本州四国連絡橋：明石海峡大橋，多々羅大橋，来島海峡大橋

Akashi Kaikyo Bridge, Tatara Bridge, Kurushima Kaikyo Bridge

広島製作所　重留正治[*1]　秦野啓司[*1]
本州四国連絡橋公団　森田一幸[*2]　真辺保仁[*3]
伊藤進一郎[*4]

平成11年5月，本州四国連絡橋の尾道～今治ルート（通称：しまなみ海道）が全線開通し，神戸～鳴門，児島～坂出ルートを合せた本州四国連絡橋プロジェクトは21世紀を前に完了した．これらのルートには瀬戸内の島々を結ぶ長大橋が連続するが，その中でも明石海峡大橋，多々羅大橋は世界最大の吊橋，斜張橋であり，来島海峡大橋は世界初の3連吊橋である．これら大規模・新形式の橋梁は，本州四国連絡橋プロジェクトを通して培ってきた設計・製作・架設技術の集大成であるといえる．特に耐風技術は，本州四国連絡橋プロジェクトとともに世界をリードしてきたといっても過言ではなく，明石海峡大橋ではセミアクティブ多段振子型制振装置（TMD）及び桁（けた）間ダンパ，多々羅大橋ではディンプルケーブルなどの新技術を開発し採用した．また来島海峡大橋では，架設時の耐風安定性の検討により，箱型断面補剛桁の直下吊り上げ全ヒンジ架設工法を可能とした．

Akashi Kaikyo, Tatara, and Kurushima Kaikyo Bridges linking Honshu to Shikoku is the longest suspension cable-stayed bridge and the first trio suspension bridge in the world. Based on the newly developed design and construction and experience accumulated in Honshu-Shikoku Bridge project, we completed this large bridges the wind resistance technology applied to this bridges was developed with the project. Tuned mass damper (TMD) systems and dampers between the stiffened girder and tower are used in the Akashi Kaikyo Bridge, and dimple surface cable for damping rain vibration is used in the Tatara Bridge. The girders of the Kurushima Kaikyo Bridge erected by all hinge erection and direct lifting on an international sea lane, where aerodynamic stability was confirmed.

1. まえがき

世界最長の吊橋である明石海峡大橋が平成10年4月に，また世界初の3連吊橋である来島海峡大橋，世界最長の斜張橋である多々羅大橋が平成11年5月にそれぞれ開通し，21世紀を目前に本州四国連絡橋プロジェクトが完成した．

その規模において瀬戸大橋をしのぐこれらの長大橋の施工に当って，数多くの解決すべき課題があったが，風・地震・潮流等の我が国の厳しい自然条件や，国際航路上における架橋制約条件等を克服する技術開発が本四架橋という夢を現実のものとした．

本報では主として耐風安定性を確保し，経済的で短期施工を行うために開発された技術について報告する．

2. 明石海峡大橋

2.1 橋梁概要

明石海峡大橋は本州四国連絡橋の“神戸・鳴門ルート”に属し，神戸と淡路島を結ぶ3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋（道路単独橋）である．施工途中に阪神淡路大震災があり，基礎の移動により主塔間が約1m伸び，橋長3911m，中央径間長1991mとなった．

橋梁一般図を図1に示す．

従来の規模をはるかに超えたこの長大吊橋の設計施工に当り，数々の課題を実験・数値解析により解決してきた．本章ではその中から耐風安定性に関する技術について述べる．

2.2 主塔の設計と施工

主塔の耐風安定性を確保するためには，主塔架設時から吊橋完成時に，ギャロッピング振動，フラッタ振動と渦励振振動に対する対策が必要であった．これらに対して風洞実験を含め種々の検討の結果，図1に示すように高さ方向にテーパをつけた隅切十字断面を採用することにより，渦励振振幅を従来橋に比べ半減でき，その他の振動の発振風速を設計風速以上に高めることができた．

しかしながら，主塔架設時から完成後まで，設計風速以下の風速で有害な渦励振振動が発生するため，制振装置による対策が必要であった．主塔の架設には工期短縮のためクライミングクレーン工法を採用したが，クレーン自身に制振装置を設置し，架設の進行に伴うクレーンの上昇と同時に制振装置も上昇させることとした．これにより制振効果の最も大きい架設頂部に盛替え作業なしで制振装置が設置できることとなった．さらに，図2に示すように配置された制振装置により，架設段階ごとの振動数の調整のみで主塔面外曲げ振動，ねじれ振動に対し効果的な振動制御が可能となった．

また，主塔架設時の長周期振動に対し，コンパクトで経済的なセミアクティブ多段振子型制振装置（TMD）を開発した．さらに，ケーブル架設時の主塔振動特性の変化にはこれをセミアクティブ化して経済的に転用した．なお主塔完成時独立状態で，本セミアクティブTMDを起振機として振動実験を行い，制振装置の有効性，主塔の減衰などを確認し，耐風安定性を検証した．

2.3 桁間ダンパによる制振

吊橋完成時の主塔の振動（曲げ1次，ねじれ1次）を制御するTMDが故障した場合のフェイルセーフとして，主塔と側径間補剛桁（けた）の間に油圧シリンダ型の桁間ダンパを設置した．桁間ダンパの設計は，TMDと同じく，許容振幅内に振動を制御できるように諸元を決定した．一方，長周期地震時には側径間補剛桁の移動量と反力が許容値を超えるため，桁間ダンパの付加減衰を積極的に利用することとした．これにより，側径間補剛桁の減衰を高め，地震時の変位を制御することも可能になった．

2.4 補剛桁の耐風安定性

本橋では補剛桁の大半の上下弦材断面が暴風時の断面力で決定されている．大きな曲げモーメントに対しHT 690，HT 780の調

*1 鉄構技術部橋梁設計課
*2 第一管理局垂水管理事務所橋梁管理役
*3 長大橋技術センター技術情報課課長代理
*4 長大橋技術センター技術調整課課長代理

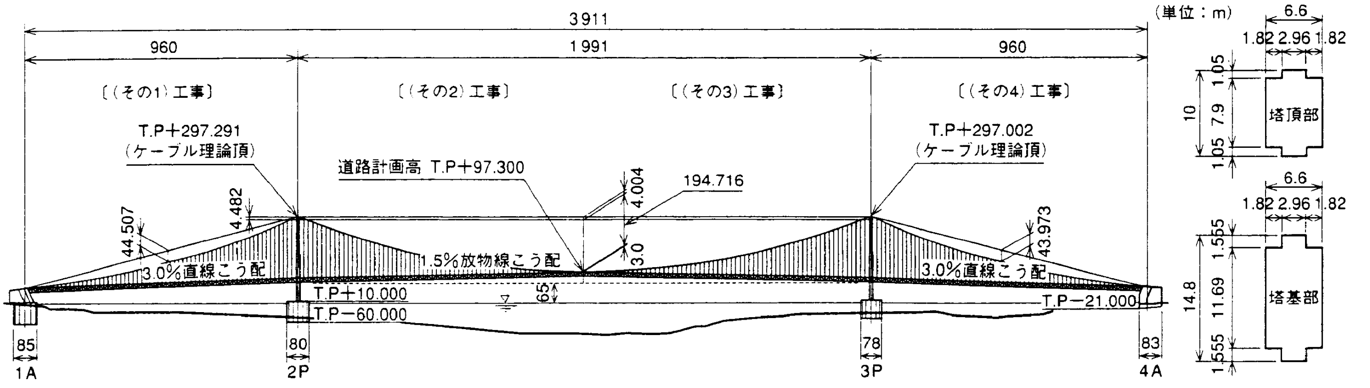

図 1　**明石海峡大橋一般図**　明石海峡大橋の全体一般図と，主塔・補剛桁の断面形状を示す．
Bridge profile and cross sectional profile of tower

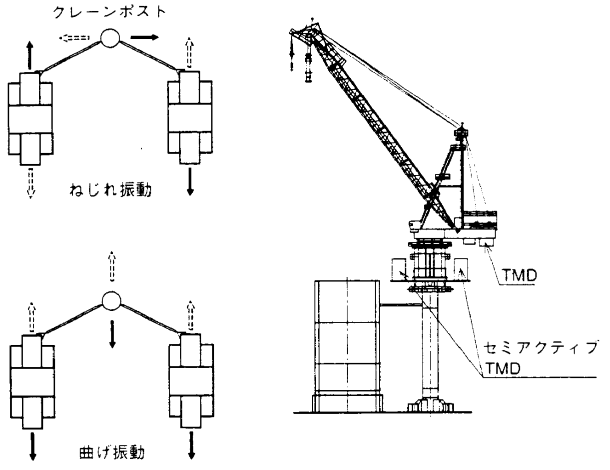

図 2　**制振装置配置と振動方向**　架設用制振装置の配置と振動方向を示す．
TMD position and vibration direction

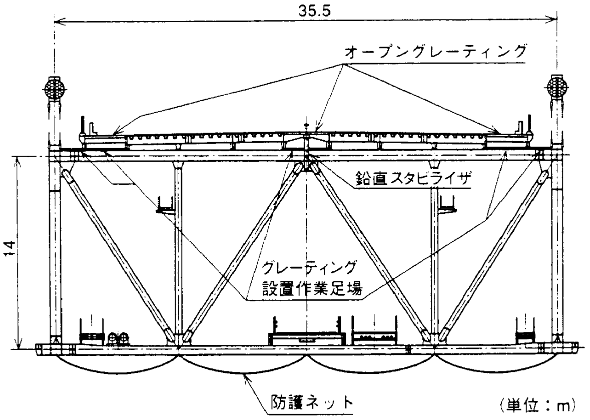

図 3　**補剛桁断面**　補剛桁の添加物断面配置と架設作業足場，防護ネットの取付位置を示す．
Cross sectional profile of girder

質高張力鋼を採用することで鋼重軽減，経済性を追求した．これら高材質鋼には予熱低減鋼を積極的に採用し，施工性を確保した．

完成時の補剛桁は風洞実験により主構造及び添加物の配置を照査し，オープングレーティング形式の風抜設備，鉛直スタビライザを設置することで，動的耐風安定性を確保した．しかし橋面工施工時は図3のようにオープングレーティング設置のため，当該箇所を作業足場で閉そくし，加えて補剛桁下面に全面防護ネットを敷設している．橋面工施工時期は台風襲来時期と重なり，耐風安定性の上で，空力特性の悪化が懸念された．そこで架設仮設備を考慮した部分模型風洞実験と数値解析結果を基に，架設時フラッタ限界風速を超えないよう，足場等の仮設備設置範囲の進ちょく状況を管理した．

3．多々羅大橋

3．1　橋梁概要

多々羅大橋は本州四国連絡橋の“尾道・今治ルート（瀬戸内しまなみ海道）”の広島県の生口島と愛媛県の大三島を結ぶ中央径間長 890 m，橋長 1 480 m の 3 径間連続複合斜張橋である（図4参照）．本橋は，桁高 2.7 m の非常にスレンダな桁断面，高さ 220 m の逆 Y 型の主塔，そして 21 段のマルチケーブルで構成されている．

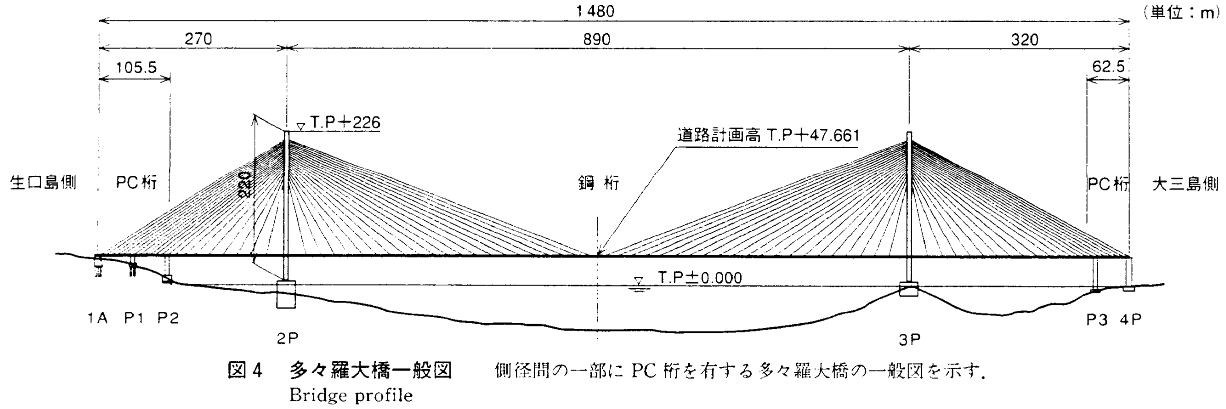

図 4　**多々羅大橋一般図**　側径間の一部に PC 桁を有する多々羅大橋の一般図を示す．
Bridge profile

本橋架橋の実現には，橋体の耐荷力の評価，風・地震に対する動的安全性の検証，施工精度の向上などが不可欠であった．本章ではこれらの中から全体座屈耐荷力試験，耐風安定性の検証及び振動実験の概要について述べる．

3．2　全体座屈耐荷力試験

長大斜張橋の主桁では曲げモーメントの増加に比べ，ケーブル張力の水平成分による軸力の増加が顕著であり，橋梁全体の座屈耐荷力を評価することが最も重要な検討課題の一つであった．本橋では数値解析及び縮尺 1/50 の全径間模型実験によって耐荷力の照査を行った．実験では，① 数値解析結果の妥当性確認，② 全体座屈に関する橋梁面内座屈モードの確認，③ 全体補剛構造の中から弱点となる箇所の確認，を行った．“死荷重＋活荷重”に対する耐荷力は，実験結果と弾塑性有限変位解析による解析結果とでは 8 %の差となり良く一致した．実験状況を図 5 に示す．

これらの検討結果を反映し，最下段ケーブル定着位置を変更するなどの構造系の見直しを行い，耐荷力を向上させることとした．なお，本実験は本州四国連絡橋公団の大型疲労試験室（静岡県富士市）で行ったものである．

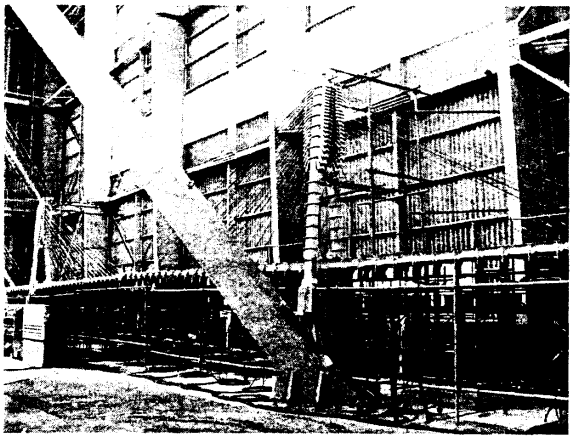

図5　全体耐荷力試験状況　1/50 の全橋模型実験．
Limit state of model

3．3　耐風安定性の検証

本橋は長大化に伴い，橋梁全体系が柔な揺れやすい構造となっている．また背後には 400 m を超える山がそびえており，風の乱れによる影響も懸念された．そのため完成形状はもちろん架設系においても，架設ステップを考慮した多くの実験・数値解析により風に対する安全性を確かめている．

主塔架設時には，架設用の足場が面外のギャロッピングを抑制していることが風洞実験により判明した．そこで架設現場では，架設足場の充実率など実験の諸条件を再現することにより，制振装置を用いることなく経済的に耐風安定性を確保した．また本橋は，主桁の最大張出し架設時に台風の襲来を受けた．しかしながら，風洞実験及びガスト応答解析結果に基づき，桁先端の架設クレーン・移動防護工の後退や桁先端の連結などの台風対策を施した結果，橋体に損傷を受けることなく，無事閉合を迎えることができた．

ケーブルの制振では，レインバイブレーションに対してケーブル表面のポリエチレン管にインデント（凹凸）加工を施すことにより，抗力係数を増大させることなく耐風安定性を向上させている．

3．4　実橋振動実験

多くの風洞実験・数値解析等の耐風安定性に関する詳細な検討において，橋梁の構造減衰など幾つかの動的諸元は仮定値となる．そこで，舗装完了後に実橋振動実験を行い，構造減衰などの動的特性の確認を行った．

実験には当社の大型起振機を使用し，桁を鉛直曲げ・ねじれ方向及び水平曲げ方向に加振した．なお，長大橋における大振幅の水平方向曲げ振動試験は過去に例がなく，貴重なデータを得ることができた．

表 1 に実験結果を示す，固有振動数について，実測値と解析値とは 10 %以下程度で一致している．また，鉛直曲げ振動及びねじれ振動の対数減衰率 δ は，既往長大斜張橋の実測値と比較すると小さいが，設計値の $\delta=0.02$ をおおむね満足している．これらの結果により耐風安定性の検討結果の妥当性を確認した．

表 1　振動実験結果
Results of vibration test

対象振動	対象モード	振動数（Hz）		対数減衰率	最大振幅（cm）
		実験値	解析値		
鉛直曲げ	対称 1 次	0.226	0.223	0.024	30.5
	逆対称 1 次	0.263	0.262	0.018	22.6
	対称 2 次	0.348	0.345	0.007	9.5
ねじれ	対称 1 次	0.497	0.498	0.017	4.8
	逆対称 1 次	0.831	0.822	0.051	1.6
水平曲げ	対称 1 次	0.097	0.094	0.132	9.4
	逆対称 1 次	0.248	0.249	0.213	4.0
	対称 2 次	0.470	0.494	0.173	1.1

4．来島海峡大橋

4．1　橋 梁 概 要

来島海峡大橋は，“尾道・今治ルート”最南端の来島海峡の島々を結ぶ世界初の 3 連吊橋である．

上部工構造の特徴は，中央径間が 1 000 m を超える長大吊橋の補剛桁に箱桁を採用したことであり，耐風安定性より偏平六角形断面の形状を採用した．この箱桁形状は維持管理に優れ，航行船舶のレーダの偽像を防ぐ効果もあり，また，“多島海美”を有する景勝地であることから景観上も優れたものとなっている．

当社が施工した第二大橋は架橋地点が国際航路上で，最も潮流の速い厳しい架設環境にあった．

補剛桁の架設工法には直下吊り架設による全ヒンジ工法を採用したが，本工法の採用に当っては，補剛桁架設時の耐風安定性の確保と，架設ブロック輸送の自航台船の開発が課題となった．補剛桁架設一般図を図 6 に示す．

4．2　架設時耐風安定性

長大吊橋の補剛桁架設は，主塔付近で荷揚げした部材を，先端の架設位置まで橋上運搬して組立てる逐次剛結方式による張出し工法が多く採用されてきた．逐次剛結方式に対して全ヒンジ方式は，架設時の補剛桁及びハンガーに特別な補強を必要とせず合理的な手段である．しかし，架設時において耐風安定性に弱点があることが知られており，国内においては多くの場合採用が見送られてきた．本橋では，全ヒンジ方式の耐風安定性を数値解析及び風洞実験により検証し，実施施工するに至った．全ヒンジ方式の耐風安定性の問題点及び検討事項を**表 2** に示す．

架設途中の補剛桁がヒンジによりつながっている状態の耐風対

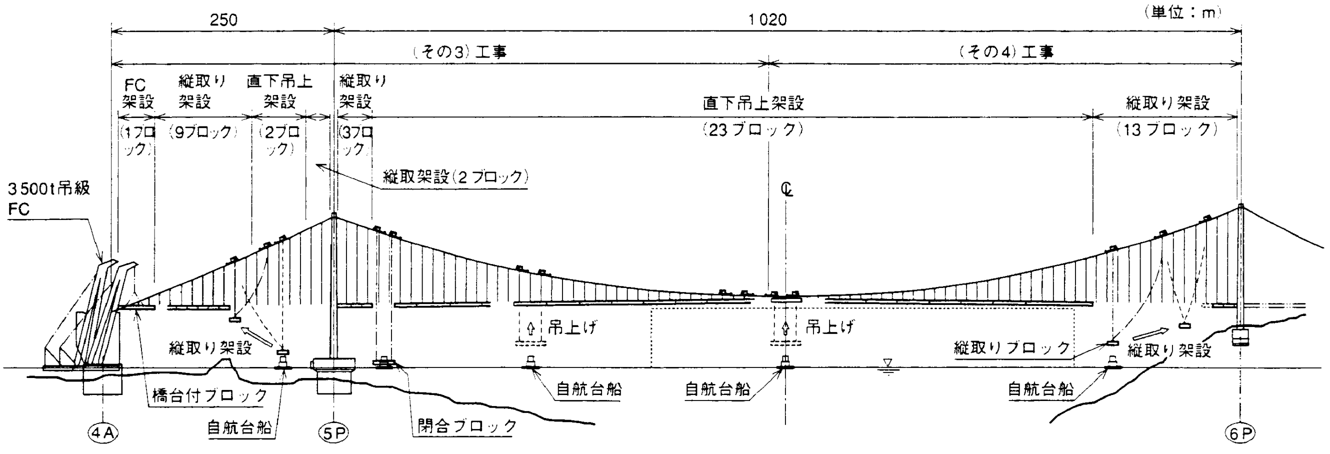

図６　**来島海峡第二大橋補剛桁架設一般図**　当社施工の来島海峡第二大橋の架設工法概要を示す．
General arrangement of erection

表２　**架設時耐風安定性の問題点と検討項目**
Aerodynamic stability for erection by structure

項　目	問題点	検討事項
静的現象	・橋軸直角方向風荷重によるヒンジ部の変形，作用力	静的風荷重解析 ・静的ヒンジ ・ヒンジ部作用力
動的現象	・曲げねじれフラッタの発振風速の低下 ・渦励振	固有値解析 ・曲げねじれフラッタの発振風速の推定 ・渦励振の発振風速と最大振幅の推定
ヒンジ構造	・架設ブロック吊下時仕口部の衝突，損傷	架設ヒンジ部の設計，構造検討 ・水平面，ねじれに対する剛性評価

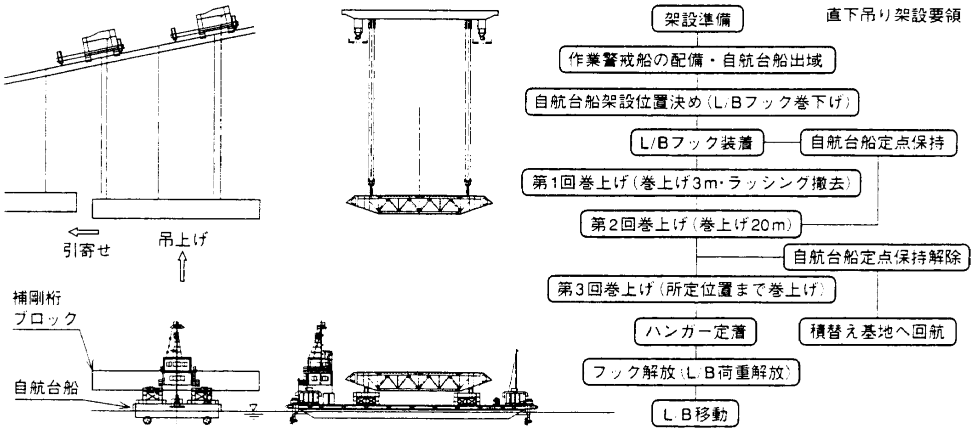

図７　**補剛桁直下吊り架設要領**　自航台船を用いた直下吊りの架設フローを示す．
Diagram for erection sequence by direct hoisting method using self-positioning barge

策は，静的な挙動と動的な挙動に対して行っており，本節では動的挙動に対する耐風安定性について述べる．

本橋の補剛桁架設において，フラッタやバフェッティングが問題となることが解析により判明した．これらに対する安全性の検証のため，縮尺 1 /160 の三次元弾性体模型を製作し，風洞実験を行った．フラッタ発振風速を測定した結果，架設初期から中期の段階において発振風速を向上させる必要が生じた．フラッタ対策として，架設段階の桁先端部とリフティングビーム（L/B）に，たすきワイヤ（直径 36 mm のワイヤを２本）を取ることにより発振風速を向上させた．また，バフェッティングにより，ピン連結されている補剛桁の下フランジが開閉し，損傷する恐れがあった．そのため，あらかじめ下フランジに用意したジャッキ引込み装置により仮添接（部分添接）することで，下フランジの損傷防止を行った．

また，架設時の橋軸方向の水平及び鉛直荷重及びねじれをピンプレートにより，また橋軸直角方向の水平力を鋼床版上面中央部分に設けたせん断キーで抵抗させることで，ヒンジ連結状態の補剛桁の耐風安定性を確保した．これらの検討結果により，本橋において全ヒンジ方式による直下吊り工法を行うことができた．

4．3　自航台船直下吊り架設

架設地点は潮流の激しい国際航路上であり，与えられたわずか 50 min という短時間に補剛桁架設ブロックを所定位置まで輸送し，吊り上げ架設を行うためには，係留なしで定点保持のできる自航式台船（以下，自航台船と称す）の開発が必須であった．

開発した自航台船は，2 000 t 級台船の四隅に主機関と，全旋回式推進機を設置した定点保持制御システムを有する自航式の専用特殊台船である．

自航台船は４基の推進機をコンピュータにて制御し，潮流力及び風力等における外力に対しての推力を発揮することにより，半径 2.5 m の範囲で定点保持を行うことができる．この定点保持システムを備えた自航台船の開発により，来島海峡という急潮流の中で，船舶の航行規制を最小限に抑え，従来吊橋の実績をはるかに上回る架設工期の短縮を実現することができた．自航台船による直下吊り架設要領を図７に示す．

5．お　わ　り　に

次世紀に向けて，幾つかの海峡横断プロジェクトが構想段階を経て調査段階へ至っている．本州四国連絡橋プロジェクトで培った長大橋の架橋技術は，これらプロジェクトの実現を担うものであるとともに，将来に継承し高度化することが必要である．

最後に本州四国連絡橋公団と共同企業体の関係各位に感謝の意を表します．