

荷重－抵抗係數 設計法에 依한 鐵筋콘크리트 構造物의 最適設計

The Optimum Design of Reinforced Concrete Structures
Based on the LRFD

具 奉 槿* 康 鍾 浊**
金 裕 植*** 金 泰 奉****

ABSTRACT

In this study, an optimization design of reinforced concrete structures is performed by using the structural optimization techniques based on the LRFD criteria. The target reliability index is estimated by the optimal reliability index considering the expected cost which is taken as a sum of the structural cost and the expected costs due to failure of the structure. The load and resistance factors calculated by using level I reliability theory with the target reliability index are compared for each load combination($D+L$, $D+L+W$).

The results of this study show that the resistance factors are $\phi_M = 0.90$, $\phi_V = 0.70$, $\phi_C = 0.65$ and the load factors are $1.20D + 1.70L$, $1.07D + 0.70L + 1.10W$. The optimization techniques used to this study are S. L. P. The optimization design based on the LRFD criteria is more economical and rational than other criteria.

1. 序 論

構造設計의 合理性과 經濟性, 그리고 構造信賴性의 側面에서 既存의 設計規準은 一貫性이 전혀 없으며 部材나 構造物의 種類 또는 形態에 따라 信賴性이 지나치게 높거나 낮게策定되어 있는 경우가 많다.¹⁾

따라서, 構造物의 設計理論에 있어서 信賴性理論을 適用하여 合理的인 設計를 하여야 할 필요가 있으며 이는 構造物 設計時 安定的 信賴性 水準을 확보함을 뜻하게 되는 것으로 構造 設計의 規準을 既存의 確定的 方法보다는 確率的 方法으로 결정하고자 함이다.

構造物의 信賴性에 관한 研究는 Mair(1926년)와 Khatsialor²⁾ (1927년)가 構造物의 安全性 解析에 確率概念을 처음 導入함으로써 研究되기始作하였다.

그 以後 Freudenthal, Port, Asplund 등에 의하여 構造物의 安全度 解析을 위한 確率理論의 適用方法에 대한 研究가 있었으나, 1957년 Trulian에 의해 發表된 ASCE의 安全率 專擔委員會의 最初 報告書에서 本格的으로 安全率의 概念과 定義를 規明하였다. 1966년 Freudenthal-Garrelts-Shinozuka³⁾에 의해 發表된 委員會의 最終 報告書에서는 最初 報告書가 發表된 이후 이 分野에서 이루어진 各種 研究資料를 整理하고 構造物의 安全率를 決定하기

* 忠北大學校 工大 土木工學科 教授, 工博

*** 大田工業大學 副教授

** 韓國水資源公社 南江淵 管理事務所長

**** 忠北大學校 大學院 博士課程

위한合理的인方法開發에力點을두었다. 그以後 Yao-Yeh⁴, Jorgensen-Goldberg⁵, Ang-Amin⁶, Moses⁷등에 의해 주로構造物의破壞確率을구하는技法들에대한研究가이루어졌으며, Moses-Kinsler⁸에의하여構造物의破壞確率을近似的으로計算할수있는Ordering方法과 Stevenson-Moses⁹의피어슨分布法(Pearson's distribution method)등이發表되었다. 한편構造物의安全性의基準을設定하는方法도2개의方向으로發表되어왔는데그중의하나는信賴性指數(reliability index)를安定性의基準으로하는것으로써Cornell¹⁰이발표한2차모멘트法에바탕을두고주로Lind-Hasofer¹¹, Hasofer¹², Lind¹³등에의해研究發表되어왔다. 다른하나는構造物의破壞確率을安定性으로하는것으로써Ang¹⁴의擴張信賴性概念(extended reliability concept)을위시하여Ang-Amin¹⁵, Elingwood-Ang¹⁶등에의해많은研究가이루어졌다. 그외에도Ravindra-Lind¹⁷, Ang-Cornell¹⁸등에의해信賴性指數와破壞確率을基礎로한構造物의安全性解析에관한實際適用結果를發表한예도있다.

最近에와서는이러한信賴性理論의實用化를위한具體的인作業으로써荷重-抵抗係數設計法(Load and Resistance Factor Design)이開發되고있는데, 그중에서鋼構造物의LRFD規準은Galambos-Ravindra¹⁹에의해,鐵筋콘크리트構造物의LRFD規準은Elingwood²⁰에의해각具體的인研究結果가發表된바있다.

本研究에서는信賴性理論에서目標信賴性指數를最適화技法을利用하여最適信賴性指數로서採擇하기 위하여 이를각變數에따른影響을比較하여目標信賴性指數로選擇하고選擇된目標信賴性指數로부터Level I의荷重-抵抗係數設計format에適合한荷重係數 r_i 와抵抗係數 ϕ 를信賴性理論의Level II方法과誤差最小化法을利用하여 ϕ 와 r_i 값을 $(D+L)$ 荷重組合으로 $(D+L+W)$ 荷重組合에대해서는 $(D+L+W_{apl})$ 의경우 $(D+L)$ 조합의경우로대치가가능하므로 $(D$

$+L_{apl}+W)$ 하중조합의경우에대해보, 기등(띠鐵筋)에대해決定하였으며,最適設計理論으로부터SLP方法을利用하여平面骨造構造物에대해最適設計를適用하여각시방서별로比較分析하였다.

2.信賴性指數와設計規準

간단한構造物의信賴性(Reliability)은荷重效果 S 와抵抗 R 로表示되는두개의確率變數에의해定義되는安全餘裕(Safety margin) $M=R-S$ 에따른간단한破壞基準 $M=R-S<0$ 으로부터구한破壞確率에基礎를두고있다.

R 과 S 가對數正規分布인경우破壞確率은다음과같이된다.

$$P_f = \Phi \frac{\sqrt{\ln(S/R\{(V_R^2+1)/(V_S^2+1)\}}}{\sqrt{\ln(V_R^2+1)(V_S^2+1)}} \quad (2.1)$$

$$\beta = \frac{\ln(\bar{n}(\sqrt{1+V_S^2}/\sqrt{1+V_R^2}))}{\sqrt{\ln\{(1+V_R^2)(1+V_S^2)\}}} \quad (2.2)$$

$$\bar{n} = \bar{R}/\bar{S} \quad (2.3)$$

本研究에서는荷重抵抗係數設計規準設定에있어構造物의初期建設費와破壞時損失費用을考慮한總費用最少化的method에의해信賴性指數로구하기로한다. 먼저目的函數로는構造物의總費用 C_T 로初期建設費用 C_I 와破壞確率 P_f 을考慮한破壞時의損失費用 C_F 를考慮하면다음과같이된다.²¹⁾

$$C_T = C_I + P_f C_F \quad (2.4)$$

不確定變數인抵抗效果 R 과荷重效果 S 를對數正規分布로하고이들의平均을 \bar{R} , \bar{S} ,變動係數를 V_R , V_S 로하면破壞確率과信賴性指數,安全率등과의關係는²²⁾初期建設費用 C_I 가總重量 W 에線形比例하면다음과같이나타낼수있다.

$$\frac{C_I^*(n)}{C_I(n_0)} = 1 + b \left(\frac{n^*}{n_0} - 1 \right) \quad (2.5)$$

(2.5) 式에 (2.4) 式과 (2.2) 式, (2.3) 式을 대하고 最適化 條件인 $\partial C_T / \partial \beta = 0$ 을 使用 하니 最適 信賴性 指數 β_{opt} 를 구하면,

$$\beta_{opt} = -\sqrt{\ln((1+V_R^2)(1+V_s^2))} + \sqrt{\ln((1+V_R^2)} \\ \frac{1+V_s^2)}{1+V_s^2)} - 2\ln[b\sqrt{(2\pi(1+V_R^2)\ln((1+V_R^2)} \\ (1+V_s^2))}/(1+V_s^2)/\bar{n}_o \cdot C_F^*] \quad (2.6)$$

1다. 이 경우 安全率 n 是 (2.2) 式과 (2.3) 式

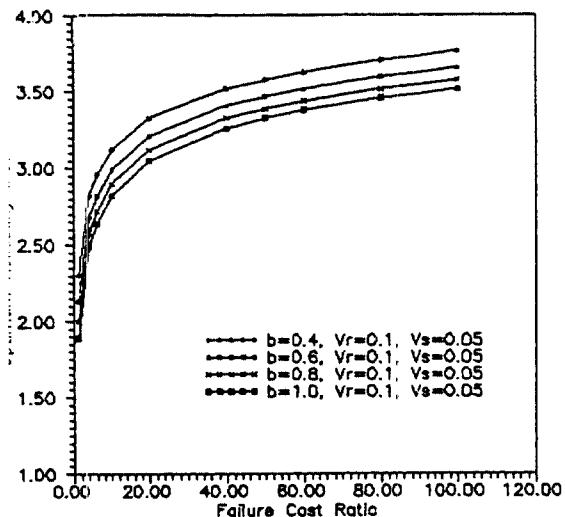


Fig. 2.1 Relationship of C_F^* and β

으로부터 다음과 같이 된다.

$$n = \exp[\beta\sqrt{\ln(1+V_R^2)(1+V_s^2)} - k_R\sqrt{\ln(1+V_R^2)} - k_s\sqrt{\ln(1+V_s^2)}] \quad (2.7)$$

위와 같이 目標 信賴性 指數가 選擇되면 Level II 方法인 MFOSM, 또는 AFOSM 등을 使用하여 주어진 條件(構造 形式, 支間, 荷重比, 不確實量 등)에 對應하는 限界狀態別部分安全母數 ϕ, r_i 를 決定한다.^{23, 24)}

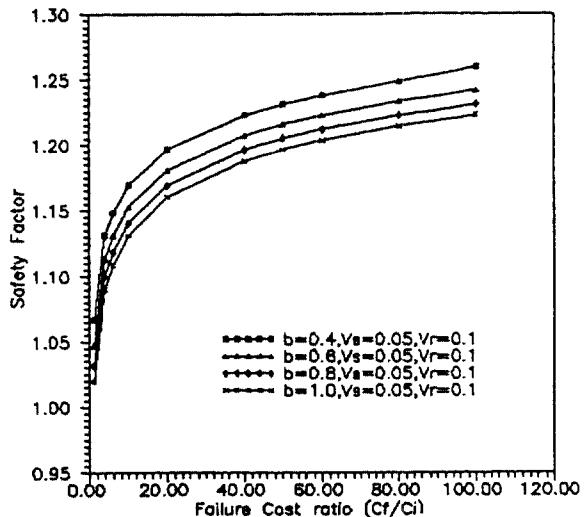


Fig. 2.2 Relationship of C_F^* and n

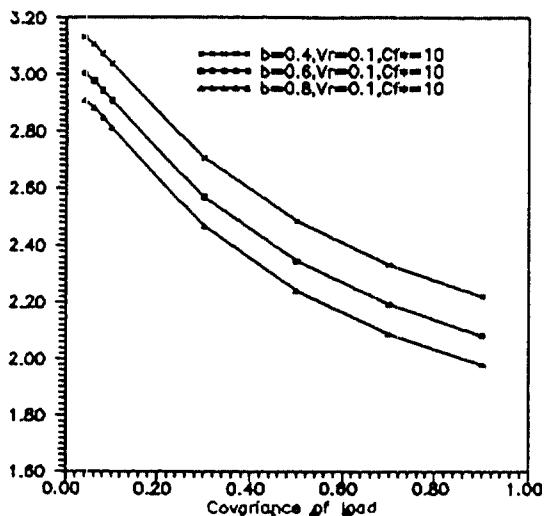


Fig. 2.3 Relationship of V_s and β_{opt} ($C_F^*=10$)

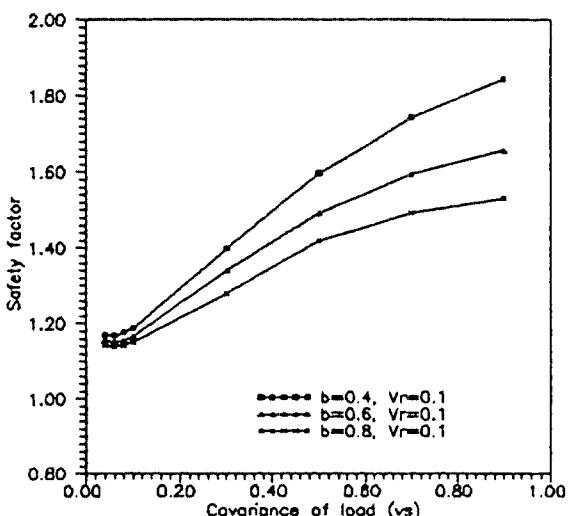


Fig. 2.4 Relationship of V_s and n ($C_F^*=10$)

Table 2. 1 Optimum reliability index and target reliability index

load	case	b	C_F	β_{opt}	β_{target}
$D+L$	beam(flexure)	0.35	10	2.95	2.95
	beam(shear)	0.20	10	3.097	3.10
	column(tied)	0.05	10	3.516	3.50
$D+L+W$	beam(flexure)	0.35	10	2.48	2.50
	beam(shear)	0.20	10	2.66	2.70
	column(tied)	0.05	10	3.093	3.10

Table 2.2 Statistical data on resistance variables

	case	distribute	mean/nominal	C. O. V.
beam	flexure	Normal	1.12	0.16
	shear	Normal	1.09	0.17
column	tied	Normal	1.05	0.17

Table 2.3 Statistical data on load variables

Load	distribution	mean/nominal	C. O. V.
dead load	Normal	1.05	0.10
live load	L	Gumbel	1.20
	L_{apt}	Gamma	0.50
wind load	Gumbel	0.90	0.37

本研究에서는 Table 2.1~2.3에서와 같이 국내 통계적 자료의 빈곤으로 문헌 25)와 문헌 31)로 부터考察한統計的資料 b , V_R , V_S , C_F^* 을 취하여 β_{opt} 를 계산하였다.

앞의 Table 2.1로 얻어진目標信賴性指數를 이용하여 Fig. 2. 5~Fig. 2. 10은目標信賴性指數에 이한荷重比別 ϕ 와 r_i 의變化를 나타내었다.

本研究에서는 採擇된 目標 信賴性 指數는 ($D+L$) 荷重組合에 있어 휨의 경우는 文獻(25)의 3.0에 近接하고, 剪斷의 경우는 3.0보다 크고, 기둥의 경우는 3.50과 같다. ($D+L+W$)의 荷重組合의 경우는 文獻(25)에서 휨의 경우 2.50과 같고, 剪斷의 경우는 2.5보다 크고, 떠칠근의 경우는 3.0보다 크게 얻어졌다. 信

賴性 理論과 誤差最少化 方法으로부터 Table 2.1의 信賴性 指數를 利用하여 設計規準으로 採擇된 ϕ 와 r_i 값을 既存의 示方書와 比較하여 Table 2.4에 나타내었다.

3. 構造의 最適設計

鐵筋 콘크리트 구조물의 最適화를 위한 目的函數를 設定함에 있어서 콘크리트는 鋼材와 달리 重量이나 體積을 最適화하는 것은 特別한 目的을 除外하고는 큰 뜻이 없으므로 콘크리트 구조물의 單位 길이당의 經費를 推定하여 最小 經費設計를 행한다.

콘크리트 구조물을 만드는 데는 콘크리트와 鐵筋 그 自體의 經費, 거푸집 經費, 보의 높이 때문에 건물 높이를 높게해야 하는 影響에 따른 費用, 기타 등이 포함되는 데, 斷面 自體의 材料費와 거푸집 費用이 큰 比重을 차지하는 것이一般的이므로 이들에 대해서 檢討한다. 最小經費를 얻기 위한 보의 目的函數는 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$C_b = C_c b d + C_s (A_s + A'_s) + (b + 2d) C_F + C_{S2} \\ (d + d' + b - 2t_2) A_{Vs} \quad (3.1)$$

여기서, C_b ; 보의 單位 길이당의 總 經費

b ; 보의 폭

d ; 보의 有效 높이

A_s ; 引張 鐵筋 斷面積

A'_s ; 壓縮 鐵筋 斷面積

A_{Vs} ; 剪斷鐵筋 斷面積

C_F ; 單位 面積當의 거푸집 經費

C_c ; 單位 體積當의 콘크리트 經費

C_s ; 單位 體積當의 鐵筋 經費

t_1, t_2 ; 鐵筋의 콘크리트 덩개

制約 條件式

$$\bar{\phi}_s M_s > M_s^* \quad (3.2a)$$

$$\bar{\phi}_s V_s > V_s^* \quad (3.2b)$$

$$ad - L > 0 \quad (3.2c)$$

$$h_{min} < h < h_{max} \quad (3.2d)$$

$$A_{Smin} < A_s < A_{Smax} \quad (3.2e)$$

$$A_{S'min} < A'_s < A_{S'max} \quad (3.2f)$$

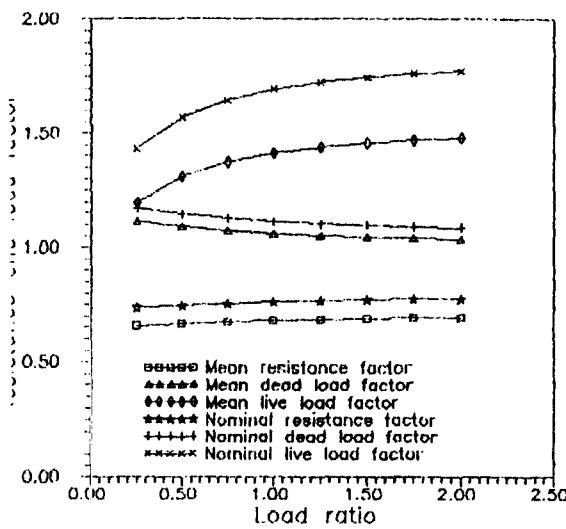


Fig. 2.5 Relationship of resistance, load factor and load ratio for flexure ($L+D$)

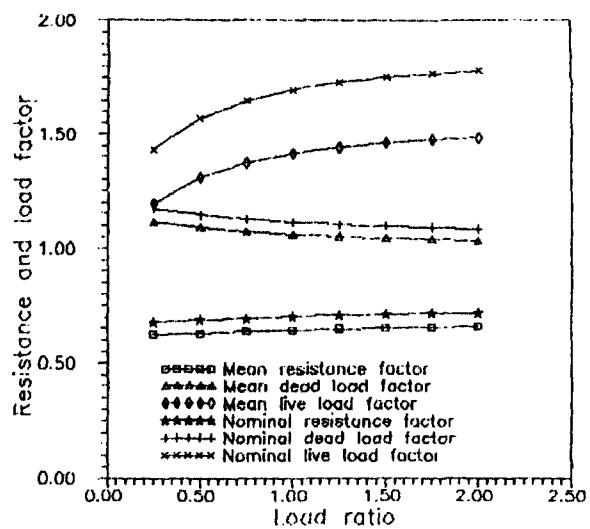


Fig. 2.6 Relationship of resistance, load factor and load ratio for shear ($L+D$)

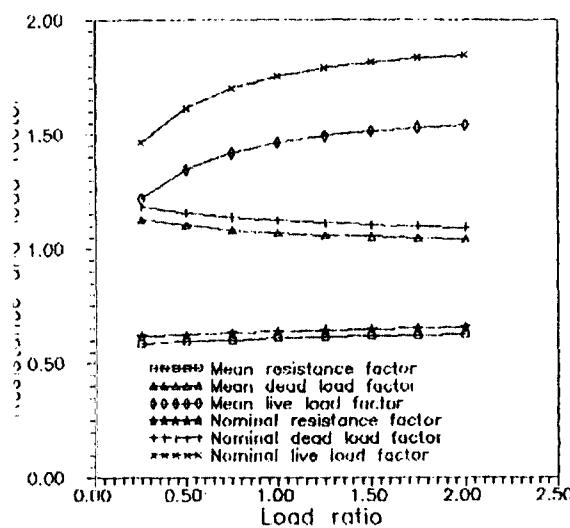


Fig. 2.7 Relationship of resistance, load factor and load ratio for tied column ($L+D$)

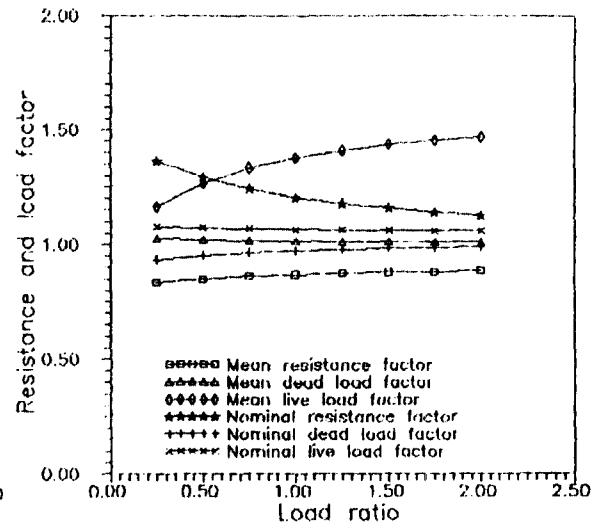


Fig. 2.8 Relationship of resistance, load factor and load ratio for flexure ($L+D+W$, $\rho_w = 1.0$)

Table 2. 4

Resistance and load factor

Item Code	ϕ, r_i	Resistance factor (ϕ)			Load factor (r_i)				
		beam		column tied	$U=D+L$		$U=D+L+W$		
		flexure	shear		r_D'	r_L'	r_D'	r_L'	r_W'
ACI 318-83	0.90	0.85	0.70	0.70	1.4	1.7	1.05	1.275	1.275
ANSI-A58	0.85	0.70	0.65	0.65	1.2	1.6	1.2	0.5	1.3
Korean spec.	0.85	0.70	0.65	0.65	1.2	1.8	1.2	0.6	1.4
This study	0.90	0.70	0.65	0.65	1.20	1.70	1.07	0.70	1.10

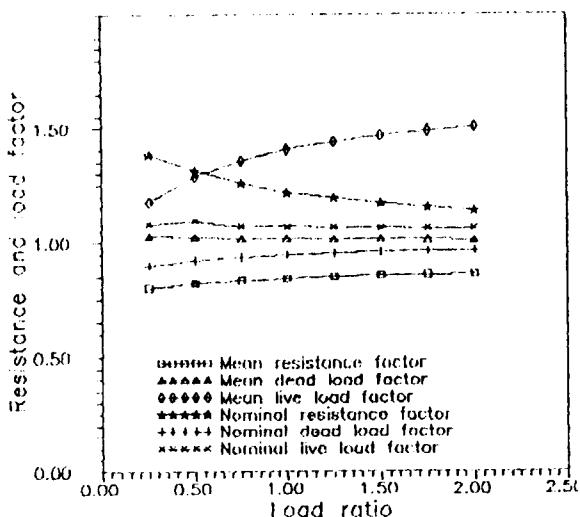


Fig. 2.9 Relationship of resistance, load factor and load ratio for shear ($L+D+W$)

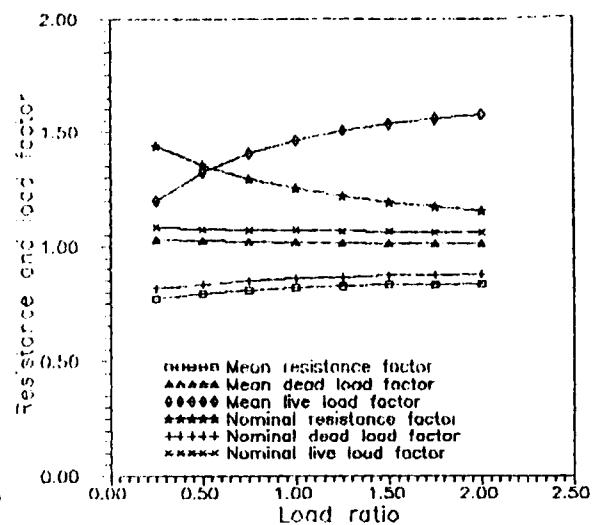


Fig. 2.10 Relationship of resistance, load factor and load ratio for tied column ($L+D+W$)

여기서, ϕ : 公稱 強度에 대한 抵抗 係數

$$M_u^* = \max(\bar{r}_D M_D + \bar{r}_L M_L + \bar{r}_W M_W)$$

M_n : 公稱 흠 모멘트 強度

$$V_u^* = \max(\bar{r}_D V_D + \bar{r}_L V_L + \bar{r}_W V_W)$$

V_n : 公稱 剪斷力 強度

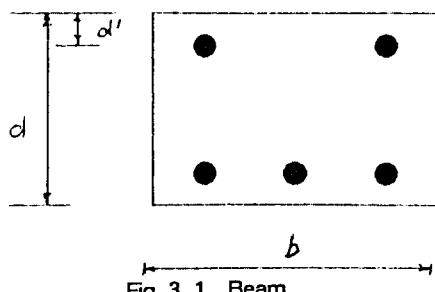


Fig. 3.1 Beam

鐵筋콘크리트 기둥의 最適化를 위한 目的函數는 보와 마찬가지로 기둥의 單位 길이當의 經費를 推定하여 구한 經費函數로 最小經費를 얻기 위한 目的函數는 다음과 같다.

$$C_{col} = (C_c b + 2C_f)t + C_s A_{st} + 2bC_f \quad (3.3)$$

여기서, C_{col} : 기둥의 單位 길이當의 總經費

b, t : 기둥의 칫수

A_{st} : 기둥의 主鐵筋의 總斷面積

C_c, C_f : 보의 경우와 같다.

또한, 制約 條件式으로는 다음과 같다.

$$\bar{\phi}_c P_a \geq P_u^* \quad (3.4a)$$

α : 보의 높이와 처점과의 比이다.

制約 條件으로는 可能한 荷重組合으로 구한 最大 極限 強度와 公稱(nominal)強度 限界로 強度 限界狀態 制約 條件과 斷面 制約 條件을 考慮하여 다음과 같이 表現할 수 있다.

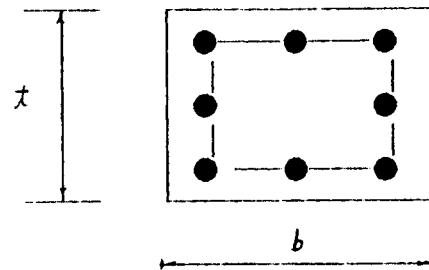


Fig. 3.2 Column

$$A_{Smin} \leq A_{st} \leq A_{Smax} \quad (3.4b)$$

$$h_{min} \leq h \leq h_{max} \quad (3.4c)$$

여기서,

$\bar{\phi}_c$: 공칭 압축강포에 대한 저항 계수

$$P_u = \max(r_D P_D + r_L P_L + r_W P_W)$$

P_n : 公稱 壓縮 強度이다.

이러한 非線形 計劃 問題를 解決하기 위해 SLP(successive linear programming)方法을 適用하였고 使用된 平面 骨造 構造의 形態는 Fig. 3.3과 같다.

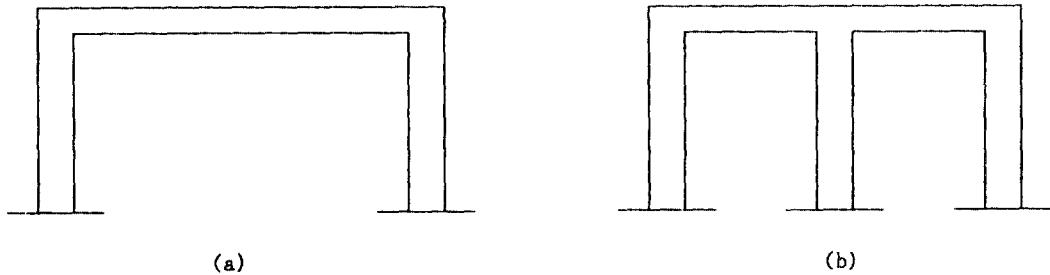


Fig. 3.3 Plane frame used in examples

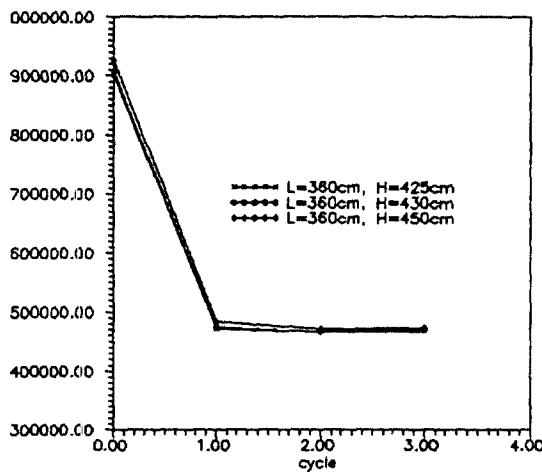


Fig. 3.4 Convergence (A type)

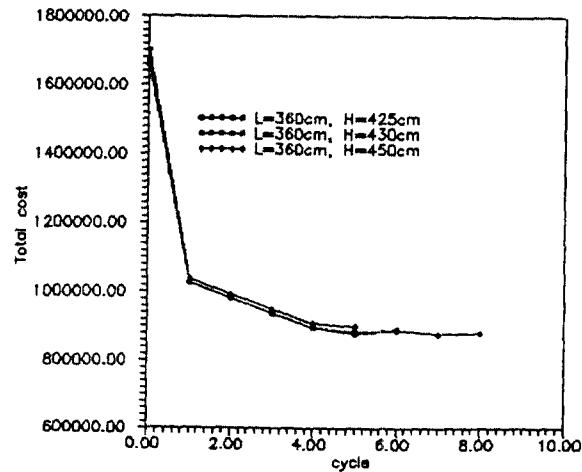


Fig. 3.5 Convergence (B type)

ACI, ANSI, 韓國 示方書 및 本 研究에서 提示하는 荷重-抵抗係數 設計規準에 대한 最適 設計의 結果를 Table 3. 2에 나타내었다.

4. 結 論

本 研究는 信賴性 設計 理論에 의한 鐵筋콘크리트 構造物設計의 標準示方書의 改定方向

Table 3. 2 Design criteria vs optimum values

Design Variables	A type				B type			
	ACI	ANSI	KS*	本研究	ACI	ANSI	KS*	本研究
$d(cm)$	31.446	30.058	34.018	26.134	27.290	28.057	27.290	29.768
$A_s(cm^2)$	45.094	47.504	48.041	28.029	42.297	46.290	45.409	31.532
$A_s'(cm^2)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$A_{sv}(cm^2)$	4.924	4.923	4.923	4.939	4.945	4.945	4.945	4.937
$t(cm)$	58.000	57.500	58.000	58.500	78.000	78.000	78.000	78.000
$A_{st}(cm^2)$	46.400	46.000	46.000	46.400	78.000	78.000	78.000	78.000
Total cost	483482	489744	493605	393372	572417	576713	573506	459819

* 본 연구에서는 1983년도 한국 콘크리트 시방서에 의한 것임

을 提示해 주는 基礎研究로서 R. C. 부재의 目標 信賴性 指數의 選擇을 最適化 理論을 適用한 期待工費 最少化 方法에 따라 決定하고 이에 따른 設計 規準에 適合한 抵抗 및 荷重 係數를 決定하여, 信賴性 理論에 基盤을 둔 R. C. 構造物의 最適設計 format를 提示하였으며 最適設計 影響을 比較 分析하였다.

研究內容의 結果를 分析 考察해 본 結果 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 目標信賴性 指數의 選擇은 期待工費 最少化 理論에 의해 다음과 같이 提案하였다.

	(D+L)	(D+L+W)
휨	2.95	2.50
전단	3.10	2.70
여기둥	3.50	3.10

2. 提示된 目標信賴性 指數에 따른 荷重係數와 抵抗係數는 다음과 같다.

$$\text{抵抗係數 보의 휨} \quad \phi_M = 0.90$$

$$\text{보의 剪斷} \quad \phi_V = 0.70$$

$$\text{여철근 기둥} \quad \phi_C = 0.65$$

荷重係數 (D+L)인 경우

$$U = 1.20D + 1.70L$$

(D+L+W)인 경우

$$U = 1.07D + 0.70L + 1.10W$$

여기서, D+L+W 荷重 組合의 경우 D+L_{opt}+W 荷重 組合의 경우에 대해서만 適用하였다.

3. 本 研究에서 使用된 最適化 技法으로부터 適用된 1 story 1 bay, 1 story 2 bay 構造物의 경우 모두 3~8회로 收斂하였다.

4. 本 研究의 荷重 抵抗係數에 대한 最適 設計가 既存의 示方書와 比較한 結果 AC1 示方書에서는 0.3~18.6%, ANSI에서는 1.1%~19.678%, 韓國示方書에 비해 0.5~20.31% 정도 經濟的인 最適設計의 結果를 얻었다.

감사의 말

本 研究는 韓國科學財團의 1987年度 研究費 支援으로 遂行된 것으로 이에 感謝를 드린다.

References

- 1) Thoft-Christensen, Palle, and Murotsu, Yoshiada, "Application of Structural Systems Reliability Theory", Springer-Verlag Co., 1986.
- 2) 尾坂芳夫, 高岡宣善, 星谷 勝; "土木構造設計法", 日本土木學會, 1981年, 6月 15日, pp. 35~36.
- 3) Freudenthal, A. M., Garrelts, J. M., and Shinohara, M., "The Analysis of Structural Safety", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 92. No. ST1, Feb., 1966. pp. 267~325.
- 4) Yao, J. T. P., and Yeh, H. Y., "Formulation of Structural Reliability", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95, No. ST12, Dec., 1969, pp. 2611~2619.
- 5) Jorgensen, J. L., and Goldberg, J. E., "Probability of Plastic Collapse Failure", Journal of the Structural Division, Proc., ASCE, Vol. 95, No. ST8, Aug., 1969, pp. 1731~1761.
- 6) Ang, A. H-S., and Amin, M., "Reliability of Structures and Structural System", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM2, April, 1968, pp. 671~691.
- 7) Moses, F., "Reliability of Structural Systems", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 100, No. ST9, Sept., 1974, pp. 1813~1820.
- 8) Moses, F., and Kinser, D. E., "Analysis of Structural Reliability", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 93, No. ST5, Oct., 1967, pp. 147~167.
- 9) Moses, F., and Stevenson, J. D., "Reliability based Structural Design", Journal

- of the Structural Division*, ASCE, Vol. 96, No. ST2, Feb., 1970, pp. 221~244.
- 10) Cornell, C. A., "A Probability based Structural Code", *Journal of the American Concrete Institute*, Dec., 1969, pp. 974~985.
 - 11) Hasofer, A. M., and Lind, N. C., "Exact and Invariant Second Moment Code Format", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 100, No. EM1, Proc. Paper 10376, Feb., 1974, pp. 111~121.
 - 12) Hasofer, A. M., "Reliability Index and Failure Probability", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 3, No. EM1, Feb., 1974, pp. 25~27.
 - 13) Lind, N. C., "Consistent Partial Safety Factors", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 97, No. ST6, June, 1971, pp. 1651~1670.
 - 14) Ang, A. H-S., "Structural Risk Analysis and Reliability based Design", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 99, No. ST9, Sept., 1973, pp. 1891~1910.
 - 15) Ang, A. H-S., and Amin, M., "Reliability of Structures and Structural System", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 100, No. EM2, April, 1968, pp. 671~691.
 - 16) Ang, A. H-S., and Ellingwood, B. R., "Critical Analysis of Reliability Principles Relative to Design", Proceedings First International Conference on Application of Statistics and Probability of Soil and Stru. Eng., Hong-Kong Univ. Press, Sept., 1971.
 - 17) Ravindra, M. K., Lind, N. C., and Sin, W., "Illustrations of Reliability based Design", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 100, No. ST9, Sept., 1974, pp. 1789~1811.
 - 18) Ang, A. H-S., Cornell, C. C., "Reliability Bases of Structural Safety and Design", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 100, No. ST9, Sept., 1974, pp. 1769~1785.
 - 19) Galambos, T. V., and Ravindra, M. K., "Load and Resistance Factor Design for Steel", *Journal of the Structural Division*, Vol. 104, No. ST9, Sep., 1978, pp. 1337~1353.
 - 20) Ellingwood, B., "Reliability based Criteria for Reinforced Concrete Design", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 105, No. ST4, April, 1979, pp. 713~727.
 - 21) Hilton, H. H., and Feigen, M., "Minimum Weight Analysis based on Structural Reliability", *Journal of the Aerospace Science*, Vol. 27, No. 9, Sept., 1960.
 - 22) 杉山俊幸, 酒井利夫, 藤野陽三, 伊藤 學, "構造設計における信頼性レベル. 安全率の設定に関する考察", 日本土木學會 論文報告集, 第327號, 1982年 11月號. pp. 21~28.
 - 23) 李春植, "鐵筋 콘크리트上部構造의 確率的 解析", 1979, 博士學位 論文, 延世大學校.
 - 24) 具奉槿, "荷重-抵抗係數 設計法에 依한 鋼構造物의 最適設計", 1979, 博士學位論文, 仁荷 大學校.
 - 25) Ellingwood, B., Galambos, T. V., MacGregor, J. G., and Cornell, C. C., "Developement of Probability based Load Criterion fo American National Standard A58", NBS SP577, U. S. Dept. of Commerce, June, 1980.
 - 26) Templeman, Andrew B., "Optimization Methods in Structural Design Practice", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 109, No. ST10, October, 1983, pp. 2420~2433.

- 27) Levy, Robert, and Ovadia, E. Lev, "Recent Developments in Structural Optimization", ASCE, Jour. of Structural Div., Vol. 113, No. ST9, Stptmber, 1987, pp. 1939~1961.
- 28) Atrek, E. et. al., "New Directions in Optimum Structural Design", John Wiley & Sons, 1984.
- 29) Kirsch, U., "Optimum Structural Design", McGraw Hill Co. Ltd. 1981.
- 30) Arora, J. S., and Haug, E. j., "Applied Optimal Design", John Wiley & Sons, 1979.
- 31) 趙宰男, 張東一, 申載喆, "確率理論에 基礎한 鐵筋 콘크리트 強度 設計 規準", 大韓土木學會 論文集, 第6卷 第4號, 1986年 12月號, pp. 53~59.