

論文 高温加熱を受けたコンクリートの養生方法と力学的性質

河辺 伸二^{*1}・一瀬 賢一^{*2}・川口 徹^{*3}

要旨:火災を受けた超高層RC造の安全性を評価するための基礎データとして,高温加熱後のコンクリートの養生方法の違いによる力学的性質への影響について実験的に検討を行い,以下のことがわかった。(1)自然冷却のモルタルとコンクリートの単位容積質量は加熱温度が高くなるほど低下する。(2)自然冷却に比べ,急速水冷と自然冷却後蒸気養生したモルタルとコンクリートの単位容積質量は大きく回復する。(3)自然冷却と急速水冷したモルタルとコンクリートの圧縮強度と弾性係数は,加熱温度が高くなるほど低下する。(4)自然冷却後蒸気養生したモルタルとコンクリートは圧縮強度と弾性係数の回復が見られる。

キーワード:高温加熱,急速水冷,蒸気養生,モルタル,コンクリート

1. はじめに

高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造(以下RC造)が多数設計・施工されてきている。RC造は,通常耐火構造として認められているが,コンクリートを使用する場合,火災時の高温加熱による力学的性質の低下が懸念される。このため高温加熱を受けたコンクリートの力学的性質の把握は,構造解析の精度を向上させる上できわめて重要である。さらには火災後の劣化診断や補修においても必要となる。

筆者らは,従来から高温加熱を受けたコンクリートの力学的性質のデータを蓄積¹⁻⁴⁾してきた。例えば,火災を受けた超高層RC建造物の安全性評価の基礎データとして,高温加熱を受けた高強度コンクリートの各種の強度特性(圧縮強度,曲げ強度,引張強度),弾性係数等を測定し,考察・検討した¹⁾。また,被災後の補修・補強の評価の基礎データとして,高温加熱を受けた高強度コンクリートの水中養生と気中養生の強度回復の違いを検討した²⁾。

火災を受けた超高層RC造の安全性を評価するための基礎データとして,火災時のコンクリートの温度が自然に常温に戻る場合と消火活

動によりコンクリートが急速に水冷される場合を想定する。またコンクリートが自然に常温に戻った後蒸気養生を行うことにより,火害劣化したコンクリートの強度や弾性係数の回復がどの程度可能であるかの検討は重要である。

そこで本研究では,高温加熱後のコンクリートの養生方法の違いによる力学的性質への影響について,水セメント比・粗骨材の有無・加熱後の養生方法をパラメータとし,実験的に検討・考察を行った。水セメント比は高強度コンクリートを想定したW/C=30%と50%とした。高温加熱後の養生方法は,従来の実験方法と同一である自然冷却,加熱温度時からの急速水冷,自然冷却後蒸気養生する3水準を設定した。粗骨材の有無としてフレッシュコンクリートから粗骨材を取り除いたモルタルを用いた。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件は,表-1に示す水セメント比(W/C)2水準,加熱温度(基準となる20を含む)4水準,加熱後の処理は自然冷却・急速水冷・自然冷却+蒸気養生の3水準とした。

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 助教授 工博(正会員)

*2 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ長 博(工)(正会員)

*3 同 室長 工博(正会員)

2.2 使用材料と調合

普通ポルトランドセメント、細骨材に木更津産山砂（密度：2.60g/cm³）、粗骨材として青梅産砕石（硬質砂岩、密度：2.65g/cm³）を使用した。骨材の品質を表 - 2 に示す。高温加熱を受けるコンクリートの強度に及ぼす骨材の影響は無視できないが、 $f_c100\text{N/mm}^2$ 級まで十分適用できる骨材を使用した。混和剤は、 $W/C=30\%$ に対してポリカルボン酸系高分子化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤を、 $W/C=50\%$ に対してポリカルボン酸ポリエーテルポリマーと変性ポリオールを主成分とする AE 減水剤を使用した。

調合条件は、 $W/C=30\%$ については目標スランプフロー値を $55 \pm 10\text{cm}$ 、 $W/C=50\%$ では目標スランプを $21 \pm 2.5\text{cm}$ とした。目標空気量は、 $W/C=30\%$ では $2.5 \pm 1.0\%$ 、 $W/C=50\%$ では $4.0 \pm 1.0\%$ とした。各コンクリートの調合を表 - 3 に示す。

2.3 測定項目と測定方法

測定項目は、フレッシュ性状と表 - 4 に示す単位容積質量変化、圧縮強度、弾性係数（ヤング係数）とした。単位容積質量変化は電子天秤にて、外観観察は目視により行った。供試体寸法は、コンクリートとモルタルともに $100 \times 200\text{mm}$ を用い、供試体本数は各実験条件に対して 3 本とした。

2.4 打設と養生

コンクリートは、容量 100L 強制練りミキサを使用した。モルタルはコンクリートを練った直後、粗骨材のみを取り除く。打設翌日の脱型後は、28 日間 20 ± 3 の水中養生を行い、その後は材齢 70 日まで 20 ± 3 、 $80 \pm 5\%R.H.$ の恒温恒湿室内で湿潤養生とした。なおコンクリートのフレッシュ性状は、表 - 5 に示すように概ね目標のスランプ、スランプフロー、空気量を有するコンクリートを得ることができた。

2.5 加熱方法

加熱は、プログラム調節器付き電気炉を使用した。加熱時の供試体は、加熱中に水分逸散を

表 - 1 実験条件

項目	摘要	水準数
水セメント比	30% , 50%	2
加熱温度	20 , 200 , 400 , 600	4
加熱後の処理	自然冷却 , 急速水冷 , 自然冷却 + 蒸気養生	3

表 - 2 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	吸水率 (%)
S	木更津産山砂	2.63	2.67	1.38
G	青梅産砕石	2.65	6.84	0.64

表 - 3 コンクリートの調合

W/C (%)	単体量(kg/m ³)				混和剤 対セメント(%)
	W	C	S	G	
30	175	583	723	889	C × 1.15
50	170	340	802	987	C × 1.0

表 - 4 測定項目

測定時期	種類	測定方法
加熱前後	単位容積質量変化 圧縮強度 弾性係数	- JIS-A1108による JSCE-G502による

表 - 5 フレッシュ性状

W/C (%)	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm × cm)	単位容 積質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	温度 ()
30	-	58.0 × 58.5	2396	2.1	27
50	20.5	-	2314	3.5	26.5

表 - 6 本研究の記号の内容

記号	内容	記号	内容
no :	自然冷却	小文字 :	モルタル
ra :	急速水冷	大文字 :	コンクリート
st :	自然冷却	30 :	水セメント比 30
	+ 蒸気養生	50 :	水セメント比 50

認めるアンシール状態とした。加熱実験は、材齢 70 日から実施した。加熱速度は、既往の研究¹⁻⁶⁾を参考とし、供試体の内外温度差と供試体内の温度分布の不均一を小さくし、熱応力の影響を小さくするため 100 /hr とした。計画加熱温度到達後は、供試体内部温度が均一とな

るように計画加熱温度を24時間保持した。

2.6 加熱後の養生方法

(1)自然冷却：降温は、炉内のファンを作動させながら自然冷却とし、炉内の雰囲気温度が50以下になるまで供試体を炉内に放置した。測定は降温から5～12時間後常温下で行った。

(2)急速水冷：火災時の消火活動を想定し、各加熱温度時に水を用いて急速に冷却した。炉から取り出した供試体を、水の入ったバケツに投入し約2時間水中養生を行った。

(3)自然冷却+蒸気養生：自然冷却後の常温の供試体を48時間20水中養生し、その後所定の蒸気養生を行い、強度回復を考察した。蒸気養生の条件は、昇温速度10 /hrで50まで温度を上昇して5時間50の蒸気養生を行い、その後自然冷却を行った。蒸気養生後の自然冷却の温度は直線的に低下し、5時間30分後32であった。

表-6に本研究で用いる記号の内容を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 外観観察

コンクリート供試体、モルタル供試体ともに高温加熱時の爆裂を生じなかった。自然冷却の場合、コンクリート供試体、モルタル供試体ともに加熱温度600では供試体の全面にわたり多数のひび割れを有した。急速水冷の場合、自然冷却に比べひび割れ幅が若干大きくなった。自然冷却+蒸気養生の供試体を水中養生した時、多数の空気泡を排出した。水セメント比の違いによる影響は、本実験の範囲では認められなかった。

3.2 単位容積質量変化

モルタルの単位容積質量残存比と加熱温度の関係を図-1に、コンクリートの関係を図-2に示す。単位容積質量残存比は、常温時の単位容積質量に対する各加熱・各養生後の単位容積質量の比を表したものである。自然冷却の場合、加熱温度が高いものほど単位容積質量残存比が低下している。モルタルの単位容積質量残

存比はコンクリートより低下した。急速水冷と自然冷却+蒸気養生の場合は、養生で吸水して単位容積質量残存比が1に近づく。特に加熱温度600ではモルタル、コンクリートともに吸水が大きく、回復傾向が見られる。

なお表-7に常温のモルタルとコンクリートの物性値を示す。

3.3 圧縮強度

モルタルの圧縮強度と加熱温度の関係を図-3に、コンクリートの関係を図-4に示す。加熱温度が高いものほど圧縮強度は低下している。しかし自然冷却のモルタルの場合、加熱温

表-7 常温のモルタルとコンクリートの物性値

	水セメント比 (%)	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
モルタル	30	2.34	96.8	3.51
	50	2.23	56.4	2.60
コンクリート	30	2.44	94.9	4.04
	50	2.36	48.6	3.27

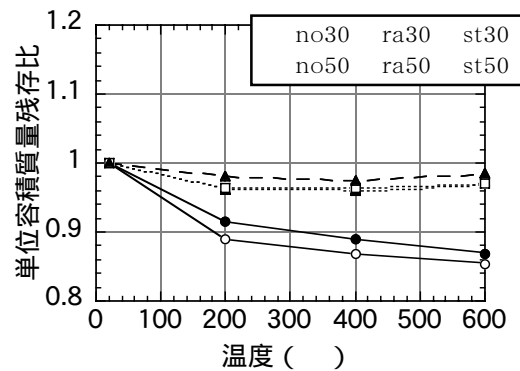


図-1 単位容積質量残存比と加熱温度 (モルタル)

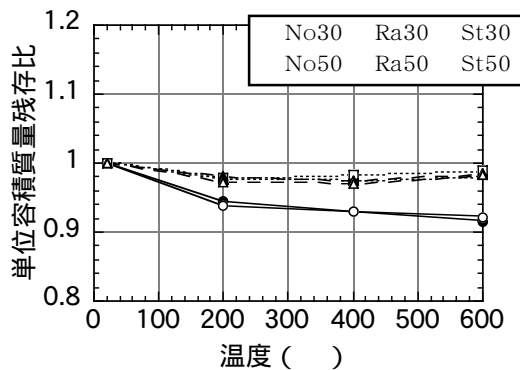


図-2 単位容積質量残存比と加熱温度 (コンクリート)

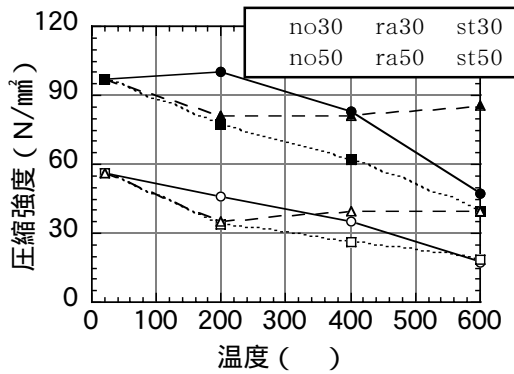


図 - 3 圧縮強度と加熱温度
(モルタル)

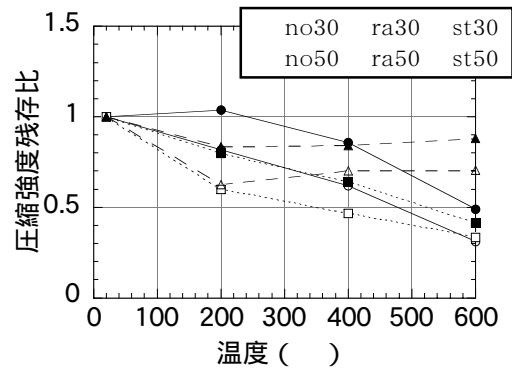


図 - 5 圧縮強度残存比と加熱温度
(モルタル)

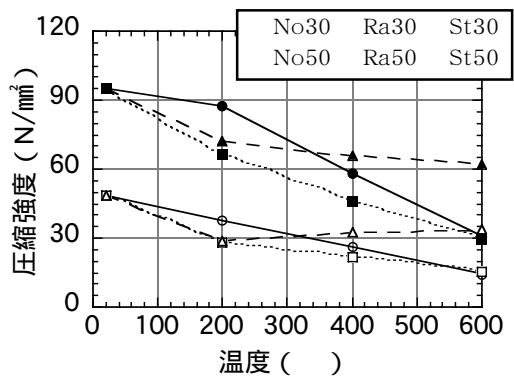


図 - 4 圧縮強度と加熱温度
(コンクリート)

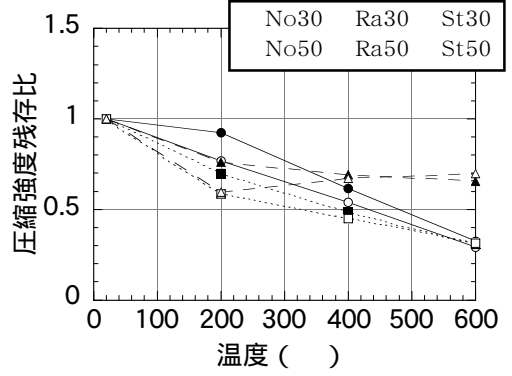


図 - 6 圧縮強度残存比と加熱温度
(コンクリート)

度 200 で水セメント比 $W/C=30\%$ については常温よりも高い圧縮強度を示した。過去の研究においても、加熱温度 100 から 200 の間では、水セメント比の小さいものほど常温よりも高い圧縮強度を示している。急速水冷の場合、モルタル、コンクリートともに加熱温度が高いものほど圧縮強度は低下している。特に 200、400 での低下は、自然冷却の場合に比べて大きい。火災時の消火活動により急冷された場合、コンクリートの表層部は大きく強度劣化が生じることを確認した。自然冷却 + 蒸気養生の場合は、モルタル、コンクリートともに加熱温度 400、600 で回復が見られる。

モルタルの圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図 - 5 に、コンクリートの関係を図 - 6 に示す。圧縮強度残存比は、常温時の強度に対する各加熱・各養生における圧縮強度の比である。モルタルの場合、どの加熱温度においても水セメント比 $W/C=30\%$ は 50% に比べ圧縮強度残

存比は大きいのがわかる。しかしコンクリートの場合、加熱温度が高いものほど水セメント比による圧縮強度残存比の差が小さくなる。自然冷却 + 蒸気養生の場合は、モルタル、コンクリートともに強度の回復が見られる。600 の加熱を受けても蒸気養生により、コンクリートで初期の強度の約 6 割以上に、モルタルで約 7 割以上に回復が可能である。

3.4 弾性係数

モルタルの弾性係数と加熱温度の関係を図 - 7 に、コンクリートの関係を図 - 8 に示す。モルタル、コンクリートともに水セメント比が小さい方が弾性係数は大きい。急速水冷の場合、モルタル、コンクリートともに自然冷却より低下している。火災時の消火活動により急冷された場合、弾性係数においても劣化が生じることを確認した。自然冷却 + 蒸気養生の場合は、モルタル、コンクリートともに加熱温度 400、600 で強度の回復と同様に、弾

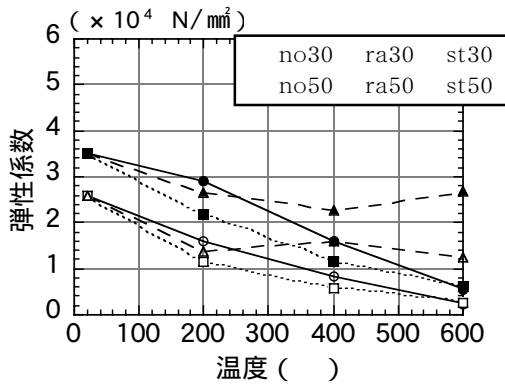


図 - 7 弾性係数と加熱温度
(モルタル)

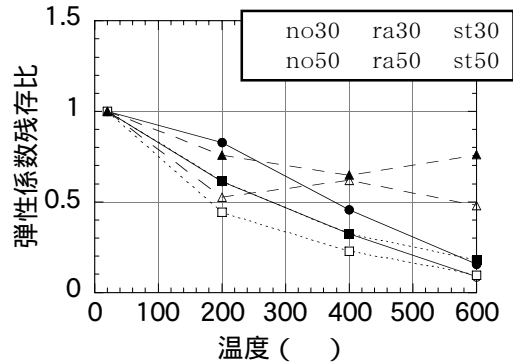


図 - 9 弾性係数残存比と加熱温度
(モルタル)

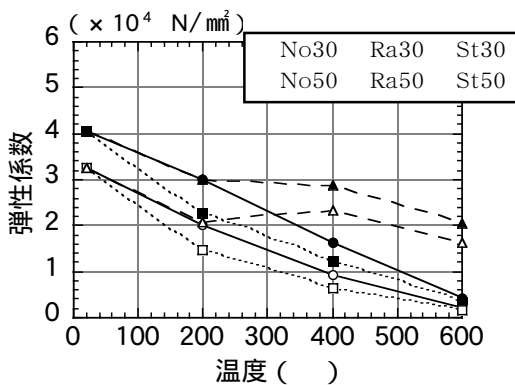


図 - 8 弾性係数と加熱温度
(コンクリート)

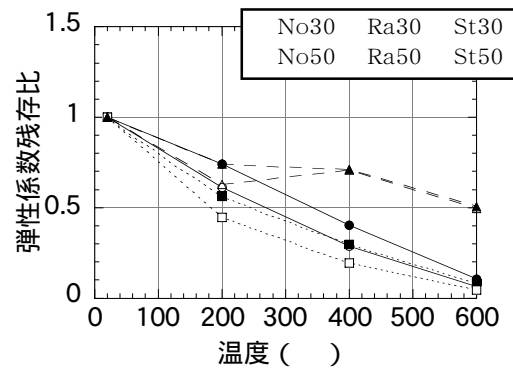


図 - 10 弾性係数残存比と加熱温度
(コンクリート)

性係数の回復が見られる。

モルタルの弾性係数残存比と加熱温度の関係を図 - 9, コンクリートの関係を図 - 10 に示す。自然冷却と急速水冷却の場合, モルタル, コンクリートともに弾性係数残存比は, 加熱温度に対し直線的に低下し, 水セメント比の小さい方が若干大きい傾向を示した。600 加熱後は, 水セメント比に関係なく常温時の約1割まで低下した。しかし自然冷却+蒸気養生の場合は弾性係数の回復が見られた。モルタル, コンクリートともに加熱温度200, 400 で弾性係数残存比は常温時の約7割, 加熱温度600において約5割の弾性係数残存比を示した。

3.5 実験結果の考察

モルタルとコンクリートの単位容積質量残存比と圧縮強度残存比の関係を図 - 11 に, 単位容積質量残存比と弾性係数残存比の関係を図 - 12 に示す。自然冷却の供試体は単位容積質量残存比の低下とともに圧縮強度残存比と弾性係

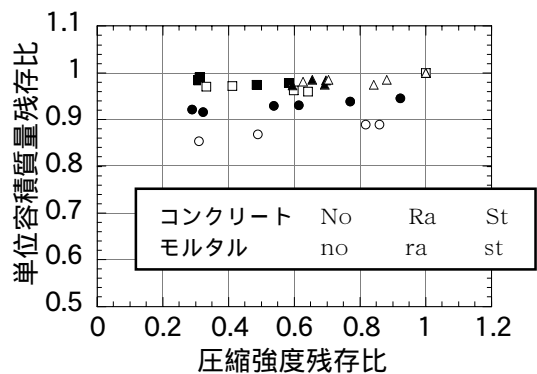


図 - 11 単位容積質量残存比と圧縮強度残存比

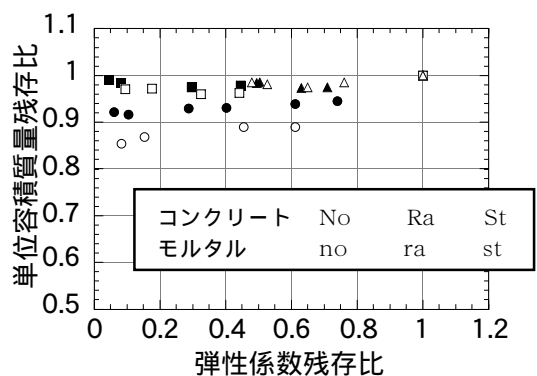


図 - 12 単位容積質量残存比と弾性係数残存比

数残存比は低下するが、養生によって吸水した供試体は単位容積質量残存比がほぼ1に近いため、このような傾向は明確に見られない。

圧縮強度残存比と弾性係数残存比の関係を図-13に示す。圧縮強度残存比の減少とともに弾性係数残存比も減少する傾向がある。コンクリートとモルタル、水セメント比、加熱温度、加熱後の養生方法の違いを区別せず、研究の範囲内について、弾性係数残存比をX、圧縮強度残存比Yとすると、式(1)の関係が成り立つ。

$$Y=0.74X+0.30 \quad R=0.93 \quad (1)$$

本研究の範囲内で、弾性係数残存比と圧縮強度残存比の相関の高い式が得られた。

4. まとめ

高温加熱後のコンクリートの養生方法の違いによる力学的性質への影響について、水セメント比・粗骨材の有無・加熱後の養生方法をパラメータとし、実験的に検討・考察を行い、以下のことがわかった。

- (1)自然冷却の場合、加熱温度が高いものほど単位容積質量残存比が低下している。モルタルの単位容積質量残存比はコンクリートより小さい。急速水冷と自然冷却+蒸気養生の場合は、養生で吸水して単位容積質量残存比が1に近づく。
- (2)高温加熱を受けたモルタル、コンクリートの圧縮強度は温度が高くなるほど低下する。しかし自然冷却+蒸気養生の場合は、モルタル、コンクリートともに強度の回復が見られる。
- (3)高温加熱を受けたモルタル、コンクリートの弾性係数は温度が高くなるほど低下する。しかし自然冷却+蒸気養生の場合は、モルタル、コンクリートともに弾性係数の回復が見られる。

今後は、火災時の消火活動により急冷されたコンクリート表層部の強度や弾性係数の劣化を、効率よく回復させる補修方法の開発に役立つ予定である。

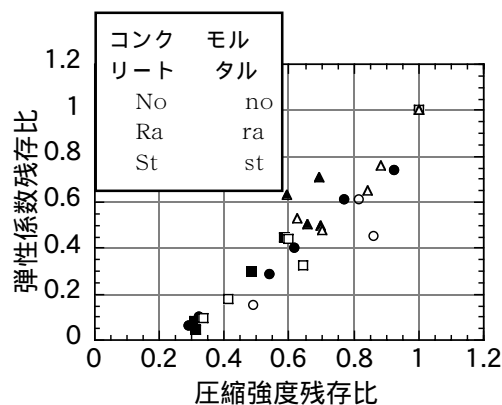


図-13 圧縮強度残存比と弾性係数残存比

謝辞 本学院生田島寛之君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 河辺伸二, 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.377-382, 2003.7
- 2) 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博, 河辺伸二: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.353-358, 2003.7
- 3) 一瀬賢一, 河辺伸二: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.17-21, 2002.11
- 4) 一瀬賢一, 河辺伸二: 高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の火災時の変形性状に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第568号, pp.1-6, 2003.6
- 5) 廣畑光生, 河辺伸二, 岡島達雄, 中村雅之: 高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートの高温加熱後の諸物性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.669-674, 1996.7
- 6) 安部武雄ほか: 高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp.163-168, 1999.1