

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560808

研究課題名（和文） 大型浮体用新形式機械継手の剛性・強度に関する研究

研究課題名（英文） Stiffness and Strength of New Type of Mechanical Connectors for Large Scale Floating Structures

研究代表者

吉田 宏一郎 (YOSHIDA KOICHIRO)

独立行政法人 海上技術安全研究所・海洋部門・客員研究員

研究者番号：90010694

研究成果の概要：平成17～18年度の科学研究費補助金を得て開発して来た大型浮体用の機械継手に予加振を与えて剛性に及ぼす影響を検討し、続いて継手の空隙に稠密に充填される小径の球状体の単体および球群の圧壊実験を実施し、その結果を用いて継手の強度の推定法を検討した。さらに、これまでの結果を機械継手で接合される桁の構造設計の考え方としてまとめた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：洋上接合、機械継手、剛性、強度、模型実験

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者等は沖合のサイトにおける大型浮体のユニットの接合に対し、浮体甲板桁の接合を、接合する両方の桁端部に設けた凹部に、上方から、寸法的に余裕をもって凸部を落とし込み、余裕である空隙に小径の球状体を充填するタイプの機械継手を提案してきた。平成17年度には、凹部と凸部の幾何形状と空隙における球状体の充填率が、この機械継手を組み込んだ桁の剛性（桁としての変形に対する抵抗）に及ぼす影響を、想定実験の1：20スケールの模型を用いた実験により明らかにした。平成18年度には、想定実験の1：100スケールの半潜水式構造物の

水槽模型の甲板桁の長さ中央に機械継手を組み込み、波浪強制実験を実施し、多数回の規則波の繰り返し負荷に対して桁の撓み変位応答、および桁の軸歪、曲げ歪応答を計測し、周波数応答関数を得た。一方、半潜水式構造物の複数のコラムに作用する波浪荷重の相互干渉、および桁の弾性変形を考慮に入れて応答を解析する、研究代表者等が開発した応答解析プログラムによる半潜水式構造物の波浪荷重に対する周波数応答解析を実行した。解析結果を計測結果と比較して、十分良好な相関があることが確認され、引いては水槽実験結果の信頼性が確認された。

## 2. 研究の目的

平成18年度の半潜水式構造物の水槽模型による波浪強制実験では、甲板桁に組み込まれた機械継手が繰り返し波力を受けて剛性が減少し、応答が大きくなるというような劣化現象は見られなかった。しかし、繰り返し力の影響は海洋構造物の構造設計において避けることの出来ない重要な課題であるので、平成19年度の主研究目的として、加振機によって人工的に作り出した機械振動を機械継手構造に作用させ、履歴を有する機械継手構造模型を作る。そして、この機械継手を桁模型に組み込み、これに静的な軸力を作用させ、軸剛性に対する加振の影響を検討する。19年度のもう一つのテーマは空隙に充填されている特定球状体の負荷による移動を、レーザー発振と高感度撮影による連続画像から同定、追跡することで明らかにする技術の応用可能性を探ることである。研究代表者等の機械継手の開発に関する、これまでの研究は、機械継手のコンセプト、メカニズム、機械継手を組み込んだ桁構造の剛性に関するものであった。桁構造の基本設計のために残っている重要なテーマは桁構造の強度の評価である。平成20年度は、想定実機の機械継手に充填される球状体(1:1スケール)を製作し、球単体、および空隙に充填されている無数の球の集合から取り出したと見なされる複数の球によって構成される球群の強度を実験的、解析的に明らかにして、その結果から桁の軸強度を評価する方法を検討することである。そして、最後に、これまでの成果をまとめて、機械継手を組み込んだ桁構造の構造基本設計の考え方を提案することである。

## 3. 研究の方法

### (1) 予加振が桁の軸剛性に与える影響

機械継手に振動を与える(予加振)には加振機が必要であり、ここでは機械式的加振機を製作した。機能としては、鉛直1方向の疑似sine波であり、振動範囲:100[mm]、周波数範囲:0.84~3.5[Hz]、被試験体質量上限:30[kg]、試験体寸法上限:300×300×330[mm]である。この加振機の性能には価格から来る制約が関係した。平成19年度の機械継手模型は1:30スケールとした。このスケールと相似則に基づく場合、模型の振幅は1/30、周期は $1/\sqrt{30}=1/5.5$ 、周波数は1/0.18である。振幅の小ささについては大型浮体を対象としているから許容できるが、周期に関しては短過ぎるものの、価格からの制約により、このまま実施された。空隙に充填する球の材料はガラスビーズ(以後ビーズと呼ぶ)であり、寸法は平均直径2.96[mm]、平均密度2.55[g/cm<sup>3</sup>]であった。機械継手の剛性にはビーズの充填率と詰まり方が影響す

ることがこれまでの研究から明らかになっている。表1に実験の予加振の条件および充填率を示す。加振の回数は、いずれの振幅、周波数の値であっても定常加振状態を得るのに十分と考えられる630回に統一した。

表1 予加振実験条件

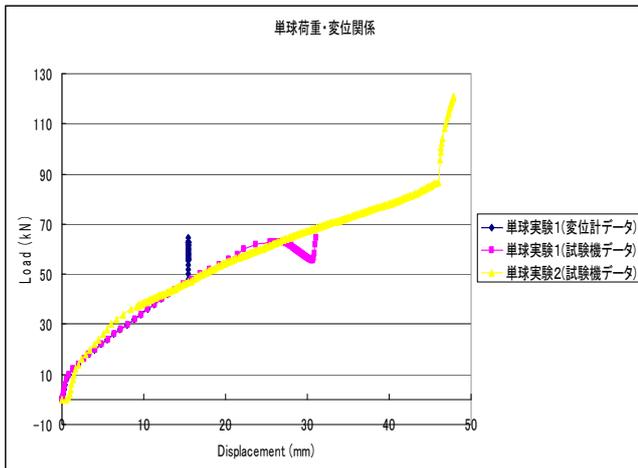
実験番号	加振		充填率 [%]
	振幅 [mm]	周波数 [Hz]	
1-1	0	0	64.3
1-2	20	3.5	64.3
1-3	30	3.5	64.3
1-4	40	3.5	64.3
2-1	0	0	65.2
2-2	20	0.84	65.2
2-3	60	0.84	65.2
2-4	100	0.84	65.2
3-1	0	0	65.7
3-2	20	2.2	65.7
3-3	50	2.2	65.7
3-4	80	2.2	65.7
3-5	100	0.84	65.7
3-6	40	3.5	65.7

表1において、振幅、周波数の欄に0が入っている実験番号は予加振を与えない場合であり、加振した場合との比較の基準とするものである。予加振を与えた機械継手を組み込んだ桁構造模型に軸荷重を加えて、桁構造の軸剛性を求める剛性実験においては、軸荷重を0→引張160→0→圧縮160→0[kgf]のように加える過程を1サイクルとして、それぞれの実験番号毎に、信頼性を高めるため3サイクルずつ加えた。軸剛性は、軸荷重と機械継手部分の伸縮量をプロットした図における勾配として求めた。継手の伸縮量は桁部分構造の間隔の伸長、縮小を電気式変位計およびπ型変位計によって計測した。歪ゲージは、桁としての伸び、あるいは縮みの検証の目的で、桁構造部分の要所々に貼られるとともに、凸部の平行部(胴部と称する)の長さ中央に12枚が貼付された。

(2) 空隙充填用の球の強度と桁の軸強度  
提案している機械継手の凹部と凸部との間の空隙部分の立体空間への充填材として中空球状体を選択することはほぼ自明として、材料、直径、肉厚については考慮すべきことが多い。材料について、鉄鋼、アルミ、チタン合金、FRP等の合成材料系等が考えられるが、強度、加工性、価格の点から鉄鋼の優位は動かないと考えられ、中でも軟鋼が取りあえずの選択として採用されることに無理はないと思われる。直径については、空隙の大きさ、ハンドリング等が決定のための重要なファクターになると考えられる。先に述べた凹部と凸部の形状決定から決められる空隙の形状、大きさ、およびハンドリング時にお

いてフレキシブルホース内を圧搾空気とともにスラリーとして流動する可能性が高いと考えると、直径には自ずと上下限があり、想定実機の機械継手の空隙部分に充填する球の公称直径として、直径=80[mm]という選択はそのなかに入っていると考えられる。また、肉厚は、重量、価格の点からはできるだけ薄いことが望ましいが、近似的な計算により、材料降伏の観点から球の肉厚の公称値を厚さ=3.2[mm]とした。即ち、これらは想定実機用の球の実寸である。球の強度を実験から求めるために、実寸の模型球を製作した。ただし、いろいろな制約から実際に製作できた43個の球のデータは平均直径=76.2[mm]、平均肉厚=2.48[mm]、平均質量=333[g]であり、バラツキは十分小さかった。これらの値は公称値として定めた値と異なるが、実験の実施および結果の利用において大きな弊害が生じるとは考えられないので採用した。空隙内における球の詰まり方は、対象としている機械継手の剛性の重要な因子になることは、先に述べた。研究代表者等が扱ってきた桁構造模型の機械継手の充填率の達成値が62~65%であることは、体心立方格子(充填率68%)よりも幾分低く、立方最密格子(面心立方格子、充填率74%)あるいは六方最密格子(充填率74%)と較べると、ある程度低いレベルであることが判る。模型空隙内の球状体の、実際の並び方は不明であるが、後出の19個の球状体の群を抽出して強度実験を行う際は、理想的な並び方として六方最密格子を選んであり、これを球群と呼ぶ。研究の順序として、一つの球、即ち単球の圧縮実験を行って、基本性質をつかみ、この結果に基づいて球群の圧縮実験を行った。六方最密格子の場合、各球は12個の最近接の球と接する。同一水平面内で層を形成する6個、および一段上、下の層から各3個である。そこで、単球の圧縮実験として、六方最密格子に近い条件を実現する支持治具を製作し、上方から下方へ圧縮荷重を加える実験(単球実験1)、および一切の水平方向の支持なしで、上方から平板により圧縮する実験(単球実験2)を行った。

図1 単球実験1, 2の荷重-変位曲線



この単球実験は東海大学海洋学部実験館に設置されている500[kN]万能試験機を使用して行われたが、後の述べる材料試験および球群実験も本試験機を使用して実施された。単球実験1および2の荷重-変位曲線を示す図1では、青い曲線:単球実験1(変位計データ)、ピンク色の曲線:単球実験1(試験機データ)、黄色の曲線:単球実験2(試験機データ)の対応関係となっている。この単球の圧縮実験を基礎に、想定機械継手の空隙部分に充填された多数の球の群の強度を推定する方法を開発するため、群の一部を球群と称して取り出し、圧縮実験により圧壊強度を計測する。この実験では、球を3層に積み、下層は球6個、中層は7個、上層は6個の計19個を六方最密格子に組み、それを支える支持治具を設計、製作した。この個数の意味は中層の7個の中心になる球は下層の3個、中層の6個および上層の3個に囲まれ、これらの計12個の球と接するものの、荷重用平板、支持治具、底板と接しないので、大規模な球群のなかの球の条件に近づくものと考えた。支持治具については、最初に設計、製作して実験に供した治具に、機能上不具合があることが実験中に見いだされた。ただし、実験としては試験機の最大荷重500[kN]まで負荷し、これを球群実験1と称することにした。引き続き不具合な点を改良した治具を設計、製作し、新しい球群を試験体として、同じく最大荷重500[kN]まで負荷し、球群実験2と称することにした。球群を構成する、それぞれの球には固有の番号が付けられ、判別しやすくしてある。

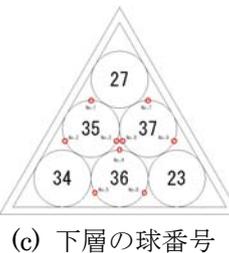
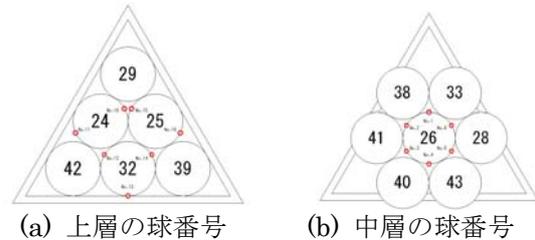


図2 球群実験2の3層の球番号

機能上の不具合とは、球を3層に積むため、それぞれの層を支持するための枠構造を製作し、適切と思われた厚さのスペーサを介し、

長ねじを通して3層を組み上げたが、荷重の負荷が進行し、球の変形が進み、個々の球が下方へ移動する時、1部の球がその下の層の枠構造の端部に接触し、これに由来する反力が発生するようになったことである。そこで、これに替わる新しい設計の治具を製作した。これは、図2から推察されるように、試験体である球群を挿入する部分が三角形の一体型で、側面に穴が開けてあり、球の下方への移動に支障を与えないようになっている。球群実験1および2は、内容的には類似であるが、形式的には独立な実験である。どちらの場合も、上層6個の球は三角形の圧縮用平板によって圧縮されることにより、球の上半分は軸対称に近い、一様にへこむ変形を示し、これは単球とほぼ同じ変形であった。中層、下層の球では、それらと接していた一つ上の層の球との相関としての部分的なへこみが顕著であった。これらのことから、全体としての荷重は鉛直下方へ負荷されるから、水平面内の関係である、同一層内における球同士の間における力の伝達は主ではないので、ほぼ一様な軸対称的な変形を示すのに対し、六方最密格子の球配置によって決まる、上下の層の球の間においては、力の伝達の主役として、伴う変形も大きく、へこみも顕著になると考えられる。球群実験1および2の荷重—変位曲線を図3に示す。

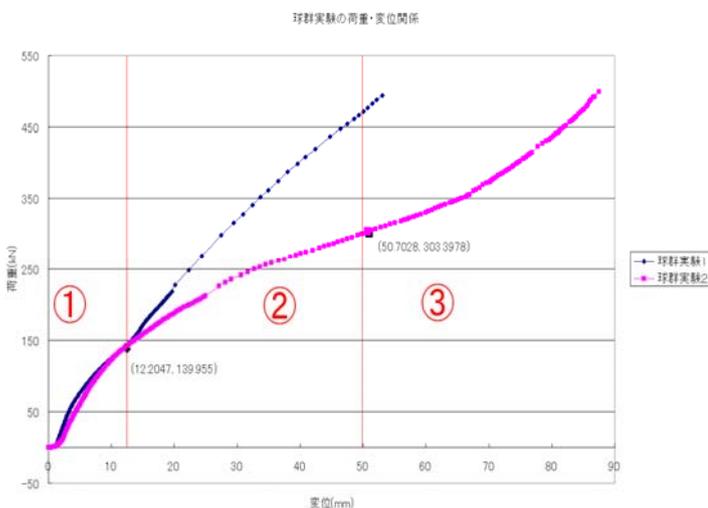


図3 球群実験1および2の荷重—変位曲線

軟鋼を材料とする中空球の製作は、まず、公称厚さ=2.3[mm]の平板から円板を切り出し、これを型にはめて塑性加工し、半球を作る。2個の半球を赤道溶接し、溶接部を機械仕上げして球が出来上がる。球を形成する軟鋼材料の材料特性を求めるために引張り試験片を3個製作し、単球実験、球群実験を実施した万能試験機を使用して引張り試験を行った。この試験から得られた材料定数は降伏応

力  $\sigma_y = 240.2[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、縦弾性係数  $E = 2.00 \times 10^5 [\text{N}/\text{mm}^2]$ 、ポアソン比  $\nu = 0.28$  であった。

#### 4. 研究成果

(1) 予加振が桁の軸剛性に与える影響  
最初にも述べたように、研究代表者等は近年、外洋性大型半潜式構造物の建設サイトにおけるユニットの接合のための機械継手の開発を継続してきた。平成17年度において、スケール1/20の桁構造模型を用いて、継手の凹部および凸部の形状・寸法と桁の剛性との関係、平成18年度には、その結果をスケール1/100の水槽模型の甲板桁に適用した水槽モデルによる波浪強制実験を行い、運動応答特性と継手の充填率との関係等について検討してきた。そこで得られた、空隙への球状体の充填率と桁の軸剛性に関する重要な関係と、今回(平成19年度)の実験との繋がりを明らかにしておくことは前提として必要と考えた。表1の実験番号1-1、2-1、3-1はそれぞれ、予加振の周波数3.5[Hz]、0.84[Hz]、2.2[Hz]の加振グループの基準実験として予加振0の場合であり、そういう意味において平成17、18年度の実験ケースと連続性がある。この件に関する平成17、18年度の結論は、充填率が62%付近までは、充填率の上昇にともなって剛性も、ほぼ線形的に増大し、それを超えると剛性はほぼ一定の大きさを保つというものであった。平成19年度のデータは表1に示されるように、いずれも充填率は62%を超えており、得られた剛性は、充填率に従って線形的な上昇を示す場合が主流であり、部分的に62%の値付近に留まった。全体として両グループのデータは比較的良好な相関があった。予加振を与えた機械継手を組み込んだ桁構造模型の軸剛性については、大きな剛性低下を示す場合とほぼ剛性が維持される場合とがあった。以下に典型例2例を示す。

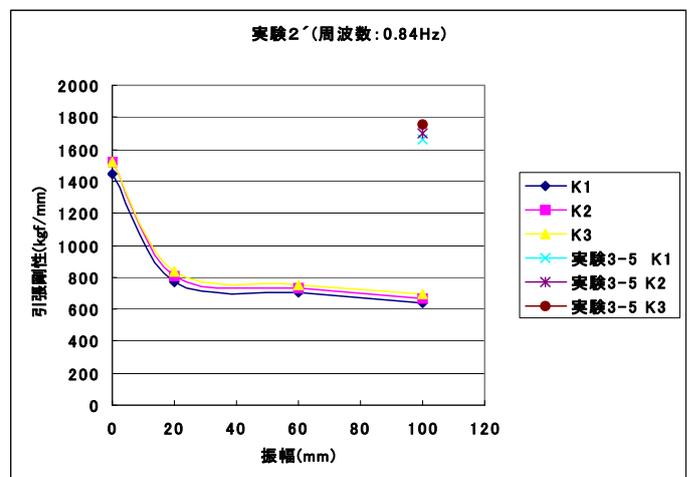


図4 実験2組の振幅—引張り剛性関係

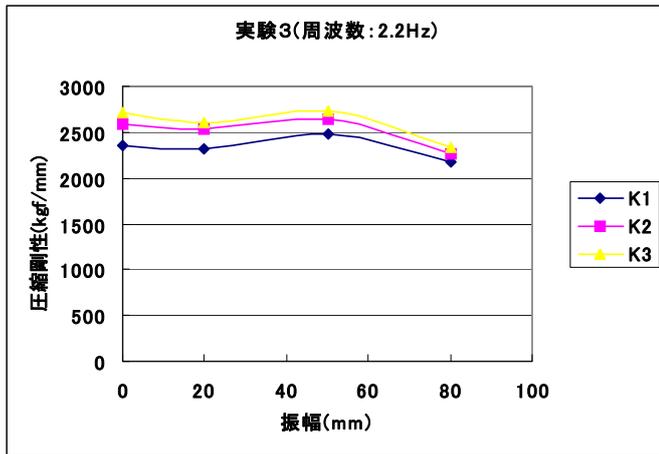


図5 実験3組の振幅—圧縮剛性関係

上記の図4, 5は、予加振の周波数をパラメタにした実験の組1 (周波数 3.5[Hz])と組3 (周波数 2.2[Hz])についての引張り実験、および圧縮実験から得た軸剛性を縦軸にとり、横軸に振幅を取ってある。図中のK1等は一つの実験条件毎に行われた3回のサイクルの個別サイクルを表している。また、図4には追加実験として行われた実験番号3-5 (周波数 2.2[Hz])の3回のサイクルも比較のため含まれている。ここに掲載を省いてある実験1組の結果は実験2組に近い傾向を有していた。図4によれば、予加振を与えることによって剛性は大きく劣化している。ただし、充填率が僅かではあるが大きな実験番号3-5のケースでは、逆に僅かとは言え増大している。図5では、予加振を与えても剛性は、無加振の場合とほぼ一致している。このような傾向の差の原因に関して、明瞭な解釈は出来ていない。すなわち、パラメタとなっている充填率、予加振の振幅、周波数が継手の軸剛性に与える影響の仕方が把握されていない。周波数に関して線形的でないから、大きな剛性低下を伴う結果となるケースは、予加振の周波数が、空隙に充填された、稠密なビーズ構造の固有周波数に近づき同調現象に近い現象が起き、ビーズの移動が発生し、結果として剛性が大幅に低下したとも考えられる。このような推測を検討するには計測法を含めて考える必要があり、今後に残された課題である。なお、前述した、レーザー発振と高感度撮影による連続画像から特定ビーズを同定、その移動を追跡する技術の、本テーマへの応用については、屈折率を合わせるため、ビーズ群をシリコンオイルに浸す必要があり、そのことがビーズ群に与える影響が考えられることから本研究においてはさらなる検討を俟つこととした。

#### (2) 空隙充填用の球の強度と桁の軸強度

図3において、球群実験1の荷重—軸変位関係を示す曲線(青色)は、軸変位が12[mm]近傍において勾配が変わり、剛性が大きくなっている。これは上層の球、あるいは中層の

球の一部が支持治具の端部に接触し、反力が生じるようになったためと考えられる。その境界より変位が小さい領域①では、球群実験1, 2の荷重—変位曲線はおおむね類似の関係を維持しており、その境界を越えた②では、両者は勾配の違いから、変位の増大にともなうでどんどん離れてゆく。変位が50[mm]を超えるあたりから、領域③において、実験2の曲線の曲率が逆転し、荷重に急上昇の気配が見られる。これは、荷重負荷用の三角形板が治具に接した痕跡が見られたり、球の一部に残されていた傷から、一部の球と支持治具との摩擦が大きくなった可能性があり、これらが原因となった曲線の傾向であろうと予想され、言い換えれば、極端な大変形を起こさせるには、使った治具にはさらなる改造が必要であろう。本研究の目的は考えている機械継手の強度に関わる挙動を考察し、それに基づいて継手の強度を推定する方法を検討することである。そこで、具体的には、球群実験2の中心に存在する球26(図2(b))に作用する鉛直方向の圧縮力を推定する方法を考える。現段階では、数値解析の利用以前に概数を求めるために、できるだけ単純な手続きで、しかも推測精度に一定の高さが保たれると考えられる手法を試みる。図2(a)によれば、球26に接する上層の球は24, 25, 32であり、(c)によれば下層の球は35, 36, 37である。これらの球の、中心球26との接触部分における半径相当長さを測り、半径から引いてへこみ量、すなわち変位とした。単球実験2の結果を使うために、以上のように求めた変位を2倍して、あらためて変位として単球実験2の変位に当てはめ、対応する圧縮荷重を読みとった。上層、下層のそれぞれ3個の球について、このような手続きによって圧縮荷重を求め、2層それぞれの和の平均として中心球に掛かる荷重とし、方向余弦を掛けて鉛直成分とした。最大荷重時における、この試算の結果は121[kN]となり、全体に作用している圧縮荷重が500[kN]なので、その1/4近くが中心球に作用するのは大きすぎる。このような結果になる原因として、参照する荷重—変位曲線が単球実験2の場合であり、この実験は平板型の底板の上に置かれた球を平板型の圧縮板で押すタイプであり、球群実験における中心球に対する上下層の球体の凸型の接触面と異なり、表面が磨かれた厚鋼板による圧縮であるため剛性が上がり、変位に対して大きな荷重を読むことになったと思われる。今後、参照曲線に改良を加えれば精度の向上が期待されるであろう。そこで、桁の強度を推算するために、球群の中に存在する単球の圧縮荷重の概略値として、全体荷重を中層の7個の球が均等に受け持つものとする。初期降伏は、図3から全体荷重として70[kN]、故に単球として10[kN]、最高荷重

(圧壊荷重)は図1から単球として60[kN]とする。これらの値を基礎として、予加振実験の模型とスケール1:30の想定実機の桁の強度推定を求める。凸部耳部裏側の面積を、球直径を1辺の長さとする正方形の面積で除して、耳部裏側に接し得る球の数を求め、これに前述の単球の降伏荷重、最高荷重を掛けると、機械継手として降伏荷重=5400[tf]、圧壊荷重=32400[tf]が得られる。ここまで述べてきたことを、提案している機械継手を組み込んだ桁構造の基本設計の考え方に適用すると、その流れは以下のフロー図によるだろう。

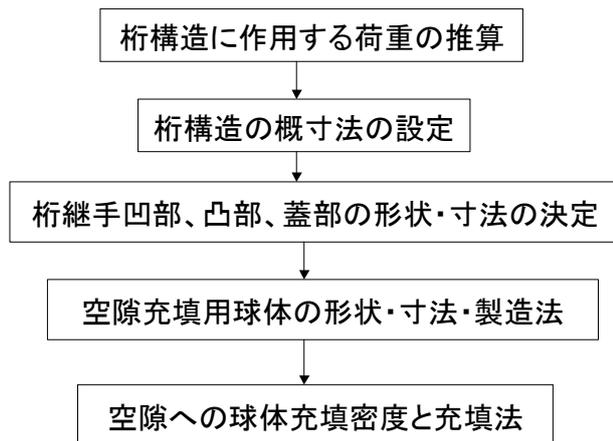


図6 機械継手を組み込む桁の設計手順

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

1. Watanabe, Y. and Yoshida, K.: Wave Response of a Semisubmersible Floating Structure Model with Mechanical Connectors, Proceedings of the 27<sup>th</sup> OMAE, Estoril, 2008
2. 渡辺喜保、吉田宏一郎: 鋼製中空球の圧縮強度、日本船舶海洋工学会春期講演論文集、5月、2009 (発表予定)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 宏一郎 (YOSHIDA KOICHIRO)

(独) 海上技術安全研究所・海洋部門・客員研究員

研究者番号: 90010694

### (2) 研究分担者

渡辺 喜保 (WATANABE YOSHIYASU)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号: 20384935

### (3) 連携研究者

星野 邦弘 (HOSHINO KUNIHIRO)

(独) 海上技術安全研究所・流体部門・主任研究員

研究者番号: 40399514

鈴木 英之 (SUZUKI HIDEYUKI)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 00196859

田中 義照 (TANAKA YOSHITERU)

(独) 海上技術安全研究所・構造材料部門・グループ長

研究者番号: 40373419