

棧橋式係船岸の地震被害の要因に関する一考察

清宮 理¹・清水 由貴夫²・南 兼一郎³

¹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)

²正会員 若築建設株式会社 (〒153 目黒区下目黒 2-23-18)

³正会員 運輸省港湾技術研究所 (〒239 横須賀市長瀬 3-1-1)

兵庫県南部地震により杭式棧橋の護岸部の杭において、地中部の地盤条件が変化する箇所でのくの字変形を起すとともに盛土部分の捨石と砂層の間で局部座屈を起こしていた。そこで本研究では、表層地盤の水平振動の他に背面護岸の影響がある考え、平坦な海底地盤の場合と棧橋背面に護岸がある場合の2種類のモデルを対象に地震応答計算を行い両者の比較を行った。特に棧橋背面に護岸がある場合、表層の軟弱な地盤の移動によりどの程度杭に発生する応力度が増大するか調べるため静的非線形解析を実施した。

Key Words : dynamic response, static non-linear, steel pile of piers

1. はじめに

兵庫県南部地震によって被害を受けた神戸港内に位置するある杭式棧橋では、護岸部の杭に大きな被害を受けた。鋼管杭を引き抜いて調査したところ、地中部の地盤条件が変化する箇所では杭がくの字変形を起すとともに護岸部の盛土部分の捨石と砂層の間で杭が局部座屈を起こしていた。この破壊状況から、表層地盤の水平振動の影響の他に、棧橋式係船岸の背面にある重力式護岸の沈下と前面への移動により、捨石と砂層も棧橋側に移動し杭が変形したと推測された。そこで本研究では、背面護岸の影響を検討するため平坦な海底地盤の場合と棧橋背面に護岸がある場合の2種類のモデルを対象に FLUSH による地震応答計算を行い両者の比較を行った。特に棧橋背面に護岸がある場合、表層の軟弱な地盤の移動によりどの程度杭に発生する応力度が増大するか調べるため SOLVIA による静的非線形解析を実施した。

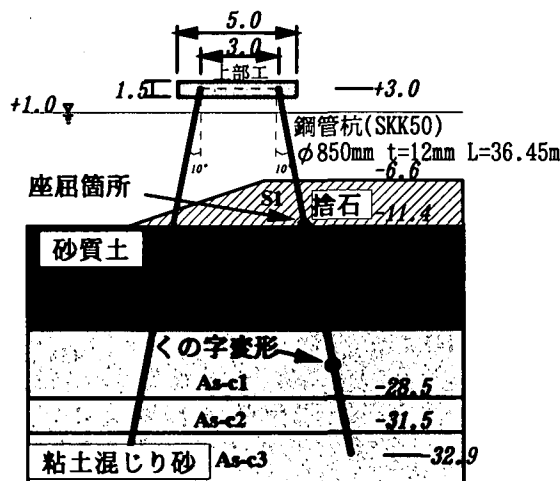


図-1 構造図

表-1 地盤条件

種類	標高 (m)	γt (tf/m ³)	ホ ^o アソ ^o 比	Vs (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
粘土混じり砂	-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。上部工は鉄筋コンクリートのスラブで、鋼管杭が-32.9mまで打設されている。鋼管杭(材質SKK50)の直径 ϕ は850mmで肉厚が12mmである。表層地盤の構成は、棧橋近傍のポートアイランドで地震計設置の際行われたボーリングによる土質調査¹⁾を基に設定した。埋め立て地盤が-6.6~-23.5m、沖積層が-23.5~-31.5m、洪積層が-31.5~-72.0mの範囲で存在している。埋め立て地盤は礫混じり砂とシ

ルト系のまさ土であり、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。

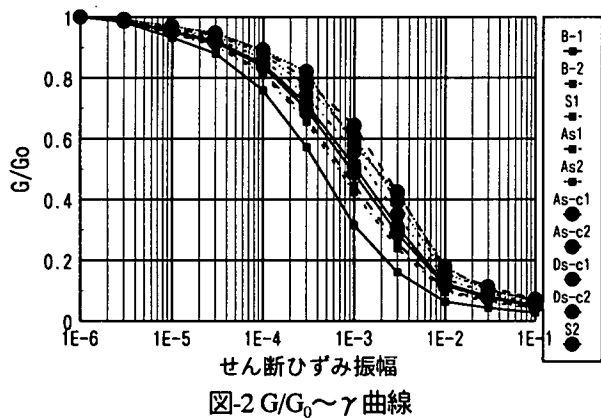


図-2 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線

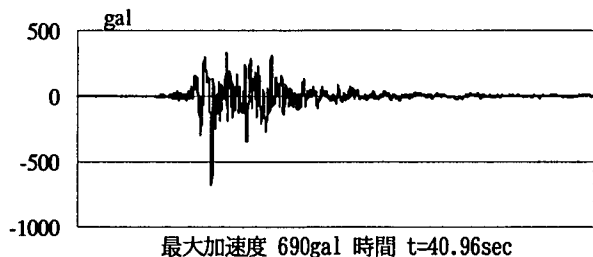


図-3 入力地震波形

3. 地震応答解析

(1) 解析条件と解析ケース

本解析で用いた地震応答計算プログラム FLUSH は、複素応答解析法を使用しているため構造・地盤系の非線形問題には適用できない。しかし、表層地盤の非線形性は等価線形法により評価している。等価線形法に用いる各層のせん断剛性のひずみ依存性²³⁾を表す $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線を図-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、底面を剛体基盤とした。剛体基盤の水平方向に入力した地震波形を図-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。構造の材料定数として、鉄筋コンクリートは単位体積重量を $7.85t/m^3$ 、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。入力加速度から高周波成分の影響が少ないと考え 10Hz 以上の振動成分を取り除いた。解析ケースは、平坦な海底地盤と栈橋背面にケーソン式護岸のある場合の 2 種類である。これら解析モデルの概要を図-4 に示す。背面に護岸がある場合の海底地盤面より上の地盤条件は、+3.0m~ -6.6m は埋土、+1.0m~ -6.6m は裏込め石、-6.6m~ -11.4m は捨石とした。解析に用いた FEM のメッシュ図を図-5 に示す。杭と上部工の結合条件は剛結合とした。解析メッシュの全節点数は、背面護岸がない場合は 474 個、ある場合は 546 個で、要素数はそれぞれ 421 要素、494 要素とした。

(2) 解析結果

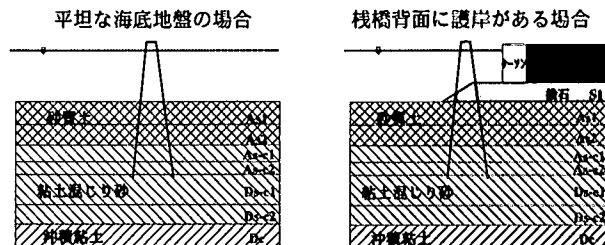


図-4 解析ケース

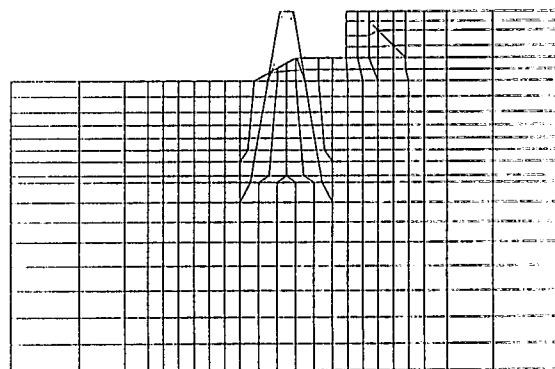


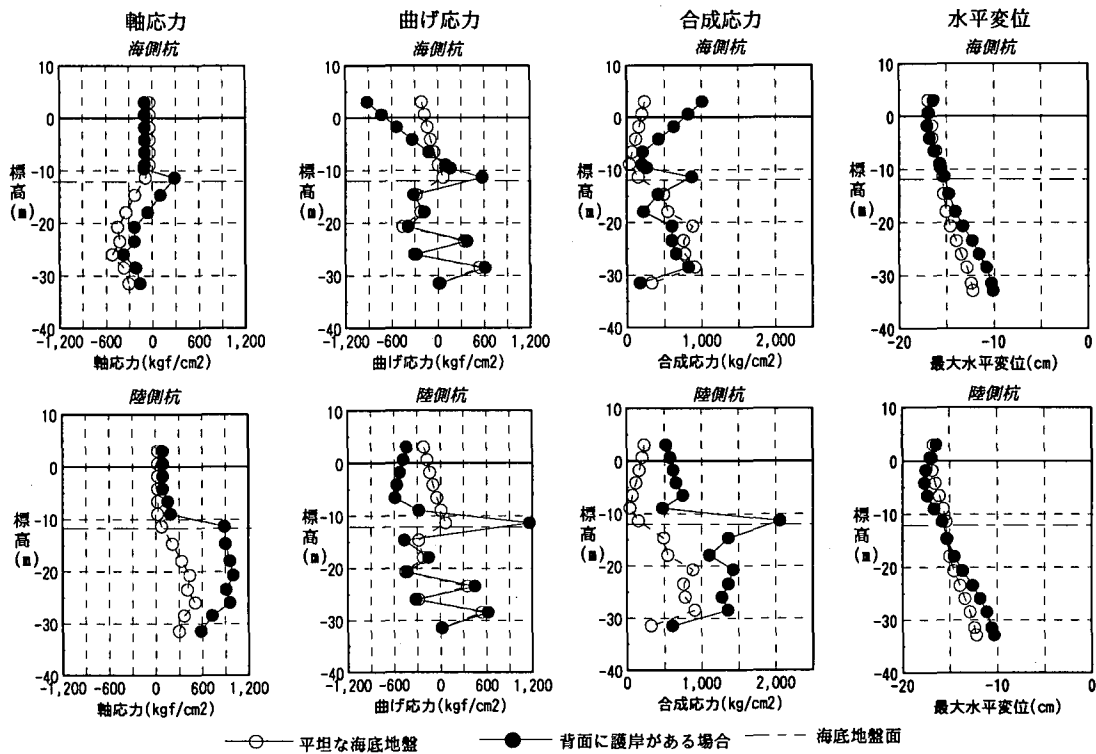
図-5 解析メッシュ図

各ケースの最大水平変位時刻における鋼管杭の応力度と水平変位の深度分布を図-6 に示す。

平坦な海底地盤の場合：海底地盤面での最大水平変位は約 17cm で海側・陸側杭ともに最大軸応力発生位置は -23.5~ -28.5m の沖積層であった。曲げ応力は両杭とも杭頭ではかなり小さく、最大曲げ応力度は表層地盤のせん断弾性係数の変化が大きな地点(-28.5m)で得られた。軸応力度と曲げ応力度の合成応力(圧縮側)は -28.5m 付近で最大となった。ただし最大合成応力度は、鋼管杭の降伏応力度および許容座屈応力度以下であり鋼管杭には被害が生じない結果となった。被害調査でも鋼管杭の破壊は見られなかったので護岸が近傍にない状況では栈橋は今回の地震に対して十分耐荷力を保有していたと言える。

栈橋背面に護岸がある場合：軸応力は杭頭~海底地盤面まではほぼ一定で、海底地盤面以下で値が大きくなり、最大軸応力発生位置は -23.5~ -28.5m の沖積層であった。海側杭の曲げ応力は杭頭で最大となり次に海底地盤面付近、-28.5m 付近の順になり、陸側杭は海底地盤面付近で最大となり次に -28.5m 付近となった。海側杭の合成応力は杭頭で最大約 $1000 kgf/cm^2$ となりつぎに海底地盤面付近、-28.5m 付近の順となり、陸側杭の合成応力は海底地盤面付近で最大約 $2200 kgf/cm^2$ となり、-23.5~ -28.5m 付近の順となった。両杭通じて合成応力最大位置は陸側杭の海底地盤面付近となった。また、最大水平変位は陸側杭の -1.8m 付近で海側方向に 17.5cm となった。

2 種類の地盤モデルの応力度を比較すると、軸応力度は陸側杭の海底地盤面付近~杭下端で、曲げ応力度は海側杭の杭頭部と海底地盤面付近、陸側杭は海底地盤面付近で栈橋背面に護岸がある場合が平坦な海底地盤の場



○ 平坦な海底地盤 ● 背面に護岸がある場合 - - - 海底地盤面
 図-6 最大水平変位発生時刻における杭の断面力と水平変位

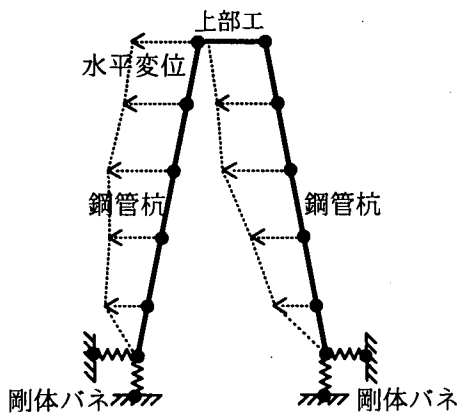


図-7 静的解析モデル

合に比べ大きく増加した。それ以外の場所における軸・曲げ応力の分布は2種類の地盤モデルともほぼ同じ分布となった。合成応力は曲げ応力度が支配的で、海側杭の杭頭部と海底地盤面付近で、陸側杭の海底地盤面付近で栈橋背面に護岸がある場合が平坦な海底地盤の場合に比べ大きく増加した。最大水平変位についても栈橋背面に護岸がある場合のほうが大きい結果となった。陸側杭の海底地盤面付近では座屈に至る圧縮応力度に達していた。また、地中部の被害調査で得られた鋼管杭のくの字の変形位置での応力度は小さく、この変形の原因を表層地盤のせん断振動の解析からは推測できなかった。また、栈橋背面に護岸がある場合、海側杭の杭頭部は曲げによる影響が大きく、陸側杭の海底地盤面付近は軸力・曲げによる双方の影響によることもわかった。

4. 静的非線形解析

(1) 解析概要と解析条件

振動解析から被害状況を十分説明できなかったことから、せん断振動によるもの以外に背面護岸の沈下や移動に伴う地盤の側方移動による影響があると考えた。そこで、FLUSH で求めた栈橋背面に護岸がある場合の最大水平変位発生時刻の変形分布に軟弱な砂質地盤の側方変位を加算し、これを強制変位として鋼管杭と栈橋の構造部分を対象に静的非線形解析を実施した。解析には材料の非線形特性を考慮できるプログラム SOLVIA を使用し、コンクリートと鋼材の材料非線形モデルはバイリニア型とした。表層地盤の変形量を強制変位として鋼管杭に直接入力したため鋼管杭と地盤との相互作用は今回考慮しなかったことになる。強制変位の形状と値は、地震後の護岸の変形調査、鋼管杭の変形状態及び別途行われた数値解析を参考に設定した。ただし FLUSH での最大水平変位計算時にどの程度の側方変位が生じたか不明なので、強制変位を順次増加させて鋼管杭がオイラーの座屈応力度に達する強制変位量を推定した。杭下端の固定条件は、剛性の非常に高いバネを使用し、鉛直・水平両方向に設置した。杭と上部工の結合条件は剛結合とした。この解析モデルを図-7 に示す。

(2) 解析結果

まず FLUSH で計算された水平変位のみを作用させた静的解析から得られた鋼管杭の応力度の深度分布を図-8 に示す。軸応力度について、海側杭は圧縮、陸側杭には引張が作用し杭頭～杭下端にかけてほぼ一定となった。曲げ応力度について、海側杭は杭頭部で最大となり、

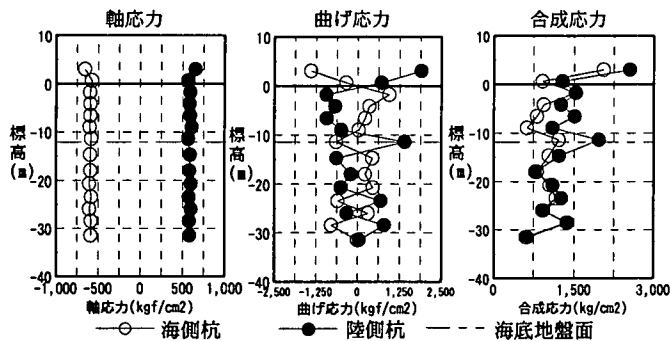


図-8 水平変位のみ作用させた杭の断面力

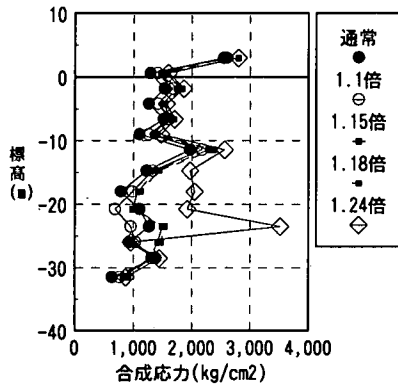


図-9 変位を増加させた場合陸側杭の合成応力

つぎに-28.5mの沖積層の順となり、陸側杭は杭頭部で最大となり、つぎに海底地盤面付近となった。合成応力度の最大値は海側杭の杭頭部で約2172kgf/cm²、つぎに陸側杭の杭頭部で約1670kgf/cm²、陸側杭の海底地盤面付近で約2000kgf/cm²の順となった。道路橋示方書⁴⁾で示される座屈応力度は2016kgf/cm²であるので表層地盤のせん断振動による強制変位だけでは鋼管杭の被害状況とくに海底地盤面での鋼管杭の座屈現象やくの字の変形を十分説明できないことがわかった。次に、側方移動による影響を加算して求めた陸側杭の合成応力の深度分布を図-9に示す。-23.5m以上の軟弱な砂層の水平変位を増加させると杭頭の応力度は変化しないが、海底地盤面と-23.5m付近で鋼管杭の応力度が増加した。図-10に示すように強制変位を増加させると海底地盤面位置で合成応力度は増加し強制水平変位が17.4cmのとき鋼管杭の合成応力度が2179kgf/cm²、18.6cmのとき2372kgf/cm²となり座屈すると計算された。また、-23.5mの箇所では強制変位が17.1cmのとき約3800kgf/cm²となり鋼管杭は降伏した結果を得た。このことはせん断振動により与えられた鋼管杭の応力度に僅かな水平の地盤の移動量による応力度を加算するだけで栈橋全体の被害状況を再現できることが判明した。

5. まとめ

今回検討した杭式栈橋では、護岸部と平坦な海底地盤に設置されており兵庫県南部地震で護岸部の鋼管杭に座屈や大変形などの被害を受けた。ポートアイランドで

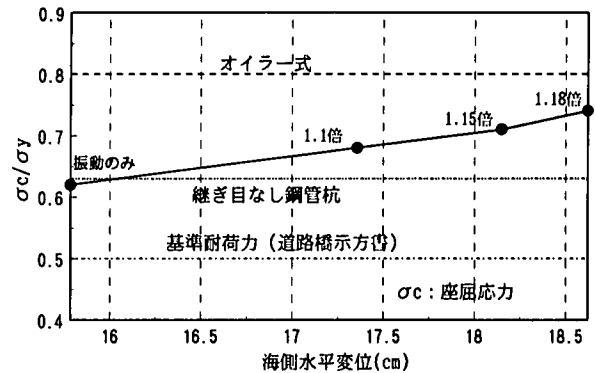


図-10 陸側杭海底地盤面における座屈応力と水平変位

取得された加速度記録をもとに FLUSH による振動解析を実施したところ、海底地盤が平坦な場合には鋼管杭は被害を受けない計算結果となった。一方護岸部に存在する栈橋の方が、水平海底地盤での栈橋より大きな応力度が算定されたものの実際の鋼管杭の被害状況を十分再現できなかった。そこで表層部分の軟弱な地層が護岸の存在による地盤の側方移動の影響をせん断振動に加算して静的非線型計算したところ僅かな水平変位の増加で鋼管杭が座屈や折れ曲がりを生じる応力度が計算されることが判明し、かなり良く栈橋の被害状況を再現できた。

この栈橋では護岸の側方への移動による影響あるいはせん断振動のみでは被害状況を再現できず両者が複合したことが被害を生じた原因と考えられる。

6. あとがき

今回表層地盤の側方移動と鋼管杭の材料非線形性の両者を考慮して一度に計算を実施できなかったため、それぞれ別途に計算を行った。今後同時に計算できるよう合理的な計算方法を検討したい。また側方移動の量と分布形状、地中部を持つ鋼管杭の座屈長の考え方、側方移動とせん断振動を受けているときの鋼管杭と地盤間のばねの設定など今回十分な検討ができなかったため今後の課題としたい。

謝辞：本論文における杭式栈橋の被害状況は第三港湾建設局神戸港湾震災復興事務所による被害調査資料を参考にさせて戴きました。ここに記して敬意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) (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
- 3) 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
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 共通編・鋼橋編、pp.121-124,1996