

建設コストの低減と耐震性能の向上を目的とした 新杭頭接合工法の研究開発

田蔵 隆¹・大槻 明¹・青木 孝¹・真野 英之¹・磯田和彦¹
岩本利行²・荒川範行²・石原孝浩²・大川 雅之²

¹正会員 工博 清水建設(株)技術研究所 部長 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)
正会員 工博 同 主席研究員、正会員 工修 主任研究員、工修 主任研究員、工修 設計本部 主査
²正会員 工修 (株)クボタ 鉄管事業部 部長 (〒103-8310 東京都中央区日本橋室町3-1-3)
同 鉄管研究部課長、同 研究員、同 工修 研究員

構造物の耐震性能の向上と建設コストの低減は、あらゆる構造物の建設において求められている必須の課題である。杭基礎構造物に関して、この課題に対する技術的解決を図ることを目的に、新たな杭頭接合工法を開発した。開発した杭頭デバイスの曲げ試験、せん断試験などを行い、9階建てRC造免震集合住宅を対象に、その有効性を確認する数値シミュレーションを実施した。建物基礎部の建設コストは、剛接合の場合と比較して15%以上低減することができた。

Key Words: *Pile Foundation, Pile-Head Device, Decreasing Construction Costs, Increasing, Seismic Performance*

1. はじめに

杭頭をピン接合にした場合、地中で発生する杭の最大曲げモーメントは、杭頭を剛接合して得られる杭頭での最大曲げモーメントより通常小さくなる。このことから、杭頭をピン接合とすることにより、杭および基礎梁の断面性能が小さくでき、経済的な設計ができることは以前から知られていた。

しかし、杭頭に静的な水平荷重を載荷して行う杭基礎の耐震設計法に従うと、杭頭をピン接合とした場合、杭頭を剛接合とした場合に比べて杭頭変位は2倍大きくなる(地盤が均質な場合)。また一方、ピン接合のための十分に信頼性のある接合工法がないなどの理由から、杭頭ピン接合工法の採用は、特別な場合を除いては見送られることが多かった。

ところが、杭基礎・地盤・構造物系の動的相互作用の研究の進展に伴い、杭の地震時応答に及ぼす地盤震動の影響(Kinematic Interaction)が非常に大きいことが認められるようになり¹⁾、杭頭をピン接合とした場合と剛接合とした場合で、杭の変位には大きな差異は発生しないことが、解析的ならびに実験的研究から明らかにされるようになった。このことから、杭頭ピン接合工法の研究開発に対する動機付けが得られ、最近この分野の研究開発が盛んになりつつある²⁾⁻³⁾。

本研究は杭基礎の耐震性能の向上と建設コストの低減を目的に実施したもので、杭頭での曲げモーメントの大幅な低減が図れる杭頭デバイスを開発した。

2. 杭頭ピン接合工法の開発に必要な要求性能と杭頭デバイスの形状決定のプロセス

杭頭ピン接合工法において求められる要求性能は、(1) 上部構造物の長期鉛直荷重を杭に完全に伝達し、(2) 杭頭が自由に回転できて曲げモーメントを発生させず、(3) 地震時に上部構造物から作用するせん断力を杭に完全に伝達することである。このことを図示すると、図1のように描ける。

上部構造物の長期鉛直荷重を杭に完全に伝達するには、図1(a)にあるように、上部構造物と杭頭デバイスは十分な広さで面接触していることが望ましい。杭頭が自由に回転するためには、図1(b)に描かれているように、球面の形状を有した部位が上部構造物と杭頭の間に組み込まれていればよい。さらに、上部構造物から杭に作用するせん断力を杭に完全に伝達するためには、図1(c)のように、上部構造物に杭頭の一部が突起状にのみ込まれているようになっている

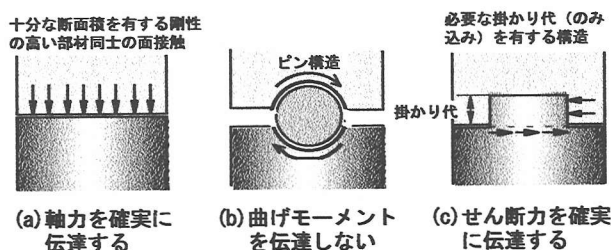


図1 杭頭デバイスの要求性能と各性能に対する理想形状

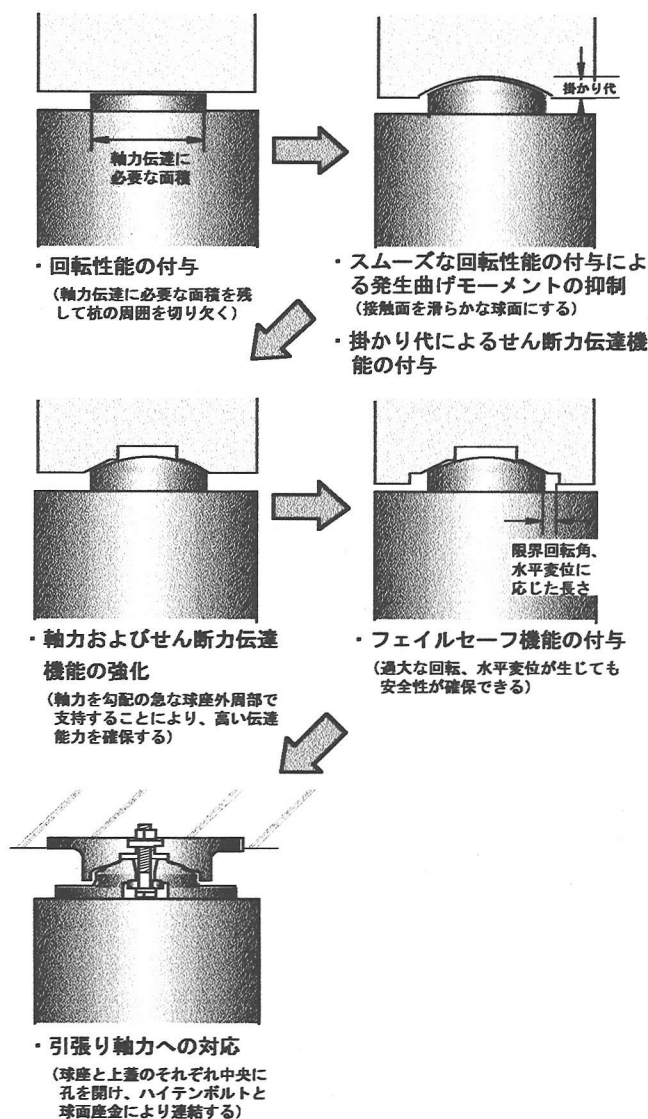


図2 杭頭デバイスの形状決定のプロセス

ることが理想的である。この三つの異なる要求をすべて満足させるようにして、杭頭デバイスの形状を決定した思考のプロセスを示したものが図2である。軸力は球面接触によって伝達させ、回転は球面での滑り、せん断力は球座と上蓋の水平方向の接触によって伝達させる機構である。

3. 杭頭デバイスの形状のさらなる工夫

せん断力は上蓋と球座が接触し、さらに球座の上に上蓋が乗り上げようとする力の働きによって伝達される。この場合、より大きなせん断力が伝達されるようにするためには、球座の球面勾配が急な部分、すなわち杭頭デバイスの外周で両者を接触させた方が有利となる。また、大きな軸力を支持させるためには、上蓋と球座が接触する面積を大きくとる必要がある。つまり、上蓋と球座が接触する位置を杭頭デバイスの外周とすることによって、これらの要求性能

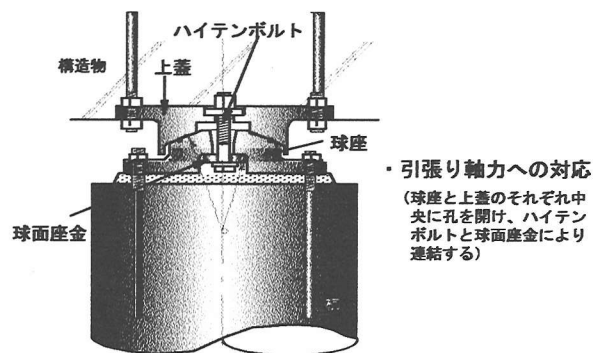


図3 杭頭デバイスの最終形状

を同時に満たすことができる。

また、引き抜き力が作用しても杭頭デバイスの機能が失われないようにするために、ハイテンボルトによって上蓋と球座を連結した。この場合、杭頭デバイスが機能維持できる最大引き抜き力は、ハイテンボルトの引張り強度となる。ハイテンボルトは、杭頭デバイスの回転に影響を及ぼさないように、杭頭デバイスの中央に配置され、さらにハイテンボルトの径と杭頭デバイス中央の穴径には余裕代が設けられている。また、杭頭デバイスにせん断力が作用しても、穴径の余裕代によって、ハイテンボルトはそのせん断力には抵抗しない構造となっている。

杭頭デバイスに引き抜き力が作用した場合、球座の下面に配置された球面座金（球面の曲率中心は球座の曲率中心に一致している）が、球座穴の下面（上蓋と同じ曲率中心を持つ球面形状となっている）と接触し、杭頭デバイスに引き抜き力が作用した状態でも、回転性能を保持しつつ、せん断力の伝達（球座穴の下面と球面座金の接触によって）が行えるような工夫が施されている。

さらに、想定以上の地震力が作用して、杭頭で過大な回転あるいはせん断力が発生した場合のフェールセーフ機構として、上蓋の外周に突起を設け、過大な回転と水平方向の移動を防止する機構を備えている。

図3は杭頭デバイスの最終形状を示したものである。杭頭デバイスは上蓋、球座、ハイテンボルト、球面座金などで構成されている。なお、上蓋、球座、球面座金はダクタイル鋳鉄製である。

4. 杭頭デバイスの曲げ試験とせん断試験

杭頭デバイスの上蓋下面と球座上面には、特別な表面処理や加工は施されない。そのため両者間で摩擦力による曲げモーメントが発生する。図4は長期鉛直荷重8MN用の杭頭デバイスに対して行った曲げ試験の結果である。杭頭デバイスに発生する最大曲げモーメントMは、軸力Nで除すことにより、M/

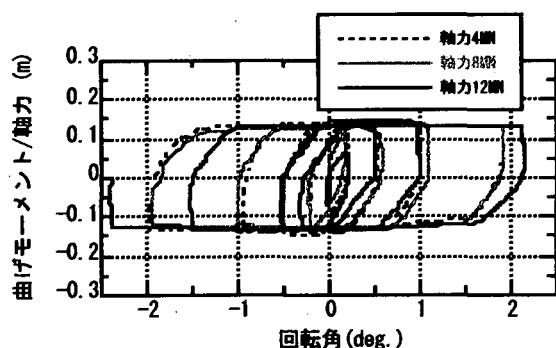


図4 杭頭デバイスの曲げ試験結果

$N = 0.16$ (m) なる関係式が成立する。

図5は長期鉛直荷重8MN用の杭頭デバイスに対して行ったせん断試験の結果である。ただし、この実験ではハイテンボルトは組み込まれていない。実験上の制約から、せん断力 S と軸力 N の比(S/N)は最大値として0.6程度までが確認できている。上蓋が球座に乗り上げる直前までの両者に相対変位が生じない第1折れ点の値は、 $S/N = 0.38$ である。

5. 集合住宅に対する数値シミュレーション

新杭頭接合工法の有効性の確認を目的に、地上9階、地下2階建てのRC造の免震集合住宅を対象に、非線形地震応答解析を実施した。

解析は2次元有限要素法により行った。解析モデルを図6に示す。免震装置は地上1階と地階の間に設置されている。建物は線形のせん断型の質点ばね系モデル、床スラブは剛な梁要素でモデル化した。建物の基礎を固定としたとき(免震装置無し)の1次固有周期は0.33秒、杭・地盤・免震建物の連成系の1次固有周期は3.1秒である。免震装置(積層ゴム)の復元力特性は、バイリニア型モデルによりモデル化した。杭は場所打ちコンクリート杭である。平面ひずみ解析であるため解析断面の奥行き方向に並んだ杭は列ごとに集約し、それぞれ線形の梁要素でモデル化した。

地盤の非線形特性は、修正 Ramberg-Osgood モデルによってモデル化した。初期剛性から求められる地盤の1次固有周期は0.37秒である。杭頭デバイスは、それぞれ剛な鉛直ばねとせん断ばね、ならびに非線形の回転ばねでモデル化した。回転ばねは、杭頭デバイス(8MN用デバイス)の曲げ試験の結果に基づき、軸力 N の0.16倍の曲げモーメント M を折点とする剛塑性ばねでモデル化した。せん断力ばねは、作用して

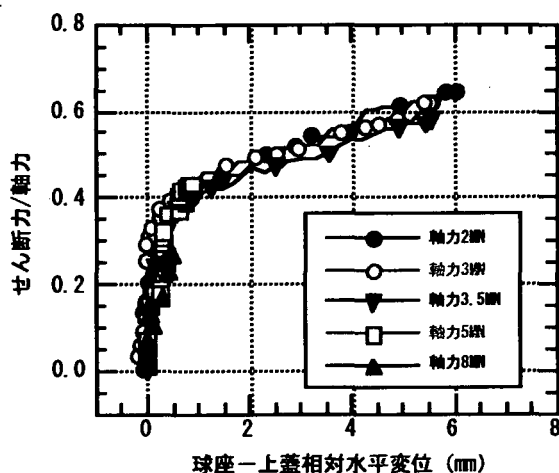


図5 杭頭デバイスのせん断試験結果

いる軸力 N によって変化するようにモデル化した。地震応答解析では、常時軸力と変動軸力を考慮し、折点の判定を逐次行った。

入力地震波は、建設省告示1461号に示されたレベル2地震(最大加速度300Gal)とし、波動の逸散を考慮するために設置した粘性ダンパーを通して下方から入力した。なお、位相特性は十勝沖地震八戸記録(NS成分)より与えた。

6. 解析結果

解析は、(1) 杭頭が剛接合の場合(剛接合)、(2) 今回開発した杭頭デバイスを用いた場合(杭頭デバイス接合)、さらに(3) 杭頭を完全ピン接合とした場合(完全ピン接合)について行った。

図7～9に、杭④および杭⑥の曲げモーメント(杭1本当たり)、変形の最大値分布、ならびに建物の最大層せん断力分布を示す。図7より、杭頭デバイス接合の場合の杭頭の最大曲げモーメントは、剛接合の40～50%となっている。完全ピン接合の場合の最大曲げモーメントは、GL-12.5mの位置で剛接合の最大曲げモーメントよりも1.2倍ほど大きい、その値は剛接合の杭頭最大曲げモーメントの30%程度である。

図8の杭の変形図から、完全ピン接合や杭頭デバイス接合によって、杭頭変位が著しく増大することがないことが分かる。また、同図より地盤変形が杭の変形に与える影響がきわめて大きいことが理解できる。

図9の建物の最大層せん断力分布から、建物の最大層せん断力分布は杭頭の接合条件によって変化しないことが分かる。

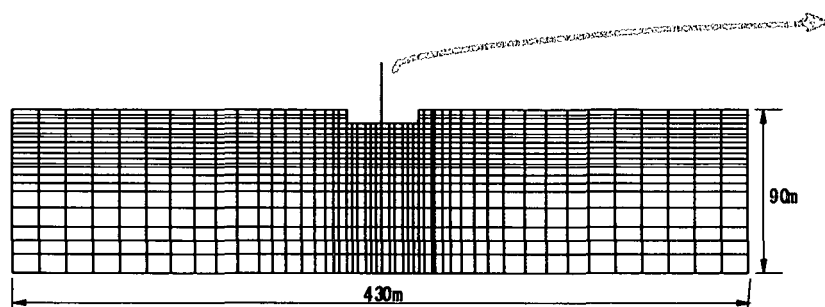


図6 杭基礎・地盤・建物系の2次元FEMモデル

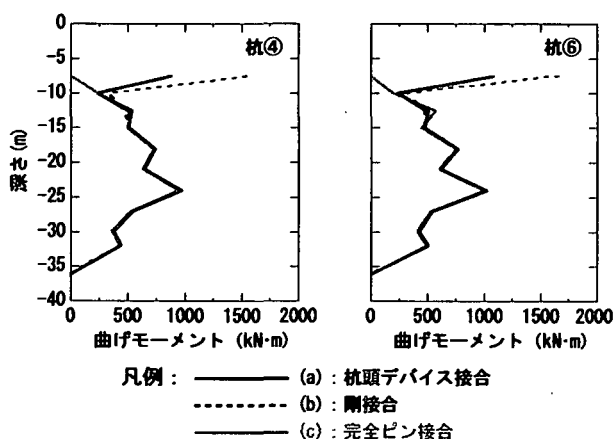
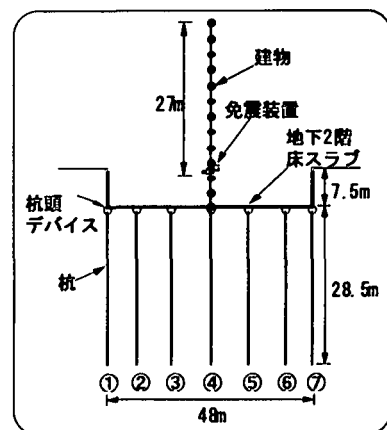


図7 杭の最大曲げモーメント分布

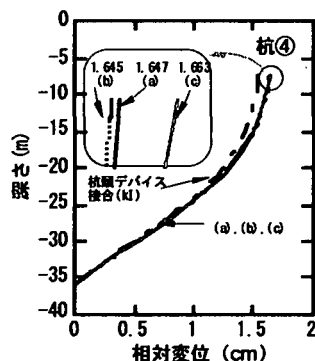


図8 杭の最大変形分布 (凡例は図7と同じ)

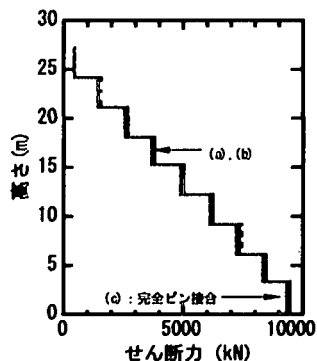


図9 建物の最大層せん断力分布 (凡例は図7と同じ)

7. あとがき

本杭頭デバイスの特長を列挙すると、(1) 繰り返しの地震外力に対しても機能維持ができる構造である、(2) 引き抜き力にも対応できる、(3) すべての種類の杭に適用が可能である、(4) 特殊な施工技術が必要としない、(5) 通常の杭の施工管理規準で施工が可能である、(6) 杭頭デバイスが安価である、などである。

免震建物を対象に、開発した杭頭デバイスを用いた場合のレベル2地震動に対する地震応答解析を実施し、杭頭デバイス適用の有効性を確認した。場所打ちコンクリート杭の杭径は、杭頭デバイスを適用することによってφ1500 mmからφ1200 mmに減少でき、床スラブの断面も大幅に縮小化を図ることができた。これによる地盤の掘削ならびに排出土量が減量でき、基礎部の建設コストは杭頭剛接合で行った当初の設計に比べて、15%以上低減することができた。

本杭頭デバイスは、通常の杭の施工管理基準で施工が可能である。また、特殊な施工機械や施工技術が必要としないなどの特長を有している⁴⁾。

さらに、杭頭デバイスの長期耐久性を確認するために、JIS-Z2371に準拠した塩水噴霧試験、また地震時挙動特性の把握するための杭基礎・地盤・構造物系の遠心模型振動実験、個別要素法ならびに有限要素法による杭頭デバイスの接触問題の解析などを行い、この新杭頭接合工法の有効性を確認している。

参考文献

- 1) 例えば、南荘淳、安田扶律、藤井康男、田蔵隆、大槻明、淵本正樹、中平明憲、黒田兆治：道路橋脚基礎杭の地震被災解析とその対策法に関する研究、土木学会論文集No. 661/I-53, pp. 195-210, 2000. 1.
- 2) 杉村義広監修：これからの建築基礎構造—杭基礎を中心に、建築技術, pp. 115-209, 2000. 9.
- 3) 日経アーキテクチャ：杭基礎—杭頭を剛結しない、pp. 94-95, 2001. 3-5.
- 4) 青木孝、田蔵隆、大槻明、真野英之、磯田和彦、岩本利行、荒川範行、石原孝浩、大川雅之、建設コストの低減と耐震性能の向上を目指した新杭頭接合工法の研究開発 (その3：施工法)、第36回地盤工学研究発表会, pp. 1697-1698, 2001. 6.