

衝撃荷重を受ける RC 版の破壊挙動に関する数値解析的検討

防衛大学校 学生会員 ○渡邊駿介 濱田匠李 清田翔吾
正会員 別府万寿博 市野宏嘉

1. 緒言

爆発や衝突による衝撃荷重が鉄筋コンクリート（RC）版に作用すると、構造物全体が変形することで生じる全体破壊に加え、荷重作用位置近傍が局部的に破壊する局部破壊が生じることが知られている¹⁾。これらの破壊モードは衝撃力の変化によって変化するが、RC 版の破壊メカニズムについては未解明な点が多い。本研究は、剛飛翔体と柔飛翔体による衝撃荷重を受ける RC 版の破壊挙動について数値解析的な検討を行ったものである。

2. 解析手法および解析モデルの概要

本解析では、表面積分法を適用した 2 次元有限差分コードを用いて解析を行った²⁾。表面積分法は、グリーンの定理と中間値の定理で構成されており、ひずみ速度および節点力を求める際に使用する。図-1 に、RC 版の解析モデルを示す。解析モデルは 1000mm×1000mm×160mm の RC 版とし、両側下端部の x 軸および y 軸方向の節点自由度を固定した。要素寸法は 5.0mm×5.0mm の正方形で、総節点数は 6633 個である。衝撃荷重は、版中央上端部の 80mm×80mm の範囲に作用させた。鉄筋についてはかぶりを 15mm として、圧縮鉄筋及び引張鉄筋を RC 版の上側および下側に配置した。せん断補強筋については、スパン中央から 100mm 間隔で 9 本配置した。なお、引張鉄筋比、圧縮鉄筋比およびせん断補強筋比はいずれも 2% である。コンクリートおよび鉄筋の構成則には von-Mises の降伏関数を適用し、コンクリートの破壊則には負圧破壊基準を適用した。また、既往研究を参考にひずみ速度効果によるコンクリートの圧縮および引張強度の増加率を、それぞれ藤掛らの式および Ross らの式を用いて算出した³⁾。以上の解析モデルを用いて、衝突によって変形が生じない剛飛翔体（ケース 1）と変形が生じる柔飛翔体（ケース 2）による衝撃荷重を作用させた。具体的には、図-2 に示すように、それぞれ三角形と長方形の荷重～時間関係にモデル化した。表-2 に飛翔体の解析定数を示す。剛飛翔体の場合は、まず、質量 0.2kg、速度 50m/s として、修正 NDRC 式から算定される貫入量を求めた。次に、この貫入量を衝突速

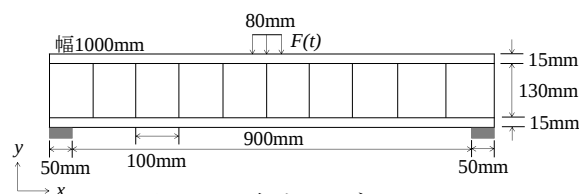
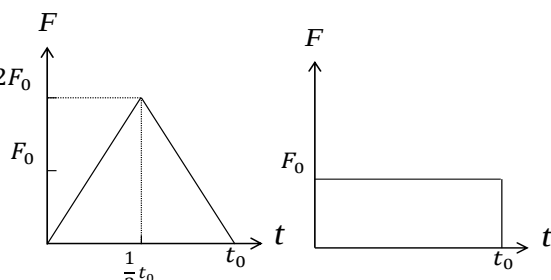


図-1 解析モデル

表-1 コンクリートおよび鉄筋の解析定数

項目	材料	コンクリート	鉄筋
降伏条件		von-Mises降伏条件	von-Mises降伏条件
破壊則		負圧破壊基準	
圧縮強度		静的:25.0N/mm ²	静的:235N/mm ²
引張強度		静的:2.5N/mm ²	静的:400N/mm ²
弾性係数		25.5kN/mm ²	200kN/mm ²
ポアソン比		0.15	
密度		2.5g/cm ³	7.85g/cm ³



(a)ケース 1: 三角形荷重 (b)ケース 2: 長方形荷重

図-2 荷重～時間関係

表-2 飛翔体の解析定数

項目	剛飛翔体	柔飛翔体	単位
質量	0.2		kg
衝突速度	50		m/s
長さ	0.5	10	cm
外径	80		mm
内径		78.6	mm
荷重	131.2	50.0	kN
荷重継続時間	0.152	0.200	ms

キーワード 衝撃荷重, 鉄筋コンクリート版, 破壊メカニズム

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL : 046-841-3810 E-mail : beppu@nda.ac.jp

度で除して衝撃荷重の継続時間とした。さらに、飛翔体が衝突前に有していた運動量と衝撃荷重の力積が等しくなることから、衝撃荷重 F_0 は 131.2kN、荷重継続時間 t_0 は 0.152ms とした。柔飛翔体は外径 80mm、内径 78.6mm、長さ 10cm として座屈荷重を求め、飛翔体の運動量～力積保存則から衝撃荷重を 50.0kN、荷重継続時間は 0.200ms と算定した。

3. 解析結果および考察

図-3 に、各ケースの最終的な破壊状況 ($t=0.30\text{ms}$) を示す。緑色は弾性領域を、赤色は破壊領域を表している。剛飛翔体のケース 1 では、版中央下端に応力波の影響によるスポール破壊が生じるとともに、斜めひび割れ (図-3 中の①) が確認できる。柔飛翔体のケース 2 では、衝撃力が小さいため、RC 版の損傷が抑制されている。また、版中央下部には曲げひび割れ (図-3 中の②) が生じ、特に版上部では剛飛翔体の場合よりも破壊が抑制された (図-3 中の③)。このように、柔飛翔体の座屈による衝撃荷重の低下によって RC 版の損傷が大幅に抑制された。

図-4、図-5 および図-6 に時刻 $t=0.08\text{ms}$ における、各ケースの x 方向、 y 方向応力 (σ_x , σ_y) およびせん断応力 (τ) 分布をそれぞれ示す。本解析では、衝撃によって生じる応力波が裏面に到達する時刻は 0.08ms 前後であり、各図は衝撃荷重が RC 版に作用して応力波が RC 版の下端に到達した直後の状態を示している。なお、 σ_x および σ_y については引張応力を正として表示している。図-4 に示す σ_x 分布から、柔飛翔体の方が剛飛翔体と比べて RC 版中央部の引張応力が減少していることがわかる。また、図-5 に示す σ_y 分布から柔飛翔体の場合には、剛飛翔体と比べて版中央上部の応力が抑制されている。図-6 に示す τ 分布から、剛飛翔体のせん断応力は剛飛翔体のケースと比べて抑制されていることがわかる。この理由は、柔飛翔体の座屈によって衝撃力が低減したため荷重継続時間が長くなったためと考えられる。また、RC 版に入力される力積は等しいが、局所的な損傷が抑制されたため、RC 版の破壊が全体破壊に移行したと考えられる。

4. 結言

本研究は、剛飛翔体と柔飛翔体の衝突による RC 版の破壊挙動を数値解析的に考察したものである。解析の結果、RC 版に入力される力積は等しい場合でも、柔飛翔体の場合には座屈によって衝撃力が低下することで損傷は大幅に低減し、局所的な損傷が抑制されて全体的な破壊が生じた。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ，1993.
- 2) Mark L. Wilkins: Computer Simulation of Dynamic Phenomena, Springer Berlin Heidelberg, 1999.5
- 3) 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, 844-858, 2009. 10

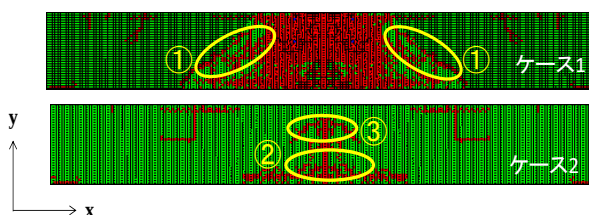


図-3 最終破壊状況($t=0.30\text{ms}$)

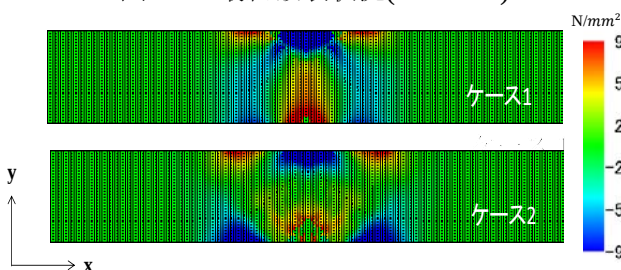


図-4 σ_x 分布($t=0.08\text{ms}$)

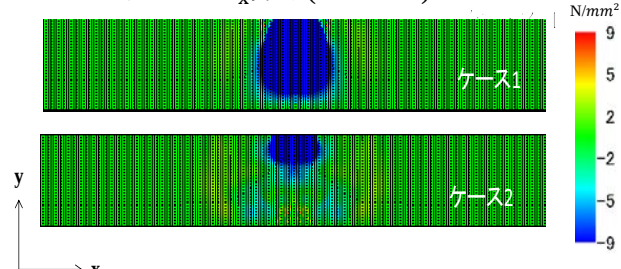


図-5 σ_y 分布($t=0.08\text{ms}$)

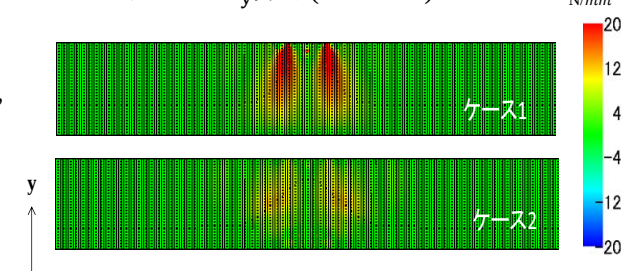


図-6 τ 分布($t=0.08\text{ms}$)