

論文

[2130] 鋼床版上のRC高欄のひびわれ対策検討

正会員 ○橋場 盛 (オリエンタルコンサルタンツ)

高田佳彦 (阪神高速道路公団)

三矢 寿 (オリエンタルコンサルタンツ)

1. はじめに

近年のウォーターフロント開発に伴い建設される湾岸道路には、長大橋梁が架橋されることが多く、その構造形式が鋼床版箱桁となることが多いようである。また、阪神公団では経済性ならびに維持管理上の観点から、RC壁高欄を標準高欄として採用している [1]。しかし、建設時から、鋼床版上のRC高欄に多数のひびわれが発生し、その原因の究明と対策が急務となっている。

本報告は上記鋼床版上のRC高欄のひびわれ発生に関して実施した解析的検討および試験施工の結果について報告するものである。

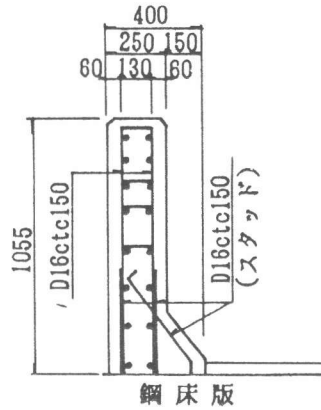


図-1 RC高欄配筋図

2. 鋼床版上のRC高欄の応力解析法

一般に、RC高欄には桁支点上に伸縮目地を設けるほかに 10m程度の間隔に収縮目地 (すなわち、高欄表面にVカットを施したひびわれ誘発目地) が設けられる。なお、鋼床版へのRC高欄の結合は、鉄筋スタッドによってなされている (図-1)。このような構造特性を考慮した応力解析を行なうために、RC高欄を含めて鋼床版箱桁を桁軸方向にセグメント化した (図-2 参照)。またRC高欄のひびわれ発生原因を推測して、次のような応力解析を対象とした。

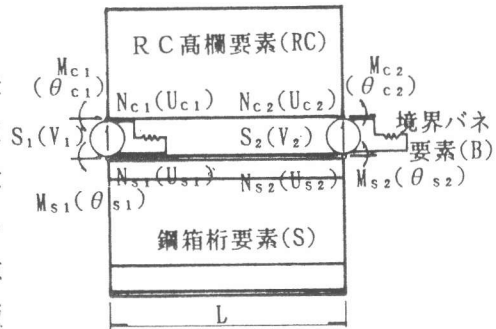
- ① 高欄コンクリートの乾燥収縮が鋼桁によって拘束されて生じる場合 (収縮応力解析)
- ② とくに鋼床版の温度上昇による鋼箱桁の変形をRC高欄が拘束することによって生じる場合 (温度応力解析)

2.1 収縮応力解析

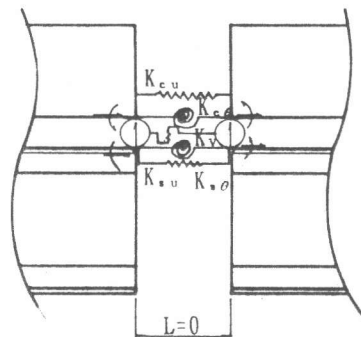
(1) 発生応力の近似

高欄コンクリートに発生する応力は、時間経過とともに変化する。ここでは図-3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 [2]。なお、時間分割する時間間隔を対数軸上で等間隔に分割すればよい精度が得られるといわれている [3]。



a) 一般部セグメント要素



物理的大きさを有しない

b) 伸縮目地セグメント要素

図-2 鋼床版上のRC高欄のモデル化

(2) RC高欄の内部拘束による発生応力[4]

コンクリートの乾燥収縮は、RC高欄に配筋された鉄筋によって拘束され応力が発生する。さらにクリープによって緩和される。コンクリートの乾燥収縮にともなう応力は次のように求められる。まず乾燥収縮ひずみを生じるコンクリートのみ（純断面）について、このひずみによる変形を元の状態に戻す力

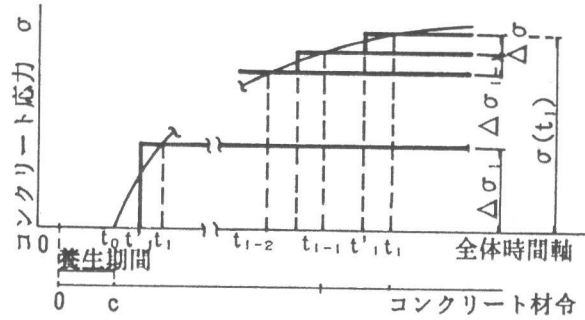


図-3 コンクリート応力の近似

$\Delta P_{s,h}$ を純断面図心に作用させる。次に換算断面に関して $\Delta P_{s,h}$ を解放する。したがってコンクリートには $-\Delta \epsilon_{s,h} + \Delta \Delta \epsilon_{s,h}(y)$ 、鉄筋には $\Delta \Delta \epsilon_{s,h}(y)$ のひずみが生じる。各要素の応力はそれぞれのひずみに弾性係数を乗ずればよい。なお換算断面での各要素のひずみは、次式ようになる。

$$\Delta \Delta \epsilon_{s,h}(y) = \{ \Delta P_{s,h} / A_v + \Delta M_{s,h} / W_v(y) \} / E_i \text{ ----- (1)}$$

ここに、 $\Delta P_{s,h} = E_i \int \Delta \epsilon_{s,h} \cdot dA$, $\Delta M_{s,h} = \Delta P_{s,h} \cdot (y_c - y_v)$

$E_i = E_{i-1} / (1 + \Delta \phi_i)$: 時間間隔 $\Delta t_i (= t_i - t_{i-1})$ でのコンクリートの有効弾性係数

A_v : 換算断面積, $\Delta \phi_i$: 時間間隔 Δt_i におけるクリープ係数の増分

y_v, y_c : それぞれ参照軸から換算断面図心および純断面図心までの距離

$W_v(y)$: 換算断面に関する断面図心から距離 y の位置での断面係数

$\Delta \epsilon_{s,h}$: 時間間隔 Δt_i におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの増分

クリープに関しても乾燥収縮と同様な方法によって求められ、換算断面での各要素のひずみは次式ようになる。

$$\Delta \Delta \epsilon_k(y) = \{ \Delta P_k / A_v + \Delta M_k / W_v(y) \} / E_i \text{ ----- (2)}$$

ここに、 $\Delta P_k = E_i \int \Delta \epsilon_k \cdot dA$, $\Delta M_k = \Delta P_k (\eta - y_v)$, $\eta = \int \Delta \epsilon_k \cdot y \cdot dA / \int \Delta \epsilon_k \cdot dA$

$\Delta \epsilon_k$: 時間間隔 Δt_i 間におけるコンクリートのクリープひずみ増分

(3) RC高欄の初期力ベクトル

高欄コンクリートの乾燥収縮・クリープによる内部応力（内力）から、換算断面図心軸に関する初期力ベクトル $\{f_o\}^e$ を仮想仕事の原理に基づいて求められる。このとき、RC高欄の断面および材料定数は一定とし、さらに上述内力分布はセグメント部材軸に沿って放物線分布とすると仮定すると、次式ようになる。

$$\{f_o\}^e = \begin{pmatrix} N_1 \\ S_1 \\ M_1 \\ N_2 \\ S_2 \\ M_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(a'_N/3 + b'_N/2 + c'_N) \\ (a'_M + b'_M)/L \\ a'_M/6 - c'_M \\ a'_N/3 + b'_N/2 + c'_N \\ -(a'_M + b'_M)/L \\ 5/6 a'_M + b'_M + c'_M \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a'_N \\ b'_N \\ c'_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2(2\Delta N_{L/2} - \Delta N_1 - \Delta N_2) \\ 4\Delta N_{L/2} - 3\Delta N_1 - \Delta N_2 \\ \Delta N_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a'_M \\ b'_M \\ c'_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2(2\Delta M_{L/2} - \Delta M_1 - \Delta M_2) \\ 4\Delta M_{L/2} - 3\Delta M_1 - \Delta M_2 \\ \Delta M_1 \end{pmatrix} \text{ ----- (3)}$$

ここに、 $\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_{L/2}$: RC高欄の乾燥収縮あるいはクリープに起因する1, 2端およびL/2点での軸力 ($\Delta P_{s,h}$ あるいは ΔP_k に相当する)

$\Delta M_1, \Delta M_2, \Delta M_{L/2}$: RC高欄の乾燥収縮あるいはクリープに起因する1, 2端およびL/2点でのモーメント ($\Delta M_{s,h}$ あるいは ΔM_k に相当する)

L : セグメント長 (一般部セグメント要素)

(4) 要素 (セグメント) の剛性方程式

要素の剛性方程式をその参照軸に関して表すと (図-2 参照)、次式ようになる。

$$\{f\} = [k] \{u\} + \{f_s\} - \{f_0\} \quad \text{-----} \quad (4)$$

ここに、 $\{f\}$: 節点力ベクトル $\{f\} = \{N_{c1} \ N_{s1} \ S_1 \ M_{c1} \ M_{s1} \ N_{c2} \ N_{s2} \ S_2 \ M_{c2} \ M_{s2}\}^T$

$[k]$: 要素剛性マトリックス

$\{u\}$: 節点変位ベクトル $\{u\} = \{u_{c1} \ u_{s1} \ v_1 \ \theta_{c1} \ \theta_{s1} \ u_{c2} \ u_{s2} \ v_2 \ \theta_{c2} \ \theta_{s2}\}^T$

$\{f_s\}$: 等価節点力ベクトル (外力を考慮していないので、 $\{f_s\} = \{0\}$ である)

$\{f_0\}$: 初期力ベクトル

図-2に示した一般部セグメント要素の初期力ベクトル $\{f_0\}$ 、要素剛性マトリックス $[k]$ は次のとおりである。

$$\{f_0\} = [T] \{f_0\}^{c\&g} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$[k] = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{pmatrix} \quad \text{-----} \quad (6)$ $[k_{11}] = \begin{matrix} \frac{E_c \cdot A_c + K_{b1}}{L} & & & & \\ -K_{b1} & \frac{E_s \cdot A_s + K_{b1}}{L} & & & \\ 0 & 0 & \frac{12E_c(I_c - G_c^2/A_c)}{L^3} & & \\ & & + \frac{12E_s(I_s - G_s^2/A_s)}{L^3} & & \\ \frac{E_c \cdot G_c}{L} & 0 & \frac{6E_c(I_c - G_c^2/A_c)}{L^2} & \frac{E_c(4I_c - 3G_c^2/A_c)}{L} & \\ 0 & \frac{E_s \cdot G_s}{L} & \frac{6E_s(I_s - G_s^2/A_s)}{L^2} & 0 & \frac{E_s(4I_s - 3G_s^2/A_s)}{L} \end{matrix}$ $[k_{12}] = \begin{matrix} -\frac{E_c \cdot A_c}{L} & & & & \\ 0 & \frac{E_s \cdot A_s + K_{b1}}{L} & & & \\ 0 & 0 & -\frac{12E_c(I_c - G_c^2/A_c)}{L^3} & & \\ & & -\frac{12E_s(I_s - G_s^2/A_s)}{L^3} & & \\ -\frac{E_c \cdot G_c}{L} & 0 & \frac{6E_c(I_c - G_c^2/A_c)}{L^2} & \frac{E_c(4I_c - 3G_c^2/A_c)}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{E_s \cdot G_s}{L} & \frac{6E_s(I_s - G_s^2/A_s)}{L^2} & 0 & \frac{E_s(2I_s - 3G_s^2/A_s)}{L} \end{matrix}$ $[k_{22}] = \begin{matrix} \frac{E_c \cdot A_c + K_{b2}}{L} & & & & \\ -K_{b2} & \frac{E_s \cdot A_s + K_{b2}}{L} & & & \\ 0 & 0 & \frac{12E_c(I_c - G_c^2/A_c)}{L^3} & & \\ & & + \frac{12E_s(I_s - G_s^2/A_s)}{L^3} & & \\ \frac{E_c \cdot G_c}{L} & 0 & -\frac{6E_c(I_c - G_c^2/A_c)}{L^2} & \frac{E_c(4I_c - 3G_c^2/A_c)}{L} & \\ 0 & \frac{E_s \cdot G_s}{L} & -\frac{6E_s(I_s - G_s^2/A_s)}{L^2} & 0 & \frac{E_s(4I_s - 3G_s^2/A_s)}{L} \end{matrix}$	$[T] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_c/(A_c \cdot L) & 1 & 0 & G_c/(A_c \cdot L) & 0 & 0 \\ G_c/A_c & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -G_c/(A_c \cdot L) & 0 & 0 & -G_c/(A_c \cdot L) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_c/A_c & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $[k] = \begin{pmatrix} k_{cu} & & & & & \\ 0 & k_{su} & & & & \\ 0 & 0 & k_u & & & \\ 0 & 0 & 0 & k_{c\theta} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{s\theta} & \\ k_{cu} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{cu} \\ 0 & -k_{su} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{c\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{s\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s \end{pmatrix}$
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\text{-----} \quad (6')$$

ここに、 $E_c = E_i, A_c, G_c, I_c$: それぞれコンクリートの有効弾性係数、RC高欄要素の換算断面定数で参照軸に関する断面積、断面1次および2次モーメント

$$(A_c > 0, G_c < 0, I_c > 0)$$

E_s, A_s, G_s, I_s : それぞれ鋼箱桁要素の弾性係数、鋼箱桁要素の断面定数で参照軸に関する断面積、断面1次および2次モーメント ($A_s > 0, G_s > 0, I_s > 0$)

$k_{b1} = k_{b2} = C \cdot L/2$: 境界バネ要素の剛度 C : 単位長さ当たりのバネ定数

つぎに伸縮目地セグメント要素の要素剛性マトリックス $[k]$ は式(8)のとおりである。同式中の $k_{cu}, k_{c\theta}, k_v, k_{su}$ および $k_{s\theta}$ は、図-2-b)に示す要素構成バネの剛度である。また、初期ベクトル $\{f_0\}$ は $\{f_0\} = \{0\}$ である。

(5) 収縮応力計算の流れ

前述 (1) で記した方法によって分割された各時間間隔ごとに、各セグメント要素ごとの剛性方

程式(式(4))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-4に示す。

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要素モデルを用いて温度応力計算を行った。このとき式(6)中のコンクリートの弾性係数 E_c は、実弾性係数 $E_c(t_c)$ とし、さらにRC高欄要素の換算断面定数を算出するときのコンクリートの弾性係数も同様に置き換える必要がある。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。

3. 構造的ひびわれ対策検討

すでに建設された橋梁でのひびわれ発生状況より、そのひびわれ原因として鋼床版箱桁の温度変化が主因と思われる。この温度変化に対してRC高欄は拘束体として働くので、その拘束度を減少させるのが妥当な対策と考えた。そこで伸縮目地の箇所数を多くする方法をとることとし、現在の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)改良効果を上記応力解析によって確認した。対象橋は、後述する試験施工を実施した3径間連続鋼床版箱桁橋(ℓ=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-1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($\sigma_{c,k}=270\text{kgf/cm}^2$)の特性は仮定した。図-5にその仮定値を用いて計算したクリープおよび乾燥収縮の進行曲線を示す。

応力解析結果を図-6, 7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-6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はほぼ同様である。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。

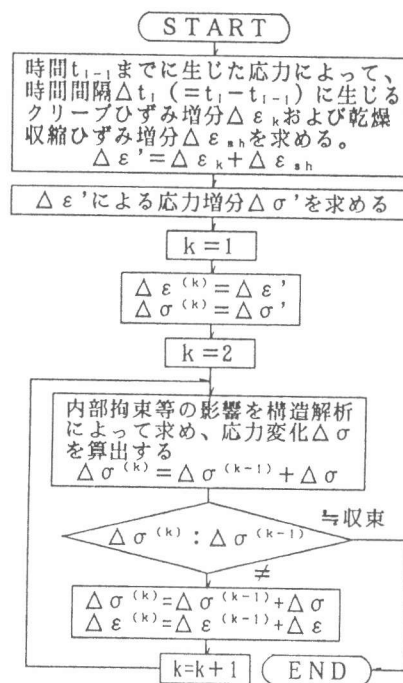


図-4 各時間間隔における計算フロー

表-1 検討条件

	温度応力解析	収縮応力解析
検 討 条 件	<ul style="list-style-type: none"> • ヤング係数 $E_c=2.45 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ (コンクリート) $E_s=2.10 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ (鋼) • 断面内の温度分布(変化量) 	<ul style="list-style-type: none"> <コンクリートの特性> • ヤング係数⁽⁵⁾ $E_c=2.45 \times 10^5 \frac{t}{0.969t \times 0.889} \text{kgf/cm}^2$ t: コンクリートの材令(日)
	<ul style="list-style-type: none"> • 線膨張係数 $\alpha_c=1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (コンクリート) $\alpha_s=1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (鋼) 	<ul style="list-style-type: none"> • 収縮特性 収縮ひずみの基本値: $\epsilon_{sh0}=-500 \mu$ 進行曲線: 道示 I⁽⁶⁾ 乾燥収縮開始材令: 4日 • クリープ特性 遅れ成分の基本値: $\phi_{d0}=0.4$ 流動成分の基本値: $\phi_{r0}=2.0$ 進行曲線: 道示 I⁽⁶⁾ • 計算時間 t=1825日(5年) • 計算分割数 n=10回

- ③伸縮目地間隔を狭くすると(図-6, 7を比較すると)、最大引張応力度は若干小さくなる程度である。しかし、とくに温度変化の場合には応力勾配が大きくなっている。
- ④また、中間に設置した伸縮目地付近では、設置しない場合(図-6)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. 試験施工

3径間連続鋼床版箱桁のランプ橋を対象に試験施工を行った。使用コンクリートは、膨張コンクリートAおよびB(表-2参照)で、伸縮目地を10m程度の間隔とした。コンクリート打設は、膨張コンクリートAが平成2年11月、また膨張コンクリートBが12月であった。約1年にわたってひびわれ調査を実施し、表-3、図-8の結果を得た。

この結果より、発生ひびわれの多くが初夏から初秋にかけてであったが、その本数は従来のものより少なくなっている(普通コンクリートを用いて、支点上のみ伸縮目地とした例では1.62本/mであった)。とくに膨張コンクリートBを用いた場合には著しく減少している。

これは膨張ひずみが残存し、鉄筋拘束によるプレストレスがひびわれ発生強度を見掛け上大きくさせたことによるものと思われる。しかし、膨張コンクリートBを用いた高欄のうち3ブロックに、他のブロックに比して著しく多くのひびわれが生じ(表-3参照)、今後の原因を明らかにする必要がある。

表-2 コンクリートの示方配合

膨張 コンクリートの タイプ	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kgf/m ³)						
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混 和 剤 (材)		
										AE減水剤	膨 張 材	収縮低減剤
A	20	8±2	4±1	50	42	166	297	773	1060	0.83	35	-
B	20	8±2	4±1	50	42	158.5	297	773	1060	0.83	35	7.5

5. まとめ

鋼床版上のRC高欄に発生するひびわれに関してその対策検討を行い、試験施工を実施した。

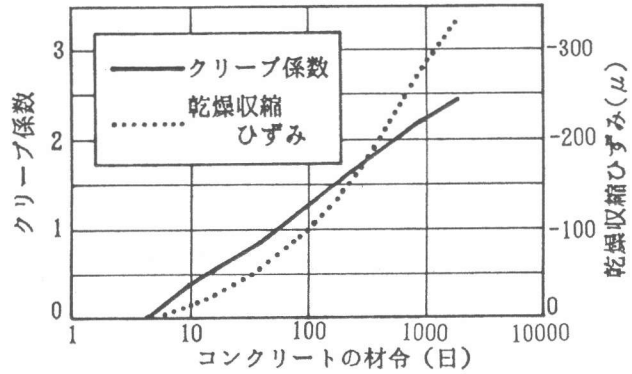
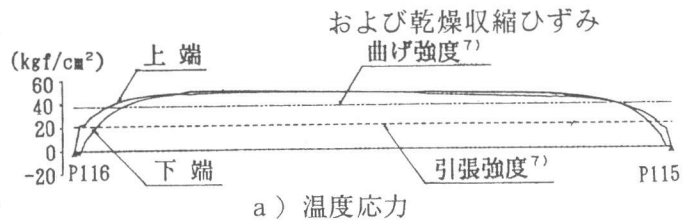
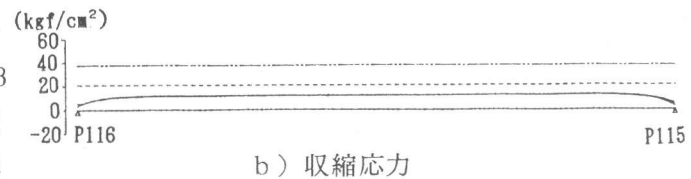


図-5 コンクリートのクリープ

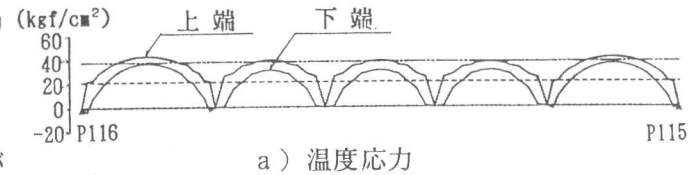


a) 温度応力

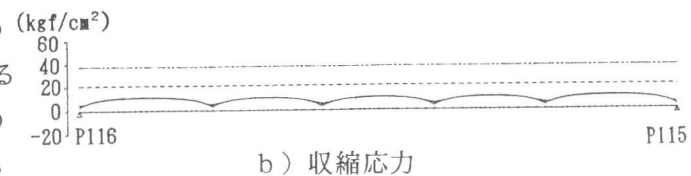


b) 収縮応力

図-6 従来のRC高欄



a) 温度応力



b) 収縮応力

図-7 改良したRC高欄

その結果、伸縮目地間隔を10m程度とし、かつ膨張材および収縮低減剤を用いたコンクリートを使用することによって、ひびわれを著しく減少させることが明らかとなった。しかし、コンクリートの品質管理について問題を残す結果も見られ、今後十分に検討を加える必要がある。

表-3 ひびわれ集計表

調査日 (平成3年)		5.10	6.17	7.15	8.9	9.24	10.29	11.29	
膨張コンクリート A	材令 (日)	164	202	230	255	301	336	367	
	ひびわれ本数 (mm)	$w \leq 0.05$	1	14	26	28	72	100	95
		$0.05 < w \leq 0.08$	0	0	2	13	33	16	20
		$0.08 < w \leq 0.10$	0	0	1	1	1	1	6
		$0.10 < w \leq 0.20$	0	0	0	0	0	0	0
	合計	1	14	29	42	106	117	121	
1m当たりのひびわれ本数	0.01	0.10	0.20	0.29	0.73	0.81	0.84		
膨張コンクリート B	材令 (日)	154	192	220	245	291	326	357	
	ひびわれ本数 (mm)	$w \leq 0.05$	0	0	0 (4)	6 (19)	11 (23)	14 (26)	16 (25)
		$0.05 < w \leq 0.08$	0	0	0 (0)	1 (6)	0 (2)	0 (1)	1 (2)
		$0.08 < w \leq 0.10$	0	0	0 (0)	0 (1)	0 (1)	0 (0)	0 (0)
		$0.10 < w \leq 0.20$	0	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	合計	0	0	0 (4)	7 (26)	1 (26)	14 (27)	17 (27)	
1m当たりのひびわれ本数	0	0	0 (0.13)	0 (0.87)	0 (0.87)	0 (0.90)	0 (0.90)		

注) ・調査範囲: L=198.74m (A), L=144.34m (B)
 ・()は他のブロックに比して著しくひびわれ発生した3ブロックに関してまとめたものである。

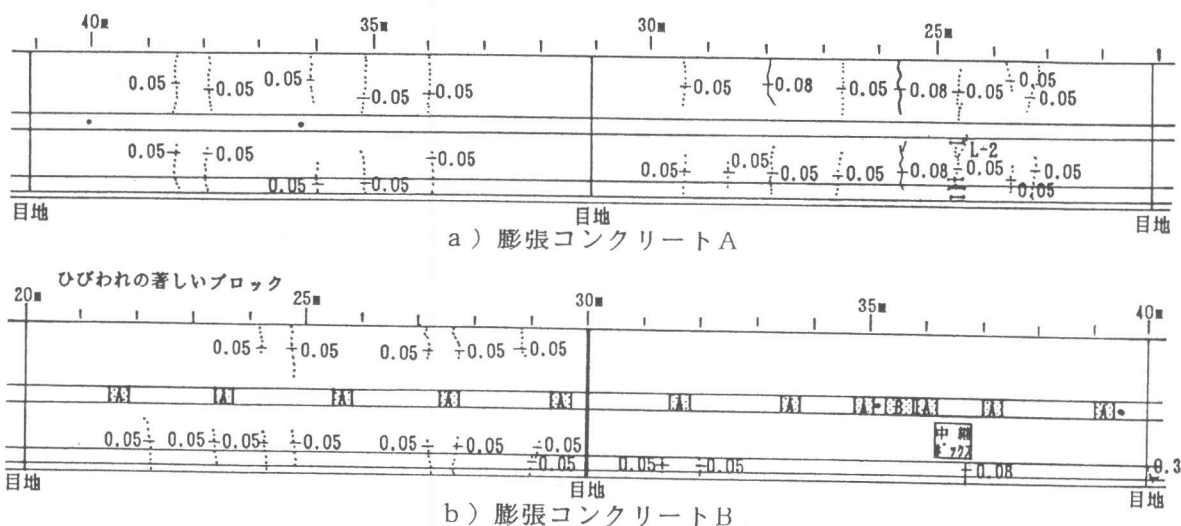


図-8 ひびわれコンクリートの例

参考文献

- 1) 南荘 淳・森 喜仁: 鋼床版上RC高欄のひびわれ対策、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、V-137、pp.300-301、1990.9
- 2) 児島孝之・橋場盛・森田信彦: 複合コンクリート舗装版の収縮応力に関する検討、コンクリート工学協会論文報告集 投稿準備中
- 3) たとえば、Bazant, Z.P, et al.: Creep of Plain & Structural Concrete, Construction Press, 1982
- 4) 児島孝之 他: PC有ヒンジラーメン橋の時間依存変位に関する検討、土木学会論文報告集V 投稿準備中
- 5) 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
- 6) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編、1990.2
- 7) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編、pp.18、1991.9