

# 若材齢時長さ変化を考慮したRC曲げ部材の ひび割れ・変形の一般化評価方法

谷村 充<sup>1</sup>・佐藤良一<sup>2</sup>・平松洋一<sup>3</sup>・兵頭彦次<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 太平洋セメント(株) 中央研究所 第1研究部 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

E-mail:makoto\_tanimura@taiheiyo-cement.co.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻

(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 (株)ピーエス三菱 大阪支店 PC事業部 (〒530-6027 大阪府大阪市北区天満橋1-8-30)

<sup>4</sup>正会員 太平洋セメント(株) 中央研究所 第1研究部 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

低熱ポルトランドセメント、膨張材、収縮低減剤を使用し、載荷以前に生じる自己収縮を低減した高強度コンクリート、膨張を付与した高強度コンクリートを用いてRCはりを作製し、その静的載荷試験を通じて若材齢時の長さ変化による曲げひび割れ・変形挙動への影響を把握するとともに、載荷以前の長さ変化を考慮したRC曲げ部材のひび割れ幅・変形の評価法について検討した。その結果、自己収縮の影響は、ひび割れ発生荷重、ひび割れ幅、たわみなど使用限界状態に現れることを確認した。さらに、鉄筋位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の変化量に着目し、載荷以前の長さ変化の影響を取り入れたRC曲げ部材のひび割れ幅・変形の評価法を提示し、その妥当性を検証した。

**Key Words :** *high strength concrete, autogenous shrinkage, RC beams, flexural crack width, curvature, design equation, low heat portland cement, expansive additive, shrinkage reducing agent*

## 1. はじめに

近年、高性能(AE)減水剤や微粉末混和材の開発と相まって、高強度コンクリート、高流動コンクリートなどのいわゆる高性能コンクリートが開発され、その各種構造物への応用研究が活発である。この種のコンクリートの利用により構造性能の向上とともに、耐久性能の向上が期待できる。コンクリートの高強度化は、硬化体組織の緻密化をもたらす、鋼材腐食性物質の侵入に対するコンクリート自体の抵抗性は飛躍的に高まる。しかし、構造物レベルでの耐久性を確保する上では、コンクリート自体の高耐久化とともに、厳格なひび割れ制御が必須である。

水結合材比が小さく、単位結合材量が多い高強度コンクリートは、乾燥収縮が主である普通コンクリートとは異なり、凝結直後から大きな自己収縮が発生し、施工段階においてひび割れが生じやすい欠点

がある。乾燥収縮は、低湿度下でより大きく生じ、それにより大きな幅のひび割れが生じたとしても鋼材腐食に及ぼす影響は小さい。このため、コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>1)</sup>では、鋼材腐食に関わる曲げひび割れ幅の増大に及ぼす乾燥収縮は、高湿度下で生じることを想定し、普通コンクリートの場合 $150 \times 10^{-6}$ を推奨していた。この値は、2002年版の〔構造性能照査編〕<sup>2)</sup>においても引き続いて用いられ、新たに高強度コンクリートを加えて $100 \times 10^{-6}$ を推奨するに至っている。

自己収縮は、よく知られているように、セメント系材料の水和反応に起因し、乾燥に曝されなくとも生じる。この自己収縮が鋼材に拘束された場合、コンクリートには引張応力が生じ、時にはひび割れ発生に至り問題となる。しかし、たとえひび割れ発生に至らない場合であっても、蓄積された応力はひび割れ抵抗性を低下させる。さらに、所定の引張鉄筋

応力度までの変化ひずみを増大させるために、コンクリートの損傷を増大させるなどの悪影響を及ぼし、ひいては耐久性の低下をもたらす。構造性能や耐久性性能の向上を期待したコンクリートに生じやすい自己収縮は、その問題の重要度において、普通コンクリートの乾燥収縮よりも持つ意味は大きく、その抑制は重要な課題である。

田澤・宮澤は、自己収縮の抑制方法を先駆けて研究し、汎用的な混和材料を用いる手法では、乾燥収縮低減対策として実績のある膨張材、収縮低減剤、セメントでは高ピーライト系のセメントが自己収縮の抑制に有効であることを明らかにした<sup>3)</sup>。最近では、これら材料を全て組み合わせたひび割れ抵抗性に優れる高性能コンクリートが開発され<sup>4), 5), 6), 7), 8)</sup>、大規模な空港エプロン舗装の改修工事にも実用されている<sup>9)</sup>。また、著者らは、部材レベルでの検討を行い、低熱ポルトランドセメント、膨張材、収縮低減剤の使用により自己収縮を低減し、その結果、RCはりのひび割れ・変形性能が大幅に向上することを報告した<sup>9), 10), 11)</sup>。

一方、高強度コンクリートを用いた構造物の性能を評価する上で自己収縮の考慮は不可欠であるにも関わらず、十分な検討が行われているとは言い難く、研究の蓄積が望まれる分野である。とりわけ自己収縮の影響が現れやすい使用性能に関する設計照査式を構築する必要性は高い。さらに、膨張を付与した高強度コンクリートも開発されるに至り、載荷以前に生じる収縮・膨張の長さ変化を一括して取り扱え

る照査式を確立することは、高性能化を図ったコンクリートの性能を正當に評価し、その優れた特性を活用する上でも不可欠である。

そこで、本研究は、普通、低熱ポルトランドセメント、膨張材、収縮低減剤を使用し、自己収縮の大きい高強度コンクリート、自己収縮を低減した高強度コンクリート、さらに膨張を付与した高強度コンクリートを用いてRCはりを作製し、その静的載荷試験を通じて若材齢時の長さ変化によるひび割れ・変形挙動への影響について検討する。さらに、その現象の把握に基づいて、載荷以前の長さ変化を考慮したRC曲げ部材のひび割れ幅・変形の評価法を提案することを目的とする。

なお、本報は、既往の報告<sup>9), 10), 11)</sup>を参照した上で、新しい知見・考察を加えて総括的に取りまとめたものである。

## 2. 載荷以前の長さ変化が構造挙動に及ぼす影響の基本的考え方

自己収縮がRC部材の構造挙動に与える影響は、その大きさが高々 $500 \times 10^{-6}$ 程度であることを考慮すれば、ひび割れ発生限界とひび割れ発生後の使用状態下における諸現象に現れると考えられる。ひび割れ発生限界に及ぼす影響は、ひび割れ発生荷重が小さくなることでよく知られている。ひび割れ発生後においては、鉄筋ひずみの変化量に着目すると理解

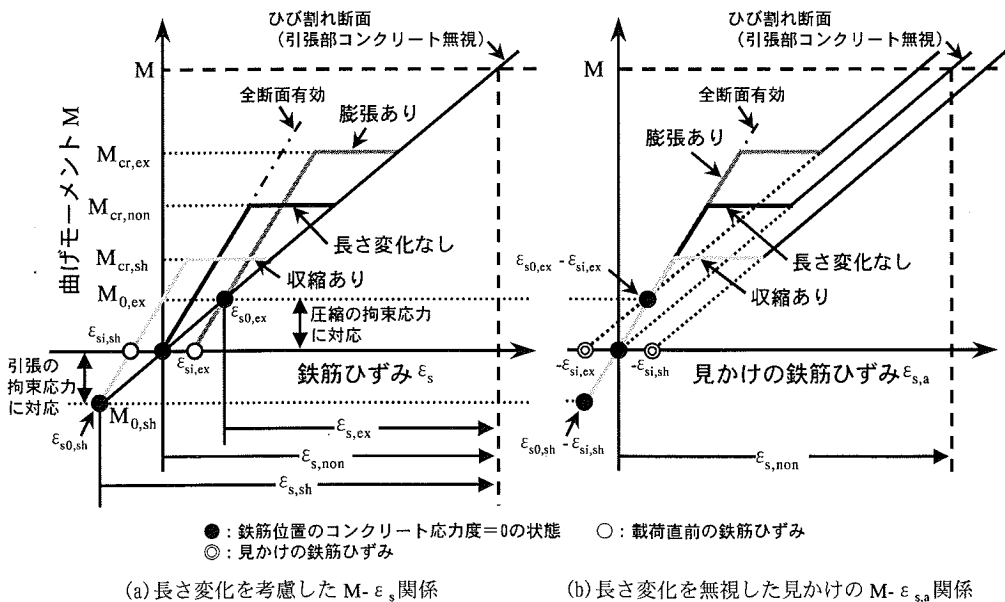


図-1 載荷以前の長さ変化が鉄筋ひずみの変化量に及ぼす影響の概念

表-1 使用材料

材料	記号	種類／物理的性質
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント／密度：3.16g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3500cm <sup>2</sup> /g
	LPC	低熱ポルトランドセメント／密度：3.22g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3280cm <sup>2</sup> /g
膨張材	EX	カルシウムサルホアルミネート系／密度：2.96g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3050cm <sup>2</sup> /g
収縮低減剤	SRA	アルキレンオキシド系／密度：1.01g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	小笠産陸砂／表乾密度：2.62g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：1.66%，実積率：67.0%，粗粒率：2.84
粗骨材	G	岩瀬産碎石／最大寸法：20 mm，表乾密度：2.64 g/cm <sup>3</sup> ，吸水率：0.85%，実積率：59.2%，粗粒率：6.61
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系／密度：1.05 g/cm <sup>3</sup>

しやすく、その基本的考え方を図-1に示す。(a)は荷重以前の長さ変化の影響を考慮した場合であり、(b)はこれを無視した見かけ上の鉄筋ひずみの変化量を示している。図中の $\varepsilon_{si,sh}$ 、 $\varepsilon_{si,ex}$ は、それぞれ収縮を生じる場合、膨張を生じる場合の荷重直前の鉄筋ひずみを、 $\varepsilon_{s0,sh}$ 、 $\varepsilon_{s0,ex}$ は、鉄筋と同位置のコンクリートの応力度がゼロの状態における鉄筋ひずみを表す。また、 $M_{cr,sh}$ 、 $M_{cr,ex}$ 、 $M_{cr,non}$ は、ひび割れ発生モーメントであり、それぞれ収縮を生じる場合、膨張を生じる場合、長さ変化を生じない場合を示す。 $M_{0,sh}$ 、 $M_{0,ex}$ は、鉄筋位置のコンクリート応力度が0の状態における曲げモーメントであり、それぞれ引張および圧縮の拘束応力に対応する。これより、図の(a)に示すように、鉄筋と同位置におけるコンクリートの応力度がゼロの状態から、所定の荷重を受けたときまでの鉄筋ひずみに着目すれば、一軸部材や曲げ部材ではひび割れ後の鉄筋応力度は収縮の影響を受けないため、コンクリートが収縮する場合、明らかに圧縮されたひずみ分だけ変化量は大きくなる。このことは、同一の荷重を受けた場合であっても、ひび割れ幅が大きくなる、あるいはひび割れの本数が増えるなど、コンクリートの損傷が大きくなることを意味する。これに対し、コンクリートが膨張する場合は、所定の荷重を受けたときまでの鉄筋ひずみの変化量は、引張を受けたひずみ分だけ小さくなり、コンクリートの損傷が軽減されることになる。

### 3. 実験概要

#### (1) 使用材料

実験に使用した材料の種類と物理的性質を表-1に示す。また、使用した鉄筋の種類および物理的性質を表-2に示す。

自己収縮について、セメントの種類、すなわちその化合物組成により著しく異なることが知られてい

表-2 鉄筋の種類および物理的性質

種類	呼び名	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
SD295A	D19	331	190

る。式(1)<sup>12)</sup>は、セメントの構成化合物からペーストの自己収縮ひずみを予測するための重回帰式を示すが<sup>3)</sup>、 $C_2S$ 量が多く、 $C_3A$ および $C_4AF$ の間隙相が少ないセメントほど自己収縮は小さいことがわかる。

$$\varepsilon_{p_{\infty}} = 2.15 \cdot (C_3S\%) - 5.49 \cdot (C_2S\%) + 68.7 \cdot (C_3A\%) + 48.5 \cdot (C_4AF\%) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{p_{\infty}}$ ：水セメント比30%のセメントペーストにおける材齢1日を原点とした自己収縮ひずみの終局値( $\times 10^{-6}$ )

$(C_3S\%)$ ： $C_3S$ の含有率(%)、 $C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$ についても同様。

使用したセメントの化合物組成は、普通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)の場合、 $C_3S$ :52%、 $C_2S$ :22%、 $C_3A$ :9%、 $C_4AF$ :9%程度、低熱ポルトランドセメント(以下、低熱セメント)の場合、 $C_3S$ :29%、 $C_2S$ :54%、 $C_3A$ :3%、 $C_4AF$ :9%程度である。これらの値を用い、式(1)より自己収縮ひずみの終局値を求めると、普通セメントが約 $1000 \times 10^{-6}$ 、低熱セメントが約 $400 \times 10^{-6}$ となり、低熱セメントの場合が約60%小さい。ただし、式(1)では材齢1日以前の自己収縮が考慮されておらず、この分を含めると両セメントの差はより大きくなる。低熱セメントは、その化合物組成からみて、本質的に自己収縮の小さいセメントであるといえる。

#### (2) コンクリートの配合

表-3に、実験に供したコンクリートの配合を示す。全8種の配合について検討した。各々の配合の特徴は以下の通りである。

NCは普通セメントを用いた自己収縮の大きい高

表-3 コンクリートの配合

配合記号	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			W	OPC	LPC	EX	S	G	SRA	SP
NC	30	49.2	175	583	—	—	800	832	—	5.25
NE		49.1		543	—	40	798		—	5.42
NS		49.2		583	—	—	800		6	5.83
NES		49.1	175	543	—	40	798		6	6.70
LC		49.5		—	583	—	809		—	2.92
LE		49.4		—	543	40	806		—	3.38
LS		49.5	169	—	583	—	809		6	2.97
LES		49.4		—	543	40	806		6	3.50

表-4 フレッシュコンクリートの性状

配合記号	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)
NC	623	1.0	19.9
NE	423	0.6	21.2
NS	630	1.5	18.0
NES	625	1.3	19.0
LC	520	2.1	18.2
LE	570	1.3	17.0
LS	530	1.2	18.2
LES	635	1.4	17.6

強度コンクリートであり、本研究における基準コンクリートである。

NE, NSは、それぞれ膨張材および収縮低減剤を単独で混和した高強度コンクリート、NESは膨張材と収縮低減剤を併用した高強度コンクリートである。

LC, LE, LSおよびLESは、普通セメントに換えて低熱セメントを用いた高強度コンクリートである。

配合条件について、水/(セメント+膨張材)比は、圧縮強度80N/mm<sup>2</sup>程度の高強度コンクリートを想定し、一律30%とした。単位水量は175kg/m<sup>3</sup>(収縮低減剤を含む)に固定し、コンクリートの流動性(スランプフロー)は高性能減水剤の使用量により調整している。膨張材の使用量は、セメントの種類に関わらず40kg/m<sup>3</sup>とし、収縮低減剤の使用量は、標準使用量の6kg/m<sup>3</sup>とした。単位粗骨材量は、コンクリートの間げき通過性を考慮し、いずれの配合も832kg/m<sup>3</sup>

とした。高流動コンクリートに良好な間げき通過性を付与するためには、粗骨材量を低減する必要がある。「高流動コンクリート施工指針」では、配筋等の構造条件に応じて単位粗骨材絶対容積の標準値を定めている<sup>13)</sup>。ここでは、単位粗骨材絶対容積を、通常のRC構造物における推奨範囲0.30~0.33m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の中間値である0.315m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>としたものである。

コンクリートは、水平2軸形強制練りミキサを用い、モルタル部分を180秒間練り混ぜた後に粗骨材を投入し、さらに60秒間練り混ぜて製造した。打込み直前におけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。スランプフローはJIS A 1150、空気量はJIS A 1128に準拠して測定している。スランプフローは、600±50mmの範囲を目標としたが、結果的にNEのみ420mm程度と小さく、他はほぼ目標を満たしていた。空気量は0.6~2.1%の範囲であった。

### (3) 供試体の作製および養生方法

RCはり供試体の概要を図-2に示す。供試体の寸法は、幅200mm、高さ250mm、長さ2700mmとし、有効高さ210mmの位置に引張鉄筋を配し、かぶりは底面および側面から30.5mmとした。引張鉄筋比は、全断面に対して1.16%である。RCはり供試体は、各配合に対して1本作製した。

コンクリートの自己収縮・膨張ひずみを測定するために、RCはり供試体と同断面で、長さが500mm

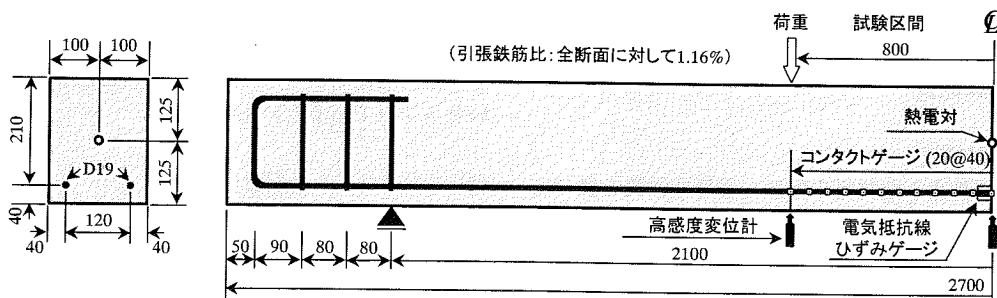


図-2 RCはり供試体の概要図(単位: mm)

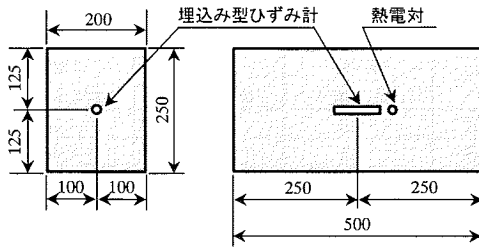


図-3 無拘束はり供試体の概要図(単位: mm)

の無拘束供試体を各配合に対して1本作製した。無拘束はり供試体の概要を図-3に示す。

はり供試体の作製には、JIS A 8652に規定される鋼製型枠を用い、日本コンクリート工学協会の「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」<sup>14)</sup>を参考に、組み立てた型枠底面の内側にテフロンシート(厚さ1mm)、両端部の内側にポリスチレンボード(厚さ3mm)を入れ、さらに、型枠内側の側面、端面および底面にポリエステルフィルム(厚さ0.1mm)を入れ、コンクリートと型枠が接触しないようにした。つまり、コンクリートの自由な変形が型枠に拘束されるのを防いでいる。

はり供試体の全ては、コンクリート打込み終了後直ちに表面仕上げを行い、水分の逸散を防ぐためにポリエステルフィルム(厚さ0.1mm)で表面を覆い、さらにその上を湿布で覆った。脱型後、直ちに供試体の全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ0.05mm)でシールし、封かん養生を開始した。型枠の脱型は、LSおよびLESは材齢2日、その他はいずれも材齢1日の時点で行った。

また、コンクリートの圧縮強度およびヤング係数を測定するために直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を、割裂引張強度を測定するために直径150mm、高さ200mmの円柱供試体を、各配合に対してそれぞれ6本作製した。円柱供試体の作製には、JIS A 5308 附属書11の規定を満たす金属製の軽量型枠を用いた。

強度測定用供試体のうちの半数は、アルミ箔粘着テープ(厚さ0.05mm)でシールする封かん養生を行い、残りの半数は、脱型後直ちに20℃の水中で養生を開始した。

図-4は、封かん供試体を保存していた試験室内の環境温度とコンクリート打込み直後からの経過日数の関係を示す。最終の経過日数は、無拘束はり供試体の計測を終了した時点であり、図に示した範囲における環境温度の平均値は、普通セメントを用いたシリーズが19.4℃、低熱セメントを用いたシリーズが20.4℃であった。

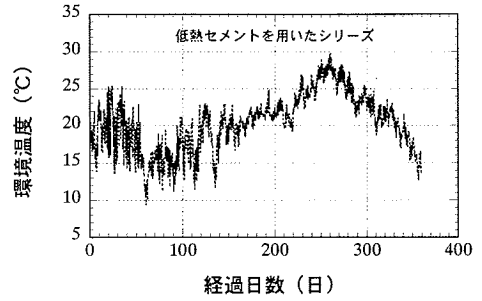
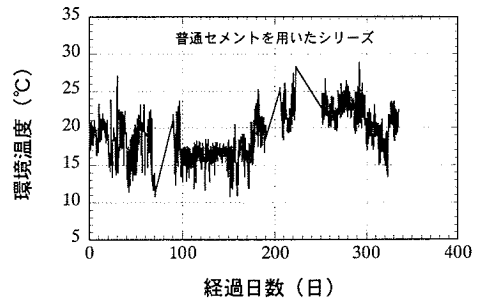


図-4 試験室内の環境温度

#### (4) RCはりにおける鉄筋ひずみの測定

図-2に示すように、供試体中央位置の鉄筋の上面および下面に貼付した電気抵抗線ひずみゲージを用い、載荷までに生じる鉄筋ひずみを測定し、それらの平均値を各供試体の鉄筋ひずみとした。ここで、ひずみゲージには自己温度補償型を用いたが、正確を期するために、コンクリート中に無応力状態のダミー鉄筋を埋設し、引張鉄筋の実測ひずみからダミー鉄筋のひずみを差し引いた。つまり、実測ひずみに与える温度の影響を厳密に取り除いている。なお、計測は、コンクリート打込み直後より開始した。

#### (5) RCはりの載荷試験方法と測定項目

載荷試験は、図-2に示すように、支間2100mm、等曲げモーメント区間(試験区間)800mmの2点集中載荷で行った。

支間中央位置および載荷点の鉛直変位を、高感度変位計(精度:0.001mm)を用いて測定し、前者から後者を差し引いて試験区間中央のたわみを求めた。これより、平均曲率は試験区間のたわみを円弧と仮定して、幾何学的に式(2)より算出した。

$$\phi = \frac{2\delta}{(L/2)^2 + \delta^2} \quad (2)$$

ここに、 $\phi$ : 平均曲率(/mm)

$\delta$ : 等曲げ区間中央のたわみ(mm)

L: 等曲げ区間長さ(=800mm)

ひび割れ幅は、試験区間の有効高さ位置に 20mm 間隔でゲージプラグを貼り付け、コンタクトゲージ法(測定器の精度：0.001mm)により測定した。変位量の実測値をひび割れ幅として評価している。

なお、載荷試験は、打込みから約 60～70 日経過した時点で行った。

#### (6) 基本特性に関する試験方法

コンクリートの自己収縮・膨張ひずみは、図-3に示すように、供試体の中心部に埋設した低弾性型の埋込型ひずみ計(外寸：直径 20mm×長さ 104mm、標点距離：100mm、見かけの弾性係数：約 40N/mm<sup>2</sup>)を用いて測定した。同時に、埋込型ひずみ計の近傍に設置した熱電対を用いてコンクリートの温度を測定し、線膨張係数を 10×10<sup>-6</sup>/°Cと仮定して温度ひずみを求めた。ここでは、この温度ひずみを埋込型ひずみ計の実ひずみから差し引いたものを自己収縮・膨張ひずみとしている。なお、計測は、コンクリート打込み直後より開始した。

圧縮強度、ヤング係数ならびに割裂引張強度の試験方法は、それぞれJIS A 1108、JIS A 1149およびJIS A 1113に準拠した。試験材齢は、水中養生供試体が材齢28日、封かん養生供試体がRCはりの載荷直前である。

## 4. 実験結果および考察

### (1) コンクリートの基本特性

#### a) 強度特性

表-5に、20℃水中養生供試体の強度試験結果を示す。NEの圧縮強度、割裂引張強度は、NCに比較していずれも約10%小さくなった。一方、LEの圧縮強度はLCよりも約10%大きく、割裂引張強度は同等であった。収縮低減剤の影響は、低熱セメントを用いたコンクリートの割裂引張強度に現れており、LS、LESの割裂引張強度は、LCに比較していずれも約10%小さかった。このように、膨張材、収縮低減剤が強度に与える影響は、セメントの種類や強度の種類により異なる。なお、ヤング係数については、膨張材、収縮低減剤の混和による影響は小さい。

表-6は、封かん養生供試体の強度試験結果を示す。養生期間は異なるものの、20℃水中養生の場合とほぼ同様の傾向が認められる。

#### b) 自己収縮・膨張特性

全ての配合について、自己収縮・膨張ひずみと有効材齢の関係を図-5に示す。温度の影響を材齢で換算した有効材齢は、図-6に示すコンクリート温度と

表-5 20℃水中養生供試体の強度特性(材齢 28 日)

配合記号	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
NC	85.3	36.5	4.79
NE	74.4	36.8	4.34
NS	81.1	38.4	4.82
NES	82.4	38.4	5.35
LC	73.5	38.7	5.17
LE	83.3	38.6	5.31
LS	70.5	36.4	4.68
LES	76.1	37.6	4.65

表-6 RCはり載荷直前の強度特性(封かん養生)

配合記号	試験材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
NC	63	79.1	37.3	4.77
NE	65	70.8	36.7	5.07
NS	57	91.4	40.4	5.47
NES	70	90.2	38.4	5.77
LC	70	73.9	38.8	4.58
LE	64	79.6	38.9	4.50
LS	64	74.4	38.1	4.16
LES	61	75.5	36.7	4.10

材齢の関係から、式(3)<sup>15)</sup>より算出した。図-6の温度履歴の範囲において、有効材齢は実材齢より22～45日短くなるが、これはコンクリート温度が20℃を下回る期間が長いためである。

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (3)$$

ここに、 $t$ ：有効材齢(日)

$\Delta t_i$ ：温度が $T$ (°C)である期間の日数

$T_0$ ：1°C

基準のNCは、初期材齢において大きな自己収縮ひずみを生じた。その後も自己収縮が進行し、有効材齢300日の時点で約 $500 \times 10^{-6}$ に達した。これに対し、低熱セメントを用いたLCは、有効材齢1日の時点で一旦 $50 \times 10^{-6}$ 程度の膨張ひずみを生じ、その後収縮が進行するが、その速度はNCに比較して緩やかであり、有効材齢300日での自己収縮ひずみの大きさは、 $100 \times 10^{-6}$ 程度と小さかった。

膨張材の効果について、普通セメントを用いたNEとNCを比較すると、膨張作用は有効材齢1日以前の早い段階で生じ始め、有効材齢3日程度でほぼ終了し、それ以降、NCにほぼ付随して収縮ひずみを生じている。膨張作用がほぼ終了する有効材齢3日におけるNEとNCのひずみ差、すなわち自己収縮ひ

ずみの補償量は約 $200 \times 10^6$ となっている。有効材齢300日の時点において、NEの自己収縮ひずみは、NCの約50%に抑制された。次に、低熱セメントを用いたLEをみると、有効材齢0.5日程度から明らかな膨張ひずみを生じ、膨張作用がほぼ終了する有効材齢3日の時点において約 $300 \times 10^6$ を発現した。有効材齢3日でのLEとLCのひずみ差は約 $250 \times 10^6$ であり、NEにおける場合より $50 \times 10^6$ 大きい。3日以降、LEはLCにほぼ付随して徐々に収縮ひずみを生じるが、膨張ひずみの収縮側への移行量は小さい。このように、膨張材を用いたコンクリートの絶対的な膨張・収縮ひずみ量は、使用セメントのそれに大きく左右され、自己収縮の小さい低熱セメントを用いた場合、普通セメントの場合と同一の膨張材使用量であっても、顕著な膨張ひずみを生じる。

収縮低減剤の効果は、普通セメントを用いた場合の長期材齢において大きく現れている。収縮低減剤の作用は、自己乾燥に起因して生じる毛細管張力の大きさを低減することによりもたらされと考えられ、自己収縮が大きいほど、収縮低減剤による絶対的なひずみの低減量は大きくなる。有効材齢300日におけるNSの自己収縮ひずみは、NCと比較して $100 \times 10^6$ 程度小さく、NCに対する自己収縮ひずみの低減率は約20%である。

NEとNESの比較より、収縮低減剤の効果は、膨張材と併用した場合にも認められる。膨張材と収縮低減剤ではその作用機構が全く異なるために、併用した場合も互いの効果がほぼ独立して発揮されるためである。

ここで、著者らは、普通セメントを用いた場合の膨張材・収縮低減剤併用時の収縮低減効果は、各々を単独で用いた場合よりも大きくなることを報告している<sup>6)</sup>。一方、本研究結果はそうはなっておらず、有効材齢20日頃までのNESの絶対的な収縮量は、NEよりも大きい。また、NCとNSの差で示される収縮低減剤の効果は、既往の報告<sup>6)</sup>よりも相対的に小さくなっている。これは、図-6に示すように、NCおよびNEの温度上昇量がNS、NESよりも $5^\circ\text{C}$ 程度高かったにも拘らず、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 一定と仮定して求めた温度ひずみを用いて自己収縮・膨張ひずみを算出しているためと考えられる。既往の研究<sup>16), 17), 18)</sup>によると、高強度コンクリートの線膨張係数は、終結以前では $15 \sim 30 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 程度以上と大きく、また時間の経過とともに急激に小さくなる。これは、水和による液相から固相への相の変化に起因していると考えられ<sup>18)</sup>、この原理からは、膨張材や収縮低減剤を用いた場合も、線膨張係数の経時的な変化傾向は上記と同様になると

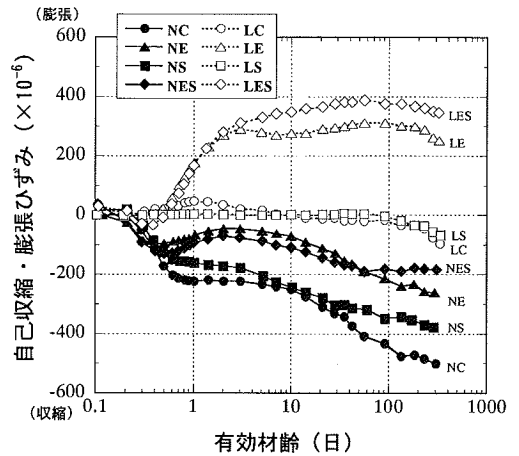


図-5 無拘束はり供試体の自己収縮・膨張ひずみの経時変化

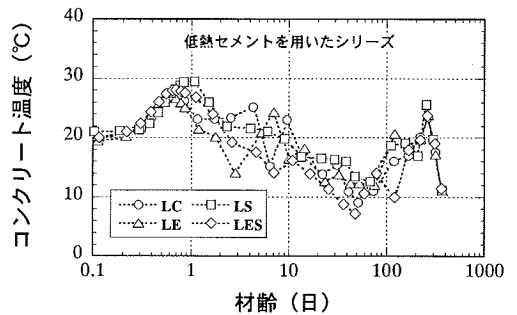
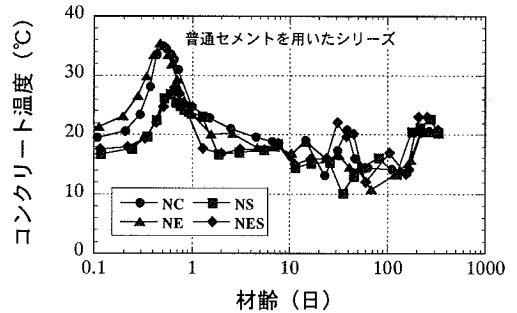


図-6 無拘束はり供試体のコンクリート温度と材齢の関係

考えられる。これを仮定して、線膨張係数の経時変化を考慮すれば、温度上昇量が大きいNCおよびNEの自己収縮ひずみは、線膨張係数を一定とした場合よりも大きく評価され、NSおよびNESとの相対的な関係は既往の報告<sup>6)</sup>と同様な傾向を示す可能性がある。なお、NCおよびNEの温度上昇量がNS、NESよりも高くなったのは、脱型までの間、供試体をブルーシートで覆っていた際の密閉状態が異なっていたためと思われる。

(2) RCはり引張下縁の拘束応力

図-7は、上述の8種類のコンクリートを用いて作製したRCはりの引張下縁における拘束応力と有効材齢の関係を示す。拘束応力は、平面保持を仮定し、引張を正、圧縮を負として、式(4)より算出した。

$$P_s = E_s \varepsilon_s A_s$$

$$\sigma_c = -\frac{P_s}{A_c} \left[ 1 + \frac{(d - C_g)(h - C_g)}{I_c / A_c} \right] \quad (4)$$

- ここに、 $P_s$  : 鉄筋に生じる軸力
- $E_s$  : 鉄筋のヤング係数
- $\varepsilon_s$  : 鉄筋のひずみ
- $A_s$  : 鉄筋の断面積
- $\sigma_c$  : RCはりの引張縁位置におけるコンクリートの応力度
- $A_c$  : コンクリートの断面積
- $I_c$  : コンクリート断面の図心まわりの断面2次モーメント
- $C_g$  : 圧縮縁からコンクリート断面の図心軸までの距離
- $d$  : 有効高さ
- $h$  : 供試体高さ

NCを用いたはりは、載荷直前においておよそ1.3N/mm<sup>2</sup>の引張の拘束応力(以下、自己収縮応力)を生じた。これに対し、NE、LCを用いたはりの拘束応力は、0.1N/mm<sup>2</sup>程度に抑制され、NESおよびLSはりの拘束応力は、ほぼ0N/mm<sup>2</sup>となった。また、低熱セメントと膨張材を組み合わせて用いたLEおよびLESはりには、約1.5N/mm<sup>2</sup>の圧縮の拘束応力(以下、ケミカルプレストレス)が生じた。

このように、膨張材は自己収縮応力の抑制に効果的である。また、普通セメントを標準とした場合は、低熱セメントの使用により、自己収縮応力の発生をほぼ抑制できる。さらに、低熱セメントと膨張材を組み合わせることにより、普通セメントの場合と同じ膨張材使用量であっても、より大きなケミカルプレストレスを付与することが可能である。なお、収縮低減剤による自己収縮応力の低減効果は、図-5のひずみ性状より判断して、より長期材齢において大きく発揮されてくるものと推察される。

表-7は、RCはり載荷直前の拘束応力および自己収縮・膨張ひずみをまとめて示す。載荷前のRCはりの状態を拘束応力の面から大別すると、自己収縮応力が卓越して生じたはり(NC、NS)、自己収縮応力がほぼ抑制されたはり(NE、NES、LCおよびLS)、

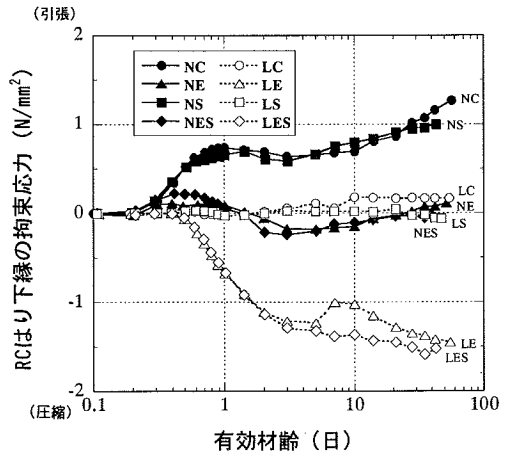


図-7 RCはり下縁の拘束応力

表-7 RCはり載荷直前の拘束応力およびコンクリートの自己収縮・膨張ひずみ

配合記号	載荷時の材齢(日)	引張下縁の拘束応力(N/mm <sup>2</sup> )	自己収縮・膨張ひずみ(×10 <sup>-6</sup> )
NC	63	1.27	-397
NE	65	0.11	-174
NS	57	1.00	-313
NES	70	-0.03	-175
LC	70	0.16	-12
LE	64	-1.45	311
LS	64	-0.06	5
LES	61	-1.52	383

さらにケミカルプレストレスが卓越して生じたはり(LEおよびLES)に分類することができる。

(3) 静的載荷によるRCはりの曲げ挙動

以下では、RCはりの静的曲げ載荷試験を通じて、自己収縮がひび割れ・変形挙動に及ぼす影響、低収縮化によるそれらの改善効果、さらに載荷以前の収縮・膨張を考慮したひび割れ幅・変形の評価法について検討した結果を述べる。なお、ここで述べているのは、引張鉄筋が降伏するまでの範囲である。

a) ひび割れ特性

図-8は、たわみの急変点より判定したひび割れ発生モーメントの実測値、および配合間の引張強度の違いを考慮するために、拘束応力を無視して載荷直前の割裂引張強度を用いて求めたひび割れ発生モーメントの計算値について、NCはりを1.0とした場合の各はりの比を示す。図中には、NCはりの実測および計算ひび割れ発生モーメントの絶対値を併記している。これより、自己収縮応力が最も卓越して生じたNCはりの実測ひび割れ発生モーメントは、拘



束応力の影響を無視した計算値の60%程度に低下しており、自己収縮によるひび割れ発生への影響が無視できない。これに対して、自己収縮応力がほぼ抑制されたNE, NES, LCおよびLSはりの実測ひび割れ発生モーメントは、NCはりの1.5~2倍程度大きく

なり、割裂引張強度の違いを考慮しても、自己収縮の低減による明らかなひび割れ発生モーメントの増大が認められる。さらに、ケミカルプレストレスが卓越して生じたLEおよびLESはりの場合、NCはりよりも割裂引張強度による計算値が若干小さくなっているにも拘らず、実測ひび割れ発生モーメントは2.5倍程度に向上しており、ケミカルプレストレスの導入による効果が明らかである。

図-9は、ひび割れ発生モーメントの実測値と載荷前の拘束応力を考慮した計算値、考慮しない計算値の比を示す。計算には、載荷直前の割裂引張強度を用いている。これより、拘束応力を無視した計算値は、実測値の約0.6~1.6倍の範囲となっており、当然のことながら、拘束応力が大きいほど予測精度は低くなる。これに対して、拘束応力を考慮することにより、計算値は実測値の約0.8~1.2倍の範囲となり、ひび割れ発生の予測精度は向上する。

図-10は、鉄筋応力度が約200N/mm<sup>2</sup>時の最大ひび割れ幅、最大ひび割れ間隔の実測値について、NCはりを1.0とした場合の各はりの比を示す。ここでいう鉄筋応力度は、従来のRC理論による引張部コンクリートを無視したひび割れ断面における計算値である。なお、図中には、NCはりの実測最大ひび割れ幅および最大ひび割れ間隔の絶対値を併記している。これより、自己収縮応力がほぼ抑制されたNE, NES, LC, LSはりの最大ひび割れ間隔は、NCはりよりも10~40%程度増大する一方で、最大ひび割れ幅はNCはりの場合と同等か約20%低減された。ケミカルプレストレスが卓越して生じたLEおよびLESはりの場合、最大ひび割れ間隔は10~35%程度増大し、最大ひび割れ幅は40%低減された。すなわち、自己収縮を低減することにより、ひび割れ間隔が増大する一方、ひび割れ幅は減少し、収縮低減の効果が明確に認められる。

載荷以前の長さ変化がひび割れ幅に及ぼす影響をより詳細に検討するために、まず、最大ひび割れ幅と従来のRC理論による鉄筋応力度との関係を図-11に示す。図中には、2002年版コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>(以下、示方書)によるひび割れ幅算定式(5)において、載荷前の拘束応力を無視した計算値(式(5))における $\sigma_{sc}$ を従来のRC理論による鉄筋応力度とした場合)も併記している。ただし、圧縮強度は

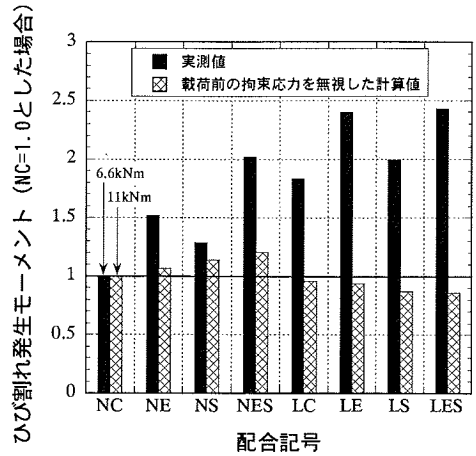


図-8 ひび割れ発生モーメントの比較

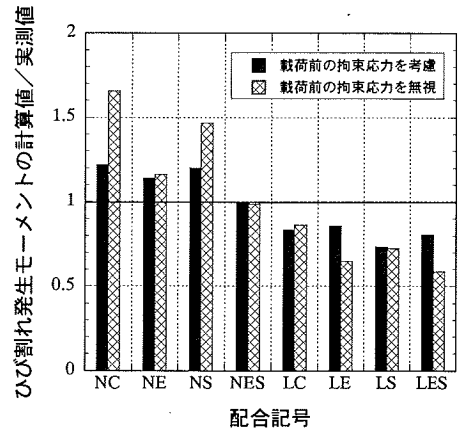


図-9 ひび割れ発生に及ぼす拘束応力の影響

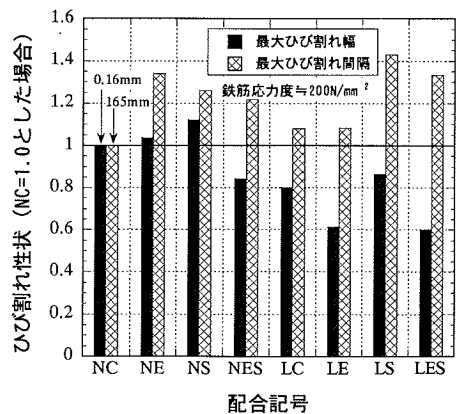


図-10 最大ひび割れ幅・間隔の比較

80N/mm<sup>2</sup>,  $\varepsilon'_{csd}$  は短期載荷であるため0とした。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[ \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (5)$$

ここに,  $w$  : 最大ひび割れ幅

$k_1$  : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数で, 一般に, 異形鉄筋の場合に1.0

$k_2$  : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$k_3$  : 引張鋼材の段数の影響を表す係数

$c$  : かぶり(mm)

$c_s$  : 鋼材の中心間隔(mm)

$\phi$  : 鋼材径(mm)

$\varepsilon'_{csd}$  : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

$\sigma_{se}$  : 鋼材位置のコンクリートの応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量(N/mm<sup>2</sup>)

これより, ひび割れ幅は鉄筋応力度に強く依存するが, 同一鉄筋応力度におけるひび割れ幅の大小は, 載荷前の拘束応力の大小に応じて差が生じていることがわかる。自己収縮が卓越して生じたはりの場合にひび割れ幅は大きく, 拘束応力を無視した計算値と実測値の差は小さくなっている。また, 載荷以前に膨張を生じたはりでは, 拘束応力を無視した計算値は実測値をかなり過大評価している。これらの差異は, 図-1にその概念を示したように, 鉄筋位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の変化量により説明できる。すなわち, コンクリートの長さ変化による鉄筋応力度の変化分を考慮した鉄筋応力度の増加量と最大ひび割れ幅との関係を示すと図-12の如くであり, 配合間の相違は明らかに小さくなり, 載荷以前に収縮, 膨張を生じるいずれの場合も, 比較的精度よく実測値を評価していることがわかる。

図-13は, 鉄筋応力度が約200N/mm<sup>2</sup>におけるひび割れ幅算定式(5)に, 載荷前の長さ変化に起因する拘束応力を考慮した場合, 無視した場合の計算値と実測値の比を示したものである。ここで, 拘束応力を考慮とは, 式(5)における $\sigma_{se}$ を鉄筋位置のコンク

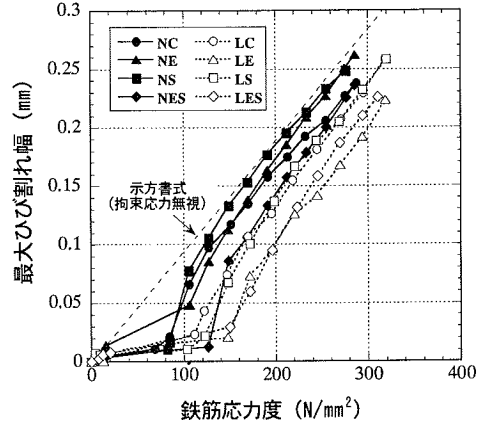


図-11 最大ひび割れ幅-鉄筋応力度の関係

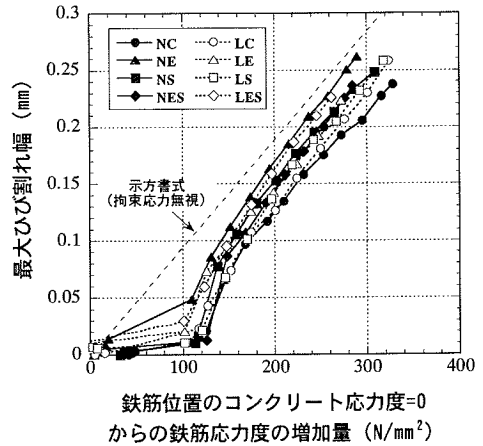


図-12 最大ひび割れ幅-鉄筋位置のコンクリート応力度=0からの鉄筋応力度の増加量との関係

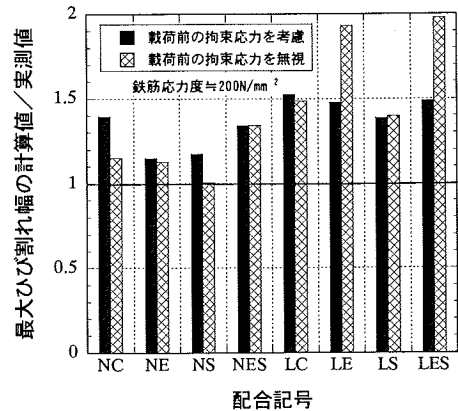


図-13 最大ひび割れ幅に及ぼす拘束応力の影響

リート応力度が0のときからの鉄筋応力度の増加量とした場合であり、拘束応力を無視とは、 $\sigma_{sc}$ を従来のRC理論による鉄筋応力度とした場合である。なお、式(5)の $k_2$ は圧縮強度の実測値より求めている。さらに、図-14は、最大ひび割れ幅と載荷以前に蓄積される鉄筋ひずみとの関係を明確にするために、最大ひび割れ幅の計算値と実測値について、鉄筋位置のコンクリート応力度が引張または圧縮から0に変わるときの鉄筋ひずみとの関係を示したものであり、直線回帰による両者の関係も併記している。ここで、図-14の拘束応力を無視した計算値がわずかに右上がりとなっているのは、ひび割れ幅測定時の鉄筋応力度が $194 \pm 4 \text{ N/mm}^2$ の範囲で若干異なっていたが、実測ひび割れ幅と比較を行うために、これをそのまま計算に用いたためである。

これより、最大ひび割れ幅の実測値は収縮側から膨張側へとほぼ直線的に小さくなるが、拘束応力を無視した計算値はこの傾向を表現することができず、膨張が生じる場合は過大評価する傾向にある。これに対して、拘束応力を考慮した計算値は実測値の1.1~1.5倍程度の範囲にあって、実測値の傾向とよく一致しており、収縮、膨張の長さ変化を生じるいずれの場合も、安全側のほぼ同じ精度で、統一的にひび割れ幅を評価することが可能である。

示方書の曲げひび割れ幅算定式(5)には、既に自己収縮の影響が考慮されているが、本研究より、ひび割れ幅に及ぼす膨張の影響についても、自己収縮の場合と同様の考え方、すなわち鉄筋応力度の増加量の取り扱いを、鉄筋位置のコンクリート応力度が0の状態からとすることにより、精度良く評価できることが明らかとなった。

### b) 変形特性

図-15は、従来のRC理論による鉄筋応力度が約 $200 \text{ N/mm}^2$ (後述の図-16における曲げモーメント $\equiv 20 \text{ kNm}$ の時点)における平均曲率の実測値、および配合間の引張強度の違いによるひび割れ発生モーメントの相違が平均曲率に与える影響を考慮するために、拘束応力の影響を無視して従来のBranson式より求めた平均曲率の計算値について、NCはりを1.0とした場合の各はりの比を示す。平均曲率の計算には、載荷直前の割裂引張強度より求めたひび割れ発生モーメントの計算値を用いている。また、図中には、NCはりの実測平均曲率および拘束応力を無視した計算平均曲率の絶対値を併記している。これより、自己収縮応力が最も卓越して生じたNCはりの

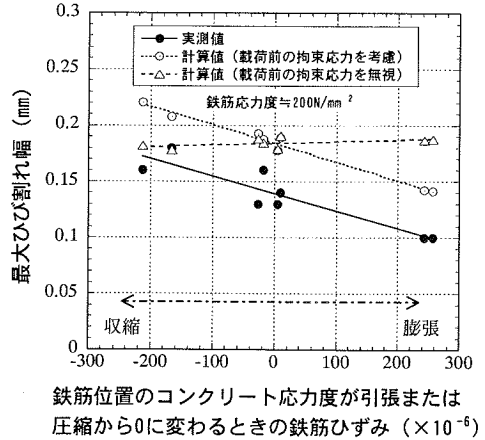


図-14 最大ひび割れ幅と鉄筋位置のコンクリート応力度が引張または圧縮から0に変わるときの鉄筋ひずみの関係

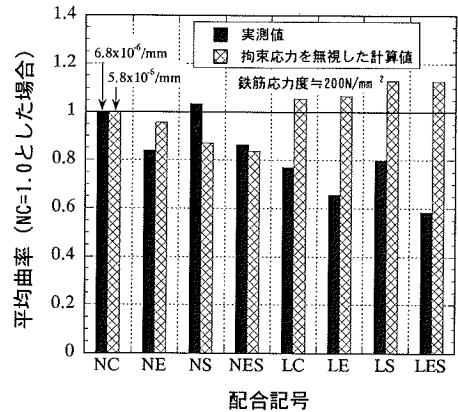


図-15 平均曲率の比較

実測平均曲率は、拘束応力を無視した計算値よりもおよそ20%大きく、自己収縮による変形性能への影響が明らかである。これに対して、自己収縮応力がほぼ抑制されたNE, NES, LCおよびLSはりの実測平均曲率は、NCはりよりも約15~25%小さくなっている。ひび割れ発生モーメントが小さくなってたわみが大きくなることを考慮すれば、低熱セメントを用いたLC, LSにおいて曲率の低減効果が大きい。ケミカルプレストレスが卓越して生じたLEおよびLESはりの場合、NCはりよりも拘束応力を無視した平均曲率の計算値が10%程度大きくなっているにも拘らず、実測平均曲率は約40%小さくなっており、ケミカルプレストレスの導入による曲率の低減効果が明らかである。すなわち、収縮を低減し、

さらに膨張を付与することによって変形性能は大幅に改善される。

図-16 は、曲げモーメントと平均曲率の関係を示したものである。図中には、NC だけの場合で、長さ変化による拘束応力の影響を無視して求めた全断面およびひび割れ断面における曲率の計算値を併せて示す。ひび割れ断面における配合間の相違は大きく、計算値と実測値を比較すると、テンションステイフニング効果を含んだ平均曲率の実測値がひび割れ断面の計算値を上回るものもある。低強度コンクリートで付着性能が特に低い場合には、ひび割れ断面の計算値と実測値がほぼ等しくなる場合もある<sup>19)</sup>が、付着特性に優れた高強度コンクリートであることを考慮すれば考えにくく、収縮によって生じる拘束応力の解放による曲率の増加を考慮しなければ説明が難しい現象である。

そこで、変形の場合も、ひび割れ幅の場合と同様に荷重以前の拘束応力の影響を考慮することによって、予測精度の向上が可能であると考えられるため、図-17 に示す考え方により、収縮・膨張の長さ変化が変形特性に及ぼす影響を考慮した。すなわち、曲げモーメント-平均曲率関係は、荷重以前の長さ変化により蓄積された鉄筋応力度と圧縮縁コンクリート応力度の状態から、外力作用後の引張部コンクリートを無視したひび割れ断面状態に移行する曲率に接近しながら変形すると考えられる。これに基づけば、長さ変化がある場合の変形特性は、ひび割れ発

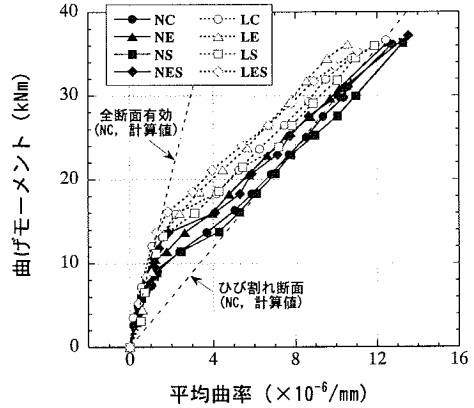
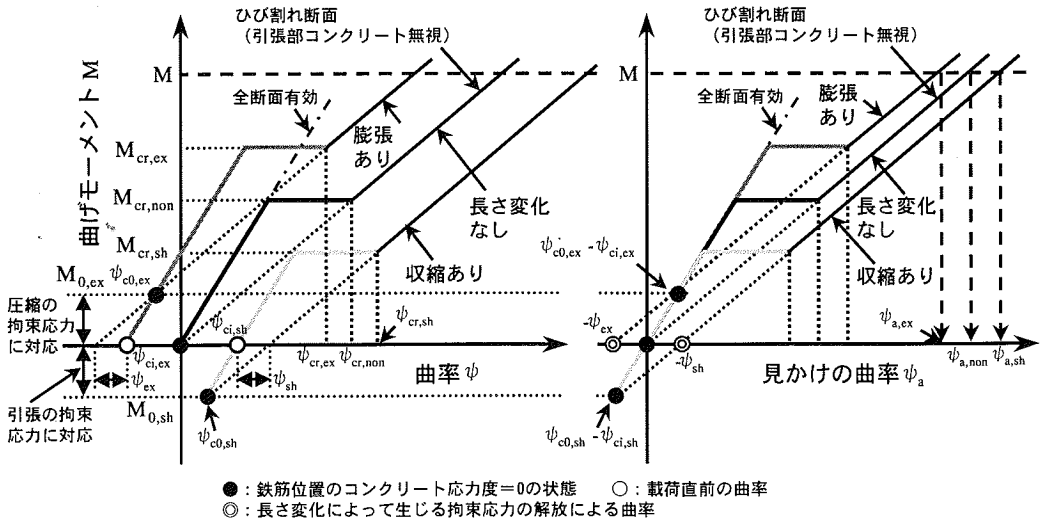


図-16 曲げモーメント-平均曲率の比較

生モーメントに蓄積された拘束応力の影響を考慮するだけでは評価されず、これに加えて拘束応力の解放による変形の変化を考慮する必要があることになる。

図-17 の (a) は、鉄筋位置のコンクリート応力度が 0 の状態からの曲げモーメント-曲率関係を示し、(b) は荷重直前の曲率を無視した見かけ上の曲げモーメント-曲率関係である。図中の  $\psi_{ci,sh}$ 、 $\psi_{ci,ex}$  は、それぞれ収縮を生じる場合、膨張を生じる場合の荷重直前の曲率を、 $\psi_{c0,sh}$ 、 $\psi_{c0,ex}$  は、鉄筋と同位置でのコンクリートの応力度が 0 の状態における曲率を示す。 $\psi_{sh}$ 、 $\psi_{ex}$  は、収縮・膨張の長さ変化によって生じる拘束応力が、ひび割れ発生時に解放される



(a) 長さ変化を考慮した M- $\psi$  関係

(b) 長さ変化を無視した見かけの M- $\psi_a$  関係

図-17 荷重以前の長さ変化が曲率に及ぼす影響の概念

ことによる曲率の増加または減少分であり、 $\psi_{sh}$ 、 $\psi_{ex}$ を统一的に $\psi_{lc}$ で表せば、式(6)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \psi_{lc} &= \left( \frac{\sigma_{s,lc}}{E_s} - \frac{\sigma_{c,lc}}{E_c} \right) / d \\ \psi_a &= -\psi_{lc} + \left( \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} \right) / d \end{aligned} \right\} (6)$$

ここに、 $\psi_{lc}$ ：長さ変化によって生じる拘束応力による曲率の増減分

$\psi_a$ ：拘束応力の解放による曲率の変化を加味したひび割れ断面における曲率

$\sigma_{s,lc}$ ：長さ変化により蓄積された載荷直前の引張鉄筋の応力度

$\sigma_{c,lc}$ ：長さ変化により蓄積された載荷直前の圧縮縁位置におけるコンクリートの応力度

$\sigma_s$ ：設計曲げモーメント作用時の引張鉄筋の応力度

$\sigma_c$ ：設計曲げモーメント作用時の圧縮縁位置におけるコンクリートの応力度

$E_s$ ：鉄筋のヤング係数

$E_c$ ：コンクリートのヤング係数

$d$ ：有効高さ

なお、拘束応力の解放による曲率の変化を加味したひび割れ断面における見かけの曲率 $\psi_a$ は、収縮の場合 $\psi_{a,sh}$ 、長さ変化が0の場合 $\psi_{a,non}$ 、膨張の場合 $\psi_{a,ex}$ として図-17に示している。

また、断面内に鉄筋が対称に配置されていて、 $\psi_{ci,sh}$ 、 $\psi_{ci,ex}$ が生じない複鉄筋の場合であっても、曲げひび割れにともなって解放される曲率 $\psi_{sh}$ 、 $\psi_{ex}$ は、圧縮縁コンクリートの応力度と引張鉄筋の応力度によって決まるため、単鉄筋断面に対する式(6)と同様の考え方により求めることができると考えている。

図-18は、代表的な例として、自己収縮が卓越して生じたNCはり、膨張が卓越して生じたLESはりの平均曲率の実測値と載荷前の拘束応力を考慮した計算値、無視した計算値を比較して示す。ここで、拘束応力を考慮した平均曲率の計算値は、式(6)による拘束応力の解放による曲率の増減を取り入れて、Branson式を修正した式(7)より算出しており、ひび割れ発生モーメントには、載荷直前の割裂引張強度と拘束応力を考慮して求めた計算値を用いている。

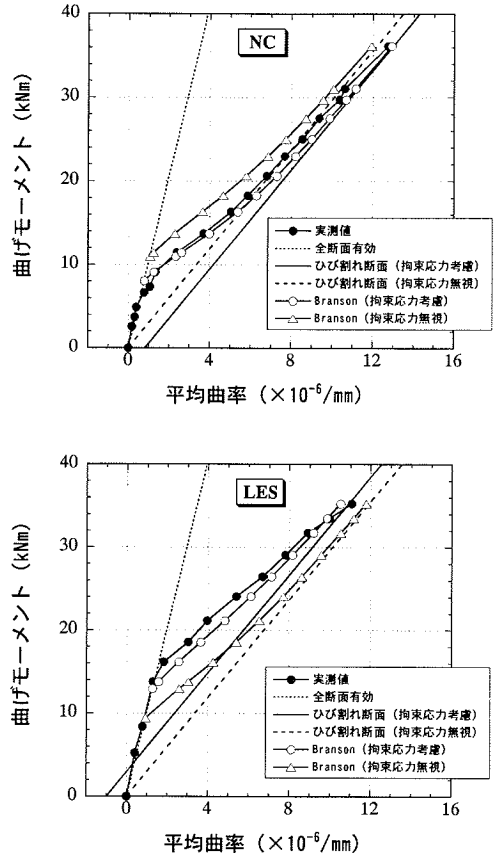


図-18 曲げモーメント-平均曲率関係における実測値と計算値の比較

拘束応力を無視した平均曲率の計算値は、割裂引張強度より求めたひび割れ発生モーメントの計算値を用いて、従来のBranson式より算出している。

$$E_c I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_d} \right)^4 E_c I_g + \left( 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_d} \right)^4 \right) E_c I_{cr} \quad (7)$$

$$E_c I_{cr} = M_d / \psi_a$$

ここに、 $E_c I_e$ ：有効曲げ剛性

$E_c I_g$ ：全断面有効時の曲げ剛性

$E_c I_{cr}$ ：拘束応力の解放による変形の増減を加味したひび割れ断面における曲げ剛性

$M_{cr}$ ：ひび割れ発生モーメント

$M_d$ ：変位計算時の設計曲げモーメント

これより、載荷前の拘束応力によるひび割れ発生モーメントの変化とともに、拘束応力の解放による

変形の変化を考慮することにより、収縮、膨張の長さ変化を問わず、ほぼ統一的に変形を評価することが可能である。膨張を生じる場合は変形が小さくなるが、拘束応力を考慮したひび割れ断面の計算値に漸近する傾向を示し、収縮を生じる場合とほぼ同様な変形特性といえる。

図-19は、全てのRCはりについて、曲げモーメントと荷重以前の拘束応力による変形の増減分をシフトした平均曲率との関係を示す。これより、図-15と比較して、ひび割れ発生後の変形挙動における配合間の相違は明らかに小さくなり、荷重以前の拘束応力を考慮することの合理性が認められる。

図-20は、全てのRCはりについて、鉄筋応力度が約200N/mm<sup>2</sup>における式(7)に、荷重以前の拘束応力を考慮した場合、無視した場合の平均曲率の計算値と実測値の比を示したものであり、拘束応力を考慮することにより、計算値は実測値の約0.8~1.2倍の範囲となっており、これを無視した場合の約0.7~1.6倍と比較して変形の予測精度は向上する。

## 5. まとめ

本研究では、低熱ポルトランドセメント、膨張材、収縮低減剤を使用し、荷重以前に生じる自己収縮を低減した高強度コンクリート、荷重以前に膨張を付与した高強度コンクリートを用いてRCはりを作製し、その静的荷重試験を通じて若材齢時の長さ変化による曲げひび割れ・変形挙動への影響について検討した。さらに、荷重以前の長さ変化を考慮したRC曲げ部材のひび割れ幅・変形の評価法の提案を試みた。本研究の範囲内において得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 自己収縮の影響は、ひび割れ発生荷重、ひび割れ幅、たわみなど使用限界状態に現れることを確認した。
- (2) 荷重以前に収縮、膨張の長さ変化を生じるいずれの場合も、鉄筋位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量を考慮することにより、ひび割れ幅をほぼ統一的に評価できることを検証した。
- (3) 荷重以前に蓄積された拘束応力によるひび割れ発生荷重の変化とともに、拘束応力の解放による変形の増減を考慮することにより、収縮・膨張を問わず、変形をほぼ統一的に評価できることを検証した。
- (4) 自己収縮を低減することにより、ひび割れ間隔

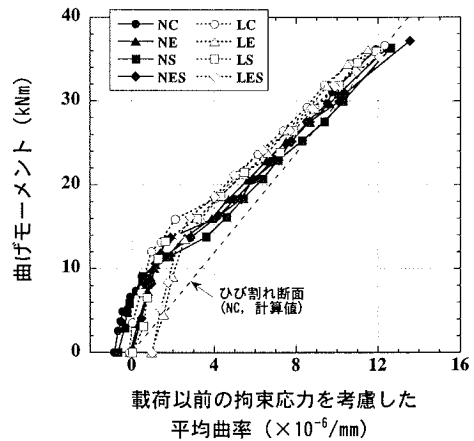


図-19 曲げモーメントー荷重以前の拘束応力を考慮した平均曲率関係

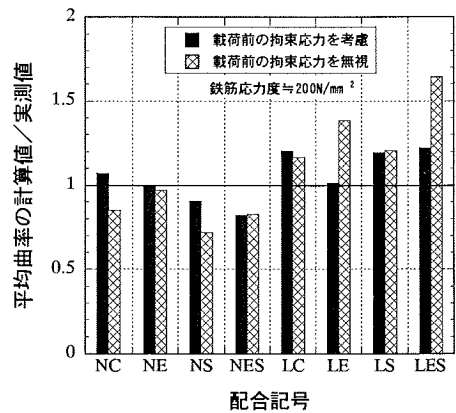


図-20 平均曲率に及ぼす拘束応力の影響

が増大する一方、ひび割れ幅は減少し、収縮低減の効果が明確に認められた。変形の場合も、収縮を低減し、さらに膨張を付与することにより変形量は大幅に抑制された。

- (5) 膨張材は自己収縮の低減に大きな効果を有し、低熱ポルトランドセメントを組み合わせることにより、普通ポルトランドセメントの場合と同じ膨張材使用量であっても、ケミカルプレストレスを付与することが可能である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、伊藤友司氏（現 中国電力(株)）、前田啓太氏（現 前田建設工業(株)）、正木聡氏（現 山口県）をはじめ、広島大学・構造材料工学研究室の皆様にも多大なご助力をいただきました。また、本研究の一部は、平成13年度吉田研究奨励賞の授与を受けて行われたことを付記し、ここに深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.90-92，1996.3.
- 2) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，pp.100-102，2002.3.
- 3) 田澤榮一，宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材及び配合の影響，土木学会論文集，No.502/V-25，pp.43-52，1994.11.
- 4) 亀田昭一：成田空港第一期エプロン舗装の改修工法－完全付着オーバーレイ工法の開発－，土木技術54巻2号，pp.99-106，1999.2.
- 5) 田中敏嗣，三瀬あゆこ，早川智浩，佐藤良一：高強度コンクリートの低収縮化と拘束応力に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1123-1128，1999.6.
- 6) 谷村 充，兵頭彦次，佐藤達三，佐藤良一：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000.6.
- 7) Kameta, S., Sato, R. and Abe, Y. : Stresses at Joint Interface between Existing Continuously Reinforced Concrete Pavement and Overlay Concrete with Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent, *4th International Workshop on Design Theories and Their Verification of Concrete Slabs for Pavements and Rail Roads*, pp. 305-320, 2000.11.
- 8) 保利彰宏，安藤哲也，小田部裕一，鈴木康範：初期欠陥のない高性能コンクリートの開発，コンクリート工学，Vol.39，No.8，pp.16-21，2001.8.
- 9) 正木 聡，谷村 充，Hussein Nour-Allah Mohamed，佐藤良一：コンクリートの低収縮化によるRC部材の曲げ性能の向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.757-762，2001.6.
- 10) Tanimura, M., Sato, R., Shimoyama, Y. and Omori, H. : Improvement of Flexural Behavior of Reinforced High Strength Concrete Members by Reducing Autogenous Shrinkage, *Concrete Science and Engineering*, Vol.3, No.11, pp. 179-184, 2001.9.
- 11) 平松洋一，谷村 充，正木 聡，佐藤良一：自己及び乾燥収縮を考慮したRC部材の変形・ひび割れ幅の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.745-750，2002.6.
- 12) 宮澤伸吾，田澤榮一：セメント系材料の自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.699-704，1996.6.
- 13) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー93，pp.46-47，1998.7.
- 14) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.195-198，1996.11.
- 15) CEB-FIP MODEL CODE 1990, Thomas Telford, pp: 61-62.
- 16) 楊 楊，佐藤良一，田澤榮一：硬化過程にある高強度コンクリートの線膨張係数測定方法の一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.961-966，2000.6.
- 17) 丁 海文，河野広隆，渡辺博志，佐藤重一：高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.955-960，2000.6.
- 18) Yang, Y and Sato, R. : A New Approach for Evaluation of Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete under Heat of Hydration, *Third International Research Seminar on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, pp. 51-65, 2002.6.
- 19) 佐藤良一，河合研至，小野 敦，長谷川泰聰：低品質再生細・粗骨材を用いたRC部材の力学特性，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.291-298，2000.2.

(2003. 8. 14 受付)

## A GENERAL METHOD FOR EVALUATING THE EFFECT OF LENGTH CHANGE AT EARLY AGES ON CRACK AND DEFORMATION OF RC FLEXURAL MEMBERS

Makoto TANIMURA, Ryoichi SATO, Yoichi HIRAMATSU and Hikotsugu HYODO

This study investigates the effect of length change at early ages on flexural performance of reinforced high-strength concrete members, and proposes design equations for evaluating the crack width and deformation of RC flexural members considering the effect of length change prior to loading. The results show that length change before loading affect serviceability limit states such as flexural cracking load, crack width and deformation of the RC beams. In addition, flexural crack widths and curvatures of RC beams can be accurately calculated by the proposed equations, taking into account the stress change in the tension reinforcement from the state where the stress in concrete at the depth of the tension reinforcement is zero.