

鋼床版箱桁橋におけるブロック全断面溶接工法について

日本道路公団技術部構造設計課 三瀬 純  
○ 同 上 中島英治

1. まえがき

鋼床版連続箱桁橋として、わが国有数の規模を有する広島大橋（広島～呉間、橋長1,020m、4車線自動車専用道路）は、比較的海象の緩やかな広島湾奥部に位置するため、現地架設はフローティングレーンによって1スパン分の架設ブロックを一挙に橋脚上に架け渡し（重さ200～590ton、長さ58～135m、2.2ブロック）、ゲルバー桁構造系として架設を進めるという大ブロック架設法を採用した。

架設ブロックは臨海工場に一体に組立てられたものを各船に搭載して現地まで海上運搬したが、この架設ブロックの一体化にあたり、添接板なしの全流接構造として計画し、その製作方式として工場屋内では、箱桁全断面の組立てをし、1次ブロックをヤードに相互に流接り合しながら部材長を伸ばしていき、いわゆるブロック製作法に取組んだ。

本報告は、このブロック製作法の概要と本施工に先立ち実施した模型実験による溶接上の問題点  
 解明と考察の経緯について紹介するものである。

## 2. 製作法の概要

ブロック製作法は大別して、ヤードにおいてパネルを組立て、箱桁を形成する、いわゆるパネル方式と小ブロック相互を接合して部材長を伸ばすブロック方式とに分けられる。いづれも得失があるが、本橋では内作量が多く、落接条件の安定していると思われるブロック方式を採用した。(図-1参照)

1次ブロックの製作については、ヤードにおける接合をなるべく少なくする意味で、これを大型化することとしたが、図-1に示すように1次ブロックの流接姿勢は全て下向きまたは横向きとしたことから、このブロックの反転作業が必要となるため、工場屋内の天井クレーン能力により制限を受ける。従って1次ブロック長の決定に際しては、受注工場と調整のうえ重さ45~60t、長さは断面単位重量の差異により8~19mとした。

2次ブロック(架設ブロック)は1次ブロックを9~12ピース結足す。  
と<sup>より</sup>に単材化できるものである。

この1次フロー相互の流接合は、従来標準の分野で経験の少ないことでもあり、以下本報告はこの継手流接合についての信頼性の確立を中心に行なう。

### 3. 模型桁による実験施工

(1) 实验项目

本施工における溶接強度の信頼性、部材精度の挙動などについて検証を行なうべく、図-2に示すような模型桁(実橋寸法の約1/3断面、長さ5.0m、板厚、材質は実橋と同じ)を製作し、実験に供した。

この実験施工で着目した検討事項はつぎのとおりである。

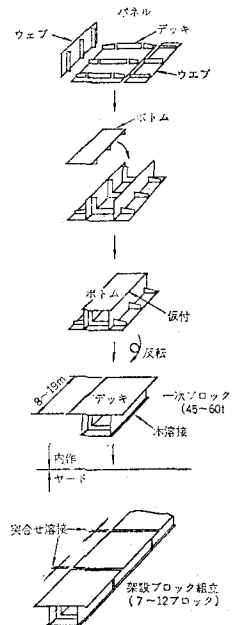


図-1 大ブロックの製作

①片面自動溶接法の適用性 (SM50Y,  $t=12\sim20\text{mm}$  に対し 2 神鋼 FAB-1, 新日鉄 SB-51) の確認。

②箱桁の全断面接合による変形およびキャンバーの把握

③接合部周辺における溶接残留応力の測定 (ストレッチゲージ, 42 点)

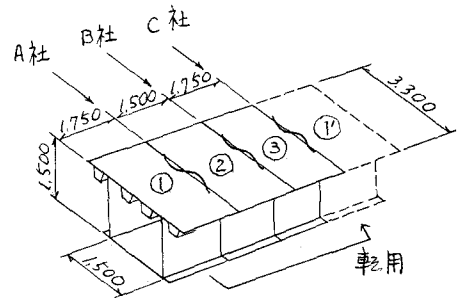
④残留応力計測点付近の材片切出しによる試験片の疲労試験 (23 片, 片振り, SN 曲線作成)

⑤実橋への評価

なお本橋の施工は 3 社による分組施工となったため, 実験施工図面-2 に示すように 3-Joint を設け

各社の溶接工と溶接機具を用い施工した。

溶接方法および溶接条件の概要は表-1 に示すとおりである。



デッキプレート SM50YA  $t=12\text{mm}$   
ウエブプレート "  $t=12\text{mm}$   
ボトムプレート SM50YB  $t=20\text{mm}$   
縦リブ SS41  $t=8\text{mm}$

図-2. 実験用模型桁

## (2) 片面自動溶接

片面自動溶接の適否については, 溶接ビード全線について 100% の X 線検査を行った。今回の模型桁における溶接作業は, 受注 3 社の溶接板桁の比較という別の意識も力いて, きれいな外觀にする傾向がある程度みられたが, それは別に X 線フィルムを見る限り, 3 社の優劣はほとんどなく全溶接線 1 級を示した。ただし数% ほどはブローホール, 溶け込み不足が観察された。懸念された終端部におけるフレは, 各社の夫々の対応策により効果と平に発生は認められなかった。

なお実橋にもデッキプレートについては 100% の X 線検査を行ったが 1 級合格率は 94.4% であった。

| 溶接箇所 | 開先形状    | 溶接法                | 溶接条件                                                   | 溶接材料                                                                   |
|------|---------|--------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| A 社  | デッキ<br> | SB-51<br>(片面自動溶接)  | 電流 850A<br>電圧 34~36V<br>速度 30cm/min<br>入熱量 61,200J     | ワイヤ Y-D (4.8φ)<br>カットワイヤ YK-C (1mm)<br>フラックス YF-15 (20×D)<br>裏当材 SB-51 |
|      | ウエブ<br> | 自動溶接<br>(OSCON-VB) | 電流 160~180A<br>電圧 21~23V<br>速度 23~30                   | ワイヤ YM-28 (1.2φ)<br>裏当材 SB-30                                          |
|      | ボトム<br> | SB-51<br>(片面自動溶接)  | デッキと同じ                                                 | デッキと同じ                                                                 |
| B 社  | デッキ<br> | FAB<br>(片面自動溶接)    | 電流 820A<br>電圧 33V<br>速度 30<br>入熱量 54,100J              | ワイヤ US-36<br>フラックス MF-38<br>鉄粉 RR-2<br>裏当材 FB-1                        |
|      | ウエブ<br> | 手溶接                | 電流 100~160A<br>速度 10~15<br>層数 5 (3+2)                  | SS41, SM41 用<br>B-17, LB-26<br>TB-24, LB-25<br>LB-26V                  |
|      | ボトム<br> | "                  | 電流 170~350A<br>速度 20~30<br>層数 7 (4+3)                  | SM50Y 用<br>LTB-50<br>LB-52<br>LB-52V                                   |
| C 社  | デッキ<br> | FAB<br>(片面自動溶接)    | 電流 850~900A<br>電圧 34~36V<br>速度 30cm/min<br>入熱量 64,800J | ワイヤ US-43<br>フラックス PF1-50<br>鉄粉 RR-2<br>裏当材 FAB-1g                     |
|      | ウエブ<br> | 手溶接                | 電流 110~150A                                            | L-55 (4.0φ)                                                            |
|      | ボトム<br> | "                  | 40φ<br>116~190A<br>5.0φ<br>130~240A                    | "                                                                      |

表-1 ブロック接合の溶接条件

### (3) 一直線継手に伴う変形

全断面接合に伴うブロックの変形状況については、実験の結果からつきのようなことが確認された。一直線継手部の溶接縮み代については、溶接線方向(幅員方向)で4~6mm、溶接線直角方向(橋軸方向)で2~4mmの範囲にバラついた。これは各社の溶接順序(ボトム側からスタートするものとデッキ側からスタートするものとに分かれた)、南芝ルートギャップその他溶接条件の相異によるものと考えられる。またキャンバーの変化については、溶接前後で0~2mmであった。

本施工に際しては、これら実験で得られた留意点をふまえて実橋に反映させることとしたが、工場出荷前における架設ブロックのキャンバーは-7~+15mmの誤差であった。

### (4) 残留応力

残留応力の計測点はブロック継手の溶接線を中心に考え、デッキプレートおよびボトムプレートを計測することとした。測定箇所は図-3に示すように断面としデッキ9点、ボトム5点計14点とした。残留応力の計測には抵抗線ひずみ計を用い、所定の測定点にひずみゲージを貼布し、その周囲をトリパソニーにより切前開放することによって開放ひずみを測定する方法をとった。(写真-1)

なおひずみゲージはゲージ長さ5mmの2方向、計測方向は溶接線に対し直角、平行の2方向とした。計測結果のあらましを概括的に述べると、デッキプレートの残留応力は、溶接線方向 $\sigma_x = 10 \sim 30 \text{ kg/mm}^2$ の引張応力、 $\sigma_y$ (溶接線直角方向)  $= -30 \sim 10 \text{ kg/mm}^2$ で圧縮ないし引張応力であった。図-4にその分布状況を示すが、数少ない測定点を結んだものであり必ずしも実際の変化を示しているものではない。また溶接線から50~100mm離れたところでは、溶接線方向の残留応力は急速に収斂しているが、直角方向はほぼ一様な圧縮応力となっている。

残留応力の分布形状は、各社によっても異なり複雑な様子を呈しているが、これは溶接順序、施工法の違いによるものおよび継りかすみ肉溶接の影響を受けている。

参考までにブロック継手溶接部から離れた継りかすみ肉のみの影響を受ける標準部についても、 $\sigma_x = 5 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\sigma_y = -20 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$ の残留応力が計測されている。

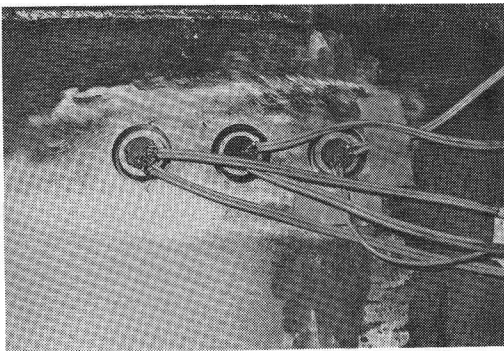


写真-1 残留応力の計測

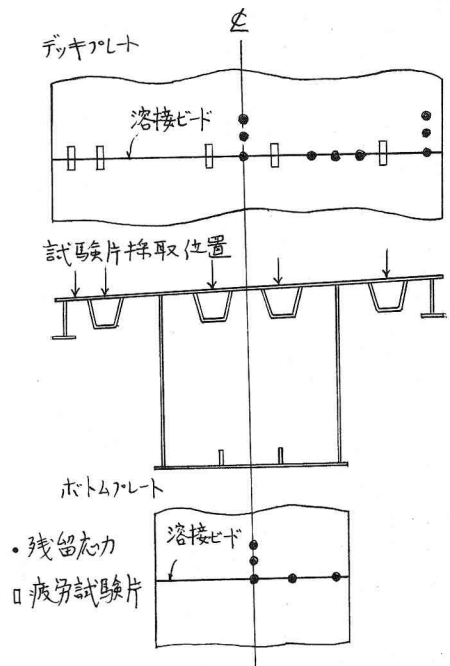


図-3 残留応力・疲労強度測定点

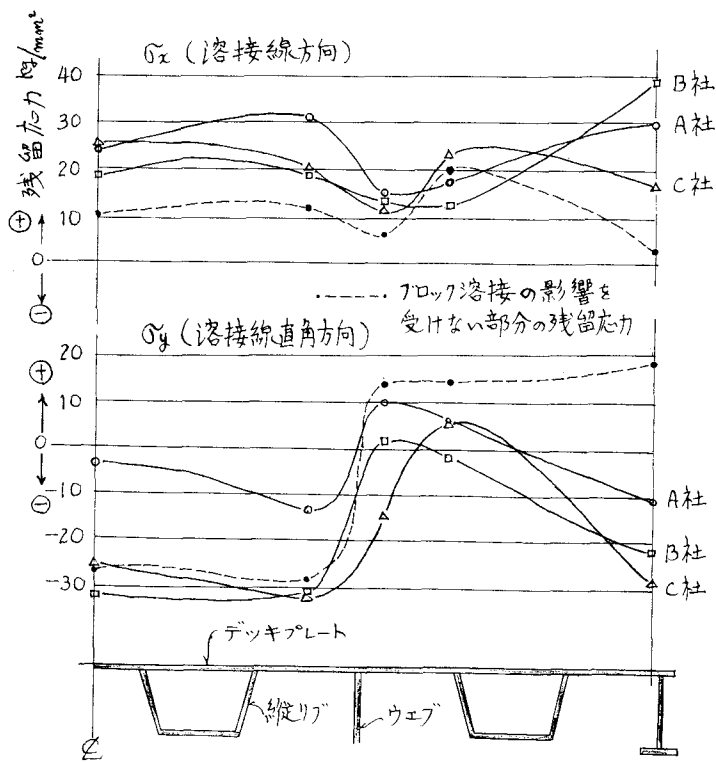


図-4. デッキプレート溶接線上の残留応力分布

| 試験片 | 応力 (kg/mm²)    | 繰返し数           | 破壊の有無           | 破壊状況<br>その他 | 使用試験機  | 目違い量<br>(mm) |
|-----|----------------|----------------|-----------------|-------------|--------|--------------|
|     | $\sigma_{max}$ | $\sigma_{min}$ | $N \times 10^4$ |             |        |              |
| A-1 | 33             | 0              | 230.375         | 0           | ser.** | 1.5          |
| 2   | 35             | 0              | 150.535         | X           | Bond部  | 1.2          |
| 3   | 48             | 0              | 39.847          | X           | Depo部  | 0            |
| 4   | 40             | 0              | 22.230          | X           | 母材部R止り | 1.4          |
| 5   | 43             | 0              | 8.565           | X           | 母材部    | 1.1          |
| 6   | 45             | 0              | 0.625           | X           | Bond部  | 1.5          |
| B-1 | 33             | 0              | 19.631          | X           | Bond部  | ser.         |
| 2   | 38             | 0              | 19.068          | —           | 試験中断   | —            |
| 3   | 38             | 0              | 28.570          | X           | 母材部R止り | —            |
| 4   | 34             | 0              | 219.534         | 0           | —      | 1.2          |
| 5   | 43             | 0              | 13.558          | X           | Depo部  | —            |
| 6   | 36             | 0              | 83.484          | X           | —      | 1.3          |
| C-1 | 35             | 2              | 195.180         | X           | Hyd.   | 1.5          |
| 2   | 40             | 2              | 6.270           | X           | Bond部  | 1.0          |
| 3   | 43             | 0              | 9.105           | X           | 母材部R止り | ser.         |
| 4   | 45             | 0              | 2.649           | X           | —      | 1.2          |
| 5   | 36             | 0              | 20.614          | X           | —      | 1.0          |
| T-1 | 35             | 0              | 38.140          | X           | Bond部  | Sch.         |
| 2   | 33             | 0              | 138.410         | X           | つかみ部   | —            |
| 3   | 37             | 0              | 74.290          | X           | Depo部  | —            |
| 4   | 50             | 0              | 0.563           | X           | —      | ser.         |
| 5   | 27             | 0              | 251.030         | 0           | —      | —            |
| 6   | 51             | 0              | 0.007           | X           | Depo部  | —            |

表-2. 疲労試験データ \*\* Ser.: Servo Pulser, Sch.: Schenck Pulser, Hyd.: Hydraulic Pulsator.

## (5) 疲労強度

疲労試験片は×線検査、残留応力計測後、デッキプレートをガス切断し、3断面から各5片を採取した。(80×500, 余盛仕上げ)

なお比較のため単純な板継ぎを5片新たに製作し試験に供した。これはブロック継ぎにおいては多少の目違い、角変位を生ずるので、この要因のない一般的な溶接条件のものと比較検討するためである。

試験方法は、下限応力  $\sigma_{min} = 0$  の完全片振り張疲労試験である。

各シリーズの試験結果を表-2に示すが、これからみると疲労破壊発生位置はDepo, Bond, 母材のいづれかで破壊し、破壊位置における寿命の長短の明確な差はない。

図-5は、これらデータをS-N曲線にまとめたものである。

これから解るように各社とも有意差は認められず、 $2 \times 10^6$ 回で、片振強度は  $30 \text{ kg/mm}^2$  が期待できることが確認された。

なお図-4には、参考のため片手溶接継手後、余盛削除の場合について破線を示してある。

これから判断すると本試験の対象としたブロック継ぎにおける片面自動溶接の劣化性は、グラインダー仕上げを十分に行なえば疲労強度に關して特に問題はないようである。

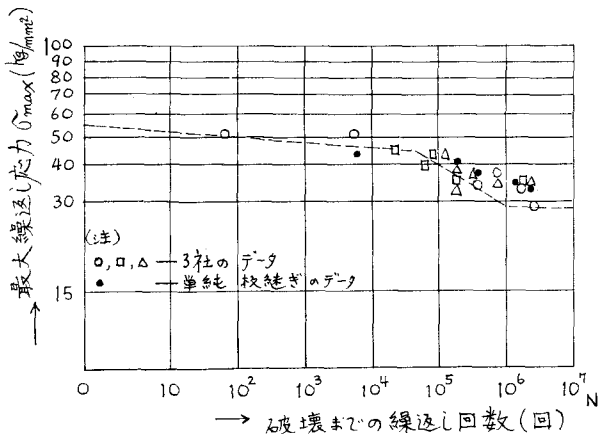


図-5. 実験データをプロットしたS-N線図

される8 Ton換算荷重の繰返し回数を求め( $1.5 \times 10^6$ 回)、実橋の各断面の平均応力と変動応力から確率的に安全性をチェックする手法を考へた。等価繰返し数の算定については、土木研究所資料<sup>1)</sup>を引用した。

本試験における疲労試験は、前述のように片振り張試験であるが、実橋が受ける変動応力は、不規則な最大最小応力である。従って今回得られた試験データから各応力比、すなわち平均応力の影響を考慮した時間強度を得る必要がある。図-6は、白石氏らの手法<sup>2),3)</sup>によって $N = 2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^4$ のそれぞれの時間強度曲線を求めたものである。この図表に設計実応力(平均応力 $\sigma_m$ と変動応力 $\sigma_a$ )をプロットし、さらに残留応力を一次的に重ね合わせるにより実橋の耐力を確認した。

鋼床版継手部に対する設計応力は、死荷重応力 $\sigma_0$ 、主桁作用による活荷重応力 $\sigma_L$ および床版作用による活荷重応力 $\sigma_T$ から構成されているが、疲労破壊を対象とする場合には、最大応力状態の $\sigma = \sigma_0 + \sigma_L + \sigma_T$ をとるべきでなく、作用頻度の多い応力状態を考慮する必要がある。この判断については、議論の別れるところであろうが、本橋の照査については $\sigma = \sigma_0 + 1/3 \sigma_L + \sigma_T$ とした。

例としては、ある断面での平均応力 $\sigma_m = 7.6 \text{ kg/mm}^2$ 、応力振幅 $\sigma_a = 5.1 \text{ kg/mm}^2$ とした場合、図-6

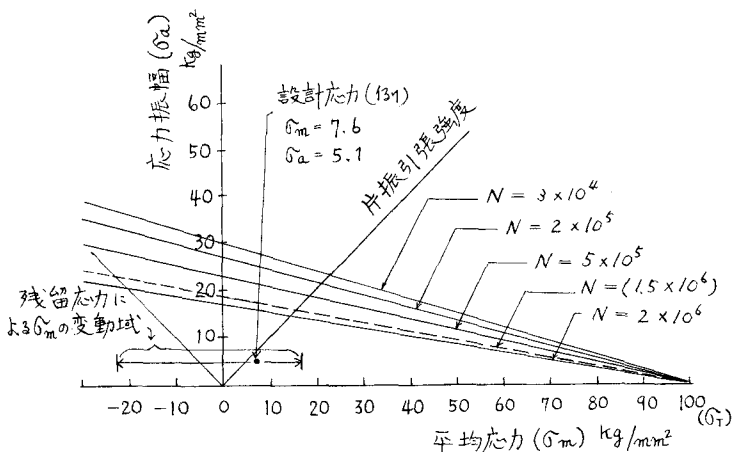


図-6 時間強度曲線図

## (6) 実橋への評価

実験データの考察にあたって当然問題となるのは、計測された残留応力をどう評価するか、これと設計実応力および疲労強度とどのように関連付けて実橋の安全性をチェックするかということである。

疲労強度の取扱については、 $k = \sigma_{max} / \sigma_{min}$ により許容応力を低減させ、この手法が用いられることがあるが、本橋では、実橋の供用後50年間に推定

の時間強度曲線図にプロットしてみると $1.5 \times 10^6$ 強度線以下にあることが分かる。上記応力には残留応力 $\sigma_r$ は含まれていないので、 $\sigma_m$ を $-30 \text{ kg/mm}^2 \sim 10 \text{ kg/mm}^2$ の範囲で左右に平行移動させ、なお余裕が残されていることを確認する。すなわち残留応力 $\sigma_r$ の扱いは、耐疲労性に対して平均応力 $\sigma_m$ を変えろということである。

#### 4. 実橋の施工

上述のような模型桁による実験と考察によって、大島大橋におけるブロック相互間継手部の強度については、残留応力、疲労強度についても特に支障はないと判断し、本施工に踏切ることとした。ただしブロック接合部のルートギャップ、目違いの精度向上が強度確保のうえできわめて重要であること、そのために1次ブロック部材寸法の精度管理に努力すべきこと、なおかつ実合せ部の誤差が生じた場合の用支部の調整手段(ウエブとフランジのすみ肉溶接を実合継手前後800~1,200mm程度、ブロック接合溶接後まで見合せる)を講ずることなどによって溶接性の向上を図った。

なおこのブロック継手溶接は、すべて屋外ヤードで施工されるため、断面設計上は、示方書で規定する現場溶接としての効率低減を行なっている。

品質管理についても、特にデックプレートのX線は100%撮影した結果、94.4%の1級合格率であり、ウエブ、ボトムプレートについては50%撮影の結果、それぞれ87.2%、89.0%の1級であり、

#### 5. むすび

模型実験においても、実橋施工においても前述のように自然ながら溶接部の強度の信頼性の確保に重点が置かれたが、実橋では部材長、キャンバーの精度管理にも十分気を配る必要があった。ヤードにおける1次ブロックはすべて多点支持の状態に接合され、架設ブロックとして完成した場合の計測も、多点支持状態のもので7~+15mmのキャンバー誤差であったが、現地架設完了後の実測では計画値に対して-28~+30mmの誤差であった。

なお最後に、本橋の模型桁実験の実施にあたっては、名古屋大学福本助教授の指導を得たことを付記する。

#### 参考文献

- 1) 国広哲男、井上啓一：道路橋の疲労設計，土木技術資料14-1
- 2) 白石隆義：疲労に関する一般常識，溶接技術，1964
- 3) 小西一郎他：橋梁鋼床版現場溶接部の耐疲労性 土木学会誌，54-8

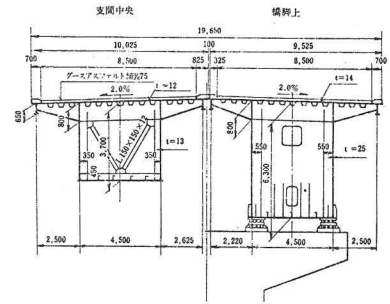


図-7 実橋断面図

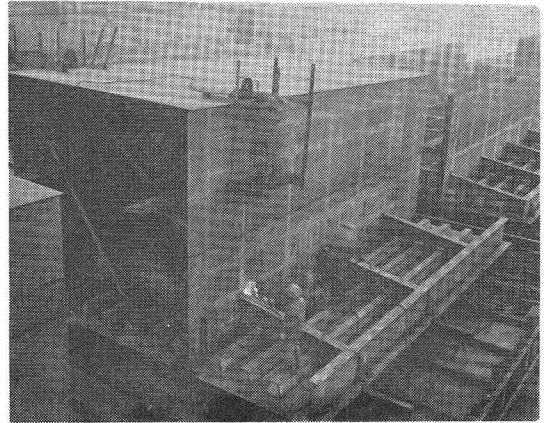


写真-2. 1次ブロックの製作状況

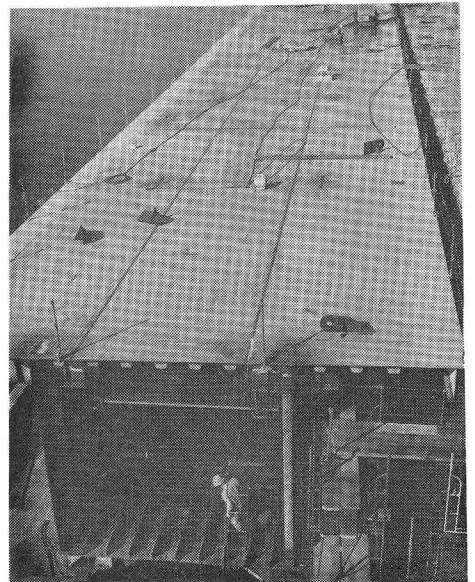


写真-3. ヤードにおける架設ブロックの製作