

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圧縮強度・弾性係数

青木 千里^{*1}・細田 暁^{*2}・藤原 浩一^{*3}

要旨：粗骨材として石灰岩を使用した高炉スラグ微粉末含有コンクリートに対して、高温の履歴を与え、圧縮強度・弾性係数を調べた。石灰岩はセメントペーストよりも熱膨張係数が相当に小さく、また高炉スラグ微粉末を含む場合にペーストの熱膨張係数は大きくなった。特に蒸気養生を模擬した温度履歴の場合に、スラグ含有コンクリートは圧縮強度や弾性係数の低下が大きく、内部に損傷を受けている可能性が高いことがわかった。

キーワード：高炉スラグ微粉末, 熱膨張係数, 高温履歴, 圧縮強度, 弾性係数, 損傷

1. はじめに

本研究では、高炉スラグ微粉末含有コンクリートに高温履歴を与えるとセメントペーストと骨材の熱膨張係数の差を主要因として骨材周囲に損傷が生じるとの考えに立ち、損傷が圧縮強度や弾性係数に及ぼす影響を調べた。

田澤ら¹⁾は、コンクリートが超高温の履歴を受けると、粗骨材とセメントペーストの熱膨張係数の差によって生じるひずみにより骨材界面に熱応力が発生し、それによってコンクリート内部に微細な損傷が誘発されるとの報告をした。また、粗骨材とセメントペーストの熱膨張係数の差が大きいほど微細な損傷も増えるとしている。

三井ら²⁾によると、高強度コンクリートの初期材齢での水和発熱を模擬した高温養生条件下では、粗骨材の熱膨張係数が小さいほど標準養生の試験体と比較した強度の低下が大きいとしている。

また、山下ら³⁾、揚揚ら⁴⁾は、高炉スラグ微粉末を混入したセメントペーストの熱膨張係数が普通セメントペーストよりも大きいことを報告している。

以上の情報を総合すると、コンクリートが高

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要因として骨材の周囲に微細なひび割れが発生する可能性があり、高炉スラグ微粉末含有の場合にさらに顕著になると推察できる。今回は粗骨材として熱膨張係数の小さいといわれている石灰岩を使用し、供試体に高温履歴を与えると圧縮強度や弾性係数にどのような影響を及ぼすかを調べた。その際、三井らの論文²⁾では標準養生の供試体との比較にとどまっていたので、本研究では同じ温度履歴を受けるペーストとの比較により直接的に損傷の程度を示すことを試みた。

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：3.14g/cm³）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。細骨材は君津市産の山砂（表乾密度：2.64 g/cm³，吸水率：1.59%）を使用した。粗骨材は奥多摩産の石灰岩（最大寸法：20mm，密度：2.69 g/cm³，吸水率：0.43%）を使用した。混和剤として、高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系化合物）、AE 剤、AE 減水剤を使用した。

*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 工学研究院 助教授 博(工) (正会員)

*3 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻

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	33.1	14.53	0.15	43.04	5.42	2	0.28	0.26	1.9

*無水石膏 3.4%添加

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	高性能 AE 減水剤	
						C	BF						
L30-0	30	0	47	3.0	165	550	0	782	898	—	—	5.5	
L30-50		50				275	275						773
L50-0	50	0	44			330	0	813	1054	0.33	3.3		—
L50-50		50				165	165	808	1048				—

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。

2.3 実験方法

(1) 熱膨張係数

供試体の種類を、表-3 に示す。W/B =50%のセメントペースト供試体は、材料分離抑制のため、増粘剤を水質量の 0.4%用いた。

(a) 粗骨材

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。

(b) セメントペースト

φ5×10cm 供試体を各配合につき 3 体ずつ作成した。配合は、表-3 に示すように、本試験に対応した水結合材比、置換率の 4 パターンで、材齢7日まで20℃で封緘養生し、試験を行った。

粗骨材と同様、供試体の長軸方向にゲージ長 30mm の箔ゲージを貼り付け、温度制御水槽を用いて見掛けひずみとダミー供試体の温度を測定した。供試体内部の水分の逸散を防ぐため、供試体表面にグリスを塗布し、ビニール袋に入れて試験を行った。与えた温度は 20℃から 50℃程

表-3 熱膨張係数試験

	供試体種類	W/B (%)	BF/B (%)
L	石灰岩	—	—
P30-0	セメント ペースト	30	0
P30-50			50
P50-0		50	0
P50-50			50

表-4 圧縮強度・弾性係数の実験シリーズ

	材齢 (日)	W/B (%)	BF/B (%)	温度履歴
L30	7	30	0 or 50	なし
L30-T				あり
L50		50		なし
L50-T				あり
YL30	1	30		基本
YL30-C				急冷
YL50		50		基本
YL50-C				急冷

度、温度上昇速度は 10℃/hr で、温度上昇時のみ計測した。

(2) 圧縮強度・弾性係数

実験の条件を表-4 に示す。

(a) 材齢 7 日シリーズ

供試体は、φ10×20cm を各配合で 7 体ずつ作成し、材齢 7 日まで 20℃で封緘養生をした。養生終了後、4 体はブリキ製の型枠をつけたまま温度制御装置に入れ、高温の履歴を与えた。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。

その後、JIS A 1108-1999, JIS A 1149-2001, JIS A 1127-2001 に従い、圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数を求め、温度履歴を与えたものと与えなかったもので比較をした。その際、温度履歴を与えるもののうちの1体は、温度履歴を与える前にも動弾性係数を計測しておき、同一供試体で、高温履歴の動弾性係数への影響を見た。

(b) 蒸気養生シリーズ

供試体は、φ10×20cmを各配合で7体ずつ作成し、1体は温度計測用のダミーとした。同時に、同配合のセメントペースト（供試体サイズ：φ5×10cm）を6体ずつ作成した。

打設後、前置き時間を3時間とし、昇温速度20°C/hr、最高温度65°Cを3時間保持し、蒸気養生を模擬した。ブリキ製の型枠はつけたままで温度履歴を与えた。その後、3体は温度制御装置に入れたままゆっくりと20°Cまで冷却し、残り3体は20°Cの恒温室に移動させて急激に冷却をした。その履歴を図-2に示す。

それぞれの条件で養生後、材齢7日シリーズと同様に、コンクリートに関しては圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数を求め、セメントペーストに関しては圧縮強度のみ求めた。

W/B=50%のセメントペーストについては、材料分離低減のため、増粘剤を添加したものと、石灰石微粉末（石粉）を混入したものの2種類作成した。

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。

3.1 粗骨材

熱膨張係数計算結果を、表-5に示す。全部で10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

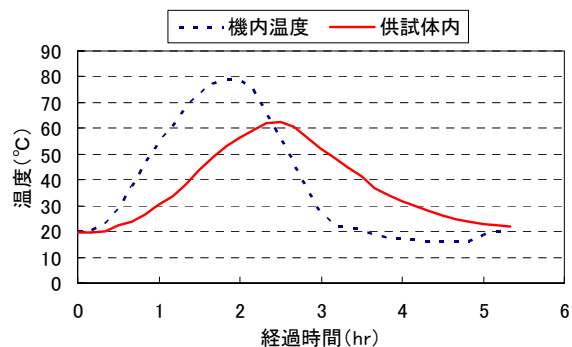


図-1 温度履歴（材齢7日）

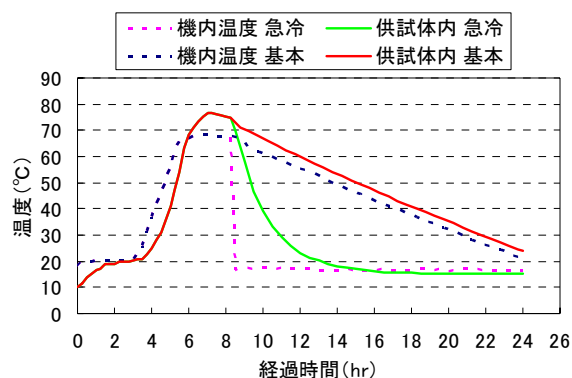


図-2 温度履歴（蒸気養生）

表-5 熱膨張係数試験（粗骨材）

供試体 番号	熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)			
	基準	直交1	直交2	供試体 平均
1	6.31	5.10	5.29	5.6
2	5.68	4.49	—	5.1
3	6.32	6.30	—	6.3
4	5.69	4.36	5.51	5.2
総平均				5.5

算した。三井らの研究²⁾では、石灰岩の熱膨張係数には異方性があるとあったが、今回はそのような傾向は見られなかった。それよりは、岩の塊ごとに熱膨張係数の違いが見られた。

3.2 セメントペースト

熱膨張係数計測結果、熱膨張曲線（P50-50）を、それぞれ表-6、図-3に示す。試験は各配合3体ずつ時期を変えて2回ずつ行い、熱膨張曲線が比較的線形な範囲から熱膨張係数を計算した。表-6より、W/Bにかかわらず、スラグ含有セメントペーストは普通セメントペースト

に比べて熱膨張係数が高く、約 1.35 倍であることがわかる。

揚揚ら⁴⁾は、極若材齢（材齢 10hr~48hr）における高強度セメントペースト（W/B =25,35,45%）に-1~5℃の温度変化を与え、自己収縮の影響を無視できるほどの低温で熱膨張係数を測定した。スラグ含有のものは、凝結終了直後には普通セメントペーストに比べて大きな熱膨張係数を示すが、材齢の経過とともに熱膨張係数は減少し、値が収束したところ（材齢 2 日）では W/B =25%を除き、高炉スラグ微粉末の有無にかかわらず、ともに $25 \times 10^{-6}/\text{C}$ 程度であった。この結果と本研究の計測結果を合わせて考えると、標準的な養生の場合、セメントペーストの熱膨張係数は材齢の経過とともに減少していき、その度合いは普通セメントペーストの方が大きい、と言える。

4. 圧縮強度・弾性係数の試験結果および考察

4.1 材齢 7 日

圧縮強度・弾性係数性状を、表-7 に示す。これを見ると、W/B=50%・置換なし以外、履歴を与えたものの圧縮強度は大きくなっている。これは、温度履歴を与えることで水和が進み、強度が大きくなったものと考えられる。通常、圧縮強度が増加すればそれに対応して静弾性係数も増加すると考えられるが、静弾性係数はほと

表-6 熱膨張係数（セメントペースト）

供試体番号	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/\text{C}$)		
	1回目	2回目	平均
P30-0	14.25	15.42	14.8
P30-50	19.29	19.48	19.4
P50-0	14.67	13.84	14.3
P50-50	20.70	19.00	19.9

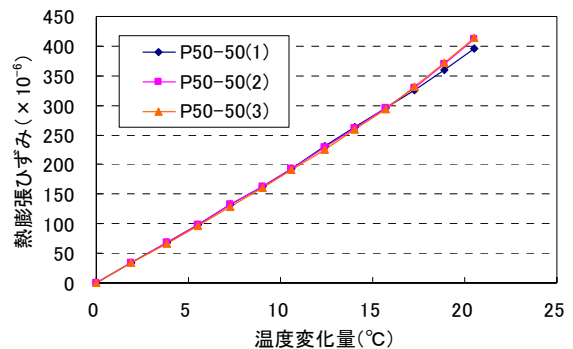


図-3 熱膨張曲線（セメントペースト）

んど変化しないか低下している。特に、スラグ含有コンクリートに関しては、圧縮強度の増加に対して静弾性係数の低下が多少大きいといえる。これは、コンクリート内部に微細な損傷が生じているためではないかと考えたが、数%の差は誤差の範囲内であり、この程度の低下で損傷が生じているとすることは難しい。

また、同 W/B のスラグの有無での動弾性係数と静弾性係数の低下率をそれぞれ比較すると、W/B =30%の場合はスラグの有無で違いはない

表-7 圧縮強度・弾性係数（材齢 7 日）

BF/B (%)	温度履歴	W/B=30%			W/B=50%		
		圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)
0	なし(3体)	58.3	37711	43068	28.7	32071	37818
	あり(3体)	59.7	37658	42673	24.8	31705	36988
	変化率	2.3%	-0.1%	-0.9%	-13.7%	-1.1%	-2.2%
	前(1体)	—	—	42259	—	—	38152
	後(1体)	56.3	35173	41946	24.7	32544	37073
	変化率	—	—	-0.7%	—	—	-2.8%
50	なし(3体)	51.0	37590	44123	17.4	22375	29154
	あり(3体)	53.9	36968	43117	18.1	22354	28492
	変化率	5.7%	-1.7%	-2.3%	4.1%	-0.1%	-2.3%
	前(1体)	—	—	44475	—	—	29935
	後(1体)	47.8	36229	43302	18.6	23138	28853
	変化率	—	—	-2.6%	—	—	-3.6%

表-8 圧縮強度・弾性係数（蒸気養生）

BF/B (%)	履歴	W/B=30%				W/B=50%				
		圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)
		C	P			C	P			
						石粉系	増粘剤系			
0	基本	47.4	62.9	33243	40223	18.5	30.6	26.0	24794	32548
	急冷	37.9	60.9	31520	38127	14.3	22.7	21.1	21734	30036
50	基本	41.9	76.4	30131	39803	13.8	29.8	20.4	19065	25997
	急冷	30.8	48.8	21995	36915	8.0	18.3	12.1	14940	21912

C・・・コンクリート P・・・セメントペースト

が、W/B=50%の場合、スラグ含有のほうが静弾性係数に比べて動弾性係数の低下率が大きい。

動弾性係数は非破壊試験なので、同一供試体に対して温度履歴を与える前後の両方で計測できることが利点である。同一供試体における温度履歴前後の動弾性係数はW/B=30%, 0%置換を除き低下しており、これらのコンクリートは内部に微細な損傷を受けていることが伺える。ただし、W/B=50%, 0%置換は圧縮強度も低下していることから、ほかの要因で動弾性係数も低下した可能性もある。

4.2 蒸気養生

圧縮強度・弾性係数を表-8に、セメントペーストとコンクリートの圧縮強度をそれぞれ図-4、図-5に示す。ここでは、W/B=50%のペーストの強度は、石粉系の値を使用した。

W/B=30%の場合、高温養生（基本の温度履歴）によりセメントペーストの圧縮強度はスラグ含有の方が大幅に大きくなっているのに対し、コンクリートの圧縮強度はスラグ含有の方が10%程度小さくなっている。W/B=30%のコンクリートは、高温養生をすることで、粗骨材が存在することにより骨材周囲に微細なひび割れが発生していると推察され、特にスラグを含む場合に著しい。

W/B=50%の場合、石粉系のセメントペーストと比較したコンクリートの圧縮強度は大幅に低下しており、特にスラグ含有の場合は強度低下が著しい。ただし、この場合は、材料分離を低減するために石灰石微粉末を添加し、水粉体比

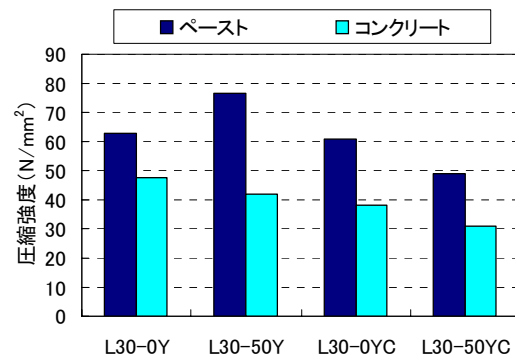


図-4 ペーストとコンクリートの圧縮強度 (W/B=30%)

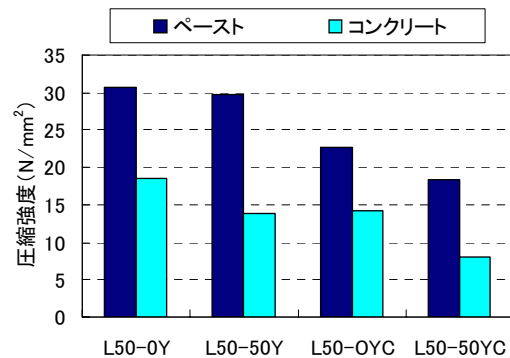


図-5 ペーストとコンクリートの圧縮強度 (W/B=50%)

を38%としたものである。石灰石微粉末がペーストの水和に影響を及ぼし、強度が増進している可能性も考えられる。今後、損傷のより適切な評価方法を検討する予定である。

また、W/B=50%の供試体を端面処理のために研磨した際にスラグ含有のものは感触に手がたえがなく、ボロボロと欠ける状態であった。高温履歴による骨材周囲の損傷が著しく、相互に

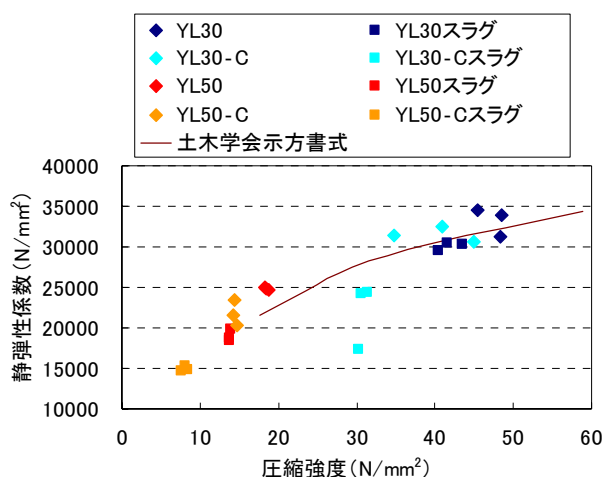


図-6 圧縮強度－静弾性係数関係（蒸気養生）

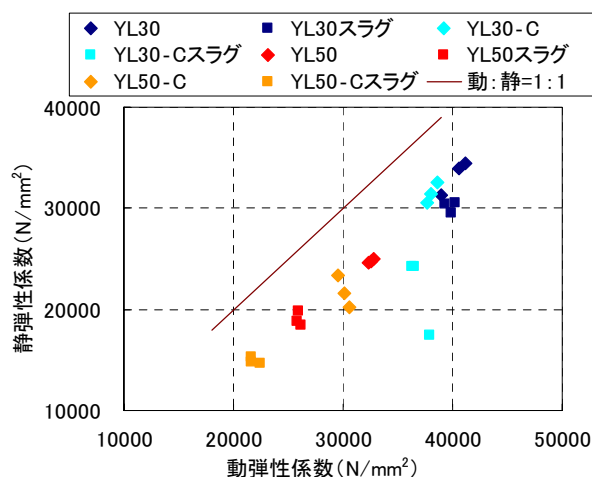


図-7 動弾性係数－静弾性係数関係（蒸気養生）

連結している状態であると考えている。

圧縮強度と静弾性係数の関係を、図-6に示す。基準として、土木学会示方書の式を示した。すでに述べたように、これらの圧縮強度はペーストに比較すると低下したものである。その低下した圧縮強度との関係を見ると、スラグ含有の場合は弾性係数が大幅に低下している。高温履歴の影響は圧縮強度よりも弾性係数により大きく表れていると言える。

動弾性係数と静弾性係数の関係を、図-7に示す。同 W/B, 同温度履歴で比較すると、W/B=30%の場合、スラグを入れたものは、動弾性係数の低下に比べて静弾性係数の低下が大きい。その傾向は急冷履歴の時に顕著である。W/B=50%の場合は、そのような傾向は見られない。

5. まとめ

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 高炉スラグ微粉末を混入したセメントペーストは、普通セメントペーストよりも材齢7日における熱膨張係数が1.35倍程度大きかった。
- (2) 材齢7日のコンクリートに高温履歴を与えた場合、圧縮強度や弾性係数への影響は小さかった。
- (3) 蒸気養生を模擬した温度履歴を受けたコン

クリートの圧縮強度は、同じ養生を施したセメントペーストの強度と比較して大幅に低下しており、スラグ含有の場合特に低下の度合いが著しい。

- (4) 蒸気養生を模擬した温度履歴を受けたスラグ含有コンクリートは、圧縮強度の低下率よりも静弾性係数の低下がさらに顕著である。

参考文献

- 1) 田澤栄一，南 和孝，影山 智，渡辺恭史：高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.1, pp.13-18, 1987.
- 2) 三井健郎，小島正朗，米澤敏男：初期材齢での高温養生条件における超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす骨材品質の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.1025-1030, 1995.
- 3) 山下淳，渡部正，舟橋政司，中島良光：高流動コンクリートの発熱特性に関する研究，第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集，pp.59-64, 1994.5.
- 4) 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.