

論文 PP 繊維で補強した膨張モルタルを薄層複合させた H 形鋼の膨張および曲げ性状

福田 直^{*1}・李 春鶴^{*2}・辻 幸和^{*3}

要旨: 本研究では, PP 繊維補強膨張モルタルの膨張性状に及ぼすミキサの種類, 水結合材比, PP 繊維の添加率, 砂結合材比などの配合の影響とともに, PP 繊維補強膨張モルタルで薄層複合させた H 形鋼の膨張性状および曲げ性状に及ぼす膨張材の置換率の影響について検討した実験結果を報告する。そして, 仕事量一定則の概念に基づく PP 繊維補強膨張モルタルの膨張ひずみの推定精度および PP 繊維補強膨張モルタルで薄層複合させた H 形鋼の膨張性状とケミカルプレストレスの推定精度についても報告する。

キーワード: PP 繊維, 繊維補強膨張モルタル, 複合 H 形鋼, 膨張性状, 曲げ性状, 仕事量一定則

1. はじめに

ポリプロピレン繊維 (以下, PP 繊維と略称する。) で補強したモルタルは, 薄層で利用することができ, 靱性に優れ, 剥離・剥落の抑制効果, 初期ひび割れ耐力の増進効果が期待出来る¹⁾。また, 膨張材を混合した PP 繊維補強膨張モルタルは, 鋼合成桁橋等のように鋼材と薄層で合成させることにより, 鋼材が拘束材となりケミカルプレストレスが導入され, 力学的性能が向上する。また, 鋼材の構造性能の向上も期待できる。

膨張コンクリートにおいては, 膨張性能に影響を及ぼす要因は単位膨張材量が支配的であるとされているが, モルタルは配合条件の及ぼす影響がコンクリートに比べ大きく, 単位膨張材量のみでは膨張ひずみの評価は困難である。ケミカルプレストレスの利用には, 膨張性能を把握することが重要であり, その効果を定量的に把握するため, 多くの研究が行われている^{2),3),4)}。しかし, これら既往の研究においては, コンクリートに関するものが多く, PP 繊維補強膨張モルタルに関して, ケミカルプレストレスの利用を検討したものは少ない。

本文は, まず, PP 繊維で補強した膨張モルタルの作製にあたってのミキサの違いによる曲げ強度性状を検討した。そして, 水結合材比, PP 繊維添加率, 砂結合材比が PP 繊維補強膨張モルタルの膨張特性に及ぼす影響を把握し, 材料レベルでの仕事量一定則の概念を用いた PP 繊維補強膨張モルタルの膨張ひずみの推定精度について検討した結果を報告する。その後, 膨張材の置換率を変化させた薄層の PP 繊維補強膨張モルタルを被覆材として用いるだけでなく, H 形鋼との複合構造としての高品質化を図ることを目的とした基礎研究結果を報告するものである。複合化させた場合の膨張性状および曲げ性状に及ぼす PP 繊維補強膨張モルタルの影響とともに,

仕事量一定則の概念に基づく膨張・収縮性状およびケミカルプレストレスの推定の精度についても報告する。

2. PP 繊維補強膨張モルタルの作製についての検討

2.1 使用材料

使用したセメント, 細骨材, 膨張材および混和剤の物性を表-1 に示す。また, 補強材として使用した PP 繊維の物性を表-2 に示す。PP 繊維は, 炭素繊維に比べ, 弾性係数は低いが, 表面処理を行っているため, 親水性が優れているので, モルタル中での分散性には優れている。

2.2 ミキサの選定についての検討

表-1 使用材料

材料	特徴
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3290cm ² /g
膨張材	低添加形, 密度:3.10g/cm ³ , 比表面積:2820cm ² /g
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体
細骨材	陸砂, 密度:2.63 g/cm ³ , 吸水率:0.84%, 粗粒率:2.76

表-2 PP 繊維の物性値

項目	物性値
密度 (g/cm ³)	0.91
長さ (mm)	12
厚さ (μm)	18
アスペクト比	667
比表面積 (m ² /kg)	225
引張強度 (N/mm ²)	440
ヤング係数 (N/mm ²)	7500

*1 群馬大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

*3 群馬大学大学院 工学研究科教授 工学博士 (正会員)

表-3 配合表 (ミキサの種類と消泡剤の有無の検討)

水結合材比 (%) W/B	砂結合材比 S/B	膨張材置換率 (%) Ex	PP 繊維添加率 (%) V_f	高性能 AE 減水剤 (%) A_d
40	1	7	1.0	0.5
			1.5	1.0
			2.0	1.0

(1) 実験概要

モルタルの配合を表-3 に示す。PP 繊維の添加率 V_f は体積比である。3 種類の基本配合に、消泡剤の有無、2 種類のミキサの組み合わせにより、合計 12 配合を用いた。消泡剤ありの場合は、結合材質量の 0.02% を添加した。ミキサは、オムニミキサ (容量 5L) とモルタルミキサ (容量 3L) を用いた。

練混ぜ方法は、セメントや水などの各投入時間を 30 秒以内とし、PP 繊維は最後に投入した。その後 3 分間練り混ぜ、入念な練混ぜに心がけた。

各配合において、40×40×160mm の供試体を 3 本ずつ作製し、材齢 1 日で脱型後、20°C±2°C の水中養生を行った。材齢 28 日において、スパンが 120mm の 3 等分点載荷で曲げ強度試験を行い、曲げ強度と供試体支間中央部のたわみを測定した。

(2) 実験結果および考察

図-1 に示すように、ミキサの種類に関わらず、消泡剤を混合していない配合では、PP 繊維添加率の増加により、曲げ強度の低下が顕著であるのに対して、消泡剤を混合した配合では、PP 繊維添加率の増加により、曲げ強度が増加する傾向が認められる。これは、PP 繊維の混入により、モルタルマトリックス中の空気量は増え、そのため消泡剤の有無により曲げ強度が異なる傾向を示していると考えられる。したがって、多量の繊維を用いる場合は、消泡剤を用いて、モルタルの強度低下を防止する必要がある。

図-2 では、W/B が 40%、S/B が 1、Ex が 7%、 V_f が 1.0% の場合の荷重とたわみの曲線を示している。破断までの荷重-たわみ曲線下の面積を曲げタフネスとすると、ミキサの種類により差がある。すなわち、オムニミキサを用いた場合、モルタルミキサを用いた場合より大きい値を示している。 V_f が 1.5%、2.0% の場合も同じ傾向である。これは、オムニミキサにより練り混ぜられた場合、モルタルミキサより良い力学的性能を持つと考えられる。

2.3 PP 繊維補強膨張モルタルの配合についての検討

W/B、S/B、 V_f などの配合条件が、PP 繊維補強膨張モルタルの膨張特性に及ぼす影響を把握し、仕事量一定則の概念に基づく膨張ひずみの推定を行った。

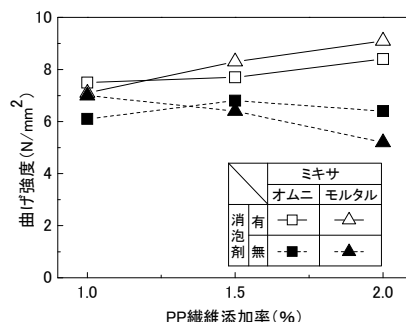


図-1 曲げ強度とミキサ種類および PP 繊維量の関係

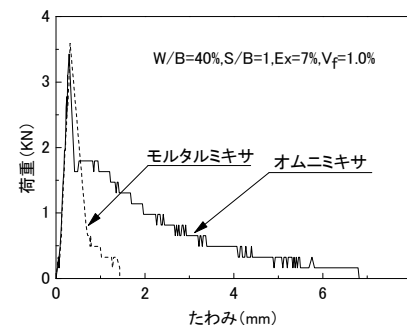


図-2 荷重とたわみ曲線

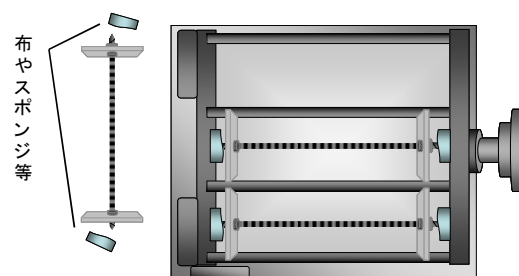


図-3 一軸拘束器具と供試体成形用型枠

(1) 実験概要

モルタルの配合を表-4 に示す。2.2 で検討した結果よりすべての配合について、オムニミキサで練混ぜを行い、高性能 AE 減水剤を使用し、結合材質量の 0.02% の消泡剤を混合した。

すべての配合で、Ex は 7% である。W/B は、30%、40%、50% の 3 種類で、W/B が 30%、50% の場合の S/B は 1、W/B が 40% の場合の S/B は 0.5、1.0、1.5 である。 V_f は、0~2% の範囲で、2~5 水準とした。

一つの配合につき、モルタル成形用型枠 (図-3) によって 3 本の供試体を作製した。この型枠には、一軸拘束器具を設置した。器具の主軸は 158±0.2mm であるため、型枠の間に隙間が生じる。主軸の先端は測長時に重要な部位であるため、型枠との接触を避けて損傷を防ぐ目的で、布やスポンジ等を型枠と器具先端の隙間にあてた。モルタルは、2 層に分けて成形した。1 層ごとに型枠の四隅を木槌で 15 回ずつ打ち、拘束器具に当たらないよ

表-4 配合表

水結合材比 (%) W/B	砂結合材比 (%) S/B	膨張材置換率 (%) Ex	PP 繊維添加率 (%) V _f	高性能 AE 減水剤 (%) A _d
30	1	7	0	0.5
			1.0	1.0
			1.5	
			2.0	
40	0.5		0	-
	1		1.0	
			0	
			0.5	
1.5	1.0	1.0		
	1.5			
	2.0			
	1.0			
50	1	0	-	
		1.0		
		1.5		
		2.0		

うに、ヘラで空隙を埋めるように成形した。

供試体は、打込み後 24 時間で脱型し、その後 20±2.0℃ の水槽内で水中養生を行った。

一軸拘束膨張率の測定には、JIS A 6202 (コンクリート用膨張材) の附属書 1 の膨張モルタルによる膨張性試験方法に従った。測定材齢は、1, 2, 7, 14, 28 日である。

(2) 仕事量一定則の概念による膨張ひずみの推定

膨張ひずみの推定には、仕事量一定則の概念に基づく方法を用いた^{2),3)}。膨張したモルタルがなす単位体積あたりの仕事量は、拘束の程度にかかわらず一定であると仮定し、同じ配合で、短繊維無添加の場合の仕事量を式(1)で、短繊維を添加した場合の仕事量を式(2)で求め、両仕事量が等しいとして求める。ここで、短繊維を拘束材として換算するための拘束材比は、式(3)により求める。α は PP 繊維の配向係数とし、短繊維が三次元的に均等に分散されていると仮定して、0.405 を用いる^{2),3)}。

これらにより、一軸拘束供試体の膨張ひずみは、式(4)により推定される。

$$U_1 = p_s E_s \varepsilon_{ss}^2 / 2 \quad (1)$$

$$U_2 = (p_s E_s + p_{pf} E_{pf}) \varepsilon_{pf}^2 / 2 \quad (2)$$

$$p_{pf} = \alpha V_f / 100 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{pf} = \varepsilon_{ss} \sqrt{p_s / (p_s + p_{pf} E_{pf} / E_s)} \quad (4)$$

ここで、p_s：一軸拘束供試体の拘束鋼材比、p_{pf}：PP 繊維を一軸拘束方向に換算した拘束繊維比、ε_{ss}：PP 繊維を混合していない一軸拘束供試体の膨張ひずみ、ε_{pf}：PP 繊維を混合した一軸拘束供試体の膨張ひずみ、E_s：拘束鋼材のヤング係数、E_{pf}：PP 繊維のヤング係数、V_f：PP 繊維の添加率 (%)、α：配向係数である。

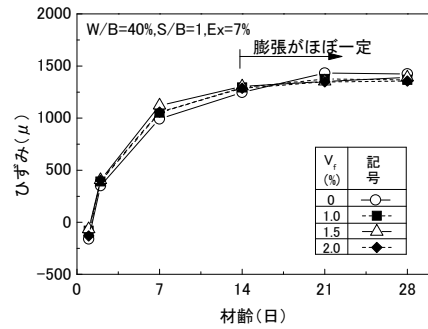


図-4 異なる PP 繊維添加率における膨張ひずみの経時変化

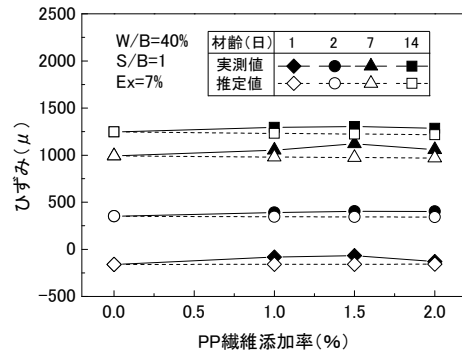


図-5 異なる PP 繊維添加率における膨張ひずみの実測値と推定値の比較

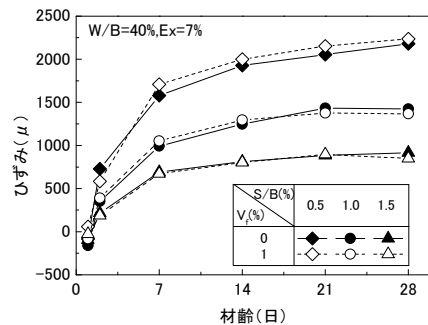


図-6 異なる砂結合材比における膨張ひずみの経時変化

(3) 実験結果および考察

図-4 に、W/B が 40%、S/B が 1、Ex が 7% の場合の、各 PP 繊維添加率におけるひずみの経時変化を示す。この実測値は、同一配合の 3 供試体の平均値である。膨張は、材齢 14 日ほどで概ね落ち着き、安定した。図-5 に、材齢 14 日までの繊維添加率による膨張ひずみの実測値と推定値の比較を示す。推定値は、PP 繊維添加率が 0% を基準にしている。繊維の添加率が膨張ひずみに及ぼす影響は、材齢の経過に関わらずほぼ一様であり、いずれの材齢においても推定が可能であることが確認された。また、繊維添加率の増加による拘束の影響は推定値からも小さく、膨張ひずみの低下は小さい。これにより、PP 繊維補強膨張モルタルに導入される PP 繊維の膨張ひずみのケミカルプレストレンとモルタルに導入される

ケミカルプレストレンは繊維添加率の影響が小さい

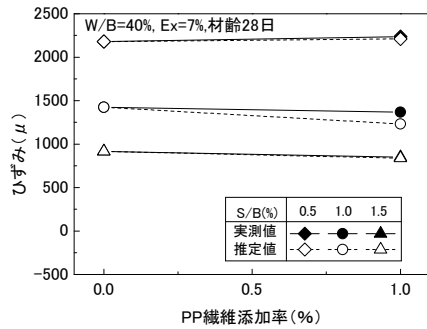


図-7 異なる砂結合材比における膨張ひずみの
実測値と推定値の比較

ことが確認された。

S/B が異なる場合、ひずみの経時変化を図-6 に示す。砂結合比が増加すると、相対的に膨張材量が減少するため、膨張ひずみは低下する。また、S/B が 1.5 の場合、膨張は材齢 7 日付近で十分安定しているのに対し、S/B が 0.5 の場合では材齢 28 日まで膨張が継続し、その後ようやく安定し始めている。S/B が小さい配合では、膨張材量が多く、水和反応に要する時間が長いためである。次に、S/B が異なるモルタルの V_f が 0% と 1% の材齢 28 日における膨張ひずみを図-7 に示す。 V_f が 1% までの範囲であれば、繊維拘束による影響は少なく、十分な精度で推定できる。

したがって、以上の検討範囲では、 V_f や S/B による影響をほとんど受けず、仕事量一定則の概念による膨張ひずみの推定は可能であるといえる。

図-8 に S/B が 1 で、Ex が 7% の場合、水結合材比 W/B ごとの膨張ひずみの経時変化を示す。PP 繊維が無添加のものと比較した場合においても、W/B が 50% と大きい場合には PP 繊維が及ぼす影響が顕著に生じており、膨張ひずみが低下する傾向が現れている。図-9 に、水結合材比ごとの繊維添加率による膨張ひずみを示す。W/B が 30%、40% においては、推定の範囲内である。しかし、W/B が 50% と大きい配合において、繊維添加率が増加すると、推定値と実測値との差が大きくなり、期待される膨張が得られなかった。水分量の増加により、流動性が増し、三軸方向にランダムでなく、一軸拘束器具の主軸方向に繊維が分布しやすくなる。そのため、繊維による拘束力が増加することが考えられる。したがって、繊維添加率の増加により、水結合材比の大きな配合では一軸方向の膨張ひずみ自体が低下する傾向があると考えられる。なお、W/B が 40% 以下であれば、精度のよい膨張ひずみの推定は可能といえる。

3. 複合 H 形鋼の挙動についての検討

以上の検討から、PP 繊維補強膨張モルタルの膨張性状は砂結合材が変化しても PP 繊維量が及ぼす影響は小さいが、水結合材比を大きくすると、PP 繊維量の増加に伴

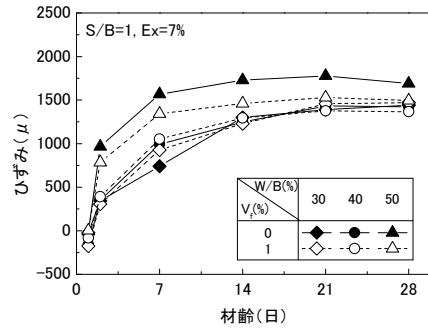


図-8 異なる水結合材比における膨張ひずみの
経時変化

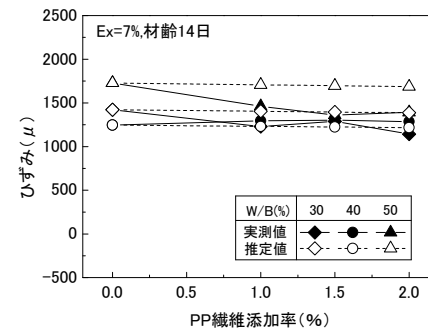


図-9 異なる水結合材比における膨張ひずみの
実測値と推定値の比較

表-5 PP 繊維補強膨張モルタルの配合

供試体名	水結合材比(%)	砂結合材比	膨張材置換率(%)	PP 繊維添加率(%)
	W/B	S/B	Ex	
E0	40	1	0	1.0
E6			6	
E8			8	

い膨張ひずみが低下することが認められた。また、PP 繊維を多量に添加することで、膨張ひずみが低下することも明らかになっている。しかし、Ex が 7%、W/B が 40% までであれば、仕事量一定則の概念に基づく推定膨張ひずみと同等の実測膨張ひずみが得られることが確認された。つまり、PP 繊維補強膨張モルタルは、W/B をある範囲内に収めれば、仕事量一定則の概念に基づき膨張ひずみの推定が可能であるが、良好な推定精度となる膨張材の置換率については明確な範囲を検討していない。

そこで、本研究では、膨張材の置換率を変化させた PP 繊維補強膨張モルタルと H 形鋼を合成させることで、膨張材の置換率 Ex の違いが複合 H 形鋼の膨張性状および曲げ性状に及ぼす影響を把握し、複合 H 形鋼におけるケミカルプレストレスの推定精度について報告する。

3.1 実験概要

PP 繊維補強膨張モルタルの配合は、表-5 に示すように、Ex を 0,6,8% に変化させた 3 配合とした。

モルタルの作製に用いた材料は、2. で使用したものと同様である。H 形鋼は、熱間圧延して表面は無処理のもので、幅が 100mm、高さが 200mm、上・下フランジの

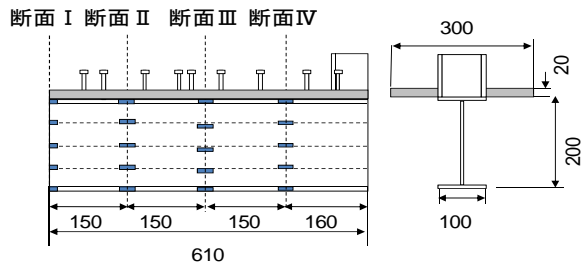


図-10 複合H形鋼供試体の形状寸法およびひずみゲージの測定位置

厚さが8mm、ウェブ厚さが5.5mm、長さが1220mmのものを使用した。その上面に、厚さが20mm、幅が300mmのPP繊維補強膨張モルタルを打ち込んだ複合H形鋼供試体を作製した。H形鋼には、ずれ止めとして、フランジ上に、高さが80mmで、直径が13mmのスタットジベルを60mm間隔で配置した。また端面から70mmの位置に、高さが100mm、厚さが6mmのみぞ形鋼を配置した。複合H形鋼供試体の形状寸法、およびワイヤストレーンゲージの貼付位置を図-10に示す。この図は、複合H形鋼の長さの半分で、ワイヤストレーンゲージを貼付した部分を示している。

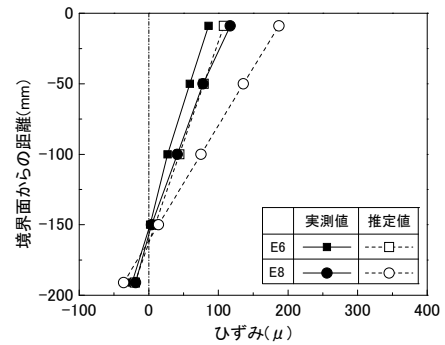
ひずみの推定は、2.と同様な方法で、H形鋼の拘束も考慮した方法^{5),6)}である。

3.2 複合H形鋼の膨張・収縮性状

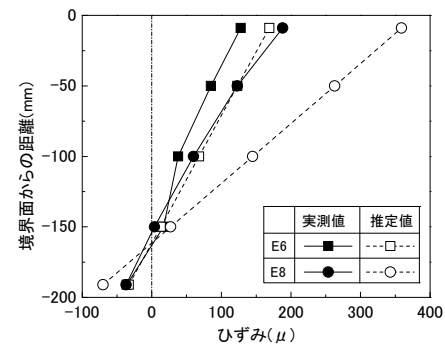
複合H形鋼の中央(断面I)に生じた材齢が7日、28日における供試体軸方向の膨張・収縮ひずみの実測値の高さ方向への分布を図-11に示す。またこの図には、一軸拘束モルタル供試体の膨張ひずみより、仕事量一定則の概念に基づいて推定したひずみ分布も併記している。

供試体E6については、材齢7日では、実測値と推定値にほとんど差はなく、両者はほぼ一致している。材齢28日では、推定値よりも実測値が小さくなったが、膨張ひずみの差は最大で40 μ 程度と小さく、仕事量一定則の概念に基づいて十分に推定可能であることを確認した。

しかし、供試体E8の実測値は推定値との差が大きくなり、期待される膨張ひずみと収縮ひずみが得られなかった。供試体E6に対し、膨張材の置換率が大きい供試体E8では、図-12に示すように、拘束鋼材比が0.62%の一軸拘束モルタル供試体の膨張ひずみは 2000×10^{-6} と著しく大きくなり、一軸拘束を受けていたとしても膨張によるPP繊維補強膨張モルタルの品質の低下が生じたと考えられる。なお、図-12には材齢1日に脱型して水中養生はJISA6202に従って $20 \pm 2.0^\circ\text{C}$ の水中に入れたもの、湿布養生は、複合H形鋼と同様な方法を採用したものである。材齢初期には水中養生の膨張ひずみが大きくなるものの、最終的には膨張ひずみは両養生ともほぼ等しい値を示している。この品質の低下に加えて、H形鋼のような曲げ剛性が大きい鋼材をPP繊維補強膨張モルタルと複合させた



(a) 材齢7日



(b) 材齢28日

図-11 複合H形鋼における軸方向ひずみの高さ方向分布

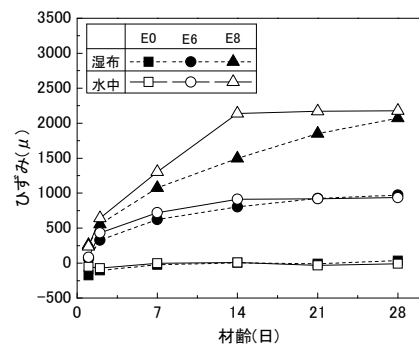


図-12 一軸拘束膨張ひずみの経時変化

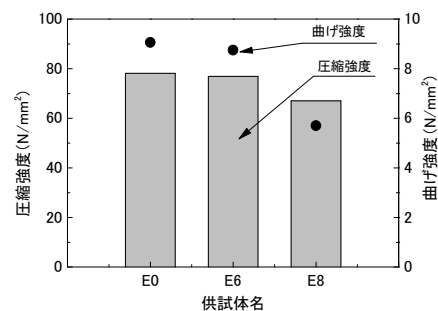


図-13 角柱供試体の圧縮強度および曲げ強度

ことで、PP繊維補強膨張モルタルに導入されるケミカルプレストレスの量が大きくなり、このケミカルプレストレスが及ぼすクリープおよび弾性変形の影響が大きくなったことで、実際に生じた膨張ひずみが小さくなったことが原因であると考えられる。さらに、材齢の経過に伴い、これらの影響がより顕著に現れたと考えられる。

3.3 複合H形鋼の供試体および角柱供試体の曲げ性状

材齢 28 日に実施した 40×40×160mm の角柱供試体を用いた曲げ強度と圧縮強度試験の結果を図-13 に、複合 H 形鋼供試体の曲げ載荷試験の結果を図-14 に示す。

自由膨張させた角柱供試体は、供試体 E8 で曲げ強度が圧縮強度に比べて大幅に低下した。図-12 に示したように、一軸拘束した場合でも約 2000×10^{-6} と大きな膨張ひずみを示したことによる。

これに対して、膨張を H 形鋼で拘束している複合供試体では、曲げひび割れ発生モーメントが膨張材を用いていない供試体 E0 のものに比べて供試体 E6 で約 5 倍、供試体 E8 で約 6 倍大きくなった。これは、H 形鋼が PP 繊維補強膨張モルタルの膨張を拘束することで導入されたケミカルプレストレスの効果によるものである。

3.4 推定ケミカルプレストレスと増加曲げ応力度

供試体 E0 の曲げひび割れ発生応力度の実測値と、供試体 E6、供試体 E8 の曲げひび割れ発生応力度の実測値の差である増加曲げ応力度を求めた。この増加曲げ応力度と、仕事量一定則の概念に基づき推定したモルタル部分の引張縁に生じた推定ケミカルプレストレスとの関係を図-15 に示す。

供試体 E6 の増加曲げ応力度と推定ケミカルプレストレスはほぼ一致しており、推定の精度は良好である。これに対して供試体 E8 では、増加曲げ応力度が推定ケミカルプレストレスより約 30% 小さくなった。この原因として、供試体 E8 は、図-12 に示したように、膨張ひずみが過大であったため、H 形鋼による一軸方向の拘束を受けても膨張による強度低下があったこと、および前述した PP 繊維補強膨張モルタルに大きなケミカルプレストレスが導入される際に膨張モルタルのクリープおよび弾性変形の量が大きくなって、生じた膨張ひずみが減少することによる影響が大きかったため、導入されたケミカルプレストレスが小さくなったと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- 1) PP 繊維の練混ぜにオムニミキサを用いた場合は、モルタルミキサより良い力学的性能を持つことが可能であり、また多量の繊維を用いる場合は、消泡剤を用いて、モルタルの強度低下を防止する必要がある。
- 2) PP 繊維を添加したモルタルでは、繊維添加率が 2% と過剰にならなければ、繊維添加率が変化しても、繊維補強膨張モルタルの仕事量一定則の概念に基づく膨張ひずみの推定が可能である。
- 3) 厚さが 20mm の薄層の PP 繊維補強膨張モルタルを H 形鋼と複合させることにより、曲げひび割れ性能は大幅に向上することが確かめられた。

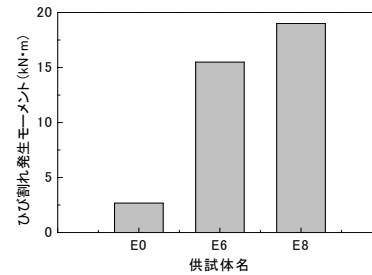


図-14 複合H形鋼供試体のひび割れ発生モーメント

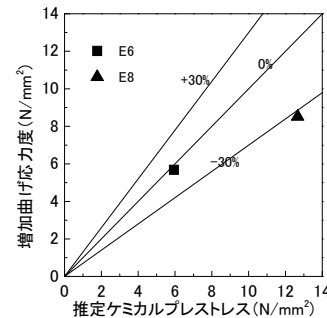


図-15 増加曲げ応力度とケミカルプレストレス

4) 複合 H 形鋼供試体に生じた膨張ひずみとケミカルプレストレスは、材齢に関わらず、仕事量一定則の概念に基づく方法により推定が可能である。しかし、膨張材を多量に添加すると、過大な膨張による強度の低下とともに、大きなケミカルプレストレスの導入による膨張モルタルのクリープおよび弾性変形の影響が大きくなり、推定精度は低下する。

謝辞：本研究の実施には、当時研究室の院生と学部学生であった木伏 万里花氏、竹本 詩乃氏、塩津 絵理氏に多大なご協力を頂いた。付記して、厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 王欣, 小野定, 鮎田耕一, 石川達朗: ポリプロピレン短繊維を使用したコンクリートの基礎性状に関する検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, pp.781-782, 2002.9
- 2) 辻幸和, 古川茂: 鋼繊維で補強した膨張コンクリート部材の膨張特性, 第 384 /V-7 号, pp.111-118, 1987.8
- 3) 古川茂, 辻幸和, 大谷杉郎: 短炭素繊維で補強した膨張モルタルの性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1045-1050, 1992.7
- 4) 辻幸和, 佐藤喜悦: 鋼繊維を用いた膨張コンクリートの膨張収縮性状および圧縮強度特性, セメント技術年報, Vol.36, pp.155-158, 1982
- 5) 辻幸和: ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法, コンクリート工学, Vol.19, No.6, pp.99-105, 1981.6
- 6) 辻幸和, 佐久間隆司, 保利彰宏: 高性能膨張コンクリート, 技報堂出版, 2008.11