

論文 ポリマー膨張コンクリート薄板の配合と導入プレストレスに関する研究

内大久保 清一*¹・出光 隆*²・山崎 竹博*³

要旨：コンクリート工事の省力化、迅速化施工の一つにコンクリート製永久型枠を用いる工法がある。永久型枠には、施工の際の自重を支え、支保工を減らすことが可能な耐力が必要とされる一方、薄肉・軽量化が望まれる。本研究では、CFRP(炭素系連続繊維補強プラスチック)緊張材を使用してケミカルプレストレスを導入し、型枠の薄肉化を試みた。一般に、ケミカルプレストレスコンクリート（CPC）では乾燥収縮やクリープに伴うプレストレスの減少が大きくなる。本研究では、各種のエマルジョンを用い、ポリマー膨張コンクリート PC 薄板製造の可能性について実験的検討を行った。

キーワード：石灰系膨張材、ケミカルプレストレス、炭素系連続繊維、永久型枠

1. はじめに

コンクリート製薄板のように、定形の PC 部材を大量生産するにはプレテンション方式が適しているが、薄板のように小径の CFRP(炭素系連続繊維強化プラスチック)緊張材を多数 2 方向に緊張するには特殊な定着装置が必要となる。これらの事情から、本研究では CFRP 緊張材の定着装置が不要なケミカルプレストレスコンクリート(CPC)を用いることを検討してきた。その際、有効プレストレスを大きくするため、土木学会コンクリート標準示方書で規定される膨張コンクリートのひずみ 700 μ を超えるひずみで CFRP 緊張材を緊張する。この場合、CPC によるプレストレス導入では緊張材のポアソン効果によって、薄いかぶりでも緊張材に沿うひび割れ発生が少ない。

しかし、膨張コンクリートでプレストレスを導入する場合、コンクリートの乾燥収縮や硬化初期のクリープにより大きなプレストレス損失が生じるため、これらの収縮ひずみを小さくして、膨張ひずみを確保しなければならない。一方、膨張材の置換率を増やして膨張ひずみを

大きくすれば、セメント硬化体の空隙率も大きくなり、強度の低下やクリープ係数の増加などを生じる。

本研究では、これら CPC 薄板性質を改善するため、ポリマーエマルジョンを用いた膨張コンクリートの特性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

コンクリートには普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、石灰系膨張材(密度 3.16 g/cm³)、細骨材(密度 2.53 g/cm³, FM2.56)、粗骨材(密度 2.73 g/cm³, FM5.90)を使用した。コンクリートの防水性を付与するために、膨張を阻害しないと考えられるポリマーセメントコンクリート用のエマルジョンとして、市販されている代表的な成分から表-1 に示す 6 種類を使用した。すなわち、EVC 系(エチレン・酢酸ビニル・塩化ビニル供重合樹脂水性エマルジョン)・SAE 系(スチレン・アクリル供重合エマルジョン)・EVE 系(エチレン・酢酸ビニル供重合樹脂エマルジョン)・SBR 系(スチレンブタジエンゴム系ラテ

*1 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (正会員)

*2 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 博士 (正会員)

*3 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 工博 (正会員)

クス)・PAE系(特殊アクリル供重合体)・EVA系(変性エチレン・酢酸ビニル系エマルジョン)のポリマーを壁材の防水効果を期待する際の各メーカーの標準使用量だけ混入した。以後ポリマーの名称は表-1に示す記号のように省略して使用する。

緊張材には表-2に示すCFRP7本より線φ5.0mmを使用した。弾性係数は鋼製の緊張材よりも3割程度低い値であるが、各CFRPごとにワイヤーストレインゲージ(ゲージ長3mm)を貼付して引張力との校正係数を求めた上でプレストレスカの測定に使用した。ゲージの貼り付けやリード線の材質などには特に防水効果に注意した。

打設する膨張コンクリートの配合はこれまでの一連の研究から、ワーカビリティや膨張量、強度などを考慮して表-3のように定めた

各配合は、一定の流動性を確保する観点から、ペーストの容積が一定となるように定めている。

2.2 供試体の形状及び寸法

薄板供試体は木製型枠を使用して横打ちで作製した。寸法は3.5×15×51cmで緊張材本数3本を5cm間隔で使用した。供試体は緊張材ひずみを測定しながら4週間湿布養生とし、その後20°C、湿度70%の気中養生とした。

2.3 膨張ひずみ及び有効プレストレスの測定法

供試体表面の膨張ひずみの測定方法は、図-1に示すように示すように打設後23時間後にガラス板を供試体中央部に20cm間隔で設置し、標点距離をコンパレーターで測定した。導入プ

表-1 ポリマー性能表

記号	SBR系	PAE系	EVA系
組成	SBR系ラテックス	特殊アクリル供重合体(PAE)	変性エチレン酢酸ビニル系エマルジョン(EVA)
pH	9.5	9.5	6.0
全固形分(%)	45	44~46	45
粘度(mPa·s)	50	300	1100
比重	1.0	1.0	1.02
記号	EVE系	SAE系	EVC系
組成	エチレン・酢酸ビニル供重合樹脂エマルジョン	スチレン・アクリル供重合エマルジョン	エチレン・酢酸ビニル塩化ビニル供重合樹脂水性エマルジョン
pH	4.5~6.6	7.0~9.0	5.0~7.0
全固形分(%)	45	50	50
粘度(mPa·s)	2000	200	5000
比重	1.0	1.0	1.0

表-2 CFRPの規格値

	CFRP
品質	CFCC
形状	より線
結合材	エポキシ樹脂 ビスマレイミド樹
繊維含有率(%)	64
外形(cm)	5.0
計算断面積(mm ²)	10.1
重量(g/m)	24
破断荷重(kN)	22.1
引張強度(Mpa)	2.190
弾性係数(Gpa)	142
破断時の伸び率(%)	1.5

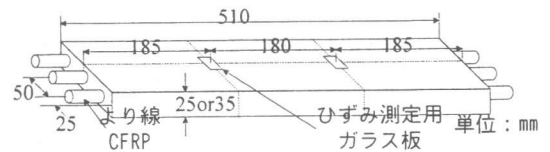


図-1 薄板供試体の寸法

表-3 配合表

コンクリートの種類	ポリマーセメント比(%)	水粉体比(%)	細骨材率(%)	空気量(%)	単位水量(kg/m ³)	重量配合(kg/m ³)					
						セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	ポリマー	減水剤
基準コンクリート	0	32.5	48	3	166	443	69.0	769	899	0	5.120
ポリマー混入	5	32.5	48	3	166	443	69.0	747	862	22.2	5.120
	10	32.5	48	3	166	443	69.0	724	826	44.3	5.120
	15	32.5	48	3	166	443	69.0	702	789	66.5	5.120

表-4 配合表

打設日	ポリマーの種類	ポリマーセメント比 (%)	膨張材量	水粉体比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	重量配合 (kg/m ³)					
								セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	ポリマー	減水剤
10/19	基準コンクリート	0	96	32.5	48	3	170.0	427	96	780	874	0.0	4.184
	EVC系	5	96	32.5	48	3	176.9	427	96	745	835	21.4	4.355
	SAE系												
	EVE系												
11/6	基準コンクリート	0	90	32.5	48	3	168.0	427	90	784	880	0.0	4.136
	PAE系	5	90	35.0	48	3	188.4	427	90	733	822	21.4	4.307
	SBR系												
	EVA系												

レストレスの測定は材齢28日目にスパン30cm, 3等分点2点載荷で曲げ試験を行った。載荷は1体につき, 表, 裏の2回行ない, 初亀裂荷重からひび割れ発生時の下縁応力, 再亀裂荷重から導入プレストレスを算定した。なお緊張材に貼付したゲージのひずみ変化量からも導入プレストレスは求められる。つまり, 荷重-ひずみ曲線の曲率の急変点を荷重初期の傾きと 400×10^{-6} 程度での接線との交点として求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 各種ポリマーの強度特性

ポリマー膨張コンクリートに用いるポリマーを選択するため, 表-3に示す6種の代表的ポリマーエマルジョンを用いたコンクリートの曲げおよび圧縮強度試験を実施した。それらの結果から, 材齢4週における強度をそれぞれ図-2および図-3に示す。図中のP/Cはセメント質量に対するポリマー混和の質量比である。それらの結果から, 曲げ強度が高い順に並べるとSAE, EVE, PAE, EVA系のポリマーコンクリートとなるが, ポリマー混和量による強度変動が小さいものに絞るとSAE, EVE, EVA系となる。さらに, 圧縮強度試験結果からみるとSAE, SBR, EVAとなり, 総合的にみればSAE系とEVA系が強度的に優れている。

3.2 各種ポリマーと膨張ひずみ特性

石灰系膨張材を使用してケミカルプレストレスを導入する際に, ポリマーの種類によって膨張特性が低下しないことを確認するため, 図-1に示した供試体に表-4の配合で膨張コンク

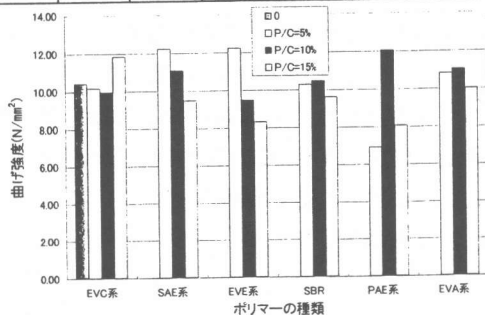


図-2 各ポリマー使用時の4週曲げ強度

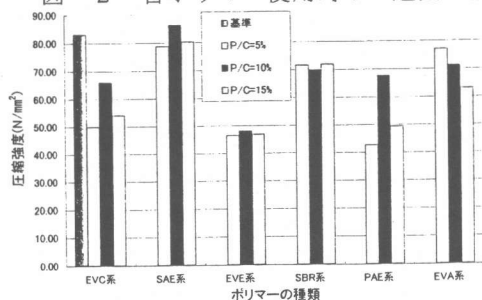


図-3 各ポリマー使用時の4週圧縮強度

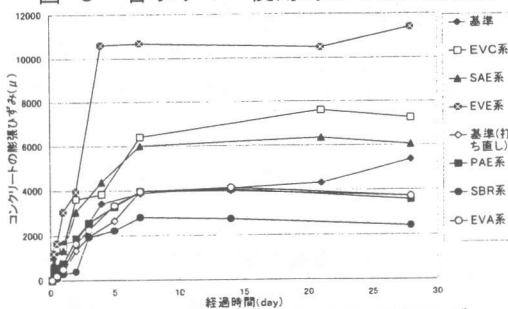


図-4 コンパレーターによる膨張ひずみ

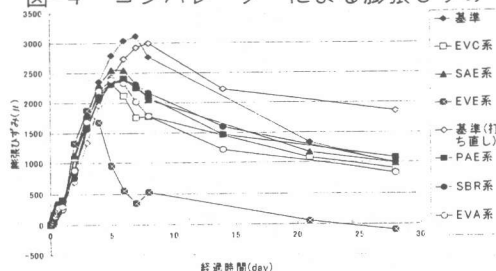


図-5 緊張材による膨張ひずみ

シートを打設し、コンパレータおよび緊張材ひずみから膨張量を測定した。それらの結果から図-4にコンパレータを用いたコンクリートひずみ、図-5に緊張材のゲージひずみを示している。表-4の配合表から分かるように打設日によって2種類の膨張材量を使用しているが、それぞれに基準コンクリートを打設しているため、ポリマー膨張コンクリートのひずみは基準値に近いものが望ましいことになる。

図-4に示すコンクリートの表面ひずみではポリマーを用いない基準供試体は膨張材量90、96共に 4000×10^{-6} 程度のひずみとなっており、これらのひずみに近い膨張を示すポリマーとしてはEVA系ポリマーが上げられる。その他のポリマーでは、SBR系を除きすべて基準供試体よりも大きいひずみを発現していることが分かる。一方、図-5に示す緊張材の膨張ひずみは、打設後7日の基準供試体で 3000×10^{-6} 程度となっているが、28日では $1000 \times 10^{-6} \sim 1900 \times 10^{-6}$ 程度まで低下している。両者の違いの原因としては緊張材とコンクリートとの界面滑りの影響やクリープひずみの発生が考えられるが、その対策として膨張材量を適切に選び膨張ひずみを必要最小限にすることを検討した。

EVE系に見られる 10000×10^{-6} を越えるコンクリートひずみに対して、緊張材のひずみがほぼ0となっているのは滑り発生の代表的な例と言える。

3.3 導入プレストレス

緊張材ひずみの緊張力から、また、曲げ試験の再亀裂荷重から薄板に導入されたプレストレスを算定した。それらの結果を図-6にまとめて示す。図-5からE=96の場合、緊張材とコンクリート間には大きなずれが生じており、緊張材ひずみも正確に測定されていないことが分かる。このことは、図-6に示すまげ試験と緊張材ひずみから求められたプレストレスの相違からも判断できる。しかし、膨張材量の減少により、この傾向は改善され、EVA系ポリマーで高い強度を得た。そこで、EVA系ポリマーを用い

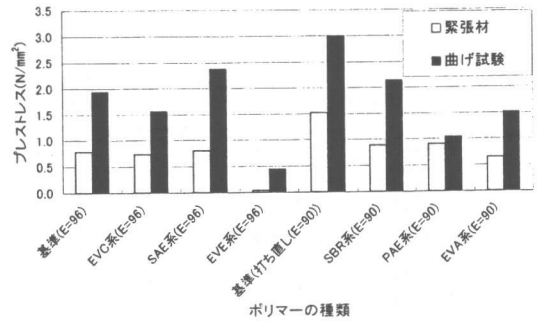


図-6 各ポリマーのプレストレス算定

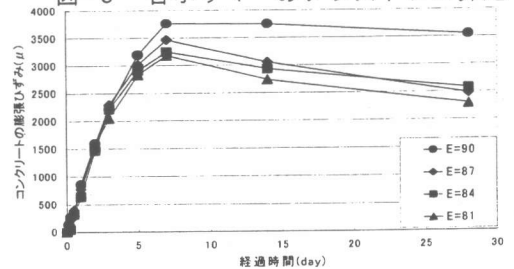


図-7 コンパレーターによる膨張ひずみ

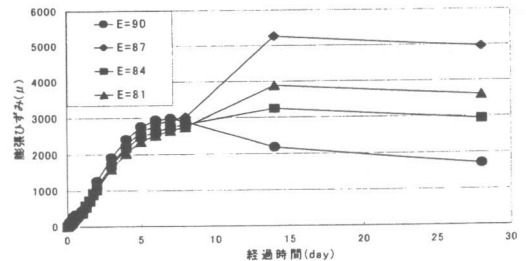


図-8 緊張材による膨張ひずみ

て最適な膨張材量の詳細を検討することにした。

3.4 EVA系ポリマーの最適膨張材量

EVA系ポリマーを用いて、表-5のように単位膨張材量を 8 kg/m^3 まで減らして再度膨張試験を実施した。その結果、図-7、図-8に示すように、コンパレータを用いたひずみと緊張材のひずみとが膨張材量の低下と共に逆転する結果が得られた。膨張材量別に両者のひずみ差を見ると、E=90では 1700×10^{-6} 、E=87では -2400×10^{-6} 、E=84では -400×10^{-6} 、E=81では -900×10^{-6} となる。すなわち、コンパレータによるひずみには大きな誤差は含まれるものの、E=90では緊張材とコンクリート間にすべりが生じていると考えられ、E=87以下ではすべりが生じていないと見ることができる。このことは、本実

表一五 膨張材量が変化する場合の配合

打設日	ポリマーセメント比 (%)	膨張材量	水粉体比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	重量配合 (kg/m ³)					
							セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	ポリマー	減水剤
12/25	5	87	30	48	3	155.3	410	87	778	873	20.5	4.140
	5	84	30	48	3	155.3	413	84	778	872	20.7	4.141
	5	81	30	48	3	155.3	416	81	778	872	20.8	4.142

表一六 水粉体比が変化する場合の配合

打設日	ポリマーセメント比 (%)	膨張材量	水粉体比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	重量配合 (kg/m ³)					
							セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	ポリマー	減水剤
12/6	5	90	32.5	48	3	162.3	390	90	771	872	19.5	3.996
			30			128.5	408				20.4	3.427
			27.5			123.0	426				21.3	3.578

表一七 ポリマーセメント比が変化する場合の配合

打設日	ポリマーセメント比 (%)	膨張材量	水粉体比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	重量配合 (kg/m ³)					
							セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	ポリマー	減水剤
12/14	5	90	30	48	3	151.7	396	90.0	781	883	19.8	4.046
	10	90	30			157.7	396	90.0	750	848	39.6	4.205
	15	90	30			163.6	396	90.0	718	812	59.4	4.363

験で用いた膨張材では単位膨張材量 87 kg/m³ 以下で強度の発現と膨張ひずみによるプレストレスの導入力とのバランスが取れたことを意味している。

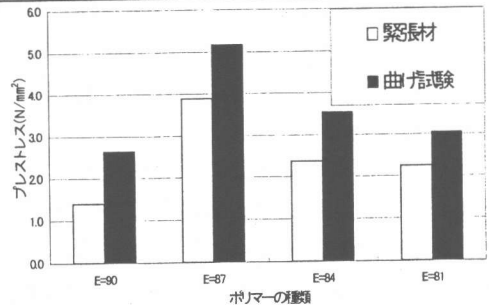
図一七、図一八に対応する薄板のプレストレスを緊張材の力と曲げによる再亀裂試験から算定した結果、図一九に示すように単位膨張材量 87 kg/m³ で 5 N/mm² を越えるプレストレスの導入が確認できた。

3.5 EVA系ポリマーの最適水粉体比

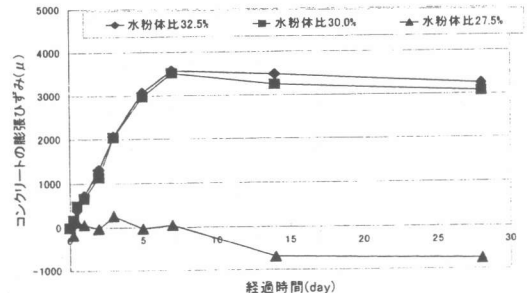
EVA系ポリマーを用いた膨張コンクリートでは膨張材量を低下させることで強度と膨張ひずみとのバランスが確保できた。この他に、水粉体比を適切に定めることによっても強度増加が図れるものと考えられる。

ここでは、表一六のように膨張材量を少し多めの 90 kg/m³ に設定し、水粉体比を調整して強度とのバランスを図り、より高いプレストレスの導入を試みた。

薄板を用いた膨張量試験から得られたコンクリートひずみと緊張材ひずみの測定結果を図一



図一九 各単位膨張材量の膨張ひずみ



図一十 コンパレータによる膨張ひずみ 10 および図一十一に示している。

同試験結果では最も水粉体比の小さい 27.5% の供試体で、コンクリートの膨張が正常に測定できない状況が生じた。しかしながら、同水粉体比での圧縮強度は 1 週で 49 N/mm² が測定されており、セメントの硬化は生じるもの

の、膨張が異常に遅延したと考えられる。

水粉体比が 32.5%ではコンクリートひずみも緊張材ひずみも極めて高く、十分なプレストレスが導入されていることが分かる。

3.6 E V A系ポリマーの混和量と膨張量

膨張コンクリートは水和結晶の増大によって膨張力を発揮するため、その組織の緻密化を図ってポリマーとの併用を検討してきた。

ここでは、ポリマー混和量の多少による膨張量と導入プレストレスとの関係を調査した。

その方法として、表一七に示す標準使用量の2および3倍のポリマーセメント比とした場合の膨張量試験を行った。その結果から、コンクリートひずみと緊張材ひずみとをそれぞれ図一12および図一13に示した。両図から分かるように、ポリマーセメント比が多くなると膨張ひずみは発生するが、緊張材との付着が悪くなり、材齢5日程度からプレストレスの低下が顕著になることが分かる。

4. まとめ

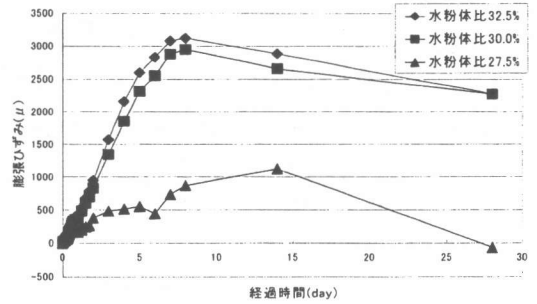
ポリマーを用いて膨張コンクリートの組織の緻密化を図り、耐久性の高いP C薄板を作製することを目標にポリマーと膨張ひずみとの関係を検討した結果、以下のような結論が得られた。

(1) 単位膨張材量 90, 96kg/m³の配合でポリマーエマルジョンの標準量を添加した結果S B R系を除き、ポリマー無混和の基準供試体よりも大きいひずみを発現した。一方、図一3に示す緊張材の膨張ひずみは、打設後7日の基準供試体で 3000×10⁻⁶程度となった。

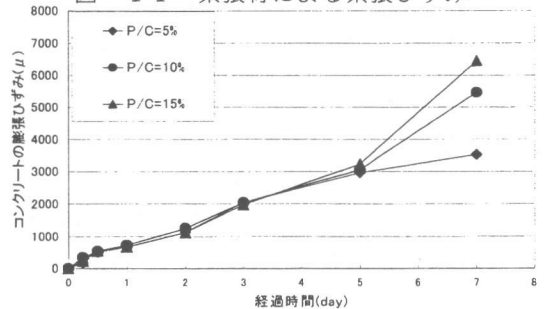
(2) 過大な膨張量に対しては、緊張材とコンクリートとの界面滑りやクリープひずみが発生しプレストレスの低下を生じる。

(3) E V A系ポリマーの最適膨張材量について単位膨張材量を 87 kg/m³以下とした場合に強度の発現と膨張ひずみによるプレストレスの導入力とのバランスが取れ、5 N/mm²を越えるプレストレスが確認できた。

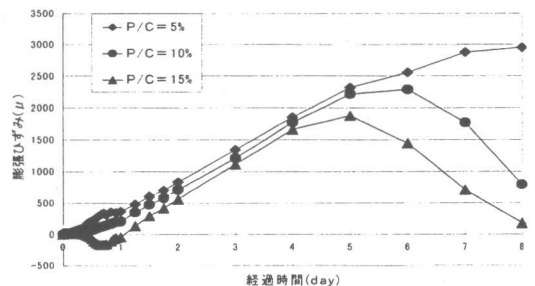
(4) E V A系ポリマーの最適水粉体比として、



図一11 緊張材による緊張ひずみ



図一12 コンプレーターによる膨張ひずみ



図一13 緊張材による膨張ひずみ

単位膨張材量 90 kg/m³の場合、27.5%の供試体で圧縮強度は材齢1週で 4.9 N/mm²が測定されたにも関わらず、膨張が正常でない状況が生じた。

(5) E V A系ポリマーの混和量と膨張量に関して、標準使用量の2倍を越えるポリマーセメント比では、緊張材とコンクリートの付着が悪くなりプレストレスの低下が顕著になる。

参考文献

- 1) 山崎竹博, 出光 隆, 小嶺啓蔵, : 高膨張コンクリートの配合および養生条件と物理的特性, プレストレストコンクリート技術協会第8回シンポジウム論文集, pp.527-532, 1998.
- 2) 山崎竹博, 出光 隆, 渡辺 明, : CPC薄板のプレストレス導入に及ぼす養生温度の影響に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会第9回シンポジウム論文集, pp.745-750, 1999.