

# ソイルセメント利用新形式鋼管杭の開発

長岡弘明\*・玉野治光\*\*・多田浩彦\*\*\*・  
千田昌平\*\*\*\*

新形式の鋼管杭の開発を行った。地中にソイルセメント柱を構築し、その中に柱径より小さい径の鋼管を挿入する。鋼管表面にリブを設け、これにより鋼管とソイルセメントの一体性を確保し、地盤支持力をソイルセメント柱の外周面および柱先端面積で評価する事を可能にしている。また、廃土量が従来工法に比べて格段に少ない事も特徴の一つとしている。

**Keywords** : steel pipe pile, soil-cement, bearing capacity, settlement

## 1. ま え が き

杭の代表的低振動・低騒音工法として、場所打ちコンクリート杭工法、中掘り杭工法がある。これらの従来工法においては、杭体体積に相当する廃土が発生する。また、廃土が産業廃棄物となる場合があり、この場合、処理場が限定されかつ工事現場より遠方となる傾向が近年顕著である。処理場への運搬に伴う周辺住民への迷惑、交通渋滞等道路交通への負担の増大、高価格処理の建設費への反映等を引き起こしており、廃土のより少ない杭工法の開発は社会的要請の大きい緊急の課題となっている。

また、これらの従来工法による杭は地盤鉛直支持力に関して、次の問題点を持っている。場所打ちコンクリート杭においては、施工時の先端地盤のゆるみ、スライムの堆積等により、先端支持力は中掘り杭の場合ほど大きな値は一般には期待できない<sup>1),2)</sup>。中掘り杭においては、杭体と杭周地盤との密着度の不良のため周面摩擦力は場所打ちコンクリート杭の場合ほど大きな値を期待できない<sup>1),2)</sup>。このように地盤鉛直支持力が比較的小さいため、地盤鉛直支持力に比べて杭体耐力が過大となる事が多々生じ、杭体耐力について不経済な設計となっている。

ここでは、これらの問題点を解決するため、近年、地下連続壁工法の一つとして多用されているソイルセメント工法<sup>3)</sup>を応用して、新しい低騒音・低振動鋼管杭工法を開発した。開発目標は次のとおりである。

- ① 場所打ちコンクリート杭工法、中掘り杭工法に比べ、廃土量が格段に少ない。産業廃棄物は生じない。

- ② 先端極限支持力度は、道路橋示方書・同解説 下部構造編<sup>1)</sup>に示される中掘り杭工法「セメントミルク噴出攪拌方式」と同等の値であり、最大周面摩擦力は同示方書の場所打ち杭工法と同等の値である。
- ③ 鉛直支持力に関して、鋼管杭の杭体耐力は地盤支持力に比較して過大となる事はなく、地盤支持力に見合ったものである。

## 2. 杭 の 形 態

### (1) 支持力機構

杭は図-1に示すようにソイルセメントと鋼管とからなり、ソイルセメント柱体内に同心にして、柱径より小径の鋼管を設置する。鉛直荷重は鋼管頭部に作用する。

「杭一般部」は鋼管の外表面にのみリブが設けられた鋼管を使用する部分である。ソイルセメントの強度は、鋼管と鋼管外側のソイルセメントが一体となって挙動するよう、設定する。即ち、鋼管からソイルセメントに伝達されたせん断力は、鋼管とソイルセメント間にすべりを生じる事なく、ソイルセメントから地盤に伝達される。これにより、一般部の地盤支持力は、ソイルセメント柱外周面に作用する周面摩擦力として求める事ができる。

「杭先端部」は鋼管内外両面にリブが設けられた鋼管とソイルセメントからなる部分であり、支持層内にある。先端部上端での鋼管軸力が、鋼管内外面においてソイルセメントと鋼管の間にすべりを生じさせる事なく、支持層に伝達されるよう、ソイルセメント強度を設定する。これにより、先端部の地盤支持力は、ソイルセメント柱外周面での周面摩擦力および柱先端断面での先端支持力により求める事ができる。

### (2) 地盤支持力と鋼管耐力の均衡

地盤支持力と均衡のとれた杭体耐力の鋼管を用いるために、鋼管径をソイルセメント柱径より小さくする必要

\*正会員 工博 京都大学教授 工学部建築学科  
(〒606 左京区吉田本町)

\*\*正会員 工博 (財)首都高速道路技術センター理事長

\*\*\*正会員 工博 (財)道路管理センター常務理事

\*\*\*\*正会員 工博 (財)土木研究センター常務理事

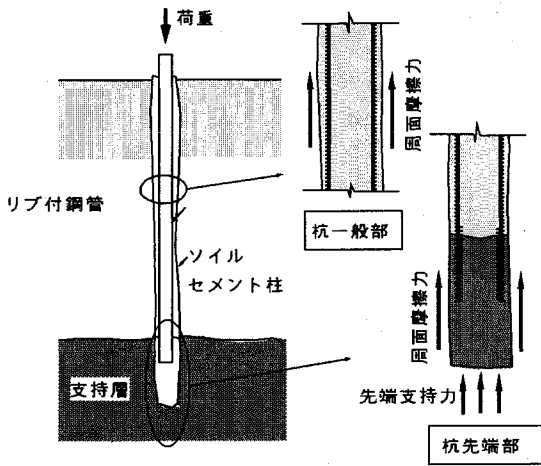


図-1 支持力機構

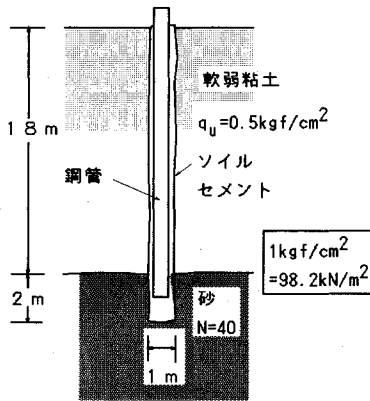


図-2 設計例題

となる場合のある事を、設計例題により示す。図-2において、地盤は深さ18mまで一軸圧縮強さ $q_u=0.5$  kgf/cm<sup>2</sup>の軟弱粘土(1 kgf/cm<sup>2</sup>=98.1 kN/m<sup>2</sup>)、それ以下は $N$ 値40の砂の支持層である。ソイルセメント柱直径は100 cmである。

周面摩擦力度の目標値を、道路橋示方書・同解説下部構造編<sup>1)</sup>による場所打ち杭工法の値、先端支持力度を同示方書のセメントミルク噴出攪拌方式による中掘り杭工法の値としていることより、周面摩擦力度は軟弱粘土層において2.5 tf/m<sup>2</sup>(1 tf/m<sup>2</sup>=9.81 kN/m<sup>2</sup>)、支持層において20 tf/m<sup>2</sup>、先端支持力度は600 tf/m<sup>2</sup>とする。

周面摩擦力および先端支持力は、各々267 tfおよび471 tfであり(1 tf=9.81 kN)、地盤から決まる極限支持力は738 tfとなる。安全率を3とした時の常時許容支持力は246 tfである。鋼管の許容応力度を1400 kgf/cm<sup>2</sup>とすると、地盤から決まる常時許容支持力を保持するために必要な、許容応力度から決まる鋼材断面積 $A_s$ は176 cm<sup>2</sup>である。

直径がソイルセメント柱径と等しい100 cm、および

柱径より小さい80 cmの鋼管を用いた場合を考える。腐食代を0.2 cmとし、上記の鋼材断面積 $A_s$ を与える板厚に腐食代を加えた板厚は、各々0.8 cmおよび0.9 cmである。鋼管は局部座屈に対し十分安全である事が必要である。安全の程度を定める方法として、圧縮応力度が降伏点に達するまで局部座屈を発生させないとする方法<sup>4),5)</sup>、十分な塑性変形能力を確保するために歪硬化開始点の歪に達するまで局部座屈を発生させないとする方法<sup>6),7)</sup>等があり、いずれの方法によるかについては、今後の検討が必要であるが、一つの目安として、道路橋示方書同解説下部構造編<sup>1)</sup>で規定されている鋼管杭の板厚下限値を用いる。この値は腐食代および局部座屈に対する安全性のみを考慮して決められた値ではないが、ここでは参考値としてこの値を用いる。直径100 cmおよび80 cmの鋼管に対して規定される板厚下限値は1.2 cmおよび0.9 cmである。板厚腐食代は考慮に入れるが、局部座屈に対する安全性を考慮しない場合、地盤から決まる許容支持力に対して必要な板厚は各々0.8 cmおよび0.9 cmであり、直径100 cm、板厚1.2 cmの鋼管を用いると、地盤支持力に比べて杭体耐力は過大となり、一方、直径80 cm、板厚0.9 cmの鋼管を用いると、地盤支持力と見合った杭体耐力となっている。即ち、この場合地盤支持力と均衡のとれた杭体耐力の鋼管を用いるためには、鋼管径をソイルセメント柱径より小さくする事が必要となる。文献<sup>8)</sup>において、一軸圧縮強さ13.6 kgf/cm<sup>2</sup>のソイルセメントが内部に充填された鋼管に曲げを负荷した場合、ソイルセメントによる鋼管の局部座屈耐力向上は期待できない事が、報告されている。後述のように、一般部のソイルセメント一軸圧縮強さはこれに近い値である。圧縮力が负荷された場合の、ソイルセメントによる局部座屈耐力向上の可能性について、今後の検討が必要であるが、曲げが负荷された場合の知見を参考にし、安全側の評価として、局部座屈耐力向上は見込まないものとした。

ソイルセメントで覆われた鋼管杭の必要腐食代の設定は今後の課題であるが、ここでは安全側の評価として、ソイルセメントによる防食効果は見込まないものとした。

### 3. 施工方法と地盤支持力

施工手順を図-3に示す。段階(1)で口元管と称するケーシングの内部土を、ハンマーグラブ等で予め掘削する。掘削量は次段階以降で注入するセメントミルク量に等しくする。段階(2)で先端からセメントミルクを噴出しながら、攪拌ロッドを回転・降下させ、セメントミルクと地盤の土を現位置で攪拌する。段階(3)において杭の先端支持層まで達するソイルセメント柱を作成する。注入セメントミルク量だけ、段階(1)で地盤上部を先行掘削しているの、ソイルセメント柱完成時で

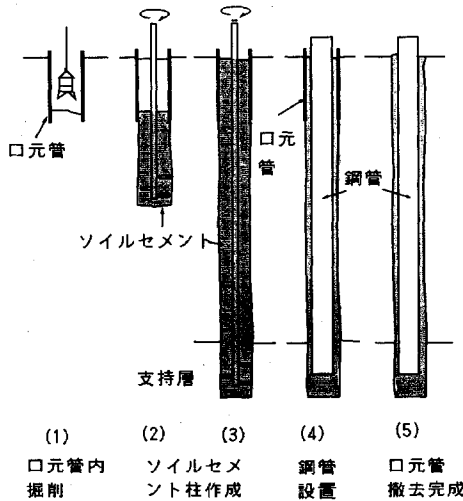


図-3 施工手順

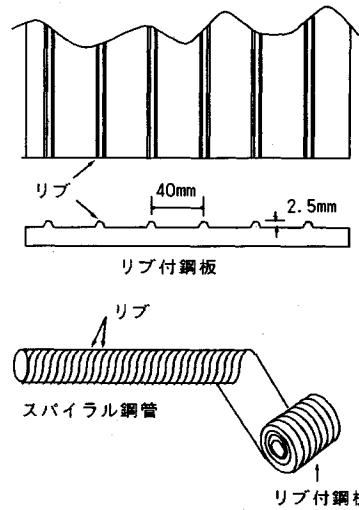


図-4 リブ付鋼管

ある段階(3)ではソイルセメントは地上に溢れ出る事はない。攪拌ロッドを引き上げ、段階(4)でソイルセメント硬化前に、鋼管をソイルセメント柱内に挿入する。段階(5)で口元管を撤去し、ソイルセメントの硬化を待って杭は完成する。この工法で発生する廃土は、段階(1)で発生する掘削土のみである。従来の場所打ち杭工法、中掘り杭工法においては、杭本体積にほとんど等しい廃土量が発生するが、これに比べ、この工法の場合、杭本体積に比較した廃土量の比は格段に小さい値となる。後述の実杭鉛直載荷実験を行った杭においては、廃土量は杭本体積の45~65%であった。今後、廃土量のさらに少ない工法に改良する予定である。また、この廃土はセメントを含んでいない掘削土であり、産業廃棄物扱いとならない。

中掘り杭工法の「セメントミルク噴出攪拌方式」の一例では、セメントミルクを注入しながら地盤と混合してソイルセメントを杭先端部に造成する。杭先端でのソイルセメント造成状態は本工法と類似と推測され、「セメントミルク噴出攪拌方式」と同じ値の先端支持力度が期待できるものとする。造成時にできたソイルセメント柱表面の凹凸により杭表面の粗度が大きく、かつ地盤との密着性は良好と考えられ、場所打ちコンクリート杭の場合と同じ値の周面支持力度が期待できるものとする。

#### 4. 基礎実験および杭の仕様

ここでは基礎実験を行うとともに、これに基づいて、2章で示した杭の形態をより具体的に表現する。

##### (1) リブ付鋼管

杭一般部に用いる鋼管においては外表面に、杭先端部に用いる鋼管においては内外両表面に、図-4に示すような、高さ2.5mm以上、間隔約40mmのリブをスパ

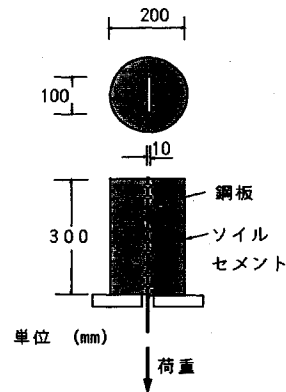


図-5 附着強度実験

イラル状に設ける。鋼管軸直角方向とスパイラルとのなす角度は、後述の附着強度実験の結果に基づき、40°以内とする。鋼管はスパイラル鋼管であり、リブのある事を除き、鋼管杭規格SKK 400, SKK 490を満たしている。

##### (2) 附着強度実験

図-5に示すように、直径20cm、高さ30cmのソイルセメント円筒中に幅10cm、厚さ1cmの鋼板を埋め込み、鋼板を引き抜く実験を行った。鋼板を引き抜く場合の附着強度は押し込む場合の強度より小さくなる事が推測される。ここでは設計値として用いることを考慮に入れ、より小さい強度を示す、鋼板を引き抜く実験を行った。鋼板は両面にリブのついたものおよびリブのつかないものの2種類を用いた。附着強度は、引き抜き最大荷重をソイルセメント中の鋼板面積30cm×10cm×2で除して求めた。また、ソイルセメント試験体の高さは30cm以上あれば、ソイルセメント試験体の高さを変えてもリブ付鋼板の附着強度は変化しない事を確認し、ソイルセメント試験体の高さを30cmとした。最初に、

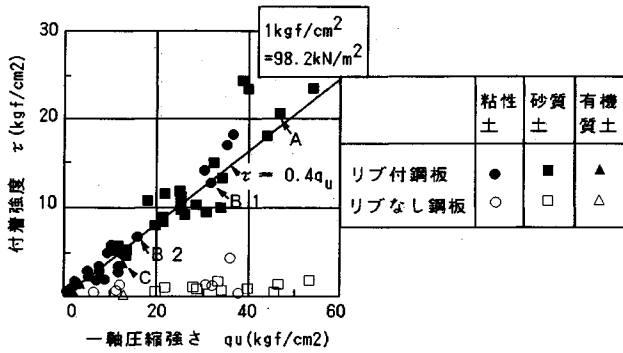


図-6 一軸圧縮強さと付着強度

表-1 試料土の物理的、化学的性質

ソイルセメント	A	B1, B2	C
試料土	砂質土	粘性土	有機質土
土粒子比重Gs	2.70	2.71	2.56
粒土分布			
礫分(2~75mm)(%)	2 <sup>1)</sup>	0	0
砂分(74~2000μ)(%)	86	17	27
シルト分(5~74μ)(%)	7	37	33
粘土分(5μ以下)(%)	5	46	40
コンシステンシー			
液性限界 w <sub>L</sub> (%)	—	110.8	129.2
塑性限界 w <sub>p</sub> (%)	—	70.4	75.4
塑性指数 I <sub>p</sub> (%)	—	34.4	53.8
pH	—	—	5.54
強熱減量Li(%)	—	—	20.9

1) 最大粒径は9.50mm.  
(1gf/cm<sup>2</sup>=9.81kN/m<sup>2</sup>)

リブが荷重方向に直交する方向に設けられている鋼板、およびリブなし鋼板を用いた実験を行った。次いで、リブが直交しない方向に設けられた鋼板を用いた実験を行った。いずれの実験においてもソイルセメントは割裂せず、鋼板がソイルセメントより抜け出る状態が最終状態に到っている。

リブが荷重方向に直交する方向に設けられている鋼板およびリブのない鋼板を用いた実験について、ソイルセメント一軸圧縮強さ  $q_u$  と鋼板の付着強度  $\tau$  との関係を図-6に示す。一軸圧縮試験用試験体は、攪拌直後のソイルセメントの一部を採取し作成した。図-6のA, B1, B2, Cで示すソイルセメントを例として、試料土の性質を表-1に、ソイルセメントの配合条件等と物理的、力学的性質を表-2に示す。Aに用いた試料土は砂質土、B1, B2は粘性土、Cは有機質土である。一軸圧縮試験および付着強度実験用試験体は実験を行う日まで室内の空気中におき、特別な養生は行わなかった。また、両実験は同じ日に行った。

図-6より、リブ付鋼板においては、土質に係わらず、 $q_u$  と  $\tau$  の間に次の関係が見られる。

$$\tau = 0.4 q_u \dots\dots\dots (1)$$

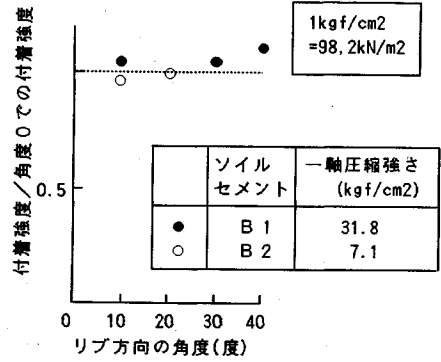


図-7 リブ方向の角度と付着強度

表-2 ソイルセメントの配合条件、物理的、力学的性質等

ソイルセメント	A	B 1	B 2	C
試料土	砂質土	粘性土	粘性土	有機質土
初期含水比 <sup>1)</sup> (%)	34.0	126.0	133.0	162.0
セメント混合比 <sup>2)</sup> (%)	17.0	36.0	29.0	140.0
材令(日)	9	9	8	8
単位体積重量(gf/cm <sup>3</sup> )	1.98	1.51	1.47	1.66
一軸圧縮強さ(kgf/cm <sup>2</sup> )	45.8	31.8	16.5	13.4

1) ソイルセメント作成直前の試料土の含水比  
2) 普通ボルトランドセメントの乾燥重量と試料土の乾燥重量の比  
(1gf/cm<sup>3</sup>=9.81kN/m<sup>3</sup>, 1kgf/cm<sup>2</sup>=98.1kN/m<sup>2</sup>)

リブなし鋼板の付着強度はリブ付鋼板のそれより小さく、リブが付着強度を大きくする事に有効であることを示している。

リブの方向と、荷重方向に直交する方向のなす角度が、0°から40°まで変化する場合の付着強度の変化を、図-7に示す。付着強度の変化を(ある角度での付着強度/角度0°での付着強度)として表している。試験体の形状・寸法、試験方法は前実験と同じであり、用いたソイルセメントは前出のB1, B2である。同図より、角度40°以内での付着強度は角度0°での強度の0.96以上となっているようすを見る事ができる。実験数が2であり、かつB2を用いた実験では角度20°までの結果しか得られていないため、今後さらに追加実験による検証が必要であるが、この実験結果のみに限定すれば、角度が40°以内で変化しても、付着強度と一軸圧縮強さの関係を示す式(2)は成立するということができる。

前節「(1)リブ付鋼管」において、鋼管軸直角方向とスパイラルとのなす角度は40°以内としたが、これは次の事に基づいている。スパイラルとリブは同一方向にあり、鉛直荷重を支持する鋼管を想定した場合、上記の付着強度実験でのべた「荷重方向」は鋼管軸方向にあたる。付着強度実験の結論である「リブの方向と、荷重方向に直交する方向のなす角度が、40°以内であれば、式(1)が成立する」ことより、鋼管軸直角方向とスパイラルとのなす角度を40°以内とした。

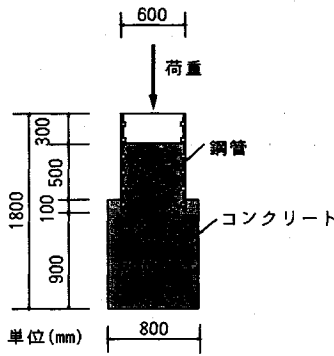


図-8 杭先端部耐力実験試験体

表-3 骨材の物理的性質

	比重		吸水率(%)	粗粒率
	絶乾状態	表乾状態		
粗骨材	2.61	2.65	1.46	6.93
細骨材	2.52	2.58	2.28	2.75

表-4 コンクリートの調合

粗骨材の最大粒径(mm)		25
スランプ(cm)		17.5
水セメント比(%)		84.0
細骨材率(%)		48.0
重量(kgf/m <sup>3</sup> )	水	169
	セメント <sup>1)</sup>	201
	細骨材	900
	粗骨材	1002
	A E 剤	0.50

1) 普通ポルトランドセメントを使用  
(1kgf/m<sup>3</sup>=9.81N/m<sup>3</sup>)

### (3) 杭先端部構造耐力実験

試験体は、図-8に示すように、直径80cm、高さ100cmのコンクリート円柱と、円柱に10cm貫入した直径60cmの鋼管から成っている。支持層として砂礫層を想定し、ソイルセメントの代わりに、通常のコンクリートを使用した。コンクリートの骨材の物理的性質を表-3に、コンクリートの調合を表-4に示す。鋼管内部に、鋼管上端から30cmまでコンクリートが充填されている。鋼管として、内面にリブの設けられた鋼管およびリブのない鋼管を用いる。鋼管からの鉛直力が主として鋼管先端の肉厚部での支圧および鋼管内面とコンクリートとの付着により支持される場合の耐力評価を目的として、リブ付鋼管として外面にリブのない、内面にのみリブのある鋼管を用いた。鋼管はSKK 400相当材であり、板厚1.9cmである。コンクリート圧縮強度試験用供試体および杭先端部構造耐力実験用試験体は実験を行う日まで室内の空気中におき、特別な養生は行わなかった。構造耐力実験は材令32日に行った。コンクリートの28日圧縮強度は86kgf/cm<sup>2</sup>である(1kgf/cm<sup>2</sup>=

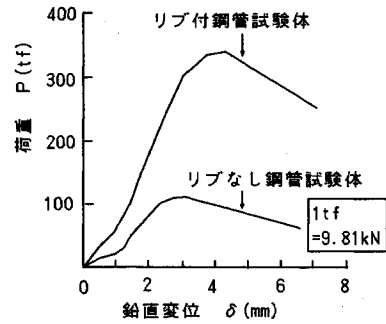
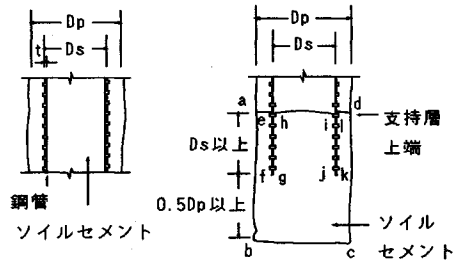


図-9 杭先端部耐力



(a) 杭一般部 (b) 杭先端部

図-10 杭の仕様

98.1 kN/m<sup>2</sup>). コンクリート下端を鋼製の耐圧板上に設置し、鋼管上部に載荷板をおき荷重を加えた。コンクリート側面は大気中にあり、側面に土圧に相当する圧力を作用させる事等は行わず、また耐圧板とコンクリートとの摩擦を減少する工夫等は行わなかった。

載荷板の鉛直変位  $\delta$  と荷重  $P$  の関係を図-9に示す。最大荷重は、内面リブ付鋼管およびリブなし鋼管を用いた試験体各々について 340 tf および 105 tf であった。両試験体の鋼管とも、局部座屈を起こさず、下部コンクリート柱にめりこむ状態で最大荷重に到達した。

内面リブ付鋼管を用いた場合、最大耐力は、リブなし鋼管を用いた場合の3.2倍であった。また、最大耐力をコンクリート断面積で除した値は 67 kgf/cm<sup>2</sup> であり、コンクリート圧縮強度の約 80% に相当している。

### (4) 杭の仕様

これらの基礎実験結果を基に、杭の仕様を定める。少数の基礎実験である事および基礎実験結果が現実の杭において成立する事が未確認である事から、この仕様は暫定的性格のものであり、次章でのべる実杭鉛直載荷実験も含めて、今後の実杭実験により所定の支持力が得られている事の確認が必要である。

#### a) 杭一般部

図-10(a)に示す鋼管径  $D_s$  および板厚  $t$  は、第2章(2)節で述べたように、杭体耐力が地盤支持力と均衡し、かつ道路橋示方書 下部構造編<sup>1)</sup>で示される鋼管板厚の下限値を満足するよう、決定する。

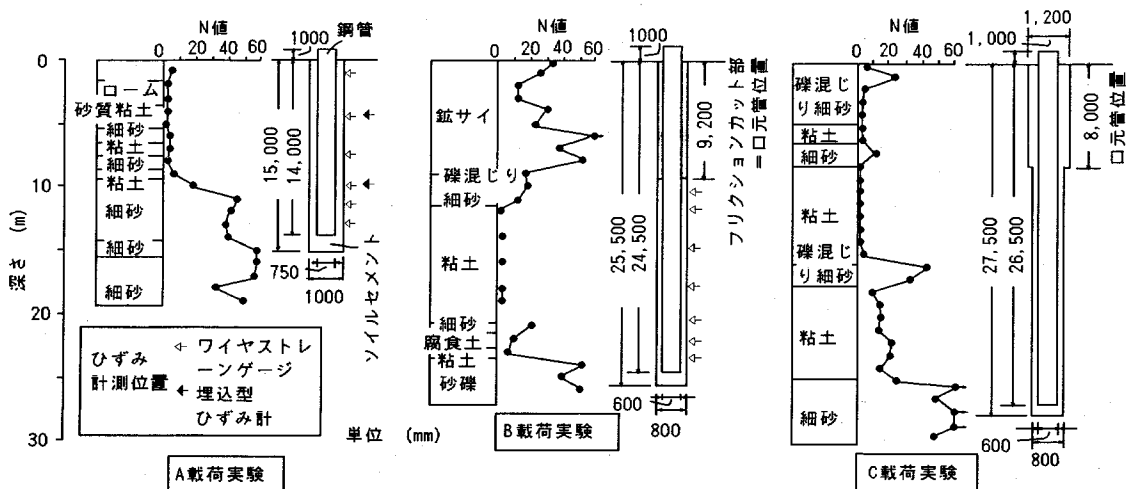


図-11 地盤条件, 杭形状

鋼管とソイルセメント間の付着強度を  $S_s$ , ソイルセメント柱外表面と地盤の間の最大周面摩擦力度を  $S_p$ , ソイルセメント柱径を  $D_p$  とすると, ソイルセメント柱外表面と地盤の間にすべりが生じるまで, ソイルセメントと鋼管外表面の間にすべりが生じない条件は,

$$\pi D_s S_s > \pi D_p S_p \dots\dots\dots (2)$$

(2) 節で示したように, ソイルセメントの一軸圧縮強さ  $q_u$  と  $S_s$  の間には実験式  $S_s = 0.4 q_u$  が成り立ち, 式 (2) は次式となる.

$$q_u > (D_p S_p) / (0.4 D_s) \dots\dots\dots (3)$$

杭が造成される地盤に対し, 上式が満たされるよう, ソイルセメントの一軸圧縮強さ  $q_u$  を決定する.

**b) 杭先端部**

図-10 (b) に示すように, 鋼管下端からソイルセメント柱下端までの長さは, ソイルセメント柱径  $D_p$  の  $1/2$  以上とする. 実験においては, この長さを  $1.125 D_p$  としているが,  $1/2 D_p$  に変化させても, 応力状態は殆ど変化しない事を, 別に行った有限要素解析で確認しており, 長さの下限を  $1/2 D_p$  とした.

実験において, 杭先端部の単位面積あたり耐力はソイルセメント一軸圧縮強さの約 80% であり, これを参考にしてソイルセメント一軸圧縮強さは, 地盤の先端極限支持力度の  $1/0.8$  以上の値とする.

内外両面リブ付鋼管の上端は支持層上端より下にあるものとする. 支持層内にあるこの部分の長さは, 杭先端部構造耐力実験での試験体寸法にならって, 鋼管径  $D_s$  以上とする他, 次の条件を満足するものとする. 図-10 (b) に示すように, 杭先端部 abcd における地盤極限支持力が, リブのついた鋼管表面 ef, gh, ij, kl 上の付着強度による支持力と等しくなるよう, ef 等の長さを設定する.

**5. 実杭鉛直載荷実験と鉛直支持力特性**

実験の目的は次の二つである.

- ① 想定した地盤極限支持力が得られている事を確認する.
- ② 他の工法による鋼管杭と比べた時の, この杭の沈下剛性の特性を把握する.

**(1) 実験概要**

3 鉛直載荷実験を実施した. 各実験を A, B, C 載荷実験とし, 杭施工時期, 実験時期, 実験場所を表-5 に, 地盤条件, 杭形状を図-11 に示す. 支持層深さ, ソイルセメント柱の径と長さ, 杭先端部長さを表-6 に, 鋼管の直径, 板厚, 長さ, 内外面リブ付鋼管長さを表-7 に示す. セメントミルク配合を表-8 に示す. 載荷実験開始数日前にソイルセメント柱中心よりコアボーリングにより試料を採取し, 実験開始日に一軸圧縮試験を行った. ソイルセメント一軸圧縮強さを同表に示す.

施工の最初の段階で行う口元管を用いた掘削部分を図-11 に示す. A 載荷実験の場合のみ, この先行掘削を行わなかった. B 載荷実験において, 地表面近くの鉾滓層での周面摩擦力が鋼管に伝達する事を避ける目的で, 深度 9.2 m まで, 鋼管外側のソイルセメントと鋼管外表面の間に, 幅約 1 cm の同心円状の空隙・溝を設けた. この部分を, 図-11 において「フリクションカット部」と示す.

載荷方法は土質工学会「クイの鉛直載荷試験基準・解説」<sup>9)</sup> に従い, 多サイクル載荷方法 B によった.

計測項目の内, 次節以降の考察で取りあげる項目のみ示すと次のとおりである. 鋼管頭部の鉛直荷重を, 油圧ジャッキ圧力の計測により求めた. 杭頭部の鋼管鉛直変位は, 水平面上で 90° 間隔に 4 箇所, 変位計により計測し, その平均値とした. 鋼管の杭軸方向ひずみを, 一断

表一五 鉛直載荷実験実施時期、場所

	施工時期	実験時期	実験場所
A 載荷実験	昭和63年 1月	昭和63年 2~3月	つくば市豊里町 建設省土木研究所構内
B 載荷実験	昭和63年 9月	昭和63年 10月	福山市鋼管町 日本鋼管(株)福山製鉄所
C 載荷実験	平成元年 3月	平成元年 4月	茨木市高浜町 茨木コンクリート工業(株)

表一六 ソイルセメント柱形状、支持層深さ

	支持層 深さ(m)	ソイルセメント 柱径(mm)	柱長さ (m)	杭先端部 長さ(m)
A 載荷実験	10.60	1000	15.0	3.0
B 載荷実験	23.60	800	25.64	2.0
C 載荷実験	24.85	800	27.5	2.6

表一七 鋼管形状

	鋼管 直径(mm)	鋼管 板厚(mm)	鋼管長さ (mm) <sup>1)</sup>	内外面リブ付 鋼管長さ(mm)
A 載荷実験	750	22 <sup>1)</sup> 9 <sup>2)</sup>	15,000	2,000 <sup>1)</sup> 0 <sup>2)</sup>
B 載荷実験	600	16	25,500	2,000
C 載荷実験	600	16	27,500	2,000

<sup>1)</sup> 鉛直載荷実験  
<sup>2)</sup> 水平載荷実験  
<sup>3)</sup> 地上突出長さを含む。

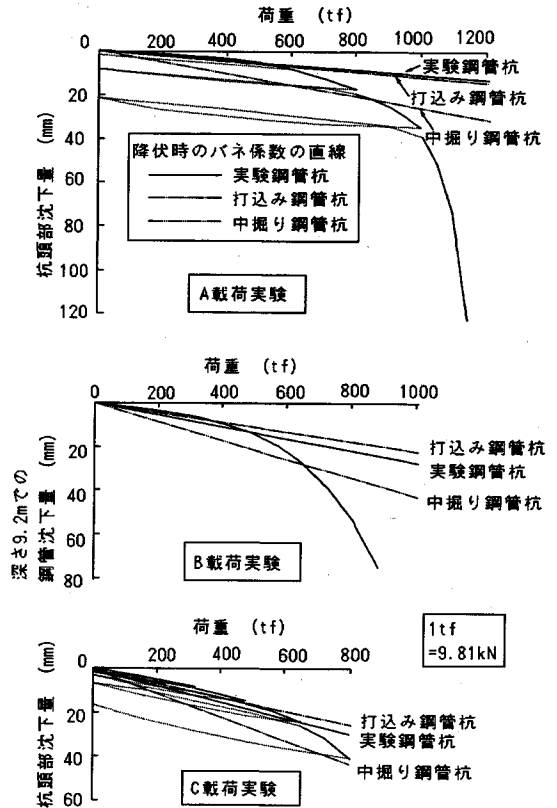
面に90°間隔に4箇所設置したワイヤーストレーンゲージにより計測し、その平均値とした。ソイルセメントの杭軸方向ひずみを次のように求めた。埋込み型ひずみ計を、一断面に180°間隔の2箇所設置し、また各ひずみ計は鋼管内部のソイルセメント中の、鋼管内面より5cm離れた位置に設置した。ひずみ計の見かけの弾性係数は約400 kgf/cm<sup>2</sup> (1 kgf/cm<sup>2</sup>=98.1 kN/m<sup>2</sup>)である。2箇所計測したひずみの平均値をソイルセメントの杭軸方向ひずみとした。鋼管およびソイルセメントの歪の計測位置を、図一11に示す。

(2) 実験結果

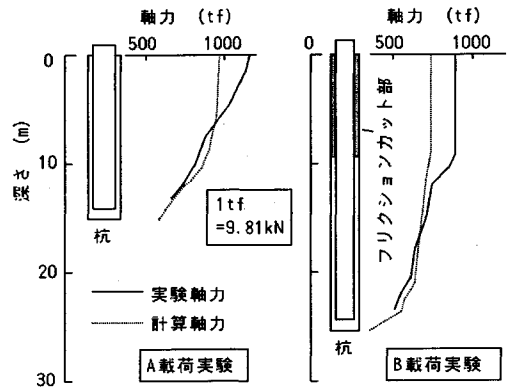
a) 荷重~沈下量関係

AおよびC載荷実験について、荷重と杭頭部沈下量の関係を図一12に示す。B載荷実験では深度9.20mまで「フリクションカット」部を設けている。深さ9.20mでの鋼管軸力~沈下量関係を次のように求めた。フリクションカット部の鋼管軸力は鋼管頭部荷重と同一とし、この部分の鋼管弾性圧縮量を求める。この鋼管弾性圧縮量を鋼管頭部沈下量より差し引き、深度9.20mでの鋼管沈下量とする。深度9.20mでの鋼管軸力は鋼管頭部荷重を用いる。この沈下量と軸力の関係を、処女荷重のみについて同図に示す。

A, B載荷実験の最大荷重において、一定油圧下で杭の沈下が進行し、この状態で実験を終了した。C載荷実験においては、計画最大荷重800tfまで載荷を行った。



図一12 鉛直載荷実験荷重~沈下量関係



図一13 軸力分布

大きな杭頭部沈下量は発生していない状態で実験を終了した。

b) 軸力分布

A, B 載荷実験の最大荷重時杭軸力分布を、図一13に「実験軸力」として示す。杭軸力は次の計算による。A 載荷実験で測定した、ソイルセメントの杭軸方向ひずみは、同じ深さの鋼管の杭軸方向ひずみとほぼ一致しており、この事より、杭軸力を計算する時、ソイルセメントの鋼管軸方向ひずみは、鋼管のそれと等しいと仮定

表—8 セメントミルク配合（原地盤1m<sup>3</sup>あたり）と一軸圧縮強さ

	セメント (kgf) <sup>1)</sup>	ベントナイト (kgf)	水 (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )	凝固遅延剤 (%) <sup>2)</sup>	水セメント比 (%)	一軸圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )
A 載荷実験 一般部	400	5	660		165	34~62
A 載荷実験 先端部	750	15	450		60	153~244
B 載荷実験 一般部	350	10	468	0.3	134	11~30
B 載荷実験 先端部	600	5	360	0.3	60	110~187
C 載荷実験 一般部	420	10	860	0.3	200	7~21
C 載荷実験 先端部	750	15	459	0.3	60	218~245

<sup>1)</sup> AおよびC載荷実験では普通ポルトランドセメントを、B載荷実験では高炉セメントB種を使用。

<sup>2)</sup> セメントに対する重量比。  
(1kgf=9.81N, 1kgf/cm<sup>2</sup>=98.1kN/m<sup>2</sup>)

表—9 先端極限支持力度と最大周面摩擦力度  
(単位: tf/m<sup>2</sup>, 1tf/m<sup>2</sup>=9.81kN/m<sup>2</sup>)

杭先端の極限支持力度	最大周面摩擦力度
q <sub>a</sub> = 15N (≦750) 砂層 20N (≦1000) 砂礫層 ここに、N: 杭先端地盤のN値	0.5N (≦20) 砂質土 CまたはN (≦15) 粘性土 ここに、N: N値、 C: 粘着力

する。ソイルセメント一軸圧縮試験結果より、各深さのソイルセメントひずみに対応する割線ヤング係数を求める、この値と鋼管のヤング係数を用いて鋼管とソイルセメントからなる断面の軸力を計算する。

(3) 考 察

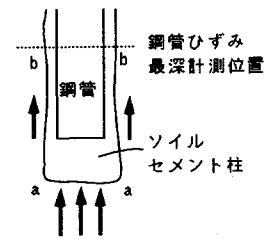
以下の考察で得られた結論は、2または3載荷実験から得られたものであり、結論の一般的妥当性については、更に載荷実験等を行い、検討を行う事が必要である。

a) 極限支持力

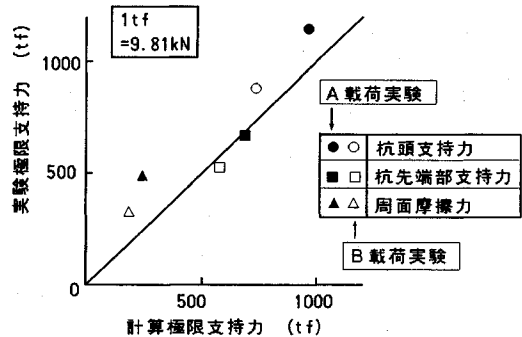
この杭の最大周面摩擦力度と先端極限支持力度として、道路橋示方書・同解説「下部構造編」に示される、場所打ち杭設計用最大周面摩擦力度と「セメントミルク噴出攪はん方式」による中掘り杭設計用先端極限支持力度が、適用できる事を開発目標としている。これらの最大周面摩擦力度および先端極限支持力度を、表—9に示す。これらの値を用いて計算した極限支持力等に「計算」を、実験より得られたものに「実験」を付加し、計算または実験極限支持力等と呼ぶ。

A, B 載荷実験の最大荷重において、図—12より各々約12, 7cmと大きな沈下量が生じており、また一定油圧下で杭の沈下が進行する状態であった事から、最大荷重状態を極限状態とみなして、以下の検討を行う。

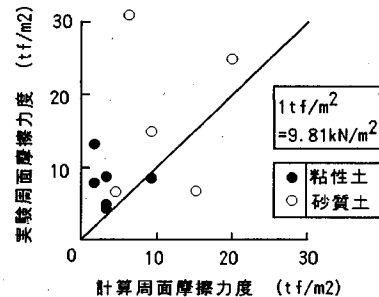
○ 先端極限支持力 載荷実験で得られた鋼管ひずみ最深計測位置の杭軸力に基づき、先端極限支持力について検討する。図—14において、この最深計測位置b-bでの杭軸力は、ソイルセメント柱下端面a-aでの先端極限支持力およびソイルセメント柱側面a-bでの最大周面摩擦力から成っている。表—9の最大周面摩擦力



図—14 先端部の極限支持力



図—15 極限支持力



図—16 最大周面摩擦力度

度および先端極限支持力度を用いて、深さb-bでの計算極限支持力を求める。

深さb-bでの極限支持力を「杭先端部支持力」とし、計算値と実験値を比較して、図—15に示す。両者は殆ど等しく、良い対応を示している。深さb-bでの計算軸力の内、先端極限支持力による値は、AおよびB載荷実験において各々88%および76%であり、「杭先端部支持力」についての計算値と実験値の良い対応は、先端極限支持力についての両者のよい対応を示しているものと推定される。

○ 最大周面摩擦力 上述の深さb-bより上部に作用する周面摩擦力について、計算値と実験値を比較して図—15に示す。実験値が約1.5倍大きな値を示して



いる。最大周面摩擦力度の比較を図-16に示す。最大周面摩擦力度は、実験で鋼管ひずみの測定された隣接する2断面間において、実験で求めた軸力差または計算で求めた最大周面摩擦力を、断面間のソイルセメント柱外表面積で除した値である。粘性土と砂質土の値が比較され、砂質土の一点を除いて、実験最大周面摩擦力度は、計算最大周面摩擦力度である場所打ち杭設計用のそれとほぼ等しいか、大きな値となっている。

○ 杭の極限支持力 極限状態軸力分布および杭頭極限支持力についての実験値と計算値の比較を、図-13, 15に示す。杭頭支持力については、実験値が計算値よりやや大きい、A 載荷実験で約6 m, B 載荷実験で約12 m以深の軸力について、実験値と計算値は良く一致している。

今回の実験によれば、杭の支持力性能として、開発目標の最大周面摩擦力度および先端極限支持力度は確保されているものとする事ができる。

**b) 沈下剛性**

他工法による鋼管杭と比較した、沈下剛性の特性について、次の簡略検討を行う。道路橋示方書・同解説 下部構造編<sup>1)</sup>において、数多くの打込み鋼管杭、中掘り鋼管杭の載荷実験結果を用いて、統計処理し、期待値としての沈下剛性の推定式が示されている。ここでは、この推定式による沈下剛性と、載荷実験によるこの杭の沈下剛性を比較する。道路橋示方書<sup>1)</sup>において、杭の軸方向バネ定数は、杭頭荷重  $P$  ~ 杭頭沈下量  $S$  曲線から、 $\log P \sim \log S$  曲線法等により判定される。降伏時における割線勾配で定義される。実験で用いた鋼管と、同じ板厚、長さの打込み鋼管杭、中掘り鋼管杭について、同示方書の方法で求めたバネ係数の直線を、それぞれ一点鎖線、二点鎖線で図-12に示す。実験 A, B, C の降伏時のバネ係数の直線を「実験鋼管杭」として実線で示す。

B および C 載荷実験においては、打込み鋼管杭の沈下剛性よりやや小さく、中掘り鋼管杭のそれより大きい沈下剛性を示している。A 載荷実験においては、打込み鋼管杭の沈下剛性よりやや大きく、中掘り鋼管杭のそれより格段に大きい沈下剛性を示している。今回の実験によれば、本工法による杭の沈下剛性は打込み鋼管杭のそれよりやや小さいか等しく、中掘り鋼管杭のそれより大きいと言う事ができる。

**6. 実杭水平載荷実験と水平支持力特性**

この杭は、ソイルセメント柱外径を用いた鉛直地盤支持力が確保できる事を特徴の一つとして開発したものであるが、本章では水平荷重に対し、ソイルセメント柱外径を用いた地盤反力が確保できる事について検討を行う。

**(1) 実験概要**

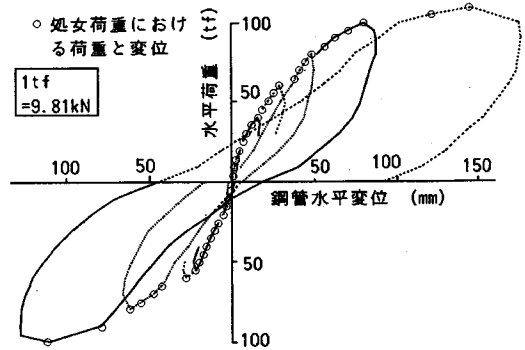


図-17 水平載荷実験荷重～変位関係

杭の施工は、A 鉛直載荷実験と同じ場所で同時期に行った。鋼管の仕様のみ鉛直載荷実験と異なり、板厚を9 mm とし、全長にわたり外面のみにリブのある鋼管を用いた。

載荷方式は土質工学会「杭の水平載荷試験方法・同解説」<sup>10)</sup>に従い、正負交番載荷方式とした。荷重載荷位置は地表面上40 cm である。計測項目は、次節で考察する項目のみをあげると、水平荷重および荷重作用位置の鋼管水平変位量である。荷重は油圧ジャッキの油圧計測により求め、変位は、荷重方向に直交する鋼管の対角線上の2点で変位計により計測し、その平均値を用いた。

**(2) 実験結果とその考察**

荷重作用位置における変位と荷重の関係を図-17に示す。以下において、地盤水平反力を評価する時の杭径として、ソイルセメント柱径を用いる事の可否を検討する。

道路橋示方書・同解説 下部構造編<sup>1)</sup>に示される基準変位量は、ソイルセメント柱径を杭径とすると、1 cm である。ソイルセメントと鋼管が平面保持の挙動をするとして、両者の曲げ剛性の和を杭曲げ剛性として用い、基準変位に対応する水平地盤反力係数  $k_h$  を次の2方法で求める。

① 地盤反力を評価する時の対象となる深さまでの平均  $N$  値は3 である。この値を用いて示方書の方法に基づき求めると、 $k_h = 1.32 \text{ kgf/cm}^3$  ( $1 \text{ kgf/cm}^3 = 9.81 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ )。

② 載荷実験の荷重～変位関係より地表面変位が1 cm となる時の地盤反力係数を逆算すると<sup>2)</sup>、 $k_h = 2.58 \text{ kgf/cm}^3$ 。

1 載荷実験結果による比較ではあるが、実験で得られた反力係数は示方書の方法で評価する値より大きく、設計上、杭径としてソイルセメント柱径を用いる事のできる可能性を示している。

## 7. あとがき

鋼管杭の新しい低騒音・低振動工法を開発した。工法の概要は次のとおりである。

最初に、次に述べるソイルセメント柱造成に用いるセメントミルク量と同じ土量の地下空洞円柱を先行掘削する。セメントミルクと地盤を現位置で混合して、ソイルセメント柱を造成する。セメントミルク量と同じ土量を先行掘削しているため、ソイルセメントは地上にあふれる事ではなく、発生する廃土は先行掘削時の廃土のみである。ソイルセメント硬化前に鋼管をソイルセメント柱内に挿入する。鋼管は、ソイルセメント柱径より小さな直径であり、表面にリブが設けられている。ソイルセメントの硬化を待って、杭は完成する。

この工法の特徴は次のとおりである。

① 発生する廃土は、先行掘削時の掘削土のみであり、杭本体積に比較した廃土量の比は、従来工法である場所打ちコンクリート杭工法、中掘り杭工法に比べ、格段に小さな値である。また、この廃土はセメントを含んでいないため、産業廃棄物ではない。

② 鋼管表面にリブを設けると共に、ソイルセメント強度を十分大きな値とし、鋼管とソイルセメント柱を一体となって挙動させる。これにより、鉛直地盤支持力として、鋼管径でなく、ソイルセメント柱径に当たる周面長および先端面積による値を得る事ができる。

③ 本工法では、支持地盤まで孔を掘削する工程のない事から、場所打ちコンクリート杭工法のように、先端地盤のゆるみ、スライムの発生等による地盤支持力低下は発生しない。また、ソイルセメント柱と地盤の密着性が良好なため、中掘り杭工法のように、密着性不良による周面摩擦係数低下は発生しない。この工法による杭の載荷実験では、先端支持力は中掘り杭工法の場合とほぼ同等、周面摩擦力は場所打ちコンクリート杭工法の場合とほぼ同等の支持力性能を示している。

④ 鋼管径をソイルセメント柱径より小さな値とする事により、鋼管の杭体耐力を地盤鉛直支持力に見合ったものとする事ができる。

支持力に関連した②、③は数少ない載荷実験結果に基づいたものであり、今後更に検討が必要である。また、この杭は主として鉛直支持力に対する合理性を求めたものである。今後これに併せて合理的な水平支持力機構を持つ杭の開発を検討したい。

謝辞 本開発は、(財)土木研究センターの「ソイルセメント合成鋼管杭構法」研究会を母体として行われた。委員各位のご指導に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、IV下部構造編、pp.281～283, pp.327～331, 1990.
- 2) (社)日本道路協会：杭基礎設計便覧、pp.162～168, 1986, pp.327～330, 1986.
- 3) 例えば、土質工学会：連続地中壁工法、土質工学会、pp.227～280, 1988.
- 4) (社)日本建築学会：鋼構造設計基準、p.57, 1970.
- 5) 栖原寿郎：海洋構造物の座屈と最終強度、日本造船学会誌、No.569, pp.21～26, 1976.
- 6) 加藤勉、秋山宏、鈴木弘之：軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力、日本建築学会論文報告集、No.204, pp.9～17, 1973.
- 7) (社)日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.268～271, 1988.
- 8) 岸田英明・赤堀弘治・石本一之：コンクリートを充てんした鋼管杭の曲げ挙動—コンクリート強度の影響—、JSSC, Vol.18, No.197, pp.31～42, 1982.
- 9) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準・同解説、1972.
- 10) 土質工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説、土質工学会基準、1983.

(1991.7.3 受付)

## DEVELOPMENT OF A NEW STEEL PIPE PILE FOUNDATION CONSTRUCTED BY SOIL-CEMENT MIXTURE METHOD

Hiroaki NAGAOKA, Harumitsu TAMANO, Hirohiko TADA and Shouhei CHIDA

A new steel pipe pile foundation is developed, to which soil-cement mixture method is applied. The characteristics are as follows.

- 1) The foundations have high bearing capacity, i.e., the end bearing capacity is greater than that of cast-in-place concrete piles and the frictional resistance is greater than that of bored piles.
- 2) Smaller amount of waste soil arises, compared with cast-in-place concrete piles and bored precast piles.
- 3) As to economy of pile material, the strength of steel pipe is nearly equal to the bearing capacity of ground in the foundations, whereas the strength is higher than the bearing capacity in usual pile foundations.