

# 論文 石灰石骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性

岡田和寿\*1・河辺伸二\*2・市川博也\*3・小林竜平\*4

**要旨:** 石灰石骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性について実験を行い, 以下の結果を得た。(1)圧縮強度は加熱温度 100℃で低下した後, 加熱温度 200℃で上昇し, 以降は加熱温度が高いほど低下した。(2)石灰石骨材を用いたコンクリートは, 高温加熱による圧縮強度, 弾性係数の低下が大きい。(3)石灰石骨材を用いた水セメント比 50%の供試体に比べて, 水セメント比 30%の供試体の単位容積質量, 圧縮強度, 弾性係数は大きい。

**キーワード:** 石灰石骨材, 高温加熱, 単位容積質量, 圧縮強度, 弾性係数

## 1. はじめに

石灰石は世界に多く存在する地下資源であり, 日本にも高品質な石灰石が多く存在する。石灰石は従来からセメントの原料として広く使用されてきた。近年, コンクリートの骨材としても用いられるようになり, 年々コンクリートの骨材としての需要が高まっている。そして, 今後もその需要が拡大していくと考えられる。

コンクリートの骨材として使用される石灰石は, 他の岩石と比べて乾燥収縮を低減できるという特徴を持っている。また, 凍結融解試験において問題がなく, アルカリ骨材反応性が無いことが知られている。しかし, 石灰石骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性に関する知見は少ない。

筆者らは過去に高温加熱後のコンクリートの力学的特性について研究を行ってきた。フライアッシュや木材片が混入した再生粗骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性の研究<sup>1),2),3)</sup>, 高温加熱後の高強度コンクリートの力学的特性の研究<sup>4),5),6),7),8)</sup>, 高温加熱後の軽量コンクリートの力学的特性の研究<sup>9),10)</sup>である。

一瀬らは, 高温加熱を受けた高強度コンクリートにおける粗骨材の影響として, 水セメント比 30%の石灰石粗骨材を用いたコンクリートと普通骨材を用いたコンクリートの違い<sup>11)</sup>を検討した。

そこで, 本研究では粗骨材と細骨材ともに石灰石骨材を用いた水セメント 50%と 30%の供試体と, 普通骨材を用いた水セメント比 50%の供試体を作製し, 単位容積質量, 圧縮強度, 弾性係数の測定を行い, コンクリートの高温加熱後の力学的特性について比較, 検討を行った。さらに, 高温加熱後の単位容積質量残存比, 圧縮強度残存比, 弾性係数残存比についても比較, 検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験条件

実験条件を表-1に示す。使用骨材は石灰石骨材と普通骨材の2水準, 加熱温度は20℃(常温, 加熱なし)と100, 200, 400, 600℃の5水準, 水セメント比は普通骨材が50%, 石灰石骨材が50%, 30%の2水準, 養生期間は4週間水中養生, 13週間水中養生の2水準とした。水セメント比50%は普通コンクリート, 水セメント比30%は高強度コンクリートを想定した。

### 2.2 使用材料と調合

骨材の品質を表-2に示す。普通骨材コンクリートは普通ポルトランドセメント, 細骨材に大井川水系産川陸砂, 粗骨材に硬質砂岩である岡崎産砕石を使用した。石灰石骨材コンクリートは普通ポルトランドセメント, 細骨材に藤原産石灰石砕砂, 粗骨材に藤原産石灰石砕石を使用した。また, 藤原産石灰石砕砂を写真-1に, 藤原産石灰石砕石を写真-2に示す。

混和剤は, 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 減水剤を使用した。各コンクリートの調合を表-3に示す。No50%は普通骨材を用いた水セメント比50%のコンクリート, Li50%は石灰石骨材を用いた水セメント比50%のコンクリート, Li30%は石灰石骨材を用いた水セメント比30%のコンクリートを表す。

### 2.3 測定方法

測定項目は表-4に示すように単位容積質量, 圧縮強度, 弾性係数(ヤング係数)とした。単位容積質量の測定については電子天秤を用いて行った。外観観察は目視による判断で行った。

### 2.4 打設と養生

コンクリートの練混ぜには容量 100L の強制練ミキサを使用して行った。調合条件は水セメント比 50%では目

\*1 竹本油脂株式会社 博士(工学)(正会員)

\*2 名古屋工業大学大学院 教授 工博(正会員)

\*3 名古屋工業大学 学部生

\*4 竹本油脂株式会社

表-1 実験条件

項目	摘要	水準数
使用骨材	石灰石骨材, 普通骨材	2
加熱温度	20°C, 100°C, 200°C, 400°C, 600°C	5
水セメント比	30%, 50%	2
養生期間	4週間水中養生, 13週間水中養生	2

表-2 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm³)	粗粒率	吸水率 (%)
S	大井川水系産陸砂	2.58	2.72	2.25
LiS	藤原産石灰石砕砂	2.66	2.71	1.18
G	岡崎産碎石	2.68	6.70	0.67
LiG	藤原産石灰石砕石	2.69	6.66	0.34



写真-1 石灰石砕砂



写真-2 石灰石砕石

標スランブを 18.0±2.0cm, 水セメント比 30%では目標スランブフローを 60.0±10.0cm とした。目標空気量は水セメント比 30%では 3.0±1.0%, 水セメント比 50%では 4.5±1.0%とした。コンクリートのフレッシュ性状を表-5に示す。目標のスランブ, スランブフロー, 空気量を有するコンクリートを得た。供試体は供試体寸法 100φ×200mm の円柱供試体を用いた。供試体本数は各実験に対して 3本とした。コンクリートの打設翌日に脱型を行い, その後は水温 20±3°Cで 4週間水中養生, 13週間水中養生を行った。

表-3 コンクリートの調合

記号	W / C (%)	単位質量(kg/m³)						混和剤対セメント
		W	C	S	G	LiS	LiG	
No 50%	50	170	340	787	997	-	-	0.65%
Li 50%	50	170	340	-	-	811	1001	0.10%
Li 30%	30	165	550	-	-	785	904	1.00%

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	-
	圧縮強度	JIS A 1108
	弾性係数	JIS A 1149 を参考

表-5 コンクリートのフレッシュ性状

記号	W/C (%)	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
No 50%	50	18.0	31.5×31.0	4.5	21
Li 50%	50	17.5	29.0×28.0	3.6	20
Li 30%	30	-	55.0×53.0	2.1	22

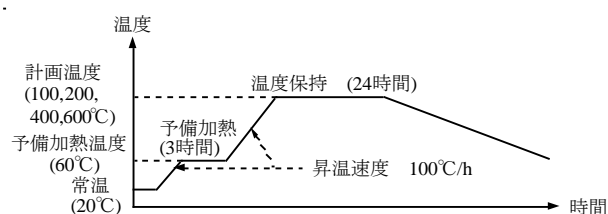


図-1 加熱概要

## 2.5 加熱方法

加熱実験はプログラム調節器付き電気炉を使用した。加熱概要を図-1に示す。加熱時の供試体は加熱中にコンクリートの水分の散逸を認めるアンシール状態とし, 無載荷状態にて行った。供試体の内外温度差, 熱応力による影響を小さくするため, 過去の研究と同様に予備加熱を 3時間, 60°Cで行った。昇温速度は 100°C/hとした。計画温度到達後は供試体内部温度を均一にするため, 24時間温度保持した。加熱後の降温は炉内のファンを作動させながら自然冷却とし, 炉内の温度が室温と同程度に

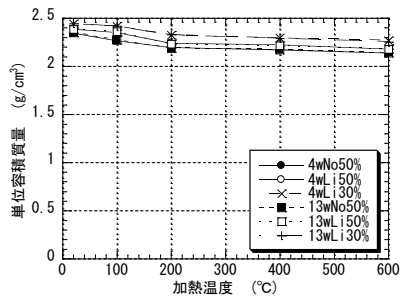


図-2 単位容積質量と加熱温度

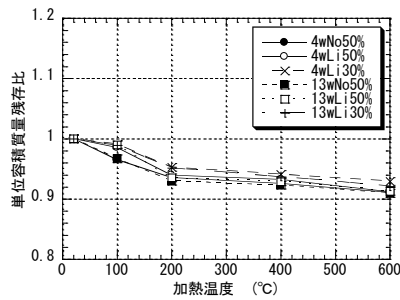


図-3 単位容積質量残存比と加熱温度

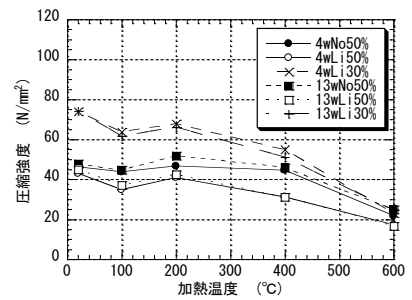


図-4 圧縮強度と加熱温度

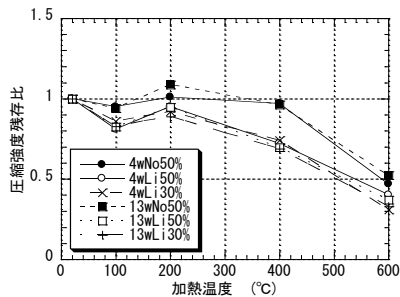


図-5 圧縮強度残存比と加熱温度

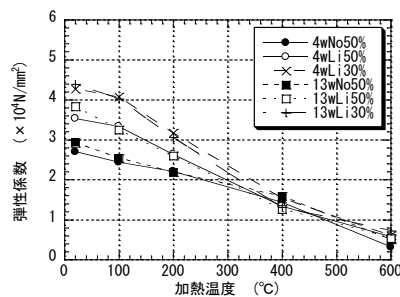


図-6 弾性係数と加熱温度

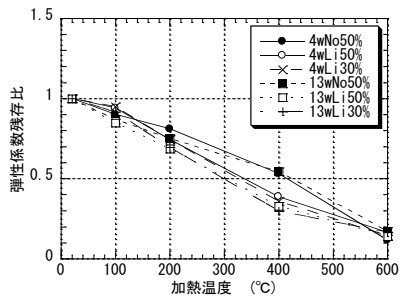


図-7 弾性係数残存比と加熱温度

なるまで、供試体を炉内に放置した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 外観観察

加熱温度 100°Cの供試体は、すべての供試体とも表面に薄く白い粉末が出た。加熱温度 200°Cの供試体も、すべての供試体の表面に白い粉末が出た。また、加熱前、供試体上面に油性ペンで書いた供試体番号は薄くなった。加熱温度 400°Cの供試体は、すべての供試体とも表面に白い粉末が出て、さらに桃色の斑点が確認できた。加熱温度 600°Cの供試体は、表面に白い粉末が出た。加熱温度 400°Cの供試体で見られた桃色の斑点より大きな桃色のシミが出た。加熱温度 400, 600°Cは、加熱前、供試体上面に油性ペンで書いた供試体番号は完全に消えた。

#### 3.2 単位容積質量

単位容積質量と加熱温度の関係を図-2 に示す。加熱温度が高くなるにつれて単位容積質量は減少した。石灰石骨材を用いた水セメント比 30%の供試体の単位容積質量がすべての加熱温度で最も大きく、普通骨材を用いた水セメント 50%の供試体の単位容積質量がすべての加熱温度において最も小さい。しかし、調合条件による単位容積質量の減少に違いは見られなかった。石灰石骨材は加熱温度 600~800°Cにおいて骨材の分解が起こる<sup>12)</sup>ので、加熱温度 600°Cまでに骨材の分解が起こる可能性は低い。よって、単位容積質量の低下は脱水によると考え

られる。

単位容積質量残存比と加熱温度の関係を図-3 に示す。単位容積質量残存比は常温の単位容積質量に対する各加熱後の単位容積質量の比を表したものである。単位容積質量残存比では調合条件に関わらず高温加熱によって同じような減少を示した。

#### 3.3 圧縮強度

圧縮強度と加熱温度の関係を図-4 に示す。圧縮強度は、すべてのコンクリートにおいて加熱温度 100°Cで低下した後、加熱温度 200°Cで上昇し、以降の加熱温度では再び低下した。これについては、過去に類似の条件下で行われたコンクリートの加熱実験においても同様の結果を報告<sup>1),2),3)</sup>した。すべての加熱温度で、石灰石骨材を用いた水セメント比 30%の供試体の圧縮強度が最も大きく、石灰石骨材を用いた水セメント比 50%の供試体の圧縮強度が最も小さい。また、4 週間水中養生した供試体、13 週間水中養生した供試体を比較すると全体的に 13 週間水中養生した供試体の圧縮強度が少し大きい。

圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図-5 に示す。圧縮強度残存比は常温の圧縮強度に対する各加熱後の圧縮強度の比を表したものである。普通骨材を用いた供試体に比べ、石灰石骨材を用いた供試体の方が圧縮強度残存比の低下は大きい。最も大きな違いは加熱温度 400°Cにおいて確認でき、普通骨材を用いた供試体が圧縮強度残存比 1 程度であることに對し、石灰石骨材を用いた供試

体は 0.7 程度となった。石灰石骨材を用いた供試体は水セメント比に関わらず圧縮強度残存比は同じ挙動を示し、加熱温度 200℃、600℃間の圧縮強度残存比は一定の変化量で低下した。よって、石灰石骨材は普通骨材に比べ、高温加熱による圧縮強度低下が大きいといえる。

### 3.4 弾性係数

弾性係数と加熱温度の関係を図-6 に示す。常温時の弾性係数は骨材、水セメント比の違いによって差があった。石灰石骨材を用いた水セメント比 30%の供試体が最も大きく、普通骨材を用いた水セメント比 50%の供試体が最も小さい。加熱温度が高くなるにつれて同程度の値に近づいていき、加熱温度 400、600℃では同程度の値となった。4 週間水中養生した供試体に比べ、13 週間水中養生した供試体の弾性係数は常温では大きい。高温加熱後の弾性係数は同じになった。また、普通骨材を用いた供試体に比べて石灰石骨材を用いた供試体の方が弾性係数の低下は大きかった。

弾性係数残存比と加熱温度の関係を図-7 に示す。圧縮強度残存比は、常温の圧縮強度に対する各加熱後の圧縮強度の比を表したものである。加熱温度 200、400℃において普通骨材を用いた供試体に比べ、石灰石骨材を用いた供試体の方が小さく、加熱温度 600℃において同程度の値となった。これは、常温時の弾性係数の差が、加熱温度が高くなるにつれて小さくなっていくためである。弾性係数残存比においても圧縮強度残存比と同様に、石灰石骨材を用いた供試体は普通骨材を用いた供試体に比べ、高温加熱による弾性係数残存比の低下が大きかった。

### 3.5 供試体の破壊面の観察

圧縮試験後のすべての供試体を割裂し、圧縮破壊時の破壊面を観察した。常温の場合、普通骨材を用いた供試体では、写真-3 に示すように供試体中の粗骨材を避けるように破壊が起きて、供試体の破壊面は粗骨材が元の形状でむき出しになっている部分を多数確認した。粗骨材の一例として写真中に○印を付ける。(以下、同) 加熱温度 600℃において写真-4 に示すように供試体中の粗骨材を避けるように破壊が起きていた。よって、主に粗骨材とモルタル界面で破壊が起きたと考えられる。

石灰石骨材を用いた供試体は、写真-5 に示すように供試体中の粗骨材が割れるように破壊が起きて、供試体の破壊面で粗骨材が割れている部分を多数確認した。よって、主に粗骨材で破壊が起きたと考えられる。しかし高温加熱後、石灰石骨材を用いた供試体でも、試体の破壊面で粗骨材が割れた部分は少なくなり、加熱温度 600℃では写真-6 に示すように粗骨材が割れた部分はさらに少なく、元の形状でむき出しになっている部分が多数確認できた。石灰石骨材を用いた供試体では、加熱温度が高くなるにつれて粗骨材の破壊から粗骨材とモル



写真-3 普通骨材を用いた水セメント比 50%の供試体の破壊面(常温)



写真-4 普通骨材を用いた水セメント比 50%の供試体の破壊面(600℃)



写真-5 石灰石骨材を用いた水セメント比 30%の供試体の破壊面(常温)



写真-6 石灰石骨材を用いた水セメント比 30%の供試体の破壊面(600℃)

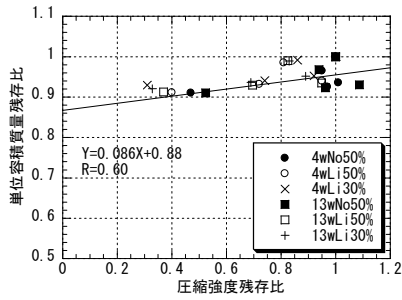


図-8 単位容積質量残存比と圧縮強度残存比

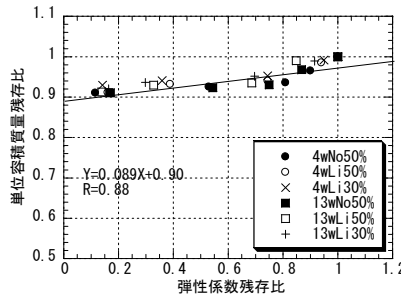


図-9 単位容積質量残存比と弾性係数残存比

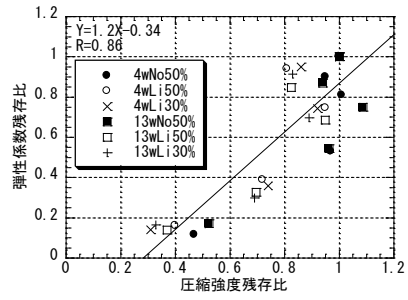


図-10 弾性係数残存比と圧縮強度残存比

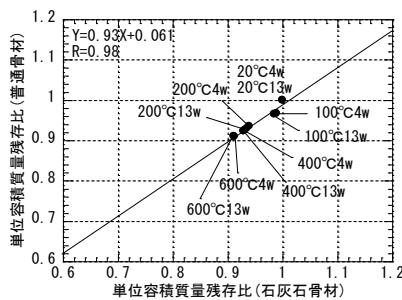


図-11 石灰石骨材と普通骨材の単位容積質量残存比 (w/c50%)

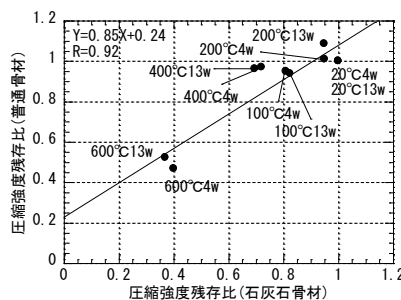


図-12 石灰石骨材と普通骨材の圧縮強度残存比 (w/c50%)

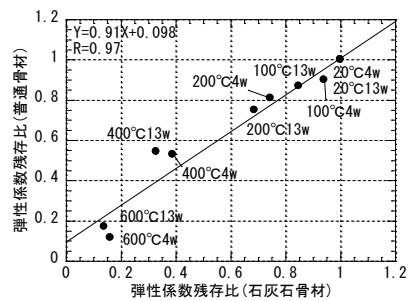


図-13 石灰石骨材と普通骨材の弾性係数残存比 (w/c50%)

タル界面の破壊になったと考えられる。

### 3.6 相関式による考察

本研究の範囲内において、使用骨材、水セメント比、養生期間、加熱温度を区別せず単位容積質量残存比 (Y) と圧縮強度残存比 (X) の関係を図-8 に、相関式を式 (1) に示す。同様に、単位容積質量残存比 (Y) と弾性係数残存比 (X) の関係を図-9 に、相関式を式 (2) に示す。同様に、弾性係数残存比 (Y) と圧縮強度残存比 (X) の関係を図-10 に、相関式を式 (3) に示す。

$$Y=0.086X+0.88 \quad R=0.60 \quad (1)$$

$$Y=0.089X+0.90 \quad R=0.88 \quad (2)$$

$$Y=1.2X-0.34 \quad R=0.86 \quad (3)$$

本研究の範囲内において、単位容積質量残存比と弾性係数残存比、また弾性係数残存比と圧縮強度残存比の関係においてそれぞれ相関の高い式を得ることができた。単位容積質量残存比と圧縮強度残存比の関係については、他の関係より相関が低い結果となった。これは、加熱温度 200°C における強度上昇によって値がばらついたことが原因であると考えられる。

## 4. 石灰石骨材を用いたコンクリートと普通骨材を用いたコンクリートの比較

### 4.1 単位容積質量残存比

石灰石骨材を用いた水セメント比 50% の供試体の単位容積質量残存比 (X) と普通骨材を用いた水セメント比

50% の供試体の単位容積質量残存比 (Y) の比較を図-11 に、相関式を式 (4) に示す。

$$Y=0.93X+0.061 \quad R=0.98 \quad (4)$$

単位容積質量残存比では相関の範囲が狭いため多少のずれが予想されるが、相関の高い直線を得た。また、原点近くを通る直線が得られたことから、石灰石骨材を用いたコンクリートと普通骨材を用いたコンクリートの単位容積質量残存比は高温加熱によって同じような挙動を示すといえる。同一水セメント比では同じ単位水量であるので、加熱温度 600°C までの加熱では水分が蒸発することで供試体の質量が低下したと考えられる。

### 4.2 圧縮強度残存比

石灰石骨材を用いた水セメント比 50% の供試体の圧縮強度残存比 (X) と普通骨材を用いた水セメント比 50% の供試体の圧縮強度残存比 (Y) の比較を図-12 に、相関式を式 (5) に示す。

$$Y=0.85X+0.24 \quad R=0.92 \quad (5)$$

圧縮強度残存比では単位容積質量残存比と同様に相関の高い直線を得た。しかし、単位容積質量残存比と比べると切片の値が大きく、傾きの小さい直線が得られた。これは、高温加熱による圧縮強度残存比の低下が普通コンクリートに比べて石灰石コンクリートの方が大きいことを示している。

### 4.3 弾性係数残存比

石灰石骨材を用いた水セメント比 50% の供試体の弾性

係数残存比 (X) と普通骨材を用いた水セメント比 50% の供試体の弾性係数残存比 (Y) の比較を図-13 に、相関式を式 (6) に示す。

$$Y=0.91X+0.098 \quad R=0.97 \quad (6)$$

弾性係数残存比では単位容積質量残存比と同様に相関の高い直線を得た。また、圧縮強度残存比と同様に単位容積質量残存比と比べると切片の値が大きく、傾きの小さい直線が得られた。これは、高温加熱による弾性係数残存比の低下が普通コンクリートに比べて石灰石コンクリートの方が大きいことを示している。しかし、圧縮強度残存比に比べると切片の大きさは半分以下であり、傾きは単位容積質量残存比に近いことから、圧縮強度残存比より弾性係数残存比の方が使用骨材の違いによる影響は少ないといえる。

## 5. まとめ

石灰石骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性について、普通骨材を用いたコンクリートと比較することによって以下のことがわかった。

- (1) 圧縮強度は加熱温度 100℃で低下した後、加熱温度 200℃で上昇し、以降は加熱温度が高いほど低下した。
- (2) 石灰石骨材を用いたコンクリートは、普通骨材を用いたコンクリートに比べて高温加熱による圧縮強度、弾性係数の低下が大きい。
- (3) 石灰石骨材を用いた水セメント比 50%の供試体に比べて、石灰石骨材を用いた水セメント比 30%の供試体はすべての加熱温度で単位容積質量、圧縮強度、弾性係数が大きい。

## 参考文献

- 1) 河辺伸二, 岡田和寿, 菊地剛広, 陳海峰: フライアッシュを混入した再生粗骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性, コンクリート工学年次論文集, 31-1, pp. 763-768, 2009. 7
- 2) 河辺伸二, 岡田和寿, 菊地剛広: 木材片が混入した

再生粗骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性, コンクリート工学年次論文集, 30-1, pp. 513-518, 2008. 7

- 3) 河辺伸二, 岡田和寿, 滝本憲太: 再生粗骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性, コンクリート工学年次論文集, 29-1, pp. 783-788, 2007. 7
- 4) 河辺伸二, 一瀬賢一, 川口徹: 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, コンクリート工学年次論文集, 26-1, pp. 687-692, 2004. 7
- 5) 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, 25-1, pp. 353-358, 2003. 7
- 6) 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, 25-1, pp. 377-382, 2003. 7
- 7) 廣畑光生, 河辺伸二, 岡島達雄, 賀屋善行: 高温加熱後の高強度コンクリートの力学的性質, コンクリート工学年次論文報告集, 19-1, pp. 625-630, 1997. 6
- 8) 廣畑光生, 河辺伸二, 岡島達雄, 中村雅之: 高ビーク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, 18-1, pp. 669-674, 1996. 6
- 9) 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博, 河辺伸二: 高温加熱を受けた軽量コンクリートの力学的性質, コンクリート工学年次論文集, 23-2, pp. 397-402, 2001. 6
- 10) 河辺伸二, 岡島達雄, 伊藤嘉規: 軽量骨材を用いたコンクリート・モルタルの高温加熱後の力学的性質, コンクリート工学年次論文報告集, 20-2, pp. 535-540, 1998. 6
- 11) 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における粗骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, 24-1, pp. 285-290, 2002. 6
- 12) U.シュナイダー: コンクリートの熱的性質, 技報堂, 1983. 12