

靱性杭の液状化地盤への適用性に関する解析的検討

Analytical evaluation of ductile pile for liquefiable ground

福武毅芳*, 大槻 明*, 田中宏征**, 松浦 敦***

Kiyoshi FUKUTAKE, Akira OHTSUKI, Atsushi MATSUURA and Hiroyuki TANAKA

大地震時の杭体損傷を最小限に抑えるため、安全余裕度の高い変形性能に富んだ杭(靱性杭)は有効である。そこで本論文では変形性能型の杭設計法の構築を目指し、材料の塑性域を活用した杭の設計を図った。靱性の大きな杭構造としてコンクリート充填鋼管杭を設定し M - 関係、限界曲率、を求め、設計に必要な定式化を行った。この靱性杭を用いた建物を液状化地盤について適用し、従来の RC 杭に比べて合理的でかつ安全余裕度があり、液状化地盤においても適用できることが分かった。

キーワード：靱性杭, M 曲線, 終局挙動, 液状化, 三次元有効応力解析

Ductile pile, M relation, Ultimate performance, Liquefaction, 3-D effective stress analysis

1. はじめに

現在行われている杭の 1 次設計はかなりの安全率を含んでいるため、2 次設計を簡易に行うことが多い。しかし、近年杭基礎の合理化が求められるようになり、合理化によって低減した基礎の安全率が許容できる範囲にあるかを正しく評価するには 2 次設計まで立ち上げた検討が必要である。杭基礎の塑性を許容した 2 次設計(変形設計)の特徴は、杭体の M - 関係や杭周辺地盤の非線形性をトレースすることで、限界状態下の杭基礎の安全性を定量的に評価できる点にある。

一方、阪神大震災の杭被害事例から変形性能に富んだ杭(靱性杭)の重要性が指摘¹⁾されている。この靱性杭を変形設計で評価すると、厚い軟弱地盤や液状化地盤で、耐震要求性能の高い建物、大きな変動軸力が予想されるアスペクト比が大きい建物、上部構造の保有水平耐力が高い建物、の基礎の合理化を図る上で有効と考えられる。具体的には、杭剛性が小さい靱性杭は発生曲げモーメントが小さく、杭体の小径化が図れる、引張り力に強い靱性杭は、低軸力下の杭に適用できる、などのメリットがある。

このような観点から、靱性杭としてコンクリート充填鋼管杭(以下「RCS 杭」と呼ぶ)と既製杭(SC 杭)、変形性能の小さい杭(以下「耐力杭」と呼ぶ)として拡頭場所打ち杭(以下「RC 杭」と呼ぶ)を想定し、杭基礎の液状化地盤での杭を三次元動的 FEM 解析と静的変形設計を行い、靱性杭の特長を議論した。

2. 変形特性に着目した部材試験

2.1 コンクリート充填鋼管杭の圧縮曲げせん断試験

コンクリート充填鋼管はこれまで柱構造を中心に多くの実験的研究が行われているが、橋脚を想定した一連

の研究²⁾では、鋼種、径厚比、軸力比、せん断スパン比などが杭の使用条件に比較的近い。本研究ではこの実験データをもとに新たに杭を念頭に置いた追加実験を行った。

表 1 杭の実験ケース

No.	鋼管径 mm	板厚 mm	径厚比 D/t	鋼種	降伏強度 N/mm ²	コンクリート強度 N/mm ²	軸力 kN	軸力比 N/N _y	せん断 スパン比	備考
1	406.4	6.1	67	400	390	28.3	1130	0.2	4	基本ケース
2	406.4	6.1	67	400	390	29.4	2795	0.5	4	軸力比大
3	406.4	6.1	67	400	390	30.1	1175	0.2	8	せん断スパン比大
4	406.4	9.1	44.5	400	350	31.9	3430	0.5	8	全パラメータ
5	406.4	6.1	67	400	390	28.6	1075	0.2	4	単調載荷
6	500	9	55.7	490	420	30.9	1130	0.35	4	API 鋼管 490 材

実験方法と実験ケース

実験方法を図 1 と表 1 に示す。実験は軸力を一定に保ち、降伏時変位(1 y)から順に y 刻みで変位を増加させる方式とし、各変位ステップ 3 回ずつの繰り返しを行った载荷パターンにより試験体に曲げせん断を与えた。各試験体の降伏時変位は、試験体鋼管基部に貼付したひずみゲージの計測値より判断した。今回の実験では図 1 に示すように、鋼管基部から塑性ヒンジ長²⁾の高さの位置の断面両端で鉛直変位を計測し、鋼管基部付近の区間平均曲率とした。

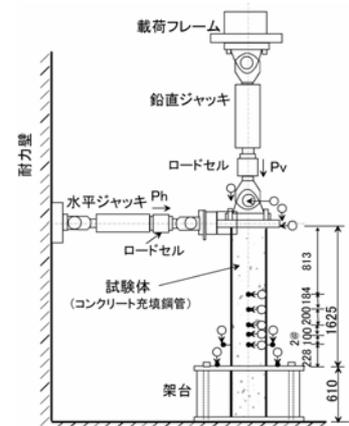


図 1 実験装置と測定位置

* 清水建設(株)

Shimizu Corporation

** 住友金属工業(株)

Sumitomo Metal Industries, Ltd

*** (株)CRC ソリューションズ

CRC Solutions Corporation

2.2 繰り返し荷重下の鋼管の鉛直支持性能

鉛直方向の残留変位と水平変位の関係を図2に示す。最大耐力点は鋼管の局部座屈が進展し始める点とほぼ対応しており、この時点では鋼管の局部変形や鉛直変位増加は小さく、鉛直支持性能の観点からも十分な部材断面性能を保持していると考えられる。

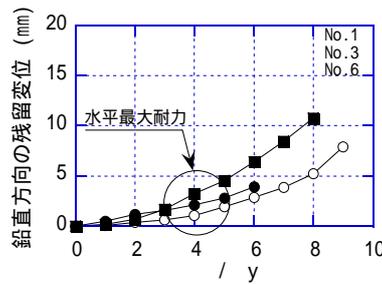


図2 M-y 関係の包絡線

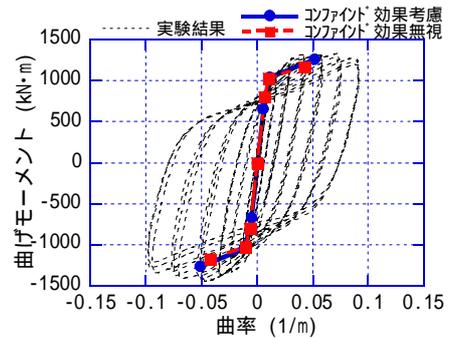


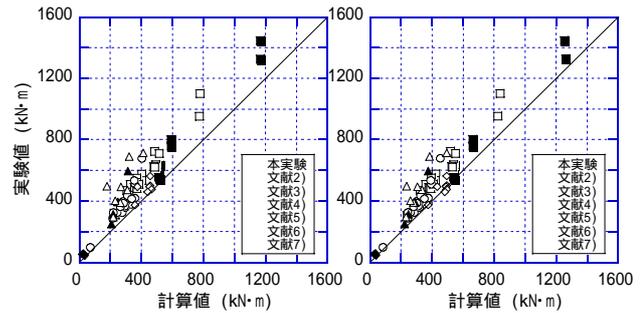
図3 M-φ の近似曲線

2.3 M-φ 関係のモデル化

杭の鉛直支持性能が十分に保持されており、定量的な評価が可能であると考えられる最大耐力までの範囲に着目することにし、この範囲の M-φ 関係を圧縮側鋼管降伏、引張側鋼管降伏、最大耐力点を折れ点とするトリリニア型で近似した。ここで、最大耐力点は、充填コンクリートの圧縮縁ひずみが式(1)に示す ϵ_c' に至る点とした。式中の D/t は鋼管径厚比、 σ_{sy} 、 E_s は鋼管の降伏強度、弾性係数である。実験 No.6 について、実験結果の M-φ 履歴曲線と計算結果の M-φ 近似曲線を図3に示す。計算結果はいずれも実験結果の最大耐力点までを概ね包絡しており、最大耐力およびその時の曲率を評価できている。

$$\epsilon_c' = 1.474 \frac{\sigma_{sy} / E_s}{D / t / 100} + 0.006 \quad (1)$$

既往の実験データ^{2)~7)}に対して前述の評価法により最大曲げ耐力を計算し、実験結果との比較を行った。図4から、コンファインド効果の考慮の有無にかかわらず、実験結果と計算結果には比較的良い相関が見られる。また、計算結果は実験結果のほぼ下限値を与えており、コンファインド効果を考慮しない場合には安全側の評価となる傾向が認められる。既往実験結果には、コンクリート強度 20~65N/mm²、鋼管降伏強度 300~600N/mm²、径厚比 20~120、軸力比 0~0.7、せん断スパン比 3~12 程度のデータが含まれている。本解析に用いた RCS 杭はコンファインド効果を無視して評価した。



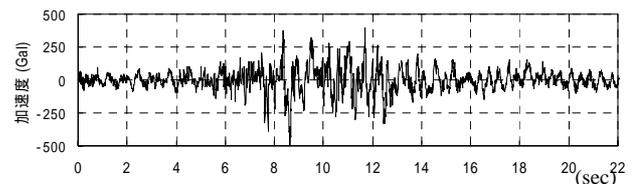
(a) コンファインド無視 (b) コンファインド考慮

図4 最大曲げモーメントの比較

(既往実験値と式(1)による計算値)

以上述べた RCS 杭部材断面性能は以下のようにまとめられる。

コンクリート充填鋼管の荷重-変位関係は安定した紡錘型の履歴ループを描き、最大耐力後の耐力低下も緩やかで高い吸収エネルギーを有している。最大曲げ耐力は鋼管の局部座屈発生段階に対応するが、その時の鉛直方向の残留変形は小さく、杭としての支持性能を保持している。



(c) 入力加速度：告示波 L2 相当 495Gal

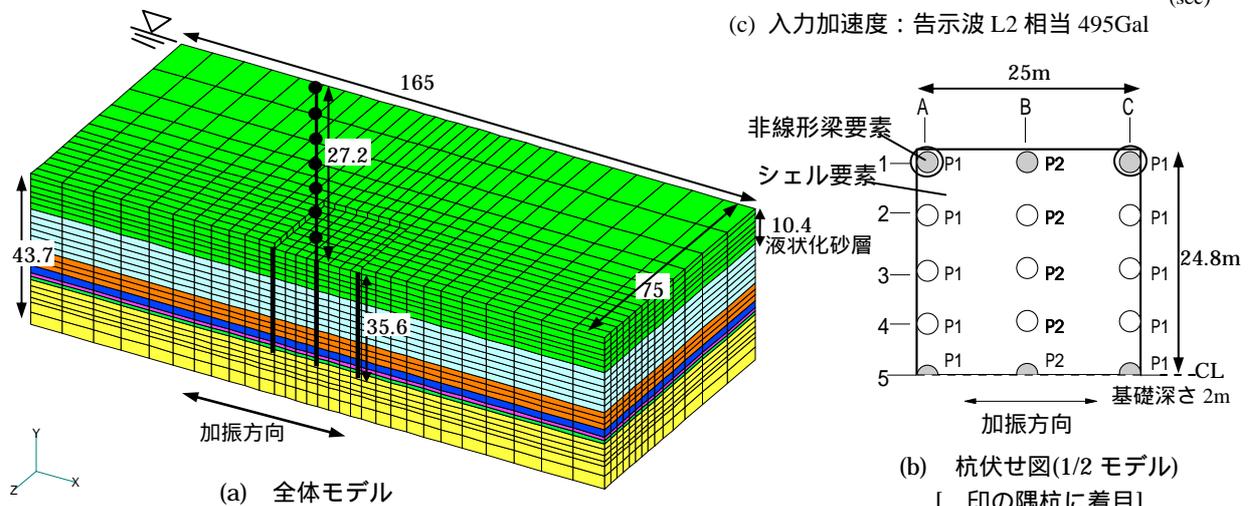


図5 有効応力解析用 FEM モデルの概要と入力加速度

コンクリート充填鋼管の最大曲げ耐力とその時の曲率は式(1)を考慮して、断面計算により評価できる。断面計算より得られた M -履歴曲線の最大耐力点までをトリリニア型の骨格曲線でモデル化することで、靱性を考慮した本杭の応答解析や設計が可能と考えられる。

表2 地層構成と地盤条件

層番号	土質	層厚 (m)	深度 (m)	N値	S波速度 Vs (m/s)	単体体積重量 (kN/m ³)	基準ひずみ 0.5	減衰 h_{max}
1	砂質土	1.50	1.80	7	140	18	0.00010	0.24
2	砂質土	2.00	3.80	7	140	18	0.00018	0.24
3	砂質土	1.70	5.50	7	150	18	0.00024	0.24
4	砂質土	1.30	6.80	10	155	18	0.00028	0.24
5	砂質土	3.60	10.40	10	160	18	0.00034	0.24
6	粘性土	11.50	21.90	2	126	16	0.00178	0.20
7	粘性土	5.00	26.90	2	126	16	0.00213	0.20
8	粘性土	2.10	29.00	5	171	16	0.00226	0.20
9	砂質土	1.00	30.00	12	183	18	0.00058	0.24
10	粘性土	1.00	31.00	20	271	16	0.00236	0.20
11	礫	13.00	44.00	30	249	19	0.00067	0.24

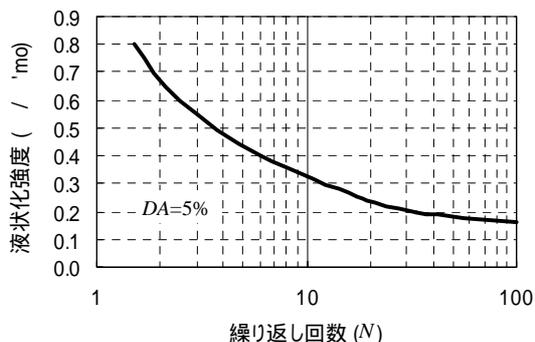


図6 砂層の液状化強度曲線

3. 靱性杭を有する建物の三次元有効応力解析

靱性杭の優位性が発揮できる大地震時の挙動に着目した杭・基礎・建物系の三次元有効応力解析(HiPER)⁹⁾を実施した。この解析では、前述の靱性杭の載荷実験から得られた曲げ特性をもとにした

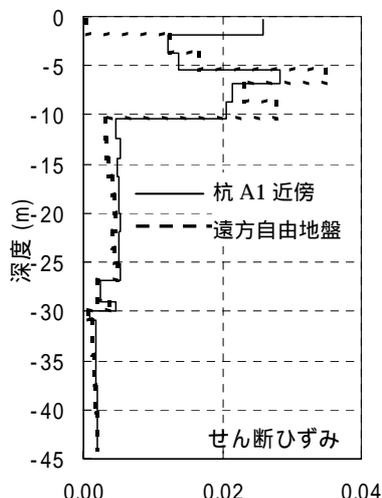


図7 地盤の最大せん断ひずみ分布

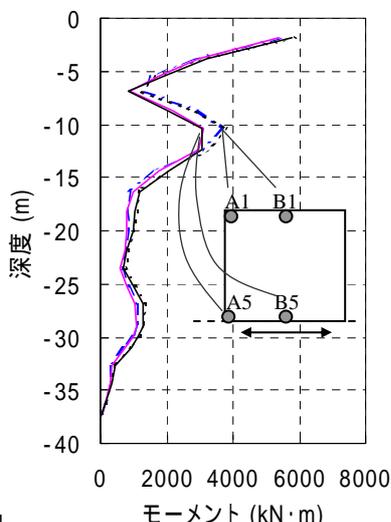


図8 4つの杭(A1,A5,B1,B5)の最大曲げモーメント分布

杭の非線形性や地盤の液状化特性を考慮し、液状化地盤における挙動を考察する。あわせて静的解析との比較も行った。

3.1 解析モデルの概要

群杭の三次元効果を検討する観点から解析モデルとして図5に示す地盤・杭・上部構造を三次元FEMにより対称性を考慮して1/2モデルで離散化した。建物は固有周期0.9秒の7階建のS造で、固有周期1.0秒の軟弱地盤に45本の支持杭で支えられている。上部構は7質点の線形な等価せん断梁要素、基礎は剛なシェル要素、杭は梁要素でモデル化し、 M -関係に非線形性を考慮した。地盤底面位置に粘性ダンパー、側方境界には水平ローラを設けた。地盤・杭・建物系モデルの1次固有周期は1.16秒である。入力地震波はレベル2相当の地震として告示波(位相は神戸海洋気象台[1995])を最大加速度495Galで2E波として入力した。

地層構成地盤定数を表2に示す。土の構成式は三次元に拡張したRamberg-Osgoodモデルとおわんモデルを併用⁹⁾した。基準せん断ひずみ_{0.5}、最大履歴減衰率 h_{max} は土質やN値から標準的な値を設定した¹⁰⁾。液状化強度曲線を図6に示す。

コンクリート強度27N/mm²、鋼管SKK400としてコンクリート充填鋼管杭(靱性杭)の M -曲線(図10)を断面解析により求め、骨格曲線をトリリニアで表し、履歴則として修正武田モデルを用いた。

図5には杭伏せ図も示すが、杭P1(A通,C通)、杭P2(B通)の常時軸力はそれぞれ4000kN、6500kNである。上杭の杭種は、コンクリート充填鋼管杭(1000, t12, 長さ10.6m(GL-12.4m))とし、下杭の杭種は場所打ち杭(軸部1300)とし、常時軸力下の杭の非線形性を考慮した。

3.2 応答結果と考察

図7に地盤の最大せん断ひずみ分布を示す。液状化層(GL0~-10.4m)では約2~3%のひずみが発生しており、過剰間隙水圧比は99%以上に達している。図8に4つの杭(A1,A5,B1,B5)の最大曲げモーメント分布を示す。GL-10.4mの液状化層下部で基礎縁の杭(A1,B1)の M_{max} が若干大きくなっているが全体の分布形状は似ている。図9に隅杭A1の M -履歴を示すが靱性杭としてエネルギー吸収が大きいことが分かる。図10は隅杭A1の M -関係であり、プロットは最大応答結果である。実線で示した M -関係は $M=5700kN$ が最大耐力であり性能を保証する意味でそこまでしか描いていないが、靱性杭ではそれより大きな M になっても徐々に

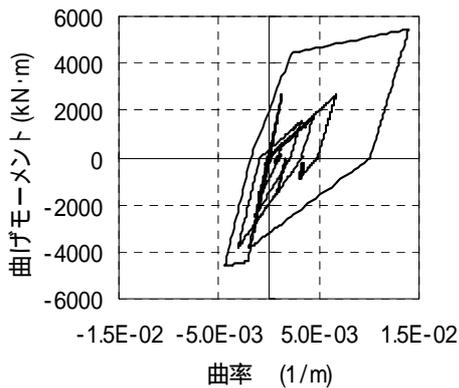


図9 隅杭 A1 の M - 履歴

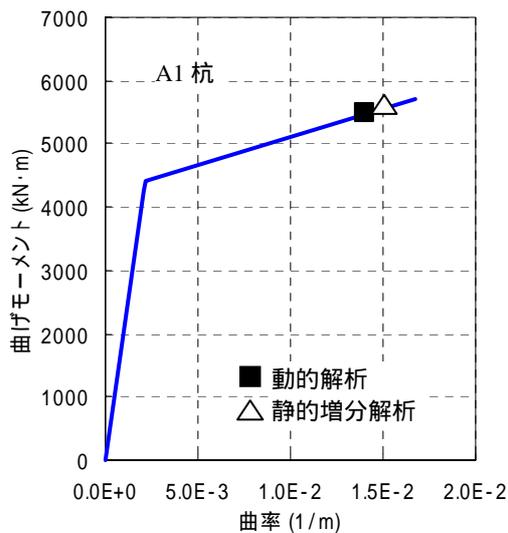


図10 隅杭 A1 の M - 関係

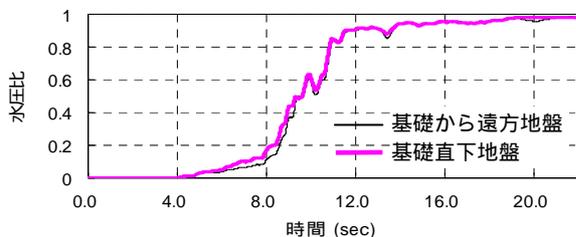


図11 過剰間隙水圧比の時刻歴

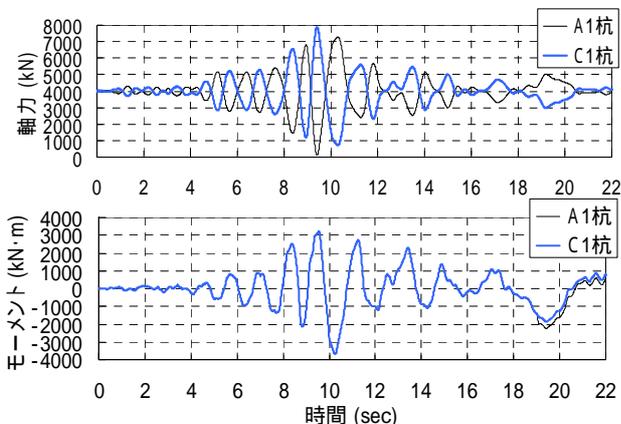


図12 隅杭(A1,C1)の軸力と曲げモーメント時刻が低下するので、実状はなだ相当な余裕がある。

プロットは静的増分解析であり動的結果よりもやや大きな値となっている。静的増分解析は次章で述べる

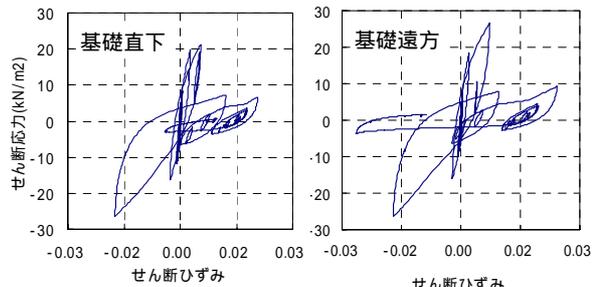


図13 砂層のせん断応力 せん断ひずみ関係

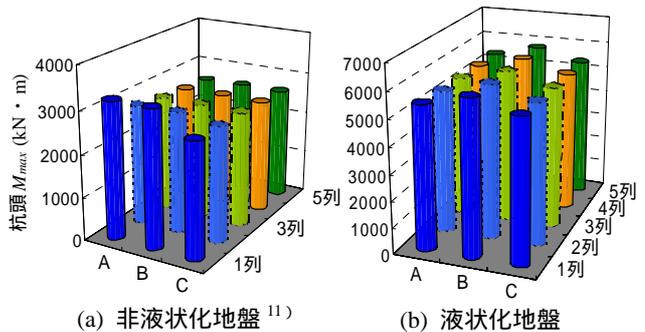


図14 全杭頭の曲げモーメント M の最大分布

が、ここでは液状化地盤ばねの軽減率を0.1とそている。なお動的解析と条件を同じにするため変動軸力は考慮していない。

図11 過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。場所による差異はあまりなく、12秒で液状化に至っている。それに伴い図12に示す軸力 N や曲げモーメント M の波形も長周期になっている。 M が19秒付近で大きくなっているのは地盤の変形がこの時点で大きくなっているためである。隅杭 A1, C1 の変動軸力は常時軸力の2倍の幅(±400kN)で大きく変動しており、引抜き時には軸力がほぼゼロとなっている。次章ではこの変動軸力を考慮した設計を行っている。図13に砂地盤の応力 ひずみ関係を示すが、基礎遠方に比べ基礎直下の方がややひずみが小さくなっている。

図14に全杭頭の曲げモーメントの最大分布を示す。図中(a)は文献¹¹⁾に示す粘土が主体の非液状化地盤の結果である。非液状化地盤では基礎縁に位置する杭 A1, B1, C1 で M が大きくなっているが、液状化地盤の場合は杭位置による差異はあまり見られない。これは杭体の塑性率が大きく荷重が頭打ちになったことと、余裕のある杭に荷重の再配分が起こっているためである。

4. 静的増分解析による変形設計

動的解析により靱性杭の液状化時の挙動を明らかにした。しかし設計では動的解析はほとんど行われず静的解析が中心である。よって本章では変動軸力も考慮した静的解析により、異なる杭種の検討を行った。

4.1 設計条件

変形解析に用いる静的増分解析では、各杭の変動軸力を考慮した。図12などの結果に基づき、中柱(B 杭)は

常時軸力 6500 kN で変動軸力 0 kN ,側杭(A,C 杭)は常時軸力 4000 kN で変動軸力 ±4000 kN として、杭基礎全体をモデル化した。杭は梁要素で、杭体と地盤間はばねでモデル化した。杭位置で異なる軸力を考慮した M - 関係により非線形性を考慮し、基礎全体の杭モデルを作成した。各層で異なる地盤剛性を反映した地盤ばねは N 値から建築基礎構造設計指針に従って求めた。1 次設計の地盤ばねの低減率は 0.6 , 2 次設計の液状化層の低減率を 0.1 と仮定した。

変形設計に用いる地震外力は、杭頭荷重(前述の動的解析の 1 階の層せん断力で水平震度:0.28 相当)と強制地盤変位(動的解析の遠方地盤の変位で地表面変位:22cm)を同位相で重ね合わせた。動的解析では変動軸力は考慮していないため、ここでの杭諸元は動的解析とはやや異なっているが、表 3 に示す 3 種類の杭径・材料強度を用いて各杭の検討を行った。上杭長は液状化層を貫通する長さとした。

表 3 3 種の杭断面の条件 (2 次設計)

杭種	上杭の径 (mm)	板厚 (mm)	上杭長 (m)	下杭の径 (m)	下杭長 (m)
SC 杭 Fc(105N/mm ²)	1000 (SC)	10 (SKK490)	10	1000 (PHC,B 種)	24
RC 杭 Fc(30N/mm ²)	2000 (36-D35)	-	10	1300 (16-D25)	24
RCS 杭 Fc(30N/mm ²)	1100	14 (SKK490)	10	1300 (16-D25)	24

4.2 結果の考察

側杭の押し込み(A 杭),引抜き杭(C 杭)に関して、2 次設計に対応する杭頭の曲げモーメント M と曲率の関係を杭種ごとに表すと、図 15, 16 のようになる。表 3 に示す断面を用いると、いずれの杭種も押し込みで曲げモーメントが厳しくなっている。靱性杭は前述した実験結果からも分かるように最大耐力後の耐力低下は小さく、建物荷重を十分に支えることができることから、SC 杭や RCS 杭は RC 杭に比較して耐震の観点から安全余裕度がある。

側杭の杭頭曲げモーメントは RC 杭に対する比で表すと、表 5 に示すように SC 杭や RCS 杭の押し込み側の杭(A 杭)の低減は 50%程度であるが、引抜き杭(C 杭)では SC 杭の低減が 50%に対し、RCS 杭の低減は 25%に止まっている。これは SC 杭や RCS 杭の鋼管の板厚の差異によると考えられる。中杭の杭頭の曲げモーメントは RC 杭との比で表すと、表 4 に示すように 1 次設計で SC 杭や RCS 杭のモーメントは 3 割、2 次設計で 5 割程度小さい。すなわち靱性杭を用いることで 1 次設計でもメリットがあることが分かる。

基礎の合理化の観点から見れば、耐力杭より靱性杭のパフォーマンスが良い。常時軸力が 1000 kN 以上の荷重に対しては現状では SC 杭で対応できないため、RCS 杭が必要となるが、当該建物のように 1000 kN 以下で

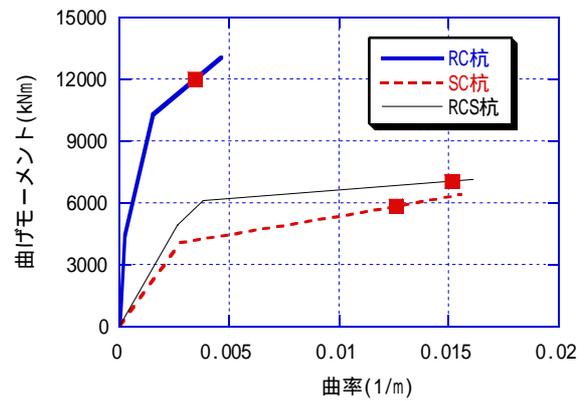


図 15 押し込み側杭の杭頭の曲げモーメントと曲率(軸力 8000kN)の関係 (2 次設計)

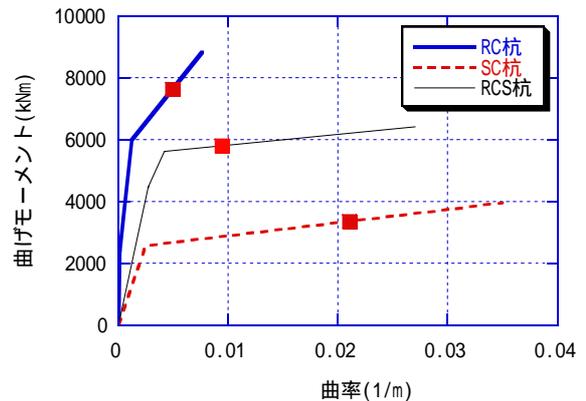


図 16 引抜き側杭の杭頭の曲げモーメントと曲率(軸力 0kN)の関係 (2 次設計)

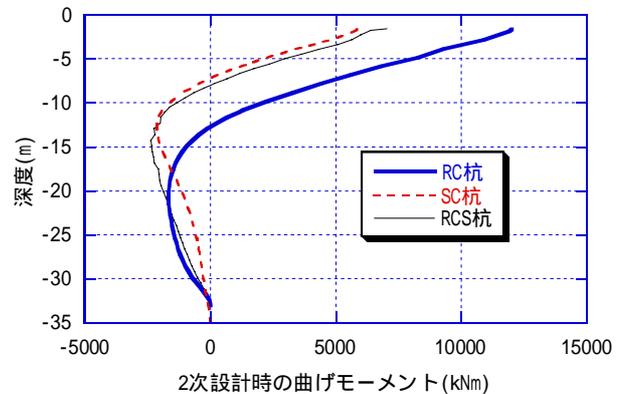


図 17 杭の曲げモーメント分布 (2 次設計)

は SC 杭が優れている。

図 17 に側杭(A 杭)の曲げモーメント分布図を示す。SC 杭と RCS 杭は杭頭が半剛接剛の挙動に類似している。このことは、接合部での工夫無しに杭頭部で引抜きに強い半剛接が実現できることを意味している。

表 4 中杭の杭頭部の曲げモーメントの RC 杭に対する比

	RC 杭	SC 杭	RCS 杭
1 次設計	1	0.63	0.78
2 次設計	1	0.48	0.54

表5 側杭の杭頭部の曲げモーメントの
RC杭に対する比(2次設計)

	RC杭	SC杭	RCS杭
側杭A(押込み)	1	0.48	0.58
側杭C(引抜き)	1	0.44	0.75

7. おわりに

ここでは変形性能型の杭設計法の構築を目指し、材料の塑性域を活用した杭の設計を図った。靱性の大きな杭構造としてコンクリート充填鋼管杭を設定し、 M -関係、限界曲率、を求め、設計に必要な定式化を行った。これに基づいた三次元動的解析や静的解析から、靱性杭は従来のRC杭に比べて合理的でかつ安全余裕度があり、液状化地盤においても適用できることが分かった。「合理的」とは、杭径が小さく発生モーメントも小さいことを言う。さらに靱性杭は杭頭が半剛接剛の挙動に類似しており、接合部での工夫無しに杭頭部で引抜きに強い半剛接が実現できる。すなわち基礎の合理化の観点から見れば、耐力杭より靱性杭のパフォーマンスが良い。

以上のことより、大地震時の杭体損傷を最小限に抑えるためには、安全余裕度の高い変形性能に富んだ靱性杭は有効であるといえる。

参考文献

- 1) 日本建築学会(2000): 基礎の調査・補強・耐震設計の課題, 日本建築学会近畿支部基礎構造部会
- 2) 村田清満・山田正人・池田学・瀧口将志・渡邊忠朋・木下雅敬(2000): コンクリート充填円形鋼管柱の変形性能の再評価, 土木学会論文集 No.640/-50, pp.149-163
- 3) Yasuo Ichinohe, *et al.* (1991): Elasto-plastic Behavior of Concrete Filled Steel Circular Columns, ASCCS

(Association for International Cooperation & Research in Steel-Concrete Composite Structure), pp.131-136

- 4) 上田弘樹・松谷輝雄・中島将好・澤田誠一郎(1989): 充填型鋼管コンクリート柱に関する研究(その3), 円形断面の軸力曲げせん断実験 L,Hシリーズ, 建築学会大会, pp.1617-1618
- 5) 佐藤孝典・中村康一・黒瀬行信・渡辺泰志(1989): 充填型鋼管コンクリート柱に関する研究(その3), 円形断面の軸力曲げせん断実験 Mシリーズ, 建築学会大会, pp.1619-1620
- 6) 山田・坂恵 他(1975): 軸圧をうけるコンクリート充填鋼管柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究, 建築学会論文報告集第233号, pp.95-100
- 7) 新都市ハウジング協会(2000): CFT長柱の曲げせん断実験報告
- 8) 石出 他(1996): コンクリート充填円形鋼管柱の弾塑性性状に関する研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1011-1012
- 9) 福武毅芳(1997): 土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究, 名古屋工業大学博士論文
- 10) 今津雅紀・福武毅芳(1986) 礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会, pp.509-512
- 11) 福武毅芳・大槻明・田中宏征・中井正一(2004): 高い変形性能を有する杭の耐震性評価 その2 靱性杭を有する建物の三次元非線形応答解析, 日本建築学会大会学術講演概要集, 構造 II, pp.723-724