

論文 長期高温曝露を受けたコンクリートの破壊エネルギーに関する実験的検討

松沢 晃一*1・嵩 英雄*2・田山 隆文*3・西 祐宜*4

要旨: 本研究では、セメント種類および混和剤の異なる供試体を作製し、175℃までの温度環境下で90日間の曝露後に破壊靱性試験を実施し、長期高温曝露を受けたコンクリートの破壊エネルギーに関する検討を行った。その結果、破壊エネルギーは、50～80℃まで低下し、110℃で増加、そして、再び低下する傾向にあること、収縮低減剤の混和により50～65℃における低下が抑制される傾向にあることが示された。

キーワード: コンクリート, 高温曝露, 破壊エネルギー, 質量減少率, 収縮低減剤

1. はじめに

コンクリート構造物は様々な用途に用いられているが、その供用期間中に炭酸ガスや塩化物イオンなどの劣化因子の影響を受ける。その劣化因子の1つに熱がある。コンクリートは熱の影響を受けると強度特性などの性質が変化するため、長期にわたり熱の影響を受ける原子力発電所に用いられるコンクリートに関しては、供用時の温度制限値が設けられている(表-1)¹⁾。そして、構造物が火災などによる熱の影響を受けた際にもコンクリートの性質は変化する。このようなことから、熱の影響を受けたコンクリートに関する検討は多くなされており、国内外で報告書なども刊行されている^{2),3)}。

100℃未満の熱の影響に関しては、曝露期間100日程度では温度50～80℃付近で圧縮強度が低下するが、曝露期間1000日では、逆に温度50～80℃で強度が最大となること^{4),5)}、その強度変化が、コンクリートの含水状態の変化によるものであること⁵⁾が報告され、水分状態と圧縮強度の関係についてのレビューもなされている⁶⁾。

上述のとおり、100℃未満の熱の影響によってもコンクリートの強度特性が変化することが明らかとなっている。強度が変化するという事は、強度変化にともなって破壊エネルギーも変化することが予想される。しかし、100℃未満の熱の影響を受けたコンクリートの破壊エネルギーに関する検討が少ないのが現状である^{7),8)}。

本研究では、100℃未満の温度を含め、表-1中のその他の部分の非定常状態である175℃までの温度環境下で90日間曝された、長期高温曝露(以下、曝露)を受けたコンクリートの破壊エネルギーについて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-2に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントの2種類、混和剤は主成分が異なるAE減水剤2種類、収縮低減剤1種類を用いた。収縮低減剤は、コンクリートの高温曝露による強度の低下抑制効果を実験的に示されている⁸⁾。

表-3に実験の要因と水準を示す。普通ポルトランドセメント(OP)にはAE減水剤1種類(AE)、中庸熱ポルトランドセメント(MP)にはAE減水剤2種類(AE, AE(H))を組み合わせた調合とし、収縮低減剤(SR)混和の有無で合計6調合のコンクリートとした。

表-4に調合を示す。供試体は水セメント比50%、目標空気量4.5%とし、粗骨材量は935kg/m³一定とした。

表-1 コンクリートにおける温度制限値¹⁾

温度荷重の作用状態	部分	温度(℃)
定常状態	貫通部	90
	その他の部分	65
非定常状態	ジェット力を受ける部分	340
	その他の部分	175

表-2 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	OP	密度3.16g/cm ³ , 比表面積3260cm ² /g
	中庸熱ポルトランドセメント	MP	密度3.21g/cm ³ , 比表面積3220cm ² /g
細骨材	川砂(掛川産)	S	表乾密度2.56g/cm ³ , 粗粒率2.67
粗骨材	碎石(青梅産)	G	表乾密度2.64g/cm ³ , 実積率59.0%
混和剤	AE減水剤	AE	リグニンスルホン酸とオキシカルボン酸塩
		AE(H)	リグニンスルホン酸, オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物
	収縮低減剤	SR	グリコールエーテル系誘導体

*1 建築研究所 材料研究グループ 主任研究員 博士(工学)(正会員)

*2 建築振興協会 技術顧問 博士(工学)(正会員)

*3 建築振興協会 八王子試験所 主席技術者(正会員)

*4 フローリック 技術本部コンクリート研究所 主席研究員 博士(工学)(正会員)

コンクリートの練混ぜは、温度 20℃の恒温室で容量 100 リットルの強制二軸ミキサを使用して行った。練混ぜ時間はミキサにセメント、細骨材、粗骨材を投入し 10 秒間、水および混和剤を投入し 90 秒間とした。練混ぜは、各調合 1 バッチにつき 100 リットルとし、それぞれ 2 バッチ行った。そして、2 バッチ分を混合したものについてフレッシュ試験を実施し、型枠に打ち込んだ。

供試体は各試験条件につき、圧縮強度試験およびヤング係数測定用供試体（φ100×200mm）3 体、曝露なしおよび曝露による長さ変化測定用供試体（100×100×400mm）各 3 体とした。なお、破壊靱性試験には、曝露後の長さ変化測定を終えた供試体を用いた。

供試体は打込み後 13 週まで温度 20℃の恒温室で封緘養生とした後に脱型した。そして、脱型直後に曝露前の質量、長さ変化測定用供試体の長さを測定した後に、それぞれの温度で 90 日間の曝露とした。曝露後は再度、質量、長さを測定し、圧縮強度試験およびヤング係数測定、破壊靱性試験を行った。なお、曝露前（材齢 13 週まで封緘養生）についても圧縮強度試験およびヤング係数測定、破壊靱性試験を行った。また、曝露なし供試体の長さ変化の測定（材齢 1 週まで標準養生後に開始）も実施した。

表-5 にフレッシュ性状と材齢 4 週および 13 週時の強度試験結果を示す。中庸熟ポルトランドセメントよりも普通ポルトランドセメントを用いた場合が高く、AE 減水剤に関しては、AE(H)よりも AE を用いた場合の方が高くなる傾向にある。また、収縮低減剤を混和した場合に圧縮強度が 1 割程度小さくなった。

図-1 に曝露なし供試体の長さ変化率を示す。曝露なし供試体の長さ変化率の測定は、JIS A 1129 における養生、保存、測定材齢に準じて行った。普通ポルトランドセメントよりも中庸熟ポルトランドセメントを用いた場合の長さ変化率が小さい。また、AE 減水剤に関しては、収縮低減剤を混和しない場合は AE よりも AE(H)を用いた方が小さくなっているが、収縮低減剤を混和した場合は AE 減水剤の違いによる影響はみられない。なお、収縮低減剤を混和することで、長さ変化率が乾燥期間 26 週で 80~120 μ 程度小さくなっている。

2.2 試験方法

(1) 曝露方法

曝露時の最高温度（以下、曝露温度）は 20~175℃とし、期間は 90 日とした。曝露は、20℃は湿度 60%R.H.の恒温恒湿室、50, 65, 80℃は恒温恒湿槽、110, 175℃は循環送風式恒温槽を用い、20℃以外の湿度調整は行わなかった。曝露後の試験は、供試体温度が外気温度と同程度となった後に行った。

表-3 実験の要因と水準

要因	水準
セメント	普通 (OP), 中庸熟 (MP)
AE 減水剤	AE, AE(H)*
収縮低減剤	あり (SR), なし
曝露温度	20℃・60%R.H., 50℃, 65℃, 80℃, 110℃, 175℃

※ AE(H)はMPを用いた調合のみで使用

表-4 調合 (単位: kg/m³)

記号	G _{max} (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	W	OP	MP	S	G	AE	AE(H)	SR
OP-AE	20	4.5	50	173	346	—	820	935	1.73	—	—
MP-AE	20	4.5	50	173	—	346	822	935	1.73	—	—
MP-AE(H)	20	4.5	50	173	—	346	822	935	—	1.73	—
OP-AE-SR	20	4.5	50	173	346	—	820	935	1.73	—	6
MP-AE-SR	20	4.5	50	173	—	346	822	935	1.73	—	6
MP-AE(H)-SR	20	4.5	50	173	—	346	822	935	—	1.73	6

表-5 フレッシュ性状および各材齢での強度試験結果

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)		
			4 週 標準	13 週 標準	13 週 封緘	4 週 標準	13 週 標準	13 週 封緘
OP-AE	13.0	3.9	45.2	52.7	50.6	28.3	31.5	29.3
MP-AE	14.5	4.6	40.2	52.8	48.4	28.6	31.2	29.2
MP-AE(H)	15.5	4.7	39.1	50.2	45.8	26.8	30.2	28.1
OP-AE-SR	13.5	4.6	40.9	48.9	48.0	27.9	31.6	29.7
MP-AE-SR	15.0	4.0	36.0	48.9	47.6	27.6	31.1	29.9
MP-AE(H)-SR	17.0	5.0	32.7	46.4	45.3	26.4	29.5	29.5

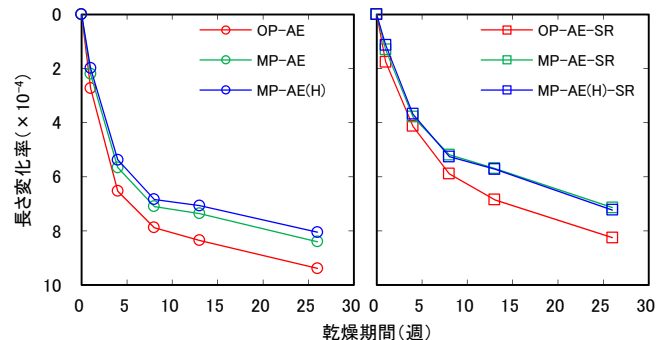


図-1 曝露なし供試体の長さ変化率

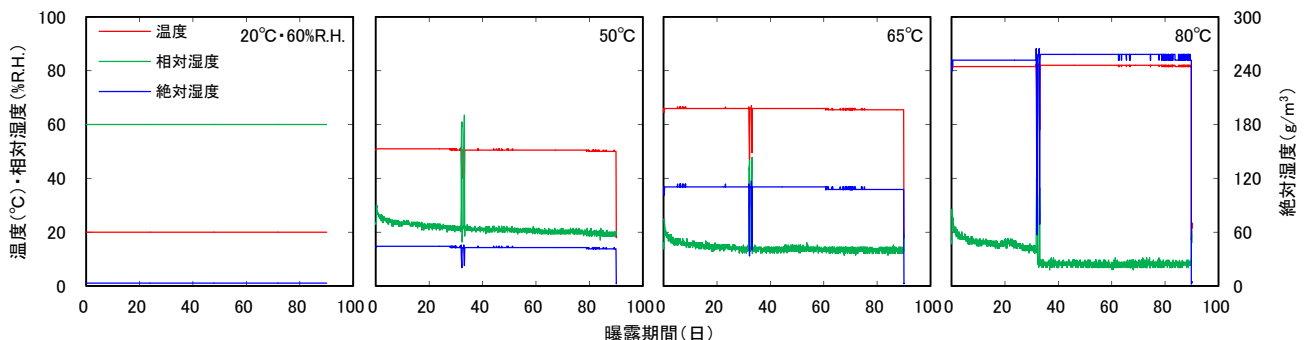


図-2 曝露時の温湿度履歴

図-2 に曝露時の温度 50, 65, 80℃における温湿度測定結果および絶対湿度を示す。また、20℃における温湿度（設定値）と絶対湿度もあわせて示す。なお、絶対湿度は温湿度から算出した値である。曝露温度 50, 65, 80℃は、曝露開始後まもなく所定の温度となっている。また、湿度は曝露開始直後で 20~30%R.H.、そして、曝露期間の経過とともに下がり、最終的に 50℃は 20%R.H.、65℃は 13%R.H.、80℃は 10%R.H.となった。曝露開始から 31~32 日で温湿度に大きな変化がみられるが、これは、実験施設の点検のために、一時停電となったためである。

(2) 質量減少率測定方法

質量減少率は寸法 100×100×400mm 供試体、φ100×200mm 供試体について、曝露前および曝露後に測定した供試体質量から式(1)により求めた。

$$\omega_T = \frac{W_0 - W_T}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 ω_T : T℃暴露による質量減少率 (%)、
 W_0 : 曝露前の供試体質量 (g)、
 W_T : T℃暴露後の供試体質量 (g)

(3) 長さ変化率測定方法

長さ変化率は寸法 100×100×400mm 供試体の曝露前および曝露後の長さを測定し、その差とした。

(4) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じ、同時にコンプレッソメーターを用いてヤング係数を測定した (JIS A 1149)。

(5) 破壊靱性試験方法

破壊靱性試験は JCI-S-001-2003 (切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法) に準じた (図-3)。供試体は、曝露後の長さ変化率測定を終えた供試体 (100×100×400mm) を用い、供試体中央にダイヤモンドカッター (刃厚 3mm) を用いてリガメント高さが 30mm となるように乾式で切欠きを入れた。

試験にはサーボ・コントロール式油圧試験機 (MTS 社製) を用い、切欠き端部の開口変位の速度を 0.1mm/min に設定、試験は供試体が破断、または、開口変位が 2mm となった時点で終了とした。

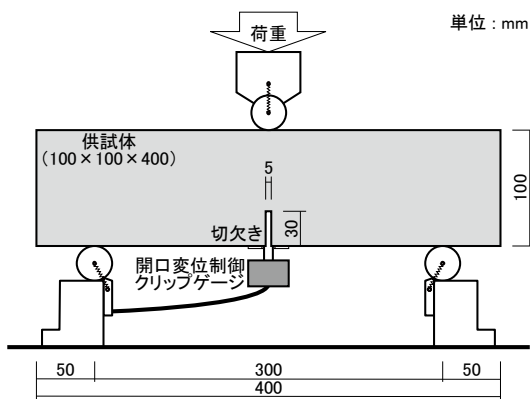


図-3 破壊靱性試験概要

3. 実験結果および考察

3.1 質量減少率

図-4 に寸法 100×100×400mm 供試体の質量減少率と曝露温度の関係を示す。曝露温度 50℃で大きく、その後は普通ポルトランドセメントを用いた場合は曝露温度 80℃で若干小さくなり、中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合は曝露温度 80℃までほぼ横ばいである。そして、曝露温度 110, 175℃では全ての供試体で曝露温度 50℃と比較して緩やかに大きくなっている。また、図-5 に寸法 φ100×200mm 供試体の質量減少率と曝露温度の関係を示す。寸法 φ100×200mm 供試体は、セメント種類に関係なく 50℃で大きく、その後は緩やかに大きくなっている。なお、両寸法の供試体とも、既往の研究と同様に⁹⁾、収縮低減剤混和の有無による違いはみられない。

3.2 長さ変化率

図-6 に長さ変化率と曝露温度の関係を示す。セメント種類、AE 減水剤の種類に関係なく曝露温度 50~65℃までは大きくなるが、80℃で小さくなり、その後は、再び大きくなる傾向にある。また、収縮低減剤を混和した場合は、混和しない場合と比較して曝露温度が 80℃程度までは小さくなるが、曝露温度の上昇とともに効果が小さくなり、中庸熱ポルトランドセメントでは、175℃における収縮低減剤の効果はみられない。なお、収縮低減剤の混和に関係なく、暴露による質量減少率は同様の値となっていることから (図-4)、長さ変化率の低減はセメント硬化体の構造変化によるものと推察される。

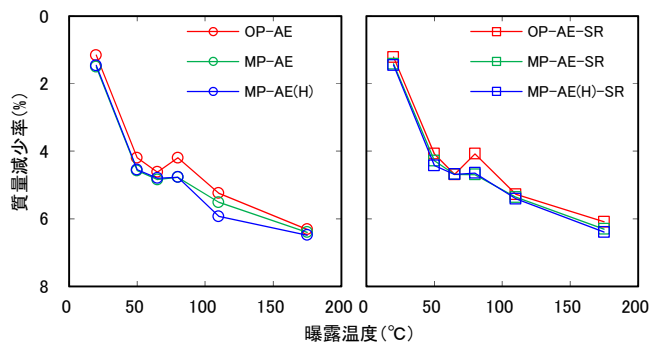


図-4 質量減少率と曝露温度の関係
(100×100×400mm 供試体)

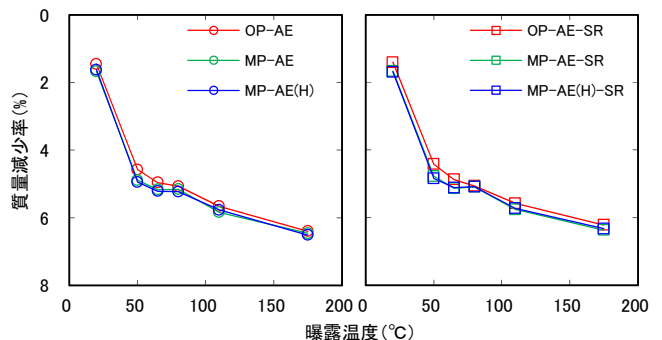


図-5 質量減少率と曝露温度の関係
(φ100×200mm 供試体)

3.3 力学特性

(1) 圧縮強度

図-7 に圧縮強度と曝露温度の関係、図-8 に曝露温度 20℃の圧縮強度に対する各温度で得られた圧縮強度の比と曝露温度の関係を示す。普通ポルトランドセメントと比較して中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合に曝露による圧縮強度の低下が抑制され、収縮低減剤を用いることで、既往の研究⁹⁾と同様に、さらに強度低下が抑制される。収縮低減剤を混和した場合は、収縮低減剤を混和しない場合と比較して、曝露温度 65℃までは 10%程度、110~175℃で 5%程度大きい結果となった。

(2) ヤング係数

図-9 にヤング係数と曝露温度の関係、図-10 に曝露温度 20℃のヤング係数に対する各温度で得られたヤング係数の比と曝露温度の関係を示す。セメント種類、AE 減水剤種類に関係なく、収縮低減剤を混和しない場合は曝露温度 50℃でヤング係数が低下し、65℃で増加、その後は曝露温度の上昇とともに再度、低下している。また、収縮低減剤を混和した場合は、収縮低減剤を混和しない場合と比較して、曝露温度 50℃でまでは 12%程度、その後も 5%程度大きく、175℃で 3%程度大きい。圧縮強度と同様に収縮低減剤の混和により高温曝露によるヤング係数の低下が抑制されている。

3.4 荷重-開口変位曲線

図-11 に破壊靱性試験により得られた荷重-開口変位曲線を示す。最大荷重はセメント種類、AE 減水剤種類、収縮低減剤混和の有無に関係なく、曝露温度 110℃まではほとんど変化がなく、175℃になると低下している。グラフ形状は曝露温度が低い場合は荷重増加時の傾きが大きく、最大荷重以降の低下も急勾配となるが、曝露温度が 110、175℃になると荷重増加時の傾きが小さくなり、最大荷重が低下するとともに、最大荷重以降の勾配も緩やかになる傾向にある。

3.5 破壊エネルギー

図-12 に破壊エネルギーと曝露温度の関係、図-13 に曝露温度 20℃の破壊エネルギーに対する各温度で得られた破壊エネルギーの比と曝露温度の関係を示す。また、図-12 に誤差範囲をあわせて示す。破壊エネルギーは JCI-S-001-2003 (切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法) に従い、式(2)、(3)により求めた。なお、 W_0 は供試体が破断となるか、または、開口変位が開口変位計の容量である 2mm までの荷重-開口変位下の面積とした。

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

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

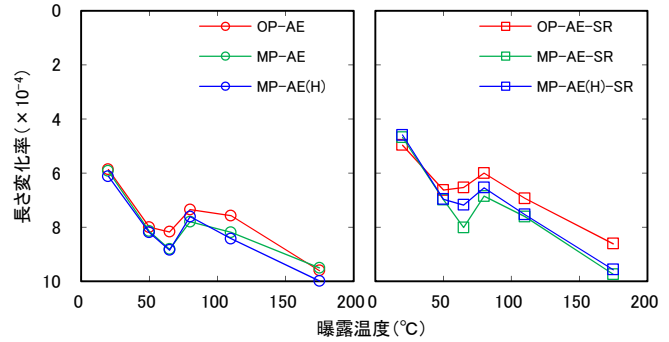


図-6 長さ変化率と曝露温度の関係

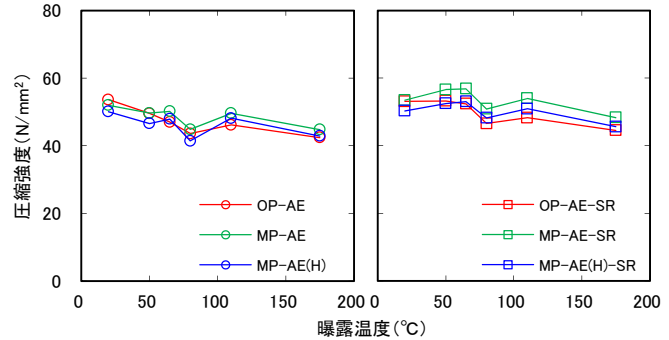


図-7 圧縮強度と曝露温度の関係

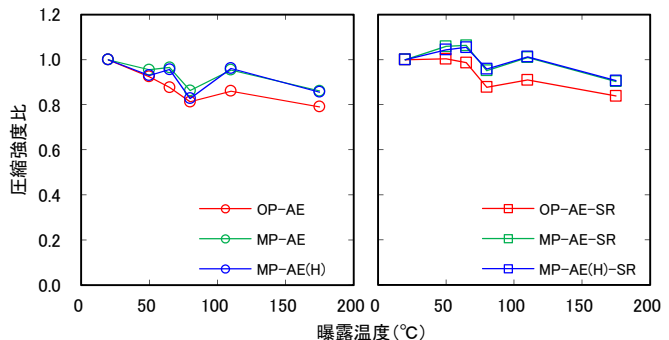


図-8 圧縮強度比と曝露温度の関係

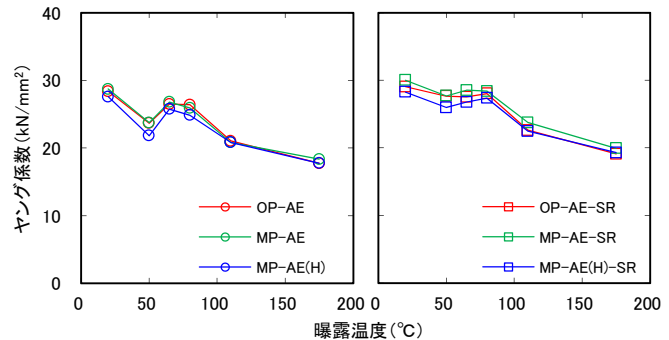


図-9 ヤング係数と曝露温度の関係

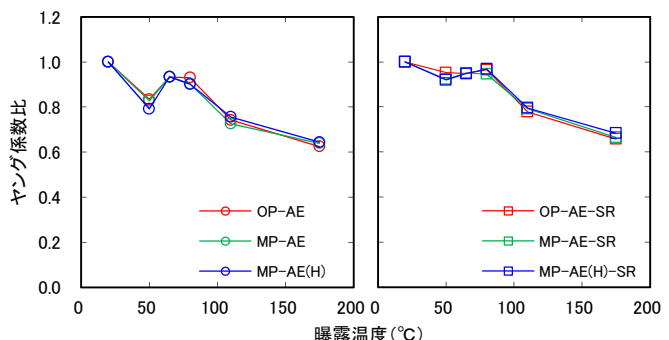


図-10 ヤング係数比と曝露温度の関係

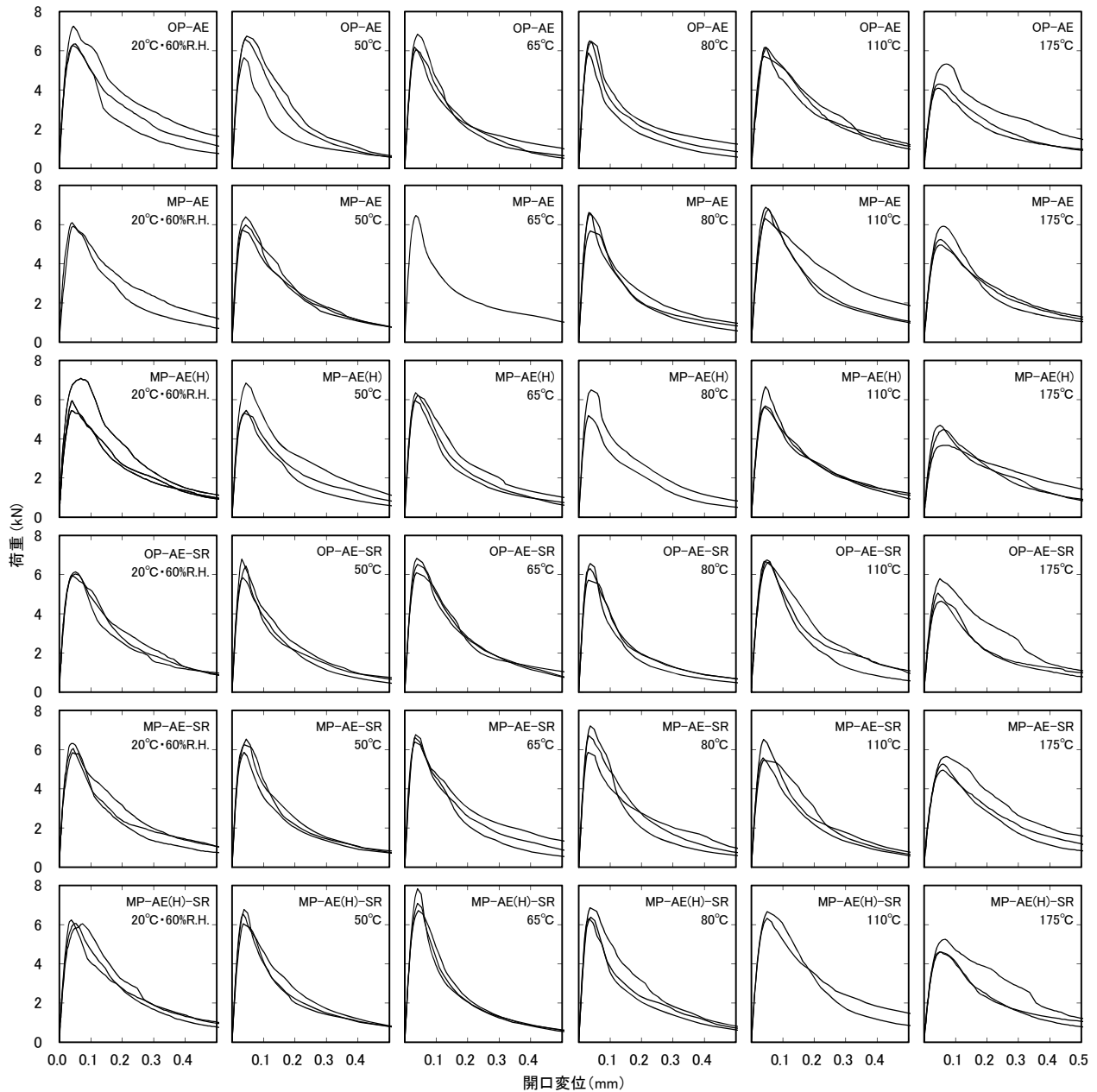


図-11 荷重-開口変位曲線

ここに、 G_F : 破壊エネルギー (N/m),
 W_0 : 供試体破断, または, 開口変位 2mm
 までの荷重-開口変位曲線下面積 (N・m),
 W_1 : 供試体の自重および載荷治具がなす
 仕事 (N・m),
 A_{lig} : リガメントの面積 0.003 (m²)
 m_1 : 供試体の質量 (kg),
 S : 載荷スパン 0.3 (m),
 L : 供試体の全長 0.4 (m),
 m_2 : 試験機に取付けておらず, 破断する
 まで供試体に載っている治具の質量 0
 (kg),
 g : 重力加速度 9.807 (m/s²),
 $CMOD_c$: 破断時のひび割れ開口変位 (mm)

破壊エネルギーは, 普通ポルトランドセメンを用いた
 場合は, 収縮低減剤の混和なしは曝露温度 50°Cで低下し
 た後に 110°Cまで増加し, 再び低下するが, 収縮低減剤
 を混和すると異なる挙動を示した。また, 中庸熱ポルト
 ランドセメントおよび AE(H)を用いた場合, 収縮低減剤
 混和の有無で, 曝露温度 50, 65°Cと低下する温度が異な
 るが, 110°Cまでは増加し, 175°Cで低下している。なお,
 中庸熱ポルトランドセメントおよび AEを用いた場合,
 曝露温度 65°Cまで緩やかに低下した後に 110°Cまで増加
 し, 再び低下するが, 収縮低減剤を混和すると他の供試
 体と異なる傾向を示した (MP-AE-SR)。これに関しては
 誤差範囲も大きいため, 再度, 検討を実施するが必要が
 ある。全体としては, 収縮低減剤を混和すると曝露温度
 50, 65°Cで破壊エネルギー低下が抑制される傾向にある。

図-14 に 20℃の破壊エネルギーに対する各温度で得られた破壊エネルギーの比と質量減少率(図-4)の関係を示す。収縮低減剤混和の有無に関係なく、質量減少率4~4.5%にかけて破壊エネルギーが低下し、6%程度までは増加、そして、6%を超えると再び低下する傾向にある。

4. まとめ

本研究では、175℃までの温度環境下に90日間曝されたコンクリートの破壊エネルギーについて検討を行なった。その結果、本研究の範囲内で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 破壊エネルギーは、50~80℃まで低下し、110℃で増加、そして、再び低下する傾向にある。
- (2) 破壊エネルギーは、収縮低減剤を混和することで50~65℃における低下が抑制される傾向にある。
- (3) 破壊エネルギーと質量減少率の関係は、質量減少率が6%を超えると低下する傾向にある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご指導いただきました東京都立大学 橘高義典教授、東急建設 大岡督尚博士に感謝いたします。また、本研究の一部は、JSPS 科研費18K13876の助成を受けて実施したものです。

参考文献

- 1) 日本機械学会：発電用原子力設備規格 コンクリート製原子力格納容器, 2011
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012
- 3) U.S.NRC：A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures, NRC Job Code N6511, 2010
- 4) 岸谷孝一, 嵩英雄, 奥山治也, 奥野亨：20~300℃の高温にさらされたコンクリートの諸性状に関する研究, その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.143-146, 1972.10
- 5) 岸谷孝一, 嵩英雄, 押田文雄, 大野定俊：300℃までの高温に長期にさらされたコンクリートの性状に関する実験的研究, セメント・コンクリート, No.444, pp.7-14, 1984.2
- 6) 酒井正樹：100℃以下の加熱を受けるコンクリートの水分状態と圧縮強度に関する研究動向, コンクリート工学, Vol.56, pp.251-259, 2018.3

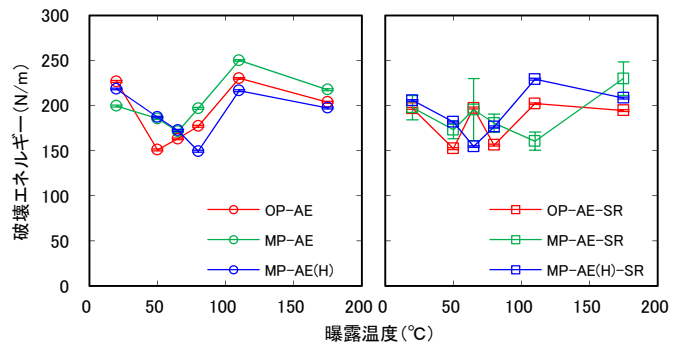


図-12 破壊エネルギーと曝露温度の関係

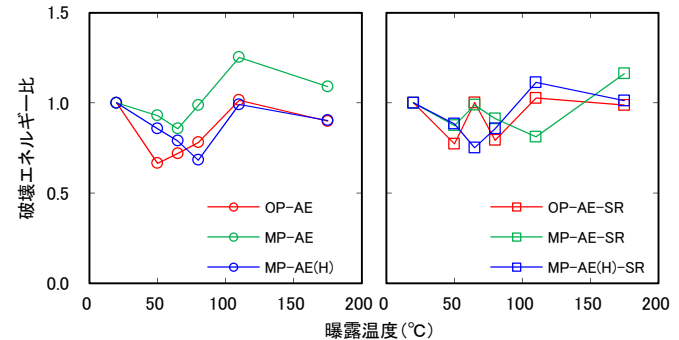


図-13 破壊エネルギー比と曝露温度の関係

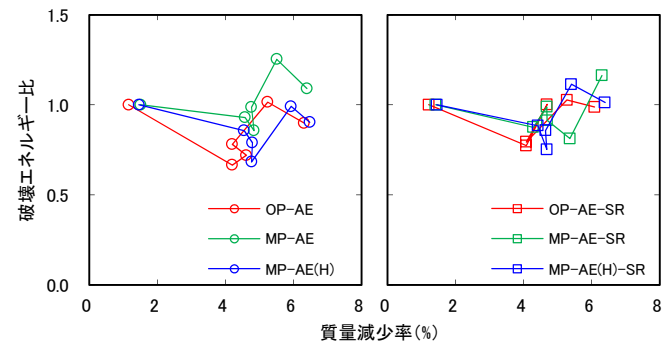


図-14 破壊エネルギー比と質量減少率の関係

- 7) MATSUZAWA Koichi, KITSUTAKA Yoshinori：Fracture Properties of Concrete Subjected to Heating up to 60°C, 14th DBMC, 9p, USB, 2017.5
- 8) 嵩英雄ほか：高温に曝されたコンクリートの力学性状およびRC梁の耐力に及ぼす暴露温度と収縮低減剤の影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 第1報~第6報, 構造II, pp.1083-1092, 2018.9
- 9) 嵩英雄ほか：高温に曝されたコンクリートの諸性状に及ぼす暴露温度と曝露期間の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 第1報~第6報, 材料施工, pp.435-436, 2016.8