

温度上昇に伴う鋼床版上 RC 高欄の挙動に関する研究

幸左賢二¹・児島孝之²・橋場 盛³・鈴木宏信⁴

¹正会員 Ph.D 阪神高速道路公団 神戸線復旧建設部 (〒650 神戸市中央区新港町16番1号)

²正会員 工博 立命館大学 理工学部土木工学科

³正会員 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツ関西支社

⁴正会員 工修 中研コンサルタント(株)

建設中の阪神高速道路湾岸線の鋼床版上 RC 高欄に、従来の乾燥収縮などに比べて、ひびわれ間隔および幅とも著しい、鉛直方向のひびわれが確認された。ひびわれ状況の経時変化調査により、ひびわれは温度上昇の大きい夏期に増加が著しいことが明らかになった。解析および追跡調査により、ひびわれ発生原因は、鋼床版上に鉄筋スタッドにより固定されている RC 高欄が、温度上昇に伴う鋼桁の変形に追随するために生じることが明らかとなった。そこで、ひびわれ幅を減少させるために、10 m 間隔に伸縮目地を設けること、および膨張材入りコンクリートを用いる改善策を実施した。その結果、試験工区における追跡調査によると、ひびわれ幅は 0.14 mm、平均ひびわれ間隔が 1.8 m 程度と大幅に改善され、これら手法が有効であることが明らかになった。

Key Words : cracks, durability, RC barrier walls, expansive joints, difference of temperature

1. まえがき

阪神高速道路湾岸線などに代表される湾岸部の橋梁では、支間および幅員が大規模となることおよび脆弱な地盤に支持層を設けることなどから、重量を軽減するために鋼床版が多く採用されている。一般に、鋼床上の高欄・分離帯構造は材料面から鋼および RC に大別することができる。阪神高速道路公団では、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こと、現場溶接部において疲労亀裂が発生しやすいこと、雨水が高欄内に滞水し腐食しやすいこと、などの理由により、昭和 46 年より鋼床版上も RC 高欄を標準とし現在に至っている。表 1 は、道路関係公団の高欄設計の考え方を示すが、各機関においては配筋の有意差が小さいこと、および鋼床版においても RC 高欄が標準的に用いられていることが分かる。

一般に、コンクリートと鋼材は線膨張係数が 10×10^{-6} 程度とほぼ同じであり、RC 構造物ではコンクリートと鉄筋の線膨張係数の違いによって発生する応力はほぼ無視できるといわれている。しかしながら、鋼とコンクリートでは熱伝達率が異なることから、直射日光などが部材に作用したとき、温度上昇の履歴が非常に異なることが知られている。このため、道路橋示方書¹⁾においては、合成げたでは床版コンクリートと鋼げたの温度差は 10 度を考慮して設計するように規定されている。同一材料においても、コンクリート構造の床版とその他の部材の相

対的な温度差は 5 度を考慮し設計している。しかしながら付属部材である高欄においては、桁・床版などの主部材との温度差から生じる応力については一般に考慮されていない。このため、温度上昇量の異なる鋼床版と RC 高欄を組み合わせた場合、供用中でも 20 度近い温度差を生じることが確認されており、特にアスファルト施工前においては鋼床版の著しい温度上昇により、30 度近い温度差が生じていることが報告されている²⁾。温度上昇量の相違、すなわち、伸び性状の違いから生じる応力によって RC 高欄などのひびわれ発生が懸念されるが、これらについては、事例報告も少なく、検討も十分ではないと考えられる。

昭和 62 年頃、建設中の湾岸線の鋼床版上 RC 高欄に多数の鉛直方向のひびわれ(平均ひびわれ幅 0.2 mm、ひびわれ間隔 0.5 m)が確認され、ひびわれの原因究明調査および解析を実施し、主原因が上記の部材間の温度上昇の相違から高欄に生じる引張力であることが明らかになった。そこで、発生力を低減するために、鋼床版上の RC 高欄について 10 m 間隔で目地を設置すること、およびコンクリート材料面からの改善として発生ひびわれ幅を低減する目的で膨張材入りコンクリートを使用する、などの対策を講じた。その結果、従来タイプに比べて発生ひびわれ幅および間隔が相当低減できうることを試験施工および解析により確認し^{2),3)}、鋼床版上の高欄に対する標準設計として採用するに至っている。本報告は、鋼床版上の高欄ひびわれの発生原因および対策に関するこれら一連の研究結果を報告するものである。

表一 RC高欄の標準的な考え方

	首都高速道路公団	日本道路公団	阪神高速道路公団
TL20	設計荷重 R>200m P=1.0tf H=1.0m R<200m P=2.0tf H=1.0m (及び端部) 配筋 R>200m D13@150mm R<200m D13@150mm	設計荷重 P=2.0tf H=0.93m 配筋 D13@125mm (防音壁 3.0m) D16@125mm (防音壁 5.0m)	V=60km/h 設計荷重 R>200m P=1.0tf H=1.0m R<200m P=2.0tf H=1.0m (及び端部) 配筋 R>200m D16@300mm R<200m D13@150mm
TT43	設計荷重 R>200m P=2.0tf H=1.0m R<200m P=4.0tf H=1.0m 配筋 R>200m D16@150mm R<200m D16@150mm	同上 TL20とTT43の使い分け はしていない	V=80km/h 設計荷重 R>200m P=(80/60) ² ×750 +250=1583kgf H=1.0m R<200m P=3167kgf H=1.0m 配筋 R>200m D16@300mm R<200m D16@150mm
壁厚	25cm	25cm	25cm
鋼床版への適用	RC高欄を標準とする	明示せず	RC高欄を標準とする

V: 越、R: 曲線半径、P: 設計荷重、H: 設計高さ

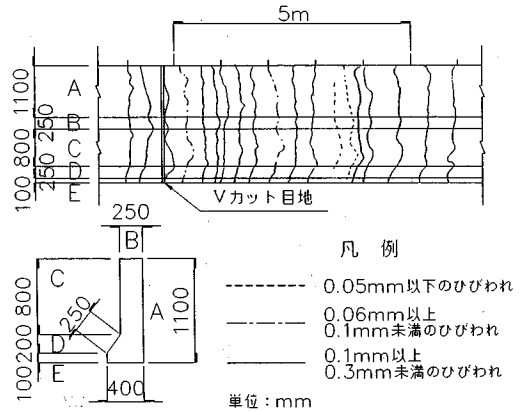
表二 各橋梁の試験施工内容と調査結果

工区名	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)
	設計面での改良	施工面での改良		
新淀川工区	—	—	0.59	0.21
正蓮寺川工区	切欠中央にφ25mmの塩化ビニール管を埋設した改良型伸縮目地を10mピッチで設置。	L型	0.62	0.13
		R型 ・膨張材 30kg/m ³ 混入	0.68	0.09
末広第2工区	完全に縁を切った伸縮目地を10mピッチで設置。	L型 ・膨張材 35kg/m ³ 混入	1.18	0.14
中島川工区	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35kg/m ³ 混入	0.91	0.07
鳴尾浜第1工区	完全に縁を切った伸縮目地を10mピッチで設置。	・膨張材35kg/m ³ 混入	1.00	0.07

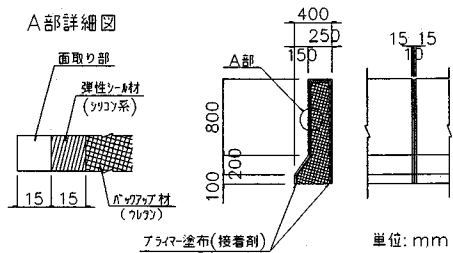
2. 実橋における調査

(1) ひびわれ状況調査

建設中の湾岸線において試験工区を設置し、実橋の鋼床版上RC高欄におけるひびわれ発生状況および対策工の効果などを簡便に調査した。調査対象となった工区の試験施工内容を表二に示す。まず、新淀川工区においては、現状の無対策高欄のひびわれ状況調査が実施された。打設2年後のひびわれ状況図を図一に示す。同工区は昭和62年10月にコンクリートが打設されており、打設後約2ヶ月においては、平均ひびわれ幅(ひびわれ上の数点を測定し、平均を取ったもの)が0.01~0.08mm、ひびわれ間隔は0.3~1.5mの範囲であった。約2年後では、図一に示すように、平均ひびわれ間隔は0.6



図一 ひびわれ発生図(新淀川橋梁)



図二 伸縮目地の構造

m程度、平均ひびわれ幅は0.2mm程度であったが、一部にはひびわれ幅が0.4mmにも達するものもあることが確認され、従来の乾燥収縮などで発生するひびわれに比べて、幅、間隔とも著しいことが明らかとなった。そこで、ひびわれ対策として、まず正蓮寺川工区において、阪神高速道路公団鋼構造物標準図集⁴⁾で示されているように、10m間隔で高欄にVカット(深さ15mm)を入れるとともにVカット切欠き中央に直径25mmの塩化ビニールパイプを埋設することによる誘発目地構造の改良と膨張材(30kg/m³)添加コンクリートの使用を実施した。その結果、表二に示すような平均ひびわれ幅の減少効果が確認された。さらに、末広第2工区、中島川工区、鳴尾浜第1工区では、図二に示すようなコンクリートおよび鉄筋を縁切りした伸縮目地を10m間隔で設置するとともに、膨張材(35kg/m³:セメント量の11%程度)添加コンクリートを用いた試験工事を行った。図三にひびわれ状況の経時的変化を示すが、打設後夏期に増加していることが分かる。このことは、後述の解析結果からも確認されるように、夏期における桁の著しい伸びが原因と推定される。また、長期計測結果を無対策の新淀川工区と比較すると、たとえば、表二に示すように末広第2工区の場合、平均ひびわれ幅が0.14mm、平均ひびわれ間隔が1.18mと大幅に改善されており、目地の設置および材料面からの改善の有効性が確認

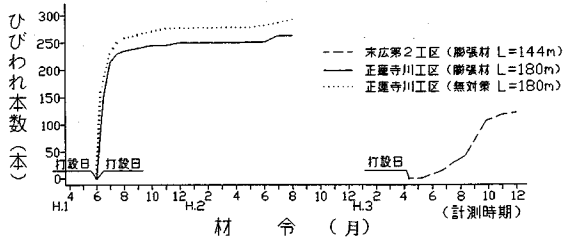


図-3 ひびわれの経時的変化

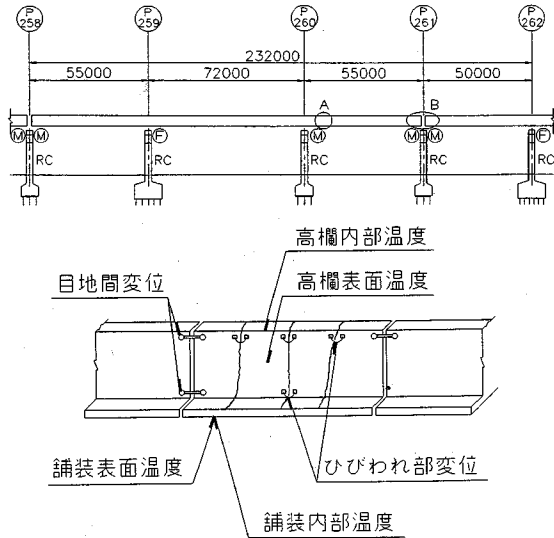


図-4 計測模式図

された。そこで、阪神道路公団では平成3年、鋼床版上のRC高欄については、10m間隔で伸縮目地を設けること、および膨張材入り(35kg/m³)コンクリートを用いることを標準仕様とする改訂を行い、現在に至っている。

(2) RC高欄挙動計測

a) ひびわれ状況調査

上記(1)のひびわれ調査などにより、夏期の桁の著しい温度伸びにより、高欄に引張応力が生じ、ひびわれが発生したものと推定される。そこで、ひびわれ対策を行ったRC高欄を対象に、桁の伸縮に伴う目地部およびRC高欄部の挙動計測を実施した。調査対象となった湾岸線高石工区ではコンクリート高欄が平成4年8月に打設され、グースアスファルト施工が平成5年11月に実施されている。RC高欄は約10m間隔で目地部が設置されており、3径間では合計20個のコンクリートブロックから成り立っている。図-4に計測模式図を示す。表-3にひびわれ経時変化表を示すが、平均ひびわれ幅は平成5年7月から平成6年8月の約一年間に平均0.10mmから0.12mm、平均ひびわれ間隔も1.73mから0.96mに漸

表-3 ひびわれの経時変化

調査場所	調査時間	平均ひびわれ幅 (mm)	ひびわれ間隔 (m)	ひびわれ本数	備考
下り線側	H5/7/24	0.09	1.16	157	天端 下り線
	H5/10/21	0.10	1.09	168	
	H6/1/27	0.12	1.04	175	
上り線側	H6/8/4	0.15	0.85	213	
	H5/7/24	0.13	1.35	135	
	H5/10/21	0.13	1.16	157	
天端	H6/1/27	0.13	1.09	167	
	H6/8/4	-	-	-	
	H5/7/24	0.08	2.68	68	
端	H5/10/21	0.09	3.87	74	
	H6/1/27	0.08	2.17	84	
	H6/8/4	0.07	0.95	191	

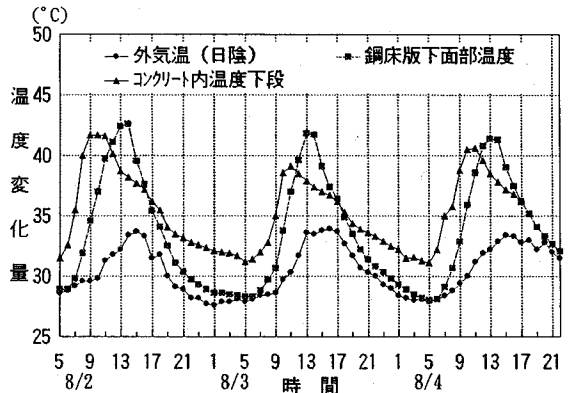


図-5 温度変化図

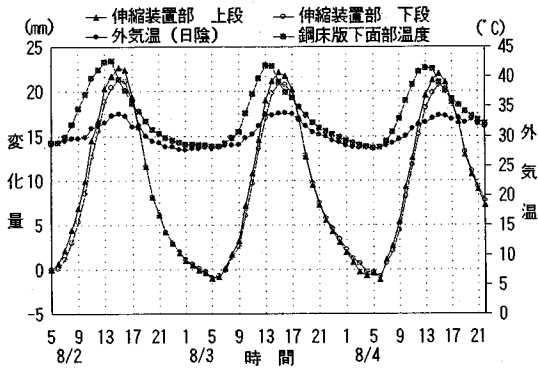
増していることが分かる。

b) 変位測定方法

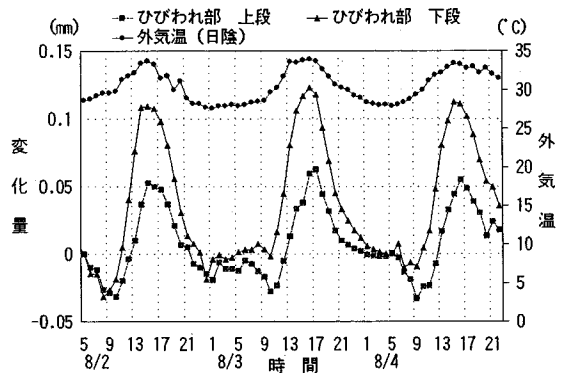
P260橋脚からP261橋脚方向に2ブロック目の高欄を対象に、高欄内部温度、鋼床版下面温度、外気温、目地間変位、高欄ひびわれ部変位、無ひびわれ部のコンクリートひずみを測定した(図-4、A点)。また、P261可動支点上の目地間変位も同時に測定している(図-4、B点)。コンクリート内部および舗装内部温度は、表面よりコンクリートドリルで削孔し、表面より3cmのところにて温度計を設置した。測定は温度上昇がもっとも高いと推定される夏期の平成6年8月21日より3日間連続して測定した。

c) 温度変化

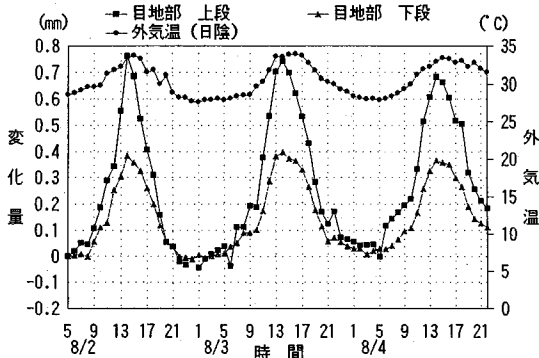
図-5に温度変化状況図を示すが、鋼床版下面温度、コンクリート内部温度とも外気温に比べると温度上昇が著しいことが分かる。また、鋼床版とRC高欄は温度上昇曲線が異なっており、最大で10℃程度の温度差が生じていることが分かる。図-6にP261の可動支点上の目地部天端から5cmの位置と高欄断面変化位置において



図一六 伸縮装置部の伸び量変化図



図一八 ひびわれ部伸び量変化図

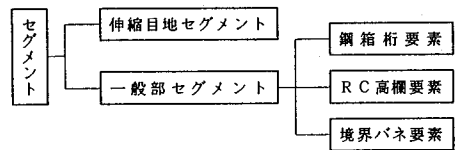


図一七 RC高欄目地部伸び量変化図

測定した桁伸縮の変化量を示す。一日の伸縮量の変化は約 23 mm となっており、鋼床版下面の温度変化(15°C:最高 43°C,最低 28°C)から求まる桁の伸縮量の 7 割程度の値となっている。

d) 目地部の伸び変化量

目地部の伸び変化量は、可動脚 P 260 支点付近の 3ヶ所(図一 4, A 点)の上下段で実施した。代表的な変化図を図一 7 に示すが、目地部 3ヶ所とも温度上昇に伴って、0.4~0.7 mm の目地部の開きが生じるとともに上段部の方が大きな開きを示していることが分かる。また、図一 8 はコンクリートブロック内のひびわれ部において実施した、ひびわれの伸び計測例であるが、ひびわれ部において温度上昇に伴い 0.1 mm の伸び、またひびわれ 6ヶ所を合計した 1 コンクリートブロック全体では約 0.7 mm の伸びが測定されている。計測されたコンクリートブロックおよび目地間の伸びを単純に 20 倍することによって桁間全体の伸びとみなすと、桁の伸びは 23 mm (1 日の伸び量が 0 mm から 23 mm の間で変化している)、目地部の伸びの合計は 11 mm 程度(図一 7 の上段および下段の平均伸び量を 20 倍する: $(0.7+0.4)/2 \times 20=11$ mm)であり、約 4 割の伸びを目地部で吸収していることが分かる。



図一九 セグメントの種類

3. 解析的検討

(1) 応力解析手法の概要

鋼床版上の RC 高欄のひびわれ原因として、鋼床版と RC 高欄との温度差が主因であることをすでに解析的に明らかにしている⁹⁾。この温度差による拘束応力によって RC 高欄に生じるひびわれ、変形を解析的に検討するために、RC 高欄を含む鋼床版桁(以下、橋桁と略記する)を次のような特性をもつセグメントに分割してモデル化した。

- ① 橋桁を樺部材にモデル化し、その部材軸(橋軸)方向にセグメント化する。セグメントは、図一 9 に示すように高欄の伸縮目地とその直下の鋼桁を表す伸縮目地セグメントと、その他の高欄一般部と直下の鋼桁を表す一般部セグメントで表現する。伸縮目地セグメントはパネで構成されたパネ要素であり、一般部セグメントは鋼桁要素、RC 高欄要素とこれら要素を結合する境界パネ要素で構成する。なお、伸縮目地セグメントのパネ剛度は、RC 高欄に相当するものを $K_{cu}=K_{cv}=K_{co}=0$ とし、さらに鋼床版桁に相当するものを予備検討の結果¹⁰⁾、 $K_{su}=K_{sv}=1.0 \times 1.0^{10}$ kgf/cm、 $K_{so}=1.0 \times 10^{13}$ kgf·cm/rad とした。
- ② 各セグメントは一端 6 自由度、セグメント全体として 12 自由度を有し、その断面力・変位を図一 10, 11 のように定義する。
- ③ 境界パネ要素は RC 高欄を鋼床版に固定している鉄筋スタッドをパネとしてモデル化したものである。鉄筋スタッドはほぼ等間隔に鋼床版に溶植され、高欄コンク

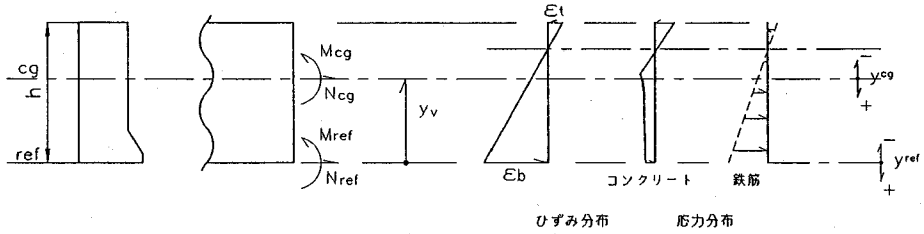


図-12 RC高欄の応力の決定

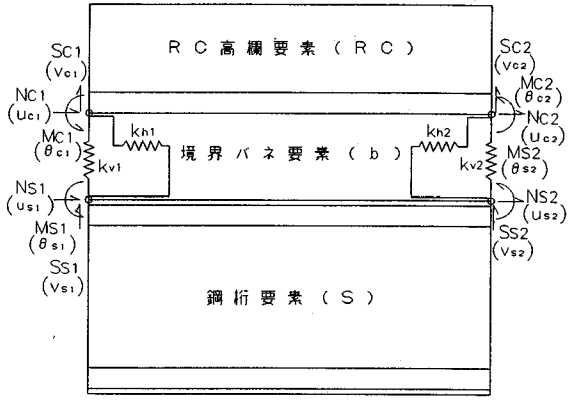


図-10 一般部セグメントの定義図

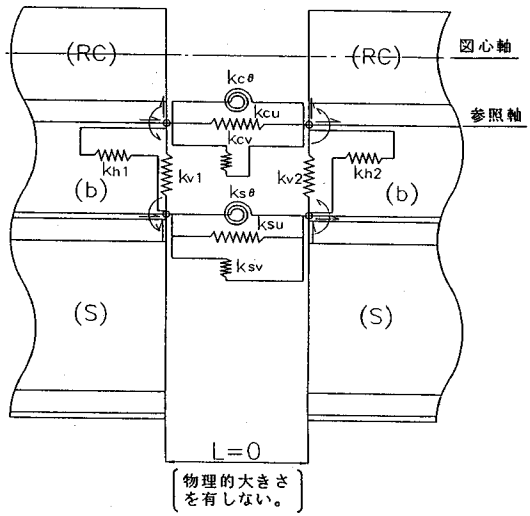


図-11 伸縮目地セグメントの定義図

リート中に埋め込まれている。高欄を含めて橋桁をセグメントに分割する際、離散的に分布する鉄筋スタッドを各セグメント端に集中するバネに置換する。

鉄筋スタッド一本のバネ剛度のうち、水平バネ剛度 K_h を Fisher ら⁵⁾ の研究成果を用いて次式のように設定する。

$$K_h = \frac{Q}{\delta} = Q_u \times \frac{3.15}{1 + 3.15\delta} \quad (1)$$

ここに、

Q_u : 終局せん断耐力 (tf), $Q_u = 1.102 A_s \sqrt{f_c \cdot E_c}$

δ : 相対ズレ (mm)

A_s : スタッドの断面積 (cm^2)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2)

E_c : コンクリートのヤング係数 (kgf/cm^2)

また、鉛直バネ剛度 K_v は後述するように調査結果を踏まえて決定することとした。

④ 橋桁に生じる温度変化による拘束断面力が求められると、RC高欄に発生する応力は、力のつり合いを満足するひずみ分布を決定することによってえられる。また、そのひずみ分布を用いて図心軸に関する曲げおよび軸剛性を算出して、そのひびわれによる低下を評価しよう。その概要を示すと以下のようである。

- ・参照軸に関する N_{ref} , M_{ref} を求める。
- ・参照軸に関する力のつり合いを満足するひずみ分布を決定する (図-12 参照)。

$$N_{ref} = \int_A \sigma_c (y^{ref}) dA + \sum \sigma_{s,i} \cdot A_{s,i} \quad (2)$$

$$M_{ref} = \int_A \sigma_c (y^{ref}) y^{ref} dA + \sum \sigma_{s,i} \cdot A_{s,i} \cdot y_{s,i}^{ref} \quad (3)$$

- ・図心軸に関する N_{cg} , M_{cg} を求める。

$$N_{cg} = N_{ref}$$

$$M_{cg} = \int_A \sigma_c (y^{cg}) y^{cg} dA + \sum \sigma_{s,i} \cdot A_{s,i} \cdot y_{s,i}^{cg} \quad (4)$$

- ・図心軸に関する剛性を求める。

$$\text{軸剛性: } EA = \frac{N_{cg}}{\bar{\epsilon}}, \quad \bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_b + \epsilon_t}{2}$$

$$\text{曲げ剛性: } EI = \frac{M_{cg}}{\phi}, \quad \phi = \frac{\epsilon_b - \epsilon_t}{h}$$

$$h: \text{部材高} \quad (5)$$

RC高欄のコンクリート、鉄筋の応力は、上述の温度変化に伴う拘束断面力および高欄内の自己平衡温度ひずみと計測 (自由) 温度ひずみとの差に起因する。

このとき、高欄内の不平衡温度 (すなわち、自己平衡温度と計測 (自由) 温度との差) によるひずみを考慮して応力を決定する必要がある、この温度ひずみを初期ひずみと見なして拘束断面力による応力増加を求める。

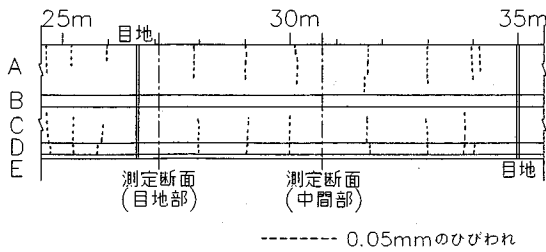
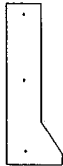
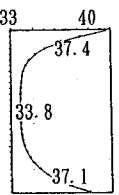
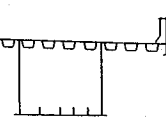
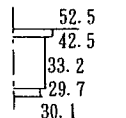


図-13 対象橋梁のひびわれ状況図

表-4 解析に用いた温度条件

	形状	温度差分布(°C)
RC高欄	 線膨張係数 $\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ $\sigma_{cs} = 270 \text{ kgf/cm}^2$	 33, 40, 37.4, 33.8, 37.1
鋼床版箱桁	 線膨張係数 $\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	 52.5, 42.5, 33.2, 29.7, 30.1

⑤ 計算は収束計算により、まずRC高欄の軸力および曲げ剛性を仮定し、えられた拘束断面力に対する計算剛性を求める。この仮定剛性と計算剛性が誤差内(ここでは、10%としている)であれば収束したと見なす方法によった。

(2) 解析的検討

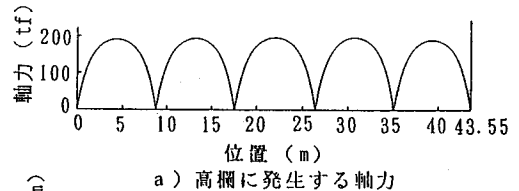
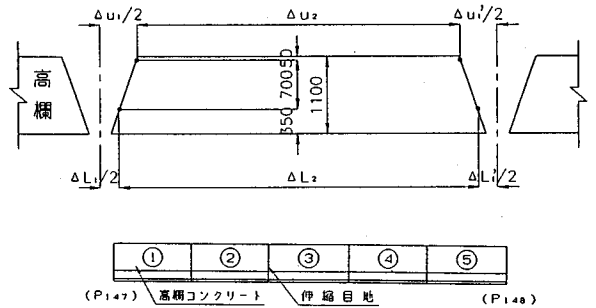
a) ひびわれに対する検討

表-2に示した鳴尾浜第1工区のうち、2径間連続鋼床版箱桁橋の第2径間(L=43.35m)を解析対象として、RC高欄のひびわれ、変形について検討した。表-2の改良を施した結果、本橋のひびわれは図-13に示すように高欄下端より50cm程度までの範囲に、その発生が留まっている。

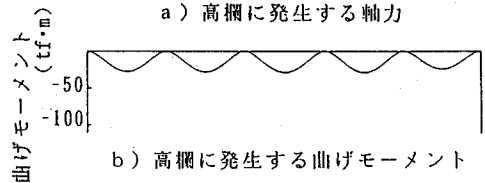
解析に用いた諸条件を表-4に示す。また、使用材料の特性は道路橋示方書I編¹⁾に従ったが、コンクリートの引張側の応力~ひずみ関係はCollinsらのモデルによった⁹⁾。なお、構造解析は対象径間を126セグメントに分割して行った。まず、境界要素の鉛直バネ剛度を設定するために、その剛度を変化させて伸縮目地の水平変位が、その計測結果とほぼ一致する値を求めた。表-5は単位長さあたり鉛直バネ剛度 $1.71 \times 10^3 \text{ kgf/cm}$ の場合であるが、両者がほぼ一致しているものと見なした。な

表-5 伸縮目地の水平変位の比較

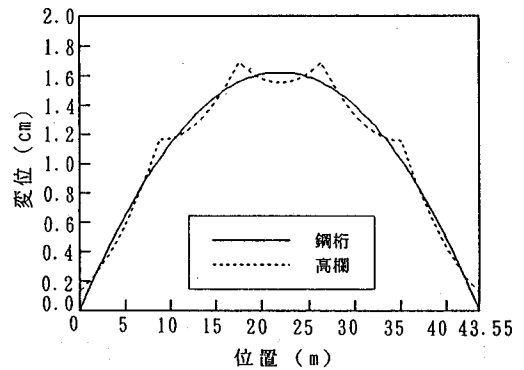
		伸縮目地部
$(\Delta U I + \Delta U I')$	実測値	2.48 mm
2	解析値	2.03 mm
$(\Delta L I + \Delta L I')$	実測値	1.28 mm
2	解析値	0.82 mm



a) 高欄に発生する軸力



b) 高欄に発生する曲げモーメント



c) 鋼桁・高欄の鉛直変位

図-14 RC高欄の解析結果

お、単位長さあたり水平バネ剛度は、本橋の場合、式(1)より、 $K_h = 9.26 \times 10^3 \text{ kgf/cm}$ である。このとき、軸剛性、曲げ剛性の初期剛性に対する比率はそれぞれ0.90、0.95とひびわれ発生による剛性の低下を示している。図-14にRC高欄に発生する参照軸に関する断面力、および鋼桁の鉛直変位を示す。各RC高欄ブロックに生じる断面

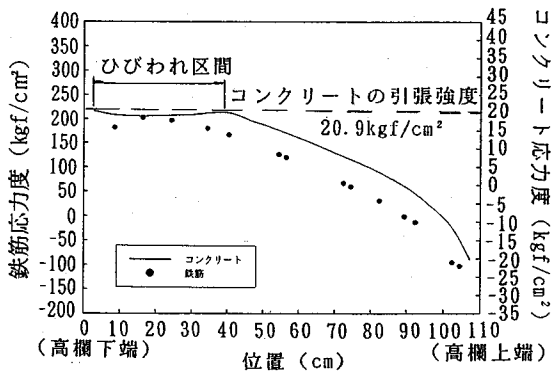


図-15 RC高欄内の応力分布 (③ブロック中央断面)

表-6 解析に用いた温度条件

	形状	温度差分布(°C)
RC高欄 線膨張係数 $\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$		
鋼床版箱桁 線膨張係数 $\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$		

力は、ほぼ同様な傾向を示し、最大軸力 200 tf、最大曲げモーメント 28 tf・m となっている。また、鉛直変位も 1.63 cm を示す結果となっている。さらに RC 高欄③ブロックの中央断面の応力状態を示すと、図-15 のようである。なお、同図の応力には、RC 高欄内の非線形な温度分布による不平衡ひずみを考慮している。断面内のひびわれは、RC 高欄下端より約 40 cm 上方まで進展する傾向を示しており、調査結果とほぼ一致している。また、同図のひびわれ区間の鉄筋応力度は、170~200 kgf/cm² であるが、実測平均ひびわれ間隔 1.0 m を用いてコンクリート標準示方書に鉄筋応力、ひびわれ間隔を代入し、ひびわれ幅を求めると、0.09~0.10 mm となる。この計算ひびわれ幅は実測値 0.07 mm に比して幾分大きく見積もっている。以上の結果には、高欄内の温度分布の推定およびスタッドのバネ剛度の設定に起因して、調査結果とは若干の相違が見られるが、鋼床版上の RC 高欄のひびわれ挙動を精度良く表現していると考えられる。

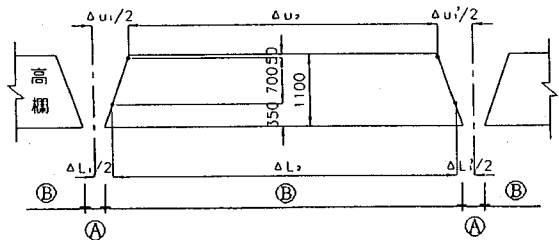
b) 変形に対する検討

上述 2 章(2)で記した石津浜工区の 3 径間連続鋼床版箱桁橋に関してその変形挙動を解析的に検討した。解析

表-7 解析結果

(単位: mm)

		伸縮目地部(A)	高欄ブロック部(B)
$(\Delta U_1 + \Delta U_1')$	実測値	0.69	0.93
	解析値	0.58	0.93
$(\Delta L_1 + \Delta L_1')$	実測値	0.36	1.08
	解析値	0.23	1.28



に用いた温度条件を表-6 に示すが計測第 1 日目の 14 時と翌 2 日目の 1 時との温度差を用いた。また、本計測は舗設後であり、RC 高欄にはそれ以前にすでにひびわれが発生していた。したがって、解析に用いた軸および曲げ剛性は、上記検討の結果を踏まえて同一の剛性低下率を用いた。境界要素のバネ剛度も、鉛直バネは上記検討と同一とし、また水平バネは式(1)より算定した ($K_h = 9.26 \times 10^3 \text{ kgf/cm/cm}$)。解析結果を表-7 に示す。同表のように伸縮目地、高欄ブロック部ともに解析値は実測値とほぼ一致した結果となっている。このことより、鋼床版箱桁上の RC 高欄の温度変化(温度上昇)時の挙動として次のようなことが考えられる。すなわち、直射日光によって鋼床版桁は急激に温度上昇し、伸びと上に凸な変形を生じる。RC 高欄は鋼桁の変形に追随しながら、高欄ブロック部は鋼桁に近い部分ほど大きな伸びを示し、その結果伸縮目地部は上端ほど大きく変形する。

(3) ひびわれおよび変形の挙動に対する考察

鋼床版上の RC 高欄のひびわれに対する解析的検討を現場計測結果と対比させながら行った。検討条件が心ずしも実橋の特性と合致していない点も見られるが、その挙動を把握しえたと考えられる。以下に、これらの検討結果を踏まえて、そのひびわれおよび変形の挙動について考察する。

建設時に発生する RC 高欄のひびわれは、表-4 に示すように直射日光による温度上昇に起因する。とりわけ、鋼箱桁の鋼床版部における温度上昇が著しく、鋼箱桁は伸びとともに上に凸な変形を生じる。鋼床版に鉄筋スタッドで固定されている RC 高欄(図-14 参照)は、自己の温度上昇による変形を上回る鋼箱桁の変形に追随することを強いられるため、コンクリートの変形能力を超えるとひびわれが発生する。ひびわれが発生すると、RC

表一 8 供試体作成条件一覧表

供試体No.	目標ひびわれ幅	補修の有無	養生方法
①	0.2 mm	なし	中性化(2ヶ月) →大気中暴露(塩水噴霧)
②	0.2 mm	樹脂注入+JF カ-1表面塗装	中性化(2ヶ月) →大気中暴露(塩水噴霧)
③	0.2 mm	なし	大気中暴露
④	0.3 mm	なし	中性化(2ヶ月) →大気中暴露(塩水噴霧)
⑤	0.2 mm	なし	中性化(2ヶ月) →大気中暴露(塩水噴霧)

注) 供試体No.⑤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。

高欄の剛性が低下し、RC部材としての変形能力が増して過大なひびわれとはならず平衡状態に至ると考えられる。

4. 耐久性検討⁹⁾

(1) 実験概要

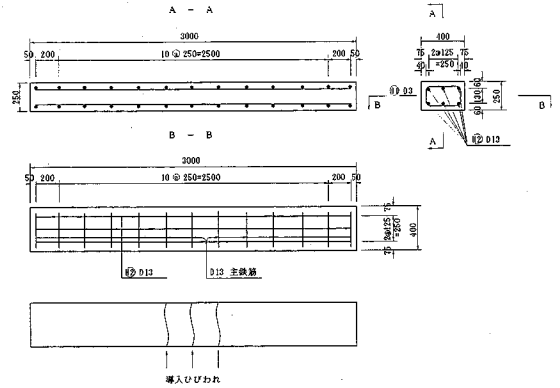
上述のように高欄ひびわれ対策によって、従来の対策を施していない高欄に比べてひびわれ本数およびひびわれ幅ともに減少するが、追跡調査によると幅0.2mm未満のひびわれが1m程度の間隔に生じており、完全にひびわれの発生を抑止することは困難な状況にあることが判明した。このため、既に実橋に発生しているひびわれを放置した場合の腐食状況の進展およびひびわれ補修効果の確認を行うことを目的として、模型供試体を作成し、各種試験を実施した。

(2) 供試体作成

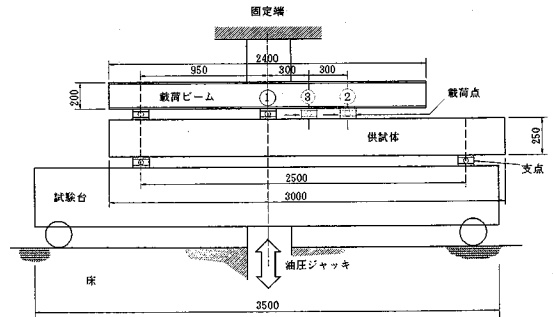
実験条件一覧を表一8に、供試体寸法、配筋およびひびわれ導入状況を図一16に示す。

供試体は実橋高欄(幅25cm、高さ110cm)のコンクリート部分のみを再現し、幅方向については、耐久性評価のため、鉄筋径、鉄筋のかぶり深さ等も実橋と同一形状とした。ただし、高さは荷重装置の容量により40cmとした。また、実橋において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、図一17に示す装置を用いて、正負交番曲げ荷重により供試体に貫通ひびわれを発生させた。以下にひびわれの導入方法を示す。

- ① 高欄側面(40cm)から1点荷重によって荷重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で順次移動させて1供試体につき3本のひびわれを導入する。
- 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1点荷重し、貫通ひびわれを生じさせる。



図一16 供試体寸法、配筋および導入ひびわれの模式



図一17 荷重装置概略図

- ③ 3箇所のひびわれ間(60cm)を同一モーメントとする2点荷重により、所定ひびわれ幅(0.2, 0.3mm)となるまで、荷重、除荷を繰り返す。

表一9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。

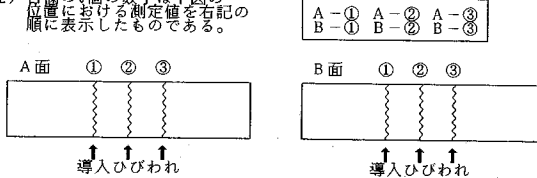
(3) 暴露条件

促進腐食試験用供試体は、最初の2ヶ月間中性化促進養生室に収納した。炭酸ガス濃度は実環境下で10年間暴露された状況を2ヶ月の促進条件で再現することとし、60倍の炭酸ガス濃度(120ヶ月(10年)/2ヶ月=60倍)とした。通常の大気中の炭酸ガス濃度が0.03~0.034%であるので、促進養生では2%(0.03~0.034%×60=2%)とした。次に、供試体の養生を大気中暴露条件下に移して5回/週の割合で塩水噴霧を施した。塩水の濃度は阪神高速湾岸線における実測値(0.1~1.0mg/dm²/日)を参考に、1.0mg/dm²/日であると仮定し、暴露期間4ヶ月で実環境下10年の塩分濃度となるように30倍(120ヶ月(10年)/4ヶ月=30倍)の塩分濃度とした。なお実際には5回/週で噴霧を行ったため、この分の補正として1.4倍(7日/5日=1.4)を割り増し1回(1日)の噴霧す

表一 試験開始6ヶ月後のひびわれ幅一覧表

供試体No.	導入時ひびわれ幅 (mm)			平均	試験開始6ヶ月後におけるひびわれ幅 (mm)			
	各測定値				各測定値			平均
①	0.20 0.15	0.20 0.15	0.30 0.20	0.20	0.25 0.20	0.25 0.20	0.30 0.25	0.24
②	0.20 0.15	0.15 0.15	0.20 0.20	0.18	コンクリート表面塗装実施のため、測定不可能			----
③	0.20 0.10	0.20 0.20	0.20 0.15	0.18	0.25 0.15	0.25 0.25	0.20 0.20	0.22
④	0.25 0.30	0.25 0.30	0.25 0.30	0.28	0.30 0.35	0.25 0.30	0.30 0.35	0.31
⑤	0.25 0.15	0.20 0.20	0.20 0.15	0.19	0.30 0.25	0.25 0.20	0.20 0.25	0.24

注) ひびわれ幅は、カチカールを用いて、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表示したものである。



る塩分量を 42 mg/dm² (1.0 mg/dm² × 30 × 1.4 ÷ 42 mg/dm²) とした。

また、No. ②の供試体については、中性化促進試験終了後、ひびわれ注入を施すとともに、コンクリート表面に保護材の塗布を行った。また、大気中暴露は阪神高速湾岸線に近接する場所において行った。

(4) 測定項目

測定項目は、外観状況 (全供試体)、自然電位測定 (供試体 No. ②を除く)、耐荷力の確認 (載荷試験) およびかぶりコンクリートのはつりによる中性化深さ、鉄筋腐食状況の確認 (供試体 No. ⑤) である。載荷は、スパン 2500 mm、載荷点間距離 600 mm の等分 2 点載荷とした。

(5) 実験結果

a) 外観および自然電位測定

塩水噴霧開始より15ヶ月経過時点において、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、表一10は主筋付近における自然電位分布を示すが、促進腐食供試体 (供試体 No. ①, ④, ⑤) の場合、塩水噴霧の実施により自然電位測定値がかなり卑な値へとシフトしているが、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。また、6ヶ月後より自然電位測定値が再び卑な値にシフトしてきており、特にひびわれ近傍の値が大きくなっている。このため鉄筋の腐食が進行していることがうかがえる。また、ひびわれ幅 0.2 mm および 0.3 mm の供試体については、自然電位の有意差は認められなかった。以上のように、促進腐食期間の経過とともに鉄筋の腐食が進行していることがうかがえる。しかし、供試体表面には錆汁や

表一10 自然電位測定状況

(単位: -mV)

測定時期	養生条件	供試体No.①		供試体No.③		供試体No.④		供試体No.⑤	
		ひびわれ近傍	ひびわれなし	ひびわれ近傍	ひびわれなし	ひびわれ近傍	ひびわれなし	ひびわれ近傍	ひびわれなし
促進養生開始前		247	251	264	268	237	233	202	201
1ヶ月後	No.①④⑤: 中性化促進	265	219	212	214	268	210	249	176
2ヶ月後	No.③: 大気中暴露	197	182	200	197	185	175	207	184
3ヶ月後		530	466	210	199	637	367	788	438
4ヶ月後	No.①④⑤: 大気中暴露 (塩水噴霧)	294	255	198	164	457	288	449	295
5ヶ月後		343	295	108	91	358	219	360	212
6ヶ月後	No.③: 大気中暴露	190	165	110	86	214	129	250	146
9ヶ月後		308	283	138	110	339	230	—	—
12ヶ月後		360	314	167	93	374	258	—	—
15ヶ月後		414	347	118	79	401	285	—	—

注: ひびわれ近傍およびひびわれなしの各測定値は右に示す範囲の全ての測定結果を平均したものである。



新たなひびわれの発生は認められておらず、腐食程度は軽微なものと予想される。

b) 載荷試験結果

供試体 No. ⑤ (平均ひびわれ幅 0.2 mm, 促進腐食) を塩水噴霧開始後5ヶ月後に耐荷力の確認を行うとともに鉄筋をはつり出し、腐食状況を目視により観察した。その結果、破壊荷重は 6.83 tf と、コンクリート標準示方書に基づく終局強度計算値 6.52 tf をほぼ満足した。また、鉄筋の腐食は主筋と配力筋が交差する箇所において軽微な腐食が生じていたが断面欠損は認められなかった。また、中性化深さは平均で 5.8 mm であり、岸谷式⁸⁾ による一般的な値 (水セメント比 50%, 経過年数 10 年と仮定した場合 6.4 mm) とほぼ同程度の進行速度であること、およびひびわれは鉄筋位置まで達しているが中性化域については鉄筋までは達していないことが確認された。

5. まとめ

建設中の阪神高速道路湾岸線の鋼床版上 RC 高欄に発生したひびわれに対して実施した原因究明調査および解析結果を以下にまとめる。

① 建設中の湾岸線において試験工区を設置し、実橋の鋼床版上 RC 高欄におけるひびわれ発生状況を調査した。その結果、鉛直方向の平均ひびわれ間隔は 0.5 m 程度、平均ひびわれ幅は 0.2 mm 程度であったが、一部には 0.4 mm に達するものも確認され、従来の乾燥収縮などにより発生するひびわれに比べて、幅、間隔とも著しいことが明らかとなった。

② ひびわれ状況の経時変化調査より、ひびわれは夏期の増加が大きいことが明らかとなった。また、解析的検討によると、ひびわれ発生原因は、鋼桁の温度上昇に伴い、鋼床版に鉄筋スタッドで固定されている RC 高欄が自己の温度上昇による変形を上回る鋼桁の変形に追いつ

て大きな変形を生じるために、ひびわれが発生すると考えられる。

③ 以上の発生ひびわれを低減するために、10 m 間隔に目地を設けることおよび膨張材入り (35 kg/m³) コンクリートを用いることを標準仕様とする改善を行った。その結果、試験工区による調査によるとひびわれ幅は 0.14 mm、平均ひびわれ間隔が 1.8 m 程度と大幅に改善された。

④ 既に実橋に発生しているひびわれを放置した場合の耐久性を評価するために、ひびわれを進展させた模型試験体を作成し、中性化および塩水噴霧促進腐食環境下において実験を実施した。その結果期間の経過とともに鉄筋腐食の進行がうかがえるが、試験体表面には錆汁や新たなひびわれの発生は認められず、腐食程度は軽減なものと予想される結果が得られた。

最後に本研究について始終貴重な助言と指導を頂きました阪神高速道路公団技術審議会コンクリート分科会(藤井学主査)の委員各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，1994.2.
- 2) 橋場，高田，三矢：鋼床版上の RC 高欄のひびわれ対策検討，コンクリート工学年次論文報告集，VOL.14，pp.753-758，1992.6.
- 3) 南荘，森：鋼床版上 RC 高欄のひびわれ対策，土木学会 45 回年次学術講演会概要集，V-5，pp.300-301，1990.9.
- 4) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，1991.4.
- 5) Ollgaard, J.G. et al: Shear strength of stud connectors in light-weight and normal-weight concrete, *AISC Eng. Jour.*, No.5, pp.55-64, 1971.
- 6) Collins, M.P. et al: *Prestressed concrete Structures*, pp.347, Prentice-Hall, 1991.
- 7) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，1991.9.
- 8) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島出版，1963.
- 9) 幸左，児島，松本，鈴木：鋼床版上 RC 高欄のひびわれに関する検討，土木学会第 49 回年次学術講演会概要集，V-5，pp.642-643.
- 10) オリエントコンサルタンツ(株)，鋼床版上 RC 高欄に対する検討，阪神高速道路公団業務報告書，1994.

(1995.9.5 受付)

BEHAVIOR OF RC BARRIER WALLS ON THE STEEL DECKS AFFECTED BY THE RISE OF THE TEMPERATURE

Kenji KOSA, Takayuki KOJIMA, Mori HASIBA and Nobuyuki SUZUKI

Uncommon cracks with an average width 0.2mm and an average crack interval 0.5m, were detected on the RC barrier walls over the steel decks of our Hanshin Expressways Bay Route. These cracks increased in number especially in summer. It was also found by the analytical and field studies that these cracks occurred because RC barrier walls fixed tightly to the steel decks made a move following the steel deck's deformation behavior as a result of the temperature rise. Our solution was to introduce joints at 10m intervals and to utilize expansion concrete. These measures were found to be effective by a follow-up inspection, with an average crack width reducing to 0.14mm and an average crack interval increasing to 1.18m.