

論文

[1171] 高炉および普通セメントペーストの短時間耐熱性に関する
実験研究

正会員 笠井 芳夫 (日本大学建築工学科)

正会員○湯浅 昇 (日本大学建築工学科)

諸岡 等 (新日鐵化学高炉セメント技術センター)

杉崎 茂 (日本大学大学院)

1. はじめに

構造体コンクリートの耐熱性に関する研究は、従来から多数行われている[1]～[3]。筆者らは、これまで鉄筋継ぎ手のうち、ねじ式カップラー継ぎ手に注入するセメントペーストの耐熱性・耐火性についての研究を行った経緯がある[4]。本研究は、これまでに得られた知見をもとに、比較的短時間の加熱に対するセメント硬化体の性状を検討するものである。ここでは、普通ポルトランドセメント及びこれに高炉スラグ微粉末を添加したセメントを用い、水セメント比を変え硬化体を作製した。この硬化体について加熱温度を 600℃以下に設定し、加熱温度の違いが強度に及ぼす影響を実験した。更に、この強度変化を硬化体の物理・化学性状の変化に基づき検討した。

2. 実験概要

2. 1 実験計画

これまで高炉スラグ微粉末を混和材として用いて耐熱性を向上させることを目的として、600℃加熱後の残存強度に及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率の影響を実験した[4]。この実験結果によると、高炉スラグ微粉末の置換率を50%とした高炉セメントは、強度残存率が高いことが認められた。しかし、加熱による強度変化のメカニズムの解明及び 600℃未満の加熱温度での強度性状については、明らかにしなかった。そこで、この高炉セメント(置換率50%)と普通ポルトランドセメントを用い、高強度コンクリートで用いられる、極めて低い水セメント比 22%から 45%の範囲の硬化体を作製し、これらを 100, 200, 300, 400, 500, 600℃で加熱し、強度変化を実験した。更に、この強度変化のメカニズム解明のため硬化体から採取した試料について、粉末X線回折、走査型電子顕微鏡による組織観察、TG(熱重量変化)、DTA(示差熱分析)及び細孔構造について検討した。

2. 2 実験方法

(1) 使用材料

使用した材料を表-1に、セメント及び混和材の化学成分を表-2に示す。高炉セメントは、セメント及び高炉

表-1 使用材料

材料	種類・性質
セメント	(社)セメント協会調整研究用ポルトランドセメント
混和材	新日鐵化学(株)製 高炉スラグ微粉末(二水石膏4.2%含) “エスメント” 粉末度4330 (cm ² /g)
混和剤	竹本油脂(株)製 ナフレン系高性能減水剤 “ホ-ル7712510-AN”

表-2 化学成分 (JIS R 5201-1981)

材料	化 学 成 分 (%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
普通ポルトランドセメント	21.4	4.9	2.9	—	64.4	1.7	2.3	0.17	0.72	0.33	0.11	0.08	0.012
高炉スラグ微粉末	31.7	13.2	—	0.3	42.5	5.9	2.0	—	—	—	—	—	—

スラグ微粉末を 1:1 の重量比で、V 型混合機により 30 分混合した。

(2) 試験体の作製と加熱

試験体は JIS R 5201 の凝結試験用ペーストに準じ練り混ぜた。フロー値が 180 を下回るものについては、 180 ± 10 になるように高性能減水剤を添加した（表-3）。成型は、 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ の 3 連型枠を用いて行い、 20°C 恒温室において 28 日間封かん養生した。

表-3 高性能減水剤の混入量及びフロー

w/c (%)	普通ポルトランドセメント		高炉セメント	
	添加量 (%)	フロー値	添加量 (%)	フロー値
2.2	2.0	170	2.0	172
2.3	1.0	175	0.9	172
2.5	0.5	177	0.6	176
3.0	0.0	183	0.0	181
3.5	0.0	207	0.0	205
4.0	0.0	234	0.0	228
4.5	0.0	269	0.0	253

* 高性能減水剤のセメントに対する混入量

試験は、材令 28 日に無加熱試験体を除き、 105°C で絶乾とし、 200°C 以上の加熱を与える場合、再び常温から電気炉に入れ加熱速度 $5^\circ\text{C}/\text{分}$ で昇温し、所定の温度で 2 時間保持した。なお、温度は炉内の雰囲気温度として管理した。冷却は炉内冷却とした。

(3) 強度試験

JIS R 5201 に準じ、曲げ及び圧縮強度試験を行った。

(4) 強度以外の性状の把握

強度試験後の試験体を用い 2.5 ~ 5 mm の試料を採取し、この試料について、①粉末 X 線回折による水和生成物定性分析、②走査型電子顕微鏡による水和生成物の観察、③TG 及び DTA（昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{分}$ ）、④水銀圧入法による細孔構造の測定を行った。

3. 加熱による性状変化

3.1 強度性状

加熱温度と圧縮強度との関係を図-1 に示す。普通ポルトランドセメントペースト（以下、普通ペーストと呼ぶ）、高炉セメントペースト（以下、高炉ペーストと呼ぶ）とも加熱温度が上昇す

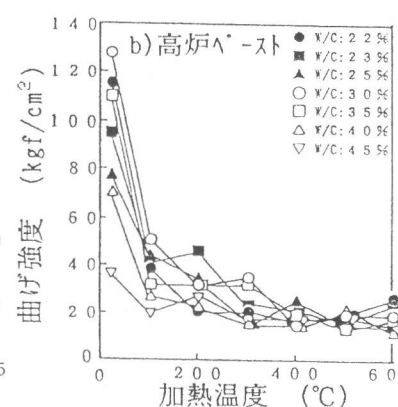
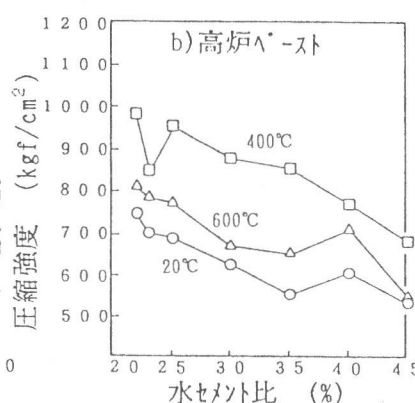
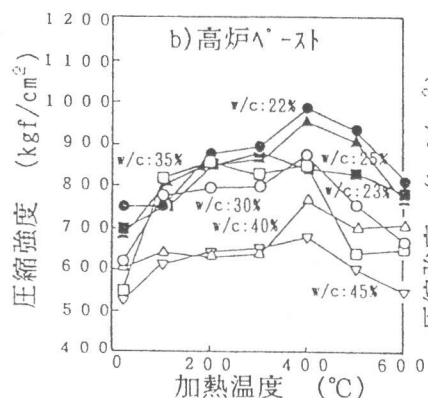
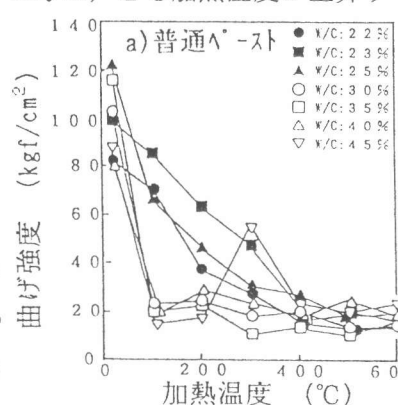
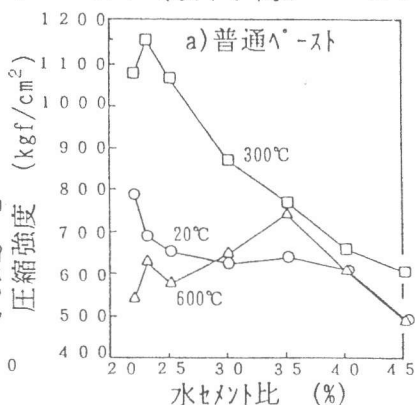
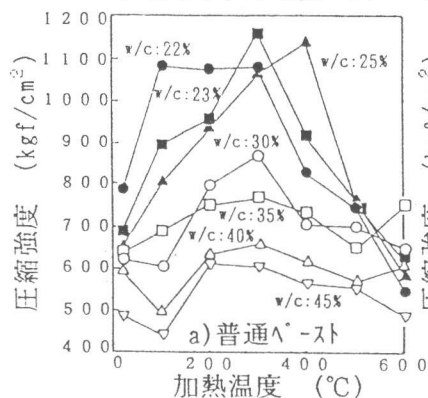


図-1 加熱温度と圧縮強度

図-2 水セメント比と圧縮強度

図-3 加熱温度と曲げ強度

るに従い圧縮強度は一旦増加し、その後減少する傾向を示した。圧縮強度の最大を示す加熱温度は普通ペーストでは 300℃、高炉ペーストでは 400℃ であった。図-2によると普通ペーストは低水セメント比ほどこの変化が大きいことが顕著であった。また、600℃ 加熱後の強度を見ると高炉ペーストはどの水セメント比でも無加熱での強度以上の強度を保持していたが、25%以下の水セメント比の普通ペーストでは無加熱強度を下回った。これらの結果を総合すると、高炉ペーストは普通ペーストに比べ加熱では圧縮強度の変化が小さく、かつ、600℃ 以下の加熱に対し無加熱での強度に比べ圧縮強度の低下がみられないことが分かる。また、曲げ強度は加熱を受けることにより著しく低下した(図-3)。これは脱水によるクラックの発生によるものである[1]。

3. 2 粉末X線回折

X線回折結果を図-4に示す。無加熱～100℃ でのカルシウムアルミノサルフェート系水和物の消失、ハイドロガーネットの 100℃での出現と 300℃での消失(高炉ペースト)、更に、普通ペーストでは 600℃で CaOが認められた。

3. 3 走査型電子顕微鏡による組織観察

加熱温度の上昇によりエトリンガイトの形骸化及び消失、水和物の微細化及び水和組織の多孔化が観察された(写真-1)。

3. 4 TG及びDTA

TG曲線を図-5に、DTA曲線を図-6に示す。また、図-7は、DTAによる、450℃付近の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の分解に伴う吸熱量比(普通ペースト $w/c=23\%$ 無加熱基準)と試験体加熱の際の加熱温度の関係を示したものである。無加熱から加熱に伴い 300℃まで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の吸熱量比の増加が観察されたが、更に加熱温度を上げた試験体の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が減少したことが分かる。前者は発生した水蒸気による水和反応の進行と考えられ[5]、後者は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の熱分解である。

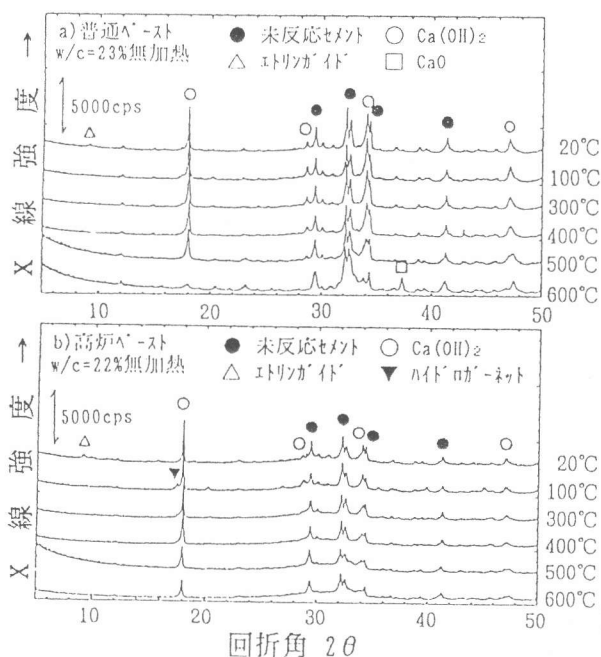


図-4 X線粉末回折結果

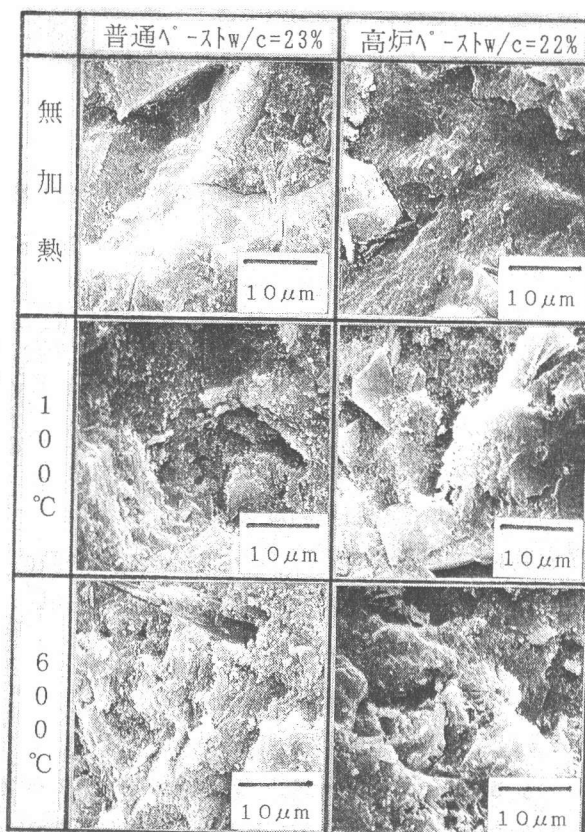


写真-1 電子顕微鏡観察結果

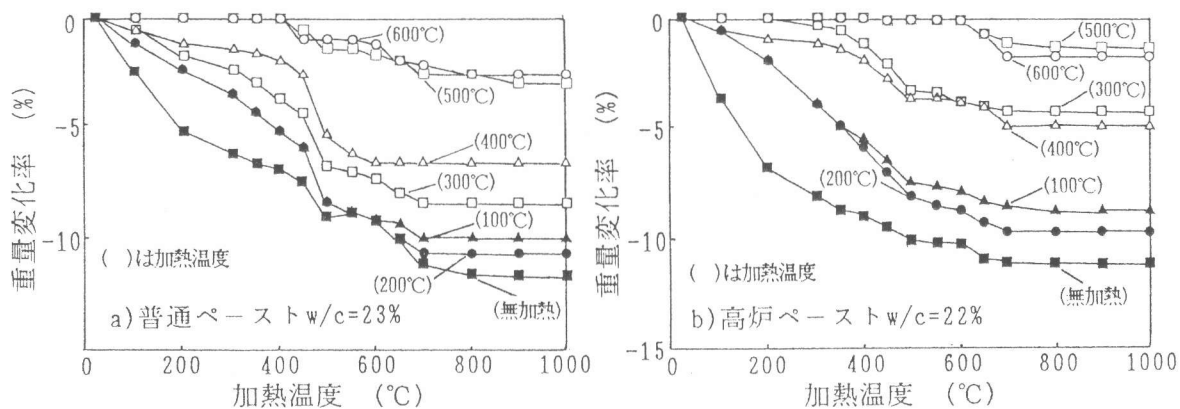


図-5 TG曲線

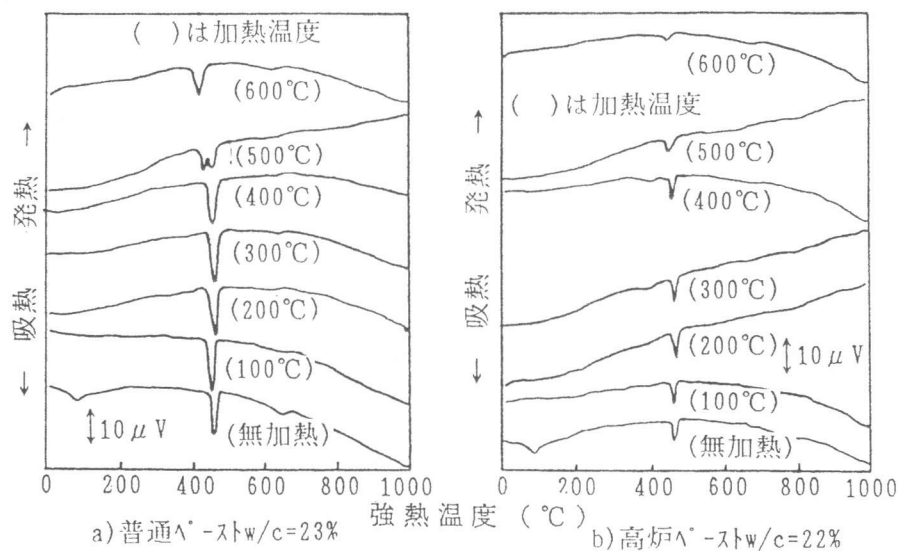


図-6 DTA曲線

3.5 細孔構造

細孔構造の一例を図-8に示す。また、無加熱からの変化量の細孔分布を図-9に示す。高炉及び普通ペーストとも加熱温度の上昇と共に、半径 200 Å 以下の細孔が減少し、200~3200 Å 程度の範囲の細孔が増加する傾向がある。特に、400 °C を越えると 550 Å 以上の細孔量の増加が著しい。また、普通ペーストと高炉ペーストの変化を比較すると、高炉ペーストが安定していることが分かる。更に図-10によると、特に普通ペーストの場合、無加熱~400°C の細孔径分布の変化は、主に自由水の脱出及び C-S-H などからの脱水、また図-11より 400~600°C の変化は主に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の熱分解に起因すると考えられる。

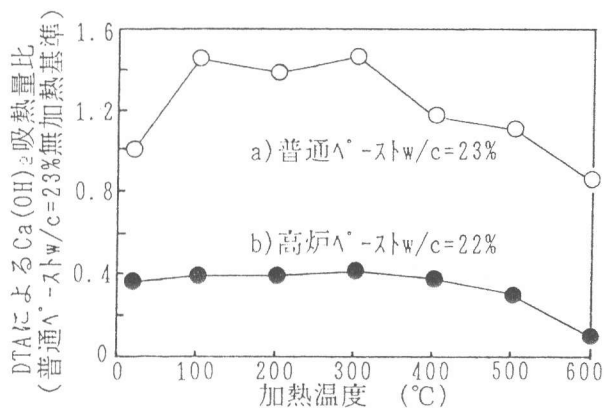


図-7 加熱温度とDTAによる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸熱量比

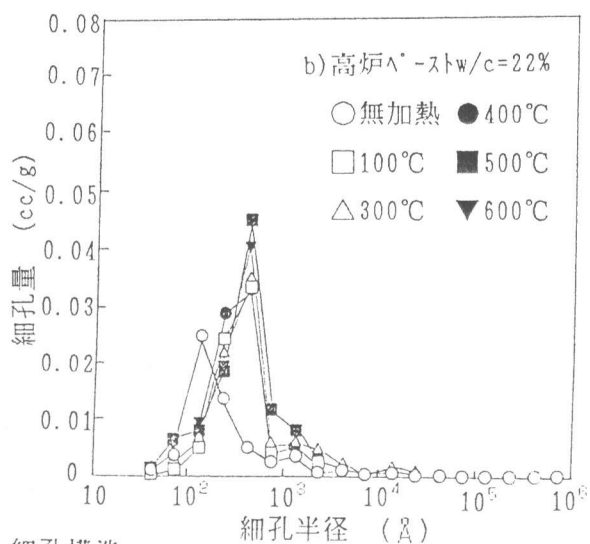
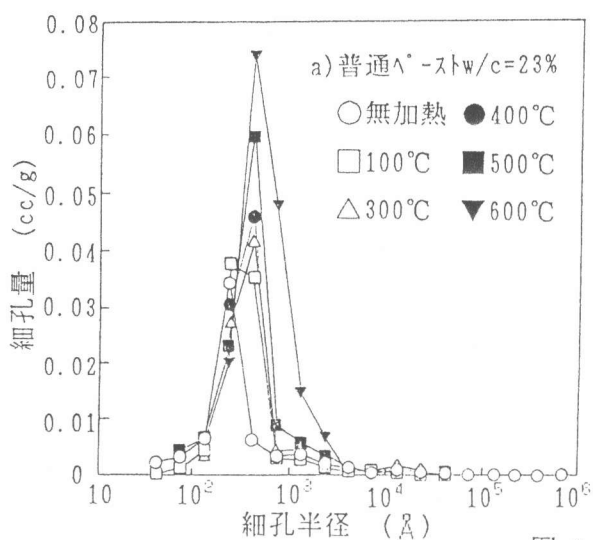


図-8 細孔構造

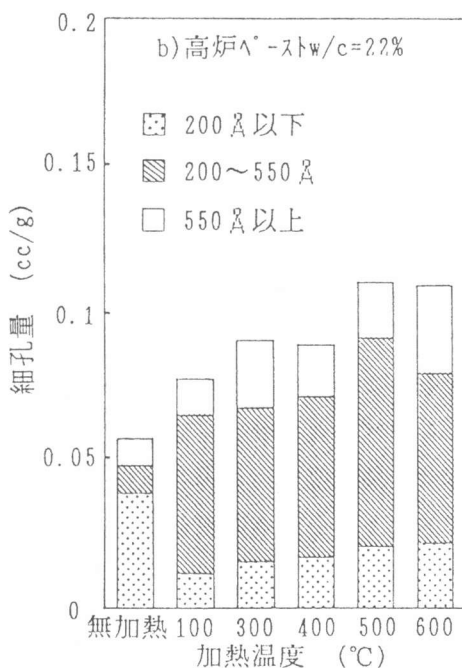
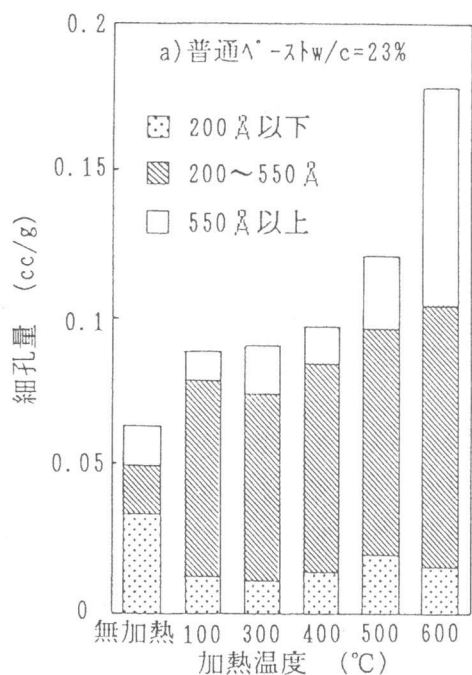


図-9 加熱による細孔量の変化

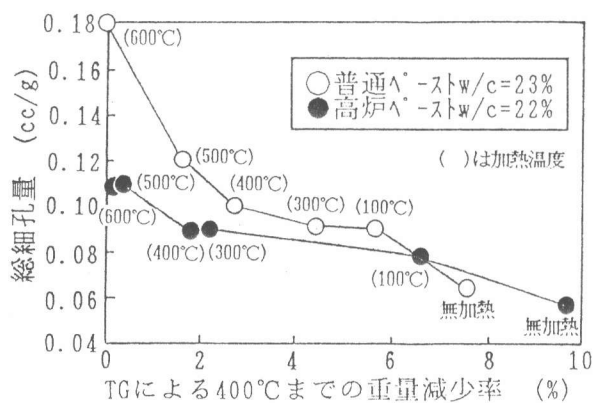


図-10 TGによる400°Cまでの重量減少率と総細孔量

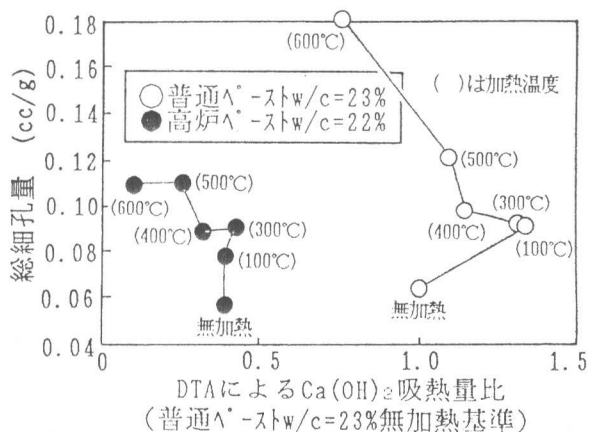


図-11 DTAによるCa(OH)₂吸熱量比と総細孔量

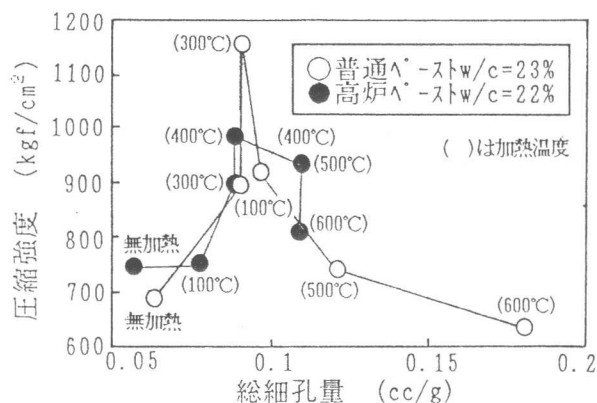


図-12 総細孔量と圧縮強度

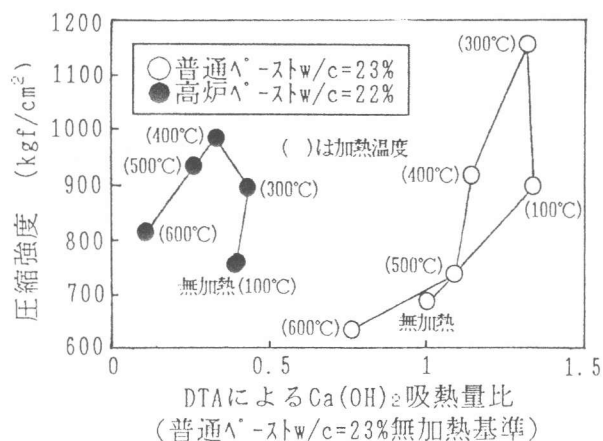


図-13 DTAによるCa(OH)₂吸熱量比と圧縮強度

4. 加熱による強度変化と他の性状変化

図-12に総細孔量と圧縮強度の関係、図-13に示差熱分析による、Ca(OH)₂の分解に伴う吸熱量比（普通ペーストw/c=23%無加熱基準）と圧縮強度との関係を示す。

普通ペーストでは、300℃まで加熱に伴い細孔量は増大するにもかかわらず、強度が上昇している。これは、脱水による固化や未水和セメントの若干の水和の影響と考えられる[1]。更に、温度の上昇により、Ca(OH)₂の熱分解及びそれに伴う細孔量の増大により強度は低下することが分かる。また、高炉ペーストではCa(OH)₂の熱分解量も少なく、結果として増加する細孔量も少なく、600℃加熱によっても強度が保持されている。

5. まとめ

実験及び考察により、次のことが明らかになった。

- (1) 加熱により曲げ強度は著しく低下する。
- (2) 圧縮強度は加熱温度に対し極大値をもち、普通ポルトランドセメントペーストの場合は300℃、高炉セメントペーストの場合は400℃で最大の強度を示した。
- (3) (2)の加熱に伴う300℃、400℃までの強度上昇は、脱水による固化や未水和セメントの水和によるものと考えられる。また、それ以上の加熱に対しては主としてCa(OH)₂の熱分解、及びそれに伴う細孔量の増加により強度が低下することが明らかになった。
- (4) 元来Ca(OH)₂の生成量の少ない高炉セメントペーストでは、普通ポルトランドセメントペーストに比べ熱的变化が小さく、結果として加熱後の強度が安定している。

参考文献

- 1) 田中弘文・戸谷陽一・斉藤 豊：セメント硬化体の加熱後の性質と再水和、セメント技術年報、Vol. 36, No. 5 pp. 45-48、1982
- 2) 原田 有・五十嵐 泉：加熱された各種骨材コンクリートの強度性状について、セメント技術年報、Vol. XXX, No. 55 pp. 230-233、1976
- 3) 依田彰彦：産業副産物高炉スラグのコンクリート用セメント、混和材、骨材への有効利用に関する実験研究、研究論文、pp. 89-98、1983. 9
- 4) Yoshio Kasai, Shin Terauchi and Hiroki Wami: Experimental Study on Heat-resisting Cement Using Granulated Blast Furnace Slag and Portland Cement, 2nd Beijing International Symposium on Cement and Concrete, 1989. 9
- 5) 深谷泰文・中井善治郎・峰岸敬一：セメント硬化体の加熱による強度変化、セメント技術年報、Vol. XXX, No. 15 pp. 81-85、1976