

本四架橋とその問題点

日本道路公団

本州四国連絡道路調査事務所長 相良正次

本四架橋に専念するようになってから丁度丸7年になりますので、ここで現時点での考え方を整理してみることも無意味ではないと思います。

工事が難しいとか楽だとか、あるいはすぐ着工できるとかできないとかいわれておりますが、工事にはいろいろな要素があって、その事業が置かれている背景や構成要素の均衡および今後進める手順方法などを総合的に判断すべきことだろうと思います。例えば経済性や危険性のある程度無視しても急がなければならない戦争のための工事と平常時の公共事業とは違ってきます、1日も早く架橋を竣功させることに大きなねらいがあるのであれば、今すぐ着工し部分的でも工事を進めて、調査研究を平行して実施しながら原則的には現在の材料・技術を組み合わせて完工を企てるようになるし、またより経済的に、より安全に、より確実にという点にアクセントをおけば、さらに幾年間かの調査研究の後に工事体制に入ることになるでしょう。しかし工学や技術の進歩は際限のないものですし、経済性と安全性や確実性とは通常相友する性質を持っておりますので、踏み切るべき明確な点があるわけではなくて判断の問題に帰することができると思います。ここで注意しなければならないのは、技術の所産は人間生活を豊かにするためのものですから、大きな犠牲や悪い副作用を伴うものであってはならないということだろうと思います。

長大橋を計画する場合、われわれは耐用年限を100年程度と考えておりますが、100年もたてば交通手段が全く変わってしまうという意見もあり、港湾施設などの歴史を見ても古いものがこわれなくて残ると需要側の変化に応じられなくなってしまうので20年程度の耐用を考えればよいという見方もあります。一方車輛の制限こそしておりますが200年も300年もの古い橋い歌が現在も有効に使用されているものも少なくありません、我が国の墨田川に架けられた数々の橋もすでに50年近くになっています。この点の妥当性はともかくとして大事なことは橋梁全体がその目的に対して均衡がとれているということではないでしょうか、このような意味では将来維持補修の不可能あるいはきわめて困難な海中部基礎と床版との破壊や老化を防止する調査研究が台風や地震に耐えることと同様に重要な課題であろうと思われま

よく橋梁の美的検討ということがいわれておりますが、色彩は別としても構造や材料は機能に徹することが自然に美的構成を生みだすように思われてなりません。花・木・鳥・動物など神の創造されたものを詳細に検討すればするほどみごとに磨き抜かれた機能性が均衡よく結合されるのに驚くばかりです、種々のきびしい条件下で生命を永遠に伝えようとする長い年月で形成されたすばらしさは科学や技術の力などでは及ぶところではないが、美に到る一つの道程を明示しているのではないのでしょうか。

次に本四架橋に関する幾つの特徴ある課題をとりあげて、今までの調査でわかったことや残された問題点にふれてみたいと思います。

1. 長大吊橋の安定

長大吊橋を数多く試算してみてもはっきりわかることは死荷重が支配的に大きく、主ケーブルが構造上の支配者であるということです、支間1,000m級の吊橋で死荷重の占める割合が85%程度で1,500mでは90%にもなります、また補剛トラスは高さが10~15m位のものですから中小支間の補剛トラスに比べますと非常にペナペナしたもので橋としての剛性はケーブルに左右されております。したがって撓みを減少させる手法として補剛トラスを連続型式にするとか、塔頂から斜めに補剛トラスを吊るタワーステーを設けるとか、塔基部から斜め上方にケーブルを張って主ケーブルの変形を拘束するケーブルステー方式などがありますが、いずれの方法も施工のむずかしい割には効果があまりありません。強いて比較をすればケーブルステーがややよいこととなります。例えば1,500m支間の吊橋で補剛トラス高さを2倍にしても撓み量は5~6%の減少にしかありません、これに比べて直線関係にあるのが主ケーブルの断面積と死荷重応力とです、したがって長大吊橋の合理化は軽量化にあるようにも考えられておりますが、その目的からみておのずから制約があることとなります。

また以上のようなことから主塔の役割も主ケーブルを高い位置に支えておればよいことになり、主塔の曲げ剛性は吊橋全体系としてはなくともよいほど影響を持たないものであって、完成時には塔基部がヒンジでも一向に

明石海峡計画

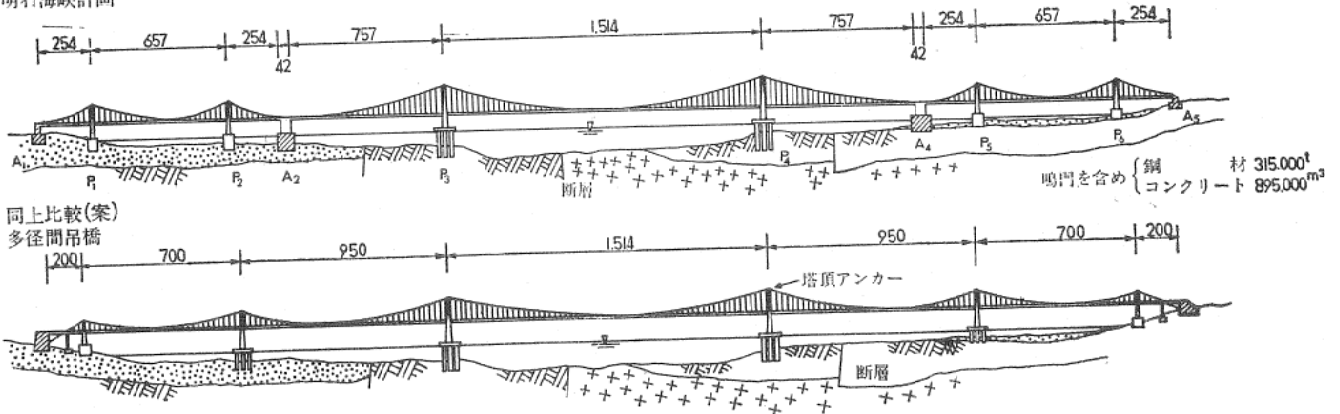


図-1 3径間吊橋と多径間吊橋

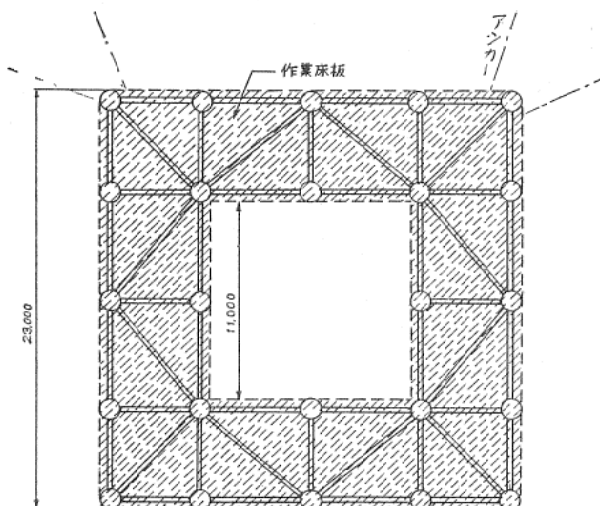
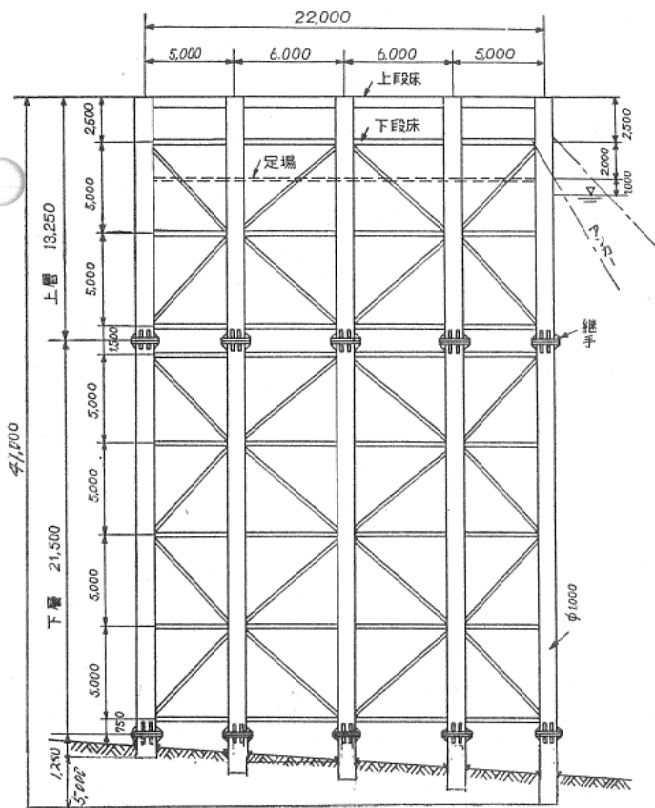


図-2 海上実験用足場枠

かまわないこととなりますので、塔の設計法については今後十分研究してみる必要があると思います。

吊橋の基礎のなかでアンカレッジが最も重量もある構造物で、海峡が広くてどうしても水深の大きい場所に築造しなければならず、しかも航路のために桁下空間を高くするようなときには工費・工期に占めるアンカレッジの比重は予想外に大きいものとなります。それで海中アンカレッジを取り去って多径間構造の吊橋にしたらどうかという案がでるわけです(図-1)が明石海峡を3径間吊橋3連で渡ると多径間とした場合の比較図です。

サンフランシスコ・オークランド・ベイ橋の計画のときも比較されたようですが、それは3径間吊橋2連との比較であったため不要になる海中アンカレッジは1基であり、当時の架設技術上にも問題があったので採用されなかったようです。明石海峡の場合には2基のアンカレッジが不要になり、しかも輻輳する船舶の航行上非常に望ましいこともあって検討を続けております。当然のことですが主ケーブルを固定しているものを取ってしまうのですからますます揺れやすい橋になるので台風や地震に耐えられるのかという心配が起きます。これに対する解決の接近法の一つとして多径間の塔の曲げ剛性をどんどん大きくしてみてその影響を調べる事が考えられます。塔頂をローラーとして自由に滑らせる場合と塔を無限大の剛性として塔頂で完全にケーブルをおさえてしまう場合とを比較しますと、主ケーブルの死荷重張力が10,000 t 付近になるとほとんど変わらない、ということは主ケーブルの死荷重応力が大きくなると多径間吊橋の性状も3径間吊橋と類似していることを示しております。主ケーブル死荷重張力が10,000 t というのは一般に支間長700m級の吊橋で、支間が1,500mになると35,000 t 程度となるので多径間吊橋でも主ケーブル断面を増し、補剛トラスの耐風性能を高めることなどにより十分安定した構造が選べると考えております。

死荷重応力度の大きいことは設計面ばかりでなくて施工上も種々の問題の基になる。例えば最初のキャットーク用ケーブルを張り渡す作業をとってみると、一般に細いワイヤーを張り渡してから次に太い使用ワイヤーを結んで引き出す方法が用いられているのが、支間が1,500mにもなると張り渡しただけの自重で破断応力度の4/5近い値となり、これに15~20m/secの風が吹くと許容応力度に近い値となる、しかも航行上の要求からワイヤーをたれ下げることができないので、ワイヤー応力に見合う力で常に緊張しておかなければならないし、少しずつ太めのワイヤーを幾段階にも引き出さなければならなくなる。したがって性能のすぐれた大容量の緊張装置の開発が要求されるし、また多くの手数と時間がなければキャットーク用のワイヤー1本架けられないのです。

また熟練労働力の不足や工期の短縮にたいしては、稼働条件の悪い海上や高所での作業量を減らす必要がありどうしても陸上で大寸法のブロックに組立てることになるが、大寸法の現場接合には今まで経験のないような精度管理技術がどうしても必要になる、完成したものは大きくとも建築などのように誤差を逃がす自由度の多い場合と拘束のきびしい場合の差を真剣にしかも詳細に具体的に考えてみなければならない。

今回鳴門海峡で実施中の海上実験に使用する(図一2)に示すような作業足場を上層(重量230t)と下層(重量350t)に分けて製作し、海上で接合させるための精度を得るのに予想以上の苦労が払われたにもかかわらず十分ではなかったことを考えると寸法精度の確保の問題は決して容易なものとは思われない。

2. 基礎の耐震設計

巨大な構造物となるので当然振動応答を考慮した設計法を採用することになるが、剛なアンカレッジ・主塔・ケーブル・吊構造など異なる性格の部材が組み合わされているので、単独建造物とちがって相互に関連しあうので複雑であるし、変形傾斜などの量が問題になる。

台風時や地震時の安定を検討する場合には活荷重の最大値を考慮しないことにしているの、活荷重の分は地震時に余力となって作用する、したがって前述の死荷重比が大きいことは基礎構造を雪だるま式に巨大化する傾向にさせることも特徴の一つといってよい。

概略設計に用いる耐震設計法として応答を考慮した暫定的手法を作成したが、今後さらに合理化するために次の事項に着目して調査研究を進めたいと考えている。

(1) 既設橋梁の振動実験結果やモデル化した模型実験結果、地盤を弾性体とした場合のエネルギー地下いつ散の理論計算、上下部の連成振動解析などから適切な減衰

定数を求める。

(2) 土を仮想質量に置きかえる方法をバネに置きかえる方法に改める。この方法はすでに機械基礎の分野での実績がある。

(3) 現在使用している地震応答スペクトル曲線をその後の強震記録や実橋試験の成果を活用して、基礎構造の型式や地盤条件に応じてきめこまかにつくり直す。

(4) 橋梁全体として均衡のとれた耐震構造とするため現象や安全度についての考え方を再検討する。設計手法が変わったり、計算が厳密になるほど前提条件となる現象把握をやり直す必要があり、無視できる内容も定量的に再検討し直すことが必要である。

(5) 地盤の透水性や間隙水圧を測定して地震時における基礎底面の水圧の変化を検討して設計に取り入れる。

基礎周辺が中央部分より深く根入れされた揚げ底型式についてはケーソンと並列杭の合成体とみなして動的解析を行ない、地盤応力や変形の検討をする目的で各種型式の基礎について有限要素法を用いた数値計算を行ってきた。また変形やねじれが問題になった地盤に直径5~10mの柱を根入れして頭部を頂版で連結した多柱型式についても39自由度として解析し、また並進・回転・ねじれの剛体系振動と柱の弾性振動の連成として解析を行ってきたが、これらの結果では基礎として十分な剛性のあることが判明しました。

3. 海中基礎工事

本四架橋の成功の鍵は海面下にあるといっても過言ではないと思います。問題は沢山ありますが海底地形の測量が正確にできないことがあげられます。深淺測量には音響測深が用いられており、測量船の位置精度を高める方法としては陸上基点を設けてハイドロジエストなど長音波の位相差などを利用した測距方法をシンクロさせると比較的よい結果が得られた、しかし船のローリングやピッチングの影響や音波反射利用の根本的性質からどうしても水深の1~2%の誤差はまぬがれないし、海底の小さな起伏や溝などは判定できない。月と地球を簡単に往復できるレーザー光線も水中では15m程度の距離が屈くかどうかというように魔力を全く失ってしまう、したがって海上のある点を垂直に海底におろしてマークするという測量の最も初歩的な仕事も海では至難な業となる。

海底に基線を張って、水中水準器を用いて縦断測量をダイバーにより実施してみたが、海底地質や起伏はわかるが測量精度としては音響測深と同程度である。また海底のステレオ写真による地形解析を試みたが、瀬戸内海はマリノウもホコリも多く予想以上に透明度が悪く幾

ら投光しても、冬期などの条件のよいときで5 m、悪ければ3 m程度までしか見えない。潜水調査船「よみうり号」による調査でも問題は潜水にあるのではなく、むしろ見えないことにあるのです。

以上のようなことから、鋼製足場などを海底に据え付ける合にも、誤差を現場合わせをするという仕事ができなくてはなりません。

デロング社、ルターナー社、IHC社など海底石油掘削を契機として開発された海上足場があって、海での土木工事にも有効に利用することが考えられる。しかしわが国のように気象条件が激しく、長期間を必要とする大規模な工事の場合には、基礎が完成して激浪や台風に耐えられるようになるまでの工事中強大な外力からどうして守るかということが欠くべからざる重要な課題で、それは機械や作業の足がかりを与える海上足場とは本質的には異なるもので、外国の工事例を見るまでもなくこの支保構造が機械や材料の足場を兼ねることが多いこととなります。

海底に圧力ハウスを沈設して、ダイバー稼働を容易にする研究も行われておりますが、無重力状態に類似したダイバー作業で大量の海底岩盤を掘削するようなことは無理な話で、ダイバーに期待できるのは調査・検査などが主で、あとは簡単な作業とか非常時態の補助作業です。海底圧力ハウスは常に海上に母船がいることを前提とするもので、潮流が早く船が転換している場合には困難な仕事ですし、また視界が悪いことからハウスを出たダイバーが帰れなくなる心配もあります。

水中ブルドーザーを考えてみると、水圧による排気などは油圧モーターなどを用いる対策がとれると思われるが、固結した海底をも掘れるようにするにはまず反力をとることがむずかしく、また海中の視界が悪いために遠隔操作をするにしても、海底の様子がどうなっているのか刻々と適確に知ることは至難なこととなります。

港内での沖仲土作業が瞬間最大15 m/secの風になると禁止されており、またコンテナ船の荷卸しにうねりの影響が問題になっていることから推察できるように、海上の沖合での工事の場合には重い機械や資材を積んだ船の接岸や荷卸しは工程に大きく影響を与える問題であり、コンクリートパッチャー船などでも骨材補給方法などに新しい工夫が必要となります。今までの観測結果から海上で15 m/sec以上の風が吹く日数が1年に120日位と予想されますから、予め十分研究して稼働を高めることが大切です。

4. 海底掘削

水深や潮流以外の特徴として、超高層ビルや欧米の長大橋基礎などいわゆる巨大構造物の最大地盤反力が100 t/m²を標準としているのに対して、本橋の場合には300～1,000 t/m²という値になる、これは支間長・桁下高・地震力など最大値ばかりの組合せのようになるため、したがって基礎掘削も一般には掘らなくともよい固結したものを掘ってさらに堅固な支持層に達するようにしなければならぬことになる。また対象としている軟岩互層の神戸層や和泉砂岩層にしても風化花崗岩にしても硬軟入り乱れたきわめて不均質な地盤であることも掘削を困難にする。

海底表面の沖洪積堆積層はグラブ類でも掘れるので、昭和39年には0.6m³標準グラムシエル、0.6m³硬土盤用グラムシエル、0.4m³油圧式グラムシエル、0.4m³オレンジピールバケット、0.08m³ハンマーグラブを使用して陸上洪積砂礫層で性能試験を行ない、41年の明石海峡での第1次海上実験でも直径3.5mのウェル内掘削に使用した。

39年に上記陸上実験と一緒にリバース・サーキュレーション・ドリルP S150型を用いて限界性能試験を実施したが、馬力・押付力・トルクなどから固結度がある程度高い洪積砂礫層になると掘削は無理であった。

海上作業は足場が限られているので機械の作業面積と占有面積の比が工程に著しい影響を与えることになるのでこの値が大きいほどよい、また地質の不均性から地質に好き嫌いのない鈍感な機械の方が段取替えがなくすね、海上運搬荷卸しの稼働率が悪いので故障の起きないものが望ましい。このような要求から検討すると最も使い古された方法ではあるが重力を利用するパーカッション方式を見直さざるを得ないことになる。このような観点から、建設省の大阪機械事務所構内で長さ1,030mmの一字ビットを落下させゆっくり回転を与える方法でコンクリートブロックの掘削試験を行ない、その成果を用いてφ3.16m・重量7.9tの十字ビットを持ち中央内管は300mmでエアリフト排土管を兼ねる試験機をつくり、41年には陸上の神戸層砂岩で実験し、翌42年には海上実験に使用して海面下40mまで掘削した。また43年にはビット重量を約1t増加させ、倉敷市児島において1軸圧縮強度が100～200 kg/cm²の風化花崗岩を対象に掘削実験を行なった。いずれもウインチで吊り上げたが能力が不足するため滑車を使用したのでサイクルタイムは8～15秒であり、標準的な掘進速度は(表一)のようであった。

(表-1)

φ3.6m 重錘掘削機標準掘進値 (水中作業)

対象地質	固 結 度	掘 進 速 度
洪積砂礫層	N値60以上	0.2 ~ 0.4m/h
神戸層 (軟砂岩)	1軸圧縮20~40kg/m ²	0.1 ~ 0.2 "
風化花崗岩	1軸圧縮100~200kg/m ²	0.18~0.26 "

注. サイクルタイムはいずれも8~15秒のときの値である。

(表-2)

ロータリー式掘削機概略推計値

孔 径	ビット推力	最大トルク	動 力	重 量	建 造 費
1 m	30~40 t	1.0~1.7 tm	100~200 KW	30~50 t	0.6~0.8億円
3.5 m	150~200 "	30~40 "	600~1,000 "	200~350 "	2~3 "
10 m	300~900 "	200~260 "	3,000~3,500 "	1,000~1,300 "	9~12 "

注. 花崗岩に対する掘進速度0.5m/h を目標として推定した。

がって重錘の回転度が調節できるもので、ターンテーブルは不要になりサイクルタイムも $\frac{1}{3}$ 位に短縮できる見込です。また海上実験ではまず中央にφ3.16mで先行掘削し、この孔に支柱を建ててφ3.16の重錘を左右に1組を配して全体をゆっくり公転させることによってφ9.6mに拡孔する試験も実施する予定で、1組には別の機構を用いて比較したいと思っております。

海上での使用を念頭に置いて、ロータリー方式で超大口径の掘削機をつくとすればどのような諸元になって、どんなところに問題があるかを数社に外注して検討を行なってみたものは(表-2)のようになる。また同様にφ3.5mの重錘式掘削機を考えてみますと、ビット重量20~30t、機械重量100~250t、建造費1~1.4億円でロータリー式の半分以下であることがわかりました。

水中コンクリート施工継目のレータンス除去、ケーソンの隅角部や仕切壁下の掘削などには高圧射水によるのが適していると思われるので、昨年その予備実験を行いました。実験の一つは、1,000~4,000 kg/cm² という超高压で噴出ノズル径は0.115~0.25mm という範囲でフレッシュな花崗岩と砂岩の供試体に穿孔、および溝をつくる実験で、ノズル径・水圧・ノズル先端と供試体表面などによっても異なるが、大雑把にいてノズル移動速度を30mm/secとした場合に花崗岩で深さ1~4mmの溝ができ砂岩では2~5mmの溝となった。もう一つの実験はノズル径を8.8~14.1mmとし、水圧を50~125 kg/cm²に変化させ、圧縮強度が50, 100, 150, 200kg/cm²の4種類の巾1.2m・長さ1.5m・厚さ60cmのコン

鳴門海峡での第2次海上実験(水深30~35m、底質和泉砂岩層)で使用するためφ3.16mの重錘掘削機の改造を現在実施中であるが、その主要点は重錘の上下および回転を与える機構に新しく開発した技術を採用したもので、1対の特殊チェーンの無限軌道によって2本の吊材が上下するもので予めセットした点でクラッチが入り最頂点で自動的に切れて落下するシステムである、クラッチポイントを変えることによって落下高さを調節することができるし、またチェーン装置の傾斜を変えることによって吊り上げ開始点と落下点の距離が変わり、した

クリート供試体80箇所を用いて空中および水中で穿孔と溝掘りの試験を行なった、その結果の1例を述べると、ノズル径12.6mm、圧縮強度100kg/cm²の供試体では水圧50kg/cm²では空中・水中ともほとんど掘れなかったが、水圧を100kg/cm²にすると10秒間の射水で空中では深さ5cm、水中では深さ24cmの孔があき、孔径は深さの半分位ある。なお水圧を125kg/cm²に上げると空中で14cm、水中で32cmの深さになった。また水圧125kg/cm²で水中でノズル速度を50mm/secとすると溝深さが10cm、25mm/secの速度では深さが18cm、10mm/secで27cmとなる。

水中の方が水がおさえの役をして空中よりも2~3倍の掘削率を示し騒音もない、また今までの研究で供試圧縮強度の半分の水圧があれば掘削能力があるといわれているが、土木工事特に海中などでは使用条件が荒いので圧縮強度程度の水圧が望ましく、ノズル径を大きくして、水量を多くした方が実用的なように思われます。多数のノズルを並列させて往復させればトレンチカットもできるし、これを回転機構に組み込めば超大口径の孔もあけられることとなります。またトレンチカットをして箱枠を据えて、内部は一定強度以上の部分を残して岩盤の弱い部分のみを掘削して工事を合理化することも可能になります。

(図-3)はトレンチカット用案で先行ノズルは細いが2,000~4,000 kg/cm²という超高压でこれを波型に移動して溝をつくり、次に300~500 kg/cm²の太いノズルで溝間をこわして、残りをビットで切り均すという構想

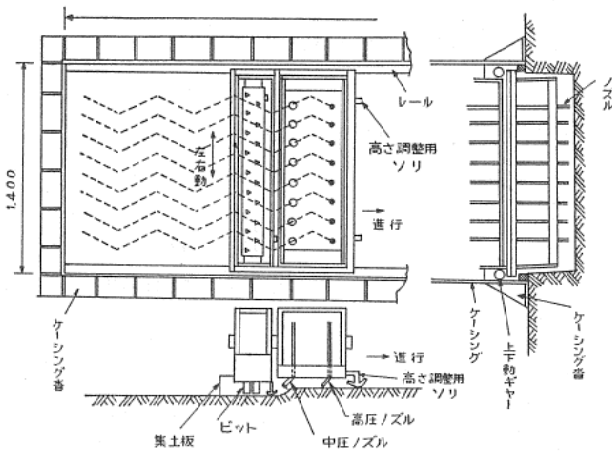


図-3 ジェット水掘削試験機案

であるが、海水を使ってこのような高圧水をつくる既製品のポンプはないので新しく設計から行わなくてはならないし、動力も2,000~2,500kw位が必要となり、どうしても2億円以上の製作費となるようで、今年は既製の大容量ポンプを使用して水圧300 kg/cm²位でノズル径4~5mmのもの数本をつかったの現場実験を計画しております。

5. その他

第1次海上実験の埋設アンカーのワイヤーにφ5mmの亜鉛メッキ線のプレファブ・パラレルワイヤー・スト

ランドを使用した。海峡中央部に面した方が腐食がはげしく、特に干潮面下2~5mが最も腐食しており1年10カ月の期間で3mm位の芯しか残らなかった。またこの実験施設を利用して海底附近から海面上まで5層に試験片を吊げて3カ年計画で腐食実験を行っており、先日1年目の試料を取り出して計量調査中であるが、矢張り海面~-5mのものが最もひどく、電気防食しているのは良好であるが単なる裸材はSS41も耐海水性鋼板もほとんど差異がないようでいずれも10%近い腐食のように見受けられた。18-8ステンレスも2~3カ所虫喰腐食がありチタンなどは変化が見られないようであります。これは予想以上に悪い結果で潮流の強い外海は溶存酸素が多く流れて常に洗われているためかと思われます。3年目の試料まで調査が済めば一応の傾向はわかると思いますがこのような調子ではコンクリートの耐久性も心配になり、圧力打設・蒸気養生でもして、しかも表面処理したプレキャスト・コンクリート部材でも外側に使用しなければならぬのではと考えさせられてしまいます。

それから海上実験も撤去を考えると今回の鳴門での実施中のものが限度です。そうかといって室内試験や小規模実験だけでは本物になれませんので、本工事の基礎の1~2基を試験的に実施してみることがどうしても必要だと思っております。そうすることによって保安に対しても十分な体制が整うし、また実際に工事を担当する業界の現場組織も養成できる方法だと考えております。