

細径鋼管により地盤補強した基礎の沈下挙動とその予測法

第2報 沈下予測法の提案

FOUNDATION SETTLEMENT ON THE REINFORCED GROUND BY SLENDER PIPES AND ITS PREDICTION METHOD

Part 2 Prediction method of foundation settlement

若命善雄*, 榎並 昭**, 真島正人***, 長尾俊昌****

Yoshio WAKAME, Akira ENAMI, Masato MAJIMA and Toshiaki NAGAO

We developed calculation method to predict foundation settlement on the ground reinforced by slender steel pipes. In this method, contact load of foundation slab and load of pile are considered separately. Settlement of foundation slab and slender piles be calculated using Steinbreener's Solution and Mindlin's Solution. The simple equation can be derived assuming that foundation slab are rigid and each pile load are equal to same value

To verify the method for its validity, simulation analyses were carried out. As a result of simulation, not only settlement of foundation slab but also pile load are approximate agreement with test results

Keywords : slender steel pile, foundation settlement, reinforced ground, prediction of settlement, parameter study, simulation analysis

細径鋼管, 基礎の沈下, 地盤補強, 沈下予測法, パラメータスタディ, シミュレーション解析

1. まえがき

筆者らは、軟弱地盤上に建設される戸建て住宅の沈下障害の防止を目的として、基礎スラブ直下の地盤中に、直径約5cmの細径鋼管を配置して地耐力増加を図る地盤補強工法を開発し、既に400件以上の住宅に適用した。

本工法の開発過程において、室内実験及び原位置実験が実施されたが、実験結果とそれらより得られた知見については、前報¹⁾で報告した。本論文では、細径鋼管により補強された地盤上の基礎の沈下予測について、その予測方法・実験結果のシミュレーション結果及びその適用性について検討した結果について述べる。

2. 沈下予測法の提案

図1に細径鋼管で補強された地盤上の基礎の断面図を示す。基礎を含む建物重量は、基礎スラブより直接地盤に伝達されると同時に、細径鋼管を介して地盤に伝達される。前報で述べたように、細径鋼管による基礎の沈下

低減効果は、荷重の一部が細径鋼管から地盤に伝達されることにより発揮される。これは摩擦杭を用いる場合やパイルドラフト基礎とした場合に沈下低減効果が期待できるのと基本的には同一と思われる。

パイルドラフト基礎に関する解析については、比較的古くから研究が行われており、これまでに幾つかの沈下予測法が提案されている^{2)~7)}。しかしながら、これらの解析は、いずれも中規模程度の建物基礎の設計を対象としており、本研究で対象とする戸建て住宅の設計に用いるには、やや難しい面があるように思われる。

そこで、本論文では、細径鋼管で補強された地盤上の基礎の沈下予測を目的として、基礎及び細径鋼管からの荷重伝達を考慮した比較的簡便な沈下予測法を提案する。

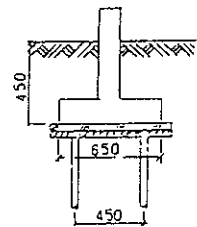


図1 基礎形状

* 大成建設(株)技術研究所

** 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

*** 大成建設(株)技術研究所

**** 大成建設(株)技術研究所

Technology Research Center, Taisei Corporation

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Nihon Univ., Dr. Eng.

Technology Research Center, Taisei Corporation

Technology Research Center, Taisei Corporation

2. 1. 沈下予測法

2. 1. 1 荷重伝達機構のモデル化

図2(a)に示すように、細径鋼管（以下鋼管と呼ぶ）で支持された基礎に作用する鉛直荷重は、基礎底面と鋼管周面及び先端から地盤に伝達される。これら荷重の伝達を基礎からの伝達と鋼管からの伝達に分離する。そして基礎からの荷重は地盤表面に等分布荷重として、鋼管からの荷重は地盤中の等価荷重面から円形の等分布荷重として地盤に伝達されると考える（図2(b)）。このうち、等価荷重面における荷重半径は、鋼管側面からの摩擦による荷重が地盤中に分散されることを考えて、鋼管頭部からの荷重分散係数 γ によって決定されるものとする。

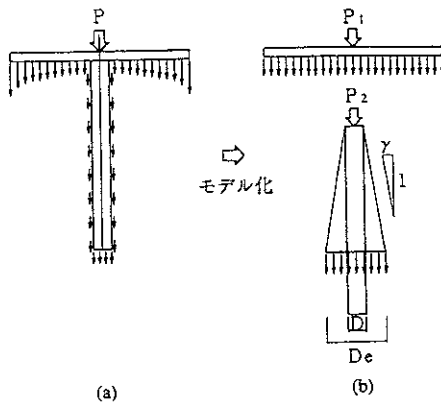


図2 荷重伝達機構のモデル化

基礎からの伝達荷重による地盤の沈下にはSteinbrennerの解¹⁰⁾を、鋼管からの伝達荷重による沈下には、Mindlinの解¹¹⁾をそれぞれ適用することにより、基礎及び鋼管からの荷重による地盤の沈下を近似する。また、等価荷重面の深さは、摩擦杭の沈下計算に用いられる仮想荷重面の考え方に準じて求める¹²⁾。

(1) Steinbrennerの解

半無限地盤上に $a \times b$ の長方形分布荷重が作用するとき、その隅部の深さ z における沈下量 ω は、式(1)により求めることができる。

(2) Mindlinの解（第1解）

半無限地盤中の深さ c の位置に、半径 R の円形等分布荷重(p_0)が作用した場合、中心軸上の深さ z における

沈下量は、式(2)のように求められる。

$$\omega = -\frac{b p_0 (1-\nu)}{2 \pi E} \left[\log_e \left(\frac{\sqrt{1+m^2+n^2}+m}{\sqrt{1+m^2+n^2}-m} \right) + m \log_e \left(\frac{\sqrt{1+m^2+n^2}+1}{\sqrt{1+m^2+n^2}-1} \right) - \frac{1-2\nu}{1-\nu} n \tan^{-1} \left(\frac{m}{n \sqrt{1+m^2+n^2}} \right) \right] \quad (1)$$

$$\omega = -\frac{p_0}{8(1-\nu)G} \left[(3-4\nu) \left(\sqrt{R^2+(z-c)^2} - (z-c) \right) - \frac{(z-c)^2}{\sqrt{R^2+(z-c)^2}} + z-c + (5-12\nu+8\nu^2) \left(\sqrt{R^2+(z+c)^2} - (z+c) \right) - (3-4\nu)(z+c)^2 - 2c(z+c) + 2c^2 \right] \left(\frac{1}{\sqrt{R^2+(z+c)^2}} - \frac{1}{z+c} \right) - 2(z+c)^2 z c \left(\frac{1}{(R^2+(z+c)^2)^{3/2}} - \frac{1}{(z+c)^3} \right) \quad (2)$$

E : ヤング率, G : せん断剛性, ν : ホアソン比,
 p_0 : 分布荷重, $m=a/b$, $n=Z/b$

2. 1. 2 釣合方程式

基礎と杭からの荷重の伝達を図2のように近似すると、地盤表面及び地盤内の等価荷重面における沈下は、図3(c)のようになると考えられる。即ち、基礎からの荷重による変形（図3(a)）と杭からの荷重による変形（図3(b)）が影響し合い、最終的な変形形状となっていると考えることができる。先に述べように、基礎からの荷重による変形をSteinbrennerの解を用いて杭からの荷重による変形をMindlinの解を用いて求めれば、図3(c)の荷重条件での地盤の変形を求めることができることになる（基礎剛性が無視できる場合）。本解析法で解析の対象とするのは、図1に示した住宅の基礎であり、細径鋼管の打設間隔を考えると、基礎は事実上剛と考えて良い。そこで、基礎の沈下量と鋼管の等価荷重面での沈下量が等しいとした以下の釣合式を考える。

$$\frac{\omega_{BC} + \omega_{BT}}{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_p \quad (3)$$

ω_{BC} : 基礎スラブ中央部の沈下量 ω_{BT} : 基礎スラブ隅部の沈下量
 ω_p : 等価荷重面における杭の沈下量 n : 杭本数

式(3)の左辺は、基礎が剛な場合の変位を近似するものであり、右辺は等価荷重面における杭の平均変位を表している。つまり、式(3)は杭の平均変位が剛な基礎の変位に等しいとするものである。式(3)から、沈下量を計算す

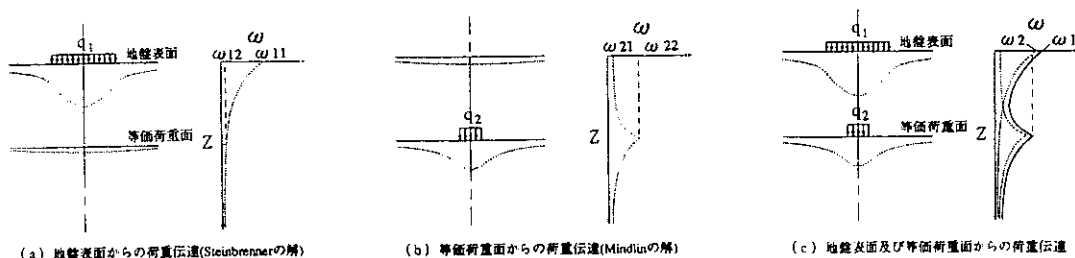


図3 半無限地盤における荷重伝達と変位

るには、各影響係数の他に、基礎及び各杭の分担荷重を求める必要があるが、本研究では、各杭の分担荷重は全て等しいと仮定する。即ち、基礎に作用する荷重をPとし、基礎の荷重分担率を α とすると、杭1本当りの分担荷重は $P(1-\alpha)/n$ で定義する。これより、変形に関する基礎の釣合式は、以下のように示される。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(U_{BBC} \cdot \alpha \cdot P + U_{BBT} \cdot \alpha \cdot P \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n U_{MBCi} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{P}{n} + \sum_{i=1}^n U_{MBTi} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{P}{n} \right) \\ & = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n U_{BMGi} \cdot \alpha \cdot P + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n U_{MMGij} \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{P}{n} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

U_{BBC} : 基礎スラブ荷重による基礎スラブ中央部への変位影響係数
 U_{BBT} : 基礎スラブ荷重による基礎スラブ隅部への変位影響係数
 U_{BMGi} : 基礎スラブ荷重によるi番目の杭の等価荷重面への変位影響係数
 U_{MBCi} : i番目の杭の荷重による基礎スラブ中央部への変位影響係数
 U_{MBTi} : i番目の杭の荷重による基礎スラブ隅部への変位影響係数
 U_{MMGij} : i番目の杭の荷重によるj番目の杭の等価荷重面への変位影響係数

式(4)から、基礎スラブの荷重分担率 α は式(5)のように表現される。式(5)より求めた α を用いて、式(4)の左辺(または右辺)を計算すれば、それが求める沈下量 w である。

$$\alpha = \frac{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_{MMGij} - n \sum_{i=1}^n (U_{MBCi} + U_{MBTi})}{n^2 (U_{BBC} + U_{BBT}) - \sum_{i=1}^n \left(n (U_{MBCi} + U_{MBTi}) - 2n U_{BMGi} \right) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_{MMGij}} \quad (5)$$

2. 1. 3 有限厚さ地盤への適用

本解析法では、Steinbrennerの解を用いて基礎荷重による基礎と杭への影響を、Mindlinの解を用いて杭荷重による基礎と杭への影響を求める。これらの解は、半無限弾性体での解であるため、有限厚さで多層である実際の地盤にはそのまま適用することはできない。そこで、まず有限厚さ(厚さ h)の地盤では、地表面の沈下(w_0)とその真下 h における沈下(w_h)の差として沈下量($w_0 - w_h$)が求まるものとする。そして多層地盤の場合は、各層ごとの圧縮量 ΔS をこの方法で求め、地表面の沈下量 S を $S = \sum \Delta S$ で計算することとした。この方法は、Steinbrennerの近似解として知られる方法と同一であり、Steinbrennerの解の場合には変位の影響係数(沈下量)が深度とともに小さくなるため、不都合は生じない。しかし、Mindlinの解の場合、荷重面の位置によっては、荷重面のある層の圧縮量が見かけ上負となることが考えられる。これは、Mindlinの解では荷重面より上方の地盤には引っ張りが生じているためである。このため、本解析法では、Mindlinの解によるある層の圧縮量が負となった場合には、これを0とする補正を行っている。

2. 2. パラメトリックスタディ

本報で提案した解析法による結果の安定性及び結果に与える各パラメータの影響について考察するため、パラ

メトリックスタディを実施した。表1に解析に用いたパラメータの一覧を示す。解析は、均一地盤について行い、①等価荷重面深さ c 、②地盤厚さ H 、③基礎幅 B (基礎の大きさは $B \times B$)、④荷重分散係数 γ 、⑤杭本数の5つのパラメータを表に示す範囲で変化させた。杭本数が2本以上(以下群杭と呼ぶ)の場合については、実際の布基礎の形状を考慮して、図4に示すように杭2本当りの基礎の形状を一定($65\text{cm} \times 65\text{cm}$)として、杭本数とともに基礎幅も変化させた。

表1 解析パラメータ一覧

項目	使用値
等価荷重面深さ C/D	1.0 ~ 2.00
地盤厚さ H/D	5.0, 1.00, 2.00, ∞ (半無限)
基礎幅 B/D	6, 1.2, 2.4
杭本数 N	2, 4, 8, 16
荷重分散係数 γ	0 ~ 1.0 (0 ~ 45度)
杭径 D(cm)	5.0
地盤のヤング率 E(kg/cm ²)	1.0, 0
地盤のポアソン比 ν	0.4

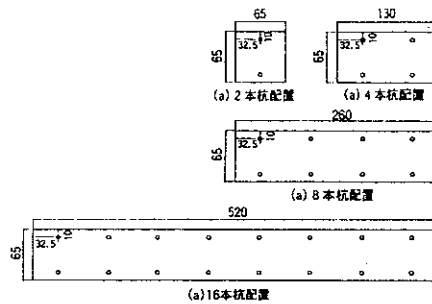


図4 杭本数と基礎スラブ形状の関係

2. 2. 1 荷重分散係数の影響

図5に杭本数が1(以降単杭と呼ぶ)、半無限地盤($H/D = \infty$)で、基礎幅(B/D)が6の場合の結果を示す。図には杭の荷重分担率と基礎の沈下率について、それぞれ等価荷重面深さを変えた5種類の結果について示した。ここで、沈下率とは、基礎の沈下量を、杭が無い場合の剛な基礎の沈下量で除して求めた値をいう。沈下率が小さい程、鋼管による基礎の沈下低減率が大きいことを意味する。同図から、 γ が大きい程、杭の荷重分担率は大きくなり、基礎の沈下率は小さくなるのが分かる。同一の γ では、 C/D が大きい程、その傾向は顕著である。

2. 2. 2 等価荷重面深さの影響

図6は、図5と同一条件での計算結果を、横軸に C/D をとって示したものである。図から明かなように、 γ が一定ならば、 C/D が大きい程沈下率は小さくなる。ただし、 $\gamma=0$ の場合、 C/D の変化による杭の荷重分担率・基礎の沈下率に大きな変化はない。これは、 $\gamma=0$ では等価荷重面の半径(以下、荷重半径と呼ぶ)が変化しないためである。図6より、異なる深さで荷重半径がほぼ等しくなる点の結果(例えば、 $\gamma=0.025$ で $C/D=100$ と $\gamma=0.05$

で $C/D=50$)を比較すると分かるように、荷重面深さの影響はあまり大きくない。これより、沈下率に大きな影響を与えるのは主として荷重半径であることが分かる。

2. 2. 3 層厚の影響

図7は、等価荷重面以深の地盤厚さが解析結果に与える影響を見るため、半無限地盤と有限厚さ地盤($H/D=200$)との沈下率の差を示したものである(単杭の場合)。図から、 $\gamma=0$ の場合は、半無限地盤との差は殆どないが、 γ が大きくなると、半無限地盤との差は大きくなる。 $H/D=200$ の場合、 C/D が150、即ち、層厚の75%以浅に等価荷重面がある場合は、 $\gamma \leq 0.2$ の範囲では半無限地盤との沈下率の差は4%以下であることがわかる。

2. 2. 4 基礎幅の影響

他の条件が同一(単杭で、 $H/D=50, C/D=20$)で、基礎幅($B \times B$)を変えた場合の解析結果の一例を図8に示す。図から、基礎幅を大きくすると、沈下率は増加し、杭による沈下低減率は減少することが分る。これは、 B/D を大きくすると、基礎スラブの面積に対する等価荷重面の面積が相対的に小さくなるためと思われる。 $\gamma=0$ の場合には、 B/D による沈下率の変化は他に比べて小さい。

2. 2. 5 杭本数の影響

図9に、半無限地盤で $C/D=20$ の場合、杭本数を2~16本に変化させた計算結果を示す。図4に示したように、杭本数を変える場合には、杭1本当りの基礎スラブ面積が等しくなるように、基礎幅を変化させている。図から、杭本数が多い程沈下率は大きくなる。これは、杭本数が増加すると互いに影響し合う度合いが強くなり、杭1本当りの基礎スラブ面積が同じでも沈下低減効果が低くなるためと考えられる。杭本数による影響は γ が大きい程顕著になるが、影響の程度は杭本数に比例するわけではなく、次第に低下する傾向にある。

2. 2. 6 パラメトリックスタディのまとめ

各パラメータが計算結果に与える影響及び提案した沈下予測法の解の安定性について、以下のようにまとめることができる。

- 1) 各パラメータのうち、結果に大きな影響を与えるのは、荷重分散係数と等価荷重面深さ(主として両者で決定される等価荷重面の半径)であり、荷重分散係数が大きくなるほど、また等価荷重面深さが大きくなるほど杭の荷重分担率は大きくなり、沈下量は小さくなる。
- 2) 等価荷重面深さが層厚の75%以浅であれば、地盤が有限であることの影響は小さいと考えて良い(荷重分散係数が0.2以下の場合)。
- 3) 基礎幅が大きい程、沈下低減効果は小さくなる。
- 4) 杭1本当りの基礎スラブ面積が等しくても、杭本数が増えると沈下量の低減効果は減少する。即ち、複数杭としての効率は、1.0より小さくなる。
- 5) 本解析法による計算では、各パラメータを変化させて

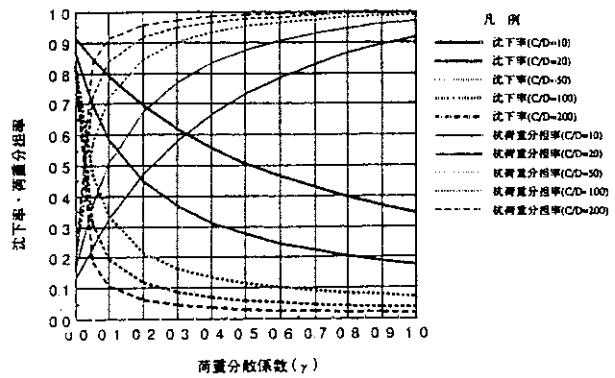


図5 荷重分散係数と沈下率・荷重分担率の関係

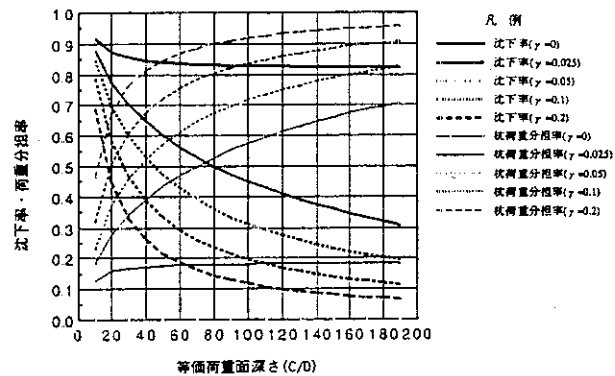


図6 等価荷重面深さと沈下率・荷重分担率の関係

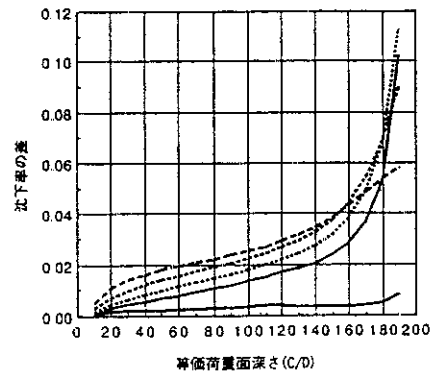


図7 等価荷重面深さと沈下率の差の関係

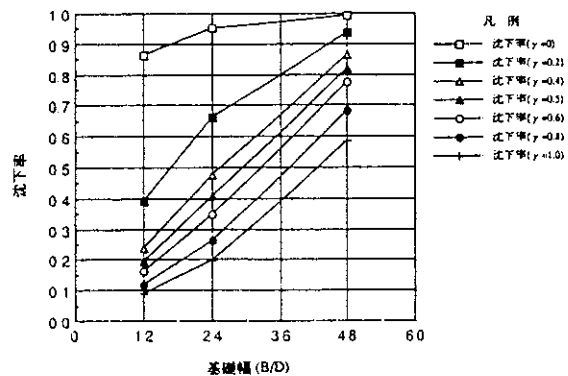


図8 基礎幅と沈下率の関係

も、発散したり、振動したりせず、常に1つの釣合状態が求まり、結果の安定性は極めて良い。

6)各パラメータを変化させて得られた結果からは、杭の荷重分担率が増加すると基礎の沈下は減少すること、杭1本当りの基礎の面積が大きくなると沈下低減効果が低下することなどが示され、これは前報で述べた実験結果と一致する。これより、ここで提案した予測手法は、釣合式にやや物理的な問題を残すものの、傾向的には妥当と考えて良いと思われる。

3. シミュレーション解析

提案した解析法を用いて、室内模型載荷実験及び原位置実大載荷実験のシミュレーション解析を実施した。ここでは、その結果を述べるとともに、実験結果との比較から本解析法の適用性について考察する。

3.1 解析対象とした実験の概要

解析の対象としたのは、室内模型実験5ケース、原位置実大実験3ケースの計8ケースである。

室内実験では、均質な粘性土を圧密養生して作製した模型地盤中に、細径鋼管を模したアルミ製パイプを埋設した後、基礎スラブを模した剛な載荷板を地表面に設け、重錘により加力する方法をとった。実験では、杭本数、杭長、地盤強度、地盤厚さをパラメータとした。

原位置実験では、実大の細径鋼管を実地盤に埋設した後、実大寸法の布基礎の一部を模した鋼製載荷板を地上に設置し、これを油圧ジャッキにより載荷する方法をとった。地盤種別、杭長がパラメータである。

これら実験の詳細については、前報を参照されたい。

3.2 シミュレーション解析

3.2.1 室内模型実験

室内模型実験では、単杭に対する実験4ケースと群杭に対する実験1ケースについて、シミュレーション解析を行った。表2に解析対象とした実験ケースの一覧表を示す。解析の対象としたのは、模型地盤の降伏荷重度のほぼ1/2に相当する荷重時の沈下量である。

(1) 使用定数

解析に必要な定数は、解析対象の物理的な大きさや位置（基礎スラブの大きさ、杭配置、杭径、杭長、載荷荷重）、地盤定数（層厚、ヤング係数、ポアソン比）、及び本解析法に固有な定数（等価荷重面深さ、荷重分散係数）である。このうち、地盤定数と本解析に固有な定数の決定方法について以下に示す。

地盤定数 地盤のヤング係数 E とポアソン比 ν は、載荷条件を考慮して決定する。 E は、短期載荷による基礎の沈下量を対象とするため、実験後に行ったベーンせん断試験より得られたせん断強度 τ_{max} から、 $E=50\tau_{max}$ として求めた。 ν については、地盤が非排水状態となること

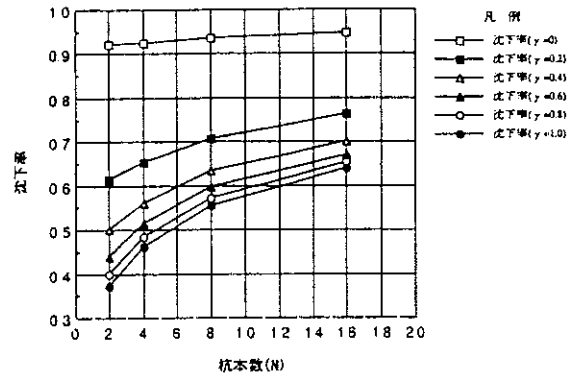


図9 杭本数さと沈下率の関係

表2 解析対象とした室内実験一覧

実験ケース	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
載荷板大きさ、杭本数、杭配置					
地盤厚さ(m)	84.0		80.0		
地盤強度(kgf/cm ²)	0.20		0.40		
杭径(cm)	24.0	48.0	24.0	48.0	
沈下(cm)	3.40				

表3 解析に使用した定数一覧

解析ケース	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
等価荷重面深さ(cm)	18.0	36.0	18.0	36.0	
荷重分散係数	0.15				
地盤のヤング係数(kgf/cm ²)	2.40		4.10		
地盤のポアソン比	0.45				
載荷荷重度(kgf/cm ²)	0.15		0.25	0.20	

*載荷荷重度は載荷荷重を載荷板面積で除したものの

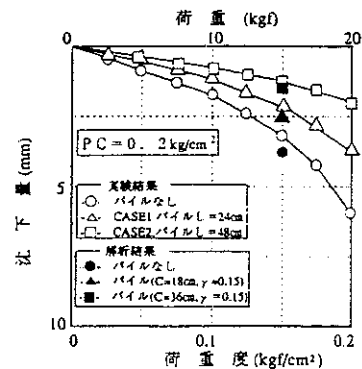


図10 荷重度と沈下量の関係(CASE1,CASE2)

を考慮して0.45と仮定した。

等価荷重面深さ、荷重分散係数 等価荷重面深さ c は、前述した手法により求めた。その際計算に必要な地盤の一軸圧縮強度 qu は、ベーンせん断強度 τ_{max} より推定し、杭周囲の摩擦応力度 $\tau f(x)$ は τ_{max} とした。

22

γ は、 c とともに等価荷重面の荷重半径を決定する重要なパラメータである。今回はCASE1の実験結果より逆解析 (γ を0~1.0で変化させ、実験と解析で沈下低減率がほぼ等しくなる γ を求める) で得た値 ($\gamma = 0.15$) を使用した。表3に解析で使用した定数の一覧表を示す。

(2) 解析結果

沈下量 図10~図12に、解析による沈下量を実験による荷重度-沈下量関係にプロットして示す。杭なしの解析値は、Steinbrennerの解を用いて計算した値である。

はじめに、杭なし、即ち、載荷板のみの沈下量について実験結果との対応を見ると、いずれの場合も良く一致している。前述したように、杭なしの解析はSteinbrennerの解で求めており、いわば本解析法の基本とも言えるものである。この解析結果と実験結果の一致が良いことから、設定した地盤の定数が解析方法に対して適切であったと考えることができる。

次に、各ケースについて、杭の有る場合の沈下量を実験結果と比べてみると、CASE2~CASE5ともかなり良く一致していると言える。CASE1は、 γ の同定に使用しているため比較しても意味はないが、 γ を一定としても他のケースの沈下量を良く推定できている。

沈下低減率 図13~図15に、解析による沈下低減率を実験による荷重度-沈下低減率の関係にプロットした結果を示す。解析結果は、いずれの場合も実験結果と良い対応を示している。両者の沈下低減率の差は、最大でも5%だが、解析結果では杭長が短い場合($L=24\text{cm}$: CASE1,3)には、やや大きめの値が、杭長が長い場合($L=48\text{cm}$: CASE2,4,5)には、やや小さめの値が算出されている。

杭の荷重分担率 図16に、全解析ケースの沈下量と杭の荷重分担率の関係を実験結果と併せて示す。解析対象とした沈下量(実験結果では、各ケースとも最大の沈下量)に対して、実験では、杭が長くなると荷重分担率は増加し、また、杭長が同一でも、地盤強度が大きくなると杭の荷重分担率はやや低下する傾向にある。群杭の場合には、杭長が同一の単杭の結果に比べて杭の荷重分担率は小さく、地盤強度が等しく杭長の異なる2つの単杭の結果(CASE2,4)の中間的な値となっている。

これに対し、解析結果では、杭が長くなると杭の荷重分担率が増加する傾向は実験と同じであるが、地盤強度による分担率の変化は認められない。また、2本杭の分担率は、杭長が同一な単杭の結果とはほぼ一致する結果を示す。これは、解析では、杭の荷重分担率は、 c と γ の影響を強く受けるが、 c の値はその決定方法から、均一地盤では地盤強度によらず杭長のみで決定され、また、 γ をすべて同一の値としているためと思われる。

3. 2. 2 原位置実大載荷実験のシミュレーション

原位置実験のシミュレーション解析では、本工法を用いた際の地盤の長期許容支持力度に当る 5tf/m^2 の荷重に

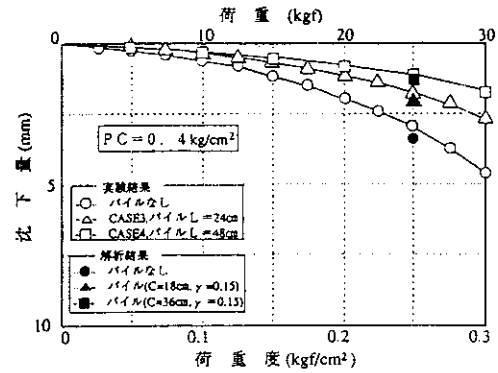


図11 荷重度と沈下量の関係(CASE3,CASE4)

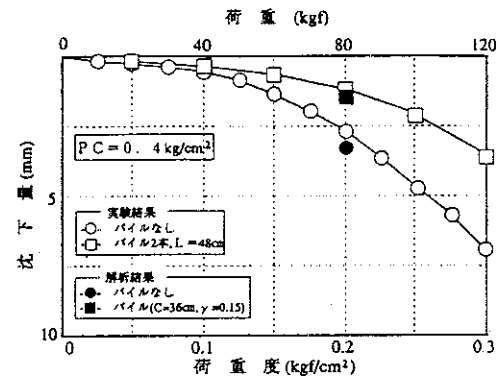


図12 荷重度と沈下量の関係(CASE5)

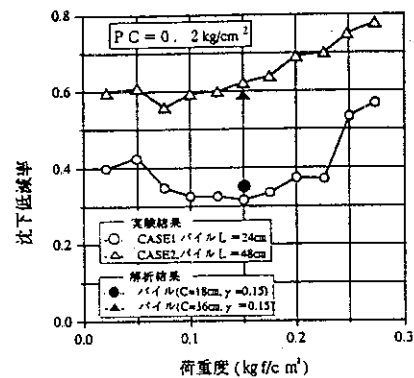


図13 荷重度と沈下低減率の関係(CASE1,CASE2)

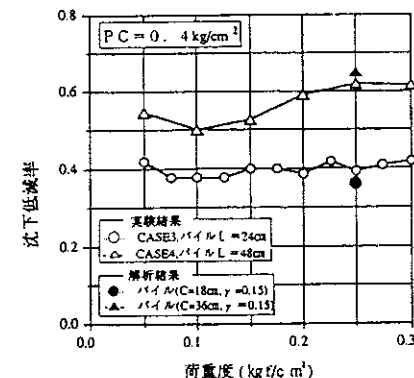


図14 荷重度と沈下低減率の関係(CASE3,CASE4)

対する基礎の沈下量を解析対象とした。

(1) 使用定数

解析の対象とした原位置実験の一覧表を表4に示す。解析の対象としたのは、3つの実大実験で、それぞれ地盤の条件がほぼ2層と見なすことができるものである。各ケースの地盤条件は、上層が下層より硬いケース(No.1)と下層が上層より硬いケース(No.2, No.3)の2通りである。同表には、各ケースの地盤をモデル化した結果を、解析に使用した定数とともに示している。

各々の定数の求め方は、室内実験の解析の場合と同様であるが、ヤング率Eについては、各地盤でサンプリングされた試料による一軸圧縮試験の E_{50} を用いている(ただし、No.1の上層については、スウェーデン式サウンディングの結果から推定している)。また、 γ は、室内実験のシミュレーションで用いた値0.15を使用した。

(2) 解析結果

図17~図19に解析結果と実験結果の沈下量を比較した図を、図20には沈下低減率の比較を行った図をそれぞれ示す。原位置実験のうち、下層が硬いNo.2とNo.3では、室内実験に比べて杭による沈下低減効果が顕著で、沈下低減率は0.8~0.9にもなる。これらに対する解析結果では、この傾向は良く捉えられており、また、沈下量に関しても実験結果と比較的良好一致している。

これに対して上層が硬いNo.1では、沈下低減効果は小さく、荷重量が 5tf/m^2 では0.2程度となっている。解析でも、下層が硬い場合に比べてNo.1では沈下低減率は小さいが、実験結果と比較するとかなり大きい(0.35)。

沈下量については、杭のある場合の結果は実験結果と良好対応を示すが、基本となる杭なしの結果ではかなり大きめの沈下量が算出されている。このことから、No.1では解析に用いたEの推定が十分でなかったものと思われる。前述の如く、No.1では上層のEをスウェーデン式サウンディングの結果から推定したが、解析結果によれば、上層のEは推定値より大きいものと考えられる。

3.3 シミュレーション解析結果のまとめ

本研究で提案した解析法を用い、室内実験5ケース、原位置実験3ケースに対するシミュレーション解析を実施した。これらの結果をまとめれば以下のようなものである。

- 1) 室内実験のシミュレーションでは、解析結果は、杭による載荷板の沈下量・杭による沈下低減率とも、実験結果と良好一致を示した。杭の荷重分担率に関しては、杭長による分担率の変化は実験と同様の傾向となったが、地盤強度や杭本数の違いによる差は表現できなかった。
- 2) 原位置実験のシミュレーションでは、1ケースを除き、解析結果は基礎の沈下量及び沈下の低減率ともに、実験結果と比較的良好一致を示した。一致の悪いケースについてもヤング係数を見直すことで良好対応が得られるものと思われる。

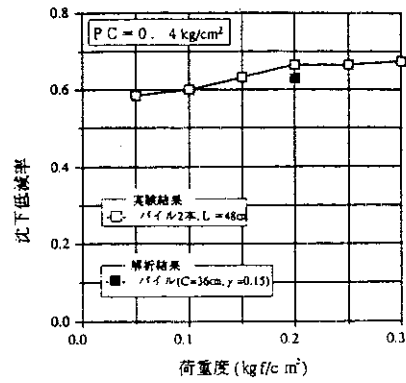


図15 荷重量と沈下低減率の関係(CASE5)

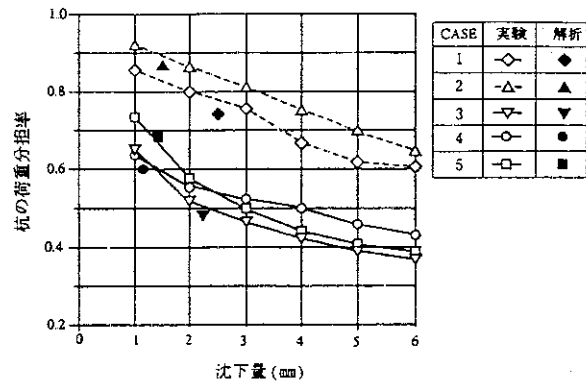


図16 沈下量と杭の荷重分担率の関係

表4 解析モデルと使用定数(現場実大実験)

実験ケース	No.1	No.2	No.3
載荷板大きさ 杭本数 杭位置			
杭	杭長 (m) 杭径 (cm)	5.5 5.0	2.5
地盤	上層	H_1 (m) E_1 (t/cm^2) ν_1	2.0 1600 0.45
	下層	H_2 (m) E_2 (t/cm^2) ν_2	5.5 450 0.45
	下層	H_3 (m) E_3 (t/cm^2) ν_3	4.0 1300 0.45
等価荷重面深さ(m)	2.9	4.4	1.8
荷重分担係数	0.15		
載荷重量(t/m^2)	5.0		

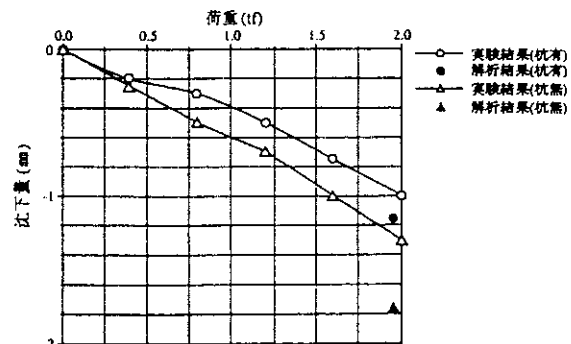


図17 荷重量と沈下量の関係(No.1)

3)本解析法固有のパラメータである荷重分散係数 γ については、シミュレーション解析では、1つの室内実験から同定した値で、残りの室内実験および原位置実験の結果をほぼ再現できた。これより、 γ は一定値を用いれば良いものと考えられる。

4. 結論

本論文では、細径鋼管により補強した地盤上の基礎の沈下挙動について、Steinbrennerの解とMindlinの解を組合せた簡便な予測法を提案した。提案した予測法によりパラメトリックスタディを実施し、解の安定性及び各パラメータによる基礎の沈下量と杭の荷重分担率の傾向を調査した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- 1)提案した解析法は計算値の安定性に優れている。
- 2)杭の荷重分担率が上がると基礎の沈下量は減少すること、杭1本当りの基礎面積が増加すると沈下低減効果が低下すること等が示され、実験結果の傾向と一致する。

更に、解析法の妥当性を検証するため、室内実験5ケース、原位置実験3ケースのシミュレーション解析を実施した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- 1)室内実験のシミュレーションでは、解析結果は、杭による載荷板の沈下量・杭による沈下低減率とも、実験結果と良い一致を示した。
- 2)原位置実験のシミュレーションでは、1ケースを除き、解析結果は、基礎の沈下量及び沈下の低減率ともに、実験結果と比較的良好一致を示した。一致が悪かったケースについても上層のヤング係数を見直すことで良い対応が得られるものと思われる。

以上の結果を総合すると、対象とする地盤の定数（ヤング係数、ポアソン比）を精度良く推定できれば、提案した解析法によって、細径鋼管で補強された基礎の沈下量が十分推定可能であると考えられる。

5. あとがき

今回のシミュレーション解析では、等価荷重面の大きさを決定する荷重分散係数 γ に、逆解析によって同定した値（全ケースで一定値）を使用した。しかしながら、 γ の決定方法については十分とは言えないため、現在実施している原位置実験に本手法を適用して考察を加えるとともに、今後、本解析法を実務に適用していくために研究を進めてゆきたいと考えている。

参考文献

- 1)若命, 榎並他: 細径鋼管により地盤補強した基礎の沈下挙動とその予測法 第1報 日本建築学会構造系論文集 第455号 pp.93~103,1994 1
- 2)Davis, E.H. & Poulos H.G.: The analysis of pile raft system Aust. Geomech. J. Q2 No.1 pp.21~27 1972

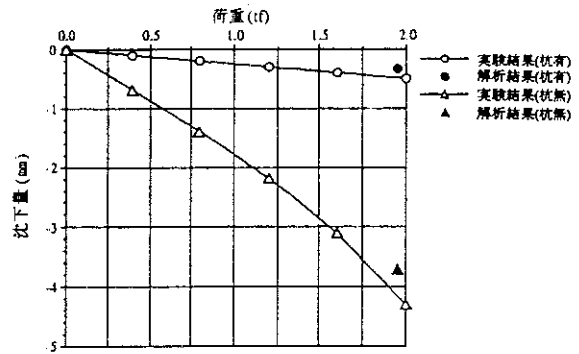


図18 荷重度と沈下量の関係(No.2)

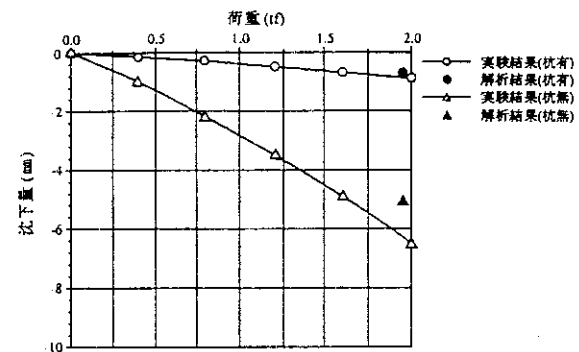


図19 荷重度と沈下量の関係(No.3)

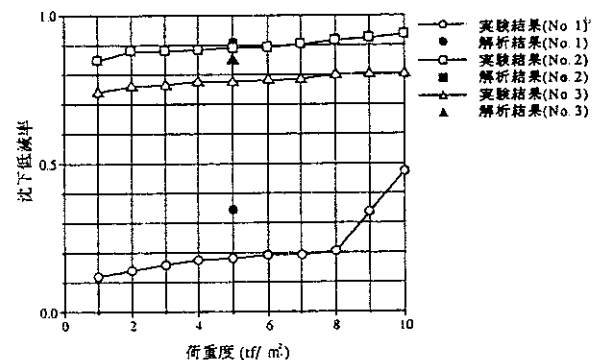


図20 荷重度と沈下低減率の関係

- 3)Hain S.J.: A rational analysis for raft and raft-pile foundation. PhD Thesis Univ. of New South Wales, 1977
- 4)Hain S.J. & Lee I.K.: The analysis of flexible raft-pile systems. Geotechnique Vol.28 No.1, pp.65~83,1978
- 5)加倉井, 伴野他: 沈下抑止杭を用いた併用基礎の設計と実測. 第20回土質工学研究発表会, pp.1173~1174,1985
- 6)M. Tomono & M. Kakurai et al.: Analysis of settlement Behavior of Piled Raft Foundation. Takenka technical Research Report No.37,1987
- 7)加倉井他: 摩擦杭を併用した直接基礎の挙動(その3) 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1033~1034,1988
- 8)梅垣他: 摩擦杭を併用した直接基礎の挙動(その4) 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1033~1034,1988
- 9)渡井他: 摩擦杭を併用した直接基礎の挙動(その5), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1455~1456 1989
- 10)最上武雄: 土質力学 技報堂 pp.282~286,1969
- 11)最上武雄: 土質力学, 技報堂, pp.246~248,1969
- 12)日本建築学会: 建築基礎構造設計基準 同解説 pp.246~253,1978

(1994年2月9日原稿受理, 1994年3月16日採用決定)