

I-B 134 衝突荷重を受けるコンクリートブロックの衝撃挙動に関する研究

東光コンサルタンツ 正会員 ○坂本 達弥
千葉工業大学 正会員 足立 一郎、吉田 秀典

1. はじめに

土木構造物の安全確保を議論する際には、飛散物等の衝突による破壊現象なども考慮する必要があるものと思われる。しかしながら、飛散物の衝突等による荷重を受ける構造物の衝撃挙動を定量的・定性的に説明した研究は少ない。そこで本研究では、飛散物の衝突による衝撃挙動を力学的視点に立って解明することを目的とし、その基礎研究として飛散物を用いたコンクリートブロックの衝撃実験を行い、それより得られた結果に対して力学的解釈を加えた。

2. 実験装置の概要

実験は、飛翔体を試験体であるコンクリートブロックに水平に衝突させるために、図-1に示すような水平打撃試験機を用いて飛翔体をガイドレールに沿って飛ばした。飛翔速度の測定には、ガイドレールに1m間隔で取り付けられた光電式速度センサーを用いた。また、衝撃時の衝撃加速度応答波形を得るために図-2のように飛翔体の先端に加速度計(ENDEVCO社製)を埋め込んだ。

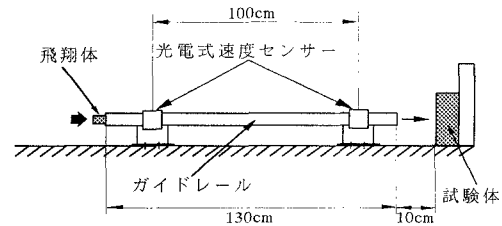


図-1 実験装置の概要

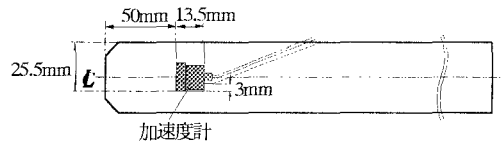


図-2 飛翔体側面図

飛翔体には、先端に加工を加えることから、200[g]の杉の角材（断面34×34[mm]、長さ36[cm]）を選び、その先端形状を加工したものを、球面型及び平面型(φ32,28,23[mm])に加工を施し使用した。試験体には、軽量コンクリートブロック(190×390×100[mm])を使用し、木片の正目方向が試験体に垂直に当たるようにした。

3. 実験結果及び考察

本実験においては、前述の通り、実験を通して飛翔体の飛行速度及び衝撃加速度を計測し、実験後に試験体(コンクリートブロック)の破壊形態の観察も行った。尚、本実験では裏面剥離現象を破壊と定義する。

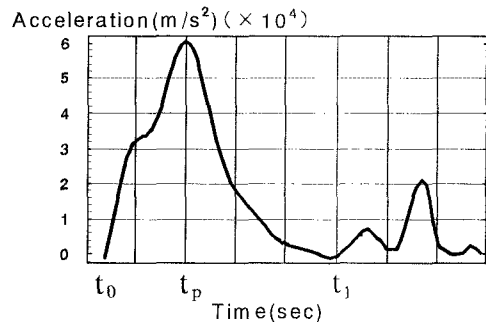


図-3 加速度応答波形の例

(1) 加速度応答波形について

衝撃加速度応答波形の一例を図-3に示す。本実験においては、破壊直前までは一つの波形しか現れないが、破壊が生じると、通常、図に示すように複数の波形が確認された。これは最初の衝突後、衝突面が剥離する事によって試験体側からの反力が一時減少するが、再び飛翔体の側面等が試験体の別の箇所にも再度衝突し、衝撃力を受けることを示している。従って、破壊に影響を及ぼしているのは一つめの波形のみと考え、本研究では図中の t_0 から t_1 の範囲に着目した。

(2) 試験体に作用するエネルギーの算定

質点の力学に基づき、実験系にエネルギー保存則を適用すると次式が得られる。

$$\frac{1}{2} m V_0^2 = \int_{t_0}^{t_1} m \left(\frac{d^2 u(t)}{dt^2} \right) \left(\frac{du(t)}{dt} \right) dt + W_{res} \quad (1)$$

全エネルギー = 衝突エネルギー = 衝突エネルギー - 以外のエネルギー

式中で m は飛翔体の質量、 V_0 は衝突直前の速度、 u は飛翔体の変位、 $mV_0^2/2$ は全エネルギー、 W_{res} は衝突後に飛翔体側にあるエネルギーを表す。式(1)において、右辺第一項は衝突エネルギーであり、右辺第二項は熱エネルギー、音響エネルギー、塑性仕事等を含む。ここで右辺第一項を以下の手順で算定する。まず、実験により得た加速度応答波形に高次の関数を内挿して時間 t の関数(式(2))とし、さらにこれを時間 t で積分することにより、速度 $v(t)$ (式(3))を導く。

$$\frac{d^2 u(t)}{dt^2} = \alpha(t) = a_0 + a_1 t^1 + a_2 t^2 + \dots = \sum_{n=0} a_n t^n \quad (2)$$

$$\frac{du(t)}{dt} = v(t) = \int \alpha(t) dt = C + a_0 t + \frac{a_1}{2} t^2 + \frac{a_2}{3} t^3 + \dots = C + \sum_{n=0} \frac{a_n}{n+1} t^{n+1} \quad (3)$$

これらの式を基に衝突エネルギーを求め、初速度 V_0 との関係を図-4に表わした。横軸には $mV_0^2/2$ を、縦軸にはその V_0 における衝突エネルギー W_{imp} 、衝突後の運動エネルギー $mV_1^2/2$ 及び両者の和 W_t の値を示す。 W_{imp} と $mV_1^2/2$ は、初期の段階では共に衝突前の運動エネルギー $mV_0^2/2$ と線形の関係にあり、f点を境に傾きが変化する。 W_{imp} はf点以降ほとんど増加せず、逆に $mV_1^2/2$ は傾きを急にして増加する。また、このf点は実験で観察された試験体の裏面剥離発生点と一致した。これらのことは、衝突時に飛翔体が有する運動エネルギーの大小に関わらず、破壊を引き起こす衝突エネルギーは一定であり、f点においてそのエネルギーに達したことを示唆している。これは、速度の増加に伴って、衝突中の試験体の歪みも増加し、その試験体(材料)固有の破壊基準(破壊靱性や内部摩擦角等)に達して破壊したことに相当し、線形破壊力学の理論を支持しているものと考えられる。

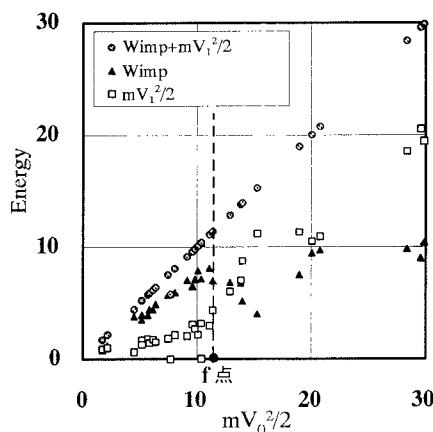


図-4 エネルギー関係図(平面型、φ 28mm)

さらに、衝突エネルギーと衝突後の運動エネルギーの和 W_t が衝突前の運動エネルギー $mV_0^2/2$ にほぼ一致することが示された。これは、衝突に費やした以外のエネルギーのほとんどが運動エネルギーであり、塑性変形などによる仕事はほとんどなかったことを示唆している。実験後の観察でも、剥離部での塑性変形がほとんど認められず、試験体はかなり脆性的に破壊したと思われる。

(3)有限要素解析

飛翔体が試験体に衝突した際にどこで剥離を生じるのかを検討する為に、3次元の有限要素解析を行った。試験体に破壊を生じる時の衝撃加速度の最大値に飛翔体の質量を乗じたものを荷重とし、それを飛翔体が試験体に衝突する部分に作用させ、各要素において最大せん断応力とそれに直交する直応力を計算した。そしてMohr-Coulombの破壊条件に基づいて内部摩擦角を求め、衝突面におけるその分布を図-5に示した。図より、衝突面での摩擦角は小さく、逆にその周辺で摩擦角が $40^\circ \sim 50^\circ$ と高く分布していることから衝突面の周辺から破壊が生じることがわかる。これは実験により得た結果と一致していた。

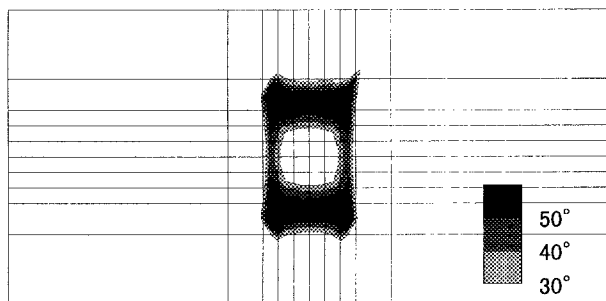


図-5 内部摩擦角の分布(正面)

4. まとめ

本研究より、次のような知見が得られた。(1)破壊に寄与する波形は、最大衝撃加速度を含む一波である。(2)衝撃力やエネルギーが材料固有の値に達すると破壊を生ずる。(3)そうした材料の固有値がわかれば、有限要素解析などを用いて破壊領域が推定出来る。