加熱によるコンクリートの劣化を考慮した曲げ強度算定法の検討

東京都市大学　学生会員○高地　透
東京都市大学　正会員　　栗原哲彦

１．はじめに

本研究では，下面を加熱された角柱供試体（100×100×400mm）の加熱冷却後の曲げ強度算定について解析を行った．また，解析に用いる基本データとして必要となる加熱を受けた際の内部温度の変化や破壊力学パラメータについて実験を行った．

２．解析概要

本解析では加熱を受けた角柱供試体（100×100×400mm）に対して圧縮縁ひずみを仮定し，曲げ強度を算出した．解析手順は断面の圧縮縁ひずみと中立軸位置を仮定し，断面応力分布を作成する．断面応力の釣り合いが取れた位置を中立軸位置として決定し，曲げモーメントを算出する．その後，圧縮縁ひずみを増加させ，再度曲げモーメントを算出する．算出した最大曲げモーメントから曲げ強度を算定した．また，本解析では，ひずみ分布を応力分布に変換する際に，加熱による応力－ひずみ関係の変化を考慮するために後述の実験で推定した内部温度分布を基に豊田らの式[1]（**式（1)**）より温度に応じた応力を算出した．本解析では基本データとして受熱温度の他にコンクリート内部温度分布の経時変化および温度により異なる応力―ひずみ曲線が必要とされる．受熱温度ごとの圧縮強度は**式(1)**を用い算出し，圧縮強度時ひずみはEuro-code[2]提案値から算出した**式（2）**を用い，弾性係数はEuro-code式[2]（**式（3)**）の応力－ひずみ関係から算出した．引張強度は**式(1)**とコンクリート標準示方書の式[3]を用いて算出し，解析に用いる引張応力－ひずみ関係には，引張軟化曲線を用いてモデル化した．引張軟化曲線には 1/4 モデルを適用した．また，破壊エネルギーおよび内部温度分布については実験で得たデータを用いた．

$$\sigma_{cu\cdot T} = \sigma_{cu\cdot R\cdot T} \cdot \left[0.5\cos\left\{ \pi \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot T}{3000} \right) \right\} + 0.5 \right] \quad (1)$$

$(\sigma_{cu\cdot R\cdot T}$: 常温時の圧縮強度　T：温度$)$

$$\varepsilon_{cu\cdot T} = 0.0247 \cdot e^{0.0037\cdot T} \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_{cu\cdot T} \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu\cdot T}} \right) \cdot \left[\frac{3}{2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu\cdot T}} \right)^3} \right] \right] \quad (3)$$

３．実験概要

本実験では角柱試験体に対し加熱実験を実施し，加熱時の内部温度分布の測定，加熱後の曲げ強度および破壊エネルギーの推定を実施した．試験体は普通コンクリートを（**表-1**）により作製し，加熱温度300℃，850℃の 2 種類の加熱を行った．加熱後の曲げ試験および内部温度の測定には 3 体，破壊エネルギーの推定は 5 体の角柱供試体（100×100×400mm）を使用し，常温時の圧縮試験体として円柱供試体（φ100×200mm）を 3 体使用した．また，養生は水中養生を 21 日間実施した．加熱はガスバーナで行い，加熱温度が目標の温度に達しているかを確認するために，試験体下面から 5mm 離れた位置にシース熱電対を設置した．また，熱が側面から放出するのを防ぐために，試験体側面　に耐火断熱材を巻いた．

3.1　加熱後の曲げ試験

加熱した翌日に JIS A 1106[4] に準じて曲げ試験を実施し，曲げ強度を算出した．

3.2　内部温度の測定方法

内部温度測定用試験体として試験体内部の**図-1** に示す位置に K 型熱電対を設置し測定を行った．

3.3　破壊エネルギーの推定

加熱した翌日に試験体に切欠き（深さ 3mm）を作製し，JCI-S-001-2003[5] に準じ 3 点曲げ試験を行った．得られた試験結果から破壊エネルギーを算出した．

表-1　示方配合

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3) W	C	S	G	減水剤	補助AE剤
50	4.5	49.7	182	363	851	877	0.908	0.00363

C：早強ポルトランドセメント　骨材最大寸法：15㎜
減水剤：ポゾリスNo.70　　補助AE剤：303A（5A）

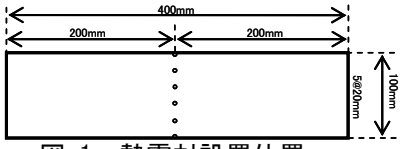


図-1　熱電対設置位置

キーワード　加熱，内部温度，破壊力学パラメータ，M－φ 曲線
連絡先　〒158-8557　東京都世田谷区玉堤 1-28-1　東京都市大学　栗原研究室　TEL03-3703-3111（内線 3242）

４．結果および考察

破壊エネルギー推定試験から得られた荷重―CMOD 曲線を図-2 に示し，測定結果から算出した破壊エネルギーを図-3 に示す．破壊エネルギーと加熱時間の関係から近似式を作成し解析に適用した．

解析から算出した M－φ曲線を図-4，5 に示す．図-4 は引張応力－ひずみ関係において引張軟化曲線を考慮した場合，図-5 は引張軟化曲線を考慮しない場合の結果である．軟化曲線を考慮した場合と考慮しない場合の最大曲げモーメントを比較するとほぼ同値を示し，大きな違いは確認できなかった．作成した M-φ曲線をみると最大曲げモーメント後の曲げモーメントの低下が軟化曲線を考慮した場合の方が緩やかに減少していく結果を示した．表-2，図-6 に最大曲げモーメントから算出した曲げ強度と実験値を示す．図-6 には，比較のために式（1）から算出した圧縮強度を基にコンクリート標準示方書の式[3)]に代入して算出した曲げ強度も示した．

算出した曲げ強度の比較から今回は式（1）を基にした曲げ強度が実験値に最も近い値を示した．常温時の強度について実験値と解析値とは，ほぼ同値であったが加熱温度が上がるに従って誤差が拡大していく結果となった．

６．まとめ

本解析の結果から，解析結果が実験結果に対して加熱温度が上昇するに従って誤差が拡大していく結果となった．このことは，内部温度や破壊エネルギーなどの解析における基本データの不足が原因ではないかと考えられる．そのため，今後は基本データの充実を図り，解析精度を向上させていくことが課題である．

参考文献

1）豊田康二他；火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学特性に関する実験的研究，日本建築学会構造工学論文集　Vol.49B，p.374，2003.3

2）Eurocode 4；Design of composite steel and concrete structures，Draft for part 1.2：Structural fire design，BS EN 1994-1-2：2005

3）土木学会；コンクリート標準示方書[設計編]，2007

4）土木学会；コンクリート標準示方書[規準編]，2005

5）コンクリート工学協会；JCI 規準集，2003

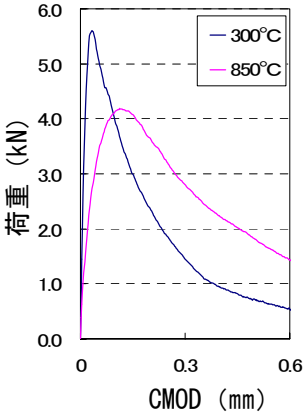


図-2　荷重―CMOD 曲線（平均曲線）

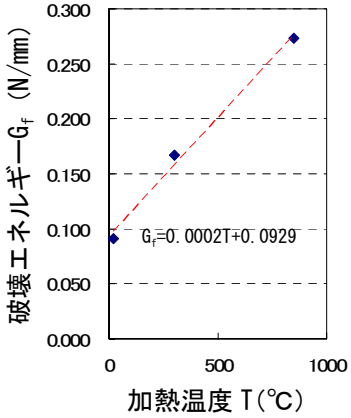
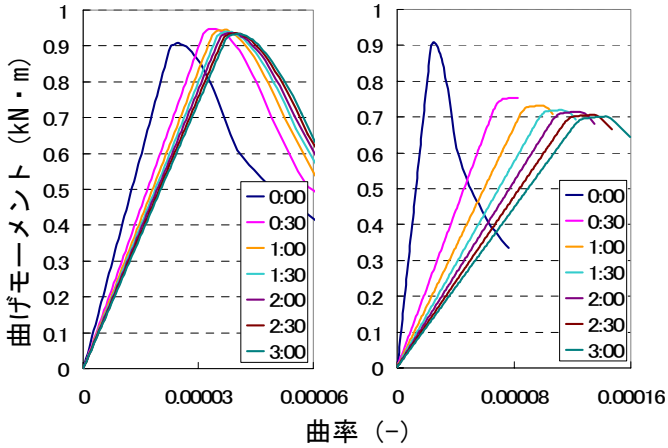
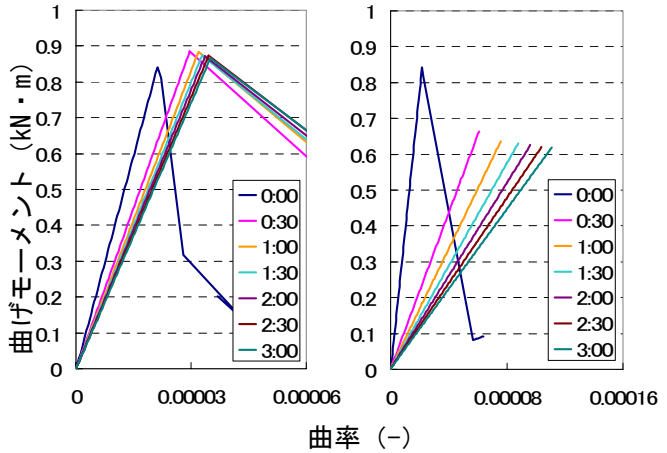


図-3　加熱温度と破壊エネルギーの関係



(a)　300℃加熱　　(b)　850℃加熱

図-4　M-φ曲線（軟化曲線を考慮した場合）



(a)　300℃加熱　　(b)　850℃加熱

図-5　M-φ曲線（軟化曲線を考慮しない場合）

表-2　算出した曲げ強度

	常温	300℃	850℃
	(N／mm^2)		
実験値	4.87	3.98	2.18
軟化曲線有	5.45	5.60	4.21
軟化曲線無	5.05	5.20	3.71
豊田式(式(1))	5.54	4.71	1.33

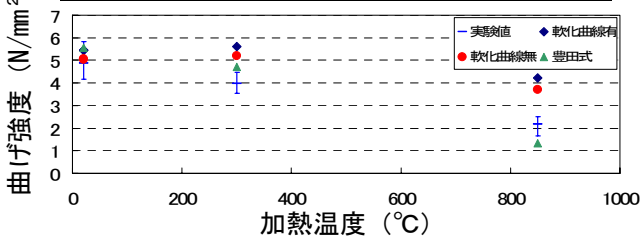


図-6　算出した曲げ強度の比較