

ダムコンクリートの引張軟化曲線の解析 Evaluation of Tension Softening Diagrams of Dam Concrete

石黒 寛
Satoru ISHIGURO

1. はじめに コンクリート構造物のひび割れ破壊に対する安全性を解析するためには強度特性に加えて破壊特性の評価が重要である。現在、コンクリートの破壊特性は破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊力学パラメータによる評価が有効と考えられている。既報¹⁾ではダムコンクリートの楔挿入割裂試験を行い、破壊エネルギーを求めた。本研究ではダムコンクリートの引張軟化モデル（ひび割れ幅と引張応力の関係）を提案し、各種の引張軟化モデルにより供試体の破壊解析を行ってそれらの適用性を検討した。

2. 破壊解析 既報¹⁾の楔挿入割裂試験の概要および供試体の形状寸法を **Fig.1** に示す。荷重 F_h は、載荷重 F_m と楔の角度 α を用いて $F_h = F_m / 2 \tan(\alpha / 2)$ で計算した。また、開口変位(CMOD)は載荷点と同じ高さ位置の水平方向変位を計測した。これら供試体の計測結果と各種の引張軟化曲線を用いた破壊解析結果を比較し、引張軟化モデルの適用性を検討した。

Fig.2(a)~(d)は検討した4つの引張軟化モデルを示す。モデル1およびモデル2は二直線モデルであり、前者はCEB-FIP model code 1990のもの、後者は土木学会コンクリート委員会の式である。前者は、図中の式に示すように引張強度 f_t を圧縮強度 f_c から推定している。モデル1以外においては、引張強度は試験によって求めた値を用いた。モデル3は指数曲線による引張軟化モデルであり、鉄筋コンクリートひび割れ解析専用ソフトウェアで用いられている。モデル4は本研究で提案した分数関数による

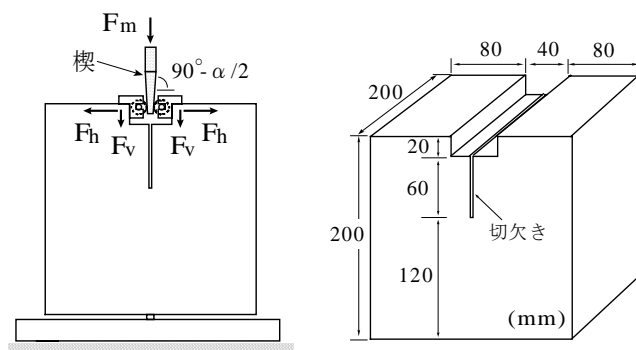


Fig.1 Wedge-splitting test and Dimensions of concrete specimens

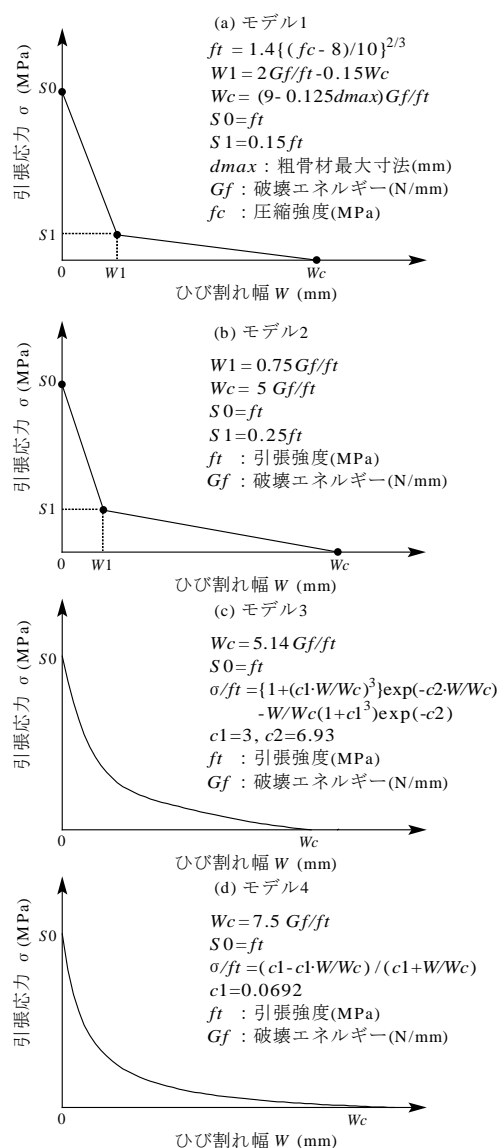


Fig.2 Tension softening diagrams

引張軟化モデルであり、次式で表される。
 $Wc = 7.5 \cdot Gf / ft$ (1)

$$\sigma / ft = \frac{c1 - c1 \cdot W / Wc}{c1 + W / Wc} \quad (2)$$

ここで、 Wc は限界ひび割れ幅(mm)、 Gf は破壊エネルギー(N/mm)、 ft は引張強度(MPa)、 σ および W はそれぞれ引張応力(MPa)およびひび割れ幅(mm)を表す。また、 $c1$ は定数であり、ここでは $c1=0.0692$ とした。

Fig.3 は破壊解析に用いた供試体のメッシュ分割を示しており、ここでは半断面を解析対象とした。解析では切欠き先端から支点までを仮想ひび割れと仮定し(図中の●節点)、これらの節点を载荷に伴って切欠き先端から一つずつ分離させてひび割れの進展を表現する。このとき分離した節点における開口変位と結合応力の関係は、引張軟化モデルで表されるひび割れ幅と引張応力(結合応力)の関係を満足するように解析した²⁾。

3. 解析結果

Fig.4(a)および(b)は、異なる引張軟化モデルを用いた GC および NC の解析結果(荷重 - 開口変位曲線)を示す。図中の平均曲線は4個の供試体の平均を表す。なお、解析では各試験材齢で求めた静弾性係数 Ec 、破壊エネルギー Gf 、圧縮強度 fc 、引張強度 ft などの物性値を用いた(Table 1 参照)。これらの解析結果によると、物性値が同じでも引張軟化モデルが異なれば最大荷重や曲線形状が異なる。ここで、モデル1の解析値は計測値とかなり異なる傾向を示し、特に圧縮強度が低い場合の最大荷重は他のモデルに比べて低下した。これは、圧縮強度による ft の推定値と計測値に差がでるためと思われる。一方、モデル2~4による最大荷重の解析結果は計測結果に比較的近い値を示した。このうちモデル4の最大荷重は計測値に最も近く、ここで提案した引張軟化モデルの適用性は良好であるといえる。

4. おわりに

ダムコンクリートの引張軟化モデルを提案し、供試体の破壊解析を行ってその適用性を検討した。提案モデルの関数は単純で適用性も良好であることを確認した。参考文献：1) 石黒覚(2005)：楔挿入割裂法によるダムコンクリートの破壊試験，第62回農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集，30-31，2) 日本コンクリート工学協会(1990)：数値解析への引張軟化特性の組込み - FEM と BEM による解析プログラム -，コンクリートの破壊力学に関するコロキウム委員会報告，55-69。

Table 1 Properties of concrete

配合区分	材齢(日)	F_c (MPa)	ft (MPa)	E_c (GPa)	G_f (N/mm)
外部(GC)	7	10.1	1.02	20.3	0.164
	28	19.6	1.77	25.8	0.150
	91	35.4	2.88	31.9	0.241
内部(NC)	7	5.02	0.593	14.4	0.089
	28	10.7	1.10	23.6	0.153
	91	21.5	2.30	29.9	0.239
構造用(KC)	7	9.24	0.872	18.5	0.110
	28	20.9	1.82	24.6	0.191
	91	36.6	2.95	30.3	0.193

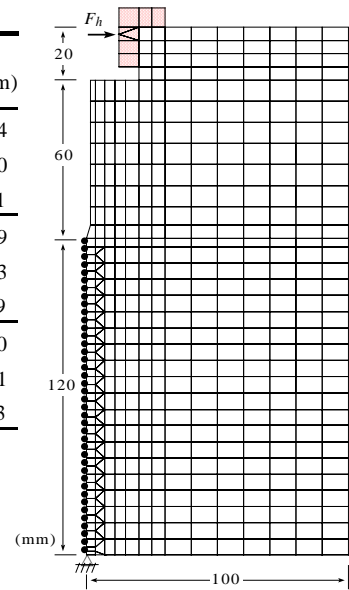


Fig.3 Finite element mesh

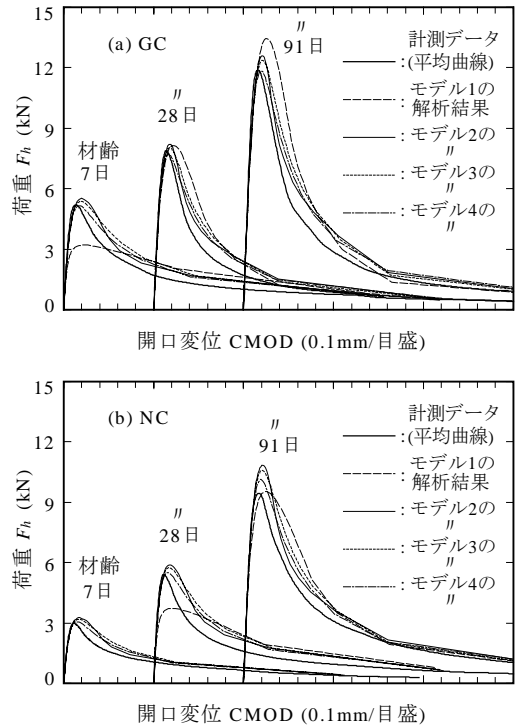


Fig.4 Load-displacement curves calculated by different tension softening diagrams