

神戸港における縦棧橋及びドルフィンの被害調査と静的弾塑性解析

高橋 邦夫¹・南 兼一郎²・園山 哲夫³・横田 弘⁴
・鈴木 規彦⁵・野路 正浩⁶

¹正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所 動土質研究室長 (〒239神奈川県横須賀市長瀬3丁目1-1)
²正会員 運輸省 港湾技術研究所 特別研究官 (前 第三港湾建設局神戸調査設計事務所所長)
³正会員 運輸省 第三港湾建設局 神戸港湾工事事務所長 (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 (〒239神奈川県横須賀市長瀬3丁目1-1)
⁵正会員 株式会社クボタ 鋼管エンジニアリング部 (〒103東京都中央区日本橋室町3丁目1-3)
⁶正会員 住友金属工業株式会社 建設技術部 (〒100東京都千代田区大手町1丁目1-3)

神戸港ポートアイランドのA棧橋及びBドルフィンについて、兵庫県南部地震による被害調査結果をまとめ、静的弾塑性解析により被災のメカニズムを検討した。縦棧橋であるA棧橋については、護岸に隣接する棧橋ブロックで杭頭部に法線直角方向の座屈と地中部に法線方向の座屈が認められた。また、Bドルフィンは護岸から離れた位置に建設されており、杭頭部の被害は少なかったが、海底面と置換砂層付近の2ヶ所に座屈が認められた。これらの構造物に対して静的弾塑性解析を実施し、被災原因の究明を行うとともに、地中部に作用した地震時側方土圧及び床版に作用した慣性力を評価した。

Key Words : Dolphin, Pier, Earthquake, Steelpile, elasto-plastic analysis, inertial force, lateral pressure

1. はじめに

神戸港ポートアイランドのA棧橋及びBドルフィンは護岸から離岸して建設されている。これら縦棧橋やドルフィンは横棧橋構造と異なり、背面護岸がないので比較的変形は小さかった。A棧橋及びBドルフィンの復旧に際して、被災状況を把握するとともに、静的弾塑性解析により被災原因の検討を行ったので、報告する。

2. A棧橋の被災状況及び解析

(1) A棧橋の概要

調査対象は-7.5m棧橋であり、護岸法線から直角方向に伸びた縦棧橋である。棧橋の平面形状及び構造概要を図-1に示す。今回の調査は、護岸に重力式ケーソン2ブロックを挟んで接続した、直杭式のA-1, 2ブロックを対象とした。

(2) A棧橋の被災状況

棧橋の変形状況の平面図を図-2に示す。また、鋼管杭の引抜き調査による杭の変形状況を図-3に示す。A棧橋の被災状況をまとめると以下のとおりである。

- ・ A-1, 2ブロックは、全体的に北側に40cm程

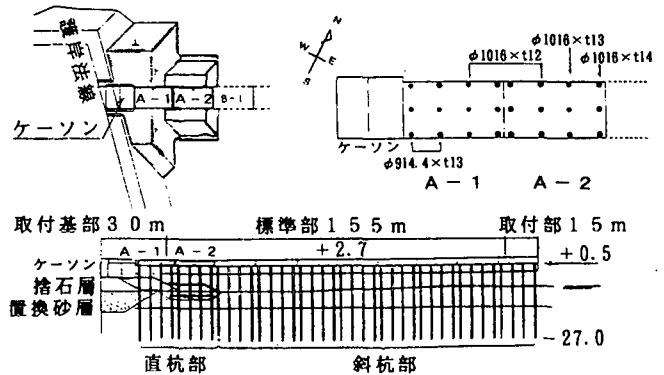


図-1 棧橋の平面形状及び構造概要

度変位していた。

- ・ A-1ブロックのうち、ケーソンに最も近い杭では地中部及び杭頭部の2点に顕著な折れ曲がりが見られた。これらはケーソンの移動や捨石マウンドの変形による影響と考えられる。他の杭では杭頭部に座屈が生じていた。
- ・ 上部工にはクラックが発生しており、南側杭列の杭頭付近及び北側杭列の上面付近に集中していた。ケーソンに近いA-1ブロックでは棧橋の軸直角方向にもクラックが見られた。

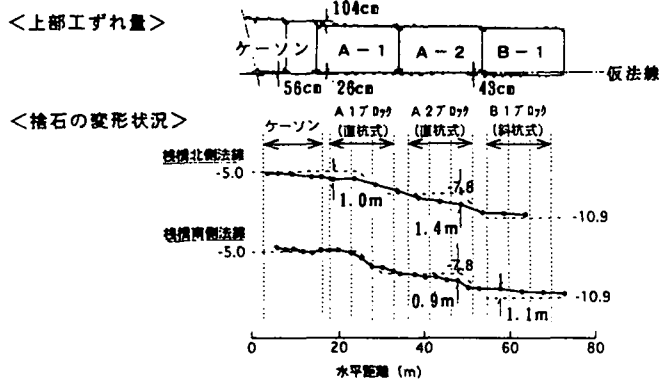
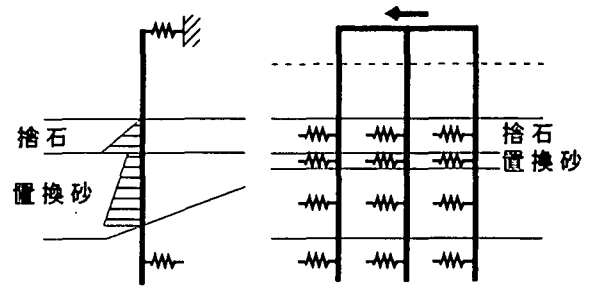
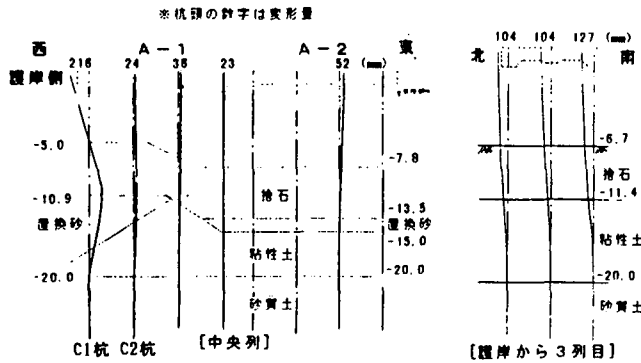


図-2 棧橋の変形状況



(1)岸壁法線方向 (2)岸壁法線直角方向

図-4 棧橋の解析モデル



(1)護岸法線方向 (2)護岸法線直角方向

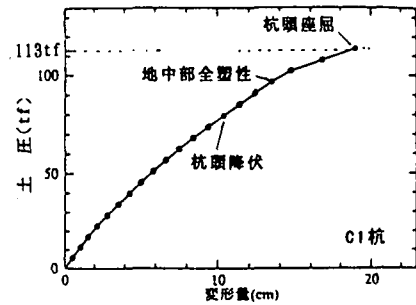
図-3 引抜き調査による杭の変形状況

- ・ A-2ブロックより東側に位置する、護岸から離れた組杭式の棧橋部では被害が見られなかった。
- ・ A 棧橋の杭は腐食代により設計されており、杭打設後約16年が経過していたが、L. W. L. 付近では3mm程度の腐食が見られた。

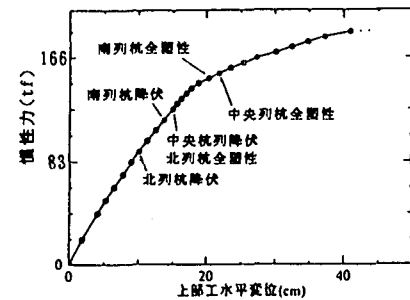
(3) A 棧橋の静的弾塑性解析

棧橋の構造を図-4のようにモデル化し、静的弾塑性解析を実施した。モデルは床版を剛体とし、杭頭と床版が剛結された杭-ラーメン構造とし、杭体及び地盤バネを弾塑性体とした。杭体及び地盤の非線形モデルを図-5に示す。解析による構造体の荷重-変位曲線を図-6に、杭体の変形図を図-7に示す。

引抜き調査の結果より、護岸法線方向では、捨石層及び置換砂層の側方土圧が杭に与えた影響が大きいものと考え、式(1)に示すとおり、有効土被り圧をベースとして側方土圧を設定し、杭モデルに作用



(1)岸壁法線方向



(2)岸壁法線直角方向

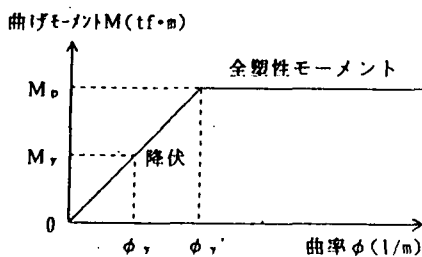
図-6 棧橋の荷重-変位曲線

させた。

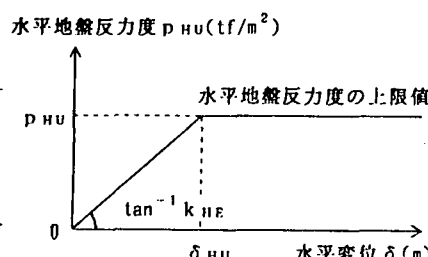
$$\text{捨石層・置換砂層} : p = \alpha \gamma' z \quad (1)$$

- ここに、 α 静的弾塑性解析時の荷重倍率
- γ' 各層の水中単位体積重量(tf/m^3)
- z 層上端からの深さ(m)

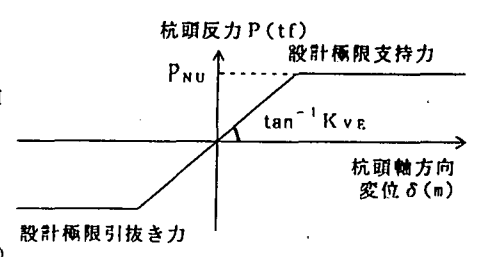
また、護岸法線直角方向では上部工慣性力による影響が卓越したものと考え、杭ラーメンモデルに慣性力のみを作用させた。



(1)鋼管杭のM-φモデル



(2)地盤の水平方向バネモデル



(3)地盤の鉛直方向バネモデル

図-5 杭体及び地盤の非線形モデル

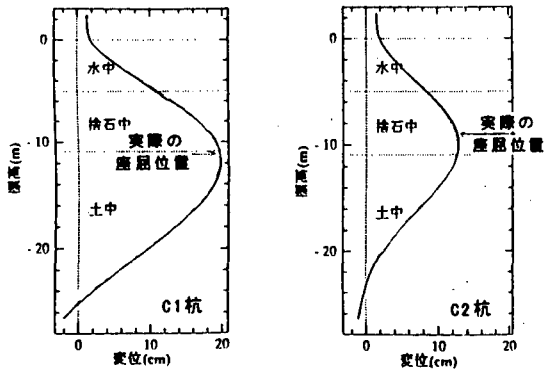


図-7 棧橋杭の変形図（護岸法線方向）

上記のような設定に基づいて行った静的弾塑性解析によれば、護岸法線方向・法線直角方向とも杭の座屈発生位置は実際の杭の引抜き調査結果にほぼ一致し、杭の変形モードを概ね再現できた。護岸法線方向では塑性ヒンジが発生するのは前記設定土圧の荷重倍率 α が4～6の時である。上部工慣性力のみ作用させた護岸法線直角方向では杭頭部に塑性ヒンジが発生し、実際の調査で上部工のクラックや杭頭座屈が見られた点を解析上裏付ける結果となった。但し、静的弾塑性解析では解析モデルの終局耐力よりも大きな外力に対しては解析が不能となるため、ケーソンに最も近接した杭で見られたような大変形までは再現できなかった。

3. Bドルフィンの被災状況及び解析

(1) Bドルフィンの概要

調査対象であるBドルフィンの形状および今回測定された水平変位を図-8に、構造及び地盤条件を図-9にそれぞれ示す。今回の調査対象は西側に位置する3つのドルフィンである。

(2) Bドルフィンの被災状況

水中観察調査を実施した結果、鋼管杭の曲がりが見られた網取りドルフィンおよび歩廊橋ドルフィンについては、鋼管杭を引抜いて変形量を調査した。調査結果を図-10に示す。なお、接岸ドルフィンでは杭の曲がりが見られなかった。Bドルフィンの被災状況をまとめると以下のとおりである。

- ・ 網取りドルフィン・歩廊橋ドルフィンで30cm程

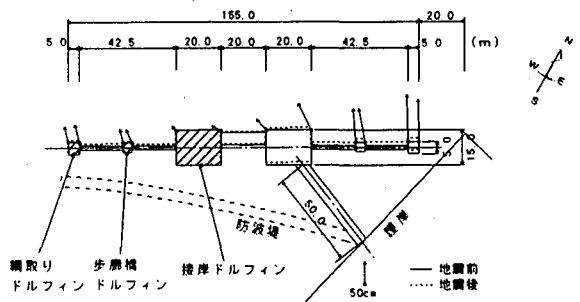


図-8 ドルフィンの平面形状及び水平変位

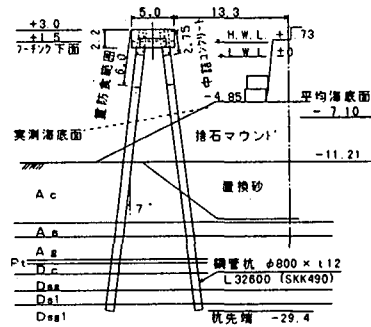


図-9 ドルフィンの構造概要（網取りドルフィン）

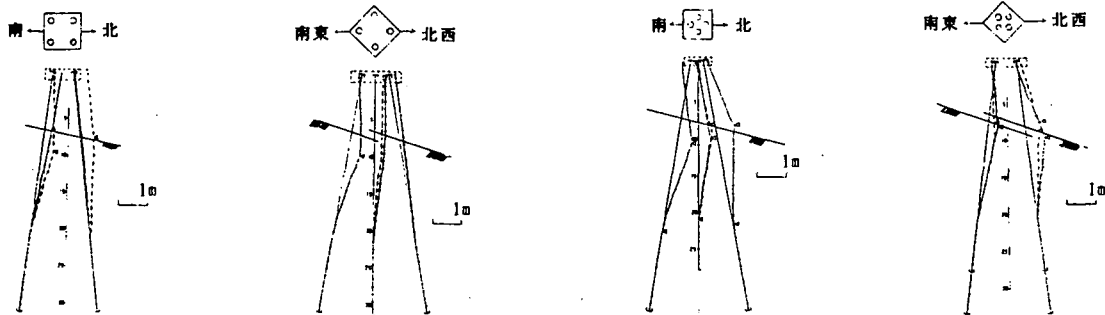
度、接岸ドルフィンで10cm程度、北西側に変位していた。

- ・ 網取りドルフィン及び歩廊橋ドルフィンでは、杭が杭頭及び置換砂層付近の2点で折れ曲がっていた。接岸ドルフィンの杭には曲がりは見られなかった。
- ・ 各ドルフィンの上部工（床版・梁）については目視調査を行ったが、網取りドルフィン・歩廊橋ドルフィンではクラック等の被害は認められなかった。接岸ドルフィンでは床版の一部にクラックが見られたが、梁は健全であった。
- ・ Bドルフィンの各杭は杭頭から水中部にかけて重防食被覆が施されており、杭体の腐食は見られなかった。

(3) Bドルフィンの静的弾塑性解析

Bドルフィンの構造を図-11に示すようにモデル化し、静的弾塑性解析を実施した。なお、杭体及び地盤の非線形モデルはA棧橋に準じた。

網取りドルフィン及び歩廊橋ドルフィンについて



(1) 網取りドルフィン

(2) 歩廊橋ドルフィン

図-10 引き抜き調査による杭の変形状況

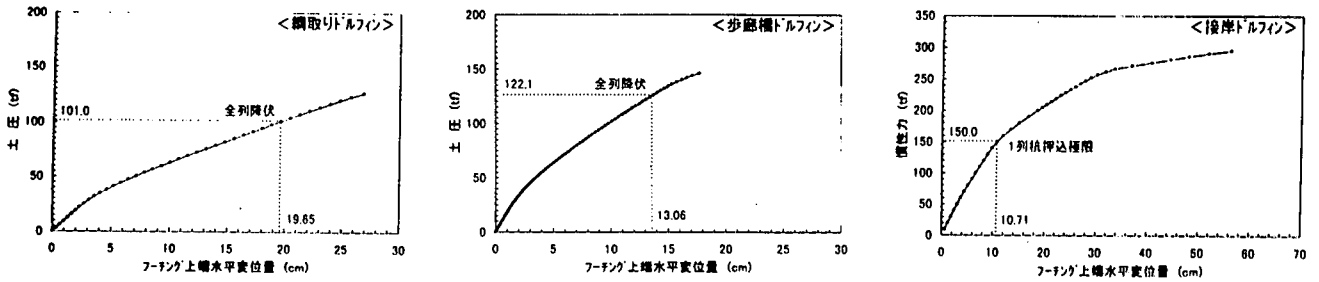


図-12 ドルフィンの荷重-変位曲線

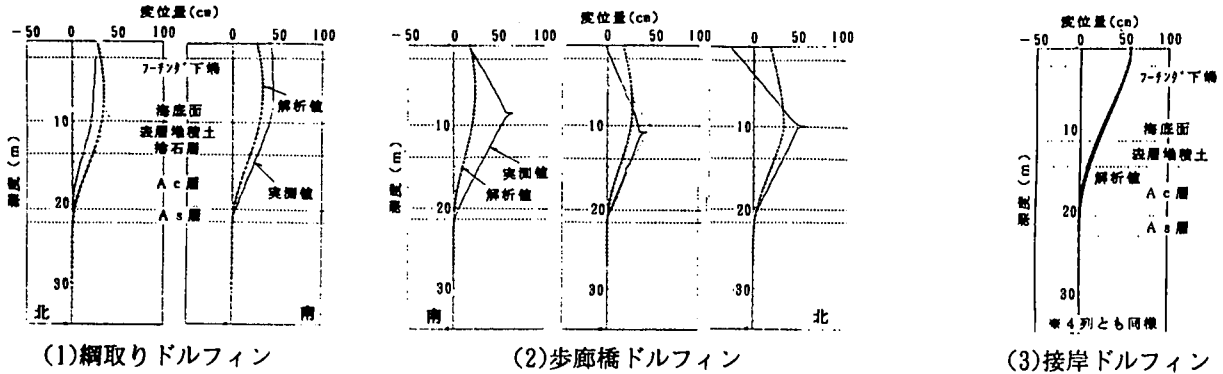


図-13 静的弾塑性解析によるドルフィンの変形図

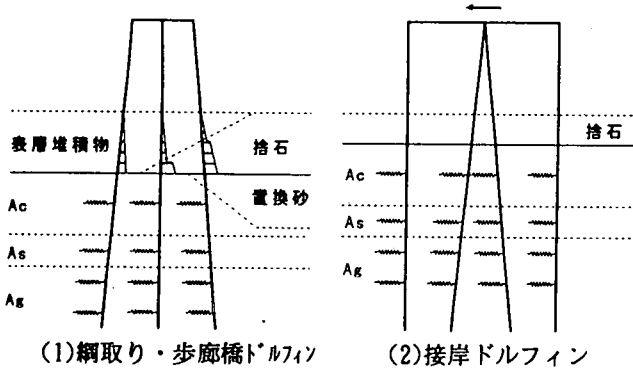


図-11 ドルフィンの解析モデル

は上部工重量が小さく、慣性力よりも側方土圧による影響が卓越したものと考えられることから、杭モデルに土圧のみ作用させた。土圧の設定式は前出の式(1)及び次式とした。

$$\text{表層堆積物} : p = \alpha(\gamma'z + 2c) \quad (2)$$

ここに、 c 粘着力(tf/m^2)

また、接岸ドルフィンでは上部工慣性力が卓越したものと考え、解析上、慣性力のみ作用させた。

解析による構造体の荷重-変位曲線を図-12に、杭体の変形図を図-13にそれぞれ示す。

これらの設定で解析した結果、各ドルフィンとも実際の杭の被災状況に近い変形モードを再現することができた。Bドルフィンの場合は杭が置換砂層にほとんど係っていないため、A栈橋と異なり、置換砂層の影響が大きくなかったと考えられる。

側方土圧を作用させた網取りドルフィン・歩廊橋ドルフィンの解析において、塑性ヒンジ発生時の荷重倍率 α は10程度であった。また、上部工慣性力を作用させた接岸ドルフィンでは杭頭だけに塑性ヒン

ジが発生した。但し、実際の被災状況では上部工にクラックが見られたものの、杭頭に座屈は生じていないことから、今回の地震応答に対して実構造体の剛性が相対的に高い構造であったと考えられる。これらの要因として、杭が重防食被覆を施され、腐食減肉が無かった点、直杭と斜杭を密に組み合わせた剛性の高い基礎構造であった点が考えられる。

4. おわりに

A栈橋とBドルフィンの被害状況の調査結果と、静的な弾塑性解析による被災原因の検討により、以下のことが確認された。

- 1) 縦栈橋及びドルフィンでは、護岸近傍ないし防波堤マウンドの捨石層の変状による被害が顕著であり、被災の原因は周辺地盤の変状によるものと推定される。
- 2) 護岸や斜面の移動により、鋼管杭に作用する側方土圧の大きさは、有効土被り圧の5~10倍程度と推測される。
- 3) 護岸の変状の影響を受けない場合の地震応答による鋼管杭の損傷は、上部工慣性力の影響が支配的であるため杭頭付近に集中する。今回の調査では、腐食減肉のために径厚比が大きくなった部位での座屈は認められたが、重防食被覆が施された鋼管杭の変状は認められなかった。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局, 港湾技術研究所, 第三港湾建設局: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等の被害報告書, 1997