

論文 縮小 RC における温度ひび割れ特性への鉄筋量の影響に関する研究

仙場 亮太^{*1}・兄父 貴浩^{*2}・満木 泰郎^{*3}・溝淵 利明^{*4}

要旨: 本研究では、実際の壁状構造物を 1/12 スケールに縮小した模型供試体を用いて、実構造物と同様の温度履歴を与え、温度応力によるひび割れを生じさせることで、ひび割れの発生時期、発生箇所、ひび割れ幅の進展などについて把握することを目的とした実験を行った。また、実験では 3 次元有限要素法(FEM)によるひび割れ幅解析を行い、試験値の比較検討を行った。その結果、縮小 RC においても鉄筋によるひび割れ幅抑制の傾向が再現されることを確認した。一方で、試験結果と解析結果との間には差異が生じる結果となった。

キーワード: 温度ひび割れ, 縮尺鉄筋, ひび割れ幅解析, 壁状構造物, 模型実験

1. はじめに

RC 構造物における温度ひび割れは、耐久性上大きな問題となるため、従来では、3 次元有限要素法(FEM)による応力解析が広く行われてきた。

一方で、実際の RC 構造物において、温度ひび割れの発生挙動を実際に目にすることは稀である。そこで、本研究では小型化した模型試験体を用いた温度ひび割れシミュレーション実験を行い、ひび割れ発生箇所や時期、ひび割れ進展について検討を行った。

本実験は、実際の壁状構造物を 1/12 に縮小した模型供試体を作製し、実構造物と同様な温度履歴、拘束状態を再現することで温度ひび割れを生じさせるものである。ひび割れの発生時期、発生箇所、ひび割れ幅の経時変化などの温度ひび割れ性状について検討するとともに、鉄筋比の違いによるひび割れ幅、本数への影響について検討を行った。また、3 次元有限要素法(FEM)による温度ひび割れ解析を行い、実測値と解析値との比較を行った。

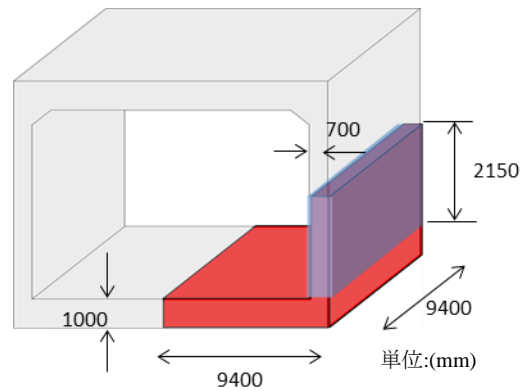


図-1 実構造物モデル概要

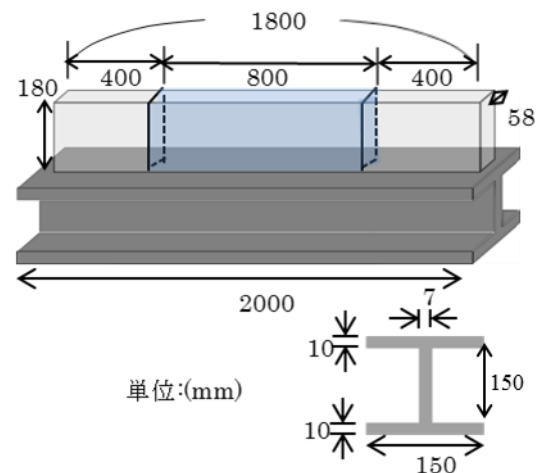


図-2 小型模型供試体概要

2. 研究概要

2.1 縮小 RC を用いた模型実験

本実験で用いた供試体は、国土交通省の設計指針¹⁾を参考にしたボックスカルバート構造物の下端部 1/4 とした。本実験で対象とした実構造物の概要を図-1 に示す。また、小型模型供試体は、実構造物の側壁(図-1 中の青色の箇所)、及び対象ブロックの前後 2 ブロック分を対象として、1/12 スケールに縮小した全長 1800mm とした。小型模型供試体の概要を図-2 に示す。拘束体はひび割れを確実に発生させるために、剛性の高い JIS 規格に準拠した寸法の H 鋼を用いることとした。また、H 鋼と側壁との付着を確保するために $\phi 6\text{mm}$

*1,*2 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 (学生会員)

*3 法政大学 名誉教授 (正会員)

*4 法政大学 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 博士(工学) (正会員)

全ねじをジベルとして用いた。全ねじの設置状況を写真-1に示す。側壁打設後、幅30mmのリボンヒーターを型枠の上から側壁上部2/3に設置し、事前解析により得られた実構造物の温度履歴を参考に、側壁中心部の温度を制御した。リボンヒーターの温度履歴を図-3に示す。その後、リボンヒーター及び型枠を取り外し、側壁の温度を低下させた。発生するひずみ、およびひび割れは、材齢24時間で側壁上面にパイ型変位計を設置し、側壁上面で測定した。パイ型変位系及びリボンヒーターの設置状況を写真-2に示す。また、マイクロカメラを用いて、打設面から高さ方向に50mm、90mm、170mmにおいてひび割れの撮影を行い、2次元画像計測ソフトウェアを用いて、測定高さでのひび割れ幅を算出した。

2.2 検討ケース

本実験における検討ケースは、使用セメントに高炉セメントB種を用い、配合は同一として、配力筋の鉄筋比を変化させた4ケースとした。各検討ケースで用いる模型供試体の透視図を図-4に、断面方向の配筋を図-5に示す。

2.3 使用材料

側壁モルタルの示方配合を表-1に示す。側壁モルタルの寸法は実構造物を1/12縮小したものであるため、より忠実な縮小寸法の模型供試体作製のため、細骨材として珪砂(シリカサンド)を使用した縮小細骨材を用いた。珪砂の配合割合は、目標フロー値240mm、目標圧縮強度 30N/mm^2 を満たす最適な粒度を、既往の成果を基に選定した。各号数の粒度範囲及び配合割合を表-2に示す。また、ケース2~4では、側壁の配力筋として $\phi 1\text{mm}$ の縮尺鉄筋を使用した。

2.4 温度ひび割れ幅解析

本研究では、模型実験により得られた結果との比較として、日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト作成委員会により開発された、3次元温度応力解析プログラム『JCMAC3』を用いてひび割れ幅解析を行った。測定スケジュールを表-3に、解析に用いた諸物性値を表-4に、境界面の熱条件を表-5に、小型模型供試体の解析用メッシュレイアウトを図-6に示す。また、解析評価位置は側壁高さ方向の中心、打設面から90mmとした。



写真-1 全ねじ設置状況

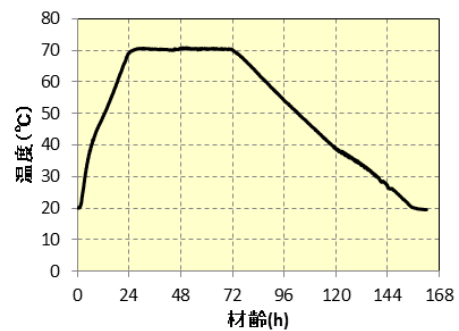


図-3 リボンヒーター温度履歴



写真-2 パイ型変位計及びリボンヒーター設置状況

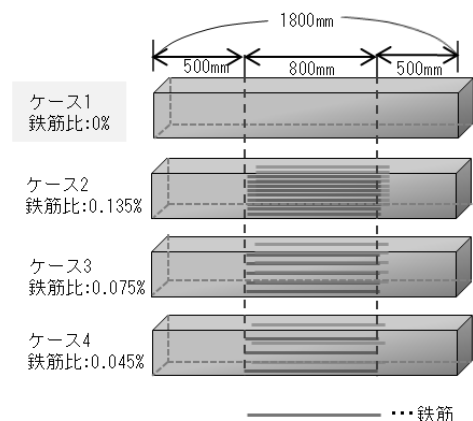


図-4 各検討ケースにおける模型供試体透視図

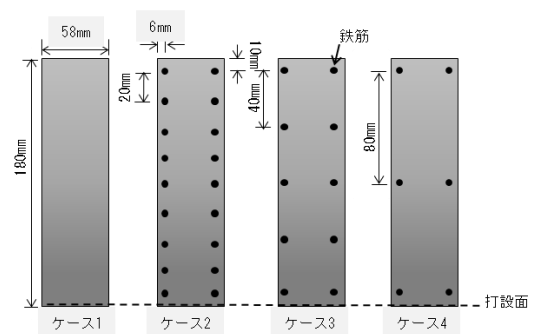


図-5 各検討ケースにおける断面配筋図

表-1 側壁モルタルの示方配合

水セメント比 (%)	砂セメント比 (%)	単体量(kg/m ³)		
		水	セメント	細骨材
W/C	S/C	W	C	S
50	2	298	596	1192

表-2 細骨材粒度分布及び配合割合

	3号硅砂	4号硅砂	5号硅砂	6号硅砂	7号硅砂	8号硅砂	9号硅砂
粒度分布 (mm)	2.4~1.2	1.2~0.6	0.8~0.3	0.4~0.2	0.3~0.08	0.2~0.05	0.01~0.04
配合割合 (%)	25	20	14	11	12	11	7

表-3 測定スケジュール

ステージ	日時	打設温度	外気温	備考
1	2013/11/9	20	20	側壁打設
2	2013/11/14		側壁の雰囲気温度のみ材齢5日まで	型枠脱型
END	2013/11/23		実験条件(図-0参照)と同様	測定終了

表-4 解析諸物性値

	側壁モルタル	H鋼
熱伝導率(W/m ² °C)	2.7	20.9
密度(kg/m ³)	2400	7.8
比熱(kJ/kg°C)	1.15	0.5
断熱温度上昇特性	Q(t)=87.5 [1-exp{-0.81(t-0.08) ^{1.0} }]	
ヤング係数(N/mm ²)	6300×f _c (t _e) ^{0.45}	19.6×10 ⁴
圧縮強度(N/mm ²)	t _e /(1.39+0.801t _e)×16.7	
引張強度(N/mm ²)	0.00520×f _c (t _e) ^{2.26}	
ポアソン比	0.2	
線膨張係数(μ/°C)	12	10.5

表-5 境界面の熱条件

境界名	熱伝達率(W/m ² °C)
H鋼	14
側壁上部	
側壁側面	材齢5日まで8, 以降14

3 試験結果および考察

3.1 ひび割れ本数測定

ひび割れ発生状況の概要を図-7に、ケース4におけるひび割れ状況の写真を写真-3に示す。図-7に示すように、ケース1(無鉄筋)では1本、ケース2(鉄筋比0.135)では2本、ケース3(鉄筋比0.75)では3本、ケース4(鉄筋比0.45)では4本(うち1本は配力筋区間外のため除外)のひび割れが確認され、従来から言われているように、ひび割れは配力筋を有するケースにおいてひび割れは分散する傾向となった。一方で、既往の研究²⁾では鉄筋比に伴いひび割れ本数は増加するといった報告があるが、今回の実験結果では異なる傾向となった。

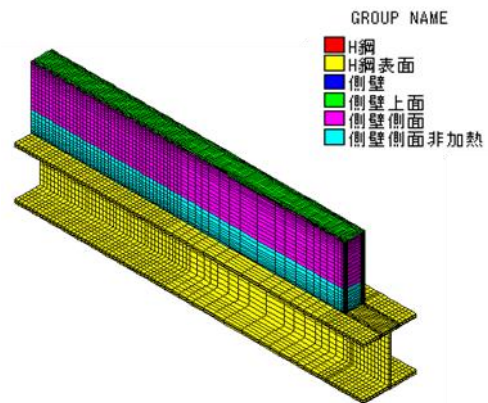


図-6 解析用メッシュレイアウト(模型供試体1/2)

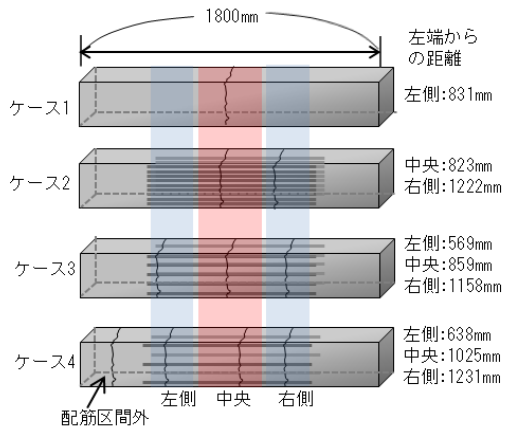


図-7 ひび割れ発生状況概要

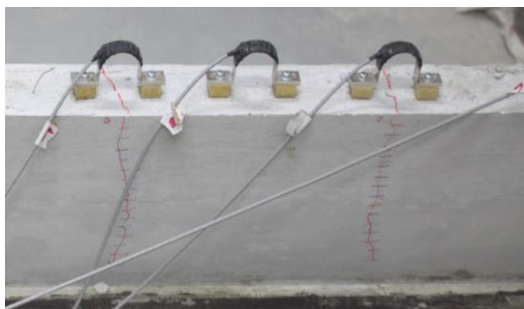


写真-3 ひび割れ発生状況写真

3.2 ひずみ・ひび割れ幅測定

本報告では、図-7のように各検討ケースにおいて発生したひび割れを側壁中央、右側、左側と分類し、各ケースにおける各ひび割れ、また、そこに跨る変位計での測定値を区別する。なお、ひび割れ発生後のひび割れ伸展性把握を目的としてひび割れ発生後に変位計を設置したケース2右側と、試験区間外である配筋区間外に発生したケース4左側のひび割れについては、本報告では割愛する。パイ型変位計を用いた、各検討ケースにおけるひび割れ発生箇所でのひずみおよび、側壁中心の温度降下量との関係を図-8、図-9、図-10に示す。なお、本報告での図中のひずみ量は、正の方向を収縮としている。各ケースにおいて、ひずみ測定開始時点では側壁中心温度はほぼ最高温度に達しており、温度降下に伴ってひずみは収縮側へと移行している。各ケースとも、温度降下量が20℃前後でひずみが急変しており、この時点においてひび割れが発生したと考えられる。また、その後のひずみ変化量を変位量で表したものが、実際に供試体に発生したひび割れ幅と考えられる。ケース4の右側のひび割れに関しては、他のひび割れ箇所と比較してひずみが小さいことに加え、温度一定となった後にひずみが伸びていることから、乾燥収縮の可能性があると考えられる。次に、各

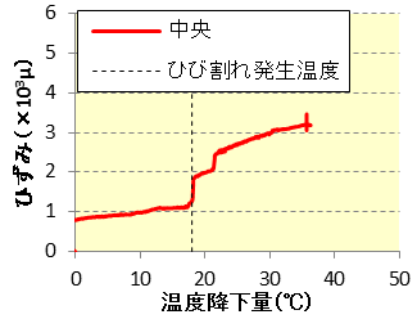


図-8 温度降下量とひずみ進展性 (ケース 2)

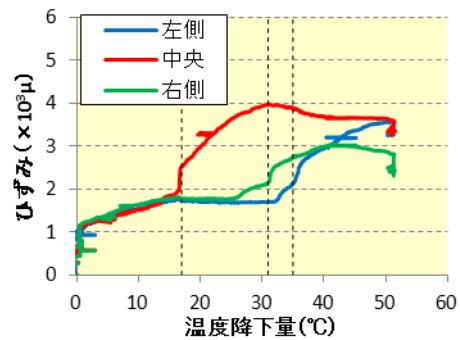


図-9 設定温度とひずみ進展性 (ケース 3)

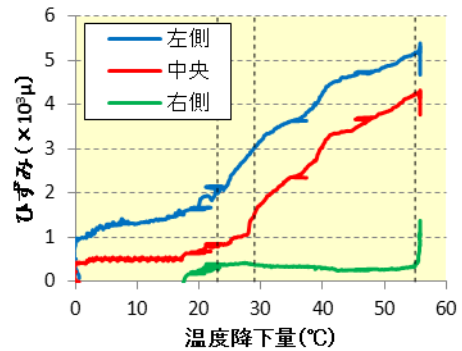


図-10 設定温度とひずみ進展性 (ケース 4)

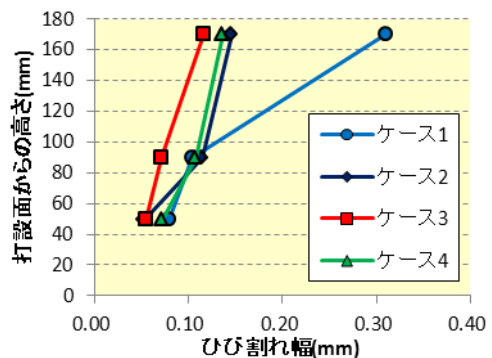


図-11 各ケースにおける材齢13日でのひび割れ幅

検討ケースにおけるマイクロカメラの画像解析により得られた材齢 13 日でのひび割れ幅の平均を図-11 に、各ケースにおける材齢に伴うひび割れ進展性を図-12 に示す。図-12 では、前述のパイ型変位計測定において、ひずみが急変した時点をはひび割れ発生材齢とし、該当材齢をひび割れ幅 0mm として扱った。図-11 より、各ケースにおいて、ひび割れ幅は側壁上部において大きく、下部に行くほど小さい V 字型の形状となり、特に無筋の場合、既往の研究³⁾で言われているように、上部と下部の差が大きい傾向が見られた。また、全体としてひび割れ幅は無筋の場合と比べ、配筋したケースはひび割れ幅が抑制される結果となった。一方で、既往の研究⁴⁾のように鉄筋比の増加に伴ってひび割れ幅が減少するという明確な結果は得られなかった。また、図-12 から、各ケースにおいて材齢に伴いひび割れ幅が進展する傾向が見られたものの、鉄筋比による差は明確にはならなかった。これは、模型供試体と底版との付着が十分でないことに加えて、H 鋼自体も温度変化による変形を受けるため、側壁全体の上部に曲げ応力が生じたためではないかと考えられる。各検討ケースにおける、実験値でのひび割れ特性を表-6 に示す。

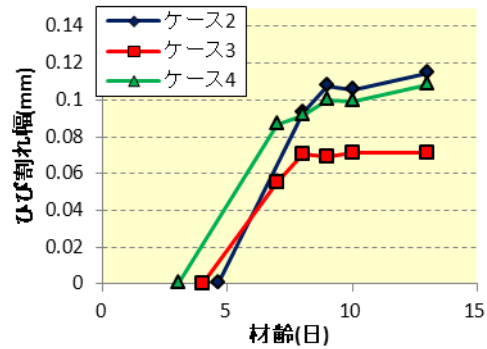


図-12 材齢に伴うひび割れ幅の進展(実験値)

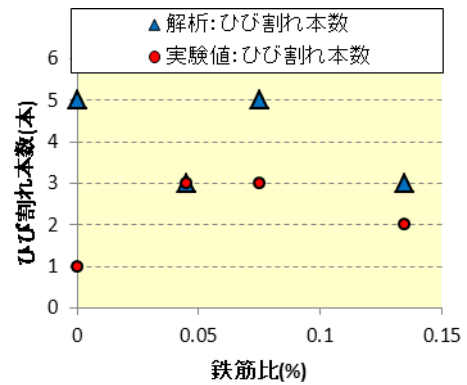


図-13 実験値と解析値の発生ひび割れ本数比較

3.3 ひび割れ幅解析

各検討ケースにおいて、室内試験で得られた実験値、およびひび割れ幅解析により得られた解析結果のうち、鉄筋比とひび割れ本数との関係を図-13 に示すとともに、ひび割れ幅との関係を図-14 に示す。図-13 より、実験値では鉄筋が埋設されているケースにおいてひび割れ本数が増加する傾向にあった一方で、解析結果ではばらつきのない結果となった。これは、ひび割れ解析の精度上、微細なひび割れの発生までも含んで

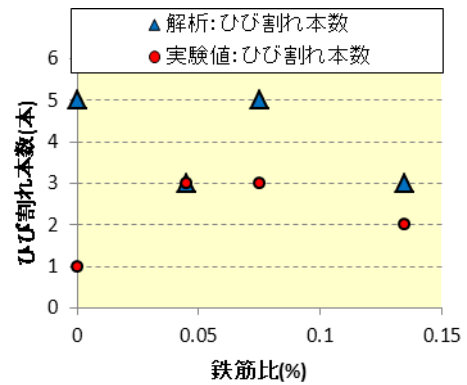


図-13 実験値と解析値の発生ひび割れ本数比較

表-6 実験値での各検討ケースにおけるひび割れ特性

ケース No.		1	2	3	4	
鉄筋比	(%)	0	0.135	0.075	0.045	
ひび割れ発生材齢	(日)		4.6	4.5	3.8	
中心最高温度(測定開始温度)	(°C)		58.2	73.3	77.6	
ひび割れ発生時温度降下量	(°C)	1 本目		18	17	23
		2 本目			32	29
		3 本目			35	55
ひび割れ本数	(本)	1	2	3	3	
幅平均	変位計	(mm)		0.125	0.083	0.133
	画像解析	(mm)	0.31	0.132	0.109	0.133

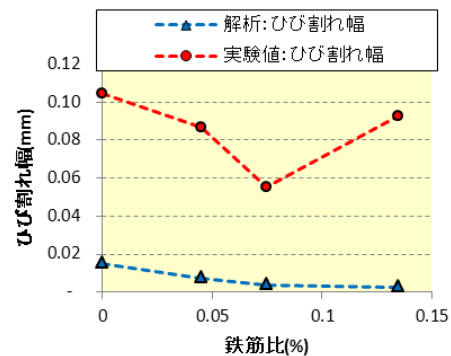


図-14 実験値と解析値の発生ひび割れ幅比較

しまうため、具体的なひび割れ本数の判定が難しいためと思われる。ただし、図-14 に示すように、ひび割れ幅の比較検討では、実験値が鉄筋比ごとのひび割れ幅が大きくばらついていたのに対して、解析値では鉄筋比の増加に伴って減少する傾向にあった。しかしながら、解析値は実験値の 1/10 程度の大きさであり、両者に大きな差異が見られた。これは解析において、鉄筋との付着が完全付着となっており、ひび割れに伴う剛性低下が考慮されていないことが影響しているものと思われる。

また、模型供試体の材齢に伴うひび割れ進展について、解析値より得られた結果を図-15 に示す。図-14 より、実験値においての各ケースでの材齢に伴うひび割れ進展は、検討ケースによるばらつきが大きく、ひび割れ伸展性に与える鉄筋比の影響を明確にすることは難しかった一方で、解析上においては、ひび割れ幅の進展は鉄筋比の増加に伴って抑制される結果となった。各検討ケースにおける解析値でのひび割れ特性を表-7 に示す。

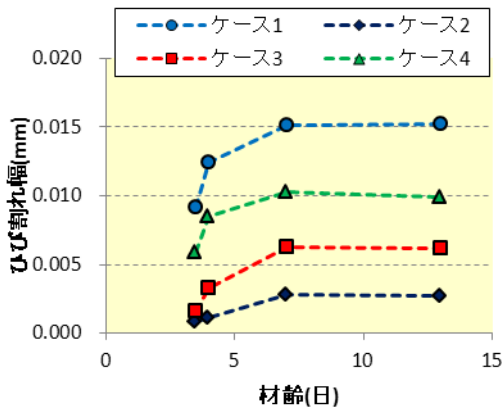


図-15 材齢に伴うひび割れ幅の進展(解析値)

表-7 解析値での各検討ケースにおけるひび割れ特性

ケース No.		1	2	3	4
鉄筋比	(%)	0	0.135	0.075	0.045
ひび割れ発生材齢	(日)	3.5			
ひび割れ本数	(本)	5	3	5	3
最大ひび割れ幅	(mm)	0.0152	0.0027	0.0061	0.0099

4.まとめ

本研究では、模型供試体を用いた場合の温度ひび割れ特性に関わる基礎データの蓄積を目的とし、鉄筋比の違いによるひび割れ幅、本数への影響について検討するとともに、3次元有限要素法によるひび割れ幅解析を行った。以下に、本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) 模型供試体で実構造物と同様の温度履歴を与えた場合、実構造物と同様にひび割れが発生した。また同時に、試験中変位計を設置しておくことにより、温度履歴を受けた模型供試体のひずみ挙動を把握することが出来た。これより、理想的な測定条件下であれば、模型供試体を用いた室内試験を実施することで、実構造物でのひび割れ発生挙動把握できる可能性を見出した。
- (2) ひび割れ本数測定、およびひび割れ幅測定では、配力筋の存在によるひび割れ本数の抑制効果は見られたものの、鉄筋比の影響については明らかにすることが出来なかった。
- (3) ひび割れ幅解析より、配力筋の影響によるひび割れ抑制効果について確認した。このため、理想環境下であれば、縮小RCを用いた模型実験でひび割れ特性に与える鉄筋比の影響を検討できる可能性を見出した。
- (4) 実験値と解析結果のひび割れ幅は、解析値のほうが 1/10 程度と小さい結果となった。これは、解析において、鉄筋の付着剛性の低下が考慮されていないためであると考えられ、今後解析条件を含め、更に検討を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省中部整備局 中部技術事務所 技術課：中部地区コンクリート2次製品 構造規格検討委員会 共同溝設計指針
- 2) 児島保明, 谷口博, 森本博昭, 小柳洽：温度ひび割れ幅におよぼす鉄筋およびひび割れ本数の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, 1997
- 3) 山崎敬敏：底面で連続拘束を受ける壁状マスコンクリート構造体の温度応力とひび割れに関する研究, コンクリート工学年次論文集, No.1078, 1989.11
- 4) 劉勇, 大野義照, 中川隆夫, 林田都芳：コンクリートの収縮ひび割れ幅に及ぼす鉄筋量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001
- 5) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートの温度応力委員会報告書 - 温度応力ひび割れ幅算定方法についての提案 -, 1992.9.