

現行 許容應力設計法으로 設計되는 RC 휨部材의 信賴性과 安全率 考察

An Investigation of Reliability and Safety Factors in RC Flexural
Members Designed by Current WSD Standard Code

申	鉉	默*
Shin,	Hyun	Mook
趙	孝	男**
Cho,	Hyo	Nam
鄭	煥	浩***
Chung,	Hwan	Ho

Abstract

Current standard code for R.C. design consists of two conventional design parts, so called WSD and USD, which are based on ACI 318-63 and 318-71 code provisions. The safety factors of our WSD and USD design criteria which are taken primarily from ACI 318-63 code are considered to be not appropriate compared to our country's design and construction practices. Furthermore, even the ACI safety factors are not determined from probabilistic study but merely from experiences and practices.

This study investigates the safety level of R.C. flexural members designed by the current WSD safety provisions based on Second Moment Reliability theory, and proposes a rational but efficient way of determining the nominal safety factors and the associated flexural allowable stresses of steel bars and concretes in order to provide a consistent level of target reliability.

Cornell's Mean First-Order Second Moment Method formulae by a log normal transformation of resistance and load output variables are adopted as the reliability analysis method for this study. The compressive allowable stress formulae are derived by a unique approach in which the balanced steel ratios of the resulting design are chosen to be the corresponding under-reinforced sections designed by strength design method with an optimum reinforcing ratio.

The target reliability index for the safety provisions are considered to be $\beta=4$ that is well suited for our level of construction and design practices. From a series of numerical applications to investigate the safety and reliability of R.C. flexural members designed by current WSD code, it has been found that the design based on WSD provision results in uneconomical

*正會員·成均館大學校 教授

**正會員·陸軍士官學校 副教授

***正會員·成均館大學校 助教

design because of unusual and inconsistent reliability.

A rational set of reliability based safety factors and allowable stress of steel bars and concrete for flexural members is proposed by providing the appropriate target reliability $\beta=4$.

要 旨

現行 鐵筋콘크리트 標準示方書는 WSD와 USD의 在來의인 두 가지 設計編으로 構成되어 있는데 이들 設計基準은 ACI 318-63 및 318-71 Code에 기초를 두고 있다. 이와 같이 주로 ACI 318-63 示方書에 기초를 둔 우리의 WSD와 USD의 安全率은 우리의 設計 및 施工實務에 비해 不適切한 것으로 받아들여지고 있다. 더구나 ACI의 安全率도 確率의으로 決定된 것이 아니고 주로 經驗과 現實性을 고려하여 決定된 것이다.

本 研究는 現行 許容應力設計 安全率規定으로 設計되는 휨部材의 安全水準을 2次모멘트 信賴性理論에 의해 考察하고, 一貫性있는 目標信賴性을 提供하는 鐵筋 및 콘크리트의 公稱安全率과 휨許容應力을 合理的이고도 效率的으로 決定하는 方法을 提案하였다.

Cornell의 第1階 二次모멘트法을 荷重과 抵抗 結果變化의 對數變換에 의해 適用하는 方法을 本 研究의 信賴性解析法으로 사용하였다. 最適 鐵筋比를 갖는 極限強設計의 過少鐵筋보에 대응하는 均衡鐵筋比로 設計되는 均衡斷面이 되도록 하는 獨특한 方法으로 콘크리트의 許容壓縮應力을 유도하였다. 우리의 施工 및 設計實務의 水準에 適合한 $\beta_0=4$ 를 安全率 決定을 위한 目標信賴性指數로 택하였다.

現行 WSD 示方書로 設計되는 RC 휨部材의 安全 및 信賴性을 여러 數值計算을 통해 考察해 본 結果, 現行 WSD 基準에 의한 設計는 非定常的이며 一貫性없는 信賴性으로 인하여 非經濟的인 設計도 된다는 事實을 알 수 있었다. 適切한 目標信賴性指數 $\beta_0=4$ 에 따른 휨部材의 鐵筋과 콘크리트의 合理的인 許容應力을 本 研究의 信賴性理論에 의해 提案하였다.

1. 序 論

現行 우리나라 鐵筋콘크리트 標準示方書는 ACI 318-63 Code를 모델로 한 許容應力設計編과 ACI 318-71 Code를 모델로 한 極限強設計編으로 되어 있다. 따라서 ACI 示方書의 安全率, 許容應力, 荷重率 등을 그대로 받아들였거나 임의로 調整하여 使用하고 있는 實情이다. 그러나 이와 같이 우리의 技術水準, Q.C.現實을 合理的으로 고려하지 않고 받아들여 사용하고 있는 現行 設計基準은 安全性과 經濟性의 側面에서 볼 때 一貫性이 없으며 合理的이며 經濟的인 設計를 可能하게 하지도 못하고 있다. 따라서 우리의 現實을 고려한 信賴性 水準에 의한 合理的인 設計基準으로의 改正이 바람직하다. 現在 先進外國에서는 종래의 確定的 設計法인 WSD와 USD 등을 止揚하고, 確率理論에 基礎를 둔 限界狀態 設計法(Limit State Design; LSD)^{(1)~(4)}, 荷重-抵抗係數 設計法(Load and

Resistance Factor Design; LRFD)^{(5)~(7)} 또는 각종 施工材料에 대하여 共通 統合基準으로서의 確率의 限界狀態 設計法(Probability Based Limit State Design; PBLSD)⁽⁸⁾ 등을 導入했거나 導入을 위한 檢討가 進程중에 있다.

이러한 先進諸國의 추세에 보조를 맞추기 위해서는 우리나라도 가급적 조속히 信賴性 設計基準을 받아들여야 하나, 아직도 우리 實務設計者들이 대부분 사용하고 있는 WSD를 전면 폐기할 수 없는 實情에 있기 때문에 LSD, LRFD, PBLSD 같은 信賴性 設計基準으로 전환하기에 앞서 現在 사용하고 있는 WSD 設計基準의 安全率과 許容應力을 信賴性 設計理論에 의하여 우리 現實에 알맞게 calibration하여 사용하는 것이 絶실히 필요한 것이다.

따라서 本 研究에서는 첫 단계로 RC 휨부재의 휨모멘트와 剪斷에 대한 安全率과 鐵筋 및 콘크리트의 許容應力을 제 1제 2차모멘트法에 의해 決定하는 方法을 체계적으로 제시하기 위하

여 現行 WSD 設計基準에 의하여 設計하는 纒
부재의 信賴性을 檢討 考察하며 우리 現實을 고
려한 目標 信賴性指數를 제시하고, 이에 따라
中央安全率(central safety factor), 公稱安全率
(nominal safety factor) 그리고 許容應力設計
에 의한 設計가 強度設計의 最適過少鐵筋보에 대
응하는 均衡斷面으로 Calibration 되게끔 하는 특
특한 方法으로 鐵筋과 콘크리트의 許容應力을 決
定하는 方法과 公式을 구체적으로 제안하였다.

現代의 信賴性 設計理論이라 할 수 있는 제 1
제 2 차모멘트법은 Mayer⁽⁹⁾, Basler⁽¹⁰⁾ 등이 제
안한 基本理論을 Cornell⁽¹¹⁾이 實用的 形態로 제
시했고, Lind-Hasofer⁽¹²⁾는 이를 最小거리法의
概念으로 좀더 체계적인 不變 2次모멘트理論으
로 확장시켰다. 여기에 Ang⁽¹³⁾의 擴張信賴性 概
念에 基礎를 둔 不確實量 解析技法의 달성으로
그간 2次모멘트法은 Level-Ⅰ 信賴性理論^{(14),(15)}
으로서 實用적인 構造 信賴性理論으로 발전되어
각종 構造設計示方書의 設計基準의 개발에 적용
하는 研究가 활발하게 進行되어 왔다. 그 결과
이제는 前述한 LSD, LRFD, PBLSD 基準이 이
미 現代의 設計基準 原型(prototype)으로 認定
되고 있다. 이와 같이 信賴性設計基準이 現在
先進外國의 示方書 모델이 되고 보니 WSD의
安全率과 許容應力의 信賴性理論에 의한 合理的
的 檢討에 관한 研究는 찾아볼 수 없다.

이러한 점에 착안하여 우리 現實에 當분간 불
가피한 WSD의 容許應力과 安全率을 信賴性 側
面에서 合理的으로 決定하는 方法과 理論을 體
系的으로 提示한 것이 本 研究의 核心이다.

2. 構造 安全性 解析 모델

確率變數인 構造抵抗 R 과 荷重效果 S 의 函數
로 表示되는 構造 信賴性의 尺度인 構造物의 破
壞確率 P_f 는 $Z=R-S$ 를 限界狀態函數라 할 때
 $Z=R-S<0$ 의 發生確率로서 다음과 같이 된
다.⁽¹⁵⁾

$$P_f = P\{Z < 0\} = \int_0^{\infty} F_R(s) f_s(s) ds$$

$$= \int_0^{\infty} [1 - F_r(r)] f_R(r) dr \quad (1)$$

여기서 $F_R(r)$, $F_s(s)$ 는 R 과 S 의 確率分布函
數이고, $f_R(r)$, $f_s(s)$ 는 R 과 S 의 確率密度函數

이다.

대개의 경우 R 과 S 가 Gaussian 分布인 경우
가 흔히 사용되고 있으며 따라서 R 과 S 가 正
規分布이면 安全마아진인 限界狀態函數 $Z=R-S$
도 正規分布이므로 $Z=\bar{R}-\bar{S}$, $\sigma_Z=\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2}$
이고, 標準變量 $u=(Z-\bar{Z})/\sigma_Z$ 로 변환시키면

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-Z/\sigma_Z} e^{-u^2/2} du$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\beta} e^{-u^2/2} du = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

여기서, β 는 信賴性指數(Reliability Index)로
定義되며 그림 1 에서와 같이

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3)$$

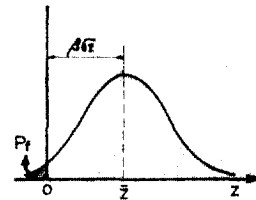


그림 1

그러므로 使用 및 極限限界狀態에 대한 통상
적인 許容範圍로서의 P_f 와 β 의 관계는 表 1 과
같다.

表 1. P_f 와 β 의 關係

限界狀態	$P_f = \Phi(-\beta)$	β
使用	10^{-1}	1.282
	10^{-2}	2.326
極限	10^{-3}	3.090
	10^{-4}	3.719
	10^{-5}	4.265
	10^{-6}	4.753
	10^{-7}	5.199

만면에, R 과 S 가 對數正規分布인 경우 限界
狀態函數는 $Z=\ln R - \ln S$ 이므로

$$P_f = P\{Z < 0\} = F_Z(0) = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

이며

$$\beta = \frac{Z}{\sigma_Z} = \frac{\ln \bar{R} - \ln \bar{S}}{\sigma_{\ln R/S}} \quad (5)$$

이고

$\ln \bar{R} = \ln \bar{R}$, $\ln \bar{S} = \ln \bar{S}$, $\bar{R} = \bar{R} \sqrt{1 + \Omega_R^2}$, $\bar{S} = \bar{S} \sqrt{1 + \Omega_S^2}$, $\sigma_{\ln R} = \sqrt{\ln(1 + \Omega_R^2)}$, $\sigma_{\ln S} = \sqrt{\ln(1 + \Omega_S^2)}$, $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln S}^2}$ 등의 관계를 식 (5)에代入하여 정리하면 β 는 다음과 같이 유도된다.

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{\bar{R}}{\bar{S}} \sqrt{\frac{1 + \Omega_S^2}{1 + \Omega_R^2}} \right)}{\sqrt{\ln(1 + \Omega_S^2)(1 + \Omega_R^2)}} \quad (6. a)$$

Ω_R , Ω_S 가 0.3보다 작은 경우에는

$$\beta \approx \ln(\bar{R}/\bar{S}) / \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2} \quad (6. b)$$

中央安全率(Central Safety Factor) n_0 와 β 의 관계는

$$\beta = \ln \left[n_0 \sqrt{\frac{\Omega_S^2 + 1}{\Omega_R^2 + 1}} \right] / \sqrt{\ln(\Omega_R^2 + 1)(\Omega_S^2 + 1)}$$

이므로

$$n_0 = \sqrt{\frac{\Omega_R^2 + 1}{\Omega_S^2 + 1}} \exp \left[\beta \sqrt{\ln(\Omega_R^2 + 1)(\Omega_S^2 + 1)} \right] \quad (7. a)$$

$$\approx \exp[\beta \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2}] \quad (7. b)$$

R 과 S 의 確率分布에 無關하게 근사적으로 β 를 解析하는 2次모멘트法⁽¹⁵⁾에서는 破壞確率 대신에 標本平均과 分散에 의해 上記한 式(6)에 의하여 구한다. Hasofer, Lind⁽¹²⁾는 信賴性指數 β 를 限界狀態函數 $Z = g(R, S) = R - S$ 의 破壞境界 $R - S = 0$ 까지의 거리로 定義하고 R 과 S 를 對數變換시켜 β 를 구하면 式(6)과 같이 유도된다. 이와 같은 형태의 限界狀態方程式은 Mexico⁽⁶⁾와 Canada⁽⁴⁾의 信賴性設計基準에서 사용된 바 있다.

現在 우리가 使用하고 있는 公稱安全率 n' 는 公稱抵抗 R' 와 公稱荷重 S' 의 比 $n' = R'/S'$ 이며 L.S.D.^{(1), (2)}에서는 公稱值로서 材料의 強度 또는 荷重變數의 確率分布의 fractile로부터 구한 特性值(characteristic value)를 사용하므로 特性值 $R' = \bar{R}(1 - k_R \Omega_R)$, $S' = \bar{S}(1 + k_S \Omega_S)$ 인 경우

$$n' = n_0 \frac{1 - k_R \Omega_R}{1 + k_S \Omega_S} \quad (8)$$

R 과 S 가 正規分布인 경우 $R' = R_{0.05}$, $S' = S_{0.95}$ 로 Fractile를 취하면 $k_R = k_S = 1.645$ 이고, 設計安全率로 $R' = R_{0.005}$ 을 사용하면 $k_R = 2.576$ 이

된다.

3. 平均과 分散의 算定

Ang⁽¹³⁾의 擴張信賴性 概念에 基礎를 두고 Ang-Cornell⁽¹⁴⁾이 구체적으로 제시한 構造抵抗과 荷重에 관계되는 각종 不確實量(uncertainty)의 解析 및 算定方法은 文獻⁽¹⁸⁾에 詳述되어 있으므로 여기서는 그 結果만을 제시하고자 한다.

Ellingwood가 各種 文獻에 발표된 材料의 強度 및 荷重에 관한 統計資料에 의하여 抵抗 및 荷重의 平均과 變動係數를 計算한 結果는 表 2에 수록된 바와 같다. 한편 우리 나라의 資料에 대한 콘크리트의 平均 및 COV 計算値와 鐵筋의 平均 및 COV 計算値는 Ellingwood의 結果値보다 조금 적은 값을 나타내고 있는데 本 研究에서는 Ellingwood의 結果値를 사용하였다.

또한 荷重에 관한 平均·公稱比와 不確實量의 範圍는 우리나라에서 統計的으로 研究 集成된 바 없으므로 Ellingwood가 計算한 ANSI의 荷重에 대한 統計値를 適用하는 외에, ANSI 平均과 公稱荷重比가 0.9~1.35 정도이므로 이는 우리의 경우 그대로 적용할 수 없는 것이고 통상 公稱荷重이 平均荷重보다 크게 보는 것이 타당하므로 우리의 경우는 0.9~1.1로 적용하였다.

表 2-a. 抵抗에 대한 統計値

원		단	
\bar{R}/R'	Ω_R	\bar{R}/R'	Ω_R
1.12	0.13~0.16	1.18	0.21~0.23

表 2-b. 荷重效果에 대한 統計値

死 荷 重		活 荷 重	
S/S'	Ω_S	S/S'	Ω_S
1.0	0.10	변 합	0.26

4. 公稱安全率과 許容應力

公稱安全率 $n' = R'/S'$ 와 鐵筋과 콘크리트의 許容應力 σ_{sa} , σ_{ca} 를 결정하기 위해서는 먼저 우리 實情에 맞는 目標信賴性指數 β_0 를 決定하여야 한다.

Ellingwood 는 LRFD 信賴性設計基準을 제안하기 위한 ACI 318-77 Code 에 의한 calibration 으로부터 휨부재의 目標信賴性指數를 휨저항에 대해 $\beta_0=3.0$, 剪斷의 경우 $\beta_0=3.2$ 로 하고 있지만, 우리나라 現示方書에서 휨부재의 휨에 대한 信賴性指數가 뒤의 計算結果에서 알 수 있는 바와 같이 4.0~4.5이므로 뒤의 計算結果와 우리의 QC 水準과 現實을 고려할 때 휨에 대한 目標信賴性指數 β_0 는 4.0 정도가 바람직하고 剪斷에 대해서는 보를 휨引張破壞로 유도하는 것이 타당하므로 휨보다는 약간 높은 4.0~4.2 정도가 좋다고 판단된다. β_0 로부터 中央安全率 n_0 를 식 (7)에 의해 계산할 수 있으므로 公稱安全率은 n_0 에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$n' = \frac{R'}{S'} = \frac{\bar{R}/\xi_R}{\bar{S}/\xi_S} = n_0 \frac{\xi_S}{\xi_R} \quad (9)$$

여기서 $\xi_R = \bar{R}/R'$; 抵抗의 平均公稱比
 $\xi_S = \bar{S}/S'$; 荷重의 平均公稱比

公稱安全率 n' 가 구해지면 휨부재는 휨引張破壞에 의해 파괴되도록 設計되어야 하므로 鐵筋의 許容應力 σ_{sa} 는 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{sa} = \sigma_y / n'_M \quad (10)$$

여기서, n'_M 은 휨抵抗에 의해 구해진 公稱安全率이며 $n'_M = M_u'/S_M'$

콘크리트의 安全率은 β_0 와 σ_{sa} 로 設計되는 均衡斷面(balanced section)이 強度設計法에 의한 적절한 過少鐵筋보에 대응하는 斷面으로 設計되어야 合理的인 設計가 된다. 따라서 均衡鐵筋比 p_b 를 過少鐵筋보(underreinforced beam)로서의 적절한 鐵筋比인 $\frac{1}{2} p_{max}$ 또는 最適鐵筋比 $p_0^{(19)}$ 가 되게 취함으로써 이에 대응하는 콘크리트의 許容應力을 다음과 같이 計算할 수 있다.

$$\frac{\sigma_{ca}}{2\sigma_{ca}} \left(\frac{n\sigma_{ca}}{\sigma_{sa} + n\sigma_{ca}} \right) = p_b \Rightarrow \left\langle \frac{1}{2} p_{max} \right\rangle p_0 \quad (11)$$

$$\text{따라서 } \sigma_{ca} = p_b \sigma_{sa} - \sqrt{p_b^2 \sigma_{sa}^2 + 2p_b \sigma_{sa}^2 / n} \quad (12)$$

여기서, n 은 彈性係數比

剪斷에 대한 目標信賴性指數 β_0 에 의한 콘크리트의 許容剪斷應力 τ_a 는 剪斷에 대한 公稱安全率 n_v' 로부터 구할 수 있다.

$$n_v' = \frac{V_u'}{S_v'} = n_{ov} \frac{\xi_{sv}}{\xi_v}$$

여기서, $n_{ov} = \bar{V}/\bar{S}_v$, $\xi_{sv} = \bar{S}_v/S_v'$, $\xi_v = \bar{V}/V'$ 콘

크리트의 公稱剪斷強度는 強度設計에서의 斜引張龜裂이 시작되는 公稱剪斷應力 $\tau_c = 0.53 \sqrt{\sigma_{ck}}$ 에 의하여 계산되어야 하므로,

$$n_v' = V_u'/S_v' = \tau_c(bd) / \tau_a(bd)$$

로 되고 따라서

$$\tau_a = \tau_c / n_v' \quad (14)$$

에 의하여 구해진다.

5. 適用 및 考察

앞의 2, 3에서 제시한 信賴性 解析모델과 不確實量을 適用하여 現行 許容應力設計法으로 設計되는 R.C.휨부재의 信賴性을 解析하고 目標信賴性指數와 4에서 제안한 許容應力 決定方法 및 公式에 의해 公稱安全率, 鐵筋 및 콘크리트의 許容應力을 計算함으로써 그 結果를 分析 考察하였다.

1) 計算條件

a) 適用對象: 支間 8m 및 10m의 RC 單鐵筋 직사각형 보

b) 材料의 性質

$$\sigma_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2, \sigma_y = 3,500 \text{ kg/cm}^2$$

(SBD 35)

c) 抵抗

	\bar{R}/R'	Ω_R
휨	1.12	0.13, 0.16
剪斷	1.18	0.22

d) 荷重

	死荷重	ANSI 荷重	適用活荷重
公稱值	$D' = L'/(L/D)$	$L_c = 50 \text{ psf}$ $L' \Rightarrow A_7, L/D$ 에 의해 변환	$L' = 0.5 \text{ t/m}$, 1 t/m, 1.5 t/m, 2 t/m, 2.5 t/m, 3 t/m
平均·公稱比	1.0	0.9~1.35	1.10
變動係數	0.10	0.26	0.26
適用荷重比	$L/D \Rightarrow 0.5,$	1, 1.5, 2	

2) 計算結果

現行 許容應力設計와 Ellingwood^{(7), (8)}가 目標信賴性指數를 決定하기 위해 計算한 ACI 318-77

強度設計에 의한 RC 보의 휨에 대한 信賴性을 比較하기 위해 支間 10m 單純보에 ANSI 設計荷重이 작용할 경우에 대한 信賴性指數 β 를 式(6)에 의하여 計算한 結果를 比較한 것이 그림 2이다. 그림 2에서 β 는 Ω_R , L/D, 分擔面積 A_T 등에 대해 許容應力設計와 強度設計 모두 同一한 變化的 樣狀을 보이지만, 許容應力設計의 경우 β 가 대체로 4~5인데 反해 強度設計에서는 2.5~3.5 정도이므로 WSD 斷面이 USD 斷面보다 同一한 設計條件에 대해 1.5 內外로 높은 信賴性을 갖는 設計가 됨을 알 수 있다.

그림 3은 휨에 대한 β 의 荷重比에 대한 敏感受度를 考察하기 위하여 支間 8m의 單純보에 고려 活荷重 W_L 을 作用시켰을 때의 計算結果를 보여

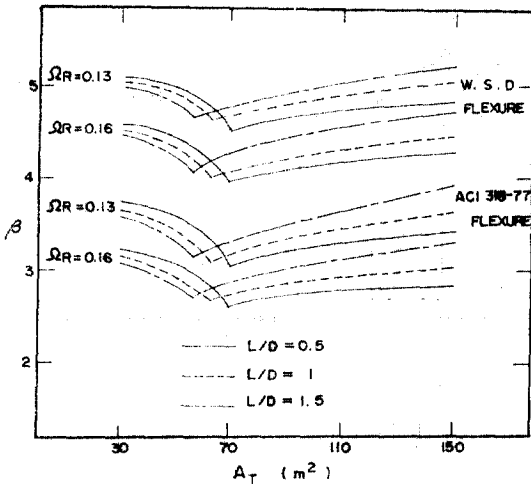


그림 2. A_T vs β

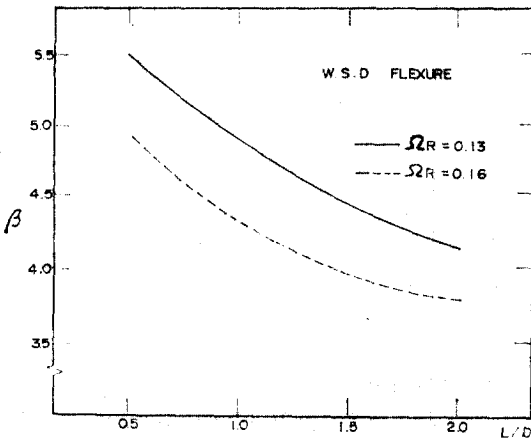


그림 3. L/D vs β

주는 것이다. 휨의 경우 β 는 L/D의 增加에 따라 그리고 Ω_R 의 變動에 따라 5.5~4.0 사이를 거의 直線으로 變하고 있다.

또한 그림 4에서는 휨에 대한 β 는 W_L 의 크기에 無關함을 보여주고 있다.

이에 反하여 剪斷의 경우는 휨보다 낮은 信賴性 값인 2.5~4의 범위에서 L/D, W_L , 剪斷力 V의 크기에 따라 變하는데 剪斷에 대한 β 의 값이

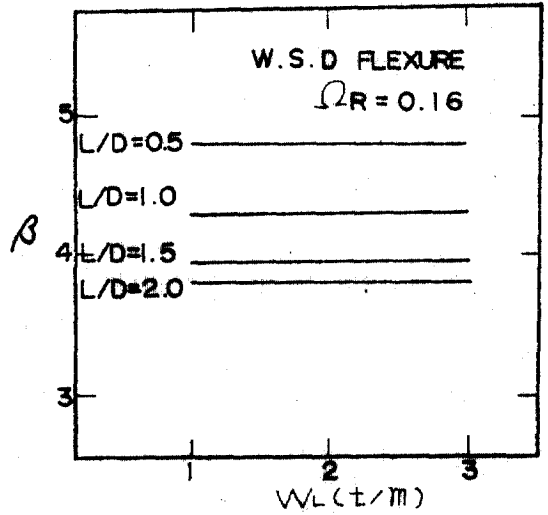


그림 4. W_L vs β

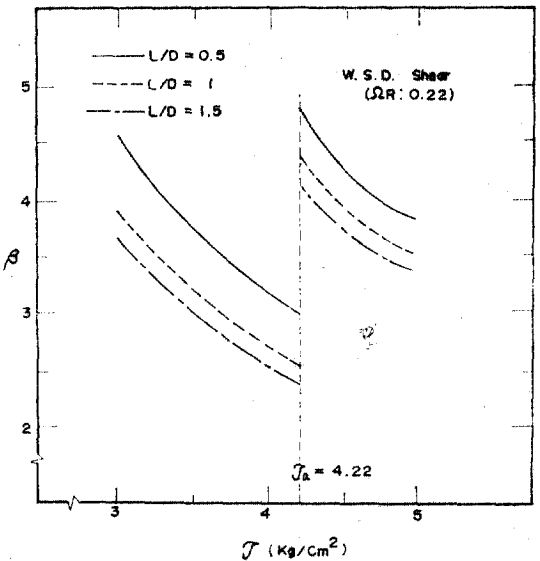


그림 5. σ vs β

L/D, W_L 의 증가에 따라 약간씩 減小하는 傾向이 있지만 剪斷에 대한 β 값과 L/D, W_L 과의 一貫性있는 關係를 얻을 수 없으므로 剪斷에 대한 β 값은 그림 5에서 보는 것과 같이 剪斷應力에 대하여 說明되어질 수 있다. 즉 剪斷에 대한 β 는 剪斷應力의 增加에 따라 減少하다가 剪斷補強이 필요한 콘크리트의 許容剪斷應力($\tau_a=0.29\sqrt{\sigma_{ck}}$)을 지난 때는 점프하여 매우 큰 信賴性을 나타내고 있는 것이다.

現行 許容應力設計法에 의한 設計斷面의 信賴性이 대개 3~5의 範圍에 있으므로 目標信賴性指數 $\beta_0=3\sim 5$ 의 範圍에 대한 公稱安全率, 鐵筋 및 콘크리트의 許容應力 σ_{cs} , σ_{sa} , 콘크리트의 許容剪斷應力 τ_a 를 式 (9)~(14)에 의하여 計算한 結果는 그림 6, 7에 圖示되고 表 3, 4, 5에 收錄된 바와 같다. 表 3 및 그림 6에서 鐵筋의 許容應力 σ_{sa} 는 $\beta_0=3.75$, $\Omega_R=0.13$ 의 경우가 現行 SBD 30의 許容應力에 대응하는 값이지만 $\beta_0=4.0$ 과 우리 現實에 適合한 $\Omega_R=0.16$ 의 경우 公稱安全率은 $n'=2.285$ 로서 이에 대응하는 $\sigma_{sa}=0.44\sigma_s$ 이므로 現行 示方書 값보다 낮은 許容應力을 주는 것을 알 수 있다.

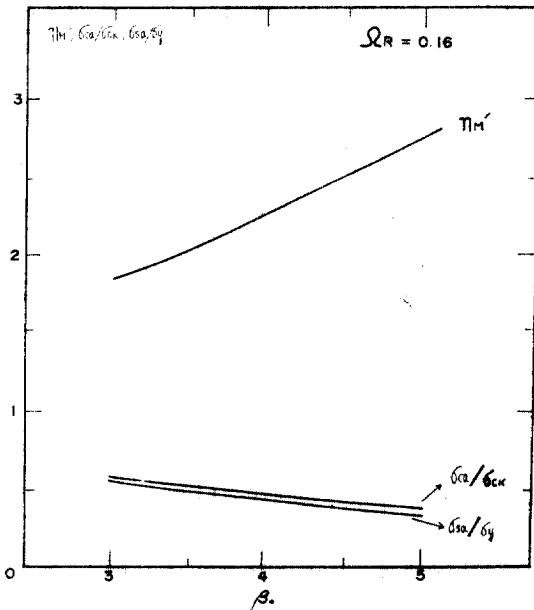


그림 6. β_0 vs nM' , σ_{cs}/σ_{ck} , σ_{sa}/σ_s

한편 콘크리트에 대한 許容壓縮應力은 式(12)에 의해 強度設計 $\frac{1}{2}p_{max}$ 에 대해 計算한 結果는 表 4에 收錄하였는데 $\beta_0=4$ 에 대응하는 σ_{ca} 는 現行 σ_{ca} 보다 $\Omega_R=0.16$ 의 경우 0.04~0.1 정도 높고, $\Omega_R=0.13$ 의 경우는 0.07~0.15 정도로 높게 나타난다.

剪斷에 대한 許容剪斷應力은 表 5와 같고 그림 7에 表示되어 있다. $\beta_0=4.0$, 4.2의 경우에 대해 $\tau_a=0.21\sqrt{\sigma_{ck}}$, $0.20\sqrt{\sigma_{ck}}$ 로 現行 示方書 값 $\tau_a=0.29\sqrt{\sigma_{ck}}$ 보다 낮은 값으로 됨을 보여주고 있다.

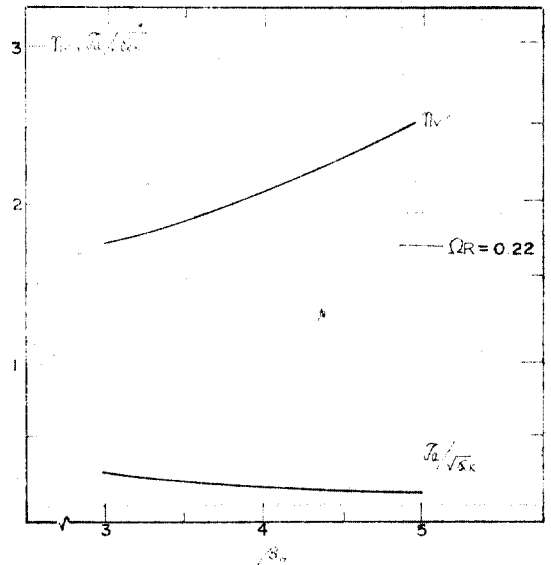


그림 7. β_0 vs nV' , $\tau_a/\sqrt{\sigma_{ck}}$

表 3-a. β_0 와 nM' 의 비교

β_0	Ω_R	
	0.16	0.13
3	1.871	1.539
3.25	1.967	1.825
3.5	2.068	1.907
3.75	2.174	1.993
4	2.285	2.084
4.25	2.402	2.178
4.5	2.525	2.276
4.75	2.657	2.379
5	2.793	2.486

表 3-b. β_0 와 σ_{sa}/σ_y 의 비교

β_0	Ω_R	0.16	0.13
3.00		0.5345	0.6499
3.25		0.5084	0.5480
3.50		0.4835	0.5243
3.75		0.4610	0.5016
4.00		0.4376	0.4798
4.25		0.4163	0.4592
4.50		0.3961	0.4393
4.75		0.3763	0.4203
5.00		0.3583	0.4021

表 4-A. $\beta_0=4$ 일 때 σ_{ca}/σ_{ck} , $\Omega_R: 0.13$

σ_{ck}	σ_y	2,400	2,800	3,000
210		0.488	0.500	0.505
240		0.466	0.477	0.482
270		0.466	0.477	0.482
300		0.445	0.455	0.459
320		0.431	0.440	0.444

表 4-B. $\beta_0=4.5$ 일 때 σ_{ca}/σ_{ck} , $\Omega_R: 0.13$

σ_{ck}	σ_y	2,400	2,800	3,000
210		0.533	0.547	0.553
240		0.509	0.522	0.527
270		0.509	0.522	0.527
300		0.486	0.498	0.502
320		0.4705	0.481	0.486

表 4-C. $\beta_0=5$ 일 때 σ_{ca}/σ_{ck} , $\Omega: 0.13$

σ_{ck}	σ_y	2,400	2,800	3,000
210		0.447	0.458	0.463
240		0.427	0.437	0.441
270		0.426	0.437	0.441
300		0.407	0.417	0.420
320		0.394	0.403	0.406

表 4-A'. $\beta_0=4$ 일 때 σ_{ca}/σ_{ck} , $\Omega_R: 0.16$

σ_{ca}	σ_y	2,400	2,800	3,000
210		0.486	0.495	0.500
240		0.465	0.475	0.481
270		0.464	0.475	0.478
300		0.444	0.454	0.457
320		0.428	0.439	0.443

表 4-B'. $\beta_0=4.5$ 일 때 σ_{ca}/σ_{ck} , $\Omega: 0.16$

σ_{ck}	σ_y	2,400	2,800	3,000
210		0.443	0.451	0.456
240		0.421	0.430	0.422
270		0.410	0.430	0.434
300		0.401	0.410	0.414
320		0.387	0.396	0.400

表 4-C'. $\beta_0=5$ 일 때 σ_{ca}/σ_{ck} , $\Omega_R: 0.16$

σ_{ck}	σ_y	2,400	2,800	3,000
210		0.396	0.408	0.409
240		0.381	0.389	0.393
270		0.380	0.389	0.393
300		0.363	0.372	0.374
320		0.350	0.359	0.362

表 5. β_0 와 n_V' , $\tau_a/\sqrt{\sigma_{ck}}$ 비교

β_0	n_V'	$\tau_a/\sqrt{\sigma_{ck}}$
3.00	1.977	0.268
3.25	2.105	0.252
3.50	2.241	0.237
3.75	2.386	0.222
4.00	2.540	0.209
4.25	2.704	0.196
4.50	2.880	0.184
4.75	3.065	0.173
5.00	3.264	0.164

3) 分析 및 考察

前述한 計算結果를 綜合 分析해 보면 다음과 같은 事實을 發見할 수 있다.

(a) 그림 2에서 보면, 모든 경우에 대하여 WSD 設計가 USD 設計보다 1.5 內외의 높은 信賴性을 갖는 設計로 됨을 보여주는데 이는 우리나라의 WSD의 許容應力이 美國 ACI 318-77 強度設計나 우리나라의 USD 보다 非合理的이

며 非經濟的인 設計結果를 준다는 통념을 뒷받침하는 것이다.

(b) 分擔面積 A_T 에 따라 β 가 변하는 것과 70 m²에서 폭 들어간 것은 Ellingwood가 지적한 것과 같이 ANSI 公稱荷重 L' 의 A_T 에 따른 減少가 통계적으로 一貫性있게 처리된 것이 아니기 때문이다.

(c) 信賴性指數 β 는 휨에 대한 β 가 一般的으

로 剪斷에 대한 β 보다 크게 나타나는데 이는 現行 WSD 設計基準은 剪斷破壞의 信賴性을 韌破壞의 信賴性보다 높게하므로써 RC 보는 韌引張破壞에 의해 파괴되도록 設計해야 된다는 設計概念에 어긋나게 되어 있음을 보여 주는 것이다.

(d) 그림 3, 4에서 韌에 대한 β 는 L/D의 增加에 따라 거의 直線으로 減少하는데 이는 L/D가 增加함에 따라 活荷重 不確實量 Ω_L 의 영향이 커지기 때문이다.

반면에 剪斷에 대한 β 는 斷面치수가 韌에 의해 決定되는 정상적인 경우에 \bar{V}, \bar{S}_v 등이 b/d 比, 荷重크기 등에 따라 달라지므로 β 도 이에 따라 變하게 된다. 한편 그림 5는 剪斷에 대한 β 가 剪斷應力の 增加에 따라 減少한다는 것을 잘 보여 줄 뿐 아니라 $\tau = \tau_a$ 에서 剪斷補強이 필요한 斷面으로 되는 경우 信賴性指數 β 가 1 이상 뛰어나오는데 이는 剪斷補強이 필요한 경우 最少剪斷補強鐵筋 基準으로 인해 β 가 急增함을 보여 주는 것이다.

(e) Ellingwood⁽⁷⁾와 Galambo^{(5), (6)} 등은 韌部材의 目標信賴性指數 β_0 를 韌의 경우 3.0, 剪斷의 경우 3.2 정도로 제안하고 있는데 이는 위에서 考察한 現行 韌部材設計의 信賴性 4~5에 비하면 크게 낮은 값이다. 따라서 우리의 技術水準, QC 現實 등을 감안할 때 우리 나라에서는 韌에 대한 目標信賴性指數 β_0 를 4.0, 剪斷에 대한 β_0 는 이보다 약간 높은 4.2가 設計概念上 바람직하다고 본다.

(f) 表 3에서 目標信賴性指數에 대응하는 公稱安全率, 鐵筋의 許容應力을 보면 우리의 現實에 맞는 $\Omega_R = 0.16$, $\beta_0 = 4$ 의 경우 $\sigma_{sa} = 0.44 \sigma_y$ 로 SBD 24의 경우 現行 $1,300 \text{ kg/cm}^2$ 보다 훨씬 낮은 $1,050 \text{ kg/cm}^2$ 이 되도록 現行 許容應力을 약간 下向 調整해야 하고, SBD 24~SBD 35까지는 $\sigma_{sa} = 0.44 \sigma_y$ 로 同一한 許容應力 公式를 適用함이 바람직한 것으로 思料된다.

(g) 本 研究에서 제안한 公式 (12)에 의해 $\beta_0 = 4.0$ 에 대응하는 콘크리트의 許容應力은 表 4에서 材料의 公稱強度에 따라 $0.42 \sqrt{\sigma_{ck}} \sim 0.5 \sqrt{\sigma_{ck}}$ 정도로 나타나는데 이는 現行 콘크리트의 許容應力보다 약간 높은 값이므로 現行을 그대

로 使用하거나 $0.45 \sqrt{\sigma_{ck}}$ 로 종전과 같이 사용해도 무방하다고 생각된다. 그러나 本 研究에서는 上限值인 $0.42 \sqrt{\sigma_{ck}}$ 를 許容應力으로 취하는 것이 바람직하다고 보았다.

(h) 剪斷에 대한 目標信賴性指數는 $\beta_0 = 4.2$ 로 하는 것이 (e)에서 考察한 바와 같이 合理的이라고 判斷되므로, 이와 같이 하는 경우 許容剪斷應力은 $\tau_a = 0.20 \sqrt{\sigma_{ck}}$ 이므로 現行 許容剪斷應力 $0.29 \sqrt{\sigma_{ck}}$ 는 下向 調整함이 바람직하다.

6. 結 論

本 研究에서는 Cornell의 MFOSM 信賴性理論에 의해 現行 許容應力設計法으로 設計되는 韌部材의 安全性를 檢討, 分析하고 RC 韌部材의 許容應力을 決定하는 效率的이며 實際的인 方法을 제안하였고, 특히 콘크리트의 許容剪壓應力은 最適過少鐵筋으로 설계되게끔 결정하는 독특한 方法을 유도하였다. 提案된 信賴性解析 및 安全率 決定方法을 現行 許容應力設計에 적용하여 信賴性을 檢討 分析하고, 우리의 技術水準을 고려한 目標信賴性指數 範圍에 대한 安全率, 許容應力 등을 計算한 結果를 考察해 보면 다음과 같이 結論을 要約할 수 있다.

1) 現行 許容應力設計法으로 設計되는 韌部材는 外國의 設計基準과 信賴性의 側面에서, 不合理하며 非經濟的이라는 것을 알 수 있으며 따라서 現行 設計示方書의 許容應力의 調整이 절실히 요구된다.

2) 우리 現實에 맞는 目標信賴性指數는 韌의 경우 $\beta_0 = 4.0$, 剪斷의 경우 $\beta_0 = 4.2$ 정도로 취하는 것이 合理的이라고 判斷된다.

3) 上記한 目標信賴性指數와 우리의 現實을 고려한 不確實量 水準에 의한 本 研究에서 제안하는 許容應力은 다음과 같다.

鐵筋의 許容應力: $\sigma_{sa} = 0.44 \sigma_y (\beta_0 = 4, \Omega_R = 0.16)$
 콘크리트의 許容壓縮應力: $\sigma_{ca} = 0.42 \sigma_{ck} (\beta_0 = 4, \Omega_R = 0.16)$

콘크리트의 許容剪斷應力: $\tau_a = 0.20 \sqrt{\sigma_{ck}} (\beta_0 = 4.2, \Omega_R = 0.22)$

4) 本 研究에서 제시한 2次모멘트法에 의한 許容應力 決定方法 그리고 許容콘크리트應力의 韌

引張破壞보로서의 합리적이며 독특한 決定公式
은 設計荷重과 強度에 대한 좀더 現實的인 統計
資料가 可用한 대로 쉽게 適用하여 許容應力을
合理的으로 改正해 갈 수 있게 하는 效率的이며
實用的인 方法이다.

5) 本 研究에서 제안한 信賴性解析 및 安全率
決定모델은 기둥, 슬래브, 옹벽 등과 같은 다른
Rc 構造要素에도 그대로 擴張 適用할 수 있으
며, 현재 이 分野의 研究가 進行 중에 있다.

參 考 文 獻

1. "Common Unified Rules for Different Types of Construction and Material," Vol. 1, CEB-FIP International Recommendations, 3rd ed., 1978.
2. "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures," Vol. 1, CEB-FIP International Recommendations, 3rd ed., 1978.
3. "Code of Practice for the Structural Use of Concrete," CP 110, Part 1, BSI, London, England, 1972.
4. Allen, D.E., "Limit States Design-A Probabilistic Study," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 1, 1976, pp.36-49.
5. Ravindra, M.K., and Galambo, T.V., "Load and Resistance Factor Design for Steel," Journal of Structural Div, ASCE, Vol. 104, No. ST9, Sept. 1978, pp.1337-1363.
6. Galambos, T.V., "Proposed Criteria for Load and Resistance Factor Design of Steel Building Structures," RR No. 45, Dept. of Civil Eng., Washington Univ., St. Louis, Mo., May 1976.
7. Ellingwood, B., "Reliability Based Criteria for Reinforced Concrete Design," Journal of Structural Div., ASCE, Vol. 105, No. ST 4, April 1979, pp.713-727.
8. Ellingwood, B., Galambo, T.V., MacGreger, J.G. and Cornell, C.A., "A Probability-Based Load Criteria for Structural Design," Civil Engineering, ASCE, July 1981, pp.74-76.
9. Mayer, H., "Die Sicherheit der Bauwerke," Springer Uerlag, Berlin, 1926.
10. Basler, E., "Analysis of Structural Safety," Special Publication 31, The American Concrete Institute, Denver, Colo., Mar. 1971, pp.189-222.
11. Cornell, C.A., "A Probability-Based Structural Code," Proceedings of the American Concrete Institute, Vol. 66, No. 12, Dec. 1969, pp.974-985.
12. Hasofer, A.M. and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format," Journal of the Engineering Mechanics Div, ASCE, Vol. 100, No. EM1, Feb. 1974, pp.111-121.
13. Ang, A. H-S and Amin, M. "Safety Factors and Probability in Structural Design," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95, No. ST7, Jul. 1969, pp.1389-1405.
14. Ang, A. H-S., and Cornell C.A., "Reliability Bases of Structural Safety and Design," Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 100, No. ST9, Sept. 1974, pp.1755-1769.
15. Loporati, E., "The Assessment of Structural Safety," Series in Cement & Concrete Research, Vol. 1, Research Studies Press, 1979.
16. Rosenblueth, E., and Esteva, L., "Reliability Basis for Some Mexican Codes," SP-31, ACI, Detroit, Mich, 1972, pp.1-42.
17. Allen, D.E., "Limit States Design-A Probabilistic Study," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 1, 1976, pp.36-49.
18. 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.

(接受: 1981.11.4)