

本州四国連絡橋建設のための海中締切り工事

Offshore cofferdams for constructing the Honshu-Shikoku bridges

なか お とし や
中 尾 俊 哉*

1. はじめに

瀬戸内海を橋で渡り本州と四国を結ぶ本州四国連絡橋は、東から順に神戸・鳴門ルート、児島・坂出ルート、尾道・今治ルート¹⁾の3つを計画している。今までに尾道・今治ルートの大三島橋および因島大橋ならびに神戸・鳴門ルートの大鳴門橋が既に完成し、供用している。現在建設を進めているのは、神戸・鳴門ルートでは大鳴門橋の関連区間の一部である淡路島内の一部および徳島県内陸上部の一部で、昭和62年春完成を予定している。児島・坂出ルートは他の2本のルートと異なり、昭和63年春に全線一斉に供用を開始すべく全面的に建設を進めている。また、尾道・今治ルートでは伯方・大島大橋が昭和63年春の完成を目標に建設を進めており、生口橋は今年度より着工準備を行っている。

各ルートとも海峡部を長大橋で渡る関係上、下部工工事、特に基礎工事は海中、あるいは陸上であっても汀線付近で行わなければならない、大規模な海中締切り工事や海上足場工事が不可欠である。本文では、これら仮設工事のうち、既に施工されたものを数例紹介しようと思う。

2. 海中締切り、足場工事の実例

本四連絡橋で今までに施工された海中締切り、足場工事には、次に示すようなものがある。

- ① ジャケット方式（大鳴門橋、門崎高架橋等）
- ② コルゲートセル方式（門崎高架橋、亀浦高架橋、撫養橋等）
- ③ 場所打ちコンクリート方式（櫃石島橋、与島橋等）
- ④ 鋼管杭建込方式（岩黒島高架橋）
- ⑤ セルラーブロック方式（羽佐島高架橋、与島橋等）

①、②は神戸・鳴門ルート、③～⑤は児島・坂出ルートにそれぞれ属する橋梁の例である。前2者は後3者に比して大規模で強固な構造となっている。これは、神戸・鳴門ルートと児島・坂出ルートの自然条件・特に潮流や波浪の相違が大きく影響しているものである。

以下、この神戸・鳴門ルートと児島・坂出ルートの自然条件の対比も含めて、主な海中締切り、足場工事の実例を、橋梁あるいは区間ごとに記す。

2.1 神戸・鳴門ルート（大鳴門橋関連区間）

神戸・鳴門ルートは、兵庫県神戸市垂水区から徳島県鳴

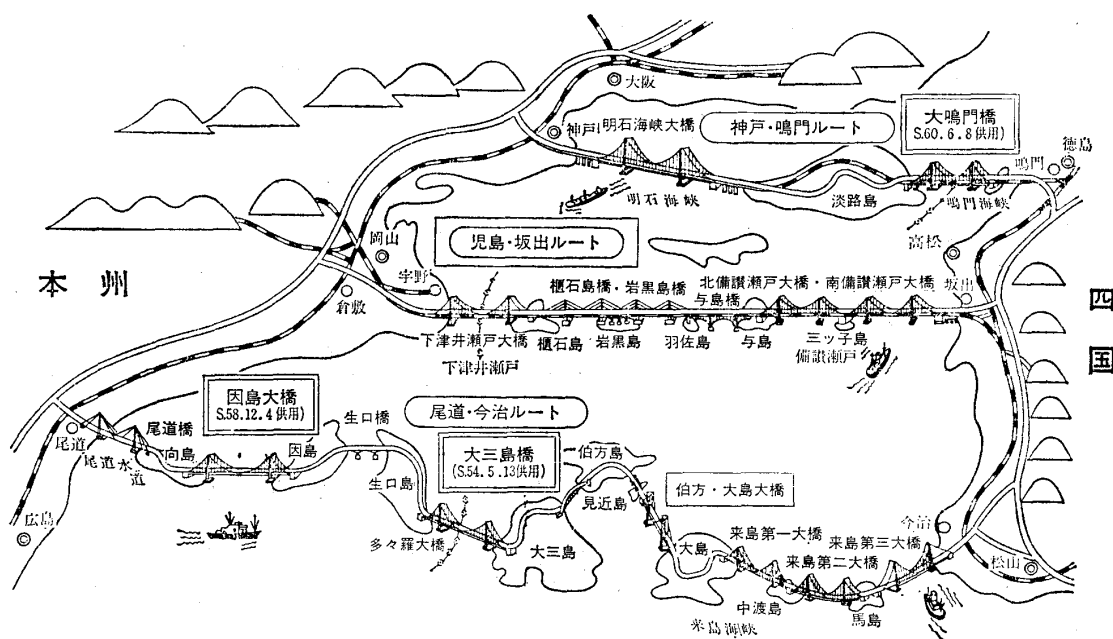


図-1 本州四国連絡橋路線図

*本州四国連絡橋公団工務第二部工務第三課

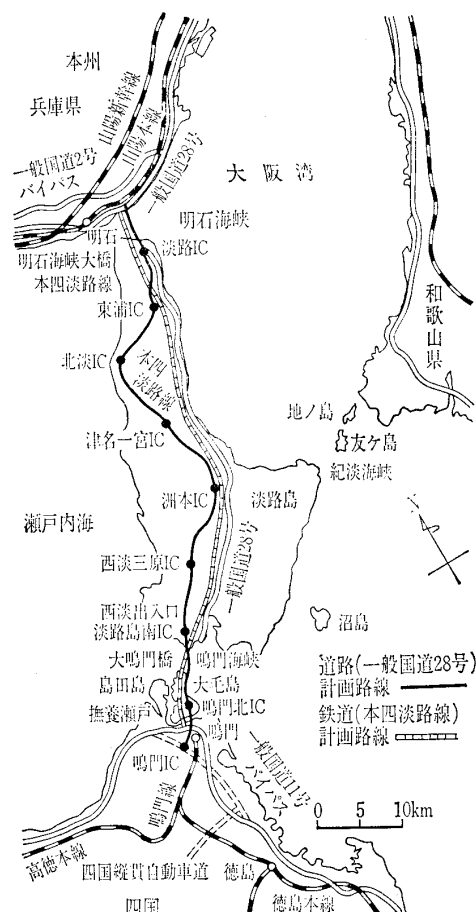


図-2 神戸・鳴門ルート

門市撫養町までの76.3 kmの道路および海峡部の鉄道7.7 kmを計画しており、このうち淡路島内の兵庫県津名郡津名町および一宮町の津名一宮ICから同洲本市納の洲本ICまでの11.9 kmの区間と、鳴門海峡を大鳴門橋で渡る兵庫県三原郡西淡町の西淡出入口から徳島県鳴門市鳴門町の鳴門北ICまでの9.9 kmの区間については本年6月に完成、供用している。また、洲本ICから西淡出入口までの区間および鳴門北ICから終点までの区間については、昭和62年春完成を目標に建設を進めている。

これら当面の建設区間のうち、鳴門海峡を渡海する西淡出入口～鳴門北IC間では、鳴門海峡をはさんで4つの橋梁、高架橋が連続して1つの橋梁群を成しており、北から順に門崎高架橋($l=1009.5$ m)、大鳴門橋($l=1629$ m)、孫崎高架橋($l=138$ m)、亀浦高架橋($l=593.4$ m)という構成になっている。また、鳴門北IC以南にも細長い海峡「撫養の瀬戸」があり、ここを渡るのが撫養橋($l=535.1$ m)である。

これら5橋の架橋地点の地質は、「和泉砂岩層」という砂岩と頁岩の互層であり、風化の進んだ所では砂岩と頁岩の間に薄く粘土をはさんでいるものもある。岩のコア強度は、砂岩は2000～1000 kgf/cm²と強いが、頁岩は1000～200 kgf/cm²と弱く、これらの互層より成る岩盤は異方性不均質性に富み工

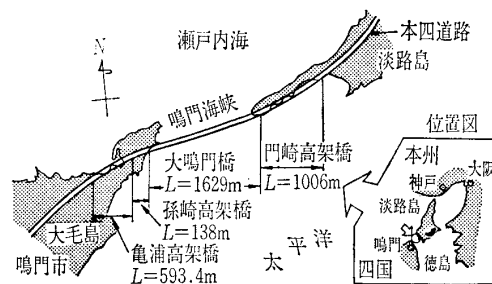


図-3 鳴門海峡の橋梁群

学的に扱いにくい岩となっている。

また、潮流は鳴門海峡で最大約5 m/s、撫養の瀬戸では約2 m/sと速い。最大波高は、門崎先端において6.7 m(昭和55年9月公団観測)、孫崎先端では7.1 m(昭和54年3月、同)と大きく、海象条件の厳しさを一層激しいものとしている。

こういった自然条件のもとで施工された、ジャケット方式およびコルゲートセル方式による海中締切り工事や海上足場工事を、前述の5橋のうち門崎高架橋および撫養橋の実例で、以下に紹介する。

(1) 門崎高架橋

門崎高架橋は、淡路島の南西端に位置する細長い半島「門崎」の太平洋側に沿う3径間および4径間連続の鋼床版箱桁橋である。橋長は1009.5 m、支間割は3径間部が3×108 m、4径間部が149.6 m+2×190.4 m+149.6 mであり、1箱桁橋としては我が国最大の規模を誇っている。下部工は、橋台2基および橋脚6基の計8基であり、このうち橋脚6基が海中基礎となっているが、いずれも和泉砂岩層を支持地盤とするニューマチックケーソン基礎の上にSRC構造の高橋脚軀体を設けた形式となっている(表-1)。いずれの基礎も締切内で施工されたが、地形の関係よりT2PおよびT3Pは主にコルゲートセルによって締切られた同一の作業ヤード上での施工となり、T4P～T7Pの4基は各1基ごとに、ジャケットと現場打ちコンクリートの組合せによる築島上で施工された(図-5)。

門崎は^{1),2)}、和泉砂岩層の走行方向に形成された岬で、付け根(T2P付近)は幅約150 m、一般に幅60～100 m、標高40～80 mのゆるやかな山陵となっているが、門崎高架

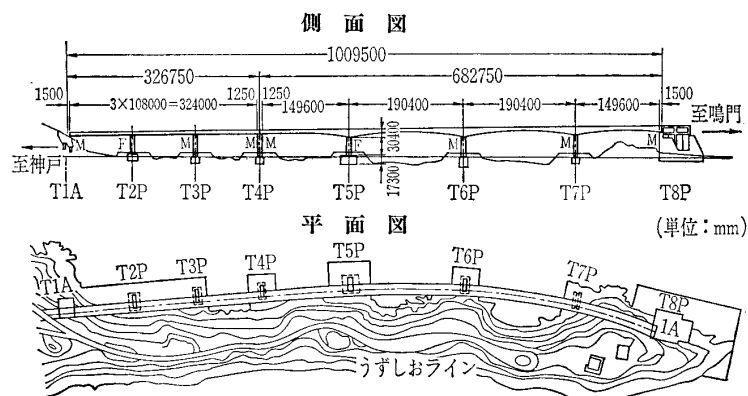


図-4 門崎高架橋一般図

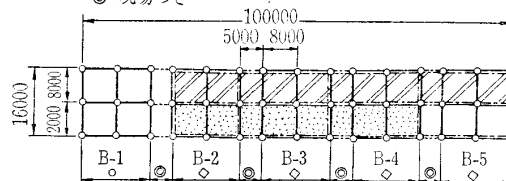
表-1 下部工諸元

(単位: m)

	ケーソン				橋脚
	橋軸方向長さ	橋軸直角方向長さ	高さ	底面高(T.P.)	高さ
T2P	21	30	10	-6	33.45
T3P	12	30	12	-10	36.50
T4P	13	30	12	-10	38.00
T5P	28	30	15	-10	32.90
T6P	13	30	15	-13	37.90
T7P	13	30	11	-9	40.10

注) T7Pは施工時の底面高はT.P.-6mに変更。

- 作業足場
- ◇ 鋼製締切棒
- ◎ 現場つぎ
- 中詰め石
- 消波ブロック



- 注) (a) 8mスパンが経済的に有利である
 (b) 1基のジャケットを300t程度にする
 (c) 1基のブロックの施工期間が短いため早期に安定をはかることが可能である。

図-6 一般平面形状 (2P, 3P)

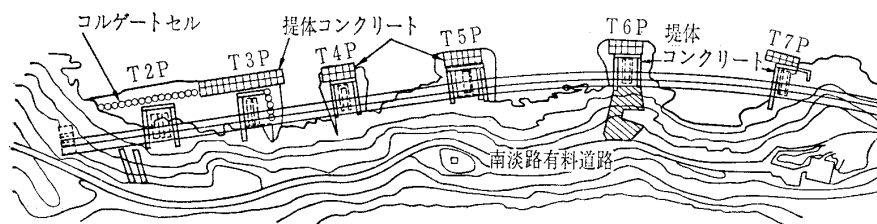


図-5 仮設構造平面図

橋施工位置である岬の南側は地層の傾斜に沿った滑落崖となっている。海岸部は急傾斜を以て海に没するところが多く、転石、崖錐が分布するが、一部では狭い玉石質の砂浜を持つ所もみられる。地質は中世代白亜紀の和泉層岩盤であり、砂岩、頁岩およびこの互層より成っていて、一部に細礫岩の薄いレンズを伴い、走向はほぼN50~60°Eで、SEに40~50°の単斜構造を形成している。砂岩は節理、亀裂に乏しくよい岩盤であるが、頁岩は多くの小亀裂、網状節理、劈開の発達するやや悪い岩盤で、露出部は急速に

風化を受けている。

海象は、急潮流で名高い鳴門海峡のすぐ近くではあるが潮流の影響がほとんどない反面、太平洋に向かって開けているため吹送距離が長くなることによる大波によって、厳しいものとなっている。特に、春から秋にかけて吹く南風による波

(土用波等) および台風による波が大きい。設計条件としては、最大波高10mと設定している。潮位は、設計最高潮位がT.P.+1.70m程度と高い。

更に、門崎は地形が急峻で既設道路と施工場所の高低差が大きい工事用道路等の施工が困難であり、資機材の搬出入は海上から行わなければならない。このため、作業ヤードおよび築島は着桟としての機能も合わせ持ったものとする必要が生じた。

T2, 3P作業ヤードの護岸形式は、a) ケーソン案、b)

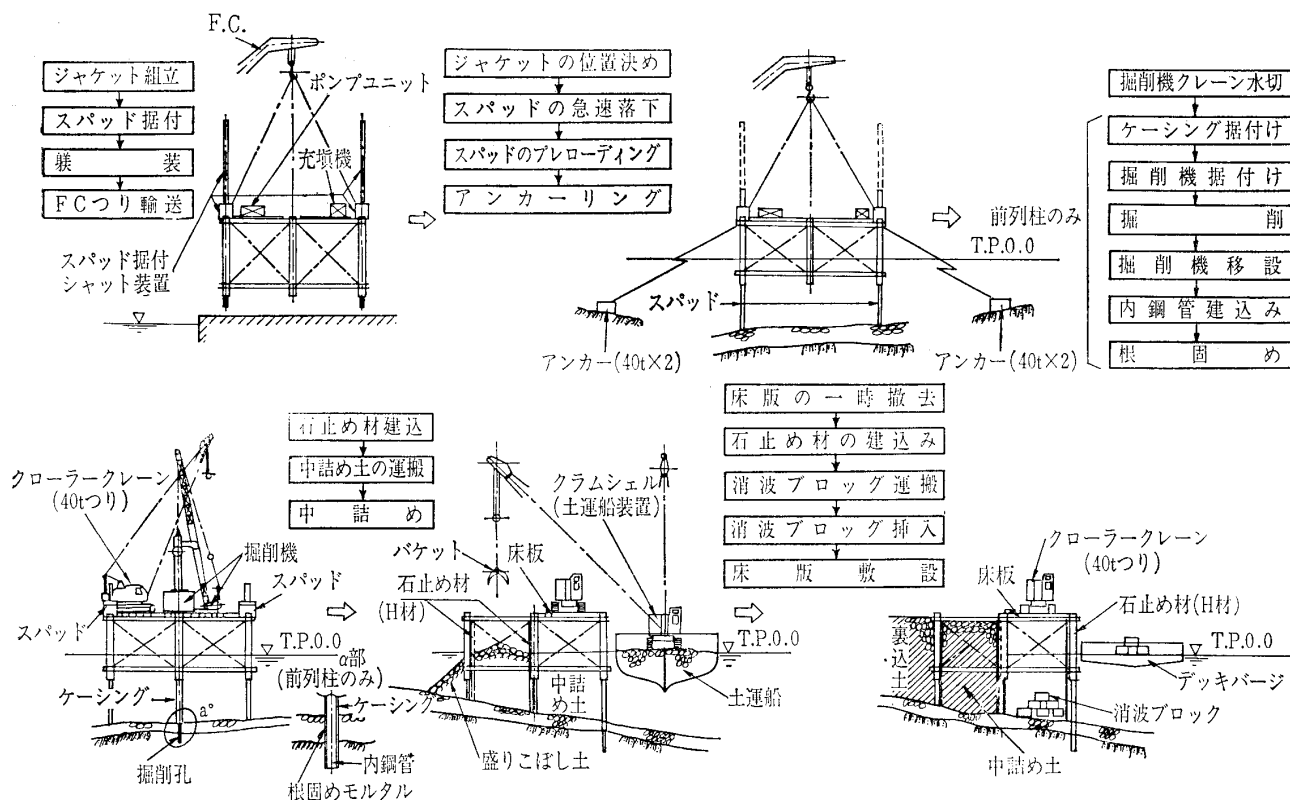
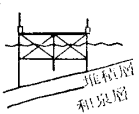
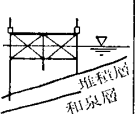
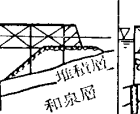
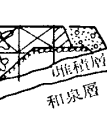


図-7 ジャケットの施工順序

表-2 設計基本条件

設計条件	施工段階	設 置 時	スパッドによる自立時	根固め施工時	中詰め、裏込めの 施 工 時	完 成 時
						
自然条件	設計波諸元	$H=0.5\text{m}$ $T=3.5\text{s}$	$H=3.0\text{m}$ $T=6.0\text{s}$	$H=4.5\text{m}$ $T=7.0\text{s}$	$H=6.0\text{m}$ $T=7.5\text{s}$	$H=10.0\text{m}$ $T=11.0\text{s}$
	設計風速	$V=8\text{m/s}$	$V=15$	$V=33$	$V=33$	$V=65$
	潮流	—	—	—	—	—
	潮位	T.P.+1.00(m) T.P.-1.00(m)			T.P.+1.70 T.P.-1.00	
	地盤	地盤条件としては、転石層、和泉層を考える。				
上載荷重	クローラークレーン	○	○	○	○	○
	掘削機			○		
	分布荷重		○	○	○	○
許容応力度の割増		35%	35%	35%	常時 波風作用時	35% 65%
その他の設計条件	部材の連結	造示によるものを原則とする。				
	鋼材の腐蝕	鋼材の腐蝕は考慮しない。 塗装の防蝕効果に期待。				
	土圧	中詰め、裏込め土 $\gamma=1.9\text{tf/m}^3$, $c=0\text{tf/m}^2$, $\phi=35^\circ$ 消波ブロック $\gamma=0.94\text{tf/m}^3$				
	地盤定数	転石層 $\gamma=1.8\text{tf/m}^3$, $\phi=30^\circ$, $c=0\text{tf/m}^2$, $E_s=300\text{kgf/cm}^2$ 和泉層 $\gamma=2.5\text{tf/m}^3$, $\phi=30^\circ$, $c=40\text{tf/m}^2$, $E_s=6000\text{kgf/cm}^2$				
備考	1. 波圧等の算定に貝がら等の付着代は考えない。 2. 洗掘は考慮しない。 3. 根固め前の脚柱はピン支点として扱う。					

セルラーブロック案、c) コルゲートセル案、d) 捨石提案の4案について比較検討した。護岸完了後の埋立工事との関係で工期的に非常に厳しい条件下にあったため、海上施工日数の長い捨石提案は不利である。また、ケーソン案やセルラーブロック案の場合は、堤体をプレキャスト=コンクリート製品として製作するためのヤードを現場付近に確保する必要があり、製作工程まで含めると工程的にも問題がある。以上から主に施工性、経済性に重点を置いて、コルゲートセル案を選定した。なお、T3P前面については着栈としての機能を持たせるべく、後に述べるT4P～T7P築島工の前面と同様にジャケット形式とした。

T4P～T7Pの築島工は、側面堤を永久構造物として残す必要があるため、前面堤とは異なる構造としており、形式選定も別々に行った。前面堤は、a) ジャケット案、b) ケーソン案、c) セルラーブロック案、d) コルゲートセル案の4案について比較検討したが、ケーソン案およびセルラーブロック案の場合は船の接岸が悪く、着栈としての機能を十分果たすことが困難であると考えられ、またコルゲートセル案の場合は設置水深が5mと大きいため施

工性に問題がある。このため、着栈としての機能に優れ、消波も容易な構造のジャケット案に決定した。一方、側面堤は、a) コンクリートブロック案、b) コルゲートセル案、c) 現場打ちコンクリート案の3案が考えられたが、将来橋脚防護工として残すことを考慮し、施工性、経済性で有利な現場打ちコンクリート案とし、捨石(T.P.+1m)の上での施工となるため気中コンクリートとした。

ジャケットの平面形状(T2, 3P)を図-6に、設計条件を表-2に示す。基本構造は、製作性、現場継手の施工性を考慮し各ブロックとも同一形状とし、現場継手材の下弦材は施工性よりH型钢とした。前面の脚柱は洗掘による耐力不足の恐れがあるため根固めを行って対処することとした。設置は、図-7に示す手順で行った。

また、コルゲートセルは基地において組立て、台船によって現地に輸送し、クレーン船により基礎捨石上に据付けた後、中詰めと裏込石をガット船で投入して安定を図り、天端コンクリートを打設して完了した。

他に特記すべきことは、コルゲートセル設置地点の基礎捨石の被覆石を強固に結合しその構造を安定させるため、アスファルト、石粉、砂を加熱混合した材料

を隙間に注入するという「サンドマスチック工」(図-8)を施工したことがあげられる。これは、波に対処したものである。

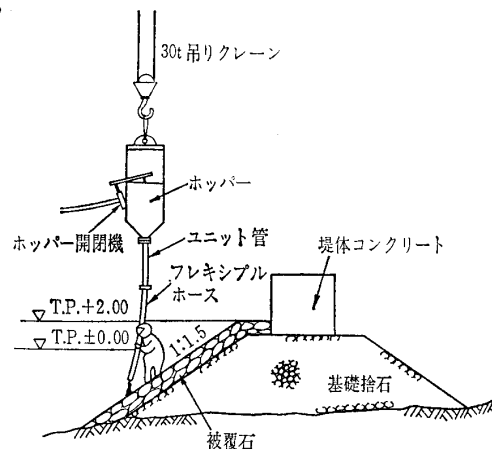


図-8 サンドマスチック施工図

(2) 撫養橋

撫養橋は、現在工事中の区間である鳴門北IC～鳴門IC間(7.9km)に位置する、大毛島と四国本土を結ぶ4径間連続鋼床版桁橋である。橋長は535.1m、支間割は107

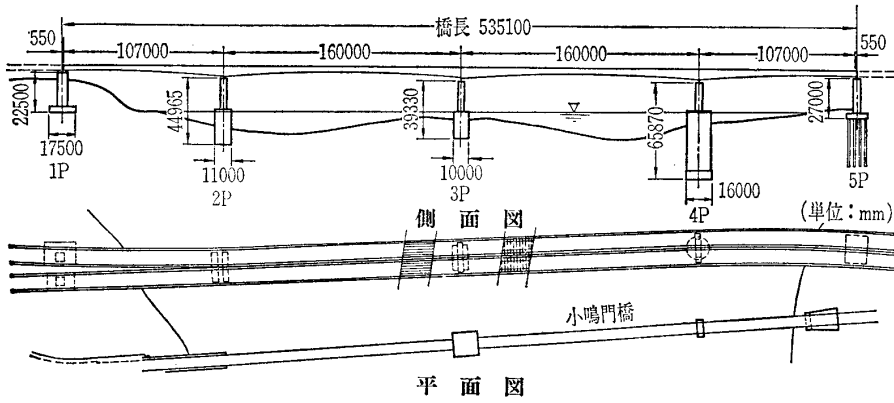


図-9 撫養橋一般図

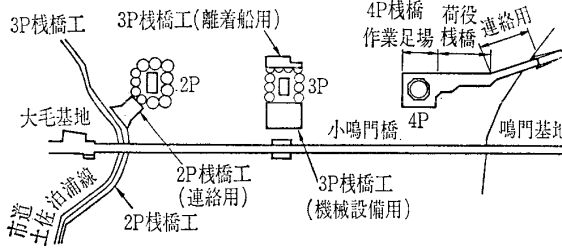


図-10 仮設工平面図

m+2×160m+107m となっている。下部工は橋脚5基であるが、このうち中間の3基が海中基礎である（図-9）。2P、3P³⁾は支持地盤である和泉砂岩層が比較的浅く露頭するが、約50度の急勾配となっているため、ニューマチックケーソンとした。一方、4Pは、支持地盤の砂礫層がT.P.-45m付近にあり、ニューマチックケーソンでは作業室内のゲージ圧が4.5 kgf/cm²にも達し、安全かつ経済的な施工を確保することが困難と考えられたため、実績の豊富なオープンケーソンとした（表-3）。これら3基の施工はいずれも築島を設けて行ったが、2P、3Pの築島工は、①海底地盤の傾斜に十分対応可能であること、②堆積層が浅く、矢板による締切りは不経済であること、③施工中の潮流の影響を極力少なくできること、④水深の変化に対応出来ること、⑤海水汚濁を最小限とし得ること等の条件より、捨石とコルゲートセルの組合せによる築島工法を採用した。一方、4Pは、①堆積層の厚さが大きく、鋼管および矢板の根入れが確保できること、②競艇場の仕切り矢板

に近接しているため、施工範囲を極力小さくする必要があること等の条件より、鋼管杭と覆工板による栈橋を構築し、ケーソンの外周は鋼矢板で締切って潮流や波の影響を避けるといった構造とした。

2P、3Pの築島工の施工は、前述の門崎高架橋と同様の手順で行ったが、施工位置である撫養の瀬戸は波の影響をほとんど受けないため、サンドマスチック工はここでは施工しなかった。4P周囲の栈橋は、構造的には門崎高架橋のジャケット式栈橋と大差ないが、やはり波の影

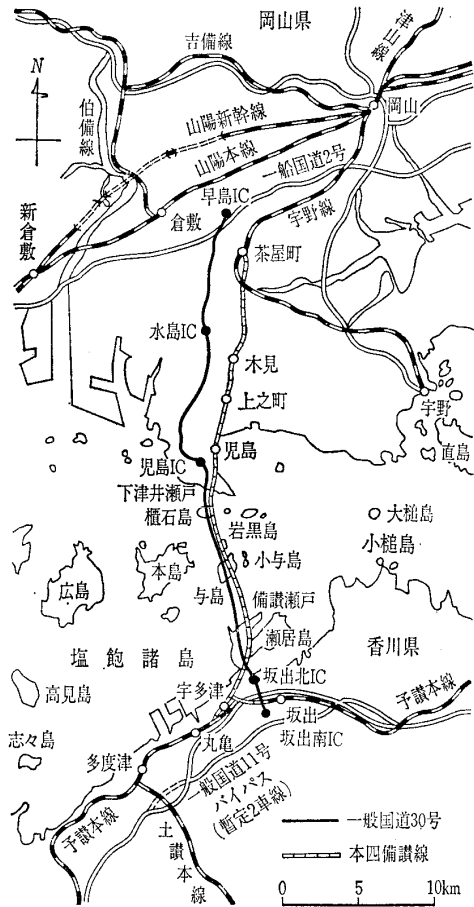


図-11 児島・坂出ルート

表-3 下部工の概要

項目	橋脚	基礎の概要					海中部の現場条件			
		基礎型式	基礎の大きさ	支持地盤高 (T.P.m)	上部工反力 (tf)	支承条件	水深	海底面の傾	堆積層の厚さ	潮流
1P	上り	直接基礎			920	固定	—	—	—	—
	下り	〃			990	〃	—	—	—	—
2P		ニューマチックケーソン	11.0×20.0m	-21.5	3510	可動	7~14m	20~25°	1.5~9m 深い方で堆積層が薄くなる	3箇所のうちで最も強い (1.5m/s)
3P		ニューマチックケーソン	10.0×18.0m	-16.5	3680	可動	2.5~6.5m	5°	3.5~10m	鍋島の影となり影響は少ない
4P		オープンケーソン	直径 16.0m	-44.5	3510	可動	7.5~10m	8~20°	35m	隣接構造物の仕切り矢板の影になり比較的少ない
5P		R.C. 場所打ち杭	杭直径 1.5m	-36.0	1710	可動	—	—	—	—

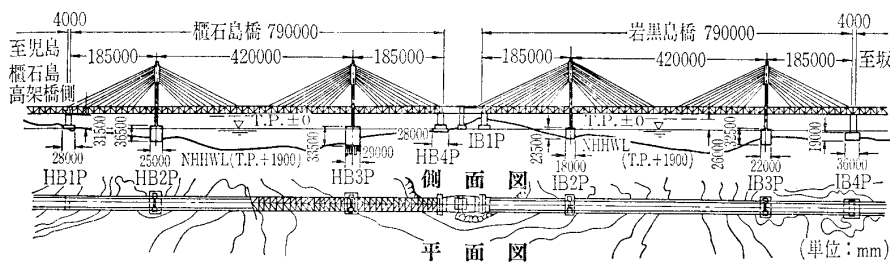


図-12 橋石島橋・岩黒島高架橋・岩黒島橋一般図

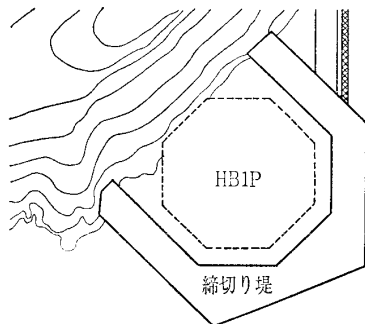


図-13 1P 締切堤平面図

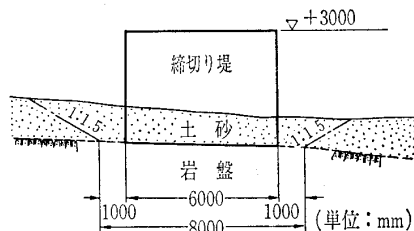


図-14 締切堤側面図

響が小さいため中詰石や消波ブロックを設置する必要がなく、それだけ簡単になっている。施工も、陸上からアプローチできない門崎高架橋と異なり資機材搬入が容易で、また海象も厳しくないため海上作業を長時間行うことができることにより、基地で大ブロック組みせず、単材あるいは小ブロック組みして行った。手順としては、まず杭打ち船により鋼管杭を打設し、その上に陸よりトラッククレーンでH鋼および覆工板を架設する。次に、架設の完了した部分よりトラッククレーンでH鋼および覆工板を張り出して行くといった順序である。ケーソン周囲の矢板は、クレーン船にパイロハンマを取付けて建込んだ。また、ケーソン周囲の作業ヤード部分については、ケーソン施工中に矢板にかかる海水圧や、矢板とケーソンの間を埋め戻した際の土圧を受け止める構造とする必要があるため、工場で作成したものを架設した。

2.2 児島・坂出ルート

児島・坂出ルートは、岡山県都窪郡早島町から香川県坂出市川津町までの37.5 kmの道路および岡山県倉敷市茶屋町から香川県綾

歌郡宇多津町までの32.4 kmの鉄道を計画しており、全線一斉に昭和63年春完成を目標に建設を進めている。

このルートの海峡部は、瀬戸内海国立公園発祥の地である倉敷市の鷺羽山を始点とし、坂出市の番の州を終点とする13.1 kmの道路・鉄道併用部分（以下「共用部」という。）より成っている。途

中比較的大きい島を4つ経るが、このうち橋石島、岩黒島および羽佐島の3島で行った海中締切工は大規模で、それぞれ独自の工法で施工している。地質は3島とも良好な花崗岩類が露出または薄い表土下に分布している。潮流は海峡中心付近では最大約2.5 m/sとやや大きい、各施工位置では島に遮られてほとんど影響を受けず、波も小さくなっている。

以下、これら3島の締切工を順に紹介する。

(1) 橋石島橋 1P (HB 1P) の締切工事

橋石島橋は岩黒島橋と共に児島・坂出ルートの中央部に位置する二連の斜張橋の1つで、橋石島と岩黒島の間に架かる橋長790m、支間割185m+420m+185mの道路鉄道併用橋である。下部工はHB1PおよびHB4Pが直接基礎、HB2PおよびHB3Pが設置ケーソン基礎となっている。

HB1Pは橋石島南端の岬部に位置する橋脚で、フーチングの約半分はゆるく傾斜した水深0～3 mの海底に設けられる。支持層である花崗岩は海底下1～2 mにあるため、基礎位置の掘削は水中掘削とするよりも、締切堤で締切った中で陸上掘削の延長として行った方が経済的である。このため、図-14に示すように、底部を岩着させて止水を図る、場所打ちコンクリート形式の締切堤を設けることとした。

施工は、図-15に示す手順で行った。上載荷重がなく、大きな支持力を必要としないため、基礎掘削はほとんど土砂のみを行い、岩盤は不陸均し程度とした。

(2) 岩黒島の締切工事

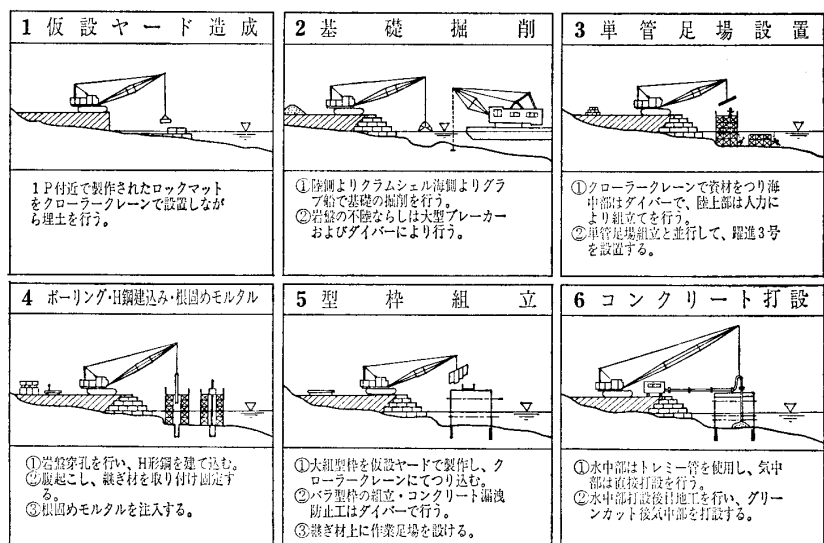


図-15 施工手順図

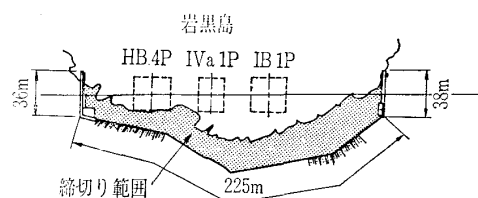


図-16 岩黒島縮切り平面図

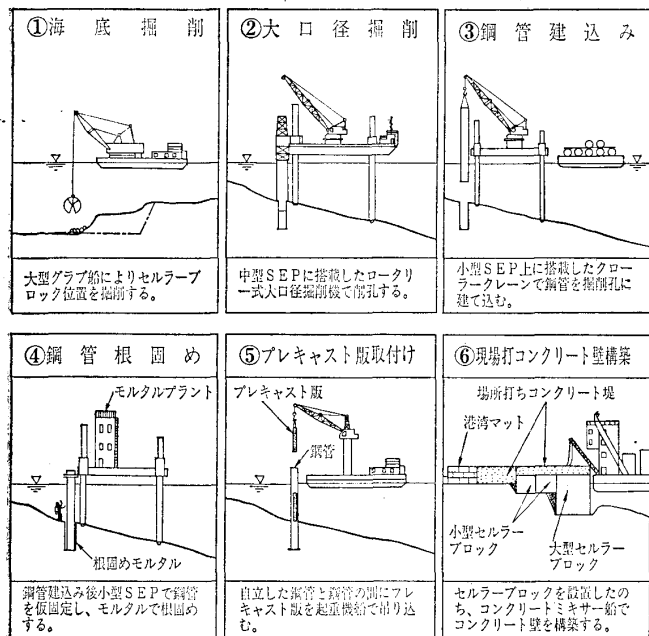
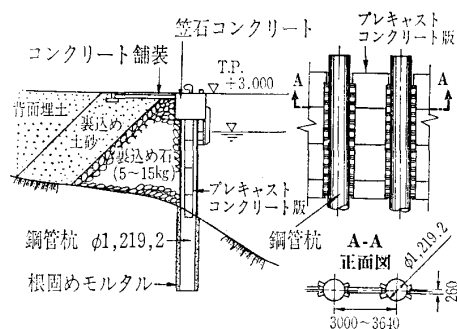


図-17 施工手順図



断面図 平面図

図-18 岸壁部詳細図

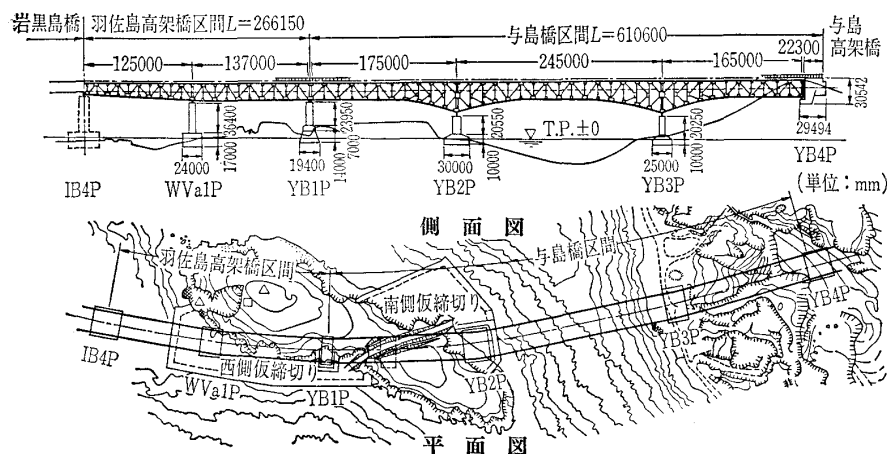


図-19 羽佐島高架橋・与島橋一般図

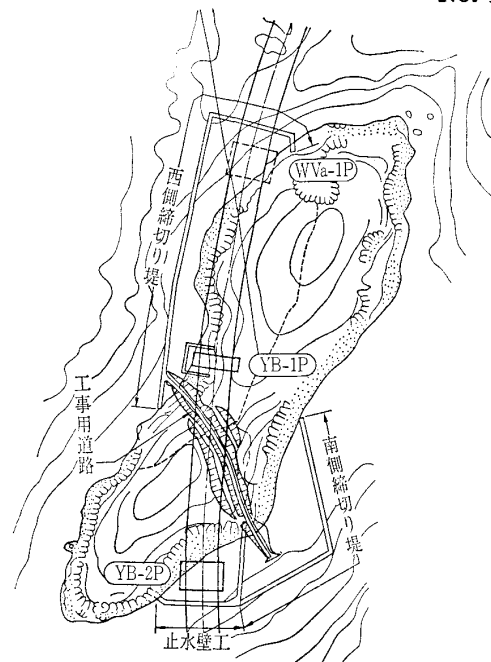


図-20 羽佐島平面図

櫃石島橋と岩黒島橋の間にある岩黒島には、櫃石島橋 4P (HB4P)、岩黒島橋 1P (HB1P) および岩黒島高架橋 1P (IVa1P) の計 3 基の橋脚を施工しているが、これらは同じ縮切内で施工されている。岩黒島橋は櫃石島橋と同様、橋長 790m、支間割 185m+420m+185m の斜張橋である。櫃石島橋と岩黒島橋の間は、橋長 92.566m の道路・鉄道 2 層式の 2 径間連続 PC 橋である岩黒島高架橋で結ばれる。下部工は、Iva1P および IB1P が直接基礎、IB2P、IB3P および IB4P が設置ケーソン基礎となっている。

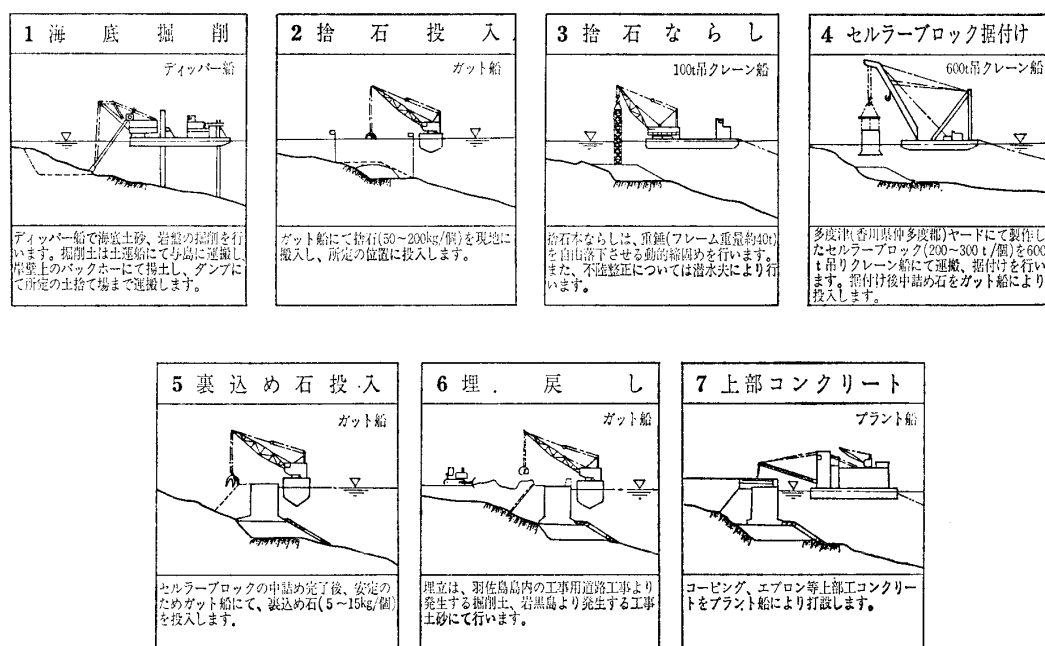
岩黒島内の 3 基の橋脚は、一直線に並んで汀線付近に位置し、支持層は浅いところで地表から 2m ほどの深さである。地形は、橋軸直角方向の西側に落ちる急斜面となっており、基礎底面の深さもそれに合せて T.P.+5.0m から T.P.-1.0m と変化させている。この、一部海面下の掘削を容易にし、またコンクリートプラント等の設置場所や施工のための作業ヤードを構築するため、3 基の橋脚を含む南北約 255m という広範囲を縮切った (図-16)。形式は、海底が急傾斜しており縮切り位置が深くなっているため、

堤体が最も小型となり工事が少なくて済む鋼管杭とプレキャスト板の組合せとした。

施工は、図-17 に示す手順で行った。施工後、縮切内を埋立て、作業ヤードを造成した。堤体付近には、水圧に抗するため裏込石 (5~15kg/個) および裏込土砂を施工し、背面に埋土した (図-18)。

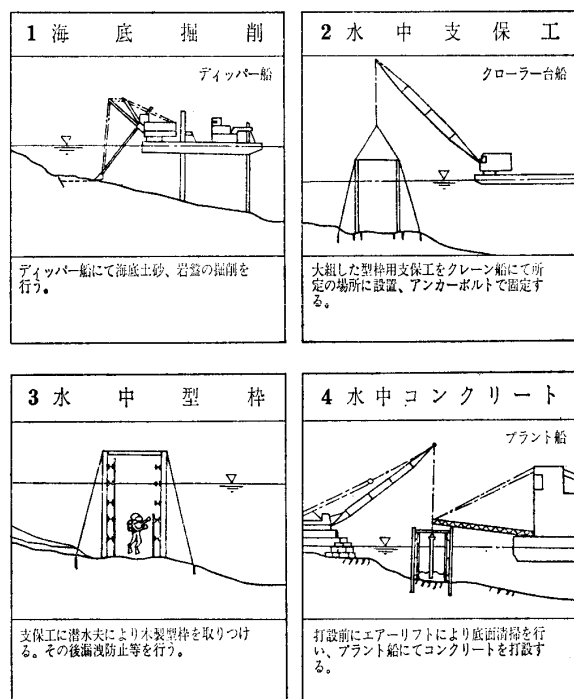
(3) 羽佐島の縮切り工事

羽佐島は、南北約 430m、東西約 120m、周囲約 1km の無人島で、ここには羽佐島高架橋および与島橋の 3 基の橋脚が設けられている (図-19)。羽佐島高架



図一21 締切堤施工手順図

ている。一方、YB1PおよびYB2Pは直接基礎であるため、前者とは別形式の止水壁工を基礎周囲に構築した。基礎底面の最深部がYB1PでT.P.-2m、YB2PでT.P.-5mであるため、基礎掘削時の止水性は良好でなければならず、このため止水壁は堰石島橋1Pの締切堤同様場所打ちコンクリート形式とし、底面を岩着させることとした。これに対し、締切堤は工期が短くて済むセルラーブロック形式とした。



図一22 止水壁施工手順図

施工は、締切堤は図一21、止水壁は図一22に示す手順で行った。締切堤背面は、岩黒島同様堤体の安定のため、裏込石(5~15kg/個)で裏込めした。

3. あとがき

本四連絡橋に限らず、海峡を横断する橋梁の基礎工事においては、作業ヤードとしての築島工や締切工が必要不可欠である。海峡における架橋位置は、通常海峡幅が最短となるよう選定されるが、その結果橋梁の両側の地形は岬あるいは尾根となっている場合が多く、陸地に作業ヤードを設けるのは困難となる。また、本四連絡橋のように国立公園内での施工となれば、地形の改変も最少限としなければならない。更に、陸からのアプローチが困難な場合は、着桟としてのヤードが必要となってくる。

一方、海峡部は一般に海象がほかより厳しく、そこに設けられる築島工や締切工は仮設構造物とはいっても強固でなければならず、重要な“人工島”あるいは“人工半島”としての役割を果たすべきものであろう。

今回は紙面の都合で、5つの例しか紹介できなかったが、本四連絡橋ではほかにも各種築島工や締切工を施工しており、これらなしには本四連絡橋も考えられないというほど重要な役割を果たしている。大海洋土木としての本四連絡橋は、人工島や人工半島の上に成立していると言っても過言ではない。

参考文献

- 1) 佐伯康二・森 章・佐藤昭光：門崎高架橋準備工事，土木施工，Vol. 22，No. 2，1981。
- 2) 高橋幸三・有田 稔：門崎高架橋建設工事の現況，橋梁，Vol. 16，No. 4，1980。
- 3) 大町武司・武山哲郎・中尾俊哉：撫養橋4Pオープンケーソン施工報告，本四技報，Vol. 6，No. 21，1982。

(原稿受理 1985.9.12)

橋は橋長266.15m、支間割127.55m+138.6mの2径間連続トラス橋、与島橋はそれに続く、橋長588.3m、支間割176.5m+245m+166.8mの3径間連続トラス橋である。下部工は、羽佐島高架橋の1P(WVa1P)がニューマチックケーソン基礎、与島橋のYB1、2、3、4Pは直接基礎となっている。

このうち、羽佐島にはWVa1P、YB1PおよびYB2Pの3基が設けられているが、WVa1Pはニューマチックケーソン基礎であるため、止水性を考慮していない締切堤で仮締切し、ヤードを造成して施工した。また、島の南側にもYB2P施工のための作業ヤードを同様の形式で設け