

# コストダウン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とその適用事例

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

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>正会員 工修 (株)クボタ 鉄管事業部 部長 (〒556-8601 大阪市浪速区敷津東1-2-47)  
同 鉄管研究部課長、同 研究員、同 工修 研究員

建設コストの低減と耐震性能の向上は、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。本論文は杭基礎構造物に対して、この課題の技術的解決を図ることを目的に研究開発した新杭頭接合工法について述べたものである。開発した杭頭デバイスの特長として、繰り返しの地震外力に対しても機能が維持でき、引き抜く力が作用しても性能が保持できる。また、すべての杭種に適用が可能であることなどが挙げられる。この工法を適用した建物の事例を紹介し、さらに杭頭デバイスの施工法に関して言及している。

*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<sup>1)</sup>、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<sup>2)-3)</sup>。

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組み込まれていけばよい。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く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図2に示した。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

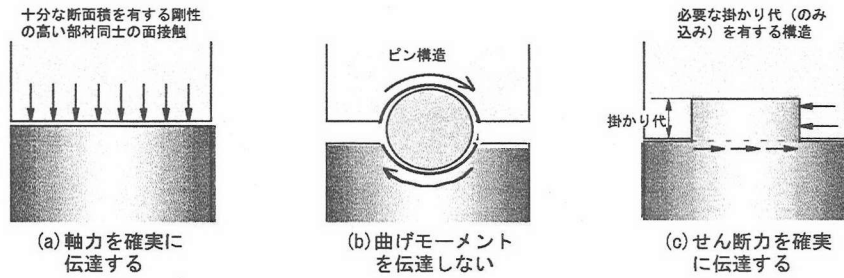


図1 杭頭デバイスの要求性能と各性能に対する理想形状

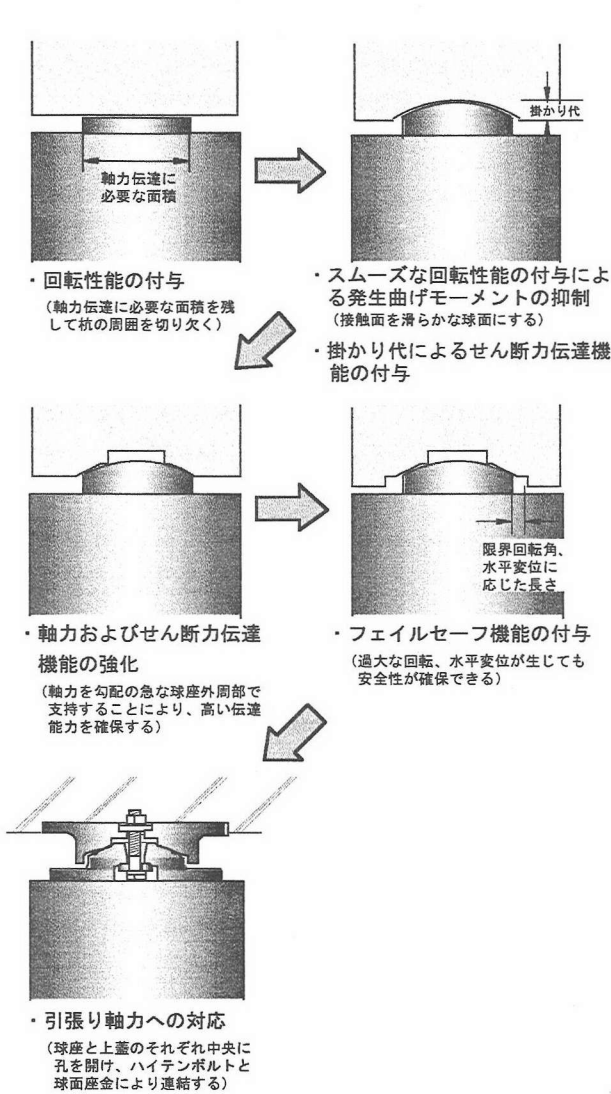


図2 杭頭デバイスの形状決定のプロセス

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

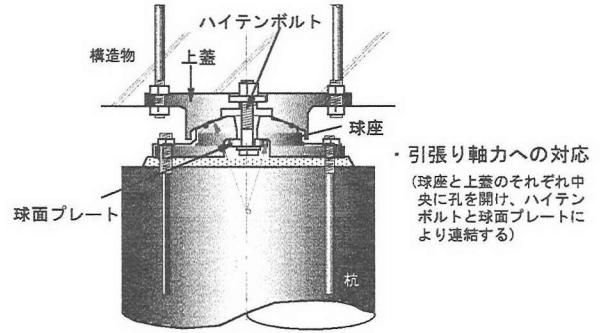


図3 杭頭デバイスの最終形状

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プレート（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プレートの接触によって）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、球面プレートなどで構成されている。なお、上蓋、球座、球面プレート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

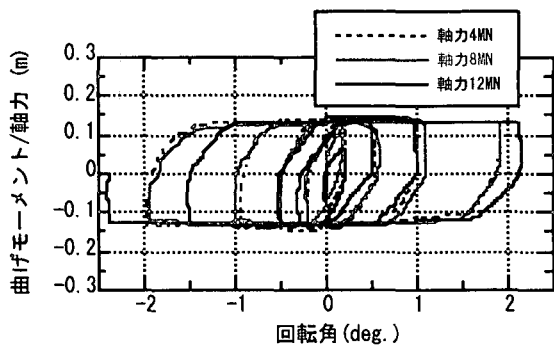


図4 杭頭デバイスの曲げ試験結果

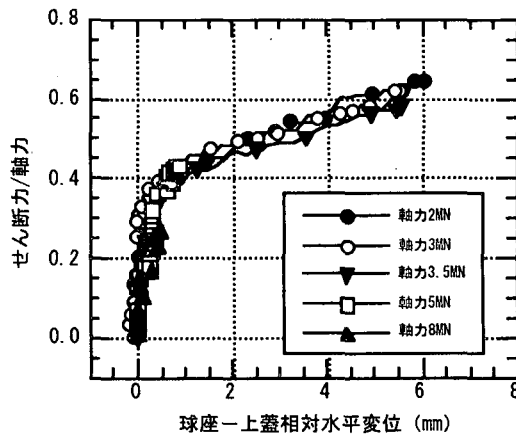


図5 杭頭デバイスのせん断試験結果

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、 $M/N=0.16$  (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<sup>4)</sup>

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。詳細は前報<sup>4)</sup>に譲るが、解析の結果から、開発した杭頭デバイスを用いた場合の杭頭の最大曲げモーメントは、剛接合の40～50%となること、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ようなことがないこと、また建物の最大層せん断力分布から、杭頭の接合条件によって建物の最大層せん断力分布は変化しないことなどを明らかにしている。

また、杭頭デバイスを用いることにより、場所打ちコンクリート杭の杭径が当初 $\phi=1500$ mmであったものが $\phi=1200$ mmに、また床スラブ厚も大幅に減少できた。また、これによる地盤の掘削ならびに排出土量も減量でき、基礎部の建設コストは杭頭剛接合として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。

## 6. 本工法の適用建物

実建物に本工法を適用した事例について紹介する。建物は図6に示す計162本の場所打ちコンクリート杭(杭径1500mmが52本、1100mmが110本)によって支持された高さ22.4mのSC造の工場建物である。長期鉛直荷重が8MNと4MN用の杭頭デバイスが、それぞれ52個、110個設置された。図7に示した2次元有限要素法モデルに対する非線形地震応答解析(入力地震波:1995年兵庫県南部地震ポートアイランド波NS成分、地表面で250gal)から得られた杭の曲げモーメントならびに変位の最大値分布図を図8、図9に示した。

解析は有効応力解析によって行い、杭頭デバイスは図4および図5の実験結果を反映させた非線形ばねでモデル化(図8参照)した。

図9および図10より、杭頭デバイスを用いた場合の杭頭最大曲げモーメントは、杭頭を剛接合とした場合の最大曲げモーメントの20～30%になっており、杭頭変位は剛接合に比べて30%ほど大きくなっていることが分かる。図11に建物の最大層せん断力の分布図を示したが、建物の最大層せん断力は杭頭の接合法の違いによって変化していない。

## 7. 杭頭デバイスの施工法

建設コストを低減するためには、杭頭デバイスだけでなく施工費の低廉化が必須の条件となる。そのためには、特別な施工機械を用いることなく、特別な施工技術も要求されないようにしなければならない。鋼管杭ならびにPHC杭に対する施工法は、別報<sup>5)</sup>に譲り、ここでは場所打ちコンクリート杭に対する接合法について述べる。

場所打ちコンクリート杭の施工法としては、表1に示すように、三つの方法を考案した。この三つの方法の違いは、杭頭デバイスを定着するためのアン

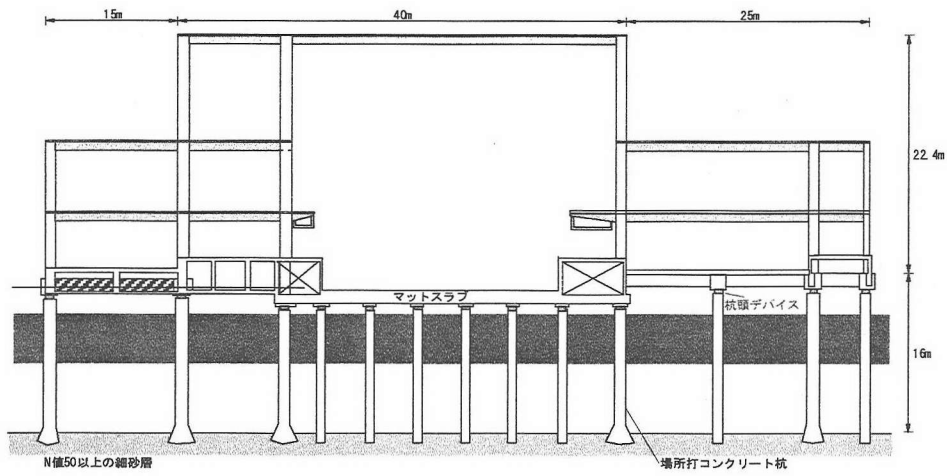


図6 杭頭デバイスが採用された建物

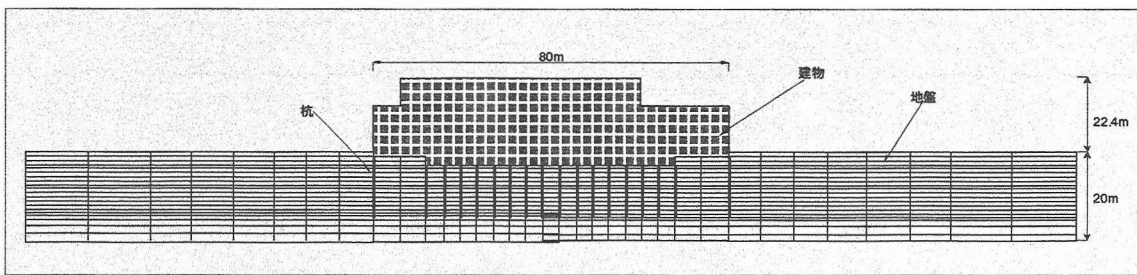


図7 2次元FEM非線形地震応答解析モデル

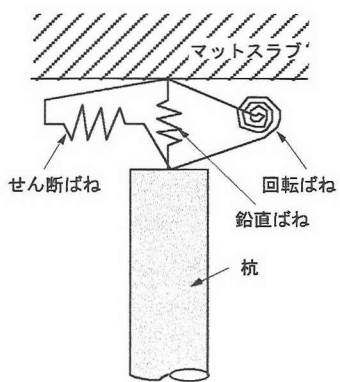


図8 杭頭デバイスのモデル化

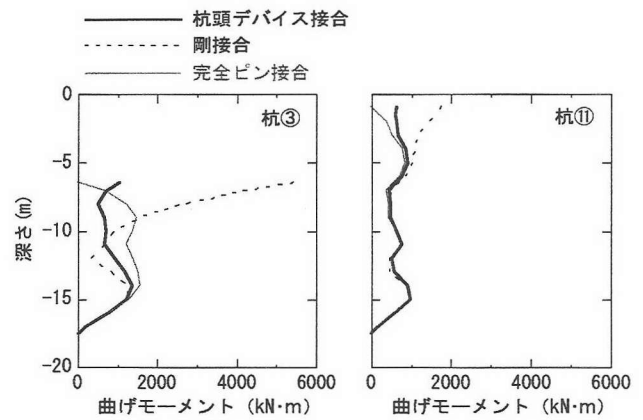


図9 杭の最大曲げモーメント分布図

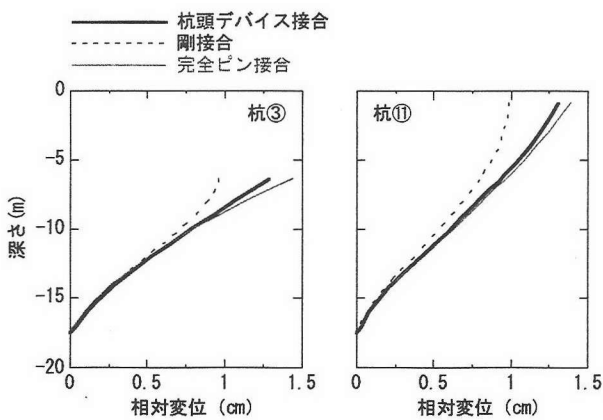


図10 杭の最大変位分布図

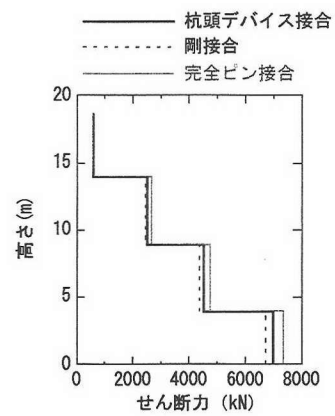


図11 建物の最大層せん断力分布図

表1 場所打ちコンクリート杭に対する杭頭デバイスの施工法

|       | (A) アンカー筋直埋方式   | (B) アンカー後施工方式   | (C) 杭コンクリート二度打ち方式   |
|-------|---|---|---|
| 工法概要図 | <p>・アンカー筋を予め杭主筋に取付けた後に杭コンクリートを打設する。余盛りコンクリート撤去時にアンカー頭部をはつり出してこれにデバイスを据付ける方式。</p>  | <p>・杭コンクリートを打設して余盛りコンクリートを撤去した後に、所定の位置に後施工アンカーをセットし、これにデバイスを据付ける方式。</p>   | <p>・杭コンクリートを70~80cm下で打ち止め、余盛りコンクリート撤去後、所定の位置にアンカーフレームをセットし、所定の高さまで気中コンクリートを打設する。この後、アンカーにデバイスを据付ける方式。</p>   |
| 施工手順  | <ol style="list-style-type: none"> <li>① アンカー筧筋を製作し、杭主筋に取付ける。</li> <li>② 杭主筋建込み。杭コンクリート打設。</li> <li>③ 杭コンクリート硬化後、根切り掘削。</li> <li>④ 余盛りコンクリート撤去。(杭天端=基礎下面-250mm)</li> <li>⑤ アンカー筋頭部ハツリ出し。</li> <li>⑥ デバイス据付け。</li> <li>⑦ 無収縮モルタル充填。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>① 杭主筋建込み。杭コンクリート打設。</li> <li>② 杭コンクリート硬化後、根切り掘削。</li> <li>③ 余盛りコンクリート撤去。(杭天端=基礎下面-250mm)</li> <li>④ アンカーボルト位置の穿孔。</li> <li>⑤ ケミカルアンカーをセット</li> <li>⑥ デバイス据付け。</li> <li>⑦ 無収縮モルタル充填。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>① 杭主筋建込み。杭コンクリート打設。</li> <li>② 杭コンクリート硬化後、根切り掘削、杭回り掘削。</li> <li>③ 余盛りコンクリート撤去。(杭天端=基礎下面-1,000mm)</li> <li>④ アンカーフレームをセット、杭主筋に固定。</li> <li>⑤ 杭主筋まわりフープ筋及び型枠セット。</li> <li>⑥ 気中コンクリート打設。</li> <li>⑦ デバイス据付け。</li> <li>⑧ 無収縮モルタル充填。</li> <li>⑨ 杭回り埋め戻し。</li> </ol> |
| 長所    | <p>・3者の中で最も一般的で、安価な方式である。</p>   | <p>・アンカー筋の芯出しを余盛りコンクリート撤去後直に行なうため、その精度が出しやすく確実である。</p> <p>・鉄筋、アンカー筋がないため、余盛りコンクリートの撤去作業が簡単である。</p> <p>・施工が簡潔である。</p>  | <p>・アンカー筋のセットが気中コンクリート中になるため、その設置精度が高まる。</p> <p>・高荷重にも対応できる。</p>  |
| 短所    | <p>・杭頭位置が杭施工盤より深い場合には、アンカー筋が杭芯からずれることが懸念される。</p> <p>・デバイス取付け作業が、アンカー筋製作取付け時とデバイス据付け時の2ステップになる。</p>  | <p>・ケミカルアンカーを用いるため高価となる。</p> <p>・アンカーの定着長が短いため、引抜き力に対する抜け出しが懸念される。</p> <p>・アンカー筋回りのフープ筋がないため、アンカー筋のせん断抵抗が劣る。</p>  | <p>・杭コンクリートを水中と気中の2度打ちするため施工が煩雑となる。</p> <p>・気中コンクリート打設時に杭回り掘削・コンクリート打ち継ぎ処理・鉄筋工・型枠工・埋め戻し工など多量の作業が必要になる。</p>  |

カー筋をいつの時点でセットするかの違いである。

(a) 「アンカー筋直埋方式」

杭の主筋にアンカー筋を予めセットしておき、それを掘削孔に挿入し、コンクリートを打設する。コンクリートが硬化した後で余盛りコンクリートを撤去して、アンカー筋の頭部をはつり出す。それに杭頭デバイスを設置し、ナットで締結する。杭頭が地中の深い位置になる場合は、アンカー筋が杭芯からずれないように施工を管理する必要がある。この方法が三の中で最も安価な施工法である。

(B) 「アンカー筋後施工方式」

杭の余盛りコンクリートを除去した後に、後施工でアンカー筋を所定の位置にセットする方法である。杭頭にアンカー筋を直接セットすることができるため、芯出し作業が確実かつ容易にでき、十分な杭頭デバイスの設置精度が確保できる。しかし、アンカー筋の定着長が短く、帯鉄筋による拘束効果が得られないため、作用荷重が大きな場合は杭への荷重伝達について十分な検討が要求される。この場合の施工費は、「アンカー筋埋設方式」よりは高くなる。

### (C) 「杭頭コンクリート二度打ち方式」

杭頭から 70～80 cm下がった位置でコンクリートの打設を止める。余盛りコンクリートを撤去し、その位置にアンカーフレームを置き、気中で所定の高さまでコンクリートを再打設する。次に、アンカー筋をセットし、続いて杭頭デバイスを設置する。

この施工法は、「アンカー筋後施工方式」と同様、杭頭デバイスの施工精度が確実に得られる方式である。また、気中で打設されたコンクリート上に杭頭デバイスがセットされることになり、高いコンクリート強度が得られ、大きな長期軸力にも対応できる。反面、気中コンクリートを打設するために、杭周りの掘削、配筋、型枠の設置、コンクリートの打設といった施工手間が増え、その分の施工費の増加を見込む必要がある。

## 8. 杭頭デバイスの据え付け精度

杭頭デバイスを用いる本工法の重要な検討事項として、杭頭デバイスの据え付け精度の問題が挙げられる。言い換えれば、杭頭デバイスの水平方向のずれ、ならびに傾斜がどの程度まで許容できるかといった点である。

場所打ちコンクリートの場合、余盛りコンクリートをはつる段階、あるいは無収縮コンクリートを敷設する段階で杭頭面のレベル調整が可能であり、杭頭デバイスは十分な精度で据え付けできる。しかし、「アンカー筋埋設方式」の場合、コンクリートを打設している時点で、アンカー筋の位置がずれる可能性が指摘されるが、アンカー筋は杭の主筋に固定して取り付けられてあり、杭の施工規準である「杭芯の水平方向のずれは10cm以内に留める」が守られていればそれ自体が問題になることはない。

## 9. 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) 特殊な施工技術や施工管理を必要としない、(5) 杭頭デバイスが安価である、(6) 杭頭デバイスの機構がシンプルで分かりやすい、などである。

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：道路橋樑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) 田蔵隆、大槻明、青木孝、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、第26回地震工学研究発表会、土木学会、pp.881-884, 2001. 8.
- 5) 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.

## A NEW PILE-HEAD DEVICE FOR DECREASING CONSTRUCTION COSTS AND INCREASING THE SEISMIC PERFORMANCE OF PILE FOUNDATIONS

T. Tazoh, A. Ohtsuki, T. Aoki, H. Mano, K. Isoda, T. Iwamoto, N. Arakawa, T. Ishihara, and M. Ookawa

No bending moment produced at the pile-heads reduces the cross-sectional dimensions of piles and continuous capping beams because the cross-sectional dimensions are commonly determined by the maximum bending moments at the pile-heads due to the inertial forces acting on the pile-cap. No bending moment at the pile-heads can also be accomplished in a way that causes no damage to the pile-heads, as observed among the damaged buildings in Kobe during the 1995 Great Hanshin Earthquake. It can be accordingly asserted that the pile-head device can increase the seismic performance of pile foundations. This paper represents a new-head device and its effectiveness through some numerical and experimental studies.