

# 論文 配合および加熱状況の違いがコンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響

高地 透<sup>\*1</sup>・栗原 哲彦<sup>\*2</sup>

**要旨:**本研究では、コンクリートの配合の違いや加熱状況が及ぼす破壊エネルギーの変化について検討を行った。配合の違いによる影響の実験では、セメントペースト量や骨材含有率を変化させた全7種類の配合を設定した。また、加熱状況が及ぼす影響の実験では、500, 630, 770℃の3種類の加熱温度と2種類のコンクリートの配合を設定し実験を行った。これらの実験の結果から、破壊エネルギーは骨材量および粗骨材含有量が多いほど増加傾向にあることが分かった。また、加熱実験結果から非加熱時に比べ500℃加熱において破壊エネルギーが一旦上昇したが、高温になるに従い質量減少率が増加し破壊エネルギーが減少した。

**キーワード:**破壊エネルギー, 荷重-CMOD曲線, 骨材量, 質量減少率

## 1. はじめに

コンクリートの破壊エネルギーに関して様々な研究がなされており、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>には、式(1)のような圧縮強度および骨材最大寸法と破壊エネルギーの関係が示されている。

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (1)$$

$$\begin{cases} G_F: \text{破壊エネルギー (N/m)} \\ d_{\max}: \text{粗骨材の最大寸法 (mm)} \\ f'_{ck}: \text{圧縮強度 (N/mm}^2\text{)} \end{cases}$$

しかし、圧縮強度や骨材最大寸法のほかに骨材形状や試験体寸法なども破壊エネルギーに影響を及ぼすことが報告されている<sup>2,3)</sup>。

また、加熱を受けたコンクリートの破壊エネルギーについては、例えば、安部ら<sup>4)</sup>やB.Zhangら<sup>5)</sup>により研究がなされているが、加熱温度と破壊エネルギーの関係性を完全に明らかにするまでには至っておらず、未だ課題が多いのが現状である。

そこで本研究では、加熱温度とコンクリートの破壊エネルギーの関係を明確にすることを目的とし、配合を変化させたコンクリートを対象に、常温時の破壊エネルギーと加熱後のコンクリートの破壊エネルギーについて比較した。コンクリートの配合（ペースト量, 骨材量）の違いが破壊エネルギーに与える影響を検討（実験1）し、さらに、加熱後のコンクリートの破壊エネルギーの変化（実験2）について比較を行った。

## 2. コンクリートの配合の違いが破壊エネルギーに与える影響（実験1）

### 2.1 実験概要

コンクリートに含まれる材料が破壊エネルギーに影響を及ぼすことから、使用材料の比率を変化させ実験を行うこととした。

#### (1) 試験体概要

試験体の種類は7種類とし、シリーズ名をA~Gとした。表-1に示方配合を示す。

各配合はAの配合を基本として決定した。Aと比較して同一の水セメント比でコンクリート標準示方書〔施工編〕<sup>6)</sup>が推奨する範囲で単位水量を増減させた配合がB・Cであり、セメント量と粗骨材量を減少させた配合がD、骨材量を増減させた配合がE・F、セメント量と粗骨材量は同一として水セメント比を低減させた配合がGである。

表-1に示す配合に基づき100×100×400mmの角柱試験体（各シリーズ6体）とφ100×200mmの円柱試験体（圧縮強度試験用、各シリーズ3体）を作製した。試験体作製後14日間水中養生を行い、その後各種試験（後述）を実施した。試験体は普通強度コンクリートにより、粗骨材は最大寸法20mmを用いて作製した。

表-1 示方配合

シリーズ	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		C	W	S	G	Ad1	Ad2
A	55	307	169	822	960	0.768	0.031
B		282	155	879	960	0.705	0.028
C		318	175	797	960	0.796	0.032
D		282	155	957	881	0.705	0.028
E		307	169	882	899	0.768	0.031
F		307	169	792	990	0.768	0.031
G	45	307	138	902	960	0.768	0.031

C: 早強ポルトランドセメント Ad1: AE減水剤 Ad2: 補助AE剤

\*1 東京都市大学大学院 工学研究科 都市基盤工学専攻 (正会員)

\*2 東京都市大学 工学部 都市工学科 准教授・博士 (工学) (正会員)

(2) 荷重-CMOD 曲線測定試験方法<sup>7)</sup>

各シリーズについて角柱試験体を6体用いて試験を行った。試験は、養生後の試験体に対し JCI-S-001-2003 に従い試験体下部に切欠きを加え、3点曲げ試験を実施した。CMOD (ひび割れ開口変位) はクリップゲージを使用し測定し、荷重-CMOD 曲線とした。このとき、クリップゲージを取付けるために切欠き部にはナイフエッジを取付けた。試験体寸法を図-1 に3点曲げ試験の概要を図-2 に示す。

(3) 破壊エネルギー算出方法<sup>7)</sup>

測定した荷重-CMOD 曲線を用いてコンクリートの破壊エネルギーを算出する。算出方法は JCI-S-001-2003 に従い式(2)および式(3)を用いて算出した。

$$G_F = \frac{0.75 \cdot W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (2)$$

$$W_1 = 0.75 \left( \frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c \quad (3)$$

- $G_F$ : 破壊エネルギー (N/mm)
- $W_0$ : 供試体が破断するまでの荷重-CMOD曲線下の面積 (N・mm)
- $W_1$ : 供試体の自重および 載荷治具がなす仕事 (N・mm)
- $A_{lig}$ : リガメントの面積 (mm<sup>2</sup>)
- $m_1$ : 供試体の質量 (kg)
- $S$ : 載荷スパン (mm)
- $L$ : 供試体の全長 (mm)
- $m_2$ : 試験機に取付けられておらず、破断するまで供試体に乗っている治具の質量 (kg)
- $g$ : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)
- $CMOD_c$ : 破断時のひび割れ開口変位 (mm)

2.2 実験結果および考察

各試験における荷重-CMOD 曲線測定結果および試験結果から算出した各種パラメータを示す。

(1) 圧縮強度

荷重-CMOD 曲線測定試験と同時に実施した圧縮強度試験の結果から算出した圧縮強度およびヤング係数を表-2 に示す。結果から、A~F は同様の水セメント比であるため同程度の圧縮強度を示しており、G は他より低水セメント比であるためやや高い圧縮強度を示した。

(2) 荷重-CMOD 曲線測定結果

表-1 に示したシリーズ A~G の荷重-CMOD 曲線測定結果の平均曲線を図-3 に示す。この結果からいずれのシリーズに関してもほぼ同様の軌道を示していることが分かる。水セメント比が低く、圧縮強度がやや高めに発現していたシリーズ G に関しても他のシリーズと同様の軌道を示す結果となった。また、この荷重-CMOD 曲線測定結果における各シリーズの最大荷重お

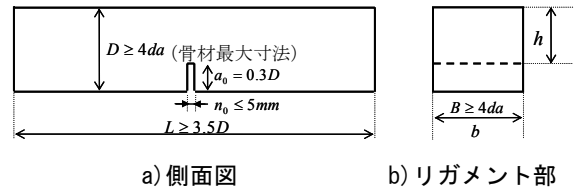


図-1 試験体寸法<sup>7)</sup>

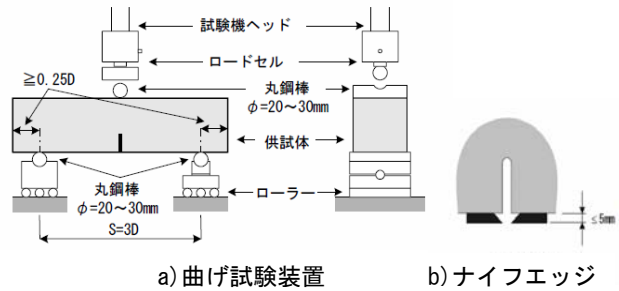
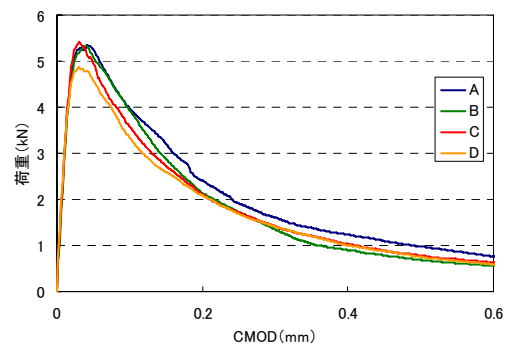


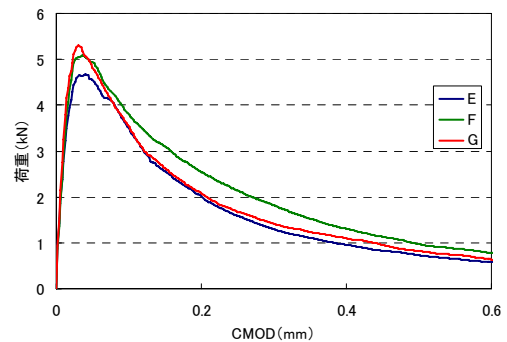
図-2 3点曲げ試験概要<sup>7)</sup>

表-2 圧縮強度試験結果

シリーズ	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)
A	40.2	29.1	5.5
B	39.9	30.2	3.5
C	41.5	29.7	13.8
D	37.4	33.0	4.1
E	38.3	29.1	15.5
F	34.4	30.0	14.5
G	44.8	31.9	0.9



a) シリーズ A~D



b) シリーズ E~G

図-3 荷重-CMOD 曲線測定結果

よび最大荷重時と試験体破断時の CMOD をまとめたものを表-3 に示す。表には変動係数も同時に示す。最大荷重は C が最も高い値を示し、破断時の CMOD は B が最も大きい値を示す結果となった。変動係数については、最大荷重に比べ最大荷重時の CMOD の変動係数が高く表れ、両変動係数において B が最も低く E が最も高い結果となった。破断後のひび割れ面を観察すると全シリーズにおいて骨材の破断が僅かに確認できた。

### (3) 破壊エネルギー算出結果

図-3 に示した荷重-CMOD 曲線測定結果および式(2)・(3)を用いて破壊エネルギーを算出した。破壊エネルギーの算出結果および前述の圧縮強度・ヤング係数の結果を図-4 に示す。また、各シリーズの代表的なひび割れの様子を写真-1 に示す。また、写真-1 (各シリーズ 1 本のひび割れ) のひび割れを対象に Digitizer ツールによって計測したひび割れ長さを表-4 に、ひび割れ長さと破壊エネルギーの関係を図-5 に示す。

破壊エネルギーに関しては、配合の基本とした A に比べて C・D・E・G が低い値を示し、B・F は A とほぼ同様の値を示す結果となった。セメント量と粗骨材量を A の配合と比較すると、C は骨材量が少ない、D・E は粗骨材量が少ないことが挙げられる。つまり、A に比べて C・D・E は、細骨材あるいは粗骨材量が少ないことが言え、それが影響していると考えられる。つまり、表-4 から分かるように C・D・E は、切欠き先端からのひび割れ経路が若干単純化・直線化したことが破壊エネルギーを結果として低下させた要因であると考えられる。B・F に関しては、A とのひび割れ経路差が微小であることが、A とほぼ同様の破壊エネルギーを示す結果となったと考えられる。なお、G に関して圧縮強度は他より高く表れたにも関わらず破壊エネルギーが小さく算出された原因としては、配合における単位水量が最適でなかったことが挙げられる(表-2 参照)。また、式(2)を用いて破壊エネルギーを算出した結果、式(1)より 1.8~2.3 倍の破壊エネルギーが算出された。

## 3. 加熱後のコンクリートの破壊エネルギーの変化 (実験 2)

### 3.1 実験概要

前述のとおり加熱を受けたコンクリートの破壊エネルギーに関しては未だ解明されていない部分が多く存在する。そこで、本実験では表-1 の配合 A・B を用いて配合の異なるコンクリートの加熱実験を実施した。

#### (1) 試験体

実験 1 と同様に、100×100×400mm の角柱試験体 (各シリーズ 6 体) と φ100×200mm の円柱試験体 (非加熱時圧縮強度試験用, 各シリーズ 3 体) を作製した。試験

表-3 最大荷重および CMOD

シリーズ	最大荷重		最大荷重時CMOD		破断時 CMOD (mm)
	平均値 (kN)	変動係数 (%)	平均値 (mm)	変動係数 (%)	
A	5.34	3.79	0.042	23.4	2.510
B	5.34	8.27	0.040	5.33	3.998
C	5.40	4.11	0.030	17.5	2.298
D	4.87	10.4	0.030	26.9	2.442
E	4.67	9.24	0.040	18.5	3.548
F	5.10	1.63	0.036	11.8	2.802
G	5.31	8.77	0.030	14.2	2.874

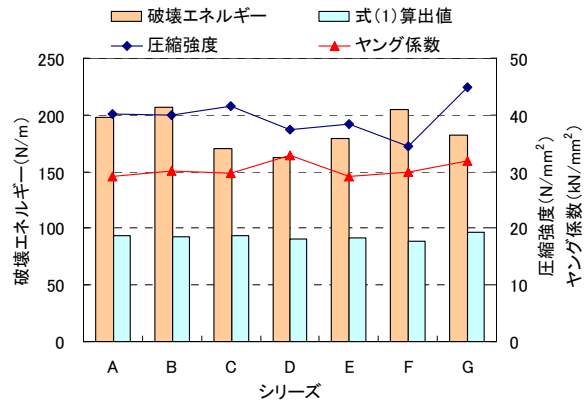


図-4 破壊エネルギー算出結果

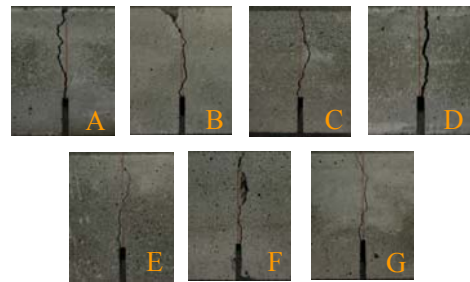


写真-1 ひび割れ写真

表-4 ひび割れ長さ計測結果

シリーズ	ひび割れ長さ (mm)	Aとの経路差 (mm)
A	78.3	0.0
B	77.5	-0.8
C	76.5	-1.8
D	75.5	-2.8
E	76.7	-1.5
F	77.7	-0.6
G	76.1	-2.2

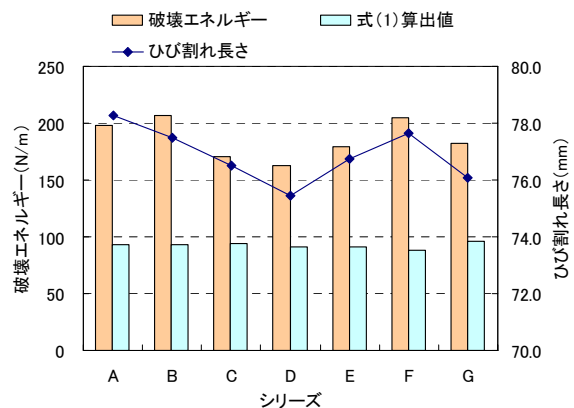


図-5 破壊エネルギーとひび割れ長さの関係

体作製後 14 日間水中養生を行い、その後各種試験（後述）を実施した。

### (2) 加熱試験

加熱試験は、耐熱レンガで自作した加熱炉を用いて行った。加熱炉の概要を図-6 に示す。加熱炉内の温度を確認するために加熱装置付近と炉内上部に K 型熱電対を設置し炉内温度を測定した。試験体は養生後切欠きを加えた状態で、この切欠き部分が下面になるように加熱炉内に設置した。加熱温度は、Euro-code<sup>8)</sup> (図-7) においてコンクリートの圧縮強度が 60%程度に減少するとされる 500°C以上で 3 種類 (770°C : H, 630°C : M, 500°C : L) 設定した (表-5 参照)。また、この時の加熱温度とは炉内下部の熱電対で測定した温度である (図-6 参照)。加熱時間は 3 時間とした。炉内下部の初期温度勾配は H, M, L それぞれ 200°C/min, 170°C/min, 140°C/min であり、加熱終了後の自然冷却時初期降温勾配は H, M, L それぞれ -80°C/min, -60°C/min, -40°C/min であった。自然冷却を行い十分冷却された状態の試験体を炉内から取り出し、加熱試験の翌日に試験を実施した。加熱時の加熱炉内上部および下部の温度測定結果を図-8 に示す。加熱後の試験体の状態は、加熱が高温になるに従い試験体表面のマイクロクラックや変色等の劣化が現れた。

### (3) 質量減少率の測定方法

加熱前と加熱後の試験体の質量を測定し、質量減少率の算出を行った。

### (4) 荷重-CMOD 曲線測定試験方法

荷重-CMOD 曲線は、前述の 3.1(3) で記載した方法と同一の方法により測定した。

### (5) 破壊エネルギー算出方法

破壊エネルギーも、前述の 3.1(4) で記載した方法と同一の方法により算出した。

## 3.2 実験結果および考察

各試験における荷重-CMOD 曲線測定結果および試験結果から算出した各種パラメータを示す。

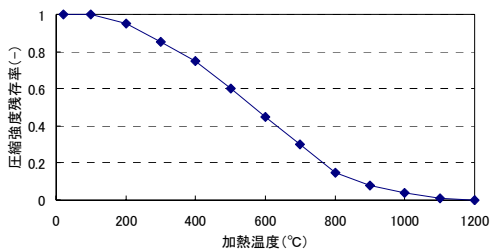


図-7 Euro-code 提案圧縮強度残存率<sup>8)</sup>

表-5 加熱実験におけるシリーズ名

温度	770°C	630°C	500°C
A	A-H	A-M	A-L
B	B-H	B-M	B-L

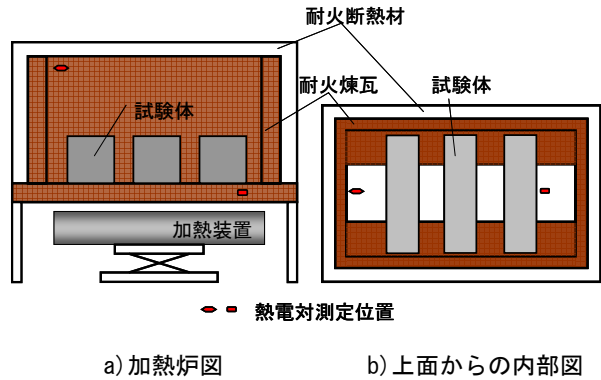
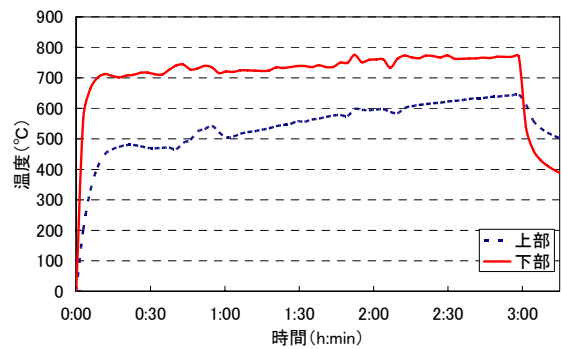
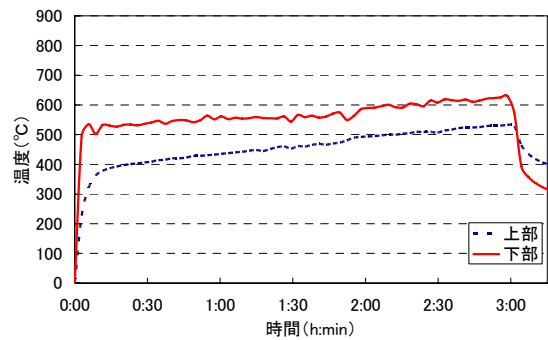


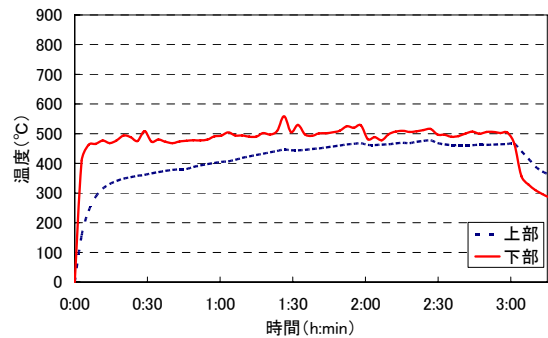
図-6 加熱炉概要



a) 770°C加熱



b) 630°C加熱



c) 500°C加熱

図-8 加熱炉内の温度測定結果

(1) 質量減少率

各シリーズの加熱前と加熱後に測定した試験体の質量から算出した質量減少率の平均値と加熱温度の関係を図-9に示す。この結果から、各シリーズ共に加熱温度が上昇するに従い質量が減少していることが確認できた。また、A はほぼ直線的に質量が減少しているが、B は 500℃加熱から 630℃加熱までの減少率の上昇より、630℃加熱から 770℃加熱にかけての質量減少率の上昇が大きく表れる結果となった。

(2) 荷重-CMOD 曲線

A, B ごとにまとめた加熱後の荷重-CMOD 曲線の平均曲線を図-10, 11に示す。結果から共に加熱温度が上昇するに従って最大荷重が減少していることが分かる。また、配合による比較を行うために加熱温度ごとにまとめた荷重-CMOD 曲線を図-12~14に示す。各シリーズの最大荷重, 最大荷重時および試験体破断時の CMOD を表-6に示す。加熱温度が 500℃および 630℃の場合において、A・B の荷重-CMOD 曲線がほぼ同じ軌道を示しているが、加熱温度 770℃では A・B の荷重-CMOD 曲線に差異が認められた。表-6からも加熱温度 770℃の場合の A・B の最大荷重および両 CMOD に差異が認められている。最大荷重以降の軌道に関しても B-H が A-H よりも荷重の低下が大きく表れる結果となった。これは、770℃の高温にさらされた際に、A が B に比べセメントペースト量が多いため水酸化カルシウムの熱分解量が多く、ペーストの脆弱化が大きかったためと考えられる。また、加熱温度が上昇するに従い、表-6中の各変動係数が上昇する結果となった。また、全シリーズのひび割れ面に非加熱時より多くの骨材の破断が発生した。しかし、加熱温度が上昇するに従い骨材界面の剥離も多く現れ、目視ではあるがひび割れ面の複雑化を確認した。

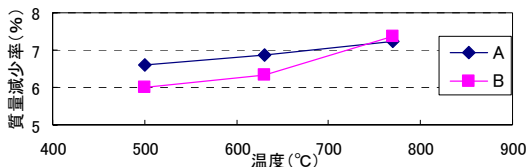


図-9 加熱温度と質量減少率の関係

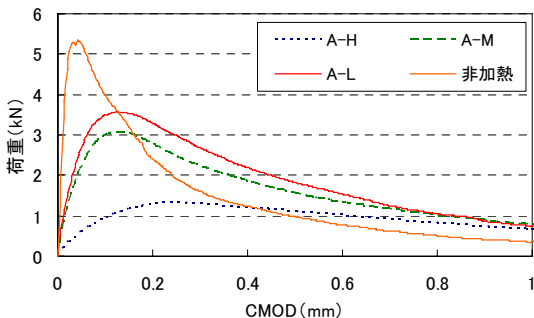


図-10 荷重-CMOD 曲線測定結果 (A)

表-6 荷重および CMOD まとめ

加熱温度 (°C)	シリーズ	最大荷重		最大荷重時CMOD		破断時 CMOD (mm)
		平均値 (kN)	変動係数 (%)	平均値 (mm)	変動係数 (%)	
770 (H)	A-H	1.33	31.2	0.242	37.8	3.898
	B-H	1.85	24.1	0.168	33.5	3.352
630 (M)	A-M	3.08	10.8	0.124	12.4	3.998
	B-M	2.86	10.1	0.164	13.8	3.998
500 (L)	A-L	3.58	5.42	0.124	4.57	3.692
	B-L	3.80	7.41	0.110	6.87	3.920

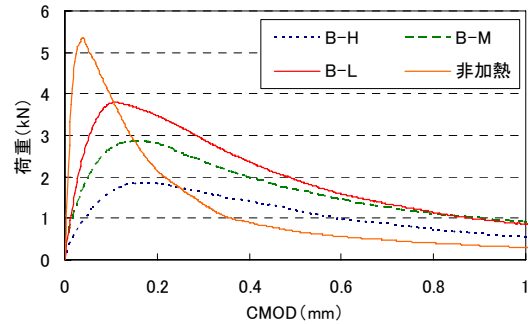


図-11 荷重-CMOD 曲線測定結果 (B)

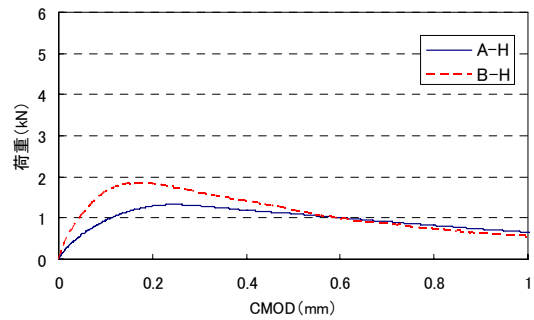


図-12 加熱温度ごとの荷重-CMOD 曲線 (770℃加熱)

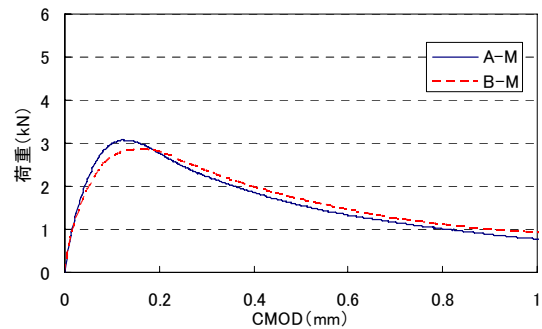


図-13 加熱温度ごとの荷重-CMOD 曲線 (630℃加熱)

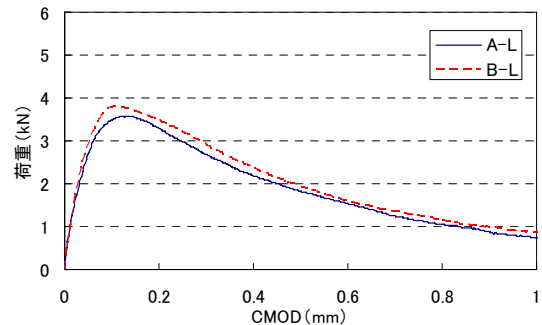


図-14 加熱温度ごとの荷重-CMOD 曲線 (500℃加熱)



表-7 算出した破壊エネルギーおよびひび割れ長さ

加熱温度 (°C)	シリーズ	破壊エネルギー (N/m)	ひび割れ長さ (mm)
770 (H)	A-H	224	78.0
	B-H	187	78.8
630 (M)	A-M	271	79.3
	B-M	310	82.1
500 (L)	A-L	289	78.1
	B-L	321	80.8
非加熱	A-O	198	78.3
	B-O	206	77.5

(3) 破壊エネルギー算出結果

実験により得られた荷重-CMOD 曲線の平均曲線から破壊エネルギーを算出した結果を表-7に示す。また、表-7には、実験終了後のひび割れ長さ計測結果も併記する。加熱温度と破壊エネルギーの関係を図-15に、質量減少率と破壊エネルギーの関係を図-16に示す。いずれのシリーズにおいても加熱温度あるいは質量減少率が上昇するに従い破壊エネルギーは減少する傾向にあった。しかし、非加熱の場合と比較すると、加熱されることによって破壊エネルギーは一旦上昇していることが分かる。これはセメントペースト部分が軟化し、荷重-CMOD 曲線の最大荷重以降の軟化が緩やかとなり、式(3)の  $W_0$  の値が大きくなったことや加熱時の発生したマイクロクラック等の影響によりひび割れ経路が長くなったためと推察できる。質量減少率との関係については、B.Zhang らの実験結果にもあるように減少率 6%以上になった場合破壊エネルギーが減少傾向にあった<sup>5)</sup>ことから、この結果は妥当なものであると言える。A に比べ B の破壊エネルギーの低下が著しく表れているのは質量減少率が大きいことや図-12に示すように CMOD0.6mm 以降で荷重値が A, B で逆転していることで、結果、A の破壊エネルギーが B より大きく算出されたことが原因として挙げられる。

4. 結論

本研究は配合の違いが破壊エネルギーに与える影響および加熱状況が破壊エネルギーに与える影響について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 非加熱時の破壊エネルギーの傾向として、水セメント比が一定である場合でも骨材量および粗骨材の含有率が高いほど破壊エネルギーは大きくなった。
- 2) ひび割れ経路長さが長いほど破壊エネルギーが増加する傾向にあった。
- 3) 本試験において、500°C・630°C加熱の場合、非加熱時に比べセメントペースト部分が軟化したことやひび割れ経路が長くなり破壊エネルギーが上昇した。
- 4) 本報告の範囲内の加熱温度における加熱後の破壊エネルギーは、加熱温度が上昇するに従い試験体の質量が減少し、それに伴い破壊エネルギーも減少した。

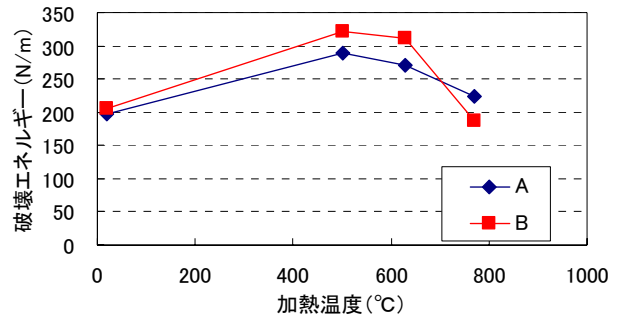


図-15 加熱温度と破壊エネルギーの関係

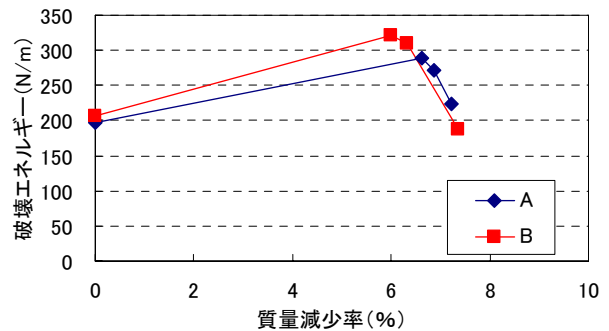


図-16 質量減少率と破壊エネルギーの関係

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2007
- 2) K.M.El-Sayed, G.V.Gunea, C.Rocco, J.Planas, and M.Elices：INFLUENCE OF AGGREGATE SHAPE ON THE FRACTURE BEHAVIOUR OF CONCRETE, Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.171-179, 1998
- 3) P.C.Perdikaris：Scale effect on the fracture of high-strength concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.727-733, 2001
- 4) 安部 武雄, 古村 福次郎, 戸祭 邦之, 小久保 勲：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, No.515, pp.163-168, 1999.1
- 5) B.Zhang and N.Bicanic：Fracture energy of high performance concrete at temperatures up to 450°C, Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.461-468, 2001
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，2007
- 7) コンクリート工学協会：JCI 規準集，2003
- 8) British Standards：Euro-code4 -Design of composite steel and concrete structures- part1-2:General rules-Structural fire design, pp.34-35, 2005