

棧橋式係船岸の耐震補強効果について

清水 由貴夫¹・清宮 理²・横田 弘³

¹正会員 若築建設株式会社 (〒153 東京都目黒区下目黒二丁目 23-18)

²正会員 早稲田大学理工学部土木工学科教授 (〒169 新宿区大久保 3-4-1)

³正会員 運輸省港湾技術研究所 設計技術研究室 (〒239 横須賀市長瀬 3-1-1)

兵庫県南部地震によって、数多くの係船岸や防波堤が被害を受けた。その中で棧橋式構造の係船岸は、水中調査や杭の引抜き結果、鋼管杭に座屈や断面変形が確認されており、構造体としては破壊している状況にあった。そこで本論では、棧橋式係船岸の座屈・断面変形に至った過程と原因を把握するとともに補強工法の効果を調べるため、地震応答解析を実施した。補強工法としては、プレス材を用いる工法と鋼管杭内部にコンクリートを充填する工法の2種類について考察した。

Key Words : dynamic response analysis, steel pile of piers, concrete injection, bress reinforcement

1. はじめに

兵庫県南部地震によって数多くの係船岸や防波堤が被害を受けた。その中で棧橋式構造の係船岸は水中調査や杭引き抜きの結果、鋼管杭に座屈や断面変形が確認されており、構造体としては破壊している状況にあった。調査報告書によると、写真-1.1¹⁾のような杭の局部座屈が確認された箇所は陸側海底地盤面付近であり、写真-1.2のような杭がくの字に変形していた箇所は沖積砂層であった。また、海側杭に比べ陸側杭の方が大きな被害を受けていた。(図-1)そこで、棧橋式係船岸の座屈や断面変形に至った過程と原因を把握するとともに補強工法の効果を調べるため、地盤・構造物連成系の地震応答解析を実施した。補強工法としては、海底地盤面付近と杭頭部の曲げと軸力を低下させるためプレス材を用いる工法、鋼管杭内部にコンクリートを充填し杭自体の断面性能を上げる工法の2種類を取り上げた。



写真-1.1 局部座屈



写真-1.2 くの字変形

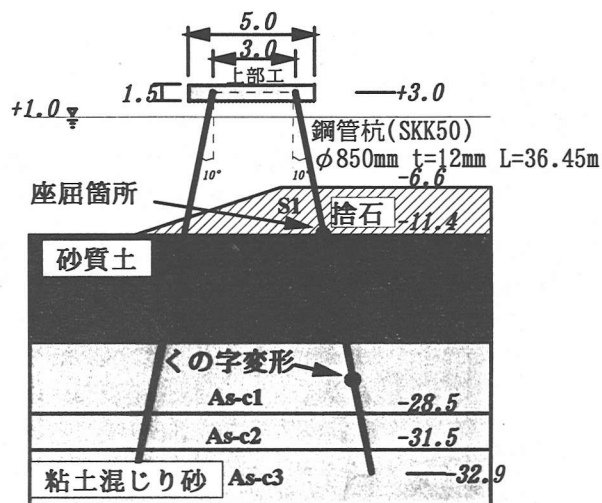


図-1 構造図

表-1 地盤条件

種類	標高 (m)	γt (tf/m ³)	ポアソン 比	V_s (m/s)
埋土	+3.0~-6.6	1.90	0.49	210
捨石	-6.6~-11.4	1.96	0.38	150
砂質土	-11.4~-18.0	2.00	0.49	210
砂質土	-18.0~-23.5	1.90	0.49	210
粘土混じり砂	-23.5~-28.5	1.80	0.49	245
粘土混じり砂	-28.5~-31.5	1.80	0.49	305
粘土混じり砂	-31.5~-45.5	2.00	0.49	305
粘土混じり砂	-45.5~-55.5	2.00	0.49	305
洪積粘土	-55.5~-72.0	1.70	0.49	305
ケーソン	+3.0~-6.6	2.10	0.17	2449
裏込め石	+1.0~-6.6	1.96	0.38	127

2. 棧橋式係船岸の構造概要と地盤条件

棧橋式係船岸の構造図を図-1に示す。上部工は鉄筋コ

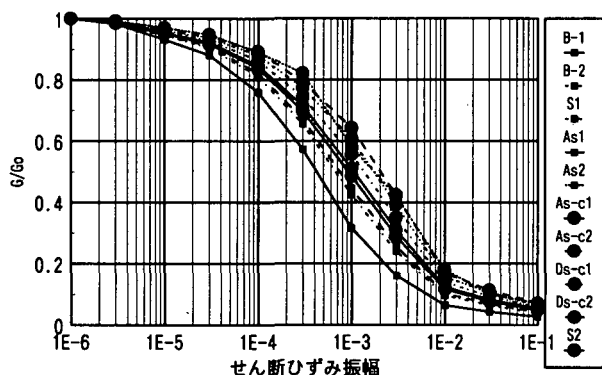


図-2 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線

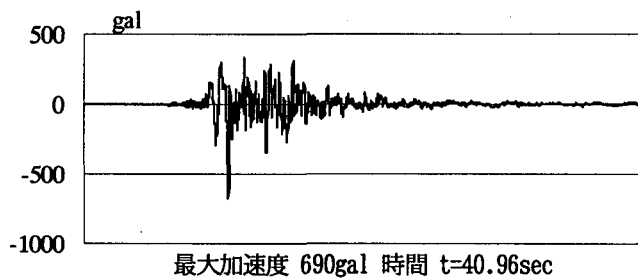


図-3 入力地震波形

コンクリート床版で、鋼管杭の諸元は直径 850mm、肉厚 12mm(SKK50)であり-32.9m まで打設されている。地盤の構成²⁾は-6.6~-23.5m が埋立地盤、-23.5~-31.5m が沖積層、-31.5m~-72.0m が洪積層である。埋め立て地盤は礫混じり砂とシルトのまさ土であり、沖積層は粘土層と砂層が互層になっており、洪積層は-55.5m 付近まで砂層が主で粘土層が所々混じっているが、それ以下は固い粘土層となっている。これらの地盤条件を表-1 に示す。

3. 地震応答解析

(1) 解析条件

本解析には地震応答計算プログラム FLUSH を使用した。FLUSH は複素応答解析法を用いているため、構造・地盤連成の非線形問題には適用できない。ただし、土の非線形性材料特性は等価線形化法により評価している。等価線形化法に用いる各層の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線³⁾⁴⁾を図-2 に示す。また、計算モデルの側方境界はエネルギー伝達境界、底面は剛体基盤とし、地震波は剛体基盤に入力した。次に、計算に用いた入力地震波形を図-3 に示す。これは、神戸ポートアイランド-79m の洪積層で観測された南北成分波であり、最大加速度は 679gal である。最大解析周波数は、構造・地盤に対して高周波成分による影響が少ないと考え 10Hz とした。材料定数について、鋼管杭は単位体積重量を $7.85t/m^3$ 、ヤング率を $2.1 \times 10^6 kgf/cm^2$ 、ポアソン比を 0.3 とし、鉄筋コンクリートはそれぞれ $2.45t/m^3$ 、 $2.1 \times 10^5 kgf/cm^2$ 、0.2 とした。

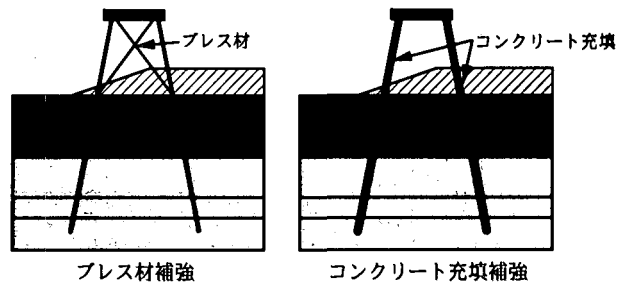


図-4 解析ケース

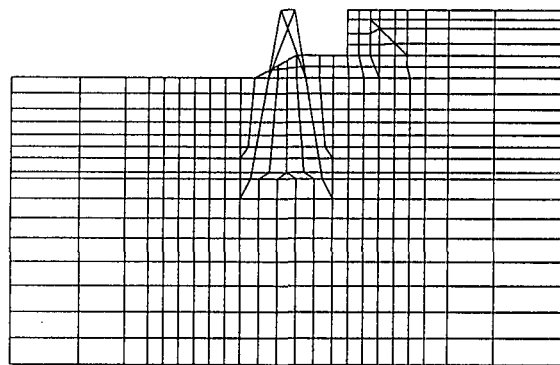


図-5 解析メッシュ図

(2) 解析ケース

解析ケースは、現状の構造とプレス材を用いる工法とコンクリートを充填する工法の 3 種類とし、各ケースの概略図を図-4 に示す。上部工と杭の結合条件は剛結合とした。プレス材を用いる工法は、上部工海側と陸側杭の海底地盤面、上部工陸側と海側杭の海底地盤面とを鋼材で結合する工法である。使用した鋼材は既存の鋼管杭と同種の断面性能のものとし、鋼材の結合条件はすべて剛結合とした。コンクリートを充填する工法は、杭内部に普通コンクリートを杭下端まで注入して杭の剛性を上げる工法である。注入したコンクリートは無筋コンクリートを使用し、単位体積重量は $2.3t/m^3$ とした。コンクリート充填による杭の剛性は、コンクリートのヤング率を鋼材のそれに置換してコンクリート充填部分の剛性を算出し、鋼管杭の剛性に累加した。次に解析に用いたメッシュ図を図-5 に示す。解析メッシュの全節点数は 546 個、要素数は現状の構造とコンクリート充填する工法で 494 要素、プレス材を用いる工法で 496 要素とした。

(3) 解析結果

1) 各ケースにおける杭頭部の水平加速度

各ケースにおける杭頭部の水平加速度の時刻歴波形を図-6 に示す。現状の構造は最大水平加速度は 975gal、プレス材を用いる工法は 363gal、コンクリート充填する工法は 751gal となり、杭頭部での水平加速度が補強によりかなり低下した。

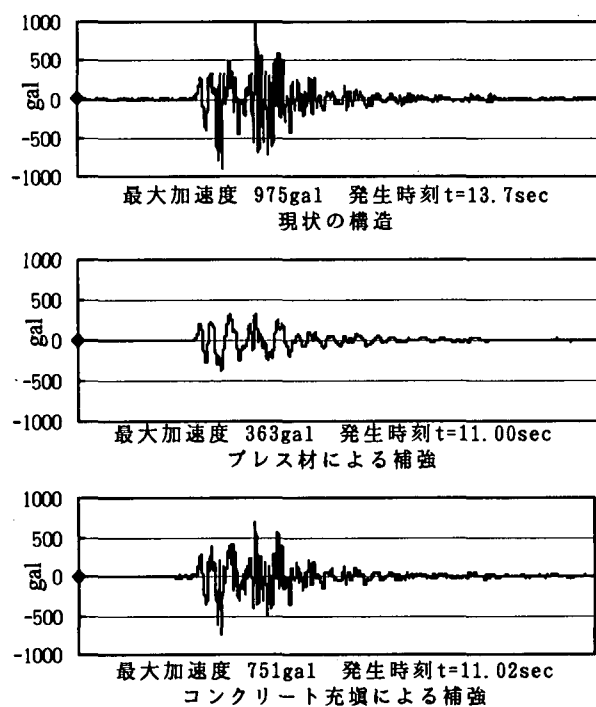


図-6 杭頭部の水平加速度

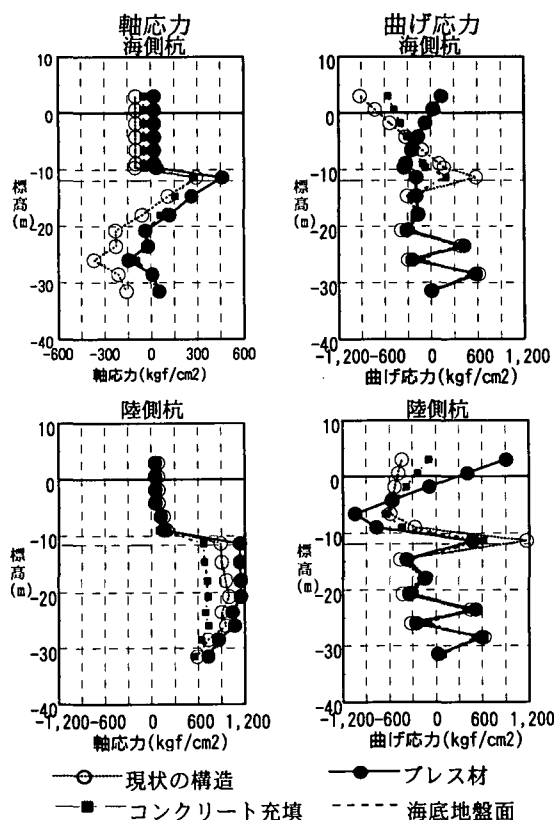


図-7 最大水平変位時刻における軸・曲げ応力

2) 各ケースにおける断面力

各ケースにおける最大水平変位時刻での軸応力・曲げ応力の深度分布を図-7に、合成応力⁵⁾と水平変位の深度分布を図-8に示す。

被害を受けた現状の構造において、海側杭の軸応力は海底地盤面付近で大きな引張力、-23.5m～-28.5mの沖積

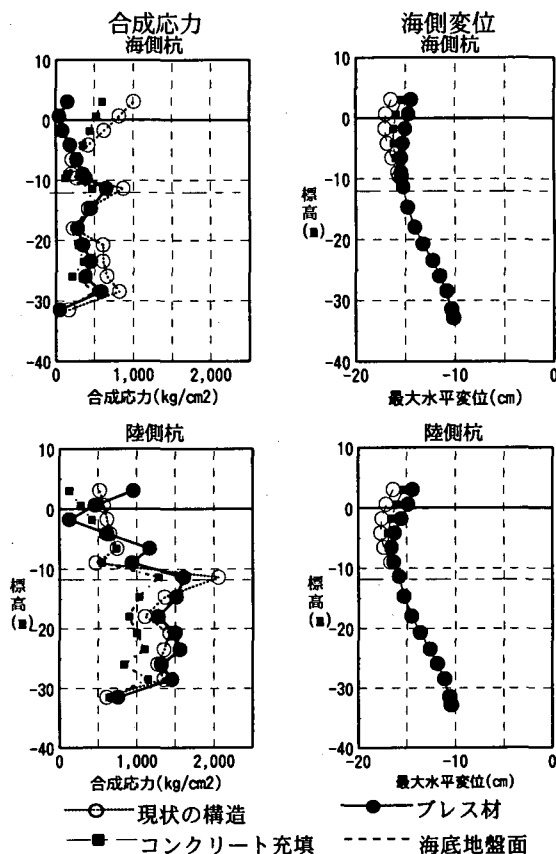


図-8 最大水平変位時刻における合成応力と海側変位

層で大きな圧縮力が作用し、陸側杭の海底地盤面～杭先端にかけては海側杭の最大値より大きな引張力が作用した。曲げ応力について、海側杭は杭頭部で最大となり、陸側杭では海底地盤面付近で最大となった。軸・曲げを考慮した合成応力は、両杭通じて陸側杭の海底地盤面付近で最大となり、座屈や断面変形のおそれがある結果となった。さらに、陸側杭の杭頭～杭先端にかけての合成応力が海側杭のそれを上回る結果となった。海側方向水平変位については標高-4.2m付近で最大17.65cmとなった。座屈が生じる断面力が計算された箇所は調査報告とほぼ一致し、被害の現状が再現できていると思われる。

ブレス材を用いる工法において、海側・陸側杭の軸応力の深度分布形状は現状の構造とほぼ同様となったが、最大値は現状の構造に比べ増加した。曲げ応力は海側・陸側杭の海底地盤面付近で現状の構造に比べ減少したが、杭頭部では増加した。合成応力は軸力や曲げの増加に伴い現状の構造より増加した部分もあるが、最大値は陸側杭の海底地盤面付近となり、現状の構造に比べ約2割低下した。海側最大水平変位は陸側杭の標高-6.6m付近で16.54cmとなり、現状の構造に比べ若干減少した。よって、ブレス材を用いる工法は補強効果が少しあるといえる。

コンクリートを充填する工法において、軸応力・曲げ応力・合成応力は海側・陸側杭ともに杭頭～杭先端にかけて現状の構造に比べ大きく減少した。特に、陸側杭の

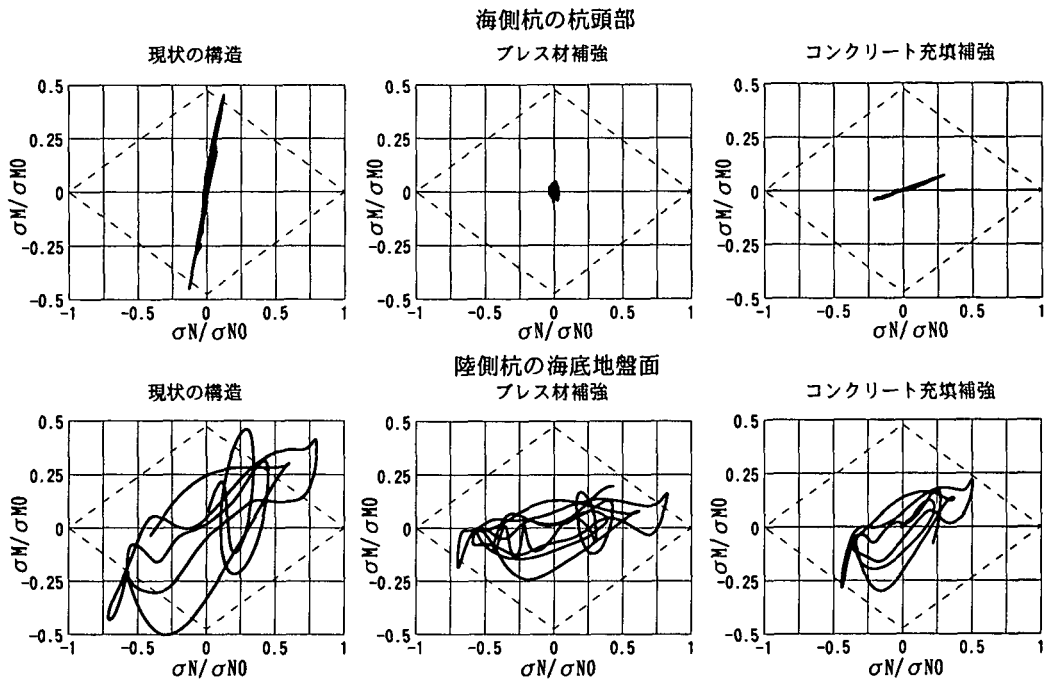


図-8 軸応力と曲げ応力の履歴

海底地盤面付近における合成応力は現状の構造に比べ約4割低下した。海側最大水平変位は陸側杭の標高-4.2m付近で16.91cmとなり、これも現状の構造に比べ減少した。各応力の最大値がプレス材を用いる工法に比べかなり減少したことから、コンクリートを充填する工法の方がより補強効果あるといえる。

2) 各ケースの軸応力と曲げ応力の履歴

現状の構造で大きな合成応力を示した海側杭頭部と陸側海底地盤面付近における各ケースの軸応力と曲げ応力の履歴を図-8に示す。横軸は軸応力をオイラーの座屈応力で除した値を、縦軸は曲げ応力を曲げ降伏応力で除した値をそれぞれ表示している。軸応力と曲げ応力の相関関係（境界線）は式（1）により設定した。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{N0}} + \frac{\sigma_M}{\sigma_{M0}} \leq 1 \quad (1)$$

σ_N : 軸応力

σ_M : 曲げ応力

σ_{N0} : オイラー座屈応力⁹⁾(=1410kgf/cm²)

σ_{M0} : 曲げ応力 (=3200kgf/cm²)

現状の構造は海側杭の杭頭部と陸側杭の海底地盤面で境界線を越えた。海側杭の杭頭部は履歴線が縦軸方向に伸びていることから、曲げ応力が軸応力より卓越しているといえる。また、陸側杭の海底地盤面付近は履歴線が横軸の45度方向に伸びていることから、軸応力・曲げ応力両方の影響を受けているといえる。プレス材を用いる工法は、海側杭の杭頭部で軸応力・曲げ応力とも現状の構造に比べ大きく低下した。陸側杭については海底地盤面付近の曲げ応力は低下したが、軸応力はほとんど

変化がなかった。しかし、境界線を越えている部分がかなり減少したことからプレス材を用いる工法の補強効果はあるといえる。コンクリート充填する工法は、海側杭の杭頭部と陸側杭の海底地盤面付近で軸応力・曲げ応力とも現状の構造に比べ大きく低下した。よって、陸側杭の海底地盤面付近で境界線を越えている部分がほぼないことから、補強効果はプレス材を用いる工法よりあるといえる。

4. まとめ

(1) 兵庫県南部地震での栈橋式係船岸の鋼管杭座屈位置と本解析がほぼ一致した。特に陸側杭の海底地盤面付近で座屈破壊する断面力が計算された。

(2) 陸側杭の海底地盤面付近の合成応力は、プレス材で補強することにより約2割、コンクリートを充填することにより約4割低下した。何れの工法も地震時に生じる杭の局部座屈に対して効果的な補強工法であるといえる。

参考文献

- 1) 第三港湾建設局 神戸港湾震災復興事務所: 神戸港復旧工事について 1996年10月
- 2) 稲富隆昌・清宮理・山田耕一郎・宮島信雄・平野昌治: 平成7年度兵庫県南部地震でのポートアイランドの表層地盤の振動特性、第23回地震工学研究発表会, pp.269-272, 1995
- 3) (財) 沿岸開発技術センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック, pp.54-59, 1993
- 4) 野津厚 上部達生 高野剛光: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その8) ケーソン岸壁の地震時滑動に関する数値解析, 港湾技研資料, No.813, 1995年9月
- 5) 鋼管杭協会: 鋼管杭 その設計と施工
- 6) 成瀬泰雄: 鋼管構造, 森北出版, 1971年