

鉄道高架橋に採用した回転圧入鋼管杭の設計と施工

全日本コンサルタント(株) 技術部

奥 平 敬
河 合 義 勝
小 谷 真 史
神 尾 正

論文要旨

近鉄奈良線連立事業における東花園駅付近高架橋は、営業線に挟まれた狭い場所で基礎工事を行わなければならない。従来から多く採用されてきたリバース工法による場所打杭では、スタンドパイプの建込み、削孔機の据付け・撤去、鉄筋かご吊込み、コンクリート打設等、複数工程の現場作業が必要で、安全管理に十分な配慮が必要だけでなく、プラント設備の配置場所、駅舎周辺ではペントナイトによる現場の汚れに対する旅客への配慮等、課題が多い。

そこで、今回はこれらの課題が克服できる工法として「回転圧入鋼管杭」を採用した。本稿は、その設計、施工について報告する。

キーワード：鋼管杭，営業線近接施工，線路切替，変形性能，杭頭結合

まえがき

近鉄奈良線八戸ノ里・瓢箪山間連続立体交差化事業は、昭和 44 年に高架化が完成している大阪中央環状線から大阪外環状線までの延長 3.3 km の区間を高架化するもので(図-1)、既に工事着手されている。この事業の完成により近鉄難波駅から瓢箪山駅までの延長約 13 km が立体高架化されることになる。

本工事の施工形態は、以下の通りである。

別線施工方式

大阪中央環状線から河内花園駅東側までは、現在線を活かしたまま北側に高架下り線を構築し、切替えた後、残り的高架上り線を構築する。(図-2)

仮線施工方式

河内花園駅以東は、南側に仮線を設け、撤去した現在線のスペースを利用して高架構造部を構築する。(図-3)

仮線施工区間は、2面4線の島式ホームを有する東花園駅と車庫線を有し、線路切替段階は8段階必要となる。また、中間段階では両側を営業線に挟まれた線間施工(図-3)となり、施工性、安全性に十分配慮した施工方法の選定が望まれる。

本稿は、全高架区間のうち、「仮線施工」区間となる東花園駅付近で採用した回転圧入鋼管杭について述べる。

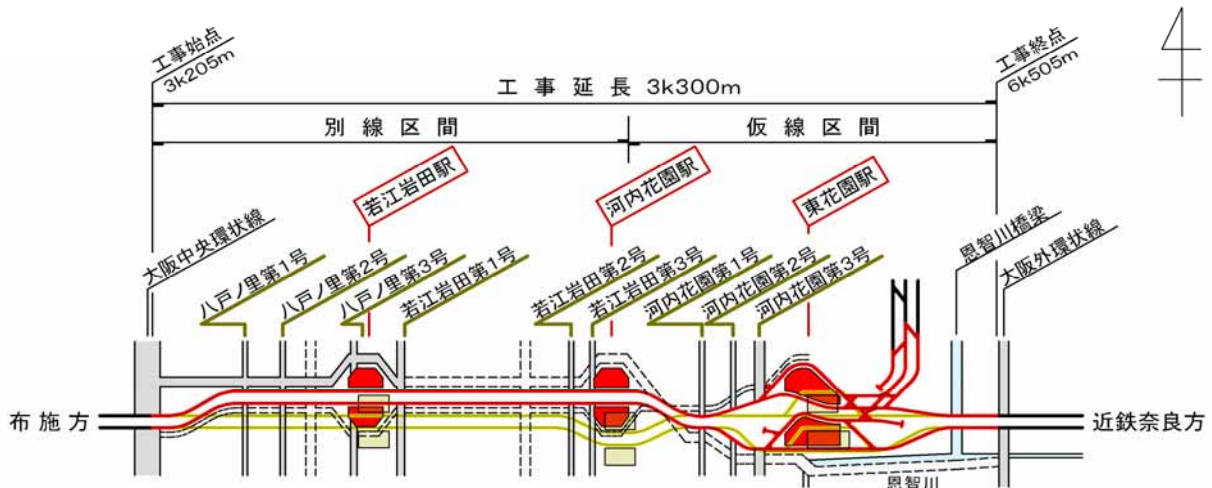


図-1 平面図

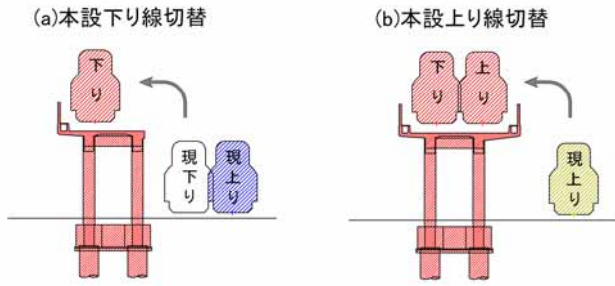


図-2 別線施工

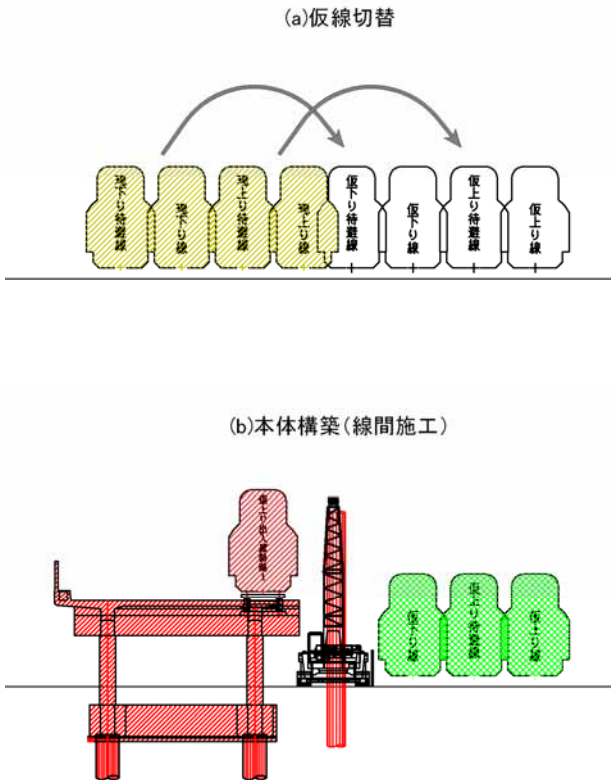


図-3 仮線施工

1. 地盤条件

当該地盤は、GLから約15mの範囲に沖積粘土層(Ac層)が厚く堆積している。これは、当地が縄文海退期において湖から平野に推移する過程で河川の運搬堆積物として生成されたものであり、N値が0~2程度のごく軟弱な鋭敏粘土である。¹⁾また、Ac層に深については支持層まで洪積砂質土層(Ds層)と洪積粘性土層(Dc層)が互層状に分布している。(図-4)

耐震設計上の地盤種別は、東花園駅部から恩智川にかけて軟弱層が厚く堆積しているためG5地盤(軟弱地盤)と判定された。

当該地盤のように軟弱な粘性土が厚く堆積する地層は、地震時に応答変位による荷重を考慮する必要があり、耐力の大きな杭種の選定が要求される。

東花園駅付近(5k 830m付近)
G5地盤(軟弱地盤)

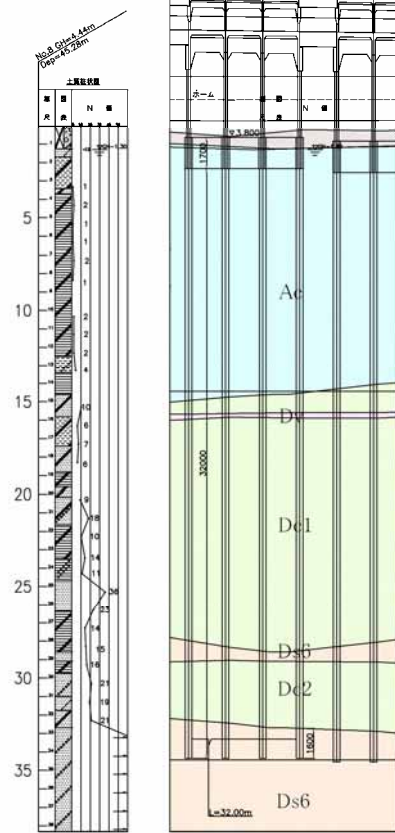


図-4 土質柱状図

2. 回転圧入鋼管杭の特徴

回転圧入鋼管杭は、鋼管の先端に螺旋状の羽根を溶接した鋼管杭である。(図-5)施工に当たっては、全回転ケーシングジャッキを回転させ、先端の羽根のくさび効果によって地盤中に杭をねじ込む工法である。(図-5)

特徴は、以下の通りである。

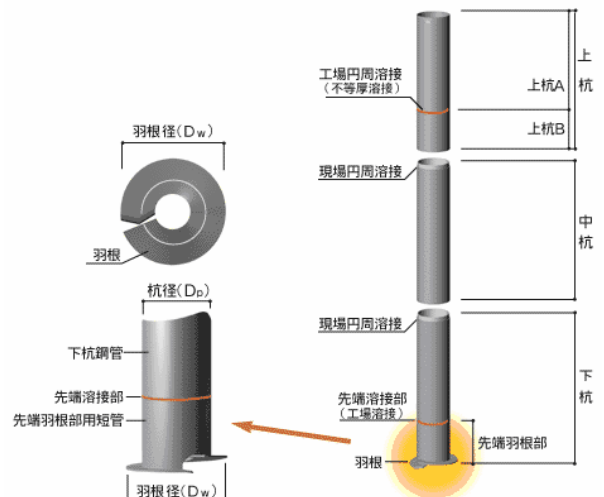


図-5 杭形状図

2.1 設計上の特徴

回転圧入鋼管杭は、羽根の拡底効果によって大きな鉛直支持力と引き抜き抵抗力を得ることができる。

回転圧入鋼管杭の支持力は、同一径の場所打杭と比べ、以下ようになる。

(1) 鉛直支持力

先端支持力の算出式は、以下の通りである。

$$R_p = q_p \cdot A_w$$

ここに、 R_p ：単杭の先端支持力（kN）

q_p ：単杭の先端支持力度（kN/m²）

場所打杭の場合、 $q_p = 70 \text{ N } 3500$

鋼管杭の場合、 $q_p = 150 \text{ N } 7500$

A_w ：単杭の先端面積（m²）

場所打杭の場合、 $A_w = \pi/4 \cdot D^2$

鋼管杭の場合、 $A_w = \pi/4 \cdot (D_w^2 - D_{wi}^2)$

D_w ：羽根径（m）

D ：杭径（m）

D_{wi} ：羽根内径（m）

表-1 設計支持力比較表

	場所打杭	鋼管杭
杭径 D (m)	1.1	
羽根径 D_w (m)		1.65
先端のN値	50	
先端面積 A_w (m ²)	0.95	1.90
先端支持力度 q_p (kN/m ²)	70N = 3500	150N = 7500
単杭の先端 支持力 R_p (kN)	3325	14250
最大周面摩擦力 R_f (kN)	2600	
設計支持力 $R_{pd} = R_p + R_f$ (kN)	5925	16850
比率	1.0	2.8

回転圧入鋼管杭の鉛直支持力は、場所打ち杭と比べ、同地盤条件での杭先端支持力度（ q_p ）が大きく評価される。また、羽根による先端面積も大きくなるので、同じ杭径の場所打ち杭と比べ、鉛直支持力が2.8倍以上期待できる。

(2) 引抜き抵抗力

場所打ち杭では、周面摩擦力（ R_f ）しか期待できないが、回転圧入鋼管杭では杭先端羽根のアンカー効果も期待できる。

杭先端羽根の引抜き抵抗力は、以下のように算出される。

$$P_u = D_w \left(\sum_i \cdot L_i + \cdot H/2 \right) \cdot H \cdot \tan$$

ここに、 P_u ：杭先端の羽根の引抜き抵抗力（kN）

i ：支持層より上面で地表面から i 番目の層の有効単位重量（kN/m³）

L_i ：支持層より上面で地表面から i 番目の層の厚さ（m）

H ：せん断破壊域の広がる高さ（m）

：引抜き係数

：せん断破壊域の広がる範囲の内部摩擦角（°）

場所打ち杭の場合、 $q_p = 70 \text{ N } 3500$

鋼管杭の場合、 $q_p = 150 \text{ N } 7500$

表-2 設計引抜き力比較表

	場所打杭	鋼管杭
杭径 D (m)	1.1	
羽根径 D_w (m)		1.65
杭長 L (m)	25	
最大周面摩擦力 R_f (kN)	2600	
羽根の引抜き 抵抗力 P_u (kN)	0	3000
設計引抜き抵抗力 $R_{ud} = R_f + P_u$ (kN)	2600	5600
比率	1.0	2.2

回転圧入鋼管杭は、貫入時に推進力として作用した受動抵抗がそのまま引抜き抵抗となるため、場所打ち杭では評価できなかった P_u （杭先端の羽根の引抜き抵抗力）を周面摩擦（ R_f ）と合わせて評価できる。

検討の結果、同じ杭径の場所打ち杭と比べ、引抜き抵抗力が2.2倍以上期待できる。

このように、回転圧入鋼管杭は、杭先端の支持力の割合が大きいため、周面摩擦力が期待できない軟弱地盤、液状化地盤において適合性の高い杭工法である。

2.2 施工上の特徴

騒音・振動：全旋回ケーシングジャッキ(写真-1)による回転圧入工法の採用により、杭を地中に貫入する際に衝撃は発生しないで、騒音・振動は比較的少ない。



写真-1 全旋回ケーシングジャッキ

排土：杭の先端に螺旋状の羽根（写真-2）を設けて回転圧入による貫入を行うため、無排土施工が可能である。このことにより、杭周辺地盤を締め固める効果も得られる。



写真-2 杭先端写真

支持力管理：最終根入れでは掘削機のトルク値管理により先端支持力を確認できる。

工期：コンクリートやセメントミルクなどの打設および養生を必要としないため、一般に場所打ち杭や埋め込み杭に比べて、短期間での施工が可能である。

近接施工，市街地施工：杭打ちに使用する設備が少ないため，列車近接部，線間作業等の狭い場所（写真-3）での施工が可能となる。また，ダンプやコンクリートアジテータ車を必要としないので市街地の施工に適している。



写真-3 列車近接部の施工

3. 杭の比較選定

連続立体交差化事業のように，市街地で線路が近接するような場合の高架橋基礎杭には，一般的にリバース工法による場所打ち杭が採用されてきた。今回も，別線施工区間においては同様にこの形式を採用していた。しかし，仮線施工区間においては，中間段階で線間施工となるため，非常に狭い施工ヤードで基礎杭を施工する必要が生じる。

このため，施工性，安全性の観点から検討が必要となった。

以下に，回転圧入式鋼管杭の重機配置図（図-6）と杭種比較選定表（表-3）を示す。

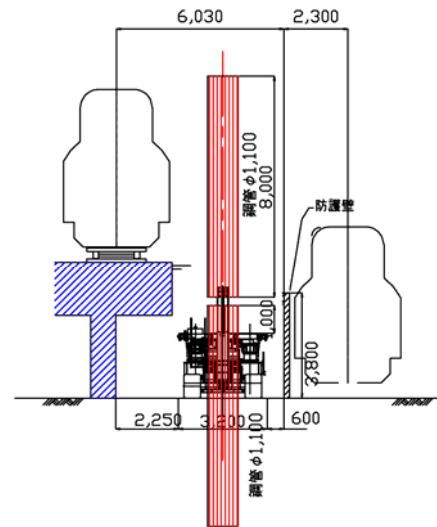


図-6 回転圧入鋼管杭 重機配置図

比較表より，場所打ち杭（リバース工法）は以下の問題点がある。

クレーン作業は，スタンドパイプの建込時，ロッドの継足時，鉄筋かごの建込時と複数の工程があり，その分，危険性が高い。

コンクリート打設は軌道横断の配管が必要であるが，詰まりの危険があり，この場合の対応が困難になることが予想される。

大きなプラント設備，残土置場が必要であり，本工事のような狭い場所では機械配置が困難である。

ベントナイト泥水などで現場が汚れるため，本工事のような仮駅舎内での施工には，十分な注意が必要である。

一方，回転圧入鋼管杭は，杭種比較表に示すように，作業安全性，機械配置，孔壁防護，排土，工期，において場所打ち杭より優れており，経済的にほぼ同等であったので，本区間においては回転圧入鋼管杭を採用することになった。

4. 回転圧入鋼管杭と場所打ち杭の設計上の差異

回転圧入鋼管杭と場所打ち杭との設計上の差異について考察する。

4.1 設計条件

(1) 構造形式：1層4柱式3径間RC高架橋（橋軸直角方向）

(2) 荷重ケース：L2地震（ $m=1.0$ ， $f=1.0$ ）

(3) 形状

・場所打ち杭：1300，30-D29

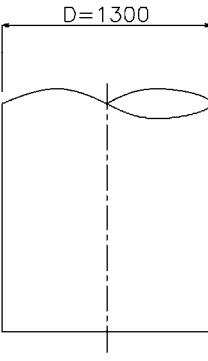
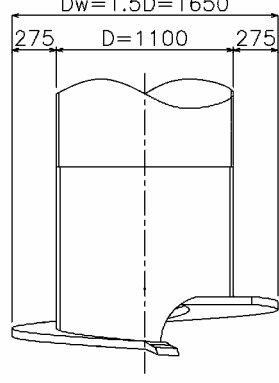
・回転圧入鋼管杭：1100， $t=22\text{mm}$

基礎形状以外の部材寸法は同一とする。

(4) 軸線図

軸線図（橋軸直角方向）を図-7に示す。

表-3 杭種比較

		場所打杭(リバース工法)	鋼管杭(回転圧入工法)	
側面図				
施工手順		スタンドパイプ建込→リバース掘削→鉄筋かご建込→コンクリート打設	杭建込(継足し)→杭回転圧入	
施工性	作業安全性	スタンドパイプ建込時、ロッド継足時、鉄筋かご建込時には、クレーン作業となり、列車近接時には特に注意が必要である。また、縦間施工ではコンクリート打設時にアジテーター車の進入が困難であり、軌道横断のポンプ配管が必要である。	△ クレーン作業は、杭建込(継足し)時のみであり、作業安全性は高い。	○
	機械設備	大きなプラント設備(200m ² 程度)と配管が必要であり、これらの配置に十分検討が必要な施工段階がある。	△ プラント設備は必要ない。自走式の掘削機械はリバース工法に比べ大きく、その移動には多少の注意が必要である。	○
	孔壁防護	孔壁の防護は、スタンドパイプとベントナイトで行う。線路近接施工となるため、孔壁防護(特に地下水位の変動や流水の影響に対して)については注意が必要である。	△ 孔壁の防護は鋼管杭自身が行うため安定している。	○
	排土	残土処分とベントナイトの廃棄処分費が必要である。また、ベントナイトにより作業ヤードは泥土化し、旅客や周辺住民に悪影響を与えることになる。	△ 圧入工法であるため、排土がなく、処分費は必要ない。また、このためクリーンな工法である。	○
	杭頭部鉄筋の施工性	鋼管杭に比べ簡素な配筋となるが杭鉄筋カゴを吊り込み施工するため、精度が悪くなると地中梁の配筋が困難となる。	△ 杭頭部鉄筋を現場溶接しなければならぬので施工管理に留意する必要がある。また、結合部配筋は場所打杭に比べ複雑となる。	△
騒音・振動	掘削作業に関しては低騒音・低振動の工法である。	○ 低騒音・低振動の工法である。	○	
工期	37.5ヶ月/221本	△	24.6ヶ月/221本	○
経済性	1,317百万円/221本 (1.000)	○	1,320百万円/221本 (1.002)	○

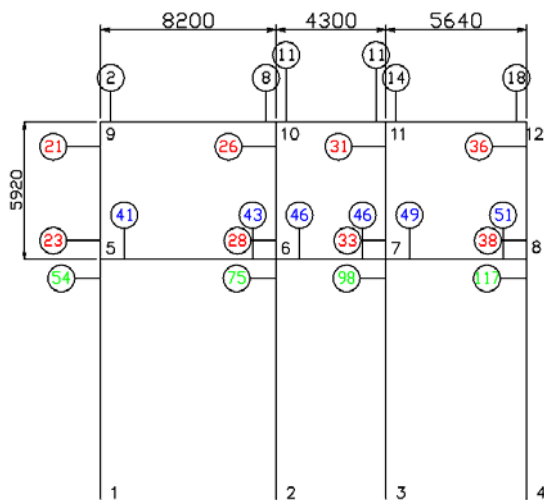


図-7 軸線図(橋軸直角方向)

4.2 計算結果

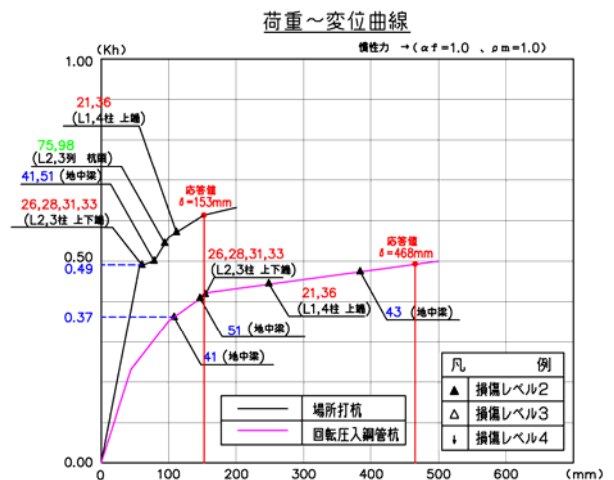


図-8 荷重変位曲線

表-4 降伏震度，固有周期，応答塑性率

	場所打杭	回転圧入鋼管杭
降伏震度	0.49	0.37
降伏変位	53.9mm	104.1mm
固有周期	0.69sec	1.06sec
応答塑性率	2.8	4.6

4.3 計算結果の考察

荷重変位曲線が示すとおり，回転圧入鋼管杭は場所打杭に比べ降伏剛性が小さく，結果として構造物の固有周期が長くなる。固有周期が長くなると，応答塑性率が大きくなり地震時のエネルギー吸収がより多く期待できるため，降伏震度を低く抑えることが出来る。

以上より，回転圧入鋼管杭を採用したRC高架橋は場所打杭に比べ，高架橋本体の鉄筋量を減じたり，部材寸法を小さくできる可能性があることがわかった。

5 . 今後の課題

5.1 高止り，低止り

実際の支持層は想定と異なることがある。

このような場合，場所打杭では先端の鉄筋を現場で変更するだけで対応可能であるが，回転圧入鋼管杭は設計時で高止り，低止りを考慮する必要がある。

本設計では，高止り1m，低止り0.5mと設定した。

しかし，低止りは，鋼管杭を設計長より長く用意しなければならないため，実際の工事では設計長通りの杭を用意し，低止りの問題については，ボーリング調査を追加して対応していた。

今後は，設計時点で従来より厳密に支持層を特定できるようボーリング調査を密に実施していく必要がある。

5.2 杭頭結合

鋼管杭の杭頭結合は，杭頭部断面力に対してRC部材で抵抗するよう鉄筋を配置した方法を採用することが一般的である。杭の発生力が杭頭で最大の場合はRC部材耐力を鋼管杭並みにする必要があり，鉄筋量がかなり多くなる。今回も，写真-4 に示すように，杭内外面にD38鉄筋を2重に配置しなければならなかった。このような杭頭構造は，最低限の構造細目を満たしてはいるものの，施工性に優れたものとは言えないものとなった。

今後は，差し込み接合や鋼管柱との直接接合，あるいは杭頭のヒンジ結合など，施工性に優れた結合方法の開発が望まれる。



写真-4 杭頭結合

6 . おわりに

近鉄東花園駅部の回転圧入式鋼管杭は，平成16年4月から工事着手し，現在約140本の基礎杭が完了している。

現時点の現場からの意見をまとめると回転圧入鋼管杭は，場所打杭に比べ，金属音や圧入トルクを上げた時の騒音・振動が予想以上に大きい，中間の硬い層を圧入する場合にかなりの時間がかかった，などマイナス面の意見もあったが，作業工程に生コンプラントの影響を受けない，搬入車両が少ないので周辺交通事情の影響を受けにくい，などのプラス評価も多かった。

本工法は，杭頭結合などの課題もあるが，今後，鉄道高架橋での採用は増えていくものと考えられる。

最後に，本報告にあたり，発注者および関係各位には多大なご指導とご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を示す次第であります。

参考文献

- 1) コロナ社：新編 大阪地盤図，昭和62年。
- 2) 近畿日本鉄道株式会社：設計仕様書(土木関係)解説，平成16年9月。
- 3) 近畿日本鉄道株式会社：第2回技術講話会，奈良線 八戸ノ里・瓢箪山間連続立体交差化工事について[計画編]，平成17年3月。
- 4) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，平成11年10月。
- 5) エコパイル協会：回転圧入鋼管 NS エコパイル，平成19年1月。