

招待論文
Invited Paper

招待論文

明石海峡大橋の基礎—調査と計画—

AKASHI KAIKYO BRIDGE FOUNDATIONS BUILT IN DEEP WATER AND POWERFUL TIDAL CURRENTS

吉田 巖*

By Iwao YOSHIDA

1. ま え が き

明石海峡大橋は、本州四国連絡橋神戸・鳴門ルートの枢要部で(図-1)、本州・淡路島間の明石海峡に跨る中央支間長1990m、橋長3910mの世界最大の吊橋である。

明石海峡大橋の調査は、1957年神戸市によるのが最初で、1959年には建設省が本四連絡橋の一環として調査を開始した。1961年からは建設省と日本国有鉄道が土木学会に技術的検討を共同委託し、土木学会内部に本四間の5ルートを調査対象とした「本州四国連絡橋技術調査委員会」が設置された。1967年、同委員会は架橋計画の技術的検討結果を取りまとめた¹⁾。そのなかで、垂水・岩屋ルートの明石海峡大橋について、「設計施工の諸条件が、世界の長大橋に類似した実施例のないきわめて厳しいものであって、中央支間長1500m級の吊橋、ならびに水深40~50mおよび潮流4m/sにおける根入れ35mの多柱基礎、あるいは根入れ40~55mの脚付きケーソン基礎などに多くの技術的問題が残されている。したがって、実施にあたってはこれらの問題を解明しなければならず、そのための十分な調査検討を必要とする。」と報告された。

この報告を受けて、1970年本州四国連絡橋公団が設立された後は本四公団が調査を引き継ぎ^{2),3)}、海中基礎の施工法確立のための海上試験工事など広範な調査を行うとともに、橋梁計画の検討を進めた。1973年、舞子・

松帆ルートの中央支間長1780mの道路・鉄道併用吊橋が工事実施計画として認可された。しかし、同年秋、総需要抑制策により工事着手が凍結された。その後、経済の好転により1ルート4橋(児島・坂出ルート、大三島橋、大鳴門橋、因島大橋、伯方・大島大橋)の建設が進められ、明石海峡大橋は調査を継続した。1ルート4橋の建設を通して培った技術は明石海峡大橋建設へ向けての技術の蓄積となり、開発への素地となった。

1985年、社会経済情勢、国鉄の財政事情等から明石海峡大橋を道路単独橋として建設することとなり、またこの間の技術的検討結果から中央支間長を1990mと決定し、翌年事業化された。以降2か年、現地での各種確認実験を経て、1988年本工事に着手した⁴⁾。

本文は、最初に、土木学会の委員会報告を受けて明石海峡大橋が着工に至るまでの20余年間に行った諸調査の成果を述べる。次いで、大水深、強潮流など基礎の施工を左右する厳しい自然条件を克服し最も合理的な橋梁計画を策定する手法について論じ、その結果として明石海峡大橋の基礎構造の計画について述べる。

2. 調査概要

明石海峡は淡路島の北部で大阪湾と播磨灘をつなぐ最小幅4kmの海峡である。海底地形は両岸部陸地沿いに水深30~50mの平坦面が発達しており、中央部には比高40m前後の急傾斜をもつ深い海釜状の谷が連なっている(図-2)。海峡部の地質は花崗岩を基盤とし、新第三紀中新世の神戸層群、鮮新世~第四紀更新世の大阪層群および沖積層が広く分布し、六甲変動の影響を受けて複雑な褶曲構造を呈する。また潮流が非常に速く最高4.5m/sにも達する。当海峡は古くからの漁場であると

* 正会員 工博 元・本州四国連絡橋公団理事
(〒107 港区南青山5-12-15-104)

Keywords: Akashi Kaikyo Bridge, foundation, long-span suspension bridge

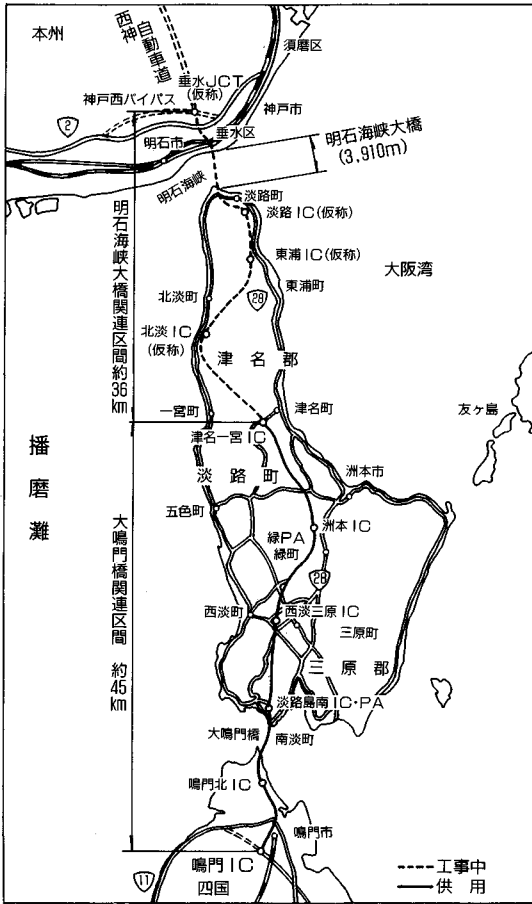


図-1 位置図

ともに、海上交通の要衝として一日の通行船舶はおよそ1400隻におよぶ。

この明石海峡にかかる明石海峡大橋は、南・北備讃瀬戸大橋（中央支間1100m・990m、1988年）の規模をはるかに超える世界最大の吊橋である。厳しい自然条件に加えて構造物の規模が大きいため、通常の調査の領域を超えた調査手法、現地に即した施工法を選定するのに必要な施工用船舶・機械、材料の開発および試験工事などが、瀬戸大橋など^{5),6)}での経験をはじめとするわが国の技術の総力を結集して行われた。特に、舞子・松帆ルートの中支間1990mの吊橋という現計画の決定に際しては、舞子側主塔基礎における明石層（半固結砂礫層）の大口径サンプリングによる地盤の確認、洗掘防止についての現地での確認実験、松帆側主塔基礎にあっては神戸層（軟岩）のグラブ掘削についての現地実験などの成果に負うところが多い。

明石海峡における、地形、地質、潮流と潮汐、洗掘、波浪および気象など自然条件の調査は海上での作業がきわめて困難なうえに、調査もしくは観測方法自体が発達段階にあり、新しい手法の導入や、開発を必要とした。

施工用船舶・機械や材料などについては、安全、確実、かつ迅速な施工を行うため、単純化、省力化、自動化、大型化、高速化の方向で開発を進めた。

試験工事は新たに開発した施工法について、施工性、安全性、品質の確保など技術的な確認と、海上作業の経験を積むために調査期間を通じて積極的に実施してきた。

3. 調査各論

(1) 自然条件調査

a) 地形・地質

海底地形調査は、1957年、1963～1965年の音響測深機を用いた深浅測量に始まる。最初に架橋計画予定水域全域をカバーする1万分の1の地形図を作成した。特に、地形が急峻な箇所については、ハイドロジストを併用して2千分の1の地形図を作成した。その後、構造物予定地付近と汀線部は1千分の1の深浅図をつけ加えたが、汀線部の深浅測量は、作業基地埋立による影響の予測を目的とした。

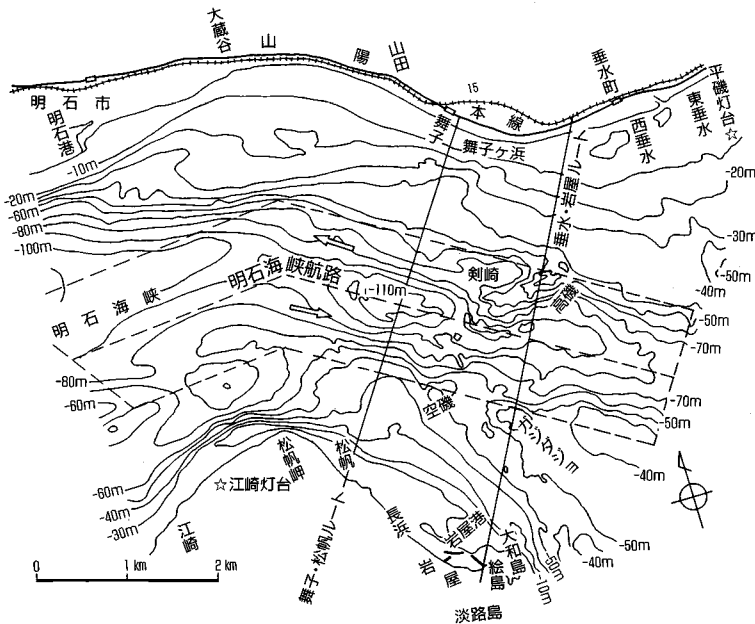


図-2 海底地形と主な比較ルート

地質調査は、1959年の音波探査（スパーカー方式）に始まり、1960～1961年には、ドレッジによる底質調査を実施している。これらの調査の目的は、海底地質構造の概況の把握であった。1964年には、新たに開発した円筒式足場を用いてボーリング調査を始め、1970年までに、60本の概査ボーリングを実施している^{7),8)}。1973～1974年には、強潮流用に設計、製作された半潜水式の大規模作業足場「創成2号」を用いて、主塔基礎予定地点で概査ボーリング（ $\phi 101$ mm）を行った。

一方、これらのボーリング調査と並行して、1973年から1983年にかけて舞子側、松帆側アンカレイジ付近および陸上部の類似地盤上で、現位置試験、大型不攪乱試料採取（ $\phi 300$ mm）等を行い、地盤の強度、変形等の力学的特性を明らかにしていった。現位置試験では、寸法効果や載荷速度の影響の検討も実施した^{9)~12)}。

これらの調査を通して、径100 mm以上の礫を含む明石層は、最低300 mm以上の径の不攪乱試料を、また、神戸層は、応力解放による緩みが大きいため、サンプリングに工夫をし、良好な不攪乱試料を得る必要があると判断された。

そこで、明石層には、径360 mm、神戸層には、径116 mmのトリプルチューブサンプラーを準備して、1986年詳細ボーリング調査を行った¹³⁾。砂礫層である明石層のコア採取率は100%に近く、試験結果も良好で、精度のよい地盤評価をすることができた。

b) 潮流

潮流調査は、潮流力の算定、稼働時間の設定、施工法・施工計画の立案等に必要情報を提供する¹⁴⁾。

1964～1965年に、海域全般の潮流の動向把握のために飛行機を使った潮流観測を行っている。これによって、より具体的な施工計画の立案ができるようになった。1973～1974年にブイ追跡法、板流しにより主塔基礎予定地付近の潮流を調査している。1984年には、検流機に加えてドップラープロファイラーによる重層的な調査も実施した¹⁵⁾。1985年には、引き続いて詳細な潮流調査を行っている。流速計で調査を行う場合、支持装置として、ワイヤ、架台、支持棒等を必要とするが、その際、支持装置の安定確保や、計器への影響を除去するためさまざまな工夫を加えた。

(2) 洗掘調査

舞子側は半固結層の明石層が、松帆側は上層にルーズな砂礫層が堆積していること、1974年、現地に設置したケーソン（ $\phi 9$ m \times 13.5 m）の周辺に大きな洗掘が観測されたことから、洗掘調査が重要なテーマとなった¹⁶⁾。

洗掘にかかる課題は、室内水理実験や、現地水理実験等を行い解決してきた。

実験は、1974～1977年に、室内小型模型実験¹⁷⁾、

1976～1978年には、室内大型模型実験として支持棒併用オープンケーソンと、支持棒のないケーソンの場合の最大洗掘深、洗掘形状、捨石の敷設範囲、迎え角や往復流の影響の検討を行った¹⁸⁾。1979～1981年には、室内実験でテトラポットと捨石を併用した洗掘防止工の検討および流れの可視化実験による洗掘のメカニズムの解明を行った¹⁹⁾。1983～1986年には、設置ケーソン工法を対象として、室内大型模型実験を行うとともに、現地でケーソン（ $\phi 15$ m \times 30 m）を使った水理実験を実施し、課題を解決した。

(3) 施工調査

a) 船舶・機械

海上ボーリング足場として、初期には円筒式足場を使用した。次いで海上作業足場（躍進1号）や船足場（創成1号）を製作し、これをもとに支援システムを含めて「創成2号」を建造した。円筒式足場は、大口径鋼管の単柱で、浮上曳航した後着底させ、頂部を4本の係留索で固定し、その上に作業足場を設けボーリング作業を行うものである。

「創成2号」の設計条件は潮流4.0 m/s、波高7.0 m、波長100 m、風速60 m/sである。船体はデッキの一边が43 mの正方形で、4基の半潜水型フーチングを有する。ボーリング時には動揺を少なくするため、300トン係留用鋼製シンカー8基に加えて85トン沈錘4基およびバラスト水による浮力拘束式の係留方式とした。係留には100キロ級鋼を用いた径95 mmチェーンを使用した。海水による腐食疲労が問題となった。支援システムの主なものに、海のガードレールともいべき長さ100 mのV字形フロートで構成する船舶接触防護施設、作業海域を明示する強潮流用大型灯浮標および300トン鋼製シンカーの設置と回収を行うためのクレーン船「金剛」がある。2年間にわたる海上作業の経験は、以後の本四連絡橋の施工計画に反映されている。

掘削機については1964～1968年に、エアリフトポンプ、重錘落下掘削装置、リバース掘削機（最大径10 m）などの試作や実用化試験、また高圧水ジェットを用いた掘削機の開発を行った。これ以降も改良を継続し基礎工法の合理化に役立てた。

一般海洋土木用船舶・機械の大型化は、起重機船が最初に手掛けられ、1964年頃から始まっている。特に1972年以降は、コンクリートミキサー船、非航グラブ浚渫船および大型海上作業台船（SEP：Self-Elevating Platform）が続いて建造され、施工計画、試験工事に組み込むことができた。

b) 材料

コンクリートは基礎構造物の主要構成材料であり、基礎工法に適した材料の開発を行ってきた。主なものに水

滓セメントモルタル、水中不分離性コンクリートおよび低発熱セメントがある。水滓セメントモルタルは海水中にモルタルを打設した際に、セメントと細骨材が分離しないよう、水滓スラグ微粉末を混和材として使用するもので、大鳴門橋（1985年）の多柱基礎の根固めに使用した。

水中不分離性コンクリートは、明石海峡における水中コンクリートの打設のため、現地条件にあわせプレバッキングコンクリート工法に代わるものとして開発を進めた。1985年には基礎実験を開始し、1988年には施工性、品質、打設設備および管理方法など全般にわたる実証確認のための大規模施工実験を行った。この実験には低発熱セメントを初めて用いており、流動距離10m、断熱温度上昇30°Cの確保に成功している。

気中施工用のコンクリートについても、1基当たりの使用量が多くアンカレイジでは20万m³を越える。そのため、水和熱を抑制し、工程短縮と品質確保をはかることを目的として低発熱セメントの実用化に踏みきった。低発熱セメントは、ポルトランドセメントにスラグ、またはフライアッシュの比率を高めて混合した2ないし3成分系の混合セメントで、コンクリートとしての断熱温度上昇の目標をセメント使用量260kgf/m³の場合で25°C以下としたものである²⁰⁾。

c) 作業基地

作業基地は、アンカレイジの位置する両岸浅海部を埋立て岸壁や泊地などを整備し確保することとした。その位置と形態は、漂砂・潮流観測の結果をもとに海底地形変動など周辺海域への影響予測を実験的手法により行い決定した。

d) 海上工事区域

明石海峡を通航する船舶の実態調査は、1963年から始めており、続いて航行安全に関する広範な調査を行ってきた。海上工事区域の設定もそのテーマであり、1973年以降の海上調査では各基礎位置ごとに海事関係者と協議のうえ、一般船の航行を禁止する区域を設定して、海域制限の影響調査を行った。工事区域は作業内容から、安全をはかり得る最小限とし、その位置を灯浮標で明示し、警戒船を配置するなどして通航船への注意喚起をはかっている。主塔基礎本体工事の場合、それを中心に明石海峡航路に接し外側に長さ1000m、幅500mの工事区域を設定している。

(4) 試験工事

試験工事の目的と概要を、実施順に述べる。

① 岩屋沖基礎工現場実験（1966～1968年²¹⁾ 岩屋沖300m、水深15m程度の地点で、支持枠（鋼管を支柱とする立体組トラス）設置およびウェル建込みの実験を行った。支持枠の平面寸法は一辺が9mの正方形で、9本の支柱（φ800m）からなり、周囲に円筒形フロ-

トを取り付け、浮上曳航し設置した。地質は砂礫層と神戸層であり、支柱の根固めとしてロータリー式掘削機でボーリングし、根固パイプを挿入してから水滓セメントモルタルを打設した。その後4基の直径3.5m、長さ30mのウェルを下げ、外周グラウトやプレバッキングコンクリートおよびトレミーコンクリートの打設試験をしている。

本実験は、海上工事の最初の総合実験であった。

② 鳴門海上実験（1969～1970年） 多柱基礎工法の実用化を目的として、鳴門海峡飛鳥付近の水深30～35m地点に、一辺が22mの正方形で、高さ41mの支持枠（重量580tf、上・下2分割）を設置し、直径3.5m重錘式掘削機によるラップ掘削で直径10mの削孔をし、鋼製ウェル（φ9.0m）の建込みを中心とした施工実験を行った。本実験により大型支持枠の大組立て、1000トン吊り起重機船による輸送と設置、および200トン埋設アンカーの緊張など一連の大規模工事の経験を積むことができた。

③ 神戸層陸上掘削予備実験（1977年） 垂水区垂水町の通称ジェームス山において、オープンケーソン工法を前提に、神戸層でのケーソン沈下、掘削および止水壁の施工実験を行った。ケーソン沈下実験は辺長1.5mの小型刃口の押し込み実験である。掘削実験は、リバース掘削機による直径2.5m、深さ30mの孔内に、新しく改造したノズル伸縮装置をもつ高圧水ジェット装置を降ろし、4.0m角に切り広げるものであった。止水壁施工実験は、ケーソン底面周辺の止水や地盤の補強を目的としたもので、ジェットグラウト工法の適用性を確認したものである。

④ 舞子沖地質調査（1978～1981年²¹⁾ 舞子沖150mの地点で一辺が10mの正方形のオープンケーソンをTP-30mまで下げ、その外周に直径1.5mのリバース掘削機を用いて先行削孔し、鋼管柱列式の地下連続壁を構築した。地下連続壁を土留杭とし、その内部をTP-40mまで掘削し、その止水性を調査した。この実験によって、明石層、神戸層の肉眼観察に成功するとともに、アンカレイジ基礎の施工計画に地下連続壁を大幅にとり入れるための確認ができた。さらに掘削機械の施工性や大深度の土圧等についても検討を加えている。ケーソンの沈下にかえて地下連続壁を継ぎ足す発想は主塔基礎の単体継足しケーソン工法（図-6）に同じものである。

⑤ 主塔基礎施工調査（1983～1985年²²⁾ 岩屋南東部の埋立地内で神戸層を対象とした大口径鋼管杭の打設および掘削実験を行った。杭径は最大が2.5mで、ロックオーガー、高圧水ジェットおよびオフショアハンマーを組み合わせ打設した。鋼管杭の間はジェットグラ-

ウトによるコラムで塞ぎ、掘削用テストピットの土留壁としている。掘削実験はグラブとロックオーガー等を組み合わせたもので、土留壁に沿う掘削不可能な部分は高圧水ジェットで落とす方法とした。これにより、単体継足しケーソン工法の改良案である鋼管連壁ケーソン工法の施工の可能性を確認することができた。

⑥ 明石海峡現地水理実験および施工調査 (1985～1988年) 工事着手を控えた最終確認の現地調査で、掘削実験および洗掘調査を行った。掘削実験は松帆側主塔基礎予定地付近で、ウルトラヘビーバケット (最大200 tf) を使用し、大型グラブ浚渫船により神戸層の掘削を行ったものである。

この結果、強潮流下でも掘削効率の確保は可能なこと、掘削跡地への埋戻りも特に支障にならないことが確かめられ、設置ケーソン工法の採用が可能なが確認された。

4. 橋梁の基本計画

吊橋中央支間長の長大化は、条件の良い地点に基礎を配置することを可能とする。2000 m級吊橋の建設が技術的に可能となったことにより、舞子・松帆ルート of 橋梁計画は、兩岸の埋立地内でアンカレイジを施工し、主塔基礎2基を海中に建設する洗練された吊橋計画としてまとめ得ることができた。

(1) ルートの選定

a) 垂水・岩屋ルート

垂水・岩屋間の明石海峡は、幅5 kmを越えるが、水深50 m未満の比較的平坦な海底が広がる。橋梁計画は1500 m級を主橋とし、両側に500～700 m級を配置する3連吊橋である。そのときの前提条件は海中基礎の施工可能限界が水深50 m程度、吊橋中央支間長は1500 m級とし、基礎工の予備検討を行った。

代表ルートは、海底谷北側斜面に突き出た高磯と、その南方に位置するガジダジョとよばれるともに水深40 m前後の磯を結ぶ。基礎は10基でそのうち9基が海中基礎である (図-2, 3)。

b) 舞子・松帆ルート

公団設立後、1800 m級道路・鉄道併用吊橋の可能性の検討を進めた。これに基づき、海中基礎の施工が容易で陸上部の開発状況にも配慮した舞子・松帆ルートに変更した。当ルートは、海峡の最も狭くなっているあたりを支間割890+1780+890 mの3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋で渡る。主塔基礎は、航路両側に広がる水深40～50 mの比較的平坦な棚状の海底に位置する。これが、1973年10月に認可を得た工事実施計画である (図-2, 3)。

(2) 基本計画

道路単独橋の可能性調査は、中央支間長1780 mを踏

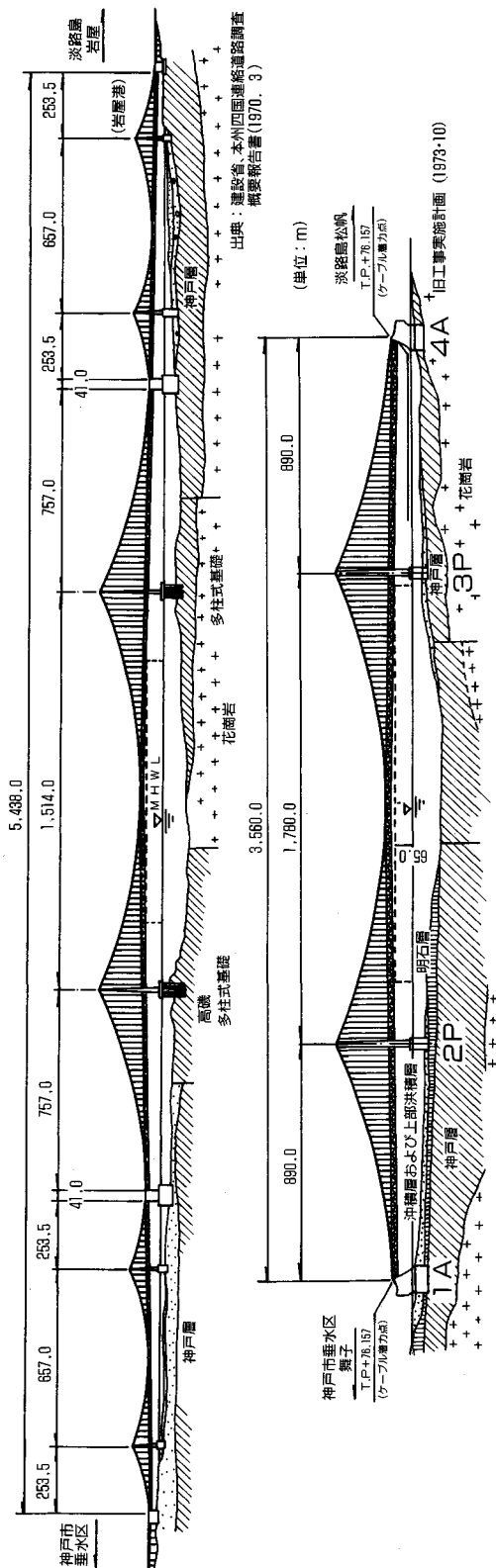


図-3 垂水・岩屋ルート3径間吊橋3連案(上段)、舞子・松帆ルート3径間吊橋案(下段)

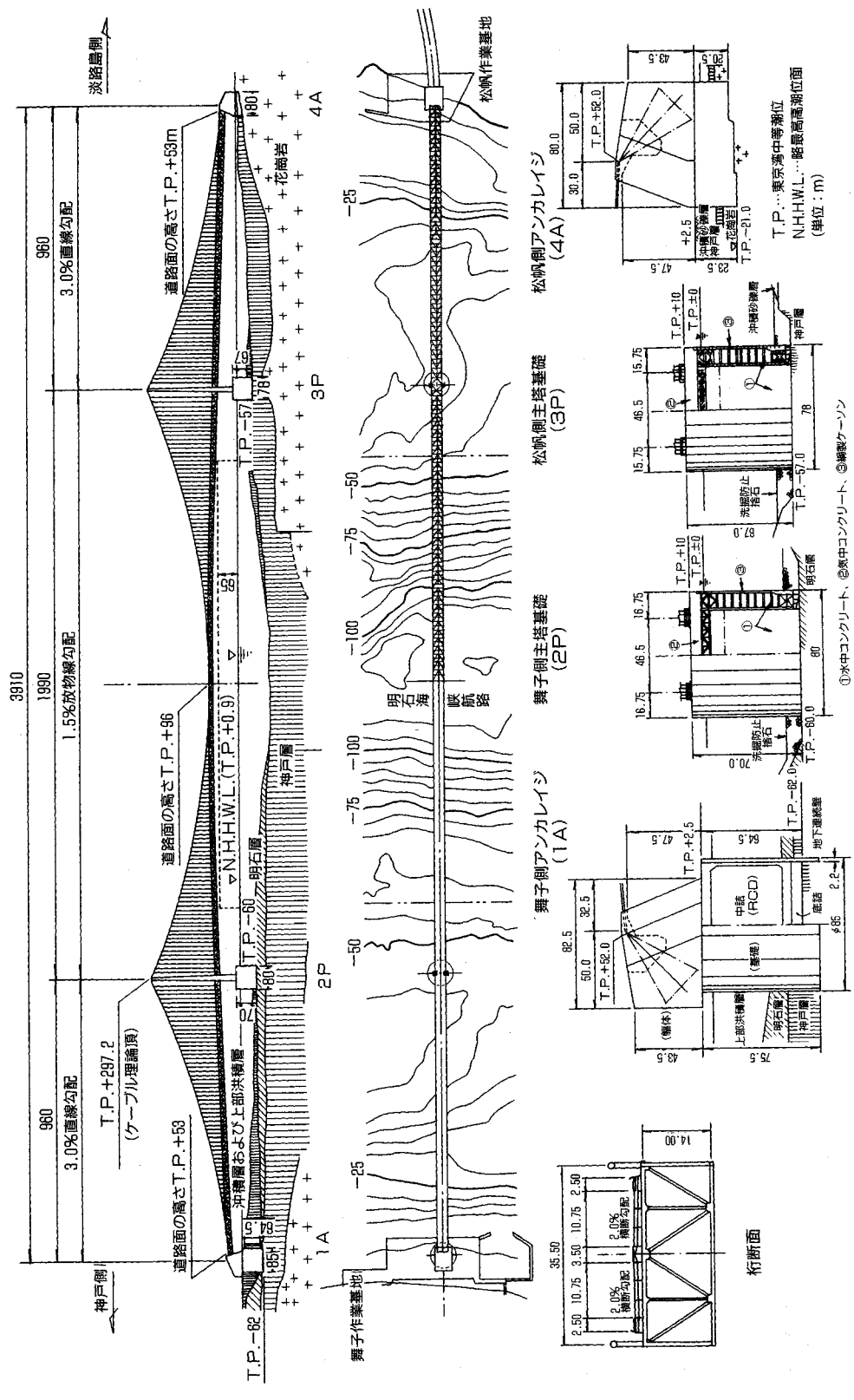


図-4 明石海峡大橋一般図および基礎構図

襲した検討であったが、1985年に道路単独橋とする方針が決定されたことにより、道路単独橋としての最適計画を策定するため設計、施工、経済性等の観点から比較設計、風洞試験等種々の検討を行った。道路単独橋の場合、併用橋に比べ荷重が軽減され、補剛桁等の構造が単純化され、また列車の走行性等設計上の制約もなくなる。中央支間長2000m級の吊橋でも、耐風性、耐震性について特に問題はなく、上部工の架設は従来の施工法の延長で可能である。また、基礎位置を変更することにより、下部工の施工性、経済性が向上する。検討の結果、中央支間長は2000m近傍が、工期、工費からも最適であることがわかった²³⁾。

基礎位置については、舞子側主塔基礎(2P)が比較的平坦な海底地形にあるため中央支間長1780mの場合とほぼ同じとし、松帆側主塔基礎(3P)を約200m淡路島側に寄せることにより、水深、潮流の条件が緩和され、支持地盤も約10m浅くなる。アンカレイジは、舞子側(1A)、松帆側(4A)とも両岸付近となり海岸からの埋立てが容易となる。4Aについては、オープン掘削による施工が可能となった。

この結果、海峡幅4kmに対して主塔基礎前面が航路(幅1500m)両側の周辺海域を侵さず、航路中心から対称に主塔を配置すると、中央支間長は1990mとなる。またアンカレイジをほぼ汀線位置に配すると中央支間長1990mに対して側支間長は960mとなる。

決定した橋梁計画を図—4に示す。

5. 基礎工法の選定

(1) 垂水・岩屋ルートでの基礎工法^{1), 2), 24), 25)}

1970年の道路・鉄道併用橋では、共用アンカレイジは水深40m、神戸層への根入れ7mの剛体直接基礎であり、主塔基礎は地形が急峻なため直径10m、神戸層への根入れ30mの2重鋼管柱9本を鋼製頂版で連結する多柱基礎がおのおの有力案であった。検討した基礎工法は多数あるが、大水深地点に適用する代表的なもの4案を挙げる。

① 支持枠併用オープンケーソン工法 ロの字形支持枠を固定して、その中へ鋼製ケーソンを曳き込み、支持枠で拘束した状態でオープンケーソンとして掘削、沈下させる。

② 海中型枠工法 支持地盤まで掘削後、支持枠を設置し、その外周に型枠パネルを取り付け、水中コンクリートを打設する(設置ケーソン工法の原形にあたる)。

③ 管柵工法 締切工法の一つで、ロの字形支持枠に遮水および根固め用ウェルを内装しておき、設置後支持枠を強固な遮水壁とする。内部は水中掘削し底版コンクリートを打設する。以後気中施工に切り替える。

④ 多柱基礎工法²⁶⁾ 固定した支持枠上で、大口径削孔、鋼管柱建込み、柱周辺グラウトおよび中詰コンクリート打設の一連の工事を行い、鋼管柱を頂版で連結する。多柱基礎は塔柱からの大きな集中荷重を柱に分散させることに構造上の難しさがあるが、地形が複雑でも施工が海面上から行い得る利点がある。大島大橋(日本道路公団、1976年)や大鳴門橋に採用されている。

(2) 舞子・松帆ルート(中央支間長1780m吊橋)での基礎工法

中央支間長1780m、道路・鉄道併用橋の基礎諸元(図—5)をもとに施工法の検討を進めた。

a) アンカレイジ

舞子側および松帆側アンカレイジとも神戸層を支持層に選定しており、基礎の根入れがきわめて大きい。施工法を確立するため、オープンケーソン工法、ニューマチックケーソン工法および地下連続壁工法の検討(1973~1976年)を行い、「舞子沖地質調査」を実施した。

① オープンケーソン工法 格子状隔壁で構成したオープンケーソンのセル内をロータリー掘削機などで掘削し沈下させる。神戸層に達してからは、高圧水ジェット装置により、刃口や隔壁の下を切り広げる。沈下完了後は水中コンクリートを打設し、ドライアップ後底版を施工する。本案では、オープンケーソンの辺長が巨大なため刃口部を背の高いSRC構造とした。

② ニューマチックケーソン工法 作業室天井部を箱形のSRC構造とし、剛度をもたせ、以後の施工に配慮した。本案は掘削深度が大きいので、地下水位低下工法による作業室内の気圧低下や潜水技術を応用し呼吸ガスにヘリウムガスを使用すること、および施工の機械化と工程短縮について検討を行っている。

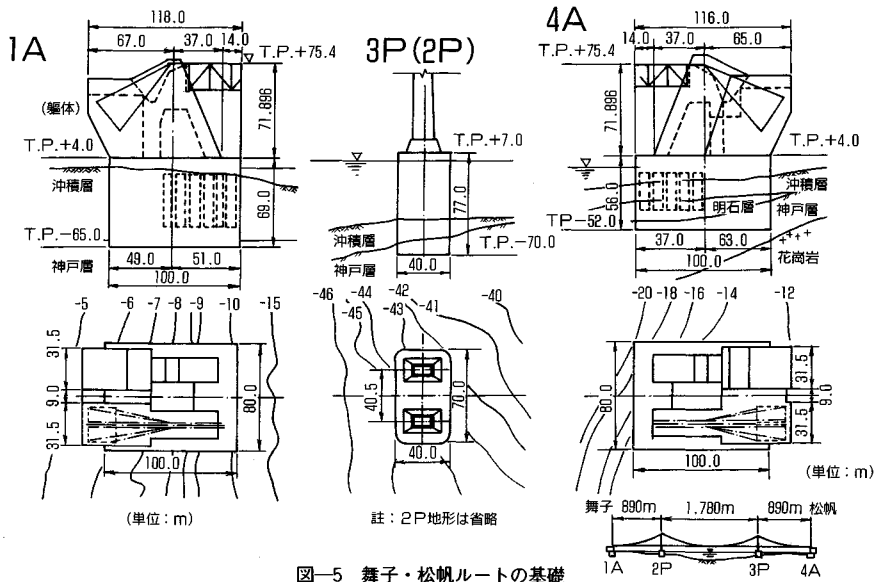
③ 地下連続壁工法 地下連続壁を土留壁あるいは基礎の一部に組み入れるなど、種々の検討を行ったが、壁厚は当時の掘削機械では1.2mが限界であり、これが計画上の隘路であった。

その後鋼管矢板で円形の遮水壁を構成し、地下水位を下げその中でケーソン工事を行う工法を検討した。次いでプレボーリングで鋼管($\phi 2.5$ m)矢板柱列を円形に建込み土留壁とし、内側を気中施工で、側壁と隔壁を逆巻きで構築する工法を考案した。

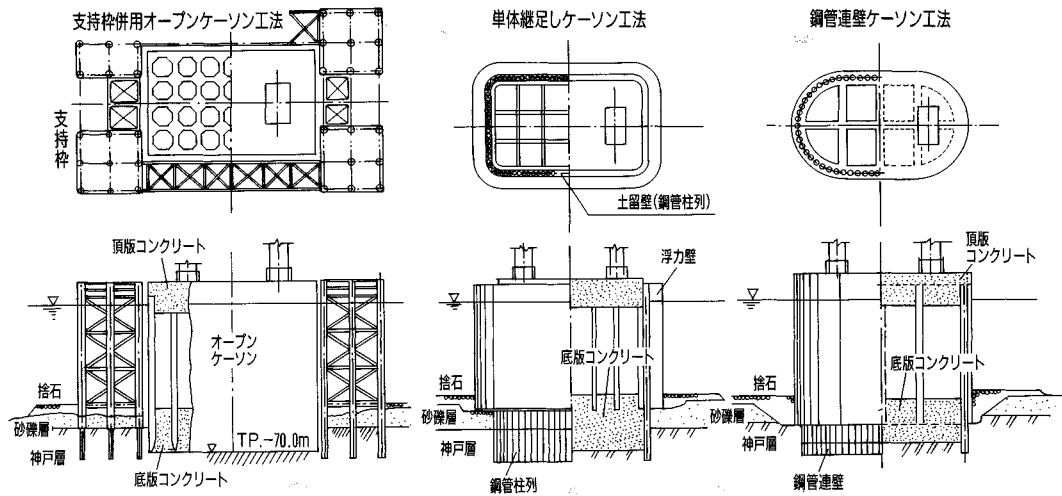
b) 主塔基礎

多柱基礎は、上部工の長大化に伴い主塔からの荷重が大きくなり頂版の構成が困難なこと、また支持層の強度や洗掘も問題になるため、剛体直接基礎を検討対象とした。基礎工法検討における課題は、迎え角の大きな強潮流と洗掘への対応である。主な工法について、松帆側主塔基礎を例として述べる(図—6)。

① 支持枠併用オープンケーソン工法 垂水・岩屋



図—5 舞子・松帆ルートの基礎



図—6 主塔基礎の主な工法（松帆側主塔基礎の例）

ルートで開発した工法の応用で、支持枠の各支柱にはスパットを装備する。輸送は5万トン級台船による。基礎位置において、スパット降下、支持枠こう上、台船取り出し、支持枠着底の一連の作業を行う。潮流力が大きいので、多数の埋設アンカーを補助に用いて支柱の根固めをする。次いで鋼製ケーソンを同様の手段により支持枠上へ導き、台船を取り出してから着底させる。鋼製ケーソンは格子構造とし隔壁内に水浮セメントモルタルを打設してオープンケーソンとする。掘削設備や沈下方法はアンカレイジのものと同一である。支持枠足元は、室内水理実験によると洗掘が深く、広がりが多いので周辺に割石を投入することとした。

② 単体継しケーソン工法 大掛りな支持枠をやめ、ケーソンの神戸層への掘削沈下をなくす改良案である。鋼製ケーソンにスパットを装備しておき、浮上曳航後、これを使って着底させる。その後もスパットで姿勢を保持し、洗掘防止工を施してから、鋼製ケーソンの外周壁内を通して鋼管柱列杭を施工する。これを土留壁としてケーソン内部を掘削し、水中コンクリートを打設する。

③ 鋼管連壁ケーソン工法 堆積層を事前に掘削し、洗掘の心配のない神戸層に平坦面を造る。鋼製ケーソンを曳航・沈設後、「主塔基礎施工調査」で述べた方法により鋼管連壁を施工し、内部掘削を行う。

(3) 舞子・松帆ルート (中央支間長1990 m 吊橋) での基礎工法

a) アンカレイジ基礎

アンカレイジ基礎の施工は、作業基地を兼ねる埋立地内で陸上施工とする。

i) 舞子側アンカレイジ

舞子・松帆ルート (中央支間長1780 m 吊橋) の諸工法をさらに比較検討した結果、円形の地下連続壁を締切りとし、内部を気中施工とする工法を選定した。その構造は、格子型隔壁と底板および頂版で構成する函体型と比較し、施工が簡単な中実型とした。その結果コンクリートの施工にRCD工法 (Roller Compacted Dam-concrete method) の採用が容易になった。

地下連続壁の施工は1986年頃から大壁厚・大深度掘削機が実用化に向かい、またLNG地下式貯槽²⁷⁾や橋梁基礎の施工例も増えており、これを使用することとした。壁厚は高強度コンクリートを用い、2.2 mとし、内側に補強のため厚さ2.0 mの側壁を施工する。エレメントの鉛直方向継手はカッティングジョイントとした。先行、後行パネル間の硬化熱による拘束応力を低減するため低発熱セメントを用いた。

神戸層の透水性は、上位の堆積層に比し桁違いに低く、締切り内の排水により発生する水頭差はほとんど神戸層が受ける。地下連続壁はヒービング防止や透水量低減などを目的に掘削底面より下方に10 m 根入れする。補助工として締切り内に揚水用ディープウェルと水頭調整用リリーフウェルを配置する。

アンカレイジでは、LNG地下式貯槽とは異なり、支持層に大きな偏心傾斜荷重が作用する。掘削面の処理を丁寧に行い、掘削による応力解放や排水に伴う支持層の変位については、押さえ荷重として底詰コンクリートを打設しその影響の低減をはかる。

ii) 松帆側アンカレイジ

支持層とする花崗岩の上面は橋軸方向、橋軸直角方向とも傾斜しており、基礎の北端と南端では20 mの高低差がある。施工性、経済性から傾斜にあわせた6ブロックの多段基礎とした。その結果、基礎底面の高さは最も深い南西端でTP-21 mとなる。基礎の施工法には、自硬性泥水モルタル柱列を土留壁に用いたオープン掘削工法を採用した。

b) 主塔基礎

当初、鋼管連壁ケーソン工法を検討の対象とし、①洗掘防止、②ケーソン沈設時の係留方法の開発、③神戸層への土留杭 (大口径鋼管杭) の打込み、④ケーソン内 (一般部、刃口下、隔壁下) の地盤掘削、および⑤水中コンクリートの施工の5つの課題をとりあげ解決に努力していた。検討の結果、次のことが確認できた。①室内水理

実験と、「現地水理実験」で、海底を10 mほど掘り下げてケーソンを据え、ケーソン周辺部に洗掘防止対策として捨石工を施工すれば、洗掘に対して長期的に安定する²⁸⁾。②短い作業時間での、径120 mmのケーソン係留索とシンカー索の接続は、クイックジョイント (オス金物、メス金物からなる着脱装置) の開発によって可能となった。③「主塔基礎施工調査」で神戸層への鋼管杭の打設は可能であることを確認した。④特に、刃口下、隔壁下の掘削が問題になったが、高圧水ジェットで掘削が可能になり、スライム処理が問題として残った。⑤水中不分離性コンクリートは、施工実験より流動性がよく、また打ち継ぎが可能であることを確認した。

一方、1986年に行った詳細ボーリング調査は、基礎底面を従来より約10 mほど浅くできることを明らかにした。

この時点で、鋼管連壁ケーソン工法と、設置ケーソン工法を比較検討したところ、設置ケーソン工法は、構造が単純で、工種も少なく、工費、工期で優位であることがわかり、最終的に、この工法を採用することとした。

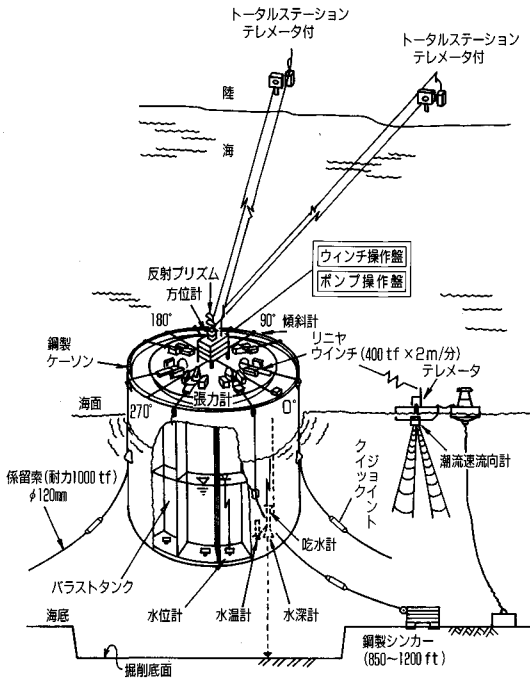
設置ケーソン工法は、瀬戸大橋で完成させた工法²⁹⁾であるが、明石海峡のような大水深、強潮流下で、軟岩や半固結砂礫層上での施工は初めてのケースになる。以下、各工種について検討した結果を概説する。

海底掘削における問題は、超大型グラブ船のグラブバケットの位置制御、掘削効率、掘削精度の確保であった。そのために、グラブ船の係留索をチェーンからワイヤに換え位置制御しやすくするとともに、掘削条件に応じて容重比の異なるバケットを使用したり、作業限界を設定する等の工夫を行い解決した。

ケーソン形状は、円形とした。その結果、潮流力を低減でき、潮流の迎え角の影響、基礎の回転も考慮しなくてよいようになった。ケーソンの係留・沈設は、ワイヤ係留方式とし、径120 mmの係留索を使った平行60°型の8点係留とした。ちなみに、瀬戸大橋では、径76 mmの係留索を使い8点係留であった。位置決め作業時の係留索の巻込みには、リニアウィンチを採用した^{30), 31)} (図-7)。

洗掘防止工は、捨石被覆工と、40~80 mmの碎石をつめた網袋式吸出し防止工からなる。捨石は4.0 m/sの潮流に対しても移動しない1トン級とし、2Pでの敷設は、ケーソン周辺の掃流力の及ぶ範囲 (ケーソンの直径) とした。

水中コンクリートの打設法として、プレバックドコンクリート工法と、水中不分離性コンクリート工法の両案を検討したが、主に骨材の製造・貯蔵・積み出し設備、施工性などから、水中不分離性コンクリート工法を採用した³²⁾。セメントは、温度ひびわれを抑制するために低



図一七 鋼製ケーソン沈設システムの概要

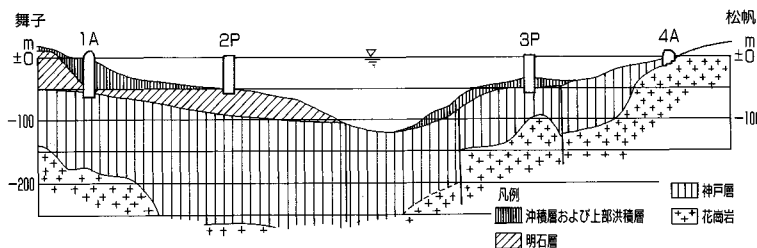
発熱セメント²⁰⁾を開発使用した。ケーソンは、内核部と幅12mの二重壁部で構成し、二重壁部は、ケーソンの曳航・沈設時の安定確保のために16区画に仕切っている。したがって、コンクリートの打設は二重壁部については1区画(9000m³)ごとに分けて行い、内核部については1回当たり約9000m³ずつ14回に分けて層状に打設することとした。

6. 下部工計画²³⁾

(1) 地盤条件

a) 地盤の構成

図一八に示すように、地質は下位より花崗岩、神戸層、明石層、上部洪積層～沖積層からなる。1A地点では、花崗岩上面の分布深度は、TP-140mからTP-180mである。神戸層は軟岩で花崗岩に不整合で接し、その構成土質は、細～粗粒砂岩、泥質岩、砂質泥岩、泥岩



図一八 模式地質断面図

および礫岩で、一部に垂炭、凝灰岩の薄層を挟在し、互層状である。明石層は数m以下であり、構成土質は、礫径最大100mm以上、平均20～30mm、礫分60～80%、基質は粗砂～シルトで粒度分布が非常に良く、締まっている。明石層の上位には、砂礫を主体とする厚い未固結層が分布する。アンカレイジの基礎は、神戸層に据えられる。

2P地点では、花崗岩はTP-260m付近に分布し、神戸層はTP-90m以深に分布する。神戸層は、泥岩と砂岩を主体とする互層からなる。明石層は、半固結状の青灰色の砂礫層からなり、TP-55m付近より、TP-95mにかけて分布し、約40mの層厚を有し、礫は、細～コプル大の垂円礫である。上部洪積層は、明石層の上位に、層厚約5mを有して分布する礫まじり砂層で、明石層に比べ固結度が低い。下位の明石層とは不整合で接する。主塔基礎は、明石層に据えられる。

3P地点では、花崗岩上面は、TP-90～120mである。神戸層は、花崗岩を不整合に覆っており、上面は、TP-50m付近にある。砂岩と泥岩の互層よりなるが、長石質の砂岩の占める割合が圧倒的に大きく、泥岩が多いのは、最上部と下部の凝灰質泥岩優勢互層に限られる。沖積層は、神戸層を不整合に覆い、層厚は約10mである。大部分は、暗灰色の玉石まじり砂礫層であり、基質は貝殻細片まじりの粗砂である。主塔基礎は、神戸層に据えられる。

4A地点は、下位より花崗岩、神戸層、沖積層が分布する。基礎岩盤となり得る花崗岩は、TP-7～21mで現われる。神戸層は、アルコーズ質粗粒砂岩を主体として細粒砂岩、泥岩の薄層を挟在する。沖積層は、平均層厚4mの砂層で、全域にわたって分布する。アンカレイジは、花崗岩上に据えられる。

b) 地盤の物性

沖積層や明石層は、比較的均一な地層と考えることができるが、神戸層や花崗岩は、地質構成の違いや風化程度によって力学的・工学的性質が異なっており、単一層として取り扱うことは難しい。そこで、設計・施工上の観点から地盤をいくつかの分帯に区分し²⁴⁾、地盤をモデル化し、それぞれの分帯に定数を与え、設計・施工の検討を行う方法をとった。

ここでは、各層の代表的な物性値を述べる。湿潤単位体積重量は、明石層で平均2.15tf/m³、神戸層で平均2.28tf/m³、平均含水比は、明石層で14%、神戸層で12%であった。PS波速度は、明石層でV_p=1.6～2.1km/s、V_s=0.3～0.6km/sで、深度方向への変

化はあまりみられない。神戸層では $V_p=1.8\sim 3.8\text{ km/s}$, $V_s=0.35\sim 1.1\text{ km/s}$ で、深度方向に増加する傾向を示した。明石層の均等係数 $U_c=D_{60}/D_{10}$ は、一部を除いて10を越し、粒度分布はよく、せん断抵抗や内部摩擦角が大きく期待できる分布傾向を示している。一方、礫の形状は、亜角礫、亜円礫が多く、形状によるインターロッキング効果は大きくないようである。

c) 地盤の工学的性質³⁵⁾

設計変形係数は、孔内水平載荷試験、ボーリングコアを用いたクリープ三軸試験、平板載荷試験等の結果により定めた。

せん断定数は、常時と地震時に分け、常時は、圧密・排水条件、すなわち CD 条件で三軸圧縮試験により求め、地震時は、圧密・非排水条件、すなわち CU 条件で試験を行って求めた。設計せん断定数は、得られた力学定数をもとに、応力状態の相違によるせん断強度の違い、強度の異方性、寸法効果および長期荷重強度を考慮して定めた³⁶⁾。

(2) 潮流条件¹⁴⁾

明石海峡の潮流は、東流最強時、播磨灘から徐々に加速されて海峡部に流入するが、その強潮流帯は、水深

60mの等深線で示される海釜状谷地形に沿って大きく迂回しながら増大し、海峡の最狭部あたりでピークに達するものと、淡路島の張り出し地形の影響を受けて生じるものがある(図-9)。西流最強時は、大阪湾からしだいに加速されて海峡部に流入するが、図に示すように大阪湾からの流れと、淡路島東岸に沿って北上する流れは、2つの強潮流帯を形成する。

最強潮流速は、強潮流帯で4.5m/s、2P地点で3.5m/s、3P地点で4.0m/sである。

図-9のホドグラフに示す2P地点の流況は3Pの流況に比べて安定しているが、流速が大きくなると、東流・西流ともより北へ向く傾向がある。一方3P地点の場合は、流向の変動は非常に大きい。

(3) 洗掘の影響¹⁸⁾

洗掘は、潮流の掃流力によって生じる。洗掘を最小にするには、掃流力を低減するか、流れの作用を底質に伝えないようにするか、あるいは底質の抵抗力を高めるかである。第一の方法は、原因となる加速流、馬蹄渦、カルマン渦等の発生を制御したり、掘削深を大きくすることによって低減する方法である。第二の方法は、何らかの材料で構造物周辺のお海底面を被覆し、流れ、渦による

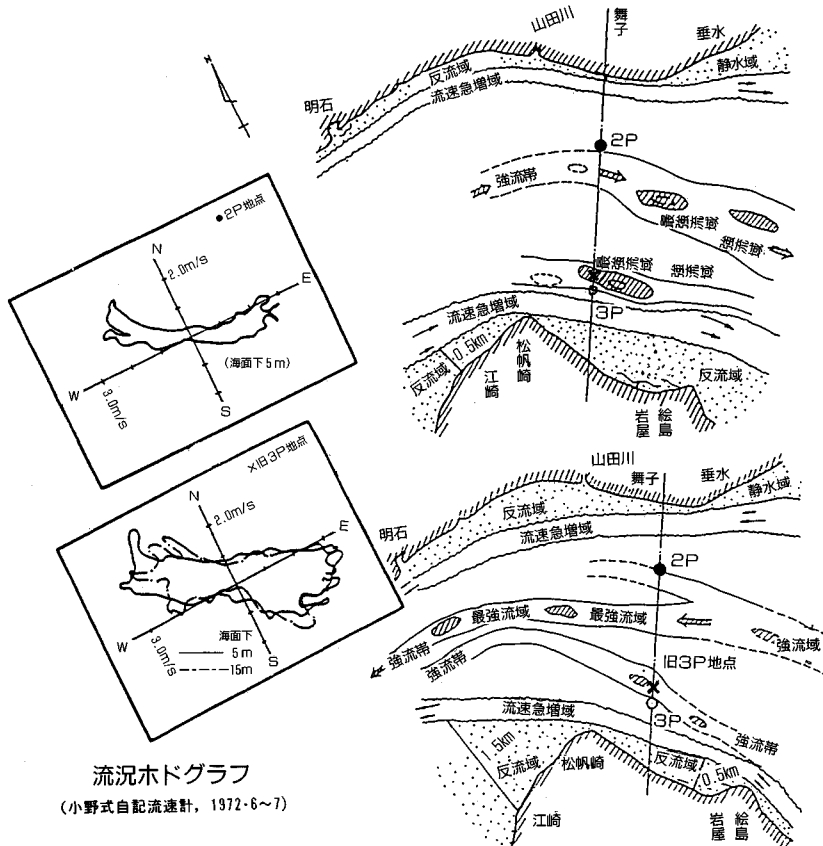


図-9 明石海峡の流況概念

底面せん断力，吸出し力を底面に伝えないことにより，洗掘防止を行うものである．第三の方法は，セメントミルクの注入等により，海底地盤の抵抗力を高め，底面を洗掘より保護しようとするものである．

中央支間長1990 mの橋梁計画においては，2P，3Pとも強潮流帯を回避することができ，掃流力そのものを小さくすることができた．

「現地水理実験」および室内水理実験で，次の事項を確認した．

a) 掘削の可能性と最適掘削形状

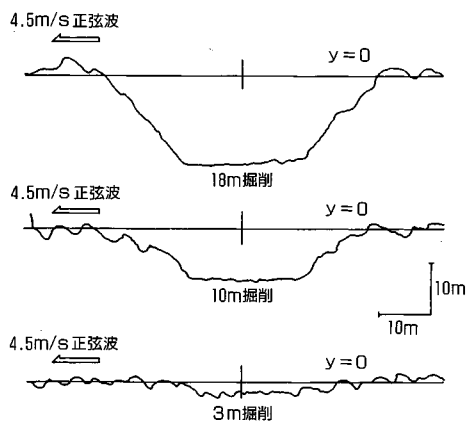
強潮流による埋戻りがあっても掘削が可能かどうか，のり面勾配とケーソン設置面の平坦性は確保できるかどうか問題であったが，現地の掘削実験で，掘削は可能であり，のり面勾配は，砂礫は1:3，明石層は1:2，神戸層は1:1で安定することを確認した．

b) 掘削深度増による掃流力の低減効果

図一10は，室内水理実験で，掘削深を変えて強潮流にさらに，掘削面の安定性を調べたものである．一般海底部では，土砂移動による比較的規模の大きい堆砂の発生がみられるが，掘削深が10 m以上では，のり面および掘削底面は安定していた．このことは，現地実験でも確認している．これは，掃流力が低減したことによる効果と考えられる．

c) ケーソン沈設時の掘削形状の安定性

ケーソン沈設時に，ケーソン周辺の流況が変化し，それによつてのり面や掘削底面に乱れが生じるかどうかの検討を室内水理実験で行った．土砂巻き込みに対して最も危険と想定されるケーソン着底直前の状況を想定し，沈設時に来襲が予想される2.5 m/sの潮流を作用させた．その結果，のり面は多少乱され，移動した砂礫は，ケーソン後方に堆積し，ケーソンとのり面との余裕幅が狭い場合にはケーソン底部にまで進入する可能性があることがわかった．



図一10 掘削形状と埋戻り状況 (1/100 模型)

d) ケーソンの形状

ケーソンの形状は，ケーソン周辺の洗掘の程度，洗掘防止対策の範囲，ケーソンの曳航，係留，沈設時の潮流力等に影響を与える．

ケーソンの形状としては，円形と小判形を想定し，洗掘について比較した．比較は，室内水理実験によつて，洗掘防止無対策の状態では，迎え角 30° を与えて，洗掘の程度および洗掘対策に必要な面積などの観点から優劣があるかどうかの検討を行ったが，洗掘量に関してはほとんど差はなかった (図一11)．

e) 洗掘防止工

いくつかの洗掘防止工を選定し，機能検証実験やパラメータスタディーを実施し，最後に「現地水理実験」で施工性の検討を行つて最適工法を決めた．選定した工法は，捨石被覆工と，網袋式吸出し防止工の組合せとした．捨石被覆工によつて保護する場合，捨石の隙間から底質が吸い出され洗掘を受ける可能性があるため，吸出し防止工を底質上に施工した後，捨石を被覆することとした．

(4) 基礎の安定と構造

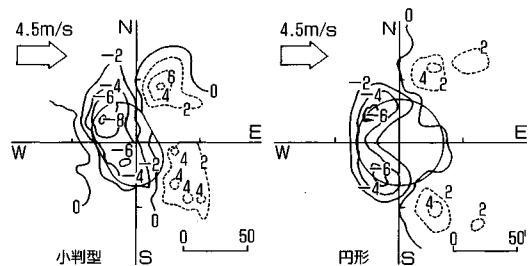
a) 設計一般

基礎の外郭形状はアンカレイジでは主ケーブルの，主塔基礎では主塔の定着に必要な，各構造上の最小寸法(構造寸法)で安定を照査し，不安定な場合は形状寸法を変更する．

鉛直支持に対する安定照査は，偏心傾斜荷重を考慮した極限支持力式に加えて，多層地盤を対象に分割法(Bishop法)を採用し，地震力など短期荷重に対しては地盤の強度定数を圧密・非排水の条件で設定した．設計レベルは概略と詳細の2段階に分け，後者では極限支持力と破壊モードの照査は弾性モデルのRBSM (Rigid Body Spring Model) 法，基礎の変位については線形弾性，弾塑性および粘弾性FEMによる解析を行っている³⁵⁾．

b) 耐震

瀬戸大橋などこれまでの本四連絡橋の基礎は，主に花崗岩等の硬岩を支持層としている．しかし明石海峡大橋



図一11 基礎形状と洗掘状況 (1/100 模型) (単位: m)

では厚く分布する神戸層や明石層の地盤の振動特性を考慮する必要がある。

設計に考慮すべき地震は、各基礎ごとに与えることとし、道路橋示方書の第1種に相当する地盤を神戸層および明石層とし、マグニチュード8.5、震央距離150kmの海洋性巨大地震、もしくは架橋地点を中心とした半径300km内で、確率論的に評価した再現期間150年に相当する地震の加速度応答スペクトルの包絡線で定義した。

基礎の応答解析は、S波速度から導かれる動的せん断変形係数をひずみレベルに応じて補正した地震時地盤モデルをもとにして、剛体2自由度モデルや、基礎・地盤系FEMモデルを用いて、基礎と地盤の動的相互作用を考慮した動的解析によった³⁵⁾。

c) 主要諸元の決定

i) アンカレイジ

アンカレイジ躯体の設計は、瀬戸大橋までの手法を踏襲した^{5), 6)}。主ケーブルの定着は、引張材直接方式とし、背部定着面積を広くとる必要から、その方向をケーブルストランドの方向に一致させた放射型とする。躯体部分は寸法が大きく、景観に占める割合が大きいためデザインを考慮した外部形状を選定する。基礎は、1Aと4Aとで支持層と根入れ深さが異なり施工法が違うが、構造的にはともに剛体直接基礎である。

① 1A基礎寸法と安定

基礎底面は、比較的均質で安定した神戸層の砂岩層を支持層に選びTP-62mとした。基礎は円形・中実構造とし、その上端と底部をRC構造の頂版と底版で補強した。外径は、安定上躯体を後方に偏心して張り出し85mとした。

中実部は、躯体支持面が全面圧縮で、基礎底面反力も地震時に後方でわずかに浮き上がる程度であり、全体が圧縮応力下にある。コンクリートの施工にはRCD工法を採用したが、RCDは貧配合のため水和熱が少なく、温度による引張応力は底部周辺のRC構造部内にとどまる。

基礎の安定状況は、地震時支持安全率が2.6(≥2.0)である。ちなみに、最大地盤反力度は、常時で220tf/m²、地震時で340tf/m²であり、基礎地盤の神戸層の降伏荷重(長期)は、砂岩系で500~1000tf/m²、泥岩系で250~400tf/m²である。

② 4A基礎寸法と安定

基礎寸法は構造寸法で決まり、支持層は堅硬な花崗岩であり、地震時の基礎重心点の応答加速度310galによる滑動が厳しく、このときの安全率は、段切りを単一斜面とした場合で1.4(≥1.2)である。

ii) 主塔基礎

主塔基礎の平面形状は、前述のとおり円形とし、その構造寸法は、設置誤差に対する余裕を含めて直径78mである。

構造は、塔柱基部など引張応力が生ずる部分は、気中施工のRC構造とした。水中コンクリート部の温度履歴は打設回数が多いためきわめて複雑なものとなるが、鉛直方向荷重が卓越しほとんど圧縮応力下にある。

① 2P基礎寸法と安定

基礎底面は、明石層中で、孔内載荷試験値やS波速度が安定し、礫分が多くなるTP-60mとした。根入れ深さは平均15m程度であり、基礎周辺の事前掘削跡は洗掘防止用捨石で埋め戻す。

基礎直径は、3Pに比較し基礎底面が少し深く、半固結の砂礫層を支持層とすることを重視して80mとした。安定状況を最大地盤反力度でみると、常時で170tf/m²、地震時で280tf/m²である。当砂礫層の長期荷重に対する降伏荷重は200~300tf/m²である。明石層の変形については、別途、特性を考慮した基礎・地盤系の変位解析³⁷⁾を行い問題のないことを確認している。

② 3P基礎寸法と安定

神戸層上面は10~15°程度の傾斜をもち、最上層は割離性に富んだ有機質泥岩が分布するので、これを除いたTP-57mを基礎底面とした。事前掘削跡は、支持層の防護やモルタル漏洩防止のため舞子側と同様に捨石で埋め戻す。基礎直径はきわめて良く締まった神戸層砂岩系層を支持層とするので構造寸法から決まる78mとした。安定状況は、最大地盤反力度が常時で160tf/m²、地震時で380tf/m²である。

③ 鋼製ケーソン

鋼製ケーソンは外周部を12m幅の二重壁とし、バルクヘッドで仕切り、この部分で浮力を得る構造とした。総体に単純な形状とし、既往最大の南備讃瀬戸大橋の南側アンカレイジに用いた鋼製ケーソン(プレパックドコンクリート打設)と比較して、容積は1.2~1.4倍と大きくなるが単位容積当たりの鋼重は70%程度(約50kgf)に納まった。

④ 船舶衝突対策

明石海峡を通航する巨大船(長さ200m以上の船舶)は水先案内人を乗船させるなど航法上特別な扱いとされる。主塔基礎への衝突はきわめて少ないと思われるが、万一に備え、衝突時の安定照査をしており、また船首乗揚げによる塔柱の損傷防止対策を施す。

7. まとめ

明石海峡大橋は中央支間長1990mの世界最大の吊橋である。本論文は最初、その調査が具体的に始められた1959年から、工事が着工になった1988年までの調査の

経過を詳細に説明している。その内容は、長大吊橋の基礎計画を取りまとめるための調査手法を具体的に提案するものである。次いで土木学会の技術調査委員会がとりあげた基礎工法を中心に一連の施工調査から基礎工法を設置ケーソン工法として取りまとめている。この結論は現時点において強潮流下、水深50~70mの地点に海中基礎を建設する手法を総括したものと見える。

8. おわりに

明石海峡架橋構想に始まる調査は、具体的な吊橋計画の立案までに30余年の歳月を数える。この間、わが国は社会、経済が進展し、橋梁をとりまく技術もまた著しい進歩を遂げた。明石海峡という、下部工建設に立ちはだかるいささか酷な条件に対し、関係者が打って一丸となり、先端の技術を取り入れつつ1つ1つ独自に解決をはかる努力を重ねてきた。一方上部工の世界では2000m級吊橋を可能にし、その橋梁案を採用することによって両岸埋立地にアンカレイジを配し、主塔基礎を2基海中に建設する、洗練された吊橋計画に実を結ぶことになったと思う。下部工事は現在、最盛期を迎える段階にあり、今後も大方のご支援を得て無事完遂することを念願している。

明石海峡架橋調査費を上程した神戸市議会で「人生すべからく夢なくてはかないません」と答弁された当時の神戸市長 故・原口忠次郎氏の言葉は、今実現しつつある。この経験は今後の長大橋の建設にまた新しい展望を約束するものと思う。

おわりにあたり長期にわたる調査にご従事された土木学会、土質工学会、建設省ならびに日本道路公団をはじめ関係各位に厚く敬意を表するとともに、工事に関係する本州四国連絡橋公団、ならびに同公団職員を代表してこの論文を発表する機会を与えて下さったことに心から感謝いたします。

なお、最後に、この論文をまとめるにあたり、本州四国連絡橋公団の職員各位、なかでも飯島武明、山田勝彦、山縣 守の三氏には特にお世話になったことを申し添えます。

参考文献

- 土木学会・本州四国連絡橋技術調査委員会：本州四国連絡橋技術調査報告書，1967年7月。
- 建設省道路局・近畿地方建設局：本州四国連絡道路調査概要報告書（上・下巻），1970年3月。
- 建設省土木研究所：本州四国連絡橋試験調査報告書，1972年4月。
- 山根 孟：明石海峡大橋建設の意義，高速道路と自動車，第29巻，第8号，1986年8月。
- 本州四国連絡橋公団：瀬戸大橋工事誌，1988年10月。
- 本州四国連絡橋公団：大鳴門橋工事誌，1987年3月。
- 吉田 巖・吉中竜之進：明石層および神戸層の工学的性質について，土木研究所報告，1966年10月。
- 高橋幸蔵・杉田 楽：本州四国連絡橋海底地盤（明石海峡）の調査について，土と基礎，1972年9月。
- 高橋幸蔵・有田 稔：神戸層載荷試験，本四技報，Vol. 2, No. 5, 1978年7月。
- Takahashi, K., Miyajima, K., Kashima, S., Yamamoto, N., Yamagata, M. and Aizawa, R. : Investigation of Bearing Capacity of Foundation Ground of Honshu-Shikoku Bridge, 第9回国際土質基礎工学会議。
- 堆積軟岩の工学的性質とその応用編集委員会：堆積軟岩の工学的性質とその応用，土質工学ライブラリー30，土質工学会，1987年5月。
- Yoshida, I., Kashima, S. and Yamagata, M. : Foundations for Honshu-Shikoku bridges, 地盤計測国際シンポジウム，1987.4.
- 山縣 守・鈴木幹啓・藤原武夫：明石海峡におけるサンプリング，地質と調査，第2号，1987年。
- 山田勝彦：海中工事における潮流条件の設定，本四技報，Vol. 4, No. 12, 1980年4月。
- 山縣 守・神崎 正：高度システム化による本四明石海峡大橋建設海域の調査，土木学会誌，1985年9月。
- 岡田哲夫・山田勝彦：明石海峡の現地洗掘調査，橋梁と基礎，1976年1月。
- 中川博次・鈴木幸一：潮流による橋脚周辺部の洗掘特性に関する研究，第22回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 21~27, 1975年11月。
- 高澤 勤・阿部明弘・伊藤進一郎：海中橋梁基礎の洗掘防止対策，第41回建設省技術研究会論文集，1987年10月。
- Kitagawa, M., Yamagata, M. and Imai, K. : New Scour Protection Methods for Large Gravity Ocean Structures under Strong Tidal Current, 第1回アジア構造工学建設国際会議，1986.1.
- 山田勝彦・新田篤志・二宮仁司：低発熱コンクリート，本四技報，Vol. 14, No. 54, 1990年4月。
- 神 弘夫：舞子沖地質調査（その1, 2, 3），本四技報，Vol. 3, 5, 7, No. 10, 17, 23, 1979年10月，1981年7月，1983年1月。
- 岩屋勝司・土田 宝・植村和宏：明石海峡大橋主塔基礎施工調査，本四技報，Vol. 9, No. 34, 1985年7月。
- 富樫凱一：わが国における長径間吊橋の計画に関する研究，土木学会論文集，第397号/VI-9, 1988年9月。
- 神戸市企画局調査部：明石架橋資料・海外長大吊橋の基礎工事，調査月報，1965年9月~1969年12月より抜粋。
- 相良正次：海中橋脚の諸問題，土木学会水理委員会，1973年度水工学に関する夏季研修会講義集（水工学シリーズ73-B-9），1973年8月。
- 多田浩彦：多柱式基礎の構造特性，橋梁と基礎，1972年9月。
- 電力土木技術協会編：電力施設地下構造物の設計と施工；Ⅲ編，火力原子力発電所の地下工事2章 燃料地下貯槽（LNG地下式貯槽），1986年3月。
- 加島 聡・高澤 勤・阿部明弘・今井貫爾：強潮流下に

- おける大型構造物の建設に当たっての事前掘削の効果に関する実験的研究, 第13回海洋開発論文集, 1988年11月.
- 29) 吉田 巖: 基礎工, 土木学会, 昭和63年度全国大会本四連絡橋開通記念, 特別連続記念講義集, 2, pp.77~111, 1989年1月.
- 30) 坂本光重・藤原洋一・広田昭次: 明石海峡大橋鋼ケーソン沈設設備, 本四技報, Vol.14, No.53, 1990年1月.
- 31) 北川 信・今井貫爾・利穂吉広: 構造物の吃水および潮流迎角が抗力係数に及ぼす影響, 第40回土木学会年次学術講演会, 1985年9月.
- 32) 加島 聡・坂本光重: 特集・水中コンクリートの現状, 本州四国連絡橋における諸事例, コンクリート工学, Vol.28, No.3, 1990年3月.
- 33) 本州四国連絡橋に関する調査試験: 土木研究所受託研究報告, 1973~1989.
- 34) 本州四国連絡橋基礎の地盤と支持力に関する調査研究報告書: 土質工学会, 1972~1974.
- 35) 土木学会・本州四国連絡橋耐震・基礎に関する調査研究小委員会: 本州四国連絡橋の耐震・基礎に関する調査研究報告書, [付属資料] 明石海峡大橋設計要領(案), 1988年3月.
- 36) 保田雅彦・鈴木幹啓・樋口康三: 明石海峡大橋主塔基礎の設計(第一報), 本四技報, Vol.13, No.52, 1989年10月.
- 37) 龍岡文夫・山田勝彦・真鍋 進: 大型橋梁基礎の地震時変位の予測, 第25回土質工学研究発表会(岡山), 1990年6月.

(1990.5.17・受付)