論文 高強度コンクリートの低収縮化による RC 部材の時間依存性曲げ挙 動の改善

平松 洋一*1・谷村 充*2・楊 楊*3・佐藤 良一*4

要旨:収縮量が異なる2種類の高強度コンクリートを用いて作製した RC 曲げ部材のひび割 れ・変形挙動の時間依存性について検討した。その結果,コンクリートの低収縮化によるひ び割れ幅,変形量の低減効果は長期にわたり保持されること,コンクリートの収縮・膨張の 影響を考慮して示方書式より求めた最大ひび割れ幅の計算値は,実測値を概ね評価するが, ひび割れ幅が小さい場合や荷重レベルが高い場合において予測精度が低くなる可能性のある こと,などを明らかとした。

キーワード:高強度コンクリート,自己収縮,時間依存性挙動,膨張材,収縮低減剤

1. はじめに

高強度コンクリートの利用が進んでいるが, この種のコンクリートにおいては,初期材齢か ら大きな自己収縮が発生し,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。 今後,種々の目的により,高強度コンクリート を利用するケースは増えるものと予想され,自 己収縮の抑制と,それによる部材性能の向上は 重要な課題である。過去に,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,さらに自己収縮の低減による変形・ ひび割れ性状の改善効果について検討が行われ ている¹⁾。しかしながら,持続荷重下において 検討されたものは少ない。

そこで,本研究では,収縮の大きい高強度コ ンクリートと膨張材・収縮低減剤を併用して収 縮を抑制した高強度コンクリートを用いて作製 した RC 曲げ部材に,一定の持続荷重を作用さ せた際のひび割れ・変形挙動を実験的に検討し た。持続荷重レベルは2水準とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究で使用した材料を表 - 1 に示す。表 - 2 には本研究で用いたコンクリートの配合,フレ ッシュ性状を示す。本研究で使用したコンクリ ートは自己収縮の大きな NC,膨張材・収縮低 減剤を併用し自己収縮を抑制した NES の2配合 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

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/密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3280cm ² /g
膨張材(EX)	石灰系/密度:3.15g/cm ³ ,比表面積:3490cm 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:2.61g/cm ³ ,吸水率:1.44%,F.M.:2.82
粗骨材(G)	砕石/最大寸法:20mm,表乾密度:2.65g/cm ³ ,吸水率:0.74%,F.M.:6.52
減水剤(SP)	ポリカルボン酸系高性能減水剤

表 - 1 使用材料

*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 中央研究所 工修 (正会員)

*3 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻 博(工)(正会員)

*4 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)

配合	記号	NC	NES
W/(C·	+EX)	0.3	0.3
単位量(kg/m ³)	W	175	175
	С	583	543
	EX	-	40
	S	797	797
	G	835	835
	SRA	-	6
SP(%)	0.70	0.60
スランプフ	'ロー (cm)	55.0	47.5
空気量	量(%)	2.9	1.6
打ち込み	温度()	14.3	15.3

表-2 配合およびフレッシュ性状

試体として 10×20cmの円柱供試体を 割裂引 張試験用供試体として 15×20cm 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 200×250×300mm の角柱供試体を各々の配合,養生条件ごとに4 体ずつ作製した。クリープ特性を把握するため に 200 × 250 × 300mm の角柱供試体を作製した。 自己収縮や乾燥収縮が持続荷重下の 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で 2 体ずつ作製し た。なお RC はり供試体は 200×250×2400mm の矩形断面とし有効高さが 210mm となるよう に引張鉄筋(D19(縦リブに幅 4mm, 深さ 3mmの 溝を切削加工),弾性係数=197kN/mm²)を配置 した。鉄筋比は 1.15% であり,鉄筋のかぶりは 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。RC はり載荷と同時(有





図 - 2 持続載荷試験載荷装置

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 A 1147 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 縮ひずみおよびクリープひずみは低弾性埋込型 ひずみ計(弾性係数:約 40N/mm²,外寸 20× 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/ と仮定し 温度ひずみを補正した。

クリープ試験には図 - 1 のような載荷装置を 用いて行い,載荷応力は載荷時材齢における圧 縮強度の20%を導入した。なお,載荷応力の変 動は目標応力の5%以内に制御した。

RC はりに使用した鉄筋にはスパン中央部の 60cm の間にひずみゲージを 2cm 間隔で貼り付 け,鉄筋ひずみの軸方向分布を測定した。打ち 込み直後からの鉄筋ひずみの経時変化を測定す ることにより RC はり下縁の拘束応力を算出し た。また RC はり供試体内にダミーゲージを, 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。

$$\sigma_{c} = -P_{s} \left[\frac{1}{A_{c}} + \frac{1}{I_{c}} (d - C_{s})(h - C_{s}) \right]$$
(1)

$$P_{s} = A_{s} E_{s} \varepsilon_{s}$$

$$_{c} : 引張下縁のコンクリート応力$$

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

表-3 供試体名および載荷荷重

供試体名	使用コンクリート	載荷モーメント(kNm)	鉄筋応力(N/mm ²)
NC15	NC	12 7	150
NES15	NES	13.7	150
NC30	NC	27 4	200
NES30	NES	27.4	300

h:はりの高さ, :鉄筋ひずみ

*E*_s:鉄筋の弾性係数

RCはりの持続載荷は図 - 2のように2体の供 試体でH型鋼を挟み込むことにより,それぞれ の変形がもう一方の供試体へ影響を及ぼさない ように配慮し,載荷した。導入応力および供試 体名は表 - 3 に示す通りである。変形は支間中 央部に高感度変位計(感度 1/1000mm)を設置し 測定した。圧縮ひずみの測定には圧縮縁より 1cm の高さにコンタクトチップを 100mm 間隔 で貼り付け,等曲げ区間の平均値を圧縮ひずみ とした。ひび割れ幅の測定には鉄筋高さにコン 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 20mm とした。

なお,試験期間中の雰囲気気温および湿度の 経時変化は図-3 に示す通りであり,平均気温 は16,平均湿度は61%であった。

3. 結果および考察

3.1 自由収縮ひずみ

図 - 4 に自由収縮ひずみの経時変化を示す。 膨張材の膨張作用により,初期材齢における進 行の速い自己収縮が相殺され,さらに幾分かの 膨張ひずみを生じている。気中乾燥下における 収縮ひずみについて,乾燥を開始した時点から 材齢約1年までの変化量をみると,NCが約300 ×10⁻⁶に対して,NESは約150×10⁻⁶となってお り,NESの使用により収縮ひずみが約50%低減 されている。封緘養生を継続した場合も,NES の自己収縮ひずみは,NCのそれより50%程度 小さい結果である。これは,主に収縮低減剤の 作用によるものである。



図-3 試験期間中の環境条件



図 - 4 自由収縮ひずみの経時変化



(載荷時有効材齢:16.7日)

3.2 クリープ特性

図 - 5 に,単位クリープひずみの経時変化を 示す。クリープひずみは,クリープ供試体のひ ずみから載荷時の弾性ひずみおよび無拘束供試 体のひずみを差し引いて求めた。まず,封緘養 生下の結果をみると,NESの方がNCよりも単 位クリープひずみが大きく,また,両者の差は 載荷後の比較的早い段階で生じている。NC と 比較して,NES では膨張材の混和によりセメン ト硬化体中に微細な空隙がより多く形成されて



図-6 乾燥下のクリープひずみ

おり,吸着水や層間水の滲出が生じやすかった ことが考えられる。気中乾燥下における NC と NES の差は,ほとんどみられない。これは,収 縮低減剤の作用によるものと考えられる。すな わち,NES の場合,気中乾燥下において、載荷 中に生じる毛細管張力²⁾が収縮低減剤の混和に よって低減され³⁾,これが膨張材によるクリー プの増加を相殺したことが考えられる。

図 - 6 は基本クリープひずみと乾燥収縮ひず みの和を,全クリープひずみと比較して示した ものである。両者はほぼ一致しており,一般に いわれている乾燥クリープがほとんど認められ ない。この理由の一つとして,用いたコンクリ ートは乾燥収縮が小さく,無拘束供試体はそれ による損傷をほとんど受けていないため,載荷 供試体と無拘束供試体との乾燥収縮ひずみ量に 差が生じなかったことが考えられる。

3.3 はり下縁の拘束応力

図 - 7 は式(1)により算出した RC はり下縁の 拘束応力の経時変化を示したものである。なお, ここでは各配合 2 体の供試体の平均値を示して いる。これより,自己収縮が大きな NC の場合, RC はり下縁に約 0.75N/mm²の引張応力が生じ るのに対し,膨張材・収縮低減剤の混和により RC はり下縁に約 0.5N/mm²の圧縮応力が生じる ことがわかる。

3.4 RC はりの時間依存性挙動

(1) ひび割れ性状

図 - 8 に初期載荷直後および持続荷重載荷後 約1年経過した時点の平均,最大ひび割れ幅を



図 - 7 RC はり下縁応力の経時変化

示す。これよ り鉄筋応力が 150N/mm²の 場合,自己収 縮を抑制した NES は初期 載荷重後にお いて平均,最 大ひび割れ幅



ともに NC よりも約 70%小さく,持続荷重載荷 後約1年経過した後では約65%小さい。また鉄 筋応力が300N/mm²の場合では初期載荷直後に 平均ひび割れ幅は約20%,最大ひび割れ幅は約 30%小さく,約1年経過した後に平均ひび割れ 幅は約10%,最大ひび割れ幅は約25%小さくな っていることから,荷重レベルに関わらず収縮 の抑制によるひび割れ幅の低減効果は保持され ている。

図 - 9 に平均ひび割れ間隔の経時変化を示す。





図 - 12 収縮の最大ひび割れ幅への影響 図には,標準示方書⁴⁾のひび割れ幅算定式((2) 式)におけるひび割れ間隔を表す項より求めた 計算値を併記している。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \mathcal{E}'_{csd} \right]$$
(2)

図 - 10 は実測の最大ひび割れ幅と示方書よ り求めた計算値の関係を示したものである。ひ び割れ幅の計算に際し,収縮とクリープの影響 による 'esd の値については 100×10⁻⁶ としてお り,鉄筋応力の増加量 se については鉄筋位置 のコンクリート応力=0 となる状態からの変化 量としている。これより,NES15 のように鉄筋 応力レベルが低く,収縮の抑制によりひび割れ 幅が小さい場合は,示方書式は実測値を過大評 価していることがわかる。これは示方書による 算定式はひび割れ間隔が定常状態に近づく鉄筋 応力が高いレベルを対象にしているため⁵⁾応力 レベルが低い場合は十分な精度が確保されてな いと考えられる。NC15,NES30 については収



図 - 13 平均付着応力の経時変化

縮・膨張を考慮することにより初期載荷,持続 載荷ともに比較的精度よくひび割れ幅が評価で きている。しかし,NC30 は持続載荷中にひび 割れ幅算定式よりも実測値は大きなひび割れ幅 となっている。

図 - 11 は初期載荷終了後から1年経過した時 点における平均,最大ひび割れ幅の増加量を示 したものである。これより,一般的な応力状態 で低収縮化を図った NES15 はひび割れ幅の増 加を大幅に低減していることがわかる。しかし, 応力レベルが高くなるとその限りではない。

図 - 12 に無拘束供試体より計測された収縮 ひずみと最大ひび割れ幅の増加量の関係を示す。 これより,NES30を除く供試体は収縮によるひ び割れ幅への影響は同等であることがわかる。 これより NES15 のひび割れ幅の増加量が小さ い理由として低収縮化によるひび割れ幅抑制効 果が挙げられる。

図 - 13 に初期載荷終了後からの平均付着応 力の経時変化を示す。ここで平均付着応力は式 (3)のように求めた。

 $\tau_{ave} = \frac{\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_{s,\min}}{L_{ave}} \cdot \frac{A_s E_s}{U_s}$ (3)
ここに ave: 平均付着応力, U_s : 周長 L_{ave} : 平均ひび割れ間隔, A_s : 鉄筋断面積

s,max, s,min:最大,最小鉄筋ひずみ

*E*_s: 鉄筋のヤング係数

なお,ここでの平均ひび割れ間隔には図-9 に示す実測値を使用した。これより,NES30を 除く供試体は付着応力がほぼ一定となっている が,NES30は付着応力が経時的に減少する傾向 がみられる。これより,NES30のひび割れ幅増 加量が大きくなった理由として,付着応力の減 少によるひび割れ幅の増加が,低収縮化による ひび割れ幅の減少効果を上回ったことが考えら れる。

以上のことから,ひび割れ幅に及ぼす低収縮 化による影響は応力レベルが低い状態では顕著 に表れる。応力レベルが高い状態においては付 着応力の低下が生じ,ひび割れ幅が増大するこ とになるが,低収縮化による持続荷重載荷時の ひび割れ低減効果を考慮すると,低収縮化は有 利に作用する。

(2) 変形性状

図 - 14 に初期載荷直後および持続荷重載荷 後約1年経過した後の平均曲率を示す。これよ り鉄筋応力が150N/mm²の場合,収縮を抑制し たNES は初期載荷直後において,NCよりも約 55%低減しており,また持続荷重載荷後約1年経 過した後は50%低減している。また鉄筋応力が 300N/mm²場合においても初期載荷直後におい て約20%低減しており,約1年経過した後も同 様に約20%低減していることから,荷重レベル に関わらず変形量の低減効果は保持さる。

4. まとめ

本研究の範囲内において,以下のことが明ら かとなった。

1. 膨張材・収縮低減剤の混和による低収縮化に よるひび割れ幅,変形の低減効果は持続荷重下 においても保 持される。 2. 低収縮化 による持続荷 重下における ひび割れ幅, 変形の低減効 果は鉄筋応力 が 150N/mm²



のときそれぞれ約 65% , 50%であった。

3. 土木学会標準示方書による最大ひび割れ幅 の計算値は持続荷重下において収縮・膨張を考 慮することにより比較的精度良く予測可能であ るが,ひび割れ幅が小さい場合や荷重レベルが 高い場合において,予測精度が低くなる。

4. 荷重レベルが高い場合に,膨張材,収縮低減 剤を混和したコンクリートにおいて付着応力の 低下が見られたが,低収縮化の効果によりひび 割れ幅の増大には至らない。

5. 膨張材・収縮低減剤の混和に関わらず高強度 コンクリートでは気中乾燥下におけるクリープ ひずみは基本クリープと乾燥収縮ひずみの和と ほぼ等しい値となる。

参考文献

 1)正木聡ほか: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
 2)長瀧重義ほか:コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察,コンクリート 工学 Vol.20, No.20, pp.85-95,1982.12
 3)田澤栄一ほか:乾燥収縮低減剤がセメント硬 化体の乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響, セメント技術年報,42,pp.435-438(1988)
 4)土木学会:コンクリート標準示方書(構造性能 照査編),2002
 5)土木学会:2002 年版コンクリート標準示方書 改訂資料,2002