

港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 660 Dec. 1989

大口徑鋼管杭に関する試験と解析

高橋邦夫

運輸省港湾技術研究所



Loading Tests on Large Diameter Steel Pipe Piles

Kunio TAKAHASHI*

Synopsis

In order to solve the problems concerning the design of large diameter steel pipe piles of open end for the wharf foundation, comprehensive tests on the piles were carried out, along with detailed survey of the ground conditions. The test piles are two large diameter piles ($\phi 1117.6\text{mm}$) and one small diameter pile ($\phi 600\text{mm}$), which are instrumented with strain gauges. Important conclusions from the tests are as follows: 1) Smith's method provides good estimation for dynamic behavior of pile driving. 2) The calculated bearing capacity according to the dynamic formulae are 40-90% larger than the measured results. 3) Although skin friction and point bearing can be evaluated by the method generally used for design in Japan, the large diameter piles of open end have loose internal plug and have small point bearing capacity. 4) Contribution of rubble mound to lateral resistance of a pile is small; 1-3 were obtained from the back-analysis for the N-value of the rubble mound.

Key Words: Quay, Pile, In-situ Test, Load Test, Bearing Capacity, Case History, Plugging Effect, Lateral Resistance, Rubble Mound

* Chief of the Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division

大口径鋼管杭に関する試験と解析

高橋邦夫*

要 旨

Y港において、詳細な地盤調査を含め、鋼管杭について総合的な試験を行なった。長さ49 mで直径600 mmの杭1本と直径1117.6 mmの杭2本を中心にした打撃応力測定、鉛直載荷試験、引抜き試験、および水平載荷試験である。杭には密にひずみ計が取付けてあり、各種の杭応力を測定した。解析の結果、次のようなことがわかった。1) 波動理論による動的解析であるSmithの方法を使って予測した貫入量や杭頭の打撃応力度は、実測の動的挙動と比べて合理的なものであった。2) 各種動的支持方式により計算される値は、実測値に比べて4~9割大きかった。3) 周囲摩擦力と先端の地盤強度は一般の設計に用いられている方法によりほぼ推定できるが、直径1.1 mの杭の先端抵抗は、閉塞が不十分なために非常に小さかった。4) 杭の水平抵抗に対する捨石層の寄与は非常に小さく、 N 値にして1~3の値が逆算された。

キーワード：岸壁、杭、原位置試験、載荷試験、支持力、事例、閉塞効果、横抵抗、捨石マウンド

1. まえがき

Y港では-14 mという大水深の岸壁を、斜組杭式横さん橋構造で建設することになった。地盤条件として、表層は砂による置換層、それより下はサンドコンパクションパイル工法による強制置換層、そして置換砂層の上には杭の設置位置によって厚さの異なる捨石層が、杭打設後に施工されるというものである。基礎杭として、直径1117.6 mmの大口径鋼管杭が用いられた。

この建設において、1.1 mという大口径の杭の使用にあたり、開放状態の先端の閉塞効果の評価が問題とされた。また、杭の横抵抗において捨石層がどのように抵抗力を発揮するかは、これまで問題視されていながら、信頼できるデータはないに等しい状況であった。これらの大きな問題の他にも、打設時の杭の動的挙動等、あわせて調査すべき多くの項目があった。そこで、綿密な地盤調査、杭打ち試験、杭の鉛直載荷試験、引抜き試験および水平載荷試験という一連の調査試験が実施された。

2. 調査、試験、解析の概要

地盤調査、杭打ち試験、杭の鉛直載荷試験、引抜き試験および水平載荷試験の内容と目的は、概略次のとおりである。

まず地盤調査においては、杭について行う各種試験の結果を解釈するのに必要な地盤の性状の把握を目的として、標準貫入試験の他に、サンドサンプリング、静的コーン貫入試験、セルフボーリング式孔内水平載荷試験（以降SBP試験と略す）を実施した。標準貫入試験では、杭打設、捨石層施工等の施工各段階における置換砂および砂杭の性状の変化を調べた。サンドサンプリング、静的コーン貫入試験およびSBP試験においては、経験の少ないこれらの方法の適用性を検討することを主眼とした。

杭打ち試験においては、打撃時の動的応力や貫入性能の測定を行い、支持力特性との関連を検討するとともに、杭の打込みに関する波動理論の基本であるSmithの方法によって解析し、実測結果との比較により、Smithの方法の適用性を検討した。

鉛直載荷試験と引抜き試験は、捨石層施工前の状態で実施し、その結果を使って静的支持方式および動的支持方式を検討した。その際、大口径杭の先端閉塞効果を検討することが本調査試験の大きな目的であり、このために、基礎杭と同じ直径1117.6 mmの杭1本と、直径600 mmの杭1本を試験のために打設し、この2本の杭について鉛直載荷試験を実施し、両者の結果を比較した。引抜き試験は、直径1117.6 mmの杭について実施し

* 土質部 基礎工研究室長

た。

水平載荷試験では、杭の横抵抗に対する捨石層の寄与に注目した。すなわち、捨石層施工前後において、3本の杭に対して一方向または交番の水平載荷試験を実施し、結果を比較した。試験結果の解析には、Changの方法、港研方式、APIの方法を用いた。また、地盤調査において得られているSBP試験の結果が、杭の横抵抗を考える上で有用であるかどうかについても検討した。

3. 地盤調査

3.1 現地地盤の概要

地盤の状況は、図-1に示すとおりである。水深-14m以下の地盤は、-20mまで置換砂、-32mまで置換率80%のサンドコンパクションパイル（以降SCPと略す）工法により改良された地盤、-40mまでN値が10~50の間でばらついているシルトと砂の互層、それ以降がN値50以上の砂層で、杭の根入れ深さは-41mである。なお置換砂層のN値は、砂を置いただけで杭打設前の状態における値である。また、試験に用いた杭3本と地盤の関係を図-2に示す。

3.2 標準貫入試験

鋼管杭打設、捨石施工の施工各段階における置換砂および砂杭の性状の変化に注目して、標準貫入試験を実施した。すなわち、鋼管杭打設前、鋼管杭打設後で捨石施工前、捨石施工後の3時点である。まず、置換砂であるが、杭打設の前には、図-1に示されるとおり、平均4程度の緩い状態であった。杭打設により、少し締固められて、平均して8程度に増大した。捨石によっても、いくらか締固められ、平均10程度に増加している。砂杭の砂については、捨石施工後には調査を実施しておらず、杭打設のみによる影響を調べた。それぞれ3孔ずつの調査において、全体の平均として、約25回から約37回に増加している。もちろん深さ方向に増大しているが、それをも含めて平均した値である。

3.3 サンドサンプリング

不攪乱状態の砂試料を採取するために、置換砂に対して改良 Bishop 式サンプラー、SCP の杭芯の砂に対してトリプルチューブサンプラーを用いて、サンドサンプリングを行った。サンプラーの貫入長さに対する試料の採取長さの比は、改良 Bishop 式サンプラーの場合86%、トリプルチューブサンプラーの場合68.5%であった。改良 Bishop 式サンプラーの場合の採取不成功の原因はほとんどが砂中の礫の存在であり、礫のない条件であれば高い採取率が期待できたと考えられる。

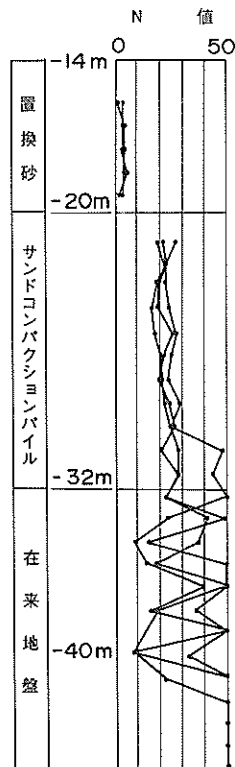


図-1 現地地盤のN値

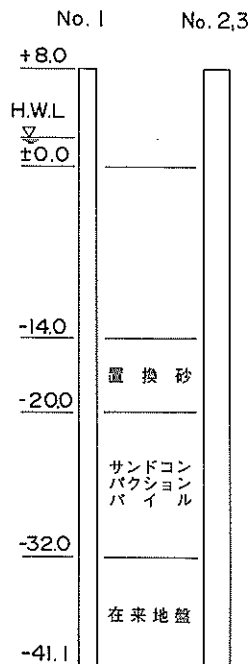


図-2 試験に用いた杭と地盤の関係

これらの不攪乱試料を用いて、密度試験、粒度試験、三軸圧縮試験（CD試験）を行った。その結果によれば、-14 mから-20 mの置換砂は、中ほどの深さで密度が若干減少しており、内部摩擦角も中ほどがいくらか小さい。しかし、内部摩擦角の変化はわずかで、平均して約35°と見ることができる。SCPの杭芯の砂についての結果は妥当なもので、例えば、内部摩擦角とN値との関係はMeyerhofの提案¹⁾とほとんど一致していた。

3.4 静的コーン貫入試験

置換砂層において、連続的な土質性状を把握するため、コーン貫入試験を鋼管杭打設後捨石施工前に実施した。用いたのはフリクションスリーブ付き電気式コーン（一重管式）で、先端抵抗（ q_c ）と周面摩擦（ f_s ）の2成分を測定した。

調査結果を見ると、地層の微細な変化を連続的にとらえ²⁾ていることは間違いないが、やはり砂質土に対してはばらつきが大きく、今回の場合、礫も混じっていたことから、相当困難な測定になった。先端抵抗については $q_c=10N$ (kgf/cm²) 程度の関係が得られたが、周面摩擦 f_s については q_c の分布と似た形状を示したものの、絶対値が非常に小さく、ほとんどゼロに近かった。

3.5 SBP試験

孔内水平載荷試験については、指針化の試みとして、土木学会により、その現状と課題がまとめられているが³⁾、これは岩盤に対する適用を対象にしたものである。一般の土を対象とした場合には、ボーリング孔の掘削による壁面応力の解放や測定管の再挿入などによる孔壁の乱れが大きな問題になる。そこでフランスおよびイギリスにおいてセルフボーリング方式の孔内載荷試験装置が開発された⁴⁾。この方式では、測定のための孔を事前に掘らずに、測定装置自体が貫入し（セルフボーリング）、そのまま膨張して計測を行う。したがって、事前ボーリングのような応力開放や壁面の乱れがなく、これまで用いられてきた一般の孔内水平載荷試験に比べて、良質の横方向反力や土圧のデータが得られるといわれているものである⁵⁾。

そこでここでは、孔内水平載荷試験として、SBP試験を行った。SBPは、Self Boring Pressuremeterの略である。この方法は、研究的には優れた計測装置であることが示されているが、現場における適用性の検討あるいは信頼できるデータは、少なくとも日本では、まだほとんどないという現状であろう。このような新しく有望な手法の適用性を検討すべく、今回の総合的な試験の中で、このSBP試験も試みた。

SBP試験は鋼管杭打設前に1孔、打設後に2孔行っ

ている。全3孔とも、置換砂層中の3つの深度、-15.5 m、-17.5 m、-19 mにおいて、すなわち、全部で9回の試験を行った。

まず、静止土圧係数について述べる。鋼管杭打設前の試験結果は、表層が1.14と大きい他は、0.5程度の妥当な値が得られた。鋼管杭打設後は1.3~3程度の値となった。この場合も、表層は非常に大きい値であった。そして鋼管杭打設後は、深さ方向に減少するという結果であった。変形係数は、60~120kgf/cm²の値が得られ、ばらつきとしては小さくなかったが、鋼管杭打設により増大するなどの変化は、はっきりと現われた。杭の横抵抗との関係については、7.4で述べる。

4. 試験に用いた杭

この斜組杭式横棧橋構造において、基礎杭は鉛直杭、斜杭とも直径1117.6 mm、先端開放の鋼管杭である。No.1とNo.2の杭2本だけは試験のために打設した杭で、No.1は直径600 mmの同じく先端開放鋼管杭、No.2は基礎杭と同じ杭である。これらの杭のうち、ゲージを貼り各種試験においてひずみその他の計測を行ったのが、No.1, 2, 3の3本で、いずれも鉛直杭である。杭打ちの際の打撃応力測定、鉛直載荷試験、引抜き試験、一方向または交番載荷の水平載荷試験のどの試験においてどの杭を用いたかを、わかりやすいように表-1に示す。

杭に取付けた測定器として、ひずみ計測に、ひずみゲージとバラショック型のひずみ計の両者を用いている。ひずみゲージの場合、1測定点を4枚のゲージを用いた2アクティブ2ダミーゲージにより構成している。バラショック型のひずみ計は、杭の打設時にひずみゲージの方が故障を起こす可能性の高いことを考慮したために用いた。杭の1断面について向い合った2点にひずみ測

表-1 試験杭と試験項目

杭	No. 1	No. 2	No. 3
直 径	600 mm	1117.6 mm	1117.6 mm
肉 厚	19 mm	19 mm	19 mm
長 さ	49.17 m	49.14 m	49.13 m
打撃応力測定	○	○	○
鉛直載荷試験	○	○	—
引抜き試験	—	○	—
水平載荷試験	一方向	交 番	一方向
測 定 項 目	ひずみ分布 先端沈下量	ひずみ分布 先端沈下量	ひずみ分布 先端沈下量

定点を置き、軸方向のひずみを計測するようにした。このような測定断面を深さ方向に10~29配置し、杭に発生する軸方向力または曲げモーメントを求める。なお、打撃応力測定時に重要な杭頭部のひずみ測定断面では、偏打などによりばらつきやすいデータの精度を高めるために、向い合った2点でなく、90度ずつ回転した方向の4点をひずみ測定点としてある。その他、杭に取付けた測定器には、沈下計、傾斜計がある。

5. 杭打ち試験

5.1 杭打ち試験の概要

杭打ち試験において、動的応力を測定した杭は、No. 1, 2の試験杭2本と、No. 3の基礎杭1本である。打設には、ディーゼルハンマーMB-70(ラム重量7.2tf)を用いており、ハンマーの落下高さ、リバウンド量、杭の貫入量などについても計測した。

5.2 打撃応力測定

打撃時の杭の軸方向ひずみを、杭頭1断面の他、軸方向に12~13断面において、動ひずみ計により測定した。これらのデータから、第1波目のピーク時圧縮応力(最大圧縮応力)を連ねたグラフを図-3に示す。このピーク時応力の分布は、同一時点における分布ではなく、時間の経過とともに下に向かって杭中を伝達する応力波のピークを連ねて表示したものである。杭先端の位置が25 m, 33 m, 40.7 m(打込み終了近く)のときの3本のカーブを、それぞれの杭に対して1枚のグラフに描いている。それぞれのカーブを見ると、打撃応力は地盤からの周面摩擦力により、深さが増すにつれて減少している。そして3本のカーブを比べると、先端が深くなるにつれて、応力がいくらか大きくなってゆく。これが、 $\phi 600$ mmのNo. 1の杭で特に顕著である理由は、後に述べるように、この杭は先端が完全な閉塞状態に近く、他

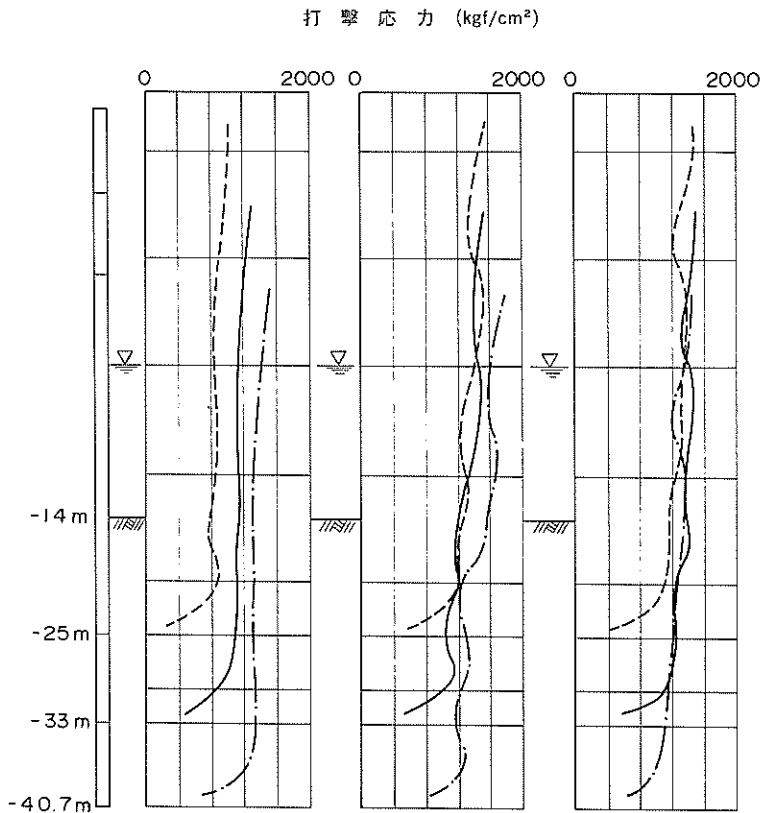


図-3 打撃時最大圧縮応力分布

の No. 2, 3 の杭に比べて排土杭としての性格が強く出て、周囲の地盤を締めつつ貫入したからであると推測される。

5.3 Smithの方法による解析

Smithの方法⁶⁾を用いた解析により打撃時の杭の挙動が説明できるかどうかを検討した。この場合大きな問題となるのは、杭打ち機の効率 e_f と地盤の評価である。地盤の評価については、次のような3通りの状態を仮定した。すなわち、周面摩擦と先端抵抗の値そのものは一般の設計で用いられている方法により推定できるとして、それらにより、貫入抵抗力 R が、

a) 閉塞状態：

$$R = (\text{閉塞全断面に対する先端抵抗力}) + (\text{外周面摩擦力})$$

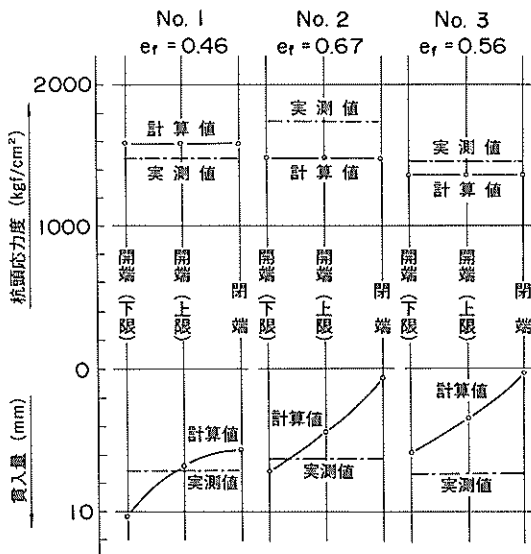
b) 開端状態：

$$R = (\text{杭先端肉厚部に対する先端抵抗力}) + (\text{外周面摩擦力}) + (\text{内周面摩擦力})$$

1) 上限値：(内周面摩擦力) = (外周面摩擦力)

2) 下限値：(内周面摩擦力) = 0.5 (外周面摩擦力)

のように表わされるとしたものである。これらの状態のそれぞれに対し、適切な e_f を求めて杭頭応力度および貫入量の適合性を調べてみた。その結果、貫入量は杭先端の閉塞状態によって変化する、最大応力度は先端の状態によらないことがわかった。また、最適な e_f の値は、実測した杭頭応力度の波形において、第1波目の反射波を除



図—4 Smithの方法による計算結果と実測値の比較

去した打撃エネルギーから求められるという結果となった。杭頭応力度と貫入量の計算値は、実測結果と図—4のような関係にある。

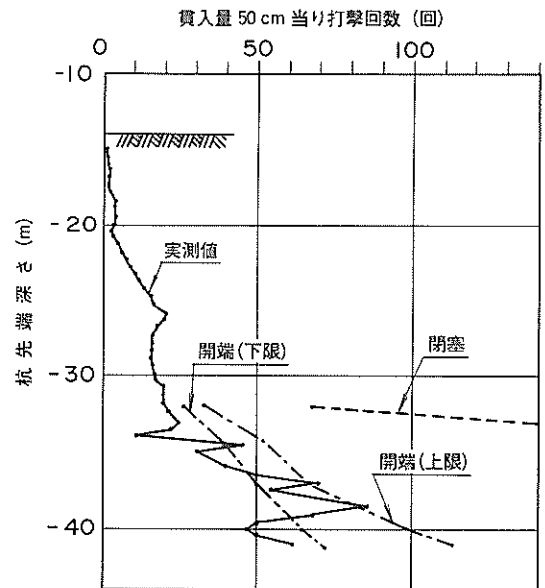
貫入量50 cm当りの打撃回数により実測値と計算値を比較すると図—5となる。この例はNo. 2の杭の場合であるが、実測値は開端状態の上限値と下限値の間にはいっており、妥当な結果が得られている。これらのことから、Smithの方法による貫入量、杭頭の打撃応力度、打撃回数などの予測は、実測の動的挙動とほぼ満足できる一致を示したと考えられる。

6. 鉛直載荷試験および引抜き試験

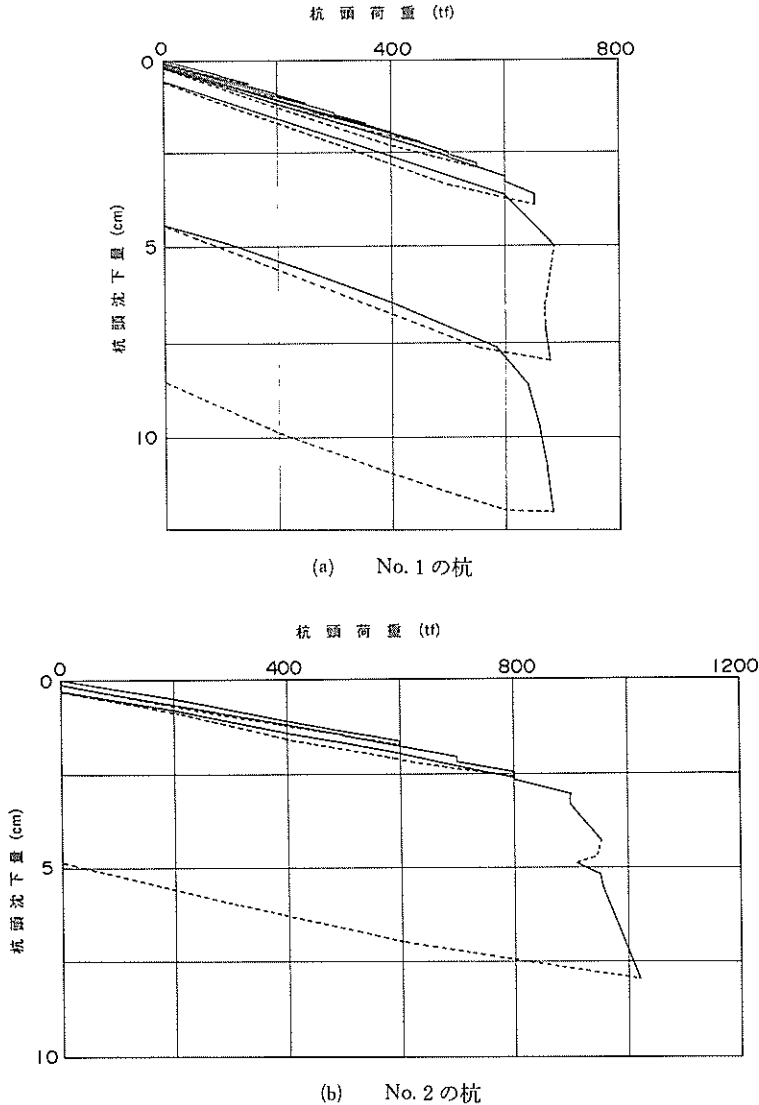
6.1 鉛直載荷試験の概要

基礎杭と同じ直径1117.6 mmのNo. 2の試験杭と、これと比較するため、直径600 mmのNo. 1の試験杭について、鉛直載荷試験を実施した。油圧ジャッキにより杭頭荷重を加えてサイクル試験を行い、杭頭荷重のほか、杭頭の沈下量およびひずみゲージにより軸方向ひずみを測定した。

鉛直載荷試験の結果を図—6, 7に示す。図—6および他の支持力判定手法の結果もあわせて判断すると、No. 1, 2の杭の極限支持力はそれぞれ約685 tf, 955 tfと推定できた。また、図—7は載荷時の軸力分布を示したものである。



図—5 No. 2の杭の貫入量50 cm当り打撃回数分布



図一六 鉛直載荷試験における荷重—沈下関係

6.2 引抜き試験の概要

直径1117.6 mmのNo. 2の試験杭について、引抜き試験を実施した。鉛直載荷試験の結果だけでは、杭の内部に詰った土による内周面摩擦力が外周面摩擦力と一緒になくなってしまっており、内周面摩擦力を含んだ一般的な意味における先端抵抗力が正しく評価できない。そこで、先端抵抗力の評価を正確に行うために、鉛直載荷試験とあわせて、引抜き試験を行ったものである。試験の方法は、荷重の方向が反対なだけで、鉛直載荷試験の場合と同じである。

引抜き試験の結果、極限状態の全引抜き抵抗力として534 tfが得られた。しかし、先端部分に約200 tfという非

常に大きな軸力が集中していた。これは、杭先端におけるサクシオン、鉛直載荷試験の際の残留ひずみ、先端に取付けてあるフリクションカッターの影響などを考慮しても大きすぎるように思われるが、極限状態の全引抜き抵抗力534 tfという値そのものは、鉛直載荷試験およびこれまで一般に用いられている支持力算定式から判断して、ほぼ妥当な値と考えられる。

6.3 静的支持力式の検討

図一六およびその他の支持力判定手法から推定された、直径600 mmのNo. 1の杭に対する約685 tf、直径1117.6 mmのNo. 2の杭に対する約955 tfという極限支持力の値は、一般に設計上用いられている方法（周面摩

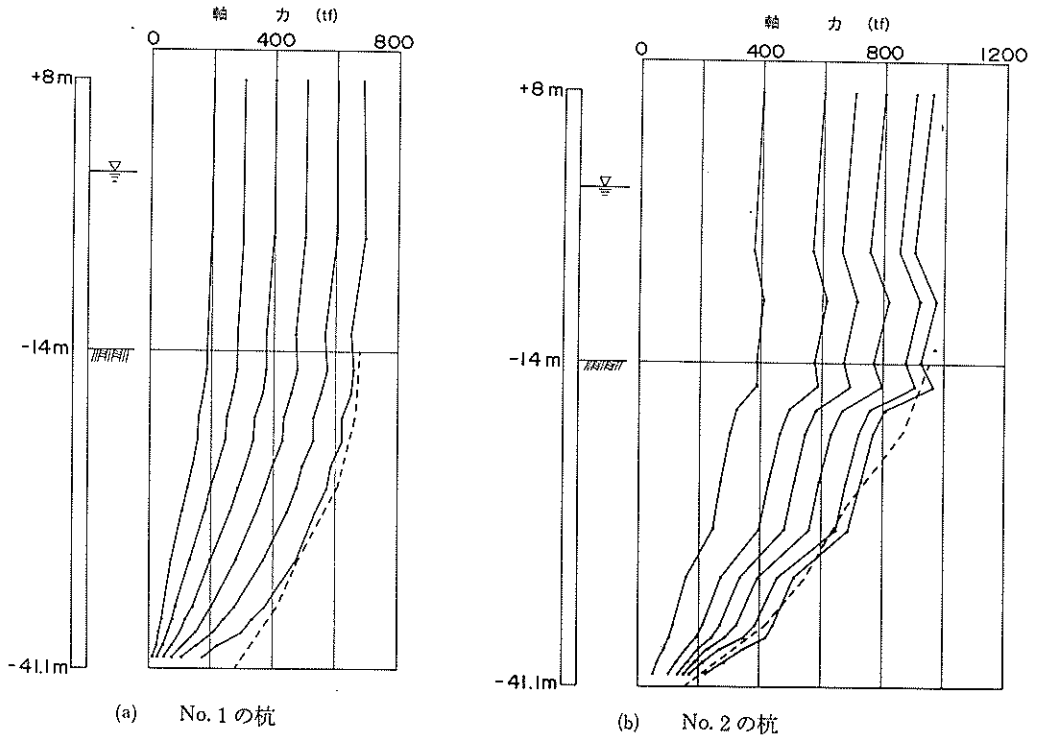


図-7 鉛直載荷試験における軸力分布

擦力強度： $f = N / 5 \text{ tf/m}^2$ 、先端支持力強度： $q_u = 30N \text{ (tf/m}^2)$ により計算される周面摩擦力と先端抵抗力の和に比べて、No. 1の杭は概ね一致しているが、No. 2の杭は非常に小さいので、開端杭の不完全閉塞の影響が大きいと考えられる。すなわち $\phi 600 \text{ mm}$ のNo. 1の杭は完全な閉塞状態にあったかまたはそれに近く、 $\phi 1117.6 \text{ mm}$ のNo. 2の杭はあまり閉塞していなかったと考えられる。

一方、引抜き試験から、極限状態の全引抜き抵抗力として534 tfという値が得られた。この引抜き試験の結果には、6.2に述べたような問題がある上に、押込み方向の周面摩擦と引抜き方向の周面摩擦が厳密に同じであるとは考えられないが、今ここでは、引抜き抵抗力が鉛直載荷試験における外周面摩擦力と正確に対応していると、大胆に仮定する。そこで、この534 tfという値を使って、それぞれの杭の先端抵抗力を求めてみる。まず、534 tfという値から杭の自重として杭の内部に詰った土の重量などを除いて正味の周面摩擦力を求めた。この値に杭の周面積を考慮してそれぞれの杭の全周面摩擦力を計算し、それを実測の全鉛直支持力から差引いて先端抵抗力を求めた。これを断面積で割って先端抵抗の単位面積当り強度に直すと、 $\phi 600 \text{ mm}$ のNo. 1の杭で1473 tf/m²、 $\phi 1117.6 \text{ mm}$ のNo. 2の杭で496 tf/m²という値が得

られる。このような数字に直すと、 $\phi 600 \text{ mm}$ のNo. 1の杭と $\phi 1117.6 \text{ mm}$ のNo. 2の杭との違いが歴然と現われている。

表-2に、平成元年2月に改定された港湾の新基準⁷⁾、それ以前に用いられていた港湾の旧基準⁸⁾、その他に、道路橋示方書⁹⁾の規定、そして建築の指針¹⁰⁾の規定のそれぞれにより算定される極限支持力の先端抵抗と、上記の実測値に基づいた値を比較している。

まず、閉塞の問題が含まれていないか、含まれていたとしても少ないと考えられる、 $\phi 600 \text{ mm}$ のNo. 1の杭について検討する。港湾の旧基準以外はすべて30Nであるのに、三者の間で数字が異なる理由は、先端抵抗を算定

表-2 先端抵抗の計算値と実測値の比較

杭	No. 1 $\phi 600 \text{ mm}$	No. 2 $\phi 1117.6 \text{ mm}$
極限支持力の 先端抵抗強度	1473 tf/m ²	496 tf/m ²
港湾の新基準 ⁷⁾	1395	1410
港湾の旧基準 ⁸⁾	1884	1784
道路橋示方書 ⁹⁾	1200	1200
建築の指針 ¹⁰⁾	1056	1084

する時のN値の求め方に差があることが一つである。さらに道路橋示方書では、N値の上限を40としている。また建築の指針では、記述にしたがって、φ600 mmの杭に対しても閉塞効率の0.8を掛けた数値を示している。港湾の新基準が最も近い値を示し、港湾の旧基準は過大で、道路橋示方書と建築の指針は過小な計算結果となっている。

φ1117.6 mmのNo.2の杭については、不完全閉塞の影響が大きいと考えられる。この影響を考慮していることになっている道路橋示方書や建築の指針でも、ここに現われている閉塞の程度を考慮するには十分でなく、現象の複雑さ、難しさが納得される。したがって現状では、閉塞の問題に対する対処方針として、大口径の開端杭を使用しその閉塞率を精密に予測して設計しようとするのではなく、十字リブで補強するなど、先端の処理により閉塞させるように考えるのが適当であると思われる。

図一7に示した載荷時の軸力分布には、実際に生じている周面摩擦力と先端抵抗力とが示されているが、この結果からそれらの値を直接求めることは難しい。その理由として、まず周面摩擦力は図一7の曲線の微分となるため、精度上問題がある。また先端抵抗力については、杭先端位置で示される肉厚部の純粋な軸力と内周面の摩擦力とを合わせたものが普通と呼んでいる先端抵抗力ということになるが、図一7の特に先端部の急勾配は外周面と内周面の摩擦力の複合による値であり、両者を分離することは難しい。そこで逆に、一般的に推定されている程度の外周面摩擦の値と、内周面摩擦については管内ボーリングの結果により推定される値（杭は改良地盤の杭間粘土部分に打設されたため外周面摩擦より小さい）とを使い、杭頭荷重を境界条件として計算される軸力分布を図一7の上に書込んで、実測結果との対応を調べ、それらの値の大きさを評価する。図一7に書入れた破線がそれであり、軸力分布の微分である周面摩擦についてはほぼ妥当な一致を示している。先端抵抗については、φ600 mmのNo.1の杭では測定値より大きく、φ1117.6 mmのNo.2の杭では小さく計算された。この結果は閉塞状態の違いに起因すると思われる。すなわち、閉塞状態の不完全なNo.2の杭では、実際に発生した内周面摩擦が計算値より小さく、完全な閉塞状態に近いNo.1の杭では、管内に進入した土が締め固められて計算値より大きな内周面摩擦を発揮したのではないかと想像される。

6.4 動的支持力式の検討

次の3つの杭打ち式により計算される極限支持力を、載荷試験結果と比較してみる。

a) ハイリーの式で反発係数を1とした式¹¹⁾

$$R_u = \frac{e_f \cdot F}{S + (c_1 + c_2 + c_3) / 2} \quad (1)$$

ここで、 R_u ：杭の極限支持力

e_f ：杭打ち機の効率 (0.5)

F ：打撃エネルギー

S ：1打撃当りの杭の貫入量

c_1 ：杭の弾性変形量

c_2 ：地盤の弾性変形量

c_3 ：クッションの弾性変形量

式(1)において、 c_1 、 c_2 、 c_3 を次のように仮定する。

$$c_1 + c_2 = K$$

$$c_3 = (R_u L_c) / (A_c E_c)$$

ここで、 K ：リバウンド量

L_c ：クッション材の厚さ

A_c ：クッション材の断面積

E_c ：クッション材のヤング率

b) 式(1)において、 $c_1 + c_2 + c_3 = K$ とした式¹²⁾

$$R_u = \frac{e_f \cdot F}{S + K / 2} \quad (2)$$

c) 道路橋示方書による式¹³⁾

$$R_u = \frac{AEK}{e_o L} + \frac{NUL}{e_f} \quad (3)$$

ここで、 A ：杭の実断面積

E ：杭のヤング係数

L ：杭の長さ

\bar{N} ：杭の周面の平均N値

U ：杭の周長

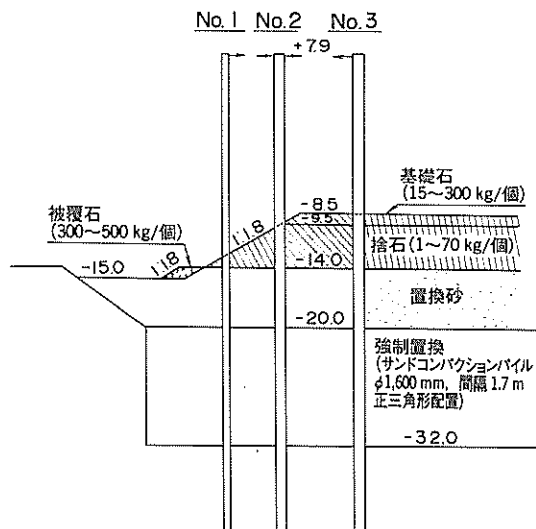
$$e_o = 1.5 W_H / W_P, \quad e_f = 2.5$$

(W_H および W_P はハンマーおよび杭の重量)

結果は表-3に示す通りであり、各種杭打ち式による計算値は、載荷試験結果の極限試験結果の極限支持力に比べて4~9割大きい値である。

表一3 動的支持力の計算値と実測値の比較

杭	No.1 φ600 mm	No.2 φ1117.6 mm
載荷試験結果	685 tf	955 tf
杭打ち式 a)	965	1485
杭打ち式 b)	995	1597
杭打ち式 c)	1082	1839



図一八 水平載荷試験における捨石マウンドの条件

7. 水平載荷試験

7.1 水平載荷試験の概要

水平載荷試験は、No. 1 (φ600 mm)、No. 2 (φ1117.6 mm)、No. 3 (φ1117.6 mm) の3本の杭に対して、捨石マウンド施工前と施工後に実施した。捨石マウンド施工前には、No. 2の杭の交番載荷試験とNo. 1およびNo. 3の杭の一方方向載荷試験を、捨石マウンド施工後には、No. 2の杭の交番載荷試験とNo. 3の杭の一方方向載荷試験を行った。いずれも多サイクルの試験で、杭頭部に加えた荷重、杭頭および海底面位置での水平変位量、杭に発生する曲げひずみを測定した。

図一八に、捨石マウンド施工後の試験における杭と地盤の状態を示す。捨石マウンド施工前の条件は、図中の捨石以上がない状態である。杭頭部の矢印で、載荷方向を示してある。捨石マウンド施工前の試験における最大変位は、載荷点で60~95cm、海底面で3~5cmである。捨石マウンド施工後の試験における最大変位は、載荷点で50cm強である。

捨石マウンド施工前の試験結果を解析するのに、Changの方法、港研方式杭の横抵抗計算法、APIの方法を用いた。そして次に、その解析において実測値を最も忠実に表現した港研方式のC型地盤の計算により、ここで問題としている、杭の横抵抗において捨石層がどのように抵抗力を発揮するかを検討した。また、地盤調査において得られているSBP試験の結果が、杭の横抵抗を考える上で有用であるかどうかについても検討した。

7.2 捨石マウンド施工前の試験結果の解析

線形の弾性地盤反力を仮定するChangの方法¹⁴⁾による解析では、実際の地盤の非線形的性質あるいは弾塑性的性質を表わすことができず、今回の試験結果においても載荷重が大きくなるにしたがって、地盤反力係数が約2.5 kgf/cm³から1 kgf/cm³程度まで減少する結果になった。

そこで次に、地盤の弾塑性的性質を表現することのできるAPIの方法¹⁵⁾による解析を試みた。これは、アメリカ石油協会 (American Petroleum Institute) が、石油掘削リグの巨大な杭基礎の設計に対して薦めている方法である。この方法により今回の試験の条件に対する計算をしてみると、計算結果は実測値に比べて、変位が非常に大きくなった。逆に言うと、実測値に近い計算結果を得るためには、置換砂のN値を43程度に評価する必要があるという程の差であった。この原因として、置換砂がゆる詰め状態であるため、自然に堆積した固い砂層に対して適用性の高いと考えられるAPIの方法がうまく適用できないのではないかとと思われる。

港研方式杭の横抵抗計算法¹⁶⁾による解析では、この試験の水平抵抗に支配的である置換砂層をN値8程度のC型地盤と評価した場合の計算結果が、実測値とよく一致した。横抵抗の非線形はねが深さ方向に一定のC型地盤であることも、そのN値の評価が8程度であることも、3.2に述べた標準準入試験による地盤調査結果とよく符合している。

7.3 捨石マウンド施工後の試験結果の解析

捨石マウンド施工前の試験結果の解析において、実測値を最も忠実に表現したのが港研方式のC型地盤の計算であったので、これにより、杭の横抵抗における捨石層の抵抗力について検討した。地盤の条件は、図一八に示したとおり、No. 3の杭で捨石層4.5m、基礎石層1mで、置換砂より上の表層の石の層厚は5.5mである。この5.5mの厚さの石の層を、ここでは便宜上、捨石層と呼ぶ。No. 2の杭は、捨石マウンドの法溝の部分に位置しており、表層の石の層厚は4.5mであるが、No. 3の杭の方向に載荷した場合と、No. 1の杭の方向に載荷した場合は抵抗が異なるはずである。

捨石層のN値を1から6と変化させて、仮想固定点深さとしての1/βの値を求めてみると、5.5~8.7mとなる。したがって、捨石層のN値を1と考えたとき、No. 3の杭の捨石層厚が仮想固定点深さに達するが、そうでない条件では、捨石層の下の置換砂層の影響を考える必要がある。そこで、捨石だけが続いている1層地盤と考えた場合と、捨石層の下に砂層がある2層地盤と考

えた場合の2通りについて計算を行った。捨石層についても、置換砂層と同じく、C型地盤として扱ってそのN値を1〜6と変化させた。置換砂層は7.2でよい一致が示されたとおり、N値8のC型地盤とした。

計算の結果は、捨石層の評価が非常に小さいものであることを示した。No.2の杭のNo.3の杭の方向への載荷の場合のみ、2〜3程度のN値が実測値に近い結果を与えたが、それ以外の場合には、実測値と一致するためのN値は1程度であった。1層と考えるか、2層と考えるかの違いは、この条件では、変位や最大曲げモーメントにほとんど影響がなく、曲げモーメント分布において、最大曲げモーメントを示す深さより下で若干差である程度である。

以前から言われているように、今回の試験においても、捨石層の横抵抗は小さいということが示された。この理由についてはよくわからないが、捨石の粒径の大きいことが、有力な要因ではないかと想像される。例えば、捨石は粒径が大きくまたその間隙も大きいので、相対的に細いあるいは小さい杭のわずかな変位に対して、有効な抵抗力を発揮しえないというようなことである。砂中の杭とその変位を、砂の粒径を基準に考えた場合と対比してみれば、このような考えも可能かと思われる。

7.4 SBP試験による横抵抗の検討

SBPによる孔内載荷試験の結果を、杭の横抵抗を推定に用いるべく解析を行った。ここでは、その概略を述べる。

まず、SBP試験の結果の $p - (\Delta r / r_0)$ 関係が、双曲線式よりもべき乗式でよく近似されていることを確かめた上で、杭の横抵抗における地盤反力の一般式、

$$p = Kx^m y^n \quad (4)$$

にならって、SBP試験の $p - \Delta r$ 関係を、

$$p = K_{SBP} x^m (\Delta r)^n \quad (5)$$

のように整理した。そうすると、

$$K_{SBP} = 1.37$$

$$m = 0.3$$

$$n = 0.5$$

として、十分な精度で表わされることがわかった。ここで、 $m = 0.3$ を求めるには、コーン貫入試験の結果を利用している。なお、 $n = 0.5$ は、港研方式杭の横抵抗計算法における定数と同じ結果となった。

一方、地盤をDuncan-Changのモデル¹⁷⁾によって表現した有限要素計算を、SBP試験および杭の水平載荷試験の両者に対して実施した。そして、それぞれ式(4)お

よび式(5)によって表わしうることを確認し、SBP試験の K_{SBP} および杭の水平載荷試験の K を結びつける関係として、次式を導いた。

$$Ky^n = \alpha K_{SBP} \left(\frac{r_0}{B/2}\right)^n (\Delta r)^n \quad (6)$$

実際の杭の水平載荷試験の結果と比較した結果、この定数 α として、1.2が得られた。

以上の結果から、SBP試験の結果を用いて表現した杭の地盤反力の関係は、次の実験式で表わされることになる。

$$p = 1.2 K_{SBP} x^m \left(\frac{r_0}{B/2}\right)^n y^n \quad (7)$$

これは、実験式としてこの地盤に適用されるべきものであるが、定数 n が港研方式杭の横抵抗計算法と同じく0.5と求められたこと、また、地盤反力に対する杭幅の影響が0.5と求められたこと¹⁶⁾など、一般的な妥当性をも相当に含むものであると考えられる。

以上の式において使われた記号の意味は、次のとおりである。

B : 杭の幅または直径

K : 式(4)で表わされる杭の水平載荷試験における地盤反力の係数

K_{SBP} : 式(5)で表わされる孔内水平載荷試験(SBP)における地盤反力の係数

p : 孔内水平載荷試験(SBP)または杭の水平載荷試験における単位面積当り地盤反力

Δr : 孔内水平載荷試験(SBP)における半径の増加量

r_0 : 孔内水平載荷試験(SBP)の初期半径

x : 地表面からの深さ

y : 杭のたわみ

8. まとめ

いずれも開端鋼管杭で、 $\phi 600$ mmのNo.1の杭と $\phi 1117.6$ mmのNo.2, 3の杭について、杭打ち試験、鉛直載荷試験、引抜き試験、および水平載荷試験を行い、その結果を解析して、次のことがわかった。

- 1) No.1の杭は先端が完全閉塞に近い状態であったが、No.2, 3の杭では閉塞しておらず先端抵抗が小さかった。
- 2) 周面摩擦力と先端の地盤強度は一般の設計に用いられている方法によりほぼ推定できるが、No.2, 3の杭の先端抵抗の推定には先端の不完全な閉塞状態を考慮する必要がある。
- 3) 先端が完全閉塞に近い状態のNo.1の杭は、そう

でないと思われる No. 2, 3 の杭に比べて、先端位置が深くなるにつれて、打撃時の応力が全体的に大きくなっていったが、この理由は排土杭として地盤を締固めながら貫入してゆくためであると考えられる。

- 4) 杭打ち機の効率と杭先端の閉塞状態とを適切に評価して、Smith の方法により計算した杭の貫入量、杭頭の打撃応力度、打撃回数などの動的挙動は、実測の結果とほぼ満足できる一致を示した。
- 5) 各種動的支持力式により計算される値は、実測値に比べて4~9割大きかった。
- 6) 杭の水平抵抗に対する捨石層の寄与は非常に小さく、 N 値にして1~3の値が逆算された。
- 7) 各種の地盤調査手法を杭の設計に適用すべく試みた結果、標準貫入試験は十分に使いこなすことが可能であったが、サンドサンプリング、コーン貫入試験、SBP 試験については、礫を含む砂地盤に適用しようとしたことに無理があったせいか、必ずしも満足できる結果とはならなかった。

9. あとがき

本試験においては、建設局、工事事務所およびその他関係者の努力によって、非常に有用な実測値が数多く得られた。鉛直載荷試験および引抜き試験の結果は、杭の先端抵抗強度の評価について、技術基準改正（旧基準では $40NA_p$ ）のための有力なデータとなった。また閉塞効果の把握に対しても貴重な参考資料となっている。水平抵抗に対する捨石層の寄与については、この結果を受け、現在基礎工研究室において、模型実験を実施している。動的解析については、この手法を積極的に活用すべく、羽田空港の沖合展開事業においてさらに調査を行っている。

地盤調査においては、期待通りの成果は残念ながら得られなかった。技術が確立している標準貫入試験については、十分に使いこなすことが可能であるが、その他のサンドサンプリング、コーン貫入試験、SBP 試験などについては、礫を含む砂地盤に適用しようとしたことに無理があったせいか、必ずしも満足できる結果とはならなかった。しかしこのような努力を積み重ねることによって、現在の N 値のように有用な手法になりうると信ずるものである。

関係の建設局および工事事務所に対して、心から感謝する。特に、荘司新潟港工事事務所長は、この大掛かりな試験の推進者であり、また主役であった。7.4のSBP試験に関する内容は、彼の成果を要約したものである。

その他にも、この試験に関しては、沢山の人にお世話になった。一人一人の名前をここに挙げることをしないが、この資料は、全員の協力による成果である。基礎工研究室は、この総合的な試験に対して、技術指導を行った。非常に貴重な内容を多く含むので、港湾技研資料として、筆者が代表としてとりまとめたものである。また、色々な理由からとりまとめが遅くなったことをお詫びする。

(1989年9月30日受付)

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版、日本港湾協会、1989, p. 192
- 2) 小林正樹、小林茂雄、吉田 稔：先端抵抗測定式静的コーンの特性について、港湾技研資料、No. 576, 1987
- 3) 土木学会：孔内載荷試験法の現状と課題、一指針化の試み一、1988
- 4) 土質工学会編：土質調査法（第2回改定版）、土質工学会、1982, pp. 405~420
- 5) Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. and Lancellotta, R.: New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils, *Proc. 11th ICSMFE*, Vol. 1, 1985, pp. 57~153
- 6) Smith, E. A. L.: Pile-Driving Analysis by the Wave Equation, *Jour. of SMFD, ASCE*, Vol. 86, No. SM4, 1960, pp. 35~61
- 7) 1) に同じ, pp. 354~356
- 8) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、1979, pp. 5-22~5-26
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、IV 下部構造篇、1980, pp. 264~270
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、1988, pp. 215~241
- 11) 1) に同じ, pp. 356~358
- 12) 日本建築学会：建築鋼ぐい基礎設計施工規準・同解説、1963, pp. 30~33
- 13) 9) に同じ, pp. 360~362
- 14) 1) に同じ, pp. 388~395
- 15) American Petroleum Institute: API Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms, *API RP 2A 15th ed.*, 1984, pp. 47~50
- 16) 1) に同じ, pp. 377~388
- 17) Duncan, J. M. and Chang, C-Y: Nonlinear Analysis of Stress in Soils, *Jour. of SMFD, ASCE*, Vol. 96,

No. SM5, 1970, pp. 1629~1653

18) 高橋邦夫, 春日井康夫: 砂地盤の横方向反力に対す

る杭幅の影響, 港湾技術研究所報告, 第26巻第2号,

1987, pp. 437-464

港 湾 技 研 資 料 No. 660

1 9 8 9 ・ 1 2

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
 横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 奥村印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.