

# 軟弱粘土中杭の周面支持機構に関する実験的考察

三浦哲彦<sup>1</sup>・呉 文経<sup>2</sup>・中村六史<sup>3</sup>・一瀬智郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部建設工学科 (〒840 佐賀市本庄町1)

<sup>2</sup>学生会員 佐賀大学大学院 博士後期課程 システム生産科学専攻

<sup>3</sup>正会員 親和テクノ(株)

<sup>4</sup>正会員 工修 応用地質(株)

地盤沈下地帯においては、構造物基礎に周面支持杭（いわゆる摩擦杭）を導入することによって地盤と構造物の間に生じる段差の低減が期待できる。N値2以下の粘土地盤においては周面支持力は無視するという現在の設計通念の背景に存在する問題を明らかにすべく、粘土中杭の周面抵抗に及ぼす要因について検討した。周面抵抗に及ぼす杭の材質と形状の影響、杭打設時の杭周辺における間隙水の移動、粘土の強度・変形特性の経時変化について考察し、杭の周面支持機構を明らかにした。

**Key Words** : pile, bearing capacity, skin resistance, clay, field test

## 1. ま え が き

地盤沈下地帯では摩擦杭を用いることによって地盤と構造物の間に生じる段差の低減を図ることが期待できる。しかし、摩擦杭の支持機構には不明点が多いので、道路橋示方書<sup>1)</sup>ではN値が2以下の軟弱粘土地盤では周面支持力は無視することになっている。軟弱粘土地盤への摩擦杭導入に積極的意義を認める筆者らは、正規圧密状態または軽く過圧密された軟弱粘土中杭の周面抵抗に及ぼす要因について室内実験及び現場実験を行ってきた<sup>2)~7)</sup>。本文はこれまでの研究成果をまとめて、この問題について総合的に考察するものである。粘土地盤中の杭の周面抵抗を計算するのに粘土の粘着力を用いることが多いので、これを“摩擦杭”と呼ぶのはなじまない。本文ではこの形式の杭を“周面支持杭”と呼ぶことにする。

粘土中に設置された杭の周面支持力を評価する方法として、粘土の非排水せん断強度に基づく $\alpha$ 法<sup>8)</sup>(式1)、土の有効土被り圧に基づく $\beta$ 法<sup>9)</sup>(式2)、および杭長の影響を考慮に入れた $\lambda$ 法<sup>10)</sup>(式3)等がある。

$$\tau_{\max} = \alpha c_u \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \beta p_v (\beta = K \tan \delta) \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \lambda (p_v + 2c_u) \quad (3)$$

ここに、 $\tau_{\max}$ ：杭の最大単位周面抵抗、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ ：係数、 $c_u$ ：杭の埋込み部分の平均非排水せん断強度、 $p_v$ ：杭の埋込み部分の平均有効土被り圧、 $K$ ：側圧係数、 $\delta$ ：有効内部摩擦角。全応力に基づく $\alpha$ 法は、杭の最大単位

周面抵抗 $\tau_{\max}$ は粘土の付着力 $c_u$ に等しく、その付着力は乱さない粘土の非排水せん断強度 $c_u$ に比例すると考えるものである。Vesic<sup>11)</sup>は既往の研究結果を整理して、 $\alpha$ 値は杭の種類や地盤条件に応じて0.2~1.5の広い範囲に分布することを示している。軟弱粘土地盤においては、杭の周面抵抗は粘土の非排水せん断強度と一致することが知られているので<sup>12)</sup>、本研究では正規圧密状態または軽く過圧密された粘土を対象として全応力法に基づいて検討を進めた。

## 2. 周面抵抗に関する室内実験

### (1) モールド実験

Fig.1に示す内径29cmのモールドを用いて杭の周面抵抗を測定する実験を行った。木製、コンクリート製、鋼管製の模型杭(Photo.1)を容器内にセットし、十分練り返した有明粘土(土粒子の密度 $\rho = 2.63 \text{ g/cm}^3$ 、含水比 $w = 150\%$ 、液性限界 $w_L = 117\%$ 、塑性指数 $I_p = 78$ )を容器に入れ、29kPaの圧力で30日間圧密を行った。圧密初期の段階で杭周辺粘土の圧密は離れた場所より速く進行するが、圧密終了時にはほぼ均一な圧密状態となる。圧密終了後、杭下端にスクリージャッキと力計をセットし、1mm/minの速度で杭を上方へ押し抜いて周面抵抗を測定した。実験の後、モールドから粘土試料をサンプリングし一軸圧縮試験を行った。

一連のモールド実験の結果をとりまとめたのがFig.2である。杭が荷重を受けて粘土との相対移動を生じ始めた時に発揮する最大単位周面抵抗と非排水せん断強度の

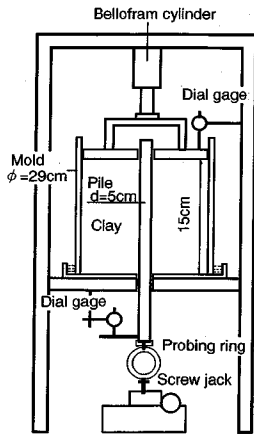


Fig.1 Testing apparatus

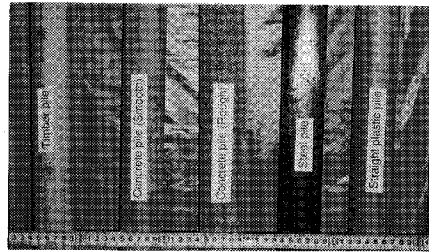


Photo.1 The model piles for laboratory tests

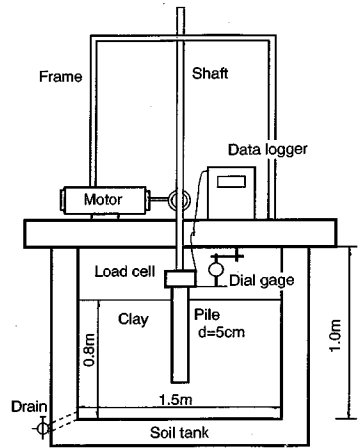


Fig.3 Test in soil tank

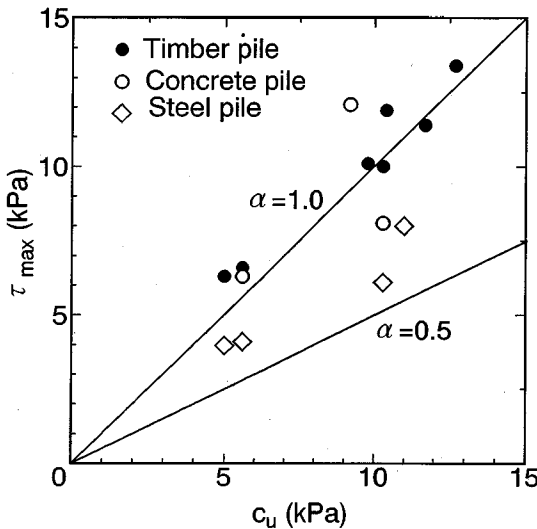


Fig.2 Relationship between maximum unit skin resistance and undrained strength in laboratory tests

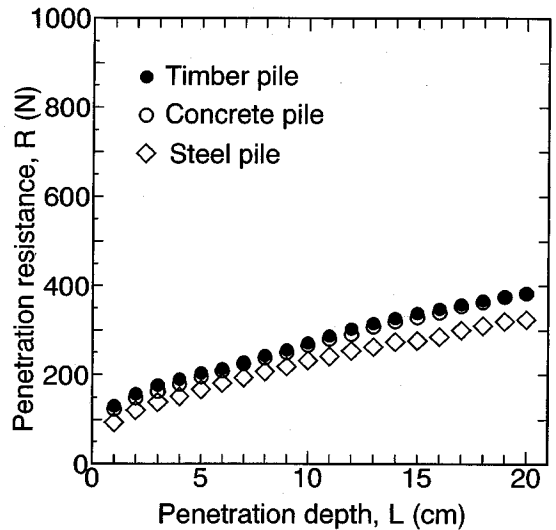


Fig.4 Results of penetration tests for different type of piles

比 $\alpha$  (式(1))は、木杭、コンクリート杭では0.8~1.2であり、鋼管杭では0.5~0.7の範囲に分布している。これらの値は既往の諸研究で指摘されてきた $\alpha$ 値と同じである。上述のように、 $\alpha$ 値が杭材質によって2倍以上も異なること、硬質粘土では木杭であっても $\alpha < 1$ となる<sup>8)</sup>こと、 $\alpha$ 値が異なる原因が明確にされていないこと、などの理由が粘土中杭の周面抵抗評価に対する技術者の信頼感を低くしていると思われる。

## (2) 土槽実験

十分練り返した有明粘土 ( $\rho = 2.62 \text{ g/cm}^3$ ,  $w = 134\%$ ,  $w_L = 128\%$ ,  $I_p = 80$ ) を広さ  $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$  高さ  $1.0 \text{ m}$  のコンクリート土槽に  $80 \text{ cm}$  厚さまで入れ、鉛直圧力 ( $10 \text{ kPa}$ ) を加えて、上下両面排水により約9ヶ月間再圧密

した。この模型地盤に直径=5 cm、長さ=50 cmの模型杭(木製、コンクリート製および鋼管の3種類)を次の方法で挿入した。模型杭の頂部にロードセルをセットし、Fig.3に示すようにモーターを用いて  $8 \text{ mm/min}$  の速度で押し込みながら貫入抵抗と貫入量を記録した。また、 $20 \text{ cm}$  貫入したところで一旦停止し、その状態で3日~28日間放置した後、再度貫入させて貫入抵抗を測定した。

土槽における模型杭の貫入実験結果は Fig.4~Fig.7に示している。杭を連続貫入させた場合には全貫入抵抗は単調に増加し (Fig.4)、杭の材質による違いは鋼管杭の値が低いものの他の2種類の杭の抵抗値とそれほど変わらない。しかし、 $20 \text{ cm}$  まで貫入させてから一定期間放置した後、再度貫入した場合には、貫入抵抗は Figs.5、

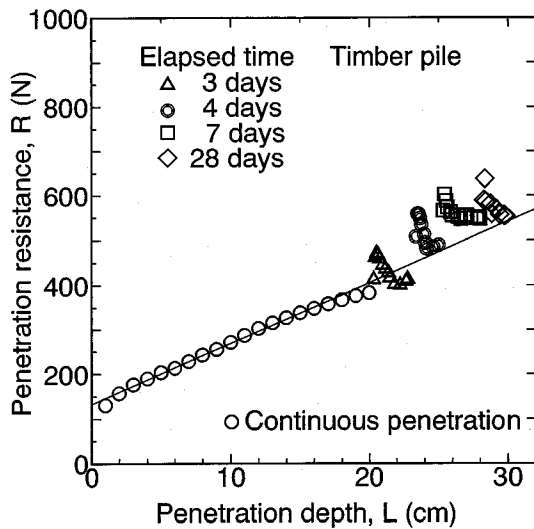


Fig.5 Influence of elapsed time on penetration resistance for timber pile

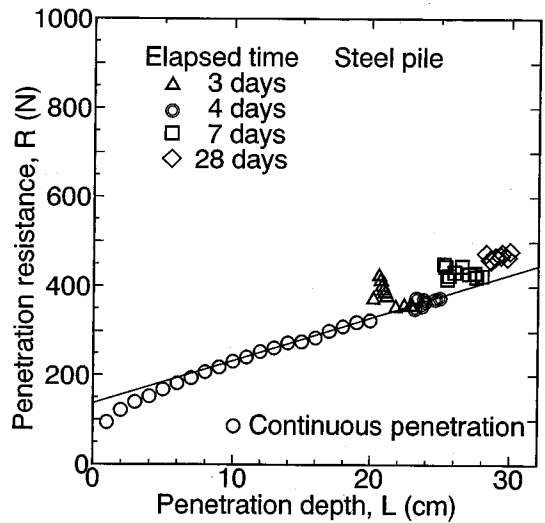


Fig.7 Influence of elapsed time on penetration resistance for steel pile

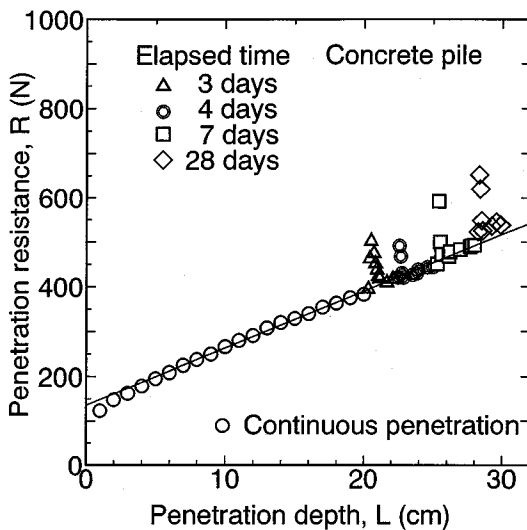


Fig.6 Influence of elapsed time on penetration resistance for concrete pile

6 および Fig.7 に示すように杭の材質によって著しく異なってくる。すなわち、木杭およびコンクリート杭では、再貫入時の抵抗は高いピーク値を示し、そのあとの貫入によって連続貫入のラインまで急速に低下した。これに対して鋼管杭では、Fig.7に見られるようにピーク値が低いという特徴が認められた。3種類の杭の先端抵抗は連続貫入曲線を直線に近似したときの縦軸切片で推定することができる。Figs.5~7に見られるように3種類の杭の先端抵抗はそれほど変わらないことがわかる。

Table 1 Amount of absorbed water for different type of piles

Pile material	Amount of absorbed water (g/cm <sup>2</sup> )			Mean value
	(3days*)	(7days*)	(14days*)	
Timber	0.077	0.115	0.120	0.104
Concrete	0.094	0.081	0.070	0.082
Steel	0.007	0.001	0.001	0.003

\* : Duration of submersion.

### (3) 周面抵抗に及ぼす水分の影響

杭材質によって $\alpha$ 値が大きく異なるのは、杭と粘土の相互作用、特に杭近傍における粘土中の水分移動が強く関与していると考えられる。このことについては後に詳述するが、ここでは杭近傍における粘土中の含水比の変化に関する実験について述べる。

杭体の吸水性を調べるために、気乾状態の模型杭をTable 1に示す期間水中に浸した。その後、表面水を丁寧に拭き取って重量を測り、吸水量を杭の表面積（鋼管杭の場合は表面と内面の和）で除して単位面積当りの吸水量を求めた。この実験によって、木杭とコンクリート杭の吸水量は大きく、鋼管杭のそれは実質的にゼロという結果が得られた。

さて、前述の土槽における貫入実験終了後、杭近傍の粘土の含水比を調べた。杭の表面から外周3方向の所定位置で厚さ5mmの試料を切り出し、平均含水比を求めた（Fig.8）。杭近傍の粘土の含水比は木杭およびコンクリート杭では、鋼管杭の場合より約5%低い値を示した。このような違いは、杭材が表面付近の水分を吸収し

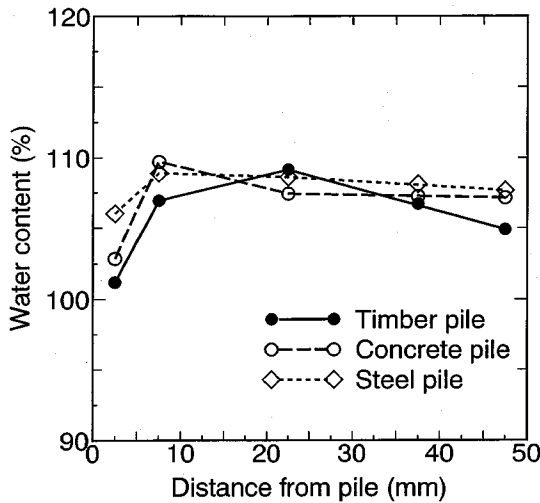


Fig.8 Water content distribution near pile surface

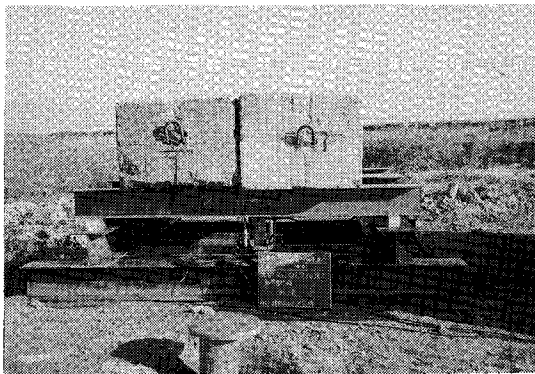


Photo.2 Field loading tests for timber pile

た結果であると考えられる。

Table 1 に示したように、木杭の吸水量  $0.104 \text{ g/cm}^2$  は、影響範囲が杭周辺の  $5 \text{ mm}$  厚さの薄層粘土だけに及ぶとすると、含水比  $130\%$  の粘土を  $100\%$  にまで低下させるのに相当する。このような杭の吸水作用は、杭近傍に低含水比の粘土薄層の形成をもたらす、杭の直径は見かけ上大きくなって貫入抵抗は大きくなると考えられる。

### 3. 木杭の現場載荷および引抜き実験

#### (1) 木杭の載荷実験

周面支持杭の現場鉛直載荷実験を佐賀県川副町におけるボックスカルバート工事現場<sup>13)</sup>において実施した(実験Ⅰ)。その地盤状況および実験概要は Fig.9 に示すとおりであった。2本の木杭(末口外径 $\approx 18 \text{ cm}$ 、頭径 $\approx 25 \text{ cm}$ 、埋込み長さ $\approx 10 \text{ m}$ 、テーパ度 $\approx 0.6 \sim 0.7\%$ )

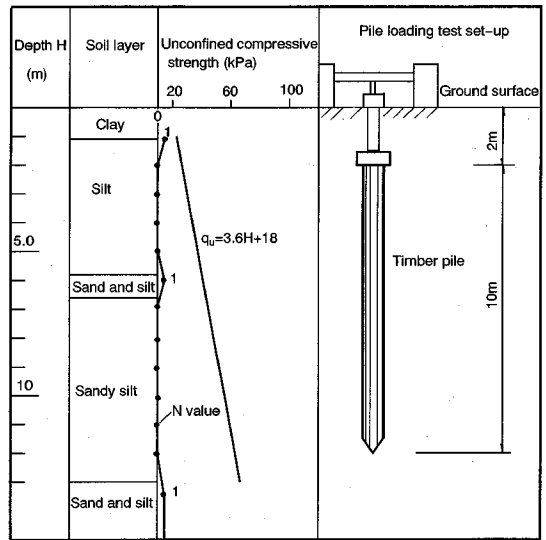


Fig.9 Profile of subsoil in the test site and the pile loading test set-up (test I)

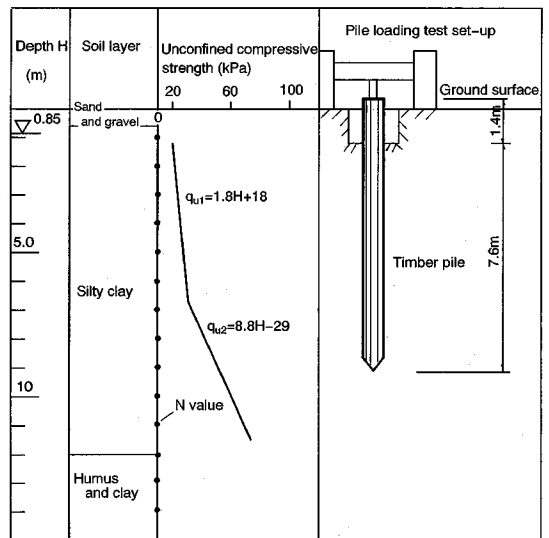


Fig.10 Profile of subsoil in the test site and the pile loading test set-up (test II)

を打設し、各杭は打設後14日間に第1回目、および第1回目の実験終了後さらに48日間放置した後に第2回目の鉛直載荷実験を実施した。同じく佐賀県芦刈町における樋管試験施工現場<sup>14)</sup>においても木杭の鉛直支持力に関する実験が行われた(実験Ⅱ, Photo.2)。この場合の地盤状況は Fig.10 に示している。実験Ⅱにおいては、6本の木杭(末口外径 $\approx 19 \sim 21 \text{ cm}$ 、頭径 $\approx 24 \sim 26 \text{ cm}$ 、埋込み長さ $\approx 7.6 \text{ m}$ 、テーパ度 $\approx 0.4 \sim 0.6\%$ )を  $3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  の間隔で打設し、各杭について打設後3日から90日の間放置した後に載荷実験を行なった。載荷は「杭

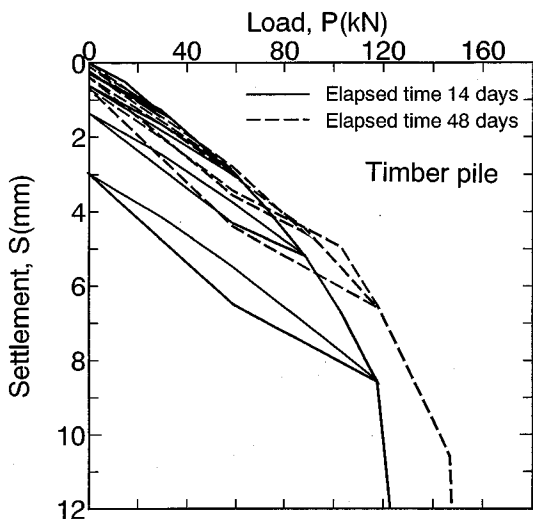


Fig.11 Results of field loading tests for timber pile (test I)

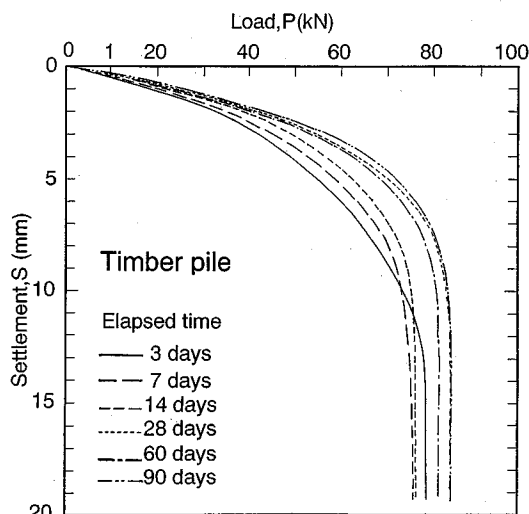


Fig.12 Results of field loading tests for timber pile (test II)

の鉛直載荷試験方法・同解説<sup>15)</sup>に準じて実施した。

木杭載荷実験の荷重～沈下量曲線を Figs.11, 12 に示している。実験結果をまとめたのが Table 2 および Table 3 である。

Table 2 に見られるように、杭打設後 14 日目に行った第 1 回目の載荷実験での支持力に対し、その後 48 日間放置した後の第 2 回目の実験では支持力は約 20% 程度増加した。 $\tau_{max}/c_u$  と放置時間との関係については、14 日における実験は  $\tau_{max}/c_u \approx 0.92 \sim 1.14$ 、48 日では  $\tau_{max}/c_u \approx 1.16 \sim 1.38$  であった。 $\tau_{max}$  の算出に当たっては各杭の極限荷重から先端抵抗を差し引いた値で求めた。先端抵抗  $Re$  は下式によって計算した。

$$Re = N \times Ae \times c_u \quad (4)$$

Table 2 Results of field loading test I

Pile number	No.A		No.B	
Elapsed time (days)	14	48	14	48
Ultimate load (kN)	118	147	147	176
Yield load (kN)	118	142	137	162
$\tau_{max}/c_u$	0.92	1.16	1.14	1.38

Table 3 Results of field loading test II

Pile number	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Elapsed time (days)	3	7	14	28	60	90
Ultimate load (kN)	78.4	75.5	76.0	83.3	80.9	83.3
Yield load (kN)	68.6	68.6	68.6	73.5	73.5	73.5
$\tau_{max}/c_u$	0.97	0.92	0.92	0.99	1.01	1.06

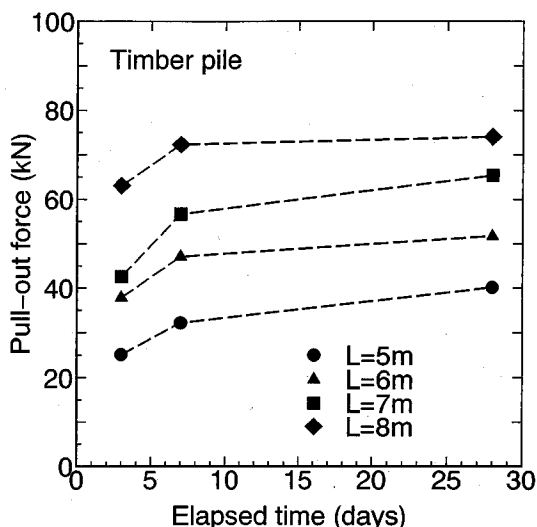


Fig.13 Results of field pull-out tests for timber pile

ここに、 $N$ : 支持力係数 $=9^{16)}$ 、 $Ae$ : 杭の先端面積 ( $m^2$ )、 $c_u$ : 杭先端における粘土の非排水せん断強度 ( $kPa$ )。

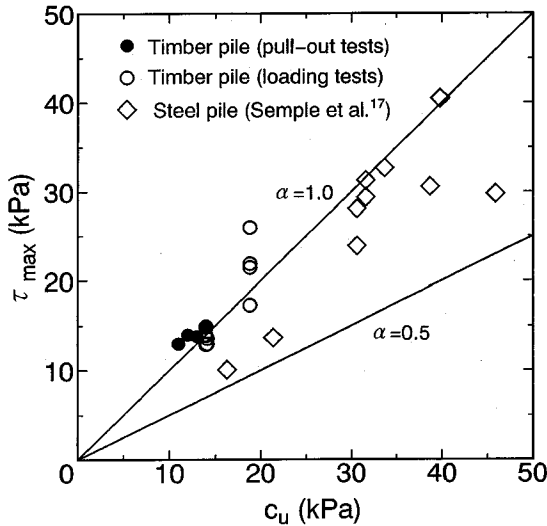
実験 II においては、杭打設 3 日後に周面支持力はかなり回復し、放置時間と共に周面支持力はやや増加する傾向が認められた。

## (2) 木杭の現場引き抜き実験

周面支持杭の引き抜き抵抗力に関する現場実験を、佐賀県福富町の道路に沿った蓮根田で実施した。実験場所においては、軟弱沖積粘土層が 15 m 程度の厚さで堆積し

**Table 4**  $\tau_{\max}/c_u$  for field pull-out tests  
(Elapsed time : 28 days)

Length of pile (m)	5	6	7	8
Pull-out force (kN)	40.3	51.8	65.4	74.1
$\tau_{\max}/c_u$	1.18	1.17	1.06	1.07

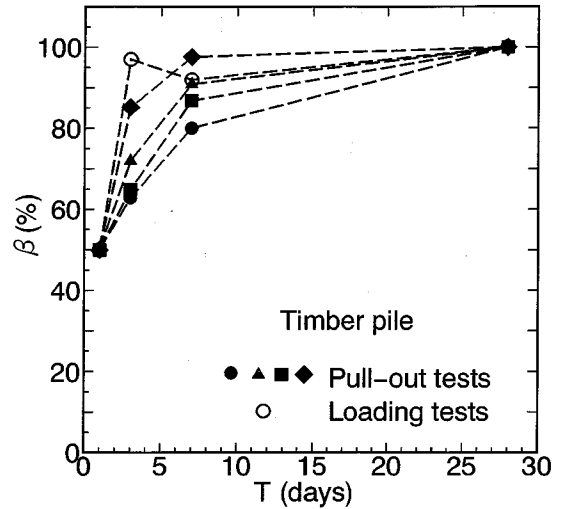


**Fig.14** Relationship between maximum unit skin resistance and undrained strength in field tests

ている。地盤強度をポータブル式二重管コーンペネトrometerを用いて調査した結果は  $c_u = 2 \times H + 3.9$  (kPa) ( $H$ はm単位)であった。木杭(末口外径 $\approx 15$  cm, 杭頭径 $\approx 22 \sim 25$  cm, テーパー度 $\approx 0.6 \sim 0.7\%$ )を1m間隔で打設し、貫入量  $L$  を5 m, 6 m, 7 m, 8 mとした。引抜き時に生じるサクシヨンの影響を小さくするために、各杭は予定貫入深度より50 cm深く貫入させ、その後50 cm引き抜いてその状態で3日~28日間放置した後に大型クレーン車で杭を引き抜き、杭頭部に取り付けた荷重計で引抜き力を測定した。引抜き力は杭重量を差し引いて求めた。引抜き実験の結果はFig.13に示すように、放置時間が長いほうが引抜き力は大きくなっている。28日目の実験結果から求めた  $\tau_{\max}$  と  $c_u$  との比をTable 4に示しており、サクシヨンの影響による誤差を若干含んでいることを考慮しても、 $\tau_{\max}/c_u$  が1以上であることは間違いない。

### (3) $\tau_{\max} \sim c_u$ 関係

Fig.14は現場における木杭の載荷実験および引抜き実験の結果から求めた  $\tau_{\max}$  と  $c_u$  との関係を示したものである。同図ではSempleら<sup>17)</sup>が報告した軟弱粘土地盤における鋼管杭の載荷実験のデータを併せて示してい



**Fig.15** Variation of skin resistance ratio,  $\beta$  with elapsed time,  $T$

る。 $\alpha = \tau_{\max}/c_u$ の値は、木杭で0.9~1.4であり、大部分は1以上の範囲にあるのに対して、鋼管杭では0.5~1.0であり大部分は1以下の範囲に分布しており、室内実験の結果とほぼ一致している。

Figs.11~13に見られるように、杭の支持力は放置時間に伴って増加する傾向を示している。現場実験における各杭の各放置時間の極限荷重を28日経過した時の極限荷重で除した値  $\beta$  で整理したのがFig.15である。同図から、木杭の周面支持力は3日で65~80%、7日で80~95%程度まで回復する。このように、実験を行った有明粘土地盤では放置時間による木杭の周面支持力の回復が速いが、室内実験の場合も同じ傾向が認められた(Figs.5, 6)。

### (4) 地盤鉛直方向変形特性の経時変化

Poulosら<sup>18)</sup>は1本の周面支持杭の沈下量と地盤の変形係数との関係を求めるのに次式を提案している。

$$S = \frac{P \times I}{E_s \times D} \quad (5)$$

ここに、 $S$ : 単杭の沈下量、 $P$ : 荷重、 $I$ : 沈下影響係数、 $E_s$ : 地盤の変形係数、 $D$ : 杭の直径。

Fig.16は、現場載荷実験(実験II)で得た  $P \sim S$  関係より式(5)で算出した地盤変形係数  $E_s$  の経時変化を示したものである。また、Fig.12の荷重~沈下量曲線に基づいて、許容荷重に相当する沈下量と放置期間の関係を求めた結果も併せFig.16に示す。同図に見られるように、28日までは放置期間と共に変形係数  $E_s$  は大きくなり、それ以後はほぼ一定値を示す。沈下量の経時変化も同じ傾向を示している。放置期間と共に地盤の変形係数が大きくなるのは、杭打設による乱れた地盤の鉛

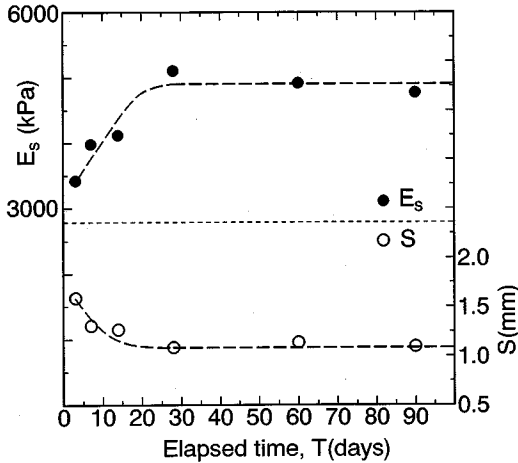


Fig.16 Variation of soil modulus,  $E_s$  and settlement,  $S$  under allowable load with elapsed time,  $T$

直方向の変形特性が放置時間の経過に伴って回復するためと判断される。今回の実験結果によると、乱れされた粘土の鉛直方向の変形特性は約4週間くらいで回復することがわかった。

#### 4. 粘土中杭の周面支持機構

##### (1) 杭周面と粘土の密着性と付着性

周面支持杭の支持力は杭と周辺粘土の密着性および付着性に強く依存することは論をまたない。密着性を阻害する要因としては、杭打設時の横振れに起因する杭～地盤間の隙の発生、打設後の水平外力による杭～地盤間の隙の発生、杭体表面の汚れや水膜の作用、等が考えられる。本文で対象としているようなN値が2以下の粘土地盤においては高い密着性が期待できるが、硬質粘土等においては杭打設に伴って杭周辺粘土中にクラックが発生し密着性が損われることが考えられる。付着力については、粘土のせん断強度、杭表面の粗さ、杭材と粘土との親和性が関与する。表面粗さに関しては、鋼管模型杭について錆の発生の有無で付着力が異なるという実験結果を得ている<sup>4)</sup>。一方、粗粒コンクリートで作った模型杭 (Photo.1) は通常のコンクリート杭の70~80%の周面支持力しか発揮できないことを実験で確かめている<sup>5)</sup>。この場合は杭表面の凹凸のくぼみの部分に粘土が入り込めないために実質的な接触面積が小さくなるのが原因であった。杭材料と粘土との付着性については、滑らかな鋼管やプラスチックにおいては劣り、木やコンクリート杭において優れている。Tsubakiharaら<sup>19)</sup>は粘土と鋼材との間の相互作用を調べて、鋼材面が極めて滑らかな場合は鋼材と粘土の境界面で滑りを生じるが、表面粗さが10 $\mu$ mを超えると粘土中にせん断破壊を生じ、

周面抵抗は粘土のせん断強度と同じになることを示している。

##### (2) テーパー効果

人工材料で製造した直型杭に対して、先細り形状の木杭は周辺粘土との密着状態が異なる。Blanchetら<sup>20)</sup>は軟弱鋭敏粘土におけるテーパー度=1%の木杭の単位周面抵抗は直型コンクリート杭の2倍程度であることを指摘している。また、平山ら<sup>21)</sup>はテーパー杭を載荷した時杭周辺地盤における水平方向の土圧の増加は直型杭より大きいことを報告している。

テーパーのある先細り杭では、打込んだ時の水平方向の振れによって生じる杭と地盤の間隙の発生が少なく、かつ打ち込んだ時杭の周辺粘土中に発生した大きな水平土圧の作用によって杭と周辺粘土の密着性は直型杭より優れていると考えられる。たとえ間隙を生じたとしても載荷時に伴う水平土圧の増大によって間隙は小さくなるからである。

##### (3) 杭周辺粘土中の間隙水の移動

粘土地盤に杭を打ち込むと、杭周辺地盤に大きな過剰間隙水圧が発生する<sup>22)</sup>。過剰間隙水圧は放置時間と共に消散し、杭周辺の乱された粘土は再圧密によって強度増加をきたす<sup>23)</sup>。また、過剰間隙水圧によってハイドロフラクチャ現象が発生し、杭周辺粘土中に割れ目を生じることが知られている<sup>24)</sup>。上昇した過剰間隙水圧は割目によって急速に消散され、杭周辺粘土の強度回復も速くなる。Massarch<sup>25)</sup>は、杭打設数日後、35%以上の過剰間隙水圧が消散したことを報告している。過剰間隙水圧の消散速度は杭材の吸水作用の有無により異なってくる。吸水作用のある木杭では、その作用によって過剰間隙水圧の消散は吸水作用のない鋼管杭より速く、強度増加も速い (Figs.5, 7) と考えられる。

一方、ハイドロフラクチャ現象によって間隙水は杭体に向かって急速に移動し、杭体表面には部分的に水膜を生じる。吸水作用のない鋼管杭では水膜は杭体と周辺粘土との密着性を妨げ、吸水作用のある木杭等では水膜は杭体に吸収されて消失するため、水膜による密着性の阻害は起こりにくいと考える。Fig.4において杭を連続貫入させた場合に、杭材質による全貫入抵抗の違いは小さいことを示したが、これは杭の周面抵抗は塑性流動した粘土と杭の間の抵抗で生じるのであり、水膜の影響はたとえあったとしても小さいためと解釈される。これに対して、Figs.5, 7の比較でわかるように再貫入時に鋼管杭の貫入抵抗が木杭より低い原因の一つは、水膜の影響で杭体と周辺粘土の境界面接触が不完全となった結果である。Hutchisonら<sup>26)</sup>は表面に1~2mm厚さのビチューメンを塗ったコンクリート杭の周面支持力が約20~

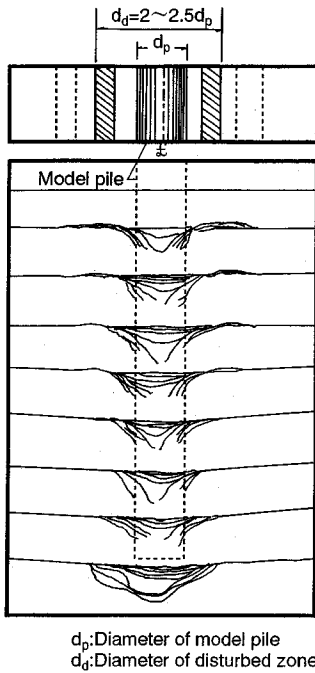


Fig.17 Zone of disturbance during pile penetration

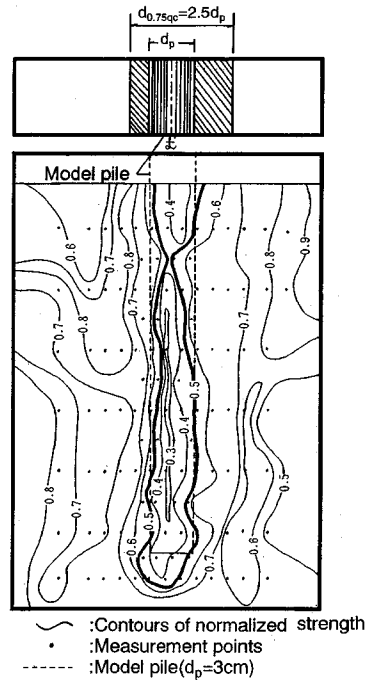


Fig.18 Variation of clay strength within the zone of disturbance

70% 程度低下したことを報告している。

また、吸水作用のある杭においては、吸水作用による杭近傍に形成された低含水比高強度の薄い粘土層が杭面に付着して一体化し、この粘土層と外側の粘土層との間においてせん断が生じることになる。Bromsら<sup>12)</sup>は打ち込んだ30年後の木杭では杭表面に付着した低含水比高強度粘土層の厚さは10cmに達したことを報告している。このようにして、杭の見かけ直径は大きくなり、 $\alpha$ 値は1を超える。

上述のように、杭周辺の粘土中における水の移動は、周辺粘土の圧密促進する働きと、杭表面に水膜を形成して密着性を阻害するという異なった2つの現象をもたらす。

#### (4) 杭周辺粘土の乱れの影響とその回復

杭貫入に伴って周辺粘土は乱れ、過剰間隙水圧は上昇して杭の周面支持力は低下する。Fig.17に示すように杭貫入に伴う乱れ領域は杭直径の2~2.5倍の範囲に及び、その領域の粘土の強度は0.50~0.75に低下する<sup>9)</sup>(Fig.18)。杭打込みにより強度低下した杭周辺粘土は放置時間と共に強度回復するので、杭の周面抵抗は杭と周辺粘土との付着状態、ならびにその強度回復と密接に関係してくる。この現象を調べるために行った実験結果について次に述べる。

Fig.19 液性限界以上の含水比で十分練返し所定期間放置した粘土についてベーンせん断試験を行った結果と

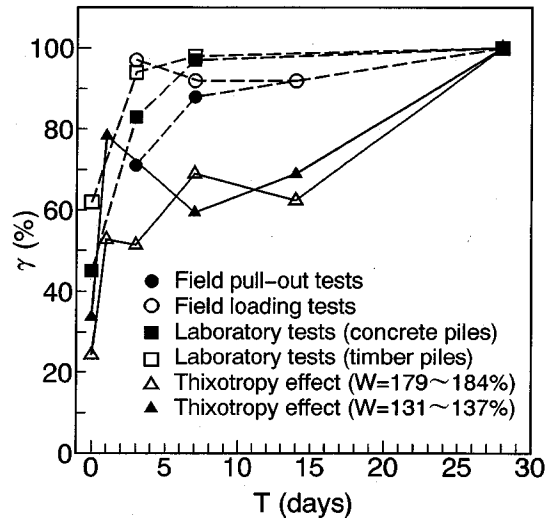


Fig.19 Variation of strength ratio,  $\gamma$  with elapsed time,  $T$

室内および現場実験から求めた杭の周面支持力の経時変化を比較して示したものである。ここで、強度回復率  $\gamma$  は次式で定義した。

$$\gamma = \frac{\text{所定の期間放置後の } c_{ur}, (R_s)}{28 \text{ 日放置後の } c_{ur28}, (R_{s28})} \quad (6)$$

ここに、 $c_{ur}$ : 練返し粘土のベーンせん断強さ (kPa),

$R_s$ : 杭の周面支持力 (N)。

Fig.19 から、杭の周面支持力の経時変化曲線の傾向



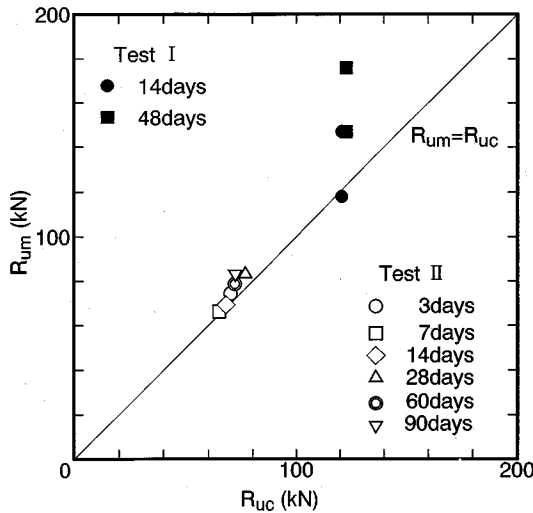


Fig.20 Comparison of calculated and measured pile capacities

は練返し粘土のシキソトロピーによる強度回復曲線のパターンと同じ傾向を示しており、杭の周面支持力の経時変化に及ぼす要因の一つはシキソトロピーによる粘土の強度回復であることを示唆している。ここで杭の支持力回復率は練返し粘土の回復よりやや速いが、これは過剰間隙水圧の消散に伴う粘土の再圧密効果が付加的に影響していると考えられる。

### (5) 木杭の周面支持力の評価

前文に述べたように、杭の単位周面抵抗  $\tau_{max}$  は粘土の非排水せん断強度  $c_u$  と密接な関係にあり、木杭の  $\tau_{max}/c_u$  の値はほぼ 1 および 1 以上を示している (Figs.2, 14)。Fig.20 は式  $R_{uc} = \pi \times D \times L \times c_u$  (kN) ( $D$ : 杭の直径,  $L$ : 杭の根入れ長さ) で求めた杭の周面支持力  $R_{uc}$  (道路橋示方書<sup>21)</sup>によって周面支持杭では先端支持力は考慮しない)と木杭の載荷実験から求めた各杭の極限支持力  $R_{um}$  (=極限荷重)の比較を示すものである。同図から見られるように、 $R_{um}$ の値は  $R_{uc}$ より上回っており、軟弱粘土では木杭の周面支持力は杭周面積×非排水せん断強度で評価できることを示している。

村山・柴田<sup>27)</sup>は、粘土に関するレオロジー的考察の結果に基づいて粘土中の杭に関する降伏荷重の判定法を提案した<sup>28)</sup>。降伏荷重は地盤のクリープ破壊に対応する荷重と考えられる。すなわち、降伏支持力の意義は、杭の沈下が時間とともに進行してついに破壊的沈下を生じるか、あるいは沈下の進行が停止して永久に構造物の安全が保証できるかの限界値としての特性を有することである<sup>28)</sup>。今回現場載荷実験から求めた木杭の降伏支持力は Table 2 および Table 3 に示しており、降伏荷重  $P_y$  と極限荷重  $P_u$  の比  $P_y/P_u$  は  $\approx 0.9$ であることを示している。

杭の極限支持力を基準として安全率 3 で許容支持力  $R_a$  を求めた場合には、 $P_u = 3 R_a$ 、すなわち降伏荷重に対しては  $P_y = 2.7 R_a$ 、安全率は 2.7 となる。よって、安全率を 3 とした場合には粘土地盤に対してのクリープ破壊の恐れはないと考えてよい。

以上より、 $N \leq 2$  の軟弱な粘土地盤であっても木杭の周面支持力は十分に期待でき、かつ時間経過に伴って増大していくことを示した。正規圧密、軽く過圧密された軟弱粘土地盤における木杭の周面支持杭の設計は、 $\tau_{max} = c_u$  とすること、軽構造物に対しては、安全率は暫定的に 3 を採用してよいと考える。

## 5. 結 論

軟弱粘土中杭の周面支持機構について実験的考察を行い、次のような知見を得た。

(1)  $N$  値 2 以下の軟弱粘土地盤における杭の最大単位周面抵抗  $\tau_{max}$  は粘土の非排水せん断強度  $c_u$  と密接な関係にあり、式  $\tau_{max} = \alpha c_u$  で評価できる。係数  $\alpha$  は、杭の材質と周辺粘土との密着性に強く依存する。

(2) 木杭の  $\alpha$  値が 1 以上を越えるのは、杭材の吸水作用によって杭近傍に低含水比高強度の薄い粘土層が形成され、杭の見かけ直径が大きくなって周面抵抗の増大をもたらすためである。鋼管杭の  $\alpha$  値が 1 以下と低い一つの原因は、杭周辺に形成された水膜が粘土と杭の密着を妨げるためである。

(3) 粘土地盤に打込んだ杭の周面抵抗は、時間経過に伴って増加していく。吸水作用のある杭の場合は吸水作用のない杭より周面抵抗の増加は速い。有明粘土地盤における木杭の現場実験から、28 日経過後の値を基準とした周面抵抗の回復率は、3 日後に 65~80%、7 日経過後には 80~95% に達する。また、乱された粘土の鉛直方向の変形特性は約一カ月くらいで回復する。

(4) 上述の粘土中杭の周面支持機構から考えて、テーパーを有する木杭は粘土との密着性に優れ、かつ吸水性が相対的に大きいために、高い  $\alpha$  値を示すものである。

謝辞：本実験の一部は、本学大学院生であった持田末男君 (現、熊本県土木部) および卒業生南里和俊君 (現、竹中工務店)、濱野洋繁君 (現、佐藤工業) によって行われたものである。また、九州地方建設局武雄工事事務所、ならびに佐賀県佐賀土木事務所には現場木杭載荷実験を実施して頂いた。お世話になった上記の関係者の方々に厚く御礼申し上げる。

### 参考文献

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、

- 1994.
- 2) 持田末男, 三浦哲彦, 中村六史: 有明粘土地盤における摩擦杭の支持力機構について, 佐賀大学理工学部集報, Vol.16, No.2, pp.127-132, 1988.
  - 3) Nakamura, R., Miura, N. and Mochida, S.: Bearing capacity of friction pile in Ariake clay, *Proceedings of International Symposium on Shallow Sea and Low Land*, pp.237-243, 1988.
  - 4) 一瀬智郎, 三浦哲彦, 南里和俊: 粘土中の摩擦杭の支持力に関する模型実験, 第24回土質工学研究発表会, pp.1393-1394, 1989.
  - 5) 三浦哲彦, 一瀬智郎: 粘土中杭の周面抵抗に及ぼす要因, 土木学会第45回年次学術講演会, pp.1058-1059, 1990.
  - 6) 三浦哲彦, 呉文経, 朴永穆, 濱脊洋繁: 粘土中杭の周面抵抗に関する模型実験, 佐賀大学理工学部集報, Vol.20, No.1, pp.97-105, 1991.
  - 7) 呉文経, 三浦哲彦: 粘土地盤における木杭の周面支持力評価のための鉛直載荷試験, 土と基礎, Vol.43, No.5, pp.40-42, 1995.
  - 8) Tomlinson, M. J.: Some effects of pile driving on skin friction, *Conf. on Behaviour of Piles*, Inst. Civ. Engrs., London, pp.107-114, 1970.
  - 9) Meyerhof, G. G.: Bearing capacity and settlement of pile foundations, *J. Geot. Eng. Div., ASCE*, Vol.102, GT3, pp.197-228, 1976.
  - 10) Vijayvergiya, V. N. and Focht, J. A.: A new way to predict capacity of piles in clay, *Proc. 4th Annual Offshore Technology Conference*, Vol.2, pp.865-871, 1972.
  - 11) Vesić, A. S.: *Design of Pile Foundations*, National Co-operative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice No.42, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. 1977.
  - 12) Broms, B. B. and Hansbo, S.: *Soft Clay Engineering*, Chapter 6, Foundations on Soft Clay, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, pp.426-430, 1981.
  - 13) 佐賀県佐賀土木事務所: 佐賀川副線木杭鉛直載荷試験報告書, 1993.
  - 14) 建設省九州地方建設局武雄工事事務所: 軟弱地盤における木杭載荷試験業務報告書, 1993.
  - 15) (社)土質工学会: クイの鉛直載荷試験基準・同解説, 1971.
  - 16) Skempton, A. W.: The bearing capacity of clays, *Proc. Building Research Congress, ICE, Div. I, Part III*, pp.180-189, 1951.
  - 17) Semple, R. M. and Rigden, W. J.: Shaft capacity of driven piles in clay, in *Proc. ASCE National Convention*, pp.59-79, 1984.
  - 18) Poulos, H. G. and Davis, E.H.: *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, 1980.
  - 19) Tsubakihara, Y. and Kishida, H.: Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses, *Soil and Foundations*, Vol.33, No.2, pp.1-13, 1993.
  - 20) Blanchet, R., Tavenas, F. and Garneau, N.: Behaviour of friction piles in soft sensitive clays, *Can. Geotech. J.* Vol.17, pp.203-224, 1980.
  - 21) 平山英喜, 藪内貞男, 山下啓明, 上紺屋好行: 砂中テーパー杭の周面摩擦抵抗, 第26回土質工学研究発表会, pp.1385-1388, 1991.
  - 22) Randolph, M. F. and Wroth, C. P.: An analytical solution for the consolidation around a driven pile, *Int. J. Num. and Anal. Methods in Geomechanics*, Vol.3, pp.217-229, 1979.
  - 23) Roy, M. and Lemieux, M.: Long-term behaviour of reconsolidated clay around a driven pile, *Can. Geotech. J.* Vol.23, pp.23-29, 1986.
  - 24) Massarch, K. R. and Broms, B. B.: Fracturing of soil caused by pile driving in clay, *Proc. 9th ICSMFE*, Vol.1, pp.197-200, 1977.
  - 25) Massarch, K. R.: New aspects of soil fracturing in clay, *J. Geot. Eng. Div., ASCE*, Vol.104, GT8, pp.1109-1123, 1978.
  - 26) Hutchinson, J. N. and Jensen, E. V.: *Loading Tests on Piles Driven into Estuarine Clays at Port of Khorramshar, and Observations on the Effect of Bitumen Coatings on Shaft Bearing Capacity*, Publication 78, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, 1968.
  - 27) 村山朔郎, 柴田 徹: 粘土のレオロジー的特性について, 土木学会論文集, 第40号, pp.1-31, 1956.
  - 28) 村山朔郎, 柴田 徹: 粘土中の摩擦杭の支持力とその新測定法, 土木学会論文集, 第59号, pp.49-56, 1958. (1994.5.23受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON SKIN RESISTANCE OF PILE IN SOFT CLAY

Norihiko MIURA, Wen-Jing WU, Rikuji NAKAMURA  
and Toshiro ICHINOSE

This study deals with the skin resistance of pile in soft clay ground. Laboratory and field tests were performed to investigate the influence factors on the skin resistance of piles in soft clay. Discussion is made on the effects of materials and shapes of piles on the skin resistance and the moisture flow toward the pile during pile driving. The variation of strength of clay around the pile with elapsed time is also discussed. It was indicated that the timber pile is suitable for foundation of light-weight structures on soft clay, and that the undrained shear strength of clay can be used for evaluating skin resistance of driven timber pile in a normally consolidated soft clay ground with N-value of less than 2.