

2次元FEM動的解析による斜め組杭式栈橋の動的応答特性

大熊弘行¹・杉澤政敏²・大熊義夫³・佐藤 博⁴・横田 弘⁵・濱田純次⁶・麻生川学⁷

¹正会員 東電設計(株)第二土木本部 地盤・構造部（〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3）

²正会員 工修 東電設計(株)第二土木本部（〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3）

³正会員 工修 東電設計(株)第二土木本部 港湾・海岸部（〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3）

⁴正会員 東京電力(株)技術開発研究所 建設技術グループ（〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1）

⁵正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室長（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

⁶正会員 工博 (株)竹中工務店技術研究所 地盤・基礎部門（〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1）

⁷鋼管杭協会 技術委員（〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10）

1. はじめに

栈橋は、通常、鋼管杭とコンクリート上部工より構成される構造物で、地盤に対して杭を鉛直に打設した直杭式栈橋と、杭を斜めに打設した斜め組杭式栈橋（以下、斜杭式栈橋と称す）に大別できる。

直杭式栈橋においては、その耐震性能照査として、鋼管杭の塑性変形による地震エネルギーの吸収を考慮した保有耐力照査法に基づく手法が提案¹⁾されており、その手法は現行の港湾施設の技術基準²⁾に採用されている。斜杭式栈橋においては、その地震時動的挙動について、振動台実験を用いた研究³⁾がされているものの、模型縮尺や使用材料等の関係から、鋼管杭の塑性後の動的挙動を得ることが難しく、詳細には把握されていない。したがって、斜杭式栈橋では、直杭式栈橋と同じような保有耐力照査法を適用した手法が確立されていないのが現状である。

ここでは、数値解析により斜杭式栈橋の地震時挙動を把握することを試みた。解析には、栈橋と地盤の動的相互作用を考慮できる2次元FEM動的解析ならびに、設計計算時に簡便な耐震性能照査の検討として使用されるプッシュオーバー解析による静的弾塑性解析を用いた。

2. 解析対象栈橋の概要

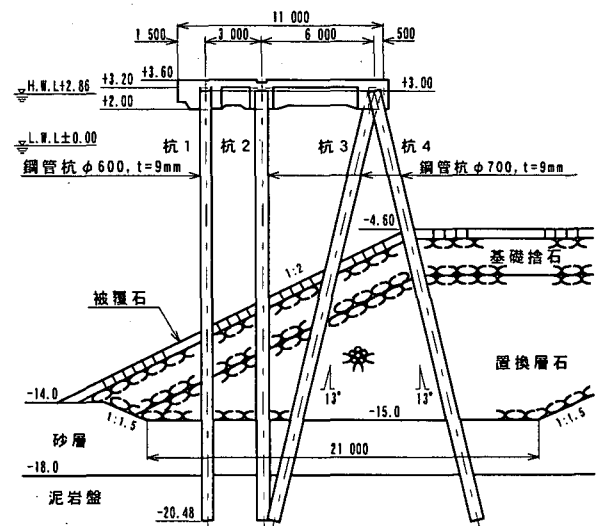


図-1 検討対象栈橋の標準断面図

解析の対象は、現地盤水深-14mの既設斜杭式栈橋に基づいて作成したモデル栈橋である。モデル栈橋の標準断面図を図-1に示す。当該栈橋の1ブロックは、法線方向延長24m、幅11mで、法線方向に5列の杭列を有しているが、解析では、このうち杭1列分である延長5m分を取り出した。杭1列分の鋼管杭は、直杭2本（海側より杭1および杭2と称する）および斜杭2本（同じく杭3および杭4）の4本である。斜杭の設置角度は13度である。杭1は直径600mm、肉厚9mmで、他の杭2～4は直径700mm、肉厚9mmで、鋼管杭の鋼質は、いずれもSKK400（降伏強度：235N/mm²）である。なお、解析では腐食による杭の肉厚の減少は考慮していない。

鉄筋コンクリート上部工は、版厚 400mm の床版と、幅 600mm×高さ 1000mm のはりにより構成される。ただし、床版は、通常の設計で行われるように、上載荷重としてのみ考慮している。また、地盤の構成は、-15m まで碎石層、-15～-18m は砂層、-18～-45m は泥岩層で、-45m を基盤面とした。なお、同図には示していないが、通常、栈橋の直背後には土留め護岸が設けられている。ただし、この護岸と栈橋本体とは構造的には分離しているので、解析では栈橋本体のみを対象とした。

3. 2次元 FEM 動的解析

(1) 解析モデルと解析手法

斜杭式栈橋の地震時動的挙動を平面 2 次元モデルによる全応力の非線形動的応答解析により検討した。解析に用いたプログラムは DINAS である。

解析手法は、直接積分法の Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) により、積分時間間隔を 0.002 秒とした。解析では、地盤の非線形性には修正 Ramberg-Osgood (R-O) モデルによる骨格曲線を、履歴ループには Masing 則⁴⁾を用いた。また、杭の非線形性には、軸力変動を考慮した軸力-曲げモーメント相関関係を用いた。地盤の左右側方境界は、既往の解析事例等⁵⁾を参考にして、構造物からの波動の影響を受けないように十分遠方にとり、水平ローラーとした。地盤の底面境界は、基盤面下の地盤が無限の剛性を有しているものと仮定して粘性境界とした。

2次元モデルの有限要素分割を図-2に示す。節点数は 1278、地盤の要素は平面ひずみ要素で、要素数は 992 である。栈橋本体の杭と上部工は、はり要素でモデル化し、杭を非線形部材、上部工を線形部材とした。また、杭と地盤間の相互作用を表現するために、杭と地盤の節点を分離し、これらをつなぐ杭軸直角方向ばね K_h と杭軸方向ばね K_{sv} を設けるとともに、杭先端には支持ばね K_v を設けた。これらのばねの履歴モデルを図-2に合わせて記述している。

地盤条件は、地層ごとに地盤の N 値、単位体積重量 γ 、ポアソン比 ν 、せん断波速度 V_s と初期せん断弾性係数 G_0 を表-1 に示すように設定した。なお、 V_s 、 G_0 および動的変形特性について、碎石層に関しては田中の研究⁶⁾に基づき、砂層に関しては液状化対策ハンドブック⁷⁾に基づきそれぞれ R-O モデルとして設定した。碎石層および砂層の動的変形特性を図-3に示す。泥岩層は線形材料とした。

入力地震動は、十勝沖地震の八戸波(N-S成分)を用い、最大加速度(2E)を350Galと1000Galに調整した。図-4に、入力地震波形(350Gal)を示す。

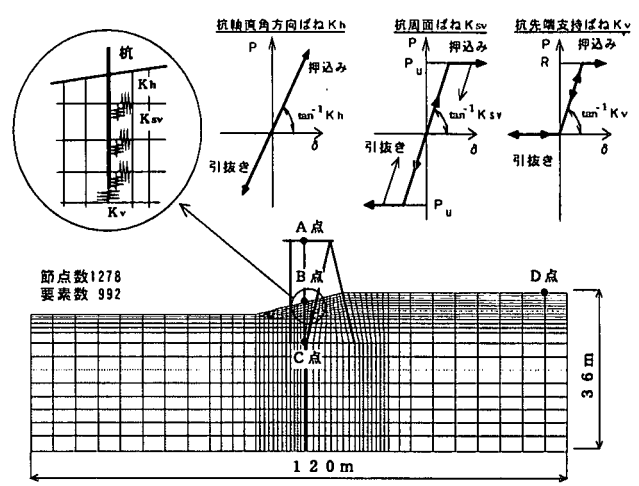


図-2 2次元解析モデルとばねの構成則

表-1 地盤定数の設定

	N値	γ (kN/m^3)	ν	V_s (m/s)	G_0 (MN/m^2)
①碎石層	8	20	0.49	160	51
②砂層	20	18	0.49	240	108
③泥岩層	50>	18	0.49	500	450

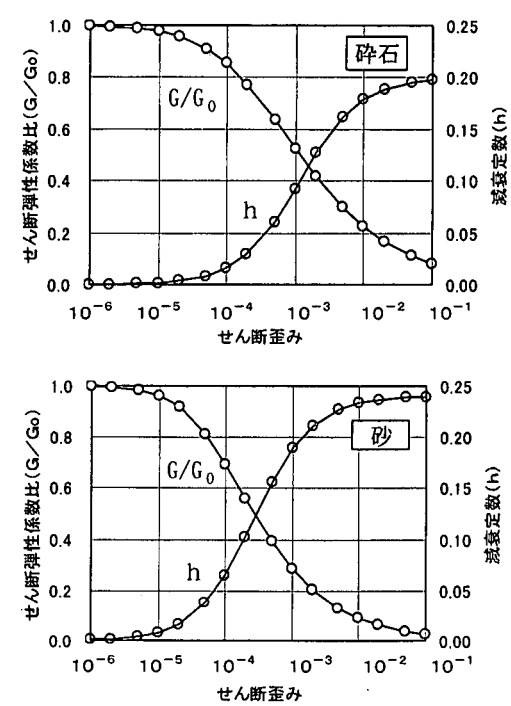


図-3 碎石と砂の動的変形特性

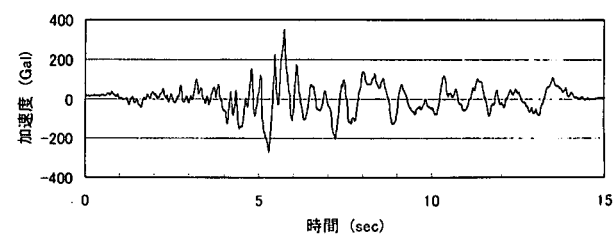


図-4 入力地震波(350Gal)

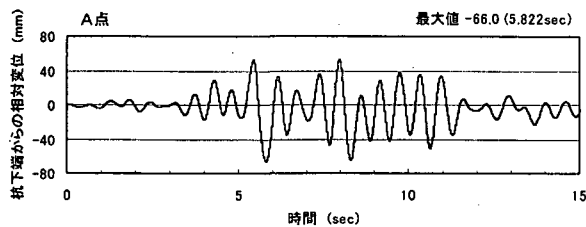


図-5 A点における杭先端からの相対変位

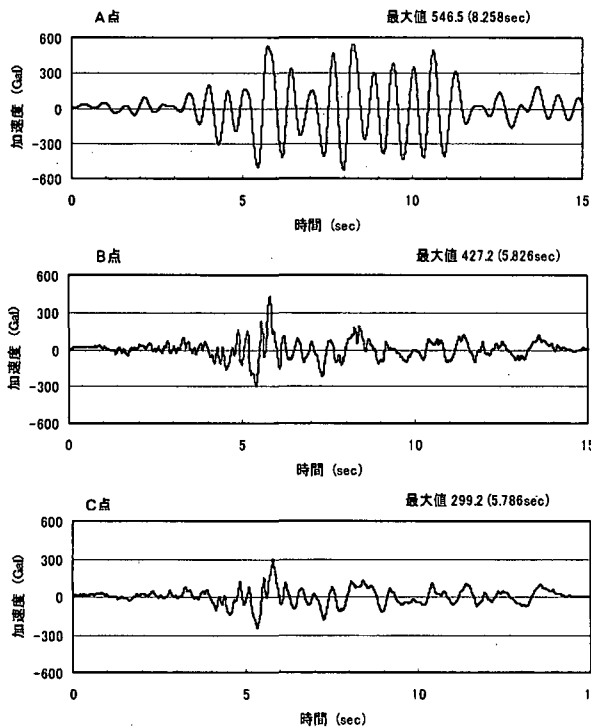


図-6 A～C点の応答加速度の時刻歴

350Gal は、レベル1地震動相当として港湾構造物の設計に用いられている基盤加速度である。また、1000Gal は、鋼管杭に塑性ヒンジを生じさせる目的で、レベル1地震動に比べて十分大きい地震動としたものである。

(2)解析結果

a) 固有値解析

解析モデルの振動特性を把握するためにまず固有値解析を行い、栈橋と地盤のそれぞれの1次モードにおける固有周期を求めた。栈橋本体と地盤の1次モードは、水平変位が卓越するモードを示し、これらの固有周期は、それぞれ0.59sおよび0.29sであった。また、解析に用いたレーリー減衰は固有値解析から得られる栈橋の1次モード ($f=1.7\text{Hz}$, $h=1\%$) と地盤の1次モード ($f=3.4\text{Hz}$, $h=2\%$) に着目し、 $\alpha=0.017$, $\beta=0.002$ とした。

b) 350Gal 入力時の解析結果

図-5に上部工位置(図-2のA点)における杭先端からの相対変位の時刻歴を示す。変位の符号は、海側から陸側に変位する場合を正としている。図-6に

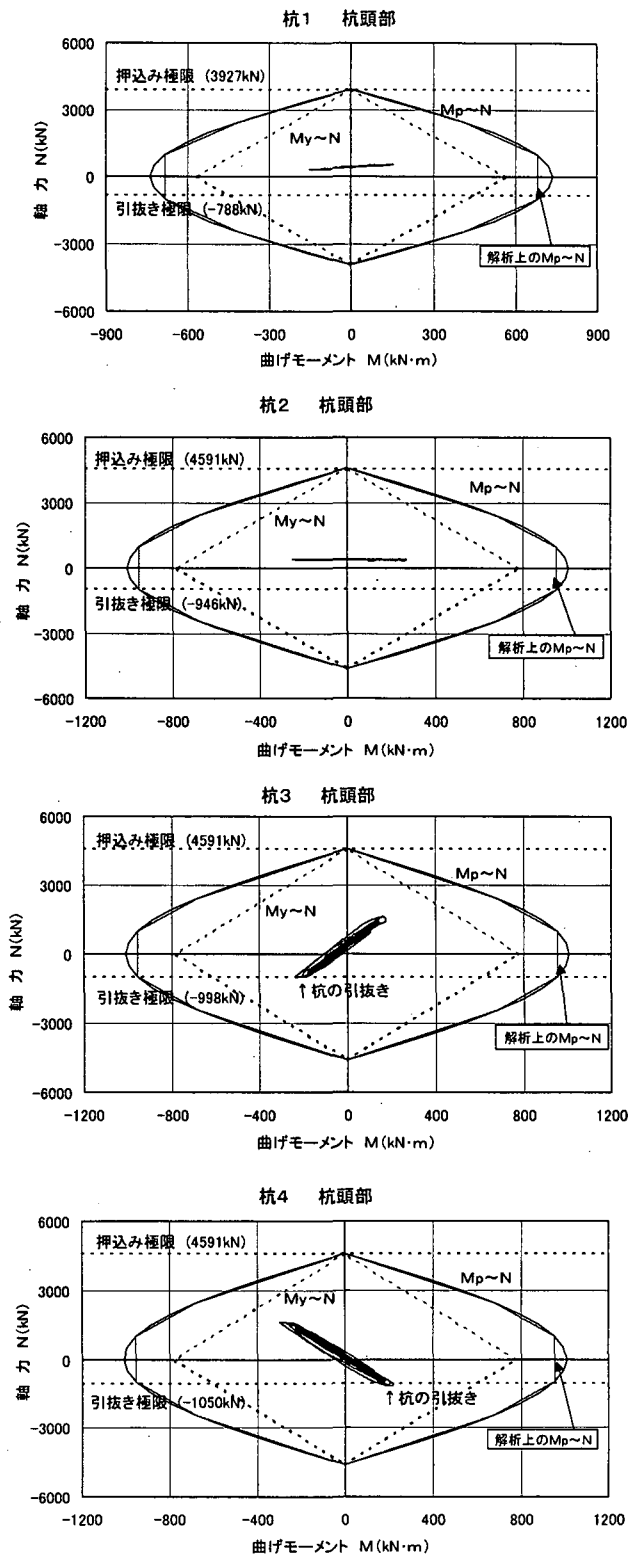


図-7 M-N 相関図 (350Gal)

図-2のA～C点における応答加速度の時刻歴を示す。B点とC点は、それぞれ栈橋直下海底面、杭先端位置を示している。

図-5と図-6から、A点での最大応答加速度および最大相対変位はそれぞれ547Galおよび66mmとなった。最大変位と最大加速度の生じた時刻は厳密には異なっていたが、最大加速度とほとんど同じ時刻に、

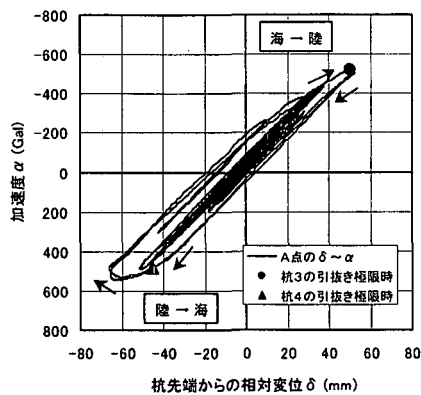


図-8 A点における加速度と応答変位の関係

最大変位が生じている傾向は確認された。また、杭先端の加速度がほぼ2倍程度に栈橋上部工で増幅される結果を示した。

図-7に杭頭部における曲げモーメント M と軸力 N の関係を示す。ここで、 M_y は杭の縁部降伏モーメント、 M_p は全塑性モーメントを示す。図-7から、2本の直杭と2本の斜杭で、それぞれ符号が異なるものの比較的同じような履歴の傾向を示した。直杭(杭1, 杭2)は常時の軸力を始点として、曲げモーメントが卓越した挙動を示し、斜杭(杭3, 杭4)は、曲げモーメントと軸力がともに変動して杭に引抜きが生じる挙動を示した。また、直杭と斜杭ともに、降伏および塑性ヒンジの発生は認められなかった。

図-8にA点での応答加速度と杭先端からの相対変位との関係を示す。同図中の●と▲の記号は、それぞれ杭3と杭4が引抜き極限に達した時点を示しており、杭3では520Gal程度、杭4では470Gal程度で引抜き現象が生じる結果となった。また、この引抜き極限を超えると、陸側から海側への変位が著しく大きくなる挙動を示した。

c) 1000Gal 入力時の解析結果

杭に塑性ヒンジを発生させ、その時の地震時挙動を把握するために、入力地震波の最大加速度を1000Galとした解析を行った。

図-9に上部工位置(A点)における杭先端からの相対変位の時刻歴を、図-10に上部工(A点)と栈橋直下の海底面(B点)の位置における応答加速度の時刻歴を示す。

A点での最大相対変位の絶対値は、345mmとなった。また、最大応答加速度はA点で763Gal、B点で1134Galとなり、上部工の方が海底面より加速度が小さくなった。これは、斜杭の杭3と杭4の引抜き極限状態が生じていた時間帯にほぼ一致し、杭が引き抜かれて地震加速度の栈橋本体への伝達が抑えられたものと考えられる。

杭頭部におけるM-N関係を図-11に示す。350Gal

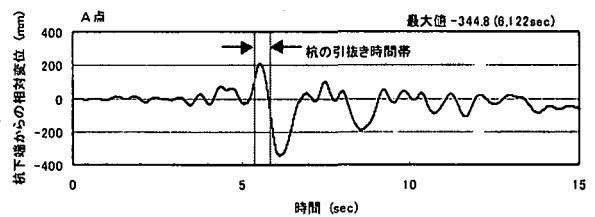


図-9 A点における杭先端からの相対変位 (1000Gal)

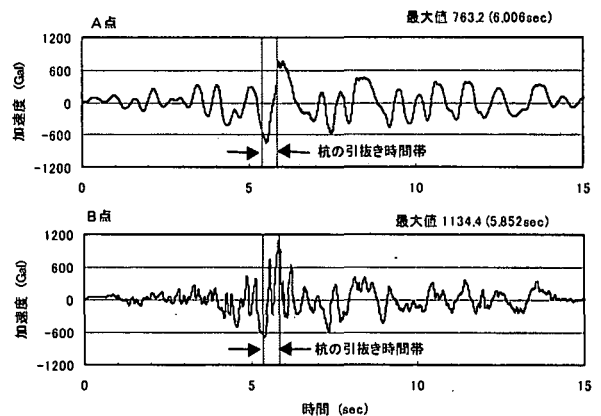


図-10 A点およびB点の応答加速度の時刻歴

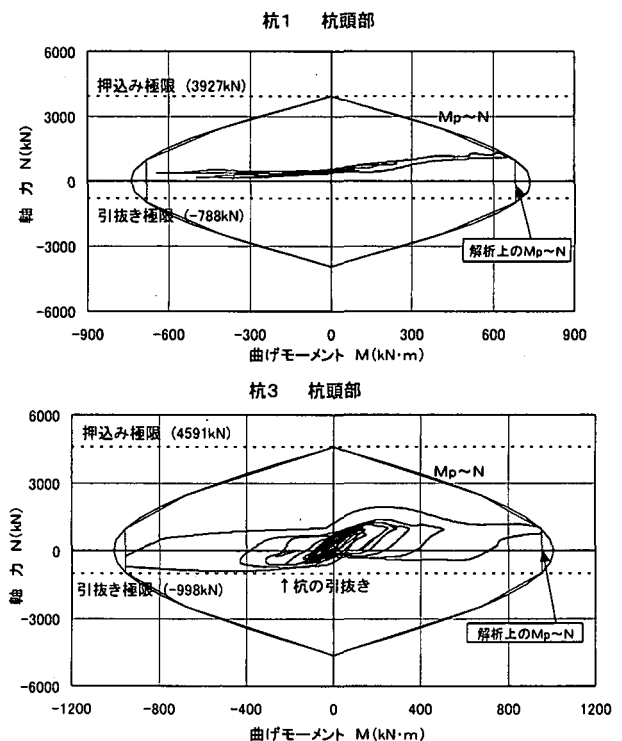


図-11 M-N 相関図 (1000Gal)

入力時と同様に、1000Gal入力時でも2本の直杭と、2本の斜杭で、比較的同じような履歴の傾向を示すことから、杭1と杭3についてのみ示す。

直杭(杭1)は常時の軸力を始点に曲げモーメントが卓越した挙動を示した。斜杭(杭3)は曲げモーメントと軸力が共に変動して引抜き限界に達すると曲げモーメントのみが増加する挙動(杭が引き抜けた状態)を示し、杭の抵抗機構が軸力卓越型から

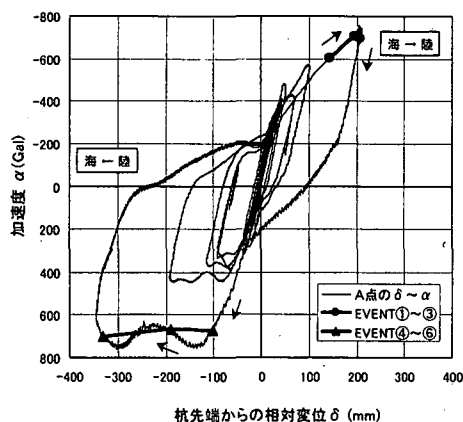


図-12 A点における加速度と応答変位の関係(1000Gal)

表-2 杭の損傷イベント発生時点

局所損傷イベント	時刻 (s)	加速度 (Gal)	相対変位 (mm)
①杭3引抜き極限	5.376	-502	104
②杭4杭頭塑性化	5.482	-708	194
③杭3杭頭塑性化	5.512	-696	208
④杭4引抜き極限	5.838	483	-63
⑤杭4杭頭塑性化	5.914	668	-188
⑥杭3杭頭塑性化	6.048	702	-329

曲げモーメント卓越型に変化する現象がみられた。そして、直杭と斜杭ともに、杭には塑性ヒンジの発生が認められた。

図-12 に、A点での加速度と杭先端からの相対変位との関係を示す。また、表-2 に杭3と杭4の局所損傷イベント時におけるA点での加速度および相対変位を示す。同図中の●と▲の記号は、それぞれ同表に示した杭3と杭4の引抜き極限時以降のイベントを示す。引抜き極限以降では、上部工の水平変位が著しく大きくなる挙動を示し、杭3と杭4の杭頭部に塑性ヒンジが生じる結果となった。杭の引抜きは約 480Gal で、全塑性化は約 700Gal で生じた。また、イベント④～⑥は、引抜き後の上部工の変位の増大とともに相次いで生じた。

4. プッシュオーバー解析

(1) 解析モデルと解析手法

斜杭式栈橋を平面骨組にモデル化し、杭頭部に所定の鉛直力を作用させ、水平力を漸増させる（プッシュオーバー解析）ことで栈橋の杭の挙動および破壊メカニズムを検討した。解析に用いたプログラムは直接剛性法による栈橋の弾塑性解析プログラム（NPILAN）⁸⁾である。

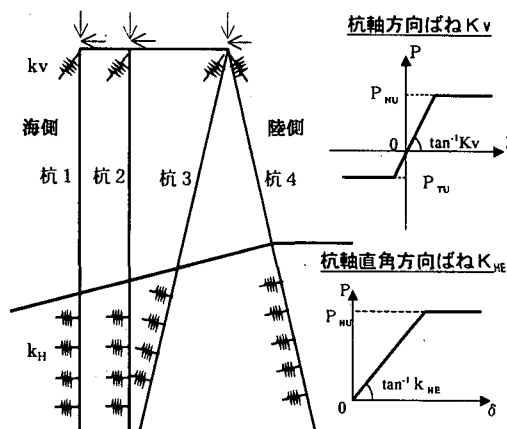


図-13 プッシュオーバー解析モデルとばねの非線形特性

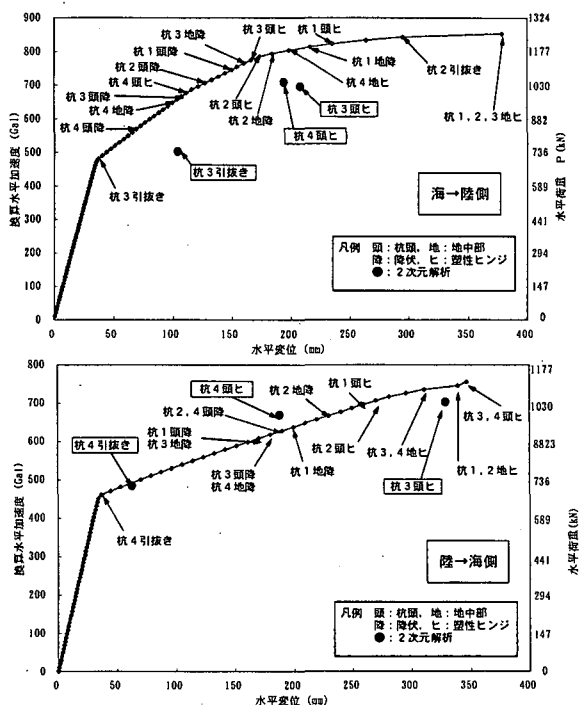


図-14 荷重-水平変位関係

解析モデルを図-13 に示す。構造解析のモデル化に際して、杭と上部工をはり要素に、杭と地盤の相互作用ばねをウィンクラーばねに置き換えた。杭軸方向ばね K_v は、杭頭部に地盤および杭の弾性ばねをひとつに集約したばねであり、極限支持力 P_{NU} 、極限引抜き支持力 P_{TU} を限界値とする非線形性を考慮した。また、杭軸直角方向ばね K_{HE} は、地盤反力度の上限値 P_{HU} を有するバイリニア型とした。

上部工と杭の接合部は固定、杭先端をピンとした。鋼管杭には、 $M-\phi$ 関係の非線形を考慮し、全塑性モーメント M_p を上限値とするバイリニア型とした。

(2) 解析結果

図-14 に海→陸側に荷重した場合と、陸→海側に荷重した場合の荷重-変位関係を示す。また、図-14 には表-2 の2次元解析の結果も示した。なお、この

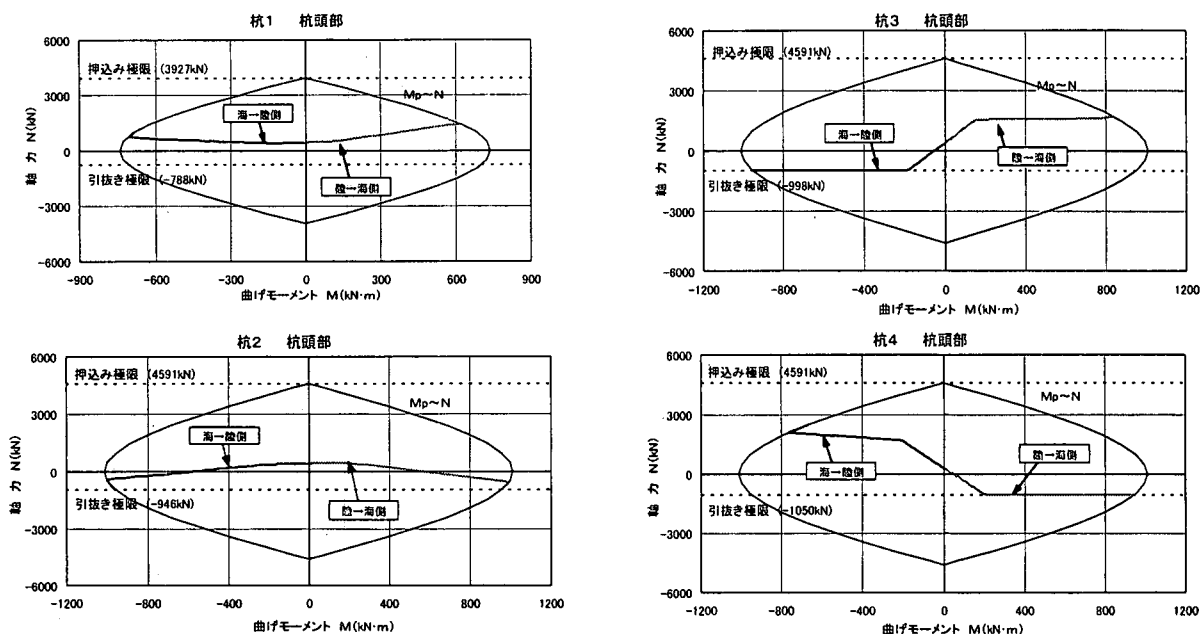


図-15 杭のM-N 相関図

図では、変位の符号は考慮していない。

海→陸側および陸→海側のいずれのケースにおいても、斜杭の引抜き極限(海→陸側:杭3の480.2Gal, 陸→海側:杭4の460.6Gal)が他のイベントよりも先に発生した。また、荷重-変位関係において、引抜き極限に達した時点で変位量が急増し、折れ曲がり点が生じるが、その後もある程度の剛性を保ちながら杭各部の損傷が進行する結果を示した。

杭頭部におけるM-N関係を図-15に示す。この図には、水平荷重を海→陸側に载荷した場合と、陸→海側に载荷した場合を併記して示す。

杭のM-N関係から、海→陸側の場合、杭3が引抜き極限に達した後の杭の軸力増加は主として杭4で、陸→海の場合、杭4が引抜き極限に達した後の杭の軸力増加は主として杭1で、それぞれ確認された。これは、水平荷重の载荷方向に対して最外縁の杭への軸力配分が高くなったためと考えられる。

5. まとめ

斜杭式栈橋の動的応答特性について、2次元FEM動的解析とプッシュオーバー解析により得られた検討結果を以下に示す。

- ① 2つの解析結果を比較するとほぼ同じような現象がみられ、引抜き極限は水平加速度500Gal程度で生じ、また、杭のM-N関係は比較的良好な傾向を示した。
- ② 斜杭式栈橋の動的応答特性は、斜杭の引抜きによって支配され、杭の引抜きにより構造体の水平変位が急増した。また、引抜き前は斜

杭は主に軸力により地震荷重に抵抗したが、引抜き後は曲げモーメントが支配的になった。

- ③ 杭の引抜きが生じて、急激に損傷が進行しなかったため、レベル2地震動相当の大きな地震を受ける場合には、杭の引抜きを許容し、引抜き後の性状を精度よく推定することで栈橋の耐震性能を照査できる可能性を示唆した。

参考文献

- 1) 横田 弘, 竹鼻直人, 南兼一郎, 川端規之: 鋼管杭式横栈橋の耐震設計法に関する考察, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1613~1622, 1998.
- 2) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 下巻, 日本港湾協会, pp.731~759, 1999.
- 3) 濱田純次, 菅野高弘, 上部達生, 上田 茂, 横田 弘: 斜杭式栈橋の地震時挙動に関する模型振動実験, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.101~113, 2001.
- 4) 石原研而, 木村 孟: 土木工学大系 8, 土質工学, 彰国社, pp.226~234, 1980.
- 5) 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601 追補版, pp.63~66, 1991.
- 6) 田中幸久: 礫の工学的性質と液状化地盤への適用に関する研究, 東京工業大学学位論文, pp.84~97, 1989.
- 7) 運輸省港湾局監修: 埋立て地の液状化対策ハンドブック, 沿岸開発技術研究センター, pp.60~69, 1997.
- 8) 横田 弘, 川端規之, 芥川博昭, 黒崎和保, 津嶋敏明, 原田典佳, 矢頭明子: 鋼直杭式栈橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案, 港湾技研資料, No.943, 1999.