

# 六甲大橋上部工の設計と架設

## 松 浦 勢 一

正会員 神戸市港湾局 技術部長

## 横 山 顕 二

正会員 神戸市港湾局 技術部工事課長

## 田 外 吉 則

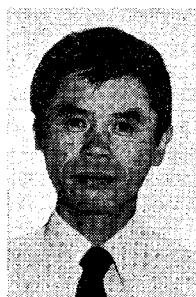
神戸市港湾局 技術部工事課設計係長



Seichi Matsuura



Kenji Yokoyama



Yoshinori Tage

## まえがき

神戸港では、近年の輸送量の増大、コンテナの大型化、流通機構の変革等に対処するため、現在、すでに供用を開始しているポートアイランドに引き続いて、東部第二工区の沖合に、流通機能と都市機能をもった、総面積 555 万  $\text{m}^2$  の大人工島である六甲アイランドを建設中である。

六甲アイランド連絡橋は、この六甲アイランドと東部第二工区を結ぶ橋梁である。このうち主橋梁である六甲大橋は、航路制限、経済性、美観、用地等の条件から、橋長 400 m、3 径間連続トラス・鋼床板ダブルデッキ形式の斜張橋を採用した。昭和 49 年 1 月着工以来、2 年半の工期で本年 6 月に完成している。

この橋は、世界で初めての形式の橋梁であるので、ここに、設計と架設の概要を紹介する。

## 1. この橋の特長と検討事項

### (1) 特 長

この橋の特長をあげると、下記のとおりである。

a) 補剛桁にトラスを用いた斜張橋であること。

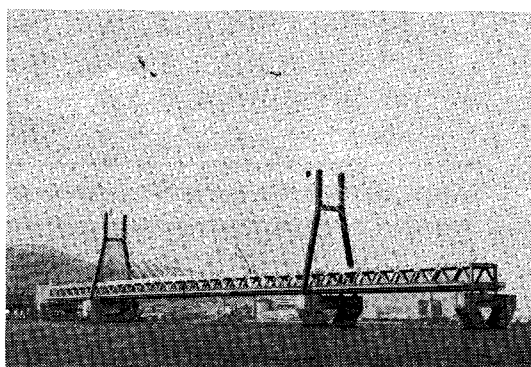
① 斜めケーブルで、トラスを弾性支持することにより、トラス構高さを支間長の  $1/28$  と低くした。

② ケーブルは、各段 PWS 217<sup>a)</sup> を 2 本と少なくしてハープ状に 5 段配置し、トラス上弦材の各格点にアンカーした。

③ 塔は、主構トラスとは独立した構造とし、形状を下方に広がった H 型とした。

b) 主構トラスは鋼床板との合成構造である

① 主構トラスの上・下弦材面を路面としたダブル



写真一1 ケーブル架設後の六甲大橋

a) パラレルワイヤーストランドの略で、直径 5 mm の鋼線 217 本を工場ですべて平行にたばねたケーブル。

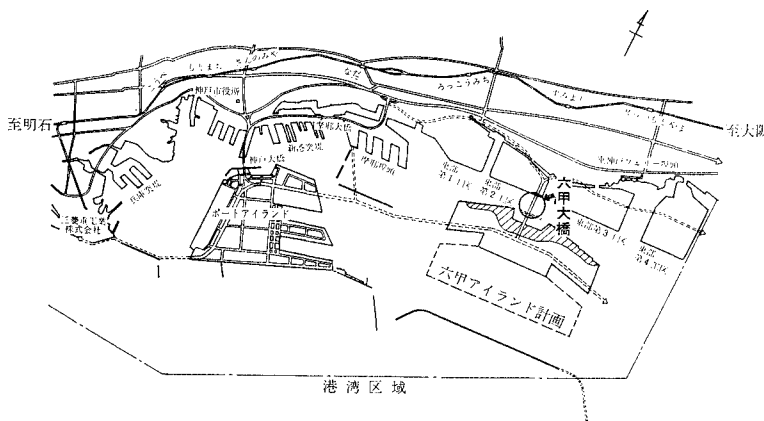


図-1 神戸港概要図

デッキの橋梁である。

② 主構トラスの上・下弦材は、鋼床板との合成構造とした。これにより、鋼床板を弦材断面の一部として利用し、橋の横剛性の増大を図るとともに、横構の省略と床組みの簡略化を図った。

③ 幅員が 12.5 m と大きい、縦桁を用いず、橋軸方向に縦リブを、幅員方向に横リブを配置したシンプルな構造とした。

c) 架設はすべてフローティングクレーンを用いて行った。トラスと塔をポートアイランドにおいて地上で組み立て、主構トラスを 5 ブロック、塔を 2 ブロックの計 7 個のブロックに分割し、各ブロックをそれぞれ 3 000 t フローティングクレーンで架設した。

## (2) 検討事項

この橋は、上記に示すような特長をもった新しい形式の橋梁であるため、設計および施工にあたっては、下記の項目について、それぞれ検討を行った。

- ① 耐風安定性
- ② ケーブル断面の決定方法
- ③ 上・下弦材と協力作用をする鋼床板の有効幅の取り方
- ④ ケーブルアンカー点の構造と設計方法
- ⑤ 多段式ケーブルの応力調整方法

以下に、これらの特長と検討事項を中心にして、この橋の設計と施工について述べる。

## 2. 耐風安定性<sup>1)</sup>

耐風安定性を調べるために、① 地形模型試験、② 静的空力試験、③ 動的空力試験を行った。

### (1) 静的空力

風洞試験の結果得られた各静的空力係数を図-4に示す。C<sub>M</sub> 値は、迎え角が -10° から +10° の間で線形的に減少しており、動的にはストールフラッター振動<sup>b)</sup>

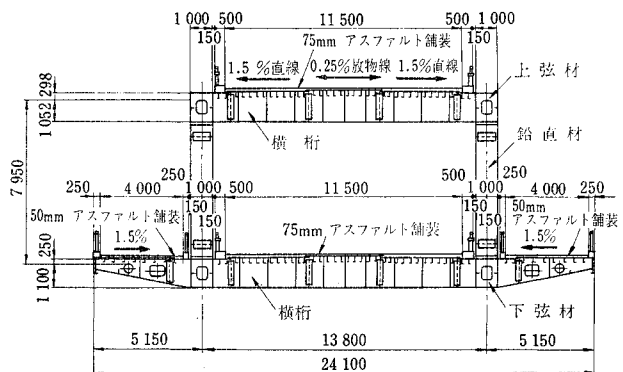
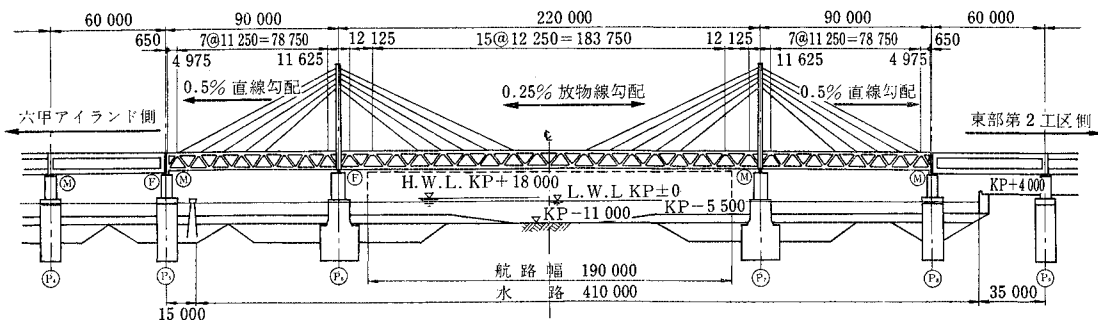


図-3 六甲大橋断面図



(a) 側面図

図-2 六甲大橋

b) 構造物が、空気流のはく離により、空力的に負の減衰となるおそれがある振動。

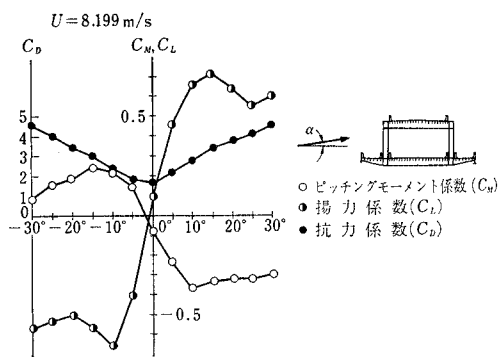


図-4 静的空気力係数

現象の発生する可能性があることが確かめられた。

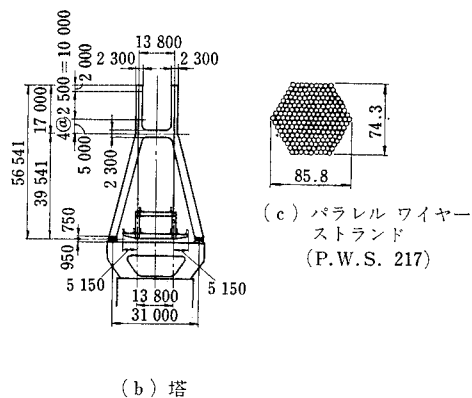
## (2) 風琴振動現象

風洞試験において風琴振動現象<sup>1)</sup>特有の 限定振動が確認されなかったこと、および水槽実験においても顕著な周期渦が確認されなかったことなどから、きわめて安定した断面形であるといえる。

なお、比較のために行った各断面形での風洞試験結果を表-1に示す。

表-1 各種断面での風琴振動

| 断 面     | 迎 え 角             | 風洞実験における風琴振動現象確認の有無 |
|---------|-------------------|---------------------|
| 六 甲 大 橋 | -10°~8°           | 無                   |
| セパン・タイプ | -10°<br>0°<br>10° | 無<br>有<br>有         |
| 逆 梯 形   | -10°<br>0°<br>10° | 有<br>無<br>有         |
| 正 方 形   | 0°<br>5°<br>10°   | 有<br>—<br>—         |



一 般 図

c) 構造物の後方の上縁・下縁に生ずる周期渦が、構造物の固有振動数と一致したとき起こる限定振動。

## (3) ストールフラッター現象

一様空気流れにおける自由振動実験において、ストールフラッター現象が観測された。このストールフラッター限界風速は、ねじれ対称一次振動モードの減衰比を0.001として、迎え角 0°において約 170 m/s、迎え角 -10°において約 85 m/s と考えられ、ストールフラッター現象については安全であると判断される。また、自然風のカスト応答特性<sup>2)</sup>についても、その応答の分散値はきわめて小さいものであり、この点についても耐風性は良好といえる。

## 3. ケーブル断面の決定方法

この橋は、主桁として鋼床板を合成したトラス桁を用いているため、従来の桁橋の斜張橋と比較して主桁の曲げ剛性が 6~8 倍と大きく、支間長に比較しても剛性の大きい斜長橋といえる。このため、ケーブル断面の検討は、主構トラスとケーブル間に荷重をバランスよく配分することに重点をおいて行った。

ケーブル断面の検討は、関係する種々のパラメーターのうち、次の条件を固定して比較を行った。

① トラス高さを取付け橋梁に合わせるため、7.95 m とする。

② ケーブル配置は 5 段とし、1 段について各 2 本ずつ配置する。

ケーブル断面として、PWS 127、PWS 217、PWS 271 の 3 種類を用いた場合の上・下弦材の部材力の比較を図-5に示す。

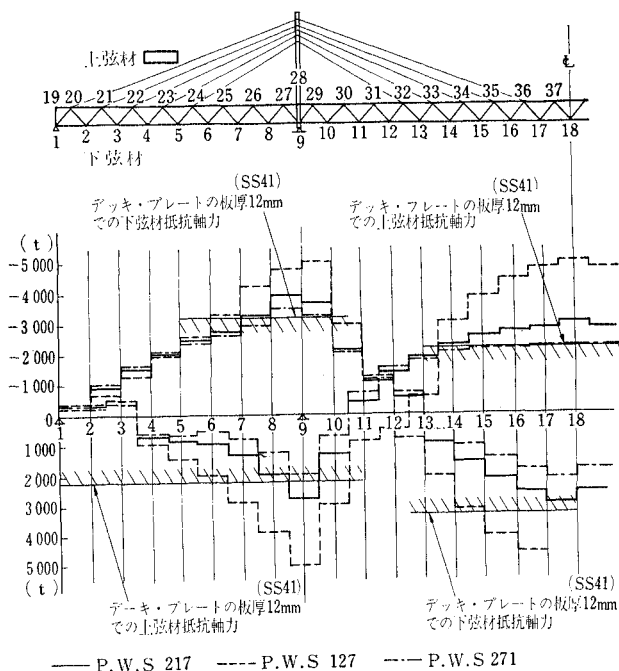
上記の検討の結果、鋼床板のデッキプレート厚さを示方書に示された最小厚さ 12 mm に押え、かつ鋼床板を有効に利用するという条件から、PWS 217 を採用することに決定した。

なお、わが国における代表的な斜張橋について、ケーブルと桁の荷重分担比率、ケーブルの重量比較等をまとめて表-2に示す。

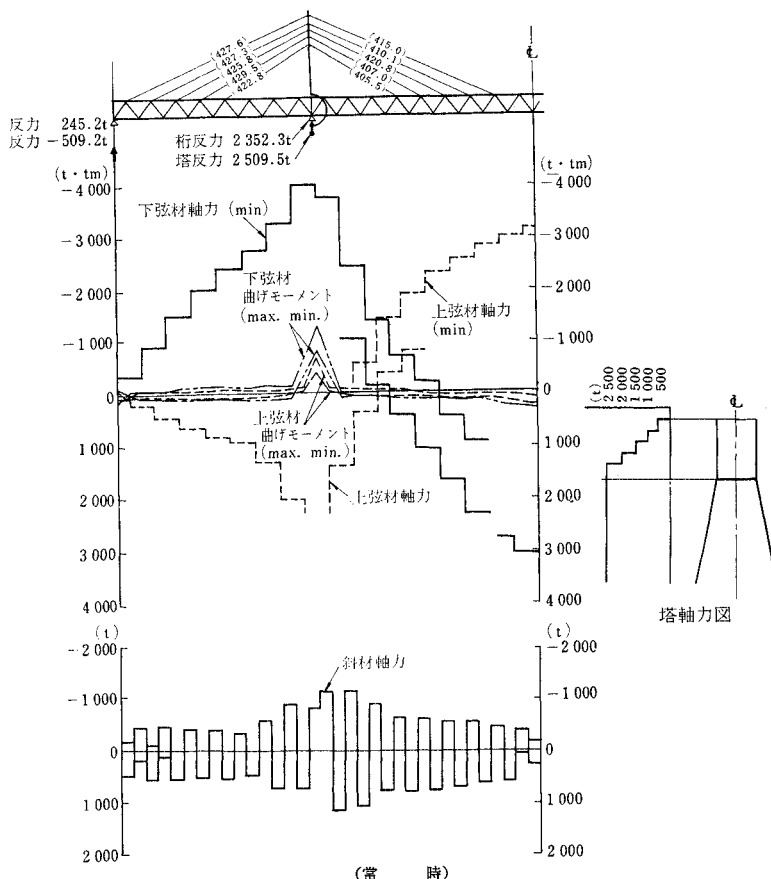
表-2 ケーブルと桁の荷重分担比較表

| 橋 名     | ケーブルの重量比 (%) | ケーブルの荷重分担比率 (%) | 桁 高<br>支 間 長                       |
|---------|--------------|-----------------|------------------------------------|
| 摩 耶 大 橋 | 4.0          | 79              | $\frac{2.8}{139.4} = \frac{1}{50}$ |
| 豊 里 大 橋 | 5.5          | 78              | $\frac{3.1}{216} = \frac{1}{70}$   |
| かもめ大橋   | 4.7          | 76              | $\frac{3.1}{240} = \frac{1}{77}$   |
| 六 甲 大 橋 | 2.7          | 55              | $\frac{7.95}{220} = \frac{1}{28}$  |

2) 突風等の風の乱れに対し、構造物が示す振動特性。



図—5 各種ケーブル断面における部材力



図—6 部材断面力図

#### 4. 主構の部材力

主構の解析は面内構造物として行った。

各ケーブルに対するプレストレス力の大きさは、各ケーブルの耐力と塔に対するつり合いを考慮したうえで決定した。なお、トラス材料は、曲げ剛性の小さい H 断面を用いたので、曲げ剛性は無視して計算を行った。図—6 に常時（死荷重 + プレストレス + 活荷重 + 支点沈下）の部材力図を示した。

#### 5. 主構の有効幅

この橋の上弦材および下弦材は、トラスと鋼床板が合成された構造となっているため、有効幅の取り方に下記のような問題点があった。

① 上・下弦材の断面構成は、腹材から直接、力が伝達されるところの腹板の断面積比が 20～30% と非常に小さい（一般のトラス橋では 50～70%）。

② トラス構造のため、各格点で軸力が導入される。

③ 上・下弦材が直接床組みを支持しているため、軸力のほかに主構としての曲げモーメントと縦桁としての曲げモーメントを受ける。

設計にあたっては、次に示す簡易計算法によって有効幅の算出を行いさらに、① 直接剛性法による解析と、② 有限要素法による解析によって、この簡易計算法の妥当性を確認することとした。

##### (1) 設計に用いた簡易計算法

##### a) 軸力に対する有効幅

任意の格点について、斜材、ケーブルから導入される軸力を格点軸力と定義し、格点軸力の累積された軸力を初期軸力と定義する（図—7）。

初期軸力に対する有効幅は、初期軸力図から符号変化点間を等価区間長とし、『道路橋示方書』の有効幅の規定を適用する。格点軸力に対する有効幅は、格点軸力が弦材格点位置で集中的に作用するので、鋼床板への分布はあまり期待できない。こ

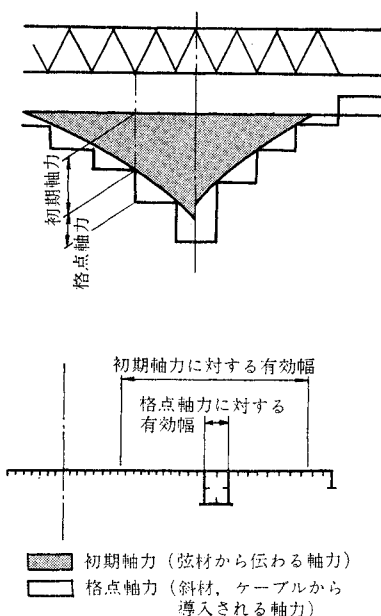


図-7 初期軸力および格点軸力

ため安全側をとり、弦材箱桁断面のみ有効とした。

#### b) 曲げモーメントに対する有効幅

それぞれの曲げモーメント図における等価支間長から『道路橋示方書』を適用し有効幅を求めた。

#### (2) 直接剛性法による解析<sup>2)</sup>

本理論は、鋼床板を合成した上・下弦材を斜材で連結

した主構トラスと、塔および斜めケーブルからなる構造系、すなわち連続体と骨組構造との混合構造系を変形法によって解析した。これによって、各骨組部材の断面力のみならず、鋼床板における応力分布をも把握した。

#### (3) 有限要素法による解析

上弦材と斜材を立体薄板構造と考えて解析した。斜材力の鋼床板への分布状態を図-8に示す。

#### (4) 考 察

① 設計に用いた面内構造系と、直接剛性法による解析結果とを比較すると、変形と部材力はよく一致している。この結果から、面内構造系としての解析で十分であることがわかる。

② 格点軸力の鋼床板への応力分布は良好で、鋼床板幅×1/4以上格点から離れた点で、十分鋼床板全体へ分布している。

このことから、設計に用いた簡易計算法における鋼床板の有効幅は、より安全側であることが確認された。

### 5. ケーブルアンカー部

#### (1) ケーブルアンカー部の構造

ケーブルアンカー部は、上弦箱断面の中にアンカー桁を2本配置し、座金を介してソケットをアンカーする構造とした(図-9参照)。

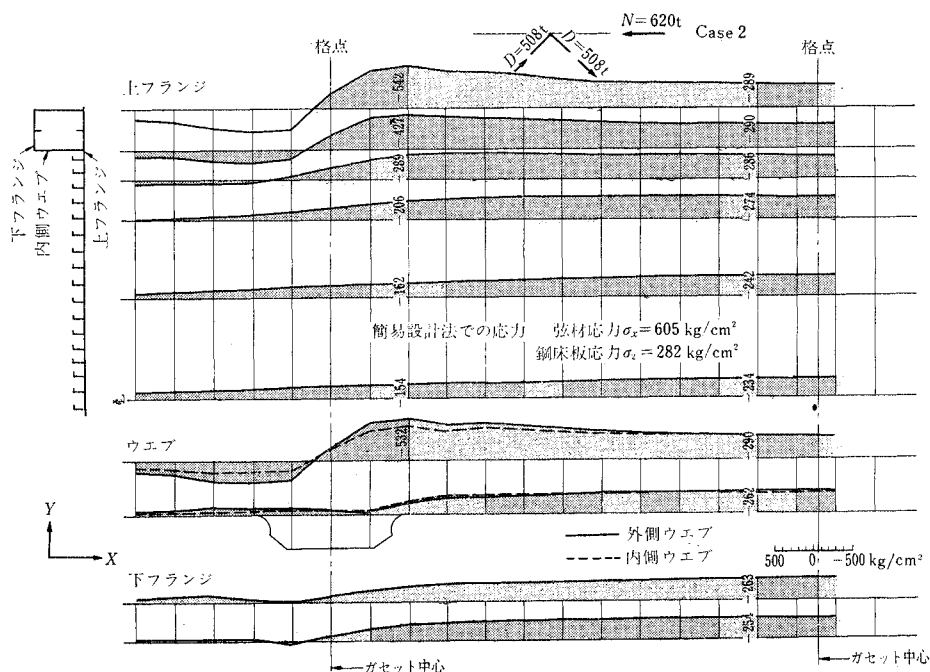


図-8 軸方向応力度 ( $\sigma_x$ )

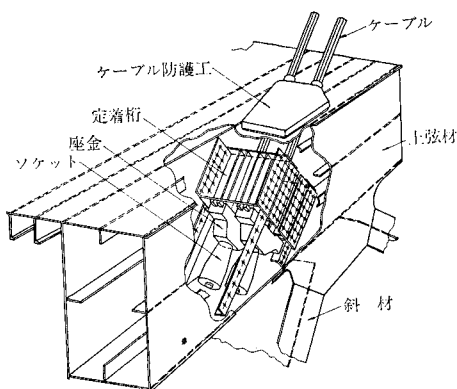


図-9 桁側ケーブル定着部

## (2) ケーブルアンカー部の設計

ケーブル力は、**ローブソケット**→**座金金物**→**アンカー桁**→**上弦材の腹板**→**主構トラス**の径路で伝達される。代表的なケーブルアンカー点を立体薄板構造として、有限要素法により解析を行った。

この解析結果から簡易計算式を導き、各アンカー点について設計を行った。図-10に上弦材腹板の応力分布を示した。この図からわかるように、主構としてトラス形式を使った場合には、ガーダー形式を使った場合に比べて、ケーブルアンカー点の応力集中が小さい。これはトラスの斜張橋の特長といえるが、その原因として下記のことあげられる。

① ケーブルの方向とトラス斜材の方向が近接し、ケーブル力が直接斜材に流れる傾向が強い。

② ケーブルアンカー点のトラスのガセットプレートが有効に作用している。

③ ケーブルが多段式のため、1か所あたりのケーブル力が比較的小さい。

アンカー部の設計は、有限要素法による解析結果を考慮に入れて、④ ケーブル力の水平成分、⑤ トラスの斜材力、⑥ 初期軸力のガセットへの移行等に対する応力分布幅を仮定して設計した。

## 6. 架 設

### (1) 架 設 概 要 (図-11)

本橋の架設は「中央径間に2本のステーシングを用いる大ブロック架設工法」により行った。架設概要を図-11に示す。大ブロック架設には、3000tフローティングクレーンを使用し、主構トラスを5ブロック(最大重量1450t)、塔2ブロックの計7個のブロックに分けて、それぞれ隣接するポートアイランドにおいて地上組立てたものを一括して吊込み架設を行った(図-11、第1～第4段階)。

大ブロック架設は、昭和50年11月2日に開始し、1ブロック3日のピッチで、同24日に終了した。

主構トラスおよび塔の架設完了後(第4段階終了後)ケーブルに対するプレストレス導入に備えて、主構トラスを中間支点上で500mm、ステーシング上で750mmそれぞれジャッキアップした。ケーブルの架設は、橋上に設置した3台のトラッククレーンによって行った。

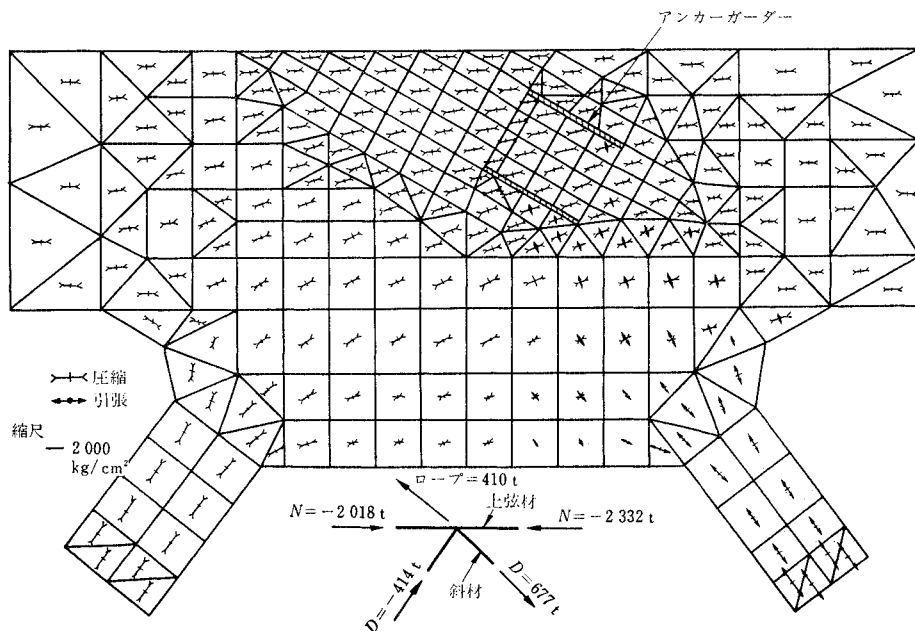


図-10 有限要素法による腹板の主応力図

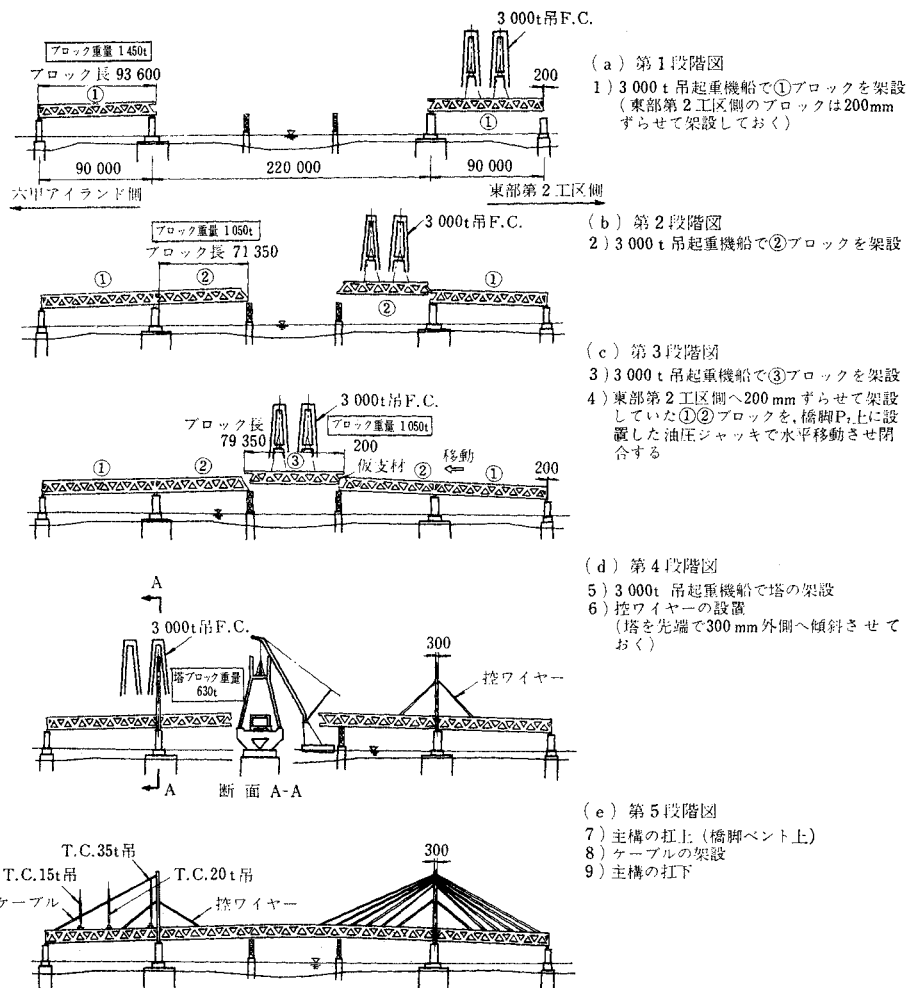


図-11 大ブロック架設順序図

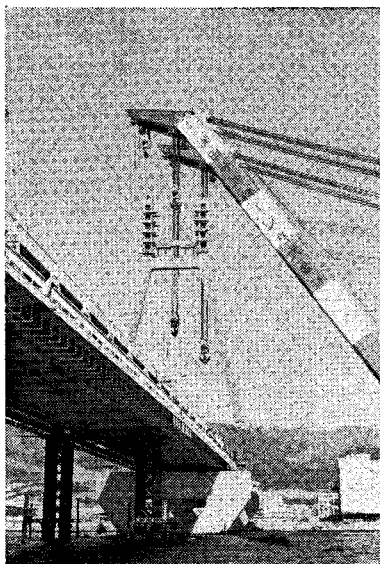


写真-2 3 000 t フローティングクレーンによる塔の架設

## (2) ケーブルの応力調整

ケーブルの応力調整法としては、一般に、① ジャッキによるケーブル張力の調整、② ケーブルサグによる調整等が行われている。

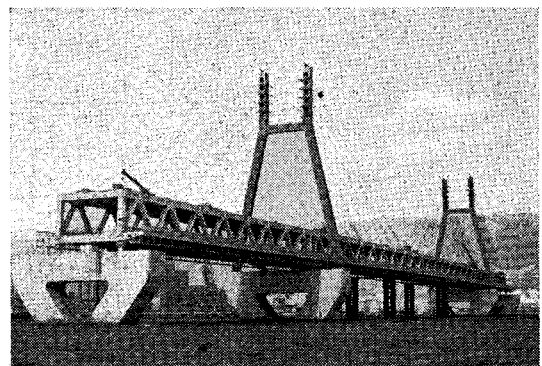


写真-3 ケーブル架設後の六甲大橋

本橋の場合、④ ケーブルが多段式である、⑤ トラス主構の剛性が大きいとケーブル力に誤差を生じ易い  
⑥ ケーブル定着部が狭くジャッキ操作が困難である、などの条件を考慮に入れると、ケーブル長を基準とする方法が最も正確であると判断された。そのため、トラスおよび塔の架設後、ケーブル架設前に、ピアノ線によって塔と桁のケーブル定着点間距離を実測し、誤差はライナープレートによって調整を行った。この調整方法では製作・架設上の誤差は、単に完成時のキャンパー誤差として残るだけで、橋の完成時の固有応力状態には関係しない。

#### a) ケーブルの測長

ケーブルの製作工場における測長精度は、誤差をケーブル長さの 1/1 000 以下とした。

#### b) 塔頂サドルと上弦材アンカー桁間の測長

あらかじめ工場内において設計寸法をマーキングしたピアノ線を、ケーブルのセット位置に張り、製作および架設の誤差を測定した。測長は、風の無い早朝に 80 か所で同時に行った。測定誤差は 1/20 000 程度と推定された。

#### c) ケーブルのライナープレート厚さの決定

上記測長の結果に対して、① 温度、② ベントの高さ、③ 荷重、④ 塔の倒れ、等の所要の補正を行い、各ケーブルについてのライナープレート厚さを決定した。

#### d) 応力測定結果

主構トラスこう下後、ケーブルに＜死荷重＋プレストレス＞の作用した状態で、ケーブルの応力測定を次の 2

つの方法で行った。

① ケーブルの固有振動数による測定：ケーブルを加振し、ケーブルに取り付けた加速度計で固有振動数を測定して、ケーブル張力を求めた。測定は精度のよい二次モードで行った。

② ストレインゲージによる測定：主構トラスのこう下前にケーブル素線にストレインゲージを張り、ケーブル応力度を測定した。ケーブル力の誤差を  $-8 \sim +10\%$  以内に架設できたのは応力調整方法が適切であったこと、および主構トラスの剛性の計算を二次部材も含めて正確に行った結果であると考えられる。

## あとがき

本橋の技術問題に関しては技術委員会（委員長 小西一郎教授）を設け、諸先生方から多大のご指導を賜わり、ここに深く感謝いたします。

なお、本橋の基本設計は、新日本技術コンサルタンツ（株）、詳細設計、製作、架設は三菱重工業（株）によるものであります。

## 参考文献

- 1) 京大工学部 土木工学研究室 橋梁工学研究室・神戸市港湾局：六甲アイランド連絡橋の耐風性に関する研究，昭和 49 年 3 月。
- 2) (財) 災害科学研究所・神戸市港湾局：六甲アイランド連絡橋の構造解析に関する研究，昭和 50 年 3 月。

(1976.7.16・受付)

8 月 15 日発売開始●土木学会土木製図委員会編

# 土木製図基準

昭和 51 年版

A 4・122 頁  
折込図 28 図

9 月ぶりの全面改訂版。製図の自動化、省力化への指針となるよう編集。

●お申込は全国主要書店または土木学会へ●

定価 2 800 円 会員特価 2 500 円 (〒 300)

マーク  
は語る



矢作建設工業株式会社

当社は、昭和 24 年 5 月現在の豊田市に誕生し、家康や秀吉の青雲の志を秘め

た母なる矢作川の名前をいただいて、矢作建設工業と名付けました。社章は YAHAGI の Y を形どったものですが、創立当時、創業者である現社長山田勝男以下の若い同志たちが、一日の仕事を終えたあと、古びた事務所ですり合った社業発展の理念を表現したものであります。外円は和であり、中の Y が固く手をつないでこれを等分し団結と調和の精神を返っております。

制定の月日は明確ではありませんが、

創業間もないころから原形は使っておりその後それを地元の絵の先生に依頼して現在の色や寸法にしたものです。

この社章は、社内の各種出版物、重機、車両、看板、ヘルメット、服、名札など各所に使用しており、その理念は、矢作の社名とともに、今日も協調・進取などの気風として生きております。

(稲垣一成・記)

|                                                   |                    |                   |
|---------------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| 土木学会誌・論文集総索引 (第1巻～第60巻) 12月予定                     |                    |                   |
| 日本土木史                                             | 昭和16年～昭和40年 36000円 | 大正元年～昭和15年 24000円 |
| 日本の土木技術                                           | 一近代土木発展の流れ一 3200円  |                   |
| 土木製図基準                                            | 昭和51年版             | 2800円             |
| 海外建設工事の契約・仕様                                      | 6000円              |                   |
| 建設プロジェクトの進め方                                      | 2800円              |                   |
| 水理公式集                                             | 5000円              |                   |
| 水理公式集例題集                                          | 1800円              |                   |
| 構造力学公式集                                           | 6600円              |                   |
| コンクリート標準示方書                                       | 昭和51年版             | 11月予定             |
| コンクリート標準示方書解説                                     | 昭和51年版             | 11月予定             |
| 遠心力大径PC杭設計施工指針案                                   | 1000円              |                   |
| トンネル標準示方書解説                                       | 昭和51年版             | 12月予定             |
| シールド工法標準示方書解説                                     | 昭和51年版             | 12月予定             |
| 開削トンネル設計施工指針                                      | 12月予定              |                   |
| 沈埋トンネル耐震設計指針案                                     | 1000円              |                   |
| 海洋鋼構造物設計指針(案)解説                                   | 1800円              |                   |
| 海上作業足場の設計要領                                       | 2000円              |                   |
| ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針                                 | 900円               |                   |
| ダム基礎岩盤グラウチングの施工実例集                                | 13000円             |                   |
| ダムの地質調査解説                                         | 52年1月予定            |                   |
| わが国におけるT・B・Mの実績と展望                                | 10月予定              |                   |
| 土木技術者のための岩盤力学                                     | 昭和50年版             | 12000円            |
| 鋼鉄道橋設計標準解説                                        | 昭和49年版             | 3000円             |
| 国鉄建造物設計標準解説                                       | 昭和49年版             | 4500円             |
| 斜張橋資料集成                                           | 14000円             |                   |
| 港大橋工事誌                                            | 30000円             |                   |
| 構造物の安全性・信頼性                                       | 10月予定              | 5000円             |
| 地下構造物の設計と施工                                       | 4700円              |                   |
| 製図の書き方                                            | 52年2月予定            |                   |
| 土木材料実験指導書                                         | 昭和52年版             | 52年2月予定           |
| 構造実験指導書                                           | 昭和52年版             | 12月予定             |
| 〒160 東京都新宿区四谷1丁目 土木学会 ☎355-3441 (販売) 振替東京 6-16828 |                    |                   |