

格子等価連続体モデル (LECOM) を使用した壁高欄の初期ひび割れ解析

日本高圧コンクリート(株) 正会員 ○齊藤 亮一
日本高圧コンクリート(株) 工修 荒畑 智志
名城大学理工学部建設システム工学科 正会員 工博 石川 靖晃

1. はじめに

昨今、コンクリート構造物のひび割れへの意識は、耐久性の確保の観点より高まっており、公共構造物などでは、施工完了後の完成検査に備えひび割れ調書の提出が義務づけられている。ひび割れは、コンクリートの材料、配合、施工、環境(使用、気象、周辺)、構造、外力またはその組合せなどさまざまな要因により生じるものとされている。

本報告では、実構造物の壁高欄コンクリートに生じたひび割れを解析的に解明するものである。解析モデルは張出し床版と壁高欄の境界面の微視的剥離を考慮し、ひび割れ誘発目地の形状やコンクリート内の鉄筋の影響および拘束体としての主桁のたわみなどを実構造物に合わせた。また解析手法は、簡便で収斂性の良い構成則である格子等価連続体モデル(Lattice Equivalent Continuum Model, LECOM)を導入した。さらに、通年における外気の温度と湿度の変化も考慮するうえで、乾燥収縮に関しては従来の土木学会式¹⁾によらず、コンクリート表面が外気に触れ乾燥し、コンクリート内部から表面へ湿気移動による相対湿度分布の変化から求める乾燥収縮の概念を採用した。

2. 本解析の特徴

2.1 格子等価連続体化法の概要

格子等価連続体化法のコンセプトは、RC要素が有する異方性とその耐荷機構を、コンクリート(ひび割れが進行する軸)、および補強材の格子成分を想定することにより表現しようとするものである。

格子等価連続体化法の特徴は、格子成分応力と全体応力場の関連にkinematics型のmicro-planeを用いることにより、RC要素の耐荷機構を形成するコンクリート、および鉄筋の局所座標方向を、破壊の進行に応じて自由に与えることが可能な点である²⁾³⁾。

コンクリート内の鉄筋の具体的評価は、鉄筋コンクリートの応力と応力依存性ひずみを関連付ける方法として、直交異方性モデル⁴⁾を用い、鉄筋コンクリートはひび割れが生じるまでは弾性連続体、ひび割れ発生後はコンクリートの応力依存性主ひずみ方向に配置された格子および鉄筋を表す格子にてモデル化をしている。そのため、新たに節点を設けることなく鉄筋比のみで鉄筋の影響を考慮でき、簡便である。

2.2 打継目である境界面へのJoint要素の適用

張出し床版と壁高欄の打継目のモデル化は、既往の一体化に構築されたモデルから境界面が微視的に剥離する考えを導入し、張出し床版と壁高欄の境界面である水平面と張出し先端部の鉛直面の2面に適用した。コンクリートに内部応力が発生することにより、境界面を剥離させ得るほどの応力が境界面に作用した場合、張出し床版に生じる変位と壁高欄側に生じる変位は決して同じではなく、ある程度の変位差が生じる。したがって、境界面は変位の適合性を持たず、要素厚が限りなく0に近いJoint要素として捉えることが適当であると考えられる⁵⁾⁶⁾。

2.3 湿気移動解析の概要

飽和状態であるコンクリートの乾燥のメカニズムは、表面付近の大きな空隙中の水が蒸発することで表面付近の空隙中の蒸気圧が低下し、内部から表面への湿気移動が連鎖的に発生して乾燥が進行する。

本解析における湿気移動則は、コンクリート中の蒸気圧勾配により生じると定義しており、温度上昇に

よる湿気移動の促進現象を表現している⁷⁾。

3. ひび割れ解析の検証

3.1 コンクリート実構造物でのひび割れの性状

実構造物の諸元は、PRC4径間連続箱桁橋 (A1, P1, P2, P3, A2) , 橋長L=297.5m, 有効幅員W=16.5m, 平面線形R=5000mなどであり, 壁高欄コンクリートは中間支点上に膨張目地, 約4m間隔に誘発目地を設けた。また, 壁高欄コンクリートの形状を図-1に示す。

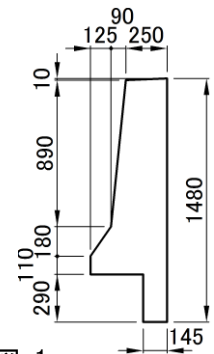


図-1 壁高欄形状図

コンクリートは, 主桁が40-12-25H, 壁高欄が30-8-25Nであり, 壁高欄の配合はW/C(50.0%), S/A(40.2%), W(152kg/m³), C(304kg/m³), 細骨材(739 kg/m³), 粗骨材(1117 kg/m³), 混和剤(AE減水剤608 g/m³)であった。また, 壁高欄には鉛直方向にD13鉄筋が125mm間隔で, 水平方向にD13鉄筋が100mmと200mm間隔に配置されている。ひび割れ調査は, 壁高欄コンクリート打込み後54日目に実施した。図-2には, P3-A2側径間の壁高欄R側の表面に生じたひび割れ展開図を示す。

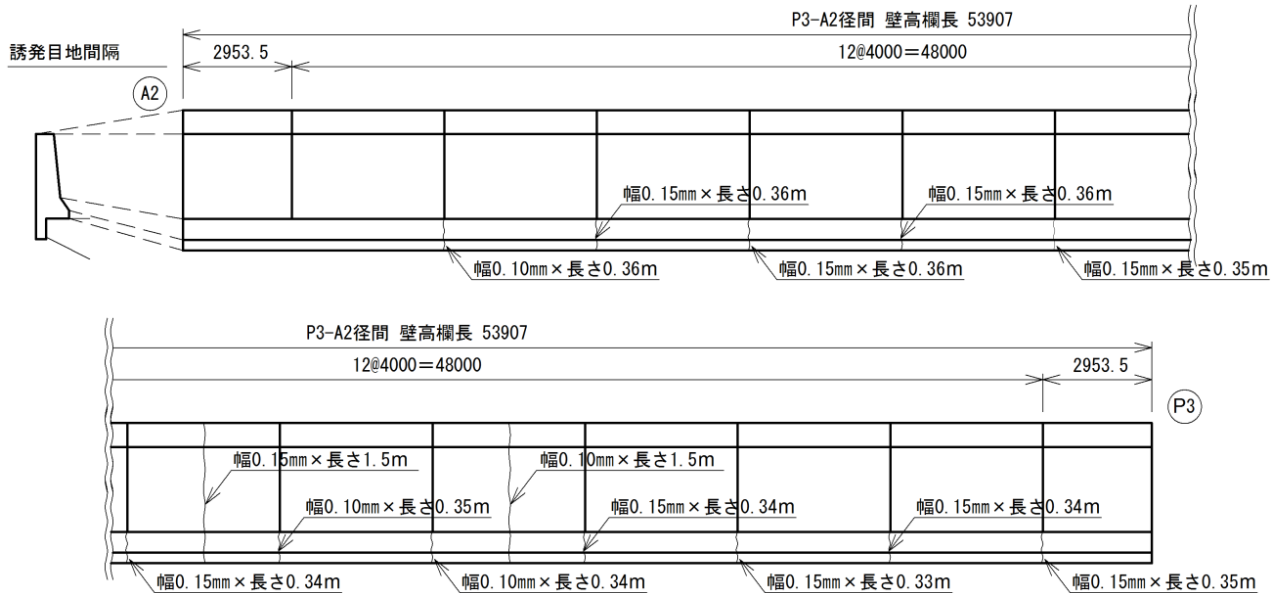


図-2 ひび割れ発生状況 (P3-A2 径間 右側壁高欄 内側)

ひび割れは0.10~0.15mmの幅であり, 誘発目地直下の位置では12/13箇所, 誘発目地間には2箇所中央付近に生じており貫通していた。

3.2 ひび割れ解析

(1) 実構造物のモデル化

壁高欄のモデル化は, 以下の設定とした。

①長辺方向はひび割れ展開図に示すP3からA2の54mとした, ②壁高欄が取り付くPRC4径間連続箱桁橋の主桁のモデル化は, 簡素化とするため矩形断面とし, 主桁の1/2モデルと同等の等価曲げ剛性 ($I=9.269m^4$)とした, ③支持条件は, P3方が矩形断面のみ固定(X, Y, Z)とし, A2方が矩形断面下方をピンローラーとし実橋に合わせた, ④壁高欄の要素の規模は, 湿気移動解析が妥当となるよう表面より5mm, 10mm, 35mmとし, これらには鉄筋の影響を考慮せず, 内部については鉄筋の影響を考慮した, ⑤Joint要素は矩形断面と壁高欄の接触面に厚さ10mmとした, ⑥誘発目地部は厚さ10mmで表

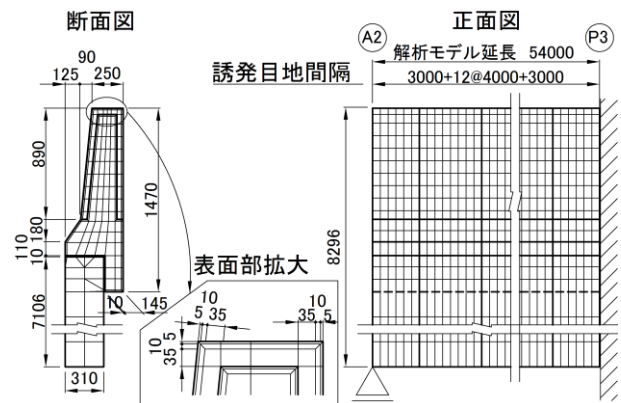


図-3 解析モデル図

面から50mm切欠いた形状とし、壁高欄部の鉄筋比を $\sqrt{2}$ で除したもので考慮した。

(2) 解析条件

本解析における諸元を表-1に示す。

表-1 解析諸元値

		壁高欄 Con 30-8-25N	主桁 Con 40-12-25H	初期相対湿度	100 %			
熱伝導率	W/m°C	2.7	2.7	熱伝達率	型枠存在時 8 W/m ² C			
	J/kg°C	1150	1150		養生マット存在時 5 W/m ² C			
コンクリート密度	kg/m ²	2350	2350		コンクリート露出面 14 W/m ² C			
打込み温度	°C	20	20	脱型時期	打設日より6日後			
終局断熱温度上昇式 Q(t) (t:材齢)	°C	0(考慮しない)	0(考慮しない)	鉄筋比	かぶり部	X方向 0		
鉄筋	ヤング係数	N/mm ²	200000		ジョイント部	Y方向 0		
	降伏強度	N/mm ²	345		主桁部	Z方向 0		
	線膨張係数	---	1×10 ⁻⁵		壁高欄部	X方向 0.00001		
コンクリート	圧縮強度 f' _{ct} (t)	N/mm ²	$\frac{33.3 \times t}{(4.5+0.95t)}$		40	Y方向 0.00564		
	引張強度	N/mm ²	0.44√f' _{ct} (t)		9999.9 (考慮しない)	Z方向 0.00338		
	ヤング係数	N/mm ²	4700√f' _{ct} (t)	31000	誘発目地部 (壁高欄部÷ √2)	X方向 0.00001		
	破壊エネルギー	N/m	91	100		Y方向 0.00403		
	ポアソン比	---	0.2	0.2		Z方向 0.00241		
	線膨張係数	---	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	支持条件	X方向	モデル全長を通して、 主桁前面部分	
	強度特性による 遅れ時間	d	0.3	0(考慮しない)		Y方向	P3側の主桁全面を固定	
	乾燥ひずみと相 対湿度の勾配	---	0.0017	0(考慮しない)	Z方向	P3とA2部の 主桁最下面を固定		
	単位	Joint 要素 (境界面が水平)	Joint 要素 (境界面が鉛直)	外気温・湿度	対象橋梁から最寄りの静岡の気象データを使用			
		水平すべり剛性	N/mm ³		10	0(考慮しない)	0d~30d	該当する時間の気象データを使用
鉛直すべり剛性	N/mm ³	2400	0(考慮しない)	~54d	当日の平均気温および平均湿度を使用			
すべり降伏値	N/mm ²	0.8	0.8	解析ステップ	範囲	間隔	範囲	間隔
Joint 引張強度	N/mm ²	1.2	1.2		0~0.02 d	0.001 d	~10 d	0.5 d
Joint 破壊エネルギー	N/m	0.0001	0.0001		~0.05 d	0.002 d	~20 d	1 d
					~0.1 d	0.005 d	~40 d	2 d
					~2 d	0.1 d	~54 d	5 d
				~4 d	0.2 d			

(3) 解析ケース

解析ケースは、逐次変化する外気温の影響を考慮した温度解析とそれに加えて湿気移動による乾燥収縮の影響を考慮した解析の2種類に、壁高欄と張出し床版の打継目のモデル化を既往の一体化に構築されたモデルとJoint要素として考慮したモデルの2種類を考慮した合計4ケースとした。

3.3 解析結果

図-4に材齢54日における誘発目地部直下の主ひずみを示す。

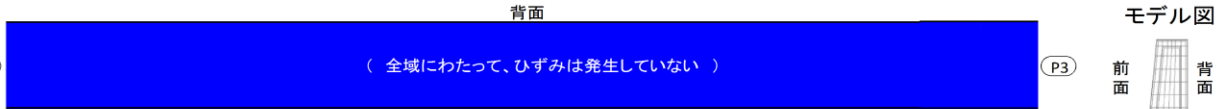
(1) 外気温の影響を考慮した温度解析と、さらに湿気移動による乾燥収縮の影響を考慮した解析の比較

外気温の影響のみを考慮した解析では主ひずみは発生していない。これは、壁高欄の部材厚が500mmを下回るのでマスコンクリートの対象とせず、解析値諸元で終局断熱温度上昇を考慮していないことによる。したがって、主ひずみは湿気移動に伴う乾燥収縮の影響のみで発生していることがわかる。

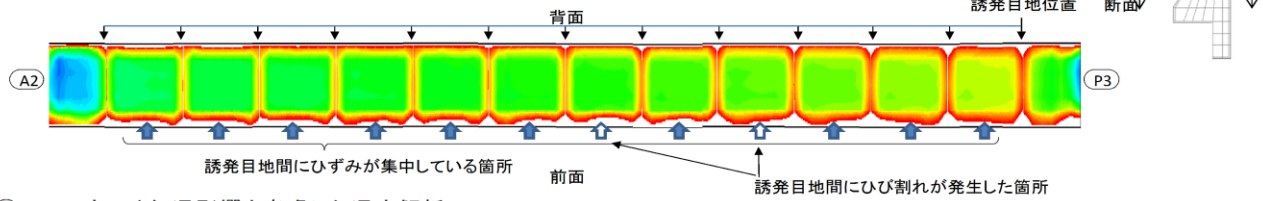
(2) 既往の一体化に構築されたモデルとJoint要素として考慮したモデルの比較

内部応力による変形は、壁高欄中央部に向かって収縮を示すが、P3方・A2方ともに壁高欄端部の発生したひずみには違いが見られる。Joint要素を用いた方が、境界面で剥離が発生しているためひずみが少ない結果となった。また、誘発目地間にひずみが集中して発生している箇所に関して、既往の一体化に構築されたJoint要素がないモデルでは、壁高欄全域で見られるのに対して、Joint要素があるものは中央付近のみであり、実構造物に発生したひび割れ性状により近い結果となった。

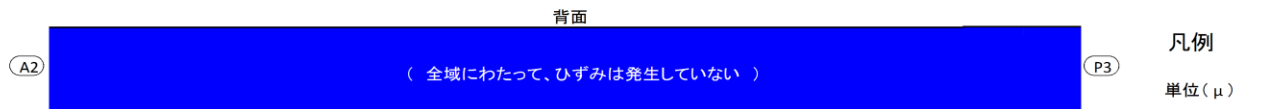
① Joint無 外気温影響を考慮した温度解析のみ



② Joint無 外気温影響を考慮した温度解析+湿気移動解析



③ Joint有 外気温影響を考慮した温度解析のみ



④ Joint有 外気温影響を考慮した温度解析+湿気移動解析

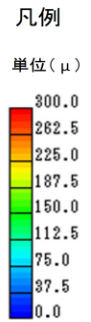
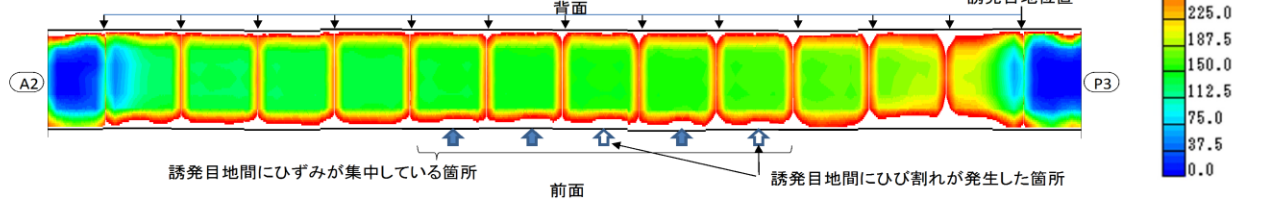


図-4 各解析ケースの主ひずみ

4. まとめ

本報告では、実構造物の壁高欄コンクリートに生じたひび割れに対して、格子等価連続体モデルを導入し、打継目である境界面にJoint要素によるモデル化を用い、従来の土木学会式によらず湿気移動による相対湿度分布の変化より求めた乾燥収縮の概念を用い、解析的に解明をした。

また、本報告で提示した数値解析手法に設けた多くの仮定は、さらに精査される必要がある。今後、実構造物に生じたひび割れと解析を対比する事例を増やし、引き続き検討を行いたいと考えている。

謝辞

本報告は、田辺忠顕名古屋大学名誉教授が主催するレコム研究会にて研究されているものであり、田辺教授をはじめとする関係各位には多大なるご指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書「設計編」2007年度制定版，2008. 3.
- 2) 野田智也，伊藤睦，石川靖晃，田辺忠顕：格子等価連続体モデル(LECOM)による初期応力を考慮したRC構造の解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26, No. 2, 1129-1134, 2004
- 3) 石川靖晃，大橋裕成，田辺忠顕：分散ひび割れモデルによるひび割れ幅評価法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 1555-1560, 2009
- 4) 田辺忠顕著：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析とプログラム，技報堂出版，2004. 3
- 5) 石川靖晃，田辺忠顕：時間依存性を考慮する境界面モデルの開発およびその層打ちコンクリート構造物温度応力解析への適用，土木学会論文集 No. 585/V-38, 175-187, 1998. 2
- 6) Goodman, R. E., Taylor, R. L. and Brekke, L. T.: A Model for the Mechanics of Jointed Rock, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proc of ASCE, SM3, pp. 637-659, May, 1968
- 7) 籠橋忍，泰泳，小澤満津雄，森本博昭：温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 2, 685-690, 2001