

水平力を受ける杭の挙動予測

Predicting method of behaviour of laterally loaded pile

なか 川 せい 志* い 藤 かつ ひこ**

1. ま え が き

杭基礎に関する最近の傾向として、口径の大きい大型杭の使用が増加し、また特殊な橋梁¹⁾の基礎杭のように、水平力が長期にわたって作用するなど、従来にならぬ構造や載荷条件のものがみられるようになってきた。水平力を受ける杭の挙動把握は、実杭による原位置載荷試験が最も直接的であるが、大口径杭の場合²⁾や、試験が長期にわたる場合³⁾は、試験規模・期間・費用などに関して制約が大きく、これに代替しうるものとしての信頼できる予測手法の確立が望まれる。

本報告は、ボーリング孔内載荷試験結果などをもとにして、はりの曲げ理論を適用して、実杭の挙動予測を行うものである。孔内載荷試験としては、非線型領域に及ぶ大変位試験および、クリープ試験を行っているのが特徴である。本方法を実杭の載荷試験結果に適用した場合の計算値と実測値の比較も行っている。

2. 線型弾性地盤反力法

水平力を受ける杭の解析法として、地盤反力の取扱いに関して分類すれば、極限地盤反力法、線型弾性地盤反力法、複合地盤反力法などがある。このうち、線型弾性地盤反力法は、弾性ばねで支持されたはり（杭）の曲げ基本式を解くもので、取扱いの便宜さからよく用いられる。

線型弾性地盤反力法では、地盤反力は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} P &= \alpha B^l x^m y^n = K B y \\ K &= \alpha B^{l-1} x^m y^{n-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで P : 深さ x での単位長さ当たりの地盤反力

K : 地盤反力係数（以下地盤 K 値という）

B : 杭幅

x : 地表からの深さ

y : 杭の変位

l, m, n : 定数

α : 比例定数

杭の曲げ基本式は次のように表される。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P = 0 \quad \text{または} \quad EI \frac{d^4 y}{dx^4} + K B y = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 EI : 杭の断面剛性

式(2)はいわゆる Chang (チャン) の式といわれるもので、実務設計でも最も多用されている。Chang の式を解くに当たって最も大切なことは、地盤 K 値の適切な設定である。地盤 K 値は式(1)で示されるように、土質条件のほか載荷幅や変位などによる影響を受けることが知られており、この点に関する研究も多く報告されている⁴⁾。

本文は地盤 K 値の設定に当たって、ボーリング孔内載荷試験によるものとし、非線型性と載荷時間効果について新しく以下に述べるような検討を行ったのである。

3. 非線型性とクリープを考慮した地盤 K 値

本節ではボーリング孔内載荷試験によって地盤 K 値を決定する考え方について述べるが、試験内容としては、荷重-変位関係が非線型状態にまでいたる大変位載荷試験（以下、孔内大変位試験という）、および載荷時間特性を知るためのクリープ試験（以下、孔内クリープ試験という）を行うものとしている。

3.1 孔内大変位試験

地盤 K 値測定のためのボーリング孔内載荷試験装置にはいろいろあるが、いずれもゴムセルあるいは載荷板装置をボーリング孔内に挿入して、横方向に載荷させるものである。この試験から得られる荷重-変位の関係は図-1(a)に示すようになり、静止土圧 p_0 を超えて降伏荷重 p_y にいたる間に、弾性的変形区間として直線とみなせる部分がある。この傾きから土の変形係数を決定し、これより載荷幅効果などを考慮して地盤 K 値を求めるのが一般的である。この

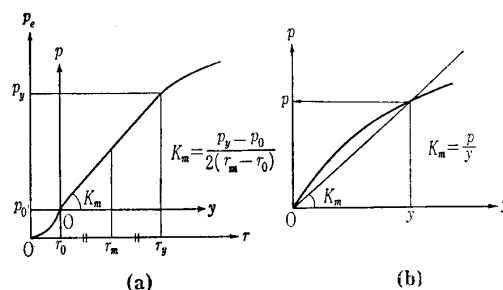


図-1 孔内載荷試験から得られる荷重-変位の関係および測定 K 値 K_m

*首都高速道路公団 第2建設部足立工事事務所

**鶴岡池組 土木技術部副部長

表—1 実杭とゴムセルの対応

	K 値	載荷様式の補正	載荷幅	変位量
実 杭 L L T (ゴムセル)	K K _m	$\pi/2$ 1	B 2r ₀	y r _m -r ₀

方法として、次に述べる今井の方法は最も合理的である。

今井⁵⁾は、孔内載荷状態と実杭の間に表—1のような対応性があり、載荷幅効果は $-\frac{1}{4}$ 乗に、変位効果は $-\frac{1}{2}$ 乗に比例すること、を考慮して杭に対する地盤K値を次のように定めている。

$$\frac{K}{K_m} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{B}{2r_0}\right)^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{y}{r_m - r_0}\right)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

K：地盤K値

K_m：ボーリング孔K値（図—1（a）で直線部の勾配）

r₀：ゴムセルの初期半径

r_m：K_mを求めたときの中間半径

y：杭の変位量

ここで定数 $\pi/2$ は、ゴムセルが等方載荷、杭は一方方向載荷であることの載荷様式の相違に関する修正係数である。

式(3)右辺第3項は、地盤K値の非線型性に関する修正項で、この関係を用いて大変位を生ずる実杭の地盤K値を推定することができる。このとき、孔内載荷試験では図—1に示した降伏応力 p_v が確認できる段階まで載荷しておけばよい。しかし本文では、土の非線型の傾向をより直線的に把握するため、ゴムセル圧力が土の降伏応力 p_v を超え

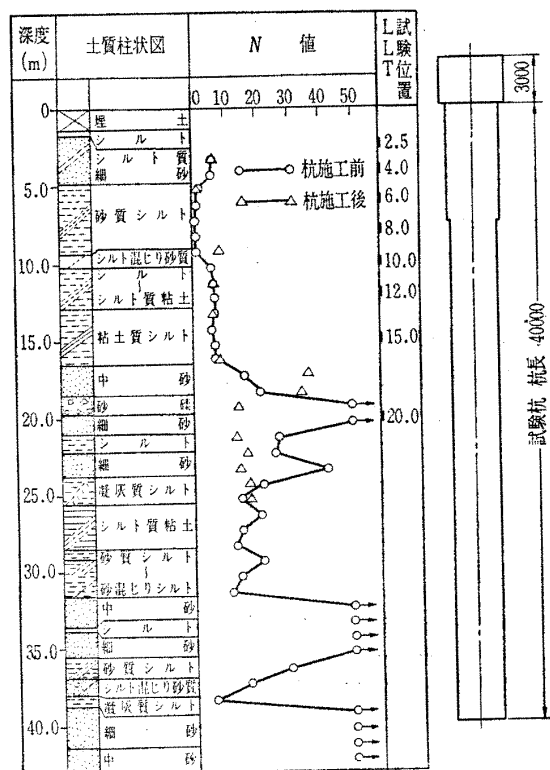
表—2 地盤K値測定時のゴムセル変位量

測 定 位 置	測定数	初期半径 r ₀ (cm)		中間半径 r _m (cm)		ゴムセルの平均最大変位量 2(r _m -r ₀)(cm)
		平均値	範囲	平均値	範囲	
上 部 砂 層 (G.L.-2.5~-4.0m)	5	4.79	4.53 5.11	4.92	4.65 5.01	0.26
上 部 粘 土 層 (G.L.-5.0~-10.0m)	15	4.39	4.21 4.76	4.49	4.25 4.86	0.20

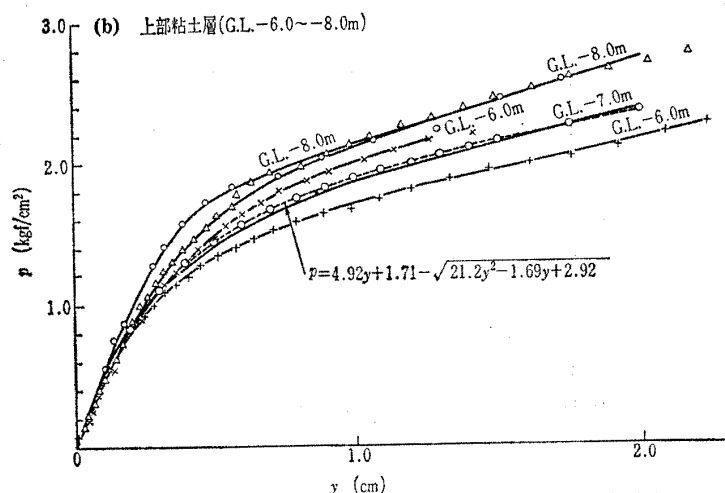
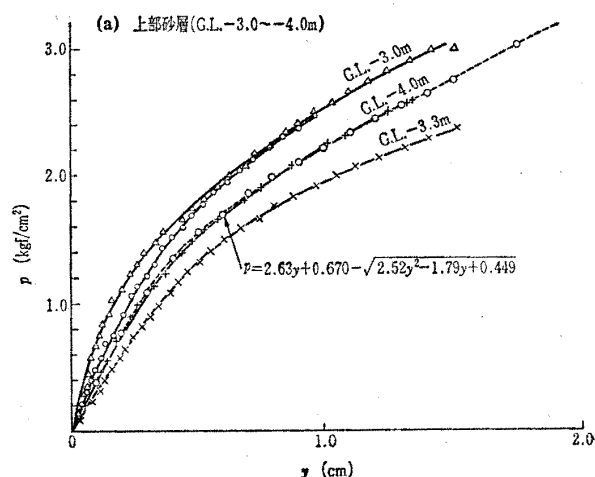
たあとも引き続き載荷して荷重-変位関係を求めるものとする。図—2に示した土質柱状図のもとで、各深度における孔内大変位試験の例を図—3に示す。このような孔内大変位試験を行うのは次のような考え方に基づいている。

ボーリング孔内載荷試験では、ゴムセル圧力は降伏荷重付近まで載荷されるが、この際のゴムセル変位量2(r_m-r₀)は、表—2の例で示すように平均的には2~2.6mmの程度である。一方、実杭ではもっと大きな変位が生ずることが多く、例えば道路構造物関係では杭頭変位として10~15mmに設定されることが多い。

このように大きな変位を生ずる実杭の設計に用いる地盤K値の設定のために、式(3)右辺第3項の修正項があるが、それにしても、ゴムセルを実杭の変位レベルまで加圧・変



図—2 実杭載荷試験位置での土質柱状図



図—3 孔内大変位試験

位させてより直接的に荷重-変位の非線型性の傾向を把握しておくのがよいと思われる。

また、ボーリング孔壁の緩みによって測定される地盤 K 値は過小評価される場合のあることが指摘されており⁹⁾、過小評価された値を、式(3)によって大変位の領域まで外そう推定しても正確な地盤 K 値が得られない。しかし図-3の例のように、大変位の領域まで载荷してその結果を直接利用するようにすれば、初期の孔壁緩みによる影響を避けることができるとと思われる。

さて図-3に示すように、原位置(図-2)の各地層における数個の孔内大変位試験結果で、ほぼ平均的と思われる荷重-変位曲線を選択し、これについてカーブフィッティングを行った。最もよく近似する関数形として次のような双曲線関数を選んだ。

$$p = ay + b - \sqrt{cy^2 + dy + e} \dots\dots\dots(4)$$

p : ゴムセル载荷圧力 ($p_e - p_0$) 図-1 参照

y : ゴムセル変位 ($r - r_0$) 図-1 参照

a, b, c, d, e : 定数

これよりボーリング孔 K 値 K_m を次のように表す。

$$K_m = \frac{p}{y} = \frac{1}{y} (ay + b - \sqrt{cy^2 + dy + e}) \equiv F(y) \dots\dots(5)$$

K_m : ボーリング孔 K 値

式(5)は図-1(b)に示すように割線係数に相当し、非線型性が式の中に含まれていることが、今井の K_m と異なる。式(3)と式(5)から、地盤 K 値が求まるが、式(3)の第3項は前述の理由によってもはや不要である。

$$\frac{K}{K_m} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{B}{2r_0} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad \text{あるいは} \quad K = \frac{\pi}{2} \left(\frac{B}{2r_0} \right)^{-\frac{1}{4}} F(y) \dots\dots(6)$$

式(6)によって、原位置の上部砂層 (GL-5m), 上部粘土層 (GL-5~-10m) に対する地盤 K 値を求めたのが図-4である。

3.2 孔内クリープ試験

土のクリープによる地盤 K 値の低下の傾向をみるためにボーリング孔内クリープ試験を行った。試験は通常の孔内载荷試験装置によるが、長時間にわたって荷重値を正確に制御調整すること、クリープ変位量を正確に測定する必要

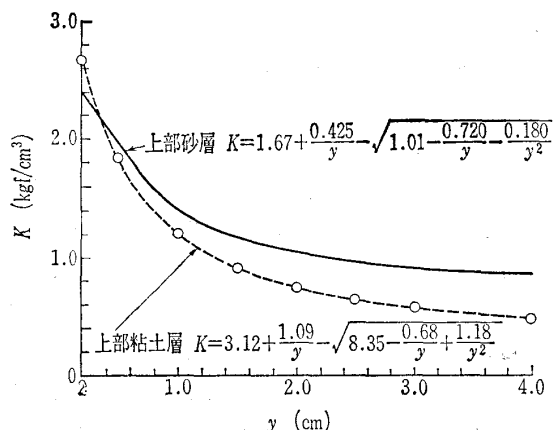


図-4 孔内大変位試験から求めた地盤 K 値

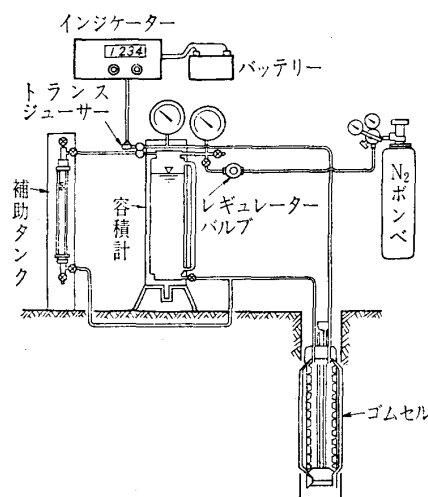


図-5 LLTによる孔内クリープ試験

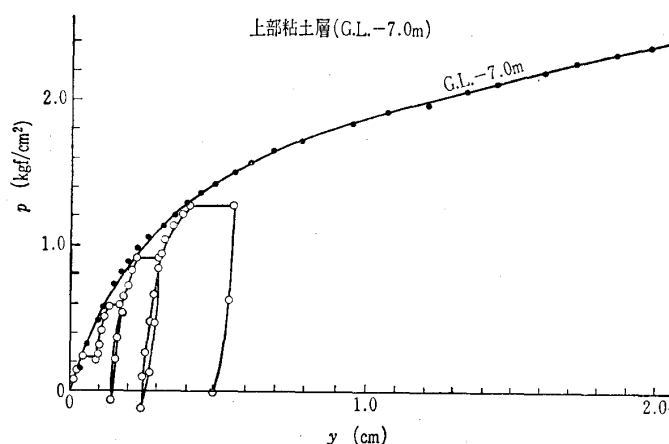


図-6 クリープ荷重設定の例(上部粘土層 GL-7.0m)

があること、などを考慮して、通常の装置のほかに図-5に示すように、レギュレーターバルブ、補助タンクを追加している。またクリープ時間は各荷重段階で180分としている。

载荷手順として、所定荷重でクリープ試験終了後、一たん除荷して再度更に高位のクリープ荷重まで载荷する場合と、除荷せずに引き続き次のクリープ荷重まで载荷する場合の2ケースについて行った。いずれの場合も前段階のクリープひずみの影響が残留しないと思われるまで次段階の荷重レベルをあげ、常に処女領域におけるクリープ試験を行うよう配慮した。結果として、一試験地点で3~4段階の荷重レベルで、またその範囲は0.4~3.0 p_v (p_v : 降伏応力, 図-1(a)参照)に設定された。結局孔内クリープ試験は上部砂層についてGL-3~-4mで3孔計10回、上部粘土層についてGL-7mで3孔計10回、計20回の結果を得た。各試験孔の離れは約1mである。

クリープ荷重設定の例を図-6、クリープ曲線の例を図-7に示す。

一般に土のクリープ曲線を表すには、時間について対数関数とするもの、指数関数とするもの、あるいはレオロジ

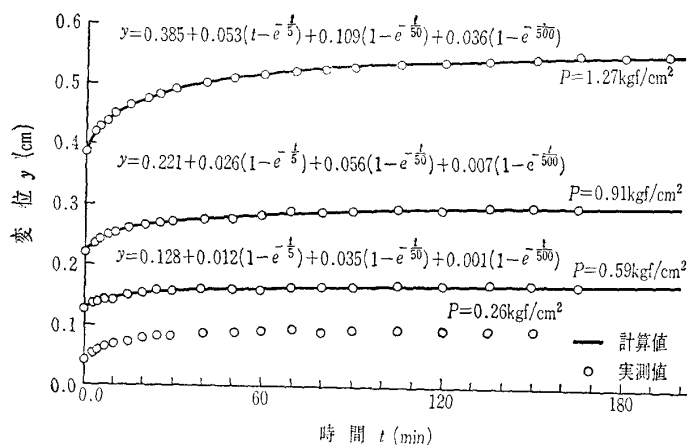


図-7 孔内クリープ試験(上部粘土層 GL-7.0 m)

ーモデルによるものなどがある。これらのうち本文では、3要素をもつレオロジーモデルによる表示が実測曲線に近似できるとして、次のようにおいた。

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^3 y_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \dots\dots\dots (7)$$

$y(t)$: 時間 t における変位
 y_0 : 時間 $t=0$ における変位
 y_i : 定数
 t : クリープ時間
 τ_i : 遅延時間

式(7)の y_i , τ_i の決定は, Schapery (シャペリー) の提案する方法⁷⁾ によった。この方法では, τ_i の値をまず任意に決めておく, とすることが特徴である。ただしその際の考え方として, 実験値として与えられたクリープ曲線の時間軸を, 1 けたを単位として N 分割し, この各々の分割部分で一つずつ適当な τ_i を決めるのである。次に N 個の点 (N 個の時刻) での y の値を読み取れば, 未定定数 N 個の y_i に対応して, N 個の連立方程式が得られる。

本文の一つの例では $\tau_i=5, 50, 500$ 分をまず仮定したうえで, 各々のクリープ時間 $t=\tau_i$ に対応するクリープ量を読み取り, 式(7)から 3 個の連立方程式を作り, これを解いて y_i を決定する。ただし孔内クリープ試験ではクリープ時間が最大 180 分なので, 対数関数表示で $t=500$ 分のクリープ変位を推定したあと上述の方法により y_i を決めていく。このようにして式(7)を定めた例を, 図-7 に示しているが, クリープ試験時間の全域において良好な近似曲線を得ることができた。

ところでクリープによって地盤 K 値は見掛け上低下する。その低下の状況を把握するため, 次のような考察を行った。クリープ前 ($t=0$) とクリープ後 ($t=t$) の地盤 K 値の比は次のように表せる。

$$G(t) = \frac{\text{クリープ後の地盤}K\text{値}}{\text{クリープ前の地盤}K\text{値}} = \frac{p}{y(t)} = \frac{p}{y_0} \dots\dots\dots (8)$$

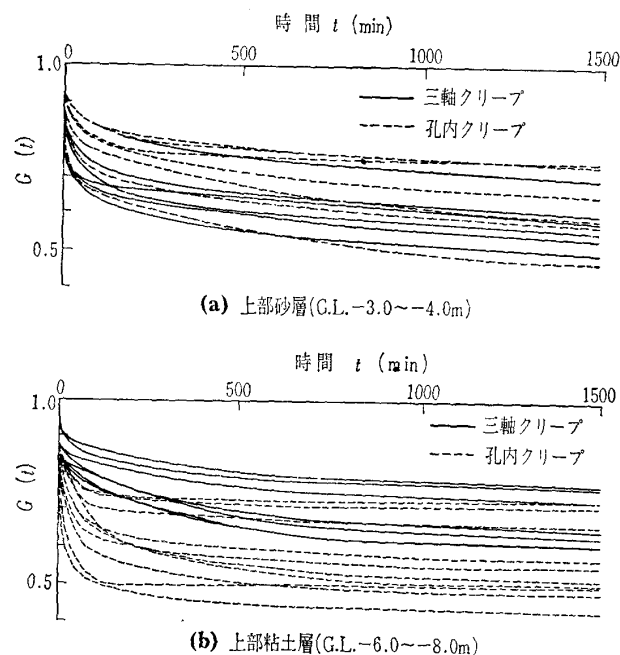


図-8 $G(t)$ の比較

$G(t)$: クリープによる地盤 K 値低下率

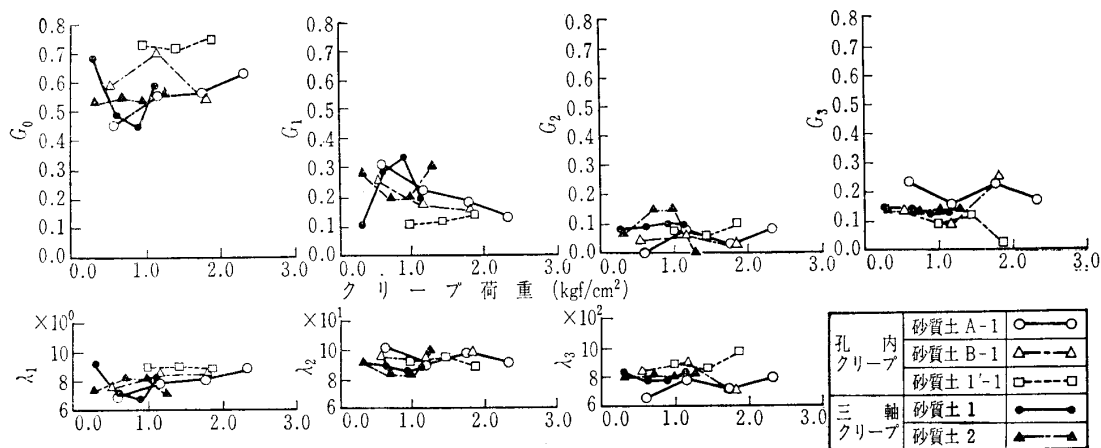
あるいは式(8)の $G(t)$ は, リラクゼーション係数の初期値と最終値の比, ともいえる。そこで一般的方法に従って, 式(7)のクリープ関数からリラクゼーション係数を求めれば, 式(8)は次のような表示が可能である。

$$G(t) = G_0 + \sum_{i=1}^3 G_i e^{-t/\lambda_i} \dots\dots\dots (9)$$

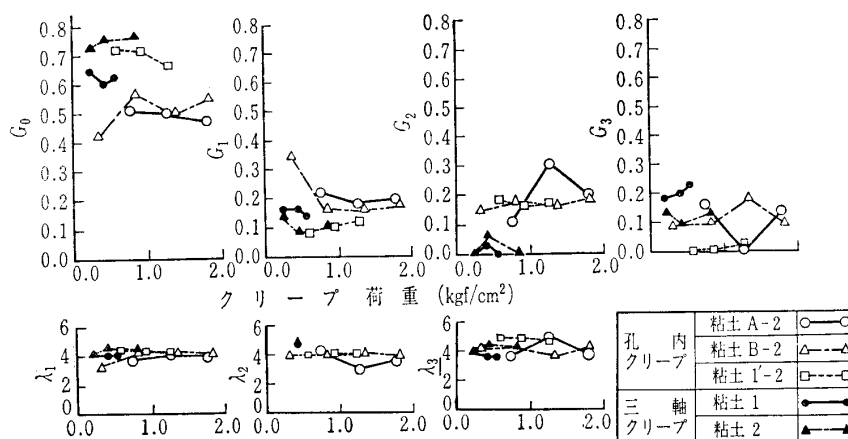
G_0, G_i : 定数
 λ_i : 緩和時間

孔内クリープ試験結果について, このようにして定めた $G(t)$ を図-8 の破線で示す。なお図中の実線は, 同様の方法によって求めた, 室内三軸クリープ試験結果である。室内三軸クリープ試験は次のような手順で行っている。原位置からの不かく乱供試体を, 上載圧相当荷重で等方圧密した後, 間隙水圧係数 B 値 >0.95 の条件を満足させ, 所定荷重で非排水クリープ載荷する。試験時間は24時間とし, 除荷放置1時間後, 次のクリープ荷重まで上げて再載荷する。クリープ荷重は最大軸差強度を 4 ~ 5 分割する値とし, 段階的に荷重値を上げてクリープ試験する。したがって1供試体につき, それぞれ異なる荷重値で 4 ~ 5 回クリープ試験することとなる。

図-8 に示す $G(t)$ の傾向は, 初期値 1.0 から減少するが, その収束の傾向は比較的早いようである。ボーリング孔内試験値と三軸クリープ試験値との比較では, 砂では相違は明らかでないが, 粘土では前者のほうが収束が早いように見受けられる。また最終収束値(予測値)は式(9)の G_0 で表されるが, G_0 および他の定数 G_i とクリープの応力レベルの関係を図-9 に示している。図には, 孔内クリープ, 三軸クリープによるものすべてのデーターを記しているが,



(a) 上部砂層(G.L.-3.0~-4.0m)



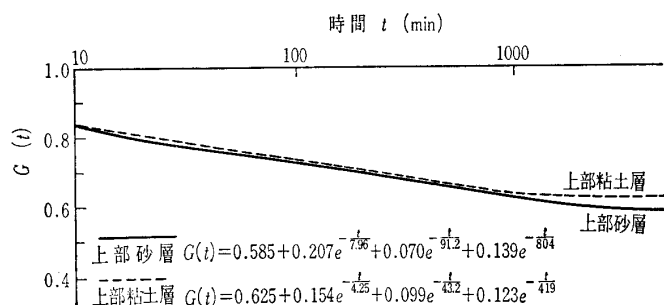
(b) 上部粘土層(G.L.-6.0~-8.0m)

図-9 レオロジー定数とクリープ荷重の関係

試験法による差,あるいは応力レベルによる影響については明確な傾向はうかがえないようである。

そこで図-8に示す各地層についてのそれぞれの実験曲線から,これらの平均曲線を一義的に決めることとした。土質の種類だけに注目し,試験方法や応力レベルの影響を無視することとなるが,現段階ではこれらの載荷変形機構などの影響が明らかでないので,このような単純化は許されよう。

その結果を図-10に示すが,具体的には各試験から得られた式(12)中の各定数をそれぞれ単純平均して,単一の平均曲線を決めたのである。

図-10 クリープ試験から求めた $G(t)$

3.3 非線型性とクリープを考慮した地盤K値

前節までに,荷重変位の非線型性を考慮した地盤K値として,孔内大変位試験結果をもとに,今井の式を修正して式(6)のようにおいた。次に孔内クリープ試験と室内三軸クリープ試験結果をもとに,地盤K値のクリープによる低下の傾向について検討し,式(8)あるいは(9)を示すことができた。これらの式中 $F(y)$ および $G(t)$ は,各地層に対する試験から求められ,一例として図-2の地層に対して本文の場合は図-4および図-10のように定められた。

ここで $F(t)$ と $G(t)$ は互いに独立の関係にあり,特に $G(t)$ については,土の種類のほかは,荷重(変位)レベルや試験方法による影響は前述のように,考慮しないでおくことができる。したがって,非線型性とクリープによる時間効果をともに考慮に入れた,一般化された地盤K値は,これらの積として次のように表せよう。

$$K = \frac{\pi}{2} \left(\frac{B}{2r_0} \right)^{-\frac{1}{2}} F(y) G(t) \dots \dots \dots (10)$$

一般化された地盤K値を式(10)のように表すことによって,非線型性のほか載荷時間効果を有するような,複雑な挙動を示す杭の解析が,Changの式を基本とした線型弾性地盤反力法によって,簡便に行えることとなり,その観点からも,式(10)は極めて意義深いものといえよう。なお, $F(y)$ や $G(t)$ の関数型として,本文ではそれぞれ式(5)や式(9)のようにおいたが,互いに独立な関数で表される限り,それぞれの関数型は任意に決めてよい。

4. 多層地盤における杭の挙動予測

4.1 解析モデル

水平力を受ける杭の解析は,Changの式によるのが最も実用的であり,また式(13)で表した一般化された地盤K値を

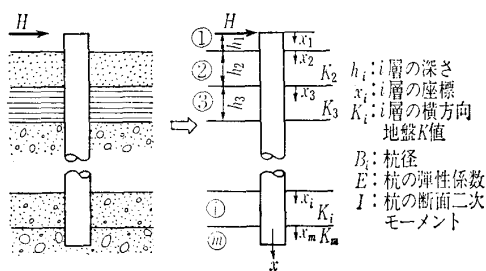


図-11 解析モデル

用いられれば更に複雑な挙動についても、繰返し計算等の手法を用いて解析が可能となる。また地盤が多層系となる場合でも、境界条件を適切に連続させることによって解析をすすめればよい。そこで以下に述べる実杭の挙動予測には、図-11のような解析モデルを用いるものとするれば、多層地盤での杭の曲げ基本式は次のように表せる。

$$(EI)_i \frac{d^4 v_i}{dx_i^4} + K_i B y_i = 0 \quad (11)$$

$(EI)_i$: 第 i 層の杭の断面剛性

x_i : 第 i 層の座標

y_i : 第 i 層の杭の変位

K_i : 第 i 層の地盤 K 値

式(11)の一般解は次のとおりである。

地表面より上の部分 ($i=1$)

$$y_1 = Ax_1^3 + Bx_1^2 + Cx_1 + D \quad (12)$$

地表面下の部分 ($i \geq 2$)

$$y_i = e^{\beta_i x_i} (S_i \cos \beta_i x_i + T_i \sin \beta_i x_i) + e^{\beta_i x_i} (U_i \cos \beta_i x_i + V_i \sin \beta_i x_i) \quad (13)$$

ここで、 A, B, C, D および S_i, T_i, U_i, V_i : 境界条件によって決まる未定係数

$$\beta_i = \sqrt[4]{\frac{K_i B}{4(EI)_i}}$$

単杭の杭頭水平載荷条件の場合、境界条件は次のようになる。

杭頭 $x_1=0$ において

曲げモーメント $=0$ よって $(EI)_1 y_1'' = 0$

せん断力 $= -H$ よって $(EI)_1 y_1''' = -H$

各層間 ($x_i = h_i, x_{i+1} = 0$) において

変位 $y_i = y_{i+1}$

たわみ角 $y_i' = y_{i+1}'$

曲げモーメント $(EI)_i y_i'' = (EI)_{i+1} y_{i+1}''$

せん断力 $(EI)_i y_i''' = (EI)_{i+1} y_{i+1}'''$

杭先端 ($x_m = h_m$) において

曲げモーメント $=0$ $(EI)_m y_m'' = 0$

せん断力 $=0$ $(EI)_m y_m''' = 0$

これらの条件より、 $i=1 \sim m$ に対して、それぞれの未定係数は、表-3に示すような連立方程式の解として求められる。計算手順は図-12のフローチャートに従って行う。

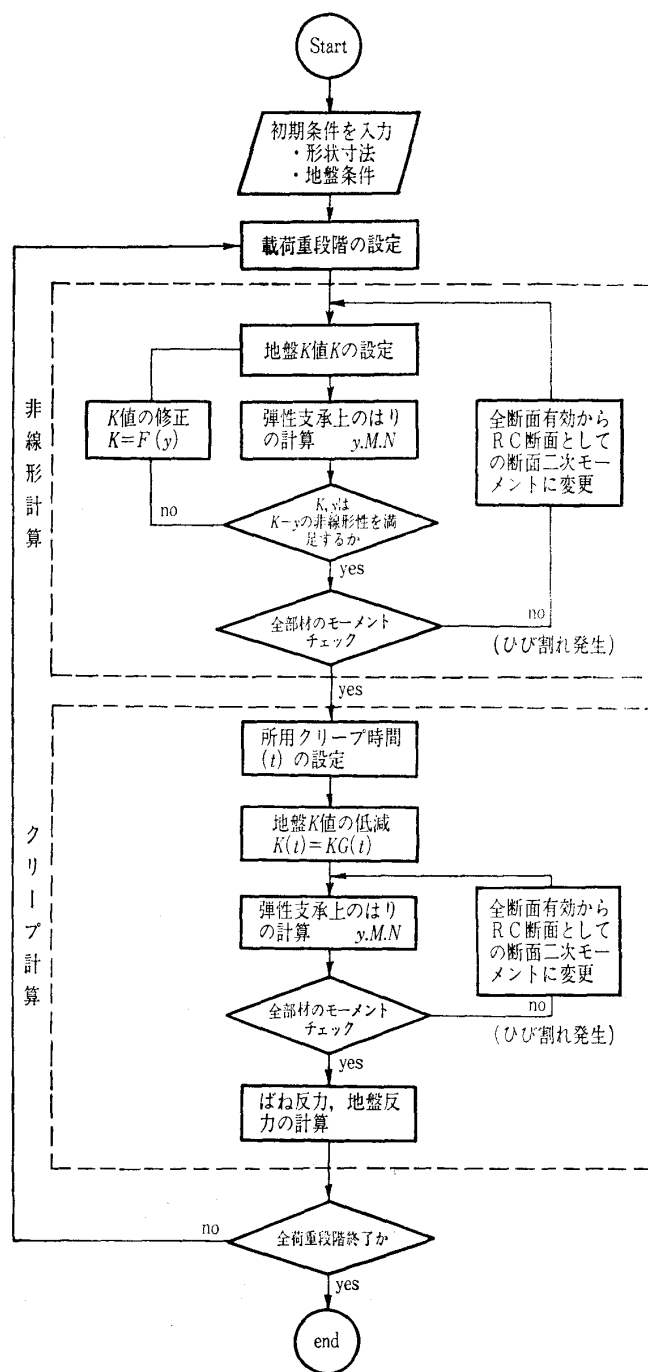


図-12 実杭解析フローチャート

4.2 実杭への適用

上に述べた解析手法を実杭に適用し、予測計算値と実測値の比較検討を行い、本解析法の有用性について考察してみる。実杭は図-2の柱状図を示す地盤で施工された大口径場所打ちコンクリート杭 ($\phi 3.0 \text{ m}$, $l=40 \text{ m}$) で、この杭に対して原位置水平載荷試験が別に行われた²⁾。

この杭のモデル解析を行うに際して用いる地盤 K 値は前節3.で既に述べているが、これをまとめると表-4のようになる。ここで下部粘土層およびその下の砂層については、この深さでは杭の変位量も小さく、線型領域にあると仮定して差しつかえないと思われるので、非線型性や載荷時間

表-3 多層系Changの連立方程式

$$\begin{aligned}\xi_i &= \sin(\beta_i h_i) \\ \eta_i &= \cos(\beta_i h_i)\end{aligned}$$

[illegible]

表-4 実杭解析に用いる地盤 K 値

	$\alpha = \frac{\pi}{2}$	$\beta = \left(\frac{2m}{B}\right)^{\frac{1}{4}}$	$F(y)$	$G(t)$	K
上部砂層 GL-0 ~ -4.8m	1.571	0.404	$\frac{1}{y} \times (2.63y + 0.67)$ $-\sqrt{2.52y^2 - 1.79y + 0.449}$	$0.585 + 0.207e^{\frac{-t}{7.96}}$ $+ 0.070e^{\frac{-t}{91.2}} + 0.139e^{\frac{-t}{804}}$	$\alpha \cdot \beta \cdot F(y) \cdot G(t)$
上部粘土層 GL-4.8 ~ -9.1m	1.571	0.404	$4.92 + 1.71 \times \frac{1}{y}$ $-\sqrt{21.2 - \frac{1.69}{y} + \frac{2.92}{y^2}}$	$0.625 + 0.154e^{\frac{-t}{4.25}}$ $+ 0.099e^{\frac{-t}{43.2}} + 0.123e^{\frac{-t}{419}}$	$\alpha \cdot \beta \cdot F(y) \cdot G(t)$
下部粘土層 GL-9.1 ~ -16.5m	$K = 6.3 \text{ kgf/cm}^2$ (一定)				
砂層 GL-16.5m ~	$K = 12.5 \text{ kgf/cm}^2$ (一定)				

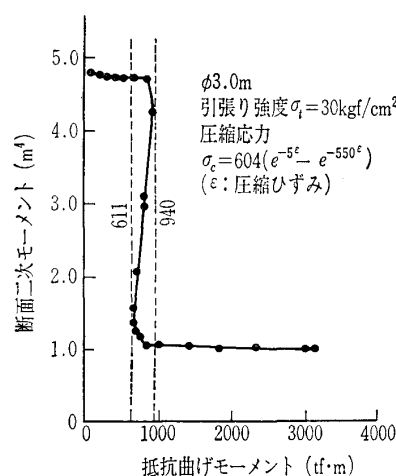


図-13 鉄筋コンクリート杭 (φ3.0 m) の断面二次モーメントと抵抗曲げモーメント

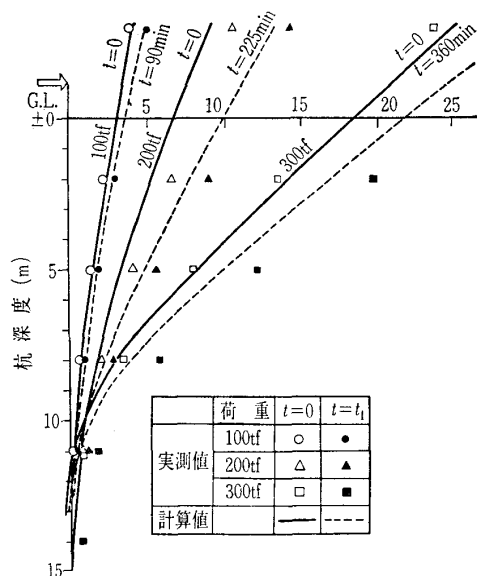


図-14 杭体変位の実測値と計算値の比較

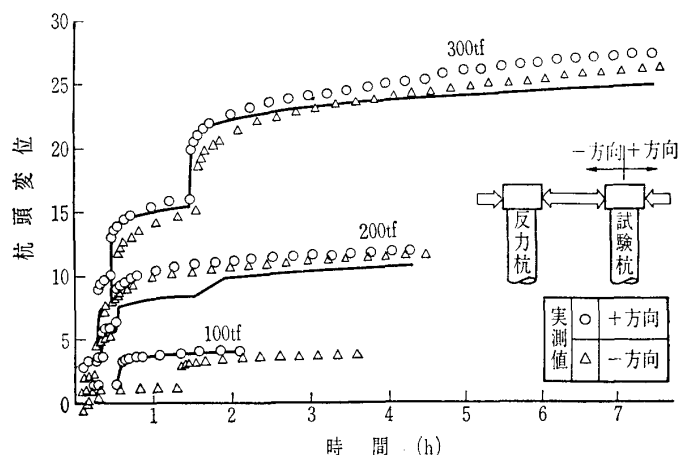


図-15 杭頭変位 - 時間の関係

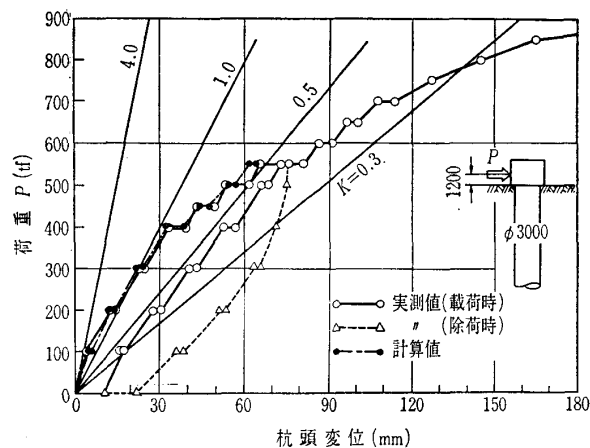
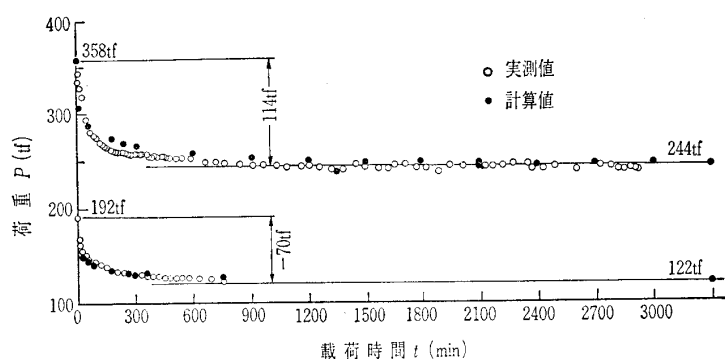


図-16 杭頭荷重 - 変位の関係

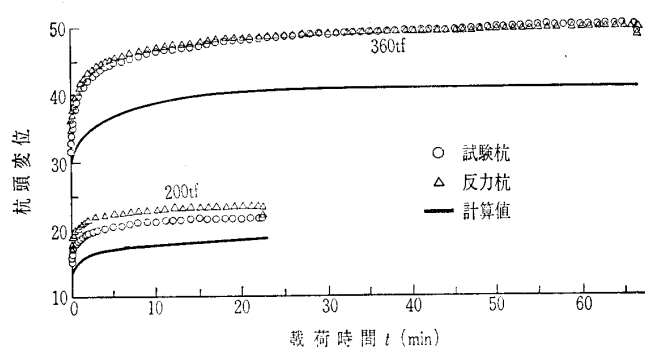
ることに注意する必要がある。ここで文献⁸⁾の方法に従って、本文の実杭について断面二次モーメントおよび抵抗曲げモーメントを求めると図-13のようになる。ここではコンクリート引張り強度 30 kgf/cm^2 とし、圧縮応力-ひずみの関係は、コンクリートコアの圧縮試験から求めた。図-12のフローチャートには、ひび割れによる断面剛性低下のチェックが組み込まれている。

効果を考慮に入れない一定値としてある。

ところで解析に当たっては、水平力を受ける鉄筋コンクリートの断面剛性がひび割れの発生によって大きく低下す



図一17 杭頭変位一定試験における荷重の低下



図一18 杭頭荷重一定試験における変位の増加

4.3 計算値と実測値の比較

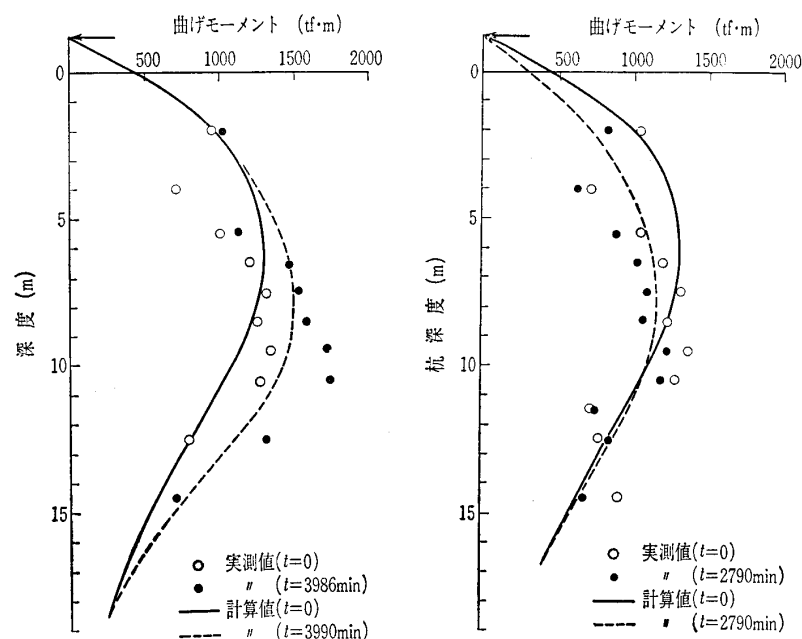
杭変位の載荷直後と時間経過後の変動と深さ方向分布についての比較を図一14に示すが、よい精度で予測しているといえよう。また図一15は各荷重段階における杭頭変位-時間の関係である。

図一16は杭頭荷重-変位の関係を示す。荷重 500 tf 付近までは極めてよい一致を示しているが、実杭の測定において、引張り側鉄筋応力はちょうどこの荷重付近で降伏応力に達したことが認められており、したがってこの荷重以降では杭体の塑性化によって解析モデルの前提が適用されない状態にいたっているものと思われる。

以上は一般的な載荷試験法⁹⁾に準拠したいわゆる短期載荷の場合の結果であったが、長期載荷の場合として、杭頭変位一定保持試験を図一17、杭頭荷重一定保持試験を図一18に示す。杭頭変位一定試験は極めて良い一致を示しているが、杭頭荷重一定試験には若干の差が見られるようである。

図一19に曲げモーメントについての比較例を示すが、おおむね良好な一致をみているといえよう。

本文の解析手法は、Chang の式による線型弾性反力法を基本としたうえで、地盤 K 値の設定に際して、非線型性や載荷時間効果について新しい考え方を導入している。解析結果の妥当性について考察してみると、図一14、15、16から分かるように、本文でいう短期載荷時の計算値は実測値と良い一致を示しており、このことから地盤 K 値に導入した非線型性の表示(式(10)の $F(y)$)は妥当であったといえよう。また図一17、18の長期載荷の場合は各ケースで予測の精度は異なっている。長期載荷の予測値に大きく影響するのは式(10)中の $G(t)$ の決定である。本文では土質の種類のみ注目して図一10のように設定したが、荷重一定試験のようなクリープ性状試験の場合と、変位一定試験のようなリラクゼーション性状試験の場合では $G(t)$ の関数は異なるのではないかとと思われる。



図一19 杭体曲げモーメント

5. まとめ

水平力を受ける杭の挙動予測の方法について考察した。解析方法は線型弾性地盤反力法によるが、地盤 K 値の設定に、ボーリング孔内載荷試験による荷重-変位の非線型性および載荷時間効果を新しく導入している。しかもこれらが互いに独立の変数分離型に表示されるため、解析はChangの式を基本として、繰返し計算の手法を用いて容易に行うことができる利点がある。

本解析法を実杭の載荷試験結果に適用したところ、長期載荷試験結果も含めて計算値と実測値は良い一致を示した。

本文は「都市高架橋の新しい構造形式に関する調査研究委員会(高速道路調査会、委員長足立 洪氏のちに宇都一馬氏)への提出資料に加筆したものである。御指導・御討議頂いた委員長はじめ委員の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 海老根 昭・宮南 紘・秋元泰輔・中川誠志: 多径間連続高

No. 1271

- 架橋の設計について，第25回構造工学シンポジウム，土木学会，pp. 195-202, 1979.
- 2) 海老根 昭・中川誠志・伊藤克彦：大口径場所打ち杭($\phi 3.0$ m)の短期および長期水平載荷試験，土と基礎，Vol. 28, No. 12, pp. 11-17, 1980.
- 3) 矢作 枢・荻原英輔・田矢 暁：クリープを考慮した横方向 K 値について，土と基礎，Vol. 27, No. 3, 1979.
- 4) 西田義親：杭基礎の水平支持力—文献資料と研究解説—，鋼管杭協会報告第1号，鋼管杭協会，1975.
- 5) 今井常雄：地盤の横方向 K 値の研究 (4)—LLT 測定結果によるクイの横方向挙動の計算法—，土と基礎，Vol. 18, No. 1, pp. 11-16, 1970.
- 6) Yoshida, I. and Yoshinaka, R.: A Method to Estimate Modulus of Horizontal Subgrade Reaction for a Pile, Soils and Foundations, Vol. 12, No. 3, pp. 1-17, 1972.
- 7) 国尾 武・Williams, M.L.: 粘弾性体の力学的挙動，日本機械学会誌，Vol. 68, No. 1, pp. 83-91, 1965.
- 8) 古藤田喜久雄・風間 了：クイ材の塑性を考慮した解析法，土と基礎，Vol. 25, No. 8, pp. 15-20, 1977.
- 9) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準・同解説，1972. (原稿受理 1981.1.19)

土質工学会発行

土質基礎工学ライブラリー

A 5 判 布クロス上製本 送料1冊 350円

	ページ数	会員特価	定 価
1 軟弱地盤の調査・設計・施工法	310ページ	3,200円	4,200円
3 掘削のポイント(第1回改訂版)	399ページ	3,800円	4,900円
4 土質調査試験結果の解釈と適用例(第1回改訂版)	365ページ	3,400円	4,400円
7 土と基礎実用数式・図表の解説	443ページ	4,100円	5,300円
9 土と構造物の動的相互作用	567ページ	4,200円	5,500円
10 日本の特 殊 土	356ページ	3,200円	4,200円
11 土留め構造物の設計法	358ページ	3,900円	5,000円
12 切 土 ノ リ 面	395ページ	4,000円	5,200円
13 軟弱地盤における工事実施例(その2)	375ページ	4,600円	5,900円
14 実施例に見る構造物基礎	310ページ	3,900円	5,000円
15 土質工学における化学の基礎と応用	326ページ	3,400円	4,500円
16 風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用	316ページ	3,500円	4,500円
17 掘削用機械・特殊な掘削	285ページ	3,000円	3,900円
18 土と基礎の沈下と変形の実態と予測	301ページ	3,200円	4,200円
19 建設工事と地下水	319ページ	3,400円	4,400円
20 緑化・植栽工の基礎と応用	319ページ	3,400円	4,400円
21 土と基礎の物理探査	308ページ	3,400円	4,400円

発売：(社)土質工学会 ☎03-251-7661(代)

〒101 東京都千代田区神田淡路町2-23(菅山ビル4階)