

応答曲面法によるコンクリートの破壊力学パラメータの同定方法

茨城大学 学生会員 ○田中 尊之
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

土木構造物の大部分を占めているコンクリート構造物は、ひび割れの発生・進展により損傷が進行する。そのためコンクリートのひび割れに起因する破壊挙動の把握が重要な課題となっている。そのなかで、破壊挙動に関する指標の1つに破壊エネルギーがある。破壊エネルギーは、ひび割れの形成・進展に必要な単位面積当たりのエネルギーである。既往の破壊エネルギーの評価方法としては、切欠きはりの3点曲げ試験¹⁾から得られた荷重-変位曲線下の面積をひび割れ面積で除することにより求める方法や試験結果を利用した逆解析により、引張軟化曲線を求め、仮想ひび割れモデルを応用したものがある。

一方で、車谷ら²⁾は損傷モデルを用いた非線形有限要素解析を提案している。このモデルはコンクリートの破壊力学に基づいたモデルであり、破壊エネルギー等の破壊に関するパラメータを用いて、ひび割れ進展挙動を詳細に再現することができる。しかし、解析パラメータの決定に際して、切り欠きはりの3点曲げ試験からは破壊エネルギーのみしか求められず、他の複数のパラメータを決定する手法は提案されていない。

そこで本研究では、非線形有限要素解析に応答曲面法を適用した文献³⁾の手法を用いて切り欠きはりの3点曲げ試験の結果を再現することによって、試験結果から破壊エネルギーだけでなく破壊に関するヤング率・破壊発生ひずみ・破壊発生エネルギーの3つパラメータを同時に同定することを目的とする。

2. コンクリートの数値解析手法

本研究では、非線形有限要素解析手法として、車谷ら²⁾が提案した等方性損傷モデルを用いる。損傷モデルの構成則は次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は応力、ひずみテンソル、 \mathbf{c} は弾性係数テンソル、 D は損傷変数であり、0~1の値をとるスカラー値関数である。損傷変数 D は次式で表される。

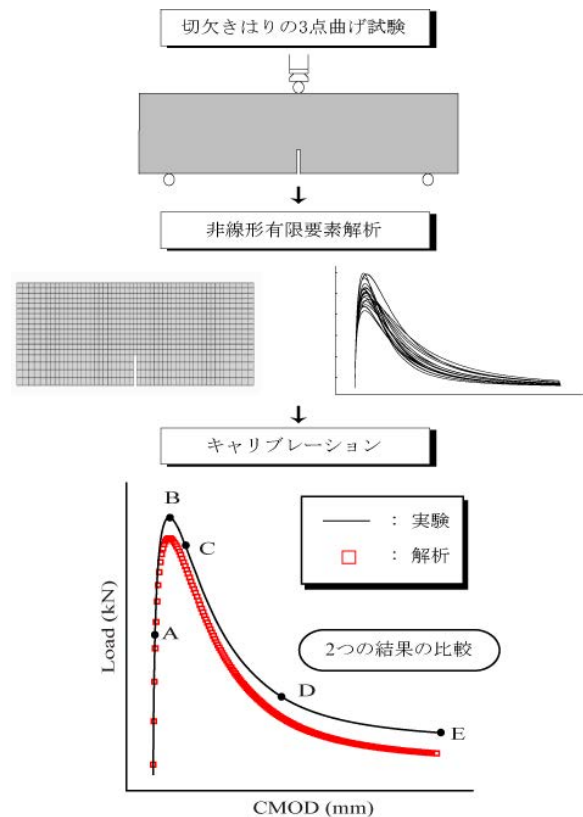


図-1 パラメータ同定の流れ

$$D(\epsilon) = 1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon} \exp\left(-\frac{E\epsilon_0 h_e}{G_f} (\epsilon - \epsilon_0)\right) \quad (2)$$

ここで、 ϵ は変形履歴における最大等価ひずみ、 ϵ_0 は破壊発生ひずみ、 E はヤング率、 G_f は破壊エネルギー、 h_e は要素長さである。等価ひずみに次式で与えられる修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ ϵ_{eq} を適用する。

$$\epsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (3)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひずみテンソルの第1不変量、 J_2 は偏差ひずみテンソルの第2不変量である。

3. パラメータの同定手法

3つのパラメータの同定手法を図-1示す。事前に切欠きはりの3点曲げ試験の荷重-ひび割れ開口変位(以下、

荷重-CMOD) 関係の結果を用意する. 本研究では, 8回の実験結果を用意した. 次に損傷モデルによる解析により, 実験結果の再現を行う. 解析に必要な3つのパラメータの組み合わせを変えて網羅的に解析を行うには, 膨大な回数と時間が必要となる. そこで, 文献³⁾の代替モデルを適用する. このモデルは非線形有限要素解析に応答曲面法を適用することにより, 短時間で解析結果の出力が可能である. 最後に, 実験結果と解析結果のキャリブレーションを行う. 実験結果と解析結果の荷重-CMOD曲線が一致していれば, その時のヤング率, 破壊発生ひずみ, 破壊発生エネルギーの3つが同定できたこととなる. 本研究では, 図-1に示すA~Eの5カ所に着目した.

Bは実験結果の最大荷重点であり, 解析結果の最大荷重点との誤差を算出した. また, A, C, D, Eは実験結果の最大荷重点を基準としてそれぞれ弾性部分における最大荷重点 $\times 0.50$, 最大荷重点 $\times 0.90$, 最大荷重点 $\times 0.35$, 最小荷重点の点である. この4カ所では, 同変位における解析結果の荷重点との誤差を算出した. 全5カ所の誤差から最大の誤差を求め, その誤差が最小になるものをキャリブレーションにより求めた最適な解析値とした.

4. 実験結果と解析結果の比較

8つの実験結果と解析結果の比較を図-2に示す. 荷重-CMOD曲線が一致しているかを確認するため, 次式で定義した実験結果と解析結果の荷重-CMOD曲線下の面積の相対誤差を算出した.

$$A_{\text{err}} = \left| \frac{A_{\text{fem}} - A_{\text{exp}}}{A_{\text{exp}}} \right| \times 100 \quad (4)$$

ここで, A_{fem} は解析結果の荷重-CMOD曲線下の面積, A_{exp} は実験結果の荷重-CMOD曲線下の面積である. また, JCI基準¹⁾の破壊エネルギーの式を用いて, 次式により実験結果と解析結果の破壊エネルギーの相対誤差を算出した.

$$G_f^{\text{err}} = \left| \frac{G_f^{\text{fem}} - G_f^{\text{exp}}}{G_f^{\text{exp}}} \right| \times 100 \quad (5)$$

ここで, G_f^{fem} は解析結果の破壊エネルギー, G_f^{exp} は実験結果の破壊エネルギーである. 図-2の各グラフの右上に面積の相対誤差と破壊エネルギーの相対誤差, 同定した各パラメータの値を示す. 面積の相対誤差は, 平均で3.5%, 最大で6.4%であり, 実験の荷重-CMOD曲線を精度よく再現できている. 破壊エネルギーにおいても, 相対誤差の平均が2.7%, 最大が6.0%となった. この結果から, 実

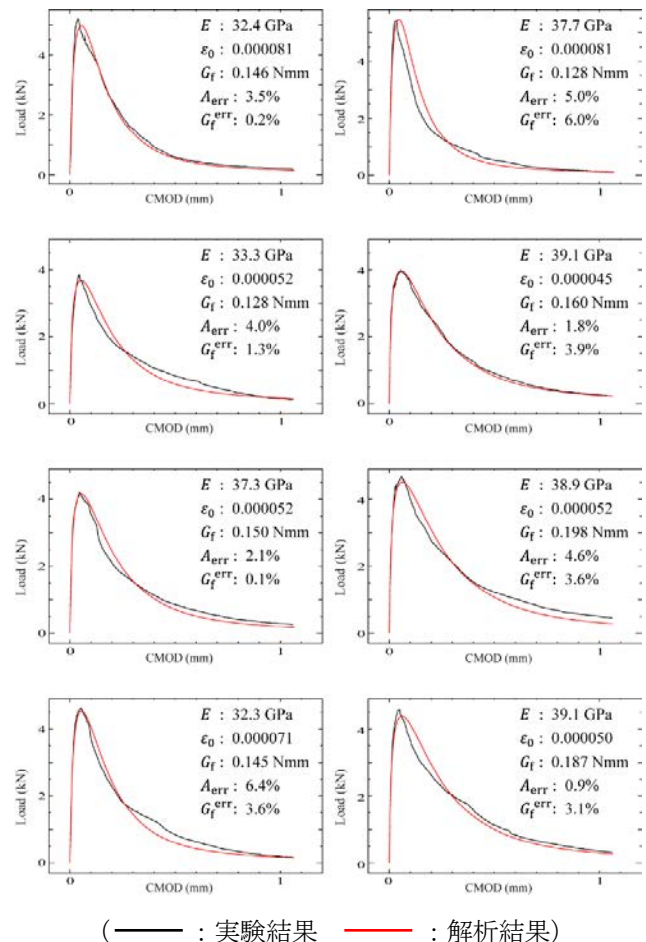


図-2 実験結果と解析結果の比較

験結果と解析結果の破壊エネルギーはほぼ一致した.

5. おわりに

本研究では, 3点曲げ試験の結果を損傷モデルと応答曲面法を用いて効率よく再現し, その後キャリブレーションを行うことにより, 試験結果からヤング率, 破壊発生ひずみ, 破壊発生エネルギーの3つのパラメータを同時に同定できることを確認した.

参考文献

- 1) JCI基準: 切り欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法, JCI-S-001-2003
- 2) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 檜山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp20130015, 2013
- 3) 車谷麻緒, 坂敏秀, 山本佳士, 上田尚史, 龍頭正幸, 小林樹人: 鉄筋コンクリートはりの非線形有限要素解析に対する代替モデルの提案とその妥当性の確認, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.77, No.2, I_403-I_412, 2021.