

# 鋼管杭式栈橋の地震時における破壊過程の解析

井口 重信<sup>1</sup>, 清宮 理<sup>2</sup>, 横田 弘<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 工修 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 新宿区大久保3-4-1)

<sup>2</sup> フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 新宿区大久保3-4-1)

<sup>3</sup> 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

New design concept of steel - pipe pier has been proposed, however, failure process of the pier during large scale earthquakes is not enough known. New design method should be considered non-linear properties of the steel-pile to buckling behavior. Model test and finite element analysis are carried out to know the non-linear properties during failure process of the piers with three straight steel-pipes. Repeated and static load is applied to upper slab horizontally and axial force is applied to steel-piles by PC cables. The steel-pipes were buckled at both near reinforced part and upper slab during loading and two dimensional FEM can explain the hysteresis behavior of the pier model and three dimensional FEM also can explain the buckling behavior.

**Key Words** : Steel-pipe type pier, Loading test, FEM analysis, Buckling,

## 1. まえがき

阪神大震災以降、杭式栈橋の保有する地震時の耐力を的確に評価し、レベル2地震動に対する耐震評価式の整備が急務とされている。港湾の基準では鋼材の降伏を考慮した設計法が提案された。現在のところ、構造部材が最大荷重に達する以前の耐力低下のない範囲においては、耐荷力の評価が可能となっている。しかし、大規模地震で大きな繰返し荷重を受ける場合や、鋼管杭の一部が局部座屈を起こし構造物全体での耐力の低下にいたる栈橋の大変形挙動についてはいまだ不明な点が多い。そこで、直杭式栈橋を対象とした縮小模型による静的繰返し載荷試験を実施した。これより鋼管杭の座屈過程及びコンクリート床版と接合部のひび割れ進展を把握した。これを材料及び幾何学的非線形性を考慮した有限要素法により解析することで、直杭式栈橋の破壊過程をどこまで再現できるか検討した。

## 2. 載荷試験

### (1) 載荷試験の検討範囲

載荷試験における目的は、1) 栈橋の縮小模型による鋼管杭及び RC 梁の塑性変形性能の確認(梁の曲げ耐力、鋼管耐力の大小と全体耐力の関係)、2) 突出長

さの違いによる、地震荷重の分散と塑性変形性能の評価(鋼管杭の塑性変形後の荷重分散機構の解明)、3) 栈橋の塑性変形性能限界と残留変位の関係(履歴特性の把握)の3項目である。今回、試験施設の制約から地盤は作成しておらず地盤の剛性を付加する形で鋼管杭の下方部を補強してある。

### (2) 試験体

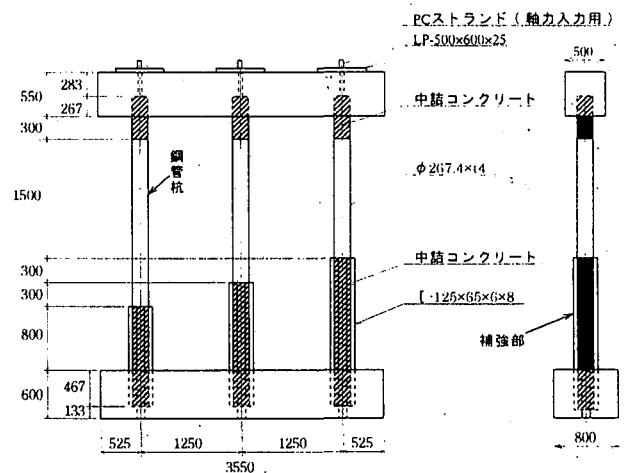


図-1 試験体の形状及び寸法(単位mm)

図-1に試験体の形状及び寸法を示す。試験体は、実際の標準的な栈橋の法線直角方向の杭1列分を約

1/4 の縮尺でモデル化したものである。RC 上部工の配筋、鋼管杭とコンクリートの結合状況は実物とできる限り類似させた。

試験体の基部には反力壁に固定するための RC 梁を設けてある。また、栈橋の設計は仮想海底面から  $1/\beta$  の位置を仮想固定点として、栈橋本体をラーメンモデルに置換して行われるため、仮想固定点より基部側ではみぞ型鋼により補強し内部をコンクリートで中詰めした。鋼管及びコンクリート(RC 梁、基部、中詰)の仕様を表-2に示す。試験杭の外径は 267.4mm、板厚は 4mm とした。RC 製床版の厚さは 550mm で鋼管杭は床版内に外径の長さだけ埋め込んだ。また床版下端より 300mm の範囲は普通コンクリートを充填した。

表-2 鋼管及びコンクリート(RC梁、基部、中詰)の仕様

鋼管	
鋼種	STK400 (一般構造用鋼管)
寸法	外径 267.4mm, 厚さ 4.0mm, 長さ 3934mm
機械的性質	降伏点 369N/mm <sup>2</sup> , 引張強さ 462N/mm <sup>2</sup> , 伸び 36.0%

・コンクリート(RC梁、基部、中詰)

設計基準強度	24N/mm <sup>2</sup>
試験時圧縮強度	37N/mm <sup>2</sup>

### (3) 荷重方法

荷重は図-3に示すように試験体を反力床に平置きにして油圧ジャッキにより荷重を行った。基部の RC 梁は PC 鋼棒で反力壁に固定した。上部 RC 梁はローラー支承に載せ、RC 梁と支承の間にはテフロンシートを挟み摩擦を低減した。荷重は、以下の手順で行い地震時荷重条件を再現した。

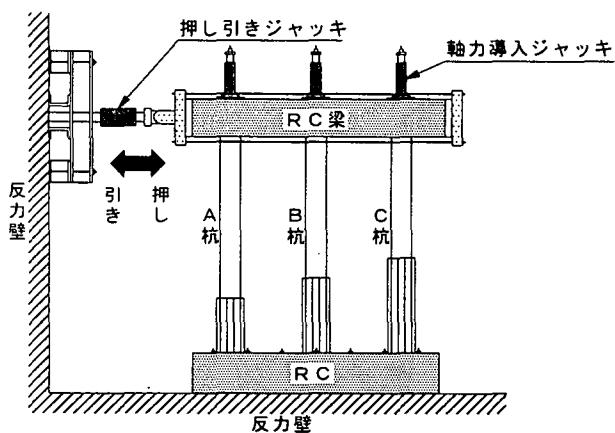


図-3 荷重方法

#### a) 上荷重の導入

栈橋上の上荷重を想定して、鋼管杭に軸力の導入を行った。導入にあたっては、鋼管内に PC より線を

通し、これをジャッキで緊張し、鋼管一本あたり 200kN の軸力を与えた。

#### b) 地震荷重の導入

地震荷重は静的荷重に置き換え、押し引きの両動油圧ジャッキを用いて、静的に繰り返し荷重することをもって模擬した。荷重ステップは 4δy まで押しと引きを各3回ずつ繰り返し、それ以降は破壊の進行状況に応じて繰り返し回数を決定した。荷重ステップを図-4に示す。なお、本試験においては、1δy (鋼管杭降伏時水平変位量) を鋼管杭のひずみゲージが材料試験より得られた降伏強度 369N/mm<sup>2</sup> に達したときの変位量とした。

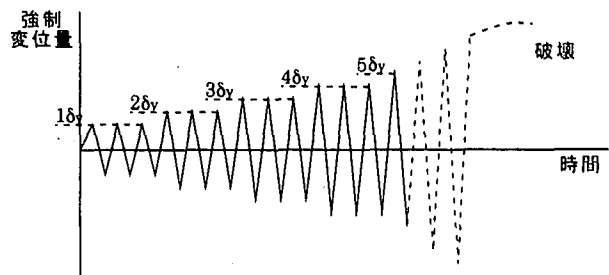


図-4 荷重ステップ

### 3. FEM解析

FEM 解析は、材料非線形性を考慮し、微小ひずみ有限変位の条件で行った。計算モデルとして二次元モデルと三次元モデルの2種類を作成した。

#### (1) 二次元モデル

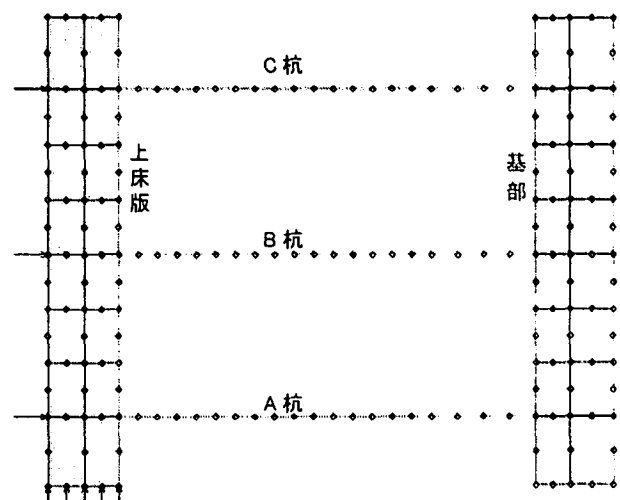


図-5 FEMメッシュ図(二次元モデル)

図-5に二次元モデルのメッシュを示す。要素数及び節点数はそれぞれ 68 及び 195 である。床板及び基部は平面応力要素でモデル化し、材料非線形性は考慮しなかった。鋼管杭には PIPE 要素を用い、応力ひずみ

み関係をバイリニアでモデル化し、塑性硬化は等方硬化則で考慮した。なお、中詰コンクリート部分及びみぞ型鋼補強部分は曲げ剛性が等しくなるように鋼管の厚さを7.4mm及び24mmと大きくして換算した。

## (2) 三次元モデル

図-6に三次元モデルのメッシュを示す。要素数及び節点数は、それぞれ2160及び11466である。床版及び基部には27節点SOLID要素を用い、材料非線形性は考慮しなかった。鋼管杭には9節点のSHELL要素を用い、バイリニア型で非線形性を考慮した。なお、中詰コンクリート部分及びみぞ型鋼補強部分は、二次元モデルと同様に曲げ剛性が等しくなるように板厚を換算した。このモデルでは、水平荷重の繰返しの影響は見なかった。

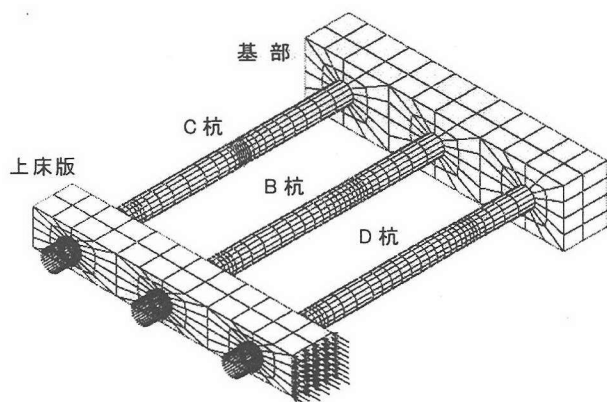


図-6 FEMメッシュ図(三次元モデル)

## (3) 解析方法

荷重方法は、軸力が杭1本あたり200kNを一定荷重、水平強制変位は二次元モデルでは単調荷重と繰返し荷重、三次元モデルでは単調荷重とした。

## 4. 荷重試験及びFEM解析結果

### (1) 変形状況

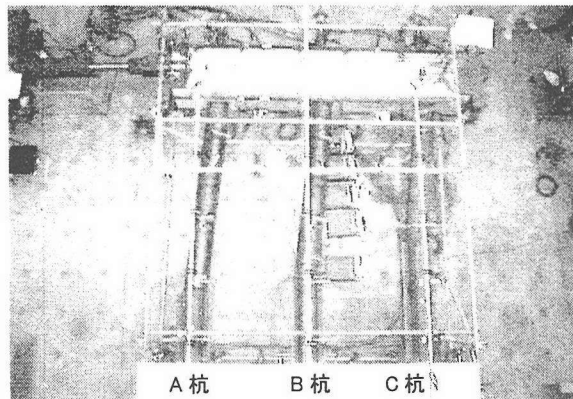


図-7 変形状況(水平変位200mm押切り時)

図-7に試験時の模型の変形状況を示す。試験ではC杭の補強部の上側にまず座屈が生じ、次にA杭の上床版側に座屈が生じた。順次座屈の杭が増加し、最終的には補強部の上側と上床版端部の全ての箇所にて座屈が観測された。上床版には1 $\delta$ y時点でひびわれが生じた。座屈は繰返し荷重に従い鋼管杭の裏と表側に交互に生じ最終的には、象の足型に座屈が鋼管杭の円周方向に生じた。

### (2) 水平変位-水平荷重関係

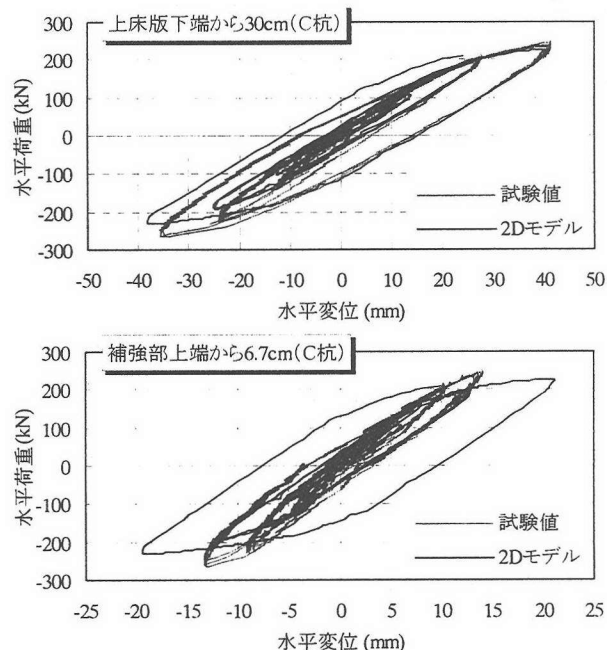


図-8 水平荷重-水平変位関係の履歴

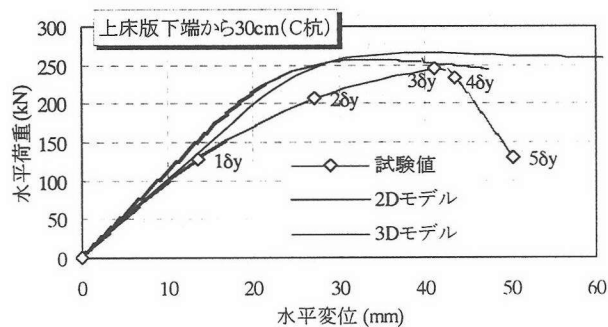


図-9 水平変位-水平荷重関係の包絡線

図-8に3 $\delta$ yまでの水平荷重と水平変位関係の履歴を示す。上床版に近いところほど試験値と解析値は近くなり、基部に近いほど差は大きくなった。これは、境界条件が解析と荷重試験とで完全に一致しなかったためと考えられる。荷重試験では基部においては鋼管杭が剛結とはみなせず、逆に解析において回転を考慮しなかったためだと考えられる。

図-9に水平荷重と水平変位関係の包絡線を示す。水平荷重の最大値は、解析値の方が大きくなったもの

の、最大水平荷重までの挙動はほぼ一致した。しかし最大水平荷重以降は載荷試験では急激に耐荷力が低下した。これは、載荷試験においては繰り返し載荷を行ったので、鋼管杭の降伏が漸増載荷のように片側だけではないこと、鋼材のバウシinger効果などの影響が考えられる。

### (3) 局部座屈

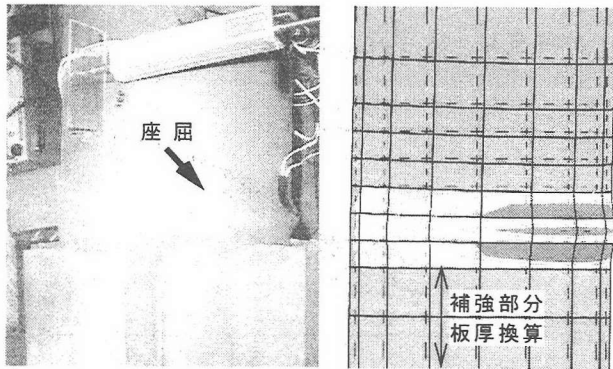


図-10 局部座屈状況(左:試験, 右:3Dモデル)

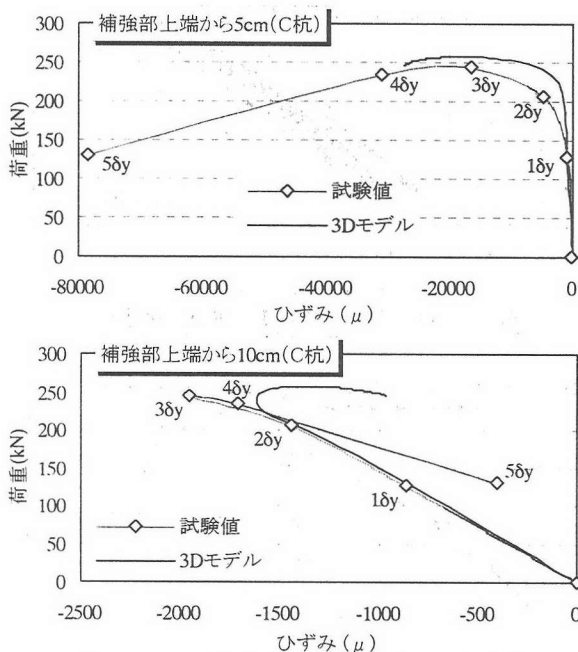


図-11 水平荷重-軸方向ひずみの包絡線

図-10に C 杭補強付近の局部座屈状況を示す。載荷試験では、座屈は補強部から約 40mm 上の位置に発生し、最終状態で座屈幅及び高さはどちらも 30mm 程度であった。解析においても座屈の位置および幅はほぼ一致したが、高さについては低くなり一致しなかった。これは、載荷試験においては繰り返し載荷が行われひずみが蓄積されたためだと考えられる。

図-11に C 杭補強部付近の水平荷重-軸方向ひずみの包絡線を示す。局部座屈の著しかった補強部より 5cm の位置では、同じ水平変位 58y のとき載荷試験で

は最大ひずみが 79%まで達したのに対し、解析では 28%とかなり差が生じた。一方、補強部から 10cm の位置では、試験では 38y でひずみが減少に転じるが、解析でもその傾向は再現できた。

## 5. 結論

今回、3本の鋼管杭から構成される栈橋模型を対象に行なった載荷試験を、二次元及び三次元の FEM 解析で再現したが、以下のことが判明した。

- (1) 載荷試験での 38y までの水平荷重-水平変位関係の履歴は、鋼材の材料非線形性をバイリニアとした簡易な材料モデルの二次元有限要素法解析(床版を線形の平面応力要素、鋼管杭を非線形梁に置換)で大方追跡ができた。38y 以降の耐力が低下する領域での解析は十分できなかった。また、鋼管杭と RC はりの接合部においては、試験と解析に大きな差が生じ、接合状況をうまく再現するモデルが必要であることが判明した。
- (2) 水平荷重-水平変位関係の包絡線は、最大値までは試験と三次元解析はほぼ一致したが、最大値以降の耐力低下領域においては試験値は著しく耐力が低下し、解析では激しい低下は見られなかった。これは、試験と解析の載荷方法(漸増載荷と繰り返し載荷)の違いのためだと考えられる。
- (3) 今回の三次元モデルで、初期不正などを与えずとも局部座屈を再現できた。また、その周辺での鋼管のひずみ分布についても、試験と同じ傾向を再現できた。ただし象の足形の座屈現象は十分解析できなかった。

## 6. あとがき

栈橋の地震時挙動を適切に追跡するためには、解析においても繰り返し荷重の影響を考慮する必要がある。また、コンクリートのひび割れとを考慮した接合部の固定条件などのモデル化および周辺地盤の影響なども考慮する必要がある。今後、地盤内での鋼管杭の座屈現象などを載荷試験と解析とで検討することが望まれる。

## 参考文献

- 1) 横田 弘ほか 4 名:鋼管杭式栈橋の終局限界における構造性能に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1527 ~ 1536, 1999.3
- 2) 井口重信, 清宮 理:直杭式栈橋の地震応答での静的解析と動的解析の比較, 鋼構造年次論文報告集, 第7巻, pp.293 ~ 300, 1999.11