

# 鋼管ソイルセメント杭(ガンテツパイル)の開発と商品化

## Development and Commercialization of Composite Foundation Pile (Gantetsu-pile)

岡 扶 樹<sup>(1)</sup>  
Tomomi OKA

寺 崎 滋 樹<sup>(1)</sup>  
Shigeki TERASAKI

木 下 雅 敬<sup>(2)</sup>  
Masanori KINOSHITA

片 山 猛<sup>(4)</sup>  
Takeshi KATAYAMA

原 田 稔<sup>(3)</sup>  
Minoru HARADA

小 林 正 治<sup>(3)</sup>  
Masaharu KOBAYASHI

### 抄 録

振動・騒音規制により都市部における基礎工法としての競争力を失った打撃鋼管杭に代え、低振動、低騒音で、建設発生残土も少なく、耐震性能にも優れたガンテツパイル(鋼管ソイルセメント杭)を開発、商品化したことについて述べた。ガンテツパイルは、地盤にセメントミルクを注入、攪拌してソイルセメント柱を造成すると同時に外面突起付き鋼管を回転埋設し、ソイルセメント柱と鋼管を一体化した杭である。外面突起付き鋼管の製造技術確立、高効率、高品質の一工程施工方式の確立、低排土と施工性を両立する施工条件の確立、地盤を緩めないことによる大支持力性能の発揮と、高い耐震性能の設計への反映など新技術として体系化、商品化した。

### Abstract

Due largely to the Noise Regulation Law and the Vibration Regulation Law, the conventional percussion pile driving method has almost been impossible to adopt in urban areas. Nippon Steel has developed a low noise and low vibration pile driving method named Gantetsu pile. It has high capability of the earthquake-resistance and causes less damage to the environment than conventional pile driving methods. The ground soil is mixed with cement milk to form a soil cement column, into which a pile with outside surface projections is driven to form a steel and soil cement composite pile. In order to commercialize Gantetsu pile, new technologies have been synthesized. This paper describes the social needs and details of a new pile.

### 1. 緒言

ガンテツパイルは、環境への配慮から生じた建設残土量低減への要求、圧倒的な価格競争力を誇る場所打ち杭(現場造成杭)に建設コスト面で対抗可能な鋼管系杭開発への要求、及び阪神淡路大震災による基礎の耐震性能への要求の高まりに対する回答として開発された。

まず、1988年当時の都市部での建設ラッシュと産業廃棄物の処理場不足から、建設発生残土を極力低減する工法が求められた。バブル経済の崩壊と共に一時期その要求は下火となったが、環境への配慮の気運の高まりと切り離せない問題であり、特に都市部において建設残土を低減することは必須であった。

次に、騒音、震動への規制により、鋼管杭工法として建設コスト競争力のあった打撃工法を都市近郊で適用することは不可能となり、低振動、低騒音の場所打ち杭工法が急激にその適用領域を拡大した。これに対しては、同じく低騒音、低振動の中掘り鋼管杭工法が生み出されたが、鋼管径よりもやや大きく地盤を削孔しながら鋼管を埋設する施工法であるため、設計で許される周面摩擦力が小さく、高架橋のように、地震時に基礎に引き抜き荷重が作用する構造

物においては杭本数の増加をまねき、場所打ち杭に対し建設コストが割高となる傾向があった。そこで、新たな低振動、低騒音工法が求められた。

最後に、1995年初頭に起こった阪神淡路大震災で多くの構造物が倒壊し、あるいは使用不能となったが、その原因の一つに基礎の耐震要求値設定上の問題があり、耐震設計法に対する見直しが行われた。これに対しては、従来の震度法設計に加えて、地震時の保有水平耐力法による設計手法が新たに規定された。震度法では、0.2Gレベルの地震力(地震時の水平力が鉛直方向力の0.2倍)に対して、部材と地盤を線形範囲でとらえ、地盤抵抗、部材の応力度、基礎の変位を許容値以下に押さえて設計する。一方、保有水平耐力法では、1.0Gと2.0Gの地震力に対して、橋脚の変形によりエネルギーを吸収することを原則とし、地盤と部材の非線形特性を考慮した解析から求まる基礎の降伏耐力が橋脚の降伏耐力を上回ることを原則として設計する。すなわち、基礎の耐荷力と変形性能を積極的に評価する思想が設計に導入され、ガンテツパイルのような合成杭の耐震性能を積極的に評価する道が開けた。

ガンテツパイルは、現地土を有効に活用することで建設残土を低減し地盤を緩めない工法と、外面突起付き鋼管により場所打ち杭よ

\* (1) 建材開発技術部 マネジャー

東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-7746

\* (2) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

\* (3) 建材営業部 マネジャー

\* (4) 建材開発技術部 グループリーダー

り20~30%小さい杭径で同等の支持力性能を発揮することで建設コストを低減し、鋼管と鋼管内ソイルセメントの合成効果により高い耐震性能を実現した。以下、ガンテツパイルの技術要素、コスト競争力、耐震性能、及び採用実績と今後の展望について述べる。

## 2. 技術要素

### 2.1 杭の仕様

#### 2.1.1 杭としての分類

ガンテツパイルは、図1に示すように、地盤の中にセメントミルクを注入、攪拌してソイルセメント柱を造成すると同時に、外面突起付き鋼管を回転埋設することにより、鋼管とソイルセメント柱を一体化した杭であり、鋼管ソイルセメント杭あるいは合成鋼管杭などと呼ばれる。杭先端部を掘り起こし、切断した断面状況を写真1に示す。鋼管径1000mm、ソイルセメント径1400mmの場合の例であり、砂れき地盤ではコンクリート状の強固な杭先端部となっていることがわかる。

土木学会による杭としての分類によると、材質面から外面突起付き鋼管杭に、工法面から埋め込み杭に分類されている。使用する鋼管径は600mmから1200mmであり、鋼管系の杭としては中型の杭である。

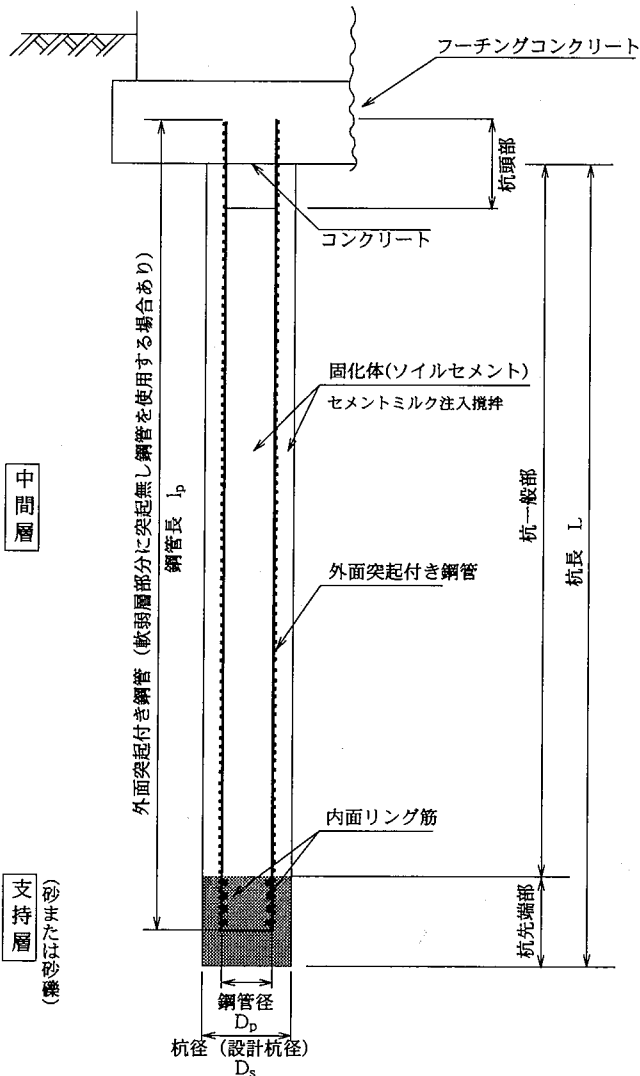


図1 ガンテツパイルの模式図



写真1 ガンテツパイルの先端部の造成状況(砂礫層) 現場造成杭を掘り起こした後に切断して断面を撮影

#### 2.1.2 外面突起付き鋼管

ガンテツパイルには、主として外面突起付き鋼管を用いる。外面突起付き鋼管とは、高さ2.5mm以上の突起が40mm以下の間隔で圧延された鋼帯を用いて、スパイラル造管法により製造した鋼管である。図2に外面突起付き鋼管用鋼帯と外面突起付き鋼管の製造方法の模式図を示す。外面突起の形状は台形であり、板幅方向に平均すると0.5mm以上の板厚に相当する断面積を有する。鋼管とソイルセメント柱の付着力がソイルセメント柱と地盤との摩擦伝達力よりも大きくなるように、突起形状とソイルセメント柱の強度を決定している。

また、突起と鋼管軸方向とのスパイラル角度は管軸方向の力の伝達を考慮して40度以下となるように製造する。外面突起付き鋼管の仕様はJIS A 5525“鋼管くい”の規格を満たしている。突起付きの鋼帯は年産2万tの水準となっており、生産量の増加とともに、製造歩留まりと造管成形機構の改善が進んでいる。

## 2.2 新施工法の開発

### 2.2.1 高能率、高品質で環境に優しい一工程施工方式の確立

鋼管杭の主たる競合品である場所打ち杭に対して、地盤を緩めず小径で大支持力を発揮し、施工能率が高く、かつ、低振動、低騒音である工法の開発が目標であった。深層混合処理工法の中で、機構が簡単でかつ高品質なソイルセメント柱の築造が可能なテノックス社のテノコラム工法を基に、ソイルセメント柱の築造と外面突起付き鋼管の埋設を同時に行い、一工程で施工完了する同時埋設工法を

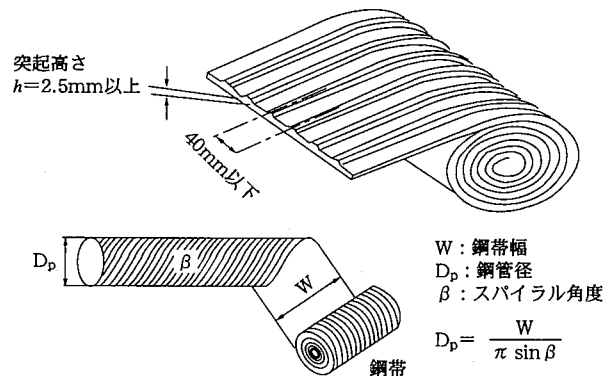


図2 外面突起付き鋼管用鋼帯と鋼管の製造方法

開発した。図3に杭の築造工程を示す。本工法は、基本特許を含み特許5件、実用新案5件が登録されており、世界初の工法である。

図4に騒音・振動のレベルを示す。環境規制値を十分クリアしていることはもちろん、競合工法に比べて最も低振動、低騒音な工法であることがわかる。

また、図5に示すように、施工機の本体とセメントミルクのミキシングプラント、及び現場管理室のパイルモニタが無線で連携をとっており、地盤推定図、掘進速度、セメントミルクの注入量などの計画データと実施工時に得られたロッドの掘進抵抗値などをリアルタイムに比較し、管理する独自の施工管理システムを有してい

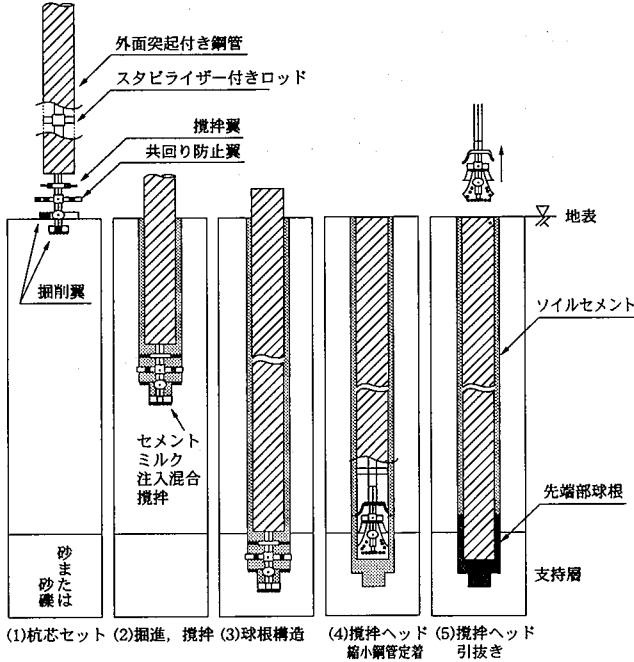


図3 ガンテツパイルの施工手順

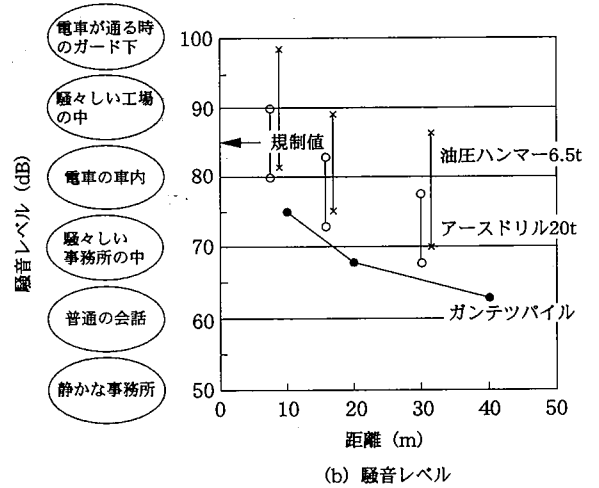
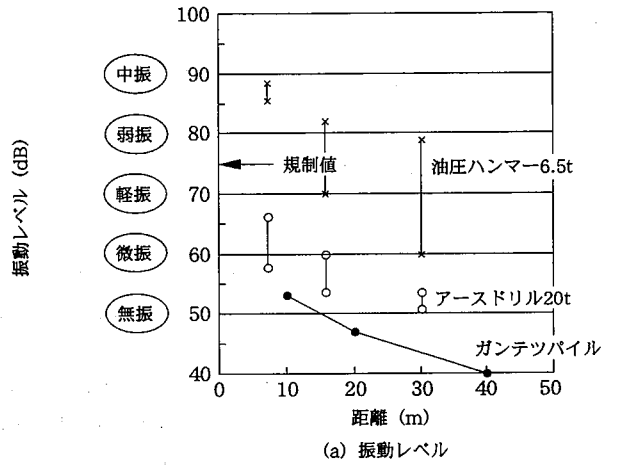


図4 ガンテツパイル施工時の振動・騒音レベル

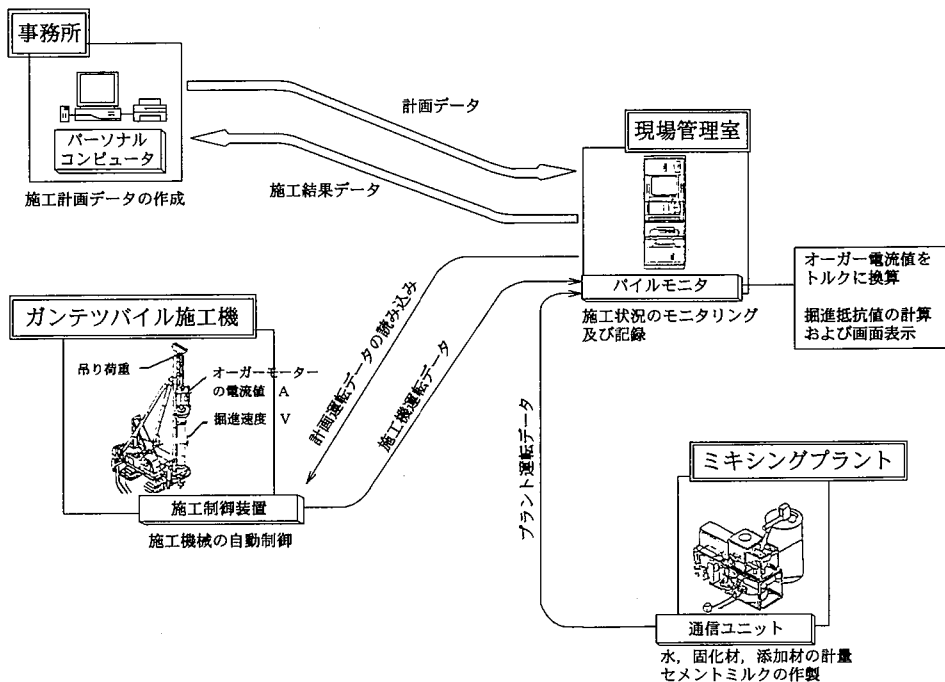


図5 ガンテツパイルの施工管理システム

る。この結果、図6に示すように、杭の全数について支持層への到達確認を行うことができ、杭としての品質確保に役立っている。このシステムはガンテツパイル独自のシステムであり業界最先端である。同時理設工法と施工管理システムにより、ガンテツパイルは長尺杭でも確実に施工が行える。実績最大杭長は杭径1000mm(鋼管径800mm)で67mである。

2.2.2 低排土と施工性を両立する施工条件の確立

ガンテツパイル開発のポイントの一つは、現地土の有効活用により排土を低減することであった。地盤にセメントミルクを注入・攪拌してソイルセメント柱を築造する際、セメントミルクの配合が施工性と排土量に大きく関係する。一般に水セメント比を高くし単位水量を上げるとソイルセメントの密度が低下し鋼管の埋設が容易となるが、ソイルセメント強度が低下し、また、排土量が増加する。各種地盤での施工試験の結果、現地土1m<sup>3</sup>に対して、セメント300kg、水セメント比100%の配合が、施工性確保と排土量の低減を両立させることを見出した。この結果、排土量は図7に示すように平均して杭体積の20~40%であり、同径の杭を施工する場合、他工法に比べて1/2~1/5となった。特に近年の環境意識の高まりと共に、建設発生残土が少ない点は、大きなアピールポイントとなってきた。

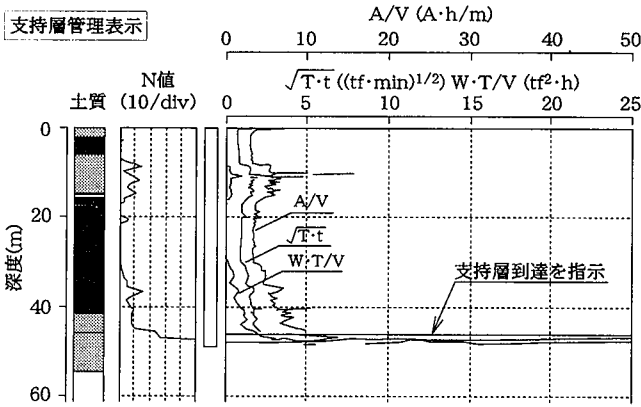


図6 掘進抵抗値による支持層到達管理の例

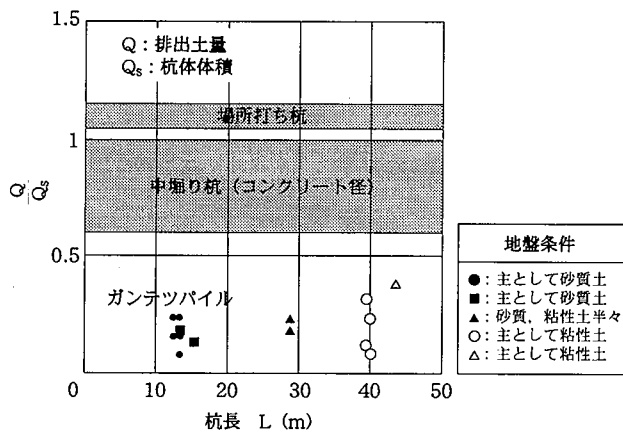


図7 排出土量/杭体積の比と杭長の関係

2.3 性能を反映する設計手法

2.3.1 地盤を緩めないことによる大支持力性能

競合工法に対する競争力を上げるには、設計面でも工夫が必要であった。ガンテツパイルは新発想の杭形式であるため既存の設計手法が無く、実態性能を可能なかぎり反映した設計法を構築した。

まず、大支持力を発揮する機構を検討した。ガンテツパイルのソイルセメントの単位体積重量は平均して1.7~1.8g/cm<sup>3</sup>程度あり、現地盤の比重とほぼ同一である。これが図8に示すように液圧としてソイルセメント柱の外側の地盤に向かって作用する。この結果、地盤は静止土圧より大きな圧力を受けることになり、杭の施工によっても地盤が緩まないことが期待された。

これを実証するために実測<sup>1)</sup>とFEMなどの数値解析<sup>2)</sup>を行った。杭先端部と同じ深度の支持層中で、杭中心から杭径だけ水平方向に離れた地点に、ジオセル<sup>3)</sup>とよぶ側圧測定装置を図9に示すように埋設し、ガンテツパイルの施工による土圧の変化を測定した。測定結果を図10に示す。掘削攪拌ヘッドがGL-11mの支持層直前まで

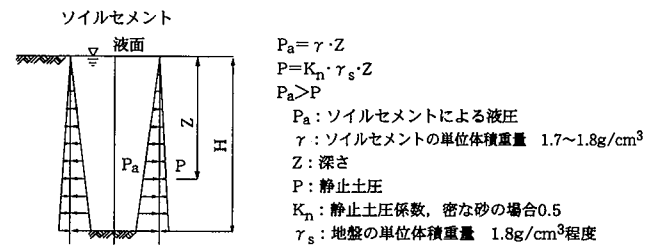


図8 ガンテツパイルの液圧作用イメージ図

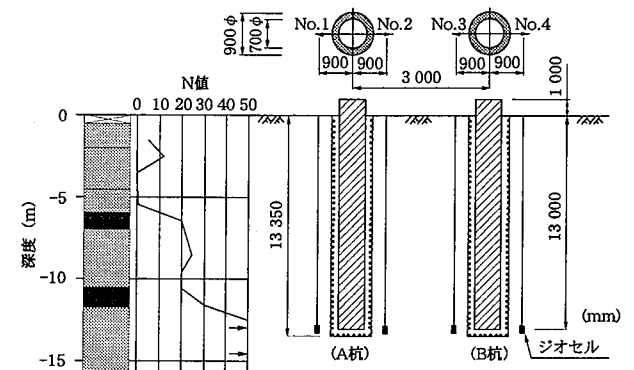


図9 ガンテツパイル施工深度とジオセル設置状況

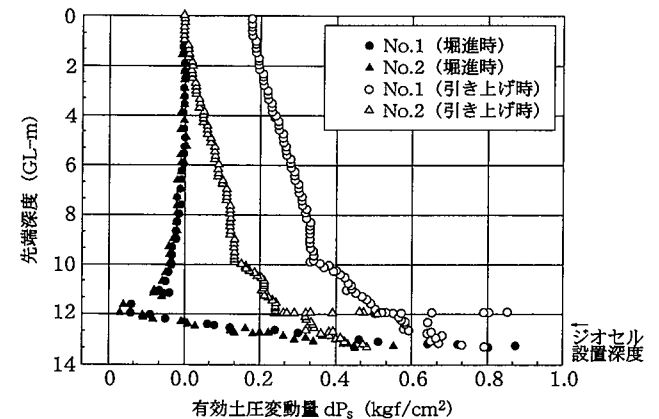


図10 ガンテツパイルB杭の掘削ヘッド深度と側圧の変化

はGL-13mの支持層中の土圧はほとんど変化が無い。それ以深への掘進と共にやや土圧が減少するが、掘削攪拌ヘッド先端が支持層に入ると土圧は上昇した。掘進終了と掘削攪拌ヘッドの引き上げとともに土圧は緩やかに減少したが、施工終了後も施工前の値よりも高い土圧を保っており、地盤は緩んでいないと考えられた。

ガンテツパイルの支持力性能は実大規模の載荷試験により最終評価されたが、杭先端の設計支持力度は砂層で最大750tf/m<sup>2</sup>、砂れき層で最大1 000tf/m<sup>2</sup>と認められ、場所打ち杭の300tf/m<sup>2</sup>に比べ2.5~3 倍の値となった。

### 2.3.2 鋼管とソイルセメントの合成による固い杭の軸方向ばね

地盤を緩めず埋設され、鋼管とソイルセメント柱が一体化しているガンテツパイルは、杭の軸方向のばねが、他の鋼管杭工法に比べて固い。図11に同一杭径の各種杭の軸方向ばね $K_v$ と杭長杭径比 $L/D_s$

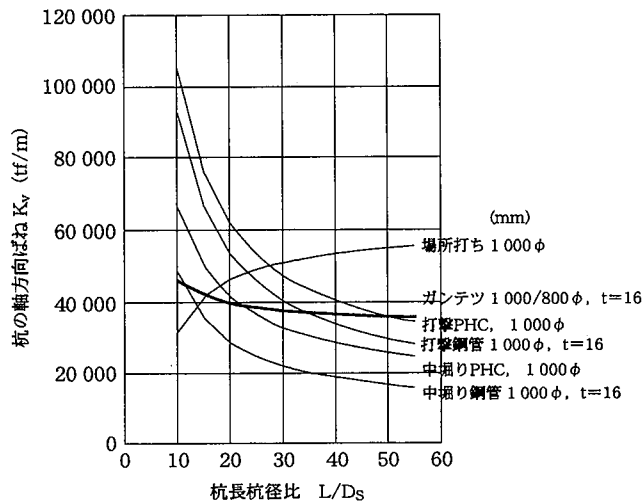


図11 杭の軸方向ばねと杭長杭径比の関係

$D_s$ の関係を示す。ガンテツパイルの $K_v$ 値は、類似工法を含め15件の載荷試験結果から評価した値である。杭径1mで杭長が30mの杭を設計する場合、杭頭部の鋼管板厚を16mmと仮定すると、ガンテツパイルの $K_v$ 値は、場所打ち杭の約80%、中掘り鋼管杭の170%となる。一般に、鋼管杭は杭としての剛性が競合工法に比べて小さく、地震時に大きな慣性力が作用すると変位も大きくなる傾向があり、高架橋の基礎のように設計上許容される変位が制限される場合には不利であった。ガンテツパイルは、ソイルセメント柱と鋼管を合成させることで剛性の高い杭を実現し、場所打ち杭に対する競争力を得た。

## 3. 耐震性能

### 3.1 水平交番載荷試験による耐震性能の評価

ガンテツパイルの部材の耐荷性能、変形性能を評価し、設計に反映する目的で一定軸力作用下での水平交番載荷試験を実施した<sup>4)</sup>。試験体のパラメータを表1に、試験概要を図12に示す。試験のパラメータは、(1)外面突起の有無の効果評価、(2)鋼管内ソイルセメントと鋼管の合成効果評価、(3)ソイルセメントの強度の影響評価を目的として設定した。載荷方法は、120tf(鋼管規格上の降伏荷重の30%)の一定軸力を載荷した状態で、杭に直角方向より正負の繰り返し荷重を準静的に載荷する水平交番載荷である。載荷パターンを図13に示す。荷重制御により設計上の降伏応力( $\sigma_{yd}=2 400\text{kgf/cm}^2$ )に対する水平変位 $\delta_{yd}$ を求め、 $\delta_{yd}$ を片振幅とした両振りの交番載荷を3サイクル行い、以片振幅を $\delta_{yd}$ の整数倍に増加させた。試験は、各サイクルの最大荷重が降伏荷重を下まわるか、または鋼管の座屈などにより試験体が明らかに終局状態に至ったとみなせる状態まで継続した。

### 3.2 交番載荷試験結果

荷重と変位関係の包絡線を図14に示す。本図では、荷重と変位のそれぞれを、鋼管の実降伏点を用いて計算した降伏荷重 $P_y$ とそれに

表1 試験体のパラメータ

試験体	仕様	ソイルセメント強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	鋼管径 (mm)	板厚 (mm)	鋼管の降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )	鋼管の規格
ケース1	通常鋼管	ソイルセメントなし	600	9.07	3 150	SKK400
GR-1	外面突起	ソイルセメントなし	600	9.02	3 330	SKK400GR
GR-2	外面突起+ソイルセメント	57	600	9.02	3 330	SKK400GR
GR-3	外面突起+ソイルセメント	28	600	8.70	3 330	SKK400GR

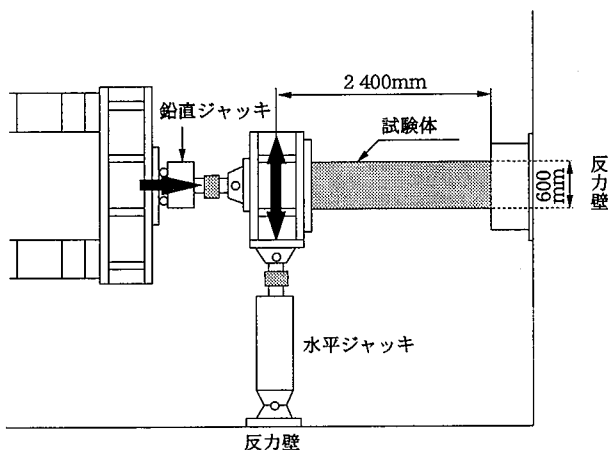


図12 水平交番載荷試験概要図

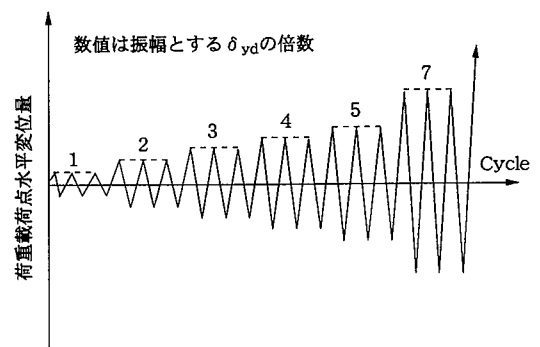


図13 水平交番載荷試験の載荷パターン

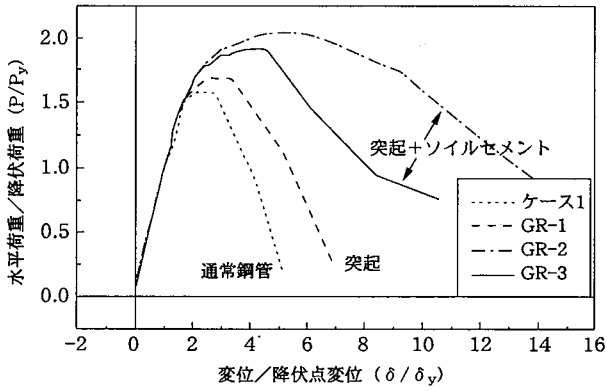


図14 無次元化した荷重-変形包絡線(実降伏点)

対応する降伏点変位  $\delta_y$  で無次元化している。各試験体の比較から、最大耐力と変形性能について次のことが分かった。(1)突起付き鋼管は、その突起の効果だけでも同じ母材厚の通常鋼管に比べて最大耐力と変形性能が向上する。また、(2)鋼管内ソイルセメントと鋼管の合成効果による耐力と変形性能の向上が確認され、ソイルセメント強度が高い方が効果は増大する。

3.3 耐震性能の設計反映

ガンテツパイルはソイルセメントと外面突起付き鋼管の合成体であるが、表2に示すように、標準的な設計手法としては、水平地盤反力、軸方向ばね、及び支持力の評価についてのみ合成効果を評価している。杭としての軸力と曲げに関しては、鋼管のみで設計しており、真の意味での合成杭の設計となっていない。これは、ソイルセメントの標準的な設計一軸圧縮強度が10kgf/cm<sup>2</sup>と低く、例えば杭径1000mmの場合曲げ剛性への寄与は数%程度と小さいためである。しかし、前述の交番載荷試験結果から分かる通り、鋼管内ソイルセメントは鋼管に拘束されているため、明らかに杭としての

表2 ガンテツパイルの標準設計と耐震性能の評価手法

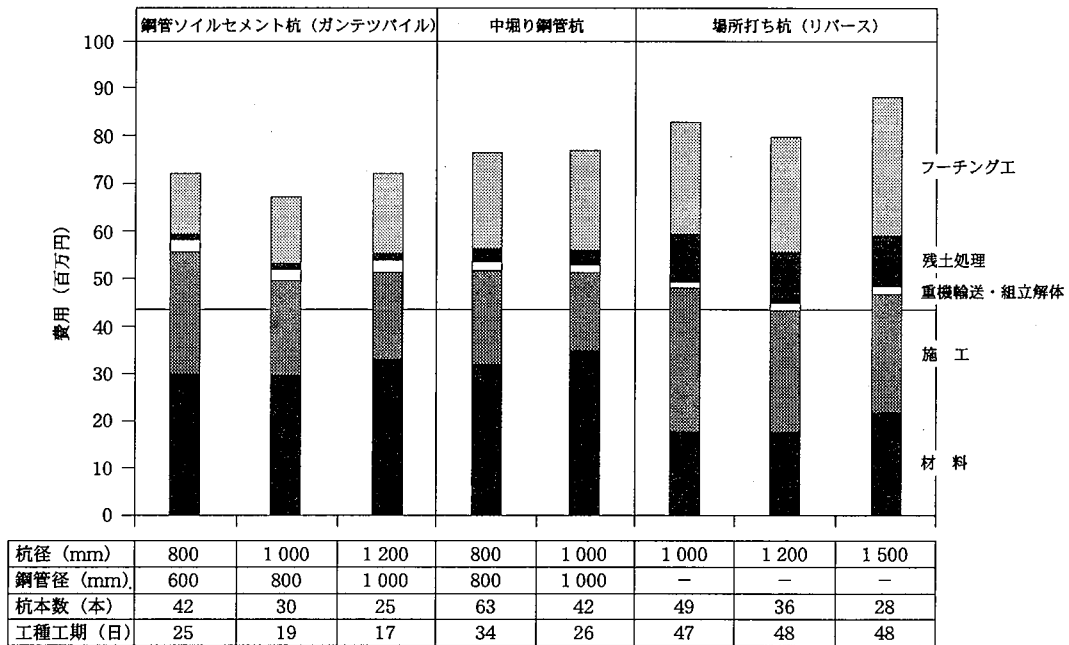
	標準設計法	合成効果評価法 (耐震性能評価)
水平地盤反力係数 $K_h$	設計杭径：ソイルセメント柱径	同左
軸方向ばね $K_v$	鋼管とソイルセメントの合成	同左
支持力評価	周面摩擦：ソイルセメント柱の外径 先端支持力：ソイルセメント柱断面積	同左
軸力、曲げの計算	鋼管のみ	鋼管内ソイルセメントと鋼管の合成効果を鋼管板厚に換算して付加

耐力・変形性能向上に寄与している。また、現地のソイルセメント実強度は20kgf/cm<sup>2</sup>程度発現している。

合成効果を設計反映するため、鋼管を同断面積の鉄筋と仮定し、RC方式(鉄筋コンクリート)で合成効果評価を試みたところ、安全側の評価であることがわかった。ソイルセメント強度が20kgf/cm<sup>2</sup>の場合には、外面突起の面積効果とあいまって鋼管板厚換算で約1mmの効果を生む。これを設計に反映して建設コストを縮減する試みは既に始まっている<sup>5)</sup>。今後更に検討を重ね、鋼管ソイルセメント杭の耐震性能の高さを適切に設計に反映したい。

4. 建設に要するコスト

ガンテツパイルの経済性を検討した例を図15に示す。支持層までの深さが25mで軟弱な地盤を対象に、スパン50mの高架橋の基礎をガンテツパイルと中掘り鋼管杭、及び場所打ち杭で設計し比較した。作用力は橋脚下端で同一とし、各杭種の杭径と杭本数に応じたフーチングの大きさの違いを反映した比較である。図には、杭の材



(軟弱地盤、杭長25m橋脚下端作用力：垂直方向=5500tf, 水平方向=1500tf, モーメント=14000tf・m)

図15 ガンテツパイルの経済性検討例

料費、施工費、施工に要する重機の輸送・組立解体費、残土処理費、フーチングの施工費を累積表示している。杭の建設費(施工と材料の和)のみを比較すると場所打ち杭の杭径1 200mmの場合が最も安価である。一方、フーチングと杭の建設費の和はガンテツパイルの杭径1 000mmの場合が最も安価となった。このことより、ガンテツパイルは、杭単体としては高価であるが、構造系全体としての建設費を下げる効果のあることが分かる。

また、基礎当たりの杭本数は、ガンテツパイルの杭径1 000mmと場所打ち杭の杭径1 500mmの場合とがほぼ同じであり、本地盤条件ではガンテツパイルの大支持力特性により杭径を2/3に小型化できることが分かる。更に、この場合、ガンテツパイルと場所打ち

杭の杭径比は0.67であり、杭体積比は0.45となる。ガンテツパイルの排土量が杭体積の20~40%程度であることから、橋脚あたりの排土量は場所打ち杭に比べ約10%程度にまで低減できることが分かる。

### 5. 採用実績

ガンテツパイルは、土木分野での設計法の確立につれ採用実績を急激に伸ばしつつある。採用実績と採用の鍵を表3に示す。建設コストが競合工法に比べて安価であることはもちろんであるが、低振動・低騒音工法であること、及び排出土量の少なさ等が採用の鍵となっている。写真2~7に第二名神高速道路での採用状況と、マン

表3 ガンテツパイルの採用実績と採用の鍵

分野	対象	採用例	採用の鍵
土木	高架橋の基礎	第二名神高速道路の高架橋基礎 青谷羽合道路の橋梁基礎 他6件	低振動、低騒音 低コスト
	水処理場の基礎	石巻浄化センター 1件	被圧水存在下で補助工法なしの施工
建築 (参考)	建築物の基礎	住宅都市整備公団のマンション 郵政省の病院、郵便局 立体駐車場 他24件	低排土 低振動、低騒音 低コスト



写真2 ガンテツパイルの掘進開始状況



写真4 外面突起付き鋼管の現地溶接状況

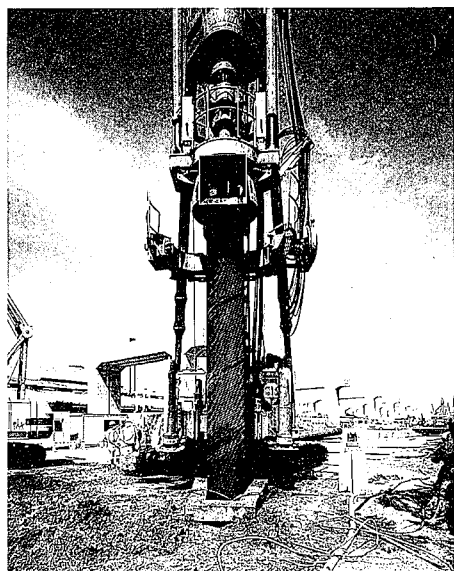


写真3 第二名神高速道路における施工状況

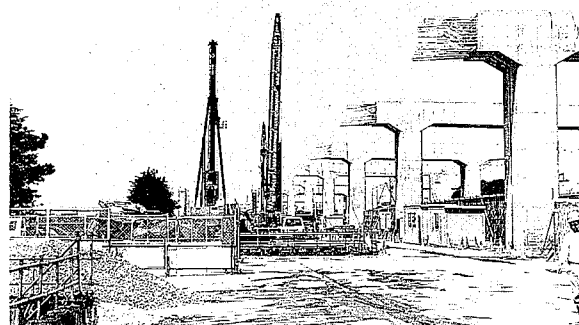


写真5 第二名神高速道路における施工状況

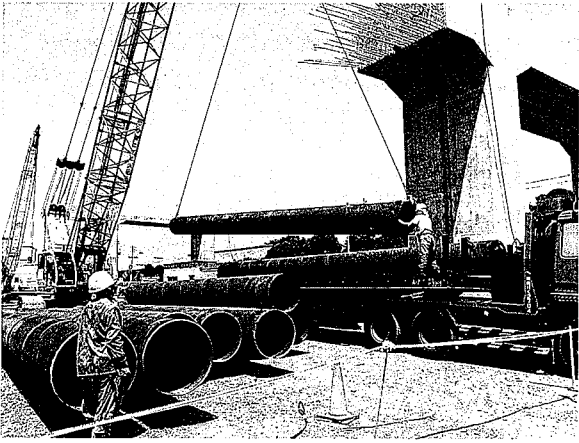


写真6 現地への鋼管搬入状況

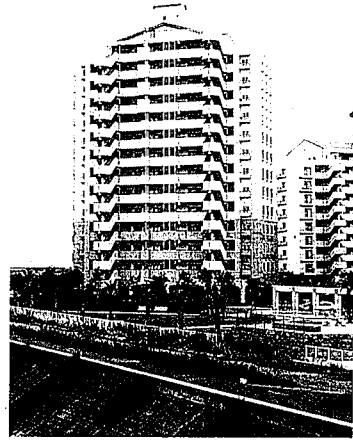


写真7 高層集合住宅への適用事例(WRC14階)

ションへの適用例を示す。杭径は900~1500mm、杭長は最大66m(杭径1000mm、鋼管径800mm)までの実績があり、1998年6月段階で、土木分野で9件9千t強、建築分野で24件16千tの実績があり、1998年度以降は15千t/年の水準が見込まれる。

## 6. 結言

ガンテツパイルは、鋼材の製造技術、設計技術、施行技術の融合による新たな建材商品創出の1例である。鋼管とソイルセメント柱の合成杭として、低排土、低振動・低騒音工法、大支持力、耐震性能など数多くの特徴を有するガンテツパイルは、更に発展の可能性を有しており、今後とも改善、改良を進めて行きたい。

開発にあたっては、住宅都市整備公団、クボタ、テノックスを始め日本道路公団など多数の関係者の御指導、御協力によるところが大きい。感謝の念を表したい。

## 参考文献

- 1) 大槻, 江口, 岡, 堀切: 同時埋設合成鋼管杭(ガンテツパイル)施工時の周辺地盤挙動調査(その2: 現場調査結果), 第33回地盤工学研究発表会, 1998
- 2) 黄, 吉田, 岡, 大槻: 同時埋設合成鋼管杭(ガンテツパイル)施工時の周辺地盤挙動調査(その3: 解析), 第33回地盤工学研究発表会, 1998
- 3) 百瀬, 岡, 江口, 日比野: 同時埋設合成鋼管杭(ガンテツパイル)施工時の周辺地盤挙動調査(その1: ジオセルを用いた地盤内水平方向応力の測定方法), 第33回地盤工学研究発表会, 1998
- 4) 木下, 日比野, 大槻: 鋼管ソイルセメント杭における鋼管と固化体の合成効果に関する実験, 土木学会第53回年次学術講演会, 1998
- 5) 日本道路公団 名古屋建設局: 鋼管ソイルセメント杭の設計・施工指針(案), 1997.12