

杭式長大栈橋の地震時杭断面力の 低減の方策に関する一考察

横井 孝征¹, 清宮 理²

¹学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555東京都新宿区大久保3-4-1)

²フェロー会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555新宿区大久保3-4-1)

Large scale pile -type marine structures such as marine air-port, pier, straight bridge and so on are proposed. When these structures are constructed at earthquake activity area, it is very important to estimate safety of structures during earthquakes and to find countermeasure for decrease of the sectional forces. This paper shows an example of calculation results by dynamic response analysis and validity of the counter measures by light weigh concrete slab or improvement of marine soft ground.

Key Words : large scale pile structures, dynamic response analysis, countermeasure, non-linear analysis

1. はじめに

海上に大規模構造物を建設する場合、代表的な構造形式の一つとして鋼管杭式栈橋がある。この構造は国内ではコンテナバースなどの実績はあるものの、空港や洋上橋梁としての長大栈橋構造物は未だ建設されておらず、現在いくつかの大規模な長大栈橋構造物が計画されている状況である。この構造物が大規模な地震の発生が予想される地域の軟弱地盤に建設される場合、地震時に大きな断面力が杭に生じることが予測されるため、本研究では、長大栈橋の地震時の動的特性の把握と杭の断面力低減の方策を調べるために、有限要素法汎用プログラム TDAP III による地震応答解析を行ったのでこの計算結果について述べる。



図-1 解析モデルイメージ

2. 解析方法

2. 1 解析モデル

解析モデルは図-1に示すような海上空港を想定し、この横断方向の2次元モデルを対象とした。図-2に解析モデルを示すが、栈橋構造は直杭式とし、床版は鉄筋コンクリート製で水平方向に250m、桁高を2m、奥行きを10mとし、メッシュは水平方向に2.5m間隔で切り、平面歪み要素の数は100個とした。床版の構造は、大型航空機を想定して仮に設定したもので、PC化、合成構造化、ジャケット化により薄く軽量化することが可能である。今回はこの床版は鋼管杭に比較して剛性が高いことから地震時の破壊についての検討はしていない。杭は根入れ深さ50m、

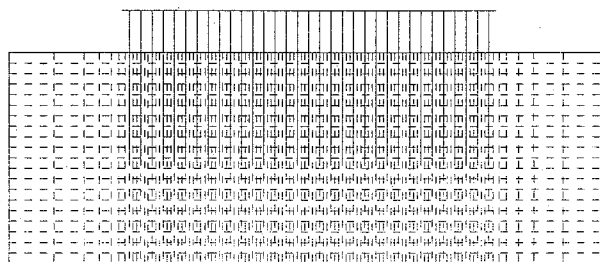


図-2 解析モデル

突出長さ20mとし、洪積層まで打設されているとした。鋼管杭の外径は1800mm、板厚は解析ごとに15mm, 19mm, 24mmと変化させた。杭の間隔は7.5mとした。鋼管杭は梁要素を用い、メッシュは鉛直方向に5m間隔で切り、杭頭付近は0.5m, 0.1m間隔と小さくしていき、要素数は梁全体で1419個とした。地盤は

水平方向に500m、鉛直方向に100mとし、表層地盤のメッシュは図-2に示すように切り、平面歪み要素の数は2240個とした。地盤条件は表層地盤が非常に軟弱な地盤を想定した。表層地盤は4層から構成されており、層厚は表面から30, 35m, 10m, および25mである。そしてこのモデルに以下の3通りの改良を施したものを解析対象とした。表-1にその解析ケースを示す。

(1) 軽量化モデル

鉄筋コンクリート製の床版を軽量コンクリートを用いて軽量化することにより断面力がどのように変化するのか解析を行った。具体的には床版の単位体積重量 23.0kN/m^3 を 18.6kN/m^3 に設定した。軽量化に関してはプレストレストコンクリート版、合成版等によっても可能である。

(2) 地盤改良モデル

想定している軟弱地盤の表層を図-3に示すように地盤改良することにより断面力がどのような変化が現れるのか解析を行った。具体的には表層10mに関して深層混合処理工法を施した場合を想定した。改良地盤の幅は300mで、せん断弾性係数は 15000kN/m^2 、減衰定数0.05で材料非線形性は考慮していない。

(3) 両方モデル

鉄筋コンクリート製の床版について軽量コンクリートを用いて軽量化を施すと同時に地盤改良を行った場合を想定している。以上の対策方法により断面力がどのように変化するかを調べた。

2. 2 構成部材

(1) 杭

今回の解析で用いた栈橋の鋼管杭は材質SKK490で7.5m間隔で横断方向に33本配置した。杭に生じる軸力及び曲げモーメントに応じて杭の曲げ剛性の非線型性を考慮して解析を行う。鋼管杭の曲げモーメント～曲率の関係は、図-4に示すように全塑性モーメントを上限値とするバイリニア型とする。全塑性モーメント M_p 及び勾配変化点 Y' の曲率 ϕ_y' は次式により求める。

$$M_p = M_{p0} \cos(\alpha\pi/2) \quad (1)$$

$$\phi_y' = (M_p/M_y) \phi_y \quad (2)$$

ここに、

M_{p0} : 鋼管杭の全塑性モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

ϕ_y' : 勾配変化点の鋼管杭の曲率 ($1/\text{m}$)

M_{p0} : 軸力がない場合の鋼管杭の全塑性モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

M_y : 鋼管杭の降伏モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

α : モーメントがない場合の降伏軸力と作用軸力の比

以上により各板厚の諸元におけるそれぞれの値を表

表-1 解析ケース

ケース	モデル	板厚(mm)	地盤	杭	床版
ケース1	改良なし	T=15	非線形	非線形	線形
ケース2		T=19			
ケース3		T=24			
ケース4	軽量化	T=15	非線形	非線形	線形
ケース5		T=19			
ケース6		T=24			
ケース7	地盤改良	T=15	非線形	非線形	線形
ケース8		T=19			
ケース9		T=24			
ケース10	ハイブリッド	T=15	非線形	非線形	線形
ケース11		T=19			
ケース12		T=24			

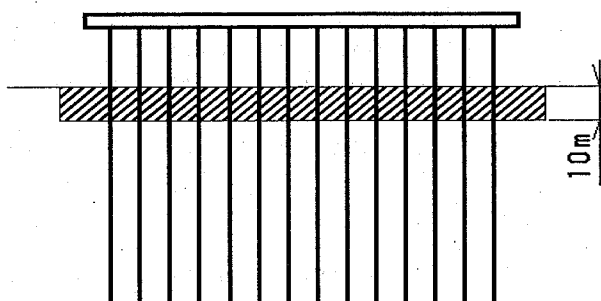


図-3 地盤改良モデル

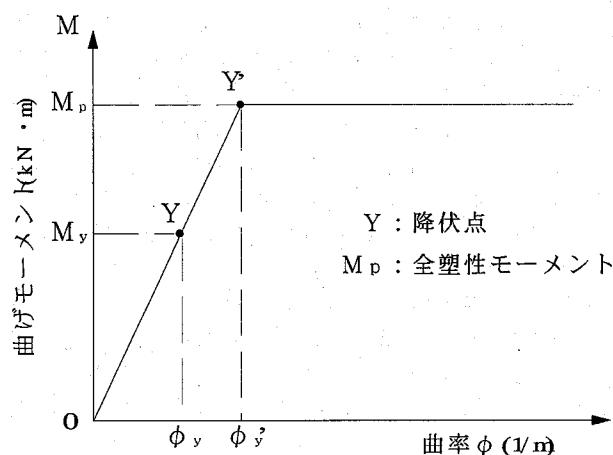


図-4 バイリニアモデル

表-2 板厚及び断面諸量

板厚(mm)	T=15	T=19	T=24
$M_{p0} (\text{kN} \cdot \text{m})$	13812	17871	20961
α	0.097736	0.077337	0.061464
$M_y (\text{kN} \cdot \text{m})$	10573	13602	17326
$\phi_y (1/\text{m})$	1.503×10^{-3}	1.539×10^{-3}	1.408×10^{-3}
$M_p (\text{kN} \cdot \text{m})$	13122	16620	18865
$\phi_p (1/\text{m})$	2.114×10^{-3}	2.132×10^{-3}	1.929×10^{-3}

- 2に示す。

(2) 地盤

地盤の基本諸元は表-3に示す通りである。表層地盤は、比較的軟弱な粘性土で構成されており、層厚が30mである。層番号5の地盤は地盤改良時に用いた埋め立て砂層である。表層地盤の非線形性は図-5に示すRamberg-Osgoodモデルを用いて考慮した。

表-3 地盤の基本諸元

層番号	層厚 (m)	せん断弾性係数 (GN/m^2)	質量密度 (kN/m^3)	ポアソン比	減衰定数	土質区分
1	30	14700	147	0.49	0.12	粘性土
2	35	24500	157	0.49	0.175	粘性土
3	10	49000	157	0.49	0.1	粘性土
4	25	392000	196	0.49	0.02	砂質土
5改良	10	147000	196	0.49	0.05	砂質土

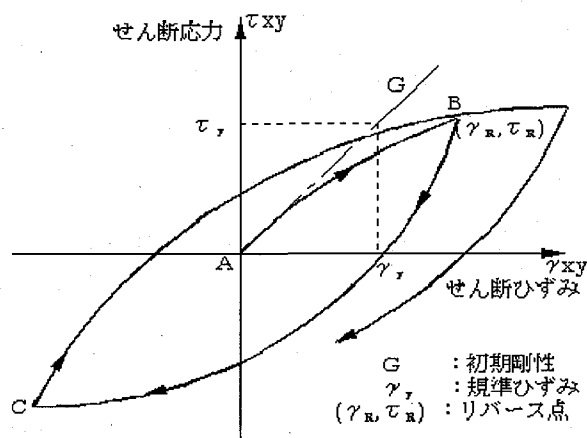


図-5 Ramberg-Osgoodモデル

(3) 床版

鉄筋コンクリート性で材料非線形性は杭の破壊性状の把握を主目的にしたので今回考慮しなかった。

2. 2入力地震動

海底地盤の基盤面に入射される地震波の加速度波形を図-6に示す。本検討に用いる入力地震波として、1995年兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランドのアレー地震観測で取得された記録の-83m(NS成分)の加速度波形とした。入力地震動の最大加速度は679Galで、ステップ数2000、ステップ間隔0.01secを水平方向に基盤入力する。

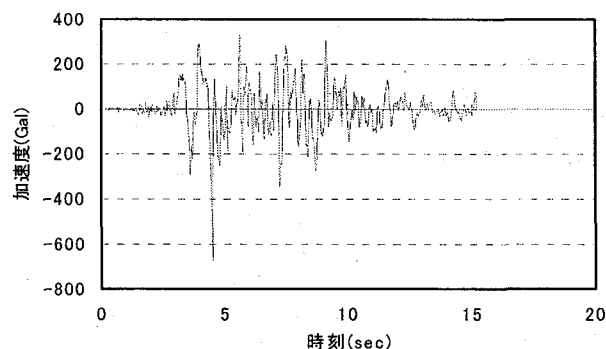


図-6 入力地震波形

3. 固有値解析

橋の固有値解析の各計算ケースでの結果を表-1に示す。1次モードは約0.4Hz、2次モードは約0.6Hzで各モデル間で大きな差はなく、比較的低い振動数が卓越している。

表-4 固有値解析結果

モデル	板厚(mm)	1次モード(Hz)	2次モード(Hz)
改良なし	T=15	0.40910	0.62867
	T=19	0.41028	0.64585
	T=24	0.41099	0.65633
軽量化	T=15	0.41354	0.64777
	T=19	0.41414	0.65743
	T=24	0.41446	0.66409
地盤改良	T=15	0.40359	0.66707
	T=19	0.40449	0.67650
	T=24	0.40509	0.68252
ハイブリッド	T=15	0.40674	0.67523
	T=19	0.40727	0.68113
	T=24	0.40762	0.68569

4. 解析結果

4. 1 応答変位

図-7に板厚15mmの杭の杭頭での相対応答変位の時刻歴波形を示す。各ケースで5~6sec付近で60cm程度とかなり大きい杭頭変位が見られた。ただし変位振幅量についてはほとんど同じであった。

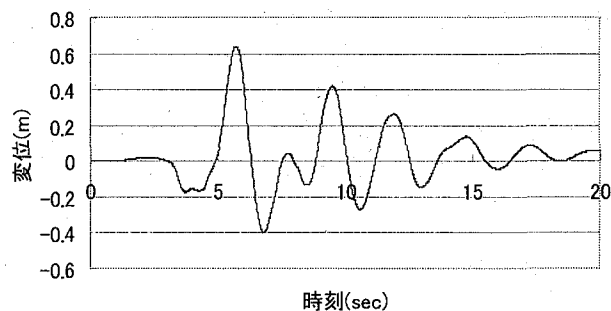


図-7(a) 変位時刻歴波形(改良なし)

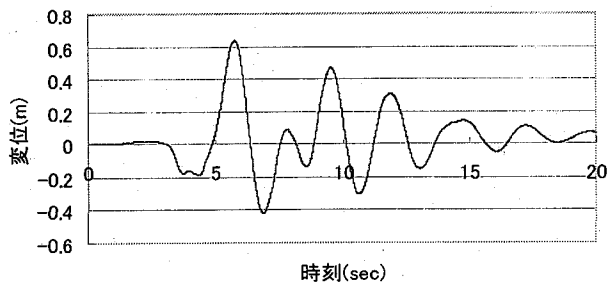


図 - 7(b)変位時刻歴波形(軽量化)

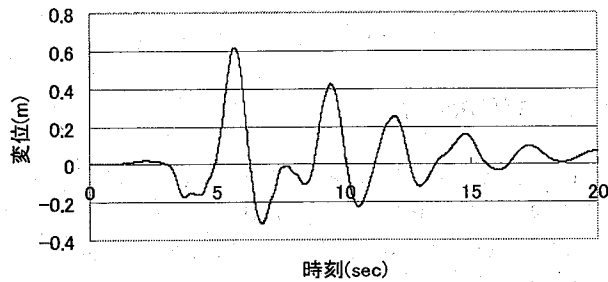


図 - 7(c)変位時刻歴波形(地盤改良)

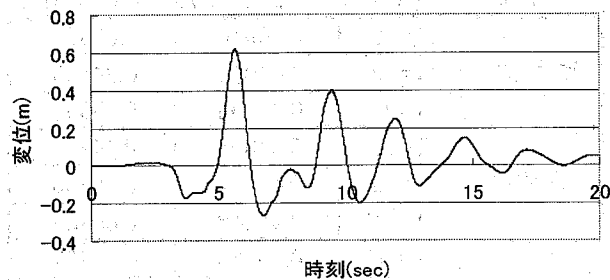


図 - 7(d) 変位時刻歴波形(両方)

4. 2 曲げモーメント

図-8に板厚15mm杭の曲げモーメントの深さ方向の分布を示す。いずれの場合も杭頭が最大値をとり、砂質土の上部に位置する3層目の粘性土付近、及び地表面付近にて曲げモーメントが大きい値を示した。この板厚では改良を施していないモデルと軽量化を施したモデルの杭が杭頭で非線形領域に達した。地盤改良モデル、及び両方モデルにおける地中5~10mの位置において、杭の曲げモーメントが大きく変化している。地盤改良を行うことで改良地盤と非改良地盤で杭頭と同程度の大きな曲げモーメントが計算された。図-9には杭頭における曲げモーメントの時刻歴波形を示す。曲げモーメントの振動周期は2秒程度で波形の状況は各ケースではほぼ同じであった。

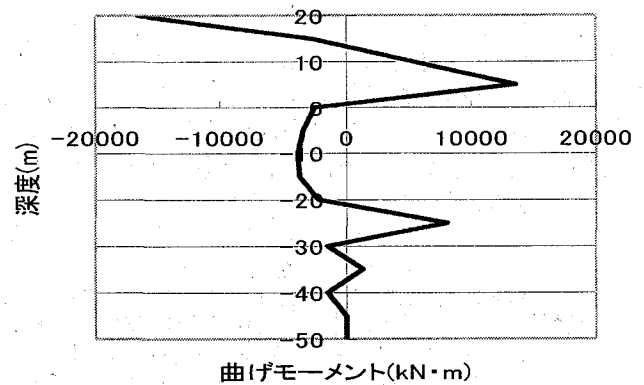


図-8(a) 曲げモーメント深度分布(改良なし)

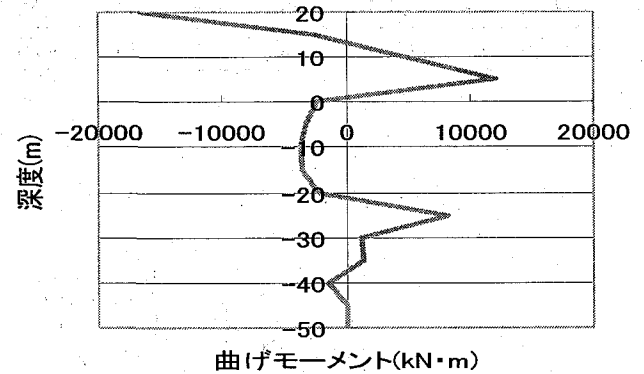


図-8(b) 曲げモーメント深度分布(軽量化)

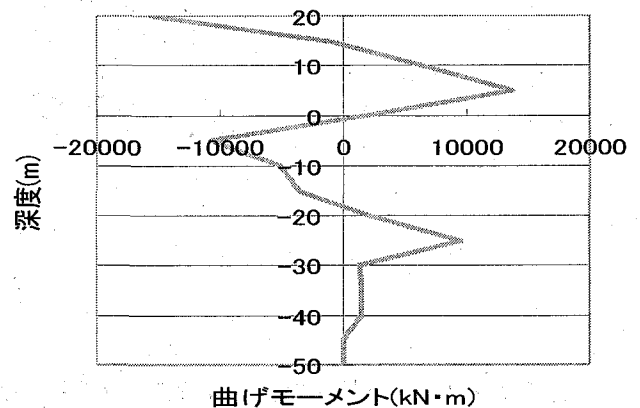


図-8(c) 曲げモーメント深度分布(地盤改良)

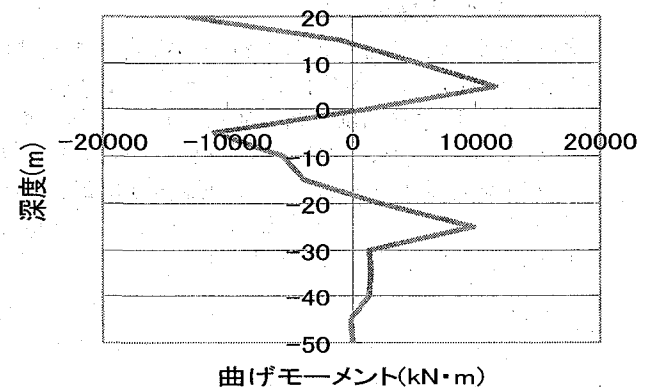


図-8(d) 曲げモーメント深度分布(両方)

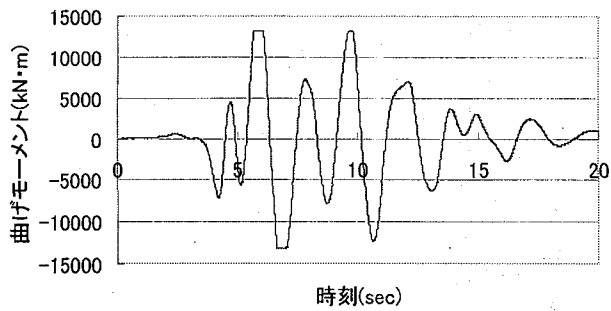


図9(a) 時刻歴波形(改良なし)

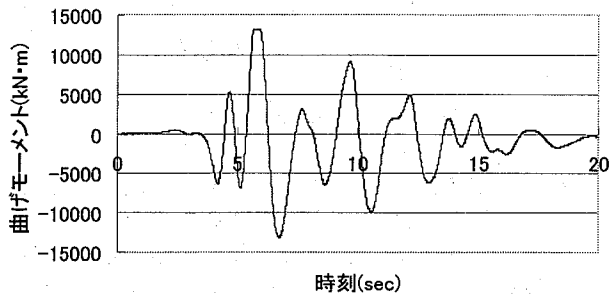


図9(b) 時刻歴波形(軽量化)

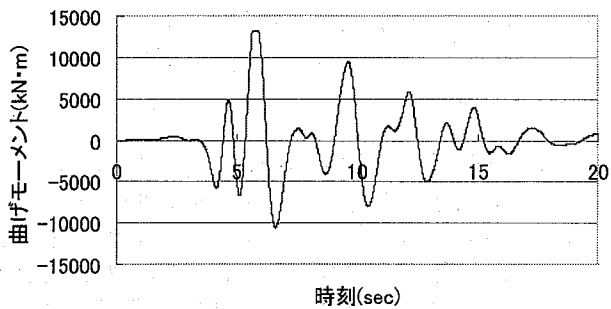


図9(c) 時刻歴波形(地盤改良)

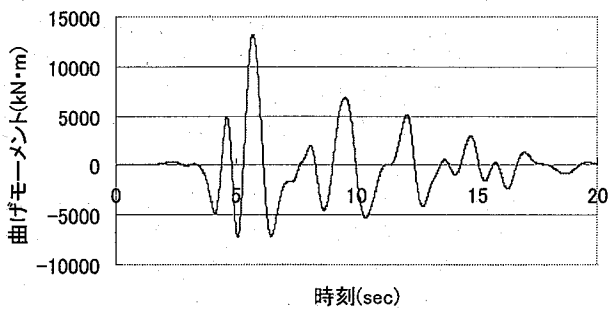


図9(d) 時刻歴波形(両方)

4. 3 曲率

図-10に板厚15mmの杭の杭頭に生じた最大曲率の深さ方向の分布を示す。いずれも杭頭に最大の曲率が生じ、また地表面付近でやや大きな値を示し、曲げモーメントの深さ分布と同様に地盤改良を施しているモデルに関しては深さ10m程度において大きな曲率が生じている。図-11に板厚15mmの杭の杭頭の曲げモーメント-曲率の履歴曲線を示す。このモデルの場合、両方モデル以外では杭頭の曲率が全塑性時の曲率を卓越していることがわかる。両方モデルのみ杭頭が塑性化していない結果となった。

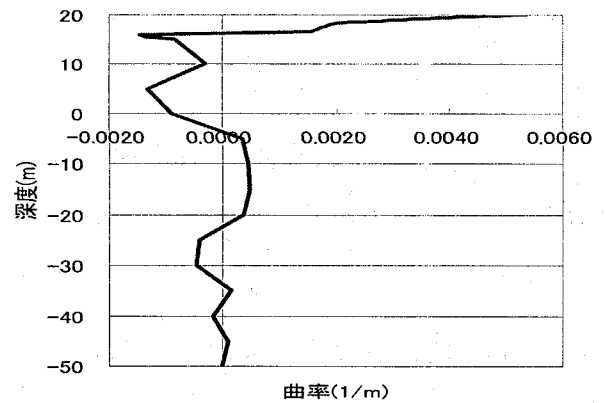


図 - 10(a) 曲率深度分布(改良なし)

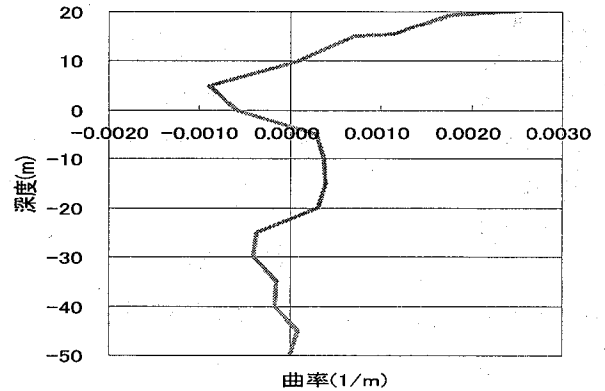


図 - 10(b) 曲率深度分布(軽量化)

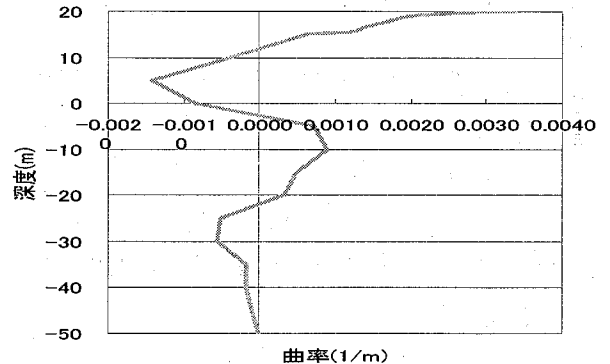


図 - 10(c) 曲率深度分布(地盤改良)

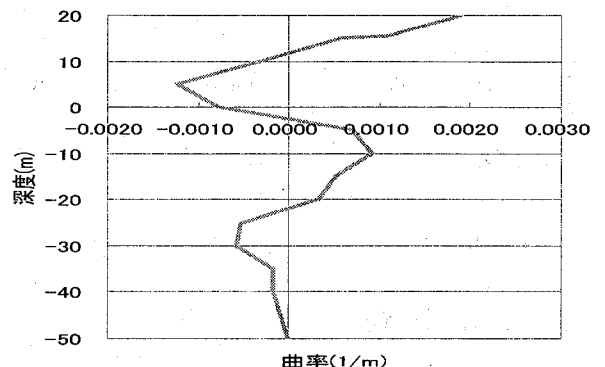


図 - 10(d) 曲率深度分布(両方)

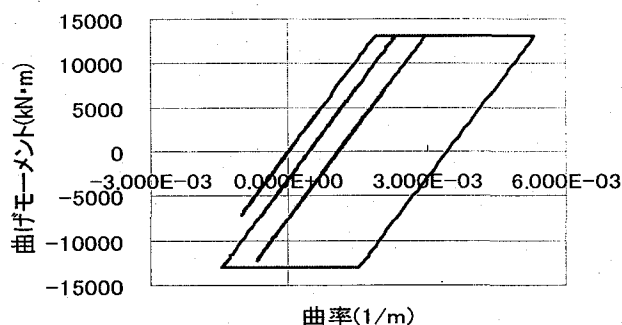


図-11(a) 曲げモーメントと曲率の関係(改良なし)

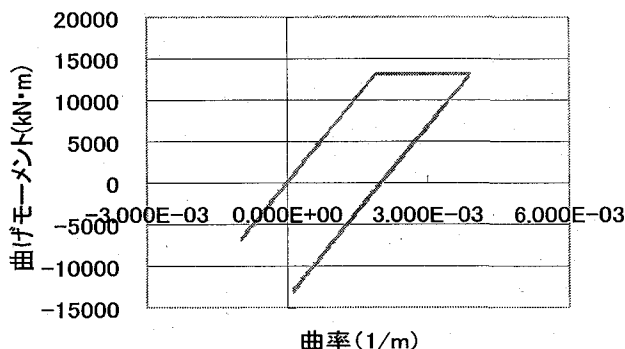


図-11(b) 曲げモーメントと曲率の関係(軽量化)

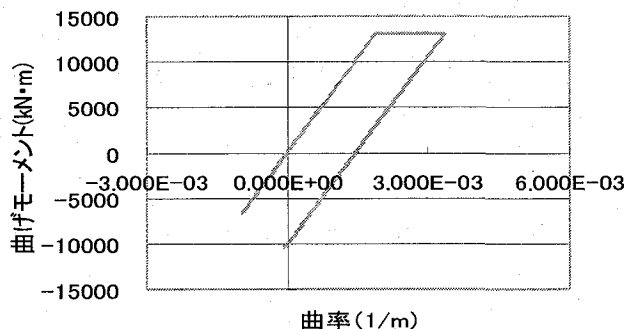


図-11(c) 曲げモーメントと曲率の関係(地盤改良)

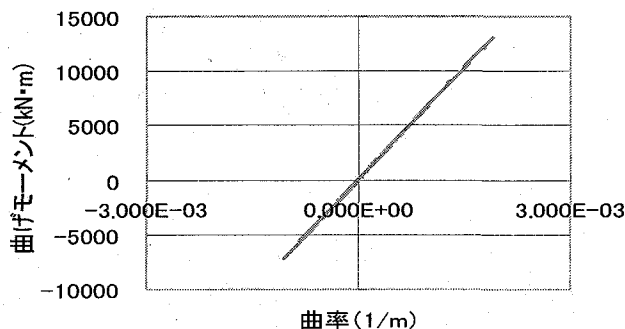


図-11(d) 曲げモーメントと曲率の関係(両方)

5. モデル間比較

図-12に板厚19mmの杭の杭頭モーメントの杭番号ごとの分布を各モデルにおいて計算した結果を示す。改良を施してないモデルと地盤改良を施したものに關しては全塑性モーメントに達して頭打ちとなって

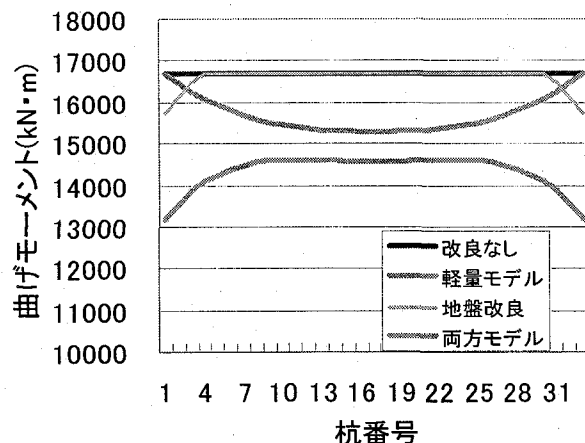


図-12 モデル間の比較グラフ

いることが考えられ、地盤改良を施したモデルに關してもほぼ塑性領域に達しているものと考えられ。杭頭の曲げモーメント分布は各モデルでかなり異なった結果となった。地盤改良と両方モデルの対策では栈橋の両端で曲げモーメントが小さくなった。これは周辺にいくほど杭頭の拘束が小さくなるからだと考えているが今後さらに検討したい。

6. まとめ

- (1) 今回想定した鋼管杭の規模では、レベル2地震動に対して大きな杭頭曲げモーメント及び曲率が計算され、何らかの対策が必要となった。今回対策工法として、表層地盤の地盤改良工法と床版の軽量化を取り上げたところ一工法では十分な曲げモーメントの低減が図れなかったが、両者を組み合わせることにより期待された効果が得られた。
- (2) 地盤改良を施した場合、その改良地盤の境界面に大きな曲げモーメントを発生させることがわかり、設計時には注意が必要である。
- (3) 杭頭最大曲げモーメントの杭ごとの分布は、その改良方法によりピークの位置が異なる。軽量化を施すと谷型、地盤改良を施すと山型が強く現れると考えられる。

7. 参考文献

- (1) 横井孝征、清宮理：杭式長大栈橋の地震応答解析、第57回土木学会学術年次講演会、第VI部門、2002.9
- (2) (財) 沿岸開発技術研究センター：港湾構造物設計事例集(上巻)、4-22
- (3) (社) 日本道路協会：杭基礎設計便覧、P41