

論文 水粉体比の小さい膨張コンクリートのひび割れ抵抗性に関する実験的検討

三村 陽一^{*1}・吉武 勇^{*2}・浜梶 方希^{*3}・七村 祐輔^{*4}

要旨: 本研究は、曲げ実験および一軸引張実験を通じて、低水粉体比の高強度膨張コンクリートのひび割れ抵抗性(ひび割れ発生応力)を検討したものである。その結果、鉄筋比を約1%とした供試体を用いた曲げ実験では、水粉体比30%の高強度コンクリートに膨張材を用いると曲げひび割れ発生応力が低下した。また、水粉体比30%~44%の膨張コンクリートの曲げひび割れ発生応力が同程度になることを示した。しかしながら、鉄筋比が約5%と大きい高強度膨張コンクリートのひび割れ発生までの引張ひずみおよび一軸引張強度は、膨張材を用いていないコンクリートの約2.0倍、約1.2倍となった。

キーワード: 高強度コンクリート, 低添加型膨張材, ひび割れ発生応力, 水粉体比

1. はじめに

従来の土木用コンクリートより水セメント比の小さい高強度コンクリートでは、増大する温度収縮や自己収縮が外的・内的に拘束されることで生じるひび割れ(以下、収縮型ひび割れと記す)の対策が不可避の課題である。膨張材はこうした収縮型ひび割れの対策のひとつであり、近年では低添加型膨張材の開発¹⁾などによって、その使用実績は増加傾向にある。膨張材を添加したコンクリート(膨張コンクリート)は、コンクリートの収縮を膨張作用によって適切に補償することで、収縮型ひび割れを抑制できる。また、鉄筋などの補強材で膨張ひずみを拘束することでケミカルプレストレスを導入するなど、膨張作用をより積極的に活用することで、鉄筋コンクリート(RC)部材のひび割れ抵抗性の向上を図ることも可能となる。しかしながら、膨張コンクリートの力学性能は、膨張材量や配合条件など様々な要因に依存することから、その定量的な評価が困難である。

これまでの研究において、低添加型膨張材を用いたコンクリートの橋梁部材への適用を視野に入れ、膨張材量および湿布養生期間を主たるパラメータとしたRCはりの曲げ実験が行われている。その結果、低添加型膨張材を使用することにより、曲げ応力に対する膨張コンクリート自身のひび割れ抵抗性・ひび割れ発生応力(原文では、曲げ強度 f_p)が向上することを示すとともに、その推定方法を報告されている^{2),3),4)}。

同報の曲げ実験では、水粉体比(W/P)44%の膨張コンクリートを用いている。近年は高品質で長期耐久性に優れるコンクリート構造物の構築が求められるとともに、急速施工化が進む中で、低水粉体比の高強度コンクリー

トの適用事例が増えている。このような高強度コンクリートは、単位セメント量の多い配合となるため、一般的な強度のコンクリートに比べて自己収縮や温度応力が大きくなる可能性がある。

そこで本研究では、既報^{2),3),4)}で示された膨張コンクリート(W/P=44%)の曲げひび割れ抵抗性に関するデータの拡充を図るべく、W/P=30%のようにさらに低水粉体比の膨張コンクリートを含む供試体を用いた曲げ実験を行った。また、曲げ実験の結果を検証するため一軸引張実験も行い、高強度膨張コンクリート自身のひび割れ抵抗性(ひび割れ発生応力)について検討した。

2. 曲げ実験

2.1 使用材料と配合条件

本研究の供試体作製に使用した材料を表-1に示す。本研究のコンクリート材料には、既報^{2),3),4)}と同様に橋梁RC床版への展開を念頭において、早強ポルトランドセメントC(密度3.13g/cm³)と標準添加量20kg/m³の石灰系低添加型膨張材Ex(3.14g/m³)を用いた。なお、その他の材料は北九州若松産海砂S(密度2.60g/m³)、山口県宮野産の安山岩砕石G(2005, 密度2.70g/m³)、およびポリカルボン酸系高性能AE減水剤Ad(C×1.0%)である。

本研究では、表-2に示すように水粉体比(W/P, P=C+Ex)を30%~51%とした。W/P=30%では、膨張材を用いない普通コンクリート(Ex=0kg/m³)と膨張材量を20kg/m³, 40kg/m³とした膨張コンクリート、W/P=37%, 44%, 51%では膨張材量を40kg/m³とした合計7種類のコンクリートを作製した。

*1 呉工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博(工) (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 西日本高速道路株式会社 修(工) (正会員)

*4 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻

表-1 使用材料

コンクリート	膨張材 Ex	石灰系膨張材
	セメント C	早強ポルトランドセメント
	水 W	水道水
	細骨材 S	海砂
	粗骨材 G	砕石
	混和剤	高性能 AE 減水剤
鉄筋 ^{※1}	呼び名	D13
	規格	SD295A
	ヤング係数 E_s	191 kN/mm ² ^{※2}

※1：一般市販品 ※2：実測値

表-2 配合条件

W/P (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		C	W	Ex	S	G	Ad
30	30	520	156	0	737	945	5.2
	31	500		20			5.0
	33	480		40			4.8
37	41	382		774	991	3.8	
44	50	315		789	1031	4.7	
51	59	265		818	1048	4.0	

2.2 供試体および実験方法

本研究では、曲げひび割れに対する鉄筋の補強効果ができるだけなくすとともに、膨張コンクリートの長さ変化を軸方向に拘束するため、断面中央に鉄筋1本のみ張出し埋設した RC はり構造とした。図-1 に供試体形状および荷重方法を示す。供試体の断面寸法を 100×140mm (標準的な橋梁 RC 床版の 2/3 モデル) とし、橋梁 RC 床版の鉄筋比と同程度となるように、矩形断面の中心に D13 鉄筋 (SD295A, 鉄筋比 0.95%) を配置した。供試体の長さは 1000mm である。

本研究の曲げ実験は、荷重点間距離 150mm, 支点間距離 700mm とする 4 点荷重 (荷重制御) である。等曲げ区間 (荷重点間) のコンクリート上下面には検長 60mm ひずみゲージを貼付し、曲げひび割れが生じるまで荷重とひずみの計測を行った。なお本研究では、曲げひび割れが発生したときの荷重を用いて、曲げひび割れ発生応力 (以下、本報では曲げ強度 f_f として表す) を求めた。

曲げ実験を行った材齢は 3 日および 7 日である。なお、養生期間中は湿布養生を行ったことから、供試体外部への水分逸散による乾燥収縮はほとんど生じないと考えられる。本研究で用いる供試体記号の一例を図-2 に示す。

2.3 膨張材量の異なる RC はりの曲げ実験結果と考察

湿布養生期間中における鉄筋のひずみ (以下、鉄筋ひずみ) を図-3 に示す。図-3 に示す鉄筋ひずみは、供試体中央の縦リブ両面に貼り付けた検長 3mm のひずみゲージにより計測したものであり、材齢 0.5 日を基準としている。なお、鉄筋ひずみの計測に用いた供試体は、曲げ実験用とは別に作製したものである。図-3 より、膨張材を添加していない普通コンクリート ($Ex=0\text{kg/m}^3$) では、

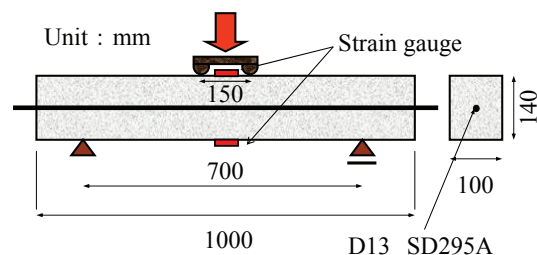


図-1 供試体形状および荷重方法

Ex40-30%-t07

材齢 (3, 7 日)
水粉体比 (30, 37, 44, 51%)
膨張材量 (0, 20, 40 kg/m³)

図-2 供試体記号の一例

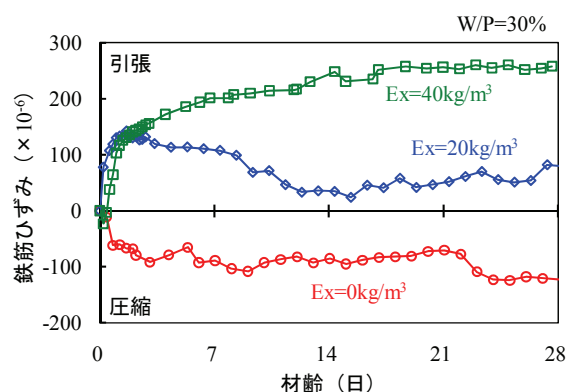
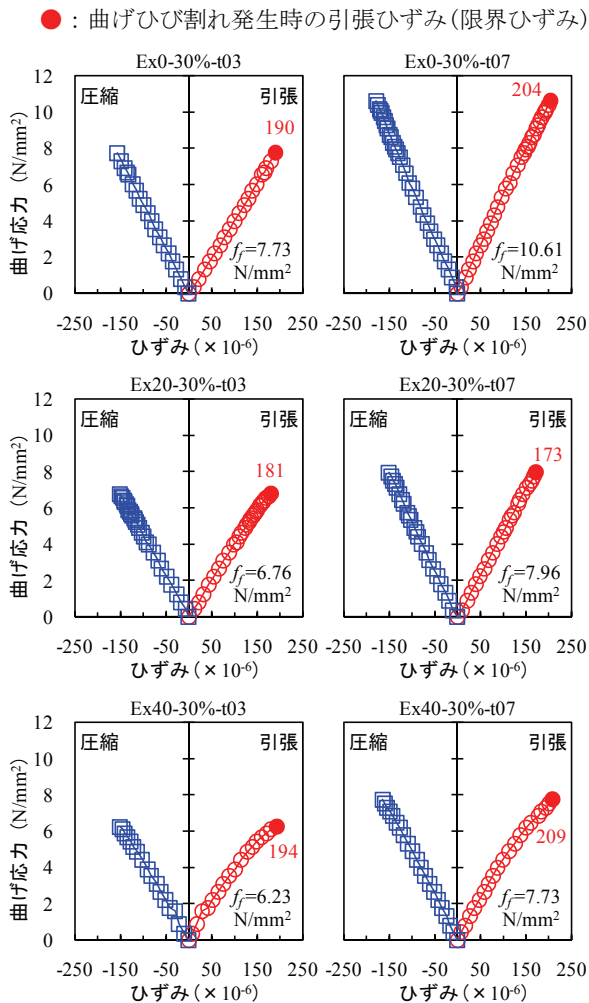


図-3 養生期間中の鉄筋ひずみ (W/P=30%)

打設後から鉄筋に圧縮ひずみが生じており、コンクリートが収縮していることがわかる。一方、膨張コンクリートでは、配合により程度の差異はあるものの、いずれも打設後から膨張作用によって引張ひずみが生じていた。Ex=20 kg/m³ と Ex=40 kg/m³ を比較すると、材齢 2 日程度までは同様のひずみ挙動を示しているが、Ex=20 kg/m³ ではそれ以降の鉄筋ひずみが小さくなった。本研究では湿布養生を行ったことから水分逸散による乾燥の影響はほとんどないと考えられ、このような鉄筋ひずみの減少はコンクリートの自己収縮に起因したものと考えられる。

W/P=30% の供試体 ($Ex=0, 20, 40\text{kg/m}^3$) の曲げ実験結果を図-4 および図-5 に示す。図-4 は、曲げひび割れ発生までの曲げ応力とコンクリート上下縁 (圧縮・引張縁) のひずみの関係を示しており、図-5 は、図-4 に示す材齢 7 日における曲げ応力と引張縁のひずみ (以下、引張ひずみ) の関係をまとめたものである。なお、図-4 および図-5 の縦軸に示す曲げ応力は、平面保持の仮定に基づいて簡易的に求めたものである。

図-4 および図-5 に示すように、普通コンクリート ($Ex=0\text{kg/m}^3$) の曲げ応力-引張ひずみ関係は、材齢 3 日



および材齢7日ともに概ね線形性を示した。一方、膨張コンクリート(Ex=20, 40kg/m³)のそれは非線形となっていることがわかる。曲げ試験におけるコンクリート下縁の引張ひずみの非線形性は既往の研究⁵⁾においても指摘されており、図-5に示すように、このような非線形性はEx=20kg/m³の場合に比べEx=40kg/m³の場合のほうが顕著であった。

曲げ実験より得られたひび割れ発生時の引張ひずみ(限界ひずみ)および曲げ強度 f_f を図-6に示す。なお図-6は、図-4に併記している限界ひずみおよび曲げ強度 f_f を再整理したものであり、各ケースにつき供試体1体の実験結果である。また、いずれの曲げ実験においても、検長60mmのひずみゲージを貼付した領域内でひび割れが生じたことを付記しておく。

既報のW/P=44%のRCはりを用いた曲げ実験の結果では、膨張材量が多くなるほど限界ひずみや曲げ強度 f_f が大きくなった⁴⁾。しかしながら、図-6に示すW/P=30%の場合はその傾向が必ずしも明確でない。限界ひずみは膨張材を用いていない普通コンクリート(Ex=0kg/m³)と膨張コンクリート(Ex=20, 40kg/m³)で同程度であった。

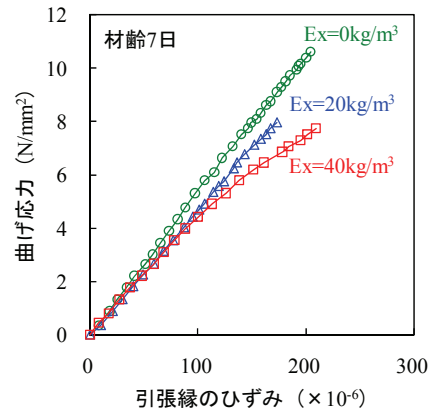


図-5 曲げ応力-縁ひずみ関係(材齢7日)

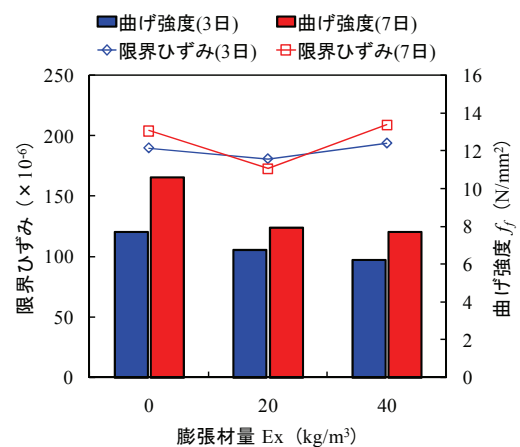


図-6 限界ひずみおよび曲げ強度(W/P=30%)

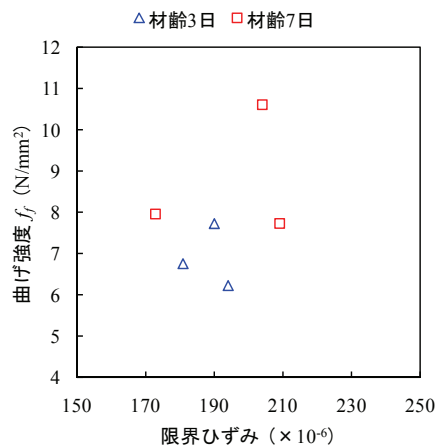


図-7 曲げ強度と限界ひずみの関係(W/P=30%)

また、曲げ強度 f_f は、普通コンクリート(Ex=0kg/m³)の曲げ強度 f_f が最も大きく、膨張コンクリート(Ex=20, 40kg/m³)の曲げ強度 f_f は、普通コンクリートのそれに対し70%~90%程度であった。

一般に、導入されるケミカルプレストレスによって(みかけの)限界ひずみが増加することで、膨張コンクリート

のひび割れ抵抗性は向上する。ここで、図-6に示した限界ひずみと曲げ強度 f_f の関係を図-7に示す。図-7に示すように、限界ひずみと曲げ強度 f_f の明確な相関性はみられず、W/P=30%の場合では限界ひずみが高ければ曲げ強度 f_f が大きいとは限らないようである。

以上のような結果は、W/P=30%のような低水粉体比の高強度コンクリートへの膨張材適用に際し、今後検討すべき課題といえよう。

2.4 水粉体比の異なるRCはりの曲げ実験結果と考察

前節では、W/P=30%のように水粉体比が小さい場合、膨張材を用いていない普通コンクリート(Ex=0kg/m³)に比べ、膨張コンクリート(Ex=20, 40kg/m³)の曲げ強度 f_f が小さくなる結果を示した。そこで本節では、配合(主にW/P)が曲げ強度や限界ひずみにおよぼす影響を調べるため、W/Pを30%, 37%, 44%, 51%と変化させた膨張コンクリート(いずれもEx=40kg/m³)の供試体を用いた曲げ実験について示す。

湿布養生期間中の鉄筋ひずみの経時変化を図-8に示す。なお、鉄筋ひずみの計測に用いた供試体は、曲げ実験用とは別に作製したものである。図-8に示すように、W/Pが小さいほど鉄筋ひずみも小さくなる傾向を示し、曲げ実験を行った材齢7日における鉄筋ひずみは、それぞれ440×10⁻⁶(W/P=51%)、410×10⁻⁶(W/P=44%)、260×10⁻⁶(W/P=37%)および200×10⁻⁶(W/P=30%)であった。なお、W/P=51, 44%では材齢6日程度において鉄筋ひずみの急増がみられるが、コンクリートにひび割れは生じていなかった。

各供試体の曲げひび割れ発生までの曲げ応力-圧縮・引張縁のひずみ関係を図-9に、限界ひずみおよび曲げ強度 f_f を図-10にそれぞれ示す。なお図-10は、図-9に併記している限界ひずみおよび曲げ強度 f_f を再整理したものであり、各ケースにつき供試体1体の実験結果である。図-9に示すように、材齢3日に比べ材齢7日のほうが引張ひずみの非線形性が顕著となる傾向にある。また図-10に示すように、限界ひずみは材齢3日に比べ材齢7日のほうがいずれも大きくなった。W/Pが37%, 44%では限界ひずみの増加が顕著であり、材齢7日における限界ひずみは、材齢3日のそれに比べてそれぞれ1.47倍、1.32倍となった。このような材齢の進行にともない大きくなる限界ひずみに対し、曲げ強度 f_f の増加はW/Pが37%, 44%においてそれぞれ1.04倍、1.14倍程度であった。特に、W/P=37%の膨張コンクリートの限界ひずみは増加が顕著であるにもかかわらず、その曲げ強度 f_f は同程度であった。そのため、図-11に示す限界ひずみと曲げ強度 f_f は、前節で示した図-6と同様、明確な相関性を示さなかった。

ここで、W/Pと曲げ強度 f_f の関係を図-12に示す。

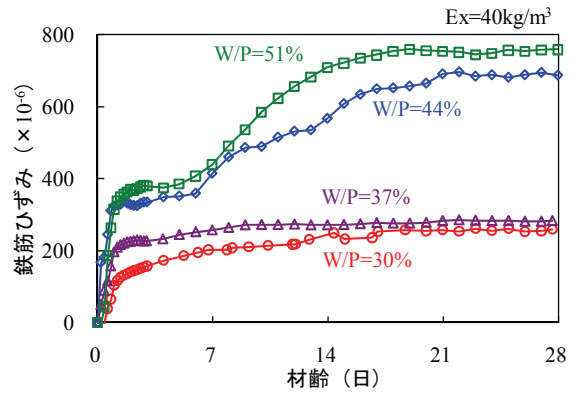


図-8 養生期間中の鉄筋ひずみ (Ex=40kg/m³)

● : 曲げひび割れ発生時の引張ひずみ(限界ひずみ)

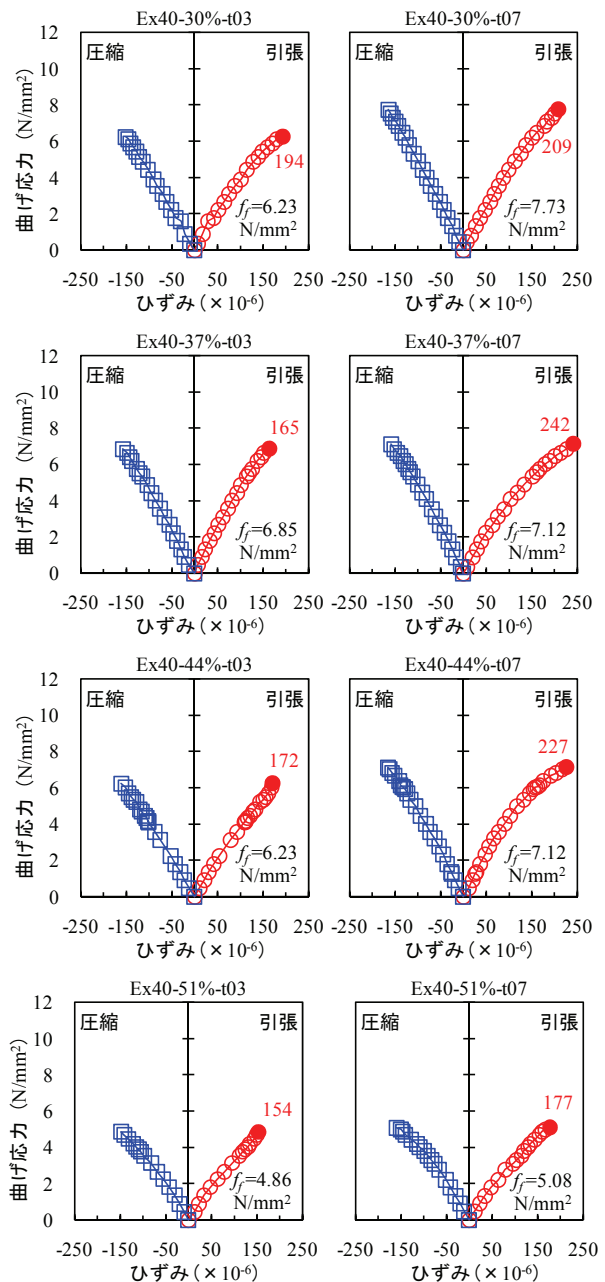


図-9 曲げ応力-ひずみ関係 (Ex=40kg/m³)

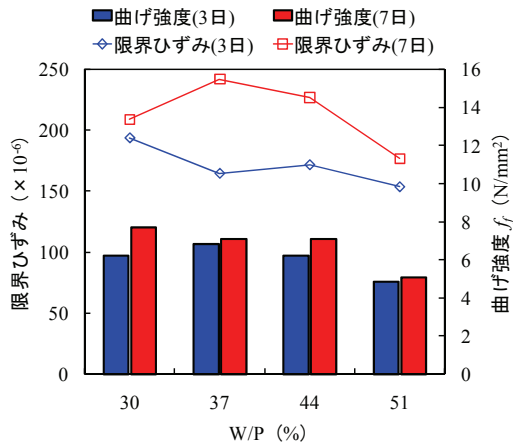


図-10 限界ひずみおよび曲げ強度 (Ex=40kg/m³)

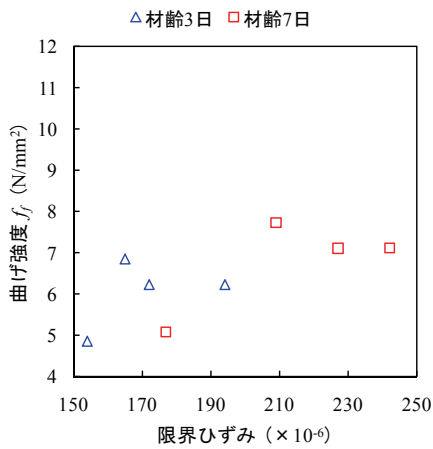


図-11 曲げ強度と限界ひずみの関係 (Ex=40kg/m³)

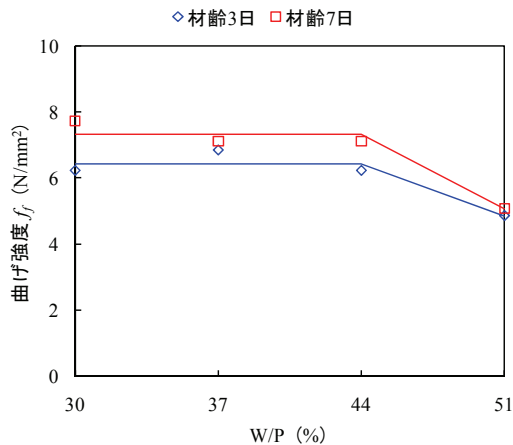


図-12 W/P と曲げ強度の関係 (Ex=40kg/m³)

W/P が 51%から 44%になることで曲げ強度 f_f は増加し、材齢 3日 で 1.28 倍、材齢 7日 で 1.40 倍であった。このような曲げ強度 f_f の増加は、限界ひずみの増加(材齢 3日 : 1.11 倍、材齢 7日 : 1.28 倍)に比べ大きいものであった。一方、W/P=30%~44%の膨張コンクリートの曲げ強度 f_f は同程度であった。このことは、膨張材を 40kg/m³ 添加した場合、少なくとも W/P を 44%より小さくしても、ひび割れ抵抗性の向上が望めないことを示唆している。

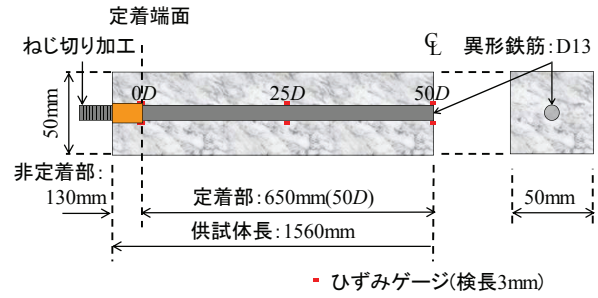


図-13 供試体およびひずみ計測位置

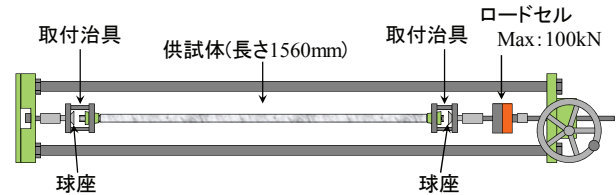


図-14 一軸引張装置

3. 一軸引張実験

3.1 供試体および実験方法

一軸引張実験で用いた供試体およびひずみの計測位置を図-13に示す。一軸引張実験で用いたコンクリートは、表-2に示す配合条件のうち、W/P=30%、Ex=0, 20, 40kg/m³の3配合である。ただし、用いた骨材の最大寸法は15mmである。各配合につき供試体3体を同バッチで作製した。供試体の断面中央には、異型鉄筋D13(SD295A)を、両端から100mmずつ張り出して埋設した。既往の研究⁶⁾と同様にコンクリートの長さは1560mmであり、供試体の中央から片側650mmずつ(計1300mm)の定着長を設けた。この片側650mmずつの定着長は、鉄筋径Dの50倍(50D)に相当する。本研究では、張り出して埋設した鉄筋に引張力を载荷した。したがって、両端に張り出した鉄筋の降伏よりコンクリートの引張破壊が先行するよう、断面寸法を50×50mmとした。したがって、鉄筋比は5.1%であり、曲げ実験で用いた供試体の鉄筋比0.95%に比べて大きく、膨張コンクリートの拘束条件が異なっている。

本研究で用いた一軸引張装置⁶⁾を図-14に示す。図-14に示すように、取付治具を用いてコンクリートから張り出して埋設した鉄筋(両端をねじ切り加工)を一軸引張装置に設置した。取付治具には球座を設けており、荷重の偏心にもなう曲げ応力の作用をできるだけ小さくした。いずれの一軸引張実験も材齢7日で行った。

3.2 コンクリートに作用する引張応力の算定方法

定着長が十分に長い供試体を用いた一軸引張実験では、供試体中央における鉄筋のひずみとコンクリートのひずみが概ね一致する⁷⁾。したがって本研究では、供試体中央(50D)においてコンクリートが負担する応力 σ_{c50} を同

表-3 限界ひずみの最大値と一軸引張強度の平均値

膨張材量	限界ひずみの最大値	一軸引張強度の平均値
0 kg/m ³	139×10 ⁻⁶	5.0 N/mm ²
20 kg/m ³	152×10 ⁻⁶	4.2 N/mm ²
40 kg/m ³	272×10 ⁻⁶	5.8 N/mm ²

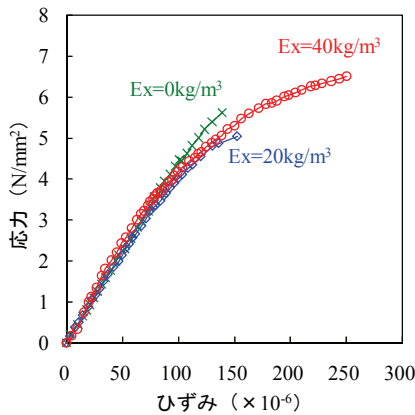


図-15 応力-ひずみ関係(材齢 7 日)

位置における鉄筋のひずみを用いて算定した(式(1)参照)。

$$\sigma_{c50} = \frac{E_s \times \varepsilon_{s0} \times A_s - E_s \times \varepsilon_{s50} \times A_s}{A - A_s} \quad (1)$$

ここで、 σ_{c50} : 50Dにおけるコンクリートが負担する応力、 E_s : 鉄筋のヤング係数、 ε_{s0} , ε_{s50} : 0D, 50Dにおける鉄筋のひずみ、 A_s : 鉄筋の断面積、 A : 供試体の断面積を表す。

3.3 実験結果と考察

一軸引張実験より得られた限界ひずみと一軸引張強度を表-3に示す。なお、表-3に示す限界ひずみは供試体3体のうち最大値、一軸引張強度は供試体3体の平均値である。表-3に示すように、 $Ex=20\text{kg/m}^3$ の膨張コンクリートの限界ひずみは膨張材を添加していない普通コンクリート($Ex=0\text{kg/m}^3$)の約1.1倍と大きくなったが、一軸引張強度は0.84倍と小さくなった。一方、 $Ex=40\text{kg/m}^3$ の膨張コンクリートでは、限界ひずみが約2.0倍、一軸引張強度は約1.2倍と、いずれも普通コンクリートに比べて大きくなった。このような結果は、膨張コンクリートの曲げ強度 f_f が普通コンクリートより小さくなった曲げ実験とは異なる傾向である。

ここで、応力-ひずみ関係を図-15に示す。なお、図-15に示す応力-ひずみ関係は、同条件の供試体3体のうち、最も一軸引張強度が高かった供試体のものである。図-15に示すように、膨張材を添加していない普通コンクリート($Ex=0\text{kg/m}^3$)の応力-ひずみ関係は線形的であるが、膨張コンクリートでは上に凸となる非線形性を示した。特に、限界ひずみおよび一軸引張強度が普通コンクリート($Ex=0\text{kg/m}^3$)に比べて大きくなった $Ex=40\text{kg/m}^3$ の応力-ひずみ関係における非線形性は、 $Ex=20\text{kg/m}^3$ の

それに比べて顕著であった。

4. まとめ

本研究は、曲げ実験および一軸引張実験を通じて、水粉体比の小さい高強度膨張コンクリートのひび割れ抵抗性(ひび割れ発生応力)を調べたものである。本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 鉄筋比約1%の供試体を用いた曲げ実験では、水粉体比30%の高強度コンクリートに膨張材を用いると曲げひび割れ発生応力が70%~90%に低下した。
- (2) 水粉体比30%~44%の膨張コンクリートの曲げひび割れ発生応力は同程度となったことから、少なくとも44%より小さくしてもひび割れ抵抗性の向上が望めない可能性がある。
- (3) 鉄筋比の大きい供試体を用いた一軸引張実験の結果、膨張材を用いていない普通コンクリートに比べて膨張材量が $Ex=40\text{kg/m}^3$ の膨張コンクリートでは、ひび割れ発生までの引張ひずみおよび一軸引張強度がそれぞれ約2.0倍、約1.2倍となった。

参考文献

- 1) 保利彰宏, 高橋光男, 辻 幸和, 原田真剛: 低添加型膨張材を用いたコンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.261-266, 2002.
- 2) 濱岡洋亘, 石田邦洋, 吉武 勇, 浜田純夫: 低添加型膨張材を用いた RC はりの曲げ強度と軸方向鉄筋のひずみ分布, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.167-172, 2006.
- 3) 石田邦洋, 濱岡洋亘, 坂本裕樹, 吉武 勇: はりの曲げ実験による膨張コンクリートの初期応力・ひずみの推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.507-512, 2007.
- 4) 石田邦洋, 吉武 勇, 濱岡洋亘, 浜田純夫: 養生期間の異なる膨張コンクリートはりの曲げひび割れ発生応力, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.459-467, 2007.8.
- 5) 岡村 甫, 辻 幸和: ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性, 土木学会論文報告集, Vol.225, pp.101-108, 1974.5.
- 6) 浜梶方希, 三村陽一, 石田邦洋, 吉武 勇: 高強度膨張コンクリートと異形鉄筋の局部付着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.643-648, 2008.
- 7) 三村陽一, 吉武 勇, 森本公典, 浜田純夫: 若材齢コンクリートと異形鉄筋の局部付着特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.410-423, 2007.7.