

# 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の表面破壊深さの評価に関する理論的検討

防衛大学校 学生会員 ○三輪 幸治 正会員 別府 万寿博  
正会員 大野 友則

## 1. 緒言

剛飛翔体がコンクリート板に高速度で衝突すると、局所的な損傷や破壊が発生する。コンクリートの局部破壊が生じる際に、表面破壊の程度は裏面側の損傷や破壊に大きな影響を与えるため、表面破壊を精度よく評価する手法を確立する必要がある。X.W.Chen ら<sup>1)</sup>は、コンクリート中を貫入する飛翔体に対して理論的な考察を行い、表面破壊深さを評価する方法を提案しているが、実験と比較して検討した例は少ない。

本研究は、高速衝突を受けて生じるコンクリート板の表面破壊深さの評価法を確立するために、X.W.Chen らの表面破壊深さの評価法を改良し、精度の向上を検討したものである。

## 2. 理論モデルによる表面破壊深さの算定

### 2.1 飛翔体先端部分に作用する抵抗力

X.W.Chen らが提案した、表面破壊深さの評価法について説明する。図-1に、円形の先端を持つ半球型の剛飛翔体モデルを示す。図-2に、この先端部分が無限厚さのコンクリート中に貫入したときに受ける抵抗力を示す。コンクリート中への貫入によって、コンクリートとの接触面には、法線方向の圧縮応力 $\sigma_n$ と接線方向の応力 $\sigma_t$ が生じる。法線方向の圧縮応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_n = A\sigma_y + B\rho V^2 \sin^2 \theta \quad (1)$$

法線方向応力 $\sigma_n$ と接線方向の応力 $\sigma_t$ との関係は、摩擦係数 $\mu_m$ を用いて次のように表される。

$$\sigma_t = \mu_m \sigma_n \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_y$  : コンクリートの圧縮強度、 $\rho$  : コンクリートの密度、 $V$  : 任意の時刻における飛翔体速度、 $A$ 、 $B$  : 無次元値である。無次元値 $A$ は次式で与えられる。

$$A = \frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{E}{3(1-\nu)\sigma_y} \right] \right\} \quad (3)$$

ここに、 $E$  : コンクリートのヤング係数、 $\nu$  : コンクリートのポアソン比である。また、X.W.Chen らは、材料の動圧による抵抗力に関する無次元値 $B$ として、コンクリートに対して1.0、鋼材に対して1.5の値で実験結果と適合することを報告している<sup>1)</sup>。

飛翔体が進行方向に受ける力は、式(1)、(2)の $X$ 軸成分の応力を表面にわたって積分し、コンクリートの圧縮強度である静圧による力と、動圧による力で整理した次式で表される。

$$F = \frac{\pi d^2}{4} (A\sigma_y N_1 + B\rho V^2 N_2) \quad (4)$$

ここに、 $N_1$ 、 $N_2$ は無次元値であり、次式で表される。

$$N_1 = 1 + \frac{8\mu_m}{d^2} \int_0^a y dx \quad (5)$$

表-1 計算入力値

半球型剛飛翔体			コンクリート板		
	記号	入力値		記号	入力値
直径(m)	d	0.025	強度(N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$	25
質量(kg)	m	0.05	密度(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	2500
摩擦係数	$\mu_m$	0.1	ポアソン比	$\nu$	0.2
衝突速度	m/s	100~500	ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	E	$2.5 \times 10^4$

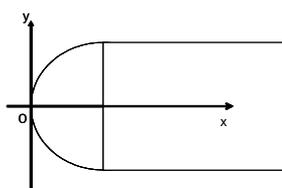


図-1 半球型剛飛翔体モデル

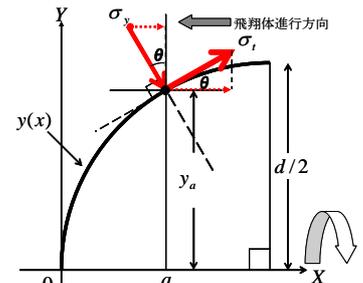


図-2 接線・法線方向の応力

$$N_2 = \frac{8}{d^2} \int_0^a \frac{yy'^3}{1+y'^2} dx + \frac{8\mu_m}{d^2} \int_0^a \frac{yy'}{1+y'^2} dx \quad (6)$$

### 2.2 表面破壊深さの算定手順

表面破壊深さの算定手順は、まず、全体の表面破壊深さ $x$ を微小量 $\Delta x$ で $n$ 個に分割し、各計算ステップにおいて運動エネルギー保存則を満足するように条件を与えて表面破壊深さ $x$ を求める。

ステップ $i$ における表面破壊深さ $x_i$ は、次式で与えられる。

$$x_i = i\Delta x \quad (7)$$

ステップ $i$ における抵抗力 $F(x_i)$ に対する各ステップ間の増分仕事 $\Delta E$ および $F(x_i)$ は、次式で求められる。

$$\Delta E_i = -F(x)dx = -\Delta x \left[ \frac{F(x_{i-1}) + F(x_i)}{2} \right] \quad (8)$$

$$F(x_i) = \pi y_i^2 (A(\bar{N}_1)\sigma_y + B(\bar{N}_2)\rho V_i^2) \quad (9)$$

ここに、 $\bar{N}_1$ 、 $\bar{N}_2$ は、ステップ $i$ における無次元値である。また、飛翔体の速度低下による運動エネルギーの減少は、次式で求められる。

$$\Delta E_i = \frac{1}{2} M (V_i^2 - V_{i-1}^2) \quad (10)$$

式(8)、(9)および式(10)を連立して、飛翔体の速度 $V_i$ について解く。ステップ $k$ のとき、飛翔体の速度 $V_k = 0$ になるとすると、全貫入深さ $x_k$ は次式で求められる。

$$x_k = k\Delta x \quad (11)$$

### 2.3 計算例

計算の対象は、著者ら<sup>2)</sup>が行なった剛飛翔体(直径25mm、先端形状:半球型、質量:0.05kg)を速度180m/s~490m/sで普通強度コンクリート(25N/m<sup>2</sup>)に衝突させた実験である。計算では貫入増分を $\Delta x = 0.01\text{mm}$ とした。表-1に、計算に用いた入力値を示

す。パラメータ  $A$  は式(3)より求め、パラメータ  $B$  は 1.0、摩擦係数  $\mu_m$  は 0.1 とした<sup>1)</sup>。

いま、先端部の飛翔体直径を  $d$  とすると、半円の先端形状  $y$  は次式で表される。

$$y = \sqrt{-x^2 + dx} \quad (12)$$

図-3 に、飛翔体の衝突速度が 300m/s のとき、式(12)を用いて計算した飛翔体の受ける衝突荷重の時刻歴を示す。これより、衝突荷重は、飛翔体とコンクリートとの接触面積の増加とともに大きくなり、先端部分が完全に貫入したとき最大値を示す。その後は、飛翔体の速度減少とともに小さくなる。

図-4 に、表面破壊深さと衝突速度の関係を示す。図には実験結果<sup>2)</sup>も示している。これより、表面破壊深さは、速度 200m/s ~ 300m/s において実験とよく一致しているが、速度 300m/s ~ 500m/s ではやや過大に評価している。この原因は、式(1)に示したコンクリート強度の算定が、金属材料に対する塑性論に基づいており、圧力の大きさに関わらずコンクリートの圧縮強度が一定であることや、ひずみ速度効果を考慮していないことが考えられる。

### 3. Drucker-Prager 降伏基準およびひずみ速度効果を考慮した改良モデルの提案

高速度領域における表面破壊深さを改善するため、図-5 に示す非線形 Drucker-Prager 降伏基準とひずみ速度効果による強度増加を考慮して X.W.Chen らの理論モデルを改良する。なお、ひずみ速度効果による強度増加は、コンクリートの降伏応力の増加として反映させる。

まず、式(1)を次式のように改良する。

$$\sigma_n = \sigma_y + pV^2 \sin^2 \theta \quad (13)$$

ここで、コンクリートの降伏応力  $\sigma_y$  は、非線形 Drucker-Prager 降伏基準であり次式で示される。

$$\sigma_y = \sqrt{f'_c f'_t / 3 + (f'_c - f'_t) p} \quad (14)$$

ここに、 $f'_c$ 、 $f'_t$  : コンクリートの一軸圧縮および引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $p$  : 圧力(N/mm<sup>2</sup>)である。

ひずみ速度効果による圧縮および引張強度の増加率は、それぞれ藤掛らの式<sup>3)</sup>および Ross らの式<sup>4)</sup>により求めて計算する。

動的圧縮強度の増加率：藤掛らの式<sup>3)</sup>

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006 \left[ \text{Log} \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^{1.05}} \quad (15)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$  : 静的載荷時のひずみ速度 [1.2 × 10<sup>-5</sup> (1/s)]、 $\dot{\epsilon}$  : 急速載荷時のひずみ速度 (1/s)、 $f'_{cs}$  : 静的載荷時の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_{cd}$  : 動的載荷時の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)である。

動的引張強度の増加率：Ross らの式<sup>4)</sup>

$$\eta(\dot{\epsilon}) = \frac{f'_{td}}{f'_{ts}} = \exp \left[ 0.00126 \left( \text{Log} \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{3.373} \right] \quad (16)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$  : 静的載荷のひずみ速度 [1 × 10<sup>-7</sup> (1/s)]、 $f'_{ts}$  : 静的載荷時の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_{td}$  : 動的載荷時の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)である。

図-6 および図-7 に、それぞれ提案モデルによる衝突荷重 (速度 : 300m/s) と表面破壊深さ ~ 衝突速度関係を示す。図には X.W.Chen らのモデルも重ねて示している。これより、提案モデルによる衝突荷重の波形は、X.W.Chen らのモデルに比べ、圧力の増大とひずみ

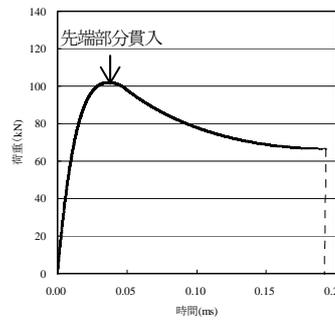


図-3 飛翔体の衝突荷重と衝突時間の関係

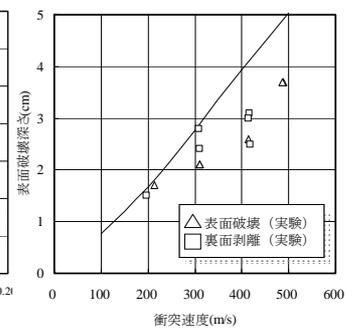


図-4 X.W.Chen らのモデルによる表面破壊深さ

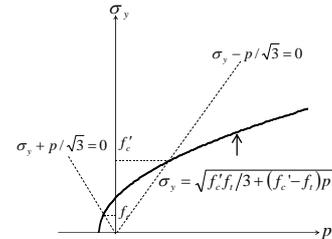


図-5 非線形 Drucker-Prager の降伏条件

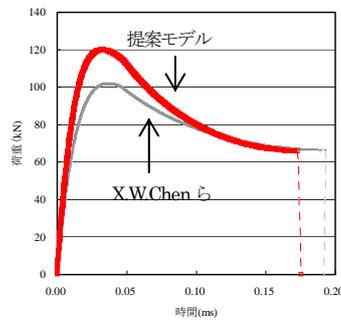


図-6 提案モデルによる飛翔体の衝突荷重

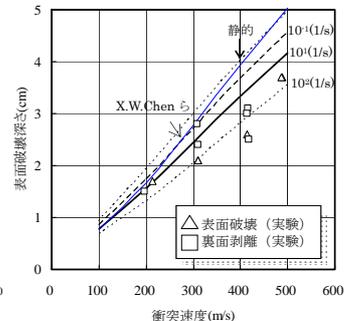


図-7 提案モデルによる表面破壊深さ

速度効果によって最大荷重が大きくなり、衝突時間は短くなること がわかる。また、提案モデルによる表面破壊深さは、ひずみ速度 10<sup>1</sup>(1/s) ~ 10<sup>2</sup>(1/s) による強度増加を考慮したときに、X.W.Chen らの式に比べて衝突速度 300m/s ~ 500m/s においても、実験とよく一致していることがわかる。

### 4. 結言

本研究は、高速衝突を受けて生じるコンクリート板の表面破壊深さの評価について理論的な検討を行なったものである。これより、X.W.Chen らの理論モデルに基づく表面破壊深さの式に、非線形 Drucker-Prager 降伏基準とひずみ速度効果を適切に考慮することにより、高速度領域の衝突に対しても表面破壊深さを評価できた。

### 参考文献

- 1) Q.M. Li, H.J.Weng, X.W. Chen: A modified model for the penetration into moderately thick plates by a rigid, projectile, Int J of Impact Engng., 30, pp. 193-204, 2004
- 2) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 片山雅英: 剛飛翔体の高速衝突を受けて生じるコンクリート板の局部破壊に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.2140, 2006.7.
- 3) 藤掛典一, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001.2.
- 4) Ross C.A. Thompson P.Y. and Tedesco J.W.: Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Material Journal, Vol.86, pp.475-481, September October, 1989