

# 貯水池 取水塔의 最適設計에 관한 研究 (II)

—強度設計法을 中心으로—

## Optimum Design of the Intake Tower of Reservoir

—With Application of Strength Design Method—

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

### Summary

A growing attention has been paid to the optimum design of structures in recent years. Most studies on the optimum design of reinforced concrete structures has been mainly focussed to the design of structural members such as beams, slabs and columns, and there exist few studies that deal with the optimum design of large-scale concrete shell structures.

The purpose of the present investigation is, therefore, to set up an efficient optimum design method for the large-scale reinforced concrete cylindrical shell structures like intake tower of reservoir.

The major design variables are the dimensions and steel areas of each member of 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 strength design method.

The results obtained are summarized as follows

1. The efficient optimization algorithms which can execute the automatic optimum design of reinforced concrete intake tower based on the strength design method were developed.
2. 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.
3. When using the strength design method, the construction cost could be saved about 9% compared with working stress design method.  
Therefore, the reliability of algorithm was proved.
4. The difference in construction cost between the optimum designs with substructures and with entire structure was found to be small and thus the optimum design with substructures

---

\* 禮山農業專門大學

\*\* 서울大學校 農科大學

may conveniently be used in practical design.

5. The major active constraints of each structural member were found to be the bending moment constraint for slab, the minimum longitudinal steel ratio constraint for tower body and the shearing force, bending moment 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 on the basis of strength design method.

## I. 緒 論

最近 컴퓨터 産業, Operation Research 및 System工學의 急速한 發展에 힘입어 最適設計法이 急速度로 發展하고 있으며 特히 最近에는 大型 構造物의 最適設計에 관한 研究가 要求되고 있다.

이와같은 要請에 따라서 筆者는 이미 本 研究의 第1報에서 許容應力設計法의 理論을 適用한 貯水池 取水塔의 最適設計 結果를 報告한 바 있다.

그러나 1970年代부터 歐美 先進國들의 콘크리트 示方書는 許容應力設計法을 탈피하여 強度設計法이나 限界狀態設計法이 主軸을 이루었으며 우리나라의 경우에도 1982年 12월에 3次 改訂된 무근 및 鐵筋콘크리트 標準示方書에서는 “鐵筋콘크리트 構造物의 設計는 強度設計法에 의하되 許容應力設計法에 의하고자 할 때는 제 3條의 許容應力設計法에 따른다”<sup>19)</sup>라고 규정하여 強度設計法이 上位로 浮上 하였다.

따라서 앞으로 모든 鐵筋콘크리트 構造物의 設計에는 強度設計法의 導入이 불가피하게 되었으며 이와같은 時代的 潮流에 따라 最適設計에 있어서도 強度設計法의 理論을 適用하여야 될 것이다.

이와 같은 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 이루어진 貯水池 取水塔의 效率적이고 合理的인 最適設計 방안을 강구하고자 하는 것이며 구체적 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 設計함에 있어서 強度設計法에 의한 設計가 自動적으로 遂行되는 效率적인 最適化 알고리즘을 開發한다.

(2) 設計變數와 制約條件이 많은 大型構造物의

最適設計를 效率적으로 遂行하는 方法으로서 構造物을 部分構造로 나누어서 設計하는 方法의 適用可能性을 判斷한다.

(3) 貯水池 取水塔을 強度設計法에 의하여 設計할 때 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. 非線形 計劃問題의 最適化<sup>8)</sup>

目的函數와 여러개의 制約條件式中 어느 하나라도 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 나누어 진다.

### 1. 制約條件을 갖지 않는 非線形 計劃問題의 最適化

制約條件이 없는 最適化 問題는 다음과 같은 形式이 된다.

$$\text{Find } \{x\} \text{ Such that } F(\{x\}) \rightarrow \min. \dots\dots\dots (1)$$

式(1)의 函數  $F(\{x\})$ 의 局所最適點에서는 式(2)의 條件을 만족하면서 式(3)으로 表現되는 2次導函數 매트릭스(hessian matrix)  $[H]$ 의 要素가 모두 陽數이어야 한다.

$$\{\nabla F\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial F}{\partial X_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial X_n} \end{array} \right\} = \{0\} \dots\dots\dots (2)$$

$$[H] = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial X_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial X_1 \partial X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial X_n \partial X_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial X_n^2} \end{pmatrix} \dots\dots (3)$$

非線形 計劃問題의 最適解를 구한다는 것은 이 局所 最適解를 여러개 구해서 그중 가장 最小가 되는 값을 찾는것인데 본 研究에서는 局所最適解를 구하는 方法으로 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.

2. 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과 等價問題로의 變換에 의한 解法이 있다.

構造最適化에 가장 普遍的으로 適用되어온 技法으로는 等價問題로의 變換에 의한 解法인 SLP (Successive Linear Programming)法과 SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique)法이 있는데 最近의 研究結果<sup>27)</sup>에 의하면 SUMT法이 SLP法보다 構造最適化問題에 適合하고 여러가지 면에서 長點이 많다고 알려져 있다.

SUMT法은 Penalty-Function Method를 Fiacco와 McCormick이 利用에 便利하도록 發展시킨 方法이다.

Penalty-Function Method는 Courant가 最初로 提案한 方法으로서 制約條件을 고려해서 만든 Penalty Term을 目的函數 F에 追加하여 식 (4)와 같은 Penalty Function을 만들고 이 Penalty Function을 最小로 하는 {x}를 찾는 方法이다.

$$\psi(\{x\}, r) = F + r \sum_{j=1}^m G(G_j) \dots\dots\dots (4)$$

Penalty Function Method는 可能領域 外部로부터 最適點으로 收歛해 가는 Exterior Penalty-Function Method와 可能領域 内部로부터 最適點으로 收歛해 가는 Interior Penalty-Function Method가 있는데 본 研究에서는 Interior Penalty-Function Method에서의 Penalty Term을 바꾸어 다음과 같은 형태의 Penalty-Function을 誘導한 SUMT法<sup>9)</sup>을 使用 하였다.

$$\psi(\{x\}, r) = F - r \sum_{j=1}^m \ln G_j(\{x\}) + \sum_{i=1}^k [H_i(\{x\})]^2 / r \dots\dots\dots (5)$$

III. 取水塔의 最適設計를 위한 問題의 形成

最適設計를 위한 問題의 形成에서 目的函數는 콘크리트, 鐵筋, 거푸집의 經費를 考慮한 經費函數로 나타냈으며 制約條件은 鐵筋콘크리트 強度設計法의 理論에 따르고 韓國 콘크리트 標準示方書<sup>19)</sup>와 ACI 313-77의 規定<sup>1)</sup>에 맞도록 誘導하였다.

1. 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.

制約條件式을 誘導하는데 必須的으로 要求되는 取水塔의 斷面力은 Fig.1의 設計變數가 決定되면 自動的으로 計算되도록 解析體系를 편성하였다. 이때 解析에 必要한 諸般 常數나 荷重狀態 및 構造狀態를 假定할 때는 文獻(22)를 準用하였다.

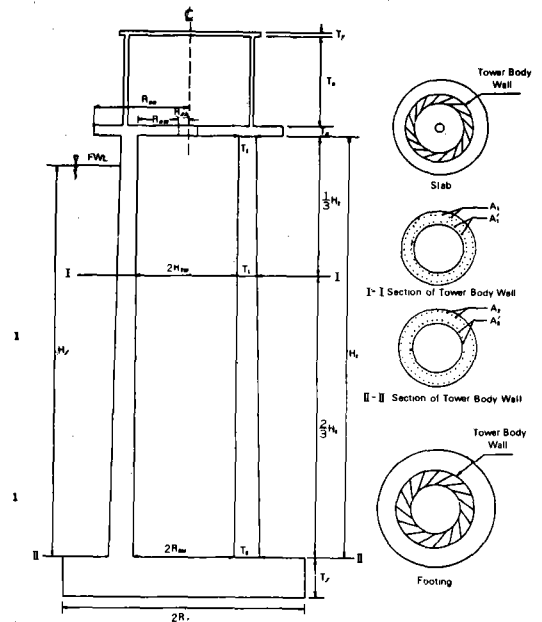


Fig. 1. Structural Geometry and Design Variables of Intake Tower.

操作室 바닥 圓形 슬래브의 解析에는 Timoshenko의 理論<sup>17)</sup>을 使用하였고 塔體에 發生되는 모멘트는 風荷重, 波壓力 및 連絡橋의 偏心荷重을 考慮하여 文獻(18), (22)에서의 方法으로 計算하였다.

2. 操作室 슬래브의 最適化를 위한 問題의 形成

操作室 슬래브의 形態는 Fig. 2와 같이 圓形 슬래브이고 가운데에 구멍이 뚫려 있다.

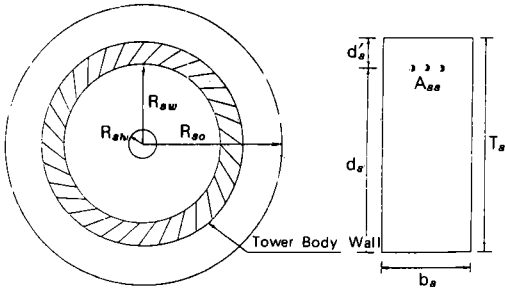


Fig.2. Design Variables in Slab.

가. 目的函數

Fig. 2와 같은 操作室 바닥슬래브의 目的函數는 式(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_1 = \pi (R_{so}^2 - R_{sh}^2) T_s C_s + 2\pi (R_{so} - R_{sh}) A_{ss} R_{sw} C_s + \pi [(R_{so}^2 - R_{sh}^2) + 2(R_{sh} + R_{so}) T_s] C_r \dots (6)$$

여기서

- F<sub>1</sub> ; 슬래브의 總建設經費
- C<sub>c</sub> ; 콘크리트의 單位體積當 經費
- C<sub>s</sub> ; 鐵筋의 單位體積當 經費
- C<sub>r</sub> ; 거꾸집의 單位面積當 經費

나. 制約條件式

슬래브設計에 있어서 考慮되어야 할 制約條件式을 強度設計法을 適用하여 誘導하면 다음과 같다.

1) 휨모멘트 制約條件式

$$(G_s)_1 = M_{s,act} - M_{s,dms} \leq 0 \dots (7)$$

여기서

$$M_{s,act} = \alpha R_{sw}^2 W_{su} + 1.8 W_{sp} a \dots (7a)$$

$$W_{su} = 1.5 \gamma_c T_s + 1.8 W_{ss} \dots (7b)$$

α ; 常數

W<sub>ss</sub> ; 슬래브 위에 작용하는 群集荷重

W<sub>sp</sub> ; 슬래브 위에 작용하는 集中荷重

a ; 슬래브와 塔體가 固定된 곳과 集中荷重이 작용하는 點사이의 距離

γ<sub>c</sub> ; 鐵筋콘크리트의 單位重量

$$M_{s,dms} = \phi P_s \sigma_y b_s d_s^2 (1 - 0.59 p_s \frac{\sigma_y}{\sigma_{ck}}) \dots (7c)$$

φ ; 減少係數 (= 0.9)

$$P_s = \frac{A_{ss}}{b_s d_s}$$

σ<sub>y</sub> ; 鐵筋의 降伏強度

σ<sub>ck</sub> ; 콘크리트의 設計基準 強度

2) 剪斷力에 대한 制約條件式

$$(G_s)_2 = S_{s,act} - S_{s,dss} \leq 0 \dots (8)$$

여기서

$$S_{s,act} = \frac{[(R_{sw} - \frac{d_s}{2})^2 - R_{sh}^2] W_{su}}{2(R_{sw} - \frac{d_s}{2})} + 1.8 W_{sp} \dots (8a)$$

$$S_{s,dss} = 1.1 \phi \sqrt{\sigma_{ck}} b_s d_s \dots (8b)$$

φ = 0.85

3) 鐵筋比에 대한 制約條件式

$$(G_s)_3 = P_{s,um} - \frac{A_{ss}}{b_s d_s} \leq 0 \dots (9)$$

여기서

P<sub>s,um</sub> ; 強度設計法에서 規定된 슬래브의 最少 鐵筋比

$$(G_s)_4 = \frac{A_{ss}}{b_s d_s} - 0.75 P_b \leq 0 \dots (10)$$

여기서

$$P_b = \frac{0.85 k_1 \sigma_{ck}}{\sigma_y} \cdot \frac{6,120}{6,120 + \sigma_y} \dots (10a)$$

k<sub>1</sub> ; 常數로서 σ<sub>ck</sub>가 280 (kg/cm<sup>2</sup>)까지 되는 콘크리트에서는 0.85이고 그 보다 10kg/cm<sup>2</sup>씩 더해감에 따라 0.85의 값에서 0.007씩 감소된다.

4) 슬래브의 最少 두께에 대한 制約條件式

$$(G_s)_s = T_{s, um} - T_s \leq 0 \dots\dots\dots (11)$$

여기서

$T_{s, um}$ ; 強度設計法에서 規定된 슬래브의 最少 두께

5) 처짐에 대한 制約條件式

$$(G_s)_s = \delta_{u1} + \delta_{u2} - \delta^L \leq 0 \dots\dots\dots (12)$$

여기서

$$\delta_{u1} = \frac{\lambda R_{sw}^4 W_s}{E_c I_{st}} \dots\dots\dots (12a)$$

$$\delta_{u2} = \frac{W_{sp} a^2}{6 E_c I_{st}} (3 R_{sw} - a) \dots\dots\dots (12b)$$

$\delta^L$ ; 示方書에 規定된 처짐의 허용한 계치

$$W_s = \gamma_c T_s + W_{sg} \dots\dots\dots (12c)$$

$$I_{st} = I_{sc} + n I_{ss} \dots\dots\dots (12d)$$

$$I_{sc} = \frac{b_s T_s^3}{12} \dots\dots\dots (12e)$$

$$I_{ss} = A_{ss} \left( \frac{T_s}{2} - d'_s \right)^2 \dots\dots\dots (12f)$$

$E_c$ ; 鐵筋콘크리트의 彈性係數

$\lambda$ ; 常數

3. 塔體의 最適化를 위한 問題의 形成

塔體의 形態는 Fig. 1과 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 하였다.

가. 目的函數

塔體의 目的函數는 다음과 같이 誘導된다.

$$F_2 = \pi \{ 0.5 [(R_{tw} + T_1)^2 + (R_{tw} + T_2)^2 - R_{tw}^2] H_t C_c + 0.5 (A_1 + A_1' + A_2 + A_2') H_t C_s + \pi (4 R_{tw} + T_1 + T_2) H_t C_f \dots\dots\dots (13)$$

나. 制約條件式

塔體를 設計하는데 考慮되어야 할 制約條件式을 強度設計法을 適用하여 誘導하면 다음과 같다.

1) 軸方向力과 彎모멘트에 의하여 發生되는 콘크리트의 壓縮應力에 대한 制約條件式

$$(G_s)_7, (G_s)_8 = \frac{1.5 (DL_t)_i + 1.8 (LL_t)_i}{(A_{tt})_i} \dots\dots\dots$$

$$+ \frac{1.5 M_t (R_{to})_i}{(I_{tt})_i} - \sigma_{c, vert} \leq 0 \dots\dots\dots (14)$$

$i = 1, 2$

여기서

$(DL_t)_i$ ; 塔體의 i-i 斷面에 作用하는 總死荷重

$(LL_t)_i$ ; 塔體의 i-i 斷面에 作用하는 總活荷重

$$(A_{tt})_i = (A_{tc})_i + (2n-1) (A_t + A_t') \dots\dots\dots (14a)$$

$$(A_{tc})_i = \pi [(R_{tw} + T_i)^2 - R_{tw}^2] \dots\dots\dots (14b)$$

$M_t$ ; i-i 斷面에 作用하는 彎모멘트

$$(R_{to})_i = R_{tw} + T_i \dots\dots\dots (14c)$$

$$(I_{tt})_i = (I_{tc})_i + 2n (I_{ts})_i \dots\dots\dots (14d)$$

$$(I_{tc})_i = \frac{\pi}{4} [(R_{tw} + T_i)^4 - R_{tw}^4] \dots\dots\dots (14e)$$

$$(I_{ts})_i = A_t S_i^2 + A_t' S_i'^2 \dots\dots\dots (14f)$$

$$S_i = 0.5 (R_{tw} + T_i - d_i) \left( 1 + \frac{2\pi}{(N_o)_i} \right) \dots\dots\dots (14g)$$

$$S_i' = 0.5 (R_{tw} + d_i') \left( 1 + \frac{2\pi}{(N_w)_i} \right) \dots\dots\dots (14h)$$

$(N_o)_i$ ; i-i 斷面の 外側 鐵筋個數

$(N_w)_i$ ; i-i 斷面の 內側 鐵筋個數

$$\sigma_{c, vert} = 0.55 \phi \sigma_{ck}$$

$\phi$ ; 減少係數 (= 0.7)

2) 軸方向力과 彎모멘트에 의하여 發生되는 鐵筋의 引張應力에 대한 制約條件式

$$(G_s)_9, (G_s)_{10} = \frac{1.5 M_t (R_{to})_i}{(I_{tt})_i} - \frac{1.5 (DL_t)_i + 1.8 (LL_t)_i}{(A_{tt})_i} - \sigma_{y, vert} \leq 0 \dots\dots\dots (15)$$

$i = 1, 2$

여기서

$$\sigma_{y, vert} = [(P_{to})_i + (P_{tw})_i] \cdot \phi \sigma_y \dots\dots\dots (15a)$$

$$(P_{to})_i = \frac{A_t}{\pi [(R_{tw} + T_i)^2 - R_{tw}^2]} \dots\dots\dots (15b)$$

$$(P_{tw})_i = \frac{A_t'}{\pi [(R_{tw} + T_i)^2 - R_{tw}^2]} \dots\dots\dots (15c)$$

$\phi = 0.9$

3) 水壓에 의하여 콘크리트에 作用하는 水平方

向의 壓縮力에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{11}, (G_s)_{12} = (H_t, act)_i - (H_t, acs)_i \leq 0 \dots\dots\dots(16)$$

$i=1, 2$

여기서

$$(H_t, act)_i = \frac{3(P_n)_i (R_{to})_i^2 T_i}{(R_{to})_i^2 - R_{tw}^2} \dots\dots\dots(16a)$$

$$(H_t, acs)_i = 0.55 \phi \sigma_{ck} T_i \dots\dots\dots(16b)$$

$(P_n)_i$ ;  $i$ - $i$ 斷面에서의 水壓強度

$\phi=0.7$

4) 垂直方向의 壓縮力에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{13}, (G_s)_{14} = (V_t, act)_i - (V_t, acs)_i \leq 0 \dots\dots\dots(17)$$

$i=1, 2$

여기서

$$(V_t, act)_i = 1.5(DL_t)_i + 1.8(LL_t)_i \dots\dots\dots(17a)$$

$$(V_t, acs)_i = 0.55 \phi \sigma_{ck} (A_{tc})_i \dots\dots\dots(17b)$$

$\phi = 0.7$

5) 鐵筋比에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{15}, (G_s)_{16} = P_{tmo} - (P_{to})_i \leq 0 \dots\dots\dots(18)$$

$$(G_s)_{17}, (G_s)_{18} = P_{tmw} - (P_{tw})_i \leq 0 \dots\dots\dots(19)$$

$i=1, 2$

여기서

$P_{tmo}$ ; 示方書에 規定된 圓形壁體의 最小 外部 鐵筋比

$P_{tmw}$ ; 示方書에 規定된 圓形壁體의 最小 内部 鐵筋比

6) 最小壁두께에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{19}, (G_s)_{20} = T_{t, min} - T_i \leq 0 \dots\dots\dots(20)$$

$i=1, 2$

여기서

$T_{t, min}$ ; 示方書에 規定된 圓形壁體의 最小 두께

7) 偏心距離에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{21}, (G_s)_{22} = \frac{M_i}{(N_t)_i} - (R_{tw} + T_i) \leq 0 \dots\dots\dots(21)$$

$i=1, 2$

여기서

$(N_t)_i$ ;  $i$ - $i$ 斷面에 作用하는 軸方向力

8) 龜裂에 대한 制約條件式

물속에 잠겨 있는 鐵筋콘크리트 構造物의 許容 龜裂幅은 CEB-FIB 國際指針과 ACI Committee 224에서 0.1mm以下로 規定하고 있다<sup>25)</sup>.

龜裂幅을 計算하는 式은 Beeby, Gergely-Lutz, 森田, 角田 等の 實驗式이 있는데 森田의 實驗式을 使用하여 制約條件式을 誘導하면 다음과 같다.

鐵筋位置에서 平均 龜裂幅을 구하는 森田의 實驗式은 式(22)와 같다<sup>25)</sup>.

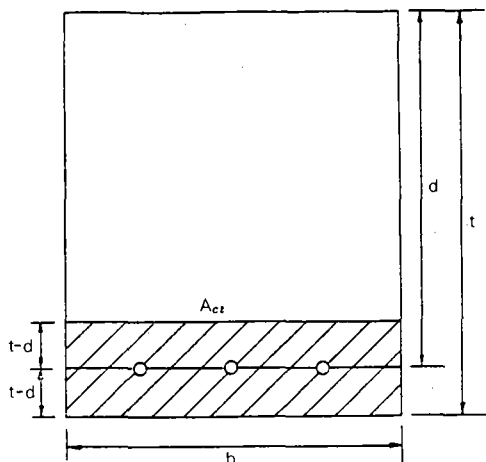


Fig.3. Tensile Effective Area of Concrete

$$w_{av} = \left( 4.36 + 0.137 \frac{A_{ct}}{m} \right) \left( \frac{\sigma_{s, max} - k_1 k_2 \sigma_{tu} / P_e}{E_s} - \frac{k_1 k_2 \sigma_{tu}}{E_s} \right) \dots\dots\dots(22)$$

여기서

$w_{av}$ ; 콘크리트의 平均 균열폭

$w_{max}$ ; 콘크리트의 最大 균열폭 (=1.5 $w_{av}$ )

$m$ ; 單位幅當 鐵筋個數

$A_{ct}$ ; 引張有效 斷面積

$A_{st}$ ; 鐵筋의 引張側 總斷面積

$k_1 k_2 = 0.4 \sim 0.5$ ; 附着 및 引張應力의 分布를 表示하는 係數

$\sigma_{tu}$ ; 콘크리트의 引張強度

$E_s$ ; 鐵筋의 彈性係數

$E_c$  ; 콘크리트의 彈性係數

$\sigma_{s,max}$ ; 鐵筋에 發生하는 應力

$$P_e = \frac{A_{st}}{A_{ct}}$$

式 (22)를  $\sigma_{s,max}$ 에 대해서 풀면 最大 龜裂  $w_{max}$ 을 規定한 경우의 鐵筋의 許容應力度  $f_s$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_s = \sigma_{s,max} = \left( \frac{w_{max}}{6.54 + 0.2055 \frac{A_{ct}}{m}} + \frac{k_1 k_2 \sigma_{tu}}{E_c} \right) E_s + k_1 k_2 \frac{\sigma_{tu}}{P_e} \dots \dots \dots (22a)$$

本 研究의 設計對象 構造物인 取水塔의 경우를 式 (22)에 適用하기 위한 model은 Fig. 4와 같다.

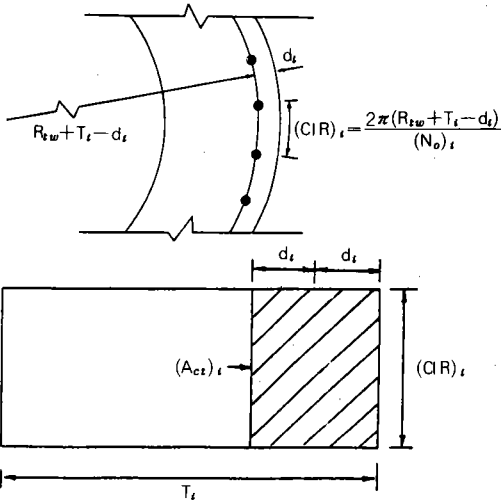


Fig. 4. Model of Intake Tower for the Calculation of Crack Width.

Fig. 4를 基礎로 龜裂에 대한 制約條件式을 誘導하면 다음과 같다.

$$(G_s)_{23}, (G_s)_{24} = \sigma_{x,vert} - (f_s)_i \leq 0 \dots \dots \dots (23)$$

$i = 1, 2$

여기서

$$(f_s)_i = \left( \frac{w_{max}}{6.54 + 0.2055 \frac{(A_{ct})_i}{(m)_i}} + \frac{k_1 k_2 \sigma_{tu}}{E_c} \right) E_s + k_1 k_2 \frac{\sigma_{tu}}{(P_e)_i} \dots \dots \dots (23a)$$

#### 4. 底版의 最適化를 위한 問題의 形成

底版의 形態는 Fig. 5와 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 원둘레 方向으로 單位길이당의 斷面에 配筋된 鐵筋斷面積 ( $A_{s,f}$ )으로 하였다.

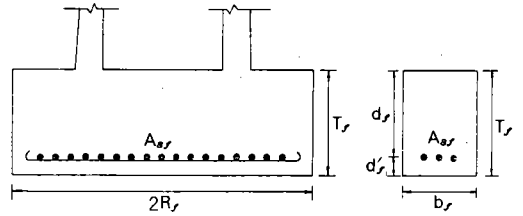


Fig. 5. Design Variables in Footing.

#### 가. 目的函數

Fig. 5와 같은 底版의 目的函數는 다음과 같이 誘導된다.

$$F_s = \pi R_f^2 T_f C_c + 2\pi (R_{tw} + T_2) A_{s,f} R_f C_s + 2\pi R_f T_f C_f \dots \dots \dots (24)$$

#### 나. 制約條件式

1) 顛倒에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{25} = 1.5 - \frac{M_{res}}{M_{out}} \leq 0 \dots \dots \dots (25)$$

여기서

$M_{res}$  ; 抵抗모멘트

$M_{out}$  ; 顛倒모멘트

2) 滑動에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{26} = 1.5 - \frac{F_f}{F_h} \leq 0 \dots \dots \dots (26)$$

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 加해지는 總垂直力

$f$  ; 底版과 岩盤사이의 摩擦係數

3) 沈下에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{27} = \frac{W_f}{A_f} + \frac{M_{out}}{Z_f} - \sigma_{fa} \leq 0 \dots \dots \dots (27)$$

여기서

$$A_f = \pi R_f^2$$

$$Z_f = \frac{\pi}{4} R_f^3$$

$\sigma_{ra}$  ; 콘크리트의 許容壓縮應力과 地盤의 許容支持力中 작은값

4) 剪斷에 대한 制約條件式

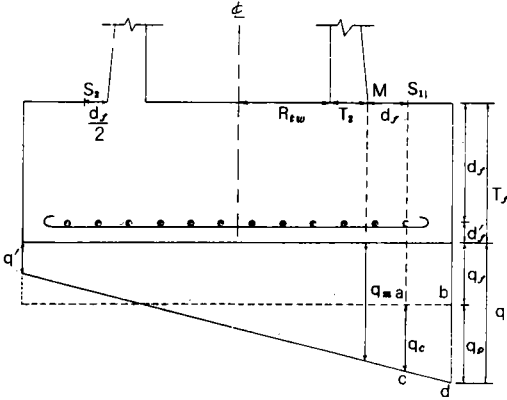


Fig. 6. Model of Footing for Calculation of Shearing Force and Bending Moment.

가) 擴大基礎를 幅이 넓은 보와 같이 생각하고 斜引張균열이 全幅에 걸쳐 일어난다고 생각하는 경우

$$(G_s)_{28} = S_{fw, act} - S_{fw, dss} \leq 0 \dots\dots\dots (28)$$

여기서  $S_{fw, act}$ 는 Fig. 6을 參考로 하여 計算하면 다음과 같다.

$$S_{fw, act} = \frac{1.5(q_c + q_p)}{2} \times (R_f - R_{tw} - T_2 - d_f) \dots\dots\dots (28a)$$

$S_{fw, dss}$ 는 示方書에 의하면 다음과 같다.

$$S_{fw, dss} = 0.4505 d_f \sqrt{\sigma_{ck}} \dots\dots\dots (28b)$$

나) 斜引張 均열이 集中荷重 또는 反力의 周圍에서 載頭圓錐形으로 일어난다고 생각하는 경우

$$(G_s)_{29} = S_{fp, act} - S_{fp, dss} \leq 0 \dots\dots\dots (29)$$

여기서

$$S_{fp, act} = 1.5DL_f + 1.8LL_f \dots\dots\dots (29a)$$

$DL_f$  ; 底版에 剪斷力으로 作用하는 死荷重

$LL_f$  ; 底版에 剪斷力으로 作用하는 活荷重

$$S_{fp, dss} = 1.1\phi \sqrt{\sigma_{ck}} b_p d_f \dots\dots\dots (29b)$$

$$b_p = 2\pi \left( R_{tw} + T_2 + \frac{d_f}{2} \right) \dots\dots\dots (29c)$$

$$\phi = 0.85$$

5) 彎모멘트에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{30} = M_{f, act} - M_{f, dms} \leq 0 \dots\dots\dots (30)$$

여기서

$$M_{f, act} = 1.5M_f$$

$$M_f = \frac{(R_f - R_{tw} - T_2)^2}{6} (2q - 2p_{h,f} + q_m) \dots\dots\dots (30a)$$

$P_{h,f}$ ; 底版의 上面에 作用하는 水壓強度

$$M_{f, dms} = \phi p_f b_f d_f^2 \sigma_y \left( 1 - 0.59p_f \frac{\sigma_y}{\sigma_{ck}} \right) \dots\dots\dots (30b)$$

$$p_f = \frac{A_{s,f}}{b_f d_f} \dots\dots\dots (30c)$$

$$\phi = 0.85$$

6) 擴大基礎의 最少두께에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{31} = T_{f, min} - T_f \leq 0 \dots\dots\dots (31)$$

여기서

$T_{f, min}$ ; 示方書에 規定된 擴大基礎의 最小두께

7) 最少鐵筋比에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{32} = P_{f, min} - \frac{A_{s,f}}{b_f d_f} \leq 0 \dots\dots\dots (32)$$

여기서

$P_{f, min}$ ; 示方書에 規定된 擴大基礎의 最少鐵筋比

8) 最大 鐵筋比에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{33} = \frac{A_{s,f}}{b_f d_f} - 0.75 P_b \leq 0 \dots\dots\dots (33)$$

여기서  $P_b$ 는 式 (10a)에 의하여 구한다.

9) 偏心距離에 대한 制約條件式

$$(G_s)_{34} = \frac{M_{out}}{W_f} - \frac{R_f}{4} \leq 0 \dots\dots\dots (34)$$

### IV. 最適化 알고리즘

앞으로 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을 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.

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  $\{X_i^*\}$ 를 구한다.

6. 反復回數  $(i-1)$ 번째와  $i$ 번째의 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  $\{X_{i+1}\}$ 로부터 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.

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

### V. 適用例

본 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.

$R_{so} = 4.65\text{m}$     $R_{sw} = 2.5\text{m}$     $R_{sh} = 0.45\text{m}$   
 $R_{tw} = 2.5\text{m}$     $H_t = 21.0\text{m}$     $H_r = 19.5\text{m}$   
 $T_r = 0.20\text{m}$     $T_o = 4.50\text{m}$

#### 1. 設計條件

본 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

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

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

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

$\sigma_y = 2,400\text{kg/cm}^2$

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

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

#### 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  $\phi = 120\text{cm}$ ; 1,000kg/m

### VI. 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를 遂行하는데는 強度設計法을 適用하면서 構造物을 全體의으로 設計하는 경우 (USENT)와 強度設計法을 適用하면서 部分構造로 나누어서 設計하는 경우 (USSUB)

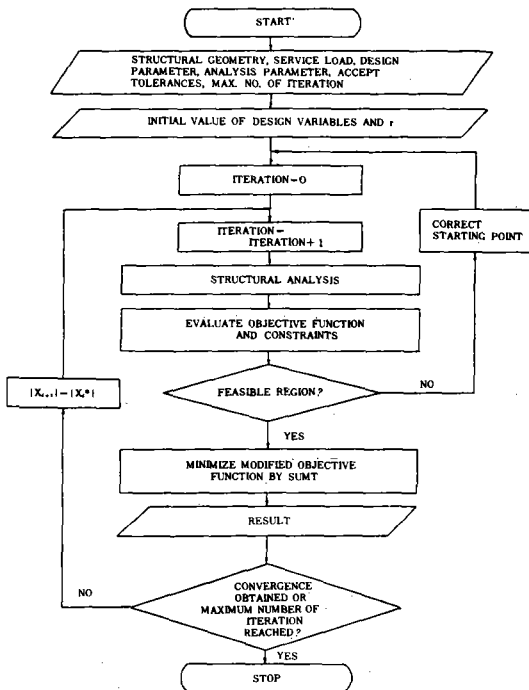


Fig. 7. Flow Chart of Optimization Procedure.

Table-1. Results of Optimum Design.

Case	Substructure Design Variables	Slab				Tower Body				Footing			Objective Function (won)
		$T_s$	$A_{ss}$	$T_1$	$T_1'$	$A_1$	$A_1'$	$A_2$	$A_2'$	$T_f$	$A_{sf}$	$R_f$	
	Iteration No.	(m)	( $m^2$ )	(m)	(m)	( $m^2$ )	( $m^2$ )	( $m^2$ )	( $m^2$ )	(m)	( $m^2$ )	(m)	
USSUB	Initial Value	0.3000	0.001200	0.7500	0.9500	0.0260	0.0200	0.0340	0.0240	1.0000	0.002500	6.0000	22,690,570
	1	0.2021	0.001539	0.7046	0.8707	0.0200	0.0138	0.0241	0.0181	0.5445	0.001956	4.3473	18,072,711
	2	0.2018	0.001542	0.7047	0.8707	0.0201	0.0138	0.0241	0.0181	0.5445	0.001956	4.3473	18,072,306
	3	0.2015	0.001545	0.7047	0.8707	0.0201	0.0138	0.0241	0.0181	0.5442	0.001959	4.3476	18,071,833
	4	0.2012	0.001548	0.7047	0.8707	0.0201	0.0138	0.0241	0.0181	0.5439	0.001960	4.3476	18,070,997
	5	0.2009	0.001551	0.7047	0.8707	0.0201	0.0138	0.0241	0.0181	0.5437	0.001960	4.3476	18,070,134
	Optimum Value	0.2009	0.001551	0.7047	0.8707	0.0201	0.0138	0.0241	0.0181	0.5437	0.001960	4.3473	18,070,134
USENT	Initial Value	0.2600	0.001300	0.8250	0.9750	0.0270	0.0210	0.0370	0.0240	1.4000	0.00315	4.7500	23,217,285
	1	0.1910	0.001670	0.8358	1.0079	0.0274	0.0213	0.0384	0.0249	0.7558	0.001858	4.7630	21,547,499
	2	0.1910	0.001670	0.8379	0.9719	0.0253	0.0176	0.0274	0.0205	0.4830	0.001677	4.2588	20,027,072
	3	0.1910	0.001670	0.8379	0.9719	0.0253	0.0176	0.0274	0.0205	0.4830	0.001677	4.2588	20,027,059
	4	0.1910	0.001670	0.8379	0.9719	0.0253	0.0176	0.0274	0.0205	0.4830	0.001677	4.2588	20,027,063
	5	0.1910	0.001670	0.8379	0.9719	0.0253	0.0176	0.0274	0.0205	0.4830	0.001677	4.2588	20,027,066
	Optimum Value	0.1910	0.001670	0.8379	0.9719	0.0253	0.0176	0.0274	0.0205	0.4830	0.001677	4.2588	20,027,066

의 두가지 方法을 使用하였다.

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

2. 考 察

가. 收斂性

形成된 貯水池 取水塔의 最適設計 問題를 本 研究에서 開發된 알고리즘에 의하여 最適解를 구 해본 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 그림에 나타난 바와 같이 各 경우 모두 1 ~2回 以內에 Oscillation 現象없이 最適解에 收

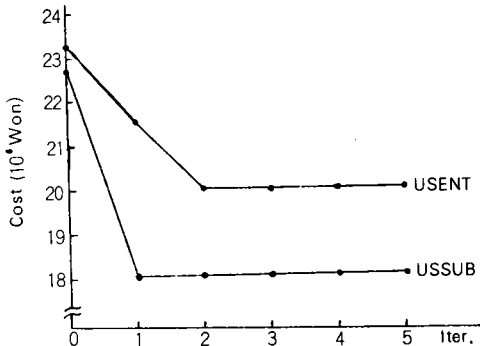


Fig. 8. Convergence Behavior of Objective Function.

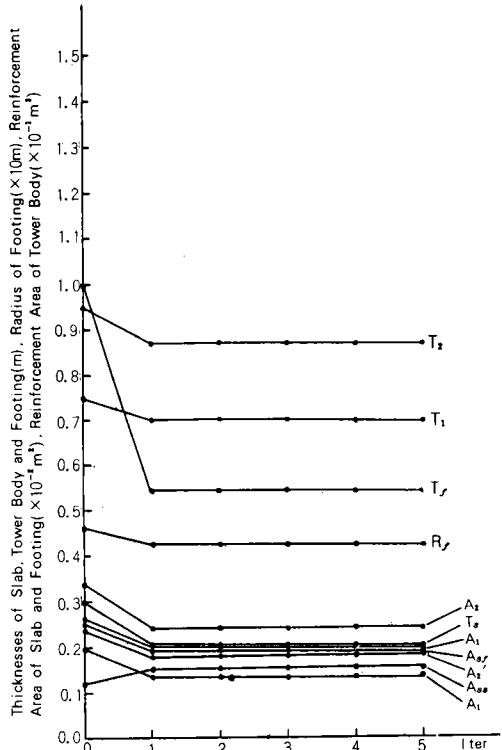


Fig. 9. Iteration History of Design Variables in the Case of USSUB.

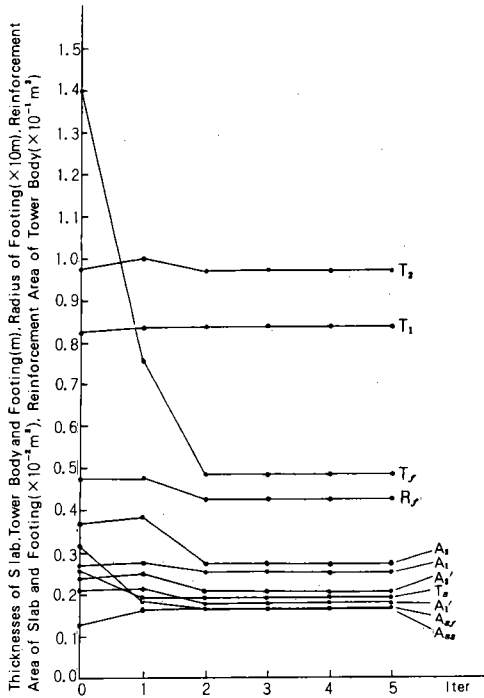


Fig. 10. Iteration History of Design Variables in the Case of USENT.

歛하고 있다.

그러므로 본 研究에서 開發한 알고리즘은 效率의이고 安定된 最適化 技法으로 判斷된다.

나. 適用可能性

지금까지 大部分의 最適設計 研究에서는 適用對象 構造物을 他研究에서 다른 方法으로 最適設計가 遂行된 構造物을 選定하였기 때문에 他研究의 結果와 比較하여 適用可能性을 判斷하였다.

그러나 本 研究에서 適用例로 擇한 貯水池 取水塔과 같은 複構造物의 最適設計例는 國內外를 莫論하고 찾아볼 수 없었으므로 얻어진 最適設計 結果值에 대하여 筆算에 의하여 確認하는 方法으로 適用可能性을 檢討하였다.

그 結果 모두 適用可能한 것으로 判斷되었다.

그러므로 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. 各 設計方法間의 比較

第 1報에서 報告한 許容應力設計法을 適用한 경우와 強度設計法을 適用한 경우에 대하여 建設 經費를 比較해 보면 Table- 2와 같다.

Table- 2에 나타난 바와 같이 部分構造로 나누어서 設計하는 경우나 全體적으로 設計하는 경우 모두가 強度設計法이 許容應力 設計法에 比하여 約 91%의 經費로 建設될 수 있는 것으로 나타났다.

이는 設計 理論上 當然한 結果이며 이러한 事實로 미루어 보아도 이 研究에서 開發된 알고리즘이 妥當성이 있음을 確認할 수 있었다.

Table-2. Comparison of Construction Cost between Working Stress Design Method and Strength Design Method.

Design Method	① Working Stress Design Method (won)	② Strength Design Method (won)	②/① × 100 (%)
With Substructure	19,842,791	18,070,134	91.07
With Entire Structure	21,911,048	20,027,066	91.40
Mean	20,876,919.5	19,048,600	91.24

한편 構造物의 舉動은 全體적으로 일어나기 때문에 全體적으로 設計하는 것이 原則이지만 全體적으로 設計할 경우에는 設計變數가 많아 初期值를 選定하는데 어려움이 많을 뿐 아니라 收斂하는데 상당히 時間이 많이 걸리는 問題點이 있다. 그러나, 部分構造로 나누어서 設計하면 設計變數가 줄어들기 때문에 各 設計變數의 初期值를 假定하기가 쉽고 또 初期值의 크고 작음에 별 關係없이 빠른 時間內에 거의 같은 값으로 收斂하게 되어 대단히 便利하다. 그런데 部分構造로 나누어서 設計하는 경우와 全體적으로 設計하는 경우를 比較해 보면 Table-3에서 보는 바와 같이 部分構造로 나누어서 設計하는 경우가 全體적으로 設計

Table-3. Comparison of Construction Cost between Optimum Design with Substructure and with Entire Structure.

Optimization Method	① With Entire Structure (won)	② With Substructure (won)	②/① × 100 (%)
Working Stress Design Method	21,911,048	19,842,791	90.56
Strength Design Method	20,027,066	18,070,134	90.23
Mean	20,969,057	18,956,462.5	90.40

하는 경우의 약 91%가 되어 약 9% 정도의 差異가 있을 뿐이다. 이와같은 差異는 部分構造로 나누어서 設計하는 경우 境界에서의 剛性이 실제보다 크게 計算되었기 때문인 것으로 判斷된다. 이 정도의 差異라면 實際設計에서 별 問題가 없을 것으로 思料되므로 실제 最適設計過程에서 部分構造로 나누어 設計하는 方法을 추천할 수 있을 것으로 思料된다.

#### 라. 主制約 條件

強度設計法을 適用한 경우 主制約條件은 슬래브의 경우 最大 휨모멘트에 대한 制約條件이고 塔體에서는 縱方向 最小 鐵筋比에 대한 制約條件이며 基礎에서는 剪斷力, 휨모멘트 및 偏心距離에 대한 制約條件이었다.

따라서 取水塔의 最適設計에서는 이들 主制約條件이 周到綿密하게 檢討되어야 할 것으로 思料된다.

### VII. 結 論

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 殼構造로 이루어진 貯水池 取水塔을 設計함에 있어서 強度設計法에 의한 設計가 自動적으로 遂行되는 效率적인 最適化 알고리즘이 開發되었다.

2. 目的函數나 各 設計變數의 反復回數에 따른 收斂特性은 거의 2회 以內에 最適值에 收斂하였으므로 本 研究에서 開發된 알고리즘은 效率적이고 安定된 最適化 技法인 것으로 判斷된다.

3. 強度設計法을 適用하면 許容應力設計法을 適用한 경우에 비하여 建設經費를 9% 정도 節減할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 部分構造로 나누어서 最適設計를 遂行하는 경우와 全體적으로 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 便利할 것으로 思料된다.

5. 強度設計法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 휨모멘트에 대한 制約條件이고 塔體는 縱方向 最小鐵筋比에 대한 制約條件이며 底版의 경우는 剪斷力, 휨모멘트, 偏心距離에 대한 制約條件인 것으로 나타났다.

6. 貯水池 取水塔을 強度設計法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 구할 수 있는 컴퓨터 프로그램이 開發되었다.

### 參 考 文 獻

1. ACI Committee 313, Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Bins, Silos, and Bunkers for Storing Granular Materials (ACI 313-77) Revised 1983, American Concrete Institute, Detroit, 1983.
2. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), American Concrete Institute, Detroit, 1983.
3. Adiam, 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.
4. 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.
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. Gunaratnam, D. J., and N. S. Sivakumaran, "Optimum Design of Reinforced Concrete Slabs", The Structural Engineer, Vol. 56B, No. 3, Sep., 1978, pp. 61-67.
8. Kirsch, U., Optimum Structural Design, McGraw-Hill Book Co., 1981.
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. Safarian, S. S., and E. C. Harris, Design and Construction of Silos and Bunkers, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985.
12. Sandhu, B. S., "Economical Design of Reinforced Concrete Slabs and Walls", Engineers note Book, Civil Engineering, ASCE, July, 1971, pp. 68-69.
13. 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.
14. Singh, K. K., and P. K. Swamee, "Optimum Proportions of Cylindrical Steel Water Tanks", Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 106, No. ST 5, May, 1980, pp. 1193-1197.
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. Thevendran, V., "Minimum Weight Design of a Spherical Shell Under a Concentrated Load at the Apex", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 18, No. 7, 1982, pp. 1091-1111.
17. Timoshenko, S., and S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959.
18. 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大學校 農科大學 農業開發研究所, 1986.
19. 國立建設研究所, 콘크리트 標準示方書, 建設部, 1982.
20. 金勇熙, 슬래브를 고려한 뼈대 構造物의 限界狀態 最適設計에 관한 研究, 東亞大學校 大學院 博士學位 論文, 1984.
21. 金鍾玉, 鐵筋콘크리트 圓筒形 쉘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.
22. 대한농업토목학회, 토지개량사업 계획설계기준 필립편, 농림부, pp. 224~245.
23. 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.
24. 이규원, 평면트러스 구조물의 형상 최적화에 관한 연구, 연세대학교 대학원 박사학위 논문, 1980.
25. 日本建築學會編, 韓吉萬譯, 鐵筋콘크리트 煙突의 構造設計 指針, 도서출판 사론, 1986.
26. 鄭榮采, 李奎遠, "SUMT法을 利用한 鐵筋콘크리트 뼈대 構造物의 最適設計에 관한 研究", 大韓土木學會誌, 第4卷, 第1號, 1984. pp. 27~48.
27. 鄭哲源, SUMT法에 의한 鐵筋콘크리트 部材斷面의 最適化에 관한 研究, 朝鮮大學校 大學院 博士學位 論文, 1977.