

鋼板의 信賴性 設計基準

On the Criteria of Reliability Design for the Steel Plate

吳 昌 洙*
Oh, Chang Soo

Abstract

This paper checked up the safety criteria of the steel structural members by LRFD. And it calculated the resistance and load modulus for it by the proposed method, considering our circumstance, by establishing the target reliability index(β_0), and compared their calculated modulus with the nominal safety factors of the road-bridge code and analyzed them.

Uncertain quantity measurements for the resistance of the steel structural members and for the load effect are due to the method of the uncertain quantity analysis of the load and the resistance, of Galambos-Ravindra and SGST.

The summary of the results is as follows:

- 1) Considering our circumstance, target reliability index(β_0) for current steel structural members are appropriate $\beta_0=3.5$.
- 2) Nominal resistance ϕ' of the strength design formula for 1) and nominal load modulus γ_i' are as follows;
 - a) Both-sides support plate: $\phi'=0.75$, $\gamma_D'=1.04$, $\gamma_L'=2.08$
 - b) One-side support plate: $\phi'=0.82$, $\gamma_D'=1.04$, $\gamma_L'=2.11$

要 旨

本 研究는 鋼構造部材의 安全性水準을 LRFD 에 의해 檢討하였다. 그리고, 우리 現實을 考慮한 目標信賴性指數(β_0)를 設定하여 이에 대한 抵抗 및 荷重係數를 提案된 方法으로 計算하였으며, 各道 路橋示方書의 公稱安全率과 이들 計算된 係數를 比較分析하였다.

鋼構造部材의 抵抗 및 荷重效果에 대한 不確實量 算定은 Galambos-Ravindra 및 SGST의 荷重 및 抵抗 不確實量 解析方法에 따랐다. 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

- 1) 現 鋼構造部材에 대한 目標信賴性指數 β_0 는 우리의 現實을 考慮하여 $\beta_0=3.5$ 가 適切하다.
- 2) 1)에 대한 強度設計方程式의 公稱抵抗 ϕ' , 公稱荷重係數 γ_i' 는 아래와 같다.
 - a) 兩緣支持板: $\phi'=0.75$, $\gamma_D'=1.04$, $\gamma_L'=2.08$
 - b) 片支持板: $\phi'=0.82$, $\gamma_D'=1.04$, $\gamma_L'=2.11$

* 正會員·羅州韓獨工高 土木科長, 朝鮮大學校 大學院
博士過程

1. 序 論

現在 設計되고 있는 鋼構造物의 解析은 道路橋 標準示方書⁽¹⁾에 規定된 許容應力設計法에 의하거나, 經驗에 의한 安全率의 導入으로 鋼材가 서로 다르든가 또는 荷重이 다를 때에는 一定한 水準의 安全率로서 鋼構造 部材를 設計할 수가 없었다. 이러한 矛盾을 止揚하고, 作用荷重과 鋼部材 抵抗이 不確實量들을 確率論的으로 處理함으로써 鋼部材가 構造的으로 一定한 信賴性을 갖도록 設計하는 것이 信賴性理論에 의한 設計法인데 先進諸國에서는 이러한 設計法을 導入하는 趨勢에 있고, 最近에 이를 集大成하고 體系化시켜 하나의 새로운 設計法으로 發展시켜 登場한 것이 LRFD^(2,3), 即 鋼部材의 抵抗과 荷重係數를 使用한 設計法이다. LRFD는 荷重과 強度에 대한 第一階確率解析(first order probability analysis)과 鋼部材의 強度(strength)와 使用法(serviceability)에 대한 限界狀態(limit state)에 基礎를 두고 있다. 이러한 設計法의 目的은 위와 같은 限界狀態로 되는 確率을 鋼構造物의 모든 部材에 대하여 거의 一定한 값이 되도록 하여 適切한 安全率을 갖게 하는데 있다.

本 研究에서는 鋼板(steel plate) 要素를 LRFD에 의해 信賴性을 解析하여 構造抵抗과 荷重效果를 外國의 示方書와 比較 檢討해서 우리의 現實에 맞는 目標信賴性指數를 定하여 Shiraishi의 近似法⁽⁴⁾과 Newton Raphson의 反復試行 algorithm⁽⁵⁾에 의해 抵抗 및 荷重係數를 荷重比에 따라 比較 分析하여 現行 示方書의 信賴性 및 設計規準을 考慮하여 綜合的이고 體系的으로 鋼板의 信賴性 規準을 提案하는데 그 目的이 있다.

2. 信賴性 解析

2.1. 近似的 解析

信賴性 解析에서 지금까지 主로 使用된 限界狀態函數는 Cornell⁽⁶⁾의 正規分布型函數 $Z=R-S$ 와 Rosenblueth-Esteva⁽⁷⁾의 對數正規分布型函數 R, S 를 그대로 使用하여 信賴性指數 β 를 求하면 MFOSM法에 의한 近似的 解析이 된다. 따

라서 正規分布型인 $Z=R-S$ 인 경우 信賴性指數 β 는

$$\beta = \frac{(\bar{R} - \bar{S})}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{(n_0 - 1)}{\sqrt{n_0^2 \Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (2.1)$$

여기서

$$\Omega_S^2 = \frac{(1 - \rho^2)}{(\Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2)}$$

$$\Omega_R = \sigma_R / \bar{R}$$

$$n_0 = \bar{R} / \bar{S}$$

\bar{R}, \bar{S} : 抵抗과 荷重效果의 平均值

σ_R^2, σ_S^2 : 抵抗과 荷重效果의 分散(標準偏差)

反면에 對數分布型인 $Z = \ln R - \ln S$ 의 경우는 近似的으로

$$\beta = \frac{\ln \bar{R} - \ln \bar{S}}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2}} = \frac{\ln n_0}{\sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_S^2}} \quad (2.2)$$

여기서 n_0 는 中央安全率이고, Ω_R, Ω_S 는 變動係數(coefficient of variation: COV)이다.

Shiraishi 등은 Cornell의 $Z=R-S$ 의 結果變數인 限界狀態函數에 대해 Lind-Hasofer⁽⁸⁾의 A FOSM法(advanced first order second moment method), 即 最少距離法을 適用하여 對數型標準變數 $(\ln X - \ln \bar{X}) / \Omega_X$ 를 取하면 式(2.2)로 되고, 反對로 $(X - \bar{X}) / \sigma_X$ 의 標準化變換을 시키면 式(2.1)로 됨을 보여 주었다.

2.2 反復試行法

Lind-Hasofer의 不變2次 moment法에 의한 標準化座標 空間에서 限界狀態 破壞面까지의 最小距離로 더 正確한 값을 求할 수 있다.

荷重效果 S 를 死荷重과 活荷重으로 區分하여

$$g(R, S_D, S_L) = \ln R - S_D - S_L \leq 0 \quad (2.3)$$

와 같이 表現하고, Ellingwood^(9,10)는 抵抗만을 對數變換시켜 式(2.3)의 $\ln R, S_D, S_L$ 을 標準變數으로 置換한 그림 1의 標準變數 座標系에서 破壞域은

$$g = (R^*, S_D^*, S_L^*) = 0 \quad (2.4)$$

이고, 最短距離 OP^* 가 信賴性 指數 β 이므로 이 最短距離點 $P^*(R^*, S_D^*, S_L^*)$ 는 $\beta \times$ 測定方向 單位 vector $(\alpha_R, \alpha_{SD}, \alpha_{SL})$ 이고, 이 單位 vector는 P^* 에서의 測定方向勾配(unit gradient) vector와 같으므로 部分對數正規標準化變換으로 나타내면 다음과 같이 誘導된다.

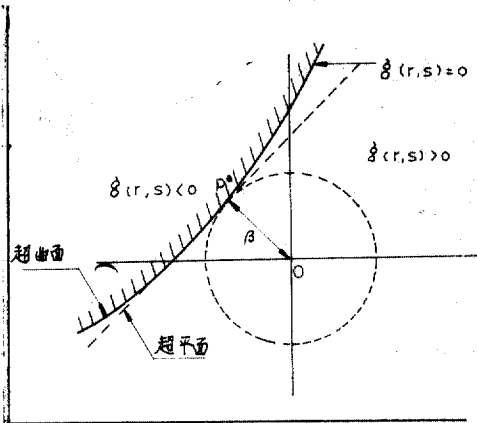


그림 1. 信賴性指數(β)의 座標

$$\left. \begin{aligned} \phi(1+\rho)n_0 &= \gamma_D + \rho\gamma_L \\ \text{(or } \phi\bar{R} &= \gamma_D\bar{S}_D + \gamma_L\bar{S}_L \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

여기서

$$\phi = \exp(-\alpha_R \beta \Omega_R) \quad (2.5-a)$$

$$\gamma_D = 1 + \alpha_{SD} \beta \Omega_{SD} \quad (2.5-b)$$

$$\gamma_L = 1 + \alpha_{SL} \beta \Omega_{SL} \quad (2.5-c)$$

$$\rho = L/\bar{D} \text{ (荷重比)}$$

이때 α_i 는 最小距離 β 의 方向 vector 成分으로

$$\left. \begin{aligned} \alpha_R &= \frac{\phi \Omega_R (1+\rho) n_0}{\sqrt{\phi^2 \Omega_R^2 (1+\rho)^2 n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2}} \\ \alpha_{SD} &= \frac{\Omega_{SD}}{\sqrt{\phi^2 \Omega_R^2 (1+\rho)^2 n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2}} \\ \alpha_{SL} &= \frac{\Omega_{SL} \rho}{\sqrt{\phi^2 \Omega_R^2 (1+\rho)^2 n_0^2 + \Omega_{SD}^2 + \Omega_{SL}^2 \rho^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

따라서, 信賴性指數 β 는 式(2.5), (2.6)을 反復試行하여 求 數 值 的 的 algorithm은 다음과 같다.

I 段階; ρ, Ω_i, n_0 가 주어지면 近似的으로 ϕ, γ_i 를 假定하여 式(2.6)으로부터 α_i 를 求하여 式(2.5)에 의해 β 計算

II 段階; β 를 式(2.5)에 代入하여 ϕ, γ_i 를 求한 다음 式(2.6)으로부터 α_i 計算

III 段階; 前 cycle의 α_i, β 값을 現 cycle의 값과 比較한 後에 收斂時까지 反復試行

2.3 公稱安全率에 의한 解析

在來式 設計示方書에 대해 檢定(calibration)하여 信賴性設計基準을 決定하는 경우나, 示方書에 의해 安全應力으로 設計되는 鋼構造에 대

한 信賴性을 解析하고자 하는 경우, 公稱安全率 n' 로부터 β 를 計算할 必要가 있다. 前節에서 β 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 η 를 利用하면 n 와 n_0 의 關係로부터 β 를 求할 수 있다.

$$n_0 = \frac{\bar{R}}{\bar{S}} = \frac{\eta_R R'}{\eta_S S'} = \frac{\eta_R}{\eta_S} n' \quad (2.7)$$

여기서

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

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

$$n' = R'/S'$$

그리고, 公稱荷重比 ρ' 와 平均荷重比 ρ 의 關係는 다음과 같다.

$$\rho = \frac{\bar{L}}{\bar{D}} = \frac{\eta_L L'}{\eta_D D'} = \frac{\eta_L}{\eta_D} \rho' \quad (2.8)$$

以上에서 본 바와 같이 公稱安全率이란 公稱抵抗 R' 와 公稱荷重效果 S' 의 比로서 許容應力設計法에서는 $n' = \sigma_y/\sigma_{sa}$ 인 反面에 極限強度設計法에서는 $\phi'R' = \gamma_D'S_D' + \gamma_L'S_L'$ 에서 $n' = R'/S'$ 임을 留意하면 公稱抵抗率은 다음과 같다.

$$n' = \frac{(\gamma_D' + \gamma_L' \rho')}{(1 + \rho') \phi'} \quad (2.9)$$

물론, 安全應力設計斷面이 아닌 경우에는 中央安全率 n_0 를 주어진 斷面 및 荷重으로부터 求해야 한다.

3. 不確實量算定

3.1 基本耐荷力算定式

板要素의 基本耐荷力은 座屈強度, 極限強度에 影響을 주는 要因, 即 材料의 降伏應力, 彈性係數, 斷面치수, 殘留應力, 初期처짐, 荷重의 偏心 등에 따라 다르며, 信賴性 解析에 있어서 統計量으로 取扱되어져야 한다.

一定한 壓縮을 받은 兩緣支持板 및 片支持板의 強度를 取하여 斷面係數 S 및 無次元化한 抵抗強度 R 은 다음과 같이 된다.

$$S = A$$

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \quad (3.1)$$

여기서, A = 板要素의 斷面積, σ_u = 板要素의 強度(應力)이며, 板要素의 公稱抵抗強度 R' 는

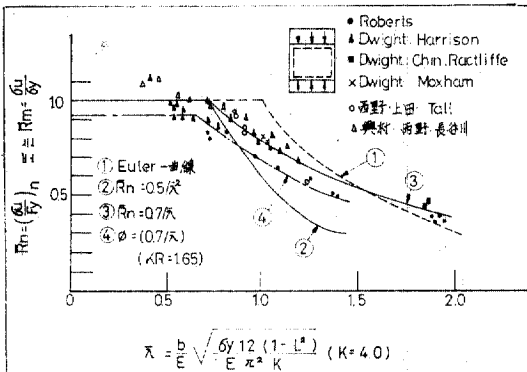
다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} (1) \text{ 道路橋 示方書의 基本耐荷力}^{(11)} \\ R' = 1.0 \quad (\lambda \leq 0.7) \\ R' = 0.5/\lambda^2 \quad (0.7 \leq \lambda \leq 1.4) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

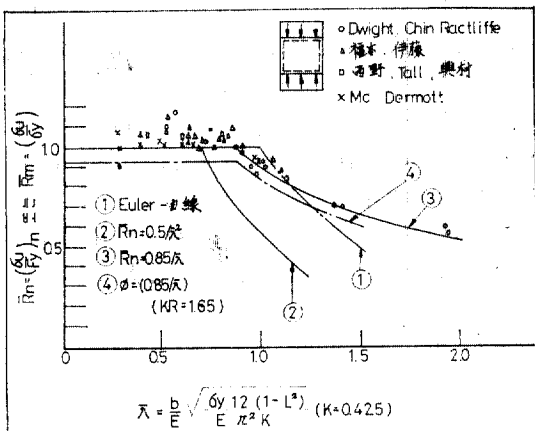
$$\left. \begin{aligned} (2) \text{ 後座屈強度를 考慮한 耐荷力}^{(12)} \\ R' = 1.0 \quad (\lambda \leq c) \\ R' = c/\lambda \quad (c \leq \lambda \leq 1.4) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

여기서 λ 는 座屈 媒介變數(parameter)로 $\lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{F_y}{E} \cdot \frac{12(1-L^2)}{\pi^2 k}}$ 이다. 그리고, $c =$ 定數, $b =$ 板幅, $t =$ 板두께, $k =$ 座屈係數(兩側 支持板인 경우 $k = 4.0$, 片支持板인 경우 $k = 0.425$)이다.

式(3.3)의 R' 는 $c = 1.0$ 인 경우에 von Korman의 後座屈 強度를 包含한 板要素의 強度式을 修正하였다. 座屈 parameter의 適用範圍는



(a) 兩緣 支持板의 公稱抵抗強度와 實驗 data



(b) 片支持板의 公稱抵抗強度와 實驗 data
그림 2. 板要素의 公稱抵抗強度와 實驗 data

道路橋 示方書에서 1.4까지로 하고 있다. 板要素의 公稱強度와 實驗 data는 그림 2와 같다⁽¹³⁾.

3.2 抵抗의 不確實量

LRFD 信賴性 解析 및 設計를 위한 構造抵抗과 荷重에 關聯되는 各種 不確實量의 解析 및 推定 方法이 많이 發表되었다^(10,13-16).

本 研究에서는 鋼道路橋 設計斷面의 平均 및 分散의 算定에 대하여 Galambos-Ravindra가 提示한 model에 의하여 考察하였다. 鋼構造物의 部材抵抗 R 은 確率變數로서 다음의 세 가지 確率變數의 積으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{R} = R' M F P \quad (3.4)$$

여기서

R' : 示方書 指定公稱抵抗

M : 部材強度나 剛性의 變化를 나타내는 確率變數

F : 鋼材 製作上의 不確實性을 나타내는 確率變數

P : 設計 model로부터 抵抗을 決定하는 過程에서 假定의 不確實性을 나타내는 確率變數

한편, 式(3.4)를 SGST(study group of steel structures in Tokai) format⁽¹³⁾로 나타내면 材料係數 $M = \sigma_y / F$, 製作係數 $F = \bar{S} / S'$, 設計係數 $P = \bar{R} / R'$ 로 하면 信賴係數 ϕ 는 다음과 같이 된다.

$$\phi = \bar{R} / R' = \bar{M} \cdot \bar{F} \cdot \bar{P} \quad (3.5)$$

여기서 \bar{M} : 材料係數의 平均值

\bar{F} : 製作係數의 平均值

\bar{P} : 設計係數의 平均值

따라서, M, F, P 의 變動係數(cov)를 各各 $\Omega_M, \Omega_F, \Omega_P$ 로 하면 抵抗의 變動係數 Ω_R 은

$$\Omega_R = \sqrt{\Omega_M^2 + \Omega_F^2 + \Omega_P^2} \quad (3.6)$$

으로 된다.

3.2.1 \bar{M}, Ω_M 의 算定

材料에 대한 不確實量은 鋼材의 機械的 性質인 降伏應力(σ_y), 引張強度(σ_u), young 率(E), poisson 比(ν)에 의해 左右된다. 따라서, 本 研究에서는 σ_y 에 最低保證值로, σ_u 에는 上·下限의 範圍로 주고, 또 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.3$ 을 주어 KS 規格에 따라 우리 나라 鋼材의 機械的

性質을 試驗한 結果가 SGST 에 의한 實驗結果와 類似했다.

우리 나라의 鋼材에 대하여 浦項製鐵과 仁川製鐵産 鋼材 1030 片의 試驗 data 를 分析한 結果 材料係數에 대한 平均/公稱(σ_y/F_y), 變動係數(Ω_M)을 算定하면 降伏應力에 대하여 (σ_y/F_y) = 1.054~1.52 이고, Ω_{F_y} = 0.05~0.14 까지 變動되며, 引張強度에 대해서는 (σ_u/F_u) = 1.045~1.195, Ω_{F_u} = 0.031~0.060 으로 推定되었다.

따라서, 우리 나라 鋼材의 data 에 따른 統計値와 日本의 SGST 에서 推定한 統計値 및 Galambos-Ravindra⁽⁹⁾에 의해 推定한 統計値를 比較하면 表(1)과 같다.

3.2.2 \bar{F} , Ω_F 의 算定

製作係數의 平均值(\bar{F})와 變動係數(Ω_F)는 Galambos-Ravindra 에 의해 推定된 $\bar{F} = (\bar{S}/S') = 1.00$, $\Omega_F = 0.05$ 를 本 研究에서 使用한다.

3.2.3 \bar{P} , Ω_P 의 算定

設計係數의 平均值(\bar{P})와 變動係數(Ω_P)는 前節에서 記述한 plate 要素의 基本 耐荷力 算定式 (3.2), (3.3)에 의해 力學的 特性을 分析해 본 結果, 우리 나라와 日本이 똑같이 兩緣支持板인 경우 $\bar{P} = 0.994$, $\Omega_P = 0.074$ 이고 片支持板인 경우 $\bar{P} = 1.05$, $\Omega_P = 0.055$ 였다.

따라서, 鋼構造 部材에 대한 構造抵抗의 平均/公稱(\bar{R}/R') 및 變動係數(Ω_{RM})의 統計値는 式 (3.5), (3.6)에 의하여 求하면 表 2와 같다.

3.3 荷重效果의 不確實量

本 研究에서는 鋼部材에 있어서 通常 基本荷重組合이 되고 있는 死荷重과 活荷重 및 衝擊荷重단을 考慮하기로 한다. 荷重效果의 平均 및 分散의 計算式은 荷重效果를 部分荷重效果의 組合으로 求하는 경우

$$S = S_D + S_{L+I} \quad (3.7)$$

이므로 荷重效果의 平均值와 變動係數는

$$\bar{S} = \bar{S}_D + \bar{S}_{L+I} \quad (3.8)$$

$$\Omega_S = \sqrt{\Omega_{SD}^2 \bar{S}_D^2 + \Omega_{SL}^2 \bar{S}_L^2 / \bar{S}^2} \quad (3.9)$$

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

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

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

$$\Omega_{SK+1} = \sqrt{\Omega_E^2 + \Omega_{CL}^2 + \Omega_{K+1}^2}$$

信賴性 理論에 의한 鋼部材의 解析 및 設計 또는 設計基準의 開發에서 아직도 가장 發展치 못했으며, 가장 어렵고 重要的 分野가 活荷重의 統計的 取扱이다. 따라서, 道路橋 活荷重의 경우 Fuzino⁽¹⁷⁾ 등이 荷重列 model 解析 結果에 의하면 支間과 解析條件에 따라 平均 公稱比(\bar{S}_L/S'_L) = 0.8~1.3 程度의 範圍로 나타나므로, 우리 나라 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 考慮하였으며, 死荷重의 경우에는 Ellingwood⁽⁹⁾가 使用한 平均-公稱比(\bar{S}_D/S'_D) = 1.0 으로 取하였다.

그리고, 表 3은 荷重效果에 대한 平均-公稱比 및 變動係數의 統計値로 $\Omega_D = 0.05$, $\Omega_L = 0.2$ 를 取하였고, 荷重效果에 대한 Ω_{S_i} 를 計算하는데 必要한 $\Omega_E, \Omega_{CD}, \Omega_{CL}$ 등은 Galambos-Ravindra 가 使用한 $\Omega_E = 0.05$, $\Omega_{CD} = 0.04$, $\Omega_{CL} = 0.2$ 를 適用하였다.

따라서, 本 研究에 의한 우리 나라의 抵抗과 荷重效果의 不確實量을 外國의 先行研究와 比較해 보면 表 4와 같다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 $\gamma_D, \gamma_L, \Omega_{SD}, \Omega_{SL}, \rho$ 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 없는 狀態이므로 不確實性을 考慮하여 比較的 큰 값을 使用하는 것이 一般的이다.

表 1. 材料係數에 대한 \bar{M} 와 Ω_M

區 分		우리 나라	SGST ⁽¹³⁾	Galambos-Ravindra ⁽⁹⁾
降伏應力	平均/分散 (\bar{M})	1.20	1.15	1.10
	變動係數 (Ω_M)	0.12	0.11	0.10
引張強度	平均/分散 (\bar{M})	1.11	1.08	1.10
	變動係數 (Ω_M)	0.06	0.07	0.07

表 2. 抵抗에 대한 平均-公稱比와 變動係數

區分	兩緣支持板		片支持板	
	우리 나라	日 本	우리 나라	日 本
\bar{R}/R'	1.19	1.14	1.26	1.21
Ω_R	0.16	0.14	0.15	0.13

表 3. 荷重效果에 대한 不確實量

荷重	우리 나라		日 本		AASHTO	
	η_i	Ω_{Si}	η_i	Ω_{Si}	η_s	Ω_{Si}
死荷重 (D)	1.0	0.08	1.0	0.08	1.0	0.08
活荷重 (L)	1.34	0.29	1.30	0.29	1.25	0.29

表 4. 抵抗 및 荷重效果의 不確實量 比較

文 獻	抵 抗		死 荷 重		活 荷 重	
	\bar{R}/R'	Ω_R	\bar{D}/D'	Ω_{SD}	L/L'	Ω_{SL}
文獻(18)	—	—	1.0	0.07	0.7	0.3
文獻(10)	0.97 ~1.13	0.17	1.0	0.1	varies	0.26
文獻(19)	0.95	0.14	1.05	0.1	varies	0.25
文獻(20)	—	0.14 ~0.22	1.0	0.13	varies	0.33
siu. el. al.	1.14	0.16	1.0	0.07	0.7	0.3
本 研 究	1.19	0.16	1.0	0.08	1.34	0.29

4. 信賴性 設計基準

個賴性 設計基準으로서의 ϕ, γ_i 決定은 信賴性 指數 β 를 目標信賴性指數 β_0 로 設定한 다음, 信賴性 解析에서의 公式를 利用한다. 따라서, 近似的方法과 反復試行法에 의하여 鋼構造 部材의 信賴性 設計基準을 記述하면 다음과 같다.

4.1 近似的方法

MFOSM에 의한 近似의 β 解析은 式(3.13)으로 求할 수 있고, Shiraiishi 는 式(3.14)와 같은 對數函數로 된 β 式에 대해 上記한 線型近似化代身에 다음과 같이 近似的으로 表現함으로써 ϕ, γ_i 를 求하도록 하였다. 荷重效果 $S=S_D+S_L$ 임을 留意하면, 信賴性指數 β 는

$$\beta = \{ \ln \bar{R} - \ln(\bar{S}_D + \bar{S}_L) \} / \sqrt{\Omega_R^2 + (\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2) / (1 + \rho)^2} \quad (4.1)$$

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

$$\exp\left(-\frac{\Omega_R^2 \beta_0}{\sqrt{\Omega_R^2 + \frac{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2}{(1 + \rho)^2}}}\right) \cdot \bar{R} \geq (\bar{S}_D + \bar{S}_L) \cdot \exp\left(\frac{\frac{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2}{(1 + \rho)^2}}{\sqrt{\Omega_R^2 + \frac{\Omega_{SD}^2 + \rho^2 \Omega_{SL}^2}{(1 + \rho)^2}}}\right) \quad (4.2)$$

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

$$\phi \cdot \bar{R} \geq \gamma_D \cdot \bar{S}_D + \gamma_L \cdot \bar{S}_L \quad (4.3)$$

로 된다. 式(4.3)에서 ϕ, γ_i 의 計算은 다음과 같다.

$$\phi = \exp\left(-\frac{\Omega_R^2 \cdot \beta_0}{V}\right) \quad (4.4-a)$$

$$\gamma_D = \alpha' \left[\exp\left(\frac{\Omega_{SD} \cdot \beta_0}{(1 + \rho)^2 V}\right) \right] \quad (4.4-b)$$

$$\gamma_L = \alpha' \left[\exp\left(\frac{\rho^2 \cdot \Omega_{SL} \cdot \beta_0}{(1 + \rho)^2 V}\right) \right] \quad (4.4-c)$$

여기서

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

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

4.2 反復試行法

前述한 AFOSM 과 Lind-Hasofer 의 不變 2次 moment 法에 의한 信賴性 解析에 利用되는 反復試行法은 ϕ, γ_i 의 決定에도 그대로 適用되는데, 이때 $\beta = \beta_0$ 로 取하여 抵抗과 荷重係數를 그림 3과 같이 flow chart 하여 反復試行 algorithm 으로 求할 수 있다.

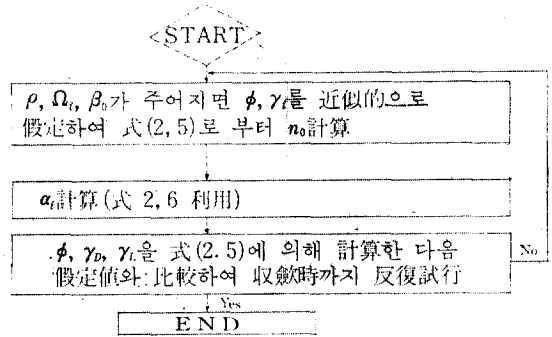


그림 3. ϕ, γ_i 에 대한 flow chart

5. 計算 및 考察

5.1 信賴性 指數(β)의 算定

信賴性 設計基準의 安全水準은 目標信賴性指數 β_0 에 의해 決定되므로 最適 β_0 의 選擇이 무

엇보다 重要하다. β_0 는 信賴性 最適化理論에 의 해 求할 수 있으나⁽⁶⁾, 實際로는 어렵기 때문에 여기서는 實用的인 方法인 기존 示方書에 의해 calibration 하는 方法으로 求하고자 한다.

表 2, 3의 統計值에 의해 板要素에 대한 β 값을 各各 比較 計算한 結果를 表 5에 收錄하였다. 이 表에서 β 값은 Trigem-30 computer에 의해 計算하였고, 우리나라 道路橋 示方書⁽¹⁾에서는 公稱安全率을 $n'=1.7\sim 2.0$ 으로 推定하고 있고, 日本 道路橋 示方書⁽¹¹⁾에서는 $n'=1.7$ 로 算定하고 있으며, 美國의 AASHTO 示方書⁽¹²⁾에서는 $n'=1.8$ 程度로 規定하고 있다. 그리고, β 값의 變化를 比較해 보면, 우리나라 道路橋 示方書의 경우 $n'=2.0$ 일 때 $\beta=4.1\sim 2.3$ (兩支板인 경우), $\beta=4.7\sim 2.8$ (片支板인 경우)이고, $n'=1.7$ 일 때 $\beta=3.3\sim 2.1$ (兩支板인 경우), $\beta=3.7\sim 2.3$ (片支板인 경우)으로 變하고 있으며, 日本 道路橋 示方書에서는 兩支板인 경우 β 는 荷重比에 따라 $\beta=3.4\sim 2.1$ 로 變化하고, 片支板인 경우 $\beta=3.9\sim 2.4$ 로 變化하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 兩支板과 片支板의 β 값을 比較해 볼때 片支板이 多少 높게 變化하고 있음을 알아 볼 수 있다.

그러나, 그림 4에 圖示된 바와 같이 現行 우리

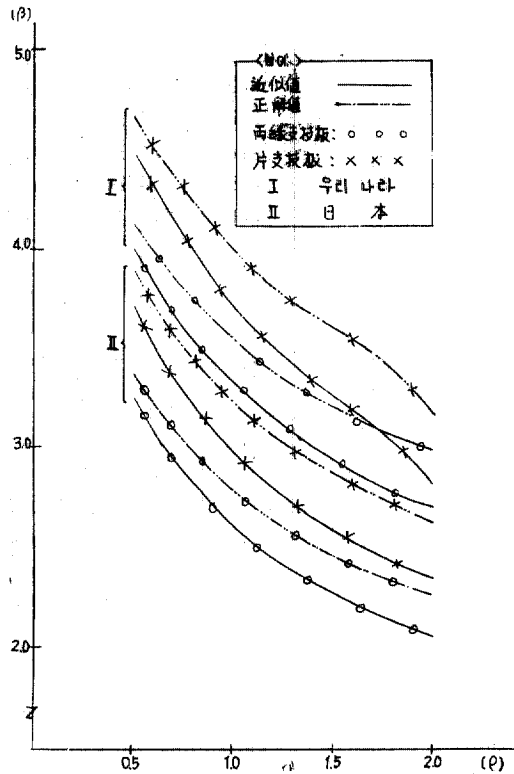


그림 4. 板要素에 대한 β 값의 比較

表 5. 板要素에 대한 β 값의 比較

區分 種類	σ	우리나라 道路橋 示方書				日本 道路橋 示方書			
		n'	n_0	β		n'	n_0	β	
				근사치	정해치			근사치	정해치
兩 緣 支 持 板	0.5	2.0 (1.7)	2.18 (1.86)	4.0090 (3.1924)	4.1389 (3.2782)	1.7	1.79	3.2655	3.3820
	1.0	2.0 (1.7)	2.08 (1.77)	3.3350 (2.6001)	3.5493 (2.7364)	1.7	1.71	2.6108	2.7815
	1.5	2.0 (1.7)	2.02 (1.72)	2.9475 (2.2735)	2.2022 (2.4320)	1.7	1.67	2.2730	2.4648
	2.0	2.0 (1.7)	1.98 (1.68)	2.7068 (2.0557)	2.9801 (2.2206)	1.7	1.64	2.0596	2.2566
片 支 持 板	0.5	2.0 (1.7)	2.31 (1.96)	4.4953 (3.6131)	4.6771 (3.7357)	1.7	1.89	3.7324	3.9032
	1.0	2.0 (1.7)	2.20 (1.87)	3.7117 (2.9466)	4.0012 (3.1376)	1.7	1.81	2.9844	3.2285
	1.5	2.0 (1.7)	2.13 (1.81)	3.2509 (2.5580)	3.5964 (2.7746)	1.7	1.77	2.6007	2.8721
	2.0	2.0 (1.7)	2.09 (1.78)	2.8362 (2.3425)	3.1618 (2.5718)	1.7	1.74	2.3620	2.6402

表 6. β_0 에 대한 ϕ, τ_i (板)

$\rho=1.5$

區分		β_0	ϕ, τ_i 방법	ϕ		τ_D		τ_L	
				근사치	정해치	근사치	정해치	근사치	정해치
兩 緣 支 持 板	우리나라 道路橋示方書	3.0		0.7247	0.6806	1.1702	1.0260	1.6905	1.5116
		3.5		0.6869	0.6319	1.1977	1.0290	1.8397	1.5717
		4.0		0.6510	0.5853	1.2249	1.0317	2.0005	1.6246
		4.5		0.6170	0.5412	1.2517	1.0340	2.1736	1.6705
		5.0		0.5847	0.4996	1.2782	1.0360	2.3599	1.7097
	일본 道路橋示方書	3.0		0.7706	0.7242	1.1797	1.0278	1.7406	1.5478
		3.5		0.7378	0.6792	1.2086	1.0310	1.9027	1.6127
		4.0		0.7065	0.6355	1.2372	1.0340	2.0782	1.6700
		4.5		0.6764	0.5935	1.2654	1.0365	2.2680	1.7194
		5.0		0.6477	0.5515	1.2932	1.0566	2.4730	1.7362
片 支	우리나라 道路橋示方書	3.0		0.7475	0.7021	1.1749	1.0268	1.7152	1.5291
		3.5		0.7121	0.6551	1.2031	1.0300	1.8707	1.5914
		4.0		0.6784	0.6099	1.2310	1.0328	2.0387	1.6463
		4.5		0.6463	0.5667	1.2585	1.0352	2.2199	1.6939
		5.0		0.6157	0.5258	1.2857	1.0373	2.4154	1.7343
持 板	일본 道路橋示方書	3.0		0.7938	0.7470	1.1845	1.0288	1.7666	1.5679
		3.5		0.7638	0.7042	1.2142	1.0323	1.9356	1.6359
		4.0		0.7350	0.6622	1.2435	1.0353	2.1189	1.6957
		4.5		0.7072	0.6215	1.2724	1.0379	2.3175	1.7475
		5.0		0.6805	0.5823	1.3008	1.0401	2.5324	1.7915

表 7. ρ 에 대한 ϕ, τ_i (板)

$\beta_0=3.5$

區分		β_0	ϕ, τ_i 방법	ϕ		τ_D		τ_L		
				근사치	정해치	근사치	정해치	근사치	정해치	
兩 緣 支 持 板	우리나라 道路橋示方書	0.5		0.6307	0.6127	1.1959	1.0656	1.3444	1.4307	
		1.0		0.6650	0.6260	1.2139	1.0408	1.6544	1.5364	
		1.5		0.6869	0.6319	1.1977	1.0290	1.8397	1.5717	
		2.0		0.7011	0.6347	1.1762	1.0223	1.9558	1.5871	
	일본 道路橋示方書	0.5		0.6806	0.6595	1.2152	1.0795	1.3806	1.5225	
		1.0		0.7162	0.6733	1.2291	1.0439	1.7112	1.5773	
		1.5		0.7378	0.6792	1.2086	1.0310	1.9021	1.6127	
		2.0		0.7516	0.6821	1.1814	1.0239	2.0208	1.6282	
	片 支	우리나라 道路橋示方書	0.5		0.6552	0.6357	1.2052	1.0683	1.3618	1.4489
			1.0		0.6902	0.6492	1.2214	1.0423	1.6821	1.5561
1.5				0.7121	0.6551	1.2031	1.0300	1.8707	1.5914	
2.0				0.7262	0.6580	1.1803	1.0231	1.9880	1.6069	
持 板	일본 道路橋示方書	0.5		0.7069	0.6842	1.2259	1.0746	1.4008	1.4902	
		1.0		0.7427	0.6982	1.2371	1.0457	1.7415	1.6003	
		1.5		0.7638	0.7042	1.2142	1.0323	1.9356	1.6359	
		2.0		0.7771	0.7071	1.1884	1.0248	2.0542	1.6513	

나라 道路橋 示方書에서 鋼構造 部材에 대한 公稱安全率을 $n'=1.7$ 程度로 規定하기에는 우리 的 技術水準과 品質管理(quality control; Q.C.) 水準에 비추어 보아 어려운 實情이고, $n'=2.0$ 程度를 取함이 바람직하다고 본다. 또, $n'=2.0$ 인 경우 그림 4에서 본 바와 같이 荷重比 ρ 에 대하여 β 값이 急激히 減少하는데 反하여 AASHTO 示方書에서의 β 값은 가장 完만하게 減少했다.

따라서 Galambos⁽⁹⁾ 등은 鋼構造 部材의 設計 基準을 위한 目標信賴性指數 β_0 를 AASHTO 示方書에 의해 calibration 함으로써 $\beta_0=3.0$ 을 採擇하였다. 本 研究에서도 Galambos에 의해 推定된 統計值에 의해 計算한 結果 β 값이 Ellingwood⁽¹⁰⁾가 推定한 β 값과 거의 一致함을 窺볼수 있다. 그러나, 아직 우리 나라에서는 鋼構造 部材의 目標信賴性指數 β_0 를 外國의 水準과 같이 使用하기는 困難하고, 表 5에서 본 바와 같이 純壓縮板要素의 경우는 $\beta_0=3.5$ 程度로 取함이 바람직한 값이라고 判斷되었다.

5.2 ϕ, γ_i 의 計算

抵抗 및 荷重係數의 計算은 限界狀態函數의 形態, 標準化 座標變換의 形式, 近似化技法, algorithm에 의한 反復法 등에 따라 달라지지만, 本 研究에서는 前節에 記述한 信賴性 解析 및 設計基準에 의해 近似值는 Shiraishi의 近似公式(4.4)를 利用하고, 正解值는 Newton-Raphson法에 의한 反復試行 algorithm式(2-12, 15, 16)을 利用하여 求했다.

純壓縮板要素에 있어서의 β_0 에 대한 ϕ, γ_i 를 그림 5 및 表 6에 나타냈는데 荷重比 $\rho=1.5$ 인 경우의 ϕ, γ_i 의 變化는 近似值가 正解值보다 약간 上限解임을 보여 주고, 兩綠支板과 片支持板을 比較해 볼 때 片支持板이 多少 높은 값을 나타내고 있다.

그리고, 表 7과 그림 6은 純壓縮板要素의 ρ 에 대한 ϕ, γ_i 의 變化를 나타낸 것으로 이 경우도 近似值가 正解值보다 약간 上限解를 보여주고

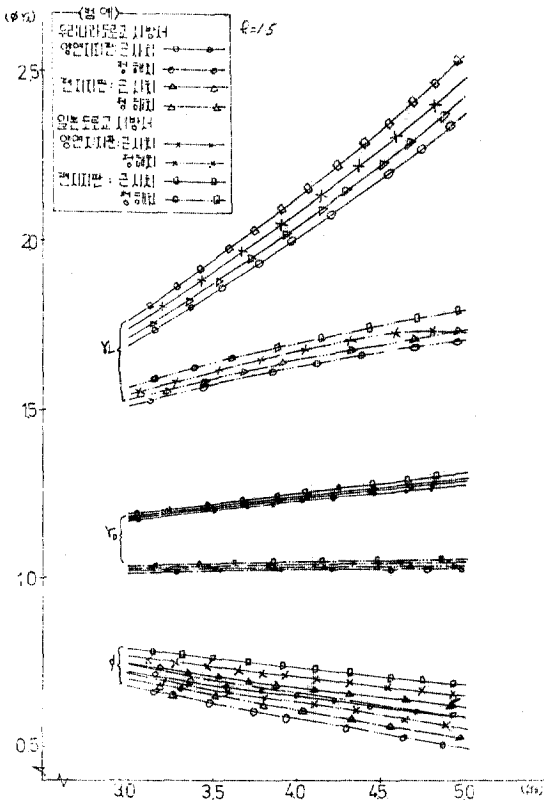


그림 5. β_0 에 대한 ϕ, γ_i 의 變化

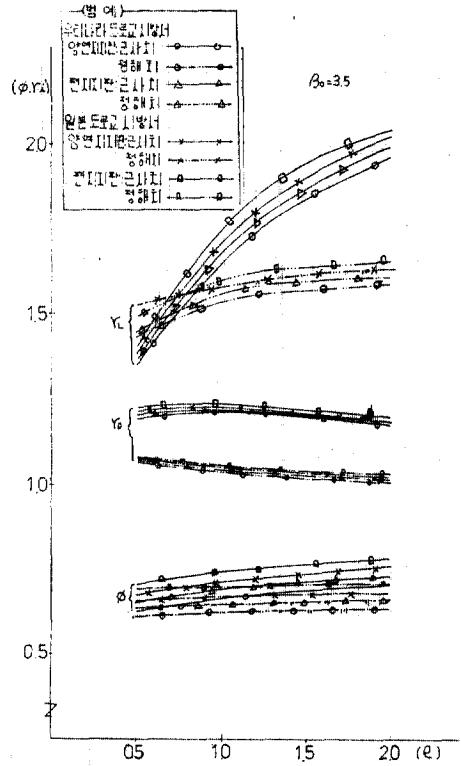


그림 6. ρ 에 대한 ϕ, γ_i 의 變化

表 8. 純壓縮板要素에 對한 ϕ, γ_i 값

$\rho=1.5$

種 類	方 法 ϕ, γ_i 示方書	近 似 值			正 解 值		
		ϕ	γ_D	γ_L	ϕ	γ_D	γ_L
兩緣支持板	우리나라道路橋	0.72~0.58	1.17~1.28	1.69~2.36	0.68~0.50	1.03~1.04	1.51~1.71
	日本道路橋	0.77~0.65	1.18~1.29	1.74~2.47	0.72~0.55	1.03~1.06	1.61~1.74
片支持板	우리나라道路橋	0.74~0.62	1.17~1.29	1.71~2.41	0.70~0.53	1.03~1.04	1.53~1.73
	日本道路橋	0.79~0.68	1.18~1.30	1.77~2.53	0.75~0.58	1.03~1.04	1.56~1.79

있다.

따라서, $\beta_0=3.0 \sim 5.0$ 으로 變할 때 各 道路橋 示方書에 있어서 鋼構造 部材의 ϕ, γ_i 의 값은 表 8과 같이 된다. 여기서 純壓縮板要素에 對한 ϕ, γ_i 를 比較 收錄했는데, 이 表에서도 ϕ 는 β_0 에 따라 크게 變하고, γ_D 는 各 道路橋 示方書에 따라 거의 一致하지만, γ_L 은 β_0 에 의해 急激히 變化하고 있음을 立證하고 있다.

5.3 設計基準

純壓縮板要素의 경우 $\rho=1.5$ 에 對한 β_0 의 變化에 따른 ϕ, γ_i 의 값을 그림 5와 表 6에 圖示한 것으로 近似值가 正解值보다 全般的으로 약간 上限解를 나타내고 있으며, ρ 의 變化에 따른 ϕ, γ_i 의 變化를 그림 6과 表 7에 圖示했는데 $\beta_0=3.5$ 에 對하여 ρ 의 變化에 따른 ϕ, γ_i 의 變化로 ϕ 와 γ_D 는 대체로 完만하게 變하는데, 다만 近似值의 γ_L 은 ρ 의 增加에 따라 急變하고 있다. 그러나, 實際 鋼道路橋에서 鋼構造 部材의 平均荷重比 ρ 가 대개의 경우 $\rho=1.0 \sim 2.0$ 사이에 있으므로 그 區間에서의 ϕ, γ_i 는 完만하게 變하므로 誤差最小化方法에 의하지 않고 $\rho=1.0 \sim 1.5$ 의 平均值 ρ 로 Level-I型 設計基準에 無關한 公稱安全率에 의한 信賴性 解析으로 ϕ, γ_i 를 決定할 수 있다.

表 7의 純壓縮板要素에 對해서 計算하면 目標信賴性指數 $\beta_0=3.5$ 로 할 경우 兩支持板인 경우는 $\phi'=0.75, \gamma_D'=1.04, \gamma_L'=2.08$ 로 計算되고, 片支持板인 경우는 $\phi'=0.82, \gamma_D'=1.04, \gamma_L'=2.11$ 로 計算된다. 이 係數들을 公稱安全率로 計算하면, $\rho'=1.0$ 인 경우는 $n'=1.92$ 이며, $\rho'=1.5$ 인 경우에 있어서 兩支持板인 경우는 $n'=2.21$ 이고, 片支持板의 경우는 $n'=2.05$ 로 計算

된다.

따라서, 本 研究에서 提案하는 鋼構造 部材에 對한 信賴性 設計基準의 ϕ, γ_i 는 信賴性 解析을 近似值로 하는 AASHTO와는 달리 信賴性 解析 正解值에 의해 ϕ, γ_D 가 낮은 값을 갖도록 하였음이 特徵이고, 板要素의 $\beta_0=3.5$ 로 할 경우 日本 道路橋 示方書와 比較해 볼 때 鋼構造 部材에 있어서 板要素의 ϕ, γ_i 값은 거의 一致하는 것을 表에 의해 計算한 結果로 알 수 있었다.

6. 結 論

本 研究는 鋼構造物의 信賴性 解析 및 LRFD 型 信賴性 設計基準의 導入에 現行 鋼道路橋 設計基準의 改定方向을 提示하기 위한 鋼板要素의 基礎研究로서 우리 나라의 現實을 考慮하여 不確實量의 水準과 目標信賴性指數에 의한 設計基準의 抵抗 및 荷重係數를 決定함으로써 合理的인 信賴性 設計基準을 提案하였다.

本 研究內容의 適用結果를 分析, 考察하여 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

1) 現行 示方書의 許容應力 設計基準에 의한 鋼構造 部材의 安全性 水準, 即 信賴性指數는 우리의 現實을 考慮하여 $\beta_0=3.5$ 程度로 함이 바람직하다고 보며, 不確實量의 範圍도 $\bar{R}/R'=1.19, \Omega_R=0.16, \Omega_{SD}=0.08, \Omega_{SL}=0.29$ 를 適用함이 바람직하다고 본다.

2) 現 鋼構造 部材에 對한 目標信賴性指數는 우리의 現實을 考慮하여 板要素인 경우 $\beta_0=3.5$ 程度를 適切한 水準으로 보고 設計하는 경우 強度設計方程式의 ϕ', γ_i' 는 다음과 같았다.

a) 兩緣支持板인 경우; $\phi'=0.75, \gamma_D'=1.04, \gamma_L'=2.08$

b) 片支持板인 경우; $\phi' = 0.82$, $\gamma_D' = 1.04$,
 $\gamma_L' = 2.11$

3) 鋼構造 部材의 경우 平均-荷重比는 通常 1.0~2.0 이고, 이 값에서 ϕ , γ_i 는 매우 緩慢하게 變化하므로 荷重比에 無關한 Level-I 型的 ϕ , γ_i 는 $\rho = 1.0 \sim 1.5$ 의 平均值를 取함이 좋다고 본다.

4) 近似的인 方法에 의해 求한 ϕ , γ_i 와 反復 試行方法에 의한 ϕ , γ_i 는 0.2 程度의 差異를 보이는데, 이는 可能한 한 反復法의 algorithm에 의해 抵抗 및 荷重係數를 決定해야 하나 近似解가 上限解를 얻으므로 近似式을 使用해도 無妨하다고 본다.

5) 現行 鋼構造 部材의 許容應力 設計基準에 使用하는 道路橋 示方書의 安全率은 鋼構造 部材의 特性을 反映하는 安全率로 再調整됨이 바람직하며, 本 研究에서 提案한 信賴性基準에 對應하는 適切한 公稱安全率은 다음과 같았다.

a) 兩緣支持板인 경우; $n' = 2.08 (\rho' = 1.0)$,
 $n' = 2.21 (\rho' = 1.5)$

b) 片支持板인 경우; $n' = 1.92 (\rho' = 1.0)$,
 $n' = 2.05 (\rho' = 1.5)$

謝 辭

本 研究를 위해 指導해 주신 朝鮮大學校 金禹錫 博士 님, 文完錫 教授님 그리고 金永寅 教授님께 深甚한 感謝를 드리며, 參考資料 및 實驗 data 收集에 協助해 준 李澄彬 教授 그리고 浦項製鐵과 仁川製鐵의 品質管理部 趙준석계장과 유병호 계장께도 紙上을 통하여 感謝를 드립니다.

參 考 文 獻

1. 建設部 國立建設研究所. 「建設工事 示方書 作成要領(付), 建設工事 標準示方書(土木部門)」 서울: 大韓建設振興會, 1982.
2. Galambos, T.V. and Ravindra, H.K. "Tentative L. R.F.D Criteria for Steel Plate Girders" *Research Report of Washington Uni.* 29, pp. 1~42, 1976.
3. "Load and Resistance Factor Design for Steel." *Journal of the Structural Div.* 104, pp. 1337~1353, 1978.
4. 白石成人 外 2人 "2次モメント法による信賴性設計法に關する二, 三の考察" 「日本 土木學會 論文報

告集」第311號, pp. 1~12, 1981.

5. Leporati, E. "The Assessment of Structural Safety." *Series in Cement & Concrete Research Vol. I.* Research Studies Press, 1979.
- 6) Cornell, C.A. "A Probability-Based Structural Code." *Journal of the American Concrete Institute*, 66, pp. 974~985, 1969.
7. Rosenblueth, E. and Esteva, L. "Reliability Basis for Some Mexico Code." *ACI Journal, Special Publication* 31, pp. 1~42, 1971.
8. Lind, N.C. and Hasofer, A.M. "Exact and Invariant Second-Moment Code Format." *Journal of the Engineering Div.* 100, pp. 111~121, 1974.
9. Ellingwood, B. "Reliability of Current Reinforced Concrete Design." *Journal of the Structural Div.* 105, pp. 699~712, 1979.
10. —, "Reliability Basis of Load and Resistance Factors for Reinforced Concrete Design." *NBS Building Science Series*, 110, pp. 713~727, 1978.
11. 日本 建設省 土木研究所, 「道路橋 示方書, 同解説 II 鋼橋偏」東京: 日本 道路協會, 1981.
12. American Association of State Highway and Transportation Officials. "Standard Specification for Highway Bridges." 12th ed. New York: AASHTO, 1977.
13. 東海 鋼構造研究グループ, "鋼構造部材の抵抗強度の評價と信賴性設計への適用(上), (下)" 「橋梁と基礎」, 11, 12月號; 33~43, 38~44, 1980.
14. 趙孝男, "「鐵筋 Concrete 道路橋 上部構造의 信賴性 設計規準에 관한 研究」, 「大韓土木學會 論文集」, 第2卷, 第3號: pp. 87~99, 1982.
15. 李澄彬, "鋼道路橋의 信賴性 設計基準에 관한 研究", 「順天工業專門大學 論文集」, 第4輯; 1~23, 1983.
16. 吳昌洙, "2次 Moment 法에 의한 보와 板의 鋼構造 解析", 「碩士學位論文」1~62, 1983.
17. 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荷重の評價", 「日本 土木學會 論文報告集」, 第286號, 1~13, 1979.
18. Allen, D.E., "Limit States Design-A. Probabilistic Study." *Canadian Journal of Civil Engineering* Vol. 2, No. 1, pp. 36~49, 1976.
19. 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.

20. 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.

(接受：1984. 8. 20)