

HORIZON

# BRIDGE



未来 FRONT

鋼管杭、海を渡る  
古宇利大橋と琉球石灰岩層

KEY WORD

古宇利架橋における琉球石灰岩層の支持力特性について

TECHNICAL NOTES

バイブロハンマ工法の設計と施工

67



鋼管杭協会

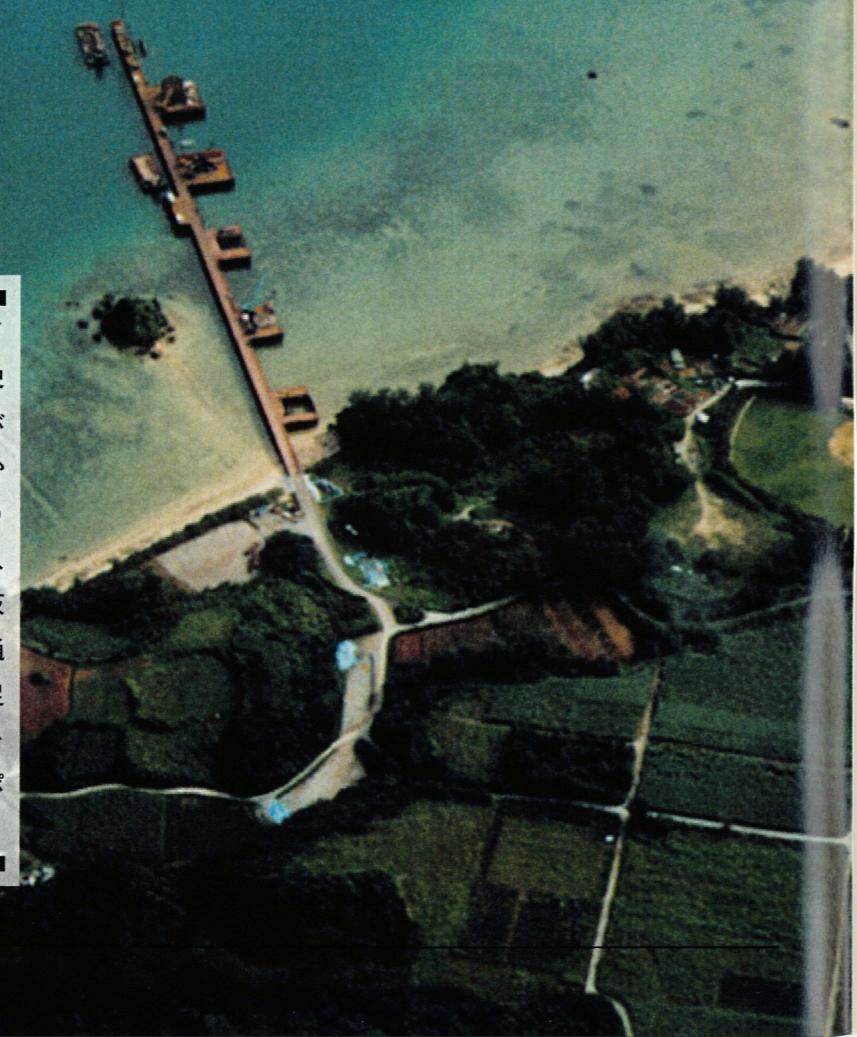
ホームページ <http://www.jaspp.com>

# 未 来 FRONT

## 鋼管杭、海を渡る。

### 古宇利大橋と琉球石灰岩層

2000年7月に開催される先進国首脳会議という一大イベントで「万国のかけ橋」を務めようとする沖縄。歴史と時代の交差点となるこの地に、全長約2kmにもおよぶ離島架橋が誕生する。沖縄の限りなく碧い海のただなかを、ただひと筋に走る「海の道」。琉球石灰岩層という独特の地盤に建設されるこの長大橋の足元を支えるのは、鋼管杭基礎と鋼管矢板基礎である。しかもここでは石灰層に対して摩擦杭的に用いられるといったこれまでの通念を打ち破る新たな設計思想が採用されている。その足元に横たわる琉球石灰岩層にスポットを当てつつ、海を渡って神の島・古宇利を結ぶ離島架橋の建設状況をレポートしてみよう。



### 離島を結ぶ橋

古宇利島には、聖書のアダムとイブを連想させる人類発祥譚がある。……むかしこの島には裸の少年と少女が住んでいて、天から与えられる餅を食べて何不自由なく暮らしていた。しかし彼らが「蓄える」ことを覚えたために、天の神は餅を降らすのをやめてしまい、彼らは苦しんで労働せねばならなくなつた。そうこうして漁労に勤しんでいたある日、二人は海辺で情を交わす儒艮を見つけて子づくりの意味を知った。そうなると互いに裸であることが恥ずかしく感じて、クバの葉で体を隠したという。やがて二人の子孫が増えて沖縄の島々に広がっていったというのだ。

太平洋戦争末期、アメリカ軍の沖縄本島西岸部上陸・首里占領の後、解散を命じられた学徒隊の一部が今帰仁（首里の北

約60km）をめざして歩いたという話はかかる「ひめゆりの塔」のストーリー中にも登場する。古宇利島はこの今帰仁村に属する小さな島である。村は沖縄本島中央部あたりから北西方向に突き出した突端部に位置しており、その北側に小さく丸い古宇利島が浮かんでいる。この島が今回の主要な舞台である。

今帰仁村の南隣は来る7月に開催される九州沖縄サミットの主会場となる名護市である。名護市といえば、米軍の普天間基地移転先に決定し、ある意味で日本と世界のあり方を象徴するような事象が集中している場所とも考えられるだろう。

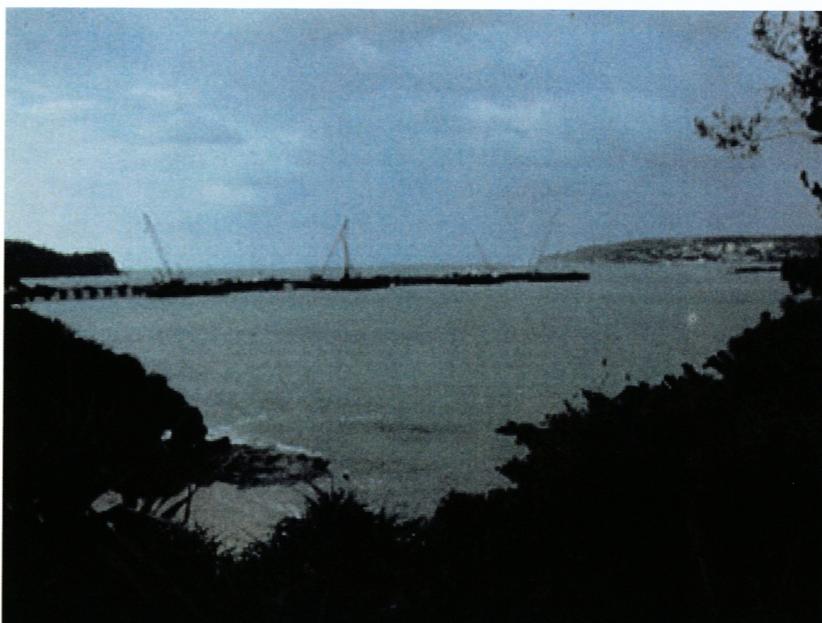
古宇利島は全周約8km、面積約3.12km<sup>2</sup>のいわゆる離島である。島への便は現状、1日5便のフェリーと自家用船のみ。こうした地勢も手伝ってよりいっそうの高齢化も進みつつある。交通の流れを確保

し、将来にわたって人々が島を暮らしの場としていくうえでは、島を陸路でダイレクトにつなぐことが欠かせないと考えられ、架橋の要請が出されてきた。

悲願を遂げるべく、平成5年から今帰仁村の村道事業として、お隣り名護市に属する屋我地島を経由し、古宇利を陸路で本島と結ぶ計画が動きはじめた。

技術検討委員会における予備設計などを経て、平成8年には県道事業に昇格し、実施設計が進められた。

検討の結果、古宇利をつなぐために浮上してきた案は、延長2,020m（橋梁部1,960m、埋立60m）という長大な離島架橋だった。海上に設置される橋脚数は24基に達し（他に橋台2基／うち航路部の6基が鋼管矢板基礎、それ以外の標準部が鋼管杭基礎）、まさしく海を渡る橋である。



屋我地から古宇利を望む。



ウンジャミ（海神祭）旧暦7月盆の後の亥の日に古宇利で行われる。祝女（のろ）による神事、船漕ぎ競技などが行われる。



古宇利島遠景。



打設が完了した航路部の鋼管矢板基礎。琉球石灰岩層を支持地盤としている。

「通念」を疑つてみる、そこから新しい道が始まる。

### 石灰岩層を支持地盤にすることは可能か

珊瑚礁起源の石灰砂礫が堆積する沖縄の地でこれだけの大きな橋を考える場合に、必然的に持ち上がってくるのが、基礎の支持地盤の問題である。琉球石灰岩層といわれる沖縄特有の地盤は、生物活動の遺産であるだけに50~60万年前の気候の変化を映して、不均質な層が短い間隔で交互に重なっている。

琉球石灰岩層を支持層にすることを想定した場合、杭の先端支持力のみでは十分な数値が得られない。基礎杭によって十分な先端支持力を得ようと考えれば、琉球石灰岩層を打ち抜いて、その下の基盤岩層まで杭を入れるというのがこれまでの常道だった。だが古宇利大橋の場合その方法を採用



古宇利大橋の完成予想図。



仮桟橋を足場として工事が進められている。



沖縄最大の観光スポットである玉泉洞の鍾乳石。琉球石灰岩層も同様の再結晶化によってできたと考えられる。この景色から連想すれば不均質で空隙の多い層であることが容易に想像される。

すると、橋脚によっては杭長が100m近くになってしまい、コスト面・施工面ともに厳しい見通しとなる。

琉球石灰岩層は、珊瑚をはじめとする生物起源の石灰質が再結晶化した石灰岩部分と、泥や赤褐色土（N値がゼロに近い部分もある）などの不均質な層が入り交じっていて、単純な打ち込みでは、杭を健全なまま目的の層まで入れることもきわめて困難だと考えられた。したがって目的の深度近くまでアースドリルで穿孔しておいて杭を下ろすという施工法をとることになるが、深度が深くなると、不均質な層が障壁となって真っ直ぐな穴を掘ることさえ難しかった。

そうしたことから、杭の先端支持力のみではなく周面摩擦力にも期待することができないか、という問い合わせがなされた。

石灰質地盤の多い欧洲などでは石灰層を支持地盤とした建築物の実績も多い。そのなかでも、石灰砂礫層では周面摩擦力には期待できないという考え方方がこれまでには一般的だったのである。

石灰砂礫層で摩擦を想定した設計は本当にありえないのだろうか？

たしかに星砂にみられるような微細な立体構造や内部空隙をもった生物起源の堆積物の場合、小さな応力でも微細構造が破



鋼管杭基礎打設が終了し、配筋作業が進む橋脚。



載荷試験の計測ポイントのひとつ。地層に応じた代表的ポイントを選んでデータが集められた。

壊されて体積減少が起こり、摩擦が働きにくくなるというメカニズムは容易に納得がいく。だが再結晶化し一部岩石化した琉球石灰岩層でも、まるで同じ結果になると考えていいものなのか。

### 琉球石灰岩層の摩擦力を実証した体系的載荷試験

この問い合わせに答えを出したのは、各種載荷試験による計測結果だった。現実のデータが、通念を破ったともいえよう。試験の数値は、予想していた以上に大きな摩擦力が働いていることを明らかにしていたのである。琉球石灰岩層は、再結晶の過程でも

との生物堆積物とは別な性質のものに変化していたのだった。

鋼管杭の周面摩擦力に期待できる。それが分かったことも大きかったが、計測数値はさらに設計上、大きな合理化を可能にした。予想されていたよりも、鋼管と琉球石灰岩層の摩擦は大きく、当初は鋼管と場所打ちの複合杭形式とするはずだったものが、鋼管杭のみで十分に支持力を得られることが分かり、さらに杭長もより短くすることができるという結果が得られた。摩擦力を高めるために使用することになっていたグラウトさえも不要との結論が得られた。

むろん古宇利大橋でこうした結論が得られたからといって、すべての石灰砂礫層で摩擦力に期待していいということにはならず、あくまでもケースごとに異なるものだと考えられる。ただ、今まで石灰層とひとつに括られてきたものが、けっして同じ地盤特性を示すわけではないことが明確にされたのである。

### 平成15年度を完成目標として

古宇利大橋の完成予定は、取り付け道路部分も含めて平成15年度の見通しとなっている。下部工は平成9年度後半から建設が始まり、13年度中にも終了する予定となっている。取材時点（平成11年11

### ●インタビュー

#### 琉球石灰岩層とはなにか？

琉球大学農学部生産環境学科  
新城俊也教授に聞く



琉球石灰岩層は、60~70万年前に堆積した珊瑚礁の石灰分が雨水などの浸透によって溶出し、再結晶化することで形成されました。

氷河期には南西諸島全体が浅い海で、この時期に珊瑚礁が発達していましたが、間氷期に氷が溶けて海面が上昇すると珊瑚礁は海面へ向けて成長し、再び氷期になると海面が下がって珊瑚礁が陸になり雨水を受けて再結晶していました。玉泉洞（沖縄の観光スポットとして有名な鍾乳洞）なども、そうして形成されました。

琉球石灰岩層は古い順に、①那覇石灰岩層②読谷石灰岩層③牧港石灰岩層と大きく3つの層に分けられます。首里あたりでは地殻変動によって地層が隆起したために、高い土地に古い那覇層があり、下のほうに新しい層がありますが、古宇利はたまたま海底に3つの層が古い順に堆積しています。

そうしたことから、かたい安定層まで打ち抜くことはあきらめ、杭の先端支持力のみでなく周面摩擦力に期待する方法がとれものだろうかという発想が出てきました。しかし、「石灰砂礫層に摩擦力は期待できない」というのは世界的通念です。欧洲などでは石灰層がごくふつうの地盤ですから、これまでその経験則が常

は砂礫状であったり、空洞があたりするわけです。また大きくは3つの層ですが、5万年おきくらいの小さな変動も多数あって、小さざみな変化が何層にもきざまれています。

古宇利でも硬軟交互に入り交じった層の中で、支持層として十分な厚み、あるいは横の広がりのある層を探さねばなりませんでしたが、これがなかなか難しい状況でした。また硬軟のある層では、杭を傷めずにどう打ち込むかという問題も出てきます。施工時に「ちょうどちん座屈」を起こしてしまっては役に立ちません。杭が長くなればなるほど、そのリスクは大きくなりますし、離島架橋のような多数の橋脚を必要とする場合には、コスト的にも大変なことになります。

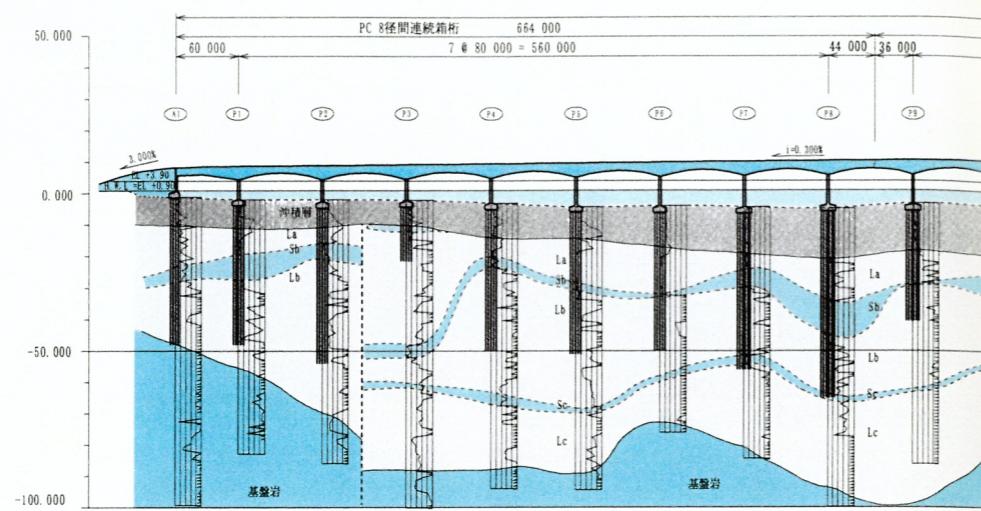
そうしたことから、かたい安定層まで打ち抜くことはあきらめ、杭の先端支持力のみでなく周面摩擦力に期待する方法がとれものだろうかという発想が出てきました。しかし、「石灰砂礫層に摩擦力は期待できない」というのは世界的通念です。欧洲などでは石灰層がごくふつうの地盤ですから、これまでその経験則が常

識とされてきました。有孔虫など立体構造をもつ生物からできた石灰層は、その構造が簡単に破碎して体積が減少するため、摩擦力が働きにくい。そのことがよく知られていたわけです。

それが今回、古宇利で連続動的載荷試験を行った結果、同じ石灰砂礫層でありながら琉球石灰岩層では大きな摩擦力が出てているということが分かったのです。琉球石灰岩層は再結晶化を経て、広く知られる石灰質堆積物の摩擦力とは違ったものになっていたということですね。「石灰砂礫層に摩擦力は期待できない」という先入観さえなければ、もっと早い時期に古宇利大橋のような方法が採用できていたはずです。琉球石灰岩層でも、その性質によっては十分に摩擦力が得られることが明確になったわけで、今回の載荷試験の意義は大きいといえるでしょう。



### 鋼管矢板基礎。



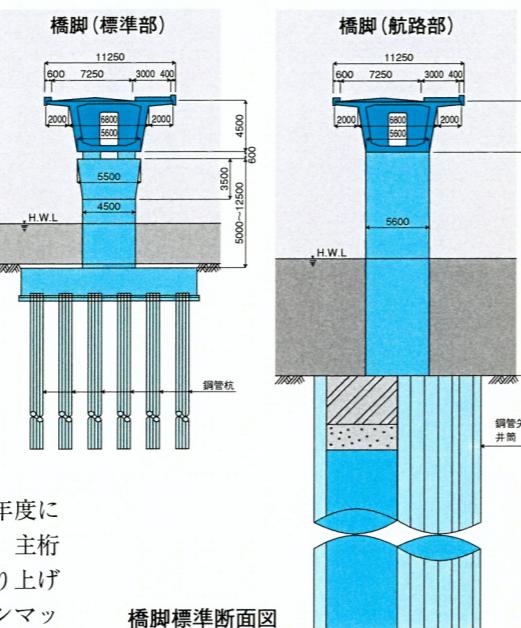
古宇利大橋側面図

月)では、2橋台24橋脚のうち10橋脚が着工済みであり、一部で橋脚部分の配筋、コンクリート打設が終了していた。

鋼管はSKY400、 $\phi$  1000 ( $t = 14\text{mm}$ )を中心として、SKY490、 $\phi$  1000 ( $t = 16\text{mm}$ 、 $19\text{mm}$ 、 $22\text{mm}$ )、SKK400、 $\phi$  1000 ( $t = 14\text{mm}$ 、 $19\text{mm}$ 、 $22\text{mm}$ )が採用されている。

杭長が約70～80mをこえるP17、P18あたりでは、22mm厚のものが多く採用されている。

上部工は下部工の進捗と途中から並行し、平成11年度後半から14年度にかけて進められる予定になっている。主桁はPC箱桁形式で、以前本誌でも取り上げた木曽三川橋と同じくショートラインマッチキャスト方式（既設セグメントをそのまま



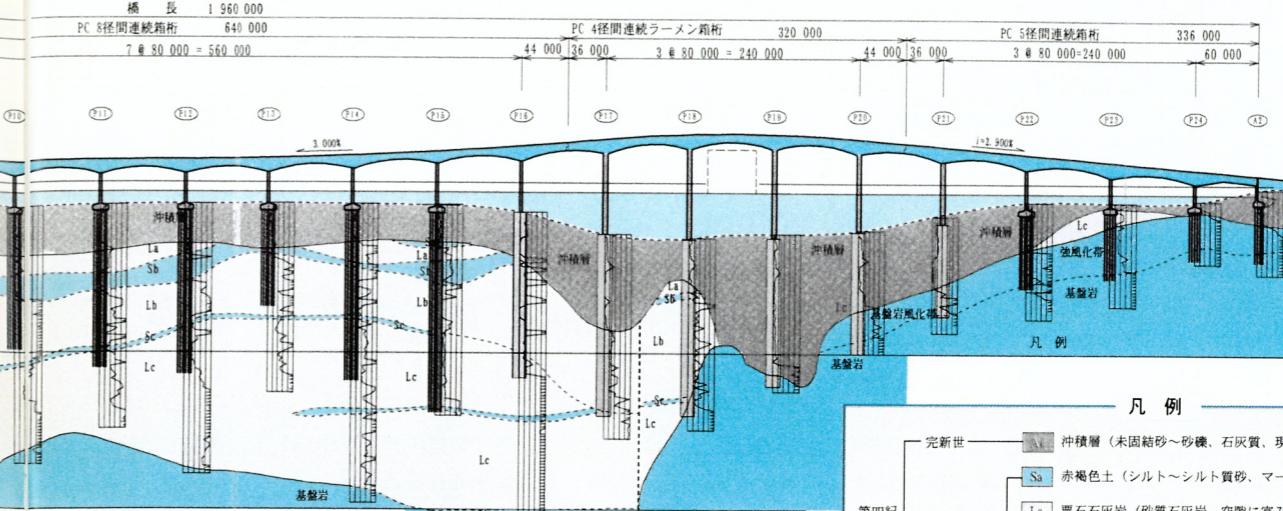
橋脚標準断面図



鋼管杭基礎。



橋梁基礎建設狀況



古宇利島から見た工事の様子。

ま次のセグメントの型枠の一部として用いる)によってセグメント単位でつくれられ、連続ケーブルの緊張によって一体化される。

活力ある沖縄を支える「かけ橋」

名護市側から屋我地島までは屋我地大橋を通って車で抜けられるが、この間は小島を経由していることもあって、ほとんど海上を通過している感じはない。古宇利大橋のほうは、仮桟橋の上に立ってみると、さすがに約2kmというスパンが、海のまったく中に立っているという気持ちにさせる。

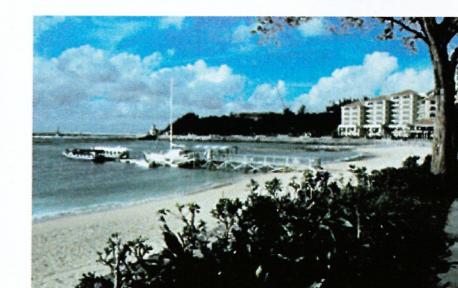
……海の碧さが違う、とは沖縄を訪れた多くの人が証言するところであるが、今帰仁村から古宇利島あたりの海も例にもれず、また格別に碧い。この碧さは水の清浄さもさることながら、海の下地になる砂の色に負うところが大きい。珊瑚礁で生まれた石灰質の砂がパックスクリーンとなって海水の透過光を吸い、淡い緑を含んだ微妙



建設由の万国津梁館



万国津梁館の完成予想図



部瀬名ビーチからサミット主会場を見渡す。遠方に見える岬の上が万国津梁館。

出すのである。絵の具の色に近ずならターコイズ・ブルーである。ら海を見ると、いくつかの小島の先の沖合一面を、白波がこちらをとりまくように立っている。一つの先端があのあたりにある事務所の東浜主任から教えていこの近くで、珊瑚礁再生の研究いるという。

一尚氏王朝の時代につくられた「万国津梁の鐘」に因む命名である。その銘文には、三韓（朝鮮）、大明（中国）、日墾（日本）と深い関係を保ちつつ「万国津梁（かけ橋）」として繁栄する当時の琉球のあり方が謳われている。万国津梁館という名称は沖縄が「世界のかけ橋」となる決意をその歴史的アイデンティティのうちに求めようとしていることを示しているよう

光明媚な土地柄だが、これまで  
らも外からも、船を使わねば交  
なかつた。快適な環境と観光資  
にはある。島に住む人々にとっ  
ちやつてくる人々にとつても古  
陸続き」になることの利便は、  
う。

冒頭でも触れたように九州沖縄サミットの主会議場は、古宇利のお隣りにあたる名護市に設けられる。市内の部瀬名岬に建設が進む施設には「万国津梁館」という名称が与えられることになっている。15世紀、3つに分かれていた琉球を統一した第一



# Key Word

## 古宇利架橋における琉球石灰岩層の支持力特性について

沖縄県北部土木事務所 主任技師 東浜 安邦

### 1. はじめに

復帰前から琉球石灰岩層を支持層とする杭基礎工事が数多く実施されてきたが、それは石灰岩層の特異性との苦闘の歴史でもある。顕著な事例は「泊大橋臨港道路」の杭基礎工事において24橋脚の施工に6カ年もの年月を要している。沖縄県においては、今後の離島架橋等の重要構造物建設にあたり、沖縄の特殊土の一つである「琉球石灰岩層」の支持力の解明と合理的設計法の確立が望まれている。そのため、古宇利架橋においては「古宇利大橋基礎工検討委員会」を発足して、2カ年にもわたり審議を進めてきたところである。以下にその概要を紹介する。

### 2. 当初計画

#### 2-1 支持層および基礎形式の選定

古宇利大橋側面図（p5～6参照）に示す地盤条件により、古宇利島側標準部の基礎杭工法として、経済性および施工性から鋼管杭基礎を選定したうえで、鋼管杭施工は原則的に打込み方式とし、打込み不可能な所については、中掘工法等の補助工法を検討した。また、支持層をN値30以上の層が5m以上連続している層とし、コストダウンを図るために琉球石灰岩層を積極的に支持層とした。なお、支持層および杭基礎形式の選定に当たっては、固結度の高い中間薄層の存在、深度方向のN値のバラツキ、支持層の連続性の問題に留意し、支持層深さ別の工費比較より、下記の3工法が選定された。

- ①支持層まで打込みが可能と思われる土層（支持層が-20m以浅）：打撃工法による鋼管杭基礎
- ②支持層まで打込みが不可能と思われる土層（支持層が-30m～40m程度）：補助工法併用鋼管杭基礎
- ③支持層まで打込みが不可能と思われる土層（支持層が-40m程度以深）：複合杭

#### 2-2 支持力特性値の設定

琉球石灰岩層の杭基礎における支持力特性値の設定に当たっては、瀬底大橋・石垣港橋梁等の載荷試験および設計実績を考慮して以下のとおりとした。  
 ①最大周面摩擦力度  $f_u = 1.0 \text{ (tf/m}^2)$  【打込み杭・中掘グラウト杭】  
 ②先端極限支持力度  $q_u = 20 \text{ N (N} \leq 32) \text{ (tf/m}^2)$

### 3. 載荷試験

#### 3-1 載荷試験概要

古宇利大橋側面図（p5～6参照）に示

した地盤状況から、打撃工法をP3、補助工法併用打撃工法をP9、複合杭をP8として載荷試験の代表橋脚を選定した。載荷試験は、静的押込み試験を基本としてP3橋脚は急速載荷試験を県内で始めて採用した。また、複合杭計画ピア（P2・P5・P7）においては、琉球石灰岩層の周面摩擦力・先端支持力の深さ方向の変化を確認する目的で連続動的載荷試験を0.5mピッチで実施した。なお、P9橋脚の試験杭打設は、P8およびP9反力杭の施工試験の結果、固結中間層が打ち抜けたため、鋼管打込み工法へ変更した。P9橋脚載荷試験杭の仕様と土質構成を図-1に示す。

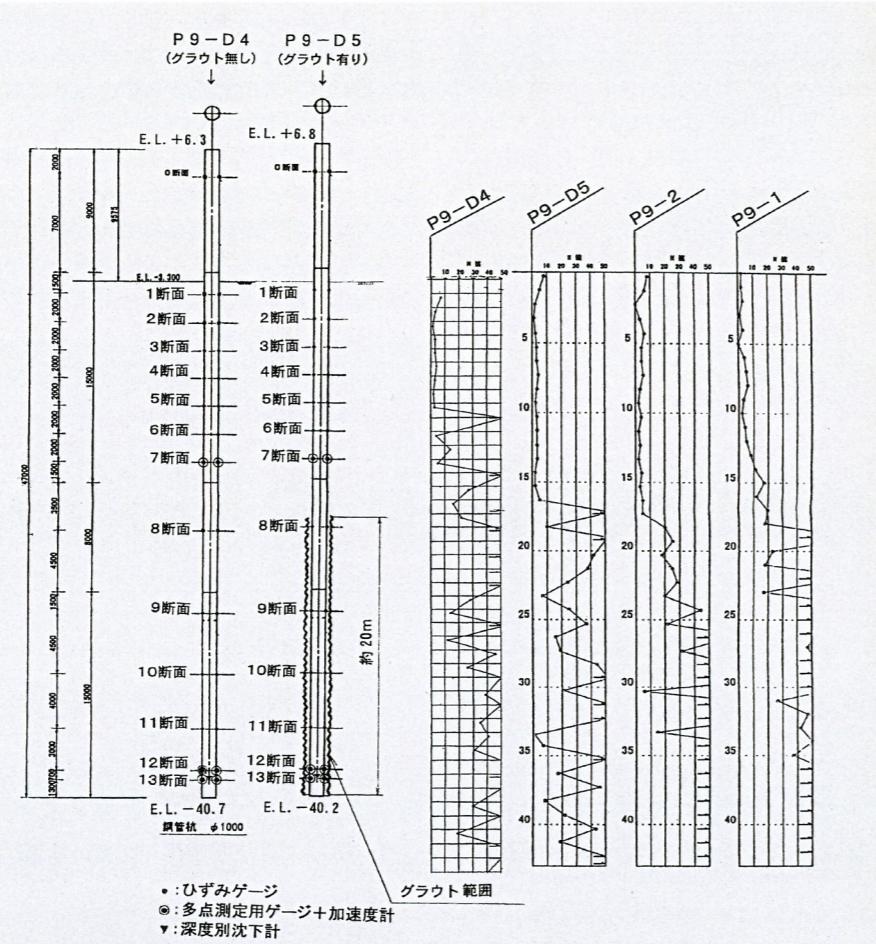


図-1 P9橋脚載荷試験杭の仕様と土質構成

表-1 古宇利大橋鋼管打撃杭工法に対する地盤定数のまとめ  
(琉球層群 La層・Lb層)

支持力の区分	当初設計	静的載荷試験(P9)	急速載荷試験(波形マッピング解析)(P3)	動的載荷試験(多点測定解析)(P2, P5, P7)	連続動的載荷試験(P2, P5, P7)	実施案
先端支持力(tt)	N値30以上が5m以上連続している層とし、3.5D根入れを想定。設計実績より20NAI(N≤32)	200tf以上(N=50)	P3: 210～520tf(N=50) P9: 200tf以上(N=40)	P3: 210～520tf(N=50) P9: 200tf以上(N=40)	7t～247tf(深度によらず良好な地盤を期待できる値として、載荷試験結果を参考にして決定)	
周面摩擦力度(押込み)(tf/m <sup>2</sup> )	設計実績より1tf/m <sup>2</sup>	0.29N～0.36N(平均N=32に対して9.3～11.5tf/m <sup>2</sup> )	0.32N(平均N=32に対して10.2tf/m <sup>2</sup> )	P3: 0.23N以上 P9: 0.34N以上	0.26N～0.33N(セッタアップ係数1.5～1.9考慮)	0.3N(≤15)(静的および急速載荷試験の平均値を採用)

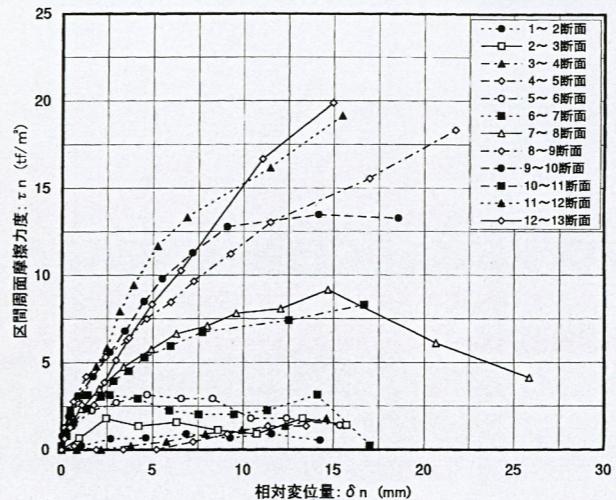


図-2 周面摩擦力度～相対変位曲線(P9グラウト無し)

### 3-2 試験結果

#### 1) 区間周面摩擦力度～相対変位分布曲線

P9橋脚グラウト無し杭の区間周面摩擦力度～相対変位分布曲線を図-2に示す。琉球石灰岩層（La層・Lb層）において、当初設定した1 (tf/m<sup>2</sup>) に比べて約10 (tf/m<sup>2</sup>) と高い値を発現しており、道路橋示方書での砂質土の最大値15 (tf/m<sup>2</sup>) を越えている区間もある。

#### 2) 先端極限支持力度

P7の連続動的載荷試験における各深度ごとのN値、打撃回数、先端支持力、周面摩擦力の結果を図-3に示す。同図から琉球石灰岩層においては、深度ごとの先端支持力が0～200tfと激しく変化しており、N値との相関が弱いのが読みとれる。

### 4. 地盤定数のまとめ

今回の古宇利大橋での琉球石灰岩層における鋼管打撃工法の最大周面摩擦力度  $f_u$  は、当初設計で用いた1 (tf/m<sup>2</sup>) を大きく上回り、8 (tf/m<sup>2</sup>) 以上の値が確認された。上記の各種載荷試験結果をもとに、古宇利大橋鋼管打撃杭に対する設計地盤定数を表-1のとおり設定した。最大周面摩擦力度  $f_u$  が0.3N (tf/m<sup>2</sup>) とかなり大きく期待できることから、杭長を短くでき、経済的な設計が可能となった。また、先端支持力は琉球石灰岩層の深度によらず期待できる値として100tfとした。

### 5. 固結中間層の打抜き

当初、P9およびP8橋脚における琉球石灰岩層（La層・Lb層）の固結中間層は、打抜きが不可能と判断して中掘補助工法・複合杭工法を採用した。施工試験でそれ

端増厚（ $1.5t_0 = 19\text{mm}$ ）部の長さを2Dから7Dへと変更した。

### 6. おわりに

$f_u$  が0.3Nと大きく取れたことにより複合杭を鋼管打込み杭に工法を変更し、現在、修正設計を終えて順次施工を進めている。古宇利架橋においては、 $f_u$  の評価が大きく取れ幸いしたが、今後の琉球石灰岩層における杭基礎の課題として次の事があげられる。  
 ①完全支持杭における支持層の定義、  
 ②薄層支持（不完全支持）での可能性、  
 ③最大周面摩擦力度  $f_u$  は、県内地域によって異なる可能性があること、  
 ④杭先端極限支持力度  $q_d$  の定量的な評価等である。

いづれにしても、その評価をするためにも各種載荷試験を積極的に進めて県内地域ごとのデータの収集が必要である。また、海外では石灰岩層の支持力特性の研究が精力的に行われており、その答えの一端を示す研究成果も見受けられる。今後は、海外の研究事例を参考しながら琉球石灰岩層の調査・試験を押し進める必要がある。

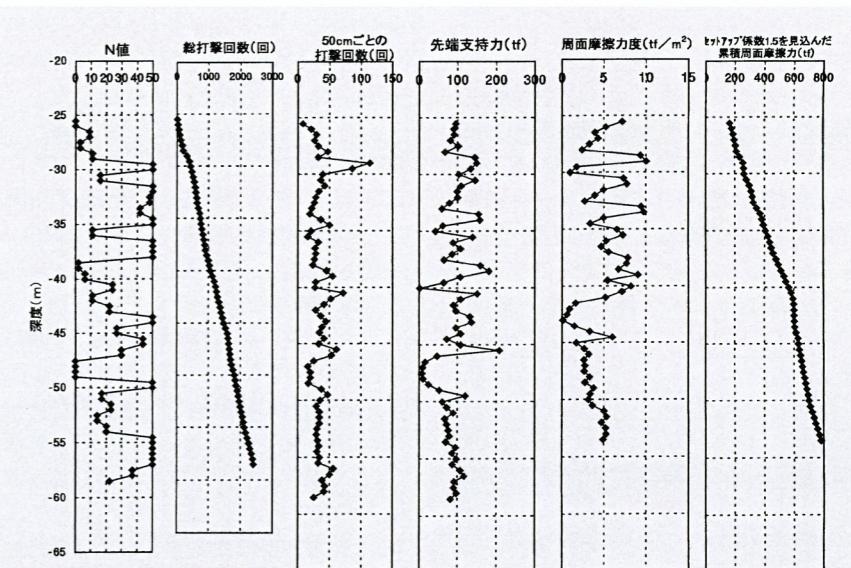
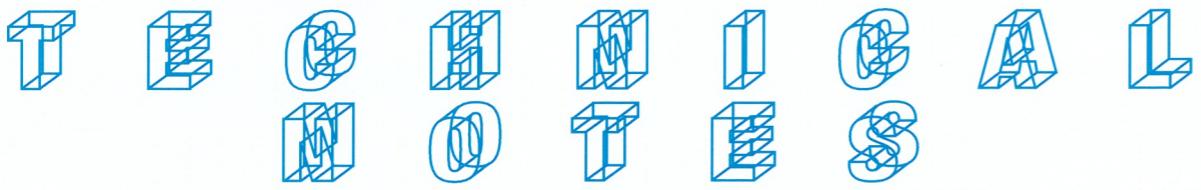


図-3 連続動的載荷試験結果(P7)



# バイブロハンマ工法の設計と施工

鋼管杭協会 振動工法研究委員会

## 1. はじめに

現在、バイブルハンマを用いる振動工法は、鋼矢板、H鋼杭のみならず、近年のバイブルハンマの大型化により、钢管杭や钢管矢板の施工に広く利用される施工法となっている。

また、振動工法の施工は効率的かつ利便性が高く、経済性に優れる面を多数持つあわせている。これにより、昨今では支持杭として利用されるケースがあるものの、本工法の設計・施工管理に関して記述されている示方書・指針は際めて少なく、使用に際しては載荷試験等による支持力確認を実施しているのが現状である。

この様な現状を踏まえて、今回、NNK、川崎製鉄(株)、(株)クボタ、新日本製鐵(株)、住友金属工業(株)、(株)トーメック、調和工業(株)では、建設省土木研究所のご指導のもと、平成9年1月より振動工法の施工管理、支持力評価に伴う載荷試験を進めてきた。本論では、今までの成果を紹介する。

## 2. 振動工法の概要

振動工法は钢管杭をバイブルハンマにて打ち込む工法である。本工法の打込み原理は、杭表面に発生する土の周面摩擦抵抗をバイブルハンマの振動力で低減させ、杭先端抵抗を上回る機械の起振力とバイブルハンマ重量、杭材重量によって、杭を貫入させる工法である。

本工法は図2.1に示す通り打撃工法同様、打込み工法として位置づけられ、補助工法を用いたウォータージェット併用バイブルハンマ工法も同様の位置づけと考え

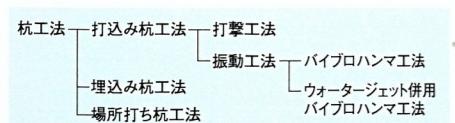


図2.1 施工法の分類

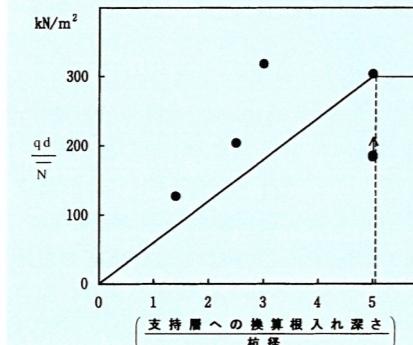


図3.1 先端支持力係数

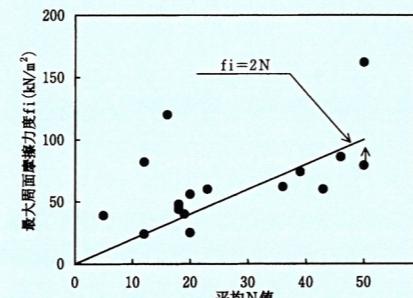


図3.2 砂質土の周面摩擦力度

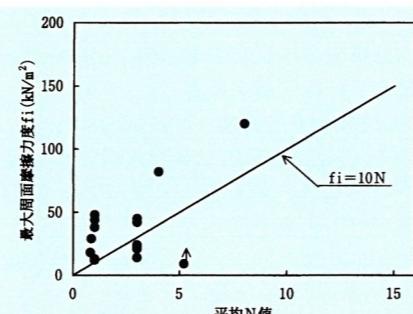


図3.3 粘性土の周面摩擦力度

## 3. 振動工法による杭の設計

振動杭工法による杭の設計は、打撃杭同様先端支持力と周面摩擦力とに区別される。当委員会は今までに6例の鉛直載荷試験を実施した。また、この内2例は打撃工法による杭の載荷試験を合わせて行い、バイブルハンマ工法との比較を実施した。

### ①先端支持力

図3.1に先端支持力係数と換算根入深さとの関係を示す。図中に打撃工法の支持力ラインを合わせると特殊土のプロットを除いた載荷試験データはラインの近くに位置する。また、支持層は砂地盤、砂礫地盤の2種類を実施しているが、今までの載荷試験結果から地盤による先端支持力の差異は認められない。

### ②周面摩擦力

周面摩擦力度は砂質土、粘性土に分けて評価した。

振動工法は、先に述べた通り、振動に

よって周面摩擦力を打設時に低減させるため、評価方法は、打設後一律の養生期間を取り試験を実施した。養生期間は、6例共3週間とした。図3.2、図3.3にそれぞれ砂質土、粘性土の周面摩擦力度と平均N値との関係を示す。砂質土、粘性土ともに若干のバラツキが認められるものの、平均して打撃工法の設計摩擦力度を上回り、良い結果を示している。また、打設時の振動によって一時的に乱された周面摩擦力度の回復は、砂質土より粘性土の影響が少ないと考える。

### ③支持力算定式

上記の結果を踏まえ、バイブルハンマ工法の支持力式を式3.1の通り提案する。

$$R_u = q_d \cdot A + U \cdot \sum L_i \cdot f_i \quad \text{式3.1}$$

ここに、

$R_u$ : 地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)

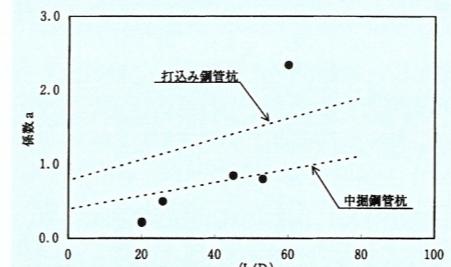


図3.4 係数aと根入れ比L/D

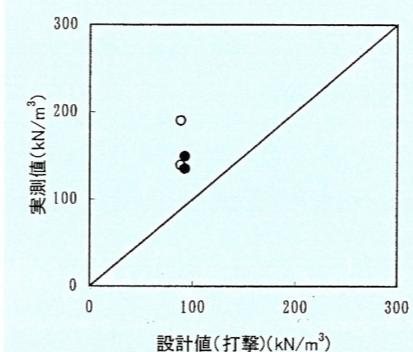


図3.5 軸方向バネ定数の実測値と設計値

A : 杭先端閉塞面積 ( $m^2$ )  
U : 杭の周長 (m)  
Li : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)  
fi : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力 ( $kN/m^2$ )

杭先端の極限支持力度は、打撃杭同様の算定方法を採用し、道路橋示方書記載の先端地盤の極限支持力度の算定図を基に算出する。杭周面に働く最大周面摩擦力度の算定において打撃工法同様、砂質土2N ( $\leq 100$ ) ( $kN/m^2$ )、粘性土C又は10N ( $\leq 150$ ) ( $kN/m^2$ )を採用した。

### ④杭の軸方向バネ定数

バイブルハンマ工法によって打設された杭の軸方向バネ定数は、打撃杭工法、中掘杭工法などの既往の推定式によらず、工法独自の推定式を定める必要がある。載荷試験による杭頭荷重P～杭頭沈下量Sの関係は、杭頭沈下量が比較的大きくなる場合がある一方、打込み杭工法の一般的な沈下傾向に近い事例も確認された。従って、試験結果を図3.4に係数aと根入れ比L/Dの関係で示すとデータにバラツキがあるものの、バイブルハンマ工法の軸方向バネ定数は現段階において中掘工法に近い傾向を示している。

### ⑤杭の軸直角方向バネ定数

杭の軸直角方向バネ定数は、2例の水平載荷試験を行い検証した。水平載荷試験

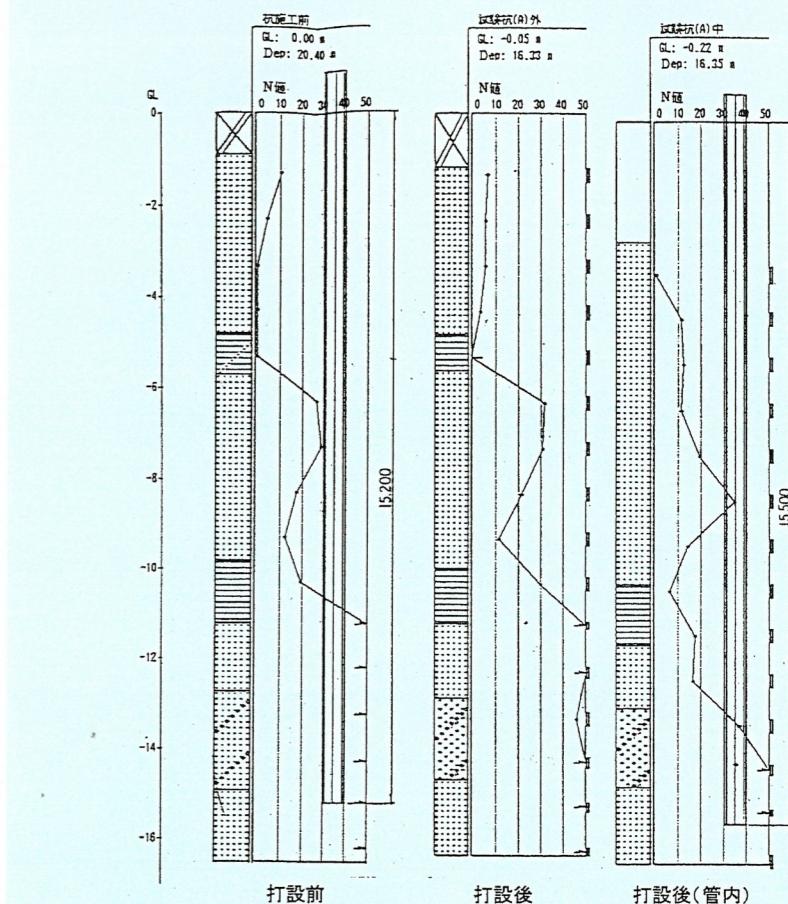


図3.6 打設前、打設後の地質調査結果

によって得られた実測値とChangの式による設計値と比較した結果を図3.5に示す。2例の試験結果全てが設計値を上回る結果を得た。ここで、杭打設前と打設後のボーリング結果を図3.6示す。事後ボーリングは、杭側面から30cm距離を取った位置で行った結果、N値の推移は杭打設前と酷似しており、振動による杭周辺地盤の影響はほとんどないことが、本結果からも裏付けられる。

## 4. 施工管理

振動工法の施工管理は、①バイブルハンマのモータ出力（電流値・電圧値より算出）、②打設管理、③動的支持力推定式の3項目に大別される。

### ①バイブルハンマ選定基準

振動工法を採用するに当たり、第一義的に重要な項目として、バイブルハンマの機種選定があげられる。適正な機種選定がなされない場合、钢管チャッキング付近の杭材の破断、設計深度まで貫入が不可能、長時間の打設による周面地盤の破壊並びに周面摩擦力度の低下等の原因を招くおそれがある。したがって、振動工法の打設は、

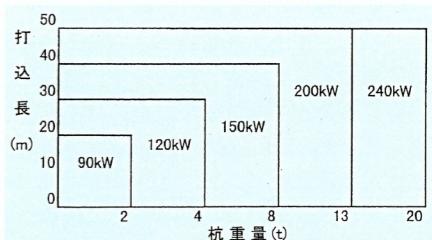


図4.1 バイブルハンマ選定基準

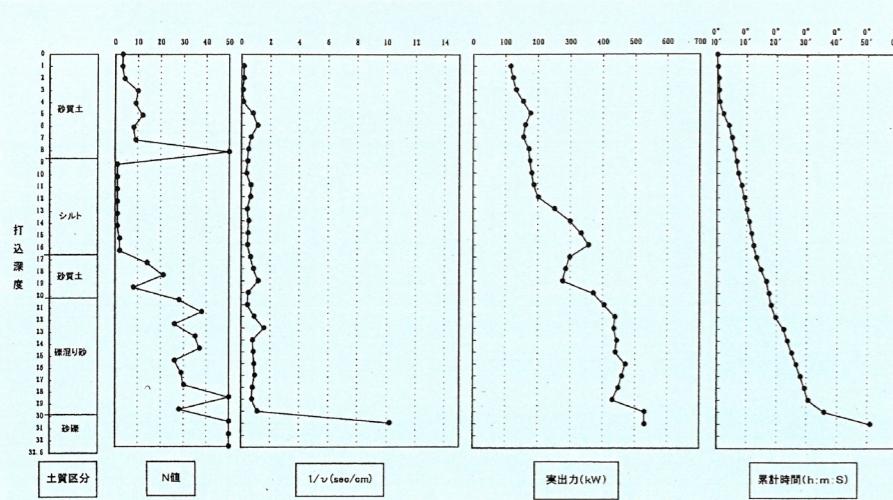


図4.2 打設時測定状況

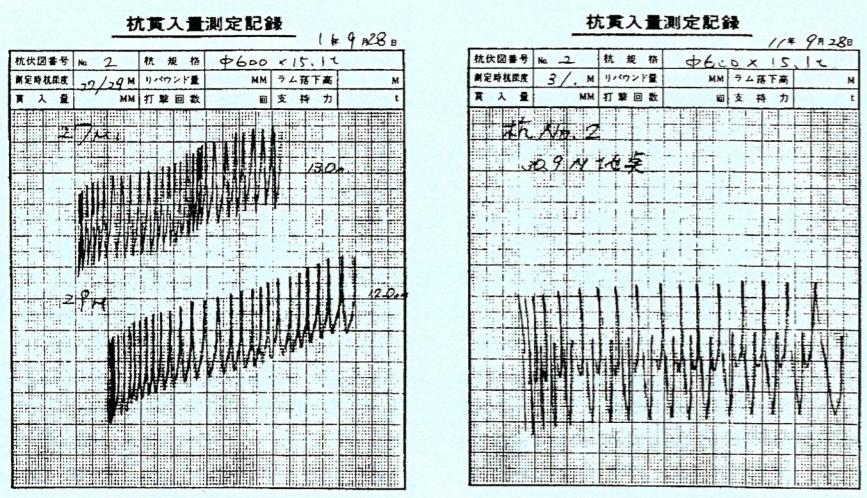


図4.3 打止め時の杭の挙動

この4項目は支持層に到達するまで1m毎に測定し、支持層への打設から打止めまでの間は10cm毎に測定し記録する。

杭の貫入速度は、支持層へ貫入開始から低下するため、杭打止めに際しては貫入速度が1cm/秒以下であることが望ましい。杭の施工時間については、先に述べた通り長時間の振動打設は周辺地盤の破壊を招くため、適切な施工時間で打設することが必要となる。当委員会は施工性試験、載荷試験を実施するに当たり、杭1本当りの施工時間を1時間程度までと制限を与えた打設を行った。また、前項のバイプロハンマ選定基準によって選定したハンマにおいても、施工時間が1時間を超えると予想される場合は、適切な時間で打設完了できる機種に変更を行った。

バイプロハンマのモータ出力は、地盤によって変動する負荷電流値を計測し、モータ出力を算出する。これは、施工前にボーリング調査した結果とモータ出力の上昇傾向を比較して杭先端が支持層へ到達した深度を現場で確認することが出来る。ここに水島地区で行った杭打設状況を図4.2に示した。

打止め決定の判断としては、貫入速度を指標と共に、バイプロハンマの規格である定格電流と打設時の測定電流値を比較した上で打止めを決定する。現在までの施工性試験、載荷試験の経験から設計上の支持力を得るために、定格電流値の150%程度の電流値が発生する傾向にある。

発生振幅は、表4.1に示す空運転時の振

幅と打設時の杭体の発生振幅を計測し比較を行う。振幅はバイプロハンマで杭を打込むにつれ杭周面の動摩擦力によって発生振幅を抑制する働きをする。従って、支持層到達前に定格電流を超える電流が発生する場合、振幅の測定結果から、その原因が先端抵抗によるものか、又は粘性土層等による動摩擦力によるものかを判断する一助とすることが出来る。

杭の打止め時は、打撃工法同様振動工法においても図4.3に示す通り杭体のリバウンドが確認された。

#### ③動的支承力推定式

元来、バイプロハンマは鋼矢板、H鋼杭などに数多く使用され、杭として使用された場合は摩擦杭として設計されてきた。従って、今までに発表されている钢管杭の動的支承力推定式は、摩擦杭を前提とした支承力推定式の構成となっているため、ここでは新たに支持杭としての動的支承力推定式を提案した。

$$R_u = k \times \frac{100P_w}{Vv} + \frac{\bar{N}UL_2}{ef} \quad \text{式4.1}$$

ここに、

$R_u$  : 杭の動的支承力 (kN)  
 $k$  : 補正係数  
 $P_w$  : モータの全消費電力 (kW)  
 $P_w = 1.3 \times I_A \times E \times 10^{-3}$   
 $I_A$  : 電流 (A)  
 $E$  : 電圧 (V)  
 $Vv$  : 杭の変位速度 (cm/sec)

$$Vv = 2 \times Av \times f$$

Av : 振幅 (cm)  
 $f$  : 振動周波数 (cps)

$f = n/60$   
 $n$  : バイプロハンマの振動数  
 $\bar{N}$  : 杭周面の平均N値  
 $U$  : 杭の周長 (m)  
 $L_2$  : 地中に打込まれた杭の長さ (m)  
 $ef$  : 補正係数  $ef = 0.25$

式4.1の右辺第1項は、エネルギーを放出する仕事量と加えられた物質の運動速度 (杭の変位速度)との比によって先端支承力を求めるものである。ここでいう杭の変位速度とは、杭が振動打設中に上下動する周期の下向きの速度をいい、計算によって求められる。変位速度を求める計算式に振幅を代入するが、本来測定振幅を代入することが望ましいものの、機械能力値 (カタログ値)を代入した場合においても計算結果に大きな影響はないことから、現場での簡略化を図るためにカタログ値を代入している。また、式4.1右辺第2項は、周面摩擦力を求める項であり、道路橋示

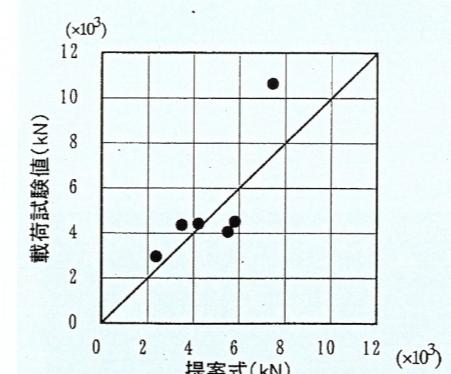


図4.4 極限支持力の比較

表4.2 動的応力測定結果 単位: N/mm<sup>2</sup>

	測定例 A		測定例 B	
	杭頭部	杭先端部	杭頭部	杭先端部
上杭打設開始	70	27	27	6
打止め時	132	84	86	62

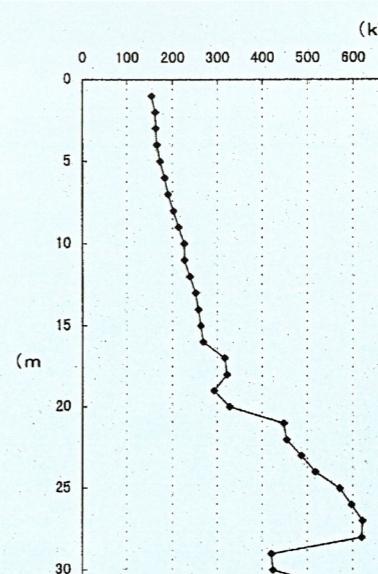


図4.5 モータ出力と動的応力 A現場

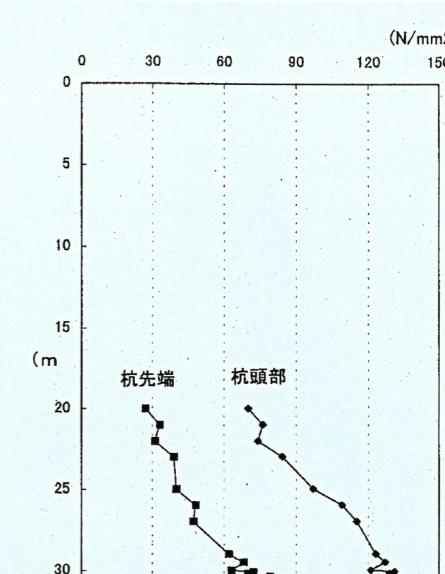


図4.6 振動測定結果

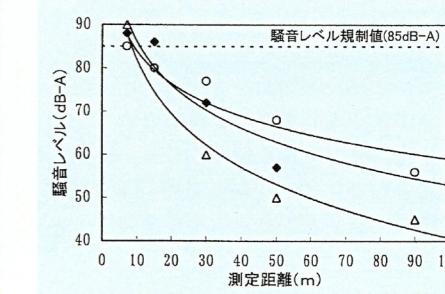


図4.7 騒音測定結果

したと考えている。また近年、コスト縮減の観点より実プロジェクトでの採用事例が増加している環境にあって、本工法の基準化は急務であることから、現在計画中の載荷試験結果を踏まえさらに基準化への精度を高めていくと共に、本工法の普及に努める所存である。

バイプロハンマ工法による騒音の発生源は、バイプロハンマモータの出力音とクレーンの振動音、発電機の稼動音に大別される。ここでは、騒音規制値である85dB-A以下になるための距離減衰は10~15m程度と考える。また、ディーゼルハンマ打撃音の様な高い周波数が発生しないため、人間に対する影響度も低いと考える。

また、本工法を採用するに当たり、近隣への振動・騒音の影響を念頭に入れた上で計画を立案しなければならない。ここで代表的な3例の現場から騒音・振動測定を行った。振動・騒音の発生源の起点を杭打設位置とし、任意に離れた距離での振動測定と騒音測定を実施した結果をそれぞれ図4.6、図4.7に示す。

振動は、対象とする地盤によって振動の

したと考えている。また近年、コスト縮減の観点より実プロジェクトでの採用事例が増加している環境にあって、本工法の基準化は急務であることから、現在計画中の載荷試験結果を踏まえさらに基準化への精度を高めていくと共に、本工法の普及に努める所存である。

#### 【参考文献】

- バイプロハンマ技術研究会 : バイプロハンマ設計施工便覧 平成5年3月
- 高橋健二、赤司有三、土谷正幸、塩津紀男、亀山彰久、斎藤勲 : バイプロ施工钢管杭の支持力式の提案、第34回地盤工学研究発表会、平成11年7月
- 鋼管協会 : 鋼管杭—その設計と施工、平成10年9月
- 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 I共通編IV下部構造編、平成8年12月
- 日本道路協会 : 杭基礎設計便覧 平成4年10月
- 日本道路協会 : 杭基礎施工便覧 平成4年10月

(文責: 振動工法研究委員会 斎藤勲)

## 5. おわりに

钢管杭協会振動工法研究委員会はバイプロハンマ工法の基準化を目的とし、本稿ではその活動成果を紹介した。当委員会では本工法の基準化に向けての骨子は、確立

## ●協会からのお知らせ

### 第34回地盤工学研究発表会



平成11年7月21日（水）～23日（金）の3日間、第34回地盤工学研究発表会が東京ビッグサイト（東京・有明）で開催されました。この発表会は、地盤工学会創立50周年記念事業の一環として行われたため、海外から3名の講演者を招致したのに加えて、展示会も併催するという盛大なものでした。

地盤工学に携わる団体・企業がそろって出展したこの展示会では、テーマパーク方式を採用したことによって、一般の来場者が大勢参加し、大変な盛り上がりを見せました。当協会のブースにおいては、鋼管杭の中掘工法において代表的な工法を持つ5団体、鋼矢板の圧入工法技術を有する2団体から、工法をわかりやすく解説したパネルを展示していただきました。当協会も、鋼管杭・鋼矢板等のパネルを展示し、多くの来訪者の好評を得ることができました。



**社会の要求に応えた  
鋼矢板の新たな技術開発**

鋼管杭協会は、建設・土木・港湾・エネルギー・資源開発等の需要に対応するため、鋼矢板に関する様々な技術開発を行っています。

**広幅型鋼矢板の開発**

鋼矢板による液状化・耐震対策工法の開発

**鋼管杭打込みの  
新たな道を開く振動工法**

コスト削減と優れた加工性を追求

コスト削減、パフォーマンス維持のため、従来の打込み工法よりも効率的で、より柔軟な施工が可能である。

**優れた経済性**

- 土工費削減
- 施工効率化
- クレーン施工可

**優れた施工性**

- 土工費削減
- 施工効率化
- クレーン施工可

**高い支持力特性**

- 鋼矢板の高い支持力

**鋼管杭打込みの  
新たな道を開く振動工法**

コスト削減と優れた加工性を追求

コスト削減、パフォーマンス維持のため、従来の打込み工法よりも効率的で、より柔軟な施工が可能である。

**優れた経済性**

- 土工費削減
- 施工効率化
- クレーン施工可

**優れた施工性**

- 土工費削減
- 施工効率化
- クレーン施工可

**高い支持力特性**

- 鋼矢板の高い支持力

**地震に強い港湾の  
整備を目指して**

鋼管式桟橋への新たな技術的取り組み

鋼管式桟橋による洪水対策工法についても、多くの実績があることを示すとともに、その特徴を説いています。

**鋼矢板による  
洪水対策工法**

鋼矢板による洪水対策工法の実例を示したパネルや鋼矢板カットサンプルを展示したところ、興味を持つ関係者が多数訪れ、パンフレットの不足が心配されるほどの盛況でした。

国外13カ国、約180団体による出展と数多くのブースがある中、全国人民代表大会常務委員楊振懷氏が当ブースを視察にみました。楊氏からは日本政府の無償援助に対して感謝の言葉を頂き、海外においても当協会の活動が着実に成果を結んでいくことがうかがえた展示会となりました。

平成11年11月12日（金）～15日（月）にかけて中国・北京展覧館で行われたWATER EXPO CHINA '99に、(社)日本鉄鋼連盟が出展するにあたり、当協会も協力して鋼矢板関連技術を紹介しました。阿武隈川（福島県）・長江（湖北省観音寺地区）の鋼矢板による洪水対策用止水壁の実例を示したパネルや鋼矢板カットサンプルを展示したところ、興味を持つ関係者が多数訪れ、パンフレットの不足が心配されるほどの盛況でした。

WATER EXPO CHINA '99出展

2046 東京・日本鉄鋼連盟  
THE JAPAN IRON AND STEEL FEDERATION

WATER EXPO CHINA '99出展

2046 東京・日本鉄鋼連盟  
THE JAPAN IRON AND STEEL FEDERATION

### 鋼管杭協会ホームページアドレス変更

鋼管杭協会ホームページのアドレスが変更になりました。お手数ですがブックマークの再登録をお願いいたします。

新アドレス  
<http://www.jaspp.com>

### 「直杭式桟橋の耐震設計法」に関する講習会

平成11年4月に「港湾の施設の技術上の基準」の解釈・運用を定めた港湾局長通達が廃止され、その基準が全面的に変更されました。また以前より、当協会では、兵庫県南部地震を契機とする港湾構造物の耐震設計法の改定作業に関連して、運輸省港湾技術研究所との共同研究を行って参りました。

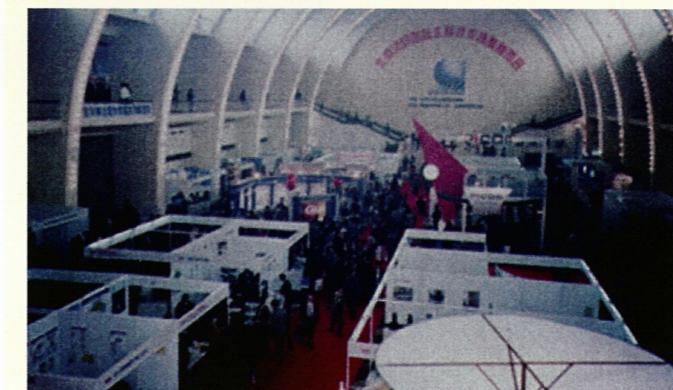
その共同研究の成果の一部を、平成11年10月27日（水）、「直杭式桟橋の耐震設計法」に関する講習会で公表することとし、関係各位に参加を呼びかけました。東京で行われた本講習会では、港湾構造物の耐震設計について港湾技術研究所から解説をいただき、引き続きプログラム「N-PIER」の講習会を行いました。プログラム「N-PIER」は、直杭式桟橋の弾塑性解析を普及させることを目的として港湾技術研究所と当協会が開発を行ったものです。また12月13日（月）にも同様の講習会を大阪で開催し、耐震設計の普及を呼びかけつつ、参加者へプログラムの配布を行いました。



### WATER EXPO CHINA '99出展

平成11年11月12日（金）～15日（月）にかけて中国・北京展覧館で行われたWATER EXPO CHINA '99に、(社)日本鉄鋼連盟が出展するにあたり、当協会も協力して鋼矢板関連技術を紹介しました。阿武隈川（福島県）・長江（湖北省観音寺地区）の鋼矢板による洪水対策用止水壁の実例を示したパネルや鋼矢板カットサンプルを展示したところ、興味を持つ関係者が多数訪れ、パンフレットの不足が心配されるほどの盛況でした。

国外13カ国、約180団体による出展と数多くのブースがある中、全国人民代表大会常務委員楊振懷氏が当ブースを視察にみました。楊氏からは日本政府の無償援助に対して感謝の言葉を頂き、海外においても当協会の活動が着実に成果を結んでいくことがうかがえた展示会となりました。



## 鋼管杭協会組織図

(平成12年2月)

