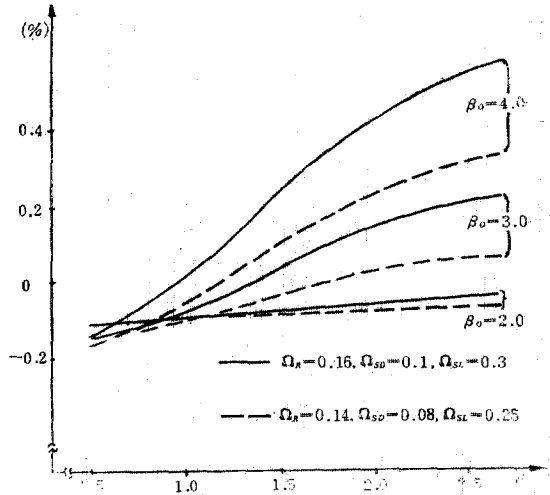


그림 7. 正解法과 近似式에서 ϕ 의 相對誤差

하여 β 를 구하면 效率的으로 比較的 正確한 β 값을 얻을 수 있을 것이다.

그림 7은 ϕ 값을 部分對數變換反復法과 近似式으로 구하여 그들의 相對誤差를 ρ 에 따라 나타낸 그림이다. 그림 7에서와 같이 ϕ 의 相對誤差는 $\pm 1\%$ 미만이며 특히 $\rho = 0.5 \sim 1.5$ 에서는 $\pm 0.1\%$ 정도로 거의 無視할 수 있는 誤差이다. 이 때, n_0 는 一致하였고 γ_i 의 誤差는 ϕ 의 誤差에 準하였다. 따라서 ϕ, γ_i 를 구할 때도 近似式을 이용하면 比較的 正確한 값을 쉽게 얻을 수 있을 것이다.

5.3 示方書 設計標準의 信賴性解析

構造物의 信賴性을 解析하거나, 目標信賴性指數 β_0 를 얻고자 할 때 기존 示方書 Calibration 方法으로 얻는 것이 一般的이다. 許容應力設計法(WSD)에서 中心軸荷重을 받는 경우 式(18), (20)으로부터 n_0 를 얻을 수 있고, 偏心荷重을 받는 기둥 또는 純粹모멘트를 받는 경우 $n'=2.5$ 임을 고려하여 式(20)으로부터 n_0 를 얻을 수 있다. 極限強度設計法(USD)에서 β 는 式(19), (20)으로부터 n_0 를 구하여 β 를 얻을 수 있다.

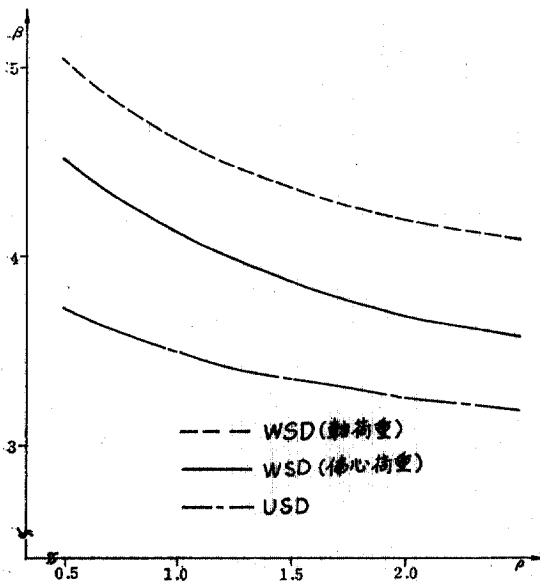


그림 8. 示方書 設計標準의 β 값

그림 8은 WSD와 USD의 信賴性指數 β 를 ρ 에 따라 나타낸 것이다. 그림 8에서 보여주는 바와 같이 WSD의 中心軸荷重에서 $\beta=4.08\sim 5.03$, 偏心기둥 및 모멘트기둥에서 $\beta=3.58\sim 4.52$ 이었고 USD에서 $\beta=3.18\sim 3.71$ 이었다. 특히 WSD에서 β 값이 상당히 큰 값을 나타냄으로써 安全한 設計가 될 것이나 非經濟的임을 알 수 있다. 螺旋기둥의 目標信賴性指數 β_0 는 外國의 경우 $\beta_0=3.2$ (Ellingwood)⁽⁶⁾, 또는 3.0 (Galambos)⁽⁸⁾이며 우리의 設計 및 施工水準을 고려하면 이들보다는 높고 USD와 비슷한水準인 $\beta_0=3.5$ 정도가 적당하다고 판단된다.

5.4 信賴性 設計標準

5.4.1 荷重-抵抗係數

그림 9는 $\rho=1.0$, $\Omega_R=0.17$, $\Omega_{SD}=0.1$, $\Omega_{SL}=0.3$ 에 대한 ϕ, γ_i 를 β_0 에 따라 部分對數變換近似式으로 算定 圖示한 것이고, 그림 10은 $\beta_0=3.5$, $\Omega_R=0.17$, $\Omega_{SD}=0.1$, $\Omega_{SL}=0.3$ 에 대한 ϕ, γ_i 를 ρ 에 따라 나타낸 것이다.

그림 9에서 ϕ, γ_i 는 거의 直線的으로 變하며 n_0 는 β_0 가 2.0에서 3.0 사이에 變化가 크고 3.5 이상일 때는 거의 變化가 없다. 이는 β_0 가 n_0 의 영향을 많이 받음을 나타낸 것이다. 그림 10에서 ρ 가 증가함에 따라 γ_L 은 약간 증가되나 ϕ, γ_D 및 n_0 는 거의 變化가 없다.

表 3은 $\beta_0=3.5$, $\rho=1.0$ 일 때 ϕ, γ_i 를 나타낸 것이다. 表 3에서 $\phi'=\eta_R \times \phi=0.6275$, $\gamma_D'=\eta_D$

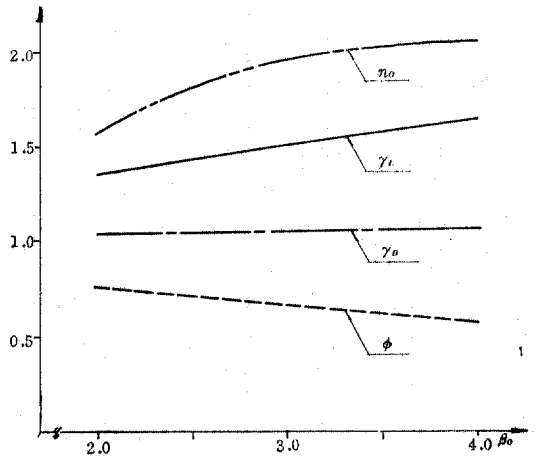


그림 9. $\rho=1.0$ 일 때 β_0 에 따른 ϕ, γ_i

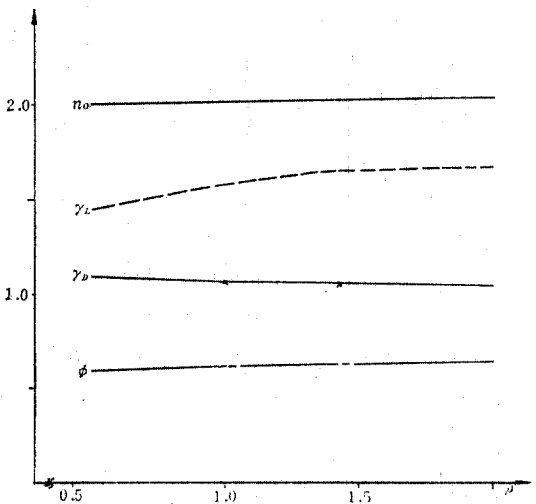


그림 10. $\beta_0=3.5$ 일 때 ρ 에 따른 ϕ, γ_i

表 3. 荷重-抵抗係數

ϕ	0.6152	ϕ'	0.6275	$\phi'=0.65$ $\gamma_D'=1.10$ $\gamma_L'=1.80$
γ_D	1.0639	γ_D'	1.0639	
γ_L	1.5751	γ_L'	1.7326	
n_0	2.1449	n'	2.2540	

$\times \gamma_D=1.0639$, $\gamma_L=\eta_L \times \gamma_L=1.7326$ 이며, 여기서 文獻(18)과 같이 $\gamma_D'=1.1$, $\gamma_L'=1.8$ 로 統一하고 ϕ' 를 再調整하면 $\phi'=0.6507$ 이 된다. 따라서, 螺旋기등의 公稱荷重-抵抗係數 $\phi'=0.65$, $\gamma_D'=1.1$, $\gamma_L'=1.8$ 로 示方書 設計規準을 調整하는 것이 보다 合理的이라고 判斷된다.

5. 4. 2 許容應力

中心軸荷重을 받는 경우 $n'=2.25$ 임을 고려하면 示方書規準(9.6)은 다음과 같이 調整된다.

$$P_a=0.32 \sigma_{cs} A_g + 0.37 \sigma_y A_s \quad (24)$$

偏心荷重을 받을 때와 純粹모멘트를 받는 경우 現行 示方書에서 $n'=2.5$ 임을 고려하면, 偏心荷重을 받는 경우($e < e_b$ 일 때) 規準(9.13)은 다음과 같이 되며,

$$\frac{\sigma_{ax}}{\sigma_{ax}} + \frac{\sigma_{bx}}{0.44 \sigma_{cb}} + \frac{\sigma_{by}}{0.44 \sigma_{cb}} \leq 1 \quad (25)$$

여기서, $\sigma_{ax}=0.37(1+\rho_r \cdot m)\sigma_{cs}$

또한, 純粹모멘트만 받을 때 規準(9.16)은 다음과 같이 調整된다.

$$M_D=0.13 \sigma_y \cdot D_r \cdot A_s \quad (26)$$

5. 5 R.C.기둥 設計規準의 比較

文獻(18)에서 밝힌 더기등의 設計規準과 本研究에서의 螺旋기등의 設計規準 그리고 示方書의 設計規準을 整理한 것이 表 4이다. 示方書 設計規準과 信賴性 設計規準과의 荷重係數를 比較해보면 γ_L' 는 같고 γ_D' 는 0.4가 작으며, ϕ' 는 더기등과 螺旋기등에서 各各 0.09와 0.1이 낮은 값이다.

表 4. 設計規準의 比較

		ϕ'	γ_D'	γ_L'
現 行 示 方 書	더기등	0.70	1.5	1.8
	螺旋기등	0.75	1.5	
信 賴 性 設 計 規 準	더기등	0.61	1.1	
	螺旋기등	0.65	1.1	

死荷重의 不確實性이 적음을 고려하면, 死荷重係數는 實測이 곤란하며 相對的으로 不確實性이 큰 活荷重係數보다 상당히 낮은 것은 自명한 일이다. 또한, 抵抗係數에 있어서도 콘크리트材料의 特性, 養生 및 人爲的인 誤謬 등이 部材抵抗에 惡影響을 미치게 되어 낮은 값을 가질 것이라는 것은 쉽게 豫測할 수 있다. 이러한 결과를 고려할 때 現行示方書의 死荷重係數와 抵抗係數는 상당히 높게 策定되어 있음을 알 수 있으며, 信賴性 設計規準의 合理性을 確認할 수 있다. 따라서, 示方書 設計規準을 信賴性 設計規準으로 調整하는 것이 보다 合理的인 設計規準이 될 것으로 思料된다.

6. 結 論

本 研究는 2次모멘트 信賴性理論 中 Ellingwood가 提案한 部分對數變換모델을 近似化한 信賴性 解析法 및 信賴性 設計規準을 誘導하고, 이를 이용하여 螺旋기등의 信賴性 設計規準을 提案하였다.

本 研究의 結果로 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

1) 平均-公稱抵抗比(η_R)는 콘크리트의 不良養生이 壓縮支配기등에서 낮은 값을 가지게 하나, 모멘트支配기등에서는 콘크리트의 良好한 養生과 비슷한 값을 나타내었다. 이는 콘크리트의 養生정도가 部材의 휨抵抗에 큰 영향을 미치지 못함을 意味한다.

2) R.C.기둥 抵抗의 變動係數 Ω_{Rn} 는, 中心軸荷重에서 最大值를 가지므로 文獻(18)과 本研究에서 誘導한 복잡한 方法을 피하고 中心軸荷重의 Ω_{Rn} 값을 사용해도 될 것이다.

3) 抵抗의 不確實量 Ω_R 은 0.15~0.18이었으며 $\Omega_R=0.17$ 을 사용했다. 荷重效果의 不確實量은 더기등과 같이 $\Omega_{SD}=0.1$, $\Omega_{SL}=0.3$ 으로 보는 것이 적당하다고 思料된다.

4) 本 研究에서 誘導한 部分對數變換近似式은 反復法에 比較的 近接한 값을 얻을 수 있으므로 變數모델을 部分對數 變換시키거나 또는 變數모델이 部分對數分布일 때, 信賴性 解析 및 荷重-抵抗係數 算定은 近似式을 이용하면 效率的인 것이다.

5) 現行 示方書로부터 β 를 구한 결과 WSD에서 3.58~5.03, USD에서 3.18~3.71이었다. 螺旋기둥의 目標信賴性指數 β_0 는 外國의 경우($\beta_0=3.2$ 또는 3.0)와 우리 나라 示方書의 信賴性 水準을 고려하면 $\beta_0=3.5$ 가 적당하다고 判斷된다.

6) $\beta_0=3.5$ 로서 公稱荷重-抵抗係數를 算定한 결과 $\phi'=0.6275$, $\gamma_D'=1.0639$, $\gamma_L'=1.7326$ 이었고, 公稱荷重係數를 文獻(18)에서와 같이 $\gamma_D'=1.1$, $\gamma_L'=1.8$ 로 再調整한 결과 $\phi'=0.65$ 였다.

7) 現行 示方書 R.C.기둥의 極限強度 設計規準을 信賴性 設計規準으로 調整할 때 荷重係數 $\gamma_D'=1.1$, $\gamma_L'=1.8$, 抵抗係數 $\phi'=0.61$ (띠기둥), $\phi'=0.65$ (螺旋기둥)으로 되며, 本研究에서 提示한 許容應力設計規準도 信賴性 設計規準과 비슷한 設計規準이 된다. 現行 示方書 設計規準을 이와 같은 信賴性 設計規準으로 調整하는 것이 바람직하다고 본다.

參 考 文 獻

- Allen, D.E., "Limit States Design—A Probabilistic Study," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, No. 1, 1976, pp. 36~49.
- Cornell, C.A., "A Probability-Based Structural Code, *Pro. of the ACI*, Vol. 66, No. 12, Dec. 1969, pp. 974~985.
- 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.
- Ellingwood, B., Ang, A.H.—S., "Probabilistic Study of Safety Criteria for Design," *Structural Research Series No. 387, Department of Civil Engineering, University of Illinois*, Urbana, June. 1972.
- Ellingwood, B., "Statistical Analysis of Rc Beam-Column Interaction," *Journal of the Structural Division. ASCE*, Vol. 103, No. ST7, Proc. Paper 13061, July. 1977, pp. 1377~1388.
- 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.
- Ellingwood, B., "Reliability of Based Criteria for Reinforced Concrete sign", *Journal of the Structural Div., ASCE*, Vol. 105, No. ST4, April 1979, pp. 713~727.
- Ellingwood, B., MacGregor, J.G., Galambos, T. V., and Cornell, C.A., "probability Based Load Criteria: Load Factors and Load Combinations", *Journal of the Structural Div., ASCE*, Vol. 108, No. ST5, May. 1982, pp. 978~997.
- 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, International Recommendations 3rd Ed.*, 1978.
- Galambos, T.V. and Ravindra. M.K., "Load and Resistance Factor Design for Steel", *Journal for the Structural Div., ASCE*, Vol. 104, No. ST9, Sept. 1978, pp. 1337~1353.
- Hanes, R.M., "Second-Moment Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs", *Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Purdue Univ.*, Aug. 1978.
- Haresh C. Shah, "Regression Analysis of R.C. Columns", *Journal for the Str Div. ASCE*, Vol. 90, No. ST1, Feb. 1964, pp. 37~59.
- 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.
- Loporati, E., "The Assessment of Structural Safety", *Series in Cement & Concrete Research, Vol. 1*, Research Studies Press, 1979.
- 白石所人外 2人, "2次モメント法による信賴性設計法に關するニ、三の考察", *日本土木學會 論文報告集 第311號*, 1981.7, pp. 1~12.
- 土木學會構造工學委員會, "構造物の安全性・信賴性" *日本土木學會* 1981年 12月
- 趙孝男, "鐵筋콘크리트 道路橋 上部構造의 信賴性 設計規準에 關한 研究", *大韓土木學會論文集 第2卷 第3號*, 1982年 9月, pp. 87~99.
- 趙孝男, 閔庚周, "鐵筋콘크리트기둥의 信賴性 設計規準에 關한 研究", *大韓土木學會誌 第3卷 第1號*, 1983年 3月, pp. 25~33.
- 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. (接受: 1983. 8. 27)