

高強度コンクリートの破壊エネルギーに関する検討

住友建設㈱ 技術研究所 正会員 ○高木康宏
 住友建設㈱ 技術研究所 正会員 松元香保里
 住友建設㈱ 技術研究所 正会員 藤田 学

1. はじめに

筆者らは、既に圧縮強度 $35 \sim 145 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートに関する破壊エネルギー試験（モードⅠ）¹⁾を行い、その算定式より破壊エネルギーを求めた²⁾。そこでは、Hillerborg らにより提案されている特性長さ l_{ch} ³⁾が、圧縮強度と高い相関性を有していることを確認し、特性長さの圧縮強度に関する回帰式を示した。

本論では、多直線近似解析法¹⁾を用いて、引張軟化曲線の推定を試み、これより得られる破壊エネルギー値と算定式から得られた破壊エネルギー値の比較を行った。また、再度、特性長さとの圧縮強度の相関関係の確認を行った。

2. 破壊エネルギー試験および多直線近似解析

本試験は圧縮強度をパラメータとした全 11 ケースからなる。試験方法の詳細は、文献^{1),2)}に譲る。公開されている引張軟化曲線推定プログラム⁴⁾を用いて、計測された荷重-CMOD 曲線より引張軟化曲線を求めた。

3. 多直線近似解析結果

表-1 に材料および破壊エネルギー試験結果および多直線近似解析結果を示す。図-1 に荷重-CMOD の推定値と実測値の比較を代表的な試験体について示す。いずれの圧縮強度レベルにおいても推定値と実測値はよく一致しており、高強度に対しても公開プログラムは適用可能であるといえる。しかしながら、高強度において逆解析が可能であったケースは少なかった。これは、解析にあたり、実測値の荷重-CMOD についてスムージング処理を行ったものの、高強度ほど荷重-CMOD 曲線の初期勾配が下に凸な弓なり形状を呈する傾向が現れたことによるものと考えられる。

ヤング係数の推定値 E_{cal} は材料試験結果 E_c に比べて全体的に低く評価され、高強度ほどこの傾向は強くなった。 E_{cal} は、荷重-CMOD 曲線の初期勾配より算定しているため、同じく初期勾配の影響によるものと考えられる。多直線近似解析により高強度コンクリートの引張軟化曲線を精度よく得るために、荷重-CMOD 曲線の初期勾配の補正および計測方法の改善が今後の課題と考える。

表-1 材料・破壊エネルギー試験および解析結果

ケース	圧縮強度 f'_c N/mm ²	引張強度 f_t N/mm ²	ヤング係数 E_c kN/mm ²	算定式 破壊エネルギー ¹⁾ G_f N/mm	多直線近似解析法 破壊エネルギー ⁴⁾ G_f^{TSD} N/mm	限界開口変位 w_{cr} mm	ヤング係数 推定値 E_{cal} kN/mm ²	有効引張強度 f_t^{eff} N/mm ²
L-36	35.1	2.87	29.0	0.197 (5.5)	0.201 (5.2)	0.710	26.4	2.75
L-36-S	43.0	3.90	30.0	0.197 (8.5)	0.200 (10.0)	0.644	27.0	2.89
M-60	50.2	4.19	32.1	0.201 (2.6)	0.202 (6.7)	0.330	32.5	3.64
M-60-S	88.0	5.09	31.1	0.202 (4.9)	0.202 (7.5)	0.451	30.0	3.45
U-100	85.6	5.47	37.2	0.192 (8.5)	0.216 (11.0)	0.350	31.4	4.11
U-100-S	101.0	7.06	40.9	0.180 (12.8)	0.172 (10.7)	0.231	31.4	3.62
H-80-S	91.9	5.61	39.6	0.211 (11.1)	0.200 (8.1)	0.192	29.6	4.62
H-100-S	102.4	6.68	40.7	0.170 (17.8)	0.158 (16.8)	0.122	34.0	5.26
H-120-S	127.8	7.07	42.9	0.185 (5.8)	0.164 (7.4)	0.109	33.7	5.83
H-140-S	138.9	8.52	47.1	0.172 (5.2)	0.159 (4.7)	0.080	36.0	7.05
H-160-S	145.8	7.13	47.0	0.175 (19.4)	0.155 (15.6)	0.060	38.0	7.74

注) 比較のため、表中の値は各ケースの解析可能であった試験体および解析結果の平均値を、() 内の数値は変動係数を表す。 G_f^{TSD} は w_{cr} までの破壊として、 l_{ch}^{TSD} は破壊エネルギー¹⁾以外は材料試験結果を用いて評価している。

キーワード：高強度コンクリート、破壊エネルギー、多直線近似解析法、引張軟化曲線、特性長さ

〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川 1726 TEL 0285-48-2611 FAX 0285-48-2655

図-2 中の破線は 1/4 モデルを表す．高強度において，解析結果の引張軟化曲線は 1/4 モデル⁵⁾に近い形状を示したことより，1/4 モデルは，圧縮強度 80N/mm^2 を超える高強度コンクリートに対しても適用可能であると思われる．前述表-1 の G_f と G_f^{TSD} の比較を図-3 に示す．普通強度コンクリートでは両者はほぼ同程度の値を示しているが，圧縮強度 80N/mm^2 を超える高強度コンクリートでは両者に相違が認められ，高強度ほど G_f に比べ G_f^{TSD} が小さくなる傾向が認められたが， G_f^{TSD}/G_f の範囲は $\pm 15\%$ 程度であった．高強度ほどヤング係数の推定値 E_{cal} も過小評価されることから，これが G_f と G_f^{TSD} の相違にも影響を与えていると推察される．

4. 各種パラメータに関する検討

材料の引張強度に関するパラメータである割裂引張強度 f_t ，初期結合応力度 σ_0 ，有効引張強度 f_t^{eff} の比較を図-4 に示す． σ_0 は他の二つのパラメータに比べて大きな値を示し，圧縮強度に対して線形に増加する傾向が認められ，高強度ほどその差が大きく現れた．一方， f_t^{eff} は圧縮強度に関係なく f_t と比較的近い値を示し，両者は良い対応を示していた．

特性長さ l_{ch} と l_{ch}^{TSD} の比較を図-5 に示す．図-5 中の一点鎖線は l_{ch}^{TSD} に関する回帰式を，破線は文献 1) で示した l_{ch} の回帰式を表す． l_{ch}^{TSD} の回帰式を求めた結果の相関係数は 0.95 であった．二つの回帰式はほぼ一致し，ともに圧縮強度のほぼ-1.1 乗に比例する結果となった． G_f と G_f^{TSD} の相違が本検討程度であれば， l_{ch} と l_{ch}^{TSD} の相違はわずかであり，同様の圧縮強度相関を呈するといえる．ここで，特性長さは圧縮強度の-1 乗に比例すると仮定し，最小二乗法により求めた以下の簡易式を実線で示す．

$$l_{ch} = 20000 f_c'^{-1.0}$$

簡易式は l_{ch} および l_{ch}^{TSD} と非常によい相関を示し，その相関係数はともに 0.94 であった．式(1)は非常に簡易な式であるが，特性長さを十分な精度で算定可能であるといえる．ただし，適用範囲は $d_{max}=20\text{mm}$ である．

4. まとめ

- (1) 多直線近似解析法による逆解析で得られた荷重-CMOD 曲線は，圧縮強度 80N/mm^2 を超える高強度コンクリートに対しても実験結果を忠実に再現できた．
- (2) 高強度コンクリートの引張軟化曲線は，示方書に示されている 1/4 モデルに近い形状を示した．
- (3) 二つの破壊エネルギー G_f と G_f^{TSD} は，普通強度から高強度コンクリートまで概ね同程度であった．

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，pp.401-405, 2001. 2) 松元ほか：超高強度コンクリートの破壊エネルギーおよび材料特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.2, pp.739-744, 2002. 3) Gustafsson, P. J. et al. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, ACI Structural Journal, May-June, pp.286-294, 1988. 4) 橘高義典：引張軟化曲線多直線近似解析ウェブサイト用プログラム，(<http://www.ecomp.metro-u.ac.jp/%7Ekitsu/fmpana-j.html>) 5) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002.

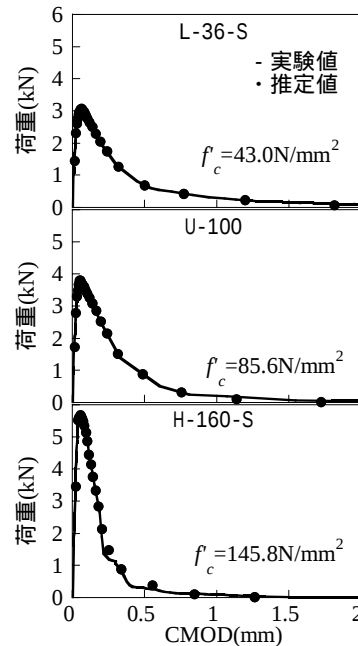


図-1 荷重-CMOD 推定値と実測値の比較

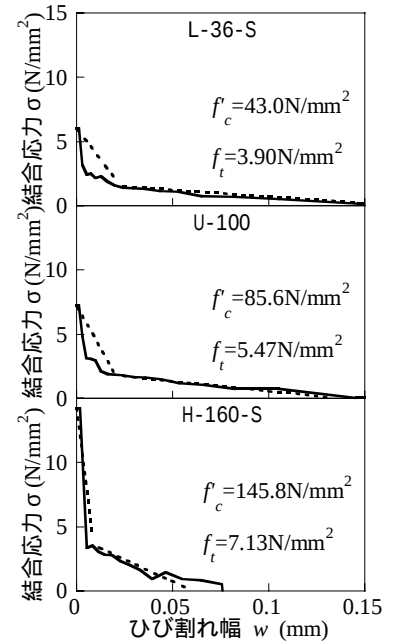


図-2 引張軟化曲線

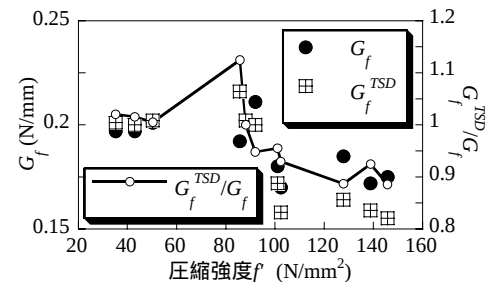


図-3 破壊エネルギーの比較

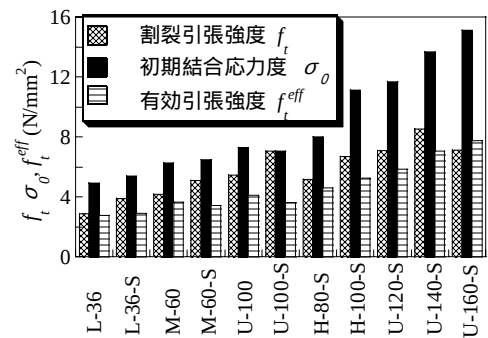


図-4 引張強度の比較

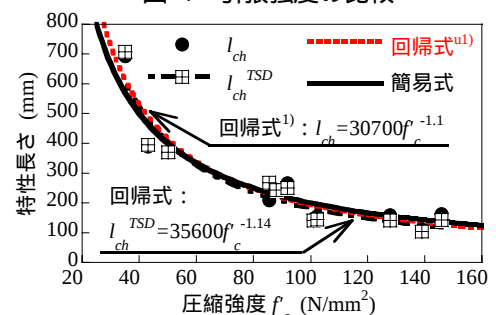


図-5 特性長さに関する回帰式の検証