

論文 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

正木聡^{*1}・谷村充^{*2}・Hussein, Nour-Allah Mohamed^{*3}・佐藤良一^{*4}

要旨: 膨張材, 収縮低減剤の単独使用あるいは併用によって高強度コンクリートの低収縮化を図り, それらを用いた鉄筋コンクリート部材(RHC)の曲げ性能の向上効果を実験的に検討した. その結果, 膨張材と収縮低減剤の併用は曲げ性能の向上に特に効果的であり, 平均ひび割れ幅およびたわみは, これらを用いない場合に対して, それぞれ70, 60%に低減した. また鉄筋位置で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と収縮の大きさにかかわらずほぼ同一のひび割れ幅の評価ができた. さらに, 曲率についても蓄積された変化ひずみを考慮すると予測値と実験値はほぼ同一になった.

キーワード: 高強度コンクリート, 収縮低減剤, 膨張材, 変形, ひび割れ幅

1. はじめに

近年, 混和剤の開発が進み高流動, 高強度コンクリートの製造が可能となった. この種のコンクリートを利用することにより, 構造部材の断面耐力の増大, 部材断面の薄肉化や耐久性の改善を図ることが可能である. しかしこのようなコンクリートは特に初期の自己収縮が卓越しており, 拘束されるとその拘束応力が大きく構造物のひび割れ性状に影響する場合があると指摘されている¹⁾. これまでにこの自己収縮を抑える研究がおおくなされており, 膨張材(EX), 収縮低減剤(SRA)の使用がかなり効果的であることがわかっている²⁾. しかしながら, 高強度コンクリートの低収縮化がRC部材にどのような有用性があるか研究されているものが少ない. そこで, 本研究では高

強度コンクリートの低収縮化を図り, そのRC部材の曲げ特性の改善効果を評価する.

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験で使用した材料を表-1にまとめて示す. 表-2は, コンクリートの配合とともに, コンクリート打込み時に測定したスランプフロー, 空気量およびコンクリートの打込み温度を示す. 4種類のコンクリート, すなわちNC, NE, NSおよびNESを使用した. これらは順に, 混和材料を用いない一般的な高強度・高流動コンクリート, 膨張材(EX)を混和したコンクリート, 収縮低減剤(SRA)を添加したコンクリートならびにEXとSRAを併用したコンクリートである.

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/密度: 3.16 g/cm ³ , 比表面積: 3500 cm ² /g
膨張材(EX)	CSA系 / 密度: 2.96 g/cm ³ , 比表面積: 3050 cm 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/ ; 2.62 g/cm ³ , 吸水率; 1.66%, F.M.; 2.84
粗骨材(G)	碎石/ 最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.64 g/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)	中央研究所コンクリート技術グループ主任研究員 工修	(正会員)
*3 広島大学大学院	工学研究科社会環境システム専攻 工修	(正会員)
*4 広島大学教授	工学研究科社会環境システム専攻 工博	(正会員)

表-2 コンクリートの配合とフレッシュ性状

配合およびフレッシュ性状	NC	NE	NS	NES
W/(C+EX)	0.3	0.3	0.3	0.3
s/a (%)	49.2	49.1	49.2	49.1
W (kg)	175	175	169	169
C (kg)	583	543	583	543
EX (kg)	-	40	-	40
S (kg)	800	798	800	798
G (kg)	832	832	832	832
SRA (kg)	-	-	6	6
SP ((C+EX) x mass %)	0.90	0.93	1.00	1.15
スランプフロー (mm)	623	423	630	625
空気量 (%)	1.0	0.6	1.5	1.3
コンクリートの打込み温度(℃)	19.9	21.2	18.0	19.0

2.2 供試体の作製

コンクリートの圧縮強度および弾性係数試験用に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、割裂引張強度試験用として $\phi 15 \times 20\text{cm}$ の供試体を作製した。収縮ひずみ測定用として、 $200 \times 250 \times 500\text{mm}$ の角柱供試体を、各々のコンクリートに対して1個作製した。さらに、自己収縮がたわみやひび割れ幅などに及ぼす影響を検討するために、RCはり供試体を各々のコンクリートに対して1体作製した。RCはり供試体の寸法は、幅200mm、高さ250mm、長さ2700mmであり、公称直径19mm、弾性係数 $1.9 \times 10^2 \text{ kN/mm}^2$ の鉄筋を圧縮縁から210mmの位置に配した。引張鉄筋比は、1.36%である。鉄筋のかぶり厚は、底面および側面から30.5mmとした。

全ての供試体は、コンクリートの打込み後すぐに、湿潤状態で養生した。材齢1日で脱型を行った後、水分の蒸発を防ぐためにすぐにその全面をアルミ箔粘着テープでシールした。また、各々のコンクリートに対して、強度試験用供試体の内の6個は、20℃の水中で養生を行った。

2.3 計測方法および載荷方法

圧縮強度および割裂引張強度は、それぞれJIS A 1108およびJIS A 1113に、圧縮弾性係数はJSCE-G502(案)に従って測定した。

打込み時点からの自己収縮ひずみは、低弾性型(弾性係数: 約 40 N/mm^2)の埋込みひずみ計(外寸 $\phi 20 \times 104\text{mm}$ 、標点距離 100mm)を供試体中央に設置し測定した。同時に、供試体の温度を熱電対によって測定し、コンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と仮定し、温度ひずみを補正した。

RCはり供試体の詳細図を図-1に示す。鉄筋の拘束によってコンクリート中に導入される収縮応力は、鉄筋のひずみから算出した。鉄筋ひずみを測定するために、ひずみゲージをはり供試体中央位置の鉄筋の上下面に貼付した。鉄筋ひずみに及ぼす温度の影響を補正するために、はり供試体のコンクリート中に埋込んだダミー鉄筋のひずみ、ならびにはりの中心位置に埋込んだ熱電対によってコンクリート温度を測定した。

はり下縁に生じる自己収縮応力は、平面保持を

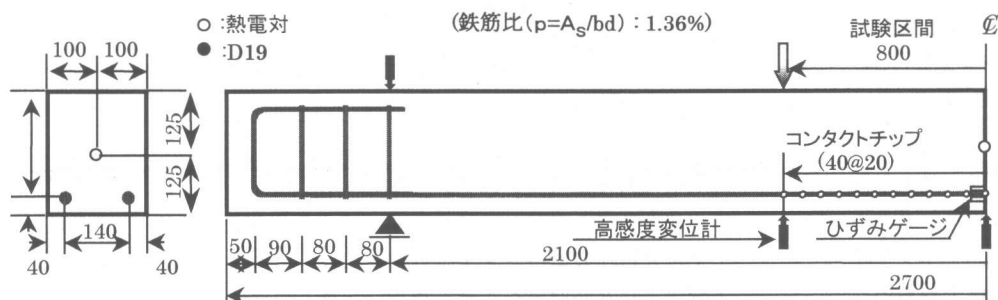


図-1 はり供試体概要図 (単位mm)

仮定し、力の釣合いから式(1)より算出した。

$$\sigma_c = Ps \left[\frac{1}{Ac} + \frac{1}{Ic} (d - Cg)(h - Cg) \right] \quad (1)$$

$$Ps = AsEs \varepsilon_s$$

σ_c : 引張下縁のコンクリート応力,

Ac : コンクリートの断面積, ε_s : 鉄筋ひずみ,

As : 鉄筋の断面積, d : 有効高さ, Cg : 図心,

h : はりの高さ, Es : 鉄筋の弾性係数,

Ic : コンクリートの断面2次モーメント.

載荷は、図-1に示すように支間2100mm、等曲げ区間800mmの2点載荷とした。たわみは、はりの中央および載荷点において、変位計(精度: 0.001mm)を用いて計測した。ひび割れ幅は、引張鉄筋と同じ深さにおいて、コンタクトゲージを用いて測定した。コンタクトチップの標点距離は、ひび割れ幅を極力正確に評価するために20mmとした。この場合の最小目盛りは0.001mmである。なお、載荷時材齢はNC、NEは62日、NS、NESは、54日である。

3. 結果と考察

3.1 コンクリートの強度特性

標準養生したコンクリートの圧縮強度、圧縮弾

性係数ならびに割裂引張強度の試験結果を表-3に示す。NCと比較すると、NEの混和によって圧縮強度および割裂引張強度は10%程度小さくなった。SRAを添加したNSの場合には、圧縮強度は若干小

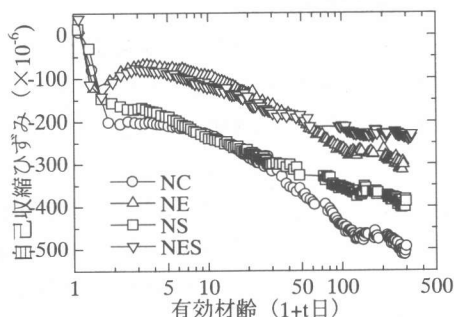


図-2 自己収縮ひずみと有効材齢の関係

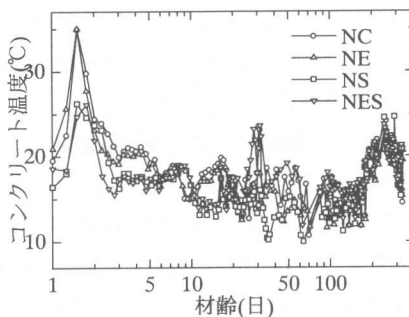


図-3 コンクリート温度と材齢の関係

表-3 20℃水中養生下におけるコンクリートの強度特性(材齢28日)

コンクリートの力学的性質	NC	NE	NS	NES
圧縮強度 (N/mm ²)	85.3	74.4	81.1	79.5
弾性係数 (kN/mm ²)	36.5	36.8	38.4	37.6
引張強度 (N/mm ²)	4.79	4.34	4.82	5.35
引張強度/圧縮強度	1/17.8	1/17.1	1/16.8	1/14.9

表-4 鉄筋応力の変化量(σ_{se})150N/mm²時の平均ひび割れ幅

	NC	NE	NS	NES
従来のRC理論に基づく平均ひび割れ幅(mm)	0.074(1.0)	0.058(0.8)	0.087(1.2)	0.054(0.7)
コンクリート応力がゼロの状態からの平均ひび割れ幅(mm)	0.030(1.0)	0.058(2.0)	0.057(1.9)	0.054(1.8)

() : NCに対するNE、NSおよびNESの比率

表-5 載荷直前の鉄筋ひずみ、その時のコンクリート応力、引張鉄筋と同じ位置にあるコンクリートの応力が0の状態からの鉄筋ひずみ、およびその時の鉄筋応力

	NC	NE	NS	NES
載荷前での鉄筋位置でのコンクリート応力(N/mm ²)	-1.0	-0.1	-0.8	0.0
載荷前での鉄筋ひずみ($\times 10^{-6}$)	-187	-16	-147	4
鉄筋位置でコンクリート応力=0のときの鉄筋応力(N/mm ²)	-40.6	-3.5	-31.6	0.9
鉄筋位置でコンクリート応力=0のときの鉄筋ひずみ($\times 10^{-6}$)	-214	-18	-167	5

さくなくなったが、割裂引張強度の低下は認められなかった。圧縮強度に対する割裂引張強度の比をみると、EXとSRAを併用したNESの場合が最も大きい結果である。

3.2 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみと有効材齢の関係を図-2に示す。また、有効材齢は図-3に示すコンクリート温度と材齢の関係から算出した。図-2でNEとNCを比較すると、材齢300日の時点において、前者は後者に対して約40%小さい。一方、SRAの添加は、材齢100日程度以降の長期材齢において自己収縮を低減している。特に、NESは材齢100日以降における収縮の増加が小さく、長期にわたる収縮抑制に対しては、EXとSRAの併用は特に有効である。これは、比較的初期の材齢における膨張材の自己膨張作用と、収縮低減剤による持続的な毛細管張力の低減作用が累加されるためである。

3.3 RCはり供試体下縁の自己収縮応力

図-4は、式(1)より計算したRCはり供試体の引張縁に生じる応力と有効材齢の関係を示す。これらの結果は、材齢約50日の時点において、NEおよびNESで作製したはり下縁の応力はNCやNSのそれと比較し無視し得ることを示している。

3.4 RCはりの曲げ性状

3.4.1 平均ひび割れ幅

図-5に、実測の平均ひび割れ幅と载荷前の収縮を無視した従来のRC理論により求めた鉄筋応力の変化量(σ_{se})との関係を示す。この鉄筋応力が 150N/mm^2 となる時点での平均ひび割れ幅の実測値を、表-4に示す。この表より、NEおよびNESはりのひび割れ幅は、NCはりと比較し約80%および70%であった。このようにRHCの曲げひび割れ性状は、自己収縮の低減化によって大幅に改善できる。ここで、ひび割れ幅は σ_{se} に強く依存するが、同じ σ_{se} で異なるひび割れ幅となっているのは、载荷以前のコンクリートの収縮によって生じる σ_{se} を無視しているためだと考えられる。この収縮が鉄筋ひずみの増加量に及ぼす影響を概念的に示したのが図-6である。図中において、 ε_{s1} および ε_{s2} は、それぞれ収縮の生

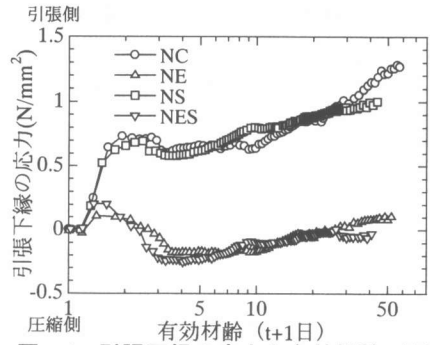


図-4 引張下縁の応力と有効材齢の関係

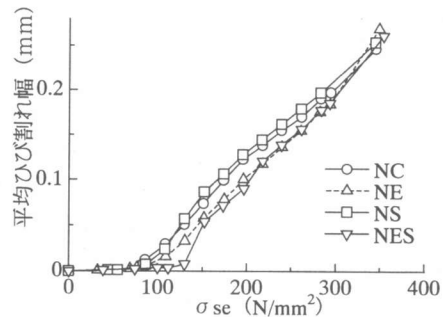


図-5 従来のRC部材の考え方による平均ひび割れ幅と σ_{se} の関係

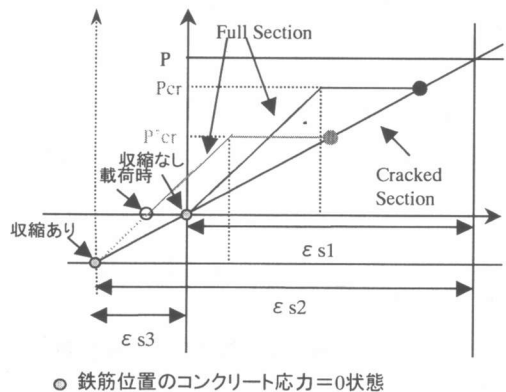


図-6 収縮が鉄筋ひずみ増加量に及ぼす影響

じない場合および収縮量の大きい場合に対して、引張鉄筋ひずみの変化量を表す。収縮の大きいコンクリートの場合には、鉄筋のひずみは圧縮状態にあるため、引張鉄筋と同位置にあるコンクリートの応力がゼロの状態から、ある荷重時点までのひずみの変化量が大きくなる。つまり、载荷以前に収縮のある場合には ε_{s3} 分だけ鉄筋ひずみの

増加量が加算されることとなる。表-5は、引張鉄筋と同位置にあるコンクリートの応力がゼロとなる状態に対して、鉄筋のひずみおよび応力を求めて示したものである。

図-7は、引張鉄筋位置におけるコンクリートの応力がゼロとなる状態からの鉄筋応力の増加量とひび割れ幅の関係を示す。表-4には、この状態からの鉄筋応力の増加量が $150\text{N/mm}^2 (= \sigma_{se})$ となる時点での平均ひび割れ幅の実測値を示す。これらより、使用状態における各配合のひび割れ幅の差は、載荷以前に生じていた収縮の影響を考慮することで小さくなる。換言すると、従来の考え方では、コンクリート応力がゼロ状態からの鉄筋応力の増加量を考えていないため、図-6中の ε_3 に相当する鉄筋応力の増加分が考慮されておらず、載荷以前に収縮がある場合には、ひび割れ幅を過小に評価する可能性がある。このように体積変化の有無に関係なくひび割れ幅を評価するためには、載荷以前の収縮の影響を考慮することが必要である。

3.4.2 変形特性

実測によるM- ϕ 関係を図-8に示す。同図には収縮を無視することで求めた全断面およびひび割れ断面におけるM- ϕ 関係の計算値を示す。ひび割れ幅の場合と同様に、従来のRC理論により求めた鉄筋応力の増加量が 150N/mm^2 となる時点でのたわみについて、NEおよびNESのそれは、NCの場合の70および60%であった。これは、NCの場合は、引張部のコンクリートはひび割れの発生により収縮が解放されるが、圧縮側においては収縮が保持されることで、曲率の増加したことが理由である。図-8からは、全断面においてはいずれのコンクリートの場合も、実測値と計算値がよく一致するが、ひび割れ断面をみると自己収縮の大きいNCやNSでは実測値が計算値よりも大きくなっている。この理由は自己収縮の影響を考慮していないためと考えられる。そこで、引張鉄筋と同位置にあ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で、ひび割れ断面におけるM- ϕ 関係を求めた。

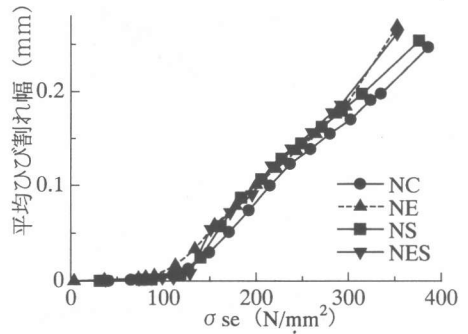


図-7 引張鉄筋と同じ位置にあるコンクリートの応力がゼロ状態から考えた平均ひび割れ幅と σ_{se} の関係

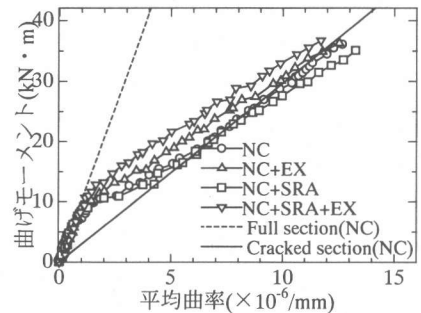


図-8 実測値におけるM- ϕ 関係

まず、平面保持を仮定し、ひび割れ断面の曲率をひずみの適合条件から求めると、式(2)の通りである。

$$\phi = \frac{\left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} - \frac{\sigma_{c1}}{E_c} \right)}{d} \quad (2)$$

σ_{se} : 鉄筋応力の変化量, E_s : 鉄筋の弾性係数,
 σ_{c1} : 圧縮縁でのコンクリート応力, d : 有効高さ,
 E_c : 載荷時のコンクリートヤング係数, ϕ : 曲率。

そして、式(2)をBranson式³⁾に組み込み按分すると式(3)を得る。

$$Ele = \left(\frac{Mcr}{Md} \right)^4 Elg + \left(1 - \left(\frac{Mcr}{Md} \right) \right)^4 \frac{Md}{\phi} \quad (3)$$

Mcr : ひび割れ発生モーメント,

Md : 変位・変形量計算時の設計曲げモーメント,

Ele : 有効曲げ剛性,

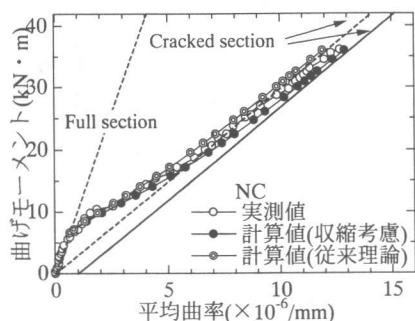


図-9 NC 実測値と計算値のM-φ関係

EI_g : 全断面有効時での曲げ剛性.

この有効曲げ剛性を用いて、各コンクリートの対するM-φ関係を求めて示したのが、図-9, 10, 11, 12である. 図中のCracked sectionについて、破線は収縮を考慮しない場合であり、実線は収縮を考慮した場合である. なお、計算にあたり、 M_{cr} には実測値を用いている. これらの図から、自己収縮が大きいコンクリートの場合も、従来理論に基づく計算値と比べ蓄積された変化ひずみを考慮した計算値は実測値とよく一致している. このように、収縮の影響を考慮した式(3)により、より精度の良い変形予測が可能である.

4. まとめ

本研究の範囲内から、以下のことが明らかとなった.

1. 膨張材や収縮低減剤は、自己収縮の低減に効果があり、特に膨張材が効果的であった.
2. RC部材の曲げ性状の向上には、膨張材と収縮低減剤の併用が特に効果的であり、これらを用いない場合と比較し、平均ひび割れ幅は約70%、たわみは約60%となった.
3. 載荷以前に収縮を受ける場合のひび割れ幅は、従来のRC理論によると過小に評価される.
4. 鉄筋位置で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と収縮の大きさにかかわらずほぼ同一のひび割れ幅の評価ができた.
5. 蓄積された変化ひずみを考慮した曲率は、実験値とほぼ同一になった.

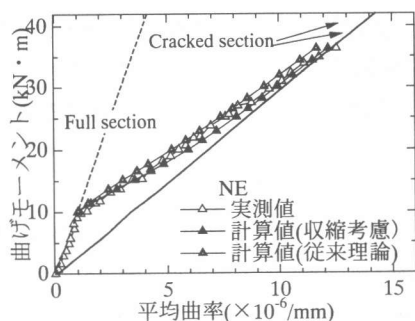


図-10 NE 実測値と計算値のM-φ関係

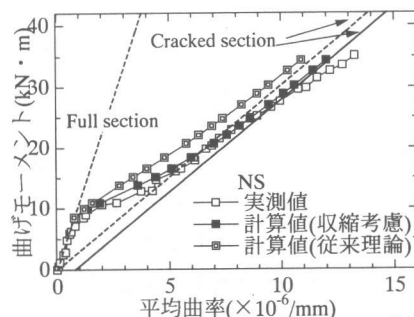


図-11 NS 実測値と計算値のM-φ関係

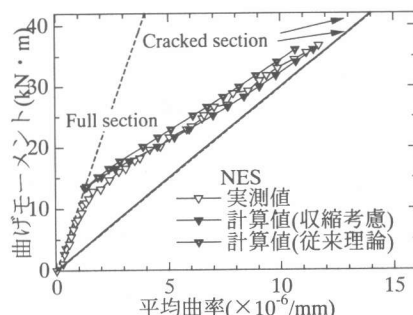


図-12 NES 実測値と計算値のM-φ関係

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, pp57-62, 1993
- 2) 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
- 3) ACI Committee 435: Deflection of Reinforced Flexural Concrete Members, ACI Journal, Vol. 63, No. 6 (1996), pp. 637-674