

論文 高温履歴を受けた低水結合材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

児玉 章裕^{*1}・細田 暁^{*2}・Ha Ngoc Son^{*3}・小野 敦子^{*3}

要旨: 低水結合材比のコンクリートが高温履歴を受けた際の強度特性を検討した。高炉スラグ微粉末の有無、粗骨材の有無、膨張材の添加等の条件で比較を行なった。その結果、今回の低水結合材比の高炉スラグ微粉末含有コンクリートにおいては、蒸気養生を模擬した高温履歴を与えた場合に、粗骨材の熱膨張係数をはじめとする種々の要因が特に引張強度に影響を及ぼすことがわかった。また、膨張材を添加した場合、高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートにおいて、小さいながらも圧縮強度・引張強度の改善効果が見られた。

キーワード: 高炉スラグ微粉末、高温履歴、膨張材、圧縮強度、引張強度、粗骨材

1. はじめに

近年、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリート構造物に著しいひび割れが発生する事例が報告されている¹⁾。筆者らは、コンクリートが若材齢時に高温履歴を受ける事で骨材周囲に微細な損傷が発生し、コンクリートのひび割れ抵抗性の低下の原因になっていると考えている²⁾。骨材周囲の微細損傷は、骨材とペーストとの間の熱膨張係数の差による微視的温度応力や過大な自己収縮を、骨材が拘束することによって発生すると考えている。青木ら³⁾は水結合材比 30%の条件において、骨材が存在することで圧縮強度・弾性係数が低下することを報告している。藤原ら⁴⁾は水結合材比 50%の条件において、粗骨材の熱膨張係数の違いによるものと思われる圧縮・引張強度の低下を確認している。

本研究は、若材齢時に高温履歴を受けた低水結合材比の高炉スラグ微粉末含有コンクリートにおける損傷の

程度と、損傷の影響を調べたものである。本研究では、石灰岩・安山岩という熱膨張係数の異なる 2 種類の粗骨材を用い、低水結合材比におけるコンクリートの性状を調べた。この理由は以下の 2 つである。1 つは、藤原らが確認した、水結合材比が 50%の条件における微視的温度応力の影響が、水結合材比が 30%と低い条件においても発生するか否かを調べたいためである。2 つ目は、青木らが確認した、低水結合材比における強度の低下は圧縮強度のみであったため、よりひび割れと深い関連を持つ指標である引張強度を調べたいためである。

さらに本研究では、膨張材添加の有無による性状の違いについても調べた。膨張材を添加することによってコンクリートの伸び能力が高まる。この伸び能力が、高温履歴を与えた際に骨材周囲に発生すると考えている損傷を緩和することを期待したためである。

表-1 高炉スラグ微粉末の品質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	lg. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	塩基度
2.92	4130	0.07	33.54	14.58	0.25	43.29	5.44	1.9	0.27	0.33	1.6以上

表-2 コンクリートの配合

		粗骨材 種類	W/B (%)	BF/B (%)	s/a (%)	air (%)	単位量 (kg/m ³)							
							水	セメント	スラグ 微粉末	膨張材	細骨材	粗骨材	AE剤	高性能AE 減水剤
シリーズ1	N(L)	石灰岩	30	0	51	3	170	568	0	0	819	823	1.13	6.8
	B(L)			283				283	0	810	814	6.8		
	B(A)	283		283				0	810	787	5.7			
シリーズ2	N(A)	安山岩		0				568	0	0	810	787		5.7
	B(A)			548				0	20	810	787	5.7		
				283				283	0	819	796	5.1		
			273	273	20	819	796	5.7						

*1 横浜国立大学大学院 環境情報学院 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 工博 (正会員)

*3 横浜国立大学大学院 環境情報学院 環境システム学専攻

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³，比表面積：3210cm²/g）を使用した。JIS で許容される 5% の後添加物を含まないものである。使用した高炉スラグ微粉末の物理的・化学的特性を表-1 に示す。膨張材には低添加型エトリンライト石灰複合系のもの（密度：3.12g/cm³，比表面積 3000cm²/g）を使用した。細骨材には君津産陸砂（シリーズ 1：表乾密度：2.60g/cm³，吸水率：1.29%，シリーズ 2：表乾密度：2.59g/cm³，吸水率：2.39%）を使用した。粗骨材には秩父産石灰岩（最大寸法：20mm，密度：2.71g/cm³，吸水率：0.43%，熱膨張係数：6.0×10⁻⁶/℃）および甲州産安山岩（最大寸法：20mm，密度：2.62g/cm³，吸水率：2.47%，熱膨張係数：11.4×10⁻⁶/℃）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 減水剤と、アルキルエーテル系の AE 剤を使用した。

熱膨張係数の計測には、粗骨材の産出箇所から採取した岩塊から、直交する 2 あるいは 3 方向のコア（直径約 50mm）を抜いたものを用いた。供試体の長軸方向にゲージ長 30mm の箔ゲージを貼り付け、温度制御装置を用いて温度と見掛けひずみを測定した。見掛けひずみを用いて求めた熱膨張ひずみと温度変化量の関係を最小二乗法で回帰し、熱膨張係数を算出した。各方向の熱膨張係数に大きな差がなかったため、平均値を上記の熱膨張係数とした。

青木ら³⁾が報告したペーストの熱膨張係数は、材齢 7 日で計測した場合、高炉スラグ微粉末を含有すると約 20×10⁻⁶/℃、普通セメント使用の場合約 14×10⁻⁶/℃で、若材齢ではさらに大きくなる傾向にある⁵⁾。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に示す。モルタルはセメント細骨材比を質量比で 1：1.44 とした。これは、コンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタル部分の配合である。一部の配合において練混ぜ直後に粗骨材が多少沈降する分離現象を確認した。これらについては、打込みまでに 1 時間程度静置し、分離がなくなってから打込みを行なった。試験後の供試体の破壊面を見ると骨材が沈降している様子はなかったことから、試験結果にばらつきを与えるような分離は生じていないと判断している。

2.3 試験パラメータ

(a) シリーズ 1 材料・養生条件の違いによる影響

シリーズ 1 では粗骨材の種類、粗骨材や高炉スラグ微粉末の有無、前置き時間がコンクリートの諸性状に及ぼ

表-3 試験パラメータ

	パラメータ名	試験材齢	BF/B (%)	粗骨材	膨張材 (kg)	高温履歴	前置き時間	変動係数 (%)		
								圧縮	直接引張	
シリーズ1	1-N(L)-C	1日	0	石灰岩	0	あり	5時間	2.6	5.1	
	1-N-M			なし				12.4	15.5	
	1-B(L)-C		50	石灰岩				30分	2.6	0.5
	1-B(L)30-C			石灰岩			2.9		8.3	
	1-B(A)-C			安山岩			9.0		6.4	
	1-B-M		14日	0			なし	5時間	7.1	11.9
	1-N(L)-C14	石灰岩			13.3	8.9				
	1-B(L)-C14	50			石灰岩	4.3	3.3			
	1-B(A)-C14		安山岩	3.3	14.2					
シリーズ2	2-N(A)	1日	0	安山岩	0	あり	5時間	3.7	9.6	
	2-N(A)-E				20			5.7	2.6	
	2-B(A)		50		0			6.1	4.5	
	2-B(A)-E				20			7.2	7.2	
	2-N(A)-14	14日	0		0	なし	—	6.6	10.4	
	2-N(A)-E-14				20			6.1	10.5	
	2-B(A)-14				50			0	3.4	3.2
	2-B(A)-E-14							20	6.1	7.1
										20

す影響を確認する試験を行った。

(b) シリーズ 2 膨張材使用による効果と自己収縮

シリーズ 2 では粗骨材を安山岩一種とし、シリーズ 1 の試験内容に加え、鉄筋によって拘束された供試体に対する試験を行なった。コンクリート中に配置した鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより、養生中の膨張・収縮量も計測した。

本研究における試験パラメータと圧縮強度、直接引張強度試験の変動係数を表-3 に示す。モルタルの直接引張強度の変動係数がやや大きい場合があるが、コンクリートと比べてそれほど顕著な差異があるわけではなかった。

(1) 高温履歴後の各種強度試験

与える高温履歴として蒸気養生を模擬し、練り混ぜ後の前置き時間を 5 時間とした。これは過去の研究においても報告されている、打込み直後の高温の悪影響を排除するためである⁶⁾。また、パラメータの 1 つを前置き時間 30 分とし、打込み直後の高温の悪影響を確認することとした。それぞれの前置き時間の経過後、20℃/hr で 65℃まで温度を上げ 3 時間保持し、その後 13 時間 45 分かけ 20℃までゆっくりと冷却した。高温履歴中には、試験供試体と同時に打設し熱電対を埋設したダミー供試

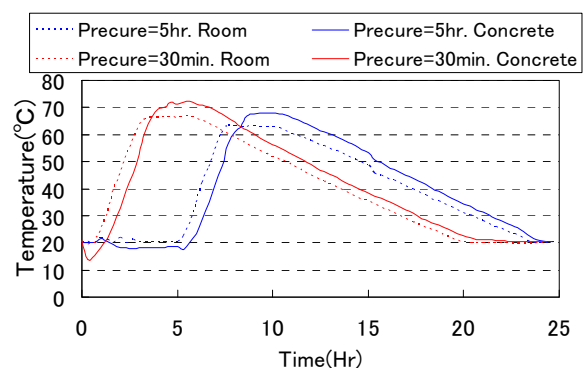


図-1 供試体に与えた温度履歴

体を用いて、コンクリート内部の温度を計測した。円柱供試体の作製には鋼製の型枠を使用し、膨張材添加による硬化時の拘束をしっかりと与えた。試験時には型枠の拘束は解放した。温度制御装置内およびコンクリート内部の温度履歴を図-1 に示す。温度履歴終了後速やかに脱型をし、各種強度試験の準備を行なった。シリーズ 1 については圧縮強度試験・直接引張強度試験・割裂引張強度試験の 3 種を行い、シリーズ 2 ではシリーズ 1 の試験に加え、供試体内部に鉄筋を入れた一軸引張試験を行なった。圧縮強度試験・割裂引張強度試験は養生終了後約 4 時間後に試験を行い、直接引張強度試験・一軸引張試験は直接引張強度試験で用いたアクリル系接着剤の硬化を待つため、約 6 時間後に試験を行なった。

圧縮強度試験、静弾性係数試験は JIS A 1108-2006, JIS A 1149-2001 に従って行い、供試体はφ100×200mm のものを使用した。また圧縮強度試験実施時には、テフロンシートとシリコング

リスを用いて載荷面の摩擦を除去した。直接引張強度試験の供試体はφ100×200mm の円柱供試体を用いた。載荷時には図-2 に示すように、偏心を除去するための治具を用い、約 0.12MPa/s の速度で載荷を行なった。また、JIS A



図-2 直接引張強度試験全景

1113-2006 に従い割裂引張強度試験を行い、割裂引張強度を求めた。一軸引張試験は細田らの研究⁷⁾を参考に行なった。載荷時の様子を図-3 に示す。供試体寸法は 100×100×400mm の角柱とし、断面中央に D16 のねじ鉄筋(ヤング係数: 1.89×10^5 MPa, 降伏強度: 375MPa)を配置した。両端には厚さ 19mm の鋼製端版を配置し、ダブルナットでねじ鉄筋と固定した。鉄筋中央にはゲージ長 5mm のひずみゲージを両面に貼り付け、打込み

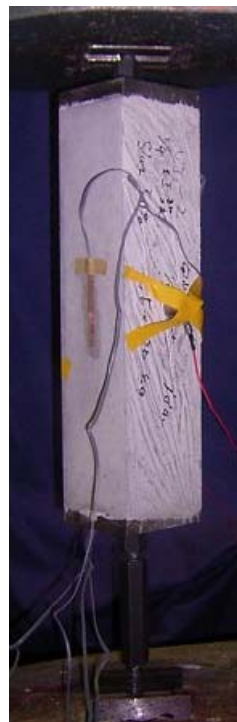


図-3 一軸引張試験全景

後からの体積変化を計測した。全ての試験はそれぞれ 3 体ずつ行い、その平均値を採用した。

(2) 温度履歴を与えない材齢 14 日シリーズ

青木ら、藤原らが着目した粗骨材と熱膨張係数の差による微視的溫度応力の影響を直接的に見るため、2.3(1)の試験体と同一バッチのコンクリートを用いて供試体を作成した。温度履歴を与えず打設後 4 日で脱型し、シリーズ 1 についてはラップで包み、シリーズ 2 については湿布養生を行い、14 日まで 20℃一定で養生をした。その後、2.3(1)と同様の試験を行なった。

3. 試験結果

3.1 シリーズ 1 (粗骨材・セメント・前置き時間の影響)

(1) 粗骨材による比較

石灰岩と安山岩を使用した高炉スラグ微粉末含有コンクリートの材齢 1 日と材齢 14 日の圧縮強度・直接引張強度・割裂引張強度を図-4・図-5・図-6 に示す。

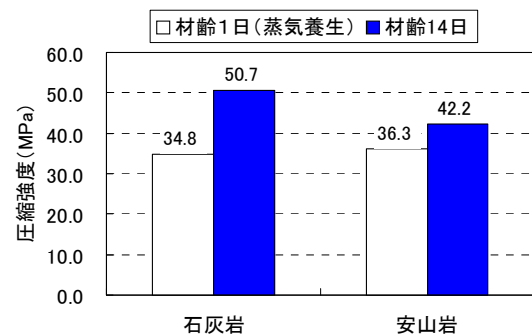


図-4 圧縮強度試験結果(骨材比較)

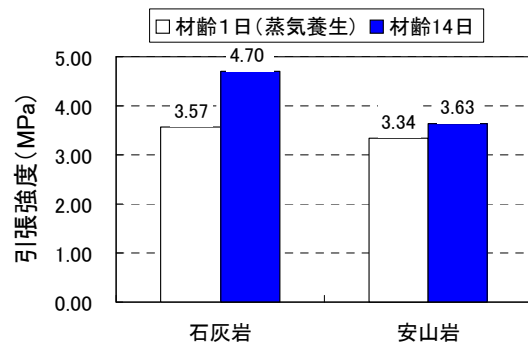


図-5 直接引張強度試験結果(骨材比較)

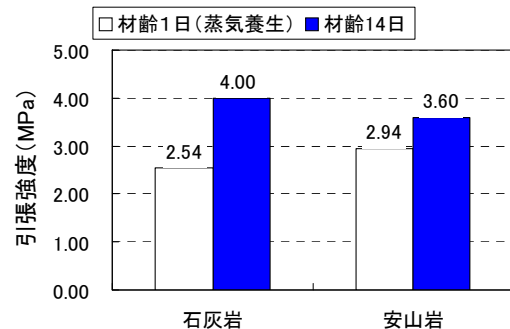


図-6 割裂引張試験結果(骨材比較)

高温履歴を受けていない材齢 14 日における強度は、石灰岩を使用したもののほうが明らかに高く出ている。石灰石微粉末にはコンクリートの強度を増進する効果があることが知られている⁸⁾。今回のケースでは石灰石微粉末を洗い落とした石灰岩を使用した。石灰石粗骨材と高炉スラグ微粉末中のアルミネートが反応して、骨材界面で化学反応が起こった可能性があると考えている。

この化学反応の仮説を検証するため、20℃一定養生で材齢を変化させて 1-B(L)-C、1-B(A)-C に対して行った直接引張強度試験の結果を図-7 に、1-N(L)-C、1-N(A)-C に対して行った直接引張強度試験の結果を図-8 に、それぞれ示す。これより、高炉スラグ微粉末を含み、石灰石粗骨材を使用したコンクリートのみ、顕著に引張強度が増進していることが分かる。これにより、石灰石粗骨材の界面で化学反応をしたと考えており、この結果を考慮して本論文の考察を行っていく。

図-7 に示したような、低水結合材比の高炉スラグ微粉末含有コンクリートに石灰石粗骨材を用いた場合の 1MPa 程度の強度上昇は、高温履歴を受けた材齢 1 日においても生じていると考えられる。この 1MPa 程度の強度上昇を割り引くと、図-5 において、粗骨材とペーストとの熱膨張係数の差の大きい石灰岩を使用したコンクリートの方が、直接引張強度が明らかに低い。低水結合材比のコンクリートにおいても、粗骨材の熱膨張係数に起因する微視的温度応力の影響が表れていると考えている。

(2) セメント種類による比較

セメントの種類を変化させた、材齢 1 日でのコンクリートおよびモルタルの圧縮強度・直接引張強度を図-9、図-10 に示す。粗骨材には石灰岩、安山岩をそれぞれ用いた。この結果においても先に説明した、石灰岩を使用した高炉スラグ微粉末含有コンクリートの引張強度が 1MPa 程度高く出ていると仮定して考察を行う。普通モルタルの直接引張強度は今回の試験の中で最も変動係数が大きかったが、3 つの試験体の値は 2.28、2.80、2.04MPa であった。

モルタルでは高炉スラグ微粉末含有のほうが明らかに高い強度を示しているのに対し、コンクリートでは高炉スラグ微粉末含有のものの方が同程度か低い強度を示している。直接引張強度について考えた場合、スラグの有無でのモルタルの強度差を見ると、スラグ含有コンクリートは普通コンクリートより 1MPa 程度高い強度（石灰岩で 4.40MPa 程度、安山岩で 4.65MPa 程度）が発現するはずであるが、実際にはそのようになっていない。スラグ含有ペーストと粗骨材の熱膨張係数の差は石灰岩の場合 ($14.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と安山岩の場合 ($8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) とで約 1.7 倍程度である。微視的温度応力の影響が高炉

スラグ微粉末含有コンクリートの強度低下の一因であると考えられるが、前述の本来持ちうるであろう強度からの低下量は石灰岩と安山岩の間に熱膨張係数ほどの差は見られない。表-4 は一軸引張試験における養生終了時の鉄筋ひずみである。この結果から、高炉スラグ微粉末を含有することで自己収縮量が大きくなることがわかる。またスラグペーストと普通ペーストのひび割れ抵抗性が異なる可能性もある。これらの要因が高炉スラグ微粉末含有コンクリートの強度低下の一因であると考えており、今後研究を進めていく予定である。

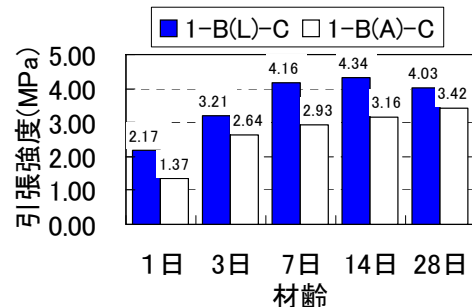


図-7 直接引張強度試験結果（材齢・骨材比較）

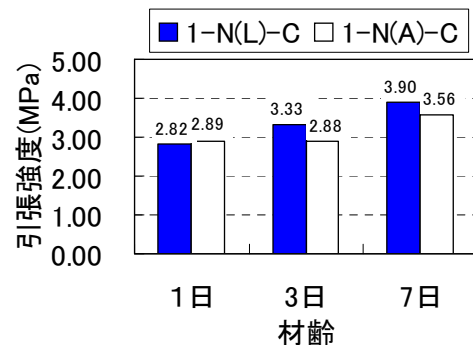


図-8 直接引張強度試験結果（材齢・骨材比較）

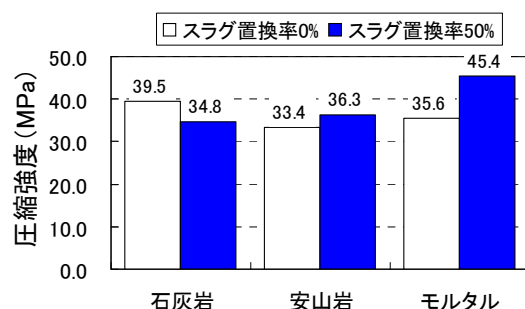


図-9 圧縮強度試験結果（セメント比較）

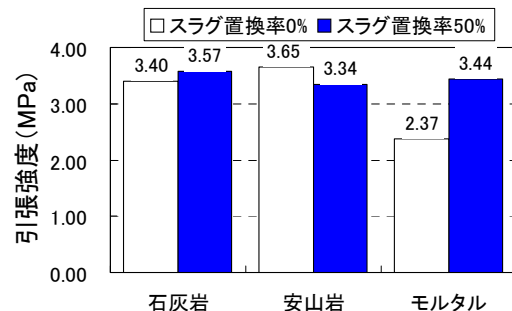


図-10 直接引張強度試験結果（セメント比較）

表－４ 養生終了時の鉄筋ひずみ

スラグ置換率 (%)	膨張材量 (kg/m ³)	鉄筋ひずみ (×10 ⁻⁶)	
		1Day	14Days
0	0	-10	-86
	20	64	43
50	0	-89	-103
	20	-38	1

(3) 前置き時間の違いによる影響

前置き時間を変化させた、材齢 1 日での圧縮・直接引張強度試験結果を図－11・図－12 に示す。圧縮強度ではそれほど強度の違いは認められないが、直接引張強度では、前置き時間 30 分で約 26%強度が低下している。大塚ら⁹⁾は、流動状態のペースト部の熱膨張率と骨材の膨張率との差が骨材周辺の剥離やモルタル部の微細ひび割れの原因となり、コンクリート組織の緻密さを欠如させ、コンクリートの強度を低下させる要因となるとしている。この影響が、特に損傷が結果に反映されやすい直接引張強度に表れたと考えている。

3.2 シリーズ 2（膨張材の効果）

(1) 一軸引張試験結果

シリーズ 2 にて実施した、材齢 1 日および 14 日における載荷時の荷重と鉄筋のひずみの関係を図－13・図－14 に、それぞれ示す。

表－4 に示した鉄筋のひずみ量を見ると、膨張材を混入していないものはコンクリートが収縮しており、特に高炉スラグ微粉末含有のものは大きな収縮を示している。養生中は水分が逸散しないようにし注意し、特に脱型後は湿布養生をしていることから、この大きな収縮は自己収縮によるものである。膨張材混入の供試体では材齢 1 日、14 日ともに収縮を抑制している。しかし、材齢 1 日ではひび割れ発生荷重の増大という形での膨張材の効果は現れていない。材齢 14 日では、ケミカルプレストレスによるものと思われるひび割れ発生強度の増加が確認できる。このことから、ひび割れ抵抗性が向上した場合は本研究の一軸引張試験で検知することは可能であると分かるが、高温履歴を与えた条件では膨張材混入のコンクリートのケミカルプレストレスによる効果が引張強度に表れなかった。

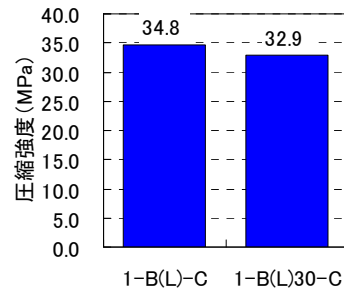
(2) 圧縮強度・直接引張強度試験結果

高温履歴をうけた材齢 1 日での膨張材の有無に着目した圧縮強度・直接引張強度試験結果を図－15・図－16 に示す。高炉スラグ微粉末の置換率 0%のものはほとんど強度が変わっていないのに対し、置換率 50%のものはわずかではあるが強度が増進している。これは筆者らが考えている、高炉スラグ微粉末含有コンクリートにおいて発生する骨材周囲の微細損傷が抑制されたためであると考えている。また置換率 0%におけるモルタルとコンクリートの直接引張強度を比較するとモルタルの方

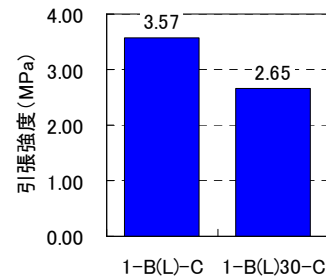
が低い。これは、水結合材比が 50%の場合²⁾と異なる傾向で、低水結合材比で特徴的な現象と考えている。

3.3 直接引張強度と割裂引張強度の比較

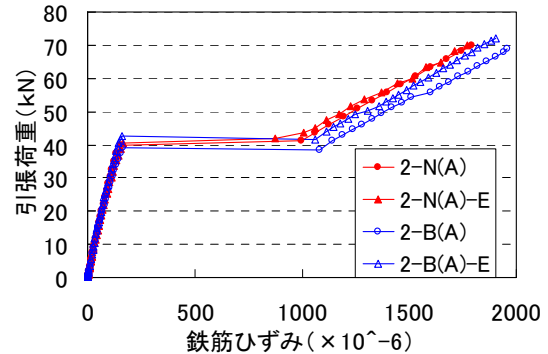
本研究における全パラメータの直接引張強度と割裂引張強度の関係をプロットしたものを図－17 に示す。ほぼ全ての供試体において割裂引張強度のほうが低い強度となった。この傾向は既報²⁾で直接引張強度と割裂引張強度がほぼ一致したとする報告と異なる。直接引張強



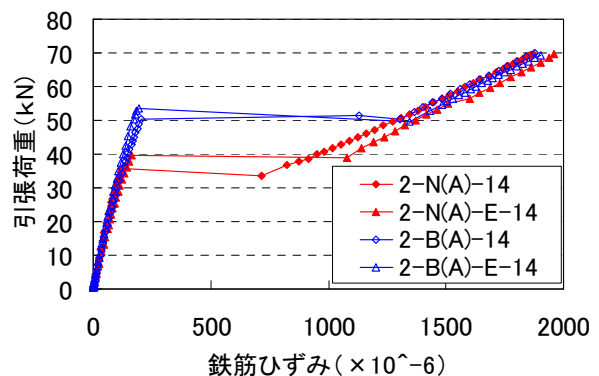
図－11 圧縮強度試験結果（前置き時間比較）



図－12 直接引張強度試験結果（前置き時間比較）



図－13 一軸引張試験結果（材齢 1 日）



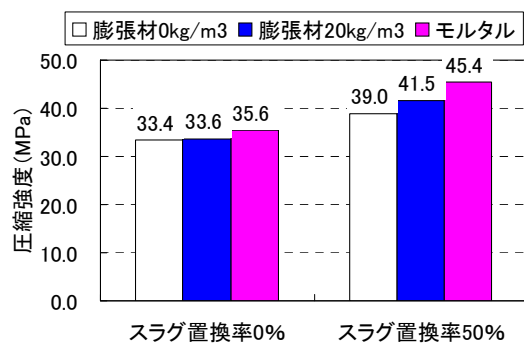
図－14 一軸引張試験結果（材齢 14 日）

度試験時の破断面は、全ての供試体が接着剤界面ではなくコンクリート母材部であった。低水結合材比で、破壊面に骨材が破断しているものが多く、既報では骨材の破断は生じていない。原因の究明は今後の課題とする。

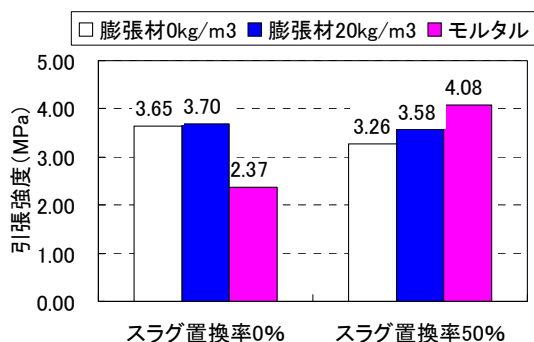
4.まとめ

本研究にて得られた結論を以下にまとめる。

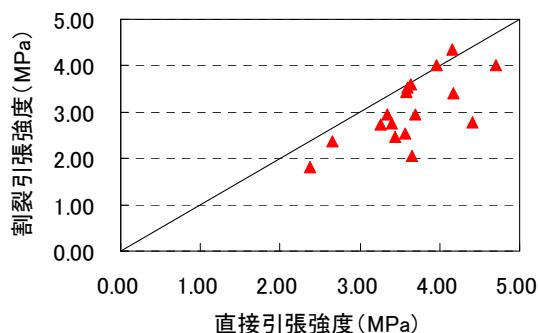
- (1) 今回用いた材料の場合、低水結合材比の条件で、前置き時間を十分にとった高温履歴を与えると、骨材の熱膨張係数や自己収縮に起因すると考えられる損傷の影響が引張強度において見られた。高炉スラグ微粉末を含む場合に、粗骨材が存在することで強度発現に負の影響を及ぼすことを確認した。
- (2) 高温履歴を与える際に、前置き時間を長く取ったものに比べ前置き時間の短いものでは、特に引張強度が低下した。
- (3) 膨張材によるケミカルプレストレスは、高温履歴を与えた材齢 1 日のものに対しては一軸引張強度の改



図一15 圧縮強度試験結果 (材齢 1 日)



図一16 直接引張強度試験結果 (材齢 1 日)



図一17 直接引張一割裂引張強度比較

善効果をほとんど発揮しなかった。

- (4) 膨張材を混入したコンクリートに高温履歴を与えた場合、普通コンクリートでは圧縮強度・引張強度の増進は見られないが、高炉スラグ微粉末含有コンクリートの場合、わずかであるが強度が増進した。
- (5) 低水結合材比の高炉スラグ微粉末含有コンクリートは、粗骨材に安山岩を用いた場合に比べ、石灰岩を用いた場合に高い強度を示した。
- (6) 低水結合材比の条件では、直接引張強度に比べ割裂引張強度は低く出る傾向があった。

謝辞

太平洋セメント (株) の伊與田紀夫氏には、材料の手配などで大変お世話になりました。深謝いたします。

なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (若手研究 (B)) により実施しました。

参考文献

- 1) 土木学会：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) 報告書ならびにシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ 74, pp.1-270-271, 2007
- 2) 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
- 3) 青木千里, 細田暁, 藤原浩一：高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの圧縮強度・弾性係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.161-166, 2006
- 4) 藤原浩一, 細田暁, 相澤健太：高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの引張性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.169-174, 2007
- 5) 楊楊, 佐藤良一, 竹内崇剛：若材齢におけるセメントペーストの熱膨張係数に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.209-214, 2000
- 6) 河野清：コンクリート製品とひび割れ, コンクリートジャーナル, Vol.11, No.9, pp.94-98, 1973
- 7) 細田暁, 白川裕之, 林和彦：乾燥による膨張コンクリートのひび割れ抵抗性の向上, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.251-256, 2006
- 8) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料・骨材研究委員会報告書, pp.191-195, 2005.9
- 9) 大塚浩司, 庄谷征美, 小関憲一, 阿波稔：コンクリートの蒸気養生過程で発生する表面微細ひび割れの性状に関する研究, 土木学会論文集 No.520, 5-28, pp.143-155, 1995.8