

杭頭免震構造の開発（その3） 既製杭に適用する拡頭杭免震構法の杭頭接合部に関する構造性能 Development of Pile-head Seismic Isolation Structure (Part3) Performance of Pile-head Joints of Expanded-Pile-Head Seismic Isolation Structure using Precast Piles

山崎 康雄* 金川 基*
Yasuo Yamasaki Motoi Kanagawa
飯塚 信一**
Shinichi Iizuka

要 約

近年、免震構造の合理化を目的に、杭頭部分に免震部材を直接設置する杭頭免震構造（以下、杭頭免震）を採用した建物が注目されている。本報では、杭頭免震構造に既製杭を適用するため、杭頭接合部のディテールを考案し、その構造性能を検証することを目的として静的加力実験を実施した。考案した接合部ディテールの終局曲げ耐力および終局圧縮耐力は設計値を上回っており、杭頭接合部の健全性を確認できた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験概要
- § 3. 積層ゴムを用いた加力実験
- § 4. 載荷治具を用いた加力実験
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

近年、免震構造の合理化を目的に、杭頭部分に免震部材を直接設置する杭頭免震構造（以下、杭頭免震）を採用した建物が注目されている。図-1に杭頭免震の概略図を示す。杭頭免震は通常の基礎免震構造（以下、基礎免震）と比べ基礎構造を合理化でき、物流倉庫などの平面規模の大きな建物には経済的メリットが大きい。

既報（その1）¹⁾では、杭頭免震と基礎免震の地盤一杭一建物連成系一体解析モデル（以下、一体解析モデル）の時刻歴応答解析結果を比較し、杭頭回転角1/100 rad.以下の範囲においては有意な差がないことを報告した。また、既報（その2）²⁾では、杭頭免震の設計の際に、杭頭の回転により各部材に生じる応力の算出方法の提案と、6階建て物流倉庫の試設計について報告した。

これらは主に場所打ちコンクリート杭を対象としており、構法の普及には、既製杭に対しても合理的な接合方法の開発が求められている。そこで、杭頭免震に既製杭を適用するため、杭頭接合部のディテールを考案し、その構造性能を検証することを目的とした加力実験を実施した。本報では実験概要および実験結果について報告する。

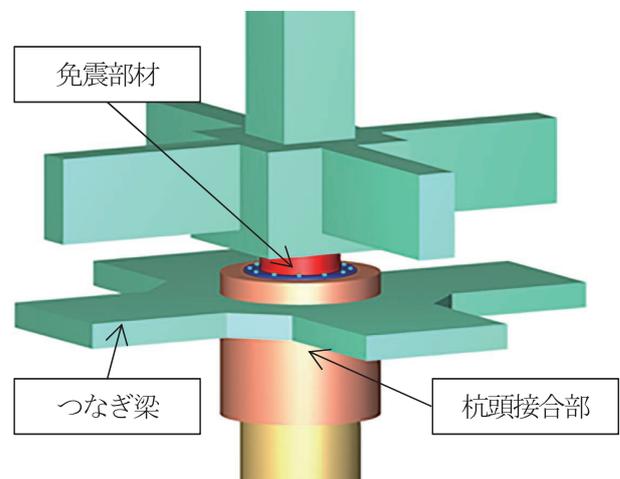


図-1 杭頭免震の概略図

* 技術研究所建築技術グループ

** 技術研究所

§2. 実験概要

2-1 試験体

杭頭免震に既製杭を適用するため、下記の手順で杭頭接合部を構築する方法を考案した。構築方法を図-2に示す。

- ① 外殻鋼管付きコンクリート杭（以下、SC杭）の杭頭部に、外殻コンクリートを充填せず鋼管のみの部分（以下、素管）を作る。
- ② そこに一体性を強固にするための鉄筋や免震部材を接合するアンカーボルト等を設置する。
- ③ コンクリート（以下、中詰めコンクリート）を充填し接合部とする。

しかし、SC杭の外殻コンクリートの様な円環断面に支持される中詰めコンクリートの終局耐力の評価方法や破壊性状が不明確である。これらの課題を解決し、妥当性の検証のため、静的加力実験を実施した。

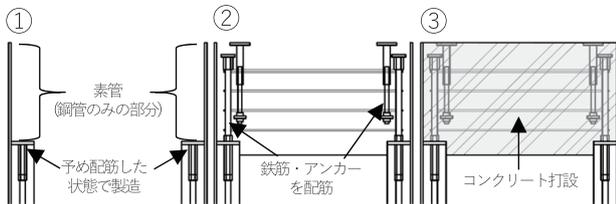


図-2 杭頭接合部の構築手順

試験体の概要を図-3に示す。試験体のSC杭外径は500mmであり、想定している最大寸法φ1500mmの1/3縮小モデルである。試験体の中詰めコンクリートは粗骨材最大寸法を13mm（6号碎石）、高さを杭径の1/2、SC杭への飲み込み長を35mmで共通とした。杭頭接合部にはSC杭との一体性を強固なものとするため、SC杭の外殻コンクリート内部に予め鉄筋を設置しておき、その鉄筋に杭頭アンカー筋を接続し、杭頭フープ筋を配している。試験体パラメータおよび中詰めコンクリートの材料試験結果を表-1に示す。B-1を標準試験体とし、中詰めコンクリート強度 F_c を42N/mm²、積層ゴムの接合方法を袋ナットとした。B-2は中詰めコンクリート強度、B-3は積層ゴムの接合方法の違いによる影響の有無を確認する。B-4は杭頭接合部に素管を設けず中詰めコンクリートのみとし、素管の有無による影響を確認する。

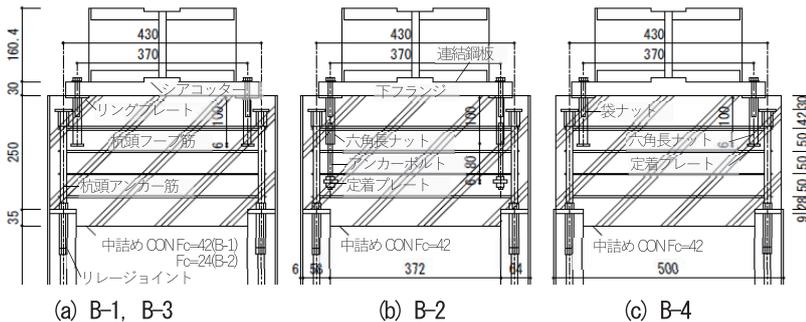


図-3 試験体の概要

2-2 試験装置

試験装置図を図-4に示す。載荷能力は、圧縮荷重は6000kN、引張荷重は4000kN、水平荷重は±2000kN、水平ストロークは±300mmである。

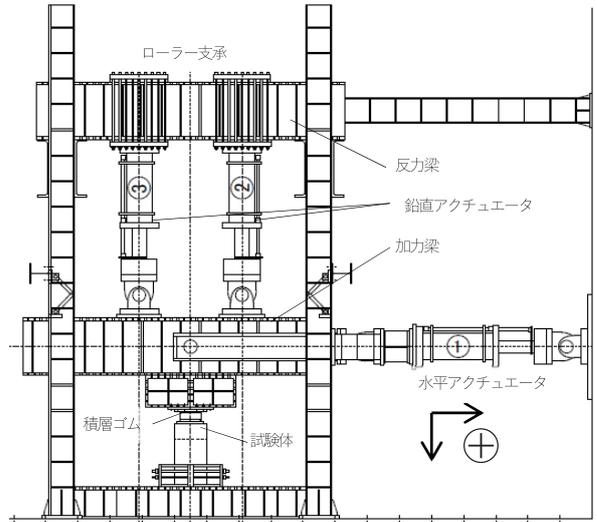


図-4 試験装置図

2-3 計測計画

計測計画の概略を図-5に示す。主に各アクチュエータの荷重および杭頭接合部の変形を計測した。ここで、以降で述べる基準点とは、接合部天端の中心点であり、その変形（水平・鉛直・回転角）は、接合部下端から天端の相対変形である。

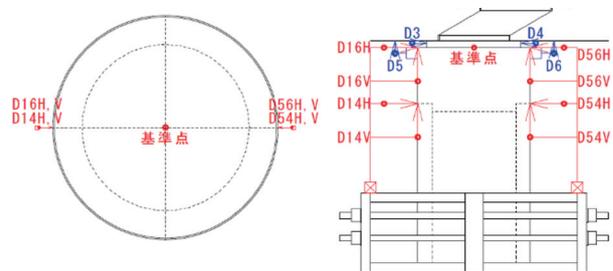


図-5 基準点の位置

表-1 試験体パラメータ

(a) 試験体概要

試験体名称	中詰めコンクリート		積層ゴム接合方法	接合部素管
	強度 F_c (N/mm ²)	実強度 σ_B (N/mm ²)		
B-1	42	53.0	袋ナット	有り
B-2	24	30.4	袋ナット	有り
B-3	42	56.4	アンカーボルト	有り
B-4	42	54.0	袋ナット	無し

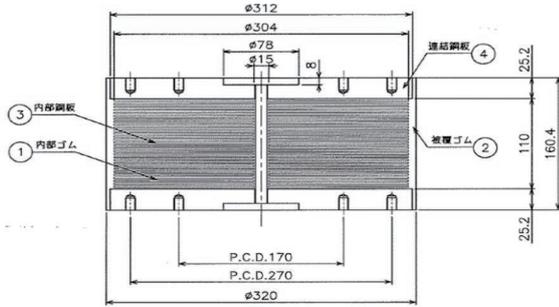
(b) 共通部材リスト

	材種	本数・寸法	備考
外殻鋼管(素管)	SKK490	t=6, φ500	鋼管厚6mm
杭頭アンカー筋	SD345	8-D13	ねじ鉄筋
プレートナット	-	8-D13	-
リレージョイント	-	8-D13	-
杭頭フープ筋	SD295A	D4@50	最上段のみダブル
六角ボルト	-	16-M10	首下80mm
リングプレート	-	PL-6×50	長ナット固定用
六角長ナット	-	16-M10	L=100mm
アンカーボルト	-	16-M10	L=145mm(B-3のみ)
定着プレート	SS400	t=6, φ27	-

§3. 積層ゴムを用いた加力実験

3-1 積層ゴムの仕様

実験に用いた免震部材を図-6に示す。免震部材は天然ゴム系積層ゴム支承とし、ゴム外径 304 mm、ゴム総厚 62 mm (2.0 mm×31層)である。積層ゴムの下フランジは外径 420 mm、厚さ 30 mm とし、連結鋼板に嵌合するようにシアコッターを設けている。



符号	名称	数量	材質	厚さ
①	内部ゴム	31	天然ゴム	2.0mm
②	被覆ゴム	—	合成ゴム	8.0mm
③	内部鋼板	30	SS400	1.6mm
④	連結鋼板	2	SS400	25.2mm

図-6 実験に用いた免震部材

3-2 加力内容

実現象に近い応力状態を再現するため、図-4で示した3台のアクチュエータを用いて加力梁を平行に維持しながら、図-7に示すように、せん断ひずみ γ に応じて作用させる面圧 σ を変動させながら加力する。

せん断ひずみ γ は、 $\gamma = -300\% \sim +300\%$ とし、面圧 σ は、 $\sigma = -1 \sim +31 \text{ N/mm}^2$ (圧縮側を正、軸力 N に換算すると $N = -72.4 \sim +2244.6 \text{ kN}$)とする。ただし、B-3についてのみ、上記の加力範囲に加え、 $\gamma = -300\%$ 到達時に $\sigma = -1.5 \text{ N/mm}^2$ 、 $\gamma = +400\%$ のサイクルを追加で実施した。

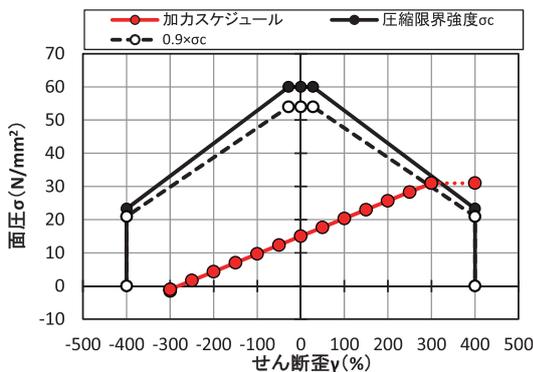


図-7 加力時のせん断ひずみと面圧の関係

3-3 実験結果

4つの試験体について、積層ゴムを含めた試験体全体の水平荷重と加力梁の水平変位の関係、および杭頭接合部下端から天端の基準点回転角（以下、回転角）と加力梁の水平変位の関係を図-8～図-12に示す。また、B-1

およびB-2の加力後の接合部天端の状況を写真-1、B-4の加力後の接合部の状況を写真-2に示す。

全体的な傾向として、接合部のパラメータによらず、復元力特性は、軸力が增大することによる剛性低下は見られるものの、著しい耐力の低下等は見られず、各試験体で同様な傾向となることが確認できた。

B-1およびB-3では、杭頭接合部の回転角は小さく、加力後も健全な状態であることが確認できた。ただし、せん断ひずみ $\gamma = +400\%$ まで加力したB-3は、 $\gamma = +350\%$ 付近で水平荷重が大きく低下した。これは、積層ゴムが座屈したためと考えられる。さらに面圧 $\sigma = -1.5 \text{ N/mm}^2$ の加力では実験中にゴム上部が破断した。

B-2では、杭頭接合部の回転角がB-1と比較して大きくなる結果となった。しかし、写真-1b)にあるように接合部天端には大きな損傷は見られなかった。

そこで、回転角が同程度となったB-4の結果を見ると、回転角は同程度であるにもかかわらず、写真-2b)にあるように中詰めコンクリートにひび割れがみられる結果であった。よって、B-2においても、外観では大きな損傷は見られないが、コンクリート内部にひび割れ程度の損傷は発生しているものと考えられる。

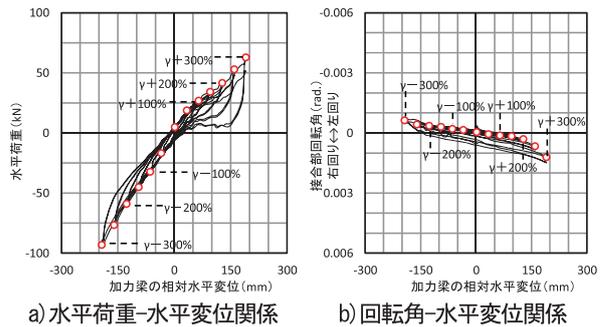


図-8 B-1の実験結果

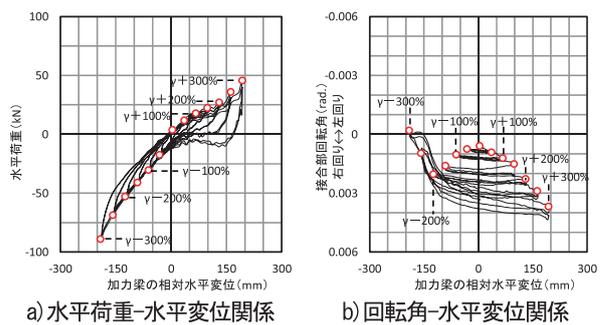


図-9 B-2の実験結果



写真-1 加力後の接合部天端の状況

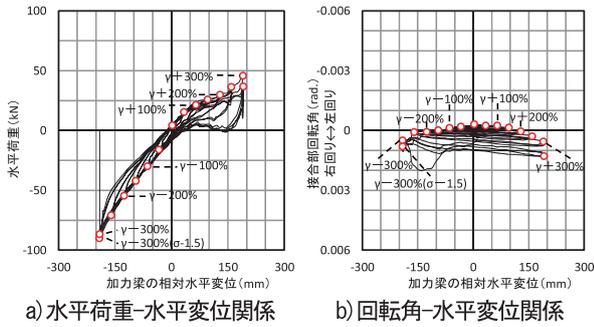


図-10 B-3 ($\sigma = -1.5 \text{ N/mm}^2$) の実験結果

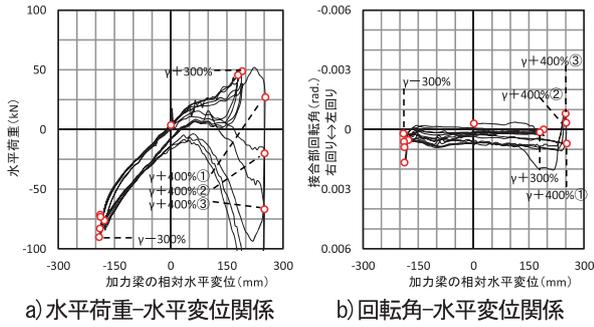


図-11 B-3 ($\gamma = +400\%$) の実験結果

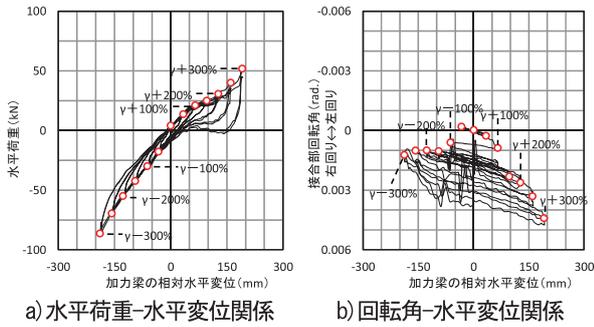


図-12 B-4 の実験結果



写真-2 B-4 の加力後の接合部の状況

§4. 載荷治具を用いた加力実験

4-1 加力方法

積層ゴムによる加力では杭頭接合部が終局状態に至らなかったため、積層ゴムと部材高さが同一である鋼製の載荷治具に交換し、接合部の曲げ耐力の確認を主目的として加力実験を実施した。

加力方法は、軸力を一定（面圧 $\sigma = +31 \text{ N/mm}^2$ ）とし、積層ゴムのせん断ひずみ γ に対応するように、水平荷重と曲げモーメントを増加させる正負交番載荷とした。B-2 は $\gamma = \pm 300\%$ のサイクルを実施したのち、水平荷重およびモーメントを 0 とした状態で純圧縮試験を実施した。

B-3 は面圧 $\sigma = +15 \text{ N/mm}^2$ とした場合も実施した。

接合部天端に積層ゴムを直接接合した場合、接合部には免震層の水平変位により生じる曲げ応力 ($P\delta$) と積層ゴムのせん断力により生じる曲げ応力 (Qh) が作用する。加力実験では、図-13 a) に示す水平変位による曲げ応力 ($P\delta$) は 2 台の鉛直アクチュエータの軸力を制御することで再現できるが、図-13 b) に示す積層ゴムのせん断力による曲げ応力 (Qh) は、せん断力の加力高さが異なるため、中立軸を補正する必要がある。そのため、鉛直アクチュエータは、 $P\delta$ 曲げ軸力 ($N_{P\delta}$) に Qh 曲げ補正分の軸力 (N_{Qh}) を加えた荷重により補正を行った。

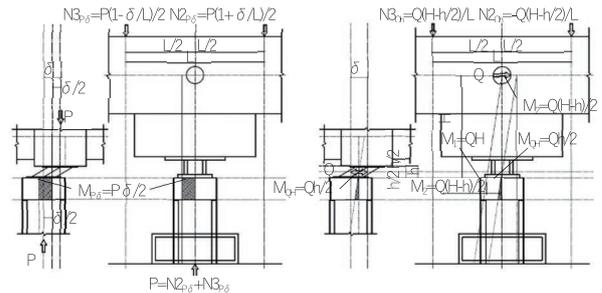


図-13 載荷治具を用いた加力方法

さらに、試験体の変形が大きくなると、試験体の中心と 2 台の鉛直アクチュエータ間の芯が偏心し、想定より大きな曲げモーメントが試験体に生じることとなる。そのため、鉛直アクチュエータ（ローラー支承）の水平移動量を計測し、偏心による曲げモーメントの増加分を補正するように鉛直アクチュエータの荷重分担を制御する。

4-2 試験体耐力

杭頭接合部の曲げ耐力の算定を図-14 に示す。SC 杭肉厚と同一の円環断面と仮定して算出した。中詰めコンクリート強度は PC 規準³⁾ による支圧強度とし、中詰めコンクリートと杭頭アンカー筋を耐力要素とした M-N 耐力曲線で評価した。コンクリート強度を支圧強度とすることで素管を間接的に考慮している。なお、B-4 は素管を有さないため支圧強度は考慮しない。B-2 の圧縮耐力も中詰めコンクリートの支圧強度とし評価した。

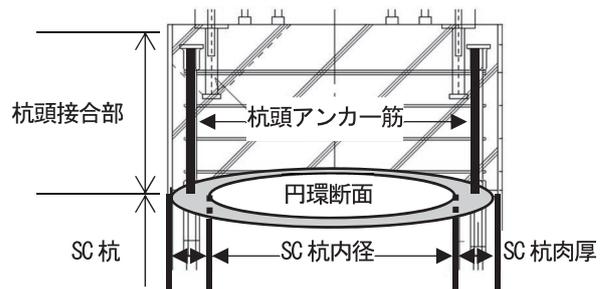


図-14 杭頭接合部の曲げ耐力の算定

4-3 実験結果

各試験体の杭頭接合部天端の曲げモーメントと基準点回転角の関係、及び耐力の計算値と実験値の比較を図15~19に示す。図中の赤矢印があるプロットは、試験体が終局状態に達する前に加力を中断した実験結果を示す。また加力後は加力芯と試験体中央を縦方向に切断し、中詰めコンクリートの最終状態を確認した。その状況を写真3~6に示す。

B-1（正負交番载荷 $\sigma = +31 \text{ N/mm}^2$ ）

積層ゴムのせん断ひずみ $\gamma = -600\%$ 相当1サイクル目で水平荷重が上昇せず回転だけが進行した。正側への加力を行ったが、 $\gamma = +600\%$ 相当2サイクル目到達前に回転だけが進行し、基準点回転角が0.06 radに達した時点で加力を終了した。中詰めコンクリートは袋ナット下端から外側45度方向と水平方向にひび割れが生じていた。正負交番载荷により袋ナット下端位置で引張側がコーン状に破壊していた。

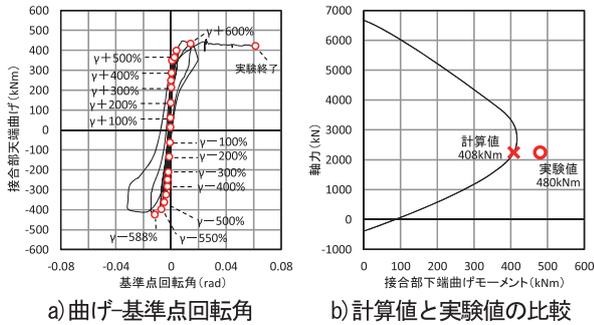


図-15 B-1の実験結果

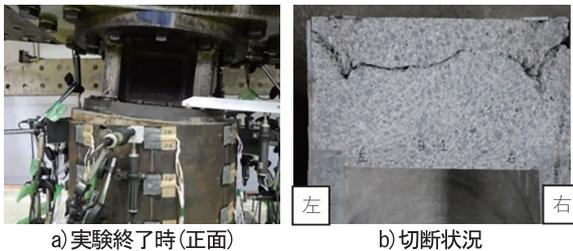


写真-3 B-1の実験後の状況

B-2（純圧縮試験，正負交番载荷 $\sigma = +31 \text{ N/mm}^2$ ）

純圧縮試験時の最大軸力は5290 kNであり、実強度 σ_B から求めた支圧耐力計算値（3653 kN）の1.45倍の耐力を有していた。また治具下フランジが15 mm程度沈み込んでおり、素管には膨らむような残留変形が生じていた。純圧縮試験後は再度、正負交番载荷を行った。

中詰めコンクリートはリングプレート外周からSC杭内周に向かって縦方向のひび割れと、袋ナット下端位置に水平方向のひび割れが生じていた。前者は純圧縮試験時に生じた押し抜き破壊、後者は純圧縮試験後に行った正負交番载荷によるものと考えられる。中詰めコンクリートとSC杭の境界面に損傷は無く健全であった。

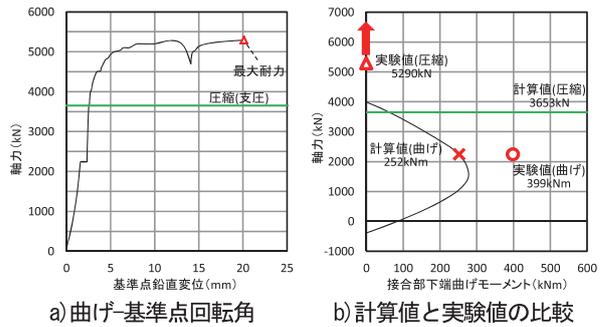


図-16 B-2の実験結果

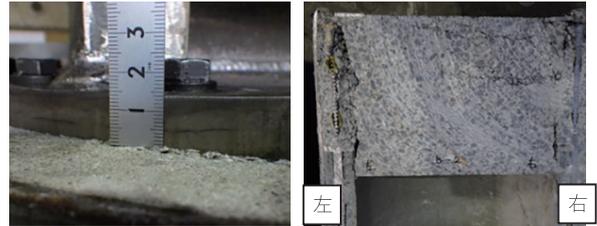


写真-4 B-2の実験後の状況

B-3 ①（正負交番载荷 $\sigma = +15 \text{ N/mm}^2$ ）

杭頭接合部の鉄筋降伏による耐力評価を目的に $\sigma = +15 \text{ N/mm}^2$ とし、中詰めコンクリートの耐力線を超える $\gamma = \pm 700\%$ 相当まで加力を行った。

$\gamma = -600\%$ 相当1サイクル目到達直前に引張側のアンカーボルトが降伏に至った。 $\gamma = +700\%$ 相当1サイクル目から引張側のリングプレートが浮き上がり始め、 $\gamma = -700\%$ 相当2サイクル目では3 mmの浮き上がりを確認した。このとき杭頭アンカー筋は降伏には至らなかった。これは杭頭アンカー筋（D13）の断面積がアンカーボルト（M10）よりも約3倍大きいためと考えられる。

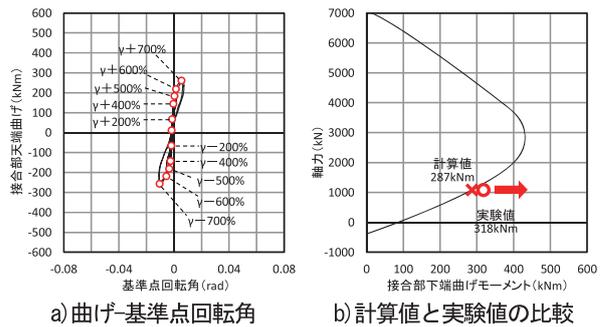
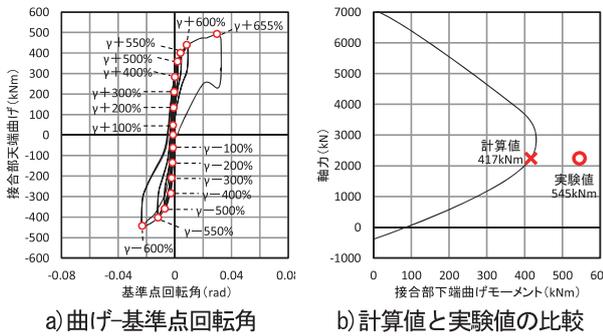


図-17 B-3 ①の実験結果

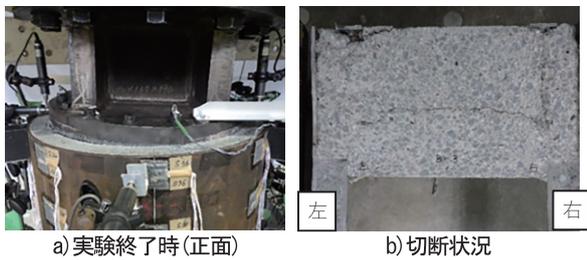
B-3 ②（正負交番载荷 $\sigma = +31 \text{ N/mm}^2$ ）

$\gamma = -500\%$ 相当以降、引張側のリングプレートが浮き上がり始めた。 $\gamma = +700\%$ 相当1サイクル目到達直前で回転角が急増し、基準点回転角が0.03 radに達した時点で加力を停止した。この時、リングプレートは引張側が25 mm浮き上がり、圧縮側は0.5 mmの沈み込みであった。 $\gamma = -700\%$ 相当に向け加力を再開したが、荷重を保持できず実験終了とした。

中詰めコンクリートはアンカーボルト下端位置の断面に水平方向のひび割れが生じていた。またB-3はB-1（袋ナット）と比べ定着位置が深いいためコーン破壊はしていなかった。



a) 曲げ-基準点回転角 b) 計算値と実験値の比較
図一18 B-3②の実験結果

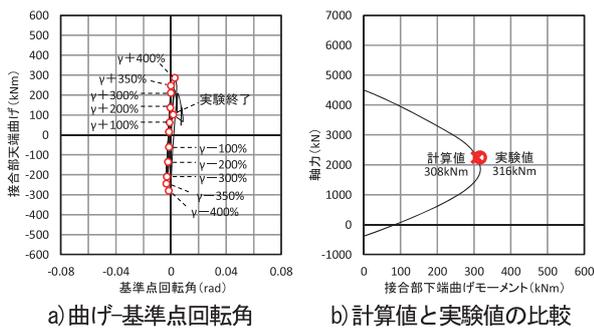


a) 実験終了時(正面) b) 切断状況

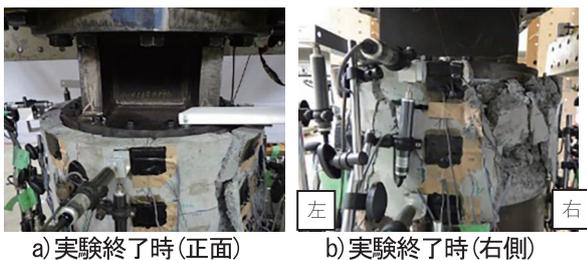
写真一5 B-3の実験後の状況

B-4 (正負交番载荷 $\sigma = +31 \text{ N/mm}^2$)

$\gamma = +300\%$ 相当 2 サイクル目を超えたあたりで、水平力および軸力の保持が出来なくなったため加力を停止した。再度 $\gamma = +400\%$ 相当を目指し加力を行ったが、停止前の耐力まで到達せずに中詰めコンクリートが破壊した。



a) 曲げ-基準点回転角 b) 計算値と実験値の比較
図一19 B-4の実験結果



a) 実験終了時(正面) b) 実験終了時(右側)

写真一6 B-4の実験後の状況

§ 5. まとめ

本研究は、外殻鋼管付きコンクリート杭に杭頭免震を適用した際の杭頭接合部の健全性および終局耐力の評価方法の妥当性を検討するため、静的加力実験を実施し、以下の内容を確認した。

積層ゴムを用いた加力では、試験体によらず、杭頭接合部の著しい耐力低下等は見られなかった。また、B-1 および B-3 では、杭頭接合部は健全であった。

積層ゴムを用いた加力では杭頭接合部が終局状態に至らなかったため、载荷用の治具を用いて一定軸力下での曲げせん断試験を行い、終局曲げ耐力を確認した。また、B-2 では純圧縮試験を行い、終局圧縮耐力を確認した。

実験結果は全ての試験体において設計値を上回っており、その範囲は終局曲げ耐力に関しては 1.11~1.58 倍、素管を有さない B-4 は 1.03 倍であった。終局圧縮耐力に関しては、設計値の 1.45 倍であった。以上より、考案した杭頭接合部の健全性を確認できた。

なお、本報は日本建築学会大会学術講演会梗概集(2021.07, 構造Ⅱ, pp. 517-522) に加筆・修正したものである。

謝辞。本報は、杭頭免震構造研究会（青木あすなろ建設、安藤ハザマ、東亜建設工業、西松建設、長谷工コーポレーション、三谷セキサン）における成果の一部を報告したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 成田悠他：杭頭免震構造の開発（その1）、西松建設技報, vol. 39
- 2) 山崎康雄他：杭頭免震構造の開発（その2）、西松建設技報, vol. 40
- 3) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998