

低速度衝突を受ける鉄筋コンクリート版の局部的損傷に関する

シミュレーション解析

Numerical analysis of the local damage of reinforced concrete slabs
subjected to low-velocity impact

柴田大希*, 金子鉄兵**, 松澤遼***, 別府万寿博****

Taiki Shibata, Teppei Kaneko, Ryo Matsuzawa and Masuhiro Beppu

- * 防衛大学校理工学研究科 システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
** 陸上自衛隊 技術研究本部下北試験場 (〒035-0063 青森県下北郡東通村大字小田野沢字荒沼 18)
*** 修(工), 伊藤忠テクノソリューションズ(株)(〒100-6080 東京都千代田区霞ヶ関 3 丁目)
**** 博(工), 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 低速度衝突, 鉄筋コンクリート版, 非線形構成則, 局部的損傷

(low-velocity impact, reinforced concrete slab, nonlinear constitutive law, local damage)

1. 諸言

現在, 構造物の設計法は性能照査型へ移行しつつあり, 衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の設計においても数値シミュレーションを用いた照査法を検討する必要がある¹⁾. 衝突を受ける構造物の破壊挙動を数値解析により精度よく予測することができれば, 構造物の性能照査においても有用な手法として活用することが期待できる. しかし, コンクリート部材に対する数値解析においては, 局部的な損傷を十分な精度で再現することは容易ではなく, 解決すべき課題も多い¹⁾. 特に衝突現象を対象とする場合には, 衝突部におけるコンクリートの力学特性の圧力依存性やひずみ速度依存性を適切に考慮する必要があると考えられる.

本研究は, 動的力学特性を考慮したコンクリートの非線形構成則を用いて, 鋼製衝突体の低速度衝突を受ける鉄筋コンクリート版の損傷・破壊に関する数値解析を行い, 破壊の再現性を検討したものであ

る.

2. 鉄筋コンクリート版に対する低速度衝突実験

2.1 実験の概要

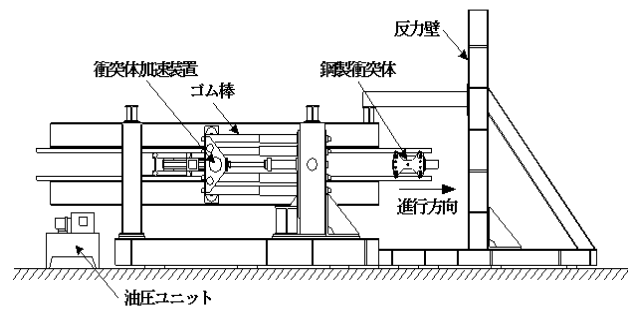
三輪らは, 鋼製衝突体の低速度衝突を受ける RC 版の局部損傷に関する実験²⁾を行っている. 図-1(a)に実験装置を示す. 本装置の構成は, 本体フレーム, ゴム棒, 油圧ジャッキ, 反力壁および衝突体である. 図-1(b)に衝突体の略図を示す. 衝突体は図に示す位置に加速度センサを設置しており, 質量が約 100kg である. 衝突体の先端部は直径が 10cm(鋼製: S45C)の半球型である. 図-2 に RC 版の概要を示す. RC 版は, 寸法が縦 110cm×横 110cm×版厚 7cm であり, 複鉄筋断面となっている. コンクリートの圧縮強度は 33.5N/mm^2 であり, 鉄筋は 3.2mm の普通鉄線(引張強さ: $540\sim 1130\text{N/mm}^2$), 間隔 5cm(鉄筋比 0.25%)で配筋している. コンクリートのかぶり厚さ

は 1.5cm である。実験は、反力壁に固定した支持梁により 4 辺をクランプで固定した RC 版に、衝突体を衝突速度 3.0m/s, 5.0m/s で版中央に衝突させている。計測項目は RC 版の変位、衝突体の加速度および速度である。RC 版の変位は高速度ビデオカメラ (5000 フレーム/秒)により測定している。衝突体の速度は、装置のガイド上に設置したレーザー式速度計および高速度ビデオカメラにより測定している。衝突体の加速度は、加速度センサ(圧電素子型)を用い、容量は 1000G, サンプリングタイムは 50kHz に設定して計測している。

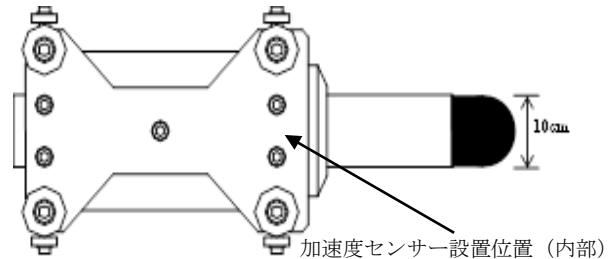
2.2 実験結果

図-3 に、荷重～時間関係、変位～時間関係および RC 版の破壊状況を示す。荷重は、加速度センサによって計測した加速度に衝突体の質量 100kg を乗じて算定している。ここで、加速度データには高周波成分が多く含まれていたため、10 区間の移動平均で平滑化を行ったものを示している。高速度ビデオカメラによる変位の計測は、衝突体の先端部分に変位追跡点を設定し、各時刻における追跡点の移動を記録することにより求めている。図中の原点は衝突体が RC 版に接触した瞬間を示している。変位の大きさは RC 版表面の位置を基準とし、衝突体の進行方向を正として表している。

衝突速度 3.0m/s では、荷重は $t=2.0\text{ms}$ で最大約 110kN に達し、 $t=3.0\text{ms}$ には約 20kN に一旦低下した後、再び約 60kN に上昇して、 $t=10\text{ms}$ で 0kN となった。変位は $t=5.0\text{ms}$ で最大約 7mm まで達している。衝突速度 5.0m/s では、 $t=0.08\text{ms}$ で最大荷重約 180kN となり、衝突速度 3.0m/s に比べて、約 70kN 大きくなっている。変位については $t=8.6\text{ms}$ で最大約 22mm となっている。また衝突後の RC 版の表・裏面の破壊状況については、衝突速度 3.0m/s では、図-3 に示すように、版の表面側の衝突位置に衝突体の先端部分と同じ形の凹みが生じ、裏面には放射状のひび割れが生じた。衝突速度 5.0m/s の場合は、版の表面側に、約 1.1cm の深さを有する凹み変形が生じた。版の裏面側は、裏面剥離が発生し、裏面において直径数 cm の小さな剥離片が多数生じた。なお、

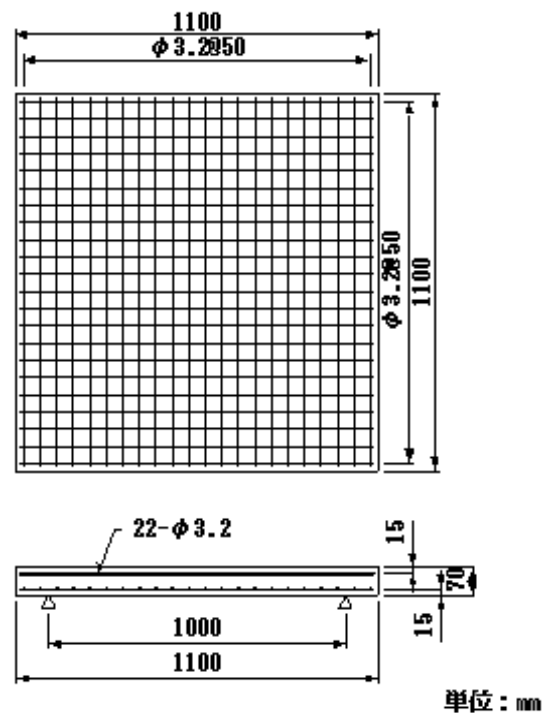


(a) 水平衝突荷重装置



(b) 衝突体

図-1 実験装置



単位：mm

図-2 RC版の概要

鉄筋の破断は生じていなかった。

	荷重～時間関係	変位～時間関係	破壊状況	
			表面	裏面
衝突速度 3m/s				
衝突速度 5m/s				

図-3 実験結果

3. シミュレーション解析

3.1 解析モデルおよび解析ケース

解析は衝撃解析コード AUTODYN を用いて実施した。図-4 に解析モデルを、表-1 に解析定数を示す。試験体は対称性を考慮して全体の 1/4 のみをモデル化した。衝突体は先端部を弾性体、衝突体後部は剛体、コンクリートは物質と共にソリッド要素、鉄線は Beam 要素および反力壁は Shell 要素でモデル化した。要素寸法は 5mm であり、境界条件は図-4 に示すように反力壁の裏面およびコンクリート表面の 50mm×300mm の領域を固定した。

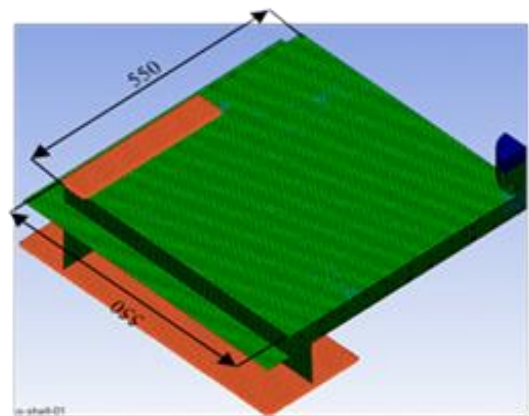


図-4 解析モデル

表-1 解析ケースおよび解析定数

種類	解析ケース	解析ケース1	解析ケース2
コンクリート	密度(g/cm ³)	2.35	
	ヤング率(N/mm ²)	2.53×10 ⁴	
	降伏応力(N/mm ²)	33.5	
	ポアソン比	0.2	
	状態方程式	線形モデル	非線形モデル
	降伏条件	Von-Mises	
	破壊基準	スポール破壊基準	
鉄線	密度(g/cm ³)	7.83	
	ヤング率(N/mm ²)	2.0×10 ⁵	
	降伏応力(N/mm ²)	1130	
	ポアソン比	0.3	
	状態方程式	線形モデル	
	降伏条件	Johnson Cook	
	破壊基準	スポール破壊基準	
衝突体	密度(g/cm ³)	7.8	
	ヤング率(N/mm ²)	2.0×10 ⁵	
	ポアソン比	0.3	
	状態方程式	線形モデル	
	降伏条件	弾性モデル	

3.2 コンクリートの非線形構成則

物質の材料特性は、状態方程式、降伏条件および破壊基準の 3 つの材料特性モデルで定義される。衝突問題においては、ひずみ速度効果等の動的特性を考慮する必要がある。よって、本研究ではコンクリートの特徴であるひずみ硬化・軟化挙動に加え、材料のひずみ速度効果および圧力依存性を考慮した非線形コンクリートモデルである CAPROUS³モデルを使用する。また、参考のため一般的な弾塑性モデルである Von-mises モデルを用いて解析した。解析ケース 1 については状態方程式を線形モデル、降伏

条件を Von-mises モデルおよび破壊基準をスポール破壊基準としている。また解析ケース2はCAPROUSモデル（状態方程式：非線形モデル，降伏条件：二直線降伏モデル，破壊基準：スポール破壊基準を用いている。

3.3 解析結果

図-5 に、解析による荷重～時間関係および変位～時間関係を実験と比較して示す。衝突速度が 3m/s の場合では、解析ケース1の荷重は最大荷重まで実験よりも緩やかな増加傾向を示した。最大荷重は 113kN を示し、 $t=4.5\text{ms}$ で一旦 27kN になる。その後再度荷重は 62kN まで増加して、 $t=5.7\text{ms}$ で 0kN になる。荷重の継続時間は実験よりも 4.3ms 短くなり、解析ケース1は最大荷重が生じる時間や荷重の継続時間を再現できていないことがわかる。解析ケース2では、実験と同様な増加傾向を示し、 $t=0.7\text{ms}$ で実験結果よりも小さいが最大荷重約 91.5kN に達している。その後、 $t=2.0\text{ms}$ で一旦 40kN まで低下し、最

終的には $t=8.8\text{ms}$ で 0kN となった。解析ケース2は、実験結果の荷重の立ち上がりから 0kN に収束するまで定性的に再現できているが、最大荷重は実験より 17%程度低く、 $t=2.0\text{ms}$ 以降における、荷重の再現性がやや低い。また、荷重の継続時間は 8.8ms と実験に比べて 10%程度短くなった。次に、変位～時間関係について考察する。実験では $t=5.0\text{ms}$ で最大約 7mm まで達しており、解析ケース1では、 $t=3.6\text{ms}$ で約 6.5mm となりその後も線形的に増加する結果となった。一方、解析ケース2では $t=1\text{ms}$ までは実験結果と同様な増加傾向を示しているが、その後は実験よりも終局変位に達する時間が長く、 $t=6.3\text{ms}$ で 9.3mm に達している。

衝突速度が 5m/s の場合の荷重～時間関係は、解析ケース1の荷重は最大荷重 120kN まで実験と同様な増加傾向を示したが、最大荷重は 144kN となった。その後、荷重は 71.5kN まで下降し、 $t=6.1\text{ms}$ で 0kN になった。すなわち、荷重の継続時間は実験の半分程度になった。解析ケース2の荷重は、実験と同様

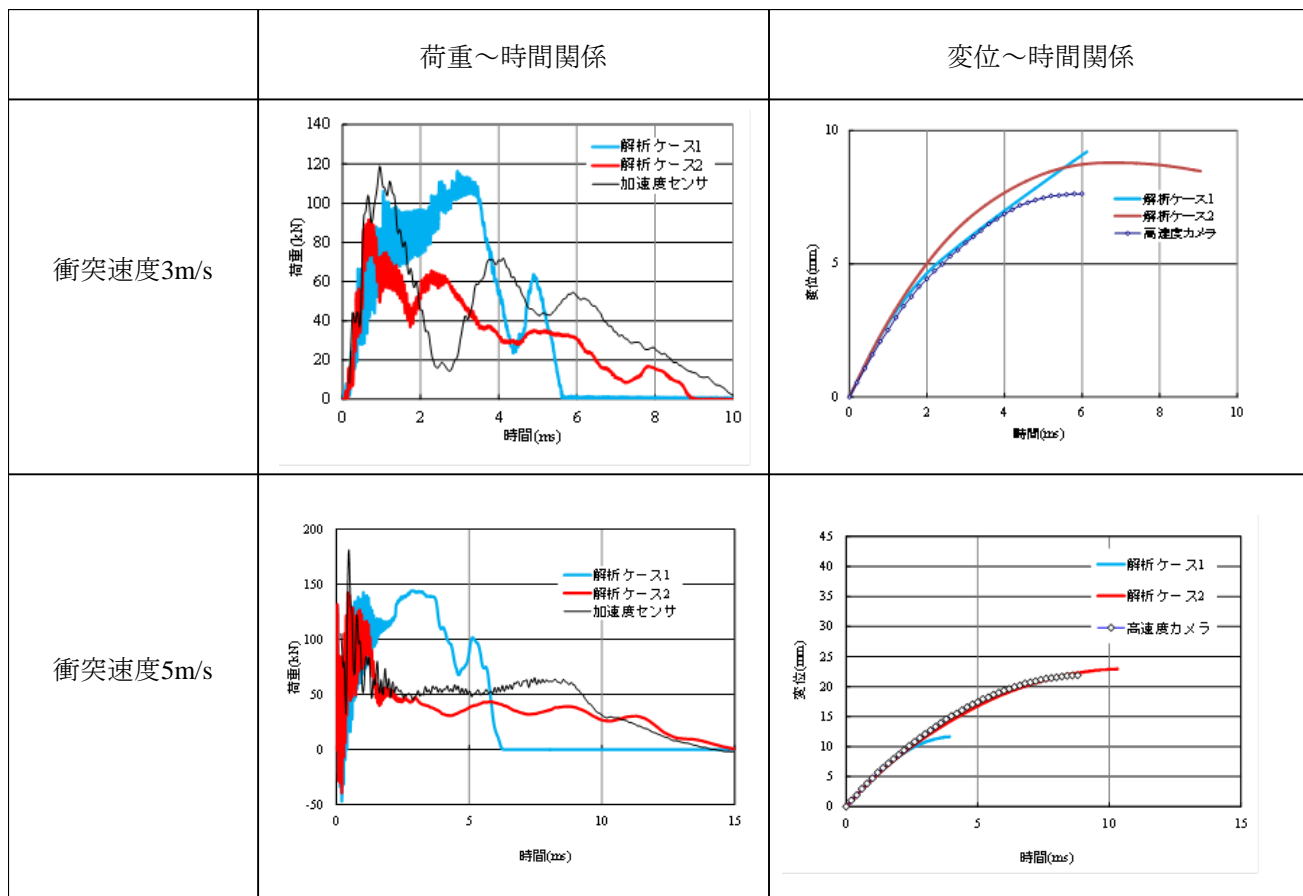
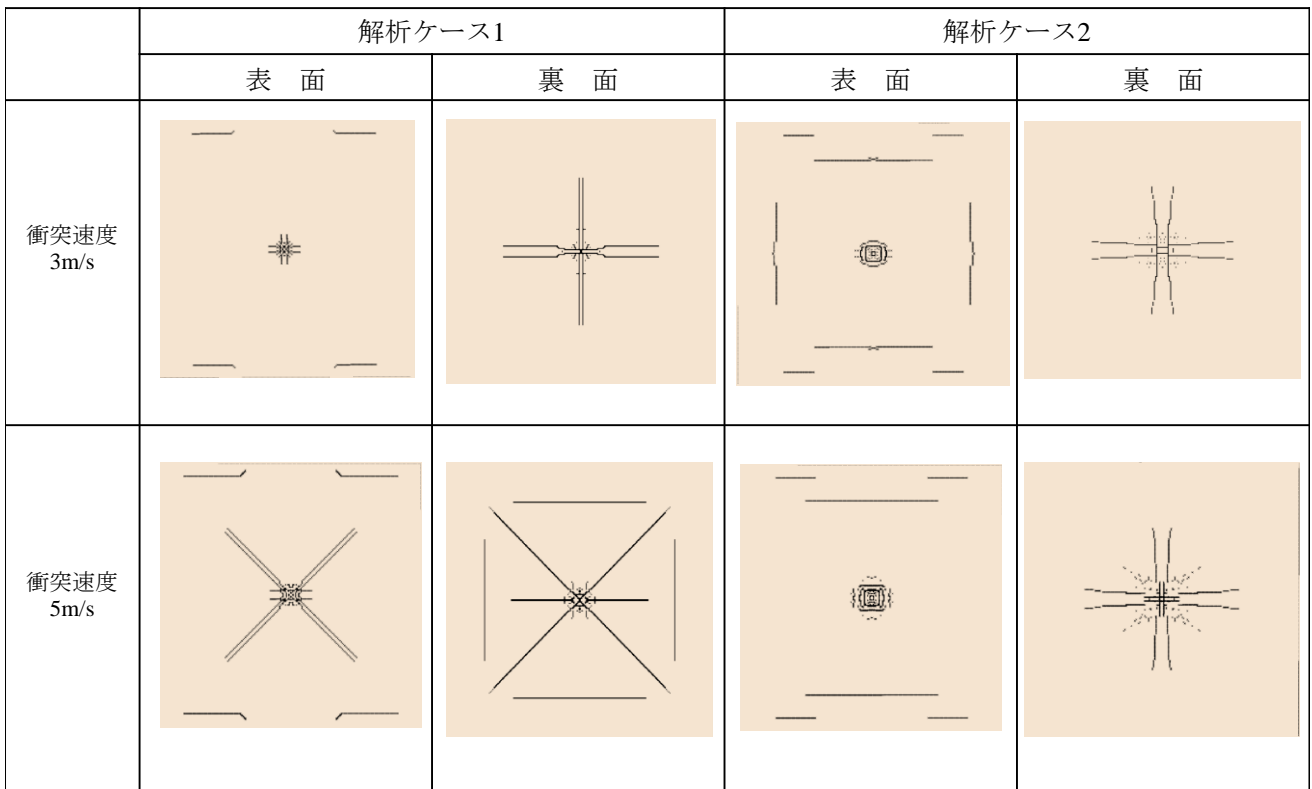


図-5 解析による荷重および変位～時間関係

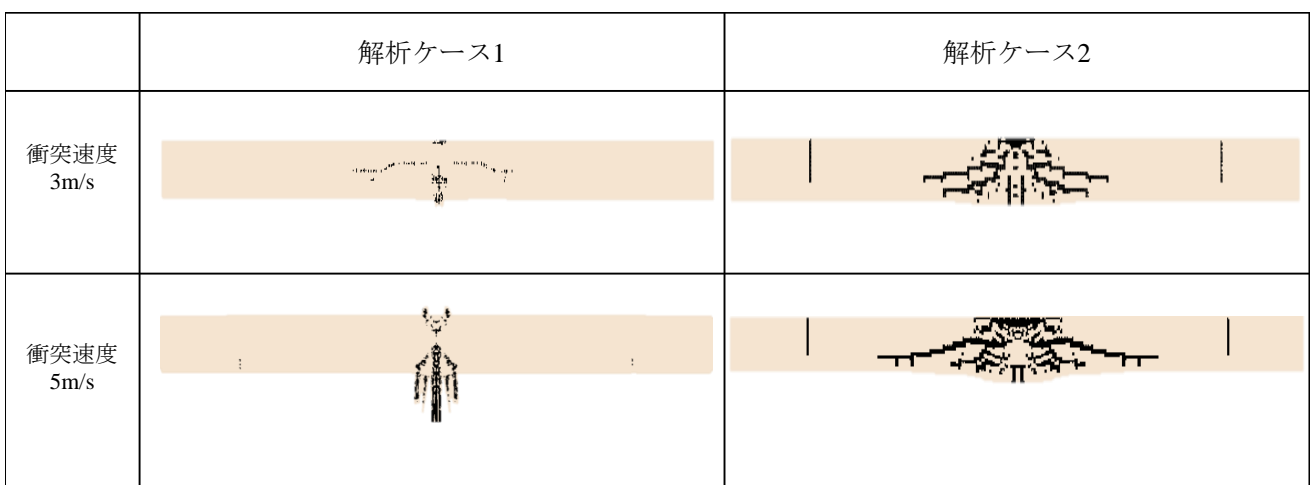
な増加傾向を示し、 $t=0.3\text{ms}$ で最大荷重 118kN に達している。その後、 $t=1.5\text{ms}$ で 52kN まで低下し、最終的には $t=15\text{ms}$ で 0kN となった。すなわち解析ケース 2 は、解析ケース 1 に比べて荷重時刻歴を良好に再現できていると言える。次に、変位～時間関係について考察する。実験では $t=8.6\text{ms}$ で最大約 22mm まで達したが、解析ケース 1 では $t=3.7\text{ms}$ で最大約 13mm となっている。一方、解析ケース 2 では実験と同様に変位が増加し $t=10.3\text{ms}$ で 23 mm に達し、

実験結果を良好に再現した。以上の解析結果から、非線形モデルを用いたケース 2 の方が、いずれの衝突速度においても実験結果を良好に再現することがわかる。

図-6 に、解析で得られた破壊性状を示す。解析では白色が弾性領域を、黒色が引張破壊をした領域を示している。衝突速度が 3m/s の場合については、解析ケース 1 および解析ケース 2 とともに、実験と同様に版の表面側の衝突位置にそれぞれ衝突体の先端



(a) 表面および裏面の破壊状況



(b) 切断面の破壊状況

図-6 解析による RC 版の破壊状況

部分と同じ形状の破壊が生じている。切断面については解析ケース 1 の破壊性状は衝突体が衝突した部位や裏面に引張破壊が生じ、版の断面には中心から横方向にひび割れが進展している。解析ケース 2 では、衝突体が衝突した付近から裏面へ斜めひび割れが生じたが、実験と同様に押し抜きせん断破壊は生じなかった。衝突速度が 5m/s の場合においては、解析ケース 1 および解析ケース 2 ともに、実験と同様に版の表面側の衝突位置にそれぞれ衝突体の先端部分と同じ形の破壊が生じている。切断面については、解析ケース 1 の破壊性状は裏面に引張破壊が生じ、版中央部では狭い領域において斜めひび割れが進展している。解析ケース 2 では衝突体が衝突した付近から斜めひび割れが生じているが、裏面剥離は生じていない。実験結果では断面の観察は行われていないが、三輪らは衝突速度 7.0m/s では押し抜きせん断破壊が生じることを報告している。すなわち、本研究で対象としている低速衝突を受ける RC 版の破壊モードは押し抜きせん断破壊と考えられ、解析ケース 2 の方が実験に近い破壊性状を示していると考えられる。

4. 結言

本研究は、コンクリートの動的力学特性を考慮した非線形構成則を用いて、鋼製衝突体の低速度衝突を受ける RC 版の局部的損傷に関する実験をシミュレーション解析し、RC 版の損傷・破壊の再現性を検討したものである。コンクリートの動的力学特性を考慮した非線形構成則を用いることにより、低速度衝突を受ける RC 版の荷重～時間関係、変位～時間関係および破壊状況を良好に再現することが分かった。

参考文献

- 1) 土木学会：防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計－基準体系の指針，丸善，2013.
- 2) 三輪幸治，別府万寿博，大野友則：先端形状が異なる衝突体の水平低速衝突を受ける鉄筋コンクリート版の局部破壊メカニズムと評価法，構造工学論文集，Vol56A，pp.1196-1205，2010.3.
- 3) 伊東雅晴，別府万寿博，片山雅英：非線形動的コンクリート構成則 CAPROUS の開発と高速衝突解析への応用，第 10 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，2010.3.