

飛翔体の質量・衝突速度が局部破壊に及ぼす影響に関する基礎的検討

防衛大学校 学生会員 ○上野 裕稔 正会員 市野 宏嘉 別府 万寿博

1. 緒言

コンクリート部材が高速衝突を受けると、表面破壊、裏面剥離および貫通等の局部破壊が生じる。Liら¹⁾は、飛翔体の運動エネルギー（以下、衝突エネルギーと呼ぶ）を指標としてこれらの局部破壊を評価する方法を提案している。しかし、このような衝突エネルギーによる局部破壊評価の妥当性に関して、実験や力学モデルに基づいた検証は行われていない。本研究は、飛翔体の衝突エネルギーをパラメータとしたコンクリート板の局部破壊実験を行うとともに、既往の理論モデルを用いて、衝突エネルギーと局部破壊の程度の関係ならびに飛翔体の質量および衝突速度が局部破壊に及ぼす影響について検討したものである。

2. 高速衝突実験

実験は、図-1に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いた。図-2に、実験に使用した飛翔体を示す。鋼製飛翔体は、質量46g、250g、500gおよび1000gの4種類である。先端は、直径25mmの半球形である。コンクリート板は縦横500mm×500mmの正方形板で、板厚は80mm、100mmおよび130mmの3種類を作製した。コンクリートの圧縮強度は25.5N/mm²である。実験は、可能な限り衝突エネルギーが2250J、4000Jとなるように衝突速度を調整したが、実際の衝突エネルギーはそれぞれ1959J～2870Jおよび3433J～4733Jとなった。

図-3(a)に、実験で得られた貫入深さ～衝突速度関係を示す。図から、貫入深さは衝突エネルギーの増大に伴って大きくなる傾向を示している。図-3(b)に示す貫入深さと飛翔体質量の関係から、衝突エネルギーが等しい場合でも、質量46gのケースに比べて質量250g～1000gの貫入深さの方がやや大きく、質量が大きいほど貫入深さが大きくなる傾向を示している。

図-4に、衝突エネルギーと破壊モードの関係を示す。図から、飛翔体の質量によらず、衝突エネルギーの増大に伴って破壊モードが裏面剥離、貫通と進展していることがわかる。図-5に、設定衝突エネルギー4000J、板厚100mmの場合の局部破壊の状況を示す。質量46g、衝突速度421m/sのケースでは、裏面剥離が生じた。衝突エネルギーが最も小さくなった質量250g、衝突速度166m/sのケースでは表面破壊となった。ただし、断面内のひび割れは大きく開口し、裏面剥離寸前であった。質量500g、

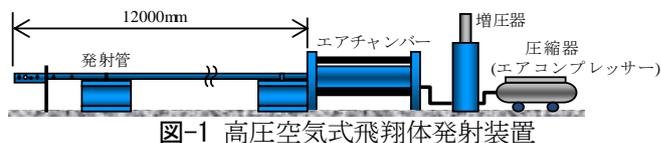


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

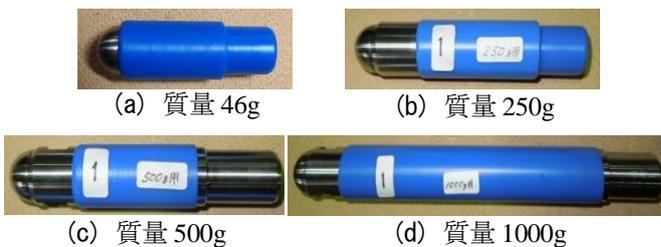


図-2 鋼製飛翔体

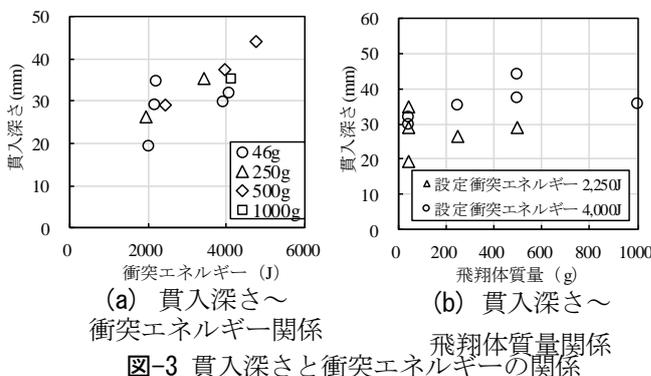


図-3 貫入深さと衝突エネルギーの関係

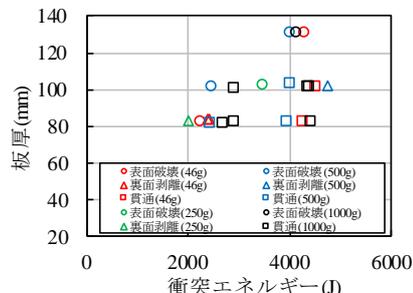


図-4 衝突エネルギーと破壊モードの関係

衝突速度 126m/s のケースおよび質量 1,000g、衝突速度 94m/s のケースでは貫通となった。すなわち、衝突エネルギーがほぼ等しい場合でも、飛翔体の質量が大きく、衝突速度が小さくなるにしたがって、破壊の程度がやや大きくなる傾向が認められた。

3. 貫入深さに関する考察

三輪ら²⁾は、Liらの理論モデル¹⁾に対して非線形 Drucker-Prager 降伏基準やひずみ速度効果による強度の動的倍率を適用した修正モデルを提案している。この修正モデルでは、深さ a だけ貫入しているときに飛翔体が

受ける抵抗力 F_a は次式のように表される。

$$F_a = \pi y_a^2 (A \sigma_y (N_1)_a + B \rho V_a^2 (N_1)_a) \quad (1)$$

ここに、 y_a は接触面の半径、 A 、 B は無次元係数 ($A=B=1.0$)、 σ_y は降伏応力、 $(N_1)_a$ 、 $(N_2)_a$ は無次元係数、 ρ は密度、 V_a は飛翔体速度である。

式(1)を用いて、飛翔体が微小長さだけ貫入したときの仕事量と、飛翔体の衝突エネルギーの減少分の釣り合いを時々刻々解くことで貫入深さを求めることができる。

三輪らの理論モデルを用いて、「質量 46g、衝突速度 421m/s、衝突エネルギー4076J」のケースと「質量 1000g、衝突速度 90.3m/s、衝突エネルギー4077J」のケースを比較する。図-6 に、理論モデルから算定した荷重～貫入深さ関係を示す。質量 46g のケースでは約 10mm 貫入した際に最大荷重 210kN に達し、貫入深さは 27mm となった。質量 1000g のケースでは約 14mm 貫入した際に最大荷重約 100kN に達し、貫入深さは 49mm となった。すなわち、飛翔体の質量が大きく、衝突速度が小さい場合には、最大荷重は小さくなるが、貫入深さは大きくなるのがわかる。図中に示した実験値の貫入深さとは 14%～36% 程度の差が生じているが、質量が大きく、衝突速度が小さい方が貫入深さが大きいという傾向は一致していた。

4. 裏面剥離に関する考察

Li ら¹⁾は、図-7 に示すように板厚から貫入深さを差し引いた板厚のせん断抵抗力と衝突荷重を比較することにより、貫通限界板厚を評価する方法を提案している。Li らが用いたせん断抵抗力 F_s を次式に示す。

$$F_s = \tau_f A_s \cos \alpha \quad (2)$$

ここに、 τ_f は最大せん断強度、 A_s は裏面剥離が生じる断面の表面積、 α は裏面剥離が生じる角度を示す。

ここでは、このせん断抵抗力を裏面剥離耐力と定義し、貫入深さが裏面剥離耐力に与える影響について考察する。図-8 に、板厚 100mm に対して式(2)を用いて算出した裏面剥離耐力と貫入深さの関係を示す。裏面剥離が生じる角度については、三輪らの研究²⁾を参考に $\alpha=62.1^\circ$ とした。図から、飛翔体の貫入深さが大きくなるにしたがって、裏面剥離耐力が小さくなり、裏面剥離が生じやすくなるのがわかる。これは、実験の結果と同じ傾向を示している。

5. 結言

本研究は、衝突エネルギーと局部破壊の関係ならびに飛翔体の質量および衝突速度が局部破壊に及ぼす影響について検討したものである。実験から、衝突エネルギーによって局部破壊の程度を概ね評価できることがわかった。また、衝突エネルギーが等しい場合でも、質量が大きく衝突速度が小さい場合には、貫入深さが大きくなり、裏面剥離が生じやすくなることがわかった。理論モデル

衝突エネルギー	4077J	3433J	3996J	4372J
質量	46g	250g	500g	1000g
衝突速度	421m/s	166m/s	126m/s	94m/s
破壊モード	裏面剥離	表面破壊	貫通	貫通
断面写真				

図-5 局部破壊の状況 (設定衝突エネルギー: 4000J)

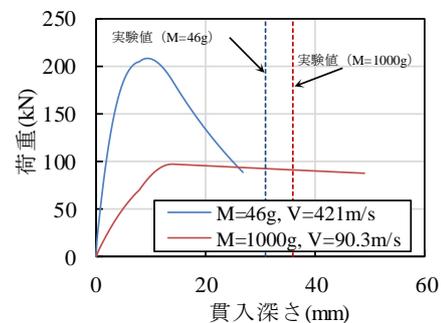


図-6 荷重～貫入深さ関係

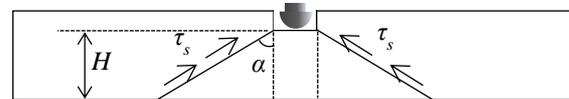


図-7 Li et al.の貫通耐力モデル¹⁾

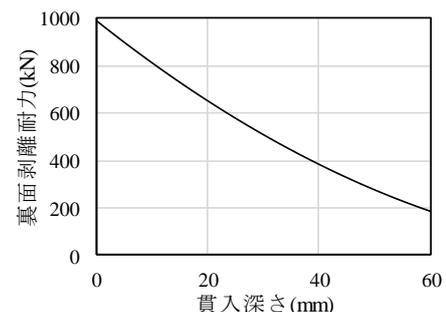


図-8 裏面剥離耐力～貫入深さ関係 (板厚 100mm)

を用いてこれらの検討を行ったところ、実験結果と同様の傾向を示すことがわかった。

参考文献

- Li, Q. M. and Tong, D. J.: Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact, ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol.129, No.9, pp.1083-1091, 2003.
- 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 伊東雅晴, 片山雅英: 改良理論モデルによるコンクリート板の局部破壊評価法, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.844-858, 2009.