

# 「杭頭半剛接合構法」 の調査報告

財建築コスト管理システム研究所  
新技術調査検討会

## 1 はじめに

従来、杭とパイルキャップ（あるいは基礎スラブ）の接合部は剛接合を志向したものが主流であり、杭基礎の耐震設計においても杭頭の境界条件を完全固定とするのが一般的であった。しかし、1995年の兵庫県南部地震において、杭頭を剛接合した杭に多数の被害が発生した。この結果は、杭頭部に応力が集中する杭頭剛接合工法（従来工法）の問題点を基礎構造に携わる技術者に再認識させ、これを契機に、杭頭半剛接合やピン接合などの杭頭モーメントを低減する新しい杭頭接合法の研究開発が精力的に行われるようになった。このような新しい杭頭接合法に対する社会的な受け入れ状況に関しては、2001年に改訂された日本建築学会の建築基礎構造設計指針にみるように、杭頭の回転剛性を考慮した杭の耐震設計（杭頭半剛接合構法を用いた設計）が認知され、財日本建築センター・基礎評定委員会においては杭頭の回転剛性を考慮した杭頭接合工法が一般評定の対象とされた。現在では、多くの杭頭半剛接合構法が実用化され、適用事例も増加している。

杭頭半剛接合構法は、地震時の杭頭モーメントを低減し、耐震性能を向上させるだけでなく、杭頭モーメントの低減を適切に設計に反映させることで、杭や基礎梁の合理化及び、これに伴う掘削土量の削減など大きなコストメリットを与える可能性が高い。ここでは、杭頭半剛接合構法の概要を紹介する。

## 2 杭頭半剛接合構法の考え方

杭頭半剛接合構法は、杭頭とパイルキャップを回転に対して半剛接合状態に接合する構法であり、剛接合とピン接合の中間に位置する。一概に、杭頭半剛接合構法といっても剛接合に近いものからピン接合に近いものまで含まれる。また、同一の構法であっても、その接合状態は軸力や水平力の大きさや地盤の硬軟によっても変化する。一般に、杭頭の回転に対する拘束度を $\alpha$ （杭頭固定度と呼ぶ）で表し、完全な剛接合状態が $\alpha=1.0$ 、ピン接合が $\alpha=0.0$ 、杭頭半剛接合が $0.0 < \alpha < 1.0$ となる。図1-1に杭頭固定度 $\alpha$ と杭の曲げモーメント分布の関係を示す。杭頭モーメント（ $M_0$ ）及び地中部最大モーメント（Max）の杭頭固定度 $\alpha$ に対する変化を図1-2に示す。剛接合（ $\alpha=1.0$ ）では、杭頭部で最大曲げモーメントが発生し、ピン接合（ $\alpha=0.0$ ）では杭頭部に曲

げモーメントが発生しない代わりに地中部で大きな曲げモーメントが生じる。(1)~(3)式に、杭頭固定度  $\alpha$  を用いた杭の応力と変形に関する算定式 (Chang の解) を示す。(1)式から固定度  $\alpha$  の大きさに比例して杭頭モーメントが変化することが分かる。一方、(2)式と(3)式から固定度  $\alpha$  が小さいほど、杭頭変位と地中部最大モーメントが大きくなることが分かる。

杭頭半剛接合構法は、この固定度  $\alpha$  の大きさを制御し、杭頭と地中部の曲げモーメントをバランス良く分布させることで杭基礎の耐震性能を向上させる構法である。また、杭の曲げモーメント分布をバランス良くすることで、場所打ち杭では杭の軸径の縮小、既製杭では杭の仕様の合理化が可能となる。さらに、杭頭モーメントが低減されるため、基礎梁の断面力も軽減され、梁せいの縮小とそれに伴う掘削深さの削減も期待できる。

ただし、前述したように杭頭固定度は、各構法で異なるだけでなく、軸力変動などの外力条件や地盤条件によって変動する。このため、従来の剛接合構法に比較して、精密な設計が必要となる。

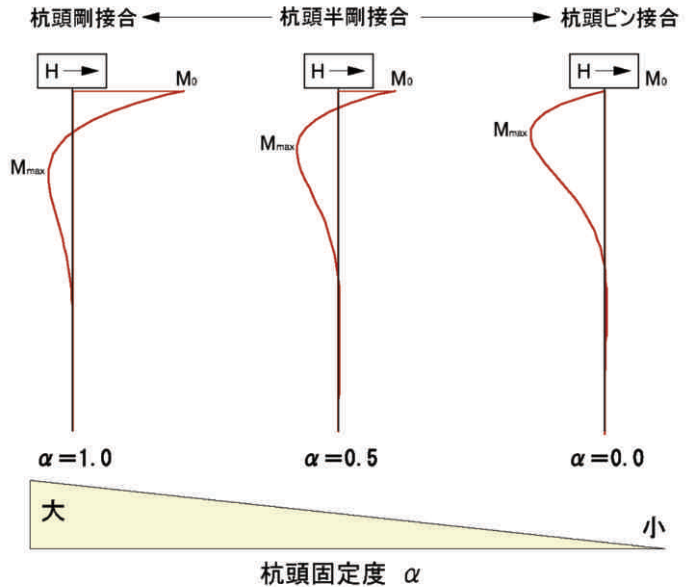


図1-1 杭頭固定度と曲げモーメント分布の関係

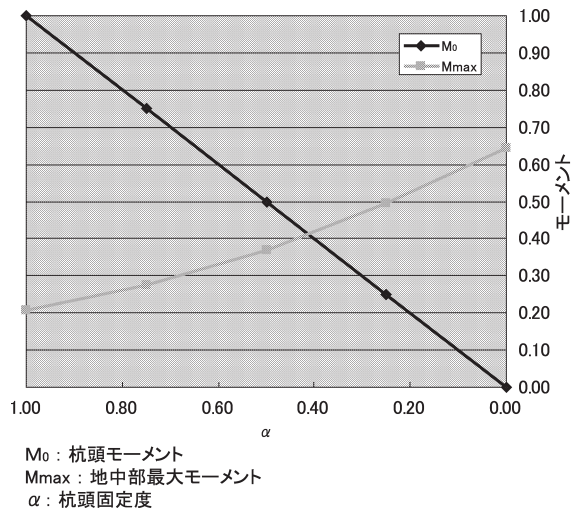


図1-2 杭頭固定度と杭頭モーメント及び地中部最大モーメントとの関係

杭頭モーメント (kN・m)

$$M = \frac{H}{2\beta} \alpha \dots\dots\dots(1)$$

杭頭変位 (m)

$$y_0 = \frac{H}{4EI\beta^3} (2 - \alpha) \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{地中部最大モーメント (kN}\cdot\text{m)} \quad M_{\max} = -\frac{H}{2\beta}\sqrt{(1-\alpha)^2+1} \cdot \exp(-\tan^{-1}\frac{1}{1-\alpha}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 H : 杭頭水平力 (kN)  
 EI : 杭の曲げ剛性 (kN・m<sup>2</sup>)  
 α : 杭頭固定度 (杭頭回転拘束度)  
 β : 地盤と杭の特性値 (m<sup>-1</sup>)

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}}$$

k<sub>h</sub> : 水平地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)

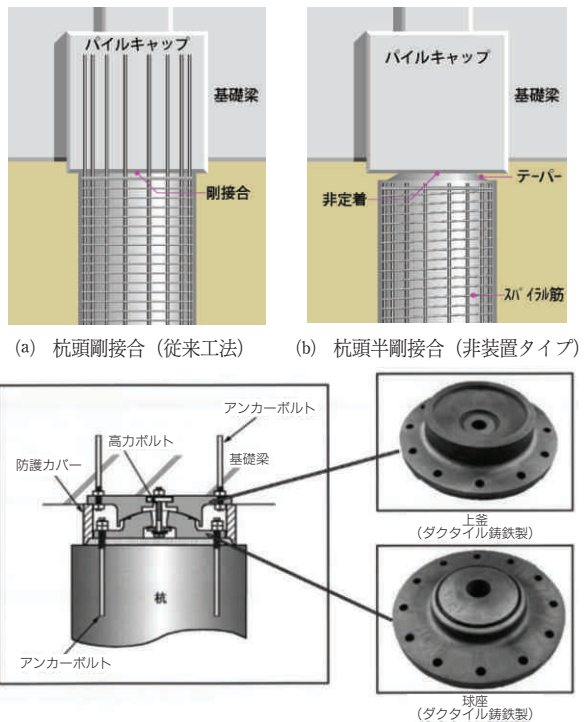
B : 杭径 (m)

上式中の α 以外の定数については、一般の杭の耐震設計と同様に、杭と地盤の特性、および設計外力に応じた値から算定できる。

### 3 杭頭半剛接合構法の特徴

#### 3.1 杭頭接合法の種類

図2に杭頭接合法の種類を典型例を用いて示す。杭頭接合法には、(a)杭の主筋をパイルキャップに定着させるなどして杭頭と基礎を剛接合とするタイプ（従来工法）、(b)特殊な装置を用いずに在来工法の延長で杭頭半剛接合を実現するタイプ（非装置タイプ）、および(c)杭頭部にピンやローラー機構を備えた装置を設置するタイプ（装置タイプ）に大別できる。装置タイプは地震時の軸力変動が生じて比較的安全したピンやローラーの性能を保持することができるが、精密な施工と装置のコストが必要となる。非装置タイプは基本的に杭の主筋をパイルキャップに定着させず、杭頭へパイルキャップを載置するだけの構造である。このため比較的に低コストで簡便に施工できるが、軸力変動の影響を受け易いなど設計段階における十分な検討が必要となる。現状ではコストパフォーマンスに優れた非



(c) 例えば、杭頭ピン接合（装置タイプ）

図2 杭頭接合法の種類（典型例）

装置タイプは地震時の軸力変動が生じて比較的安全したピンやローラーの性能を保持することができるが、精密な施工と装置のコストが必要となる。非装置タイプは基本的に杭の主筋をパイルキャップに定着させず、杭頭へパイルキャップを載置するだけの構造である。このため比較的に低コストで簡便に施工できるが、軸力変動の影響を受け易いなど設計段階における十分な検討が必要となる。現状ではコストパフォーマンスに優れた非

装置タイプの杭頭半剛接合構法の普及が進んでいる。本報では、この非装置タイプの杭頭半剛接合構法についての調査結果を示す。

### 3. 2 各種杭頭半剛接合構法

表1に今回調査を行った杭頭半剛接合構法の概要を示す。各種杭頭半剛接合の共通点として、杭主筋もしくは定着筋を基礎に定着させないことを基本構造とし、場所打ち杭では杭頭とパイルキャップの接触面を杭軸部よりも縮小することで回転性能を向上させている。適用物件は2007年6月時点での調査結果であるが、低層から超高層まで様々な用途の建物が含まれる。

## 4 杭頭半剛接合構法の設計事例

### 4. 1 建物概要

表2に建物概要を示す。この建物は地上12階、地下1階の鉄筋コンクリート造で、場所打ちコンクリート拡底杭を採用し、杭頭とパイルキャップとの接合部に杭頭半剛接合構法（F.T.Pile 構法）を採用した。図3に杭伏せ図を示す。軸力変動の小さい中杭にフラットタイプ（杭頭の断面縮小を行わないタイプ）を、軸力変動が大きい側杭に杭頭テーパタイプ（芯鉄筋あり）を採用した。図4に地盤状況を示す。基礎底はGL-5.3mであり、基礎底以深約20mの地盤は、N値の小さい沖積層が続く軟弱地盤である。杭支持層は、GL-35mのN値50以上の砂礫層とした。

表2 建物概要

用途	共同住宅
建設地	東京都中央区
主要構造	鉄筋コンクリート造
階数	地下1階、地上12階
最高高さ	36.77m
延床面積	6462㎡
基礎形式	場所打ちコンクリート拡底杭（アースドリル工法） フラットタイプ（中杭）：φ1600(2500) テーパタイプ（側杭）：φ1300(1800)～φ1400(2000) ( )内数値は拡底径を示す
基礎底	GL-5.3m
杭先端	GL-35.0m

### 4. 2 構造設計

杭の地震時の応力は、上部建物の地震応答による慣性力と地震時の地盤変形を考慮した静的非線形解析により算定した。図5に解析モデルを示す。基礎は剛と仮定し、杭体は曲げ変形およびせん断変形を考慮した線材に置換し、杭と基礎の接合部に杭頭回転ばねを設けている。杭頭回転ばねは、杭頭モーメントー回転角関係をトリリニアでモデル化した。地盤と杭は、建築基礎構造設計指針の方法により求まる地盤水平

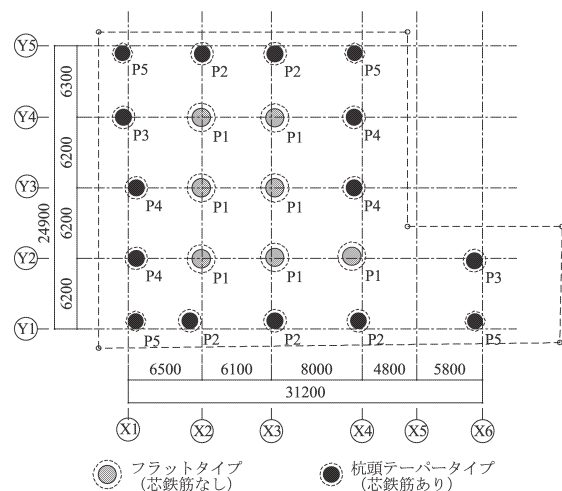
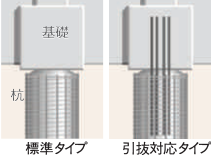

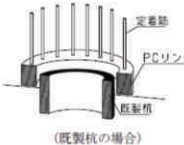
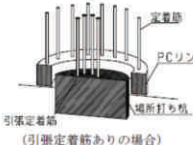
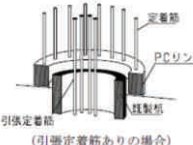
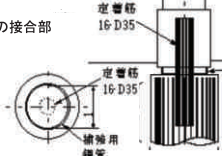
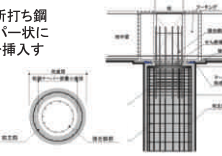
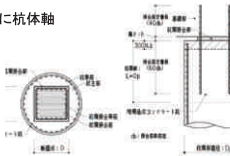


図3 杭伏せ図

表 1 各種杭頭半剛接合構法

構法名	評定取得会社 取得日 審査機関	構法概要	杭径 (mm)	適用杭種		引抜き 力対応	適用 実績
				場所打ち杭	既製杭		
F.T.Pile構法 (場所打ち杭)	大成建設 H15年2月 日本建築センター	場所打ち杭の杭頭半剛接合構法であり、主筋をバイルキャップに定着させない。杭頭をテーパ状に縮小させ、基礎との接触面積を調整することにより固定度を制御可能。引抜き力が作用する場合は、杭中心部に芯鉄筋を配置する。基礎側にテーパを設けることも可能。 	φ 800~ 3000	○	-	○	100件
F.T.Pile構法 (既製杭)	大成建設 H15年12月 日本建築センター	既製杭の杭頭半剛接合構法であり、定着筋を用いない。杭頭部にFTキャップ(テーパ状の型枠)を設置し、根入れ部にテーパ状クリアランスを構築することで、せん断力を伝達しつつ杭頭の回転を許容する。引抜き力が作用する箇所には、杭頭端部に引抜き抵抗用鋼棒を設置する。 	φ 300~ 1200	-	○	○	140件
キャブリング工法	鹿島建設 H14年12月 日本建築センター	杭主筋をバイルキャップに定着させずに、PCリング(PC工場で製作したコンクリート製のリング)を杭頭部に設置する。PCリングが杭頭のせん断力伝達性能を高める。場所打ち杭と既製杭に対応している。 	φ 300~ 2000	○	○	-	129件
キャブテンバイル工法	鹿島建設、他10社 H17年12月 日本建築センター	場所打ち杭の杭頭半剛接合構法であり、キャブリング工法に回転性能の向上と引抜き抵抗機能を付加した工法。回転性能の向上は杭頭部の面積縮小により対応する。引抜き力には、杭中心部に引張定着筋を配置することで対応する。 	φ 800~ 3000	○	-	○	20件
テンキャップ バイル工法	鹿島建設 H19年1月 日本建築センター	既製杭の杭頭半剛接合構法であり、キャブリング工法に引抜き抵抗機能を付加した工法。引抜き力には、杭中空部に中詰めコンクリートを打設するとともに引張定着筋を配置することで対応する。 	φ 300~ 1200	-	○	○	-
FSR-Pile工法	フジタ H13年10月 日本建築センター	場所打ち杭の杭頭部と基礎部分の接合部の断面を小さくし、比較的少量の鉄筋で接合することで、地震力に対して変形しやすくする。さらに接合部を補強用鋼管で囲うことにより、粘り強い構造とする。 	φ 800~ 3000	○	-	○	10件
SOHP工法	鴻池組 H14年11月 日本建築センター	場所打ちコンクリート杭または場所打ち鋼管コンクリート杭の杭頭部をテーパ状にして断面積を小さくし、接合鉄筋を挿入する杭頭半剛接合工法。杭主筋、鋼管は杭頭部で止め、基礎まで定着させない。 	φ 800~ 3000	○	-	○	3件
シミズ杭頭 半剛接合構法	清水建設 H18年7月 日本建築総合試験場	場所打ち杭の杭頭部と基礎の間に杭体軸部の断面より小さい、矩形断面の杭頭接合部と称する扁平な部位を配置するとともに杭頭接合筋を埋め込み、かつ、杭頭接合筋の周囲に杭頭接合帯筋を配置する。 	φ 700~ 3000	○	-	○	3件



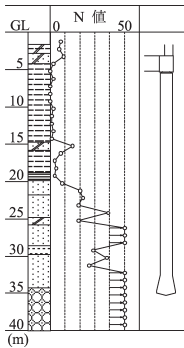


図4 地盤状況

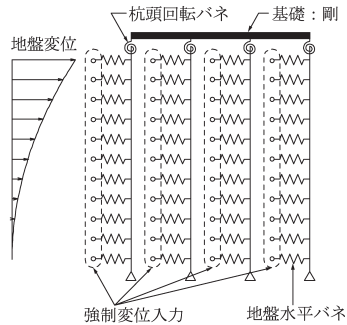


図5 解析モデル

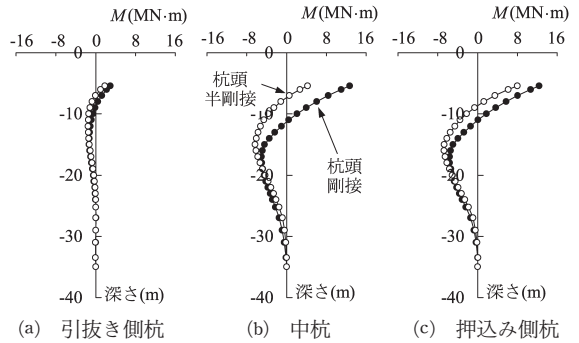


図6 最大曲げモーメント分布

ばねでつなぎ、地盤側の節点に強制変位を与えた。

図6に極めて希に起こる地震に対する解析結果の最大曲げモーメントを、杭頭剛接とした場合と比較して示す。杭頭を剛接した場合に比べ、杭頭に生じる曲げモーメントが35～65%程度に低下しており、本構法の有効性が確認された。

ここでは、特殊な装置を用いない杭頭半剛接合構法の設計事例として、F.T.Pile 構法について例示したが、表1で示した各種構法の基本構造は類似しているため、設計手法に大きな差はないと考えられる。

## 5 杭頭半剛接合構法の施工事例

### 5.1 場所打ち杭 (F.T.Pile 構法)

#### (1) 施工状況

杭頭部を除き、杭体の施工方法は従来の場所打ちコンクリート杭と同様である。写真1に施工状況を示す。芯鉄筋を用いる場合、芯鉄筋は外周主筋の環状保持材に固定した芯鉄筋支持材（プレート等）により位置を確保し、外周主筋と芯鉄筋を一体として建込を行った。なお、芯鉄筋は円形配置とし、その直径はトレミー管が挿入できる最小径とした。



写真1 施工状況

杭頭テーパタイプでは、杭頭部に高強度コンクリート (Fc48) を使用し、精度良く錘台形状のテーパに成型するため、杭頭部のコンクリート打設は杭体の打設後別途途中にて行った。杭頭余盛コンクリートのはつり処理を行った後、杭頭部にテーパ成型用の型枠を設置した。型枠の天端には緩衝材（スタイロフォーム）を錘台形状に成型したものを固定している。

(2) コストメリット

4章で紹介した建物では、杭頭半剛接合構法を採用したことにより、従来に比べて杭径は300mm、基礎梁せいは400mm縮小し、掘削土量の削減とともにコスト低減に大きく寄与している。また、本構法は杭主筋をパイルキャップに定着していないため、パイルキャップおよび基礎梁の配筋作業が従来よりも容易であった。

5. 2 場所打ち杭 (キャプリング工法)

(1) 施工状況

表3にキャプリング工法 (CP工法) を適用した施工事例の工事概要を示す。本工事では杭に引抜き軸力が作用しないことから、すべての杭にCP工法を採用した。PCリング仕様を表4に、杭頭詳細を図7に示す。

写真2(a)~(d)に施工状況を示す。(a)は追加フープを設置している状況である。PCリングが嵌合する範囲の杭頭をはつた後、はつり面から20mm上で切断した杭主筋に追加フープを巻く。(b)はPC工場で製作したPCリングの設置状況である。発泡ポリエチレンシートをあらかじめ付いている粘着テープでPCリングに貼る。(c)はPCリング下端面にあらかじめつけておいたインサートにボルトをねじ込んで、レベル調整している状況を示している。PCリングと杭の隙間にやや固練りのモルタルを詰めた後、(d)に示すように流動性のあるモルタルを杭頭に打設する。

(2) コストメリット

従来工法である杭主筋をパイルキャップ内に定着させる方法との比較を表5に示す。従来工法の場合、杭頭モーメントが高くなるので、杭径が0.1m大きくなっている。在来工法の杭工事費を基準

(100) にすると、CP工法のコスト指数は92であった。なお、CP工法の採用によって基礎梁鉄筋量が減ったので、パイルキャップや基礎梁配筋との干渉問題がなくなったことや杭頭はつり作業が軽減したことなど、施工性に

表3 工事概要

場所	東京都杉並区
用途	共同住宅
構造	RC造地上7階、地下なし
杭	拡底アースドリル杭 (軸径1.6m、杭長12m、46本)

表4 PCリングの仕様

PCリング				鋼板リング	
外径 (mm)	内径 (mm)	厚さ (mm)	高さ (mm)	厚さ (mm)	材質
1958	1700	120	200	9	SM490
スパイラル筋		定着筋			
呼び名	巻き数	配筋	材質	定着長 (mm)	
U9.0	8	32-D19	SD390	550	

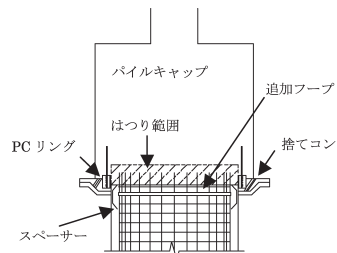


図7 杭頭詳細

表5 在来工法との比較

		在来工法 (杭主筋定着)	キャプリング パイル工法
杭仕様	径 (m)	1.7	1.6
	主筋	30-D35	26-D35
コスト指数 (材工)	杭	89	77
	PCリング	0	12
	杭頭はつり	4	3
	土工事*	7	0
	合計	100	92

については格段に向上した。



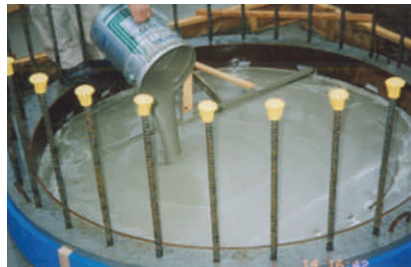
(a) 追加フープ巻き付け



(b) PCリングの設置



(c) PCリングのレベル調整



(d) 杭頭にモルタル打設

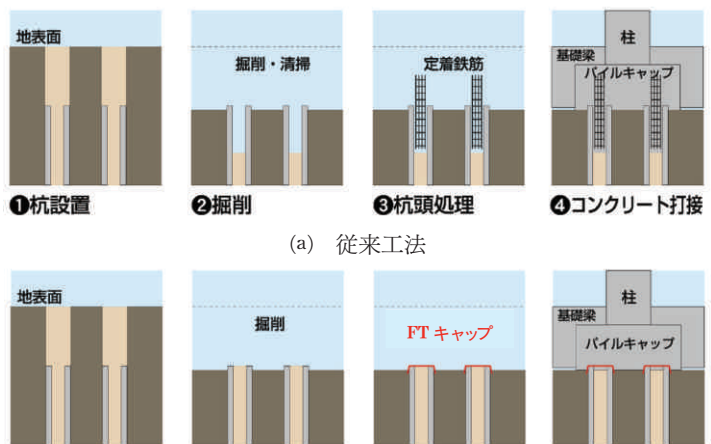
写真2 キャブリング工法の施工状況

### 5.3 既製コンクリート杭 (F.T.Pile 構法)

#### (1) 施工状況

図8に既製コンクリート杭の杭頭接合部の施工手順について、F.T.Pile 構法と在来工法を比較して示す。F.T.Pile 構法は、原則として全ての既製コンクリート杭およびその施工法に対応でき、杭の施工

に関しては在来工法と差異はない。杭の施工が完了した後、杭頭レベルまでの整地を行う。一般的な在来工法では、杭中空部の掘削・清掃作業を行い、杭中空部へ補強鉄筋を設置する。これに対し、F.T.Pile 構法では、杭頭部にテーパ状のクリアランスを構築するための型枠 (FT キャップ) を設置する (写真3(a)参照)。FT キャップは、薄肉の鋼製で軽量であるため、大口径になって



(a) 従来工法

(b) F.T.Pile 構法

図8 施工手順



も、設置作業に重機を用いる必要がなく、施工性に優れている。引抜き対応タイプの場合は、引抜き抵抗用鋼棒を既製杭端板のボルト孔を利用して設置する。その後は、捨てコン、基礎配筋、コンクリート打設となる。

(2) コストメリット

既製コンクリート杭の場合、一

般に、杭径は支持力により決定され、杭の仕様（PHC 杭の種別や SC 杭の鋼管厚など）は水平力によって決定される。従って、F.T.Pile 構法の採用によって、杭径が変更されることはないが、地震時の最大曲げモーメントが低減されるため、例えば、SC 杭から PHC 杭への仕様変更が可能となる。また、場所打ち杭と同様に基礎梁の梁せいの縮小、およびそれに伴う掘削土量の削減も期待できる。一方、施工性については、杭頭定着筋の施工が不要となるため、在来工法に比較しても短工期で実施できる。写真 3 (b) に F.T.Pile 構法を採用した場合の基礎の配筋状況を示すが、杭頭定着筋がないため、基礎の配筋作業についても施工性が向上する。コストダウン効果は、杭頭モーメントの低減率が地盤条件や変動軸力の大きさによって変わるため一概には言えないが、基礎梁を含めた基礎工事費の 5～30%程度が期待できる。



(a) FT キャップの設置



(b) 基礎の配筋状況

写真 3 施工状況

## 6 まとめ

杭基礎の耐震性能の向上とコストダウンを同時に実現できる可能性をもつ「杭頭半剛接合構法」について調査を行った。杭頭半剛接合構法は、兵庫県南部地震以降に開発が進み、近年では、合理的な杭基礎を構築する技術として、低層から超高層建物まであらゆる用途の建物に普及が進んでいる。今後は公共の建築工事においてもコスト低減技術として幅広い活用と展開が期待できる。

なお、本調査は、鹿島建設(株)、大成建設(株)、清水建設(株)、(株)フジタ、(株)鴻池組、(社)建築業協会から提供して頂いた技術資料を参考にし、その一部を引用している。