

鋼管杭中掘根固め工法「KING 工法」の 建築分野への適用*

川崎製鉄技報
34 (2002) 4, 170-174

Application of Inner Pile Excavation Method of Steel Pipe Pile with Pile Tip Protection to Architecture Field



脇屋 泰士
Yasushi Wakiya
建材技術部 課長補



沖 健
Takeshi Oki
建材技術部 課長



元木 卓也
Takuya Motoki
建材技術部 主席掛長

要旨

建築分野における鋼管杭の適用拡大を目指して、鋼管杭中掘根固め工法（KING 工法）を開発した。確実な支持力を得るためには根固め部の品質を確保することが不可欠であるので、FEM 解析によるシミュレーションおよび載荷実験による検討を行った。根固め部の FEM 解析においては、根固め径が杭径の 1.15 倍以上の場合に必要なとする耐力を確保でき、破壊耐力に対する根固め高さの影響は小さいことが明らかとなった。また、根固め部の載荷試験においては、根固め部築造時の施工仕様を明らかにするため、実際の施工機械を用いて根固め部を築造し、載荷試験を行った。その結果、撈拌回数が約 350 回/m 以上の場合に必要なとする耐力を得ることができた。

Synopsis:

The inner pile excavation method of steel pipe pile with pile tip protection (KING method) was developed in order to expand the application of steel pipe pile to the architecture field. In this method, the ensurance of the quality of pile tip protection is inevitably important to obtain reliable pile capacity. Then, this paper describes about the results of FEM analysis that has been successfully applied and experimental load tests with respect to pile tip protections. From the result of FEM analysis, the proper shape of tip protection was clarified to obtain the required capacity, and from that of load test on the tip protections that were made in the field by using an actual piling machine, appropriate construction technique was clarified.

1 緒 言

建築基礎分野における杭基礎の利用においては、通常、市街地での施工となることが多い。1960 年代の終わりから市街地での振動・騒音の規制が厳しくなるとともに、打ち込み工法の適用が困難になった。そのため、低振動・低騒音工法が主流となり、1970 年代には場所打ち杭工法と既製コンクリート杭（PHC 杭）の埋込み杭工法の開発が非常に活発に進められた。場所打ち杭分野では高支持力化を目指して拡底場所打ち杭の開発¹⁾が行われ、既製コンクリート杭（PHC 杭）分野では中掘工法²⁾やプレボーリング工法²⁾が開発されてきた。

一方、1970 年代の鋼管杭の利用は臨海部での打ち込み工法が主流であったため、建築分野での適用を目指した低振動・低騒音工法の開発はあまり行われず、また、価格の面からも建築基礎市場における鋼管杭の利用は限られたものであった。

こうした背景の中で、建築基礎分野での鋼管杭工法の適用拡大を目指して、当社は 1988 年より低振動・低騒音工法としてドリル杭

工法³⁾の開発に取り組み、1992 年までに杭径 $\phi 600$ mm 以下を適用範囲として旧建築基準法第 38 条に基づく建設大臣の認定を取得した。その後、1996 年よりさらなる利用拡大を目指して、大径・長尺杭の施工が可能で、かつ幅広い条件の地盤に適用可能な工法として鋼管杭中掘根固め工法（KING 工法⁴⁾）の開発に着手した。1998 年に杭径 $\phi 800$ mm までを対象として建設大臣の認定を取得し、1999 年には杭径 $\phi 1000$ mm まで適用範囲を拡大してきた。その結果、本工法は当社の建築分野での鋼管杭受注の約 7 割を占める主力工法として確固たる地位を築くに至った。

この工法では、Fig. 1 に示すように、鋼管の中にオーガースクリューを挿入し、杭をケーシング代わりに利用して杭先端部の土砂を排出しながら杭を支持層まで沈設する。さらに、支持層においては杭先端部にセメントミルクを注入して拡根固め部の築造を行い、その根固め部の硬化によって支持力を発現させている。したがって、確実な支持力を得るためには根固め部の品質を確保することが重要となり、そのため高品質な根固め部を築造する技術の開発に特に注力して取り組んできた。

根固め部に関する検討としては、まず根固め部の弾塑性特性を考慮した FEM 解析を実施して、所定の支持力を得ることのできる根固め形状を明らかにした。次に、実際の施工機械を用いて築造した

* 平成 14 年 7 月 17 日原稿受付

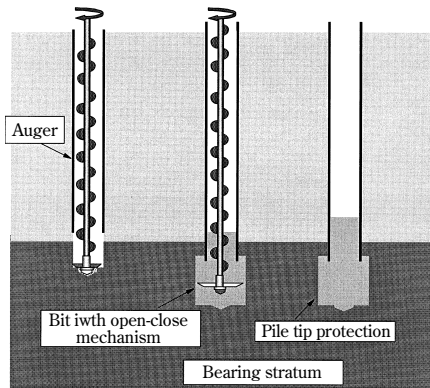


Fig. 1 Inner pile excavation method of steel pipe pile

根固め部の載荷試験を行い、所定の耐力が得られる施工仕様を明らかにした。本論文は主としてこれら 2 点の検討結果について報告する。

2 FEM 解析による根固め部の検討

2.1 解析手法の概要

杭および地盤のモデルを Fig. 2 に示す。杭先端部のモデル化は、杭径 $\phi 800 \text{ mm} \times$ 板厚 $t 20 \text{ mm} \times$ 杭長 $L 5.4 \text{ m}$ の鋼管杭を想定し、弾性係数 $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ の弾性要素を用いた。

根固め部の形状としては、これまでに日本建築センターの評定を取得している工法⁵⁾や模型実験⁶⁻⁸⁾、FEM 解析⁹⁾、実大載荷試験¹⁰⁻¹²⁾などの結果を参考にして、杭径を D とした時、直径が $D + 200 \text{ mm}$ ($= 1.0 \text{ m}$)、高さが $2.5 D$ ($= 2.0 \text{ m}$) で、根固め中に鋼管杭が $0.5 D$ ほど挿入されている状態を標準とした。

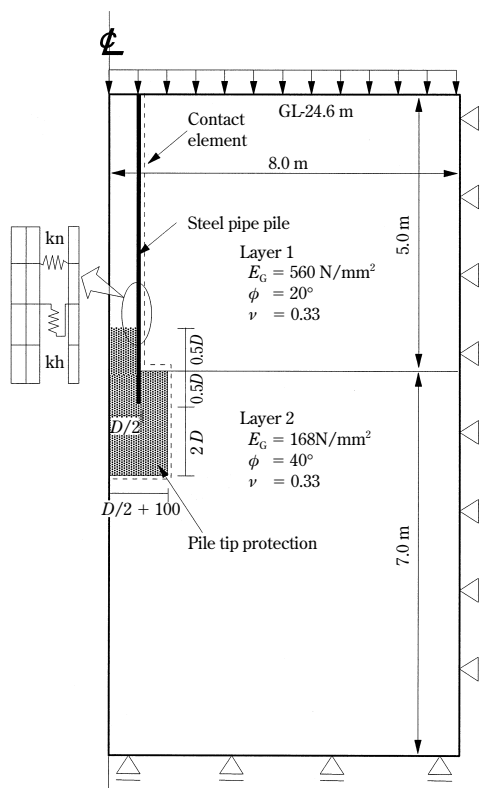


Fig. 2 Model for FEM analysis

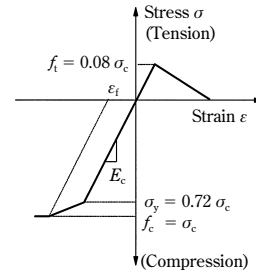


Fig. 3 Property of pile tip protection

根固め部はコンクリートの力学特性で表現できるものとし、Fig. 3 に示す材料特性を与えた。圧縮強度を $\sigma_c = 20 \text{ N/mm}^2$ として、降伏条件はモール・クーロン式を用い、圧縮領域においては圧縮強度 σ_c の 72% で降伏し、100% で圧壊する加工硬化則を与えた。引張領域においては smeared cracking の手法¹³⁾を用い、引張応力が圧縮強度 σ_c の 8% に達した時点でクラックが発生し、クラック発生後には最大引張応力が作用する方向の剛性が 0 となり、応力の解放が行われるとした。鋼管内部には根固め部と同様の強度の硬化剤が充填されているものとし、根固め部と鋼管内壁との付着力特性については、両者の間にジョイント要素を配し、その剛性を変えることで表現した。バネ定数として 10 N/mm^3 程度を用いれば完全に滑り、 $1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^3$ 程度で完全に剛結の特性が与えられる。

地盤モデルについては水平方向に 8 m 、鉛直方向に 12 m の領域を要素分割し、モール・クーロンモデルにより地盤の弾塑性特性を表現した。地盤の弾性係数 E_G (N/mm^2) は N 値を用いて $E_G = 2.8 N$ として算定し、上層を $N = 20$ 、下層を $N = 60$ とした。また地盤と杭および地盤と根固め部の境界には接触要素を配し、地盤との滑りを考慮した。特に根固め部の上面については、杭が沈下した際に根固め部が地盤を引っ張ることがないように剥離を生じさせ、逆に底面においては根固め部が地盤に貫通しないように、地盤と根固め部は常に接触している条件とした。さらに地盤内応力については地盤の単位体積重量を 17 kN/m^3 として、杭先端部が GL-30 m の深度となるような応力を与えた。

解析要素は 4 節点の 4 変形軸対象要素を用い、境界条件として、側面は水平方向を固定、鉛直方向を自由とし、底面は水平方向を自由、鉛直方向を固定とした。また、解析においては杭頭部を鉛直下方に変位させ、破壊挙動の検討を行った。変位増分値は 0.5 mm 程度を用い、各増分変位段階での最大繰返し回数は 20 回とし、収束性を確認しながら適正值を設定した。根固め形状に関するパラメータとして、根固め高さと根固め径を選定した。

2.2 解析結果

2.2.1 根固め高さの影響

根固め高さ $H = 2.0 D$ の時の変形図を Fig. 4 に示す。根固め部の剛性は地盤の剛性よりも大きいため、根固め底面部の地盤に変形が生じており、杭は根固め底面底部で支持されていることが分かる。根固め高さについては $H = 0.5 D, 1.0 D, 1.5 D, 2.0 D$ の 4 ケースについて解析を行った。解析結果として杭頭部の荷重と変位との関係を Fig. 5 に示す。図中には必要先端支持力を $R_t = 250 N A_p$ ($N = 60, A_p$: 先端閉塞面積) として計算した値を示している。根固め径 $\phi 1000 \text{ mm}$ の場合には、根固め部の破壊荷重はいずれの根固め高さにおいても必要支持力を上回る値が得られた。破壊機構を検討するため Fig. 6 に $H = 2.0 D$ の場合における塑性ひずみの伸展状況を示す。根固め部底面の地盤内には底面外周部より塑性域が広がってい

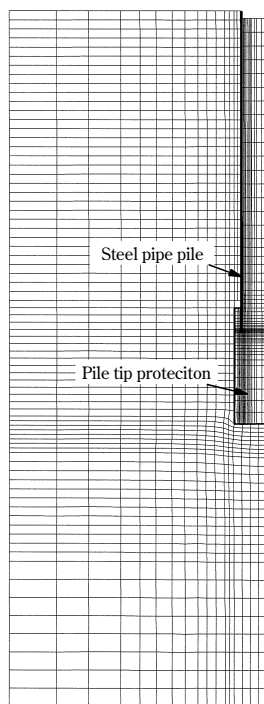


Fig. 4 Deformation simulated by FEM method (Protection height $H = 2.0 D$)

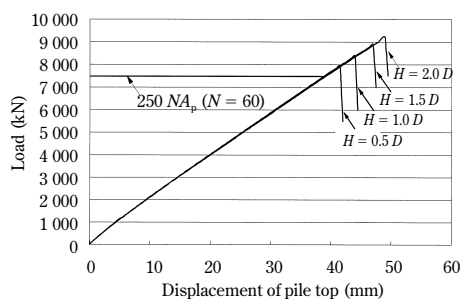


Fig. 5 Load-displacement relation at pile top (Influence of pile height)

る。また破壊時の 9 220 kN においては、根固め部の周辺部に地盤反力が集中するため、根固め部の底面外周部と杭先端部直下に塑性域が発生している。根固め高さの影響としては、根固め高さが小さくなるのにしたが破壊荷重も低下しているが、これは根固め底面と鋼管直下に発生する塑性域が干渉して、より早く連続することが原因であると考えられる。しかしながら、 $H = 0.5 D$ と $H = 2.0 D$ のケースを比較した場合、その差は約 13.6% であり、破壊荷重に対する根固め高さの影響は比較的小さい。

2.2.2 根固め径の影響

根固め径の影響については、根固め高さを $H = 2.0 D$ として根固め径を 900 mm, 1 000 mm, 1 100 mm に変化させた場合の検討を行った。Fig. 7 に杭頭部の荷重～変位関係を示す。根固め径が大きくなれば、同じ変位量に対する荷重値および破壊荷重も大きくなっており、根固め径が 1 000 mm 以上の場合に必要支持力を上回っている。また、根固め径比 (D_o/D ; D_o : 根固め径, D : 杭径) と破壊荷重の関係を Fig. 8 に示す。根固め高さが $H = 2.0 D$ の場合、根固め径が杭径の 1.15 倍以上となれば、破壊荷重は必要支持力を上回ることとなる。

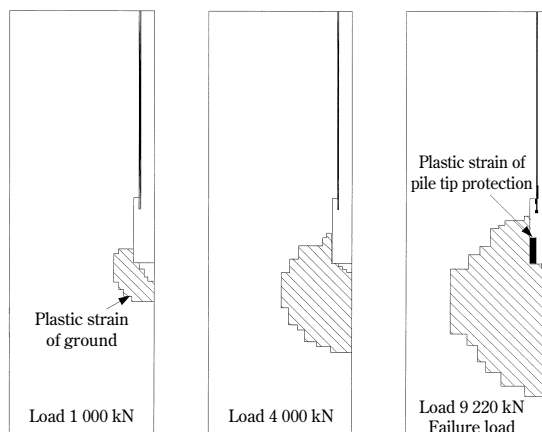


Fig. 6 Extend of plastic strain

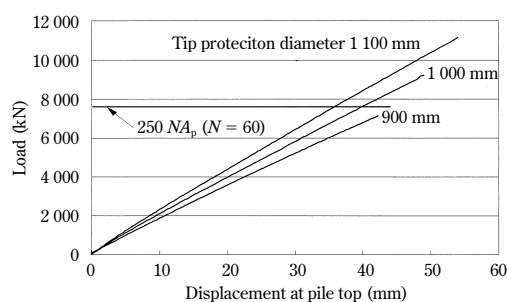


Fig. 7 Load-displacement relation at pile top (Influence of pile diameter)

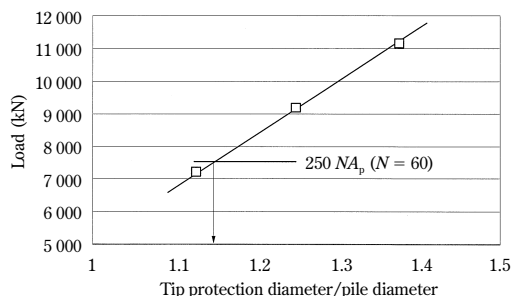


Fig. 8 Relationship between load and tip protection diameter ratio

3 根固め部の載荷試験

3.1 実験概要

実施工において、根固め部の品質を確保するためには、根固め内部が均質でかつ、十分な強度を得ることが必要となる。そこで根固め築造時の混合・攪拌条件をパラメータに施工実験を行い、その結果として単位深さ当たりの攪拌回数が 250 回/m 以上あれば十分に均質な根固め部が得られることが明らかとなった。載荷試験に用いる根固め部は Table 1 に示すように 1 m 当たりの攪拌回数が 256 回～512 回となるように掘削速度を変えた 3 体を築造することとした。注入するセメントミルクの水セメント比は $w/c = 60\%$ とした。

試験杭は杭径 $\phi 600$ mm × 板厚 $t 12$ mm × 長さ $L 3.7$ m の鋼管杭を用い、管内には根固め部と杭の一体化を図るために D13 の鉄筋を用いて 2 段の支圧リングを取り付けた。Fig. 9 に土質柱状図を示す。地下水位は GL-0.5 m で、地盤は鉾津層の下に 1960 年代に埋め立て

Table 1 Construction conditions of pile tip protection

Case	Number of repetition (times)	Excavation speed (cm/min)	Rotation number of moter (times/min)	Construction time (min)	Mixing times (times/m)	Amount of cement milk spouting (/min)
1	2.5	100	16	9.0	256	100
2		70		12.9	366	70
3		50		18.0	512	50

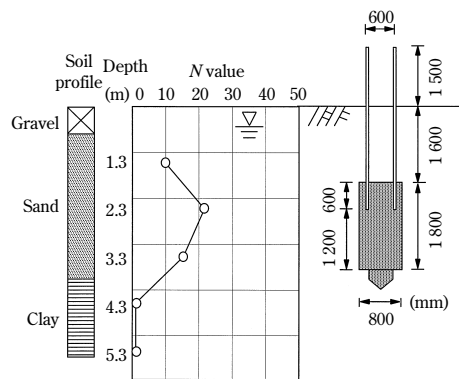


Fig. 9 Soil profile and test pile position

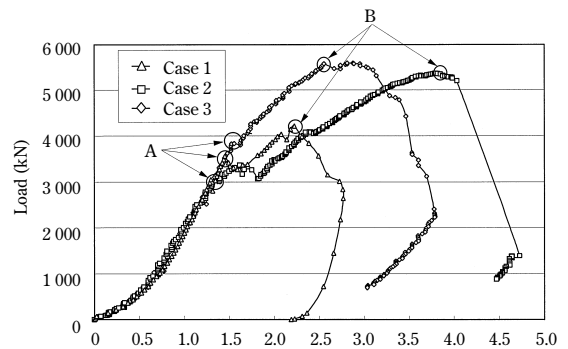


Fig. 12 Load-displacement relations

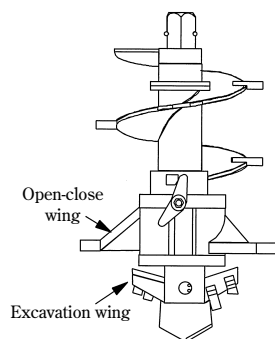


Fig. 10 Bit with open-close mechanism (KING bit)

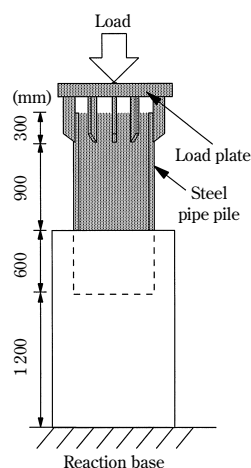


Fig. 11 Method of load test

られた N 値 10~20 の細砂層があり、その層で根固め部の築造を行った。目標とする根固め形状は根固め高さを杭径の 3 倍 (1800 mm)、根固め径を杭径 +200 mm (= 800 mm) とし、根固め内に 1D の長さ杭を挿入する形状とした。鋼管杭の施工は実際の施工時と同じく 3 点式杭打機と独自に開発した拡大ヘッド (KING ビツ



Photo 1 Failure situation of tip protection

ト、Fig. 10) を用いて行った。築造した根固め部は 1 週間養生後、実験ヤード周辺の地下水位をウエルポイントにより低下させ、掘り出しを行った。

載荷試験において、掘り出した根固め部は Fig. 11 に示すように、根固め部先端の突起部を切断し、底面を平らに仕上げた。また、杭頭部は根固め部上端から 1200 mm の位置で溶断して、載荷用の補強リブと載荷盤を取り付けた。また、載荷装置として 10 000 kN 載荷試験機を用いた。

3.2 実験結果

載荷試験結果として杭頭部での荷重と変位との関係を Fig. 12 に、載荷後の破壊性状を Photo 1 に示す。また、亀裂の進展状況を観察した結果を Fig. 13 に示す。

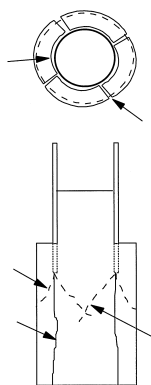


Fig. 13 Failure mechanism of pile tip protection

Table 2 Maximum load

Experiment case	Maximum load, $P_{\max}$	$P_{\max}/A_p$
	(kN)	(kN/m ²)
Case 1	4 213	14 900
Case 2	5 363	18 968
Case 3	5 591	19 774

破壊メカニズムは以下のように推定された。

- (1) 最初の亀裂である Fig. 13 中の は鋼管杭先端より斜め下方の外側に向かい伸張し、根固め部の表面まで貫通し、その時一時的に荷重が低下する。(Fig. 12 A 点)
- (2) その後、再び根固め部の健全な部分に応力が再分配され、荷重が増加する。
- (3) 荷重が増加するとともに、根固め部の拡底部分が外側に剥離するように縦亀裂、Fig. 13 中の と が発生し、破壊が進む。
- (4) 最終的に根固め部の中心部のみで荷重を受け、圧壊する。(Fig. 12 中の B 点)

Table 2 に最大荷重および杭閉鎖断面積当たりの支持力度を示す。設計上の最大の支持力度は $15\,000\text{ kN/m}^2$ ($=250\text{ N}$, $N=60$) であり、ケース 2 およびケース 3 はその値を十分に超えた値となった。

したがって、確実な根固め部を築造するためにはケース 2 およびケース 3 の仕様により施工を行えば良いと考えられる。

4 結 言

掘削速度を変えて根固め部の FEM 解析を実施し、所定の支持力を得ることのできる根固め部形状を明らかにした。さらに実際の施工機械を用いて築造した根固め部の載荷試験を行い、所定の耐力が得られる施工仕様を明らかにした。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 根固め高さを変えた FEM 解析により、根固め高さが小さくなれば根固め底面からと杭先端からの塑性域が早く重なるため破壊荷重も低下することが明らかとなった。しかし、その影響は比較的小さく、根固め高さを $2.0D$ から $0.5D$ に変化させた場合の耐力の低下は 13.6% 程度となった。
- (2) 根固め径を変えた FEM 解析によれば、根固め径が大きくなれば支持力も増加する。増加率は地盤の非線形特性に依存するが、破壊荷重は根固め断面積比以上の増加率となった。また、根固め高さが $2.0D$ の場合、必要支持力を上回る耐力の得られる根固め径は杭径の 1.15 倍以上であることが明らかになった。
- (3) 攪拌回数を約 250 回/m ~ 500 回/m に変えて築造した根固め部の載荷試験を実施し、攪拌回数 366 回/m 以上の場合に設計値以上の破壊耐力が得られた。

本論文においては、所定の性能を確保できる根固め部の形状および施工仕様を明らかにした。これらの検討結果に基づき KING 工法の施工方法を定め、これまでに 16 本におよぶ実大杭の現場載荷試験を実施し、要求性能を十分に満たす支持力を確認している。

近年、鋼管杭の中掘工法は施工時の排出残土が他工法に比べ少ないことから、環境に優しい工法として認知されつつあり¹⁴⁾、今後は KING 工法の適用杭径を $\phi 1\,200\text{ mm}$ までさらに拡大することで、より利用しやすい鋼管杭工法となるように開発を推進していきたい。

本研究は川鉄シビル(株)、(株)ジオトップおよびノザキ建工(株)との共同研究として実施したものである。研究において多大の協力をいただきました(株)ジオトップの須見光二氏、ノザキ建工(株)の福田一夫氏に深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 石塚忠行：「最近の場所打ち杭工法の現況」，基礎工，17(1989)3, 2-11
- 2) 山崎邦男，町田重美：「日本建築センター基礎評定物件における最近の傾向と話題」，基礎工，17(1989)5, 1-16
- 3) 館野次郎，橋本正治，西澤信二，佐藤清治，豊原陽登志，志賀厚：「新しい低騒音低振動鋼管杭（ドリル杭）工法の開発」，川崎製鉄技報，22(1990)1, 37-43
- 4) KING 工法研究会：「KING 工法」，基礎工，28(2000)3, 45-47
- 5) 青木 功：「日本建築センター埋め込み杭工法評定における最近の傾向」，基礎工，23(1995)5, 6-11
- 6) 倉知禎直，日下部治，上野勝利，加倉井正昭，横山幸満：「根固め杭の先端支持力に及ぼす形状の影響」，第 27 回土質工学研究発表会，(1992)，1559-1562
- 7) 大井 明，倉知禎直，上野勝利，横山幸満：「大型土槽を用いた根固め杭の載荷試験」，第 28 回土質工学研究発表会，(1993)，1727-1730
- 8) 倉知禎直，上野勝利，大井 明，横山幸満：「根固め杭の根固め先端部の破壊に及ぼす形状の影響」，第 28 回土質工学研究発表会，(1993)，1731-1734
- 9) 山崎雅弘，竹脇 出，長岡弘明，中村恒善：「既製コンクリート杭根固め部構造耐力の施工形状依存性」，構造工学論文集，41B(1995)，467-476
- 10) 芳賀孝成：「埋め込み杭工法における載荷試験」，基礎工，24(1996)5, 84-90
- 11) 浅山金吾，清水喬次，平尾幸太郎，大杉富美一：「拡大 TAIP 工法の実験工事」，基礎工，23(1979)5, 60-65
- 12) 三浦邦夫，川上圭二，山下久男，吉野 学，日比野信一：「TN 杭（鋼管杭）先端根固め部の荷重伝達機構」，第 20 回土質工学研究発表会，(1985)，1035-1036
- 13) 吉川弘道：「コンクリート構造物の設計法としての FEM 解析」，コンクリート工学，30(1992)9, 65-71
- 14) 大貫博史，寺崎滋樹：「中掘り鋼管杭工法の現状と施工事例 - TAIP, TN, TBS, KING, FB9 工法 - 」，基礎工，28(2000)12, 60-64