

ローム層における杭の支持力に関する実験的研究

玉置克之
小林幸男

§ 1. はじめに

杭の支持力は、基本的に土を剛塑性体として取扱った支持力理論により求められてきた。しかし、近年の Kerisel や Vesic の実大実験から、求められた支持力や地盤の変形は塑性理論のそれとは全く異なることがわかった。このため、関係者にとって、杭の支持力は早急に解決しなければならない新たな問題となった。

この問題を解明するため、BCP委員会（小泉を委員長とする杭の支持力を研究する委員会）では東京砂層を対象として、外径20mmの鋼製試験杭を用いた一連の貫入試験を実施した。また、筆者等はBCP委員会の実験に継続して同一試験杭を用い、主として砂層を対称として3つの異なった地盤で試験を行なった。

これらの実験から、砂層に関する杭の支持力とN値、杭の設置方法、および貫入速度との関係など杭の支持力を解明するのに重要なデータを得た。特にBCP委員会の実験では、貫入試験後に杭先端地盤のブロックサンプルを採取し、綿密な調査の結果、杭は高圧力下にある杭先端下部地盤の砂粒子の破碎を伴う圧縮により沈下するという重要な現象がわかった。

本実験は上述の砂層での一連の試験に継続するものであり、砂層の試験と同一の試験杭を用い、ローム層を対象として行なったものである。本実験の貫入試験結果からローム層における杭支持力と杭設置方法およびN値の

関係を検討することができたほかに、貫入試験後の杭周囲および先端の地盤調査から杭の貫入による土性の変化を調査できた。特に、杭先端についてはブロックサンプル(50cm×50cm×70cm)を採取し、その調査から杭の貫入機構を検討することができた。また、同時期に同一敷地で行っていたPIP杭に関する一連の載荷試験における試験杭のうち、ローム層に設置した杭(1本)についても先端ブロックサンプルを採取することができ、本実験のものと比較することができた。

§ 2. 地盤

実験は横浜市瀬谷区瀬谷町の清水建設機械工場敷地の一画で行なった。同実験敷地では同時期に本実験のほかにSSS地下連続壁およびPIP杭の載荷試験も実施している。

図-1は実験敷地の平面図である。敷地内では、実験に先立って標準貫入試験と乱さない試料の採取を伴うボーリング調査を5地点で行なった。図-2にB-1の柱状図と土質試験結果を示す。

地盤は次の3つの地層に大別できる。これらの層は敷地内で等しく分布している。

A. 上部ローム層(0~8.5m) N値2~10

茶褐色をしていて、全般にローム塊を含んでいる

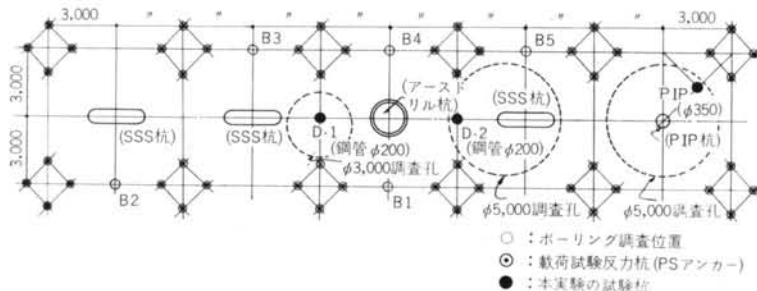


図-1 敷地平面図

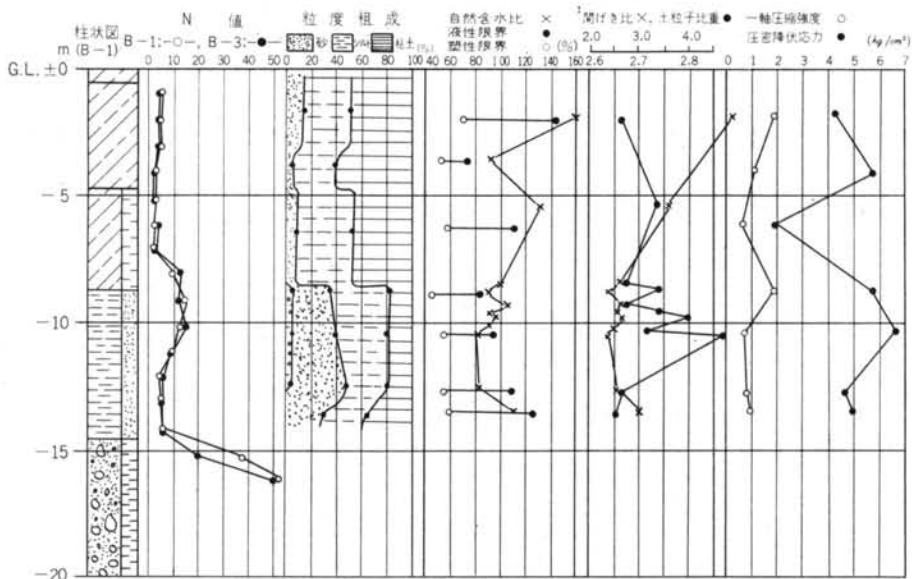


図-2 地盤調査結果

(写真-1)。N値は下部で大きい、その他では2～4である。

B. 下部ローム層 (8.5～14.5m) N値4～16

全体に灰色を帯びていて、固結した粘土をシマ状に多量に含む(写真-2)。N値の増加はこれによると考えられる。

A, B層は関東ローム層であり、間げき比が大きい、含水比が高い、過圧密であるなどの関東ロームの特色を示している。

C. 粘土質れき層 (14.5m～) N値>50

武蔵野れき層と呼ばれている層であり、れきは、100mm～200mmのものが多量に含まれる。

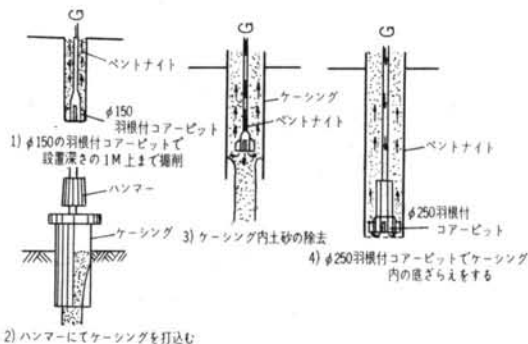


図-3 ケーシングの設置順序

D-1 杭は、地表からG. L. -10.4mまで貫入試験を行なった杭である。

D-2 杭……杭、および装置はD-1 杭と全く同じである。この杭は図-3に示す方法で、ケーシングを用いてG. L. -10mまで掘削して作った孔に、あらかじめ建て込んでおき、G. L. -10mから貫入試験を行なった杭である。貫入試験はG. L. -17.5mのれき層まで行なった。

PIP 杭……外径350mmのPIP杭である。杭の設置深度はG. L. -13.5mの下部ローム層である。杭先端荷重は杭先端から約50cm上部に取付けた6本の杭体ひずみ計により、杭先端沈下量はモルタル中に埋め込んだ2重管式ロッドにより測定できる。

載荷は、油圧ジャッキによる荷重制御方式により最大150tonまで行なった。載荷試験による総沈下

§ 3. 試験杭

本実験で、載荷試験および試験後の杭周辺地盤調査を行なった杭は下記の3本である。

D-1 杭……外径200mm、肉厚30mmの鋼製で先端が平面な閉そく杭である。この杭は貫入試験用に製作したものであり、杭先端荷重と杭先端沈下量が測定できる。杭は1.25mの短い杭をネジで継いだものであり、地表面からの貫入抵抗が連続的に測定できる。杭の圧入は油圧ジャッキによる。1回の貫入量はジャッキストローク(200mm)の関係で最大200mmであった。また、貫入速度は10～20mm/minであった。

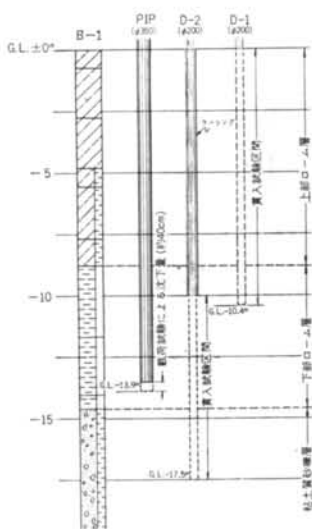


図-4 杭の試験深度

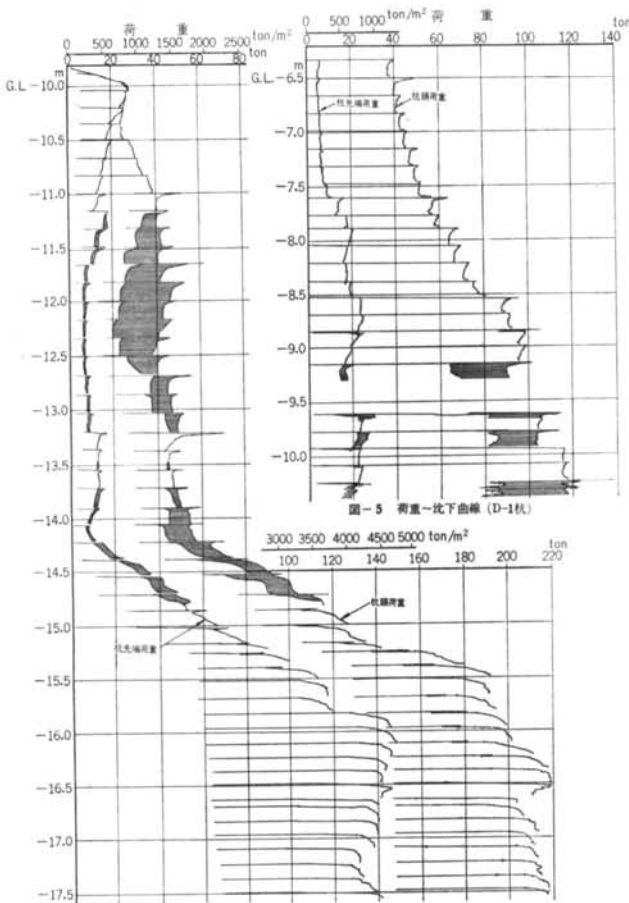


図-6 荷重～沈下曲線 (D-2杭)

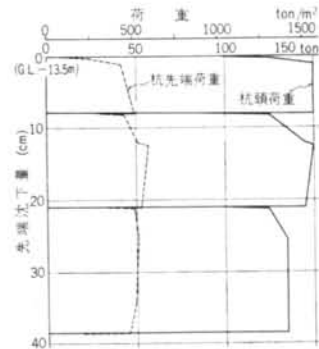


図-7 PIP杭荷重～沈下曲線
量は約40cmであった。

図-4に、3本の杭の設置深度と試験深度を示す。

なお、試験の反力杭にはいずれもPSアンカー杭を用いた(図-1参照)。PSアンカーの先端深度は、G.L.-25mであり、G.L.-15m以深のれき層だけを反力地盤としている。

§ 4. 貫入試験の結果と検討

図-5、図-6は、D-1杭、D-2杭の貫入試験結果である、杭先端深度と杭先端荷重および杭頭荷重の関係である。また、図-7はPIP杭の荷重～沈下量曲線である。

4.1 貫入試験における特異現象

貫入試験中 D-1杭のG.L.-8.8m～10.4m、D-2杭のG.L.-11m～16mの範囲では今までの杭の貫入試験では生じたことのない特異な現象が生じた。図-8は、D-1杭のG.L.-10.3mにおける測定記録である。初期の荷重増加時点では、沈下量に比例して、荷重が

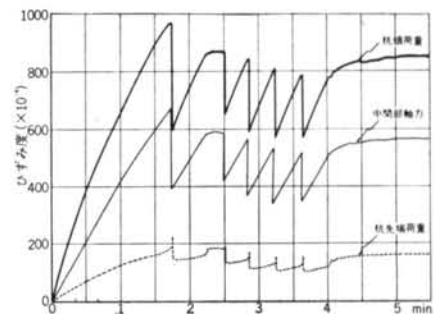


図-8 特異現象の自記録例
(D-1杭: G.L. -10.3m)

増加する一般的な状況を示す。しかし、荷重がほぼ最大値に達したと思われる時点で、杭頭荷重の減少、杭先端荷重の増加、周面まきつ力の減少および杭の沈下が急激に生ずる。なお、このときの沈下による衝撃のため、ダイヤルゲージが落下し、沈下記録の採取は不能であった。

この現象ののち、杭先端荷重は直ちに減少し、再び増加する。このときの減少量は始めに増加した量の約2倍である。一方、杭頭荷重は、はじめの増加時とほぼ等しい割合で増加する。しかし、各荷重が増加した時点では再度、荷重の急減な変化現象と沈下が生ずる。

この特異な現象は、1サイクル中連続する場合、途中から生ずる場合、初期のみ生ずる場合、など様々である。図-5、図-6では、この現象を荷重の変化した範囲で示してある。

特異現象の発生は、先端地盤支持力も関係するが主として8.8m~14.5mのローム層の周面まきつ性状の特異性によるものであることが次の3点から指摘される。

- (1) 特異現象は杭先端がG.L.-8.8m~14.5mのローム層とG.L.-14.5m~16mのれき層を貫入しているときに生じている。
- (2) G.L.-10m付近についてD-1杭とD-2杭を比較すると、先端地盤が同じであるにもかかわらず、周面まきつ力の大きいD-1杭の場合だけこの現象が生じている。また、D-2杭において、貫入量が増加し周面まきつ力が増大したG.L.-11m付近からは特異現象が生じている。
- (3) れき層に貫入し、杭頭荷重に対する先端荷重の割合が増加するのにしたがって、特異現象は徐々に消滅している。

ローム層については、原地盤の乱さない試料の三軸圧縮試験、一軸圧縮試験、および圧密試験を行なったが、一軸圧縮試験において試料中に潜在するクラックに沿った破壊が生じ、急激に荷重が減少する現象はあった。しかし、三軸試験では荷重の急な減少状態はなく、一般の土の試験と差はなかった。この現象の発生原因については、鉄とロームとのまきつ試験などの土質試験や、杭周辺の地盤調査から今後検討せねばならない。

4.2 先端支持力とN値の関係

図-9に、 $\phi 200$ 試験杭の貫入試験から求めた先端支持力とN値の関係を示す。先端支持力は先端荷重の増加が沈下量の増加に比べて非常に少なくなった時点の、いわゆる極限状態の支持力である。図-9中には、同一試験杭を用いた本実験外の試験結果も記入してある。

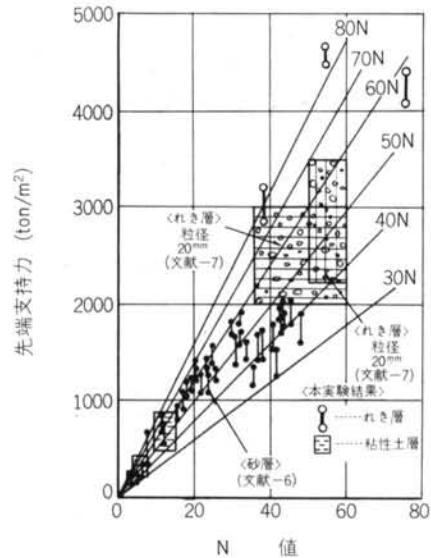


図-9 先端支持力とN値の関係

砂層における先端支持力は、N値が30以下で40N(N:N値)以上、40以上では40Nに近づく傾向がある。本実験のローム層の値はN値15以下の場合に限られるが、ほぼ砂層における両者の関係に一致している。

ちなみに、れき層の場合の関係についてのべると、砂層の場合とかなり差があり、N値40以上に対して、50N以上となっている。このような差を生じたのはれきの大きさに関係するものと考えられる。すなわち、標準貫入試験のスプリットサンプラー直径は51mm、試験杭直径は200mmであり、いずれもれき径に比べて相対的に小さいこと、図-9においてれき径が大きいほどN値と先端支持力は大きくなっていること、粒径が大きいほど貫入抵抗値は地盤強度(密度)より粒子自体の強度に影響されることが考えられることなどの理由が考えられる。

4.3 杭の設置方法の影響

杭の荷重・沈下性状は、杭の設置方法により異なる。図-5、図-6の貫入試験結果でも、D-2杭の初期の荷重・沈下曲線は押込んだ時点のそれとは異なり、極限支持力に達するのに約20cmの沈下量を必要としている。

表-1は、掘削により設置した杭の貫入試験における

先端地盤種類	ローム層	砂層 ^①	
杭種類	$\phi 200$ 鋼杭(D-2)	PIP杭	$\phi 200$ 鋼杭
極限荷重に達する沈下量	1D	0.1D以下	3~5D

表-1 極限支持力に到達するまでに要する沈下量の比較

先端荷重が極限に達するまでの沈下量と、杭径の比を比較したものである。ローム層における本実験の値は砂層の場合に比べて非常に小さく、いずれも $1D$ (D :杭径)以下である。特にPIP杭では $0.1D$ 以下である。このように地盤種類および杭施工法により差を生じたがこれについては、今後数多くの実験を行ない検討する必要がある。

周面まきつ抵抗値は、PIP杭とD-1、D-2杭とは大差がある。地表からG.L. -13.5mの区間におけるPIP杭の平均周面まきつ抵抗が 7 ton/m^2 で $q_u/2$ の平均値にほぼ等しいのに対し、D-1、D-2杭の試験結果から求めた同区間の平均値は、約 15 ton/m^2 でPIP杭の約2倍である。

D-1、D-2杭の周面地盤は杭の貫入により密度が増大していた(4.2)、一方、PIP杭周面は施工法からみて原地盤密度にほぼ等しいものと考えられる。上述の杭種類によるまきつ抵抗の相違は、設置方法によって生ずる杭周面地盤性状の違いによるものと考察される。

§ 5. 杭の貫入による周辺地盤の土性変化

杭の貫入試験後、3本の試験杭の側面および先端部の地盤状況を調査した。調査は深礎工法により、杭周囲を掘削して行なった(図-1)。表-2は各杭の貫入試験と地盤調査の工程である。

5.1 杭周辺地盤調査概要

図-10は、各杭の調査内容を示したものである。調査は主として杭先端地盤について行なった。先端が粘土層中にあるD-1杭とPIP杭については、杭先端部のブロックサンプル($50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 70\text{ cm}$)を採取した。ブロックサンプルは実験室に持ち帰り綿密に調査した。

また、地表から杭を貫入したD-1杭では、各深度で杭側面地盤の調査を実施した。D-1杭側面地盤の調査内容、方法は下記のとおりである。

(a) 密度分布の測定

図-11(a)に示すリングを地中に打込み、リング内の土重量を測定することにより、各深度における湿潤密度、乾燥密度、含水比、間げき比の杭周面からの距離に対する分布状態を調査した。測定は1深度につき杭周面から約1.2mの間で約40点実施した。

(b) コーン貫入試験

図-11(b)に示すコーンを10kgまたは5kgの重錘を15cmから落下させて10cm貫入するのに要する打撃回数を

	1972						1973								
	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D-1杭 { 貫入試験 調査				■											■
D-2杭 { 貫入試験 調査				■						■					
PIP杭 { 載荷試験 調査															■

表-2 貫入試験と地盤調査の工程

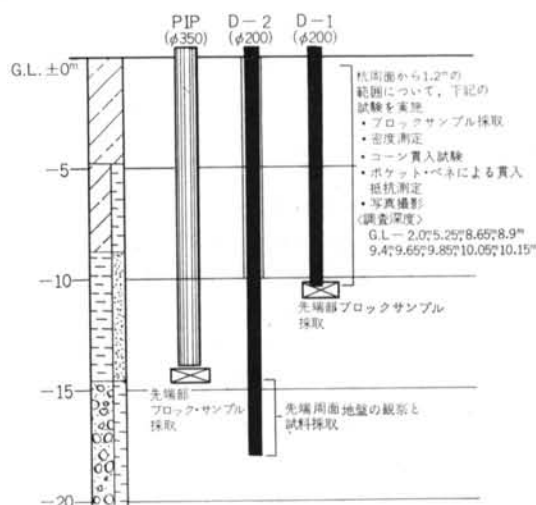


図-10 各杭の調査内容

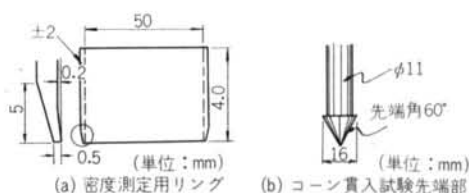


図-11 密度測定用リングとコーン貫入試験先端部

測定することにより、周面地盤の土の強度の分布を調査した。

(c) ポケットペネトローメーターによる貫入抵抗の測定

(b)と同様に土の強度分布を調査するものであり、静的にコーンを貫入させるものである。コーンは直径4mmの円柱で、これを10mm貫入させたときの貫入抵抗を測定した。ポケット・ペネによる測定は固結粘土を含む下部ローム層では実施不可能であった。

(d) 写真撮影

各深度の杭周面の水平断面と鉛直断面では、地面をナイフエッジにより平滑にしたのち写真撮影を行なった。このとき土の硬さを明確にするため、先端角度60度の円すい型コーンを一定荷重で押し込み、地表面にくぼみを付けた。

(e) ブロックサンプルの採取

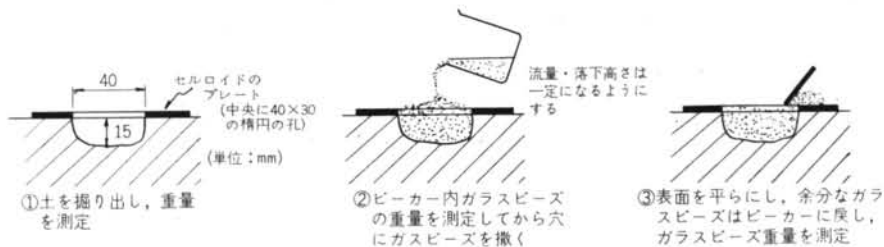


図-12 ガラスビーズによる置換法

杭周囲の各深度では、杭周囲から1.2mの範囲の地盤のブロックサンプル(20cm×20cm×15cm)を採取した。ブロックサンプルは各深度で3~4個採取した。杭先端部ブロックサンプルについては、室内において(d)の写真撮影を行なったほかに、ガラスビーズを用いた置換法により各部分の密度測定を行なった。図-12にガラスビーズによる地盤密度測定方法を示す。

ガラスビーズの密度の校正は27³の半球形の容器で行なったが、30回の測定の平均値は1.291g/cm³であり、このときの標準偏差は0.556%であった。用いたガラスビーズは球型で、80%以上が粒径210 μ ~270 μ の粒径のそろったものである。

5.2 杭側面の地盤の土性変化

写真-1および写真-2は、D-1杭の杭側面地盤水

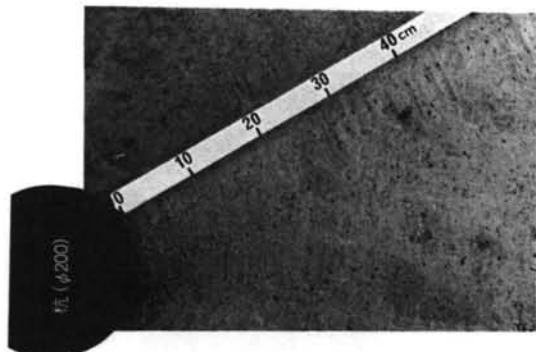


写真-1 杭側面水平断面(G.L.-2m)

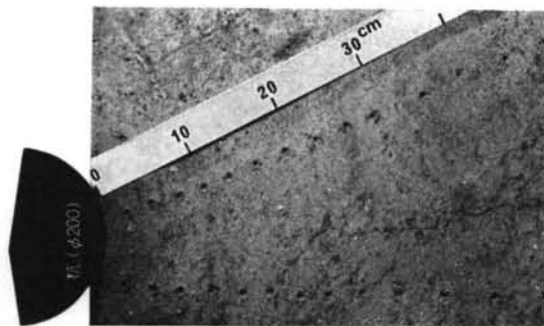


写真-2 杭側面水平断面(G.L.-8.7m)

平衡面写真の一例である。写真中のくぼみは定荷重による先端角60度のコーンの押し込み試験によるものである。杭周囲からの距離によるくぼみの大きさの差は明確でない。これは固結粘土やローム塊を多く含むためである。色調は、杭周囲に近いほど濃くなっていて、杭周囲では圧縮の度合いが激しいことを示している。

G.L.-8.7mおよびG.L.-9.5m付近では写真-2に示すような杭周囲から20cm離れた地点から外にのびる明瞭なクラックが発見された。これが杭の貫入により生じたもので、4.1に述べた特異現象に関連するものか、調査の掘削時に生じたものかは不明である。

D-1杭のG.L.-9.7m付近の杭周囲には、約5mmの厚さで固結した上部ローム層が付着していた。同様な現象はD-2杭のれき層中에서도発見された。図-5, 6によると、この現象が発見された深度ではいずれも杭先端荷重が増加して、後に述べる写真-3の杭先端コアが貫入抵抗のより大きな地盤に貫入した際に一部が破壊され、杭周囲に残留するものと思われる。このようにして、先端コアは順次新しい地盤のものに置換されるも

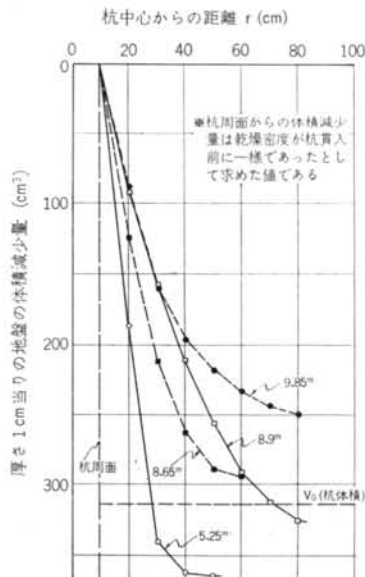


図-14 杭側面地盤の体積減少量

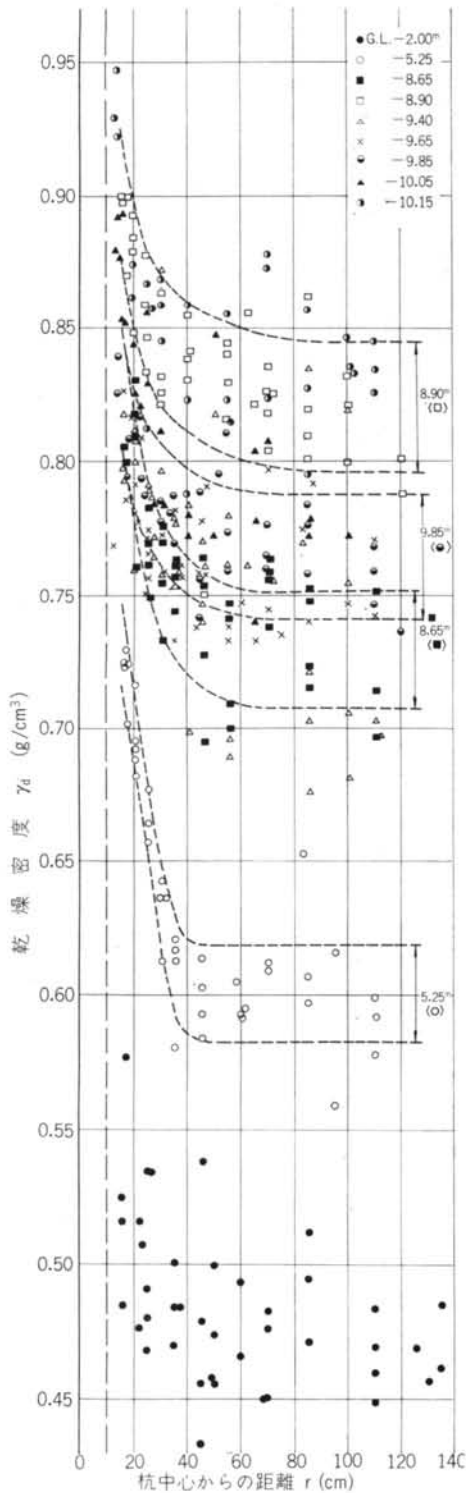


図-13 杭側面地盤の乾燥密度分布

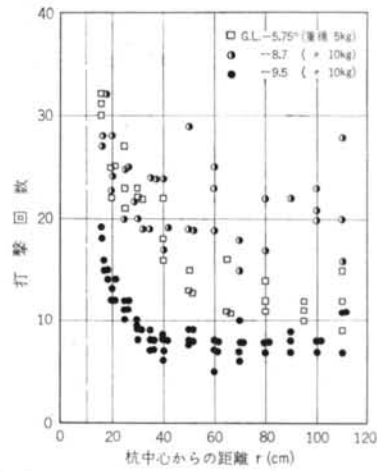


図-15 杭側面地盤のコーン貫入試験結果

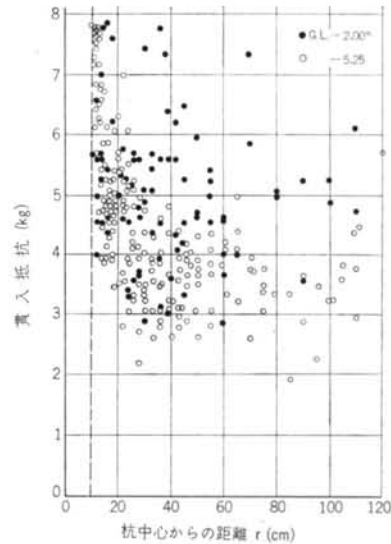


図-16 杭側面地盤のポケットペネトロメータによる貫入抵抗分布

のと考えられる。

図-13はD-1杭周囲の乾燥密度測定結果である。各深度の乾燥密度は杭周囲に近いほど大きく、密度のばらつきが少なくなっている。図中の破線は、測定値のバラツキの少ない深度について、平均値の $\pm 3\%$ の範囲を示したものである。これから、原地盤密度が低いほど杭の貫入による密度変化領域は小さいが、周囲近傍の密度変化率は高いことがわかる。密度変化領域は原地盤乾燥密度が 0.6 g/cm^3 の場合で、杭周囲から約 40 cm ($2D$, D : 杭径), 0.82 g/cm^3 で約 80 cm ($4D$)である。図-14に示す、乾燥密度分布から算出した各深度の杭側面地盤の体積減少量は、杭先端に近いG.L. - 9.85 m の場合を除

いてほぼ杭の体積に等しく、杭の貫入体積は周面地盤の圧縮によって吸収されていることが指摘される。

図-15、図-16はコーン貫入試験結果およびポケットペネトロメータ貫入抵抗測定結果である。各抵抗値は杭周面に近いほど増加しており、図-13の密度増加に比例した増加をしている。杭周面の貫入抵抗値はいずれも原地盤の約2倍になっている。これは、PIP杭の周面まさつ抵抗がD-1、D-2杭の周面まさつ抵抗の約1/2であったことと一致していて、ローム層に押し込んだ杭では、杭周面地盤の密度増加とそれに比例した強度の増加を生ずることが指摘される。

5.3 杭先端地盤の土性変化

写真-3は、D-1杭の杭先端ブロックサンプルの杭中心を通る鉛直断面の写真である。先端底部には、円錐形の明瞭なコアが形成されている。コア底面の直径は杭径に等しく、高さ18cm (0.9D) である。コアは図-17に示すように、貫入途中の層から成り、また固結していて、ローム層に含まれた、ローム塊・固結粘土などは明瞭でなく、圧壊している。写真中の白点は定荷重によるコーンの押込み試験によるもので、コア内部は非常に小さく、コアから離れるにつれて徐々に大きくなっている。

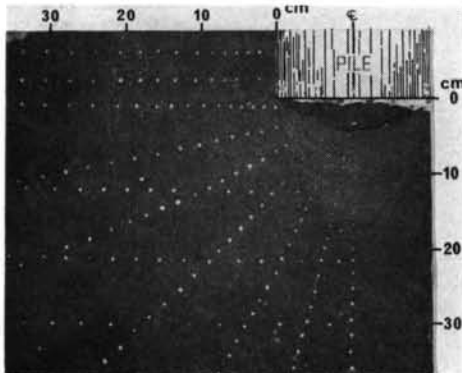


写真-3 D-1杭先端地盤鉛直断面

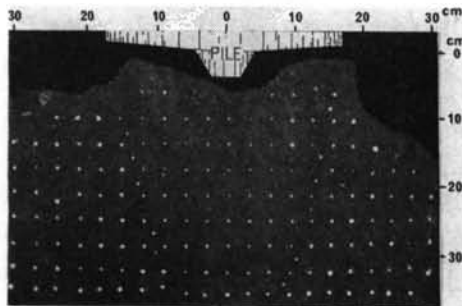


写真-4 PIP杭先端地盤鉛直断面

て、土の圧縮の度合いがコアに近いほど激しいことを示している。

一方、D-2杭底面下には底面にわずかに固結したロームが付着していた程度で、底面下には破碎したれきがあって、コアの内容はD-1杭と全く異なっていた。両者のコア内容の相異から、杭の貫入中5.2に述べたコア内容の置換が明らかに生じていることがわかる。

D-1杭先端には、杭底面端部から明確なすべり線が発生している。すべり線は、杭中心線に対称ではない、また途中で分岐したり、折れ曲ったりして下方にのびている。すべり線はブロックサンプル下端よりなお下方にまでのびていると思われるが、その形状は確認されていない(図-17参照)。

写真-4はPIP杭先端地盤ブロックサンプルの杭中心を通る鉛直断面である。D-1杭のような明瞭なコアはない、あったとしても同一地盤であるため、はっきりわからないものと思われる。しかし、すべり線は明瞭に発生している(図-18参照)。杭中心線に対してほぼ対称な放物線状であり、D-1杭のすべり線の形状とは多少異なる。すべり線内の定荷重コーン貫入試験のくぼみの大きさは外部に比べて小さくなっていて、すべり線内では大きな圧縮が生じていることがわかる。

図-17、図-18はD-1杭、およびPIP杭の鉛直断面における乾燥密度測定結果である。また、D-1杭については、杭底面の各深度の水平面でも乾燥密度を測定した。図-19は水平面での測定結果をまとめたものである。

測定結果には原地盤密度のばらつきが含まれるため、分布はかなり複雑である。D-1杭ではコアから離れるにつれて密度が徐々に減少している。密度増加領域は $z = -10\text{cm}$ (z : 底面からの深度) で $r = 40\text{cm}$ (r : 杭中心からの距離)、 $z = -30\text{cm}$ で $r = 20\text{cm}$ と底面から深いほど小さくなっていて、底面下では比較的狭い範囲で圧縮が行なわれている。しかし、杭底面を境にしてその上部では杭中心から少なくとも50cm以上の範囲で密度が変化していて、杭先端の通過により変化領域は急激に増大することを示している。

PIP杭では、特に原地盤密度のばらつきが大きく密度増加領域は明瞭でない。しかし、すべり線内部とその周辺では圧縮されていることがわかる。また、D-1杭のコア周面の最大乾燥密度は 1.0g/cm^3 以上であるのに対し、PIP杭底面下では 0.9g/cm^3 であり、地表から貫入してきたD-1杭と貫入量が約40cm (1D) であるPIP杭では、先端下部地盤の圧縮状況に大きな差がある。

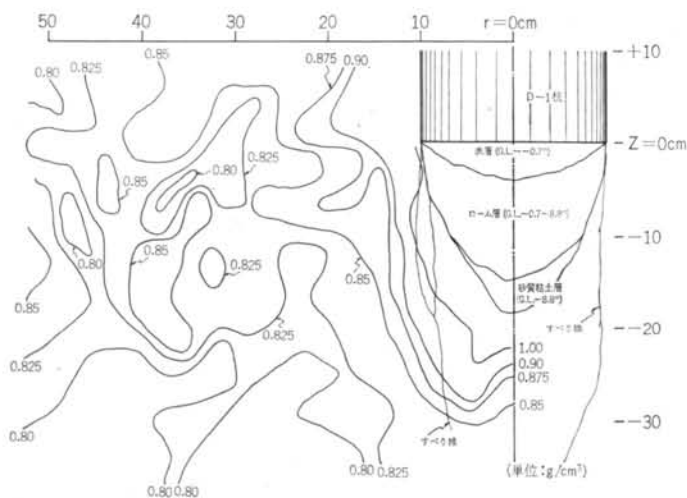


図-17 D-1 杭先端地盤乾燥密度分布

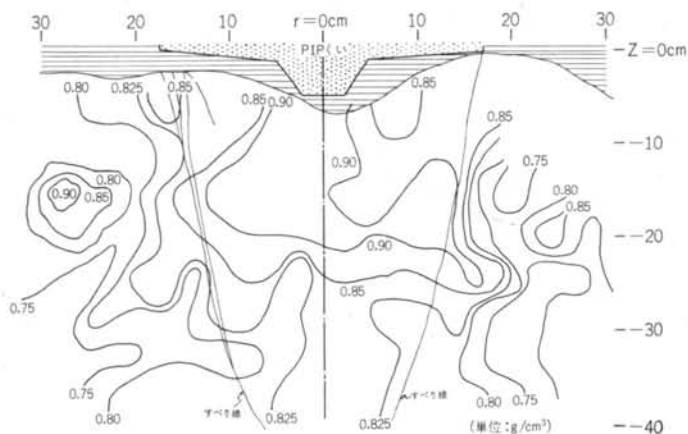


図-18 PIP 杭先端地盤乾燥密度分布

D-1 杭について、乾燥密度測定結果をもとに原地盤密度が 0.815 g/cm^3 であったとして求めた、たとえば $z=0 \sim -20 \text{ cm}$, $r=0 \sim 30 \text{ cm}$ の範囲におけるコアを含まない部分の土の体積減少量（原地盤における体積と杭貫入後の体積の差）は約 $3,800 \text{ cm}^3$ であり、約 12 cm 分の杭長にあたる大きな体積減少が生じている。また、D-1 杭先端側面の $z=0 \sim +10 \text{ cm}$, $r=0 \sim 50 \text{ cm}$ の範囲の体積減少量は $z=0 \sim +10 \text{ cm}$ の杭体積にほぼ等しい。

上述の杭先端側面の体積減少と 5.3 に述べた杭側面での体積減少とから、地表から杭先端 ($z=0$) までの杭体積が、杭側面地盤の体積減少により吸収されているとしたら、上述の杭先端下部 ($z=0$ 以下) の体積減少量はなんらかの現象により消去されねばならないことになる。しかし、図-14において杭側面の一部である杭先端から 55 cm ($2.75D$) 上部の G.L. -9.85 m の杭側面で体

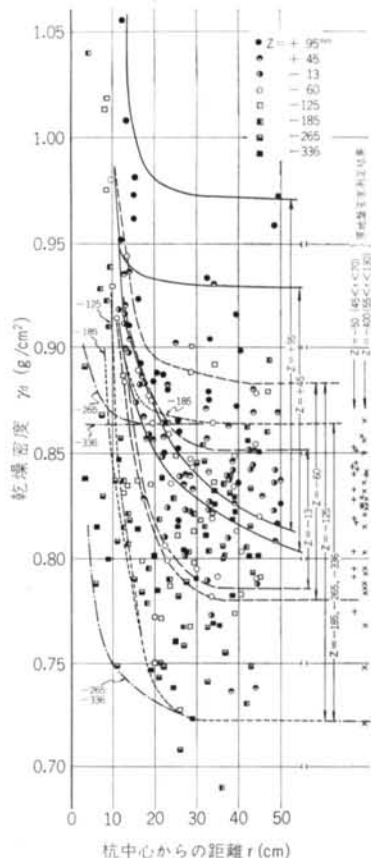


図-19 D-1 杭先端部乾燥密度測定結果

積減少量は杭体積以下であった。このことは、杭先端部で一度圧縮された土が、先端上部で膨脹することを示している、これにより杭底面下の体積減少量が吸収されているものと思われる。また、コア側面の土が杭の貫入に伴って順次上部に移ると考えたとき、図-17において、コア側面で密度 1.0 g/cm^3 以上に圧縮された土が杭先端側面 ($z=0 \sim +10 \text{ cm}$) で 0.9 g/cm^3 に減少しているのも上述の膨脹現象の一部と考えられる。

コアは、砂層における BCP 委員会の実験 (BCP 委-5C 杭)^{注)}でも生じていた。図-20 は、その形状を本実験の場合と比較したものである。底面は砂層の方が大きい、高さはローム層の方が大きい。

注) 本実験と同じ試験杭をケーシングを用い G.L. -11 m の密な砂層に設置した後、密な砂層中に約 1 m 連続貫入試験をした杭である。

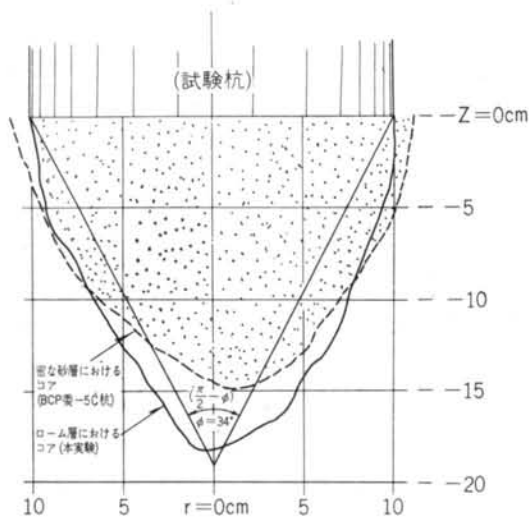


図-20 杭先端コアの比較

コアは杭と一緒に貫入する部分であり、支持力理論では、杭底面下の頂角 $\frac{\pi}{2} - \phi$ (ϕ :土の内部まさつ角)の三角形の領域となる。しかし、実験で生じたコアの形状はいずれも理論の三角形とは異なっている。

杭先端地盤の試料の三軸圧縮試験による ϕ は砂層が36度、ローム層が34度でほぼ等しい。しかし、砂の内部まさつ角は高圧下では粒子の破碎現象により減少する。BCP委員会では杭先端地盤砂試料の高圧三軸試験によりこのことを確認している。

砂層における杭の最終時の先端抵抗は約 260 kg/cm^2 であった。これに対応する高圧試験の ϕ は約30度に減少する。一方、ローム層の先端抵抗は約 55 kg/cm^2 であり、砂層に比べて小さく、 ϕ は減少しないものとすれば、塑性理論で求められるコアの頂角は、 ϕ の大きいローム層の場合が大きくなり、実際と一致する。しかし、前述したようにその形状は理論とかなり異なる。

5.4 杭の貫入機構に関する考察

ローム層に押し込んだ杭の側面や先端の地盤は杭の貫入による圧縮により大きな体積減少をする。密度測定結果から求めた体積減少量は杭の体積を吸収できるものであった。したがって、ローム層における杭の貫入は従来の支持力理論で示される地盤の大きな変形により生ずるものではなく、杭下部の地盤の圧縮により生ずることが指摘される。これは、BCP委員会の密な砂地盤での測定結果に等しいものである。

杭底面下には、貫入途中層からできたコアが形成される。コアは杭と一体となって貫入する部分であり、杭の貫入中にコアに沿ったせん断破壊を生ずることは明白で

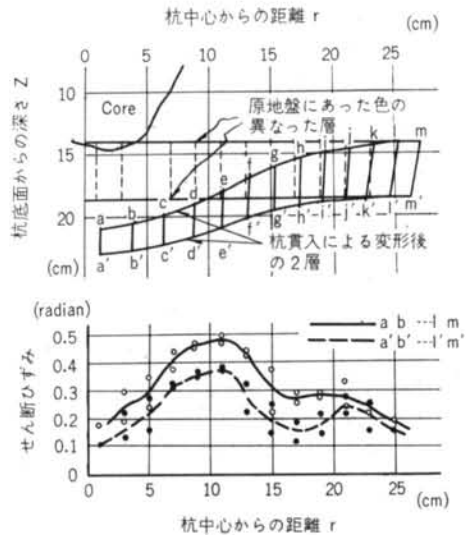


図-21 コア近傍のせん断ひずみ分布
(砂層の場合: BCP委-5C杭)

あろう。

コアのほかに、杭下部地盤には、杭底面端部から下方に延びるすべり線が発生している。このすべり線に相当するせん断変形は砂地盤における杭(BCP委-5C杭)でも確認されている。図-21は、そのせん断ひずみの分布であり、幸運にも先端地盤に存在した色の異なった2つの砂層が杭の貫入前は水平であったという仮定のもとに求めたものである。杭底面下14~18cmにおけるせん断ひずみ度は杭中心から約10cmで最大であり、本実験のD-1杭のすべり線の位置にほぼ等しい。

以上から、極限状態における杭先端地盤の変形状況はローム層の場合も砂層の場合も基本的に差のないものと思われ、杭の貫入機構は次のように考察される。

杭先端荷重による底面下の土の圧縮により杭は沈下する。このとき、杭底面端部には最も大きなせん断力が作用し、端部からは下方にせん断破壊が進行する。杭の先端抵抗はせん断破壊と底面下の土の圧縮の進行に伴って増加する。

一方、杭先端に近い側面の地盤では、先端下部の圧縮の進行に比例して応力の解放が生じ土の膨脹が生ずる。この現象は本実験のD-1杭側面における地盤の体積減少量が先端から約3D上部でのみ杭の貫入体積より小さかったこと、BCP委員会の実験では杭側面土圧の測定も行なったが、側面土圧が先端から約3D以下では極端に減少することなどから推察できる現象である。杭先端荷重の一部はこの膨脹領域の外側を通して、杭側面の少なくとも3D以上上部に伝達されるものと考えられ、し

たがって3D以上上部の杭側面土は再圧縮されるものと考察される。

杭先端から約3D部分の応力は先端抵抗の増加に比例して減少し、最終的にはコアに沿ったせん断破壊を導くものと考察される。コアの強度に比べて先端地盤強度が大きい場合には、せん断破壊はコア内に生じ、したがって、コアは順次強度の大きい地盤のものに置換されるものと思われる。

このような機構により杭が地盤に貫入するならば、杭の先端支持力は杭先端地盤の圧縮性と高圧下の土のせん断強度により決定されるものと考えられる。

§ 6. 結 論

- (1) ローム層に貫入した杭の底面には、貫入途中層から成る円すい形のコアを生ずる。また、杭底面端部からは下方にのびるすべり線が発生する。
- (2) 杭周辺地盤の密度は杭の貫入により増加する。その増加範囲は、原地盤の密度が大きいほど広く、乾燥密度 $0.6 \sim 0.82 \text{ g/cm}^2$ で杭周面から $2D \sim 4D$ である。ま

た密度の増加に比例した地盤強度の増加が生ずる。

- (3) 杭の周辺および先端地盤の体積減少量は杭の体積を吸収できるものであり、杭の貫入は地盤の圧縮により生ずる。
- (4) ローム層の埋め込み杭では、沈下量が約1Dで極限支持力に達する。これは砂層の場合に比べて非常に小さい。また、PIP杭では0.1D以下のわずかな沈下量で極限支持力に達する。
- (5) ローム層のN値と支持力(Q)の関係は、砂層での両者の関係にほぼ等しい($Q=50N \sim 60N$)。なお、れき層の支持力はれきの径、およびれき自体の強度に支配されると思われる。

現在、杭周辺から採取したブロックサンプルおよび先端部ブロックサンプルの土質試験から、杭の貫入による地盤の力学的性質の変化を検討している。また今後、杭の支持力の検討のために高圧下の土の性質を究明する予定である。

最後に、貴重なPIP杭の先端ブロックサンプルを提供くださった当研究所の小粥庸夫氏、および密度分布の測定など実験に協力してくれた日本大学土木工学科学生酒寄清毅君に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) BCP委員会：“砂層に支持されるくい/support力に関する実験的研究” 1969年7月
- 2) 山本・小泉・井上：“東京砂層におけるくいの支持力に関する研究(その1)” 第4回土質工学研究発表会講演集(1969) pp. 223~228
- 3) 玉置・吉見・遠藤：“東京砂層におけるくいの支持力に関する研究(その2)” 第4回土質工学研究発表会講演集(1969) pp. 229~234
- 4) 陶野・吉見：“くいの貫入によるくい先端地盤の粒子破碎について” 第5回土質工学研究発表会講演集(1970) pp. 193~196
- 5) BCP委員会：“Field Tests on Piles in Sand” Soils and Foundations Vol. 11, No. 2 (1971) pp. 24~49
- 6) 小林・玉置・井上：“砂層に設置されたくいの支持力に関する実験(第1報)” 清水建設研究所報 第19号(1972) pp. 13~22
- 7) 井上・小林・玉置：“砂層におけるくいの支持力に関する研究” 日本建築学会大会学術講演梗概集(1973) pp. 1621~1622
- 8) 土質工学会編：“土質工学ハンドブック”

