高温加熱を受けたコンクリートの基礎的物性と微細構造変化

蓄熱, 封緘, 高温暴露, 圧縮強度

1. はじめに

世の中の一般的な建材は蓄熱し、放熱する性質を持っ ている。建物の蓄熱性はその建物の使用材料の熱容量で 評価される。この熱容量は質量×比熱で表され,普通コ ンクリートの単位容積当たりの熱容量は 880J/K 程度と なり、木材に比べて高く、蓄熱性が高い。図1にセメン ト硬化体の空隙構造と蓄熱の特性を示す。近い将来、世 の中のエネルギーが自然エネルギーへと移行していった 場合, 夜間などは作られるエネルギーが減少するため, このようなコンクリートの蓄熱性を活かし、コンクリー トからエネルギーへの変換に期待ができる。一方、暴露 温度によってはコンクリートの強度が変わる可能性も考 えられる。1)-3)そこで本研究では、直射日光を受けるビ ルの外壁などのコンクリートは夏場 50℃~80℃まで上 昇することがあること,原子炉,工業炉,コンクリート 煙突などでは 100℃以上の高温に常時さらされることを 踏まえて、20℃、50℃、80℃、110℃、300℃の温度条件 下で養生方法別に暴露した後の強度, 強度低下の原因と なりうる細孔構造を分析し、加熱後のコンクリートの基 礎的物性と微細構造を分析した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料及びコンクリート調合

表1に使用した材料の品質を示す。表2に実験要因を 示す。表3にコンクリートの調合を示す。使用したセメ ントは普通ポルトランドセメント(Ns),中庸熱ポルトラ ンド(Ms),高炉B種セメント(Bs),フライアッシュセメ ント(Fs)の4種類使用し,Fsを除いて市販品を使用し, Fsについては普通ポルトランドセメントの15%をフラ イアッシュII種で置換してフライアッシュセメントB種 とした。化学混和材はリグニンスルホン酸系のAE 減水 剤標準形を使用した。普通ポルトランドセメントでは全 てのセメント種類で使用した砂岩砕石に加え,石灰岩砕 石も使用した(NL)。計画調合は水セメント比50%,単位 水量174kg/m³,空気量4.5%一定とした。また,AE 減水 剤は C×1.25%一定とし,空気量は空気量調整剤にて目 標空気量となるように調整した。

2.2 実験項目および実験内容

表4に実験項目と実験方法を示す。図2に供試体の養 生方法,高温暴露のプロセスを示す。供試体は,使用す るセメント4種に加え,石灰を加えた普通ポルトランド セメントを含み,全5種のコンクリートをフレッシュコ ンクリート試験後にサミットモールド(φ10×20cm)を 石垣芙季^{*1},田村雅紀^{*2},嵩英雄^{*3} 西祐宜^{*4},金子樹^{*5},田山隆文^{*6}





表 1 使用材料

項目	記号	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
	Ns	普通ポルトランドセメント	3.16	_
セメント	Ms	中庸熱ポルトランドセメント	3.21	-
	Bs	高炉 B 種セメント	3.04	—
	Fs	フライアッシュセメント B 種	3.02	-
細骨材	S1	陸砂 (大井川産)	2.58	2.17
	S2	石灰岩砕砂(福岡産)	2.70	0.78
粗骨材	G1	硬質砂岩砕石 (青梅産)	2.65	0.57
	G2	石灰岩砕石 (山口県産)	2.69	0.48
	G3	石灰岩砕石 (青森県産)	2.69	0.46

表 2 実験要因

要因	水準			
細骨材	陸砂, 石灰岩砕砂			
粗骨材	砂岩砕石,石灰岩砕石			
コンクリート	Ns, Ms, Bs, Fs, NL(Nsに石灰石骨材を加えた)			
養生方法	標準, 封緘 (13W)			
暴露方法	標準→アンシール(13₩),封緘→シール,アンシール(13₩)			
暴露温度	20°C, 50°C, 80°C, 110°C, 300°C			
アンシール:暴露状態において封緘されていない状態				

シール:暴露状態において、水分の移動が無いように封緘されている状態

表3 コンクリート調合

種	W (0 (%) 0 /0 (%)		単位量(kg/m ³)					
類	W/C(%)	//(%) S/a(%)	W	S1	S2	G1	G2	G3
Ns		44.3		766	-	991	-	-
Ms		44.4		771	-	991	-	-
Bs	50	43.9	174	756	-	991	-	-
Fs		43.6		746	-	991	-	-
NL		44.3		384	400	-	705	301

*1 工学院大学建築系学科・学部生 *2 工学院大学建築学部・准教授 *3(社)建築研究振興協会 博士(工学)

*4 株式会社フローリック技術本部コンクリート研究所 *5 株式会社長谷工コーポレーション技術研究所

*6 (社)建築研究振興協会

用いて採取し、20℃60%RHの恒温室にて静置した。その 後,標準→アンシール,封緘→シール,封緘→アンシー ルの全3水準の養生を13W行った。標準→アンシール養 生を行うものについては翌日脱型し, 封緘→シールおよ び封緘→アンシールではサミットモールドのまま供試体 上部をポリエチレンフィルム等で封緘処理を行いそれぞ れの養生を開始した。その後、全ての供試体において材 齢4週時に研磨にて表面処理を行った。封減→アンシー ルおよび封緘→シールについては、サミットモールドの まま水ではなくブタノールを使用し研磨した。さらに研 磨後には、上記と同様な封緘処理に加え、ポリエチレン フィルムの上からエポキシ樹脂で覆い、封緘状態とした。 その後それぞれを 20℃, 50℃, 80℃, 110℃, 300℃の全 3水準で暴露した。よって、供試体の種類は全45種類と なる。ただし、300℃加熱時にエポキシ樹脂が溶け出した ので、300℃、封緘養生の水準の供試体に関しては、エポ キシ樹脂を取り除き、剥き出しになった上部を下にして 底を上にして置き、封緘状態とした。高温暴露は、20℃、 50℃, 80℃, 110℃, 300℃に調節した熱風循環式恒温機 で13W行った。恒温機内の供試体の配置はランダムにし、 セメント種別、養生方法別に偏りが出ないようにした。 なお,高温暴露開始前後では、20℃/h で昇降温させ、暴 露後の強度試験は降温翌日,供試体が常温となってから 実施した。その後、強度試験を終えた供試体は、次の試 験が行われるまで空気に触れないように袋で密閉し, 20℃恒温室で保存した。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュコンクリート試験結果

表5にフレッシュコンクリート試験の結果を示す。フレッシュコ ンクリート試験はスランプ(JIS A 1101),スランプフロー(JIS A 1150),空気量(JIS A 1128),単位容積質量,コンクリート温度(JIS A 1156)とした。コンクリート温度は20℃一定であった。Bs,NL 種においてはスランプ値が高く出ているが結果をそのまま使用し た。

3.2 高温暴露前の圧縮強度と静弾性係数

図3に高温暴露前の脱型後13Wの供試体のセメント別 にみた圧縮強度と静弾性係数のグラフを養生方法別に示 す。封緘養生に比べて標準養生の方が圧縮強度が高い。 養生条件に関わらずFs種は圧縮強度,静弾性係数が低く, NL種においては静弾性係数が他セメント種に比べ高い。

3.3 高温暴露後の供試体の単位容積質量の変化

図4 a)に高温暴露後の供試体の単位容積質量の変化 を示す。20℃から 300℃まで,自由水,物理吸着水の蒸 発,移動により段階的に減少した。封減-シール種にお いては,110℃から,封減のために使用したエポキシ樹脂 が溶けて完全封減ではなくなったので乾燥により急激に



表4 試験項目と実験方法

試験項目	実験方法
加熱処理	20, 50, 80, 110, 300℃環境に 13 週間暴露
圧縮強度	JISA1108 準拠。円柱供試体(φ100mm×200mm)
静弹性係数	JIS A 1149 準拠。圧縮強度試験と同時に測定
供試体密度測定	加熱処理前後の密度を測定
細孔径分布測定	Ns,Bs,NL 種は D-乾燥後, Ms 種は 20℃乾燥後水 銀圧入
粉末X線回折	封緘-シールの Ns,Ms 種の高温暴露前(13W)と 300℃高温暴露後(26W)を測定

表5 フレッシュコンクリート試験結果

種類	スランフ゜(cm)	スランフ゜フロー (mm)	空気量(%)	単位容積質量 (kg/L)
Ns	14.0	283	4.1	2.32
Ms	14.8	259	3.5	2.34
Bs	17.6	267	3.6	2.32
Fs	15.5	255	4.5	2.29
NL	17.3	277	3.9	2.35



質量が減少したと考えられる。他セメント種に比べ Fs 種は単位容積質量が小さい。

3.4 高温暴露後の供試体の圧縮強度の変化

図4 b)に高温暴露前後の養生別,セメント種別の圧 縮強度を示す。110℃までは強度が発現しているが, 300℃の場合は乾燥が進み,結合水,自由水が分解され 強度が低下していると考えられる。封繊-アンシール, 封繊-シール養生では高温暴露により強度が上がる傾 向にある。これは熱を受けることによる水和促進での強 度増加と乾燥による強度増加が同時に作用している可 能性がある。

3.5 高温暴露後の圧縮強度残存比

図4 c)に加熱前の高温暴露後のセメント別圧縮強度残 存率を示す。なお,加熱前の脱型後13Wの圧縮強度を 100%とした。温度が上がるにつれ残存率は 低下しているが,封減-シール養生において は 80℃までは残存率が 100%以上か 100%付 近にあるがその後低下している。しかし他養 生条件と比べて 300℃での低下は小さい。Bs 種に関しては養生条件関わらず 50℃付近で の残存比低下が大きい。

3.6 高温暴露後の静弾性係数の変化

図4 d)に高温暴露後の静弾性係数の変化 を示す。養生条件に関わらず石灰を加えた NL 種は20℃~110℃では大きい値を示している が300℃では数値が急激に低下する。Bs 種に 関しては,圧縮強度同様,他セメント種に比 べて50℃での圧縮強度の値の低下が大きい。 3.7高温暴露後の圧縮強度と静弾性係数の関 係

図4 e)に高温暴露後の圧縮強度と静弾性 係数の関係を示す。NewRC式(図中)に従い推 移している。20 $^{\circ}$,50 $^{\circ}$ では推定式近傍にあ るが高温になるにつれ推定式から離れる。 300 $^{\circ}$ では圧縮強度,静弾性係数ともに推定 式から大きく離れる。Bs はNs に比べ圧縮強 度と静弾性係数の値の低下が激しい。Fs に比 べ Bs は圧縮強度が高いが 300 $^{\circ}$ では静弾性 係数に関しては Fs の方が高い。なお, 図中 では供試体密度 γ は実測値の平均から 2.3t/m³とした。

3.8 高温暴露後の細孔量分布特性

図5に高温暴露後の封緘-アンシール種のNs,Ms,Bs,NL種の4水準の供試体の細 孔径分布を示す。累積細孔量は加熱により増 加する傾向にある。セメント種,暴露温度に 関わらず,100nm付近の細孔量が一番大きい 値を示している。加熱により空隙のピークが 右方向にずれており,110℃からは小空隙側 にずれる傾向が見られる。300℃では大空隙 側の細孔量が増えている。Bs種に関しては 他セメント種に比べて緩やかな山を描いて いる。Ms種に関しては50℃で細孔量のピー クが大幅に大空隙側にずれている。

3.9 高温暴露後の温度変化による累積細孔量 特性

図6に高温暴露後の累積細孔量特性を示す。 グラフの勾配の位置が問題となってくる。 20℃から温度があがるにつれ、大空隙側で勾 配が急になっていて、大空隙の増加がわかる。 累積細孔量は高温になるにつれ値が大きくな る傾向にある。



3.10 高温暴露後の累積細孔量特性

図7に温度別でみた累積細孔量特性を示す。温度が上 がるにつれ累積細孔量も増えていく傾向にあるが、 Bs 種は高温時の累積細孔量が他セメント種に比べ て少ない。

3.11 高温暴露前後の粉末X線回折結果

図8に封緘-シールのNs,Ms種の高温暴露前(13W)と高 温暴露後(26W)の粉末X線回折図を示す。ともに加熱前では エトリンガイト(E)やカルシウムアルミネートハイドレー ド(CA)の回折ピークがみられるが、300℃では消失している。 これは水分移動の無い封緘状態の温度環境下ならびに高温 暴露までの過程で結合水が失われてこれらの結合水を多く 含む水和物が消失したと考えることができる。なお、蓄熱 ならびに高温暴露により結合水を含む水和物の消失が生じ た場合、強度低下が起こると考えられる。

4 まとめ

- 高温暴露後の各セメント種の供試体質量は自由水や物理 吸着水により段階的に減少した。
- 2)高温暴露後の Ms 種を使った供試体は、標準-アンシール、 封緘-アンシールだと圧縮強度が 50℃で落ち、110℃で また上がる。
- 3)NL 種では静弾性係数が他セメント種に比べて高いが, 300℃高温では急激に低下する。
- 4)常温 20℃の供試体の細孔構造は Ns, NL 種では 100nm 前後, Bs 種では 1000nm 手前に最大量があり,加熱温度が高くな るにつれ,細孔量の大きい方へずれていき,50~80℃付 近で折り返し,300℃でまでは再び小空隙側にずれていく。
- 5) 蓄熱, 高温暴露による, コンクリート供試体内で起きる 結合水を含む水和物の消失が強度低下につながると考え られる。

参考文献

- (1) 志村重顕、嵩英雄、全洪珠、洪杰:高温に長期間さらされた コンクリートの諸性質に関する研究 第一報 高温暴露後の 強度性状に及ぼすセメントの種類の影響、日本建築学会大会 学術講演梗概集、2002.08, pp603~604
- (2) 志村重顕、嵩英雄、假屋園礼文:高温に長期間さらされたコンクリートの諸性質に関する研究 第二報 高温暴露後の強度性状に及ぼすセメントの種類及び加熱前養生方法の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、 pp583~584、2003.09
- (3) 岡野速人、田村雅紀:各種副産材料を使用したセメント系建 設資材の熱的物性変化、仕上学会、p21~22、2011.10

謝辞

本研究の一部は,建築研究振興協会,株式会社フローリック,株 式会社長谷川コーポレーションが共同で実験した。セメント協会, 地質鉱物エンジニアリング・丸章夫博士,関係各位に助力を得た。

