

大型 LNG タンクに適用した杭頭半剛接合構法 (F.T.Pile 構法) の設計と施工

大成建設株式会社 正会員 ○木村 利秀 正会員 三谷 弘則
正会員 山本 平 正会員 市波 克洋
正会員 岡嶋 修一 正会員 小林 祐樹

1. はじめに

土木分野における杭基礎構造物において、一般的に杭とフーチングの接合部(以下、「杭頭接合部」と称す.)は剛接合として設計されている。その場合、杭頭部において最大曲げモーメントが発生し、これにより杭本体および杭頭接合部(杭頭補強鉄筋)の仕様が決定される。

「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」では、杭頭接合部を剛接合とする場合、以下の2つの杭頭構造を記載している。

- ① フーチング内の杭の埋込み長さを 100mm とし、杭頭補強鉄筋で接合する方法(図 1(a))
- ② フーチング内に杭を 1D(杭径)埋込み接合する方法(図 1(b))

①の方法では杭周囲の限られた範囲に多数の杭頭補強鉄筋を配置する必要があるため、過密配筋となる。
②の方法は、フーチングの下側の鉄筋は、埋込んだ杭と干渉しないように配置する必要がある。

本稿で取り上げる大型 PCLNG 貯槽は、1基当たり約 400~1,000 本(貯槽容量 14~23 万 kl)の基礎杭に支持された構造物であるため、上記の方法では、杭頭部付近の配筋作業が煩雑となる。

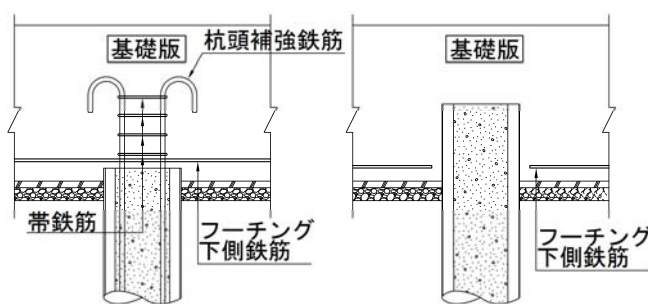
1995 年に発生した兵庫県南部地震では、杭頭部を剛接合として設計された杭基礎構造物に多数の被害がもたらされた。この被害を契機に、杭頭接合部に対する研究開発が進められることとなった。そして、2001 年に改定された建築基礎構造設計指針では、杭頭の回転剛性を考慮することが記載され、多くの杭頭半剛接合構法が実用化された。

本稿では杭頭半剛接合構法の一つである F.T.Pile 構法の概要、設計方法および施工方法を記載するとともに、大型 PCLNG 貯槽への適用事例について報告する。

2. F.T.Pile 構法の概要

図 2に示すとおり、F.T.Pile 構法では杭頭接合部に回転性能を付加するため、杭頭部に「FT キャップ」を設置する。以下に「FT キャップ」を設置した際の杭頭接合部の特徴を示す。

- ① 杭頭補強鉄筋を用いずに、「FT キャップ」を介して杭と基礎版コンクリートを非定着な状態とする。
- ② 「FT キャップ」と杭頭側面部にクリアランスを設けることで埋込み部の回転剛性を低減する。



(a)杭頭補強鉄筋による接合方法 (b)杭埋込み接合方法

図 1 杭頭接合方法

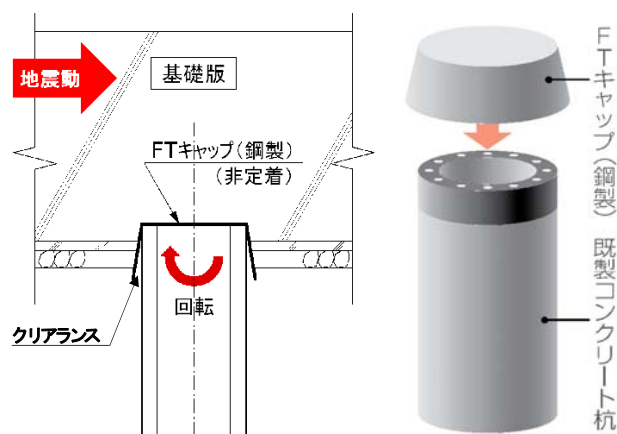


図 2 F.T.Pile 構法概要図

キーワード 大型 PCLNG 貯槽, 基礎杭, 杭頭半剛接合構法, F.T.Pile 構法

連絡先 〒160-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設株式会社土木本部土木設計部 TEL 03-5381-5293

さらに、本構法は杭の配置、荷重条件を元に、各杭における杭頭固定度を考慮した曲げモーメントを算出することで、経済的な杭仕様の実現が可能となる。

これらの特徴を有する本構法を採用する際のメリットを以下に示す。

- ① 地震時に杭頭部に発生する曲げモーメントを低減できるため、上杭の仕様を合理化し、コストダウンが可能となる。
- ② 杭頭補強鉄筋の設置（配筋作業もしくは溶接作業）が不要であるため、工事工程短縮および労務費、材料費のコストダウンが可能となる。
- ③ 杭頭補強鉄筋の過密配筋が解消できる。
- ④ 杭頭補強鉄筋が不要、かつ杭の埋込み長が 100mm であるため、基礎版下筋を容易に配筋できる。

3. F.T.Pile 構法の設計方法

(a) 杭頭接合部の固定度および回転剛性

任意の杭頭固定度における杭頭曲げモーメントと、杭頭剛接合の場合の杭頭曲げモーメント（理論解）に対する比が杭頭固定度であり、下式によって算定することができる。

$$M = \alpha M_0$$

ここに、 M : 任意の杭頭固定度における杭頭曲げモーメント (kN・m)

α : 杭頭固定度

M_0 : 杭頭剛接合の場合の杭頭曲げモーメント (kN・m)

この場合、杭頭剛接合は $\alpha = 1.0$ で、杭頭ピン接合は $\alpha = 0.0$ と表すことができる。杭頭半剛接合は、 $0.0 < \alpha < 1.0$ となる。

また、杭頭固定度と回転剛性の関係は下式で定義されている。

$$\alpha = K_\theta / (EI\beta + K_\theta)$$

ここに、 K_θ : 回転剛性 (kN・m/rad)

EI : 杭の曲げ剛性 (kN・m²)

β : 杭の特性長さ (1/m)

(b) 杭に発生する曲げモーメントの算定

杭に発生する曲げモーメントの算定は、図 3 に示す解析モデルを用いる。本解析モデルは地盤をバネ要素、杭体を梁要素、杭頭接合部を回転バネを用いたものである。

杭頭を剛接合とした場合の回転剛性 K は、下式で定義される。

$$K = M_0 / \theta_0$$

ここに、 θ_0 : 杭頭剛接合の杭頭の回転角 (rad)

一方、F.T.Pile 構法を用いた場合、曲げモーメント M と回転角 θ の関係（以後、 $M-\theta$ 関係と略す）は下式に示す双曲線関数で表される。

$$M = \frac{\theta}{\frac{1}{K_0} + \frac{1}{M_{\max}} \theta}$$

ここに、 θ : 杭頭の回転角 (rad)

K_0 : 杭頭接合部の初期回転剛性 (kN・m/rad)

$M_{\max}$: 杭頭接合部の最大抵抗モーメント (kN・m)

図 4 に示すように、杭頭接合部の $M-\theta$ 関係は非線形性状を示し、回転角 θ の増加に伴い回転剛性 K_θ が減少し、収束計算を行うことで外力レベルに応じた回転剛性 K_θ を得ることができる。

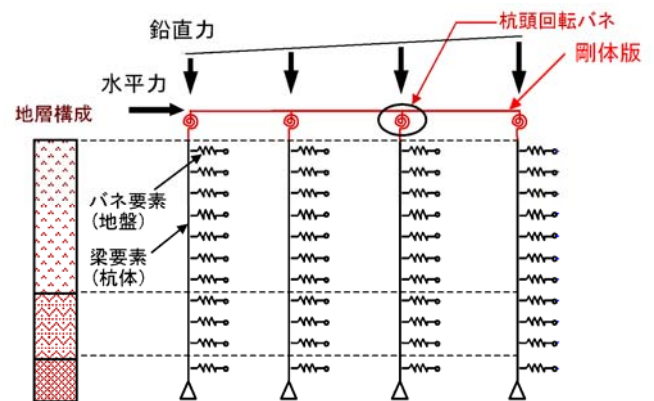


図 3 解析モデル概要

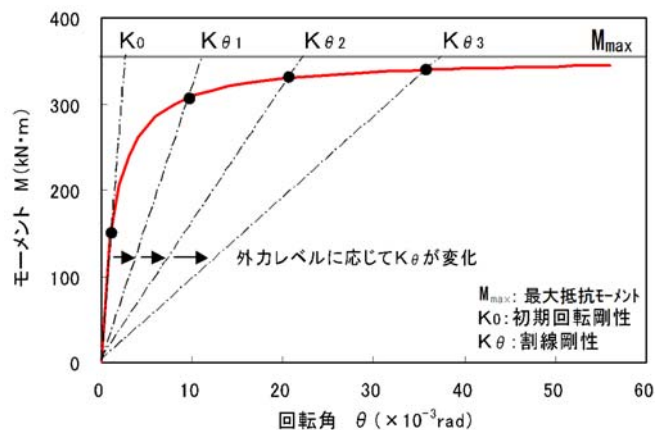


図 4 双曲線モデルの一例

杭頭接合部の初期回転剛性および最大抵抗モーメントはそれぞれ下式で算定される。

$$K_0 = \frac{\pi}{32(1-\nu^2)} (D_1^3 - D_2^3) \times 10^3$$

ここに、 ν : フーチングコンクリートのポアソン比

D_1 : 杭の外径 (m)

D_2 : 杭の内径 (m)

$$M_{\max} = N D_1 / 2$$

ここに、 N : 軸力 (kN)

上式の通り、最大抵抗モーメントは軸力の関数であるため、 $M-\theta$ 関係も軸力により変化する (図 5 参照)。なお、 $M-\theta$ 関係については、 $\phi 600\text{mm}$ の PHC 杭と SC 杭を対象に実大実験を行い、算定式が実験結果を捉えることができた。

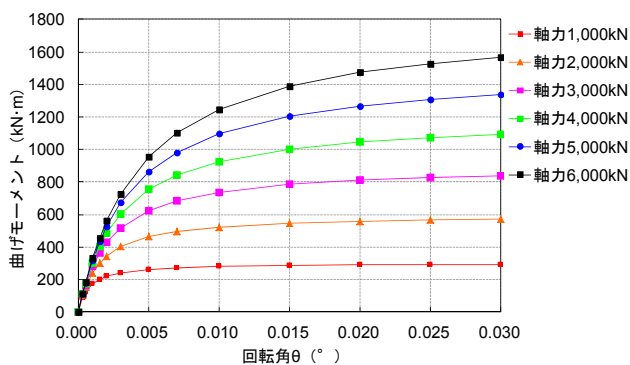


図 5 軸力ごとの $M-\theta$ 関係の一例



(a) FT キャップのボルト固定

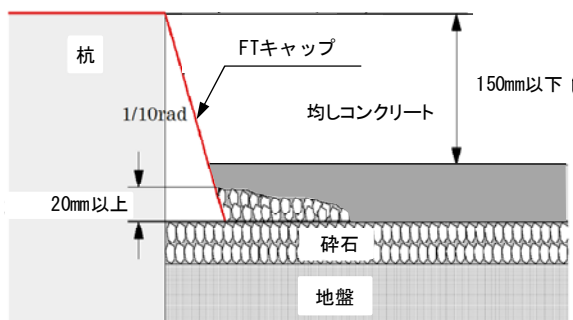


(b) 均しコンクリート打設



(c) ボルト撤去

写真 1 F.T.Pile 構法の施工状況写真



(a) FT キャップ設置のポイント



(b) 杭頭部平滑作業状況

図 6 品質管理上のポイント

3.1. F.T.Pile 構法の施工方法

F.T.Pile 構法の施工は、杭頭剛接合の場合の杭頭補強鉄筋の配筋または溶接と比較すると、非常にシンプルな施工方法である。その「FT キャップ」設置手順を以下に示す (施工状況は写真 1 参照)。

- ① 砕石敷均し完了後、「FT キャップ」を設置する。この際、杭の端板のボルト穴を用いて仮固定する (ボルト 2 本)。
- ② 均しコンクリートを打設し、「FT キャップ」をコンクリートで固定する。
- ③ 均しコンクリート硬化後に仮固定用のボルトを撤去し設置完了とする。

上記の施工手順において、品質管理上のポイントは以下の 2 点である。

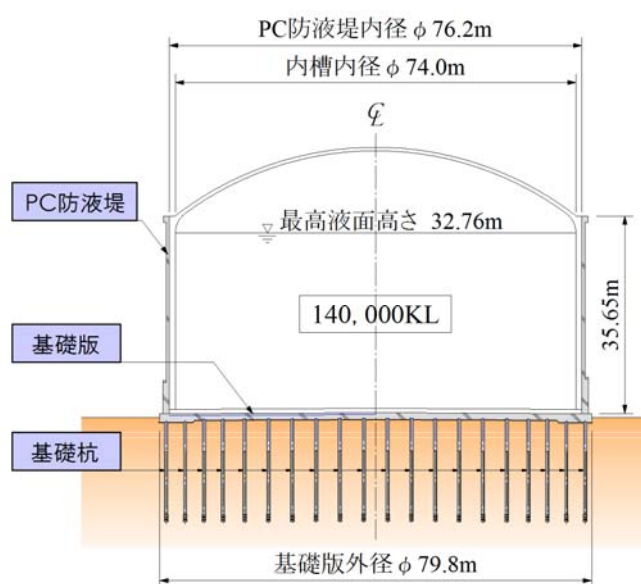
- ① 「FT キャップ」テーパ部を空間を確保するために、「FT キャップ」と杭側面の隙間に、異物が入らないようにする (図 6 (a) 参照)。
- ② 全方向に杭頭部回転角が、均一に確保されるように、「FT キャップ」と杭頭部を密着して設置する。
(杭頭に溶接された杭頭金具(ヨウカン)は撤去し、端板をグラインダー等で滑らかに整形する (図 6 (b) 参照))

4. 大型 PCLNG 貯槽への適用事例

4.1. 構造概要

PCLNG 貯槽の一般構造図を図 7に示す。本貯槽は、通常運転時に LNG を貯留する金属製の内槽と万一の漏洩に対する PC 構造の防液堤と基礎版が一体となった円筒形構造物である。本貯槽の防液堤は部材厚さが段階的に変化する DualPC 防液堤を採用した。

基礎杭の仕様を表 1に示す。杭径は $\phi 600\text{mm}$ とし、上杭には地震時の水平力に抵抗するため SC 杭を、下杭には鉛直支持力を確保するため先端を拡径($\phi 700\text{mm}$)した PHC 杭を使用した。杭長は基礎版の厚さの違いにより、外周部を 14.0m、中央部を 15.0m とした。



基礎版	外径：79.8m 版厚：中央部 1.2m，外周部 1.6m
PC 防液堤	内径：76.2m 高さ：36.65m 壁厚：下端部 1.2m，一般部 0.55m， 頂部 1.1m

図 7 一般構造図

表 1 基礎杭の仕様

杭 種	上杭：SC 杭 $t=5\text{mm}$ (SKK490) 下杭：PHC 杭 C 種
杭 径	$\phi 600$
杭 長	上杭：4.0m 下杭：14.0～15.0m
杭本数	356 本/基

4.2. 従来工法（剛接合）との比較

F.T.Pile 構法を採用することによる設計および施工上の効果を以下に示す。

(a) 上杭仕様の合理化

F.T.Pile 構法にて設計した場合と杭頭剛接合とした場合の曲げモーメント分布を図 8に示す。回転剛性を考慮したことにより、杭に発生する最大曲げモーメントは、剛接合に対して最大軸力下で 75%，最小軸力下では 38%低減することができた。これにより、図 9に示す通り、SC 杭の鋼管肉厚は、剛接合に比べ 40% ($t=12\text{mm} \rightarrow 5\text{mm}$) 低減することが可能となった。鋼材量に換算すると、1 基あたり約 143t 低減することができた。

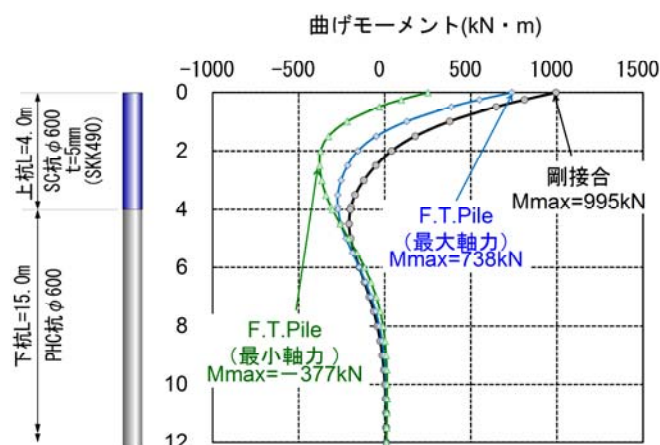
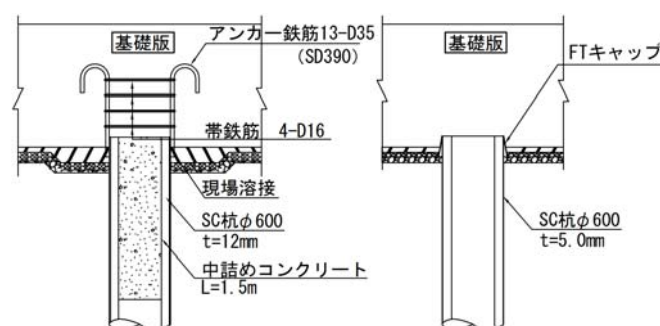


図 8 曲げモーメント分布の比較



(a) 剛接合

(b) F.T.Pile 構法

図 9 剛接合と F.T.Pile 構法の杭仕様比較

(b) 杭頭接合部の施工性向上

杭頭剛接合では、図 9に示す杭頭補強鉄筋（13-D35）が必要となる。一方、F.T.Pile 構法の場合、写真 2に示すとおり「FT キャップ」を設置するだけで良いため、施工性が格段に向上した。

(c) 基礎版下筋の施工性向上

剛接合では杭頭補強鉄筋が 13 本配置されるため、基礎版下筋の配置を予め考慮して、杭頭補強鉄筋を配置または溶接する必要がある。一方、F.T.Pile 構法の場合、写真 3に示すとおり、杭の直上に障害物がないため、基礎版下筋をスムーズに配筋することができた。

(d) 工程短縮効果

杭打設後から杭頭接合部施工の概略工程の比較を図 10に示す。これより、F.T.Pile 構法を採用することで、基礎版土工事工程を杭頭剛接合よりも 9 日間短縮し、基礎版下側鉄筋の配筋を 3 日間短縮した。

5. おわりに

F.T.Pile 構法は今回のプロジェクトを含め、全国の建築・土木の構造物（ビル、マンション、工場基礎など）に適用されており、2015 年 5 月時点で適用プロジェクト 2,493 件、杭本数 159,540 本の実績がある。F.T.Pile 構法は杭頭剛接合に比べ、施工性が向上するだけでなく、過密配筋が解消されるため品質の改善を図ることが可能となる。そのため、土木分野においても、F.T.Pile 構法の採用が増えることが考えられることから、本事例が今後の土木構造物における F.T.Pile 構法採用の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本道路境界：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編，平成 24 年
- 2) 青島一樹，安達俊夫：杭頭半剛接合法の効果と留意点，基礎工 Vol.40，No.6
- 3) 高木宏彰，松本久夫：小型タンク基礎への杭頭半剛接合の適用事例，基礎工，2012，Vol.40，No.6
- 4) 市波克洋，岡嶋修一，小林祐樹：大型 LNG タンクに対する杭頭半剛接合構法（F.T.Pile）の採用，土木学会第 69 回年次講演大会，2015 年，VI-544
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001 年
- 6) 大成建設株式会社：大成式杭頭半剛接合構法（F.T.Pile 構

法）既製コンクリート杭 設計・施工指針，2014

- 7) 青島一樹，島田博志，小室努：改良型簡易接合法を採用した既製コンクリート杭杭頭の力学性状，日本建築学会構造系論文集，2006 年 9 月，第 607 号



写真 2 FT キャップ設置状況



写真 3 下筋配筋状況

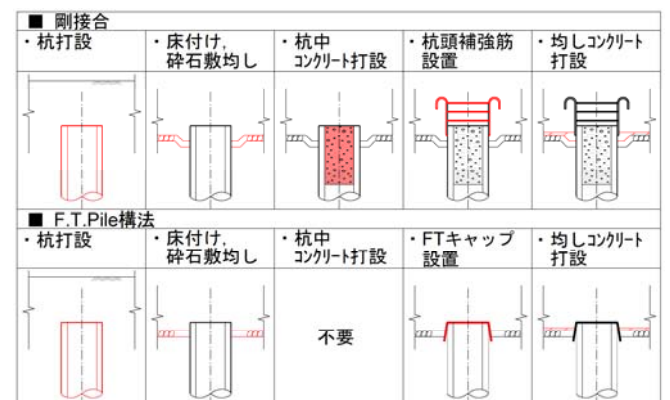
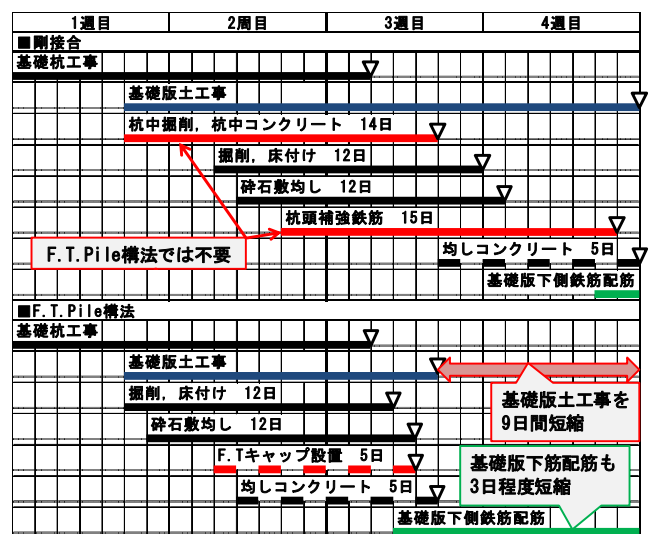


図 10 基礎版土工事概略工程比較