

# 論文 鋼床版上 RC 高欄のひびわれ発生メカニズムについて

黒木 勇治\*<sup>1</sup>・幸左 賢二\*<sup>2</sup>・橋場 盛\*<sup>3</sup>・児島 孝之\*<sup>4</sup>

要旨：鋼床版箱桁上の RC 高欄は、建設段階から多数のひびわれが発生する。そこで、RC 高欄を含む鋼床版箱桁を棒部材にモデル化して解析検討を行うと同時に試験施工を行った。その結果、高欄ひびわれは温度応力の影響が大きいことが明らかになった。また、実験値と解析値が良く一致し、RC 高欄ひびわれ発生メカニズムを把握できたものと考えられる。

キーワード：鋼床版、RC 高欄、ひびわれ、温度応力、配力筋、境界バネ要素

## 1. はじめに

阪神高速道路公団では、自動車用防護柵の標準として RC 壁高欄を採用している。しかし、鋼床版上の壁高欄には建設段階から多数のひびわれが発生しているのが現状であり、種々の試験施工および解析検討がなされてきた。本研究では、鋼床版上の RC 高欄のひびわれメカニズムをより明らかにするため、試験施工および解析を行った。さらに、RC 高欄ひびわれを抑制するための検討も行った。

## 2. 鋼床版上 RC 高欄のひびわれに関する検討経過

建設中の湾岸線において試験工区を設置し、実橋における鋼床版上 RC 高欄のひびわれ発生状況および対策効果を継続的に調査してきた。調査対象となった工区の試験施工内容および調査結果を表-1 示す。試験施工の結果、主に鋼床版上の温度変化による影響が明らかになった。そこで、伸縮目地間隔を10m程度とし、かつ膨張コンクリートを用いた場合、鋼床版上 RC 高欄のひびわれ発生に対して、かなりの改良効果があることが明らかになった。しかし、このような対策を施しても、0.2mm未満のひびわれが1m程度の間隔に発生しているのが現状であり、伸縮目地間隔および膨張コンクリートは施工上ある程度制限を受けるものと考えられる[1, 2]。

表-1 各橋梁工区の内容と調査結果

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	なし	添加物なし	0.59	0.21
正蓮時川工区	切欠中央にφ25mmの塩ビ管を埋設した改良型伸縮目地を10m間隔で設置	①添加物なし	0.62	0.13
		②膨張材 30kg/m <sup>3</sup>	0.68	0.09
末広第2工区	完全に縁を切った伸縮目地を10mビッチで設置	膨張材 30kg/m <sup>3</sup>	1.18	0.14
中島川工区	地腹部は連続化し、高欄部は伸縮目地を10mビッチで設置	膨張材 30kg/m <sup>3</sup>	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で設置	膨張材 30kg/m <sup>3</sup>	1.00	0.07

\*1 (株)オリエンタルコンサルタンツ 関西支社 総合技術部 (正会員)

\*2 阪神高速道路公団 復旧建設部 Ph. D (正会員)

\*3 (株)オリエンタルコンサルタンツ 関西支社 総合技術部 工修 (正会員)

\*4 立命館大学 理工学部 土木工学科 工博 (正会員)

### 3. 解析的検討

#### 3. 1 解析手法の概要

鋼床版上RC高欄のひびわれ要因として、鋼床版とRC高欄との温度差が主因であることは、すでに解析的に明らかにしている[1, 2]。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および変形を解析的に検討するために、RC高欄を含む鋼床版箱桁（以下、橋桁と称す）をセグメントに分割してモデル化した。

前回の報告は、ひびわれの進展が高欄天端から下端に向い、現実のひびわれ発生状況とは必ずしも一致しないものであった。そこで、境界バネ要素に新たに鉛直バネ（図-2, a)に示す $Kv1, Kv2$ )を加えたモデルを用いて解析的検討を行った。

①モデル：橋桁を棒部材にモデル化し、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-1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および、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バネで構成されたバネ要素であり、一般部セグメントは鋼箱桁要素、RC高欄要素とこれらの要素を結合する境界バネ要素で構成する。

②自由度：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、断面力および変位を図-2のように定義した。

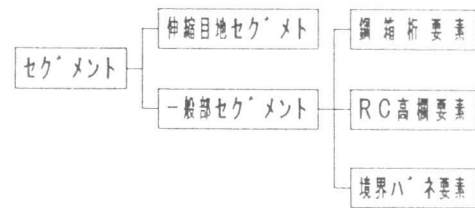


図-1 セグメントの構成

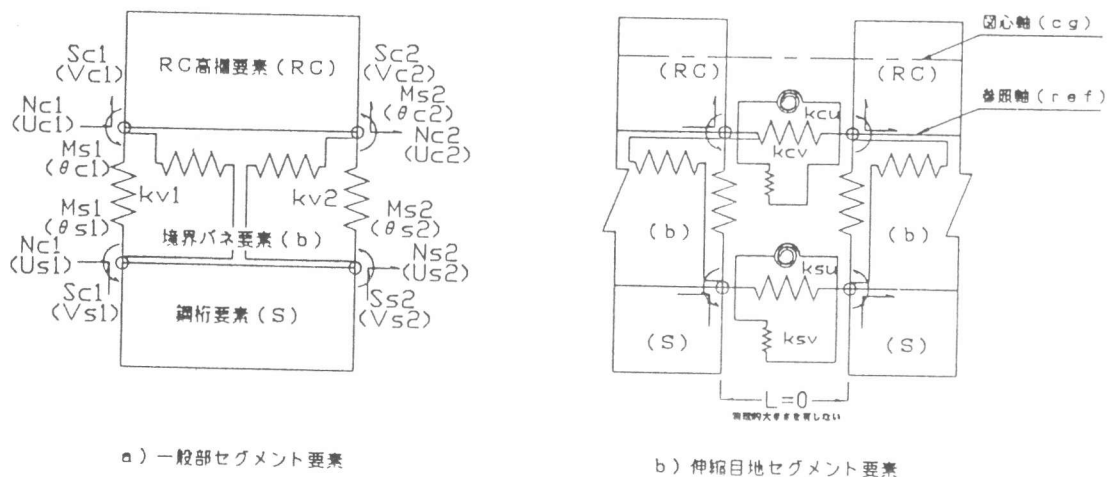


図-2 鋼床版上のRC高欄のモデル化

③境界バネ要素：境界バネ要素はRC高欄を鋼床版に固定している鉄筋スタッドをバ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、高欄コンクリート中に埋め込まれている。鋼箱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 $K_h$ はFisherの研究成果[3]を用いた。

$$K_h = Q / \delta = Q_u \times 3.15 / (1 + 3.15 \times \delta) \quad (1)$$

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

$\delta$  : 相対ズレ(mm)

$f_c'$  : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$A_s$  : スタッドの断面積(cm<sup>2</sup>)

$E_c$  : コンクリートの弾性係数(kgf/cm<sup>2</sup>)

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。なお、伸縮目地セグメントのバネ剛度は、RC高欄に相当する $K_{c,u}$ 、 $K_{c,v}$ 、 $K_{c,\theta}$ を0とし、さらに鋼箱桁に相当するものを予備検討の結果から $K_{s,u}=K_{s,v}=1.0 \times 10^{10}$  kgf/cm、 $K_{s,\theta}=1.0 \times 10^{13}$  kgf·cm/radとした。

④剛性低下：鋼箱桁に生じる温度変化による拘束断面力が求まると、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から決定される。また、そのひずみ分布を用いて図心軸周りの曲げおよび軸剛性を算出し、ひびわれによる剛性低下を評価した。

RC高欄のコンクリートおよび鉄筋の応力は、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(自己平衡温度と計測平衡温度との差)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。

⑤解析手法：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、得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範囲内であれば、収束したとみなす方法によった。

### 3. 2 解析結果および考察

#### (1) ひびわれ挙動評価 (解析対象橋梁：鳴尾浜第一工区)

表-1 に示した鳴尾浜第一工区のうち、2径間連続鋼床版箱桁橋の第2径間(L=43.35m)を対象工区として、RC高欄の解析検討を行った。解析に用いた諸条件を表-2に示す。使用材料の特性は道路橋示方書に従ったが、コンクリート引張側の応力とひずみの関係はCollinsのモデルに用いた。構造解析は対象径間を126セグメントに分割して行った。境界要素における鉛直バネ剛度(鉄筋スタッド部)の設定は、その剛度を変化させ伸縮目地の水平変位(解析値)が実測値とほぼ一致するような値を用いた。表-3は単位長さ当りの鉛直バネ剛度を $1.71 \times 10^5$  (kgf/cm/cm)とした場合の伸縮目地部における水平変位である。解析値と実験値はほぼ一致しているものとみなし、この鉛直バネ剛度を

採用した。なお、本橋の場合、単位長さ当りの水平バネ剛度の初期値(式(1)で $\delta=0$ の場合の値)は $9.26 \times 10^3$  kgf/cm/cmである。また、軸剛性および曲げ剛性の初期剛性に対する比率はそれぞれ0.90および0.95とな

表-2 解析に用いた諸条件

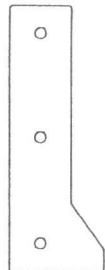
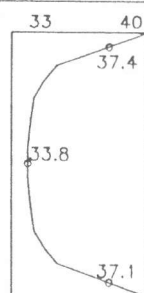
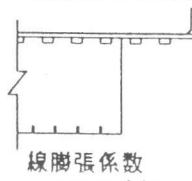
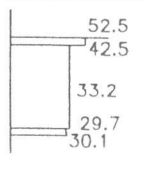
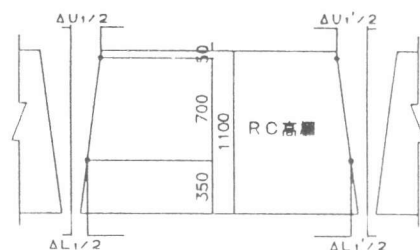
	形 状	温度分布(°C)
RC高欄		
	線膨張係数 $\alpha = 10 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	
鋼床版箱桁		
	線膨張係数 $\alpha = 12 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	

表-3 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
2	解析値	2.03
$(\Delta L_i + \Delta L_i')$	実測値	1.28
2	解析値	0.82

(単位:mm)



り、ひびわれ発生による剛性低下を示している。RC高欄のブロック中央断面に発生する応力状態（解析値）を図-3に示す。なお応力には、RC高欄内における非線形の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、高欄下端から約40cm上方まで進展する傾向を示した。これは実測結果とほぼ一致している。また、鉄筋応力度は170~200kgf/cm<sup>2</sup>であるが、実測平均ひびわれ間隔1.0mを用いてひびわれ幅をもとめると、0.09~0.10mmとなる。このひびわれ幅は実測値のひびわれ幅0.07mmに比較して幾分大きな値となっている。解析結果と実測結果との若干の相違は、高欄内の温度分布の推定および鉄筋スタッドの剛度の設定によるものと思われる。しかし、鋼床版上のRC高欄の挙動を精度良く表現しているものと考えられる。

(2) 変形に対する検討(解析対象橋梁：石津浜工区)

石津浜工区の3径間連続鋼床版箱桁橋に関して、RC高欄の変形挙動を解析的に検討した。解析に用いた諸条件を表-4に示す。温度条件は計測第一日目の14時と翌二日目の1時との温度差を用いた。なお、本計測は舗装後に行い、RC高欄には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、曲げ剛性の低下率および境界要素におけるバネ剛度は、上述の検討と同一の値を使用した。また、境界要素のバネ剛度も同一とした。解析結果を表-5に示す。伸縮目地、高欄ブロック部の水平変位の解析値は、実測値と同程度の結果が得られた。以上より、

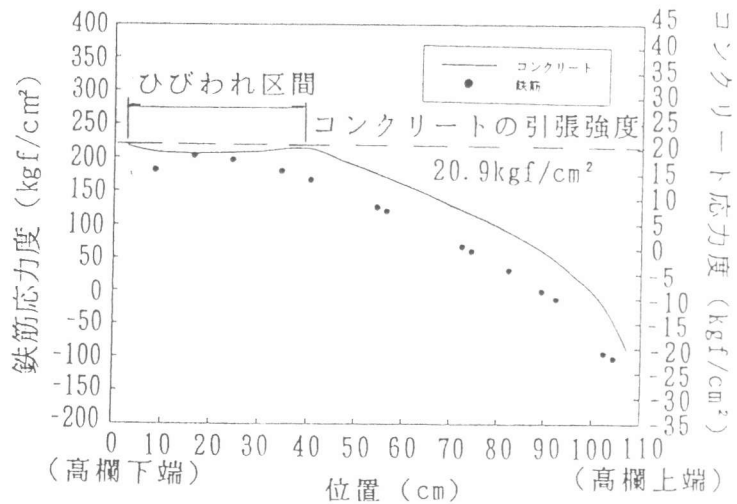


図-3 RC高欄内の応力分布

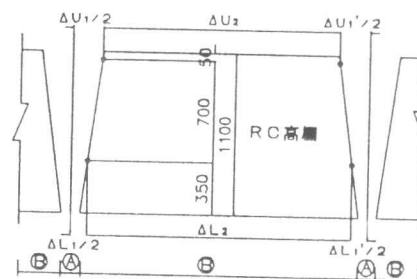
表-4 解析に用いた諸条件

	形状	温度分布(°C)				
		6	7	8	9	10
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 $\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$					

表-5 伸縮目地の水平変位の比較

		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
	2 解析値	0.58	0.93
$(\Delta L_1 + \Delta L_1')$	実測値	0.36	1.08
	2 解析値	0.23	1.28

(単位:mm)



温度変化(温度上昇)時による鋼桁上RC高欄の挙動として、以下のことが考えられる。鋼床版箱桁は直射日光により急激に温度上昇し、伸びと同時に上に凸に変形する。鋼床版に鉄筋スタッドで固定されているRC高欄は、自己温度上昇による変形を上回る鋼床版箱桁の変形に追随し、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。RC高欄にひびわれが発生するとその剛性が低下し、RC部材としての変形能力が増加する。その結果、過大なひびわれとはならず平衡状態に至るものと考えられる。

#### 4 RC高欄の配筋改良に関する検討

##### 4.1 施工試験方法

①施工試験概要：兵庫県道高速湾岸線「東海岸工区」は、5径間連続鋼床版箱桁である。このうち、比較的平面線形が直線部に近い範囲にある2径間(L=182m)を試験施工の対象とした。

②構造的改良：同工区では、標準型断面と配筋鉄筋本数を増やし、鉄筋比を増加させた改良型断面の2タイプで試験施工を実施した。改良型の配筋鉄筋量は、標準型の1.6倍とした。改良型断面と標準型断面の配筋図を図-4に示す。

③材料的改良：東海岸工区における試験施工には、末広第2工区、中島側工区等と同様に膨張材を $35\text{kg}/\text{m}^3$ 混入した膨張コンクリートにより高欄を施工した。

④調査方法：ひびわれ状況調査はコンクリート材令3ヶ月までに計8回(脱型時、材令から1週間毎に計7回)実施した。ひびわれ状況は対象区間の高欄内側面をクラックスケールを用いて目視観察した。

##### 4.2 施工試験結果および考察

高欄単位長さ当りのひびわれ面積( $\Sigma$ (ひびわれ延長×ひびわれ幅)/高欄延長)と経時変化の関係を図-5に示す。高欄(L)における改良型高欄のひびわれ面積は、標準型よりも $1/2 \sim 1/3$ 程度と小さな値になっており、改良効果による優位性が認められた。また、高欄(L)における改良型高欄および標準型高欄は、同時期に打設されており、同じ気温条件における測定値である。これに対して、標準型高欄と改良型高欄の打設時期が異なる高欄(R)は、改良型高欄のひびわれ面積が標準型高欄よりも若干大

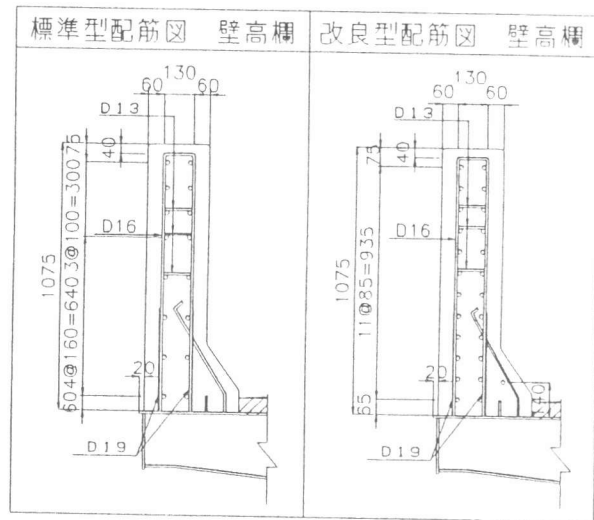


図-4 標準型および改良型高欄の配筋図

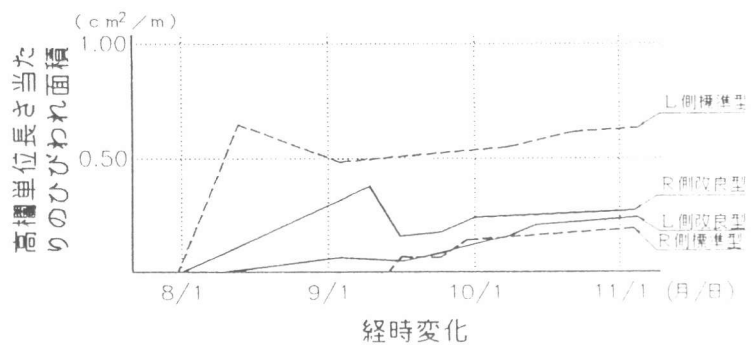


図-5 ひびわれ面積と経時変化の関係

きくなり、改良効果による優位性が認められなかった。これは、改良型高欄が8月前半の気温の高い時期に打設した結果、温度の影響をより大きく受けたのに対し、標準型高欄は比較的気温の低い時期（9月中旬）に打設したために温度応力の影響が小さかったためによるものと考えられる。鉄筋比を増加させた改良型高欄は、標準型高欄よりも幾分ひびわれ抑制効果が見られたが、ひびわれを完全になくすまでには至っておらず、改良の効果はさほど上がらなかった。

表-6 ひびわれ幅の比較

		改良型高欄	標準型高欄
実測平均ひびわれ間隔(m)		1.45	1.88
平均ひびわれ幅 (mm)	実測値	0.06	0.06
	解析値	0.13	0.18

改良型高欄と標準型高欄の平均ひびわれ幅を、上述した解析手法を用いて算出した結果を表-6に示す。なお、平均ひびわれ幅の解析値は、実測平均ひびわれ間隔を用いて算出した。改良型高欄と標準型高欄の平均ひびわれ幅を比較した場合、改良型高欄の方が標準型高欄よりも小さくなったが、その差は僅かであった。

以上より、高欄の配力鉄筋を増加させた場合のひびわれ抑制に対する優位性は認められるが、施工性および経済性を考慮した場合は、必ずしも有効な方法とは言い難いものと思われる。

## 5. まとめ

- (1) RC高欄および鋼床版箱桁を棒部材として橋軸方向にセグメント化し、伸縮目地および鉄筋スタッド部を境界バネ要素で構成することにより、RC高欄を含む鋼床版箱桁の挙動を把握することが可能であるものと考えられる。
- (2) 鋼床版上RC高欄のひびわれ挙動における解析値は、鉄筋スタッドを境界バネ要素（水平および鉛直バネ）にモデル化することにより、実測値により近づく結果となった。
- (3) 鋼床版鋼桁は直射日光により大きな温度差が生じ、上に凸に変形する。鉄筋スタッドにより鋼床版と結合されているRC高欄は、自己の温度上昇による変形を上回る鋼箱桁の変形に追従できず、ひびわれが生じるものと考えられる。
- (4) 鋼床版上RC高欄では、配力筋を密にすることで高欄ひびわれを抑制することができるが、ひびわれを完全になくすことは困難である。

## 【参考文献】

- [1] 橋場・高田・三矢：鋼床版上のRC高欄ひびわれ対策検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 753-pp. 758、1992. 6
- [2] 三矢・松本・幸左：床版形式とRC高欄の温度応力についての一考察、土木学会第48回年次学術講演会概要集、V-7、pp. 40-pp. 41、1993. 9
- [3] Ollgard, 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