

# 杭の沈下推定式とそれを用いた基礎の設計

脇田英治<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 清水建設(株)技術研究所 社会基盤技術 G. (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

杭基礎の設計を行う場合、沈下特性を考慮しなければ合理的な設計が困難なケースがある。過去に実施された杭の載荷試験データを統計処理することにより、そのような場合に適用可能な沈下推定式を提案した。そして、それら推定式を用いた杭基礎の解析・設計法について検討した。

**Key Words:** pile foundation, settlement, pile loading test, bearing capacity, hyperbolic curve, pile design, foundation, settlement characteristic, reuse, recompression.

## 1. はじめに

杭基礎の設計を行う場合、杭の沈下特性を十分考慮しなければ、合理的な設計が困難なケースがある。そのような例として、4.で後述する(1)杭の再利用工法の設計、(2)基礎の補強工の設計(耐震補強等)、(3)異種杭混在型基礎の設計などを挙げることができる。ところが、現状ではこのような設計に関する技術や知見が不十分である。

文献1)および本研究の目的は、そのような場合に適用可能な沈下推定式とそれを用いた杭基礎の解析・設計法を提案することである。そのうち、文献1)では、多数の杭の載荷試験データを統計処理することにより、杭の沈下推定式を誘導した。しかし、文献1)における記載に一部分不明瞭な箇所があったので、本紙面の2.(1)で訂正すると共に、文献1)の結論を再記する。ただし、訂正の影響は軽微なものであり、文献1)の主旨自体には誤りはない。

本研究では文献1)の内容をさらに発展させ、杭の除荷・再載荷過程における沈下特性を明らかにする。そして、文献1)・本研究の結果を併せて可能となる杭基礎の解析・設計法について検討する。

なお、本研究のメインテーマである杭の除荷・再載荷過程の沈下特性に関して、個々の事例についての現象の報告は過去に数多くある。しかし、それらを統一的・系統的に扱い、設計への適用を前提とした推定式の提案まで言及した研究はほとんど見られない。

表-1 パラメータ  $p$ ,  $q$  の値<sup>1)</sup>

	$p$	$q$
埋込み杭	0.328	1.87
打込み杭	24.0	1.60
場所打ち杭	9.46	1.50

## 2. 処女載荷過程の沈下特性

### (1) 沈下推定式

文献1)では、過去に実施された多数の杭の載荷試験データを用いて、杭の荷重-沈下関係の曲線近似を行い、杭の沈下特性を表す最適な曲線式を求めた。そして、その曲線式のパラメータと杭種および仕様との関係を重回帰分析により解析し、杭種・仕様に対して一義的に標準的な沈下特性を設定できる推定式として、式(1)を提案した。

$$S/D = \frac{(q-1) S_0 P_0 / R_y}{(q-1) - p S_0 + (p S_0 - 1) P_0 / R} \quad (1)$$

ここに、 $S$ は杭頭沈下量、 $D$ は杭径、 $P_0$ は杭頭軸力、 $R_y$ は第1限界荷重(log P-log S曲線に現れる明瞭な折れ点の荷重)である。これらの変数以外に式(1)には3つのパラメータ  $S_0$ ,  $p$ ,  $q$  が含まれている。そのうち、パラメータ  $p$ ,  $q$  の値は回帰分析(詳細は文献1)参照)の結果、表-1のように得られている。

式(1)におけるもう1つのパラメータである  $S_0$  は  $P_0 = R_y$  のときの  $S/D$  の値であり、その定義を式で表せ

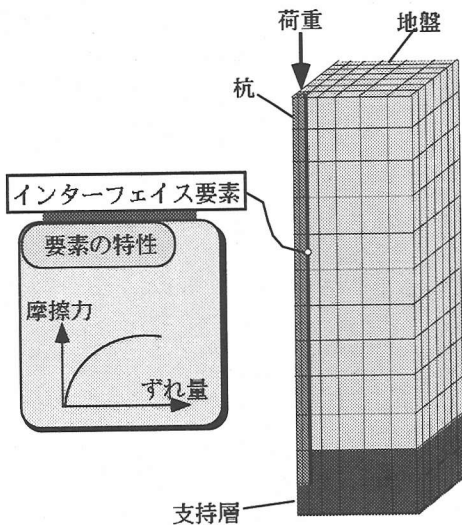


図-1 3次元有限要素法による杭の解析モデル

表-2 杭種毎の  $S_0$  推定式<sup>1)</sup>

杭種	$S_0$ 推定式
埋込み杭	$S_0 = 8.97 \times 10^4 L_p + 3.51 \times 10^3$
打込み杭	$S_0 = 5.88 \times 10^4 L_p + 5.29 \times 10^3$
場所打ち杭	$S_0 = 5.43 \times 10^2 R_p + 5.42 \times 10^3$

ば次のとおりである。

$$S_0 = [S/D]_{P_0=R_0} \quad (2)$$

重回帰分析(詳細は文献1)参照)の結果, 得られた  $S_0$  の推定式を表-2に示す。なお, 表-2の  $L_p$  は杭長(m),  $R_p$  は杭頭荷重の先端伝達率(杭の先端部の軸力値を杭頭部の軸力値で除した値)である。

文献1)において, 表-1, および表-2における数値の表示が, 有効数字に関して明瞭でなかった。そこで, 本論文ではそれを訂正して示している。

## (2) 既往の方法と提案法の比較

杭の沈下特性を推定する既往法の適用性について検討する。次に, それと提案法の場合を比較する。

図-1は代表的な既往の沈下推定法である3次元有限要素法<sup>2)</sup>による解析モデルを表している。先端が支持層に貫入している単杭の1/4モデルである。杭頭に荷重を作用させると, 杭体はその接する地盤との間に, 徐々にずれを生じる。このずれの効果を考慮するためにインターフェイス要素などが用いられる。

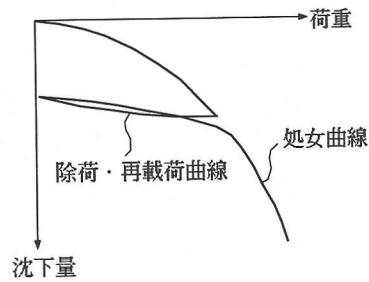


図-2 杭の荷重-沈下特性

この要素は図-1の小枠内に表示されているような非線形な変形特性を示す。この解析法を杭基礎の設計に適用する場合, 入力データとしてインターフェイス要素の非線形特性を与える必要がある。

ところが, 杭の周面に沿う土質を推定するために, 一般に設計で利用できる土質調査・試験データはN値程度である。実際, N値を用いて, この要素の非線形特性を設定することは困難である。さらに, 杭の周囲の地層分布の複雑さや杭の施工法による特性の差をどう評価するかという問題もあり, 入力データとしてこの要素の非線形特性を与えることは容易ではない。また, インターフェイス要素ばかりではなく, 地盤要素にも同様の問題がある。このように有限要素法などの数値解析法により, 杭の沈下特性を推定することは, 実用面では課題が多いと言える。

それに対して, 提案する式(1)で与えられる沈下推定式は, 過去に実施された多くの杭の載荷試験データを統計処理して得られたものである。したがって, 本式を用いれば, 大きくはずれることなく, 実務設計において, 杭の沈下特性を簡便に推定できる点で優れていると考えられる。

## 3. 除荷・再載荷過程の杭の沈下特性

図-2は杭の荷重-沈下特性を模式的に表している。前述の式(1)はこの図における処女曲線の式である。ところが, 4.で後述する杭基礎の設計を行うためには, この式のみでは不十分であり, 除荷・再載荷曲線の沈下推定式も必要である。

そこで, 表-3に示すような過去に実施された杭の載荷試験データを解析して, 除荷・再載荷過程の沈下推定式を求める。

図-3に示す処女曲線が双曲線がよく近似できることは前論文1)で明らかにした。処女曲線が双曲線であるとすると, 図-3に示す初期接線の勾配は容易に求めることができる。そこで, 表-3の杭の載荷試験デー

表-3 除荷・再載荷過程の解析に用いた杭の載荷試験データ

No	支持形式	杭種	工法	杭径 (mm)	杭長 (m)	R <sub>y</sub> (tf)	先端地盤の土質	No	支持形式	杭種	工法	杭径 (mm)	杭長 (m)	R <sub>y</sub> (tf)	先端地盤の土質
1	支持	場所打	リバー	1200	16.5	660	砂(33)	13	支持	SC杭	埋込み	600	27	470	砂礫(>50)
2	摩擦	PHC杭	打込み	300	31	60	粘土(7)	14	支持	鋼管杭	打込み	800	48	400	砂礫(>50)
3	支持	場所打	リバー	2000	37	2300	砂礫(>50)	15	支持	鋼管杭	打込み	1000	38	600	砂礫(>50)
4	支持	PC杭	打込み	400	7.5	60	砂(28)	16	摩擦	PHC杭	埋込み	600	35	>610	砂(18)
5	支持	場所打	7-ストリ	400	7.5	120	砂(28)	17	支持	場所打	ベノト	1300	22	620	砂礫(>50)
6	支持	鋼管杭	打込み	508	47	>550	砂礫(>50)	18	支持	鋼管杭	埋込み	600	24.5	340	砂礫(>50)
7	支持	鋼管杭	打込み	1524	39	850	砂(36)	19	支持	PHC杭	埋込み	500	18.5	650	砂礫(40)
8	支持	場所打	ホールシリング	1500	28	1270	砂(>50)	20	支持	SC杭	埋込み	800	71	370	泥岩(>50)
9	支持	鋼管杭	打込み	600	49	645	砂(>50)	21	支持	鋼管杭	打込み	1600	51	1150	洪積粘土(25)
10	支持	鋼管杭	打込み	1118	49	870	砂(>50)	22	摩擦	PHC杭	埋込み	600	23	310	粘土(20)
11	支持	鋼管杭	打込み	1220	45	720	砂(30)	23	支持	鋼管杭	埋込み	800	16.5	570	砂礫(30)
12	摩擦	場所打	リバー	1500	47	820	粘土(10)	24	支持	場所打	ベノト	1000	14	900	泥岩(>50)

註) ()内の数字は平均N値を示している。

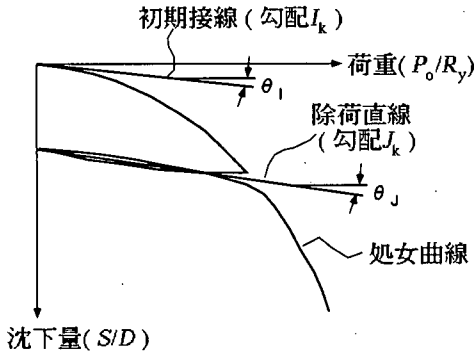


図-3 初期接線と除荷直線

タについて最小二乗法を用いて、双曲線近似を行い、初期接線の勾配  $I_k (= \tan \theta_1)$  を求める。

一方、図-3に示すように、除荷曲線と再載荷曲線の2つの交点を結んで得られる直線を除荷直線と定義する。そして、その直線の勾配  $J_k (= \tan \theta_2)$  について、前述の  $I_k$  の場合と同様、表-3の各データについてその値を求める。なお、図-3では1つの載荷試験中に除荷・再載荷が1回だけ実施される例を模式的に示している。しかし、通常の杭の載荷試験では、1つの載荷試験中に除荷・再載荷は複数回、繰り返し実施される。したがって、表-3のデータを用いて得られる  $J_k$  の値も1つの載荷試験について、複数個である。次に示す図-4のプロット点の数が表-3のデータ数よりかなり多いのはこのような事情によるものである。

図-4はこのようにして得られた除荷直線勾配  $J_k$  を初期接線勾配  $I_k$  で除した値を縦軸に、杭頭軸力  $P_o$  を

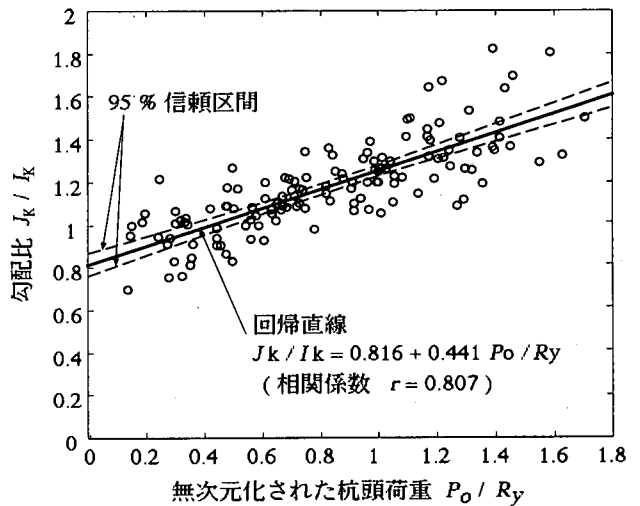
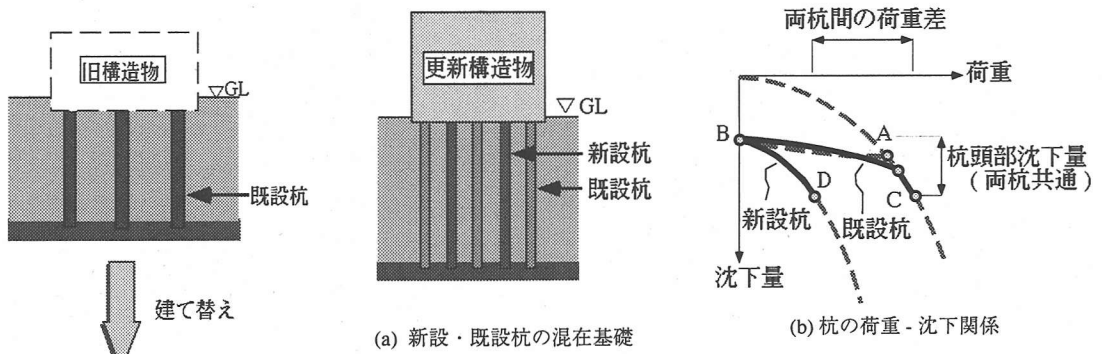


図-4 初期接線勾配と除荷直線勾配の関係

第1限界荷重  $R_y$  で除した値を横軸に採り、プロットしたものである。なお、この図の作成に当たり使用した  $R_y$  値は学会の指針に示されている試験法に基づく第1限界荷重であり、先行荷重ではない。また、 $P_o$  を  $R_y$  で除する目的は、作用荷重を無次元化し、解析結果に一般性を持たせるためである。

勾配比 ( $J_k / I_k$ ) に影響する要因として、除荷開始時の荷重レベル ( $P_o / R_y$ ) ・荷重範囲・杭の施工法・仕様・先端地盤の土質・周辺地盤の土質などが考えられる。これに関する重回帰分析(ステップワイス重回帰分析)の結果、除荷開始時の荷重レベル ( $P_o / R_y$ ) のみが影響要因として有意であった。そこで、( $P_o / R_y$ ) と ( $J_k / I_k$ ) の関係について、最小二乗法による直線重回帰分析を行った。図-4に示す重回帰直線はこのようにして得られた



(a) 新設・既設杭の混在基礎

(b) 杭の荷重 - 沈下関係

図-6 既設・新設杭の混在する基礎の荷重 - 沈下関係

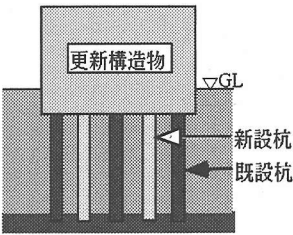


図-5 杭を再利用した構造物の立て替え

ものであり、回帰式は次のとおりである。

$$J_k / I_k = 0.816 + 0.441 P_o / R_y \quad (3)$$

相関係数も大きい ( $r=0.807$ ) ので、処女曲線の初期接線勾配と除荷直線の勾配の関係は、式 (3) で近似できるのではないかと考えられる。

実務設計用の除荷直線の勾配の推定式は次のように得られる。まず、図-3の処女曲線を表す式 (1) を ( $P_o/R_y$ ) で微分することにより、初期接線勾配  $I_k$  を表す式が次のように得られる。

$$I_k = \left[ \frac{d(S/D)}{d(P_o/R_y)} \right]_{P_o=R_y} = \frac{(q-1) S_o}{(q-1) - p S_o} \quad (4)$$

式 (4) を式 (3) に代入すると、除荷直線の勾配  $J_k$  を与える式として、次式が得られる。

$$J_k = \frac{(0.816 + 0.441 P_o / R_y) (q-1) S_o}{(q-1) - p S_o} \quad (5)$$

ここに、パラメータ  $S_o$  の値は表-1、パラメータ  $p$ 、 $q$  の値は表-2 に示されている。実務設計においては、式 (5) を用いることにより、除荷・再載荷時の杭の沈下特性を推定することができる。

#### 4. 杭の沈下推定式の設計への適用法

##### (1) 杭の再利用工法の設計

今後、全建設工事件数に占める建て替え工事件数の比率が次第に増加すると予測されているが、その代表的な場合について、図-5はその工事の過程を模式的に表している。

更新後の構造物の重量は更新前の構造物の重量よりも大きいのが通例である。また、長期間の使用により既設杭の耐力は低下している。これらのことを考慮すると、既設杭のみで更新後の構造物の重量を支持することは一般的には無理である。したがって、新設杭を増し打ちし、図-5に示すように、更新後は既設杭と新設杭が混在する基礎構造となるのが一般的である。

図-6はそのような場合の杭の荷重 - 沈下関係を示している。すなわち、既設杭は既に荷重を受けているので、更新前、図のA点に位置する。次に既設構造物が撤去されると、杭頭に作用する荷重は図のB点まで低下する。そして、更新構造物が建設されると、再びB点からA点付近を経由して、C点まで荷重が増加する。つまり、A～B間は除荷・再載荷曲線上を辿ることになる。

それに対して、新設杭は初めて荷重を受けるので、図-6に示すように、処女曲線上をB点→D点へ単純に荷重が増加する。

ところが、両杭の頭部は図-6(a)に示すように、同一の基礎スラブに固定されているので、沈下量は共通である。したがって、既設杭と新設杭を均等な配置とした場合、両杭の受ける荷重に大きな差が生じることになる。たとえば、上部構造の重量 150 tf のうち、100 tf を既設杭が支持して、残りの 50 tf を新設杭が支持するという具合である。これは好ましいことではない。既設杭は耐力が低下しているため、あまり荷重を掛けないようにし、新設杭の方により多く荷重が作用

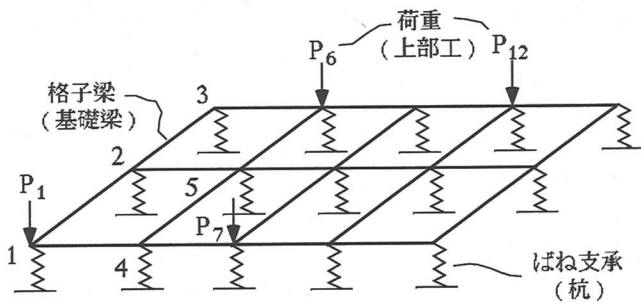


図-7 杭基礎の数値解析モデル

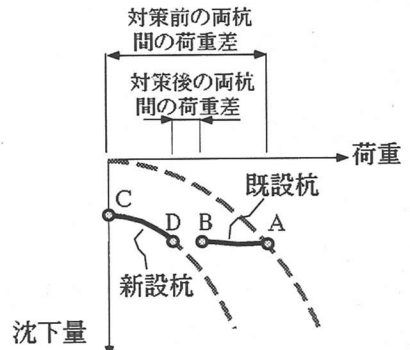


図-9 杭の荷重-沈下関係 (基礎の補強の場合)

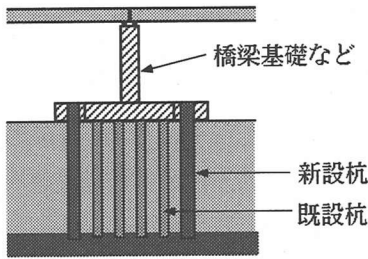


図-8 既設基礎の補強例

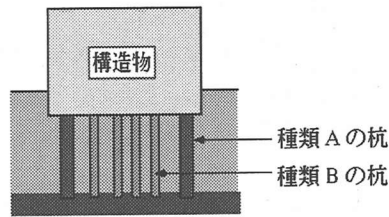


図-10 異種杭混在型の基礎

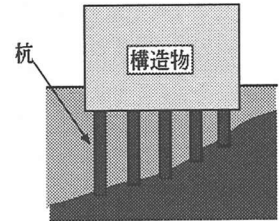


図-11 支持層が傾斜した杭基礎

するようにできるのが本来は望ましいのに、その逆となる。以上のような事態を避けるためには、新設・既設杭の配置を工夫するか、または、杭頭に反力を調節する装置を取り付けるなどの工夫が必要である。

図-6に示したような工事期間中の沈下量の変化は5~30mm程度であり、沈下量としてはわずかであるが、荷重のアンバランスは大きい。

以上のような新設・既設杭の混在する基礎の挙動は、一例ではあるが、次に述べるような数値解析法を用いることにより、定量的に把握することができる。図-7はそのための数値解析モデルを表している。構造物は格子状の梁で表されている。構造物の基礎梁や基礎スラブの剛性は格子梁に剛性を持たせて考慮することができる。上部構造の荷重は図-7に矢印で示すように、格子梁に作用させる。また、格子の各交点に杭を表すばね支承が設けられている。それらのうち、新設杭のばね支承の特性は式(1)で与えられる。一方、既設杭のばね支承の特性は除荷・再載荷過程上で処女曲線に至るまでは式(5)で与えられる。そして、それより荷重の大きい処女載荷過程上では式(1)で与えられる。

## (2) 基礎の補強工の設計 (耐震補強等)

既設構造物の供用期間中に、基礎杭の耐力が不足していることが明らかとなった場合、新設杭を施工し、既設杭と新設杭の両方で荷重を支持する構造に改める等の対策が採られる。図-8はそのような工事の一例を示しており、既設の擁壁の基礎杭の支持力不足を補うため、既設の基礎スラブを貫通して、新設杭を施工する様子を示している。

この場合、新設杭の杭頭を単純に基礎躯体に固定すると、次のような問題が生じる。すなわち、既設杭は既設構造物を支持しているので、すでに荷重を受けた状態にある。その状態において新設杭を基礎躯体に固定したとしても、その時点では新設杭に作用する荷重はゼロであり、既設構造物からの死荷重は既設杭が全部支持している。つまり、既設杭と新設杭の荷重状態は図-9に示すように、それぞれA点とC点にある。したがって、両杭間に大きな荷重差が生じる。

このような事態を避けるために、次のような対策が可能である。すなわち、補強のための新設杭の施工後、アースアンカーやジャッキを用いて、新設杭に荷重を載荷した状態で、新設杭の杭頭を基礎躯体に固定する。これにより、既設杭と新設杭の荷重状態は図-9に示

すように、それぞれ A 点 → B 点、および C 点 → D 点に移り、両杭間の荷重差は小さくすることができる。

以上のような基礎の挙動の把握と対策工法の設計のための数値解析は 4. (1) と同様、図 - 7 に示す解析モデルと前述の方法を用いて行うことができる。

### (3) 異種杭混在型基礎の設計

前述の 4. (1), (2) は既設杭と新設杭が混在する場合の基礎の設計に関するものであった。しかし、杭基礎の設計において、杭の沈下特性を考慮する必要があるケースは既設基礎の場合に限定されるものではなく、全くの新設の基礎の場合もある。たとえば、図 - 10 は異なる種類の新設杭が混在する基礎の例であり、図 - 11 は支持層が傾斜する場合の杭基礎の例である。これらの場合にも、杭間で荷重差が生じるので、4. (1), (2) で前述したような沈下特性を考慮した数値解析と設計が必要である。

## 5. おわりに

一般的な杭の荷重 - 沈下関係について、処女曲線の推定式として、前論文で式 (1)、除荷・再載荷直線の推定式として、本論文で式 (5) を提案した。そして、両式を用いた杭基礎の解析・設計法を示した。

3. の除荷・再載荷過程の沈下特性の解析に用いたデータ数がやや少ないので、推定精度の点では問題が残っている。その点は今後、より多くのデータを用いた検証によってより推定精度を高めていく必要があると考えられる。

既設杭を再利用する構造物の建て替え工事の設計は、既設構造物の上部構造が存在する段階で設計が行われるので、少なくとも、その段階で何等かの目安を立てる必要がある。提案した推定式はそのような場合に有効であると考えられる。そして、建設が進み、上部構造が撤去された段階では、杭の載荷試験も可能であり、それらを援用することにより、より設計の精度を高めることができる。

### 参考文献

- 1) 脇田英治：杭の標準沈下特性に関する研究，土木学会論文誌，No.603，pp.45 - 52，1998.
- 2) 秋野矩之：杭周摩擦と地盤剛性の非線形性を考慮した杭の沈下解析，第26回土質工学研究発表会概要集，pp. 1175 - 1178，1991.

(1999. 1. 29 受付)

## SETTLEMENT ESTIMATE EQUATION OF PILE AND ITS APPLICATION TO FOUNDATION DESIGN

Eiji WAKITA

When plural kinds of piles coexist in a foundation, the pile settlement characteristic influences the foundation behavior greatly. For example, when new piles are added for the reinforcement of an existing bridge foundation supported by piles, the new pile's behavior differs from the existing pile's behavior in the stress and the settlement. It is difficult to carry out such a pile foundation design reasonably without considering the pile settlement characteristic. The settlement estimate equations were proposed that are applicable to the practical design in such cases. The proposed equations make the pile foundation design reasonable. This paper also showed the pile foundation design method using the equations.