

# 鋼床版上RC高欄のひびわれ発生メカニズムに関する研究

第3建設部	設計課	江原	武
第3建設部	設計課	松本	茂
工務部	設計課	幸左	賢二

## 要 約

昭和62年頃より建設中の湾岸線鋼床版上のRC高欄において、多数の鉛直ひびわれの発生（平均ひびわれ幅0.2mm、ひびわれ間隔0.5m）が認められた。そこで、これらのひびわれ発生原因究明のための実橋における現場計測および、これらのデータを基にした数値解析が実施された。その結果、ひびわれ発生原因は、主として鋼床版の温度変化に伴う鋼桁の変形が高欄コンクリートに拘束されることにより生じる引張応力によるものであることが明かとなった。また、制御対策としては、発生応力を低減するために、10m毎にコンクリートおよび鉄筋を縁切りした伸縮目地を設置するとともに、膨張材入りコンクリートを使用することが有効であることが数値計算より明らかとなり、実橋試験においても有効性が確認された。次にこれらのひびわれ発生を模した模型供試体を用いた促進実験を実施した。その結果、単純累加塩水濃度および炭酸ガス濃度10年相当期間においては、腐食の進行は極めて緩やかであることが明らかとなり、耐用期間（10年程度）においては、比較的腐食の問題は少ないと考えられる結果が得られた。

キーワード：RC高欄、ひびわれ、鋼床版、耐久性、乾燥収縮、目地、膨張材入りコンクリート

## 1 はじめに

阪神高速道路湾岸線においては、支間および幅員の長大化、脆弱な地盤に支持層を設けることから、重量軽減化のために鋼床版が多く用いられている。鋼床版上の高欄、分離帯の構造は材料面から鋼製高欄、RC高欄に大別することができる。阪神道路公団においては、過去において鋼製高欄を標準としていた時期もあったが、車両の衝突を受けた場合、損傷箇所の補修が困難である、現場溶接部において亀裂が発生しやすい等の理由により、昭和46年よりRC高欄を標準とし現在に至っている。昭和62年頃より建設中の湾岸線鋼床版上

のRC高欄において、多数の鉛直ひびわれの発生（平均ひびわれ幅0.2mm、ひびわれ間隔0.5m）が認められた。現場実測および解析的検討から、そのひびわれ発生原因は、主として鋼床版の温度変化に伴う鋼桁の変形が高欄コンクリートに拘束されることにより生じる引張応力によるものであると推定された。そこで、これらのひびわれ制御対策として、発生応力を低減するために、10m毎にコンクリートおよび鉄筋を縁切りした伸縮目地を設置するとともに、コンクリート材料面からの改良として膨張材の混入により乾燥収縮の低減を

図った。その結果、これらのひびわれ対策を施した高欄は、従来タイプに比べてひびわれ幅、ひびわれ間隔が抑制できうることを解析および現地実験により確認している。しかしながら、現状の改良法においてはひびわれそのものを解消することは困難であることから、発生したひびわれの耐久性的観点からの検討を模型供試体を用いて行った。本報告は、これら一連の鋼床版上RC高欄に発生するひびわれの対策効果および耐久性からの評価について述べるものである。

## 2 現地におけるひびわれ状況調査

### 2-1 調査概要

現在までの調査対象となった橋梁の調査概要を表-1に示す。新淀川工区においては、現状のひびわれの状況調査が実施され、平均ひびわれ間隔0.5m程度、平均ひびわれ幅0.2mm程度であるが、一部には0.4mmにも達するものもあることが確認

された。そこでこれらのひびわれ対策として、まず正蓮寺大橋工区において、鋼構造物標準図集で示されている10m間隔でVノッチ（深さ15mm）を入れるとともに切欠き中央に直径25mmの塩化ビニールパイプを埋設した目地構造の改良と膨張材添加コンクリートを使用した。また末広第2工区、中島川橋梁工区、鳴尾浜第1工区では、コンクリートおよび鉄筋を縁切りした伸縮目地を10m間隔で設置して、さらに膨張材添加を用いた試験工事を行った。その結果無対策に比べて大幅な改善が認められ、目地の設置および材料面からの改善の有効性が確認された。そこで、鋼床版上のRC高欄については、10m間隔で完全目地を設けること、および膨張材入り(35kg/m<sup>3</sup>)コンクリートを用いることを標準仕様とする改訂を行った。以下に代表的調査事例として、無対策である新淀川工区と標準的な対策を実施した鳴尾浜第1工区を取り上げ、調査結果を報告する。

表-1 各橋梁の試験施工内容と調査結果

橋梁名	橋梁形式	試験施工の内容		平均ひびわれ発生間隔(m)	平均ひびわれ幅(mm)
		設計画での改良	施工面での改良		
新淀川橋梁	3径間連続鋼床版桁橋 L=69.4+69.14+ 186.2 =324.7m	なし	・添加物なし。	0.59	0.21
正蓮寺川橋梁	3径間連続鋼床版桁橋 L=118.5+235.0+ 173.4 =526.9m	切吹き中火にφ25mmの塩ビ管を埋設した改良型収納目地を10mピッチで設置。	L側 ・添加物なし。	0.62	0.13
			R側 ・膨張材30kgf/m <sup>3</sup> 混入。	0.68	0.09
末広第2工区	3径間連続鋼床版桁橋 L=69.8+70.0+ 149.95=289.75m	完全に縁を切った伸縮目地を10mピッチで設置。	L側 ・膨張材35kgf/m <sup>3</sup> 混入。 ・P-115~116径間は鋼製型枠を使用。	1.18	0.14
中島川橋梁	バスケットハンドル型 ニールセンローゼ橋 L=160m	地覆部は連続化し、高欄部は伸縮目地を10mピッチで設置。	・膨張材35kgf/m <sup>3</sup> 混入。	0.91	0.07
鳴尾浜第1工区	2径間連続鋼床版桁橋 L=81.4+43.55 =124.95m	完全に縁を切った伸縮目地を約10mピッチで設置。	・膨張材35kgf/m <sup>3</sup> 混入。	1.00	0.07
	3径間連続非合成鋼桁橋 L=37.55+40.0+ 137.6 =215.15m	従来型のV字カット目地を約10mピッチで設置。	・膨張材35kgf/m <sup>3</sup> 混入。	5.41	0.11

## 2-2 新淀川工区（無対策）におけるひびわれ発生状況

新淀川工区のひびわれ状況集計表を表-2に示す。同橋は昭和62年10月にコンクリートが打設されており、打設後約2ヶ月で平均ひびわれ幅が0.01~0.08mm、間隔が0.3~1.5m程度で発生していた。約2年後では図-1のひびわれ状況図から明きらかのように、ひびわれ幅が0.05~0.2mm、鉛直方向のひびわれ間隔が0.5~1.0m程度に増加していた。

## 2-3 末広第2工区におけるひびわれ発生状況

当工区においては設計面の改良として、図-2に示すように地覆および高欄部においてコンクリート、鉄筋共に縁切りした伸縮目地を10m毎に設置した。施工面の改良としては膨張材を無拘束状態でひびわれが発生しない量として35kg/m<sup>3</sup>（セメント量の10%程度）添加した。図-3にひびわれ状況の経時変化を示すが、ひびわれがコン

クリート打設後数カ月を経て、夏期に増加していることが分かる。また、表-3のひびわれ集計表に示すように、表-2の無対策の新淀川工区と比較すると、平均ひびわれ幅が0.12mm、平均ひびわれ間隔が1.85mと大幅に改善されていることが分かる。

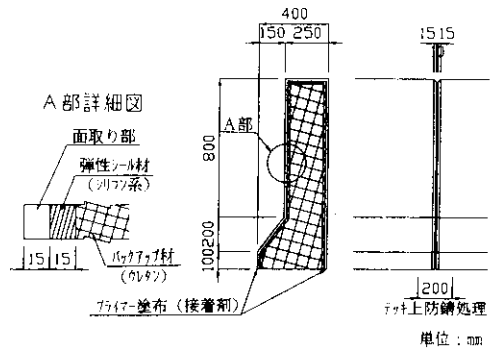


図-2 伸縮目地の構造

表-2 ひびわれ集計表（新淀川橋梁）

橋梁形式	ひびわれ幅 (本数)				平均ひびわれ幅 (mm)	ひびわれ間隔 (m)	ひびわれ本数計	高欄延長 (m)	1m当りひびわれ本数 (本/m)	備考
	0.2mm未満	0.2~0.3mm	0.3~0.4mm	0.4mm以上						
3径間連続鋼床版	386	43			0.21	0.52	429	224.7	1.91	内側 材令720日 警高欄 神戸行車線
	372	42			0.21	0.54	414	224.7	1.84	外側
	214	46		1	0.21	0.86	261	224.7	1.16	大阪行 材令720日
	214	46		1	0.21	0.56	261	224.7	1.16	神戸行 中央分離帯
	428	35			0.20	0.40	463	224.7	2.06	内側 材令720日 警高欄 大阪行車線
	417	35			0.20	0.50	452	224.7	2.01	外側

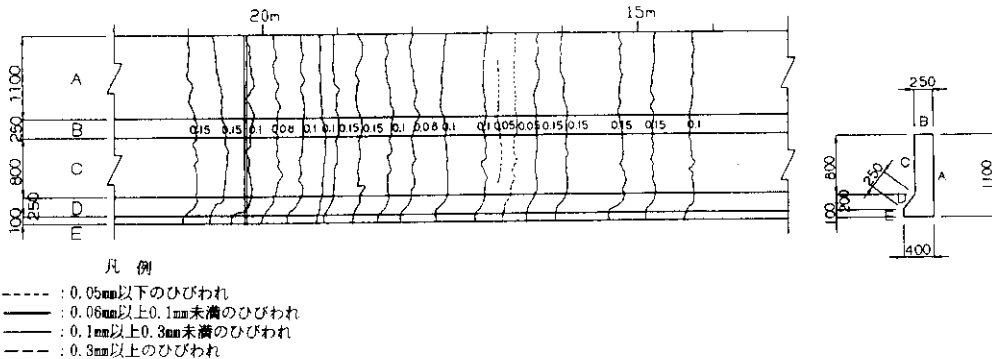


図-1 ひびわれ発生図（新淀川橋梁）

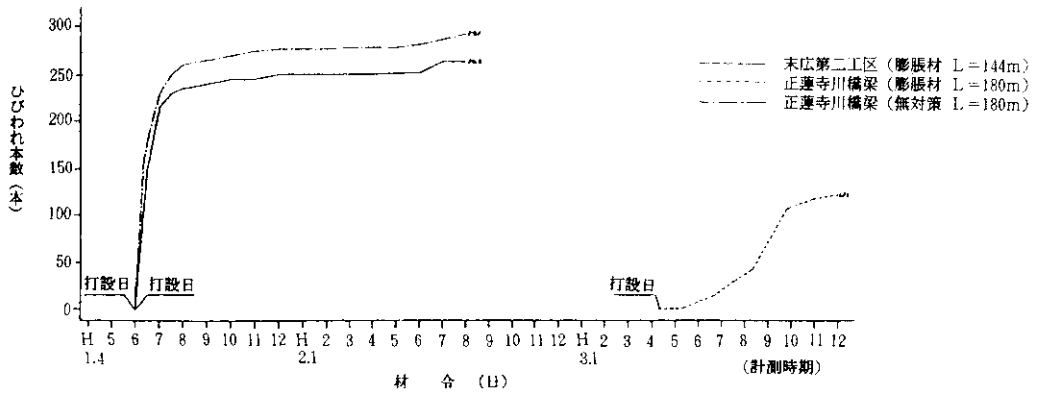


図-3 ひびわれの経時変化

表-3 ひびわれ集計表 (末広第2工区)

橋梁形式	ひびわれ幅 (本数)				平均ひびわれ幅 (mm)	ひびわれ間隔 (m)	ひびわれ本数	高欄延長 (m)	1m当りのひびわれ本数 (本/m)	1m当りのひびわれ係数 (mm本/m)	材令 (日)
	0.1mm未満	0.1~0.2mm	0.2~0.3mm	0.3mm以上							
3径間連続鋼	105	1	0	0	0.15	1.35	106	144.34	0.73	0.044	270
床版2箱桁	12	6	3	0	0.09	2.34	21	51.44	0.41	0.037	

### 3 解析的検討

3-1 R C高欄を含む鋼床版箱桁のモデル化  
R C高欄を含む鋼床版箱桁のモデル化は次のように考えて行った (図-4 参照)。

- ① R C高欄を含めた鋼床版箱桁を、図-4 に示すように伸縮目地部 (高欄部分がなくて鋼床版のみの部分) とその他の一般部に分けて幾つかのセグメントに分割し、一本の梁にモデル化して剛性方程式を構成する。なお、鋼桁と高欄との境界を参照軸とする。
- ② 高欄はスタッドによって鋼床版に固定されているが、その高欄と鋼床版との境界での両者の相対水平変位は、バネ要素としてモデル化している。
- ③ 図-5 に示すように一般部セグメントは、R C高欄 (R C)、鋼箱桁 (S) 要素および前述の境界バネ (B) 要素で構成し、セグメントの一端を5自由度で定義する。また、伸縮目地を表すセグメントは、一般部セグメントと同様に5自由度として5個のバネ要素でモデル化する。

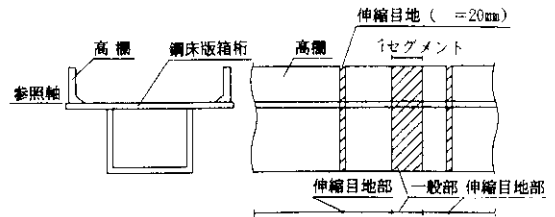


図-4 高欄を含めた鋼床版箱桁のフレームモデル

#### 3-2 応力解析の概要

R C高欄のひびわれ発生原因を推測して、次の2種類の応力解析を対象とした。

- ① 高欄コンクリートの乾燥収縮が鋼桁によって拘束されて生じる場合 (収縮応力解析)
- ② 鋼床版の温度上昇による鋼箱桁の変形をR C高欄が拘束することによって生じる場合 (温度応力解析)

##### 3-2-1 収縮応力解析

コンクリートの乾燥収縮がR C高欄内の配力鉄筋等によって拘束され、高欄コンクリートに応力が発生する。この応力はクリープによって緩和さ

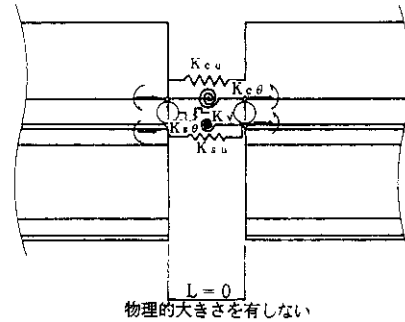
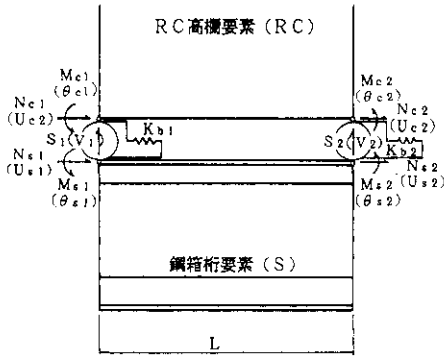


図-5 鋼床版上のRC高欄解析モデル (左:一般部 右:伸縮目地部)

れ、また時間の経過とともに変化する。ここでは図-6に示すようにステップ状に分解し、ある時間間隔ごとに求積する逐次法によって収縮応力を求めることとした。この内部応力より初期力ベクトルを求め、要素の剛性方程式をその参照軸に関して表すと(図-4参照)、次式ようになる。

$$\{f\} = [k] \{u\} + \{f_e\} - \{f_0\}$$

$\{f\}$  : 節点力ベクトル

$$(\{N_{c1} N_{s1} S_1 M_{c1} M_{s1} N_{c2} N_{s2} S_2 M_{c2} M_{s2}\}^T)$$

$[k]$  : 要素剛性マトリックス

$\{u\}$  : 節点変位ベクトル

$$(\{u_{c1} u_{s1} V_1 \theta_{c1} \theta_{s1} u_{c2} u_{s2} V_2 \theta_{c2} \theta_{s2}\}^T)$$

$\{f_e\}$  : 等価節点力ベクトル

(外力を考慮していないので  $\{f_e\} = \{0\}$  である)

$\{f_0\}$  : 初期力ベクトル

伸縮目地セグメント要素の要素剛性マトリックス  $[k]$  は、図-5に示す要素のバネ剛度で構成し、初期ベクトル  $\{f_0\}$  は  $\{f_0\} = \{0\}$  である。

各時間間隔ごとに、各セグメント要素ごとの剛性方程式を重ね合わせて全体剛性方程式を組立てて解くが、その繰り返し計算の流れを図-7に示す。

### 3-2-2 温度応力解析

温度応力解析は弾性解析によることとし、上述の収縮応力解析と同じくセグメントモデルを用いて温度応力計算を行った。なお、初期力ベクトル  $\{f_0\}$  は収縮応力解析と同様な方法によって求められる。

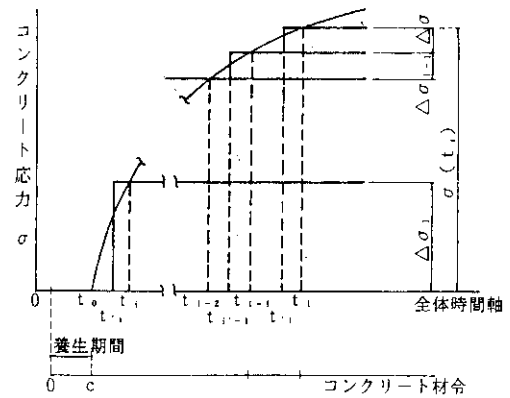


図-6 コンクリート応力の近似

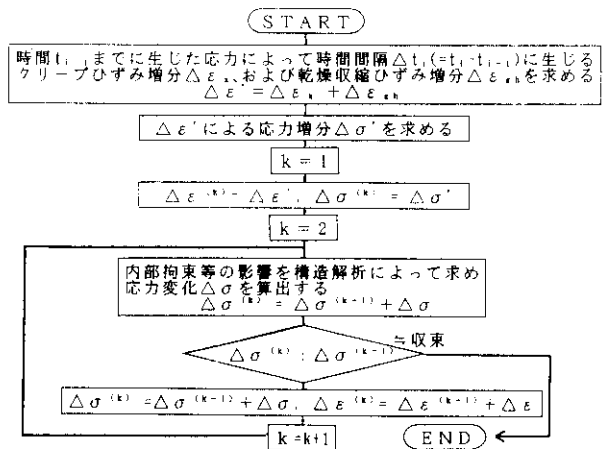


図-7 各時間間隔における計算フロー

### 3-3 構造的ひびわれ対策検討

従来のRC高欄構造で収縮目地となっている箇所を伸縮目地に変更して（すなわち10m程度の間隔に伸縮目地を設ける）高欄の拘束度を減少させる改良工法を検討した。上記応力解析に用いて、この効果を従来のRC高欄構造の場合と比較した。対象橋は、3径間連続鋼床版桁橋（72.2+72.8+51.3m）とし、その側径間（72.2m）を対称条件により2径間モデルとして検討した。表-4に検討条件を示す。同表中の温度データは実測値であるが、コンクリート（ $\sigma_{ck}=270\text{kgf/cm}^2$ ）の特性はコンクリート標準示方書による。図-8にクリープおよび乾燥収縮の進行曲線の計算結果を示す。応力解析結果を図-9, 10に示す。これらの図より次のようなことが考えられる。

- ① 図-9の従来の高欄では、発生応力の傾向は温度変化の場合とコンクリートの乾燥収縮の場合でほぼ同様である。すなわち、伸縮目地付近を除いてほぼ一定な応力状態となっている。また、応力勾配もほとんどなく純引張応力状態となっている。
- ② さらに、温度変化の場合には十分にひびわれが生じうる応力を示しており、高欄断面を上端から下端へ貫通するひびわれが予想される。なお、このようなひびわれパターンは、実橋のひびわれ状況とも一致している。
- ③ 伸縮目地間隔を狭くすると（図-9, 10を比較

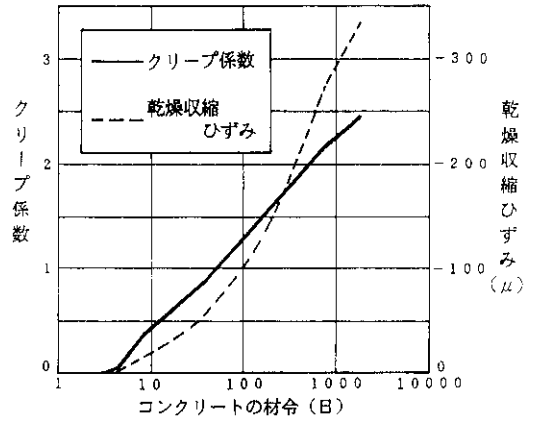


図-8 コンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみ

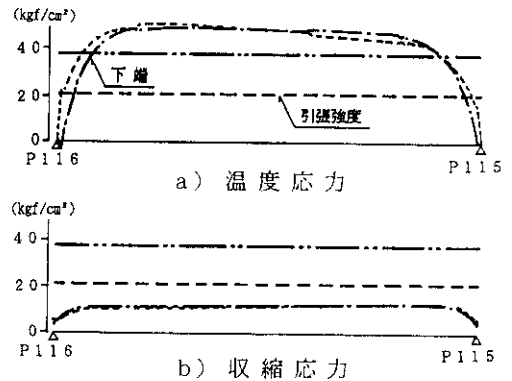


図-9 従来タイプRC高欄応力分布

表-4 解析検討条件

	温度応力解析	収縮応力解析
検	・ヤング係数 E <sub>c</sub> =2.45×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> (コンクリート) E <sub>s</sub> =2.10×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> (鋼)	<コンクリートの特性> ・ヤング係数 <sup>(1)</sup> E <sub>c</sub> =2.45×10 <sup>5</sup> 0.969×0.889 kgf/cm <sup>2</sup>
	・断面内の温度分布(変化量)	t:コンクリートの材令(日)
計		・収縮特性 収縮ひずみの基本値: $\epsilon_{sh,0} = -500 \mu$ 進行曲線: 道示I <sup>(6)</sup> 乾燥収縮開始材令: 4日
		・クリープ特性 遅れ成分の基本値: $\phi_{s,0} = 0.4$ 流動成分の基本値: $\phi_{f,0} = 2.0$ 進行曲線: 道示I <sup>(6)</sup>
条		・計算時間 t=1,825日(5年)
件	・線膨脹係数 $\alpha_c = 1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (コンクリート) $\alpha_s = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (鋼)	・計算分割数 n=10回

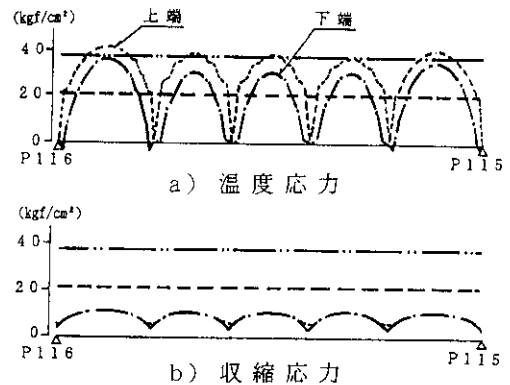


図-10 改良タイプRC高欄応力分布

すると)、最大引張応力度は若干小さくなる程度である。しかし、温度変化の場合には応力勾配が大きくなっている。

- ④中間に設置した伸縮目地付近では、設置しない場合(図-9)に対して応力も小さく、かつ応力勾配も大きくなっている。このことより、この区間でのひびわれ発生の度合いは、かなり小さくなるものと思われる。

#### 4 耐久性検討

##### 4-1 実験目的

上述のように高欄ひびわれ対策によって、従来の高欄に比べてひびわれ本数およびひびわれ幅ともに減少するが、追跡調査によると0.2mm未満のひびわれが1.5m程度の間隔に生じていることが明らかとなった。そこで、現状の対策で発生が想定されるひびわれを放置した場合のひびわれ損傷状況の進展、およびひびわれ補修効果の確認を行った。実験方法は図-11に示すとおり、実橋において発生している主として軸引張力により発生している貫通ひびわれを再現するために、まず正負交番曲げ載荷により貫通ひびわれを発生させた。ついで、供試体の促進腐食環境下(中性化、塩水噴霧)および自然環境下における経時的変化を載荷試験、外観調査、自然電位測定、鉄筋はつり出し試験により評価した。

##### 4-2 供試体作成

表-5に供試体作製条件一覧表を示す。供試体形状は実高欄のコンクリート部分(幅25cm, 高さ110cm)のみを再現した。幅方向については、耐久性評価のため、鉄筋径、鉄筋のかぶり厚さ等も実橋と同一形状としたが、高さは載荷装置の容量により40cmとした。ひびわれ供試体は以下の要領で作製した。

- 1) 高欄側面(40cm)からまず1点載荷によって載荷直下に曲げひびわれを導入させたのち、実橋における最小ひびわれ間隔30cmを模して、載荷点を30cm間隔で順次移動させて1供試体に3本のひびわれを導入する。

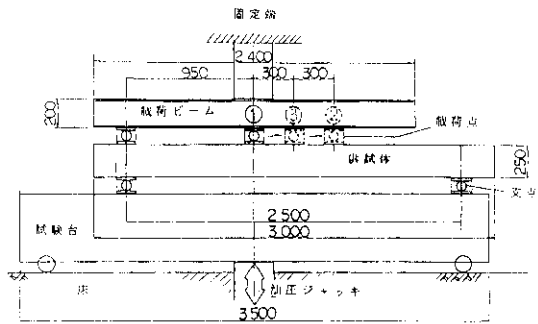


図-11 実験方法

表-5 供試体作成条件一覧表

供試体No	目標ひびわれ幅	補修方法	促進養生方法
①	0.2mm	なし	中性化 ⇒塩水噴霧
②	0.2mm	樹脂注入 +コンクリート塗装	中性化 ⇒塩水噴霧
③	0.2mm	なし	標準 大気中放置
④	0.3mm	なし	中性化 ⇒塩水噴霧
⑤	0.2mm	なし	中性化 ⇒塩水噴霧

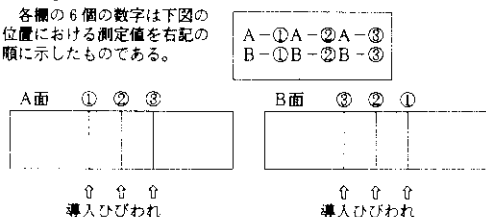
注) 供試体No⑤は①と同一条件である。中間時点での確認試験に用いるために設定した。

表-6 導入ひびわれ幅一覧表

供試体号	導入時のひびわれ幅(mm)			所定の暴露期間が終了した時点でのひびわれ幅(mm)			
	各測定値	平均	各測定値	平均	各測定値	平均	
①	0.20 0.20 0.30 0.15 0.15 0.20	0.20	0.25 0.25 0.30 0.20 0.20 0.25	0.24			
②	0.20 0.15 0.20 0.15 0.15 0.20	0.18	0.25 0.25 0.30 0.15 0.25 0.20	測定不可能			
③	0.20 0.20 0.20 0.10 0.20 0.15	0.18	0.25 0.25 0.20 0.15 0.25 0.20	0.22			
④	0.25 0.25 0.25 0.30 0.30 0.30	0.28	0.30 0.25 0.30 0.35 0.30 0.35	0.31			
⑤	0.25 0.20 0.20 0.15 0.20 0.15	0.18	0.30 0.25 0.20 0.25 0.20 0.25	0.24			

注) ひびわれ幅は、クラックスケールを用いて、0.05mm単位で測定を行った。

各欄の6個の数字は下図の位置における測定値を右記の順に示したものである。



2) 供試体を上下反転させて、ひびわれが生じた同一断面上に一点載荷し、貫通ひびわれを生じさせる。

3) 3箇所のひびわれ間の50cm間を同一モーメントとする2点載荷により、配力鉄筋を降伏させることにより、所定ひびわれ幅(0.2, 0.3mm)となるまで、載荷、除荷を繰り返す。

表-6に示すように導入ひびわれ幅(残留ひびわれ幅)は目標値に対して10%程度の差異に収まっており、実験条件を満足していると考えられる。

#### 4-3 暴露試験

供試体の暴露環境としては、中性化および塩水噴霧を施した促進腐食試験と自然暴露供試体の2種類とした。促進腐食試験用供試体は、まず2ヶ月間炭酸ガス濃度2%の中性化養生室に収納した(単純な濃度計算による10年累加炭酸ガス濃度に相当する)。ついで、作成した供試体に対して5回/週の割合で塩水噴霧を実施した。なお、用いた塩水の濃度は、阪神高速湾岸線における実測値(0.1~1.0mg/dm<sup>2</sup>/日)を参考に、1.0mg/dm<sup>2</sup>/日であると仮定し、暴露期間4ヶ月で実環境下10年の等価塩分濃度となるように、42mg/dm<sup>2</sup>とした。また、暴露地は湾岸線と比較的環境条件の近い大阪市大正区の工業地域に自然環境下で暴露した。

#### 4-4 実験結果

##### (1) 外観および自然電位測定

現在塩水噴霧開始より6ヶ月を経過しているが、いずれの供試体も錆汁の滲出、新たなひびわれの発生は認められていない。また、表-7は配力筋付近における自然電位分布を示すが以下に特徴を列記する。

1) 促進腐食供試体の場合、塩水噴霧直後に大きな自然電位を示したが、その後は貴な値に戻っている。この変化は暴露環境条件の変化により、一時的に活性化された状態となったためと考えられる。

2) 自然暴露供試体は、ほぼ定常的な値で推移している。また、ひびわれ部とひびわれ無し部で、自然電位差は認められず、特にひびわれ部が活性的な動きをしているとは考えられない。

3) ひびわれ幅0.2mmおよび0.3mmの供試体についても自然電位の有意差は認められなかった。

以上のように、外観および自然電位調査においては腐食の進行は認められなかった。これは、現在コンクリートのかぶり、過去に腐食等の問題が顕著に生じた旧タイプ(1980年当時)の3cm程度と比較して5cm程度と比較的厚さが確保されており、腐食の進行が遅いことなどが考えられるが、より長期的に経過を評価する必要があると考えられる。

表-7 自然電位分布

測定 時期	供試体 ① ひびわれ幅 0.2mm		供試体 ③ ひびわれ幅 0.2mm		供試体 ④ ひびわれ幅 0.3mm		供試体 ⑤ ひびわれ幅 0.2mm	
	中性化⇔塩水		大気中暴露		中性化⇔塩水		中性化⇔塩水	
	ひびわれ周囲	ひびわれなし	ひびわれ周囲	ひびわれなし	ひびわれ周囲	ひびわれなし	ひびわれ周囲	ひびわれなし
初期	247	251	264	268	237	233	202	201
1M	265	219	212	214	268	210	249	176
2M	197	182	200	197	185	175	207	184
3M	530	466	210	199	637	367	788	438
4M	294	255	198	164	457	288	449	295
5M	343	295	108	91	358	219	360	212
6M	190	165	110	86	214	129	250	146



## (2) 載荷試験結果

供試体No.4（平均ひびわれ幅0.2mm，促進腐食）について塩水噴霧開始後5ヶ月後に載荷試験を実施するとともに、鉄筋をはつり出し腐食状況等を調べた。（単純累加塩水濃度および炭酸ガス濃度10年相当期間は促進試験期間4ヶ月に相当する）。その結果、耐荷荷重は6.83tfと、コンクリート標準示方書に基づく終局耐力値(6.52tf)とほぼ一致した。また、表面ひびわれ幅0.2mmの供試体を樹脂注入によって内部ひびわれ幅を確認したところ図-12に示すように、ひびわれは貫通しており、またひびわれ幅は鉄筋位置において0.2mmであったが、鉄筋の腐食はほとんど進行していないことが明らかとなった。



図-12 コア採取によるひびわれ状況確認

## 5 まとめ

一連の鋼床版上RC高欄に発生するひびわれの対策効果および耐久性からの評価を以下にまとめる。

- 1) 解析的検討により、ひびわれ発生原因は主として鋼床版の温度変化に伴う鋼桁の変形がコンクリート高欄に拘束されることにより、生じる引張応力によるものと推定される。
- 2) 試験工事により、完全伸縮目地を10mとし、膨張材(35kg/m<sup>3</sup>)を用いたコンクリートを使用することにより、ひびわれを著しく減少させることが明らかとなった。
- 3) 実橋を模した模型供試体を用いた促進実験によると、単純累加塩水濃度および炭酸ガス濃度10年相当期間においては、腐食の進行は極めて緩やかであることが明らかとなった。

最後に本検討にあたり貴重な助言をいただきました、当公団技術審議会コンクリート構造分科会の各委員に深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図表，1991年4月。
- 2) 阪神高速道路公団・(社)日本材料学会：コンクリート基礎性状に関する調査研究(その2)報告書，PP.140，1983.3。