

栈橋の鋼管杭と上部工接合部の回転変形挙動に関する実験および解析

Structural performance of the joint between steel pipe pile and reinforced concrete beam

横田 弘^{*}, 片岡保人^{**}, 菅原 亮^{***}, Hazem El-Bakry^{****}, 川端規之^{*****}

Hiroshi Yokota, Yasuto Kataoka, Ryo Sugawara, Hazem El-Bakry, Noriyuki Kawabata

^{*} 工博 運輸省港湾技術研究所構造部構造強度研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

^{**} 工修 運輸省港湾技術研究所研修生 (神戸製鋼所機械研究所, 〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

^{***} 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)

^{****} PhD 前 運輸省港湾技術研究所客員研究員 (現 アレキサンドリア大学講師)

^{*****} 工修 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)

A series of experimental tests with approximately 1/2 scaled joint models between a steel pile and a reinforced concrete beam have been carried out to investigate the mechanical behavior, especially the ultimate load bearing capacity and the relationship between bending moment and rotation angle at the joint. As a result, it was confirmed that the joint showed excellent structural performance, that is, its load bearing capacity did not degrade up to the ductility factor of about 5 at least. Moreover, a numerical approach has been newly developed for the joint based on a two-stage, two-dimensional analysis to account for the three-dimensional behavior of the joint. The validity of the new approach was verified by applying to the tested joint models.

Key Words : open-piled wharf, joint, rotational deformation, nonlinear analysis

1. まえがき

鋼管杭式栈橋 (以下、栈橋と称す) は、海底地盤中に打設された複数の鋼管杭と、これらに支持されたコンクリート上部工 (鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート) による複合構造物である。先の港湾の施設の技術上の基準・同解説の改訂により¹⁾、栈橋の耐震設計においては、構造性能が要求性能を満足しているかどうかを照査する手法が採用された。そこでは、栈橋の部分的損傷を許容しつつ、地震時の保有耐力を照査することが標準となっており、個々の施設の要求性能や目標損傷形態を直接評価できる合理的な体系となっている。

栈橋の杭頭部における上部工との接合部分は、一般に剛結と仮定されて種々の解析や照査のための検討が行われる。しかし、過去に行った約1/4縮尺の2本杭および3本杭モデル栈橋を対象とした構造実験や、これらに対する数値解析の結果²⁻⁴⁾、この接合部における非線形回転変形挙動が、栈橋全体の変位やエネルギー吸収にかなりの影響を及ぼすことが明らかになった。特に、接合部を剛結と仮定した構造解析では、栈橋上部工の変位が実験結果の約1/2となり、実現象を十分に再現できなかった。これを解決するには、接合部の回転変形を精緻に表現できるモデルの構

築が必要である。

これに対しては、実験結果より得られた接合部分における曲げモーメント-回転角関係を用いることにより、上部工の荷重-変位関係を精度よく計算することが可能となった^{2,3)}。しかし、これは実験結果を用いて接合部の解析上の構成則を構築して、解析に用いているため、実験結果と合致するのはある意味では当然のことである。そのため、より汎用的な構成則の構築のための検討が必要となっている。

そこで、本研究では、接合部の回転変形挙動をより明確に把握するため、栈橋の杭頭付近の接合部およびその近傍のみを抽出してモデル化した試験体 (縮尺は標準的栈橋の約1/2) に曲げモーメントを負荷する実験を実施した。その際、上部工の鉄筋量、上部工と鋼管との接合方法の構造諸元を変化させて、これらが接合部の力学特性に及ぼす影響についても調べた。また、接合部の挙動を表現する解析モデルの構築を試みた。そこでは、3次元的な挙動を示す杭頭部およびその近傍を、解析の便を考慮して2次元モデルに置き換えて表現する手法を提案した。そして、本研究および以前に行った実験結果と比較することにより、本解析手法の妥当性について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

載荷実験は、特に以下の項目に着目して実施した。

- (1) 鋼管杭と上部工接合部の終局状態に至るまでの損傷発生過程と終局時の損傷状況
- (2) 接合部の力学的挙動、特に回転変形挙動（接合部の曲げモーメントー回転角関係）
- (3) 接合部の構造諸元が接合部の剛性や耐荷力に及ぼす影響

2.2 試験体の種類

図-1に、試験体の概要を示す。試験体は、L形で、実橋橋の上部工梁部分と鋼管杭の接合部を約1/2縮尺でモデル化したものである。上部工寸法は、長さ3000mm×高さ700mm×幅700mmとし、そこに長さ3000mm、外径500mm、肉厚9mmの鋼管を埋込んだ。また、鋼管の上端は、上部工下縁から500mmの位置までコンクリートの中詰めした。

試験体は全部で4体とし、CASE1試験体の構造詳細を図-2(1)に、CASE2～4試験体の接合部近傍の構造を図-2(2)～(4)に示す。CASE1は実橋橋でも一般的に用いられている基本タイプで、主鉄筋はD22を4本とし、鋼管杭に肉厚9mmのプレート（図-2(1)中の斜線で示した部分）を溶接し、

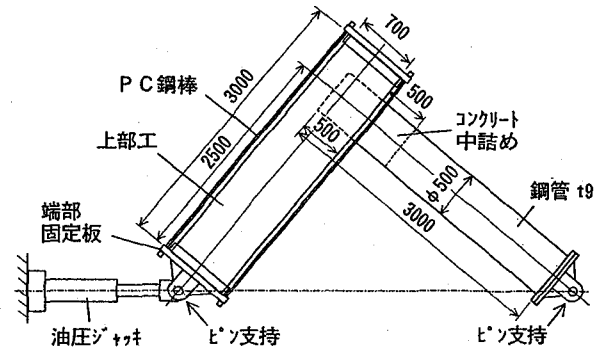


図-1 試験体および載荷方法

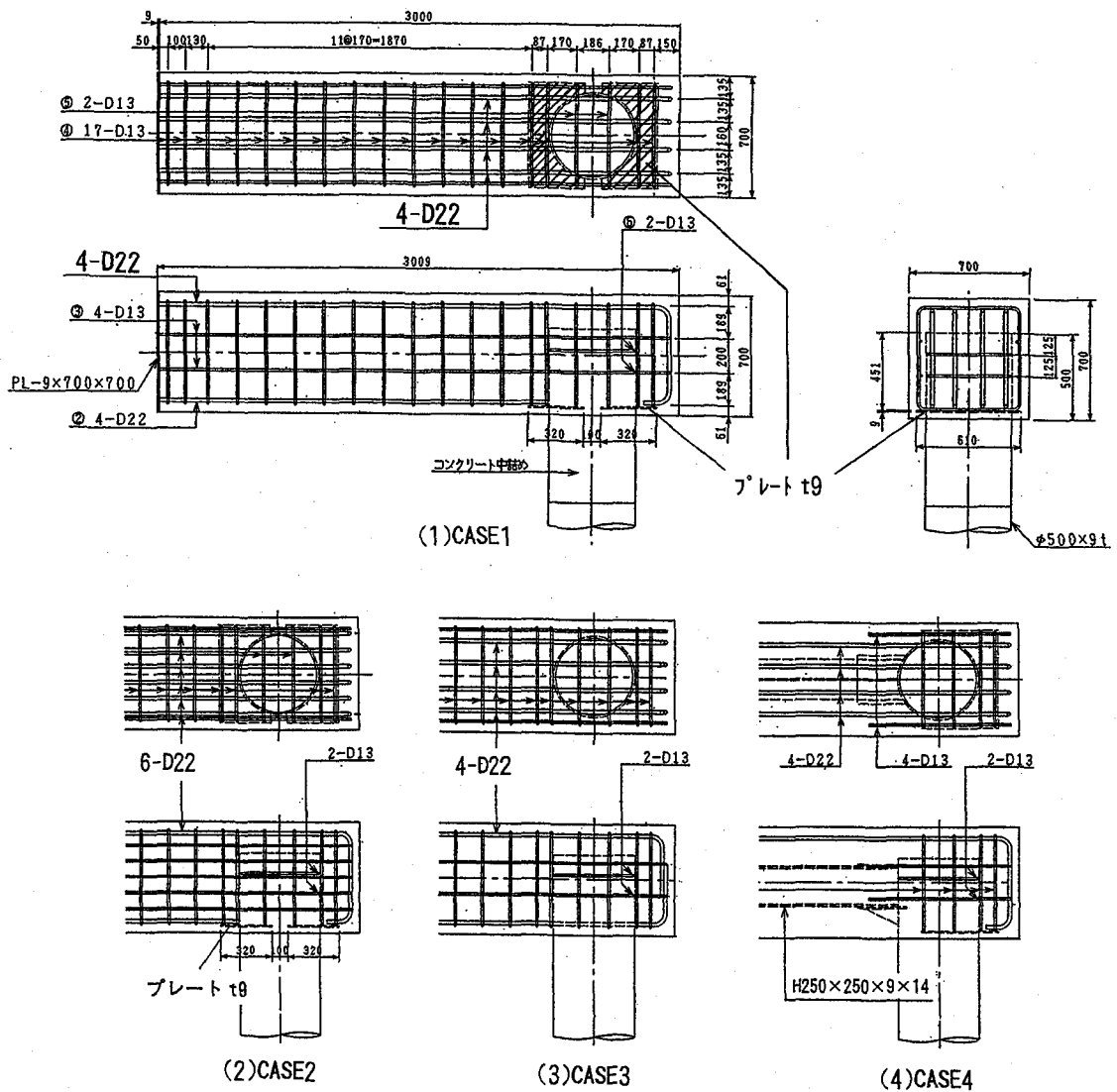


図-2 配筋および接合状況

表-1 コンクリートの性質

設計基準強度 (N/mm ²)	スラブ [*] (cm)	空気量 (%)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)	実験時 圧縮強度 (N/mm ²)
24	9.3	4.5	28.9	31.4

表-2 鋼材の機械的性質

部位	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
鋼管	STK400	322	470	40
鉄筋 D22	SD295A	380	538	24
鉄筋 D13	SD345	379	544	26
H形鋼	SS400	361	456	29
プレート	SS400	310	445	30

さらにそれに鉄筋を溶接している。CASE2は、CASE1と同様にプレートを設けて鉄筋を溶接しているが、鉄筋量を増やした (D22を6本とした) タイプである。CASE3は、鉄筋量はCASE1と同じ (4-D22) であるが、プレートを設けずに鋼管に穴をあけ、その穴に鉄筋を通して溶接したタイプである。また、CASE4は鉄筋の代わりにH形鋼 (H250×250×9×14) を使用したタイプである。

上部工および鋼管上端の中詰めには、設計基準強度が24N/mm²、粗骨材最大寸法が25mmのコンクリートを使用した。直径10cm、高さ20cmの円柱供試体より求めた実験時のコンクリート強度試験結果を表-1に示す。また、鋼材の機械的性質を表-2に示す。

2.3 載荷方法

図-1に示すように、接合部に最大曲げモーメントが作用するように、上部工および鋼管端部をピン支持とし、両支持部を結ぶ直線上に荷重を負荷した。また、上部工側のピン支持用治具は上部工に直接取り付けられないので、端部固定板に取り付け、4本のP C鋼棒で端部固定板と上部工を固定した。試験体は寝かせて、水平面内に設置した。その際、上部工を、ローラー支承およびテフロンシート2枚を組合せたものの上に載せ、試験体がスムーズに動くよう配慮した。

荷重は、図-1において左から右、すなわち油圧ジャッキが試験体を押す方向の荷重のみを負荷している。本来、地震荷重に相当する荷重としては押し、引き両方の荷重を負荷させるべきである。しかし、本実験の場合、引き荷重では、P C鋼棒もいくぶん荷重を分担することになり、接合部のみに作用する曲げモーメントの値が明確ではなくなるため、一方向のみの負荷とした。なお、P C鋼棒は単に端部固定板を上部工に取り付けるためだけのものである (載荷時の安全性確保)。このため、押し荷重の際、4本のP C鋼棒にも長さ方向中央位置にひずみゲージを貼付し、ひずみが生じていないこと、すなわちP C鋼棒が荷重を分担していないことを確認しながら実験を行った。また、図-1に示した載荷方法では、曲げモーメントとともに軸力

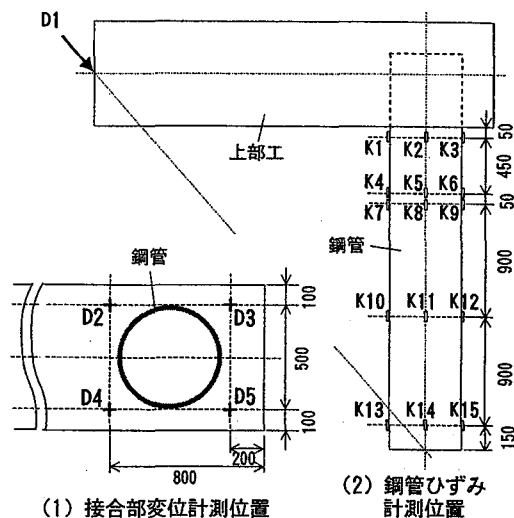


図-3 変位および鋼管ひずみの計測位置

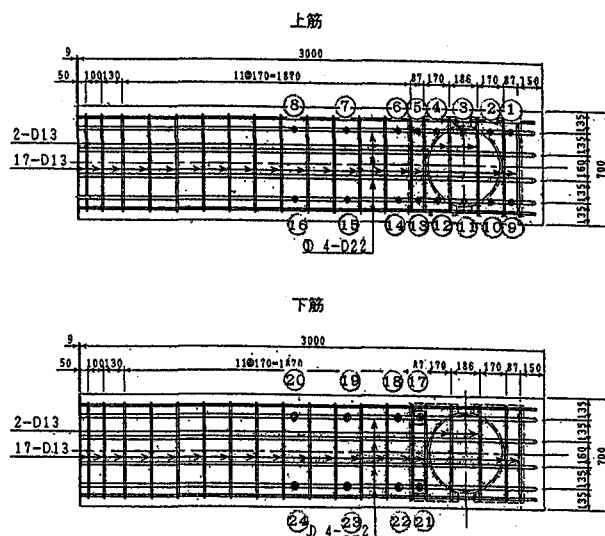
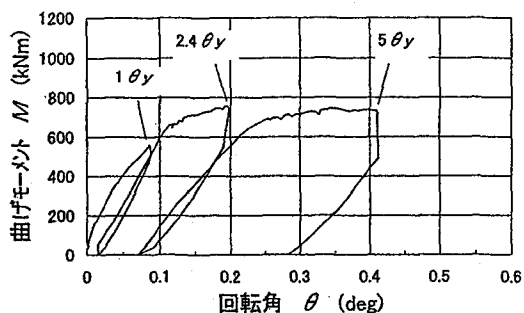


図-4 鉄筋ひずみの計測位置

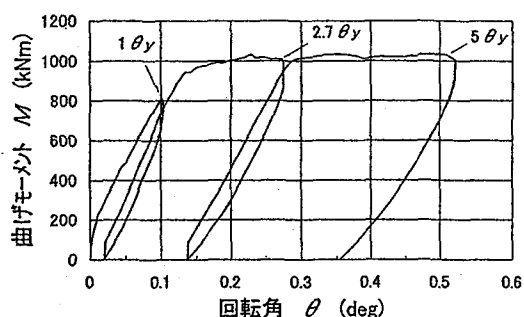
も作用することになるが、接合部における軸力による応力は最大曲げ応力度の約4%程度と小さいので、耐荷力等の実験結果に対する影響は無視できるものとした。

繰返し載荷は、鉄筋あるいは鋼管縁部のいずれかにおける応力度が降伏応力度 (引張試験より得られた値) に達したときの載荷点荷重方向 (図-3中D1方向) の変位 δ_y をもとに行なった。具体的な繰返し載荷方法は、荷重0→1 δ_y →荷重0→2 δ_y →荷重0→3 δ_y →荷重0で、繰返しは1回のみとした。1 δ_y 時の接合部回転角を1 θ_y とすると、今回の試験は回転角でほぼ5~6 θ_y 程度まで載荷することに相当する (回転角の算出法は後述する)。

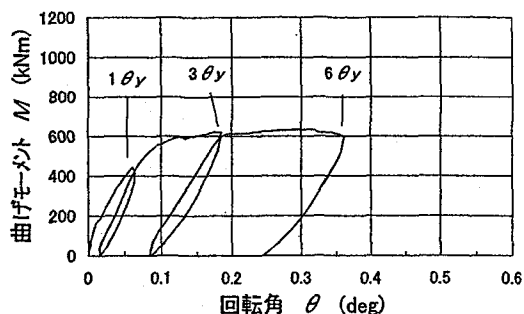
計測位置の例として、CASE1試験体における変位およびひずみの代表的計測位置を図-3および図-4に示す。変位およびひずみの測定は、各試験体でほぼ同じ位置で行った。図-3(1)に示すように、鋼管杭まわりD2~D5の合計4点で



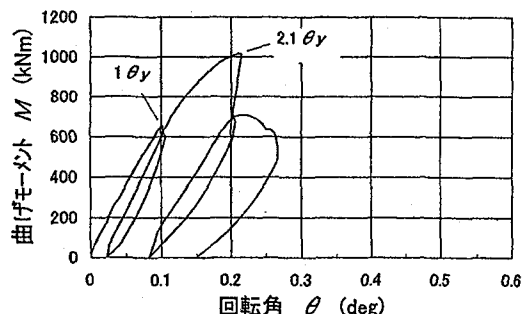
(1)CASE1



(2)CASE2



(3)CASE3



(4)CASE4

図-5 曲げモーメント-回転角関係

鋼管軸方向（すなわち，図中紙面直角方向）の鋼管に対する上部工下面の相対変位を測定し，これらの変位から鋼管杭と上部工間の接合部の回転角 θ を算出した．具体的には，図-3(1)中の変位D2とD3，およびD4とD5の差をとり，それらを変位計間隔600mmで除し，両者の値を平均して接合部における回転角を求めた．

コンクリートひび割れ発生状況，鋼管杭の座屈状況等の外観上の損傷については，各載荷ステップ毎に目視により観察，記録した．

3. 実験結果と考察

各試験体の接合部における曲げモーメント-回転角関係を図-5に示す．ここで，曲げモーメントは載荷荷重の鋼管軸方向成分（上部工に作用するせん断力成分）とアーム長の積，回転角は2. で述べた接合部まわりの変位計の計測値より算出した値である．以下，各試験体の結果とそれに対する考察を述べる．

3.1 CASE1 試験体

基本タイプであるCASE1試験体の場合，接合部に作用する曲げモーメントが283kNm（荷重で142kN）のとき上部工コンクリート引張側に最初の曲げひび割れが発生した．そして，557kNm（荷重279kN）のとき上部工接合部近傍の引張側鉄筋（図-4中No. 13の箇所）が降伏に至った．このときの接合部回転角を $1\theta_y$ とした．この時点で，上部工上面，すなわち引張側の面には数本の貫通ひび割れが生じてい

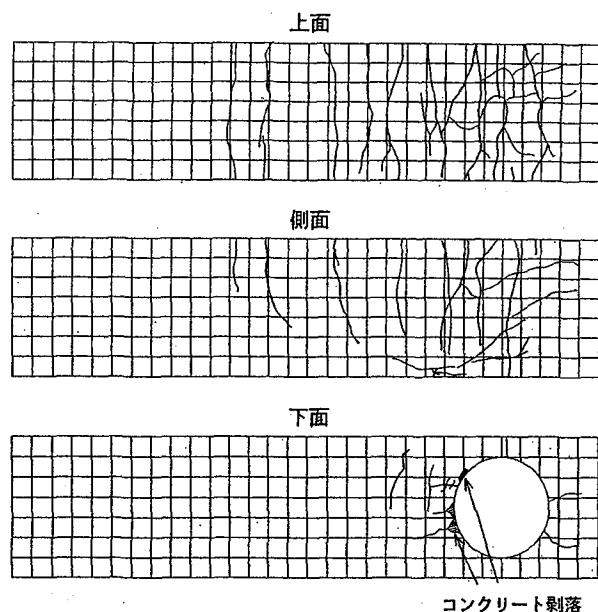


図-6 CASE1 試験体の終局時ひび割れ発生状況

た．そして， $2.4\theta_y$ 時に最大曲げモーメントの758kNmに達し，その後，少なくとも $5\theta_y$ まで変形が進んでも耐力は低下せずにほぼ一定のままであった．

図-6にCASE1試験体の終局時の上部工ひび割れ発生状況を示す．上面すなわち引張側の面には多くの貫通ひび割れが，側面には鋼管杭の付け根部から引張側に向かって放射状にひび割れが発生していた．また，下面すなわち圧縮側



写真-1 終局時コンクリート圧縮破壊状況

杭頭部周辺には、鋼管の押し込みによるひび割れや、コンクリート表面部の圧縮破壊、はく落が見られた。コンクリート圧縮破壊状況を写真-1に示す。圧縮側のひび割れは鉄筋降伏の $1\theta_y$ 時までは見られず、コンクリートの圧縮破壊やはく落は、最大曲げモーメント到達の $2.4\theta_y$ 時までは観察されなかった。曲げモーメント-回転角関係とこれら損傷発生過程を考え合わせると、接合部の回転変形は、主に上部工圧縮側における鋼管の押し込みによるコンクリートのひび割れと圧縮破壊によるものと考えられる。

図-7にCASE1試験体の鋼管杭圧縮縁、引張縁における軸方向ひずみ分布を示す。引張側、圧縮側のひずみの大きさは、ほぼ同程度になっていた。また、ひずみの絶対値は、鋼管ピン支持部近傍において最小値になり、杭頭方向に向かってほぼ直線的に増加していた。ただし、杭頭部近傍にはコンクリートが中詰めされているため、ひずみの値が若干乱れている。本試験体の場合、最大変位($3\delta_y$)時にお

いても杭頭部のひずみは最大約 3000μ で、降伏時ひずみ(約 1600μ)の2倍未満となり、あまり大きい値は示さなかった。また、鋼管杭には局部座屈も観察されなかった。このことより、杭頭近傍において、塑性ヒンジは生じなかったものと考えられる。なお、その他の試験体についてもひずみの分布形はほぼ同様で、ひずみの値自体も同程度か、本試験体(CASE1)よりも小さかった。また、局部座屈も観察されなかった。

3.2 CASE2 試験体

CASE2試験体の場合、初期ひび割れについてはCASE1とほぼ同じく、曲げモーメント 284kNm (荷重 142kN)のとき上部工コンクリートの引張側に生じた。そして、 811kNm (荷重 406kN)のとき鋼管接合部近傍の引張側縁部(図-3(2)中K6の箇所)が降伏に至った。このときの接合部回転角を $1\theta_y$ とした。その後、最大曲げモーメントは 1018kNm に達し、回転変形が $5\theta_y$ 程度になっても耐力の低下は見られなかった。CASE2では、CASE1に比較して鉄筋量が多いために、鋼管が先に降伏に達し、接合部の曲げ剛性、耐荷力も大きくなったと考えられる。初期降伏時の剛性で比較すると、CASE1では約 6000kNm/deg であるのに対して、CASE2では約 8000kNm/deg と3割程度大きくなった。また、耐荷力も3割程度大きくなっている。終局時の上部工ひび割れ発生状況は、基本的にはCASE1とほぼ同様のパターンであったが、荷重が大きくなった分、ひび割れ発生箇所もいくぶん多くなった。

3.3 CASE3 試験体

CASE3の場合、曲げモーメントが 444kNm (荷重 222kN)のとき上部工接合部近傍の引張側鉄筋(図-4中No. 5の箇所)が降伏した。このときの接合部回転角を $1\theta_y$ とした。その後、最大曲げモーメント 634kNm (荷重 317kN)に達し、回転変形が少なくとも $6\theta_y$ 程度まで耐力は低下しなかった。CASE3の場合、鉄筋量が同じにもかかわらずCASE1よりも約2割程度耐荷力が低下した。この結果より、鋼管に溶接したプレートも接合部の耐荷力にいくぶん寄与しているものと考えられる。終局時のひび割れ発生状況は、CASE1とほぼ同様であった。

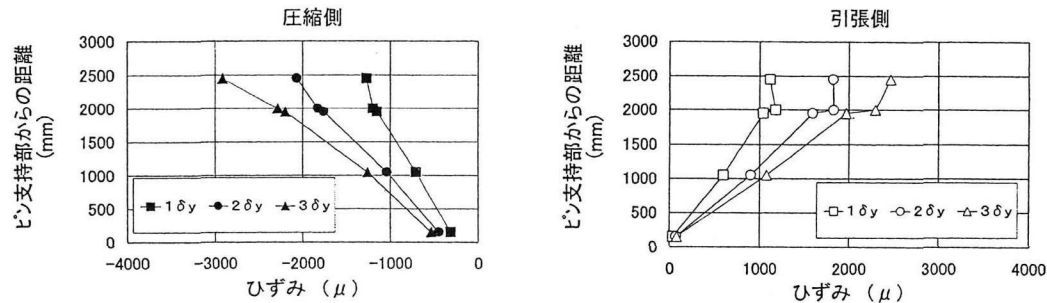


図-7 CASE1 試験体の鋼管軸方向ひずみ分布

3.4 CASE4 試験体

CASE4では、曲げモーメントが656kNm（荷重328kN）のとき上部工接合部近傍の引張側鉄筋（図-4中No. 13の箇所）が降伏に至った。このときの接合部回転角を θ_y とした。そして、 $2.1\theta_y$ 時に最大曲げモーメントである1017kNm（荷重509kN）に達したが、その後、かなり大きな音とともに破壊が進行し、約3割程度耐力が急激に低下した。これは、H形鋼とコンクリート界面が一気に剥離したためではないかと推察される。耐力を維持するためには、H形鋼にずれ止めを設けるなどの対策が必要であると考えられる。また、終局時のひび割れ状況は、基本的にはCASE1と同じようなパターンであったが、引張側で上部工長さ方向に走るひび割れがいくつか観察された。これも、上記の剥離が原因で生じたものと思われる。

4. 数値解析

鋼管杭と上部工接合部の回転変形挙動を、実際の設計段階においても取り入れるための解析手法について検討した。栈橋の接合部を解析する場合、実際の構造をかなり忠実にモデル化できる3次元非線形FEM解析手法を用いることが挙げられる。実際にソリッド要素を用いて、解析を試行してみたが、データ作成および計算にかなりの労力と時間を要し、また、要素分割数等によっても収束性や結果がかなり左右され、現段階で実設計に用いるには適切ではないと考えられる。このほかにも、接合部を単純に曲げ剛性を合わせた2次元モデルとした解析も試みたが、写真-1に示したような、鋼管杭がコンクリートを押し込む際の局所的な応力集中や損傷等を考慮できないため、十分な精度が得られなかった。そこで、下記に示すような解析手法を新たに開発し、その適用性を検討した。

4.1 解析方法の概要

解析手法の概要を図-8に模式的に示す。本手法は、3次元の挙動を2次元モデルで評価するもので、2段階の2次元非線形FEM解析を行うものである。まず、図-8(1)に示すように、上部工接合部を等しい厚みのいくつかの層に分割する。そして、図-8(2)に示すように、ここから一層を取り出す。この層は、コンクリートが充填された鋼リングとRC（鉄筋コンクリート）板から構成されている。鋼リングに荷重を作用させ、RC板を押し込み、荷重-変位（ $P-\delta$ ）関係を得る（第1段階の2次元FEM解析）。つぎに、図-8(3)に示すように、この解析で得られた荷重-変位関係をもつ等価バネ要素で各層を置き換え、また、鋼管も等価な梁に置き換える。すなわち、接合部がバネ要素と梁要素を組合せた2次元モデルに変換される。そして、このモデルに曲げモーメントを作用させ、接合部の曲げモーメント-回転角（ $M-\theta$ ）関係を解析する（第2段階の2次元FEM解析）。

このようにして得られた接合部の曲げモーメント-回転角特性を、栈橋を骨組み構造解析する際に、接合要素の特性として組み込む。

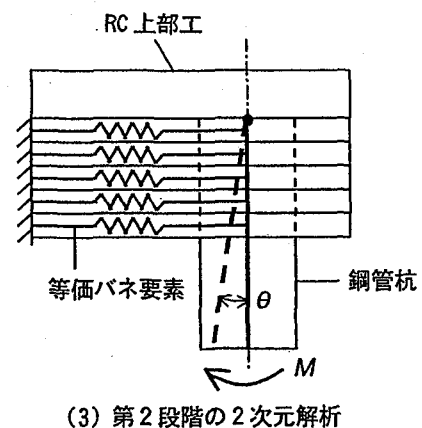
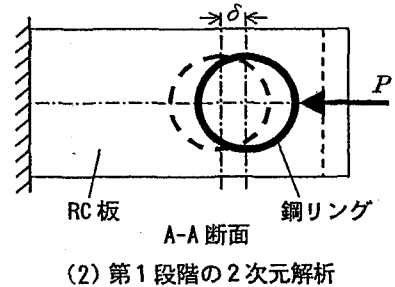
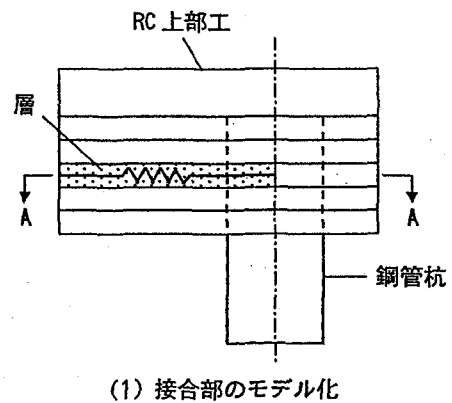


図-8 解析手法の概要

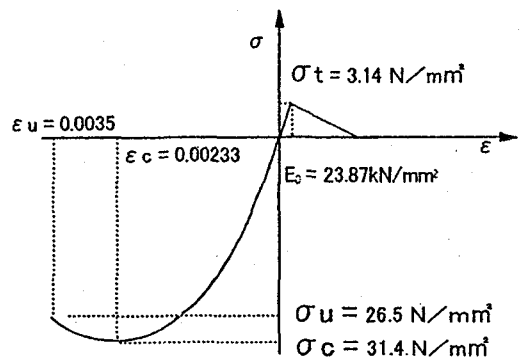
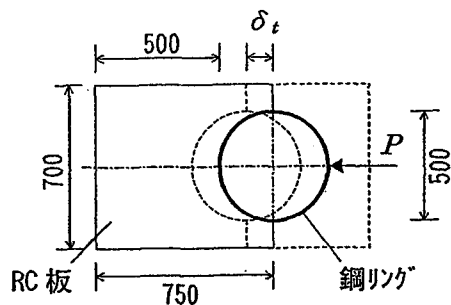
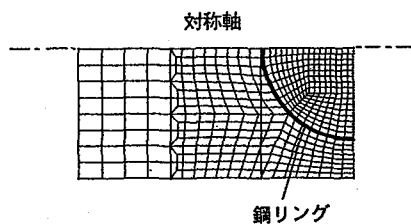


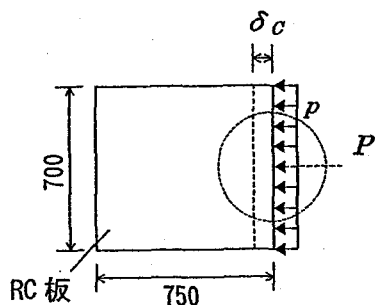
図-9 コンクリートの応力-ひずみ関係



(1) 鋼リングによる圧縮荷重作用時のモデル



(2) FEM解析メッシュ分割図



(3) 一様圧縮応力作用時のモデル

図-10 一層分の2次元解析モデル

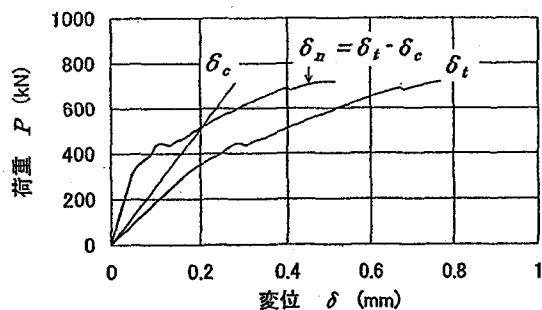


図-11 一層分の荷重-変位関係

4.2 接合部試験体に対する解析と考察

本論文で取り扱った模型試験体（縮尺約1/2）に、本解析手法を適用し、その妥当性について検討した。解析で用いたコンクリート材料の応力-ひずみ関係を図-9に示す。これらの特性値は、材料試験で得られた値を使用した。また、鋼管および鉄筋の応力-ひずみ関係は、表-2に示した降伏応力を有する弾完全塑性体とした。なお、解析は汎用有限要素解析プログラムSOLVIAを用いて行った。コンクリ

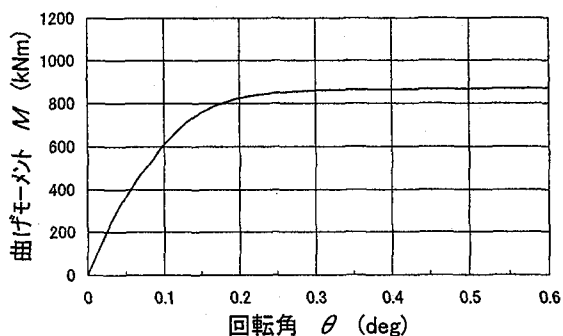


図-12 L形試験体接合部の
曲げモーメント-回転角関係

ートのひび割れは、smeared crackとして考慮した。

(1) 第1段階の2次元解析

図-8(2)に示した上部工接合部の層に対する解析モデルを図-10(1)に示す。モデルは、コンクリートを充填した鋼リングとRC板から構成される。この際、引張側コンクリートは層の力学的挙動にほとんど寄与しないと考えられるので、圧縮側部分のみをモデル化している。また、図-10(1)において、鋼管中心からモデル左端（荷重方向変位拘束位置）までの長さを750mmとした。これは、この程度の長さをとっておけば左端における応力分布がほぼ一様となるためである。上部工長さ方向の主鉄筋については、栈橋構造全体の骨組み構造解析の際に上部工梁要素において加味されるのでここでは考慮していない。ただし、スターラップについては、コンクリートの圧縮破壊特性にいくぶん寄与すると考えられるため、モデル内にトラス要素として取り入れている。FEM解析で用いたメッシュ図を図-10(2)に示す。解析モデルは対称性を考慮して1/2モデルとし、要素は平面ひずみ要素、板厚は10mmとした。さらに、図-10(3)に示すような圧縮荷重Pによって上部工が一樣に収縮する変形も、全体骨組み構造解析の際に上部工梁要素における変形として加味されることとなる。このため、接合部分のみの変形量としては、図-10(1)に示した変位量 δ_t から、図-10(3)に示した荷重Pと等価な一様圧縮応力 p による変位量 δ_c を差し引いた量 δ_n となる。すなわち、

$$\delta_n = \delta_t - \delta_c \quad (1)$$

として表される。

このようにして得られた2次元非線形解析（第1段階の2次元解析）結果を図-11に示す。ただし、図-10に示したモデルの板厚は10mmであるので、図-10のモデルで求めた荷重値を10倍して、厚さ100mm分の層に対する荷重に換算した。図-11には、この換算した後の値、すなわち厚さ100mm分の層の荷重-変位関係を示す。なお、図-11において、荷重が400kNを少し越えたあたりで一旦わずかに減少している。これは、コンクリートの一部で引張応力が引張強さに達して、除荷したためである。

(2) 第2段階の2次元解析

図-11に示した荷重-変位（ $P-\delta_n$ ）関係を、図-8(3)に示した上部工一層分に相当する等価バネ要素の特性と

して与えた。上部工接合部の鋼管埋込み部分の厚みは500mmであるので、図-8(3)に示したように、5本のバネ要素を用いて接合部をモデル化した。この接合部の解析結果、すなわち接合部の曲げモーメント-回転角関係を図-12に示す。

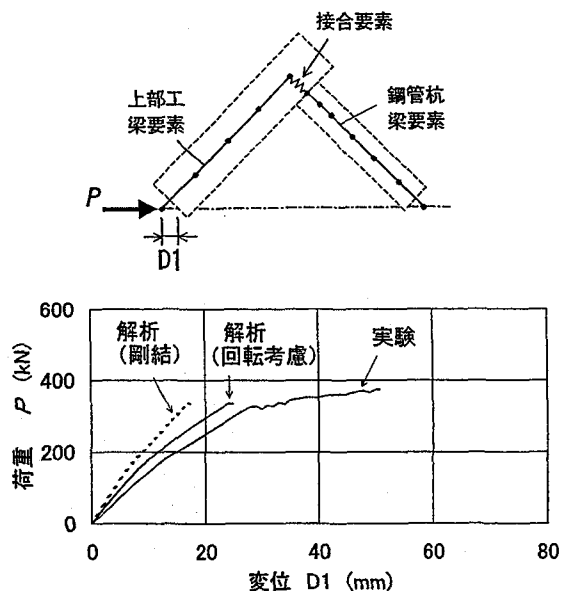


図-13 L形試験体の解析

(3) L形試験体に対する解析

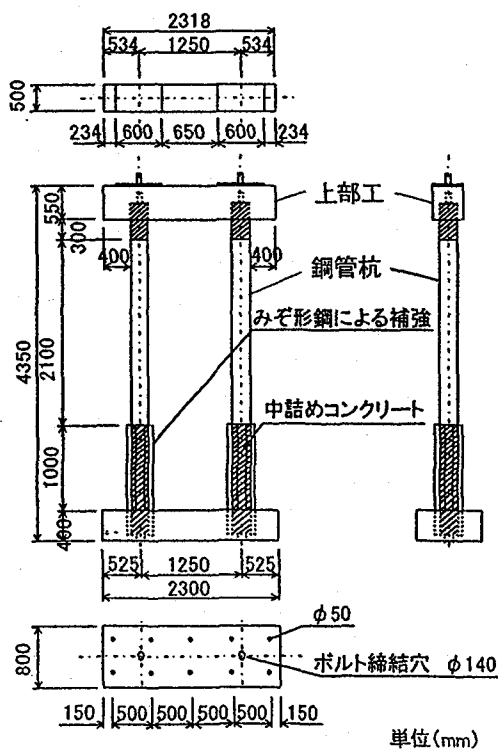
図-13に、模型試験体に対する解析モデルと解析結果を示す。モデルは、上部工および鋼管杭を梁要素で置き換えた骨組み構造で、接合部には図-12に示した曲げモーメント-回転角特性をもつ接合要素を導入した。ここで、接合要素は図-13に示すように長さを持つ梁要素で、軸方向およびせん断方向には剛体とし、上述の非線形回転特性のみを有している。また、図-13には、代表的な接合構造を有するCASE1試験体の実験結果と、接合部を剛結とした場合の解析結果もあわせて示している。

本手法による解析結果は、実験結果と比較すると若干の差異が認められる。これは、実際には複雑な3次元構造である接合部を、2次元モデルで単純化したことによるものと考えられる。しかしながら、本手法による解析結果は、剛結とした場合に比べると実験結果とよく一致しており、設計における照査に用いる目的に対しては、十分な精度で接合部の回転変形挙動を推定できているものと考えられる。

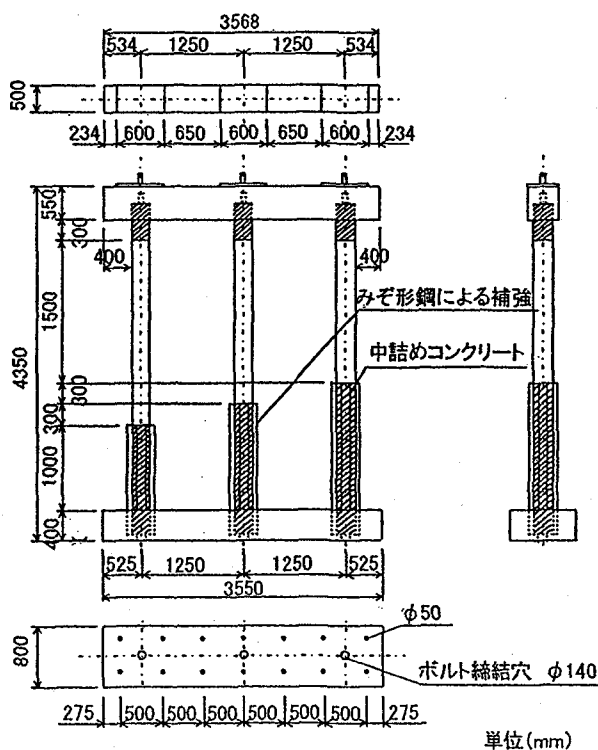
4.3 栈橋モデル試験体に対する解析と考察

(1) 試験体の概要

著者らが先に実施した2本杭および3本杭栈橋モデル試験体²⁻⁴⁾のうち各1ケースずつに対して本手法を適用し、その妥当性について検討した。図-14にモデル試験体の概



2本杭



3本杭

図-14 2本杭および3本杭栈橋モデル試験体

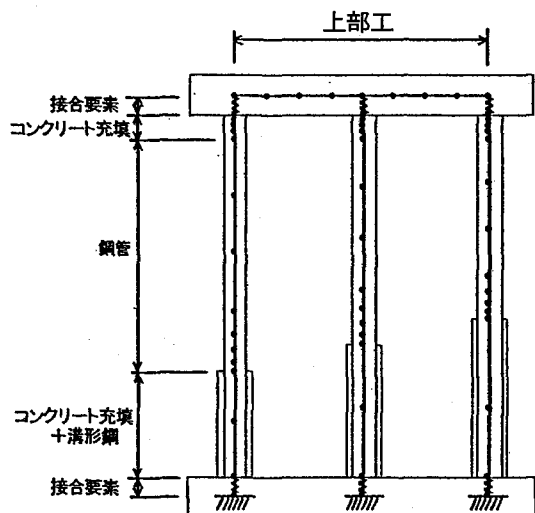


図-15 3本杭栈橋試験体の解析モデル

要を示す。これらは縮尺約1/4で、上部工の主鉄筋としてD16を6本配筋し、鋼管杭の外径267.4mm、肉厚5.8mmである。また、これら試験体の接合部の構造は全て、2.で述べたCASE1と同様、すなわち鋼管杭にプレートを溶接し、さらにそれに鉄筋を溶接するという実栈橋でも一般的に用いられているタイプである。

(2) 栈橋モデル全体の解析

つぎに、4.1および4.2に述べた本手法を同じように適用して、接合部の回転変形挙動を、栈橋モデル全体の骨組み構造に取り入れた解析を行い、実験結果と比較した。解析モデル例として、3本杭栈橋モデル試験体に対するものを図-15に示す。図-15中の鋼管杭頭と上部工をつなぐ接合要素に、本解析手法によって曲げモーメント-回転角特性を与えた。2本杭および3本杭試験体に対する解析結果をそれぞれ図-16、17に示す。縦軸は、図-15の上部工左端から右方向へ作用させた水平荷重（押し載荷荷重）を、横軸は荷重点での水平方向変位を表している。また、図-16、17には、実験結果、および接合部を剛結とした場合の解析結果もあわせて示している。

回転変形挙動を考慮した本手法による解析結果は、弾性域から最大荷重近傍に至るまで実験結果とかなりよく一致している。そして、接合部を剛結と仮定した場合に比べて、本手法による解析結果は、最大荷重近傍で約2倍以上の変位量になっている。逆に言えば、接合部を剛結と仮定すると、変位量を実際の半分以下に見積もってしまう可能性があり、大規模地震時の終局限界状態検討の際には注意を要する。

以上に示した結果から、本解析手法により、接合部の回転変形挙動を簡便にモデル化し、栈橋の全体解析に取り入れることができ、栈橋の耐荷力、変形量、エネルギー吸収能等を実用上十分な精度で推定できるものと考えられる。

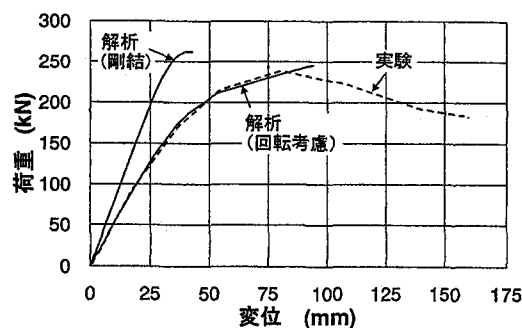


図-16 2本杭試験体の全体解析

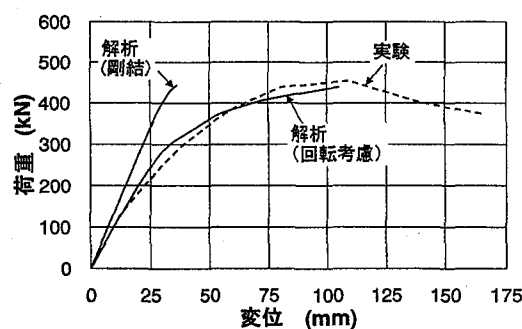


図-17 3本杭試験体の全体解析

5. まとめ

本研究の結果得られた主要な結論は、以下のとおりである。

- (1) 実栈橋で一般的に用いられるタイプの接合部では、鉄筋あるいは鋼管杭が最初に降伏した時点における回転角の5～6倍の回転変形が生じて、接合部の耐荷力は低下せず、この範囲では優れた構造性能を有していた。
- (2) 実設計での適用も考慮し、3次元構造である接合部を2段階の2次元FEMモデルで解析する簡便で効率的な手法を提案した。
- (3) 接合部を剛結とする従来の方法と比較して、本手法による解析結果は大型構造実験結果とよく一致し、その妥当性が示された。

謝辞

本研究の載荷実験の実施にあたっては、港湾技術研究所構造強度研究室の岩波光保研究官および前研修生秋本孝氏（現 若築建設株式会社）のご協力をいただきましたことに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 横田 弘，川崎 進，菅原 亮，Hazem El-Bakry，川端規之：鋼直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.
- 3) 横田 弘，川崎 進，菅原 亮，Hazem El-Bakry，川端規之：鋼直杭式栈橋の地震時保有耐力に関する実験および解析，港湾技術研究所報告，Vol. 38, No. 2, pp. 223～255, 1999. 6.
- 4) 横田 弘，山田昌郎，川崎 進，菅原 亮，Hazem El-Bakry：鋼管杭式栈橋の終局限界における構造性能と弾塑性解析法の適用性，構造工学論文集，Vol. 46A, pp. 1647～1654, 2000. 3.

(2000年9月14日 受付)