

# 背面土圧を受ける格点式ストラット構造の非線形動的解析による耐震性能照査

北澤 壮介\*, 瀧川 浩之\*\*, 川端 規之\*\*\* 脇屋 泰士\*\*\*\*

- \* (財) 沿岸開発技術研究センター 第1調査部長
- \*\* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 研究員
- \*\*\* 新日本製鐵 (株) 建材開発技術部 マネジャー
- \*\*\*\* 川崎製鐵 (株) 建材技術部 主査

格点式ストラット構造は、直杭式栈橋を2重管構造の鞘管を有する鋼管ストラット部材で補剛した、新形式の岸壁・護岸構造である。本構造形式の特徴はストラット部材により床版附近に作用する水平力を前方杭の海底面付近に伝達させて鋼管杭の設計重量を低減できる点にあり、このような特長から床版に大きな水平力が作用する護岸一体型の岸壁構造にも適している。

本論文は背面土圧が作用する格点式ストラット構造の地震時挙動を確認する目的で、震度法により断面設定された格点式ストラット構造に対し非線形動的解析手法により耐震性能の評価を行ったものである。

背面土圧を受ける骨組み構造の動的相互作用解析は、構造形式の3次元性や地震時土圧挙動の不明確さから、レベル2クラスの非線形動的解析を的確に実行するプログラムは少ない。ここでは、地盤のみを非線形特性でモデル化し有効応力解析を実行する有限要素解析プログラムと、その地盤応答変位を骨組みに入力する非線形骨組み解析プログラムを併用する本構造の耐震性能照査手法を検討し、格点式ストラット構造の崩壊メカニズムに基づく耐震性能の照査を行った。

**Key Words:** 格点式ストラット構造, 耐震照査, 非線形動的解析, 鋼管杭, 護岸, 応答変位法

## 1. はじめに

港湾施設の岸壁構造には重力式や矢板式等の多くの構造形式が用いられている。栈橋式係船岸も代表的な構造であるが、一般に補剛部材を用いずに鋼管杭や鋼矢板が組み合わされて設計されている。直杭式栈橋構造は最も一般的な鋼構造を主体とする岸壁構造であるが、通常は船舶を係留する岸壁部と背面の土留め護岸は分離して設計されている。

一方で、港湾構造物の大型化（大水深化）や港湾区域の高度化利用から、岸壁部と背面護岸を分離して設計することが不経済であったり、困難となる場合が多くなっている。このような岸壁形式では前面水深が大きくなることによって、杭部材に大きな曲げモーメントが発生し、補剛のない直杭構造では不

経済となる場合が多い。

格点式ストラット構造は、図-1に示すように背面の水平土圧を前方杭の海底面付近に直接伝達させる目的で、鞘管を有するストラット部材を現場で杭打設後に建て込む構造形式である。ストラット部材は、2重管構造の格点部に水中モルタルを充填することにより、上部構造と杭を連結している。

格点式ストラット構造の適用により、前方杭の有効座屈長を短縮でき、杭の許容応力度を大きく設定できる。また、ストラット部材の取り付け位置を極力海底面に近づけることによって、水平荷重の作用位置を低くすることができ、鋼管杭断面を小さくすることができる。

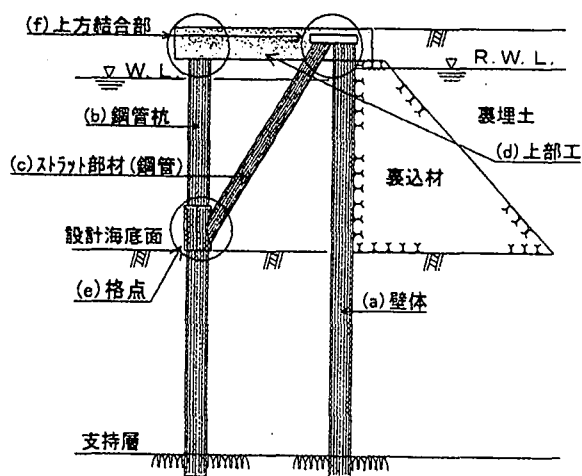


図-1 格点式ストラット構造の一般図

## 2. 本研究の目的

本研究では、背面土圧を有する格点式ストラット構造の耐震性能を評価することを目的として、震度法で設計された格点式ストラット構造に対して、レベル2地震動に相当する地震力を作用させ、動的解析と静的弾塑性解析を行った。

一般に骨組み構造物の動的相互作用解析はPenziengモデルが用いられることが多い。Penziengモデルは構造物のモデル化が比較的容易であることや、質量や剛性の取り扱いが容易であることから、水平地盤上の構造物設計での適用性には優れているが、下記のような短所も有している。

- 1) 地盤モデルの質量規模を設定しにくい。
- 2) 水平地盤を対象していない場合の地盤振動の評価が困難である。(護岸構造や斜面上構造)
- 3) 土圧が考慮できないために、構造物に発生している初期応力の評価が困難である。

一方、2次元モデルで地盤の応答解析を行う手法として種々の解析法が提案されているが、大規模地震に対応する構造物との連成解析を実施する観点からは、下記のような解析機能が必要であろう。

- 1) 初期応力解析において構造物に作用する壁面水平土圧が適切にモデル化されること
- 2) 大規模地震時の過剰間隙水圧による有効応力の減少が評価できること
- 3) 振動中の壁面土圧の変動を評価できること
- 4) 地盤要素と構造物要素の非線形特性が考慮できること

以上の各特性を考慮する解析プログラムは少ない。

ここでは、2種類の非線形動的解析プログラムを併用して、格点式ストラット構造の地震時挙動を検討した。その要領は以下の通りである。

- ステップ-1：震度法設計による格点式ストラット構造の設定
- ステップ-2：有限要素解析による地盤振動の評価(骨組みは線形、地盤は非線形モデル)
- ステップ-3：骨組みの弾塑性時刻歴応答解析による構造物の塑性変形の評価
- ステップ-4：静的弾塑性解析による塑性化の評価と動的挙動との相違の検討

以上の検討により、背面土圧を有する格点式ストラット構造の2種類の解析プログラムの併用により耐震性能評価法の妥当性を検討した。

## 3. 震度法による格点式ストラット構造の設計

解析で対象とした格点式ストラット構造を図-2に示す。岸壁の前面水深は8.1mで、背面の埋土は液状化の可能性のあるために液状化対策を施している。設計震度は0.27で耐震強化岸壁を想定している。土留め壁は震度法による地震時土圧モデルから、径800mmの鋼管矢板を用いている。前方杭は、杭径1000mmで板厚12mmの鋼管杭を3140mmピッチで配置する。ストラット部材は径600mmで板厚12mmである。

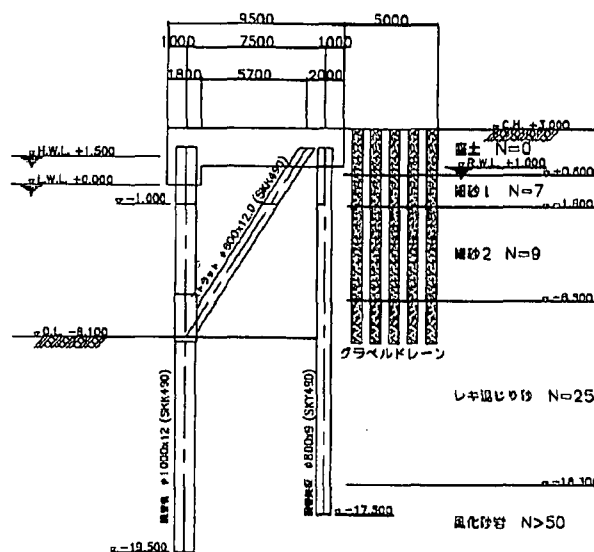


図-2 震度法設計断面

地盤構成は、現水深が6.5mで海底地盤は比較的良好なN値25の砂地盤を想定しており、背面土とし

て、図-2に示す土層を想定した。

震度法設計は、格点式ストラット構造を弾性骨組みとして解析することにより、許容応力度設計で行った。水平震度0.27における構造物の発生応力と床版の変位は、表-1の通りである。

表-1 震度法設計結果

部位	解析値	許容値	対許容値比
鋼管杭	261N/mm <sup>2</sup>	285N/mm <sup>2</sup>	0.92
鋼管矢板	199N/mm <sup>2</sup>	210N/mm <sup>2</sup>	0.95
ストラット部材	2274N/mm <sup>2</sup>	285N/mm <sup>2</sup>	0.80
杭支持力	2.67MN	7.40MN	0.36
床版変位	57.0mm	100.0mm	0.57

#### 4. 有効応力有限要素解析による非線形動的解析

有効応力法による地盤と構造物の非線形動的解析として種々の解析プログラムが開発されている。ここでは、運輸省港湾技術研究所で開発された「FLIP」<sup>1)</sup>を用いて、格点式ストラット構造の解析を実施した。有効応力解析法は地震時に地盤内に発生する過剰間隙水圧を評価して、地盤の降伏規準を適用する解析手法である。「FLIP」では地盤内の応力-歪み関係を双曲線形のR-Oモデルでモデル化している。過剰間隙水圧は計算歪みに対して間隙水圧係数を用いて算定する。骨組み要素は、線形の梁要素が適用されている。梁要素端部と地盤要素の節点は共有されている。地盤のせん断破壊は過剰間隙水圧を考慮した有効応力規準によるせん断破壊が考慮されている。

図-3にFLIPでの解析断面を示す。解析の領域は、幅200mで高さが30mである。図-4基盤での入力加速度波形であり、八戸波を最大加速度377galに調整している。

図-5及び図-6は、解析された栈橋床版の加速度波形と応答変位波形である。栈橋床版の最大加速度は422galであり、最大応答変位は13.0cm(絶対変位)であった。地盤の塑性化により格点式ストラット構造には、海側に残留変位が5.06cm(絶対変位)発生している。

図-7は有限要素解析による残留変位の分布である。護岸の水平変位により、背面地盤が大きく沈下している状況を確認できる。

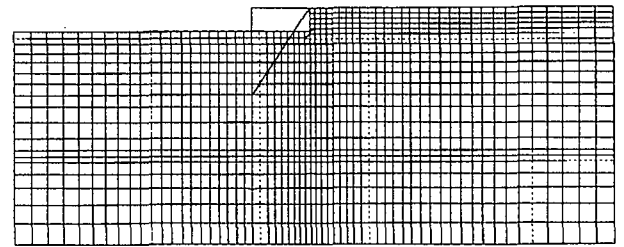


図-3 FLIPによる解析断面

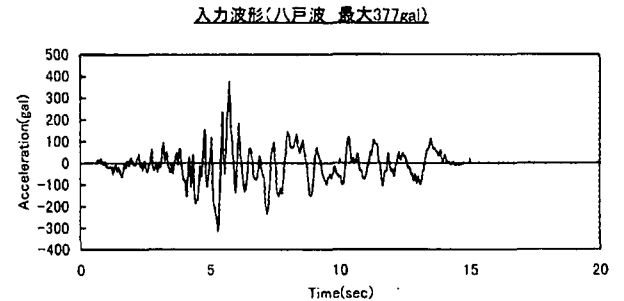


図-4 基盤入力加速度波形

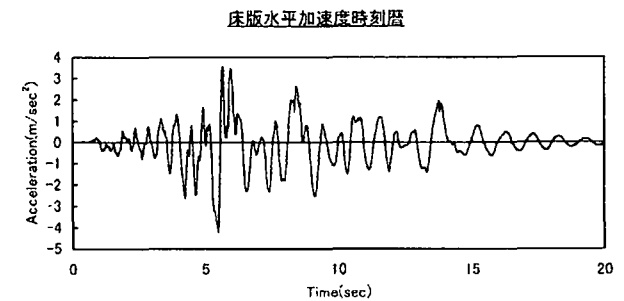


図-5 床版応答加速度

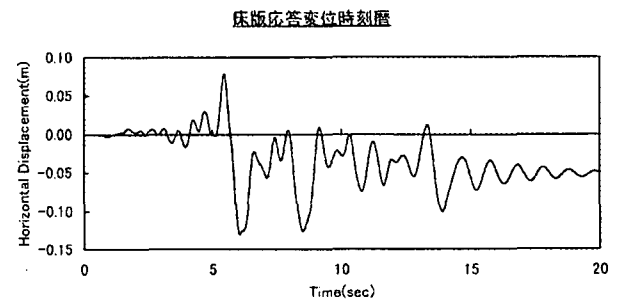


図-6 床版応答変位

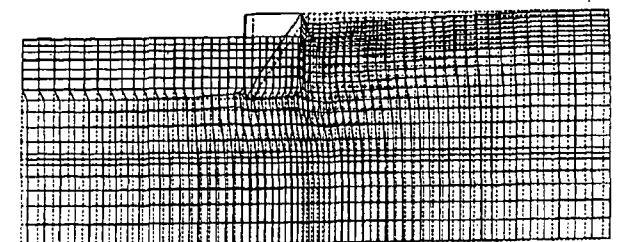


図-7 護岸周辺の残留変位分布

格点式ストラット構造に発生する断面力については、FLIPによる梁部材のモデル化が線形モデルであることや、地盤要素と節点を共有していることから、鋼管挙動の詳細な評価が困難である。以下に骨組み部材の弾塑性挙動を確認する目的で、骨組みの非線形時刻歴応答解析を行った。

### 5. 骨組みの非線形応答解析による格点式ストラット構造の地震時挙動

前述の有限要素解析では、格点式ストラット構造を構成する骨組み部材を弾性梁要素でモデル化し、節点を共有する解析を行った。一般に杭構造の動的相互作用解析では、杭と地盤の相対変位を考慮するために杭節点と地盤節点との間に地盤反力バネを介して相互作用解析を行う。本研究における骨組みの非線形動的解析（応答変位モデルの解析）では、前方杭に杭の水平方向地盤反力バネをモデル化し、背面の鋼管矢板壁には、地盤バネを介さずに地盤応答変位を節点に強制入力した。図-8に応答変位モデルの概略図を示す。解析プログラムとしてはT-DAP<sup>2)</sup>を用いた。

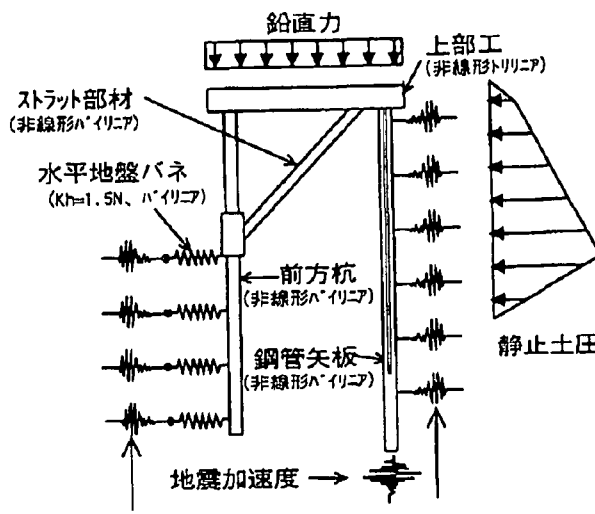
骨組み解析に用いた部材断面は、前述の図-2に示す通りである。地盤の応答変位は、2次元有効効力解析結果の応答変位を所定の節点に入力した。

図-9は床版の応答波形（杭先端に対する相対変位）である。最大変位で16.1cmで、残留変位が9.4cmとなった。前述の有限要素解析では、変位波形が全体変位であることから、両者に相違が認められる。

骨組みの非線形応答解析による発生軸力及び曲げモーメント分布を図-10に示す。鋼材の断面力の分布は、地盤の有限要素解析の結果を強制変位として入力しているので、基本的には前述の解析と近い値をとることとなるが、慣性力の入力の相違や、相互作用バネの影響により、本解析では有限要素解析よりも断面力が大きくなり、一部の鋼管杭に塑性化領域が認められた。鋼管部材に塑性変形が発生している個所は、背面土留め壁の地中部と前方杭の格点部直下であった。背面土留め壁の塑性ヒンジは土層の剛性が急変する地盤境界付近の変位急変点と対応しており、鋼管に大きな曲げ変形が発生している点と考えられる。一方、格点下の塑性化部位は鋼管の全塑性モーメントには至っていない塑性変形であった。この点には、ストラット部材による大きな軸力が伝達されるために、応力が集中したものと考えられる。骨組み

構造の終局耐力は、一般には柱部材の2点ヒンジの発生により、そのメカニズムが評価されるが、本解析では、同一部材に2点ヒンジは発生していないので、終局耐力に達していないものと考えられる。

震度法で設計された格点式ストラット断面の地震時挙動を、地盤の有限要素解析と骨組みの非線形動的解析を組み合わせて実施した結果、検討断面はレベル2地震に対する十分な耐震性能を保有するものと考えられる。



FLIPで得られた地盤変位波形の入力

図-8 骨組みの応答解析モデル

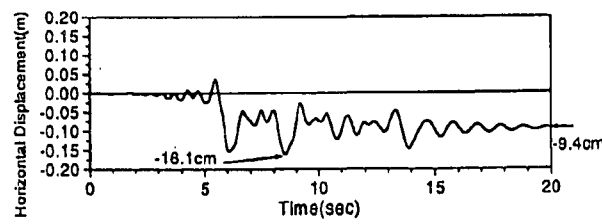


図-9 床版の応答変位（相対変位）

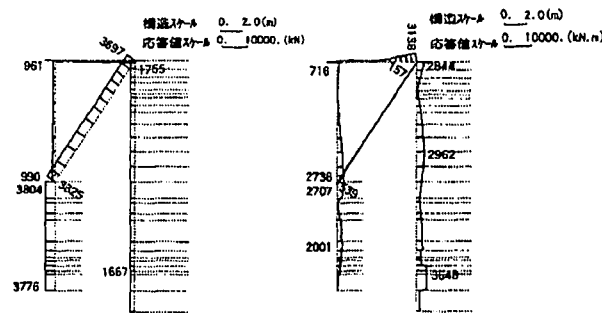


図-10 最大軸力及び曲げモーメント分布

## 6. 静的弾塑性解析による骨組みの

### プッシュオーバー解析

非線形動的解析と静的解析との相違を評価する観点で、本断面に対して主な作用外力である背面土圧を漸増させて、プッシュオーバー解析を行った。解析断面は前項の解析と同一断面であり、前方杭には地盤反力バネとして受働土圧を上限とするバリエーション型のバネを配置している。

地震時の主働土圧強度については、物部・岡部による地震時土圧式で算定できるが、地震震度が大きくなると、主働土圧の算定が不可能となる。そのため、ここでは便宜的に震度0.27に相当する地震時土圧を相似形で増幅して、プッシュオーバー解析を実施した。解析プログラムとしてはMARCを用いた。

土圧を漸増させるプッシュオーバー解析による床版の荷重—変位関係を図-11に示す。荷重増分法による鋼管断面の塑性化発生順序は、以下のような順序となった。

- ① 前方杭格点部の下端
- ② 前方杭の地中部
- ③ 背面土留め壁の地中部
- ④ スラット部材の下端
- ⑤ 背面土留め壁の杭頭部

図-11の荷重—変位関係から、前方杭及び背面土留め壁の鋼管杭に2点ヒビが発生しても荷重の増加が継続しており、地盤抵抗による余力が大きな終局耐力を示す結果となっている。

図-12は有限要素解析によって得られる背面土圧の最大値の分布と、震度法設計に用いた地震時土圧分布を比較したものである。土圧強度の平均値は概ね一致するが、分布形状には大きな相違が認められた。

## 7. まとめ

格点式スラット構造の非線形動的解析及び、静的弾塑性解析により以下のことが明らかとなった。

- 1) 震度法で設定された格点式スラット構造断面は、地盤の有限要素解析結果を骨組みの非線形動的解析に入力する検討結果から、極大地震に対しても十分な耐震性能を有しているものと考えられる。
- 2) 非線形動的解析結果と静的弾塑性解析結果で

は、骨組み部材に発生する塑性化部位が異なる結果となった。その理由として、骨組みの非線形動的解析では、地盤の大きな相対変位が杭の地中部深くで、鋼材に強制変形モーメントを生じさせている理由による。

- 3) 背面土圧を有する格点式スラット構造に対する耐震検討手法として、土圧を漸増させるプッシュオーバー解析法の適用性を検討し、応答変位による付加モーメントの考慮が不可欠であることを示唆した。

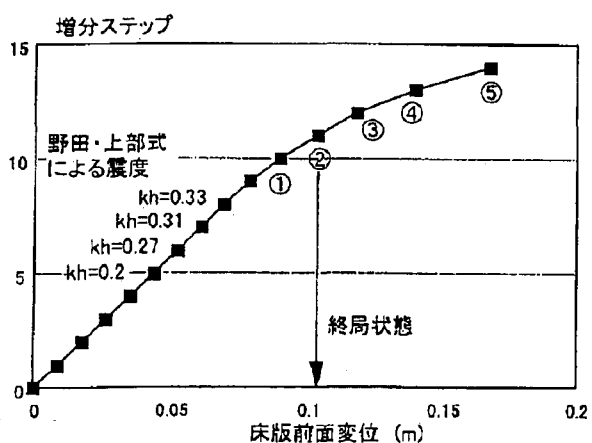


図-11 床版の荷重—変位関係

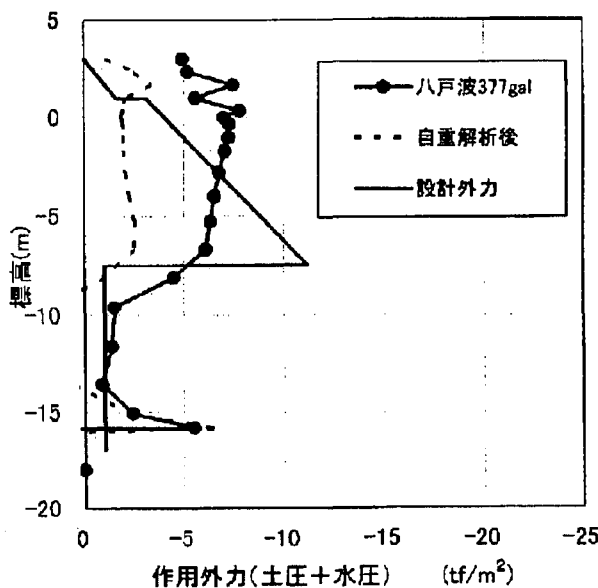


図-12 背面土圧分布の比較

## 参考文献

- 1) 井合 進 他：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリック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。

- 2) 南 兼一郎 他, 神戸港における横棧橋の  
被害調査動的相互作用解析, 第24回地震工  
学研究発表会論文集, 1997. 7

(1999年11月19日受付)

NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS FOR STRUTTED FRAME QUAY-WALL STRUCTURE  
WITH LATERAL EARTH PRESSURE

Sousuke KITAZAWA, Hiroyuki TAKIGAWA, Noriyuki KAWABATA and Yasushi WAKIYA

The strutted frame quay-wall structure has been developed for the large port structure in Japan. This newly developed structure is consist of steel piles, retaining sheet piles, concrete slabs and inclined strut steel tubes. The strut members are bracing between the upper slab and the lower part of the steel pile. This structure has characteristics such as decreasing the structural steel weight and increasing the earthquake resistance of the whole structure.

This report presents that the seismic resistance of the strutted frame quay-wall structure has been proved by combining the results of two kind of nonlinear dynamic analysis. One of which is the finite element method for the soft soil and the other one is the nonlinear dynamic response analysis of the strutted frame with the induced displacement by the soil surrounding the structure such as piles. Also the differences between the static lateral resistance and the dynamic resistance of the structure are compared.