

各種セメントを用いたコンクリートの蓄熱による基礎的物性

材料施工—モルタル・コンクリートの物性

蓄熱 高温暴露 圧縮強度
封緘 静弾性係数 水分

準会員 ○ 石垣 芙季^{*1} 正会員 田村 雅紀^{*2}
正会員 嵩 英雄^{*3} // 西 祐宜^{*4}
// 金子 樹^{*5} // 田山隆文^{*6}

1. はじめに

世の中の一一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。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)~2)}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想定し、20℃、50℃、80℃、110℃、300℃の温度条件下で蓄熱状態になるように封緘した状態で暴露した後の強度を測定し、高温暴露後のコンクリートの基礎的物性と、粉末X線回折を使用し、強度低下の原因となりうるコンクリート内部の化合物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碎石に加え、石灰岩碎石も使用した(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。

表1 使用材料

項目	記号	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
セメント	Ns	普通ポルトランドセメント	3.16	—
	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	硬質砂岩碎石(青梅産)	2.65	0.57
	G2	石灰岩碎石(山口県産)	2.69	0.48
	G3	石灰岩碎石(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	砂岩碎石、石灰岩碎石
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	封緘(0-13W)
暴露方法	封緘—シール(13W-26W)
暴露温度	20℃, 50℃, 80℃, 110℃, 300℃

シール: 暴露状態において、水分の移動が無く、ように封緘されている状態

表3 コンクリート調合

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

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	JIS A 1108 準拠。円柱供試体(φ100mm×200mm)
静弾性係数	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
粉末X線回折	Ns, Ms種の加熱前、300℃加熱後を測定

表5 フレッシュコンクリート試験結果

種類	スラブ (cm)	スラブ厚 (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

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 1 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軽量鋼製型枠（ $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ ）を用いて採取し、 20°C 60%RH の恒温室内にて静置した。その後封緘→シール養生を 13W 行った。この時、軽量鋼製型枠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 4W 時に軽量鋼製型枠のまま、水ではなくブタノールを使用し研磨して表面処理を行った。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°C 、 50°C 、 80°C 、 110°C 、 300°C の全 5 水準で暴露した。よって供試体の種類は、コンクリート 5 水準、暴露温度 5 水準の全 25 種類となる。ただし、 300°C 高温暴露中にエポキシ樹脂が溶け出したので、 300°C の供試体に関しては、高温暴露中に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通常と逆にした状態にして置き、封緘状態とした。また 110°C 供試体においても、13W 高温暴露終了後にはエポキシ樹脂の一部に熱分解が生じていたため完全封緘とは言えないため、完全封緘状態は 80°C までといえる。高温暴露は、 20°C 、 50°C 、 80°C 、 110°C 、 300°C 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、 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 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。

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全コンクリート種 20°C 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 高温暴露前の単位容積質量および圧縮強度と静弾性係数

図 2 に高温暴露前 (13W) の供試体のセメント別にみた単位容積質量および圧縮強度と静弾性係数のグラフを示す。石灰を加えた NL 種は単位容積質量が大きく、Fs 種は小さい値を示す。NL 種に関しては、静弾性係数が他コンクリート種に比べ高く、Fs 種においては圧縮強度、静弾性係数ともに他コンクリート種に比べて低い。

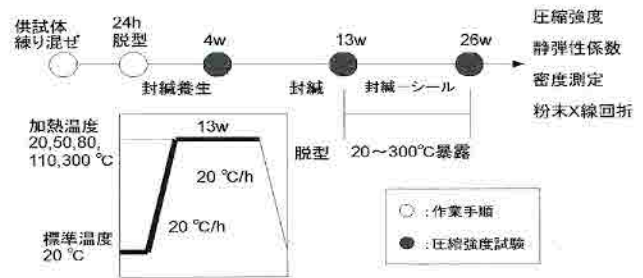


図 1 養生方法、高温暴露のプロセス

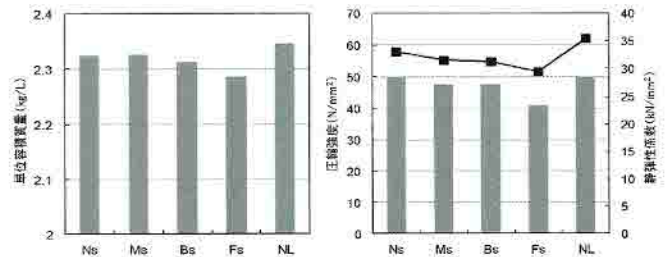


図 2 高温暴露前 (13W 後) の単位容積質量および圧縮強度と静弾性係数

3.3 高温暴露後の供試体の単位容積質量の変化

図 3 a) に高温暴露後の供試体のコンクリート種別で見た単位容積質量の変化を示す。 20°C 、 50°C は完全封緘であるため大きな変化は見られないが、 80°C では少し質量減少が起きている。 110°C からは、封緘のために使用したエポキシ樹脂の一部に熱分解が生じ、完全封緘ではなくなったため乾燥により急激に質量が低下した。

3.4 高温暴露後の供試体の圧縮強度の変化

図 3 b) に高温暴露後の圧縮強度の実数と残存比を示す。実数からみると、Fs 種を除き、 20°C よりも 50°C の方が強度が発現している。これは封緘状態であるため、水分の移動、蒸発を防ぎ、内部で水和が進んだと考えられる。 80°C では強度が落ちている。 110°C からは乾燥が進み、結合水の蒸発、自由水が分解により強度が低下していると考えられる。圧縮強度残存比については、Bs 種を除く、Ns、Ms、Fs、NL 種は 20°C 供試体よりも 50°C 供試体の方が残存比が高くなっている。Ms、Fs 種は 50°C で高温暴露前と比べ 20% 残存比が高くなっている。Bs 種のみ 50°C から段階的に残存比が低下している。Fs 種は低温 20°C 、 50°C での残存比が他コンクリート種と比べて高い。コンクリート種に関わらず、 80°C からは強度残存比が低下している。単位質量は 80°C までは大きな変化は見られないが、強度には激しい低下が見られる。これはコンクリート供試体の内部において、 80°C 付近でのエトリンガイトなどの結合水を含む水和生成物の崩壊、消失などが考えられる。 110°C からの急激な強度低下は、単位容積質量の変化から見て、水分の蒸発、乾燥による強度低下と考えられる。

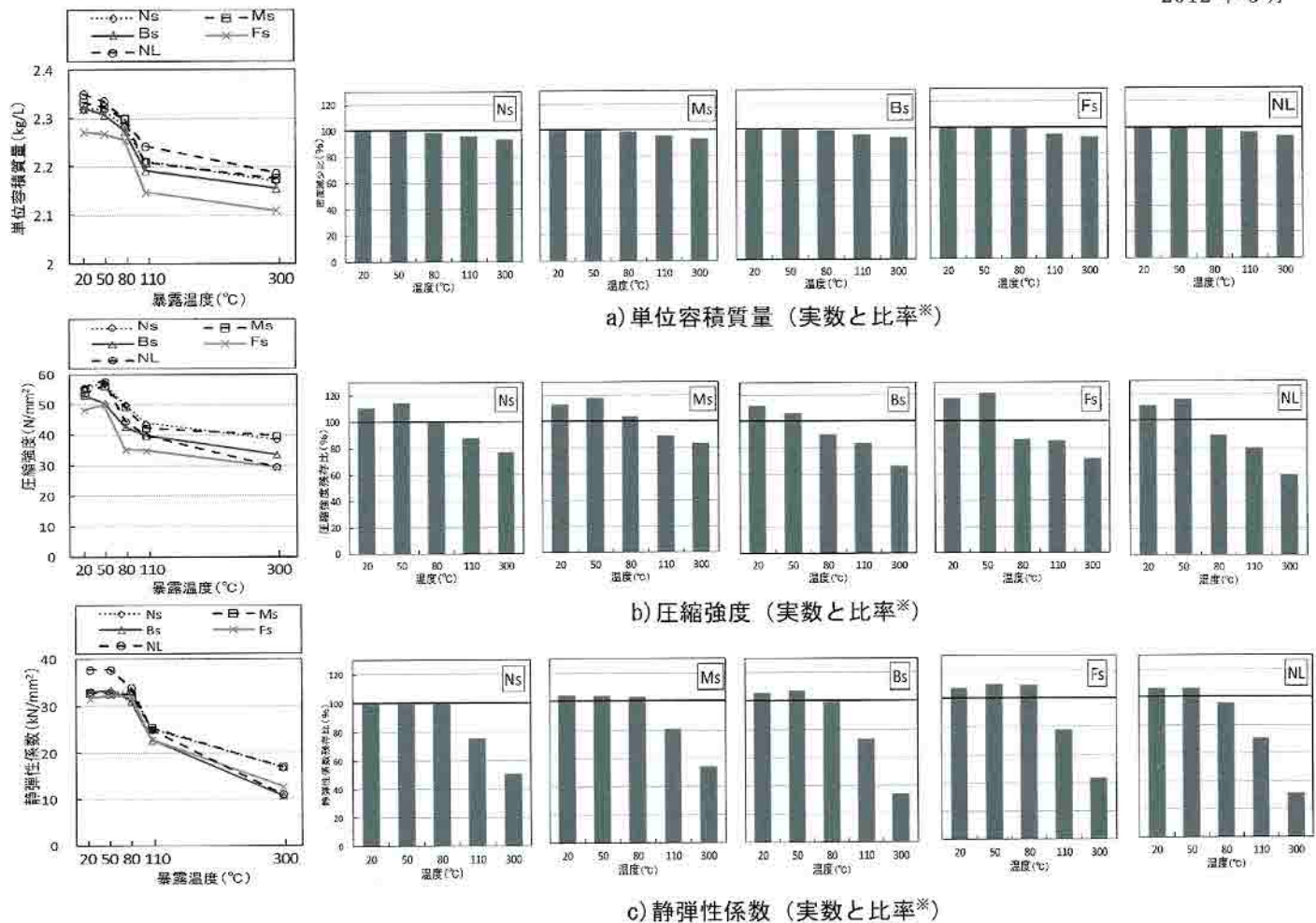


図3 高温暴露後の各種物性の変化

※高温暴露前 13W を 100% とする

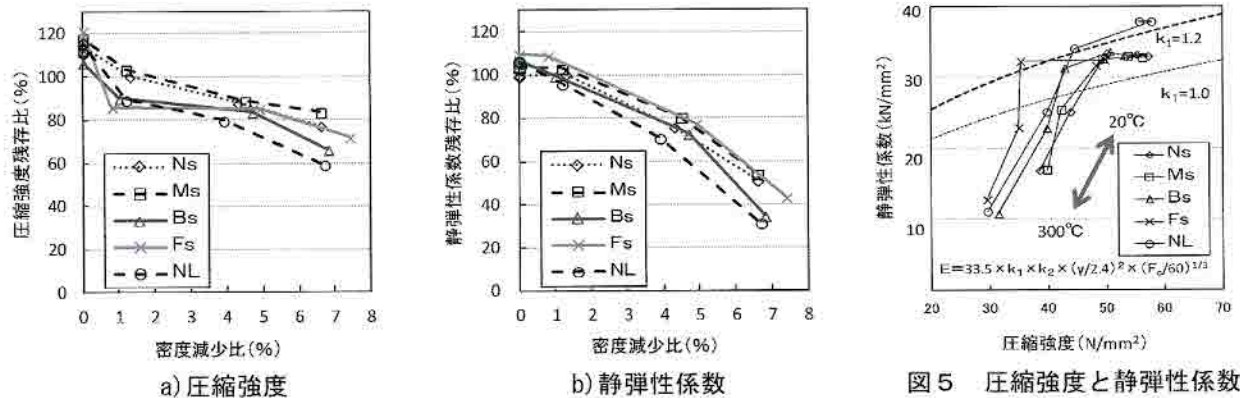


図4 密度減少比と残存比

3.5 高温暴露後の静弾性係数の変化

図3 c)に高温暴露後の静弾性係数の実数と比率を示す。実数から見ると、石灰を加えた NL 種は 20, 50℃では大きな値を示しているが 80℃から徐々に低下していき、300℃では急激に低下する。他コンクリート種も 80℃までは 20℃と殆ど変わらない値を示しているが 110℃からは急激に低下する。残存比から見ると、20℃供試体は、Ns 種に関しては高温暴露前と比べ静弾性係数は変わらない。他のコンクリート種は高温暴露前と比べ若干ではあるが数値が上がっている。80℃までは残存比が 100%以上が

100%付近にあるが、110℃からは殆どのコンクリート種の供試体が、残存比が 20%以上低下している。Ns, Ms, Fs 種は 80℃までは数値が一定であり、むしろ Fs 種に関しては 50, 80℃で残存比が 20℃に比べ高い値を示している。しかし高温になるとまた低下する。特に Bs, NL 種に関しては高温での残存比低下が大きい。300℃においては、Bs, NL 種ともに加熱前と比べ 60%以上も低下している。NL 種は今回実験に使用したコンクリート種の中で一番静弾性係数の低下が大きいといえる。

3.6 高温暴露後の密度減少比と強度特性

図 4 に高温暴露後の密度減少比と圧縮強度残存率および静弾性係数残存率を示す。圧縮強度は密度減少比が 4, 5% 程度までであれば 80% の残存比を維持している。Ns, Ms は 7% 程度の密度減少比でも約 80% の残存比を維持しているが他コンクリート種は残存比が低下する。Ms 種に関しては今回使用したコンクリートの中では密度減少比に対する残存比低下が一番少ないといえる。Fs 種においては密度減少値が 1% の早い段階から残存比が 80% 付近まで低下するが、1% から 5% までは残存比がほとんど変わらない。NL 種においては 4% の段階からすでに残存比が 80% を下回っている。圧縮強度は密度減少比が 0~1% 程度でも、残存比に大きな変化をもたらす。一方静弾性係数は密度減少比が 4, 5% 程度から残存比が 80% を下回る結果となった。静弾性係数も NL 種は密度減少比 3% の早い段階から残存比 80% を下回る。Fs 種に関しては今回使用したコンクリートの中では密度減少比に対する残存比低下が一番少ないといえる。静弾性係数は密度減少比 0~1% における残存比の大きな低下は圧縮強度に比べて少ない。

3.7 高温暴露後の圧縮強度と静弾性係数の関係

図 5 に高温暴露後の圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は NewRC 式(図中)に従い推移している。推定値は $k_1=1.0$, $k_2=1.0$ (Ns, Ms, Bs, Fs), $k_1=1.0$, $k_2=1.2$ (NL) を用い、 γ および F_c には供試体密度、圧縮強度の実測値をそれぞれ用いて算出した。 $(\gamma=2.3)$ 20°C, 50°C 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°C 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。特に Bs, Fs, NL 種は 300°C で推定式の危険側に大きく乖離する。

P: ボルトラングナイト $[Ca(OH)_2]$ CA: カルシウムアルミネートハイドレート $[4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O]$
E: エトリンガイト $[Ca_2A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O]$ M: 雲母 C: 緑泥石 F: 長石

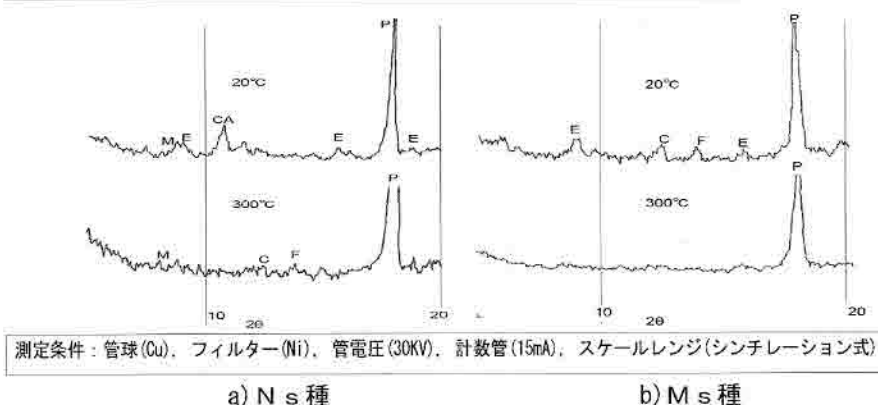


図 6 粉末 X 線回折図

3.8 高温暴露前後の粉末 X 線回折

図 6 に Ms, Ns 種の 300°C 暴露供試体の高温暴露前(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ト(CA)の回折ピークがみられるが、300°C 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

- 1) コンクリート種によっては、完全封緘で高温暴露した場合、20°C より 50°C 暴露の方が圧縮強度が高いものがある。
- 2) コンクリート種によっては乾燥による水分の移動が殆どない 80°C 付近で圧縮強度の急激な低下がみられるものがある。
- 3) 圧縮強度は、蓄熱、高温暴露による密度減少比が 0~1% 程度でも、残存比に大きな変化をもたらす。
- 4) 石灰を用いた NL 種は、高温暴露前は静弾性係数が他コンクリート種に比べて高いが、300°C 高温暴露後では急激に低下する。
- 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、2003.09, pp583~584

謝辞

本研究の実施にあたり、地質鉱物エンジニアリング・丸章夫博士に粉末 X 線回折試験の実施協力をいただいた。

- * 1 工学院大学建築都市デザイン学科 学部 4 年
- * 2 工学院大学建築学部建築学科准教授 博士(工学)
- * 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