

4. 既製杭を対象とした拡頭杭免震構法の杭頭接合部性能確認実験

Experiment to Confirm the Performance of Pile-head Joints of Expanded-Pile-Head Seismic Isolation Structure Using Precast Piles

土田克章* 林 晴佳* 竹内健一** 上田英明*

—概要—

免震構造は、耐震構造に比べて大地震時における建物の損傷や揺れを大幅に低減できることは、広く認識されている。しかし、従来の基礎免震構造は、免震部材の上下に基礎梁を配置した免震ピットを設けるため、耐震構造と比べて建設コストも高く、工期が長くなる傾向があった。そこで、当社は、基礎免震構造の性能を保持しつつ、物流倉庫や共同住宅等、多くの用途に適用可能かつ、建設コストの削減・工期短縮等のメリットを有する「拡頭杭免震構法」を開発し、日本 ERI 株式会社の構造性能評価(ERI-K15015)を2016年2月26日付で取得している。

本構法は、杭頭部の径を拡げた拡頭杭の頭部に直接免震部材を設置し、杭頭部を基礎免震構造における下部の基礎梁より薄い扁平な「つなぎ梁」で連結することで免震層の一体化を図った杭頭免震構造である。杭頭部の径を拡げた拡頭杭とすることで、杭頭に生じる回転角を制御することが可能である。また、基礎梁をつなぎ梁とすることで、基礎工事の簡略化を図ることが可能である(図1)。

しかし、杭種別を既製杭とした場合の杭頭接合部のディテールには改良の余地があったことから、既製杭に特化した杭頭接合部の開発を行い、日本 ERI 株式会社より取得した構造性能評価を2021年3月15日付けで改定(ERI-K15015-1)した*。

—技術的な特長—

本研究では、外殻鋼管付きコンクリート杭に杭頭免震構造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た(写真1)。

実際の応力状態を再現するため、積層ゴムのせん断ひずみ($\gamma = -300 \sim +300\%$)に応じて作用させる面圧($\sigma = -1 \sim +31\text{N/mm}^2$)を変動させながら加力を実施した。その結果、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。

杭頭接合部の終局耐力を確認するため、载荷治具を用いて加力を実施し、全ての試験体で設計値を上回る耐力を有していることを確認した。

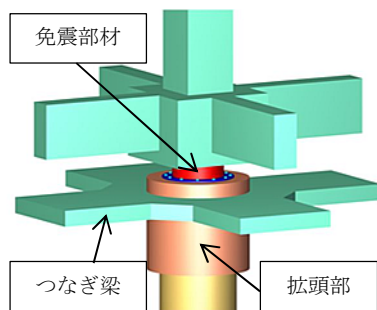


図1 拡頭杭免震構法の概略図



a) 積層ゴムを用いた加力 ($\gamma = +400\%$) b) 载荷治具を用いた加力(最大耐力)
写真1 実験状況 (B-1)

*本構法は、日本大学 北嶋圭二教授の御指導により杭頭免震構造研究会(青木あすなろ建設(株)、(株)安藤・間、東亜建設工業(株)、西松建設(株)、(株)長谷工コーポレーション、三谷セキサン(株))にて行った研究開発成果である。

**本報の内容は、日本建築学会大会学術講演梗概集(2021.07.pp.517-523)で発表した論文に、加筆・修正したものである。

既製杭を対象とした拡頭杭免震構法の杭頭接合部性能確認実験 Experiment to Confirm the Performance of Pile-head Joints of Expanded-Pile-Head Seismic Isolation Structure Using Precast Piles

○土田 堯章* 林 晴佳* 竹内健一** 上田英明*
Takaaki TSUCHIDA Haruka HAYASHI Kenichi TAKEUCHI Hideaki AGETA

ABSTRACT In this study, a static loading experiment was conducted to examine the validity of the evaluation method of the soundness and ultimate strength of the pile head joint when the pile head seismic isolation structure is applied to the concrete pile with outer shell steel pipe. As a result of applying a force using laminated rubber in order to reproduce the actual stress state, no significant decrease in the yield strength of the pile head joint was observed regardless of the test piece. In order to confirm the ultimate strength of the pile head joint, a load was applied using a loading jig, and it was confirmed that all the test pieces had a strength exceeding the design value.

Keywords : 杭頭免震, 既製杭, 杭頭接合部, 積層ゴム支承, 静的加力実験
Pile-head Seismic Isolation, Precast Pile, Pile-head Joint, Rubber Bearing, Static Loading Test

1. はじめに

免震構造は、耐震構造に比べて大地震時における建物の損傷や揺れを大幅に低減できることは、広く認識されている。しかし、従来の基礎免震構造は、免震部材の上下に基礎梁を配置した免震ピットを設けるため、耐震構造と比べて建設コストも高く、工期が長くなる傾向があった。そこで、当社は、基礎免震構造の性能を保持しつつ、物流倉庫や共同住宅等、多くの用途に適用可能かつ、建設コストの削減・工期短縮等のメリットを有する「拡頭杭免震構法」を開発し、日本 ERI 株式会社の構造性能評価(ERI-K15015)を 2016 年 2 月 26 日付で取得している。

拡頭杭免震構法の概略図を図 1 に示す。本構法は、杭頭部の径を拡げた拡頭杭の頭部に直接免震部材を設置し、杭頭部を基礎免震構造における下部の基礎梁より薄い扁平な「つなぎ梁」で連結することで免震層の一体化を図った杭頭免震構造である。杭頭部の径を拡げた拡頭杭とすることで、杭頭に生じる回転角を制御することが可能である。また、基礎梁をつなぎ梁とすることで、基礎

工事の簡略化を図ることが可能である。

しかし、杭種別を既製杭とした場合の杭頭接合部のディテールには改良の余地があったことから、既製杭に特化した杭頭接合部の開発を行い、日本 ERI 株式会社より取得した構造性能評価を 2021 年 3 月 15 日付で改定(ERI-K15015-1)した。

なお本構法は、日本大学 北嶋圭二教授の御指導により杭頭免震構造研究会(青木あすなろ建設(株)、(株)安藤・間、東亜建設工業(株)、西松建設(株)、(株)長谷工コーポレーション、三谷セキサン(株))にて行った研究開発成果である。本報は、本研究会での検討成果の一部を報告するものである*。

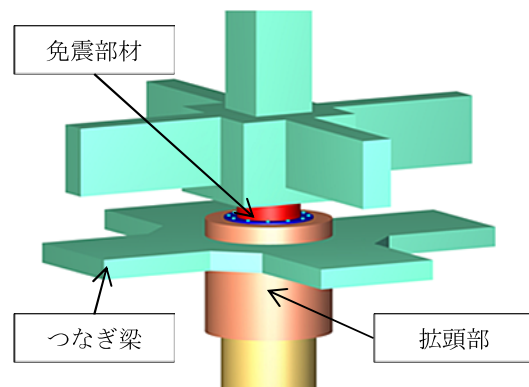


図 1 拡頭杭免震構法の概略図

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 **東京建築本店 設計部

※本報の内容は、日本建築学会大会学術講演会梗概集 (2021.07,構造II, pp.517-522) にて発表したものに、加筆・修正したものである。

2. 研究背景

杭頭免震構造は、二重基礎梁を設ける基礎免震構造と比べて基礎構造の合理化が可能な構法である。これまで、筆者らは、地盤-杭-建物連成系一体解析モデルを用いた解析的検討による本構造の有用性^{1),2)}、杭頭回転角を考慮した免震部材の加力実験から構造性能に大きな影響はない³⁾ことを示している。しかし、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、筆者らは、杭頭免震構造を既製杭へ適用するため、下記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という課題があった。

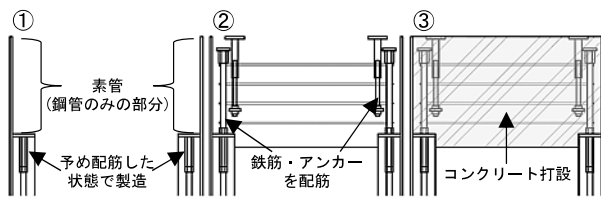


図2 杭頭接合部の構築手順

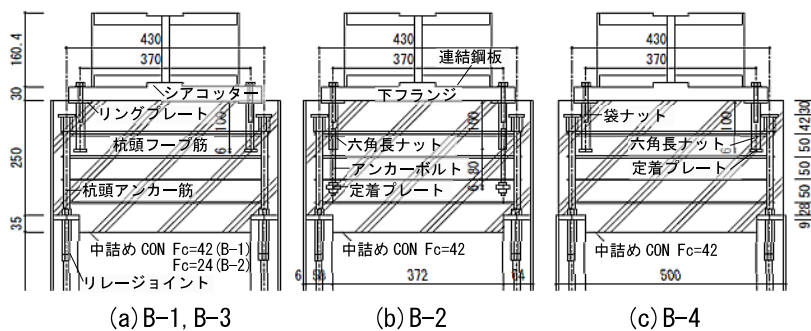


図3 試験体図

そこで、本研究では、上記の課題を解決し、接合部ディテールの妥当性を検証することを目的として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示す。

3. 実験概要

3.1 試験体

試験体を図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は標準試験体であり、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。

表1 試験体パラメータ

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

	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	ねじ節鉄筋
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	-

3.2 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。

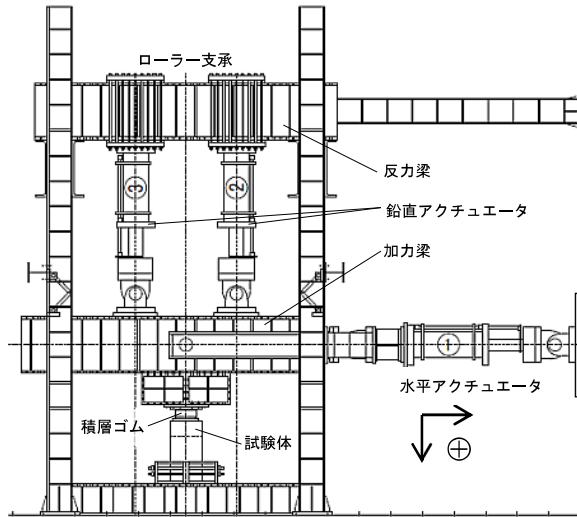


図4 試験装置図

3.3 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。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。

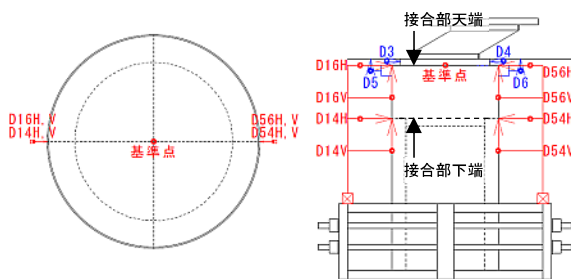
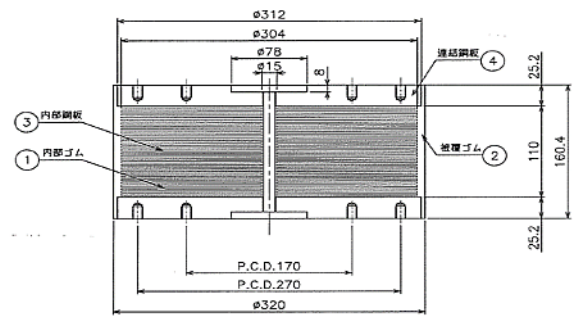


図5 基準点の位置

4. 積層ゴムを用いた加力実験

4.1 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304mm、ゴム総厚62mm(2.0mm×31層)である。積層ゴムの下フランジは外径420mm、厚さ30mm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 実験に用いた積層ゴム

4.2 加力内容

実験は、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。

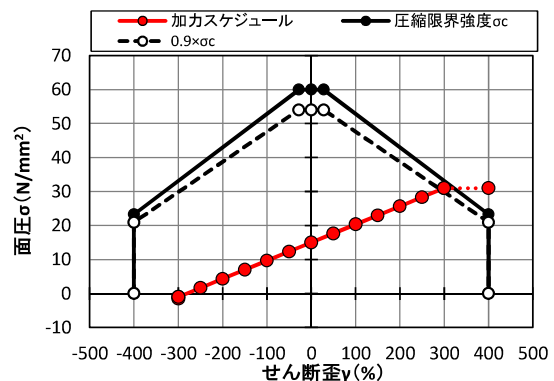


図7 加力時のせん断ひずみと面圧の関係

4.3 実験結果

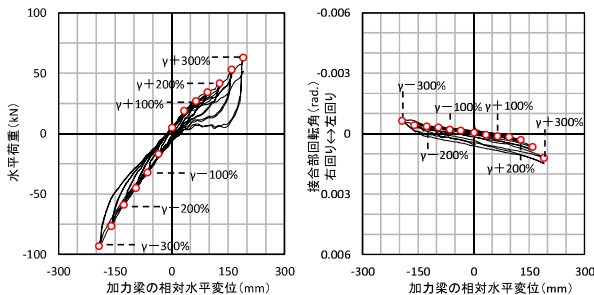
4つの試験体について、積層ゴムを含めた試験体全体の水平荷重と加力梁の水平変位の関係、および杭頭接合部下端から天端の基準点回転角(以下、回転角)と加力梁の水平変位の関係を図8～図12に示す。また、B-1 および B-2 の加力後の接合

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。

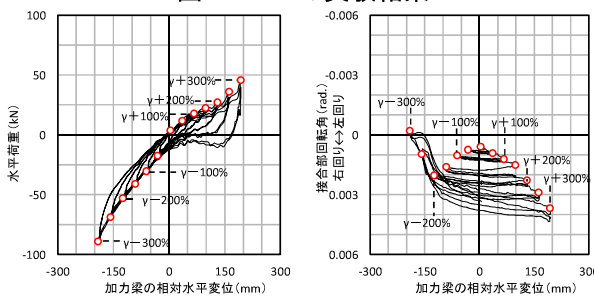
全体的な傾向として、接合部のパラメータによらず、復元力特性は、軸力が増大することによる剛性低下は見られるものの、著しい耐力の低下等は見られず、各試験体で同様な傾向となることが確認できた。

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、せん断歪 $\gamma=+400\%$ 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 $\sigma=-1.5N/mm^2$ 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1.b)



a) 水平荷重-水平変位関係 b) 回転角-水平変位関係
図8 B-1の実験結果

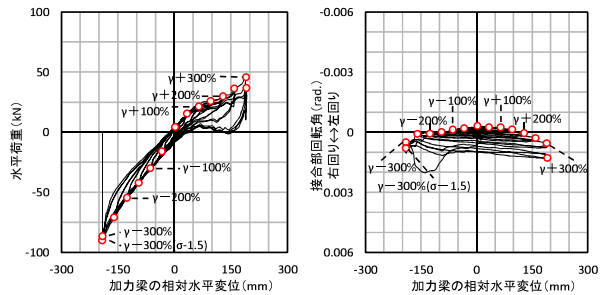


a) 水平荷重-水平変位関係 b) 回転角-水平変位関係
図9 B-2の実験結果

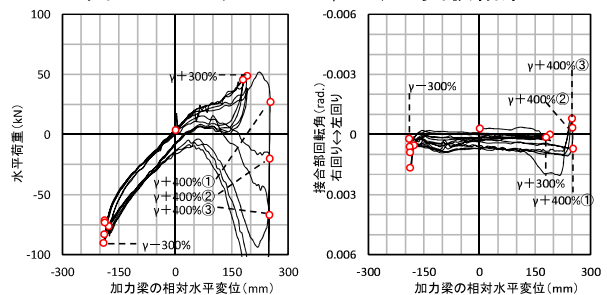


a) B-1 b) B-2
写真1 加力後の接合部天端の状況

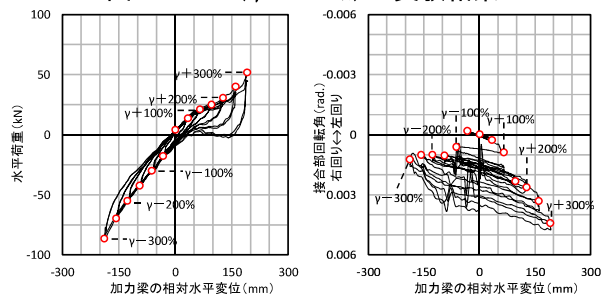
にあるように接合部天端には大きな損傷は見られなかった。そこで、回転角が同程度となった B-4 の結果を見ると、回転角は同程度であるにもかかわらず、写真2.b)にあるように中詰めコンクリートにひび割れがみられる結果であった。よって、B-2においても、外観では大きな損傷は見られないが、コンクリート内部にひび割れ程度の損傷は発生しているのではないかと考えられる。



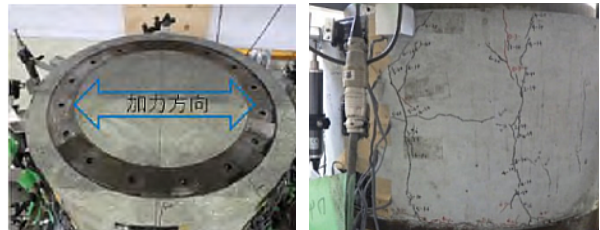
a) 水平荷重-水平変位関係 b) 回転角-水平変位関係
図10 B-3 ($\sigma=-1.5N/mm^2$)の実験結果



a) 水平荷重-水平変位関係 b) 回転角-水平変位関係
図11 B-3 ($\gamma=+400\%$)の実験結果



a) 水平荷重-水平変位関係 b) 回転角-水平変位関係
図12 B-4の実験結果



a) 杭頭接合部天端 b) 杭頭接合部側面
写真2 B-4の加力後の接合部の状況

5. 載荷治具を用いた加力実験

5.1 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応力($P\delta$)は 2 本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モーメント(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($NP\delta$)に Qh 曲げの補正分(NQh)を加えた荷重で制御する。

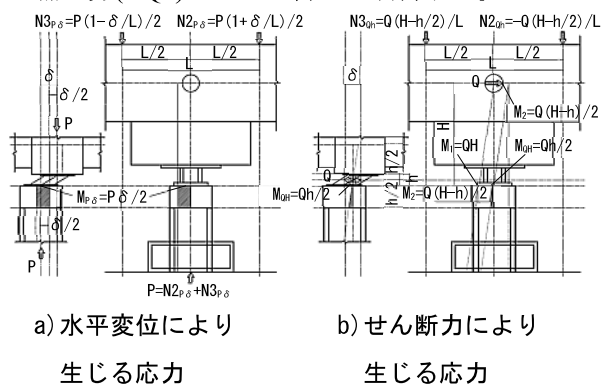


図 13 載荷治具を用いた加力方法

さらに、試験体の変形が大きくなると、試験体の中心と 2 基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。

5.2 試験体耐力

図 14 に示す杭頭接合部の曲げ耐力の算定は、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⁴⁾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。

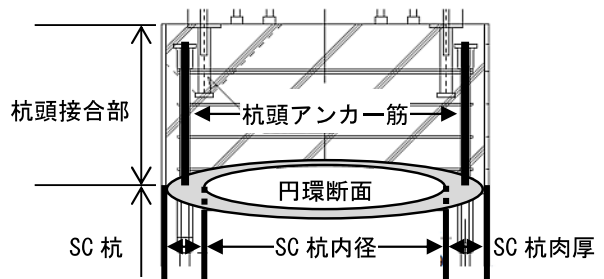


図 14 杭頭接合部の曲げ耐力の算定

5.3 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況を確認した。その状況を写真 3~6 に示す。

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

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 0.06rad 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。正負交番載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。

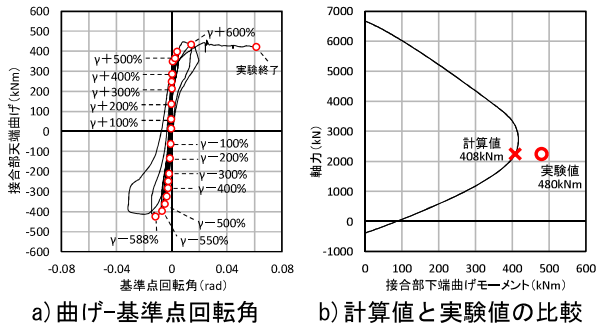


図 15 B-1 の実験結果

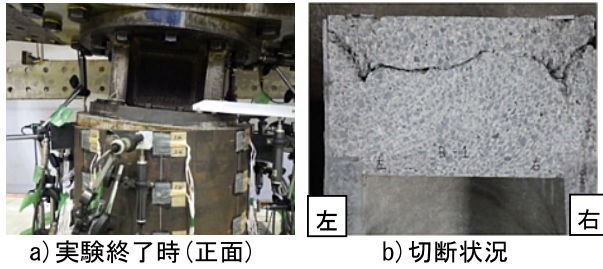


写真 3 B-1 の実験後の状況

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

純圧縮試験時の最大軸力は 5290kN であり、実強度 σ_B から求めた支圧耐力計算値(3653kN)の 1.45 倍の耐力を有していた。また治具下フランジが 15mm 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、正負交番載荷を行った。

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

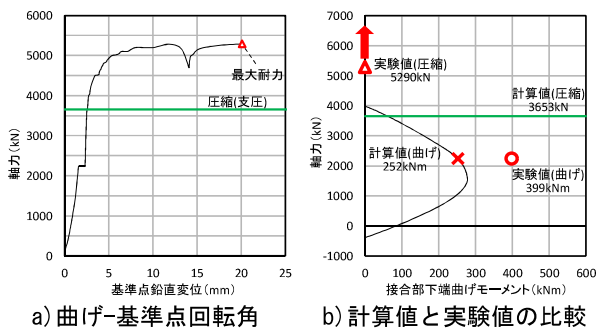


図 16 B-2 の実験結果

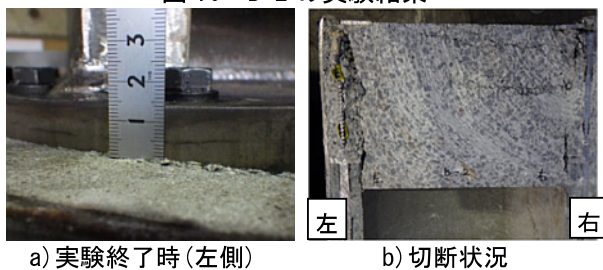


写真 4 B-2 の実験後の状況

いた。前者は純圧縮試験時に生じた押し抜き破壊によるもの、後者は純圧縮試験後に行った正負交番載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。

B-3① (正負交番載荷 $\sigma = +15\text{N/mm}^2$)

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 3mm 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。

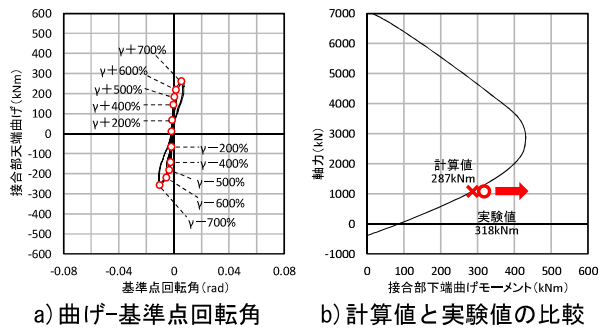


図 17 B-3①の実験結果

B-3② (正負交番載荷 $\sigma = +31\text{N/mm}^2$)

$\gamma = -500\%$ 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 0.03rad 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 25mm 浮き上がり、圧縮側は 0.5mm 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ためコーン破壊はしていなかった。

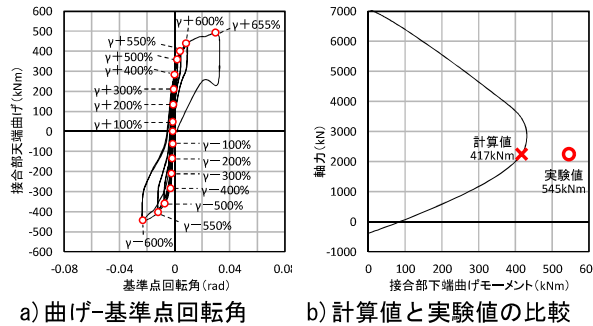


図 18 B-3②の実験結果

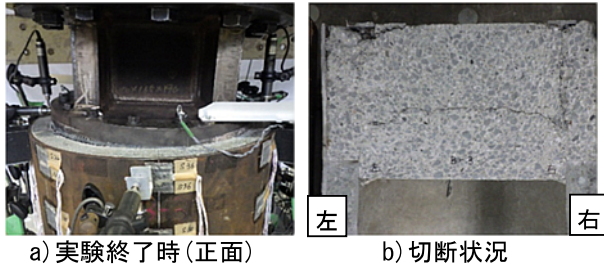


写真 5 B-3 の実験後の状況

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

$\gamma = +300\%$ 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。

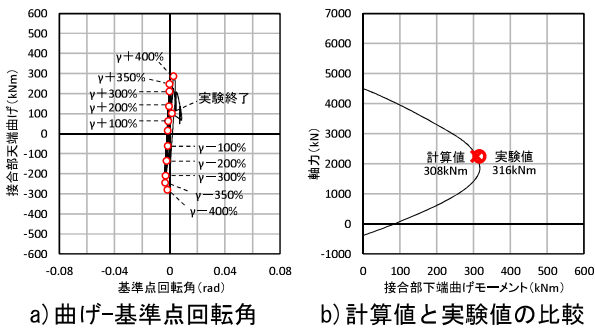


図 19 B-4 の実験結果

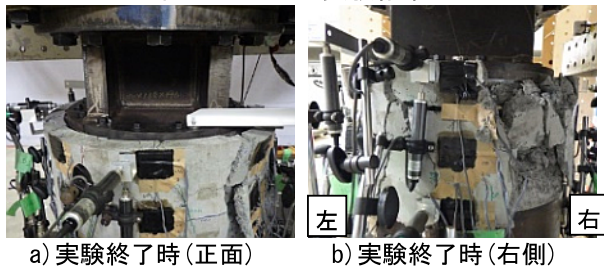


写真 6 B-4 の実験後の状況

6. まとめ

本研究では、外殻鋼管付きコンクリート杭に杭頭免震構造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、載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。

【謝辞】

本報告は、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）での検討成果の一部を報告したものである。関係各位に謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 村田鉄雄 ほか：地盤-杭-建物連成系一体解析モデルを用いた杭頭免震構造の地震応答解析 その1~4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.605-612, 2015.09
- 2) 西本憲司 ほか：地盤-杭-建物連成系一体解析モデルを用いた杭頭免震構造の地震応答解析 その5~10, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.465-476, 2016.08
- 3) 牧田敏郎 ほか：杭頭回転角を考慮した免震部材の構造性能 その1~4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.449-456, 2016.08
- 4) 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