

高温加熱されたコンクリートの力学的特性と総細孔量との関係

長尾 寛博 中根 淳

Relationships between Mechanical Properties and Total Pore Volumes of Concrete Subjected to High Temperature

Kakuhiro Nagao Sunao Nakane

Abstract

It is normally recognized that the strength and elasticity of concrete subjected to high temperature of more than 200°C are reduced compared with those at atmospheric temperature. This is surmised to be caused by deterioration due to migration of free water and crystalline water in the concrete. However, few studies have been made concerning the mechanisms of deterioration. With such a situation, total pore volume was selected as an index of the alteration of concrete due to heating and considerations were given to the relationships with the compressive and splitting tensile strengths and elastic modulus of the concrete subjected to rapid heating up to 600°C.

As a result, proportional relationships between the increases in the total pore volumes and decreases in strength and elastic modulus were observed.

概 要

200°Cを超える高温で加熱されたコンクリートの強度・弾性係数は、常温値に比較して低下することが一般的に認められている。これは、高温によるコンクリート中の自由水、結晶水などの水分移動に伴うコンクリート組織の変質によると推察されるが、劣化のメカニズムについてはまだ十分な検討がなされていない。

そこで、コンクリートの高温加熱に伴う変質の指標として総細孔量を取りあげ、600°Cまで急速加熱されたコンクリートの強度・弾性係数との関係を検討した。

その結果、総細孔量は加熱温度の上昇とともに増大し、圧縮強度・弾性係数・割裂強度の劣化と密接な関係のあることを示した。

1. はじめに

火災などにより高温を受けたコンクリート構造物の健全性評価のためには、高温下のコンクリートの物性評価が必要となる。

そこで、高温を受けるコンクリートの圧縮強度・弾性係数・割裂強度の劣化評価の指標として、加熱前後の細孔分布の変化に着目し、高温によるコンクリートの変質が著しいと思われる600°Cまで急速加熱されたコンクリートの総細孔量の変化と圧縮強度・弾性係数・割裂強度との関係を調査した。また、加熱後のコンクリート内部のマイクロクラックの発生状況を観察し、コンクリートの高温劣化のメカニズムについても考察した。

2. 実験概要

2.1 調査項目

加熱前後のコンクリートについて以下の項目を調査した。

- ① 圧縮強度, ② 弾性係数, ③ 割裂強度,
- ④ 細孔分布, ⑤ 熱重量分析, ⑥ マイクロクラックの発生状況

2.2 使用材料およびコンクリートの調査

a. 使用材料

実験で使用した材料は以下の通りである。

セメント：普通ポルトランドセメント，フライアッシュセメントB種，高炉セメントB種，中庸熱ポルトランドセメント，アルミナセメント

骨材：粗骨材－硬質砂岩，細骨材－山砂

混和剤：AE減水剤

b. コンクリートの調査

コンクリートの調査条件は以下の通りとし、試し練りによって表-1に示す調査を用いた。

スランブ：12±1.5 cm

水セメント比(W/C)：45, 55, 65%

空気量：4±1%

2.3 加熱条件

加熱温度，加熱方法，加熱開始材令，加熱前養生条件，加熱速度などの加熱条件は表-2に示す通りである。

なお，300°Cは調査上の水セメント比55%についてのみ圧縮強度，弾性係数，割裂強度の試験を実施した。

表一1 コンクリートの調合

調合No.	セメントの種類	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	容 積 (ℓ/m ³)			重 量 (kg/m ³)			混 和 剤 AE減水剤(cc)
						セメント	砂	砂利	セメント	砂	砂利	
A	普通ポルトランドセメント	45	12	44.1	167	117	298	378	371	781	998	0.928
B		55	"	46.6	161	93	331	380	293	867	1004	0.733
C		65	"	48.5	159	78	351	373	245	920	985	0.613
D	フライアッシュB種セメント	45	12	41	170	118	276	396	378	737	1045	0.945
E		55	"	43	164	93	302	401	298	806	1059	0.745
F		65	"	45	162	78	324	396	249	865	1005	0.623
G	中庸熱ポルトランドセメント	45	12	44	167	116	298	379	371	781	1001	0.928
H		55	"	46.5	161	94	329	378	293	861	998	0.733
I		65	"	48.5	159	76	352	374	245	922	987	0.613
J	高 炉 セ メ ン ト B 種	45	12	44.1	166	121	297	376	369	778	993	0.923
K		55	"	46.5	161	96	330	380	293	865	1002	0.733
L		65	"	48.8	158	80	352	369	243	922	974	0.608
M	アルミナセメント	45	12	44.5	167	124	298	372	371	781	982	0.928
N		55	"	46.5	161	98	330	380	293	865	1002	0.733
O		65	"	48.8	159	82	349	371	245	914	979	0.613

2.4 細孔分布の測定方法

細孔分布は、加熱後の圧縮強度試験用供試体を粉砕し、5mm目のフルイでスクリーニングした後、水和反応を停止させるために細孔分布の測定を行なうまでアセトンに浸し、測定時に絶乾状態とした後、水銀圧入法により測定した。

3. 実験結果および考察

実験結果を図一1～12および写真一1～4に示した。ここで、加熱前後の圧縮強度・弾性係数・割裂強度については加熱前の値との比（以下残存比と称する）で評価した。

3.1 Spalling (爆裂破壊)

今回の実験条件では、300℃加熱時には spalling 現象が認められなかったが、600℃加熱ではかなりの頻度で圧縮強度および割裂強度試験用供試体に spalling が発生した。特に普通ポルトランドセメントおよびアルミナセメントを用いたコンクリートにおいて顕著で、次いでフライアッシュセメントB種、中庸熱ポルトランドセメントの順となった。また、水セメント比の小さいものすなわち強度の高いコンクリートに多く発生する傾向が認められた。

3.2 加熱後の圧縮強度

圧縮強度の結果を図一1に示す。

これより、圧縮強度の残存比に及ぼすセメント種別の影響は、300℃加熱ではアルミナセメントの残存比が最小値を示した他は80%程度の残存比で大差ない。アルミナセメントの大幅な強度低下は、高温加熱によって急速に生じた転移現象（3.5節参照）によると推察される。

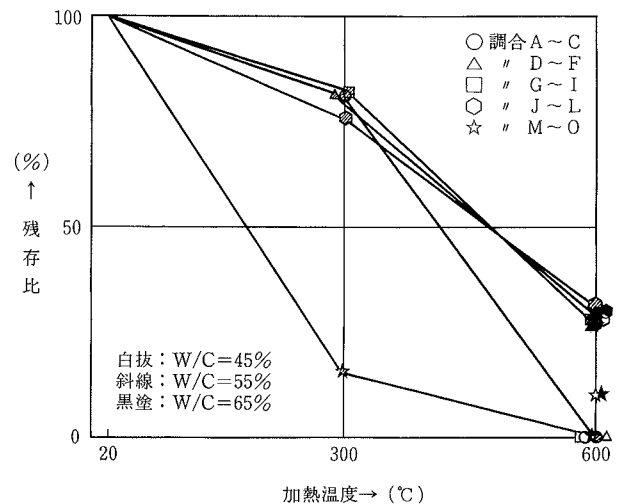
600℃加熱では、その残存比は30%以下となりセメント種別および水セメント比による差は明確ではない。

3.3 加熱後の弾性係数

弾性係数の結果を図一2に示す。これより、圧縮強度

表一2 加熱条件

項 目	条 件
1) 最高加熱温度	300℃, 600℃
2) 加熱方法	電気炉 (マッフル炉)
3) 加熱中の暴露条件	アンシール
4) 加熱期間	7日
5) 昇温速度	200℃/hr
6) 加熱前養生条件	20±3℃ 水中養生
7) 加熱開始材令	91日以降
8) 一実験条件当りの供試体数	3体
9) 供試体の寸法	・圧縮強度; φ100×200mm 弾性係数 ・割裂強度; φ150×150mm
10) 強度試験時温度	常 温



図一1 加熱温度と圧縮強度

の場合と同様300°C加熱ではアルミナセメントが最小値を示し、600°C加熱ではいずれのセメントとも残存比が10%未満となっており、セメント種別および水セメント比間の差はほとんど認められなかった。また残存比は圧縮強度よりもかなり小さい結果となった。

3.4 加熱後の割裂強度

割裂強度の結果を図-3に示す。これより、300°C加熱における残存比は約20~90%で、普通ポルトランドセメントの残存比が高く、アルミナセメントが最小値を示し、セメント種別間の差が認められる。600°C加熱における残存比は約20~30%で、セメント種別および水セメント比間の差はほとんど認められない。

3.5 細孔分布の測定結果

総細孔量と加熱温度との関係を一括して図-4に示す。

これより、各コンクリートとも加熱温度が高くなるに従い、総細孔量は増大する結果となっている。

総細孔量は、セメント種別および水セメント比により差があるが、常温では約40~60mm³/g、300°C加熱では約80~110mm³/g、600°Cでは約110~150mm³/g程度であった。

一方、加熱後の総細孔量を常温時の総細孔量との割合で示すと図-5となる。

これより、セメント種別により若干差があるが300°C加熱における増大率は概略150~250%、600°C加熱では200~350%程度となった。また、アルミナセメントでは明確ではないが、水セメント比が小なる程総細孔量の増加率が大となる傾向が見受けられる。この理由は水セメント比が小さい程結晶水が多いため、結晶水の逸散によって生ずる細孔量の増大が顕著なことによると推察される。

また、各セメント種別毎の細孔径分布をW/C=55%について図-6~10に示した。これより、常温供試体においては径の小さい細孔量が多いが、加熱温度が高くなるに従い径の大きい細孔量が増大している。例えば普通ポルトランドセメントでW/C=55%の場合、その細孔量は、常温供試体では細孔径が1.4~1.9×10⁴Å、300°C加熱供試体では2.4~3.2×10⁴Å、600°C加熱供試体では4.3~5.7×10⁴Åで最大となり、その量も加熱温度の上昇とともに増大している。

細孔径分布のパターンを各セメント種別間で比較すると、アルミナセメントでは常温時、300°C、600°C加熱時とも他のセメントに比較して径の大きな細孔量が多い傾向を示している。他のセメントについては大略類似のパターンを示している。

文献1)によると、ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおいては、300°C程度までにセメントゲルが崩壊し、120~600°Cで化学吸着水が放出される。特に、450~550°Cでポルトランドライト (Ca(OH)₂) が分解するとしている。これらを考慮すると、300°C加熱による細孔量の増大は主にセメントゲルの崩壊によるものと推察され、600°C加熱による細孔量の増大はセメントゲルの他、

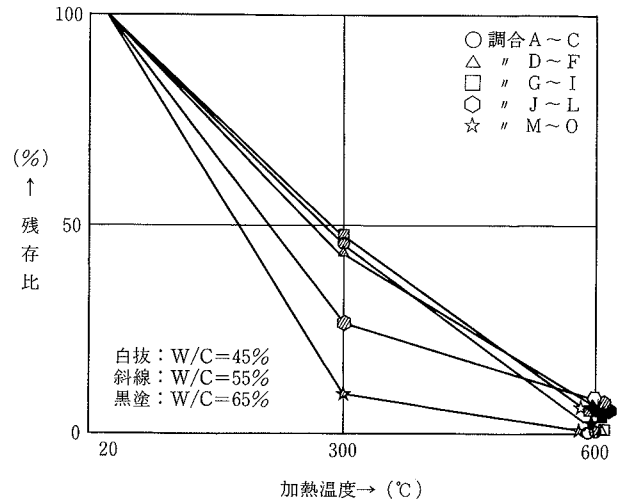


図-2 加熱温度と弾性係数

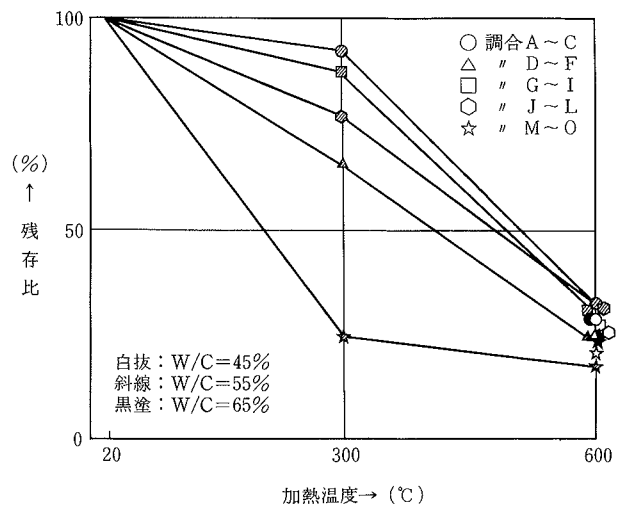


図-3 加熱温度と割裂強度

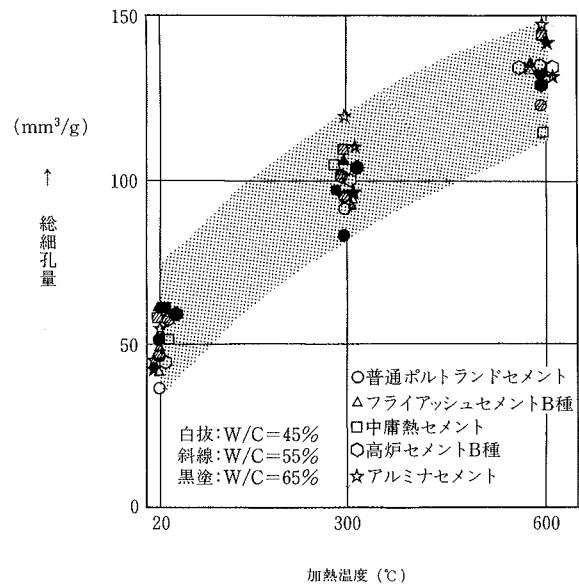


図-4 加熱温度と総細孔量

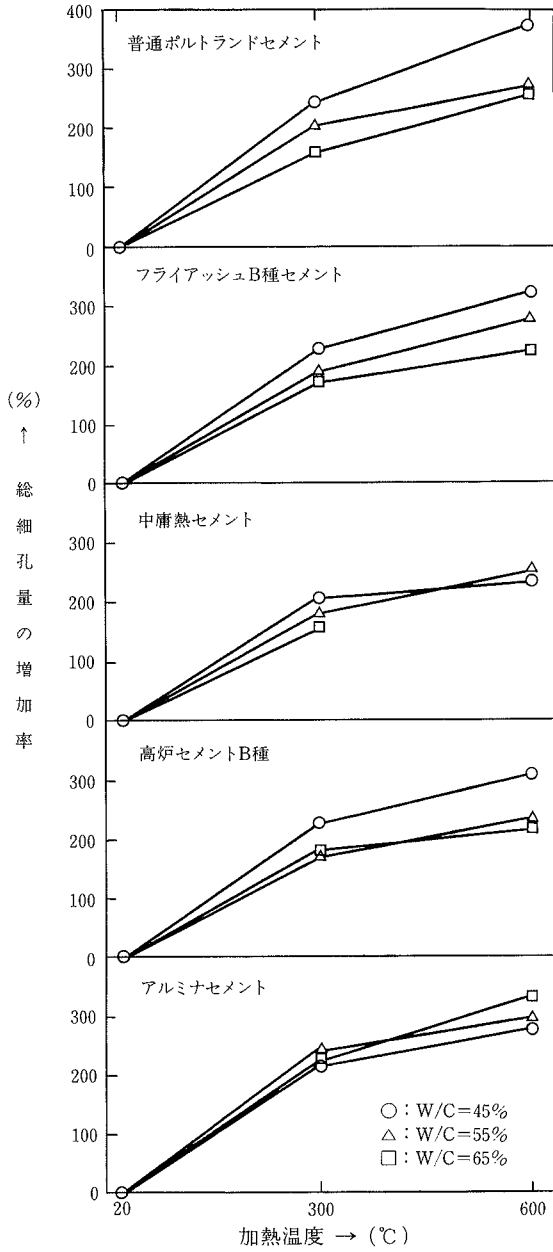


図-5 総細孔量の常温に対する増大率

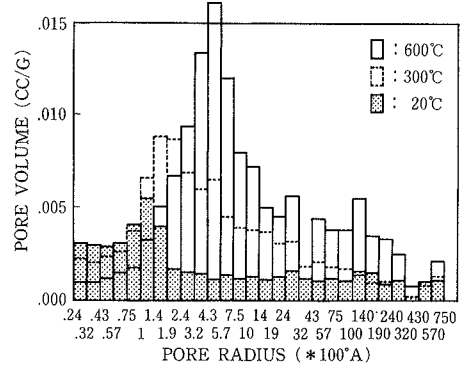


図-7 加熱温度と細孔分布 (フライアッシュセメント B種)

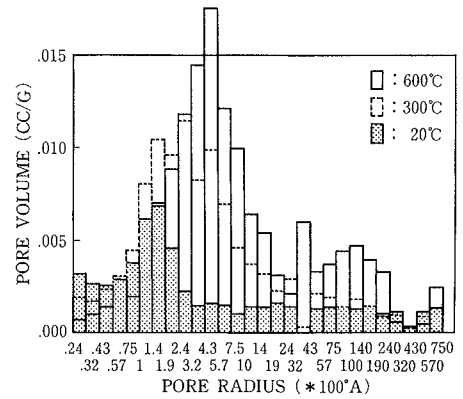


図-8 加熱温度と細孔分布 (中庸熱ポルトランドセメント)

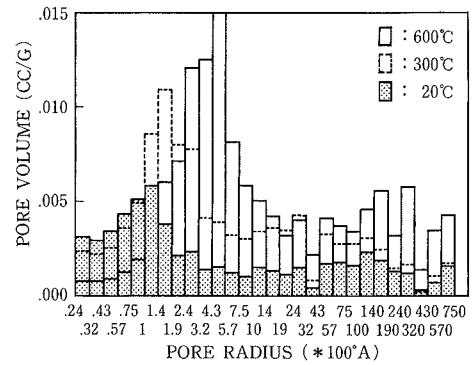


図-9 加熱温度と細孔分布 (高炉セメント B種)

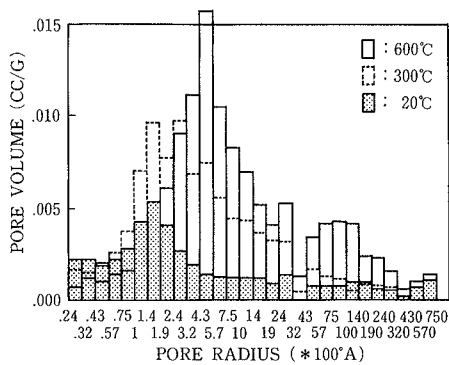


図-6 熱温度と細孔分布 (普通ポルトランドセメント)

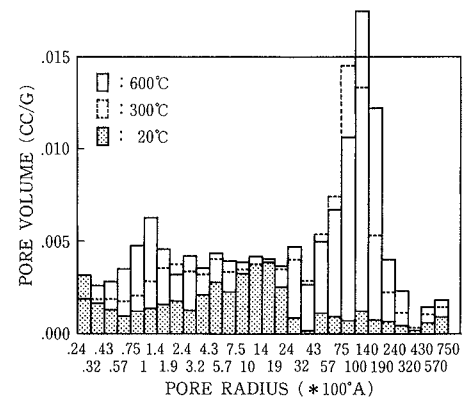


図-10 加熱温度と細孔分布 (アルミナセメント)

ポルトランドイトの崩壊によるものと考えられる。

これらの変化を確認するために、フライアッシュセメント B種を用いたコンクリート (W/C=55%) について行なった熱重量分析 (TGA) の結果を図-11に示す。

これより常温供試体の場合には、加熱温度の上昇に伴い顕著な重量減少を生じ、特に、400°Cを超えた時点でポルトランドイトが崩壊したことによると思われる重量減少 (図中の→印) が認められる。

すなわち、加熱温度の上昇に伴ってセメントゲルの崩壊およびゲル水の脱水が生じ、さらにポルトランドイトの崩壊が進行したことが推察される。300°C加熱供試体においても加熱温度の上昇に伴う重量減少が生じ、非加熱の場合と同様ポルトランドイトの崩壊と思われる重量減少 (図中の→印) が認められる。

600°C加熱供試体では、600°Cまでの重量減少は少なく、400°Cを超えても急激な重量減少は認められない。

これは、600°C加熱によってすでにポルトランドイトが崩壊していることによるものと考えられる。また、600°C以降若干の重量減少が認められるが、これは CHS 相の分解によるものと推察される。

一方、アルミナセメントの細孔径および細孔量が大となる理由としては、詳細は不明であるが、結晶水の逸散のほか、不安定な六方晶系アルミネート水和物 (CAH₁₀とC₂AH₈) が比重の大きい水和物 (C₃AH₆) へ転移する (高温加熱において急速に生ずる) ことにより、セメントペースト部の空隙率がかなり増大することに起因する³⁾と推察される。

これらの高温によるコンクリートの化学的な変質が、総細孔量の増大および力学的特性の劣化要因の一つになっていると考えられる。

3.6 総細孔量と強度・弾性係数との関係

総細孔量と圧縮強度・弾性係数・割裂強度との関係を図-12に示す。これより、加熱温度の上昇に伴う総細孔量の増大と強度・弾性係数および割裂強度の低下との間には明らかな関係が認められる。

すなわち、圧縮強度は総細孔量が増加するに従って低下し、総細孔量が2倍で圧縮強度は大略80%、2.5倍で20%程度の残存比となっている。

弾性係数については、総細孔量の増大に伴う残存比の低下は圧縮強度よりも顕著で、総細孔量の増加が約250%で、いずれのセメントも弾性係数の残存比はほとんど失われている。

また、総細孔量の増加率と割裂強度の残存比との関係は圧縮強度とほぼ類似の傾向を示している。

これらのことから、加熱温度の上昇に伴う総細孔量と力学的物性の変化の間には密接な関係のあることがわかる。

3.7 劣化のメカニズムに関する一考察

高温加熱されたコンクリートの圧縮強度・割裂強度・弾性係数は総細孔量の増大とともに急激な低下を示しているが、劣化の原因はペースト部の細孔量の増加の他、

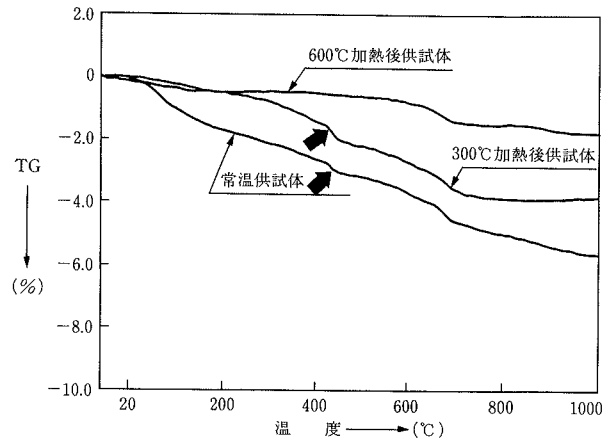


図-11 熱重量分析 (TGA) の結果

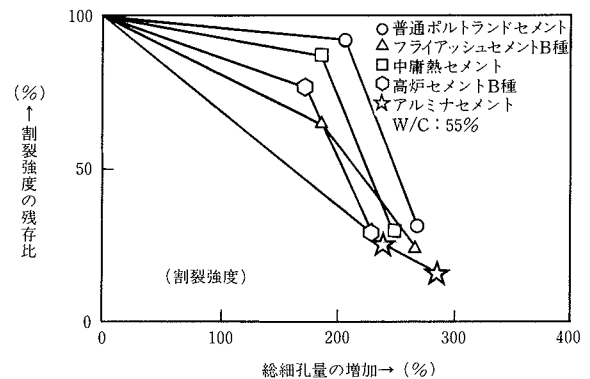
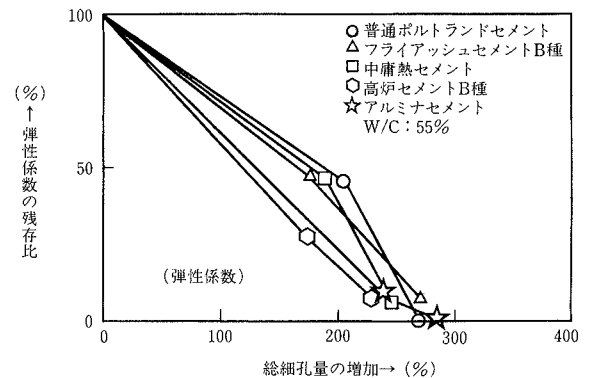
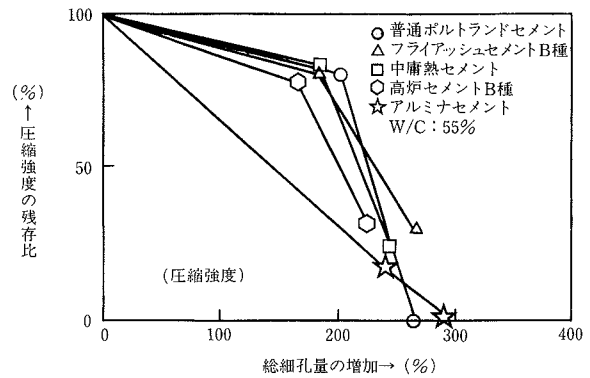
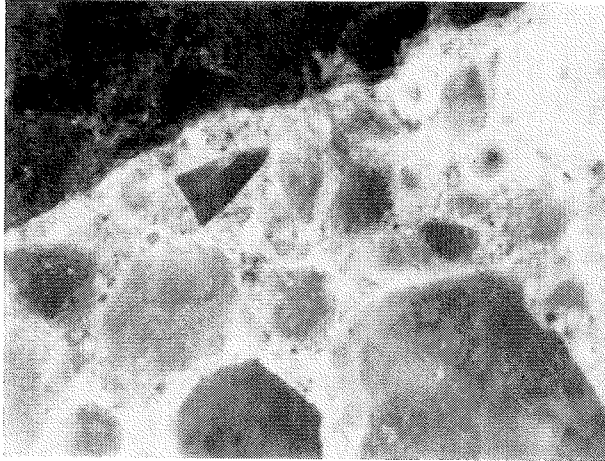
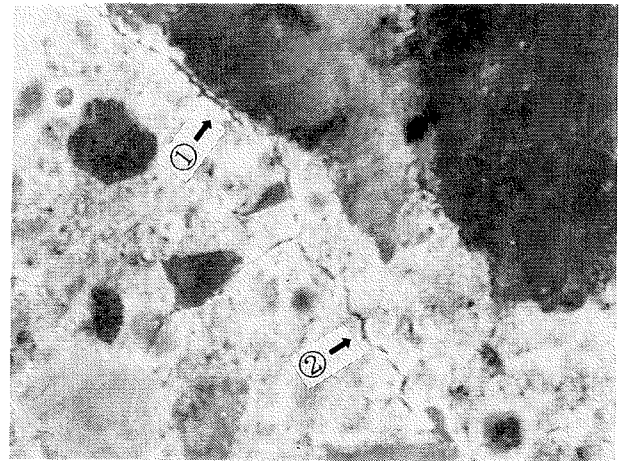


図-12 総細孔量と圧縮強度・弾性係数および割裂強度との関係



写真一 非加熱供試体の内部組織

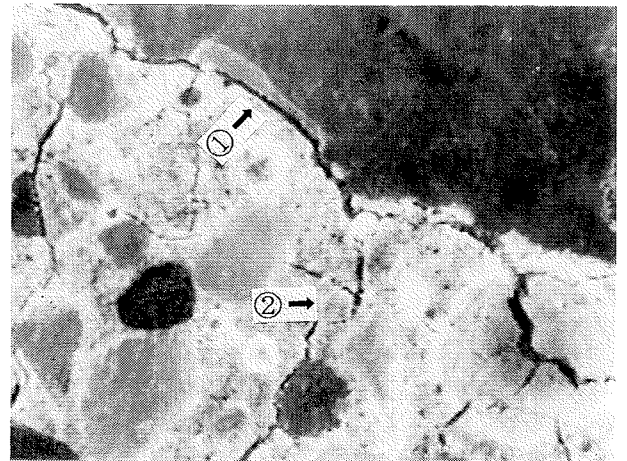


写真二 300°C加熱供試体の内部組織

コンクリート内部のマイクロクラックの発生などが関係していると推察される。

加熱前後のマイクロクラックの発生状況を、あらかじめ観察面を研磨した供試体を加熱し、顕微鏡により観察した。

写真一に常温供試体の内部組織、写真二に300°C加熱供試体、写真三に600°C加熱供試体の内部組織の拡大写真を示した。これより、常温供試体の内部にマイクロクラックの発生は認められないが、300°C加熱では骨材とペーストとの界面にマイクロクラックの発生が認められ(写真二の①→)、また、モルタルペースト部分にもマイクロクラックの発生が認められる(写真二の②→)。600°C加熱では、300°C加熱に比較して骨材界面にかなり顕著なクラックが発生し(写真三の①→)、またモルタルペースト部にも多数のマイクロクラックの発生が認められる(写真三の②→)。



写真三 600°C加熱供試体の内部組織

高温加熱を受けたコンクリートの力学的特性の低下は前述の総細孔量の増大に伴うモルタルペースト部の劣化の他、内部組織のマイクロクラックの発生による脆弱化によると考えられる。特に、顕著な弾性係数の低下は、細孔量の増大およびマイクロクラックの発生など、空隙量の増大がコンクリートひずみを増大させていることによると推察される。詳細については、マイクロクラックの定量的な評価も含めて今後の検討課題と思われる。

4. まとめ

高温加熱されたコンクリートの総細孔量と力学的特性との関係を検討した結果以下のことが指摘される。

- ① 高温加熱によってコンクリートの総細孔量は著しく増大する。
- ② 総細孔量の増大と力学的特性の劣化との間には明

確な関係が認められ、総細孔量がコンクリートの高温劣化を評価する上で指標になりうると考えられる。また、高温を受けたコンクリート構造物の品質評価への活用が可能と考えられる。

③ コンクリートの高温劣化は、総細孔量の増大および内部組織のマイクロクラックの発生が主要な原因と考えられる。

参考文献

- 1) U.シュナイダー著、森永繁監訳：コンクリートの熱的性質、技報堂、p.17~28、(1983)
- 2) 山田順治、他：わかりやすいセメントとコンクリートの知識、鹿島出版会、p.71~76、(1977)
- 3) 後藤幸正監訳：ネビルのコンクリートの特性、技報堂、p.74~85、(1979)