

論文 繊維補強された高曲げコンクリートに関する実験的研究

久保征則^{*1}・上垣義明^{*2}・入矢桂史朗^{*3}・竹田宣典^{*4}

要旨：プレキャスト型枠に用いられるモルタルおよびコンクリートにおいて、曲げひび割れ強度 10 N/mm^2 以上の高強度化を図るためには、繊維補強が有効と思われるが、同時に乾燥および熱的外力に対するひび割れ抵抗性の向上が必要と考えた。このため、熱膨張係数の低減、乾燥による収縮変形の抑制、高熱時変形特性の把握等を主目的として使用材料および配合をパラメータとした実験を行った。その結果、熱膨張係数の低減と収縮変形の抑制を図り、同時に高強度を有するには、碎石にステンレス繊維を用いることが有効であることが判明した。

キーワード：繊維補強、熱膨張係数、収縮変形、曲げひび割れ強度、鋼繊維

1. はじめに

近年、コンクリート工事の合理化および省力化が求められている。さらに構造物は、完成後メンテナンスに手のかからない高耐久化が要求される場合が多い。この様な状況下で、コンクリート工事の省力化、工期短縮を目的として、コンクリート打設後も脱型しないプレキャストコンクリートの埋設型枠（以下P C a型枠と称する）の使用が考えられた。

以上のような背景のもとで、P C a型枠に用いられるモルタルおよびコンクリートについて、繊維補強によるひび割れ抵抗性の向上および高強度化に関する実験（熱膨張試験、収縮変形試験、熱変形試験、強度試験）を行い、その結果について検討した。

2. 実験概要

使用材料を表-1に、試験項目と試験方法概要などを表-2に、配合の組み合わせを表-3に、配合を表-4に示す。熱膨張係数の低減のために石灰岩砕砂を用い、また収縮変形の抑制のために収縮低減剤、ブレン値の小さな高炉スラグ微粉末、膨張材を使用した。さらに、熱膨張係数および収縮変形の低減のため石灰岩砕砂とビニロンおよびステンレス繊維を用いた。

表-1 使用材料

使用材料	記号	備考
早強ポルトランドセメント	C	比重:3.14 比表面積:4510 cm^2/g
高炉スラグ微粉末	Sg	比重:2.91 比表面積:9210 cm^2/g
白色シリカヒューム	Si	比重:2.20 比表面積:200000 cm^2/g
細骨材	S1	比重:2.76 乾燥陸砂 FM=1.42
	S2	比重:2.66 石灰岩砕砂 FM=3.22
	S3	比重:2.57 木更津産山砂 FM=2.84
石灰岩砕砂	G1	比重:2.72 秩父産 5~13mm
	G2	比重:2.72 秩父産 5~15mm
	G3	比重:2.72 秩父産 5~10mm
膨張材	EX	比重:2.92 石灰・石膏・水・特殊
白色顔料	WF	比重:3.90 酸化チタン
ビニロン繊維	VF	比重:1.30 長さ $\phi=30\text{ mm}$
ステンレス繊維	SF	比重:7.80 長さ $\phi=15\text{ mm}$
アラミド繊維	AF	比重:1.39
高性能減水剤	SP1	比重:1.13 高濃合トリアジン系
高性能A E減水剤	SP2	比重:1.05 ポリカルボン酸系
高性能A E減水剤	SP3	比重:1.05 ポリカルボン酸系
収縮低減剤	NS	比重:0.985 低級アルコール
特殊エポキシ樹脂	PE	比重:1.15 変性エポキシ樹脂

*1 (株)大林組 土木技術本部技術第五部(正会員)

*2 (株)大林組 本店紀ノ川工事事務所 工修(正会員)

*3 (株)大林組 土木本部本部長室管理課長 工修(正会員)

*4 (株)大林組 技術研究所土木第三研究室 研究員, 工修(正会員)

表-2 試験項目

試験項目	試験方法	試験材齢	供試体(cm)
熱膨張係数	熱湯浸漬後コンパレータ法	7, 28日	10×10×40
	押棒式変位法	7日	φ5×10
曲げ強度	JIS A 1106	7日	10×10×40
長さ変化	強制炉乾燥コンパレータ法	2, 4, 7日	4×4×16
	JIS A 1129コンパレータ法	1, 4, 8週, 3, 6, 9, 12ヵ月	
収縮変形	室内保存の版の長さ変化・反りを測定	1, 2, 4日 1, 2, 4, 13週	50×300 ×5.3
熱変形	ジェットヒーターにより一面加熱乾燥	11, 12日	曲面パネル R=2m, H=1.5m

2. 1 熱膨張係数試験

熱膨張係数の測定における供試体は、差動トランス型変位計を用いた押棒式変位計ではφ5cm×10cmを1配合あたり3本、熱湯浸漬後コンパレータで供試体長さを測定する方法では、10cm×10cm×40cmを1配合あたり2本とした。

2. 2 長さ変化試験

4×4×16 cmの供試体を用い、強制炉乾燥法とJIS法により行った。

①強制炉乾燥法は、材齢1日に基長測定を行った。その後、90℃・18時間の炉乾燥を行った。そして材齢2日の乾燥終了後に6時間かけて徐冷を行い、JISコンパレータ法により長さ変化率を測定した。

②JIS A 1129のうちコンパレータ法により行った。

2. 3 収縮変形試験

一面にポリマーを3mm塗布した50cm×300cm×5.3cmの供試体（表面は滑面仕上げ）を用い、供試体の反りを水糸で測定した。側面および上面中心におけるたわみ（δ1、δ2）はノギスにより測定した。図-1に供試体寸法および反り測定位置を示す。

表-3 配合の組み合わせ

区分	繊維混入	使用材料および構造
A	×	繊維無混入基準モルタル、細骨材：絶乾山砂
B	×	繊維無混入モルタル、細骨材：石灰岩砕砂
C	×	繊維無混入モルタル、スラグをセメントに置換
D	×	繊維無混入モルタル、スラグのブレンを4000に
E	○	Aのモルタルにビニロン繊維を2%混入
F	○	Aのモルタルにステンレス繊維を2%混入
G	×	Aのモルタルに石灰岩砕石(5-13mm)使用
H	○	Eの繊維混入モルタルの表面にアラミドを配置
I	○	Hのアラミド繊維と反対面にポリマーを3mm塗布
J1	○	石灰岩砕石コンクリートにビニロン繊維を1.5%混入
J2	○	石灰岩砕石コンクリートにステンレス繊維を1.5%混入
K	○	Eのセメント、スラグ、シリカフームを膨張材に置換
L	○	Eの収縮低減剤を20→30kg/m ³ に増量
M	○	Dスラグ4000にビニロン繊維を混入

表-4 配合

区分	W/P (%)	単 位 量 (kg/m ³)								混和剤		
		W	C	Sg	Si	EX	S	G	繊維	WF	NS	SP (P×%)
A	26.8	265	692	249	49	—	S1:944	—	—	40	20	SP1:5.5
B						—	S2:910	—	—			
C			960	—	—	—	S1:944	—	—			
D			692	249*1	—	—	—	—	—			
E				249	—	—	—	—	VF:26			
F					—	—	—	—	SF:156			
G		234	610	219	43	—	S1:832	G1:302	—			
H		265	692	249	49	—	S1:944	—	VF:26			
I					—	—	—	—	—			
J1	25.0	172	481	172	34	—	S3:888	G2:530	VF:19.5			SP2:2.6
J2					—	—	—	—	SF:117			
K	26.8	265	636	229	45	80	S1:944	—	VF:26			SP1:5.5
L			692	249	49	—	—	—	—		30	
M				249*1	—	—	—	—	—		20	

*1：高炉スラグ微粉末のブレン4000cm²/g（その他はブレン8000cm²/g）

注：空気量は4.5±1.5%、P=C+Sg+Si+EX、NS (kg/m³)はWの内割
A～D、Gの無混入繊維分の容積換算はしていない
繊維量は容積比の内割

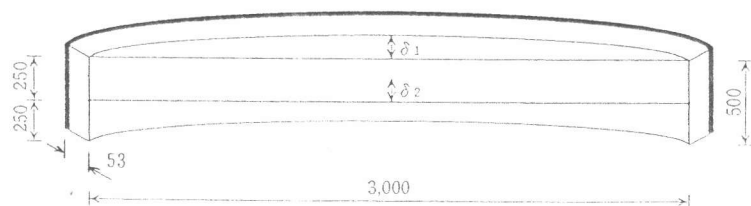


図-1 供試体寸法および反り測定位置

2. 4 熱変形試験

熱変形試験では、収縮変形に対して抵抗性があると予想された配合を対象とした。供試体には、 $R=2.0\text{m}$ 、 $H=1.5\text{m}$ の曲面パネルを用いた。曲面が水平方向となるようにパネルを設置し、パネルの加熱はジェットヒータを用い、ポリマー面（裏面）のみから行った。図-2に加熱方法の概念図示す。

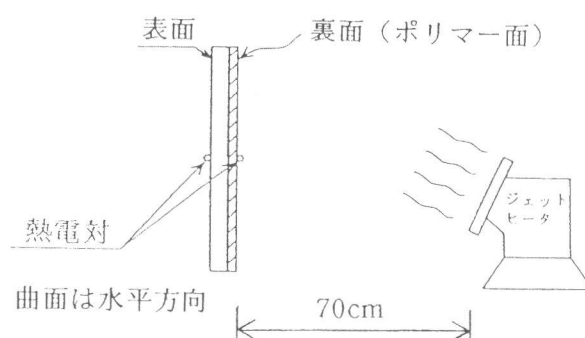


図-2 パネル加熱方法概念図

2. 5 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、収縮変形試験の結果から強度の確認が必要と考えた配合について行った。供試体は $10\text{cm}\times 10\text{cm}\times 40\text{cm}$ とし、試験方法はJIS A 1106に準じて行った。試験材齢は7日とした。

2. 6 強度改善試験

2章1節から5節までの試験結果から、砕石コンクリートにすることにより収縮変形が小さくなること、ステンレス繊維を混入することにより強度が大きくなることが確認された。しかし、高性能AE減水剤の過剰添加が原因とみられる凝結遅延が発生し、強度発現が遅れた。このため強度を増大させる対策として、高性能AE減水剤の主成分を変更し、粗骨材の最大寸法を小さくした。またステンレス繊維とシリカフュームの混入率、膨張材の有無をパラメータとして実験を行った。試験方法は圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度試験とした。圧縮強度試験の供試体寸法は、 $\phi 10\text{cm}\times 20\text{cm}$ 、供試体材齢は1、7、14日、曲げ強度の供試体寸法は $10\text{cm}\times 10\text{cm}\times 40\text{cm}$ 、供試体材齢は1、7、14日、割裂引張強度試験の供試体は $\phi 10\text{cm}\times 20\text{cm}$ 、供試体材齢は1、14日とした。

表-6 試験の組み合わせ

配合 番号	Gmax (mm)	W/C (%)	ステン レス (%)	シリ カ フュー ム (%)	膨張材	粗骨材 容 積 (l)
1	10	25	2	5	×	200
2					○	
3				15	×	
4			3	5	×	150

表-7 コンクリートの配合

No	W/P (%)	単位量 (kg/m^3)									混和剤	
		W	C	Sg	Si	EX	Sl	G3	SF	WF	NS	SP3 P×%
1	25.0		490			0	881					
2		175	410	175	35	80	876	540	156			1.8
3			490	105	105		861					
4		185	518	185	37		924	405	234			2.0

注：空気量は $4.5\pm 1.5\%$ 、 $P=C+Sg+Si+EX$
 $NX(\text{kg}/\text{m}^3)$ はWの内割、繊維量は容積比の内割

表-6に試験の組み合わせを、表-7にコンクリートの配合を示す。

3 試験結果

3. 1 熱膨張係数試験

熱膨張係数試験の結果を表-8に示す。今回行った試験では供試体寸法および試験方法が2通りあり、同一配合であっても熱膨張係数 α ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) が最大1程度異なるものもあった。基準配合から補強繊維を除いたA配合の α は12.3 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) であった。細骨材を陸砂から石灰岩砕砂に変更すると α は1低下するが、目標である10 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 以下までには低減されなかった。

ビニロンおよびステンレス繊維を混入すると、繊維無混入モルタルより低下するものもあったが、全体的に α は増加し、その増分はステンレス繊維の方が若干大きかった。 α が10 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 程度未満となる配合は、碎石を混入したコンクリートであり、ビニロンとステンレス繊維による差はほとんどなかった。

表-8 熱膨張試験結果

区分	VF	SF	AN	P	供試体寸法 (cm)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
A	-	-	-	-	$\phi 5 \times 10$	12.3
					$10 \times 10 \times 40$	12.0
B	-	-	-	-	$\phi 5 \times 10$	11.3
C	-	-	-	-	$10 \times 10 \times 40$	12.8
D	-	-	-	-	$10 \times 10 \times 40$	11.9
E	○	-	-	-	$\phi 5 \times 10$	12.6
					$10 \times 10 \times 40$	13.6
F	-	○	-	-	$\phi 5 \times 10$	13.0
					$10 \times 10 \times 40$	11.8
G	-	-	-	-	$\phi 5 \times 10$	9.6
H	○	-	○	-	$10 \times 10 \times 40$	13.3
I	○	-	○	○	$10 \times 10 \times 40$	11.1
J1	○	-	-	-	$10 \times 10 \times 40$	8.2
J2	-	○	-	-	$10 \times 10 \times 40$	8.5
M	○	-	-	-	$10 \times 10 \times 40$	13.6

VF: ビニロン繊維、SF: ステンレス繊維、
AN: アラミド繊維、P: ポリマー

表-9 長さ変化率($\times 10^{-6}$)

区 分	強制乾燥	J I S A 1 1 2 9			
	材齡 2 日	材齡 1 週	材齡 3 週	材齡 8 週	
F	3 7 1	1 5 0	2 0 0	2 5 2	
H	3 0 7	8 3	9 3	1 3 8	
J1	2 0 2	4 3	6 2	9 1	
J2	1 6 4	3 8	8 3	1 0 0	
K	— 3 4 3 0	1 0	2 1	— 6 4	
L	3 0 2	6 4	7 9	1 0 7	
M	2 3 6	7 6	1 1 9	1 9 8	

3. 2 長さ変化試験

長さ変化試験の結果を表-9に示す。

80℃・18時間の強制炉乾燥は、JIS法の材齢8週以上の値を示したが、各配合で比較した場合JIS法における結果の大小関係と必ずしも一致していない。

他の配合よりも収縮低減剤を10 kg/m³増量したL配合において、強制炉乾燥法では効果がみられなかったが、JIS法では、乾燥収縮が小さくなった。JIS法の8週で比較すると、碎石コンクリート、膨張材混入、収縮低減剤の増量を行った配合において乾燥収縮を低減する効果が認められた。

3. 3 収縮変形試験

収縮変形試験結果(パネル上面中心: $\delta 2$)を図-3に示す。供試体の反りは材齢7日までに漸増し、それ以後は最大で0.5 mmの増加しかなかった。パネルの反りには、ステンレス繊維の混入が効果的であった。

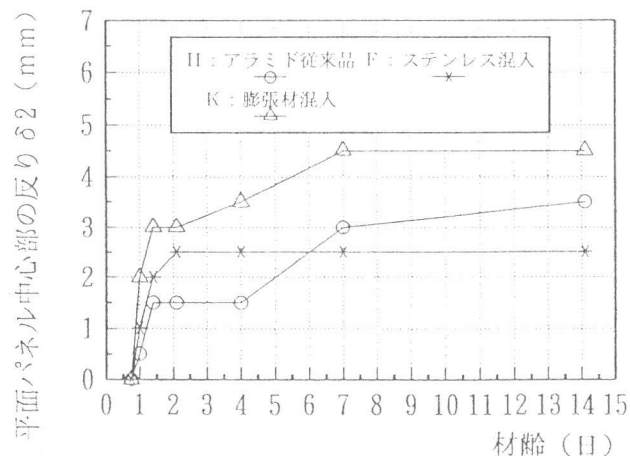
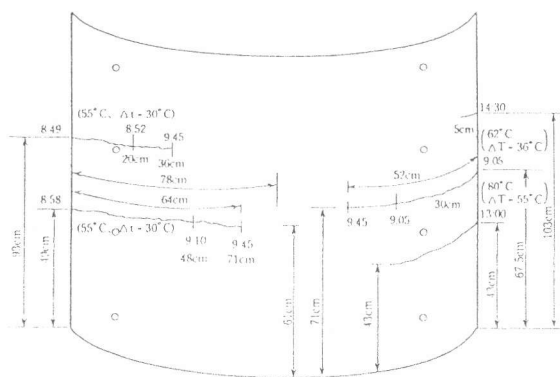


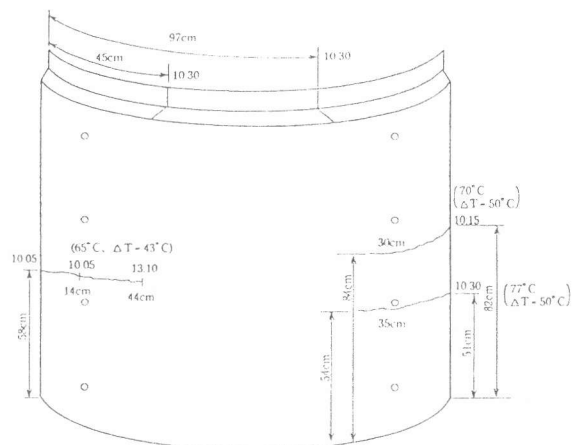
図-3 収縮変形試験結果

3. 4 熱変形試験

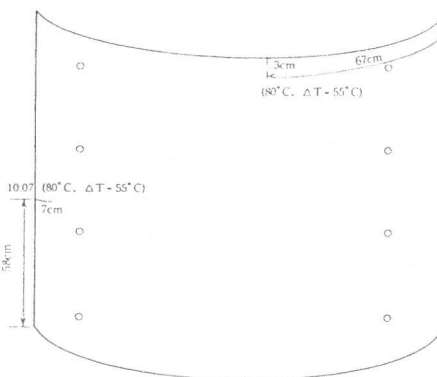
熱変形試験における表面のひび割れ発生温度およびひび割れ状況を図-4に示す。基準配合Hではポリマー面温度55℃、表裏面温度差30℃で水平ひび割れが発生し、ひび割れ幅は0.04mm以下であった。裏面温度を80℃まで上昇させた結果、5本のひび割れが発生した。膨張材を混入したK配合ではポリマー面温度65℃、表裏面温度差40℃で水平ひび割れが発生した。またポリマー面温度80℃、表裏面温度差50℃において鉛直ひび割れが発生した。ステンレス繊維を使用したF配合ではポリマー面温度80℃、表裏面温度差50℃の状態までひび割れは発生しなかった。80℃を超えた時点で端部にひび割れらしきものが確認されたが、幅、長さともに測定できる程度のもではなかった。



① H 配合：基準配合



② K 配合：膨張材混入



③ F 配合：ステンレス混入

図-4 ひび割れ発生状況

3. 5 曲げ強度試験

曲げ試験結果を表-10に示す。最も強度が大きかったのは、膨張材を混入したK配合であった。曲げひび割れ強度において、10 N/mm²を超えたのは、ステンレス繊維を用いたF配合と膨張材を混入したK配合であったが、ステンレス繊維を用いたF配合では、曲げひび割れ発生と同時に破壊に至っており課題が残った。

3. 6 強度改善試験

圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度試験の結果をまとめて表-11に示す。ステンレス繊維2%混入の基準配合のみ、曲げひび割れ強度10

表-10 曲げ試験結果

区分	繊維 (%)		曲げ強度 N/mm ²	
	VF	SF	ひび割れ	破壊
E	2.0	—	8.39	11.9
F	—	2.0	10.6	10.6
H	2.0	—	6.93	12.6
J1	1.5	—	3.81	7.46
J2	—	1.5	4.08	7.59
K	2.0	—	11.0	13.7
L	2.0	—	6.74	9.17
M	2.0	—	9.29	12.8

N/mm²を満足した。

シリカフェームの増量および膨張材を混入しても配合1の強度と同程度であった。ステンレス繊維を3%に増量した配合4では、曲げおよび引張強度で著しい増大がみられた。

表-11 強度改善試験結果

区分	圧縮強度 N/mm ²			曲げ強度* N/mm ²			引張強度 N/mm ²	
	1日	7日	14日	1日	7日	14日	1日	14日
1	79.2	87.7	88.8	8.14 (9.36)	10.0 (10.8)	9.81 (10.8)	8.67	8.05
2	81.4	88.6	88.7	8.51 (11.1)	10.3 (11.1)	10.2 (10.9)	8.05	8.40
3	83.7	88.4	92.3	8.49 (9.45)	9.90 (10.8)	8.22 (9.48)	6.91	8.73
4	88.6	87.6	93.8	10.6 (13.9)	11.1 (13.7)	13.8 (15.1)	8.84	11.4

*: 上段は、曲げひび割れ強度、()は、曲げ破壊強度

4. まとめ

P C a パネルのひび割れ抵抗性を向上させるために行われた性能実験により以下のことが確認された。

- 1) 熱膨張係数は α を $10 (\times 10^{-6} / ^\circ\text{C})$ 程度未満とするには、碎石を混入させるのが有効である。また繊維混入効果は、ビニロン繊維とステンレス繊維でほとんど差はなかった。
- 2) 碎石の使用、膨張材の混入、収縮低減剤の増量などが乾燥収縮の低減に効果がある。
- 3) 平面パネルの反りの抑制には、ステンレス繊維混入が効果的であった。
- 4) 熱変形に対しては、ステンレス繊維の混入により温度上昇による曲面パネルのひび割れ発生が大幅に抑制できる。
- 5) 曲げ強度試験では、碎石コンクリートの強度発現の遅れが課題として残ったが、粗骨材の最大寸法を小さくすることにより、曲げ強度の高強度化が図れる。

以上の結果より、熱膨張係数の低減と収縮変形の抑制を図り、同時に所定の強度を有するには、碎石コンクリートにステンレス繊維を用いることが有効であると確認された。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会編：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準、日本コンクリート工学協会、1984.2
- [2] 土木学会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）、1993.3
- [3] 高田和法、信田佳延、高尾洋平、梅原秀哲：高強度繊維補強コンクリートの力学的特性と破壊パラメータに及ぼす配合要因の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 1, pp463-468、1995
- [4] 鈴木計夫、大野義照、中川隆夫、山田紘：鋼繊維補強コンクリートの収縮乾燥ひび割れ抵抗性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp1051-1056、1992