

球面接触による杭頭ピン接合工法の研究開発とその適用

青木 孝 田蔵 隆 大槻 明 真野 英之 磯田 和彦
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (設計プロポーザル統括)

Development of a newly pile-head pin device with spherical connection and its application

by Takashi Aoki, Takashi Tazoh, Akira Ohtsuki, Hideyuki Mano and Kazuhiko Isoda

Abstract

Increasing seismic performance and decreasing construction costs are inquired as essential issues for designing any kind of structures. In order to resolve these problems, a new pile-head device has been developed for pile foundation-structures. The full-scale bending and shear tests of the device are conducted to assess the seismic performance. Its effectiveness is demonstrated through earthquake response analyses of a mid-rise factory. The developed devices are applied to pile-heads of the factory completed in Niigata in 2001, Japan, and have received the ministerial approve as satisfying the building code.

概 要

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。杭基礎構造物に対して、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やせん断試験などを行い、中層建物を対象に数値シミュレーションを実施し、その有効性を確認した。これらの結果を踏まえ、この工法を工場建物の基礎杭に実用化し、また、建築センターの一般工法評定を取得している。

§ 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では杭の被害が発生し、その約7割が杭頭部の被害であったと報告されている¹⁾。

この対応策として、杭頭を剛接合として強度を上げ地震力に対抗する方法と、杭頭をピン接合として杭頭部に生じる応力を緩和する方法の2つが考えられる。杭頭部の強度を上げる方法は、杭や基礎接合部の断面寸法や鉄筋量を増大させることになるが、強度と同時に剛性も大きくなって、杭頭に生じる応力も増大する。このため、杭ばかりでなく基礎梁などの断面を大きくする必要が生じ、それに伴って部材コストも増大することになる。

一方、杭頭をピン接合とした場合、杭に発生する曲げモーメントが小さくなるため、杭や基礎梁の断面性能が減少でき経済的な設計ができる。しかし、剛接合の場合に比べて杭頭変位が大きくなること、ピン接合となる信頼性の高い接合方法がこれまで無かったことなどの理由から、杭頭ピン接合工法の採用はごく一部の場合を除いて見送られることが多かった。

最近、杭基礎にも性能設計の考え方が取り入れられるようになり、杭頭をピン接合にすることによって、杭頭部の応力集中が軽減されるだけでなく、接合部の設計が合理的かつ経済的となることが明らかになってきた。このため、杭頭ピン接合工法の開発に対する動機付けが得られ、この分野の研究開発が盛んになっている^{2)~3)}。

このたび、(株)クボタと共同で杭頭の曲げモーメントを大幅に低減できる球面接触型の杭頭デバイスを開発し、実際の建物に適用した。以下に、杭頭デバイスの概要を示すとともに、その性能を実大載荷試験により確認した結果について報告する。また、実際の建物に適用した事例について、地震応答解析による検証結果および用いた施工法について述べる。

§ 2. 杭頭ピン接合工法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



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

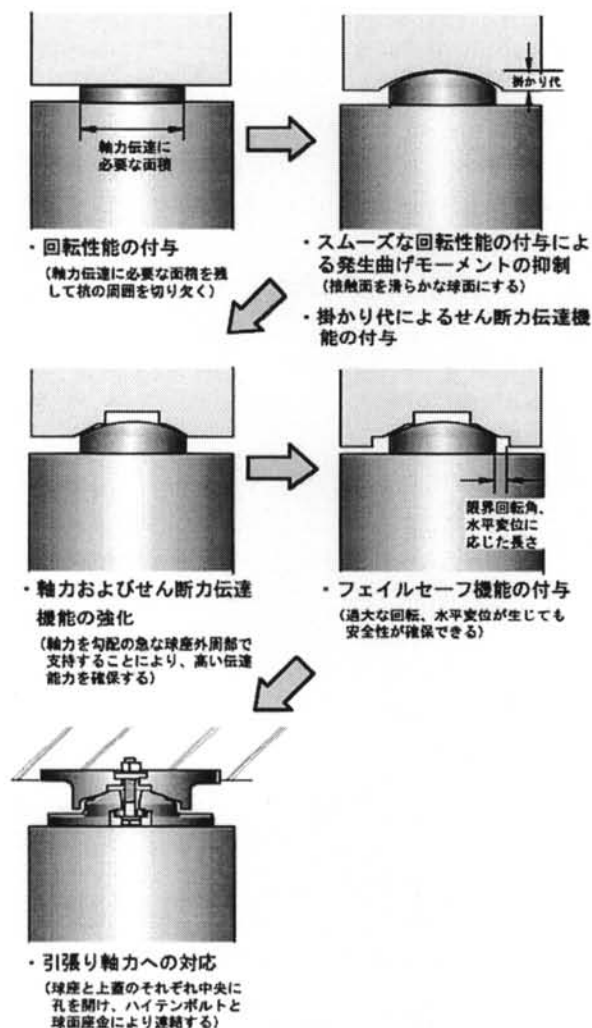


図-2 杭頭デバイスの形状決定のプロセス

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分が突起状のみ込まれているようになってい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。

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、使用するハイテンボルトの引張り強度に依存する。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。

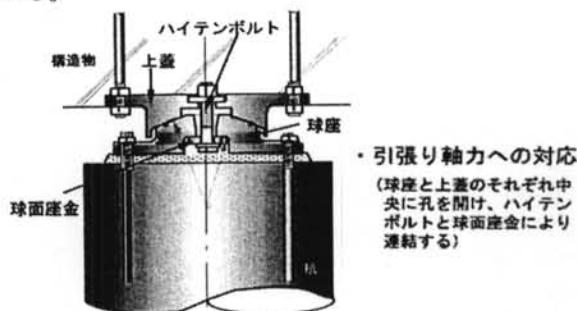


図-3 杭頭デバイスの最終形状

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、鋳型に入れてこれらの形状を製造する⁴⁾。

§ 3. 杭頭デバイスの曲げ特性とせん断特性

ここでは、杭頭デバイスの曲げおよびせん断特性について、実大デバイスを用いた試験結果と理論的考察について述べる。

3.1 杭頭デバイスの曲げ特性

3.1.1 曲げ試験

1) 試験装置

杭頭デバイスの曲げモーメント-回転角の関係を求めるため、図-4に示す試験装置を用いて曲げ試験を行った⁵⁾。試験方法は以下のとおりである。

- ①試験装置に試験体をセットし、変位計を取り付ける。
- ②軸力載荷用ジャッキ (5MN×4個) を用いて、試験体に所定の軸力を作用させる。
- ③水平力載荷用ジャッキを用いて水平力を作用させる。
- ④载荷は、試験体周囲に取り付けた変位計の読み値より、回転角を算出し、変位制御で実施した。

2) 試験結果

杭頭デバイスの上蓋下面と球座上面は、鋳型から出

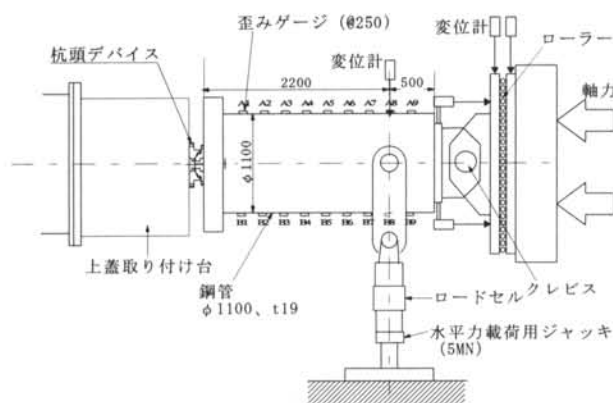


図-4 曲げ試験装置

したままで特別な表面処理や加工は施されない (すなわち、“鋳放し”状態である)。そのため両者間で摩擦力による若干の曲げモーメントが発生する。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曲げ試験の結果である。

図-5より、以下のことがわかる。

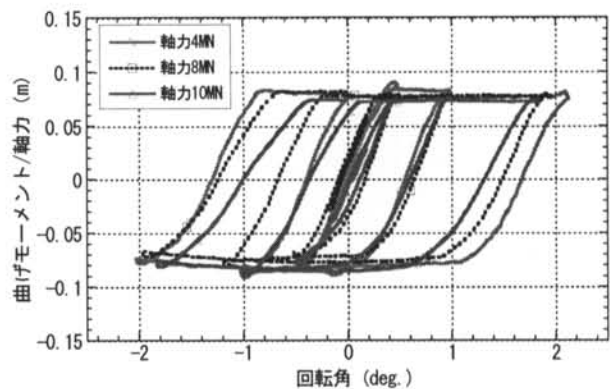


図-5 8MN用杭頭デバイスの曲げ試験結果

・杭頭デバイスの曲げモーメント-回転角関係は、ある曲げモーメントまでは、回転角に比例してモーメントが増加する。

- ・ある曲げモーメントに達した後は、その曲げモーメントを保ったまま、球座と上蓋間に回転を生じる。
- ・曲げモーメントを軸力で除して表したループの形状は、軸力によらずほぼ同じとなり、杭頭デバイスの最大曲げモーメントMは、軸力Nに比例し、 $M/N=0.08$ (m)なる関係式が成立する。

3.1.2 曲げ試験に対する理論的考察

図-6に示すように接触面に沿って上蓋と球座が滑りを生じる場合、接触面に働く摩擦力Fは軸力Nの球面法線方向成分に摩擦係数 μ を乗じたものとなり、これは概略 $F=\mu N$ で表される。よって、杭頭で生じる最大の曲げモーメント M_{max} は、次式のように表せる。

$$M_{max} = F \cdot r = \mu N r \quad (1)$$

ここに、rは球座の曲率半径で、8MN用杭頭デバイスの場合は0.4mである。また、鋳鉄の摩擦係数 μ はお

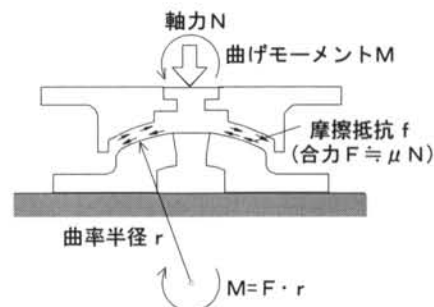


図-6 球座に作用する摩擦力と曲げモーメントの関係

よそ0.2である。

これより式(1)は、 $M_{max} = \mu N r = 0.08 \cdot N$
すなわち、 $M_{max}/N = 0.08m$ となって、上記試験結果に一致する。

3.2 杭頭デバイスのせん断特性

3.2.1 せん断試験

1) 試験装置

許容せん断力を求めるため、図-7に示す試験装置を用いてせん断試験を行った⁶⁾。

試験方法は以下のとおりである。

- ①試験装置に上蓋同士が背中合わせになるよう、試験体を2個1組にしてセットし、変位計を取り付ける。
- ②軸力載荷用ジャッキ(5MN×4個)を用いて、試験体に所定の軸力を作用させる。
- ③水平力載荷用ジャッキを用いて上蓋にせん断力を作用させ、上蓋と球座間の相対変位を測定する。

2) 試験結果

図-8は、8MN用の杭頭デバイスに対して行った

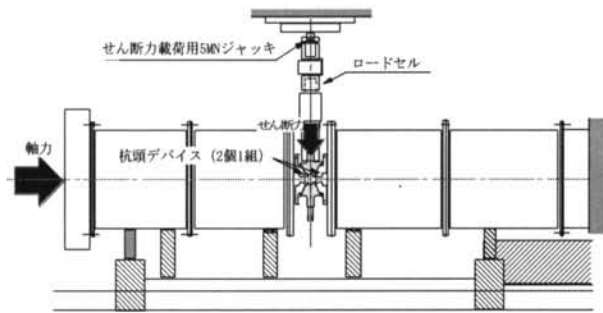


図-7 せん断試験装置

せん断試験の結果である。相対水平変位とは、球座上蓋間のせん断力加力方向の相対変位であり、離間する方向を正としている。図では、加えたせん断力を1/2倍してデバイス1個あたりのせん断力とし、これを軸力で除して無次元化してある。ただし、この試験では

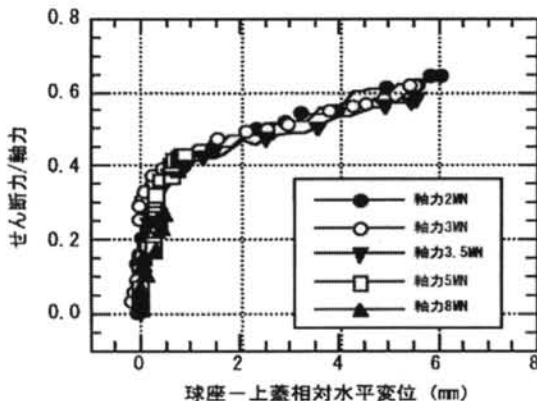


図-8 8MN用杭頭デバイスのせん断試験結果

ハイテンボルトは組み込まれていない。

試験上の制約から、せん断力Qと軸力Nの比(Q/N)は最大値として0.6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、Q/N=0.4である。設計では十分な安全性を考慮して、最大せん断力Qは軸力Nの0.4倍以下を目安に行うことを推奨している。

3.2.2 せん断試験に対する理論的考察

図-9に示すような力の釣り合いを考える。

上蓋と球座が接する点の勾配を θ とすると、軸力Nとせん断力Qの接線方向成分である $N \sin \theta$ と $Q \cos \theta$ において、 $N \sin \theta$ が $Q \cos \theta$ より大きければ上蓋が球座の上に乗りに上げるような状態にはならない。つまり、

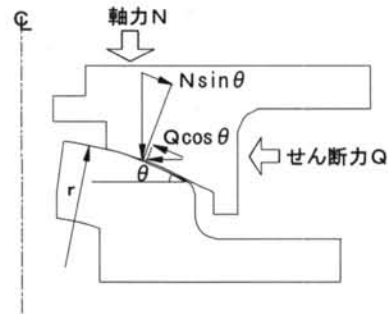


図-9 せん断力が作用したときの力の釣り合い (杭頭デバイスの右側半分のみを図示)

$$Q/N \leq \tan \theta \quad (2)$$

である。8MN用杭頭デバイスの $\tan \theta$ の平均値は0.4であり、この値は上記の試験結果に一致する。

§4. デバイスの杭頭固定度

杭頭に静的な水平荷重Qを載荷して行う基礎杭の耐震設計法では、杭頭を剛接合とした場合に杭頭に発生する曲げモーメント M_0 は、 $M_0 = Q/2\beta$ で計算される。ここに、 β は杭の特性値で、 $\beta = \sqrt{k_H D/4EI}$ 、 k_H : 杭の水平方向地盤反力係数、 D : 杭径、 EI : 杭の曲げ剛性である。

また、杭頭デバイスによる杭頭曲げモーメント M_s は、§3の式(1)より、 $\mu r = \alpha$ と置くことにより、 $M_s = \alpha N$ で表せ、前述のように8MN用杭頭デバイスでは $\alpha = 0.08m$ である。

したがって、剛接合の場合の杭頭固定度を1としたとき、本杭頭デバイスの固定度 γ_a は、

$$\gamma_a = \frac{M_s}{M_o} = \frac{\alpha N}{Q/2\beta} = \frac{2\alpha\beta}{Q/N} \quad (3)$$

で表される。

これを杭周辺地盤の強度（地盤のN値）ごとにグラフ化すると、図-10が得られる。

この図から、杭頭デバイスを用いた場合、周辺地盤

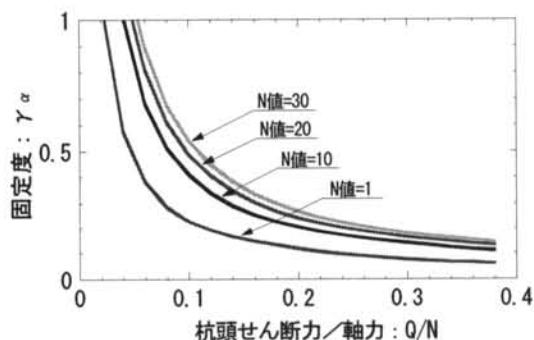


図-10 デバイスの杭頭固定度

が悪く軟弱なほど、固定度は小さくなりピンに近づくことがわかる。また、横軸 Q/N は、見かけの設計震度を表しており、この設計震度が大きくなるほど固定度が小さくなって、 Q/N すなわち設計震度0.2以上では固定度は0.3以下となる⁷⁾。

§ 5. 接合部の耐力確認試験

杭頭デバイスを基礎躯体コンクリートとコンクリート杭との間に設置した状態で、軸力載荷試験を行い、接合部の極限耐力およびその破壊性状について確認を行った。

試験装置を図-11に示す。杭頭デバイスは4MN用を使用し、コンクリート杭にクラックが発生し、荷重があがらなくなるまで、軸力を単調載荷で加えた。

試験の結果、以下のことがわかった。

(1)接合部のコンクリート強度から決まる杭頭デバイスの長期許容軸力2.5MN（実験条件を考慮して、気中コンクリートの許容応力度 $F_c/3$ より算出）に対し、杭表面にクラックが確認されたのは軸力8.43MNと長期許容軸力の3.4倍の耐力であり、長期の安全率3は確保されている。引き続き、最大9.05MNまでの軸力載荷を行えたが、杭頭デバイス本体には損傷は認められなかった。

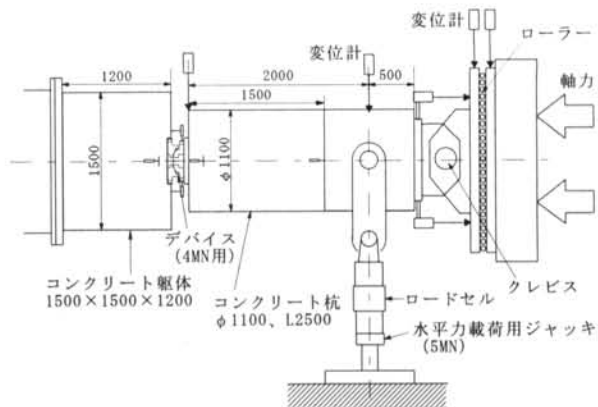


図-11 接合部耐力確認の試験装置

(2) 杭体のクラックは球座の周辺から放射線状に、また、杭体の軸方向に生じた。最大のクラック幅は2.5mm程度であった。

(3) 上蓋側の躯体コンクリートには、クラックは生じなかった。

また、図-11に示す試験装置を使って行った曲げ試験結果から、杭頭デバイスの球座を固定するアンカー筋の歪み分布を図-12に示す（ここで、歪み値の-は圧縮を表す）。

図-12において、アンカー筋には引張り歪みは生じ

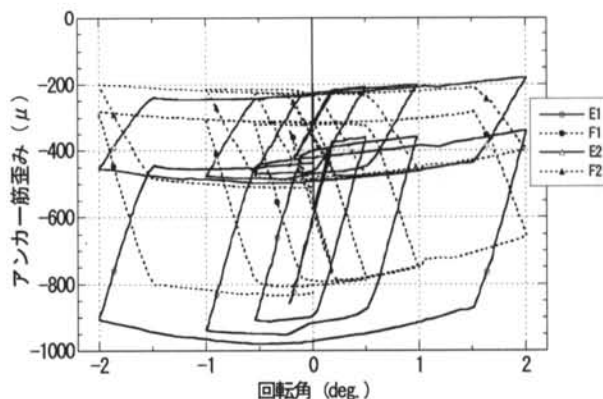


図-12 アンカー筋歪み-回転角の関係

ていない。このことから、球座下のコンクリートは全断面圧縮状態にあり、アンカー筋には引張り力が発生しないことが確認された。

§ 6. 適用建物に対する地震応答解析による検証

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-13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

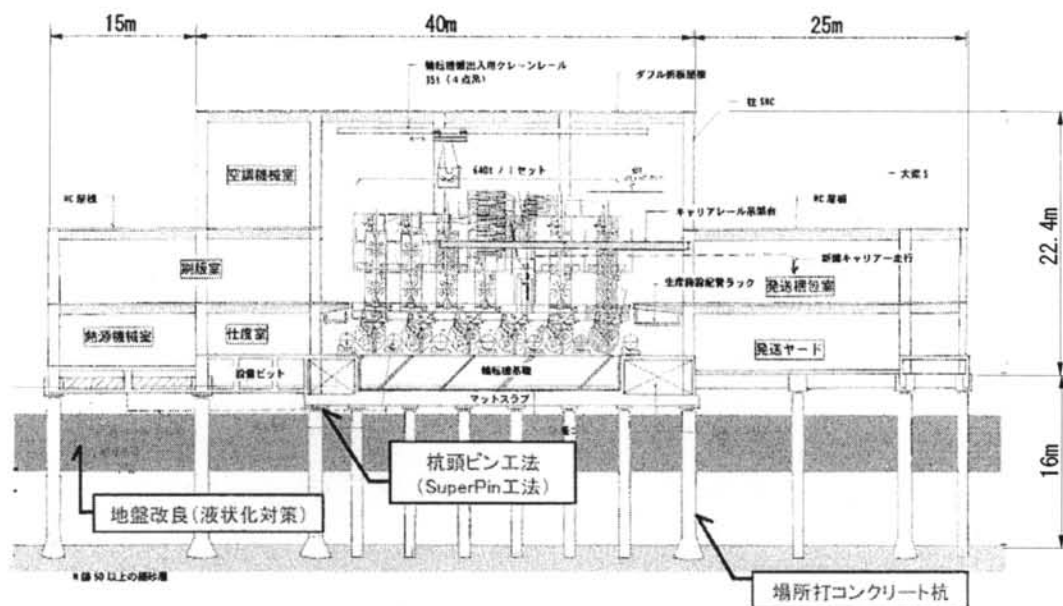


図-13 杭頭デバイスが採用された SC 造の工場建物

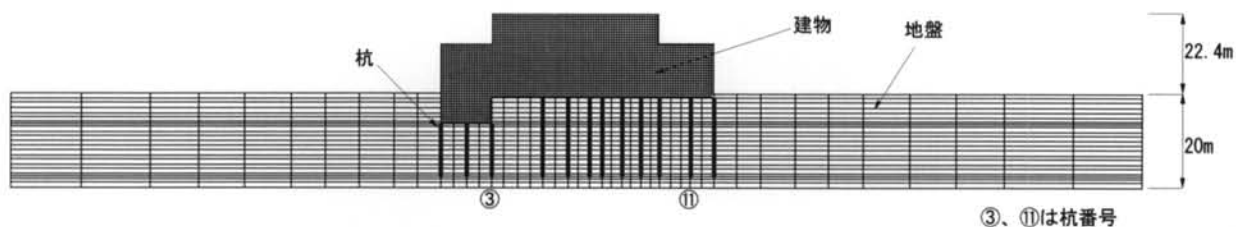


図-14 2次元FEM非線形地震応答解析モデル

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 8 MN と 4 MN 用の杭頭デバイスが、それぞれ 52 個、110 個設置された。

図-14 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 年兵庫県南部地震のポートアイランド波 NS 成分、地表面加速度で 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-16、図-17 に示す。

解析は有効応力解析によって行い、杭頭デバイスは図-5 および図-8 の実験結果を反映させた非線形ばねでモデル化（図-15 参照）した。

図-16 および図-17 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。

また、図-18 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。

これら杭頭デバイスを用いることによる上記の特性は、他のケースの地震応答解析結果でも同様な傾向がみられる。

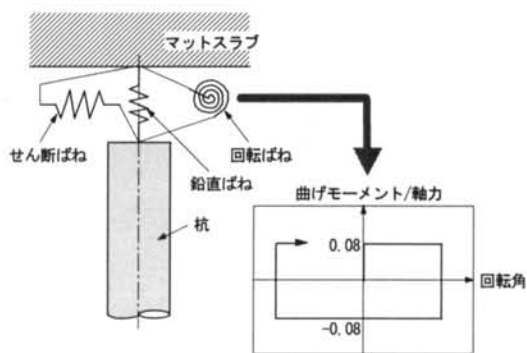


図-15 杭頭デバイスのモデル化

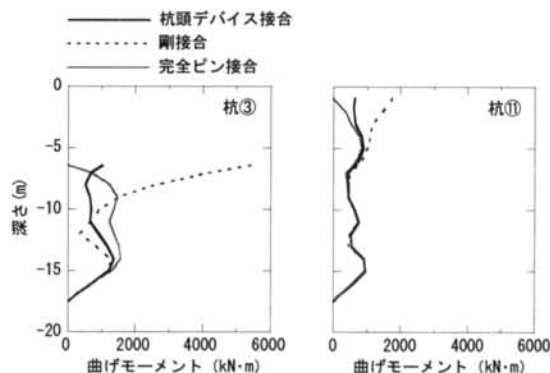


図-16 杭の最大曲げモーメント分布図

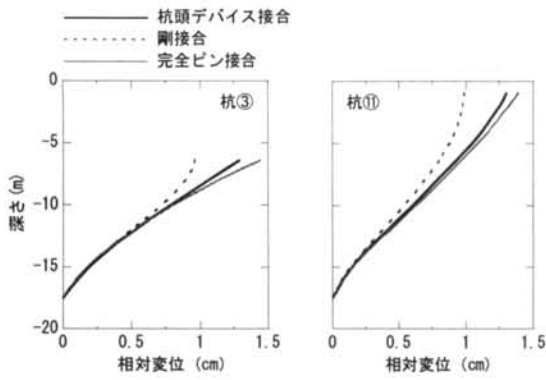


図-17 杭の最大変位分布図

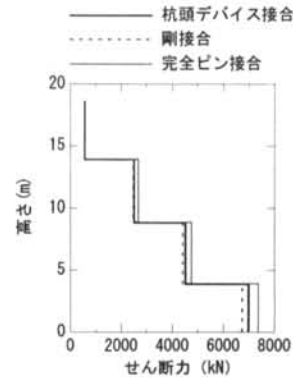


図-18 建物の最大層せん断力分布図

§ 7. 杭頭デバイスの施工法と据え付け精度

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用の低減化も必要である。そのためには、特殊な施工機械を用いることなく、また特別な施工技術が必要とされないようにしなければならない。

今回開発した杭頭デバイスは、場所打ちコンクリート杭のほか、鋼管杭、PHC杭、SC杭といった既製杭にも設置可能である。これらのうち例えば、場所打ちコンクリート杭に対する施工法としては、表-1に示すように、三つの方法を考案した⁸⁾。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杭アンカー筋をどの時点でセットするかで異なり、設置を行う現場の状況や杭頭デバイスに載荷される設計荷重の状態などによって適宜選定されることになる。

図-13に示す適用建物では、表-1の(B)の施工法を主体として、施工が実施された。

杭頭デバイスを用いる場合の施工上のもう一つの検討事項として、杭頭デバイスの据え付け精度の問題が挙げられる。つまり、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杭の場合、余盛りコンクリートをはつり取る段階、あるいは杭頭デバイス下面と杭天端との間に充填する無収縮モルタルを敷設する段階で、杭頭デバイスのレベルや傾斜調整が可能である。また、水平方向のずれについては、デバイス中心を杭芯に合わせて施工するとした時、杭体施工時の一般的な施工管理規準である「杭芯の水平方向のずれは10cm以内に収める」が守られていれば問題にはならない。適用建物の施工では、十分な据え付け精度で杭頭デバイスを設置することができた。

§ 8. 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すべての種類の杭に適用が可能である、③特殊な施工技術や施工管理を必要としない、④杭頭デバイスが安

	(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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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を撤去後、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。

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

価である、⑤杭頭デバイスの機構がシンプルで分かりやすい、⑥引き抜き力にも対応できる（8MN用の杭頭デバイスの最大引き抜き耐力は1.2MN）、などである。

そのほか、杭頭デバイスの長期耐久性を確認するためのJIS-Z2371に準拠した塩水噴霧による腐食促進試験、また地震時挙動特性の把握するための遠心模型振

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、この新杭頭接合法の有効性を確認している。

また、より大きな引き抜き力ならびにせん断力に対応可能な改良デバイスについて現在、計画し検討しているところである。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会他：“兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書”，1996.7.
- 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) 大槻明，田蔵隆，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：“球面接触部を有する杭頭接合法の開発（その1：工法の概要と曲げ試験）”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.451-452，2001.9.
- 6) 真野英之，田蔵隆，大槻明，青木孝，磯田和彦，岩本利行，荒川範行，石原孝浩，大川雅之：“球面接触部を有する杭頭接合法の開発（その2：せん断試験）”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.453-454，2001.9.
- 7) 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：“新杭頭接合デバイスの曲げ特性に関する解析的検討”，土木学会第57回年次学術講演会，pp.419-420，2002.9.
- 8) 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.