

論文 高温履歴を受ける高炉スラグ微粉末含有コンクリートの拘束ひび割れ抵抗性

石渡 大嗣^{*1}・細田 暁^{*2}・栖原 健太郎^{*3}

要旨: 2種類の高炉セメントを用いて低水セメント比のコンクリートの温度ひび割れ抵抗性と軽量細骨材の内部養生効果について検討した。軽量細骨材は自己収縮を低減し、ひび割れ抵抗性を大きく改善した。内部養生効果は粗骨材周囲の微視的温度応力を低減し、その影響は粗骨材界面の強さに表れた。割裂引張強度により計算したひび割れ指数が高い状態で、高炉スラグコンクリートにひび割れが発生した。

キーワード: 高炉スラグ, 自己収縮, 軽量細骨材, ひび割れ抵抗性, 微視的温度応力

1. はじめに

高炉スラグ微粉末を含むコンクリートは塩害やアルカリシリカ反応の抑制効果が大きいとされ、セメント量削減による環境負荷削減効果も大きいことから、今後も利用を促進すべきであると考えられる。しかし、高温履歴を受ける高炉スラグ微粉末含有コンクリートに顕著なひび割れが発生する事例が報告されている^{1), 2)}。

大友らは、自己収縮を考慮した温度応力解析の結果から、湛水養生中に発生したスラブのひび割れ発生に自己収縮の影響が大きいことを指摘している²⁾。

コンクリートの自己収縮を抑制する方法の一つとして人工軽量骨材の内部養生効果が上げられる。五十嵐らは、人工軽量粗骨材の防水機能を利用して、低水セメント比の高強度コンクリートの自己収縮を抑制する効果について実験的に検討し、その効果を確認している³⁾。またCussonらは、本研究と同様に、軽量細骨材の内部養生効果に着目し、普通セメントを用いた高強度コンクリートにおける軽量細骨材の自己収縮抑制効果とひび割れ抵抗性の改善について説明している⁴⁾。

高炉スラグ微粉末を含むコンクリートについては、高温履歴を受ける場合に引張強度が低下する現象も報告されている^{5), 6)}。児玉らの報告⁶⁾によれば、水結合材比30%の高炉スラグコンクリートにおいて、蒸気養生を模擬した高温履歴を与えると、骨材とセメントペーストの熱膨張係数の差により生じる微視的温度応力と自己収縮によって、粗骨材周りに微細ひび割れが生じ、強度が低下したと考察しており、特にこの影響は、普通セメントのペーストに比べて熱膨張係数が大きい高炉スラグペーストにおいて顕著であると述べている。

本研究では、自己収縮特性等が異なる2つの高炉セメントを用いて、低水セメント比のコンクリートがマスコンクリートを想定した高温履歴を受けた場合のひび割れ抵抗性を比較する。これらと比較する形で、軽量細骨材が保持する水分が硬化時にペーストに放出される内部養生効果による、ひび割れ抵抗性改善効果を検証する。

さらに、同じ高温履歴を受けるコンクリートの力学的特性を調べ、微視的温度応力による内部損傷がひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討する。

さらに、同じ高温履歴を受けるコンクリートの力学的特性を調べ、微視的温度応力による内部損傷がひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

市販の2銘柄の高炉セメントB種を使用した。使用した高炉セメントの成分及び試験結果を表-1, 2に示す。細骨材には君津産山砂(表乾密度:2.62g/cm³, 吸水率:1.61%, 粗粒率2.25)と軽量細骨材(膨張性頁岩を原料とする非造粒型人工軽量骨材, 表乾密度:1.96g/cm³, 絶乾密度:1.70g/cm³, 吸水率:14.32%)を使用した。山砂は粒度調整を行う前のもので、スラグ細骨材など混和物のないものである。軽量細骨材(LWA)として、工場から出荷されてきた状態から24時間吸水させたものを使用した。低水

表-1 セメントの物性

セメント	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	平均粒径 (μm)	凝結水量 (%)	凝結始発 (h-r)	終結 (h-r)
BB(A)	3.04	4150	14.90	29	2-25	4-05
BB(B)	3.01	3790	15.90	28	3-05	4-55

表-2 セメントの化学成分

セメント	ig.loss	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO
BB(A)	1.49	25.7	9.61	1.79	0.12	54.41	3.41
BB(B)	1.62	26.2	9.92	1.61	0.07	54.06	3.13
セメント	SO ₃	f-CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
BB(A)	1.90	0.37	0.49	0.09	0.21	0.36	0.01
BB(B)	1.96	0.43	0.41	0.08	0.29	0.29	0.02

*1 横浜国立大学大学院 環境情報学府 環境システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 准教授 博士(工) (正会員)

*3 電気化学工業(株) 無機材料研究センター 博士(工) (正会員)

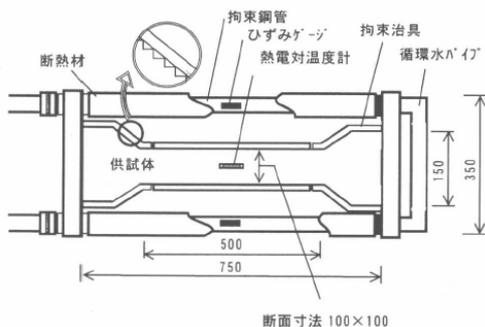


図-1 温度応力制御装置

結合材比で高炉スラグ微粉末を含む場合に、石灰石粗骨材を使用すると、ペーストと骨材界面とが化学反応を起こし、付着強度の増加によりコンクリートの引張強度が上がるという報告がある⁶⁾。今回の実験ではその影響を除くため粗骨材として安山岩(表乾密度:2.56g/cm³, 吸水率:1.52%, 粗粒率5.88)を使用した。混和剤にはポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤を使用した。

コンクリートとモルタルの配合を表-3に示す。配合BB①のセメントはBB(A)を、配合BB②にはBB(B)を使用した。成分や自己収縮が異なる2種類の高炉セメントを使用したコンクリートにおける拘束ひび割れ抵抗性の違いを検討した。配合BB①-Lは配合BB①の細骨材37%を軽量細骨材に置換した配合である。軽量細骨材添加による内部養生効果によって、拘束ひび割れ抵抗性が改善されることを期待した。

モルタルの配合はBB①(M), BB②(M), BB①-L(M)で、それぞれコンクリートNo.1,2,3の粗骨材を除いた配合になる。

2.2 実験方法

(1) 拘束試験装置

マスコンクリート構造物を想定した拘束ひび割れ抵抗性を評価するため、図-1に示す温度応力制御装置を用いた。この装置はJIS原案「コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案)」⁷⁾に準拠するものである。

(2) 試験方法

a) 拘束試験シリーズ

温度応力制御装置で、配合No.1~No.3の拘束ひび割れ抵抗性を評価した。温度応力制御装置を温度制御槽内に静置し、コンクリートを打ち込んだ。その後高温履歴を

試験体に与えた。コンクリートの拘束応力は、温度応力制御装置の外部拘束鋼管の拘束ひずみから計算した。外部拘束鋼管の温度を20℃一定に保つために、鋼管に20℃一定の循環水を流した。使用した温度応力制御装置と温度制御槽は各配合につき1体ずつである。

拘束試験体とは別に、10×10×40cmの無拘束試験体を作製した。無拘束試験体は拘束試験体と同じ温度制御槽内に静置し、無拘束ひずみを、(株)東京測器研究所製の埋め込み型ひずみ計(KM-100BT)を長軸方向に設置し、計測した。

拘束試験体、無拘束試験体共にコンクリートと型枠との摩擦を除去するために、型枠の上にテフロンシートを敷き、その上からビニールシートでコンクリートを覆った。コンクリートはビニールシートで封緘状態にした。

b) 力学的特性試験シリーズ

本実験で使用した温度制御槽内の大きさが限られているため、温度制御槽内に静置し、拘束供試体、無拘束供試体と同じ温度履歴を与えることができる力学的特性試験用のφ10×20cmの円柱試験体の数は限られる。本実験では、円柱試験体7本を同じ温度制御装置内に静置し、同じ温度履歴を与えた。7本では時系列の力学的特性を十分に検討できないため、温度応力制御装置に使用した配合No.1~No.3のコンクリートとは別に、力学的特性を調べるために、同じ材料で同じ配合のコンクリートを練った。このコンクリートに与える高温履歴は、拘束試験シリーズに使用したコンクリートとなるべく同じ温度履歴となるようにした。

微視的温度応力による内部損傷を評価するために、φ5×10cmのモルタル試験体を作製した。児玉ら⁶⁾は、蒸気養生を模擬した高温履歴下において、普通コンクリートと普通モルタルの引張強度差よりも、高炉スラグ微粉末含有コンクリートと高炉スラグ微粉末含有モルタルの引張強度差が大きかったことから、微視的温度応力による内部損傷を力学的に評価している。本研究においても、コンクリートとモルタルの引張強度の差から微視的温度応力の影響を検討した。

力学的特性試験として、割裂引張強度試験(JIS A 1113)、直接引張強度試験を行った。直接引張試験は児玉ら⁶⁾の方法を参考にした。材齢は3, 6, 12日で行った。割裂

表-3 コンクリートとモルタルの配合

No.	配合名	W/C(%)	air(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)							
					W	BB(A)	BB(B)	OPC	山砂	LWA	安山岩	混和剤
1	BB①	30	2	48	160	533	0	0	811	0	858	3.73
2	BB②				0	533	0	808	856			
3	BB①-L				158	527	0	0	560		240	
4	BB①(M)			248	827	0	0	1257	0	5.79		
5	BB②(M)			248	0	826	0	1252		5.78		
6	BB①-L(M)			236	787	0	0	838		359	5.51	

表-4 解析条件

解析条件
解析対象：厚さ1m壁状構造物 (温度出力点は中心)
配合：配合No.1
養生：完全封緘
打ち込み温度：20度
外気温：20度

引張強度試験は試験体の高さが 100mm のものと 200mm のものの 2 種類行った。

(3) 自己収縮試験シリーズ

配合 No.1~3 の無拘束ひずみを測定した。φ10×20cm の円柱試験体を鉛直に打込み、(株)東京測器研究所製モールドゲージ (PMF-60-2LT) を試験体中央部の打込み方向に設置した。コンクリート試験体の温度履歴は 17℃ から 20℃ の養生室に静置したものである。これを温度履歴 C とする。型枠との摩擦はテフロンシートとビニールシートで除去し、試験体は封緘状態にした。

拘束試験シリーズの無拘束試験体のひずみの測定結果と合わせて考察した。

(4) 温度履歴

表-4 に示す解析条件で、熱力学連成解析⁹⁾によりコンクリートの温度を算出した。それを参考にして試験体に高温履歴を与えた。実構造物で計測された温度上昇量については、一般的な高炉セメントと普通セメントでほとんど差がない、という報告²⁾に基づき、解析条件において典型的な鉱物組成の普通セメントのみを使用すると仮定した配合を用いた。高温履歴は凝結時間などを考え、練り混ぜ水添加時から 3 時間たってから与えた。

拘束試験シリーズでは、温度制御装置の制約上、配合 No.1~No.3 に同じ温度履歴を与えた。部材寸法や環境条件が同じ実構造物に施工すれば、3 配合で温度上昇量などが異なるであろう。本研究では、同一の条件の構造物に 3 種類の配合を適用した場合のひび割れ抵抗性を評価しているのではなく、3 種類の配合のコンクリートがほぼ同一の温度履歴を受けた場合のひび割れ抵抗性を評価していることになる。

力学的特性試験シリーズでは、拘束試験シリーズとは別の温度制御槽を使用した。拘束試験シリーズと同一と判断される温度履歴が与えられることを事前に確認した上で試験を行った。拘束試験シリーズでの高温履歴を温度履歴 A、力学的特性試験シリーズでのものを温度履歴 B と呼ぶことにする。

(5) コンクリートの練り混ぜ

拘束試験シリーズのコンクリート試験体は、各配合において室温 20℃、R.H.=60%の恒温室で練り混ぜを行った。別系統で高温履歴を与える力学特性試験シリーズのコンクリートとモルタルは、1 月の気温の実験室で練り混ぜを行い、練りあがり温度を調整するため、材料を全て練り混ぜ数日前に 20℃の恒温室に静置し、練り混ぜ直前に取り出して使用した。

力学的特性試験シリーズのコンクリート及びモルタルを全て同一の温度制御槽に入れて高温履歴を与えた。練り混ぜ水投入時刻の差を 6 配合でなるべく小さくなるように調節し、3 配合における前置き時間の差に影響がでないように配慮した。

試験に使用した全てのコンクリートの練り混ぜは以下の通りである。砂、セメントを 2 軸強制練りミキサーで 60s 空練りしたあと、水、混和剤を投入し 90s 練り混ぜ、最後に粗骨材を投入して 60s 練り混ぜた。

3 実験結果と考察

3.1 フレッシュ性状

力学的特性を調べるための実験パラメータとフレッシュ性状を表-5 にまとめて示す。スランプフローは平均値で示している。力学的特性の評価には、拘束試験の槽内で高温履歴を受けた試験体の結果も活用した。

恒温室で練り混ぜを行ったにも関わらず練り上がり温度が 18℃程度なのは、使用した練り混ぜ水が 16.6℃であったからである。力学的特性試験用のコンクリートは拘束試験シリーズと同じ練りあがり温度 18℃前後になるように調節した。

スランプフローが全体的に小さい結果になった理由として、高性能 AE 減水剤添加による材料分離の影響と凝結遅延効果をできるだけ避けるため、高性能 AE 減水剤の添加量を抑えたからである。

表中の注水時間差というのは、試験体に高温履歴を与える時刻の 3 時間前の注水を基準とした時の時間差を示している。No.2-B の場合は、練り混ぜ水の投入が、高温

表-5 引張強度試験体の一覧とフレッシュ性状試験結果

	No.	配合 No.	温度履歴	試験体数									フレッシュ性状結果			
				割裂引張試験 (L=200mm)			割裂引張試験 (L=100mm)			直接引張試験			スランプフロー (mm)	練りあがり温度 (°C)	空気量 (%)	注水時間差 (分)
				3日	6日	12日	3日	6日	12日	3日	6日	12日				
拘束試験シリーズ	1-A	1	A	-	2	2	-	-	-	-	-	3	419	18.8	1.9	0
	2-A	2		-	2	2	-	-	-	-	-	3	261	18.3	2.1	0
	3-A	3		-	2	2	-	-	-	-	-	3	356	18.7	2.7	0
力学的特性シリーズ	1-B	1	B	2	-	2	3	3	3	3	3	3	255	18.2	1.9	0
	2-B	2		2	-	2	3	3	3	3	3	-	355	18.0	1.9	-10
	3-B	3		2	3	2	3	3	3	3	-	3	360	18.8	2.1	10
	1(M)-B	4		-	-	-	-	3	-	-	3	3	-	18.5	-	4
	2(M)-B	5		-	-	-	-	3	-	-	3	-	-	18.0	-	-8
	3(M)-B	6		-	-	-	-	3	-	-	-	3	-	18.5	-	16

履歴開始 2 時間 50 分前であったということになる。力学的特性シリーズのコンクリートとモルタルに高温履歴を与える際の時刻差は最大で 16 分であり、力学的特性を比較するのに十分な範囲で練り混ぜができたと考えている。

3.2 温度履歴

温度履歴 A, B, C を与えた BB①の温度経時変化を図-3 に示す。BB①のみの温度履歴を記しているが、各配合において、BB①との温度差はほとんどみられなかった。

コンクリートは材齢約 1 日で最高温度に達するが、拘束試験シリーズのコンクリートの最高温度が 70℃に対し、力学的特性試験シリーズのコンクリートとモルタルの最高温度は、73℃まで上昇した。最高温度以降に多少の差が見られるが、ほぼ同程度の高温履歴を再現できたと言える。

3.3 自己収縮ひずみ

図-4, 5 に温度履歴 A を与えた配合 No.1~No.3 の無拘束ひずみと温度履歴 C を与えた配合 No.1~No.3 の無拘束ひずみの経時的变化を示す。図-4, 5 は硬化原点からのひずみに修正した²⁾。無拘束ひずみは、温度ひずみと自己収縮ひずみを合わせたものもある。図-6 に、温度履歴 A を与えた配合 No.1~No.3 の硬化原点修正前の無拘束ひずみと温度変化量の関係を示す。図中の矢印で示した点を硬化原点とした。

図-4 で、BB①と比較して BB①-L は材齢 12 日の収縮ひずみが 120μ 小さい。これは軽量細骨材の内部養生効果によるものである。BB①と BB①-L の温度降下時の熱

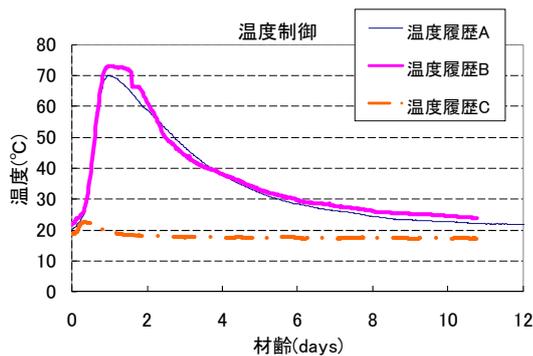


図-3 各シリーズの配合 No.1 の温度履歴

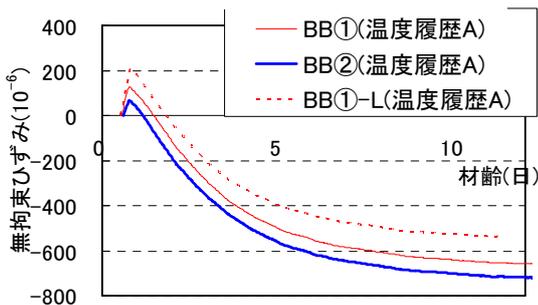


図-4 高温履歴を受けたコンクリートのひずみ (拘束試験シリーズ)

膨張係数が同じならば、温度上昇時(材齢 1 日)に 82μ、温度降下時に 38μ 収縮を抑制していることになる。内部養生効果による収縮低減効果は、最高温度 70℃程度の高温履歴を受けた後においても、十分発揮されると考えている。

図-4 と図-5 で、BB①と BB②の収縮ひずみ量が逆転している。高温履歴を受けると自己収縮ひずみが大きくなることは報告されている⁸⁾が、高炉セメントの物性・化学成分によって、自己収縮の温度依存性がかなり異なる可能性が示唆された。

3.4 拘束ひび割れ抵抗性

(1) 拘束ひび割れ試験

図-7 に拘束試験体の応力の経時的变化を示す。温度履歴は温度履歴 A である。コンクリートの応力は外部拘束鋼管の拘束ひずみから以下の式(1)を用いて求めた。

$$\sigma_c = \frac{\sum P_i}{A_c} \quad (1)$$

ここに、 P_i : 拘束鋼管一本分の拘束力(当該の拘束鋼管のひずみを拘束力に換算したもの)

A_c : 供試体の断面積

図中に記されている数値はコンクリートがひび割れた時点でのコンクリートの応力である。

圧縮応力について、BB①は 0.73MPa、BB②は 0.67MPa で、同程度であった。図-4 で、BB①の最大膨張ひずみは 127μ、BB②は 64μ と、膨張ひずみに差があるが、それが

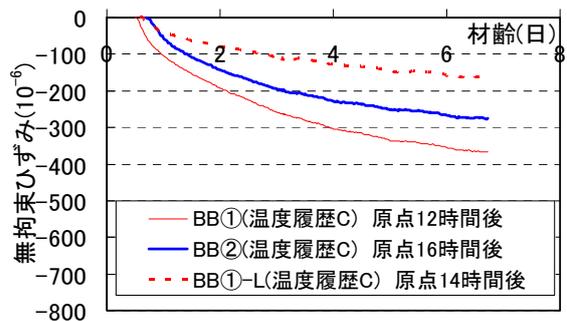


図-5 高温履歴を受けていないコンクリートのひずみ (自己収縮試験シリーズ)

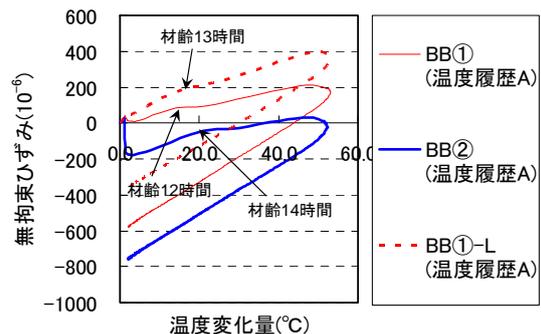


図-6 硬化原点

拘束圧縮応力の差には現れなかった。引張応力についても応力導入速度がBB①とBB②ではほとんど変わらない。若材齢時のコンクリートは熱膨張係数や弾性係数などの物性値が時々刻々と変化するので、それらの影響で応力が同程度になったと考えている。本実験では2つの高炉セメントを使用し、同じ温度履歴を与えた。成分の違いによる自己収縮の大小が拘束応力に与える影響は小さく、コンクリートが受ける温度履歴の影響が支配的であるとと考えている。しかし、本実験では2つの高炉セメントのみの比較であり、さらなるデータの蓄積が必要である。

BB①-Lの圧縮応力が1.18MPaと最も大きい値を示した。軽量細骨材で置換することにより、圧縮応力には顕著な差が見られた。引張応力についても、BB①とBB①-Lを比較するとBB①-Lの引張応力の導入速度が低減されていることがわかる。自己収縮の低減効果によるものと考えているが、軽量細骨材を添加することによるコンクリートの物性値の変化（熱膨張係数、ヤング率、クリープ係数）の影響も含んでいると考えている。

(2) 力学的特性試験結果

図-8,9に材齢6日と12日におけるコンクリートとモルタルの直接引張強度を示す。図中の数字は引張強度、記号は表-5の試験体番号である。

図-8で、コンクリートとモルタルの強度差を比べると、BB①比較、BB②比較ともモルタルよりコンクリートの直接引張強度が1MPa程度低い。既往の研究⁶⁾にあるように、高炉スラグ微粉末含有コンクリートにおいて、粗骨材周りに微細損傷が生じ、直接引張強度が低下した

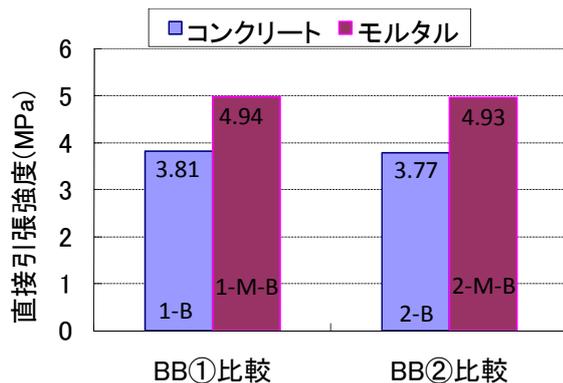


図-8 材齢6日における直接引張強度

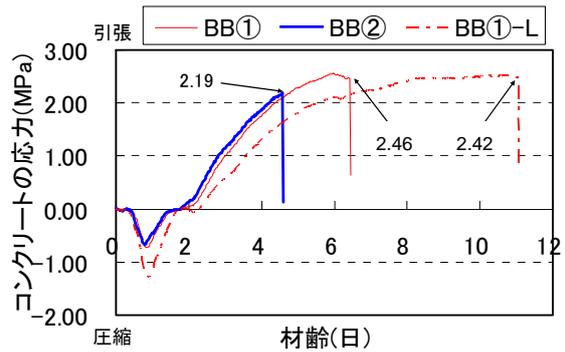


図-7 拘束試験体の拘束応力(拘束試験シリーズ)

と考えている。写真-1に直接引張試験体の破断面を示す。BB①とBB②の破断面については、全ての試験体において、粗骨材界面から割れていた。BB①-Lは全ての試験体で粗骨材が割れていた。本実験試験体においては粗骨材周りに生じている内部微細損傷を目視で確認することはできなかったが、BB①、BB②ともに粗骨材界面から破壊しており、微視的温度応力による骨材周囲の損傷の可能性を示唆している。BB①とBB②の間には直接引張強度の観点からは違いが見られなかった。

図-9で、BB①比較とBB①-L比較を見てみると、BB①では図-8と同じように、骨材周囲の損傷によると考えられる強度低下が生じたのに対し、BB①-Lでは強度低下は改善している。軽量細骨材添加による内部養生効果によって自己収縮が低減され、粗骨材周りの拘束応力が低減されたことが原因と考えている。また、軽量細骨材添加によってモルタルの熱膨張係数などの物性が変化し、粗骨材周囲の微視的温度応力が軽減された可能性も

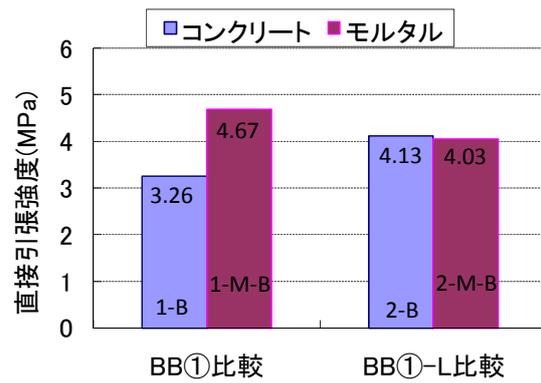


図-9 材齢12日における直接引張強度

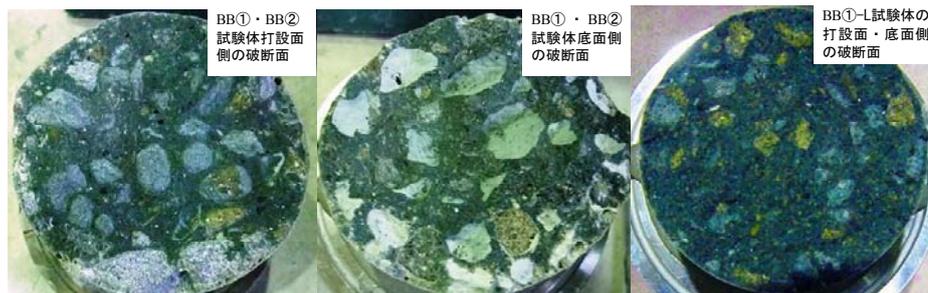


写真-1 直接引張試験体の破断面

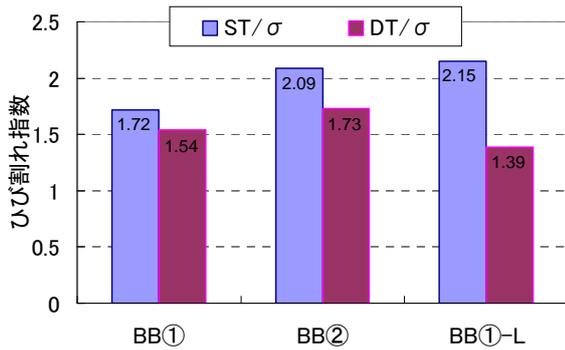


図-10 拘束試験体のひび割れ発生時のひび割れ指数

ある。

(3) ひび割れ指数

図-10 にひび割れ発生時における割裂引張強度(ST)または直接引張強度(DT)と拘束引張応力の比(ひび割れ指数)を示す。土木学会標準示方書の規定では、ひび割れ指数が 1.75 以上あれば、ひび割れが発生する確率は 5%以内であるとしている。

図-10 を見ると、ひび割れ発生時のひび割れ指数は非常に高い値を示している。特に割裂引張強度を用いて計算した場合に顕著である。高炉スラグコンクリートのひび割れ抵抗性を示方書で示されているひび割れ発生確率で評価することは、ひび割れ抵抗性を過大に評価する可能性がある。

軽量細骨材により、微視的温度応力の悪影響が改善された BB①-L においても、割裂引張強度による高いひび割れ指数のものでひび割れが発生している。高強度コンクリートであったために、軽量細骨材の強度そのものがひび割れ抵抗性に影響を及ぼした可能性もあり、今後も検討を続ける。

4. 結論

2 種類の高炉セメントを用いて低水セメント比のコンクリートの温度ひび割れ抵抗性と軽量細骨材の内部養生効果について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 軽量細骨材の内部養生効果による自己収縮抑制効果を確認した。最高温度 70℃程度の高温履歴を受けた時に、温度上昇時と温度下降時の両方に自己収縮抑制効果があり、拘束引張応力が大幅に軽減された。
- (2) マスコンクリートを想定した高温履歴を受けた場合に、モルタルの直接引張強度がコンクリートの直接引張強度よりも小さかった。微視的温度応力による粗骨材周囲の損傷によるとの考察を示した。軽量細骨材で置換した場合、モルタルとコンクリートの強度差がわずかとなり、内部養生効果により粗骨材周囲の損傷が緩和されたためであると考察した。粗骨材周囲の損傷の影響は、粗骨材界面の強さに顕著

に表れた。

- (3) 低水セメント比の高炉スラグコンクリートが、マスコンを想定した高温履歴を受けたときに、割裂引張強度により計算したひび割れ指数が高い状態で、ひび割れが発生した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、土木学会平成 18 年度吉田研究奨励賞の助成を受けた。また、横浜国立大学環境情報研究院共同研究課題 A として助成を受けた。

参考文献

- 1) コンクリート技術シリーズ 74, 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会) 報告書, 土木学会, 末巻資料, pp.I-270 ~I-271, 2007.3
- 2) 須網功二, 大友 健, 原 毅, 山上正敏: 底面を拘束されたスラブにおける自己収縮によるひび割れ発生現象の解明, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.685-690, 2003
- 3) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史: 軽量細骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.399-404, 2002
- 4) Cusson, D and Hoogeveen, T: Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking, *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 757-765.
- 5) 細田 暁, 藤原浩一, 青木千里: 高炉スラグ微粉末含有コンクリートの力学的特性に対する微視的温度応力の影響, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.549-561, 2007.10
- 6) 児玉章裕, 細田 暁, Ha Ngoc Son, 小野敦子: 高温履歴を受けた低水粉体比の高炉スラグ微粉末含有コンクリートの圧縮・引張性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.363-368, 2008
- 7) JIS 原案: コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案), コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.52-54, 1985
- 8) 宮澤伸吾, 佐藤良一, 杉山淳司: 高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.465-470, 2008
- 9) Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T.: *Modelling of Concrete Performance*, E&FN SPON, 1999