

拘束リング加熱試験法を用いた繊維補強無孔性コンクリートの高温爆裂性状

太平洋セメント（株） 正会員 ○溝口 愛実，小亀 大佑，落合 昂雄，河野 克哉
群馬大学 正会員 小澤 満津雄

1. はじめに

近年，圧縮強度 400N/mm²程度を発現する無孔性コンクリート（PFC）が開発されている¹⁾。PFCは供試体内部のミクロ空隙が極めて少ないため，力学特性ならびに耐久性に優れるものの，耐爆裂性についてはほとんど検討されていない。そこで，本試験では PFC の高温時の耐爆裂性を評価することを目的とし，拘束リング供試体を用いて爆裂現象を評価する手法により，高結晶性ポリプロピレン繊維（PP）の有無や鋼繊維（ST）の量が水蒸気圧や拘束応力に与える影響を検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料ならびに配合

使用材料を表 1 に示す。また，試験水準ならびに力学特性を表 2 に示す。水結合材比（W/B）は 14%で一定とし，細骨材（S）の絶対容積は 355L/m³とした。繊維はコンクリート体積に対して外割で添加した。高性能減水剤（SP）は結合材の質量に対して 2.5%，消泡剤（DF）

表 1 使用材料

分類	記号	諸元
練混ぜ水	W	上水道水
結合材	B	PFC 用プレミックス粉体 密度 2.95g/cm ³
細骨材	S	珪砂，密度 2.63g/cm ³
混和剤	SP	高性能減水剤 ポリカルボン酸系
	DF	消泡剤 ポリアルキレングリコール誘導体
繊維	ST	鋼繊維（直径：0.2mm，長さ 15mm）
	PP	高結晶性ポリプロピレン繊維 （直径：0.014mm，長さ 6mm）

表 2 水準ならびに力学特性

配合名	ST (vol.%)	PP (vol.%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)
ST2.0%-PP	2.0	0.1	330	10.3
ST3.5%-PP	3.5	0.1	346	11.8
ST3.5	3.5	--	327	10.2

は結合材の質量に対して 0.1%をそれぞれ練混ぜ水に内割で添加した。

2. 2 練混ぜおよび供試体の作製方法

オムニミキサを用いて 6 分間の練混ぜを行った。打込み後，材齢 48 時間まで 20℃環境下で封緘養生を行い，材齢 2 日で脱型後，脱気吸水処理（30 分間）を実施した。吸水処理後の試験体は蒸気養生（90℃-48 時間）ならびに加熱養生（180℃-48 時間）の 2 段階の熱養生を実施した。

2. 3 拘束リング試験

図 1 に拘束リング加熱試験の概要を示す。鋼製の拘束リング（外径 300×高さ 50×厚さ 8mm）には，水蒸気圧計測用のステンレスパイプ（外径 5mm，内径 2mm）と温度計測用の熱電対を高さ 5,10,25,40mm の中央部 4 箇所を設定した。さらに，鋼製リングの側面にはコンクリートの拘束応力を算出するためのひずみゲージを加熱面から深さ 5,10,25,40mm の位置に設置した。加熱条件は，昇温速度が速いドイツ規格の RABT 加熱曲線に基づいて 5 分間で 1200℃まで昇温し，保持時間を 25 分とした。その後 110 分間かけて常温まで徐冷した。

3. 実験結果

3. 1 供試体内部温度

図 2 に加熱面からの深さ 5mm 位置における供試体内部温度の結果を示す。加熱開始から 30 分経過後の供試体内部温度は，ST2.0%-PP の場合では 876℃，ST3.5%-PP の場合では 932℃，ST3.5%の場合では 812℃であり，温度の上昇傾向は配合にかかわらずほぼ同等であった。

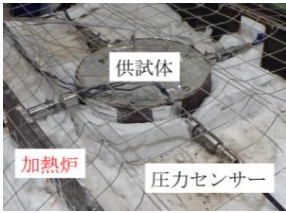


図 1 拘束リング加熱試験の概要

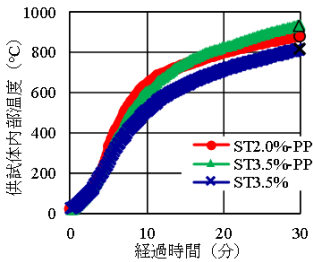


図 2 加熱面から 5mm 位置における供試体内部温度

キーワード 無孔性コンクリート，繊維，拘束応力，水蒸気圧，爆裂

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント（株） 中央研究所 TEL 043-498-3893

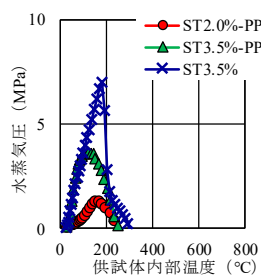


図3 加熱面から深さ5mm位置の水蒸気圧計測結果

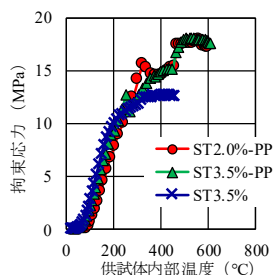


図4 加熱面から深さ5mm位置の拘束応力計測結果

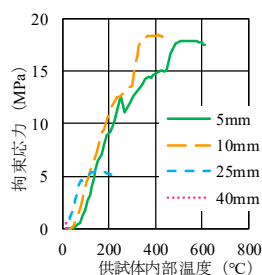


図5 ST3.5%-PPにおける深さ位置の拘束応力計測結果



図6 ST2.0%-PPの供試体断面写真



図7 ST3.5%-PPの供試体断面写真



図8 ST3.5%の供試体断面写真

3. 2 水蒸気圧計測結果

図3に加熱面からの深さ5mm位置の水蒸気圧計測結果を示す。水蒸気圧の最大値はPPを添加したST3.5%-PPの場合は約3.5MPaであるのに対して、ST3.5%の場合には約7MPaとなった。この原因としてPFC製造における180℃の加熱養生工程で生じたPPの溶解により形成された空間を通じて水蒸気が移動したことで、PPを添加した場合には水蒸気圧の上昇が抑えられたと考えられる。また、ST2.0%-PPの場合の水蒸気圧の最大値は1MPaほどであり、前述したST3.5%-PPの場合よりも水蒸気圧が低下した。これより、鋼繊維量が少ない場合のほうが温度上昇過程でひび割れを生じやすく、そのひび割れを通じて水蒸気が供試体外部へ移動するため、内部の水蒸気圧が低下したものと考えられる。

3. 3 拘束応力計測結果

図4に加熱面からの深さ5mm位置の拘束応力の結果を示す。ひずみの計測結果より薄肉円筒を仮定した式(1)を用いてコンクリートに生じる拘束応力を算出した²⁾。

$$\sigma_{\text{restrain}} = \varepsilon_0 E \frac{t}{R} \quad (1)$$

ここで、 σ_{restrain} :拘束応力、 t :リング肉厚、 R :リング内径、 ε_0 :円周方向ひずみ、 E :リング材のヤング係数

拘束応力の最大値は、ST2.0%-PPの場合に約17MPa、ST3.5%-PPの場合に約18MPaであるのに対して、ST3.5%の場合では約13MPaであり、PPを添加した場合の拘束応力の最大値はほぼ同等であった。これより、加熱面からの深さ5mm位置では鋼繊維量が拘束応力に与える影響は小さいことがわかった。また、PPを添加しない場合の拘束応力は低下した。この原因としてPPを添加しない場合では加熱面近傍で圧壊が生じたため、PP繊維を添加した場合と比較して拘束応力が小さくなったと考えられる。

図5にST3.5%-PPの場合の加熱面からの深さ位置における拘束応力の結果を示す。加熱面からの深さ5mmと10mmの位置において、拘束応力の最大値は同等であった。また、加熱面からの深さ25mmの位置における拘束応力の最大値は5.5MPaであるのに対して、加熱面からの深さ40mmの位置においては0.5MPaであった。

3. 4 断面観察

図6～8に試験後の各供試体断面の状況をそれぞれ示す。ST3.5%の場合のみ加熱面に圧壊が生じ、ST2.0%-PPの場合はST3.5%-PPの場合と比較してひび割れ幅が大きいことを確認した。さらに、すべての配合において本数に差があるものの、加熱面に平行なひび割れが確認された。この現象は、拘束応力に起因した層状のひずみによる引張破壊が原因と考えられる。また、鋼繊維は剥落の防止に効果があることも確認した。

4. まとめ

本検討ではRABTの加熱曲線と同様の温度履歴で繊維補強PFCの拘束リング試験を行った。今回の実験で得られた知見を以下に示す。

1. 加熱面からの深さ5mm位置における供試体内部の温度上昇は全水準で同様の傾向を示した。
2. PPの添加あるいはST量の減少により加熱面からの深さ5mm位置における内部水蒸気圧は低減する。
3. 加熱面からの深さ5mmにおける拘束応力は、ST量にかかわらず同じ傾向を示したが、PPを添加しない場合に拘束応力の最大値が低下した。

参考文献

- 1) 河野克哉ら:世界最高強度を発現するコンクリートの開発ならびに更なる性能向上の可能性,コンクリート工学, Vol. 54, No. 7, pp. 702-709, 2016
- 2) 谷辺徹ら:拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp.1135-1140, 2013