

ISSN 0912-6953

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.15 No.60 '91.10

本州四国連絡橋公団監修

APPROVED BY HONSHU-SHIKOKU BRIDGE AUTHORITY

本四技報 第60号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.60

「共生・協調」の重視へ……………副総裁 A Focus on Harmony and Collaboration	杉岡 浩… 1
本州四国連絡橋におけるFEM解析の適用事例……………設計部 設計第二課 Applications of FEM Analysis of Honshu- Shikoku Bridge Designs	奥川 淳志… 2 高城 信彦 山口 和範
第三建設局 今治工事事務所 (前)設計部 設計第二課 同 上	
長大橋梁の維持管理……………維持施設部 橋梁技術課 Maintenance and Administration of Long- Span Bridges	糸日谷 淑光…11
明石海峡大橋大型風洞試験全橋模型……………設計部 設計第一課 Modeling of the full Aeroelastic Model of the Akashi-Kaikyo Bridge with a Geometrical Scale of 1/100	保田 雅彦…20 鈴木 周一 勝地 弘
同 上	
明石海峡大橋1Aアンカレイジ基礎の設計・施工……………第一建設局 建設部 (その2) Design and Construction of Foundation of Akashi-Kaikyo Bridge 1A Anchorage	加島 聰…27 佐野 幸洋
企画開発部 審議役 (前)第一建設局 垂水工事事務所	
チュニジア国を訪ねて……………企画開発部 企画課 Visiting Tunisia	森谷 俊美…44
技術ニュース……………46 The Latest Information	

※本四技報総目次前回掲載：第55号, 次回掲載予定：第65号

本四技報 第61号 (4.1) 掲載予定

- ・鋼床版現場継手と皿ボルト
- ・塗装基準改正概要
- ・ケーブル防食法の検討
- ・尾道大橋塗装工事
- ・因島大橋塗膜調査
- ・多々羅大橋海峡部地質調査



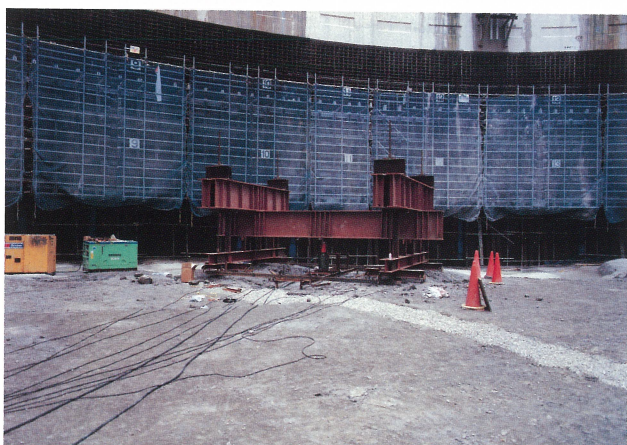
舞子トンネル準備工事（その2）

（3年8月）



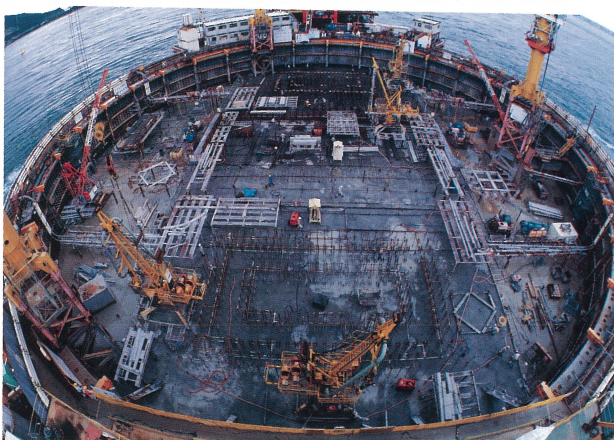
舞子高架橋下部工試験工事

（3年8月）



明石海峡大橋1A下部工（その2）工事（支持力試験）

（3年8月）



明石海峡大橋3P下部工気中コンクリート工事

（3年8月）



明石海峡大橋3P主塔工事（塔柱横仮組立）

（3年8月）



明石海峡大橋4A下部工（その2）工事（アースアンカー施工状況）

（3年8月）



福江地区防災工事全景

(3年8月)



福江地区防災工事アンカー工

(3年8月)



坂出IC二期工事全景

(3年8月)



坂出IC本線料金所施設工事

(3年8月)



生口橋全景 橋面舗装（ゲースアスファルトコンクリート工）施工状況

(3年9月)



生口橋橋面舗装（研掃工及び接着層工）
施工状況

(3年8月)



洲江側陸上部施工状況（生口橋3P塔頂より）

(3年8月)



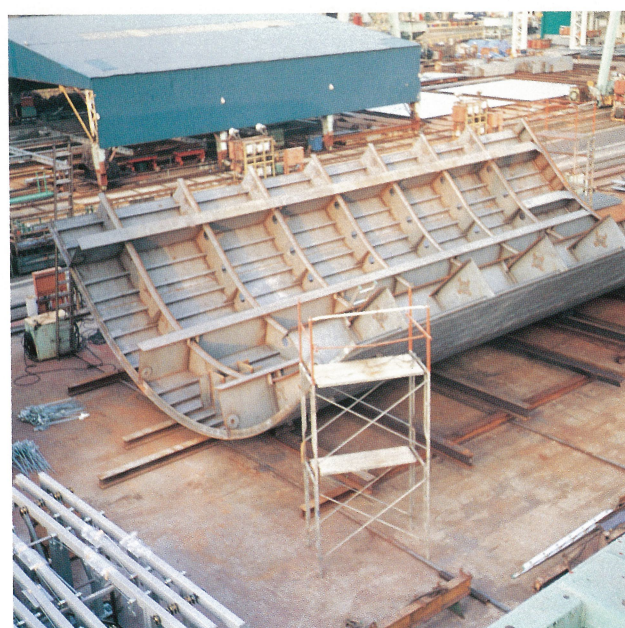
来島大橋8P作業足場施工状況

(3年8月)



馬島北棧橋施工状況

(3年8月)

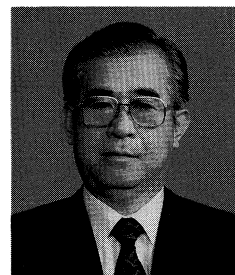


来島大橋4A鋼ケーソン工事 外周壁（下段）ブロック組立状況

(3年8月)

「共生・協調」の重視へ

A Focus on Harmony and Collaboration



副総裁 杉岡 浩

Hiroshi Sugioka

平成3年度の建設白書は、あと10年に迫った21世紀に向けて新たな生活空間を創造していくためには、均衡のとれた国土利用を実現していくことを基本として押えつつ、住宅・社会資本を計画的に整備していくことが必要であるとしている。

このため、昨年決定された「公共投資基本計画」(1991年度から10ケ年で430兆円の投資規模)に沿った着実な住宅・社会資本整備により、「2000年に向けた新たな生活空間の創造」を図ることが、今回の建設白書の基本的な柱となっている。

白書はさらに、新たな生活空間の創造に向けての基本認識と基本課題を次のように記述している。

「基本認識」は、次の3つを掲げている。

- ① 身の回りから国土基盤に至る豊かな生活環境の創造 一般に身近だといわれる公園、下水道のみならず、我々の生活を支える治水、高規格道路なども広域的な基盤として豊かな生活の実現のために必要不可欠である。
- ② 「共生・協調」の重視へ これからは分野を超えた、総合的な視点から仕事をしていかなくてはならないということで、今回の白書のキーワードとしている。具体的には、自然や文化との調和、地域間のネットワーク、国・地方公共団体等の協調、産官学のパートナーシップ、公共・民間の協調等、「共生・協調」の視点に立って社会資本整備を進める必要がある。
- ③ 地球環境問題への対応 21世紀に快適な生活空間を創造するためには、都市の緑化、自動車交通対策等が必要であり、地球環境問題への対応が重要となる。

次に、「基本課題」は6項目を掲げている。

- ① 国土の均衡ある利用の推進(交流ネットワークの強化による地方圏の戦略的整備)
- ② 住宅・社会資本の計画的整備
- ③ 都市計画制度の充実
- ④ 大都市地域における住宅・宅地の供給
- ⑤ 生活空間の創造を担う建設産業、不動産業
- ⑥ よりよい生活空間を支える建設技術

白書が、21世紀に向けて新たな生活空間創造のため重点的に取り組むべき政策課題の一つに、建設技術の推進を掲げていることは注目される。建設労働需給の引き締め、地球環境問題への対応、住宅・社会資本ストックの維持管理制度などを背景として、建設技術開発の役割が一段と高まっている。また、今後の社会的、経済的な変化を踏まえ、2000年に向けて新たな生活空間を創造し

ていくためには、建設技術開発に対する一層の取り組みが必要であると建設白書は記述している。

本四架橋事業は、まさに建設白書にいう「2000年に向けた新たな生活空間の創造」のための事業であり、公共投資基本計画の最重要事業の一つである。「基本認識」でいう「身の回りから国土基盤に至る豊かな生活環境の創造」のための事業である。そこで、本四架橋事業を進めるうえにおいて、我々が留意しなければならないのは、「共生・協調」の重視である。自然景観、都市景観との調和、自然公園、国営公園、都市公園、リゾート開発等と一体となった道路整備、また整備に当っては、地域公共団体等との密接な協調、産官学のパートナーシップ等建設白書のキーワード「共生・協調」は、本四公団の事業遂行に当って、まさにぴったりのものである。当然我々はそれらの点について留意して来たところであり、また今後も積極的に配慮していくことが必要である。

建設白書は基本的課題の一つとして、「よりよい生活空間を支える建設技術」を掲げているが、本四架橋事業は世紀の大事業として、その技術は内外に注目されているところである。本四架橋事業は他に例を見ることが出来ない大規模な事業であり、現地においては、日々新しい技術、工法に挑戦しつつ事業を進めている。本四公団において新しく開発された長大橋の技術は数多くある。これは本四公団でなければ持ち得ない技術であろう。この開発された長大橋の技術は、今後散逸することなく蓄積され、将来のわが国の長大橋建設のために、いや世界の長大橋建設のために役立つよう努めることが本四公団に課せられている重要な役割といえよう。公団は本州と四国の間に連絡橋を建設し、管理することにより、本州四国間の交通の円滑化を図ることを目的とするが、この長大橋の建設を通じて、長大橋技術を開発し、その技術を蓄積し、さらにその技術が内外に活用されるようにすることこそ、技術立国日本として重要な課題といえよう。

最近、ある生命保険会社が日本の橋ベスト10を発表した。瀬戸大橋が1位となったのは当たり前といえば当たり前だが、近代技術の粋に対する賞賛に加えて、自然景観との調和、地域開発への貢献、与島PA等「走って楽しい道路」の建設への配慮等、「共生・協調」の重視の結果であると確信している。

本州四国連絡橋における FEM 解析の適用事例

Applications of FEM Analysis of Honshu – Shikoku Bridge Designs

設 計 部 設 計 第 二 課 長 奥 川 淳 志
Atushi Okukawa

今治工事事務所 第 二 工 事 長 高 城 信 彦
(前) 設 計 部 設 計 第 二 課 長 代 理 Nobuhiko Takagi

設 計 部 設 計 第 二 課 山 口 和 範
Kazunori Yamaguti

概 要

これまで本州四国連絡橋公団において鋼上部構造に FEM 解析を適用した事例の調査結果を取まとめ、FEM 解析を行う目的、FEM 解析結果の評価法、モデル化の手法 (要素の種類、要素によるモデル化、要素分割、境界条件の設定) 等について整理し全体の傾向について記述した。

なお、理解を深めるため、塔頂部構造およびタワーリンク部については北備讃瀬戸大橋および下津井瀬戸大橋の事例を、また、支承部については与島橋の事例を示した。

1. まえがき

近年、コンピューターの長足の進歩、また、NASTRAN, SAP, FINAL 等の便利な FEM (有限要素法) の汎用ソフトの普及により様々な鋼構造物の応力解析に積極的に FEM 解析が適用されている。

本州四国連絡橋公団の設計基準においても、吊橋主塔設計要領、吊橋主塔の塔頂補強構造解析要領 (案)、重力式直接基礎アンカレイジ設計要領 (案)、吊橋及び斜張橋の塔基礎設計要領 (案) (二建内規) では、FEM 解析の適用を原則にしているか、もしくは推奨され、FEM 解析に関する規定が設けられている。またそれ以外にも応力集中部および応力の流れの複雑な部所に対して FEM 解析が適用されている。

FEM 解析は解析の対象物を離散化モデルにモデル化し解析を行う手法であるが、現在様々な要素、また、適用の手法が開発されており、要素分割の程度、境界条件の選定まで考えると一つの構造ディテールに対してさえも

様々なモデル化が考えられる。また、FEM 解析を行う目的も様々で、これによってモデル化および解析結果の評価法なども違ってくる。そこで、これまで本州四国連絡橋公団で行われてきた FEM 解析の現状を把握するため、平成元年度に表-1 に示す構造ディテールに対して FEM 解析の実態調査を行った。

本報告は FEM 解析の実態調査を分類整理した結果を述べるものである。

2. FEM 解析の適用の目的

FEM を適用する主な目的は①応力の流れの把握、②複雑な境界条件を持つ構造ディテールの応力の解析であるが、設計という観点から考えると I) 応力照査、II) 構造部材の形状の決定、III) 設計定数の決定が考えられ、今回調査した本州四国連絡橋公団の実例では複数の目的を兼ねて FEM 解析が行われていた事例が多かった。

I) 応力照査

FEM 解析を行うことにより必要とする評価対象応力を比較的正確に把握できるため、応力照査を目的に FEM 解析が適用されたことが多く、FEM 解析の適用事例では主に主応力、方向応力、Von Mises の相当応力等の対象応力に着目して応力評価を行っていた。

また、FEM 解析により解析された評価対象応力に対する許容値の考え方は現在のところ明確に示されていない。参考のために表-2 に FEM 解析の適用事例における対象荷重および評価対象応力とこれに対して採用された許容値の件数の総括表を示す。

II) 構造部材の形状の決定

フィレット部、ブラケット部等の断面の急変部の部材の形状を通常 2 つもしくは 3 つの構造形状に対して FEM 解析を行い最適な形状を選択している。このとき、よく適用される手法としてズームアップの手法が用いられていた。

III) 設計定数の決定

表-1 構造ディテール別集計

構造ディテール	件 数	シェア (%)
① 塔頂部補強構造 (サドル含む)	4	7.3
② 塔柱ケーブル定着部	6	10.9
③ 塔柱断面変化部	3	5.5
④ 塔水平材ラーメン隅角部	2	3.6
⑤ 塔柱マンホール	1	1.8
⑥ タワーリンク、エンドリンク関連	6	10.9
⑦ 塔基部構造、(橋脚コンクリート含む)	8	14.5
⑧ 主橋上・下弦材	3	5.5
⑨ 主橋斜材連結部	1	1.8
⑩ 主橋トラス上・下弦材 (中間支点、端支点)	4	7.3
⑪ 主橋ハンガー取付部関連	5	9.1
⑫ 主橋トラスピンプレート (中間支点)	4	7.3
⑬ 主桁側ケーブル定着部	2	3.6
⑭ 主桁構造 (複合桁・箱桁)	3	5.5
⑮ 可動支承	2	3.6
⑯ ケーブルアンカー・フレーム吊環部	1	1.8
合 計	55	100.0

表-2 本州四国連絡橋公団におけるFEM解析結果の評価

対象荷重 評価対象応力 許容値		常時静荷重				暴風時荷重		地震時荷重				最大鉛直荷重等				最大ケーブル張力等			単位荷重				列車被荷重		その他	
		主 応 力	Von Mises の 相 当 応 力	方 向 応 力	そ の 他	主 応 力	Von Mises の 相 当 応 力	主 応 力	方 向 応 力	そ の 他	主 応 力	Von Mises の 相 当 応 力	Tie- force の 相 当 応 力	主 応 力	Von Mises の 相 当 応 力	方 向 応 力	主 応 力	Von Mises の 相 当 応 力	方 向 応 力	主 応 力	主 応 力	主 応 力	主 応 力	方 向 応 力		
降 伏 点 強 度 σ_y 基 準	0.588 σ_y (1/1.7 σ_y)	11		5	2						1					2	1					1	1			
	0.647 σ_y (1.1/1.7 σ_y)	2	2	1			1					1	1													
	0.677 σ_y (1.15/1.7 σ_y)			1																						
	0.706 σ_y (1.2/1.7 σ_y)	1		1							1	2			1											
	0.8 σ_y	2	2	2							1								2							
	0.882 σ_y (1.5/1.7 σ_y)																					1				
そ の 他	σ_y	3		2			3		2										2							
	許容せん断応力 τ_s			1																						
疲労許容応力度																					1					
そ の 他	コンクリートの支圧応力度等			1	2					1		1										1	1			
	応力分布等	3		4	4	2		1		1				1			2	2					1			

注) 方向応力は、鉛直応力、水平応力、せん断応力を指す。その他は、縁応力、支圧応力度等を指す。単位荷重のうち、2件は照査は暴風時を対象としている。

応力集中係数、有効幅の決定、また、設計式の妥当性の確認等に適用される。例えば斜張橋の桁の応力集中係数、有効幅の決定に適用されていた。

3. FEM解析のモデル化手法^{1), 2), 3)}

FEM解析を適用する場合、要素の種類、要素分割の方法、境界条件の設定の方法等の様々な組合せの中から最適なものを選定して構造ディテールをモデル化する必要がある。しかしながら、個々の問題に対してFEM解析をバラバラに適用している例が多く、モデル化手法に明確な思想が与えられていない。そこで、FEM解析の実態調査の結果をⅠ) 要素の種類、Ⅱ) 構造部材のモデル化、Ⅲ) 要素分割、Ⅳ) 境界条件の設定等に分けて整理し、その傾向について考察を行った。

Ⅰ) 要素の種類

FEM解析の実態調査の結果によると、主に表-3に示す要素が用いられていた。その内、平面三角形要素、平面四角形要素、シェル要素が多く用いられていたが、平面三角形要素は要素内応力一定の要素であり応力変化が大きい部所では避けるべき要素で、むしろ、要素内応力が線形的に変化する平面四角要素を用いる方がよい。また、同様の理由で要素分割数を多く取るよりは、変位関数の次元の高い要素を用いた方が解析の精度が高くなることが知られている。しかしながら、このような高次の変形関数を持つ要素は一般的でない場合や、入力の手間がかかる、また、出力結果の評価が経験を積まないと難しいなどの欠点があり、このようなメリット、デメリットを考慮して要素の選択をする必要がある。

Ⅱ) 要素によるモデル化

塔頂部、塔基部、斜張橋ケーブル定着部、格点交差部、BOX桁等は様々な部材(ビーム材、平板、曲板、開口板、スチフナ材等)により複雑に構成されている。また、応力の流れが非常に複雑で面外曲げなどを考慮すべき構造ディテールもある。このように複雑な構造ディテールに対して、FEM解析の適用事例では、面外応力を考慮しな

表-3 要素特性

要 素	特 徴	適用する部材の次元
① トラス要素	軸圧縮、引張のみを表現できる要素	1
② はり要素	軸圧縮、引張に加え、曲げを表現できる要素	1
③ 平面要素	平面内の変形を表現でき、平面解析に用いる要素で、三角形、四角形(長方形)要素に分類出来る。	2
④ 板曲げ要素	曲げとねじりを表現でき、面外方向の荷重に対して用いられる。	3
⑤ シェル要素	曲面板(平面板も含む)で構成される構造の解析に用いられる。	3
⑥ ソリッド要素	3次元のすべての変位を表現できる要素	3
⑦ アイソパラメトリック要素(特殊要素)	個々の要素内での変位分布を仮定する変位関数と形状を近似する関数が一致している要素である。	

ければならない部分に対して面外応力を考慮できるより自由度の大きい要素を用い、それ以外の部分に対してはより簡単な要素を用い、数種類の要素で構成されたモデルで解析を行っている例が多かった。また、曲面に対しては一般にシェル要素、アイソパラメトリック要素等でモデル化し解析を行っている。

一般に鋼構造部材は多数のスチフナで補剛されているのが普通であるが、FEM解析の適用事例では補剛材の影響を主に以下の3つの内のいずれかの手法で評価していた。

- 1) 母材と同じ要素を用いてモデル化(図-1参照)
- 2) 母材の要素の中に換算断面積、換算断面2次モーメントとしてその影響を取り込む
- 3) 棒部材としてモデル化(図-1参照)

1) 3) の手法は塔壁のスチフナのように寸法が大きく、面外方向の影響を取り入れて解析をする必要がある場合、2) はスチフナの影響がそれほど大きくない場合もしくは平面モデルとして解析をする場合に適用されていた。また、3) の手法でも平面モデルに対して適用可能であり、2) および3) の手法の明確な使い分けはされていない。

Ⅲ) 要素分割

部材の形状の急変点、部材の交差部等の応力の急変点では要素を細かく分割されており、一般に離散化誤差を均等にするという意味から要素間の応力差が均等になるような要素分割が望ましいと考えられている。ただし、要素の大きさが急変するような分割は避けるべきである。また、FEM解析では要素間の力の伝達は要素節点のみで行われているという仮定の基に解析がされていることを考

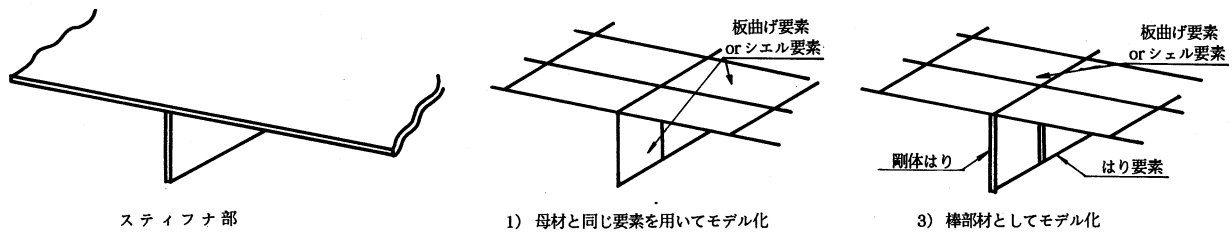


図-1 スティフナのモデル化

われているという仮定の基に解析がされていることを考慮して要素分割をすることが肝要である。

IV) 境界条件の設定

FEM解析の適用事例ではモデル化する構造ディテールに対称性があると認められる場合には1/2モデル、1/4モデルを用いてより簡略化したモデルで解析を行っている。この時の境界条件は一般に図-2のように設定されていた。また、モデル化は境界条件が明確な位置を含めて行うのが望ましい。例えば、塔頂部の解析では塔頂サドルから伝達された応力が塔壁で一定になる位置までモデル化をしている。

V) その他

① 平面モデルと立体モデル

FEM解析の実態調査の結果によると表-4に示しているようにほとんどが弾性FEM解析で、そのうち約4:6の割合で平面モデルによるFEM解析と立体モデルによるFEM解析を行っていた。

平面モデルは奥行き方向の影響を換算断面積、換算断面2次モーメントもしくは棒部材として取り入れているので、一般に計算された結果は精度を欠くが応力状態が面内方向に卓越する場合には比較的良好な計算結果が期待でき、少ない計算労力で応力の流れの把握、構造部材を取り替えたときの応力状態の相対的な比較ができる。また、FEM解析の適用事例の中には立体モデルで詳細な解析を行う前の予備検討として平面モデルで解析をしている事例も見受けられた。

② ズームアップの手法

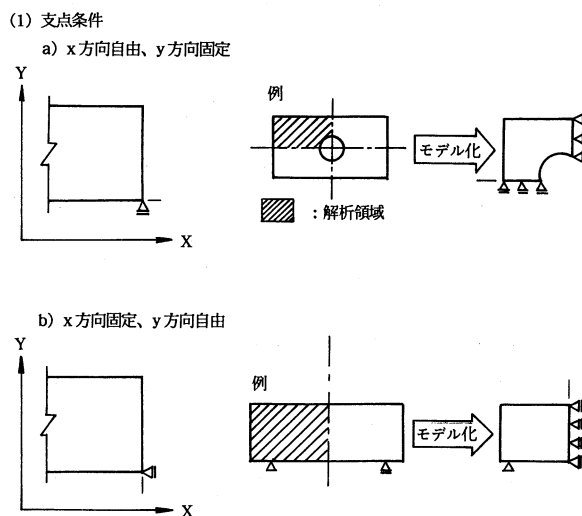


図-2 境界条件の設定

表-4 解析法別集計

解 析 法	件数	シェア (%)
① 弾性平面FEM	23	41.8
② 〃 立体FEM	31	56.4
③ 弾塑性平面FEM	1	1.8

注) 1件の中で、数ケースの解析をしている場合は、高次の解析法によって集計した。

一般に構造物が大きい場合、1回の計算で構造物の全体挙動から接合部の局部応力まで求めようとする、計算規模が大がかりになり、あまり経済的ではない。しかし、まず構造物全体についての全体挙動解析、次に接合部の構造の全般的な応力分布解析、さらに応力が著しく集中すると思われる箇所を取り出し詳細な応力分布解析を行うズームアップの手法を適用すると大規模な構造でも比較的経済的な計算が可能となる。FEM解析の適用事例ではこの手法をブラケット、フィレット等の局部応力の解析に適用していた。

4. 解析事例

これまで、2. FEM解析の適用目的、3. FEM解析のモデル化手法でFEM解析の実態調査の整理とその考察を行ってきたが、ここではその具体的な事例として、塔頂部構造、タワーリンク部および、支障部のFEM解析事例を示す。特に、塔頂部構造、タワーリンク部に対してそれぞれ北備讃瀬戸大橋と下津井瀬戸大橋の解析事例を例示し比較を行った。また、平面FEMにより予備検討を行い立体FEMで詳細な解析を行った事例として与島橋支障部の解析事例を示す。

【塔頂部構造】

I) 解析事例-1 北備讃瀬戸大橋塔頂部構造⁹⁾

[解析目的]

塔サドルの鞍部は溝などがあり構造が複雑なため、鋳鋼 (SCW49) を使用し、その下の箱部は鋼板 (SM50B) から構成されている。

これらの設計にあたっては、まず構造各部を近似モデルに置換した“慣用手法”により、強度検討を行い、各部構造寸法を詳細に検討した後、全体FEM解析で照査し、局部的な修正を施した。なお、慣用手法では十分検討できない箇所については、部分的に取り出し、FEM解析を行っている。

[モデル化]

モデル化の要点を以下に記述し、その概要図を図-3に示す。

- 1) モデルは対称性を考慮し、全体の1/4を取り出し、塔柱も含めた一体モデルとし、塔柱高さは塔頂部の長辺長さ以上を考慮した。
- 2) サドル底板と塔頂板との間は、鉛直力のみ伝達するように考慮した。
- 3) 要素は、サドル本体および塔頂板は面内・面外剛性を持つ板要素、塔柱は面内剛性のみを有する板要素を採用した。

[荷重のモデル化]

サドルに作用する荷重は、ケーブル張力による溝底面圧と測圧があるが、底面圧が卓越しているので底面圧のみ考慮した。側面圧は、ケーブル曲率の中心方向に向かう法線力 ($PV = T/R$) として作用させ、サドル幅方向はストランド数に比例した分布を持たせた。なお、ケーブル曲率は複合円モデルとした。

[結果の評価]

- 1) 中央リブコーナー部、鞍軸直角方向端部の鋳鋼部のど部、横リブのマンホール近傍では、一部許容応力を越える応力が発生したので、これらのデテールを変更した。
- 2) サドル底板での反力分布状況は各塔壁へ平均化しており、塔壁への力の伝達がスムーズに行われていることが確認できた。

II) 解析事例-2 下津井瀬戸大橋塔頂部構造⁵⁾

[解析目的]

- 1) サドルウェブの応力分布状態の把握
- 2) サドルウェブから頂版を介して塔頂部への荷重伝達状況および応力分布の把握
- 3) 上段水平材による応力分布の乱れと荷重伝達状況の把握 (フィレットの形状の決定)。

[モデル化]

モデル化の要点を以下に記述し、その概要図を図-4に示す。

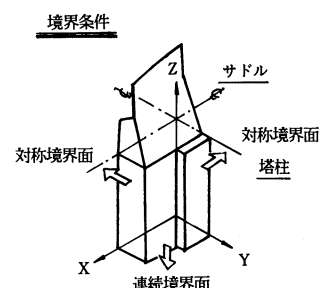
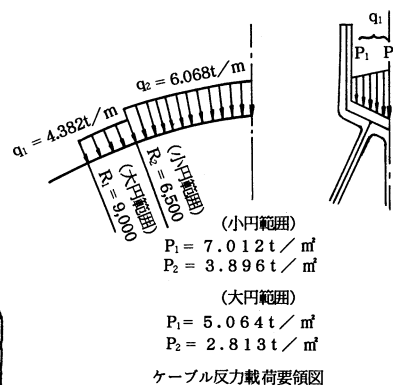
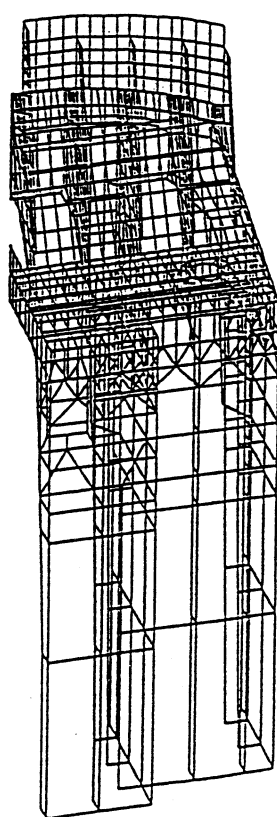
- 1) 対象とする構造は、橋軸直角方向軸に対称構造であるので、1/2構造部分をモデル化した。
- 2) 塔壁・ダイヤフラムは膜要素、サドル・頂版はシェル要素、リブは棒要素でモデル化する。
- 3) フィレット部の形状検討はズームアップモデルでおこなう。

[荷重のモデル化]

主ケーブルからサドルに作用する荷重は、側圧は全体解析に影響が少ないことが知られているので、サドル曲率中心に向かう等分荷重のみを考え、安全を期してサドル鞍部全長に載荷する。

[結果の評価]

- 1) 塔頂サドル及び上段水平材以上の塔壁部の一部が少しであるが許容応力度 σ_c を越えていたので、版厚を厚くした。
- 2) 上段水平材以下の応力分布は比較的滑らかになっていることを確認した。
- 3) フィレット部のRは700程度が適当であることを



境界面	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
対称境界面 (Y-Z)	Fix				Fix	Fix
対称境界面 (X-Z)		Fix		Fix		Fix
連続境界面 (X-Y)			Fix			

図-3 北備讃瀬戸大橋塔頂部構造のモデル化の実例

確認した。(表-5 参照)

III) 北備讃瀬戸大橋と下津井瀬戸大橋の解析事例の比較
要素によるモデル化はどちらの場合もサドル部および塔頂部頂版は面内、面外剛性を有する要素で行い、塔壁およびダイヤフラムは面内剛性のみを有する要素で行っている。また、境界条件は対称境界面 (Y-Z)、(X-Z) は一致していたが、連続境界面 (X-Y) では異なっていた。他の事例を調べてみたが、連続境界面の境界条件の設定の考え方は今のところ定まっていないようである。

【タワーリンク部】

I) 解析事例-3 北備讃瀬戸大橋タワーリンク部⁶⁾

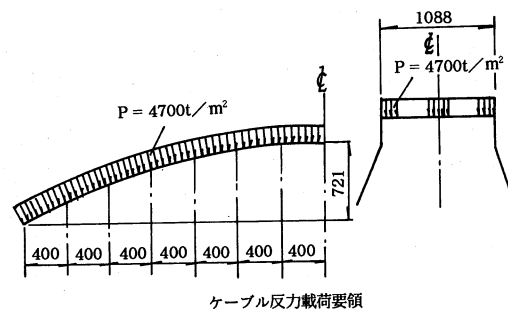
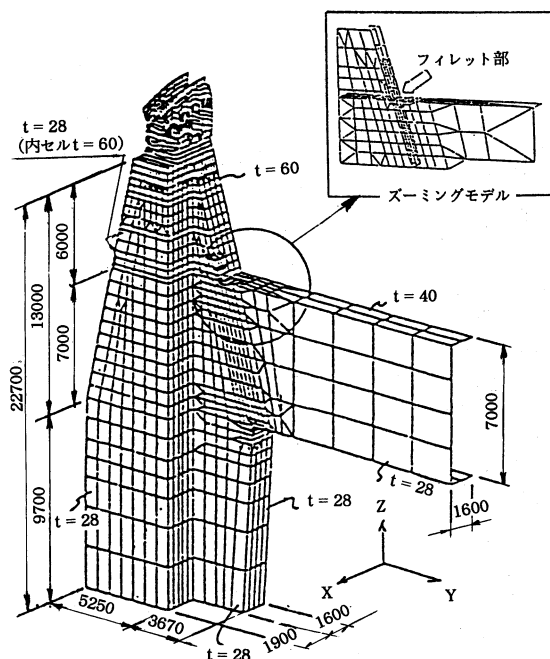
[解析目的]

- 1) ピン穴周辺の応力の流れ、ブラケット本体との溶接部付近の応力分布を確認する。
- 2) ブラケット周辺の応力の流れを把握する。

[モデル化]

モデル化の要点を以下に記述し、その概要図を図-5に示す。

- 1) タワーリンクブラケットは板要素 (面外剛性無) でモデル化し、リブ、ダイヤフラム等の影響を換算断面積で考慮した。
- 2) ピンプレートは面外剛性を考慮した板要素でモデル化した。
- 3) タワーリンクブラケットとピンプレートを別々にモデル化した。(ピンプレートの解析結果をタワーリン



境界条件

境界条件	U	V	W	θ_x	θ_y	θ_z
対称境界面 (Y-Z)	Fix				Fix	Fix
対称境界面 (X-Z)		Fix		Fix		Fix
連続境界面 (X-Y)	Fix	Fix	Fix	Fix	Fix	Fix

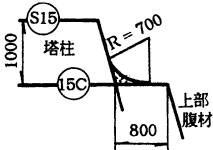
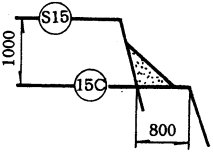
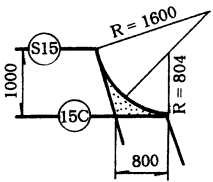
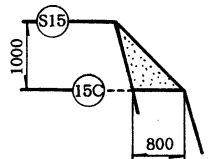
図-4 下津井瀬戸大橋塔頂部構造のモデル化の実例

クブラケットの解析に用いた。)

[荷重のモデル化]

- 1) タワーリンクばかりでなく、塔頂からのケーブル反力の流れも問題となるので図-6に示す2種類の荷重を組合せて解析を行った。
- 2) ピンプレートの解析は図-7に示す面内鉛直荷重、

表-5 フィレット部の形状による比較例

ケース	形状図	応力長 (kg/cm ²)		
詳細設計 R = 700		塔 壁	σ_1	3184
		塔 壁	σ_v	2988
		フィレット部	σ_1	4717
		フィレット部	σ_v	<u>4527</u>
ケース (1)		塔 壁	σ_1	2733
		塔 壁	σ_v	2769
		フィレット部	σ_1	3863
		フィレット部	σ_v	<u>3888</u>
ケース (2)		塔 壁	σ_1	2593
		塔 壁	σ_v	2637
		フィレット部	σ_1	3499
		フィレット部	σ_v	<u>3462</u>
ケース (3)		塔 壁	σ_1	2327
		塔 壁	σ_v	2379
		フィレット部	σ_1	2773
		フィレット部	σ_v	<u>2759</u>

σ_1 : 最大主応力度
 σ_v : 最大相当応力度
 σ_s : 許容応力度 = 3120kg/cm²

面内トルク荷重、面外水平荷重を考慮した。

II) 解析事例-4 下津井瀬戸大橋タワーリンク部

[解析目的]

リンクピン孔周辺、ブラケット下側R部の局部応力の照査と版厚決定

[モデル化]

モデル化の要点を以下に記述し、その概要図を図-8に示す。

(1) 塔壁、ブラケット部は板要素、リブは棒要素でモデル化する。

(2) フィレット部はズームアップ法を適用する。

(3) ブロックの十分離れたところに変位境界を設けた。

[荷重のモデル化]

(1) ブロック上端に応力境界として軸方向力、塔軸直角方向曲げ、せん断力を考慮した。

(2) タワーリンクからの荷重は面内力のみを考慮した。

III) 北備瀬戸大橋と下津井瀬戸大橋の解析事例の比較

要素によるモデル化は大きく違っていた。北備瀬戸大橋の場合、タワーリンクピンプレートはタワーリンクから面外水平荷重を受ける場合も想定しており、このため、タワーリンクピンプレートを面外剛性を有する要素でモデル化していた。また、ブラケットの解析を平面モデルで行っていた。一方、下津井瀬戸大橋の場合、平面要素で構成されている立体モデルで解析を行っていた。

【支承部】

解析事例-5 与島橋支承部⁷⁾

[解析目的]

(1) 下沓形状を従来型の1本リブとした場合および三角形状に2本リブとした場合の、ローラー反力分散性情および下沓各部位の応力特性の把握(支承~下部工一体の平面FEM解析)。

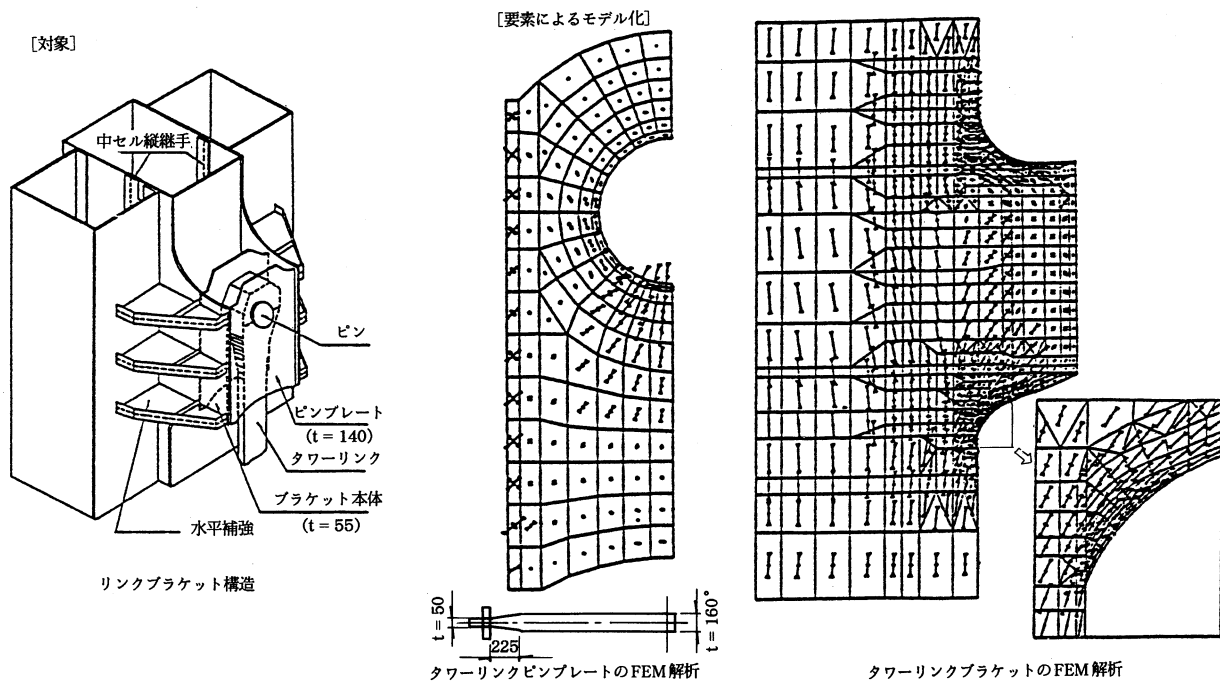


図-5 北備讃瀬戸大橋タワーリンク部のモデル化の実例

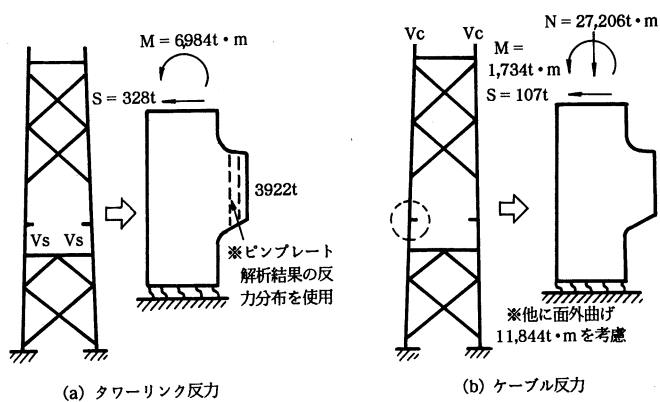


図-6 タワーリンク部の荷重のモデル化

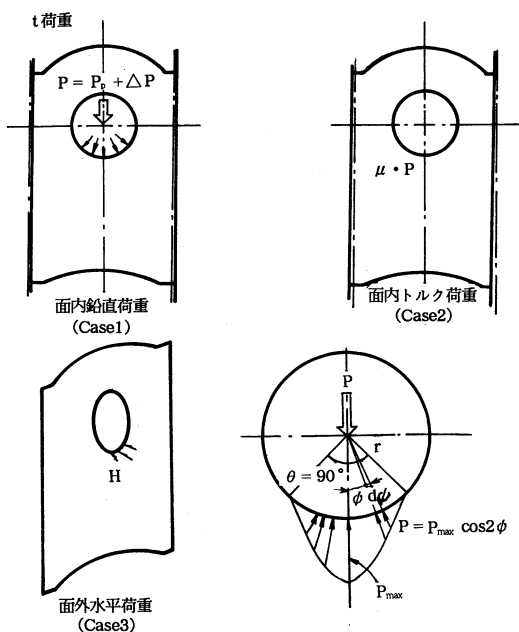


図-7 ビンプレート部の荷重のモデル化

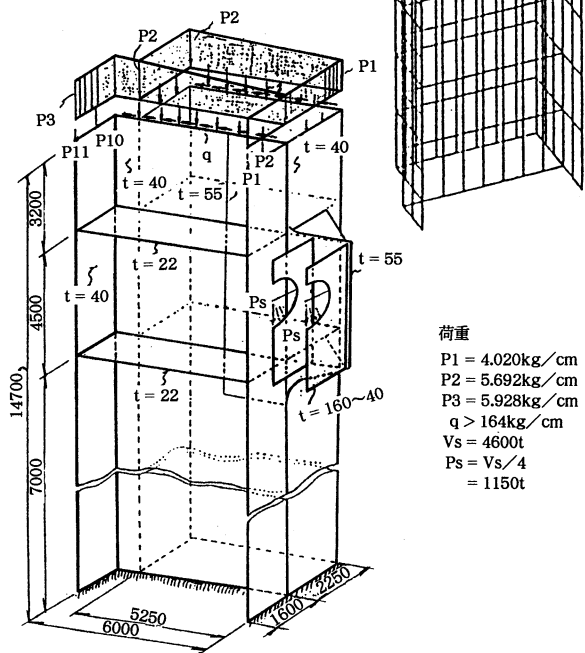


図-8 下津井瀬戸大橋タワーリンク部のモデル化の実例

- (2) 支承～下部工系の剛性に起因する影響の把握（3次元FEM解析）。
- (3) ローラー反力の橋軸直角方向分布に着目し、ローラー端部に発生するピーク応力に対する安全性の確認（3次元FEM解析）。

[モデル化]

モデル化の要点を以下に記述し、その概要図を図-9に示す。

－平面FEM－

- 1) ローラーの移動量は、 $e = 0, 200, 300\text{mm}$ の3ケース、載荷方法はピン受け部の円周に添って 90° の範囲に余弦分布とした。

－立体FEM－

- 1) アイソパラメトリック8節点要素、シェル要素、トラス要素の3種類の要素の組合せでモデル化した。
- 2) 下沓は2本リブタイプ、移動量は、 $e = 200\text{mm}$ とし、載荷方法は最大 $11,113\text{tf}$ を上沓に等分布載荷した。

[結果の評価]

－平面FEM－

- 1) 2本リブの最大反力は1本リブの場合に対して12%減となり、1本リブに対する有意性が確認できた。

－立体FEM－

- 1) 4本ローラーへの反力分散状況は、平面FEM解析結果よりやや良好。
- 2) ローラー単独では、両端部にピーク現象がみられ、特に外側端部の単位長当たり作用力 18.4t/cm はC-13Bの許容値である 14.7t/cm に対し、約25%増であるが、局部応力であるので、製作面での処理で十分と判

断した。

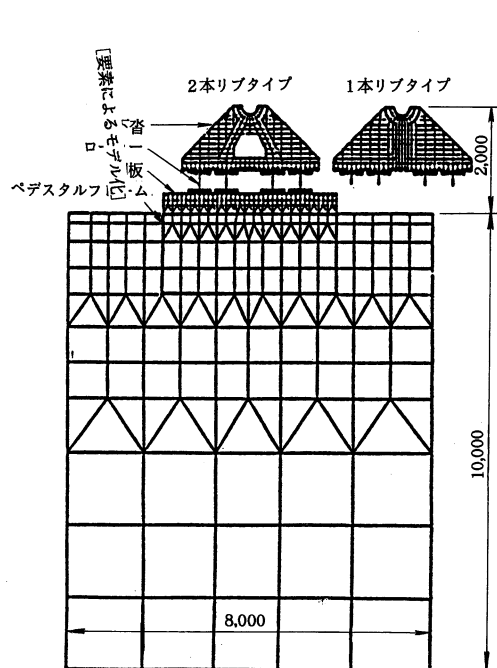
5. あとがき

本州四国連絡橋公団のFEM適用事例の整理を行ない、解析目的および解析の対象とする構造ディテールに対する要素によるモデル化、境界条件の設定方法および荷重のモデル化の傾向をある程度示すことができたが、モデル化手法、結果の評価法等にまだまだ不明確な問題が多い。これらの問題はFEM解析の自由度の広さを考えると明確な考え方を設定するのは困難であるが、現在設計第二課で上記のことも含めた上部構造に対するFEM解析の適用に当たっての指針を検討中である。

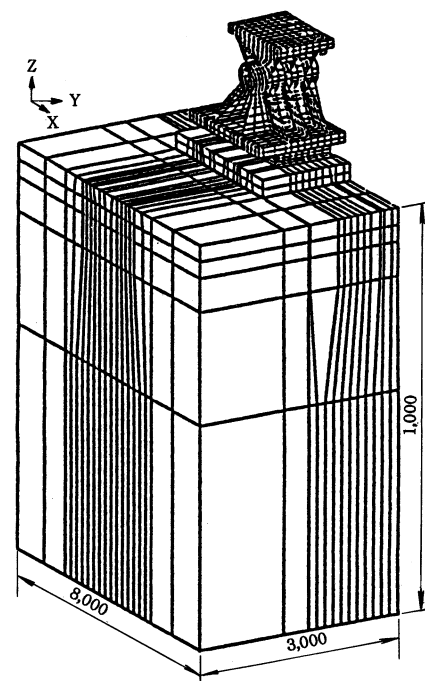
参考のために今回調査したFEM解析事例の一覧表を付表-1に示す。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学会：コンクリート構造物の設計のFEM解析を適用するためのガイドライン、1989年3月
- 2) 中尾、川嶋、尾崎：鋼構造物応力解析への有限要素法適用に関する考察、三菱重工技報、Vol.9、No.2、1972-3
- 3) Richard H. Gallagher著（川井他訳）：有限要素解析の基礎、1973.8、丸善
- 4) 馬場、成井、吉元：北備讃瀬戸大橋ケーブルサドルの設計（その1）、本四技報、No.42、1987.4
- 5) 山根、村瀬：下津井瀬戸大橋の塔頂構造の設計、本



下沓形状の差異によるローラー反力比較検討要FEMモデル



立体FEM解析モデル

図-9 与島橋支承部のモデル化の実例

付表-1 本州四国連絡橋公団におけるFEM解析事例

構造ディテール	橋梁名	解析の着目点	対象とする荷重	応力の評価		設計への反映
				対象応力	許容値	
塔頂部補強構造 (サドル含む)	南備	応力伝達、マンホール周辺の応力集中	常時静荷重	主応力	(圧縮) 1.2 σ	R形状、板厚を変更
	北備	応力伝達状態、局部応力	"	"	(圧縮) 1.1 σ	局部的に板厚アップ
	下津井	応力伝達、フィレット形状決定	最大鉛直圧と側圧	主応力および Von Mises の相当応力	(圧縮) 1.2 σ	フィレット部はFEM より構造決定
	南備	応力伝達、応力集中	常時静荷重	Von Mises の相当応力	1.1σ 0.8 σ (応力集中部)	FEMより断面決定
	大鳴門	応力伝達	"	主応力	(圧縮) σ	
塔柱ケーブル定着部	岩黒	応力分布、ディープビームの評価	常時静荷重	要素線応力	(圧縮・引張) σ	FEMより断面決定
	"	隣接する定着点との応力の重ね合わせを評価する定式化	ケーブル張力 500T	σ_x, σ_y, τ	(圧縮) σ	
	"	応力分布、応力集中	常時静荷重	主応力	(引張) σ	
	"	ディープビームの評価	"	直応力	(圧縮・引張) σ	FEMより断面決定
	櫃石	設計手法の確立(有効幅)	ケーブル張力 500T	主応力、水平および 鉛直応力	-	設計手法を確立し、 断面決定
	生口橋	応力分布状態	常時静荷重	方向応力	(引張) σ	
	多々羅	導入プレストレス力	斜材張力とプレスト レス力	主応力	コンクリートの許容 応力度	
塔柱断面変化部	岩黒	セル変化部補強格子のせん断伝達 力の範囲	最大鉛直力	主応力	(圧縮) 0.8 σ	補強格子のウェブ高 を決定
	生口橋	応力伝達	常時静荷重	"	(圧縮) σ	
	櫃石	設計手法の確立	"	主応力、水平および 鉛直応力	(圧縮) 0.8 σ	設計手法を確立し、 断面決定
塔水平材ラーメン 隅角部	岩黒	水平材と塔柱ハンチのウェブ面に ナックルを設けることの応力評価	常時静荷重	主応力	σ	
	"	解析モデルの妥当性評価	"	σ_x, σ_y, τ	"	
塔柱マンホール	岩黒	応力集中	常時、地震時荷重	σ_x, σ_y, τ	(圧縮) 常時 0.8 σ 地震時 σ	ダブリングを增厚
	"	応力状態	常時静荷重	主応力	(圧縮) 0.8 σ	"
タワーリンク、エンド リンク関連	北備	フィレット部の局部応力、応力 伝達	常時静荷重	主応力	(圧縮) 1.2 σ	フィレット部半径の 変更
	"	ピン孔周辺の応力、応力集中	"	"	(引張) σ	
	"	局部圧縮応力、荷重伝達	"	"	(圧縮) σ	
	下津井	局部応力照査、板厚決定	常時鉛直最大反力	Von Mises の相当応力	(圧縮) 1.2 σ	フィレット部はFEM より板厚決定
	"	ピン孔周辺の応力分布	"	主応力、Trescaの相当 応力	(引張) 1.1 σ	
	岩黒	応力分布	常時静荷重	主応力	(引張) σ	FEMより断面決定
塔基部構造(橋脚コン クリート含む)	岩黒	コンクリートの支圧応力分布	常時、地震時荷重	σ_x, σ_y, τ	コンクリートの許容支 圧応力度 $\times 1.15$	補強構造を決定
	"	補強格子を底版まで下げる場合の 応力分布	常時静荷重、 地震時荷重	主応力	コンクリートの引張 応力度	補鉄鉄筋が増加
	北備	応力分布状態、安全性照査	常時静荷重	支圧応力度、 曲げ応力度	(圧縮) σ	
	"	"	"	主応力度	"	
	下津井	塔柱応力の流れ、コンクリート 支圧応力等	塔柱鉛直最大応力、 プレストレス	鉛直方向垂直応力	コンクリートの許容 支圧応力度	
	生口橋	コンクリート内部応力分布	常時、風時、 地震時荷重	方向応力	-	
	櫃石	補強格子構造と接触部コンクリート 応力照査	常時、地震時荷重	支圧応力度	コンクリートの許容 支圧応力度	
主構上・下弦材	大鳴門	塔基部、コンクリート支圧応力	常時静荷重	最大支圧応力	"	
	櫃石	慣用設計法の妥当性、応力集中	常時静荷重	主応力	(圧縮) σ	
	"	格点部の応力分布	"	方向応力、主応力	(圧縮) σ_x, σ_y	
主構斜材連結部	岩黒	疲労応力	列車疲労荷重	主応力	疲労許容応力度	
	下津井	ウェブに切り欠きを有する斜材 連結部のせん断流分布	常時静荷重	-	-	

構造ディテール	橋梁名	解析の着目点	対象とする荷重	応力の評価		設計への反映
				対象応力	許容値	
主構トラス上・下弦材 (中間支点, 端支点)	下津井	ウインド沓接触部の応力照査	暴風時荷重	Von Mises の相当応力	(引張) σ_v	
	"	フランジナックル部の応力分布	常時単位荷重, 暴風時荷重	垂直応力	(圧縮) 常時 $0.8\sigma_v$, 暴風時 σ_v	
	大鳴門	上下弦材の応力分布	常時固定荷重, 暴風時固定荷重	Von Mises の相当応力	(圧縮) $1.1\sigma_v$	FEMより断面決定
	"	ウインド沓反力の偏心分布状態	暴風時荷重	"	(圧縮) σ_v	塑性変形による反力 分布の把握
	"	ウインド沓部の応力照査	"	"	"	腹板の一部分をFEM より決定
	樫石	応力分布, 応力集中	常時静荷重	主応力, 直応力, 面外せん断応力	(圧縮) $\sigma_v, 1.1\sigma_v$, τ_v	
主構ハンガー取付部 関連	大鳴門	ダイヤフラムの応力, ダイヤフラムと上弦材の溶接部の応力	常時静荷重(上弦材) 許容切断荷重(ハンガー)	主応力, せん断力	(引張) σ_v	FEMより断面決定
	"	ハンガー受リブおよびダイヤフラムの応力度照査	常時静荷重	"	"	
	樫石	慣用設計法の妥当性, 応力集中	ケーブル最大張力	主応力	(引張) σ_v	
	"	応力伝達, 応力分布	常時静荷重	方向応力	"	
	大島大橋	交差部の応力性状, 局部応力	"	主応力	(圧縮・引張) σ_v (応力性状), σ_v (応力集中)	実験にて検証
	"	"	"	"	(引張) σ_v	
	南備	交差部の応力状態	"	"	(引張) σ_v	ハンガーブラケット 側仕口の 材質をSM58に変更
	北備	応力伝達, 応力集中	常時静荷重	"	"	FEMより断面決定
主構トラスピンプレート (中間支点)	下津井	ピンプレート板厚テーパ形状決定のための応力分布	単位荷重	主応力, Von Mises の相当応力	(引張)	
	"	応力分布状態	最大正反力時	Von Mises の相当応力	(圧縮) σ_v	
	南備	接触部, 板厚変化部, ガセット フィレット部の局部応力	常時静荷重	主応力	(圧縮・引張) σ_v	
	北備	局部応力	常時静荷重	主応力	(圧縮・引張) σ_v	FEMより断面決定
主桁側ケーブル定着部	大鳴門	応力分布, 溶接部のせん断力	スティ張力	Von Mises の相当応力	(引張) $1.1\sigma_v$	
	生口橋	応力分布状態	常時静荷重	垂直応力度	(圧縮) σ_v	
主桁構造(複合桁, 箱桁)	生口橋	応力伝達	許容応力度の上限値	水平応力度	(圧縮)	
	多々羅	縦リブ取付位置における変動応力 分布	線荷重	上下フランジの 垂直応力度	-	
	"	"	常時静荷重	"	-	
可動支承	与島橋	ローラー反力分散性状の改善	常時静荷重	鉛直反力	(圧縮)	
	"	ローラー反力分散性状の改善 ローラー端部のピーク反力	"	"	(圧縮)	
ケーブルアンカー フレーム吊環部	南北備讃	ガセットの応力集中	常時静荷重	Von Mises の相当応力	(引張) $0.8\sigma_v$	

長大橋梁の維持管理

Maintenance and Administration of Long-Span Bridges

維持施設部 糸日谷 淑光
橋梁技術課長代理 Toshimitsu Itohiya

概要

世界的規模の本州四国連絡橋は海峡部に位置する長大橋梁が大きな特徴であり、その維持管理は厳しい海峡部に位置することから安全かつ効率的に行なわなければならない。大規模かつ複雑な構造を有していることから維持管理においてはいくつかの特徴が上げられる。主なものとしては点検・補修のための作業車があらかじめ橋体に設置されている。また橋体の健全度を把握するため、主な橋梁には各種の計測器が設置されており動態観測のシステム化を図っている。点検は、日常点検・定期点検・臨時点検からなっており点検の結果はその内容に応じて評価判定し、必要な措置をとるようにしている。本報文は、海峡部長大橋の特徴と維持管理全般について述べるものである。

1. まえがき

世界的規模を誇る本州四国連絡橋は3つのルートからなっており、総延長は178kmで現在その60%に当たるおよそ107kmが供用している。本州四国連絡橋の大きな特徴は海峡部に位置する長大橋梁群でありその橋梁数は21橋を数えている。長大橋梁の維持管理は架橋地点が厳しい海上部であること、また大規模かつ複雑な構造を有していることからいくつかの特徴が上げられる。その内容としては、点検・補修のための管理路の他に全橋梁あわせて133台の橋梁点検補修作業車が設置されている。また橋体の健全度を把握したり、交通管理用としての情報収集の手段として主な橋梁には各種の計測器が設置されている。点検は日常点検、定期点検、臨時点検から成っており、上述の管理路や点検作業車を利用して効率的に実施している。点検の結果はその内容に応じて評価判定し必要な措置をとるようにしている。

長大橋梁の維持管理の中で重要な要素として塗装が上げられる。本州四国連絡橋の海峡部橋梁の塗装は自然条件の厳しいことから長期防錆型の重防食塗装を採用している。本報告では、海峡部長大橋梁の維持管理について概説しその特徴を述べることとする。

2. 維持管理の概要

本州四国連絡橋の道路は、計画延長の約60%に当たる107.4kmを既に供用し、管理している。その内訳は表-1に示すとおりである。

維持管理は大別して料金の徴収、財産の管理、交通の管理、構造物の保全業務に分けられる。さらにそのうち構造物の保全業務については維持作業、点検管理、補修工事、改善工事に分けられる。その主な内容を次に示す。

- ① 維持作業……道路の清掃、植栽管理及び冬期の路面の雪氷対策等、交通の安全を確保すること。
- ② 点検管理……道路構造物の異常の有無を調査する

と共に異常発生予測、並びにその対策を検討すること。

- ③ 補修作業……点検管理で発見された異常が交通の安全をおびやかすことのないよう、あるいは既に交通障害となっている構造物の損傷に対して補修工事等を実施すること。

- ④ 改善工事……本州四国連絡橋は、道路が比較的新しいためこの必要はないが、将来道路構造物を改良あるいは改善する必要が生じる工事。

維持管理体制は、現地組織として3ルートとも1局、2管理事務所を配置して維持管理業務の遂行に万全を期している。

3. 長大橋梁の概要

海峡部橋梁は表-2に示すように世界20位までの長大吊橋に9橋の吊橋がランクされるほか、斜張橋、トラス橋、箱桁橋など合計21橋を数える。表-3に主な海峡部長大橋梁の一覧表を示す。

長大橋梁の建設は1979年5月、尾道・今治ルートの大三島橋の完成をスタートとして1983年12月に因島大橋、1985年6月に大鳴門橋、そして1988年4月に道路・鉄道併用橋として世界最大の規模を誇る児島・坂出ルート（瀬戸中央自動車道）が完成し、供用するに至っている。残る長大橋梁では、明石海峡大橋、生口橋、来島大橋、多々羅大橋が現在工事中で今世紀中には3ルートが全線供用する予定である。

4. 長大橋梁の交通管理体制

本州四国連絡橋は代替えのない道路であるため道路構造物の重要性は言うまでもなく、交通の安全を確保することも最重要事項となっている。交通管理の目的は、道路の構造に係る条件、大型車の混入、交通規制等の交通の質に係る条件、気象条件等の外的条件などにより様々な影響を受ける道路の交通流を円滑かつ安全に確保する

表-1 供用区間の概要

ルート	供用区間の概要			
A (第一建設局)	津名一宮 洲本 緑 西淡三原 淡路島南 鳴門北 鳴門 11.9km 9.5km 8.8km 7.1km 7.9km 29.7km 15.5km 洲本管理事務所 鳴門管理事務所 使用開始日 S.60.6.8 S.62.10.8 S.60.6.8 S.62.5.23	項目	数量	
		供用延長	45.2km	
		土工延長 注2)	33.8km (75%)	
		橋梁延長	11.4km (25%)	
		LC	6	
		S.A	-	
		P.A	2	
D (第二管理局)	早島 粒江 水島 鴻ノ池 児島 坂出北 坂出 8.2km 10.7km 15.9km 2.5km 19.5km 17.8km 早島管理事務所 坂出管理事務所 使用開始日 S.63.4.10	項目	数量	
		供用延長	37.3km	
		土工延長 注2)	16.5km (44%)	
		橋梁延長	20.8km (56%)	
		LC	5	
		S.A	1	
		P.A	2	
E (第三建設局)	尾道大橋 向島管理事務所 大浜 因島 大三島 上浦 大三島橋 伯方島 宮窪 4.2km 9.4km 6.8km 4.5km 13.6km 11.3km 向島管理事務所 大三島管理事務所 使用開始日 S.63.2.1 S.58.12.4 S.54.5.13 S.63.1.17 注1)	項目	数量	3ルート合計
		供用延長	24.9km	107.4km
		土工延長 注2)	18.7km (75%)	注2) 69.0km (64%)
		橋梁延長	6.2km (25%)	38.4km (36%)
		LC 注3)	7	注3) 18
		S.A	-	1
		P.A	2	6
B.S	6	26		

注1)：日本道路公団より引継 注2)：トンネルを含む 注3)：仮出入口(向東、宮窪)を含む

表-2 世界の長大吊橋

順位	橋 梁 名	中央支間長 (m)	国 名	完成年	順位	橋 梁 名	中央支間長 (m)	国 名	完成年
①	明石海峡大橋	1,990	日本	1998 (未定)	11	4月25日橋	1,013	ポルトガル	1966
2	ハンバー橋	1,410	イギリス	1981	⑫	来島第二大橋	1,010	日本	1999 (予定)
3	ベラザノ・ナロウズ橋	1,298	アメリカ	1964	⑬	フォース道路橋	1,006	イギリス	1964
4	ゴールデン・ゲート橋	1,280	アメリカ	1937	⑭	北備讃瀬戸大橋	990	日本	1988
5	マキノ橋	1,158	アメリカ	1957	15	セバーン橋	988	イギリス	1966
⑥	南備讃瀬戸大橋	1,100	日本	1988	⑮	下津井瀬戸大橋	940	日本	1988
7	フティ=スルグソン=メハネット橋	1,090	トルコ	1988	⑯	大鳴門橋	876	日本	1985
8	ボスボラス橋	1,074	トルコ	1973	18	ニュー・タコマ・ナロウズ橋	853	アメリカ	1950
9	ジョージ・ワシントン橋	1,067	アメリカ	1931	⑰	因島大橋	770	日本	1983
⑩	来島第三大橋	1,030	日本	1999 (予定)	20	白鳥大橋	720	日本	未定

○：本四連絡橋

ことである。このような目的に沿って行なわれている交通管理について述べる。

表-3 海峡部長大橋梁

項目	神戸・鳴門ルート (Aルート)	児島・坂出ルート (Dルート)	尾道・今治ルート (Eルート)	延長 (km)
吊橋	(明石海峡大橋) 大鳴門橋	下津井瀬戸大橋 北備讃瀬戸大橋 南備讃瀬戸大橋	因島大橋 大島大橋 (来島第一大橋) (来島第二大橋) (来島第三大橋)	8.7 (7.9)
斜張橋	-	櫃石島橋 岩黒島橋	尾道大橋 (生口橋) (多々羅大橋)	2.0 (2.3)
トラス橋	-	与島橋	-	0.9
箱桁橋	門崎高架橋 撫養橋	番の州高架橋	伯方橋	4.8
アーチ橋	-	-	大三島橋	0.3
延長 (km)	3.3 (4.0)	10.1	3.3 (6.2)	16.7 (10.2)

(注) () は建設中、延長は橋梁区間長を示す。

4.1 交通管理システム

交通管理の主な内容としては、

- ① 交通、気象及び各種情報の提供
- ② 積荷、車体の重量制限及び速度、駐停車、I.C.における流入、流出の制限
- ③ 違反車両に対する指導、警告
- ④ 事故、道路破壊等の異常時における援助及び障害物の排除活動
- ⑤ 快適な走行環境を提供するための諸設備の整備などが上げられる。

これらを情報の流れとして示すと図-1のように一つのシステムと見ることができる。

なお、交通管理上の通行規制基準値を表-4に示す。

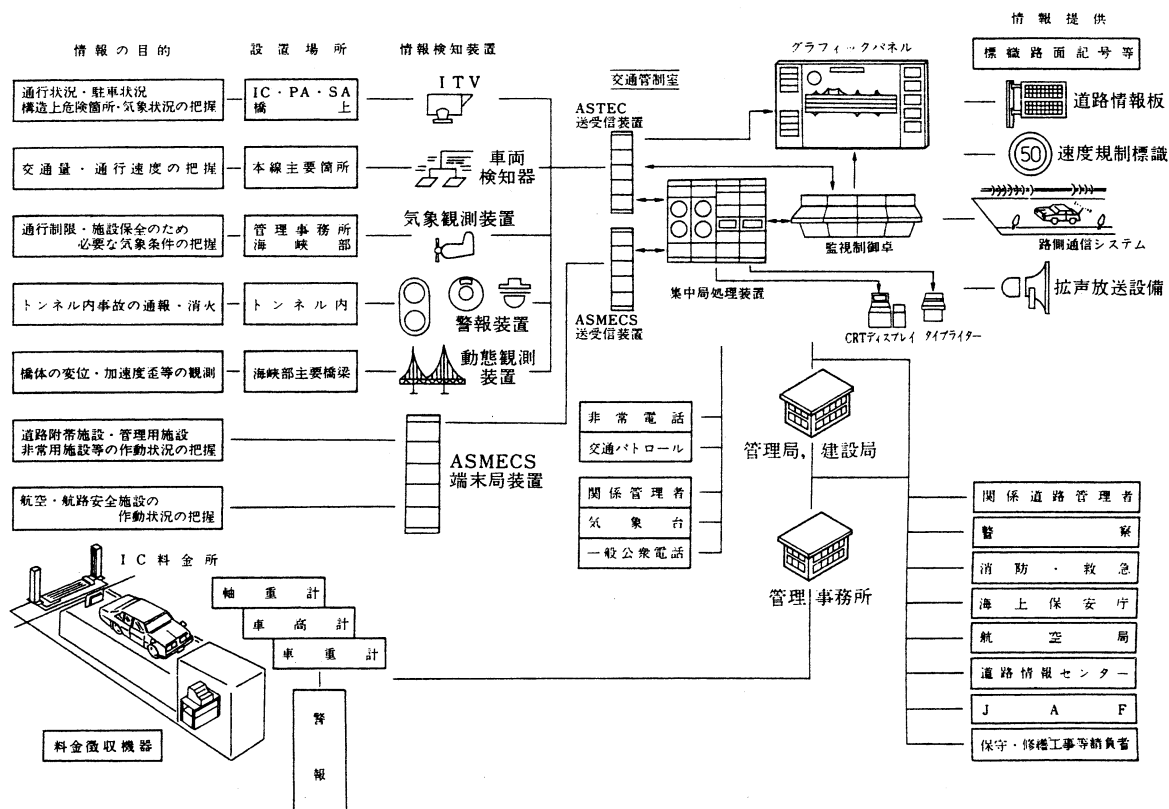


図-1 交通管理システム図

ASTTEC: 交通管制用自動監視制御システム

ASMECS: 自動計測監視制御システム

GPNET: 総合伝送交換接続システム

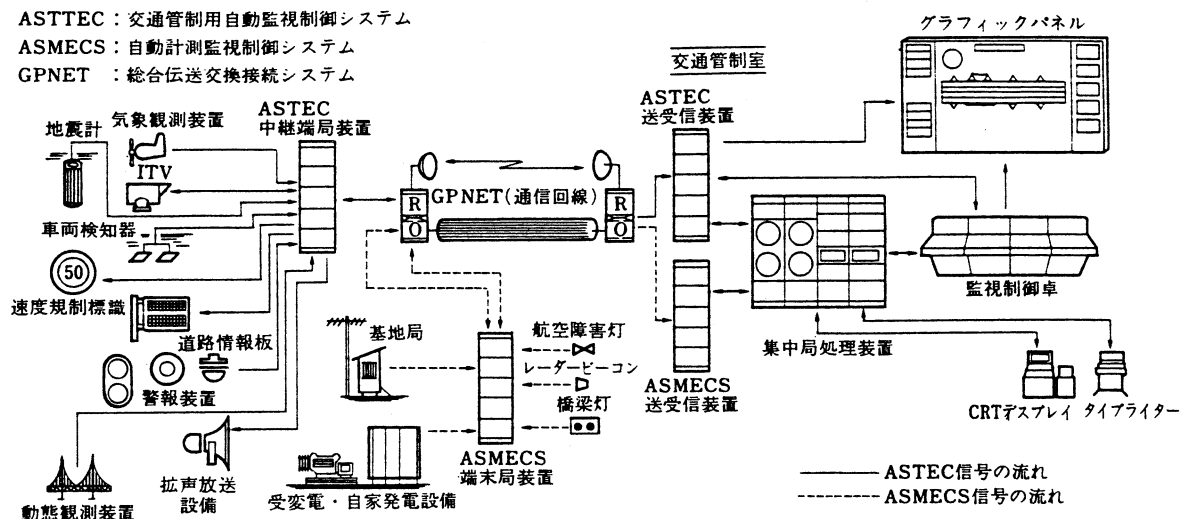


図-2 交通管理用基幹システム図

4.2 交通管理用基幹システム

交通管理用の電気通信施設は次の3つに機能分化し、システム化を図っている。その系統図を図-2に示す。システムの構成は、交通管制用自動監視制御システム (ASTEC)、自動計測監視制御システム (ASMECS)、デジタル総合ネットワークシステム (GPNET) から成り立っている。各システムの概要を次に述べる。

(1) 交通管制用自動監視制御システム

交通管理に係る情報、例えば通行状況、駐車状況、通行制限のための気象条件、橋梁の変位、事故の状況等をリアルタイムで伝送し道路全体の効率的な一元管理運営を行う総合データ伝送システムである。

表-4 通行規制基準値

項目	規制値	
風	50km/h	平均風速おおむね15m/s以上
	通行止	平均風速おおむね25m/s以上
霧	通行止	視程おおむね50m/s以下
	50km/h	連続雨量おおむね150mm以上または時間雨量おおむね30mm以上
雨	通行止	連続雨量おおむね250mm以上または連続雨量おおむね80mmに達したあと時間雨量おおむね40mm以上
	50km/h	50gal以上
地震	通行止	80gal以上

(2) 自動計測監視制御システム

電力供給設備、照明設備、航行援助設備、通信設備等の各電気通信施設の運用状況の監視、異常発生時の自動通報、遠隔制御などを一元的に行うシステムである。

(3) デジタル総合ネットワークシステム

大別して二つに分けられる。一つは伝送路を交換接続網として信頼性の向上を図っていること、もう一つは電話とデーターを統一的に取り換えるようにしていることである。

4.3 交通管理施設

各ルートの交通管理は原則として一元管理である。各ルートの管理体制によって、その運用形態や設備の構成は異なっているが、道路交通の管理は刻々変化する交通流が対象であり、交通指令のための状況判断の容易な情報収集及びその表示、平易な運用操作が要求される。そのため、橋梁には気象観測設備や情報提供のための情報

板、非常時の連絡手段としての非常電話、監視用テレビカメラ、さらに拡声放送用のスピーカー等が設置されている。図-3に交通管理施設の例を示す。

5. 長大橋梁の点検

5.1 維持管理の特徴

長大橋梁の特徴を述べると次のようになる。

- ① 長大橋梁は、架橋地点の厳しい自然条件等を克服して架設された大規模橋梁であり、架替えが困難であるため、今後100年以上の長期にわたって良好な維持管理が必要となる。
- ② 海上部又はその近傍にあるため、鋼材に対する厳しい腐食環境の中での維持管理が要求される。
- ③ 道路・鉄道併用橋をはじめとして、大規模かつ複雑な構造を有し海上にあることから、点検あるいは補修等の作業に困難が伴う。
- ④ 他に代替交通機関が少ないことから、安全でスムー

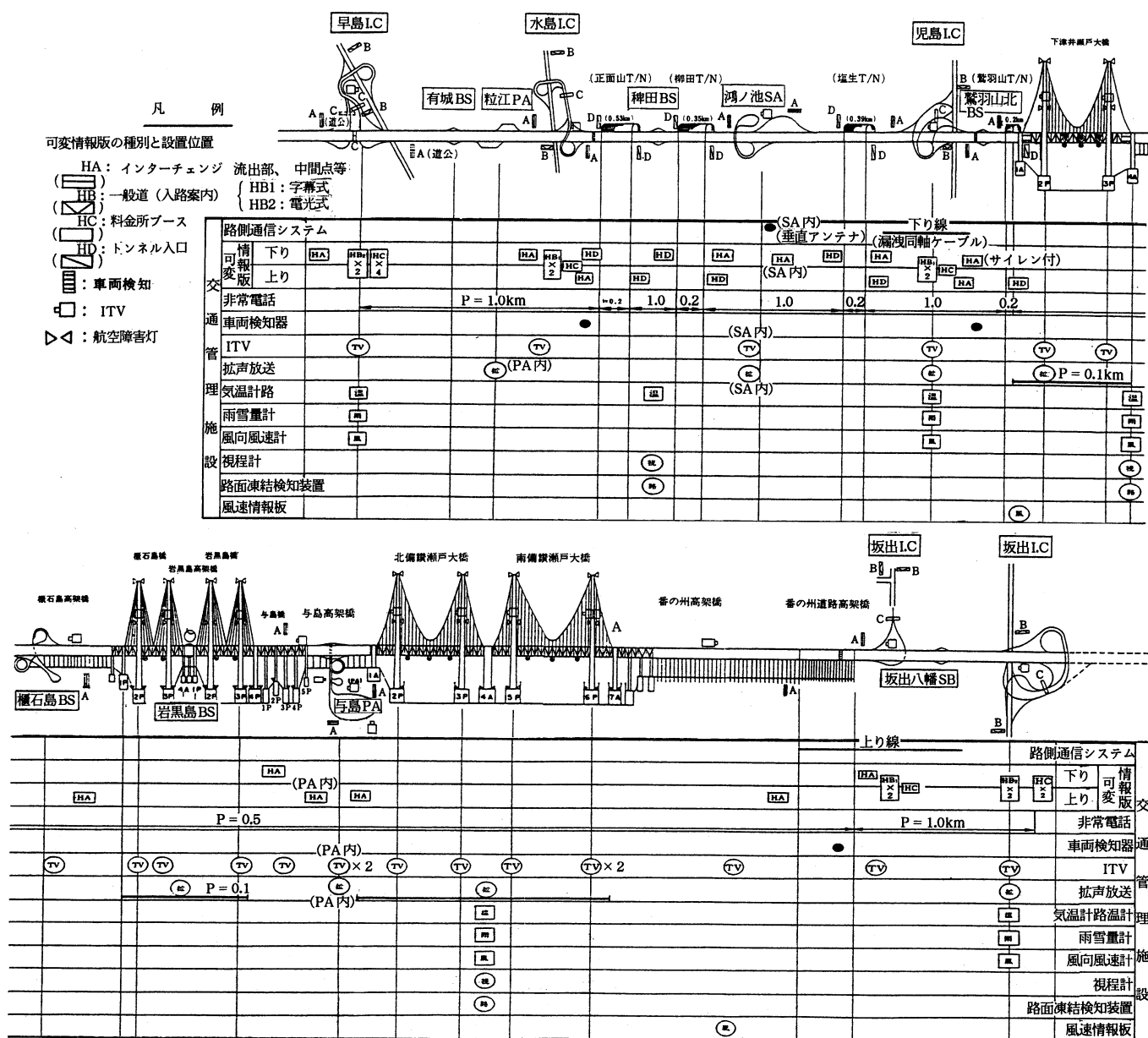


図-3 交通管理施設一覧図 (Dルート)

徒歩で行なう巡回点検である。目視を主体としているので橋面、交通安全施設や添加物などの状況把握のほか、重大な変状を発見することを主目的としたものである。頻度は3ヶ月に1回程度で行なわれている。点検項目の一例を表-6に示す。

(2) 定期点検

定期点検は日常点検により発見された変状や損傷を整理し、全橋にわたって計画的な総合点検を行なうものであり劣化度の評価及び構造物の健全度を判定する目的で期間及び周期を定めて実施する点検である。この点検は大別すると部材に着目した基本点検と主に全体構造系に着目した精密点検に分けられる。

1) 基本点検

基本点検は管理路または橋梁点検補修作業車を利用して目視あるいは簡単な器具を用い、橋梁各部材の細部にわたり点検するものである。さらに点検によって変状の分布状況と量的なものを知り、補修計画の資料とする。頻度は、年1回程度で行なわれている。

点検の方法は点検部位への接近手段で次のように分けられる。

- 外面、内面作業車での点検、補剛桁、床組、ケーブル
- ケーブル作業車での点検、主ケーブル
- 管理路での点検、補剛桁、主塔、アイカレイジ

2) 精密点検

精密点検は基本点検が橋梁部材の健全性を把握する目的であるのに対し、測量機器を使用して橋梁の構造系を測定し、橋梁全体の健全度を把握することを目的としている。頻度は5年に1回程度である。表-7に点検項目を示す。

(3) 臨時点検

臨時点検は暴風、地震及び走行車両の橋体への衝突、それによる火災などの異常事態が発生した場合や、日常点検及び定期点検で発見された変状のうち、次の点検まで放置できない変状について、その継続的な監視または計器による測定が必要と判断された場合に行なう点検である。この点検は大別すると再点検、災害点検に分けられる。

1) 再点検

日常点検及び基本点検で再点検が必要であると判断された変状について精査し、原因や問題点を解明するため、計測機器を用いて行なうものである。

2) 災害点検

暴風、地震及び火災などの異常事態の発生に伴い、部材と構造系の変状や損傷を点検するものであるが、一旦、交通規制した状況から点検の結果により直ちに交通開放の安全性についての判定を行なう必要から、点検項目を限定して行なうものである。

5.4 健全度の判定

点検の結果、変状または欠陥が発見された場合は、表-8に示す5段階の評価を行なって次に示す措置を行なうこととしている。

表-6 日常点検の項目(吊橋)

管 理 路 よ り の 範 囲	
構 造 部 位	点 検 の 内 容
補 剛 桁	部材の変形、亀裂、ハンガー定着部
床 組	鋼床版裏面の発錆、変形、縦桁支承部
エンドリンク タワーリンク ウインド クロー ストッパー	変形、破損、異常音
H T B	ゆるみ、欠落、ネジ部の発錆
管 理 路	グレーチング、高欄の損傷、異常音
伸 縮 装 置	異常音、異物のかみ込み、排水の不良
塗 装	塗膜の変状、表面のよごれ、滞水
橋 台 で の 範 囲	
構 造 部 位	点 検 の 内 容
橋 台	コンクリートのはく離、よごれ、鉄筋の露出、管理路の損傷
緩 衝 工	変形、損傷
塔 頂、上 部 水 平 材 で の 範 囲	
構 造 部 位	点 検 の 内 容
塔 頂	吊元設備の損傷、滞水、塗膜の変状
上 部 水 平 材	高欄の変状、よごれ、滞水、塗膜の変状
全 体	塔、ケーブル全体の目視

表-7 精密点検の項目

点検項目	橋 梁 形 式		
	吊 橋	斜 張 橋	トラス橋
ケーブル周囲温度	○		
桁の縦断線形	○	○	○
伸縮装置の遊間量	○	○	○
塔の倒れ量	○	○	
橋台、橋脚の移動量	○	○	○
塔と桁、橋体と下部工の相対位置	○	○	○
スプレーサドルの移動量	○		
ハンガーロープの張力	○		
ケーブルの張力		○	

① 判定Aの場合

応急措置を行なった上で永久措置の準備に入るか、直ちに永久措置を行なうかの判断を下し、補修作業に入る。

② 判定Bの場合

当面は交通の支障を生じることはないが、早期に措置を行なうために補修の優先度を見きわめた上で補修する。

③ 判定Cの場合

発見された変状または損傷について進行状態を監視し、更に悪化が予測されれば補修に入る。また変状が停止したときは記録するにとどめる。

なお塗膜劣化状態の把握はアメリカ鋼構造協会(SSPC)の標準見本図等を参考としている。

5.5 動態観測システム

暴風時あるいは地震時などの異常時における橋体の挙動を測定することによって橋梁の健全性を把握すること、また耐風設計や耐震設計等の設計基準に対する検証用の目的で長大橋梁の主要な橋には各種の計測器が設置されており、動態観測のシステム化を図っている。なお、測定データは橋体管理だけでなく交通管理にも利用されて

表－8 健全度判定標準

塗 装 以 外	
判 定	判 定 標 準
A	自動車の走行、列車の運転及び第三者の安全に関わる変状または欠陥があり、安全上直ちに補強、使用停止等の措置を必要とするもの。
B	変状または欠陥があり、それらが進行して橋体の機能を低下させる恐れがあり、早期に措置するもの。
C	変状は軽微であるが、その進行状況を監視する必要があるもの。
D	軽微な変状または健全なもの。
Q	変状または欠陥の有無、程度の判定が困難で別の方法で再点検する必要があるもの。
塗 装	
判 定	判 定 標 準
B	塗装変状または、腐食があり、それらが進行する恐れがあり、早期に措置するもの。
C	塗膜変状は軽微であるが、その進行状況を監視する必要があるもの。
D	軽微な塗膜変状または健全なもの。
Q	塗膜の変状の有無、程度の判定が困難で、別の方法で再点検の必要があるもの。

表－9 動態観測の計測器設置一覧表

橋 梁 名	地 震 計	プロベラ型 風向風速計	超 音 波 風向風速計	加 速 度 計	加 速 度 型 変 位 計	変 位 計	光 学 式 変 位 計
大 鳴 門 橋	12 (4)	10 (5)	18 (6)	18	3	4	2 (1)
撫 養 橋		2 (1)	3 (1)		2		
下 津 井 瀬 戸 大 橋	6 (2)	4 (2)		4		2	
櫃 石 島 橋		4 (2)		20		4	
岩 黒 島 橋	3 (1)					2	
与 島 橋						4	
北 備 讃 瀬 戸 大 橋	3 (1)					2	
南 備 讃 瀬 戸 大 橋		4 (2)		35	2	4	2 (1)
番 の 州 高 架 橋	12 (4)			9			
因 島 大 橋	3 (1)	4 (2)		18		1	
大 島 大 橋	3 (1)	4 (2)	3 (1)	18	4	1	

(注) 1. カッコの外書きの数字は測定チャンネルのセンサー数、カッコ内の数字は計測器の設置台数
2. 大鳴門橋の超音波風向風速計18 (6)のうち6 (2)はエースパーンである。
3. 大鳴門橋の設置台数の中で超音波風向風速計、加速度計、加速度型変位計は下記の台数が門崎高架橋に設置されている。
超音波風向風速計……3 (1)
加速度計………2
加速度型変位計………1

表－10 橋梁点検補修作業車の設置台数

		形 式 区 分					
ル ー ト	橋 梁 名	桁 外 面 作 業 車	桁 内 面 作 業 車	塔 外 面 作 業 車	塔 内 面 作 業 車	塔 上 部 材 作 業 車	ケーブル 作 業 車
A	門 崎 高 架 橋	11					
	大 鳴 門 橋	5	4				1
	撫 養 橋	4					
D	下 津 井 瀬 戸 大 橋	4	3				
	櫃石島高架橋(トラス部)	1	1				
	櫃 石 島 橋	3	2	2	1	4	
	岩 黒 島 橋	3	2	2		4	
	与島橋(2径間連続トラス部)	1	2				
	与島橋(3径間連続トラス部)	1	3				
	北 備 讃 瀬 戸 大 橋	4	4				
	南 備 讃 瀬 戸 大 橋	4	4				
	番の州高架橋(併用部トラス)	1	3				
	番の州高架橋(併用部箱桁)	34					
E	番 の 州 南 高 架 橋	4					
	因 島 大 橋	3					1
	大 三 島 橋	1					
	伯 方 橋	2					
	大 島 大 橋	1					1
合 計		87	28	4	1	8	5

いる。動態観測設備を設けている橋梁と設置されている計測器の種類・台数を表－9に示す。

データの計測は、全て風及び地震があらかじめ機器にセットされている設定値(トリガー作動値)以上になった時点で10分間ごとに測定される。トリガーの設定項目は、風及び地震を対象としている。

測定のシステムは、計測器からのデータをアンカレイジ内に設置されている変換器を通して観測装置に送り磁気テープ(MT)に保存するようになっている。管理事務所内では端末の観測操作卓により測定データをデジタルでプリントアウトすることができる。また、測定データの解析処理は管理事務所あるいはアンカレイジ内の解析処理装置により風向・風速の最大値、平均値、ガストファクター、乱れ強さ及び加速度より変位の最大値、平均値と光学式変位計による絶対変位を算出しプリントアウトすることができる。

システムの一例としてDルート
の全体システム図を図－5に示す。

5.6 維持管理設備

従来橋梁の維持管理設備としては、点検歩廊を設置するかあるいは車載式の橋梁点検車によるか、またはその併用のいずれかが主なものであった。しかしこの場合点検範囲が限られ不十分な点が多い。長大橋梁の維持管理は重要性及び危険性の面から、管理路はもちろんのこと点検のための作業車や専用のエレベーターがあらかじめ設置されている。

管理路は、補剛トラスの場合橋梁全線を通して橋軸方向に主桁管理路があり、橋軸直角方向には約150m間隔に横断管理路を設けている。また管理用エレベーターは、吊橋や斜張橋の塔内にそれぞれ設けられている。

点検補修作業車は、桁・塔・ケーブル及び添架設備の点検・補修に使用するもので設置台数は、現在までトータル133台にのぼる。表－10に点検補修作業の内訳を示す。材質は橋体への負担荷重を極力軽減させるためと防錆を考慮していずれも耐食アルミニウム合金としている。

点検補修作業車の概要を以下に述べる。

① 桁外面作業車

橋梁の下面及び側面を取り囲

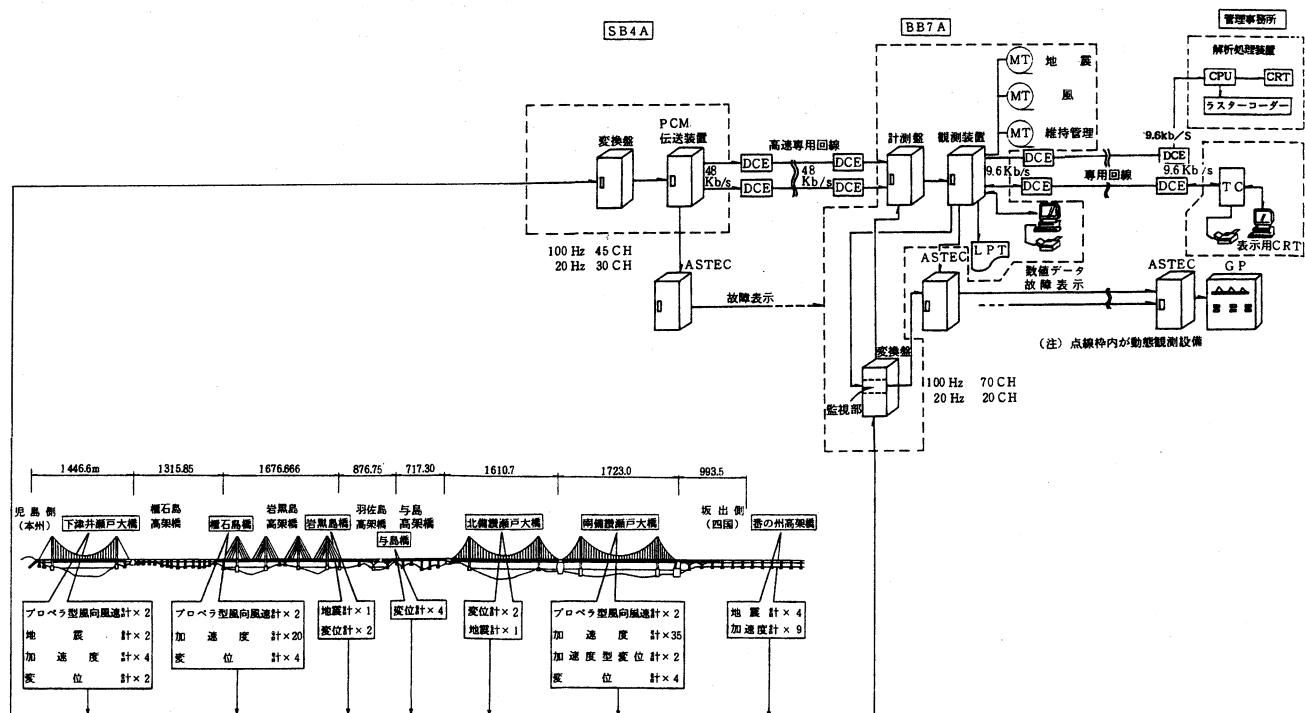


図-5 動態観測システム図 (Dルート)

写真-1
桁外面作業車

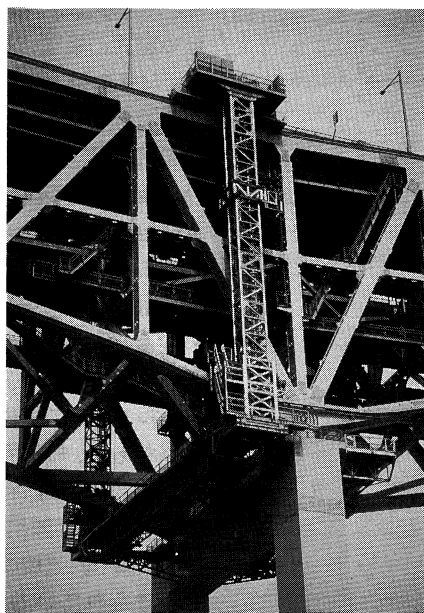


写真-3
塔作業車

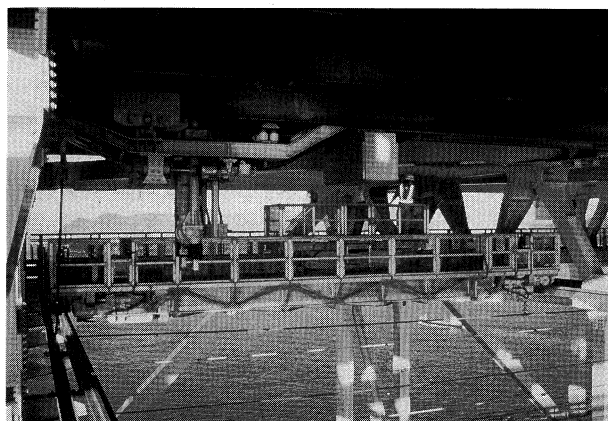
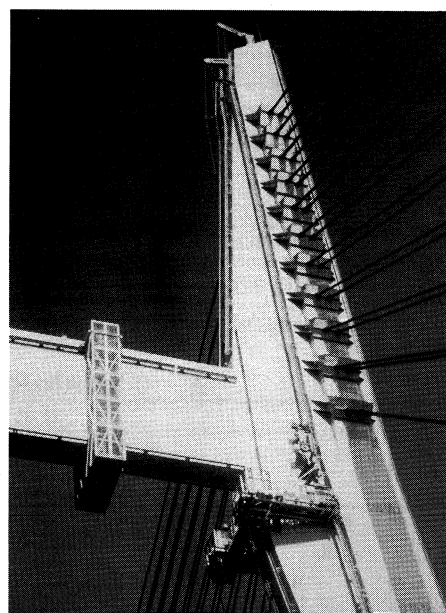


写真-2 桁内面作業車

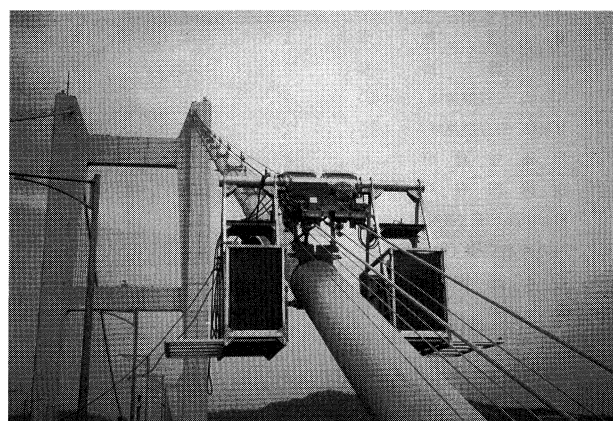


写真-4 ケーブル作業車

表-11 橋梁点検補修作業車の主要諸元 (Dルート)

桁外面作業車主要諸元												
区分	諸元	搭載荷重 (kg)			速 度 (m/min)			出 力 (kw)			給電方式	重量 (t/台)
		乗 員	機 材	計	走 行	昇 降	伸 縮	走 行	昇 降	伸 縮		
吊 橋	橋	750 (10人)	1,000	1,750	0～30	5	5	22×2 台	7.5	0.2	AC440V、3φ絶縁トロリー	64
斜 張 橋	橋	750 (10人)	1,000	1,750	0～30	5	5	15×2 台	5.5	0.1	AC440V、3φ絶縁トロリー	54
曲 弦 ト ラ ス 橋		750 (10人)	1,000	1,750	0～20	5	5	11×4 台	5.5	0.1	AC440V、3φ絶縁トロリー	140
番 の 州 高 架 橋 (共 用 部)		375 (5人)	625	1,000	4～10	－	－	3.7	－	－	AC440V、3φキャブタイヤケーブル	12
番 の 州 南 高 架 橋 (道 路 単 独 部)		375 (5人)	625	1,000	2～10	－	－	1.5×2 台	5.5	(旋回) 1.5	AC440V、3φ絶縁トロリー	12
桁内面作業車主要諸元												
※搭載荷重の()内数値は昇降台数を示す												
区分	諸元	搭載荷重 (kg)			速 度 (m/min)			出 力 (kw)			給電方式	重量 (t/台)
		乗 員	機 材	計	移設台車 走 行	移設台車 昇 降	内面作業 台 走 行	移設台車 走 行	移設台車 昇 降	内面作業 台 走 行		
吊 橋、斜 張 橋 曲 弦 ト ラ ス 橋		225 (150)	200 (50)	425 (200)	4/20	0.5	3.0	0.2×4 台	1.5×4 台	0.2×4 台	AC440V、3φ絶縁トロリー	9
斜張橋塔作業車主要諸元												
区分	諸元	搭載荷重 (kg)			昇降方式	昇降速度 (m/min)	巻上機出力 (kw)	安全装置 (ロープ切斷)	給電方式	重量 (t/台)		
		乗 員	機 材	計								
外 面 作 業 車		375 (5人)	375	750	ワイヤーロープ 巻取式	平均 6.2	18.5×2 台	落下防止装置	AC440V、3φキャブタイヤケーブル	11		
内 面 作 業 車		225 (3人)	225	450	ワイヤーロープ 巻取式	平均 6.5	18.5×2 台	落下防止装置	AC440V、3φキャブタイヤケーブル	7		
ケーブル作業車主要諸元												
※搭載荷重の()内数値は機材重量を示す												
区分	諸元	搭載荷重 (kg)			走行方式	走行速度 (m/min)	走行出力 (kw)	安全装置 (過速度)	給電方式	重量 (t/台)		
		走行台車	ケ ー ジ	計								
吊 橋	橋	(200)	300 (260)	760	キャタピラによる摩擦駆動	6.0	5.5	落下防止装置	AC440V、3φキャブタイヤケーブル (桁外面作業車より給電)	2.2		

んで走行する作業車で橋体にあらかじめ取り付けられたレールに沿って移動する走行装置と昇降及びスライド式作業台を有する。写真-1 参照。

② 桁内面作業車

吊橋の補剛桁、斜張橋・トラス橋の桁内面に設置されており橋軸直角方向にも移動可能である。写真-2 参照

③ 塔作業車

塔の作業車は塔の形式が屈曲しているとともに、ケーブルが多段に取り付けられている斜張橋にのみ設置されている。構造は塔頂部に設けた巻上げ機により Gondola 形式の作業車を昇降させるもので塔柱面に取り付けられたレールに沿って移動する。なお、吊橋の塔については塔頂の水平材上面に設置されている吊元設備により市販の Gondola を使用して点検するよう考えている。写真-3 参照

④ ケーブル作業車

吊橋のケーブルを点検・補修するもので主ケーブル上のハンドロープを利用して走行する。この作業車はハンドロープを軌条としているため軽量化を図っており重量は約 2t/台である。他の作業車と異なり常時は取り外して、他の場所に保管してある。写真-4 参照。
以上、維持管理設備としての橋梁各部位に対する接近手段について述べたが、これらの設備を利用しても全て

の部位を点検することはできない。補助的な手段としては簡易足場による方法も考えられる。表-11 に D ルートの作業車諸元を示す。

6. あとがき

橋梁の各構造部位における機能低下は、点検や監視でとらえる必要があり、得られた情報をもとに補修の有無に関し管理者は判断しなければならない。そのため点検に当たっては、橋梁の特徴及び各構造の機能を十分理解する必要がある。

長大橋梁の維持管理はまだ実績が浅く、現在データの蓄積を行なっている段階である。今後は、管理上幾つか残された問題点をクリアーし、点検・補修データの効率的活用により安全かつ合理的な維持管理を進め管理の充実を計って行かなければならない。

なお、貴重な管理データは将来の長大橋建設の参考となるであろう。

参考文献

- 1) ESCAP 橋梁維持セミナー・テクニカルレポート
平成2年10月
- 2) 本州四国連絡橋公団：管理用電気通信施設マニュアル

Modeling of the full aeroelastic model of the Akashi Kaikyo Bridge with a geometrical scale of 1/100

設 計 部 設 計 第 一 課 勝 地 弘
Hiroshi Katsuchi

本報告は、この風洞試験で用いた全橋模型について、実橋諸元の相似方法及び模型性能の確認試験結果について述べたものである。

現在、明石海峡大橋の縮尺1/100全橋模型による風洞試験が大型風洞において行われている。これは、明石海峡大橋がこれまでの吊橋をはるかにしのぐ規模であり、非

常に可とう性に富むことから複合的耐風挙動を考慮する必要があるためである。

すなわち、これまで行われていた2次元部分模型風洞試験では捉えきれない3次元効果を含めた耐風安定性の照査を行って、より精度の高い結果を得るとともに部分模型風洞試験の精度と限界を定量的に把握することを目的と

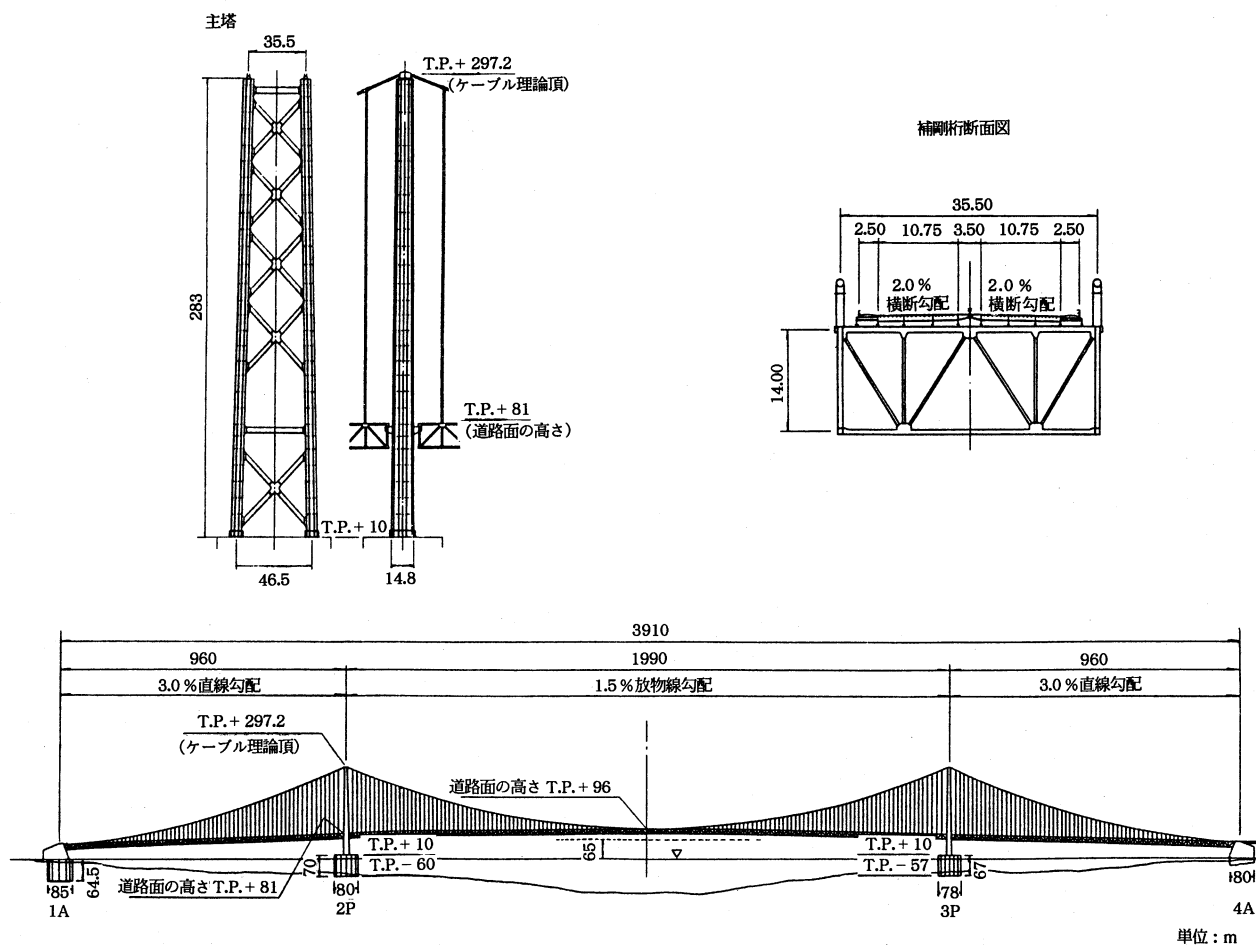


图-1 明石海峡大桥一般图

表-1 実橋構造諸元

		中央径間の諸元
ケーブル重量 (t/m)		14.25
補剛桁重量 (t/m)		29.54
補剛桁極慣性 (tf m ² /m)		5,336
ケーブル伸び剛性: EA (tf)		1.606×10^7
補剛桁剛性: EI (tf m ²)		図-4参照
補剛桁 固有振動数 (Hz)	鉛直対称一次	0.0638
	ねじれ対称一次	0.1497
	水平対称一次	0.0387

している。ここでいう3次元効果とは、

- ① 振動モード及び静的変形の影響
- ② ガスト応答の影響
- ③ ケーブル、塔と補剛桁との連成振動の影響
- ④ 構造及び気流の橋軸方向分布の影響
- ⑤ 境界層乱流の影響

等である。

風洞試験では、使用する模型は相似則に従って実橋諸元を模型化していくが、全橋模型では相似則の要求から部分模型に比べてより制約が多くなり、模型の設計、製作においては種々の工夫が必要となる。このため、試験の成否は模型の出来、不出来に左右されるとも言える。

本報告は、この明石海峡大橋の全橋模型風洞試験で使用する全橋模型の設計方法を述べるものである。なお、本試験で使用する大型風洞施設については、既に報告したとおりである。

2. 模型の設計概要

模型の設計にあたって、まず最初に模型縮尺の検討を行った。

試験を行う大型風洞施設の建設費の面からは模型はなるべく小さい方が好ましいが、小さすぎても形状の相似が困難になるため、試験精度を損なうこととなる。

従来の全橋模型で使われていた断面中心に剛性棒を通す方法では、明石海峡大橋の微妙な空力特性が変わってしまうことが懸念された。このため、補剛桁は剛性棒によらない「剛体ブロック+バネ」構造の模型化を図ることとした。縮尺については、模型の製作可能性を検討した結果、1/100であれば製作が可能と判明したため、全体縮尺も1/100と決定した。

次に、詳細な模型の設計は、全橋を補剛桁、主塔、ケーブルの3部分に分け、それぞれについて解析、風洞試験等により最適な模型化の検討を行った。ただし、最終的には全橋模型として一つに組み立てられるため、それぞれの検討においては、他の部分に及ぼす影響や全体系への影響を考慮に入れながら模型化の検討を進めた。次に、各部分の模型化の検討内容を述べる。

表-2 模型概要

補 剛 桁	4パネル剛体ブロック+V字バネ - 部材はカーボンファイバープレート+発泡アクリルフォーム
主 塔	- 剛性棒+枠外形材 - 斜材交差部一部切り離し
ケ ー ブ ル	- ステンレスより線+離散重錘 - ハンガーは樹脂被覆ナイロンロープ

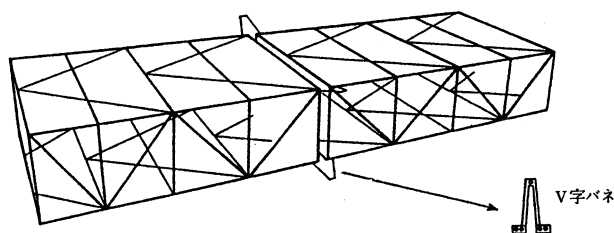


図-2 補剛桁の模型化

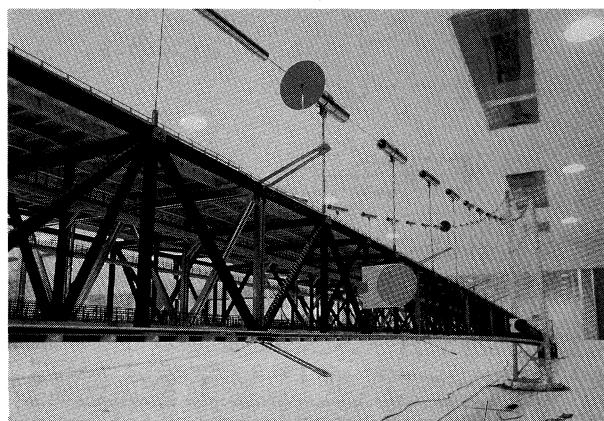


写真-1 補剛桁の模型化

3. 補剛桁の模型化検討

3.1 概 要

補剛桁は、剛体ブロックとそれを連結するバネとで構成される「剛体ブロック+バネ」構造とした。

これは、4パネルの剛体トラス桁模型相互をV字型のバネによって連結し、実橋のたわみ、ねじれ、水平曲げの剛性をこのV字バネによって相似しようとするものである。

また、補剛桁部材には従来の風洞模型での桧に替えて、軽量で高強度なカーボンファイバーで発泡アクリルフォームをはさみ込んだ新素材を用いた。これによれば、剛体トラス桁は実橋の形状、質量分布、重心、極慣性モーメントを精度よく相似させることができ、微妙な空力特性が再現できる。(図-2、写真-1参照)

以下に、V字バネを中心とした補剛桁模型の設計検討過程と本方法による模型化に対するいくつかの性能確認試験結果について述べる。

3.2 補剛桁模型の設計

1) V字バネの設計

模型の鉛直、水平曲げ剛性及びねじれ剛性は、V字バネの剛性によって相似した。V字バネの剛性評価は、図-3の要領で行った。ここで、補剛桁剛体ブロックは、4パネルを1ブロックとし、ハンガーは2パネルおきに取り付け

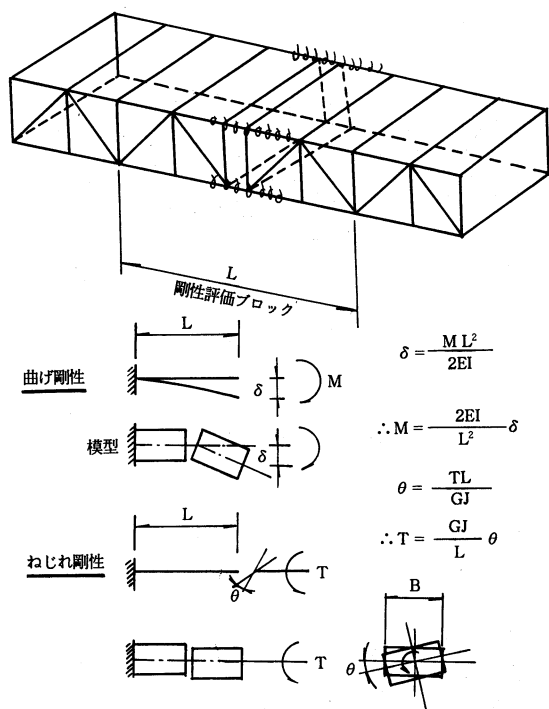


図-3 補剛桁剛性評価法

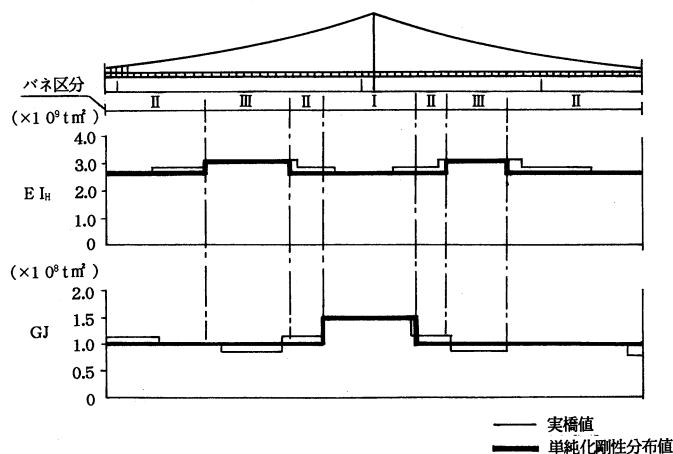


図-4 トラス補剛桁剛性相似

た。

実橋の補剛桁剛性は橋軸方向に分布しているが、これを忠実に再現することは困難であるため、図-4に示すように3段階の剛性に単純化し、3種類のV字バネで相似した。剛性の単純化による固有振動性状と風荷重変形量の誤差は、概ね3%程度であり、影響は小さいことを確認した。また、V字バネはフラッター照査風速(78m/s)付近でのフラッターにも耐えられるよう強度面の検討も行った。

このようにして設計したV字バネについて、製作後に性能試験を行った。図-5にV字バネ寸法、表-3に剛性確認試験結果を示す。

2) 剛体ブロックの設計

剛体ブロックは、V字バネで実橋剛性を相似させるため、

	バネⅠ	バネⅡ	バネⅢ
a	13.50	15.82	16.96
b	9.44	11.78	12.92
c	49.40	62.20	63.00
d	7.40	7.40	7.40
e	15.13	15.96	16.24
f	41.00	41.00	41.00
g	4.72	5.89	6.46
t	0.9	0.9	0.9

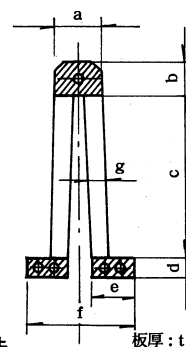


図-5 V字バネ寸法

表-3 V字バネ剛性確認結果

	剛性	バネⅠ	バネⅡ	バネⅢ
剛性	水平曲げ EI _H	$2.68 \times 10^6 \text{ kgcm}^2$	$2.50 \times 10^6 \text{ kgcm}^2$	$3.13 \times 10^6 \text{ kgcm}^2$
	鉛直曲げ EI _V	$4.49 \times 10^5 \text{ kgcm}^2$	$4.21 \times 10^5 \text{ kgcm}^2$	$5.25 \times 10^5 \text{ kgcm}^2$
	ねじれ GJ	$1.36 \times 10^5 \text{ kgcm}^2$	$0.93 \times 10^5 \text{ kgcm}^2$	$1.02 \times 10^5 \text{ kgcm}^2$
所要値比	水平曲げ EI _H	0.982	0.916	0.966
	鉛直曲げ EI _V	1.056	0.991	1.042
	ねじれ GJ	0.913	0.904	0.991

以下の項目が要求される。

- ① V字バネに影響しないよう十分剛であること。
- ② 重量、極慣性、重心が相似可能であること。
- ③ 試験中の振動に耐えられる強度を持つこと。

これらの要求を満たすべく検討した結果、補剛桁部材には、弦材断面を0.3mm厚のカーボンファイバープレートで構成しその内部に発泡アクリルフォームを詰めた新素材を用いることとした。その新素材で試作したブロックについて確認試験を行った結果、剛体ブロックの剛性は模型所要値に比べ1オーダー以上大きく、十分剛であることを確認した。

3) 性能確認試験結果

(1) 空力性能

「剛体ブロック+バネ」構造の模型が従来の2次元模型と異なるところは材料に新素材を使っていること、ブロック間に隙間(3mm)があること、V字バネがついていることの3点である。この違いが空力特性に及ぼす影響を調べるため、この2つの模型についてバネ支持風洞試験を行った。試験結果を図-6、7に示す。主な結果を以下に示す。

- ① 新素材の影響はないと考えられる。(図-6) 仰角 $\alpha = +3^\circ$ において若干の差があるが、これは $\alpha = +3^\circ$ の空力特性がもともと微妙であるためと考えられる。
- ② ブロック間隙間の影響はない。(図-7)
- ③ V字バネの影響はないと考えられる。(図-7) フラッター発振風速に最大4m/s程度の差があるが、補剛桁空力特性の微妙さを考えると、この差は小さいと判断した。

(2) 質量

明石海峡大橋のような微妙な空力特性を持つ補剛桁断面では、断面形状の相似はもちろん質量分布の相似は重要な課題である。

軽量な新素材を使ったため、付加重りを適当に配置することで重量、極慣性モーメント、重心ともに相似可能となった。模型製作後に付加重りで調整した結果、それ

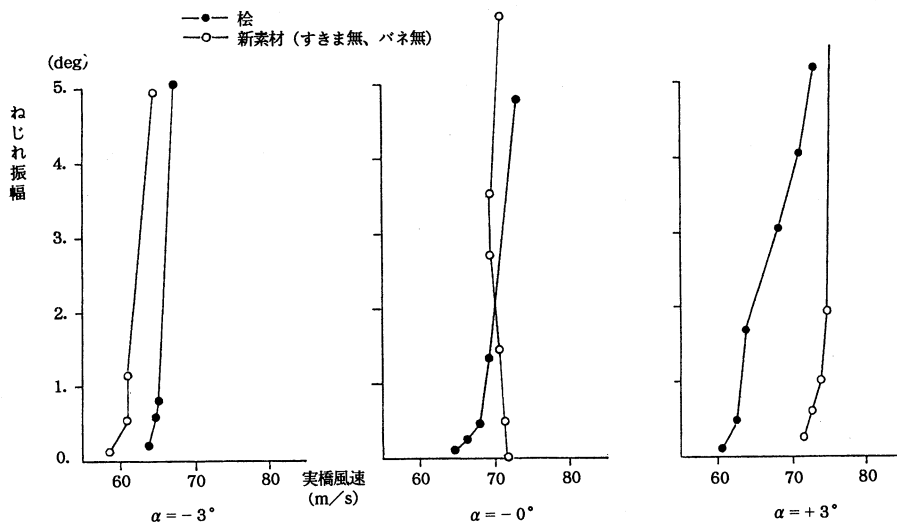


図-6 新素材の影響 (ねじれ振幅-風速曲線)

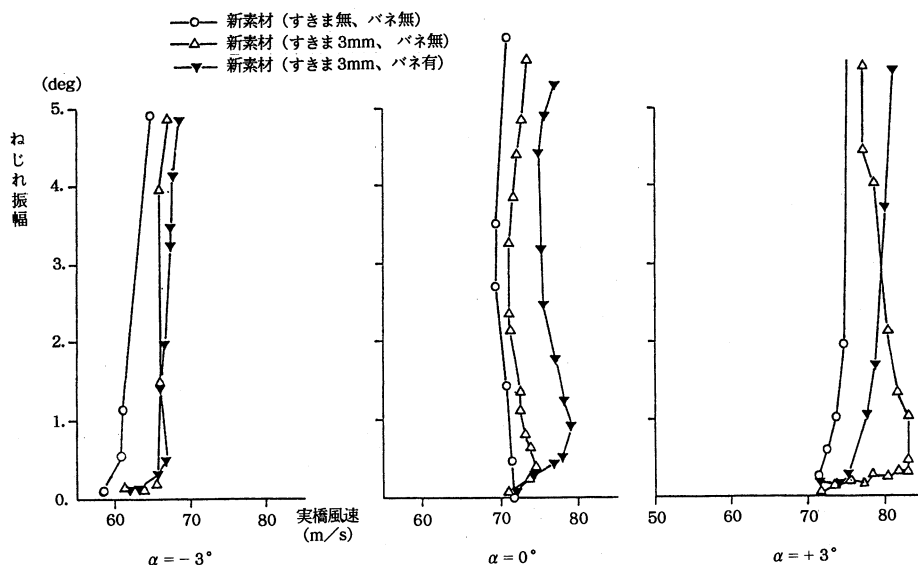


図-7 パネの影響 (ねじれ振幅-風速曲線)

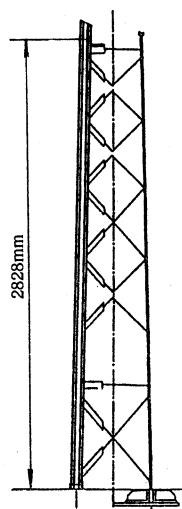


図-8 主塔の模型化

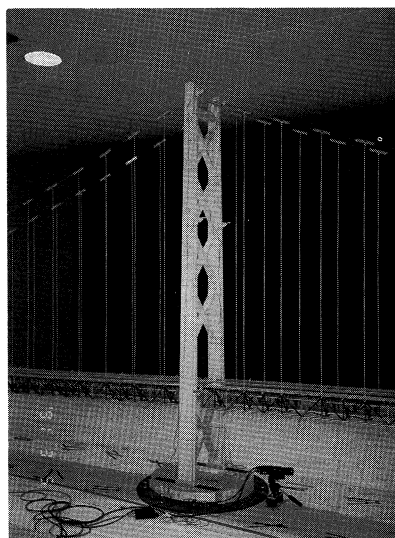


写真-2 主塔の模型化

それぞれ2%程度の範囲内で合わせられた。

(3) 減衰

減衰の計測は、V字パネで連結した桁ブロック5ブロックを片持ち梁状態(自重はコイルパネで支持)にし、自由振動減衰から求めた。

鉛直曲げ、ねじれ及び水平曲げ振動の対数減衰率は、それぞれ0.04、0.028、0.015となった。鉛直曲げとねじれは耐風設計要領の0.03、0.02を上回っているが、これは全体系での規定であるため、全橋模型状態で改めて確認することとした。

4. 主塔の模型化

4.1 概要

主塔の模型化は、剛性を相似する剛性棒と形状を相似する桧の外材材によることを基本に検討を行った。

また、主塔特性の相似に加えて、主塔が全体系へ及ぼす影響についても考慮した。特に、明石海峡大橋は補剛桁の横たわみ変形が大きく、これに影響を与える主塔面内剛性、また補剛桁ねじれ振動数に影響を与える塔柱伸び剛性の考慮も行った。(図-8、写真-2参照)

4.2 主塔特性の解析

主塔の模型化では、実橋諸元を完全に相似させることはできないため、解析によって剛性、質量分布等のパラメタが主塔の振動特性に与える影響度合いを調べ、影響度合いの大きいパラメタを優先的に相似させていくこととした。

解析は、塔柱、斜材、水平材の剛性が主塔の振動特性に与える影響を調べるため、各断面定数(断面積A、ねじれ定数J、断面2次モーメントIy(面外)、Iz(面内))を所要値に対して、10倍、1/10倍にそれぞれ変化させて行った。(表-4)その結果、以下のことがわかった。

① 主塔の面外曲げモード振動数には、塔柱の面外曲げ剛度(Iy)の影響が支配的である。

② 主塔のねじれモード振動数には、塔柱の面外曲げ剛度(Iy)とねじれ剛度(J)及び、斜材の面外曲げ剛度(Iy)が大きく影響する。

表-4 主塔各断面定数の振動数への影響

No.	M O D E	塔 柱				水 平 材				斜 材			
		A	J	I _y	I _z	A	J	I _y	I _z	A	J	I _y	I _z
1	面 外 一 次	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	振 れ 一 次	×	○	○	×	×	△	△	×	×	×	○	×
3	面 内 一 次	○	×	×	○	×	×	×	△	○	×	×	△

○ 振動数に大きく影響する
△ 振動数に若干影響する
× 振動数に影響しない

表-5 主塔設計の対象モデル

	塔 柱				斜 材				水 平 材			
	I _y	I _z	J	A	I _y	I _z	J	A	I _y	I _z	J	A
モデルA	○	○	×	×	○	○	×	×	○	○	×	×
モデルB	○	○	○	×	○	○	×	×	○	○	×	×
モデルC	○	○	○	×	○	○	×	△ ^{*1}	○	○	×	×
モデルD	○	○	○	×	○	○	×	△ ^{*2}	○	○	×	×

○ 相似を行なった諸元
× 相似を行なわなかった諸元
△ 間接的に相似した諸元

*1 斜材数を減らして調整
*2 斜材交差部を切り離して調整

表-6 固有振動数の解析結果 (モデルA) (Hz)

		所 要 値	モ デ ル A	誤 差 (%)
主塔単独系	面 外 一 次	1.323	1.324	0.0
	振 れ 一 次	4.788	5.774	20.6
	面 内 一 次	5.396	11.336	110.1
全体系	水 平 一 次	0.388	0.392	1.0
	鉛 直 一 次	0.650	0.651	0.2
	振 れ 一 次	1.392	1.420	2.0

表-7 固有振動数の比較 (Hz)

解 析 モ デ ル	面外一次		振れ一次		面内一次	
	振動数	誤差 (%)	振動数	誤差 (%)	振動数	誤差 (%)
所 要 値	1.323		4.788		5.396	
モデルA	1.324	0.0	5.774	20.6	11.336	110.1
モデルB	1.329	0.5	4.831	0.9	11.153	106.7

③ 主塔の面内曲げモードの振動数には、塔柱の伸び剛度 (A) と面内曲げ剛度 (I_z) 及び斜材の伸び剛度 (A) が大きく影響する。

4.3 主塔の設計

解析の結果を受けて、相似を行う主塔諸元の検討を行った。検討対象とした各モデルの諸元を表-5に示す。

1) モデルA

まず最初に、全部材の曲げ剛度 (I_y, I_z) を相似させたモデルについて、主塔単独及び全体系での固有値解析を行って、モデルの妥当性を検討した。この結果、以下の

表-8 有風時 (U = 80m/s) 振動特性の比較 (Hz)

	模型所要値	モデルC		モデルD		モデルA	
全体系	水平対称一次	0.395	0.396	1.001	0.396	1.001	0.399
	水平逆対称一次	0.788	0.791	1.004	0.791	1.004	0.794
	鉛直対称一次	0.642	0.642	1.001	0.642	1.000	0.645
	鉛直逆対称一次	0.762	0.762	1.000	0.762	1.000	0.762
	振れ対称一次	1.468	1.471	1.002	1.471	1.002	1.505
主塔単独系	面外曲げ一次	1.270	1.274	1.003	1.273	1.002	1.271
	振れ一次	4.765	4.536	0.952	4.740	0.995	5.756
	面内曲げ一次	5.381	4.631	0.861	5.158	0.959	11.302

※各モデルの右欄は所要値に対する比率

ことがわかった。(表-6)

① 主塔単独時には、面外の振動数は一致するが、面内、ねじれの振動数は所要値に比べ大幅に高くなる。前者は塔柱及び斜材の断面積が所要値より大きいいため、後者は塔柱のねじれ定数が所要値より大きいためである。

② 全体系では水平、鉛直曲げの対称1次振動数は比較的良好一致しているが、ねじれ対称1次モードで若干の誤差 (約2%) が生じる。これは、塔柱単独時と同様に塔柱のねじれ剛度が影響しているためである。

2) モデルB

次に、塔柱のねじれ剛度が無視できないことがわかったため、モデルAにこれを考慮したモデルBを検討した。(表-5参照)

主塔単独での固有値解析の結果、モデルAに比べて、ねじれについてはよく相似されるが、面内モードについてはやはり実橋とはかなり相違する。(表-7) これは、モデルAと同様、塔柱及び斜材の断面積が所要値より大きいためである。しかし、塔柱断面積は、ねじれ、面外曲げ剛度の相似上変えられないため、斜材断面積でこれを調整することとした。

3) モデルC及びモデルD

モデルC、Dでは、斜材断面積の調整方法の検討を行った。ただし、模型の斜材断面積はこれ以上減らせないため、幾何構造で対応した。

具体的には、モデルCでは斜材数を減らす、モデルDでは斜材交差部を切り離す、という方法をとった。そして、全体系での静的変形特性及び有風時振動特性の解析を行って、比較検討した。

① 静的変形特性

両モデルとも良い相似結果が得られた。ただし、中央径間中央点の補剛桁ねじれ変位で実橋風速80m/s相当時に約0.7°の誤差が生じることがわかった。これは、塔柱の伸び剛度が所要値より大きいためであるが、塔柱はねじれ剛度、面外曲げ剛度を相似する必要があるため、この誤差は避けられないものと判断した。

② 有風時振動特性

実橋風速80m/s相当時の模型固有値 (振動数、一般化質量) を実橋値と比較した。比較は、全体系、主塔単独時の2つの系に対して、ねじれ、曲げの最低次モードについて行った。(表-8)

その結果、固有振動数についてみると、全体系では両モデルとも1%以内で相似できるが、主塔単独時においてモデルCで最大15%程度の誤差に対して、モデルDでは5%以内で相似できる。したがって、主塔の模型化は、斜材の交差部を切り離すモデルDの剛性棒タイプとした。

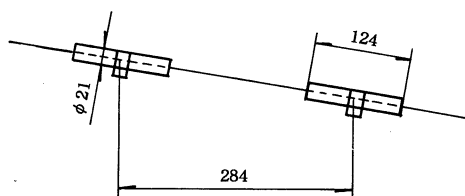
5. ケーブルの模型化

5.1 概 要

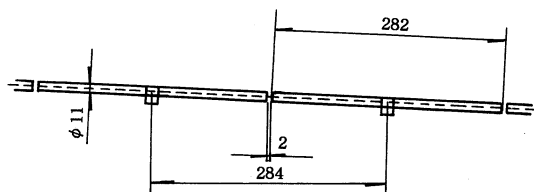
ケーブルの模型化では、重量、伸び剛性、抗力の3つの相似が必要となる。この条件を軸方向に一樣な円形断面で実現できる材料がないため、伸び剛性



写真-3 ケーブルの模型化



(a) ケーブル一般部



(b) 中央径間中央付近

図-9 ケーブルの模型化

を相似する線材と抗力、重量を相似する重錘を離散的に取り付けた分離重錘型の模型化を図ることとした。(図-9、写真-3参照)

5.2 ケーブルワイヤの設計

模型ケーブルワイヤには、主として実橋ケーブルの伸び剛性相似を分担させた。

伸び剛性を相似する材料として、材料の均一性、応答の線形性、入手の容易さ等を考え、直径1.2mm (1×19)のステンレスより線ワイヤを選定した。これについて、相似則から要求される伸び剛性所要値 ($E_0 A_0$) に対する模型実現値 ($E_1 A_1$) を確認したところ、

$$E_1 A_1 / E_0 A_0 = 13300 / 15820 \text{ kgf} = 0.84$$

であった。所要値に対しては、少し低めではあるが、入手の容易さの面からは、一応満足のいくものと判断した。ただし、ケーブル剛性が影響するねじれ振動に対しては、全体系で再確認することとした。

5.3 離散重錘の設計

離散重錘は、抗力と重量の相似を分担させた。重錘は円筒形とし、ストリップ理論を用いて重錘円筒直径、重錘取り付け率 (一定区間内での重錘のある部分と無い部

分の比率) を求めた。

一方、空力的問題として、重錘相互の空力的干渉や3次元効果が抗力に及ぼす影響、さらには斜風時の抗力、横力の影響等が考えられたため、ケーブルワイヤと重錘の1ユニット分を模型化し、2次元部分模型風洞試験で確認した。主要な結果を次に示す。

① 重錘相互の空力干渉による抗力増加より、3次元効果による抗力減少の方が大きい。

② したがって、必要な抗力を満足する所要重錘長さはストリップ理論による解析値より大きくなる。(約1.35倍)

③ 斜風時の横力は極めて小さく、無視できる。

この結果、重錘はハンガー取り付け点に配置することとし、2パネルおきにハンガーを配置するため、1箇所あたりの重錘長は12.4cmとなった。

5.4 3次元部分模型風洞試験

前節までで設計した模型ケーブルについて、その設計法の妥当性及びこの方法による模型化を行った場合の問題点を確認するため、1/100 模型ケーブルの一部分 (長さ3.9m) を対象にして、3次元風洞試験を行った。なお、本試験ではハンガーも取り付け付けた状態としている。主な結果は次のとおりである。

① 抗力は2次元試験の結果とよく一致する。

② 横力係数は極めて小さい。

③ ハンガー取り付け金具による抗力係数の増加は約10%程度である。

④ ケーブル模型の構造減衰は、対数減衰率で0.004以下であり、十分小さい。

⑤ 重錘のケーブルワイヤへの固定は、重錘中間、両端の3点支持が優れている。(ケーブル系減衰への影響は小さい。)

また、ハンガー材料は、抗力相似のみをはかることとし、軽量で小さな曲げ剛性とある程度の引っ張り剛性を持つものとして、直径3.5mmのナイロンロープに樹脂被覆を施して直径4mmとしたものを選定した。

5.5 ケーブル、補剛桁の空力干渉

重錘は、全体系として抗力を相似しているため、その直径は形状相似から要求されるものよりかなり大きい。したがって、局部的にはかなり気流を乱しており、中央径間中央付近の補剛桁との距離が小さい部分では、補剛桁空力特性への影響が懸念された。この影響を調査するため、ケーブルとの距離を変えた補剛桁模型を用いて、2次元風洞試験を行った。

この結果、重錘による気流攪乱の影響は大きく、実橋特性が再現できないと考えられたため、その部分については形状を相似する重錘を連続的に取り付けることとした。取り付け範囲は、ケーブルの気流攪乱の影響がケーブル～補剛桁距離が桁高さに等しくなるあたりまで見られたため、この距離をもとに中央径間中央から両方向へ16パネル、合計32パネルの間とした。(図-9、写真-4

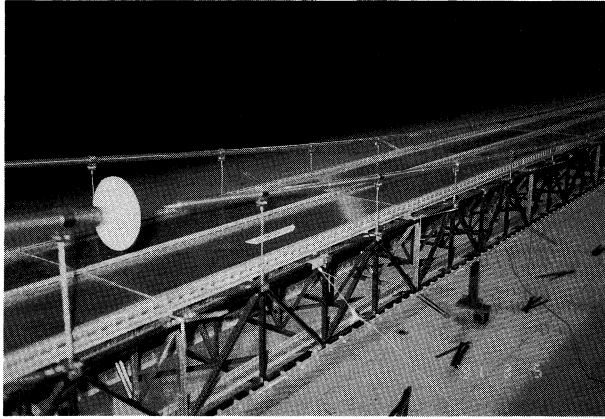


写真-4 ケーブルの模型化（中央径間中央付近）

参照)

6. 全橋模型特性

これまでの設計検討に基づき模型の製作を行った。補剛桁、主塔については、全橋模型に組み立てる前に単体の性能確認試験を行い、設計方法に誤りのないことを確認した。

また、全体系に組み立てた後に、いわゆる模型の出来具合を確認するため、静的変形特性、動的振動特性等の試験を行った。

一方、全橋状態での模型特性（変形、振動特性）を別途解析（V字バネ、支持条件等模型を忠実に再現したモデルで解析）によっても把握している。これは、風洞試験で得られる結果は、正確には実橋を相似した模型の耐風性能であって、実橋挙動と若干の相違も予想される。

このため、実橋と模型との変形及び振動特性の差異を

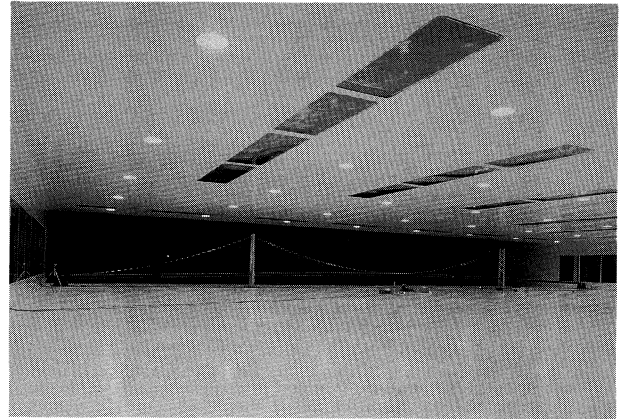


写真-5 模型全景

把握し、模型の対風挙動から実橋の耐風性能を判断するうえでの諸データを得るため、模型の解析を実施するものである。

7. あとがき

以上、明石海峡大橋大型風洞試験の全橋模型の設計について報告した。模型の特性、模型構造解析、さらには大型風洞試験の結果については、改めて報告したい。

現在、この模型の特性試験、模型構造解析を終え、大型風洞試験を行っている。

最後に、この模型の設計、検討にあたりご指導いただいた本州四国連絡橋耐風委員会（委員長：宮田利雄横浜国立大学教授）、同風洞試験作業班（主査：横山功一建設省土木研究所構造研究室長）の委員各位に誌面を借りて深く感謝する次第である。

明石海峡大橋 1A アンカレイジ基礎の設計・施工（その2）

Design and construction of Foundation of Akashi-Kaikyo Bridge 1A Anchorage

第一建設局 建設部次長 加島 聡
(前) 垂水工事事務所 所長 Satoshi Kashima

企画開発部 審議役 佐野 幸洋
(前) 垂水工事事務所 第一工事長 Yukihiro Sano

概要

明石海峡大橋1Aアンカレイジの設計と施工について（その1）に引継ぎ報告するもので基礎の内部構造の検討、内部掘削の底面地盤の安定に関する検討、そして地下連続壁の施工を述べている、特に地下連続壁は我国最大規模のもので、連壁施工、コンクリートなどの施工に我国初めての技術が使われている。また環境対策についても新たな試みがみられている。

10. 基礎内部構造の検討

10.1 概要

基礎内部の応力検討に当っては、まず全体の応力の流れの傾向が境界条件の設定（連壁、側壁、中詰間の結合条件）によってどのように変化するかを2次元FEM解析により解析した。その結果を踏まえ、3次元FEM解析で全体の変形、応力の流れ、特異点がないかを検証した。また、中詰コンクリートの打設による水和熱の影響については温度応力解析を実施し、この条件はコンクリートの打設時期も考慮するなど実施工を反映したものとした。

10.2 2次元FEM解析

解析は図-30に示す基礎寸法によっておこない節点条件としては

- ① 連壁と側壁は分離
- ② 連壁、側壁、中詰は一体
- ③ 側壁と中詰は分離

の3ケースについて試算した。但し分離条件は鉛直方向にスライド構造とした。構造モデルとしては連壁を無視したケース、前面地盤の抵抗を無視したケース、地盤のバネ評価を変化させたケースなど全部で15ケースの試算を行った。その結果以下の知見が得られた。

- ① 節点の結合条件の違いによる変形、応力の差は殆

んどない。

② 底版部には $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の引張応力が発生し鉄筋による補強が必要。前面地盤のバネを無視した場合には引張応力は倍増する。

③ 連壁を無視した場合は連壁根入れの影響はなくなり全体的に応力値は平均化され、引張応力は減少する傾向にある。

④ 地盤のバネが相対的に大きくなった部分には応力は集中するが、中詰コンクリート部に着目すれば地盤のバネ評価（2倍の範囲）によってとくに応力上の問題はない。

⑤ 施工当初は周辺地盤の土圧、水圧はすべて連壁（側壁）が負担し基礎内部へは伝達されないと考えているが、永年に亘る復水・地中応力の再配分等を考慮すると周辺の土圧、水圧は内部コンクリートに伝達される。これを考慮したケースではこれまでの引張域は殆ど圧縮域となった。

10.3 3次元FEM解析

解析モデルを図-31に、解析結果のうち基礎中心鉛直

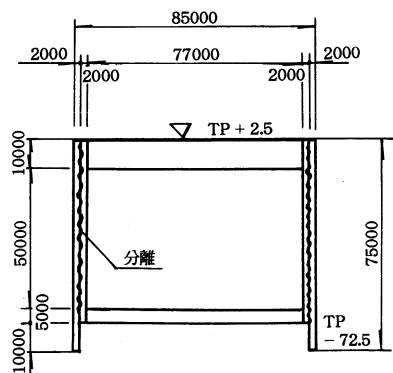


図-30 2次元解析モデル

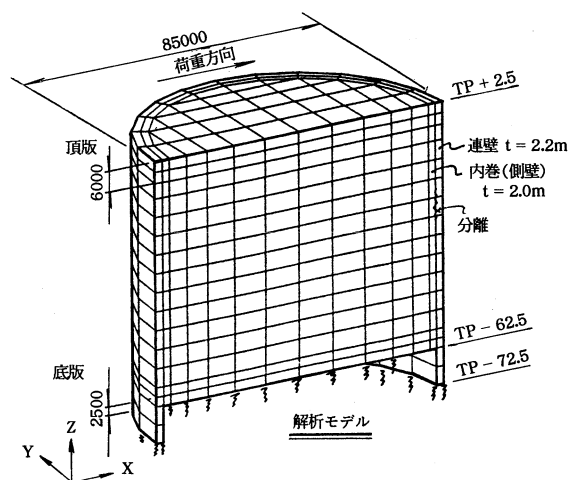


図-31 3次元解析モデル

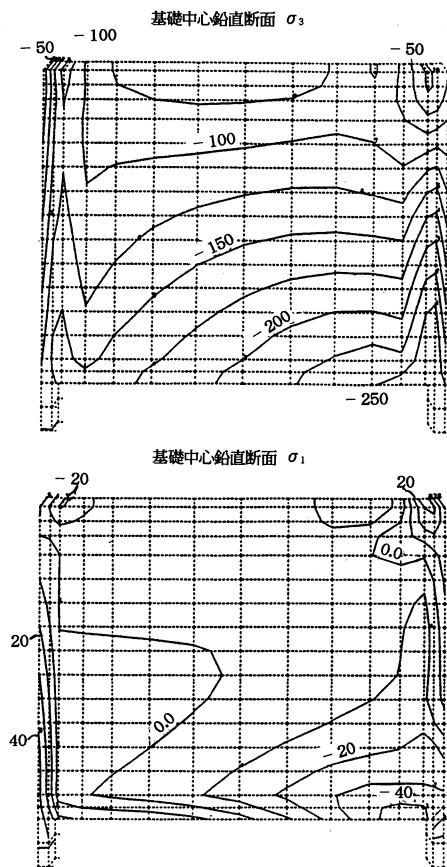


図-32 三次元FEM解析結果

断面における主応力図を図-32に示す。この結果、大きな引張力が発生するのは連壁と側壁部であり、各部位における最大応力は以下の通りである。

- 連壁部 4kgf/cm²
- 頂版部 7kgf/cm²
- 底版部 4kgf/cm²
- 中詰部 1kgf/cm²

これにより中詰部の発生応力は設計基準強度を90kg/cm²程度のコンクリートとすれば、コンクリートの許容引張応力以内に納まるため、無筋コンクリートとした。また、底版部は4kgf/cm²の引張応力が発生していることから鉄筋コンクリート構造とし、厚さを2.5mとした。なお、底版については、掘削最終過程における開放時間を短縮し作業の安全確保を図るという観点から省略する案について検討したが、底版部に引張力が作用すること、また底版を設けることにより中詰コンクリート全体をRC構造で囲むことが可能となり基礎全体で高い剛性が得られること、更に、底版を省略しても開放期間を大幅に短縮できないこと等の判断から、底版を設置することとした。

10.4 温度応力解析

軸対象モデルにより施工時期も考慮した温度解析を行った。その結果、打設時に蓄積された温度が降下する際に内部に引張を引き越し、頂版および底版の隅角部に引張応力が集中することが判った。これに対しては、隅切するとともに施工性を配慮のうえ、鉄筋で補強することとした。また、中詰コンクリートの温度収縮に伴ない側

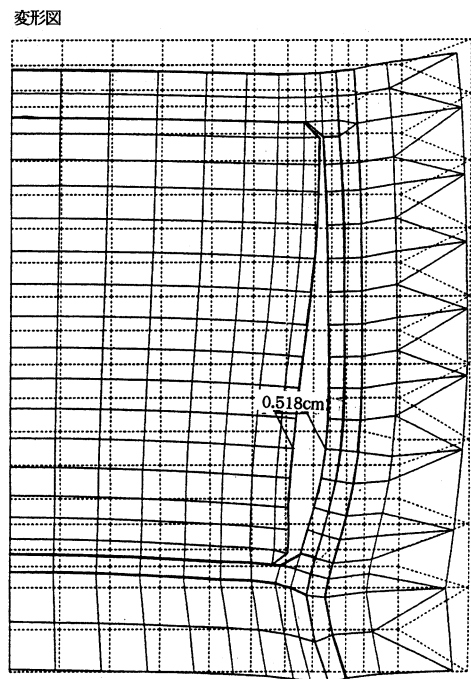


図-33 温度応力解析結果

壁と中詰コンクリートの間にすきまが発生するが、これは側壁の内側に5cmの突起を持つせん断キイを全面に配置して対処することとした。図-33に變形図を示す。

11. 内部掘削時の底面地盤安定に関する検討

11.1 概要

掘削時の底面地盤の安定検討に必要な詳細な地質データを得る目的で、埋立完了と同時に基礎中心および4方向に5本のボーリングを実施した。この結果から得た新たな透水係数、地盤強度を用いて浸透流、盤ぶくれ、ハイドロフラクチャリングの解析を行った。

11.2 解析

ボーリング結果からTP-55m以深は一樣な透水係数と想定した地盤が、TP-82~TP-100mにかけて不透水層と見なせる地盤が存在することが判明した。また、神戸層を砂岩と泥岩に詳細に分類し、それぞれの透水係数も設定した。これを踏まえ、以下の3つのモデルについて解析を実施した。

TYPE-1 基本設計段階で使用した透水地盤モデル

TYPE-2 平成元年度調査結果を基に地層区分をマクロに把えた地盤モデル

TYPE-3 平成元年度調査結果を基に地層分を泥岩層、砂岩層に細分化した地盤モデル

各ケースごとの透水係数の分布を図-34に、また浸透流解析結果を図-35に示す。TYPE-1では比較的均等なポテンシャル線が、TYPE-2、3ではTP-82m付近からの不透水層の影響を受け、連壁根入下端から20m付近にポテンシャル線が集中する結果となった。

浸透流解析結果から盤ぶくれの検討を行ったところ、過剰間隙水圧の分布は基本設計に比し約60%程度の値となることが判った。この結果を基に、連壁内部掘削の最終

透水係数 k (cm/sec)		
TYPE-1	TYPE-2	TYPE-3
8×10^{-4}	8×10^{-4}	8×10^{-4}
8×10^{-5}	5×10^{-5}	6×10^{-5}
8×10^{-5}	1×10^{-7}	4×10^{-5}
		6×10^{-6}
		8×10^{-6}
		1×10^{-7}
8×10^{-5}	3×10^{-5}	3×10^{-5}

図 34 透水係数モデル

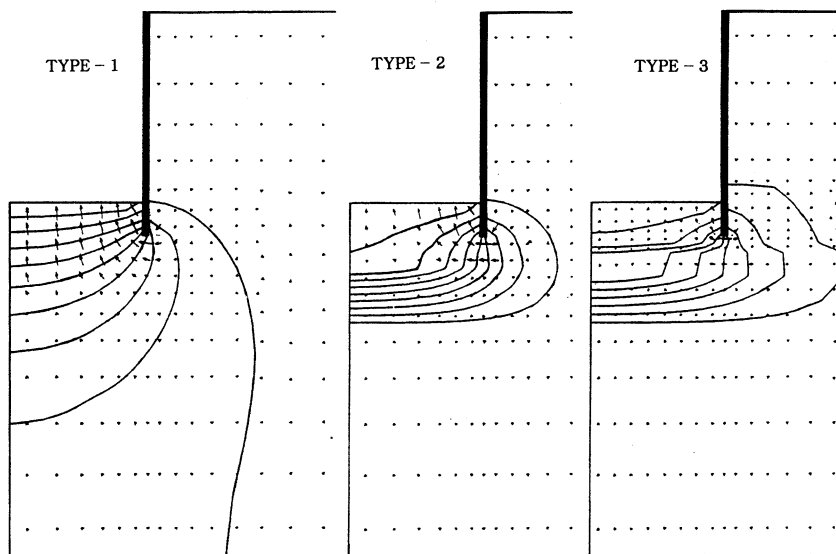


図-35 等ポテンシャル線

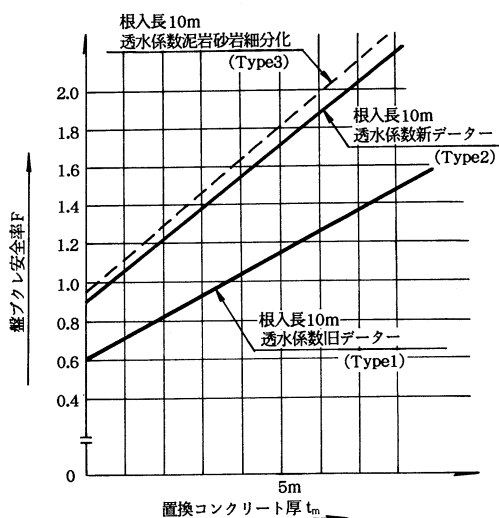


図-36 置換コンクリート厚と盤ぶくれ安定率の関係

段階における地盤の安定性をより確保するため、床付後、直ちにRCCFコンクリート打設を行なった場合の盤ぶくれ安全率を求めた。その結果を図-36に示す。この計算には神戸層のせん断耐力は評価されていない。

1Aの内部掘削はTP-62.5mと本四架橋のアンカレイジ基礎で最も深く、かつドライ掘削する計画のため、底面地盤の安定はこの基礎の成否を決定づける重要な問題である。この点に関してはさまざまな角度から検討したが、掘削底面における開放状態が長期化する底版の構築時点においては、神戸層のせん断耐力を期待しない状態で安定性を得る必要があると判断し、5mの置換えコンクリートを底版の下に設けることとした。図-36に置換コンクリート厚と盤ぶくれ安全率の関係を示す。

12. 地中連続壁の掘削工

12.1 概要

地下連続壁（以下「連壁」という）の施工手順は図-37に示すとおり、掘削中の溝壁の安定を図るための地盤改良を実施後、先行エレメントの掘削を開始する。掘削後、スライム除去、鉄筋カゴの建込み、そしてコンクリート

を打設し後行エレメントに移る。後行も先行エレメントと同様な施工手順を繰返して連壁を完成する。本工事の連壁の特徴を列記すれば以下の通りである。

- ① 外径85m、深さ75.5m、壁厚2.2mの我国では最大級の地下連壁で、完成後は内部をTP-62.5mまで大深度掘削を行う。
- ② 掘削には最大壁厚3.2mまで掘削可能なHF-10,000型2台とEM-320型1台の最新鋭機が本工事で初めて移動。
- ③ コンクリート間の継手はコンクリートカッティング方式とし、テーパカッティングを我国で初めて採用。
- ④ コンクリートに超低発熱型セメントを採用し、設計基準強度 $f'_{ck} = 370 \text{ kg/cm}^2$ 、配合強度 560 kgf/cm^2 の高強度コンクリートを採用。

12.2 準備工

舞子作業基地の埋立完了後、約5ヶ月間で以下の準備工の施工を行った。

- ① 大型コンクリートプラント
- ② 場内排水路及び道路
- ③ 場内濁水処理施設
- ④ 土砂積出し設備
- ⑤ 地下連続壁の仮設備工

地下連続壁工事における作業基地の使用計画を図-38に示すが、基地の西側にコンクリートプラントを、東側に連続仮設備及び土砂積出し設備を設けるレイアウトをした。これらは西側にあるマンション群に対する環境保全を意識したもので、コンクリートの骨材サイロを遮音壁として利用したこと、またコンクリートプラントはその影になるとともに、できるだけ海側に配置する等の配慮をした。

12.3 地下連壁の仮設備工

地下連続壁の施工は、泥水を循環しながら連続して掘削するため、大規模な関連設備が必要となる。これらの設備は泥水循環設備、泥水回収槽、作泥設備、廃液処理

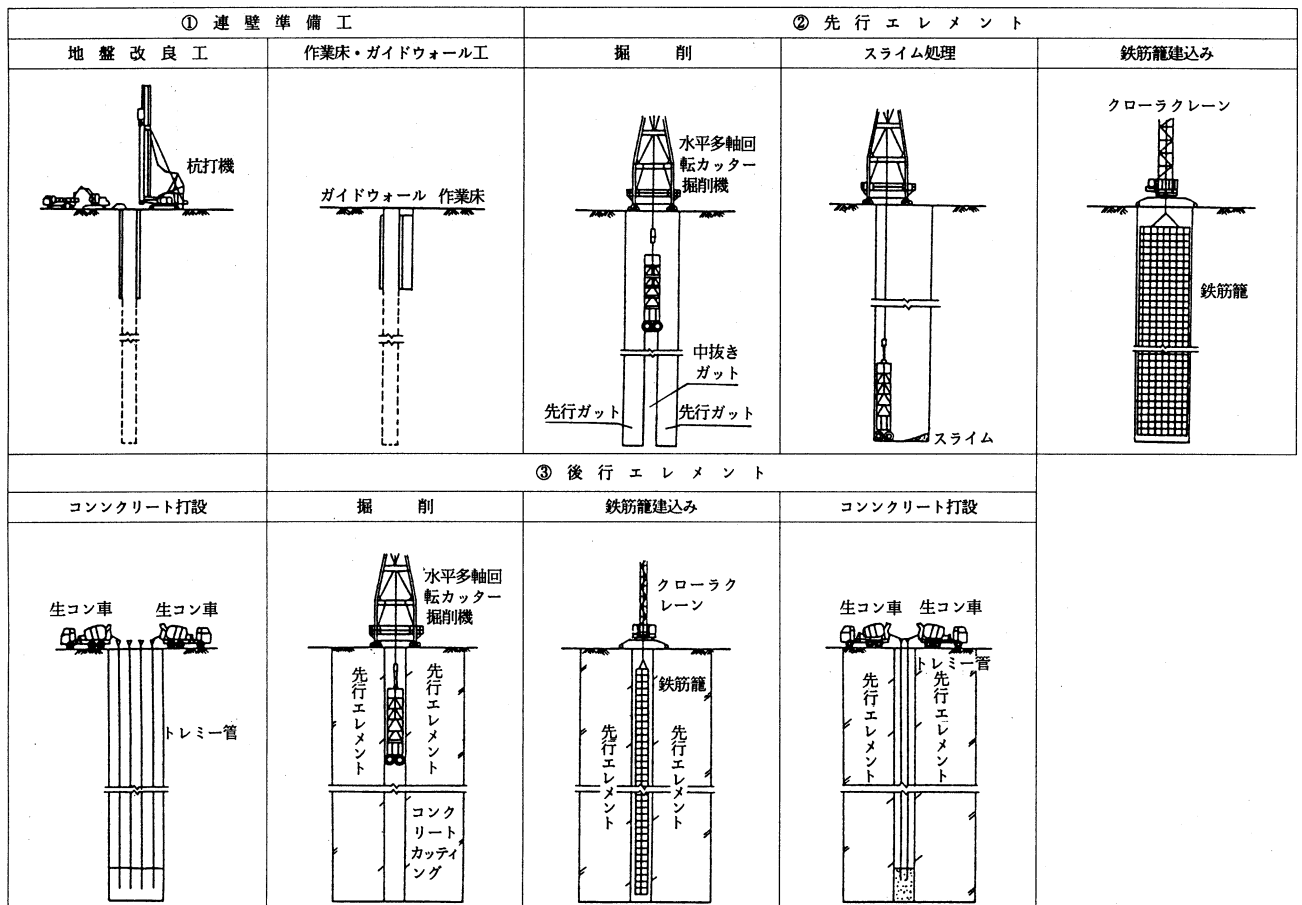


図-37 連壁施工手順図

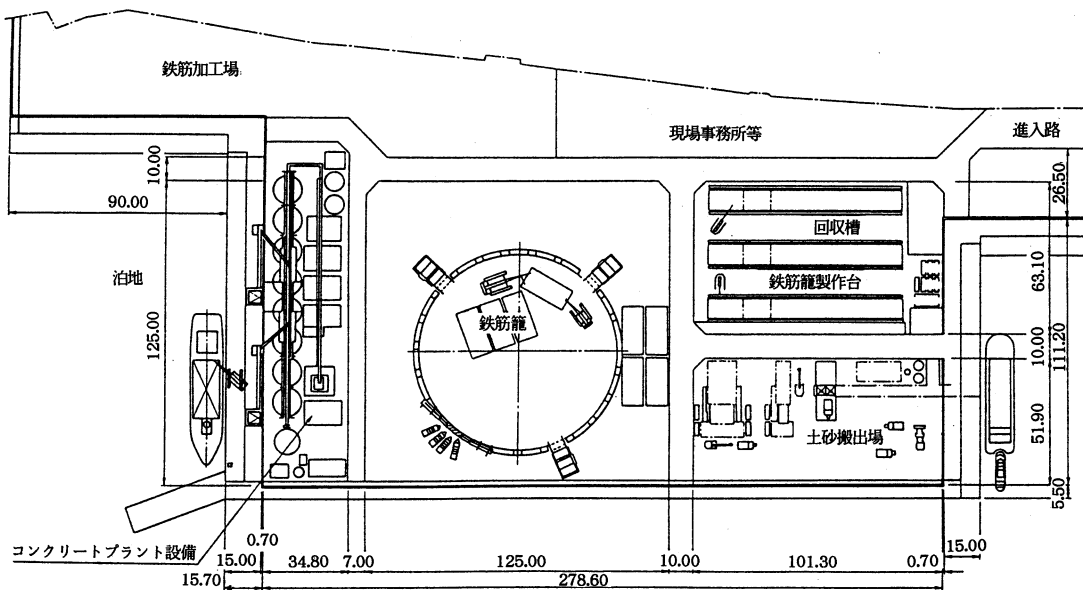


図-38 地下連続壁工仕様計画図

設備に大別され、それぞれの設備の機能は以下の通りである。

泥水循環設備：掘削機から泥水とともに送られてきた土砂を3段階からなる土砕分離装置に掛け、土砂・シルト分を分離。更に微粒分はスクリーデカンタにより取り去った後、沈殿槽に送りここで沈殿させた後、泥水を掘

削機に戻す。

泥水回収槽：コンクリート打設に伴い泥水を一時的にストックするための槽で、掘削機の数に対応して3系列を設けた。

作泥設備：安定液を製造する設備で、掘削開始時に所要量を作泥するほか、掘削中の逸泥、安定液の劣化、粘

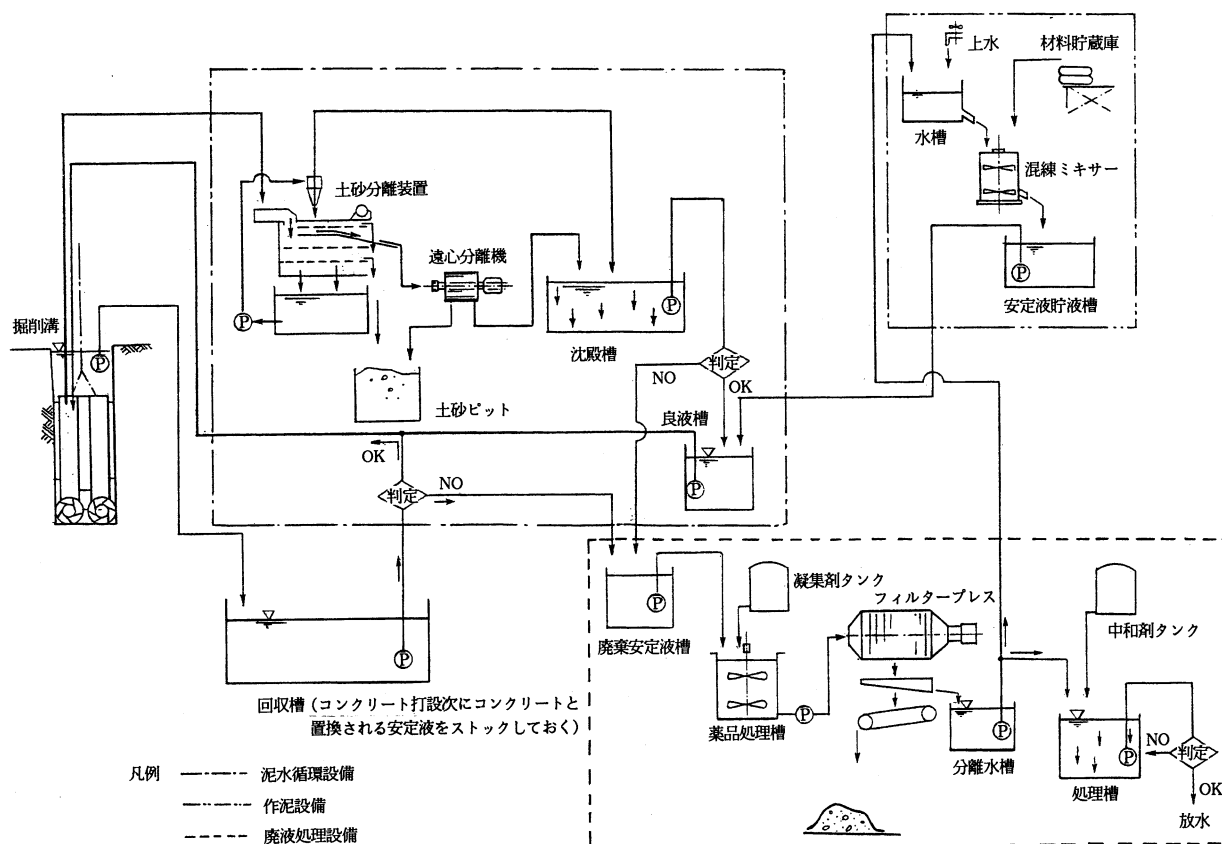


図-39 泥水関連設備フロー図

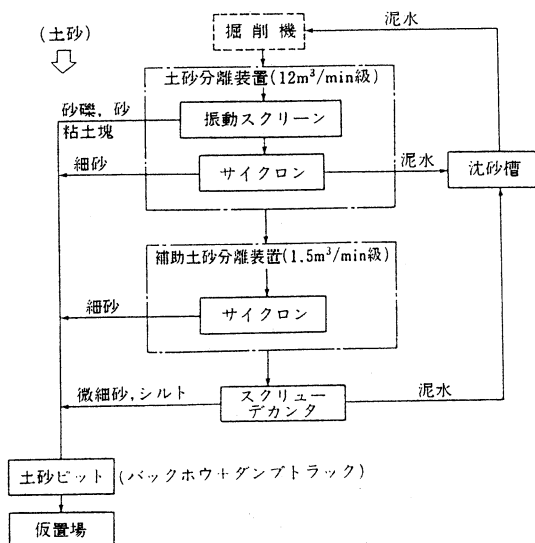


図-40 土砂分離フロー図

性などの品質を確保するための補給を行う。

廃液処理設備：劣化泥水、余剰泥水を処理するための設備で、凝集剤を加えた後、フィルタープレスで泥水を絞り微粒子はマッドケーキ状で分離する。

これらの設備のフローを図-39に、また土砂分離のフローを図-40に示す。表-9には機械の仕様を示す。

表-9 連壁仮設備工

設備	機械名	仕様	台数
泥水循環設備	土砂分離装置	サンドマスター 12 m ³	3
	土砂分離装置	サンドマスター 3 m ³	1
	土砂分離装置	サンドマスター 1.5 m ³	2
泥水回収槽	スクリーニングデカンタ	270 m ³	6
	沈殿槽	270 m ³	3
	水中サンドポンプ類	φ 50mm~φ 100mm	約50
作泥設備	回収槽 (I)	1350 m ³ (54×8.5×3.0m)	3
	回収槽 (II)	350 m ³ (15×8.5×3.0m)	3
廃液処理設備	作泥連続ミキサー	20 m ³ /hr	1
	貯液槽	22 m ³	6
	フィルタープレス	540 m ³ , 8.6 m ³	2
	酸化処理設備	200 m ³	3

12.4 地盤改良工

地下連続壁の施工においては、溝壁の安定が最も重要である。特に本工事においては、埋立直後の若材令地盤であること、また過去の実績に上廻る壁厚・エレメント長を施工しなければならない。溝壁が不安定であると、はだ落ち、更に崩壊を招き、場合によっては掘削機が埋没して復旧に多大な時間と費用をロスすることになる。溝壁の安定は経験的要素が多いので、過去の実績を綿密に調査するとともに溝壁の安定計算を実施した。その結果溝壁安定の補助工には以下の組合せを採用した。その計画図を図-41に示す。

水位低下……ウェルポイント

溝壁面の保護……ソイルモルタル柱列杭

載荷重の支持……ソイルモルタル柱列杭

周辺地盤の改良……ロッドコンパクションパイル (後

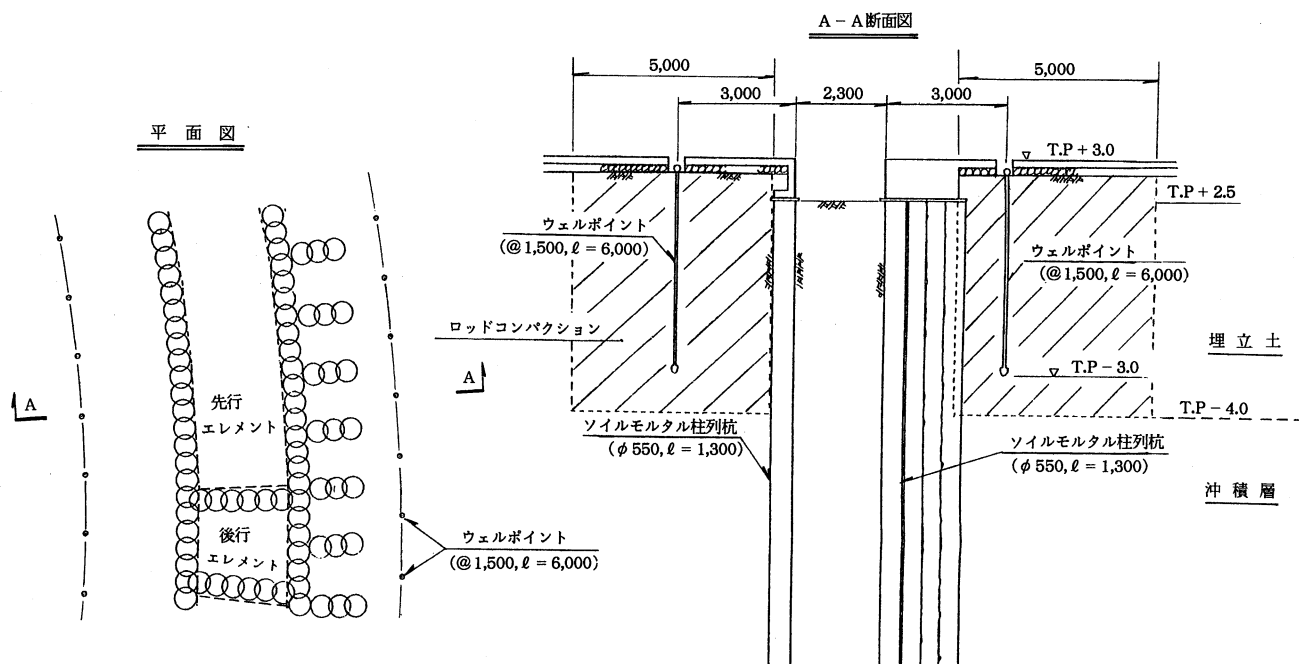


図-41 補助工法一般図

にソイルモルタル柱列杭に変更)

ロッドコンパクションは40cm角のパイプロットを土中に貫入後、引き上げを繰り返しながら地盤の動的締固めを行うものであるが、全体の1/4程度を施工した段階で、国道を越えた民家より「振動が感じられる」との苦情があり、計測、シミュレーションの結果、環境基準をはるかに下まわる値ではあるが、今後の工事展開に対するインパクトを配慮して、ソイルモルタルによる地盤改良に変更した。

12.5 掘削機械の選定

1Aの地下連壁の掘削条件は表-10に示すとおりで、過去に施工例のない壁厚とともに、神戸層（軟岩）を20mも掘削するのが特徴である。このような地質条件から掘削に適した機械は水平多軸回転カッターとなり、確実に掘削できる機械としてHF-10,000型とEM320型を選定した。しかし、両機とも施工実験を終了した段階であったが、その性能から実施工に供しうると判断した。神戸層の掘削については、岩盤掘削の実績を調査した結果、一軸圧縮強度が600~700kgf/cm²、場合によっては1,

000kg/cm²を越えた実例もあるので、神戸層の硬岩も掘削可能と判断した。表-10に1Aの掘削条件を、表-11

表-10 連壁掘削条件

項目	内容
壁厚	2.20m
施工深度	T.P.+2.5m ~ T.P.-73.0m (75.5m)
継手方法	コンクリートカッティング継手
地盤条件	沖洪積層 : N値25以下, レキ最大径100m/m以下 明石層 : N値50以上, レキ最大径100m/m以下 神戸層 : $q_u = 10 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ (軟岩)

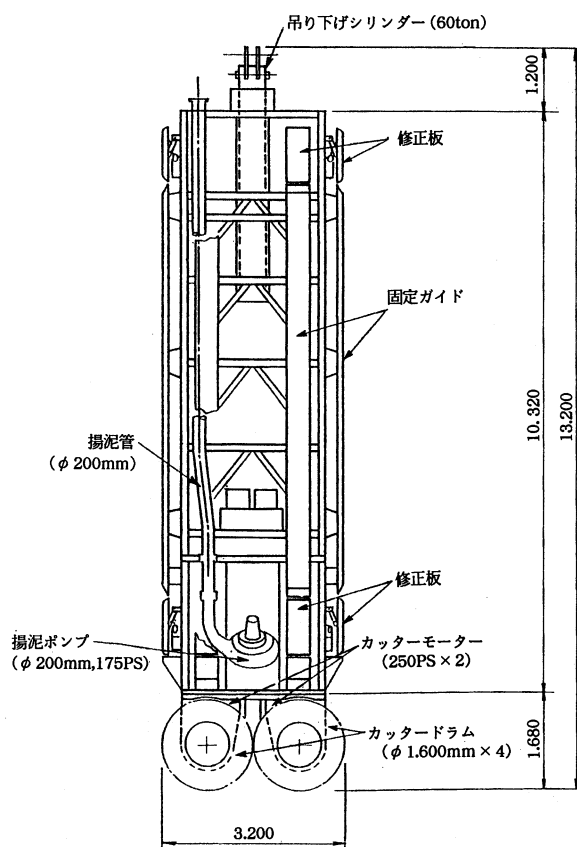


図-42 ハイドロフレーズ10,000型刃口部構造図

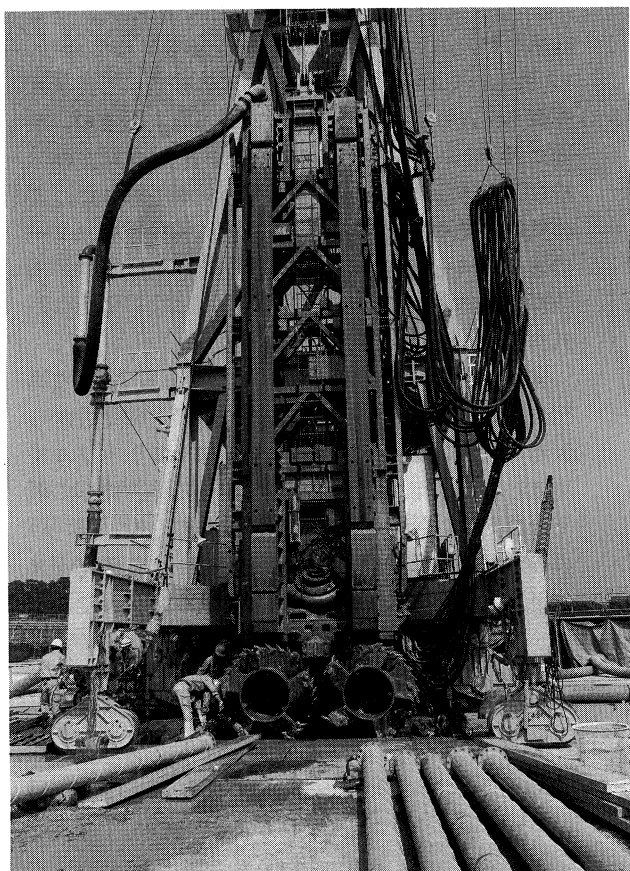


写真-2 HF10,000型掘削機

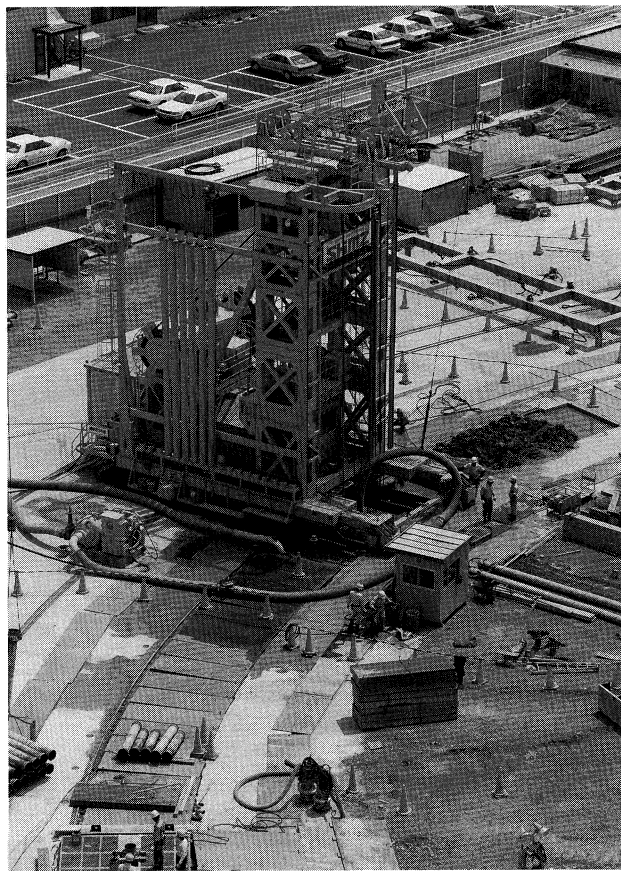


写真-3 EM-320型掘削機

表-11 連壁掘削機要目

		スーパーハイドロプレーズ 10,000型 (2台)	エレクトロミル EM-320S (1台)
能力	壁 厚	1,500~3,200mm	1,500~3,200mm
	深 度	170m	150m
	土 質	玉石層・岩盤にも適応	軟岩まで掘削可能
仕様	掘削機械長	3,200mm	3,200mm
	カッターモーター駆動	油圧	水中モーター
	掘削機械出力	250PS×2	30kw×1 55kw×2
	揚泥ポンプ口径	200mm	250mm
	揚 水 量	10m³/min	10m³/min
	本 体 重 量	48t	45t
	やぐら重量	122.5t	115t

に掘削機の要目を、図-42にはHF-10,000型の刃口部を構造図を示す。また、写真-2、写真-3にはそれぞれの掘削機の全景を示す。

12.6 掘削工

12.6.1 掘 削

掘削は大型の水平多軸回転カッターを有するHF-10,000型2台とEM320型1台を使用して実施した。事前に3機の割付を決めるとともに、各エレメントの掘削順序も決定した。表-12に施工数量を、図-43に施工フローを、図-44に各掘削機の割付図を示す。

掘削方法は図-45に示す通り以下の手順で行った。

表-12 施工数量

	エレメント数	掘削深度	1エレメント当り掘削土量	掘削土量
先行エレメント	23	(TP+2.5~TP-73.0)	1,390.56m³	31,983m³
後行エレメント	23	GL-0.5~76.0m ℓ=75.5m	531.52m³	12,225m³
合計	46			44,208m³

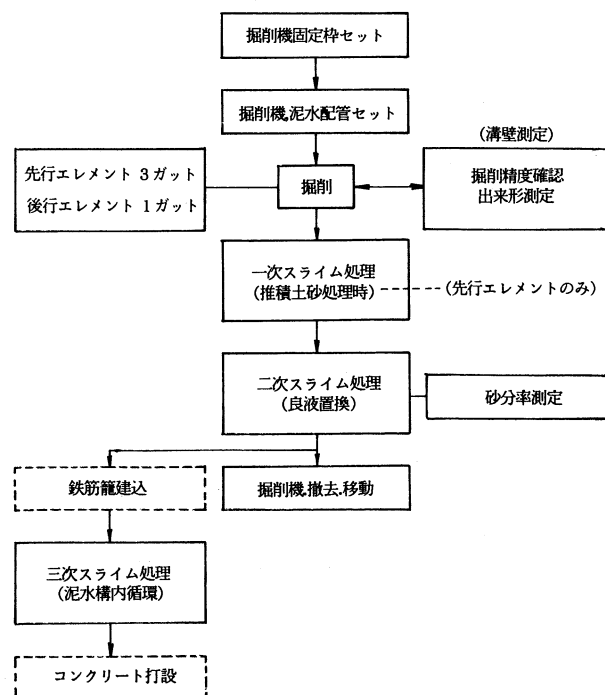


図-43 連壁施工フロー

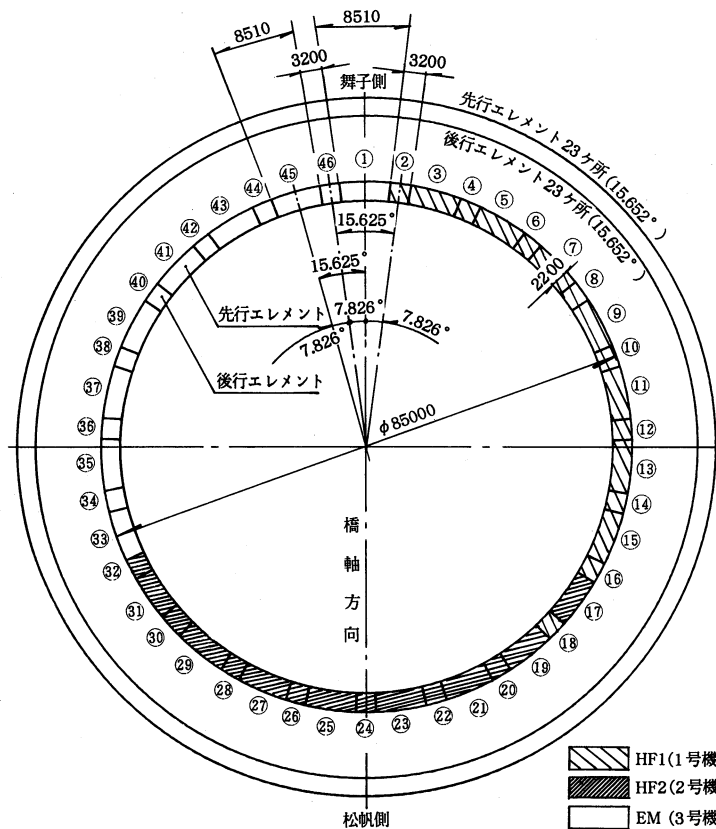


図-44 掘削機割付図

① 先行エレメント

- 1) 先行のガット1を掘削する。
- 2) 先行の反対側のガット2を掘削する。
- 3) 中抜ガット3の掘削を行う。
- 4) 中抜ガットの掘削に伴ないガット1ガット2に土砕が落下するため、ガット1の堆積土砕を処理した後、1次スライム処理を行う。
- 5) ガット2の堆積土砕を処理し、その後ガット1と同様スライム処理する。
- 6) ガット3のスライム処理後、別途ストックしておいた良液置換を行う。(二次スライム処理)

② 後行エレメント

- 1) 先行エレメントの両側の端部を5~20cm コンクリートカッティングしながら掘削。
- 2) スライム処理し、良液置換を行う。

掘削は平成2年3月上旬から開始することとし、HFの

1台を1ヶ月前に現場に持込み騒音状況のテストを繰返した。これは5項の環境条件でもふれた通り、1Aにおいて24時間作業を行うには機械に防音装置を取り付けることが絶対条件であると判断され、事前にHFのエンジン部は防音壁で囲い、また土砂分離装置全体は防音建屋で全て覆う対策を行った。この計画に従って、機械の持込み前に各機械センターで確認試験を実施した。また掘削開始前には神戸市の環境局さらに地元の対策協議会の立会いが行われた。

掘削開始後、埋立層に含まれていた玉石により揚泥管が詰まったり、モルタル柱列杭の下部附近から大量に泥水の逸泥が発生したり、様々なトラブルを見舞われた。なかでも神戸層における掘削能率の低下は著しく、掘削工程に最後まで影響した。神戸層の砕岩の掘削は局部的には時間10cm程度の能率まで低下した。また泥岩の強い粘着力が原因でカッターティスの間に附着し、カッタードラム全体が「ダルマ」の状態となった。これに対処するためサブティースの追加などのティース配列の変更、ティースチップの角度、硬度などを変え幾度となくトライを繰返し、状況は若干改善されたが、最も確実な方法は掘削機



写真-4 掘削状況全景

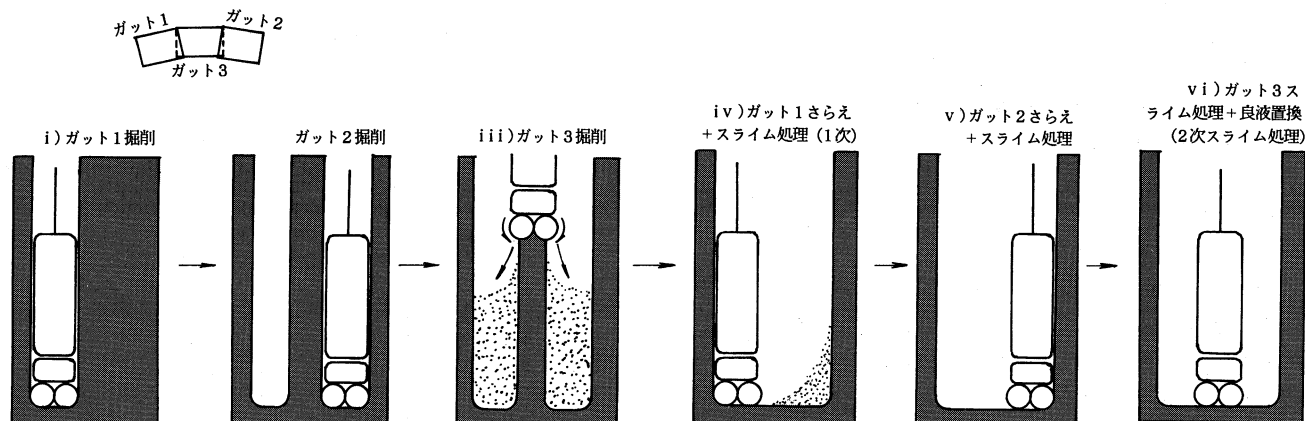


図-45 掘削手順

		1990 年									
項 目		3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月			
連壁掘削工	HF.1	①7 14日	②9 8日	③7 7.5日	④5 7日	⑤2 6日	⑥1 5日	⑦3 6日	⑧20 4.5日		
			②3 10日	③1 7.5日	④9 8日	⑤1 15.5日		⑦4 5日	⑧6 5日		
	HF.2	③13.5日	④9 8.5日	⑤13 9.5日	⑥後行EL試験掘削	⑦1 6.5日		⑨3 日	⑩5 日	⑪2 日	
			⑨9.5日	⑦7 7日	⑤6.5日	①1 6日	③8.5日	④6 日	⑤1 4日	⑦2 4日	
	EM	③3 20日		④5 12.5日		④3 10日	⑥1 7日	⑦3 6日	⑧3 日	⑩1 5日	
			③9 13.5日		③7 18日	⑤9 9日	⑦5 7.5日	⑧2 8日		⑩4 日	
鉄筋電 製作設置工	鉄筋電 製作 建込・ 打設準備										
コンクリート工	打 設		③9 17 ③3 9 23 ③5 39 29 7 21 45 ③3 27	⑤1 19 37 ①1 25 ④3 ①	⑦5 ⑧ 22 ①1 ④4 ①4 ①8 ⑥4 ②2 ③0	⑩2 20 ④0	⑫2 26 ④2 44 ③5				

圖-46 地下連續壁工事工程表

を引き揚げ高圧ジェット、鉄棒で
 附着した泥岩を除去するという
 原始的な方法であった。

一方、未経験であったターパークティングはほぼ順調に進んだ。これは、口付部の掘削形状をあらかじめ仕切板により確保していたことにより、掘削機の姿勢制御が出来たこと、また、コンクリートの圧縮強度は700kgf/cm²以上にも及び、カッターテースの損耗はかなりはげしかったが、掘削速度をコントロールするこ

とで対応できた。実掘削速度は先行エレメントの一般部で8.5 m³/H、神戸層で2.3 m³/H、後行エレメントの一般部で5.5 m³/H、神戸層で2.0 m³/Hであった。図-46には掘削の全体実施工程を示す、また写真-4には掘削状況の全景を示す。

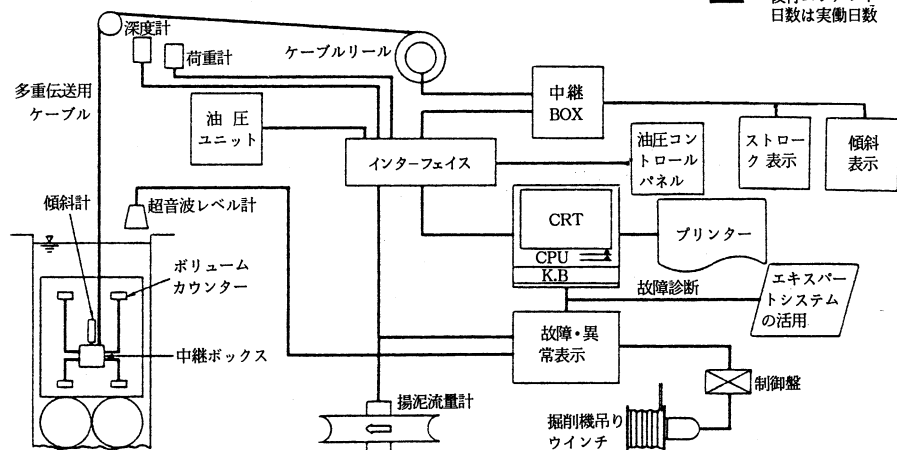


図-47 掘削管理システム

め、コンクリート打設のトレミー管を利用して、水中サンドポンプで安定液を循環させ浮遊物の沈殿を防止した。

12.6.3 掘削精度の管理

掘削溝の鉛直度の確保は連壁施工における最も重要な管理項目で、設計条件に直接影響する。本工事に於ては以下の精度管理を実施した。

- ① 掘削機本体を自然状態で吊り下げた時の鉛直性のチェック
- ② 掘削開始時の精度確保。これにはガイドウォール上の墨出しを行い固定枠をセットした。
- ③ 掘削中は掘削機に装備した傾斜計等による精度検出装置により常に設計位置との偏位状況を検知。
- ④ 掘削位置の矯正が必要な場合は、本体の前後及び側面に設置されている位置修正装置により傾斜を修正。
- ⑤ 掘削途中及び終了後、超音波溝壁測定器を使用して、掘削溝面の出来高を測定、精度管理基準を越えた場合は修正掘削を行う。

掘削機の掘削管理システムは図-47に示すが、現在位置のズレがリアルタイムでディスプレイに表示され、オペレータはこれを見ながら位置修正装置を操作し、鉛直精度を確保し掘削する。掘削機の本体重量は約45tで、吊荷重によりカッター先端にかかる荷重を調整。この吊荷重が持つペンデュラム効果を併せ利用して掘削を行った。写真-5に掘削管理装置を示す。

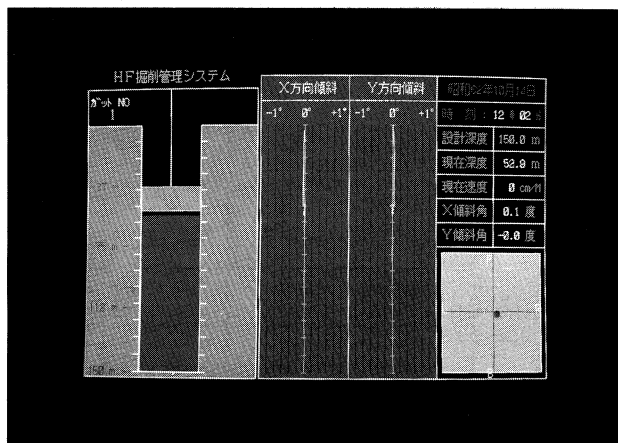


写真-5 掘削管理システム

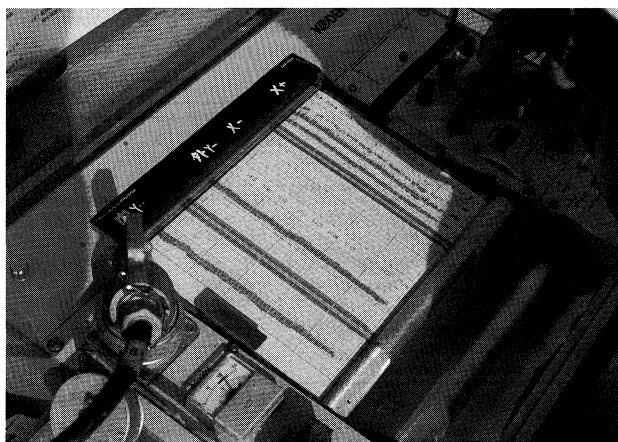


写真-6 溝壁測定状況

超音波による掘削精度の確認は、機械を引き揚げた後、先行エレメントには図-48に示す箇所の掘削壁面の状態を測定した。測定は1日1回または深度25mごとに測定した。その測定状況を写真-6に示す。

本連壁の掘削精度の管理基準は設計軸線に対して±50mmとし、これ以上の変位が生じた場合は、修正掘削を行った。修正掘削を実施したエレメントは12コで、全体の約13%であった。図-49には設計位置に対するズレ(余掘り)のヒストグラムを示す。

12.6.4 安定液

安定液は掘削壁面の安定及び掘削作業の向上のための両機能が求められる。この機能としては、掘削面に泥壁を形成する造壁性、掘削面に作用する土圧、水圧に対抗する比重、そして逸泥防止、碎層の肌落ち等の壁面の安定に寄与する粘性があるが、各現場により要求される機能はそれぞれ異なる。

(1) 安定液の配合

安定液にはベントナイト系安定液とポリマー系安定液があるが、1Aの地下連続壁においては、以下の諸点からポリマー系安定液とした。

- ① 掘削構内に海水が浸透すること
- ② ソイルモルタル柱列杭、コンクリートカッティングによりセメント分が混入すること
- ③ 砂層、砂礫層において逸泥のおそれがあること

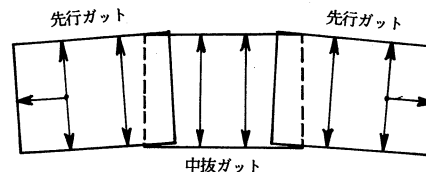


図-48 溝壁精度測定位置

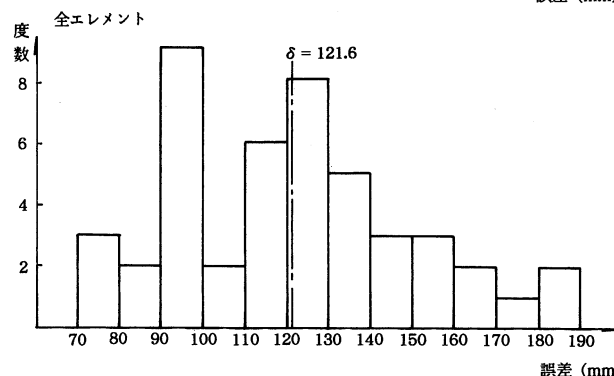
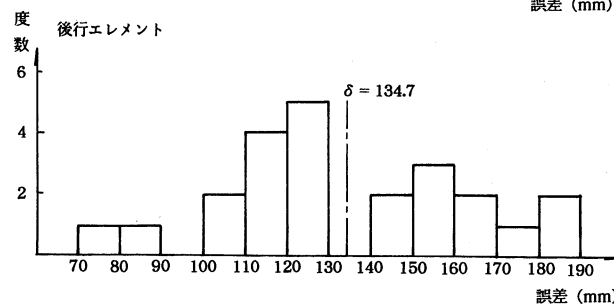
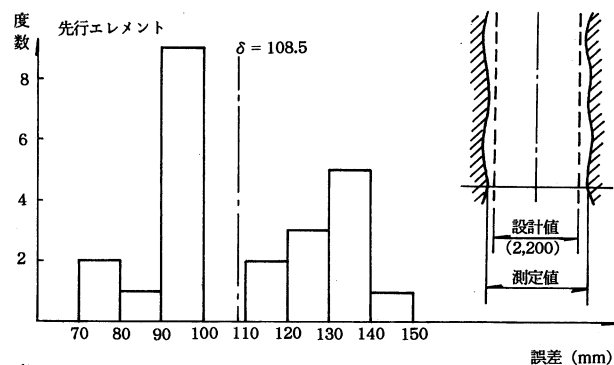


図-49 余掘りヒストグラム

安定液の配合は本現場と類似の条件で施工された実績を勘案して、表-13の配合を設定した。

(2) 安定液の管理

安定液の管理は手動計測、自動計測装置(A)と(B)の三種類の組み合わせで実施した。品質の判定は基本的に自動計測装置(A)で行うが、手動計測とも相関関係をチェックすることとした。また、自動計測装置(B)は安定液の構成成分や性状を把握する目的とし、品質管理の参考値とした。なお、測定頻度は手動計測で1~2回/日とし、自動計測は1回/2Hとした。表-14に測定方法、試験項目の一覧を示す。また表-15には安定液の管理基準を示す。

(3) 自動測定装置

- ① 自動計測装置(A)

表-13 安定液の配合実績とIA地下連壁の配合

工事名	掘削機械	配合の決定要因			安定液主材	配合 (kg/m ³)					
		海水(塩分)の影響	コンクリートカッティング	地質		ベントナイト	ポリマー	分散材	逸泥防止	変質防止	その他
青森大橋基礎 P ₉ , P ₁₀	エリクトミル EM-320	有り	なし	細砂層	ポリマー	20	6	2	5	0.3	—
北浦港橋梁基礎 2P~5P	ハイドロプレス HF-4000 及びBW	有り	なし	砂混じりシル ト、粘土混じ り砂質土	ポリマー	5	5	状況に応じて増減			—
東京湾横断道路 川崎人工島	エリクトミル EM-320	有り	なし	—	ポリマー	20	5	3	3	0.5	加重材 1.5
明石海峡大橋 1A 下部工	ハイドロプレス 10,000 エリクトミル EM-320	有り	有り	砂質土、砂レキ層 及び軟岩	ポリマー	13	6	5	0.7	0.7	—

表-14 計測方法別試験項目一覧表

試験項目	計測方法	手動計測	自動計測装置 (A)	自動計測装置 (B)
造壁性	—	○	◎	—
	造壁性試験法	—	毛管上昇(sec)	—
粘性	—	○	◎	—
	ファンネル粘度(sec)	—	回転粘度(g・cm)	—
比重	—	○	◎	○
	比重	—	比重	比重
砂分率	—	◎	—	—
	(%)	—	—	—
pH	—	○	◎	—
	pH	—	pH	—
温度 (液温)	—	○	◎	—
	(°C)	—	(°C)	—
スライム沈降速度	—	—	—	○
	—	—	—	(S.G/H)
成分分析	—	—	—	○
	—	—	—	(%, ppm)

凡例 ◎: 品質判定基準 ○: 品質判定参考

表-15 安定液管理基準一覧表

計測方法 泥水の種別	出動計測	自動計測装置 (A)	自動計測装置 (B)
作泥良液	粘度 22~35sec	—	—
循環泥水 (沈砂槽)	造壁性 5ml以下 粘度 24~35sec 比重 1.03~1.15 その他参考値	造壁性 70sec以上 粘度 130gcm以上 比重 1.03~1.15 その他参考値	比重 1.03~1.15 その他参考値
回収槽泥水 (NO.6)	造壁性 5ml以下 砂分 0.5%以下 粘度 22~35SEC 比重 1.02~1.10 PH 7~12.5 その他参考値	造壁性 70sec以上 粘度 120gcm以上 比重 1.02~ 1.10 PH 7~12.5 その他参考値	比重 1.02~1.10 その他参考値
回収槽泥水 (NO.6以外)	参考値	—	—
溝内泥水 (良液置換後)	砂分 1.0%以下 (溝底から5m)	—	—
溝内泥水 (コンクリート打設 回収時)	PH 7~12.5 造壁性 5ml以下 その他参考値	—	—
サンドマスター デカンタ出入	参考値	—	—

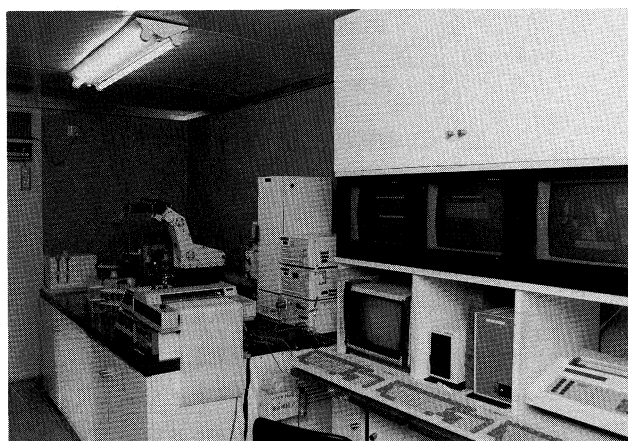


写真-7 安定液自動分析装置

泥水の物性を全自動で連続的に計測するもので、項目は、造壁性、比重、粘性、pH及び温度である。

② 自動計測装置 (B)

安定液中の構成成分や性状を連続して測定できる自動管理システムで、計測内容は密度計及びスペクトル分析器による安定液中のベントナイト、ポリマー分散剤の濃度変化及び劣化因子となるセメント、海水の濃度である。これらの計測はロボットを用いて自動化されており、計測制御、データ処理はコンピュータによりリアルタイムで管理できる。写真-7にその測定状況を示す。

(4) 逸泥対策

逸泥とは掘削中の安定液が急激に地盤中の間隙や透水

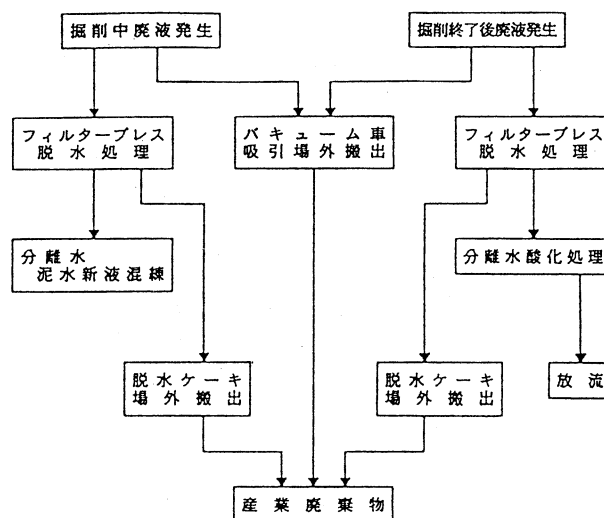


図-50 廃液処理フロー図

層に流出する現象で、その規模により小逸泥、中逸泥、大逸泥に分離される。中小逸泥には、安定液のベントナイト、ポリマー濃度を高くすること、逸泥防止材を投入する等の対策が行なわれ、本工事の掘削初期に遭遇した逸泥では、糸くず状の繊維ファイバーを投入し対処した。

(5) 作泥

安定液の混練は混練能力 $20 \text{ m}^3/\text{H}$ の連続混練装置により大量に安定液が必要となる以外は昼間に作泥した。作泥された安定液は、仮受ピットから回収槽に送り劣化等による安定液の品質を改善した。なお、安定液の配合は逸泥状況、劣化状況に応じ配合を修正した。

(6) 廃液処理

掘削で劣化した安定液及び掘削終了に伴ない発生する廃液の処理は、図-50に示すシステムで処理した。

12.6.5 掘削溝の管理

(1) 泥水位の管理

泥水位を所定の高さに保つことは溝壁の安定に非常に重要である。本工事では潮位の変動を考慮して、TP+2.8~TP+2.5mの間に管理した。掘削中は超音波レベル計を使用し、掘削機の運転室で管理できるシステムとした。

(2) 地下水位の管理

連壁掘削位置から内側、外側とも3m離れた位置に1.5m間隔で長さ6m ウェルポイントを打込み、地下水位の低下を行った。溝壁面の地下水位は、TP-0.9m以下に管理するため観測井を掘り、警報水位を設定した警報システムを採用した。

12.6.6 掘削残土の処分

土砂分離装置で分離した掘削土は土砂ピット内に堆積され、これをバックホウで11tダンプに積み込み、仮置場又は積出しベルコンホッパーに直接投入した。掘削土は写真-8に示す積出し装置により、クレーン付台船に積み込み、兵庫県芦戸沖の埋立事業に流用した。なお、スクリーデカクタからの微粒土には土壌改良剤を添加して改良を行った。



写真-8 土砂積出状況

13. 鉄筋籠建込み工

13.1 鉄 作

鉄筋籠は鉄筋及び補強棒からなり、鉄筋はコンクリートの充填性を考慮し最大径は41mmとし、ピッチは200mmとした。補強棒は主に型钢で構成し、鉄筋重量に対する比率は約15%である。製作は、現場の鉄筋籠製作ヤードに掘削機に対応する3系列の製作台を設け、

全長を一括で製作した。補強棒は工場で製作したものを現場に搬入し、架台上で組立後、鉄筋の配筋を行った。鉄筋籠は全長を4ブロックで製作し各継手はオーバーラップとし、建込み時の精度を確保するためマーキングが実施された。図-51に施工フローを示す。なお、側壁との接合には図-52のような歯型鉄板と接合鉄筋から構成された金物を用いた。接合鉄筋はトルク固定方式のネジコン継手を採用した。

13.2 運搬、建込み

鉄筋籠はトレーラー及びクレーンで運搬し連壁内側に仮置きした。建込みに先立ち鉄筋籠を建起しするが、これには先行エレメントの主クレーンは270t吊、副クレー

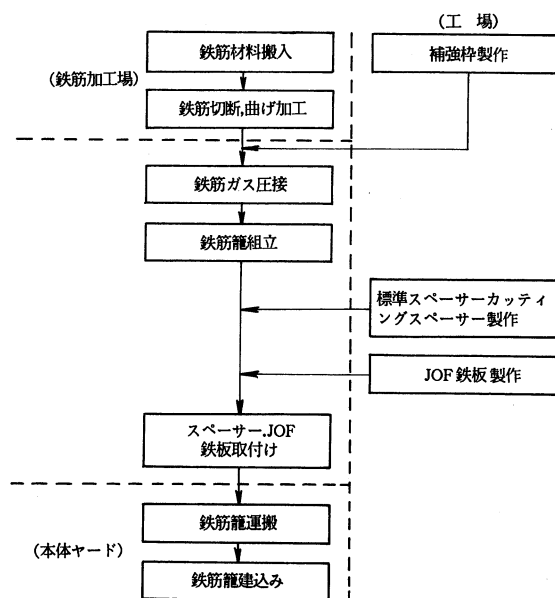


図-51 鉄筋かご施工フロー

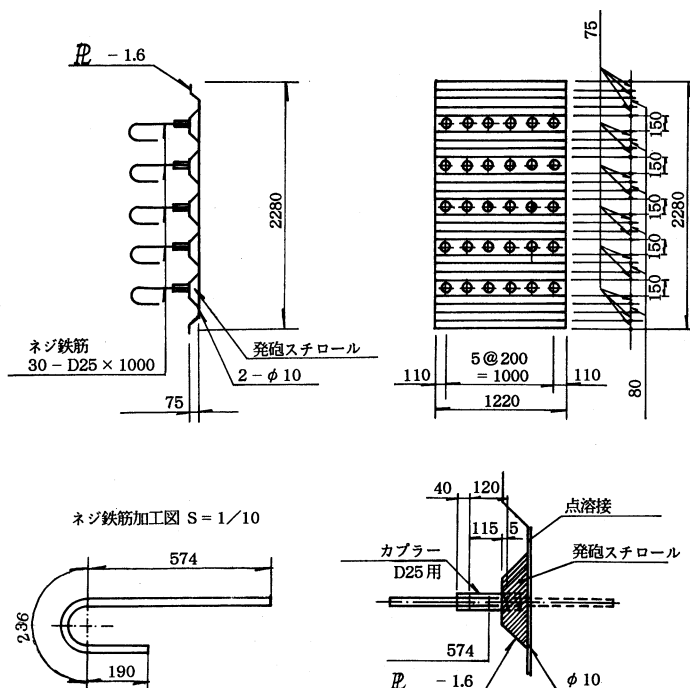
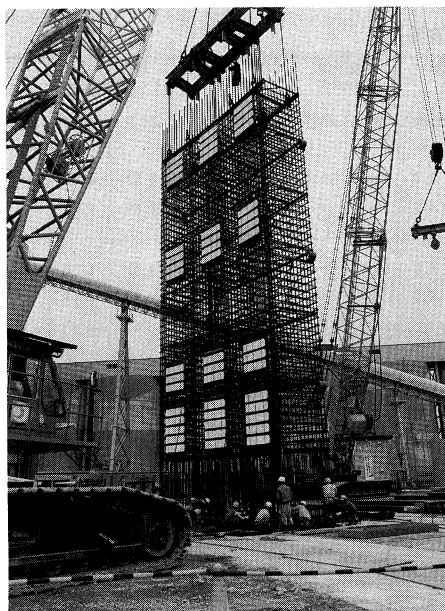


図-52 側壁接合金物

写真-9
鉄筋かご
建込状況



ンは150t吊、後行エレメントは主クレーンを150t、副クレーンは50tのクロラクレーンを用いた。鉄筋籠の長さは約20mで、先行エレメントの全重量は約120t、ブロックの最大重量は38tである。また、後行エレメントは全重量55t、ブロック重量は18tである。鉄筋かご建込みは下側ブロックから行ない、各ブロックのジョイントは縦筋の重ね継手部を一部溶接して接合し、継手部の横筋は現場取付した。本連壁はコンクリートカッティングが行われることから建込精度には特に注意を払った。写真-9に建込み状況、写真-10に接合作業の状況を示す。

14 連壁コンクリート工

14.1 概要

本工事の連壁コンクリートの特徴を別記すれば以下となる。

- ① 設計基準強度 $f_{ck91} = 370\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、配合強度 $560\text{kgf}/\text{cm}^2$ の強高度コンクリートを使用。
- ② 我国で初めて連壁に超低発熱型セメントを採用。
- ③ クーリングは冷水、氷によるプレクーリングとし、練上り温度を 20°C 以下に規制するとともに超低発熱セメントの採用によりひび割れ指数1.2以上を確保。
- ④ ブリージング対策として細骨材の $1/3$ 相当に砕砂を使用。
- ⑤ 現場の環境対策の一環として先行エレメント $1,400\text{m}^3$ を昼間の10～12時間で急速施工。
- ⑥ 本基礎のコンクリート量と急速施工に対応するため、 6.0m^3 のミサー2基を持ち $480\text{m}^3/\text{H}$ の能力を有する専用のコンクリートプラントを設計し現場内に設置。

コンクリート打設はトレミー管による水中コンクリート施工とし、トレミー管は径 $250\text{mm}/\text{m}$ で、先行エレメントに4本、後行エレメントには2本を配置した。コンクリートはアジテータトラックで運搬し、先行エレメントは約 1400m^3 、後行エレメントは約 510m^3 、総計 $45,000\text{m}^3$ を打設した。

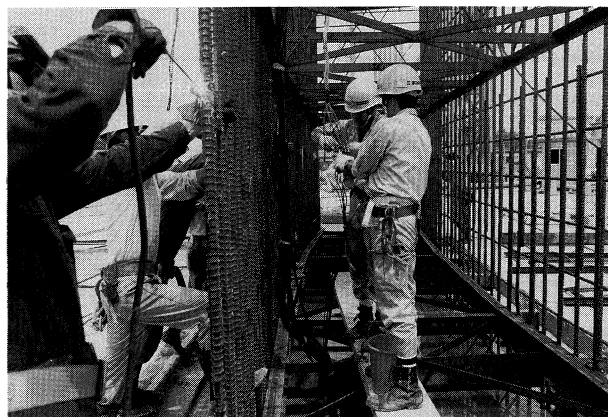


写真-10 鉄筋かご接合状況

表-16 地下連壁コンクリート配合条件

強度(kgf/cm^2)			粗骨材 最大寸 法(mm)	スランプの範囲(cm)		空気量 (%)	ブリージング率 (%)
設計基準 強度 f_{ck} (91)	水中強度低 下も考慮した圧 縮強度(91)	配合強 度 f_{ck} (91)		ベース	流動化		
370	465	560	20	8 ± 2.5	24 ± 1.5	4 ± 1	3以下

表-17 各セメントの性質

種 別	記号	比重	比表面積 (cm^2/g)	混合割合 (%)		
				PC	BS	FA
三成分系超低発熱型セメント	LBF	2.85	3,420	40	40	20
高炉セメントB種	BB	3.03	3,730	50	50	-
低発熱型高炉セメントB種	LBB	3.00	3,790	44	56	-

(注) PC:ポルトランドセメント, BS:高炉スラグ, FA:フライアッシュ

14.2 超低発熱セメントの適用性の検討

1Aの連壁は高強度配合でしかも壁厚が 2.2m と厚く、また本体利用の設計となっていることから鉄筋量、埋込金物が多い。このため、広範囲に流動しやすくかつ分離を生じにくいコンクリートであるとともに、構造的に連壁を本体利用しているので、温度ひび割れに有利なコンクリートを目指した。

そこで本州四国連絡橋公団において、超低発熱型セメントの研究が行なわれていたので、このセメントに焦点を絞り、地下連壁への適用性の室内実験を開始した。セメントは地中連壁の強度を満たすことのできる比較的高強度の二成分系(セメントと高炉微粉末)と三成分系(セメント、高炉微粉末、フライアッシュ)のセメントを一種類づつ選定し、配合試験に入った。その結果、超低発熱型セメントでも必要な高強度を達成できるとともに、良好な流動性が得られ、かつ温度上昇量を 10°C 以上も低く抑えることが可能なことが判明し、地下連壁への応用の見通しを得た。

14.3 配合試験

14.3.1 概要

設計及び施工条件から定めたコンクリートの配合条件を表-16に示す。粗骨材の最大寸法は流動性と充填性から 20mm とし、流動化後のスランプは $24 \pm 1.5\text{cm}$ に設定した。これらの条件のもとで表-17に示すセメントを使用したコンクリートの品質の比較試験を行った。使用した粗骨材は兵庫県赤穂産とし、細骨材は香川県広島産の海砂とし、実施工で使用するものを選定した。なお、海

表-18 室内配合試験結果

セメントの種類	砕砂混入	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤 (C×%)		スランプ ^{※3} (cm)		空気量 (%)		凝結時間 (h-min)		圧縮強度 (kgf/cm²)		静弾性係数 (×10⁴kgf/cm²)		引張強度 (kgf/cm²)		フリージング率 (%)
				W	C	S₁ ^{※1}	S₂ ^{※2}	G	高性能AE減水剤	流動化剤	ベース	流動化	ベース	流動化	始発	終結	28日	91日	28日	91日	28日	91日	
LBF	有	33	45	142	430	495	267	961	1.20	0.30	6.0	25.0 (55.5)	3.7	4.6	21-00	25-00	530	676	3.91	4.39	40.9	45.7	0.63
	無	33	45	142	430	763	-	961	1.20	0.30	105	25.5 (60.0)	4.5	4.2	-	-	515	629	3.85	4.27	-	-	1.99
BB	有	33	45	142	430	502	270	974	1.20	0.40	6.5	25.0 (60.0)	3.3	4.5	13-20	15-40	653	764	4.11	4.27	44.0	46.9	0.35
	無	33	45	142	430	773	-	974	1.25	0.40	8.5	24.5 (57.5)	4.6	4.5	-	-	538	626	3.99	4.12	-	-	1.55
LBB	有	33	45	142	430	500	271	972	1.50	0.40	10.0	24.0 (57.0)	3.6	3.6	17-50	20-40	555	724	4.01	4.42	43.6	50.6	1.23
	無	33	45	142	430	771	-	972	1.60	0.40	10.5	25.5 (62.0)	3.4	3.8	-	-	494	617	4.00	4.19	-	-	2.95

(注) *1 S₁: 海砂, *2 S₂: 砕砂, *3 かっこ内はスランプフロー

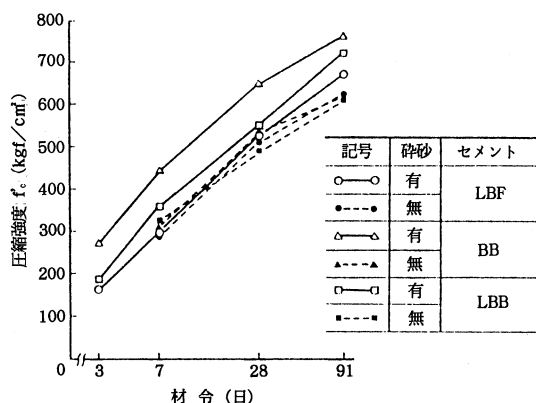


図-53 材令と圧縮強度の関係

砂の微粒分を補いブリージング性状を改善する目的で、砕砂の使用の検討も合わせて行った。試験は単位セメント量 430kg/m³、水セメント比 33%、細骨材率 45% の一定の条件で実施した。

14.3.2 試験結果

配合試験の結果を表-18に示す。図-53には材令と圧縮強度の関係を、また図-54には断熱温度上昇試験の結果を示す。これらから明らかになった点は以下の通りである。

- ① 三種類のセメントとも連壁の配合条件を満たすコンクリートが得られる。
- ② 圧縮強度は高炉セメント (BB)、マスコン型高炉セメント (LBB)、超低発熱型セメント (LBF) の順で高いが、BBとLBFの強度差は約1割程度に納まった。
- ③ 引張強度はBBとLBFはほぼ同強度となり、LBBは約1割高い値を示した。これによりBBのぜい度係数は他のセメントに較べて若干小さな値となった。
- ④ 断熱温度上昇量はBBとLBFはそれぞれ63.2℃と61.0℃であり差はなかったが、LBFは47.9℃とBBに

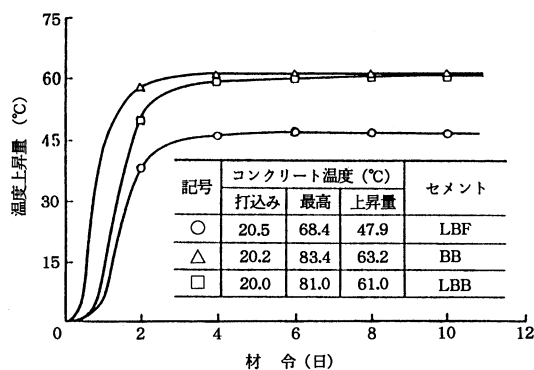


図-54 断熱温度上昇試験結果

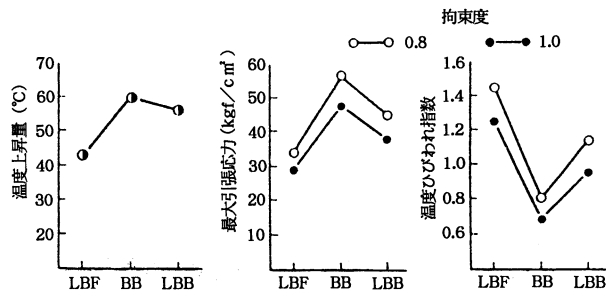


図-55 温度応力解析結果

比較して約25%小さく、大幅な低発熱化を示した。

⑤ 発熱速度はBB、LBB、LBFの順で、凝結時間及び終結時間もこれを示している。

⑥ 砕砂を混合することでブリージング率は約1/2に低減できる。

14.3.3 温度応力解析

室内試験及びモデル実験の結果から連壁の温度応力解析を実施した。温度解析は二次元FEMで求め、この結果を基に仮想温度分布を設定し、コンクリートの伸縮に対

表-19 連壁コンクリートの品質基準

セメント	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)		空気量 (%)	ブリージング率 (%)	断熱温度上昇*		コンクリート温度 (°C)		配合強度 (kgf/cm²)	
		ベース	流動化			K	α	練上り時	打設時	材令28日	材令91日
超低発熱型	20	8 ± 2.5	24 ± 1.5	4 ± 1	3以下	50以下	0.4~0.8	20以下	22以下	400	560

(注) *断熱温度 上昇式 $T_{90} = K(1 - e^{-\alpha t})$

する一次元拘束モデルで応力解析を行った。なお、先行エレメントによる後行エレメントの拘束度は、過去の計測結果から0.8～1.0の範囲にあると考えられるため、0.8～1.0の2ケースについて試算した。解析結果を図-55に示す。この結果、引張応力度と引張強度の関係から求めた温度ひび割れ指数において、拘束度を1.0とした場合でも超低発熱セメントの場合には1.24の値が得られ、高炉セメントのひび割れ指数0.69を大幅に向上することが判明した。結果を基に地下連続壁に使用するセメントは超低発熱型の三成分セメントを用いることとし、表-19に示すコンクリートの品質基準を定めた。

14.4 施工

14.4.1 コンクリート製造設備

コンクリートプラントは1Aアンカレイジの地下連続壁、側壁、内詰め、貧配合の硬練りコンクリート、そして躯体の各コンクリートに対応できる設計とし、最大480 m³/hが製造できる国内最大の能力を有するものである。また併設されたアイスプラントは、製氷能力30t/日の製氷機2基と100tの貯水庫を備えている。表-20にその要目

表-20 コンクリートプラント設備概要

設 備	仕 様
材 料 一 式 貯 蔵 設 備	細 骨 材 : 1,000m ³ コルゲートサイロ×4基 粗 骨 材 : 1,130m ³ コルゲートサイロ×4基 セ メ ン ト : 1,500t サイロ×1基 水 : 246 m ³ ×1基 混 和 剤 : 10m ³ ×4基、4m ³ ×1基
材 料 二 次 貯 蔵 設 備	粗 骨 材 : 125m ³ ×2槽 粗 骨 材 : 125m ³ ×2槽 セ メ ン ト : 70m ³ ×1槽、40m ³ ×1槽 水 : 4m ³ ヘッドタンク×1槽
計 量 器	粗 骨 材 : 7,000kg (2種累積) ×1基 粗 骨 材 : 6,000kg ×2基 セ メ ン ト : 2,850kg ×1基、1,000kg ×1基 水 : 1,200kg ×1基、550kg ×1基 混 和 剤 : 40kg ×1基、25kg ×1基 後 添 加 剤 : 25kg ×1基、15kg ×2基
ミ キ サ	油圧可変速2軸強制練りミキサ6m ³ ×2基
氷 製 造 設 備	製 氷 能 力 : 60t/日 貯 蔵 能 力 : 100t 氷 運 送 能 力 : 80t/h
冷 水 製 造 設 備	冷水製造能力 : 180,000kcal/h ×2基 冷水タンク : 20m ³

を示す。このプラントは明石海峡の海岸線に位置し、附近は公園があり多くの人々が訪れるとともに、西側には集合住宅、更に背後地には一般住宅が密集しており、環境に対する特別の配慮が求められた。このためコンクリートの打設時間は昼間に限定し、プラント本体は防音板で囲むとともに材料の受入ポッパー、ベルトコンベヤーの騒音発生部はゴムライニングを施し、バルコンは密閉し粉塵の防止を図った。また表面にはデザイナーによるイラストを施し、周辺環境との調和に努めた。写真-11にプラント全景を示す。コンクリートの練りまぜはミキサー内で遅れて添加する時差添加方式を採用し、事前の試験練りの結果から、ベースコンクリートで60秒、流動化剤を添加後更に30秒間練り混ぜ、合計90秒とした。

14.4.2 セメントの供給

本コンクリートは超低発熱セメントを連壁に初めて応用するためセメントの製造については特別な品質管理を実施した。使用したセメントは中庸熟ポルトランドセメント40%、高炉スラグ40%、フライアッシュ20%を混合したもので、社内基準に上乘せし、各材料及び混合後のセメントの各ロットごとの試験頻度を増するとともに、他のセメントの混合を防止する装置、また出荷前の確認試験等をおこなうなどの配慮が行われた。

14.4.3 コンクリートの打設

コンクリートはプラントの1バッチ単位である5.5 m³をアジテータトラックで運搬し、トレミー管のホッパーに直接投入した。連壁コンクリートは途中で打設を中断できないため、各トレミー管の両側にアジテーター2台を待機させ、先行エレメントは10～12台、後行エレメントは5～6台のアジテータトラックを使用して連続して打設した。

打設は平成2年4月6日から開始したが、コンクリートが比較的高い粘性を持っていること、また作業に不馴れな点もあって予定時間を大幅に超えた17～18時間を要した。しかしその後は少しずつ時間は短縮され、予定の10～12時間で打設を完了することができた。

コンクリートの打上り速度は先行で約7.7 m/h、後行エレメントで10.4 m/hであった。これをトレミー管1本あたりに換算すると37 m³/H、39 m³/H程度でスランプ

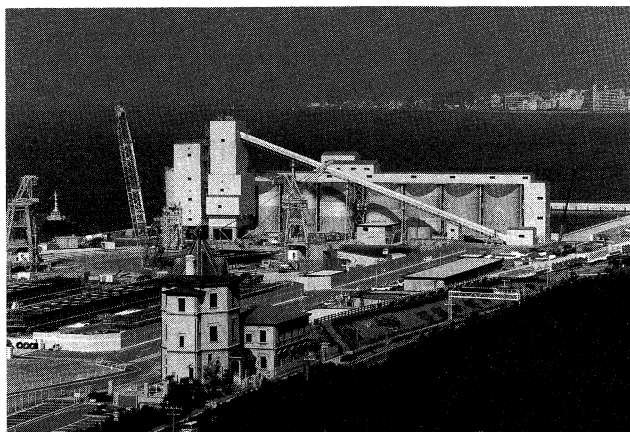


写真-11 プラント全景

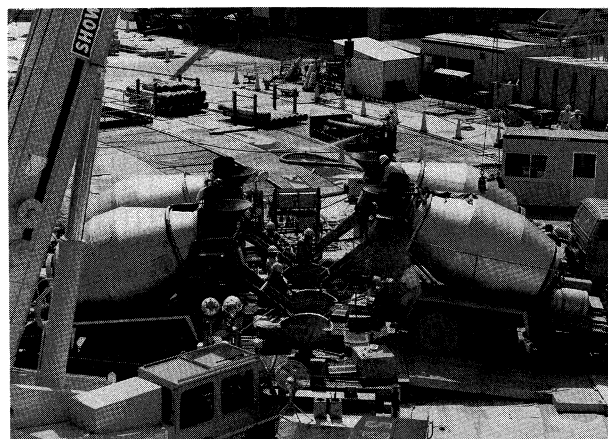


写真-12 コンクリート打設状況

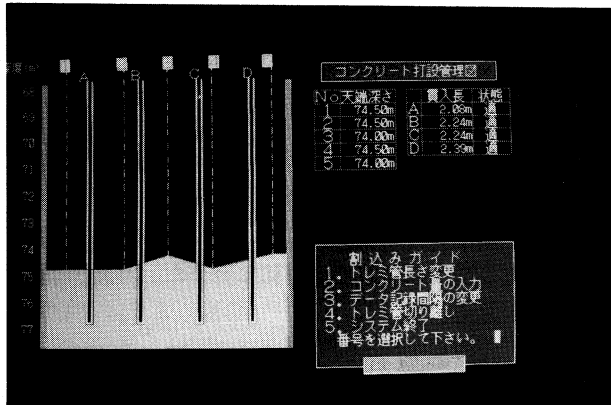


写真-13 打設管理ディスプレイ

フローが60cm以下になると急速に打設速度の低下がみられた。打設速度は計画したものより若干遅く、コンクリートの粘性によりトレミー管内の流下速度が低下したものと考えられる。

打設中のコンクリート天端管理はトレミー管先端を常にコンクリート内に貫入しておく必要から、重要な管理項目である。従来この管理は作業員によるレット測定により行なわれていたが、本工事では当初から自動コンクリート天端測定装置を使用することを計画した。この装置は、おもりを連続的に上下させそのワイヤーの張力から天端を測定するものである。写真-12に打設状況を、写真-13にコンクリート打設管理のディスプレイを示す。

14.4.4 コクリートの品質

コンクリートの品質管理試験は、最初のアジテータートラックから連続5回のサンプリングを行い、以降は200㎡に1回採取し、フレッシュコンクリートの性状を確認するとともに供試体を作成した。コンクリートのスランプフローは流動化剤の効果が温度により変化するので、練上り温度の上昇に合せ添加量を調整した。コンクリートの現場配合を表-21に、品質状況の一部を図-56、表-22に示す。

スランプは規定値の $24 \pm 1.5\text{cm}$ に対して平均値は24.9cmとやや大きく、スランプフローはほとんどが60～66cmの範囲であった。本コンクリートではスランプが70cmに近づく、コンクリートの広がり端部に骨材と

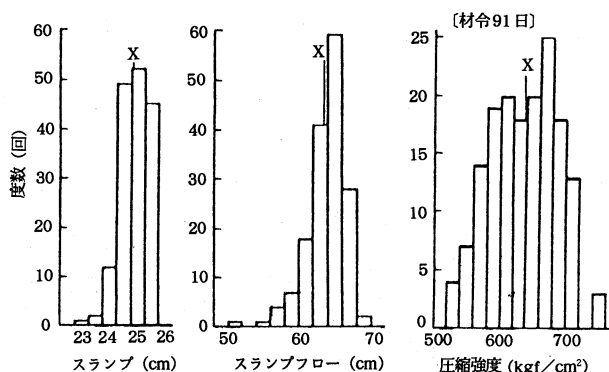


図-56 コンクリート品質状況

表-21 地下連続壁用コンクリートの現場配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)							
			W	C	S ₁	S ₂	G	A ₁	A ₂	A ₃
20	33	45	142	430	501	270	965	4.73	2.58 ~ 3.44	0.034 ~ 0.073

(注) S₁: 海砂, S₂: 砕砂, A₁: 高性能 AE 減水剤, A₂: 流動化剤, A₃: AE 助剤

表-22 コンクリート品質管理結果のまとめ

項目	サンプル数	平均値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数
スランプ (cm)	161	24.9	25.5	23.2	0.51	—
スランプフロー (cm)		63.8	68.8	50.3	2.72	—
空気量 (%)		3.9	4.8	3.0	0.39	—
コンクリート温度 (°C)		17.4	19.5	15.1	0.97	—
ブリージング率 (%)	6	1.42	2.61	0.63	0.64	—
材令28日圧縮強度 (kgf/cm²)	161	493	559	406	36.4	7.4
材令91日圧縮強度 (kgf/cm²)		636	752	527	49.3	7.8

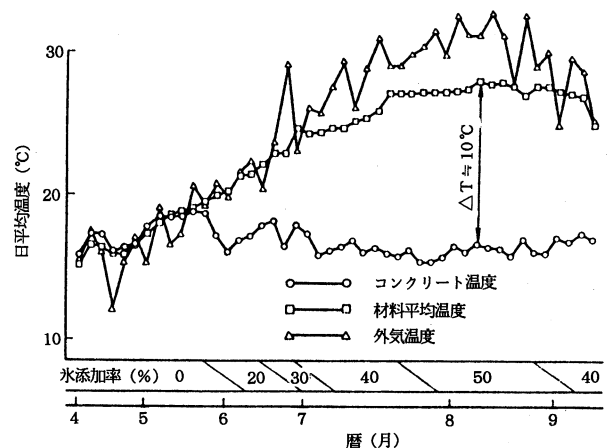


図-57 コンクリート練上り温度と材料温度の変化

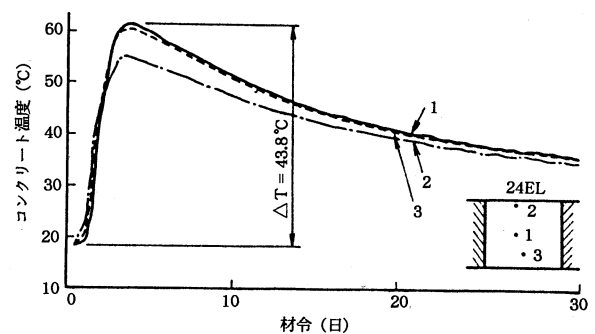


図-58 コンクリート温度の計測結果

モルタルの分離が若干認められた。

材令91日の圧縮強度の度数分布を図-56に示す。材令91日の平均圧縮強度は $636\text{kg}/\text{cm}^2$ であり、室内試験結果とほぼ同値で変動係数は7.8%であった。

打設期間中の材料の温度と気温との関係を図-57に示す。打設開始の間もない4月下旬からは冷水によるクーリングを、5月から氷を混入し、8月におけるコンクリートの練上り温度の平均値は 16.1°C で、外気温の平均値 30°C 。

8℃に対してほぼ15℃のプレクーリングとなった。打設コンクリートの温度測定の結果を図-58に示す。温度上昇の最大値は43.8℃で、モデル実験とほぼ同様な結果を得た。

14.5 まとめ

以上連壁コンクリートについて得られた結果を以下に示す。

- ① 超低発熱セメントを使用したコンクリートは良好な流動性とともに入令91日で平均636kg/c㎡、変動係数7.8%の高強度を得ることができた。
- ② 超低発熱セメントを使用したコンクリートの最高温度は60℃程度に抑制され、温度ひび割れ指数を大幅に改善できる。
- ③ 汚水中に打込まれたコンクリートは標準養生の供試体の約90%以上の強度を得ることができた。
- ④ 海砂に砕砂を混合することにより、ブリージングの改善、圧縮強度の効果があつた。
- ⑤ 水と氷によるプレクーリングにより、真夏日でも16℃～18℃の練上り温度が確保でき、平均気温とのプレクーリング量は約15℃であつた。また、打込みまでの温度上昇は平均0.5℃であつた。

15 最後に

1Aアンカレイジは平成3年5月現在、写真-14に示すよう内部掘削中で、その深さは明石層に達し、ほぼ計画通りの進捗をみている。本基礎は他の本四アンカレイジに比し構造的にユニークなもので、最新技術を応用して工程短縮の追求が行なわれた。また、本稿で繰返し述べている環境対策は、本工事を展開する上で最大の課題であつたが、十分な成果を得たと思っている。

今回は紙幅の都合で一部しか報告できなかった掘削時の底面地盤の安定検討、計測計画は改めて報告する機会があると考えている。

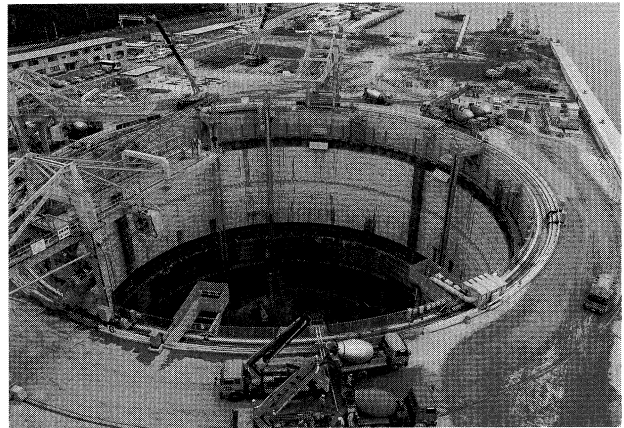


写真-14 内部掘削状況（平成3年5月）

最後に昭和48年頃から本格的に始まった本基礎の調査、試験工事、設計検討等に携わつた幾百人、幾千人の技術者に心から深謝する次第です。

参考文献

- 1) 舞子側アンカレイジ基礎施工法の検討概要書昭和56年10月本四公園第1建設局垂水工事事務所
- 2) 明石海峡大橋下部構造安定計算要領(案)・同解説
- 3) 明石海峡大橋耐震設計要領(案)、同解説第2次原案
- 4) 明石海峡大橋1Aアンカレイジ詳細設計
- 5) 明石海峡大橋1Aアンカレイジ修正設計
- 6) アンカレイジ地下連続壁用コンクリート調査研究(その1)
- 7) アンカレイジ地下連続壁用コンクリート調査研究(その2)
- 8) 加島、佐野、酒井、山岡、十河：明石海峡大橋アンカレイジにおける低発熱型高強度コンクリートによる地下連続壁の施工、コンクリート工学 Vol.29 '91.4

チュニジア国を訪ねて

Visiting Tunisia

企画開発部 企画課 審議役 森 谷 俊 美
Toshimi Moritani

マグレブ（太陽の沈む所の意）と呼ばれる北アフリカ西部にある国の一つチュニジア国は、地中海に面し、領土は西のアルジェリアと東のリビアにはさまれている。平成元年12月11日から12月20日まで、及び平成2年11月11日から11月19日までの2回にわたり、チュニジア国の首都テュニスにある運河を結ぶ橋梁の建設計画調査にかかる調査団員として、この国を訪れる機会を得た。

この国は、アフリカ大陸の最北端にあり、地中海をはさんでヨーロッパに面しながら、隣接するモロッコやアルジェリアのように、映画や自動車レースの舞台となることも少なくなじみがうすいので、名前を聞いて直ぐに世界地図上のどこにあるのか分かる人は少ないであろう。今回、調査期間中に入手した資料、見聞等から、この国の様子について紹介したい。

(1) 社会

正式国名は、チュニジア共和国 (the Republic of Tunisia) と称し、1956年3月にフランスから独立した。テュニスに首都を置き、共和国制をしいている。議決機関は国民議会による一院制をとっている。

チュニジアの総人口は約750万人で、首都テュニス及びその周辺に約130万人が住んでいる。民族的には、アラブ人が全体の約98%を占めるアラブ国家である。その他は、チュニジアの先住民であるベルベル人、わずかのユダヤ人である。外国人居住者は約3万8,000人で、内日本人は70名弱である。宗教は国民の90%がイスラム教のスニー派である。

チュニジアの公用語はアラビア語であるが、フランスの支配が長かったため、フランス語が全般的に通用する。

アグレブ三国の国民性を比較したものとして、モロッコは漁師、アルジェリアは獅子、チュニジアは乙女という表現があるように、一般に温和で愛想が良いが利害が対立する場合には、フェニキア商人の末裔としての性格が現れ、相当なハード・ネゴシエーターに変ずる。また自尊心も強い。これまでの日本の技術協力、技術援助にあたって、交渉担当者が相当苦勞した話も今回の訪問時に聞かされた。しかし、その国民性からかテュニスの治安はとても良く安心して1人で町を歩くことができた。

この国では、女性にも参政権が与えられていることに象徴されるように、女性の職場進出は目覚ましいものがあるが、地方にいくと年配の女性は外出時依然として白い被り物を身にまとい、また喫茶店には女性の姿が見られないなどイスラム教国としての古い因習が色濃く残っ



写真-1 架橋予定地点のフェリー乗場



写真-2 結婚式の行列

ている。なお、今回の調査のチュニジア側のカウンターパートは、若い魅力的なアラブ人の女性技術者であった。

(2) 自然

チュニジアは、北緯30~37.5度、東経7.5~11.5度に位置し、面積163,610km² (日本の約0.44倍) を有する。アフリカでは小さな国だが、北と東が地中海に囲まれ、約1200kmの出入りの激しい海岸が美しい。北西部にはアルジェリアからのびているアトラス山脈があり、東へいくほど高度が下がる。また、南部はエルグと呼ばれているサハラ砂漠東部の一端であり、砂丘が発達している。チュニジアの気候は、地中海とサハラ砂漠の影響を受けるが、おおむね温暖な地中海性気候である。北部では、夏が6~10月初旬まで続き雨はほとんど降らない。冬は降雨量が多く、気温がかなり下がるため暖房が必要となる。二度目にチュニジアを訪れた時は、ちょうど雨季に入ったところで毎日シトシトと雨が降り、うっとおしい日が続いた。また、市内の道路はあまり排水工が整備されて



写真-3 ローマ時代の水道橋



写真-5 ビゼルトの可動橋



写真-4 ドラの遺跡

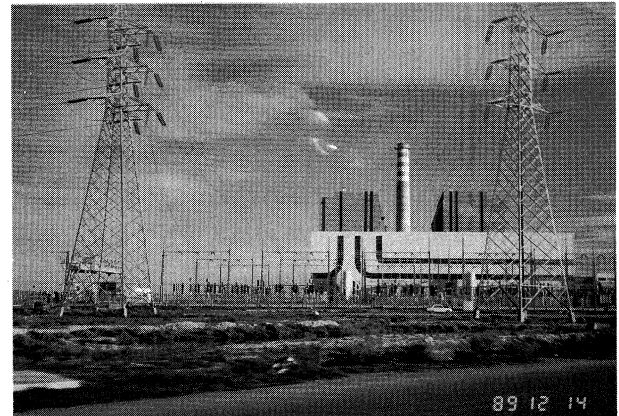


写真-6 日本企業が建設した発電所

おらず、雨の後は非常に歩きにくい思いをした。

(3) 歴史

チュニジアの名前を知らない人でも、カルタゴ、ポエニ戦役、名将ハンニバルの象部隊によるアルプス越え等の言葉を、かつて歴史の教科書で見たことがあると思う。

チュニジアの歴史は、紀元前12世紀頃から船で渡来していたフェニキア人が、紀元前814年にチュニジア郊外のウティックに都市を建設し、カルタゴ（現在のアルタージュ）を築いたのが始まりである。カルタゴは、しだいにシシリー島、サルディニア島、マグレブ沿岸、南スペインと勢力を広げ、紀元前4世紀には最盛期に達する。しかし、この頃からシシリー島をめぐるローマと対立し、紀元前264年から始まったポエニ戦役は、そのローマとの戦いである。カルタゴは、一時名将ハンニバルの活躍によって勝利を得たこともあったが、やがてローマの勢いに押されるようになり、紀元前146年に破れた。

ローマ人の支配下に入ると、チュニジアを中心とするマグレブは、オグスト帝によって再建が行われる。円形劇場、大浴場、水道橋などが造られ、ローマに次ぐ大都市としてアフリカに君臨することになった。人工は3万人を越え、小麦、ブドウなどの農産品の輸出港として賑わったという。ローマ人は以前からこの地を「イフリキー

ヤ」と呼んでいたが、これがアフリカの語源である。この頃に造られた構造物がチュニジアの各地に残っていて観光名所となっているが、皆素晴らしいものばかりである。日本においてようやく狩猟生活から稲作が行われるようになった頃に、すでに精密な測量技術を要する百数十キロにも渡る水道橋を造り上げた高い土木技術が存在したことに驚かされた。

(4) 経済状況と日本との関係

チュニジアは基本的には農業国であり、国内総生産の15%を第一次産業が占める。首都テュニスの郊外には広大な畑が広がりオリーブをはじめ、オレンジ、トマト、ブドウなどが生産されているが、国内向けの穀物は少ない。鉱物資源では石油、リン鉱石などがある。わが国は、チュニジアよりパルプ、ワイン、じゅうたん等を輸入し、同国に対し自動車、機械、電気製品などを輸出しており、86年の輸入額は200万ドル、輸出額は2,400万ドルとなっている。

日本の経済技術協力として、わが国は、チュニジアの一人当たりGNPが比較的高い（1300 \$）水準にあることから、有償資金協力を中心に援助を実施しており、従来より、わが国の援助額の8～9割以上は政府貸し付けで占められている。

チュニジアには、日本大使館、JICA事務所があり、この活躍により、水産分野におけるプロジェクト方式技術援助をはじめ、通信・放送、社会基盤、エネルギー、保険医療などの分野で各種形態による協力が行われている。

第1回技術発表会 報告 技術発表会 事務局

Report of first meeting for lecture of engineering works

1. はじめに

第1回技術発表会が平成3年6月13、14日に本社第2会議室で開催され、第三建設局片山建設部長他14名の技術職員の発表が行なわれた。

この技術発表会の目的は、本四公団事業が、1ルート4橋の完成により、3ルートの時代に入って、その完成目標が定まり新たな事業に対しての模索が必要になってきている現状の中で、個人に所有されている技術を広く公団技術者の間に広めること、そのための技術伝達、研磨の場を提供することである。

技術発表会の構成は、当面1ルート4橋の技術について、建設当時の工事長、工事長代理の方々の発表を主体とし、合わせて若手技術者を含む全ての技術職員の自由な提案をも募るということで、前者に対しては、指定課題方式、後者に対しては、自由課題方式とした。

以上の主旨から、発表者に対しては発表内容を単なる工事の概要報告でなく、例えば工期短縮、経費節減、安全管理のための工夫等、今後公団の架橋技術の維持向上に資する幅広い視点からのものとしていただくようお願いした。さらに、発表会における議論を活発にするため、討論のリード役として本社の技術系代理がテーマ毎の幹事を務めることとした。

なお、平成3年度の指定課題は、本四公団技術の代表的なものであり、現在進行中の建設事業に参考となるものということで、「海峡部長大橋下部工の設計・施工における技術開発」とした。

また、諸先輩から1ルート4橋時代の体験談をしていたくということで、今回は、瀬戸大橋の下部工事に直接携わられた(財)海洋架橋調査会 杉田理事に特別講演をお願いした。

2. 全体総括

第1回技術発表会の開催に当って、最初に飯島常任参与から開会の挨拶をいただいた。その中で参与は、本四の1ルート4橋を建設して来た技術の意義と現在建設中の明石海峡大橋、来島大橋、多々羅大橋に向けての技術の有り方にふれた上でこの技術発表会が有意義なものとなる様期待すると述べられた。

次に特別講演に入り、南北備讃瀬戸大橋の下部工工事を永年現場の所長として担当された海洋架橋調査会の杉田理事に経験談をまじえ、当時の技術者が何を考え、どう建設に取り組んで来たかをお話しいただいた。

特に児島・坂出ルートの海中基礎の多くに採用された設置ケーソン工法の工法選定及び実施に向けての取り組みにふれ、先例の研究から普遍的な価値を見出すことの必

要性、実用に対する保証を得るためには中途半端な実験は原理の確認にしかならず実物大の実験が必要と考えたこと等基本哲学とも言うべき姿勢について話が有った。

また、海中工事の実施に当っては実例に則し具体的な数字を示して海中という潮流力、波力等の外力が大きく陸上に較べ不確かな現場状況のもとでは単純に徹することとし、現場作業のプレハブ化をはかり、これにより大型化したケーソンは浮力を利用することを考えたがこれに付随し大型の浮体のマスの影響のこわさ、遊動水の影響に対する配慮が必要であったこと等具体的な事例の解説があった。また実地の検証の意味で5Pをパイロットとして実物大実験と位置付け7Aに反映させ、更に明石海峡大橋に発展的に引き継がれたこと等々現場の所長を経験し、技術に徹した人のみが語れる重みのあるお話を伺うことができた。

その後指定課題の11件について、海中基礎掘削、設計・施工、マスコンクリートの3グループ毎の発表に入り各グループ毎に決められた幹事の司会のもとに各発表者は約15分の発表に5分の質疑応答と約10分の総括質疑を行ない幹事がとりまとめを行なった。

各グループとも活発に質疑応答が行なわれ発表者以外からも応援の回答が出るなど真剣でなごやかな雰囲気の中に発表が行なわれた。

また自由課題として4件の発表があったが国内の今後予定されている架橋プロジェクトの紹介も有り多くの関心を集めた。

発表会の最後に岡田理事から閉会の挨拶をいただき、本四公団の将来展望にも言及され技術の伝承及び更なる発展が必要であり、この意味からもこの技術発表会が有意義な企画であったとの感想を述べられた。

3. 各部門の総括

(1) 自由課題

自由課題としては調査・計画から上下部工の設計・施工まで広範囲に亘る4件の発表がなされた。

最初に、藤原亨氏が「斜張橋ケーブルの振動と制振対策」と題して、檀石・岩黒島橋のケーブルの振動の実橋観測結果、制振対策の検討結果等について発表された。この発表にたいして、生口橋の架設時におけるケーブルの振動状況、ケーブル振動の桁・塔への影響等について質疑議論がなされた。

次に、福井幸夫氏が「共用アンカレイジのケーブル定着部構造の設計」と題して、南北備讃瀬戸大橋の共用アンカレイジのケーブル定着方式の検討の結果ストランド空中交差方式に決定された経緯、空中交差方式の設計上の留意点について説明されたあと、今後、共用アンカレイジの設計に当たっては前例に囚われることなく、柔軟な頭脳と姿勢をもって取り組んで欲しいと要望された。この発表に対して、引張材の埋込長についての議論がなさ



れた。

次に、高澤勤氏が「明石海峡大橋主塔基礎の洗掘防止対策」と題して、事前掘削と捨石被覆工の併用による洗掘防止工法の検討課題、課題の検証のための水理模型実験の概要を説明され、事前掘削の安定性および長期安定性を確保するための捨石被覆工の施工範囲が確認され、その後の現地での洗掘実験等を通して明石海峡大橋主塔基礎の施工法が確立されたことが発表された。この発表に対して、現地と実験に関する相似則についての議論がなされた。

最後に、山縣守氏が「海峡部長大橋と広域地質調査」と題して、日本の地質構造、地震活動の話から伊勢湾口道路を始めとした海峡連絡道路計画、さらに長大橋梁での下部工の技術的課題について発表された。この発表に対して、本四公団がこれらの海峡連絡道路事業に参画できるのかという質問がなされ、発表者が答えに窮した場面があったが、岡田理事から臨機の答弁を頂き、その場をどうにか凌いだ次第であった。

自由課題部門としては、指定課題と異なり幅広い、自由な議論がなされ、有意義であった。

(2) 設計・施工

設計・施工の部門では、高架橋の下部工の設計施工に関するものとして「門崎高架橋のSRC」(宮下 力氏)、「番の州高架橋下部工の設計・施工」(樋口 康三氏)の2編、トンネルアンカレイジについて「トンネルアンカレイジの設計・施工に関する2、3の提案」(吉田 好孝氏)と題して1編、そして鋼ケーソン工法に関するものとして「脚付ケーソン基礎の設計と施工」(田島 照義氏)、「設置ケーソン工法における鋼ケーソン設計と施工」(奥川 淳志氏)の2編、以上合計5編の発表があった。

「門崎高架橋のSRC」は橋脚躯体としてRC構造とSRC構造の比較、採用したSRC構造の特徴、工事概要ならびに工事完了後における留意事項について報告があった。

「番の州高架橋下部工の設計・施工」については、基礎地盤の流動化の評価、太径杭の鉛直支持力、水平支持力の評価、高橋脚の耐震性および地震時列車走行性の評価、



太径(3m)かつ長尺の杭の施工、フーチング部のマスコンクリート施工、高橋脚のコンクリート施工について報告があった。

「トンネル式アンカレイジの設計施工に関する2、3の提案」は、トンネル式アンカレイジのくさび効果について、トンネル式アンカレイジの滑動問題、引き抜けに対する安定計算における弾塑性FEM解析、RBSM解析の解析手法の比較や、コンクリートの大量施工の必要性、拡幅部の応力集中部の鉄筋、鉄骨による補強等についての提言があった。

「脚付ケーソン基礎の設計・施工については、脚付鋼製ケーソンを採用するにいたった経緯、その設計、脚部の大口径杭掘削等の施工について報告がなされた。

「設置ケーソン工法における鋼製ケーソンの設計と施工」は、鋼製ケーソン本体の基本構造、安定性等の設計について、また、大規模なケーソン設置工法の施工システム、そしてケーソンの曳航等、施工に関する2、3の考察が紹介された。

以上の発表に対して、トンネルアンカレイジ施工における底面の拡幅の可能性、鉄骨により補強した最小鉄筋量を入れた事、また、風化花崗岩の地盤定数の設定方法について発表者、場内と活発な質疑、意見交換が行われた。

(3) 海中基礎掘削

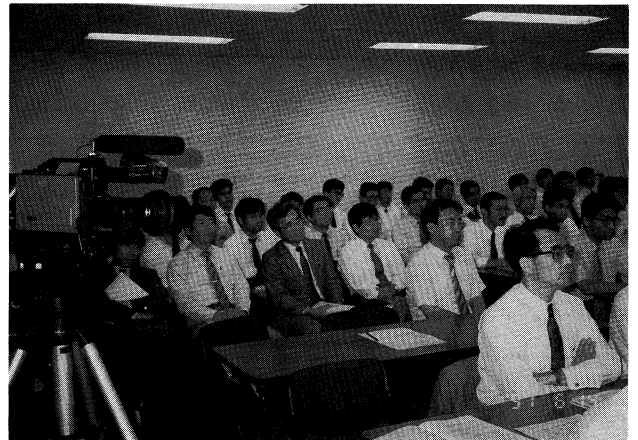
上記の指定課題に関する論文は、児島・坂出ルートの建設にあたって技術開発された水中発破工法に関するものが2編、グラブ掘削に関するものが1編の計3編の発表があった。発表者並びに発表内容の要旨は以下の通りである。

① 南北備讃瀬戸大橋7Aの発破工法

企画開発部 吉田修

Dルート完成のクリティカルパスとなるBB7Aの施工計画策定に当たり、海底発破工法を採用するに至った技術的検討及びその施工実績に関して次の通り報告された。

発破計画は、近接する石油プラントに対する影響に配慮し、現地実験及びコンピュータ・シミュレーション等



により定めている。また、発破の実施に当たっては、関係者の緊密な協力関係がキーポイントであった。

② 無自由面発破工法の得失

第三建設局 建設部 片山英二

BB7Aで採用したOD発破工法について、起爆手法と薬量、破砕量の関係、SEPの仕様と穿孔機の性能、耐水圧性の火薬類と火工品の開発及び水中衝撃波と地盤振動に対するアセスメント等について定量的に取り扱えるに至る技術的検討内容について詳しく報告された。

③ 海底掘削の精度管理

第三建設局 建設部 計画課 佐々木雅敏

明石海峡大橋の主塔基礎工を例に、掘削方法（粗掘削、仕上掘削、さらえ掘削）、精度管理（精度基準、グラブ船の選定、日常管理、出来形管理）について具体的な方法について示し、合わせて掘削結果を示して、グラブ船のみで高精度の掘削が可能と報告された。

発表後、出席者により、設置ケーソン工法における底面仕上げの必要性及び岩掘削する場合の発破もしくは砕岩棒の適用性等について活発な質疑応答がなされた。

(4) マス・コンクリート

指定課題「マスコンクリート」について硬化熱処理1題、水中コンクリートの品質並びに打設工法2題が発表された。

まず、硬化熱処理に関して高島氏は大島大橋4Aにおけるクーリング方式について発表した。ここではコンクリートの最高温度上昇抑制にパイプクーリング方式が採用されたが、配管位置が既設リフト面上でなく次リフト内、いわゆる中空配管方式としたのが特徴である。その効果として高島氏は① リフト内温度の均等化、② コンクリートの熱放散効率の上昇、③ 温度上昇率の低下、を挙げている。マスコンクリートにおける硬化熱処理は最も大きな課題であり、低発熱セメントの使用、プレクーリング等対策があるがこのように計測データを活かす情報化施工も見逃せない。

水中コンクリートの品質について加島氏は、水中コンクリートにより良質な基礎を施工するためにはプレパッ

クドコンクリートのモルタルや水中不分離性コンクリートの練り上がり時の品質管理、注入・打設時の管理の他に準備段階から対策が必要とし、その実施例としてプレパックド工法による北備讃瀬戸大橋2Pにおける粗骨材投入時のビリの発生防止対策を中心に発表された。また、ケーソン設置からコンクリート打設までの期間が長い場合には海中浮遊物の他に錆も堆積するのでケーソンのブロック継目部等を塗装することが望ましいとしている。

また、坂本氏はプレパックドコンクリートは「施工の工夫」により、水中不分離性コンクリートは特殊混和剤等の「材料革命」により実現したものと位置づけた上で両工法の開発実験から実施工までを担当した実績を基に、水中コンクリート打設工法の変遷とより大規模な基礎へ展開する場合の課題について発表された。

「瀬戸大橋、明石海峡大橋で築いた技術をもってすれば1基あたり100万㎡のコンクリートを1年で打設可能」との弁にマスコンの「次代」と「今こそ」を感じた。

4. おわりに

発表会は、発表者、各局からの若手技術者、本社技術職員等100名以上が参加して、盛会裏に終了した。

発表会の参加者には、今後の会の運営の参考とするため、発表会に対する感想と意見を求めるアンケートをお願いした。

アンケートによれば、発表時間を多くすべきだ、会場が狭い、発表者の声が聞き取りにくいのでマイクを設置すべきだ、会場を本社、3局持ち回りにしたら等の改善意見もあったが、全体的な印象として良かった、今後とも継続すべきだとの感想が多く寄せられた。

特別講演に関する要望については、事業化、吊橋上部工の長大化、一般土工の苦労話等の演題があがった。

技術発表会は、今後毎年開催し、会場については、本社、各局持ち回りとするを考えている。

最後になりましたが、発表会の開催にあたり御協力いただいた皆さんにお礼申し上げます。

技術ニュース

本州四国連絡橋関連技術文献紹介

'91.4~'91.9月受入分

文献紹介の対象は、公団職員が本四技報以外の刊行物に投稿し、文献抄録票の提出のあったものです。掲載もれの場合は文献複写1部を、公団本社企画開発部 企画課 技術情報担当者宛送付下さい。

◎ 著者欄の*印は公団以外の人

題 名	著 者	雑 誌 名	巻	号	年 月	頁
平成3年度高速道路建設計画の課題（上）本州四国連絡橋公団	中島英輔	高速道路と自動車	34	4	1991.4	63-66
大型橋りょうマスコンクリートに適した超低発熱型セメント	金沢克義、山田勝彦*、新田篤志、二宮仁司、十河茂幸*	コンクリート工学	29	4	1991.4	27-36
明石海峡大橋アンカレイジにおける低発熱型高強度コンクリートによる地下連続壁の施工	加島聰、佐野幸洋、酒井和吉、山岡禮三*、十河茂幸*	コンクリート工学	29	4	1991.4	59-69
平成3年度 道路関係予算 本州四国連絡橋公団	中島英輔	道路		602	1991.4	74-76
本州四国連絡橋公団 平成3年度予算額（案）と事業計画の概要	土谷和博	道路と自然	18	3	1991.4	70-71
Design and Construction of the Akashi Kaikyo Bridge	松本弘輝、保田雅彦	Civil Engineering in Japan（土木学会）			1990	45-60
Aesthetic Design on the Seto Ohashi Bridge	飯島武明、神弘夫	IABSEコロキウム（デンマーク）			1991.5	143-150
Predicting the Effect on Tidal Current of Constructing the Akashi Kaikyo Bridge	森本隆也、高澤勤	IABSEコロキウム（デンマーク）			1991.5	151-158
大型風洞施設による全橋模型試験の概要	保田雅彦、鈴木周一、勝地弘、金崎智樹	橋梁と基礎	25	6	1991.6	2-4
全橋模型風洞試験用の大型風洞施設	保田雅彦、鈴木周一	土木学会誌	76	7	1991.6	16-17
Automation and Robotics of Underwater Concreting in Huge Scale Steel Caisson, The Main Tower Foundations of the Akashi Kaikyo Bridge	加島聰、坂本光重、岡田凌太、井保武寿*、中川良隆*	建設の自動化・ロボット化に関する第8回国際シンポジウム（ドイツ）			1991.6	179-188
Rock Mechanics and its application to the Akashi - Kaikyo Bridge	遠藤武夫、山縣守	Rock Mechanics in Japan（岩の力学連合会）	6		1991.7	25-30
Circumstances of Wind - Resistant Design Examinations for Very Long Suspension Bridge	松本弘輝、保田雅彦、宮田利雄*	第8回風工学国際会議（カナダ）			1991.7	
Construction of Boundary Layer Wind Tunnel for Long - span Bridges	飯島武明、辰己正明、金崎智樹、宮田利雄*、山田均*、横山功一*	第8回風工学国際会議（カナダ）			1991.7	
PWS疲労強度の改良	三田村武*、杉井謙一*、奥川淳志	土木学会第46回年次学術講演会講演概要集I			1991.9	404-405
多々羅大橋ケーブル曲げ疲労の検討	大江慎一、奥川淳志、三木千寿*	〃			1991.9	406-407

題 名	著 者	雑 誌 名	巻	号	年 月	頁
鋼床版横リブの開リブ用スリット周辺部の疲労について	奥川淳志、西川和廣*、 村越潤*、田中良樹*	土木学会第46回年次学 術講演会講演概要集 I			1991.9	418-419
鋼床版三次元モデル疲労試験	三木千寿*、館石和雄*、奥川淳 志、大江慎一	"			1991.9	420-421
トラス弦材角溶接部の疲労強度	奥川淳志、大江慎一、 三木千寿*、安井成豊*	"			1991.9	430-431
「明石海峡大橋主塔架設時風洞実験（架設機材の影響）」	森邦久、中村幸*、谷川浩司* 本田明弘*	"			1991.9	532-533
超長大橋梁の全橋模型風洞試験計画 －大型風洞施設の概要－	勝地弘、宮田利雄*、横山 功一*、金崎智樹、保田雅彦	"			1991.9	538-539
超長大橋梁の全橋模型風洞試験 －主塔模型の設計検討－	荒居祐基*、宮崎正男*、宮田 利雄*、横山功一*、勝地弘	"			1991.9	540-541
超長大橋梁の全橋模型風洞試験 －ケーブルの設計検討－	藤澤伸光*、宮田利雄*、 横山功一*、鈴木周一	"			1991.9	542-543
超長大橋梁の全橋模型風洞試験 －補剛桁模型の設計検討－	鈴木政直*、樋上琇一*、宮田利 雄*、横山功一*、保田雅彦	"			1991.9	544-545
中間橋脚を有する鋼斜張橋の中央支間の変化によ る構造特性	奥川淳志、高城信彦、山口和範	"			1991.9	614-615
斜張橋の架設管理における考察	奥川淳志、高城信彦、藤原亨 金吉正勝*	"			1991.9	704-705
Development and Investigation of High - Strength Galvanized Wire	遠藤武夫、飯島武明、松本弘輝 保田雅彦	IABSE シンポジウム (ソ連)			1991.9	
Similarity Relation Between Site and Laboratory Scour Phenomenon	松本弘輝、高澤勤、今井貫爾* 小池司*	国際水理学会第24回 講演会（スペイン）			1991.9	

本州四国連絡橋公団の基準類

本州四国連絡橋公団で現在使用している基準類は次のとおりです。この基準類は（財）海洋架橋調査会（TEL）03－3555－8361）で販売しています。

*仕様書・要領等

土木工事共通仕様書[平成3.5一部改訂]	昭和48年 10月
測量・調査・設計等共通仕様書[平成3.5一部改訂]	昭和56年 11月
電気通信施設標準仕様書集(3分冊)(貸出しのみ)	昭和61年 4月
電気通信施設工事等共通仕様書	昭和60年 4月
電気通信施設管理規程自家用電気工作物	昭和60年 10月
保安規程電気通信施設保安規準	
電気通信設備標準図集	昭和58年 4月
図面作成要領（貸出しのみ）	昭和59年 10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	昭和58年 1月
植生のり面工施行要領	昭和62年 4月
維持・修繕等共通仕様書 [平成元.5.追録]	昭和63年 10月

*設計基準類（上部工・設計編）

上部構造設計基準・同解説	平成元 年 4月
耐風設計基準（1976）・同解説	昭和51年 3月
風洞試験要領（1980）・同解説	昭和55年 6月
吊橋主塔設計要領・同解説	平成元 年 4月
吊橋主塔の塔頂補強構造解析要領（案）	昭和52年 3月
鋼床版設計要領・同解説	平成元 年 4月
ハンガー設計要領（案）	昭和53年 3月
ケーブルバンド設計要領（案）	昭和53年 3月
トラス格点構造設計指針（案）	昭和51年 3月
吊橋リンク・支承構造設計指針・同解説	平成元 年 4月
下路管理路設計マニュアル（案）	昭和53年 9月
明石海峡大橋耐風設計要領・同解説	平成2 年 2月

*設計基準類（上部工・製作・材料編）

鋼橋等製作基準	平成元 年 4月
鋳鍛鋼品製作基準・同解説	昭和55年 3月
鋼橋等塗装基準・同解説 [平成2.4.一部改訂]	昭和55年 3月
橋面舗装基準(案)	昭和58年 4月
鋼床版現場溶接施工基準(案)	昭和54年 3月
鋼上部構造用鋼材選定要領（案）[60.3.一部改訂]	昭和48年 9月
材料規格	昭和60年 8月
HBS 鋼材規格 [53.10.改正]	昭和52年 11月
HBS ケーブル材料規格	昭和54年 6月
HBS 塗料規格 [平成2.4.改訂]	昭和55年 3月

*設計基準類（下部工編）

下部構造設計基準・同解説 仮設物設計指針 [56.8.一部改訂]	昭和52年 3月
耐震設計基準・同解説	昭和52年 3月
鉄骨鉄筋コンクリート構造設計指針・同解説(案)	昭和52年 8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
重力式直接基礎アンカレイジ設計要領(案)・同解説	昭和55年 3月
橋梁用マスコンクリート設計・施工基準・同解説(案) [平成2.8.改訂]	昭和50年 3月
鋼設置ケーソン設計要領（案）	昭和54年 2月
風化花崗岩の支持特性判定要領（案）	昭和55年 3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

本四技報編集委員会名簿

（アイウエオ順）

編集委員長	松本 弘 輝			
編集委員	青山 銀 三	阿部 明 弘		
	糸日谷 淑 光	磯 江 浩		
	岡野 哲	岡本 泰 臣		
	加島 延 行	河村 幸 夫		
	梶原 博 道	小原 経 隆		
	鈴木 周 一	高城 信 彦		
	土谷 和 博	中尾 信 幸		
	中尾 洋 一	星野 剛		
	日里 正 夫	平原 伸 幸		
	森谷 俊 美	山岸 一 彦		
	山中 清	吉川 章 三		
	小暮 三 郎	（海洋架橋調査会）		

本四技報 第60号

発行 平成3年10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

〒104 東京都中央区新富2丁目14番4号

住友新富ビル6F 電話 03 (3555) 8361

発行者 井上 義 光

制作 株式会社 エディック

定価 2,200円

PUBLISHED BY BRIDGE & OFFSHORE ENGINEERING ASSOCIATION

本 四 技 報

