# 論文 加熱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・國枝 陽一郎\*3・松沢 晃一\*4

要旨:本研究では、調合条件の異なる6種類のモルタル供試体を作製し、20℃(常温)から200℃までの9つの 加熱温度条件下において破壊靭性試験(くさび割裂試験)を実施することで、加熱がコンクリートのひび割れ抵 抗性に与える影響について検討を行った。その結果、いずれの調合についても加熱温度の上昇に伴い荷重-開口変位曲線の最大荷重および初期結合応力が低下すること、プレーンモルタル供試体は175℃以上で破壊エ ネルギーが増大すること、ビニロン繊維および鋼繊維を混入した供試体では加熱温度の上昇に伴い破壊エネ ルギーが減少することが明らかとなった。

キーワード:コンクリート,加熱,熱間試験,ひび割れ,破壊靱性試験,引張軟化曲線,破壊エネルギー

# 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、乾燥収縮 によるひび割れの発生、弾性ひずみエネルギーの増加な どによりひび割れが進展しやすくなることが懸念される。 これらの現象はコンクリートの強度および耐久性を低下 させると考えられることから、原子力発電所などの一部 のコンクリート施設では、耐久性の確保を目的として、 用途に合わせた温度規定値を設定している<sup>1)</sup>。

加熱を受けたコンクリートについての研究は以前か ら行われており,加熱中に試験を行う熱間試験と加熱冷 却後に試験を行う冷間試験による検討が行われている。 まず圧縮強度は、熱間試験と冷間試験共に加熱温度の上 昇に伴い低下する傾向にあることが報告されている<sup>2)-3)</sup>。 破壊靱性試験(切欠き梁3点曲げ試験)による検討も行わ れており、荷重-開口変位曲線の最大荷重は、熱間試験 の場合は 105℃で低下した後 200℃で増大しその後は再 び低下すること、冷間試験では 150℃で若干増加した後 低下することが示されている。破壊エネルギーについて は、熱間試験の場合は 150℃までは低下した後温度の上 昇に伴い増大し、冷間試験では 100~300℃の間では増大 し以降は低下することが報告されている<sup>4)</sup>。また加熱温 度および加熱時間を変えて破壊靭性試験を行い破壊エネ ルギーを求めた例では、熱間試験においては 200℃以下 では加熱時間が増加とともに減少し 250℃以上では増大 すること、冷間試験においては 350℃以下では加熱時間 の増加とともに増大し 400℃以上では減少することが報 告されている<sup>5)</sup>。

また,近年進められているコンクリートの高強度化, 高靱性化を背景に、コンクリートの引張特性についての 研究が進められている <sup>9</sup>。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 験を行い破壊靭性を評価することは、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用いた3点曲げ試験な 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点曲げ試験やくさび割裂試験などの 破壊靭性試験を行い、その試験結果から解析により引張 特性を求めるという手法が採用されることが多い。

このことを受け、本研究では加熱を受けたコンクリートのひび割れ抵抗性について明らかにするため、モルタ ル供試体を加熱中にくさび割裂試験を行い検討を行った。

#### 2. 研究概要

本研究では,調合および加熱温度を変えたモルタル供 試体について,加熱炉を設置した油圧試験機を使用し, 供試体加熱中に破壊靭性試験(くさび割裂試験)を行った。 試験から得られる荷重-開口変位曲線をもとに初期結合 応力,破壊エネルギーなどを求めた。

\*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 Ph.D
\*4 建築研究所 主任研究員 博士(工学)(正会員)

記号	調合(kg/m³)							
	W/C(%)	S/C	W	С	S	Ad(%)	SF	VF
N-20	20	1.35	193	963	1300	3.12	—	—
N-40	40	1.35	323	807	1089	_		
N-60	60	2.85	298	496	1414	—	—	—
N-80	80	3.50	324	405	1418	—	—	—
SF-20	20	1.35	193	963	1300	3.12	78.5	—
VF-20	20	1.35	193	963	1300	3.12		13.0

表-1 調合

## 2.1. 供試体概要

表-1 に調合,表-2 に使用材料,図-1 にくさび割裂 試験供試体概要を示す。供試体は、水セメント比 20,40, 60,80%の繊維無混入(以下,プレーン)モルタル供試体4 種類(N-20, 40, 60, 80)と水セメント比 20%の繊維混入モ ルタル供試体2種類(SF-20, VF-20)とした。繊維には鋼繊 維またはビニロン繊維を使用し、1.0vol.%で混入した。 供試体の作製は、温度 20℃,相対湿度 60%の恒温恒湿室 で行い、練り混ぜには容量55リットルの強制練りミキサ を使用した。繊維混入モルタル供試体の練り混ぜは、モ ルタルが練り上がった後、ミキサを回転させながら繊維 を少しずつ投入する方法で行った。供試体の寸法は 100mm×100mm×120mmとし, 打ち込みには鋼製型枠を 用いた。供試体は打ち込み後2日で脱型し,脱型後は材 齢4週まで温度20℃の水中養生,その後材齢8週まで温 度 20℃,相対湿度 60%の気中養生を行った。また、破壊 靱性試験実施直前にダイヤモンドカッター(刃厚 1mm)を 使用し、供試体中央部にリガメント高さが 50mm となる よう切欠きを入れた。

## 2.1.2 破壞靱性試験概要

図-2 に本試験で使用した加熱炉設置型試験装置,図 -3に破壊靭性試験(くさび割裂試験)概要,図-4にシス テムフローチャートを示す。試験装置には、MTS 社製サ ーボコントロール式油圧試験機を使用した。図-4 に示 したクローズドループシステムにより、この試験機は最 大荷重以降の荷重-開口変位関係を高い精度で測定でき る。油圧試験機の載荷部分に加熱炉を設置し、供試体加 熱中に破壊靭性試験を行った。炉内寸法は W230×D320 ×H310(mm)である。最大荷重後の急激な荷重低下を防ぎ 供試体の安定破壊を得るため、切欠き端部の開口変位速 を、繊維無混入の供試体の場合は 0.02mm/min、繊維混入 モルタル供試体の場合は0.1mm/minと設定した。開口変 位を高感度クリップゲージ(使用可能温度:-100℃~200 ℃)により計測し、荷重-開口変位曲線を求めた。試験は 各条件について3体ずつ行い、それらの試験結果を平均 したものを用いて検討することとした。

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	С	密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>		
細骨材		S	表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup>		
	硬質砂岩砕砂		絶乾密度 2.53g/cm <sup>3</sup>		
	(相模原産)		吸水率 2.36%		
			粗粒率 3.09		
混和剤	计正常字子		ポリカルボン酸系		
	尚性能减水剤		化合物		
繊維	6回 645 644	SF	長さ 30mm		
	<b></b>		比重 7.85		
	18	L.F.	長さ18mm		
	ヒニロン絨維		比重 1.30		







図-2 加熱炉設置型試験装置



図-3 破壊靭性試験概要

## 2.1.3 加熱方法

図-5 に試験時の加熱履歴を示した。供試体加熱時の 炉内最高温度(以下,加熱温度)は20℃(常温),40℃,65℃, 90℃, 100℃, 125℃, 150℃, 175℃, 200℃の9通りとし た。昇温速度は、供試体表面と内部中央との温度差が小 さくなるよう 1.0℃/min とした。炉内温度が目標温度に 達した後,温度を1時間保持し,以降は保温状態で破壊 靭性試験を行った。

## 2.2 破壊特性の評価方法

図-6 に荷重-開口変位曲線と引張軟化曲線との関係, 図-7 に多直線近似解析フローを示した。本研究では, ひび割れの発生および進展の2つの観点から破壊特性を 評価するため、初期結合応力と破壊エネルギーの2つの 破壊パラメータを用いることとした。これらは、破壊靭 性試験により得られる荷重一開口変位曲線に解析プログ ラムを用い,引張軟化曲線を推定することで求められる。 解析には、供試体の引張軟化曲線を詳細に推定できる多 直線近似解析法を採用した。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0のとき の結合応力である。本質的な引張強度に相当し、ひび割 れ発生に対する抵抗性を示す。破壊エネルギーは引張軟 化曲線で囲まれた面積 G<sub>F</sub><sup>TSD</sup>に相当し,ひび割れ進展に 対する抵抗性を示す。 $G_{F}^{TSD}$ は仮想ひび割れ節点 $\delta$ が $\delta$ cr(限界開口変位)となり,供試体が完全に分離するまでに 必要な破壊エネルギーである。しかし繊維を混入した供 試体では、繊維のブリッジング作用などにより供試体が 破断に至らず $\delta$  cr が特定できないため,正確な G<sub>F</sub><sup>TSD</sup>は 算出できない。そこで本研究では、引張軟化曲線におい て有効ひび割れ幅δu までの範囲で囲まれる面積を有効 破壊エネルギーG<sub>F</sub>uとし、繊維混入供試体についてはG<sub>F</sub>u で破壊エネルギーを評価することとした。δu について は、耐久性や防水性および美観の観点から、鉄筋コンク リート部材の機能が大きく低下する値として 0.5mm が 提案されている。これをもとに、本研究ではδuを0.5mm に設定したり。







仮想ひび割れ幅

δcr

開口変位





## 実験結果および考察

## 3.1 荷重一開口変位曲線

図-9 に荷重-開口変位曲線を示す。曲線は全て同条件の供試体3体の試験結果を平均したものである。繊維 混入供試体については、一部スムージング処理を施した。

曲線の最大荷重に着目すると、いずれの調合について も加熱温度の上昇に伴い低下する傾向がみられる。これ は供試体が乾燥しひび割れが発生しやすくなったためと 考えられる。N-20 供試体は、90℃以下ではほぼ一定の値 をとるが 100℃以上で徐々に低下し 200℃で増大してい る。また SF-20 供試体は 175℃で一旦増大した後 200℃で 再び低下している。

曲線の形状に着目すると, N-40, N-60, N-80の供試体は 175℃以上で、N-20 供試体は 200℃になると開口変位の 増加に伴う荷重の増大および低下が緩やかになっている。 これは加熱により発生した供試体内部の水蒸気圧などの 影響から微細なひび割れが発生し、それを介して徐々に ひび割れが進展したためであり, N-20のみ 200℃で変化 したのは、他の供試体に比べて供試体組織が緻密なため であると考えられる。VF-20供試体は、荷重の上昇勾配 については加熱温度が上昇してもほぼ一定であった。し かし、最大荷重直後の荷重低下は加熱温度の上昇ととも に急激になっている。また、それ以降の傾向は加熱温度 の上昇とともに変化している。20℃および40℃では、開 口変位約 0.3mm から約 0.7mm の間ほぼ一定の荷重値を 保持し、以降は荷重が徐々に低下している。これはビニ ロン繊維の効果によるものと考えられる。ただし、40℃ では20℃と比べ荷重の低下が緩やかになる。65~125℃で は、開口変位約0.3mmから荷重値が徐々に増大する傾向 を示し、その勾配はいずれの温度でもほぼ一定である。 これは、加熱によりビニロン繊維が延性化し、繊維の伸 展により強度が低下したためと推察する。150℃以上では 開口変位の増加に伴い荷重が緩やかに低下する傾向を示 し、温度の上昇に伴い荷重の低下は急激になっている。 これは、高温により繊維自体の強度が低下したためと考 えられる。SF-20 供試体については、曲線の傾きや形状 には明確な変化はみられない。これは、モルタル部分は 加熱によりひび割れが発生しやすくなるが、鋼繊維の強 度が低下しなかったためと考えられる。

#### 3.2 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 に初期結合応力と加 熱温度との関係,図-12 に初期結合応力残存比と加熱温 度との関係を示す。図-12 は 20℃(常温)における初期結 合応力を1 としたときの比で示したものである。

曲線の形状に着目すると, N-40, N-60, N-80の供試体は, 150℃以下では明確な変化はみられず, 175℃以上になる と曲線の下降が緩やかになっている。また, N-20 供試体





は 200℃で下降が緩やかになる。これは結合応力の低下 が緩やかになっていることを示し、ひび割れが進展しに くくなっていると考えられる。VF-20 供試体は、温度上 昇に伴い結合応力の低下が著しくなっている。SF-20 供 試体は、温度に関わらず開口変位 0.01mm 程度まで結合 応力が急激に低下した後、0.1mm 程度まで上昇し、以降 はほぼ一定の応力を保っている。

初期結合応力に着目すると、N-40、N-60、N-80の供試体 は、加熱温度の上昇に伴い低下する傾向が見られる。こ れは、加熱により供試体が乾燥しひび割れが発生しやす くなったためと考えられる。N-20供試体は、90℃以下で は加熱温度の上昇に伴い初期結合応力が増大するが、こ れは供試体の含水率が低下したためと推察する。100℃以 上においては低下傾向を示すが、これは供試体の乾燥に よる強度低下が、含水率低下による強度増大の影響を上 回ったことが原因と考えられる。VF-20供試体は N-20 と同様の傾向を示しているが、これは初期結合応力に対 してはモルタル部分の影響が支配的であるためと考えら れる。SF-20供試体は、175℃で一度増大するが全体とし ては温度上昇に伴い低下している。これは温度上昇によ り鋼繊維の強度低下が起きているためと考えられる。





初期結合応力残存比に着目すると,N-40,N-60,N-80 の供試体は 200℃で常温時の半分程度まで低下している。 一方でN-20,VF-20,SF-20の供試体では,200℃において も常温時の7割以上の初期結合応力が残存する。このこ とから,水セメント比が低下し供試体組織が緻密になる と,加熱の影響による初期結合応力の低下は抑えられ, ひび割れが発生しにくくなると考えられる。

#### 3.3 破壊エネルギー

図-13 にプレーンモルタル供試体の破壊エネルギー と加熱温度との関係,図-14にN-20,VF-20,SF-20供試 体の破壊エネルギーと加熱温度との関係,図-15に破壊 エネルギー残存比と加熱温度との関係を示す。図-15は 各温度における破壊エネルギーを,20℃(常温)での値を1 としたときの比で表している。

破壊エネルギーに着目すると,N40,N-60,N-80の供試 体は175℃で,N-20供試体は200℃でそれぞれ増大し, 常温時の値を大きく上回っている。これは供試体の破壊 が延性的になり,破断までに消費されるエネルギーが増 加したためと考えられる。繊維を混入した供試体は,加 熱温度の上昇に伴い破壊エネルギーが減少する傾向にあ る。ただし,SF-20供試体は175℃で,VF-20供試体は 125℃で一度エネルギーが増大しており,これは加熱によ るモルタルまたはビニロン繊維の延性化によるものと考 えられる。しかし,全体としては減少の傾向が大きい。

破壊エネルギー残存比に着目すると、プレーンモルタ ル供試体は 200℃で常温時の 1.5~2 倍程度までエネルギ ーが増大している。SF-20 供試体は 200℃で約 7 割, VF-20 供試体は 200℃で約 4 割に減少しており、加熱による影 響は鋼繊維よりビニロン繊維の方が大きいといえる。

### 4 まとめ

(1) 荷重-開口変位曲線における最大荷重および初期 結合応力は、水セメント比および繊維の有無に関わ らず加熱温度の上昇に伴い低下する。 (2) 破壊エネルギーは、プレーンモルタルの場合、175℃ 以上において破壊が延性的になり常温時の1.5~2倍 程度まで増大する。鋼繊維やビニロン繊維を混入し たモルタルでは、温度の上昇に伴い破壊エネルギー は減少する傾向にある。

#### 謝辞

繊維を提供して頂いた株式会社クラレ,太平洋セメン ト株式会社に感謝致します。

#### 参考文献

- 日本建築学会:原子力施設における建築物の維持管 理指針・同解説,2008.7
- 2) 安部武雄,古村福次郎,戸祭邦之,黒羽健嗣,小久 保勲:高温度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
- 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.3 77-382, 2003
- B.Zhang and N.Bicanic : Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450°C : the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold) , Magazine of Concrete Research, 58, No.5, June, pp.277-288, 2006
- Binsheng Zhang : Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures, Fire Safety Journal, 46, pp.543-549, 2011
- 6) 大岡督尚,橘高義典:繊維補強コンクリートの破壊 パラメータに及ぼす材齢の影響,コンクリート工学 年次論文集, Vol.20, No.2, pp.241-246, 1998
- 7) 橘高義典,上村克郎,中村成春:ハイパーコンクリートの靱性評価方法に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.451-456, 1995