

論文 地覆・壁高欄コンクリートの収縮ひび割れ幅算定に関する検討

松村 達也*1・師山 裕*2・塩永 亮介*3・小川 潤一郎*4

要旨: 地覆・壁高欄コンクリート目地位置のひび割れ幅を予測するため, 目地位置の地覆部鉄筋比をパラメータとして実橋でのひずみ計測実験を行い, 付着喪失等価領域を仮定したひび割れ幅解析により検証を行った。付着喪失等価領域は鉄筋とコンクリート間に付着がないとする部分の長さである。既往の文献では付着喪失等価領域として 200mm 一定値を用いることが提案されているが, 目地位置の地覆部鉄筋比に応じて付着喪失等価領域の設定を変えたひび割れ幅解析を行うことで精度良くひび割れ幅を予測できることを示した。

キーワード: 計測実験, 付着喪失等価領域, 乾燥収縮, ひび割れ幅, 地覆・壁高欄コンクリート

1. はじめに

橋梁床版の付帯構造物となる地覆・壁高欄(コンクリート製防護柵)は底面に大きな拘束を受ける構造物であるため, 温度応力や乾燥収縮によるひび割れが発生しやすい。そのため壁高欄には一定間隔(5~10m)に目地を設けひび割れを集中させる設計がなされているが, この目地部に発生したひび割れが地覆部さらには床版まで進行すると内部の鉄筋腐食などを引き起こし耐久性を大きく低下させる。これを防止するためにも地覆・壁高欄のひび割れを事前に予測し制御する技術を開発する必要がある。

本報では先ず, 実橋における壁高欄目地位置のコンクリートひずみの計測実験を行い, 地覆部の補強鉄筋比を変化させることで, 目地部のひび割れ幅に与える鉄筋比の影響を調べた。

次に, 実橋を模擬した解析モデルを作成し壁高欄目地位置に付着喪失等価領域¹⁾を仮定したひび割れ幅解析を行った。ここで付着喪失等価領域とは鉄筋とコンクリート間に付着がないと仮定した部分の長さである。既往の文献¹⁾では 200mm の一定値を用いることが提案されているが, 本研究では地覆部の鉄筋比ごとに付着喪失

等価領域の設定を変えて解析を行った。その結果, 比較的良い精度でひび割れ幅を予測できることを確認した。

2. 計測実験

2.1 実験概要

実橋における壁高欄目地位置のコンクリートひずみの計測実験は下記の要領で行った。

(1) 実験場所

連続合成 2 主桁橋 PC 床版(床版支間 5.5m)に付帯する地覆・壁高欄(フロリダ形)

(2) 実験期間

H14.7.12~H15.1.23(約 6 ヶ月)

(3) 実験項目

実験は, 全壁型高欄(床版上面からの高さ $h=975\text{mm}$) および半壁型高欄($h=675\text{mm}$) の目地部において地覆部の補強鉄筋を違えた 4 ケースについて, コンクリート打設時から約 6 ヶ月の期間に渡り以下の項目の経時計測を実施した。本報では材齢 14 日程度までの初期材齢時に着目して計測結果を報告する。

- ・外気温および内部温度
- ・目地位置のコンクリートひずみ

*1 石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所構造研究部 工修 (正会員)

*2 石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所構造研究部 工修

*3 石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所構造研究部 工修 (正会員)

*4 石川島播磨重工業(株)物流・鉄構事業本部橋梁事業部設計部 課長

2.2 壁高欄構造

本実験は、8径間連続合成桁橋の中央支間(支間長約60m)における壁高欄を対象とした(図-1)。両側の壁高欄のうち一方は上部に鋼製高欄を付属させるため半壁式、一方は一般的なコンクリート製防護柵である全壁式となっている。また目地構造は、支点上では縁の切れた伸縮目地、それ以外は約6mおきにVカット(深さ30mm)した誘発目地である。本実験は誘発目地部を対象としている。

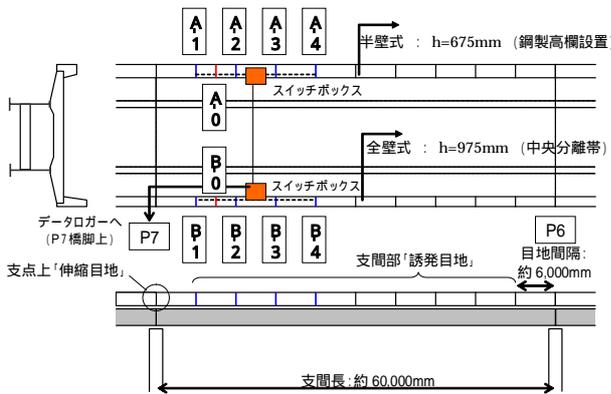


図-1 対象橋梁の上部構造

地覆部に補強鉄筋を追加しない標準断面(A-1, B-1)における壁高欄(半壁式・全壁式)の配筋図を図-2に示す。

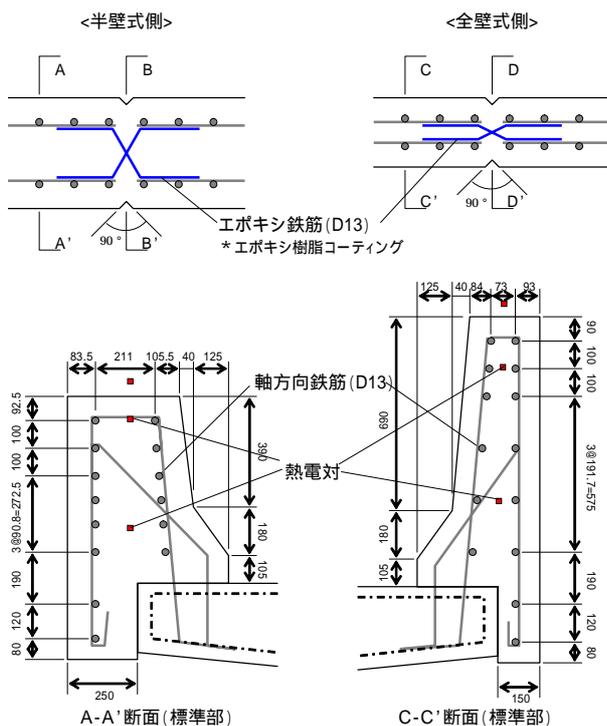


図-2 壁高欄(半壁式・全壁式)の配筋図

壁高欄誘発目地部の配筋図を図-3に示す。

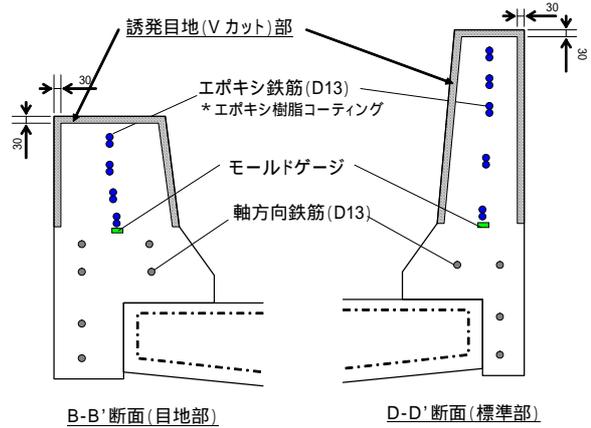


図-3 壁高欄誘発目地部の配筋図

2.3 実験ケース

補強鉄筋の追加によるひび割れ幅の影響を把握するため、半壁式・全壁式ともに補強鉄筋を追加しない標準断面に対して3ケースの断面を作成した。補強鉄筋の種類と鉄筋比との関係を表-1に示す。なおここでの鉄筋比は高欄断面全体の鉄筋比でなく、地覆(目地切り部より下の断面)内断面(着色部)での鉄筋比とした。なお

表-1 補強鉄筋の追加ケース

半壁式 (外側)	全壁式 (中央分離帯)
<p>A-1</p> <p>標準断面 D13×4</p> <p>鉄筋比 $p=0.34$ (%)</p>	<p>B-1</p> <p>標準断面 D13×2</p> <p>鉄筋比 $p=0.22$ (%)</p>
<p>A-2</p> <p>D13×4 (標準) + D13×3 (補強)</p> <p>鉄筋比 $p=0.59$ (%)</p>	<p>B-2</p> <p>D13×2 (標準) + D13×3 (補強)</p> <p>鉄筋比 $p=0.55$ (%)</p>
<p>A-3</p> <p>D13×4 (標準) + D10×6 (補強)</p> <p>鉄筋比 $p=0.62$ (%)</p>	<p>B-3</p> <p>D13×2 (標準) + D10×6 (補強)</p> <p>鉄筋比 $p=0.59$ (%)</p>
<p>A-4</p> <p>D13×4 (標準) + D13×6 (補強)</p> <p>鉄筋比 $p=0.85$ (%)</p>	<p>B-4</p> <p>D13×2 (標準) + D13×6 (補強)</p> <p>鉄筋比 $p=0.88$ (%)</p>

地覆部内に設置した補強鉄筋の定着長さは目地を挟んで800mmとした。

図-1における断面番号(A-1, B-1等)は表-1における断面ケースと一致する。補強鉄筋のパターンが異なる各断面のコンクリートのひずみ計測は、図-3に示すように誘発目地部のコンクリートの中に埋め込んだモールドゲージで行った。また、目地のない断面(図-1における「A-0」および「B-0」)には図-2に示すようにコンクリートの中に熱電対を埋め込み、壁高欄上部と中心位置の温度を計測した。以上、片側で計5断面を計測箇所とした。

2.4 壁高欄コンクリートの配合

壁高欄の配合は、JHコンクリート施工管理要領²⁾の「A1-1」配合に基づき表-2に示す示方配合とした。呼び強度は30N/mm²、セメントは普通ポルトランドセメントを用いており、膨張材は添加していない。

表-2 示方配合表

粗骨材の最大寸法	スラブの範囲	空気量の範囲	水セメント比	細骨材率	示方配合				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
Gmax	SL	Air	W/C	s/a	W	C	S	G	Ad
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/m ³)				
20	10±2.5	4.5±1.5	47.0	38.0	157	334	723	1245	2.672

3. 実験結果

3.1 打設時の温度変化

温度計測結果を図-8および図-9に示す。タイプA(半壁式)の打設日は7/19 AM10:30、タイプB(全壁式)の打設日は7/12 AM10:30であり、いずれもコンクリート打込み温度は30程度であった。

打設後約半日後には高欄の内部温度は最高に達し、その後は徐々に低下して材齢4日にはほぼ外気温と同等な温度に落ち着く。断面幅の大きな半壁式の方が若干温度上昇量は大きく23程度、全壁式は19程度であった。

3.2 初期材齢時のひび割れ幅

初期材齢時のひび割れ幅計測結果を図-4(半

壁式)、図-5(全壁式)に示す。モールドゲージの計測データに温度補正(温度ひずみを足し合わせ)を施したひずみにモールドゲージ長60mmを乗じてひび割れ幅とした。ひび割れ幅が(-)側はコンクリート内部に膨張ひずみが生じていることを示しており内部温度最高時に最大膨張ひずみとなり、その後温度降下とともに収縮側にひずみ移行し、各断面でひび割れが発生している(ひび割れ幅が(+)側に転じている)。なお、目地部の高欄上面に取付けたパイ型変位計により高欄天端の開口変位の測定も合わせて行っており同じ材齢でひび割れが発生することを確認している。

ひび割れ発生時のひび割れ幅および材齢を表-3に示す。A-4, B-2断面はリード線の断線により計測不能となったため対象から除外した。これよりひび割れ発生時期は半壁式は6日以降、全壁式は2日程度となっている。ひび割れ幅については補強鉄筋の違いによる差が顕著に現れていて補強鉄筋量が多いほど発生するひび割れ幅は小さく抑えられている。いずれの断面にお

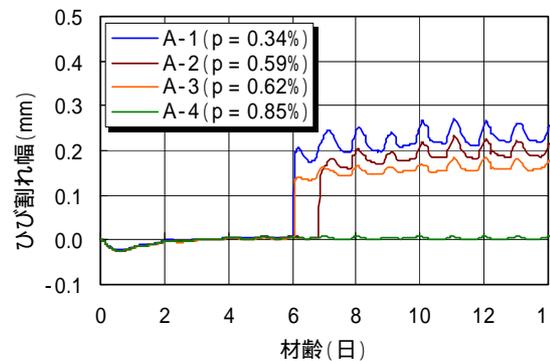


図-4 ひび割れ幅計測結果(半壁式)

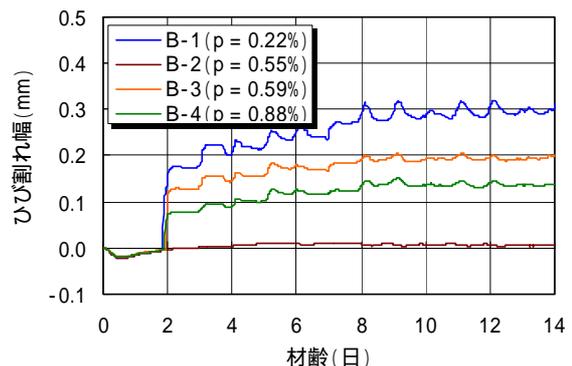


図-5 ひび割れ幅計測結果(全壁高式)

表-3 ひび割れ発生時のひび割れ幅と材齢

		ひび割れ発生時	
		ひび割れ幅 (mm)	材齢 (日)
半壁式	A-1 (p=0.34)	0.19	6.0
	A-2 (p=0.59)	0.14	6.8
	A-3 (p=0.62)	0.13	6.1
	A-4 (p=0.85)	-	-
全壁式	B-1 (p=0.22)	0.18	1.9
	B-2 (p=0.55)	-	-
	B-3 (p=0.59)	0.10	2.0
	B-4 (p=0.88)	0.06	1.9

いてもひび割れ発生後、7～10日間程度は徐々にひび割れ幅が増大するが、それ以後は安定し乾燥収縮等による急激なひび割れ幅の増大は見られなかった。安定したひび割れ幅が許容ひび割れ幅0.2mmに収まっているのは地覆部の鉄筋比が半壁式で0.62%(A-3)以上、全壁式で0.88%(B-4)以上の場合であることがわかる。

4. ひび割れ幅解析

4.1 解析モデル

全体モデル図を図-6に示す。計測対象である中央支間部を取り出し、両端単純支持の1/4対称ソリッドモデルを全壁式、半壁式ごとで作成した。壁高欄誘発目地部のモデル化は図-7に

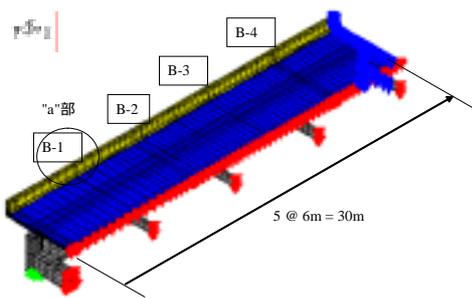


図-6 全体モデル図(全壁式の例)

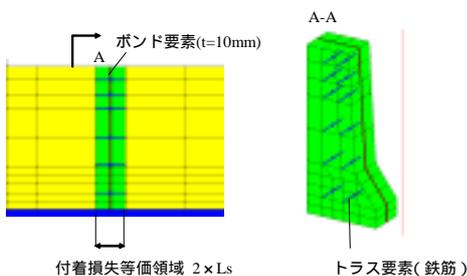


図-7 誘発目地部のモデル化(“a”部詳細)

示す。目地中央には発生引張応力度が引張強度を超えると引張強度=0になるボンド要素(線膨張係数0)を置き、その両側に付着喪失等価領域(片側当たりの長さ L_s)を設定した。この間の鉄筋はすべてトラス要素でモデル化し、コンクリート要素とは節点を共有させないことで付着が切れていることを表現した。計測結果と比較するひび割れ幅はボンド要素に発生するひずみにボンド要素長10mmを掛けることで算出した。本解析は初期材齢時に誘発目地に生じる1次ひび割れ幅を予測することを目的としており、実橋の計測においても目地部に1次ひび割れが生じていることから上記のモデル化とした。

4.2 解析条件

(1) 温度解析条件

温度解析条件を表-4および表-5に示す。表中のコン示【施工編】とはコンクリート標準示方書【施工編】³⁾を示す。放射・輻射の影響は無視し、熱伝達境界の特性を平均的に考慮した表面の熱伝達率を用いて解析を行った。日温度変動に伴うひび割れ幅の変動を追跡するのではなく、平均的なひび割れ幅の経時変化を見るのが本解析の目的であるため上記境界条件とした。

表-4 熱物性値

		項目	単位	数値
コンクリート	床版	熱伝導率	W/m	2.7
		密度	kg/m ³	2400
		比熱	kJ/kg	1.31
	壁高欄	熱伝導率	W/m	2.7
		密度	kg/m ³	2400
		比熱	kJ/kg	1.31
		断熱温度上昇量() $Q(t) = Q (1 - e^{-t})$	コン示【施工編】より算定	
		打設時初期温度		30
		鋼材	主桁	熱伝導率
		密度	kg/m ³	7850
		比熱	kJ/kg	0.47
外気温		半壁式コンクリート打設時		30
		全壁式コンクリート打設時		25

表-5 表面の熱伝達率

部位	材齢	養生方法	熱伝達率 (W/m ²)	備考
高欄上面	0～5(day)	湿潤養生(マット)	8.0	5～5.5(day)は8～14(W/m ²)の間で線形補間を行った。
	5.5(day)～	養生なし	14.0	
高欄側面	7(day)	固定型枠(合板)	7.0	7～7.5(day)は7～14(W/m ²)の間で線形補間を行った。
	7.5(day)～	型枠撤去	14.0	
床版および鋼桁表面	-	-	14.0	

(2) 温度応力解析条件

温度応力解析条件を表-6に示す。この他、図-8に示すコンクリートの収縮ひずみを別途考慮した。収縮ひずみはコンクリート標準示方書【構造的性質照査編】⁴⁾に基づき仮定し、4つのパラメータを下記の通り与えた。～は半壁式・全壁式ともに共通である。なお収縮ひずみ

表-6 温度応力解析条件

		項目	単位	数値
コンクリート	床版	圧縮強度	N/mm ²	50.0
		引張強度	N/mm ²	3.1
		ヤング係数	N/mm ²	3.3 × 10 ⁴
		ポアソン比	-	0.167
		線膨張係数	/	10.0
壁高欄	設計基準強度(28日)	設計基準強度(28日)	N/mm ²	$f'_c = 30.0$
		圧縮強度	N/mm ²	$f'_c(t) = \{t/(4.5 + 0.95t)\} \times f'_c \times 1.11$ t:材齢(日)
		引張強度	N/mm ²	$f_t(t) = 0.44\sqrt{f'_c(t)}$
		ヤング係数	N/mm ²	$E_c(t) = 4700\sqrt{f'_c(t)}$
		ポアソン比	-	0.167
鋼材	弾性係数	弾性係数	N/mm ²	2.0 × 10 ⁵
		ポアソン比	-	0.3
		線膨張係数	μ /	12.0

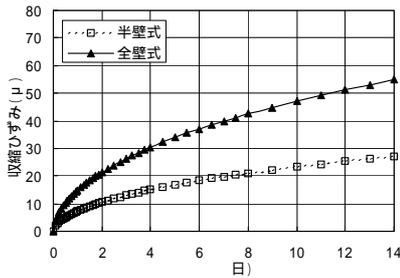


図-8 コンクリートの収縮ひずみ

は、乾燥収縮、自己収縮等を含んだひずみである。 相対湿度 80%， 単位水量 157kg/m³， 乾燥開始材齢 0 日， 体積表面積比(V/S)： 125.6 (全壁)， 165.3 (半壁)

4.3 計測結果との比較

(1) 打設時の温度変化

計測値との比較結果を図-9 (半壁式)および図-10 (全壁式)に示す。これより解析によりコンクリート内部の温度変化をほぼ正確に予測可能であることがわかる。

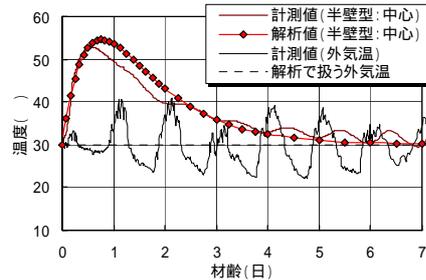


図-9 温度変化の比較 (半壁式)

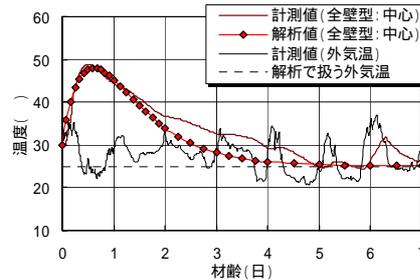
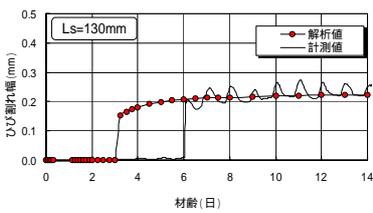
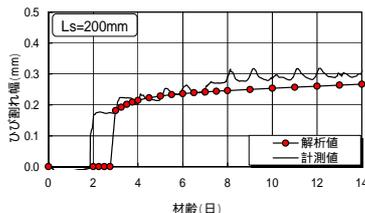


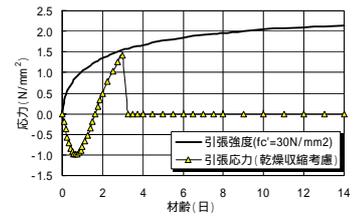
図-10 温度変化の比較 (全壁式)



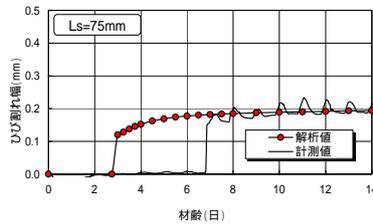
(a) A-1



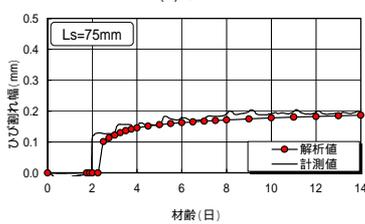
(a) B-1



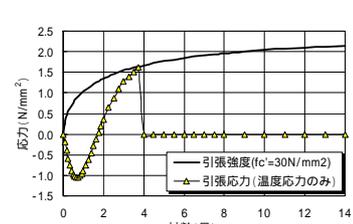
(a) CASE-1 (半壁式温度応力解析結果(A-1))



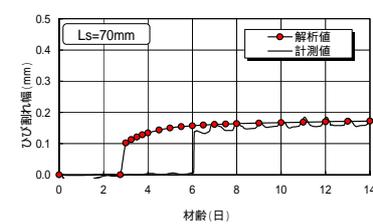
(b) A-2



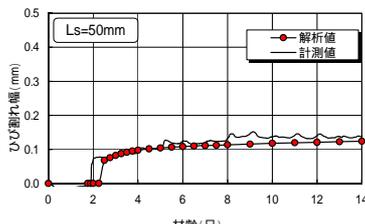
(b) B-3



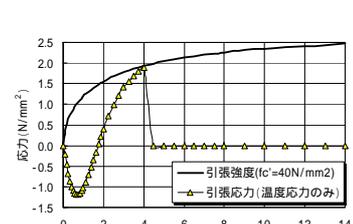
(b) CASE-2 (CASE-1 で収縮ひずみを考慮しないで解析)



(c) A-3



(c) B-4



(c) CASE-3 (CASE-2 で呼び強度を40に変更して解析)

図-11 ひび割れ幅の比較 (半壁式)

図-12 ひび割れ幅の比較 (全壁式)

図-13 発生引張応力度の比較 (A-1断面)

(2) 初期材齢時のひび割れ幅

計測値との比較結果を図-11(半壁式)および図-12(全壁式)に示す。これより、初期材齢時のひび割れ幅はほぼ正確に予測可能であることがわかる。ただ、ひび割れ発生時の材齢については全壁式については計測結果と同様2日程度であるのに対して、半壁式では計測結果6日で解析結果は3日と差が生じた。これについては半壁式の解析結果に対して、収縮ひずみを考慮しない場合(CASE-2)とさらに呼び強度を 40N/mm^2 と変更した場合(CASE-3)について再解析を行い、A-1断面の発生引張応力度をまとめた(図-13)。これより、半壁式については乾燥収縮の進行が遅く、かつコンクリートの発現強度も呼び強度 30N/mm^2 に対して高めに出ていた可能性があるために解析値は計測値と一致しなかったと考えられる。

表-7 鉄筋比と付着喪失等価領域の関係

鉄筋比 ρ (%)	付着喪失等価領域 L_s (mm)
0.22	200
0.34	130
0.59	75
0.62	70
0.88	50

表-7に地覆部の鉄筋比に応じて付着喪失等価領域の設定を変えたときの結果を示す。これより地覆部の鉄筋比に応じて反比例的に付着喪失等価領域を設定して解析を行うことにより、地覆部上端の初期材齢時のひび割れ幅が予測可能であることがわかる。

5. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 地覆部の補強鉄筋量が多いほど発生するひび割れ幅は小さく抑えられ、安定した段階のひび割れ幅が許容ひび割れ幅 0.2mm に収まっているのは地覆部の鉄筋比が半壁式で 0.62% (A-3)以上、全壁式で 0.88% (B-4)以上の場合であった。
- (2) 壁高欄目地部に地覆部の鉄筋比に応じて反比例的に付着喪失等価領域を設定することで地覆部上端の初期材齢時の

ひび割れ幅を解析で予測可能である。

- (3) ひび割れ発生時の材齢については、半壁式の場合、乾燥収縮の進行が遅く、かつコンクリートの発現強度も呼び強度 30N/mm^2 に対して高めに出ていた可能性があるために解析値は計測値と一致しなかったと考えられる。

なお、本報告では初期材齢時のひび割れ幅に着目して計測値と解析値の比較を行ったが、長期的なひび割れ幅の解析には乾燥収縮の他にクリープの影響を考慮する必要がある。また、今回鉄筋比と付着喪失等価領域の関係を計測結果に基づき解析的検討を行ったが、要素実験により検証を行う必要がある。これらは今後の課題とする。

謝辞

本研究における実橋計測実験は、日本道路公団・舞鶴工事事務所殿(当時)の御協力を得て実施されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) マスコンクリートの温度応力研究委員会：温度応力ひび割れ幅算定方法についての提案，日本コンクリート工学協会，1992.9
- 2) 日本道路公団：コンクリート施工管理要領，pp.17-32，1999.7
- 3) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」，2002
- 4) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書「構造性能照査編」，pp.30-34，2002