

# 貯水池 取水塔의 最適設計에 관한 研究 (I)

- 許容應力 設計法을 中心으로 -

## Optimum Design of the Intake Tower of Reservoir (I)

- With Application of Working Stress Design Method -

金 鍾 玉\* · 高 在 君\*\*  
Kim, Jong Ok · Koh, Chae Koon

### Summary

The purpose of the present study is to set up an efficient optimum design method for the large-scale reinforced concrete cylindrical shell structures like intake tower of reservoir and to establish a solid foundation for the automatic optimum structural design combined with finite element analysis. The major design variables are the dimensions and steel areas of each member of the structures. The construction cost which is composed of the concrete, steel, and form work costs, respectively, is taken as the objective function. The constraint equations for the design of intake-tower are derived on the basis of the working stress design method. The corresponding design guides including the standard specification for concrete structures have been also employed in deriving the constraint conditions.

The present nonlinear optimization problem is solved by SUMT method.

The reinforced concrete intake-tower is decomposed into three major substructures. The optimization is then conducted for both the whole structure and the substructures. The following conclusions can be drawn from the present study.

1. The basis of automatic optimum design of reinforced concrete cylindrical shell structures which is combined with finite element analysis was established.
2. The efficient optimization algorithms which can execute the automatic optimum design of reinforced concrete intake-tower based on the working stress design method were developed.
3. Since the objective function and design variables were converged to their optimum values within the first or second iteration, the optimization algorithms developed in this study seem to be efficient and stable.
4. The difference in construction cost between the optimum designs with the substructures and with the entire structure was found to be small and thus the optimum design with the substructures may conveniently be used in practical design.
5. The major active constraints of each structural member were found to be the tensile

---

\* 禮山農業專門大學

\*\* 서울大學校 農科大學

stress in steel for slab, the minimum longitudinal steel ratio constraints for tower body and the shearing stress in concrete, tensile stress in steel and maximum eccentricity constraints for footing, respectively.

6. The computer program developed in the present study can be effectively used even by an unexperienced designer for the optimum design of reinforced concrete intake-tower.

## I. 緒 論

지금까지의 一般의인 構造物 設計方法에서는 設計變量을 適切히 假定하는데 풍부한 工學의 知識은 勿論 많은 設計經驗이 要求될 뿐 아니라 構造解析과 設計의 過程을 反復하는데 많은 努力과 時間이 要求되며 設計條件을 滿足하는 경우의 數는 無數히 많기 때문에 불과 몇가지 경우의 設計案 中에서 가장 費用이 적게 드는 것으로 決定된 設計가 最適設計라는 保障이 없는 등의 問題點을 가지고 있다.

이와같은 慣行的 設計方法의 問題點을 解決하면서 合理的으로 設計할 수 있는 最適設計法이 最近 急速度로 發展하고 있다.

1950年代부터 始作된 最適設計法은 1960年代까지는 주로 理論의인 發展에 치우쳤고 1970年代에 들어와서 斷面의 構成이 複雜한 鐵筋 콘크리트 構造物의 最適設計에 관한 研究가 始作되었는데 初期에는 아주 간단한 構造要素에 適用되었으며 後半期로 올수록 점점 大型 構造物에 適用하는 研究가 遂行되었다.

1980年代에 들어와서는 外國의 경우 주로 大型 構造物의 最適設計에 관한 研究와 有限要素法에 의한 構造解析 結果를 利用하여 最適設計를 遂行하는 方案에 관한 研究가 進行되고 있다.

그러나 國內에서는 아직도 簡單한 部材의 最適設計에 치우쳐 있을뿐 大型 構造物의 最適設計에 관한 研究는 未盡한 實情이며 특히 構造解析과 問題形成이 複雜한 鐵筋콘크리트 쉘構造物의 最適設計에 관한 研究는 거의 찾아 볼 수 없다.

그리고 最近의 發展推移로 보아 앞으로 有限要素法에 의한 構造解析과 연계된 最適設計法이 實質的으로 活用될 것으로 期待되는데 이러한 研究역시 未洽한 實情인바 이들에 관한 研究가 要求되고 있다.

이와같은 要請에 副應하기 위하여 遂行된 本 研究의 主目的은 鐵筋콘크리트 圓筒形 쉘構造로 이

루어진 貯水池 取水塔의 效率의인 最適設計方法을 提示하고자 하는 것이며 具體的인 目的은 다음과 같다.

(1) 鐵筋 콘크리트 圓筒形 쉘構造로 構成된 貯水池 取水塔을 對象으로 有限要素法에 의한 構造解析과 最適設計가 同時에 遂行되는 自動化 最適設計의 基礎를 確立한다.

(2) 貯水池 取水塔의 許容應力設計法에 의한 設計가 自動的으로 遂行되는 效率의인 最適化 알고리즘을 開發한다.

(3) 貯水池 取水塔을 設計할때 設計條件의 變化에 따라 몇가지 入力資料만 바꾸면 經驗이 不足한 設計者라도 最適設計값을 쉽게 구할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 開發한다.

## II. 最適設計 理論

### 1. 基本概念

構造物의 最適設計란 모든 設計常數와 設計荷重이 주어졌을때 設計變數에 賦課된 여러가지 制約條件들을 同時에 滿足하면서 目的函數를 最小로 하는 設計變數의 組合을 數學的 計劃法에 의하여 구하는 設計法으로서 그 一般形式은 다음과 같다.

Find  $\{X\}$

Such that

$$F(\{X\}) \rightarrow \min, \dots\dots\dots (2-1)$$

$$H_i(\{X\}) = 0 \quad i = 1, \dots, \ell \dots\dots (2-2)$$

$$G_j(\{X\}) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \dots\dots (2-3)$$

여기서  $\{X\}$  : 設計變數 벡터

$F(\{X\})$  : 目的函數

$H_i(\{X\}), G_j(\{X\})$  : 制約條件式

$\ell$  : 等式制約條件式의 數

$m$  : 不等式 制約條件式의 數

### 2. 非線形 計劃問題의 最適化

目的函數와 여러개의 制約條件式中 어느 하나

라도 設計變數 $\{X\}$ 의 2次項 以上の 項으로 結合되어 있으면 非線形 計劃問題라 하며 이는 制約條件을 갖지 않는 問題와 制約條件을 갖는 問題로 나눌수 있다.

가. 制約條件을 갖지 않는 非線形 計劃問題의 最適化

制約條件이 없는 構造最適化 問題는 다음과 같은 形式이 된다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } \{X\} \\ & \text{Such that} \\ & F(\{X\}) \rightarrow \min. \dots\dots\dots (2-4) \end{aligned}$$

이와같은 非線形 計劃問題의 最適解를 구하는 方法에는 導函數를 使用하지 않는 直接探査法, 一次導函數를 利用하는 Gradient Method, 그리고 二次導函數의 매트릭스를 利用하는 Newton and Newtonlike Method로 分類된다.

또한 이들 3부류의 方法들 中에는 여러가지 方法들이 있는데 本 研究에서는 一般의 非線形 計劃問題의 解決에 優秀한 方法으로 알려진 Modified Newton-Raphson Method를 使用하였다.

나. 制約條件을 갖는 非線形 計劃問題의 最適化

制約條件을 갖는 非線形 計劃問題의 解決에는 直接解法인 Feasible Direction Method와 等價的인 問題로 變換시켜 解를 구하는 方法 즉 一連의 線形 計劃問題나 無制約 最適化 問題로 變換시켜 逐次的으로 解를 구하는 方法이 있다.

이중에서 直接解法은 複雜하고 設計變數가 많은 問題의 경우에는 잘 收斂하지 않기 때문에 構造 System의 最適化 技法으로 適合하지 않는 것으로 알려져 있으며 等價問題로의 變換에 의한 解法中 SUMT法과 SLP法이 構造最適化에 가장 많이 適用되는데 특히 SUMT法이 SLP法 보다 여러가지 면에서 長점이 많은 것으로 알려져 있다.

그러므로 本 研究에서는 SUMT法을 使用하였다.

SUMT法은 Fiacco와 McCormick이 Interior Penalty Function Method를 보다 發展의 變換시켜 開發한 方法으로서 이 方法에서는 Interior Penalty Function Method에서의 Penalty Term을 바꾸어 다음과 같은 形態의 Penalty Function을 誘導하여 이를 最少化하는 方法이다<sup>9)</sup>

$$\begin{aligned} \psi(\{X\}, r) = & F - r \sum_{j=1}^m \ln G_j(\{X\}) + \sum_{i=1}^l \\ & [H_i(\{X\})]^2 / r \dots\dots\dots (2-5) \end{aligned}$$

3. 部分構造를 使用한 構造物의 最適設計

最適設計에 있어서 設計變數와 制約條件이 많은 大型 構造物일 경우에는 計算時間이 길어지고 컴퓨터 記憶容量이 크게 要求될 뿐 아니라 設計變數의 初期值를 假定하기가 어려워지는 등의 問題가 發生한다<sup>5, 6)</sup>.

이러한 問題를 解決할 수 있는 方便으로서 構造物 全體를 對象으로 最適設計를 遂行하는 대신 여러개의 部分構造(substructure)로 나누어서 遂行하는 方法을 考慮해 볼 수 있다.

本 研究에서는 貯水池 取水塔을 슬래브, 塔體, 底版의 部分構造로 나누어서 最適設計를 遂行하고 그 適用可能性을 檢討해 보았다.

III. 取水塔의 構造解析

本 研究에서 最適設計 對象으로 選定된 取水塔의 幾何學的 形狀과 設計變數는 Fig.1과 같다.

이와같은 貯水池 取水塔의 斷面力을 正確히 구하기 위하여 解析的인 方法과 有限要素法을 使用하였으며 解析에 必要한 諸般常數나 荷重狀態 및 構造形狀 등을 假定할때는 文獻(19)를 準用하였다.

1. 解析的인 方法에 의한 構造解析

貯水池 取水塔의 斷面力은 Fig.1의 各 設計變數가 定해지면 自動的으로 구해지도록 해석체제를 편성하였다.

操作室 바닥 圓形 슬래브의 解析에는 Timoshenko의 理論<sup>16)</sup>을 使用하였고 塔體에 發生되는 모멘트는 風荷重, 波壓力 및 連絡橋의 편심하중을 考慮하여 文獻(17) (19)의 方法으로 計算하였다.

2. 有限要素法에 의한 構造解析<sup>24, 25)</sup>

構造解析에 있어서 有限要素法은 解析的인 方法에 비하여 構造物의 幾何學的形態나 境界條件 및 荷重狀態에 關係없이 容易하게 適用할수 있으며 프로그램이 보편성을 가질수 있다는 持有的 長點때문에 現在로서는 가장 훌륭한 構造解析 方法으로 알려져 있다.

따라서 本 研究에서는 有限要素法에 의하여 取水塔의 構造解析을 수행하여 다음과 같은 두가지

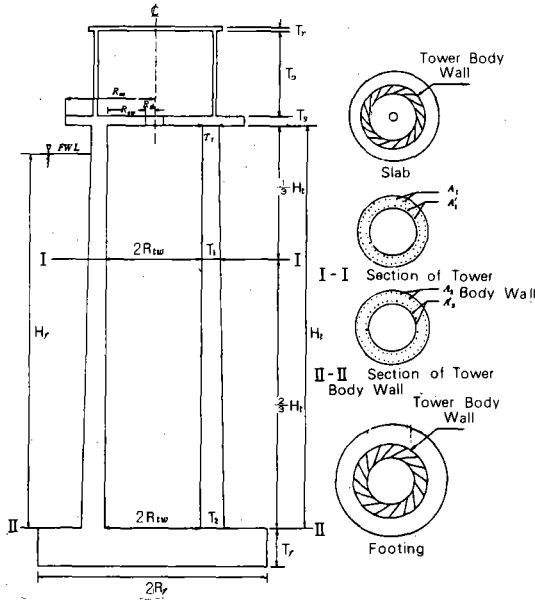


Fig. 1. Structural Geometry and Design Variables of Intake Tower.

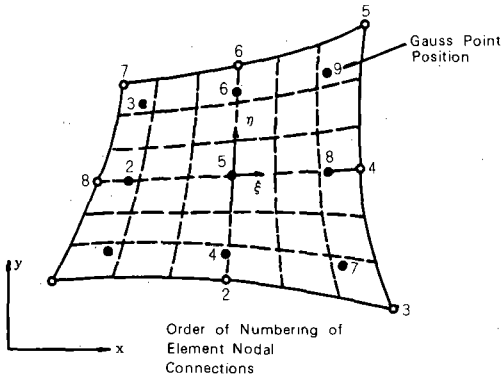


Fig. 2. Orientation of Local Axes  $\xi$ ,  $\eta$ , and Order of Gauss Point Numbering for Two Dimensional Parabolic Isoparametric Elements.

측면에 利用하였다.

첫째는 解析的인 構造解析方法에 의한 最適設計 結果를 檢證하는데 利用하였고,

둘째는 有限要素法에 의한 構造解析 結果를 利用하여 最適設計를 遂行하므로써 有限要素 法과 연계된 最適設計의 可能性을 타진해 보았다.

이 研究에서 使用된 有限要素는 Fig. 2와 같

은 8節點 等媒介變數要素이며 그 形狀函數는 式 (3-1)과 같다.

要素分割은 圓周方向으로는 슬래브, 塔體, 底版 모두 6等分 하였으며 슬래브와 底版의 半徑方向으로의 分割은 7등분으로 하였다.

이와같은 方法으로 分割한 結果 總要素數는 180個이고 總節點數는 613個이며 全體 自由度는 3,678이었다.

$$\begin{aligned}
 N_1(\xi, \eta) &= -\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta) \\
 N_2(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta) \\
 N_3(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1) \\
 N_4(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2) \\
 N_5(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) \\
 N_6(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \\
 N_7(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1) \\
 N_8(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2)
 \end{aligned} \quad \dots (3-1)$$

#### IV. 取水塔의 最適設計를 爲한 問題의 形成

最適設計를 위한 問題를 形成하는데는 目的函數와 制約條件을 誘導하는 두가지 段階가 있다.

本 研究에서 目的函數는 콘크리트, 鉄筋, 거푸집의 經費를 考慮한 經費函數로 나타냈으며 制約條件은 鉄筋콘크리트 許容應力設計法의 理論과 콘크리트 標準 示方書의 規定에 맞도록 誘導하였다.

##### 1. 操作室 슬래브의 最適化를 위한 問題의 形成

操作室 바닥 슬래브의 形態는 Fig. 3과 같이 圓形 슬래브이고 가운데에 구멍이 뚫려 있다. 여기서 設計變數는 슬래브의 두께 ( $T_s$ )와 슬래브의 半徑  $R_{sw}$  되는 곳에서 원둘레 方向으로 單位 길이당 斷面에 配筋된 鉄筋斷面積 ( $A_{ss}$ )으로 잡았다.

##### 가. 目的函數

Fig. 3과 같은 操作室 바닥 슬래브의 目的函

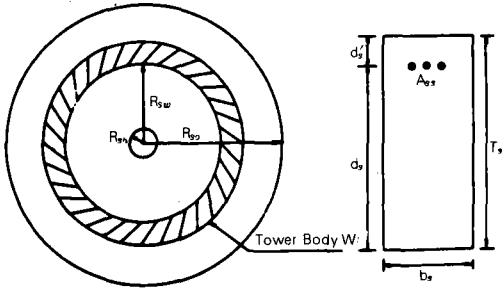


Fig. 3. Design Variables in Slab.

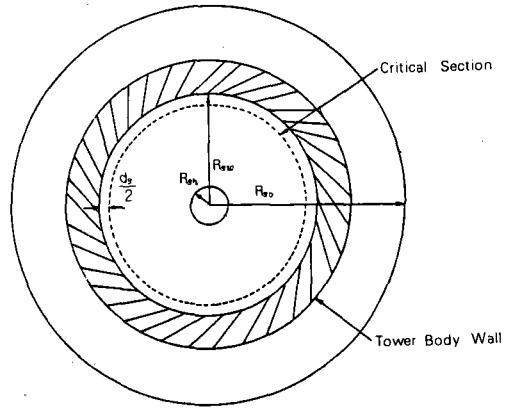


Fig. 4. Critical Section for Shearing Force in Slab.

數는 式(4-1)과 같이 誘導된다.

$$F_1 = \pi(R_{so}^2 - R_{sh}^2)T_s C_s + 2\pi(R_{so} - R_{sh}) A_{ss} R_{sw} C_s + \pi[(R_{so}^2 - R_{sh}^2) + 2(R_{sh} + R_{so}) T_s] C_f \dots (4-1)$$

여기서,

$C_c$  : 콘크리트의 單位 體積當 經費

$C_s$  : 鐵筋의 單位體積當 經費

$C_f$  : 거푸집의 單位面積當 經費

나. 制約條件式

슬래브의 設計에 있어서 考慮되어야 할 制約條件式을 許容應力 設計法을 適用하여 誘導하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트의 許容應力에 대한 制約條件式

$$(C_A)_1 = \frac{2M_s}{kj b_s d_s^2} - \sigma_{ca} \leq 0 \dots (4-2)$$

여기서,

$M_s$  : 슬래브에 發生하는 最大 彎모멘트

$$k = -np_s + \sqrt{(np_s)^2 + 2np_s} \dots (4-2a)$$

$j = 1 - \frac{k}{3}$ ,  $\sigma_{ca}$  : 콘크리트의 許容壓縮應力

$$P_s = \frac{A_{ss}}{b_s d_s}, \quad n : \text{彈性係數比}$$

(2) 鐵筋의 許容應力에 대한 制約條件式

$$(G_A)_2 = \frac{M_s}{A_{ss} j d_s} - \sigma_{sa} \leq 0 \dots (4-3)$$

여기서,  $\sigma_{sa}$  : 鐵筋의 許容應力

(3) 콘크리트의 剪斷應力에 대한 制約條件式

Fig. 4.에 나타난 바와 같이 剪斷에 대한 危險斷面은 塔體와 固定된 곳에서  $\frac{d_s}{2}$  만큼 떨어진 곳 이므로 剪斷應力에 대한 制約條件式은 다음과 같다.

$$(G_A)_3 = \frac{S_s}{b_s d_s} - \tau_a \leq 0 \dots (4-4)$$

여기서

$$S_s = \frac{[(R_{sw} - \frac{d_s}{2})^2 - R_{sh}^2] [\gamma_c T_s + W_{sg}]}{2(R_{sw} - \frac{d_s}{2})} + W_{sp} \dots (4-4a)$$

$\gamma_c$  : 鐵筋콘크리트의 單位重量

$W_{sg}$  : 슬래브위에 作用하는 群集荷重

$W_{sp}$  : 슬래브위에 作用하는 集中荷重

$\tau_a$  : 鐵筋콘크리트의 許容剪斷應力

(4) 鐵筋比에 대한 制約條件式

$$(G_A)_4 = P_{s, am} - \frac{A_{ss}}{b_s d_s} \leq 0 \dots (4-5)$$

여기서,

$P_{s, am}$  : 許容應力 設計法에서 規定된 슬래브의 最少鐵筋比

(5) 슬래브의 最少두께에 대한 制約條件式

$$(G_A)_5 = T_{s, am} - T_s \leq 0 \dots (4-6)$$

여기서,

$T_{s, am}$  : 許容應力 設計法에서 規定된 슬래브의 最少두께

(6) 처짐에 대한 制約條件式

$$(G_A)_6 = \delta_{A1} + \delta_{A2} - \delta^L \leq 0 \dots (4-7)$$

여기서,

$$\delta_{A1} = \frac{\lambda R_{sw}^4 W_s}{E_c I_{st}} \dots (4-7a)$$

$$W_s = \gamma_c T_s + W_{sg} \dots\dots\dots (4-7b)$$

$$I_{st} = I_{sc} + nI_{ss} \dots\dots\dots (4-7c)$$

$$I_{sc} = \frac{b_s T_s^3}{12} \dots\dots\dots (4-7d)$$

$$I_{ss} = A_{ss} \left( \frac{T_s}{2} - d'_s \right)^2 \dots\dots\dots (4-7e)$$

$E_c$  : 鐵筋콘크리트의 彈性係數

$\lambda$  : 常數

$$\delta_{az} = \frac{W_{sp} a^2}{6E_c I_{st}} (3R_{sw} - a) \dots\dots\dots (4-7f)$$

$a$  : 슬래브가 塔體와 固定된 곳과 集中荷重이 作用하는 點 사이의 距離

$\delta^L$  : 示方書에 規定된 처짐의 許容 限界值

2. 塔體의 最適化를 위한 問題의 形成

塔體의 形態는 Fig.1.과 같으며 設計 變數는 I-I斷面과 II-II斷面에서의 壁體두께 ( $T_1, T_2$ )와 内外側 鐵筋斷面積 ( $A_1, A'_1, A_2, A'_2$ )으로 잡았다.

가. 目的函數

塔體의 目的函數는 다음과 같이 誘導된다.

$$F_2 = \pi \{ 0.5[(R_{tw} + T_1)^2 + (R_{tw} + T_2)^2] - R_{tw}^2 \} H_t C_c + 0.5(A_1 + A'_1 + A_2 + A'_2) H_t C_s + \pi (4R_{tw} + T_1 + T_2) H_t C_f \dots\dots\dots (4-8)$$

나. 制約條件式

塔體를 設計하는데 考慮되어야 할 制約條件式을 許容應力設計法을 適用하여 誘導하면 다음과 같다.

(1) 軸方向力과 힘모멘트에 의하여 發生되는 콘크리트의 壓縮應力에 대한 制約條件式,

$$(G_A)_7, (G_A)_8 = \frac{(N_t)_i}{(A_{tt})_i} + \frac{M_i(R_{to})_i}{(I_{tt})_i} - \sigma_{ca} \leq 0 \quad i = 1, 2 \dots\dots\dots (4-9)$$

여기서

$$(A_{tt})_i = (A_{tc})_i + (2n-1)(A_1 + A'_1) \dots\dots\dots (4-9a)$$

$$(A_{tc})_i = \pi[(R_{tw} + T_1)^2 - R_{tw}^2] \dots\dots\dots (4-9b)$$

$(N_t)_i$  : i-i斷面에 作用하는 軸方向力

$M_i$  : i-i斷面에 作用하는 힘모멘트

$$(R_{to})_i = R_{tw} + T_1 \dots\dots\dots (4-9c)$$

$$(I_{tt})_i = (I_{tc})_i + 2n(I_{ts})_i \dots\dots\dots (4-9d)$$

$$(I_{tc})_i = \frac{\pi}{4} [(R_{tw} + T_1)^4 - R_{tw}^4] \dots\dots\dots (4-9e)$$

$$(I_{ts})_i = A_1 S_1^2 + A'_1 S_1'^2 \dots\dots\dots (4-9f)$$

$$S_1 = 0.5(R_{tw} + T_1 - d_i) \left( 1 + \frac{2\pi}{(N_o)_i} \right) \dots\dots\dots (4-9g)$$

$$S_1' = 0.5(R_{tw} + d'_i) \left( 1 + \frac{2\pi}{(N_w)_i} \right) \dots\dots\dots (4-9h)$$

$(N_o)_i$  ; i-i斷面의 外側 鐵筋個數

$(N_w)_i$  ; i-i斷面의 內側 鐵筋個數

$d_i$  ; i-i斷面의 壁體 外面에서 外側 鐵筋까지의 거리

$d'_i$  ; i-i斷面의 壁體 內面에서 內側 鐵筋까지의 거리

(2) 軸方向과 힘모멘트에 의하여 發生되는 鐵筋의 引張應力에 대한 制約條件式

$$(G_A)_9, (G_A)_{10} = \frac{M_i (R_{to})_i}{(I_{tt})_i} - \frac{(N_t)_i}{(A_{tt})_i} - \sigma_{sa} [(P_{to})_i + (P_{tw})_i] \leq 0 \quad i = 1, 2 \dots\dots\dots (4-10)$$

여기서,

$$(P_{to})_i = \frac{A_i}{\pi[(R_{tw} + T_1)^2 - R_{tw}^2]} \dots\dots\dots (4-10a)$$

$$(P_{tw})_i = \frac{A'_i}{\pi[(R_{tw} + T_1)^2 - R_{tw}^2]} \dots\dots\dots (4-10b)$$

(3) 水壓에 의하여 發生되는 콘크리트의 壓縮應力에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{11}, (G_A)_{12} = \frac{2(P_h)_i (R_{to})_i^2}{(R_{to})_i^2 - R_{tw}^2} - \sigma_{ca} \leq 0 \quad i = 1, 2 \dots\dots\dots (4-11)$$

여기서,

$(P_h)_i$  ; i-i斷面에서의 水壓強度

(4) 鐵筋比에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{13}, (G_A)_{14} = P_{tmo} - (P_{to})_i \leq 0 \dots\dots\dots (4-12)$$

$$(G_A)_{15}, (G_A)_{16} = P_{tmw} - (P_{tw})_i \leq 0 \dots\dots\dots (4-13) \quad i = 1, 2$$

여기서

$P_{tmo}$  ; 示方書에 規定된 圓形壁體의 最少 外部

鐵筋比

$P_{tmw}$ ; 示方書에 規定된 圓形壁體의 最少 内部 鐵筋比

(5) 最少 壁두께에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{17}, (G_A)_{18} = T_{i, \min} - T_i \leq 0 \dots\dots\dots (4-14)$$

$i = 1, 2$

여기서,

$T_{i, \min}$ ; 示方書에 規定된 圓形壁體의 最少두께

(6) 偏心距離에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{19}, (G_A)_{20} = \frac{M_i}{(N_i)_1} - (R_{tw} + T_i) \leq 0 \dots\dots\dots (4-15)$$

$i = 1, 2$

3. 底版의 最適化를 위한 問題의 形成

底版의 形態는 Fig. 5.과 같으며 設計 變數는 底版의 두께( $T_f$ )와 底版과 塔體의 外側壁이 固定된 部分에서 圓둘레 方向으로 單位길이당의 斷面에 配筋된 鐵筋斷面積( $A_{s,f}$ )으로 잡았다.

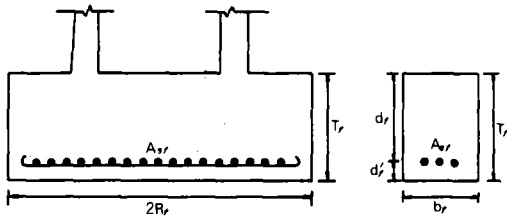


Fig. 5. Design Variables in Footing.

가. 目的函數

Fig. 5.와 같은 底版의 目的函數는 다음과 같이 誘導된다.

$$F_s = \pi R_f^2 T_f C_c + 2\pi(R_{tw} + T_2) A_{s,f} R_f C_s + 2\pi R_f T_f C_f \dots\dots\dots (4-16)$$

나. 制約條件式

底版의 設計에 있어서 考慮되어야 할 制約條件式을 許容應力設計法을 適用하여 誘導하면 다음과 같다.

(1) 顛倒에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{21} = 1.5 - \frac{M_{res}}{M_{ovt}} \leq 0 \dots\dots\dots (4-17)$$

여기서,

$M_{res}$ ; 抵抗모멘트

$M_{ovt}$ ; 顛倒모멘트

(2) 滑動에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{22} = 1.5 - \frac{F_f}{F_h} \leq 0 \dots\dots\dots (4-18)$$

여기서,

$F_h$ ; 取水塔에 作用하는 總水平力

$$F_f = W_f \cdot f$$

$W_f$ ; 取水塔 底版의 바닥에 가해지는 總垂直力

$f$ ; 底版과 岩盤사이의 摩擦係數

(3) 沈下 및 壓挫에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{23} = \frac{W_f}{A_f} + \frac{M_{ovt}}{Z_f} - \sigma_{fa} \leq 0 \dots\dots\dots (4-19)$$

여기서,

$$A_f = \pi R_f^2 \dots\dots\dots (4-19a)$$

$$Z_f = \frac{\pi R_f^3}{4} \dots\dots\dots (4-19b)$$

$\sigma_{fc}$ : 콘크리트의 許容支壓력과 地盤의 許容支持力中 작은 값

(4) 剪斷에 대한 制約條件式

① 擴大基礎를 幅이 넓은 보와 같이 생각하여 사인장 龜裂이 全幅에 걸쳐 일어난다고 생각하는 경우

$$(G_A)_{24} = \tau_b - \tau_{ba} \leq 0 \dots\dots\dots (4-20)$$

이 경우 危險斷面은 Fig. 6.에서  $S_1$ 이 되므로  $\tau_b$ 와  $\tau_{bc}$ 는 다음과 같이 計算된다.

Fig. 6에서

$$q = \frac{W_f}{A_f} + \frac{M_{ovt}}{Z_f} \dots\dots\dots (4-20a)$$

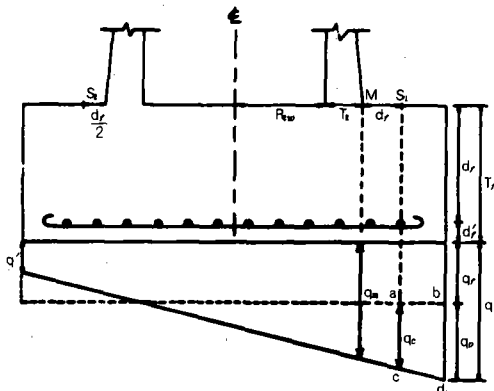


Fig. 6. Model of Footing for Calculation of Shearing Force and Bending Moment.

$$q' = \frac{W_f}{A_f} - \frac{M_{ovt}}{Z_f} \dots\dots\dots (4-20b)$$

$$q_f = \frac{\pi \{ \gamma_c R_f^2 T_f + [R_f^2 - (R_{tw} + T_2)^2] P_{hf} \}}{A_f} \dots\dots\dots (4-20c)$$

여기서,  
 $\gamma_c$  : 콘크리트의 單位重量  
 $P_{hf}$  ; 底版의 上面에 作用하는 水壓強度

$$q_p = q - q_f \dots\dots\dots (4-20d)$$

$$q_c = \frac{q - q'}{2R_f} (R_f + R_{tw} + T_2 + d_f) - (q_f - q') \dots\dots\dots (4-20e)$$

$$F_{sher} = \frac{q_c + q_p}{2} (R_f - R_{tw} - T_2 - d_f) \dots\dots\dots (4-20f)$$

$$\tau_b = \frac{F_{sher}}{b_f d_f} \dots\dots\dots (4-20g)$$

$$\tau_{ba} = 0.25 \sqrt{\sigma_{ck}} \dots\dots\dots (4-20h)$$

② 斜引張 龜裂이 集中荷重 또는 反力의 周圍에서 截頭圓錐形이나 角錐形으로 일어난다고 생각하는 경우

$$(G_A)_{25} = \tau_c - \tau_{ca} \leq 0 \dots\dots\dots (4-21)$$

이 경우 위험단면은 Fig. 6.에서  $S_2$ 가 되므로  $\tau_c$ 와  $\tau_{ca}$ 는 다음과 같이 計算된다.

$$\tau_{ca} = 0.46 \sqrt{\sigma_{ck}} \dots\dots\dots (4-21a)$$

$$R_{punch} = R_{tw} + T_2 + \frac{d_f}{2} \dots\dots\dots (4-21b)$$

$W_{punch}$  : 底版바닥에 作用하는 總荷重에서 水壓 및 底版 自體의 自重에 의한 荷重을 뺀 값

$$F_{punch} = \frac{W_{punch}}{R_f^2} [R_f^2 - (R_{tw} + T_2 + \frac{d_f}{2})^2] \dots\dots\dots (4-21c)$$

$$\tau_c = \frac{F_{punch}}{2\pi R_{punch} \cdot d_f} \dots\dots\dots (4-21d)$$

(5) 휨모멘트에 대한 制約條件式  
 휨모멘트에 대한 危險斷面은 Fig. 6.에서 M點이 되므로 휨모멘트에 대한 制約條件式은 다음과

같다.  
 ① 휨모멘트로 인한 콘크리트의 壓縮應力에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{26} = \frac{2M_f}{k_j d_f^2} - \sigma_{ca} \leq 0 \dots\dots\dots (4-22)$$

여기서,  
 $M_f = \frac{(R_f - R_{tw} - T_2)^2}{6} (2q - 2P_{hf} + q_m) \dots\dots\dots (4-22a)$

$$P_f = \frac{A_{sf}}{b_f d_f} \dots\dots\dots (4-22b)$$

$$k = -np_f + \sqrt{(np_f)^2 + 2nP_f} \dots\dots\dots (4-22c)$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} \dots\dots\dots (4-22d)$$

② 鐵筋의 引張應力에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{27} = \frac{M_f}{A_{s_f j} d_f} - \sigma_{sa} \leq 0 \dots\dots\dots (4-23)$$

(6) 擴大基礎의 最少두께에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{28} = T_{f, min} - T_f \leq 0 \dots\dots\dots (4-24)$$

여기서,  
 $T_{f, min}$  ; 示方書에 規定된 擴大基礎의 最少두께  
 (7) 鐵筋比에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{29} = P_{f, min} - \frac{A_{sf}}{b_f d_f} \leq 0 \dots\dots\dots (4-25)$$

여기서,  
 $P_{f, min}$  ; 示方書에 規定된 擴大基礎의 最少鐵筋比

(8) 偏心距離에 대한 制約條件式

$$(G_A)_{30} = \frac{M_{ovt}}{W_f} - \frac{R_f}{4} \leq 0 \dots\dots\dots (4-26)$$

### V. 最適化 알고리즘

앞에서 誘導한 目的函數와 多數의 制約條件式들로 形成된 最適化 問題는 非線形計劃 問題가 된다.

이를 SUMT法을 利用하여 最適化하는 綜合的인 알고리즘은 다음과 같다.

(1) 取水塔의 幾何學的 形狀 및 荷重條件은 決定짓는 常數와 設計 및 解析에 必要한 各種常數 그리고 許容最大反復回數를 賦與한다.



## 貯水池 取水塔의 最適設計에 관한 研究(I)

- (2) 各 設計變數  $\{X\}$ 와  $r$ 의 初期值를 賦與한다.
- (3) 주어진  $\{X\}$ 에 대하여 構造解析을 遂行한다.
- (4) 設計變數의 初期值 또는 反復試行中에 얻은 값이 實行可能 領域에 있는지를 檢討한다.
- 實行可能領域에 있으면 다음 段階로 進行되나 그렇지 않으면 實行可能領域에 들도록 設計變數의 값을 修正하여 (3)으로 되돌아간다.
- (5) SUMT法과 Modified Newton-Raphson Method를 使用하여 Penalty Function을 最少化하는  $\{X_1^*\}$ 를 구한다.
- (6) 反復回數(i-1)번째와 i번째의 目的函數를 比較하여 解가 收斂하거나 反復回數가 許容最大 反復回數에 到達하면 停止하고 그렇지 않으면  $\{X_{i+1}\} = \{X_i^*\}$ 로 되어 (3)으로 되돌아가  $\{X_{i+1}\}$ 로 부터 出發하여 (3)~(6)의 過程을 反復한다.

이때 收斂限界는  $\frac{F(\{X_{i-1}^*\}) - F(\{X_i^*\})}{F(\{X_i^*\})}$ 의 값을 基準으로 하였다.

이와같은 最適化 過程을 Flow Chart로 나타내면 Fig. 7과 같다.

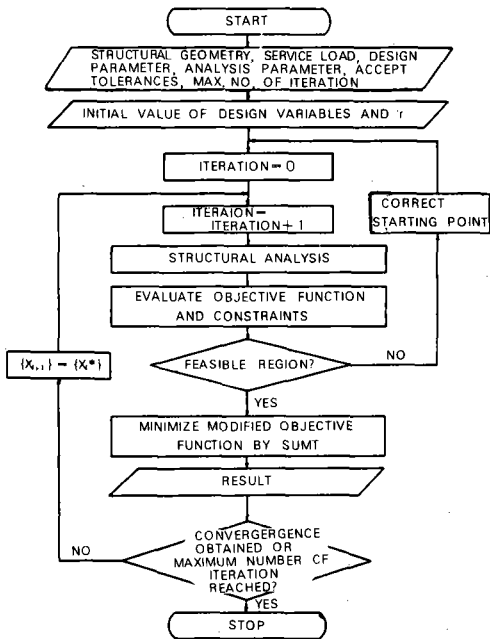


Fig. 7. Flow Chart of Optimization Procedure.

## VI. 適用例

本 研究에서 開發된 最適設計 알고리즘의 效率

性, 適用可能性 등을 檢討하기 위하여 選定된 貯水池 取水塔의 幾何學的 形狀은 Fig. 1과 같으며 그 固定 變數가 다음과 같은 경우로 하였다.

$$\begin{aligned} R_{so} &= 4.65\text{m} & R_{sw} &= 2.5\text{m} & R_{sh} &= 0.45\text{m} \\ R_{tw} &= 2.5\text{m} & H_t &= 21.0\text{m} & H_f &= 19.5\text{m} \\ T_r &= 0.20\text{m} & T_o &= 4.50\text{m} \end{aligned}$$

### 1. 設計條件

本 研究에서 適用例로 選定된 取水塔의 諸般設計條件은 다음과 같다.

#### 가. 材料의 性質

(1) 콘크리트의 性質

$$\sigma_{ck} = 210\text{kg/cm}^2, \sigma_{ca} = 84\text{kg/cm}^2$$

$$\tau_a = \begin{cases} \tau_{ba} = 0.25\sqrt{\sigma_{ck}} & (\text{斜引張 균열이 全幅에 걸쳐 일어난다고 생각할때}) \\ \tau_{ca} = 0.46\sqrt{\sigma_{ck}} & (\text{斜引張 균열이 截頭圓錐形이나 角錐形으로 發生한다고 생각할때}) \end{cases}$$

$$n = 9$$

$$E_c = 230,000\text{kg/cm}^2$$

鐵筋콘크리트의 單位重量  $\gamma_c = 2,400\text{kg/m}^3$

地盤과 콘크리트와의 摩擦係數  $f = 0.6$

(2) 鐵筋의 性質

$$\sigma_y = 2,400\text{kg/cm}^2, \sigma_{sa} = 1,300\text{kg/cm}^2$$

$$E_s = 2,040,000\text{kg/cm}^2$$

(3) 基礎地盤의 支持力  $q_0 = 20\text{kg/cm}^2$

#### 나. 建設經費 單價

(1) 콘크리트 單價  $C_c = 33,380(\text{원}/\text{m}^3)$

(2) 鐵筋單價  $C_s = 1,724,661(\text{원}/\text{m}^3)$

(3) 거푸집 單價  $C_f = 6,145.4(\text{원}/\text{m}^2)$

#### 다. 荷重條件

(1) 機械類의 무게 = 6,000kg

(2) 連絡橋에 의한 偏心荷重 = 20,000kg

(3) 操作室 슬래브 위의 群集荷重 = 400kg/m<sup>2</sup>

(4) 鑄鐵管 重量  $\phi = 120\text{cm} : 1,000\text{kg/m}$

## VII. 最適設計 結果 및 考察

### 1. 最適設計 結果

貯水池 取水塔의 最適設計 問題의 最適解를 구하는데는 許容應力設計法을 適用하면서 全體 構

Table-1. Results of Optimum Design.

Case	Substructure Design Variables	Slab		Tower Body						Footing			Objective Function (won)
		$T_s$	$A_{ss}$	$T_1$	$T_2$	$A_1$	$A'_1$	$A_2$	$A'_2$	$T_f$	$A_{sf}$	$R_f$	
	Iteration No.	(m)	( $m^2$ )	(m)	(m)	( $m^2$ )	( $m^2$ )	( $m^2$ )	( $m^2$ )	(m)	( $m^2$ )	(m)	
WSSUB	Initial Value	0.2400	0.0008	0.8000	1.0000	0.0250	0.0190	0.0320	0.0200	0.8000	0.003000	4.6000	20,999,137
	1	0.2451	0.001199	0.8381	0.9075	0.0236	0.0164	0.0252	0.0182	0.5415	0.001928	4.2346	19,853,969
	2	0.2436	0.001208	0.8381	0.9075	0.0236	0.0164	0.0252	0.0182	0.5415	0.001928	4.2346	19,851,397
	3	0.2421	0.001218	0.8381	0.9075	0.0236	0.0164	0.0252	0.0182	0.5415	0.001928	4.2346	19,848,685
	4	0.2404	0.001228	0.8381	0.9075	0.0236	0.0164	0.0252	0.0182	0.5415	0.001928	4.2346	19,845,821
	5	0.2387	0.001239	0.8381	0.9075	0.0236	0.0164	0.0252	0.0182	0.5415	0.001928	4.2346	19,842,791
	Optimum Value	0.2387	0.001239	0.8381	0.9075	0.0236	0.0164	0.0252	0.0182	0.5415	0.001928	4.2346	19,842,791
WSENT	Initial Value	0.2600	0.001300	0.8250	0.9750	0.02700	0.0210	0.0370	0.0240	1.4000	0.003150	4.7500	23,218,287
	1	0.2333	0.001401	0.9118	0.9519	0.02757	0.0193	0.0267	0.0201	0.7357	0.002384	4.6893	21,911,046
	2	0.2333	0.001401	0.9118	0.9519	0.02757	0.0193	0.0267	0.0201	0.7357	0.002384	4.6893	21,911,039
	3	0.2333	0.001401	0.9118	0.9519	0.02757	0.0193	0.0267	0.0201	0.7357	0.002384	4.6893	21,911,041
	4	0.2333	0.001401	0.9118	0.9519	0.02757	0.0193	0.0267	0.0201	0.7357	0.002384	4.6893	21,911,044
	5	0.2333	0.001401	0.9118	0.9519	0.02757	0.0193	0.0267	0.0201	0.7357	0.002384	4.6893	21,911,048
	Optimum Value	0.2333	0.001401	0.9118	0.9519	0.02757	0.0193	0.0267	0.0201	0.7357	0.002384	4.6893	21,911,048

造物을 한번에 設計하는 경우 (WSENT)와 許容應力設計法을 適用하면서 部分構造로 나누어서 設計하는 경우 (WSSUB)의 두가지 方法으로 나누어서 遂行하였다.

이와같은 두가지 경우로 最適解를 구한 結果는 Table-1.과 같다.

2. 考 察

가. 收斂性

貯水池 取水塔의 最適設計를 위하여 形成된 問

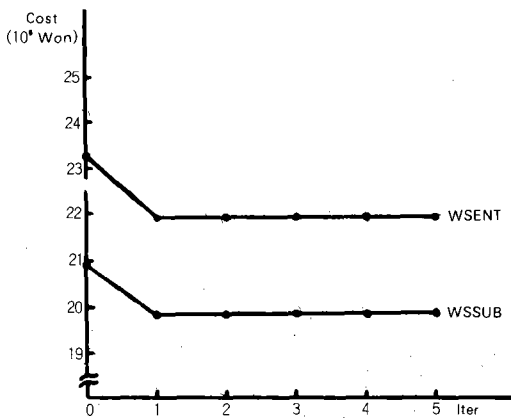


Fig. 8. Convergence Behavior of Objective Function.

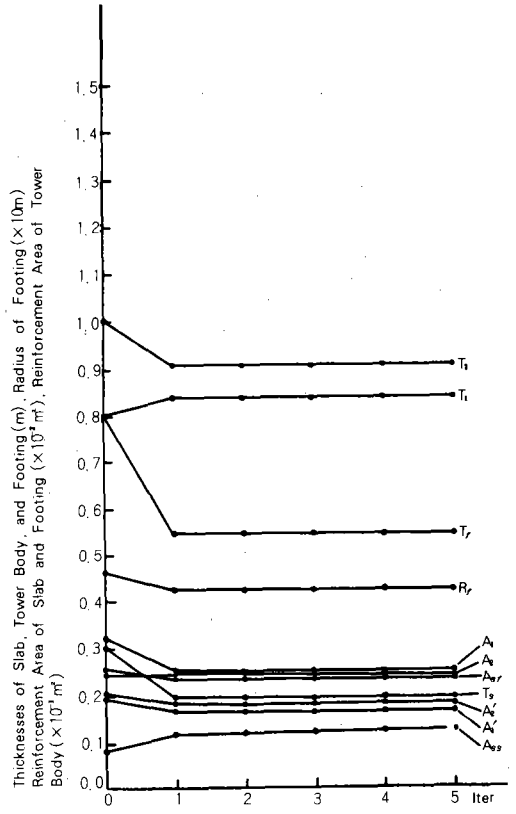


Fig. 9. Iteration History of Design Variables in the Case of WSSUB.

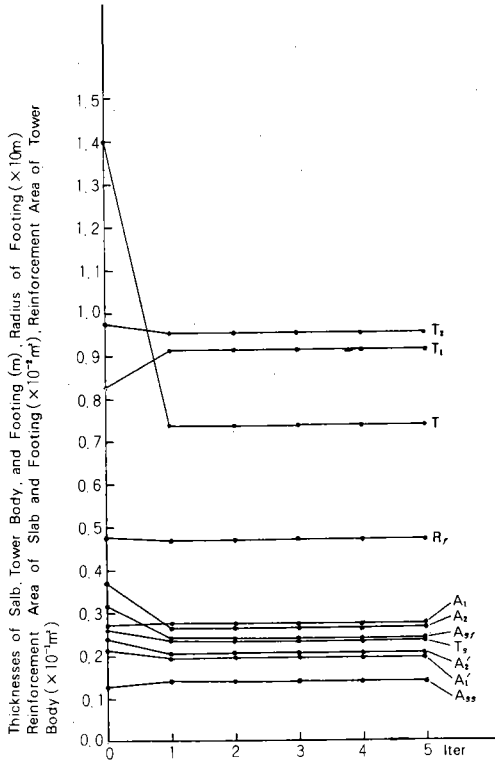


Fig. 10. Iteration History of Design Variables in the Case of WSENT.

題를 SUMT法에 의하여 最適解를 구해본 結果 反復回數에 따른 目的函數와 各 設計變數의 最適化 傾向은 各各 Fig. 8~Fig. 10과 같다.

이들 Fig에서 보는바와 같이 各 경우 모두 1~2회 以內에 Oscillation現象없이 最適解에 收斂하고 있다.

이러한 結果는 文獻(21) (22) (23)의 結果와 一致한다. 그러므로 이 研究에서 使用한 알고리즘은 收斂性에 있어서 効率的이고 安定된 最適化 技法이라고 判斷된다.

#### 나. 適用可能性

適用可能性은 언어진 最適設計 結果值에 대하여 筆算에 의하여 確認하는 方法과 有限要素法에 의한 精密解析의 方法으로 檢討하였다.

그 結果 Table-1의 結果值는 모두 適用可能한 것으로 判明되었다.

따라서 本 研究에서 開發된 알고리즘은 貯水池

取水塔의 最適設計에 適用可能한 것으로 判斷된다.

#### 다. 設計方法間의 比較

構造物은 全體의으로 한번에 設計하는 경우와 部分構造物로 나누어서 設計하는 경우의 건설경비를 比較해 보면 部分構造物로 나누어서 設計하는 경우가 全體의으로 設計하는 경우의 약 91%가 되어 9% 정도의 差異가 있을 뿐이다. 이와같은 差異는 部分構造物로 나누어서 設計하는 경우 境界에서의 剛性이 약간 크게 計算되기 때문인 것으로 判斷된다. 이 정도의 差異라면 實際設計에서 별 問題가 없을 것으로 思料되므로 實際 最適設計過程에서 대단히 便利한 部分構造物로 나누어서 設計하는 方法을 추천할 수 있을 것으로 思料된다.

#### 라. 主制約 條件

슬래브의 主制約 條件은 鐵筋에 發生하는 引張應力에 대한 制約條件이고 塔體의 경우는 縱方向 最小 鐵筋比에 대한 制約條件이며 底版에 있어서는 剪斷應力에 대한 制約條件, 鐵筋에 發生하는 引張應力에 대한 制約條件, 偏心距離에 대한 制約條件이 主制約 條件이었다.

따라서 取水塔의 設計에서는 이들 主制約條件을 特別히 周到綿密하게 誘導하여야 될 것으로 思料된다.

#### 마. 有限要素法에 의한 檢討

WSSUB, WSENT의 경우로 구해진 最適斷面에 대하여 有限要素法에 의하여 構造解析을 해서 安全性 여부를 檢討해 보면 다음과 같다.

##### (1) 슬래브의 解析

最適設計法으로 구해진 슬래브 斷面의 下緣에서의 應力을 구해가지고 콘크리트의 許容應力( $\sigma_{ca}$ )과 比較하면 Fig. 11와 같다.

Fig. 11에서 보면 2가지 경우 모두 실제 발생하는 應力이 許容應力 以下인 것을 알 수 있다. 따라서, 이 研究에서 구해진 最適斷面은 適用可能性이 있다는 것이 確認되었다.

##### (2) 塔體의 解析

##### (가) 콘크리트에 發生하는 壓縮應力의 解析

塔體의 圓周方向(x-方向)과 子午線方向(y-方向)의 最大 壓縮應力을 구하여 許容應力과 比較해 보면 Table-9와 같다.

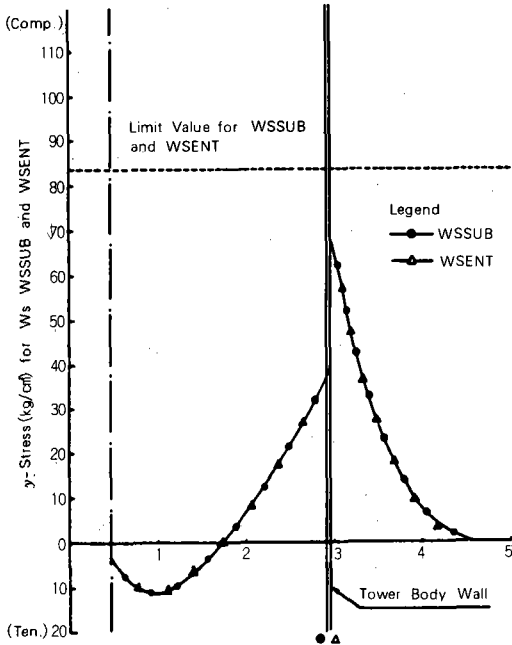


Fig. 11. Comparison of Stresses with Their Limit Value in Slab.

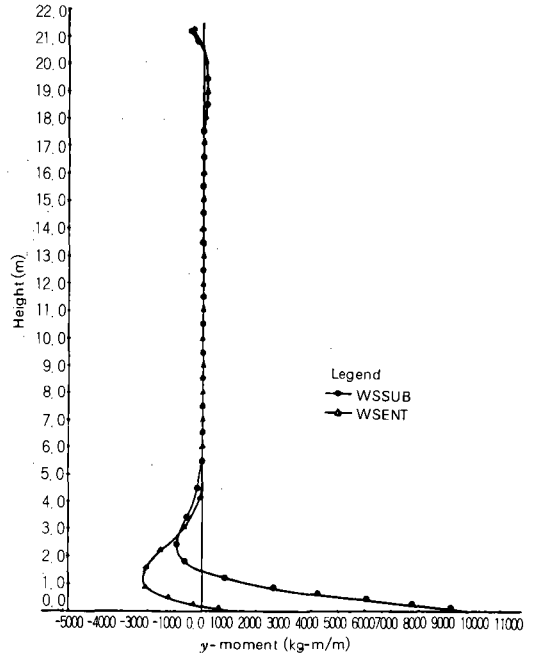


Fig. 12.  $y$ -Moment Variation along Height in Tower Body.

Table-2.에서 보는 바와 같이 2가지 경우 모두  $x$ -方向이나  $y$ -方向의 最大壓縮應力은 許容値以內에 있으므로 安全한 것으로 判斷되며, 特히  $x$ -方向의 壓縮應力은 許容値에 比하여 상당히 작으므로 實際 設計에 있어서 考慮하지 않아도 別로 問題가 되지 않을 것으로 思料된다.

Table-2. Comparison of Stresses with Their Allowable Stress in Tower Body.

Item	Case	WSSUB	WSENT
Allowable Stress (kg/cm <sup>2</sup> )		84.0	84.0
Maximum Hoop Stress (kg/cm <sup>2</sup> )		5.40	5.54
Maximum Meridional Stress (kg/cm <sup>2</sup> )		18.75	12.56

(나) 휨모멘트 ( $y$ -Moment)

塔體의 높이에 따른 휨 모멘트의 變化 狀態는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 휨 모멘트는 塔體 上端에서는 슬래브의 影響을 받아 얼마간의 正負 모멘트가 發生하고 塔體의 中央部에서는 設計에 影響을 줄만한 모멘트가 거의 發生하지 않다가 下端에 가서 급격히 큰 모멘트가 發生함과 同時에

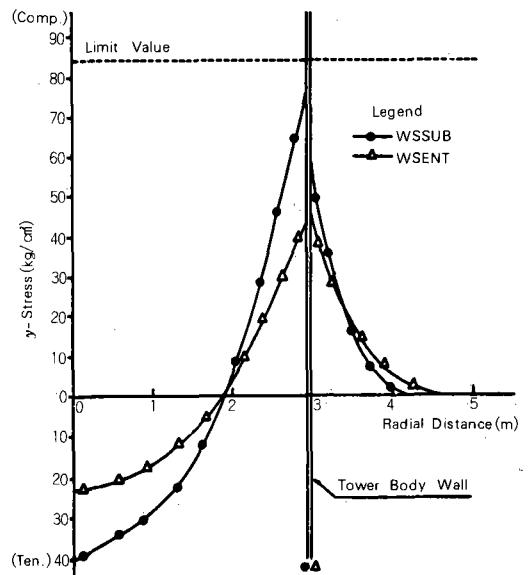


Fig. 13. Comparison of Stresses with Their Limit Value in Footing.

## 貯水池 取水塔의 最適設計에 관한 研究(I)

**Table-3. Comparison of Design Results between Optimum Design with Analytical Analysis and with F. E. M. Structural Analysis.**

Structural Analysis Method Connected to Optimum Design		① with Analytical Structural Analysis (WSENT)	② with F. E. M. Structural Analysis	② ① × 100 (%)
Cost & Design Variables	Unit			
Cost	Won	21,911,048	20,518,710	93.65
$T_s$	m	0.2333	0.2355	100.1
$A_{ss}$	m'	0.001401	0.001293	92.29
$T_1$	m	0.9118	0.7820	85.76
$T_2$	m	0.9519	0.8923	93.74
$A_1$	m'	0.0276	0.02344	84.93
$A_1'$	m'	0.0194	0.0168	86.60
$A_2$	m'	0.0267	0.0248	92.88
$A_2'$	m'	0.0201	0.0199	99.0
$T_f$	m	0.7357	0.8721	118.54
$A_{sf}$	m'	0.002384	0.003251	136.36
$R_f$	m	4.6893	4.7259	100.78

正負 모멘트가 교차한다.

이와 같은 傾向은 2가지 경우 모두 비슷하였으며 文獻(3) (24) (25)와 一致한다. 따라서, 塔體의 縱方向 鐵筋은 반드시 複鐵筋을 配筋해야 될 것으로 判斷된다.

### (3) 底版의 解析

슬래브의 경우와 마찬가지로 最適設計法에 의하여 求解된 底版斷面의 上緣에서의 應力을 求解 가지고 콘크리트의 許容應力과 比較해 보면 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이 實際로 發生하는 應力이 許容應力 以內에 있기 때문에 安全性이 充分히 認定되었다.

### 바. 有限要素法에 의한 構造解析結果를 利用한 最適設計

有限要素法과 最適設計法을 연계하여 構造解析은 有限要素法에 의하여 遂行되고 設計는 最適設計法에 의하여 遂行되도록 하는 것이 가장 바람직한 設計法으로 判斷된다.

이와같은 方法의 可能性을 確認해 보기 위하여 解析的인 方法에 의한 構造解析 體系와 最適設計法을 연계하여 구한 最適斷面과 그 斷面에 대하여 有限要素法으로 構造解析을 해 가지고 그 斷面力을 常數로 하여 最適設計를 遂行한 結果를 比較해 보면 Table-3.과 같다.

Table -3.에서 보면 有限要素法에 의한 構造

解析 結果를 利用한 最適設計가 解析的인 方法에 의한 構造解析 結果를 利用한 最適設計에 比하여 總建設 經費는 약 6%정도 減少되고 다른 設計變數들도 약간씩 감소되는 것을 알 수 있다.

이와 같은 事實로 미루어 볼 때 有限要素法과 最適設計法을 連繫하여 構造解析과 設計가 自動的으로 遂行되는 自動化 最適設計가 可能할 것으로 判斷되며 이렇게 될 경우 보다 더 進歩된 理論에 의하여 最適設計값을 얻을 수 있을 것으로 判斷된다.

## VIII. 結 論

鐵筋콘크리트 圓筒形 竪構造로 이루어진 貯水池 取水塔의 效率적이고 合理的인 最適設計 方法을 모색하기 위하여 遂行된 本 研究의 結論은 다음과 같다.

1. 鐵筋콘크리트 圓筒形 竪構造로 이루어진 貯水池 取水塔을 對象으로 有限要素法에 의한 構造解析과 最適設計가 同時에 遂行되는 自動化 最適設計의 基礎가 確立되었다.

2. 貯水池 取水塔을 設計함에 있어서 許容應力設計法에 의한 設計가 自動的으로 遂行되는 效率的인 最適化 알고리즘이 開發되었다.

3. 目的函數나 各 設計變數의 反復回數에 따른 收斂特性은 거의 2回 以內에 最適值에 收斂하였으므로 本 研究에서 開發된 알고리즘은 效率

的이고 安定된 最適化 技法인 것으로 判斷된다.

4. 最適設計를 部分構造로 나누어서 遂行하는 경우와 全體的으로 遂行하는 경우를 比較해본 結果 目的函數의 差異가 그리 크지 않으므로 實際 適用면에서 便利한 部分構造로 나누어서 遂行하는 方法이 有利할 것으로 思料된다.

5. 許容應力 設計法을 適用하여 貯水池 取水塔을 設計할때 各 構造要素의 主制約條件은 슬래브의 경우에는 鐵筋에 發生하는 引張應力에 대한 制約條件이고 塔體의 경우에는 縱方向 最小 鐵筋比에 대한 制約條件이며 底版에 있어서는 剪斷應力, 鐵筋에 發生하는 引張應力 및 偏心距離에 대한 制約條件이었다.

6. 貯水池 取水塔을 許容應力 設計法을 適用하여 設計할 경우 設計條件의 變化에 따라 몇가지 入力資料만 바꾸면 經驗이 不足한 設計者라도 쉽게 最適斷面을 구할수 있는 컴퓨터 프로그램이 開發되었다.

### 參 考 文 獻

1. Adidam, S. R. and A. V. Subramanyam, "Optimum Design of Reinforced Concrete Water Tanks", Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 108, No. ST 6, June, 1982, PP. 1219-1231.
2. Arora, J. S., and A. K. Govil, "An Efficient Method for Optimal design by Substructuring" An-International Journal Computers & Structures, Vol. 7, No. 4, 1977, PP. 507-515.
3. Billing, D. P., Thin Shell Concrete Structures, McGraw-Hill Book Co., 1982.
4. Esping, B. J. D., "Minimum Weight Design of Membrane Structures", An International Journal Computers & Structures Vol. 19, No. 5/6, 1984, PP. 707-716.
5. Govil, A. K., J. S. Arora and E. J. Haug, "Optimal Design of Wing Structures with Substructuring", An International Journal Computers & Structures Vol. 10, No. 6, December 1979, PP. 899-910.
6. Govil, A. K., J. S. Arora and E. J. Haug, "Optimal Design of Frames with Substructuring", An International Computers & Structures, Vol. 12, No. 1, 1980, PP. 1-10.
7. Gunaramam, D. J., and N. S. Sivakumaran, "Optimum Design of Reinforced Concrete Slabs", The Structural Engineer, Vol. 568, No. 3, Sep., 1978, PP. 61-67.
8. Kark, S. K. and A. Scholes, "Minimum Weight Design Using Finite Elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 19, No. 9, 1983, PP. 1319-1330.
9. Kuester, J. L., and J. H. Mize, Optimization Techniques with Fortran, McGraw-Hill Book Company, 1973, PP. 412-463.
10. Nguyen, D. T., Fail-Safe Optimal Design of Complex Structures with Substructures and Composite Materials, Ph. D. Thesis, Iowa University, Iowa City, 1982.
11. Rao, S. S., and E. S. Reddy, "Optimum Design of Stiffened Cylindrical Shells with Natural Frequency Constraints", An International Journal Computers & Structures, Vol. 12, No. 2, 1980, PP. 211-219.
12. Safarian, S. S., and E. C. Harris, Design and Construction of Silos and Bunkers, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985.
13. Sandhu, B. S., "Economical Design of Reinforced Concrete Slabs and Walls", Engineers Note Book, Civil Engineering, ASCE, July, 1971, PP. 68-69.
14. Saouma, V. E., and R. S. Murad, "Partially Prestressed Concrete Beam Optimization", Journal of Structural Engineering Div., ASCE, Vol. 110, No. 3, March, 1984, PP. 589-603.
15. Templeman, A. B., "Optimization Methods in Structural Design Practice", Journal of Structural Engineering Div., ASCE, Vol. 109, No. 10, October, 1983, PP. 2420-2433.
16. Timoshenko, S., and S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959.
17. 高在君, 吳炳煥, 李信昊, 金鍾玉, 高弘錫, 朴光洙, 排水閘門 構造改善研究(I), 서울大學

貯水池 取水塔의 最適設計에 관한 研究(I)

- 校 農科大學 農業開發研究所, 1986.
18. 金鍾玉, 鐵筋콘크리트 圓筒形 竝構造物의 最適設計에 관한 研究, 서울大學校 大學院 博士學位論文, 1987
  19. 대한농업토목학회, 토지개량사업 계획설계기준 필답편, 농림부, 1968, pp. 224~245.
  20. 邊根周, “鐵筋 콘크리트 卍대 構造物의 最適化를 위한 最適斷面의 決定에 관한 研究”, 연세대학교 대학원 博士學位 論文, 1975.
  21. 吳柱源, 鐵筋 콘크리트 直四角形 탱크의 最適設計에 관한 研究, 全北大學校 大學院 博士學位 論文, 1985.
  22. 이규원, 평면트러스 구조물의 형상 최적화에 관한 연구, 연세대학교 대학원 박사학위 논문, 1980.
  23. 鄭榮采, SUMT法에 의한 鐵筋 콘크리트 卍대 構造物의 最適設計에 관한 研究, 全北大學校 大學院 博士學位 論文, 1985.
  24. 曹鎮久, 趙顯榮, “地盤과 構造物사이의 相互作用을 考慮한 農業用 사이로의 解析에 관한 研究(I)”, 韓國農工學會誌, Vol. 27, No. 2, 1985, pp. 38~46.
  25. 曹鎮久, 趙顯榮, “地盤과 構造物사이의 相互作用을 考慮한 農業사이로의 解析에 관한 研究(II)”, 韓國農工學會誌, Vol. 27, No. 3, 1985, pp. 97~108.