

地震時における鋼管杭式栈橋の破壊メカニズム に関する解析的研究

横田 弘¹・高橋邦夫²・南兼一郎³・川端規之⁴・原田典佳⁴

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所構造強度研究室長（〒239 横須賀市長瀬3-1-1）

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所動土質研究室長（〒239 横須賀市長瀬3-1-1）

³正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部長（〒239 横須賀市長瀬3-1-1）

⁴正会員 工修 鋼管杭協会（〒103 中央区日本橋茅場町3-2-10）

1. まえがき

栈橋は鋼管杭とコンクリート上部工により構成される構造物で、構造面で以下のような特徴を有している。

- ① 鋼管杭の基礎が上部構造と直接接合されており、橋梁基礎のようなフーチングが存在しない。
- ② 栈橋の背面に護岸が存在する場合が多く、地盤振動が2次元적であり、偏土圧が作用する可能性が高い。
- ③ 地震力以外に船舶接岸力などが支配的設計荷重になっている場合も多く、水平力が大きい際には斜杭構造も適用される。
- ④ 栈橋の終局耐力は、鋼管杭と上部工の終局曲げ強度と水平方向地盤反力の相互作用で評価される。

また、栈橋は従来より地震時の被災事例が少なく、耐震性が高いと考えられている構造物でもある。

栈橋構造の保有耐力性能に関する研究は古くから港湾技術研究所を中心に進められてきている。山本らは、直杭式栈橋の保有水平耐力を各杭の塑性化を考慮した解析手法により検討し、栈橋の保有水平耐力の評価法を提案している¹⁾。また、稲富らは、栈橋の非線形応答挙動を検討し、Jenningsらの手法による非線形応答解析から栈橋の応答倍率を求めて観測結果と比較している²⁾。

本論文では、栈橋の地震時応答を地盤と構造物の動的相互作用としてとらえ、等価線形解析法によるプログラム（FLUSH）を用いて動的解析を行い、その応答加速度に対する栈橋の保有水平耐力を評価した。栈橋の保有水平耐力は、杭基礎の弾塑性解析プ

ログラム（NPILAN）を用いて照査した。さらに、1995年兵庫県南部地震で被災した栈橋の非線形動的解析と静的弾塑性解析を実施し、弾塑性解析法による栈橋の保有水平耐力照査法の妥当性を検討した。

2. 栈橋の応答解析と保有水平耐力解析

設計水平震度0.2で設計された水深7.5mの直杭式モデル栈橋を対象として、FLUSHによる動的相互作用解析を実施した。解析対象断面を図-1に示す。応答解析には、十勝沖地震の際に八戸港で観測された地震波を最大値が200Galになるように補正して用いた。栈橋の有限要素モデル化においては、杭および上部工をはり要素でモデル化し、地盤要素に接する個所の節点は共有化させた。等価線形解析法による地盤と栈橋の動的相互作用解析では、構造物の剛性と地盤の剛性がほぼ同程度の影響を応答値に与えるものと考えられ、2次元解析を行う際の解析地盤幅と解析栈橋幅の相対的なバランスが重要となる。振動が地盤から杭に伝達する影響範囲や、栈橋の振動が杭から地盤中に伝達されるひずみの影響範囲は一律に規定はできないが、本解析では地盤の影響幅が杭径程度であると考えた。すなわち、地盤モデルの幅は杭幅と同等とし、栈橋の剛性と質量は杭間隔で換算して設定した。

動的解析で得られた上部工の応答加速度の波形を図-2に示す。最大応答加速度は203Galであった。また、最大応答変位は12.8cmであった。

このモデル栈橋の保有水平耐力を評価する目的で、栈橋の杭ラーメンモデルによる弾塑性解析を実施した。解析では、鋼管杭の $M-\phi$ 関係と地盤反力

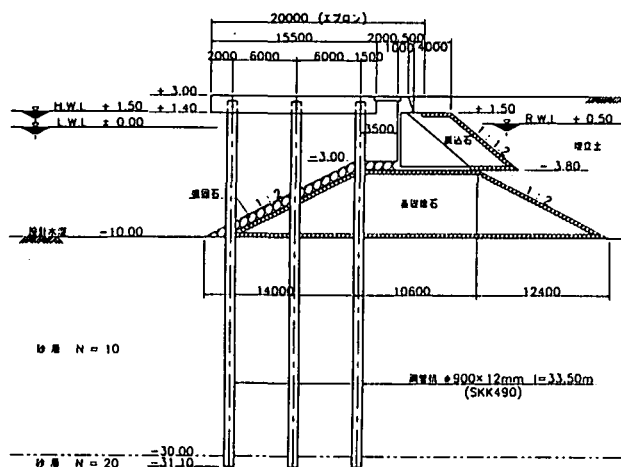


図-1 モデル栈橋の標準断面

の $P-\delta$ 関係を完全弾塑性型のバイリニア関係でモデル化した。モデル栈橋の解析では、上部工の剛性は無限大とした。

上部工の荷重－水平変位関係の解析結果を図－3に示す。栈橋の初期剛性は、約7.5tf/cmで、固有周期は約0.9secであった。栈橋の終局耐力としては、解析的には1.0G（G：重力加速度）の水平震度に相当する155tf程度の終局耐力が確認できた。また、直杭式モデル栈橋の崩壊メカニズムは、概ね以下のような順序で発生する結果となった。

- ① 杭頭部の塑性ヒンジ 陸側杭→海側杭
② 地中部の塑性ヒンジ 陸側杭→海側杭

モデル栈橋は水平震度0.2で設計されているが、弾塑性解析により1.0Gレベルの終局耐力を有しており、設計震度の約5倍の地震力にも抵抗が可能であることが確認できた。また、200Galクラスの地震入力に対しては、杭の塑性化に至らない結果となった。

3. 神戸港ポートアイランドの直杭式棧橋の被災メカニズム

図-4は神戸港ポートアイランドの北部に建設された直杭式栈橋である。この栈橋はいわゆる縦栈橋と呼ばれているもので、背面に土留め護岸がない構造である。同栈橋は地震後の調査により杭頭部に座屈が生じ、地中部にも杭の塑性化（曲がり）が確認されている³⁾。この栈橋の詳細な被災メカニズムを推定する目的で、非線形動的解析および静的弾塑性解析を実施した。栈橋は水平震度0.1で設計されている。建設後10年が経過しており、飛沫帯近に腐食

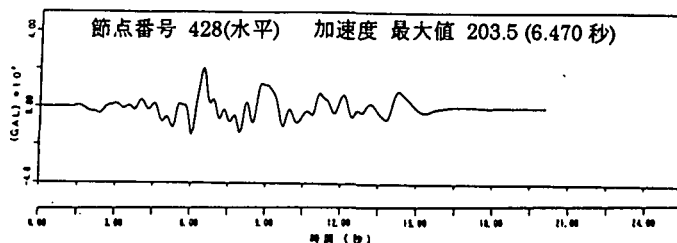


図-2 モデル栈橋上部工の応答加速度

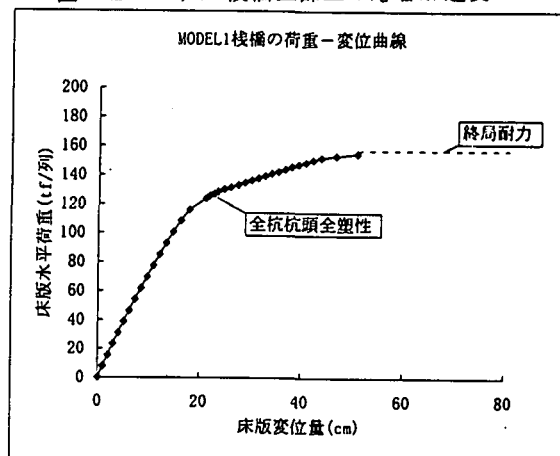


図-3 モデル栈橋上部工での荷重-水平変位関係

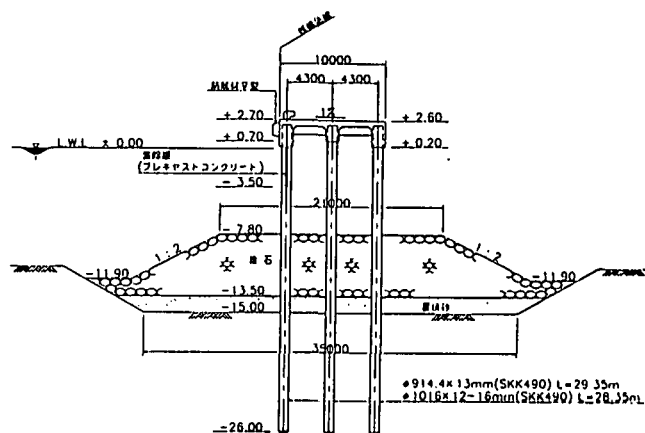


図-4 神戸港直杭式棧橋の標準断面

が進行したため、解析では腐食調査の結果に基づいて2.5mmの肉厚減少を考慮した。また、解析では上載荷重を考慮していない。

(1) 非線形動的解析

兵庫県南部地震においてポートアイランドの基盤で観測された加速度は最大値が500Gal以上であり、栈橋の応答解析では、鋼管杭の塑性化を考慮する必要がある。本論文では、鋼管杭と床版梁の塑性化を

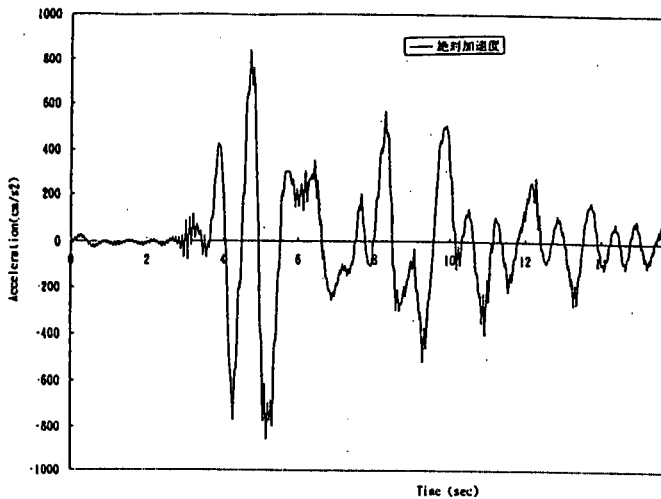


図-5 直杭式栈橋上部工の応答加速度

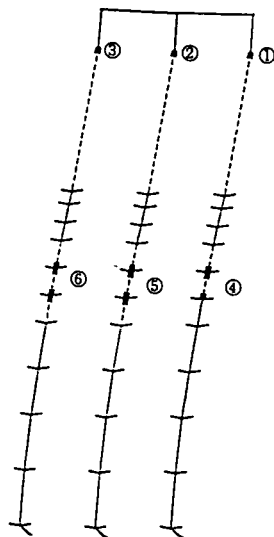


図-6 塑性化イベントの進展状況

考慮した弾塑性骨組に、重複反射理論に基づく地盤変位を相互作用バネを介して強制変位として与える Penzieng型の非線形動的解析を実施した。入力ポートアイランドの基盤波(678Gal)を用いた。

図-5に上部工の応答加速度の解析結果を示す。最大応答加速度は825Galであった。解析による杭の応答モーメントは、全塑性モーメント以下であった。図-6は解析中の塑性化イベント図である。杭頭部と地中部が各杭列共に降伏モーメントを超過していることがわかる。非線形応答解析結果の最大応答変位は60cm程度であったが、鋼管杭の完全塑性化に至らないために、最終変位はほぼ0であった。なお、この栈橋では地震後に40cm程度の残留変位が確認されており、解析結果と一致しなかった。

(2) 静的弾塑性解析

栈橋の保有水平耐力を確認するために、静的弾塑

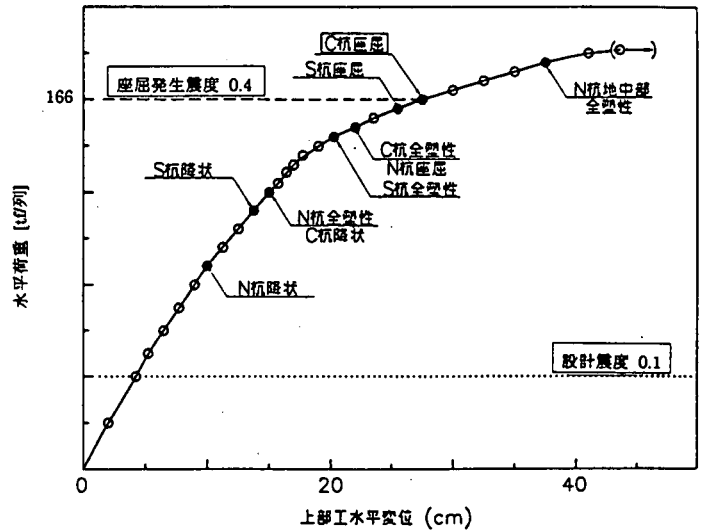


図-7 直杭式栈橋上部工での荷重-水平変位関係

性解析を実施した。鋼管杭および上部工の塑性化挙動および杭の押込み-引抜き支持力挙動などを評価するために、栈橋構造を弾塑性骨組みでモデル化し、地盤の応答解析結果を相互作用バネを介して強制変位入力した。

図-7に栈橋上部工での荷重-変位関係の解析結果を示す。栈橋の終局耐力は、静的水平震度で0.4程度(防波板の動水圧を考慮)であり、この栈橋の耐力も設計震度に相当する地震力の4倍程度の耐力が期待できたものと考えられる。

鋼管杭の塑性化の順序は、モデル栈橋と同様に杭頭部の塑性化が先行し、地中部の塑性化が始まる結果となった。同図中に杭頭部の座屈の発生を塑性イベントとして記入している。鋼管杭の座屈の評価は、建築学会の鋼構造塑性設計指針⁴⁾に基づき、次式で評価した。

$$\varepsilon_{max} = 0.44t/D \quad (1)$$

ここで、

ε_{max} : 座屈発生時のひずみ量

D : 杭の直径

t : 杭の肉厚

座屈発生震度は0.4以下であり、動的解析による825Galレベルの応答を考慮すれば、解析による座屈状況と調査結果の傾向は一致した。図-8は、弾塑性解析結果にエネルギー一定則を適用して栈橋の保有水平耐力を評価した結果である。エネルギー一定則による最大応答変位は40cm程度であり、鋼管杭の座屈の発生により栈橋が復元力を失っていたことを考慮すれば、観測結果の残留変位43cmと概ね一致する。

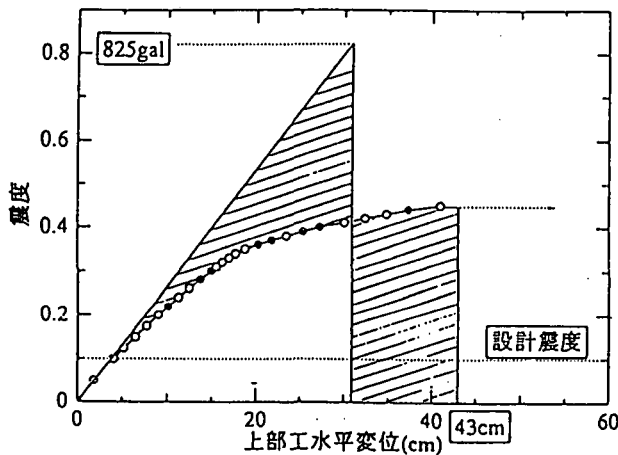


図-8 保有水平耐力の評価

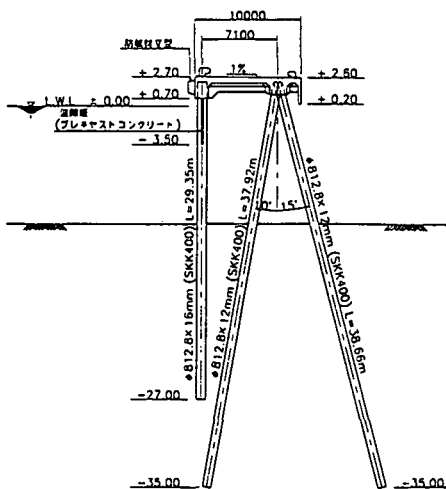


図-9 神戸港斜杭式栈橋の標準断面

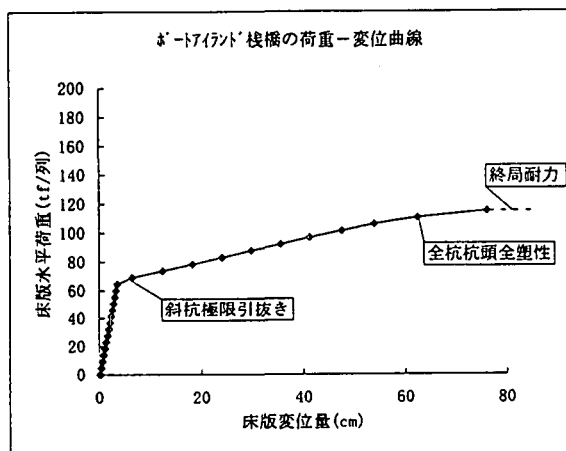


図-10 斜杭式栈橋上部工での荷重-水平変位関係

4. 斜杭式栈橋の弾塑性解析

図-9に前出の直杭式栈橋に隣接して建設されている斜杭式栈橋の標準断面を示す。この栈橋の設計

震度は直杭式栈橋と同じ0.1である。震災後の被災状況は、直杭部は43cm程度北側へ変形したものの、斜杭部はほとんど変形がなかったことが報告されている³⁾。

斜杭式栈橋の弾塑性解析結果を図-10に示す。解析方法は、3.で述べた方法と同じである。斜杭断面の終局耐力は約115tfであり、直杭部の座屈発生耐力166tfよりも小さくなった。調査結果で直杭部に座屈と残留変位が認められたにもかかわらず、斜杭部に残留変位がなかった理由として次のようなことが考えられる。

- ① 直杭断面と斜杭断面の固有周期が異なり、直杭部の方が固有周期が長くなった。この周期と神戸地震の卓越周期が近く、直杭部の応答が大きかった。
- ② 斜杭断面での動的解析は実施していないが、斜杭の引抜き支持力に近い力が作用したものと想定される。斜杭の引抜きに伴い地震時動的応答が低下して、地震力が斜杭部で低減された可能性がある。
- ③ 栈橋断面には、北側に防波板が設置されているが、防波板の動水圧は水深の小さな直杭部で大きくなる。直杭部の地震力と斜杭部の地震力として、動水圧に相当する分の差が生じていた可能性がある。

5. まとめ

本論文では、等価線形解析により栈橋の地震応答特性を検討し、同時に非線形解析による終局耐力評価とエネルギー一定則の適用性について考察した。その結果、栈橋の地震時挙動は未解明の問題が残されているものの、エネルギー一定則に基づく保有耐力設計法の導入の可能性が示されたといえる。さらに本設計法の精緻化に向けて検討を続けていく予定である。

参考文献

- 1) 山本隆一ほか：鋼直杭式栈橋の耐震性に関する研究、港湾技術研究所報告、Vol.9, No.1, 1970.3
- 2) 稲富隆昌・高木保志・風間基樹：鋼直杭式栈橋の地震観測と動的解析、港湾技研資料、No.615, 1998.6
- 3) 南兼一郎ほか：神戸港における縦栈橋及びドルフィンの被害調査と静的弾塑性解析、第24回地震工学研究発表会講演論文集、1997.7
- 4) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針、1985