

逆T字型基礎の最適設計に関する一考察

東電設計(株) 松島 学^{*1}
東京電機大学 松井 邦人^{*2}, 高久 利明^{*3}
田村 雅彦^{*3}

1. はじめに 構造物の最適設計に関する研究は、我が国よりも欧米諸国において精力的に行われていた。しかし、この分野の研究は、最適化アルゴリズムの開発に重点が置かれており、その結果、特に土木分野では実務面への応用とはあまりにも遊離したものになっている。本研究は、最適化の概念を土木構造物へ応用する立場から比較的簡単な構造物である逆T字型基礎を選択して、その概略設計を試みた。基礎は2層地盤に築造され、圧縮力、引張力及び水平力の各外力を受けるとし、引きぬき耐力、圧縮耐力、許容水平変位に耐えるような最適構造形状を決定する。最適化のアプローチは、応答形式で行い、与えられた尺度で、i) 最も良い解を見つける。ii) 最も良い解から順に複数の解を求めることが可能である。特にii)のアプローチは、設計者が工学的判断を加え設計形状を決定することが可能であり、有効な方法である。また、熟練した技術者には自分の経験的判断の検証になり、未熟な技術者には、その構造物の特性を学習するのに役立つであろう。

2. 逆T字型基礎の設計変数 図1に逆T字型基礎の概略形状を示す。ただし、床版形状は正方形とする。図にみられるように、逆T字型基礎は、浅型基礎として用いられるので、一般に地盤モデルは、2層もしくは1層を考慮せば、設計では十分である。設計で最適解を求める場合、最適解のパラメータとなる設計変数とそれに従属する変数及び、設計条件(一義的に決定される値)があり、逆T字型基礎も同様に区分すると

a. 最適解を求める設計変数

- i. 根入れ深さ Df^*
- ii. 床版幅 B^*

b. 設計変数に依属する変数

- i. 柱体下部寸法 $b^* = \max(a^* + 0.15h^*, B^*/4)$
- ii. 床版厚 $t^* = B^*/5$
- iii. 柱体部高さ $h^* = Df^* - t^* + f^*$

c. 設計条件(入力条件として、一義的に与えられる値)

- i. 荷重 Q^*, T^*, C^*
- ii. 一部形状寸法 a^*, f^*
- iii. 地盤条件 $C_1^*, \phi_1^*, E_1^*, \delta_1^*, l_1^*, C_2^*, \phi_2^*, E_2^*, \delta_2^*$

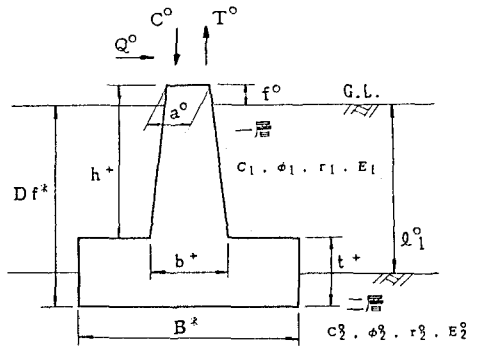


図1 逆T字型基礎形状と設計変数

となる。

図中には、最適解の設計変数には*印を、それに従属する設計変数には+印を、入力条件として与えられる値は。印で示してある。よって、最適解を求めるための値は、 Df^* 及び B^* の2つの変数を求めればよいことになる。

3. 設計での制約条件と目的関数

本設計で対象としている基礎体は、圧縮力、引張力及び水平力を受けるため、それ等の荷重に対して安全で、かつ後述する最適性の尺度を最小とするものが最適案として採択される。安全に対する照査は、圧縮支持力、引張支持力及び許容水平変位とする。

(a) 圧縮支持力に関する制約

降伏圧縮支持力はテルツァギーの式を利用し、次式のように表わせる。

$$q_{cr} = \{ \alpha C_2 N_c + \beta \sigma_2 B N_r + \gamma \sigma_2 D_f N_\gamma \} / 1.5 \quad (1)$$

*1, 工学, 送電土木設計部, 主任; *2, Ph.D., 理工学部建設工学科, 教授; *3, 同, 学生

ここで、 $\alpha = 1.3$ 、 $\beta = 0.4$ 、 C_2 : 基礎の粘着力、 ϕ_2 : 基礎の内部摩擦角、 N_c 、 N_r 、 N_b ; ϕ_2 の内部摩擦角で与えられる定数である。底面に生ずる持地圧 σ_{max} は、水平力が加わることも考慮して、次式で表わされる。

$$\sigma_{max} = \mu P / B^2 \quad (2)$$

ここで、 $\mu = 1 + 6e/B$ ($e \leq B/6$) または、 $\mu = 2 / (3 (1/2 - e/B))$ ($e \geq B/6$)

$e = Q(H+t)/P$, $P = C + W_c + W_s$, W_s : 基礎体上の土塊重量、 W_c : 基礎体重量

今、安全率を W_s, W_c については1.0とし、地盤の持つ抵抗力に対しては、 $F_c = 3.0$ とすると、圧縮支持力に関する制約式は次のようになる。

$$g_1(Df, B) = \{ \alpha C N_c + \beta r B N_r + r Df N_b \} / 1.5 - F_c (C/B^2) \mu - (W_c + W_s) \mu / B^2 \geq 0 \quad (3)$$

(b) 引揚支持力に関する制約 引揚支持力の計算式は、鉛直にすべり面が生じると考えたせん断法¹⁾を利用することとする。引揚支持力は次式で表わされる。

$$P_u = 4 B Df \zeta_u \quad (4)$$

ここで、 $\zeta_u = C_1 / 1.5 + Df / 2 \cdot K_0 r \tan \phi_1$; $K_0 = 0.5$ である。

さらに、水平力が加わり、 F ことによる引揚支持力の低減率 k ²⁾は、

$$k = 1 / \{ 6eB / (B^2 + b^2) + 1 \} \quad (5)$$

ここで、 $e = Q(h+t) / (T - W_c - W_s)$

となり、結局、引揚力と水平力が加わり、 F 場合の引揚支持力は、

$$P_u = k P_u \quad (6)$$

となる。引揚支持力に関する制約式としては、安全率を W_s, W_c に対しては1.0とし、地盤抵抗力に対しては、 $F_c = 3.0$ とすると、次式のようなになる。

$$g_2(Df, B) = \{ 4 B Df (C_1 / 1.5 + Df / 2 + r K_0 \tan \phi_1) \} k - (T - W_c - W_s) F_c \geq 0 \quad (7)$$

(c) 水平変位に関する制約 水平変位の計算は、道路橋下部構造による設計方法³⁾を利用し、回転による変位と、移動による変位を合せた変位が許容変位量を満足するかを照査する。

回転による変位は、次式のように表わされる。

$$\delta_\theta = (h+t) \theta \quad (8)$$

$$\theta = M_B / (I_x k_r) \quad (e \leq B/6) \text{ または、 } \theta = M_B / (I k_r) \quad (e \geq B/6)$$

ここで、 $M_B = Q(h+t)$

$$I = B^3 / 12, I_x = \eta I, \eta = (3B - 2x) x^2 / B^3$$

$$x = 3(B/2 - e) \text{ ただし、 } x \leq B$$

$$k_r = \xi E_0 (B_H / 30)^{3/4} / 30, \xi = 1.0, B_H = \sqrt{B x}$$

また、移動による変位は、次式のように表わされる。

$$\delta_h = Q / (k_s x B) \quad (x > B \text{ の時は } x = B) \quad (9)$$

ここで、 $k_s = \lambda k_v$ ($\lambda = 1/3$)

結局、全変位は、次式のようなになる。

$$\delta_T = \delta_\theta + \delta_h \quad (10)$$

安全の照査は、 $\delta_T = 1.0 \text{ cm}$ を満足するものとする。水平変位に関する制約式は、次式のように表わされる。

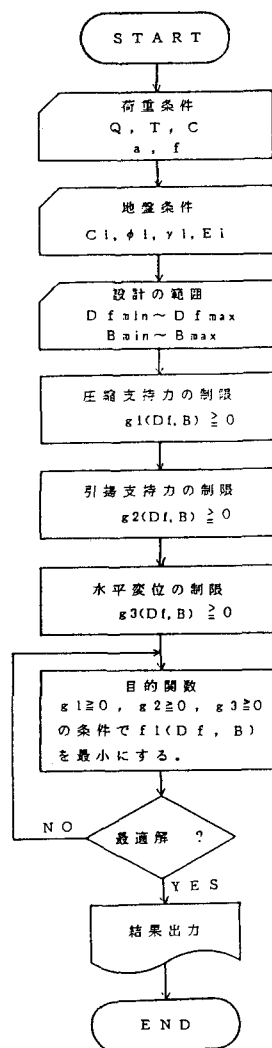


図-2 最適形状を求めるプログラムのフローチャート

$$g_3(Df, B) = \delta_{cr} - (h + t) \theta - Q / (k_s \times B) \geq 0 \quad (11)$$

ただし、式 g_3 は引揚力と水平力、及び圧縮力と水平力の両方の複合荷重のうちで水平変位が大きくなる方を制約式としている。

以上のように各制約式とともに、すべて Df, B がパラメータとなり、各制約式を満足する Df, B が設計条件となり、その中で最適案を決定すればよい。最適案を決定するための目的関数は、①コンクリート量、②掘削量、③支保工量を最小にすることを目的として、次式で表わせる。

$$f_1(Df, B) = \{ B^2 t + (a^2 + a b + b^2) h / 3 \} C_1 + \{ B^2 Df \} C_2 + \{ 4 B Df \} C_3 \quad (12)$$

ここで、 C_1, C_2, C_3 は、コンクリート、掘削、支保工の各工程の単価であり、これらの単価で全建設費を評価できるものとした。また、目的関数も同様に Df, B の関数で表わすことができる。図2に本解析のプログラムのフローを示す。フローにみられるように、 $g_1 \geq 0, g_2 \geq 0, g_3 \geq 0$ の条件を満足し、目的関数 f_1 を最小にする形状が最適設計の解である。

4. 計算例
今まで説明したプログラムを採用して試算を行なった地盤は2層地盤に区分できる地盤で、比較的浅い位置に床付面が表われる直接基礎に適した地盤である。図3にその地盤の概要を示す。計算上問題となるのは、荷重が小さければ、上層地盤に床付した基礎体を設計できるとしても設計者は下層地盤に床付するであろうというこの両者の判断のできることである。また、荷重も圧縮力よりも引揚力が卓越したもののなどのバランスが異なった場合も基礎形状に大きく影響する。表1に試算に用いた荷重の組合せの一覧を示す。また、試算での建設費を算定するにあたり、コンクリートの単価を10万円/m³、掘削単価を20万円/m³、支保工単価を20万円/m²とした。

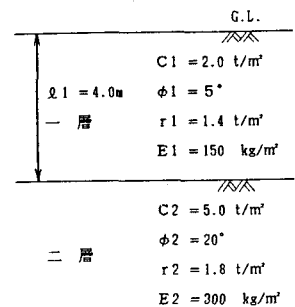


図3 試算の地盤条件

設計の過程をCase Iを例に、図4-a, b, cに示す。まず初めに図4-aにみられるように、設計画面では各制約式により、設計領域が決定される。次に図4-bのように、目的関数のスケールを適当な位置に設定する。そして、目的関数をすこしずつ移動させ、図4-cのように最適解を決定することができる。他のケースを含めて、図5-a, b, cに決定された最適形状のグラフィックスを示す。

最後に、本論文を作成するにあたり、東京電機大学理工学部建設工学科 小林利雄助手に色々と御援助を得たことに對し、ここに謝意を表します。

表1 試算の荷重

	Case I	Case II	Case III	Case IV
圧縮力 C	70 ton	30 ton	200 ton	100 ton
引揚力 T	30 ton	70 ton	100 ton	150 ton
水平力 Q	4 ton	4 ton	10 ton	10 ton
特徴	比較的小さな荷重で、圧縮力の方が引揚力より卓越した荷重。	比較的小さな荷重で、引揚力の方が圧縮力より卓越した荷重。	比較的大きな荷重で、圧縮力の方が引揚力より卓越した荷重。	比較的大きな荷重で、引揚力の方が圧縮力より卓越した荷重。

(参考文献)

- 1) 送電用支持物設計標準 (JEC-127) P.140 電気学会 1979年
- 2) 同上 P.147
- 3) 道路橋示方書・同解説 P.193~P.199 日本道路協会 昭和55年5月

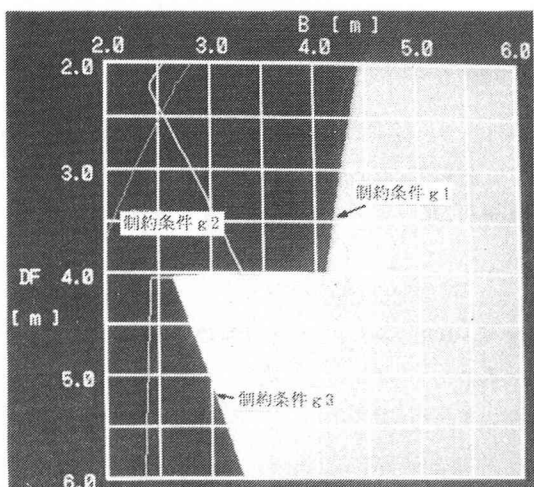


図4-a (設計領域) Case I

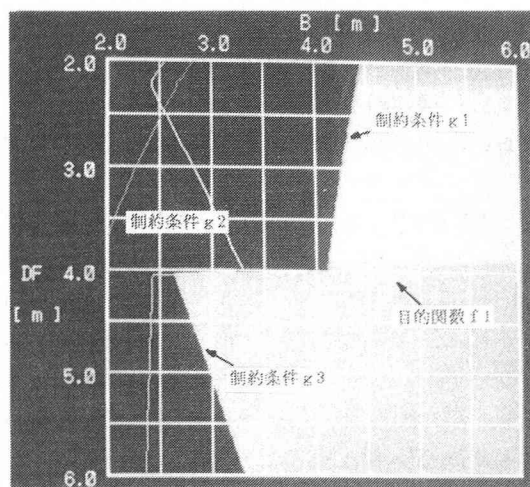


図4-b (目的関数の表示) Case I

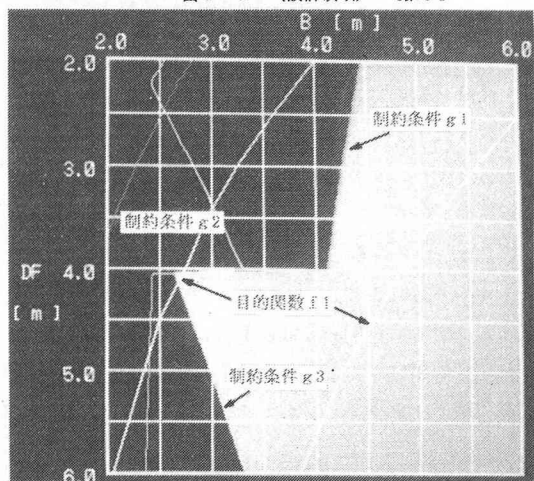


図4-c Case I 最適形状
($B=2.7\text{ m}$, $Df=4.0\text{ m}$, $Copt=1493.34$ 万円)

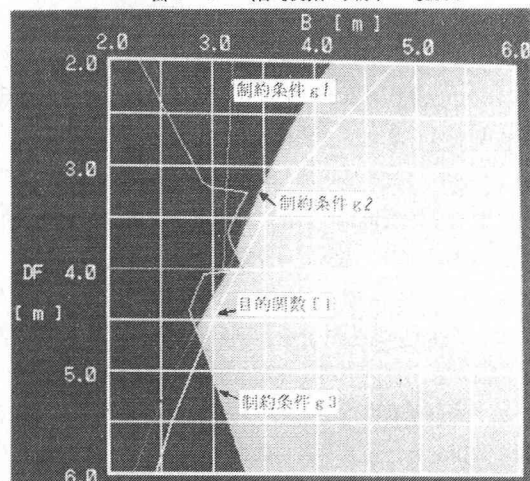


図5-a Case II 最適形状
($B=3.2\text{ m}$, $Df=4.0\text{ m}$, $Copt=1918.04$ 万円)

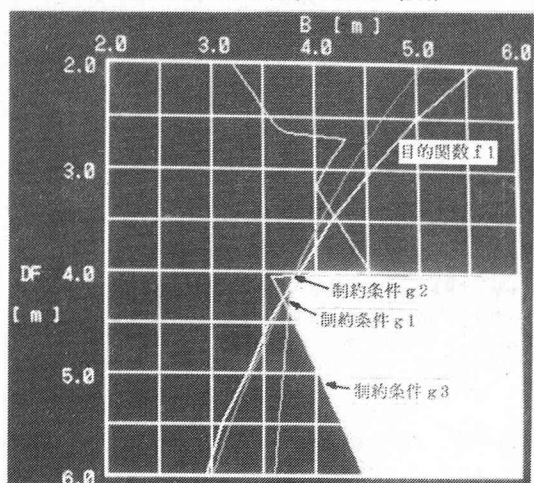


図5-b Case III 最適形状
($B=3.8\text{ m}$, $Df=4.0\text{ m}$, $Copt=2493.7$ 万円)

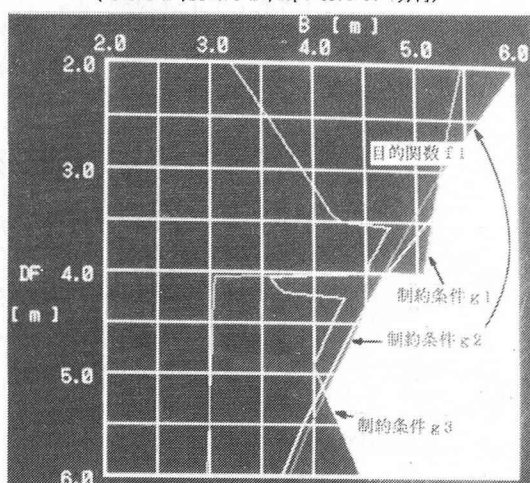


図5-c Case IV 最適形状
($B=4.7\text{ m}$, $Df=4.0\text{ m}$, $Copt=3497.53$ 万円)