

# 鐵筋콘크리트 道路橋 上部構造의 信賴性 設計規準에 관한 研究

A Study on Reliability Based Design Criteria for Reinforced  
Concrete Bridge Superstructures

趙 孝 男\*  
Cho, Hyo Nam

## Abstract

This study proposes a reliability based design criteria for the R.C. superstructures of highway bridges. Uncertainties associated with the resistance of T or rectangular sections are investigated, and a set of appropriate uncertainties associated with the bridge dead and traffic live loads are proposed by reflecting our level of practice.

Major 2nd moment reliability analysis and design theories including both Cornell's MFOSM (Mean First Order 2nd Moment) Methods and Lind-Hasofer's AFOSM (Advanced First Order 2nd Moment) Methods are summarized and compared, and it has been found that Ellingwood's algorithm and an approximate log-normal type reliability formula are well suited for the proposed reliability study.

A target reliability index ( $\beta_0=3.5$ ) is selected as an optimal value considering our practice based on the calibration with the current R.C. bridge design safety provisions.

A set of load and resistance factors is derived by the proposed uncertainties and the methods corresponding to the target reliability. Furthermore, a set of nominal safety factors and allowable stresses are proposed for the current W.S.D. design provisions. It may be asserted that the proposed L.R.F.D. reliability based design criteria for the R.C. highway bridges may have to be incorporated into the current R.C. bridge design codes as a design provision corresponding to the U.S.D. provisions of the current R.C. design code.

## 要 旨

R.C. 道路橋 上部構造의 信賴性 設計 基準을 提案하는 것이 本 研究의 主要 內容이다. T형 및 4각형 斷面의 抵抗 不確實量과 橋梁死荷重 및 交通活荷重에 대한 不確實量을 우리의 現實을 반영하는 適切한 값으로 提案하였다. Cornell의 MFOSM과 Lind Hasofer의 AFOSM을 포함하는 주요 2次모멘트 信賴性 理論을 比較 分析하므로써 Ellingwood의 反復試行 알고리즘과 對數正規型 近似公式을 本 研究에서 提案하는 信賴性 解析 및 設計基準의 유도에 사용함이 適切하다는 것을 알 수 있었다. 現行 道路橋 設計規準에 따라 Calibration하므로써 目標信賴性指數  $\beta_0=3.5$ 를 우리의 現實을 반영하는 最適值로 選擇하였다. 上記한 不確實量 解析 理論에 의해  $\beta_0=3.5$ 에 對應하는 荷重 및 抵抗係數를 유도하였다. 그리고 現行 WSD 道路橋 設計 規準을 위해

\* 正會員 · 陸軍士官學校 副教授

信賴性 理論에 의한 公稱安全率과 許容應力을 提案하였다.

本 研究에서 提案하는 R.C.道路橋의 LRFD 信賴性 設計基準을 現行 R.C.標準設計 示方書의 規準에 對應하는 設計基準으로 導入함이 바람직하다는 事實을 確認할 수 있었다.

## 1. 序 論

道路橋의 主荷重은 交通車輛荷重인 故로 橋梁의 壽命期間內에 發生할 最大載荷條件을 確定的으로 推定하기란 거의 不可能하다. 더구나, 風荷重, 地震 等과 같은 2次 活荷重의 組合에 의한 最惡의 載荷條件, 材料의 現場強度, 施工載荷, 製作誤差 等은 豫測하기 不可能할 정도로 不確實性이 많다. 따라서 다른 어느 種類의 構造物보다도 確率理論에 基礎를 둔 設計法의 開發이 要請된다.

現行 R.C.標準示方書의 許容應力設計規準과 強度設計規準으로 設計되는 構部材의 信賴性和 安全率, 그리고 LRFD 設計基準의 導入方向 等은 既發表된 論文<sup>(24,25)</sup>에 詳述되어 있으므로 여기서는 信賴性解析 및 設計理論의 發展推移, 基本概念 等은 加급적 중복을 피하는 方向으로 記述하였다.

本 論文은 一般 R.C. 構造와는 荷重의 統計의 特性和 構造의 不確實性의 特性이 相異한 우리나라의 R.C.道路橋上部構造의 信賴性解析 및 設計規準의 開發을 위한 基礎研究에 目的을 두고 있다.

道路橋의 荷重, 強度 等에 관한 統計의 取扱方法과 各國의 道路橋 設計規準에서의 安全性의 取扱方向에 대해서는 文獻 16에 詳細하게 紹介되어 있다. 英國을 中心으로 한 유럽 先進諸國에서는 限界狀態設計法으로 된 CEB-FIP 信賴性設計 規準에 基礎를 둔 LSD(Limit State Design)型 R.C. 道路橋 設計示方書가 數年前부터 使用되어 오고 있다<sup>(2,4,11)</sup>. 美國에서는 아직도 AASHTO 示方書에 信賴性 理論에 基礎를 둔 設計法을 導入하지 않고 있으나, Galambo<sup>(12)</sup>, Ellingwood<sup>(5,6,7)</sup>, Cornell<sup>(8,9)</sup>, 等을 中心으로 PBLSD(Probability Based Limit State Design)<sup>(10)</sup>의 形態로서의 施工材料에 無關한 荷重組合 一般信賴性規準의 開發과 LRFD<sup>(5)</sup>(Load and Resistance

Factor Design)型 R.C.構造의 信賴性設計規準의 導入을 위한 檢討가 活發하게 進行중에 있다. 最近에 Shiraishi 等<sup>(17)</sup>은 2次 모멘트法에 의한 信賴性 理論인 Cornell의 MFOSM<sup>(15)</sup>(Mean First Order Second Moment)法과 Lind-Hasofer의 AFOSM<sup>(15,14)</sup>(Advanced First Order Second Moment)法의 相關性을 考察하고 鋼道路橋의 荷重 및 抵抗係數의 支間에 따른 變化 等을 考察한 바 있다. 한편, 道路橋荷重의 統計의 算定方法에 대한 研究는 Asplund<sup>(1)</sup>의 橋梁活荷重의 確率의 考察 以來로 最近 Fujino<sup>(18)</sup> 등의 คอมพิวเตอร์ 시뮬레이션에 基礎를 둔 道路橋 活荷重의 荷重列 모델에 의한 統計의 解析에 관한 研究에 이르기까지 상당한 研究가 있었으나 아직도 道路橋 設計 交通荷重의 統計의 解析 및 推定에 관한 體系的인 研究 結果는 찾아볼 수 없다. 本 研究에서는 먼저 現在 많이 使用되고 있는 各種 信賴性 解析 및 設計 理論을 體系的으로 比較分析한 다음, 보다 合理的이며 效率的인 近似法과 알고리즘을 提案하였고, 4각형 및 T형 단면의 平均 및 分散의 比較에 의한 우리 現實을 고려한 抵抗 不確實量水準의 選擇과 道路橋 活荷重의 不確實量의 合理的인 算定方法을 提示하였다. 그리고 AASHTO의 荷重係數 設計 規準과 現行道路橋 設計示方書의 許容應力 設計 規準에 의한 Calibration과 우리 現實을 복합적으로 고려한 目標信賴性指數의 選擇에 따른 槓모멘트 設計 LRFD 信賴性 設計 基準을 提案하여, 實際 R.C. 道路橋 設計에 適用하므로써 既存 來式 設計와 比較 考察하였다.

## 2. 不確實量 算定

### 2.1 抵 抗

2次모멘트 信賴性解析 및 設計를 위한 構造抵抗과 荷重에 관련되는 各種 不確實量의 解析 및 推定方法은 文獻 5와 既 發表된 文獻 24, 25에 詳述되어 있으므로 여기서는 本 研究에서 取扱

하고자 하는 R.C. 道路橋 上部構造의 典型인 設計斷面의 平均 및 分散의 算定에 대해서만 考察하였다. 그리고 道路橋의 設計가 주로 휨모멘트에 의해 決定되므로 휨破壞모드에 대한 平均 및 分散을 고려하였다. 剪斷에 대해서도 文獻 24에 提示한 바와 같이 類似한 方法으로 計算할 수 있다.

1) 4각형 및 슬래브斷面

單鐵筋 4각형 또는 슬래브 R.C.斷面의 極限 荷重強度는

$$M_u = A_s f_y d (1 - 0.59 A_s f_y / b d f_c)$$

이므로 計算모델의 平均 및 變動係數  $\bar{M}_u, \Omega_{M_u}$  는 文獻 5에서와 같이

$$\bar{M}_u = \bar{A}_s \bar{f}_y \bar{d} (1 - 0.59 \bar{A}_s \bar{f}_y / \bar{b} \bar{d} \bar{f}_c) \quad \dots\dots(1)$$

$$\Omega_{M_u}^2 = [(1 - 1.18 \bar{q}^2) \Omega_{f_y}^2 + (0.59 \bar{q}^2) \Omega_{f_c}^2 + \Omega_d^2] / (1 - 0.59 \bar{q}^2)^2 \quad \dots\dots(2)$$

이 때  $\bar{q} = \bar{A}_s \bar{f}_y / \bar{b} \bar{d} \bar{f}_c = \bar{\rho} \cdot \bar{f}_y / \bar{f}_c$

슬래브斷面의 경우는  $b=100$  으로 取하면 된다. 따라서 實斷面에 대한 平均 및 變動係數는 Ellingwood의 文獻 5와 既發表된 文獻 24에서와 같이

$$\bar{M} = \bar{B} \bar{M}_u \quad \dots\dots(3)$$

$$\Omega_M^2 = \Omega_{M_u}^2 + (\sigma / \bar{B})^2 \quad \dots\dots(4)$$

여기서  $\bar{B}$  = 모델된기 平均

$\sigma^2 = \text{var}[M/M_u | M_u = m]$ 에서 求할 수 있다.

Ellingwood와 같이  $\bar{B} = 1.11$ ,  $\sigma / \bar{B} = 0.07$ 로 하며,  $A_s, b$ 는 確定量으로 取하고,  $\bar{f}_y, \Omega_{f_y}, \bar{f}_c, \Omega_{f_c}, \bar{d}, \Omega_d$ 와 같은 基本變數의 平均 및 變動係數만 求하면 式 (3), (4)로부터  $\bar{M}, \Omega_M$ 이 計算된다.

2) T形斷面

T형보의 해석을 따르는 T形 R.C.斷面의 경우는 式 (1), (2) 대신에 T形보의 極限 荷重強度

$$M_u = (A_s - A_{s,r}) d \{1 - 0.59 (A_s - A_{s,r}) f_y / b_w d f_c\} - A_s f_y d (1 - 0.5 t / d)$$

로부터 다음과 같이 유도된  $\bar{M}_u, \Omega_{M_u}$ 를 使用한다.

$$\bar{M}_u = \bar{A}_{s,w} \bar{f}_y \bar{d} (1 - 0.59 \bar{q}_w) + \bar{A}_{s,r} \bar{f}_y \bar{d} (1 - 0.5 \bar{\xi}) \quad \dots\dots(5)$$

$$\Omega_{M_u}^2 = \frac{1}{\bar{M}_u^2} \{ [\bar{A}_{s,w} \bar{f}_y \bar{d} (1 - 0.59 \bar{q}_w) - \bar{A}_{s,r} \bar{f}_y \bar{d} (0.59 \bar{q})]^2 \Omega_{f_y}^2 + [ - \bar{A}_{s,r} \bar{f}_y \bar{d} (1 - 0.59 \bar{q}_w) + \bar{A}_{s,r} \bar{f}_y \bar{d} (1 - 0.5 \bar{\xi}) + \bar{A}_{s,w} \bar{f}_y \bar{d} (0.59 \bar{q}_w) ]^2 \Omega_{f_c}^2 + [ \bar{M}_u - \bar{A}_{s,w} \bar{f}_y \bar{d} (0.59 \bar{q}_w) - \bar{A}_{s,r} \bar{f}_y \bar{d} (1 - 0.5 \bar{\xi}) ]^2 \Omega_d^2 \} \quad \dots\dots(6)$$

여기서

$$\bar{A}_{s,w} = \bar{A}_s - \bar{A}_{s,r}$$

$$\bar{A}_{s,r} = 0.85 \bar{f}_c (b - b_w) t / \bar{f}_y$$

$$\bar{q}_w = \bar{f}_y \bar{\rho}_w / \bar{f}_c = \bar{f}_y (\bar{A}_s - \bar{A}_{s,r}) / \bar{f}_c \bar{b}_w \bar{d}$$

$$\bar{q} = \bar{f}_y \bar{A}_s / \bar{f}_c \bar{b}_w \bar{d}$$

$$\bar{\xi} = t / \bar{d}$$

2.2 道路橋 活荷重

信賴性理論에 의한 土木構造物의 解析 및 設計 또는 設計基準의 開發에서 아직도 가장 發展되지 못하고 있고 가장 어렵고 重要한 分野가 活荷重의 統計的 取扱이다. 특히 道路橋에 作用하는 各種活荷重, 即 道路交通荷重, 風荷重, 地震衝擊, 制動, 衝突荷重 등과 같은 各種活荷重의 橋梁壽命期間中에 發生하는 最大活荷重 分布는 理論的으로는 推計確率理論에 의해 解析되지만 實際로는 測定資料의 貧困, 또는 實態과악이나 모델링의 곤란, 복잡성 등으로 인하여 이 分野에 대한 充分한 研究結果가 없는 실정에 있다. 實際로 道路橋梁設計의 基準이 되는 各國의 標準設計活荷重은 道路交通 統計的 取扱의 곤란으로 인하여 確率論的 決定보다는 政策的 判斷을 加味한 確定論的으로 決定되어 示方書의 規定이 되는 것이 보통이다. 그러나 信賴性理論에 의한 道路橋의 設計에서는 橋梁壽命間 發生 最大活荷重의 統計的으로 推定된 平均 및 分散이 必要하기 때문에 信賴性設計基準에 適用할 수 있는 엄격한 統計的 設計 活荷重에 대한 研究結果가 定立되기 前까지는 現行 確定的인 設計活荷重에 의한 다음과 같은 두가지 近似的인 取扱方法을 本 研究에서 提案하고자 한다. 첫째로는 文獻 23에서와 類似하게 現行 道路橋 設計 活荷重을 確定量으로 보아 이로부터 荷重效果의 平均 및 分散을 求하는 方法이고, 둘째로는 現行 道路橋 設計 活荷重을 正規分布의 10% Fractile로 求한 特定值<sup>(15)</sup>에 對應하는 公稱值로 간주하여 이로부터 荷重效果의 平均 및 分散을 求하는 方法이다. 이때 活荷重의 分散은 文獻 18에서와 같이 道路橋의 荷重列모델로부터 求해진 값을 取하였다.

### 2.3 荷重効果

本 研究에서는 R.C. 道路橋設計에 있어서 通常 基本荷重組合이 되고 있는 死荷重과 活荷重(標準트럭輪荷重 또는 車線荷重) 및 衝擊荷重만을 고려하기로 한다. 기타의 2次荷重과의 組合에 對해서도 類似하게 取扱할 수 있다.

荷重效果의 平均 및 分散의 計算式은 Galambos<sup>(12)</sup>와 같이 荷重效果를 基本確率變數의 組合으로부터 誘導할 수도 있고, Ellingwood와 類似하게 部分荷重의 荷重效果組合으로부터 求할 수도 있다<sup>(6)</sup>.

基本確率變數의 組合을 利用하는 경우

$$S = E[C_D D + C_L(L + I)] \quad \dots\dots(7)$$

이므로

$$\bar{S} = \bar{E}[\bar{C}_D \bar{D} + \bar{C}_L(\bar{L} + \bar{I})] \quad \dots\dots(8)$$

$$\Omega_S = \sqrt{\Omega_E^2 + \frac{D^2 \bar{C}_D^2 (\Omega_{CD}^2 + \Omega_D^2) + (\bar{L} + \bar{I})^2 \bar{C}_L^2 \Omega_{CL}^2 + \bar{C}_L^2 (\bar{L}^2 \Omega_L^2 + \bar{I}^2 \Omega_I^2)}{\bar{S}^2}} \quad \dots\dots(9)$$

活荷重을 確定量으로 取扱時에는 式 (8), (9)에서  $L=L', I=I', \Omega_L=\Omega_I=0$ 로 놓으면 된다.

$$\eta_L = \bar{L}/L' = 1/(1 - k_p \Omega_L)$$

$$\rho = \bar{L}/\bar{D} \text{ (荷重比)}$$

荷重效果를 部分荷重效果의 組合으로 求하는 경우

$$S = S_D + S_{L+I} \quad \dots\dots(10)$$

이므로

$$\bar{S} = \bar{S}_D + \bar{S}_{L+I} \quad \dots\dots(11)$$

$$\Omega_S = \sqrt{\Omega_{SD}^2 \bar{S}_D^2 + \Omega_{SL}^2 \bar{S}_L^2 / \bar{S}} \quad \dots\dots(12)$$

여기서

$$\bar{S}_D = \bar{E} \bar{C}_D \bar{D}$$

$$\bar{S}_{L+I} = \bar{E} \bar{C}_L (\bar{L} + \bar{I})$$

$$\Omega_{SD} = \sqrt{\Omega_E^2 + \Omega_{CD}^2 + \Omega_D^2}$$

$$\Omega_{SL+I} = \sqrt{\Omega_E^2 + \Omega_{CL}^2 + \Omega_{L+I}^2}$$

### 2.4 平均-公稱比

2次 모멘트法에 의한 信賴性理論에서 抵抗과 荷重의 平均值는 各名의 公稱值 또는 特性值로부터 平均-公稱比를 利用하여 求한다.

抵抗의 경우 式 (1) 혹은 式(2)의 平均值式과 對應하는 公稱值式을 通常의인 R.C.斷面에 대해 計算하면  $\bar{R}/R'$ 의 범위가 決定된다. 이로부터 代表的인 抵抗 平均-公稱比  $\bar{R}/R' = \eta_R$ 을 取하면  $\bar{R}$ 는

$$\bar{R} = \eta_R R' \quad \dots\dots(13)$$

로부터 求해진다. 그리고 荷重效果의 경우  $\bar{S}/S' = \eta_S$ 는 式(8)이나 (11)과 對應하는 公稱  $S'$ 의 比로부터

$$\eta_S = \frac{(1 + \rho) \eta_L}{\eta_L + \rho} \quad \dots\dots(14)$$

여기서

$$\eta_D = \bar{D}/D' = 1.0$$

### 3. 信賴性解析

#### 3.1 近似的 解析

Level II 2次 모멘트法에 의한 信賴性解析理論은 文獻 15 등에 詳述되어 있고 既發表된 文獻 24에서도 要約 紹介한 바 있다. 지금까지 2次 모멘트法에 의한 信賴性解析에 主로 使用된 限界狀態函數는 Cornell<sup>(15)</sup>의 正規分布型 函數  $Z = R - S$ 와 Rosenblueth Esteva<sup>(17)</sup>의 對數正規分布型 函數  $Z = \ln R - \ln S$ 이다. 이 때 抵抗  $R$ 과 荷重效果  $S$ 를 結果變數  $R, S$ 로 그대로 使用하여 信賴性指數  $\beta$ 를 求하면 MFOSM法(Mean First Order Second Moment Method)에 의한 近似的 解析이 된다. 따라서 信賴性指數  $\beta$ 는  $Z = R - S$ 의 경우

$$\beta = (\bar{R} - \bar{S}) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = (n_0 - 1) / \sqrt{\Omega_R^2 n_0^2 + \Omega_S^2} \quad \dots\dots(15)$$

反面에  $Z = \ln R - \ln S$ 의 경우는 近似的으로

$$\beta = (\ln \bar{R} - \ln \bar{S}) / \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2} = \ln n_0 / \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2} \quad \dots\dots(16)$$

여기서

$$n_0 = \bar{R}/\bar{S} \text{ (中央安全率)}$$

文獻 17에서 Shiraiishi 등은 Cornell의  $Z = R - S$ 의 結果變數 限界狀態函數에 대해 後述할 Lind-Hasofer<sup>(14)</sup>의 AFOSM法(Advanced First Order Second Moment Method), 即 最小거리法(Minimum Distance Method)을 適用하여 對數型標準變換  $(\ln X - \ln \bar{X})/\Omega_X$ 를 取하면  $Z = \ln R - \ln S$

의  $\beta$  식인 (16) 식으로 되고, 反對로  $Z = \ln R - \ln S$  에 대해  $X - \bar{X}/\sigma_X$  의 標準化變換을 시키면  $Z = R - S$  의  $\beta$  식인 식 (15)로 됨을 보여 주었다.

### 3.2 反復試行法

限界狀態函數  $Z$  를 部分荷重의 組合 即  $Z = R - S_D - S_L$  로 나타내면  $\beta$  는 Lind-Hasofer 의 不變 2次모멘트法에 의하여 標準化座標空間에서 限界狀態破壞面까지의 最小거리로서 좀더 正確한 값을 求할 수 있다<sup>(14)</sup>. 그러나 이와 같은 方法으로는  $\beta$  를 解析的인 方法으로 求할 수 없고 數值的으로 反復試行에 의해 求해야 한다.

#### 1) 部分對數 正規標準化變換

Ellingwood 等이 文獻 5에서 使用한 바와 같이 抵抗  $R$  을 標準對數正規變換시키고 荷重效果  $S$  는 標準正規變換시키면 既 發表된 文獻 24에서 提示한 形態로 다음과 같이 유도된다.

$$\phi(1+\rho)n_0 = \gamma_D + \rho\gamma_L \quad \dots\dots(17)$$

$$(\text{또는, } \phi\bar{R} = \gamma_D\bar{S}_D + \gamma_L\bar{S}_L)$$

$$\text{여기서 } \phi = \exp(-\alpha_R\beta\Omega_R) \quad \dots\dots(18-a)$$

$$\gamma_D = 1 + \alpha_{SD}\beta\Omega_{SD} \quad \dots\dots(18-b)$$

$$\gamma_L = 1 + \alpha_{SL}\beta\Omega_{SL} \quad \dots\dots(18-c)$$

$$\rho = \bar{L}/\bar{D} \text{ (荷重比)}$$

$$n_0 = \bar{R}/\bar{S} \text{ (中央安全率)}$$

이때  $\alpha_i$  는 最小거리  $\beta$  의 方向벡터 成分이며

$$\alpha_R = \frac{\phi\Omega_R(1+\rho)n_0}{\sqrt{\phi^2\Omega_R^2(1+\rho)^2n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2\rho^2}} \quad \dots\dots(19-a)$$

$$\alpha_{SD} = \frac{\Omega_{SD}}{\sqrt{\phi^2\Omega_R^2(1+\rho)^2n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2\rho^2}} \quad \dots\dots(19-b)$$

$$\alpha_{SL} = \frac{\Omega_{SL}\rho}{\sqrt{\phi^2\Omega_R^2(1+\rho)^2n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2\rho^2}} \quad \dots\dots(19-c)$$

따라서 信賴性指數  $\beta$  는 式 (17), (18), (19)를 聯立시켜 풀어서 計算할 수 있으며 이를 위한 數值的인 알고리즘은 다음과 같다.

段階 1.  $\rho, \Omega_i, n_0$  가 주어지면 近似的으로  $\phi, \gamma$  를 假定하여 式(19)로부터  $\alpha_i$  를 求하여 式(18)을 式(17)에 代入한 다음 式(17)로부터  $\beta$  計算

段階 2. 이  $\beta$  를 式(18)에 代入  $\phi, \gamma_i$  를 求한 다음 式 (19)로부터  $\alpha_i$  計算

段階 3. 前사이클의  $\alpha_i, \beta$  值를 現사이클의 값과 比較한 後에, 수렴시까지 反復試行 2) 對數 正規標準化變換

文獻 13, 17 等에서와 같이 抵抗  $R$  및 荷重效果  $S$  에 대해 모두 標準對數正規變換시킨 空間에서의  $\beta$  는 다음과 같이 解析된다. 限界狀態函數  $Z = R - S_D - S_L$  의  $R, S_i$  를  $r = (\ln R - \ln \bar{R})/\Omega_R, s_i = (\ln S_i - \ln \bar{S}_i)/\Omega_{S_i}$  로 標準化시키면 原點에서 破壞域까지의 最少거리 座標點은

$$r^* = -\alpha_R\beta \quad \dots\dots(20-a)$$

$$s_D^* = \alpha_{SD}\beta \quad \dots\dots(20-b)$$

$$s_L^* = \alpha_{SL}\beta \quad \dots\dots(20-c)$$

이므로

$$\text{限界狀態方程式 } Z = R^* - S_D^* - S_L^* = 0 \text{ 는}$$

$$Z = \bar{R}\exp(r^*\Omega_R) - \bar{S}_D\exp(s_D^*\Omega_{SD}) - \bar{S}_L\exp(s_L^*\Omega_{SL}) = 0 \quad \dots\dots(21)$$

로 되고, 式 (21)에 式 (20)을 代入하여 정리하면 다시 式(17)과 같이 된다. 이때  $\phi, \gamma_0, \gamma_L$  은 다음과 같다.

$$\phi = \exp(-\alpha_R\beta\Omega_R) \quad \dots\dots(22-a)$$

$$\gamma_D = \exp(\alpha_{SD}\beta\Omega_{SD}) \quad \dots\dots(22-b)$$

$$\gamma_L = \exp(\alpha_{SL}\beta\Omega_{SL}) \quad \dots\dots(22-c)$$

여기서  $\alpha_i$  는 破壞點에서의 單位勾配벡터로서 다음과 같이 誘導할 수 있다.

$$\alpha_{Si} = a_i / \sqrt{\sum a_i^2}, \quad i = R, S_D, S_L, \quad \dots\dots(23)$$

이때

$$\alpha_R = \exp(-\beta\alpha_R\Omega_R)\sigma_R \frac{\partial Z}{\partial R} \Big|_* = \exp(-\beta\alpha_R\Omega_R)$$

$$\alpha_{S_i} = \exp(\beta\alpha_{S_i}\Omega_{S_i})\sigma_{S_i} \frac{\partial Z}{\partial S_i} \Big|_* = \exp(\beta\alpha_{S_i}\Omega_{S_i})$$

따라서 式 (19)와는 달리 다음과 같이 정리된다.

$$\alpha_R = \frac{\phi\Omega_R(1+\rho)n_0}{\sqrt{\phi^2\Omega_R^2(1+\rho)^2n_0^2 + \gamma_D^2\Omega_{SD}^2 + \gamma_L^2\Omega_{SL}^2\rho^2}} \quad \dots\dots(24-a)$$

$$\alpha_{SD} = \frac{\gamma_D\Omega_{SD}}{\sqrt{\phi^2\Omega_R^2(1+\rho)^2n_0^2 + \gamma_D^2\Omega_{SD}^2 + \gamma_L^2\Omega_{SL}^2\rho^2}} \quad \dots\dots(24-b)$$

$$\alpha_{SL} = \frac{\gamma_L\Omega_{SL}\rho}{\sqrt{\phi^2\Omega_R^2(1+\rho)^2n_0^2 + \gamma_D^2\Omega_{SD}^2 + \gamma_L^2\Omega_{SL}^2\rho^2}} \quad \dots\dots(24-c)$$

$\beta$  를 求하는 알고리즘은 上述한 것을 그대로 使

用할 수 있으나 이때 式(18) 대신에 式(22), 式(19) 대신에 式(24)를 使用해야 한다.

### 3.3 公稱安全率에 의한 價額性解析

在來式 確定的設計 標準示方書에서는 設計安全率을 公稱安全率  $n'$ 로 나타내고 있다. 即 公稱安全率이란 公稱抵抗  $R'$ 와 公稱荷重效果  $S'$ 의 비로서  $n' = R'/S'$ 로 定義된다. 許容應力設計法(WSD)에서는  $n' = \sigma_y/\sigma_{sa}$ 인 反面에 強度設計法(USD)에서는 強度設計式

$\phi'R' = \gamma_D'S_D' + \gamma_L'S_L'$ 에서  $n' = R'/S'$ 에 유의하면  $n' = (\gamma_D' + \gamma_L'\rho')/(1 + \rho')\phi'$ .....(25)로 된다. 여기서  $\rho' = L'/D'$ (公稱荷重比)

따라서 在來式 設計 示方書에 대해 Calibration 하여 信賴性設計基準을 決定하는 경우나, 在來式 設計 示方書에 의해 完全應力 設計되는 構造에 대한 信賴性을 解析하고자 하는 경우에는  $n'$ 로부터  $\beta$ 를 計算할 必要가 있다. 前節에서  $\beta$ 는 모두 中央安全率( $n_0 = \bar{R}/\bar{S}$ )의 函數이며 抵抗 및 荷重의 平均-公稱比  $\eta$ 를 利用하면  $n'$ 와  $n_0$ 의 관계로부터  $\beta$ 를 求할 수 있다.

$$n_0 = \bar{R}/\bar{S} = \frac{\eta_R R'}{\eta_S S'} = \frac{\eta_R}{\eta_S} n' \quad \dots\dots(26)$$

여기서  $\eta_R = \bar{R}/R'$

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

그리고, 公稱荷重比와 平均荷重比의 관계도 (27)式에서 求할 수 있다.

$$\rho = L/\bar{D} = \frac{\eta_L L'}{\eta_D D'} = \frac{\eta_L}{\eta_D} \rho' \quad \dots\dots(27)$$

勿論 完全應力設計斷面이 아닌 경우에는 中央安全率( $n_0 = \bar{R}/\bar{S}$ )를 주어진 斷面 및 荷重으로부터 求해야 한다.

### 4. 信賴性 設計基準

現行 強度設計, 即 荷重係數設計法(Load Factor Design)과 類似한 形態의 規準으로 되어 있는 유럽을 中心으로 發展된 限界狀態設計法(LSD)과 美國에서 導入한 荷重-抵抗係數設計法(LRFD)은 모두가 Level I 信賴性 設計基準이다<sup>(15)</sup>. 이들 사이에 根本的인 設計 概念上的 差異는 없고 다만, 抵抗側 安全係數를 部分 安全係數로 取하느냐 全體抵抗에 대한 安全係數를 使用하느냐에 대한 差異만 있을뿐, 適切한 目標 信賴性指數에 對應하는 各種 限界狀態方程式의

荷重 및 抵抗側 係數들을 Level II 信賴性理論에 따라 合理的인 Level-I化 過程을 거쳐 決定하는 技法은 同一하다. 本 研究에서는 現 우리나라 R.C.標準示方書는 ACI 強度設計法과 同一하므로 R.C.道路橋의 경우에도 AASHTO의 荷重設計基準과 類似한 LRFD 信賴性 設計基準의 導入이 適切하다는 것을 前提로 하여 R.C.道路橋 設計를 支配하는 韋抵抗 極限 限界狀態方程式을 中心으로 考察하였다. 剪斷, 비틀림抵抗에 대한 信賴性規準도 類似한 技法을 適用시켜 擴張할 수 있다.

#### 4.1 近似的 方法

信賴性 設計基準으로서의  $\phi, \gamma$  決定은 前述한 信賴性解析에서  $\beta$ 를 求하는 解析理論 및 公式을 그대로 使用하는 것이지만, 解析의 경우와는 달리 信賴性 指數  $\beta$ 를 目標指數  $\beta_0$ 로 設定한 다음 이에 對應하는  $\phi, \gamma$ 를 決定하는 問題가 된다.

前述한 信賴性解析과 같이 限界狀態函數와 變數 變換方法 및 第1階近似化 技法에 따라 여러 가지 理論과 公式이 算出되는데,  $\phi, \gamma$ 의 決定에서도 不確實量根의 線型近似化 技法이나  $\beta$ 의 表現式에 따라 여러가지 近似的 方法이 있게 된다. 따라서 代表的인 몇가지 技法의 效率性 및 타당성에 대한 比較를 通해 R.C.道路橋의 信賴性解析 및 設計方法을 提案하는 것도 本 研究目的의 하나이므로 아래 比較에 使用된 主要技法의 概要만을 記述하였다.

##### 1) 正規變換 近似法

MFOSM에 의한 近似的  $\beta$ 解析式(15)

$\beta = (\bar{R} - \bar{S})/\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 에서  $S = S_D + S_L$ 의 組合을 고려하면

$$\beta = [\bar{R} - (\bar{S}_D + \bar{S}_L)]/\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{SD}^2 + \sigma_{SL}^2} \quad \dots\dots(28)$$

이므로  $\beta = \beta_0$ (目標信賴性指數)로 놓고 式(28)을 정리하면

$$\phi\bar{R} = \gamma_D\bar{S}_D + \gamma_L\bar{S}_L \text{로 되며}$$

이 때

$$\phi = 1 - \frac{\Omega_R^2 \beta_0 (1 + \rho) n_0}{\sqrt{\Omega_R^2 (1 + \rho)^2 n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2}} \quad \dots\dots(29-a)$$

$$\gamma_D = 1 + \frac{\Omega_{SD}^2 \beta_0}{\sqrt{\Omega_R^2 (1 + \rho)^2 n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2}} \quad \dots\dots(29-b)$$

$$\gamma_L = 1 + \frac{\Omega_{SL}^2 \beta_0 \rho}{\sqrt{\Omega_R^2 (1+\rho)^2 n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2}} \quad \dots\dots(29-c)$$

2) 對數變換 近似法

式 (16)과 같이  $\beta$ 를 對數函數 即  $\beta = \ln \bar{R} - \ln \bar{S} / \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2}$ 로 表現하는 경우 荷重效果  $S$ 를 式 (11)로 나타내면 Galambo가 文獻 12에서  $\sqrt{\sum x_i^2} \approx \sum \alpha_i x_i$ 로 線型近似化시켜 誘導한 形態로 다음과 같이  $\phi, \gamma$ 가 求해진다.

$$\phi = \exp(-\alpha \beta_0 \Omega_R) \quad \dots\dots(30-a)$$

$$\gamma_D = \exp(\alpha \beta_0 \Omega_D) [1 + \alpha \beta_0 \sqrt{\Omega_{CD}^2 + \Omega_D^2}] \quad \dots\dots(30-b)$$

$$\gamma_L = \exp(\alpha \beta_0 \Omega_L) [1 + \alpha \beta_0 \sqrt{\Omega_{CL}^2 + \Omega_L^2}] \quad \dots\dots(30-c)$$

여기서  $\alpha=0.55$  程度가 最少誤差를 나타낸다.

3) Shiraishi 近似法

Shiraishi<sup>(17)</sup>는 式(16)과 같은 對數函數로 된  $\beta$ 式에 대해 上記한 線型近似化 代身에 다음과 같이 近似的으로 表現하므로써  $\phi, \gamma_i$ 를 求하도록 하였다.  $S = S_D + S_L$ 임을 유의하면  $\beta = \{\ln \bar{R} - \ln (\bar{S}_D + \bar{S}_L)\} / \sqrt{\Omega_R^2 + (\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2) / (1+\rho)^2}$   $\dots\dots(31)$

로 되며,  $\beta \geq \beta_0$ 라는 設計條件으로부터

$$\exp\left(-\frac{\Omega_R^2 \beta_0}{\sqrt{\Omega_R^2 + \frac{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2}{(1+\rho)^2}}}\right) \bar{R} \geq (\bar{S}_D + \bar{S}_L) \cdot \exp\left(\frac{\frac{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2}{(1+\rho)^2} \cdot \beta_0}{\sqrt{\Omega_R^2 + \frac{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2}{(1+\rho)^2}}}\right) \quad \dots\dots(32)$$

右邊의 exp 項은  $\Omega_{SD}, \Omega_{SL}$ 에 대해 近似的으로 分離하면

$$\exp\left(-\frac{\Omega_R^2 \beta_0}{V}\right) \bar{R} \geq \alpha' \left\{ \exp\left(-\frac{\Omega_{SD}^2 \beta_0}{(1+\rho)^2 V}\right) \bar{S}_D + \exp\left(\frac{\rho^2 \Omega_{SL}^2 \beta_0}{(1+\rho)^2 V}\right) \bar{S}_L \right\} \quad \dots\dots(33)$$

여기서

$$V = \sqrt{\Omega_R^2 + \frac{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2}{(1+\rho)^2}} \quad \dots\dots(34)$$

$$\alpha' = \frac{(1+\rho) \exp\left\{\frac{(\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2) \beta_0}{(1+\rho)^2 V}\right\}}{\exp\left(\frac{\Omega_{SD}^2 \beta_0}{(1+\rho)^2 V}\right) + \rho \exp\left(\frac{\rho^2 \Omega_{SL}^2 \beta_0}{(1+\rho)^2 V}\right)} \quad \dots\dots(35)$$

4.2 反復試行法

3.2에서 詳述한 AFOSM, Lind-Hasofer 不變 2次 모멘트法에 의한 信賴性解析 反復試行法은  $\phi, \gamma$ 의 決定問題에도 그대로 適用된다. 即  $\phi, \gamma$ 를 決定하고자 하는 경우에는  $\beta = \beta_0$ 로 取하여  $\phi, \gamma$ 를 다음과 같은 反復試行 알고리즘으로 求할 수 있다.

段階 1.  $\rho, \Omega_i, \beta_0$ 가 주어지면  $\phi, \gamma_i$ 를 近似的으로 假定하여 式 (17)로부터  $n_0$  計算

段階 2.  $\alpha_i$  計算(式(19) 또는 式(21) 利用)

段階 3.  $\phi, \gamma_D, \gamma_L$ 을 計算(式(18) 또는 式(22) 利用)한 다음 假定値와 比較하여 許限 時까지 反復試行

5. 計算 및 考察

5.1 不確實量

1) 휨抵抗

휨抵抗에 대한 R.C. 4각형 斷面 및 T형 斷面의 平均 및 分散値는 2.1에서 提示한 公式을 使用하여 Ellingwood<sup>(6)</sup>, 文獻 23 그리고 우리나라의 一部 資料(東國製鋼鐵筋 및 漢陽住宅레미콘)에 의해 計算함으로써 表 1,2와 같은 結果를 얻었다.

表 1. 基本變數의 統計値

|               | Ellingwood | 文獻 23 | 東國·漢陽 |
|---------------|------------|-------|-------|
| $\Omega_{fy}$ | 0.110      | 0.150 | 0.124 |
| $\Omega_{fc}$ | 0.200      | 0.210 | 0.200 |
| $\Omega_d$    | 0.040      | 0.086 | 0.087 |

$$\ast \bar{f}_c \begin{cases} < 0.8 f_c' & \text{Bad} \\ < 1.01 f_c' & \text{Good,} \end{cases} \quad \bar{f}_y \begin{cases} < 1.2 f_y' (\text{SBD } 35) \\ < 1.19 f_y' (\text{SBD } 30) \end{cases}$$

表 2. 抵抗不確實量

|            | T形 보         |               | 矩形 보         |               |
|------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|            | $\bar{M}/M'$ | $\Omega_R$    | $\bar{M}/M'$ | $\Omega_R$    |
| Ellingwood | 1.24~1.31    | 0.1037~0.1242 | 1.09~1.25    | 0.1220~0.1570 |
| 文獻 23      | 1.24~1.31    | 0.1387~0.1675 | 1.11~1.26    | 0.1671~0.2101 |
| 東國漢陽       | 1.11~1.17    | 0.1304~0.1544 | 1.02~1.15    | 0.1620~0.1992 |

表 2의 結果에서 보는 바와 같이  $\bar{M}/M'$ 는 T形보의 경우가 약간 높게 되어 있으나 큰 差異

는 없다고 보아 安全側으로 Ellingwood 가 使用한  $\bar{M}/M' = 1.12$  를 抵抗의 平均-公稱化로 선택함이 바람직하며,  $\Omega_R$  의 경우도 T形보의 경우가 더 적은 범위로 되어 있지만 마찬가지로 安全側으로 우리의 現實을 고려하여 Ellingwood 의 上限值인  $\Omega_R = 0.16$  程度가 적당하다고 사료된다. 表 2에서 흥미있는 것은  $\Omega_R$  에 대해서는 文獻 23과 우리나라 資料가 類似한 값을 나타내고,  $\bar{M}/M'$  는 Ellingwood 와 文獻 23이 비슷한 結果를 주고 있다. 表 2에서  $\bar{M}/M' = 1.12$ ,  $\Omega_R = 0.16$  은 우리나라 資料에 의한 T形보에서 最惡의 條件值에 해당함을 알 수 있다.

2) 荷重效果

作用荷重에 대한 平均-公稱比는 死荷重의 경우 Ellingwood 가 使用한 바와 같이  $\eta_D = \bar{D}/D' = 1.0$  으로 平均과 公稱值를 같게 보는 것이 타당하므로 本 論文에서도 1.0으로 取하였다.

道路橋 活荷重의 경우에는 Fuzino 等<sup>(18)</sup>이 荷重列모델로 解析한 結果에 의하면 支間과 解析條件에 따라  $\eta_{SL} = \bar{S}_L/S_L' = 0.8 \sim 1.3$  程度の 범위로 나타나므로, 우리나라는 道路交通의 超過重量車輛 走行狀態가 日本이나 外國 先進國보다 더 극심함을 고려하여, D.B.標準 設計荷重 公稱值를 正規分布로 보고  $L' = L(1 - k_p \Omega_L)$  에서 安全側으로 10% Fractile 值인  $k_p = 1.28$  로 취하여 平均公稱化를 計算하였다.

死荷重과 活荷重의 變動係數  $\Omega$  는 死荷重의 경우에 文獻 23에서 콘크리트의 單位重量  $W_c$  에 대한  $\Omega_{W_c}$  로부터  $D = kW_c$  인 관계에 의해  $\Omega_D = \sqrt{\Omega_k^2 + \Omega_{W_c}^2}$  로 計算하면 0.02 程度에 불과하나, Ellingwood 가 使用한  $\Omega_{SD} = 0.1$  로부터 逆算하면  $\Omega_D = 0.08$  의 현저한 差異가 있으므로 本 研究에서는 이 값들의 中間值인  $\Omega_D = 0.05$  로 取하였다. 反面에 設計活荷重의 變動係數는 Fuzino 의 文獻<sup>(18)</sup>과 文獻 17 等の 資料를 參考로 하여 安全側인  $\Omega_L = 0.2$  로 取하였다. 式 (11), (12)에 따라 荷重效果에 대한  $\Omega_{SI}$  를 計算하는데 必要한  $\Omega_B$ ,

表 3. 荷重不確實量

| 불확실항        | $\eta_i$ | $\Omega_i$ | $\Omega_{Si}$ |
|-------------|----------|------------|---------------|
| 死荷重         | 1.0      | 0.05       | 0.08          |
| 活荷重 (DB 하중) | 1.34     | 0.2        | 0.29          |

$\Omega_{CD}$ ,  $\Omega_{CL}$  等은 Galambo<sup>(12)</sup>가 使用한  $\Omega_B = 0.05$ ,  $\Omega_{CD} = 0.04$ ,  $\Omega_{CL} = 0.2$  를 適用하였다. 表 3은 上述한 方法과 假定值에 따라 本 研究에서 適用한 不確實量數值를 綜合적으로 提示한 것이다.

5.2 理論의 比較 分析

3.4에서 記述한 信賴性解析 및 設計理論은 限界狀態函數의 形態, 標準化 座標變換의 型式, 近似化 技法 等에 따라 달라지기 때문에 R.C.道路橋의 信賴性解析 및 設計基準의 開發에 앞서 合理的이며 效率的인 알고리즘과 近似解析法의 一貫性있는 選擇이 重要하다. 現在까지 알려진 바로는 AFOSM 法 中에는 Ellingwood<sup>(6)</sup> 等이 使用한 部分對數 標準化 變換 方法이 가장 效率的이라고 간주되고 있다.  $n_0 = 2.5$ ,  $\Omega_R = 0.16$ ,  $\Omega_{SD} = 0.1$ ,  $\Omega_{SL} = 0.3$  에 대한 各 解析法의  $\beta$  值를  $\rho$  의 變化에 대하여 比較한 것이 그림 1이다.

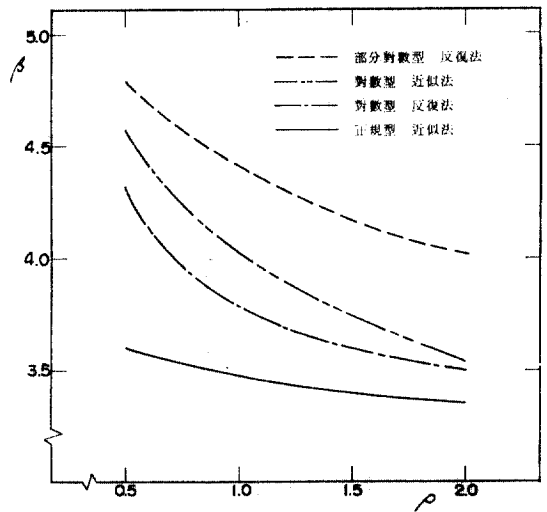


그림 1.  $\rho$  v.s.  $\beta$

그림 1에서 同一한 條件에 대해 Ellingwood 의 部分對數型 反復法은  $\beta = 4.5$  내외인데 反하여 正規型 近似法은  $\beta = 3.5$  내외로 거의 1.0 程度의 差異가 있음을 보여준다. 다른 두 方法은 그 中間值를 나타내고 對數型 近似法이 Ellingwood 方法과 0.2~0.5 程度의 差異가 있으므로 다른 方法에 比하여 相對적으로 가장 正確하다고 볼 수 있다. 따라서 近似式으로는 上限值解



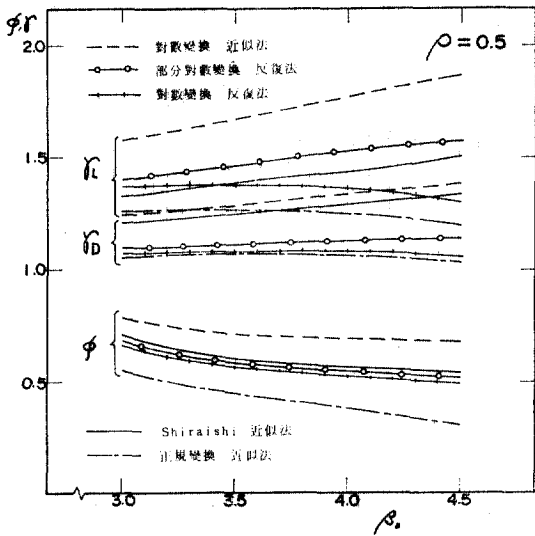


그림 2.  $\beta$  v.s.  $\phi$

를 주는 對數型公式(16)을 使用함이 바람직하다고 볼 수 있다.

또한  $\rho=0.5$ ,  $\Omega_R=0.16$ ,  $\Omega_{SD}=0.1$ ,  $\Omega_{SL}=0.3$ 을 使用하여 4.1과 4.2의 方法에 따라  $\phi, \gamma$ 를 計算한 것이 그림 2이다.

그림 2에서 두 反復法은 서로 近接한 結果를 주고 있으나 近似法과는 상당한 差異가 있고, 그 中에 對數型  $\beta$ 式으로부터 近似的으로  $\phi, \gamma$ 를 求하도록 考案한 Shiraish<sup>(17)</sup>의 近似法이 解析의 경우와 마찬가지로 가장 近接解를 주는 近似公式임을 보여준다.

따라서 解析 및 設計의 경우 近似解析理論으로는 對數型 近似公式 (16)과  $\phi, \gamma$ 決定을 위한 近似式으로는 Shiraish의 近似公式(33)을 使用함이 바람직하다고 본다.

### 5.3 示方書 信賴性 檢定

信賴性 設計基準의 安全水準은 目標信賴性指數  $\beta_0$ 에 의해 決定되므로 最適  $\beta_0$ 의 選擇이 무엇보다도 重要하다.  $\beta_0$ 는 信賴性 最適化理論에 의해 理論적으로 求할 수 있다고 하나 實際로는 어렵기 때문에 通常적으로 使用되는 實用的인 方法으로는 既存 示方書에 의한 Calibration 方法이다. 여기에서 對象 構造物의 破壞로 인한 人命 財產 피해와 社會 經濟的 重要度를 고려하여 政策적으로 決定하기도 한다. Ellingwood<sup>(6)</sup>는 R.C. 韌部材의 設計基準을 위한 目標信賴性指數

를 ACI 318-77 示方書에 의해 檢定하므로써  $\beta_0=3.0$ 을 채택하였다.  $\beta_0=3.0$ 으로 取한 文獻 5에서의 ACI 318-77의  $\beta$ 는  $\beta=2.8\sim 3.5$ 인데 反하여 그림 3에서 圖示된 바와 같이 AASHTO 示方書의 경우는  $\beta=2.8\sim 3.0$ 程度로 通常 荷重比 근처에서는 0.5程度 낮은  $\beta$ 值로 되어있음을 알 수 있다.

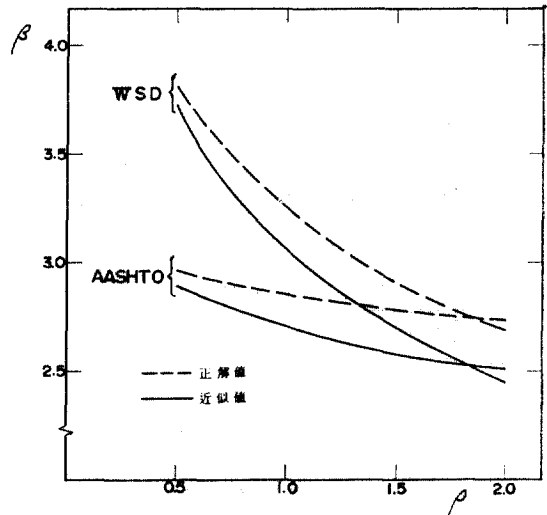


그림 3.  $\rho$  v.s.  $\beta$

表 4. 現行 WSD 設計와 AASHTO 荷重係數 設計의  $\beta$ 比較

| $\rho$ | 現行 WSD 設計 |       |                    | AASHTO 荷重係數 設計 |       |                    |
|--------|-----------|-------|--------------------|----------------|-------|--------------------|
|        | $n'$      | $n''$ | $\beta$<br>近似值 正解值 | $n'$           | $n''$ | $\beta$<br>近似值 正解值 |
| 0.5    | 2         | 2.08  | 3.6994   3.8092    | 1.71           | 1.75  | 2.8808   2.9506    |
| 1.0    | 2         | 1.95  | 3.0626   3.2419    | 1.86           | 1.81  | 2.7226   2.8674    |
| 1.5    | 2         | 1.90  | 2.6965   2.9082    | 1.95           | 1.85  | 2.5992   2.7971    |
| 2.0    | 2         | 1.86  | 2.4691   2.6950    | 2.02           | 1.88  | 2.5139   2.7474    |

이는 AASHTO 設計가 ACI 318-77 設計보다 낮은 信賴性을 갖는 設計가 됨을 나타내는 것이다. 따라서 AASHTO에 의해 Calibration 하면  $\beta_0=3.0$ 程度로 ACI와 같은  $\beta_0$ 를 使用할 수 있다. 그러나 그림 3에서 보는 바와 같이 現行 WSD 安全率  $n'=2$ 에 의해 計算된  $\beta$ 는 2.8~3.7의 범위이며 荷重比에 따라 급격히 減少하므로 通常 荷重比  $\rho=0.8$  근처에선  $\beta=3.5$ 程度가 된다. 따라서 우리의 技術水準과 高速重量化

表 6.  $\rho$ 에 대한  $\phi, \gamma$

| 區分           | $\phi$ |        | $\gamma_D$ |        | $\gamma_L$ |        |
|--------------|--------|--------|------------|--------|------------|--------|
|              | 近似值    | 正解值    | 近似值        | 正解值    | 近似值        | 正解值    |
| $\rho = 0.5$ | 0.6300 | 0.6235 | 1.1938     | 1.0732 | 1.3378     | 1.4712 |
| $\rho = 1.0$ | 0.6637 | 0.6346 | 1.2114     | 1.0439 | 1.6418     | 1.5648 |
| $\rho = 1.5$ | 0.6854 | 0.6450 | 1.1954     | 1.1038 | 1.8237     | 1.6141 |

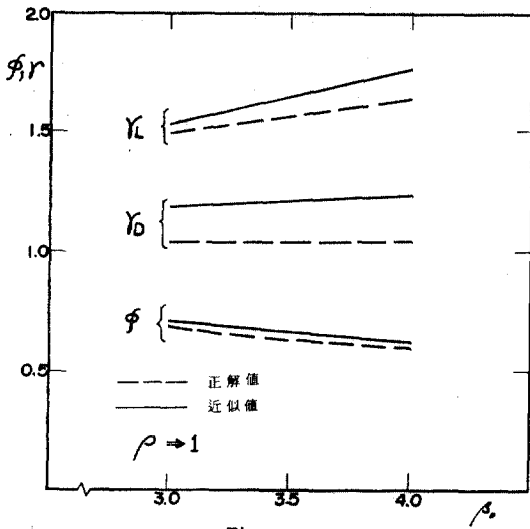


그림 4.  $\beta$  v.s.  $\phi, \gamma$

表 5.  $\beta_0$ 에 대한  $\phi, \gamma$

| 區分              | $\phi$ |        | $\gamma_D$ |        | $\gamma_L$ |        |
|-----------------|--------|--------|------------|--------|------------|--------|
|                 | 近似值    | 正解值    | 近似值        | 正解值    | 近似值        | 正解值    |
| $\beta_0 = 3.0$ | 0.7038 | 0.6800 | 1.1803     | 1.0384 | 1.5317     | 1.4936 |
| $\beta_0 = 3.5$ | 0.6637 | 0.6346 | 1.2114     | 1.0439 | 1.6418     | 1.5648 |
| $\beta_0 = 4.0$ | 0.6260 | 0.5919 | 1.2427     | 1.0492 | 1.7591     | 1.6338 |

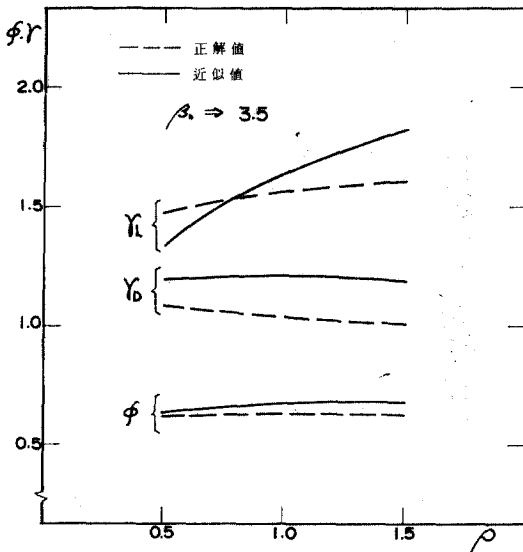


그림 5.  $\rho$  v.s.  $\phi, \gamma$

交通荷重의 現實을 고려하면  $\beta_0=3.5$ 가 適切한 값을 판단할 수 있다. 그림 3과 表 4에서  $\beta$ 는 0.1~0.2 程度의 差異로 近似值가 上限解임을 보여준다.

#### 5.4 設計規準

그림 4 및 表 5는 前述한 信賴性理論과 不確實量  $\Omega_R=0.16$ ,  $\Omega_{SD}=0.08$ ,  $\Omega_{SL}=0.287$ ,  $\rho=1$ 에 대한  $\beta_0$ 의 變化에 따른  $\phi, \gamma$ 의 값을 圖示한 것이다.

그림 4에서 보면 近似值가 전반적으로 正解值보다 약간 높은 上限值를 나타내고 있는 反面에 그림 5 및 表 6에서 보면  $\beta_0=3.5$ 에 대하여  $\rho$ 의 變化에 따른  $\phi, \gamma$ 의 變化는 대체로 完滿하게 變하는데, 다만 近似值의  $\gamma_L$ 을  $\rho$ 의 增加에 따라 急變하고 있다. 이는 對數型 近似公式의 活荷重係數  $\gamma_L$ 을 活荷重의 載荷狀態에 따라 민감함을 나타내는 것이다. 그러나 實際 R.C.道路橋에서는 平均荷重비가 대개의 경우  $\rho=0.5\sim 1.0$  사이에 있는고로 이 區間에서의  $\phi, \gamma$ 는 完滿하게 變하므로 Ellingwood<sup>(5)</sup>나 文獻 15에서 使用한 誤差 最少化 方法에 의하지 않고  $\rho=0.5\sim 1.0$ 의 平均值  $\rho$ 로 無關한 Level I型 設計基準의  $\phi, \gamma$ 를 決定할 수 있다. 表 6에서 이 값은  $\phi=0.629$ ,  $\gamma_D=1.059$ ,  $\gamma_L=1.518$ 로 計算되며  $\phi'R'=\gamma_D'S_D'+\gamma_L'S_L'$ 에 對應하는 公稱荷重 抵抗係數는  $\phi'=0.629\eta_R=0.629\times 1.12=0.71$ ,  $\gamma_D'=1.06$ ,  $\gamma_L'=1.518\eta_L=1.518\times 1.34=2.03$ 으로 된다. 이 係數들을 公稱安全率로 換算하면  $\rho'=1$ 의 경우  $n'=\gamma_D'+\gamma_L'\rho'/(1+\rho')\phi'=2.17$ 程度인데 反하여 AASHTO의 荷重係數設計法의  $\phi'=0.9$ ,  $\gamma_D'=1.3$ ,  $\gamma_L'=2.17$ 에 대하여는  $n'=1.93$ 으로 AASHTO의 公稱安全率이  $\beta_0=3.5$ 에 對應하는 本研究의 公稱安全率보다 낮은 것은 당연한 것이다.

本 研究에서 提案하는 LRFD 信賴性基準의  $\phi, \gamma$

表 7.  $\beta_0, \rho$ 의變化에 대한  $n', \sigma_{sa}/\sigma_y$

| $\beta_0$ | $\rho$ | $n'$   |        |        |        | $\sigma_{sa}/\sigma_y$ |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|--------|--------|--------|
|           |        | 0.5    | 1.0    | 1.5    | 2.0    | 0.5                    | 1.0    | 1.5    | 2.0    |
| 3.0       |        | 1.7464 | 1.9729 | 2.1493 | 2.2849 | 0.5726                 | 0.5069 | 0.4653 | 0.4377 |
| 3.5       |        | 1.9240 | 2.2007 | 2.4199 | 2.5902 | 0.5197                 | 0.4544 | 0.4132 | 0.3861 |
| 4.0       |        | 2.120  | 2.4549 | 2.7247 | 2.9363 | 0.4717                 | 0.4073 | 0.3670 | 0.3406 |

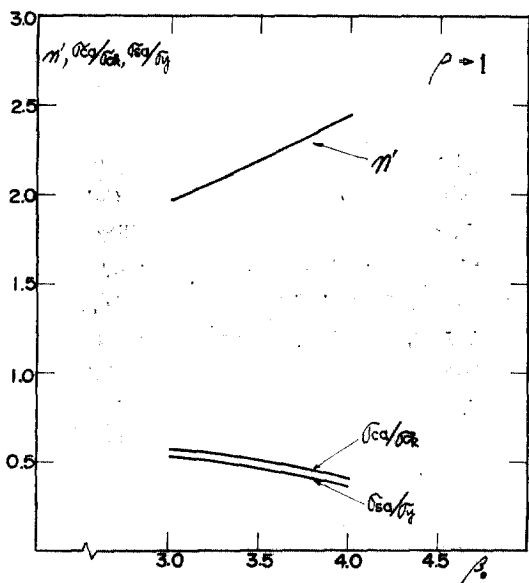


그림 6.  $\beta$  v.s.  $n \sigma_{ca}/\sigma_{ck}, \sigma_{sa}/\sigma_y$

表 8.  $\beta_0, \rho$ 의變化에 대한  $\sigma_{ca}/\sigma_{ck}$

| $\beta_0=3.5 \rho=0.5$ |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|
|                        | 2400   | 3000   | 3500   |
| 210                    | 0.4797 | 0.5018 | 0.5845 |
| 280                    | 0.4515 | 0.4689 | 0.5237 |
| 350                    | 0.4206 | 0.4374 | 0.5103 |
| $\beta_0=3.5 \rho=1.0$ |        |        |        |
|                        | 2400   | 3000   | 3500   |
| 210                    | 0.4195 | 0.4381 | 0.5111 |
| 280                    | 0.3949 | 0.4100 | 0.4784 |
| 350                    | 0.3678 | 0.3825 | 0.4462 |
| $\beta_0=3.5 \rho=1.5$ |        |        |        |
|                        | 2400   | 3000   | 3500   |
| 210                    | 0.3814 | 0.3984 | 0.4647 |
| 280                    | 0.3591 | 0.3728 | 0.4350 |
| 350                    | 0.3344 | 0.3477 | 0.4057 |

는 AASHTO와는 달리 抵抗係數가 0.9에서 0.71로, 死荷重係數가 1.3에서 1.06으로 낮은 값을 갖도록 하는 것이 특징이라 할 수 있다.

한편, 그림 6 및 表 7, 8은 現行 道路橋 示方書의 WSD 設計法에 의해 設計하는 경우 既 發表된 文獻 24에서 提示한 바와 같이  $\beta_0$ 와  $\rho$ 에 對應하는 公稱安全率  $n'$  및 許容應力  $\sigma_{ca}, \sigma_{sa}$ 를 計算 圖示한 것이다.

마찬가지로  $\beta_0=3.5$ 로 하는 경우  $n'=2.06$ ,  $\sigma_{sa}=0.485\sigma_y$ ,  $\sigma_{ca}=0.440\sigma_{ck}$ 는 現行 道路橋 示方書의 許容應力으로 R.C 設計 標準示方書의 安全率을 그대로 使用함은 適切하지 못하다는 事實을 나타내는 것이다.

## 6. 結 論

本 研究은 R.C. 道路橋 上部構造의 信賴性解析 및 LFRD型 信賴性 設計規準의 導入에 現行 道路橋 設計基準의 改定方向을 提示하기 위한 基礎研究로서, 우리나라 R.C. 道路橋의 交通荷重特性 및 R.C. 斷面의 強度 特性, 우리의 技術水準을 고려한 不確實量의 分散值를 채택하여 合理的인 信賴性 設計基準을 提案하였다.

本 研究의 結果를 分析 考察하므로써 다음과 같은 結論에 도달할 수 있었다.

1) 現行 R.C. 道路橋 示方書는 許容應力設計法만을 規定하고 있으므로 R.C. 設計 示方書의 極限強設計法에 對應하는 強度設計 規準의 導入이 시급하다. AASHTO에서는 荷重係數設計法이라는 在來式 強度設計規準을 채택하고 있는데, 앞으로 이러한 強度設計法의 導入時에는 本 研究에서 提案한 信賴性 設計理論에 基礎를 둔 LFRD 設計規準과 같이 우리 現實을 고려하여 決定된 荷重 및 抵抗係數를 使用해야 할 것이다. 本 研究에서 우리의 現實을 고려하여 提案하는 韌強度設計 方程式의  $\phi', \gamma'$ 는 다음과 같다.

$$\phi' = 0.71, \gamma_D' = 1.06, \gamma_L' = 2.03$$

2) 現行 道路橋 示方書의 許容應力 設計規準에서 使用하는 R.C.設計 示方書의 安全率은 道路橋의 特性을 反映하는 安全率로 再調整 되어야 하며 本 研究에서 提案한 信賴性 設計規準에 對應하는 適切한 公稱安全率 및 許容應力은 다음과 같다.

$$n' = 2.06, \sigma_{sa} = 0.485\sigma_y, \sigma_{ca} = 0.44\sigma_{ck}$$

3) R.C.道路橋 設計 規準의 製定에 使用할 目標信賴性指數는 우리의 現實을 고려하여  $\beta_0 = 3.5$ 로 함이 바람직하다고 보며 不確實量의 범위도 보다 正確한 統計資料 및 信賴性解析 方法이 研究되기 前에는 安全側인  $M/M' = 1.12, L/L' = 1.34, \Omega_R = 0.16, \Omega_{SD} = 0.08, \Omega_{SL} = 0.287$ 을 適用함이 바람직하다고 본다.

4) 信賴性解析 및 設計理論으로는 Ellingwood 等이 使用하는 抵抗-對數正規 標準化, 荷重-正規 標準化 알고리즘을 基本으로 하되 上限解로서 近似的인 解析을 하고자 할 경우에는 對數型 信賴性 指數公式과 Shiraishi 近似公式을 使用함이 적당하다고 사료된다.

5) R.C.道路橋의 경우 平均-荷重比는 通常 0.5~1.0 사이이고, 이 사이에서  $\phi, \gamma$ 는 매우 완만하게 變하므로 荷重比에 無關한 Level I型  $\phi, \gamma$ 는  $\rho = 0.5 \sim 1.0$  사이의 平均值로 取함이 좋다고 본다.

#### 謝 辭

끝으로 本 研究는 產學財團研究費로 實施하였으며 研究費를 지급하여 本 研究를 可能하게 한 財團當局에 感謝를 드린다.

#### 參 考 文 獻

1. Asplund, S.O., "Probabilities of Traffic Loads on Bridges", *Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 81, No. 585, Jan. 1955, pp. 585, 1~12.*
2. "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures", *Vol. II, CEB-FIP International Recommendations, 3rd Ed., 1978.*
3. "Steel, Concrete and Composite Bridges", *CP 5400, Part I, II, IV, BSI, London, 1978.*
4. "Common Unified Rules for Different Types of Construction and Material", *Vol. I, CEB-FIP*

*International Recommendations 3rd Ed., 1978.*

5. 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.*
6. Ellingwood, B., "Reliability of Current Reinforced Concrete Designs", *Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 105, No. ST4, April 1979, pp. 699~712.*
7. Ellingwood, B., "Reliability Based Criteria for Reinforced Concrete Design", *Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 105, No. ST4, April 1979, pp. 713~727.*
8. Ellingwood, B., MacGregor, J.G., Galambos, T.V., and Cornell, C.A., "Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice", *Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 108, No. ST5, May 1982, pp. 959~977.*
9. 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.*
10. Ellingwood, B., "Safety Checking Formats for Limit States Design", *Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 108, No. ST7, July 1982, pp. 1481~1493.*
11. Flint, A.R. and Edwards, L.S., "Limit State Design of Highway Bridges", *Journal of the American Concrete Institute, Vol. 48, No. 3, Mar. 1970, pp. 93~108.*
12. Galambos, T.V. and Ravindra, M.K., "Load and Resistance Factor Design for Steel" *Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 104, No. ST9, Sep. 1978, pp. 1337~1353.*
13. Hanes, R.M., "Second-Moment Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs", *Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Purdue Univ., Aug. 1978.*
14. Hasofer, A.M. and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format", *Journal of the Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol. 100, No. EMI, Feb. 1974, pp. 111~121.*
15. Loporati, E., "The Assessment of Structural Safety", *Series in Cement & Concrete Research*

Vol. 1, Research Studies Press, 1979.

16. “構造物の安全性・信頼性” 日本土木學會, 昭和51年10月.
17. 白石成人外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.
18. 藤野陽三外2人, “シミュレーションに基づく道路橋設計活動の評価”, 日本土木學會論文報告集 第286號, 1979.6, pp.1~13.
19. 松尾稔, 上野誠, “構造物の耐用期間内に生起する外力の不確実性を考慮した信頼性設計法”, 日本土木學會論文報告集 第289號 1979.9, pp.89~98.
20. 中川建治, “換算等分布活荷重の確率論的考察”, 日本土木學會論文報告集 第127號(昭和41年3月), pp.1~8.
21. 中川建治, はりに作用する荷重の統計的な扱いについて, 日本土木學會論文報告集 第175號, 1970.3, pp.15~22.
22. 村瀬安彦, 中川建治, “平均と分散を規定した荷重によるはりの設計”, 日本土木學會誌 1975.4, pp.71~76.
23. 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.
24. 趙孝男, “R.C. 樑部材의 L.R.F.D. 信頼性設計基準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.
25. 申鉉默, 趙孝男, 鄭煥浩, “現代許容應力設計法으로 設計되는 R.C. 樑部材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.

(接受: 1982. 8. 30)