

接触爆発を受ける連続繊維シート補強 RC 版の損傷解析に関する研究

正会員 ○山口 信\* 同 村上 聖\*\*  
同 平居孝之\*\*\*

連続繊維シート      鉄筋コンクリート      接触爆発  
スポール破壊      数値シミュレーション

1. はじめに

前報では、既存 RC 部材の耐爆補強工法の開発を目的に、爆薬量および繊維素材の違いが連続繊維シート補強 RC 版の耐爆性能に及ぼす影響に関して実験的検討を行った<sup>1)</sup>。本報では、同 RC 版の耐爆性能評価に資するため、汎用衝撃解析コード ANSYS AUTODYN<sup>2)</sup>を用い、爆薬量 200g による接触爆発を受ける炭素繊維シート(高強度および高弾性タイプ) 補強 RC 版を対象に数値シミュレーションを実施した結果について報告する。

2. 解析方法

2.1 解析体系

詳細な実験内容については、文献 1) を参照されたい。数値解析モデルは、図 1 に示す通り、2 次元軸対称系とした。普通コンクリートおよび爆薬を Lagrange 要素で、異形鉄筋および炭素繊維(以下、CF) シートをシェル要素でそれぞれ模擬した。軸対称モデルの制約上、鉄筋は等価質量の円板で置き換えるものとした。但し、本問題では鉄筋は格子状に配されているため、膜応力によってモデル化するものとした。また、試験体は 2 本の角材上に設置されており、試験体上面中央に設置された爆薬の衝撃力が爆源から最も近い角材の頂点にせん断力として作用することが想定されたため、試験体断面の内接円を試験体の断面であるものと仮定した。

2.2 材料モデル

(1) 爆薬

爆薬には、JWL の状態方程式を適用した。式 (1) に同方程式、表 1 に爆薬の物性値一覧をそれぞれ示す。

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) \exp \left( -\frac{R_1}{\eta} \right) + B \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) \exp \left( -\frac{R_2}{\eta} \right) + \omega \eta \rho_{ref} e \quad (1)$$

ここに、 $p$ : 圧力、 $\eta: \rho / \rho_{ref}$ 、 $\rho$ : 密度、 $\rho_{ref}$ : 参照密度、 $e$ : 比内部エネルギー、 $A, B, R_1, R_2, \omega$  は爆薬に固有の値である。なお、爆薬の燃焼は、定常爆轟速度で伝播するものと仮定している。

(2) コンクリート

コンクリートには、圧力  $p$  が密度に比例する、式 (2) に示す線型の状態方程式を仮定した。

$$p = K\mu, \quad \mu \equiv \rho / \rho_{ref} - 1 \quad (2)$$

ここに、 $K$ : 体積弾性率、 $\mu$ : 圧縮度である。

コンクリートの構成則は、Drucker-Prager 則に従うものとした。本モデルの模式図を図 2 に示すが、本解析では、式 (3) に示す通り、降伏応力  $Y$  は最大値  $Y_{max}$  を超えないものと仮定した。

$$Y = \min(Y_{max}, aP + b) \quad (3)$$

式 (3) における傾き  $a$  および縦軸切片  $b$  は、下式により表される。

$$a = \frac{3(n-1)}{n+2}, \quad b = -\frac{3}{n+2} f_c^d \quad (4)$$

ここに、 $f_c^d$ : 動的圧縮強度、 $f_t^d$ : 動的引張強度、 $n \equiv f_c^d / f_t^d$  である。 $f_c^d$  および  $f_t^d$  は、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  を  $10^4$  (単位:  $1/\mu s$ ) オーダであると仮定し、下式により算出した。

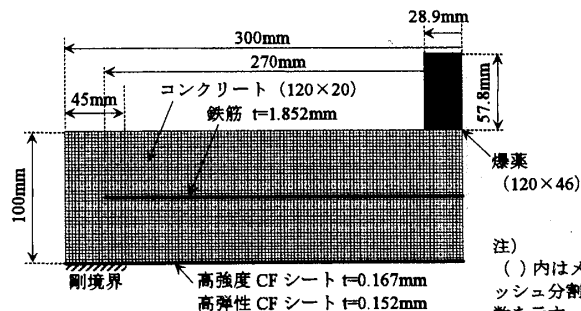


図 1 数値解析モデル図

表 1 爆薬の材料データ

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 状態方程式                              | JWL       |
| 参照(初期)密度 $\rho_{ref}$ ( $g/cm^3$ ) | 1.3189    |
| JWL 式第 1 項係数 $A$ (GPa)             | 578.4123  |
| JWL 式第 2 項係数 $B$ (GPa)             | 10.1342   |
| JWL 式第 1 項指数係数 $R_1$ (-)           | 5.711761  |
| JWL 式第 1 項指数係数 $R_2$ (-)           | 1.425701  |
| JWL 式第 3 項係数 $\omega$ (-)          | 0.279831  |
| 爆轟速度 $V_{det}$ (m/s)               | 6278      |
| 単位体積あたりの内部エネルギー $E_0$ ( $GJ/m^3$ ) | 5.8409    |
| C-J 圧力 $P_{CJ}$ (GPa)              | 12.774    |
| 構成則                                | 無 (Hydro) |
| エロージョン則 (幾何学的ひずみ (%))              | 500       |

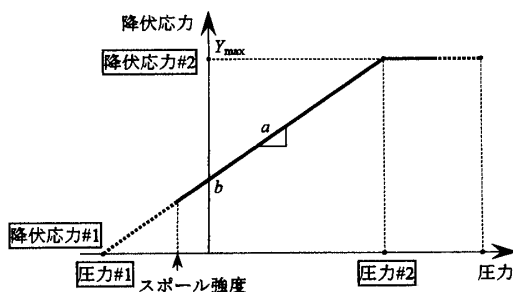


図 2 Drucker-Prager モデルの模式図

A Study on Numerical Analysis of Damage to RC slabs Strengthened with Continuous Fiber Sheets Subjected to Contact Detonation  
YAMAGUCHI Makoto, MURAKAMI Kiyoshi and HIRAI Takayuki

$$f_c^d = f_c \times (1.021 - 0.05076 \cdot \log \dot{\epsilon} + 0.02583 \cdot (\log \dot{\epsilon})^2) \quad (5)$$

$$f_t^d = f_t \times (0.8267 + 0.02987 \cdot \log \dot{\epsilon} + 0.04379 \cdot (\log \dot{\epsilon})^2) \quad (6)$$

表2に、コンクリートに対して用いた物性値を示す。

(3) 鋼材

鋼材には、密度や内部エネルギーの状態量に依存しないビーム要素を適用するため、線型の状態方程式を適用した。また、構成則には、式(7)に示す Johnson-Cook のモデルを適用した。

$$Y = [A + B\epsilon_p^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (7)$$

ここに、 $\epsilon_p$ : 相当塑性ひずみ、 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$ : 無次元化相当塑性ひずみ速度 (但し、 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0$  (1/s)),  $T^*$ : 相同温度、 $A, B, n, C, m$ : 物質に固有の値である。表3に鋼材に対して用いた物性値を示す。

(4) CF シート

CF シートに関してもシェル要素を適用し、圧力や内部エネルギーの状態量は評価されないため、線型の状態方程式を適用した。CF シートに用いた材料データを表4に示す。

3. 解析結果

図3に解析結果と実験結果との比較を示す。なお、解析結果図中において黒塗りで表示されている部分が「破壊」と判断された計算セルである。但し、コンクリートに適用した破壊条件は、負の限界静水圧力によって破壊が生じる、いわゆるスポール破壊であるが、コンクリートのような脆性材料の場合、ある方向にマイクロクラックが生じて、他の方向は健全な状況を保持している状況等が想定され、スポール破壊により直ちに材料強度が失われるとは限らない点に注意を要する。

図より、高弾性 CF シート補強 RC 版の損傷程度は高強度 CF シート補強 RC 版のそれよりもやや大きく評価されていることから、本解析により CF シートの種類の違いに起因する損傷の差異を部分的に再現することが可能であると考えられる。

但し、両ケースともに実験結果に比してコンクリートの損傷が大きいように見受けられ、また、いずれの CF シートも爆発点直下近傍で破断が生じていると考えられる点で実験結果とは異なっている。CF シートの材料物性値には未だ明らかとはなっていない点が多く、接着層の仮定条件等も含めて、今後更なる検討が必要である。

4. まとめ

接触爆発を受ける CF シート補強 RC 版の損傷解析を実施した結果、本解析方法により、CF シートの種類の違いに起因する損傷の差異を部分的に再現することが可能であると考えられた。

表2 コンクリートの材料データ

|  |                 |
|--|-----------------|
| 圧縮強度/ヤング率                              | 37.9MPa/27.3GPa |
| 状態方程式                                  | 線型              |
| 参照密度 $\rho_{ref}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.4             |
| 体積弾性率 $K$ (GPa)                        | 15.667          |
| 構成則                                    | Drucker-Prager  |
| 横弾性率 $G$ (GPa)                         | 11.375          |
| 圧力#1 $P_1$ (MPa)                       | -16.26          |
| 圧力#2 $P_2$ (MPa)                       | 54.52           |
| 降伏応力#1 $Y_1$ (MPa)                     | 0               |
| 降伏応力#2 $Y_{max}$ (MPa)                 | 150             |
| 破壊則                                    | 無 (Hydro)       |
| スポール強度 $P_{min}$ (MPa)                 | -5.0            |
| エロージョン則 (幾何学的ひずみ (%))                  | 100             |

表3 鋼材の材料データ

|  |                |
|--|----------------|
| 降伏強度/引張強度                              | 370MPa/520MPa  |
| 状態方程式                                  | 線型             |
| 参照密度 $\rho_{ref}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 7.9            |
| 体積弾性率 $K$ (GPa)                        | 171.6          |
| 構成則                                    | Johnson-Cook   |
| 横弾性率 $G$ (GPa)                         | 79.21          |
| 初期降伏応力 $A$ (MPa)                       | 370            |
| 加工硬化係数 $B$ (MPa)                       | 275            |
| 加工硬化乗数 $n$ (-)                         | 0.36           |
| ひずみ速度係数 $C$ (-)                        | 0.022          |
| 温度軟化係数 $m$ (-)                         | 1.0            |
| 破壊則                                    | Plastic Strain |
| 破断ひずみ $\epsilon_{max}^p$ (%)           | 30.6           |
| エロージョン則 (塑性ひずみ (%))                    | 30.7           |

表4 CF シートの材料データ

|  |       |       |
|--|-------|-------|
| CF シートの種類                              | 高強度   | 高弾性   |
| 状態方程式                                  | 線型    | 線型    |
| 参照密度 $\rho_{ref}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.796 | 1.974 |
| 体積弾性率 $K$ (GPa)                        | 127.8 | 391.1 |
| 横弾性率 $G$ (GPa)                         | 95.83 | 293.3 |
| 破断ひずみ (%)                              | 1.0   | 1.0   |
| エロージョン則 (塑性ひずみ (%))                    | 1.1   | 1.1   |

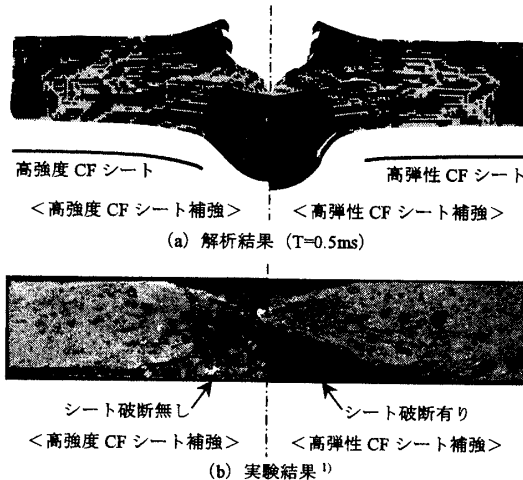


図3 解析結果と実験結果との比較

謝辞

数値解析にあたり、伊藤忠テクノソリューションズ(株)の片山雅英氏より技術支援を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 山口信ほか: 新素材繊維補強コンクリートの耐爆性能に及ぼす部材構成方法の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.509-512, 2009
- Katayama, M. et al.: Numerical Analysis Method for the RC and Geological Structures Subjected to Extreme Loading by Energetic Materials, International Journal of Impact Engineering, Vol.34, Issue 9, pp.1546-1561, 2007

\* 日本理科大学工学部建築学科 助教・工博  
 \*\* 熊本大学大学院自然科学研究科 教授・工博  
 \*\*\* 日本理科大学工学部建築学科 教授・工博

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Nippon Bunri Univ., Dr.Eng.  
 Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr.Eng.  
 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Nippon Bunri Univ., Dr.Eng.