

## 橋梁基礎の海中工事 (南北備讃瀬戸大橋の海中基礎)

UNDERSEA CONSTRUCTION WORKS OF BRIDGE  
FOUNDATION (CONSTRUCTION OF SOUTH  
AND NORTH BIKAN-SETO BRIDGE)

杉 田 秀 夫\*

By Hideo SUGITA

## まえがき

本州四国連絡橋児島一坂出ルートでは、現在、海峡部約 10 km の間に、吊橋、斜張橋、連続トラス橋等、種々の形式の長大橋梁が建設されているが、このうちの十数基の橋脚の基礎が海中に設けられた。

なかでも、備讃瀬戸南および北航路を横断する中央スパン 1100 m, 990 m の 2 連の吊橋、南北備讃瀬戸大橋の海中基礎は、基礎底面の最深は海面下 50 m に及び、施工規模が格段に大きいため、その工期は、ルート全体のクリティカルパスとなった。また、工事海域は航路に近接し、周辺は好漁場である。航行船舶や漁労に対する影響を最小に止めるためにも、工期の短縮は甚だ効果的である。このため海中基礎の施工には、確実性、安全性に加えて迅速性が強く要求されたのである。

海中基礎は、すべて事前掘削によるケーソン工法で施工された。施工手順は、図-1 に示す通りであるが、まず海底掘削により、堆積層および風化岩層を除去して、基礎底面となる岩盤を確実に露出させるのである。次に掘削底面を所要の精度で仕上げ、ケーソンの据え付けにそなえる。一方、ケーソンは、海中基礎の全形を一体の

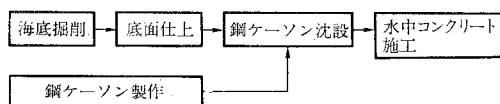


図-1 施工順序図

鋼ケーソンとして、造船ドックで製作する。この鋼ケーソンの製作は、現地の海底掘削とは独立に、並行して行われる。完成したケーソンは、現地に運び、基礎底面に沈設する。沈設した鋼ケーソン内に、プレパックドコンクリート工法により、水中コンクリートを施工して海中基礎が完成するのである。

原理的には甚だ単純な工法であるが、土木工事はもちろん原理だけで成立つわけではない。きびしい条件下での大規模施工は、高い水準の様々な施工技術や施工機器を背景として、はじめて可能となったのである。

南北備讃瀬戸大橋の海中基礎の施工条件、施工規模、施工内容等の具体的事実は表-1 に譲り、以下ではこの海中工事において課題であった事項のうち、紙数の許す範囲でいくつかを取りあげ、何が問題であったか、あるいは何故そうしたのかについて触れてみたい

## 1. 海底の岩盤はどのように掘削したか

海底の岩盤は花崗岩であるが、表面から 5~15 m の厚さの部分は風化が進んでおり、良好な基礎底面を得るために掘削除去すべき岩盤は、表-1 に示すようになんかなり大量であった。このため、大水深、あるいは急潮流下で大量の岩盤を最短期で掘削するには、いかなる施工法をとるべきかが重要な課題であった。海底の岩盤を確実に、かつ能率よく掘削するためには、あらかじめ岩盤を破碎しておく必要がある。そして海底の岩盤の破碎には、水中発破が最も確実で、効率のよい方法である。

水中発破は、海外では、航路浚渫を始め多くの海底岩盤掘削工事に用いられてきた普遍的工法であるが、わが

\* 正会員 (財) 海洋架橋調査会 常務理事 (元本州四国連絡橋公団設計部長)

(〒105/東京都港区虎ノ門 4-3-20 第22 森ビル)

表-1 南北備讃瀬戸大橋海中基礎施工概要

| 海中基礎名称       |                                | 北備讃瀬戸大橋(中央スパン 990 m) |                     |                     | 南備讃瀬戸大橋(中央スパン 1100 m) |                 |                 |      |
|--------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------|
|              |                                | 2 P<br>(主塔)          | 3 P<br>(主塔)         | 4 A<br>(アンカレッジ)     | 5 P<br>(主塔)           | 6 P<br>(主塔)     | 7 A<br>(アンカレッジ) |      |
| 平面寸法 (m)     |                                | 23×57                | 23×57               | 57×62               | 27×59                 | 38×59           | 75×59           |      |
| 底面深度 (TP. m) |                                | -10                  | -10                 | -10                 | -32                   | -50             | -50             |      |
| 原海底水深 (m)    |                                | 0~8                  | 0~5                 | 0~5                 | 22~25                 | 33~35           | 14~22           |      |
| 潮流速 (ノット)    |                                | 3                    | 5                   | 5                   | 5                     | 3               | 2               |      |
| 海底掘削         | 掘削数量<br>(1000 m <sup>3</sup> ) | 堆積層                  | —                   | —                   | —                     | 78              | 519             |      |
|              |                                | 岩盤                   | 16                  | 37                  | 54                    | 32              | 44              | 79   |
|              | 水中発破爆薬量 (t)                    | —                    | 23.5                | 41.5                | 12.1                  | 16.3            | 36.0            |      |
|              | 装薬孔数 (本)                       | —                    | 663                 | 1189                | 504                   | 768             | 1632            |      |
|              | 発破回数 (回)                       | —                    | 15                  | 19                  | 8                     | 21              | 32              |      |
|              | 1発破の爆薬量<br>(kg)                | 最大                   | —                   | 2240                | 3000                  | 2016            | 1080            | 1440 |
|              |                                | 最小                   | —                   | 672                 | 720                   | 480             | 360             | 960  |
|              | 穿孔機                            | —                    | OD 3台               | OD 3台               | OD 4台                 | ウエルマン6台         | ウエルマン6台         |      |
|              | 穿孔作業台                          | —                    | ミニセップ「たいせい」<br>躍進2号 | ミニセップ「たいせい」<br>躍進2号 | SEP「盤石」               | SEP「たまの」        | SEP「たまの」        |      |
|              | ロックブレイカー                       | NM-BSP 1100          | —                   | —                   | —                     | —               | —               |      |
| グラブ船         | 第10西部号                         | 第八閘門号                | 第八閘門号               | 第八閘門号               | 三友1号<br>第八閘門号         | 三友1号<br>第八閘門号   |                 |      |
| 底面仕上         | 施工数量 (m <sup>2</sup> )         | 1827                 | 1885                | 4284                | 2366                  | 2752            | 5120            |      |
|              | 施工方法                           | 潜水作業によるエアリフト         |                     |                     | 回転式掘削機 MD 250 による切削   |                 |                 |      |
|              | 作業台                            | 寄神 SEP-1号            | ミニセップ「たいせい」         | ミニセップ「たいせい」         | SEP「盤石」               | SEP「盤石」         | SEP「盤石」         |      |
| 潜水支援船        |                                | —                    | —                   | —                   | シートピア                 | シートピア           | シートピア 深竜        |      |
| 鋼ケーソン        | 寸法 (m)                         | 23×57×13             | 23×57×13            | 57×62×13            | 27×59×37              | 38×59×55        | 75×59×55        |      |
|              | 鋼重 (t)                         | 739                  | 739                 | 1625                | 4125                  | 8732            | 17798           |      |
|              | 構造                             | 一重壁                  |                     |                     | 二重壁(フローティングケーソン)      |                 |                 |      |
|              | 沈設方法                           | クレーン船による吊り降し         |                     |                     | 注水洗降・クレーン船による着底       |                 |                 |      |
|              | クレーン船                          | 日神号<br>(1300 t吊)     | 日神号<br>(1300 t吊)    | 武蔵<br>(3000 t吊)     | 武蔵<br>(3000 t吊)       | 武蔵<br>(3000 t吊) | 武蔵<br>(3000 t吊) |      |
| プレバケットコンクリート | 粗骨材数量 (m <sup>3</sup> )        | 13430                | 13101               | 37156               | 48881                 | 115188          | 230349          |      |
|              | 投入期間 (日)                       | 57                   | 41                  | 57                  | 62                    | 83              | 114             |      |
|              | モルタル注入量 (m <sup>3</sup> )      | 6296                 | 5955                | 17326               | 22866                 | 55947           | 109148          |      |
|              | 注入区画数                          | 1                    | 1                   | 3                   | 2                     | 3               | 7               |      |
|              | 平均注入速度 (m <sup>3</sup> /h)     | 217                  | 157                 | 195                 | 148                   | 232             | 221             |      |

国ではほとんど用いられることがなかった。漁業補償というわが国独特の事情によるものである。

このためわが国の海底岩盤掘削では、水中発破を用いずに、いかに岩盤を砕くかに苦心が払われてきたのである。例えば、重錘落下あるいはロックブレイカーによる砕岩である。しかし、これらの方法による砕岩は、せいぜい1層1m程度までであって、岩盤の厚い場合には砕岩と浚渫を交互に果てしなく繰り返す非能率的施工を余儀なくされるのである。また、大水深、急潮流下では、施工の確実性と能率はほとんど期待できない。

一方、これらの砕岩工法の限界を補うべく、グラブ船の掘削性能を強力化する研究開発がすすめられ、閘門海

峡や備讃瀬戸の航路浚渫等において、岩盤掘削の実績をあげるようになった。

本州四国連絡橋公団(以下、本四公団という)では、昭和48年に2P地点において、当時最強のグラブ船第八閘門号(DE 2300 PS, グラブバケット重量90t)を用いて試験掘削を行い、風化花崗岩に対する掘削性能を調査した。

その結果、かなりの硬岩でもグラブバケットの爪が掛かるだけのクラックがありさえすれば、容易に掘削できることがわかった。すなわち、この大型グラブ船で掘削する限りは、岩盤を細かく砕く必要はなく、適当なクラックが入れば十分なのである。

しかし、掘削底面まで一挙に能率よくクラックを入れ

ようとすれば、現在の技術水準ではやはり水中発破によらざるを得ない。このため海底の岩盤掘削は、強力な掘削性能を有する大型グラブ船と水中発破の組合せで施工することとしたのである。

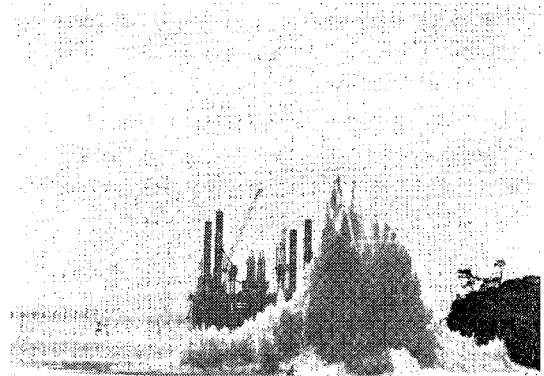
水中発破は、爆発のエネルギーを岩盤の破砕に最も効果的に利用し、かつ周辺への影響を軽減するために、すべて穿孔装薬発破（内部装薬発破）とした。さらに堆積層の有無、風化岩の厚さの大小にかかわらず、最初に掘削底面まで一挙に発破をかけておき、基礎全面の発破完了後にまとめてグラブ船で掘削するという施工計画とした。

原海底面から掘削底面まで穿孔装薬して発破をかけるということは、海底の岩盤が比較的薄い場合には1自由面発破になるが、風化岩が厚くさらにその上に堆積層のあるような場合には無自由面発破になる。表—1の7Aの例は、その典型である。岩盤の破砕効果という点にのみ着目すれば、陸上の発破と同様に1自由面発破よりは2自由面発破（ベンチカット）の方が有利である。また1自由面発破であっても、グラブ掘削の可能な範囲の岩盤や堆積層はあらかじめ除去し、最小抵抗線の長さを極力小さくして発破をかける方が破砕効果は当然すぐれる。

しかし、2自由面発破では、1回の発破ごとに次の発破のための自由面形成にグラブ船の投入を必要とし、発破とグラブ掘削を交互に繰り返すため工程を複雑化し、施工機器の運用に無駄を生じる。1自由面発破の場合でも、発破の前にグラブ掘削を入れようとすると工程の複雑化は避けられないし、そもそも発破をかけない岩盤をどこまでグラブ掘削できるかは相手次第、やってみなければわからないのである。これでは工程計画は立てられない。

これに対して無自由面発破では、発破とグラブ掘削の両工種は明確に分離される。発破は、海底掘削工程の前段に集約して遅滞なく遂行され、グラブ掘削は、発破施工後の岩盤に対して行われるから確実な工期が保証されるのである。大型の施工機器や作業船を駆使する大規模海中工事においては、工程の停滞は工期のみならず工費の面でも甚だしく損失を招く。海底掘削の工程を単純化し、かつ停滞を生じさせないということは、施工計画上きわめて重要である。一方、無自由面発破によって所要の砕岩効果を得るためには、装薬間隔と装薬量を適切に選定する必要がある。

本四公団では、水中発破の諸問題を解明するために、学界、産業界の協力を得て、昭和46年以来10年にわたって調査研究をすすめてきたのであるが、その一環として電子計算機によって発破に伴う諸現象のシミュレーションを行う手法が開発され、岩盤の破壊状況あるいは水中圧力波、地



写真—1 水中発破（4A）

盤振動の強さや伝播の状態を予測することが可能になった。

この手法により、爆薬量、岩盤の性質、岩盤の厚さ、堆積層の有無等、条件を種々組合せて、岩盤の破壊状況のシミュレーションを行った結果を基礎にして、装薬間隔および装薬量を定めたのである。

発破直後の海底面は、表—1の3Pあるいは4Aのように、1自由面発破に近い発破の場合には、原形を止めない程激しく地形が変化するが、典型的無自由面発破である7Aあるいは6Pにおいては、せいぜい装薬孔近傍に陥没を生ずる程度であって、地形の変化は認められない。発破条件が両者の中間にある5Pの場合は、海底地形も中位の変状を示している。5Pの発破直後の海底の状況の一例を図—2に示す。約40分の憩流時に筆者が潜水観察を行ってスケッチしたものである。

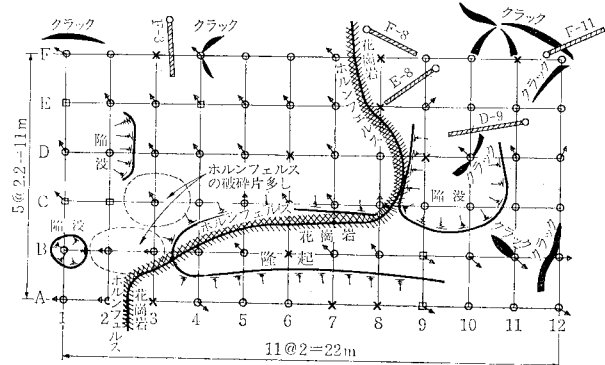
このように、発破後の海底面の状況にはかなり差異があるけれど、いずれの地点においても発破後の岩盤は、大型グラブ船によって確実に、かつ容易に掘削すること

5P③ブロック

発破日：昭和54年3月28日  
 装薬量：28kg×72本=2016kg

凡例

- ：原位置に残存する起爆索子
- ：矢印は索子の傾斜の方向を示す
- ◻：残存するが大きく抜出した索子
- ×：原位置に残存しない索子
- ▨：飛出したカートリッジ（番号は原位置）



図—2 発破直後の海底の状況

ができて、無自由面発破による破碎効果が証明された。

海底掘削工事において、発破は目的ではなく手段の一つである。最も効果的な発破をかけることはもちろん大切であるが、それ以上に工事全体を最も有利に運べるように発破の役目を定めるべきである。それが、無自由面発破工法であった。そして、電算機による発破のシミュレーション手法と強力な大型グラブ船が背景にあったから無自由面発破工法が成立したのである。

## 2. 水中発破は果して有害であるか

水中発破と云えば、爆雷による潜水艦攻撃に代表されるような誇大な被害が連想されがちである。しかし、爆発のエネルギーを利用する点においては同じであっても、水中発破と爆雷攻撃では、その目的と方法を異にするから当然効果には差を生ずるのである。

爆雷の場合は、爆薬を完全に水中で爆発させて、爆発のエネルギーを効率よく水中衝撃波に換え、潜水艦をも沈めようとするのである。一方、水中発破は、爆発のエネルギーを岩盤の破碎に最も効果的に利用しようとするものであり、そのために穿孔装薬発破とするのである。

穿孔装薬発破の場合は、爆発によって装薬の周囲の岩盤内に発生した強力な応力波が、岩盤と水との境界面に達し、圧力波として水中に放出される。したがって、この水中圧力波は、単に爆薬量だけでなく、岩盤中の装薬の状態、岩盤の性質、水深、海底地形等の影響を受けて、複雑な伝播の状況を呈するが、いずれにしても、伝播に伴う圧力の減衰は、完全な水中爆発の場合に較べて著しく大きい。一例として、3P および 4A 地点の水中発破工事における水中圧力波の実測結果を整理してピーク圧の減衰を求め、爆薬量 3t に対して図示すると図-3 のようになる。図-3 には、同じ 3t の爆薬を爆雷のように集中装薬して完全な水中爆発をさせたときのピーク圧の減衰を、Kirkwood-Brinkley の式によって求めたものも併せて示してある。

本四公団では、魚類の水中圧力波に対する耐限度を把

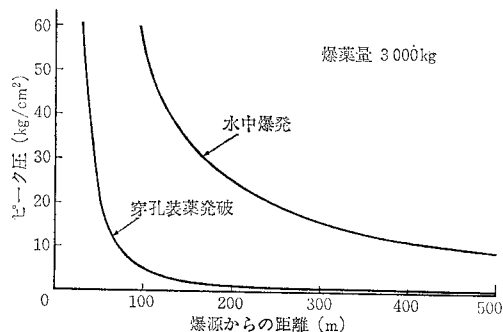


図-3 水中圧力波の減衰

握するために、長年にわたって種々の調査研究を行ってきたのであるが、その総決算として昭和 50 年に 4A および 7A 地点で、実工事規模の水中発破の試験工事を実施した。この試験工事では、爆源から 1000 m までの種々の距離の海中に、イクス網に入れた総計 1000 尾余の生魚を圧力計とともに配置して、最大 1.5 t までの種々の爆薬量に対して、水中圧力波が魚に及ぼす影響を調査したのである。その結果、魚への影響は魚の種類や受圧方向によって差はあるけれど、ピーク圧が 2 kg/cm<sup>2</sup> 程度以下であれば、非常に弱い魚に対しても損傷は与えないことがわかった。

この試験工事の結果と併せて、さきに述べたシミュレーション手法により発破地点ごとに異なる諸条件を入力して求めた水中圧力波の予測値を検討の上、水中発破の環境保全目標として、魚類に顕著な影響を生ずる範囲は最大でも 500 m 以内とすることを定め、漁業関係者の同意を得たのである。

船舶に対する水中圧力波の影響は、船舶の材質、構造、寸法等によって異なるが、魚類より脆弱な船舶はまずないと考えられるので、魚類に準じて保安距離を 500 m に設定した。爆源から 500 m 以内に航行船舶がないときに限り起爆するわけである。

この保安距離 500 m 以内の海面は、SEP (self-elevating platform, 移動式海上作業台) や作業船等の運用上必要な工事区域とたまたま一致していて諸事好都合であった。

実際の工事では、1 発破の最大爆薬量は、表-1 に示すように、4A 地点の 3t である。図-3 によれば、爆源から 200 m も離れればピーク圧は 2 kg/cm<sup>2</sup> 以下となり、500 m 地点では 1 kg/cm<sup>2</sup> を下まわる。

一方、水中圧力波のピーク圧は、ほぼ爆薬量の 2/3 乗に比例するので、いま仮に、4A 地点の計 19 回の発破で用いた総爆薬量 41.5 t を 1 回で起爆させたとしても、500 m 地点におけるピーク圧は、なお 2 kg/cm<sup>2</sup> を下まわるのである。水中圧力波の距離減衰はきわめて大きいから、ある程度以上の距離さえ保てば、魚類に対する影響は爆薬量の増加に鈍感である。したがって発破の総量が一定であれば、施工方法や施工設備の許す限り、1 発破の爆薬量をできるだけ多くし、発破の回数を減らす方が発破による被害の総量を却って少なくするといえよう。

水中発破では、水中圧力波よりも地盤振動の方が重大な問題になることがある。最も著しい例が 7A である。最大の海中基礎 7A は、海峽部工事のクリティカルパスであるため、極力 1 発破の爆薬量を多くして発破回数を減じ、工期短縮を図る必要があったが、あいにく 7A 地点は臨海工業地帯に近接し、至近 430 m に石油精製プラントがあった(写真-2 参照)。このため発破による地盤振動の影響によって 1 発破の爆薬量には甚だきび

しい制約を受けることになったのである。

石油精製プラントには、自動制御装置があって、プラント各部で常時定量的に検出される情報によってフィードバック制御を行うようになっている。ところが、情報を検出して制御装置に伝送するまでの間は、きわめて低いエネルギーレベルですむので、比較的小さい地盤振動によっても容易に誤信号を発生し、制御装置に誤操作をさせ、正常な状態にあるプラントに異常を生じさせることになるのである。

7A 地点で実施した水中発破の試験工事では、爆薬量わずか 180 kg で誤信号を発生させている。このときの地盤振動の変位速度は、プラント内の至近距離 430 m の地点において 3 cm/s であった。そこで、1 発破の爆薬量として 1~1.4 t を維持しながら地盤振動を軽減するために、斉発爆薬量 80~120 kg で 12 段の段階発破を行うこととしたのである。試験工事の計測結果から 1 段の発破による地盤振動の継続時間が 0.5~0.6 秒程度であることが明らかにされたので、各段の振動波形を完全に分離させるため段発の間隔は 1 秒とした。そしてタイマー付大容量発破器により各段の電気雷管に 1 秒おきに通電して、正確に 12 段の秒差段発を実施したのである。

水中発破の影響は、皆無にはできない。しかし、影響を正確に予測し、対象の恕限度を正確に把握した上で、影響を恕限度内に抑え込む工夫があれば、決して有害とはならないのである。構造物や機械、あるいは魚は、神のごとく正直であるから、恕限度を守る限りは無事である。ところが、人間に対しては、恕限度は限りなく幅がある。感覚よりも感情が優先するからである。

石油精製プラントの技術者には、影響を定量的に認識する合理性があったからきわめて困難な発破をも可能としたのであるが、島根部の民家に近接する発破地点では、言うに言われぬ苦勞があったのである。

### 3. 底面仕上げとは何か

水中発破とグラフ掘削により風化岩の除去された海底面は、最大で  $\pm 0.5$  m の凹凸があり、凹部には細礫と岩片が残留している。

残留する細礫は、基礎底面の地質の判定の障害となり、かつコンクリートと岩盤の密着を阻害する。したがって細礫は除去して、岩盤を露出させる必要がある。

また、ケーソン刃口部の岩盤の凹凸は、ケーソン沈設時に障害となり、あるいはモルタル注入時に漏洩を生じる原因となる。したがって凹凸の整正ないしは何らかの処理を必要とするのである。この底面仕上げの施工は、水深に応じて方法を異にする。

まず水深の浅い 2P、3P および 4A においては、潜

水作業でエアリフトにより残礫を除去し、凹凸を残したまま岩盤面を露出させる。次にケーソン沈設に支障しない適当な高さに頂面を揃えたコンクリート台座を、潜水作業で海底に構築する。ケーソンをこの台座の上に設置した後、ケーソン刃口と海底面との隙間を、あらかじめ刃口に取り付けてある布袋にモルタルを注入することによって塞ぎ、追って施工するプレパックドコンクリートのモルタルの漏洩を防止するのである。

以上の施工は、潜水作業に依存する所がきわめて大きいのであるが、10 m 程度の水深下の作業であるから、確実に、安全に、かつ容易に行うことができる。このため底面の凹凸は整正を要しなかったのである。

一方、水深の深い 5P、6P および 7A では、作業効率や労働安全衛生上の制約から、潜水作業に依存する底面仕上げは困難となる。海中無人を原則とする機械施工とせざるを得ない。

機械には雲の細かい作業は期待できない。凹凸のある底面の残礫をエアリフトで除去する作業は、ダイバーが目視で狙って筒先を操作するから完全に行えるのである。エアリフトの筒先からの吸込可能深さはほぼ管径に等しいから、底面の凹凸に合わせて筒先を上下させる必要があるし、礫の有無に応じて筒先を移動させなければならないが、機械ではそんな器用な真似はできない。施工中の海底の状況が把握できない海面上で、機械を遠隔操作して複雑な凹凸の底面の残礫を除去する最も確実な方法は、最も機械的な方法である。すなわち、機械の高さを一定に保って、無差別に、残礫もろとも底面の凹凸を削り取り、全体を平坦に仕上げるという方法である。

全面を削るというのは、いかにももったいないように見えるが、大水深には姑息な手段は通用しない。一定の手順の機械的繰り返しで全面をカバーする単純明快な施工の方が、結局は高能率で確実な結果を得るのである。基礎底面を平坦に仕上げれば、ケーソンは直接岩盤上に設置することができる。また刃口部にあらかじめ取り付けられているシールゴムが、ケーソン着底とともに圧縮されて刃口の隙間を塞ぐから、何ら人力を要せずしてモルタル漏洩防止工ができるのである。

底面切削用の機械としては、口径 2.5 m の回転式掘削機 MD 250 を用い、SEP「盤石」に搭載して、プラットフォームの開口部をまたいで走行するブリッジおよびブリッジ上のトロリーによって、平面位置を縦横に移動させながら、潮流に関係なく 24 時間運転で、所定の深度で底面を切削した（写真—2）。

SEP でカバーできる面積は約 230 m<sup>2</sup> であるから、順次 SEP を移設して基礎底面全体に同様の施工を行うのである。最も面積の広い 7A では、SEP を 24 回移設して全面積を仕上げている。

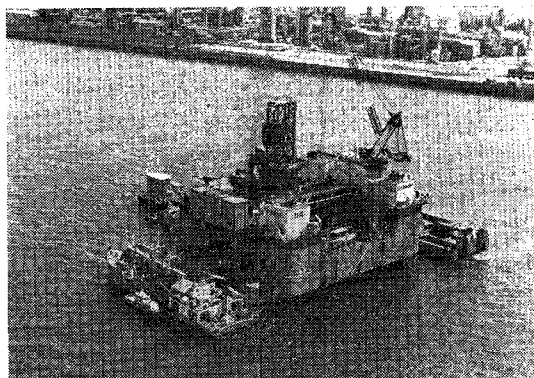


写真-2 底面仕上げ施工状況 (7A)

掘削機のカッターは、ドリルパイプを介して SEP につながっているから、ドリルパイプの長さを計測することにより直接的に切削底面高を管理できる。また SEP の高さは、陸上から精度よく測量できる。このため、SEP の移設にもかかわらず、良好な施工精度が得られた。仕上の完了した底面は、掘削機のガイドパイプの先端に取り付けた超音波測深器を平面移動させながら 25 cm ピッチで計測したのであるが、施工精度はすべて  $\pm 10$  cm 以内であった。

#### 4. 底面の確認はどのように行ったか

底面仕上げを終るとはじめて基礎底面の岩盤が露呈される。しかし水中に露呈された岩盤の確認は厄介である。簡単に見ることができないからである。

これが地上ならば、白日の下に地質は一目瞭然である。さらに必要があれば、岩盤の工学的性質を定量的に把握するための諸試験の実施も容易である。

海底の岩盤を直接見なくとも、底面仕上げ施工中に掘削機からあがる岩礫の観察、あるいは掘削機の掘進速度、スラスト荷重等の分析により、ある程度の岩質の推定はできるが、やはり限界はある。岩盤の亀裂や断層の状態等は見なければわからない。

水中の岩盤を見ることができれば、風化の度合を識別することもほぼ地上並みに可能である。要するに見れば簡単にわかることが、簡単に見ることができないから困るのである。

備讃瀬戸の海中は、季節、潮汐等による差はあるけれど、透明度は甚だ悪い。水温の低い 3 月、小潮期の快晴の日に、水深 50 m の海底で、ライトグレーの 7A ケーソンを照明なしで認識できたこともあるが、これは好条件が重なったからのことである。通常は、陽光は水深 50 m の海底まで届かない。照明がなければ自分の手を目の前に持って来ても見えない程の暗さである。

浮遊物のある水中では、いかに強力な照明を用いても

霧中のヘッドライトのごとく、乱反射によって視界がさえぎられて、条件の余程よい場合で 3 m、通常はせいぜい 1 m 先しか見えない。

水中 TV の場合もカメラを 1 m 以内に接近させなければならぬから、画面に切り取られる範囲が甚だ狭く、複雑で変化に富んだ岩盤のような場合には性状を把握し難い。そこで TV カメラを掘削機のガイドパイプの先端に取り付け、底面から 60~90 cm の一定の高さに保って平面移動させながら全面をくまなく撮影するという方法をとったのであるが、1 回の底面仕上げの範囲 230 m<sup>2</sup> を写し終るのに約 6 時間を要している。それでもなお常時明瞭に見えるという保証はない。また往々にして生ずることであるが、マリンスノー等の浮遊物が沈殿して薄雪のようになるともはや岩盤と粘土の見分けもつかなくなる。TV の画面には常に隔靴搔痒の憾みが残るのである。

海面上にて海底の状況を正確に見るということは、現在の技術水準ではまだ無理なのである。結局は、明確な目的意識とある程度の工学的知識をもつ人間が、潜水して直接対象を肉眼で見、あるいは手で触れて確かめるのが、最も確実に、かつ迅速に海底の情報を得る方法ということにならざるを得ない。

潜水の方法は、大部分は SCUBA 潜水で間に合ったのであるが、6P および 7A のように水深 50 m になると、ごく短時間の潜水を除いて通常の SCUBA 潜水ないしは空気を呼吸する潜水の限界を超える。

それは、まず水深 50 m では 6 気圧の圧縮空気、すなわち地上の 6 倍の密度の空気を呼吸するから呼吸抵抗が甚だ大きくなり、肺換気機能を低下させるためである。

次に、空気の成分の窒素による窒素酔いがある。ちょうど酒に酔ったのと同じ状態におちいり、判断力が鈍ったり、根気を失ったり、極端な場合には失神に至ることもあるが、水深 50 m では必ず罹るといわれている。また、同じく空気の成分の酸素による酸素中毒がある。空気に 21% 含まれる酸素の水深 50 m における分圧は約 1.3 気圧である。この程度では、通常は酸素中毒の心配はないが、それでも長時間になると危険とされている。

さらには潜水効率の問題がある。代表的潜水病である減圧症については、その防止のために潜水深度と潜水時間に応じた減圧時間が規定されているが、潜水深度が深くなるにつれて減圧時間は加速度的に増える。たとえば水深 30 m では、1 時間の潜水に対する減圧時間は約 50 分であるが、水深 50 m では、4 時間 40 分を要する。このように、水深が深くなると甚だ効率の悪い潜水を余儀なくされるのである。

以上のようなことから、水深 50 m において長時間の潜水を安全確実に行うためには、空気に代えて人工の呼吸ガスを用いる必要がある。このため 6P および 7A

の潜水には、ヘリウム・酸素混合ガスを使用した。窒素をヘリウムに置換えることにより窒素酔いの心配はなくなるし、ヘリウムは甚だ軽い気体であるから呼吸抵抗も小さい。また酸素の混合比を適切に選ぶことにより高压下の酸素中毒も防止できる。混合比をヘリウム 83%、酸素 17% とすれば、大気圧下で呼吸しても酸素が 16% を上まわっているから酸素欠のおそれはないし、水深 50 m で長時間呼吸しても酸素の分圧がほぼ 1 気圧であるから酸素中毒のおそれなくなる。

しかし混合ガス潜水には、減圧表や潜水支援システム等ソフト、ハード両面の高度な潜水技術が必要とされる。現在の世界の潜水技術の水準はきわめて高く、北海の海底油田では水深 150 m で日常的に潜水が行われており、水深 300 m の潜水もすでに実用の域にあると言われている。

わが国では、海底油田のような大深度潜水の常時の需要がなかったため、混合ガス潜水技術は立ち遅れていたのであるが、海洋科学技術センターにおいてシートピア潜水システムが開発され、昭和 50 年には 100 m 潜水を成就させるに至った。幸いなことに、7A で混合ガス潜水を必要とする 5 年前であった。

本四公団では、海洋科学技術センターの協力を得て、このシートピア潜水システムで混合ガス潜水を実施する計画を立て、昭和 51 年からセンターに委託して、潜水システムの工事海域における運用の研究と公団職員の混合ガス潜水研修を開始した。そして、これらの研究および研修の総括として、昭和 54 年から 55 年にかけて、工事の先行する 5P において、シートピア潜水システムによる底面確認を実施し、工事海域における実戦的運用方法を確立したのである。

水深 50 m の 7A の基礎底面の確認は、この潜水システムにより、昭和 56 年から 57 年にかけて実施した。写真—2 には、底面仕上げ施工中の SEP「盤石」の左方に繫留した潜水支援母船「シートピア」（排水量 650 t）が見える。

母船「シートピア」には、管制中枢、減圧室、水中エレベーター装置、送気・通信・送電・温水・TVライン等が組み込まれている。ダイバーは水中エレベーター装置で母船と海底の間を往復し、水中エレベーターのカプセルは海底の前進基地となる。潜水作業中のダイバーはこのカプセルを経由して母船と送気・通信・保温用温水ラインで結ばれ、潜水支援システムによりバックアップされる。潜水作業が終了すると、直ちにダイバーをカプセルに収容して母船上に揚収し、減圧室にドッキングさせて管制中枢の厳密な管理の下に減圧を行うのである。

潜水による底面の観察は、SEP「盤石」がカバーする面積約 230 m<sup>2</sup> の施工を終了するごとに行い、SEP の移

設に従って同様のことを繰り返して 7A 全面約 5 000 m<sup>2</sup> に及ぶのである。

水深 50 m の海底は暗闇であるから、底面を観察するためには照明が不可欠である。また観察した位置を知るためには座標を必要とする。

230 m<sup>2</sup> の海底を照明するために、SEP から 6 点、合計 30 kW の水中ライトが海底に吊降ろされる。透明度の悪い水中では、これだけの照明によっても余程条件のよい場合で視界 3 m、悪いときには 1 m 先が見えない。このため、ダイバーの携行するヘッドランプによって明るさを補い、顔面を海底に近づけて岩盤面を観察するのである。

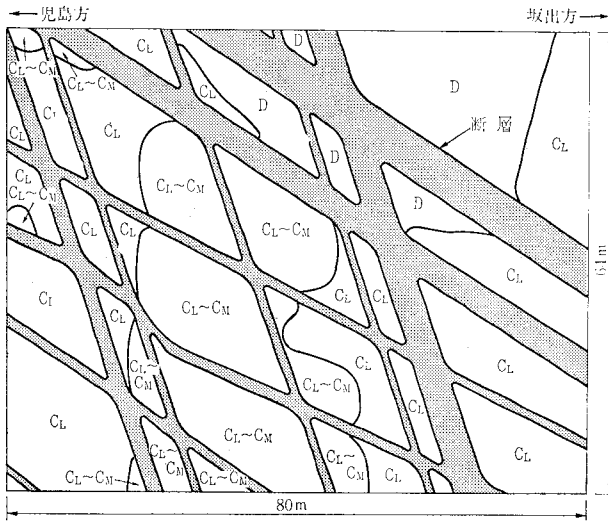
座標は、頑丈なパイプフレームの座標枠に、縦横 1 m 間隔で細いワイヤーを張り、交点に番号を付したものを SEP から吊り降ろして海底に設置する。海底の座標枠は、超音波測深によって SEP との相対位置が把握され、SEP の位置は陸上から測量される。したがって SEP の移設ごとに設けた底面の座標は、すべて設計図上に正確に再現されるのである。ダイバーは、縮尺 1/50 の座標を記したボードを携行し、海底の座標の番号と照合して自分の現在位置を確認し、ボード上の対応する箇所を観察結果を記入する。1 回 230 m<sup>2</sup> を観察するのに要した時間は、平均して約 2 時間であった。これに対する減圧時間は約 3 時間である。ヘリウム・酸素混合ガスを用いることにより、空気潜水に較べて格段に効率のよい潜水を行うことができた。

筆者が 7A 底面で行った合計 35 回、延 75 時間の潜水観察で得た情報から、地質に関するものを整理して図化したのが 図—4 (b) である。一方、図—4 (a) は、事前の地質調査から推定した TP-50 m 面における岩盤の性状である。限られた本数のボーリング調査から得られた点の情報を、地質の専門家の知識と経験で補完して面の情報に再構成したものである。当然精度には限界があるが、断層が著しく発達し、かなり複雑な様相を呈しているため、底面露呈の結果が極端に悪くて何らかの岩盤処理を必要とした場合の、クリティカルパス 7A の工期に及ぼす影響が懸念されたのである。

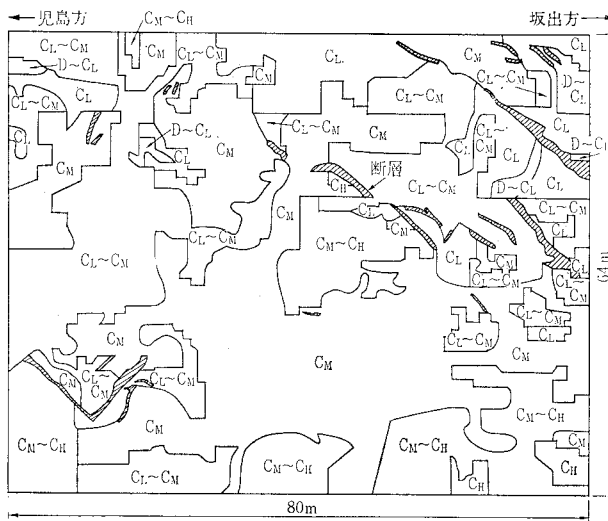
幸いにも、底面観察の結果判明した岩盤は、図—4 (b) に示すように、予想よりはるかに良好であった。

## 5. ケーソンの沈設はどのように行ったか

ケーソンの規模は、表—1 に示す通りであるが、2P、3P および 4A のように水深の浅い地点に設置されるケーソンは、鋼重が軽いので、直接クレーン船で海底まで吊り降ろして据え付けることができる。クレーン船を所定位置に繫留した後、あらかじめ設けてあるガイド杭



(a) ボーリング調査からの推定



(b) 潜水観察結果

図-4 7A 基礎底面地質

を目標に、クレーン船のウインチ操作でケーソンを海底に沈設するのである。現在の大型クレーン船の操船技術をもってすれば、水面上の目標を直接狙う限りは、センチメートルオーダーで位置を調整することは容易である。したがってケーソンの設置精度は、ガイド杭の設置精度に支配されることになるが、水深の浅い場合にはガイド杭を正確に設置することも比較的容易である。

一方、5P、6P および 7A のように、大水深の地点に設置される大型ケーソンは、鋼重が大きいため周壁部を二重壁構造の浮力区画とすることによりフローティングケーソンとし、沈設地点までタグボートで曳航する。

沈設地点においてケーソンを繋留するアンカーラインは、潮流、風、波浪等の外力に対して十分抵抗し得るも

のであると同時に、ケーソンを平面内の所定位置に正確、迅速、円滑に移動させ得る機能が要求される。

ケーソンの位置調整は、円形断面の場合には断面重心を所定位置に合わせるだけですむから比較的容易であるが、矩形断面の場合はわずかの回転によっても端部に大きい偏位を生ずるから、設置精度を確保することが難しくなる。

ケーソンの平面移動は、人間の操作で行う以上は、回転と平行移動を分離して独立に扱わなければ混乱を生じる。このため、アンカーラインの操作によるケーソンの位置調整は、まず所定の方位に対して回転による整正を行い、次に所定の位置に対して平行移動による整正を行う。すなわち、 $\theta \rightarrow X \rightarrow Y$  を繰り返して、目標位置に収斂させるのである。これを迅速かつ円滑に行うためには、アンカーラインは 図-5 に示すように、ケーソンの 4 面に直交する 4 方向に、各 2 本づつ配置するのが最も理想的な形である。これによって回転のための偶力と平行移動のための引張力を、それぞれ独立に作用させ得る。

繋留索は、潮流の条件の最も厳しい 5P ケーソンの外力で決まり、 $\phi 76$  mm のワイヤーロープを使用することになった。ケーソンを繋留するためには、海底のシンカーから引き揚げた連結用ワイヤーロープとケーソンから引き出したワイヤーロープを揚錨船上で連結し、ケーソン上のウインチで巻き込むのであるが、5P ケーソンでは、8本の  $\phi 76$  mm のワイヤーロープの連結に、2 隻の揚錨船を用いて 4 時間を要している。一旦連結してしまうとあとは機械の仕事であるから問題はないが、人力に依存するところが大きく、しかも限られた時間内で遅滞の許されない連結作業においては、取扱うワイヤーロープの径として  $\phi 76$  mm は限界に近いと思われる。

$\phi 76$  mm の 8 本のワイヤーロープは、大型ウインチ (130 t  $\times$  2 m/min) に直接巻き取り、8 台のウインチを集中操作してケーソンの平面位置を調整する。この作業は憩流時に行うから、きびしい外力の条件で決ったアンカーラインには余力を生じるが、この余力をプレストレスとして利用することにより、ケーソン沈降に伴うワイヤーロープの弛みを減じ、ケーソンの偏位を抑制することができる。実際にはアンカーライン 1 本当りのプレストレス (初期張力) は 100 t 程度であったが、甚だ有効であった。

ケーソンの平面位置の調整は、所定の位置と方位に対して現在のケーソンがどの程度偏っているかを測量によって把握し、アンカーラインの操作で偏位を整正し、再



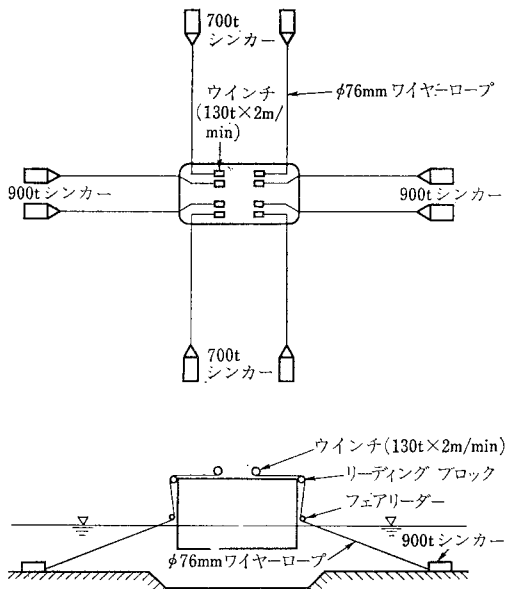


図-5 ケーソンのアンカーライン

び測量によって確認するということの繰り返しで行われる。測量は、陸上あるいは海上の測量台の基準点から光波測距儀と測角儀で行われるが、距離が比較的近いからある時点におけるケーソンの位置と方位の情報はきわめて精度高く得られる。しかし沈設中のケーソンの位置と方位は刻々に変化しているから、この情報がアンカーラインの操作に、迅速かつ円滑にフィードバックされないと偏位の収斂は困難となる。

このため、測量データは、直ちにテレメーターでケーソンに送り、ケーソン上のミニコンピューターで演算後、目標位置に対する偏位としてCRTディスプレイによって簡単明瞭に表示することとした。これによってアンカーライン操作の指揮者は、ケーソンの刻々の位置をほとんど即時に把握できるので、偏位の整正を的確、迅速、かつ円滑に行うことができたのである。

ケーソンの沈降は、二重壁構造の浮力区画に注水することによって行った。注水の方法としては、バルブとポンプの2通りが考えられるが、水位差を利用するバルブの方が載荷は迅速である。しかし万一トラブルによってバルブが閉じられなかったときは、きわめて短時間のうちにケーソンに大傾斜を生じる。これに対してポンプの場合は、トラブルがあれば注水は止まる。結果的にはフェールセーフである。また沈降中のケーソンを何らかの理由で浮上させる必要を生じた場合には、ポンプは排水にも転用できる。このため注水はポンプで行うことにした。水バラストの問題は、遊動水（free water）の影響によってフローティングケーソンのGMの減少を招くことである。GMの比較的小さい5Pケーソンのような

場合には、特に影響が大きい。このため二重壁部には所要の隔壁を設け、GMの減少を抑制して、沈降時の浮体の安定を確保した。

水バラストを加えたケーソンのマスは巨大である。5Pケーソンでも2万t、7Aケーソンでは10万tに及ぶ。そして刃口部にはモルタル漏洩防止用のシールゴムが取り付けられている。これを岩盤の上に着底させるのである。シールゴム、ケーソン、岩盤のいずれをも傷めないためには、確実な接地の制御を必要とする。

このため、着底1m手前で注水による沈降を停止し、大型クレーン船（3000t吊り）で吊り取って、吊り能力一杯に注水載荷した後、クレーン船のウインチ操作によって鉛直方向の位置と速度を直接制御しながら着底させることとした。ケーソンとクレーン船は、それぞれのアンカーラインによって独立に繫留される。ケーソンの吊り降ろしに伴う浮力の増加は、すなわちクレーン船の負荷の減少となるからトリムは大きく変化する。このためケーソンとクレーン船は相対的に近寄ることになるが、さきに述べたようにケーソンのアンカーラインには1本約100tのプレストレスが入っているため拘束力が圧倒的に強く、クレーン船をケーソンに引き寄せてもケーソンの平面位置は変わらない。ケーソンに対してクレーン船は鉛直方向のみに作用するのである。

クレーン船を用いれば、必要の場合には着底のやり直しも容易である。また、着底後クレーン船の負荷を解放すれば、それは直ちに接地圧となる。憩流時を狙ったケーソンの着底も、わずかの時間のずれによりたちまち水平力の作用を受けるから、着底直後の接地圧は貴重である。

クレーン船による着底のもう一つの大きい利点は、ケーソンの姿勢の制御が容易にできることである。3000t吊りクレーン船は、4個のフックでケーソンを吊り、各フックは独立に操作できるからケーソンの傾斜の修正が容易であり、水平の状態、いわゆるeven keelのまま着底できるのである。これは沈設精度の向上には甚だ有効であった。

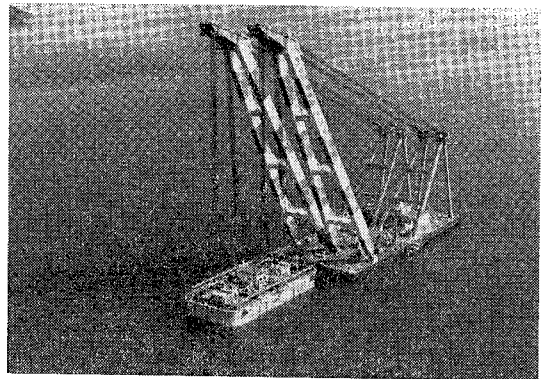


写真-3 ケーソン沈設（5P）

海底は橋軸方向に傾斜しているの、ケーソンの両側にそれぞれ 100 m 程度離して配置したシンカーには、大きくは 15 m もの高低差を生じる。このため、アンカーラインからの力の作用方向は鉛直面内では対称にはならない。したがってケーソンの両側のアンカーラインの水平分力をバランスさせれば、鉛直分力に差を生じ、ケーソンを傾斜させることになる。

傾斜によりケーソンの頂面と底面では平面位置にずれを生じる。着底に必要なのは、ケーソンの底面位置の情報であるが、測量はケーソン頂面のターゲットを視準して行われるため、別途に傾斜を測定して、測量データとともにコンピューターに入力し、底面の位置を求めるのである。位置の精度は傾斜測定の精度に支配されるが、傾斜したままの着底も十分可能である。しかし人間の感覚を超えて計算のみに頼るといふことには何となく不安が残る。現に傾斜補正のプラス・マイナスを逆に演算するという信じられないようなプログラムミスもあったのである。限られた時間内の待たなしの海上作業を、神ならぬ身の人間が行うのである。まちがいをなくすためには、多少でも複雑なことは避けた方がよい。単純が最善である。傾斜は、計算で補正するより実物で修正する方がまちがいないし、精度もよい。折角クレーン船を用いるのであれば、even keel の着底が正解であろう。

ケーソンの設置精度は 0.5 m で計画されたが、結果はすべてこの範囲に入っており、なかには数 cm という、測量精度並みの施工精度を得た例もあった。

限られた時間内の待たなしの海上作業において、このような好結果が得られた背景には、第一に、位置情報のオンラインリアルタイムシステム、十分な容量の繫留装置、着底用大型クレーン船等に代表される万全の装備、第二に、予行演習を通じて繰り返し行われた作業員の教育訓練、第三に、作業組織を有機的に動かす確立された指揮系統があったのである。

## む す び

本四架橋の海中工事は、たしかに既往の実績を飛躍的に超えるものであった。しかしそれはすべて独自の技術開発によってもたらされたわけではない。時宜を得て、工事を取り巻く広い分野の技術の高い水準が背景にあったからこそできたのである。たとえば、それは、大型造船設備、大型クレーン船、大型グラブ船、SEP、大深度潜水システム等々である。

本四架橋のために独自の開発を行ったものは、水中発破とプレパックドコンクリートである。いずれも長い年月をかけて、学界、産業界の協力の下に研究をすすめ、世界の水準を抜く技術を確立したのである。

しかし、水中発破は、海外においては岩盤掘削の普遍的工法であり、プレパックドコンクリートは、すでに 30 年前に、Mackinac 橋の水中橋脚において本格的施工の実績がある。本四架橋の技術開発は、あるレベルまでの技術的保証のあるものを、より難しい条件で、より確実に、より安全に、より迅速に施工できるようにしたということである。

残念ながら、あるいは当然ながらというべきか、わが国情では、成否の見通しの立たないものに開発投資は行われぬ。現在海中工事において、最も必要であるにもかかわらず、技術的に確かな見通しの立っていないのが海中を見る技術である。海中工事といえども、人間が行う限り基本的には陸上の工事と変らない。工事の対象が見えなければ、確実にものはつくれないし、危険の予知もできないのである。たとえば、SEP の足元を常に監視できなければ、突然ひっくりかえることだって起り得る。海中の状況が常に見えないことの怖さは、海中工事に携わる者共通の認識なのである。

本四架橋では、海中の状況を把握するために、いろいろ手段をつくしたが、結局海中の情報の多くは、潜水観察によってしか得られなかった。

潜水は、既成の汎用性のある技術である。現在それがあるから、そしてそれしかないから潜水に依存したのである。しかし、潜水観察といえども、透明度の悪い水中では、接近しなければ対象を把握できない。陸上のように能率よく広範囲を知ることができない。また、潮流に制約されて、常時見ることができない。そして、誰でもが潜水できるわけではないから、情報に客観性を欠くのである。理想は、海中の状況を、即時に、海面上で、誰もが、常時把握できる手段を得ることである。

海中の機器の開発には、莫大な経費と時間と人的エネルギーを必要とする。透明度の悪い海中で、光学的手段の限界を克服することは、まさに成否の審かかならざる新しい開発である。その達成は容易なことではない。

常時対象を把握できる陸上の工事でも、危険予知の精度を向上するためには、長い年月の経験、事故の教訓の累積を必要とした。それに較べて、はるかに不自由な状況の中で行われる海中工事、特に大水深の工事は、まことに情報不足である。本四架橋により情報量が飛躍的に増えのは事実であるが、仮にそれが従前の倍に増えたとしても、それは 1/100 が 2/100 になっただけにすぎないと理解すべきであろう。

海中の施工状況が容易には見えないなかで、工事を行わなければならないとすれば、複雑なことは極力排すべきである。単純を以て旨とすべきである。それが海中工事を確実に、安全、迅速、かつ容易に運ぶための要諦である。