

論文 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

平松 洋一^{*1}・谷村 充^{*2}・正木 聡^{*1}・佐藤 良一^{*3}

要旨：収縮レベルを制御した高強度コンクリートを用いて作製した RC 部材の曲げひび割れ・変形性状を実験的に検討し、併せて載荷以前に生じる収縮・膨張を考慮したひび割れ幅・変形の評価方法を検討した。その結果、乾燥を受けた場合にも、低収縮化や膨張を付与したことによるひび割れ幅の抑制効果が保持されること、鉄筋位置におけるコンクリート応力がゼロの状態からの鉄筋応力の変化量を考慮することにより、コンクリートの収縮・膨張量の大小に拘わらず、ひび割れ幅ならびに変形量をほぼ統一的に評価できること、示方書式によるひび割れ幅の計算値は、実測値を 1.1~1.6 倍程度過大評価することなどが明らかとなった。
キーワード：高強度コンクリート、自己収縮、乾燥収縮、変形、ひび割れ幅

1. はじめに

近年、混和材料の開発が進み、高強度・高流動コンクリートが比較的容易に製造できるようになった。この種のコンクリートの活用により、部材断面耐力の増大、部材断面の薄肉化、さらに、部材の耐久性向上などが期待される。その一方で、この種のコンクリートでは、材齢初期の段階から自己収縮が顕在化し、RC 部材における変形・ひび割れ性状への悪影響が懸念される¹⁾。これまでも、自己収縮が RC 部材の変形・ひび割れ性状に与える影響や、その評価方法について検討されている²⁾が、乾燥を受けてコンクリートが大きく収縮する場合や、膨張材の使用によって載荷以前に膨張を生じる場合を対象に検討されたものは少ない。

そこで本研究では、自己収縮低減に効果的な低熱ポルトランドセメント(LC)を使用し、これ

と膨張材(EX)や収縮低減剤(SRA)を組み合わせ、低収縮化を図った高強度コンクリートによって RC はりを作製し、これが自己収縮あるいは乾燥収縮を受けた場合の曲げ変形・ひび割れ性状を実験的に検討し、併せて載荷以前に生じる収縮・膨張を考慮した変形・ひび割れ幅の評価方法を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

本研究で使用した材料を表-1に示す。また表-2に本研究で用いたコンクリートの配合を示す。高性能減水剤の添加量は、スランプフローが 60±5cm の範囲となるように調整し、コンクリートの空気量は 2.0%以下とした。使用した高強度コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた NC、低熱ポルトランドセメント

表-1 使用材料

材料(記号)	種類/特性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント(N)/密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3500cm ² /g
	低熱ポルトランドセメント(L)/密度：3.22g/cm ³ ，比表面積：3310cm ² /g
膨張材 (EX)	CSA系/密度：2.96g/cm ³ ，比表面積：3050cm ² /g
収縮低減剤 (SRA)	低級アルコールのアルキレンオキシド付加物
細骨材 (S)	陸砂/表乾密度：2.62g/cm ³ ，吸水率：1.66%，F.M.：2.84
粗骨材 (G)	砕石/最大寸法：20mm，表乾密度：2.64g/cm ³ ，吸水率：0.85%，F.M.：6.61
減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系高性能減水剤

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所第1研究部建設技術グループ 主任研究員 工修 (正会員)

*3 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

表-2 配合表

配合記号	セメント種	W/(C+EX)	単位量(kg/m ³)						SP(%)
			W	C	EX	S	G	SRA	
NC	N	0.3	175	583	—	800	832	—	0.90
LC	L	0.3	175	583	—	809	832	—	0.50
LE	L	0.3	175	543	40	806	832	—	0.58
LS	L	0.3	169	583	—	809	832	6	0.51
LES	L	0.3	169	543	40	806	832	6	0.60

を使用した LC, 低熱ポルトランドセメントに膨張材を混和した LE, 収縮低減剤を混和した LS, 両者を併用した LES の 5 種である。

2.2 供試体の作製

コンクリートの圧縮強度, 弾性係数試験用供試体としてφ10×20cm の円柱供試体を, 割裂引張試験用供試体としてφ15×20cm の円柱供試体を各々のコンクリートで作製した。また自由収縮ひずみを測定するため

200×250×500mm の角柱供試体を各々の配合, 養生条件ごとに 1 体ずつ作製した。自己収縮や乾燥収縮が RC 部材の変形・ひび割れ性状に及ぼす影響を調べるため RC はり供試体を各々の配合, 養生条件ごとに 1 体ずつ作製した。なお RC はり供試体は 200×250×2700mm の矩形断面とし有効高さが 210mm となるように引張鉄筋(D19, 弾性係数=1.90×10⁵N/mm²)を配置した。鉄筋比は 1.36% であり, 鉄筋のかぶり厚は底面及び側面から 30.5mm とした。

全ての供試体は打ち込み後脱型まで表面を飽水状態に保ち, 脱型後直ちにアルミ粘着テープを用いて封緘養生した。供試体の半数を材齢 7 日に表面のシールを取り除き気中乾燥させた。

2.3 計測方法及び載荷方法

圧縮強度試験及び割裂強度試験は JIS A 1108 及び JIS A 1113 に弾性係数の測定は JIS A1147 に準じて行った。

打ち込み直後からの自己収縮ひずみ, 乾燥収縮ひずみは低弾性型埋め込み型ひずみ型(弾性

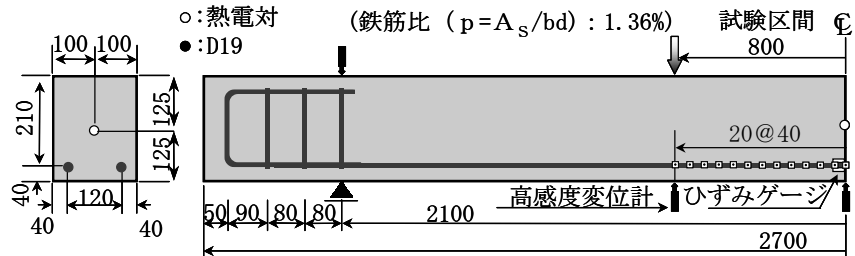


図-1 RC はり供試体概要図(単位 mm)

表-3 コンクリートの強度特性(標準養生)

強度特性	NC	LC	LE	LS	LES
圧縮強度(N/mm ²)	85.3	73.5	83.3	70.5	76.1
ヤング係数(kN/mm ²)	36.5	38.7	38.6	36.4	37.6
割裂引張強度(N/mm ²)	4.79	5.17	5.30	4.68	4.65
割裂引張強度/圧縮強度	1/17.8	1/14.2	1/15.7	1/15.0	1/16.3

係数: 約 40N/mm², 外寸φ20×104mm, 標点距離: 100mm)を供試体中央に設置し計測した。それと平行して供試体の温度を熱電対により計測し, コンクリートの線膨張係数を 10×10⁻⁶/°C と仮定し, 温度ひずみを補正した。

RC はり供試体の概要図を図-1 に示す。主鉄筋中央にひずみゲージを貼り付け, 鉄筋ひずみの経時変化より収縮による拘束応力を算出した。また RC はり供試体内にダミーゲージを, RC はり供試体中央に熱電対を設置しコンクリートの温度変化による影響を取り除いた。収縮による拘束応力は平面保持を仮定し, 力の釣合いから式(1)を用いて算出した。

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

$$P_s = A_s E_s \varepsilon_s$$

σ_c : 引張下縁のコンクリート応力

A_c : コンクリートの断面積, d : 有効高さ

A_s : 鉄筋の断面積, C_g : 図心位置の高さ

I_c : コンクリートの断面 2 次モーメント

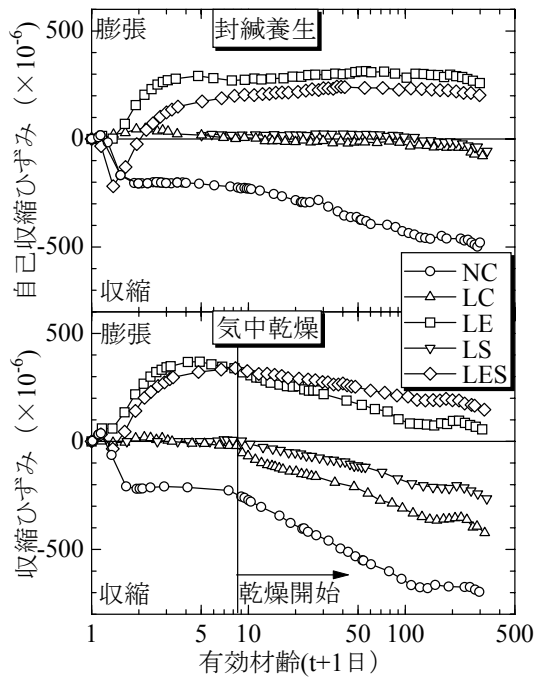


図-2 自己・乾燥収縮ひずみの経時変化

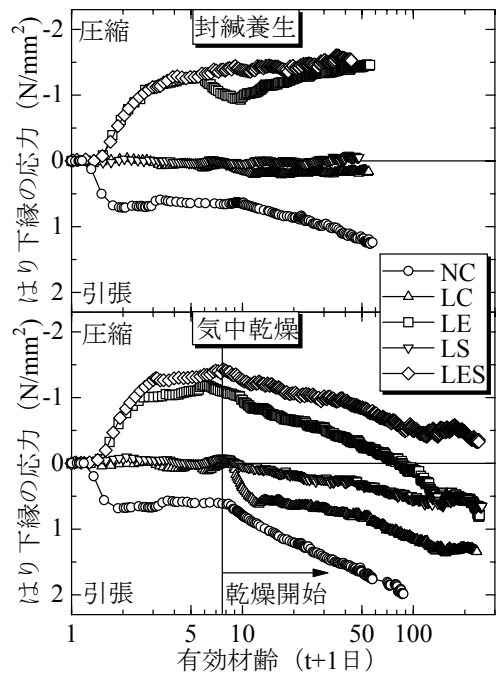


図-3 RCはり下縁の拘束応力の経時変化

h : はりの高さ, ϵ_s : 鉄筋ひずみ

E_s : 鉄筋の弾性係数

載荷試験は図-1のように支間 2100mm, 等曲げ区間 800mm の 2 点載荷試験とした。変形は支点, 載荷点, 支間中央において高感度変位計(感度 0.005mm)を用いて計測した。ひび割れ幅の測定は鉄筋高さにコンタクトチップを貼り付けコンタクトゲージ法により測定し, その実測値をひび割れ幅とした。コンタクトチップの間隔は, ひび割れ幅を極力正確に評価できるように 20mm とした。

3. 結果及び考察

3.1 コンクリートの強度特性

表-3に 20℃の水中で養生した供試体の材齢 28 日における強度特性を示す。低熱ポルトランドセメントの使用により普通ポルトランドセメントの使用と比較して圧縮強度は最大約 15%小さくなるが, 膨張材を混和することにより増大する傾向がある。コンクリートの違いによる弾性係数の差は小さい。圧縮強度に対する割裂引張強度の比は低熱ポルトランドセメントのみ使用した LC が最大となった。

表-4 載荷時材齢, 載荷時材齢における自由収縮ひずみ載荷直前のはり下縁の応力

配合	養生条件	載荷時	自由収縮	はり下縁
		材齢 (day)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	の応力 (N/mm^2)
NC	封緘	62	-381	1.27
	乾燥	116	-649	2.03
LC	封緘	70	-13	0.16
	乾燥	263	-359	1.35
LE	封緘	64	307	-1.45
	乾燥	262	88	0.80
LS	封緘	63	22	-0.06
	乾燥	270	-231	0.65
LES	封緘	61	238	-1.52
	乾燥	268	212	-0.33

3.2 自由収縮ひずみ

封緘養生供試体の自己収縮ひずみ及び, 気中乾燥供試体の収縮ひずみと有効材齢の関係を図-2に示す。普通ポルトランドセメントを使用した NC と比較し, セメント種を低熱ポルトランドセメントとすることで, 自己収縮が大幅に低減され, 長期的にもほぼゼロとなっている。膨張材を混和した LE, LES では, 膨張ひずみが生じており, 長期的にも残留している。乾燥を受ける場合の収縮量は, 収縮低減剤を添加した LS, LES の場合がその発生速度が小さく, 特に乾燥を受ける場合の収縮抑制には, 収縮低減剤の使用が効果的である。以上のことより, 初期

材齢で急激に生じる高強度コンクリートの自己収縮低減には膨張材の使用が、長期的に乾燥を受ける場合の持続的な収縮低減には、収縮低減剤の使用が有効であるといえる。

3.3 はり下縁の拘束応力

図-3に式(1)より算出したはり下縁の拘束応力と有効材齢の関係を示す。また表-4にRCはり載荷時材齢における収縮ひずみ、載荷直前におけるはり下縁のコンクリート応力を示す。拘束応力の観点からも、低熱ポルトランドセメントの使用と、乾燥を受ける場合の膨張材と収縮低減剤の併用は特に効果的である。

3.4 RCはりの曲げ性状

(1) ひび割れ性状

載荷時からの鉄筋応力の増加量と最大ひび割れ幅の関係を図-4に示す。またコンクリートの引張部を無視したひび割れ断面における鉄筋応力の計算値が約 200N/mm^2 における最大ひび割れ幅・平均曲率を表-5に示す。NC に対するひび割れ幅の低減比について、封緘養生の場合を比較すると、LC, LS の最大ひび割れ幅は約 10%低減されており、はり下縁に圧縮応力が残留した LE, LES では、最大ひび割れ幅が約 40%減となり、大幅に低減されている。乾燥を受けた場合について、NC と比較すると、LC, LE が 40%減、LS, LES が 30%減となった。これより、乾燥を受けた場合にも、低収縮化や膨張を付与したことによるコンクリートの種類によって最大ひび割れ幅が大幅に異なっている。この理由としては、ここでの鉄筋応力の増加量には載荷以前において蓄積されている鉄筋応力を考慮されていないことが考えられる。図-5は、鉄筋応力の増加量に及ぼす収縮・膨張の影響を示す概念図であるが、コンクリートが収縮した場合には、同一荷重作用時において、鉄筋位置のコンクリート応力がゼロの状態からの鉄筋応力の増加量は σ_{s2} だけ大きく ($\sigma_{s1} + \sigma_{s2}$) となる。一方、コンクリートが膨張した場合には、

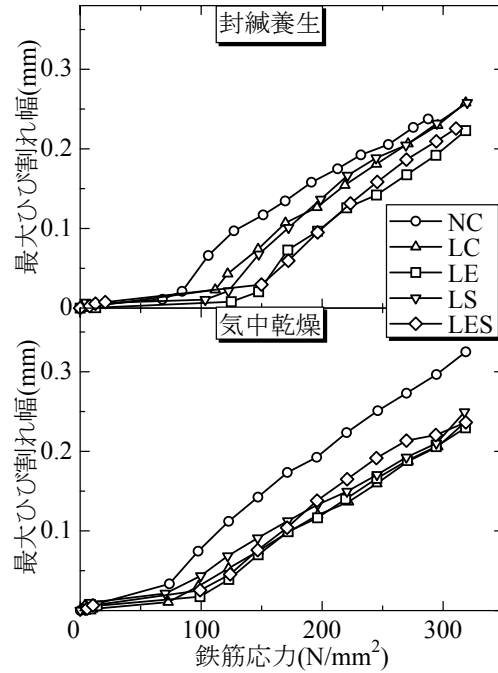


図-4 最大ひび割れ幅と鉄筋応力の関係

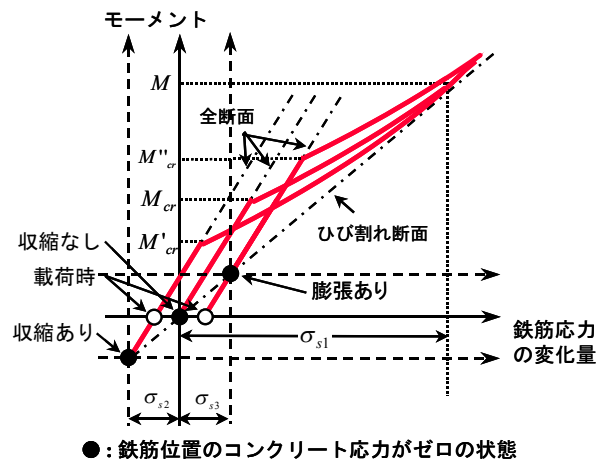


図-5 収縮・膨張が鉄筋応力の増加量に及ぼす影響

表-5 鉄筋応力 $\approx 200\text{N/mm}^2$ における最大ひび割れ幅・平均曲率

養生条件		封緘養生					気中乾燥				
配合		NC	LC	LE	LS	LES	NC	LC	LE	LS	LES
最大ひび割れ幅	実測値(mm)	0.16	0.13	0.10	0.14	0.10	0.19	0.12	0.12	0.13	0.14
	配合間の比較(NC=1.0)	1.0	0.8	0.6	0.9	0.6	1.0	0.6	0.6	0.7	0.7
	養生条件による比較	—	—	—	—	—	1.2	0.9	1.2	1.0	1.5
平均曲率	実測値($\times 10^{-6}/\text{mm}$)	6.81	5.25	4.47	5.44	3.97	7.66	7.59	5.97	7.19	5.47
	配合間の比較(NC=1.0)	1.0	0.8	0.7	0.8	0.6	1.0	1.0	0.8	0.9	0.7
	養生条件による比較	—	—	—	—	—	1.1	1.4	1.3	1.3	1.4

σ_{s3} だけ小さくなり ($\sigma_{s1} - \sigma_{s3}$) となる。この鉄筋応力の変化分を取り入れた鉄筋応力の増加量と最大ひび割れ幅との関係を示すと図-6のようである。表-6には、鉄筋位置のコンクリート応力がゼロの状態からの鉄筋応力の変化量が約 200N/mm^2 となる時点の最大ひび割れ幅・平均曲率の実測値を示すが、このように、荷重前の鉄筋応力を考慮することにより、ひび割れ幅の差は相当に小さくなり、ひび割れ幅をほぼ統一的に評価できるといえる。

次に土木学会コンクリート標準示方書(以下示方書)におけるひび割れ幅算定式によるひび割れ幅の予測値について検討する。示方書³⁾では式(2)が採用されている。

$$w = k \{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (2)$$

- w : ひび割れ幅, k : 1.0, c : かぶり
- c_s : 鉄筋の中心間隔, ϕ : 鉄筋径
- ε'_{csd} : 収縮, クリープを考慮した値
- σ_{se} : 鉄筋応力の増加量

図-7は最大ひび割れ幅と計算で求めたひび割れ断面における鉄筋ひずみの関係を示したものである。ここでは収縮量の大きなNC(気中乾燥)と膨張ひずみが残留しているLES(封緘養生)を比較する。式(2)における σ_{se} には、鉄筋と同位置におけるコンクリート応力がゼロとなる状態からの鉄筋ひずみの変化量を加味している。図中には、実測値と示方書式の比率も合わせて示した。なお ε'_{csd} は静的荷重のため0とした。この結果より示方書のひび割れ幅算定式は実測値を1.1~1.6倍過大評価することがわかる。こ

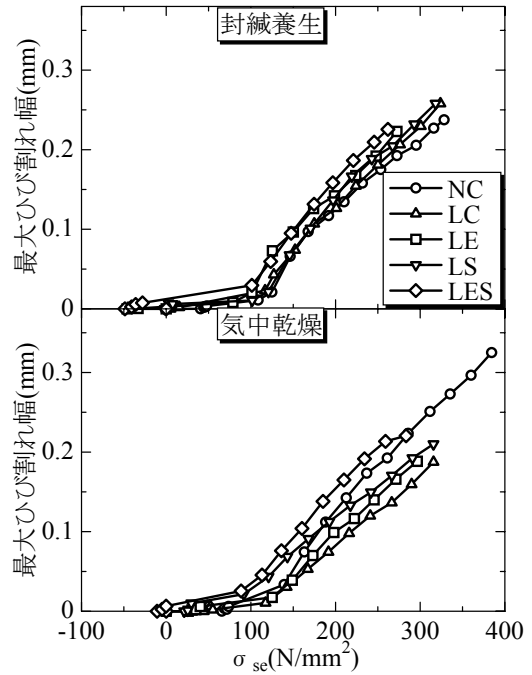


図-6 最大ひび割れ幅と鉄筋位置のコンクリート応力=0状態からの鉄筋応力の変化量の関係

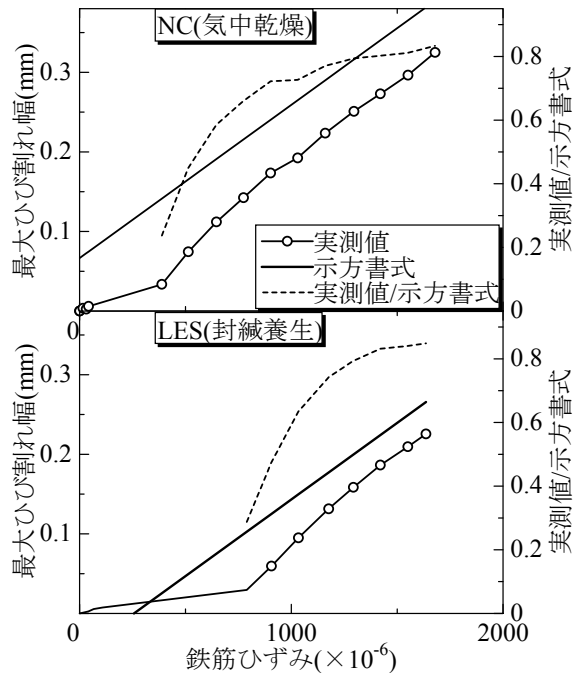


図-7 最大ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係

表-6 鉄筋位置のコンクリート応力=0状態からの鉄筋応力変化量 $\approx 200\text{N/mm}^2$ における最大ひび割れ幅・平均曲率

養生条件		封緘養生					気中乾燥				
		NC	LC	LE	LS	LES	NC	LC	LE	LS	LES
最大ひび割れ幅	実測値(mm)	0.12	0.13	0.14	0.14	0.16	0.11	0.07	0.10	0.11	0.17
	配合間の比較(NC=1.0)	1.0	1.1	1.2	1.2	1.4	1.0	0.7	0.9	1.0	1.5
	養生条件による比較	—	—	—	—	—	1.0	0.6	0.7	0.8	1.0
平均曲率	実測値($\times 10^{-6}/\text{mm}$)	5.06	5.25	6.62	5.44	6.69	4.22	5.19	4.81	6.00	7.00
	配合間の比較(NC=1.0)	1.0	1.0	1.3	1.1	1.3	1.0	1.2	1.1	1.4	1.7
	養生条件による比較	—	—	—	—	—	0.8	1.0	0.7	1.1	1.0

これは示方書式では付着の影響が取り入れられておらず、高強度コンクリートのように高い付着力を有する場合には、引張部コンクリートの剛性寄与が正当に評価されないためであると考えられる。

(2) 変形状

表-5において平均曲率も最大ひび割れ幅と同様に低収縮化の効果が顕著に表れている。封緘養生での曲率はNCに対してLC, LSが約20%減少, LE, LESで約40%減となった。乾燥を受けた場合について、NCと比較すると、LCは同等であり、LS, LE, LESの順に、10, 20 および 30% 減となった。これより、乾燥を受ける場合には、膨張材や収縮低減剤が効力を発揮しており、それらの併用が特に効果的である。次に、ひび割れ幅における場合と同様に、载荷以前の鉄筋応力を考慮して、平均曲率と曲げモーメントの関係を評価する。計算手法については、既往の報告²⁾に詳述されており、ここでは割愛する。

図-8に、鉄筋応力の変化量を考慮した計算値と実測値を比較して示す。図中における従来理論とは载荷以前の応力を無視したものであり、収縮考慮とは载荷以前の収縮・膨張を考慮し、鉄筋位置のコンクリート応力がゼロの状態からの鉄筋応力の変化量を考慮したものである。これより、乾燥を受けて载荷以前におけるコンクリートの収縮が大きく進行したNCや、膨張材の使用によって载荷以前に膨張を生じているLESにも、鉄筋位置のコンクリート応力がゼロの状態からの鉄筋応力の変化量を考慮することにより、ほぼ統一的に変形量を評価できるといえる。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

1. 初期材齢における自己収縮の低減には膨張材の使用が、長期的に乾燥を受ける場合の持続的な収縮低減には、収縮低減剤の使用が効果的である。
2. 乾燥を受けた場合にも、低収縮化や膨張を付

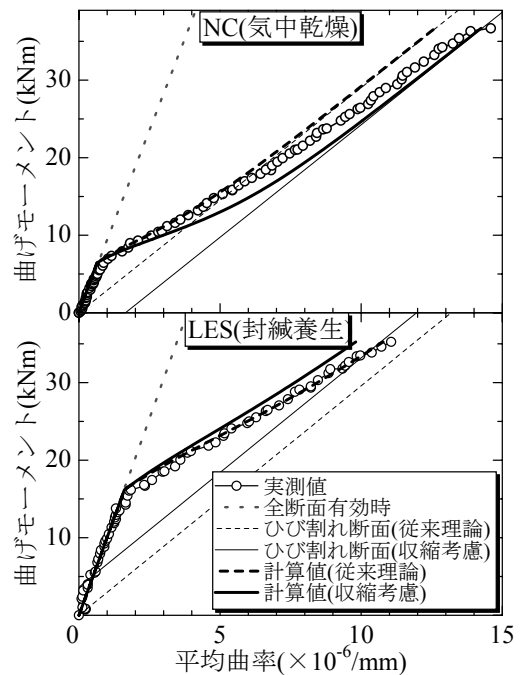


図-8 計算値と実測値の比較

与したことによるひび割れ幅の抑制効果が保持される。

3. 鉄筋位置におけるコンクリート応力がゼロの状態からの鉄筋応力の変化量を考慮することにより、コンクリートの収縮・膨張量の大小に拘わらず、ひび割れ幅ならびに変形量をほぼ統一的に評価できる。
4. 示方書式によるひび割れ幅の計算値は、実測値を1.1~1.6倍程度過大評価しており、特に、高強度コンクリートの場合における引張部コンクリートの剛性寄与分を考慮する必要性が示唆された。

参考文献

- 1) 宮澤伸吾, 田澤榮一, 佐藤 剛, 佐藤克俊: 鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No.1, pp.57-62, 1993.6
- 2) 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
- 3) 土木学会: [平成8年制定] コンクリート標準示方書 [設計編], 1996.3