

コンクリートの引張軟化特性に着目した破壊エネルギーの寸法依存性に関する検討

首都大学東京 学生会員 ○松崎 晃 正会員 大野 健太郎

首都大学東京 正会員 宇治 公隆 正会員 上野 敦

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 梁の曲げひび割れ強度は、断面高さの減少に伴い高くなることが知られており、コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾ (以下、示方書と称する) による曲げひび割れ強度算定式は、断面高さが 200mm 以下では適用範囲外とされている。多くのコンクリート製品では、断面高さが 200mm 以下の、いわゆる薄肉部材が多く、示方書による性能照査においては、曲げひび割れ強度算定式を適用することの妥当性について課題が残されている。ここで、曲げひび割れ強度算定にあたっては、コンクリートの破壊エネルギーおよび引張軟化特性を考慮する必要がある。本研究では、部材厚が異なるコンクリート梁の破壊エネルギーおよび引張軟化特性について考察し、薄肉部材の曲げひび割れ強度算定に適用する場合の引張軟化特性について検討した。

2. 実験概要

実験では、表-1 に示すように、骨材最大寸法 $d_{\max}$ を 5mm, 20mm とし、水セメント比を 50% として、 $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱供試体を作製した。なお、 $d_{\max}=5$ mm の配合については、 $d_{\max}=20$ mm のコンクリートのモルタル相と各種材料の体積割合を統一した配合とした。供試体概要を図-1 に示す。供試体は、各 $d_{\max}$ に対して、切欠き高さ a を 30, 40, 50, 60, 70, 80mm と変化させ、各 5 体作製した。供試体は材齢 14 日まで水中養生を行い、その後材齢 28 日まで 20℃, 60% R.H. の恒温恒湿環境下で気中保管を行った。破壊エネルギー試験²⁾は、材齢 28 日から 3 日以内に実施した。実験で使用したコンクリートの力学的特性を表-2 に示す。表中の a/W は断面欠損率であり、供試体断面高さ W に対する切欠き高さ a が占める割合と定義した。図-1 に示すように、切欠き下部にクリップ型変位計を設置し、開口変位 (Crack Mouth Opening Displacement : CMOD と称す) と同時に荷重の計測を行った。載荷速度は載荷点変位で 0.05mm/min とした。

表-1 計画配合

$d_{\max}$ (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad
					W	C	S	G	
20	8	50	4.5	44.3	172	344	767	980	C<0.3%
5	-	-	-	100	297	549	1324	-	-

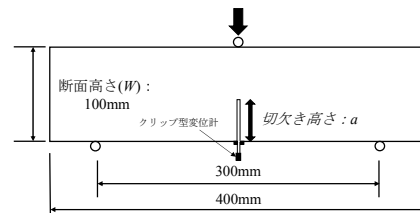


図-1 供試体概要

表-2 コンクリートの力学的特性

$d_{\max}$ [mm]	a/W	圧縮強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]	割裂引張強度 [N/mm ²]
20	0.3~0.5	38.0	28.0	2.96
	0.6~0.8	44.8	26.7	3.16
5	0.3, 0.4	71.0	30.3	3.35
	0.6, 0.7	72.5	26.2	3.62
	0.5, 0.8	68.5	23.7	3.46

3. 破壊エネルギー試験結果

破壊エネルギー試験により得られた破壊エネルギーと a/W の関係を図-2 に示す。この図より、両骨材最大寸法 $d_{\max}$ において、変動が大きいものの概ね a/W の増加に従い、破壊エネルギーが減少しており、破壊エネルギーは寸法依存性を示すことが確認された。

4. 引張軟化曲線の形状

示方書によれば、コンクリートの破壊エネルギーおよび引張軟化特性 (1/4 モデル) はコンクリートの骨材最大寸法と圧縮強度からそれぞれ算出される。すなわち、示方書では破壊エネルギーおよび引張軟化特性は、断面高さによらず一定となる。しかし、図-2 から明らかなように、破壊エネルギーは断面高さの減少によって低下する。そのため、薄肉部材における示方書の破壊エネルギーおよび引張軟化特性の妥当性を検討するために、実験から得られた荷重—CMOD 曲線から推定される引張軟化曲線 (多直線近似解析結果³⁾ と称する) と示方書の 1/4 モデルを比較した。

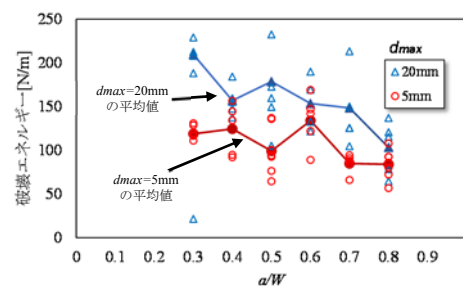


図-2 破壊エネルギー試験結果

キーワード 破壊エネルギー, 断面欠損率, 骨材最大寸法, 引張軟化特性, 初期結合応力, 最大ひび割れ幅
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 TEL 042-677-1111 (代表)

図-3に $a/W=0.3$ における 1/4 モデル (示方書), 1/4 モデル (実験値), 多直線近似解析結果を示す. ここで, 示方書および実験値の 1/4 モデルは, 図-3 中のパラメータを用いて算出した. 両骨材最大寸法において推定された多直線近似解析結果は, 1/4 モデル (実験値) と概形が一致し, 1/4 モデル (示方書) は算出される破壊エネルギーが実験値より小さいため, 多直線近似解析結果と異なる概形となった. また各 a/W において, 多直線近似解析から得られる初期結合応力 σ_{ini} は, 表-3 に示すように変動はあるものの a/W に依存せず, 最大ひび割れ幅 w_{max} は a/W の増加に伴い概ね減少する傾向を示した. これは既往の研究⁴⁾で示されるように, a/W が増加するに伴い破壊進行領域が小さくなることに起因すると推察される. このことから, a/W に応じて引張軟化特性を考慮する必要がある, 特に薄肉部材では w_{max} を低減させることが重要であるといえる. したがって, 薄肉部材に適用する引張軟化曲線は実験値を用いた 1/4 モデルで表現できると考えられる.

ここで, JCI 規準²⁾では破壊エネルギー試験に用いる供試体は $a/W=0.3$ となっていることから, 本研究では $a/W=0.3$ の実験値を基準とし, 各 a/W における w_{max} の割合を算出した. 図-4 に各 a/W における 1/4 モデル (実験値), 表-4 に $a/W=0.3$ に対する w_{max} の割合を示す. 図および表より, σ_{ini} は両骨材最大寸法において概ね一定であり, w_{max} は a/W の増加に伴い低下傾向を示すことがわかる.

以上のことから, 薄肉部材の曲げひび割れ強度算定においては, 骨材最大寸法および圧縮強度から求まる示方書の破壊エネルギーは断面寸法に依存しないため, そのまま強度算定に用いることは適切でないと考えられる. したがって, 部材厚に応じた破壊エネルギーおよび引張軟化特性 (1/4 モデル) を適用する必要があると考えられる.

5. まとめ

薄肉部材における引張軟化曲線は, JCI 規格の破壊エネルギー試験および割裂引張強度試験の実験値から推定される 1/4 モデルで表現できる可能性が示された. また, 初期結合応力は部材厚さに依存せず, 最大ひび割れ幅が断面寸法の減少に伴い低下することが示された. したがって, 薄肉部材における破壊エネルギー算定においては, 部材厚さに応じた低減係数を乗じて算定するなど, 工夫が必要であると考えられる.

謝辞

本研究は, 日本学術振興会科学研究費補助金 (若手研究 (B) 25820195) の補助を受けて行った. ここに記して, 謝意を表する.

参考文献

1) 土木学会: 2012 制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.32-38, 2012
2) 日本コンクリート工学協会: 「切欠きはりを有したコンクリートの破壊エネルギー試験方法」, JCI-S-001-2003, 2003
3) JCI 規格「FORTRAN による引張軟化曲線解析プログラム (作成者: 内田裕市)」
4) 大野健太郎ほか: AE 法による切欠き高さが異なるコンクリート梁の破壊進行領域形成に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1805-1810, 2011

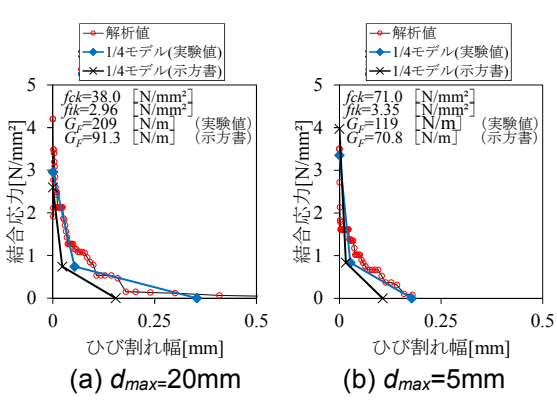


図-3 引張軟化曲線推定結果($a/W=0.3$)

表-3 多直線近似解析の σ_{ini} および w_{max}

a/W		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
σ_{ini} [N/mm²]	$d_{max}=20\text{mm}$	4.2	3.2	4.5	2.4	3.3	3.0
	$d_{max}=5\text{mm}$	3.5	2.4	3.4	2.8	3.7	3.5
w_{max} [mm]	$d_{max}=20\text{mm}$	0.98	0.47	0.44	0.29	0.60	0.29
	$d_{max}=5\text{mm}$	0.20	0.19	0.12	0.20	0.15	0.14

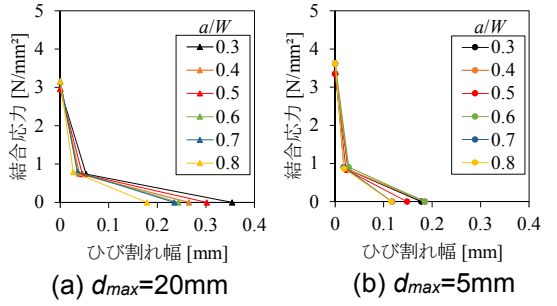


図-4 1/4 モデル(実験値)と a/W

表-4 $a/W=0.3$ に対する w_{max} の割合

a/W	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$d_{max}=20\text{mm}$	1.00	0.75	0.85	0.69	0.66	0.51
$d_{max}=5\text{mm}$	1.00	1.05	0.84	1.04	0.66	0.68