

論文 短繊維により拘束した膨張モルタルのケミカルプレストレス特性

上原 尚也^{*1}・大内田 直也^{*2}・松本 進^{*3}

要旨: 本研究では、膨張モルタルと短繊維を併用して得られるケミカルプレストレスについて扱った。このケミカルプレストレスは、モルタルの膨張に伴い伸ばされた短繊維の引張力に対する反力として得られるが、膨張が過大になると強度低下やひび割れ等が生じる。そこで、適切な膨張量を求め、有効なケミカルプレストレスを得るための条件について実験的に検討した。その結果より、水結合材比、膨張材量、繊維長さ等の要因が強度やケミカルプレストレスに及ぼす影響を明らかにした。また、強度低下等の問題点を生じることなくケミカルプレストレスを得るための条件を提示した。

キーワード: ケミカルプレストレス, 短繊維, 繊維混入率, 膨張材, 膨張ひずみ

1. はじめに

著者らは船体材料や埋設型枠等への適用を考えたモルタル部材の開発にあたり、漏水防止および部材の薄肉化・高強度化の観点から、ひび割れ強度向上のため、膨張モルタルと短繊維を併用して得られるケミカルプレストレス¹⁾²⁾の利用について検討を進めてきた。

一般的に、ケミカルプレストレスはコンクリートの膨張に伴って伸ばされた拘束材引張力の反力として発生するが、膨張が過大になるとひび割れ、強度低下を生じる場合がある³⁾。本研究で扱うケミカルプレストレスについても、これと同様の問題点が挙げられる。

そこで、本研究は膨張モルタルと短繊維を併用したケミカルプレストレスに関して、ひび割れや強度低下等の問題点を生じることなく、有効にケミカルプレストレスを得るための諸条件を提示することを目的とした。このため、このようなケミカルプレストレスに影響を及ぼす要因として、モルタルの膨張特性と短繊維による拘束特性を挙げ、これらの要因がモルタル部材の強度およびケミカルプレストレスに及ぼす影響について実験的検討を行った。

2. 膨張特性および短繊維の拘束特性がケミカルプレストレスに及ぼす影響に関する実験

2.1 実験概要

(1) 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。結合材として早強ポルトランドセメントおよびエトリンサイト系膨張材を用いた。モルタルに混入する短繊維は、耐アルカリ性ガラス繊維のチョップドストランドを用いた。また、モルタルに適

表-1 使用材料

材 料	特 性
結合材	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³ ,比表面積:4530cm ² /g
	エトリンサイト系膨張材 密度:2.93g/cm ³ ,比表面積:2280cm ² /g
細骨材	富士川産川砂 密度:2.63g/cm ³ ,吸水率:1.93% 実積率:67.0%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
	メチルセルロース系増粘剤
短繊維	耐アルカリ性ガラス繊維 密度:2.7g/cm ³ ,単繊維径:18.5 μm 約 200 本集束,弾性係数:75kN/mm ² 繊維長:13,25,38mm

*1 鹿児島大学 大学院理工学研究科物質生産工学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学 大学院理工学研究科海洋土木工学専攻

*3 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科教授 工博 (正会員)

度な粘性を与えると同時に流動性を得るため、混和剤としてメチルセルロース系増粘剤および高性能 AE 減水剤を用いた。

(2) 実験供試体および測定項目

図-1 に実験供試体の概要を示す。実験供試体は寸法 40×40×160mm のモルタルバー供試体であり、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に規定されるモルタル整形用型枠を用いて各配合につき 3 体作製した。供試体は打設翌日に脱型し、上面および下面にコンタクトゲージ測定用チップを取り付け、膨張ひずみの変化を測定長 100mm のコンタクトゲージにより測定した。供試体は、材齢7日まで20℃の水中で養生した。

膨張材の混入によるケミカルプレストレス量および圧縮強度の変化を求めるため、材齢 7 日において曲げ試験および圧縮試験を行った。曲げ試験の概要を図-2 に示す。曲げ試験はスパン 120mm、荷重点間隔 40mm の三等分点荷重とし、荷重中の曲げ引張ひずみを測定するため供試体底面にゲージ長 30mm のひずみゲージを貼付した。曲げ試験で得られた荷重-ひずみ曲線の急変点より曲げひび割れ強度を求め、式(1)よりケミカルプレストレスを算出した。また、圧縮試験には曲げ試験後の供試体折片を用い、圧縮強度を求めた。

$$\sigma_{CP} = \sigma_{exp} - \sigma_0 \quad (1)$$

ここに、 σ_{CP} ：ケミカルプレストレス

σ_{exp} ：膨張材を混入した供試体の
曲げひび割れ強度

σ_0 ：膨張材を混入しない供試体の
曲げひび割れ強度

2.2 要因および水準

既往の検討結果より、短繊維を混入した膨張モルタルの膨張ひずみは、膨張材混入率およびペースト容積比（モルタル容積に対するペースト容積の比）の影響を受けることが明らかとなっている⁴⁾。このため、本実験ではペースト容積比の影響を低減するため、ペースト容積比が同程度の（約 0.58）配合を選定した。また、実験

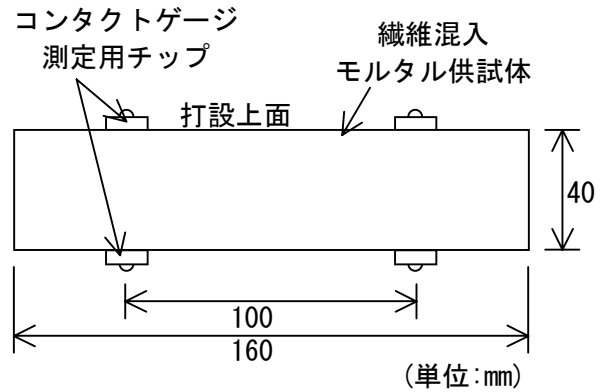


図-1 供試体概要

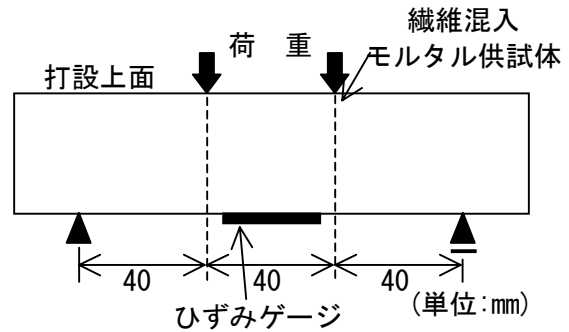


図-2 曲げ試験概要

表-2 実験(1)の要因および水準

要因	水準
水結合材比(W/B)	40,50,60%
膨張材混入率(E/B)	0~20%
繊維混入率(V_f)	体積比 2.0,3.0%
繊維長(L_f)	25mm

表-3 実験(2)の要因および水準

要因	水準
水結合材比(W/B)	40,50,60%
膨張材混入率(E/B)	0,15%
繊維混入率(V_f)	体積比 2.0%
繊維長(L_f)	13,25,38mm

は2シリーズに分けて行った。

実験(1)では、ケミカルプレストレスに及ぼす膨張モルタルの配合および繊維量の影響を把握するための検討を行った。実験(1)の要因および水準を表-2に示す。モルタル配合は水結合材比および膨張材混入率を変動させ、膨張材は内割で混入した。また、繊維長 25mm の短繊維を体積比 2%、3%混入した。繊維混入後のフロー値が 140mm 以上となるように高性能 AE 減水剤

表-4 実験(1)のモルタル配合

水 結合材比 W/B (%)	細骨材 結合材比 S/B	繊維 混入率 V _f (vol.%)	膨張材 混入率 E/B (%)	単位量(kg/m ³)							フロー (mm)
				水 W	結合材 B	膨張材* E	細骨材 S	ガラス 繊維	高性能AE 減水剤	増粘剤	
40	1.37	2.0	0,11.6,13.8, 15.0,16.1	316	791	0,92,109, 119,127	1083	54	7.9	0.4	142
50	1.5		0,11.6, 13.6,14.6	353	706	0,82, 96,103	1058		0.0		151
60	1.75		0,11.6,13.8, 15.0,16.1	371	619	0,72,85, 93,100	1083		0.0		162
50	1.5	3.0	0,10.5, 13.6,16.2, 16.9,17.4	349	698	0,73, 95,113, 118,122	1048	81	7.0	0.4	142
60	1.75		0,13.6, 15.0,16.2	368	612	0,83, 92,99	1072		1.5		148

*膨張材重量は結合材重量に含む

表-5 実験(2)のモルタル配合

水 結合材比 W/B (%)	細骨材 結合材比 S/B	繊維 混入率 V _f (vol.%)	膨張材 混入率 E/B (%)	単位量(kg/m ³)							フロー (mm)
				水 W	結合材 B	膨張材* E	細骨材 S	ガラス 繊維	高性能AE 減水剤	増粘剤	
40	1.37	2.0	0,15	316	791	0,119	1083	54	7.9	0.4	140
50	1.5		0,15	353	706	0,106	1058		3.5		144
60	1.75		0,15	371	619	0,93	1083		0.0		144

*膨張材重量は結合材重量に含む

の使用量を調整した。モルタル配合を表-4に示す。ただし、水結合材比40%の繊維混入率3%においては流動性の低下が著しく、適切な配合が決定できなかったため、検討を省略した。

実験(2)では、ケミカルプレストレスに及ぼす繊維長の影響について検討した。実験(2)の要因および水準を表-3に示す。繊維混入率を体積比2%、繊維長を13,25,38mmと変動させた。膨張材は内割で混入し、混入率は15%および0%とした。水結合材比40,50,60%においてケミカルプレストレスを求めた。配合を表-5に示す。

3. 実験結果および考察

(1) 膨張材量と膨張ひずみの関係

実験(1)の結果より、図-3に膨張ひずみの経時変化の一例を示す。材齢7日では膨張はほぼ終息している。この傾向は、他の条件においても概ね同様であった。図-4に材齢7日における膨張ひずみと膨張材混入率の関係を示す。図中の曲線は測定値を指数近似したものである。これを見ると、膨張ひずみは膨張材混入率に対して概ね指数的に増加している。ペースト容積比が若干異なるため、水結合材比間の比較はで

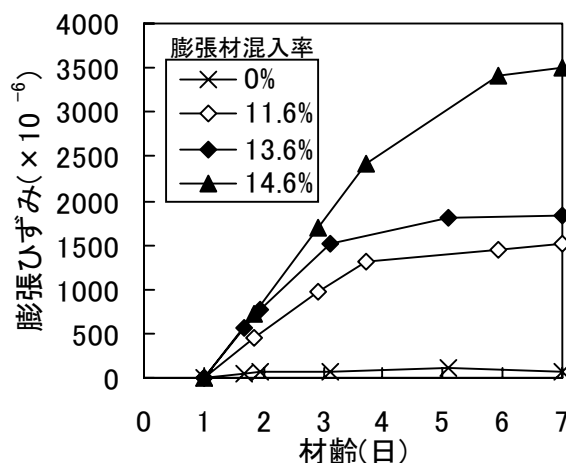


図-3 膨張ひずみの経時変化
(水結合材比50%, 繊維混入率2%)

きないが、繊維混入率3%の場合には2%に比べて膨張ひずみが抑えられており、混入する繊維量が多いほどモルタルの膨張が拘束されている。

(2) 膨張ひずみと強度およびケミカルプレストレスの関係

曲げ試験結果より、膨張ひずみと曲げひび割れ強度の関係を図-5に示す。曲げひび割れ強度は水結合材比が小さいほど大きく、膨張ひずみが0~1500×10⁻⁶程度では強度が増加する傾向が見られた。その後、膨張が過大となると強度

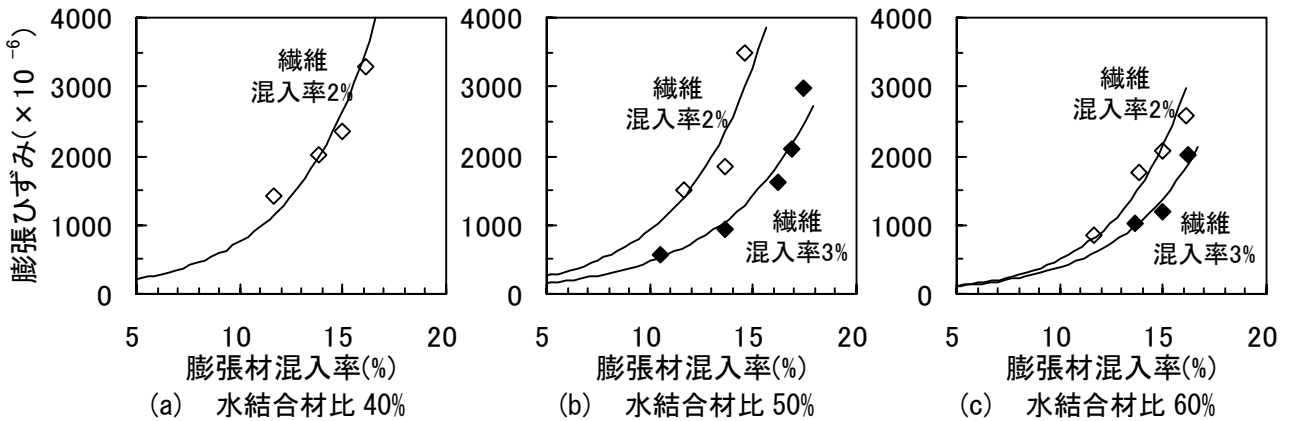


図-4 膨張材混入率と膨張ひずみの関係(材齢7日)

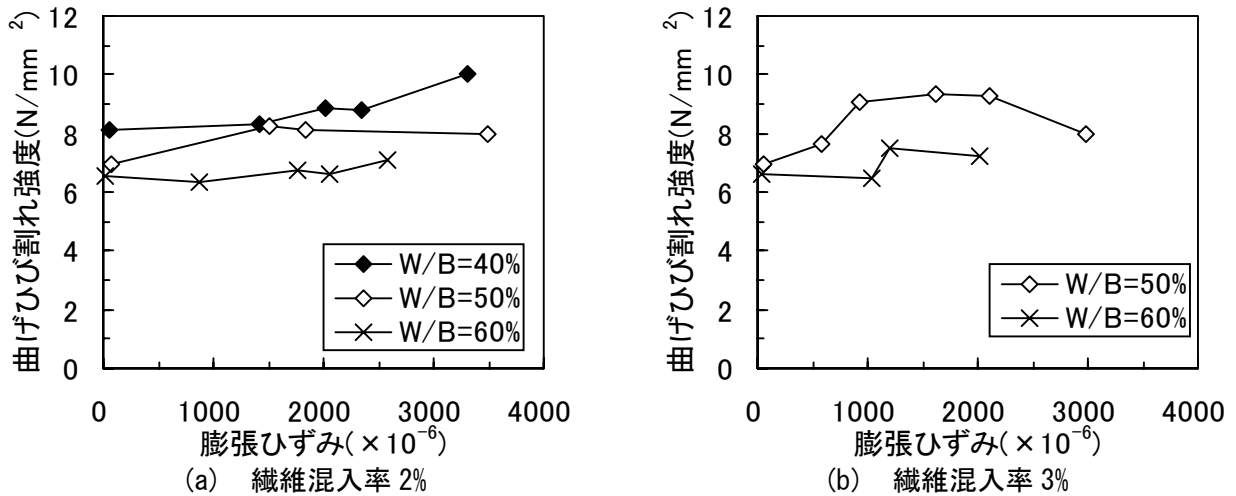


図-5 膨張ひずみと曲げひび割れ強度の関係

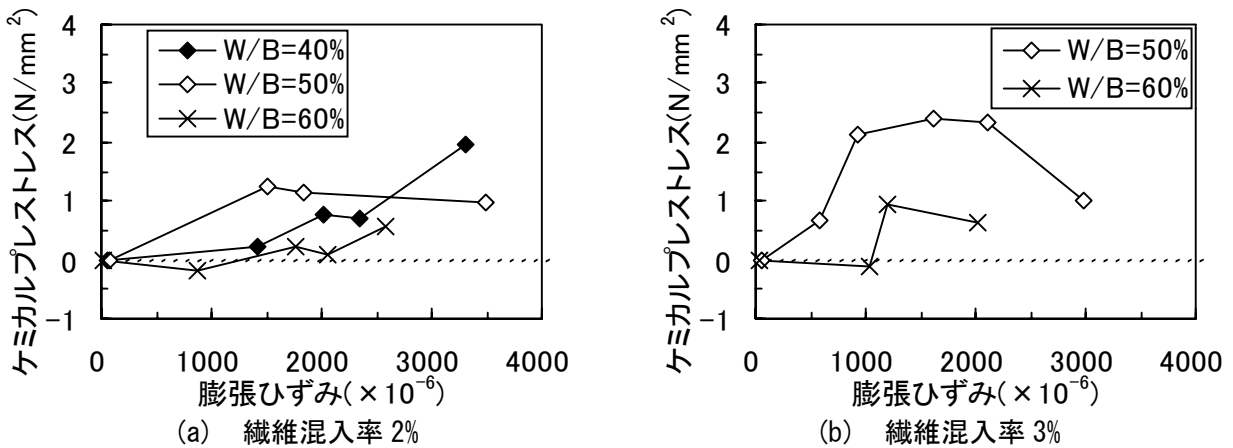


図-6 膨張ひずみとケミカルプレストレスの関係

は横ばいまたは低下していた。膨張ひずみとケミカルプレストレスの関係を図-6に示す。これを見ると、水結合材比40%および50%の場合には膨張ひずみの増加に伴ってケミカルプレストレスが生じている。繊維混入率3%の場合には膨張ひずみ 1500×10^{-6} 程度で最大 2.3 N/mm^2 程度のケミカルプレストレスが得られた。膨張ひず

みがさらに増加すると、ケミカルプレストレスはほぼ一定または低下する傾向が見られた。しかし、水結合材比60%の場合には、膨張ひずみが増加してもケミカルプレストレスがほとんど得られない結果となった。これには、水結合材比が高いために付着強度が低く、膨張を十分に拘束できなかったか、膨張の過程で繊維が滑り

を生じた可能性が考えられる。

膨張ひずみと圧縮強度の関係を図-7に示す。いずれの場合も膨張ひずみの増加に伴い圧縮強度が徐々に低下するような傾向が見られた。

ここで、アルカリ骨材反応や凍結融解等の損傷調査に用いられる超音波測定器を用いて超音波伝播速度を測定し、これより動弾性係数を算出した。繊維混入率2%の場合の膨張ひずみと動弾性係数の関係を図-8に示す。水結合材比60%では 2000×10^{-6} 以降に動弾性係数の低下が見られた。このような場合、目視観察の際にひび割れや異常変形の発生が認められた。しかし、水結合材比40%については、今回実験を行った膨張ひずみ 3300×10^{-6} までの範囲では動弾性係数はわずかに低下するのみであり、ひび割れや異常変形の発生も認められなかった。

以上の結果について考えると、膨張が過大になるとモルタル供試体内部に微細なひび割れが発生し、特に水結合材比が大きくモルタル強度が小さい場合には膨張による強度低下等の問題が生じやすくなるものと考えられる。さらに、水結合材比が大きい場合には付着強度が低いため、繊維による拘束効果が十分に得られなかった事が考えられる。このために水結合材比60%の場合には、膨張ひずみが増加してもケミカルプレストレスがほとんど得られない結果となったものと考えられる。

以上より、モルタルの膨張によってケミカルプレストレスを有効に得るためには、水結合材比を50%以下とし、膨張ひずみが $1000 \sim 2000 \times 10^{-6}$ 程度となるよう膨張材混入率を設定する必要があると考えられる。また、水結合材比が小

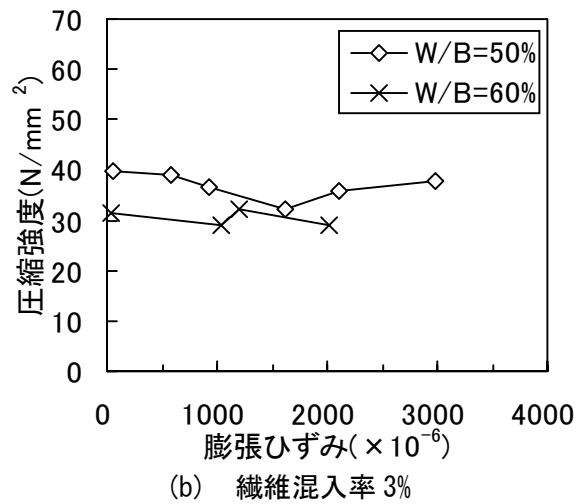
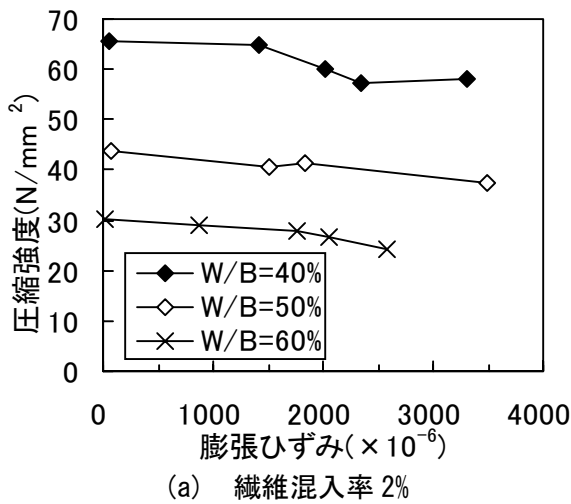


図-7 膨張ひずみと圧縮強度の関係

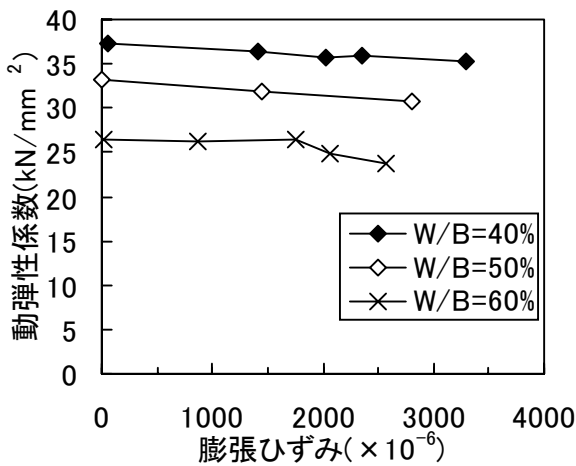


図-8 膨張ひずみと動弾性係数の関係 (繊維混入率2%)

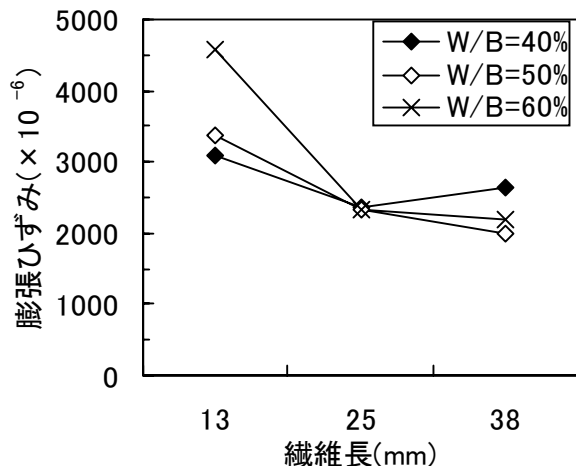


図-9 繊維長と膨張ひずみの関係

さい場合には、やや大きな膨張ひずみに対しては強度低下を生じにくいものと考えられる。

(3) 繊維長とケミカルプレストレスの関係

実験(2)の結果より、繊維長と膨張ひずみの関係を図-9に示す。繊維長 25mm および 38mm では、膨張ひずみに繊維長および水結合材比による差異は小さく、いずれも 2300×10^{-6} 程度であった。しかし、繊維長 13mm においては $3000 \sim 4500 \times 10^{-6}$ にまで膨張ひずみが大きくなっており、このように繊維長が短い場合には膨張拘束効果の低下が見られた。

曲げ試験の結果より算出したケミカルプレストレスと繊維長の関係を図-10に示す。実験値の変動が大きいため一部実験(1)と整合しない点もあるが、繊維長の影響についてみると、繊維長 13mm では有効なケミカルプレストレスが得られない結果となった。このことは、短繊維の引張力は付着によってモルタルに伝達されるため、上記のように繊維長が短い場合には、付着に関して不利な条件であると考えられる。このような条件下では付着力が十分に得られず、拘束効果が低下していることが考えられる。このことから、有効にケミカルプレストレスを得るためには、繊維長を 25mm 以上とする必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、短繊維と膨張モルタルを併用して得られるケミカルプレストレスについて、膨張特性および短繊維による拘束条件との関係を把握し、有効にケミカルプレストレスが得られる条件を求めることを目的として検討を行った。その結果、以下の事項が明らかとなった。

膨張モルタルと短繊維を併用することで、膨張ひずみの増加に従ってケミカルプレストレスの発生が確認され、今回検討の範囲では最大 2.3N/mm^2 程度が得られた。このときの膨張ひずみは 1500×10^{-6} 程度で、ひび割れ、強度低下は認められなかった。

水結合材比が大きい場合および繊維長が短い

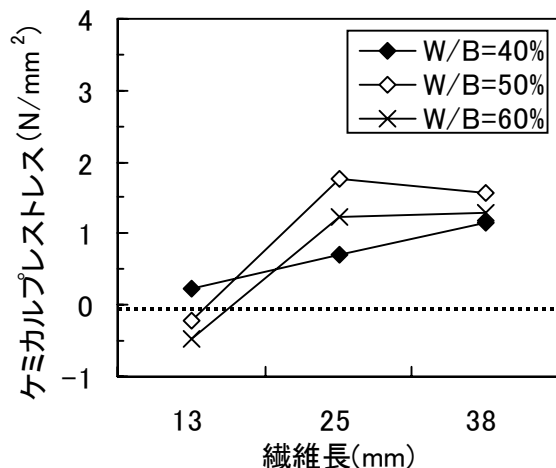


図-10 繊維長とケミカルプレストレスの関係

場合には、付着力の不足からケミカルプレストレスが得られない場合がある。

以上より、水結合材比を 50%以下、繊維長を 25mm 以上とし、過大な膨張を避けるため膨張ひずみを $1000 \sim 2000 \times 10^{-6}$ 程度の範囲に設定することで、膨張モルタルと短繊維によるケミカルプレストレスを利用可能であると考えられる。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、電気化学工業(株)、日本電気硝子(株)には、実験材料の提供を頂きました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺明子, 神尾典, 松田応作: プレストレス応用による G.R.C.と積層材, セメント技術年報, Vol.35, pp.522-525, 1982.1
- 2) 辻幸和, 岩井稔, 奥泉貴朗, 小川晃市: 鋼繊維で補強した CPC はりの曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.843-847, 1989
- 3) 岡村甫, 辻幸和, 後藤克己: 一軸拘束を受ける膨張コンクリートの強度, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.1, pp.85-88, 1979
- 4) 上原尚也, 松本進: 短繊維により拘束したモルタルの膨張特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.261-266, 2004.7