

# 大型グラブ船による橋梁基礎の岩盤掘削の変遷

## HISTORY OF ROCK EXCAVATION FOR BRIDGE FOUNDATION USING LARGE SCALE GRAB DREDGER

後藤 英一\*・中川 良隆\*\*・中林 進\*\*\*

*By Eiichi GOTOH, Yoshitaka NAKAGAWA and Susumu NAKABAYASHI*

For the foundation of the large bridges connecting Honshu and Shikoku, excavation for the 2P and 3P piers of the Akashi Kaikyo Bridge, following similar work on the Seto Ohashi Bridge, were carried out using a large scale grab dredger. High accuracy was achieved, leading to success of the laying down caisson method.

Large scale grab dredger have demonstrated their ability to dredge conventional navigation channels, particularly in excavating bedrock for the navigation channel through the Kanmon Strait. Consequently, the method was adopted for the underwater bedrock excavation of bridge piers for the Kurono Seto Bridge, the Seto Ohashi Bridge and the Akashi Kaikyo Bridge.

This report describes the transition of grab dredger and the bedrock excavation of bridge foundations.

*Keywords: grab dredger, underwater bedrock excavation, sounding*

### 1. ま え が き

本州と四国を結ぶ長大橋のうち、瀬戸大橋の基礎掘削につづき、明石海峡大橋の2P・3Pの基礎掘削を大型グラブ船により施工、いずれも高精度で掘削し、設置ケーソン工法を成功させた。

従来、航路浚渫等に使われていたグラブ船のうち、特に関門海峡航路浚渫の岩盤掘削に威力を発揮した大型グラブ船が、鹿児島県の黒之瀬戸大橋の橋脚部海底掘削に使用されたのが橋梁基礎の岩盤掘削にグラブ船が採用された最初の例といわれている。

その成功により、瀬戸大橋の基礎掘削に大型グラブ船が採用された。

さらに明石海峡大橋では、基礎地盤が、沖積砂礫層(2P)、軟岩に属する神戸層砂岩(3P)であり、大型グラブ船のみで掘削可能であること。および、2P、3P地点は大水深(2P-60m, 3P-57m)、強潮流(2P 7

kt, 3P 8kt)の条件のため、瀬戸大橋で大口径掘削機による仕上げ掘削に使用したSEP(自己昇降式海上作業足場)の自立が不可能である。以上2点の理由から大型グラブ船のみで掘削を行い、直ちにケーソンを沈設する工法が採用された。海底掘削工事は1988年5月から約1年の工期で工事が始まり、大水深、急潮流の厳しい施工条件にもかかわらず、大型グラブ船のみの掘削で高精度に仕上げることができ、ケーソンの設置(設置精度; 平面誤差5cm以内、ケーソン刃口平均高さTP-57.05m、ケーソン傾斜NS 0.04°, EW 0.13°)と合わせて成功裏に完了した。この成果により大型グラブ船による海底岩盤の高精度掘削法を確立したといえる。

本報文では、グラブ船と、グラブ船による橋梁基礎岩盤掘削の変遷について述べる。

### 2. グラブ船の変遷

わが国は四方を海に囲まれ、鎖国開港以来、港湾の諸施設の整備に力を入れてきた。港湾の諸施設の基礎はその大部分が海面以下にあり、大規模な港湾工事を行うには施工機械すなわち、作業船が不可欠となる。作業船の歴史は、明治20年イギリスのプリストマン社よりグラブ式浚渫船が輸入されたのが始まりで、明治44年にはロブニック社製の砕岩船が関門海峡で使用された。大正

\* 正会員 大成建設(株)技術研究所副所長  
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

\*\* 正会員 明石海峡大橋3P下部工大成・間・佐藤・東洋・日本国土共同企業体所長  
(〒655 神戸市垂水区平磯3-1-50)

\*\*\* 関門港湾建設(株)業務部次長  
(〒750 下関市細江新町3-54)

表-1 大型グラブ船の仕様の変遷

グラブ船 規 模	建造年	船 体 寸 法 長さ×幅×深さ×吃水 (m)	液 深 機			発 電 機 原 動 機		グラブバケット			係 留 設 備	そ の 他 特 徴	主 要 工 事 名 称	
			巻上重 (t)	作半 徑 (m)	液深 (m)	主発電機	主原動機	超硬質 土 用	硬質土 用	平				
4 m <sup>3</sup> 級	1953	26.4×11.0×2.5×1.3	-	10	16	DC440V× 150kW 2台	320PS× 600rpm 2台	—	12t 4m <sup>3</sup> 重容比 3	—	クインクス 3t×8m/min	2基	長門号に次ぐ 電機式グラブ 船	
10 m <sup>3</sup> 級	1967	36.5×16×2.9×1.8	70	15	20	DC440V× 450kW 2台	750PS× 600rpm 2台	6m <sup>3</sup> 42t 重容比 7	10.5m <sup>3</sup> 30t 重容比 2.8	—	クインクス 25/5t×9/18 m/min ストリッパ 3t スプリング 36φ×250m	2基 4丁 4本	7/7 重容比3 から7に上げ 対潮流、硬岩 掘削に対応	関門航路
12.5 m <sup>3</sup> 級	1970	42×18×3.3×1.75	85	15	40	AC450V× 850KVA 1台	1500PS× 600rpm 1台	7m <sup>3</sup> 63t 重容比 9	12.5m <sup>3</sup> 45t 重容比 3.6	—	クインクス 10/5t×9/18 m/min ガルトクインフ 7.5t×20m/min ストリッパ 3.5t スプリング 40φ×250m	2基 2基 4丁 4本	ガルト 2本装 着7/7 重容比 を7から9に あげる	黒之瀬戸 大橋 下部工 関門航路
20 m <sup>3</sup> 級	1972	52×20×3.7×1.9	110	18	60	AC450V× 1250KVA 1台	2300PS× 600rpm 1台	9.5m <sup>3</sup> 85t 重容比 9	20m <sup>3</sup> 60t 重容比 3	6m <sup>3</sup> 20t 重容比 3.3	クインクス 15/7.5t×9/18 m/min 前ストリッパ 30t×10m/min 後ストリッパ 27t×10m/min ストリッパ 5t ストリッパ 5t スプリング 50φ×480m	2基 2基 1基 2丁 4本	測深機装備 スケット両舷 船尾3本装備	備讃瀬戸 大橋 下部工 関門航路
25 m <sup>3</sup> 級	1974	60×23×4.5×2.3	150	20.5	80	AC450V× 1700KVA 1台	3200PS× 600rpm 1台	13m <sup>3</sup> 125t 重容比 9.6	25m <sup>3</sup> 85t 重容比 3.4	6m <sup>3</sup> 20t 重容比 3.4	クインクス 30/15t×8/16m/min シンククインフ 55/27.5t×6/12m/min 特殊アンカー 13t スプリング 70φ×400m シンクワイ 70φ×400m	2基 2基 4丁 4本 2本	測深機装備 6点係留設備 対潮流に対応	明石海峡 大橋2下部工 若松大橋 下部工 来島海峡 コノ瀬
32.5 m <sup>3</sup> 級	1987	68×28×5×2.6	250	25	100	3500KVA ×600rpm	5000PS× 600rpm	17.5m <sup>3</sup> 200t 重容比 11.4	32.5m <sup>3</sup> 150t 重容比 4.6	18.0m <sup>3</sup> 52t 重容比 2.9	クインクス 50/25×8/16m/min シンククインフ 60/30×8/16m/min ストリッパ 18t スプリング 73φ×475m シンクワイ 85φ×400m	2基 2基 4丁 4本 2本	水平掘削装置 深度制御ソフ ト補込 測深機装備 6点係留設備 7/7重容比11.4	明石海峡 大橋3P 下部工 来島大橋 下部工

11年にはピサイラス社製のデッパー式浚渫船を横浜港の関東震災復旧工事に使用している。戦後花形であった電動ポンプ船は大正8年アメリカより輸入された末廣丸が東京湾埋立会社で初めて使用された。

グラブ式浚渫船（以下グラブ船と称する）は明治、大正を通じて数多く輸入され、後年までそれが国産機であろうとも「プリストマン」と通称された事実がそれをよく物語っている。

明治、大正中期まではグラブ船の船体は木造で機関は堅形ボイラーを旋回台上に浚渫ウインチと一緒に搭載していたので、東京湾の河川浚渫工事は必ず数か所の橋下通過があり、その都度ボイラーの撤去および、ジブを倒す苦労は並大抵ではなかったようである。

関東大震災以降の建造船はボイラーを旋回台から分離独立して船体中央部の底助板上に移し、ジブを固定式から起伏式に改善し橋下通過がスムーズに行われるようになった。さらにジブを前方低く倒すことによってこれまで人力に頼っていた橋下の浚渫まで施工できるようになった。関東大震災後の深刻な経済不況のなか、作業船はこれまでの輸入に替えて国産化が計られ、この間に革新をみた電気溶接技術もたくみにとりいれて飛躍の糸口がついたかに見えた。しかし、満州日支事変につづく第二次世界大戦によってあえなく崩壊し、再び迎える転機は戦後の復興を待たねばならなかった。

戦後、昭和28年の港湾修築事業のうちの作業船整備

事業に伴いグラブ船も飛躍的にその能力の増大が要求されることになり、官民一体で、技術を結集して取り組んだ結果、当時としては超大型の4m<sup>3</sup>、240m<sup>3</sup>/hのグラブ船、相模号が建造された。その翌年には武蔵号、引きつづいて、摂津、長門、佐渡、播磨号等が次々と建造された。これらと並行して自航グラブ船、黒姫、蔵王丸も建造されている。昭和28年以降に建造されたグラブ船はそれ以前のものに比べ次の特色を有している。

- ① グラブ容量が飛躍的に増大した。
- ② 従来のスチーム式に代わりディーゼルエレクトリック方式を採用し建造価格の低減と運転効率の向上をはかった。
- ③ 制御方式にワードレオナード方式でスピード制御をし、運転操作を容易にした。

その後、浚渫規模増大に伴いグラブ船の能力増大はますます著しいもので、列島改造論以後、河川、航路、港湾にとどまらず橋脚の床掘、岩礁の掘削等に使用されるようになった。そして、大水深、急潮流箇所や、N値の出ない超硬質土の掘削に対応できる大型グラブ船が建造されて大規模工事に使用されている。クラブバケットも容量20、30、50m<sup>3</sup>、重量100、150、200tと大型化の一途をたどっている。大型グラブ船の仕様の変遷を表-1に示す。

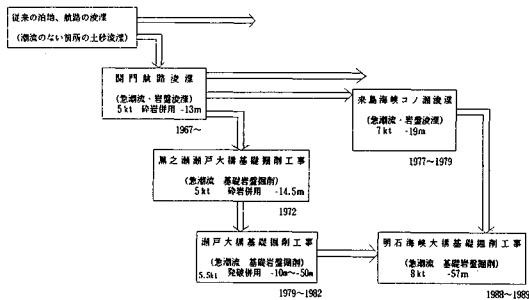


図-1 大型グラブ船による岩盤掘削の変遷

### 3. 大型グラブ船による橋梁基礎の岩盤掘削

図-1に従来の泊地、航路浚渫から最近の瀬戸大橋、明石海峡大橋下部工掘削工事の変遷を示す。

従来の泊地、航路浚渫の工事は1953年頃より各地の港湾整備計画に伴い、泊地浚渫工事が盛んになった。浚渫船の種類はバケット、ポンプ、ディッパー、グラブ船等があり、大規模工事にはバケット、ポンプ船、硬質土工事にはディッパー船が主に使用された。グラブ船は小規模工事で使用されており、対象は土砂・シルトの浚渫であった。

1961年第1次港湾整備計画に基づき、本格的に関門航路の浚渫が始まった。当初は掘削力のあるディッパー船、施工能力の大きいバケット船が浚渫工事の主力であったが、本航路中央部では潮流も速く(5~7ノット)、硬質土となり掘削深度も-13mとなった。このため、潮流と深度でディッパー船が、硬質土でバケット船の作業が困難となり、またポンプ船も硬さ、潮流、環境問題で関門航路から姿を消した。これに対応していくため、1967年、10m<sup>3</sup>級グラブ船が建造されディッパー船に負けず劣らずの掘削ができるようになった。その後、12.5m<sup>3</sup>級グラブ船、20m<sup>3</sup>級グラブ船と大型グラブ船の建造でグラブの大型化を図り、すべての能力で完全にディッパー、バケット船をしのぐようになり現在では浚渫工事の花形となっている。その原動力は、潮流に流されにくく、岩盤も掘削できる重容比9という大型グラブにあった。掘削能力の増大、操船(アンカー操作)も操船室での集中制御とし、掘削管理もレッド測深から音響測深機(プロファイラー)を装備して、近代グラブ船のもととなった。

関門航路における岩盤掘削の成功が1972年に始まる黒之瀬戸大橋の橋脚基礎の岩盤掘削へのグラブ船の採用をもたらした。黒之瀬戸は潮流も速く(5kt)、硬岩の橋梁基礎掘削を初めてグラブ船で施工した工事で、砕岩船を併用し、2P、3Pの約5000m<sup>3</sup>の掘削を2か月で施工した。グラブバケット深度計を装備した12.5m<sup>3</sup>級

グラブ船が威力を発揮した。関門航路浚渫および黒之瀬戸大橋での大型グラブ船の成功が航路岩盤浚渫としては来島海峡コノ瀬浚渫、橋梁基礎の岩盤掘削としては瀬戸大橋基礎の岩盤掘削へと発展した。

来島海峡コノ瀬浚渫は1977年より始まり、-19mの航路を確保する工事で急潮流下(7kt)の作業であり、グラブ船の係留能力の向上のため、25m<sup>3</sup>級グラブ船にシンカーウインチ2基を設置し、アンカー4丁、シンカー2基の6点係留として施工した。これにより係留の限界に挑戦した工事であった。

一方、1979年より始まった瀬戸大橋工事では、急潮流下(5.5kt)の係留にあわせ、大水深(-50m)、高精度(±50cm)の施工に、数多くの大型グラブ船団が参加した。基礎花崗岩が硬いため、発破を併用し、大型グラブでケーソン据付面上50cmの所まで、掘削した。ここでは、グラブの爪で底盤を水平にリッパーがけし、広い面積を平滑に掘削するとともに、爪のない平バケットでほぐされた岩屑を除去する工法をとり、大水深下の高精度掘削に挑んだ工事であった。

瀬戸大橋での大水深下の高精度掘削および来島海峡コノ瀬の急潮流下での実績が1988~1989年の大水深、急潮流下での明石海峡大橋主塔基礎での大型グラブ船直接掘削の原動力となった。

以下に大型グラブ船による橋梁基礎の岩盤掘削の代表例として黒之瀬戸大橋(P1、P2)瀬戸大橋(南北備讃瀬戸大橋3P~6P)、明石海峡大橋3Pの施工を紹介する。

#### (1) 黒之瀬戸大橋

黒之瀬戸大橋は鹿児島県阿久根市脇本~出水郡東町山門野を結ぶ3径間連続トラス鋼橋で、橋脚2基(P1、P2)が海中基礎で、設置ケーソン工法で施工されている。この特徴は、以下のとおりである。

- ① 海底岩盤掘削に初めて砕岩船と併用で大型グラブ船(12.5m<sup>3</sup>)を使用した。
- ② 大型グラブ船は重容比9のグラブバケットを装備し、グラブバケット深度計により定深度掘削をした。係留固定のため、スパットを装備。
- ③ 鋼製ケーソン据付けのための均し作業は水深も浅いことから潜水夫により施工。

#### a) 下部工の施工法

海中2橋脚の基礎工事は、まず岩盤を鋼製ケーソン設

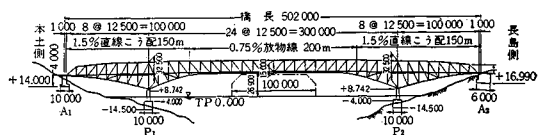


図-2 黒之瀬戸大橋一般図

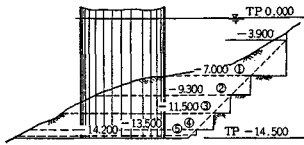


図-3 標準断面(長島側)

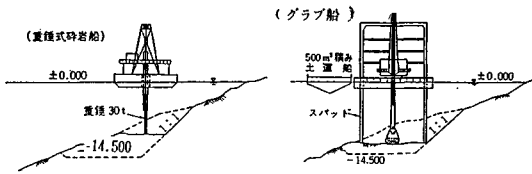


図-4 砕岩作業図

図-5 掘削作業図

置盤まで砕岩船とグラブ船で掘削し、鋼ケーソン受台を据え付け、PC鋼棒で岩盤中にアンカーした。次に、幅10m、長さ22m、高さ18.5mの鋼製ケーソンを大型FC船で吊り下げ、所定位置に設置後、その内部にプレバクトコンクリートを打設した。

地盤条件は、海底に直接岩盤が露出しており、岩層は全般に火山角礫岩で一部、安山岩層が認められる。潮流は平均最大流速5ktといわれている。

b) グラブ掘削

掘削方法は、砕岩掘削方式が採用され、重錘式砕岩船(重錘30t)と12.5m<sup>3</sup>級グラブ船(グラブ重量63t、容量7.0m<sup>3</sup>)を使用した。掘削要領は、図-3に示すように掘削深度が-14.5mでのり勾配は1割と定められており、通常の浚渫工事に比べてその掘削精度は厳しい。掘削深度管理については、重錘が支持岩盤をゆるめることのないようにするとともに、グラブ船のグラブバケット深度計により、グラブ高さを固定し、定深度掘削を行った。グラブ船は、潮流に影響されることなく位置固定をするために船尾にスパッド2本を装備して、作業の確実性と安全性を高めた。さらにグラブバケットは重容比9.0と大きくしてあり、つかみ効率の増大をはかるとともに、岩盤への食込み力も大きく、掘削の威力は大であった。最終仕上げ掘削は、当初の計画の掘削精度50cmが得られた。

鋼製ケーソン受台、および鋼製ケーソン刃口面のならし作業は潜水夫により行った。

(2) 南北備讃瀬戸大橋(3P, 4A, 5P, 6P)

南北備讃瀬戸大橋は香川県坂出市番ノ州～坂出市与島を結ぶ二連の吊橋で中央径間が1100m、および990mである(図-6)、7基の基礎のうち6基が海中基礎で設置ケーソン工法で施工されている。この特徴は、以下のとおりである。

- ① 6基の海中基礎の掘削に大型グラブ船が多数参加し、総掘削量約86万m<sup>3</sup>の掘削を行った。

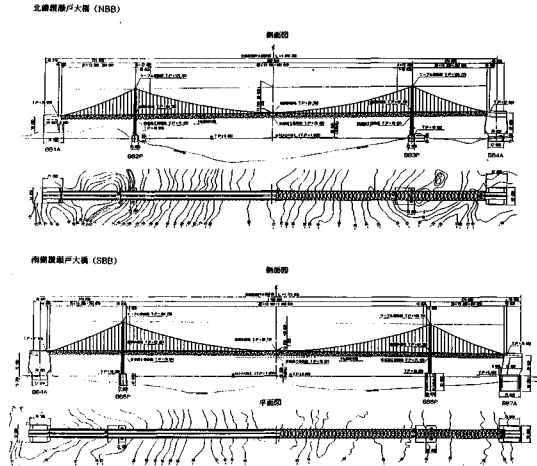


図-6 吊橋全体一般図

①海底発破	②海底掘削	③底面仕上げ	④ケーソン沈設
<p>自己昇降式作業足場(SEP)に搭載した穿孔機により増幅層を通して穿孔。重錘を壊したまま発破(電磁誘導起爆)するオーバーバーデン工法で行う。</p>	<p>海底発破完了後、増幅層及び破砕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。掘削ズリ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現積し、ケーソン上り増幅層に沈設した沈設設備を使用して着底1m付近まで沈下させた後、大型FC船により沈設する。</p>

図-7 南北備讃瀬戸大橋6Pの施工法(ケーソン沈設まで)

- ② 基盤の花崗岩が硬いため、発破工法を併用した。
- ③ 水深が-10～-50m、潮流速が2～5.5ktと変化に富んでいる。
- ④ 掘削底面の掘削ズリを極力撤去するため、爪のない平バケットを使用した。
- ⑤ 鋼製ケーソン刃口設置岩盤は大水深基礎(-32m以深)ではSEPに搭載した大口径掘削機で仕上げ掘削を行った。

a) 下部工の施工

下部工のうち海底掘削は、1979～1982年に施工した。水深の浅い2P, 3P, 4A (TP-10m) 海中基礎と水深の深い5P (TP-32m), 6P, 7A (TP-50m) 海中基礎とは施工法が異なる。

5P～7Aの海中基礎は図-7に示すように海底発破→海底掘削→底面仕上げ→ケーソン沈設→プレバクトコンクリート→気中コンクリートの施工法である。

3P～4Aは水深が浅いので、小型SEPを使い、海底発破の後、海底掘削を行い、ケーソン設置面はダイバーで台座を設けるとともに、ダイバーで掘削ズリをエアリフトで清掃を行った。ケーソンは大型FC船で吊運搬、

設置を行い、その後、プレキャストコンクリート、気中コンクリートで海中基礎を完成させた。

地盤条件は上層が堆積層で花崗岩層を基礎据付盤としている。

流速は、3P~5Pが5.0~5.5 kt, 6Pが3.5 kt, 7Aが2 ktである。

b) グラブ掘削

① グラブ船による掘削試験

グラブ船の風化花崗岩に対する掘削性能を調査するため、1973年にBB 2Pにおいて、当時最強の20 m<sup>3</sup>級グラブ船を用いて掘削試験が行われた。

その結果、風化花崗岩の相当程度は掘削でき、グラブパケットの爪が掛ればかなり硬い岩でもつかみ取る能力があり、海中基礎の工事には有力な武器となることを確認した。しかし、掘削除去すべき風化岩層のうち基礎底面直上数mの厚さの岩盤は、いかに強力といえどもグラブ船単独での掘削は困難であり、別途の砕岩、少なくともグラブパケットの爪が掛かるだけのクラックをあらかじめ岩盤に生じさせておくことが必要であった。この硬くて厚い岩盤を掘削底面まで一挙に確実に、かつ効率良くクラックを生じさせるには、当時の技術水準では水中発破によらざるを得なかった。

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が決定された。

② グラブ掘削施工法

グラブ船の係留は浅い基礎(3P, 4A)ではスパッドを使用し、深い基礎(5P, 6P)では4点アンカリングで行った。係留位置決めは円座標を用いた。

グラブ掘削の要領は、設計断面、底面の精度(のり勾配(堆積層)1:1, 小段以下(花崗岩層)1:0.5, 底面±0.5 m,)を満足するため、グラブの操作方法、グラブの種類、のり面から、粗掘削、のり面掘削、仕上げ掘削、さらえ掘削に分けた。

i) 粗掘削は、グラブ着底後グラブの重量を支える支持ワイヤーをゆるめ、グラブ重量を海底にあずけることにより爪をくい込ませ、開閉ワイヤ操作によりグラブを閉合して掘削するもので、超硬質土用グラブを使用し、掘削効率を優先した。仕上げ掘削盤までおよび、のり面以外はこの方法で掘削し、一層厚1.5 mで掘り下げた。

ii) のり面掘削

のり面を掘削する場合、グラブが傾斜すると掘削効率が落ちるだけでなく、掘削のり面が内側へ入って設計のり面が確保できなくなる。特に5P, 6Pでは底面から5 m上に幅5 mの小段を設ける(のり勾配1:0.5)ため出入りの少ないのり面を必要とした。

このため、図-8の要領で段掘り施工とし、小段の肩

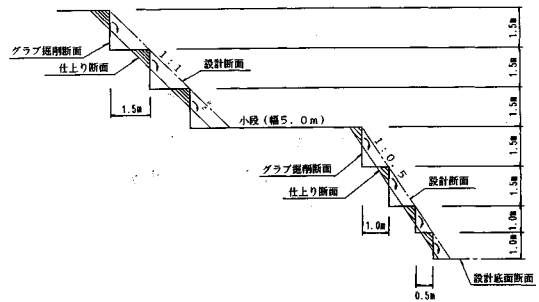


図-8 のり面掘削

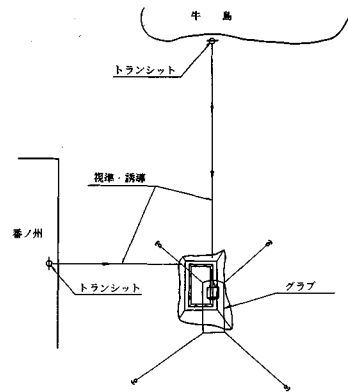


図-9 グラブ視準誘導

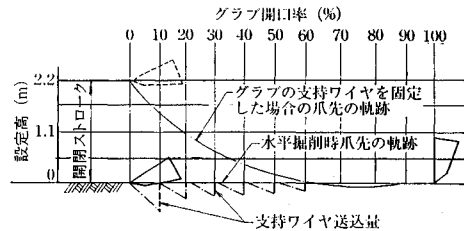


図-10 爪先軌跡図

は、陸上部よりトランシットで1パケット掘削ごとに、グラブワイヤを視準、誘導(図-9参照)して、掘削した。

iii) 仕上げ掘削

仕上げ掘削は、掘削底面を水平に仕上げ、なおかつ支持層を痛めないように掘削するために行うもので、グラブの爪の軌跡が水平になるように、グラブ開口率に応じて支持ワイヤを規定の水深まで下げていく(図-10参照)掘削方法である。仕上げ掘削の対象層厚は設計底面上1 m以下とし、グラブのつかみ効率は粗掘削に比べて極端に悪くなるので、掘削管理は掘削土量のみでなくグラブを当てる回数と面積も併用して管理した。この掘削で仕上り精度が決まるため、潮流によるグラブの流れ、傾きを極力押さえるべく、限界作業潮流速を2 ktとした。深度管理は音響測深機で行い掘削岩ズリが残留する

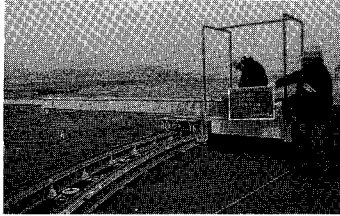


写真-1 超音波測深機による測深状況

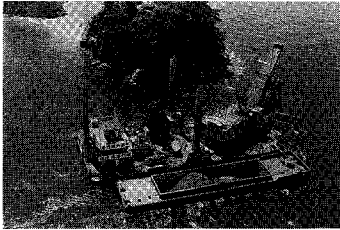


写真-2 20m³級グラブ船による3Pの掘削

表-2 測深比較表

		BB5P	BB6P
グラブ掘削直後	測深機	プロファイラ	千本電機製
	指向角	3°	4°
	設置位置	「藤石」水中エレベーター	797船の走行式測深機
	測深結果(平均)	-31.2m	-49.4m
標準偏差		0.18m	0.14m
底面仕上げ直前	測深機	沖電機製DPI	沖電機製DPI
	指向角	4°	4°
	設置位置	SEPの1147先端	同左
	測深結果(平均)	-31.5m	-49.43m
標準偏差		0.21m	0.14m

ため設計深度より50cm程度上を目標とし、グラブの爪先深度コントロールはグラブ船の深度計および、支持ワイヤに目盛りを付け、グラブの開口度数に応じ、深度に合わせて掘削管理をした。

iv) さらえ掘削

仕上げ掘削後、残された岩ズリをさらえ底面岩盤を露出させるため、平バケットを使用した。平バケットは重容比が小さく(3.33)、潮流に流されやすいため、2kt以下の潮流で施工した。さらえはバケットを着底させ、底盤にバケットをあずけて閉合し、底面ズリをできるだけ撤去する掘削方法とした。掘削後の残留ズリの確認は音響測深機で行った。通常2回以上バケットを当てると良好なさらえができた。

深度管理については、掘削途中は、掘削管理のため、グラブ船に取り付けた指向角の広い超音波測深機(6°, 200kHz)により行った。

掘削完了時の出来形検測は精密な測深が必要なため、BB5Pでは、SEPに広い範囲を扇形に測深できるプロファイラーを取り付けて使用し、BB6PではBB5Pの実績から、指向角が狭く精密で、さらに広い面積

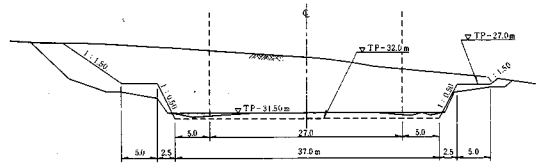


図-11 BB5Pグラブ掘削後の断面図

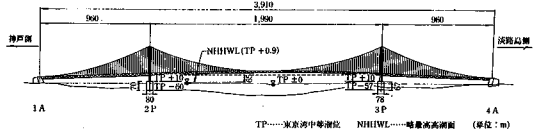


図-12 明石海峡大橋計画図

の測深が可能で、グラブ船の走行測深機(4°, 400kHz)によった。その状況を写真-1に示す。

BB5P, 6Pの測深比較を表-2に示す。

③ 施工実績

i) BB3P・4Aのグラブ掘削(水深10m)

BB3Pと4Aのグラブ掘削は、各種作業船の進入路(TP-6~7.5m)を直接掘削する工事と海底発破により破碎した岩盤を掘削する工事である。掘削数量は、直接掘削量約2万m³、破碎岩約7万m³の合計9万m³である。大型グラブ船は、20m³級グラブ船を使用した。

約2万m³の直接掘削の実績は、掘削日数89日、また、破碎岩7万m³の掘削は160日で、直接掘削に対して約2倍と能率が向上している。

ii) BB5Pのグラブ掘削(水深32m)

BB5Pのグラブ掘削は、水深32m、潮流5.5ktと最も悪条件であり、岩盤を破碎していないのり面部と破碎した基礎底面(精度±50cm)を所定の深度に仕上げるため、20m³級大型グラブ船を使用した。掘削後の形状の一例を図-11に示す。

BB5Pの掘削数量は、TP-27mまでの堆積層を直接掘削する部分約19000m³、軟岩部の直接掘削約3000m³、破碎岩部掘削約10000m³の合計32000m³である。工期は約6か月を要した。

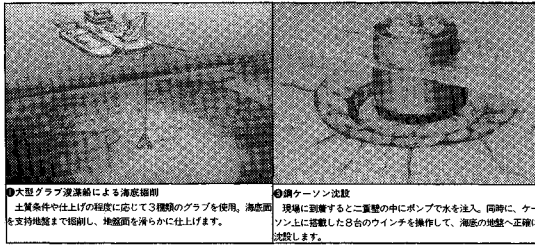
iii) BB6Pのグラブ掘削(水深50m)

BB6Pは、BB5Pに比べ潮流が3.5ktと小さいが、水深は50mと1.5倍である。

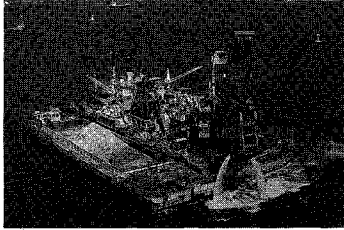
BB6Pの約12万m³の掘削は、25m³級大型グラブ船を使用して12か月かかった。

(3) 明石海峡大橋(3P)

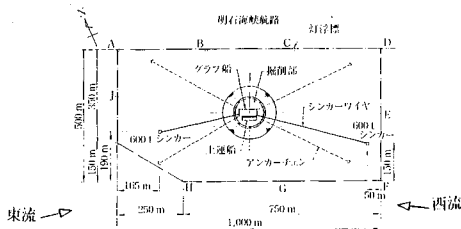
明石海峡大橋は橋長3910mの吊橋であり、明石海峡を跨いで兵庫県神戸市東舞子町と津名郡淡路町間に架けられる。中央支間長1990mは、世界最大である(図-12)、4基の基礎のうち主塔基礎2基(2P, 3P)が海中基礎で設置ケーソン工法で施工されている。3Pの海底掘削の特徴は以下のとおりである。



図一13 明石海峡大橋 2P, 3Pの施工法（鋼ケーソン沈設まで）



写真一3 32.5 m³級大型グラブ船による掘削状況



図一14 グラブ船係留図

① 3Pでは大水深（-57 m）、急潮流（8 kt）、大量の埋戻り砂（6 000 m³/月）と厳しい条件下、岩盤（神戸層砂岩、泥岩）を直接掘削し、グラブ掘削のみで鋼ケーソン掘付盤を仕上げ、掘削完了後ただちに鋼ケーソンを設置した。したがって大型グラブ船の掘削力、掘削精度（-57±0.5 m）が問われる工事となった。

② 3Pの厳しい施工条件に合う新鋭の32.5 m³級のグラブ船を投入した。

a) 下部工の施工

下部工のうち海底掘削は1988～1989年に施工した。

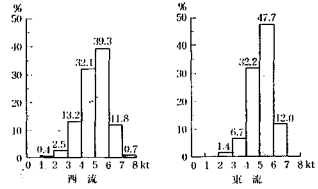
3Pの施工法は図一13に示すように大型グラブ船による海底掘削→鋼ケーソン沈設→水中不分離性コンクリート打設→気中コンクリート打設で海中基礎を完成させる。

地盤条件は、海底面（平均TP-37 m）から約10 m厚で沖積砂礫層、そしてその下約10 mが神戸層砂岩と泥岩で、TP-57 mの基礎掘付位置は砂岩となっている。潮流速は最大8 ktである。

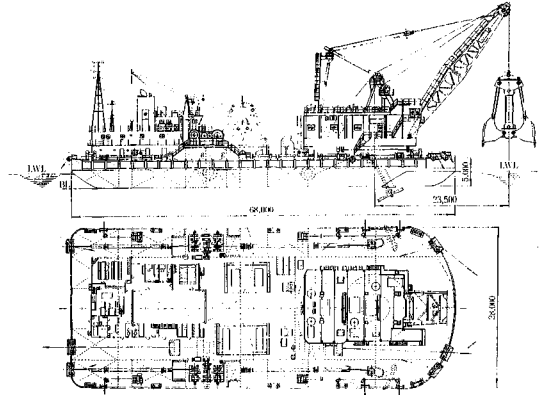
b) グラブ掘削

① 潮流条件

明石海峡では最大潮流速が8 ktに達し、施工に大き



図一15 日最大流速出現頻度 (S 62.5~63.2)



図一16 32.5 m³級グラブ船

く影響するため、調査工事を通じて現地の工事区域で潮流測定を継続的に実施し、流況の把握に努めた。

平均潮流速は西流、東流とも約3 ktであるが、東流のほうが若干大きな値となっている。図一15に示す最大流速出現頻度から、5 kt以上の出現する日が西流で51.8%、東流で59.7%であり、強潮流日が年間の半分以上を占めていることがわかる。

② 掘削位置および形状

掘削地点の海底面は南東から北西にかけて約1/15の勾配で傾斜しており、平均地盤高はTP-37 mである。掘削の平面形状は調査工事において施工性を確認し円形が採用された。またのり面勾配は砂礫層の存在する海底面～TP-50 mは1:3、神戸層掘削部TP-50 m以深は1:1である。掘削底面は支持層であるK<sub>3P-2</sub>層が露呈するTP-57.0 mである。

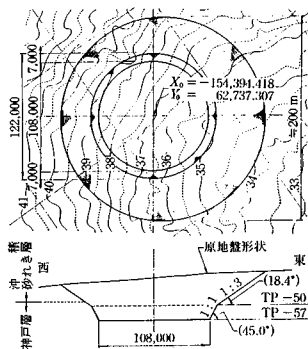
③ 使用船舶

大型グラブ船は32.5 m³級、土運搬は3 000 PS級の押船と、1 500 m³級の土運搬を使用した。32.5 m³級グラブ船の一般配置図を図一16に示す。

④ 掘削方法

i) 係留方法

グラブ船は4丁のアンカー（18 t）と2基のコンクリートシンカー（600 t）にて6点係留した。掘削時はアンカーウインチ、シンカーウインチを操作し移動、位置決めを行い、強潮流時には潮流方向に対する側のアンカー、シンカー3点で現場に止まっていた。係留限界はこの3点



図一七 掘削形状図

のウインチのブレーキ力で決まり、グラブ船単独で約 8 kt、満載バージを抱いた状態で約 5.5 kt であった。

ii) 掘削位置の決定

グラブ船の位置だしは、備讃瀬戸大橋工事と同じ方法で、円座標で行った。位置誤差は±0.5m程度であった。

iii) 掘削作業

潮流が速く、掘削作業時間が著しく制限され昼間のみでは作業時間が短いため、掘削は昼夜間作業とした。土運搬は航行安全の観点から昼間のみ作業とし、付け替え作業は潮流速 1.5 kt 以下の時間帯とした。

iv) 掘削要領

掘削要領は前述の備讃瀬戸大橋工事と基本的に同じであるが、3P工区では流砂の区域内流れ込み、滞積、-57mの深さでの鋼ケーソン直接設置のため、基盤の神戸層高精度掘削と、未知の施工部分があり、急潮流係留とあわせ、備讃瀬戸大橋基礎掘削と異なる施工要領を記述する(図一七、掘削形状図)。

㉑ 沖積砂礫層の掘削

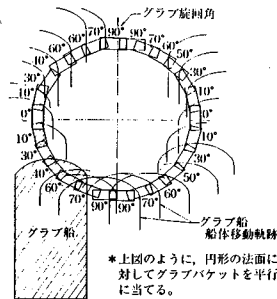
沖積砂礫層掘削は TP-48m までの掘削で硬質土用グラブを使用し、掘削層厚は 1.5m を標準とした。のり面掘削はのり面の崩れ込みが大きいので、グラブの転倒によるつかみ効率の低下はなく、全面を粗掘削によって掘ることができた。掘削作業は潮流によりグラブが流されるため、作業流速は硬質土用グラブは、西流 3.0 kt、東流 3.8 kt 以下である。西流ではグラブが流され船体への接触のおそれがあるため小さな値となっている。のり面勾配は 1:3 の設計である。

㉒ 神戸層の掘削

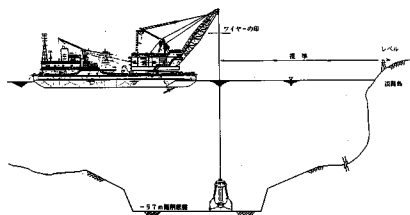
神戸層は砂岩系の岩のため重容比が最大の超硬質土用グラブを使用した(表一参照)。掘削種別は粗掘削、のり面掘削、仕上げ掘削、さらえ掘削に分けた。

・粗掘削

掘削層厚は砂岩系の岩質で爪の食い込みが小さいため、1.0m を標準とした。重量比が大きいため硬質土用グラブに比べ潮流の影響は小さく西流 4 kt、東流 4.5 kt



図一八 円形掘削におけるグラブ当て図



図一十九 レベルによる爪先水深確認

以下の時間帯で施工した。下層の砂質質では予想された以上に硬い部分が局部的にあり、爪の刃先を改造し掘削した。-56.0mの掘削では粗掘削ではあるが、掘削効率優先ではなく掘削水深を揃えることに管理目標を置き、-57mの設計岩盤掘削の事前掘削とした。

・のり面掘削

のり面掘削勾配は-50~57mまで 1:1 となっておりグラブの側面をのり面と平行にあてる掘削方法とした。

のり面に平行にグラブをあてない場合、グラブが大きく傾き、掘削効率が悪くなりまた、のり面余掘が多くなる。円形のり面掘削のグラブのあてかたを図一八に示す。

のり面掘削はのり面の向きによってグラブが潮流の向きに大きな角度をもつため、潮流速が大きいと位置保持が難しいため潮流速 2 kt 以下で行った。このとき潮流 2 kt 以上の時間帯では粗掘削を行ったので潮流条件による掘削能率への影響はほとんどなく、余掘厚は約 3m、のり面勾配は 1:1 (設計値) がほぼ達成できた。

・仕上げ掘削

仕上げ掘削の対象層厚は-56~57mの 1m とした。仕上げ掘削は-57mの基盤をできるだけ不陸のないように掘削するもので、リッパーがけの要領でグラブの爪先が-57m上をこさいでゆく掘削で(図一十参照)掘削面には大量のズリが残留する。仕上げ掘削は均一に掘削することが目的であるが、鋼ケーソンを直接設置するため基礎岩盤を乱してはならない。このため掘削深度管理は音響測深機記録では-56.5mを目標(ズリの表面深度)とし、爪先深度のコントロールは爪先軌跡をもとに開口



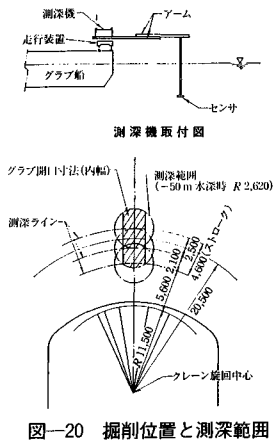


図-20 掘削位置と測深範囲

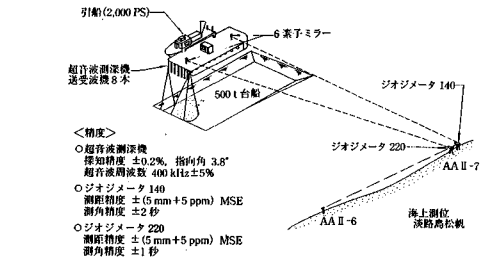


図-21 台船測深概念図

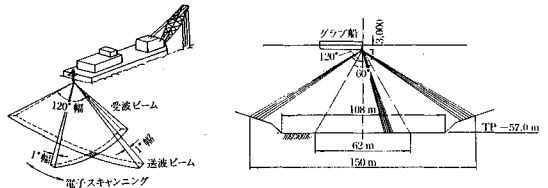


図-22 マルチファンビーム概念図

度が変わるごとにグラブ船のデジタル深度計とグラブの指示ワイヤにつけた印(爪先からの長さ)を陸上(淡路島)からレベルで視準しグラブ船オペレーター室と無線交信し確認しながら(図-10参照)1グラブごとの掘削深度管理を行った。潮流によるグラブの傾き、位置ずれを極力押さえるため2kt以下で作業した。

・さらえ掘削

全面積仕上げ掘削後、超硬質土用グラブから平バケットに取り替えた。平バケットは重容比が小さく基盤の地山が掘削されることはない、このためさらえ掘削はバケットを着底させ、基盤にバケットをあずけて閉口させ、仕上げ掘削で発生した底面ズリをできるだけ撤去し底面の基礎岩盤を露出させる。

刃口部への砂の滞積を避けるため、ケーソン設置日の3日前までのり尻のさらえ掘削を行い万全を期した。さらえ掘削完了後、水中テレビカメラで刃口部を始め、のり面全域を撮影し、平らに掘削された刃口の岩盤状況や砂の溜まり具合などを目で見て確認、これと並行して音響測深による刃口深度、不陸状況の調査を行い、ケーソンの設置点3点を想定し、大型グラブ船による掘削工事を完了した。

⑤ 測深管理

本工事では高精度掘削管理が要求されているため、測深管理には最新の技術を駆使した。

測深管理は、掘削管理のための測深と出来形管理の測深の2系統で行った。掘削管理測深はグラブ船の船首にグラブの旋回半径と同心円上を測深できるように自走式の測深装置を設置し(図-20参照)、グラブ船が掘削位置に移動して掘削を開始する前、およびその位置の掘削を完了した後、測深を行い計画どおりの掘削が成されているかどうかをチェックした。その結果をグラブのオペレーターにフィードバックして、グラブ運転室の掘削深度設定装置の値を決め掘り進んだ。粗掘削では主に各層

表-3 測深結果比較表

	マルチファンビーム	台船測深	グラブ船音響
抽出箱間	φ70~φ83m	φ70~φ83m	φ70~φ83m
データ数	380 (2mメッシュ)	380 (2mメッシュ)	274 (ランダム)
平均値 (TP-m)	57.24	57.17	57.22
最大値 (TP-m)	57.5	57.5	57.5
最小値 (TP-m)	56.7	56.6	56.8
標準偏差 (m)	0.19	0.19	0.19

表-4 測深方法比較

	マルチファン測深	台船測深	グラブ船音響
測深機の名義仕様	• 周波数 400 kHz • 指向角 1° • フロスファン方式	• 同機数 400 kHz • 指向角 3.8° • 8素子	• 同機数 400 kHz • 指向角 2.5° • 1素子
採用船舶、機番	• グラブ船に設置 • 船体掘削専用一式	• 900t D/B に設置 • 2,000 PS 船付船	• グラブ船船首に設置 • 42t D/B、船付アーム
測深、データ取得方法	• 係留大型グラブ船での定点測深 • フロスファンビーム回転 • マイコンによるデータ処理システム	• 係留係留3台船での航行測深 • 8本の換算機を船首に集計 • 大型コンピュータによるデータ処理	• アナログデータ取得時
測深時間、範囲	• 測深1回 1.0~1.5 時間 • (2kt以下) φ150m (水深 57m)	• 水深 4kt 以下 7~8 時間 • 200×200m	• 水深 4kt 以下 20分 • 船首1ポイント
データ取得、観測範囲	• 1.0 点	• 7 点	• 測深
測深作業人員	• 5 人	• 5 人 (船員1人)	• 4 人
データアウトプット	• 係留船、メッシュ表示、観測範囲 • 土量変化図 (土量変化量)	• 等深線図、メッシュ表示、観測範囲 • 土量変化図 (土量変化量)	• アナログデータ
備 考	• 仕上げ測深 • 従来の観測ミス、誤差削減	• 観測の連続性 • 広範囲の観測範囲の観測	• 観測中の高さ管理

厚の掘削水深管理、のり面掘削では主に位置と水深の対比管理、仕上げ掘削では岩ズリ上の水深と爪先深度との対比管理、そしてさらえ掘削では基盤の凹凸位置と高さを管理し、高い所はグラブバケットを取り替えてもう一度、超硬質土用グラブで削り、平バケットでさらえて、凹凸差を少なくし、-57.0m均一(特に刃口部分)になるように測深管理した。

出来形管理の測深は事前測深から3か月に1回ずつ全区域を測深し、掘削出来形、流砂の把握、のり面の変化等の管理を行った。測深方法は500t台船に音響測深機を8台搭載し2000PSのタグボートで走らせ、所定の範囲を陸上からの測量で誘導しながら測深した(図-21参照)、測深データは2mメッシュの測深値として得られ、等深線図にして管理した。

以上の2系統の測深管理を行って掘削を進めていった

