

ジャケット式栈橋の非線形解析による耐震性照査

北澤壮介^{*}、瀧川浩之^{**}、小島一雄^{***}、山本邦弘^{***}

* 工修 (財)沿岸開発技術研究センター 第一調査部 部長(〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)

** 工修 (財)沿岸開発技術研究センター 調査研究部 研究員(〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)

*** 工修 沿岸鋼構造技術研究会 (〒221-1131 神奈川県相模原市西橋本 5-9-1 新日本製鐵株式会社)

ジャケット式栈橋は、水深、栈橋幅、マウンド形状などに応じてトラス骨組の形状が異なるうえ不静定次数が高い構造であることから、直杭式横栈橋のように鋼管杭のみの塑性化に着目した簡易法による保有水平耐力の照査方法を適用すると、耐震性能を過小評価する可能性がある。そこで、骨組などが異なる4種類のジャケット構造について静的弾塑性解析により、部材損傷の発生位置、順序、程度を調べ、そのうち1ケースについて、時刻歴弾塑性解析により損傷位置等の確認を行い、実用的な静的弾塑性解析による保有水平耐力の照査法が適用できることを確認した。

Key Words : jacket type pier , inelastic behavior , seismic performance , pushover analysis

1. はじめに

杭式構造物の一種であるジャケットは、これまで国内外の石油掘削プラットフォーム、シーバースなどの大水深の海洋構造物に利用されてきたが、高い水平剛性と短工期、高品質といった利点から、近年護岸、栈橋、防波堤などの港湾構造物への利用が進められている。ジャケット式栈橋の構造上の特徴は、鉛直力を荷重分散効果の高いトラス骨組で支持するため他の杭式栈橋に比べ杭間隔で大きくできること、上部工の桁が鋼製で軽量なため地震時慣性力が小さいことが挙げられる。

ジャケット式栈橋は、一般に直杭式横栈橋に比べると水平剛性が高いが、重力式に比べると可撓性の大きい構造物であり、地震時には他の杭式構造物と同様に動的応答が大きく複雑である。

兵庫県南部地震において、杭式栈橋は応答変位、加速度が大きかったと考えられるにもかかわらず、倒壊の被害が比較的少なかった。¹⁾ これは、鋼管杭の塑性化により地震動のエネルギーを吸収したためであると考えられる。横田ら²⁾は、直杭式横栈橋の弾塑性挙動を静的弾塑性解析により明らかにし、動的解析により検証した。これをもとに、平成11年4月に改訂された港湾の施設の技術上の基準³⁾では鋼管杭の塑性化を考慮した保有水平耐力照査による耐震設計法を直杭式横栈橋について規定している。照査方法は、一般的なマウンドを有する直杭式横栈橋に適用出来る簡易法とそれ以外の構造にも適用出来る弾塑性解析による方法の2通りが示されている。

ジャケット式栈橋の耐震設計は、直杭式横栈橋に準じて、保有水平耐力の照査を行うことになるが、設置水深、栈橋幅、マウンド形状、上載設備などの荷重条件に応じて、杭配置、杭傾斜角、トラスの骨組が異なるため構造が一様でないこと、また高次の不静定構造であることから、直杭式横栈橋の簡易法のように鋼管杭のみの塑性化に着目して保

有水平耐力を規定すると、耐震性能の過小評価につながる恐れがある。

そこで、本論文では、地盤タイプ、マウンド形状、骨組構造の異なる4種類のジャケット構造について、構造部材および地盤ばねの塑性化を考慮した静的弾塑性解析を行い、部材損傷の発生経過をシミュレーションしてジャケット式栈橋の弾性限度、終局状態を検討した。

さらに、静的弾塑性解析結果と時刻歴弾塑性解析結果を比較して部材損傷の進行状況が一致することを検証し、保有水平耐力による耐震照査が適用できることを確認した。

2. 静的弾塑性解析

2.1 解析概要

ジャケット式栈橋の静的弾塑性解析は、地盤ばねを持つ平面骨組モデルを用い、栈橋上部工に作用する地震時慣性力に相当する荷重を増加させて、上部工の水平変位と水平荷重の関係などを求めるいわゆる Pushover 解析である。解析に用いる骨組モデルの各部材、地盤ばねには、非線形性を考慮する。静的弾塑性解析により、栈橋全体の変位増加、各部材の損傷の位置、順序、程度を直接知ることでき、地震時保有水平耐力の照査に必要な栈橋の弾性限度、終局状態の判定が可能となる。

2.2 検討ケース

ジャケット式栈橋の主な適用範囲となる水深12m~15mの栈橋をモデルに、地盤条件、設計震度の異なる典型的なジャケット構造4ケースを設定した。各ケースの構造を図2-1に、設計条件を表2-1に示す。

それぞれの構造の特徴とジャケット骨組形状の設定理由は以下である。

ケース1:

良質な水平地盤で設計震度が小さい栈橋を想定したもので、杭の地盤面での水平変位が小さいためトラスを深くす

る必要がなく、直杭式横桟橋に近い構造となる例である。
このケースは、地震時で断面が決定されていない。

ケース 2:

中程度の地盤に一般的なマウンドを有する桟橋構造を想定したもので、水平変位を抑制するためにマウンド勾配に沿った斜材を持つ構造である。

ケース 3:

軟弱な水平地盤に設置される耐震強化桟橋を想定したもので、海底面付近までトラス骨組を有する構造であり、地震時で部材サイズが決定している。

ケース 4:

中程度の地盤でマウンドがない場合を想定したもので、水平変位を抑制するためにケース 3 と同様に海底面付近までトラス骨組を有する構造であり、地震時で断面が決定されていない。

2.3 解析モデル

解析モデルの概要を図 2-2 に示す。静的弾塑性解析に用いるモデルは、ジャケットの構造部材をそれぞれ表 2-2 のように、非線形の梁要素に置き換えている。部材のモデル化の例を図 2-3 に示す。

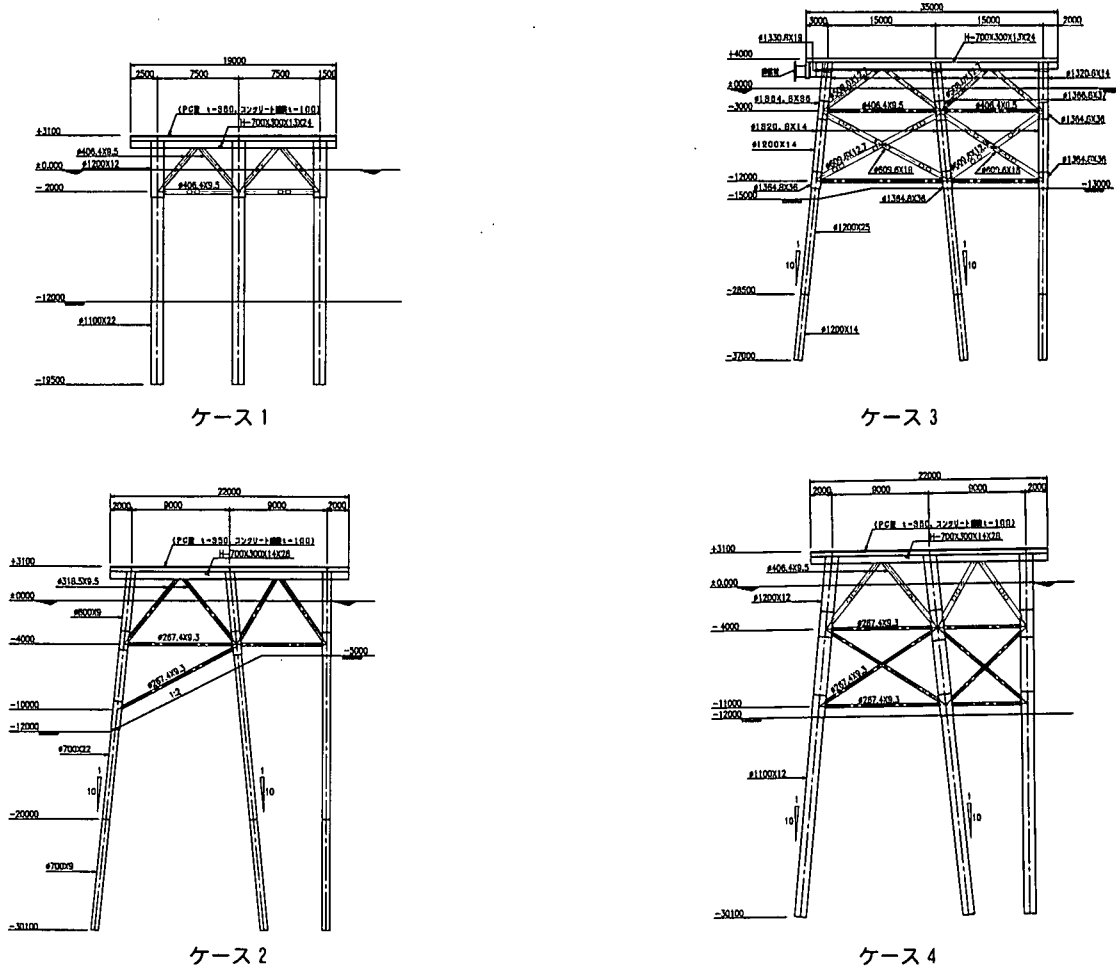


図 2-1 ジャケット構造図

表 2-1 設計条件

ケース	水深 (m)	設計震度	地盤タイプ	接岸力 (kN)	牽引力 (kN)	地震力 (kN)
1	-12.0	0.12	良質	1,117 ^{※1}	490 ^{※1}	977
2	-12.0	0.15	中程度	1,117 ^{※1}	490 ^{※1}	904
3	-15.0	0.25	軟弱	1,388 ^{※2}	980 ^{※2}	3,809
4	-12.0	0.15	中程度	1,117 ^{※1}	490 ^{※1}	763

※1) 30,000 D.T 級貨物船を対象

※2) 90,000D.W.T コンテナ船を対象

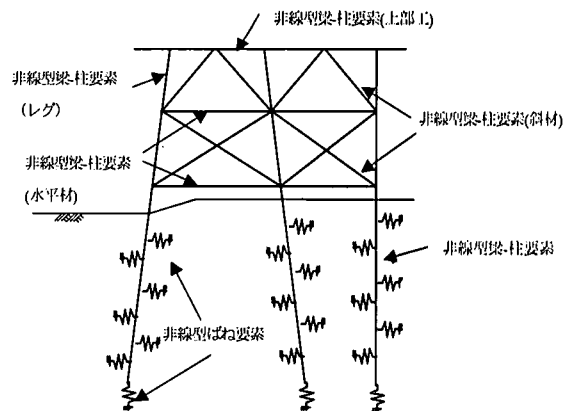


図 2-2 静的弾塑性骨組解析モデル

非線形梁-柱要素は、局部座屈、長柱座屈を生じない部材を対象にした要素で、部材端部で図 2-3 に示すような曲げモーメントと曲率の関係をマルチリニアで定義し、軸力と曲げモーメントの相関曲線も定義している。

非線形トラス要素は、トラス部材に用いる要素で、引張・圧縮の弾性限度応力とひずみ硬化係数で応力-ひずみの関係を定義している。非線形梁要素は、梁の曲げモーメントと曲率をバイリニアで定義している要素である。

地盤ばねは、道路橋示方書下部構造編に従って、保有水平耐力の照査に用いる地盤の横抵抗 $K_h = E_s D$ を算出し、杭の受働抵抗幅を考慮して、受働土圧強度を上限とするバイリニアばねとした。地盤ばねモデルを図 2-4 に示す。

2.4 解析結果

各ケースの静的弾塑性解析は、栈橋上部工に作用する水平力を徐々に増加させて、水平荷重と水平変位の関係を求めた。水平荷重は、栈橋の等価重量で除して、震度で表示している。図 2-5~図 2-8 に各ケースの荷重-変位曲線と部材損傷イベントの発生及びそれぞれのイベントに対応する部材の損傷位置と順序を示す。荷重-変位曲線上の○印は初期降伏を、●印は全塑性化または座屈を示している。荷重-変位曲線は、計算を打ち切ったところまで表示している。

表 2-2 部材の非線形モデル化

構造部材	構造	モデル
杭	鋼管杭	非線形梁-柱
レグ	2重鋼管	非線形梁-柱
水平材	鋼管	非線形トラス
斜材(ブレース)	鋼管	非線形トラス
上部工桁	鋼製桁	非線形梁要素
床版スラブ	RC 版	モデル化しない

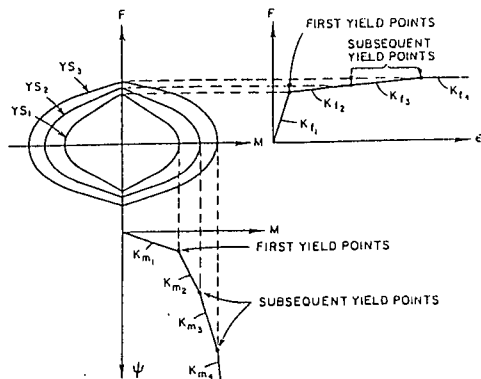


図 2-3 部材の非線形モデル (梁-柱要素)

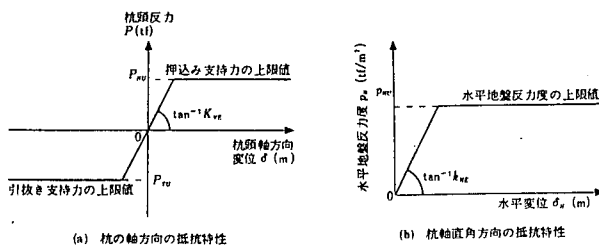


図 2-4 地盤ばねモデル

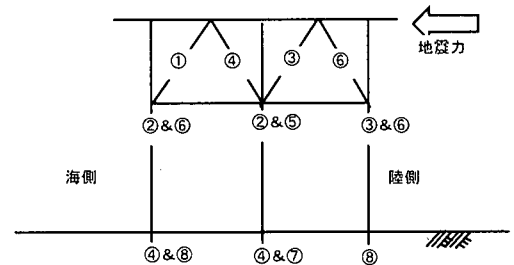
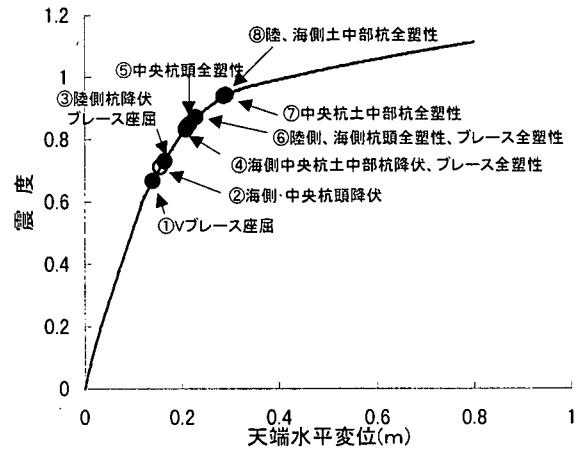


図 2-5 荷重-変位曲線 ケース 1

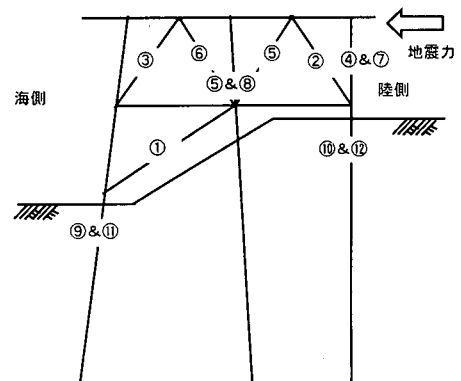
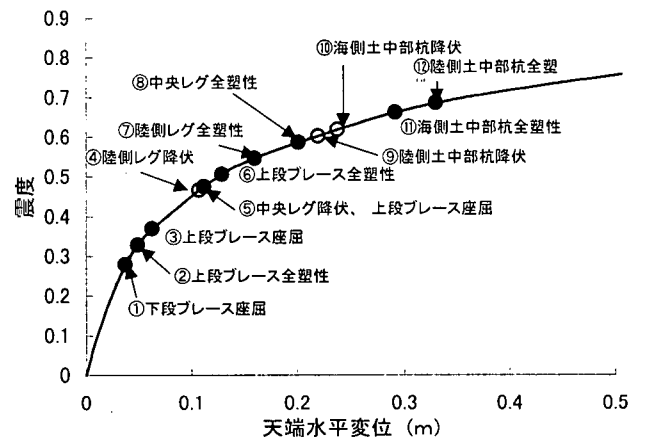


図 2-6 荷重-変位曲線 ケース 2

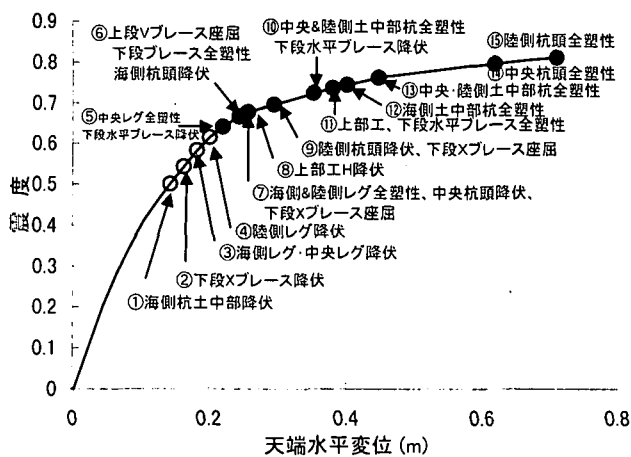


図 2-7 荷重-変位曲線 ケース 3

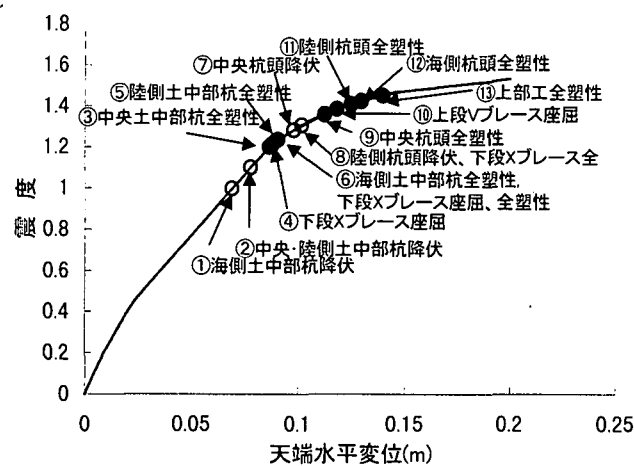


図 2-8 荷重-変位曲線 ケース 4

ケース 1(図 2-5)は、圧縮側の斜材の 1 本が最初に座屈した後、トラス下端で鋼管杭が全塑性に達し、次に土中部の鋼管杭が全塑性化するという順序で損傷が発生している。全ての斜材の座屈、塑性化は、土中部の杭の全塑性以前に発生している。栈橋の弾性限度は、トラス下端の鋼管杭が全塑性化する直後である。終局状態は、直杭式横栈橋と同様に鋼管杭に 2 点ヒンジが発生した時点と考えられる。

ケース 2(図 2-6)は、トラス下段、上段の海側圧縮側斜材が座屈したあと陸側レグの全塑性、陸側斜材の座屈、土中部杭の全塑性により終局状態となる。栈橋の弾性限度は、トラス上段の海側斜材の座屈直後である。

ケース 3(図 2-7)は、各部の初期降伏のあと、中央レグが全塑性化し、続いて斜材の座屈、海側・陸側レグが全塑性化する。その後、上部工鋼桁、土中部鋼管杭が全塑性化する。終局状態は、トラス斜材の全塑性によって発生すると推測される。この損傷過程より、部材が多いことによるジャケットの冗長性が確認できる。栈橋の弾性限度は、中央レグの全塑性化直後である。

ケース 4(図 2-8)は、土中部の鋼管杭が全塑性化した後、海底面付近の鋼管杭が全塑性化する。この間トラスの一部の圧縮斜材が座屈しているが、栈橋全体は耐力を保持しており終局に到っていない。トラスの斜材、水平材が接岸時や常時の上載荷重、変位制限などで決定していて、ジャケットの剛性が高い場合には、このように土中部の鋼管杭が最初に全塑性に到ることがある。従って、終局状態を直杭式横栈橋のように土中部の鋼管杭の全塑性化で規定することは適当でない。栈橋の弾性限度は、土中部の鋼管杭が全塑性化する直後である。

なお、各ケースとも鋼管杭の発生支持力は押込、引抜ともに極限支持力に達していない。

2.5 保有水平耐力の照査

直杭式横栈橋の弾塑性解析結果の典型例を図 2-9 に示す。直杭式横栈橋は、鋼管杭の上部工接合部と土中部に曲げモーメントによる塑性ヒンジが形成されて耐荷力を失い、終局状態を迎える。すなわち 2 点ヒンジが形成された時点が終局状態であると定義されている。

直杭式横栈橋の保有水平耐力は、弾性限度の荷重と許容損傷レベルに対応する上部工の水平変位からニューマークのエネルギー一定則の仮定を用いて求める。港湾の施設の技術上の基準²⁾では、栈橋の弾性限度は、荷重-変位曲線において変位が急激に増加する点であり、栈橋の法線直角方向断面の杭列で過半数の杭頭が全塑性化する点であると定義している。また、許容損傷レベルに対応する上部工の水平変位は、弾性限度における上部工の水平変位に鋼管杭の変形性能をもとに定めた許容塑性率を乗じて求めることとしている。これは、直杭式横栈橋では、栈橋全体の变形性能が鋼管杭のみの塑性変形性能により規定できるためである。

一方、前述のようにジャケット構造は、塑性ヒンジの発生順序、発生位置が、地盤、トラスの骨組により大きく異

なる。

ケース1のように、鋼管杭の自立長の長い構造の場合は、鋼管杭の2点ヒンジ形成によりジャケット式栈橋が終局状態を迎え、直杭式横栈橋とほぼ同じ破壊形態となる。しかしながら、ケース2,3,4のようにトラス骨組が海底面付近まであるジャケット構造は、鋼管杭及びピレグに2点ヒンジが形成されても、水平材、斜材の存在により高い靱性を示し急激な崩壊に到らない。従って、終局状態は、荷重の増加に対してトラス部材の座屈、塑性化が進行して栈橋全体がラーメン構造になる状態であると考えられる。つまり、栈橋全体の変形性能は、鋼管杭の塑性変形性能だけでは規定されず、トラス部材と鋼管杭の塑性変形性能の組み合わせで規定されることになる。

ジャケット式栈橋の許容塑性率は、本来ジャケットの骨組構造に応じて設定すべきで一概には決定できないことから、弾塑性解析により弾性限度、終局状態を確認した上で、直杭式横栈橋に準じて構造物の重要度に応じて許容損傷レベルを設定する必要がある。また、各ケースの比較から、栈橋の弾性限度をたとえば鋼管杭や圧縮側の斜材といった特定の部材の損傷イベントに着目して定義することは難しいといえる。従って、ジャケット式栈橋の弾性限度は、荷重-変位曲線において水平変位が急増する点として求める必要がある。

3. 時刻歴弾塑性解析

3.1 解析概要

静的解析を行った4ケースの内、耐震強化栈橋を想定したケース3について弾塑性時刻歴応答解析を行って、Pushover解析結果を損傷の程度、発生過程について検証する。解析は、骨組、地盤の非線形モデルに、地盤応答解析による時刻歴変位を基盤加速度とともに与えて行う。

また、地盤応答解析手法の違いが結果に及ぼす影響を調べるため、重複反射モデルに基づく解析プログラム「SHAKE」に加え、有効応力解析プログラム「FLIP」による結果も使い、比較を行う。参考のため、従来から動的解析に用いられているプログラム「FLUSH」による構造物-地盤一体モデルによる解析も行う。この解析では、骨組は、弾性モデルである。

3.2 解析モデル

(1)入力地震動及び地盤応答解析

地盤の応答解析には、液状化や地盤の大変形がない事を前提に、「SHAKE」を用いた。地盤条件を表3-1に示す。入力地震動は、八戸波、大船渡波、ポートアイランド波を用い、 $1/\beta$ の深さにおける加速度応答時刻歴から求めた、栈橋の加速度応答が最も大きい八戸波について、時刻歴弾塑性解析を実施した。八戸波の基盤での入力加速度の最大値は380galである。入力地震動を図3-1に、 $1/\beta$ の深さにおける加速度度応答スペクトルを図3-2に示す。ジャケット式栈橋の固有周期は0.75秒で、これに対応する栈橋の応答加速度は600galである。

(2)解析モデル

解析には、静的弾塑性解析に用いた2次元の弾塑性モデルを用い、骨組モデルの地盤のばねに、地盤の応答解析で得られた時刻歴絶対変位を各要素毎に与えた。図3-3に解析モデルを示す。

骨組モデルのトラス斜材には、P.W.Marshallによって提案された、座屈後の非弾性引張圧縮挙動を表すマーシャルストラット要素⁴⁾を用いたが、本解析では、応答は弾性範囲内であった。マーシャルストラット要素の応力・ひずみの関係を図3-4に示す。

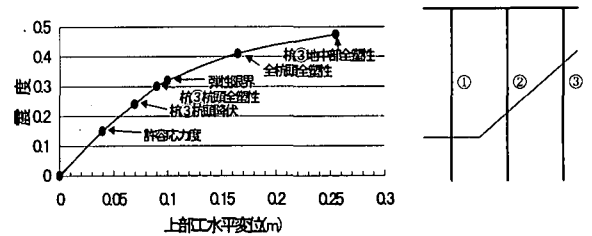


図 2-9 直杭式横栈橋の荷重-変位曲線の例

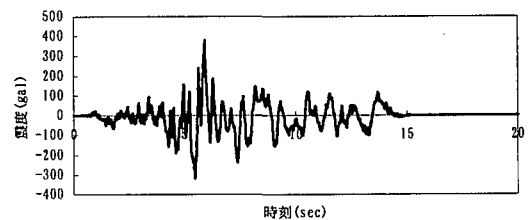


図 3-1 基盤の入力地震動(八戸波 380gal)

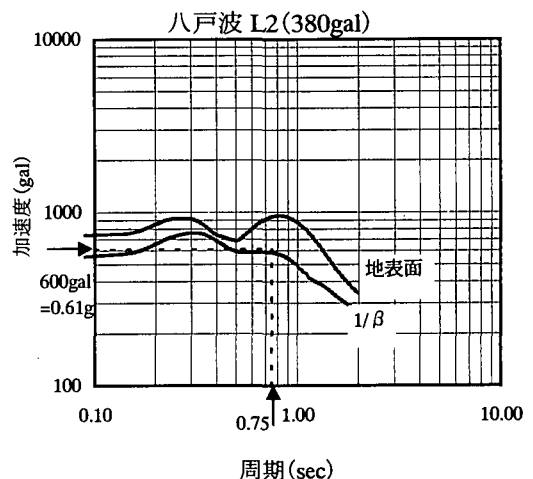


図 3-2 加速度応答スペクトル

3.3 解析結果

(1)SHAKE による地盤応答を用いた解析結果

入力地震動と上部工天端の応答を図 3-5 に、損傷イベントの発生を図 3-6 に示す。

(2)静的弾塑性解析との比較

静的弾塑性解析の結果(図 2-7)と比較すると、杭、レグの部材損傷の過程、発生位置が良く一致している。下段ブレースは時刻歴弾塑性解析では損傷イベントが発生していないが、発生応力度は高く降伏に近い。時刻歴弾塑性解析の損傷レベルが、保有水平耐力の照査に比べて若干大きい理由は、時刻歴弾塑性解析には、ジャケット骨組に作用する地震時動水圧を考慮しているが、静的弾塑性解析の荷重-変位曲線の算出には動水圧による水平荷重を無視している為である。動水圧の影響は約 5 %程度であり、荷重-変位曲線の水平荷重を震度に換算する際に地震時動水圧も考慮することによりその影響を反映できる。

表 3-1 地盤応答解析地盤条件

標高(m)	土質区分	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ_i (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断剛性 G_0 (kN/m ²)
-15.00~-20.00	粘性土	0.499	14.2	72	7,105
-20.00~-24.00	粘性土	0.497	15.2	101	14,720
-24.00~-27.00	粘性土	0.496	15.2	125	23,589
-27.00~-31.00	砂礫	0.483	18.1	355	226,625
-31.00~-35.00	砂質土	0.481	18.6	300	179,948
-35.00~-39.00	砂質土	0.469	18.1	405	303,428
-39.00~-43.00	砂質土	0.477	18.1	345	220,196
-43.00~-51.00	砂質土	0.478	18.1	335	207,613

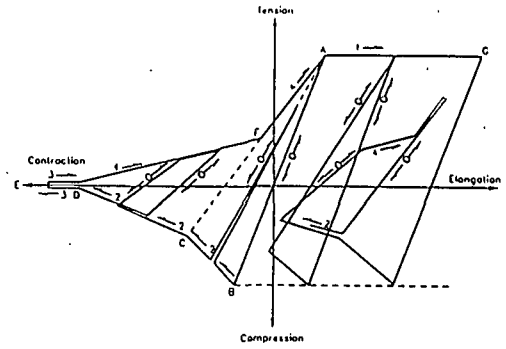
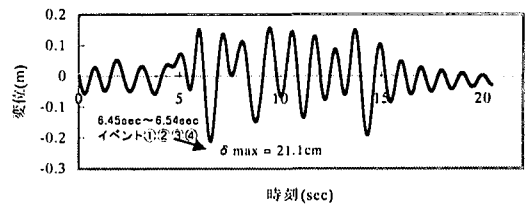
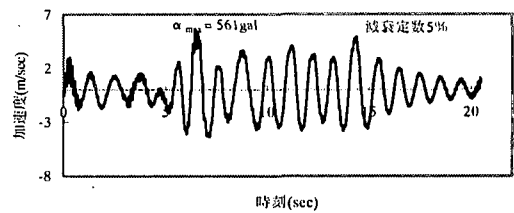


図 3-4 マーシャルストラットの応力・ひずみの関係



上部工天端の応答変位



上部工天端の応答加速度

図 3-5 SHAKE による応答を用いた弾塑性解析結果

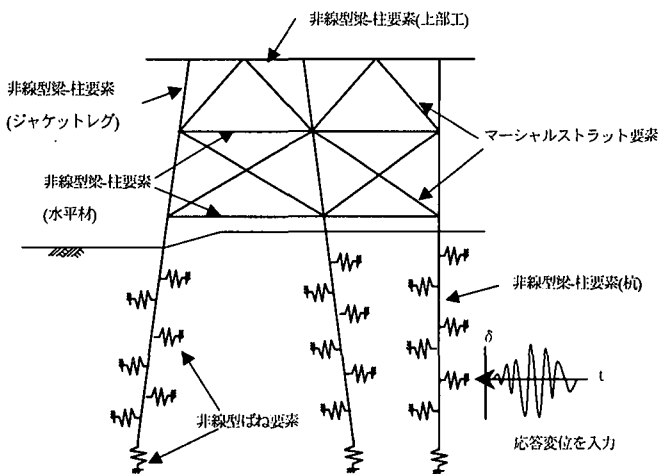


図 3-3 時刻歴弾塑性骨組解析モデル

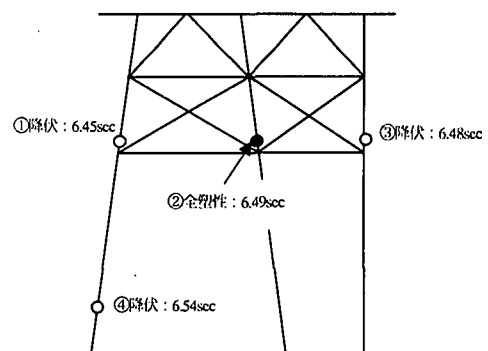


図 3-6 SHAKE による応答を用いた弾塑性解析の損傷イベント

(3) 非線形地盤応答解析結果との比較

地盤応答解析の解析手法による違いの影響を調べるため、「FLIP」による地盤のみの応答解析から得られる応答変位を用いて時刻歴弾塑性解析を行った結果を図3-7に示す。これによると、上部工天端の加速度は、「SHAKE」による応答変位を用いた弾塑性解析の結果より大きい、変位は小さい。僅かながら残留変位が発生しているのは、地盤全体の変形によるものであり、ジャケット構造部材は全塑性化は発生していない。部材降伏の発生箇所は「SHAKE」による結果、あるいは静的弾塑性解析の結果と一致している。従って、地盤の液状化、大変形が発生しない場合は、モデル化の負荷が高い有効応力解析を用いなくても「SHAKE」による地盤応答を用いた時刻歴弾塑性解析を適用できる考えられる。

(4) 従来の弾性動的解析との比較

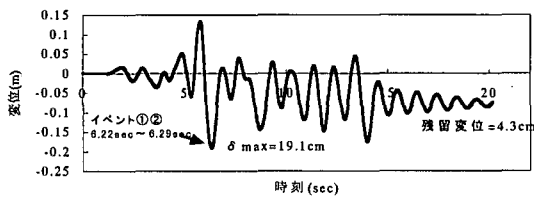
構造物を弾性モデルで与えた場合と弾塑性モデルで与えた場合の時刻歴応答解析結果を比較し、応答や損傷の発生過程における差を把握する。構造物を弾性骨組で与える解析の一例として、プログラム「FLUSH」による解析を行った。このプロ

グラムは、構造物-地盤一体モデルを用いているため、構造物の弾性、弾塑性の違い以外にも結果に違いを生じさせる要因がある可能性はあるが、一般に動的解析に用いられることが多いことから選択した。

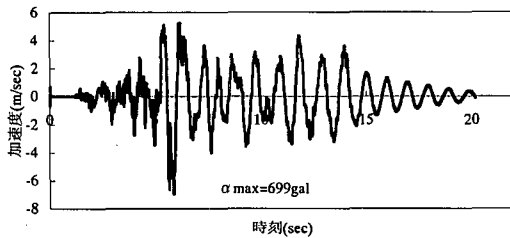
結果を図3-8に示す。図中には同時に、(1)で示した解析結果の最大応答変位と最大応答加速度を示してある。

二つの解析結果を比較すると、上部工天端の応答変位はよく一致しているが、加速度応答は骨組を弾性で与えた「FLUSH」による結果の方が大きい。理由としては、構造物-地盤一体モデルにより、(1)で用いた骨組みモデルよりも構造物が受ける地盤の影響が過大に評価されている、構造物の弾性、弾塑性の違いの影響が考えられる。従来の弾性動的解析の結果は、安全側の結果を与えているといえる。

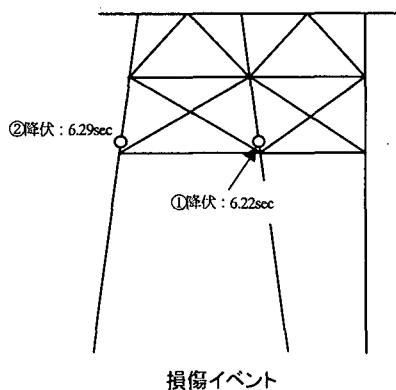
しかし、弾性モデル中の、発生ひずみから実際には降伏していると思われる部位に着目すると、中央杭の土中部深くにこのような部位が存在していた。これに対して、弾塑性モデルでは杭は塑性化せず、ジャケットレグ中央部が塑性化していた。ジャケットの終局状態を判断する上で損傷の発生部位は非常に重要な点であり、構造物を弾塑性モデルで表した動的解析が望ましいと考えられる。



上部工天端の応答変位

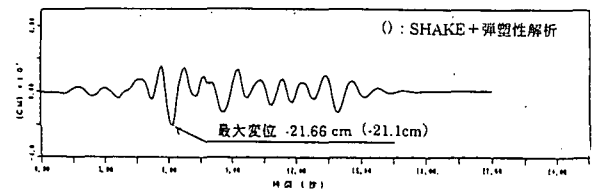


上部工天端の応答加速度

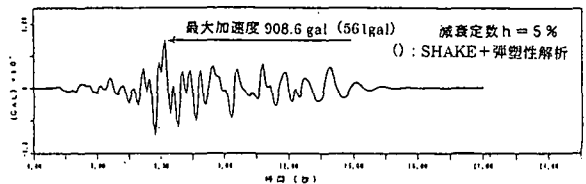


損傷イベント

図 3-7 FLIPによる応答を用いた弾塑性解析結果



上部工天端の応答変位



上部工天端の応答加速度

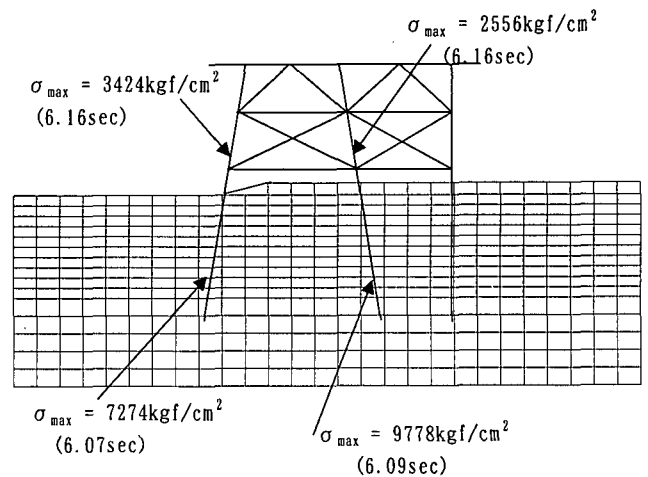


図 3-8 FLUSHによる応答を用いた弾性解析結果

4. 結論

構造の異なる4タイプのジャケット式栈橋について、静的弾塑性解析(Pushover 解析)を行い、損傷イベントの発生過程を明らかにした。また、その中の1タイプについては、弾塑性時刻歴応答解析も行っており、その妥当性を確認した。これにより、以下の結論が得られた。

1) ジャケット式栈橋の耐震設計は、静的弾塑性解析を行うことで、直杭式横栈橋と同じ手順による保有水平耐力法の適用が可能である。許容塑性率の算定に必要な弾性限度と終局状態は、それぞれ、荷重-変位関係及び損傷イベントの発生順序に着目することで規定できる。

2) 静的塑性解析と時刻歴応答解析の結果を比較すると、損傷イベントの発生位置、順序がほぼ一致した。損傷レベルも地震時動水圧を荷重に考慮することで評価できる。静的解析で精度良く弾塑性挙動を表せることがわかった。

3) 時刻歴応答解析を行う場合、地盤の大変形や液状化が起こらなければ、重複反射モデルによる地盤応答解析結果をジャケット単体の弾塑性骨組みモデルへ入力することで、精度良い動的解析が行える。

謝辞

本論文に示した耐震照査法の検討にあたっては、ジャケット工法設計・施工技術委員会：委員長 野田節男(財団法人沿岸開発技術研究センター理事長)の指導・助言を得た。委員各位に感謝の意を表する。

弾塑性骨組解析には、プログラム「CAP」を用いたことを付記する。

参考文献

- 1) 稲富隆昌ほか：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害状況、港湾技研資料, No. 857, 1997.
- 2) 横田 弘ほか：鋼管杭式横栈橋の地震時保有耐力設計法に関する解析的検討、第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、土木学会, pp. 65~68, 1998. 12
- 3) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会 1999. 4
- 4) P. W. Marshall, W. E. Gates and S. Anagnostopoulos: "Inelastic Dynamic Analysis of Tubular Offshore Structures", OTC-2908, 1977

(1999年11月19日受付)

Static and dynamic inelastic analysis for Jacket type pier

Sosuke KITAZAWA, Hiroyuki TAKIGAWA, Ichio KOJIMA, Kunihiro YAMAMOTO

This paper presents the inelastic behavior of jacket type pier which has redundant structural framing by means of static and dynamic inelastic analysis during strong ground motion. The ultimate state and yielding point of the jacket type pier can be known from the pushover analysis, not from simplified method established for open type wharf with steel pipe piles. Locations and degree of damages in jacket members are confirmed with the dynamic and static analysis and conclude that the pushover analysis can predict the event of jacket member damages properly.