

大水深域における海上橋の主塔及び基礎の新建設工法の開発

New Construction Method for Main Tower and Substructure of Marine Bridge at Great Water Depth

技術本部 関本 恒^{*1} 布山 裕之^{*2}
大川 賢紀^{*3}
神戸造船所 岡部 俊三^{*4} 亀井 宏之^{*5}

次世紀の海峡横断橋の実現には、水深 100 m を超える大水深域において大幅な工費縮減を可能とする設計・施工法の開発が必要である。今回、経済性や施工性の面から従来の鋼製主塔と設置ケーソンの組合せに替えて、主塔を鋼管とコンクリートの複合構造 (CFT 構造)、海中部をジャケッ構造、海底地盤を鋼管杭 (くい) 基礎で構成する“複合主塔—ジャケッ式鋼管杭基礎”による低コスト化工法を提案した。本研究では、鋼管杭の支持力、ジャケッと杭の間の接合部強度、主塔の耐荷力についてそれぞれ検討した上で全体構造の耐震性についての評価を行い、本構造の成立性及び安全性を確認した。

To construct a cross-strait bridge with a center span exceeding 2 000m, such as Ise Bay, the Kitan Strait, Tokyo Bay, or the Second Kanmon Bridge, a design and construction must be developed that minimize construction cost at water depths exceeding 100m. We propose a low-cost “multi pillar-jacket and steel-pipe-pile foundation.” The structure consists of a CFT as the main tower, a jacket structure in the sea, and a steel-pipe-pile foundation in sea bed, rather than the conventional construction of main tower and lay-down caisson, which is expensive and difficult to construct for marine bridges. We studied the bearing capacity of the steel-pipe-pile, the strength of the joint between the jacket and piles, and the ultimate capacity of the main tower. We also calculated the seismic safety of the overall structure, ensuring the structure's potential and safety.

1. 緒言

本州四国連絡橋は、平成 11 年で 3 ルート共完成したが、“21 世紀の国土のランドデザイン”では新たに 4 つの国土軸の相互補完連携による国土づくりが提唱されている。

この新しい国土構想には、伊勢湾口・紀淡連絡・東京湾口・第二関門橋等の海峡横断橋の計画が盛り込まれており、これらは実現すれば、中央径間が 2 000 m 以上の長大橋になる。この場合、橋梁基礎は、大水深域に設置する必要があるため、上下部工共大幅な工費縮減を達成し得る新しい技術の開発が望まれている。

本報では従来の設置ケーソンと鋼製主塔に替る工法としてジャケッ式鋼管杭基礎と複合主塔構造を提案し、解決すべき技術課題に対して成立性確認のための検証を行った。

2. 構造概要

水深 100 m を超える海域に橋梁基礎を構築する場合、従来の重力式ケーソン構造では、地震や波力等の水平力に対して、転倒・滑動を防止するために基礎の幅を大きくする必要がある。このため、海底面の地盤改良や整備を広範囲にわたり行うことが必要となり、大幅な工費増加が予想される。この問題を解決するには、基礎が負担する重量を軽減するとともに、海底地盤の改良・整備を最小とする工法開発が必要となる。

基礎の重量を軽減する一手法として、石油掘削のプラットホームで多数の実績のあるジャケッ式基礎を橋梁基礎に用いることが考えられる。本基礎では、基礎本体にコンクリートを用いないため重量を大幅に軽減でき、波力に対しても有利な構造で、杭により固定することから海底地盤を改良する必要がない。

また、主塔を鋼・コンクリートの複合構造 (CFT) による多柱式構造とすることで、橋梁全体の軽量化及びコストダウンを図る

ことができる。

図 1 に、複合主塔—ジャケッ式鋼管杭基礎を持つ吊橋の鳥かんとを示す。本基礎の特徴⁽¹⁾は、以下のとおりである。

- ① 基礎本体は鋼管を用いたトラスで構成したジャケッ構造とし、鋼管杭を介して地盤へ力を伝達する。
- ② 主塔とジャケッ構造はフーチングを介さない一体構造とする。
- ③ 浮力タンク (バラストタンク) を設置し、これにより浮力調整を行うと同時に、杭本数を低減する。
- ④ 鉛直杭と斜杭を組合せることにより、地震力などの水平荷重に対しても大きな支持力を得る。

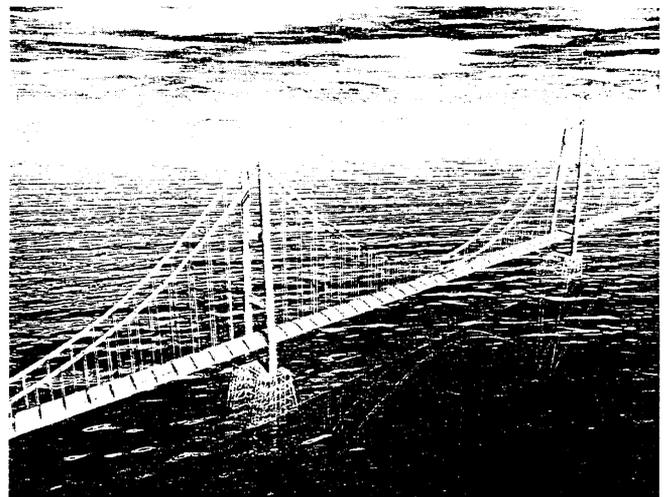


図 1 構造概要図 ジャケッ式鋼管杭基礎を用いた吊橋の鳥かんとを示す。
General view

*1 高砂研究所構造研究室主査

*4 鉄構部建設主務

*2 高砂研究所振動・騒音研究室主務 Ph.D.

*5 鉄構部構造設計課

*3 高砂研究所建機研究推進室

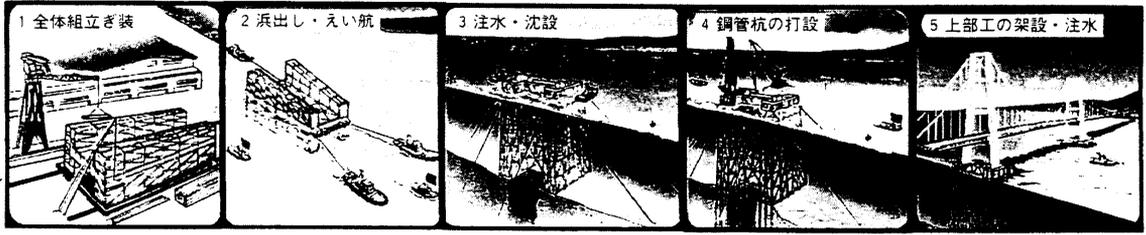


図2 施工手順の概要 ジャケット基礎本体をすべて工場で組立てて現地海域までえい航し、沈設した後、上部工の架設を行う。
Flow-chart of construction

⑤ ジャケットの防食仕様は、飛まつ帯・干満帯にはステンレスクラッド鋼を、海中部に重防食塗装+電気防食を適用することにより土木構造物としての長期耐久性を満足する。

施工概要を図2に示す。本工法では、ジャケット基礎全体の大組立を工場内で完了し、進水後、現場海域までバラスタタンクで喫水調整を行い、えい航する。ジャケット到着後は、あらかじめ打設しておいたパイロット杭の位置で、バラスタタンクに海水を注入して沈設する。続いてジャケットレグをガイドとして鋼管杭を打設し、杭頭とレグ下端を接合する。上部工の架設では、段階に応じてバラスタ調整を行ない、杭への負担を軽減する。

この基礎形式では、基礎全体の製作を工場内で行うため、現地工程は従来の重力式基礎に比べ1/4程度に大幅短縮が可能となり、基礎のコストも中央径間600m、水深40m程度の斜張橋で試算しても約1/2となる。大水深になれば、工期・コスト共に優位性はさらに増すと考えられる。

3. 主塔・基礎構造部の強度特性

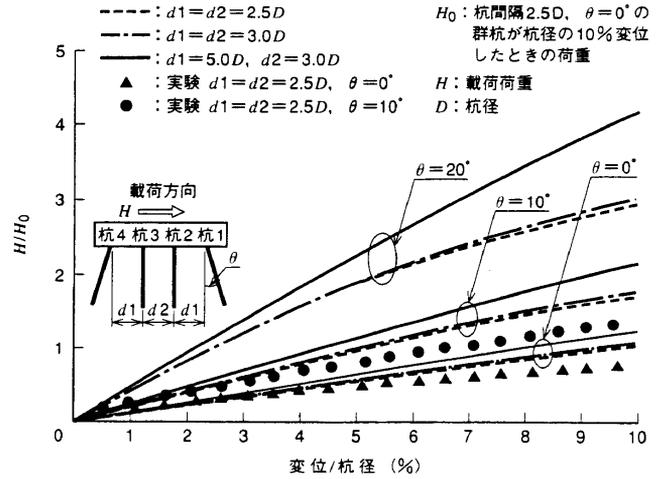
3.1 杭の支持力評価

ジャケット式基礎の基本構造である鉛直杭と斜杭を組合せた群杭の支持力特性を把握するため、杭と地盤の相互作用を考慮した三次元解析が可能な弾塑性有限要素解析コード (GPILE-3D)⁽²⁾を使用した。本コードでは、弾塑性構成式をDrucker-Pragerの降伏関数と関連流れ則により与え、杭周辺の地盤はNo-tension解析を適用している。杭の曲げモーメントと曲率の関係は、鋼管の弾完全塑性の仮定によりモデル化した。地盤の物性値は、密度1.6g/cm³、せん断抵抗角(内部摩擦角)30°、ポアソン比0.33とした。モデルは、図3(a)に示すように、載荷方向に対して4本の杭を一行に配置した群杭とし、パラメータは、杭間隔及び外側に配置した杭の傾斜角とした。なお、本コードの解析精度は地盤の相似実験が可能な遠心模型実験にて検証した⁽³⁾⁽⁴⁾。

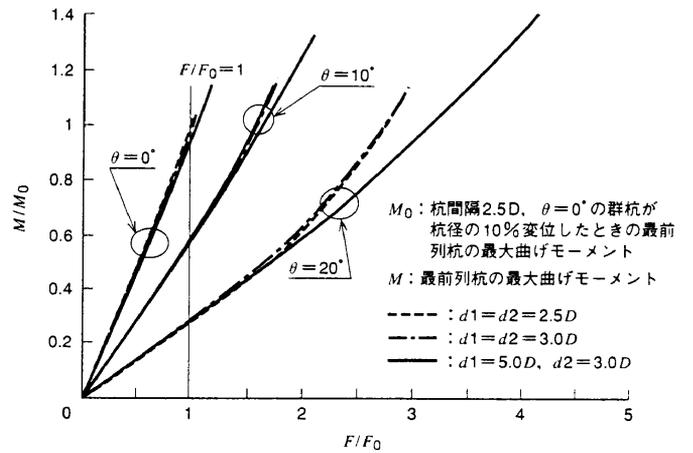
水平荷重一杭頭変位曲線を図3(a)に、水平荷重一最前列杭の最大曲げモーメントの関係を図3(b)に示す。図3(a)には、遠心模型実験の結果を併せて示す。図3(a)における解析結果と実験結果の比較により、斜杭を組合せたことによる支持力の増加傾向を本コードにて表現し得ることを確認した。

図3(a)及び図3(b)より、杭間隔を広げると支持力は増加し、斜杭を用いると、支持力の増加率は大きくなる。このとき、支持力が増加するにもかかわらず、杭に作用するモーメントの変化が小さいことが斜杭を用いたときの特徴である。

杭頭が杭径の10%変位したときの杭頭でのせん断力及び軸力の分担比を図4に示す。その分担比は最前列杭のせん断力及び軸力を1として求めた。杭間隔が狭い場合、傾斜角の増加に伴って、前列の杭の分担が増加するが、間隔を広げると、傾斜角を変えてもせん断力の分担に大きな変化はなく、より均等化される。また、



(a) 水平荷重一杭頭変位曲線



(b) 水平荷重一曲げモーメントの関係

図3 水平荷重に対する群杭の変形挙動 斜杭を組合せた群杭は、杭への作用モーメントをあまり増加させずに、支持力を増加できるメリットを持つ。
Lateral loading behavior of pile group

水平荷重は主に前後列の斜杭の軸力に置換り、内側の鉛直杭はほとんど軸力を分担しないことが分かる。

以上より、ジャケット式基礎は、斜杭を利用することで各杭への負担をあまり増加させずに水平支持力を増加できるメリットを持つ。一方、群杭として鉛直支持する場合には、内側の杭の分担が大きくなる⁽⁵⁾。したがって、鉛直杭を内側に配置し、その周りに杭径の5D程度離して斜杭を配置することにより、上部工からの鉛直力は主に鉛直杭で、風や地震などの水平力は鉛直力の分担が小さい斜杭の軸力で分担させることが可能と考えられる。本検討により、ジャケット式基礎は長大橋の基礎構造を合理化する上で

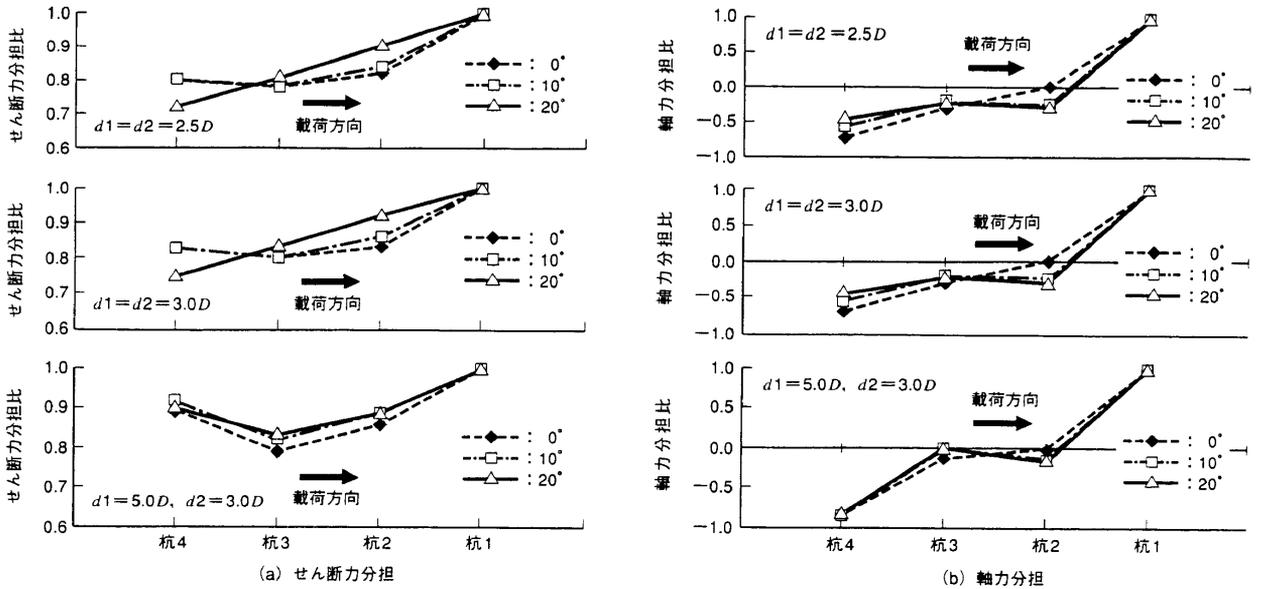


図4 支持力分担 杭間隔を広げると、各杭の分担するせん断力が均等化される。斜杭を用いると、水平荷重が主に斜杭の軸力に置換る。
Share ratio of each pile about shearing resistance and axial force

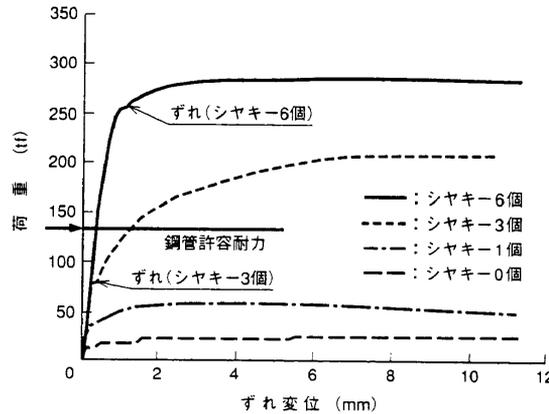
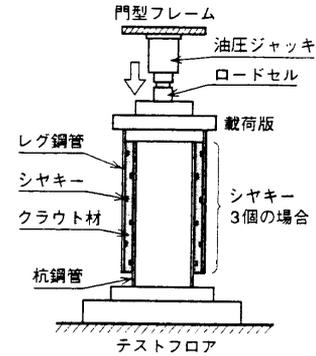


図5 レグ鋼管と杭鋼管とのせん断強度 シヤキー数を6個にするとずれ荷重、耐荷力共に鋼管の許容耐力を上回る。
Shear strength between leg pipe and pile pipe



有効な基礎形式であることが分かった。

3.2 レグ・杭接合部強度特性

ジャケットレグと杭接合部には軸力と曲げせん断力とが作用する。このうち軸力に対しては機械継手で、曲げせん断力に対してはグラウト充てんで抵抗するのが一般的に用いられている方法である⁽¹⁾。ここでは、より合理的な接合方式の開発をねらってグラウトのみによる荷重伝達特性を把握するためにシヤキー数をパラメータとした軸力載荷試験を行った。加力方法を図5に示す。試験体はスケールモデルとし、載荷は油圧ジャッキにより単調に行い、レグと杭の相対変位を測定した。図5に荷重-相対変位関係を示す。図5には、鋼管の長期許容応力に断面積を乗じて求めた許容耐力を併記した。

試験ではレグと杭との間にずれ（荷重-相対変位関係で線形域を離脱する点）が発生した後も荷重が増加し続け、最大荷重付近で変位増大が顕著になり、終局に至った。また、レグと杭のずれはシヤキー数が1、3個では最大耐力の約50%程度で発生したが、6個では最大耐力の約90%まで生じなかった。実験値と許容耐力を比較すると、シヤキー数が3個以上あれば許容耐力を上回るもの、ずれ発生荷重についてはシヤキー数が3個では不足であり、

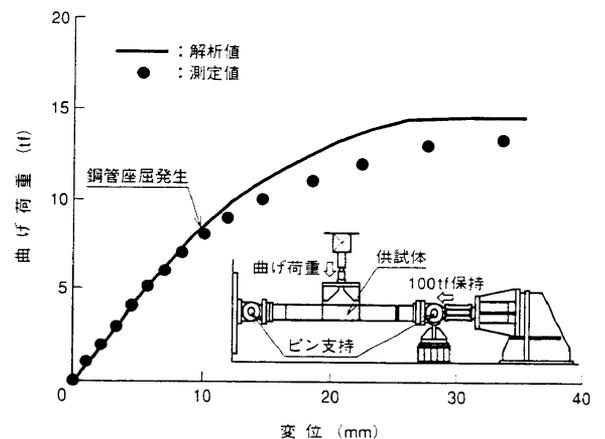


図6 荷重と変位の関係 簡易梁モデル解析により実験値を評価することが可能である。
Load-displacement relationship

今回の試験では6個以上必要であることを確認した。以上より、レグ・杭接合部は機械継手を併用しなくてもシヤキーを適切に配置すればグラウトのみによる軸力伝達が可能であることが分かった。

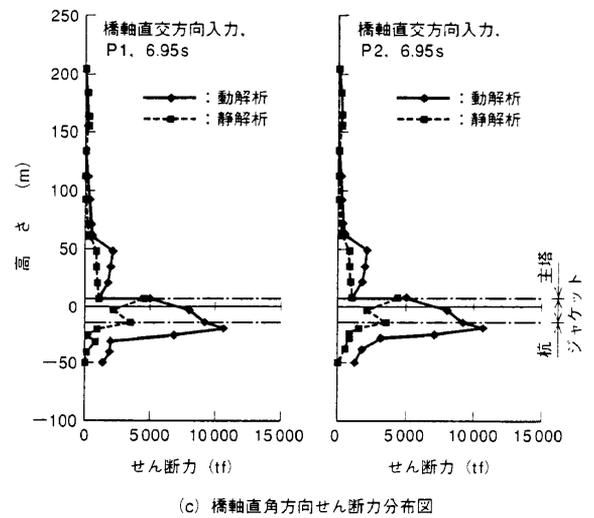
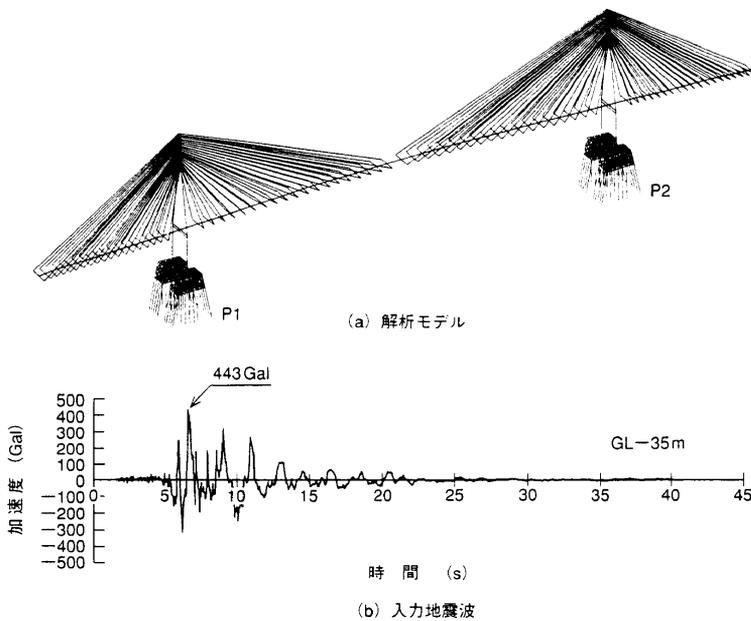


図7 耐震解析モデルとせん断応力分布 斜張橋全橋のすべての部材を骨組でモデル化。線形解析により得られたせん断力は設計用せん断力に比べ大きい。
Analytical model and shearing force distribution.

3.3 主塔部耐荷力評価

鋼管コンクリート (CFT) を主塔に適用するためには、CFT 部材の耐荷力を把握する必要がある。ここではそのための基本試験として、主塔一般部の CFT 部材の一定軸力下における曲げ挙動を把握する試験を行った。加力は図 6 に示す方法で、一定軸力を与えた後、両端ピン支持による 4 点曲げ载荷により、対象部に曲げ荷重を与えた。

図 6 に荷重-変位関係を示す。同図に示すとおり、8 tf で圧縮側鋼管が座屈後剛性が低下し、最大荷重 13.6 tf に達して変位が増大し曲げモーメントが低下するのを確認した後、試験を終了した。図中の解析値は、鋼管と充てんコンクリートを別々の梁部材とし、前者には鋼材の弾塑性特性を、後者にはコンクリートの弾塑性クラック特性を与え、対応する節点の変位を同一にするモデル化により求めたものである。実験値と解析値を比較すると、初期には良好な対応を示し、鋼管座屈発生後には、実験値が解析値を下回る傾向を示すものの、荷重最大時で約 10% の範囲内の誤差に収まることを確認した。このことにより今回の三次元体を梁によりモデル化する簡易解析手法は CFT 部材を用いた主塔の挙動解析に十分使用できる見通しを得た。

3.4 耐震性評価

三次元モデルを使用した線形時刻歴応答解析により、ジャケット式鋼管杭基礎の耐震性の検討を行った。

図 7 (a) には、中央径間 600 m の斜張橋にジャケット式鋼管杭基礎を適用した海上橋梁の解析モデルを示す。各ビーム要素には自重とケーブルのプレストレスによる初期軸力を与えた。杭と地盤の剛性は、集中ばねで模擬し、その剛性は動的地盤反力係数により求めた。入力地震波は図 7 (b) に示す兵庫県南部地震時に東神戸大橋の GL-35 m で観測された地震波 (最大加速度 443 Gal) を使用した。この地震波を杭下端位置 GL-60 m に、橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ入力した。

図 7 (c) に橋軸直角方向に地震波が作用したときのジャケットを含む主塔のせん断力分布を示す。桁 (けた) は橋軸方向に関してはケーブルで主塔とつながれているのに対し、橋軸直角方向は、地震時において直接主塔にせん断力が伝わる構造となっている。このため、主塔のせん断力は橋軸直角方向のものが橋軸方向によ

るものより大きくなる。実線は時刻歴応答解析により得られたせん断力、破線はジャケット部材を設計するときに用いたせん断力を示す。解析により得られたせん断力は、ジャケット上部の加速度が最大となった時刻のものである。また、静解析でのせん断力は水平震度 0.2 として計算したものであり、このときの応力で断面を決定した。線形解析により得られたせん断力は、静解析で得られたせん断力に比べ大きい。変形エネルギー量から非線形挙動を簡便に計算すると靱性率は 4 程度であり、構造上健全である。地震時の主塔の変位は、橋軸方向最大変位 40 cm、橋軸直角方向最大変位 30 cm 程度であり、構造上問題ないことが分かった。

4. 結 論

本報では、大水深域に複合主塔-ジャケット式鋼管杭基礎工法を適用することにより、従来工法に対して低コストで安定性の高くなる海上橋梁工法を提案した。今後、本工法を実現するに当たっては波浪に対して疲労を含めた強度特性を把握し、さらに耐震性及び杭の支持力特性について架設地点での実証試験等を実施する必要があると考えられる。

最後に、本報の執筆に当たり、試験を含め多大なご支援を頂いた、京都大学木村亮助教授及び関連研究室の学生の方々に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 岡部俊三, 海上橋の明日を拓く一新しい基礎型式の提案一, 土木学会誌 Vol.83 (1998-7) pp.16-18
- (2) 足立紀尚ほか, 水平力を受ける 2 本群杭の遠心模型実験と 3 次元 FEM 解析, 第 28 回土質工学研究発表会 (1993-6) pp. 1789-1792
- (3) 木村 亮ほか, 斜杭を有する群杭基礎の水平抵抗に関する遠心模型実験, 第 33 回地盤工学研究発表会 (1998-7) pp.1499-1500
- (4) 大川賢紀ほか, 斜杭を有する群杭基礎の水平支持力解析, 第 54 回土木学会年次学術講演会 (1999-9)
- (5) 木村 亮ほか, 斜杭を含む鋼管杭基礎の鉛直支持力特性に関する実験的研究, 第 54 回土木学会年次学術講演会 (1999-9)