

論文 加熱および中性化による複合劣化作用を受けたコンクリートのひび割れ抵抗性に関する研究

山内 博史*1・橘高 義典*2・松沢 晃一*3・刈田 祥彦*4

要旨: 本研究では、水セメント比 60%, 80%, 100% のモルタル供試体を作製し、温度 20°C, 65°C, 二酸化炭素濃度 0%, 5% の異なる環境下で養生した後に破壊靱性試験を行い、各供試体のひび割れ抵抗性について検討を行った。その結果、20°C 養生では 4 週時点より圧縮強度、初期結合応力および破壊エネルギーが上昇し、圧縮強度は中性化するとさらに上昇することが明らかとなった。65°C 養生では 4 週時点より圧縮強度が低下し、破壊エネルギーはほぼ変化せず、初期結合応力は上昇するが、65°C で中性化するといずれも上昇し、また圧縮強度の上昇は水セメント比の低下に伴い著しくなることが判明した。

キーワード: コンクリート, 加熱, 中性化, 破壊靱性試験, 引張軟化曲線

1. はじめに

原子力発電所などに用いられる鉄筋コンクリート構造物は、その用途から、長期にわたり加熱の影響を受ける。このようなコンクリートでは水分の逸散が想定され、強度の低下に加えヤング係数の低下が懸念され、構造体に蓄えられる弾性ひずみエネルギーの増加によりひび割れが進展しやすくなる。これらのコンクリートには耐久性を確保するため、65°C 以下の温度規定値が設けられているが、この温度規定についての研究例は少ない。加熱を受けたコンクリートの研究は以前から行われており、圧縮強度および引張強度は加熱温度の上昇に伴い低下することなどが報告されている¹⁾⁴⁾。また加熱を受けたコンクリートの破壊靱性試験についても検討されており、200°C 以下の温度環境下において含水状態を変化させたコンクリートでは破壊エネルギーは加熱温度の上昇に伴い低下すること、湿潤状態においてはその傾向が顕著になることが報告されている⁵⁾。

さらに、鉄筋コンクリート構造物の安全性および耐久性を検討する際に考慮すべき要因として、コンクリートの「中性化」がある。中性化とは、コンクリート中に含まれる水酸化カルシウムが、大気中の二酸化炭素と反応することにより炭酸カルシウムを生成し、pH8.5~10 程度になる現象である。中性化の進行については、進行速度が経過時間の平方根に比例するという理論をもとにした速度式が使用されることが多い。コンクリートの中性化に関する研究も数多く行われており、中性化することで微細組織が緻密化し圧縮強度が増加すること、中性化の進行が速いものほど圧縮強度の増加が大きいことなど

が報告されている⁶⁾。モルタルについても、中性化による重量増加に伴い圧縮強度が増加すること、またその一方で中性化により含水率が増加すると圧縮強度が低下することなどが報告されている^{7),8)}。しかし、65°C 以下の高温加熱と中性化の複合作用については十分な検証がされていない。

また、近年進められているコンクリートの高強度化、高靱性化に伴い、コンクリートの引張特性についても研究が進められている。コンクリートは引張脆性破壊型の材料であるため、引張型であるモード I 型の破壊試験を行い破壊靱性を評価することは、その破壊特性やひび割れ抵抗性の評価に有効である。コンクリートは引張破壊が全体の破壊を支配するが、引張力によって一気に破壊するのではなく、内部に多くの微細なひび割れが蓄積することにより徐々に破壊が進展していく性質を持つ。そのため、最大荷重到達後も引張力を持続する引張軟化現象を生じる。このような引張特性の評価には、RILEM や JCI 基準に定められている切り欠きはりをを用いた 3 点曲げ試験やくさび割裂試験などがある。モード I 型の破壊に関する試験方法としては直接引張試験が最も単純で明快であるが、この試験方法ではひび割れ進展時に一様な応力状態を維持するのが難しい。そのため、試験結果を比較的安定して得ることのできる切欠きはり 3 点曲げ試験が採用されることが多い。

本研究では、加熱と中性化による複合的な作用を受けたコンクリートの強度および耐久性に着目し、そのひび割れ抵抗性について、モルタル供試体を用いた破壊靱性試験により検討を行った。

*1 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域 大学院生 (正会員)

*2 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域 教授 工博 (正会員)

*3 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域 助教 修士 (工学) (正会員)

*4 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域 大学院生 (正会員)

2. 研究概要

2.1 供試体概要

表-1 に実験の要因と水準、表-2 に使用材料、表-3 に調査表、図-1 に実験フロー、図-2 に促進中性化試験フロー、図-3 に供試体概要を示す。供試体の作製は、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室で行った。練り混ぜには容量 10 リットルのモルタルミキサを使用した。打ち込みには鉄製の型枠を用い、供試体寸法は 40mm×40mm×160mm とした。水セメント比 60%、80%の供試体は打ち込み後 2 日で脱型し、100%の供試体は 5 日で脱型した。脱型後はそれぞれ材齢 4 週まで養生温度 20℃の水中養生とし、その後は表-1 に示した温度条件および二酸化炭素濃度条件に従って養生を行った。養生時の湿度は相対湿度 60%とした。二酸化炭素濃度 5%の供試体については、フェノールフタレイン溶液を用いて定期的に中性化深さの測定を行い、中性化完了を確認した時点でそれぞれ二酸化炭素濃度 0%の供試体とともに破壊靱性試験を実施した。中性化深さの測定は、JIS A 1153 : 2012 を参考にまず 1 週、4 週時点で行った。以降はその測定結果を用いて式(1)から係数 A を求め、これをもとに供試体全体が中性化する時期を予測し、各供試体の測定時期を設定した。式(1)は中性化の進行が経過時間の平方根に比例するという「 \sqrt{t} 則」によるものであり、係数 A は中性化速度係数とも呼ばれている。

$$C=A\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、C : 中性化深さ(mm), t : 材齢(年), A : 係数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

また破壊靱性試験の直前には、供試体中央部にダイヤモンドカッター(刃厚 1mm)を使用してリガメント高さが供試体高さの 30%となるよう切欠きを入れた。

2.2 破壊靱性試験概要

図-4 に破壊靱性試験概要、図-5 に試験装置、図-6 に試験装置のシステムフローチャートを示す。試験は JCI-S-001-2003「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」に基づいて行った。試験装置には、図-5 に示したクローズドループシステムを有する MTS 社製サーボコントロール式油圧試験機を使用した。切欠き端部の開口変位速は 0.02mm/min とし、開口変位を高感度クリップゲージにより計測し、荷重-開口変位曲線(L-CMOD 曲線 : Load - Crack Mouth Opening Displacement 曲線)を求めた。試験は各条件について 3 体ずつ行い、破壊靱性試験終了後の供試体について圧縮強度試験を実施した。

破壊靱性試験により得られる荷重-開口変位曲線をもとに、多直線近似解析法を用いて引張軟化曲線(TSD 曲線

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比(%)	60, 80, 100
加熱温度(℃)	20, 65
二酸化炭素濃度(%)	0, 5

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	C	密度 3.16g/cm ³ 比表面積 3300cm ² /g
細骨材	硬質砂岩砕砂(相模原産)	S	表乾密度 2.61g/cm ³ 絶乾密度 2.56g/cm ³ 吸水率 2.15% 粗粒率 3.25

表-3 調査表

W/C (%)	S/C (kg/kg)	質量(kg/m ³)		
		W	C	S
60	3.0	300	500	1500
80	4.3	301	376	1616
100	5.0	314	314	1571

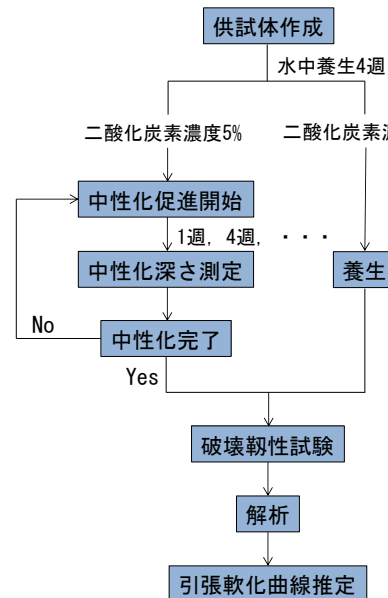


図-1 実験フロー

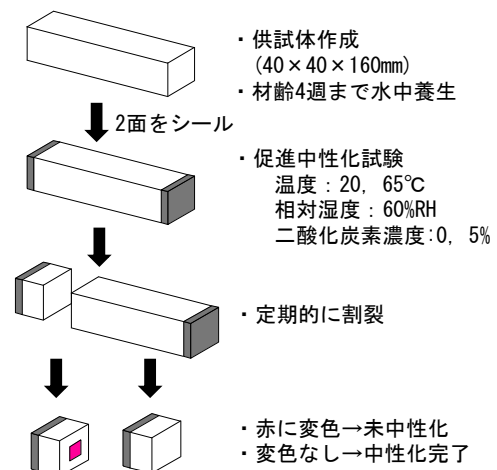


図-2 促進中性化試験フロー

: Tension Softning Displacement 曲線)を推定した。さらにそこから破壊エネルギー G_F および初期結合応力 F_t を導いた。

2.3 破壊特性の評価方法

(1) 引張軟化曲線の推定方法

本研究では、まず破壊靱性試験により各供試体の荷重-開口変位曲線を求め、それをもとに解析プログラムを用いて多直線近似法により逆解析を行い、引張軟化曲線の推定を行った(図-7)。次に、推定した引張軟化曲線から解析によって荷重-開口変位曲線を推定し、破壊靱性試験の計測から得た荷重-開口変位曲線との誤差を小さくする。引張軟化曲線は実験から求めることも可能だが、試験機の性能や誤差などの要因によりばらつきが生じやすい。そのため、本研究では上記の推定方法により引張軟化曲線を求める。

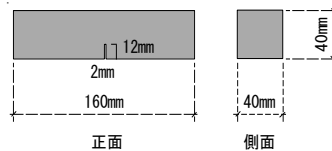


図-3 供試体概要

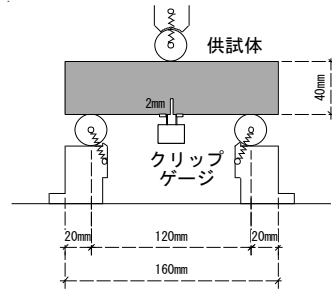


図-4 破壊靱性試験概要

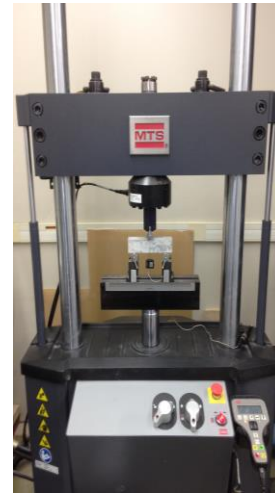


図-5 試験装置

図-8 に多直線近似解析法フローを示す。本解析法では、荷重-開口変位曲線のデータを利用して結合応力-開口変位の関係を求め、これを引張軟化曲線とする。この解析では、ひび割れを進展させるごとに引張軟化曲線の先端の勾配を仮定し、荷重変位関係を計算し、これと実験結果が合致するように順次決定する。この際、計算により既に求めている結合応力-開口変位関係を繰り返し演算の構成則として適用する。

(2) 破壊パラメータ

本研究では、引張軟化曲線から初期結合応力および破壊エネルギーを求め、ひび割れ抵抗性を評価した。

初期結合応力は、破壊靱性試験により得られる荷重-変位曲線の初期勾配より決定する応力で、引張軟化曲線において開口変位が0mmであるときの結合応力である。本質的な引張強度に相当し、この値が大きいほどひび割れが発生しにくい。荷重-開口変位曲線の初期勾配をもとに初期のひび割れ進展に対して結合応力を仮定し、ひび割れ進展解析を行い、荷重変位関係が試験から得られた荷重変位関係と一致する結合応力を求め、これを初期結合応力とする。

破壊エネルギーは供試体が破断するまでに蓄えられるエネルギーであり、この値が大きいほどひび割れが進展しにくい。破壊エネルギーの導出方法は1つではなく、破壊エネルギー G_F^{WOF} は破壊靱性試験より得られる荷重-開口変位曲線の面積 W_0 をもとに算出することができる。 G_F^{WOF} は求め方が簡単であり、なおかつ靱性を評価しやすいため最も多く利用されている。また、引張軟化曲線で囲まれる面積は破壊エネルギー G_F^{TSD} とされ、 $G_F^{WOF} = G_F^{TSD}$ の関係が成り立つ。これにより、荷重-開口変位曲線から引張軟化曲線を逆解析することができる。本研究では、引張軟化曲線で囲まれた面積 G_F^{TSD} を求め、これを破壊エネルギーとした。

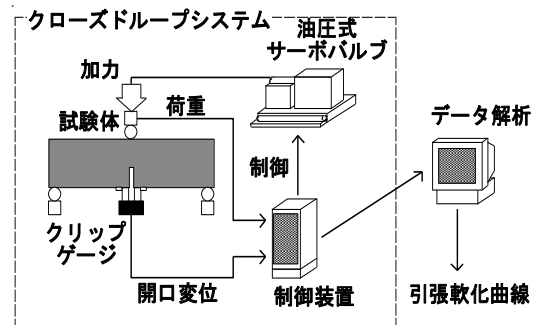


図-6 システムフローチャート

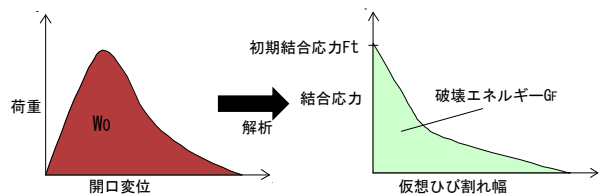


図-7 引張軟化曲線の推定

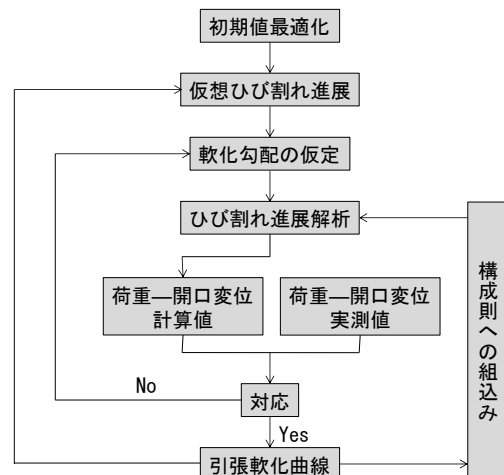


図-8 多直線近似解析法フロー

表-4 促進中性化試験結果

水セメント比(%)	60		80		100	
加熱温度(°C)	20	65	20	65	20	65
促進期間(週)	48	11	11	6	6	4
係数(mm/√週)	2.9	6.0	6.0	8.2	8.2	10

3. 実験結果および考察

3.1 促進中性化試験結果

表-4 に促進中性化試験結果を示す。水セメント比が小さい供試体ほど中性化に長い期間を要した。また、20°C養生より65°C養生の供試体のほうが、中性化の進行が速くなる傾向にある。これは、65°Cのほうが高温であり、供試体が乾燥したためであると考えられる。

3.2 荷重-開口変位曲線

図-9 に破壊靱性試験より得られた荷重-開口変位曲線を示す。曲線は、それぞれ各条件について供試体3体の試験結果を平均化したものである。この図では、同水セメント比、同加熱温度の供試体について、二酸化炭素濃度0%と5%で試験結果を比較している。加熱のみの影響を受けた供試体と、加熱に加え中性化の影響も受けた供試体とを比較し検討する。

供試体ごとの曲線のばらつきは少なく、平均化により得られた曲線についても、全体的に安定した結果が得られた。

20°Cで養生した供試体は、いずれの水セメント比においても、材齢4週時点と比較して最大荷重が上昇していた。これは材齢の増加に伴い、供試体の水和反応が進行したためと考えられる。20°C養生で中性化した供試体も最大荷重は上昇していたが、水セメント比80%、100%については中性化した供試体の方が低い数値を示した。この原因としては、中性化に伴う水の生成による、含水率の増加が挙げられる。中性化による含水率の変化がモルタルの強度に及ぼす影響については、千葉⁸⁾らが、真空乾燥した後中性化促進養生を行い含水率を変化させたモルタル供試体を用い、圧縮強度試験を行うことで検証を行っている。その結果、モルタルは中性化に伴い含水率が増加すると圧縮強度が低下することが示された。本研究においても同様に、含水率が増加したことにより強度の低下が引き起こされたと考えられる。しかし水セメント比60%については、20°C養生において中性化すると強度が大きく上昇した。これは、中性化による供試体組織の緻密化が影響した結果と考えられるが、水セメント比60%の供試体のみ強度が増加したのは、材齢(促進中性化試験期間)が長くなった結果含水率が低下したためであると推測する。以上の結果から、中性化すると強度の上昇が抑制されるが、材齢が長くなると含水率が低下し、最終的には強度が増大するものと考えられる。

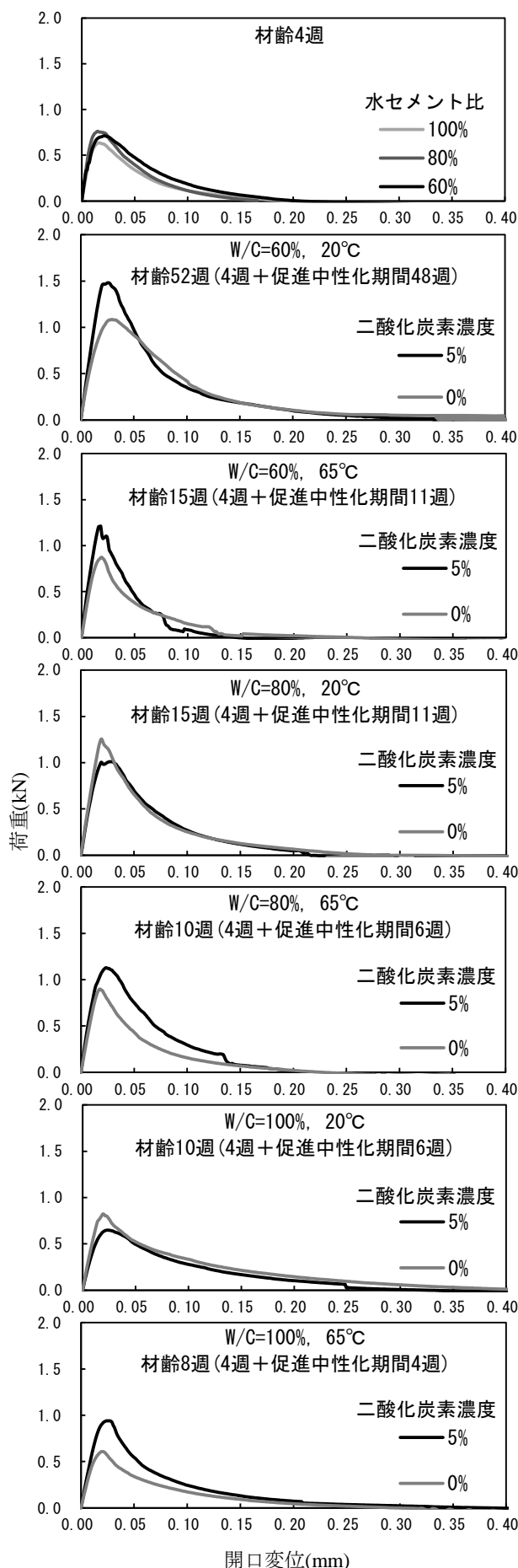


図-9 荷重-開口変位曲線

65℃養生の供試体についても、全ての水セメント比において、4週時点より最大荷重が上昇する傾向がみられた。65℃養生で中性化すると最大荷重は大きく上昇しているが、これは中性化による組織の緻密化の影響であると考えられる。

また最大荷重の上昇が著しいものについては、曲線の最大荷重直後の下降勾配が急になっており、これらは脆性的な破壊挙動を示しているといえる。

3.3 引張軟化曲線および初期結合応力

図-10に引張軟化曲線、図-11に初期結合応力を示す。引張軟化曲線は図-9に示した荷重-開口変位曲線をもとに、多直線近似解析法により解析を行い得られたものである。引張軟化曲線において、開口変位が0のときの結合応力が初期結合応力 F_t である。

初期結合応力に着目すると、中性化していない供試体については、20℃養生、65℃養生ともに材齢4週時点より上昇しているが、20℃養生の供試体がより大きい値を示した。しかし、水セメント比60%の供試体については、いずれの温度についてもほぼ同等の値となった。中性化した供試体については、65℃養生では結合応力が上昇するが、20℃養生においてはその上昇が小さくなる傾向にある。ただし水セメント比60%の供試体については、20℃養生でも中性化すると応力が大きく上昇した。また水セメント比ごとに比較すると、60%では20℃養生の方が、100%では65℃養生の方が大きく、80%では20℃養生と65℃養生でほぼ同等の値を示した。60%では供試体中の水分が少ないため加熱による水分散逸やひび割れの影響が中性化による強度増進を上回り、逆に100%では水分が多いため中性化による強度増進の影響が上回り、80%ではそれらの効果がほぼ均衡したと推測する。また図-9との比較から、荷重-開口変位曲線における最大荷重が大きい供試体は、初期結合応力も大きい値を示す傾向にある。以上の結果から、初期結合応力についても水和反応の進行や中性化による強度増大、加熱による劣化作用などの要因が影響すると考えられるが、異なる傾向も確認できる。

また荷重-開口変位曲線において下降勾配が急な供試体は、引張軟化曲線においても急激な下降を示す傾向にあり、これらの供試体は最大強度が大きいものの脆くなりやすい性質を持つと考えられる。

3.4 破壊エネルギー

図-12に破壊エネルギー G_F を示す。初期結合応力と同様、20℃養生と65℃養生ともに4週時点より上昇しており、中性化によりさらに値が上昇する傾向にある。しかし、初期結合応力が大きいにも関わらず破壊エネルギーが小さい供試体もみられた。これは開口変位の増加に伴う結合応力の低下が大きいためである。

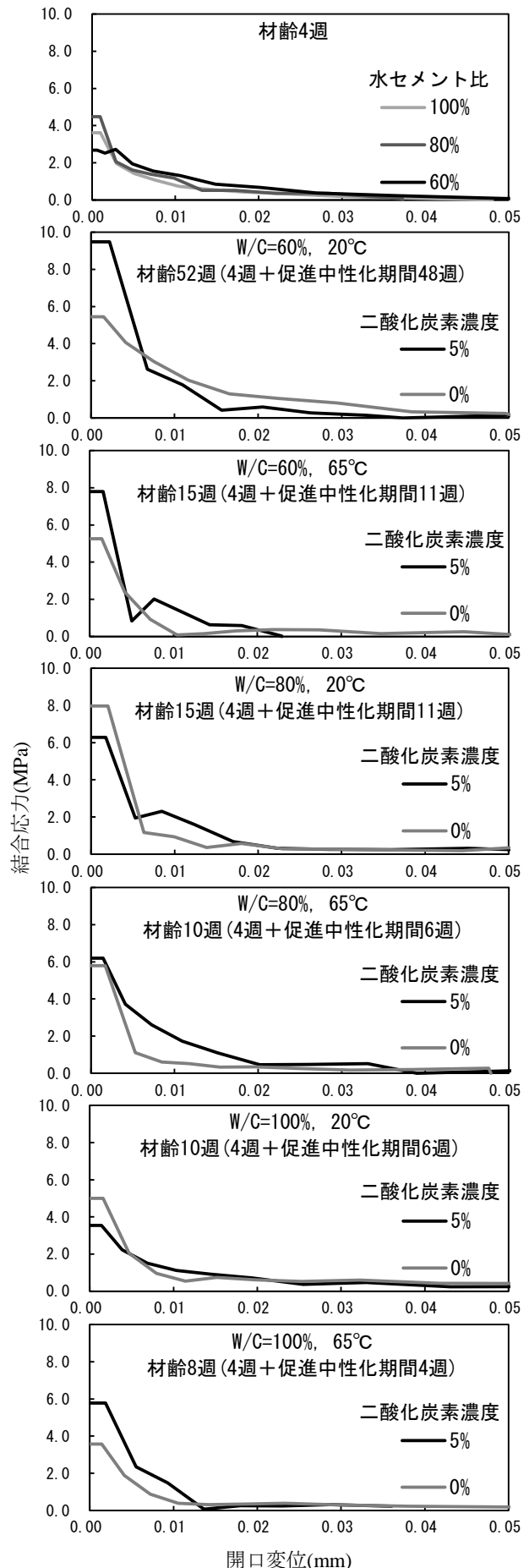


図-10 引張軟化曲線

3.5 圧縮強度

図-13に圧縮強度試験の結果を示す。圧縮強度試験は、破壊靱性試験終了後に得られるモルタル供試体の一部を用いて行った。

中性化していない供試体に着目すると、20℃養生では4週時点より強度が上昇し、65℃養生では4週時点より強度が低下していた。65℃養生において強度が低下した原因としては、加熱による水和反応の阻害、水分散逸による空隙の粗大化、微小ひび割れの発生などが挙げられる。また20℃、65℃ともに中性化した供試体は強度が上昇しており、65℃では大幅に上昇した。また、中性化による強度の上昇は、水セメント比の低下とともに急激になる傾向がみられた。この原因としてはS/C(細骨材質量/セメント質量)の低下が挙げられる。S/Cが低いほど供試体の単位セメント量が多く空隙の割合が大きいため、中性化によりその空隙が緻密化し強度が上昇する割合が大きくなったと考えられる。

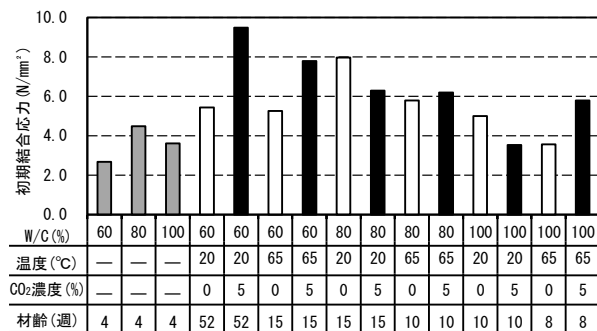


図-11 初期結合応力

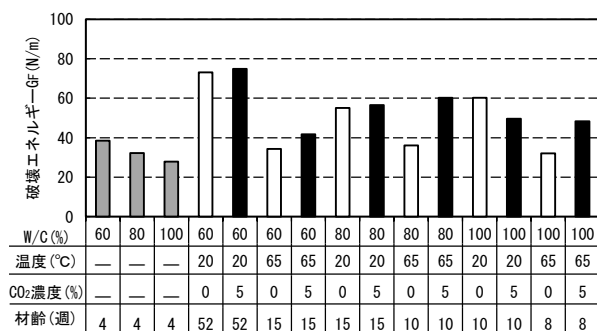


図-12 破壊エネルギー

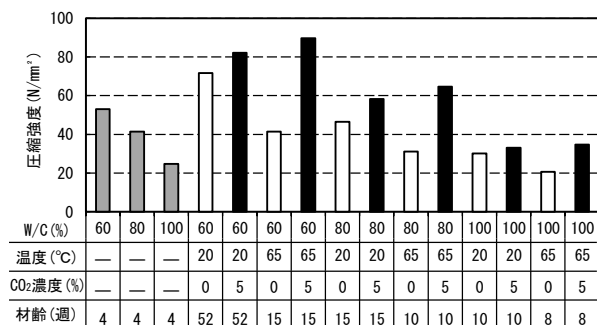


図-13 圧縮強度

4. まとめ

- (1) 20℃で中性化していない場合、材齢4週時点に比べ、圧縮強度、初期結合応力、破壊エネルギーが上昇する。20℃で中性化すると、同温度で中性化していない場合に比べ、圧縮強度は上昇するが、初期結合応力は低下する傾向にあり、破壊エネルギーはほぼ上昇しない。
- (2) 65℃で中性化していない場合、材齢4週時点に比べ、圧縮強度は低下し、破壊エネルギーはほぼ変化しないが、初期結合応力は上昇する。65℃で中性化すると、同温度で中性化していない場合に比べ、圧縮強度、初期結合応力、破壊エネルギーはいずれも上昇する。
- (3) 中性化による圧縮強度の上昇は、水セメント比の低下に伴い著しくなる。

参考文献

- 1) 岸谷孝一, 髙英雄, 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), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.143-144, 1972, 10
- 2) 岸谷孝一, 髙英雄, 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2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.145-146, 1972.10
- 3) 安部武雄, 古村福次郎, 戸祭邦之, 黒羽健嗣, 小久保勲: 高温における高強度コンクリートの力学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
- 4) 河辺伸二, 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博: 高温加熱を受けた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報告集, Vol.25, No.1, pp.377-382, 2003
- 5) Bazant Z.P., and Prat P.C.: Effect of Temperature and Humidity on Fracture Energy of Concrete, Materials and Structures, Vol.29, pp.383-388, 1996
- 6) 佐伯竜彦, 米山紘一, 長滝重義: 中性化によるモルタルの強度変化, 土木学会論文集 No.451, V-17, pp.69-78, 1992.8
- 7) 千葉一雄, 高木嗣朗, 椎名国雄: モルタルコンクリートの中性化に伴う圧縮強度とヤング係数の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.889-890, 1993.7
- 8) 千葉一雄, 高木嗣朗, 椎名国雄: モルタルコンクリートの中性化に伴う水分が圧縮強度とヤング係数に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.235-236, 1994.9