

論文 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

藤原 浩一^{*1}・細田 暁^{*2}・相澤 健太^{*3}

要旨：若材齢時に高温履歴を受けた際にセメントペーストと骨材の熱膨張係数の差による微視的溫度応力がコンクリートに及ぼす影響を検討した。溫度履歴の有無や粗骨材の有無で比較し、力学特性について評価を行った。その結果、高炉スラグ微粉末含有コンクリートに熱膨張係数の小さい石灰岩を用い、蒸気養生を模擬した高温履歴を与えた場合に内部損傷の程度が大きく、特に引張強度が大幅に低下した。また AE 法の計測結果からも損傷の存在が示唆された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、熱膨張係数、高温履歴、引張強度、粗骨材、AE法

1. はじめに

近年、高炉スラグ微粉末含有コンクリートはひび割れ抵抗性が劣るとの懸念から使用が敬遠される場合がある。しかし資源の有効利用・環境負荷の削減等の観点、またコンクリート構造物の耐久性への多くのメリットを考えると、高炉スラグ微粉末含有コンクリートは、欠点は明らかにした上で、その改善や適切な利用を推進していく必要があることは言うまでもない。

本研究は、若材齢時に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発生する損傷の影響を調べるものである。筆者らはコンクリートが蒸気養生を模擬した高温履歴を受けると、粗骨材とセメントペーストの熱膨張係数の差を主たる要因として内部に微細な損傷が生じると考えており、昨年報告した研究¹⁾では、骨材の存在により圧縮強度や弾性係数が大きく低下するという結果を示した。

本研究では筆者らの考える損傷の発生機構をより直接的に検証するために、熱膨張係数の異なる粗骨材（石灰岩・硬質砂岩）を使用し、蒸気養生を模擬した高温履歴が各種強度特性に与える影響を調べた。特にひび割れ抵抗性に直結する引張強度は割裂引張試験・直接引張試験の両方を実施した。損傷の発生機構に迫るため、溫度履歴を受けていない試験体との比較や、コンクリートとモルタルとの比較を通して考察を行ったのが、本研究の特徴である。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³，比表面積：3280cm²/g）を使用し、高炉スラグ微粉末は表-1 に示すものを使用した。細骨材は秩父産石灰石砕砂（表乾密度：2.56 g/cm³，吸水率：1.20%）を使用した。粗骨材は

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)	Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	塩基度
		(%)									
2.91	4000	0.07	33.10	14.53	0.15	43.04	5.42	2.00	0.28	0.26	1.90

*無水石膏 3.4%添加

*1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻（正会員）

*2 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 助教授 博（工）（正会員）

*3 横浜国立大学 工学部 建設学科

表-2 コンクリートの配合

	W/B (%)	BF/B (%)	s/a (%)	air (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	B		S	G	AE 剤	AE 減水剤
						C	BF				
N(L)	50	0	50	3.0	165	330	0	896	948	0.33	3.3
BB(L)		50			165	165	165	891	943		
BB(K)		50			165	165	165	891	918		

表-3 実験シリーズ

	試験 材齢	BF/B (%)	粗骨材	温度 履歴
N(L)-C	1 日	0	石灰岩	あり
N-M			なし	
BB(L)-C		50	石灰岩	
BB-M			なし	
BB(K)-C			硬質砂岩	
N(L)-C14	14 日	0	石灰岩	なし
BB(L)-C14		50	石灰岩	
BB(K)-C14			硬質砂岩	

秩父産石灰岩(最大寸法:20mm, 密度:2.71 g/cm³, 吸水率:0.43%,) および奥多摩産硬質砂岩(最大寸法:20mm, 密度:2.64 g/cm³, 吸水率:0.56%,)を使用した。混和剤として AE 剤, AE 減水剤を使用した。

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 1:3 とした。

2.3 試験パラメータと測定項目

試験パラメータを表-3 に示す。粗骨材の有無および熱膨張係数の値で比較を行うため、各粗骨材の熱膨張係数の計測を行った。

(1) 熱膨張係数試験

異方性を考慮して、4 つの岩石より直交する 2 方向(もしくは 3 方向)から直径 5cm のコアを採取し、供試体とした。

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。与えた温度は 20℃から 80℃程度、温度上昇速度は 1℃/min で、温度上昇

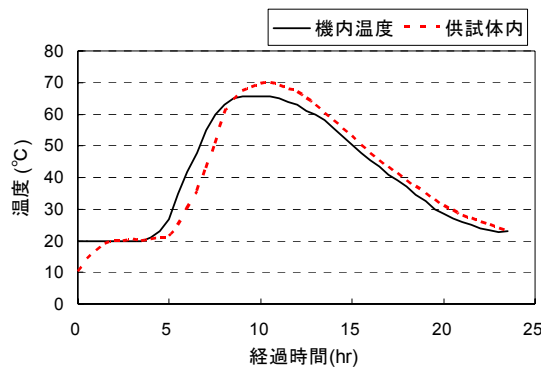
時のみ計測した。

(2) 温度履歴後の各種強度試験

蒸気養生を模擬し、打設後、前置き時間を 5 時間とした。これは、組織を安定させ、過去の研究でも指摘されている打ち込み直後の高温の悪影響を排除するためである⁴⁾。その後、昇温速度 20℃/hr で温度を上げ、最高温度 65℃を 3 時間保持し、ゆっくりと 20℃まで冷却した。その際、温度計測用として熱電対を埋設したダミー供試体を用いてコンクリート内部の温度を計測した。与えた温度履歴とコンクリート内部の温度を図-1 に示す。温度履歴終了後、速やかに脱型し各種強度試験の準備を行った。各試験は 3 体ずつ行い、その平均値を採用した。試験準備の都合から圧縮試験・曲げ試験・割裂引張試験は養生終了から約 4 時間後、直接引張試験はエポキシ系樹脂接着剤の硬化を待ため約 10 時間後の試験となった。しかし各シリーズ間の試験開始時間に差はないため、結果の考察への影響はない。

直接引張強度試験の供試体は応力分布が最も明快な φ100×200mm の円柱供試体を用いた。載荷は偏心を除くための治具を用いて接続し、0.03MPa/s の速度で載荷を行った。試験の全景を図-2 に示す。また試験結果の信頼性を高めるため JIS A 1113-1999 に従い割裂引張強度を求めた。さらに、圧縮強度から算定した引張強度を求め比較の対象とした。

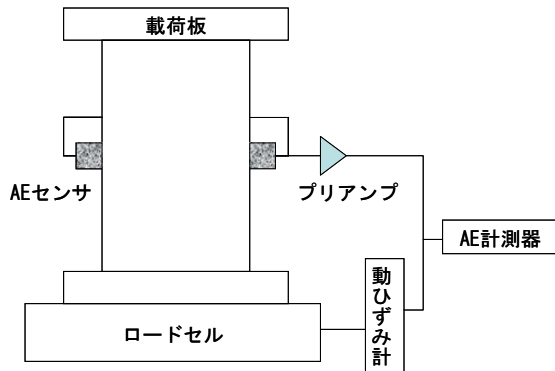
また、JIS A 1108-1999, JIS A 1149-2001, JIS A 1106-1999 に従い、圧縮強度試験・静弾性係数試験・曲げ試験を行った。供試体は、φ100×200mm および 100×100×400mm のものを使用した。



図－1 供試体に与えた温度履歴



図－2 直接引張試験 全景



図－3 AE 計測装置

(3) 温度履歴を与えない材齢 14 日シリーズ

筆者らが着目している粗骨材とセメントペーストの熱膨張係数の差による微視的温度応力の影響を直接的に見るために前述の 2.3(2)の試験体と同一バッチのコンクリートを使用した。温度履歴を与えずに打設後 1 日で脱型し、温度 20℃ 一定で湿布養生を行い、乾燥を防ぐため定期的

に水分を補給した。その後材齢 14 日で 2.3(2)と同様にして圧縮強度試験・直接引張強度試験を行った。

2.4 圧縮強度からの引張・曲げ強度の算定

圧縮強度からの引張・曲げ強度の算定には、コンクリート標準示方書にならい(1)，(2)式を用いた。

$$f_{t_cal} = 0.44\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$f_{b_cal} = 0.43f_c^{2/3} \quad (2)$$

ここに、 f_{t_cal} : 算定引張強度 (MPa),

f_{b_cal} : 算定曲げ強度 (MPa),

f'_c : 圧縮強度 (MPa)

2.5 AE 法による計測

一軸圧縮試験時における AE 計測概要を図－3 に示す。使用した AE センサは 0～約 1MHz までの幅広い応答感度を有するものを使用し、センサにて検出された AE 信号はプリアンプおよびメインアンプでそれぞれ 40dB の増幅処理を行った。また、計測に際して、しきい値は 43dB とした。

3. 熱膨張係数の試験結果および考察

計測され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。

熱膨張係数計算結果を表－4 に示す。各骨材につき 6 体のコアについて試験を行い、熱膨張曲線が比較的線形であった範囲から、熱膨張係数を計算した。石灰岩・硬質砂岩を比較すると平均で $5.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の熱膨張係数の差がみられた。昨年報告した高炉スラグ微粉末含有ペーストの熱膨張係数は材齢 7 日で計測した場合に約 $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で、普通セメントペーストは $14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり¹⁾、それより若材齢ではさらに大きくなる傾向にある³⁾。

表－4 熱膨張係数（粗骨材）

供試体番号	熱膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
	基準	直交 1	直交 2	供試体平均
石灰岩 1	6.0	5.1	5.6	5.6
石灰岩 2	6.5	5.1	5.4	5.7
総平均				5.6
硬質砂岩 1	13.7	12.7	11.8	12.8
硬質砂岩 2	10.1	10.1	9.9	10.0
総平均				11.4

4. 各種強度試験結果および考察

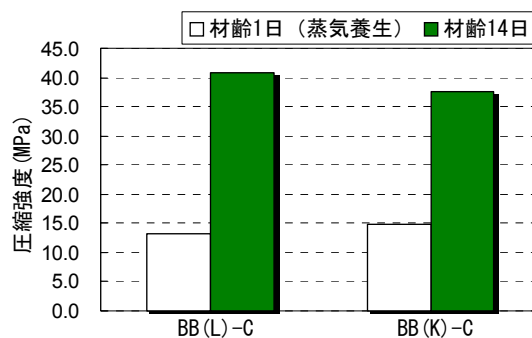
4.1 圧縮強度・引張強度

(1) 粗骨材の熱膨張係数による比較

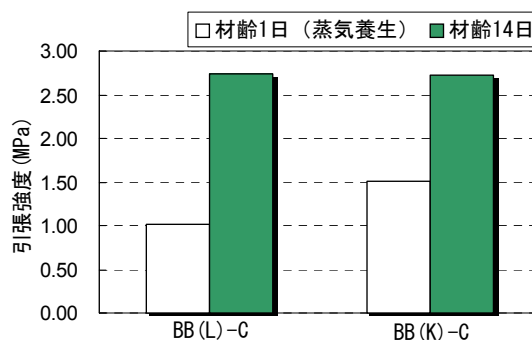
石灰岩と硬質砂岩を使用した高炉スラグ微粉末含有コンクリートの材齢 1 日と材齢 14 日の圧縮・直接引張強度試験結果を図－4・図－5 に示す。

高温履歴を与えていない材齢 14 日の場合、石灰岩を使用したものの圧縮強度のほうが若干高くなっているのに対し、蒸気養生後の試験では逆に低くなるという傾向を示した。この傾向は引張強度により顕著に表れており、石灰岩を使用したものの引張強度は硬質砂岩を使用したものより約 32%低下している。

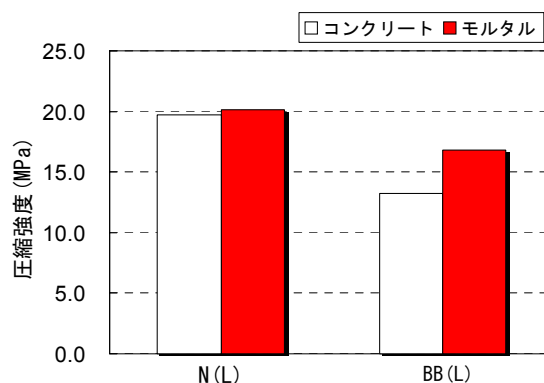
粗骨材を変えることでコンクリートのフレッシュ性状に違いが表れ、主として材料分離の影響で強度に違いが出る可能性も考えられるため、細心の注意を払って試験体の作製を行った。温度履歴を与えない材齢 14 日の結果からも、試験体は適切に作製されたと考えている。つまり、粗骨材の熱膨張係数の差が温度履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの強度に影響を及ぼしたのである。粗骨材とセメントペーストの熱膨張係数の差による微視的温度応力²⁾によって骨材周囲に微細損傷が発生し、その結果内部損傷の影響を受けやすい引張強度において顕著に影響が現れたと考えている。



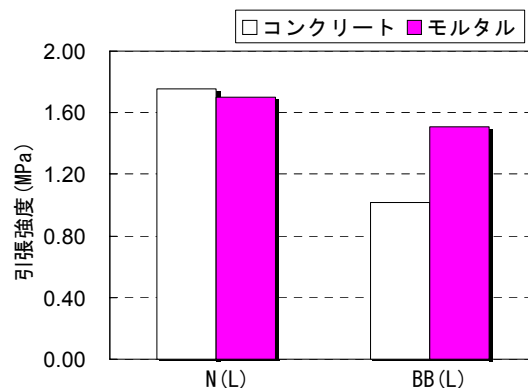
図－4 圧縮強度試験結果（骨材比較）



図－5 直接引張強度試験結果（骨材比較）



図－6 圧縮強度試験結果（セメント比較）



図－7 直接引張強度試験結果（セメント比較）

(2) セメント種類による比較

普通セメントを使用したコンクリート・モルタル

タルの圧縮・直接引張強度試験結果および高炉スラグ微粉末を 50%置換したコンクリート・モルタルの圧縮・直接引張試験結果を図-6・図-7に示す。粗骨材は共通して石灰岩を使用した。

モルタルの強度を比較すると高炉スラグを 50%置換したもののほうが圧縮・引張強度ともに低くなるという傾向を示した。これは、高炉スラグの水和度が小さい可能性や、細骨材によって内部に損傷が生じていること等が考えられるがこのデータだけではそれ以上は分からない。

それ以上に着目すべきはモルタルに対するコンクリートの強度である。普通セメントを使用したコンクリートは圧縮・引張強度ともにモルタルと同程度であるのに対し、高炉スラグを 50%置換したものは明らかにコンクリートの強度が低下している。これは粗骨材を混入したことにより微視的温度応力の影響が顕著になったことによるものであると考えている。

4.2 引張強度・曲げ強度

圧縮強度に対する直接引張・割裂引張・曲げ強度の関係を図-8・図-9に示す。直接引張試験と割裂引張試験はほぼ同程度の値を示した。

引張強度はコンクリート標準示方書の算定式に対して全体的に下回る傾向を示している。特に高炉スラグを 50%置換し石灰岩を粗骨材として用いたものは圧縮強度に対する引張強度の低下の傾向が著しく、微視的温度応力が引張強度に対して顕著に影響を与えたものと考えている。

また直接引張強度試験において、破壊に特徴的な傾向が見られた。破断面を観察すると二つに割れた供試体の打設面側に粗骨材が付着し、特に温度履歴を与えたものに対してその傾向が強く見られた。これはブリーディングによりコンクリート中の水分が粗骨材下にたまり、その水分が熱により膨張することもあり、直接引張試験の場合にはその部分が弱点になりやすいからであると考えている。

曲げ強度については本研究においては特に圧縮強度と比べて低下するという傾向は見られなかった。引張試験と曲げ試験の結果の傾向の違い

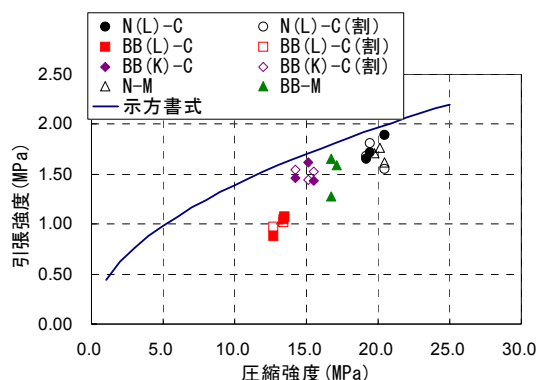


図-8 圧縮－引張強度の関係

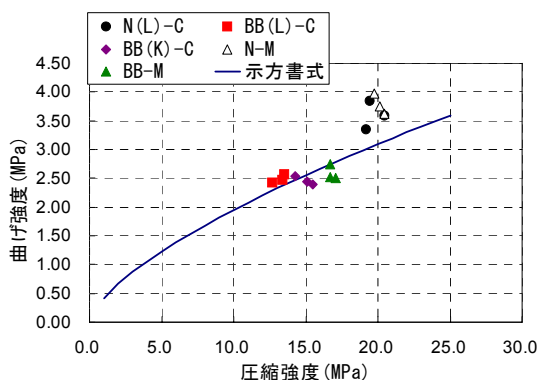


図-9 圧縮－曲げ強度の関係

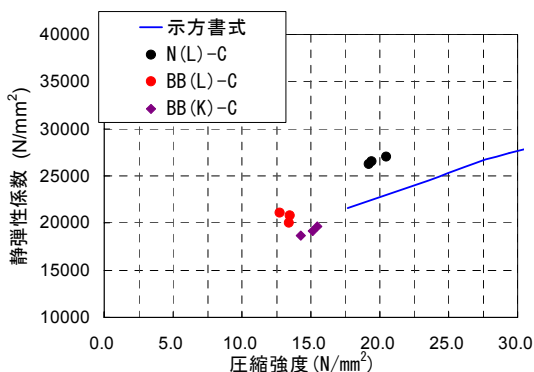


図-10 圧縮強度－静弾性係数の関係

いは、今後検討を深める。

4.3 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-10に示す。硬質砂岩を粗骨材として使用した高炉スラグ含有コンクリートの引張強度は、石灰岩のものよりも大きかったが、静弾性係数はほぼ同じ値まで低下している。

粗骨材そのものの弾性係数を測定したところ

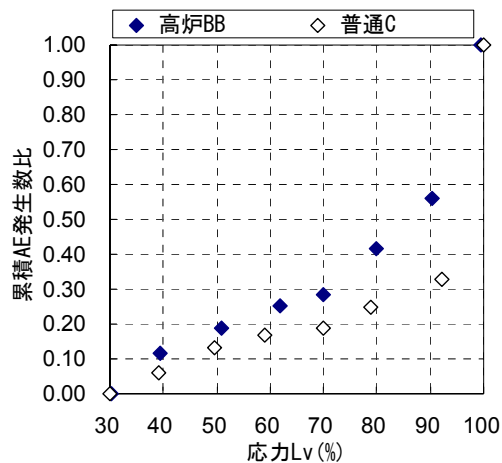


図-11 累積 AE 発生数比

硬質砂岩は石灰岩に比べ 2 倍程度大きな値を示しており、粗骨材の弾性係数の値が影響しているとは考え難い。熱膨張係数のより大きい硬質砂岩を使用した高炉スラグ含有コンクリートにおいても高温履歴を加えることで内部に微細損傷が生じ、その影響は静弾性係数に顕著に表れている。本研究の範囲では考察が不十分であるので今後さらに検討を進めていく必要がある。

5. AE 法による微細損傷の評価

図-11 に高温履歴後の圧縮試験中に得られた累積 AE 発生数比と破壊応力に対する応力の割合（応力レベル）との関係を示す。載荷初期における供試体と載荷板の摩擦によって発生する AE を除去するため、応力レベル 30%までに発生した AE を発生数として考慮しなかった。

普通コンクリートは終局破壊近傍で AE 発生数が急激に増加しているのに対し、高炉スラグ含有コンクリートにおいては応力レベルが初期の段階から AE が頻発している。これは、骨材周辺に存在する微細損傷の影響により、早い段階から AE が発生しているものと考えている。

6. まとめ

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 高炉スラグ微粉末含有コンクリートに熱膨張係数が小さい石灰岩を粗骨材として用い、

蒸気養生を模擬した高温履歴を与えた場合、硬質砂岩の粗骨材を用いた場合に比べ、引張強度が 32%低下した。粗骨材の熱膨張係数が影響したものである。

- (2) 高温履歴後のコンクリートとモルタルの強度を比較すると高炉スラグ微粉末含有コンクリートのモルタルに対する強度低下が顕著であった。粗骨材による微視的温度応力の影響は、普通セメントよりも、高炉スラグ微粉末を含有する場合に顕著である、と言える。
- (3) 温度履歴をうけた高炉スラグ微粉末含有コンクリートは一軸圧縮試験時において、普通コンクリートに比べ初期の応力レベルから AE 発生数が増加した。

謝辞

本研究を実施する際に、太平洋セメント（株）の伊與田紀夫氏とデイ・シイ（株）の鯉淵清氏には、材料の手配などで大変お世話になりました。本研究は、文部科学省科学研究費補助金（若手研究（B））および横浜国立大学の環境情報研究院共同研究プロジェクトにより実施しました。

参考文献

- 1) 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.1，2006
- 2) 南 和孝，田澤栄一，寺西修治：高温条件下のコンクリートの力学的性質に及ぼす微視的温度応力の影響，土木学会論文集，第 420 号，V-13，pp.173-180，1990 年 8 月
- 3) 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
- 4) 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