

神戸港における横棧橋の被害調査と動的相互作用解析

南 兼一郎*¹、高橋 邦夫*²、園山 哲夫*³、横田 弘*⁴
川端 規之*⁵、関口 宏二*⁶、辰見 ター*⁷

¹正会員 工修 運輸省 港湾技術研究所 特別研究官 (前 神戸調査設計事務所所長)
(〒239 神奈川県横須賀市長瀬 3丁目1-1)

²正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所 動土質研究室長

³正会員 工修 運輸省 第3港湾建設局 神戸港湾工事事務所所長
(元 震災復興建設部長)

⁴正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所 設計技術研究室長

⁵正会員 工修 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 部長代理

⁶正会員 工博 NKK 基盤技術研究所都市工学研究部 主任研究員

⁷正会員 工修 川崎製鐵(株) 建材センター 建材技術部

神戸港のT棧橋は、兵庫県南部地震によって岸壁法線が約1.5mせり出す等の被害を受けた。棧橋を構成する鋼管杭及び床版の被災状況を調査した結果、鋼管杭は杭頭部及び地中部で座屈が認められ、床版にはクラックが発生していた。棧橋の背面にはコンクリート護岸が建設されており、その水平移動量が棧橋の水平変位とほぼ等しいことから、棧橋の被害は護岸のせり出しによるものと推定された。被災メカニズムを究明するために、棧橋と護岸及び周辺地盤をモデル化した3種類の非線形動的解析手法による検討を実施した。動的解析では、捨石層と鋼管杭を繋ぐ相互作用バネの相違が、鋼管杭の座屈挙動に影響し、最大バネ反力値は側方土圧係数で1.0程度に相当した。

Key Word : Soil Structure Interaction, Quaywall, Earthquake Damage, Non-Linear Analysis

1. はじめに

T棧橋は、昭和63年に建設された直杭式の鋼管杭棧橋である。棧橋は図-1に示すような断面で構成されており、兵庫県南部地震において崩壊に至る致命的な被害は受けなかったものの、棧橋全体が1.5m程度せり出す等の変状が生じた。棧橋の復旧に際して、鋼管杭及びRC床版の詳細な調査を実施し、被災状況を把握すると共に、非線形動的解析による被災メカニズムの検討を行った。

2. T棧橋の概要

2.1 構造概要

棧橋は、図-1に示す通り3列の鋼管杭とRC梁で構成される直杭式横棧橋である。3本の鋼管杭の板厚がそれぞれ異なっており、設計水平震度0.15に対する発生応力に応じた配置となっている。図-1中に棧橋の主な被災箇所を記入している。

2.2 地盤条件

棧橋建設地点の地盤の構成を図-1中に示す。海底地盤は表層に沖積粘土が堆積し、下方の洪積礫層との間に薄い沖積砂層が存在している。沖積砂層の粒度分布を図-2に示すが、液状化の可能性を有している。

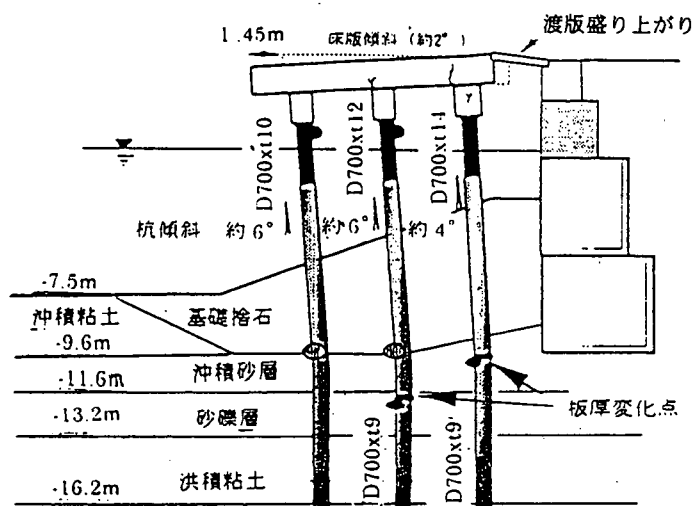


図-1 T棧橋の構造断面の模式図

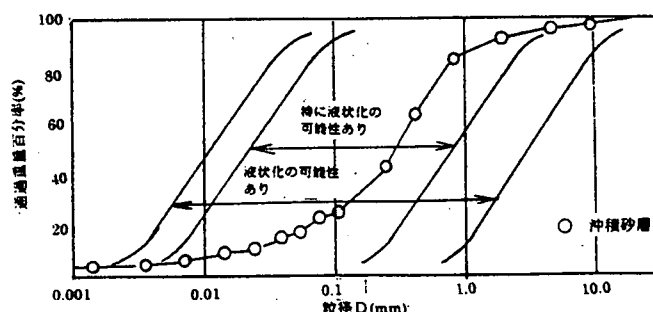


図-2 沖積砂層の粒度分布

3. 被害調査結果

3. 1 全体変形状況¹⁾

栈橋全体のせり出し量の測定結果を図-3に示す。栈橋のせり出し量は、栈橋中央で最大1.7mであり、南端で0.5m、北端では顕著な永久変位は認められていない。

3. 2 床版クラック調査

栈橋の詳細調査を実施した床版(12m×23m)のクラック調査結果を図-4に示す。RC梁のクラックは下面にのみ認められた。クラック幅は陸側の梁ほど大きく、海側の梁にはクラックは見られなかった。クラック幅は最大で3.0mm程度あり、鉄筋の降伏レベルの曲げモーメントが発生していたものと推定される。

3. 3 鋼管杭座屈状況

鋼管杭頭部には、床版の陸側からの水平力に起因すると考えられる座屈が認められた。座屈箇所分布と座屈による膨らみ量を図-4に示す。RC梁のクラックとは対照的に、鋼管杭頭部の座屈は海側の杭が多く、陸側の杭頭部では少ない。杭頭部の座屈の形状は凸型であった。

栈橋のブロックを構成する15本の内3本を引き抜いて、詳細な変形量を調査した結果を図-5に示す。鋼管杭は、地中部でも座屈しており、座屈位置は陸側の杭ほど深い位置で生じている。座屈の形態は杭頭部と異なり、凹型であった。

3. 4 被災メカニズムの推定

栈橋の被災状況から見て、床版には陸側から海側へ大きな力が働いたと推定される。この力は背面の護岸のせり出しにより生じ、渡版を介して床版に伝わったものと考えられる。同時に護岸ケリンのせり出しが栈橋下の捨石層を移動させ、鋼管杭に直接側方土圧が作用して、地中部の座屈を発生させたものと考えられる。

4. 静的弾塑性解析

4. 1 構造モデル

栈橋に作用した外力を推定するために、静的弾塑性解析を行った。栈橋の鋼管杭は完全弾塑性型でモデル化し、側方土圧は杭体に3角形分布荷重を作用させた(図-6)。床版は剛体と仮定し、地盤反力は完全弾塑性型の連続バネでモデル化した。解析プログラムとしてNPILAN²⁾を用いた。

4. 2 解析結果

地中部に作用させる側方土圧係数をパラメータとして数ケースの解析を実施した。調査によって確認された地中部座屈の位置を再現しうる側方土圧モ

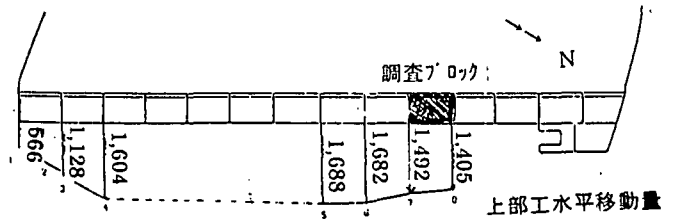


図-3 栈橋の水平変位状況

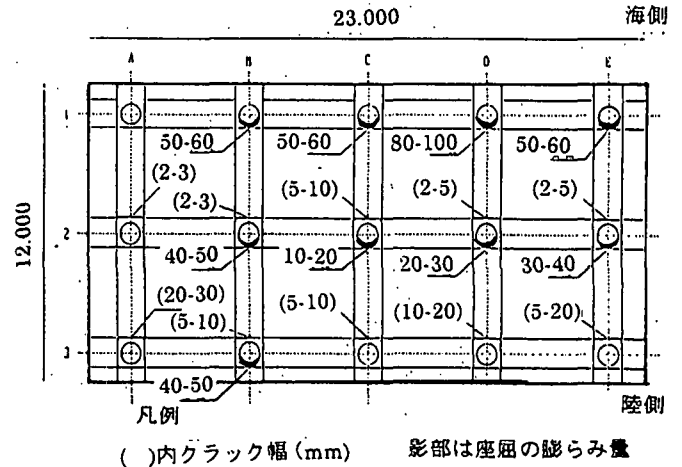


図-4 床版の被害状況

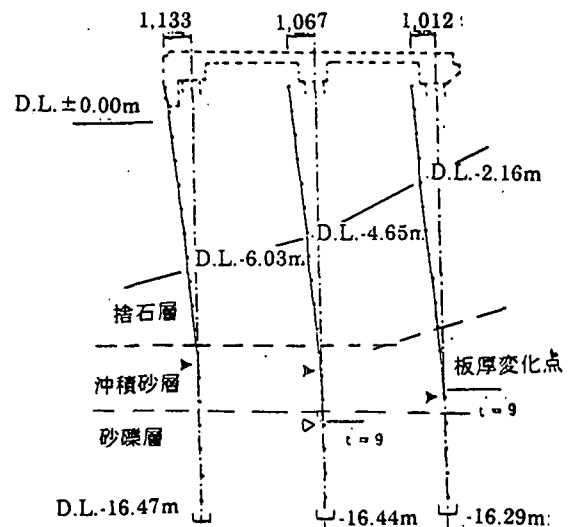


図-5 引き抜いた杭の変形状況

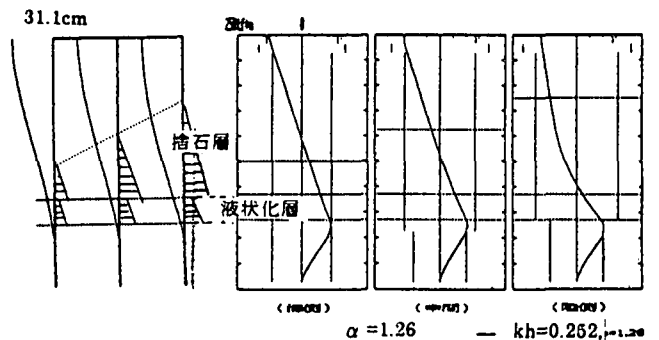


図-6 杭の変形図 図-7 曲げモーメント図

デルは、土圧係数で $\alpha=1$ 程度の場合（図－6、7）であり、受働土圧レベルの側方土圧を作用させるケースでは、地中部座屈の位置と方向が調査結果と対応しなかった。

5. 非線形動的解析

5. 1 非線形動的解析手法の概要

栈橋と地盤の動的相互作用解析を実行するプログラムはいくつか提案されているが、鋼管杭の弾塑性挙動も考慮できるプログラムは少ない。ここでは、港湾技術研究所にて開発されたFLIPと、米国で開発された2つのプログラムFLAC（陽解差分法）とCAP（Penziengモデル）の3つの方法により解析を実施し、調査結果との比較を行った。

入力地震波は栈橋近傍のポートアイランドで観測されの基盤波をT栈橋の法線直角方向成分に合成して基盤に入力した。³⁾ また、栈橋部材と地盤要素の間には杭の軸直角方向の地盤反力バネに相当する相互作用バネを設置している。

5. 2 FLAC⁴⁾による動的解析

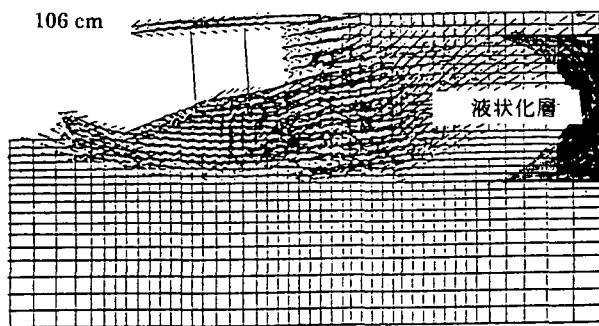
FLACは地盤と構造物の非線形動的解析を陽解差分法によって解析するプログラムであり、大変形問題を更新Lagrangian法で解析している。地盤及び構造部材は弾塑性モデルとしているが、地盤のせん断変形や液状化に伴う経時的な物性値の低下は考慮できないので、予め仮定した液状化範囲とせん断歪みレベルに応じて、せん断強度と変形係数を低減させている。

いくつかの解析ケースに対して検討を実施したが、調査結果と傾向が一致しているケースに関してのみ述べる。図－8は鋼管杭と捨石間の相互作用バネの最大値を有効土被り圧の1.0倍としたケースの変形図であり、最終変位と鋼管杭の降伏位置が概ね被災状況と一致しているケースである。各土層の変形係数は地震時の歪みレベルを 10^{-3} と考えて $G/G_{max}=0.3$ とした。予備解析による液状化範囲はケーソン背面と栈橋下の沖積砂層であり、この範囲の地盤強度と変形係数を1/3に低減して解析した。（図－8着色部）

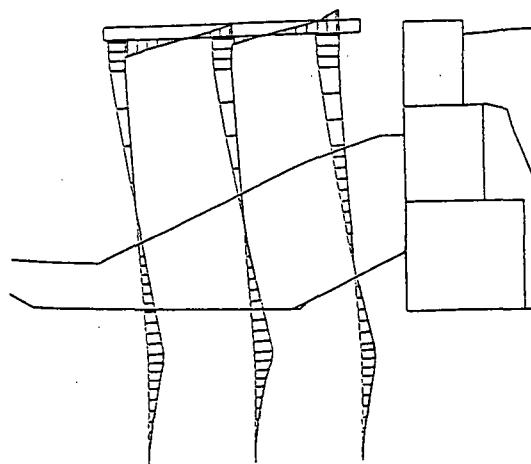
解析結果は、図－8に示すように栈橋の終局変位として10.6cmが計算されており、調査結果の15.0cmより小さい。また、図－9は地震後の残留モーメント分布であるが、鋼管杭の塑性化位置は座屈の調査結果と一致した。

5. 3 FLIP⁵⁾による動的解析

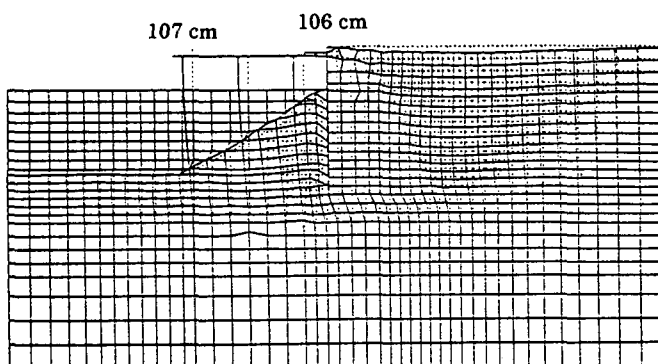
FLIPは、地震時の繰り返しせん断による有効応力の変化を考慮して非排水条件下で相互作用解析



図－8 FLACによる残留変形ベクトル図



図－9 FLACによる残留モーメント分布



図－10 FLIPによる残留変形図

を実施するプログラムである。鋼管杭及びRC梁の構造部材は線形梁要素を適用し、相互作用バネには線形バネを用いている。図－10は、栈橋の水平変位と鋼管杭の被災状況が調査結果に近い解析ケースであり、この時の鋼管杭と捨石間の相互作用バネの反力係数は $Kh=0.015\text{kgf/cm}^3$ であった。

相互作用バネの設定は本プログラムが現状では線形バネでの計算に制約されるために、線形バネの値を小さめに設定することで、側方土圧の大きさを確認した。相互作用バネを大きくすると、捨石層の移動に伴い、捨石層中の杭部に大きなモーメントが発生して、被害調査結果と一致しない深さで鋼管杭が塑性化することとなる。（図－11）

なお、ケーソン背面が液状化しない場合の解析や、
 栈橋下の沖積砂層が液状化しない場合の解析結果
 は、栈橋の水平変位が小さく、鋼管杭も降伏に至
 っていない。このことから、栈橋の被害の主因
 は強い地震動による護岸背面及び捨石下面の沖積
 砂層の液状化によるものと推定される。

5. 4 CAP⁶⁾による動的解析

CAP は石油掘削用の海洋構造物であるプラットフォームの動的解析プログラムとして開発された。構造部材は鋼構造物のM-P-φ関係のモデル化が可能である。地盤モデルは、Penzieng 型の自由地盤の振動モデルと相互作用バネで連結されている。CAP の解析モデルを図-12に示す。地盤の応答はFLIPによる栈橋が存在しない場合の地中部の応答変位を強制変位として入力している。栈橋の構造部材の最終的な塑性化状態を図-13に示す。図中の番号は塑性化の順序を示している。鋼管杭の塑性化位置は調査結果とよく一致している。

6. おわりに

本検討により以下のことが確認された

- 1) 地震時にT栈橋に生じた大きな残留水平変位は、護岸背面の埋立土層と栈橋下の沖積砂層の液状化によりケーソン護岸が栈橋と捨石層を押し出した事により生じたと推定される。液状化が生じなければ、栈橋は十分な耐力を有してた。
- 2) 捨石層から鋼管杭に作用した側方土圧は、捨石層の有効土被り圧と同程度であったと推定される。
- 3) 非線形動的解析手により被災メカニズムが説明できたが、杭体と地盤間の相互作用バネの設定については、今後十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局、港湾技術研究所、
 第3港湾建設局：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等の被害報告書、平成9年1月
- 2) 高橋邦夫 他：東京国際空港進入灯基礎の水平載荷実験と3次元解析、構造工学論文集 vol. 41A, 1995
- 3) 関口宏二 他：兵庫県南部地震における鉛直アレー強震記録に基づく地震動型増幅特性と地盤振動解析法の検討、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp. 109-116, 1996

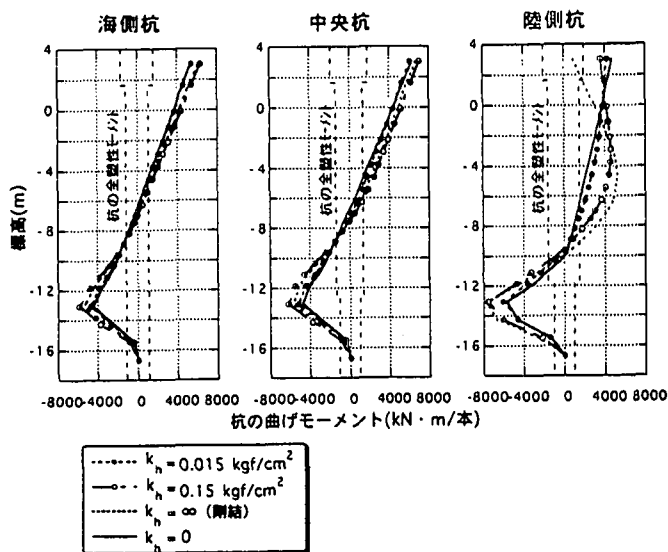


図-11 FLIPによる残留モーメント図

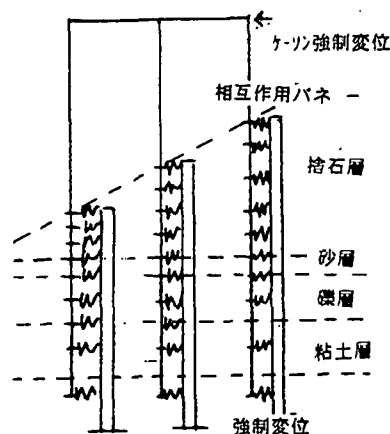


図-12 CAPの解析モデル

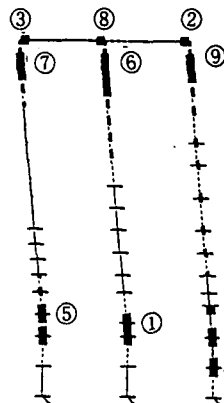


図-13 CAPによる残留塑性ヒンジ

- 4) 及川研 他：阪神大震災によって被災した重力式岸壁の簡便な地震時変形解析、第31回地盤工学研究発表会、pp. 1133-1134, 1996
- 5) 井合進 他：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクルモビリティのモデル、港湾技術研究所報告、第29巻、第4号、1990
- 6) PMB Engineering Inc.: Capacity Analysis Program, Theoretical Manual, 1993