

中心軸に関して対称形の剛体基礎底盤の 接地圧分布簡便計算法

植田謙三¹・深川良一²

¹正会員 技術士(建設) 77 測量設計(株) (〒520-0112 滋賀県大津市日吉台二丁目三番一号)

²正会員 工博 立命館大学教授 土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目一番一号)

本論文では、各種構造物に対する基礎構造の合理的な設計を目的として、基礎底面における接地圧分布を簡便に計算する手法を提案している。対象とする基礎は中心軸に関して左右対称で、かつ長方形の組み合わせからなる形状を有するものである。従来法では煩雑な繰り返し計算を必要としていたが、かなり複雑な形状の基礎に対しても簡便に接地圧分布の計算できる手法を提案した。

Key Words: optimum foundation design, eccentric loading, contact pressure, shape factor, irregular contact surface.

1. はじめに

構築物の基礎構造に関しては、上部構造に働く外力の影響により、その基礎底面には偏心荷重が作用する可能性が高い。こうした場合の接地圧分布を求める計算はフーチング底面の形状が複雑になり、また偏心荷重の作用位置が基礎底面の核の外にある場合は、かなり煩雑なものとなる。

以上のような場合に関する従来研究(例えば、大崎、川崎(1956)などが典型¹⁾)は少くはないが、今日では、もっぱら、フーチング底面に作用する鉛直力と曲げモーメントおよびフーチング底面形状を考慮し、また支持地盤を弾性体と考へて力学的なつり合い条件から接地圧分布を推定し、最大接地圧を求める手法が受け継がれている。その手順は、指針²⁾類の中で取り扱われる構造物の具体的な基礎構造を対象とする設計において長年にわたり実用に供されてきている。

しかし、これらの指針は、基礎の幅や長さが任意に変るフーチング底面に偏心荷重が作用し、底面の一部で接地圧がゼロとなる部分を生じる場合の剛体基礎底盤形状に対応する地盤反力の分布を与えていない。このため、支持地盤の性状や強度によって変化させなければならないフーチングの設計の際、あるいは、既存の施設の用途変更による再利用計画に係る増設荷重や耐震上の補強に対して基礎構造を検討する際、実用上きわめて不便となっている。また、結果的に安全性の過大評価につながっている可能性もある。

以上の点に鑑み、本論文では、従来からよく知られている解析法を力学的なベースとし、新たに複雑な形状を有する直接基礎構造の接地圧分布を容易に推定できる設計法を提案した。ここで対象とする基礎は、中心軸に関して左右対称で、かつ任意の大きさの長方形の組み合わせからなる形状を有するものと仮定している。同時に、本論文では提案設計法の実用性を検討するために、実際的な寸法をもつフーチング構造を対象に新しい手法を適用して数値計算を行い、その解析手順をとりまとめて、実務の設計において十分活用できることを示した。

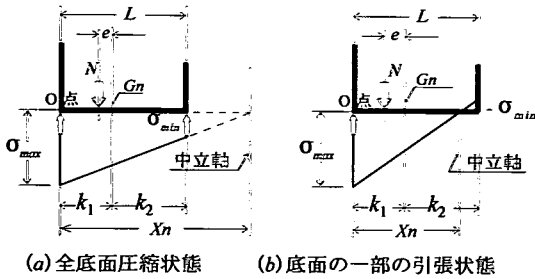
ただし、実際の設計における傾斜荷重(鉛直荷重と水平荷重、場合によってはモーメントが作用する複合条件下の合力)は、通常、鉛直荷重と水平荷重とに分解して扱われるが、ここでは鉛直荷重のみを対象としている。

また、本論文では対象としていないが、与えられた接地圧分布に対する基礎の沈下が問題となる場合は、基礎自体の寸法効果を考慮して地盤の弾性係数あるいは、地盤反力係数を決定し、それに基づいて地盤の変形評価を行う必要がある。

2. 従来の解析手法

(1) 解析の基本的条件

直接基礎の接地圧の解析にあたり、本論文では、従来の煩雑な計算法の改善を目的としたが、地盤構成などのいくつかの条件は現行設計法の枠内の比較的単純な仮定に基づいて設定している。



(a)全底面圧縮状態 (b)底面の一部の引張状態

図-1 梁理論式における接地圧分布

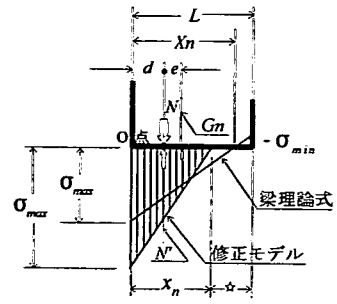


図-2 梁理論式と修正モデルの接地圧分布の関係

本論文が仮定するこれらの基本的条件を示すと、以下のとおりである

- ① 基礎底面に作用する外力は静的に作用するものとする(震度法による地震入力を含む)。
- ② 基礎の底盤は変形を無視して剛体とする。
- ③ 接地圧のうち基礎底面と支持地盤との間では、引張力は作用しないものとする。
- ④ 基礎底面の形状は中心軸に関して左右対称で、かつ鉛直荷重のみ基礎底面に作用することとし、傾斜荷重などは考えないものとする。
- ⑤ 支持地盤は弾性地盤とし、接地圧は直線的に変化し、かつ平面的に分布するものとする。

(2) 接地圧の推定式

一般に、静的状態での接地圧は梁理論により、次の式で表現される。

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} + M \cdot \frac{k_1}{I} \quad (1)$$

$$\sigma_{min} = \frac{N}{A} - M \cdot \frac{k_2}{I} \quad (2)$$

ここに、 σ_{max} ：地盤に生じる最大接地圧、 σ_{min} ：地盤に生じる最小接地圧、 N ：基礎底面に作用する全鉛直荷重、 M ：底面の図心に作用する転倒モーメント $=N \cdot e$ (e ：図心からの偏心距離)、 A ：基礎底面の総面積、 k_1 、 k_2 ：偏心(中心)軸における底面の図心から両縁端までの距離、 I ：底面の断面二次モーメントである。

σ_{min} は、図-1 (a)の全底面圧縮状態(N の作用点が底面の核内)である場合に対して、

$$0 \leq \sigma_{min} \quad (3)$$

一方、図-1 (b)底面の一部が引張状態(N の作用点が底面の核外)である場合に対して、

$$\sigma_{min} < 0 \quad (4)$$

となる。

ここに、図-1の記号はO：圧縮縁端、 L ：偏心方

向における基礎底面の全幅、 Gn ：底面の図心、 Xn ：O点から梁理論式でいう中立軸までの距離である。

梁理論式を単純に応用すると、地盤と底面との間に一般には生じ得ない引張力が、式(4)のように計算上作用して矛盾することとなる。このため、直接基礎の実際の設計では、地盤と接触するフーチングの底面形状を考えた修正モデルを適用し、力とモーメントとのつり合いから接地圧分布を求めている。

修正モデルでは、式(4)のような引張応力状態が現れないと仮定して接地圧分布を推定する。その場合に対するO点から接地圧0の位置までの間隔を x_n と、 Xn と区別する。

梁理論式と、修正モデルの接地圧分布で仮定する応力状態の関係を図-2に示す。いま、図-2で x_n に対応する分布荷重を修正モデルに基づく応力状態で表すと、長方形底盤の場合の最大接地圧は、式(5)、(6)のように非常に簡単になる。

$$x_n = 3d \quad (5)$$

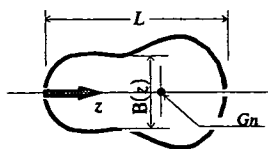
$$\sigma_{max} = 2N' / x_n \quad (6)$$

ここに、 d はO点から全鉛直荷重 N が作用する点までの距離を表し、 N' は全鉛直荷重(N)に対する地盤反力(すなわち、 $N' = N = \sigma_{max} \cdot x_n / 2$)である。また、☆印の部分は底面が地盤から浮上っていて、接地圧がゼロとなる領域を示している。

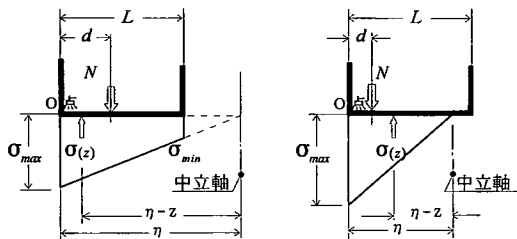
一方、地盤との接触領域の底面形状が複雑になる場合は、次節で述べるような方法³⁾でこの問題が解決されている。したがって、梁理論でいう推定式が単純に適用できるのは、地盤と底面との間に見かけ上の引張力の作用しない式(3)の条件に限られる。

(3) 従来法とその問題

任意の複雑な形状の基礎底面を対象に、つり合い条件で地盤反力を求める場合の手法として、図-3に示すような解法が従来から採用されている。図-3 (a)は、複雑な形状の基礎底面を表している。



(a) 複雑な形状の基礎底面



(b) 台形分布の場合

(c) 三角形分布の場合

図-3 従来解法の地盤反力

図-3 (b) は地盤反力の分布形状が台形の場合、図-3 (c) は三角形分布の場合など単純なケースである。

いま、圧縮縁端O点を原点とするz軸を図-3のように基礎左端よりとる。基礎底面上の着目点までの原点からの距離をzとすると、

$$0 \leq z \leq L \quad (7)$$

である。次に、図-3 (b), (c) のような台形、あるいは三角形の接地圧分布の場合を仮定する。最大接地圧 σ_{max} や底面の接触領域における幾何学的な関係から、着目点での地盤反力 $\sigma(z)$ はつぎの式で表せる。

$$\sigma(z) = \sigma_{max} \cdot (\eta - z) / \eta \quad (8)$$

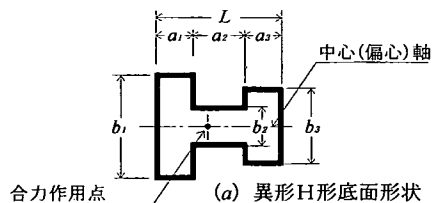
ここに、 η は図-3 (b), (c) に示すO点から中立軸までの距離である。すると、鉛直方向の力のつり合い条件およびモーメントのつり合い条件から、式(9)、(10)が得られる。

$$N = \int_0^{\eta} \sigma(z) \cdot B(z) \, dz \quad (9)$$

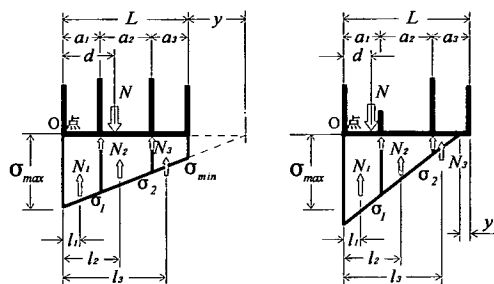
$$N \cdot d = \int_0^{\eta} \sigma(z) \cdot B(z) \cdot z \, dz \quad (10)$$

ここに、 $B(z)$ は、z軸の着目点に対する直角方向の基礎幅である。基本的にはこの両辺を連立して解いて、未知数 σ_{max} と η を決定するが、具体的には σ_{max} と η の二つを未知数として、式(9)および式(10)の左辺と右辺との差を縮めてゆくという繰り返しの数値計算³⁾を実施する必要がある。これらの計算は煩雑をきわめることが多く、パソコン等を使った合理的な手法も見あたらないことから、従来よりこの手法に対する改善が望まれてきた。

本研究で提案する手法は、従来法と同様な基本的仮定に立脚するものの、簡便で合理的な接地圧計算



(a) 異形H形底面形状



(b) 台形分布の場合

(c) 三角形分布の場合

図-4 新しい推定法における地盤反力

プログラムを提案したことに特徴が有るものと考えている。

3. 新しい接地圧分布の推定法

(1) 新しい推定法の特徴

本論文で提案する新たな推定法は、従来からよく知られている解析の基本的条件を力学的なモデルの基礎としている。中心軸に関して左右対称で、かつ任意の大きさの長方形の組み合わせからなる直接基礎底盤を対象とし、中心軸方向のみの接地圧変動に着眼するものである。

提案する手法では、地盤と底面との間に生じる圧縮応力領域の接触面の形状が、転倒モーメントの影響により幾何学的に変化することに着目し、その性状を特徴づける変数が、三次のべき級数等で表現できることを利用している。したがって、本論文で提案する方法は、形状に制約はあるものの、与えられた条件に対して簡便な三次式等に基づく解を直ちにみいだし得るという便利さを有する。

(2) 解析例

提案する手法の考え方を説明するため、比較的単純な異形H形底面形状(図-4参照)をここでは解析の対象例とする。図-4 (b) は N の作用位置が底面の核内にあるものと仮定し、地盤反力が台形分布の場合を表している。また図-4 (c) は、 N の作用位置が底面の核外にあって、地盤反力が三角形分布をなすものと仮定した場合を想定したものである。

(3) 変数、パラメータの定義

解析にあたり、図-4における変数やパラメータをつぎのように定義する。

a_1, a_2, a_3 : L を任意の幅に分割(組合せ)する偏心方向の底面幅。(n: 長方形を組み合わせる数であり、この場合 $n=3$ を仮定)。

b_1, b_2, b_3 : a_1, a_2, a_3 に対応する直交方向の任意の底面幅。

y : 圧縮縁端の反対縁端から図-4 (b)のように、接地圧=0となる点が基礎底板外となる場合を正の値で定義する。

σ_{max} : 底面縁端における最大接地圧。

σ_i : 底面変化点での接地圧。

N_i : 底面を任意に分割(組合せ)する部分の鉛直地盤反力。

l_i : 任意に分割・組合せした部分 N_i の重心から、圧縮縁端までの距離。

(4) 推定法の手順

提案する推定法では、結局、圧縮の反対縁端から y までの距離を求めることが主眼となる。これを以下の手順にしたがって進める。

a) 鉛直方向の力のつり合いに基づく定式化

基礎底面に作用する鉛直方向の力のつり合いは、次式で表される。

$$\sum_{i=1}^n N_i - N = 0 \quad (11)$$

式(11)を具体的に解くことによって、例えば、底面縁端部における最大接地圧 σ_{max} が、次のように求められる。

$$\sigma_{max} = \frac{B_n}{A_n} \quad (12)$$

A_n, B_n は、接地圧がゼロとなる圧縮反対縁端からの y までの距離や、対象とする基礎底面形状等の関数で、例えば、図-4 (c) に関しては次式のように表現できる。

$$A_n = b_3 y^2 - 2 \left(\sum_{i=1}^3 a_i b_i \right) y + \sum_{i=1}^3 a_i^2 b_i + 2(a_1 a_2 b_1 + a_2 a_3 b_2 + a_3 a_1 b_1)$$

$$B_n = 2N(L - y)$$

b) O点を中心とするモーメントのつり合いに基づく定式化

基礎底面縁端部のO点を中心とするモーメントのつり合いを考えると、結局、次式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n N_i l_i - N \cdot d = 0 \quad (13)$$

ここに、 l_i はO点からの N_i 重心までの腕の長さ、 d はO点から全鉛直荷重 N が作用する点までの距離である。

式(13)を解くことによって、式(12)の場合と同様底面縁端部における最大接地圧 σ_{max} が、次のように求められる。

$$\sigma_{max} = \frac{B_m}{A_m} \quad (14)$$

A_m, B_m も、基礎底面形状や y などの関数で、図-4 (c) の三角形分布に関しては次式のように表現できる。

$$A_m = -b_3 y^3 + 3b_3 \left(\sum_{i=1}^3 a_i \right) y^2 - 3 \left(\sum_{i=1}^3 a_i^2 b_i \right) y - 6(a_1 a_2 b_2 + a_2 a_3 b_3 + a_3 a_1 b_3) y + \sum_{i=1}^3 a_i^3 b_i + 3a_i^2 b_i (a_2 + a_3) + 3a_2^2 b_2 (a_3 + a_1) + 3a_3^2 b_3 (a_1 + a_2) + 6a_1 a_2 a_3 b_2$$

$$B_m = 6N \cdot d(L - y)$$

c) 力とモーメントのつり合い条件の連成

以上の式(12)および(14)を連立して解くと、最終的には、結局、次のような形式の一次および三次方程式が得られる。

$$\gamma y + c = 0 \quad (15)$$

$$\alpha y^3 + \beta y^2 + \gamma y + c = 0 \quad (16)$$

ここに、 α, β, γ および c は、それぞれの基礎底面形状に関する定数 a_i, b_i および d のみの関数である。

式(15)は、図-4 (b) に示されるような台形分布で表される場合、つまり全鉛直荷重 N が基礎の全底面に分布して作用する場合に対応し、式(16)は図-4 (c) で支持地盤から底面の一部が浮き上がっている場合の応力状態に対応する。

表-1に式(15)の γ および c の値を示す。また、表-2に式(16)の α, β, γ および c の値を示す。表-1, 2で示した α, β, γ および c は、定数 a_i, b_i と d に関してある種の規則性があるため、 $n \geq 5$ の場合もプログラミングは容易である。

d) 中立軸までの距離 y の決定

基本方程式(15), (16)の解析にあたり、特に三次方程式はその解法がカルダノにより導かれており

表-1 一次方程式(15) ($\gamma y + c = 0$)の係数

n	γ	c
2	$3 \begin{Bmatrix} a_1 b_1 (a_1 & -2d) \\ +a_2 b_2 (a_2+2a_1 & -2d) \end{Bmatrix}$	$\left[\begin{Bmatrix} a_1^2 b_1 (a_1+3a_2 & -3d) \\ +a_2^2 b_2 (a_2+3a_1 & -3d) \end{Bmatrix} \mid -6 \{ a_1 b_1 (d) (a_2) \} \right]$
3	$3 \begin{Bmatrix} a_1 b_1 (a_1 & -2d) \\ +a_2 b_2 (a_2+2a_1 & -2d) \\ +a_3 b_3 (a_3+2a_1+2a_2 & -2d) \end{Bmatrix}$	$\left[\begin{Bmatrix} a_1^2 b_1 (a_1+3a_2+3a_3 & -3d) \\ +a_2^2 b_2 (a_2+3a_1+3a_3 & -3d) \\ +a_3^2 b_3 (a_3+3a_1+3a_2 & -3d) \end{Bmatrix} \mid -6 \{ a_1 b_1 (d) (a_2+a_3) \\ +a_2 b_2 (d-a_1) (a_3) \} \right]$
4	$3 \begin{Bmatrix} a_1 b_1 (a_1 & -2d) \\ +a_2 b_2 (a_2+2a_1 & -2d) \\ +a_3 b_3 (a_3+2a_1+2a_2 & -2d) \\ +a_4 b_4 (a_4+2a_1+2a_2+2a_3-2d) \end{Bmatrix}$	$\left[\begin{Bmatrix} a_1^2 b_1 (a_1+3a_2+3a_3+3a_4-3d) \\ +a_2^2 b_2 (a_2+3a_1+3a_3+3a_4-3d) \\ +a_3^2 b_3 (a_3+3a_1+3a_2+3a_4-3d) \\ +a_4^2 b_4 (a_4+3a_1+3a_2+3a_3-3d) \end{Bmatrix} \mid -6 \{ a_1 b_1 (d) (a_2+a_3+a_4) \\ +a_2 b_2 (d-a_1) (a_3+a_4) \\ +a_3 b_3 (d-a_1-a_2) (a_4) \} \right]$
n 対応の 一般式	$3 \sum_{i=1}^n a_i b_i \left(2 \sum_{k=1}^n a_k - a_i - 2d \right)$	$\left[\left\{ \sum_{i=1}^n \left(a_i^2 b_i \left(3 \sum_{k=1}^n a_k - 2a_i - 3d \right) \right) \right\} \right. \\ \left. - 6 \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left(a_i b_i \left(d - \sum_{k=1}^i a_{k-1} \right) \left(\sum_{k=i+1}^n a_k \right) \right) \right\} \right]$ ただし, $a_0 = 0$

表-2 三次方程式(16) ($\alpha y^3 + \beta y^2 + \gamma y + c = 0$)の係数

n	α	β	γ	c
2	b_2	$-3b_2(a_1+a_2 \quad -d)$	$3 \begin{Bmatrix} a_1 b_1 (a_1 & -2d) \\ +a_2 b_2 (a_2+2a_1 & -2d) \end{Bmatrix}$	$- \left[\begin{Bmatrix} a_1^2 b_1 (a_1+3a_2 & -3d) \\ +a_2^2 b_2 (a_2+3a_1 & -3d) \end{Bmatrix} \mid -6 \{ a_1 b_1 (d) (a_2) \} \right]$
3	b_3	$-3b_3(a_1+a_2+a_3 \quad -d)$	$3 \begin{Bmatrix} a_1 b_1 (a_1 & -2d) \\ +a_2 b_2 (a_2+2a_1 & -2d) \\ +a_3 b_3 (a_3+2a_1+2a_2 & -2d) \end{Bmatrix}$	$- \left[\begin{Bmatrix} a_1^2 b_1 (a_1+3a_2+3a_3 & -3d) \\ +a_2^2 b_2 (a_2+3a_1+3a_3 & -3d) \\ +a_3^2 b_3 (a_3+3a_1+3a_2 & -3d) \end{Bmatrix} \mid -6 \{ a_1 b_1 (d) (a_2+a_3) \\ +a_2 b_2 (d-a_1) (a_3) \} \right]$
4	b_4	$-3b_4(a_1+a_2+a_3+a_4-d)$	$3 \begin{Bmatrix} a_1 b_1 (a_1 & -2d) \\ +a_2 b_2 (a_2+2a_1 & -2d) \\ +a_3 b_3 (a_3+2a_1+2a_2 & -2d) \\ +a_4 b_4 (a_4+2a_1+2a_2+2a_3-2d) \end{Bmatrix}$	$- \left[\begin{Bmatrix} a_1^2 b_1 (a_1+3a_2+3a_3+3a_4-3d) \\ +a_2^2 b_2 (a_2+3a_1+3a_3+3a_4-3d) \\ +a_3^2 b_3 (a_3+3a_1+3a_2+3a_4-3d) \\ +a_4^2 b_4 (a_4+3a_1+3a_2+3a_3-3d) \end{Bmatrix} \mid -6 \{ a_1 b_1 (d) (a_2+a_3+a_4) \\ +a_2 b_2 (d-a_1) (a_3+a_4) \\ +a_3 b_3 (d-a_1-a_2) (a_4) \} \right]$
n 対応の 一般式	b_n	$-3b_n \left(\sum_{i=1}^n a_i - d \right)$	$3 \sum_{i=1}^n a_i b_i \left(2 \sum_{k=1}^n a_k - a_i - 2d \right)$	$- \left[\left\{ \sum_{i=1}^n \left(a_i^2 b_i \left(3 \sum_{k=1}^n a_k - 2a_i - 3d \right) \right) \right\} \right. \\ \left. - 6 \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left(a_i b_i \left(d - \sum_{k=1}^i a_{k-1} \right) \left(\sum_{k=i+1}^n a_k \right) \right) \right\} \right]$ ただし, $a_0 = 0$

(例えば, 文献¹⁾: 1969に記載), 本論文でもその公式を利用するため, ここで簡単に説明する.

まず, 未知数 y の一次式で与えられる基本式(15)については, $\gamma \neq 0$ なら,

$$y = -c/\gamma \quad (17)$$

より y が決定できる.

次に, 三次の項の係数が $\alpha \neq 0$ なら式(16)は,

$$y^3 + (\beta/\alpha) y^2 + (\gamma/\alpha) y + c/\alpha = 0 \quad (18)$$

で表せる. 簡略化のため, 第2~4項の係数を a, b, c と置き換え,

$$y^3 + a y^2 + b y + c = 0 \quad (19)$$

で表し, また $y = x - a/3$ を代入して x について2乗の項のない形の三次式(20)に変形する.

$$x^3 + (b - a^2/3)x + (2a^3/27 - ab/3 + c) = 0 \quad (20)$$

さらに,

$$(b - a^2/3) = (b/3 - a^2/9) = p \quad (21)$$

$$(2a^3/27 - ab/3 + c) = q \quad (22)$$

で整理すると, 式(20)は次式で表現できる.

$$x^3 + 3px + q = 0 \quad (23)$$

ここで, $x = u+v$ とおき式(23)に代入すると, 式(24)を得る.

$$u^3 + v^3 + q + 3(u+v)(uv+p) = 0 \quad (24)$$

これが成立するためには式(25), 式(26)を満たせばよいこととなる.

$$u^3 + v^3 + q = 0 \quad (25)$$

$$uv + p = 0 \quad (26)$$

いま式(26)を $u^3 v^3 = p^3$ で書き換える. すると u^3 と v^3 は, 式(27)で二次式を因数に分解する形で表せる.

$$t^2 - qt - p^3 = (t - u^3)(t - v^3) \quad (27)$$

すなわち,

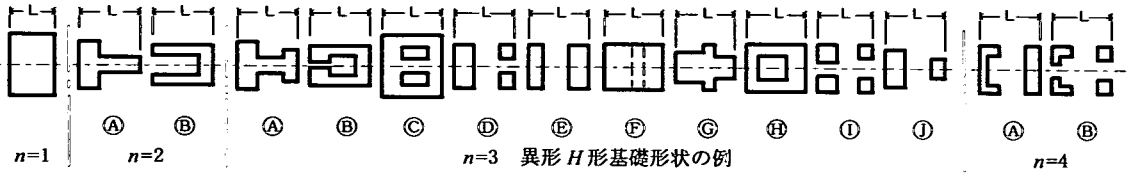


図-5 構築物基礎の底面形状の例 (n=1~4)

$$u^3 = -\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}, \quad v^3 = -\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}} \quad (28)$$

である。u³とv³の立方根をとると、uとvは式(29)で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, & v_1 &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} \\ u_2 &= \omega u_1, & v_2 &= \omega^2 v_1 \\ u_3 &= \omega^2 u_1, & v_3 &= \omega v_1 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

これは関係式 $x = u + v$ から式(30)で表せる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= u_1 + v_1 \\ &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} \\ x_2 &= \omega u_1 + \omega^2 v_1 \\ x_3 &= \omega^2 u_1 + \omega v_1 \quad \text{ただし, } \omega = \frac{-1 + \sqrt{3}i}{2} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

結局、三次方程式(16)の3つの解は、最終的に、

$$y_i = x_i \cdot \frac{a}{3} \quad (31)$$

なる式より決定できる。ここに、 $a = \frac{\beta}{a}$ である。

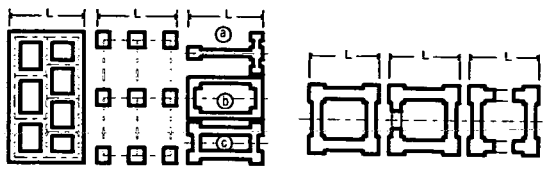
4. 新しい手法の設計への具体的適用

3. (4)によってyの具体的決定が可能となったが、提案する手法を実際の設計で適用するには、いくつか考慮しなければならない点がある。それらについて以下説明する。

(1) 底面(全幅)形状の分類とモデル化

実際の設計で扱われる基礎構造は多岐にわたる。ここでは、提案手法の手順を具体的に説明するために、まず、本論文の対象とする具体的な基礎底面形状の例を(図-5~7)に示す。

例示する基礎構造は、いずれもフーチング底面のウェブの有無と、中心軸を両側からはさむ対称断面の長方形のサイズ・形状により特徴づけることができる。例えば、中心軸を一つと仮定していることから、図-5 n=3 ①のように中心軸に関して対称的な



①連続フーチング ②独立フーチング ③連結フーチング

図-6 n=5の底面形状

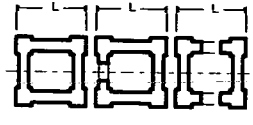


図-7 nが高次の例

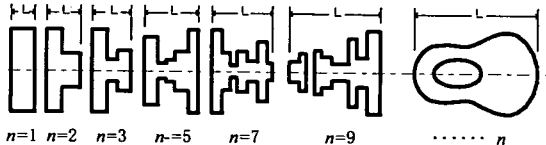


図-8 長方形の組合せ・分割底面の形状モデル

位置に離れている(分割された)基礎も、それを軸に直交する方向に移動させて①のように一体化させた基礎も、同一の基礎と見なすことができる。

したがって、中心軸に関して整理すれば種々の複雑な底面形状も、基本的には図-8のような形状モデルに単純化できる。

(2) 設計上仮定するパラメータ

基礎の構造設計は、まず、既知の技術データを収集することからはじまる。図-4に対する具体的な底面形状の一例として、図-5 n=3(A~J)を考える。③、④、⑤、⑧および①の底面のように、中心軸直交方向にフーチングの連続していない場合も、先に述べたように中心軸に関して図-8のn=3の場合のように再整理することが可能である。また、⑥に示すようにフーチングの底面が長方形であっても、基礎を設置する地盤の性状などにより、その一部が無効と考慮して設計する場合もある。

このように設計上仮定する多くのフーチング基礎底面も、結局は、任意サイズの長方形3つを偏心方向に単純に組み合わせてモデル化した、図-8 n=3の場合に考える形状、すなわち図-4(a)の異形H形底面として分類できる。

すると結局、単純化されたモデルに対応する辺長 a_1, a_2, a_3 , 直交方向の辺長 b_1, b_2, b_3 を決定できることになる。また、鉛直荷重 N やその作用位置 d も、計画する構築物の用途や形態が明らかになれば容易に決定できる。

(3) 計算の実行

前項でモデル化した具体的な底面形状に関する係数 a_1, b_i などを基本方程式(15), (16)の係数 α, β, γ および定数 c を決定する式(例えば, 表-1, 表-2)中に代入し展開すると, 中立軸までの距離 y が直ちに決定できる。

計算を実行する際, 3章で図-4の異形H形底面形状を解析例として誘導した基本式から得られた解において, 圧縮端の反対ブロック端から中立軸までの距離 y と地盤反力分布との関係を図-9に示す。

計算は以下の手順にしたがって実行する。

a) 一次式(15)による y の計算

まず, 式(15)によって y を計算する。もし図-9(a)-④に示すように, $0 < y$ (と定義する)なら地盤反力は台形分布を示すことになり, これで正しい接地圧分布は得られたと判断する。もし, 図-9(a)-⑤に示すように, $y < 0$ なら地盤反力に負の部分が生じることになるため, この負の部分をゼロとして接地圧分布を再計算する次のステップに移る。

b) 三次式(16)による y の計算

・三次式の解の分類

三次式(16)を解いた場合, 得られる根は判別式 D によって次のようなパターンに分類できる。

$D > 0$ の場合, 一つの実数根と二つの虚数根。

$D = 0$ の場合, 三つの実数根でそのうち二つは重根。

$D < 0$ の場合, 値の異なる三つの実数根。

$$D = \frac{q^2 + p^3}{4 + 27} \quad (32)$$

数学的に厳密に証明した訳ではないが, すでに実施した大量の解析ケースで明らかになったこれらの根の性質を, 以下詳細に述べる。

まず, 図-9(b)の具体的な基礎区分の各領域に対応して y の値を次のように分類する。

$$y < 0 \quad (33)$$

$$0 \leq y < a_3 \quad (34)$$

$$a_3 \leq y < a_2 + a_3 \quad (35)$$

$$a_2 + a_3 \leq y < a_1 + a_2 + a_3 \quad (36)$$

$$y \geq a_1 + a_2 + a_3 \quad (37)$$

複数の実数根が得られた場合, これらが式(34)~(36)で表すそれぞれの y の範囲に重複して入ることはなかった。勿論, 重根は1つの解と考える。

・ $0 < y < a_3$ なる y が得られる場合

既に述べたように, 本論文で提案している接地圧分布の計算方法は, 想定している基礎ブロックのうち, 最も右側のブロック端において, 中立軸までの接地圧がゼロとなる場合(例えば図-9(b)-③のような場合)に三次式(16)を適用し, 適切な y が決定

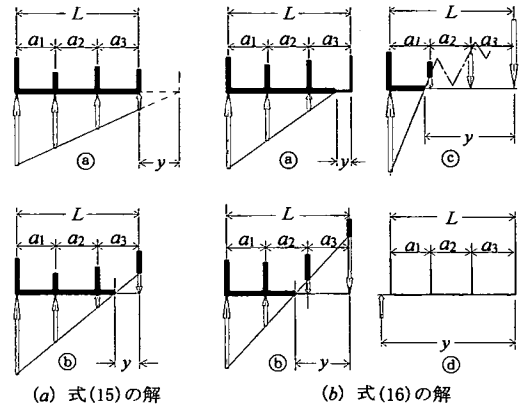


図-9 y の値と地盤反力の関係

できるというものである。例えば, 図-9(b)-⑥のような場合は, そもそも図-4(c)における修正モデルに対応する右端ブロック(式(34)に対応する領域)内に中立軸 y が算定されない場合, 少なくとも式(35)で表現される領域よりも左側に中立軸が存在することになるため, その中立軸の位置から右側の任意の点での地盤反力はマイナスとなり, 結局, 地盤と基礎底面との間に引張り力が作用して矛盾することとなる。したがって, このような場合は, 右端のブロックが基礎としての役割を果たさないと考えられるから, このブロックはないものとして再計算することとなる。この場合, 基礎ブロックの総数 n は, $3 - 1 = 2$ とカウントすることになる。つまり図-8形状モデルで $n=2$ のパターンに基礎形状そのものを見直し, 改めて三次式(16)を適用すれば正しい接地圧分布の求められることが確かめられている。これらの対応については後でさらに述べる。

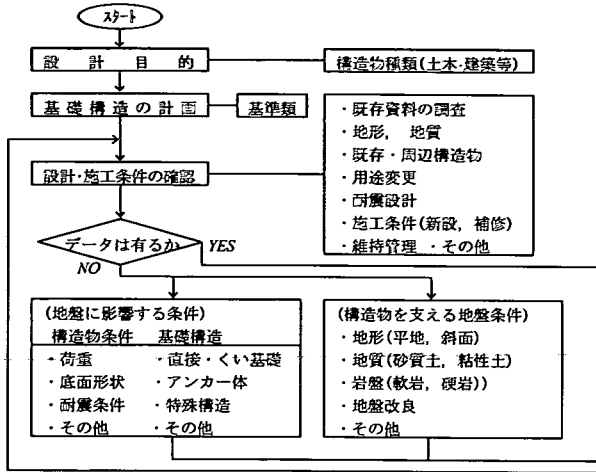
よって, いくつ実数根が得られたとしても基本的に意味のある解は, 図-9(b)-③に示すような右端のブロックで接地圧がゼロとなるような場合, つまり $0 < y < a_3$ の場合のみである。

筆者らのこれまでの経験では, $0 < y < a_3$ の領域で y が2つ以上の解を持ったことはなかった。

結局, 三次式(16)で $0 < y < a_3$ なる解が得られた場合, 右端基礎ブロック端から距離 y に相当する部分は, 接地圧がゼロと算定されているから, 適切な地盤反力が得られたものと判断できる。

・ $0 < y < a_3$ なる y が得られなかった場合

仮に図-9(b)-⑥~⑦のように右から2, 3ブロック目に中立軸 y が計算された場合は, 地盤反力に負の部分が生じることとなる。したがって, そのブロックよりも右側のブロックは, 基礎として意味をなさないため, ブロック数を1つ, あるいは, 2つ減じる。また, 図-9(b)-④のように極端な場合にあ



っても、意味のない右端ブロックから1つ目、2つ目などと逐次ブロック数を減じて、ブロック総数 n に対応する式(16)を用いて再計算を実行する。

現在までの多数の計算によれば、ほぼこうした1回の再計算で、適切な接地圧分布を決めることができた。つまり再計算によって $0 < y < a_n$ なる y を得ることができた。

以上の計算の流れを図-10にフローチャートとして示している。実際の設計計算はこのフローチャートにしたがって実施した。次の章において、具体的な設計の手順の具体的な計算例をいくつか示す。

5. 計算事例

この章では、具体的な基礎底面に対する提案手法の適応性や妥当性について検討する。

(1) 数値計算の具体例

接地圧分布の解析にあたり、3.の図-4でとり上げた異形H形底面の具体的な形状の一例として、図-5 ($n=3$)の異形H形底面④ウェブのある場合を、また、ウェブのない底面として①の場合を対象に数値計算し、その結果を図-11、図-12に示す。

まず、図-11で想定する基礎ブロックを図-10の手順に従い一次式(15)にあてはめた結果、右側基礎ブロック端よりも、なお右方の位置に中立軸 $y(x_n)$ を得た。この結果は、図-9(a)-⑧に示すように地盤反力が台形分布となることを意味している。つまり基礎の全底面が地盤と接触していて、フーチング底面に作用する外力と地盤反力とがつり合う状態であるため、これで正しい接地圧分布は求められたものと

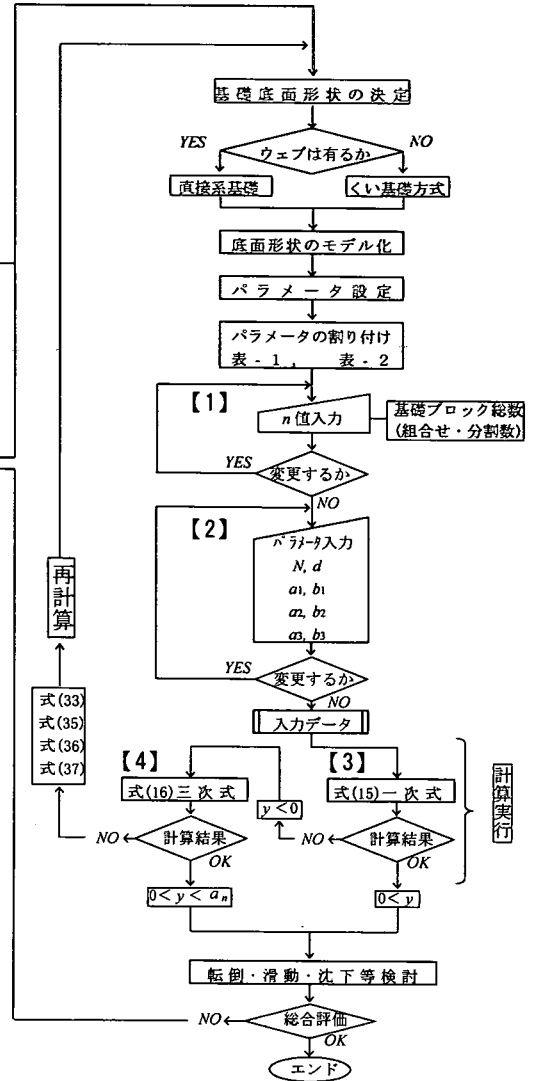


図-10 設計計算のフローチャート
([n] : 図-11, 12中の計算段階に対応)

判断できる。

図-12で仮定する基礎底面に対しても、中立軸 y を決定する一次式(15)を最初に適用する。すると、求められた一次式の解は、図-9(a)-⑥のパターンとなる。したがって、この負の接地圧部分をゼロとして再計算する次のステップに移行する必要がある。

すなわち、負の接地圧分布が計算される場合には、本論文で提案する三次式(16)を図-10のフローに当てて適用し、適切な中立軸 y を決定するのである。

結局、右端ブロック底面内に想定する中立軸 y が決定されると、底面に作用する外力と地盤反力とがつり合い、最終的な接地圧分布は、図-12の最下図に示すような三角形および台形形状により表される

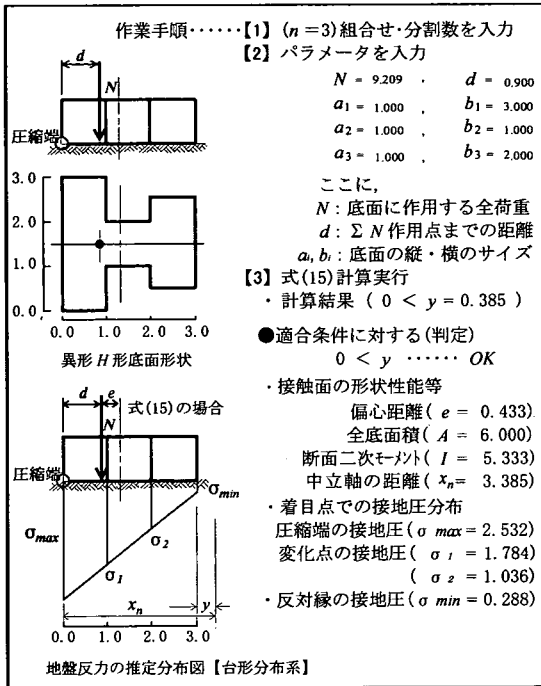


図-11 異形H形底面形状($b_2 > 0$)の地盤反力

こととなる。この事例において、式(16)の具体的な形は式(38)のようになる。

$$2.000y^3 - 14.400y^2 + 21.000y - 4.400 = 0 \quad (38)$$

既に4.(3)b)で述べたように、三次式(38)より圧縮の反対縁端からの中立軸までの距離として得られる三つの解 $y_1 = 0.251$, $y_2 = 1.653$, $y_3 = 5.296$ は、 a_3, a_2, a_1 それぞれの三つの基礎ブロック領域に対応しているものの、意味のある基礎ブロック領域 $0 < y < a_3$ に注目してみると、重複した解は算出されていないことが分かる。

結局、圧縮の反対ブロック内に中立軸 y がくるときの $0 < y < a_3$ なる y として、解となる中立軸(すなわち、 $y = 0.251$)が決定されることになる。

(2) 提案した解法の実務への適用事例

a) 実際の基礎構造プラン

この項では、実務で提案式を展開する場合の手順について、図-13に示す具体的な構築物の基礎プランを対象に説明する。

事例①の基礎構造は、上部に水槽を設けた高さ9.5mの構築物を支えていて、この底面は図-5 $n=3$ ㊸系で、形状モデル図-8 $n=3$ の直接基礎である。

事例②は、逆T式擁壁 高さ4.5mで幅3.3mの剛体フーチング底面に、径 $\phi 300$ 長さ11mのコンクリー

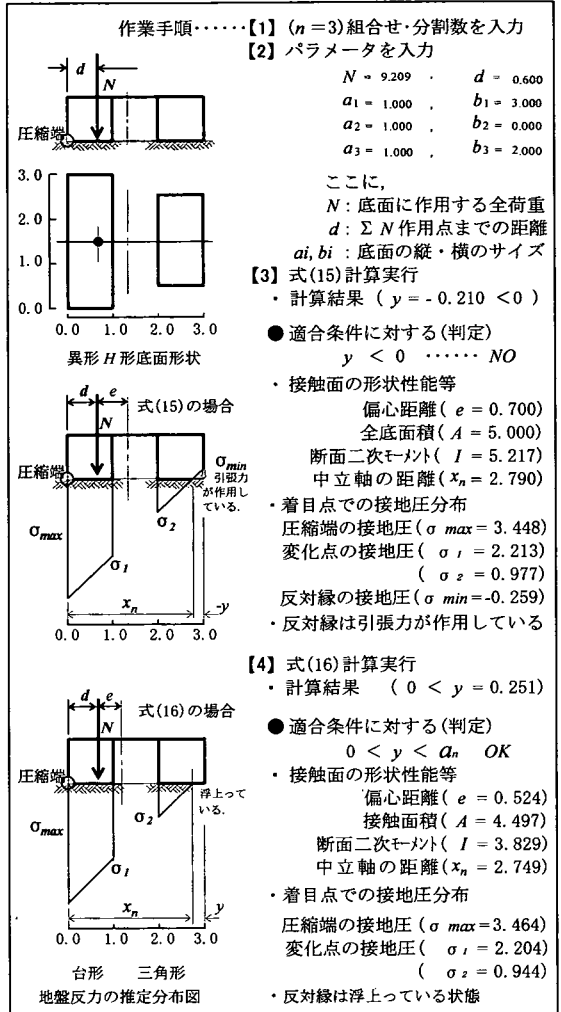


図-12 異形H形底面形状($b_2 = 0$)の地盤反力

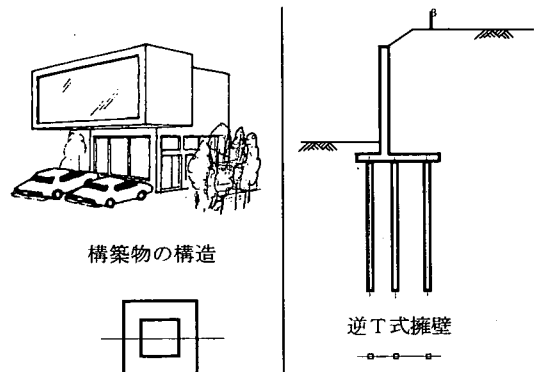


図-13 実際の基礎構造プランの例

ト製くい2本をつないで、偏心方向に3列配置した群ぐい基礎構造である。事例では $\phi 300$ の同面積の正方形断面に換算したくい形状を仮定している。

表-3 解析事例

対象構築物	構築物(直接基礎)						逆T式擁壁(くい基礎)				
解析ケース	ケース(1)		ケース(2)		ケース(3)		ケース(4)		ケース(5)		
具体的な底面形状											
	図-5 n=3Ⓐ		図-5 n=2Ⓑ		図-5 n=4Ⓐ		図-6 n=5Ⓑ		図-5 n=3Ⓒ		
形状モデル	異形H形		異形T形		特殊形		三列		二列		
計算ステップ	ステップ' 1)		ステップ' 2)		ステップ' 1)		ステップ' 1)		ステップ' 2)		
	式(15)	式(16)	式(15)	式(16)	式(15)	式(16)	式(15)	式(16)	式(15)	式(16)	
【1】 ブロック総数 n	n=3		n=3-1=2		n=4		n=5		n=5-1-1=3		
【2】 パラメータ	N	206.3	206.3	206.3	206.3	206.3	206.3	18.07	18.07	18.07	18.07
	d	1.283	1.283	1.283	1.283	1.283	1.283	0.133	0.133	0.133	0.133
	a ₁	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	0.266	0.266	0.266	0.266
	b ₁	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	0.266	0.266	0.266	0.266
	a ₂	4.000	4.000	4.000	4.000	1.000	1.000	0.734	0.734	0.734	0.734
	b ₂	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	a ₃	2.000	2.000			3.000	3.000	0.266	0.266	0.266	0.266
	b ₃	8.000	8.000			0.000	0.000	0.266	0.266	0.266	0.266
	a ₄					2.000	2.000	1.034	1.034		
	b ₄					8.000	8.000	0.000	0.000		
a ₅							0.266	0.266			
b ₅							0.266	0.266			
【3】 計算結果 一次式 y	-1.546		-0.966		-0.823		-0.522		-0.121		
適合判定 0 < y	NO		NO		NO		NO		NO		
再計算ステップへ	ステップ' 1) 式(16)		ステップ' 2) 式(16)		ステップ' 1) 式(16)		ステップ' 1) 式(16)		ステップ' 2) 式(16)		
【4】 計算結果 三次式 { y ₁ , y ₂ , y ₃ } ※虚数根を示す		13.895		1.387		1.255		6.560		0.207	
		※4.177		6.259		2.805		※0.901		0.327	
		※2.079		6.505		16.090		※-0.162		2.866	
適合判定 0 < y < a _n		NO		OK		OK		NO		OK	
再計算ステップへ		ケース(2) 式(15)						ケース(5) 式(15)			
着目点	着目点での接地圧分布										
σ _{max}	11.304	—	12.808	13.316	12.300	12.523	214.49	—	285.63	289.97	
σ ₁	7.801	—	7.719	7.543	8.873	8.809	186.58	—	219.26	217.16	
σ ₂	0.795	—			7.159	6.953	109.57	—	36.13	16.28	
σ ₃					2.017	1.383	81.67	—			
σ ₄							-26.81	—			
σ _{min}	-2.709	—	-2.459	0.000	-1.410	0.000	-54.72	—	-30.24	0.000	
地盤反力推定分布と y の関係											

次に、図-10のフローに示す手順【1】、【2】……【4】に沿って提案式(15)、(16)を適用・展開した解析事例を表-3に示す。因みに表-3は、その手順を一通りの計算サイクルと考えて解析ケース(No)

をカウントしている。つまり、基礎ブロック総数 n に対する式(15)の解が、y < 0 なら負の地盤反力が発現するため、続いて式(16)を展開する。これを一つの計算ステップでカウントしたものである。

b) 構築物(直接基礎)の場合の計算

・解析ケース(1)(表-3)の計算ステップ

すでに、4.(1)および(2)で述べたように、本論文では、中心軸を一つと仮定していることから中心軸に関して対称的な位置に離れている基礎を、その軸の直交方向に移動させて寄せ集めても、同一の基礎と見なすことができる。すなわち中心軸に直交する図心(重心)軸に関して、対称の底面形状を平行移動しても、結局、断面一次モーメントの値が変化しないと仮定する。この仮定に基づいて事例①の底面形状を整理すると、比較的単純な異形H形で表すことが可能である。したがって、具体的な底面が決まれば一つの形状モデルが定まる。形状モデルは図-8で説明したように、図-5~7で示した実際の各種底面形状を単純化したものである。

次に、単純化した形状モデルに対応する基礎ブロック総数(この場合 $n=3$)を図-8を参考に決定する(手順【1】)。そして単純化されたモデルにおけるそれぞれの辺長要素 a_i, b_i を決定する。さらに、上部工から伝達されたフーチング底面に作用する鉛直荷重 N 、および、その作用位置 d を逐次決定する(手順【2】)。

結局、手順【3】において一次式(15)により中立軸 y の位置が算出されると、この y に対応する着目点での接地圧分布、すなわち、地盤反力の分布が推定できる。

このケースでは、式(15)が $y < 0$ で負の解となることから、結局、4.(3)a)で述べたように接地圧分布を再計算する次のステップに移行する必要がある。

・式(16)に基づく計算ステップ

一次式の解が $y < 0$ なら、式(16)を実行する展開(手順【4】)となる。手順【3】の設計条件(パラメータ)をそのまま用いて三次式を解くと、三つの根が直ちに得られる。この場合は二つの根が虚数なので意味がありそうな解は一つしかない。そのときの解 y_1 は 13.895 である。結局、 $a_3 = 2.000 < y_1 = 13.895$ であるから、4.(3)b)ですでに述べたように、地盤反力に負の部分が生じることになる。したがって、右端ブロックは基礎としての意味をなさないため、解析上は、 n を一つ減じた異形T形基礎と見なし、再度、底面に対する計算を解析ケース(2)で実行する必要がある。

・解析ケース(2)(表-3)の計算ステップ

ここでは、右端ブロックのない $n=2$ の基礎と見なした基本式(15)を展開(手順【1~3】)する。すると、 $y = -0.966 < 0$ でケース(1)の場合と同様に負解を得るから、これに対応する三次式(16)を展開する

こととなる。

結局、事例①の構築物を支える直接基礎の接地圧分布は手順【4】で得る $0 < y_1 = 1.387 < a_2 = 4.000$ なる解 y_1 を用いて地盤反力分布が最終的に決定される。

・解析ケース(3)の設計計算

フーチング底面に生じる接地圧分布は、一般的に構築物の設計条件から推定される地盤等に影響する荷重強度である。これは、構築物を支える基礎地盤などの条件に対応して比較・検討される。

例えば、仮定した設計地盤の支持力が軟弱(耐力不足)であったり、地中障害物が出現した場合などで、この対策の一つの手段として、必要な場合には地盤を改良したり、基礎構造を変更して検討する場合は少なくない⁹⁾。

ここでは、事例①の直接基礎を対象に、構築物周辺のそうした状況に対応して提案式を適用した事例について説明する。

まず、ケース(3)の具体的な底面から形状モデルを設定し、これに基づいてブロック総数($n=4$)を決定する。3番目の領域(a_3 に相当)は未改良地盤であると仮定し、その部分の地盤の支持力は考えない(手順【1,2】)ものとする。そして、 $n=4$ に対応する一次式(15)および、三次式(16)を適用する(手順【3,4】)。この展開では、三次式(16)の1回目の適用で条件 $0 < y_1 < a_4$ が満たされる中立軸位置 $y_1 = 1.255$ を算出している。

結局、地盤と接触するフーチング底面のそれぞれの着目点における接地圧分布は、結局、最下段で示すような台形および三角形の形状で推定できることとなる。

c) 逆T式擁壁(くい基礎)の場合の計算

逆T式擁壁の事例②の群ぐい構造においては、フーチング底面とくい頭の接合をヒンジ結合と仮定した場合、またはくい基礎が被災した場合などの⁹⁾リスクを想定し、くい頭反力におけるその支持力を定量的かつ容易にとらえることを目的として、提案式を適用したものである。

・解析ケース(4)(表-3)の計算ステップ

解析にあたっては、中心軸に沿うくいの配列形状により、 $n=5$ のパターンでモデル化し、 a_i, b_i に対応するそれぞれのパラメータを決定(手順【1,2】)して、まず、くい頭ヒンジ結合を想定した式(15)を適用する(手順【3】)。結局、 $y < 0$ であるから右端のくい(パラメータ a_5, b_5 に対応)は、引抜き力(引張力)が作用していることが分かる。

こうした場合、次のような取り組みが展開できる。

1) フーチングから連続して伝わる引抜き力に耐える

引張り力を負担させるくい (a_5, b_5 に対応)として検討する。

2)連続して伝わる引抜力に相当する引張力をくいに期待しない場合、すなわち、圧縮状態のみに着目して基礎構造を検討する場合である。例えば、松ぐいをを用いた設計などでは、フーチングと右端のくい頭とが緊結されていない場合として、くいには引張力を作用させないのが普通である。また、くい基礎被災を想定したリスクを配慮する場合などでも、くいに引張力は作用させない。

3)構築物に要求される品質水準に照らして検討する場合。つまり、支持地盤の強度が接地圧分布と比較して小さい場合の対応策等で、地盤強度に見合う接地圧分布を確保するために必要な保有耐力を、構築物に求められる品質性能に合せて任意に設定し、検討する場合。

ここでは、手順【3】の結果に対する取組みとして2)における各くいが、どの程度の負担率をもって圧縮力を保持しているかを定量的にとらえるために試算している。

手順【3】で、結局負の解 ($y < 0$) を得るから、 $n=5$ に対する式(16)を実行することとなる。しかし、この計算を実行しても、なお、条件 $0 < y_i < a_n$ に対応する解が得られていない ($y_1 = 6.560$)。このため、すでに述べたように、右端ブロック部分 (a_5, b_5 に相当)のくいのない基礎構造 ($n=4$) を考える。しかし、この場合、該当する領域に基礎 (a_4, b_4 に対応)が存在しないため、結局、基礎ブロック総数として $n=3$ を設定し、次のステップにおいて再計算することとなる。

・解析ケース(5)(表-3)における計算ステップ

逆T式擁壁がもつくい基礎は、この段階で二列のくいが圧縮機能に役立っているものと推定し、 $n=3$ に対応する一次式(15)を計算する(手順【1, 3】)。

結局 $y < 0$ で負の解を得るから式(16)を計算する。この結果、 $0 < y_1 = 0.207 < a_3 = 0.266$ で、条件を満たす中立軸 $y_1 = 0.207$ が最終解として得られる。

この中立軸を基にくい基礎の着目点での接地圧分布を調べると、結局、一列目のくいは台形分布をなしているが、また、二列目は三角形分布でくいの一部分が、フーチングに作用する荷重に対して圧縮力のかたちで負担していることが分かる。すなわち、二本のくいでフーチングを支えていることとなる。

このことは、右端のくい (a_5, b_5 に対応)の引抜き抵抗機能がなくなった場合、結局、一列および二列目のくいが支持ぐいとして機能し、それらでの値が式(16)の計算によって定量的にとらえられているこ

とが分かる。

ただし、計算フロー図-10を適用する際、基礎ブロック総数 n は、実際の設計においては、地盤の強度などの周辺の状況により、できるだけ大きめの数 n を最初に仮定しておくことと便利である。

すなわち、逐一変化する設計条件への対応が容易であるし、適切な解(一次式の場合 $0 < y$ 、三次式の場合は、 $0 < y_i < a_n$)が合理的に決定できる。

(3) 提案計算法の適応性・妥当性の検討

上述の新しい計算法の数値シミュレーション解析を踏まえて、ここでは実務の設計で参考とした文献^{7)~9)}に掲載されている基礎構造(表-4)を例にとり、この基礎データを用いて提案設計法の適応性や妥当性を検証する。

また、計算は前項と同様に図-10のフローチャートに対応して実施した。適応性や妥当性で対象となる比較・評価項目と計算結果は、構造事例別の枠内に現行法、提案法それぞれのアウトプットデータを対比させ、表-5にとりまとめて示す。

a) 解析条件(インプットデータ)の設定

表-4に例示する基礎構造について説明する。

まず、実際の設計で必要となる具体的な基礎断面や底面形状から、偏心方向の中心軸に関して対称的な位置に離れている基礎を、図-8で述べたように中心軸の直交方向に移動させて寄せ集め、長方形ブロックの組合せを考える。そして中心軸方向の基礎ブロックの総数 n をもって、結局、具体的な底面形状に対応する形状モデルを決定する。(表-4 手順【1】)。単純化された形状モデルが決定されると、中心軸および直交方向に対応するそれぞれの長方形の辺長 a_i, b_i は容易に決定できる。

ここでは、提案計算法の適用性・妥当性を比較・検討するため、形状モデルやモデルに対応する形状パラメータなどの共通する設計条件は、表-4 手順【2】のようなインプットデータとして与えられている。

ただし、本論文で対象としなかった傾斜荷重についても、比較例では触れられているため、ここでは力を分解することによって得られた水平方向荷重については、鉛直荷重に比例させてとり扱うという従来通りの考え方にしたがって処理している。

b) 直接基礎の事例検討

・構造事例(1)の場合

事例(1)の構造は、山岳地の急峻な斜面に計画された擁壁構造物である。段切り基礎であるが平面的には単一の長方形を3ブロック組合せた単純な構造である。これを提案法では $n=5$ と仮定する。

表-4 接地圧分布計算法の比較(構造事例)

実際の基礎構造の設計	基礎形式	(直接基礎系)		(くい基礎系)					
	構築物の種類	擁壁構造物 (段切り基礎)	ツバーイフォー住宅 (布基礎)	T式橋脚(橋軸直角方向) (PHCくい)					
		引用文献 ⁷⁾	引用文献 ⁸⁾	引用文献 ⁹⁾					
	構造事例	事例(1)	事例(2)	事例(3)					
	基礎の断面形状								
	具体的な底面形状								
(フーチング底面と地盤との間に想定される接触ブロック着目点の領域)									
提案法における解析条件インプットデータの パラメーター入力	【1】	ブロック総数 n 値入力	$n = 5$		$n = 3$		$n = 7$		$n = 7 \sim 5$
	【2】	N (tf)	120.0		88.37		219.11		219.11
		d (m)	1.500	1.500	0.650	2.174	0.532	0.996	0.996
		a_1 (m)	1.500	1.000	4.810	11.570	0.532	0.532	0.532
		a_2 (m)	0.300	0.000	0.650	2.500	0.968	0.000	0.968
		a_3	1.500	1.000	0.650	11.570	0.532	0.532	0.532
		a_4	0.300	0.000	—	—	0.968	0.000	0.968
		a_5	1.500	1.000	—	—	0.532	0.532	0.532
		a_6	—	—	—	—	0.968	0.000	—
	a_7	—	—	—	—	0.532	0.000	—	
		b_1 (m)	—	—	—	—	0.532	—	—
		b_2 (m)	—	—	—	—	0.532	—	—
		・ 水平荷重 H (tf)	40.0		12.170		42.133		—

表-5 接地圧分布の計算結果

($tf=9.807kN$, $t/m^2=9.807kN/m^2$)

地盤に影響するアウトプットデータの 鉛直荷重	傾斜荷重に対する鉛直水平荷重分解と変位	構造事例に対する ・ 現行法・提案法 具体的な計算方法	事例(1)		事例(2)		事例(3)			
			現行法(1)	提案法(1)	現行法(2)	提案法(2)	現行法(3)	提案法(3)	提案法(4)	
			地盤係数法	手順【4】 式(16)	σ 仮定法	手順【3】 式(15)	変位法	手順【3】 式(15)	手順【3】 式(15)	
		y の 値 (m)	—	0.363	—	2.641	—	-0.650	0.213	
		中立軸位置 x_n (m)	—	4.737	—	8.751	—	4.382	3.745	
	鉛直荷重	接地圧分布(軸力)	σ_{max} ①	48.250	57.372	$\sigma_{max}=10 t/m^2$ 地盤反力 σ_{max} を仮定して x を 定め、つりあい 式(9)、(10)を つりあわせる 計算法。	5.016	124.810	120.833	128.404
			σ_1	35.550	39.206		4.644			
			σ_2 ②	33.010	35.573		1.886			
			σ_3	20.320	17.407		—			
			σ_4 ③	17.780	13.773		—			
σ_5			—	—	—					
	p	5.080	0.000	1.514	-15.240	-11.278	0.000			
水平荷重	水平分荷担重力	①	13.410	24.145	—	5.002	10.533	23.235	24.691	
		②	16.590	13.245	—	5.407	10.533	14.767	14.044	
		③	10.005	2.610	—	1.761	10.533	6.299	3.398	
		④	—	—	—	—	10.533	-2.169	—	
変位	接の触変位	水平方向変位 cm	-0.046	—	—	—	0.3289	—	—	
		鉛直方向変位 cm	0.062	—	—	—	0.1877	—	—	
	回転角 rad	-0.00011	—	—	—	0.0010662	—	—		
	現行法と提案法が とらえた地盤反力 推定分布									

表-6 最大接地圧の比較

事例	現行法		提案法	
	手法	提案法に対する比	手法	
事例(1)	地盤係数法	0.84	提案法(1)	1.00
事例(2)	σ 仮定法	1.99	提案法(2)	1.00
事例(3)	変位法	1.03	提案法(3)	1.00
	見あたらず	—	提案法(4)	1.00

現行法(1)に対応した事例は、基礎地盤を離散型の弾性バネとみなした事例である。鉛直方向のバネと水平方向のせん断バネの設定にあたっては、地盤調査で得られる変形係数等を導入して解析する地盤係数法がここでは用いられている。

これに対して提案法(1)では、すでに述べたように設計の基本的要素を基礎平面の形状パラメータや鉛直力 N 、およびその作用位置 d の既知データのみを用いて、簡便法⁷⁾に対応した計算をしている。地盤反力の分布形状をブロック単位で見ると、現行法では3ブロックとも台形分布で鉛直荷重を支えているのに対して、提案法では右端ブロック縁端が浮上がる形の三角形となる。これは最下段の段切り面におけるせん断バネのみが有効とした静定構造を仮定したものであるが、略算的には提案法の方がより合理的な接地圧分布を与えていると判断できる。

・構造事例(2)の場合

事例(2)に示す3階建ツーバイフォー住宅がもつ布基礎の検討では、現行法(2)において支持地盤の短期許容地耐力 σ を想定した解析手法が採用されている。

この事例(2)は、本論文2.(3)項の式(9)、(10)で扱う二つの未知数のうち、最大接地圧 σ_{max} を仮定し、一方の未知数 η を求めるという σ 仮定法である。この σ_{max} は、工学的判断に基づく予測値と考えられるが、結果的に安全性の過大評価につながっている可能性もある。

これに対して本論文提案法(2)では、既知のパラメータのみの設計情報で、中立軸から基礎右端までの距離として一つの未知数 y が容易に見つかるので、直ちに、最大接地圧などの計算が合理的にできる。

c) くい基礎の事例検討

・構造事例(3)の場合

T式橋脚(橋軸直角方向)剛体フーチングに設けられた構造事例(3)の群くい構造においては、くい頭ヒンジ結合を仮定してくい本数を推定する場合の計算を示した。

そもそも、フーチング底面に作用する面荷重は、くい基礎設計の場合には軸力に変換して扱われる。また、提案手法のように略算的な設計であっても、使用材料やフーチング底面とくい頭との結合などの条件によって、取り組みが大きく異なることは既に述べた。ここでは、引張力(引抜き力)を作用させるか否かは、設計上の選択肢の一つとしてとらえることとする。

そこで、現行法(3)の場合に対し、提案法(3)ではヒンジ結合を仮定した場合をまず示して、対応する計算精度を比較・検討している。結果として差異が生じているもののわずか3.2%である。実務において

この程度は、通常、許容される誤差として扱われており、結局、提案法の計算値はかなり正確で、期待通りの良好な精度を得たものと判断できる。

他方、くい基礎が被災した場合などを想定し、引抜き抵抗機能を失うことのリスクを定量的に簡単に予測できれば設計上きわめて有用である。提案法(4)では最終的に右端側くいの引抜き抵抗機能喪失を仮定した場合の計算を試みている。つまり提案法(4)は、現行法(3)または提案法(3)で仮定する(a_1, b_1)くい頭ヒンジ結合などの条件機能が喪失した場合における事例である。結局、くいに正の鉛直反力のみを与えてという設計条件下では、従来法の繰り返し計算の煩雑さに比して、新たな手法(提案法)を用いれば合理的に、かつ容易に解答を得ることができることを明らかにしている。

これら現行法、提案法により得られた最大接地圧の計算結果を表-6に示す。表-6は提案法による値を1としたときの現行法に対応する値の比率で示している。

6. 結論

本論文では、転倒モーメントの影響によって逐次変化する接地圧分布を明らかにするため、まず従来からよく知られている静力学的平衡条件下における梁理論式や修正モデルにおける解析法の問題点を指摘した。

次に、任意サイズの長方形を中心軸に関して左右対称に任意に組合せ・分割した剛体フーチング基礎を対象とし、新たな接地圧分布推定式を誘導した。これらの新たな推定式に基づいて、いくつかのケーススタディとして数値シミュレーションを行い、本手法の適応性や妥当性について検討した。

それらの結果、本論文において提案する手法は、以下のような特徴を有することが確かめられた。

(1) 剛なフーチングを介して支持地盤に伝達される基礎底面に発現する接地圧分布は、地盤と接触するフーチング底面の形状と、力のつり合い条件との再

表-7 提案した新しい手法(接地圧分布推定式)の特徴

推定式 注目点	一次方程式(15)		三次方程式(16)	
	yの値	$0 \leq y$	$y < 0$	$0 \leq y_i$ かつ $y_i < a_n$
圧縮縁端から 中立軸までの 距離 (x_n)	底面の外側 $x_n = L + y$	底面の内側 $x_n = L + y$	底面の内側 $x_n = L - y_i$	仮定基礎 ブロックの数を一つ減ら したブロック の数に対応 する式(15), (16) で再 計算する。
圧縮端の反対 縁端における 地盤接触面の 接地圧分布の 状態	圧縮状態	引張状態	浮き上って いる状態	
圧縮の反対側 基礎ブロックの 接地圧分布の 形状	台形分布	——	三角形分布	
適合判定	OK	NO	OK	NO
・計算ステップ	① 一次方程式を適用。 ② ①の解がNOであれば三次方程式を適用。 ③ 三次方程式の解がNOであれば基礎ブロック の数を一つ減じたnの対応式を適用。			

修正解析モデルを適用して得た中立軸の位置により求められる。

この中立軸は、想定する基礎底面の外にある場合には一次方程式(15)で、また、中立軸が底面の内にある場合には三次方程式(16)で容易に求められることが判明した。

(2) 一次および三次方程式の係数項は、フーチングの辺長 a_i, b_i , および、圧縮縁端より N の作用点までの距離 d のみの関数として表現され(表-1, 2), かつ基礎の組合せ・分割数 n に関し、ある種の規則性を有することが明らかになった。

(3) 基礎形状を決定する長方形の組合せブロック数 n が増加して複雑となる場合も、本論文で示す基礎

式(15), (16)の係数に見られる規則性を参考にすると、容易に拡張できることが確かめられた。

前項の検証結果を踏まえて、提案した新しい手法の特徴を表-7にとりまとめて示す。

引用・参考文献

- 1) 大崎順彦, 川崎孝人: 偏心荷重をうけた基礎盤に関する一実験, 建築研究報告 No. 18, pp. 1-23, 1956.
- 2) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, pp. 181-196, 1988.
- 3) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 日本港湾協会, pp. 481-485, 2000.
- 4) 大地羊三, 染谷弘, 山田晃, 編者土木学会: わかり易い土木講座 数学, pp. 24-27, 1969.
- 5) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, pp. 375-377, p. 379, pp. 158-166, p. 433, 2001.
- 6) 杭基礎のトラブルとその対策講座委員会: 杭基礎のトラブルとその対策, pp. 8-17, 土質工学会, 1992.
- 7) 右城 猛: 擁壁設計Q&A, pp. 140-142, 理工図書, 1998.
- 8) 建設省住宅建築指導課・木造住宅振興室, 枠組壁工法建築物木3共等計算事例編集委員会, 社団法人 日本ツアーフォー建築協会: 3階建ツアーフォー住宅構造計算の手引き, pp. 325-327, オーム社, 1995.
- 9) 矢作 枢, 五十嵐 功: 杭基礎の設計, pp. 81-92, 山海堂, 1996.

(2002. 2. 28 受付)

NEW CALCULATION METHOD OF THE DISTRIBUTION OF GROUND CONTACT PRESSURE UNDER IRREGULAR SHAPED RIGID FOUNDATIONS

Kenzo UEDA and Ryoichi FUKAGAWA

This paper proposes an easy method for calculating the contact pressure distribution in the bottom of foundations in order to facilitate optimum design of foundations used in all types of civil and building structures. The foundations in question have horizontal symmetry about the central axis and have a shape made up of rectangular combinations. Existing methods require the repetition of complex calculations, but with the method presented here, the contact pressure distribution can be calculated easily, even for quite complex shapes.