

(5) 衝突実験における飛来物の運動量と衝撃力積に関する分析

Analysis of the Momentum of Missiles and Associated Impact Impulse in Collision Experiments

武田慈史*, 河西良幸**
Shigefumi Takeda, Yoshiyuki Kasai

*前橋工科大学大学院, 工学研究科大学院生 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460番地の1)

**工博, 前橋工科大学大学院, 工学研究科教授 (同上)

Key Words: Momentum, Impact impulse, Collision experiment

キーワード: 運動量, 衝撃力積, 衝突実験

1. 研究の背景と目的

近年, 土木学会や建築学会では飛来物による重要構造物への衝突, 衝撃問題やガス, 火薬等の爆発時の挙動の解明と耐衝突, 耐爆の性能評価や設計のためのガイドラインの構築^{1), 2)}が求められるようになった. 土木や建築構造物への衝突, 衝撃に関する事故^{2), 3)}として, 土石流, 落石, 雪崩, 落雪等の自然作用によるもの, 重量物の落下, 車両, 航空機の衝突等の人為的作用によるものに分けられ, 更に, ロックシェッドへの落石衝突のような剛飛来物の直接衝突, 敷砂設置のロックシェッドへの落石衝突のような飛来物と被衝突体の間に緩衝機構が設置される場合の衝突(以下, 緩衝機構を介した間接衝突と称する), 航空機のような柔な飛来物による建物への衝突といった柔飛来物の衝突等に分けることができる. このような衝突現象を考える際, 構造物の衝撃応答と損傷をどのように評価するかがポイントとなる.

一般に, 鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete, 以下RCと略す)構造物に衝突, 衝撃荷重が作用した場合の損傷⁴⁾は図-1に示すように, 局部損傷と全体損傷とに大別される. 飛来物の衝突に起因する局部損傷は貫入, 裏面剥離, 貫通に分類され, 例えば実験式⁵⁾等に基づく評価がなされている. また, 全体損傷は比較的長い継続時間に生じる動的な弾塑性応答として特徴づけられ, 従来, 衝撃荷重が算定された後, 時刻歴の非線形有限要素解析法等により全体曲げ損傷が評価されている^{6), 7)}.

衝撃現象の分析や耐衝撃設計においては, 飛来物や被衝突体がモデル化され, 時々刻々の時刻歴衝撃解析によって衝撃応答が評価されている. 飛来物衝突の際の衝撃解析手法に関して⁸⁾, 飛来物, 被衝突体, 衝撃荷重の観点から解析モデル⁹⁾を大別すると図-2に示す4種類が考えられる. 各方法の概要は次の通りである.

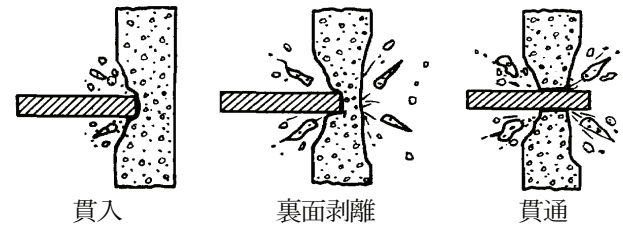
● A法では, 飛来物と被衝突体の双方を有限要素でモデ

ル化し(Finite Element Method, 以下FEMと略す), 飛来物の衝突速度 v を与えて時々刻々の衝撃解析を行う.

● B法では, 飛来物と被衝突体の双方を個別要素でモデル化し(Discrete Element Method, 以下DEMと略す), その後はA法と同じように解析する.

● C法では, 飛来物と被衝突体の双方を質点にモデル化し, 飛来物と被衝突体の反発係数 e を考慮した衝突理

局部損傷



全体損傷

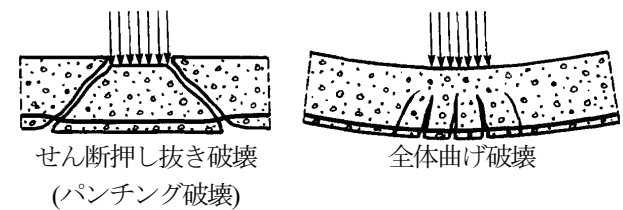


図-1 衝撃荷重によるRCの損傷⁴⁾

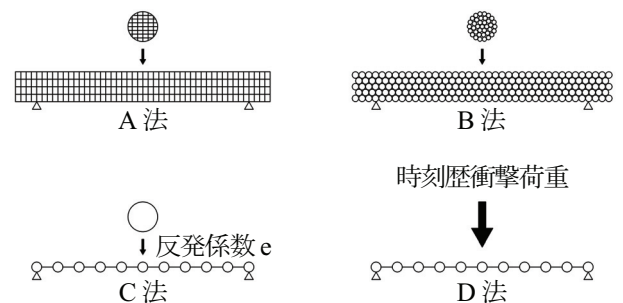


図-2 衝撃解析モデル

論によって時々刻々の衝撃解析を行う。

- D法では、被衝突体を有限要素や質点系等でモデル化し、飛来物が衝突した際の時刻歴衝撃荷重を作用させて時々刻々の衝撃解析を行う。

衝撃応答評価の観点から既往の研究を概観してみると以下の通りである。

文献^{10),11)}ではRC梁を対象として重錘落下衝突実験、FEM解析、設計式の提案がなされており、詳細なFEM(図-2のA法)による実験後のシミュレーション解析がなされて、かなり良い精度で実験結果が再現できるとしている。文献¹²⁾では緩衝機構として敷砂を設置したRC梁に対する重錘落下衝突実験がなされており、文献^{13),14)}では大型RCスラブを対象として重錘落下による直接衝突実験、緩衝機構として敷砂、碎石を設置した間接衝突実験がなされている。また、耐衝撃設計法として文献¹⁵⁾には敷砂や三層緩衝構造を設置したロックシェッドについての調査、実験、設計例が詳しくまとめられている。以上の実験では、飛来物衝突による衝撃荷重、被衝突体の支点反力、応答変位などが時刻歴波形として測定されており、衝突実験の分析に当たっては、主として衝撃荷重、支点反力、応答変位のピーク値が重視され、衝撃力積についてはほとんど言及されていない。衝撃荷重のピーク値は飛来物や被衝突体の条件によって変動しやすく、また、衝撃荷重のピーク値を解析によって正確に捉えることはかなり難しいことが理解される。

また、衝撃応答の予測においてはFEMやDEMによる解析でも十分な予測精度が得られておらず¹⁶⁾、いかに詳細な解析モデルを用いても、例えば敷砂や碎石のような気候条件や保全状態によって変動する緩衝材が使用される場合には、衝撃応答を予測することは不可能に近く、緩衝材の効果を適切に評価することも難しいと考えられる。

したがって、耐衝撃設計に必要な衝撃応答(特に応答変位)の予測や評価に当たっては、飛来物までを詳細にモデル化する解析方法(図-2のA法、B法)ではなく、図-2のD法のような衝撃荷重を与える方法が適しているのではないかと示唆される。図-2のD法による方法は、大別して①飛来物の質量分布や破壊強度分布を基に、できるだけ正確に評価した衝撃荷重の時刻歴波形を与える方法、②正弦半波、三角波、矩形波のように単純化した形状の衝撃荷重の時刻歴波形を与える方法がある。特に②は衝撃応答の性状を理解しやすい方法であり、例えばMeder¹⁷⁾による衝撃応答スペクトル図による方法やUFC¹⁸⁾に示されている方法が既に提案されている。しかし、それらの方法は衝撃荷重のピーク値と荷重継続時間を共に正確に設定できないと衝撃応答(塑性率)を算定することができず、特に剛飛来物の直接衝突の場合には衝撃荷重のピーク値は変動しやすく、スペクトル図から求められる衝撃応答は不正確になりやすい。

一方、武藤博士^{19),20)}が約3/4世紀前に指摘した衝撃力積に着目した衝撃現象の捉え方(力積破壊の世界)は優れた見識に基づいており、その考え方を取り入れて衝撃荷重のピーク値に代えて衝撃荷重の力積 $\int F(t)dt$ (以下、衝撃力積と称する)をパラメータとすることにより、前記のスペクトル図を精度良く使いやすいものとする事ができる可能性が示唆された。そこで、既往研究の衝突実験における衝撃力積に着目したところ、既往の研究例は比較的少なく、例えば、著者の一人によってなされた実物航空機を用いた衝突実験²¹⁾、雪氷塊の衝突実験^{22),23)}、敷砂の特性に関するFEM²⁴⁾、DEM²⁵⁾を用いた解析的研究、著者らによってなされた衝撃力積を与えた衝撃応答の計算^{9),26)}等が挙げられる。それらの結果によると、運動量保存則、即ち、衝突前後の運動量が保存され、飛来物の運動量の変化が力積に等しいとする動力学の基本法則が成立していることが示唆される。また、前記の衝撃力積に関する言及が少ない論文¹⁰⁾⁻¹⁵⁾等においても、測定された衝撃荷重の時刻歴波形が示されているので、それらの波形を基に衝撃力積を評価することが可能である。そこで今般、過去に実施された衝突実験結果の衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv (m :飛来物の質量、 v :衝突速度)の関係を系統的に分析してみたところ、2章で述べるように衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv がかなり近い値であること(即ち、 $I \approx (0.8 \sim 1.4)mv$)が把握され、算定しやすい飛来物の運動量 mv を基に衝撃力積 I を評価し得ることが示唆された。

以上より本論文は耐衝撃設計法構築の観点から、衝撃力積を基に衝撃応答をできるだけ精度良くしかも簡便に算定する方法を提案することを目的として、既往の各種衝突実験における飛来物の運動量と衝撃力積の関係を明らかにするものである。

2. 飛来物の運動量と衝撃力積

2 質点の衝突を考えると、運動量保存則から被衝突体が飛来物から受ける衝撃力積 I は(1)式のように表すことができる²⁷⁾。

$$I = \int F(t)dt = \frac{1+e}{1+\frac{m}{M}}mv \quad (1)$$

ここで、 t :時間、 m :飛来物の質量、 v :飛来物の衝突速度、 e :反発係数、 M :被衝突体の質量である。

(1)式から運動量と衝撃力積の関係を考える場合、飛来物の質量 m と被衝突体の質量 M の比 m/M を考慮する必要もあるが、多くの衝突実験の場合、被衝突体は地面やしっかりとした基盤で支持されており、 M を大きく評価できる場合($m/M \approx 0$)もあり、衝撃力積 I は $I \approx mv(1+e)$ という単純でかつ大き目に評価する式で表すことができる。既往の各種衝突実験^{11)-14),28)-35)}に関して飛来物の運動量 mv と衝撃力積 I の関係を整理して図-3に示す。文献

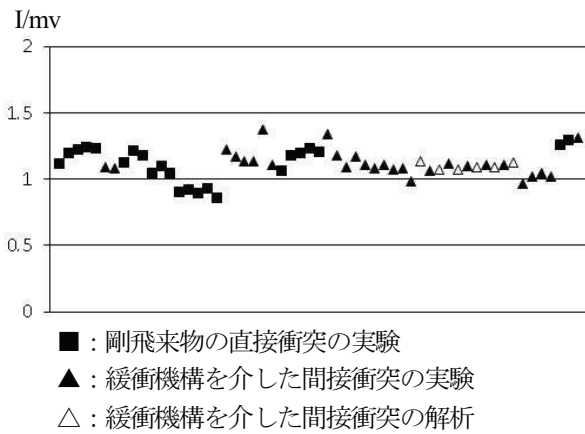


図-3 衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv の関係

中に衝撃力積が記載されているものはその値を、記載されていない場合は筆者らが衝撃荷重の時刻歴波形の図から面積を読み取り衝撃力積を評価した。図-3の縦軸は衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv の比 I/mv であり、剛飛来物の直接衝突の実験を■で、緩衝機構を介した間接衝突の実験を▲で、緩衝機構を介した間接衝突の解析を△でプロットしてある。(1)式において m/M が無視できない場合については文献¹¹⁾で m/M に着目した分析がなされているが、筆者らが衝撃荷重の時刻歴波形の図から面積を読み取り衝撃力積を評価すると、 m/M が小さい場合は衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv は近い値となり、 m/M が大きい場合は衝撃力積 I は飛来物の運動量 mv と比べて小さい値となっていることが把握できた。

剛飛来物の直接衝突の場合は荷重継続時間は短く、衝撃荷重のピーク値は大きい傾向にあり、衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv の比 I/mv は平均で $I/mv=1.12$ である。文献³⁵⁾では RC 梁に対する重錘落下による衝突実験がなされており、剛飛来物の直接衝突の場合では衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv の関係は $I=1.31mv$ と表せると報告されている。

緩衝機構を介した間接衝突の場合は、剛飛来物の直接衝突と比べて衝撃荷重の継続時間は長く、衝撃荷重のピーク値は小さい傾向にあり、衝撃力積 I と飛来物の運動量 mv の比 I/mv は平均で $I/mv=1.12$ である。また、図-3の緩衝機構を介した間接衝突に関しては、本章での分析目的に適合した緻密な FEM 解析²⁴⁾がなされており I/mv の分析に役立つと判断しその解析結果も△で示している。

図-3にはプロットしていないが柔飛来物の衝突の I/mv の評価の参考になる実験として、文献²¹⁾の実物 F4 ファントム戦闘機 (柔な機体、比較的剛なエンジンと燃料を模擬した水で構成される柔飛来物)を RC 版に衝突させる実験がある。空気で浮上させた剛な RC 版(質量 $M=469t$)に F4 ファントム戦闘機 (質量 $m=19t$)を速度 $v=215m/s$ で衝突させ、その加速度記録を基に評価した衝撃力積 I と運動量 mv の比 I/mv は約 0.9 となっている。また、文献^{22),23)}では雪氷塊の衝撃力特性の研究がなされており、柔飛来物である低密度雪氷塊の衝突による衝撃力

積 I と衝突直前の雪氷塊の運動量 mv はほぼ等しい ($I/mv \approx 1.0$)と報告されている。文献³⁶⁾では地盤へ重錘が衝突する場合の衝撃力について述べられており、土のような塑性体への重錘衝撃問題では、塑性変形、熱、音エネルギー等によるエネルギーロスが大きいため、力学的エネルギー保存則は成立せず、運動量保存則が支配的であり、衝撃力積 I と重錘の運動量 mv は等しい ($I/mv=1.0$)としている。

以上より既往の衝突実験結果の分析や衝撃応答変位の算定においては、衝撃荷重のピーク値が重視されてきたが、衝撃荷重のピーク値は衝突の条件(剛飛来物の直接衝突、緩衝機構を介した間接衝突、柔飛来物の衝突等)によって著しく変動しやすく、正確に評価することが難しい。その点、衝撃力積 I は、飛来物の運動量 mv に対して 0.8 ~ 1.4 程度の値であるので、耐衝撃設計のための衝撃応答変位の算定には、

$$I = \gamma mv \quad (2)$$

として運動量係数 $\gamma=1.0 \sim 1.4$ の範囲から衝突条件と設計での安全率を考慮して γ の値を選定すれば(2)式により適切な衝撃力積 I を設定できると言える。

3. 衝突条件別の衝撃荷重

飛来物の剛・柔、飛来物の質量、衝突速度、緩衝機構の有無等により衝撃荷重波形や荷重継続時間は様々である。以下に主な衝撃荷重の特性を示す。

3.1 剛飛来物の直接衝突の衝撃荷重

例えば落石のような剛飛来物が被衝突体に直接衝突する場合で、衝撃荷重の継続時間 τ が被衝突体の弾性固有周期 T に比べて非常に小さい場合には、衝撃応答変位が衝撃力積 I によって決まるという知見^{19), 20), 37), 38)}を基に、衝撃力積 I を前記(1)式ないし(2)式で評価することができる。衝撃荷重波形は正弦半波や三角波等とし、荷重継続時間 τ は弾性固有周期 T より十分短いもの ($\tau/T < 0.1(1/10)$)とする。反発係数 e は、飛来物の質量 m と被衝突体の質量 M の比 m/M や被衝突体の損傷状況に関連するという研究成果³⁹⁾等も参考にして設定することができ、例えば RC 梁や RC スラブに重錘が直接衝突する場合には $e=0.3 \sim 0.4$ 程度の値が選定される。

3.2 緩衝機構を介した間接衝突の衝撃荷重

図-4に示すような飛来物と被衝突体の間に緩衝機構が設置される場合の衝突で、例えば緩衝機構として敷砂が設置される場合は、衝撃荷重は緩衝機構を介することで、ある広がりを持って被衝突体に作用すると考えられる。被衝突体の剛性はこの荷重作用域を考慮して算出し、被衝突体の質量には緩衝機構の重量を考慮する。衝撃荷重の継続時間 τ は直接衝突に比べて長くなるので、それ

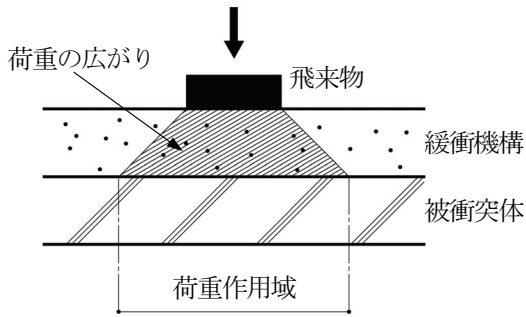


図 - 4 緩衝機構と荷重作用域

を適切に考慮することが重要である。衝撃荷重の継続時間 τ は例えば文献⁴⁰⁾等を参考にして設定し、衝撃荷重波形は正弦半波等とし、衝撃力積 I は (1)式ないし(2)式で評価することができる。反発係数 e は緩衝材の材質により異なるが、例えば敷砂の場合、衝突後に飛来物の跳ね返りが無いと考えれば $e=0$ として良い。(2)式においては運動量係数 $\gamma=1.0$ を選択することもできる。

3.3 柔飛来物の衝突の衝撃荷重

例えば航空機の衝突や低密度の雪氷塊の衝突等の場合で、柔飛来物の衝撃荷重は Riera によって提案された方法²¹⁾により、次の仮定に基づいて算定される^{6),41)}。

- (a) 飛来物の破壊の期間、被衝突体の変形はない。
- (b) 飛来物の瞬間的変形は衝突面近くの小さな領域に限られている。
- (c) 飛来物の変形領域と末端の間は変形領域に入るまで変形しない。したがって、この非変形領域のすべての部分は同じ速度で動いている。
- (d) 被衝突体に対する瞬間的な力は次のものの和である。
 - (d1)変形領域を圧壊させるための動的荷重。
 - (d2)飛来物の圧壊していない部分の運動量の変化。

飛来物の先端からの距離 X の材料が損傷領域に入って静止させられる時、それは衝突面に対して次の(3)式によって与えられる瞬間的な力 $F(t)$ が作用する。

$$F(t) = P_d(X, V) + U(X)V^2 \quad (3)$$

ここに $P_d(X, V)$ は位置 X 及び圧壊しつつある部分の衝突速度 V における飛来物の動的圧壊強度であり、 $U(X)$ は、位置 X での単位長さあたりの質量、 V は飛来物の圧壊していない部分の瞬間速度である。 $U(X)V^2$ は単位時間あたり変形領域に入ってくる運動量の消滅によって生じた力である。

衝突の間、変形領域は飛来物の圧壊していない部分に対して $P_d(X, V)$ の力を及ぼすと仮定される。この力は圧壊していない部分の減速 $A(X, V)$ を生じて、それは $P_d(X, V)$ と圧壊していない部分の質量の比である。即ち、 $A(X, V)$ は(4)式によって表される。

$$A(X, V) = \frac{P_d(X, V)}{\int_X^L U(k)dk} \quad (4)$$

ここに $U(k)$ は、飛来物の末端と X の間のある点での飛来物の圧壊していない部分の単位長さあたりの質量であり、 L は飛来物の長さである。

この方法で算定される衝撃荷重 $F(t)$ の衝撃力積 $I = \int F(t)dt$ は柔飛来物の運動量 mv (質量 m , 衝突速度 v) と一致する結果($I=mv$)となる。

なお、飛来物が航空機のように柔らかい場合には(3)式の $P_d(X, V)$ が極めて小さく ($P_d(X, V) \approx 0$)、文献^{42),43)}に示されるように、航空機の質量分布が概ね三角形であることを考慮して衝撃荷重波形を三角形分布とし、その衝撃力積 I を $I=mv$ (m :航空機の質量, v :航空機の衝突速度)、衝撃荷重の継続時間 τ を $\tau=L/v$ (L :航空機の長さ, v :航空機の衝突速度)として簡易に算出することができる。例えば文献⁴²⁾ではセスナ機(質量3.8t, 全長12m)が衝突速度56m/s, 111m/s で衝突する場合の衝撃荷重が算定されており、文献⁴³⁾ではF4 ファントム戦闘機(質量19t, 全長17.7m)が衝突速度50m/s, 100m/s, 150m/s で衝突する場合の衝撃荷重が算定されている。図-5 にセスナ機の衝突荷重の例を、図-6 にF4 ファントム戦闘機の衝突荷重の例を示す。

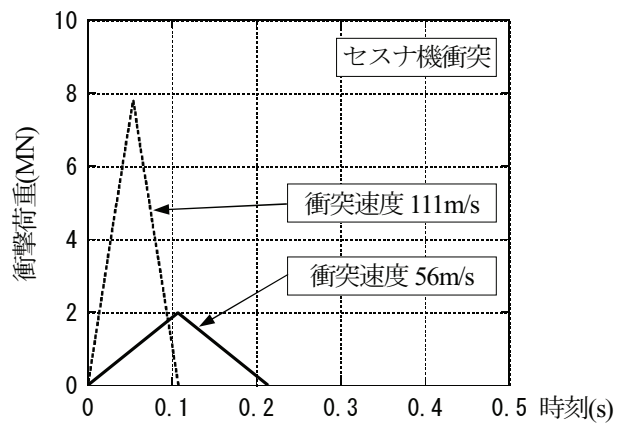


図 - 5 セスナ機衝突による衝撃荷重

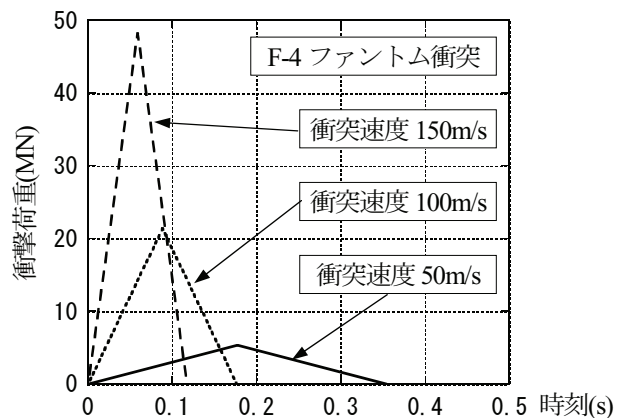


図 - 6 F-4 ファントム衝突による衝撃荷重

4. まとめ

本論文では、飛来物の運動量 mv と衝撃力積 I の関連に着目して既往の衝突実験結果を分析してみたところ、運動量の変化が力積に等しいとする動力学の基本法則の

成立が確認された。その成果の要点は次の通りである。

- 1) 飛来物の構造物への衝突の種類として①剛飛来物の直接衝突、②緩衝機構を介した間接衝突、③柔飛来物の衝突等に分けることができるが、同じ衝突速度において衝撃荷重のピーク値は①が最も大きく、②や③では小さいが、荷重継続時間は逆に①は短く、②や③では長く、衝撃力積 I が一定となる傾向にある。
- 2) 既往の衝突実験結果の分析や衝撃応答変位の算定には、衝撃荷重のピーク値が重視されてきたが、ピーク値は前記 1) のように衝突の条件によって著しく変動しやすく、正確に評価することは難しい。その点、衝撃力積 I は、飛来物の運動量 mv に対して $0.8 \sim 1.4$ 程度の値であるので、耐衝撃設計のための衝撃応答変位の算定には、 $I = \gamma mv$ として運動量係数 $\gamma = 1.0 \sim 1.4$ の範囲から衝突条件と設計での安全率を考慮して γ の値を選定すれば適切な衝撃力積 I を設定できる。

謝辞

本論文の作成に当たって、既往の衝突実験結果における衝撃力積と運動量の分析を担当した前橋工科大学学部の木幡諒氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 濱本卓司, 「耐衝撃設計ガイドラインづくりに向けて」, 2009 年度日本建築学会大会(東北)構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料「衝突・爆発などの衝撃的な外力による構造被害の低減化について考える」, pp.1-10, 2009 年 8 月。
- 2) 園田佳巨, 「衝撃荷重に対する土木学会の取り組み」, 2009 年度日本建築学会大会(東北)構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料「衝突・爆発などの衝撃的な外力による構造被害の低減化について考える」, pp.55-61, 2009 年 8 月。
- 3) 河西良幸, 「衝突・爆発の事例紹介」, 2009 年度日本建築学会大会(東北)構造部門(応用力学)パネルディスカッション資料「衝突・爆発などの衝撃的な外力による構造被害の低減化について考える」, pp.11-20, 2009 年 8 月。
- 4) 河西良幸, 「衝撃荷重を想定した実験」, コンクリート工学, 第 39 巻, 9 号, pp.74-77, 2001 年 9 月。
- 5) 伊藤千浩, 白井孝治, 大沼博志, 「剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式」, 土木学会論文集, No.507, pp.201-208, 1995 年 1 月。
- 6) P. Barr, "Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures subjected to Impact", 1990 Edition, May 1990.
- 7) 住谷寛, 「六ヶ所再処理工場の安全性(六ヶ所再処理工場における施設の概要と安全性)」, 原子力工業, 第 36 巻, 9 号, pp.24-32, 1989 年 9 月。
- 8) 河西良幸, 「衝撃・衝突問題の最近の発展と今後の課題」, シンポジウム「建築構造力学における最近の発展と展望」, 日本建築学会構造委員会応用力学運営委員会資料, pp.38-45, 2008 年 12 月。
- 9) 武田慈史, 河西良幸, 「簡易 1 質点系による RC スラブの衝撃応答解析手法の提案」, 前橋工科大学研究紀要, 第 13 号, pp.25-32, 2010 年 3 月。
- 10) 岸徳光, 三上浩, 「衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案」, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1251-1260, 2007 年 3 月。
- 11) 岸徳光, 今野久志, 三上浩, 岡田慎哉, 「大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案」, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.1077-1088, 2008 年 3 月。
- 12) 今野久志, 岸徳光, 石川博之, 三上浩, 「敷砂を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験」, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.859-864, 2006 年。
- 13) 今野久志, 山口悟, 西弘明, 岸徳光, 栗橋祐介, 「重錘落下衝撃を受ける大型 RC スラブの耐衝撃挙動」, 平成 21 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 66 号, A-15, 4 ページ, 2010 年 2 月。
- 14) 山口悟, 今野久志, 西弘明, 岸徳光, 栗橋祐介, 「敷砂あるいは碎石を設置した大型 RC スラブに関する衝撃載荷実験」, 平成 21 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 66 号, A-17, 4 ページ, 2010 年 2 月。
- 15) 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会, 「ロックシェッドの耐衝撃設計」, 構造工学シリーズ 8, 土木学会, 1998 年 11 月。
- 16) 土木学会構造工学委員会構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会, 「性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法」, 構造工学シリーズ, No.52, 2007 年 10 月。
- 17) G. Meder, "Dynamic Response of a SDOF Elastic-Plastic System Subjected to Aircraft Impact Pulses", Nuclear Engineering and Design, 74-1, pp.61-74, January 1983.
- 18) "UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) STRUCTURES TO RESIST THE EFFECTS OF ACCIDENTAL EXPLOSIONS", December 2008.
- 19) 武藤清, 「力積破壊の世界 - 爆圧による構造物の破壊に関する考察 - 」, 建築學會論文集, 第 21 号, pp.246-251, 1941 年 4 月。
- 20) 武藤清, 「構造物の動的解析 - 耐震設計シリーズ 4 - 」, 丸善株式会社, 1966 年。
- 21) T. Sugano, H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika, S. Orui, W. A. von Riesemann, D. C. Bickel, M. B. Parks, "Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force", Nuclear Engineering and Design, 140-3, pp.373-385, June 1993.
- 22) 阿部修, 小林俊一, 佐藤篤司, 中村秀臣, 中村勉, 「大型野外シュートを用いた雪崩実験, その 3 - 低密度雪塊の衝撃波形予測 - 」, 日本雪氷学会誌 雪氷, 64

- 卷1号, pp.25-31, 2002年1月.
- 23) 庄司淳, 和泉薫, 河島克久, 伊豫部勉, 「高密度雪塊の衝撃力特性と破壊過程」, 日本雪氷学会誌雪氷, 69巻4号, pp.471-480, 2007年7月.
 - 24) 岸徳光, 岡田慎哉, 今野久志, 池田憲二, 「敷砂材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察」, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1323-1332, 2003年3月.
 - 25) 渡辺高志, 榎谷浩, 佐藤彰, 中村佐智夫, 「3次元DEMを用いた重錘落下による実物大サンドクッションの衝撃応答解析」, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1296-1303, 2009年3月.
 - 26) 桂正治, 河西良幸, 「簡易質点系モデルによる衝撃解析手法の適用性の検討」, 前橋工科大学研究紀要, 第12号, pp.20-27, 2009年3月.
 - 27) 小林俊夫, 河西良幸, 大野友則, 「高所からの落下物に対する安全性検討のための衝突実験」, 第7回構造物の衝突問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.187-192, 2004年11月.
 - 28) 花岡健治, 岸徳光, 西弘明, 今野久志, 「2/5RC製覆道模型の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値解析的検討」, 平成21年度土木学会北海道支部論文報告集, 第66号, A-24, 4ページ, 2010年2月.
 - 29) 岡田慎哉, 岸徳光, 西弘明, 今野久志, 「RCラーメン構造の耐衝撃挙動に関する実験的検討および数値解析手法の妥当性検討」, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1388-1398, 2009年3月.
 - 30) 岡田慎哉, 今野久志, 岸徳光, 「小型RC製アーチ模型の耐衝撃応答に関する実験的研究」, 寒地土木研究所月報, No.649, pp.2-14, 2007年6月.
 - 31) 今野久志, 池田憲二, 岸徳光, 竹本伸一, 「敷砂を設置した落石覆工用PRC桁の重錘落下衝撃実験」, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1057-1062, 2004年.
 - 32) 今野久志, 岸徳光, 栗橋祐介, 山口悟, 西弘明, 「敷砂緩衝材を設置しないRC製ロックシェット模型の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃実験」, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1101-1112, 2010年3月.
 - 33) 山口悟, 岸徳光, 今野久志, 西弘明, 「敷砂緩衝材を有するRC製ロックシェット模型に関する衝撃載荷実験」, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1149-1159, 2010年3月.
 - 34) 西弘明, 今野久志, 山口悟, 岸徳光, 栗橋祐介, 「敷砂緩衝材を有するRC製ロックシェット模型の重錘落下衝撃実験」, 平成21年度土木学会北海道支部論文報告集, 第66号, A-18, 4ページ, 2010年2月.
 - 35) 橋紗代子, 榎谷浩, 中村佐智夫, 「RCはりの衝撃特性と性能評価に関する実験的研究」, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1261-1272, 2009年3月.
 - 36) 大島昭彦, 高田直俊, 「地盤へ重錘が衝突するときの衝撃力」, 第2回構造物の衝突問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.146-149, 1994年.
 - 37) 土木学会構造工学委員会衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会, 「衝撃実験・解析の基礎と応用」, 第4章 耐衝撃設計に関する検討事例 4.1 質点系問題における衝撃応答の簡易評価法(河西良幸執筆担当), pp.349-363, 2004年3月.
 - 38) 河西良幸, 「航空機衝突時の衝撃荷重の形状と衝撃応答の関係」, 日本機械学会第17回計算力学講演会講演論文集, pp.491-492, 2004年11月.
 - 39) 藤田壮裕, 河西良幸, 「構造物の衝撃問題における質量と衝突角度が衝撃応答に及ぼす影響の検討」, 前橋工科大学研究紀要, 第10号, pp.45-50, 2007年3月.
 - 40) 油谷勇佑, 風富祥一, 榎谷浩, 佐藤彰, 中村佐智夫, 「サンドクッション上への重錘衝突室内実験について」, 第9回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.145-160, 2008年12月.
 - 41) 桂正治, 河西良幸, 坪田張二, 「RCへの柔飛来物の衝突による貫通・裏面剥離に関する3つの既往実験へのUKAEAガイドの評価法の適用性検討」, 第9回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.187-192, 2008年12月.
 - 42) 河西良幸, 王国璽, 桑原高久, 「鉄筋コンクリート高層建物への衝撃荷重に対する応答特性 - 航空機衝突による応答と地震応答との比較 -」, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp.221-216, 2005年12月.
 - 43) 桑原高久, 河西良幸, 王国璽, 「鉄筋コンクリート高層建物への衝撃荷重に対する応答特性 - その2 中規模の航空機衝突による応答特性 -」, 日本建築学会技術報告集, 第24号, pp.143-148, 2006年12月.