

鋼管柱を鋼管杭に挿入し一体化させる基礎工法 「JFE いちいち基礎工法」

“JFE Ichi-Ichi Kiso”

—Non-footing Column Pile-Joint for Steel Pipe-Pile Foundation—

沖 晃司 OKI Koji JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(副課長)
今野 和近 KONNO Kazuchika JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(部長)
飯谷 邦祐 IITANI Kunihiro JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(副課長)

要旨

JFE スチールは、フーチングを介さずに鉄骨柱脚と杭頭鋼管を直接結合することを可能とした「JFE いちいち基礎工法」を開発した。本工法を建築物に適用することで、耐震性能に優れ、経済的な基礎構造を構築することができる。柱-杭接合部は、軸力曲げ繰返し載荷実験により、耐震性能を確認しており、柱埋込長さを柱径の 1.5 倍以上とし、軸力比で 1.0 以下の引張軸力とした場合には、接合部の降伏後においても、安定した履歴特性と、限界変形角で 0.05 rad 以上の変形性能を発揮することを確認している。JFE スチールでは、実験による確認事項をもとに、2005 年 5 月に (財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得した。

Abstract:

Column pile-joint, Ichi-Ichi Kiso, is a newly proposed method for foundation construction developed by JFE Steel. It makes possible to connect a column-base and a pile-top directly without pile-top footing for steel pipe-piles. By this method, an economically competitive foundation with excellent seismic safety can be constructed. Cyclic loading tests of the column pile joint are conducted to evaluate its ultimate strength and deformation capacity. By securing sufficient embedded length of a column which is 1.5 times of the column diameter, stable hysteretic characteristics and ultimate deformation capacity of more than 0.05 rad are obtained when tensile force is less than its strength. Certificate for its design and construction specification was issued from GBRC in May 2005.

1. はじめに

通常、鉄骨上部架構と杭は、図 1 の従来工法に示すようにフーチングを介して間接的に結合するのが一般的である。しかし、フーチングと杭の接合部などでは、多くの場合、配筋が過密で作業が煩雑となったり、鉄筋と杭頭部との接続が現場溶接となることから品質確保が難しいといった問題がある。そこで鉄骨柱を杭頭鋼管に直接埋め込み、両者を充填コンクリートにより一体化させる工法「JFE いちいち基礎工法」を開発した。本工法は、上部架構と杭基礎の力の伝達が明快かつ単純であり、H 形鋼基礎梁の採用と合わせて、以下の効果が期待できる。

- (1) 塑性ヒンジの発生を、鉄骨柱または鋼製基礎梁という靱性の高い部材に限定することができる。
- (2) フーチングが不要で、かつ基礎梁のせいを鉄筋コンクリート基礎梁に比べ 1/2 程度にできるため、掘削土量

や基礎躯体数量を低減することができる。

- (3) 基礎梁の配筋・型枠工事が省略できるため、基礎の工期短縮が可能である。
- (4) 断面サイズの小さい基礎梁を使用することで、地震時の杭頭曲げモーメントを杭頭固定条件の場合と比較し 1/2 程度に低減することができる。

本論文では、JFE いちいち基礎工法の概要を述べるとと

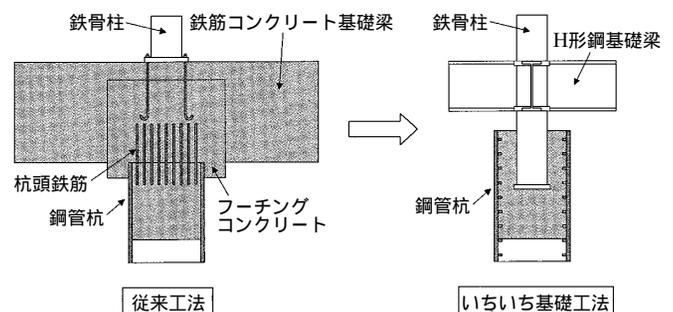


図 1 いちいち基礎工法と従来工法の比較

もに、柱-杭接合部について実施した構造実験の結果を報告する。

2. いちいち基礎工法の概要

2.1 柱-杭接合部の構成

接合部の構成を図2に示す。本工法では、杭頭接合鋼管に柱鋼管（以下、杭上部柱）を柱径の1.5倍以上挿入し、埋込部分にコンクリートを充填することにより柱-杭接合部を構築する。また、杭頭接合鋼管は、接合部の耐荷能力を高めるため、内面に突起が配置してあり、突起形状により、2つの仕様がある。ここで、仕様①は、杭頭接合鋼管を内面リブ付鋼管としたもので、内面リブ付き鋼管とは、圧延により鋼管内面に高さ3mm程度のリブを等間隔に設けたスパイラル鋼管¹⁾である。仕様②は、杭頭接合鋼管の上端部に鋼製のズレ止めリングを溶接接合したもので、製造範囲（外径、板厚）の制約の大きい内面リブ付鋼管と異なり、すべてのサイズの鋼管に適用可能である。

なお、基礎梁は、鉄骨梁あるいはコンクリート被覆鉄骨梁とし、また安定した履歴特性を担保するため、直上階の梁と同等以上の剛性・耐力を有する断面としている。

2.2 いちいち基礎工法の設計

本工法では、通常の基礎梁と比べ断面サイズの小さい基礎梁を使用する。そのため、構造設計にあたっては、基礎梁の挙動を適切に評価できる解析モデルを使用することが必要である。現在、この目的にかなう解析モデルとしては、一体解析モデルと、基礎梁剛性を考慮した分離解析モデル²⁾の2つの方法が提案されている³⁾。一体解析モデルとは、図3のように地盤の影響を地盤反力バネ⁴⁾に置換し、上部架構と基礎、地盤バネを一体の骨組みとしてモデル化したものである。杭と上部架構を分離して扱う分離解析と異なり、一体解析では基礎と上部架構の両方の部材断面が同時に必要である。

ちなみに、本工法では基礎梁を設置しないケースも可能であり、その場合には、杭頭変位の増大や地盤連成の傾向

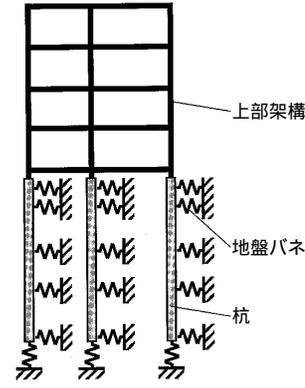


図3 一体解析モデルの概要

が強くなるため、地盤状況を考慮した詳細な検討が必要である。設計にあたっては「線路上空建築物（低層）構造設計標準 2002」⁵⁾が参考となる。

また、柱-杭接合部の設計については、通常の耐力検定とともに、柱埋込部のクリアランス（杭内径と柱外径の差）の確認が必要である。接合部耐力については、軸力依存の評価式⁶⁾が確立されており、同式に各突起仕様に対応する材料定数⁷⁾を与えることで算定される。

2.3 いちいち基礎工法の施工

施工手順を図4に、コンクリート充填後の柱杭接合部の施工状況を写真1に示す。施工は、①杭の建込み・位置合わせ、②柱鉄骨の建込み・位置合わせ、③柱-杭接合部のコンクリート充填、④基礎梁の設置、以上の手順で実施する。

施工に際しては、手順②にて杭頭鋼管に鉄骨柱を差し込むため、杭打設時の施工精度管理⁸⁾と、柱埋込部のクリアランスの確保が特に重要である。同クリアランスの目安として、30 cm以上とするのが望ましい。

3. 柱-杭接合部の構造性能

3.1 柱-杭接合部の軸力曲げ実験の概要

接合部の降伏・最大耐力および塑性変形能力を把握する

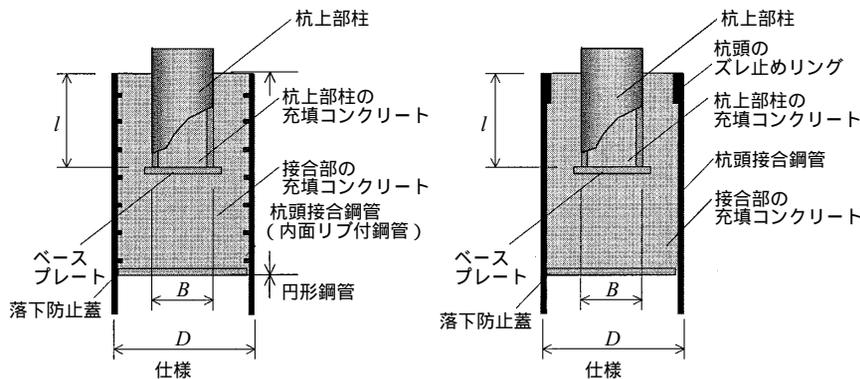


図2 柱-杭接合部の構成

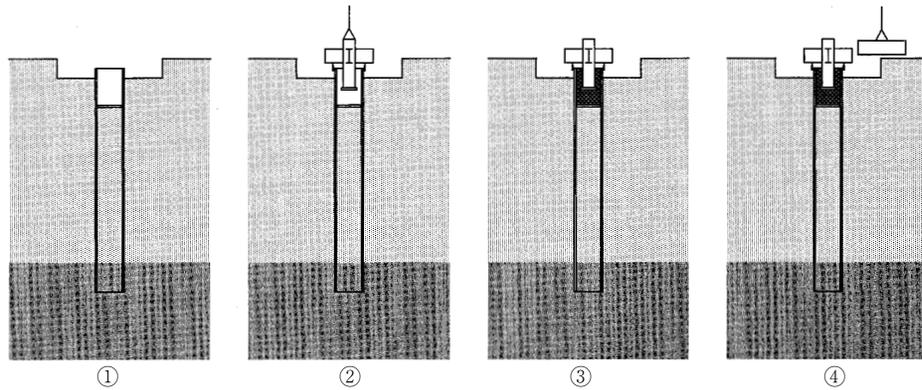


図4 柱-杭接合部の施工手順



写真1 柱-杭接合部の施工状況

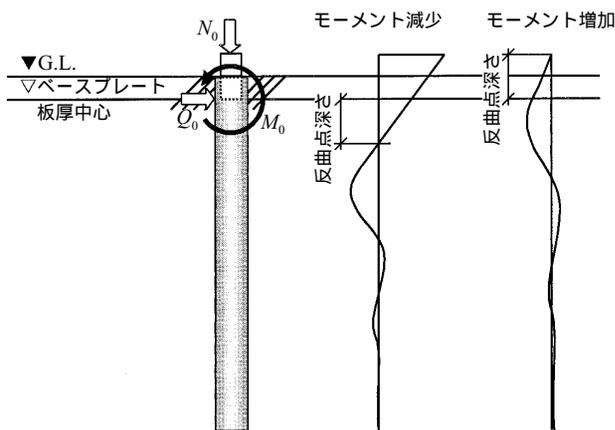


図5 杭の応力状態

ため、繰返し軸力曲げ荷重実験を実施した。実験は、図5に示す基礎梁付架構に特徴的な応力状態（モーメント減少型）と基礎梁がない架構の応力状態（モーメント増加型）をそれぞれ想定した荷重を行うこととした。

3.2 試験体

代表的な試験体を図6に示す。試験体は、柱埋込長、柱形状、柱軸力および突起形状をパラメータとし、表1に示す全10体とした。

柱埋込長は、柱径の1.5倍（突起仕様②の角形柱では2.0倍）を標準とし、No.1, 3, 4では埋込が浅い場合の影響

を把握するため柱径の1.0倍とした。柱形状は、角形を標準とし、一部No.4, 8, 9を円形鋼管とした。柱軸力については、無軸力の場合を標準とし、No.5では杭の長期圧縮耐力相当の荷重約2000kNの定圧縮軸力を導入し、No.7, 9, 10では前記の1/2の定引張軸力を導入した。また、杭鋼管の突起形状は、内面リブ付き鋼管である仕様①を標準とし、突起高さ2.5mm、突起ピッチ35mmとした。なお、No.8, 9, 10についてはズレ止めリングを溶接した仕様②を採用し、突起高さ9mm、突起本数1本とした。

全試験体に共通な条件として、試験体の柱と杭径の比は、実施構造の部材構成を考慮し約2.0とし、ベースプレートの径は、柱径+40mmとした。また接合部の破壊を強制させるために、杭上部柱は径厚比10前後の厚肉鋼管を標準とした。なお、柱降伏の挙動に着目したNo.2、埋込長を柱径の1.0倍としたNo.1, 3, 4については、径厚比を20前後とした。

3.3 実験方法

荷重装置を図7に示す。モーメント減少型の実験については、繰返しの曲げせん断力とともに、圧縮・引張の定軸力を接合部に導入した。

荷重ルートは、予備荷重後、接合部の降伏耐力 M_y で5サイクル正負交番荷重し、最大耐力を確認するまで荷重した後、以降は最大耐力に対し80%までの耐力低減を確認し、

表2 実験結果一覧

試験体	試験体諸元						実験結果				
	柱鋼管*1 $B \times t$ (mm)	杭鋼管 $D \times t$ (mm)	埋込長*2 (mm)	軸力*3 (kN)	突起 仕様	降伏耐力*4 (kN·m)	最大耐力*5 (kN·m)	最大降伏	θ_u (rad)	破壊 状況*6	
1	A1-R306010-N	□-300 × 12 (25)	Φ-600 × 6	300 (1.0)	0 (0.0)	①	503	613	1.22	0.073	H
2	A1-R306015-N	□-300 × 12 (25)	Φ-600 × 6	450 (1.5)	0 (0.0)	①	592	1 127*8	1.90	0.070 以上*8	P
3	B1-R306010-N	□-300 × 19 (16)	Φ-600 × 6	300 (1.0)	0 (0.0)	①	335	522	1.56	0.030	H
4	B1-C325010-N	○-319 × 17 (19)	Φ-500 × 6	319 (1.0)	0 (0.0)	①	382	508	1.33	0.049	H
5	B1-R255015-C	□-250 × 30 (8.3)	Φ-500 × 6	375 (1.5)	1 960 (2.1)	①	301	619	—	0.081 以上*7	H
6	B1-R255015-N	□-250 × 30 (8.3)	Φ-500 × 6	375 (1.5)	98 (0.1)	①	257	552	2.15	0.086	H
7	B1-R255015-T	□-250 × 30 (8.3)	Φ-500 × 6	375 (1.5)	-980 (-1.0)	①	142	366	2.58	0.057	H
8	B2-C305015-N	○-300 × 32 (9.3)	Φ-508 × 9	450 (1.5)	98 (0.2)	②	398	913*8	—	0.078 以上*8	C
9	B2-C305015-T	○-300 × 25 (12)	Φ-508 × 9	450 (1.5)	-980 (-1.6)	②	358	770	2.15	0.120	H
10	B2-R255020-T	□-250 × 25 (12)	Φ-508 × 9	500 (2.0)	-980 (-1.4)	②	460	701*8	—	0.100 以上*8	C

*1 柱鋼管：() 内の値は、径厚比 (B/t) を示す。

*2 埋込長：() 内の値は、柱径に対する比率を示す。

*3 軸力：圧縮軸力を正、引張軸力を負とする。

() 内の値は軸力比で、文献9)で示される支圧強度によって定まる許容引張耐力 (T_a) と導入軸力 N の比率を示す。

*4 降伏耐力：降伏荷重時のベースプレート位置の作用モーメント M_b (図7参照)。

*5 最大耐力：最大荷重時のベースプレート位置の作用モーメント M_b (図7参照)。

*6 破壊状況：P：杭降伏、C：柱降伏、H：柱の拔出し破壊。

*7 ジャッキストロークの限界により実験終了した時点の値で、実験終了時の耐力低下率は約2%であった。

*8 柱溶接部の破断あるいは部材の座屈により実験を終了した時点の値。

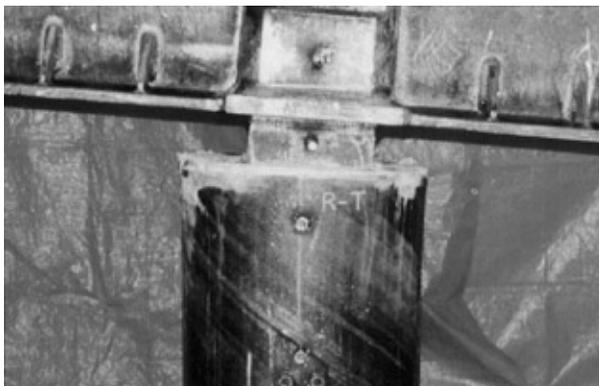


写真2 柱の拔出し破壊状況 (No. 6, B1-R255015-N)

た。

埋込長を柱径の1.5倍とした試験体 (No. 6) の履歴ループは、柱径の1.0倍とした試験体 (No. 3) と比べ、スリップ型の傾向が少なく、降伏耐力後も安定した履歴ループを示した。また、同試験体は、最大耐力後は緩やかな劣化勾配を示しており、限界変形角は0.086 radであった。ちなみに、埋込長を柱径の1.5倍とした試験体では、降伏耐力と最大耐力の比率は、全ての試験体で1.9以上となっており、かつ降伏耐力後も安定した履歴特性が確保されることを確認した。

ここで、柱部材/接合部の耐力バランスと、限界変形角という2つの指標に着目し、以下に実験結果を整理した。

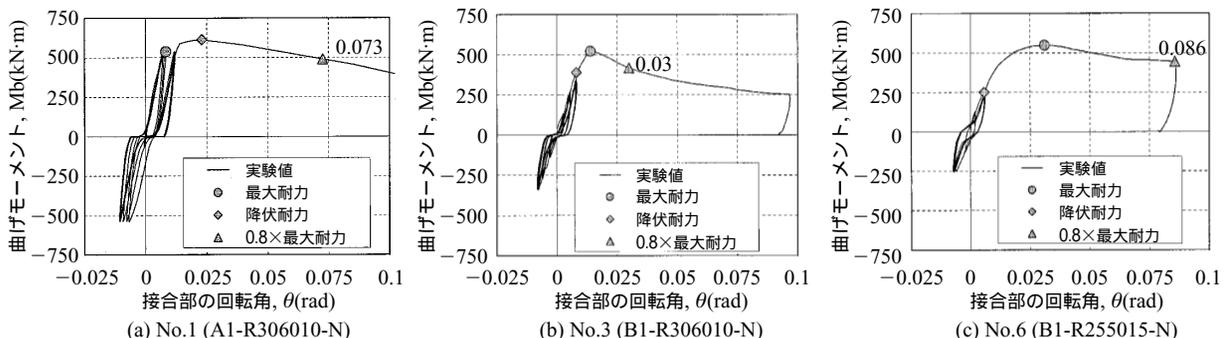


図8 荷重-回転角関係図

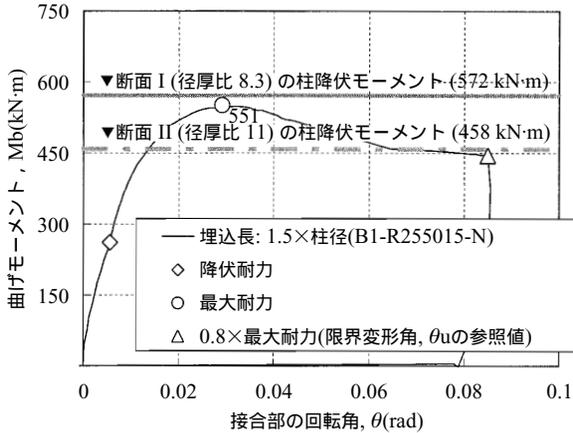


図9 荷重-回転角関係スケルトン (No. 6, B1-R255015-N)

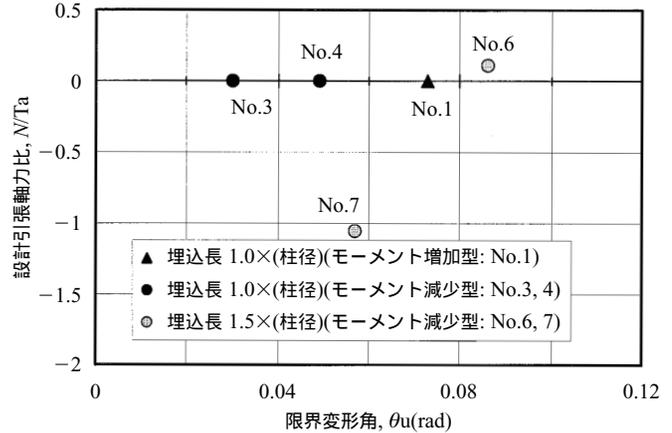


図10 軸力比と限界変形角の関係

3.4.1 柱部材/接合部の耐力バランス

図9に、試験体 (No. 6) のモーメント-回転角関係のスケルトンを示すとともに、埋込柱の全塑性耐力と接合部耐力のバランスを確認するため、図7に示す試験体のモーメント分布をもとに、埋込柱が梁フェース位置で全塑性耐力に達する時の接合部 (ベースプレート中心) の作用モーメント (以下、柱降伏モーメント) を示す。図示した2つの柱降伏モーメントは、径厚比 8.3 の試験体 (No. 6) の埋込柱 (断面Ⅰ) と外形寸法が同じで径厚比 11 の埋込柱 (断面Ⅱ) とした。ここで断面Ⅱの全塑性耐力は、材料強度を試験体 (No. 6) と同じ値として算出した。

断面Ⅰは、接合部破壊を埋込柱の降伏に先行させるために一般的に使用される柱と比べて径厚比を小さくした断面であるが、その柱降伏モーメントは、接合部耐力よりも大きく、接合部が塑性変形し崩壊した破壊状況と符合した。また、断面Ⅱは、一般的に使用される柱としては極めて径厚比の小さい断面であるが、その柱降伏モーメントに対して接合部最大耐力は約 1.2 倍となった。慣行的に、梁端溶接部に求められる耐力余裕度 (α 値) は部材耐力に対して 1.2 倍とされており¹⁰⁾、接合部耐力は埋込柱の径厚比に依存しないため、一般的に使用される柱であれば、おおむね梁端と同等以上の耐力余裕度が確保できることが予想される。

3.4.2 限界変形角

図10は、柱の抜き破壊により限界変形角に達した試験体のうち、突起仕様①試験体の軸力比と限界変形角の関係を示したものである。

柱埋込長に着目した場合、埋込長を柱径の 1.5 倍とした試験体 (No. 6) の限界変形角 (0.086 rad) は、1.0 倍とした試験体 (No. 3, 4) の値 0.030 rad および 0.049 rad に対して約 2~3 倍で、埋込長を長くすることで変形能力が大きく向上する傾向が認められた。ちなみに、この関係は表2に示す他の試験体についても確認された。ここで、埋込長を柱径の 1.5 倍とした試験体のうち、軸力を 0 あるいは圧縮とした試験体の限界変形角は 0.07 rad 以上となること

を確認した。

柱軸力に着目した場合、引張軸力 (軸力比: -1.0) を導入した試験体 (No. 7) の限界変形角は 0.057 rad で、無軸力の試験体 (No. 6) の値 0.086 rad に対し約 2/3 であった。これは、引張軸力の影響により柱の抜け出しが促進され、変形能力が低下したものと推測された。

また、接合部の応力状態に着目した場合、モーメント減少型とした試験体 (No. 3) の限界変形角 (0.030 rad) は、モーメント増加型とした試験体 (No. 1) の値 0.073 rad に対し約 1/2 で、モーメント減少型ではモーメント増加型よりも最大耐力後の耐力低下が早く、変形能力が低くなる傾向が認められた。

なお、突起仕様②については、表2に示すように、軸力比 -1.6~0.2 の試験体に対し、限界変形角は 0.08 rad 以上となり、仕様①よりも高い変形性能を有することを確認した。

ちなみに、「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編」¹¹⁾では、上部架構が健全性を保ちうるのに許容しうる最大の変形角を 0.02 rad としている。便宜的にこれを最低要求性能とみなし、埋込長を柱径の 1.5 倍とした試験体の結果に照らし合わせると、同試験体は要求性能に対し 3 倍以上 (軸力比: -1.0 で限界変形角: 0.057 rad) の性能を有するものと評価できる。

4. おわりに

フーチングを介さずに鉄骨柱脚と杭頭鋼管を直接結合することを可能とした「JFE いちいち基礎工法」を開発した。

柱-杭接合部の軸力曲げ荷重実験を実施し、柱の埋込長と耐力および変形性能の関係を評価した。柱埋込長を柱径の 1.5 倍以上とすることにより、接合部の降伏後においても、安定した履歴特性と、高い変形性能を確保できることを確認した。また、柱として一般的に使用される断面の埋込柱であれば、おおむね梁端と同等の耐力余裕度が確保できることを示した。

本工法における柱-杭接合部は、2章に示した設計施工方法について、2005年5月に(財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明(性能証明 第05-01号)を取得している。また、基礎梁のない架構についても建築センターの個別評価(BCJ-S 1953)を取得した実績があり、さまざまな架構形式に対応可能である。

参考文献

- 1) 松村弘道. 充填型鋼管コンクリート構造に於ける鋼管とコンクリートの付着性能の影響に関する研究. 九州大学, 1990. 博士論文.
- 2) 八尾真太郎. 水平荷重時のラーメン材応力算定に関する略算法. 技苑, 1986-01.
- 3) 日本建築士事務所協会連合会編. 建築基礎の耐震設計の実務的考え方と設計例. 1999-05.
- 4) 日本建築学会. 地盤の変形係数評価法に関する研究の現状. 1997.
- 5) 鉄道総合技術研究編. 線路上空建築物(低層)構造設計標準2002. 鉄道建築協会, 2002-06.
- 6) 沖見司ほか. 鋼管柱と鋼管コンクリート杭の一体化構造に関する研究

- その1~3. 日本建築学会学術講演梗概集. C-3, 2002-08, p. 813-822.
- 7) 日本建築総合試験所. JFE いちいち基礎工法. 建築技術性能証明評価概要報告書. 2005-05.
- 8) 今本泰久ほか. CFTおよびいちいち基礎工法を用いた倉庫の設計・施工. コンクリート工学. vol. 41, no. 8, 2003-08.
- 9) 日本建築学会. 各種合成構造設計指針・同解説. 1985-02.
- 10) 国土交通省住宅局建築指導課ほか. 2001年版 建築物の構造関係技術基準解説書. 2001-03.
- 11) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説. IV下部構造編. 2002-03.



沖 見司



今野 和近



飯谷 邦祐