

基礎の設計法に関する検討

AN ANALYSIS MODEL OF FOUNDATIONS

小笠原 政文* , 角田 浩** , 原 隆史***

Masafumi OGASAWARA , Hiroshi TSUNODA and Takashi HARA

*首都高速道路公団 設計技術課 課長補佐 (〒100 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)

**首都高速道路公団 設計技術課 (〒100 東京都中央区霞ヶ関 1-4-1)

*** (株) 建設技術研究所 東京支社道路本部技術第7部 (〒103 東京都中央区日本橋 4-9-11 第9 中央ビル)

The current design method of foundations is developed following the way that the foundations are classified based on the rigidity and the mechanism of bearing capacity of the foundation. The researches were made on each type of foundation with different methods and no any effort was made on the compatibility of so developed design methods.

Considering the compatibility of design method of different type of foundations, the authors have made a study on standardized design model on purpose to estimating the safety of the foundation.

In this paper, the foundation was modeled as a unit column and good agreement was obtained between evaluation and measured data. The direction that bring the proposed method to design practice was also pointed out.

Key Words : design method of foundation, analysis model of foundation, column type foundation

1. はじめに

これまで基礎の設計は、杭、ケーソンおよび直接基礎といった各基礎形式ごとに異なった手法により行われており、この間の整合性は必ずしも図られていない。これは、それぞれの基礎の剛性を考慮した支持力発生機構により分類され、独自に実験や検討が行われて発展してきたためであると考えられる。

この様な設計法の分類は、近年の限界状態設計法の導入に関する研究や、兵庫県南部地震を踏まえた設計法の研究においても用いられており、大変位を対象として各基礎の挙動を考慮し、それぞれに異なった設計モデルが確立されつつある。

しかしながら、基礎ごとに設計法が研究される一方で、平成2年の道路橋示方書改定に伴う地盤反力係数算出式の統一化にみられるように、設計モデルを統一化する研究も進められている。設計モデルを統一化することは、各基礎間での設計法の整合性を図るとともに、一律に安全性を評価する上で望ましい形といえるが、現状では具体的な設計方法として確立されるにはいたっていない。

そこで筆者らは、既存の設計方法やその分類を一度白紙に戻した上で、過去に行われてきた大変位までを対象

とした載荷試験結果に着目し、各基礎の統一した設計モデルについて研究している。

今回の報告では、全ての基礎を単一の柱状体として評価した場合に実測値を比較的良好に再現しているためこれについて述べる。

2. 基礎の挙動

ここでは、過去に行われてきた載荷試験や実験に関する文献により、各基礎の挙動や支持力機構の特徴から、設計における統一した取り扱いについて考察する。

現在、一般に用いられている構造物の基礎としては、直接基礎、ケーソン基礎、地中連続壁基礎、鋼管矢板基礎および杭基礎などがあり、構造上の特徴から以下のように分類される。

- ・断面が水平方向に閉塞された基礎：ケーソン、地中連続壁、鋼管矢板
- ・断面が水平方向に分離された基礎：杭
- ・基礎底面が閉塞された基礎：直接、ケーソン
- ・基礎底面が閉塞されていない基礎：地中連続壁、鋼管矢板、杭

ここで、断面が水平方向に閉塞された基礎の挙動として、図-1に実物大地中連続壁基礎の大変形載荷実験¹⁾

を行ったときの地表面の破壊形状を示す。

これによると、基礎の前面における支圧と側面のせん断により、柱状体の外周部から一定の広がり範囲内において地表面にクラックが発生しており、地中連続壁基礎が変位する際の水平方向における地盤抵抗の極限状態を推定することができる。このような状況は、ケーソン基礎や鋼管矢板基礎といった水平方向に断面が閉塞された基礎に共通するものであると考えられる。

ただし、基礎の剛性が大きくかつ底面が閉塞された基礎の場合には、閉塞されていない基礎と比較して基礎底面の載荷面積の違いから基礎底面の回転挙動に伴う反力が大きく、基礎の水平挙動に及ぼす影響も大きくなるものとする。したがって、水平方向に断面が閉塞された基礎どうしであっても、ケーソン基礎のように基礎底面が完全に閉塞されたものと鋼管矢板基礎や地中連続壁基礎といったこれが不完全なものとはその違いを考慮する必要があり、これを適正に評価することによってこれらの基礎を同一に取り扱うことができるものとする。

図-2に模型実験を行った場合のケーソン基礎の地盤反力の発生状況²⁾を示す。

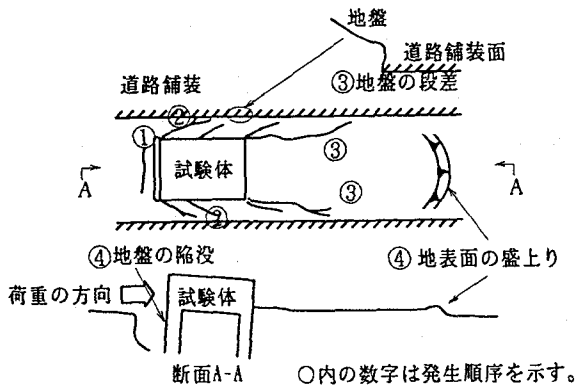


図-1 地中連続壁基礎の載荷試験による地表面の破壊形状¹⁾

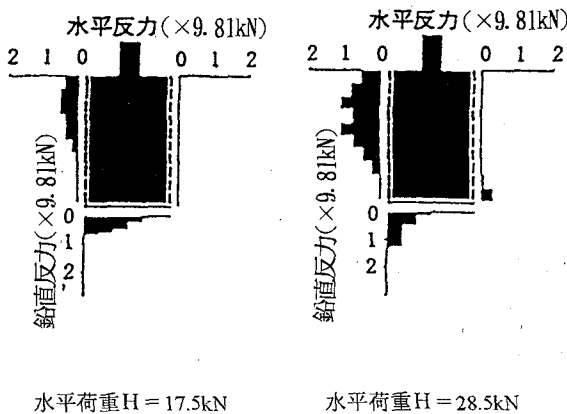


図-2 模型実験によるケーソン基礎の地盤反力発生状況²⁾

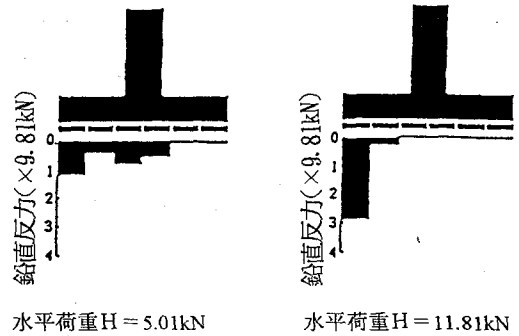


図-3 模型実験による直接基礎の地盤反力発生状況³⁾

また、図-3に模型実験での直接基礎における地盤反力の発生状況³⁾を示すが、直接基礎の鉛直地盤反力はケーソン基礎と同様な発生状況を示すことから、直接基礎も根入れの短い柱状体基礎として取り扱えるものとする。

つぎに断面および底面とも閉塞されていない杭基礎の挙動として、実物大の鋼管群杭基礎の載荷試験⁴⁾における大変位時の地表面の破壊形状を図-4に、群杭基礎の模型実験⁵⁾による各杭の深さ方向の変位分布を図-5に示す。

これらによると、地表面の破壊形状は図-1に示した地中連続壁基礎の場合と極似しており、また、各杭の深さ方向の変位分布は若干の違いはあってもほぼ各杭が同一の挙動を示しているなど、あたかも群杭基礎が一つの柱状体基礎として挙動している状況が推定される。このことは、杭間隔や変位量の大きさから水平方向における杭間の地盤のすり抜け挙動、基礎底面における閉塞状況に応じて厳密には異なった挙動を示しても、マクロ的には他の水平方向に断面が閉塞された一つの柱状体基礎と同様に取り扱えると考える。また、このような挙動は、ある模型実験⁶⁾において繰り返し水平載荷試験後に一度に全ての杭を引抜いた際、群杭と杭間の地盤が一体となって撤去されることから推定される。

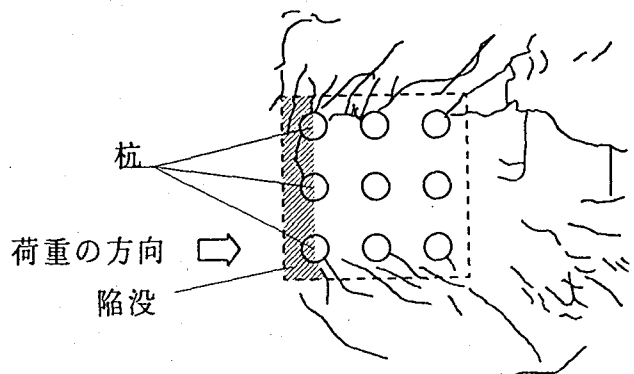


図-4 鋼管群杭の載荷試験による地表面の破壊状況⁴⁾

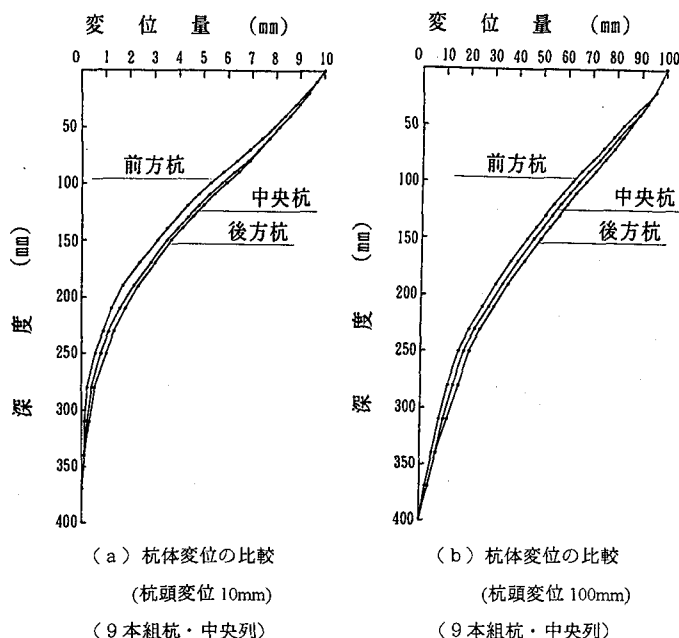


図-5 群杭の模型実験による各杭の
深さ方向の変位分布⁵⁾

3. 設計手法の提案

3. 1 基本的な考え方

先に述べてきた各基礎の挙動から、基礎の底面における閉塞効果を考慮した地盤反力発生機構についてこれを適正に評価することで、一つの柱状体モデルにより直接基礎から杭基礎にいたるまでを同一な設計手法が可能であると考えられ、ここでは図-6に示すモデルを仮定した。このモデルは、水平方向の断面と底面についてそれぞれの閉塞効果を考慮して各基礎を一つの断面剛性を有する柱状体と仮定し、地盤の抵抗機構を前面の圧縮、側面のせん断、および底面の圧縮とせん断により評価するものとしている。

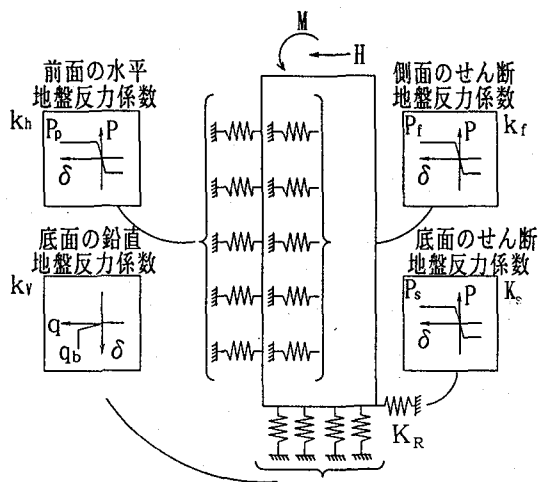


図-6 単一柱状体モデル

ここで、当該モデルの変形性能、および抵抗機構は次のように仮定する。

(1) 柱状体の曲げ剛性

柱状体の曲げ剛性は、図-7に示すように基礎の外周を柱状体の中実断面と仮定、これを全断面有効として算出する。

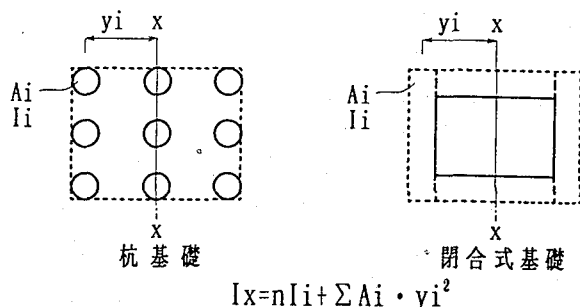


図-7 基礎体の曲げ剛性

(2) 基礎の挙動と地盤抵抗の関係

基礎の挙動と地盤抵抗の関係としては、基本的に従来から用いられているウィンクラーの離散バネモデルを用いて変位と反力は比例するものとするが、図-8に示すように上限値を設けて弾塑性とする。

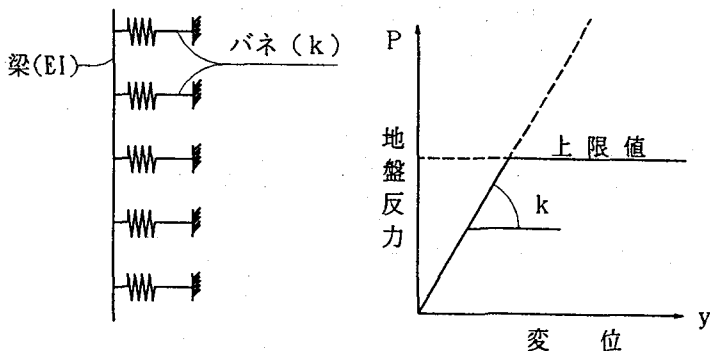


図-8 基礎の挙動と反力の関係

(3) 地盤反力の種類と上限値

地盤反力は、図-6に示すとおり基礎の挙動に応じてそれぞれ基礎前面の圧縮地盤反力、側面のせん断地盤反力、底面の圧縮およびせん断地盤反力を考慮する。この際のそれぞれの地盤反力の上限値は以下に示す通りとし、一部が塑性領域に達した後も計算を行う。

- ・前面の圧縮地盤反力度：受働土圧
- ・側面のせん断地盤反力度：地盤と基礎との摩擦力度
- ・底面の圧縮地盤反力度：極限支持力度

なお、浮き上りを考慮し、下限値は0とする。

・底面のせん断地盤反力：底面と基礎地盤との摩擦力
ここで底面の地盤反力についても塑性化を考慮することで、当該モデルの短いタイプとして直接基礎も取り扱う。

(4) 基礎体の非線形モデル

基礎を一つの柱状体として評価したM-φ曲線から等価線形モデルで計算する。

3. 2 安定計算

安定計算は、図-6に示した柱状体モデルを荷重条件も含め簡易的に図-9に示す梁バネモデルを仮定して行う。ここで、各抵抗バネは次のようにモデル化する。

・基礎中間部の軸直角バネ (k_h)

図-6に示した前面の水平方向地盤反力係数と側面のせん断地盤反力係数は、それぞれ前面幅と側面幅を考慮して一つのバネとして取り扱うが、それぞれに塑性化が異なって発生するため、トリリニアなバネと仮定する。

・基礎底面の回転バネ (K_R)

ここでは、底面幅が有限な柱状体モデルを梁バネモデルとして取り扱うため、底面直角方向に分布するバネを基礎底面の断面二次モーメントを用いて一つの回転バネとして評価する。

ただし、底面地盤反力の一部が極限支持力度に達した場合や浮き上がりの発生に伴い、非線形なバネとして取り扱う。

・基礎の底面のせん断バネ (K_s)

基礎底面のせん断バネは、底面積を考慮してバイリニアなバネとする。

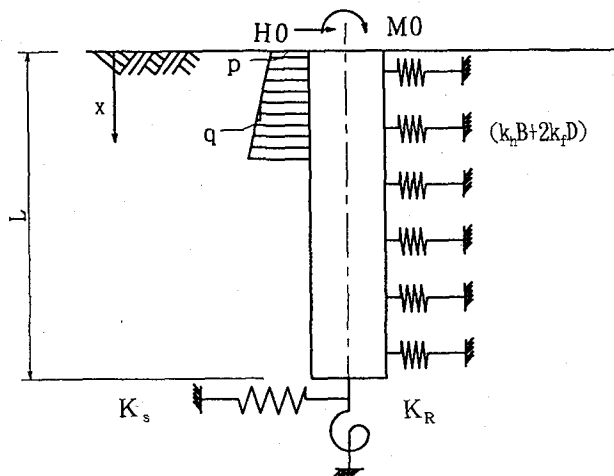


図-9 計算モデル

この際の基礎中間部における水平方向の荷重のつり合いは(式-1)となる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + (k_h B + 2k_f D)y - (p + qx) = 0 \quad (\text{式-1})$$

ここに、EI: 基礎の曲げ剛性 (kNm^2)

y: 水平変位量 (m)

x: 基礎頭部からの深さ (m)

k_h : 基礎前面の水平方向地盤反力係数

(kN/m^3)

k_f : 基礎側面の水平方向せん断地盤反力係数

(kN/m^3)

B: 柱状体基礎の前面幅 (m)

D: 柱状体基礎の側面幅 (m)

p: 基礎頭部での水平方向分布荷重 (kN/m)

q: 深さ方向の増加水平方向分布荷重

(kN/m/m)

ここで、基礎頭部と底面の境界条件は、以下のように仮定した。

・基礎頭部 ($x=0$)

$$EI[y'']_{x=0} = M_0 \quad (\text{式-2})$$

$$EI[y''']_{x=0} = H_0 \quad (\text{式-3})$$

・基礎底面 ($x=L$)

$$-EI[y''']_{x=L} = K_s[y]_{x=L} \quad (\text{式-4})$$

$$-EI[y'']_{x=L} = K_R[y']_{x=L} \quad (\text{式-5})$$

ここに、 M_0 : 基礎頭部に作用するモーメント (kNm)

H_0 : 基礎頭部に作用する水平力 (kN)

K_R : 基礎底面の回転バネ定数 (kNm/rad)

$$K_R = k_v \cdot I$$

K_s : 基礎底面のせん断バネ定数 (kN/m)

$$K_s = k_s \cdot A$$

k_v : 基礎底面の鉛直方向地盤反力係数

(kN/m^3)

k_s : 基礎底面の水平方向せん断地盤反力係数

(kN/m^3)

I: 柱状体基礎の断面二次モーメント (m^4)

A: 柱状体基礎の底面積 (m^2)

L: 基礎頭部から底面までの長さ (m)

これらを用いた具体的な計算手法としては、水平方向のつり合い式の一般解から伝達(剛性)マトリクスを作成し、境界条件を考慮することで簡単に算出することができる。このような計算は従来から一般に行われているため、具体的なマトリクスの構築などについては紙面の都合上割愛させていただき、つり合い式の一般解のみ(式-6)に示す。

なお、ここでは一層地盤を対象として述べているが、多層地盤の場合には層ごとにマトリクスを作成して伝達させて計算を行う。

$$y = c_1 e^{\beta x} \cos \beta x + c_2 e^{\beta x} \sin \beta x + c_3 e^{-\beta x} \cos \beta x + c_4 e^{-\beta x} \sin \beta x + \frac{p + qx}{khB + 2kfD} \quad (\text{式-6})$$

$$\text{ここに、} \beta = \sqrt{\frac{khB + 2kfD}{4EI}}$$

3. 3 応力計算手法

応力計算については、安定計算において基礎の挙動をよく再現し、かつ理論的にも整合性が図られた段階において、材料非線形も含めた形で検討を行っていく予定であり、今後の課題とされるところである。

しかしながら、応力計算は基礎の断面を決定する上での重要な照査項目であることから、その方向性について検討しておくこととした。

ここで、従来から一体基礎として安定計算が行われているケーソン、地中連続壁および鋼管矢板などの基礎は、ここから得られる軸方向応力や地盤反力度から直接あるいは応力分配を考慮して計算され、直接基礎についても安定計算から得られる底面の地盤反力により剛体理論で計算可能である。ただし杭基礎については、杭一本あたりの照査が必要であるとともに、フーチングとの結合部も問題とされるところから、応力分配や非線形性の取り扱いについて今後検討していく必要があるが、ここでは次に示す計算手法を仮定した。

(1) 杭頭結合部のモーメント

杭頭モーメントについては、載荷重に対する変位量およびこれを再現する水平方向の地盤反力係数が安定計算より既知であるため、杭頭を拘束した chang の式により杭の特性値 β を逆算することで、(式-7)により計算することができる。

$$M_t = M_0 + M_1 \quad (\text{式-7})$$

ここに、 M_t : 杭頭モーメント (kNm)

M_0 : フーチング底面のモーメント荷重による杭頭モーメント (kNm)

M_1 : フーチング底面の水平荷重による杭頭の拘束モーメント (kNm)

$$M_1 = \frac{H}{2\beta n} \quad , \quad \beta = \frac{\delta \cdot kh \cdot d}{H}$$

d : 杭径 (m)

(2) 地中部のモーメント

鋼管矢板基礎における鋼管矢板の断面を設計する際に用いられている応力分配法⁷⁾を参考として、次のように換算する。

$$\sigma_x = \frac{V_0}{nA_0} + M_x \left(\frac{\eta}{I_B A_0} y_i + \frac{1-\eta}{nZ_0} \right) \quad (\text{式-8})$$

$$\sigma_i = \frac{V_0}{nA_0} + \frac{M_{mi}}{Z_0} \quad (\text{式-9})$$

$$M_{mi} = M_x \left(\frac{\eta}{I_B A_0} y_i + \frac{1-\eta}{nZ_0} \right) \quad (\text{式-10})$$

ここに、 M_{mi} : i 番目の杭の地中部任意点でのモーメント (kNm)

M_x : 安定計算で得られた単一柱状体の地中部任意点でのモーメント (kNm)

A_0 : 単一柱状体の断面積 (m^2)

I_B : 単一柱状体の断面二次モーメント (m^4)

Z_0 : 一本の杭の断面係数 (m^3)

n : 杭本数

y_i : i 番目の杭図心から単一柱状体中立軸までの距離 (m)

η : モーメントの配分率で鋼管矢板基礎に準ずる⁷⁾

4. 実測値との検証

ここでは、3. で述べた設計手法により実測値との検証を行い、基礎の設計における単一柱状体を用いた統一化モデルの実用性について確認した。

4. 1 計算条件の仮定

具体的な計算を行うにあたって、以下の条件を仮定した。

(1) 柱状体の曲げ剛性

単一柱状体の曲げ剛性を算出するにあたって、侠在する地盤の剛性は考慮しない。

(2) 地盤反力係数

基礎前面と側面の地盤反力係数は、地中連続壁を設計する際の係数⁸⁾を用いて、柱状体の基礎幅を載荷幅の基準として算出する。底面の鉛直地盤反力係数、およびせん断地盤反力係数は道路橋示方書⁹⁾による。

(3) 底面の回転バネ定数とせん断バネ定数

底面の回転バネ定数は、一部が極限地盤反力に達したり浮き上がりが発生することで非線形なバネとなり、せん断バネ定数は塑性化することでバイリニアなバネとなるが、ここではこれらをその都度等価線形モデルとして取り扱う。

(4) 基礎体の非線形モデル

今回の検討では、基礎の設計における統一化モデルとしての単一柱状体の実用性を検証することを主な目的としており、基本的には弾性体モデルで計算を行った。

ただし、試算の結果場所打ち杭については材料非線形の影響が大きいと考えられたため、今後このようなモデ

ル化の妥当性については十分に検討する必要があるが、図-10に示すような中実モデルを仮定して $M-\phi$ 曲線を設定した。これは、仮定した単一柱状体モデルと同一の断面高さを有する等価断面剛性の梁（中実モデル）を仮定し、鉄筋は断面に対する中立軸からの作用高さが杭配置を考慮したときと同一となるように各杭の鉄筋を配置したものである。

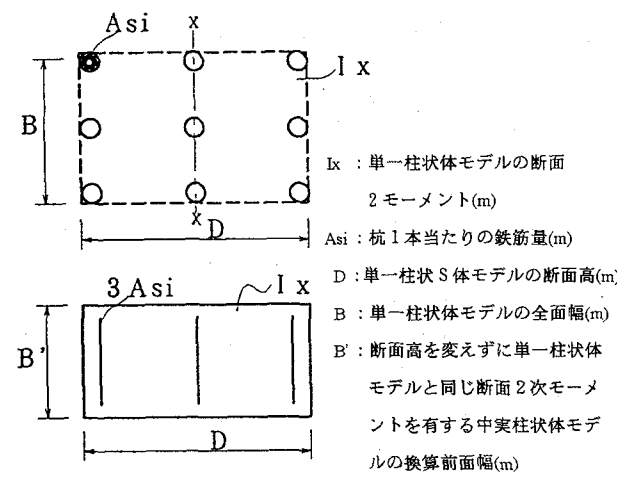


図-10 場所打ち群杭の $M-\phi$ 曲線計算モデル

4. 2 安定計算結果

ここでは、杭基礎⁴⁾ 10) と地中連続壁基礎¹⁾ については実物大の載荷実験の結果、直接基礎については模型実験から検討されている応答回転角モデル³⁾ と比較した。

図-11に各基礎の挙動（頭部での荷重-変位曲線）をシミュレートした結果を示す。

これらの結果によると、いずれの場合も単一柱状体モデルは、基礎の微小な変位から大変位にいたるまでの挙動をよく再現している。また、図-12にはこれらのうち場所打ち群杭¹⁰⁾ の深さ方向の変位分布について実測値と計算値を比較した結果を示すが、この結果において

も計算値は微小な変位から大変位にいたるまで実測値を比較的良好に再現している。

これらのことは地盤の閉塞効果、およびこれに伴う地盤抵抗をマクロ的に評価した柱状体モデルは、各基礎の統一した挙動の予測に際して有効な手法であると考えられる。ただし、図中に示している α_p 、 α_k は、実測値を再現するためにそれぞれ地盤反力上限値と地盤反力係数に乗じた補正係数であり、比較結果によるとこれらの値は基礎に応じて大きくばらついているため、地盤反力係数やその上限値の設定法、あるいは従来から用いてきたウィンクラーの離散バネモデルの適正について今後検討していく必要がある。

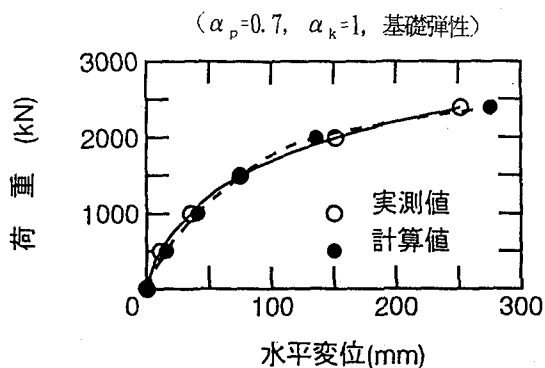
しかしながら、これらのばらつきに関わらず、各基礎の実挙動を再現し得たことは、各基礎の挙動再現に際し今回提案した単一柱状体モデルの実用性を確認し得たものと考えている。

なお、鋼管杭と地中連続壁については、基礎を弾性とし地盤の非線形性のみで挙動を再現することができたが、場所打ち杭の場合には荷重-変位関係の折れ点を明確にするため、先に仮定したような基礎体の非線形評価の影響が大きいことを確認した。

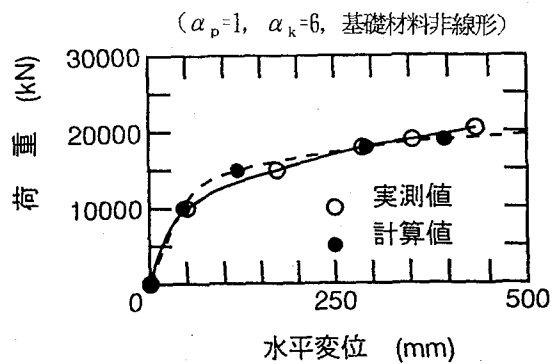
4. 3 応力計算結果

図-13に鋼管群杭⁴⁾ の発生応力度について、水平荷重 1570kN における各杭の実測値と計算値とを比較した結果を示す。計算値は、先に仮定した手法から杭頭部と地中部とを別々に計算しており、図中ではこれを便宜上連続して表示している。これによると、計算値は実測値をほぼ設計上安全な範囲で再現していると考えられる。

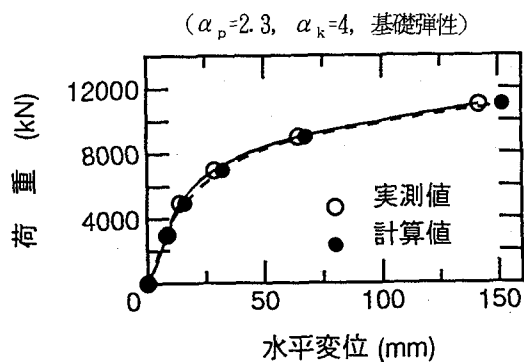
今回の比較は、既存の設計法を応用した一手法により、杭基礎の応力照査の方向性を確認するために行ったものであるが、比較的良好にこれを再現しうることを確認し、今後非線形や理論的な応力分配についての検討やさらに多くの実測値との比較を行う必要があるが、単一柱状体モデルにより杭基礎の応力照査を行うことは可能であると考えられる。



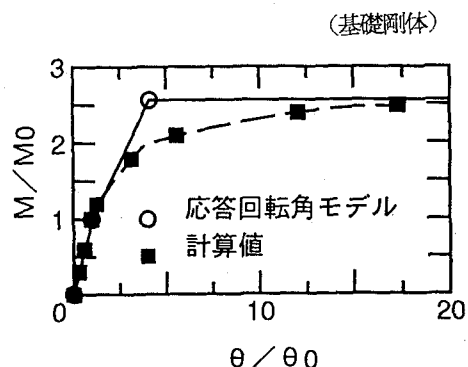
(a) 鋼管群杭⁴⁾



(b) 場所打ち群杭¹⁰⁾



(c) 地中連続壁基礎¹⁾



(d) 直接基礎³⁾

図-11 単一柱状体モデルによる実測値の比較

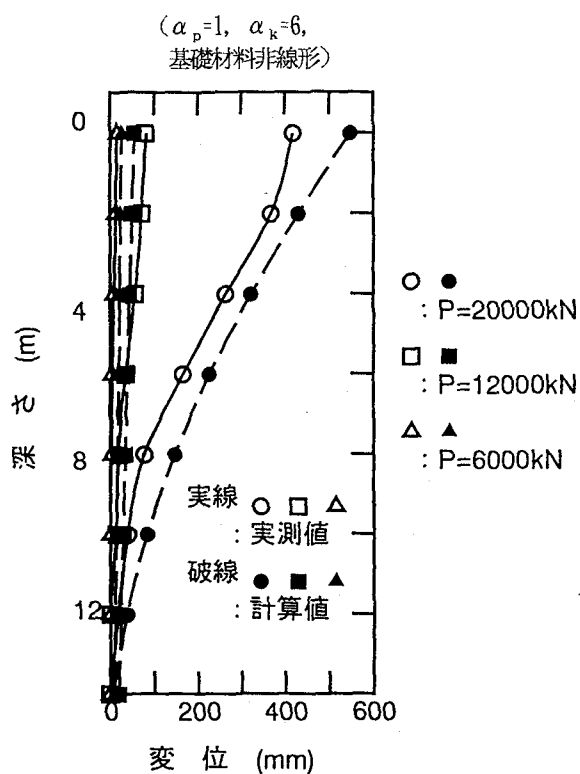


図-12 場所打ち群杭¹⁰⁾ (前列杭) 深さ方向の変位分布

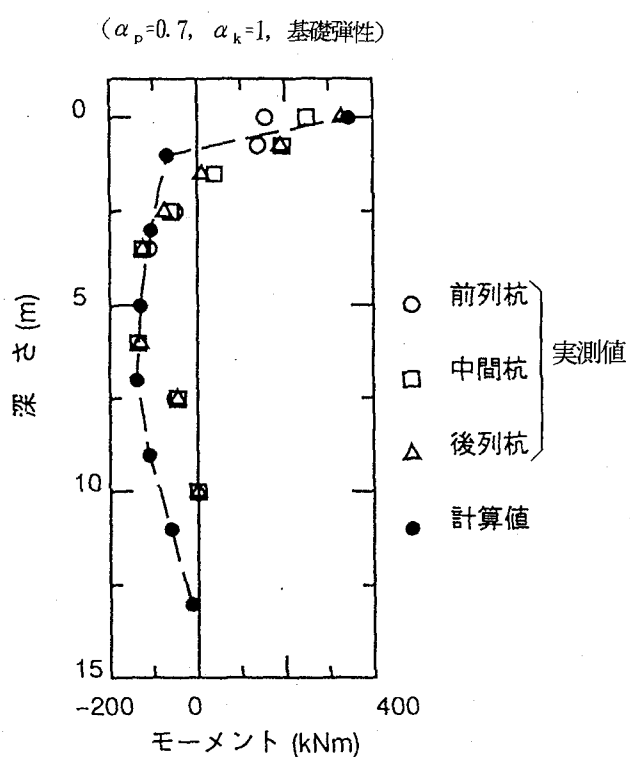


図-13 鋼管群杭⁴⁾ の深さ方向の応力分布 (1570kN)

5. まとめ

今回の報告をまとめると、次の内容に整理することができる。

- ①過去の載荷試験結果などを調査した結果、直接基礎から杭基礎にいたるまで単一の柱状体モデルで挙動を説明できるものと考えられた。
- ②計算手法と条件を仮定し、柱状体モデルを用いて各基礎の挙動をシミュレートした結果、実測値をよく再現しており、挙動の予測に伴う柱状体モデルの実用性を確認した。
- ③挙動の再現にあたり、地盤反力係数と地盤反力の上限值に対する補正係数は、基礎に応じてばらつきがある。
- ④ 挙動の再現にあたり、基礎体の非線形性の影響は、場所打ち杭の場合に大きい。
- ⑤ 既存の設計法を応用した一手法により杭基礎の応力度をシミュレートした結果、比較的よくこれを再現することを確認し、単一柱状体モデルにより各基礎の応力照査を行うことは可能である。

6. おわりに

本報文では、基礎の支持機構をマクロ的に取り扱った単一柱状体モデルを仮定することで、直接基礎から杭基礎にいたるまでの各基礎の水平挙動に対する再現性がよいことを確認した。

今後は、この手法を設計法として実用化していくため、より多くの実測値との検証を行い、地盤抵抗のばらつき、材料非線形の取り扱いおよび応力計算法などについて検討を行っていきたいと考えている。

7. 参考文献

- 1)飯島、鈴木：「地中連続壁基礎の大変形水平載荷試験」、基礎工 Vol.17 No.1 (1989)
- 2)神田、棚村、下村、羽矢、西村：「大規模地震を考慮したケーソン基礎の設計法」、基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム(1995)
- 3)羽矢、西村、下村、室野：「直接基礎の限界状態設計法試案」、基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム(1995)
- 4)小笠原、飯古、五瀬、川口：「杭基礎の耐力に関する研究」、構造工学論文集(1991)
- 5)岡原、中谷、木村、高木、社森：「群杭模型の水平方向載荷実験」土木研究所資料 第3079号 (1994)
- 6)西村：「土木学会講習会（基礎と地盤との動的相互作用）における講演」(1992)
- 7)日本道路協会：「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」
- 8)日本道路協会：「地中連続壁基礎設計施工指針・同解説」(1991)
- 9)日本道路協会：「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」(1990)
- 10)幸左、森田、鈴木：「実杭基礎による大規模水平載荷試験」基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム(1995)

(1996 年 月 日受付)