

改良型高靱性能耐震ジョイント杭の液状化による地盤の側方移動に対する応答

宮坂享明¹・三浦房紀²・平田大三³

¹正会員 大同コンクリート工業(株)施工技術部(〒130 東京都墨田区両国2丁目10番14号)
山口大学大学院 工学研究科博士後期課程(〒755 山口県宇部市常盤台2557)
²正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科(〒755 山口県宇部市常盤台2557)
³学生会員 山口大学大学院 工学研究科博士前期課程(〒755 山口県宇部市常盤台2557)

筆者らは前論文「高靱性能耐震ジョイント杭の開発とその側方移動する液状化地盤に対する応答」において、新しく開発した高靱性能耐震ジョイントを用いた杭の曲げ特性を明らかにし、液状化によって側方に移動する地盤に対するその応答を限られた条件下で解析することによって、その有効性を報告している。本研究は、さらにたわみ性を持たせるように高靱性能耐震ジョイントを改良し、これを用いた杭の曲げ特性をまず明らかにした。そして数値解析法の精度を確認した後、高靱性能耐震ジョイントのタイプ、液状化層厚、杭頭固定度、杭の支持層への根入れ深さなどについてパラメトリックスタディを行った。その結果、全ての場合に対して改良型高靱性能耐震ジョイントが有効であることが明らかになった。

Key Words : pile foundation, high ductility, spliced pile, liquefaction, lateral ground displacement

1. まえがき

地震による地盤変位には斜面崩壊や地滑り、あるいは液状化による地盤のクラック、沈下、側方移動などが挙げられる。特に液状化に伴って発生する地盤の側方移動は、時には数メートルにも達することがあり、これによって地上構造物だけでなく地中構造物も被害を受けて破壊する事例が多く報告されている¹⁾。杭もその例外ではなく、地盤の側方移動に起因する破壊例も多く報告されている^{2)~4)}。

この様な背景の下で筆者らは、杭がその支持力を失うことなく、地盤の大変形に対しても追従できるようなジョイント杭の開発を行い、その基本的な特性および有効性に対して検討を行った⁵⁾。すなわち、まず新しく開発した高靱性能耐震ジョイントの基本構造を説明し、このジョイントを用いた杭径400mmの高強度プレストレスコンクリート杭の曲げ性能特性を実験的に明らかにした。そして幾何および材料の両非線形性を考慮に入れた解析手法を用いて、曲げ性能試験結果が精度良くシミュレーションできることを示した。さらにその解析手法を用いて液状化による地盤の側方移動に対する高靱性能耐震ジョイント杭の応答特性を解析し、通常の杭に比べて約2倍の地盤変位に対して杭が破壊しないこと

を明らかにした。

しかしながら前論文の段階では杭径が400mmの1種類であり、地盤モデルも1種類であった。したがって高靱性能耐震ジョイントの有効性を明らかにするには異なる杭径、異なる特性、異なる地盤条件に対して幅広く検討をするという重要な課題が残されていた。

そこで本研究では、まず前論文で検討した高靱性能耐震ジョイント(以下これをXタイプと呼ぶ)と、これをさらに大きな変形に対しても追従できるように改良を加えたもの(Yタイプと呼ぶ)とを杭径600mm用に開発し、これらを用いた杭の曲げ特性を軸力-曲げ試験によって明らかにした。次に前論文で用いた解析手法を用いて軸力-曲げ試験の結果を精度良くシミュレーションできることを再確認した。そして高靱性能耐震ジョイントのタイプ、液状化層厚と非液状化層厚の比、杭頭固定度、支持層への杭の根入れ深さなどをパラメータに、これらが杭の応答に及ぼす影響を詳しく調べ、高靱性能耐震ジョイントを用いた杭の有効性を確認できたのでここに報告する。

2. 杭の曲げ試験の概要

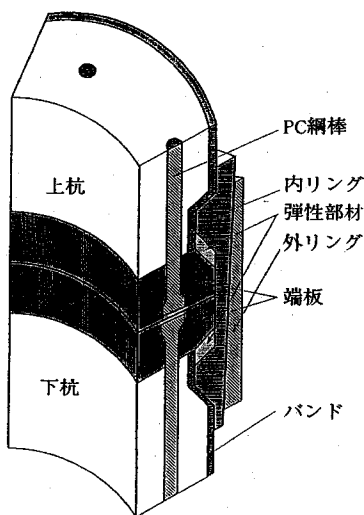


図-1 高靱性能耐震ジョイント

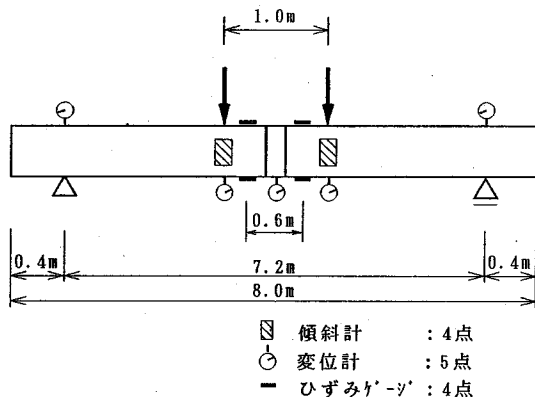


図-2 実験の概要

(1) 改良型高靱性能耐震ジョイント

高靱性能耐震ジョイントの断面を図-1に示す。高靱性能耐震ジョイントは基本的に端部金具、弾性部材(減衰ゴム)、円周方向に4つに分割されている内リング、円環状の外リングから構成される。高靱性能耐震ジョイントは、弾性部材の厚さを変化させることにより杭と杭の継手部での変形量を制御することが可能である。この弾性部材の厚さを2mmとしたものが前論文で検討の対象としたXタイプ高靱性能耐震ジョイントであり、4mmのものが本論文で新しく検討の対象とする改良型高靱性能耐震ジョイント、すなわちYタイプ高靱性能耐震ジョイントである。以下、表記の簡便を計るためこれら2種類の高靱性能耐震ジョイントを用いた杭をそれぞれ「ジョイント杭X」、「ジョイント杭Y」と呼び、継手を用いない杭を「杭本体」と呼ぶ。

表-1 実験ケース

実験ケース	杭径 (mm)	軸力 (tf)	杭長 (m)	継手の有無及びタイプ
1	400	0	12.0	無(N) *
2			8.0	有(X) *
3			8.0	有(Y)
4		60	8.0	無(N) *
5				有(X) *
6				有(Y)
7	600	0	8.0	無(N)
8			8.0	有(X)
9			8.0	有(Y)
10		130	8.0	無(N)
11				有(X)
12				有(Y)

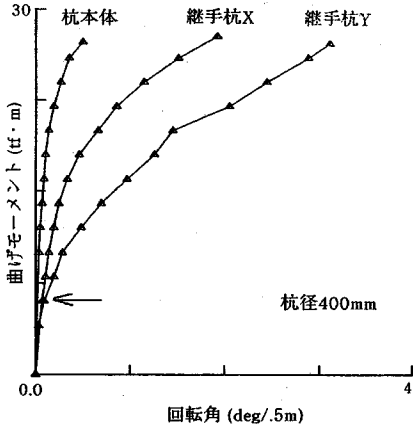
* 文献5)で報告済み

表-2 実験結果

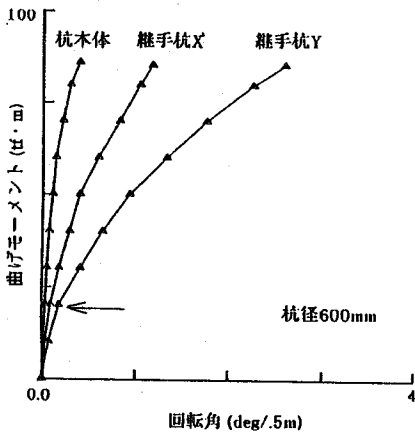
実験ケース	終局モーメント M_u (tf·m)	中央たわみ (mm)	回転角 (deg/5m)
1	19.5	96	0.78
2	19.2	131	2.01
3	19.7	166	3.67
4	27.3	68	0.51
5	27.8	108	1.80
6	26.7	162	3.09
7	61.5	50	0.69
8	60.3	93	1.80
9	60.6	125	3.06
10	86.1	32	0.38
11	85.4	61	1.16
12	85.6	95	2.56

(2) 実験方法および実験ケース

ジョイント杭の曲げ変形特性を明らかにするために軸力-曲げ試験を行った。試験は図-2に示すように、スパン長7.2m、その中央に鉛直荷重を載荷して行う。高靱性能耐震ジョイントはスパン中央にセットする。測定項目は回転角 θ (4箇所)、ひずみ ϵ (4箇所)、たわみ δ (5箇所)であり、それぞれ傾斜



(a) 杭径400mm



(b) 杭径600mm

図-3 実験結果 (M-θ 曲線)

表-3 解析に用いた杭の曲げ剛性

実験ケース	曲げ剛性 (tf・m ²)
1, 2, 3	3995
4, 5, 6	4794
7, 8, 9	17867
10, 11, 12	21441

2に示す。図-3(a)は杭径400mm, (b)は600mmに対する結果である。ここで曲げモーメントMは載荷荷重や自重による曲げモーメントのほか、杭のたわみが相当大きいため、いわゆるP-Δ効果による曲げモーメントも考慮して求めた。また回転角θは傾斜計により測定した値を0.5m当りに換算したものである。図-3、表-2を見ると、終局モーメントは継手の有無、タイプに関わらずほとんど同じであるが、その時の回転角は相当異なる。図-3(a)の杭径400mmの軸力のない場合、杭本体に比べてジョイント杭Xが約2.6倍、ジョイント杭Yが約4.7倍となっている。軸力のある場合はジョイント杭Xが約3.5倍、ジョイント杭Yが約6.1倍である。図(b)の杭径600mmの軸力のない場合はジョイント杭Xが約2.6倍、ジョイント杭Yが約4.4倍である。一方、軸力のある場合ジョイント杭Xが約3.1倍、ジョイント杭Yが約6.7倍となっている。

いずれの場合もジョイント杭が杭本体より回転特性が大きくなっており、ジョイント杭Xは2.6~3.5倍、ジョイント杭Yは4.4~6.7倍と改良型のジョイント杭Yがジョイント杭Xより大きな回転特性を有することが明らかである。

常時に水平荷重が作用した場合、あるいは地震時に動的な地盤変位を受ける場合、杭本体に比べてジョイント杭の弾性領域における曲げ剛性が大幅に小さいと、弾性領域内においても許容変形量を超える心配がある。図-3中の矢印は弾性限界を示したものであるが、これらの図より明らかなように弾性域においては杭本体とジョイント杭の曲げ剛性はあまり変わらず、この心配は少ないと思われる。この点に関しては動的解析等により詳しい検討を今後行う予定である。

以上より、ジョイント杭は弾性域においては杭本体とほぼ同じような回転特性を有し、終局状態では杭本体の数倍の回転特性を有することが明らかとなった。

b) 数値シミュレーション

曲げ性能試験から曲げモーメントMと支点間中央

計、ひずみゲージ、変位計で測定する。それらの位置を図-2に併せて示す。実験は表-1に示す12ケース行った。杭径2種類、軸力のある場合と無い場合、およびそれぞれに対して継手のある場合と無い場合である。曲げ試験に用いた杭はPHC杭 (Prestressed High strength Concrete Pile)のB種(プレストレス量=80kgf/cm²)である。

なお、ここで杭径を400mmと600mmとしたのは既製杭の大半がこの範囲内にある杭径を持つからである。

(3) 試験結果と数値シミュレーション

a) 実験結果

実験により得られた曲げモーメントMと回転角θの関係を図-3に、曲げ性能試験結果の一覧を表-

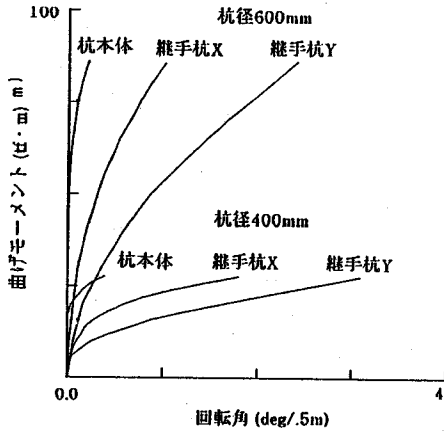


図-4 解析に用いたM-θ曲線

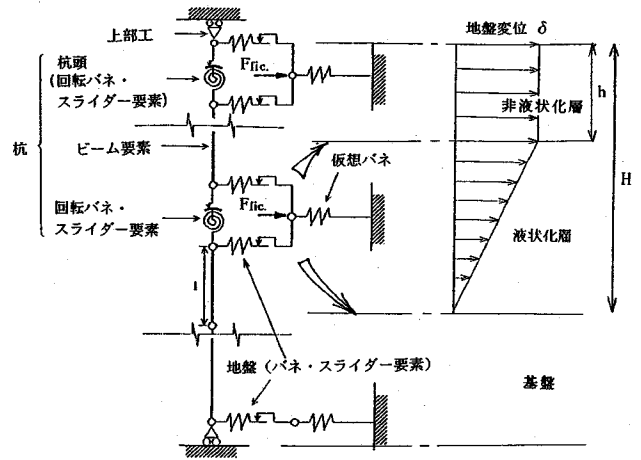
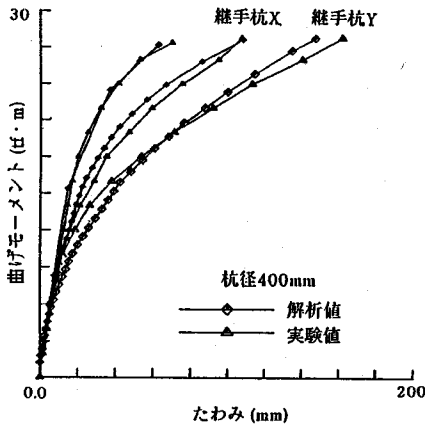
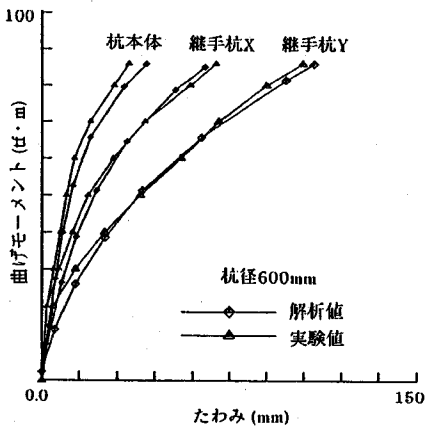


図-6 解析モデル



(a) 杭径400mm



(b) 杭径600mm

図-5 実験結果のシミュレーション

たわみ δ との関係が得られている。ここでは軸力のある場合についてこのM- δ 曲線を数値シミュレーションし、両者を比較することによって解析手法の妥当性を確認する。

ここで解析は大変形を取り扱うため杭の幾何学的非線形性と杭の破壊現象、すなわち塑性ヒンジの出現を表現するために、杭の材料非線形性を考慮したモデルを用いて解析を行う必要がある。すなわち杭は高靱性能耐震ジョイントの有無に関係なく、幾何学的非線形性を有するビーム要素と非線形な曲げモーメント-回転角関係を有する回転バネ・スライダ要素を交互に直列に配列することによってモデル化し解析を行った。ビーム要素の曲げ剛性を表-3に示す。解析に用いる回転バネ・スライダ要素の回転特性は、図-3の曲げモーメント-回転角関係からビーム要素による弾性回転角を差し引いた値を用いる。これを図-4に示す。これら解析手法の詳細は文献5)を参照されたい。

軸力のある場合の曲げ性能試験から得られたM- δ 曲線と数値シミュレーションから得られたM- δ 曲線を併せて図-5に示す。図(a)は杭径400mm、図(b)は杭径600mmの結果である。これらの図から試験結果と解析結果は降伏するまでよく一致していることが分かる。これにより本研究に用いた解析手法の妥当性を確認することができた。

次章のパラメトリックスタディではこれらの物性値、および解析手法を用いて行う。

3. 地盤の側方移動に対する杭の応答

(1) 解析モデルと解析ケース

a) 解析モデル

本研究で用いる解析モデルを図-6に示す。地盤は表層厚が一定の $H=1.2\text{m}$ とし、基盤への根入れ深さ l_b は $0.5\text{m}\sim 1.5\text{m}$ とする。また地表面非液状化層厚を h とし、ここでは地盤変位は直線的に変化し、その上の非液状化層の地盤変位分布は一定であるとする。すなわち地盤変位は台形分布とし、振幅を徐々に増大させる。また、新潟地震の際の杭の被害例を見ると、杭の破壊は液状化層と非液状化層との境界の位置に生じている。このことから、高靱性能耐震ジョイントは杭の破壊が予想される位置、すなわち液状化層と非液状化層との境界に配置した。以下において上側境界、下側境界という言葉を使うが、前者は液状化層とその上の非液状化層との境界、後者は液状化層とその下の基盤との境界を意味する。したがって、上側境界の位置は層厚比 h/H の値によって変わるが、下側境界の位置は変わらない。

なお、地盤の材料非線形特性はバイリニアを仮定し、その降伏強度、降伏変位の与え方、および地盤バネのモデル化は文献5)と同じである。本研究では杭の材料非線形性、幾何学的非線形性、地盤の材料非線形性という3つの非線形性を扱っているので、地盤の変位増分は極めて僅かでなければ解が発散する。ここでは 1m の地盤変位に対して500ステップの変位増分を与えた。

b) 解析ケース

パラメトリックスタディには以下のパラメータを用いた。

1) 杭径

外径 400mm 、 600mm の2種類とする。

2) 継手

継手無し(杭本体N)、Xタイプ、Yタイプの3種類とする。

3) 液状化層厚比

表層 H に対する液状化層厚 h の層厚比 h/H を $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 0 の4種類とする。

4) 杭頭固定度

杭頭固定度は 100% (剛結)、 50% 、 0% (ヒンジ結合)の3種類とする。杭頭固定度の定義は文献5)と同じである。

5) 根入れ深さ

根入れ深さ l_b は杭径 400mm の場合 0.5m と 1.0m の2種類とし、杭径 600mm の場合 1.0m と 1.5m の2種類とする。(根入れ深さ)/(杭径)に換算すると、杭径 400mm の場合 1.25 と 2.5 となり、杭径 600mm 場合は 1.67 と 2.5 になる。

(2) 解析結果

a) 層厚比 h/H の変化による曲げモーメント分布の変化

杭径 400mm の場合の杭本体およびジョイント杭Yの曲げモーメント分布をそれぞれ図-7、図-8に示す。図(a)が杭頭固定度 100% 、(b)が 50% 、(c)が 0% に対するものである。図中の破線は終局モーメント M_u を表している。曲線は杭のどこか一点が降伏したときの分布を示したものである。したがって1点で破線に接している。降伏しない場合には値が一定に落ち着いたときの分布を示している。

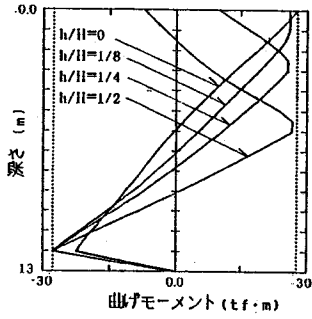
これらの図を概観すると曲げモーメントの極大値は層厚比の大小に関係なく、また杭頭固定度にも関係なく液状化層と非液状化層の境界付近に発生することがわかる。また層厚比 $h/H=0$ の場合を除き、いずれの場合も下側境界が上側境界よりも先に杭が降伏しているのが分かる。

固定度 100% の場合、 $h/H=1/2$ 、 $1/4$ のとき杭本体、ジョイント杭のいずれにおいても杭頭付近の曲げモーメントはそれほど大きくなく、この付近で塑性ヒンジが生じる可能性は低い。ところが h/H が小さくなるにしたがって杭頭部付近の曲げモーメントは大きくなり層厚比が 0 になると下側境界より先に降伏し塑性ヒンジがここに生じる。

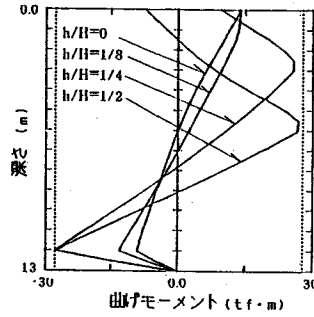
固定度 50% の場合には杭頭の降伏モーメントは固定度 100% のときの $1/2$ であるが、杭本体、ジョイント杭Yともに $h/H=1/2$ 、 $1/4$ のときは固定度 100% の場合と同様になる。しかし $h/H=1/8$ 、 0 のときには上側境界ではなく杭頭が降伏し、ここに塑性ヒンジを生じる。

固定度 0% 、すなわち杭頭がヒンジの場合には当然杭頭モーメントは 0 であるが、 $h/H=1/2$ 、 $1/4$ のときには杭本体、ジョイント杭Yともに上側境界でのモーメントは固定度 100% の場合と同じく終局モーメントに近い値となっている。ところが $h/H=1/8$ 、 0 のときには、杭本体の曲げモーメントは下側境界で降伏はするものの、その他の場所では小さい。一方、ジョイント杭Yでは、下側境界では降伏モーメントに近い値ではあるが、降伏に至っていない。しかも上側境界では曲げモーメントが小さく、どの場所においても降伏しない。したがって、これら2本の曲線は M_u 線に接していない。

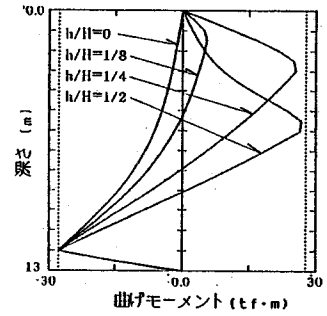
杭径 600mm の場合の杭本体、ジョイント杭Yの曲げモーメント分布をそれぞれ図-9、図-10に示す。図(a)が固定度 100% 、(b)が 50% 、(c)が 0% である。まず 400mm の場合との大きな違いは下側境界ではどの場合も降伏せず、上側境界だけで降伏が生じているという点である。これは、杭径 600mm に



(a) 杭頭固定度 100%

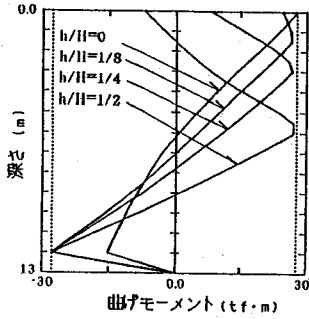


(b) 杭頭固定度 50%

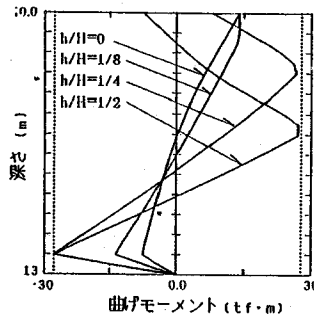


(c) 杭頭固定度 0%

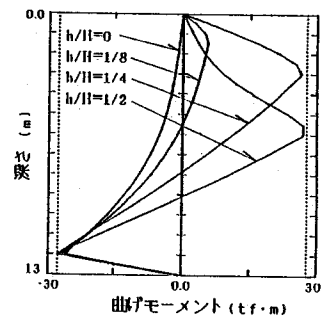
図-7 曲げモーメントの分布；杭本体、杭径 400 mm



(a) 杭頭固定度 100%

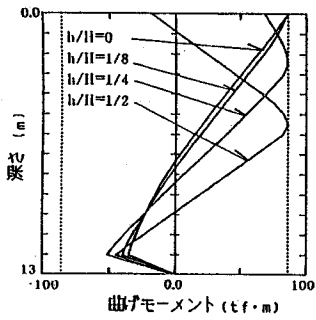


(b) 杭頭固定度 50%

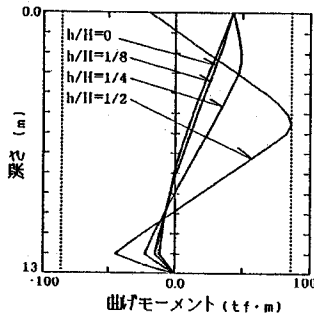


(c) 杭頭固定度 0%

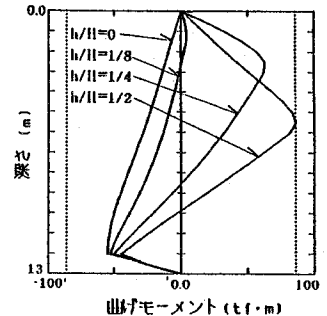
図-8 曲げモーメントの分布；継手杭 Y、杭径 400 mm



(a) 杭頭固定度 100%

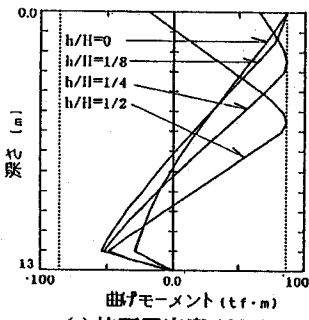


(b) 杭頭固定度 50%

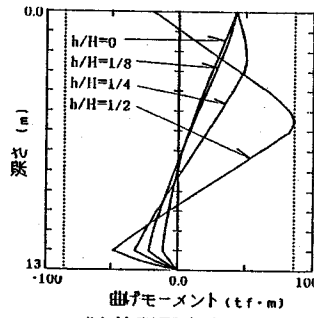


(c) 杭頭固定度 0%

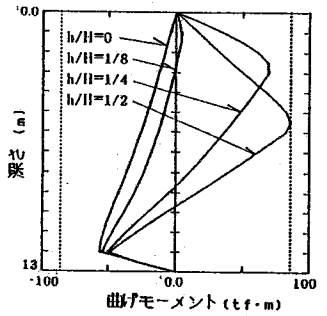
図-9 曲げモーメントの分布；杭本体、杭径 600 mm



(a) 杭頭固定度 100%



(b) 杭頭固定度 50%



(c) 杭頭固定度 0%

図-10 曲げモーメントの分布；継手杭 Y、杭径 600 mm

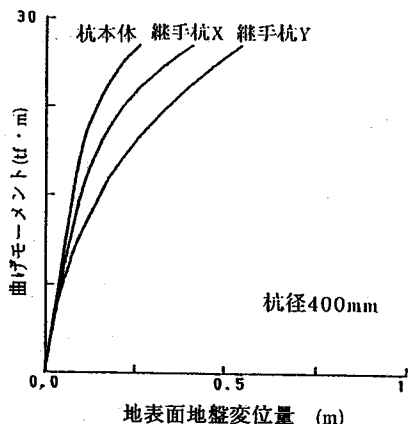
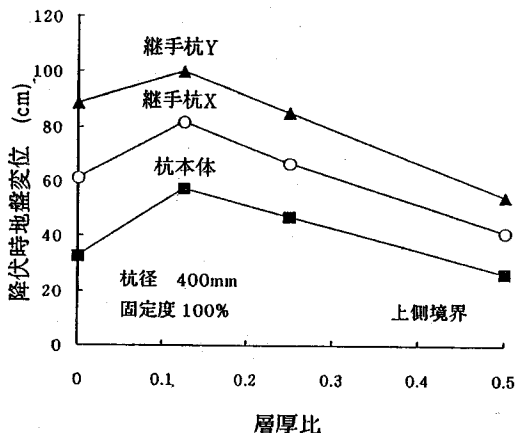
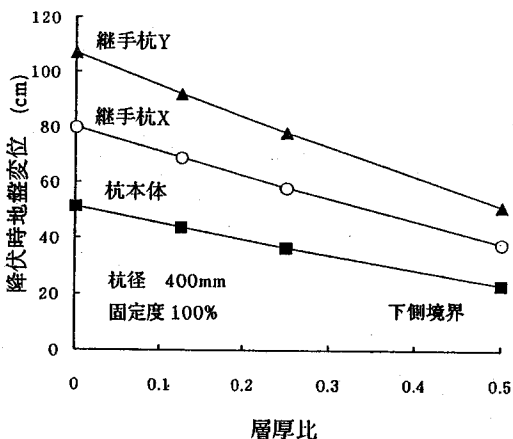


図-11 曲げモーメント-地盤変位の関係



(a) 上側境界



(b) 下側境界

図-12 降伏時地盤変位量；杭径400mm
杭頭固定度 100%

対して根入れ深さが1mと浅いため、下側境界で塑性ヒンジを生じさせるだけの拘束が基盤で発揮されなかったためである。また上側境界でも同様の理由によっての場合ほど降伏を生じていない。

b) 降伏時地盤変位量

図-7(a)と8(a)の曲げモーメントを比較するとほぼ同じに見えるが、変位応答ではかなり異なる。

図-11は杭径400mm、杭頭固定度100%、層厚比 $h/H=1/2$ の場合の上側境界における杭の曲げモーメントと地盤の地表面の変位の関係を示したものである。図より、杭本体は地盤の変位が26.5cmで終局モーメントに達して塑性ヒンジを生じている。これに対してジョイント杭Xは41.3cm、ジョイント杭Yは54.5cmと塑性ヒンジの生じる地盤変位は大きくなっている。すなわち改良型のジョイント杭Yは杭本体に比べ約2倍の地盤変位に対しても追従できることが分かる。

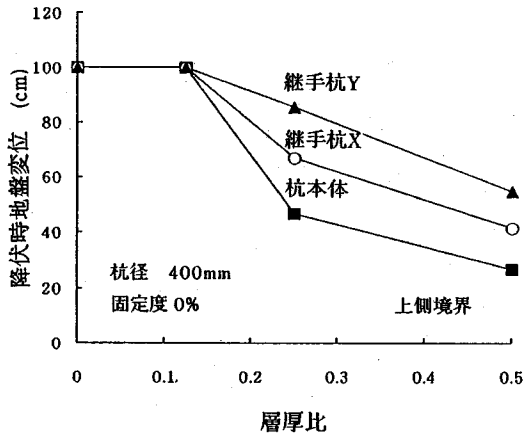
以下、杭に塑性ヒンジが出現する時の地表面における地盤の変位を降伏時地盤変位量と称する。継手の有無やジョイントのタイプ、層厚比による降伏時地盤変位量への影響を見るために杭径400mmの場合の杭頭固定度100%と0%の降伏時地盤変位量をそれぞれ図-12、図-13に示す。

図-12(a)、13(a)は上側境界に対する降伏時地盤変位量を、図-12(b)、13(b)は下側境界に対するそれらをまとめたものである。

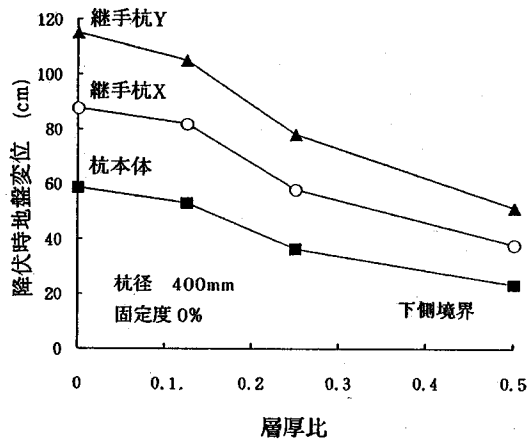
まず固定度100%の図-12を概観すると、上側、下側両境界とも杭本体に比べジョイント杭Xは約1.5倍、ジョイント杭Yは約2倍の降伏時地盤変位となっている。また上側境界の $h/H=0$ を除けば h/H が小さいほど降伏時地盤変位は直線的に大きくなっている。そして僅かではあるが、上側境界に対する降伏時地盤変位の方が下側境界に対するそれらより大きくなっている。これは図-8(a)において下側境界で曲げモーメントが M_u に達したときに上側境界の曲げモーメントは僅かに M_u より小さいことから分かる。

上側境界の降伏時地盤変位が、 $h/H=0$ のときの方が $1/8$ のときよりも小さくなるのは、 $h/H=1/8$ の場合には杭に生じる曲げモーメントが上側の非液化化層全体にはほぼ等しく分布、すなわち曲げモーメントの集中が緩和されているのに対し、 $h/H=0$ の時には杭頭に曲げモーメントが集中しているためである(図-7(a)の $h/H=0$ の曲線を参照)。したがって塑性ヒンジの出現順番が他の場合と異なって、まず上側境界(杭頭)で出現し、次に下側境界で生じている。

次に固定度0%の図-13を見る。下側境界の図(b)



(a) 上側境界



(b) 下側境界

図-13 降伏時地盤変位量；杭径400mm
杭頭固定度 0%

は図-12(b)に比べ多少の変動はあるものの、基本的には同じ傾向にある。一方、上側境界の図(a)は $h/H=1/2$, $1/4$ では図-12(a)とほとんど同じであるが $h/H=1/8$ と 0 ではずいぶん異なる。

$h/H=1/8$ の場合は、まず下側境界で塑性ヒンジが生じるが、それより少し小さい地盤変位で上側境界の曲げモーメントは頭打ちになる。そしてその後の地盤変位の増大に対しては下側境界の塑性ヒンジと杭頭のヒンジが回転する事によってもはや曲げモーメントは増大せず、結局上側境界では塑性ヒンジは生じない。これはN, X, Yいずれのタイプに対しても共通である。

$h/H=0$ の時、すなわちこの場合上側境界は杭頭と

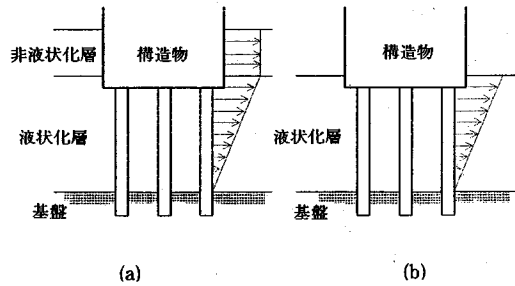


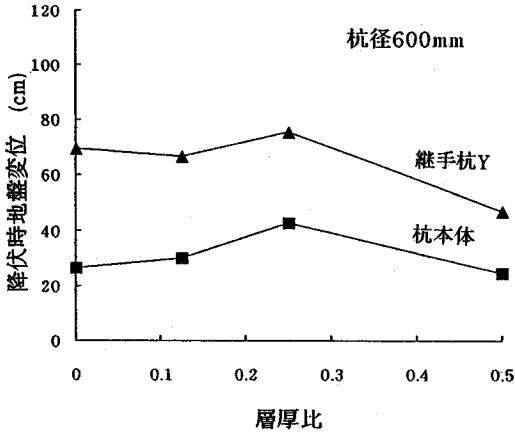
図-14 構造物-杭系と液化化層の関係

一致するが、杭頭固定度は0%すなわちヒンジであるから杭頭での曲げモーメントは常に0である。したがって下側境界で塑性ヒンジが生じるまでは、杭は下端固定の片持ちばり的な挙動をするが、その後は $h/H=1/8$ と同様な挙動を示す。

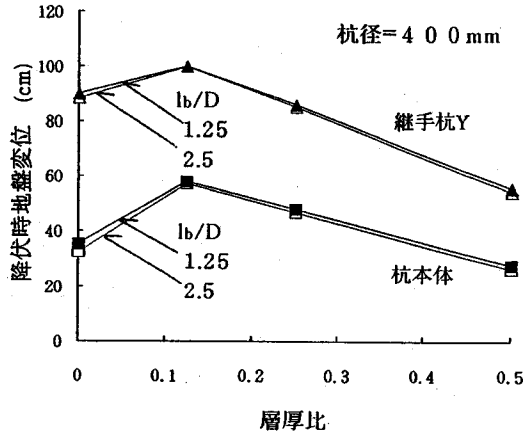
ところで以上に示した解析は表層全てが液化した場合 ($h/H=0$) でも杭が支えている構造物が液化化地盤と一緒に側方に移動するという仮定のもとに、杭頭の変位を地盤と同じだけ強制的に変位させている。例えば図-14(a)のように構造物が比較的厚い非液化化層に根入れされており、杭頭以深が液化している場合がこの様な場合に相当する (杭に対しては $h/H=0$ と同じ)。しかしながら図-14(b)のように構造物が直接液化化層上にある場合には液化化地盤は構造物の下の杭の間をすり抜けていくことが考えられる。この様な場合には液化化地盤から杭に作用する力は小さく、杭の応答は上述の結果とはずいぶん異なることが考えられる。

この様な観点から、杭頭に地盤と同じ強制変位を与えることをせず、非線形の地盤パネを通じて地盤から杭に力が作用するようなモデル化を行って杭径400mmの杭本体とジョイント杭Yに対して解析を行った。その結果杭頭固定度100%のとき杭に生じる最大曲げモーメントは杭本体は杭頭で $10.0\text{tf}\cdot\text{m}$ 、下側境界で $14.7\text{tf}\cdot\text{m}$ 、ジョイント杭Yはそれぞれ $12.6\text{tf}\cdot\text{m}$, $12.08\text{tf}\cdot\text{m}$ と終局曲げモーメントの $1/2 \sim 1/3$ であった。ちなみにその時の杭頭の変位は、杭本体が 12.3cm 、ジョイント杭Yが 16.2cm であった。

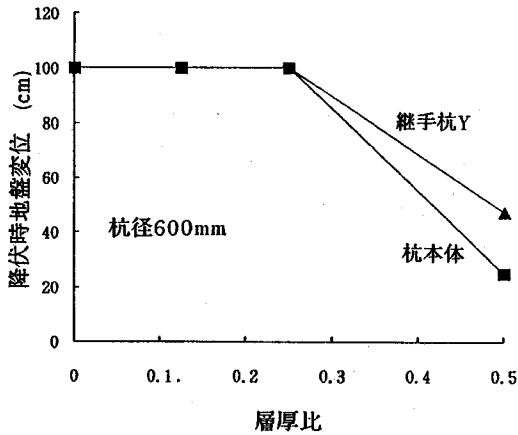
杭頭固定度0%の時の下側境界の曲げモーメントは杭本体が $2.45\text{tf}\cdot\text{m}$ 、ジョイント杭Yが $2.40\text{tf}\cdot\text{m}$ であり、これも降伏には至らない。しかし杭頭の変位はそれぞれ 38.6cm と 81.5cm でかなり大きいという結果が得られた。しかしながらいづれにしても全層液化化して、液化化地盤が杭間を流れる場合には、杭の破壊はむしろ生じにくいことがこれより分



(a) 杭頭固定度 100%

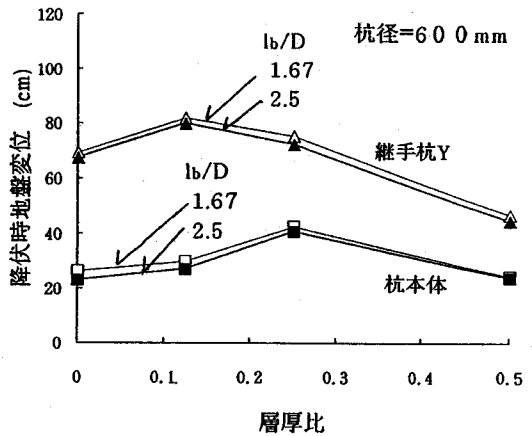


(a) 杭径400mm



(b) 杭頭固定度 0%

図-15 降伏時地盤変位量；杭径600mm



(b) 杭径600mm

図-16 降伏時地盤変位に及ぼす
根入れ深さの影響

かる。

c) 杭径の影響

前項b)では杭径が400mmの場合について詳しく検討を行ったが、杭径600mmのときその応答がどのように変化するかを見るために図-15(a)に杭頭固定度100%の際の上側境界における降伏時地盤変位を示す。この図よりジョイント杭Yの上側境界で塑性ヒンジの生じる変位は400mmの場合と同様に杭本体の約2倍であることが分かる。一方の下側境界のモーメントは終局モーメント86.1tf・mに達する前に約50tf・mで頭打ちとなり塑性ヒンジを生じない。

図-15(b)の杭頭固定度が0%の場合、 $h/H=1/2$ の場合にのみ上側境界が降伏して、他の $h/H=0$ 、

$1/8$ 、 $1/4$ の場合には上側、下側両境界とも降伏していない。 h/H が $1/4$ より小さい場合は杭先端はあたかもヒンジとしての挙動を呈し、これと杭頭のヒンジとに支えられた杭は剛体の棒のように地盤の側方移動に追随して回転している。この現象は杭本体に塑性ヒンジが生じることはなく、一見安全のように見えるが、杭基礎の安全性という観点からは必ずしも安定とはいえない。

d) 基盤への根入れ深さの影響

上述のように、杭径が400mmと600mmとでは同じ根入れ深さであっても塑性ヒンジの出現パターンがずいぶん異なっていた。それは特に下側境界で顕著であった。そこで根入れ深さと杭径の比を考える

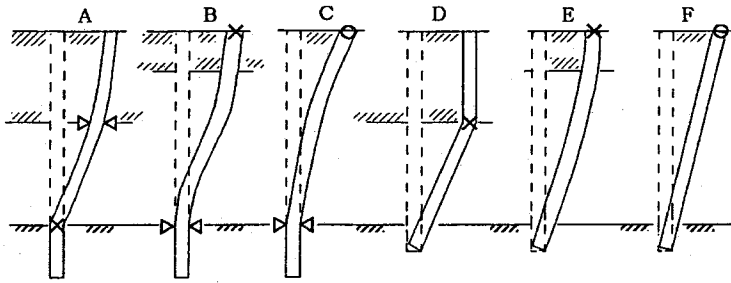


図-17 破壊パターン

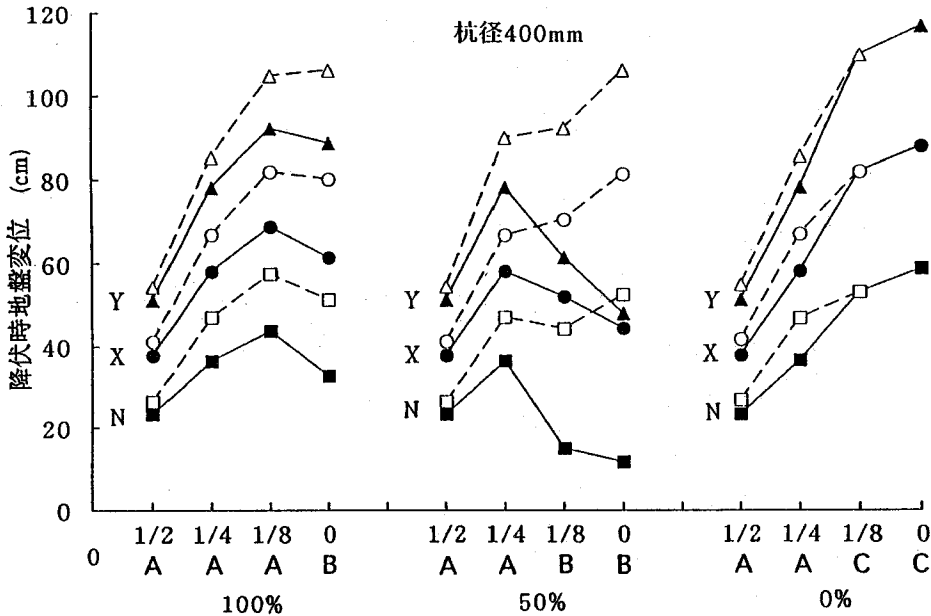


図-18 最初と2番目の塑性ヒンジの生じる地盤変位の比較

表-4 破壊パターン

杭頭固定度 (%)	層厚比 h/H	破壊パターン	
		浅い根入れ	深い根入れ
100	1/2	A	D
	1/4	A	D
	1/8	A	D
	0	B	E
50	1/2	A	D
	1/4	A	D
	1/8	B	E
	0	B	E
0	1/2	A	D
	1/4	A	F(D)
	1/8	C	F
	0	C	F

と400mm 杭の場合は $1.0/0.4=2.5$ ，600mm 杭の場合は $1.0/0.6=1.67$ となる。すなわち杭径600mmの方が相対的に根入れが浅い。そこで400mm杭に対しては0.5m，600mm杭に対しては1.5mと根入れ深さを変えて解析を行った。その結果，塑性ヒンジの出現パターンは全く逆転し，400mm杭の下側境界では降伏せず，600mm杭ではそのほとんどが上側，下側両境界で降伏した。すなわち塑性ヒンジの出現パターンは根入れ深さと杭径の比に強く依存する。

ところが，図-16(a)，(b)はそれぞれ400mm，600mmの杭本体，ジョイント杭Yの異なる根入れ深さに対して求めた上側境界における降伏時地盤変位であるが，これより根入れ深さによる差はほとんどないことが分かる。すなわち，根入れが浅い場合には杭の先端がヒンジの役割を果たすため，杭の応答は下側境界で塑性ヒンジが生じた場合とほとんど

ど同じになるためと考えられる。

(3) 安定性の評価

以上様々な角度から地盤の側方移動を受ける際の杭本体、ジョイント杭X、ジョイント杭Yの応答を検討してきた。ここでは塑性ヒンジの出現を破壊と考へて杭の安定性に関して考察を行う。本研究で行った解析の範囲では、塑性ひずみの発生パターン、すなわち破壊パターンは図-17に示す以下の6つのパターンに分類できる。

- A: 下側境界にまず塑性ヒンジが生じ、次に上側境界に生じるパターン。
- B: 杭頭にまず塑性ヒンジが生じ、次に下側境界に生じるパターン。
- C: 杭頭固定度0%の時、下側境界に塑性ヒンジが生じるパターン。
- D: 上側境界に塑性ヒンジが生じ、下側境界には生じないパターン。
- E: 杭頭に塑性ヒンジが生じ、下側境界には生じないパターン。
- F: 杭頭固定度0%の時、どこにも塑性ヒンジが生じないが、地盤の降伏が発生するパターン。

これらのパターンを杭頭固定度、層厚比、根入れ深さとの関係でまとめると表-4の様にきれいに分類できる。これよりパターンAとD、BとE、CとFが対応することが分かる。これは前項の根入れの影響のところで述べたことと整合する。なお、固定度100%、 $h/H=1/4$ の浅い根入れでF(D)としているのは、分類上はFであるが、杭に生じる曲げモーメントは終局モーメントに非常に近く、破壊パターンはDに非常に近いという意味である。

図-18は杭径400mmの杭に対して最初に生じる塑性ヒンジ(実線で連結)と2つめの塑性ヒンジ(破線で連結)の生じる時の降伏時地盤変位量をまとめたものである。図には併せて破壊パターンも記入してある。これよりどの破壊パターンに対しても、また最初のヒンジ、2つめのヒンジに対しても杭本体、ジョイント杭X、ジョイント杭Yの順で降伏時地盤変位が大きくなる事が分かる。換言すれば高靱性能耐震ジョイントを用いれば、ジョイントを用いない場合に比べてXタイプで約1.5倍、Yタイプで約2倍の地盤の側方移動量に対して杭が“ねばり”を発揮することが期待できる。なお、文献5)ではXタイプジョイントを用いることによって約2倍のねばりを発揮するという結果を得ている。これは杭長の違いによるもので、前回の場合表層の厚さが8.5mに対し、今回は12mである。このため杭本体の降伏時地盤変位量が今回は相対的に大きくなり倍

率は逆に小さくなったものである。

4. 結論

本研究は400mm杭用に既に開発済みの高靱性能耐震ジョイントと、これを改良したものを径400mmと600mmの杭用に開発しこれらを用いた高靱性能耐震ジョイント杭の曲げ特性を軸力-曲げ試験によって明らかにした。そして前回用いた解析手法がさらに大変形する改良型高靱性能耐震ジョイント杭に対しても精度良く軸力-曲げ試験の結果をシミュレーションできることを確認した。さらにこの数値解析法を用いてジョイントのタイプ、液状化層と非液状化層の層厚、杭頭固定度、支持層への根入れ深さなどを変化させてパラメトリクスタディを行い、これらの場合における高靱性能耐震ジョイントの有効性を検討した。

その結果、液状化層と非液状化層との層厚比や杭径、杭頭固定度などによって破壊パターンが6種類に分類できること、そしていずれのパターンに対しても高靱性能耐震ジョイントは有効であること、Yタイプ高靱性能耐震ジョイントが最も効果的であることなどが明らかになった。具体的には高靱性能耐震ジョイントを用いれば、ジョイントを用いない場合に比べてXタイプで約1.5倍、Yタイプで約2倍の地盤の側方移動量に対して杭が“ねばり”を発揮することがわかった。

今後に残された課題として、異なる地盤モデルにおける高靱性能耐震ジョイントの有効性、群杭としての挙動、さらに地震動に対する高靱性能耐震ジョイント杭の動的応答特性などに対する検討が必要である。今後もこれらの課題に対して引き続き研究を進めていく予定である。

最後に、本研究を進めるに当たって貴重な助言を頂いた早稲田大学浜田政則教授、東北大学杉村義広教授、茨城大学福沢公夫教授、米国コーネル大学T.D.O'Rourke教授に、また多大なご協力を頂いた無溶接継手杭研究会、並びに同研究会会長伊藤吉孝氏に心より感謝の意を申し上げる。

参考文献

- 1) Hamada, M. and T.D.O'Rourke: Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes, *Technical Report NCEER-92-0001, VOL.1 and 2, 1992.*
- 2) 河村壮一, 西沢敏明, 和田暉暎: 20年後の発掘で分かった液状化による杭の被害, *Nikkei Architecture, Vol. 7/29, pp.130-134, 1985.*
- 3) Hamada, M., S. Yasuda, R. Isoyama and K. Emoto: Study on

liquefaction induced permanent ground displacement, Association for the Development of Earthquake Prediction, pp.24-31, 1986.

4) 吉田望, 浜田政則: 地盤の永久変位による基礎杭の被害の解析, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 55-60, 1990.

5) 宮坂享明, 三浦房紀, 平田大三: 高靱性能耐震ジョイント杭の開発とその側方移動する液状化地盤に対する応答, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.201- 211, 1995.

(1995.1.30 受付)

BEHAVIOR OF HIGH DUCTILITY ASEISMIC JOINT SPLICED PILES SUBJECTED TO LIQUEFACTION-INDUCED LARGE GROUND DISPLACEMENTS

Takaaki MIYASAKA, Fusanori MIURA and Daizou HIRATA

In the previous study, a newly developed High Ductility Aseismic Joint (H.D.A.J.) was introduced. Meanwhile, a nonlinear FEM was proposed and then applied to examine the energy dissipating effect of H.D.A.J. spliced pile. In this study, two kinds of H.D.A.J. were mounted in two different diameter piles. The bending characteristics of these spliced piles were clarified by experiments. The validity of nonlinear FEM was reconfirmed by simulating the experiment results. A parametric study was performed to examine the effect of splicer types, stratum thickness, pile cap connectivity, pile tip embedded depth etc. on the spliced piles. In all cases, H.D.A.J. spliced piles were found to be effective subjected to liquefaction-induced large ground displacements.