

井桁壁基礎の三次元非線形解析による耐震性の検討 — 杭の応力低減効果の検討 —

福武 毅芳¹

¹正会員 工修 清水建設株式会社 和泉研究室 (〒100 東京都千代田区幸町2-2-2)

対象とする基礎構造は井桁壁工法である。既設杭を撤去しないで有効に利用することと、井桁状の壁で仕切ることにより基礎の耐震性を確保することを想定した。本工法は杭と壁とを有する複雑な構造であるので、三次元の動的解析を実施した。当該地盤は液状化の可能性もあるので、過剰間隙水圧を考慮した非線形解析を実施し、液状化時の挙動を検討した。井桁壁工法の耐震上の特徴としては、1) 動的せん断力の大部分を井桁壁が負担し、杭にはほとんどせん断力を伝えないこと、2) 地震時の地盤のせん断変形を抑制し液状化の程度を抑えることにある。

Key Words : *Liquefaction, Diaphragm wall, Pile, Three dimension, Bending moment, Excess pore water pressure, Nonlinear, Dynamic interaction*

1. はじめに 本研究で対象とする構造物は火力発電所であり、基礎面積は通常の建築物に比べかなり広い。発電所は建て替えることを想定しており、既設基礎は中間支持層(N 値=30, 洪積砂5m程度)に杭支持されている。新設基礎も中間支持層に支持させることを想定した。新設の基礎構造としては井桁壁工法を想定した。井桁壁は、鉄筋コンクリートの地中連続壁が格子状に配置された基礎であり、壁間には杭も存在する。

井桁壁工法を考えた理由は以下の2点による。

1) 健全な既設の杭(ペDESTAL杭)を撤去しないで有効に利用するという観点から、新たに建設する基礎に既存杭を積極的に組み込む¹⁾。これにより、基礎の耐震性の向上や建設廃材の減少が期待できる。2) 新設基礎も中間層に支持させることを想定しているため、杭だけだと支持力が不足する。そこで、建物の鉛直荷重を井桁壁を通じて分散して中間支持層に伝える。

井桁壁工法の耐震上の特徴としては、動的なせん断力はその大部分を井桁壁が負担し、杭にはほとんどせん断力を伝えないことにある。さらに、地震時の地盤のせん断変形を抑制し、液状化の程度を抑えることにある。液状化抑制効果については既に発表済²⁾である。そのときの結論は、1) 井桁壁工法は地盤のせん断変形を抑制し、液状化の程度を抑えることができる、2) 井桁壁が上部構造物に与える応答の影響は小さい、ということであった。ここでは、井桁壁で囲まれた杭の応力低減効果について検討した。

基礎形状は杭と壁とが混在する複雑な三次元構造であるので、三次元の動的解析を実施した。当該地盤は液状化の可能性もあるので、過剰間隙水圧を考慮した非線形解析(コード名HiPER)^{3), 4)}を実施し、液状化時の本工法の挙動を検討した。

2. 解析条件 対象とする基礎では杭本数が膨大であり、さらに井桁壁も存在し複雑である。このような構造物を二次元で解析するのは限界がある。例えば、二次元では杭は奥行き方向に無限に続く壁のようにモデル化されるし、壁で囲む構造物は壁の面内せん断抵抗がモデル化できない。しかしながらこのような基礎を、三次元の地盤・杭・建屋の全体系モデルで解析するのは、膨大な計算

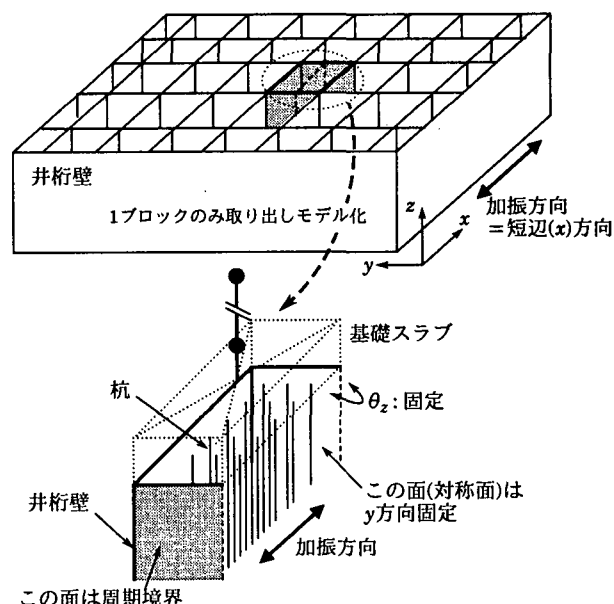


図1 モデル化の概念図 (1/2モデル)

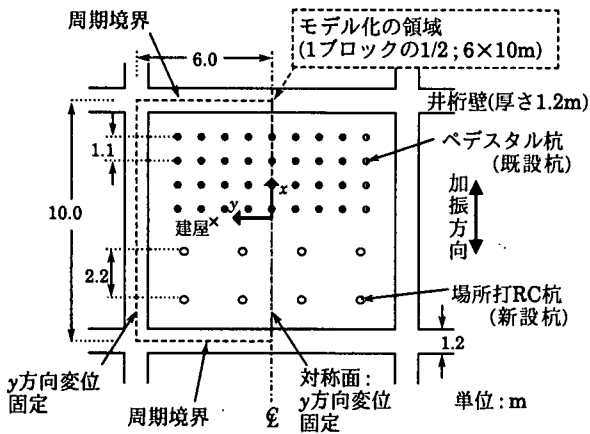


図2 杭・井桁基礎の平面図

容量とCPUを必要とする。そこでここでは、簡便に解くという観点から、側方の境界条件を工夫することによって近似的に大規模な基礎の三次元挙動を解析した。

解析のモデル化に当たっては、図1に示すように、基礎の中央部付近の井桁の一部(1ブロック分)のみに着目した。さらに対称性を考慮して1ブロックの1/2モデル(図2の破線で囲まれた部分)とし、その部分の負担する建屋・基礎・地盤を図3に示すように三次元FEMでモデル化した。

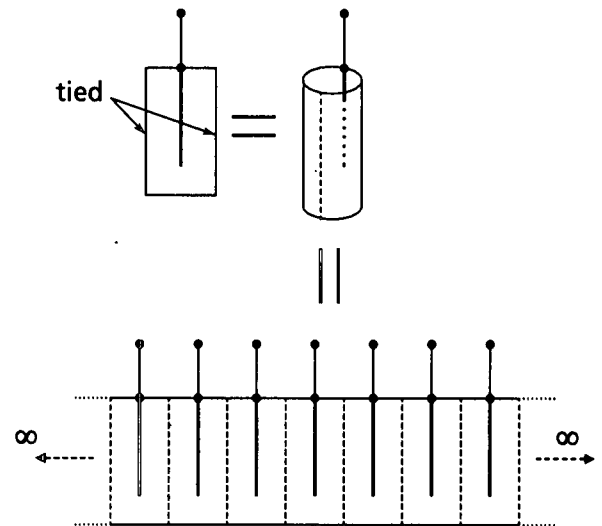


図4 周期境界の概念図

側方の境界条件としては、左右面の対応する節点どうしを同変位条件(tied)とした(周期境界)。これにより、周辺地盤は考慮されず、10mピッチの井桁配列のパターンが無限に繰り返されるモデルに対応する。図4にはその二次元的イメージ図を示す。対称面($y=0\text{m}$ の面)とその対面(奥の井桁壁に沿った面, $y=6\text{m}$ の面)では、 y 方向の変位は拘束した。

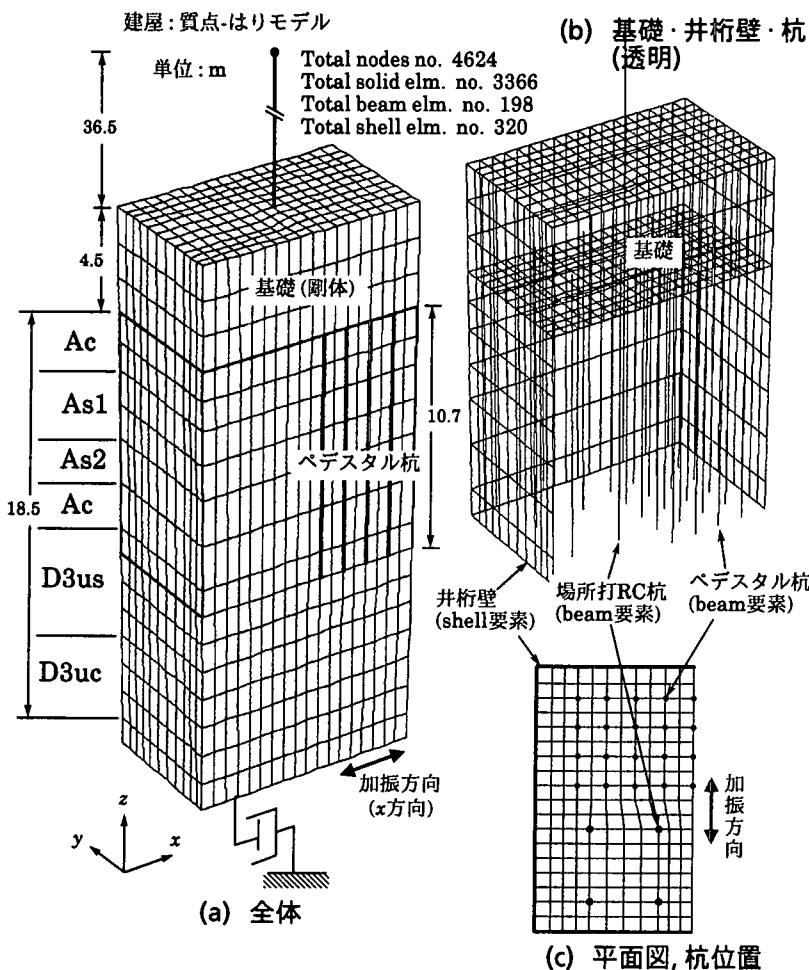


図3 有限要素メッシュ

底面境界は、鉛直方向を固定とし水平方向に粘性ダンパーを用いた。この簡易モデルの欠点は、基礎の場所による挙動の違いが把握できないことにある。しかし、基礎中央の平均的挙動はこのモデル化で表現可能である。

基礎梁・基礎スラブは、剛体要素でモデル化し、回転成分を固定した。杭はベリチコのはり要素でモデル化し、杭頭は固定条件(基礎の剛体要素中に埋めこむ)とした。井桁壁はシェル要素でモデル化した。対称面では、シェル要素の z 軸回りの回転 θ_z は固定とした。シェル要素の頭部は基礎に剛結とした。杭の諸元を表1に示す。

表2に想定した地盤条件⁵⁾を示す。地下水位はGL-1mであり、初期応力は成層地盤の値を使用した(静止土圧係数 $K_0=0.5$)。

表1 杭(梁要素)および井桁壁(シェル要素)の物性

杭 種	直径 (m)	断面積 A (m ²)	ヤング率 E (tf/m ²)	断面二次モーメント $I_x=I_y$ (m ⁴)
ベデスタル杭	0.55	0.238	2.1×10^6	0.0045
場所打RC杭	1.10	0.950	2.2×10^6	0.0719
井桁壁	—	(厚さ 1.2m/2)	2.2×10^6	—

単位体積重量 $\gamma_t = 2.5$ (tf/m³)、ポアソン比 $\nu = 0.167$

表2 地盤条件

地層名	GL (-m)	単位体積 重量 γ_t (tf/m ³)	せん断波 速度 V_s (m/s)
基礎	1~5.5	3.02	(剛体)
軟弱層			
沖積粘土 (Ac)	5.5~8	1.65	105
沖積砂 (As1)	8~11	1.88	160
沖積砂 (As2)	11~13	1.93	220
沖積粘土 (Ac)	13~15	1.65	105
支持層			
洪積砂 (D3us)	15~20	1.90	259
洪積粘土 (D3uc)	20~24	1.83	295
洪積砂 (D3us)	24~	1.90	259

注) $G_0 = (\gamma_t/g) \cdot V_s^2$ 動的ポアソン比 $\nu = 0.33$

解析に用いる土の構成式^{3),6)}のパラメータは、既往の実験データ⁵⁾($G/G_0 \sim \gamma$ 関係・ $h \sim \gamma$ 関係と液状化強度)より設定した。

入力地震動は図8に示すエルセントロ波であり、短辺方向(x方向)に入力した。解析ケースは、杭のみの場合と、杭+井桁壁の場合の2ケースである。

3. 解析結果と考察 杭と井桁壁の荷重分担率ならびに、既設杭(ベデスタル杭)と新設杭(場所打RC杭)の荷重分担率について以下に考察する。図5に各杭の杭頭における最大曲げモーメント M を、図6に各杭の杭頭における最大せん断力 S を、井桁壁がある場合と無い場合を併せて示す。図7,8には、場所打杭とベデスタル杭の最大曲げモーメントならびに最大せん断力の深さ方向の分布を示す。各図より、井桁壁があることにより、杭の曲げモーメントやせん断力が大幅に低減することが分かる。

1ブロックにおける全ての杭の M や S の合計に着目すると、井桁壁により場所打杭の M は3%に低減し、 S は23%に低減している。ベデスタル杭では M は5%に低減し、 S は21%に低減している。

1本あたりの場所打杭とベデスタル杭の応力を比較すると、場所打杭の M はベデスタル杭に比べ約15倍大きく、 S は約10倍大きくなっている。基礎は剛であるため杭頭変位は各杭で同じであるから、この M や S の値の差はもっぱら EI や GA の値の差(表1)によるものである。ベデスタル杭に発生する応力の場所による違いはあまり見られない。

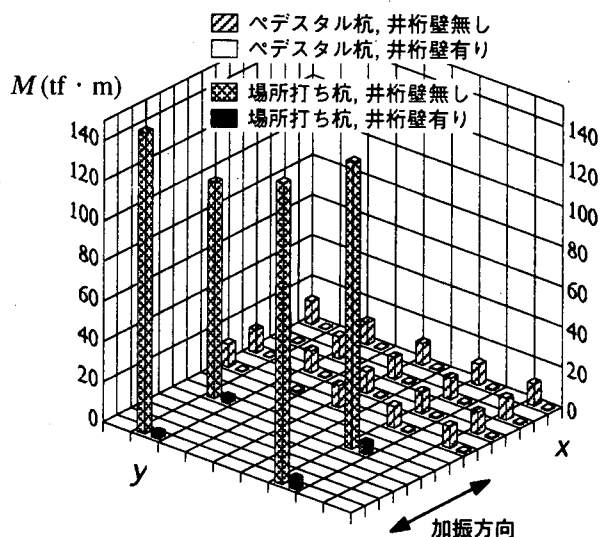


図5 各杭の杭頭における最大曲げモーメント M

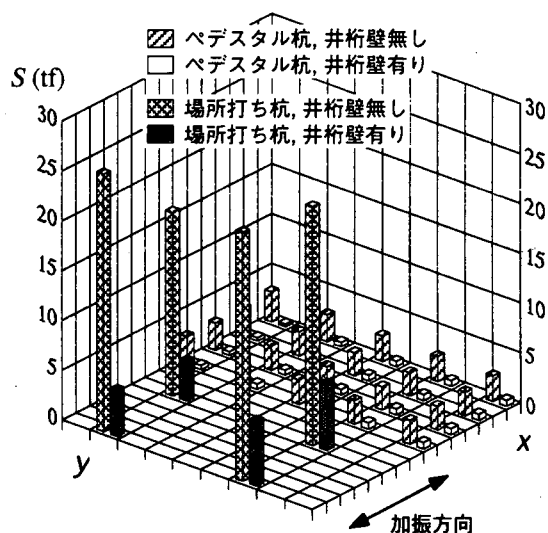


図6 各杭の杭頭における最大せん断力 S

図10,11には、場所打杭とベデスタル杭の最大曲げモーメントならびに最大せん断力の時刻歴を示す。井桁壁により、特に曲げモーメントの低減が著しい。

4. おわりに 本研究では、杭と井桁壁を併用した基礎について、その耐震性の比較・検討を行った。その結果、井桁壁を施工した場合には、動的な力による曲げモーメントやせん断力は、その大部分を井桁壁が負担し、杭にはほとんど負荷がかからないことが示された。

類似の既往の研究⁷⁾によれば、SMWで囲まれた超高層基礎の杭応力は、約70%に低減することが示されている。今回の方が低減効果が大きかった理由は、SMWに比べ井桁壁の方が剛性がかなり高く、壁の間隔も狭いためと考えられる。

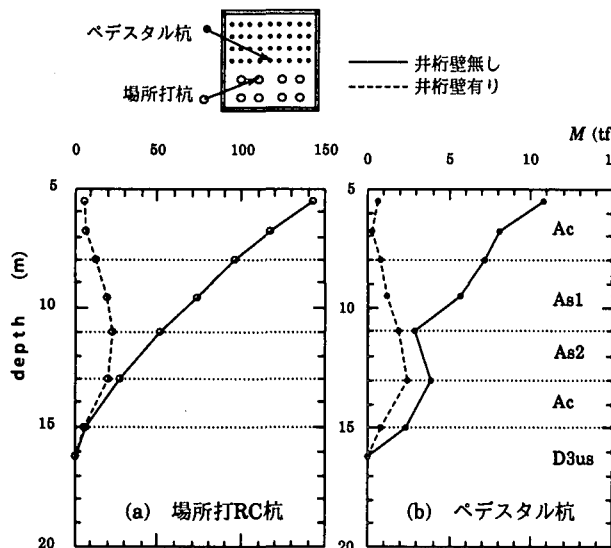


図7 杭の最大曲げモーメント分布

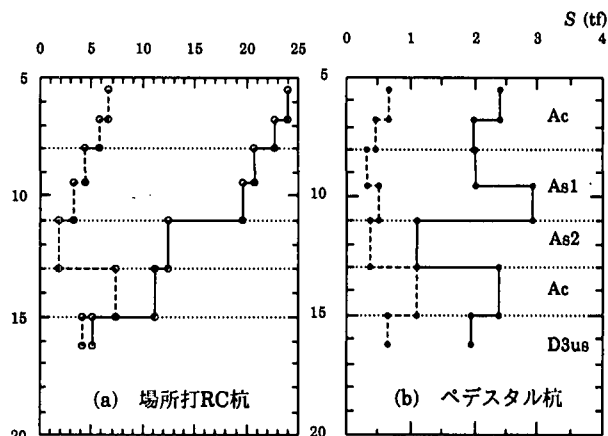


図8 杭の最大せん断力分布

最後に、井桁壁工法について助言をいただいた清水建設(株)の村上一夫氏、石井 清氏、勝沢勝栄氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤川・福武: 既設杭の再利用による新設杭の応力低減効果の解析的検討, 日本建築学会大会学術講演概要集, B-1 構造 I, pp.581-582, 1996.
- 2) 福武: 井桁壁基礎の三次元非線形解析による耐震性の検討 - 液状化抑制効果の検討 -, 第32回地盤工学研究発表会, pp.1635-1636, 1997.
- 3) 大槻・福武・藤川・佐藤: 液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, No.495/ I -28, pp.101-110, 1994.
- 4) 大槻・福武: 三次元液状化シミュレーション, 電力土木 No.253, pp.110-116, 1994.
- 5) 古川・森・松井・井上・津田・富田・平澤: セメント系地盤改良工法の火力発電所建屋基礎地盤への適用検討-その3 改良地盤の振動特性-, 日本建築学会大会学術講演概要集, 構造, pp.659-660, 1996.
- 6) 福武・大槻: 三次元液状化解析による部分改良地盤の効果の予測, 地盤の液状化対策に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.205-210, 1991.
- 7) 藤川・福武・大槻・吉見・中村: 連続地中壁による杭-地盤系の液状化防止に関する三次元解析, 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, pp.991-996, 1994.

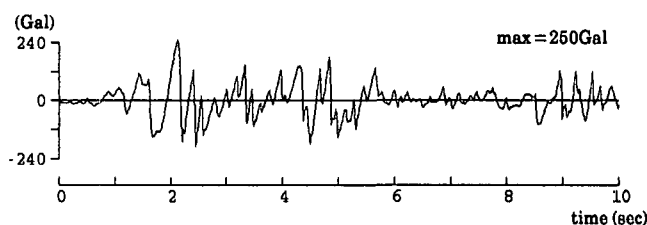


図9 入力加速度: ElCentro NS (2E)

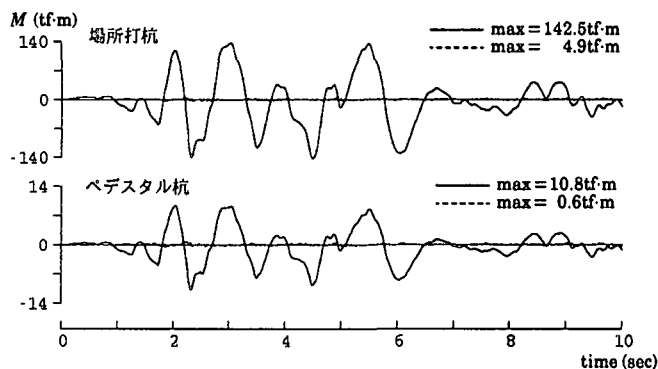


図10 杭頭の曲げモーメント時刻歴

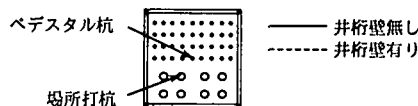
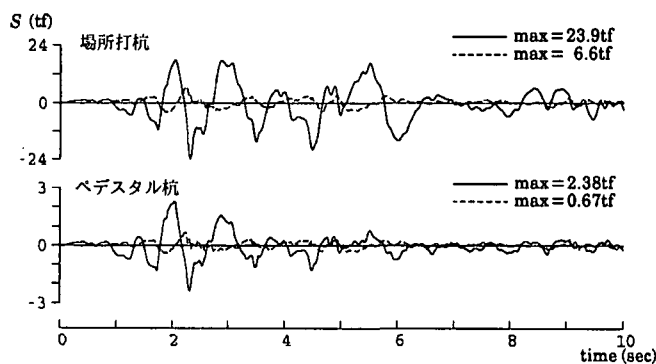


図11 杭頭のせん断力時刻歴