

Fig.2 櫃石島橋下部工一般図



Photo 1 櫃石島橋下部工完成現場全景

- ② 両島間の水路の工事期間中の航路保全が必要である。
- ③ 大水深、急潮流下の海中で、潜水作業が不可欠である。
- ④ SEPを使用した工種は昼夜勤作業で実施する。

作業基地は、事務所、宿舍等を設けた岡山県側の児島基地と企業先から無償貸与を受けた香川県側の瀬居基地に分かれており、ともに現場から海上距離で約10km離れている。坂出の瀬居基地は、最大2万t級の船舶が接岸できる延長約1km岸壁(他工区と共用)と、約3万m²のヤードを有することから、大型資機材の搬出入、仮置場、揚土場および鉄筋加工場等に使用した。

各基地から現場までの人の往来は、3隻の交通船(50人乗り程度)の定時運航による海上輸送により、通信連絡には無線電話(UHF,VHF)を使用した。

Table 1に櫃石島橋下部工工事の主要工事数量、Table 2に実施工程表及びFig.3に2P、3P基礎構造一般図を示す。

§ 3. 設置ケーソン工法の概要

3-1 施工条件

児島～坂出ルート海峡部の海底地質状況は、基盤が花崗岩であるが、表層の5～15mはほとんど風化しており、部分的に基盤上20～30mの厚さで堆積層がある。

橋の基礎は、この風化岩盤、堆積層を除去して堅固な岩盤上に据え付ける必要があるため、基礎底面の位置は、水深10～50mと非常に深くなり、また平面寸法も大きく、最大のもは長さ75m、幅59mとなる。海上の施工条件としては、最大潮流が5ノットを超え、周辺海域は、主航路に囲まれて1日約1,000隻の船舶が航行し、また漁船の操業密度が高い等、海中工事の極めて難しい箇所である。

3-2 海中工事の施工例

基礎の施工水深が20mを超えるような過去の施工例は、全て外国の例になるが、一部の特殊工法を除けば、仮締切工法とオープンケーソン工法で施工されている。

Table 1 櫃石島橋下部工工事主要工事数量

施工場所	工 種	数 量	摘 要
HVa27P HVa30P	掘 削 鉄 筋 型 枠 コンクリート	59,300m ³ 2,340t 7,400m ² 16,780m ³	岬部の地山, 土砂, 軟岩, 硬岩の掘削 支給鉄筋, 主筋はD51が主体 圧着継手 5,363箇所 ガス圧接 1,907 "
HB1P	締切堤掘削 締切堤コンクリート 置換部コンクリート 鉄 筋 型 枠 躯体コンクリート アンカーフレーム据付	920m ³ 3,480m ³ 2,360m ³ 1,350t 3,660m ² 11,850m ³ 7基	水中部軟岩までの掘削 水中コンクリート(TP-5.0m~TP±0.0m)と 気中コンクリート(TP±0.0m~TP+3.0m) 躯体フーチング下部コンクリート (TP-6.0m~TP±0.0m) 支給鉄筋, 主筋はD51が主体 圧着継手 3,883箇所 ガス圧接 1,988 "
HB2P	海底発破 海底掘削 底面仕上 鋼製ケーソン沈設 根固め捨石 粗骨材充填 モルタル注入A モルタル注入B 表面仕上 鉄 筋 型 枠 HB2P コンクリート 塔アンカーフレーム据付	432本 24,180m ³ 1,530m ² 1式 3,600m ³ 31,960m ³ 1,102m ³ 14,572m ³ 1,130m ² 690t 560m ² 9,530m ³ 2基	電磁誘導無線起爆工法, SEP“たまの”使用 薬量 10,200kg 13m ³ 級グラブ船による掘削 SEP“盤石”にφ2.5m大口径掘削機を搭載し, ラップ掘削 により海底地盤を平坦に仕上げる ケーソン鋼重2,034t, 簡易構築架台搭載 3,000t吊FC船による一括吊運搬据付 150mm~800mmの捨石 80mm~150mmの大径粗骨材の投入, リクレーマ船使用 根固め部への注入, MP船“世紀”使用 TP-28.0m~TP-25.0m間 内殻部への注入, MP船“世紀”使用 TP-28.0m~TP+0.5m間 プレパックドコンクリートの天端50cmを研る 支給鉄筋 圧着継手 686箇所 ガス圧接 1,216 "
HB3P	海底掘削 底面仕上 鋼製ケーソン沈設 モルタル注入A モルタル注入B モルタル注入C 床版の製作・架設 地盤安定化グラウト 大口径くい掘削 大口径くい鉄筋	32,330m ³ 1,730m ² 1式 1,588m ³ 3,719m ³ 5,530m ³ 660t 870m ³ 312m 930t	13m ³ グラブ船による海底直接掘削 SEP“盤石”にφ2.5m大口径掘削機を搭載し, ラップ掘削 により海底地盤を平坦に仕上げる ケーソン鋼重5,592t, 構築架台を搭載した曳航沈設タイプ 3,000t吊FC船使用 外周への注入, MP船“世紀”使用 TP-25.0m~TP-23.0m間 内殻部への注入, MP船“世紀”使用 TP-25.0m~TP-12.0m間 外殻部への注入, MP船“世紀”使用 TP-22.06m(平均)~TP-12.0m間 ケーソン上の作業足場用床板 大口径くい掘削地盤の崩壊防止用グラウト φ4.0mのロータリーボリングマシンによる掘削 32本, 1孔当りの掘削長 4m~17m 鉄筋籠, 主筋はD51

(Table 1つづき)

施工場所	工 種	数 量	摘 要
	大口径くいコンクリート	10,070m ³	水中トレミーコンクリート工法、コンクリートプラント船(120m ³ /h)使用
	鉄 筋	880t	TP±0.0m~TP+8.40m間を配筋 支給鉄筋 圧着継手 572箇所 ガス圧接 1,220 "
	型 枠	460m ²	TP+5.5m~TP+8.40m間の外周型枠 大組み型枠使用
	コンクリート(鉄筋部)	16,080m ³	TP-12.0m~TP±0.0m間の無筋部コンクリート コンクリートプラント船(120m ³ /h)使用
	コンクリート(無筋部)	11,190m ³	TP±0.0m~TP+8.45m間の鉄筋部コンクリート コンクリートプラント船(120m ³ /h)使用
	塔アンカーフレーム据付	2基	支給製品、主塔のアンカーフレーム据付 100t吊FC船使用
共 通	海上警戒 工事記録映画	34月 1式	500PS級2隻、昼夜24時間警戒 35mmカラーフィルム

Table 2 樫石島橋下部工工事実施工程表

施工場所	工 種	昭和57年度			昭和58年度			昭和59年度			昭和60年度	備 考
		9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	
HVa27P	掘 削	準備			掘 削							
HVa30P	コンクリート							コンクリート				
HB1P	掘 削	掘 削			掘 削							
	コンクリート	コンクリート			コンクリート			コンクリート				
HB2P	海底掘削	SEP構築			穿孔発破			海底掘削			底面仕上	
	ケーソン沈設				ケーソン沈設			アンカー設置・沈設				
	海中コンクリート							粗骨材投入			表面仕上	
	気中コンクリート							根固め			気中コンクリート	
HB3P	海底掘削	海底掘削			底面仕上							
	ケーソン沈設				ケーソン沈設			モルタル注入				
	大口径くい				調査・グラウト			大口径くい				
	気中コンクリート							気中コンクリート			片付	
その他	海上安全対策				海上警戒							
全 体 工 期		S.57.7.31			下部工(その1)工事			S.59.1.31				
					S.58.3.31			下部工(その2)工事			S.59.7.12	
					S.58.10.1			下部工(その3)工事			S.60.7.12	

仮締切工法は、その構造上から水深及び基礎深度が比較的浅い箇所に適用されている。オープンケーソン工法は、ケーソンの掘削用開孔の中を通してグラブ等で海底を掘削する方法であるが、岩盤に当たるとそれ以上掘れず、特に本ルートのように基盤が傾斜しているとなお困難な状態となることが予想された。そこで、開発されたのがFig.4に示す設置ケーソン工法である。

3-3 設置ケーソン工法

当工事で施工した設置ケーソン工法は、直接海底をオープン掘削して基礎底面の岩盤を出した後、造船用ドックで製造した鋼製ケーソンを据え付け、ケーソン内に粗骨材を投入後、モルタルを一気に注入して空隙を充

填するプレパックドコンクリートで施工するものである。鋼製ケーソンは、海上作業の確実性、安全性確保および迅速化のために極力プレハブ化を図ったもので、さらに据付後直ちに型枠として機能できる構造とした。また、コンクリート打設についてもプレパックドコンクリート工法により3~4万m³のマスキングコンクリートの3~4日の連続打設に成功した。これは本四架橋用に開発したモルタルプラント船『世紀』の能力に負うことが大きい。このコンクリートを従来工法、例えば、トレミ工法で施工すれば、1年以上の工期を要し、かつ、連続打設が困難で、どうしても海中でのコンクリート打継目処理が必要になる欠点もある。

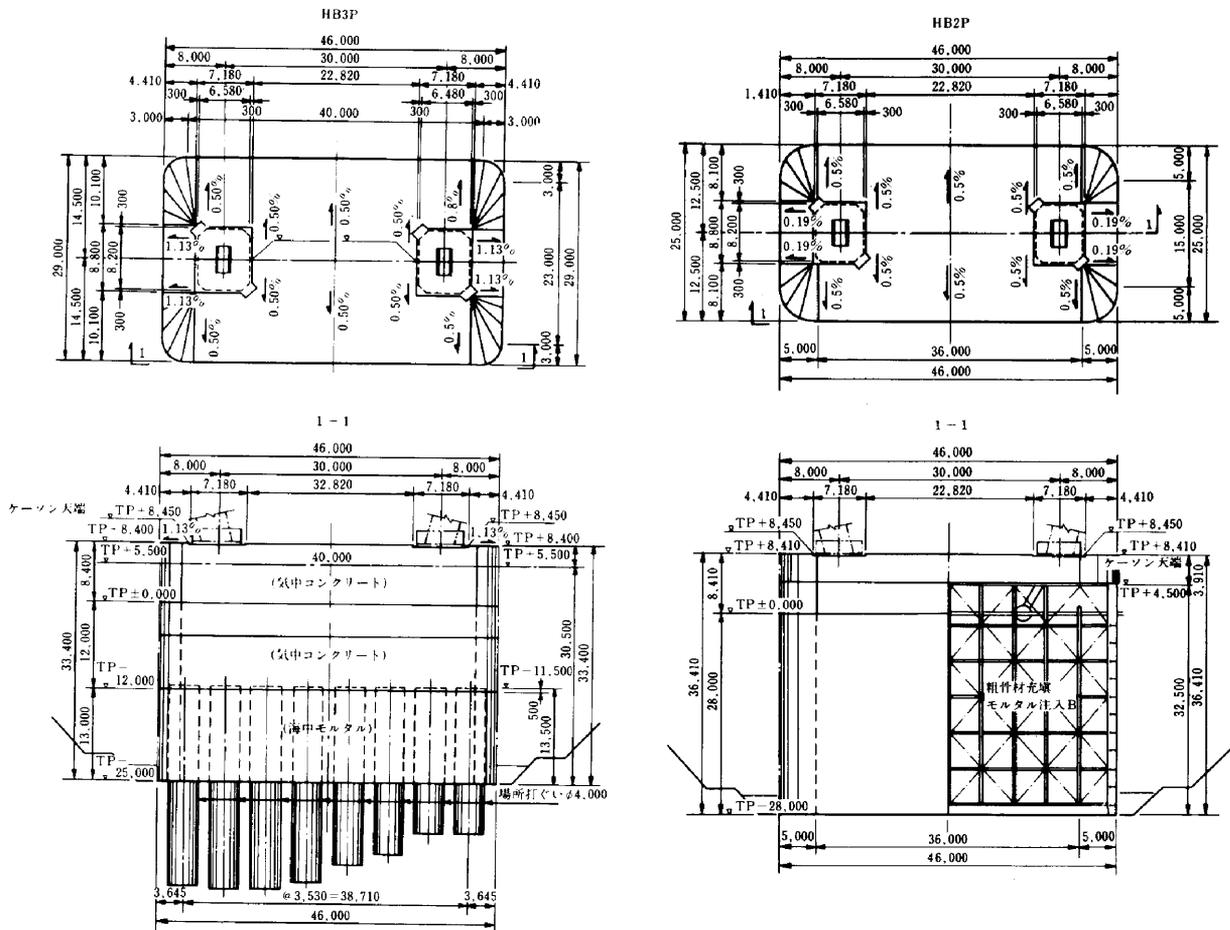


Fig.3 2P・3P基礎構造一般図

Table 3 児島・坂出ルートの中橋脚基礎一覧

橋梁名	上部工形式	支間割り (m)	基礎						
			番号	基礎寸法 (長×幅×高)(m)	基礎深度 (TP-m)	基礎施工法	水深 (TP m)	掘削量 (m ³)	コンクリート量 (m ³)
下津井瀬戸大橋	張出し径間付き単径間吊橋	230+940+230	SB2P	20.0×54.0×30.0	25.0	ニューマチックケーソン工法	—	22,000	18,000
			SB3P	20.0×54.0×14.0	6.0	コファダム工法	—	28,000	15,000
横石島橋	斜張橋	185+420+185	HB1P	φ28.0×31.5	5.0	コファダム工法	—	2,000	12,000
			HB2P	25.0×46.0×36.0	28.0	設置ケーソン工法	-9~-22	22,000	37,000
			HB3P	29.0×46.0×33.5	25.0	設置ケーソン工法	-13~-22	59,000	61,000
岩黒島橋	斜張橋	185+420+185	IB2P	18.0×46.0×23.5	15.0	設置ケーソン工法	-8~-16	7,000	19,000
			IB3P	22.0×46.0×32.5	24.0	設置ケーソン工法	-3~-21	24,000	32,000
			IB4P	36.0×32.0×19.0	14.0	設置ケーソン工法	-3~-11	17,000	36,000
羽佐島高架橋	3径間連続トラス橋	102+132+102	Wva1P	24.0×34.0×53.4	11.0	ニューマチックケーソン工法	—	10,600	16,000
与島橋	3径間連続トラス橋	154+204+154	YB2P	30.0×40.0×30.6	5.0	コファダム工法	—	3,900	17,400
南北備讃瀬戸大橋	3径間連続吊橋	北備讃瀬戸大橋 274+999+274	BB2P	23.0×57.0×20.0	10.0	設置ケーソン工法	+4~-8	22,000	24,000
			BB3P	23.0×57.0×20.0	10.0	設置ケーソン工法	+10~-4	42,000	24,000
			BB4A	57.0×62.0×15.0	10.0	設置ケーソン工法	+16~-8	58,000	329,000
		南備讃瀬戸大橋 274+1,100+274	BB5P	27.0×59.0×42.0	32.0	設置ケーソン工法	-21~-24	32,000	63,000
			BB6P	38.0×59.0×60.0	50.0	設置ケーソン工法	-32~-36	126,000	129,000
			BB7A	75.0×59.0×55.0	50.0	設置ケーソン工法	-13~-20	597,000	473,000

さらに、自己昇降式作業足場(SEP)、海底発破、大深度潜水作業、水中基礎岩盤の確認方法等の新技術開発によって、設置ケーソン工法の施工が初めて可能となり、

児島～坂出ルートの中橋脚基礎10基に採用されたが、横石島橋2Pも、そのうちの1基である。Table 3に同ルートの中橋脚基礎の一覧表を示す。

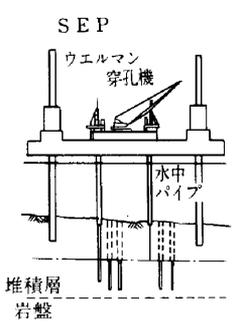
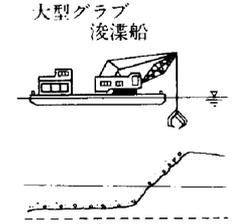
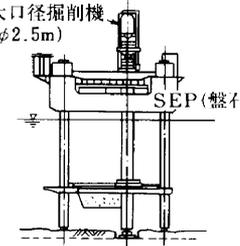
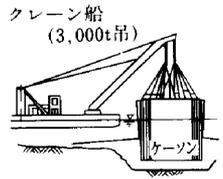
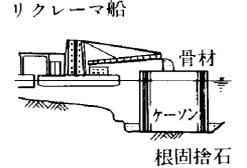
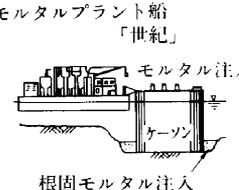
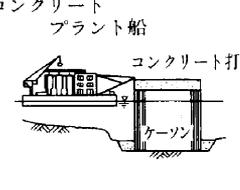
①海底発破	②海底掘削	③底面仕上げ	④ケーソン沈設
 <p>SEP ウエルマン 穿孔機 水中パイプ 堆積層 岩盤</p>	 <p>大型グラブ 浚渫船</p>	 <p>大口径掘削機 (φ2.5m) SEP(盤石)</p>	 <p>クレーン船 (3,000t吊) ケーソン</p>
<p>自己昇降式作業足場 (SEP) に搭載した穿孔機により堆積層を通して穿孔, 装薬し, 堆積層を残したまま発破 (電磁誘導起爆) するオーバーバーテン工法で行う。</p>	<p>海底発破完了後, 堆積層及び破碎された岩石を大型グラブ船で, TP-49.5mまで掘削する。</p>	<p>グラブ船による掘削完了後, SEPに搭載した大口径掘削機により, TP-50.0mまで仕上げ掘削を行う。掘削ブりはエアリフトで土運船に排出する。</p>	<p>別途工場製作した鋼製ケーソンを曳航し, ケーソン上に養生した沈設設備を使用し, 二重壁内にポンプ注水して着底1m付近まで沈下させた後, 大型クレーン船により沈設する。</p>
⑤骨材投入	⑥モルタル注入	⑦気中コンクリート	
 <p>リクレーマ船 骨材 ケーソン 根固捨石</p>	 <p>モルタルプラント船 「世紀」 モルタル注入 ケーソン 根固モルタル注入</p>	 <p>コンクリート プラント船 コンクリート打設 ケーソン</p>	
<p>沈設後, ケーソンの外周部に根固め捨石を投入し, ケーソン内に粗骨材(φ80~150mm)を充填する。</p>	<p>モルタルプラント船「世紀」により根固めモルタル注入を行った後, ケーソン内にモルタルを連続注入する。ケーソン内のモルタル注入は平面的に3回に分割して行う。</p>	<p>注入後, プレパックドコンクリートの表面部をはつり(0.5m), コンクリートプラント船により気中コンクリートを打設する。</p>	

Fig.4 設置ケーソン工法の施工手順

3-4 脚付き設置ケーソン工法

櫃石島橋3Pにおいては, 基礎岩盤の岩相変化が激しい上に岩黒島の民家に近く, 海底発破の薬量の制限から, 所定の工期では, 基礎の施工は不可能であったので, ケーソン下に大口径杭を施工する脚付き設置ケーソン工法が採用された。

大島大橋や大鳴門橋の多柱基礎は, フーチング部が海底面より上にあるが, 櫃石島橋3Pは, フーチング部が海底に着いており, 杭以外の底面も荷重を分担する構造となっている。このような基礎工法を選定した理由は下記のとおりである。

- ① 地質の複雑な変化に対応できる。
- ② 海面下40mにも及ぶ基礎支持面を信頼できるものにする。
- ③ 工期を短縮できる。
- ④ 大口径杭施工時に, ケーソンを作業足場として利用できる。

大口径杭は, 種々の検討の結果, φ4.0mの掘削径, 4列×8行=32本の配置とし, 基礎の傾きを押さえるために, 杭下端を同一の地盤(C_M級)に着底させることとした。従って杭長は均一ではない。また, 3Pでの脚付き設置ケーソン工法の施工フローシートをFig.5に示す。

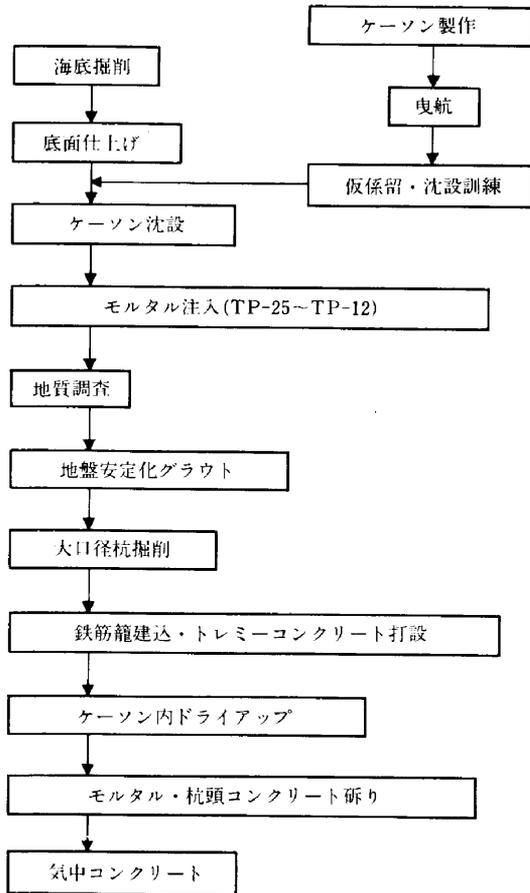


Fig.5 脚付き設置ケーソン工法
施工フローシート(3P)

§ 4. 海底発破

4-1 概要

榎石島橋2Pにおいて、ケーソンを支持するC_L~C_{II}級岩盤まで直接掘削することは、現有の大型グラブ船では不可能である。そこで、あらかじめ掘削範囲の岩盤に亀裂を発生させ、グラブの爪がたつような海底発破が必要であった。Fig.6に2P海底発破施工手順図を示す。

海底発破は、瀬居基地で構築したSEP『たまの』を現場に曳航・設置し、岩盤に穿孔・装薬、SEPを退避させた後、無線式電磁誘導起爆工法により行った。Table 4はSEP『たまの』構築設備一覧表を示す。

Table 4 SEP『たまの』構築設備一覧表

名称	仕様	数量	備考
ウェルマン穿孔機	WM-ST2	6台	
クローラクレーン	50t吊	2台	W=45t/台
エンジン発電機	350kVA	5台	
———	90kVA	2台	
グラウトポンプ	300ℓ/min	6台	
監督員詰所	2K×3K×1F	1棟	
JV及作業員詰所	4K×6K×2F	1棟	
SEPタラップ		1式	
水中ポンプ	φ100 30m	2台	
———	φ 80 20m	2台	

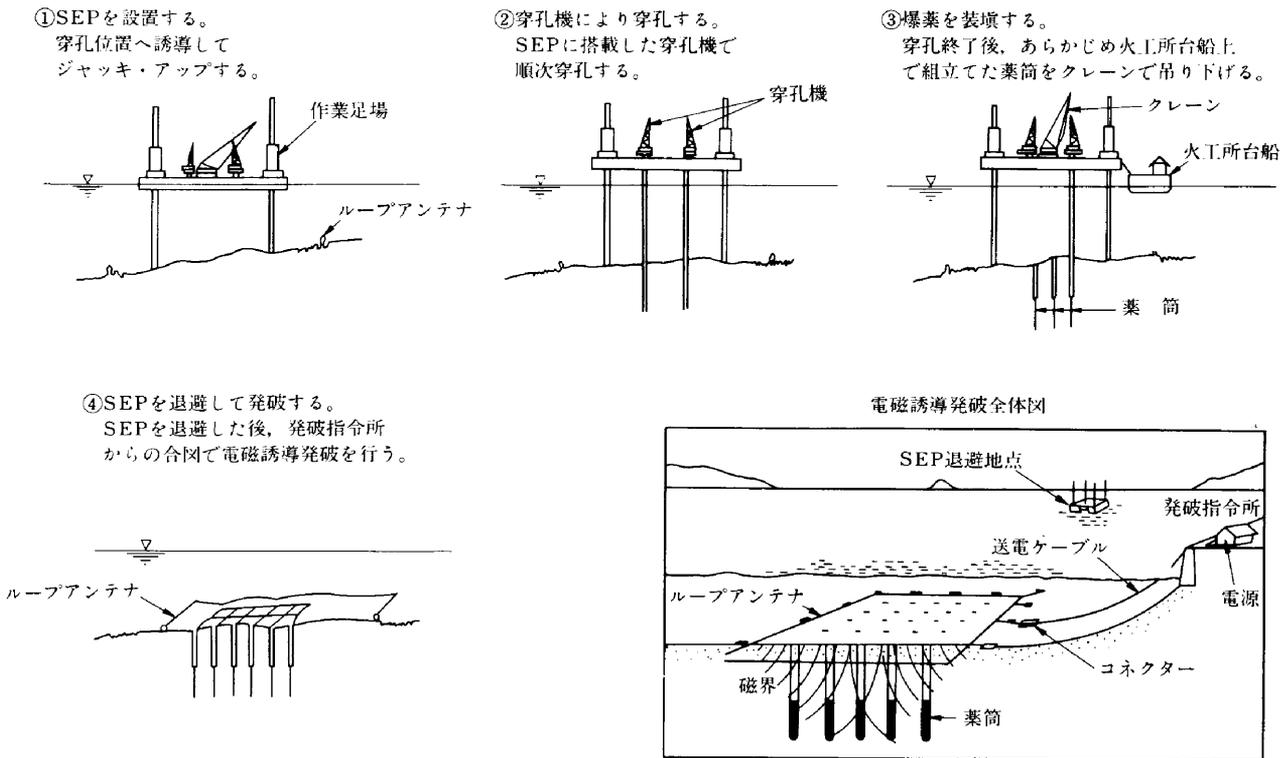


Fig.6 2P海底発破施工手順図

発破地点は、水深が9m～25mと変化にとんだ地形で、かつ、最大潮流速が5ノット以上を記録する施工条件の厳しい所であった。

1回当りの発破薬量は、檜石島、岩黒島への発破振動の制約から、240～480kgとなり、総薬量は10,200kgに対し、発破回数は33回であった(平均310kg/回)。

海底発破は、昭和57年11月シンカ装置に始まり、昭和58年10月SEP機撤去まで約1年を費やし、その間急潮流によるループアンテナの損傷に対する補修を行った以外は、特に大きなトラブルもなく無事完了した。また、穿孔発破作業の標準施工サイクルは、穿孔機のビットの改良およびSEPシフトの効率化により、7日/回と非常に短くなり、全体工期の短縮に大いに貢献した。

Photo 2は、2Pにおける海底発破状況を示す。



Photo 2 海底発破状況
(第1回発破、薬量480kg)

4-2 穿孔・装薬

海底発破により岩盤に亀裂の生じる範囲は、平面的には、1.5～2.0m程度、下方には、0.5m程度と言われている。従って、2Pでは、穿孔間隔は岩盤厚の大きい所で2.0m×2.0m、岩盤厚の小さい所で2.0m×2.5mとした。

なお、孔尻の高さは、基礎底面を傷めることなく岩盤を、確実に掘削できるように、仕上げ盤から0.5m上りのTP-27.5mとした。

穿孔作業は、SEP上の移動装置(サブストラクチャ、トラベラ)に搭載した穿孔機を移動させて行った。

Photo 3は、SEP『たまの』である。

穿孔機には、インナチューブと云う刃先引込装置内蔵のビットを有し、ドリルパイプを引き上げないでビット交換、装薬を行うことができ、しかも長尺穿孔に適したウエルマン穿孔機を採用した。穿孔外径は146mm、ドリルパイプ内径は127mmであった。ドリルパイプは、潮流を受けると曲がる恐れがあり、これを防ぐために外径800mm、



Photo 3 SEP『たまの』

肉厚25mmの水中パイプを、潮止りに海底面に押しつけて使用した。

装薬量は、発破対象岩の岩区分、水深等を考慮して計画した。標準装薬量は、過去の施工実績から求めた次式により決定した。Fig.7は、2P海底発破パターンを示す。

$W = A \cdot \sum w_i \cdot l_i + \text{水深による補正}$

W : 装薬量(kg/孔) A : 分担面積(m²)

w_i : 岩区別標準装薬量(kg/m³) l_i : 岩区別穿孔長(m)

1孔当りの装薬量は、10kg/孔～40kg/孔となった。

発破孔への爆薬の装填には、確実に、迅速かつ円滑に行え、信頼性のあるカートリッジ方式を採用した。

カートリッジ方式とは、あらかじめ所要の寸法と強度をもつ塩ビ製の円筒形容器を用意しておき、その中に、薬量に応じて爆薬、親ダイ、起爆用の各部品等を順序よく挿入して薬筒(カートリッジ)を作り、その上部に吊り上げ用治具を取付け、クレーン等でSEP上の穿孔機のドリルパイプを通して薬筒全体を発破孔に静かに降下させながら装填する方法である。Fig.8は、カートリッジ構成図を示す。

また、今回は、穿孔径が制限された条件下での長孔発破なので、岩盤に対する破碎効果を十分期待するために、一部、分散装薬(デッキチャージ)を行った。Fig.9に分散装薬模式図を示す。

海底発破に使用する爆薬及び火工品は、Table 5の火薬類の仕様に示すように、海底発破用に開発されたものであり、現場の火工所台船へは火薬運搬船を用いて、海上運搬した。

4-3 発破

(1) 起爆方法の選定

海底発破の装薬方法は、小規模作業での貼り付け発破を除けば、ほとんど、破碎効果が大きい穿

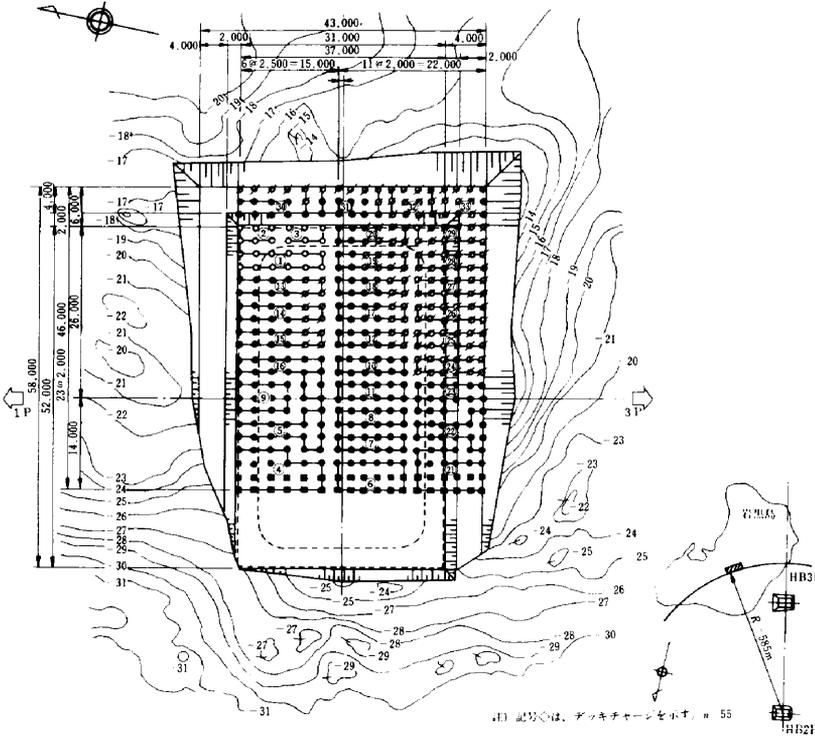


Fig.7 2P海底発破パターン図

発破順序	穿孔数	GX-1ダイナマイト		穿孔機稼働台数				発破日
		再発重量		3台	2台	1台	計	
①	12孔	480kg		4			4	2・15
②	6	240			2	2	4	28
③	6	240			2	2	4	3・5
④	22	320		6	2		8	12
⑤	16	320		4		4	8	19
⑥	18	240		6			6	26
⑦	12	240		4			4	31
⑧	12	240		4			4	4・6
⑨	12	240			6		6	11
⑩	12	240		4			4	20
⑪	12	240		4			4	30
⑫	12	280		4			4	5・7
⑬	12	280		4			4	25
⑭	12	280		4			4	30
⑮	12	280		4			4	6・4
⑯	16	280		4		4	8	10
⑰	12	280		4			4	15
⑱	12	280		4			4	21
⑲	12	320		4			4	27
⑳	12	320		4			4	7・2
㉑	22	320		6	2		8	8
㉒	16	320		4		4	8	14
㉓	16	320		4	2		6	20
㉔	12	360		4			4	27
㉕	12	360		4			4	8・1
㉖	12	360		4			4	6
㉗	12	360		4			4	11
㉘	12	360		4			4	20
㉙	12	360		4			4	26
㉚	15	360			6	3	9	9・1
㉛	15	360			6	3	9	6
㉜	12	360			6		6	12
㉝	12	360			6		6	19
計	432	10,200kg		110	40	22	172	

1孔当りの装薬量	孔数	小計	記号
40kg	24	960kg	←
30	148	4,440	←
20	220	4,400	←
10	40	400	←
計	432	10,200kg	



Fig.8 カートリッジ構成図

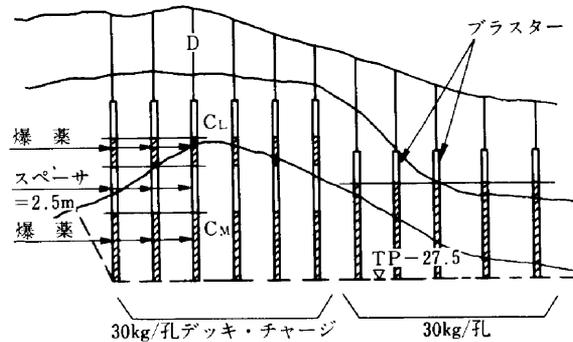


Fig.9 分散装薬模式図

Table 5 火薬類の仕様

品名	仕様
爆薬 (GX-1)	種類 膠質ダイナマイト
	爆速 6,500m/s以上
	耐水圧性 5kg/cm ² の水圧で30日以上経過しても完爆すること。
電気雷管 (EDX-2)	耐水圧性 5kg/cm ² の水圧で30日以上経過しても完爆すること。
	耐静電性 2,000 PF 8kV
	耐衝撃性 900kg/cm ² 以上
起爆筒 (CN-1)	伝爆薬 テトリル・24±2g
	耐水圧性 5kg/cm ² の水圧で30日以上経過しても完爆すること。
	耐衝撃性 1,000kg/cm ² 以上
電磁誘導起爆素子 (ブラスター-LB-4W)	耐電圧 AC 100Vで1分間異常がないこと。
	受信周波数 550±2 Hz
	放電電圧 30V±1V
	放電開始時間差 各素子の標準放電時間に対し±1 msec以内
	耐水圧性 5kg/cm ² の水圧で30日以上経過しても異常のないこと。
誘起電圧 60V 1 AT m	

Table 6 海底発破起爆工法の概要

起爆方法	工法概要	特徴
有線方式	有線電気起爆	陸上、船、足場等からの電線で起爆する。 ●潮流の強い場所では困難。 ●段発発破が可能。
	導爆線起爆	陸上、船、足場等からの導爆線で起爆する。 ●経済性、確実性、安全性に優れている。 ●ダイバー作業が多い。
無線方式	超音波起爆	500~1,000m離れた船上から超音波信号を送り、起爆する。 ●水深、潮流の大きい場所に適する。 ●海底地形の複雑な場所では、施工に注意を要する。
	電磁誘導起爆	発破区域を囲むようにループアンテナを海底に設置しておき、これを流れる交流電流による磁界で起爆する。 ●堆積層が厚い場所でも可能。 ●不測の暴発事故がない。 ●ループアンテナ、送電線の保持が、潮流の強い場所では大変。

孔装薬発破である。次に、起爆方法としては、導爆線、電気段発雷管、超音波及び電磁誘導起爆の4種類あり、その各々の特徴は、Table 6の海底発破起爆工法の概要に示すとおりである。

陸上発破では、電気雷管を用いた有線起爆方式が一般的でかつ信頼性が高いが、大深度、急潮流下の海底発破では、有線起爆方式は、脚線の断線やもつれ等の種々のトラブルが生じることが多い。

本工事の起爆工法の選定に当っては、潮流が最大5ノットと速く、水深も28mと深いので、確実なダイバー作業は期待できず、また断線の恐れがあるため、導爆線及び電気段発雷管の有線式起爆工法の採用は、困難と判断し、無線式起爆工法を

採用した。無線式起爆工法には、超音波を利用する方法と電磁誘導現象を利用する方法の2通りがあるが、前者は、超音波を受信する受波器を海底面から30cm以上突出させる必要があるため、穿孔長の長い2Pでの採用は困難であった。そこで、発破区域を大きく取り囲むようなループアンテナを海底に敷設し、これに交流電流を流して磁界を発生させ、発破孔内に挿入された起爆素子の受信コイルに誘起させる起電力によって電気雷管を点火する無線式電磁誘導起爆工法を採用した。

なお、参考としてTable 7に同ルートにおける海底発破工事一覧表を示す。

Table 7 児島~坂出ルート of 海底発破工事一覧表

項目	橋名 基礎	南北備讃瀬川大橋					櫃石島橋	岩黒島橋	
		3P	4A	5P	6P	7A	2P	3P	4P
施工条件	潮流速 (kt)	5	5	5.5	3	2	4	5	4
	水深 (TP-m)	0~5	0~5	22~25	32~36	14~22	9~25	3~20	2~10
	基礎底面深度(%)	10	10	32	50	50	28	24	14
	基礎底面掘削寸法(m)	29×65	73×63	37×71	48×69	85×74	31×52	28×52	42×38
	堆積層の厚さ(m)	0	0	0~5	13~15	24~30	0	0	0
	掘削量 (Tm ³)	42	58	32	126	597	25	33	24
穿孔条件	作業時間帯	仕間のみ	仕間のみ	仕夜連続	仕夜連続	仕夜連続	仕夜連続	仕夜連続	仕間のみ
	穿孔深度 (TP-m)	10	10	31.5	49.5	49.5	27.5	24	14
	穿孔長(m)	5~12	5~12	7~10	15~17	28~36	3.5~13	4~15	4~13.5
	穿孔数(本)	663	1,189	504	768	1,632	432	572	832
穿孔機	穿孔間隔(m)	2×2	2×2	2×2.2	2×2.25	1.8×2.25	2×2.5	2×2	2×2
	穿孔作業足場	ミニセップ 躍進2号	ミニセップ 躍進2号	盤石	たまの	たまの	たまの	たまの	つくど2号
	穿孔機	OD機 3台	OD機 3台	OD機 4台	ウエルマン 6台	ウエルマン 6台	ウエルマン 6台	OD機 6台	OD機 6台
装薬	穿孔機(mm)	102および153	102および153	153	146	146	146	137	137
	装薬径(mm)	70および80	70および80	80	72	69	70	70	70
	装薬方法	穿孔時に塩ビ管を建て込んでおき、発破前にダイバーが装薬を直接装填し導爆線を敷設		SEP上からのカートリッジ装薬	同左	同左	SEP上からのカートリッジ装薬	SEP上からのカートリッジ装薬、発破前にダイバーで導爆線を敷設	
発破	装薬量(kg/1孔)	14~60	8~50	20~28	20および30	20および30	10~40	8~46	10~38
	起爆方法	(有線) 導爆線	(有線) 導爆線	(無線) 超音波	(無線) 電磁誘導	(無線) 電気段発	(有線) 電磁誘導	(有線) 導爆線	(有線) 導爆線
	発破方法	斉発	斉発	斉発	斉発	1秒差12段発	斉発	斉発	斉発
	爆薬量(1kg/1発破)	672~2,240	720~3,000	480~2,016	360~1,080	960~1,440	240~480	550~1,356	800~1,279
	発破方法	15	19	8	21	32	33	15	13
総爆薬量(t)	23.5	41.5	12.1	16.3	36.0	10.2	17.3	15.0	
穿孔発破工期		54年2月 55年5月	54年1月 55年9月	54年1月 54年6月	55年11月 56年5月	54年1月 54年11月	58年2月 58年9月	56年11月 57年4月	57年5月 57年10月

(2) 発破警戒

発破警戒は、警戒区域内への船舶の出入り、隣接海域での潜水者の有無等、周辺的安全確認を目的とするもので、この他に、発破の事前通報、魚類威嚇作業及び完爆確認作業等も含まれている。

発破は、12時30分から13時30分の時間帯で、周囲に航行船舶のいない時を選んで行い、発破当日は朝9時から職員および作業員約40人、警報船4隻、広報船5隻を動員して発破警戒に当たるとともに、発破体感員約15人を両島の民家に配置して、発破振動及び騒音を実際に体感し、記録した。

(3) 発破影響計測

海底発破に伴って発生する地盤振動、水質汚濁、騒音、水中音圧等については、発破影響計測として発破毎に実測してその影響を調査した。特に、地盤振動問題は、斉発薬量の決定に重要な要因である。測定結果から求めた振動速度推定式は次のとおりであった。

$$V = 3367 \times W^{\frac{1.29}{3}} \times R^{-1.84}$$

V：振動速度の最大値 (kine = $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$)

W：斉発薬量 (kg)

R：爆源からの距離 (m)

なお、実際は、測定地点の地質構造や先行ブロックの破砕の程度によりバラツキがあり、最も近い保安物件 (R=580m) でのVmaxの値は0.3~0.6kineの範囲で推移した。

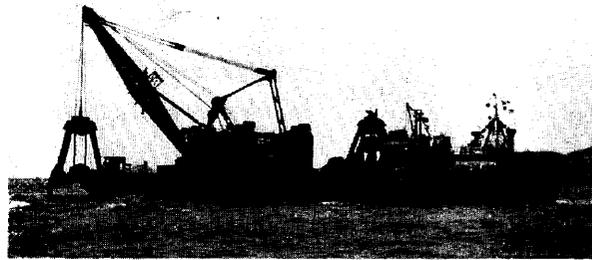
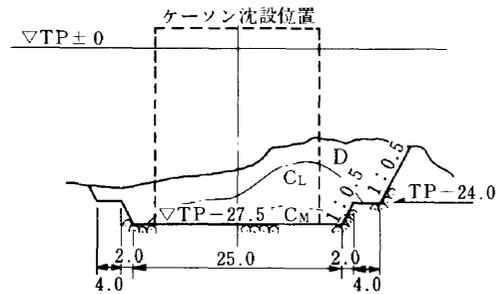


Photo 4 海底掘削状況



2P橋軸方向標準断面図

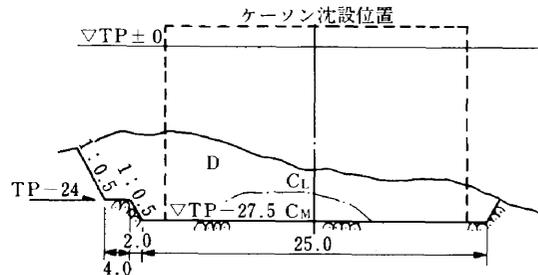


Fig.10 2P海底掘削標準断面図

§ 5. 海底掘削

5-1 概要

堆積層及び風化軟岩部の海底掘削は、大型グラブ浚渫船に装備した超硬土用グラブにより、直接掘削が可能である。しかし、2Pの基礎底面は、CL~CH級の花崗岩だったので、海底発破をかけた後、掘削した。Fig.4は、海底掘削状況を示し、Fig.10は、2P海底掘削標準断面図を示す。

当現場の海底掘削は、2Pでは、大部分が発破後グラブ掘削であるのに対して、3Pでは、前に述べたように直接グラブ掘削のみで計画・実施した。また2P、3Pとも部分的な硬岩部については、一部重錘式の砕岩工法を併用した。なお、Table 8に岩区分別の掘削数量を示す。

目標掘削深さは、グラブ浚渫船の掘削精度が±0.5m程度予想されたため、基礎底面から0.5m上りとし、2P

Table 8 岩区分別掘削数量

施工場所		2 P	3 P
項目	平面寸法	52m×31m	52m×35m
岩区	(堆積層) dt	—	5,888m ³
	D級	18,302m ³	25,912m ³
	CL級	3,929m ³	485m ³
	CM級	1,944m ³	27m ³
合計		24,175m ³	32,313m ³
工期		昭和58年10月 ~昭和58年11月	昭和57年11月 ~昭和58年4月
掘削区分		発破後掘削	直接掘削

でTP-27.5m、3PでTP-24.5mとした。

5-2 グラブ浚渫船の選定

海底掘削は、広範囲にわたる露天掘りなので、作業効率の良い掘削を期待できる一方で、潮流、波浪等の影響

を直接受ける1種である。従って、グラブ浚渫船の選定に当たっては、下記の事項を考慮して決定した。

- ① バケット重容比の大きい強靱な超硬岩土盤用グラブバケットを有すること。(重容比= $\frac{\text{バケット重}}{\text{容}}$)
Table 9に重容比とN値の関係を示す。

Table 9 グラブ浚渫船の重容比とN値の関係

重容比	対象土砂	N値
1.5以下	軟泥、粒状の砂	4以下
1.5~2	軟質土砂(ゆるい砂質土、中位の粘性土等)	4~10
2~3	中質土砂(中位の砂質土、硬い粘性土等)	10~20
3~5	硬質土砂(特に硬い粘性土、礫混り土砂等)	20~30
5以上	硬土盤、岩盤(破碎岩)	30以上

- ② 急潮流に対して充分耐え得る係留設備を有すること。
- ③ グラブ浚渫船の極端な負荷変動に耐える信頼性の高い動力(ディーゼルエレクトリック)方式で、強力な馬力を備えていること。
- ④ 円滑な操作を行うために、ワードレオナード制御装置を有すること。
- ⑤ 急潮流時におけるグラブバケットの平面位置及び掘削深度の測定装置を備えていること。
- ⑥ 掘削精度を高めるために、定深度掘削装置を備えていること。

以上の事項を満足するグラブ浚渫船として、南北備讃瀬戸大橋で既に実績のある13m³グラブ浚渫船『三友一号』を選定した。Table 10は同ルートで稼働した大型グラブ浚渫船の一覧表である。

5-3 グラブ掘削

(1) 掘削位置決め

グラブ浚渫船の掘削位置決めは、円座標の原理を利用して船上の所定の2測点からの六分儀による測量で行った。特に、精度を要求される法面及び最終仕上げ面の掘削にあたっては、陸上からトランシットを用いて、グラブ浚渫船のワイヤを視準しながら慎重に行った。

(2) 掘削方法

掘削は、浅い所から着手し、潮流時には中央部、潮止り時には法面部を行った。また、グラブの喰い込み側の爪が掘削面に直角に当る様一層を2mとし、船をシフトさせずに掘削できる区域を終了させた後、グラブ浚渫船をシフトにする方法で行った。Photo 5はグラブ爪の交換状況である。



Photo 5 グラブ爪の交換状況

法面の各深度における法線を正確に通すため、グラブの旋回角度は、0° および90°だけを使用し、計画線に対してグラブのシェルを平行に切込むように掘削して、掘削底面の寸法、途中での法勾配の精度確保に努めた。

基礎底面の掘削は、13m³グラブで基礎底面を乱さないようグラブの爪でリップングした後、平バケット(6m³, 20t)に付替えて、底面全域を2回取りで浚えた。

(3) 砕岩掘削

2Pでは海底発破領域外の北東隅角部の小段で、また、3Pでは掘削領域の内西側でC_L~C_M級岩盤が出たため、その部分は砕岩掘削を行った。

砕岩の要領は、瀬居基地で使用していた揚土用グラブ船のグラブバケットを30t重錘に付替え現場に曳航し、13m³グラブ浚渫船に横付けし、重錘を気中から自由落下させて、その衝撃力で砕岩した。重錘の落下位置の間隔は1mで、貫入量が0.5m~1.0mになると次の砕岩位置

Table 10 児島~坂出ルートで稼働した大型グラブ浚渫船一覧表

船名	所属	船体諸元(m)	バケット容量(重容比)(m ³)	浚渫深度(m)	主機	稼働基礎名
三友一号	関門港湾建設	60×23×4.5	25(3.4), 13(9.6)	80	3,200ps DE	HB 2P, 3P BB 6P, 7A
第十関門号	"	52×20×3.7	25(1.8), 20(3), 9.5(9.5)	60	2,300ps DE	BB 7A
第八関門号	"	48×20×3.7	20(3), 9.5(9.5)	50	2,300ps DE	BB 3P, 4A, 5P, 7A
第十西部号	三省建設	54×23×4.5	20(4), 11(9)	60	1,300×2ps D	BB 2P
第20芳祥号	吉田組	54×23×4.5	25(2.8), 20(4), 10(11)	60	1,300×2ps D	IB 2P, 3P, 4P

Table 11 海底掘削における水質計測項目表

測定項目	計測区分		準 拠	測定概要	管理基準
	日常管理	月別管理			
透 明 度	○		海洋観測指針 第4章	直径300mm白色板使用	—
浮遊物質量(SS)	○		JIS K-0102 1974-10	グラスファイバーフィルター使用 吸引ろ過重量法	潮下手で 50ppm以下
総 珞 素(T-P)		○	海洋観測指針 第8章	吸光度法 (酸化処理後モリブデン青法)	—
総 窒 素(T-N)		○	瀬戸内海水質調査法		—
水素イオン 濃度(pH)		○	JIS K-0102 1974-8	pH計はJIS-8802型	—
化学的酸素 要求量(COD)		○	JIS K-0102 1974-13	100℃ KMnO ₄ 法	—
溶存酸素量(DO)		○	JIS K-0102 1974-243	ウインクラアジ化ナトリウム変法	—
水 温		○	JIS K-0102 1974-4(2)	ガラス製棒状温度計による	—
濁 度	○	○			—

に移り、1シフト区域の砕岩が終るとグラブ浚渫船で破砕岩を浚い、砕岩・掘削を繰り返した。

(4) 測深

掘削深度および最終仕上高確認のため、音響測深機を用いて測深した。測深機は、グラブ浚渫船の船首に装備し、3段階に伸縮、左右に走行する仕組みで、測定精度は、±(0.03+ $\frac{\text{水深}}{1000}$)m以上であった。

(5) 水質計測

グラブ掘削作業で生ずる海水汚濁の実態を把握し、また、環境基準を満足しているかどうか、管理するために、専門業者による水質計測を行った。採水位置は、工事地点から潮下手500mの上層(海面付近)と下層(海底上3m)の2点とし、Table 11に示す計測項目について、測定したが、潮汐に合わせて透明度が4m~9m、SS(濁度)が2ppm~10ppmと多少変動する程度で、特に問題はなかった。

5-4 掘削ズリの処理

掘削ズリは、グラブ浚渫船により1,000m³積土運船2隻に直接積み込み、現場から揚土場である瀬居基地まで押船で海上運搬した。運搬された掘削ズリは、6m³バケットを取付けたグラブ船で、揚土され、人頭大以下のズリ、人頭大以上の中塊及び1.5m³以上の大塊に仕分けし、大塊については小割した後、それぞれ指定された場所に捨土した。

5-5 グラブ浚渫船の施工実績

2P及び3Pでの海底掘削におけるグラブ浚渫船の施工実績表をTable 12に示すが、施工実績値は計画値を上回っている。その理由としては、天候に恵まれたこと他に、2Pは海底発破の破碎効果が十分有効であったこと及び3Pは軟岩の風化が予想していた以上に進んでいたこと等が挙げられる。

Table 12 グラブ船施工実績表

基礎	期 間	拘束日 当り					実働時間当り					拘束時間 当り				
		掘削日 当り 掘削土量	掘削日 当り 掘削土量	純掘削 時間当り 掘削土量	グラブ 1回当り 掘削土量	グラブ サイクル タイム	純掘削 時間率	移 動 時間率	準備片付 時間率	実 働 時間率	整 備 時間率	測 量 時間率	待 機 時間率	そ の 他 時間率	拘束日 当り 拘束時間	
2 P	S.57.11.28 ~12.4	m ³ /日 342.8	m ³ /日 480.0	m ³ /hr 67.3	m ³ /回 7.0	分:秒 6:17	0.457	0.075	0.071	0.603	0	0.019	0.226	0.152	hr min 11.14	
	58.5.10 ~5.18	206.4	265.4	31.7	4.0	7:30	0.535	0.054	0.064	0.653	0	0.027	0.039	0.281	12.16	
	58.10.2 ~10.31	472.6	472.6	52.9	6.0	6:47	0.713	0.061	0.079	0.853	0.027	0	0.020	0.100	12.52	
	58.11.1 ~12.3	173.9	212.5	25.2	2.5	5:55	0.566	0.072	0.067	0.705	0.030	0.052	0.036	0.177	12.18	
	計	306.0	350.4	41.0	4.4	6:27	0.611	0.066	0.072	0.749	0.023	0.026	0.046	0.156	12.22	
3 P	57.11.8 ~11.27	563.4	594.7	107.0	9.2	5:08	0.466	0.073	0.075	0.616	0.007	0.004	0.189	0.184	11.15	
	57.12.6 ~12.31	400.0	400.0	61.3	5.3	5:10	0.579	0.078	0.078	0.071	0.728	0	0.030	0.106	11.16	
	58.2.1 ~2.28	381.0	381.0	53.4	4.8	5:44	0.593	0.076	0.081	0.750	0.067	0.005	0.011	0.167	12.03	
	58.3.1 ~3.31	166.1	172.2	21.6	2.0	6:51	0.627	0.059	0.080	0.766	0.070	0.035	0.008	0.121	12.17	
	58.4.1 ~4.23	155.7	180.3	24.8	1.8	4:27	0.515	0.105	0.076	0.696	0.091	0.054	0.034	0.125	12.10	
	計	310.8	326.5	46.4	4.0	5:15	0.563	0.077	0.077	0.717	0.056	0.027	0.055	0.145	11.54	

§ 6. 底面仕上げ

6-1 概要

海底掘削によってほぼケーソン支持地盤まで掘削した後、ケーソン据付水平精度を確保し、ケーソン刃口からのモルタルの漏洩を防止するために、海底面のズリを除去し、全面を±10cm以内の精度で平滑に掘削する底面仕上げを行った。

底面仕上げは、SEP『盤石』に大口径掘削機を搭載し、2Pは51m×30mの範囲をTP-28.0mまで、3Pは51m×34mの範囲をTP-25.0mまで各々9ブロックに分けて掘削した。

大口径掘削機は、口径2.5m級のロータリ式掘削機(ロータリ出力トルク20tm)を使用し、オーバーラップ掘削を行い、ドリルストリングスは潮流の影響を避けるため、ガイドパイプの中に収め、エアリフトにより揚水した。掘削した泥水は、ズリを沈降させた後、気泡除去装置を介して放流した。

なお、底面仕上げ完了ブロック毎に、底面の測深、ビデオ撮影、弾性波(P波)速度探査等による施工確認を行うとともに、環境管理の一環として、水質計測を実施した。Photo 6に3P底面仕上げ全景を、Fig.11に各ブロック毎の底面仕上げ施工フローシートを示す。

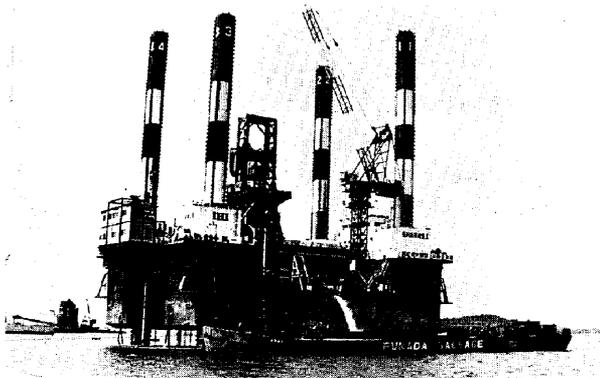


Photo 6 3P底面仕上げ全景

6-2 施工ブロック及び順序

SEPの最大掘削範囲は、大口径掘削機の移動可能範囲がSEPの開口部、ガイドパイプおよび排砂トラフの大きさにより制限され、12.66m×22.66mである。そこで、掘削およびエアリフト清掃の施工性およびSEPシフト時の設置誤差、余裕代等を考慮し、橋軸直角方向、橋軸方向にそれぞれ3分割し、全体を9ブロックに分割して行った。

ブロックの施工順序は、次の事項を考慮して決定した。

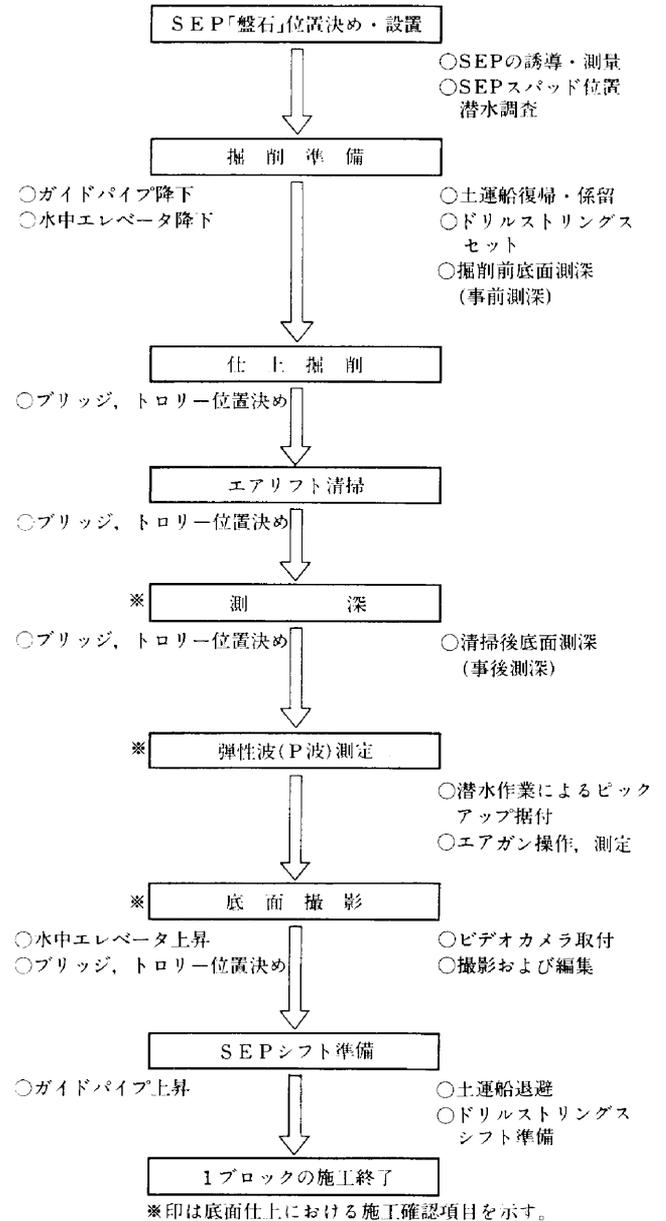


Fig.11 各ブロック毎の底面仕上げ施工フローシート

- ① ケーソン刃口部にできるSEPのスパッド跡は、後続のブロックにおいて整形できる。
- ② 仕上げ掘削完了ブロックへの崩落土砂の堆積を極力少なくするために、法面の大きなブロックの施工は後にする。
- ③ SEPのスパッド位置は、SEPの安全上から法面を避けて掘削底面または小段位置とする。
- ④ SEPの第1回目設置位置は、誘導位置決め簡単なブロックとする。

6-3 SEP『盤石』の機装

SEP『盤石』は底面仕上げのために開発された海上作業足場で、水深50m、潮流5ノット、風速15m/secの条件下でも施工可能なように、6,000tの能力を有する昇

動量を計算した。

スパッドの傾斜による移動量やワイヤ操作による位置決め誤差を考慮して、SEPの設置精度の目標地を25cm以内と設定したが、結果は、比較的良好であった。

6-5 仕上げ掘削およびエアリフト清掃

仕上げ範囲を最も能率的に掘削する方法は、最小孔数で包括することであり、その施工パターンは直径2.5m(大口径掘削機の掘削径)の円に内接する正六角形配置(2.16m)であるが、SEP上の大口径掘削機の位置決め誤差及び施工時の人為的なミス防止を考慮して、縦・横ともに2.0m間隔とした。また、偶数列と奇数列とでは、座標軸が1.0mずれるため、シフト端部を揃える必要から1孔を追加した。Fig.14は仕上げ掘削パターンである。

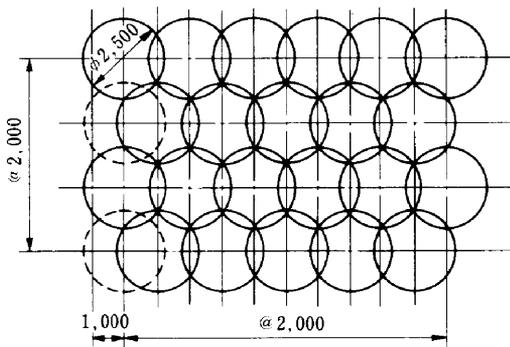


Fig.14 仕上げ掘削パターン図

仕上げ掘削した範囲の残留ズリ及び砂は、掘削機のズリ排出管を使い、エアリフトにより清掃した。

エアリフト1孔当りの清掃有効径は、残留ズリの比重粒度及び吸入口の形状寸法からφ1.5m程度でありエアリフト清掃は、次の3種類に分けて行った。

- ① 清掃するブロック内のズリ及び土砂が施工済ブロックへ流出するのを防ぐための大廻し清掃。
- ② 清掃有効径1.5mの円が外接するように、1.5m間隔で清掃をする清掃A。
- ③ 清掃Aでクリアできない菱形範囲を1.5m間隔で清掃をする清掃B。

なお、1孔当りの仕上げ掘削、エアリフト清掃の平均所要時間は各々50分と20分であった。

6-6 施工確認

各ブロック毎にSEP設置、仕上げ掘削・清掃終了後、施工確認作業を行った。作業は、水中ガイドパイプに取り付けた水中ビデオカメラによる底面撮影及びスケッチによる仕上がり、清掃状況の確認と、超音波測深装置による仕上げ精度の確認、弾性波速度探査である。

測深システムは、測深センサーがキャッチした信号を、

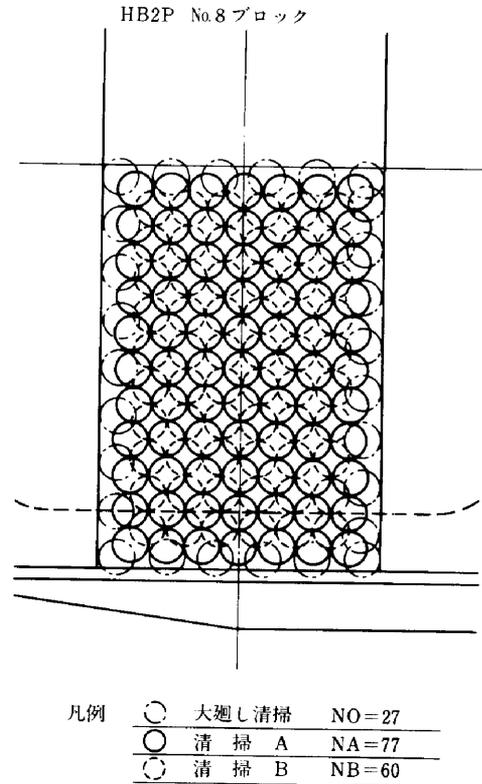


Fig.15 エアリフト清掃標準パターン図

SEP操作室内に設置した超音波測深装置でデータ処理し、フロッピーディスクに記録させるとともに、仕上げ高さをプリントアウトできるようになっている。また、フロッピーディスクに記録したデータは、マイクロコンピュータによって必要な処理をした後、X-Yプロッタで底面仕上げ高に関する深度一覧表及び深度分布図を作成した。この結果、仕上げ精度は、±10cmを充分満足するものであったことが確認された。

次に、底面撮影は極めて解像度の高い水中カメラを用いて、海底面の状況をSEPから確認するもので、海水の濁り等の影響をやや受ける以外は、非常に有効な手段であったと言える。また、水中でのダイバーによる弾性波(P波)速度探査は基礎岩盤の地質構造および強度特性を知るのに役立った。

Table 14に示す水中基礎岩盤の確認方法の確立も、本四架橋における開発技術の1つで、従来、ダイバーによる直接的確認がほとんどであった水中基礎に対して、種々の間接的確認方法を導入することで、それらの総合的な評価として捉えたことに大きな意義があると言える。そして、その総合的評価によると、2Pは、既存資料と比較すると岩盤区分で1~2ランク硬く、3Pは、既存資料とはほぼ同じであるという結果を得た。

6-7 実施工程

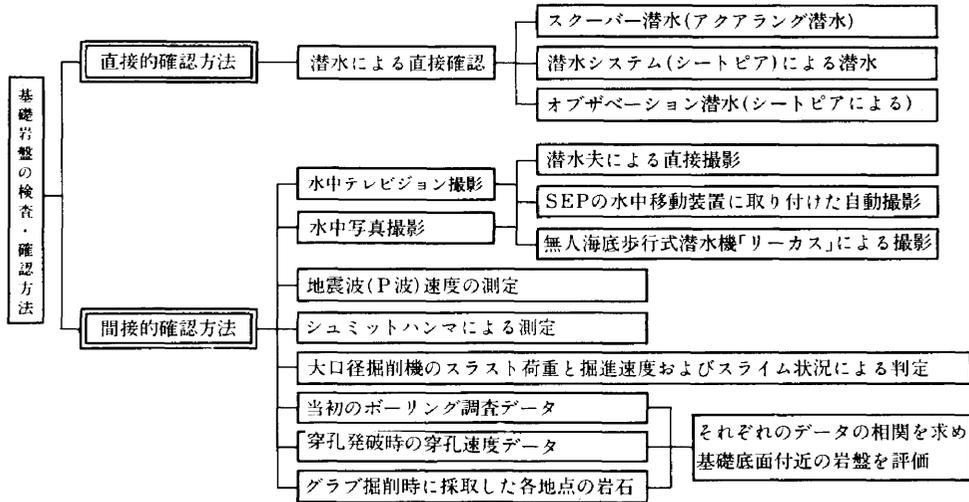


Table 14 水中基礎岩盤の確認方法

SEP「盤石」を使用している昼夜勤作業による底面仕上げに要した期間は、2Pが5箇月、3Pが4箇月であり、1ブロック当りの施工日数を比較すると、2Pが13日、3Pが9日であった。この差異は、岩盤強度と施工海域の潮流条件によるものと考えられる。

§7. おわりに

以上述べた海底発破、海底掘削及び底面仕上げは、いずれも海面下での作業であり、現場周辺の海上から確認できるものといえば、大型作業船と工事海域を示す燈浮標ぐらいである。海面下30m付近で実施した工事の進捗状況は、逐一、測深及び潜水調査によって把握したが、その情報は、陸上工事と比較してはるかに少なく、かつ、不確実である。このような施工条件下で工事を遂行する上で重要なことは、使用船舶、機械を含めた最適施工法の徹底的検討と担当職員の不断の気くばりであると言える。特に、諸々の厳しい施工条件下で合計33回にわたる2P海底発破を、短期間で無事施工できたことは、大きな成果と思われる。ここに、関係各位の御指導、御支援に対し、深く謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：「本州四国連絡橋のあゆみ」昭和60年7月
- 2) 総合安全工学研究所，山海堂：「水中発破」昭和59年11月
- 3) 土木学会：「海上工事の施工技術」一本四連絡橋児島～坂出ルートの下部工-昭和60年9月
- 4) 田島照義：「櫃石島橋における脚付ケーソン基礎の施工」土質工学会，土木学会，日本建設機械化協会関西支部 昭和59年度，施工技術報告会講演概要 昭和60年1月
- 5) 西松・青木・東洋共同企業体児島出張所：「櫃石島橋下部工工事工事報告書」昭和60年7月
- 6) 西松・青木・東洋共同企業体児島出張所：「櫃石島橋下部工工事工事記録写真集」昭和60年7月