

限界狀態設計法에 의한 鐵筋콘크리트 플래트 슬라브型 構造體의 最適化에 관한 研究

A Study on the Optimal Limit State Design of Reinforced
Concrete Flat Slab-Column Structures.

朴 文 浩*
Park, Moon Ho

Abstract

The aim of this study is to establish a synthetical optimal method that simultaneously analyze and design reinforced concrete flat slab-column structures involving multi-constraints and multi-design variables.

The variables adopted in this mathematical models consist of design variables including sectional sizes and steel areas of frames, and analysis variable of the ratio of bending moment redistribution.

The cost function is taken as the objective function in the formulation of optimal problems.

A number of constraint equations, involving the ultimate limit state and the serviceability limit state, is derived in accordance with BSI CP110 requirements on the basis of limit state design theory.

Both objective function and constraint equations derived from design variables and an analysis variable generally become high degree nonlinear problems.

Using SLP as an analytical method of nonlinear optimal problems, an optimal algorithm is developed so as to analyze and design the structures considered in this study. The developed algorithm is directly applied to a few reinforced concrete flat slab-column structures to assure the validity of it and the possibility of optimization

From the research it is found that the algorithm developed in this study is applicable to the optimization of reinforced concrete flat slab-column structures and it converges to a optimal solution with 4 to 6 iterations regardless of initial variables. The result shows that an economical design can be possible when compared with conventional designs. It is also found that considering the ratio of bending moment redistribution as a variable is reasonable. It has a great effect on the composition of optimal sections and the economy of structures.

要 旨

本 研究는 多制約 多設計變數를 갖는 鐵筋콘크리트 플래트 슬라브型 構造體의 構造解析과 設計過程을 限界狀態設計理論에 의하여 同時에 遂行할 수 있는 綜合的인 最適化를 試圖한 것이다.

數學的 모델의 變數로는 플래트 슬라브와 기둥의 斷面치수 鐵筋斷面積 등의 設計變數와 翫모우먼

* 正會員·慶北大學校 工科大學 土木工學科

트 再分配率의 解析變數로 構成되어 있다. 最適化 問題의 形成에서는 目的函數로 工費函數를 取하고, 限界狀態設計法을 導入하고 있는 英國의 CP 110 示方規定에 따라 極限限界狀態와 使用限界狀態의 制約條樣式을 誘導하였다. 設計變數와 解析變數의 項으로 誘導된 目的函數와 制約條件式은 一般的으로 高次的 非線型計劃問題가 된다.

本 研究에서는 形成된 非線型最適化 問題를 逐次線型計劃技法을 導入하여, 解析과 設計를 同時에 遂行하면서 全體構造를 綜合적으로 最適化할 수 있는 最適알고리즘을 開發하였다. 開發된 알고리즘의 妥當性과 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化 可能性 등을 確認하기 위하여 알고리즘을 數種의 構造體에 直接適用하였다.

本 研究에서 開發된 알고리즘은 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體에 適用 可能하고, 變數들의 初期假定直에 關係없이 數回(4~6回)의 反復試行으로 最適解에 收斂하고, 이렇게 얻어진 結果는 在來의 設計에 비해 經濟的인 設計라는 것을 알았다. 또한 示方書에서는 設計者가 任意로 決定하도록 되어 있는 힘모우먼트 再分配率이 最適斷面의 構成과 構造의 經濟性에 미치는 影響이 크므로 設計變數로 택하는 것이 妥當함을 알았다.

1. 序 論

지금까지의 鐵筋콘크리트 構造物의 最適化 問題는, 斷面力의 決定에 彈性理論을 利用하고, 斷面의 設計에 許容應力設計法과 極限強度設計法을 利用하여, 주로 最適斷面을 數值的으로 구하는 것이 大部分이었다^(1,4). 그러나 近來에는 鐵筋콘크리트 構造物의 設計가 許容應力設計法에서 極限強度設計法으로 變遷되고 있고, 構造解析은 彈性的으로, 斷面의 設計는 極限強度 概念을 利用하는 現在의 設計過程은 構造解析과 設計方法이 一致하지 않는 矛盾點을 內包하고 있다.

그리하여 鐵筋콘크리트 構造物의 構造解析過程과 設計過程 모두가 同一한 理論概念에 根據를 둘 수 있는 合理的인 設計法이 切實이 要請되어 왔다. 이에 알맞게 研究된 代表的인 設計法이, 유럽을 中心으로 하는 限界狀態設計法(limit state design)⁽⁴⁻⁶⁾과 美國을 中心으로 하는 荷重-抵抗係數設計法(load & resistance factor design)^(7,8)으로서, 限界狀態設計法은 構造解析過程과 設計過程이 모두 塑性解析의 概念과 確率的인 信賴性에 基礎를 둔 合理的인 鐵筋콘크리트 構造物의 設計法으로서 1960年代 以後부터 活發히 研究되어 왔다^(9,10).

文獻調查 結果 限界狀態設計法에 의한 鐵筋콘크리트 構造物의 最適化는, 지금까지 거의 모든 文獻들이, 斷面力最適化^(11,12) 또는 보, 슬라브,

기둥, 基礎 등의 單體 構造物의 斷面最適化^(13,14) 등에 局限된 것들 뿐이고 構造解析과 設計過程을 同時에 考慮한 綜合的인 最適化에 관한 研究^(15,16)는 극히 드물었다. 특히 슬라브와 거더 및 기둥이 一體되거나 플레이트슬라브와 기둥이 一體된 統體的인 鐵筋콘크리트 構造體의 最適化에 관한 文獻은 거의 찾아 볼 수가 없었다. 그 理由는 限界狀態設計法에 의한 鐵筋콘크리트 構造體의 最適化가 許容應力設計法이나 極限強度設計法에 의한 最適化보다 解析技法이 複雜多樣하고 設計變數가 많아 상당한 電算容量을 必要로 하며 또한 아직 大部分의 設計示方書에 限界狀態 設計法의 概念을 導入하고 있지 않기 때문이라 생각된다.

따라서 本 研究에서는 플레이트 슬라브와 기둥이 一體화된 總體的인 플레이트 슬라브型 構造體를 構造解析過程과 設計過程이 同時에 自動적으로 遂行할 수 있는 綜合的인 最適化를 試圖하였다.

드롭패널과 기둥머리 有無에 따른 플레이트 슬라브와 braced 된 기둥 및 unbraced 된 기둥이 一體된 모든 경우의 플레이트 슬라브型 構造體에 대하여 最適化 問題를 形成하였으며 플레이트 슬라브에서 問題시 되는 기둥 또는 기둥머리 주위와 드롭패널 주위의 剪斷應力 問題를 힘應力과 더불어 極限限界狀態(ultimate limit state)에 대한 制約事項으로 考慮하였으며 또한 解析變數인 힘모우먼트 再分配係數가 最適化에 미치는 影響

을 考慮하여 設計變數로 취하여 最適化問題를 形成하였다.

最適化 解析技法으로는 多設計變數, 多制約條件을 갖는 非線型 最適化 問題를 解決하는데 效果인 逐次線型設計技法^(17,18)을 利用하여 最適化 알고리즘을 開發하였으며, 數種의 플래트 슬라브型 構造體에 直接 應用하여 最適化 可能性, 實用性, 收斂性 및 經濟性 등을 檢討하였다.

그러므로 本 研究은 限界狀態設計法에 의한 鐵筋콘크리트 플래트 슬라브型 構造體의 完全最小經費 設計에 대비한 綜合的인 最適化의 先行的 研究結果이다.

2. 限界狀態設計法에 鐵筋콘크리트 플래트 슬라브型 構造體의 構造解析

限界狀態設計法에서는 特性死荷重(characteristic dead load)과 特性附加荷重(characteristic imposed load)의 組合으로 이루어질 수 있는 모든 荷重條件을 構造에 載荷시켜 彈性的으로 各部材斷面別 最大 正·負斷面力 envelope를 찾은 후 塑性解析의 概念을 導入하여 極限荷重解析의 近似值에 到達하도록 斷面力을 再分配하므로써 設計斷面力을 決定하는 것이다. 플래트 슬라브型 構造體에서의 構造解析方法은 크게 나누어 CP 110 示方規定에 따른 經驗式에 의한 解析方法(empirical method)과 슬라브의 스트립(strip)과 기둥으로 構成된 일련의 連續 뼈대構造型으로서 解析하는 方法(frame analysis)이 있다. 連續 뼈대構造解析은 뼈대構造 全體를 하나로 解析하는 方法(complete frame analysis)과 뼈대構造 自體를 個個의 層의 뼈대의 組合으로 構成된 構造로 보아 分割하여 解析하는 同層 副 뼈대構造解析方法(one floor level subframe analysis)이 있는데, 이는 前者의 경우보다 電算의 記憶容量과 解析時間이 상당히 節約되는 長點이 있다. 故로 本 論文에서는 後者의 方法을 택하여 解造解析을 試圖하였으며 이에 대한 構造解析方法을 記述하면 다음과 같다.

2.1 斷面力 Envelope와 設計斷面力

휨모우먼트 envelope와 剪斷力의 envelope는, 그림 1의 경우와 같이 같은 層의 플래트 슬라브 위에 作用하는 特性死荷重과 特性附課荷重의 組

합으로 이루어지는 各種 載荷 荷重에 대하여 彈性構造解析으로 얻어진 휨모우먼트와 剪斷力을 各各 重疊하여 모든 플래트 슬라브와 기둥의 最大 正·負 휨모우먼트와 剪斷力으로 둘러싸인 臨界 휨모멘트(critical bending moment)와 臨界 剪斷力(critical shear force)으로서, 그림 2의 上·下의 굵은 實線으로부터 얻을 수 있다.

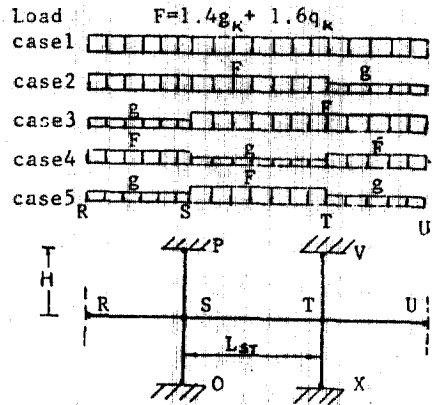


그림 1. 死荷重과 特性荷重의 組合別 載荷荷重

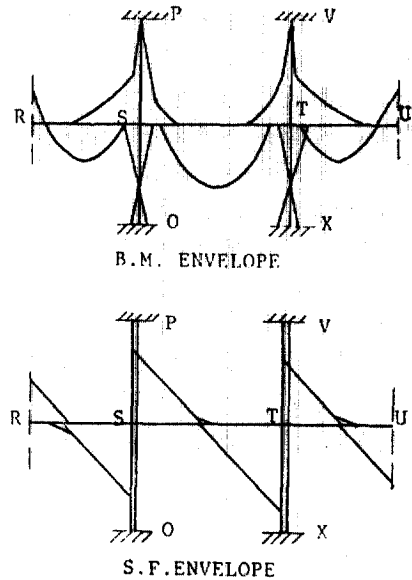


그림 2. 휨모우먼트 및 剪斷力 Envelope

플래트 슬라브型 連續 뼈대構造體의 任意의 層의 任意의 徑間인 그림 1의 ST部材의 플래트 슬라브와 SO部材(또는 TX部材)의 기둥의 S, T 節點 및 徑間 ST의 斷面力 envelope를 求하고자 할때는 그림 1과 같이 ST部材를 中央徑間으로 하는 三徑間連續層 2層 뼈대構造를 취하여 各

種載荷荷重 別로 構造解析을 修行하면 된다. 이 경우 슬라브의 端모멘트와 剪斷力 envelope는 S節點에서는 載荷條件 case 2에서, T節點에서는 載荷條件 case 3에서, 슬라브의 徑間 ST에서의 휨모멘트와 기둥의 S節點 및 T節點에서의 휨모멘트 envelope는 載荷條件 case 5에서, 그리고 기둥의 軸力の envelope는 플레이트 슬라브型 構造體의 모든 層에 載荷條件 case 1과 같은 荷重시스템이 適用될 경우이다.

플레이트 슬라브型 構造體의 어떤 部材斷面의 휨모멘트가 極限抵抗모멘트가 되더라도 部材는 파괴되지 않지만, 그 斷面에서 휨모멘트 값의 增加없이 臨界힌지(critical hinge)와 같은 顛倒가 發生하는데, 이를 防止하기 위하여서는 플레이트 슬라브型 樑대構造에서 絕對最大휨모멘트 envelope를 갖는 部材斷面에서 塑性解析概念을 導入하여 휨모멘트 값을 減少(scaling down)시키는 휨모멘트 再分配를 행하여야 한다. 再分配 휨모멘트 減少率은 構造形態에 따라 다르나 플레이트 슬라브型 構造體에서는 絕對最大휨모우먼트 envelope의 값의 15%以內로 하여야 하며⁽²⁰⁾ 減少된 絕對最大 휨모멘트가 樑대構造에서 全體적으로 平衡을 이루도록 각 部材斷面의 휨모멘트를 再分配하여야 한다. 이렇게하여 얻어진 각 部材斷面의 再分配 휨모우먼트가 設計 휨모멘트이다. 그러나 設計者가 任意로 휨모멘트 再分配率을 0.85에서 1.0사이의 어떤 값으로 택할 경우 構造形狀과 載荷條件에 따라 가장 適合한 휨모멘트 再分配率의 값을 決定할 수 없게 된다. 고로 本 研究에서는 解析變數인 휨모멘트 再分配率을 設計變數로 취하여 最適化를 試圖하였다.

剪斷력과 軸力の 경우에는 再分配가 없기 때문에 剪斷력과 軸力の envelope가 各各 設計剪斷력과 設計軸力이 된다.

2.2 構造解析過程

前述한 限界狀態設計法에 의한 플레이트 슬라브型 構造體의 構造解析過程을 要約하면 다음과 같다.

段階 1. 特性死荷重과 特性附課荷重의 組合별 로 플레이트 슬라브型 構造體의 各 部材의 斷面力을 彈性解析에 의하여 구한다.

段階 2. 모든 形成 可能한 各種 載荷組合에 의하여 얻어진 휨모우먼트, 剪斷力, 軸力을 各各 重疊하여 各 部材斷面의 最大正·負 휨모멘트, 剪斷力, 軸力으로 둘러쌓인 臨界휨모멘트, 臨界剪斷력과 臨界軸力을 決定하여 휨모멘트 envelope, 剪斷力 envelope(設計剪斷力) 및 軸力 envelope(設計軸力)을 구한다.

段階 3. 絕對最大 휨모멘트 envelope를 갖는 部材斷面의 휨모멘트 envelope를 휨모멘트 再分配率로 減少시켜, 全 部材斷面이 平衡狀態를 이루도록 全 部材斷面의 휨모멘트를 再分配시켜 設計휨모멘트를 決定한다.

3. 最適化 問題의 形成

設計變數로는 플레이트 슬라브의 長邊支持方向(X方向)과 短邊支持方向(Z方向)의 正·負모우먼트에 따른 柱列帶(column strip)와 中間帶(middle strip)의 主鐵筋, 기둥머리(또는 기둥)주위와 드롭패널 주위의 剪斷鐵筋, 슬라브의 有効깊이, 기둥의 斷面치수 및 主鐵筋, 휨모우먼트 再分配 係數를 취하고 制約條件으로는 플레이트 슬라브와 기둥의 휨應力, 플레이트 슬라브의 剪斷應力, 기둥의 軸應力, 中立軸거리比, 휨모우먼트 再分配率 및 CP 110 示方書의 기타 極限限界狀態와 使用限界狀態의 制約事項을 考慮하여 드롭패널과 기둥머리의 有無에 따른 braced된 기둥과 unbraced된 기둥으로 構成된 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化 問題를 綜合적으로 形成한다.

3.1 目的函數

鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化를 위한 目的函數를 設定함에 있어서 콘크리트는 鋼材와는 달리 重量이나 體積을 最適化하는 것은 特別한 目的을 除外하고는 큰 뜻이 없으므로, 플레이트 슬라브型 構造體의 任意의 層의 任意의 徑間の 全建設經費를 推定하여 設計變數의 函數로 表示되는 經費函數를 目的函數로 취하여 最小經費設計를 행한다.

最小經費設計를 위한 目的函數는 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$C = C_c V_c + C_s V_s + C_f A_f + C_d d + C_m \quad (1)$$

式 (1)에서

$$C = F[d, d_c, (A_s)_i, A_{sc}, \alpha, A_{s1}, A_{s2}] \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, 8$$

$$V_c = F(d, d_c) \quad (3)$$

$$V_s = F[d, d_c, (A_s)_i, A_{sc}, A_{s1}, A_{s2}] \quad (4)$$

$$A_f = F(d, d_c) \quad (5)$$

이다.

여기서

C : 플레이트 슬라브형 構造體의 任意層의 任意 節間의 全建設經費

C_s, C_c : 單位體積當의 콘크리트 및 鐵筋經費

d : 플레이트 슬라브의 中間帶의 有效깊이

d_c : 기둥斷面의 有效깊이

$i = 1, 2, (3, 4)$: 플레이트 슬라브의 長邊支持方向(短邊支持方向)의 正모멘트에 의하여 設計되는 柱列帶(column strip) 및 中間帶(middle strip)

$i = 5, 6, (7, 8)$: 플레이트 슬라브의 長邊支持方向(短邊支持方向)의 負모멘트에 의하여 設計되는 柱列帶 및 中間帶.

$(A_s)_i$: 플레이트 슬라브의 i 번째 設計斷面의 單位幅당 引張鐵筋面積

A_{sc} : 기둥斷面의 主鐵筋面積

A_{s1}, A_{s2} : 플레이트 슬라브의 기둥머리(또는 기둥) 주위와 드롭패널 주위에 配筋되는

剪斷鐵筋面積

α : 휨모멘트 再分配 係數

3.2 制約條件式

3.2.1 플레이트 슬라브의 制約條件式

플레이트 슬라브의 制約條件에는 휨應力, 軸應力, 剪斷應力, 變位, 振動數, 斷面比, 鐵筋比, 中立軸거리比, 처짐 등의 制約이 있으나, 슬라브와 같은 두께가 얇은 휨部材에서는 휨應力과 中立軸거리比, 처짐 등이 斷面決定에 주된 役割을 하며, 거어더나 보가 없이 바로 기둥의 支持를 받는 플레이트 슬라브型 構造體는 기둥머리 또는 기둥주위와 드롭패널주위의 剪斷抵抗이 큰 問題가 된다. 고로 抵抗모멘트, 中立軸거리比, 剪斷抵抗, 처짐과 斷面比, 鐵筋比 등의 CP 110 示方制約事項을 制約條件으로 採하여 設計變數의 函數로 表示되는 制約條件式을 誘導한다.

1) 휨모우멘트 制約條件式

限界狀態設計法에 의하여 그림 3과 그림 4로부터 휨모멘트에 대한 制約條件式을 誘導하여 整式化하면 다음과 같다.

$$(G_s)_i = (M_u)_i - (M)_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (6)$$

式 (6)에서

$$(M_u)_i = \frac{f_y}{r_m} (A_s)_i \left\{ (d)_i - \frac{f_y (A_s)_i}{0.8 f_{cu} n b} \right\} \quad (7)$$

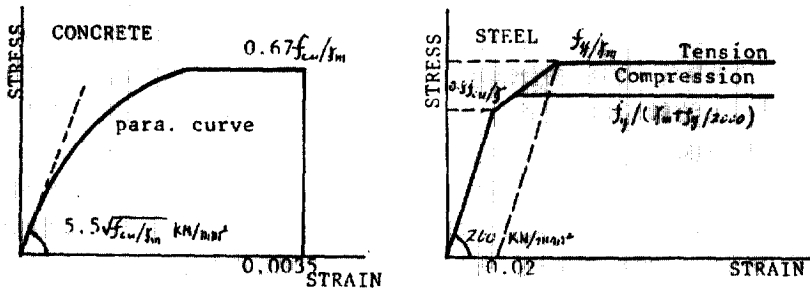


그림 3. 應力·變形率圖

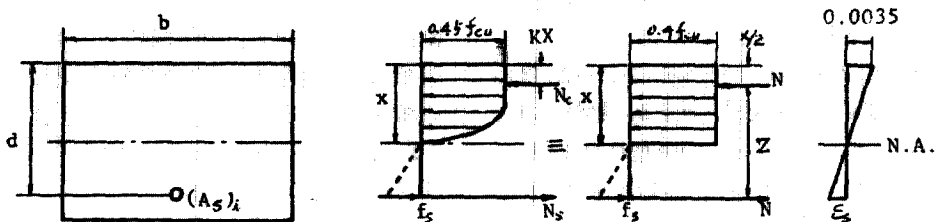


그림 4. 限界狀態設計法에 의한 휨部材의 設計

$$(M)_i = (R)_i (M_{act})_i \quad (8)$$

여기서

$(M_u)_i$: 플레이트 슬라브의 i 번째 設計斷面의 極限抵抗모멘트

f_y : 鐵筋의 降伏應力

f_{cu} : 콘크리트의 特性強度

r_m : 材料의 強度에 對한 部分安全係數

b : 設計斷面의 單位幅

$(d)_i$: 플레이트 슬라브의 i 번째 設計斷面의 有效깊이

$(R)_i$: 連續梁대構造로서 設計되는 플레이트 슬라브의 i 번째 設計斷面의 모멘트 分配係數

$(M_{act})_i$: 플레이트 슬라브의 i 번째 設計斷面의 作用모멘트

2) 壓縮端으로부터 中立軸까지의 거리의 制約條件式

플레이트 슬라브의 設計斷面에서의 壓縮端으로부터 中立軸까지의 거리에 對한 制約條件들을 誘導하여 整式化하면 다음과 같다.

$$(G_B)_i = (X)_i - 0.1(d)_i \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, 8 \quad (9)$$

$$(G_C)_i = 0.5(d)_i - (X)_i \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, 8 \quad (10)$$

式 (9), (10)에서

$$(X)_i = f_y (A_s)_i / (0.4 f_{cu} r_m b) \quad (11)$$

이다. 여기서

$(X)_i$: 플레이트 슬라브의 i 번째 設計斷面의 壓縮端으로부터 中立軸까지의 거리

3) 剪斷抵抗에 對한 制約條件式

플레이트 슬라브의 기둥머리주위(또는 기둥주위)와 드롭패널주위에는 剪斷抵抗에 큰 問題가 되는 斷面이므로 이 部分에 剪斷抵抗鐵筋을 配筋하여야 하는데 剪斷抵抗에 對한 制約條件은 應力이나 그밖의 制約條件에 比하여 더욱 複雜한 過程을 거쳐야 하고 또한 高次의 非線計劃問題로 된다. 本 研究에서는 示方制約에 따라 슬라브의 두께가 20 cm 以下이거나 콘크리트 斷面만으로 剪斷抵抗이 可能한 경우로 除外하고는 그밖의 모든 경우에 對하여 剪斷抵抗鐵筋을 配置하는 것을 原則으로하여 剪斷抵抗에 對한 制約條件式을 誘導하여 整式化하면 다음과 같다.

(1) 기둥머리(또는 기둥)주위의 剪斷抵抗에 對

한 制約條件式

㉞ $SR1 \geq 0.04$ (kN/cm²)인 경우(case 1)

$$G_D = 0.87 f_{yv} \cdot A_{sv1} - SR1 \cdot u_{cr1} \cdot d_{av1} \geq 0 \quad (12)$$

式 (12)에서

$$SR1 = v_{cm1} - \xi \cdot V_{c1} \quad (13)$$

$$v_{cm1} = S_{max1} / (u_{cr1} \cdot d_{av1}) \quad (14)$$

이다.

㉟ $0 < SR1 < 0.04$ (kN/cm²)인 경우(case 2)

$$G_D = 0.87 f_{yv} \cdot A_{sv1} - 0.04 u_{cr1} \cdot d_{av1} \geq 0 \quad (15)$$

2) 드롭패널 주위의 剪斷抵抗에 對한 制約條件式

가) $SR2 \geq 0.04$ (kN/cm²)인 경우(case 1)

$$G_E = 0.87 f_{yv} \cdot A_{sv2} - SR2 \cdot u_{cr2} \cdot d_{av2} \geq 0 \quad (16)$$

式 (16)에서

$$SR2 = v_{cm2} - \xi \cdot V_{c2} \quad (17)$$

$$v_{cm2} = S_{max2} / (u_{cr2} \cdot d_{av2}) \quad (18)$$

이다.

나) $0 < SR2 < 0.04$ (kN/cm²)인 경우(case 2)

$$G_E = 0.87 f_{yv} \cdot A_{sv2} - 0.04 u_{cr2} \cdot d_{av2} \geq 0 \quad (19)$$

여기서

f_{yv} : 剪斷鐵筋의 降伏應力

$u_{cn1}(S_{max1}), u_{cn2}(S_{max2})$: 기둥머리(또는 기둥) 주위의 드롭패널 주위의 最大作用剪斷應力(剪斷力)

u_{cr1}, u_{cr2} : 기둥머리(또는 기둥) 주위와 드롭패널 주위의 臨界周長

d_{av1}, d_{av2} : 기둥머리(또는 기둥) 주위와 드롭패널 주위의 슬라브의 平均有效깊이

ξ : 슬라브의 깊이係數

V_{c1}, V_{c2} : 기둥머리(또는 기둥) 주위와 드롭패널 주위의 콘크리트 斷面이 부담하는 剪斷抵抗應力

式 (13)의 $SR1$ 의 값과 式 (17)의 $SR2$ 의 값의 값이 陰의 값이면 기둥머리(또는 기둥) 주위와 드롭패널 주위에는 콘크리트斷面만으로 剪斷抵抗이 充分하여 剪斷鐵筋이 必要하지 않지만 陽의 값일 경우에는 剪斷鐵筋이 必要하므로 各 各의 case 別에 따라 式 (12) 또는 式 (15)와 式 (16) 또는 式 (19)의 制約條件에 의하여 剪斷抵抗의 支配를 받게 된다.

前述한 바와 같은 剪斷抵抗에 對한 制約條件式의 組合過程의 Flow Diagram은 그림 5와

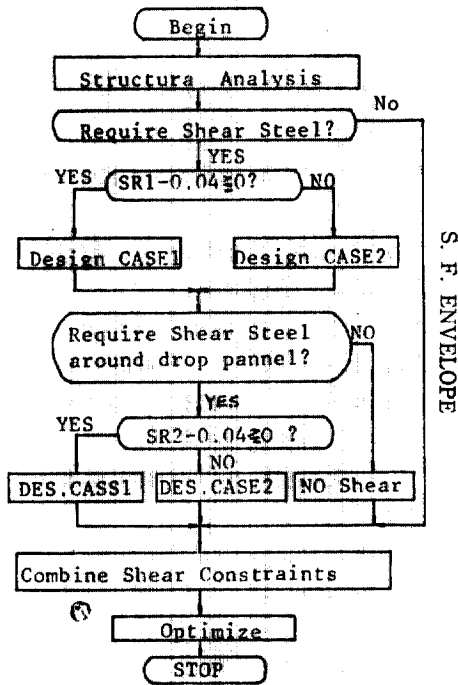


그림 5. 剪斷抵抗의 制約條件式의 組合過程의 Flow Diagram

같다.

4) 鐵筋比에 대한 制約條件式

限界狀態設計法에 의한 플레트 슬라브의 鐵筋比에 대한 制約條件式들을 整式化하면 다음과 같다.

$$(G_F)_i = (A_i)_i - P_{m1}b(d)_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (20)$$

$$(G_G)_i = P_{m2}b\{(d)_i + d'\} - (A_i)_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (21)$$

여기서

P_{m1}, P_{m2} : 플레트 슬라브의 最小 및 最大 鐵筋比

d' : 플레트 슬라브의 鐵筋덮개 깊이

5) 휨모멘트 再分配率 및 使用性限界狀態에 대한 制約條件式

限界狀態設計法에 의한 휨모멘트 再分配率 및 使用性限界狀態에 대한 制約條件式을 整式化하면 다음과 같다.

$$G_H = \alpha - 0.85 \geq 0 \quad (22)$$

$$G_I = 1.0 - \alpha \geq 0 \quad (23)$$

$$G_J = \beta d - \eta L \geq 0 \quad (24)$$

$$G_K = d + d' - t_{min} \geq 0 \quad (25)$$

$$G_L = t_{max} - (d + d') \geq 0 \quad (26)$$

$$G_M = A_{sv1} - a_{sv1} \geq 0 \quad (27)$$

$$G_N = A_{sv2} - a_{sv2} \geq 0 \quad (28)$$

여기서

α : 휨모멘트 再分配率

β : 처짐의 限界係數

η : 플레트 슬라브의 中間帶의 引張鐵筋比 값에 따른 처짐 補正係數

t_{min}, t_{max} : 플레트 슬라브의 中間帶의 最小 및 最大 두께

3.2.2 기둥의 制約條件式

鐵筋콘크리트 기둥에 대한 制約條件은 슬라브나 보와 같은 휨部材에 비하여 더욱 複雜한 過程을 거쳐야 하고 또한 剪斷抵抗問題와 같이 高次의 非線型 計劃問題로 된다. 기둥의 制約條件에도 여러 種類가 있으나 주로 휨應力, 軸應力, 長柱效果 등을 考慮하여 制約條件式을 誘導하여 整式化한다.

限界狀態設計法에 의한 뼈대構造體에 대한 有效기둥길이에 대한 區分은, braced기둥에서는 $0.75l_0$ 의 l_0 의 사이값을, unbraced기둥에서는 l_0 와 $2l_0$ 의 사이값을 一般的으로 취하므로 다음과 같은 式들을 택하여 長柱(slender column)과 短柱(short column)을 區別하여 制約條件式을 誘導하였으며

本 研究에서는 기둥의 斷面은 正四角形으로, 鐵筋은 對稱으로 配筋하는 것으로 하였다.

$$\text{braced 기둥} : l_e = l_0[0.7 + 0.05(\alpha_{e1} + \alpha_{e2})] \leq l_0 \quad (29)$$

$$\text{unbraced 기둥} : l_e = l_0[1.0 + 0.15(\alpha_{e1} + \alpha_{e2})] \leq 2l_0 \quad (30)$$

여기서

l_e : 有效기둥길이

l_0 : 기둥의 兩端사이의 純길이(clear height)

α_{e1}, α_{e2} : 기둥의 上, 下端에서 Σ (기둥의 剛性度)/(플레트 슬라브의 剛性度)의 값

限界狀態設計에서 기둥의 長·短柱는 $l_e/d_e < 12$ 이면 短柱로서, $l_e/d_e \geq 12$ 이면 長柱로서 區別한다. 短柱의 경우는 다음의 式 (30) 및 式 (31) 과 같은 限界偏心거리 e_e 와 限界軸力 c_N 에 따라

- 1) 軸力만으로 支配設計되는 경우 ($e_c \geq 0, c_N \geq 0$),
 2) 軸力과 휨모멘트로 支配設計되는 경우 ($e_c \geq 0, e_N < 0$), 3) 휨모멘트만으로 支配設計되는 경우 ($e_c < 0$) 등으로 區分된다.

$$e_c = (d_c - d') / 2 - M_{col} / N_{col} \quad (31)$$

$$c_N = 0.4 f_{cu} (d_c + d') (d_c + d' - 2M_{col} / N_{col}) - N_{col} \quad (32)$$

여기서

M_{col}, N_{col} : 기둥의 設計斷面에 作用하는 作用휨모멘트 및 作用軸力.

- 1) 軸力만으로 支配設計되는 短柱의 制約條件式

$$G_N = N_u - N_{col} \geq 0 \quad (33)$$

式 (32)에서

$$N_u = \frac{0.00161 E_s}{0.006325 E_s + f_y} \cdot (d_c + d') d_c f_{cu} + \frac{1}{2} \left(\frac{2000 f_y}{2300 + 10 f_y} + \frac{f_y}{r_m} \right) A_{sc} \quad (34)$$

이다. 여기서

N_u : 極限抵抗軸力

E_s : 鐵筋의 彈性係數

- 2) 軸力과 휨모멘트로 支配設計되는 短柱의 制約條件式

$$G_N = N_u - N_{col} \geq 0 \quad (35)$$

$$G_o = M_u - M_{col} \geq 0 \quad (36)$$

式 (34)에서

$$M_u = 0.2 f_{cu} (d_c + d') \frac{0.04025 E_s}{0.006325 E_s + 10 f_y} d_c \left(d_c + d' - \frac{0.004025 E_s}{0.006325 E_s + 10 f_y} \cdot d_c \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1000 f_y}{2300 + 10 f_y} + \frac{f_y}{r_m} \right) (d_c + d') A'' \quad (37)$$

- 3) 휨모멘트만으로 支配設計되는 短柱의 制約條件式

$$G_P = M_u - M_{col} - \frac{1}{2} \cdot N_{col} (d_c - d') \quad (38)$$

- 4) 長柱로 支配設計되는 기둥의 制約條件式

$$G_N = N_u - N_{col} \geq 0 \quad (39)$$

$$G_o = M_u - M_t \geq 0 \quad (40)$$

式 (37)에서

$$M_t = M_{col} + K M_{odd} \quad (41)$$

$$K = \frac{N_{uz} - N_{col}}{N_{uz} - N_{bal}} \leq 1 \quad (42)$$

$$M_{odd} = \frac{N_{col}}{1750} \cdot \frac{l_c}{d_c + d'} \left(1 - \frac{0.0035 l_c}{d_c + d'} \right)^2 \quad (43)$$

$$N_{uz} = 0.45 f_{cu} A_c + 0.75 f_y \cdot \frac{A_{sc}}{2} \quad (44)$$

이다. 여기서

M_t : 기둥의 設計斷面의 主軸에 대한 全作用모멘트

M_{odd} : 기둥의 設計斷面의 부가作用모멘트

K : M_{odd} 의 調整係數

N_{uz} : 기둥의 設計斷面의 純軸力

N_{bal} : 極限變形率 $\epsilon_u = 0.0035$ 이고 壓縮鐵筋의 變形率 $\epsilon_s = 0.002$ 인 平衡狀態에서의 기둥의 設計斷面에서의 軸力.

- 5) 기둥의 鐵筋比 및 使用性限界狀態에 대한 制約條件式

$$G_R = A_{sc} - P_{cmin} (d_c + d')^2 \geq 0 \quad (45)$$

$$G_s = P_{cmax} (d_c + d')^2 - A_{sc} \geq 0 \quad (46)$$

$$G_T = A_{sc} - a_{sc} \geq 0 \quad (47)$$

$$G_U = \gamma (d_c + d') - l_c \geq 0 \quad (48)$$

$$G_V = d_c - d_{cmin} \geq 0 \quad (49)$$

$$G_W = d_{cmax} - d_c \geq 0 \quad (50)$$

여기서

P_{cmin}, P_{cmax} : 기둥斷面의 最小 및 最大鐵筋比

a_{sc} : 기둥斷面의 最小鐵筋面積

γ : unbraced 기둥의 처짐限界係數

d_{cmin}, d_{cmax} : 기둥斷面의 最小 및 最大鐵筋面積

4. 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化

4.1 逐次的 線型化

本 研究에서는 目的函數와 制約條件式이 設計變數 $\vec{X} = \{d, d_c, (A_s)_i, A_{sc}, \alpha, A_{sv1}, A_{sv2}\}$ 에 대하여 非線型이 되지만, 非線型計劃問題의 解에 많이 利用되는 逐次線型計劃法(SLP)을 利用하여 線型計劃問題로 變換시켜 最適化를 試圖하고자 한다. SLP에 대해서는 文獻 (14), (15)에 자세히 記述하여 놓았으므로 本 論文에서는 簡單히 要約한다.

各 設計點에서 非線型의 制約條件式 및 目的函數를 Taylor 級數展開에 의하여 線型化하고,

이 變形된 線型問題에 線型計劃알고리즘을 適用 하므로서 近似解를 구한 후, 이 近似解를 利用 하여 初期設計點을 修正한다. 이런 過程을 滿足 할 만한 값이 구하여 질 때까지 되풀이 하므로서 最終으로 最適解를 얻게 된다. 즉 $K+1$ 번째 設計을 위한 K 번째 設計變數 \bar{X}^k 주위에서 非線型計劃問題를 線型計劃問題로 變形시킨 逐次 線型計劃問題는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize : } C(\bar{X}) &= C(\bar{X}^k) + \nabla C(\bar{X}^k) \\ &(\bar{X} - \bar{X}^k) \quad K=1, 2, 3, \dots, N \quad (51) \\ \text{Subject to : } J(\bar{X}) &\geq J(\bar{X}^k) \bar{X}^k - G(\bar{X}^k) \quad (52) \end{aligned}$$

式 (48)의 $\nabla(\bar{X}^k)$ 와 式 (49)의 $J(\bar{X}^k)$ 는 K 번째 되풀이 過程에 의하여 修正된 設計變數 \bar{X}^k 에 관한 目的函數 $C(\bar{X})$ 와 制約條件式 $G(\bar{X})$ 의 Gradient matrix와 Jacobian matrix이다.

4.1.1 目的函數의 線型化

多設計變數를 갖는 高次의 非線型問題로 誘導 되는 目的函數를 $K+1$ 번째 設計을 위한 K 번째 線型化된 設計變數 \bar{X}^k 주위에서 線型化한 目的 函數를 matrix로 表示하면 다음과 같다.

$$C(\bar{X}) = \left[\frac{\partial C(\bar{X}^k)}{\partial \bar{X}} \right] (\bar{X} - \bar{X}^k) + C(\bar{X}^k) \quad (53)$$

4.1.2 制約條件式的 線型化

限界狀態設計法의 誘導된 플래트 슬라브와 기둥의 制約條件式을 Taylor 級數展開理論에 따라 \bar{X}^k 주위에서 線型化한 線型計劃一般式을 matrix로 表示하면 다음과 같다.

1) 플래트 슬라브

$$J(\bar{X}^k) [\bar{X}] \geq [J(\bar{X}^k)] [\bar{X}^k] - [G(\bar{X}^k)] \quad (54)$$

式 (51)에서

$$J(\bar{X}^k) = \left[\left(\frac{\partial G(\bar{X}^k)}{\partial \bar{X}} \right)^k \right] \quad (55)$$

$$\begin{aligned} [G(\bar{X}^k)] &= \{ [G_A(\bar{X}^k)], [G_B(\bar{X}^k)], \\ &[G_C(\bar{X}^k)], [G_D(\bar{X}^k)], [G_E(\bar{X}^k)], \\ &[G_F(\bar{X}^k)], [G_G(\bar{X}^k)], [G_H(\bar{X}^k)], \\ &[G_I(\bar{X}^k)], [G_J(\bar{X}^k)], [G_K(\bar{X}^k)], \\ &[G_L(\bar{X}^k)], [G_M(\bar{X}^k)], [G_N(\bar{X}^k)] \} \quad (56) \\ &i=1, 2, \dots, 8 \end{aligned}$$

이다. $G_A(\bar{X}^k), G_B(\bar{X}^k), \dots, G_N(\bar{X}^k)$ 를 각각은 3.2.1節에서 記述한 設計變數 \bar{X} 의 函數로 되

어 있는 플래트 슬라브의 制約條件式들이다.

2) 기둥

(1) 軸力으로만 支配設計되는 短柱

$$J(\bar{X}^k) [\bar{X}] \geq [J(\bar{X}^k)] [\bar{X}^k] - [G(\bar{X}^k)] \quad (57)$$

式 (54)에서

$$\begin{aligned} [G(\bar{X}^k)] &= \{ [G_N(\bar{X}^k)], [G_R(\bar{X}^k)], \\ &[G_S(\bar{X}^k)], [G_T(\bar{X}^k)], [G_U(\bar{X}^k)], \\ &[G_V(\bar{X}^k)], [G_W(\bar{X}^k)] \} \quad (58) \end{aligned}$$

이다.

(2) 軸力과 휨모멘트로 支配設計되는 短柱

$$J(\bar{X}^k) [\bar{X}] \geq [J(\bar{X}^k)] [\bar{X}^k] - [G(\bar{X}^k)] \quad (59)$$

式 (56)에서

$$\begin{aligned} [G(\bar{X}^k)] &= \{ [G_N(\bar{X}^k)], [G_M(\bar{X}^k)], \\ &[G_R(\bar{X}^k)], [G_S(\bar{X}^k)] \dots, [G_W(\bar{X}^k)] \} \quad (60) \end{aligned}$$

이다.

(3) 휨모멘트만으로 支配設計되는 短柱

$$J(\bar{X}^k) [\bar{X}] \geq [J(\bar{X}^k)] [\bar{X}^k] - [G(\bar{X}^k)] \quad (61)$$

式 (58)에서

$$\begin{aligned} [G(\bar{X}^k)] &= \{ [G_R(\bar{X}^k)], [G_M(\bar{X}^k)], \\ &[G_S(\bar{X}^k)], \dots, [G_W(\bar{X}^k)] \} \quad (62) \end{aligned}$$

이다.

(4) 長柱로 支配設計되는 기둥

$$J(\bar{X}^k) [\bar{X}] \geq [J(\bar{X}^k)] [\bar{X}^k] - [G(\bar{X}^k)] \quad (63)$$

式 (60)에서

$$\begin{aligned} [G(\bar{X}^k)] &= \{ [G_N(\bar{X}^k)], [G_O(\bar{X}^k)], \\ &[G_R(\bar{X}^k)], [G_S(\bar{X}^k)], \dots, [G_W(\bar{X}^k)] \} \quad (64) \end{aligned}$$

이다.

4.2 플래트 슬라브型 構造體의 最適化 알고리즘

本 研究에서 適用한 逐次線型計劃에 의한 鐵筋콘크리트 플래트 슬라브型 構造體의 最適化 알고리즘은 다음과 같이 要約할 수 있다.

- ① 初期假定設計變數, 構造物의 幾何學的 條件 및 設計荷重 등 layout 附屬
- ② 構造物 解析(設計斷面力 決定)
- ③ 플래트 슬라브의 設計方法 附屬
- ④ 기둥의 長·短柱 判別 및 기둥의 支配斷面

力에 適合한 設計方法 附與

⑤ 플레트 슬라브型 構造體의 制約條件 組合 및 SLP를 利用한 最適斷面의 決定

⑥에서 計算된 設計變數를 ①의 初期假定設計變數로 바꾸어 되풀이 過程을 밟는다.

⑦ ⑥의 初期假定設計變數와 最適設計變數가 거의 같아 질 때까지 ①~⑥사이를 往來하면서 最適設計變數를 決定하게 된다.

前述한 바와 같은 最適化 알고리즘의 綜合的인 Flow Diagram은 그림 6과 같다.

5. 最適設計例 및 結果考察

限界狀態設計法에 의한 鐵筋콘크리트 플레트 슬라브型 構造體의 最適化 可能性과 實際의 活用性을 檢討하기 위하여 4章에서 開發한 最適化 알고리즘을 利用하여 5層의 플레트 슬라브

型 構造體중 3層部의 内部徑間의 1 Bay를 택하여, 드롭패널과 기둥머리를 갖는 플레트 슬라브型 構造體, 드롭패널이 없이 기둥머리만을 갖는 플레트 슬라브型 構造體, 드롭패널과 기둥머리가 없는 플레트 슬라브型 構造體, 各各의 경우에 대하여 最適設計를 하고 그 結果를 在來의 限界狀態設計法에 의한 結果值와 比較檢討한다. 最適化 알고리즘의 收斂性에 대하여는 文獻(13)과 文獻(21)의 結果와 比較分析한다. 本 研究를 위하여 많은 플레트 슬라브型 構造體에 대하여 荷重 條件과 形狀條件을 달리하여 最適化를 試行하였으나 紙面의 制約으로 代表的인 것만을 收錄한다.

5.1 最適設計例

5.1.1 構造形狀과 設計條件

1) 構造形狀

本 設計例의 最適化를 위한 構造形狀은 그림 7과 같다.

그림 7과 같은 플레트 슬라브型 構造體를 最適化하기 위하여 式 (1)의 目的函數를, 드롭패널과 기둥머리 有無에 따라 各各 一般化하면 다음과 같다.

$$C(X)_N = C_c V_c(N) + C_s V_s(N) + C_f A_f(N), \quad N=1, 2, 3 \quad (65)$$

式 (65)에서

$$V_c(1) = \left(l_x \cdot l_x + \frac{l_{cx} \cdot l_{cx}}{3} \right) (d + d') + \left(H + \frac{49}{16} \pi t_s \right) (d_c + d')^2 + \frac{5}{8} \left(\frac{49}{16} \pi - 1 \right) (d_c + d')^3 \tan \theta \quad (66)$$

$$V_c(2) = l_x \cdot l_x (d + d') + \left(H + \frac{49}{16} \pi \cdot t_s \right) (d_c + d')^2 + \frac{5}{8} \left(\frac{49}{16} \pi + 1 \right) (d_c + d')^3 \tan \theta \quad (67)$$

$$V_c(3) = l_x l_x (d + d') + H (d_c + d')^2 \quad (68)$$

$$V_s(1) = \left(\frac{11}{1600} \{ l_x (l_{cs} \cdot A_{s1} + l_{ms} \cdot A_{s2}) + l_x (l_{cs} \cdot A_{s3} + l_{ms} \cdot A_{s4}) \} + 0.08 \{ 3.5 (d_c + d') + 5 (d + d') \} A_{s5} + 0.06 \{ l_{cx} + l_{cs} + 12 (d + d') \} (d + d') A_{s6} + 0.01 \{ (0.15 l_x + l_{cx}) (l_{cs} A_{s7} + l_{ms} A_{s8}) \} + (0.15 l_x$$

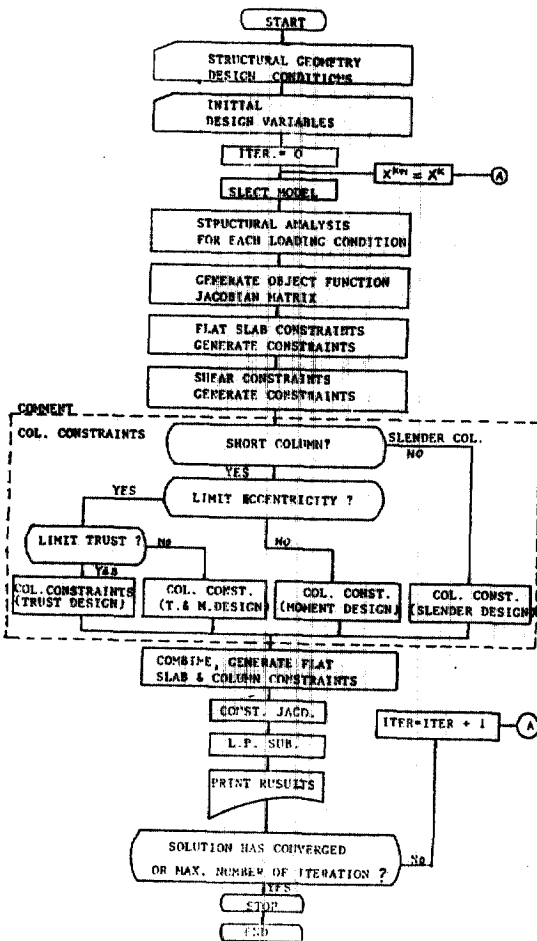


그림 6. 最適化 Flow Diagram

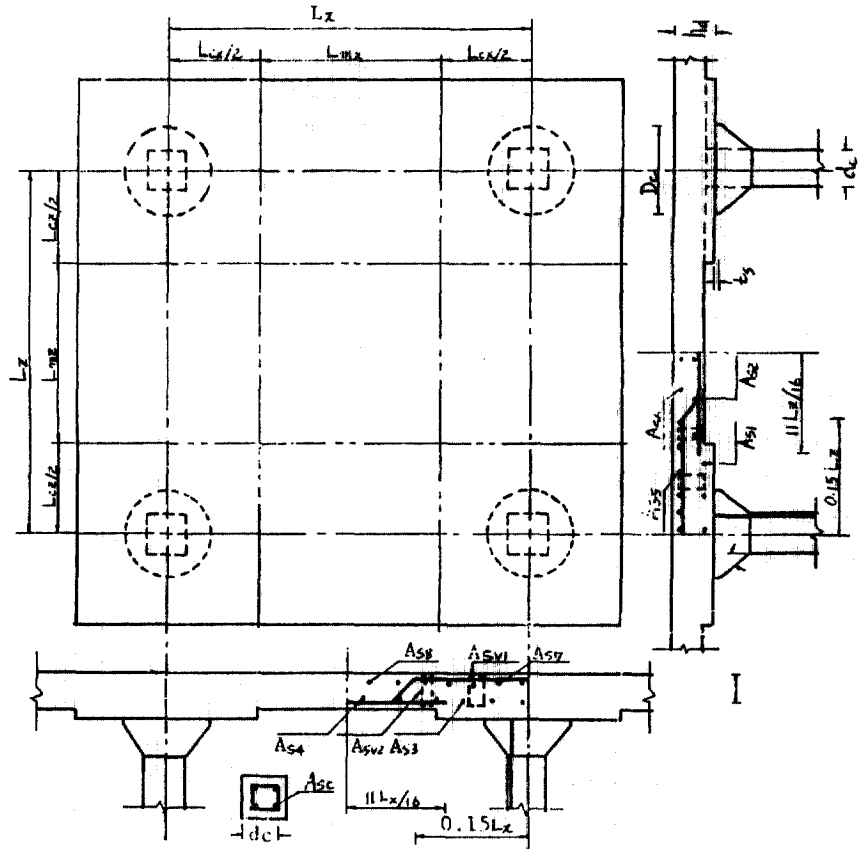


그림 7. 플레이트 슬라브型 構造體 形狀

$$+l_{cx})(l_{cx}A_{s7}+l_{mx}A_{s8})+H \cdot A_{sc} \quad (69)$$

$$V_s(2) = V_s(1) + 0.08 \{3.5(d_c + d') + 5(d + d')\} (d + d') A_{sv1} - 0.06 \{l_{cx} + l_{cx} + 12(d + d')\} (d + d') A_{sv2} \quad (70)$$

$$V_s(3) = V_s(2) - 0.16 \{3.5(d_c + d') + 5(d + d')\} (d + d') A_{sv1} + 0.2(d_c + 5d + 2d') (d + d') A_{sv1} \quad (71)$$

$$A_f(1) = l_x l_x + \frac{2}{3} (l_{cx} + l_{cx}) (d + d') + 3.5\pi t_s (d_c + d') + 4H(d_c + d') + \left[\left(\frac{45}{16}\pi - 5 \right) \tan\theta - \frac{49}{16}\pi \right] (d_c + d')^2 \quad (72)$$

$$A_f(2) = l_x l_x + (4H + 3.5\pi t_s) (d_c + d') + \left(\frac{45}{16}\pi \tan\theta - \frac{49}{16}\pi \right) (d_c + d')^2 \quad (73)$$

$$A_f(3) = l_x l_x - \frac{49}{16}\pi (d_c + d')^2 + 4H(d_c + d') \quad (74)$$

이다. 여기서

N : 플레이트 슬라브型 構造體의 드롭패널 및 기둥머리 有無에 따른 固有番號

$N=1$: 드롭패널과 기둥머리를 갖는 경우

$N=2$: 드롭패널만을 갖는 경우

$N=3$: 드롭패널과 기둥머리가 없는 경우

2) 設計條件

鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體를 最適化하기 위하여 選定한 設計條件들은 表 1과 같다.

5.2.2 最適設計 結果

드롭패널과 기둥머리 有無에 따라 플레이트 슬라브型 構造體의 目的函數式으로 式 (65)를 취

表 1. 設 計 條 件

構 造 形 狀(cm)		強 度 및 荷 重		設 計 常 數	
L	600(700, 800)	f_{cu}	25kN/cm ²	C_c	0.0318 원/cm ³
L_c, L_m	$L/2$	f_y	42.5kN/cm ²	C_s	2.2987 원/cm ³
L_s, L_m	$L/2$	f_{yv}	42.5kN/cm ²	C_f	0.4376 원/cm ²
H	$L/2$	E_s	20000kN/cm ²	P_{m1}	0.0015
b	100	g_s	0.14kN/cm	P_{m2}	0.01
h_s	$4(d+d')/3$	q_s	0.14kN/cm	D_m	1.6cm
D_s	$3.5(d_c+d')$			r_m	1.15
t_s	4			β	26
d'	2			η	0.6
θ	45°			t_{min}	12.5cm

하고 3.4章에서 誘導한 最適化 알고리즘을 利用하여 表 1의 設計條件과 幾何學的 條件을 주 어 最適解를 各各 구하면 表 2 및 그림 8~ 그림 12와 같다.

5.2 結果考察

本 研究의 最適化 알고리즘을 利用하여 設計한 各種 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適設計例들을 中心으로 結果를 考察하면 다음과 같다.

① 經濟的 設計를 위한 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化에는, 슬라브의 中立軸거리에 관한 制約條件, 휨모멘트에 관한 制約條件과 처짐의 限界를 定하여 주는 徑間과 슬

라브의 有效깊이의 比에 관한 制約條件들이 主 制約條件들로 나타나는데, 그중 中立軸거리에 관한 制約條件이 先行的 臨界制約條件임을 보여 주었다. 슬라브의 有效깊이는 降伏應力の 42.5 kN/cm² 以上の 高強度鐵筋을 使用할 경우 슬라브의 短邊支持徑間길이 가 5 m 미만이면 휨모멘트와 처짐의 限界를 定해주는 制約條件이 主制約條件이 되며, 5 m 이상이면 휨모멘트와 中立軸거리의 限界를 定해주는 制約條件이 主制約이 됨을 보여 주었다. 고로 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化에는 처짐과 中立軸거리에 관한 制約條件을 반드시 考慮하여 最適化 問題를 形成하여야 한다고 생각한다.

表 2. 最適設計結果 ($H=3.5\text{ m}$, $L=7\text{ m}$)

기 동 設 計 條 件	플레이트 슬라브 形狀	初 期 值 最 適 值	d (cm)	d_c (cm)	$\sum A_{s1}/8$ (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	α	COST (원)	수 량 및 수 밀 기 동 設 計	주 意 事 項
Braced column	N=1	初 期 值	13	25	9.875	8	6	6	1	822317.88	4	추 력 밀 모 지 우 멘 트 지 배 설 계
		最 適 值	17.266	29.425	8.414	29.627	5.553	0	0.85	882390.50	4	
	N=2	初 期 值	25	30	13.001	9	7	0	0.9	1101446.00	4	"
		最 適 值	20.755	30.024	7.556	29.438	5.024	0	0.85	896362.88	4	
	N=3	初 期 值	13	25	9.875	8	6	0	1	784264.75	4	"
		最 適 值	18.292	42.375	8.186	19.735	5.002	0	0.85	874326.42	4	
unbraced column	N=1	初 期 值	13	25	9.875	8	6	6	1	822317.88	4	장 주 지 배 설 계
		最 適 值	17.266	29.425	8.415	29.632	5.550	0	0.85	882391.25	4	
	N=2	初 期 值	25	30	13.001	9	7	0	0.9	1101446.00	4	"
		最 適 值	20.764	30.041	7.557	29.473	5.023	0	0.85	896374.56	4	
	N=3	初 期 值	13	25	9.875	8	6	0	1	822317.88	5	"
		最 適 值	18.294	42.432	8.187	19.736	5.021	0	0.85	874330.56	5	

(그림 8~그림 12에서 ○ △ □ 또는 각각 플레이트 슬라브의 구조형상 N=1, 2, 3을 나타낸다)

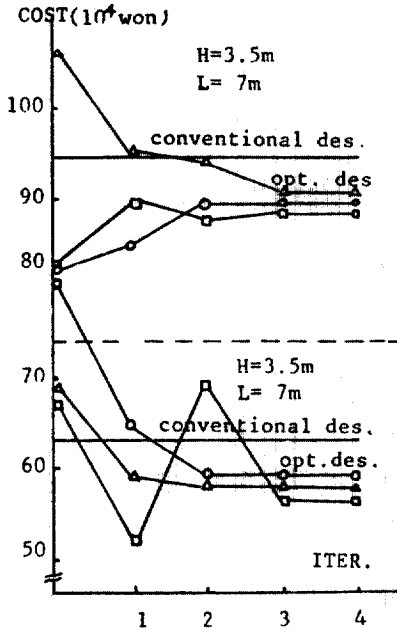


그림 8. 最少經費設計結果
(braced 기둥으로設計된 構造體)

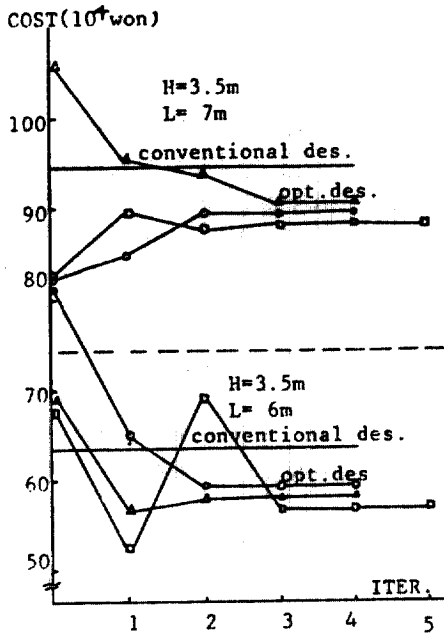


그림 9. 最少經費設計結果
(unbraced 기둥으로設計된 構造體)

② 嚴密한 比較는 어렵지만, 同一한 條件하에 서 最適設計理論에 의하여 얻어진 슬라브의 有效깊이 d 를 利用하여 在來의 限界狀態設計法 으로 나머지 變數를 設計한 結果와 本 研究의 最適化 모델 및 알고리즘을 利用하여 設計한 結果를 經費面에서 分析하면 本 研究의 最適化 모델 및 알고리즘을 利用하여 행한 경우가 약 6.49 ~ 7.15% 經濟的임을 보여주었다.

③ 本 研究의 最適化 알고리즘은 上限, 下限 初期值의 값에 關係없이 대개의 경우 4~6 회의 反復試行으로 最適解에 收斂함을 알았다. 文獻 (13)에서는 極限強度設計法에 의한 鐵筋콘크리트 뼈대構造의 最適化에 Gradient projection 最適化 알고리즘의 適用하여 40 회의 反復試行으로 最適解를 얻었고, 文獻 (21)에서는 立體鋼 뼈대 構造物에 線型最適化 알고리즘을 適用하여 8~10 회의 反復試行으로 最適解를 얻었다. 고로 本 研究의 最適化 알고리즘은 아주 적은 反復試行으로 最適解를 구할 수 있는 알고리즘이라는 것이 間接적으로 立證된다.

④ 플레이트 슬라브型 構造體의 기둥部는 braced 기둥인 경우는 大部分 軸力과 휨모멘트로 設計되는 短柱의 制約으로 支配되며, unbraced 기둥의 경우는 長柱의 制約으로 支配됨을 보였으나 두 경우 모두 最適化 結果를 거의 同一하였다. 이는 braced 기둥, unbraced 기둥 등의 기둥의 支持條件은 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化 結果에는 큰 影響을 미치지 않는다는 것을 보여준 것이라 생각한다.

⑤ 기둥머리와 드롭패널 有無에 따른 最適化 傾向은, 기둥머리와 드롭패널이 없는 構造體는 기둥부의 斷面은 다른 두 경우의 構造體에 비해 대체로 크나 鐵筋比는 反對로 最小鐵筋比쪽으로 最適化하는 傾向을 보이고 있으며, 徑間길이 8m 以上의 長徑間이 되면 기둥머리만을 갖는 構造體에서도 同一한 傾向을 나타내고 있다. 이는 드롭패널이 없는 두 경우의 構造體에서는 長徑間으로 支持되면 휨應力과 더불어 剪斷 및 처짐에 대한 制約이 主制約임을 보여주는 것이라 생각된다.

⑥ 在來設計에서는 휨모멘트 再分配率 α 를 0.85에서 1.0 사이의 位意의 값을 취하도록 되

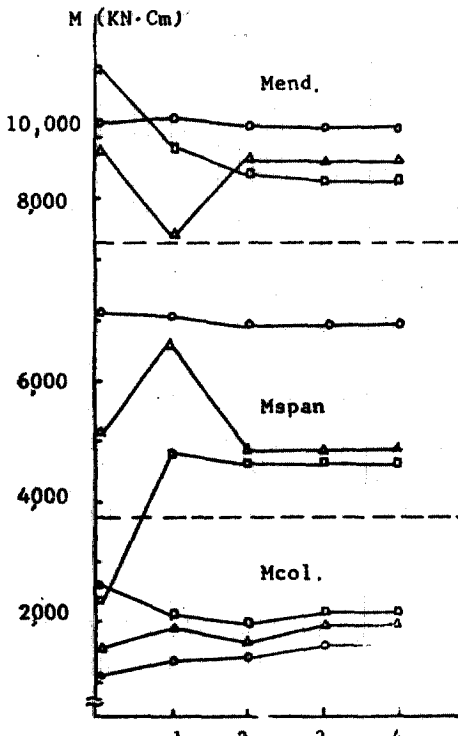


그림 10. 휨모멘트의最適化傾向
($H=3.5\text{ m}$, $L=6\text{ m}$)

어있으나 α 값의 변화에 따라 面斷의 構成과 設計經費에 큰 影響을 미치므로, 解析變數인 휨모멘트 再分配率 α 를 設計變數로서 반드시 考慮하여야 된다고 생각된다.

① 限界狀態設計法에 의하여 多變數 多制約條件을 갖는 各種 構造型을 갖는 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適化가 可能함을 本研究의 最適化 알고리즘을 利用한 많은 設計例를 통하여 알았다.

6. 結 論

本 研究에서는 많은 制約條件과 設計變數를 갖는 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體를 構造解析과 設計를 同時에 限界狀態設計法으로 最適化하는 알고리즘을 開發하였으며, 數種의 設計例에 適用하므로써 알고리즘의 收斂性, 經濟性 및 最適化傾向 등을 考察하였고 그 結果 얻어진 結論을 要約하면 다음과 같다.

1) 限界狀態設計法에 의하여 鐵筋콘크리트 플

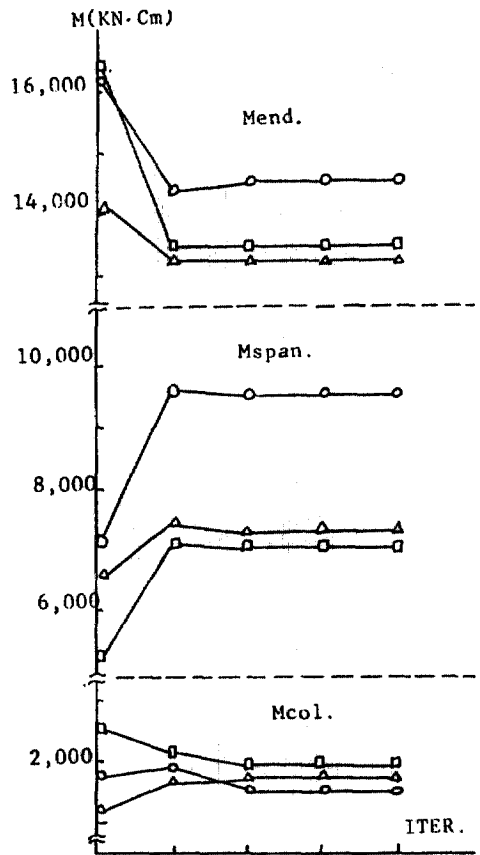


그림 11. 휨모멘트의最適化傾向
($H=3.5\text{ m}$, $L=7\text{ m}$)

래트 슬라브型 構造體의 最適化를 위하여 開發된 本 研究의 最適化 알고리즘은 初期設計值에 관계없이 대개 4~6 회의 反復試行으로 最適解에 收斂하므로 매우 效率的이라고 생각된다.

2) 限界狀態設計法에 의하여 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體의 最適設計를 할 때에는, 連續보나 비대構造와는 달리, 슬라브의 有効깊이, 中立軸거리 및 처짐에 관한 制約事項이 휨應力에 관한 制約과 더불어 臨界制約條件이 되므로 반드시 制約條件으로 考慮되어야 한다고 생각한다.

3) 限界狀態設計法으로 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브型 構造體를 最適化 할 경우 휨모멘트 再分配率을 반드시 設計變數로 考慮하여야 된다고 생각된다.

4) 限界狀態設計法으로 鐵筋콘크리트 플레이트슬

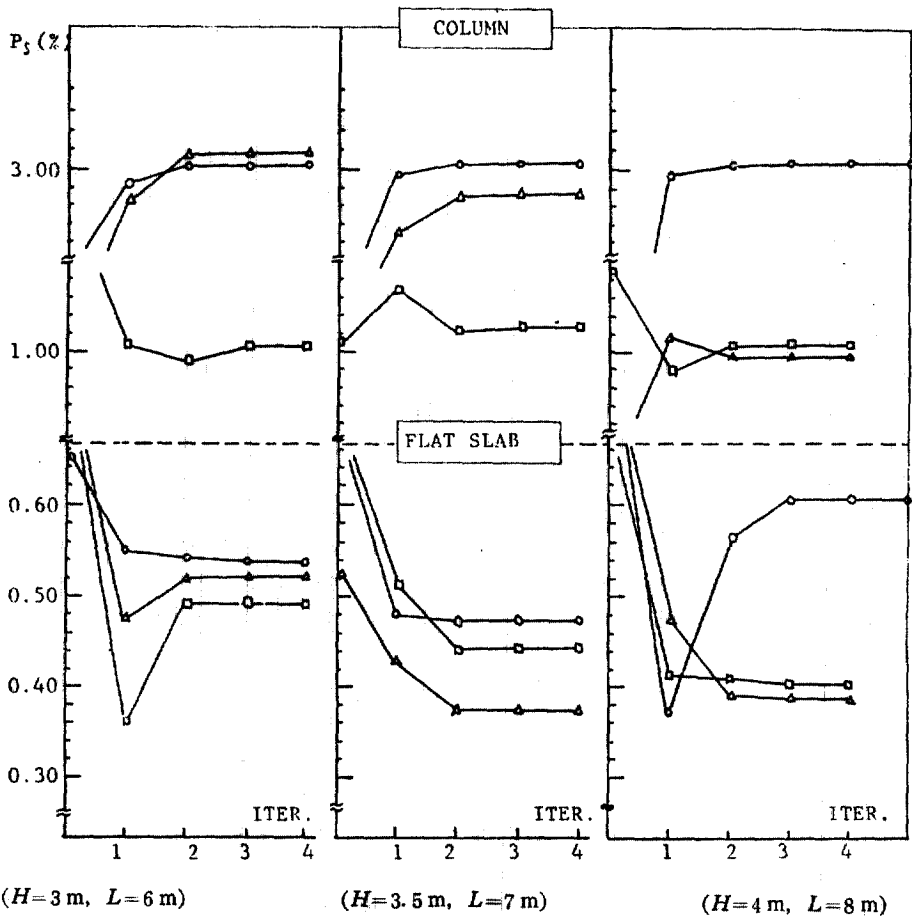


그림 12. 鐵筋比의 最適化 傾向

라브형 構造體의 最適化에는 braced 기둥, unbraced 기둥 등의 기둥에 관한 制約은 最適化 結果에 큰 影響을 미치지 않음을 알았다.

5) 本 研究에서 開發한 限界狀態設計法에 의한 最適化 알고리즘을 使用할 경우, 長·短邊徑 間隔이와 構造型에 따라 다소 差異가 있을 것으로 思慮되나, 대개의 경우 약 6~8% 經濟的인 設計가 될 것으로 생각된다.

6) 限界狀態設計法에 의하여 鐵筋콘크리트 플레이트 슬라브형 構造體의 最適化가 可能함을 알았다.

謝 辭

本 研究는 한국과학재단의 1982年度 후반기 研究費 支援計劃에 따라 遂行된 것임을 밝히며, 本 研究를 可能케 한 한국과학재단에 심심한 感謝를 드리는 바이다

參 考 文 獻

1. Huang, Ti, "Minimum Steel Design of Doubly Reinforced Section", *ACI Journal, Proc. Vol. 69, Aug., 1972, pp. 510~513.*
2. Friel, Leroy L., "Optimum Singly Reinforced Concrete Section", *ACI Journal, Proc. Vol. 71, No. 37, Nov., 1974, pp. 556~641.*
3. Takashi Chou, "Optimum Reinforced Concrete T-Beam Sections", *J. Structural Division, AS CE. Vol., No., ST8, Aug., 1977, pp. 1605~1617.*
4. 趙孝男·梁昌鉉, "플레이트 플레이트 鐵筋콘크리트 構造시스템의 電算化 最適設計法", *大韓土木學會誌, 第28卷 第1號, 1980. 2, pp. 115~128.*
5. "Common Unified Rules For Different Types of Construction and Material", *Vol. 1, CEB-FIP*

- International Recommendations 3rd Ed., 1978.*
6. "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures", *Vol. II, CEB-FIP International Recommendations, 3rd Ed., 1978.*
 7. "Code of Practice for the Structural Use of Concrete", *CP110 Part 1, BSI, London, England, 1972.*
 8. 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.*
 9. Ellingwood, B., "Reliability Based Criteria for Reinforced Concrete Design", *Journal of Structural Div., ASCE, Vol. 105, No. ST4, April, 1979, pp. 713~727.*
 10. M.Z. Cohn, "Limit Design for Reinforced Concrete Structures: An Annotated Bibliography", *Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Ontario, Canada, Report No. 12, Aug., 1969, pp. 1~89.*
 11. M.Z. Cohn, D.E. Grierson, "Further Results on the Equilibrium Method of Limit Design", *Proc. of Institution of Civil Engineering, (London), June, 1970, pp. 143~168.*
 12. D.J. Gunaratnam, N.S. Sivakumaran, "Optimum Design of Reinforced Concrete Slabs", *The Structural Engineer, Vol. 56B, No. 3, Sep., 1978, pp. 61~67.*
 13. M.Z. Cohn, "Limit Design of Reinforced Concrete Frames", *J. Structural Division, ASCE, Vol., No. ST. 10, Oct., 1968, pp. 2467~2483.*
 14. D.E. Grierson, M.Z. Cohn, "A General Formulation of the Optimal Frame Problem", *Transaction of the ASME, June, 1970, pp. 356~360.*
 15. Rowland Richard, J.R., Angel, L. Lazaro, "Limit Analysis of a Reinforced Concrete Frame", *ACI Journal, Title No. 68-65, Oct., 1971, pp. 748~755.*
 16. J. Munr, C.S. Krishnamoorthy C.W. Yu, "Optimal Design of Reinforced Concrete Frames", *The Structure Engineer, Vol. 50, No. 7, July, 1972, pp. 259~294.*
 17. Horace Randolph Thomas, J.R., "Optimum Least-Cost Design of a Reinforced Concrete Portal Frame", *M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Univ. of Raleigh, 1970, pp. 1~62.*
 18. 변주근·황학주, "철근콘크리트 뼈대구조물의 최적화를 위한 최적단면 결정에 관한 연구", 대한토목학회지, 제24권, 제3호 1976.9, pp. 105~116.
 19. 朴文浩·黃鶴周·邊根周, "限界狀態設計法에 의한 鐵筋콘크리트 平面 뼈대構造物의 最適斷面設計에 관한 研究", 大韓土木學會誌, 第29卷 3號, 1981.6, pp. 131~143.
 20. 朴文浩, "限界狀態設計法에 의한 鐵筋콘크리트 連續보의 最適設計에 관한 研究", 慶北大學校論文集 第33輯, 1982.12, pp. 397~410.
 21. Cornell, C.A., Reinschmidt, K.F. and Brotchie, J.F., "Structural Optimization", *Research Report R65-26, Cambridge, Mass., September, 1964.*
 22. Reinschmidt, Kenneth F. and Russell, M.D., "Linear Methods in Structural Optimization", The Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, *Research Report R70-41, July, 1970.*
 23. Cornell, C.A., Reinschmidt, K.F. and Brotchie, "A Method for the Optimum Design of Structures", *Proceedings of International Symposium on the Use of Computers in Structural Engineering, Newcastle-Upon-Tyne, England, July, 1966.*
 24. Reinschmidt, K.F., Cornell, C.A. and Brotchie, J.F., "Iterative Design and Structural Optimization", *Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 92, No. ST6, December, 1966, pp. 281~318.*
 25. B.P. Hughes, "Limit State Theory for Reinforced Concrete Design", Pitman, 1977, pp. 479~500.
 26. Charles E. Reynolds & James C. Steedman, "Examples of the Design of Buildings to CP 110 and Applied Codes", A Viewpoint Publication, 1977, pp. 147~157.
 27. Donald E. Grierson & Ahmed A. Aly, "Plastic Design Under Combined Stresses", *Journal of Mechanics Division, ASCE, Vol. No. EM 4, August, 1980, pp. 585~607.*

(接受 : 1983. 11. 24)