

建築分野の地震対策技術

Earthquake-resistant Technologies for Building Structures

高橋元美 澤本佳和 宮田章
日向大樹 丹羽直幹 高岡栄治

I. はじめに

極稀に起こる最大級の地震に対して人命を保護することを最低限の目標の一つとする建物設計理念は、地震国日本において古くから変わるものではないが、建物を持続可能な社会インフラとするためには、耐震安全性の向上はもとより、地震後の継続使用性や補修性、地震時の居住性（安心感）の向上も必要である。

耐震安全性の確保を目指して、建物を構成する構造部材の変形性能向上技術や地震入力の低減、揺れの抑制に効果的な免震・制震技術¹⁾が進化を続けている。構造部材の変形性能の向上は、地震後の継続使用性や補修性を高める効果があり、免震・制震技術は建物の損傷低減のみならず地震時の居住性を高める効果がある。

これらの技術の例として、ここでは、実用段階技術として、CFT柱・梁端拡幅鉄骨梁接合部の性能向上技術²⁾と鉄筋コンクリート(RC)造建物のヒンジリロケーション架構³⁾、検討段階技術として極低摩擦すべり支承を用いた高性能免震⁴⁾とウォータージェットを用いた杭頭目視調査技術⁵⁾について述べる。

II. CFT柱・梁端拡幅鉄骨梁接合部の性能向上技術

長周期・長時間地震下の鉄骨高層建物において、部材・接合部が多数回繰り返し荷重を受けた場合の挙動や梁端接合部の繰り返し性能に関して、様々な検討⁶⁾が行われている。ここでは、梁端拡幅鉄骨梁の多数回繰り返し性能を向上させる目的で、水平ハンチ開始点に大きな円弧(R)を設け、柱をCFTとした部分架構の多数回繰り返し実験を実施して、構造性能の確認を行った。

試験体は、梁断面がBH-600×225×12×19(SN490B)で、柱断面が□-450×450×16(SN490B)からなるト字形部分架構(3/4縮尺)である。また、柱はFc60のコンクリートを充填したCFT柱であり、径厚比(D/t)が28である。試験体形状をFig.1に、接合部詳細をFig.2に示す。梁端拡幅形状は、ハンチ開始点での応力集中を防ぐことを目的として、ハンチ部と梁フランジをR150で一体成型(一体型)しており、RはFig.2の直線A(ウェブの曲げモーメント負担を考慮した必要フランジ幅とハンチ開始点を結ぶ直線)に接するように設けている。また、スカラップはJASS6改良型(27R+8R)とした。梁ウェブは高力ボルト摩擦接合とし、ハンチ開始点が全塑性荷重となった時のせん断力に対して滑らない設計とした。試験体は柱上下をピン・ローラー支持し、梁中央部および先端部の面外変形を拘束した状態で、梁先端に接続したジャッキにより加力した。加力パターンは正負交番漸増での繰り返しとし、梁の塑性率 μ を基準として設定した。

実験結果をFig.3に示す。 $\mu = \pm 6.0$ の1回目の加力でフランジに局部座屈が発生し、その後、局部座屈が進展することにより荷重が低下し、 $\mu = +8.0$ の2回目の加力で実験を終了した。累積塑性変形倍率 η は67であり、十分な変形性能を有していることを確認した。

本工法は鉄骨造建物の耐震安全性向上に寄与するものである。

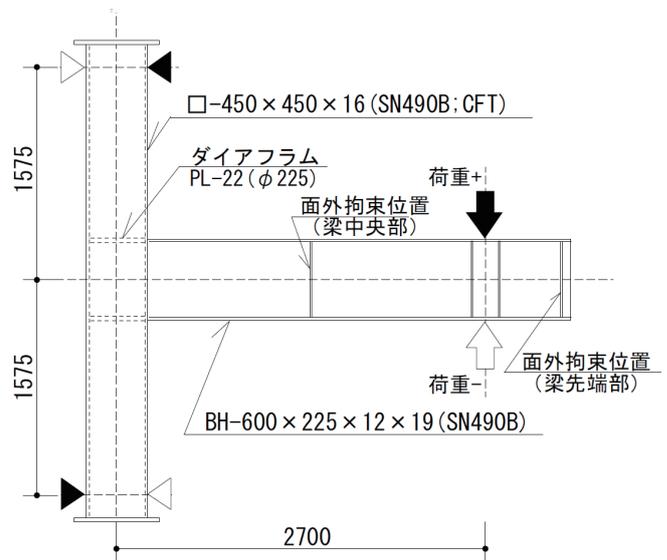


Fig. 1 試験体形状および加力方法
(Test Specimen and Loading)

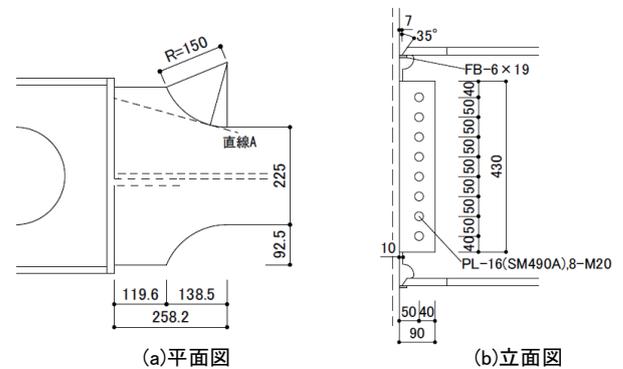


Fig. 2 接合部詳細
(Detail of Beam to Column Connection)

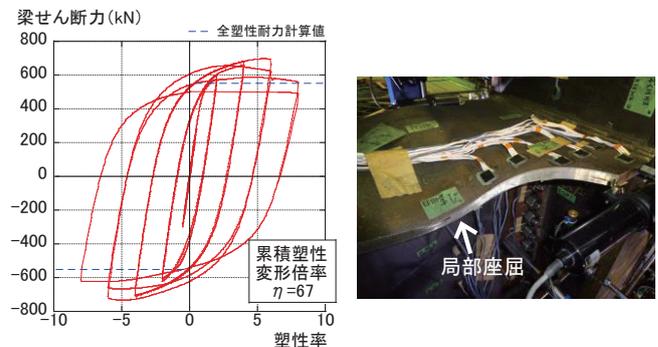


Fig. 3 梁せん断力-塑性率関係と終局状況
(Relationships between Shear Force and Ductility Factor of Beam and Photo of Fracture)

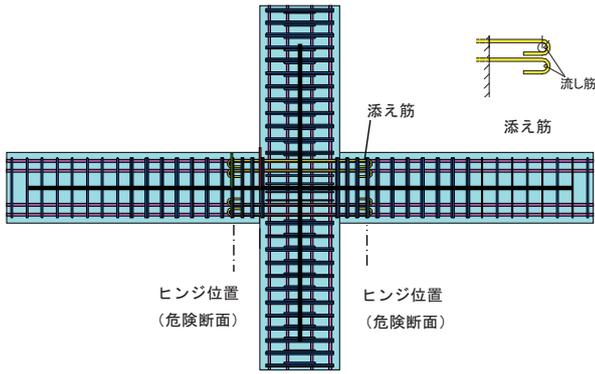


Fig. 4 RC 建物を対象としたヒンジリロケーション架構 (Hinge Relocation Structure)

III. ヒンジリロケーション架構

RC 建物の耐震設計では、梁の降伏ヒンジを柱フェイス位置に計画するのが一般的であるが、降伏ヒンジ位置を柱フェイスから遠ざけることにより、柱梁接合部の損傷低減による継続使用性の向上や降伏ヒンジ位置 (損傷部) の補修性の向上が可能になる。ここで示すヒンジリロケーション架構は、両端部を 180° 折曲げフックとした添え筋により柱梁接合部と梁端部を補強する工法であり、添え筋の長さによって、梁の降伏ヒンジ位置をコントロールする (Fig. 4)。

本架構の構造性能確認実験を行った。試験体形状・配筋を Fig. 5 に示す。試験体は高層 RC 造建物の低層階を対象とした縮尺約 1/2 の柱梁架構 2 体で、180° フック付き添え筋の有無をパラメータとした。RB 試験体は添え筋を設けたヒンジリロケーション架構、ST 試験体は添え筋のない通常の RC 架構である。梁曲げ耐力時に両試験体の柱梁接合部への入力せん断力が同等となるように、梁主筋径を調整した。加力は柱上下端をピン・ローラーで支持し、柱に軸力比 0.1 の一定軸力を加えつつ、左右の梁に逆対象せん断力を作用させた。加力点変位をスパンで除した層間変形角 R_s で制御する正負交番繰り返し载荷とし、 $R_s=1/800\text{rad.} \sim 1/12.5\text{rad.}$ まで漸増させた。

実験結果における梁せん断力-層間変形角関係を Fig. 6 に示す。図中の写真は、 $R_s=40 \times 10^{-3}\text{rad.}$ 時の接合部損傷状況である。赤色一点鎖線は梁曲げ強度時せん断力の計算値であるが、実験結果は両試験体とも、これと良く対応した。ST 試験体は $R_s=20 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で最大耐力に達したのに対し、RB 試験体では $R_s=36 \times 10^{-3}\text{rad.}$ まで緩やかに耐力上昇を続けた。なお、曲げ強度の算定に当たっては ACI 法⁷⁾を採用し、ST 試験体は柱フェイスを、RB 試験体は添え筋の 180° フックの折曲げ起点を危険断面位置と仮定した。また、ST 試験体の梁せん断力-層間変形角関係は $R_s=20 \times 10^{-3}\text{rad.}$ を超える大変形時において、スリップ性状が確認されたが、RB 試験体では紡錘形の履歴性状になり、エネルギー吸収能が向上した。 $R_s=40 \times 10^{-3}\text{rad.}$ 時の接合部損傷状況の写真により、ST 試験体に比べて RB 試験体のひび割れ幅が小さくなっていることも確認できる。添え筋が接合部のひび割れの拡幅を抑制し、損傷低減に寄与したものと考えられる。

添え筋のない ST 試験体は柱フェイス位置から主筋が降伏したが、添え筋のある RB 試験体では、Fig. 7 に示すように柱フェイス位置よりも危険断面位置のひずみが大きく、ほぼ想定した位置で主筋が降伏した。また、柱フェイス位置に向かいひずみが減少する傾向を示した。このことより、添え筋が有効に機能して、降伏ヒンジが柱フ

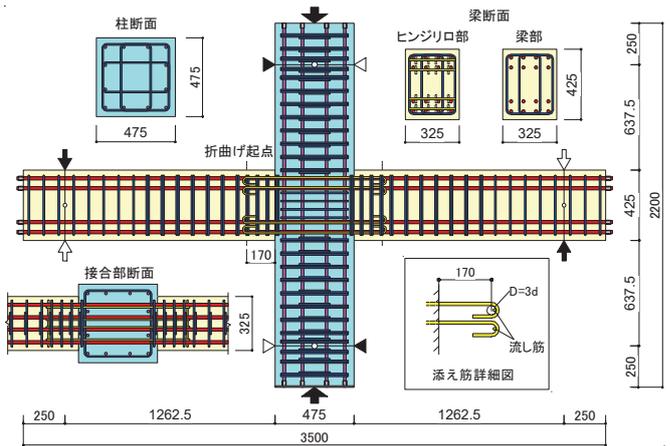


Fig. 5 試験体形状および配筋状況 (RB 試験体) (Specimen and Members)

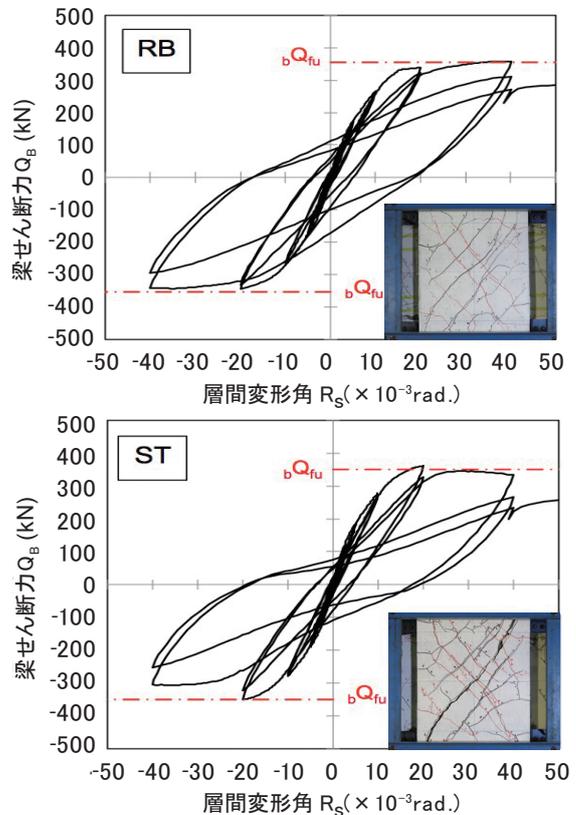


Fig. 6 梁せん断力-層間変形角関係 (Relationships between Load and Deformation Angle of Beam)

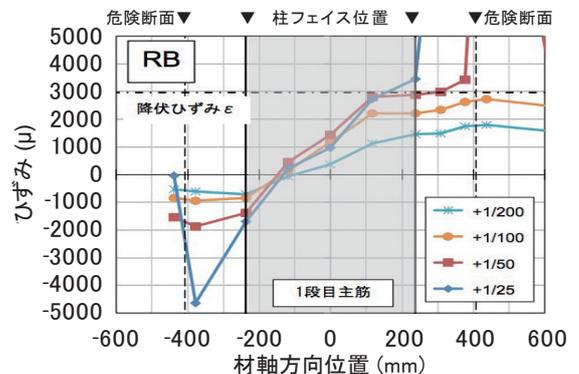


Fig. 7 梁上端主筋のひずみ分布 (Strain of Upper Reinforcing Bar)

ェイス位置から梁スパン中央側に移動したことを確認した。

本ヒンジリロケーション架構により、RC骨組における柱梁接合部の損傷が低減し、骨組変形性能が向上することを確認した。地震後の建物継続使用性や補修性の向上策として有効と考える。

IV. 高性能免震構造

免震構造に期待される効果は、地震時の建物の安全性向上と建物機能の維持である。これらはいずれも上部構造の加速度低減によってもたらされるが、現状の免震構造では極稀に発生する地震動入力に対して、上部構造の加速度は150~200cm/s²に低減される程度である⁸⁾。本免震システムは、上部構造の加速度を50cm/s²程度に抑え、免震層水平変位は通常免震構造と同程度の45cmとすることにより、建物使用者の不安感や恐怖感を軽減して安心空間をもたらす、より高性能な免震システムである。

本システムを設計するに当たり、Fig. 8 に示す振動特性を設定した。告示3波のSa-Sd曲線の包絡線に対して、加速度50cm/s²と水平変位45cmの2つの直線で囲まれた性能範囲を満足する振動特性として等価周期6~8秒、等価減衰定数30%を目標とする。

Fig. 9 に提案システムを構成する免震部材の概要を示す。等価周期6~8秒という長い周期を達成するために、弾性ゴムと摩擦係数の小さいすべり支承または転がり支承（以下、すべり・転がり支承）を併用したシステムを採用した。弾性ゴムは、鉛直荷重を支持せずシステムの全水平荷重を負担する。すべり・転がり支承は、全ての鉛直荷重を支持することとし、積層ゴム（以下、弾性体）と直列に組合せて使用する。弾性体との組合せについては、すべり支承には弾性すべり支承として一般的な製品があるが、転がり支承については今のところ実製品は存在しない。等価減衰定数30%を満足する免震部材としてオイルダンパーを選定した。ダンパーの減衰力が増大すると、上部構造の加速度が大きくなり長周期化の効果が十分に得られないことが懸念される。そこで、ダンパーに弾性ばねを直列に設置し、必要な減衰力を確保して衝撃的な力を緩和する構造とする。

提案システムの応答特性を確認するため、免震モデル建物を対象とした地震応答解析を行った。解析モデルは、上部構造の各階を適宜集約した6質点系モデルとし、弾性ゴムを線形ばね、すべり・転がり支承を完全弾塑性モデル、直列ばね付きオイルダンパーをマクスウェルモデルでそれぞれモデル化した。上部構造は、免震層上部の質点(1F)を490ton、2~6層(2F~6F)の各質点を980tonとし、基礎固定時1次周期が3秒となるように各層の水平剛性を設定した。上部構造の復元力特性は線形とし、基礎固定時1次周期に対して2%の内部粘性減衰を考慮した。

解析におけるパラメータは、すべり・転がり支承の摩擦係数 μ と弾性体水平剛性 k_s およびオイルダンパー直列ばねである。解析ケースをTable 1に示す。入力地震動は八戸NS波を選定し、最大速度50cm/sで規準化した。

解析による応答最大水平加速度と応答最大水平変位の高さ方向の分布をFig. 10に示す。ケース1に比べて、ケース2~6ではいずれも加速度が減少している。変位は逆の傾向となり、ケース2~6の応答値はケース1よりも大きくなった。Fig. 11に、ケース1と6について、1Fと6Fの水平加速度の時刻歴を示す。ケース1では1Fにパルス的な加速度が数か所で見られ、その値は100~150cm/s²とな

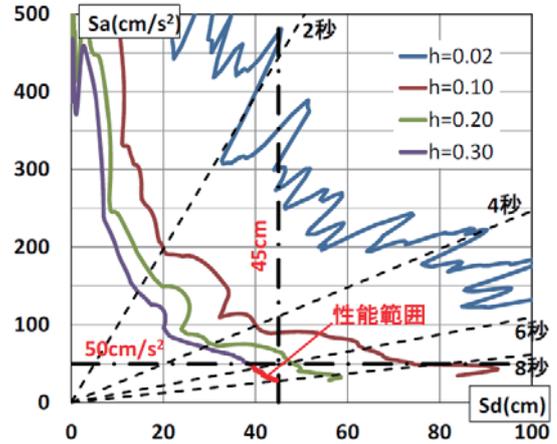


Fig. 8 Sa-Sd 曲線の包絡線と目標とする振動特性 (Target of Vibration Characteristic)

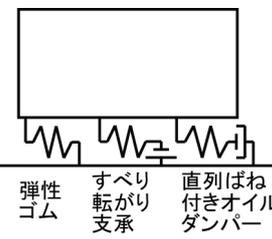


Fig. 9 提案システム (Proposed System)

Table 1 解析ケース一覧 (Analysis Cases)

ケース	μ	k_s	直列ばね
1	0.01	1.0	なし
2		0.1	
3	0.005	1.0	なし
4		0.1	
5		1.0	
6		0.1	あり

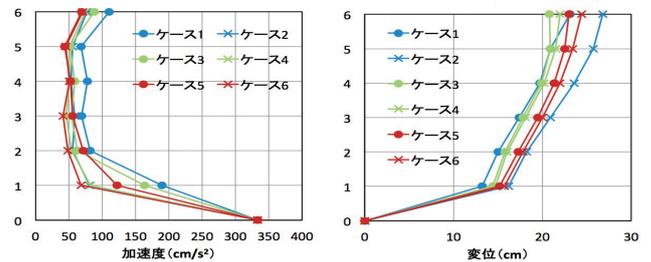


Fig. 10 応答最大加速度および応答最大変位 (Maximum Value of Acceleration and Displacement)

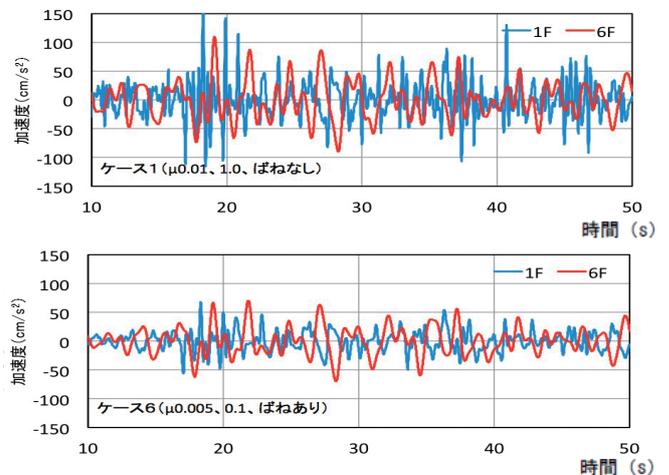


Fig. 11 応答加速度の時刻歴波形 (1F, 6F) (Time Histories of Response Acceleration)

っている。これは、変形方向が切り替わる際に生じる過渡的な応答（過渡応答）であり、すべり・転がり支承弾性体の剛性の影響によって生じるものである。一方、ケース6では過渡応答がほとんど認められず、加速度のピーク値は 50cm/s^2 程度まで低減されるとともに、波形全体が滑らかになっている。

本解析的検討により、すべり・転がり支承の摩擦係数および弾性体の剛性を小さくすること、オイルダンパー直列ばねを考慮することにより、上部構造の加速度を 50cm/s^2 程度に低減できることを確認した。

提案する本免震システムは、大地震に対する安全性を確保するだけでなく、安心感も提供できるものである。

V. ウォータージェットを用いた杭頭目視調査技術

地震後の建物継続使用性を判断するためには、躯体の健全性を確認する必要がある。杭の場合、地下に隠れており、その調査はかなり大がかりになる。従来は杭頭を露出させる必要があったが、今回、ウォータージェットを利用して、露出させることなく杭頭を目視調査できる技術を開発した。

基本的な調査手順をFig. 12、および以下に示す。

- ① 耐圧盤にφ125程度の孔を開け、調査機器を設置する。
- ② WJ（ウォータージェット）ノズルをロッドに取り付けて鉛直掘削を噴射口にて鉛直掘削を行う。
- ③ WJノズルを水平噴射口へ切り替えて水平掘削を行う。
- ④ 吸引ポンプを利用し、掘削土を排出する。

その後、杭体洗浄して撮影用カメラ（有効画素数1800万画素）を孔壁内部へ降ろし撮影する。調査終了後は排土にセメント等を混合し埋め戻す。耐圧盤に開けたφ125の孔はモルタルで埋めて完了となる。カメラによる撮影高さを、Fig. 13に示すとおり杭頭部から約1000mmまでとした実際の撮影映像をPhoto 1に示す。杭頭部の損傷をカメラにて目視確認した結果、骨材は明確に分散していたことから、コンクリートは密実であることがわかった。また、ジャンカのような施工不良箇所や損傷の疑いがあるひび割れは確認されなかった。

本調査方法は調査完了後もφ125の孔の跡しか残さないため、地震後の杭頭調査における有効な技術となることが期待される。

VI. おわりに

地震時の耐震安全性の向上、地震後の建物継続使用性や補修性の向上を目指したCFT柱・水平リブ付鉄骨梁接合部の性能向上技術、RC造ヒンジロケーション架構およびウォータージェットを用いた杭頭目視調査技術、地震時の居住性（安心感）の向上を目指した高性能免震システムについて述べた。建築の耐震・制震・免震分野において、建物の社会インフラとしての持続可能性を高める取り組みは今後も進展を見せるものと期待される。さらには、環境配慮の観点からの部材リユース⁹⁾への取り組みや、「レジリエント（被害を最小限に留めるとともに、被害からいち早く立ち直り元の生活に戻らせる）」な建物の実現に向けた取り組みもすでに始まっている。

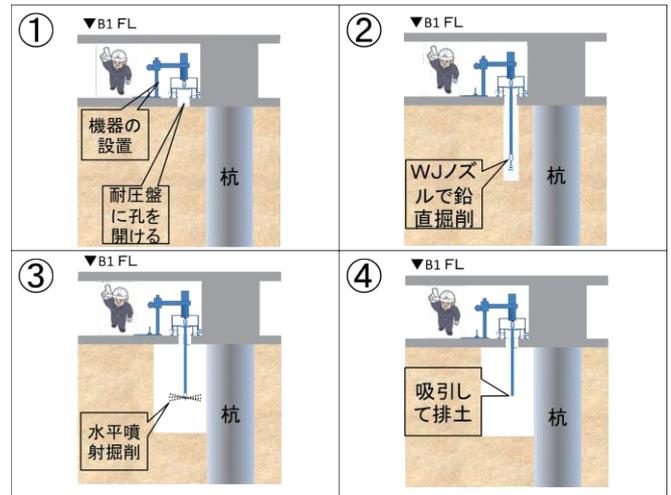


Fig. 12 杭頭調査手順 (Survey Procedure)

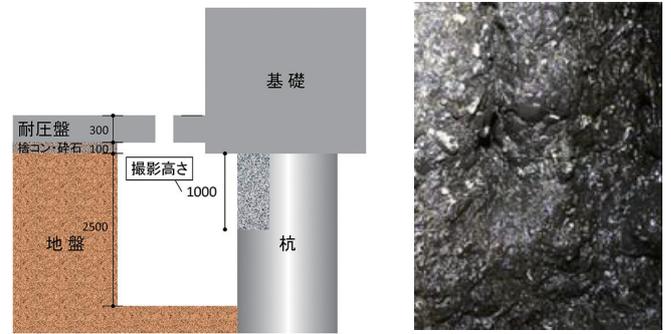


Fig. 13 調査断面図 (Survey Cross-sectional View)

Photo 1 杭体表面 (Surface of Pile)

参考文献

- 1) 小堀鐸二；制震構造 理論と実際 新版，鹿島出版会，2014. 10.
- 2) 澤本佳和ほか；CFT柱・水平リブ付鉄骨梁接合部の多数回繰り返し性能向上に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016. 8， pp. 1241-1242.
- 3) 日向大樹ほか；添え筋ヒンジロケーション架構の構造性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016. 8， pp. 433-434.
- 4) 高岡栄治ほか；地震入力遮断を追求した免震構造（その1）提案システムの概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016. 8， pp. 639-640.
- 5) 掛谷誠ほか；ウォータージェットを利用した杭頭目視調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，2014. 9， pp. 453-454.
- 6) 建築研究所；長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する検討，建築研究資料 160号，2014. 7.
- 7) American Concrete Institute；Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary，2011.
- 8) 大宮幸ほか；免震建物の調査研究—公表されたデータに基づく免震建物の傾向把握—，日本建築学会大会学術講演梗概集，2006. 9， pp. 513-514.
- 9) 日本建築学会；鋼構造環境配慮設計指針—部材リユース—，2015.