

欧米における長大橋梁の基礎工法について

宮 澤 吉 弘*

要 旨 “明石、鳴門橋梁”，“青函トンネル”の建設促進をはかるため、国会では昨年末生田、薄田両議員を欧米に派遣することとなり、両氏のテクニカル アシスタントとして筆者が同行したので、ここに長大橋梁の基礎工法について視察したところを技術的な面から報告する。

今回の海外視察は、生田、薄田両議員の随行であり、旅行日程が比較的短く、しかも工事視察には最も都合の悪いシーズンでもあつたので、視察内容を極力集約することとした。橋梁に関しては「明石橋梁を対象として、水深 30 m 以上のカ所で潮流の速いカ所に下部構造を建設する工法」にテーマを限定した。

1. 長大橋梁架設の問題点およびその利点

現在世界で最大級のスパンを持つ橋梁はすべてサスペンションタイプのものであるが、これらはいずれも道路橋であつて、鉄道橋としては、荷重が重く振動も多いということによつて、カンティレバーまたはアーチタイプが採用せられ、中央における最大スパンもおおむね 500 m 前後である。

従つて本土、四国間すなわち、明石または鳴門海峡に架橋することを頭に画く場合にも、まず最大スパンは 500~600 m 前後と考えざるを得ないので、明石海峡では水深 70~80 m の潮流の速いカ所に安全確実に下部構造がつくられるかどうかが先決問題となることは、誰しもうなづけることであろう。橋梁は橋脚の施工可能を前提とするならば、残された問題は経済的なスパン割と、橋梁架設の工法を検討することであつて、これらは、細心の注意を要するとはいえ、必ず可能な範囲内にあるからである。

また、この程度の長大橋梁となると、ラテラルなリジディティを保つために複線の鉄道橋で設計しても、自ら両側に相当の余裕 (5~6 m) ができて、この余裕を道路橋に使用できることであつて、ちょうどミシシッピー河口ニューオーリアンズ付近に架設されているヒュービーロング橋のようなわけである。このことはトンネルにくらべて橋梁の非常に有利な点であつて、海峡連絡を橋梁かトンネルかで比較する場合、このことを考慮しなければならないし、また橋梁架設はトンネル施工にくらべて不確定要素がほとんどないから、海峡連絡を考慮する場合、まず橋梁を考えるのが自然であり、トンネルは橋梁を架設することが技術的に不可能である場合、または別の理由から水底を通すことが要求される場

合にかぎるべきであるとは筆者の持論であるが、この意味から、水深の深い潮流の速いカ所に、安全確実に橋脚をつくりうるかどうかということは、非常に重要でもあり、興味もある問題となつてくるわけである。

2. 下部構造の施工発達史

水深の深いことを前提として橋梁基礎工は 1930 年を境として、いちじるしい変化をきたした。それは Open dredged caisson が考案されたからである。

(1) 1930 年まで

橋梁基礎工といえば、鉄筋コンクリートのケーソンが信用され、含水層にぶつかると気圧工法を併用し、いわゆる Dry method によつて、下部構造を完成させる方法を採用していたのであるが、鉄筋コンクリートケーソンの強度の関係から大体 35'~45' の深さを限度としていたといわれる。

(2) 1930 年前後

鉄筋コンクリートのケーソンに代つて、蜂の巣形の鉄製のシートパイル (Cellular steel sheetpiling cofferdam) が考案され、さらにシングルスキンのこの構造物をプレーシングで補強することにより、水面下の深い所の土圧に抵抗させ、気圧工法を併用することによつて、施工可能な深度を一気に 115' まで拡張することができるようになつたのであるが、ニューマティックケーソン内で働らく労働者に対し

100'~110' の深さでは労働時間 1 時間で

110'~115' の深さでは労働時間 30 分間で

大気圧下で作業する労働者の 8 時間労働賃銀を支払わなければならず、このような下部構造をつくるのが経済的な面から制約を受けるようになった。

(3) 1930 年後

ここで、アメリカのコンサルティング エンジニアが相寄り討論して考案したのが、Open dredged caisson であつて、従来の工法が Dry method であつたのに対し、これは Wet method であり、気圧工法を併用しない。すなわちわれわれが普通にウェルシンキングといつているのと本質的には異なるところがない。Open dredged と呼ばれるのはこのためであるが、労働者がケーソン内に入る必要のないところから、深さも従来の 115' の限度をはるかに越えることとなり、続々と長大橋梁が計画され、架設されることになつたのである。

同じ Open dredged caisson であつても、陸上から、あるいは水中に築島してそこから沈める Dry shoe con-

* 正員 日本国有鉄道 建設局建設線課課長

struction と、ケーソンを水に浮せたまま沈める Floater construction とがあるが、明石または鳴門を対称とするかぎりにおいては海中に築島することは不可能であるから、ここでは Floater construction による Open dredged caisson について述べることにしよう。

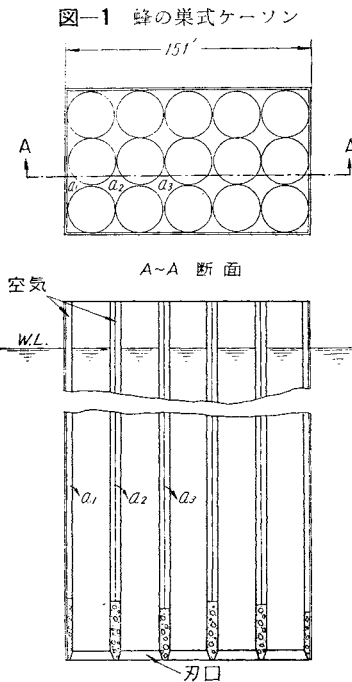
歴史的にいうならばこのアイデアの生まれたのは、サンフランシスコのオークランドベイ橋の基礎に使用されたドームをつけた Domed caisson の名で呼ばれている Open dredged caisson であるが、説明の都合でこれをあとまわしとすることとする。

3. オープン ドレッジ ケーソン

(1) ケーソンの種類

オープン ドレッジ ケーソンには長方形の蜂の巣形のもの (Cellular type caisson または Honeycomb type caisson といわれる) と、円形の二重壁を持つもの (Double wall caisson といわれる) とがある。

ハニカムタイプのケーソンは図-1に見るごとく、角形の鋼製のワクの内部へ、鋼製のウェルをちょうど蜂の巣状に設置して作ったケーソンで、ダブルウォールケーソンは、図-2に示すごとく、二つの円形の鋼製のコッファードームの間に隔壁を設けたケーソンであるが、この両者の撰択は a) 設計上の問題、b)

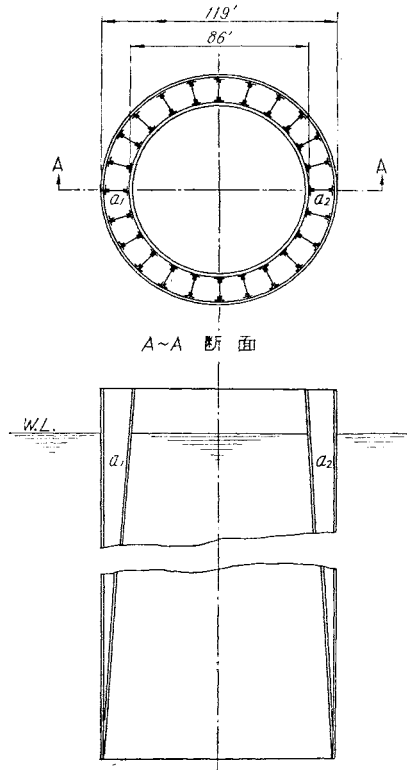


施工上の問題、をあわせ考えて、いずれが有利であるかということから決定されるわけである。設計上の問題は、いうまでもなく、このケーソンが橋脚も含めての上部構造の縦横荷重に耐えるかどうかの問題であり、施工上の問題とは、後述するようにケーソンの沈下に際し、その外側のスキンフリクション並びに浮力に勝つだけの自重を持たしうるかかどうかの問題である。

(2) 浮游式沈下法

Open dredged caisson を浮せたまま沈下させる場合の要点は、いうまでもなく「どうやって、ケーソ

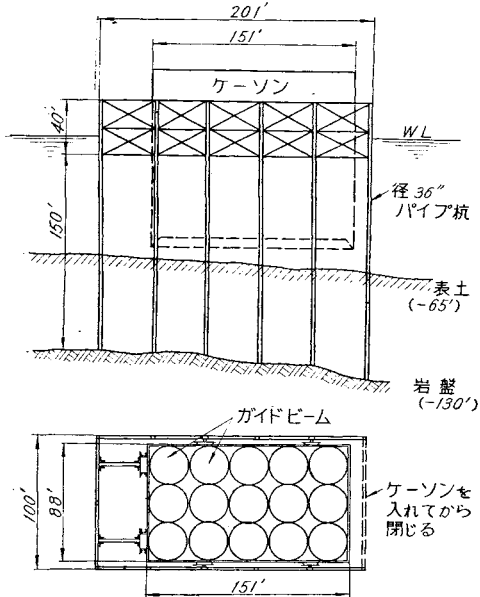
図-2 二重壁式ケーソン



ンを所定の位置に保持するか」ということであつて、このためにストール (Stall)……U 字型の鋼製柵とかコラル (Corral) とか呼ばれている鋼構造物を使用されている。前者はニューオーリアンズ橋の橋脚基礎工に、後者はマキノウ橋の橋脚基礎工に使用されていた。まずこれらについて述べよう。

A) ストールについて これは水中につくる築島の代りに浮いているケーソンを支えるためにつくられた図のようなフレームワークであるが、ここでは基礎となるべき岩盤の上に、約 65' の沈泥および軟岩がかぶつているので、まずこの中に長さ 150'、径 36" のパイプ杭を打込むため、フローティングクレーンでこのパイプ杭を吊し、この中に 30" の H-杭をフローティングハンマーで打ち込み、パイプ杭を固定され、その剛性を保つために、砂、および砂利をパイプ中につめ込み、このワクの上に 40' 高のトラスを組んだものがストールと呼ばれるものである。これを使えば、水申いかなる深さのところにも、またたとえ岩盤に傾斜があつても、潮流が相当速くても、据付け可能であることは容易に理解できよう。New Orleans Bridge では、あらかじめ陸上で組み立てたストールを進水させ、これを図-4に示すごとく、二はいのバージにのせて現地に曳航しパイプパイル内に H-杭をフローティングドライブハンマーをもつて打込み、ストールを据付けたものであるが、パイプ杭の

図-3 ストール



長さを適当に撰ぶことによつて、基礎岩盤の傾斜に影響されることなく、掘付けできることはこの図によつて明らかであろう。また、ここではストールの掘付けに当り、……H-杭が打たれる以前において河の流れによつて、バージにつんだストールが移動するのを防止するため、河岸からワイヤーをもつてストールをつなぎ、正位置を保持するような方法をとつていたが、これは、橋脚が河岸から近いためであつて、もし、橋脚の位置が岸より遠い場合には、別の保持法を考えなければならないが、この

図-4(a) ストールのすえつけ方

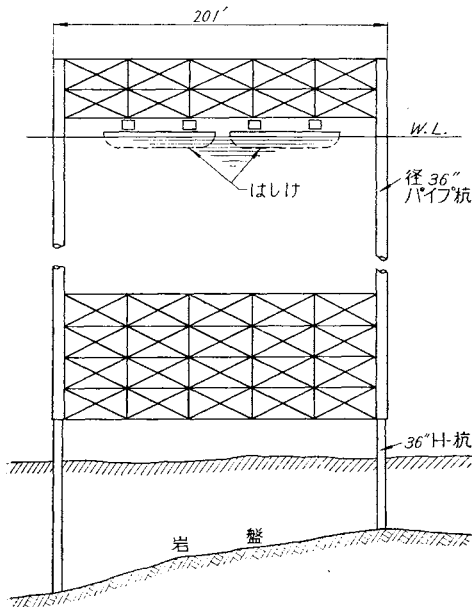
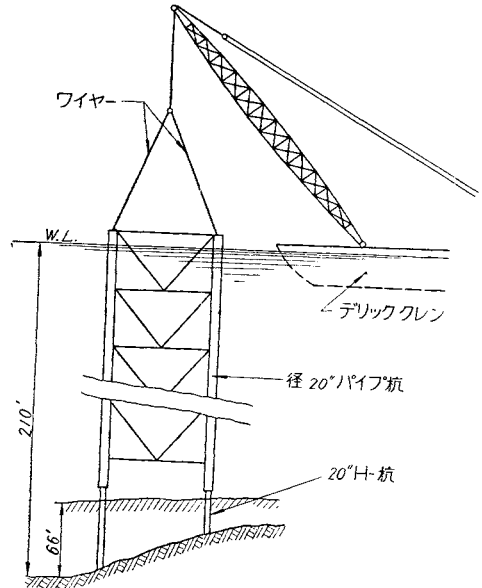


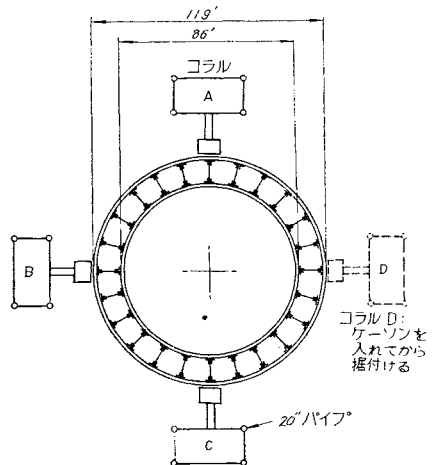
図-4(b) ストールのすえつけ方



ストールの掘付位置はケーソンの掘付位置ほど正確を要せず、少しの狂いがあつても、ケーソンを正しい位置に掘付けろうことは、このアイディアの一大長所である。すなわち、掘付けを終了したストールにケーソンの外側までガイドとなるべきガイドビームを取付けるわけであるが、この寸法を加減することによつて、ケーソンの正確な位置を決定するわけである(図-4 参照)。

B) Mackinac Bridge で使用したコラル ストールはケーソン全部を取囲む大きさの鋼柵であるが、コラルは設置されるべきケーソンを4点で支えようとする鋼製の支点用柵であつて、この方が全体的にストールより少ない重量で、安価に仕上げられるばかりでなく掘付けもまた容易であり、外からの荷重に耐えるだけの安定性が約束される場合は、明らかにストールよりも進歩したア

図-5 コラル



アイデアである。それでもなお、マキノ橋で深さ 210' の水深の所に使用したコラル 1 本の鋼重量は、160 t であり、4 コの全重量は補強のためのつなぎ部材も含めて 720 t である。このコラルの利点は、重量も軽く、大きさもスートルのように大きくはないので、陸上で全部組立て、現地まで曳航して、フローティングデリッククレーンで吊り下げて、パイプ杭を通して H-杭を打ちこみ、据付けることが可能なことである。

C) ガイドビームの取付け ガイドビームとはスートルなりコラルなりが据付けられてから、フローティングケーソンを沈下させるべき所定の位置に支えるガイドであつて、**図-6** の

長さ a および角 α 等は、これらの柵の据付け具合を見て、自由に加減できるために、スートルやコラルの据付けに少しの位置の狂いがあつても、これで矯正してケーソンを所定の位置に据付けることができるわけである。

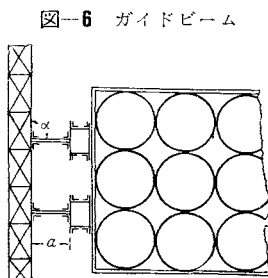
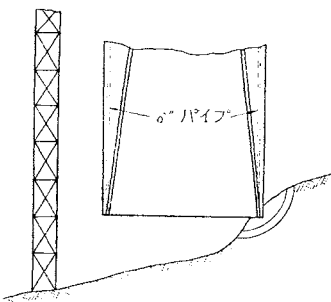


図-6 ガイドビーム

D) フローティングケーソンの沈め方 上述のようにして、スートルなりコラルが据付けられたならば、次に残る問題はケーソンをいかにして沈めるかということになるが、初め空気室 (Air chamber) A (**図-1**, **図-2** の a_1, a_2, \dots) 大きさを、ケーソンの自重と関連させて設計し、現地に曳航してガイドビーム内にセットし、空気室内にコンクリートを打ち漸次自重を増し、徐々にケーソンを沈下させ、ケーソンが、自重で下がる点まで下げられたならば、バージに取付けたクラムシェルをもつて、ウェルを通じて、ケーソンの下部を掘削し、さらに空気室にコンクリートを打ちつつ、自重を漸増して、自重によつて、外側のスキンフリクションに打ちかたせながらケーソンを沈下させるわけである。

図-7 岩盤に傾斜ある場合の施工法



ここで問題になるのは、基礎となるべき岩盤に傾斜凹凸等がある場合であるが、あらかじめ、かかるケースを予想して、ケーソンの外側には 6" パイプを取付け、発破用にこれを使用し、爆破によつて、岩を削り取り、ケーソンの傾斜をなおすわけである。また岩盤に到達する場合、オーバーバードンとケーソンの表面摩擦が大で、ケーソンが自重で沈下しにくい

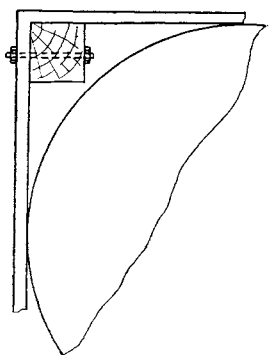
場合は、ウォータージェットにより、スキンフリクションを減じて、沈下を容易にすることは、ウェルシンキングの場合となんら変るところがない。

このようにして沈下したケーソンの下部はどの程度岩盤に喰ひこませているかといえば、ニューオーリアンズ橋でも、マキノ橋でも 15" 程度とのことであつた。これは、岩盤上にかぶつているオーバーバードンの地質も相当の硬さをもつていて、十分に横荷重に耐えらるからであり、事実ケーソンの沈下に最も苦心したのは、この中を掘削しつつ、垂直に下げることであつたと、フィールドエンジニアは口を揃えて強調していた。

ケーソン沈下後は、この内部にコンクリートを打つことであるが、マキノ地方は、台風の通過地であり、また冬期は荒天がつづき、湖水は結水するので、ケーソン工事は 4 月から 11 月までに終了させなければならない。しかもマキノ橋では 1 本のケーソンでもコンクリート量は最大 80 000 m³、全体では 4 00 000 m³ にもおよんだのであつて、これだけの水中コンクリートを、普通のトレミーを使用したのでは、暴風に際し、破壊されるおそれもあるし、コンクリート打ちが中断されるおそれもあるので、プレバクトコンクリートを使用し、60% を占める砂利 (1/2"~6" の砂利を使用) をミキサを通すことなく直接ケーソン内に投入して、非常に施工速度をあげているわけであるが、このプレバクトコンクリートは、コアボーリングによつて採取されたサンプルを見ても実に見事な物であつて、わが国のプレバクトコンクリートも、さらに一段と研究を進める必要がある。

さらにまた、200' 以上におよぶケーソンを陸上で一気に組立てて、水深の浅い岸から進水させることは、事実上困難であることから、ニューオーリアンズ橋では、ケーソン 1 組の高さは 20' であり、またマキノ橋では約 40' 高のものを使用し、これをスートルまたはコラル内で **図-9** に示すように、最初のケーソンの四隅に木製のホズを取付け、ケーソンを順次この中にはめこんで、ジョイントはウエルドしてつないでいた。

図-8 木製のホズ



(3) Deep Open Dredged Caisson 沈下に際し注意すべき事項

A) 基礎の地質が均等でなく、硬度の異なる場合には、たとえガイドビームでケーソンを押えていても、ケーソンは傾斜するが、かかる場合、発破によつてこの傾斜の傾向を直す以外うまい方法がなく、施工上十分の注

意を要する。

B) 下部をクラムシェルで掘削してもケーソンが沈下しない場合に、掘削をやりすぎるとケーソンは急激に傾斜し、これと同時にいわゆる“walking”現象を起して横に移動するから、ケーソンとその外部の地質の摩擦力に対して、いかなる自重をとつたらよいかということ在设计にさいし、十分考慮しておかなければならない。

C) 地質が不適当な場合 例えばクイックサンドのような地質がある場合には、掘削側に急激に移動するから特に注意を要するが、あまりにも摩擦力がなく、滑りやすい地質に出合った場合には地質の置きかえが必要である。

4. ドーム ケーソン (Damed Caisson)

現在施工中の長大橋梁基礎はすべてストールで支えるオープン ドレッジ ケーソンを使用しているが、1933年建設されたサンフランシスコのオークランド ベイ橋は当時世界一の水深-220'に橋梁基礎をつくることに成功したもので、土木史上忘れることができないものであり、これがまた、現在の Deep caisson の先駆をなしたものであるのもので、ここに略述することとする。このとき用いられたのが、ケーソンの上部にドーム形のフタを取付けた。ドーム ケーソンなのであるが、このアイデアは次に示すような討議を経て生れたものである。

(1) もしなんらかの形で、橋脚をソリッドにしないことができるならば、十分横荷重に耐える軽量で価格の安い下部構造が作られるであろうということから蜂の巣状のケーソンに考えよんだ。

(2) 最初は、それぞれのウェルがフローティング チェンバーになるような考案……ウェルの下部に一時的な底をつくり(これを False bottom と呼んでいる)、ケーソンを水上に浮かせて現地まで曳航し、これが底につくまで荷重をかけて沈下させ、False bottom を開いたらよいと考えたのであるが、この方法には次のような欠点または危険をとまうので、使用さるべきでないとの結論に到達したとのことである。すなわち

a) 水深が深くなるにつれて、この底自体の重量が増加してくるため、ケーソンが沈下してから、この底の撤去が困難であること。

b) ケーソン沈下の際、最初は一般的にいつて、水底に沈んでいる沈泥の上に掘付けられることになるが、このさい、下向きの力によつて、シルトが急激に押しつけられ、ケーソンは大きく横に移動するであろうこと。

c) たとえ、この困難を克服したとしても、False bottom 撤去のさい、このシルトは一気に吹き出して、ケーソンを顛倒させるかも知れないこと、これは単なる危惧ではなく、かつてミッド ハドソン橋で経験済みである。この橋梁は、60'で岩盤上のオーバー バードンに

達するのであるが、False bottom caisson を使用し、ケーソンを掘付け、False bottom 撤去のさい、一時にシルトが噴出しケーソンを顛倒させる事故を起したもので、建設史上忘れることのできない事故であろう。

(3) 以上のことを討議しているうちに、コンサルティング エンジニアの Daniel E. Moran 氏が False bottom の代りに、ウェルの上部にフタをつけて浮力を持たせる Domed caisson を提案し、これが採用されたのである。

Damed Cylinder Method

(1) 図-9のごとく組み立てられた、ドーム ケーソンのウェル

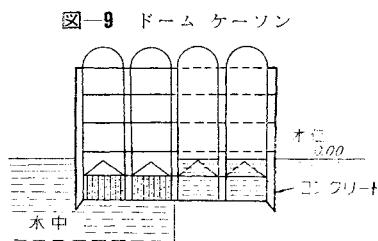


図-9 ドーム ケーソン

内部の空気は水中では圧縮されているため、十分な浮力をとることができるのみでなく、ドームに作られたコックを開くことによつて浮力を自由に調節させることができる。

(2) 従つて、沈下の際、きわめて安定であり、ケーソンがシルト上に掘付けられた場合にも横移動を防止することができる。

(3) 土砂の中にケーソンを沈下させる場合に、地質の不均等によつてケーソンが傾斜するようなときは、一方側のウェルに再びドームを取付け、ドームのロックから圧さく空気を吹きこんで、片側に浮力をつけて、全体の重心を移動させ傾斜を直すことができる。

(4) ただこの方法の欠点は、ケーソン自体のアンカーが困難であつて、この経験を通して、ストールなりコラルなりを使用する現代の工法へと発展したわけであるが、問題はいずれが安価に仕上げうるか、より施工が容易であるかということにすぎない。

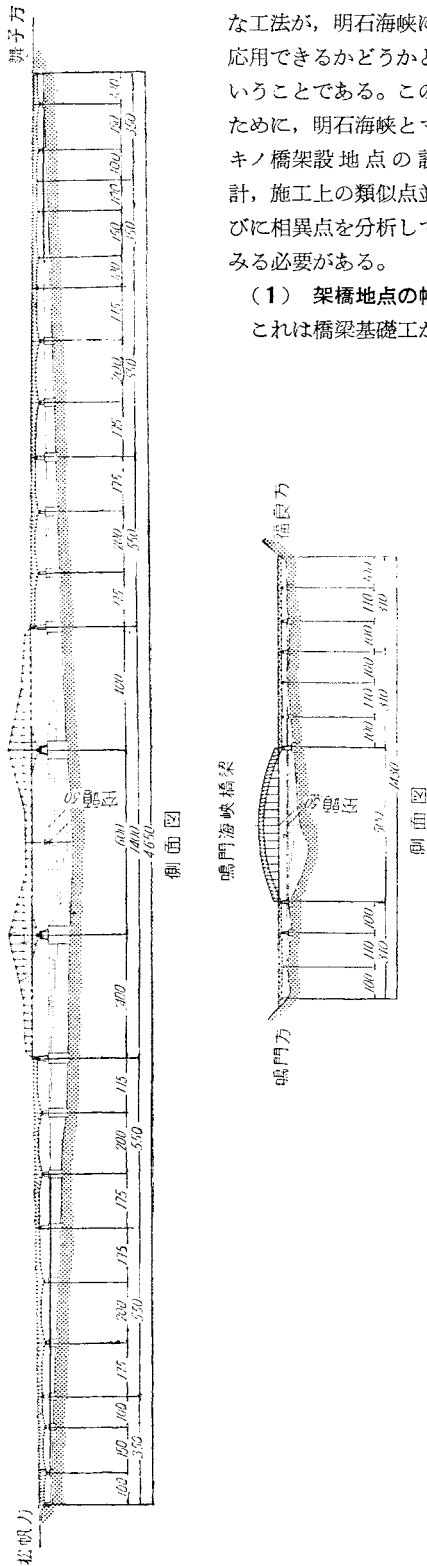
5. ポンツーン ケーソン

最近アメリカではオープン ドレッジ ケーソンより、より安価なケーソンをつくる目的で、一流のコンサルティング エンジニア 130 人が一堂に会し種々検討した結果、ポンツーン ケーソンなるものを考案したのであるが、これに関しては、アメリカでも未発表であり、公表を禁止されているので、ここには単に深さ300'におよぶケーソンを、いままでのものより安価に完成させるために Pontoon caisson が考案されたことのみを報告することに止めなければならない。

6. 結 論

以上は、今回視察した長大橋梁基礎工法の大略である

図-10 明石、鳴門橋梁想定設計図
明石海峡橋梁



が、問題は、このような工法が、明石海峡に適用できるかどうかということである。このために、明石海峡とマキノ橋架設地点の設計、施工上の類似点並びに相異点を分析して見る必要がある。

(1) 架橋地点の幅
これは橋梁基礎工が

施工できることを前提とすれば、径間数が増減するだけで問題にならない。

(2) 水深

明石海峡は一番深いところで水深約100 mあるが500~600 mのスパンを可能とすると、ピアー部の水深は約70 m(230')前後であつて、マキノ橋のピアーの最大水深220'と大差ない。

(3) 潮流、風速

明石海峡の潮流は6マイル前後であるが、マキノもまたミシガン湖とヒュウロン湖のボトルネックであつて、潮流8マイルにおよんでいる。

風速は明石付近秒速50 mと考えられるが、マキノ付近も280 mと考えて設計されている。

(4) 震度

わが国では常に地震時2000 mm程度の震度を考えなければならぬが、マキノでは震度を考えていない。

(5) 地盤

すでに述べたようにマキノ地点は岩盤の上に、オーバードンとして軟岩をかぶっているため、ケーソンにかかる横荷重はこれで支えられると考えられているが、明石海峡部は岩盤が水底に露出しているようである。従つて、ケーソンの横荷重を支えるための考案をしなければならぬが、横荷重は地震力が最も大きい影響を与えるので、一応地震力の影響を考えなければならぬ。

そこでさしあたり、最も安全な場合を仮定し、横荷重はすべてケーソン最下部で受け持つものとして、概算的に設計して見たところ、スパン600 mmのカンティレバータイプの橋梁として、

ケーソンの大きさ $60 \times 70 \times 70 \text{ m}$

ケーソンのコンクリート容積 $170,000 \text{ m}^3$

となり、既述のマキノ橋梁のケーソンのコンクリート容積80,000 m^3 にくらべ図体は非常に大きいものとなるが、設計施工上不可能となる問題点は存在しない。

この概算設計をもとにして、明石、鳴門橋梁想定設計図を画けば図-10のようになる。

なお、最後に、参考のため、マキノ橋とこれらの橋梁を比較すると表-1のようになる。

表-1

	Mackinac	明石	鳴門
最大スパン	1158 m	600 m	550 m
総延長	8061 m	4650 m	1430 m
	内スチール部 5461 m コンクリート部 2600 m	(アプローチスパンを除く)	(アプローチスパンを除く)
スチール上部構造重量	66500 t	102500 t	40100 t
ケーソンの最大深さ	67 m	70 m	20 m
ケーソンの大きさ同コンクリート容積	$\phi 35 \text{ m} \times 67 \text{ m}$ 80000 m^3	$60 \times 70 \times 70 \text{ m}$ 170000 m^3	$45 \times 30 \times 20 \text{ m}$ 20000 m^3
工費	360 億円	—	—