

論文 短繊維により拘束したモルタルの膨張特性

上原 尚也^{*1}・松本 進^{*2}

要旨：埋設型枠や船体材料のような薄肉部材への適用を考えたモルタルの開発にあたり、コンクリート用膨張材と拘束用短繊維を併用して得られるケミカルプレストレスの利用を考えた。これに関して、繊維混入時のモルタル膨張特性はケミカルプレストレスに係る重要な特性であるが、膨張モルタルに関する検討例は少なく、配合設計ができなかった。そこで、繊維混入時の膨張特性と配合条件の関係について実験的検討を行った。その結果より、ペースト容積比が膨張材の効果に影響を及ぼすことを明らかにし、膨張材混入率とペースト容積比を用いた膨張ひずみの推定式を構築した。

キーワード：短繊維，膨張材，膨張ひずみ，膨張材混入率，ペースト容積比，推定式

1. はじめに

埋設型枠や船体材料等への適用を考えた薄肉モルタル部材の開発にあたり、部材の薄肉化および漏水防止のためにひび割れ強度を改善する必要があることから、膨張材による膨張を短繊維により拘束して得られるケミカルプレストレス¹⁾²⁾の利用を考え、検討を行ってきた。

膨張材を用いた部材に関しては、これまでに多くの検討が行われているものの、これらはコンクリートに対するものが主であり、モルタルに対する検討例は少ない。また、既往の検討例によれば、膨張コンクリートの膨張性に影響を及ぼす要因は単位膨張材量が支配的である³⁾とされているが、モルタルについては配合条件の変動範囲がコンクリートに比べて大きく、その影響から、膨張材量のみでは膨張ひずみを表現できない¹⁾ため、膨張コンクリートに関する検討結果の直接的な適用は困難であった。

そこで、拘束材として短繊維を混入した場合のモルタル膨張と配合条件との関係について実験的な検討を行い、膨張特性に影響を与える要因を明らかにすることとした。また、繊維混入時の膨張ひずみについて推定式の構築を試みた。

2. 短繊維により拘束した膨張モルタルの膨張特性について

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。結合材として早強セメントおよびエトリンガイト系膨張材を用いた。拘束材として用いた短繊維は、ガラスおよび炭素のチョップドストランドであ

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
	エトリンガイト系膨張材 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:2.05% 実積率:65.0%
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 , 寸法: ϕ 13 μ m $\times$ 19mm 約 200 本集束, 弾性係数:75kN/mm ²
	PAN 系炭素繊維 密度:1.7g/cm ³ , 寸法: ϕ 7 μ m $\times$ 25mm 約 12000 本集束, 弾性係数:235kN/mm ²

*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 工学部海洋土木工学科教授 工博 (正会員)

る。また、流動性の確保と材料分離の防止のため、高性能 AE 減水剤および増粘剤を使用した。

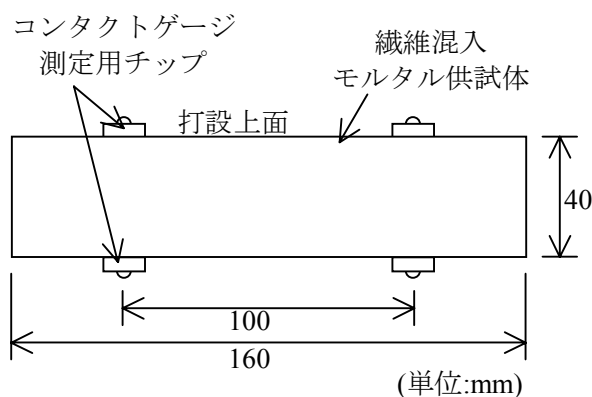
(2) 実験方法

実験供試体の概要を図－１に示す。供試体の作製には JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に規定されるモルタル成形用型枠を用い、寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ のモルタルバーを各配合につき 3 体作製した。打設翌日に脱型し、材齢 7 日まで 20°C の水中において養生した。また、養生中の膨張ひずみの変化をコンタクトゲージにより測定した。実験に用いたモルタルについて、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(W/B)および細骨材結合材比(S/B)の組み合わせによりベース配合を作成し、膨張材は各ベース配合について結合材重量の 0～20% を内割で混入した。拘束用の短繊維は、ガラス繊維の場合に体積比 2%、炭素繊維の場合に体積比 1%混入した。材料分離を防止し、繊維の分散が良好となるよう増粘剤を添加した。また、モルタルの流動性を得るため、繊維混入状態のモルタルフローが 140mm 以上となるように高性能 AE 減水剤の添加量を調整した。以上のように調整したモルタルの配合を表－３に示す。

2.2 実験結果

(1) 膨張材量と膨張ひずみの関係

繊維混入膨張モルタルの膨張ひずみについて、材齢 7 日における膨張ひずみと膨張材量の関係



図－１ 供試体の概要

表－２ 実験の要因および水準

要 因		水 準
水結合材比 (W/B)		40, 50, 60%
細骨材結合材比 (S/B)		1.0～2.5
膨張材混入率 (E/B)		0～20%
短繊維 混入率	ガラス繊維 (GF)	体積比 2.0%
	炭素繊維 (CF)	体積比 1.0%

表－３ モルタル配合

繊維種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材 結合材比 S/B	単位量(kg/m ³)						
			水 W	結合材 B	膨張材* E	細骨材 S	繊維	増粘剤	高性能 AE減水剤
ガラス 繊維	40	1.0	358	894	0,45,89,134,179	894	54	0.4	8.9
		1.5	305	763	0,38,76,114,153	1157			15.3
		1.75	284	711	0,36,71,107,142	1244			28.4
	50	1.0	405	811	0,81,122,162	811			0.0
		1.5	355	708	0,35,71,106,142	1062			0.0
		1.75	331	663	0,33,66,99,133	1160			3.3
	60	2.0	312	623	0,31,62,93,125	1246			12.5
		1.5	396	660	0,33,66,99,132	990			0.0
		2.0	351	586	0,29,59,88,117	1171			0.0
炭素 繊維	40	1.0	357	893	0,89,134,179	893	18	0.4	13.4
		1.5	304	759	0,76,114,152	1138			15.2
		2.0	268	669	0,67,100,134	1339			14.7
	50	1.0	413	826	0,41,83,124,165	826			0.0
		1.5	352	705	0,71,106,141	1057			3.5
		2.0	315	629	0,63,94,126	1259			9.4
	60	1.5	399	665	0,33,67,100,133	997			0.0
		2.0	354	590	0,30,59,89,118	1179			0.0
		2.5	318	530	0,53,80,106	1324			2.7

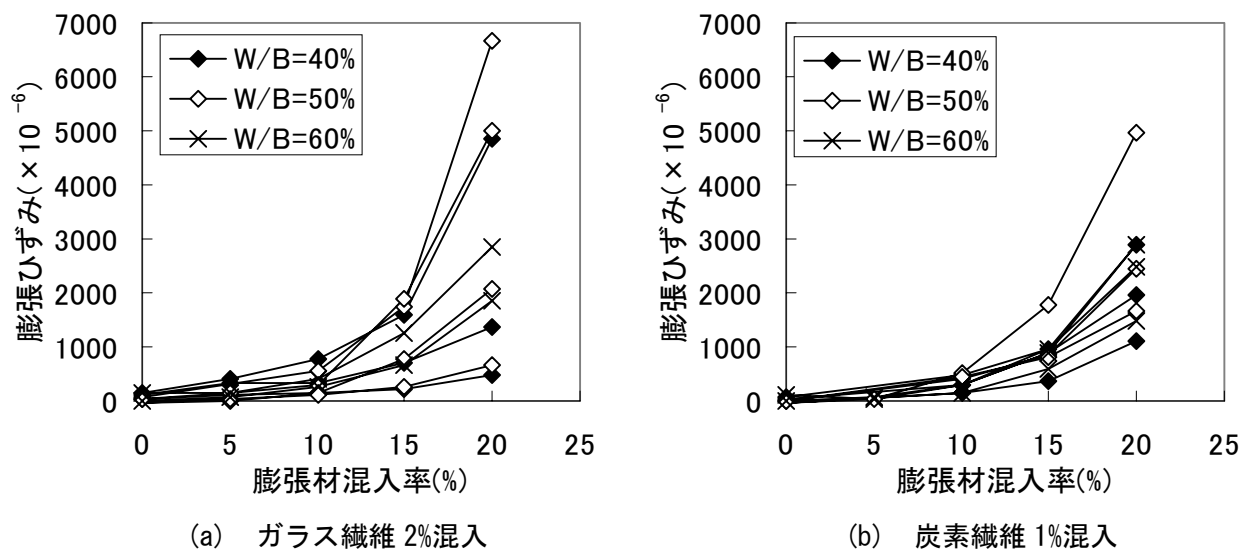
* 膨張材は結合材重量に含む

を整理した。図－2に膨張材混入率と膨張ひずみの関係を示す。図中において実線で連ねた値はベース配合が同一のものである。いずれの繊維および配合条件の場合においても、ベース配合が同一の場合には膨張ひずみが膨張材混入率に対して指数的に増大している。しかし、ベース配合が異なる場合、膨張材混入率が同一の場合においても膨張ひずみは大きく異なる。また、図－3に単位膨張材量と膨張ひずみの関係を示す。単位膨張材量が同一の場合においても得られる膨張ひずみは配合条件により大きく異なる。膨張コンクリートの膨張性は膨張材混入率または単位膨張材量によって表される場合が多いが、

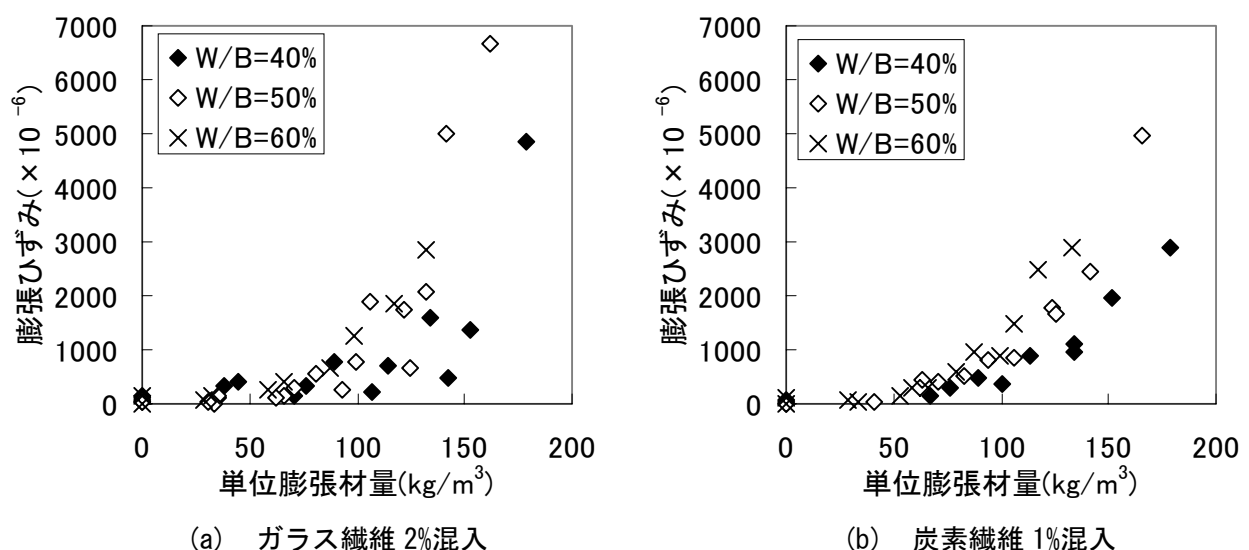
膨張モルタルの場合には配合条件の変動範囲がコンクリートの場合に比べて大きく、その影響から膨張ひずみが増大するものと考えられる。なお、繊維混入時の膨張ひずみが 4000×10^{-6} を超える場合にはひび割れや強度低下を生じたが、 3000×10^{-6} 以下では、特に異状は見られなかった。

(2) ベースモルタルの配合条件と膨張ひずみの関係

膨張材量以外の要因について、ベースモルタルの配合条件が膨張ひずみに与える影響について検討した。膨張材混入率が一定の場合（ここでは 20%）について、細骨材結合材比および水結合材比と膨張ひずみの関係を図－4に示す。



図－2 膨張材混入率と膨張ひずみの関係



図－3 単位膨張材量と膨張ひずみの関係

膨張材混入率および水結合材比を一定とすると、細骨材結合材比が 1.0 では膨張ひずみは大きな値となっているが、細骨材結合材比を増加させると膨張ひずみが急激に減少している。また、膨張材混入率および細骨材結合材比を一定とすると、水結合材比が小さいほど膨張ひずみが小さいようである。以上のことから、膨張材混入率が一定の場合、細骨材結合材比が小さく、また、水結合材比が大きいほど膨張材の効果が大きくなる傾向が得られた。

3. 短繊維により拘束した膨張モルタルの膨張ひずみ推定式の構築について

3.1 膨張ひずみ推定式の作成

(1) 推定式の作成方法

ベースモルタルの配合条件が等しい場合には、膨張材混入率に対して膨張ひずみが指数関数的に生じることから、膨張材混入率の指数関数を用いて膨張ひずみを表すこととした。さらに、ベースモルタルの配合条件が異なる場合に膨張材の効果が変動する。そこで、膨張材の効果を表す補正係数を考案した。膨張ひずみを、膨張材混入率と補正係数の積に対する指数関数として表し、各配合条件について補正係数を求めることで、ベースモルタルの配合条件が異なる場合にも推定式を適用できるようにした。以上より、膨張ひずみの推定式を式(1)のように構成した。

$$\varepsilon = \alpha \cdot \exp\left(\beta \cdot k \cdot \frac{E}{B}\right) \quad (1)$$

ここに、 ε ：膨張ひずみ

k ：補正係数

E/B ：膨張材混入率

α, β ：実験定数

配合条件の影響を考慮した推定式の作成には、まず水結合材比 50%, 細骨材結合材比 1.5 のベース配合を基準 ($k=1.0$) とし、この場合の膨張ひずみを近似して実験定数 α, β を求めた。次に、他の各ベース配合について、この関数によって膨張ひずみが表されるように、補正係数 k を求めた。求めた推定式を、式(2)および式(3)に示す。

ガラス繊維 2%混入の場合

$$\varepsilon = 65.6 \cdot \exp\left(21.2 \cdot k \cdot \frac{E}{B}\right) \quad (2)$$

炭素繊維 1%混入の場合

$$\varepsilon = 39.8 \cdot \exp\left(20.5 \cdot k \cdot \frac{E}{B}\right) \quad (3)$$

また、このとき求めた補正係数と配合条件の関係について図-5に示す。これを見ると、細骨材結合材比が小さい配合ほど補正係数が大きく、膨張材の効果が大きいことを示している。

(2) 配合条件と膨張材の効果の関係

ベースモルタルの配合条件によって膨張材の効果が変動する原因として、細骨材結合材比が大きく、水結合材比が小さいほど膨張要素であ

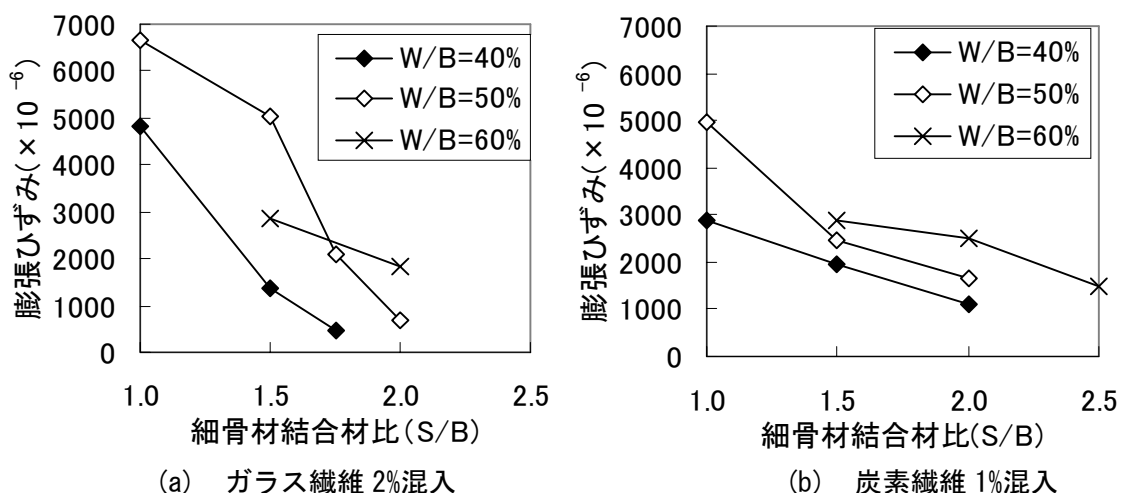


図-4 細骨材結合材比と膨張ひずみの関係(膨張材混入率 20%)

るペーストが減り、非膨張要素である細骨材が増えるため、モルタル全体としては膨張しにくくなる状況が考えられる。このことからモルタル全体の膨張特性は、ペースト量の影響を受けると考えられる。そこで、膨張材の効果を表す補正係数とペースト量の関係について検討した。

図-6にペースト容積比（モルタル全体に対するペースト容積の割合）と補正係数の関係を示す。ペースト容積比が小さくなると補正係数が小さく、膨張材の効果が小さくなる傾向が現れている。なお、補正係数に与える水結合材比の影響は小さいようである。また、ペースト容積比が小さい領域では補正係数の低下が著しい。

今回用いた細骨材の実積率は65.0%であり、細骨材間の空隙を埋めるのに最低限必要なペースト容積比は0.35であるが、安定した膨張を生じ

るためにはペースト容積比0.35では不十分で、細骨材粒子の周囲に、ある程度のペーストが必要と考えられる。これより、ペースト容積比0.55未満の領域では膨張に必要なペーストが不足し、膨張しにくい状況にあるものと考えられる。

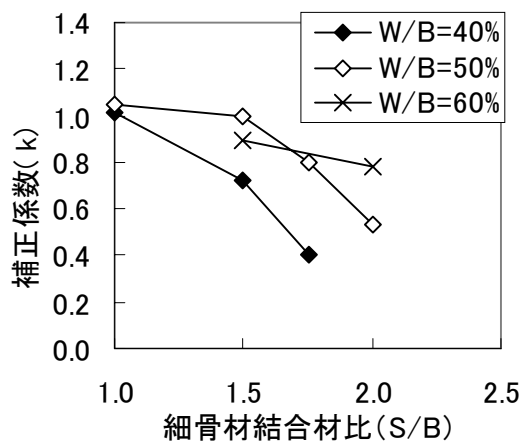
以上より、ペースト容積比と補正係数の関係について、ペースト容積比0.55を境界とする2直線により近似を行った。ペースト容積比と補正係数の近似式を式(4)および式(5)に示す。

ガラス繊維2%混入の場合

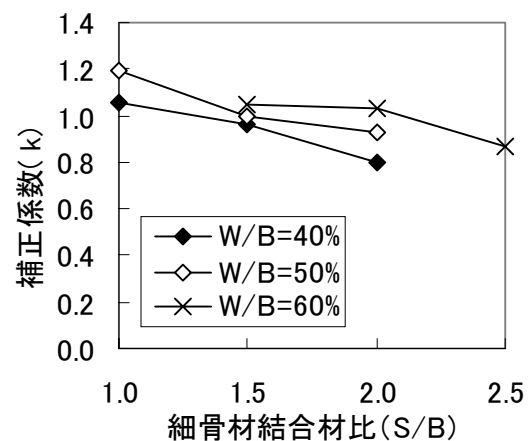
$$k = \begin{cases} 8.61p - 3.91 & (p < 0.55) \\ 0.98p + 0.38 & (p \geq 0.55) \end{cases} \quad (4)$$

炭素繊維1%混入の場合

$$k = \begin{cases} 2.70p - 0.47 & (p < 0.55) \\ 1.23p + 0.31 & (p \geq 0.55) \end{cases} \quad (5)$$

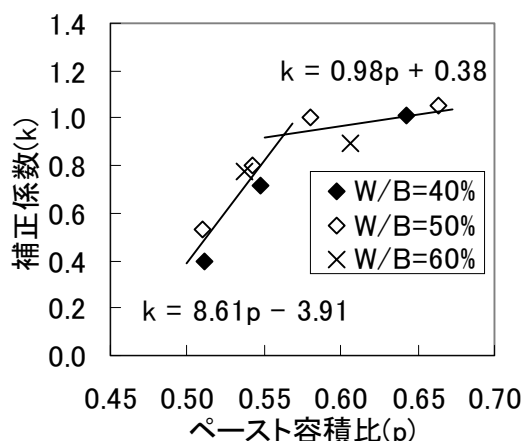


(a) ガラス繊維 2%混入

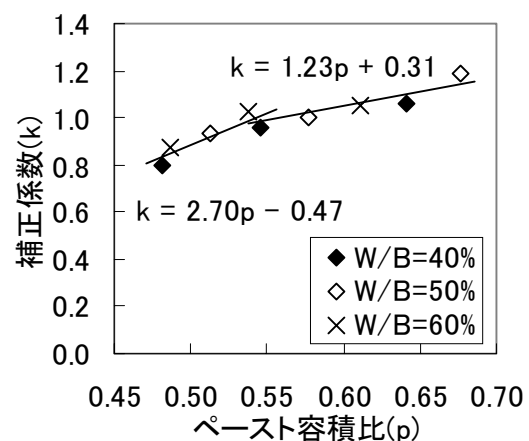


(b) 炭素繊維 1%混入

図-5 水結合材比および細骨材結合材比と補正係数の関係

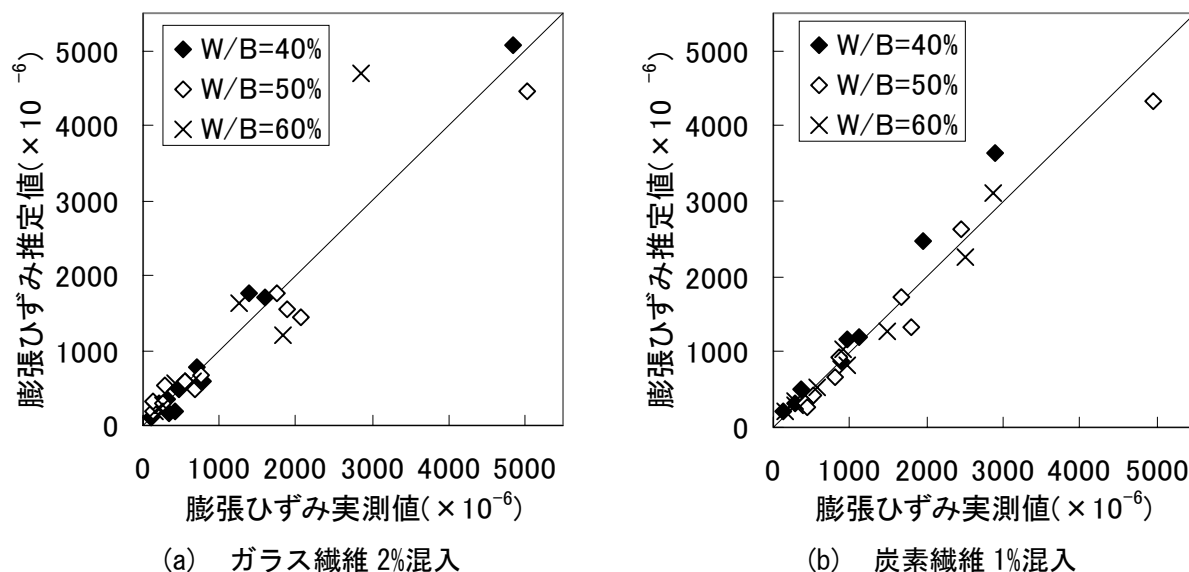


(a) ガラス繊維 2%混入



(b) 炭素繊維 1%混入

図-6 ペースト容積比と補正係数の関係



図ー7 膨張ひずみの推定結果

ここに、 k ：補正係数

p ：ペースト容積比

3.2 膨張ひずみの推定結果

短繊維により拘束した膨張モルタルの膨張ひずみについて、配合条件から式(2)～式(5)によって推定し、実測値と比較した。図ー7に膨張ひずみの推定値と実測値の関係を示す。一部膨張ひずみの大きい場合には推定値と実測値の差が大きいものもあるが、今回の実験の範囲においては、この推定式により膨張ひずみを良好に推定できているものと考えられる。

短繊維による拘束効果を利用し、ケミカルプレストレスを導入するための条件として以下の点が挙げられる。まず、ベースモルタルの配合条件について、ペースト容積比が 0.55 以下の場合には膨張材の効果が高く、膨張が生じにくいことから、ペースト容積比を 0.55 以上とするのが適当である。また、膨張材量の決定にあたっては、過度の膨張による強度低下やひびわれを防ぐため、繊維混入時の膨張ひずみを 3000×10^{-6} 程度に制限する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、短繊維と膨張材を併用して得られるケミカルプレストレスに関する一検討とし

て、短繊維により拘束された膨張モルタルの膨張ひずみと配合条件との関係について実験的に検討した。また、その結果より膨張ひずみの推定式の構築を試みた。その結果、膨張ひずみは膨張材量のみならず他の配合条件の影響を受け、膨張材混入率とペースト容積比によって膨張ひずみを概ね表現できた。この手法を用いることにより、所要の膨張特性を有する繊維混入膨張モルタルの膨張設計が可能であると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、インフラテック(株)、テイジン(株)、電気化学工業(株)には、実験材料の提供をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 辺志切祐希, 上原尚也, 松本進：短繊維を用いたケミカルプレストレスの導入要因に関する検討, 平成 13 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.A482-A483, 2002.3
- 2) 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
- 3) 土木学会編：コンクリートライブラリー75, 膨張コンクリート設計施工指針, p.93, 1993