

本四技報

HONSHU-SHIKOKU TECHNICAL REPORT

本州四国連絡橋公団監修

APPROVED BY HONSHU-SHIKOKU BRIDGE AUTHORITY

本四技報 第34号 目次

技術開発に思うこと	第三建設局局长	林 宣 熙	1
明石海峡大橋主塔基礎施工調査	設計部設計第一課	岩 屋 勝 司	2
	(前)第一建設局垂水工事事務所		
	(元)同上	土 田 宝	
	第一建設局垂水工事事務所	植 村 和 宏	
明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験 (その3)	第一建設局垂水工事事務所	北 川 信	12
	第三建設局計画課	森 邦 久	
	(前)第一建設局垂水工事事務所		
大鳴門橋の補剛桁製作工事	第一建設局鳴門工事事務所	淵 田 政 信	18
	同 上	江 藤 隆 男	
下津井瀬戸大橋塔の製作	第二建設局児島工事事務所	奥 川 淳 志	26
	第二建設局建設第一課	村瀬佐太美	
下津井瀬戸大橋タワーリンクの設計製作	第二建設局児島工事事務所	奥 川 淳 志	37
	第二建設局建設第一課	村瀬佐太美	
北備讃瀬戸大橋ケーブルサドルの製作	第二建設局坂出工事事務所	成 井 信	43
	第三建設局向島管理事務所	平 野 茂	
	(前)第二建設局坂出工事事務所		
	第二建設局坂出工事事務所	古 家 和 彦	
技術ニュース			52

本四技報 第35号 (60.10) 掲載予定

- 調質鋼を使用した補剛トラス疲労部材の製作基準検査
- 鷺羽山鉄道トンネル施工
- 下津井瀬戸大橋塔架設
- 岩黒島橋上部工詳細設計
- 羽佐・与島橋の橋梁計画
- 北備讃瀬戸大橋塔架設
- 南備讃瀬戸大橋4 Aアンカレイジの施工
- 伯方・大島大橋下部工施工報告

臨時増刊号(大鳴門橋特集号) 第36号 掲載予定(60.12)

- 大鳴門橋補剛桁の製作
- 大鳴門橋ケーブル架設
- 大鳴門橋下部工工事の計測結果
- 大鳴門橋動態観測システム
- 大鳴門橋照明柱の耐風検討
- 大鳴門橋振動実験
- 大鳴門橋橋面工
- 大鳴門橋緩衝工の計画
- 大鳴門橋陸上部工事
- 大鳴門橋関連区間の維持管理設備
- 門崎高架橋振動実験および風による振動計測

神戸～鳴門ルート



津名一宮 I C～洲本 I C間の交通パレード (6月8日)



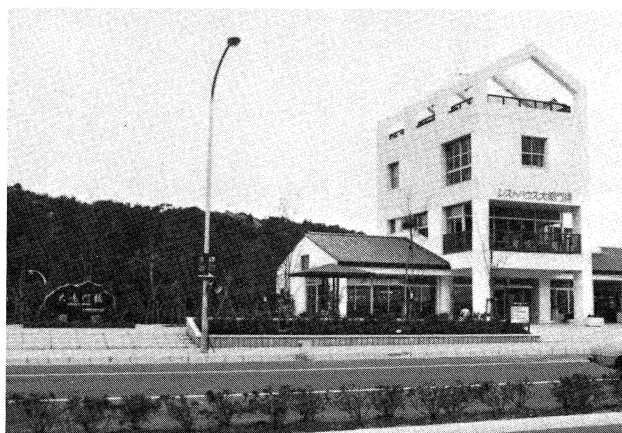
淡路島南 I C～鳴門北 I C開通記念式典 (6月8日)



淡路島南 I C～鳴門北 I C間の
開通パレード (6月8日)



6月8日鳴門北 I C (1,800m 供用開始一番車の通行)



淡路南 I C内レストハウス (60年6月)



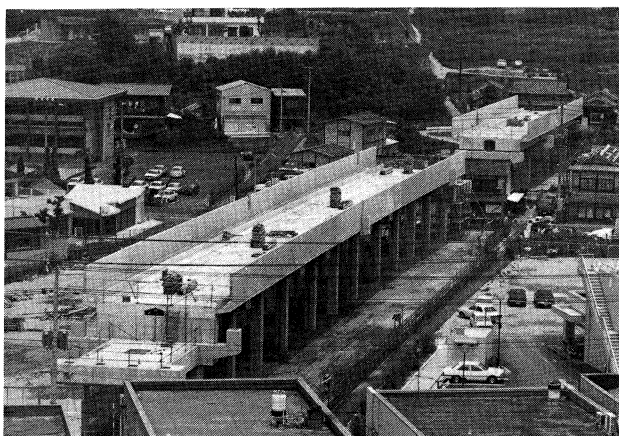
大鳴門橋開通記念碑 (60年6月)



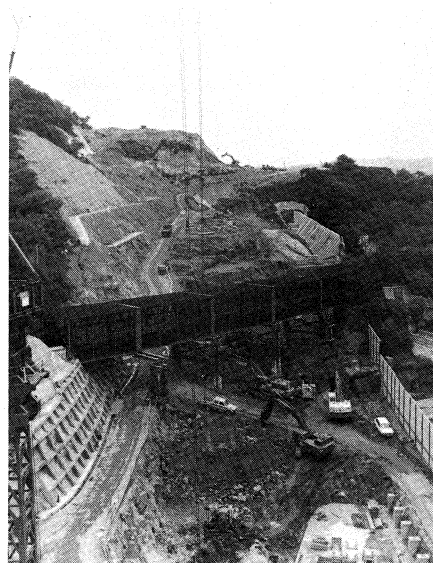
水島インター（その2）工事 (60年6月)



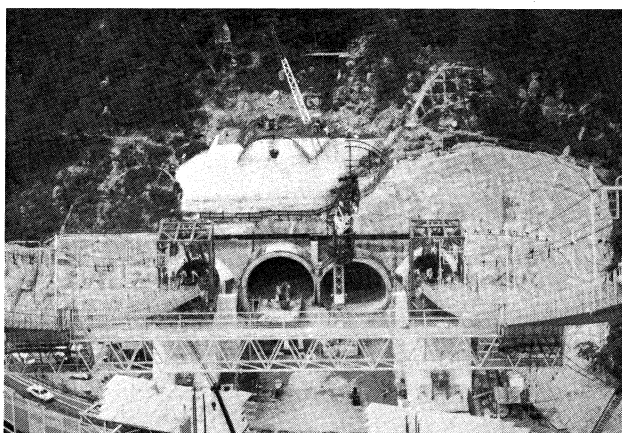
本四備讃線福南山トンネル北工区工事 (60年5月)



本四備讃線小川（その2）工事 (60年6月)



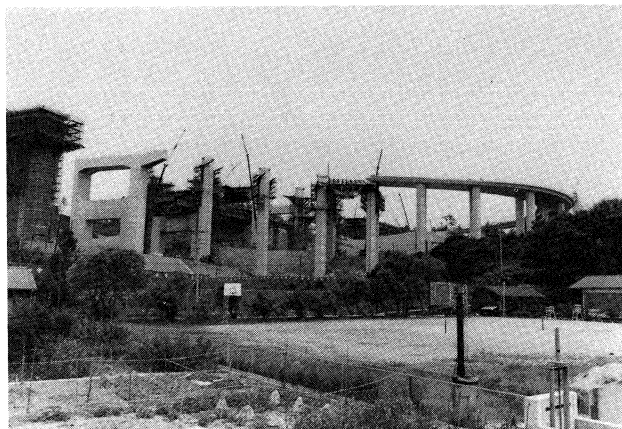
鷺羽山地区(その3)工事 (60年6月)



鷺羽山地区（その4）工事 (60年6月)

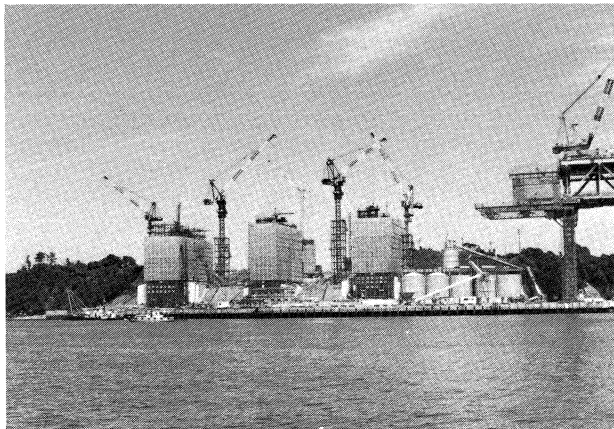


下津井瀬戸大橋ケーブル工事 (60年5月)
(キャットウォークシステムの調整)



櫃石島高架工事

(60年6月)



岩黒橋下部工(その2)工事

(60年6月)

(IB 1 P、IVa 1 P、HB 4 P 軀体コンクリート工)



羽佐島地区(その1)工事

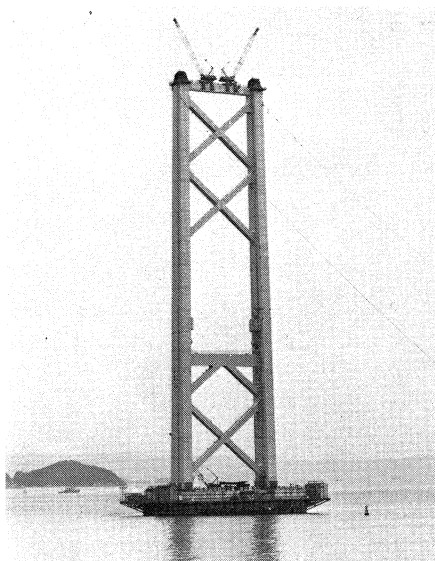
(60年6月)

(YB 2 P 梁部コンクリート工)

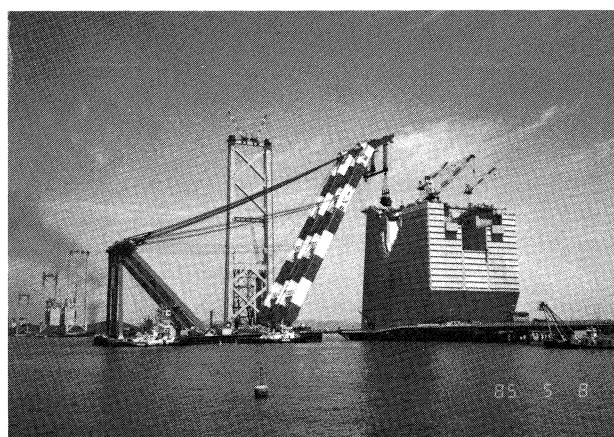


与島高架橋工事(全景)

(60年6月)



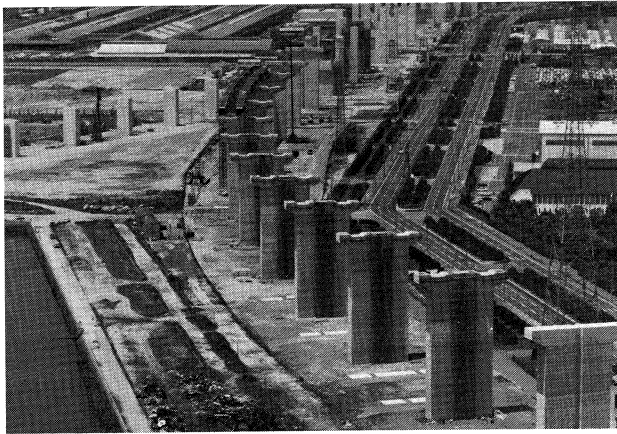
南備讃瀬戸大橋塔架設工事(60年5月)
(完了)



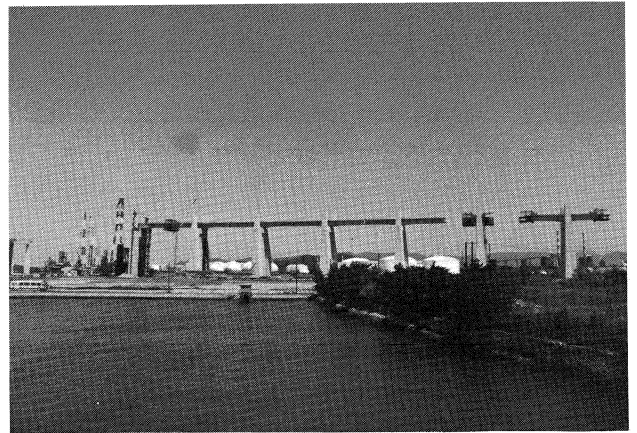
南備讃瀬戸大橋ケーブル架設工事
(7 A スプレーサドル 架設)

(60年5月)

児島～坂出ルート

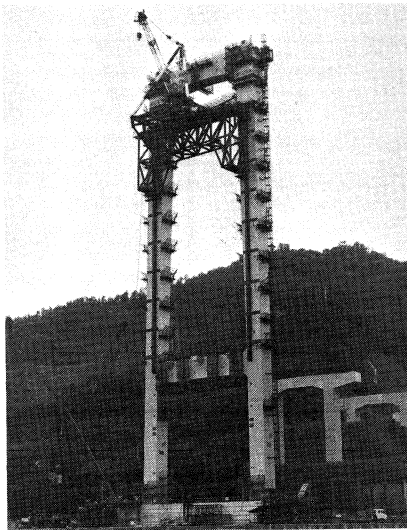


番ノ州高架橋PC上部工（その1）工事 （60年5月）

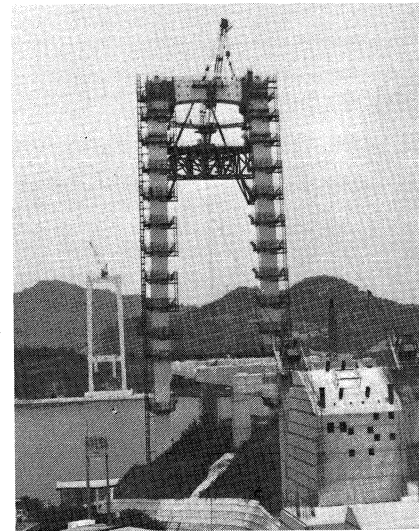


番ノ州道路高架橋鋼上部工架設工事 （60年6月）
（3P～6P上り線架設終了）

尾道～今治ルート



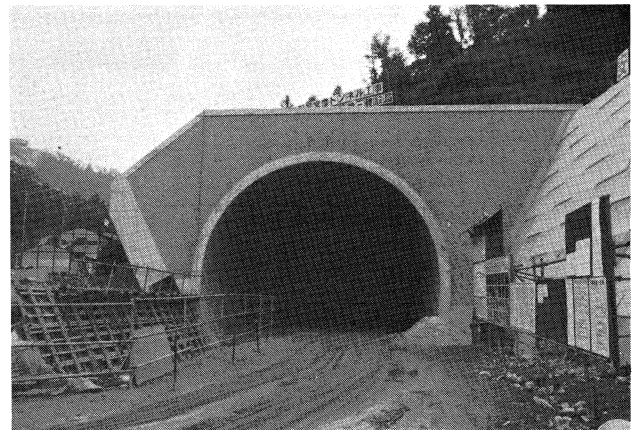
大島大橋6P塔架設完了（60年5月）



大島大橋6P塔架設完了（60年5月）
（向側5P）



一般国道317号伯方島工事 （60年5月）



一般国道317号宮窪トンネル工事（南坑口） （60年5月）

技術開発に思うこと

Small Talks on the Technical Development

第三建設局長 林 宜 熙
Nobuhiro Hayashi

数年ぶりの第三建設局管内の勤務である。窓から見える景色は以前とほとんど変わらない、ただ局の前の道路の車が異常と思えるほど多いことである。前回の勤務は昭和51年7月から約4年間の今治工事事務所であったが、本四プロジェクトの最初の橋である大三島橋の下部工を着工してまもない頃で、海事関係者との話合いに明け暮れたものである。一時は先行はどうなることかと思ったが、幸いよき上司と部下に恵まれたのと、関係者の過分の協力によって、とにかく予定どおり関連区間も含めて完成することができ、ほっとしたことを昨日の事のようによく憶えている。あれから約6年、現在はさらに因島大橋関連区間も開通し、伯方・大島大橋関連区間の工事も62年度完成に向けて着々と進んでいる。感無量である。

瀬戸内の海は美しい。特に鷲ヶ頭山（大三島）などの山頂からみる海はまた格別である。かつて案内した外国の技術者夫妻が船の中から移りかわる景色をみて「日本にはこんなに美しい所があるのに、なぜ日本人はお金を使ってハワイやグアムへ行くのだろうか、」問いかけてきたことがあるが、お世辞半分としても実感である。このような所で仕事ができるのはほんとうに幸せである。したがって、このプロジェクトの遂行にあたって、この美しさとここに住む人々の生活環境をできるだけ損なわないよう、巾広い勉強をして最大限の努力をしていかなければならないと思っている。

ところで、最近の俗にいう先端技術の分野では、日本は過去欧米の技術に対して、追いつき追い越せのかけ声のもとに、技術導入、改良、開発を重ねて、現在は少なくとも商品開発の分野においては世界一流国の仲間入りをした。したがって、商品開発の技術では外国に学ぶものがなくなったので、これからは基礎研究をおおいに行なうとともに、発想の転換ができる創造性豊かな人間が必要であるとしている。

このことは、土木の分野においても技術開発における先見性、創造性の必要が議論されており、早急に発想の転換をはからなければならないとする見方も多い。たしかに、プロジェクトが大きくなればなるほどその先見性創造性は重要であり、心して養っていかなければなら

ない課題であるが、しかしその前に、しっかりと地についた土台が必要である。さらに現在の土木のプロジェクトは公的なものが多いので、その技術的失敗はもちろん、社会的失敗も許されないからである。

さて、我が公団のプロジェクトも、すでに大三島橋、因島大橋、大鳴門橋関連区間が完成し、工事中の兄島一坂出ルート、伯方・大島大橋関連区間も折返し点をなんとか無事通過した。努力のたまものである。しかし、さらに生口橋、明石海峡大橋など未着手橋梁が待っている。

ふり返ってみると、本四の橋の造形は総じて外国の橋のその延長で新味がないという批判もある。しかしでき上った橋の景観は環境にマッチしていると思うし、何よりも、これらは公団内外の広い分野にわたる専門家の知恵を結集して、機能上、安全上などから総合的に検討した結果であり、あの完成当時名橋といわれたセバーン橋の二の舞になってほしくないのである。また我が公団は、このプロジェクトを進めるにあたって、発足以前より行われてきた調査、研究に加えて、内外の専門家の協力を得て、いろいろな新しい技術の開発に取り組んできた。種々の設計、施工技術はもとより、社会環境の要求に対応する調査、研究、予測技術など、広範囲にわたる新しい問題の解決に総力をあげてきたのである。プロジェクトが現在まで進展してきたのは、多くの専門家の経験を基礎として、これと前述のような広範囲にわたる技術の総合的調和がなされてきたからにはかならないと思っている。

これから、わが公団は明石海峡大橋などの建設、社会のニーズに合う長大橋群の管理システムの開発など、世界に例をみない問題と取り組んでいかなければならない。それには、さらに勉強を重ねていくとともに、常に新しいものを模索する心と、それに対する巾広い、しかもしっかりと土についた検討が求められるものである。

日頃心がけながら、性格上なかなかうまくいかないこと、その1、指向性のないアンテナをできるだけ高くあげること。その2、人の話を自分の経験の外挿で即断しないこと。以上、さらに努力していきたい。

明石海峡大橋主塔基礎施工調査

Investigation of Construction Method for main tower pier of Akashi-Kaikyo Bridge

設計部 設計第一課長代理
(前) 垂水工事事務所 工事長
(元) 垂水工事事務所 工事長代理

垂水工事事務所 工事長代理

岩屋 勝司
Katushi Iwaya
土田 宝
Takara Tuchide
植村 和宏
Kazuhiro Uemura

1. まえがき

明石海峡大橋の主塔基礎位置は、大水深・強潮流（水深は2Pで45m、3Pで37m、最大潮流は2Pで4m/s、3Pで4.5m/s）に位置しているほか、とくに3Pの場合は、上層地盤の沖積砂礫層・明石層に粘着力がほとんどないことから、この上層地盤がケーソン沈設後に潮流の乱れにより、数メートルも局部洗掘を受け、無対策ではケーソン保持が困難であることが室内水理実験などにより推定されている。

主塔基礎の施工法については、これらの課題を中心に各種工法が検討されているが、現時点では「鋼管連壁ケーソン工法」を主体に検討が行われている。

本工法は、図-1に示すようにケーソンとその下部構造（底板コンクリート）を一体化させたもので、ケーソン沈設後ただちに土留杭を所定の根入れまで打ち込み、ケーソンと土留杭との一体化を行ったのち、土留杭締切内の岩盤を掘削し、コンクリートを打設するものである。その施工流れを図-2に示す。

本工法の主な検討課題は、

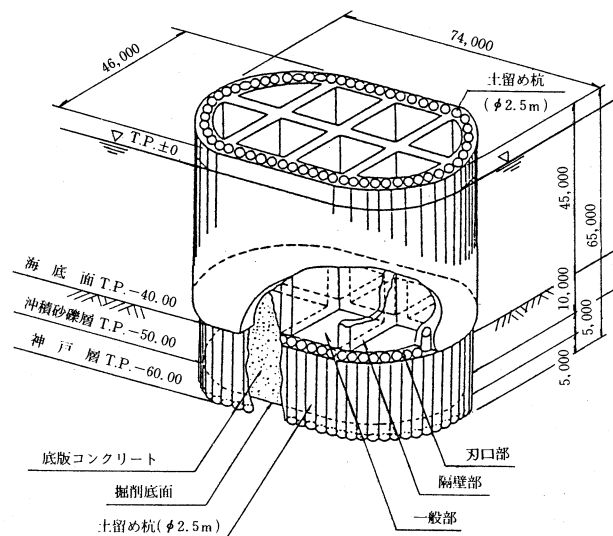
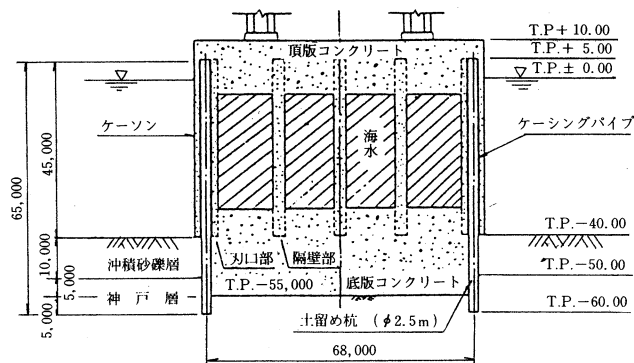
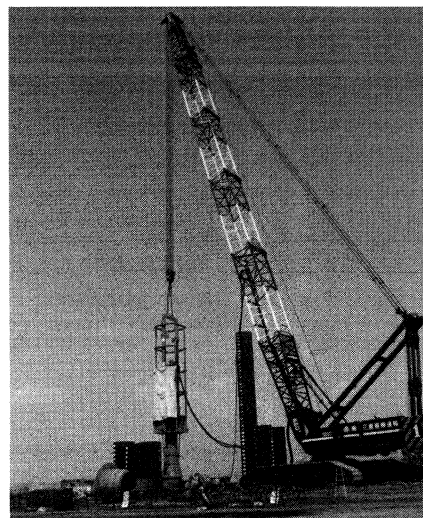
- ① 海底洗掘現象の把握および洗掘防護法の確立
- ② ケーソンの沈設方法
- ③ 土留杭（大口径鋼管杭）の神戸層への打込み方法
- ④ ケーソン刃口下および隔壁下の掘削方法
- ⑤ 土留杭間のグラウト方法
- ⑥ 鋼ケーソンと底板コンクリートとの一体化

などがあげられる。

本報告では、上記検討課題③の工法のうち、（ロックオーガ+パイルハンマー）の併用工法について実験を行ったので、その実験概要を述べる。なお、パイプロハンマーと（パイプロハンマー+ウォータージェット）併用工法については、松帆沖地質調査の一環として、その施工性調査が行われ、すでに本誌等^{1),2)}に報告されているので参照されたい。

なお、上記検討課題の①については、ケーソンの断面形状などを变化させて、洗掘量・洗掘範囲・洗掘防護方法などの検討を室内水理実験で行っている。④、⑤、⑥については、本実験の打込み杭を利用して、昭和59年度に実験を行い施工性を調査を行った。

写真-1
鋼管杭打込実験
（パイルハンマー
による打設、杭
径2.5m）



(注) 数値は参考値

図-1 鋼管連続壁ケーソン工法案（3Pモデル図）

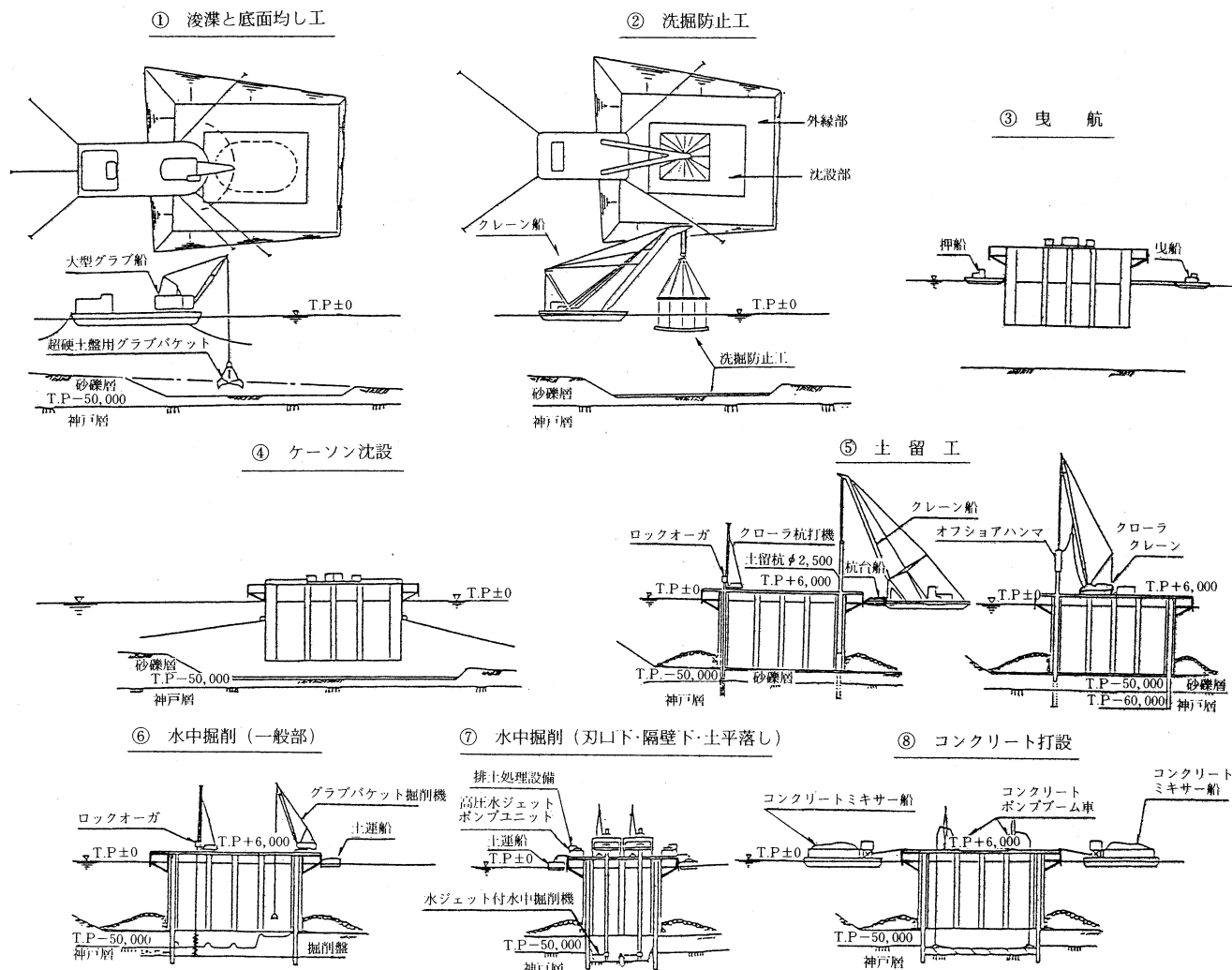


図-2 主塔基礎（鋼管連続ケーソン工法）施工要領（3Pの場合）

2. 鋼管杭打込み実験

2.1 実験の目的

鋼管連壁ケーソン工法の土留杭は、

- ① 本体工の掘削時の土留壁
- ② ケーソンと底板コンクリートとの一体化（コンクリートによる）が終了するまでのケーソン保持

などの役目がある。

そのため、鋼管杭は所定の深さ（2Pで明石層に30m、3Pで沖積層13m・神戸層10m）まで確実に打込まなければならない。

現計画案の土留杭は、直径が2.5m、長さ65m（2Pは80m）で、打込み地盤は図-3に示すとおりである。

杭の打設法としては、表-1に示す工法が考えられるが明石層・神戸層に大口径の鋼管杭を打設した実績がほとんどないことから、工法を選定するにはこれらの工法の施工性を調査しておく必要がある。

本調査では、大口径削孔機（ロックオーガ）と（ロッ

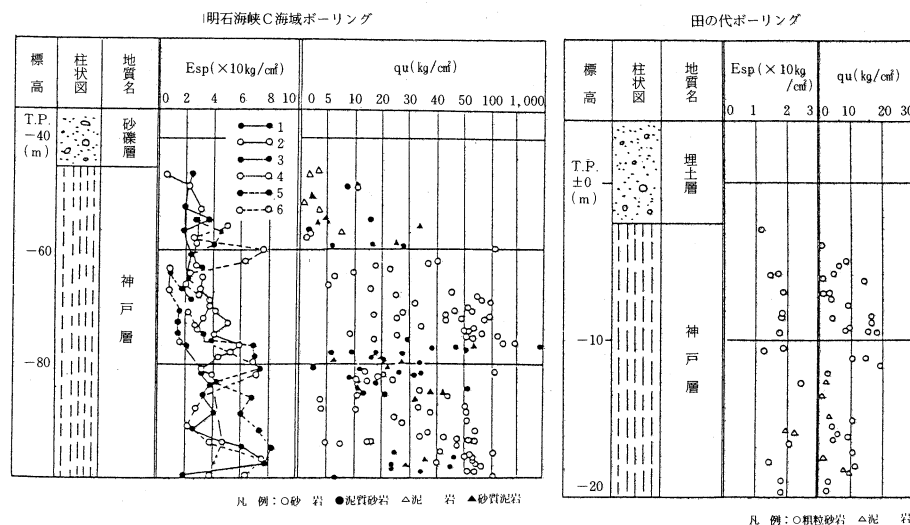


図-3 地質比較図

クオーガ+パイルハンマー）併用工法の施工性について実験を行った。

2.2 実験場所の選定

実験場所は、主塔基礎の原位置で実施することが望ましいが、予算上の制約のほか航行船や騒音・振動による住民家への影響などを考慮して、松帆より南へ約3kmの

表-1 打込み工法の比較

工 法		特 徴 ・ 問 題 点
打 撃	バイルハンマー	① 打設設備が比較的簡単である。 ② 打撃力により局部座屈の可能性が ある。 ③ 砂礫・軟岩に大口径鋼管杭を打設し た実績がほとんどない。
	パイプロハンマー	① 打設設備が比較的簡単である。 ② 支持力の確認がむずかしい。 ③ 神戸層への打込みは不可能と判断さ れる。
併 用 工 法	パイプロハンマー + ウォータージェット	① 二重の打設設備が必要となる。 ② 支持力の確認がむずかしい。 ③ 砂礫・軟岩に大口径鋼管杭を打設し た実績がほとんどない。
	ロックオーガ	① 二重の段取りが必要となる。 ② 先行掘りなので、神戸層($q_u > 100 \text{ kg/cm}^2$)以上でも確実に打込める。 ③ 大口径・大深度の掘削実績がない。
	バイルハンマー + R.R.C	① 二重の段取りが必要となるほか、排 土処理を必要とするため、泥土処理 プラントが必要となる。 ② 打撃力により、局部座屈が生じた場 合R.C.D掘削が不可能になる。
	重錘式工法	① 二重の段取りが必要となる。 ② 中掘り工法となるため杭の肉厚分が 掘削できず、残る可能性がある。 ③ 神戸層への掘削実績がない。

田の代(埋立地)を選定した。

実験場所の地質については、事前にボーリングを実施し、C海域の地質とほぼ同等の工学的特性であることを確かめた。(図-3参照)

表-2 実験ケース

工種		杭名	杭径 (mm)	杭長 (m)	ロックオーガ掘削		鋼管杭打込			備 考
					掘削径 (mm)	掘削深さ GL (m)	バイルハンマー 打撃エネルギー (ton・m/blow)	打止め深さGL (m)		
								計画	実績	
鋼 管 杭 打 込 実 験	A	A	φ2,500	27	φ2,600	-19.0	45	-24.00	-20.926	・ジャンクション有
	B	B	φ2,500	27	φ2,600	-19.0	45	-24.00	-20.966	・ジャンクション有 ・特殊コンクリート部は2回掘(オーガ径1.5m, 2.6m)とする
	C	C	φ2,500	27	φ2,600	-19.0	45	-24.00	-20.578	・ジャンクション有 ・アダプター補強後の再打込みを含む ・打止めの深さは、再打込み時の深さ
	D	D	φ1,000	27	φ1,100	-19.0	45	-24.00	-24.000	・ジャンクション有
	E	E	φ2,500	40	φ2,600	-17.0	45	-37.00	-17.491	・ジャンクション無
	F	F	φ2,500	27	φ2,600	-17.0	45	-24.00	-17.566	・ジャンクション無 杭先端(ℓ=0.65m)切断後の打込み
	G	G	φ2,500	27	φ2,600	-17.0	45	-24.00	-18.073	・ジャンクション無 杭先端(ℓ=0.65m)切断後の再打込み含む ・打止めの深さは再打込み時の深さ

2.3 実験の概要

図-4に示す施工フローで、ロックオーガとパイロハンマーの施工性を調査した。実験ケースと杭の打込配置は表-2、図-5に示すとおりである。

3. ロックオーガ工

3.1 概 要

本調査では、ロックオーガによる大口径削孔工法を採用し、本工事で対象となる砂礫層(本調査では礫混り置換土砂)、神戸層(主として粗粒砂岩)と洗掘防護工の一工法として考えられている特殊(水中)コンクリート($\sigma_{28} \div 40 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$)を削孔し、その施工性を調査した。

調査に使用したロックオーガ機は、現有日本最大級のもので、表-3に示すように全装置重量約100tの3点支持油圧作動式クローラ式杭打機に削孔機(ロックオーガ機)を装着したものである。

ロックオーガ用スクリュースは、中空の中心管(水、エア、グラウトを送る)の周辺にスパイラル状に羽根を取り付けたもので、先端ヘッドは超硬刃先を取り付けたオーガヘッド(東芝タイガロイ製R-5型)を使用した。

ロックオーガ削孔位置と削孔径は図-6に示すとおりで、削孔深度はJ₁~J₃、A~DがGL-19m、E~GがGL-17mである。

3.2 実験結果と考察

実験結果を表-4~5、図-7~8に示す。結果を要約すると、つぎのようである。

- (1) 削孔速度は、削孔径が小さいほど時間当り削孔長は長くなるが、削孔量では削孔径が大きい方が能率が良い。(表-4参照)
- (2) オーガ削孔機出力トルクは、削孔径φ650、φ1,100に対しては充分であったが、φ2,600に対しては、図-7に示すようにトルク不足となっている。従って、効率の良い削孔を行うには定格40~50t·m程度の削孔機の開発が必要と思われる。
- (3) 削孔径φ2,600におけるトルク不足を補う手段として、C杭部でφ1,100による先行削孔後、φ2,600の削孔を行い、その効果を調べた。削孔速度はほとんど変わらなかったが、オーガトルクの負担は低減された。(表-5参照)
- (4) q_u が大きくなるに従って、削孔速度は遅くなる傾向にある。

表-3 ロックオーガの仕様

ベースマシン仕様			
項 目		単位	100P
本体重量(ハイフレーム、カウンタウェイト16ton付時)		ton	50.0
走行可能全装備重量		ton	100.0
接地圧(全装備走行時)		kg/cm ²	1.22
登坂能力		% (度)	40(21.6)
ディーゼルエンジン	名 称	—	日産PD604
	定格出力	ps/rpm	152/2,000
作動油タンク容量		ℓ	450
燃料タンク容量		ℓ	250
カウンタウェイト(最大)		ton	16.0(7.0, 9.0)

表-4 削孔速度

地層	φ2,600	φ1,100	φ650
埋土層	7.0m/hr	12.1m/hr	12.2m/hr
特殊コンクリート	37.2m ² /hr	11.5m ² /hr	4.0m ² /hr
粗粒砂岩	2.7m/hr	6.7m/hr	9.1m/hr
	14.3m ² /hr	6.4m ² /hr	3.0m ² /hr
泥岩	1.0m/hr	4.4m/hr	6.8m/hr
	5.3m ² /hr	4.2m ² /hr	2.3m ² /hr
泥岩	1.6m/hr	10.9m/hr	9.8m/hr
	8.5m ² /hr	10.4m ² /hr	3.3m ² /hr

(図-8参照)

- (5) ビット消耗が削孔速度に大きく影響する。(ビット取り替え前後の削孔速度は2～4倍の差があった。
 (6) 削孔の鉛直精度は2/1,000～7/1,000程度であった。

4. 鋼管杭打込工

4.1 概要

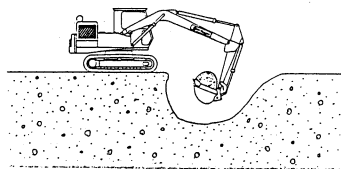
打込実験に使用する鋼管杭は、杭径・杭長の差異、ジャンクション(継手部)のセリを把握するために表-

表-5 先行削孔比較

地層	A (分/m)	C (分/m)		
		φ2,600	φ1,100	計
埋土層①	4.6	3.1	1.3	4.4
特殊コンクリート	22.3	12.7	7.5	20.2
埋土層②	14.7	13.9	5.2	19.1
粗粒砂岩層	47.2	50	9.3	59.3
泥岩層	43.8	27	3.6	30.6

①土砂置換工

調査場所が埋立地で、土中に転石が埋没しているため、土砂と置換した。



②ロックオーガ先掘り工

鋼管杭打込み箇所をロックオーガにて先掘りを行う。

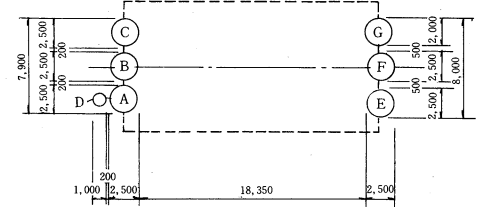
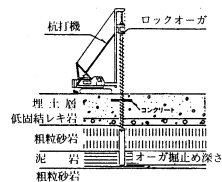
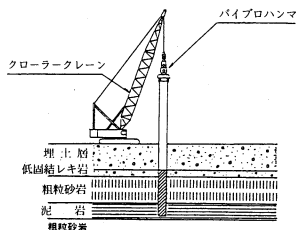


図-5 鋼管杭打込配置図

③パイロ建込み

鋼管杭を先掘りした孔の中へパイロで建込む。



④オフショアハンマ打込み

オフショアハンマで鋼管杭を所定の深度まで打ち込む。

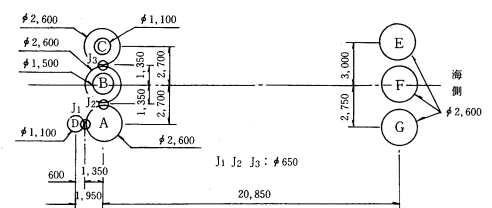
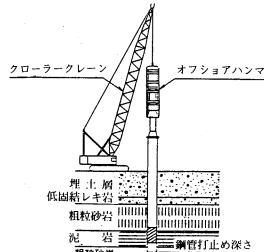


図-6 オーガ削孔位置図

図-4 施工流れ図

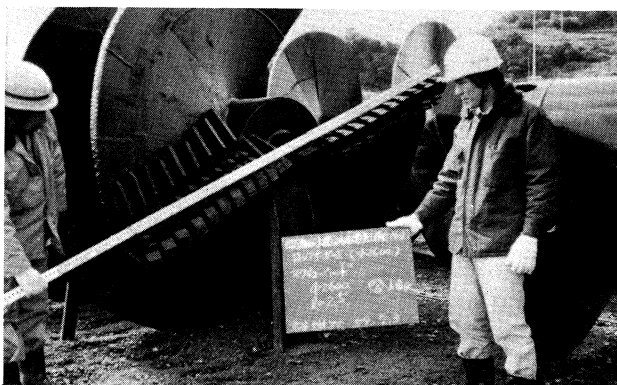
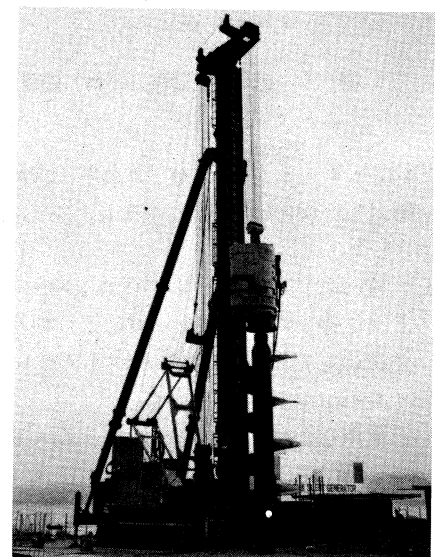


写真-2 「ロックオーガヘッド」

写真-3

「ロックオーガ」



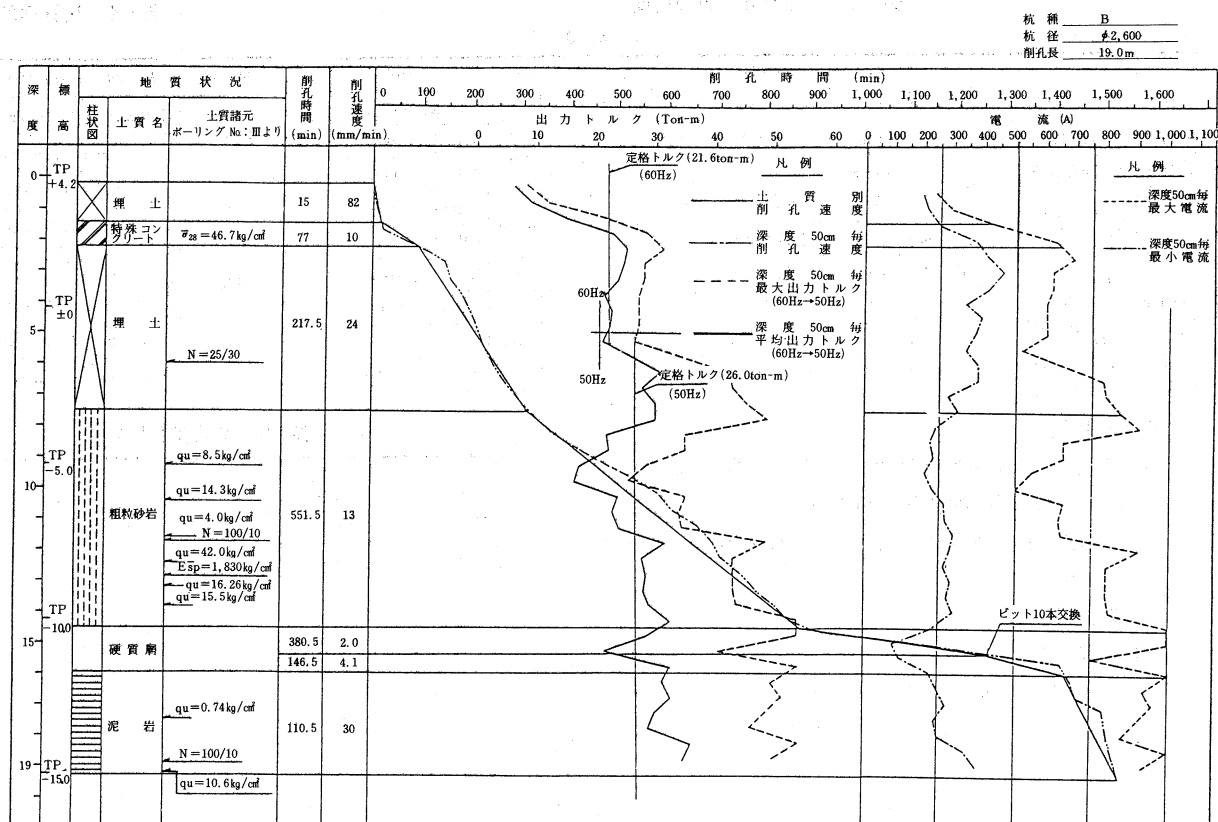


図-7 ロックオーガ削孔実績図

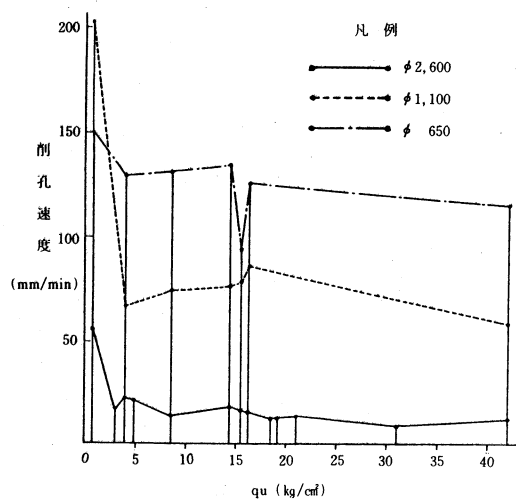


図-8 q_u -削孔速度 (平均) 関係図

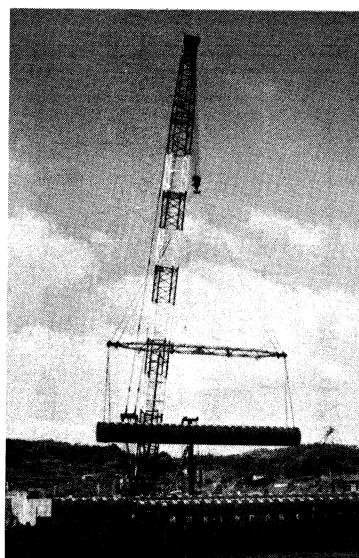


写真-4 鋼管杭水切



写真-5 バイブロによる杭の建込み

2に示す7本を製作し、海上から台船で搬入し、650tのクローラークレーンで水切りした。

杭の打込みは、バイブロハンマー (VM2-25,000AⅡ×2連) でロックオーガにより削孔されている深度まで建込んだ後、650tのクローラークレーンを使用し、パイルハンマーで打込んだ。

使用したパイルハンマーは、表-6に示すように打撃エネルギー45t・m (ラム重量30t、ストローク長1.5m) で日本最大の能力を持つものであったが、このハンマーは構造上 $\phi 1,500$ 程度の杭までしか打ち込めな

いため、D杭を除く他の杭はヤットコ (チューブラアダプターと呼ぶ) を使用した。

施工性調査および環境調査としては、次の項目について測定を行った。

- ① タイムスタディ
- ② 貫入量・リバウンド量の測定
- ③ 打撃応力測定
- ④ 騒音・振動測定
- ⑤ 家屋調査

4.2 実験結果と考察

実験結果の総括を図-9~10に示す。

(1) 打込長

表-8に示すように、D杭を除く他の杭は所定の深度まで打ち込むことができなかった。その原因として、

- ① 杭先端抵抗力が予測値より大きい。
- ② ヤットコ使用による打撃エネルギーのロスな

どが考えられた。

①については、F杭・G杭の再打込み前に、杭先端の補強バンドを除去し、その影響を調べたが、その影響は

主な仕様

項	目	クレーン仕様
最大つり上能力	18.29mウルトラヘビティチューティブーム ton×m	650×5
	24.38mスタンダードブーム ton×m	500×7
基本ブーム長さ	ウルトラヘビティチューティブーム m	18.29
	スタンダードブーム m	24.38
最大主ブーム長さ	m	103.63

表-7 650T クレーンの仕様

表-6 オフショアハンマの仕様

要 目	形 式	MRBS-3000形
作業方式		単動、シリンダ打撃式・ストローク遠隔無段調整式
打撃体重量	kg	30,000
最大シリングストローク	m	1.50
ストローク調整比	—	1:4
定格最大打撃エネルギー	kgm/blow	45,000
打撃回数(最大ストローク時)	blows/min	約44
許容最小貫入量	mm/blow	1.5
標準適用抗外径	inch	30~60
最大抗重量	ton	180
斜打使用限度	—	1:3
蒸気圧力(ハンマ入口)	ata	11
蒸気消費量	kg/hr	5,500
空気圧力(ハンマ入口)	ata	11
空気消費量	m ³ /min	175
潤滑油消費量	ℓ/hr	4.05
ハンマ本体	kg	49,000
標準ステップアンビル	kg	15,000
オフショアガイドゲージ	kg	30,000
総重量	kg	93,000

表-8 打込長さ比較(計画・実績)

杭名	計 画 (m)	変更計画 (m)	実 績 (m)	備 考
A	5,000	—	1.632	φ2500 再打込を含む
B	5,000	—	1.966	φ2500
C	5,000	—	1.493	φ2500 再打込を含む
D	5,000	—	4.440	φ1000
E	27,000	20,000	0.508	φ2500
F	14,000	7,000	0.475	φ2500 先端補強カット
G	24,000	7,000	0.452	φ2000
G'	(24,000)	(7,000)	0.553	φ2000 再打込 先端補強カット

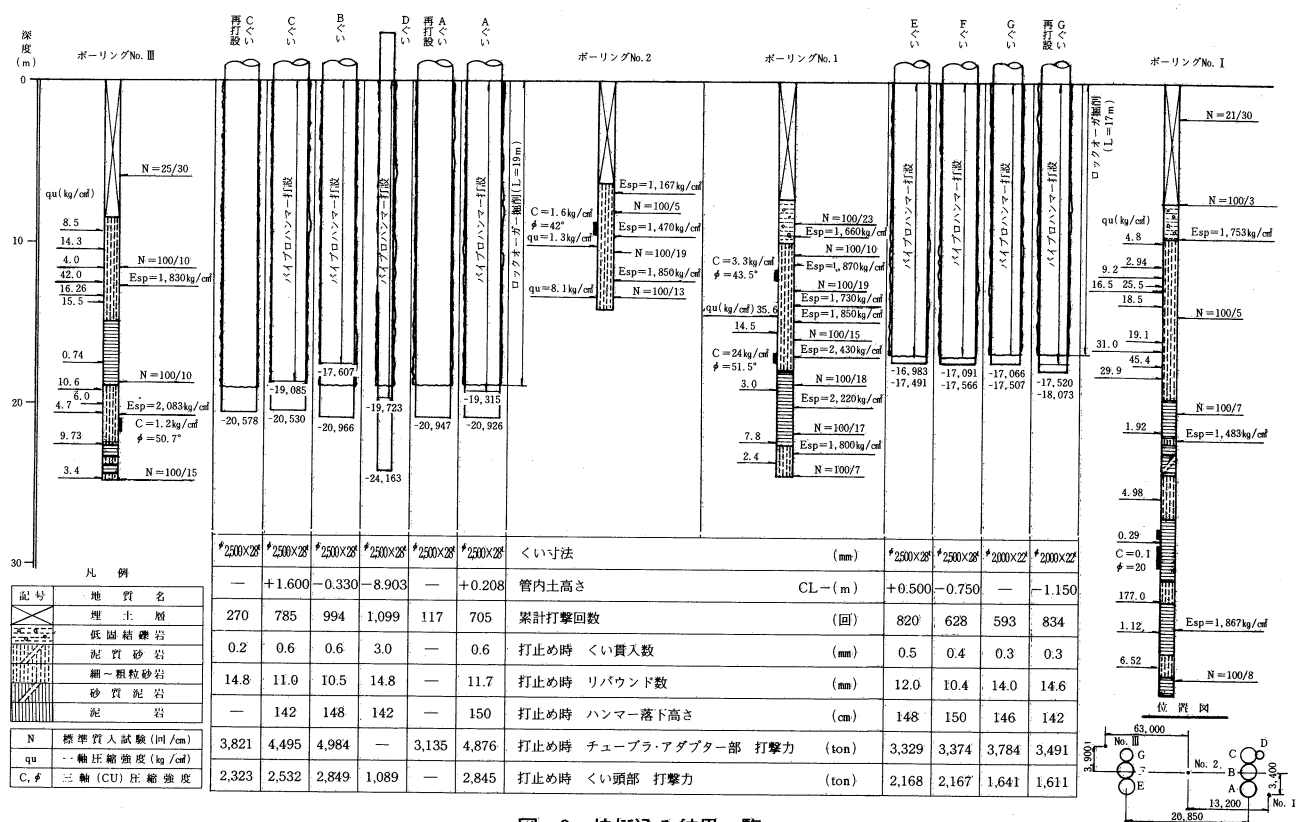


図-9 杭打込み結果一覧

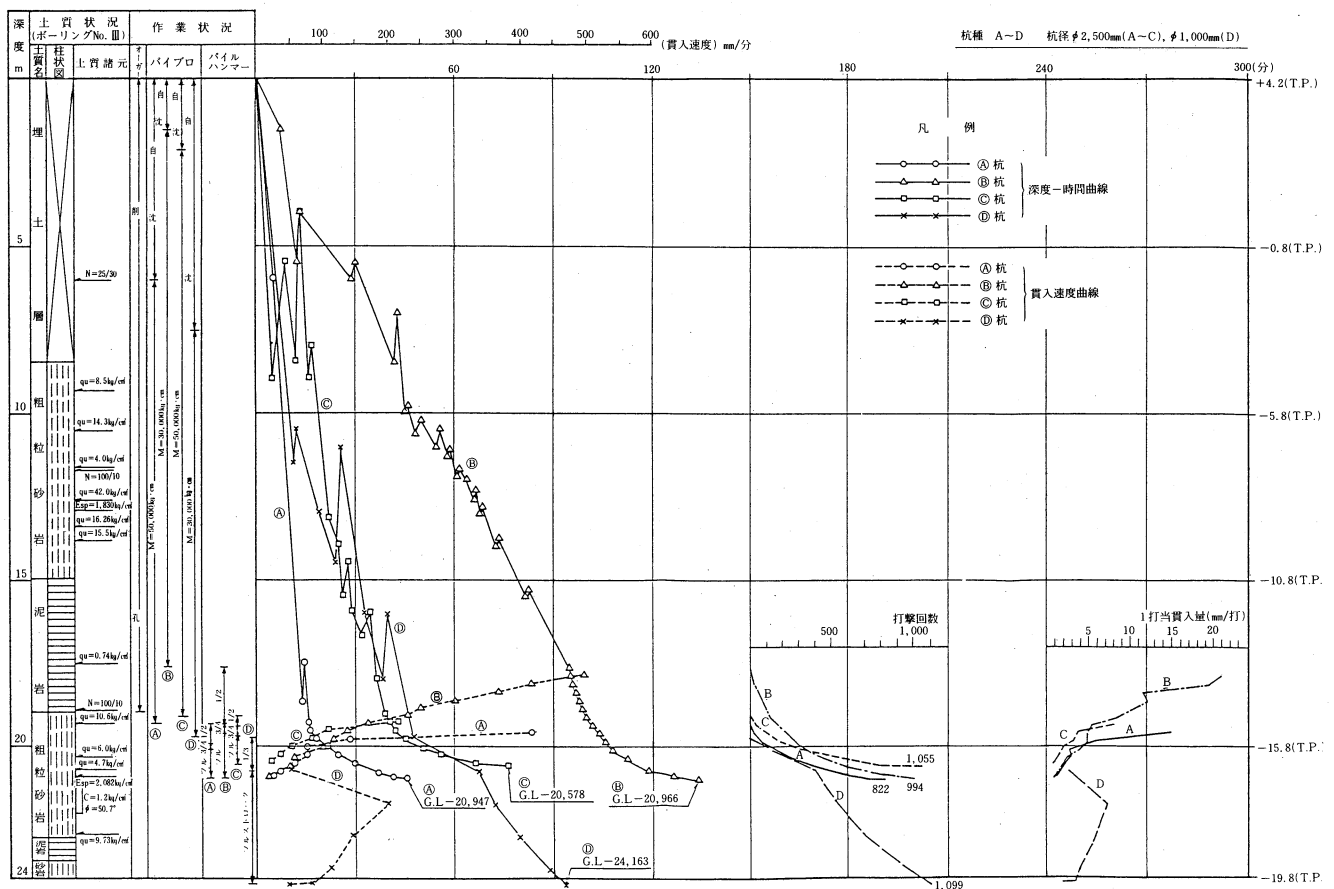


図-10 貫入比較図

表-9 杭先端断面積比較

断面	杭名	F	G
断面			
補強バンド切断前		4,156.6cm ²	2,635.7cm ²
補強バンド切断後		2,174.5 "	1,367.1 "
切断による面積の比率 (切断前を100%とする)		52.3%	51.9%

F杭 () はG杭
 補強バンド
 E-600×25
 (E-500×20)

表-10 打撃力伝達比較 (打止時)

打撃力	チューブラアダプター打撃力(t)	杭頭打撃力(t)	伝達率	備考
補強前				
A	4,876	2,845	58.3%	
B	4,984	2,849	57.2	
C	4,495	2,532	56.3	再打込60.8%
D	—	—	—	
補強後				
E	3,329	2,168	65.1	
F	3,374	2,167	64.2	
G	3,784	1,641	43.4	
G'	3,491	1,611	46.1	引抜後再打込

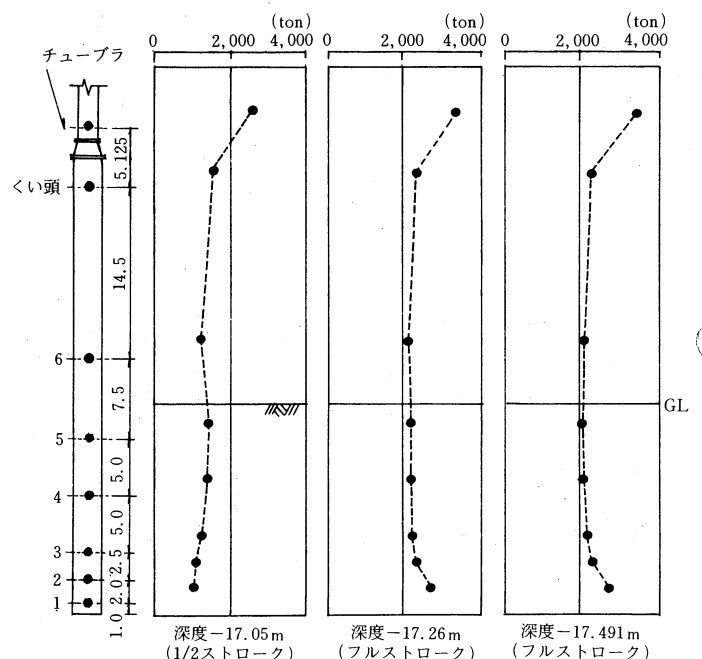


図-11 E杭パイルハンマーによる打撃測定結果(深さ方向分布)

貫入量で1割程度の効果があった。②については、チューブラアダプターに補強リブを取り付け、スムーズなエネルギー伝達を試みたが表-9に示すように、その効果は余り見られていない。

従って、大口径鋼管杭の神戸層への打込みには現有パイルハンマーより能力の大きなハンマーが必要となる。

(2) 打撃力分布の特性

深さ方向打撃力分布は、各杭に共通する現象として、杭頭部より杭先端に至る中間部の打撃力はほぼ垂直であり、杭周面抵抗がほとんどない分布形状といえる。また、杭先端部では打撃力が大きくなる現象が見られている。この現象については、理論上では具現化されているが、実測としては一般的には見受けられないまれなケースである。この特性は、打撃力に対する地盤抵抗のほとんど

が杭先端にある場合といえる。

(3) ジャンクションのセリ

A～D杭には、打込みによるジャンクションのセリを調べるために、図-12に示す継手を取りつけられていたが、パイプロハンマーによる建込み状況からも、そのセリはほとんどなかった。

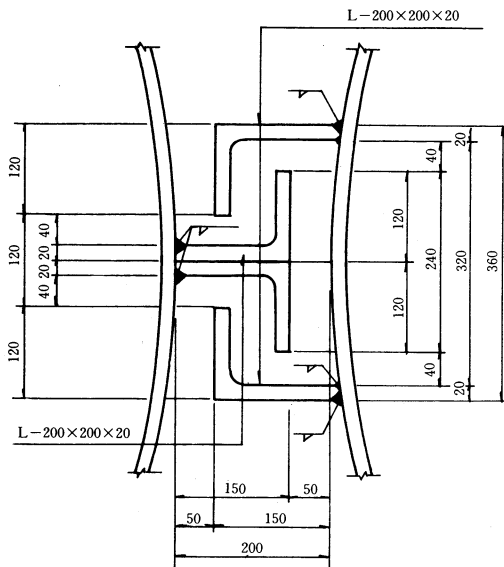


図-12 継手詳細図

(4) 環境測定

本実験に使用したパイロハンマー（MRBS 3,000）は、通常海上の基礎工事に使用されており、本実験のように陸上で鋼管杭を打込んだ実績がほとんどなく、杭打込み時に発生する騒音・振動が周辺の住民や家屋・池・井戸等への影響が懸念されたが、表-11、12に示すように音・振源の近傍では、かなりの高値となったが、民家の密集している付近（450m）では距離減衰し問題は生じなかった。

5. 鋼管杭打込実験の解析

5.1 概要

鋼管杭打込実験の計画に先立ち、従来の算定方式（周面摩擦力や杭先端抵抗力など）や既往の経験に基づく諸常数（ハンマー効率やクッション材のバネ常数など）を用いて、Smithの波動方程式により貫入量を予測した。その結果では、今回使用したパイロハンマー（MRBS 3,000）の能力であれば神戸層への貫入は充分可能と予測された。しかし、実測値と予測値には大きな差異が生じた。

その原因を明らかにするために、本実験で得られたデータをもとに主要入力常数の見直しを行い、パイロハンマー工法による2P、3P主塔基礎の土留杭打設の可能性を検討した。

5.2 解析手法とその結果

本解析では、杭を多数の質点・バネ系の要素に分割し、

表-11 騒音測定結果

地 点			1	2	3	
音源よりの距離 (m)			10	100	450	
暗・雑騒音 (ホン)			測定値	51~75	41~71	42~61
			平均値	62	56	50
パイプロ ハンマー 作 動 時 (ホン)	φ 2500	測定値	73~88	61~ 82	46~72	
		平均値	82	70	57	
	φ 2000	測定値	83~100	53~74	56~61	
		平均値	90	65	58	
	φ 1000	測定値	79~88	62~71	46~66	
		平均値	84	68	56	
パ イ ロ ハ ン マ ー 打 込 時 (ホン)	φ 2500	ラ 1/2	測定値	102~108	83~89	69~94
			平均値	105	86	81
		ム 3/4	測定値	103~ 108	83~88	72~92
			平均値	107	87	82
		高 4/4	測定値	100~112	84~96	72~93
			平均値	106	88	82
	φ 2000	ラ 1/2	測定値	101~108	80~89	65~81
			平均値	103	85	74
		ム 3/4	測定値	102~109	84~89	72~87
			平均値	106	87	78
		高 4/4	測定値	101~106	82~88	60~87
			平均値	104	85	73
	φ 1000	ラ 1/3	測定値	92~96	74~77	54~71
			平均値	94	75	63
		ム 3/4	測定値	—	—	—
			平均値	—	—	—
		高 4/4	測定値	93~97	72~75	56~72
			平均値	94	75	65

表-12 振動レベル測定結果

地 点			1	2	3		
振 動 よ り の 距 離 (m)			10	100	450		
振 動 方 向 (鉛直)			z	z	z		
暗 ・ 雑 振 動 (dB)		測定値	10～47	10～39	10～38		
		平均値	26	20	16		
パイプロ ハンマー 作 動 時 (dB)	φ 2500	測定値	53～82	46～66	14～32		
		平均値	72	55	23		
	φ 2000	測定値	67～77	34～55	16～28		
		平均値	73	46	24		
	φ 1000	測定値	67～78	52～62	10～21		
		平均値	76	58	16		
	パイ ル ハ ン マ ー 打 込 時 (dB)	φ 2500	ラ 1/2	測定値	62～74	51～61	22～44
				平均値	70	57	40
ム 3/4			測定値	64～76	52～61	33～45	
			平均値	73	59	42	
高 4/4			測定値	71～76	41～62	41～45	
			平均値	74	61	43	
φ 2000		ラ 1/2	測定値	74～77	54～60	36～45	
			平均値	76	57	40	
		ム 3/4	測定値	77～78	59～61	39～44	
			平均番	77	60	42	
		高 4/4	測定値	77～78	59～62	41～44	
			平均値	78	61	43	
φ 1000		ラ 1/2	測定値	68～74	54～60	22～29	
			平均値	72	58	26	
		ム 3/4	測定値	—	—	—	
			平均値	—	—	—	
		高 4/4	測定値	71～74	57～60	34～39	
			平均値	73	58	37	

杭体を伝播する応力を求める波動方程式を基本に、Smithの手法に基づき数値解析を行った。

解析モデルと入力諸常数を図-13、表-13に、本実験における解析値と実測値の結果を表-14に示す。

また、本解析で得られた諸常数を使用して2P、3Pにおける打設の可能性を解析した。その結果が表-15である。2Pの明石層に対してはパイルハンマーMRBS-8,000クラスで打設可能(杭径2mの場合)と考えられるが、3Pの神戸層に対しては最大級のパイルハンマーMRBS 12,500クラスであっても神戸層に5m貫入させることは不可能と予測された。

なお、入力定数の主な検討結果は以下のとおりである。

表-13 入力諸常数

ハンマー関連	杭、アダプタ関連	地盤抵抗関連
- ラム重量(W_r) - ハンマーストローク(H) - クッション材バネ定数(K_c) - クッション材復元定数(e) - パイルキャップ重量(W_c) - ハンマー効率(ℓ_H)	- 杭分割要素重量(W_{pi}) - バネ定数(K_i) - チューブラアダプタ分割要素重量(W_{ti}) - バネ定数(K_{ti}) - 杭長 - 貫入深さ	- 周面地盤周面摩擦力(f) - 最大弾性変位量(Q_s) - 減衰定数(J_s) - 杭先端地盤杭先端抵抗力(R) - 最大弾性変位量(Q_p) - 減衰定数(J_p) - 杭先端の状況(閉塞か開口か)

(注) 1) ハンマー効率の定義 ここに E_H : 杭に伝達される打撃エネルギー

$$E_H = W_r \times H \times e_H$$

H : ハンマーストローク

2) 減衰定数

ℓ_H : ハンマー効率

$$J_s = 0.05 \text{ sec/ft}$$

$$J_p = 0.15 \text{ sec/ft}$$

(1) ハンマー効率 (ℓ_H)

杭頭およびチューブラアダプターにおける打撃応力のピーク値や打撃エネルギーより推定した結果、ハンマー効率は0.5~0.7であることがわかった。

(2) 杭先端抵抗力 (R)

実測の打撃応力は、杭先端の肉厚に関連し、ほぼ $t^{-1.2}$ に比例することがわかった。この打撃応力は杭先端において地盤の動的な抵抗力 R_d につり合っていると考えられる。そこで、静的杭先端抵抗力 R_s についてもこの関係が成り立つと仮定し、次式で静的杭先端抵抗力を求め、その妥当性を確認した。

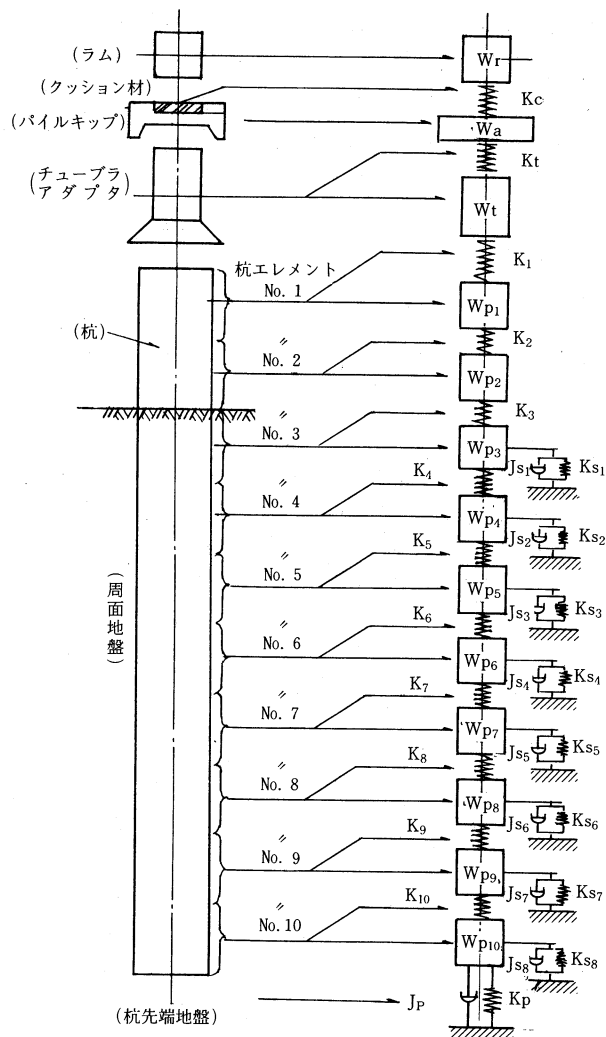
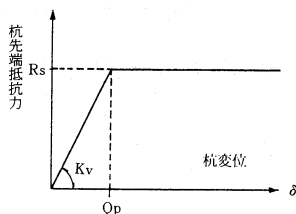


図-13 解析モデル図

表-14 杭貫入解析結果表

くい名	貫入深さ(m)	くい先端状態	ハンマー効率 er	クッション材のバネ定数 K_c (t/m)	最大弾性変位 Q_s, Q_p (mm)	チューブラアダプタ最大応力(kg/cm^2)		くい頭最大応力(kg/cm^2)		貫入量(mm)	
						解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値
Dぐい	-24.163	開口状態	0.71	2.95×10^6	$Q_p=1.1$ $Q_s=2.5$	—	—	2,147	2,148	2.90	3.0
Bぐい	-20.966	〃	0.72	7.2×10^5	〃	1,651	1,698	1,173	1,310	1.09	0.6
Aぐい	-20.926	〃	0.67	7.4×10^5	〃	1,673	1,660	1,183	1,308	1.14	0.6
Cぐい	-20.53	〃	0.60	〃	〃	1,541	1,531	1,101	1,164	0.76	0.6
Gぐい	-17.507	〃	0.47	2.45×10^6	〃	1,307	1,289	1,162	999	0.44	0.3
Fぐい	-17.566	〃	0.44	8.1×10^5	〃	1,136	1,149	914	997	0.26	0.4
Eぐい	-17.491	〃	0.51	7.5×10^5	〃	1,129	1,134	896	997	0.72	0.5

なお、②式で求めた R_s は E 杭で $3,250 \text{ t}/\text{m}^2$ 、F 杭で $7,000 \text{ t}/\text{m}^2$ となり一般に使用されている $3 q_u$ (ここでは $3 \times 100 \sim 300 \text{ t}/\text{m}^2$ 程度) よりかなり大きな値となっている。



$$R = D \cdot C \cdot F \times R_s \quad \dots ①$$

$$R_s = k_V \cdot Q_P \quad \dots ②$$

$$k_V = k_{V_0} \cdot \left(\frac{t}{30}\right)^{-1.2} \quad \dots ③$$

ここに、

R : 杭先端抵抗力、

$D \cdot C \cdot F$: Dynamic Crushing Factor (=2.0)

R_s : 静的杭先端抵抗力、

Q_P : 最大弾性変位 (=1.1mm)

k_V : 杭先端地盤のバネ定数 (kg/cm²)

$$k_{V_0} = \frac{1}{30} \cdot \alpha \cdot E_o, \quad \alpha = 4$$

E_o : ボーリング孔内で測定した E_{sp} (kg/cm²)

t : 鋼管杭先端の肉厚 (cm)

(3) 周面摩擦力 (f)

最も貫入深さが大きかった D 杭を対象に検討した結果、硬質地盤に対しては次式で求められると判断した。

$$f = K \cdot \bar{\sigma}_V \tan \phi' + 0.5C$$

ここに、

f : 最大周面摩擦力 K : 土圧係数 (=0.7)

C : 土の粘着力

$\bar{\sigma}_V$: 任意の深さにおける有効土被り圧

$\tan \phi'$: 周面摩擦係数 ($\phi' = \phi$, ϕ : 土の内部摩擦角)

(4) チューブラアダプタの影響

図-11に示すように、アダプタに発生した打撃力は杭頭に伝達する過程で低下した。この現象を検討した結果、アダプタの断面積に対して鋼管杭の断面積が小さくなっているためと推察された。(下図参照)

$$\sigma_0 = \frac{E}{C} \cdot V_0 \quad \text{ここに} \quad \begin{aligned} \sigma_0 &: \text{発生応力} \\ V_0 &: \text{杭体の初速度} \\ C &: \text{応力の杭体伝播速度 (5, 120 m/sec と仮定)} \\ E &: \text{杭体ヤング率} \end{aligned}$$

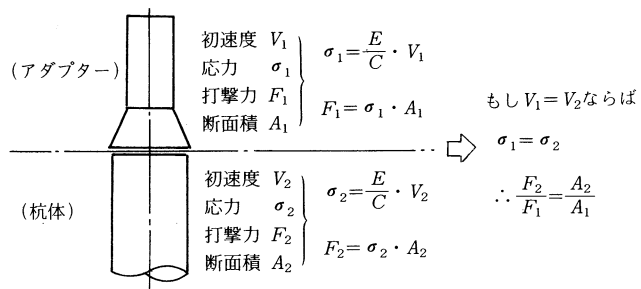


表-15 2P, 3Pの杭貫入予測値

基礎名	貫入深さ(m)	パイルハンマー(MRBS)	杭径2.5mの場合		杭径2.0mの場合		備考
			貫入量(mm)	杭応力(kg/cm ²)	貫入量(mm)	杭応力(kg/cm ²)	
2P (明石層)	-27	8,800	0.28	1,772	3.37	1,766	・杭先端閉口状態として計算
		5,000	-0.33	—	0.94	1,412	
	-33	12,500	-0.20	—	2.17	2,057	
		8,800	-0.55	—	0.35	1,739	
3P (神戸層)	-2.5	12,500	3.52	2,472	7.68	2,052	・杭先端閉口状態として計算
		8,800	1.55	2,289	4.36	1,771	
		5,000	0.22	1,930	1.93	1,618	
	-5.0	12,500	0.53	2,657	3.35	2,195	
		8,800	-0.11	—	1.33	1,911	
		5,000	-0.41	—	0.07	1,646	

6. あとがき

主塔基礎の土留杭の施工法を確立するために、本調査では、現有日本最大級の能力を持つ650tクローラークレーン、ロックオーガ、パイルハンマーを使用して、その施工性を調査し、一応の成果が得られた。

また、3Pの本工事を対象とした場合、パイルハンマー単独による打撃工法では世界最大級のパイルハンマー(MRBS 12,500)を使用してもφ2.5mの大口径鋼管杭を神戸層に5m打込むことは不可能に近いことも判明した。

したがって、土留杭の打込み方法としてはロックオーガなどにより先行掘削を行った後、パイプロハンマー(又はパイルハンマー)で建込む併用工法が有望と考えられる。併用工法では施工能率を向上させるために、大型のロックオーガ機などの開発が必要となる。

本報告では、調査結果の紹介に留まったが、詳細は下記の参考文献を参照されたい。

最後に、本調査工事を担当した熊谷・大林共同企業体の関係各位並びに本調査工事に参画された方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩屋、土田、小林：「松帆沖地質調査」 本四技報 Vol. 8 No. 28, '84. 4
- 2) 岩屋：「明石海峡大橋松帆沖施工調査」 基礎工 1984年1月号
- 3) 明石海峡大橋主塔基礎施工調査(その1) 調査報告書 昭和59年4月 本四公団、熊谷・大林共同企業体
- 4) 明石海峡大橋主塔基礎施工調査(その1) 鋼管杭打込実験報告書 昭和59年4月 本四公団、熊谷・大林共同企業体
- 5) 鋼管杭打込実験の解析 昭和60年2月 本四公団、熊谷・大林共同企業体、新日本製鉄㈱

明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験（その3）

Model Tests of Scour Protection for Tower Foundation of Akashi Kaikyo Bridge

垂水工事事務所 工務技術課長

北川 信

Makoto Kitagawa

第三建設局 計画課長代理

森 邦久

Kunihisa Mori

1. まえがき

明石海峡大橋主塔基礎建設予定海域、特に3P海域は、潮流速が最大9ktにも達する急潮流海域である。本橋の主塔基礎で計画している鋼管連壁ケーソン工法では支持地盤まで掘りさげる以前にケーソンを海底面上に設置することとしているため、ケーソン沈設時におけるケーソン周辺の洗掘防止工が施工計画立案上の重要な課題となっている。これまでも文献1)～4)に報告されているような各種実験が行なわれ、ケーソン周辺に捨石又はコンクリートブロックを配置することでケーソンの安定を図る洗掘防止工が提案されてきた。

しかし、その後の検討で、急潮流の中に捨石やテトラを精度よく積み上げることの困難さやケーソン刃口下へのコンクリートブロックの滑落が懸念されたため、昭和58年度から有効な洗掘防止工を見出す目的で室内水理実験に着手した。

ここまでに至る検討経過をまとめると表-1のようになる。本報告は、潮流条件の厳しい3P橋脚を対象として、鹿島建設(株)技術研究所の平面水槽(図-1)において実施された実験結果の概要である。今後、主塔基礎施工法を確立するうえで有用な情報と判断されるので、ここに報告するものである。

2. 実験条件

2.1 潮流条件

表-1 これまでの検討概要

項 目	委託又は 請負先	年 度	摘 要	文 献
現地洗掘実験	本 四 公 団	48～49	φ9mウェル	1) 2)
室内小型模型 実 験	京 大 中 川 研 究 室	49～52		3)
室内大型模型 実 験 (1)	三 菱 重 工 (株)	51、53	1方向流 捨石	
同 上 (2)	三 井 造 船 (株)	54～56	2方向流 テトラ・捨石併用 整流多孔板	4)
同 上 (3)	鹿 島 建 設 (株)	58～59	正弦流 被覆工 均し工 新洗掘防止工	本報告

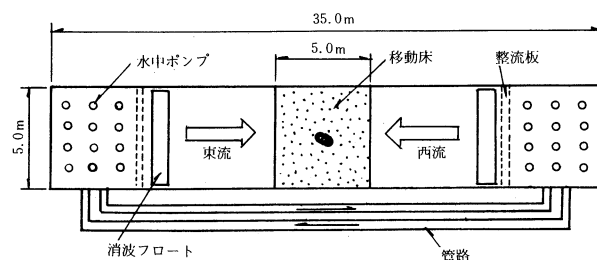


図-1 実験水槽平面図

3P海域の最大潮流速については昭和49年5月1日より半年間行われた板流し法による潮流調査において、8.9ktの最大潮流が記録されている。これをふまえて実験での年間最大潮流速は9ktを想定した。また、実験で用いる潮流に関しては、過去の洗掘実験が、すべてパルス流を用いていたのに対し、今回は、現地条件に近い往復正弦流を基本とした。さらに、施工期間中における洗掘現象をより忠実に再現させるため、上記潮流調査をもとに時系列潮流モデルを作成し、必要に応じて使用した。すなわち、昭和49年5月から半年間の実測値に予報値を追加して1年間の潮流モデルを作成したものである。

なお、潮流方向については橋軸直角方向を基準にしてほぼ0°が主方向であるが、バラツキが大きいことを考え、実験では橋軸直角方向を基準にして30°の方向を潮流方向とした。

2.2 底質条件

3P海域は、水深約40mで、海底地質は表層から沖積層、明石層、神戸層の順で構成されている。表層から13mまでの沖積層および明石層は、平均粒径 $d_{50}=50\text{mm}$ 、最大粒径 $d_{\text{max}}=100\text{mm}$ 程度の砂礫からなり、特に表層は、粘土分が洗い流されて粘着力が全く期待できないので洗掘が問題となる。明石層から下は、神戸層となるが、神戸層は洗掘されないものと考えられる。

2.3 ケーソン

主塔基礎ケーソンは、円形ケーソン(直径66m)と楕円形ケーソン(長径68m×短径40mまたは、長径74m×短径46m)を対象にした。

2.4 実験条件

実験は1/100の幾何学的縮尺で行った。流れに関しては、比較的流速が大きいため、重力の影響が卓越するとして Froude 相似則を適用した。Froude 相似則を用いた場合の現地と模型の間の物理量の関係を表-2に示す。

表-2 Froude 相似則による模型と現地の物理量の関係

項目	縮尺	項目	縮尺
長さ	λ	面積	λ^2
流速	$\lambda^{1/2}$	時間	$\lambda^{1/2}$
体積	λ^3	力、重量	λ^3
流体密度	λ^0	粗度係数	$\lambda^{1/6}$
	1/100		1/10,000
	1/10		1/10
	1/1,000,000		1/1,000,000
	1		1/2.15

実験に用いた模型粒調砂は、現地粒径を1/100に縮小したものを使用することとしたが、微粒子による水中懸濁が発生したため微小粒径はカットした。そのため、平均粒径 d_{50} の相似関係は成立ったが、粒度分布の標準偏差 $\sigma = d_{84}/d_{16}$ は、表-3のように現地で $\sigma_p = 3.46$ 、模型で $\sigma_m = 2.25$ とくいちがうこととなり、現地の洗掘深の推定にあたっては、参考文献3)に示された砂粒標準偏差 σ と洗掘深 Z_s の関係による補正、つまり実験値に対して $Z_s(\sigma_m)/Z_s(\sigma_p) = 0.63$ 倍の補正を施して現地洗掘深を換算することにした。

表-3 模型条件

項目	現地条件	模型条件
縮尺	1	1/100
水深	41m	41cm
潮流*	2方向 正弦流 最大流速 4.5m/s 迎え角 0~30° 12時間	2方向 正弦流、パルス流 45cm/s 30° 72分
粒径分布**		
dmax	100mm	1.0mm
d84	72mm	0.91mm
d50	50mm	0.49mm
d16	6mm	0.18mm
$\sigma = d_{84}/d_{16}$	3.46	2.25

*Froude相似則 **幾何相似則

なお、底質移動については、一般に Froude 相似則が成立たないとされているが、底質移動限界状態（限界シルズ数）及び底質移動形態の分類（底面摩擦速度 u_* /沈降速度 w_0 ）を調べたところ、現地と室内実験の底質移動に関するこれらの諸量は表-4のようになった。表より粒径が小さい底質については室内実験の方が移動しにくい傾向にあるが、全般に底質移動限界、移動形態ともに現地と室内ではほぼ相似関係が成立っていることがわかる。

3. ケーソンの洗掘安定性に関する実験

3.1 洗掘防止工を施さない場合のケーソンの挙動

長径68m×短径40mの楕円形ケーソンと直径66mの円形ケーソンを海底面に直接設置した場合を想定した実験を行った。ケーソンに9kt正弦流を流した所、何れの

ケーソンも最初のピーク（1/4周期）に達する前に、前面底部が洗掘によってえぐり取られ、ケーソンが洗掘孔の中に自重により落込み傾斜した（写真1）。円形ケーソンの場合、1/4周期後には上流に向かって約1/50傾斜するのみだが、楕円形ケーソンの場合、さらに、偏心潮流力で約3°回転した。すなわち、何らかの洗掘防止工をケーソン沈設前に海底面にほどこさないと洗掘に対してケーソンの安定が確保できないことが判明した。そこで、次節では海底面を被覆して洗掘を防止することとして実験を実施した。

3.2 洗掘防止のための被覆工

海底被覆による洗掘防止は、洗掘の直接の原因となるケーソン周辺の局所的な強い掃流力を底質に伝えないことを目的としている。被覆が十分に機能を果たすためには、被覆材料が、

- ① 洗掘を防止できる十分な広さを有すること。
- ② 潮流力に対して、安定であるような十分な強度及び重量を有すること。

が肝要である。実験では比重2.4のアスファルトマット

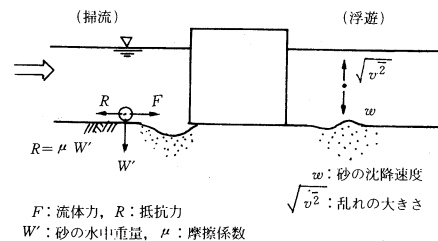


図-2 洗掘のメカニズム

表-4 掃流限界と浮遊限界の算定(単位: cm. sec)

	現地 (P)			室内 (m)		
底質粒径	dmin	d50	dmax	dmin	d50	dmax
限界シルズ数 $\phi_c^{1)}$	0.03	0.05	0.05	0.10	0.04	0.04
$u_*^{2)}/\omega_0^{3)}$	1.3 (300)	0.17 (300)	0.05 (300)	1.3 (30)	0.22 (30)	0.09 (30)
掃流卓越: ≤ 0.8	1.5 (350)	0.20 (350)	0.06 (350)	1.5 (35)	0.25 (35)	0.10 (35)
浮遊卓越: ≤ 2.0	2.0 (450)	0.27 (450)	0.08 (450)	2.0 (45)	0.33 (45)	0.13 (45)

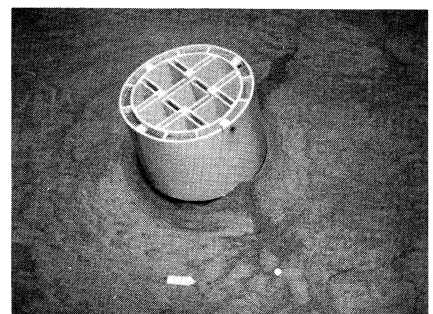
1) $\phi_c = \frac{U_* c}{S_g d}$, $U_* c$ の算定は岩恒の式による

2) $u_* = \frac{v}{6.0 + 5.75 \log \frac{h}{ks}}$

3) Rubey の式

写真-1

洗掘孔に落ち込み傾いたケーソン
(9kt正弦流1/4周期後、矢印は潮流方向)



を使用した、材料の問題は水理実験の目的から外した。実験では、被覆範囲をパラメータとし、主塔基礎ケーソン及び被覆工の洗掘に対する安定性を把握し、最適な被覆範囲を調べることを目的とした。

楕円形ケーソン(68m×40m)の場合、ケーソン側壁よりB、0.8B、0.6B(Bは、ケーソン短辺長)の余裕幅(クリアランス)を持つ被覆工を対象とし9kt正弦流を1周期かけて実験したところ、0.8Bクリアランスの被覆が最適被覆幅と判断された。長期的な被覆工の安定性を調べるためさらに、この0.8Bクリアランスを対象として9kt正弦流3周期、8kt正弦流10周期をかけ被覆工周辺の最大洗掘深の経時変化を調べた。いずれの場合もケーソン自体は安定であったが、長方形被覆工のコーナー下部に無視できない砂の吸い出しが起り、被覆工がたれさがる現象が見られた。また長方形被覆工の各4辺について、各辺の長さの1/4の位置に最大洗掘深が出現した(写真-2)。

以上より、長期的には0.8Bクリアランスでは面積が

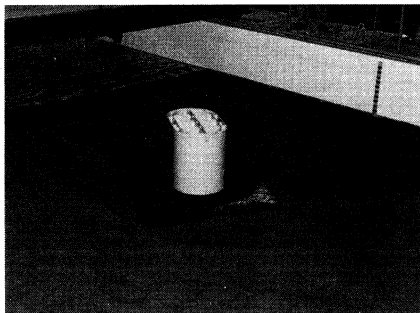


写真-2 0.8Bクリアランスの被覆工の効果(9kt 3周期後、4辺で吸い出しによる垂れ下りが見られるが、ケーソンは安定)

不足気味だが、長期的な洗掘防止工を別途に施すか、被覆範囲を1.0Bクリアランス程度に広げれば問題ないと考えられる。

円形ケーソンに対しては、被覆形状として正方形と円形が考えられるが現地の潮流方向が常に一定でない点を考慮し、方向性がない円形被覆を基本形に考えた。被覆範囲としてケーソン直径Dに対して0.4D、0.6D、0.8Dの円形被覆を選定し、9kt 3周期をかけて実験したところ、0.8Dクリアランスで10%以下の洗掘被害面積率(被害面積/洗掘範囲)になり、最適被覆範囲としては、0.8Dクリアランスが妥当であると判断された。

以上の結果を表-5に示す。

4. 底面均し工の安定性に関する実験

洗掘防止のための被覆工を施工する前に、ケーソン設置位置の海底面を均して平坦面を確保する必要がある。この場合、急潮流の中での施工となるので、法面形状の確保、ケーソン設置面の平坦性の確保等が均し工を施工する上での課題となる。均し工については、均し面の掘削深度に応じて以下の3ケースが考えられている。

- ① 浅掘り(約3m程度の掘削で海底面勾配均しのみ)
- ② 中掘り(約10m程度の掘削)
- ③ 深掘り(支持地盤である神戸層が現れる約18m程度の掘削を行う場合で、設置ケーソン工法に相当)

均し面の掘削深さと均し工の安定性の関係を調べるため、上記の3ケースの均し工に対して9kt正弦流5周期を作用させた。図-3は潮流によって均し底面がどの

表-5 ケーソン洗掘実験の概念

実験種別	実験検討項目	円形ケーソン(直径66m×高45m)	楕円形ケーソン(長軸68m×短軸40m×高45m)	ま と め
無対策洗掘実験	転倒時間	3時間後	3時間後	
	洗掘特性 {洗掘+堆積}	ケーソン前面部及び斜め側面部に洗掘領域が広がる	ケーソンの前方部及び後方部の非対称な位置に洗掘領域が生じる。	- いずれのケーソンも9Kt、潮流1/4周期で洗掘の進行により転倒状態に達する。 - 楕円形ケーソンは、偏心潮流力が作用するため洗掘の進行に伴い回転運動を生じる。 - 最大洗掘深は円形の方がやや大きい。
	洗掘影響範囲	(ケーソン中心からの距離) 110m	100m	
	最大洗掘深	* 4.4m	* 3.8m	
	ケーソン変位量	$\Delta x = 0.1m$ $\Delta y = 0.0m$ $\Delta z = 0.4m$ $\Delta \theta_z = 0.1m$	$\Delta x = 3.0m$ $\Delta y = 0.3m$ $\Delta z = 1.1m$ $\Delta \theta_z = 2.8m$	
被覆工洗掘実験 (9kt3周期)	最適被覆工形状 (長期安定性)	(0.8P-フリーランス) ケーソン側方部方向の被覆工が洗掘を受けた。	(0.8P-クリアランス) 被覆工下・下コーナー部が洗掘を受けた。	楕円形ケーソン被覆工を0.8Bから1.0Bクリアランスに広げると、被覆面積は23,000㎡(長方形)となり、円形ケーソンの場合とほとんど差がなくなる。
	被覆面積	24,000㎡(円形)	18,000㎡(長方形)	
	被覆工被害面積率	8%	10%	
	洗掘影響範囲 (被覆工末端からの距離)	50m	50m	
	最大洗掘深	* 4.4m	* 6.3m	

* 砂粒標準偏差による最大洗掘深の補正をした後の現地換算最大洗掘深

ように荒されるかを砂漣の発生状況に着目してまとめたものである。

図より、3 m程度の浅均しの場合、9 kt 潮流1～2周期の作用で高さ1 m長さ10数mの規模の砂漣が均し底面に発生することが分る。一方、均し面の深さを10 m以上の深さにすると砂漣の出現時期が遅くなるばかりでなく砂漣の規模も小さくなる。これは均し底面が深くなることで、均し面内の流速が低下し、海底面の底質土が動きにくくなったことによるものであり、中掘りや深掘りとすることでケーソン設置面の平坦性が確保されるとともに洗掘軽減効果も期待できることを示している。

法面については潮流が作用することによりせり出し現象が生じ法勾配も変化するが、潮流作用が繰り返されるにつれて3種類の均し工とも一定の安定勾配に近づく傾向にある。法面は掘削深度が大きいほど安定で、特に、深掘りの場合、図-4のように非常に安定していた。

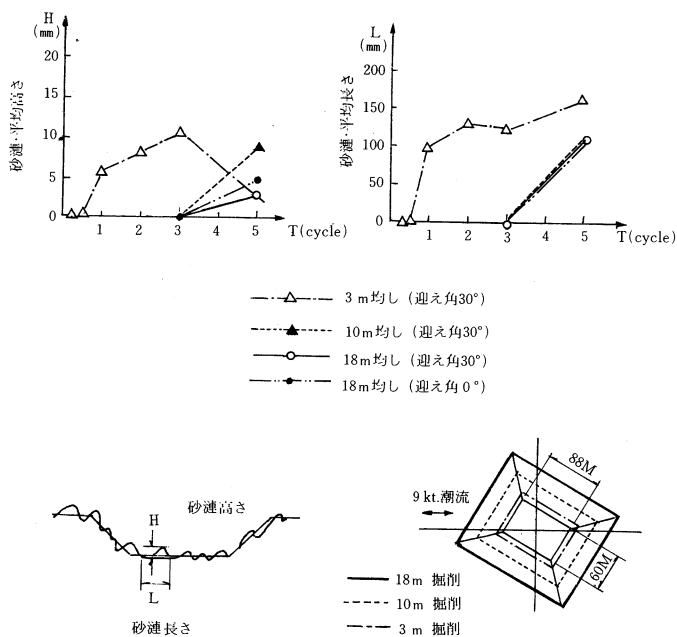


図-3 均し底面深さを变化させた場合の底面における砂漣の発生状況

次に、潮流下での均し工の掘削可能性を調べるため、各掘削段階において均し部分が潮流によって埋め戻るかどうかを調べた。実験は0 m、1 m、5 m、10 mの深さの均し掘削を行うごとに8 kt 3周期の潮流を作用させて埋め戻り状態を見た。結果は図-5の通りで、掘削深が深くなればなるほど埋め戻りが少なくなることがわかった。また、掘削初期段階で埋め戻りが生ずるか、8 kt 3周期程度の潮流では埋め戻ることではないので、初期掘削の時期を強潮流時から外せば掘削は可能であると判断された。

5. 設置型ケーソン工法に関する実験

明石海峡大橋の主塔基礎は鋼管連壁ケーソン工法で計画されているが、神戸層までの深掘りが可能であれば、設置ケーソン工法も考えられる。ここでは、設置ケーソン工法を前提として、ケーソン設置時、沈設後の均し工の安定性に着目した実験を行った。なお、実験では均し工の深さを18 m、法勾配を1:3、ケーソン周囲の底面余裕幅を5 mと設定し、ケーソンは楕円形ケーソン(長径74 m、短径46 m)を用いた。

ケーソン沈設時については、ケーソンを海底面から1 m浮かせた状態で5 kt 正弦流を1周期作用させて実験を行った。実験より、ケーソン周囲の加速流によって、法

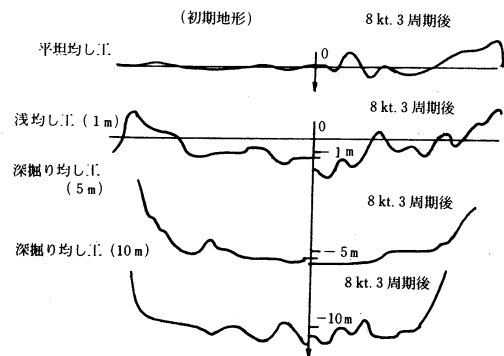


図-5 掘削途上での均し面の埋め戻り状況

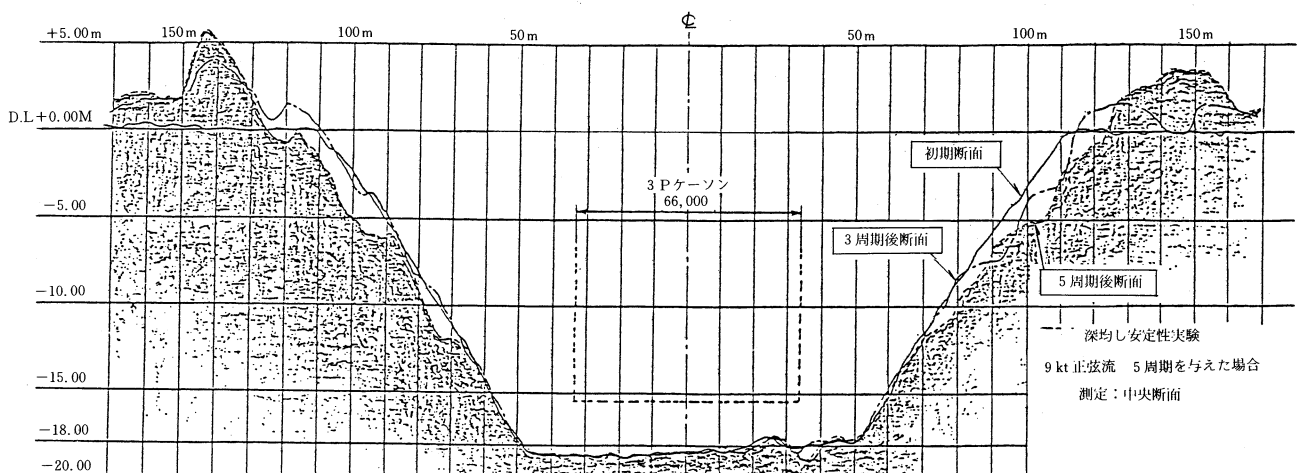
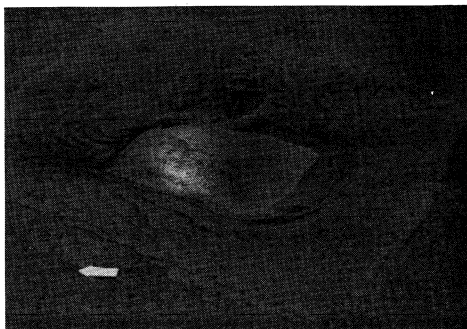


図-4 深掘り断面の潮流に対する安定性(法面初期勾配は1:3)

面の一部が若干崩壊しケーソン下面に回りこむおそれのあることがわかった（写真－3）。これにより、底面余裕幅をさらに大きくすることの必要性が示唆された。



写真－3 ケーソン沈設時（ケーソン底面と海底面が1mあいた状態）に5kt 1周期が作用した時の法面の崩壊

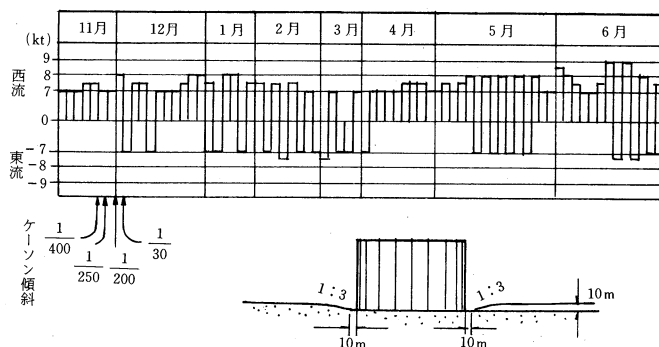
さらに、ケーソンが設置された状態で9kt 正弦流3周期を作用させて、均し工の安定性を観察した。実験の結果1/4周期後からケーソン後方部の法面で崩壊が起り、均し底面上に土砂が堆積したが、3周期後には、これらの土砂が潮流で掃き飛ばされ、均し工が埋め戻るような状況にはならないことがわかった。

6. 中掘り埋戻し工法に関する実験

10m程度の中掘り均しの場合、均し工内の流速低下によって、均し底面が比較的安定し、洗掘に対しては浅掘りの場合より安定性が増すと考えられる。これをふまえると、中掘り均しされた海底面上にケーソンを設置すれば3で述べたようなケーソン底面が急に洗掘される現象がないことが期待される。ここでは、事前に洗掘防止工を施さない中掘り均し面にケーソンを設置し、沈設後、短時間でケーソン周辺を埋め戻す中掘り埋戻し工法の可能性を実験的に調べた。

まず、中掘りによる洗掘軽減効果を見るため、10m深さの均し面上に直径66mの円形ケーソンを設置し、2.1で述べた現地潮流モデルを作用させるシミュレーションを実験的に行った。その結果、ケーソン沈設後約1か月でケーソンの傾斜が限界値の1/250程度に達し、次の潮流でさらに大きく傾むくことがわかった（図－6）。これから、10m程度の中掘りの場合、無対策では1か月程度しかケーソンの水平姿勢が確保できないと判断された。

次に、洗掘された部分を現地底質土を用いて、埋め戻し可能な期間に逐次埋め戻すシミュレーションを実験的に試みた。この場合、ケーソンは7か月以上の長期間にわたって水平を保ったが、その後の、9kt 潮流の作用によって1/250程度の傾斜を示した。ただし、この場合の傾斜は中掘り深さ（ケーソン根入れ長）と埋め戻し材料を工夫すれば防止できると考えられる。しかし、ケーソン沈設後の短期間に所要の埋め戻しができるか否かが本工法成立の最大のポイントと考えられるので、今後は施工面からの十分な検討が必要である。



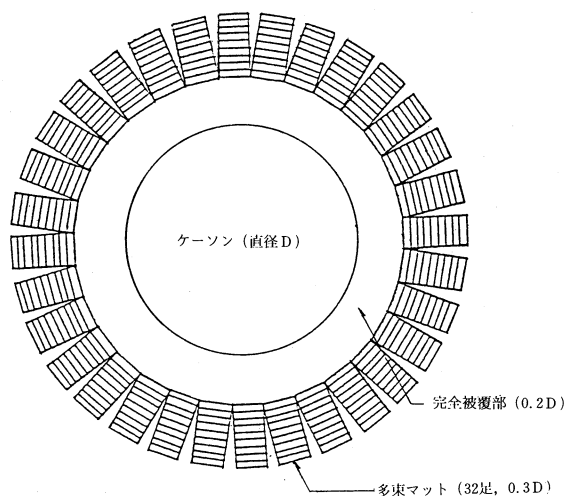
図－6 現地潮流モデルによる中掘り均し工上のケーソンの挙動（ケーソン沈設10月22日想定）

7. 新洗掘防止工に関する実験

これまでに述べた洗掘防止工はケーソン設置とは別途に実施することとしていたが、ここではケーソンと一体化した構造で洗掘を防止する方法について模索した。その結果、ケーソンの周辺に放射状にマットを取りつけた多束マット案が水理機能面から有望であることが分った。

マット寸法をパラメータにして実験を行ったところ、図－7に示すようにケーソン直径Dに対して、ケーソン周辺に0.2D幅の完全被覆部を設け、更にその外側に0.3Dの長さを持った多束マットで洗掘に対応できることがわかった。

本案は、ケーソン周辺の吸い出し洗掘に対して、マットが追随していくこととしているため、マットの可撓性が重要な要求性能である。さらに、潮流によってマットがめくれ上ってはならないので、マットには一定の重量とねじれ剛性も必要となる。これに対応するため、マット構造としては放射方向のみに曲がるようなキャタピラーのような構造が有望となろう。今後は、これをより現実的なものにしていくため、施工面からの検討が必要である。



図－7 多束マット案

8. ケーソンに働く潮流力

ケーソン設置に至るまでの各施工段階毎のケーソンの抗力係数を求めるため、吃水、流速、迎角をパラメータにして、円形ケーソン（直径66m）と楕円形ケーソン（長軸74m×短軸96m）の模型に三分力計を設置して潮流力を測定した。潮流力を計測する場合、ケーソンのまわりの非定常な渦によって、潮流力が変動するので、抗力係数を求める場合、これらの平均的な値をとらざるを得ないという事情がある。

さらに、抗力係数はレイノズル数に依存するが、今回の実験では 10^5 のオーダーのレイノズル数であるのに対し、現地は 10^8 のオーダーである。円柱の場合から推定すると、 10^8 オーダーの場合に抗力係数が小さくなると考えられ、今回の実験値が大きめの値を示す可能性があるといえる。

したがって、ここでは実験結果に若干の工学的判断も加えて、表-6のように設計に用いる抗力係数を提案した。なお、ここで抗力係数は下式のように定義されている。

$$C_D = \frac{F}{w_o \cdot A_x \cdot \frac{V^2}{2g}} \quad C_M = \frac{M_z}{w_o \cdot A_x \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot B}$$

ここで

w_o ; 水の単位体積重量 ($=1.0 \text{ g/cm}^3$)

A_x ; ケーソン長軸方向の投影面積 (cm^2)

$= B \times D$, B ; 短軸長, D ; 吃水

g ; 重力加速度 ($=980 \text{ cm/sec}^2$)

F ; 合力 (kg)

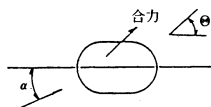
表-6 設計に用いる抗力係数 (案)

ケーソン形状	楕円形ケーソン (74m×46m)						円形ケーソン (φ66m)					
吃水 D	10m (曳航)			30m (保留)			40m (沈設)			10～40m		
係 数 迎え角 α	C _D C _M θ			C _D C _M θ			C _D C _M θ			C _D C _M θ		
	0°			0°			0°			0°		
	30°			75°			75°			0°		
	90°			90°			90°			0°		

C_D : 抗力係数

C_M : モーメント係数

θ : 合力の作用角度



表から、係留、沈設時にケーソンに働く潮流力は楕円形ケーソンの方が大きいこと、また、楕円形の場合、回転モーメントが発生することがわかる。

9. あとがき

今回の室内実験結果はFroude相似則に基づいており、2.3で述べたように、掃流力と底質土の剪断抵抗力との間にはほぼ相似関係が成立している。しかし、洗掘現象においてはこれ以外にケーソン周辺のカルマン渦や馬蹄渦が大きな役割を果たしており、これらの渦の強度、スケール、時間的変動については粘性項が支配するにもかかわらず、この条件に関する模型と現地の間の相似関係が成立していない点について留意する必要がある。

また、洗掘速度の相似性を見るため、京大中川研での室内³⁾実験、昭和49年度の現地実験¹⁾²⁾と今回の室内実験結果を比較したところ、室内実験の方が現地より現象が早く生じる傾向が見られた⁵⁾。しかし、時間スケールについての定量的な把握までには至らなかった。

したがって、今回の実験結果の位置づけとしては、主塔基礎の洗掘現象をマクロに把握したということであって、現地で予想される実際の挙動の把握には、さらに現地実験等での検証を待つということになる。

最後に、本実験は「明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工に関する水理模型実験 (その1) (その2)」の成果であり、実験及び解析にあたっては鹿島建設(株)技術研究所の今井主任研究員をはじめ多くの方々の尽力があったことを付記するとともに誌上を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡田、山田：明石海峡の現地洗掘調査 橋梁と基礎 1976年1月
- 2) 明石海峡大橋現地洗掘調査：1984年7月 本四公団設計部
- 3) 加島、田中：明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験 本四技報 Vol. 3 No. 7 1979年1月
- 4) 加島、古屋：明石海峡大橋主塔基礎洗掘防護工実験 (その2) 本四技報 Vol. 4 No. 14 1980年10月
- 5) 北川、今井、小池：強潮流下における局所洗掘に関する実験的研究 — 水理模型実験の現地再現性第40回土木学会年次学術講演会 1985年9月

大鳴門橋の補剛桁製作工事

Fabrication of Ohnaruto Bride Stiffening Girder

鳴門工事事務所 第二工事長

瀧田 政信

Masanobu Fuchida

鳴門工事事務所 工務技術課長

江藤 隆男

Takao ETo

1. まえがき

大鳴門橋は神戸～鳴門ルートのうち淡路島門崎と大毛島孫崎との間にかかる、全長1,629mの3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋である。図-1に一般図を示す。

本橋は上路に道路、下路には新幹線を通す、道路・鉄道併用橋であるため、昭和55年3月に発注された大鳴門橋補剛桁製作工事では、製作検討委員会の指導のもとに溶接部の疲労についての検討を行った。

特に本橋の場合、図-2に示すように、多量の調質高張力（SM58、TH70）を使用しているため、調質高張力鋼の疲労設計、及び疲労強度に影響を及ぼす溶接継手の品質の確保が重要な問題であった。そのため本橋では、溶接施工試験により施工方法の検討、超音波探傷検査による部分溶け込みかど継手の品質管理方法について

検討し、実製作に反映した。

本稿では溶接施工試験、及び実製作での溶接部の品質

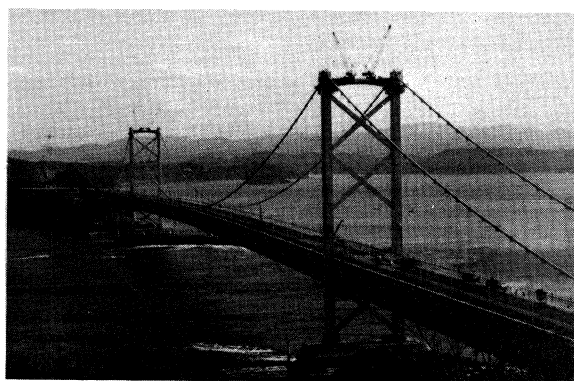


写真-1 大鳴門橋全景

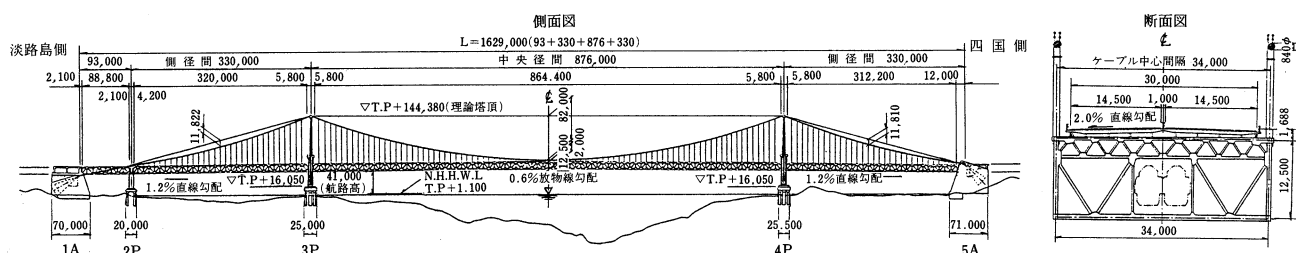


図-1 大鳴門橋一般図

鋼材使用区分図

上下弦材									
2P					3P				
上弦材疲労等級	D	C2	D		D	C2	D		
上弦材断面パネル数	3	2	2	18	2	2	3	3	32
上弦材断面	(SM41)	(SM58)		(SM58)	(SM58)	(SM41)		(SM58)	(HT70)
下弦材断面	(SM50Y)	(SM41)	(SM58)	(SM58)	(SM58)	(SM41)	(SM50Y)	(SM58)	(HT70)
下弦材断面パネル数	2	4	2	16	2	4	2	4	30
下弦材疲労等級	D	C	C	C2	C	D		C2	D
斜材									
斜材断面	(SM58)	(SM50Y)	(SM41)	(SM50Y)	(SM58)	(SM58)	(SM50Y)		(SM41)
斜材断面パネル数	3	6	14	6	3	3			70
疲労等級			D						D

図-2 補剛桁鋼材使用区分と主構断面諸元

管理について述べるものとする。

2. 溶接施工試験

2.1 概要

溶接施工試験は、まず最初に作業要領を確立するための予備検討として、小型試験体による溶接施工試験から始められた。

ひきつづき、その施工試験結果を基に作成した作業要領が、実際の大型部材は製作にあてはまるかどうかを検証するため、長さ4mの中型試験体を製作し、施工方法の確認を行った。

小型試験体および中型試験体を用いた溶接施工試験の結果を基に、実部材の作業要領、及び管理要領を整備したが、実部材は約21mの長さがあり、製作時の予熱変形、

溶接変形等による部材精度上の問題については中型試験体では不十分であるため、パイロットメンバーを製作し、さらに確認並びに検証を行った。

図-3に溶接施工試験のフローチャートを示す。また、図-4～図-7に中型試験体、パイロットメンバーの製作図、及び製作手順を示す。

2.2 溶接継手部の品質について

本橋が道路、鉄道併用橋であるため、溶接部の疲労を考慮して、溶接継手部の要求品質は下記の通りとした。

(1) 調質高張力鋼のかど継手（部分溶け込み継手、及びすみ肉継手）は健全でなければならない。

1) ルート部の完全溶融（仮付ビードの完全溶融）

2) ルート部欠陥の防止

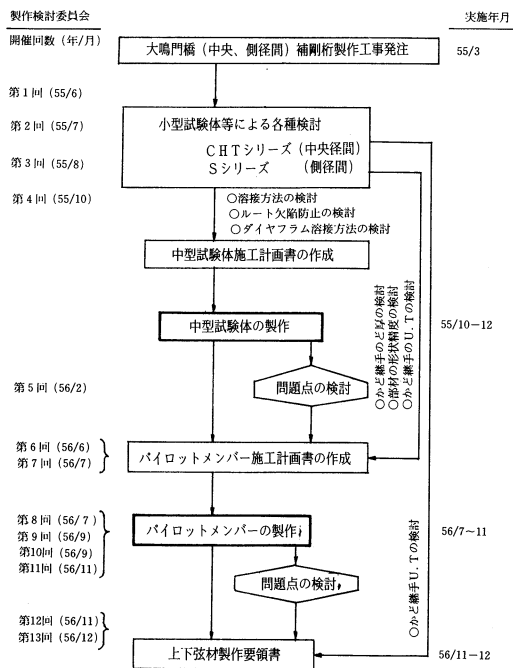


図-3 溶接施工法検討フローチャート

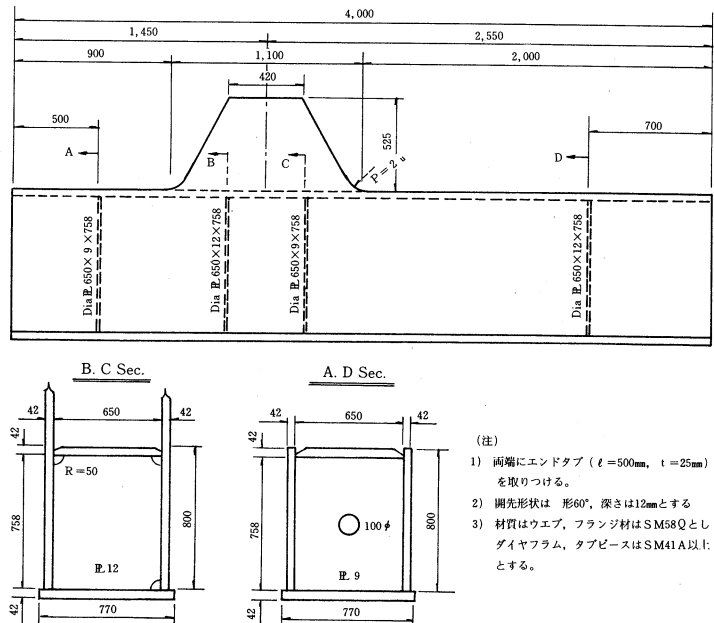
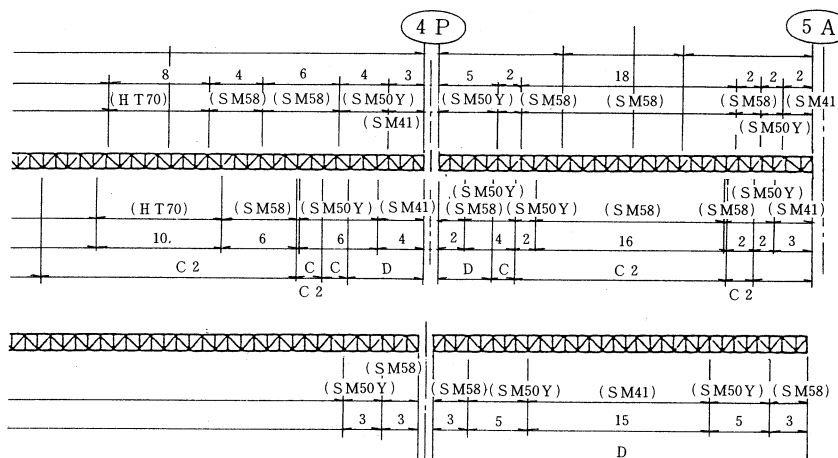


図-4 中型試験体の一例

主構断面諸元

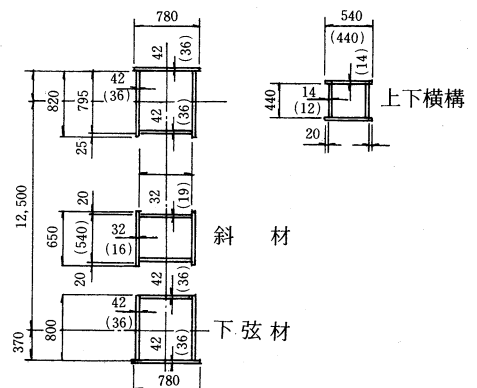
上弦材

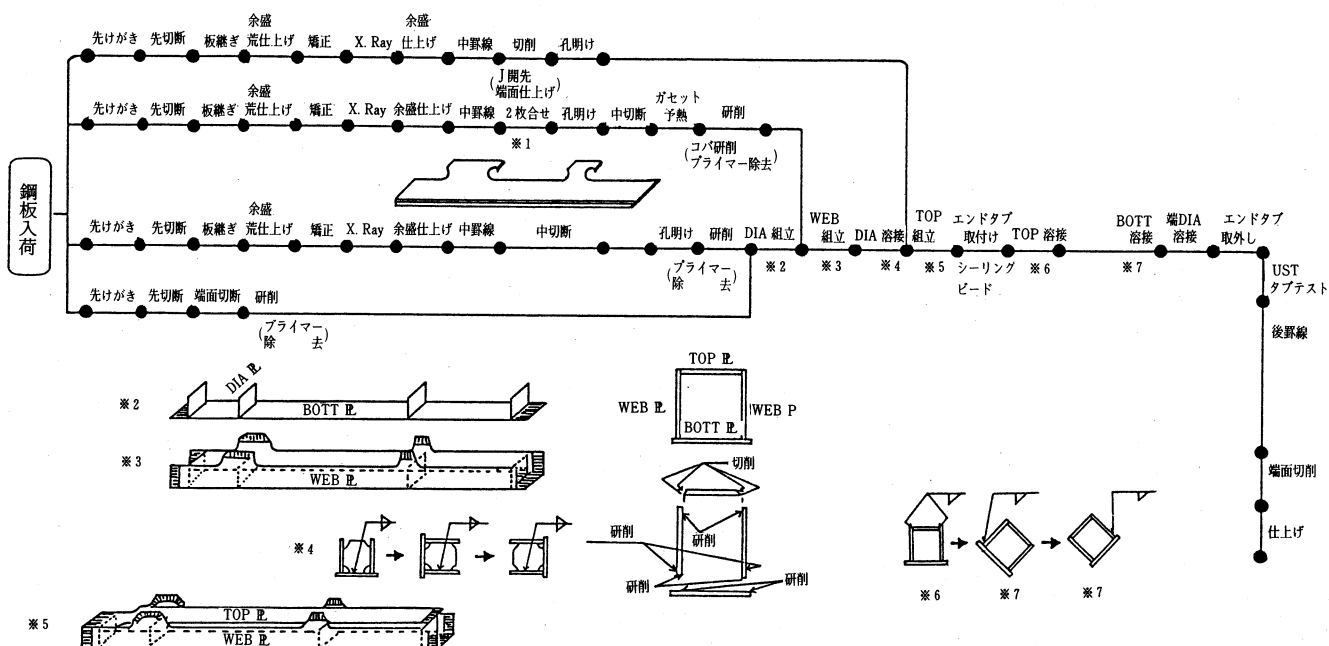
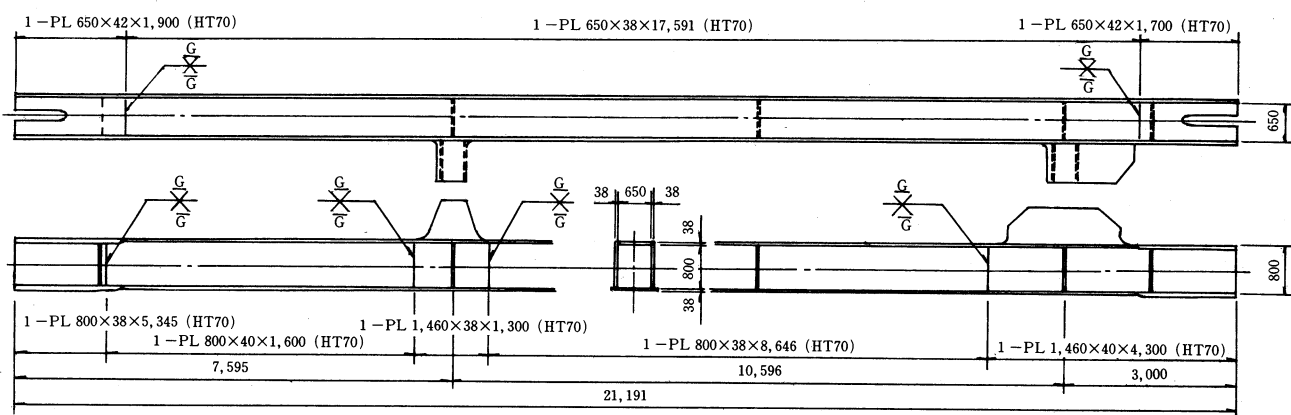
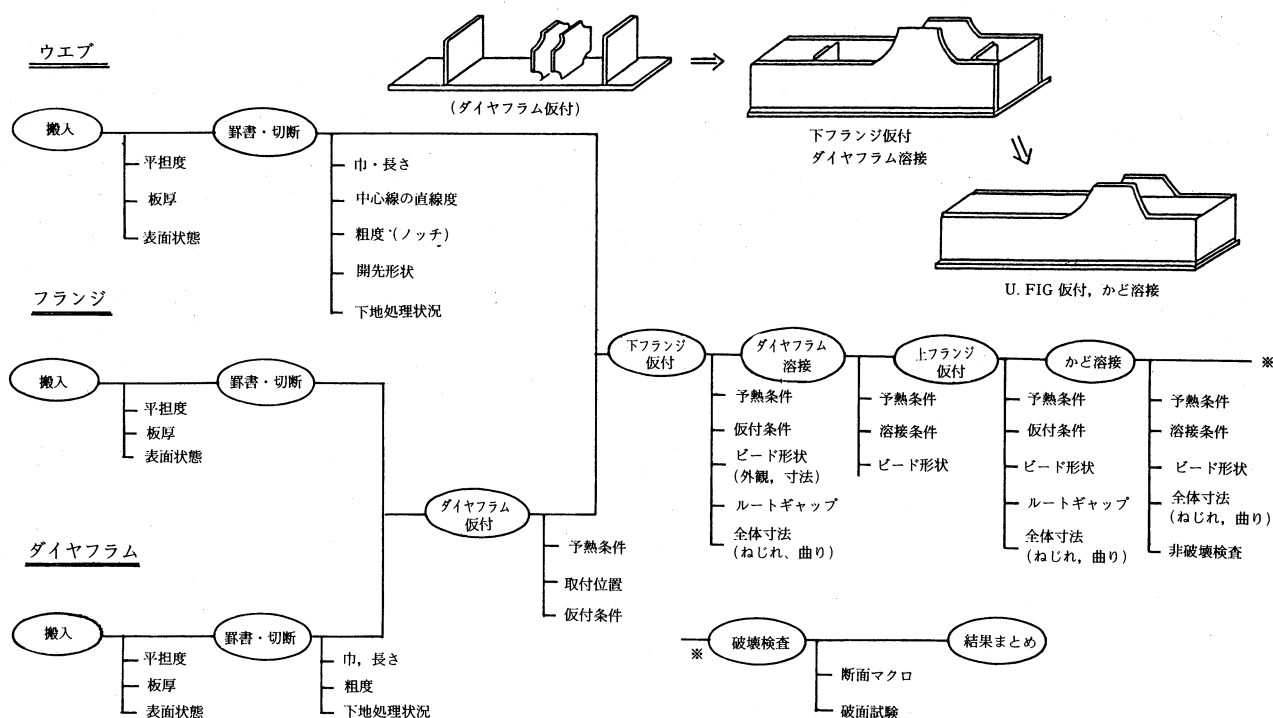


上下横構

斜材

下弦材





3) 融合線の滑らかさ
 (2) 調質高張力鋼のかど継手の健全性を非破壊検査等で確認する。

(3) 溶接部には、割れ等の溶接欠陥があってはならない。

- 1) 高温割れ
- 2) 低温割れ
- 3) その他の有害欠陥の防止
- 4) 応力直角のダイヤフラム等のすみ肉溶接のビードの止端は滑らかとする。

2.3 溶接施工試験結果

2.3.1 かど継手ルート部の健全性について

かど継手ルート部に発注する欠陥を大別すると

- イ) ルートブローホール
- ロ) 溶け込み不整
- ハ) ルート部のスラグ巻き込み
- ニ) 溶接金属の垂れ込みになる。

(1) ルートブローホールの発生要因とその対策

ルートブローホールの発生要因を抽出すると①溶接法②溶接材料③溶接条件④溶接装置⑤開先形状⑥開先部の下地処理⑦開先精度⑧仮付精度⑨予熱方法⑩組立後の放置時間等が考えられる。このなかで特に顕著な発生要因と考えられる項目についての検討結果を述べる。

1) 開先部の下地処理

開先部の下地処理は、ルートブローホールの発生に対し最も影響する項目のひとつであり、開先部のプライマー、及びガス切断の酸化皮膜を完全に除去することにより、ルートブローホールの発生防止につとめた。

各溶接面の処理の方法としては、ベベル面については

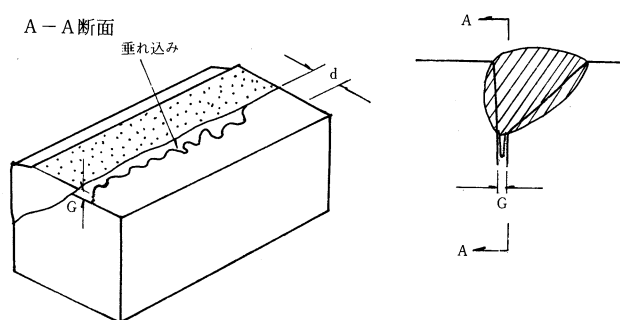


図-8 溶接金属の垂れ込み

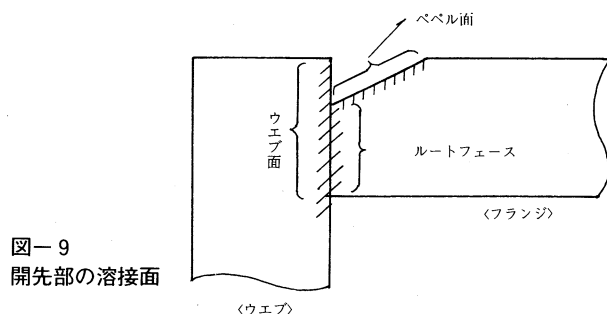


図-9 開先部の溶接面

酸化皮膜、及び油脂等を完全に除去することとし、グラインダーの目の方向については特に規定はしなかった。

ウェーブ面はジंकリッチプライマーが塗布してあるが、実験の結果、研削量をほぼ120μ以上行うことにより、1mm以上のルートブローホールの発生をほとんど防止できることが確認された。

次にルートフェイスについては、下地処理をする場合のグラインダーの目が溶接線と直角であるあると微小なルートブローホールが発生しやすいため、溶接線と平行とすることとした。

2) 開先精度 (ルートギャップ)

実験結果によると、ルートギャップ0mmの場合ルートブローホールを含め、ルート部欠陥は極めて発生しにくく、ルートギャップが大きくなると、ルート部のスラグ巻き込み、溶接金属の垂れ込み現象が見られるようになり、それにともないルートブローホールの発生も多くなることが確認された。

開先精度によってルートギャップが生じる場合、その形状は図-10に示す3つの形状がある。

上開放型の場合、ルートフェイス部の空気が溶接熱により膨張し、気泡となって溶接金属中に吹き上げるため、微小なルートブローホールが多発する場合がある。そこで開先精度として図-11に示すように上開放型となる方向への精度を厳しくした。

3) 予熱方法

かど継手の予熱方法は、ガスバーナーで予熱すると、燃焼によって生じた水分が空気中の水蒸気分圧を高め、かつ開先部に錆を発生させルートブローホールの発生要因となり得る。

従って本橋での予熱方法はガスバーナーは使用せず、全て電気ヒーターとした。

(2) 溶け込み不整

溶け込み不整の要因としては①溶接条件②シーリング溶接の有無③溶接電流、電圧の変動④ワイヤ狙い位置の変動等が考えられた。

特に仮付溶接部の溶け込み不整を妨ぐ最も確実な方法は、仮付溶接を本溶接で再溶接することであるが、同時に高温割れに対する危険性もあるため、高温割れについては十分なる実験、検討を行った。その結果、高温割れに対し問題のない溶接諸条件が設定された。

また、シーリング溶接は、開先部への異物の混入の防

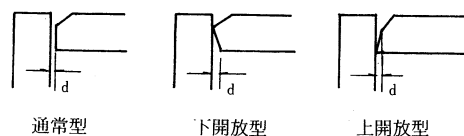


図-10 ルートギャップの形状



図-11 開先精度

止と同時に、溶け込み不整防止に非常に有効であることが実験結果より明らかになった。

ワイヤ狙い位置の変動の影響は、開先形状によりその傾向は異なるが、21mの連続溶接を考えると溶け込み不整防止上重要な課題であった。

そこでワイヤ狙い位置と溶け込み深さに関する実験を行い、その結果により、ワイヤ狙い位置の変動を±1mm程度におさえる開先ならい装置を用いることとした。

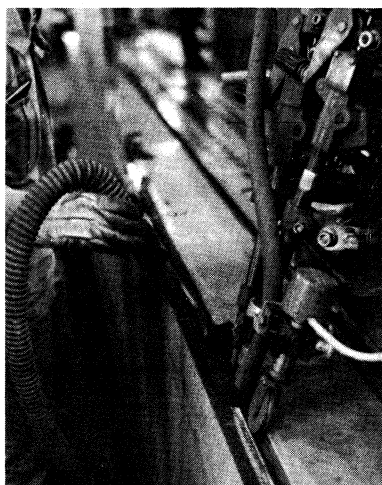


写真-2
下弦材かど継手の溶接

(3) 溶接金属の垂れ込み

本工事の場合、かど継手の溶接はサブマージアーク溶接で行うため、入熱も比較的高く、ルートギャップが大きいとルート部に溶接金属の垂れ込みが生じる危険性があった。

従ってルートギャップは0を指向することが垂れ込み防止のうえで重要なことであり、各工程でのきめ細い管理が必要となった。

各工程でのルートギャップに影響を与える要因の一つとして最も注意を要したのは、はめ込みフランジの余裕であり、特にダイヤフラム部のはめ込み余裕は、フランジの幅加工精度と、ダイヤフラムの幅加工精度にも大きく影響した。

はめ込み余裕を大きくしたとしてもダイヤフラム部での圧着によるルートギャップの縮小は困難であり、一方はめ込み余裕を小さくし、フランジを無理に押し込むとウェブ面に押し込み傷をつけてしまい、疲労上の弱点になってしまう。

以上のことを考慮して、中型試験、及びパイロットメンバーの製作等により、適切なはめ込み余裕を決めた。

2.3.2 溶接部の割れ等の溶接欠陥

本橋は調質高張力鋼の厚板を使用していることから、溶接割れについて十分検討しておく必要があったため、小型試験体により溶接施工試験を行った。

試験ビードは、かど継手の仮付溶接ビード長と同じとし、100mmづつ5回にわたって断続的に行い（図-12参照）、溶接後、各ビードの断面マクロを採取し、割れの調査を行った。調査結果は、仮付ビードの割れ率は2%

程度であり、しかも発生した割れもルート近傍の非常に小さなミクロの割れであった。

また、仮付溶接ビードの溶け込み深さと熱影響の範囲を調査し、仮付け溶接により再溶融していることを確認した。

2.3.3 すみ肉溶接

疲労を考慮する部材のすみ肉溶接部については、応力直角方向のすみ肉継手のビード形状が、疲れ強さに影響を及ぼすため、止端部の形状がなめらかで、かつアンダーカットをなくするように施工しなければならなかった。

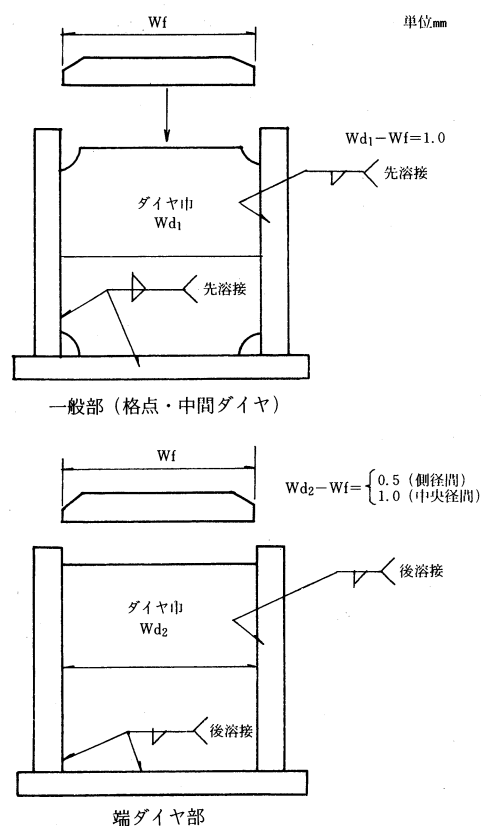


図-12 フランジのはめ込み余裕

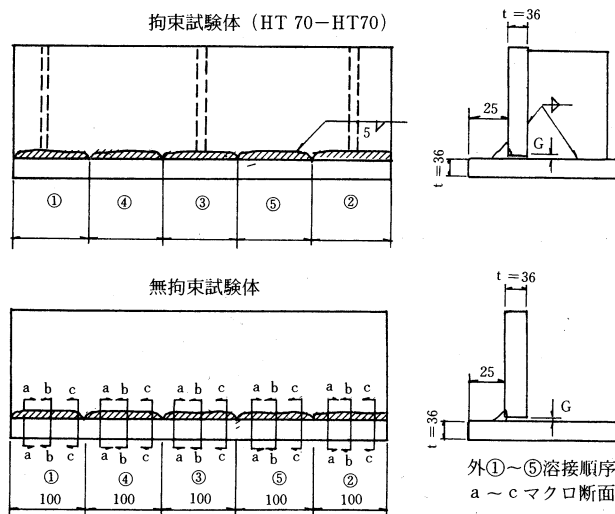


図-13 溶接割れ調査用試験体

一般に、すみ肉溶接部のビード止端部の形状を改良する施工法として下記の3種類が考えられる。

① 低水素系溶接棒+グラインダー仕上げ

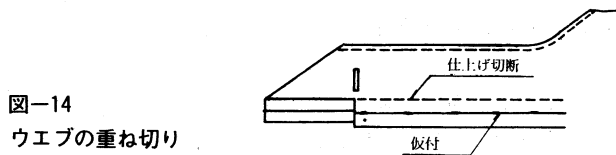


図-15
ウェブの両端のみの
仕上げ切断

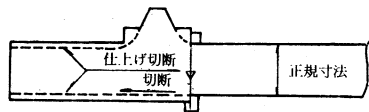
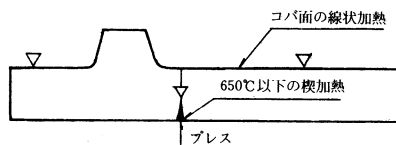


図-16
プレス矯正と加熱矯
正の併用



② 低水素系溶接棒+トウメルディング

③ 止端部形状が改良された溶接棒

これらの施工法のうち、本橋では③の方法を採用し多くの検討を行った。

特にダイヤフラムの溶接は、中間ダイヤフラムのスカラーップ部のまわし溶接、及び端ダイヤフラムのコーナー部の溶接等複雑な施工となるため、運棒方法等各種施工方法、管理要領について検討を行った。

2.3.4 部材の形状精度

調質高張力鋼は、熱処理により機械的性質を確保しているため、加熱矯正時の温度は、線状加熱で750℃以下とされている。そのため、板継溶接あるいはガス切断によって生じたひずみ矯正がかなり制約される。特に、2枚のウェブのズレは製品の精度、ルートギャップ等に影響を及ぼすために、次のような施工方法で変形の吸収をはかった。

(1) ウェブの重ね切り

ウェブ板は、全長に渡って余幅を取っておき、板継溶接が終わった後に、2枚のウェブを重ねて同時に仕上げ切断を行う。

(2) ウェブの両端部材の仕上げのための二次切断両端の部材には余幅を設けておき、板継溶接後に中間の部材を基準にして所定の仕上げのための二次切断を行う。

(3) プレス矯正と加熱矯正との併用

ウェブ面は、板継前に正規寸法に幅切断を行ない、変形をプレスと線状加熱矯正で修正する。

3. 非破壊検査方法及び製作実績

3.1 放射線透過試験

グループ溶接を用いた突合せ継手の放射線透過試験の要求品質、及び検査規準を表-1に示す。また、フィルムと表示方法について図-17に示す。

本橋の全撮影枚数は、中央径間、側径間合計30,834枚であり、94枚に2級欠陥があった。それ以外はすべて1級に合格するものであった。なお、2級の欠陥があった部材は、鋼床版、

表-1 突合せ溶接継手の要求品質および検査基準

突合せ継手の種類			併用品および鉄道部		道 路 部	
			検査基準 (撮影の範囲)	要求品質 (等級)	検査基準 (撮影数)	要求品質 (等級)
プレートガーダーなど、主として曲げモーメントをうける部材	引張フランジの継手	幅0.8m未満	全 幅	1 級	1 継手につき 1 枚 (クレータ側)	2 級以上
		幅0.8m以上1.7m未満	両端および中央各 1 枚			
		幅1.7m以上	両端各 1 枚を含み 約50%の範囲			
	圧縮フランジの継手	幅0.8m未満	全 幅	2 級以上	5 継手につき 1 枚	3 級以上
		幅0.8m以上1.7m未満	両端および中央各 1 枚			
		幅1.7m以上	両端各 1 枚を含み 約50%の範囲			
	腹 板	垂直継手	両端各 1 枚を含み 約50%の範囲	引張端 1 枚は1級、 その他は 2級以上	2 継手につき 1 枚 (引張側)	2 級以上
		水平継手	両端各1枚、中間に ついては間隔 3 m以 内ごとに1枚	2 級以上	1 継手につき 1 枚 (クレータ側)	3 級以上
トラスの主構材 など、主として 軸力をうけるもの	引張部材の継手		全 幅	1 級	1 継長につき 1 枚 (クレータ側)	2 級以上
	圧縮部材の継手		全 幅	2 級以上	5 継手につき 1 枚	2 級以上
跳ね出し架設のための架設連結構			全 幅		—	
格子作用を考慮 する場合の横桁	桁本体のフランジとカセットプレートとの継手および横桁のフランジプレート相互の継手		全 幅		2 級以上	プレートガーダーに同じ
	腹板の垂直及び水平継手		両端各 1 枚を含み 約50%の範囲			
鋼 床 板	橋軸方向の継手		両端各1枚、中間に ついては間隔 3 m 以内ごとに1枚	1 級		1 継手につき 1 枚 (クレータ側)
	橋軸直角方向の継手		両端各 1 枚を含み 約50%の範囲			
	縦リブの継手		全 幅			

横構、横トラスであり、主構については全て1級に
っていた。表-2に検査結果を示す。

3.2 超音波探傷検査実績

かど継手部の品質管理の方法として、超音波探傷により溶接部の品質管理を行った。

本橋での超音波探傷方法は、A.U.T法 (Automatic Ultrasonic Testing) を採用した。

3.2.1 A.V.T法

この方法は、複数個の探触子を同時に使用し、溶込み線追従方式により、連続的に自動走査し、溶込み線形状の検査、ルート部近傍の欠陥の検出、及び一般部溶着金属内の欠陥を検出し、自動記録する方法である。

この検査方法によると、下記に示すように従来の超音波探傷検査の問題点が解決される。

- (1) 探触子の種類、及び探傷感度の選択により1mm程度以上の微小欠陥、及び溶込み形状の検出が可能である。
- (2) 欠陥検出情報、及び溶込み線形状変化の検出情報

表-2 放射線透過検査結果

	撮影枚数	1級合格	2級合格
中央径間	17,216 ^枚	17,170 ^枚	46
側径間	13,618	13,570	48
合計	30,834	30,740	94

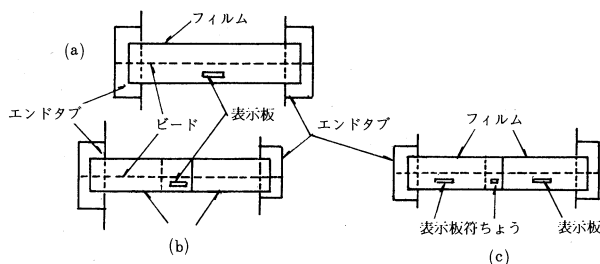


図-17 フィルムと表示方法

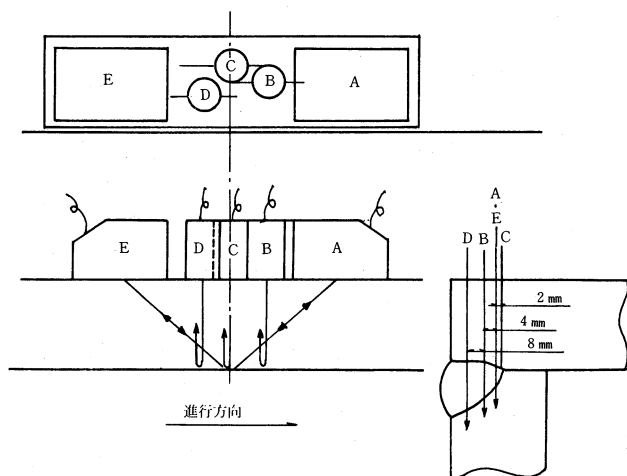


図-18 探触子の配置

の記録が可能である。

- (3) 装置の自動化を図ることにより、検査者の技量に左右されることなく、また検査結果の再現性が可能である。

図-17に探触子の配置を示す。また、写真-3に超音波自動探傷検査装置を示す。

3.2.2 検査実績

部分溶込み溶接の検査は、調質高張力鋼を使用している部材の25%を製作J.Vで実施し、残りの部材で疲労許容応力度に対し作用応力度が80%以上の部材(非調質部材も含む)の全線を公団が実施した。

また、すみ肉溶接については、参考として製作J.Vが検査を行った。

図-18に検査箇所を、表-3～表-6に検査率及び検査結果を示す。

表-3 下弦材部分溶込み溶接の検査長と検査率

材質	中央径間			側径間		
	溶接長(m)	検査長(m)	検査率(%)	溶接長(m)	検査長(m)	検査率(%)
SM41B	251	0	0	246	0	0
SM50YB	545	305	56	580	95	16
SM58	509	509	100	1714	1634	95
HT70	2130	1366	64	—	—	—
計	3435	2180	63	2540	1729	68

表-4 すみ肉溶接の検査長と検査率

	中央径間			側径間		
	溶接長(m)	検査長(m)	検査率(%)	溶接長(m)	検査長(m)	検査率(%)
下弦材 下フランジ側	3462	285	8.2	2540	180	7.1
上弦材 上フランジ側	3464	191	5.5	2540	60	2.4
上弦材 下フランジ側	3464	252	7.2	2540	220	8.7
計	10390	728	7.0	7620	460	6.0

表-5 下弦材部分溶込み溶接の検査結果(内部→一般部)

材質	中央径間			側径間		
	ルートブローホール(個数)	底面傷(箇所)	内部欠陥(箇所)	ルートブローホール(個数)	底面傷(箇所)	内部欠陥(箇所)
SM50YB	5 (0.017)	8 (0.026)	15 (0.049)	1 (0.011)	3 (0.032)	0 (0)
SM58	8 (0.016)	6 (0.012)	14 (0.028)	26 (0.017)	36 (0.022)	10 (0.006)
HT70	14 (0.010)	10 (0.007)	8 (0.006)	—	—	—
計	27 (0.013)	24 (0.011)	37 (0.017)	27 (0.016)	39 (0.023)	10 (0.006)

()内数値=個数/検査長

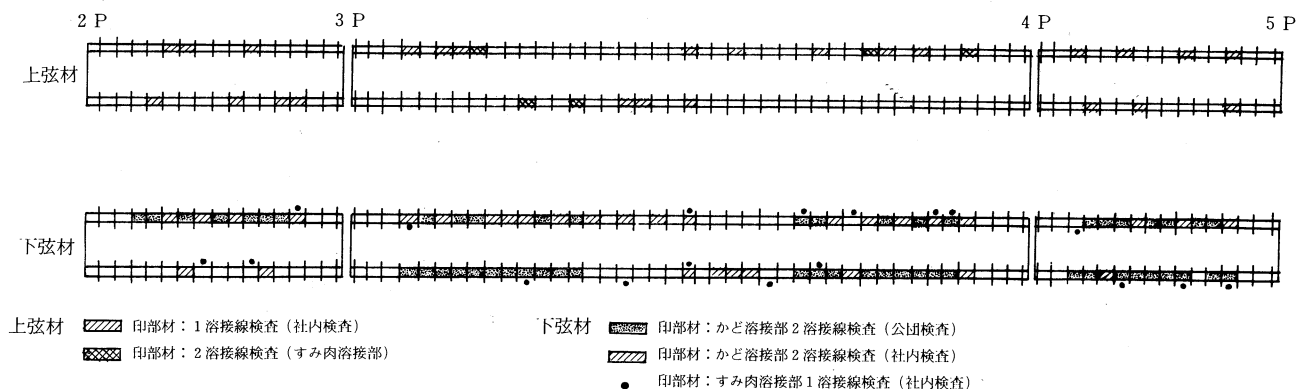


図-19 超音波探傷検査箇所

表-6 すみ肉溶接の検査結果

	中央径間			側 径 間		
	ルートブロー ホール(個数)	底面傷 (個所)	内部欠陥 (個所)	ルートブロー ホール(個数)	底面傷 (個所)	内部欠陥 (個所)
下弦材 下フランジ側	14 (0.050)	0 (0)	0 (0)	2 (0.011)	1 (0.006)	0 (0)
上弦材 上フランジ側	5 (0.026)	2 (0.010)	0 (0)	3 (0.050)	0 (0)	0 (0)
上弦材 下フランジ側	6 (0.024)	1 (0.004)	0 (0)	15 (0.068)	8 (0.036)	0 (0)
計	25 (0.034)	3 (0.003)	0 (0)	20 (0.043)	9 (0.020)	0 (0)

()内数値=個数/検査長

注) 表-5、表-6のルートブローホール個数は1.5mmφ以上と目される検出個数を示す。

4. あとがき

本工事の製作実績を見ると、主構トラス下弦材でのルートブローホール（1.5mm以上）の発生率が、全橋の平均で70mに1箇所と極めて低い値で終わることができた。

これは、パイロットメンバーの製作等による溶接施工試験の成果といえよう。

また、超音波探傷検査においても、自動記録機能を有する超音波自動探傷機を採用し、検査結果を記録として残すことが出来たのは、今後の製作工事を考えると大きな成果といえよう。

しかし、本橋の製作により全ての問題点が解決された訳でなく、これからもひき続き検討を要する事項も残されている。

たとえば、ブローホールの発生数と同程度の母材傷が発見されている。これは、ブローホールの発生防止、溶

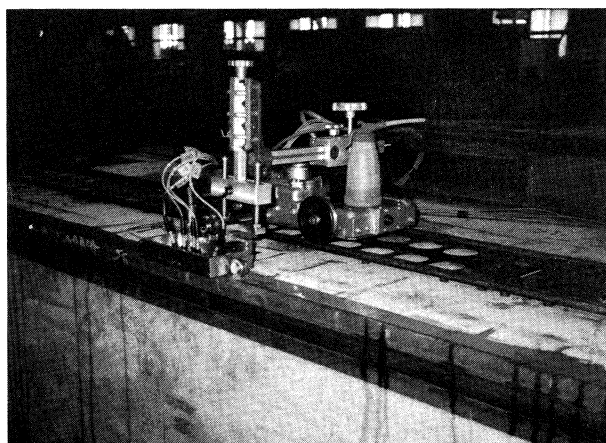


写真-3 超音波自動探傷検査装置

接金属の垂れ込み防止のためにフランジのはめ込み余裕を極力小さくした結果、はめ込みの際の傷が発生しやすい傾向となったと考える。

この他にも本工事で残された問題点は幾らかあるが、今後の製作工事にてさらに検討がなされていくであろうことを期待し、本報告書の終りといたします。

最後に、本工事の施工にあたり、御指導、御協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋の補剛トラス製作に関する検討報告書
大鳴門橋補剛桁 主構弦材用SM58およびHT
- 2) 70溶接施工法の検討 昭和57年3月 (財) 海洋架橋調査会、本州四国連絡橋製作検討委員会
- 3) 大鳴門橋補強剛桁（中央径間）工事報告書 昭和59年3月
- 4) 大鳴門橋補剛桁（側径間）工事報告書 昭和59年3月

Fabrication of Shimotsui-Seto Bridge Tower

Satami Murase

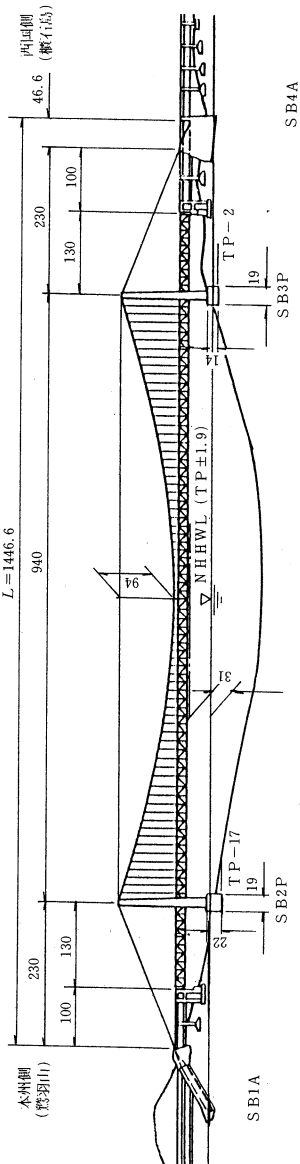
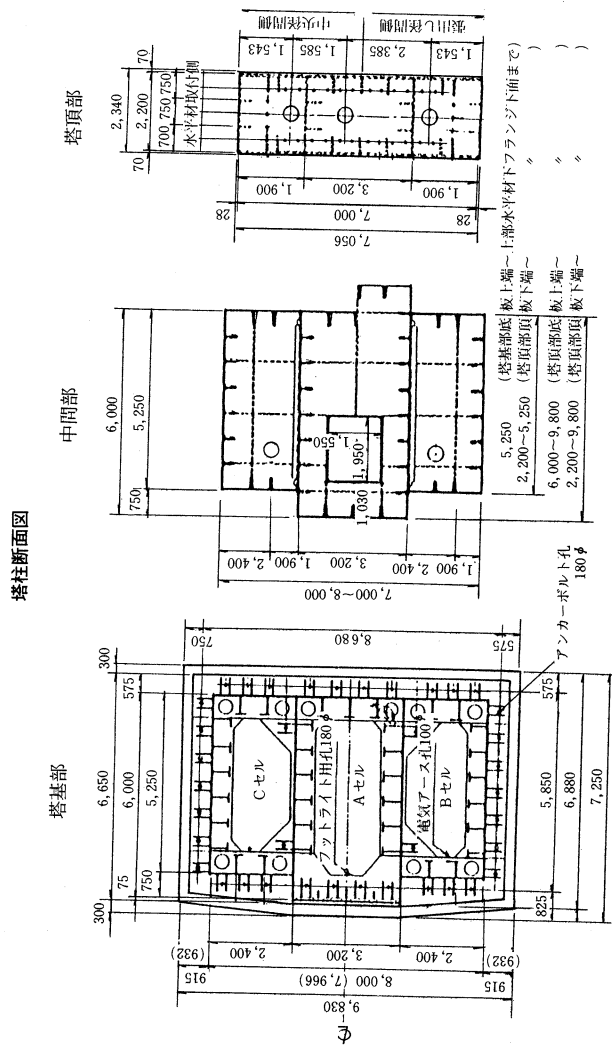


図-1 下津井瀬戸大橋一般図



図一2 下津井瀬戸大橋塔一般図

3.1 構造設計上の特徴

(1) 塔アンカーフレーム及びアンカーボルト

本橋では下面支圧型のアンカーガーダーによるアンカーボルト方式を採用した⁶⁾

アンカーガーダー下フランジは、SM 41 B, $t = 80\text{mm}$ 、アンカーボルトは、低レラクセーション性、太径ボルトとしての実体強度保証性、低遅れ破壊感受性等を考慮して SMB 24-5 (JISG 4108) を選定し、M 140 $\times 6$ (7 H/8 g) のサイズとした⁷⁾

本橋はラーメン塔であるため、アンカーボルトは、常時においても塔基部に大きな橋軸直角方向曲げモーメント ($D+L+T: V_c \max, 2,500 \text{ t}\cdot\text{m}$) が作用し、異常時には浮上り ($D+W+T$: 曲げモーメントで $72,000 \text{ t}\cdot\text{m}$) が生じるため、吊橋完成系においてもそのプレストレスを持続する必要がある。本橋では、常時には塔底板に浮上りを生じないこと、暴風時・架設時には若干の浮上り (塔柱外板の外側局部) を認める条件で設計されており、アンカーボルト本数は38本/塔柱、有効プレストレス量460 ton/本である。又、初期導入軸力は、コンクリートの乾燥収縮・クリープ、ボルト本体のレラクセーション等による軸力抜けを考慮して520 ton/本として設計した。なお、このアンカーボルトは、全く同一の断面材質で実施された疲労試験⁸⁾により 10^7 回疲労強度は 4.7 kg/mm^2 であり、使用上問題ないことが認められている。

アンカーボルトの配置は、塔基部で中セルが突出した T 字断面であるため、その部分は中セル塔内配置とし、全本数を矩形の対称配置とした。(図-2 参照)

(2) 塔基部及び塔底板

一般の吊橋では、塔基部には内部補強格子を設け、荷重を平面的に分散させた後、極厚底板を介して橋脚コンクリートに伝達させているが、本橋では、内部補強格子を設けずに塔柱外板からの荷重を直接底板に伝達する方式を採用した。この結果本橋の底板は250mmと超極厚となった。

従来型 塔柱外板 → 内部補強格子 → 底板 → 橋脚
(均一化) (格子線接触) (平面接触)
脚コンクリート

下津井型 塔柱外板 → 上底板 → 下底板 → 橋脚コ
(無補強格子) (溶接型線接触) (平面接触) (平面接触)
ンクリート

ここに、上底板厚 $t=50\text{mm}$ (SM 58)、

下底板厚 $t=200\text{mm}$ (SM 41 B)

底板に上下2枚重ね方式を採用した本橋の上底板の効用は次のとおりである。

- (1) 底板としての板厚の一部を構成すると共に、製作・架設ハンドリング上の塔基部ブロックの仕口補強 (ダイアフラム) として働く。
 - (2) 塔柱外板 (SM 58) から下底板 (SM 41) への応力伝達は、メタルタッチでは50%しか期待できないが、溶接では100%確保できる。
- 以上から、上底板厚を50mmとし、材質も塔柱外板と同一

じ SM 58とした。

なお、塔基部は塔柱断面力を確実に伝達するほか、塔の精度の基準ブロックともなるため、溶接一体構造とした。アンカーボルト定着部 (ウィグプレート・ハカマ部) は3次元 FEM により応力照査を行った。

(3) 塔柱隅角部

吊橋の塔においては、塔柱外板と水平材との隅角部においても、水平材は軸圧縮部材として塔外板と貫通させるのが一般的である。しかし、本橋では、塔柱が変断面であり、塔柱中セル外板と水平材フランジとは、中間水平材部で斜交し、さらに、上部水平材部では、折れ曲がった十字継手を形成している。

特に折れ曲がり部の溶接構造であるため冷間曲げ加工後の歪時効により脆化し、またラーメン隅角部として板厚方向に大きな応力を受けるためラメラテアが懸念される。このため本橋では、耐歪時効脆化、耐ラメラテア性、溶接施工性、非破壊検査の困難さ等を考慮し、各種のディテール検討⁴⁾の結果から、水平材フランジ貫通案を採用した。

このフランジ貫通案は、ラーメン隅角部としての耐力上から好ましいほか、製作精度確保上も問題が少ないため全ての隅角部に採用した。

又、美観を考慮して全ての隅角部に断面寸法に見合う曲線を配し丸味を付けた。

なお、本橋では上記のように対策を施したため、耐ラメラテア仕様鋼板は採用していない。

(4) タワーリンクブラケット

本橋のタワーリンクは、補剛トラスの下吊り型とし、その設計反力は5,000 ton と D ルート吊橋中最大である。このタワーリンクを支持する部材は、塔柱中セルを突出させたブラケット方式とした。このため中セル (塔柱第5段) のウェブは $t=70\text{mm}$ となり、2枚のウェブ間にせん断力を受けるピン受プレートを2枚設置した。ピン受プレートは応力の伝達を明快にするため1枚物の $t=160\text{mm}$ の別途規格 SM58 材を採用したがブラケット板との接合部は溶着部品質確保のため $t=70\text{mm}$ の両面テーパ加工とした。

ブラケット隅角部は応力集中を考慮した曲線を付した。

又、維持管理を考えてブラケットには、換気口を有する屋根を設置し、2次的ではあるが、ブラケットの水平補剛として三角補剛板を2段配置した。

以上の様に、通常の中セルとは異なり重くなったため、第5段中セルは鉛直シームを設け2ブロックとした。

なお、タワーリンク本体については別途報告したい。

(5) 塔頂部

主ケーブル鉛直反力約26,500 t/cable を受ける塔頂構造として、①直接荷重伝達型 (2又) 塔頂サドルを採用し、②塔頂部の塔柱外板を絞ることにより2又の主ウェブの勾配に合せ、極厚板 ($t=60\text{mm}$) を用いた無補強格子構造とし、さらに、③応力伝達性から3セル一体溶接構造とした。これにより塔頂部の荷重伝達機構は塔基部と全く同じとなる。

また、④上部水平材位置を塔頂部より1段下げ、応力の攪乱を緩和した。⑤サドルカバーは、美観上塔と一体感を持たせるため、塔柱各外面に合わせると共に、塔作業車駆動機器を収納できる寸法とした。

以上の設計から⑥頂板は引張荷重のみを受ける部材となり設計板厚は50mmとなった。

(6) 塔水平材

本橋の水平材は塔形式がラーメン構造であるためトラス形式での斜材に代る部材となり大断面の水平材となった。

(7) 塔全体構造

塔柱及び水平材は架設クレーン能力から最大ブロック重量を約100tに設定し、塔柱を16段(2Pは17段)に、水平材を3ブロックに分割した。2P、3P共下部水平材より上部は全く同一寸法とした。

なお、表-2に塔の各部に取付く構造部分及び付属物について示す。

表-2 下津井瀬戸大橋塔付金物

番号	塔付金物・設備		設置位置
	目的物	仮設物	
①	フットライト用孔		下底板
②	塔作業車ガイドレール孔		T2~T15
③		ストームロープ取付孔	T2
④		クリーパークレーンガイドレール補強	T3~T14
⑤	ウインド杓補強		T4、T5
⑥	タワーリンク		T5
⑦		ジブクレーン定着用孔・補強	T5、6、7、9
⑧		サグ測定孔	T6
⑨	航空障害灯台座		T8
⑩	サドルカバー		T15、T16
⑪		キャットウォーク定着金物	T16
⑫	塔作業車係留装置		サドルカバー
⑬	出入口扉		T2、T6、H1、H2、H3
⑭	エレベーター出入口		T2、T15
⑮	管理用アンテナ架台受		H3
⑯		塔頂クレーン架台受	H3

3.2 製作設計

(1) 溶接設計

1) 鋼板セル型塔柱の溶接設計として、本橋では、①セル一般部のかど溶接は、耐ラメラテア上から、フランジ突出(突出長 $d=25\text{mm}$)の両側スミ肉溶接($2\times\sqrt{2}\text{t}$)とし、②現場継手部は仕口部であることを考慮して、母材の板厚を確保するのど厚のK型グループ+スミ肉溶接とした。この区間は、一般部で600mm、応力が複雑な隅角部、塔基部及びタワーリンク部で100mmとした。

2) 水平材は、外側に部分溶込みレ型($2\sqrt{t_f}+3$)、内側にスミ肉溶接($\sqrt{2t_f}$)を採用した。

(2) 現場継手の設計

塔柱の水平継手は設計要領どおり⁹⁾外板50%メタルタッチ(50% H.T.B)、縦リブ25%メタルタッチ(75% H.T.B)、水平材は100% H.T.B継手とした。

なお、継手の設計断面力には作用応力度及び母材全強の75%のうち大きい方を採用した。

また、塔柱のセル間継手は、フランジ方式の100% H.T.B継手、タワーリンクブラケット部を有する5段中セル縦シームも100% H.T.B継手とした。

高力ボルトは主要部材では全てM24(F10T)とし、標準孔径は、 $\phi 26.5\text{mm}$ とした。

(3) 工場H.T.B継手

本橋では次の箇所に工場締めH.T.B継手を適用した。

①塔基部中セル内のハカマ部材の外板への取付け。(狭隘箇所のため溶接品質上不利なため) ②塔柱ダイヤフラムとセル間コネクション部材の取付け。(精度管理上)

(4) 製作伸し

塔柱にはケーブル反力及び補剛桁反力の圧縮軸力による弾性収縮量を製作長に考慮した。

本橋ではこの量を各段に配分せず、塔高を確保するためにT7段、タワーリンク及びウインド杓完成高を確保するためにT4段において製作伸しを行った。これらの段はいずれも塔柱等断面部である。表-3に製作伸し量を示す。

なお、水平材については、タワミ変形量が微小なため製作伸しは考慮しなかった。

表-3 下津井瀬戸大橋塔の製作伸し量

部材名	SB2P	SB3P	支配要因
T4段	26mm	22mm	タワーリンクウインド杓
T7段	61	61	塔高
計	87	83	

3.3 架設設計

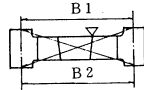
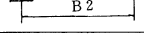
工場製作時に塔、ケーブル、補剛桁各架設工事で必要な塔付部材の主な物について以下に示す。(表-2参照)

- クリーパークレーン塔内補強：本橋の塔は2P・3P共クリーパークレーン方式で架設されるため、そのガイドレール反力を受ける塔本体(T2~T15段)を補強した。クリーパークレーン(105ton吊り)の設計重量は自立架台を除いて約520tonである。
- ケーブル架設用取付金物：ケーブル工事のため、ストームロープ定着孔(T2)、サグ測定用孔(T6)、キャットウォーク定着構造受金具(T16)、塔頂クレーン用架台受金具(H3)等の加工及び必要な塔内補強を行った。
- ジブクレーン塔内補強：補剛桁架設用ジブクレーン(仮定90ton吊り)塔内補強をT5、67及びT9に実施した。

4. 製作基本方針と実施工程

4.1 製作基本方針

表－4 下津井瀬戸大橋塔の製作要求品質（主要なもの）

部 材 精 度				仮 組 立 精 度				
管 理 項 目			許 容 値	管 理 項 目			許 容 値	
塔 柱 部 材	断 面 寸 法	部材高、フランジ幅	± 2 mm	塔 柱 仮 組 立	全 長 (N:ブロック数)		± 1 × N mm	
		対角線長	± 3 mm		現 場 継 手 部 メタルタッチ 精 度	ウェブ、フランジ	≤ 0.2mm 密着度 ≥ 50 %	
		ね じ れ	± 3 mm / 10 m			縦リブ	≤ 0.2mm 密着度 ≥ 25 %	
	部 材 長		± 1 mm		鉛直度 (通り)		≤ 1 / 10,000	
	端面直角度		≤ 20 "	水 平 材 仮 組 立	現場継手部の目違い		≤ 2 mm	
	切削面 の表面粗さ	メタルタッチ部	≤ 12 S		塔 柱 間 隔		B1、B2 ± 2 mm	
		頂板、底板	標準12 S				B1-B2 ± 2 mm	
		そ の 他	≤ 50 S		対 角 線 長		D ± 3 mm	
	ウイングプレートの水平度		≤ 1 / 200		水平材のそり		- 5 ~ + 10 mm	
	塔柱 T 5 段 H T B 添 接 部	添 接 部 隙 間	ダイアフラム		± 2 mm	水平材の通り	± 3 mm	
			フランジ		± 2 mm	水平材現場継手部の隙間	± 2 mm	
		添接部の目違い			2 mm	水平材現場継手部の目違い	≤ 2 mm	
上底板、頂板の ボルト孔		位 置	± 2 mm					
		径	± 2 mm					
水 平 材	断 面 寸 法	部材高、フランジ幅	± 2 mm					
		対角線長	± 3 mm					
	部 材 長		± 3 mm					

下津井瀬戸大橋の塔においては、従来の塔を踏襲した部分と、詳細構造において新しい試みを採用した箇所があり、工場製作においてそれらを具現するため、以下の製作基本方針を設定した。

- ① 製作全般について詳細設計の意図を忠実に反映する。製作精度を設計計算にカウントしている、例えば、タワーリンク及びその取付けブラケット、ウインド杓受け、アンカーボルト定着部等は、要求品質を必ず確保すべき箇所である。
- ② 本橋は大断面であるが、部材端面取合精度（メタルタッチ率）を3セル体機械切削により確保する。この精度が結果的に塔の鉛直精度を支配するものであると考ええる。
- ③ 塔材の鉛直精度 1 / 10,000 を第一優先の要求精度とする。個別の部材長等は二次的な管理項目であると考ええる。このため本橋では5-5に述べる4面芯累積管理手法を採用した。
- ④ 部材の取付高を確保すべき重要位置は、タワーリンク部、ウインドシュー部、塔頂板天端等である。（3・2・(4)参照）。上記②、③及び④はいずれも塔架設工事では、現場での修正が不可能であり、又修正は本質的に誤りであるため極力、工場製作で精度をあげ、現場ではそれを忠実に再現する事をねらったものである。

4.2 製作要求品質

本橋の塔の製作要求品質は、

本四製作基準¹⁰⁾の規定を基に表－4のとおりとした。

4.3 塔の製作フロー

本橋の塔製作担当工場は表－5のとおりである。3 P アンカーフレームは下部工事進捗に合わせて別件で先行施工した。

図－3に塔の標準部の製作フローを示す。

表－5 下津井瀬戸大橋塔の製作分担

項 目	製作分担	協力会社
塔 本 体	三井造船(株)	(株)神戸製鋼所
2 タワーリンク		
P アンカーフレーム		
アンカーボルト	日本鋼管(株)	(株)日本製鋼所
3 塔 本 体		
2 タワーリンク		
P アンカーフレーム	宇野重工(株)	
アンカーボルト		

表－6 下津井瀬戸大橋塔の実施工程

年 月		S 5 7												S 5 8												S 5 9					
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6		
項 目																															
詳 細 設 計																															
底 板 製 作																															
タ ワ ー リ ン ク 製 作																															
2P 3P 塔 本 体	原 寸																														
	加 工																														
	仮 組 立																														
	塗 装																														
2 P 塔アンカーフレーム																															
3 P 塔アンカーフレーム		S56																													
		12																													

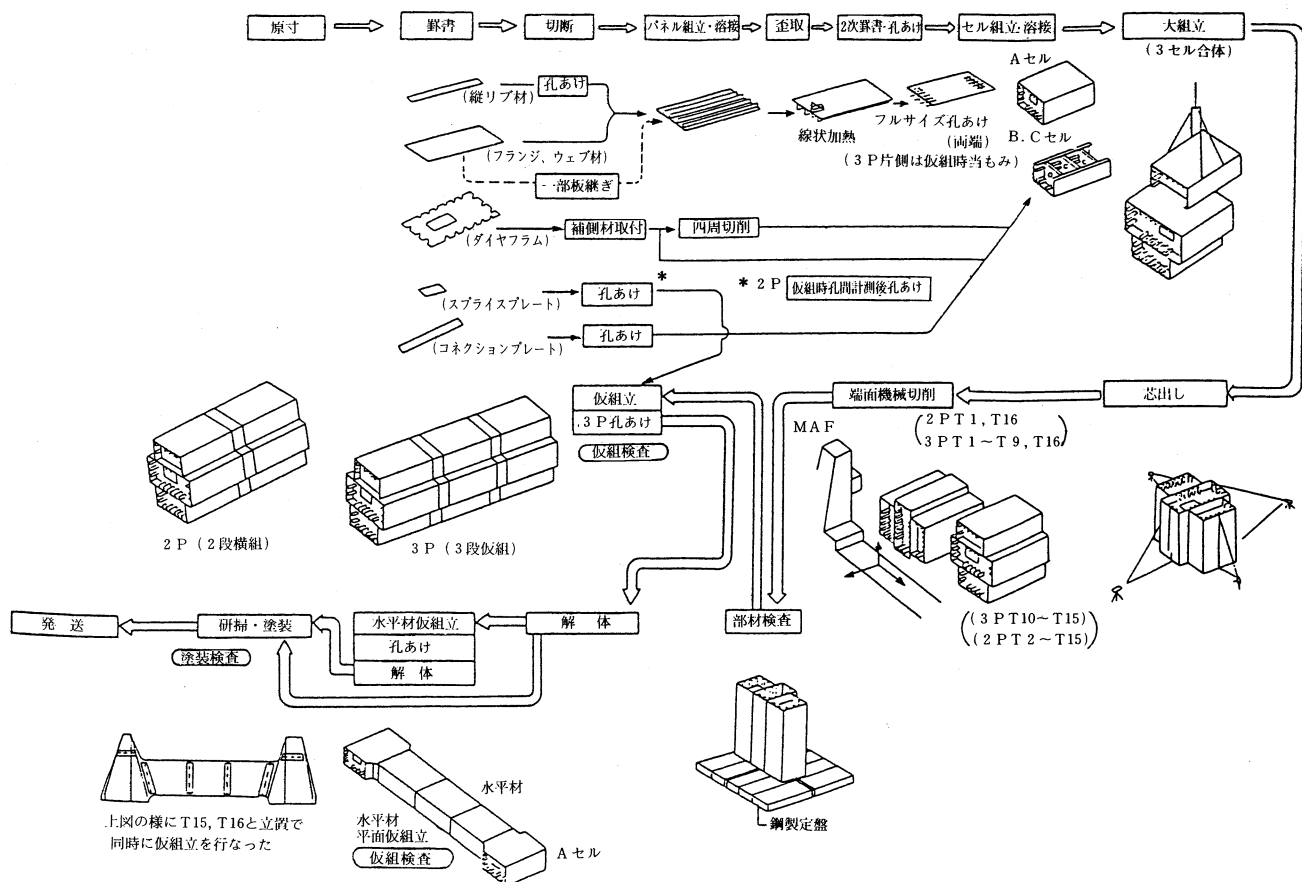


図-3 SB塔の製作フロー

4.4 製作実施工程

表-6に本橋の製作実施工程を示す。本橋では現場架設工程を優先した工程短縮努力の結果、当初予定より約1カ月早く進捗した。

4.5 製作数量

表-7、8に本橋塔の主要材質別鋼重及び主要材質別鋼重及び主要材料メーカーを示す。

5. 部材の製作

5.1 溶接施工法

本体の溶接方法を表-9に示す。また、SM 58の極厚板、拘束度の高い継手等について、表-10に示す溶接施工試験を実施してその施工条件を確認している。

5.2 孔あけ

本体の孔径は高力ボルト M 24 を使用したため、 ϕ 26.5mm を原則としたが、組立部材精度管理及び施工性を考慮して塔柱及び水平材の縦リブ、コネクション部材 (L & T 形鋼) については、疲労を含めた継手性能上問題ない範囲の ϕ 28.5mm の孔径を採用した。

また、孔明け時期については、精度確保上から、パネル組立後、セル組立後、仮組時等、各工場が得意とする時期で柔軟に対応した。

表-7 (a) 下津井瀬戸大橋塔の鋼重表 (ton)

部 材 区 分	2 P	3 P	計	備 考
塔 本 体	6,362	6,194	12,556	
タ ワ ー リ ン ク	229	231	460	
塔 内 補 強	165	163	328	クレーン用ケーブル工事用
維 持 管 理	14	14	28	
サ ド ル カ バ ー	84	84	168	頂板下
付 属 設 備	28	27	55	梯子階段等
小 計	6,882	6,713	13,595	
アンカーフレーム	114	114	228	
アンカーボルト	82	82	164	
小 計	196	196	392	
合 計	7,078	6,909	13,987	その他埋込金物 12 ton

表-7 (b) 塔本体鋼重内訳 (ton)

種 別	材 質	2P 鋼重	3P 鋼重	2P+3P 鋼重
鋼 板	SM58	5,367	5,209	10,576
	SM50Y	216	216	432
	SM41	364	363	727
	SS41	387	378	765
形 鋼	SS41	15	16	31
H. T. B	F10T	13	12	25
計	-	6,362	6,194	12,556

5.3 機械切削

端面切削には主に大型横中ぐり盤（最大切削高さH） $(2P)=8\text{m}$ 、 $H(3P)=7\text{m}$ ）を使用し、タワーリンクピン受プレート、ウインド杓部、頂板等には、門型プラノミラー、中型の端面切削機等を使用した。

以下に機械切削上配慮した事項を示す。（図-3参照）

(1) 塔柱断面は、基部で $8.0\text{m} \times 6.0\text{m}$ 、上部で $7.0\text{m} \times 9.8\text{m}$ という大断面であるが隣接ブロックとのメタルタッチを確実にするため3セル一体に大組立し、精度確保上、各端面を4～5回に分けて切削した。

また、切削機は、使用中も定期的に点検整備を行い、切削時には、治具、イケール等を使用し、ビビリ防止対策（補強材の取付け）を行った。

(2) 塔柱の鉛直精度を確保するために各段のブロックは大組立後、定盤上で立置き芯出し、切削差し越し野書きを行い、切削完了後定盤上で立置き部材検査を行い、塔芯の鉛直度と上下端面の水平度を計測した。

5.4 単品部材の製作

本橋塔の各部材毎の製作上の特徴を以下に述べる。

(1) 塔アンカーフレーム

本橋では、現地条件からアンカーボルトを組み込んだアンカーフレーム一体ブロック架設を前提に製作した。

留意した点は、アンカーボルト・ナットのプレストレス導入時の嵌合性で $7H/8g$ の許容値内で隙間を大きくするため製作精度を上げた。又、アンカーボルトは全

体曲がり $6\text{mm}/(\text{全長 } 8\text{m})$ ときびしくした。

(2) 下底板

下底板は、表裏面の平坦度と平行度を確保するために素材厚 235mm から、素材歪切削、板継溶接、焼鈍、仕上切削という工程を経て設計厚 200mm に仕上げた。

素材厚 235mm の設定根拠を表-11に示す。

下底板1枚の設計重量は 110ton である。

表-8 SB塔の材料メーカー

材料区分	規格	2P	3P	備考
厚板(支給材)	SS41, SM41 SM50Y, SM58	日本鋼管	川崎製鉄	
底板	SM41B	日本製鋼所		$t=235\text{mm}$
タワーリンクピン受プレート	SM58-SB	日本製鋼所		$t=160\text{mm}$
厚板(自給材)	SS41, SM41 SM50Y, SM58	略		
形鋼(自給材)	SS41	略		
溶接材料	SMAW, GMAW SAW	神戸製鋼所	神戸製鋼所 川崎製鉄	
H.T.B(自給材)	F10T	日本ファスナー工業	三星産業	防錆処理
アンカーボルト	SNB24-5	大同特殊鋼	神戸製鋼所	
タワーリンク	SFVQ2B-SB	神戸製鋼所	日本製鋼所	
塗料	HBS塗料規格	日本ペイント	東亜ペイント	

表-9 SB塔の溶接施工法

(a) 溶接方法

溶接箇所	溶接方法
仮設溶接	SMAW GMAW
ウェブ・フランジの板継	SAW
ウェブ・フランジのかど溶接	SAW GMAW SMAW
縦リブの板継	SAW GMAW
ウェブ・フランジと縦リブの溶接	SAW
ウェブ・フランジとダイヤフラム	SMAW GMAW

SMAW: 手溶接
 GMAW: ガスシールドアーク溶接
 SAW: サブマージアーク溶接

(b) 塔中の溶接開先

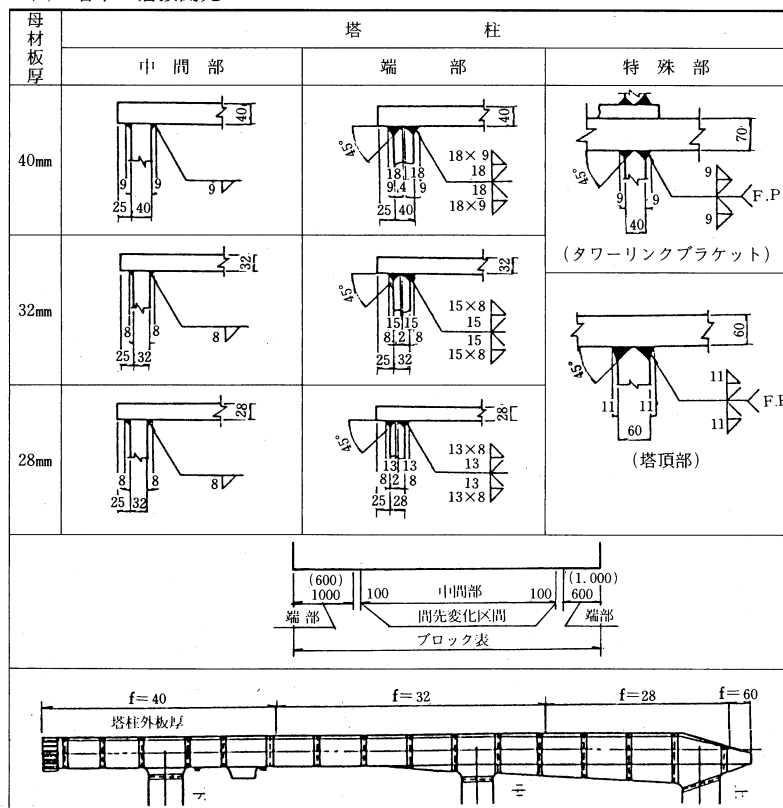
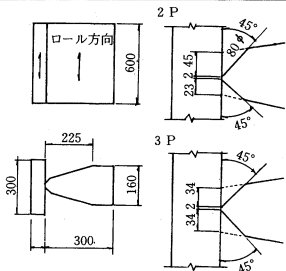
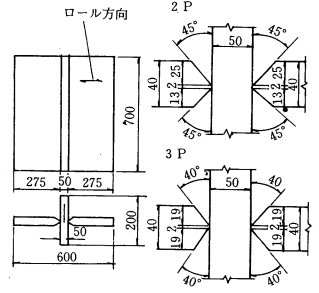


表-10 S B塔の溶接施工試験

供試鋼材	溶接法	適用箇所	供試体形状	試験項目	試験方法	判定基準	試験結果			
							2 P		3 P	
SM58Q 70×160 [T継手]	ガスシールド アーク溶接 (下向)	塔柱5段目 タワーリンク ブラケット部		衝撃試験	JIS Z 2242	吸収エネルギーが-10℃で 4.8kg/mm ² 以上	表面側	溶着金属	18.2	15.0
								熱影響部	10.5	13.6
				ルード側	溶着金属	11.9	11.1			
					熱影響部	9.4	8.5			
				硬さ試験	—	ビッカース硬さHv≦430	最大 376	最大 313		
				マクロ試験	JIS G 0533	欠陥があってはならない	合格	合格		
				UT	HBS	3級以上	1級	1級		
その 他 の 供 試 体	SM58Q 40×50 [十字継手]	手溶接 (立向) ガスシールド アーク溶接 (下向)		MT	JIS G 0565	われがあってはならない	合格	合格		
				外観検査	目視	鋼橋等製作基準	合格	合格		
				その他、アンカーフレームアンカーガーダーでt80×t45(SM41)の下継手						

切削は2 P側は門型プラノミラー、3 P側は横中ぐり盤で型型架台（イケール）により行った。素材歪切削量は15～18mmで3回/片面切削、仕上げ切削量は20～17mm 4回/片面である。

なお、下底板は厚板圧延可能単重より2枚板継ぎとし、のど厚約50mm/片側の部分溶込み溶接とした。こののど厚は製作・架設ハンドリング時の応力から決定した。

(3) 塔基部と塔頂部

塔基部（塔頂部）ブロックは3セル一体溶接後下端（上端面）を機械切削し、上底板（頂板） $t=50\text{mm}$ とのメタルタッチを確認した後溶接一体化し、上底板の裏面（頂板の外表面）を機械切削した。

第1段（第16段）重量は、2 P：184 t（79 t）、3 P：195 t（79 t）である。

(4) 塔柱一般部

塔柱断面寸法と切削機寸法から3セル断面は、橋軸方向あるいは橋軸直角方向に横置きして切削した。

中セルブロック重量は55～97 ton、外セルブロック重量は29～55 tonである。

(5) 水平材

水平材の現場継手部の隙間は、架設性を考慮して5 mmで設計したが、端面の平面度及びブロック長を確保するため組立後切削仕上げとした。

ブロック重量は54～79 tonである。

(6) タワーリンクブラケット

タワーリンクの架設精度を確保するため、ピン受プレートのピンピン孔は平板時に下孔を明け、塔柱ブロックの端面切削後、仕上げ加工した。表-12に使用したピン受プレートの材料品質を示す。本厚板はブラケット板と $\frac{1}{2}$ 厚でフルペネで溶接されるため、板厚中心において品質保証を要求した。

表-11 S B下底板 $t=235\text{mm}$ の設定根拠

素材寸法（幅×長）		3560×9840 3710×9840	設 定 根 拠
付 加 厚 (mm)	板 厚 公 差	2.2	HBS G3107
	平 坦 度 公 差	13	〃
	組合せによる平坦度公差	5	板継ぎ溶接設計
	溶接による変形	8	〃
	切 削 代	7	HBS G3107
設 計 板 厚（mm）		200	
支 給 素 材 厚（mm）		235	

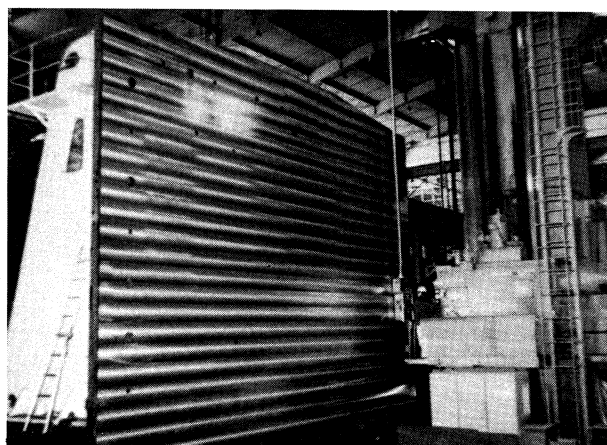


写真-2 S B下底板の切削

(7) ウインド沓取付面

ウインド沓の座面となる部分は、内部補強格子の溶接による変形除去の目的で大組立後切削仕上げとした。（なお、塔基部ウインドプレート上面もアンカーボルトナットの座面となり同様の加工とした。）

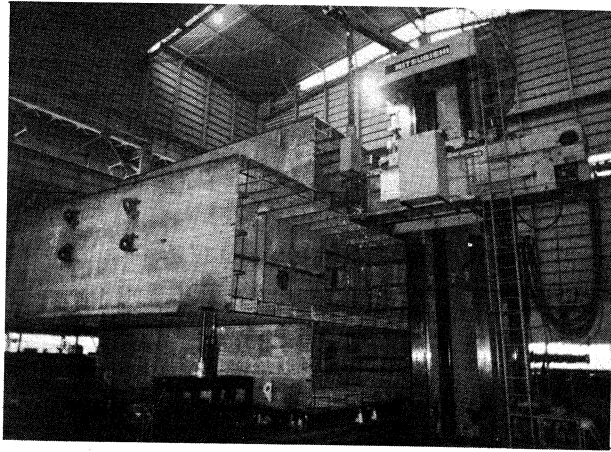


写真-3 S B塔柱3セル1体端面切削

表-12 S Bタワーリンクピン受プレートの材料品質

(a) 化学成分 (レドール分析)

	化 学 成 分 (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al	Ceq
規 格	≤0.14	≤0.55	0.60 ~1.50	≤0.015	≤0.015	—	—	—	—	—	—	≤0.51
実績値 (82D904)	0.13	0.34	1.31	0.006	0.004	0.43	0.19	0.10	0.09	0.07	0.016	0.44

(b) 機械試験結果

	S R の有無	引 張 試 験			曲げ試験	衝 撃 試 験	
		耐力(0.2%) (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び 4号 (%)	180°×R 1号	-10°C, 2 V, 4.8(kg·m)	
規 格	—	44≤	56~73	19≤	R=1.5T	1/4 T	1/2 T
実 績 値 (82D904-2-1)	—	49.7	63.5	30.1	Good	4.8≤	4.8≤
	S R	48.6	62.8	28.3	—	12.4	15.0

表-13 S B塔の部材寸法精度

部 材	測定項目	2 P			3 P		
		最大	平均	最小	最大	平均	最小
塔 柱	辺長 (B, W)	+2.0	+0.47	-2.0	+2.0	+0.56	-2.0
	断面对角長 (D)	+3.0	+0.59	-3.0	+3.0	+0.64	-2.4
	長さ (L)	+1.0	-0.04	-1.0	+1.0	+0.29	-1.0
	端面直角度 (各段上下 端の平均)	東側塔柱 +1.3° 西側塔柱 +0.4°			東側塔柱 -0.3° 西側塔柱 -0.9°		
水 平 材	幅、高さ (W, H)	+2.0	+0.22	-2.0	+2.0	+0.56	-1.7
	長さ (L)	+3.0	+0.79	-1.0	+2.0	+0.56	-1.1
	断面对角長 (D)	+3.0	+0.51	-2.5	+3.0	+0.72	-2.3

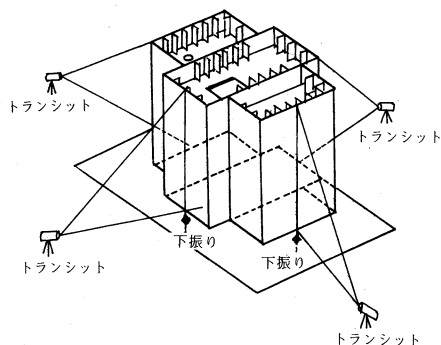


図-4 正芯出し要領

5.5 部材検査

(1) 一 般

寸法計測に使用したテープは、公団基準テープ (スーパーインバー鋼製 50m テープ、製品精度 0.1mm/50m) とテープ合せした本製作工場基準テープである。

テープによる寸法計測は0.5mm単位、精密水準器では0.01mm単位とした。

(2) 塔柱部材

①部材組立時の仮芯を基準に部材を鉛直に立て、4方向の相対芯を合わせて正芯 (4面芯) とした。(図-4 参照) ②正芯を基にして、両端面の切削完了後、検査定盤上で温度影響の少ない時に立置き検査を行った。③精密水準器により端面水平度を求め、④相対する面の下端軸芯を結ぶ線の上にトランシットを据え、下端軸芯を基準にし、上下端軸芯の偏位量から各面の軸芯鉛直度を求めた。(4面芯管理) ⑤さらに、相対する2面の軸芯鉛直度の差をねじれとした。⑥相対する2点を結ぶ線の交点を塔芯と定義した。

(3) 部材精度

主要部材寸法製度を表-13に示す。

6. 仮組立

6.1 仮組立要領

本橋での仮組立の全組合せを表-14に示す。

以下に部材毎の仮組立要領を説明する。

(1) 塔柱基部の仮組立

塔柱基部は架設精度を支配する基本となるため、工場内で可能な限り多数の定盤上の立置仮組立とした。2 P は [下底板 + T 1 段 + T 2 L 段]、3 P は [下底板 + T 1 段] である。

(2) 塔柱一般部の仮組立

塔柱一般部は、屋内で2段以上の仮組立を原則としたが、3 P では製作工程上から2~4段の仮組立とした。仮組立姿勢は部材高より平面横置とした。

(3) 水平材の仮組立

水平材は、塔柱 T 3、T 10、T 15 各段の中セルとの横置き仮組 (屋外) を基本とした。ただし、2 P 上部水平材については、架設精度情報を得るため T 15、T 16 段との一体仮組立を屋内立置で行った。(図-3 参照)

(4) サドルカバーの仮組立

塔頂板下のサドルカバーの仮組立は、T 15、T 16 段仮組時に合わせて行った。

6.2 仮組立の基本事項

(1) 一般事項

①仮組立は強固な地盤上で、部材を無応力状態になるよう受台を配置した。②主要部材の現場継手は、ボルト孔数に対し、ドリフトピン5%以上、仮締めボルト20%以上を使用した。

(2) 2P塔柱の孔明け

①塔柱本体の孔明けはパネル製作時先孔とし、②先孔を利用し、仮組前に隣接2ブロックの仮合せを行い、ボルト孔の縁端距離を測定する。③添接板の孔明け(片側は先孔)は、塔柱のメタルタッチを確保するため孔明け位置を計測値より0.5~0.8mm短くし、種板を使用して行った。なおこの値は別途試作実験により決定した。

(3) 3P塔柱の孔明け

①塔柱外板片側はパネル製作時先孔とし、②また、表側添接板を先孔とし、仮組立時に裏側添接板を0.5~1.0mmずらして表側添接板から当てもみを行った。

(4) 塔柱縦リブの孔明け

縦リブは全て完全先孔($\phi 28.5$)としたため、ドリフトピンにより引寄せはできなかったが表-15に示すとおり十分なメタルタッチが確保できている。

(5) 塔柱架設用合マーク・基準孔

仮組立時寸法を架設時に再現できるよう設置した①合マークは、仮組時塔芯と合せ、野書き針により各外板面添接板両脇にマーキングした。②基準孔は、仮組立時のドリフトピン打設位置及び仮組時・架設時メタルタッチ確認用のパイロットホール(添接板1枚に2箇所)の2

種類設置した。

(6) 水平材の仮組立寸法

一般に水平材の取付高は左右両塔柱の累積製作誤差の影響を受けるが、本橋では誤差が微小なため設計図面寸法で仮組立を行った。

6.3 再現性実験

本橋では、工場製作精度の架設時再現性を確認するため、工場屋外ヤードにて2P側〔T1+T2L段〕(立置仮組立時の底板を外した状態)について、トラッククレーンを使い外気温の影響下で架設実験を行った。

これにより工場製作品質が温度変化を受ける現場においても充分再現できる自信を得た。

6.4 仮組立検査

本橋においては、仮組立場の温度変化を考慮し、2Pは工場屋内のため日中に、3Pは移動ハウス内のため早朝に実施した。

(1) 塔柱の検査要領

塔柱仮組時の要求品質(精度確認項目とその許容値)は表-4に示した。このうち軸芯の通り計測方法を図-5に示す。ここに軸芯は、中央径間面、側径間面、内面及び外面の4面芯をいう。(塔芯が要求品質で、4面芯は代替品質であるがいずれも1/10,000で管理した。)また、メタルタッチの判定は、安全側の判定となるよう、板厚の1/3以下で40 μ 厚スキマゲージ停止で密着と規定した。

(2) 水平材の検査要領

水平材仮組時の要求品質は表-4に示した。

(3) 塔柱の出来形品質

塔柱の仮組立検査結果のうち端面密着度(メタルタッチ率)及び鉛直度(塔芯の通り)について表-15に示す。また、図-6に各塔芯からの偏心量(真の鉛直度)を示す。

7. あとがき

下津井瀬戸大橋の塔は、2Pが59年5月14日、3Pが同23日に閉合した。ここに本邦長大吊橋で最初のラーメン塔が児島坂出ルート海峡部の玄関口に雄姿を現した。

本橋の塔はこの報告のとおり所要の精度をもって製作を終えたが、今後の類似工事のために本橋での成果及び反省を記す。

表-14 SB塔仮組立の組合せ

(a) 塔 柱																		
塔	底板	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10	T-11	T-12	T-13	T-14	T-15	T-16	計
2P	(立置)	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	31回
3P	(立置)	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	18回

※：立置、上部水平材含

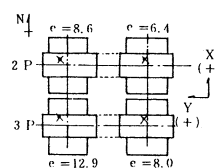
(b) 水 平 材				
塔	H 1 - T 3 A	H 2 - T10A	H 3 - T15A	計
2P	平 面 組 (屋外)	平 面 組 (屋外)	H3-T15-T16 立 置 (屋内)	3 回
3P	平 面 組 (移動ハウス内)	左 同	左 同	3 回

表-15 SB塔の仮組立検査結果

(a) 端面密着度 (メタルタッチ率) (%)							
	2P平均		3P平均		全平均	最小値	規定値
	E塔柱	W塔柱	E塔柱	W塔柱			
外 板	95.5	94.9	95.2	97.7	95.8	65.1	≥ 50
縦リブ	91.7	92.2	92.0	90.4	91.6	73.0	≥ 25

(b) 鉛 直 度							
	2 P			3 P			
	E	W	許容値	E	W	許容値	
塔 頂	X	+6.4	+6.7	± 13.8	+7.9	+11.0	± 13.3
	Y	+0.9	+5.4	± 13.8	+1.5	+ 6.9	± 13.3
T	X	+3.8	+0.1	± 4.5	+0.6	+ 0.7	± 4.0
	Y	-0.7	+2.5	± 4.5	+2.5	+ 0.1	± 4.0

工場製作時の塔頂偏心量



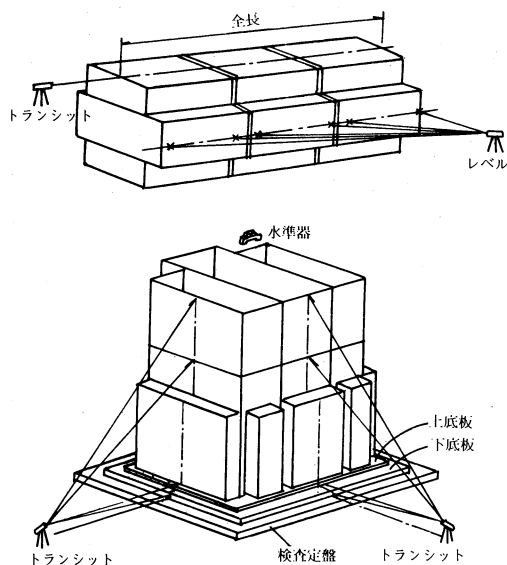


図-5 SB塔軸芯計測（仮組立時）

- (1) 塔の鉛直度は最重要管理項目であるが、ブロック長が短い部材ではブロック間の管理は相当な手間を要した。
- (2) 端面密着度は、切削機の状態、品物の定盤への据付管理で決まり、縦リブの切削時の振動防止対策さえ講じておけば問題が少ない。本橋でのメタルタッチ率は外板・縦リブ共、平均90%以上確保できた。
- (3) 大規模な塔では多数の重量ブロックのハンドリングが行われるが、その場合、仕口部ボルトピッチをできる限り統一しておくことと本体製作管理・吊金具取付に便利で無駄を省く事ができる。
- (4) 部材製作では、夏場天井の高い屋内では意外と部材に温度差を生じることがあり（本橋では最高7 degree が計測されている）、軸芯の通り、寸法計測時には温度分布管理が重要である。
- (5) 本橋のように斜材を有しない塔の水平材の仮組、特に中セルとの仮組立は部材の製作精度が高いため、ボルト孔の公差を利用すれば相当量調整が可能であった。

末筆ながら、昭和54年度の基本設計に続く55.56年度の塔施工法検討委員会を経て各界の有識者から貴重な助言を戴いた。また、工場製作担当者にとっては、当初予定工程を大幅に短縮し、かつ良好な品質を残して戴いた。ここに記して各位に深謝の意を表したい。

なお、本橋についての詳細は製作報告書¹¹⁾を参照されたい。

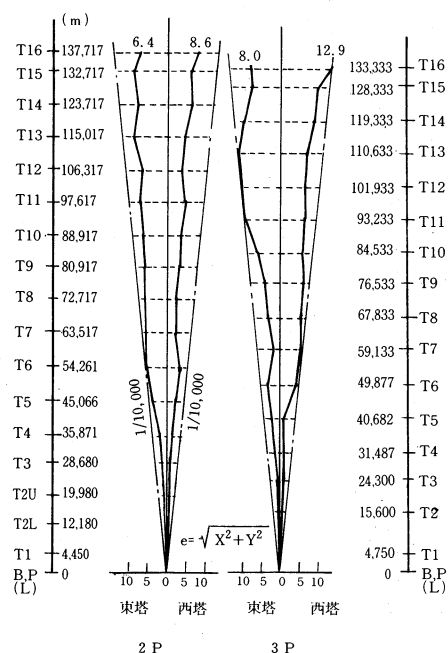


図-6 SB塔芯鉛直度

参考文献

- 1) 飯島、谷中、村瀬：下津井瀬戸大橋の橋梁計画 橋梁と基礎 昭58.4
- 2) T. Iijima, Y. Yanaka, S. Murase: The Shimotsai-seto Bridge Conotmction Pnoject Annual Report of Roads 1982 Japan Road Association
- 3) 加島、田中、村瀬：下津井瀬戸大橋の橋梁計画、第14回日本道路会議論文集 昭56.10
- 4) 山根、村瀬：下津井瀬戸大橋の塔頂構造の設計、本四技報No.17 昭56.7
- 5) 本四公団；吊橋主塔設計要領（案） 昭55.3
- 6) 本四公団、第二建設局；吊橋及び斜張橋の塔基礎設計要領（案） 昭57.2
- 7) 本四公団、第二建設局；下津井瀬戸大橋塔アンカーフレーム用アンカーボルト製作基準 昭56.11
- 8) 谷中、村瀬：下津井瀬戸大橋ケーブル定着用ロッド疲労試験 本四技報No.26 昭59.1
- 9) 本四公団、第二建設局；塔の継手設計要領 昭56.10
- 10) 本四公団；鋼橋等製作基準、同解説 昭52.3
- 11) 本四公団、第二建設局；下津井瀬戸大橋製作製作報告書 昭59.6

下津井瀬戸大橋タワーリンクの設計製作

Design and Fabrication of Tower Link for Shimotsui-Seto Bridge

児島工事事務所 第七工事長

奥川 淳志

Atsushi Okukawa

第二建設局建設第一課課長代理

村瀬 佐太美

Satami Murase

1. まえがき

下津井瀬戸大橋のタワーリンクは、昭和59年1月24日に3P、2月2日には2Pがそれぞれ製作・架設を完了した。

タワーリンクは補剛桁中間支点反力を塔柱に伝達する鉛直支承であるが、本橋の場合、吊橋形式が道路鉄道併用橋で側径間をハンガーで吊らない「張出し径間付単径間補剛トラス吊橋」であるため、約5,000 ton という大きな反力を受ける。この反力はDルートの吊橋の中で最大であり、その結果、一組のタワーリンク重量は約114 ton となっている。

本報では、きびしい設計条件、使用材料の特性、製作上の特徴的な事項など設計・製作の概要をとりまとめて報告する。

2. タワーリンクシステムの概要

2.1 タワーリンク方式の採用と取付位置

Dルート吊橋の補剛桁は高速列車の走行性から中間支点到角折れのない連続トラス形式を採用している。

中間支点の支承には別に風・地震等による水平反力を支持するウインド杓と、鉛直反力のみを支持する支承とを別々に設置することが多い。これは支承構造を簡易にするため機能を分割する目的からである。さらに鉛直支承には、作用する負反力の大小により、(下支えピンローラー)方式、リンク(アイバーの規模を大きくしたもの)方式等が用いられる。Dルート吊橋では道路鉄道併用吊橋のリンク支承構造設計製作指針¹⁾に基づいて負反力にも対処が比較的簡易なリンク形式が採用されている。^{2)注)}

このタワーリンクは、施工性と、補剛桁水平変位時のリンク回転によるリフト高の影響を少なくするため、リンク長(ピン間距離)が長くとれる補剛トラスの上弦材吊り(上吊り)方式が採用されるのが一般的である。これは連続吊橋であっても同じであるが、連続吊橋では、塔柱間を桁が通過するため、このタワーリンクが塔柱の

内側配置となり頗る走行景観を損う事となる。よってDルート吊橋では補剛桁主構面内にタワーリンクを収納できる補剛トラスの下弦材吊り(下吊り)方式が採用された³⁾(図-1参照)

なお、塔柱の第5段が上ピン(すなわちタワーリンクブラケット)取付位置である。

2.2 下津井瀬戸大橋のタワーリンク

本橋では、大型架設クレーンの操作性と後続する桁架設の作業性及び精度管理面から塔架設工事でタワーリンクを架設するのが良いと判断し、塔工場製作に含めてタワーリンクを製作した。

製作にあたっては、基本設計では上吊り方式であった事、設計外力が増大した事などからまず詳細設計を実施した。

3. 詳細設計の概要

タワーリンクは吊橋中間支点の支承として機能するため、中間支点主構トラスの変形を考慮し、吊橋全体系から設計断面力を求めた。また適用JIS等で指針制定当時より改訂されたものは全て見直しを行った。

3.1 設計外力

表-1にタワーリンク設計製作指針¹⁾に基づいて求めた設計外力を示す。同表には、別途考慮した付加荷重(面外曲げモーメント)も併記した。

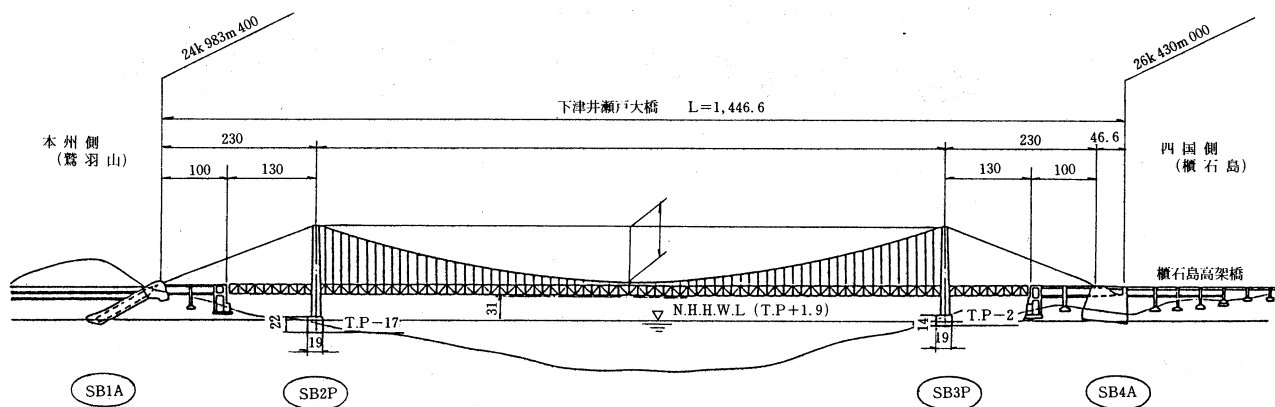
3.2 設計基本方針

本橋のタワーリンク詳細設計においては、指針¹⁾に規定のない事項を含めて下記の基本方針を設定した。

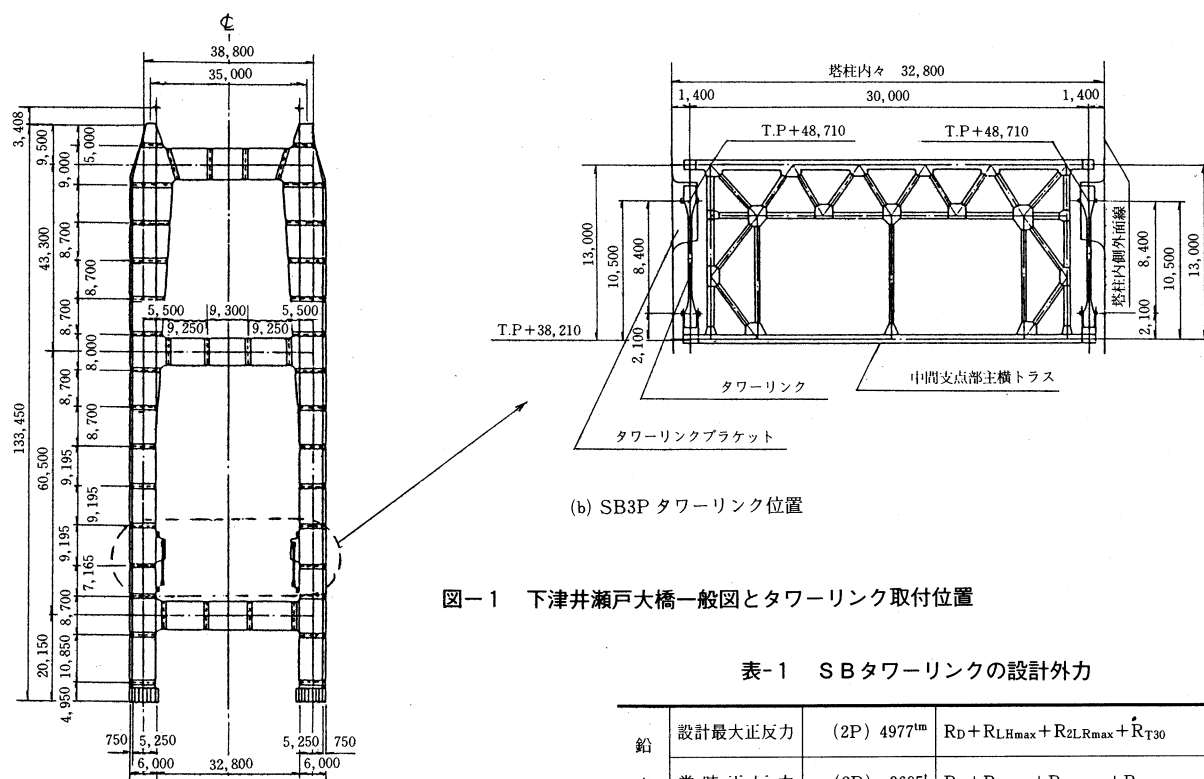
- (1) 設計断面力は、2P3Pでその差が僅少なため、大きい方の2P側を採用する。
- (2) 主要部材の接合は、品質確保上、ボルト止め等機械的方法とし、溶接は使用しない。
- (3) 許容応力度は設計外力の組合せに対し割増ししない。

ただし、ボス部の局部応力集中にはピーク応力に対し、10%割増しまで認める。(ボス部とはブシュ孔部をいう)

注) 指針では、吊橋中間支点鉛直支承には、固体潤滑材埋込型ブッシュと円筒形ピンによるリンク形式が各種実験検討の下に採用され、その適用材料、設計要領、製作仕様等の詳細が定められている。



(a) 橋梁一般図



(b) SB3P タワーリンク位置

図-1 下津井瀬戸大橋一般図とタワーリンク取付位置

これは、タワーリンクが、連続併用吊橋である本橋の重要部材であること、摩擦・摩耗・潤滑というトライボロジー面の設計が多く、寿命中の設計条件の変動に対する応答が推定できるほどデータの蓄積がないことなどから設計に余裕を持たす配慮より定めた。

(4) リンク本体の材質は、58キロ級かつ大型部材での内部保証性の良い特殊鍛鋼品 SFVQ 2 B-相当材^{注)}(JIS G 3204-1982 圧力容器用調質型合金鋼鍛鋼品)とし、その許容応力度は次のとおりとする。

一般部 (T/4)

$$\sigma_y \geq 4,600 \text{ kg/cm}^2 \text{ より } \sigma_a = \sigma_y / 1.7 = 2,700 \text{ kg/cm}^2$$

(参考 $\sigma_B / 2.2 = 2,860 \text{ kg/cm}^2$)

ボス部 (T/2)

$$\sigma_y \geq 4,000 \text{ kg/cm}^2 \text{ より } \sigma_a = 2,350 \text{ kg/cm}^2$$

注) 当該 JIS の適用板厚を超え、衝撃試験温度を下げるため、相当材とし、本橋では記号 SFVQ 2 B-SBとした。

表-1 SBタワーリンクの設計外力

鉛直反力	設計最大正反力	(2P) 4977 tm	$R_D + R_{LHmax} + R_{2LRmax} + R_{T30}$
	常時正反力	(2P) 3605 ^t	$R_D + R_{LH'} / 2 + R_{LR'}max + R_{T20}$
	設計最大負反力	(3P) -486 ^t	$R_D + R_{LHmin} + R_{2LRmin} + R_{T-30}$
	常時負反力	(3P) -566 ^t	$R_D + R_{LR'}min + R_{T-20}$
面外曲げモーメント	最大反力時	162 tm	下ピン位置
	常時反力時	128 tm	〃

(5) ブシュの材質は、高力黄銅铸件 HB_sC4 (JIS H 5102-1979 高力黄銅铸件)の母材に固体潤滑材 (PTFE)を埋め込んだものとし、リンクボス部に冷しばめにより取り付ける。

許容面圧は常時荷重に対し $\sigma_{ba} = 300 \text{ kg/cm}^2$ 、設計最大反力時 $\sigma_{ba} = 500 \text{ kg/cm}^2$ とする¹⁾

(6) ピンは大単重なため経済性を考慮して、中心コアに機械構造用炭素鋼鍛鋼品 SF 55A を、スリーブにマルテンサイト系ステンレス鋼鍛鋼品 SUS 431 を使用し、焼きばめ一体化構造とする。ただし、指針¹⁾どおり摩擦・摩耗に対してスリーブ、それ以外の耐力設

計には中心コアの材質充実のピンとして機能させる設計とする。

(7) プシュのピン摩擦力によるボス内回転止めは、プシュ1個当り2×2本とし、プシュと同材質の高力黄銅棒をボス部の応力集中の低い箇所（水平軸より45°）に温間圧入する方式とする。

3.3 付加曲げ要因と変形量

設計外力として考慮した付加曲げ要因とそれによる変形量の代表値を以下に示す。

- ① タワーリンク・ピン受ブラケット・ウインド杏間の遊間：設計最大負反力時：4 mm
横力時（風・地震）：6 mm

- ② 塔架設誤差による水平移動（鉛直度1/5,000）：16mm

- ③ 塔の水平度：ピン位置で1/10,000

- ④ 両塔柱の高低差：±4 mm（リンク長製作誤差含む）

- ⑤ リンクの製作誤差、上下ボス内面の平行度：3.6/10,000 プシュ・ピンの円筒度：0.9/10,000
〔水平変位及び回転変位の集計〕

通常時：4.1mm、5.5/10,000、（R.M.S—自乗和平均一値とした）

異常時（風・地震）：6.1mm、5.5/10,000

3.4 FEMによる応力照査

ボス部橋軸方向、リンク本体部橋軸直角方向についてはFEM解析により発生応力の照査を行った。

ボス部最大相当応力 $\sigma_{TR} = 2304 \leq 2350 \text{ kg/cm}^2$

（発生位置：上ピン水平軸より+約15°）

リンクR部最大応力 $\sigma_W = 2,216 \leq 2,700 \times 1.1 = 2,970 \text{ kg/cm}^2$

（発生位置：下ピン側R開始点）

3.5 プシュ応力度

<最大反力時> $\sigma_b = 406 < 500 \text{ kg/cm}^2$ （下ピン側）

<常時反力時> $\sigma_b = 296 < 300 \text{ kg/cm}^2$ （上ピン側）

3.6 ピン応力度

<プシュ全強時>

$\sigma = 710 \leq 1,700 \text{ kg/cm}^2$, $\tau = 411 < 1,000 \text{ kg/cm}^2$,

ただし、SF 55充実として評価した。

3.7 詳細設計結果

本橋のタワーリンク形状を図-2に、構成部品を表-2に示す。なお、本橋ではリンク形状から橋軸直角方向の応力集中がきびしいため大きなR部を設け対処している。

4. タワーリンクの製作

タワーリンクの製作には、素材精錬から成品まで約8ヵ月を要した。図-3に主要部品の製作フロー（写真-1に完成状況）を示す。

以下に製作時の主要検討内容と主要部品の製作結果を述べる。

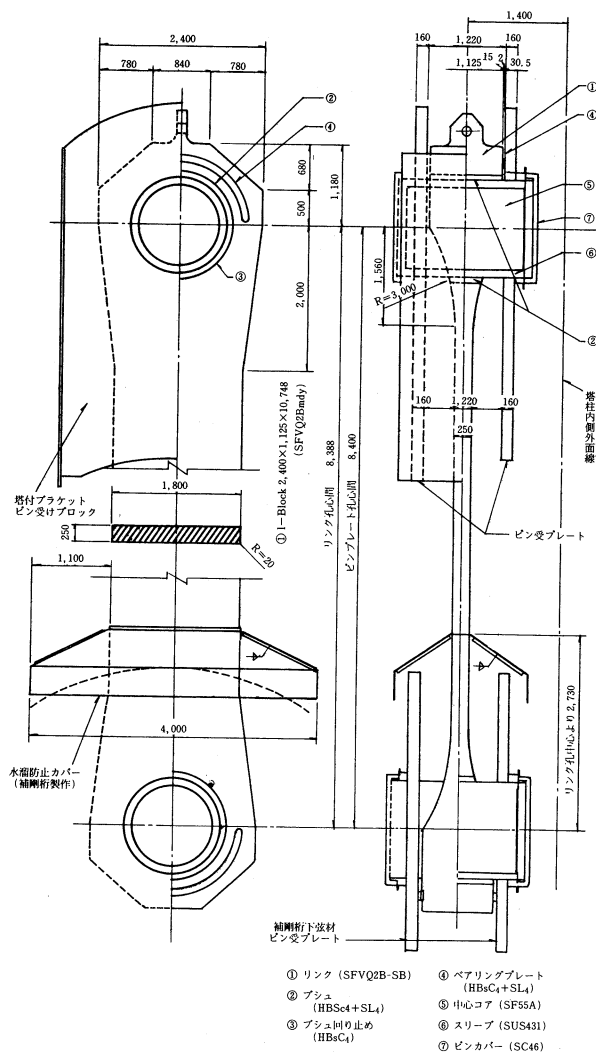


図-2 SBタワーリンク形状

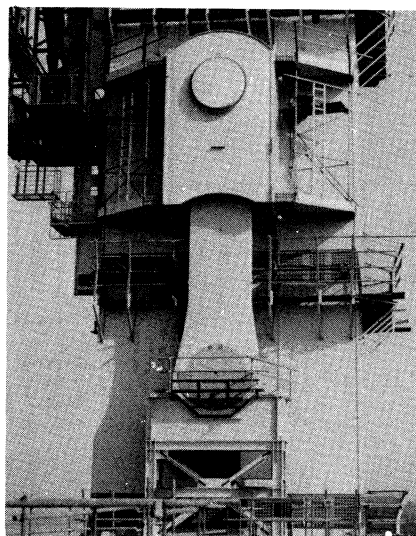


写真-1 タワーリンク完成状況

4.1 一体鍛造型リンク

従来、タワーリンクはリンクボス部を鍛鋼品、リンク軸部を施工性（架設ブロック重量の軽量化と製作架設誤差の吸収性）から高力ボルト継手を有する厚板溶接構造としていた²⁾。

しかし、本橋の場合は特に過酷な荷重条件で使用されるため、溶接を極力避け、また、添接によって軸部の剛性を高くしないために、構造が簡単である「一体鍛造型」を採用することとした。

表-2 SBタワーリンク構成部品および付属品

品名	材質	製作数量		概略重量		備考
		2P	3P	単重(t)	合計(t)	
① リンク	SFVQ2B-SB	2	2	59.1	236.4	2,400×1,125×10,748
② プッシュ	HB _s C4+SL4	4	4	2.6	20.8	φ1,576×φ1,416×1,125
③ プッシュ回り止め	HB _s C4	16	16	—	—	30φ×150
④ ベ어링プレート	HB _s C4+SL4	8	8	0.1	1.6	R1,020×R890×30
⑤ 中心コア	SF55A	4	4	15.9	127.2	φ1,210×1,760
⑥ スリーブ	SUS431	4	4	6.3	50.4	φ1,410×φ1,210×2,010
⑦ ピンカバー	SC46	8	8	1.3	20.8	φ1,702×165
⑧ その他	HTボルト・ピン架設用治具(1基), 下ピン孔用仮カバー(4基)					

4.2 リンクの要求靱性値と許容欠陥寸法

(1) リンク本体(SFVQ2B-SB)は、強度SM58級の鍛鋼品として選定したが、その要求靱性値は以下の理由から2mmVノッチ・シャルピー試験で-5℃における吸収エネルギーを4.8kg・mと規定した。なお、当該JISの規定温度は+20℃である。

① 超極厚58キロ級鋼としてSM58(50<t≤75)の規定値(2vE-5℃≥4.8kg・m)と同等以上であること。

② 架設地点の過去最低気温(-10℃)で破壊安全度が保証されること。

なお、設計のトータルバランスから、前項①を規格値、②を参考値とし、別途製作基準⁴⁾に盛り込んだ。

以上について、製作着手前に本体の一部から採取し

た供試体により、破壊靱性試験、疲労き裂進展速度試験、回転曲げ疲労試験を実施し、破壊安全性解析を行って規定の妥当性を確かめている。

なお、図-4に板厚t/4、t/2における遷移温度曲線を示したが、

$$-5^{\circ}\text{Cで}2\text{vE}(t/4)=12.0\text{kg}\cdot\text{m},$$

$$2\text{vE}(t/2)=13.0\text{kg}\cdot\text{m}$$

$$-10^{\circ}\text{Cで}2\text{vE}(t/2)=9.8\text{kg}\cdot\text{m},$$

$$2\text{vE}(t/2)=11.6\text{kg}\cdot\text{m}$$

でありいずれも充分である。

(2) 前項で行った破壊力学的検討から「き裂(欠陥)が存在しても進展しない」ための許容き裂寸法は、2vE-5℃=4.8kg・mで7mmφとなった。これより、超音波探傷による非破壊検査では許容欠陥寸法を4mmφ

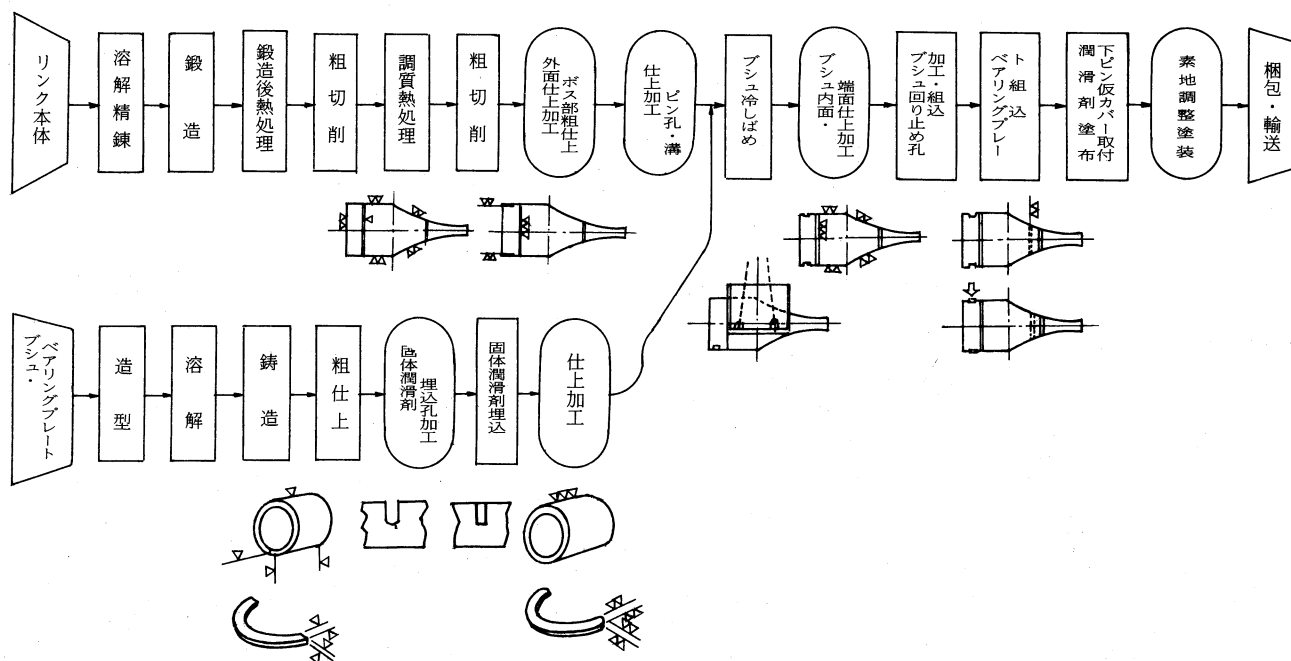


図-3 SBタワーリンクの製作フロー

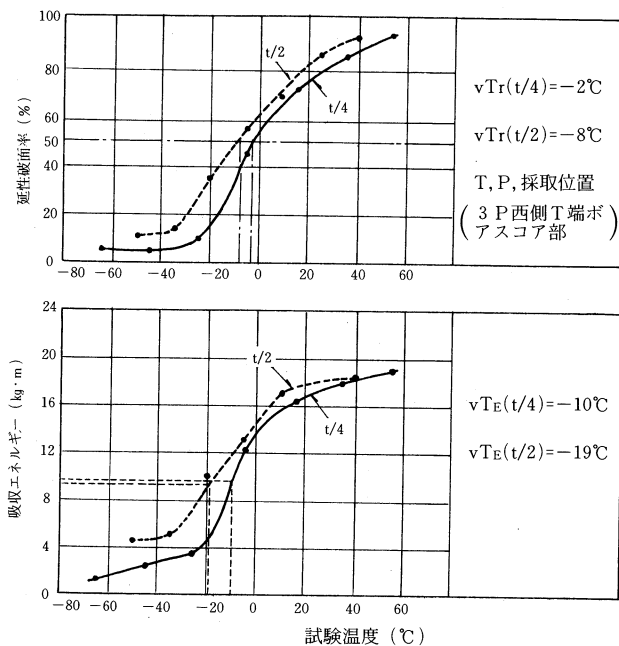


図-4 SFVQ2B-SBの遷移温度曲線

に設定した。

4.3 製作基準の策定

以上のように JIS 規格値の一部変更（衝撃試験）及び追加（ $t/2$ での機械試験、 -10°C での衝撃試験）があること、設計条件を満足させる部材寸法精度、仕上げ精度等を規定するために、別途、本橋タワーリンク独自のための製作基準を策定した。詳細は文献5）を参考にされたい。

4.4 主要部品の製作結果

(1) リンクの製作

リンク本体の製造方法は次のとおりである。①塩基性電気炉により溶解精錬し、鑄込時に真空脱ガス処理と②内部均質を確保するため鍛錬成型比を実体鍛錬で3S相当以上とし、鍛造後熱処理（焼準+焼戻し）を行った。③粗切削後約30mm残し、調質熱処理（焼入れ+焼戻し）し、④超音波探傷検査のため約5mm残しの粗切削を行った。

表-3に3P西側の化学成分、機械的性質を示す。⑤仕上げ切削は、ブシュを冷しばめした後、大型プラノミラー及び大型横中ぐり盤によって行った。⑥最後にブシュ回り止めの埋込み及び橋軸方向移動ガイド用のベアリングプレートのはめ込みを行った。

ブシュ冷しばめは、冷媒にメタノールを使い、ドライアイスで -60°C に冷却し、冷しばめ時のすき間約1.5mm、しめ代約0.3mmの条件で実施した。なお、冷しばめは、ブシュに埋め込まれた固体潤滑材（PTFE）の高温劣化特性から選定した工法である。

(2) ブシュの製作

ブシュの母材は①誘導電気炉、遠心鑄造法により円筒形に鑄込み②粗加工後射出成型された固体潤滑材を埋め

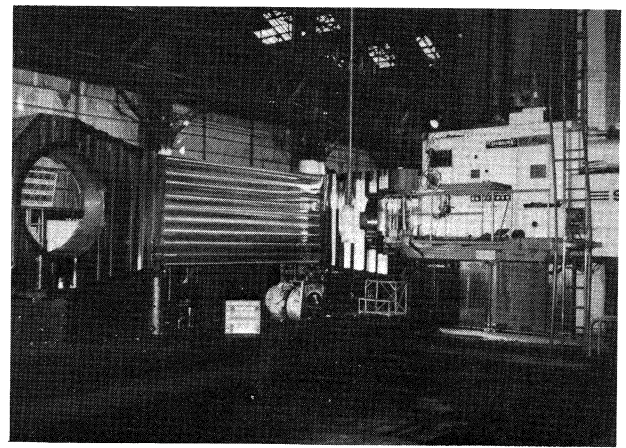


写真-2 リンク本体の機械切断

込んだ。③ブシュは冷しばめ時は円筒形のままとし、冷しばめ後正規寸法に仕上げた。これは冷しばめ後温度戻り時の円周反力の不均等による変形を拘束するためである。

(3) ピンの製作

スリーブは①塩基性電気炉で真空脱ガス処理された鋼塊を鍛錬成形比（中空鍛錬）2M以上で鍛造した。ただし、中空鍛錬に穴ひろげ鍛錬を併用した。②鍛造後熱処理は〔焼準+焼戻し〕を行った。③このスリーブを加熱温度約 160°C 、すき間約1.4mmしめ代約0.6mmで焼きばめし、別途製作した中心コア材と一体化した。④ピンの仕上げ切削精度6.3S以上で行った。

4.5 タワーリンクの製作精度

タワーリンクの製作精度は設計計算上の要求値から許容値を設定したが、表-4に示すとおり十分な成績が得られた。

5. あとがき

下津井瀬戸大橋のタワーリンク製作にあたっては、補剛桁の設計荷重が未定な部分もあったが、できる限りの試算を行ってその設計荷重を決定した。

“摩擦”“摩耗”“潤滑”いわゆるトライボロジイ面においては、厳密な挙動の推定は行い難く、特に本橋では時間の余裕がなく確認実験を実施せずに設計を固めている。供用後は十分な頻度で観察し、異常な摩耗、発生音、変位等を管理する必要がある。

末尾ながら、短時日内の膨大な諸検討・試算の下に設計を詰め、良好な品質確保に努力された関係各位に深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 本四公団 道路鉄道併用吊橋のリンク支承構造設計製作指針 昭51.3
- 2) 土木学会 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書別冊5吊橋リンク支承構造設計の指針. 昭51.3
- 3) 本四公団第二建設局 下津井瀬戸大橋タワーリンク製作基

表-3 SBタワーリンク本体の化学成分・機械的性質

(部材: 3P西側)

化学成分 (%)	元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	JIS3204 -1982を適用 とりべ分析
	規格値	≤0.27	≤0.40	0.50 -1.00	≤0.030	≤0.030	0.50 -2.00	0.25 -1.50	0.25 -0.70	≤0.10	
	実績値	0.15	0.26	0.85	0.006	0.006	1.93	1.01	0.53	0.05	
機械的性質		㊤ 軸部 (平行部)					㊤ ボス部 (ピン孔)			JIS3204 -1982を準用 (衝撃試験の試験温度のみ変更)	
試験片位置		表面		1/4t	1/2t	1/4t	1/2t				
耐力 ($\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$) (0.2%)	規格値	(41)		46 ≤	(41)	46 ≤	(41)				
	実績値	61.0		60.1	59.8	60.1	59.4				
引張強さ ($\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$)	規格値	(57~81)		63~81	(57~81)	63~81	(57~81)				
	実績値	72.0		71.8	71.5	71.9	71.6				
伸び (%)	規格値	(13)		14 ≤	(13)	14 ≤	(13)				
	実績値	26.3		23.2	23.3	22.5	21.6				
絞り (%)	規格値	(32)		35 ≤	(32)	35 ≤	(32)				
	実績値	75.0		74.3	74.3	69.0	70.5				
衝撃試験 ($\text{kg} \cdot \text{m}$)	-5℃規格値	(3.7 ≤ 4.3 ≤)		個別4.1 ≤ 平均4.8 ≤	(3.7 ≤ 4.3 ≤)	個別4.1 ≤ 平均4.8 ≤	(3.7 ≤ 4.3 ≤)				
	(平均)実績値	24.4		24.3	19.6	11.0	13.8				
	-10℃参考値	個別3.7 ≤, 平均4.3 ≤									
	(平均)実績値	24.5		25.5	23.0	9.4	8.6				
硬さ (H_B)	目標値	HB=170~250									
	実績値	214		209	217	220	212				
											参考試験

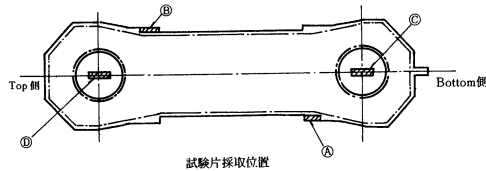


表-4 SBタワーリンクの製作精度 (a) リンク本体

計測項目	許容値	寸法精度実績			
		2P		3P	
		(西)	(東)	(東)	(西)
ピン孔間隔 L_1, L_2-L (設計値)	±0.8mm	+0.13(L ₁) +0.30(L ₂)	+0.54(L ₁) ±0.20(L ₂)	-0.20(L ₁) -0.30(L ₂)	±0(L ₁) ±0(L ₂)
ピン平行度 L_1-L_2	0.4mm	0.17	0.34	0.10	±0
ベアリングプレート間隔 H_1, H_2-H (設計値)	±1.0mm	+0.30 +0.77	+0.60 +0.90	+0.10 +0.50	±0 +0.50
曲り δ_1 δ_2	3.0mm	1.0(δ_1) 1.0(δ_2)	0(δ_1) 1.0(δ_2)	0.1(δ_1) 0(δ_2)	0.1(δ_1) 0.2(δ_2)
ボス部上下側面ずれ h	0.5mm	0.5	0.5	0	0
プッシュ内径 d (実績) - d (設計値)	±0.2mm	-0.13 _{max}	-0.17 _{max}	-0.17 _{max}	-0.14 _{max}
内面真円度 (rmax-rmin)	0.1mm	0.09 _{max}	0.08 _{max}	0.04 _{max}	0.07 _{max}
内面円筒度 $\frac{\sum r}{5}(\text{max}) - \frac{\sum r}{5}(\text{min})$	0.1mm	0.05 _{max}	0.09 _{max}	0.10 _{max}	0.08 _{max}

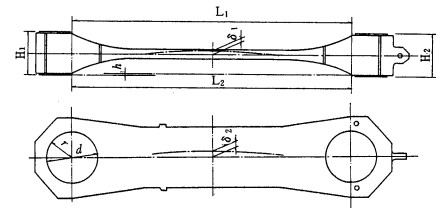


表-4 (b) ピン (スリーブ焼ばめ後)

項目		外径公差	真円度 ^[1]	円筒度 ^[2]
区分	許容値	±0.20	0.1	0.1
2 P	東側上ピン	+0.11～+0.16	0	0.025
	東側下ピン	+0.04 + 0.08	0	0.020
	西側上ピン	+0.11～+0.16	0	0.025
	西側下ピン	+0.05～+0.06	0	0.005
3 P	東側上ピン	+0.09～+0.13	0.005～0.025	0.03
	東側下ピン	+0.07～+0.09	0.01	0.02
	西側上ピン	+0.12～+0.15	0.01	0.03
	西側下ピン	0 ～ +0.03	0.01	0.03

注1) $\frac{D}{2}(\text{max}) - \frac{D}{2}(\text{min})$ 注2) $\frac{\sum D}{8}(\text{max}) - \frac{\sum D}{8}(\text{min})$

D: 外径

準 昭58.5

- 4) 飯島、谷中、村瀬 下津井瀬戸大橋の橋梁計画、橋梁と基礎 昭58.4
- 5) 本四公団第二建設局・鋼管・三井共同企業体 下津井瀬戸大橋塔製作・製作報告書 昭59.6

北備讃瀬戸大橋ケーブルサドルの製作

Manufacture of Cable Saddles on the Kita-Bisan-Seto Bridge

坂出工事事務所 第五工事長 成井 信
Shin Narui
向島管理事務所 維持補修課長代理 平野 茂
(前)坂出工事事務所 第五工事長付 Shigeru Hirano
坂出工事事務所 第五工事長付 古家 和彦
Kazuhiko Furuya

1. まえがき

児島一坂出ルート建設も下部工の工事がほぼ終り、順次上部工に移行している。

北備讃瀬戸大橋に使用されるケーブルサドル(塔サドル、スプレーサドル)も製作を完了し、それぞれ塔頂とアンカレイジに無事設置されたところである。

今回製作したサドルの主要寸法および諸元をそれぞれ図-1、表-1に示すが、本橋のケーブルサドルは従来の吊橋のサドルに比べ、下記の特徴を有している。

(1) 今まで建設された吊橋のサドル(因島大橋、大鳴

門橋等)に比べ、寸法がさらに大型となったが、機械的性質・寸法精度は従来と同等の品質が要求され、一層厳しい品質管理が必要となる。

(2) 従来の塔サドルの場合、鞍部直下に中央縦リブを設けた間接荷重伝達型サドルを採用し、ケーブル反力をサドルの剛性で一旦塔頂板面に分散させたのちに、塔頂補強格子を介して塔壁に伝達しているが、本橋の場合、リブ付き二又形状の側壁を有した直接荷重伝達型サドル¹⁾を採用することにより、塔頂補強格子構造をなくし、サドル本体で直接ケーブル反力を塔壁に伝達することになっている。

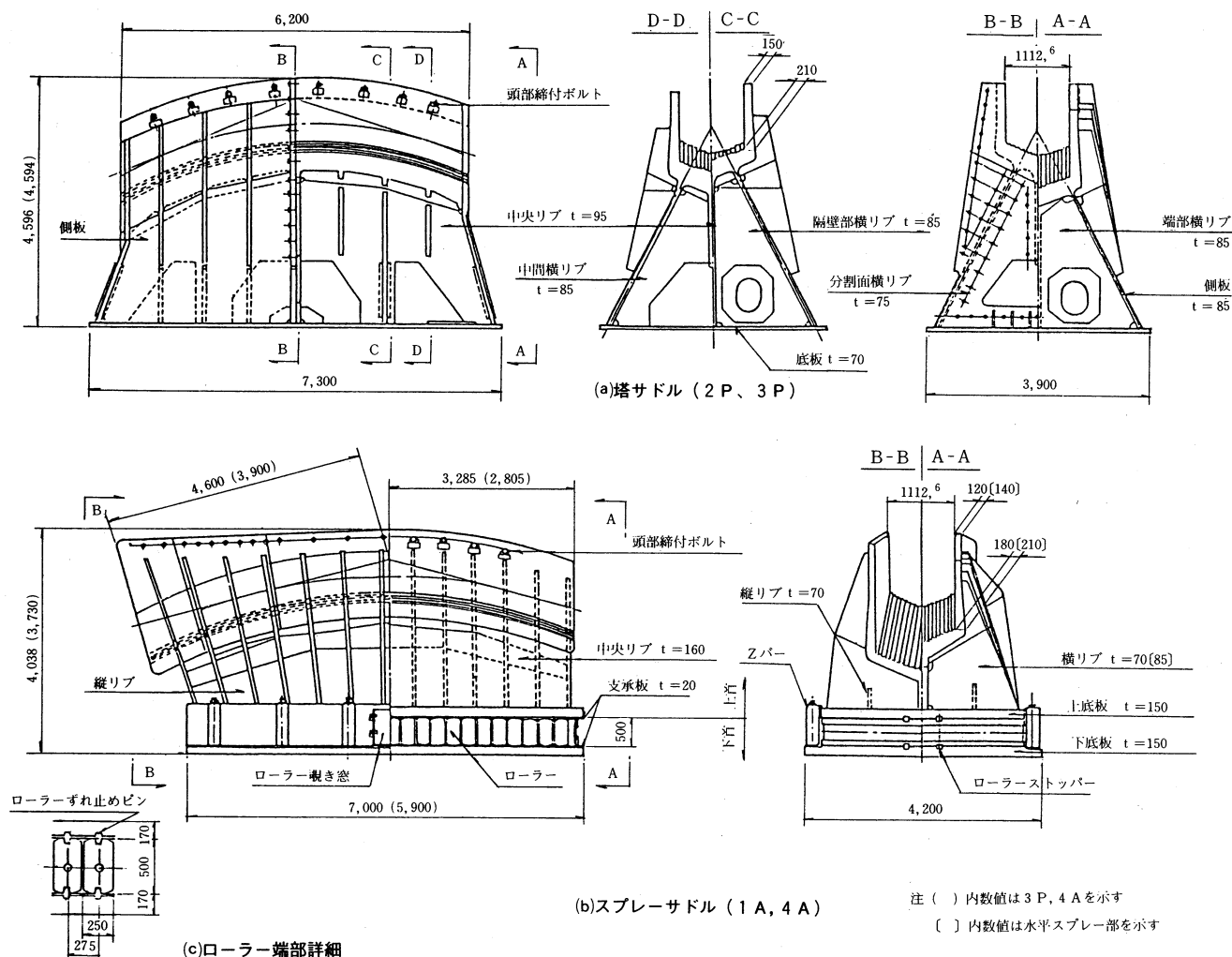


図-1 ケーブルサドル構造一般図

表－1 サドルの主要諸元

(a) 構造諸元

サドル (2P・3P)	全 体 構 造 (分 割 の 有 無)		鋳鋼・鋼板併用構造 (2分割ボルト結合)
	主 要 寸 法 (単位: mm)	全 高	4,596
サドルの 曲率半径 (単位: mm)	鉛 直 面	全 長	7,300
		底 板 寸 法	3,900×7,300
サドルの 曲率半径 (単位: mm)	鉛 直 面	(主円)	9,000
		(複円)	6,500
取 付 構 造	主 要 材 質	主塔とボルト結合 (フレキシブル塔)	
		鞍 部: SCW49 リブ、底板: SM50B	
鋼 重 (単位: t / 基)	架 設 重 量 (単位: t / ブロック)	146(付属物含む)	
		72	
ス プ レ ー サ ド ル (1A・4A)	全 体 構 造 (分 割 の 有 無)		鋳造・鋼板併用構造 (無し)
	主 要 寸 法 (単位: mm)	全 高	4,038 [3,730]
サドルの 曲率半径 (単位: m)	鉛 直 面	全 長	8,140 [6,825]
		底 板 寸 法	4,200×7,000 [4,200×5,900]
サドルの 曲率半径 (単位: m)	鉛 直 面	(主円)	9,000
		水 平 面	12,000 (最外線)
移 動 構 造	支 承 面 様 式	ロッカー式 (ローラー本数: 24本(20本) ローラー径: 500mm ローラー長さ: 3,460mm)	
		SUS410 Modified: 5 ^{mm} 肉盛	
支 承 板	主 要 材 質	SUS410 相当材: 20 ^{mm} 板貼付	
		鞍 部: SCW49 リブ、底板: SM50B ローラー: SF55A	
鋼 重 (単位: t / 基)	架 設 重 量 (単位: t)	260[212](付属物含む)	
		上 下 下 下 (下底板+ローラー): 135 [205]	

注) カッコ内数値は4Aを示す。

(b) 鋼重一覧

種 別	材 料	単 重(kg)	1基分個数	1基分計(kg)	基数	合計(kg)
塔 サ ド ル	本 体	SCW 49	53893	1	4	584402
	付 属 品	SM 50B	89159			
	計					
1 A ス プ レ ー サ ド ル	本 体	SCW 49	54376	1	2	520944
	支 承 板	SM 50B	110054			
	浮上り止め	SUS410				
	ローラー	SC 46	3185	2		
	付 属 品	SF 55A	3217	24		
	計					
4 A ス プ レ ー サ ド ル	本 体	SCW 49	45376	1	2	423550
	支 承 板	SM 50B	85838			
	浮上り止め	SUS410				
	ローラー	SC 46	2665	2		
	付 属 品	SF 55A	3217	20		
	計					

注) 塔サドル単重は3P塔サドルを採用、
2P塔サドルは1基分重量=146,007kg

(3) 塔柱ブロック重量 (約110 ton) に比べ塔サドルの方が、約140 ton/基と格段に重く、クレーン吊能力を越えるので、塔サドルを垂直に二分割し、塔頂に架設後ボルトで一体化させる構造としている。

(4) 従来の塔サドルは鋳鋼一体型 (例: 若戸大橋、関門橋、平戸大橋、因島大橋、大鳴門橋) を採用してきたが、本橋の場合、大鳴門橋のスプレーサドルと同様に鞍部のみを鋳鋼(SCW49)とし、これ以外のリブ・底板は鋼板(SM50B)としたハイブリット構造を採用している。これによって全体重量を低減するとともに、大型鋳鋼品の場合特に問題となる寸法精度の低下と質量効果に伴う強度低下を解決することにした。なお、直接荷重伝達型サドルでは、塔壁に直接荷重を伝達するので、サドルのリブ、側板に対して従来の塔サドル以上に高い寸法精度が要求されるが、その点でハイブリット構造は鋳鋼一体型に比べて有利となる。

(5) スプレーサドルの支承部は従来から SUS 410材を使用し、防錆対策がなされて来た。しかし、海峡部の鋼材の腐蝕は想像以上に厳しく、ステンレス材についても、十分な注意が必要なが、大鳴門橋サドルの実績で報告²⁾されている。従って、本橋ローラーの転動面肉盛材には、SUS 410を基本とし、さらにニッケルを添加した13 Cr-4Ni 系ステンレスを採用し、耐蝕性の向上に万全を期した。

(6) 従来のスプレーサドルローラー枠内には長期防錆を目的としてグリス注入を行ってきたが、スプレーサドル自体が斜面に設置されていることにより、気温が高い夏場にグリスの流出が著しいことが指摘²⁾されている。そこで、本橋のサドルではローラーおよび支承板との付着性が高く、また離油しにくいグリス (ASTM D 1742、離油度500H 値0%) を使用し改善をはかった。

(7) スプレーサドルは従来上沓と下沓を別々に輸送しアンカレイジ上で一体に組み立てられるが、4Aスプレーサドルにおいては今回工場にて最終形状に組み立てた後、治具で固定し、大型FC船で一括架設することにした。このため、下沓を固定するアンカーボルトについては、コンクリート表面にカップラジョイントを設けてボルトを上下に二分割し、スプレーサドル架設後に連結する構造とした。

上記のように、設計・製作・架設の面において種々問題が生じたため、事前に多方面から技術的検討を行い、製作に反映してきた。本報告では、製作要領及び製作にあたって特に配慮した事項について、概要を述べることにする。

2. 製 作

製作にあたっては、因島大橋、大鳴門橋の製作実績を踏まえ、本橋サドルに固有の問題については細部にわたって検討を行っている。ここでは、本橋のサドル製作で初めて採用された施工法・材料について、その特徴と

留意点を主に述べることにする。

製作工程を表-2に示す。また製作実施工程表を表-3に示す。

2.1 鑄鋼部の製作

塔サドル、スプレーサドルとも鞍部は鑄鋼（材質SCW49）で製作した。

(1) 鑄造方案および木型

鑄造方案の概要を図-2に示すが、鑄造および木型製作にあたっては特に下記の点に留意した。

1) 鞍部には寸法の大きいリブが多数付いているので、

造型後の型抜き作業を容易にするため、木型を数個の小ブロックに分割した寄せ型とした。

2) 大鳴門橋の実績と類似形状の鑄込み経験から凝固後の寸法の縮みとして17/1,000(1A, 2P)、16/1,000(3P, 4A)を見込んだ木型とした。

3) 造型方向は鞍内面の根元の品質確保を重視し、鞍部を下向きにするとともに、鞍外面の底部に押湯を設けた。さらに、指向性凝固（下方から押湯方向に向って徐々に凝固していく形態）が確実に行われるように押湯寸法を決定した。

4) 鑄鋼と鋼板とのハイブリット構造の場合、各々の

ブロックを溶接で一体化するので、鑄鋼部の横リブは相手方鋼板の寸法許容差以内に収まらないと肌違いが生じる。また一般に、長尺鑄鋼品は鋼板構造より寸法誤差が大きく、鞍全長7～8mに対して生じる収縮誤差を溶接構造物の寸法許容差（JIS B0412鑄鋼品普通許容差の中級）に全て入れることは困難である。したがって、鞍の各リブの表裏面に5～10mmの補正代を設けるとともに、砂落し後エアガウジングにより肉厚を調整して精度確保をはかった。

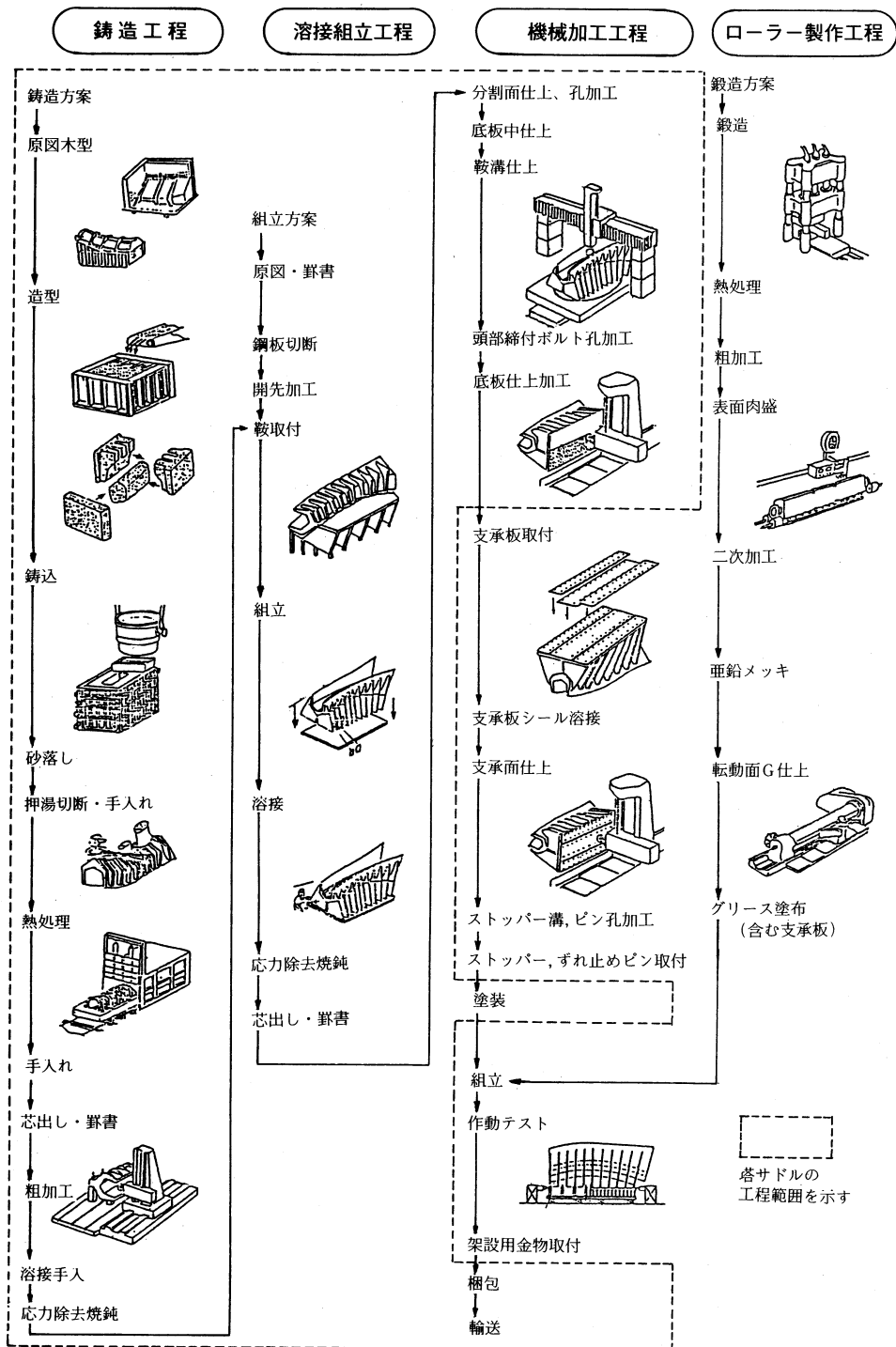
(2) 造 型

水ガラスおよびダイカルシウムを硬化剤とする自硬性砂を使用して造型を行った。大型鑄鋼の場合、鑄型の表面は溶鋼によって長時間熱にさらされるので、表面に耐火度が低い砂を使用すると、砂が半熔融状態となって鑄肌に膠着現象（鑄肌に鑄型表面の砂が強固に焼きつくこと）を生じる。そこで、鑄型表面から20～30mmの層には耐焼着性の高いクロマイトダイカル砂を使用し、鑄型内部の裏砂には通常使われる珪砂ダイカル砂とした。

(3) 製 鋼

1A、2P サドルは100 ton 電気炉で、3P、4Aは180 ton 転炉で製鋼した。また、

表-2 塔サドル・スプレーサドルの製作工程



後の工程で極厚鋼板との拘束度の高い突合せ溶接を行うので、溶接性向上のために炭素当量を極力低くするとともに ($C_{eq} \leq 0.43$)、リン・イオウ等の不純元素を極力おさえることにも留意して精錬を行った。一方、鑄造は鞍部を下向きにして行ったために、押湯直下の濃厚偏析部が厚鋼板 (95mm の塔サドル、160mm のスプレーサドル) との突合せ溶接部に位置することになった。しかしながら、元湯成

表-3 製作実施工程表

		58年度											59年度										
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
2 P塔サドル	木型	鑄込	砂落・熱処理	整調	整調							溶接組立・SR		分割面 仕上加工	底板 仕上加工	手仕上げ			手入れ	梱包・輸送			
		造型		粗加工										組立	鞍部仕上加工				分割	塗装			
3 P塔サドル	木型	鑄込	砂落・熱処理	整調	整調							溶接組立・SR		分割面・鞍部仕上加工	手仕上げ組立	手仕上げ	梱包・輸送						
		造型		粗加工										底板仕上加工			塗装						
1 A スプレー サドル	上沓	木型	鑄込	砂落・熱処理	整調	粗加工	整調					溶接組立・SR		鞍部仕上加工	底板仕上加工			仮組	梱包・輸送				
			造型											支取板取付	手仕上げ・キー取付			塗装					
	下沓								底板仕上加工					支取板単体加工	支取板取付・仕上加工			組立					
	ローラー	鍛造・熱処理					SUS肉盛			垂鉛メッキ			仕上加工				すれ止めピン加工						
4 A スプレー サドル	上沓	木型	鑄込	砂落・熱処理	整調	粗加工	整調					溶接組立・SR		鞍部仕上加工	手仕上げ	組立			梱包・輸送				
			造型											支取板取付	キー取付								
	下沓												支取板単体加工	底板仕上加工	キー・ピン	組立							
	ローラー			鍛造・熱処理						SUS肉盛			垂鉛メッキ仕上加工				支取板取付・仕上加工	塗装					

表-4 SCW49 の化学成分及び機械的性質

規格 種別	化 学 成 分 (%)										機 械 的 性 質				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	C. Eq	降伏点	引張強さ	伸び率	紋 理	2 V シャルピー (°C)
	0.22 以下	—	—	0.040 以下	0.040 以下	—	—	—	—	0.43 以下	>28 kgf/mm ²	>49 kgf/mm ²	>20 %	—	>2.8 kgf・m
1 A ・ 2 P	0.19	0.60	1.02	0.011	0.009	0.03	0.13	0.01		0.41	29.2	51.3	31.3	56.8	3.5
		0.61	1.05	0.013	0.012	0.06	0.14	0.02	—	0.42	32.5	52.3	39.7	65.7	5.7
4 A ・ 3 A	0.17	0.50	1.24	0.017	0.003	0.34	0.01	0.001	0.075	0.42	33	53	32	63	4.8
	0.18	0.58	1.26	0.019	0.006	0.42	0.03	0.002	0.080	0.43	35	54	33	68	6.8

分の清浄度が良く、また押湯効果が十分発揮できるように鑄込みを行ったので、偏析はほとんどなく、溶接に全く支障はなかった。

(4) 鑄造結果

1) 化学成分、機械的性質

表-4 に化学成分と機械的性質を示すが、規格を十分満足する結果が得られた。

2) 外観、寸法

鞍上型面に現れた砂かみ、ノロかみ等の小欠陥を溶接補修した後、磁粉探傷検査を行い、補修が完全であることを確認した。また、粗加工芯を基準に鑄込み後の主要寸法、鞍肉厚等の測定を行った。その測定値は所要精度以内に収まり、良好な結果が得られた。

3) 非破壊検査

粗加工後、下記検査を行った。

- ① 磁粉探傷検査 (以下MTと称す): 黒皮コーナー部および加工面全面
- ② 放射線透過試験 (以下RTと称す): 図-3 に示す位置
- ③ 超音波探傷試験 (以下UTと称す): 図-4 に示す位置

各サドルのRTの結果を表-5 に示す。鑄鍛鋼品製作基準³⁾では3級以上が合格となっているが、試験結果は一部に3級程度の砂かみ、ノロかみおよび線状引け巣があったもののこれ以外は2級以上と良好な結果

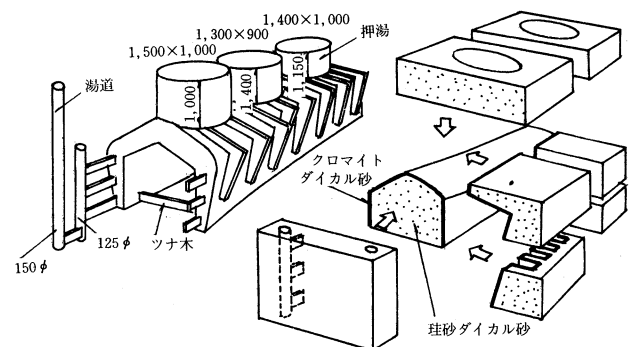


図-2 スプレーサドル方案図 (4 A)

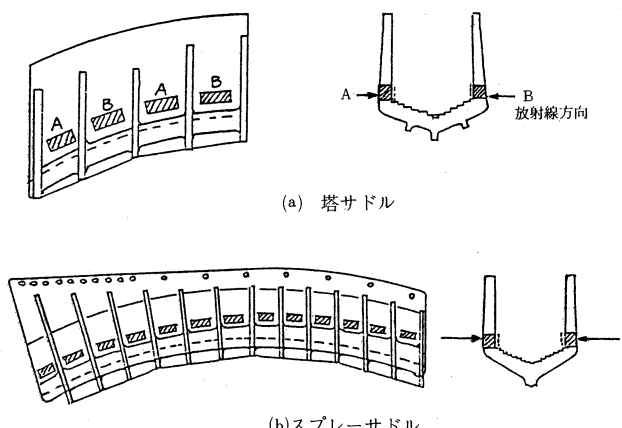


図-3 放射線透過試験撮影位置

が得られた。また、UT、MT
の検査結果も良好であった。

2.2 鋼板部の製作

(1) 溶接施工試験

溶接施工に先立って、重要な箇所であるスプレーサドルの鞍と中央リブ、中央リブと底板、塔サドルの側板と底板の溶接継手部について、溶接施工試験を行った。表-6に塔サドルの側板と底板の溶接性試験の要領と結果を示す。溶接部の機械的性質は母材以上あり施工要領として適切であると判断した。

(2) 溶 接

1) 組立手順

鋼板部には70~160mmの極厚板を使用しているので、溶接変形が生じた場合その修正はほとんど不可能である。さらに、リブ間隔が狭い格子構造になっているので、溶接時に大きな拘束応力が作用し、ラメラティア（層状割れ）が生じるおそれがある。そこで、製作工場の設備特性と考え合せて、溶接変形および溶接時の拘束度が小さくなるように、組立手順を決定した。1A、2P、4A、については剛性の大きい鞍本体に中央リブ、横リブを順次仮付けを行って大組した後、極力対称に溶接を行い、最後に底板を取りつけることにした。3Pについては、底板・中央リブおよび横リブを大組みしたのち、2分割されている左右のブロックの底板を抱き合せた状態で本溶接を行い、最後に鞍および側板を取りつける手順とした。

2) 使用鋼板

主要鋼板には SM50B を使用した。化学成分については溶接性を考慮し、スプレーサドル中央リブ

表-5 放射線透過試験結果

	2 P 塔 サドル						3 P 塔 サドル						1 A スプレーサドル						4 A スプレーサドル					
位 置	E			W			E			W			E			W			E			W		
撮影枚数	8			8			12			16			26			26			22			22		
等 級	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ブロー	2												1											
線引	1	3			2		4	5		4	2		3	6		8	5		5	3		10	8	1
樹枝													1		4									
砂か	5	2		4	2	12			12	4			11	5	4	11	9		12	10		13	9	

表-6 塔サドル側板×底板の継手性能試験

試験片採取要領

- ①継手引張試験片
継手側曲げ
- ②衝撃
- ③マクロ
- ④硬度
- ⑤削 除

①引張、側曲げ試験片の採取位置

②衝撃試験片の採取位置

継手部開先形状

() は 3 P

YM26×SF-1 (KW43×KB50)

試験結果

写真-1 継手部マクロ写真

写真-2 引張試験片破断状況

写真-3 側曲げ試験結果

機 械 的 性 質

	引 張 強 度 >50kg f/mm ²	破 断 位 置	曲 げ	衝 撃 位 置 >2.8kg f・m
2 P	54.8 55.1	底 板 母 材	良	12.4
3 P	53 53	底 板 母 材	良	17.6

材 (t=160mm) も含めた全ての極厚鋼板に対し、炭素当量を0.45以下に規定した。特に塔サドルの底板については、側板との溶接部に溶接時の大きな拘束応力が生じるうえに、ケーブル反力の大部分を受け持つ最重

要箇所である。そこで、底板にはラメラティアの発生を防止するために、イオウ含有量を0.008%以下に規制した鋼板を採用することにした。

3) 溶 接

塔サドルの底板と側板の溶接については、100mmの余長をつけ一層バタリングを行なったうえで、外側溶接を狭開先サブマージ溶接法で主として行い、内側溶接をCO₂溶接または手溶接で行った(図-5参照)。その他の部分の溶接は、CO₂溶接を主に手溶接を併用した。

開先は機械加工によって行い、溶接は反転を繰返して、可能な限り下向き溶接姿勢で行った。また、一部のサドルはローラー回転台を使用し、反転の作業性の改善をはかった。

溶接条件のうち予熱温度は150℃とし、特に厳しい管理を行った。

鋳鋼部の横リブと鋼板の横リブとの取合いは、鋳造時の配慮にもかかわらず、一部のリブで肌違いを生じたので、組立時にグラインダー等により修正を行った。

(3) 検査結果

1) 非破壊検査

溶接部全線に対してUTとMTを行い、さらに重要な溶接部に対してRTを行った。検査結果はいずれのサドルも鋳鍛鋼品製作基準を満足した良好な成績であった。

2) 寸法検査

塔サドルリブ間隔の測定結果を表-7に示すが、比較的良い精度で製作することができた。

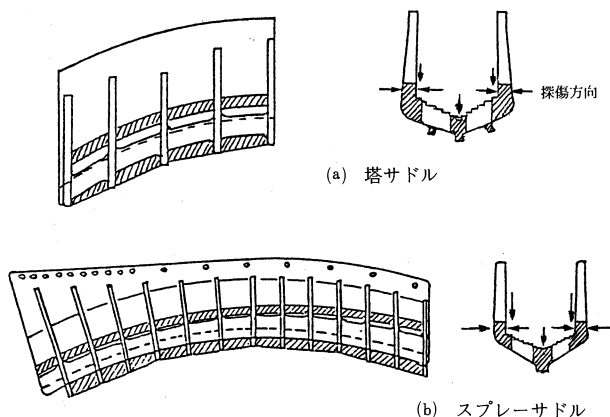


図-4 超音波探傷試験探傷範囲

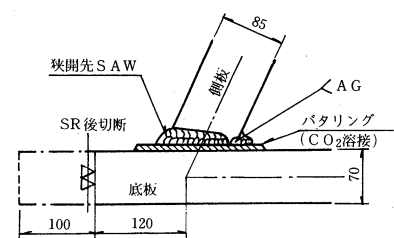


図-5 塔サドル(側板×底板)溶接方案

2.3 機械加工

(1) 加工方法

1) 鞍部の加工

スプレーサドルは、3次元の複合曲面を有するので、ストランド溝線の加工は、一般の平面加工に比べ格段に困難な作業である。1Aは大型横中ぐり盤に簡易NC装置を設置し、塔サドルのために設計した専用ターンテーブルと連動制御させて、所定の形状に加工した。4Aは大型5軸NCフライス盤で加工を行った。いずれの加工機においてもサドルが大重量で、さらにアンバランスな重量配分となっているので、加工機への設置誤差を少なくするとともに、回転テーブルの円滑な動きを得るために種々の工夫をこらした。また加工形状に応じたカッターや専用アタッチメントの使用によって、複雑な線形形状を高精度に仕上げることができた。ただし、大鳴門橋に比べ鞍溝が深く、ツールバーの固定部と刃先の距離が長いため、ビビリ気味の所や使用刃具では完成形状に加工不能な所もあり、最終の仕上げはグラインダーによって行った。

2) 底板部の加工

塔サドルについては塔柱頂板上面との当り率、スプレーサドルについては、ローラーとの当り率を向上させるため、平面度の許容値は0.2mm以内としているが、今後更に大型化した場合、その確保は困難なことが予想される。特に硬度がブリネル硬さH_B180以上のスプレーサドルの支承板面にその傾向が強かった。この原因は主に、カッターの温度が高くなるため生じるパス間の段差、バイトの磨耗による面粗度の劣化と考えられたので、バイトを自由に交換できる仕上げカッターの使用、およびミスト冷却(切削液を噴霧状にして加工熱を冷却する)等で面精度の確保をはかった。

二分割タイプの塔サドルの場合、一体に連結した後、鞍部の溝状は所定の線形に、また底板は段差のない一平面にする必要がある。したがって、鞍溝面、底板下面、分割面の3面の相対関係の精度確保に特に注意を払って、機械加工を行った。また、同時に分割面、底板下面には0.2mmのヌスミを設け、締付ボルト周辺の当り率の向上、および直接荷重伝達型サドルの力の伝達機能の向上をはかっている。図-6にヌスミを設けた箇所を示す。

表-7 塔サドルの主要寸法の製作精度

単位: mm

位 置	a	b	c	d	e	f	備 考
設計寸法	1180	770	780	800	1830	1830	
2 P	E -7.0 3.0	-4.5 -1.5	-4.0 0	-2.0 7.0	-6.5 -3.0	0 5.5	J I S B0412 鋳鋼品普通許容差の巾級を適用した場合の寸法許容差 a, b, c, d ≤ 8^{mm} e, f ≤ 14^{mm}
	W -6.0 2.0	-3.0 0	-2.0 4.5	0 3.0	2.5 4.5	-1.0 -7.0	
3 P	E 1.5 3.5	-0.5 1.0	0 0.5	1.5 3.0	-0.5 2.0	2.0 3.0	
	W 1.5 2.0	-2.0 -1.0	-2.0 0	1.0 2.0	2.5 4.5	0.5 2.5	

3) 支承板の単体加工および取付け

スプレーサドルの支承板の平面加工は平削盤とプラノミラーで行い、底板との当り面も0.05mm/mの平坦度許容値内に収まるように加工を行った。材質が比較的硬く、また板厚も20mmと薄いので、支承板に大波があるとカッターに押し込まれた状態で加工されるため、カッターが通過後元にもどる傾向がある。そこで、加工前にプレスで平坦度を3mm以下に矯正するとともに、さらに支承板を何度も反転しながら加工を行って、テーブルとの密着度が高まるように対処した。

支承板が取付く上下底板とは、SUS 309溶接棒を使用してシール溶接を行った。締め付けボルトは、全て接着材を塗布した後、締め付けを行って保持力の強化をはかった。

4) ローラーストッパー、ローラーずれ止めピンの加工および取付け

スプレーサドルの上下底板には、横ずれ防止用のローラーストッパーと、長手方向のずれ防止用のローラーずれ止めピンを取付けており、下記公差で加工を行った。

ローラーストッパー：

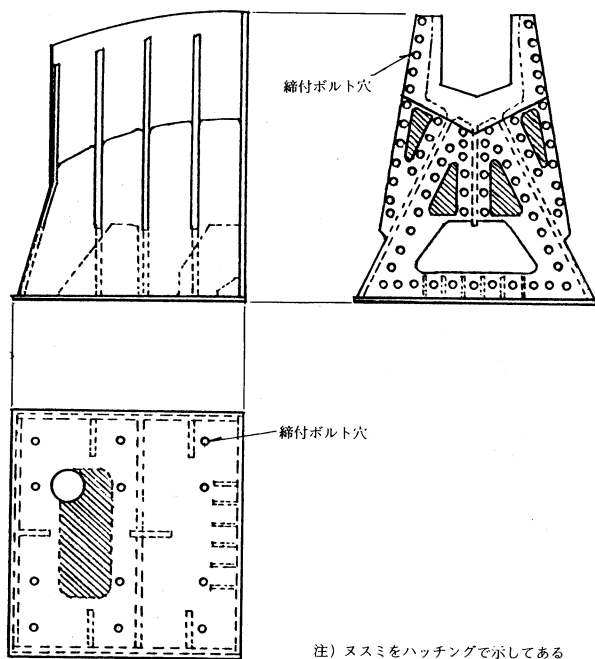


図-6 塔サドルのヌスミ図

溝巾78mm $\left(\begin{smallmatrix} +0.10 \\ +0.05 \end{smallmatrix} \right)$ キー巾78mm $\left(\begin{smallmatrix} -0.05 \\ -0.01 \end{smallmatrix} \right)$

ローラーずれ止めピン：

穴径50mm $\left(\begin{smallmatrix} +0.025 \\ 0 \end{smallmatrix} \right)$ 軸径50mm $\left(\begin{smallmatrix} +0.042 \\ +0.026 \end{smallmatrix} \right)$

取付けは、ローラーストッパーはボルト締めで、ローラーずれ止めピンは冷しばめにより固定した。

(2) 機械加工後の検査結果

1) 浸透探傷検査

機械加工を終了した鞍の内面について浸透探傷検査(PT)を行ったが、異常は認められず良好であった。

2) 外観、寸法検査

鍛鋼品製作基準に基づき、各部の検査を行った。鍛鋼品製作基準では肉厚許容値(一)の範囲が認められているが、強度部材であり十分な強度を確保する必要があるため、片側削り加工を行う鞍部、底板の肉厚については、鍛鋼の製作、鋼板の組立ての段階から常に(+)側になるよう施工した。ただ、(+)側の範囲内のみをねらった製作の場合、局所的に板厚許容値の上限をオーバーする箇所が生じたが、設計上、機能上支障がないものと判断し、許容値内への修正は行わなかった。表-8に主要部の製作精度を示す。

2.4 ローラーの製作

(1) 肉盛材質

支承板、ローラーは概ね大鳴門橋の仕様を踏襲したが、ローラー肉盛材は防蝕性を更に高めるため、13Cr-4Ni系ステンレスを採用し、肉盛厚は1A、4Aとも5mmとした。施工に先立って施工性試験を実施した結果、肉盛溶接後の応力除去焼鈍(SR)温度が高いほど靱性は増加していくが、600℃を多少越えても硬度分布は問題ないことが判明した。そこで母材(SF 55A)の焼戻しが600℃で行われていることを考慮し、上限温度を600℃としてSRを行った。

(2) 製作

炭素の含有量が多い母材に直接肉盛り溶接する場合、炭素の希釈により耐蝕性の劣化や遅れ割れの危険がある。また、母材から肉盛硬化部にかけてはなめらかな硬度変化が好ましい等の点から、図-7に示すような下、中盛りをはさんだ溶接を行った。

加工精度は真円度、円筒度とも：0.025mm、ベアー差

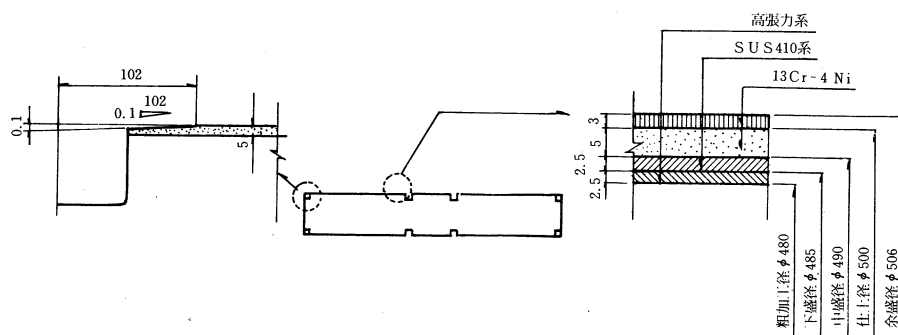


図-7 ローラー胴部肉盛断面図及び
ローラー端部処理

(1A24本、4A20本) : 0.05mmなどと、使用条件から厳しい許容値が設けられている。一方、長さ/直径の比が大きくしかも、欠円断面(○)の場合は、一般の円筒形状のローラーの研磨仕上げより精度確保が難しい傾向にある。そのため、3点支持の専用治具を使用することによってその問題点を解決し、許容精度内におさめることができた。表-8に結果を示す。また、ローラー部に発生する集中支圧を緩和するために、グラインダー研磨により長さ102mmの間で0.1mmの勾配をつけ逃げをとった。

ローラー部の長期防錆対策として、前に述べた高粘度グリースをローラー組立時に、支承板: 1mm、ローラー側面: 5mm厚で塗布した。

2.5 塗 装

(1) 下地処理

支承面を除いて全面サンドブラスト処理を行った。除錆度はSd2以上とした。

(2) 塗 装

- 1) 鞍溝内面、底板下面、分割部合せ面、ボルト座面は、エアスプレーで無機ジンクリッチペイント75 μ 一層塗りとした。
- 2) その他の面については、エアレススプレーでタールエポキシ90 μ を三層塗りとした。

2.6 梱包、輸送

1Aスプレーサドルは上沓と下沓を別々に架設(従来

の架設方法)するので下沓側は、下底板にローラー枠固定治具を取り付けて下底板とローラー、ローラー枠等を一体に梱包、輸送した。

4Aスプレーサドルは作動テスト完了後、そのまま治具で上下沓を一体に固定して梱包、輸送した。

3. 今後留意すべき問題点

サドルの製作について因島大橋、大鳴門橋サドルといくつかの経験を経てきており、本橋のサドルについては、そこで提起された課題に種々の検討を加えて製作に入った。しかし、従来の橋に比べ飛躍的に寸法が大きくなるとともに、また塔サドル自体の構造も大きく変更したため、それによって問題点もいくつか発生した。以下にこれらの問題点を列記し、今後のサドル製作の技術向上の資に供したいと思う。

(1) 鑄 造

本橋のサドルのような全長8mにも及ぶ鑄鋼の場合、種々の鑄造条件の違いによって生じるわずかな収縮率の差であっても、絶対値としては大きくなる。通常、16/1,000前後の伸尺が使用されるが、種々の条件で2~4/1,000のバラツキは十分あり得ることである。今回、鑄鋼鞍部本体に横リブを付けて鑄造したが、端部側のリブの寸法は鑄鋼品普通許容差の中級には入っても、組立精度のよい鋼板の組立てリブと溶接接合すると肌違いが出てくるために、修正が必要となるリブもあった。従っ

表-8 主要寸法の製作精度

項 目		許 容 差 (mm)		製 作 誤 差 の 最 大 値 (mm)					
		塔頂サドル	スプレーサドル	スプレーサドル		塔 サ ド ル		備 考	
				1 A	4 A	2 P	3 P		
く ら ら 溝	内 面 間 の 幅	± 2		1.9	0.4	−0.6	−0.5		
	各段の幅、深さ	± 1.0		巾 ±0.9 深 0.9	巾 ±0.8 深 0.6	巾 −0.6 深 0.5	巾 −0.3 深 ±0.2		
	側壁面の平面度	1 最大すきま 0.5mm/m		0.54 0.25/m	0.65 0.12/m	0.5 0.24/m	0.6 0.1/m		
	底 面 の 曲 面 度	理想円曲面に対するずれ 2 最大すきまは弦長 1 m当り 1.0		1.5 0.2/m	1.1 0.2/m	0.7 0.24/m	1.6 0.3/m		
	底溝線の真直度	1		0.63	0.69	0.6	0.45		
	スプレー部 側面の曲面度	—	底面の曲面度 に同じ	0.62 0.6/m	0.85 0.4/m	—	—		
く ら 肉 厚	上 端	—		7.0~19.6	3.0~22.5	4.6~16.0	10.0~16.5	製作範囲を示す	
下 コーナ付根	—		6.4~19.8	2.5~17.5	1.0~24.0	8.0~23.0			
底板平面度	上 底 板	全仕上面積 0.20 1 m当たり 0.05mm/m		0.20 0.05/m	0.15 0.05/m	0.14 0.05/m	0.05 0.03/m		
	下 底 板	—	上底板に同じ	0.05 0.04/m	0.06 0.04/m	—	—		
底板肉厚	上 底 板	—		1.9~11.1	1.5~7.0	0.9~6.0	2.4~5.5	製作範囲を示す	
ロ ー ラ	直 径	—	± 0.1	0.085	0.080	—	—		
	真 円 度	—	0.025	0.015	0.010	—	—		
	円 筒 度	—	0.025	0.020	0.015	—	—		
	ベ ア ー 径	—	0.05	0.045	0.03	—	—		
	真 直 度	—	0.05	0.03以下	0.03以下	—	—		

写真-4
2P塔サドル

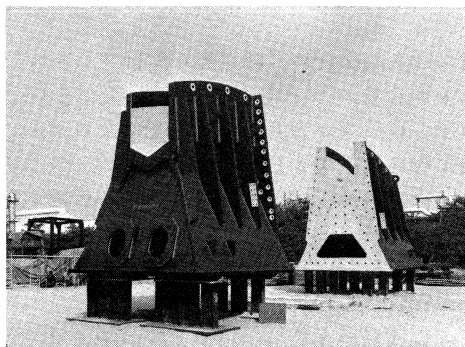
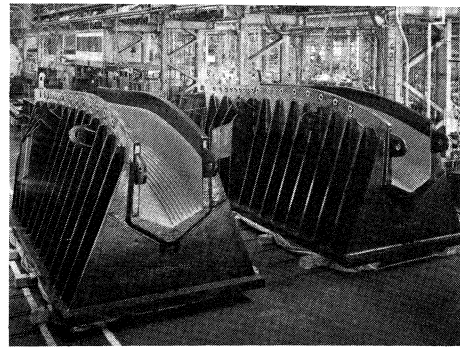


写真-5
1Aスプレー
サドル



て、今後は鞍溝本体のみ鋳鋼品とし、溶接開先を図-8のように鋳鋼鞍外面の座に移すことも考える必要がある。

(2) 鋼板組立

現在、溶接構造部分の寸法許容差は JIS B 0412 鋳鋼品普通許容差の中級が採用されているが、当基準は間接荷重伝達型サドルを想定して規格化されたもので、サドルが独立性の高い部材であることから考えれば当然なことである。しかし、今回の直接型塔サドルのように、ケーブル反力がサドルの側板、リブから塔柱の外壁、隔壁に直接線接触に近い状態で伝達される機構の場合、塔サドル、塔柱の相対する部材の位置のズレは上記許容差を適用するのでは（例えば、側板の場合、底板との交点位置は中央より 1,830mm であるから、±14mm まで許される）、本来の設計意図を逸脱する場合も考えられる。今回の塔サドル完成後の精度（表-7 参照）はそれに十分対応できるものであった。しかしながら、今後直接荷重伝達型サドルを製作する場合は、現行基準をそのまま適用すると矛盾があるので、個々の橋に応じ精度を検討する必要がある。

(3) 機械加工

サドルが大型化した場合、2.3(2)に述べたように、片側削り加工部分の肉厚については、現行の基準内の精

度に収めるのが困難な箇所が生じてきている。そのため、現行基準の板厚に応じた肉厚の普通許容差の精度を、設計上、機能上問題がない限りは、部材の大きさも加味した基準に変更する必要があると思われる。

(4) その他

海峡部の腐蝕環境が予想以上に厳しいことが指摘され、ステンレス材についても架設後わずかな時間で錆を生じていることが大鳴門橋サドルの製作実績から報告されている。本橋のサドルでは、ローラー肉盛材質を SUS 410 Modified として 13Cr-4Ni 系を使用し、さらに離油度の高い高粘度グリースを塗布し、防蝕性の向上を期した。しかし、上下支承板の材質については SUS 410 のままのため、今後の追跡調査で腐蝕が見うけられるようなことがある場合は、ローラー肉盛材質と同水準の材質の採用を検討する必要がある。

4. あとがき

北備讃瀬戸大橋のケーブルサドルの製作は、詳細設計が完了した昭和58年4月から59年11月にかけて実施した。本橋に用いられるケーブルサドルは、従来のサドルに比べ格段に大型化しているが、それに対応した鋳造、組立、溶接施工法と加工機の検討の改造を行って、品質、精度とも十分なものが製作された。特に塔サドルとしては今回初めて2分割結合の直接荷重伝達型構造を採用し、大型鋳鋼と極厚鋼板との格子構造溶接が成功裏に製作出来た技術的価値は大きいものがある。この間に生じたいくつかの反省点、技術的課題が今後のケーブルサドルの製作に参考になれば幸いである。完成したケーブルサドルを写真-4、5に示す。

最後に前担当者である馬場賢三氏（三建計画課長）、吉元郁男氏（三建維持課）及び、製作に携わられた新日鉄、川鉄共同企業体の方々、また、関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 馬場、成井、吉元：北備讃瀬戸大橋ケーブルサドルの設計 本四技報 No.28,30 1984年4月, 7月
- 2) 鈴木周一：大鳴門橋ケーブルサドルの製作 本四技報 No.26 1983年10月
- 3) 鋳鍛鋼品製作基準同解説 本四公団 昭和55年3月

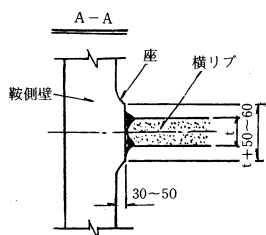
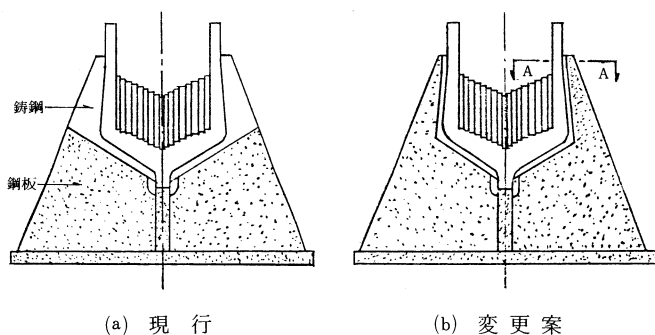


図-8 横リブ開先位置の変更

大振幅による大鳴門橋振動実験実施される

大鳴門橋の振動特性を明らかにするために、大振幅による振動実験が昭和60年5月10日から約2週間にわたって実施された。

今回の実験は、大型起振機で補剛桁を大振幅（片振幅約15cm）で上下に強制的に振動させ、自由減衰振動から固有振動数や構造減衰率等の振動特性を把握したもので、実験は曲げおよび捩れの振動について行われた。

実験結果については、現在解析中であるが捩れの構造減衰率は風洞実験で設定している値（ $\delta=0.03$ ）をほぼ満足する値が得られた。

本実験に使用した起振機は、既存の起振機では長周期で大振幅の振動実験が行えないために、新しく長周期用大型起振機（幅6.1m、長さ7m、高さ6.3m）を開発製作したものである。現段階での起振機の主な仕様は以下に示すとおりであるが、重錘ストロークを0.16mに改造することにより最大周波数2Hzまで可能な設計となっている。なお、本起振機は分解して因島大橋の1Aアンカレッジに保管され、次橋での出番を待っている。

- | | |
|-----------|-------------------|
| ① 起振周波数 | 0.1Hz～0.6Hz（連続） |
| ② 発生波型 | 近似正弦波 |
| ③ 起振力 | 最大20,000kg |
| ④ 重錘ストローク | ±0.500m |
| ⑤ 重錘重量 | 7～33ton |
| ⑥ 起振機重量 | 82ton（重錘33tonを含む） |



児島・坂出ルート海峡部橋梁上部工工事の現況

下津井瀬戸大橋、南北備讃瀬戸大橋の吊橋は、主塔の架設が3月末に全て完了し、現在ケーブル工事の作業段階に入り、櫃石島橋、岩黒島橋の斜張橋は、現在2橋とも上部工の架設の段階に入っている。

下津井瀬戸大橋は、昨年11月にルートで初めてのパイロットロープの渡海作業を世界初の航路閉鎖を伴わない大型クレーン船を用いて実施し、キャットウォーク床組架設台車を用いて中央径間中央及び橋台側より架設し、完成したキャットウォーク床組の上を6月4日から直径5.37mmの素線をスピニングホイール（移動式滑車）で引き出しを開始し、本四公団では下津井瀬戸大橋だけに採用された「エアスピニング工法」によるメインケーブルの架設作業が始まった。今後は架設のピッチを上げ来年度2月ごろに素線の架設を完了させる予定である。

北備讃瀬戸大橋では、昨年主塔が完成し、共用橋台の4Aも本年2月に気中コンクリートの最終打設を行い、パイロットロープの渡海の準備作業を随時進め、3月30

日に巨大船を含めて数百隻が航行する備讃国際航路を午前9時にタグボート6隻にひかれたクレーン船でパイロットロープが海面上65m以上にたれ下がらないよう慎重に与島側主塔2Pから南進し、約50分で南側主塔に接岸、係留の後、迎えロープと連結し仮固定された。6月現在、キャットウォーク設備の架設を実施しており、今後、直径6.7cmのストランド234本を束ねる主ケーブル工事を10月ごろに始める予定である。

南備讃瀬戸大橋は、吊橋3橋の中では一番おくれており、7月26日にパイロットロープの渡海を実施するための準備作業等を進めている。

上部工架設が先行している岩黒島橋2Pは、昨年6月に10パネルの大ブロックに組立てられた主桁を3,000トン吊クレーン船2隻で一括架設し、その後、10パネル上に設置されたトラベラークレーンで塔柱ブロックを1段ごとに積み重ねて昨年12月27日に塔最上部の25段目を架設完了し、桁架設に移っている。3Pは6パネル主桁大ブロックを昨年12月に架設を開始し、6月18日架設を完了した。岩黒島橋では最後の12パネル主桁大ブロックの架設を7月下旬に予定している。なお、ケーブルと同時に行う中央径間の張り出し架設は来年1月以降に着手する予定である。

櫃石島橋では、4月に下部工工事が完了し、5月29日・30日は2P・3Pそれぞれの塔柱1段の据付を完了させ、ルートに架かる三つの吊橋、二つの斜張橋で一番最後の主塔架設工事がスタートしたことになる。その後6月10日、6月14日に2P・3Pの塔下部大ブロック架設を実施しており、今年度中を目度塔柱ブロックの組立作業を進めていく予定である。

大島大橋塔架設完了

大島大橋6P塔頂最後の水平材が5月21日に閉合した。これで、主塔の架設は、59年8月4日に5P第1段の架設を開始して以来、約10か月の工期と、約22億円の工費（製作費約12億円を含む）を用いて完了した。

塔の架設方法は、底板と第1段を100t吊F.Cで、第2、3段を300t吊F.Cで架設し、第4～14段（全14段）と塔頂サドル及び塔頂クレーンはクリーパークレーンで架設された。

大島大橋は、伯方島と大島の間に見近島を挟む宮窪瀬戸東部にあり、吊橋延長が840mの単径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋（側径間部は4径間連続プレートガーダー）で、中央径間長560m、側径間長140mである。

塔の特徴として、大島大橋の附近一帯が瀬戸内海国立公園第二種特別地域に指定されるため、主塔の形状については自然景観との調和がはかられ、塔頂部分を化粧外板で蓋い、上面が空に向かって緩やかな曲線を描く2層ラーメンの斜塔形式が採用された。

塔の主要諸元は、鉛直高寸法が88.350m、塔柱間隔が塔頂部で22.500m、塔基部で25.500m、塔柱断面は矩形をしており、塔頂部で4.3m×3.3m、塔基部で3.2m×3.3m、1塔当りの銅重が1,209tである。

なお、現在はケーブル架設工事を準備中で、10月頃にはパイロットロープの渡海を行う予定である。

本四公団の基準類

本四公団で現在適用している基準類は以下のとおりです。
*印のものは(財)海洋架橋調査会(Tel 03-436-3896)で販売しております。

仕様書・要領等

- *土木工事共通仕様書(改訂版) 昭和59年8月
- *測量・調査・設計等共通仕様書 昭和56年12月
- *電気通信施設標準仕様書
- *施工管理試験要領 昭和54年11月
(昭和56年4月追補)
- 測量作業規程 昭和55年度
- 図面作成要領 昭和46年12月
- *技術関係資料取扱要領・技術関係資料
マイクロフィルム作成等事務処理要領 昭和56年4月
- 海上工事安全施工技術指針 昭和52年3月
- *溶接構造部材における溶接欠陥と疲労
き裂の発生の一例(写真集) 昭和58年1月

設計基準類

- 海峡部における道路の建築限界および
幅員構成 昭和47年10月
- 用語と定義 昭和48年5月
- *上部構造設計基準・同解説 昭和55年6月
- *下部構造設計基準・同解説 昭和52年3月
- *耐震設計基準・同解説 昭和52年3月
- *耐風設計基準(1976)・同解説 昭和51年3月
- *鋼橋等製作基準・同解説 昭和52年3月
- *鍛造鋼品製作基準・同解説 昭和55年3月
- *鋼橋等塗装基準・同解説 昭和55年3月
- *橋面舗装基準(案) 昭和58年4月
- 橋梁用マスコンクリート施工基準・
同解説(案) 昭和50年3月
- *仮設物設計指針 昭和52年3月
- 吊橋リンク・支承構造設計指針 昭和51年3月
- *トラス格点構造設計指針(案) 昭和51年3月
- 鉄骨鉄筋コンクリート構造設計指針・
同解説 昭和52年8月
- 耐震設計要領 昭和52年3月
- 吊橋主塔設計要領(案) 昭和55年3月
- *吊橋主塔の塔頂補強構造解析要領(案) 昭和52年3月
- ケーブルバンド設計要領 昭和53年3月
- ハンガー設計要領 昭和53年3月
- *鋼床版設計要領 昭和53年3月
- *鋼床版現場溶接施工基準(案) 昭和53年3月
- *風洞試験要領(1980)・同解説 昭和55年6月
- 鋼上部構造用鋼材選定要領(案) 昭和48年9月
- *鋼橋直結軌道および緩衝桁軌道伸縮装
置設計要領・同解説 昭和59年3月
- 重力式直接基礎アンカレッジ設計要領
(案)・同解説 昭和55年3月
- *鋼設置ケーソン設計要領(案) 昭和54年2月
- 多室型緩衝工の設計要領(案) 昭和55年3月
- 複合材型緩衝工の設計要領(案) 昭和56年3月
- 大型鉄骨鉄筋コンクリート橋脚設計要
領・同解説(案) 昭和54年11月
- 風化花崗岩の支持特性判定要領(案) 昭和55年3月
- 陸上部道路橋設計要領(案) 昭和51年11月
- ケーブルアンカーの設計マニュアル 昭和49年2月

下路管理路設計マニュアル

鉄道床組の標準図作成

- *鋼材規格 昭和53年9月
- 鋼上部構造用鋼板規格の解説 昭和57年10月
- 摩擦接合用防錆処理高力ボルト・六角
ナット・平座金のセット暫定規格 昭和53年10月
- *ケーブル材料規格 昭和54年6月
- *塗料規格 昭和55年3月
- リンク支承用ピン(案) 昭和51年3月
- リンク支承用ブッシュ(案) 昭和51年3月
- 設計関係通知文書集(昭和56~58年度) 昭和59年3月

本四技報編集委員会名簿(アイウエオ順)

編集委員長	杉田秀夫			
編集委員	岩屋勝司	上田克己		
	榎沢寛	加藤茂		
	阪本謙二	庄司吉美		
	下村稔	鈴木朗		
	田島照義	田中秀也		
	千々岩敏弼	手島茂富		
	成田秀志	福井幸夫		
	宮沢修二	村田正信		
	森田行	山下義之		
	湯谷優	渡辺忠明		
	小暮三郎	(海洋架橋調査会)		

本四技報 第34号

発行 昭和60年7月15日
監修 本州四国連絡橋公団
発行所 財団法人海洋架橋調査会
東京都港区虎ノ門4丁目3番20号
第22森ビル 〒105
電話03(436)-3896
発行者 井上義光
印刷 中井編集デザイン事務所

定価 1,900円

PUBLISHED BY BRIDGE & OFFSHORE ENGINEERING ASSOCIATION

