

建築物の耐衝撃設計の考え方と日本建築学会での取組み

AIJ Concept of shock-resistant building design and recent investigation

向井洋一*, 西田明美**, 濱本卓司***, 竹内義高****, 加納俊哉*****

Yoichi Mukai, Akemi Nishida, Takuji Hamamoto, Yoshitaka Takeuchi, Toshiya Kano

* 工博, 神戸大学准教授, 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 工博, 日本原子力研究開発機構研究主席, 安全研究センター (〒277-0871 千葉県柏市若柴 178-4)

*** 工博, 東京都市大学名誉教授, 工学部建築学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

**** (株)大林組, 原子力本部技術部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

***** (株)JSOL, エンジニアリング事業本部 (〒104-0053 東京都中央区晴海 2-5-24)

Key Words: shock-resistant design, accidental action, collision, blast

キーワード: 耐衝撃設計, 偶発作用, 衝突, 爆発

1. はじめに

日本建築学会では、1995年の兵庫県南部地震をきっかけに、1997年に「地震による衝撃的破壊を対象とした調査研究委員会」(主査: 故野中泰二郎京都大学名誉教授)を設置し、「衝撃作用」による構造物の破壊現象についての調査研究の取組みを始めた。2006年9月に、日本建築学会大会(関東)構造部門(応用力学)パネルディスカッション「重要構造物の耐衝突・耐爆性能評価と防止対策」¹⁾を開催し、2009年度より、「耐衝撃性能の評価小委員会」(主査: 橋英三郎大阪大学名誉教授)を設置し、建築物を対象とした、耐衝撃設計のためのガイドライン作成の取組みを開始した。

日本の建築分野においては、戦時中の耐爆設計以降、一般建築物の設計に関して、衝撃荷重に対する積極的な取組みが行われてこなかった。そのため耐衝撃設計に関しては、過去の歴史や他分野および諸外国の動向から学ぶべきことも多い。米国と英国では、外部爆発に対する建築物の耐爆設計の体系が確立している。また、EU統一設計技術標準のEurocode²⁾では、自動車・脱線列車・ヘリコプター等の衝突と内部爆発を偶発作用として大きく括って設計体系に取り込んでいる。現在、建築物の構造設計は、永続作用と変動作用による設計荷重に基づき体系化されているが、建築物の耐衝撃設計への取組みにおいては、偶発作用を設計体系の中で新たに取扱うことが必要となる。そこで、日本建築学会では、建築物の構造設計に偶発作用をいち早く取り入れたEurocodeと同じ視点に立ち、扱う衝撃荷重をヒューマンエラーに伴う事故荷

重に限定し、耐衝撃設計のためのガイドラインを取りまとめることとした。

2010年11月に土木学会との共催で「構造物の耐衝撃設計ガイドラインに関するシンポジウム」³⁾を開催し、2012年9月の日本建築学会大会(東海)構造部門(応用力学)パネルディスカッション「建築物の耐衝撃設計を考える」⁴⁾の開催を経て、2015年1月に日本建築学会より衝撃作用をテーマとした書籍である「建築物の耐衝撃設計の考え方」⁵⁾(以下、「考え方」と略記する。)を刊行することとなった。また、2015年2月には、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」の改定版⁶⁾に衝撃荷重に関する章が新たに加わることとなった。

Eurocodeでは、偶発作用を想定内作用と想定外作用に分類している。想定内作用は偶発作用のうち確率的表現が可能な作用であり、想定される事象に応じた静的等価な設計荷重として設計体系に取込まれている。一方、想定外作用は確率的表現が困難な作用と考えられるが、このような作用に対しても、建築物の局所的な破壊が架構全体の崩壊へと繋がらないように、架構の主要構造部材にタイバーを配して建築物を一体化する対策を示している。このような想定外作用に関しては、2001年のニューヨークWTCへの航空機衝突テロ以後、進行性崩壊の回避という視点から新たな取組みが行われている。

先の「建築物荷重指針・同解説」⁶⁾は、衝撃荷重を静的等価な荷重として取り扱うことを前提とし、対象とする想定内作用についての設計荷重の算定方針を示したものである。一方、「考え方」では、偶発作用としての衝突・爆発を構造設計体系に取り込む際に、想定内作用に対し

ては、Eurocode とは異なり動的外力としての設計荷重を設定し、損傷制御設計に基づき、部材レベルの安全性と機能性を照査することにした。さらに、想定外作用に対しては、具体的な設計荷重を設定することはせず、架構の一部に局所的な破壊が生じたとしても架構全体の進行性崩壊には至らないことを確認することで、設計荷重を規定する想定内作用だけでなく、設計荷重を超える想定外作用についても、設計プロセスにおける検討事項として扱っている。

本報では、日本建築学会で取りまとめた、「建築物の耐衝撃設計の考え方」の要点を概説するとともに、同書の出版後、耐衝撃設計を具体的かつ合理的に進めていくために日本建築学会において進めてきた取組み状況について以下に紹介する。

2. 「建築物の耐衝撃設計の考え方」の目的と構成

2.1 目的

建築物の耐衝撃性能は、建築物内外で偶発的に発生する衝突・爆発に対し、被害低減対策のために投入されたコストに対して、人的被害に関しては死者・負傷者数、物的被害に関しては損傷ないし損失コストを指標として、それらをどの程度まで低減できるかを定量化することにより評価できる。被害を低減するには、構造部材や接合部の強靱化を行うだけでなく、建築物に作用する荷重効果を低減する方法、ガラス窓や外装材などの非構造部材を強靱化する方法、さらに構造部材や非構造部材に生じた損傷や破壊が、2 次的な付帯被害を誘発しないように、被害の連鎖や拡散を回避する方法などを総合的に検討する必要がある。すなわち、「考え方」では、荷重の低減、部材の強靱化、被害連鎖・拡散の回避に対して、ハード面とソフト面で可能な対策を具体的に提示することが、その役割となる。

2.2 対象とする建築物と事象

「考え方」では、設計対象とする建築物として、用途については、オフィス、集合住宅、ホテル、病院、学校、公共建築、および商業建築とし、構造種別・形式については、鉄筋コンクリート造および鉄骨造の骨組構造ないし壁構造に限定している。建築物の設計は、構成する各種部材の要求性能を満足するように部材レベルで行う。建築物を構成する部材は、構造部材と非構造部材に分類され、構造部材はさらに鉛直力の支持機能に直接関与する主要構造部材とそれ以外の補助構造部材に分類される。主要構造部材には柱、梁、鉛直力を負担する耐震壁が含まれる。補助構造部材には床、鉛直力を負担しない耐震壁、ブレースなどが含まれる。非構造部材には、ガラス窓、扉、外装材、天井、間仕切り壁などがある。

衝突・爆発現象には、地震、暴風、火山などの自然現象に伴う作用と人為的な衝突や爆発に伴う作用がある。

「考え方」では、人為的作用を対象とすることとし、その中でも、特に偶発的な事故に由来する作用のみを対象とすることとした。戦争やテロのような意図的な行為および原子力発電所等に関連した衝撃問題は、一般建築物への作用という点からは極端に過大な荷重となる場合があるため、「考え方」の適用外とした。

(1) 衝突作用

Eurocode で衝突事象として取り上げられている作用には、自動車の衝突、脱線列車の衝突、ヘリコプターの落下、フォークリフトの衝突、および船舶の衝突がある。「考え方」においては、Eurocode で取り上げている作用から船舶の衝突を除き、新たに小型飛行機の衝突を加えている（表-1 参照）。なお、小型飛行機の衝突は、来年出版予定の ISO10252 (Accidental actions) においても取り上げられている。

表-1 対象とする衝突事象

衝突体	対象とする作用
自動車	道路に隣接する建築物の柱（梁）や壁への衝突。駐車場での衝突・落下も考慮する。
脱線列車	鉄道に隣接する建築物の柱（梁）や壁への衝突。軌道の終端部を乗り越えた衝突も考慮する。
小型飛行機	高さ 60m 以上の高層建築物への衝突。飛行場および飛行経路近傍の地域への墜落も考慮する。
ヘリコプター	ヘリポートとして設計された屋上への緊急着陸荷重。
フォークリフト	作業範囲内の梁・柱・壁ラックへの衝突。

表-2 対象とする爆発事象

分類	対象とする事象
内部爆発	密閉／半密閉空間に漏洩した可燃性ガス（メタンガス、プロパンガス、都市ガス）が、静電気、スイッチ火花、ライター等により着火する場合を想定。
外部爆発	危険施設（火薬工場、各種プラント、水素エネルギーステーション等）に建築物が隣接している場合。爆源として、可燃性ガス、水蒸気、粉塵、火薬／爆薬を想定。

(2) 爆発作用

建築物に作用する爆発事象は、爆源が当該建築物の内部にあるか外部にあるかで、内部爆発と外部爆発に分けて考える。Eurocode が爆発現象として取り上げている作用は内部爆発のみであるが、「考え方」においては、内部

爆発に加えて対象建築物周辺の危険施設からの爆発（外部爆発）による影響も考慮する（表-2 参照）。

2.3 要求性能

耐震設計と耐風設計が日本の全ての建築物に対して必須とされることに対し、耐衝撃設計は衝撃作用を受けるリスクがあると想定される建築物に対して限定的に行われるものである。従って、耐震・耐風設計の要件が満足された建築物に対して、耐衝撃性能を定量的に評価し、十分な耐衝撃性能が付与されていないと見なされる場合に、被害低減対策を設計プロセスに具体的に反映させることが耐衝撃設計の役割である。このため、耐衝撃設計と耐震・耐風設計との連続性は重要であり、耐衝撃設計においても耐震・耐風設計で採用されている性能マトリクスの枠組（図-1）を採用することとした。なお、耐衝撃設計では、想定内作用とともに想定外作用に対する安全性と機能性の確保を目指している。偶発作用のうち、想定内作用に対する基本性能としては安全性、修復性、および機能性を、また想定外作用に対する基本性能としては、人命安全のための建築空間確保を保証するロバスト性あるいは残存性を考慮する。

建築物に対する要求性能は、縦軸に衝撃荷重の荷重強さ、横軸に建築物に許容される被害状態をとることにより、架構全体の耐衝撃性能マトリクスが構成される。すなわち、耐衝撃設計における要求性能レベル（防護レベル）は、荷重強さと許容被害状態との組合せにより決まる。要求性能レベルは、図-1 の場合、①～⑥の斜線部分に対応する。例えば、施主は対象建築物の要求性能レベルを①～⑥のいずれとするかを選択し、設計者はその要求性能を満足するように耐衝撃設計を行う。

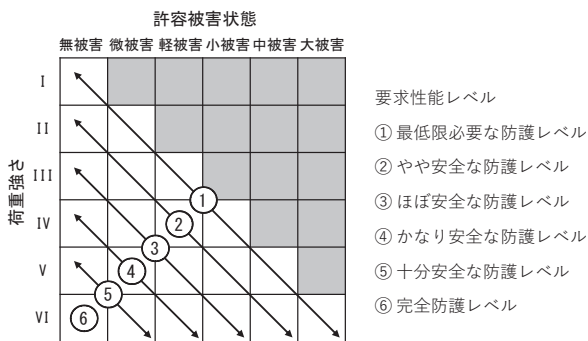


図-1 架構全体の耐衝撃性能マトリクス

2.4 架構全体の損傷レベルと各部材の損傷レベル

耐衝撃性能に関する要求性能レベルは図-1 で示したように架構全体に対する性能により評価される。従って、耐衝撃設計においては、架構全体の損傷レベルと各部材の損傷レベルとの関係を明確にしておく必要がある。想定される荷重レベルに応じて、主要構造部材とそれ以外の補助構造部材、並びに非構造部材の損傷性状は異なる。主要構造部材の損傷は、構造安全性に影響し、非構造部

材の損傷は、人的被害や機能性の障害に影響を与える。従って、建物全体の防護レベルは、主要構造部材と補助構造部材、非構造部材の損傷レベルを網羅して評価する必要がある（表-3 参照）。

表-3 架構全体と各部材の要求性能レベルの関係

架構全体の被害	主要構造部材	補助構造部材	非構造部材	人的被害
無被害	無損傷	無損傷	微損傷	なし
微被害	無損傷	微損傷	小損傷	なし
軽被害	微損傷	小損傷	中損傷	なし
小被害	小損傷	中損傷	大損傷	けが人の可能性
中被害	中損傷	大損傷	甚大損傷	けが人多数・死者の 出る可能性
大被害	大損傷	大損傷	甚大損傷	死者多数の可能性

3. 設計荷重

「考え方」で扱う耐衝撃設計の想定内作用として考慮する衝突事象と爆発事象は、Eurocode で考慮されている事象に新たに小型飛行機の衝突と外部爆発を加えたものである。しかしながら、設計荷重としての扱いは、等価静的荷重として扱う Eurocode とは異なり、衝突と爆発を動的現象と捉え、動的応答解析を用いて安全性・機能性を照査することを基本としている。このため、衝突による設計荷重は、荷重-時間曲線 ($F-t$ 曲線) として、また爆発による設計荷重は、圧力-時間曲線 ($p-t$ 曲線) として与えるものとする。

表-4 衝突事象の原因と荷重強さ

想定した荷重強さ (kN)	自動車		脱線列車	小型飛行機	ヘリコプター	フォークリフト
	普通車	大型車				
10 ⁰						
10 ¹						
10 ²						
10 ³						
10 ⁴						
10 ⁵						
10 ⁶						

表-5 爆発事象の被害状況と荷重強さ

爆風圧 (kPa)	内部爆発	外部爆発
1	一部の窓・扉破壊	窓ガラス破壊
5	鉄筋コンクリート壁・床に損傷発生	窓枠破壊
10	広範囲にわたる窓・扉破壊	軽量鉄骨造建物の大変形
50	鉄筋コンクリート壁・床修復限界	屋根瓦崩落・軽量鉄骨造破壊
100	鉄筋コンクリート壁崩壊・床崩落	木造建物の大変形
500	—	木造建物倒壊
1000	—	煉瓦造建物倒壊
2000	—	鉄筋コンクリート造建物の大変形
3000	—	鉄筋コンクリート造建物倒壊

3.1 荷重レベル

「考え方」が対象とする衝突事象の衝突力と爆発事象の爆風圧に関するおおよその想定荷重の範囲をそれぞれ表-4 と表-5 に示す。表-4 は、想定する衝突体の衝突速度の範囲を設定し、衝突エネルギーあるいは運動量の範囲を求め、三角形パルス波への近似と作用時間の仮定に基づく衝撃解析を行って整理したものである。表-5 は、内部爆発に関してはマンション等の内部爆発事故例と実験に基づいており、外部爆発に関しては土木学会編

「性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法」⁷⁾を参考にしている。従って、図-1に示した耐衝撃性能マトリクスの荷重強さの設定には、表-4あるいは表-5を参考にすることができる。

3.2 衝突事象

衝突は構造物と衝突体の相互作用現象であり、その際に衝突体の運動エネルギーが構造物あるいは衝突体の変形・破壊のエネルギーに急速に変換される。衝突事象の解明には、構造物と衝突体の力学特性を十分に把握した上で、動的効果と非線形挙動を適切に評価する必要がある。自動車に関しては、米国では衝突実験・解析データを公開しているが、日本では未公開である。脱線列車や飛行機の衝突荷重に関する実験・解析研究も行われているが、データの蓄積はまだ十分とはいえない。ヘリコプターやフォークリフトの衝突に関するデータは一般に公開されていない。

このため、「考え方」では、すべての衝突事象について、衝突体に比べて構造物が十分に硬く、衝突エネルギーが衝突体の変形・破壊のエネルギーにより消費されるもの（ハードインパクト）として扱う。衝突体を詳細な有限要素モデルあるいは簡単に質点と弾塑性ばねで構成される等価1自由度モデルを用いて衝突解析を実施し、衝突速度を変化させながらハードインパクトの仮定のもとに建築物に生じる衝突荷重を時刻歴波形として求め、これを三角形パルス波で単純化した $F-t$ 曲線を動的設計荷重として与えた。ハードインパクトの仮定は、建築物のエネルギー消費がない状態での評価であり、一般に安全側の設計荷重となる。

以下に、自動車が建築物に衝突した場合の衝突荷重の時刻歴の算出例を示す。図-2は、公表されている普通車の前面衝突試験における計測値と、この前面衝突試験を模擬した有限要素モデルにおける衝突解析の計算値の比較である。衝突解析結果は、衝突試験の計測値に基づく時刻歴における最大荷重、ピーク時間、および作用時間を概ね再現できていることがわかる。

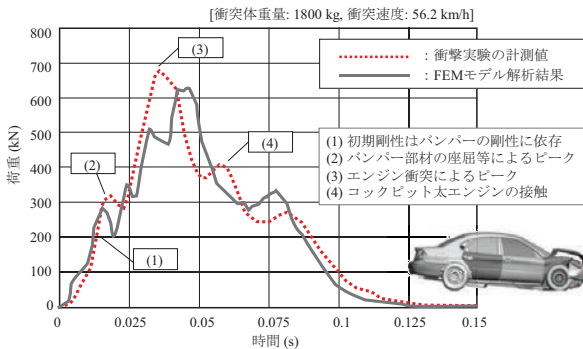


図-2 自動車の前面衝突試験の荷重時刻歴の例

車体重量を 1700 [kg]、衝突速度が 20、40、60 [km/h] の 3 ケースを想定した場合の衝突解析結果を図-3 に示す。

この結果に基づき、衝突荷重の時刻歴を、最大荷重 F 、ピーク時間 t_p 、作用時間 t_{end} により定義される三角形パルス波に近似し、任意の衝突条件（重さと速度）における三角形パルス波の時刻歴を設計荷重として示している（図-4 参照）。設計用三角形パルス波の最大荷重とピーク時間は、衝突解析による荷重時刻歴から直接読み取るものとした。作用時間は、荷重時刻歴の力積（衝突荷重の時間積分値 $= t_{end} \times F/2$ ）が衝突現象における運動量（=車体重量×衝突速度）に一致するものとして求めた。

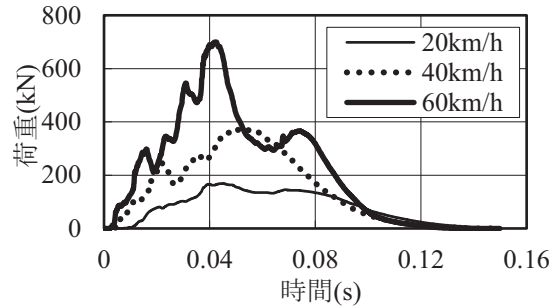


図-3 自動車の衝突荷重の時刻歴の例

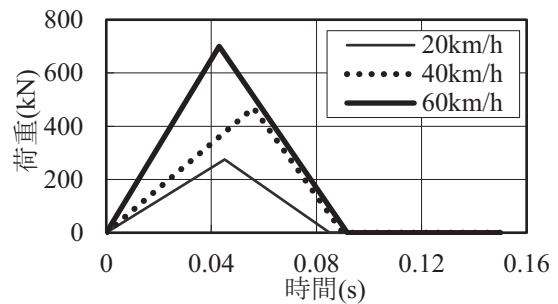


図-4 自動車の衝突荷重の三角形パルス波近似

3.3 爆発事象

対象とする爆発現象には、表-2に示したように、建築物内部の爆発と建築物外部の爆発がある。爆発は急速な物理作用や化学作用により気体が高温高压の状態になる現象である。燃焼反応を伴う爆発現象は、火炎伝播速度が亜音速となる爆燃と超音速となる爆轟に分類される。内部爆発では爆燃のみを扱うが、外部爆発では爆燃と爆轟の両方を扱う。なお、爆発現象においては、気体による作用（爆風圧）のみを考慮し、爆破に付随して飛散するコンクリート片やガラス片等の固体の衝突作用（飛散物）の影響は付帯事象として、被害低減のためのプロセスで別途検討する。

(1) 内部爆発

内部爆発は、メタンガス、プロパンガス、都市ガス等の可燃性ガスが密閉/半密閉空間内に漏洩し、静電気、スイッチ火花、ライター等により着火する場合を想定する。ガス濃度が一定の条件にならないと爆発は生じないので密閉空間あるいは半密閉空間で生じることがほとんどである。なお、可燃性ガスとして気化したガソリンを

考えることもできるが、地下駐車場などの機密性の高い空間内に置かれた車両からガソリンが漏れ出すリスクはあるものの、ガソリンが気化する割合は低いいため、ここでは想定外事象とする。

内部爆発による衝撃荷重は、内部空間の容積と開口面積の関数になる。爆発に伴い開口部の窓ガラス等脆弱部は全て飛散するものとする。内部爆発の設計荷重は既往の実験式・解析式に基づき圧力-時間曲線 ($p-t$ 曲線) として与える。但し、密閉空間であっても、圧力を解放できるパネルやダクトが適切に配置されている場合は、その効果に応じて設計荷重を低減することができるものとする。内部爆発を想定した爆発実験による内部圧力の上昇を表現する推定式は、多種提案されているが、建築物においては、早期に脆弱部が破壊される状況を勘案し、開口部の破壊圧力が低く、室内容積が一般的な建築物の室内容積に近い実験結果を採用し、「考え方」では、圧力上昇過程については、Harris⁹⁾によって提案された式(1)を、最大圧力については、Eurocode の式(2)を用いるものとした。

$$p = p_0 \exp \left[e^2 (e - 1) \frac{4\pi (S_L t)^3}{3V} \right] \quad (1)$$

$$\text{Max} \left(\begin{array}{l} p_d = 3 + p_{stat} \\ p_d = 3 + \frac{p_{stat}}{2} + \frac{0.04}{(A_v/V)^2} \end{array} \right) \quad (2)$$

ここで、 $V < 1,000 [\text{m}^3]$ 、 $0.05 \leq A_v/V < 0.15 [1/\text{m}]$ 、 $p_d \leq 50 [\text{kN/m}^2]$ 。式(1)の圧力 p と初期圧力 p_0 はいずれも絶対圧力であり、単位は任意である。 e 、 S_L 、 t および V は膨脹比 (未燃混合気と既燃混合気の体積比)、燃焼速度 $[\text{m/s}]$ 、時間 $[\text{s}]$ 、部屋の容積 $[\text{m}^3]$ である。

(2) 外部爆発

外部爆発については、化学プラント、花火工場、石油タンク、水素ステーションなどの危険施設に建築物が隣接している場合は想定内作用と考える。爆発源としてはガス爆発のほかに、水蒸気爆発、粉塵爆発、火薬・爆薬爆発を考える。火薬・爆薬は熱や衝突などにより急激な燃焼反応を生じる物質である。火薬取締法では、使用目的が花火やロケットの推進力を得るための推進的爆発の時は火薬、対象物を破壊するための破壊的爆発の時は爆薬と区別している。ただし危険施設は、通常、保安距離を考慮して敷地境界が設定されているため、たとえ事故が発生してもその影響は敷地内にとどまることがほとんどである。

外部爆発が生じると建築物外面に衝撃荷重が作用する。爆発の大きさが建築物の規模に比べて大きい場合 (大規模爆発) では、爆風圧が建築物を通過する際、建築物の存在により圧力波の回折現象が生じるため、建築物の前面、側面、背面、屋根それぞれに作用する荷重を決定する必要がある。爆発の大きさが建築物の規模に比べて小さい場合には、爆風圧は建築物前面の一部のみに作用し、

柱、梁、壁等の各部材は時間の経過とともに順次荷重を受ける。

外部爆発の爆源の大きさは、爆轟の場合、爆源の種類にかかわらず TNT 等価薬量を用いて表現する。爆源から建築物の荷重作用位置までの離間距離については換算距離 (K 値) を用いる。

$$K = R/W^{1/3} \quad (3)$$

ここに、 R は評価地点までの距離、 W は爆薬の持つエネルギーの TNT 換算質量である。単位は $[\text{m/kg}^{1/3}]$ である。建築物に作用する衝撃荷重は各爆源の TNT 等価薬量と換算距離の関数として評価する。爆轟の場合も爆燃の場合も、設計荷重は圧力-時間曲線 ($p-t$ 曲線) として与える。なお、離隔距離をできるだけ大きく取れるような建物配置計画や爆源と建築物の間に防護壁を設けるような対策を施した場合は、その効果に応じて設計荷重を低減することができる。

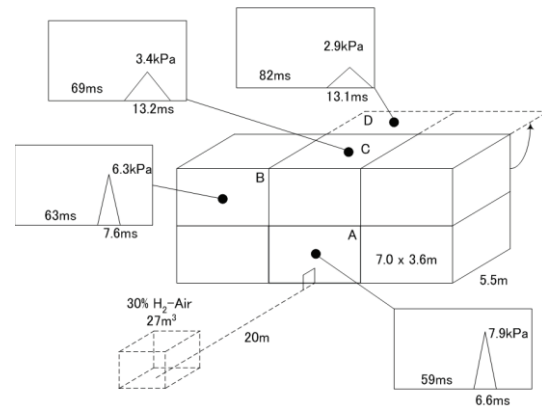


図-5 建築物全体に分布する爆風圧荷重の例

建築物全体に分布する爆風圧の設計荷重を求める場合には、まず、建築物と爆源の位置関係から、建築物の各壁の中心から爆源への距離と入射角をそれぞれ計算する。爆源と反対側の壁は、屋上の延長として水平方向に展開して求める。このときスパン長が大きい壁については適宜長手方向を複数の領域に分割する。次に、それぞれの領域に対して、爆源の大きさ、距離、および入射角からピーク圧と力積を求める。なお、爆発により生じた圧力波は、空気中の音速で伝播するので、それぞれの壁に到達する時間に差を生じる。爆風圧を建物全体への変動分布荷重として扱うために、爆源からのそれぞれの壁までの距離を空気中の音速で除した値を 曲線の立ち上がり時刻とし、最終的に図-5 に示したような分布荷重履歴が求まる。図中のそれぞれの壁および天井への $p-t$ 曲線には、ピーク圧力と作用時間および到達時間を記した。

4. 構造部材の動的応答解析

地震荷重や風荷重が建築物架構の全体応答を励起するのに対して、衝撃荷重は建築物の一部に大きな局部応

答を生じるため、耐衝撃設計では、従来から個材応答解析がよく用いられている。個材応答解析においては、接合部を介しての部材間相互作用を直接的には評価できないため、材端における反力を求め、これを間接的な外力として隣接部材に荷重を伝達することにより、限定された領域で応答解析を行うことになる。「考え方」では、このような個材応答解析を耐衝撃設計における基本的な部材設計のための応答評価法と位置付けている。

4.1 個材応答解析

構造部材が曲げ破壊を生じるような場合は、1自由度モデルを用いた個材応答解析が有効である。しかしながら、部材の曲げ破壊に先行してせん断破壊や局部座屈を等を生じるような場合には、1自由度モデルでの評価には限界があり、有限要素解析等の詳細解析を用いることとなる。個材詳細解析の役割は、1自由度モデルでは応答評価が困難な場合の代替や1自由度モデルの応答解析結果の妥当性検証等にある。

一方、「考え方」では、想定外作用により生じた局所的な破壊が、構造システムの全体崩壊あるいは部分崩壊という不釣合いに大きな被害へと進展することがないように、設計荷重には関係なく進行性崩壊を回避するための方策を進行性崩壊限界状態として設計プロセスに取り入れることとしている。その場合には、架構全体をモデル化した全体詳細解析が必要となる。

以下に、個材応答解析のうち、柱や梁、床、壁等の個材を1自由度モデルに置換した場合の解析法について述べる。ここでは、衝撃荷重を時間の関数として与えるものとし、設計という観点から最大応答に着目し、最大応答変位を用いて構造物に作用する衝撃力の特性を分類する考え方の例を示す³⁾。

4.2 最大応答変位

図-6に示すような三角形インパルスによる振動応答を考える。このとき、最大応答変位は式(4)で与えられる。

$$x_{max} = \begin{cases} x_{st} \left(\frac{\sin \omega t_m}{\omega t_1} - \cos \omega t - \frac{t_m}{t_1} + 1 \right) & : \text{if } \frac{2}{\omega} \tan^{-1}(\omega t_1) \leq t_1 \\ x_{st} \sqrt{\frac{-2(\omega t_1 \sin \omega t_1 + \cos \omega t_1 - 1)}{(\omega t_1)^2} + 1} & : \text{if } \frac{2}{\omega} \tan^{-1}(\omega t_1) > t_1 \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 $t_m \leq t_1$ 、かつ、 $\cos \omega t_m + \omega t_1 \sin \omega t_m = 1$ 。ここに、 $\omega = \sqrt{K/M} = 2\pi/T$ ：固有円振動数、 $x_{st} = F_0/K$ ：静的変位を表す。エネルギー的解法による最大応答変位の限界値は以下のように表せる。

① 三角形パルス波の準静的載荷における弾性時の最大応答変位：準静的載荷では最大応答に達するまで衝撃力 F_0 は一定値で作用するとみなす。最大応答変位 x_{max} までに衝撃力によってなされた外力仕事 ($U_{ex} = F_0 x_{max}$) とひ

ずみエネルギー ($U_\varepsilon = K x_{max}^2/2$) を等しいとおくと次式を得る。(x_{el} は弾性限変位。)

$$x_{max} = 2(F_0/K) = 2x_{st}, x_{max} \leq x_{el} \quad (5)$$

式(5)は準静的漸近線であり、最大応答変位と静的変位の比は動的増幅率と呼ばれる。準静的載荷においては、動的増幅率は最大値2をとる。

② 三角形パルス波の衝撃的載荷における弾性時の最大応答変位：弾性時の衝撃的載荷のときは、振動問題で用いられている力積応答の考え方をを用いる。ニュートンの第2法則より、力積 ($I = F_0 t_1/2$ ：三角形パルス) が作用した時、瞬時に部材に、 $\dot{x}(t) = I/M$ で与えられる速度が生じると考える。このとき、三角形パルスは部材に以下の運動エネルギーを与える。

$$K_e = M\{\dot{x}(t_1)\}^2/2 = I^2/2M \quad (6)$$

したがって、最大応答変位 x_{max} は運動エネルギーと x_{max} まで変形した場合に部材に蓄えられるひずみエネルギー ($U_\varepsilon = K x_{max}^2/2$) を等しいとおくことにより、式(7)が得られる。

$$x_{max} = I/\sqrt{KM} \quad (7)$$

式(7)の両辺を静的変位 x_{st} で除して整理すると、式(8)が導かれる。

$$\frac{x_{max}}{F_0/K} = \frac{I}{\sqrt{KM}(F_0/K)} = \frac{F_0 t_1/2}{\sqrt{KM}(F_0/K)} = \frac{\omega t_1}{2} \quad (8)$$

式(8)は衝撃応答の漸近線と呼ばれる。

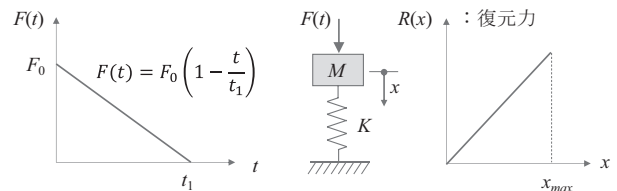


図-6 三角形パルス波が作用する1自由度モデル

式(7)による最大応答変位と ωt_1 の関係を図示すると図-7の太実線ようになる。文献9)、10)では、既往の多くの研究成果を検討し、図-6の三角形パルス波に対応する最大応答変位と ωt_1 の関係において、構造物に作用する衝撃力の特性を次の(I)~(III)のように分類し、衝撃的・動的・準静的載荷領域の各問題を区分する目安としている。(表-6にこれらをまとめて示す。)

(I) 衝撃的載荷 ($0.4 > \omega t_1$ のとき)：

衝撃力は構造物が顕著に応答する前に作用を終え、最大応答変位は継続時間以降の時刻で起こる。

(II) 動的載荷 ($0.4 \leq \omega t_1 \leq 40$ のとき)：

その応答を運動方程式から求めると複雑になる場合があるため、衝撃的載荷あるいは準静的載荷から得られた結果を用いて応答の近似を行うこともできる。

(III) 準静的荷重 ($40 < \omega t_1$ のとき) :

構造物が最大変位に達するまでは荷重は一定値で作用するものと考えられる。最大変位は衝撃力の継続時間や構造物の慣性と減衰には関係せず、最大衝撃力と剛性の関数となる。

表一六 衝撃力の特徴の分類

分類	定義	区分	
衝撃的 荷重領域 (I)	衝撃荷重の作用時間が、対象部材の固有周期に比べて、極めて短い場合 ($t_1 \ll T$)	$\omega t_1 < 0.4$	$t_1/T < 0.064$
動的 荷重領域 (II)	衝撃荷重の作用時間と対象部材の固有周期が、比較的近い場合	$0.4 \leq \omega t_1 \leq 40$	$0.064 \leq t_1/T \leq 6.4$
準静的 荷重領域 (III)	衝撃荷重の作用時間が、対象部材の固有周期に比べて、極めて長い場合 ($t_1 \gg T$)	$40 < \omega t_1$	$6.4 < t_1/T$

5. 設計クライテリア

図一に示した架構全体の要求性能マトリクスに基づき耐衝撃設計の防護レベルを決定すれば、荷重強さごとに直接作用部材の許容損傷状態が表一3 のように定まる。想定される荷重強さに対応した衝撃荷重の作用時に、直接作用部材に生じる損傷状態がすべてこの許容損傷状態以下に収まるように損傷制御設計を行う。

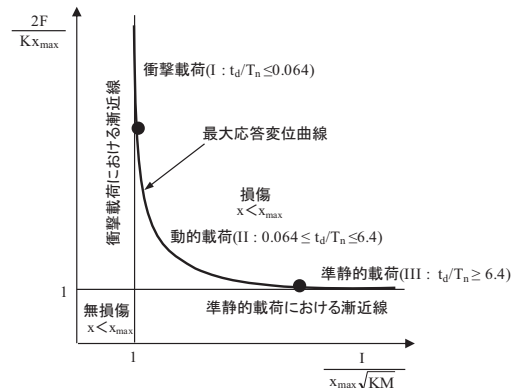
主要構造部材と補助構造部材の損傷状態は、応答解析により求まる材端回転角、塑性率、層間変形角などの応答値に関係付けて評価される。従って、実際の耐衝撃設計においては、荷重強さごとに算定される応答予測値が許容値以下となるように部材設計を行う必要がある。この荷重強さごとに設定される許容応答値が部材の設計クライテリアである。

5.1 最大応答変位

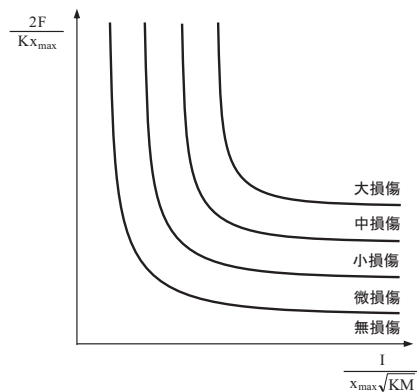
構造部材と非構造部材について、設計クライテリアを設定するためには、まず多段階の損傷状態の区別を言語表現として与える。さらに、損傷状態の言語表現を設計クライテリアという定量的表現に変換するためには、衝撃力-力積図 ($F-I$ ダイアグラム) ^{9, 11)} を用いる。縦軸に衝撃力 F 、横軸に力積 I をとって描かれる弾性応答時の $F-I$ ダイアグラムを図一七に示す。ここで、 t_d は荷重の作用時間、 $T_n = 2\pi/\omega_n$ は部材の有効固有周期であり、 K_e および M_e はそれぞれ直接作用部材を模擬した 1 自由度モデルの等価剛性および等価質量である。

この図を塑性領域に拡張し、塑性率を損傷指標として

ダイアグラムを描くと、図一八に示すように、多段階の損傷状態を複数の等損傷曲線により表すことができる。この等損傷曲線に対応する応答パラメータの値が許容損傷状態に関する設計クライテリアを与えることになる。



図一七 弾性応答時の衝撃力-力積図



図一八 弾塑性応答時の等損傷曲線の概念図

5.2 構造部材

構造部材の要求性能に応じて多段階の設計クライテリアを設定する。構造部材の設計クライテリアは鉄筋コンクリート造と鉄骨造に分けて与える。

(1) 鉄筋コンクリート造

鉄筋コンクリート (RC) 造に関しては、梁や柱のように力を一方向に伝達する 1 次元部材と、床や壁のように力を二方向に伝達する 2 次元部材に分けて設計クライテリアを設定する。一例として、ここでは、1 次元部材の損傷状態をそれぞれ 5 段階に分けたそれぞれの言語表現を以下に示す。また、曲げ破壊の場合における、これらの損傷状態を部材の応答限界値 (材端回転角 θ) について定量化したものを表一七に示す。

RC 部材・1 次元部材 (梁と柱) :

- ・無損傷： ひびわれなし。
- ・微損傷： かぶりコンクリートにわずかのひびわれ。
- ・小損傷： かぶりコンクリートに顕著なひびわれ。コアコンクリートにはひびわれなし。
- ・中損傷： かぶりコンクリートの剥離。コアコンクリートに小さなひびわれ。

- ・大損傷：コアコンクリートに顕著なひびわれ。主筋の座屈。

表一七 RC 部材の応答限界値（曲げ破壊の場合）

損傷限界	許容量	主要構造部材 (柱、梁、耐力壁)	補助構造部材 (スラブ、鉛直荷重を 負担しない壁)
無損傷限界	応力 θ	短期許容耐力 -	短期許容耐力 -
微損傷限界	応力 θ	降伏耐力 -	降伏耐力 -
小損傷限界	応力 θ	- 1/100	- 1/100
中損傷限界	応力 θ	- 1/60	- 1/30
大損傷限界	応力 θ	- 1/30	- 1/15

表一八 鉄骨部材の応答限界値

損傷限界	許容量	主要構造部材 (柱、梁)
無損傷限界	応力 材端回転角 θ 材端塑性率 μ	短期許容耐力 (降伏耐力) 1/200 1
微損傷限界	応力 材端回転角 θ 材端塑性率 μ	- 1/120 1.5
小損傷限界	応力 材端回転角 θ 材端塑性率 μ	- 1/100 2
中損傷限界	応力 材端回転角 θ 材端塑性率 μ	- 1/60 5 ^{*1}
大損傷限界	応力 材端回転角 θ 材端塑性率 μ	- 1/30 10 ^{*1}

*1 板要素の幅厚比制限、曲げ材の細長比制限、柱材の軸力比と細長比の制限および接合部の性能によっては達成できない応答限界値となることに留意

(2) 鉄骨造

鉄骨造に関しては、梁や柱のように力を一方向に伝達する 1 次元部材についてのみ設計クライテリアを設定する。5 段階に分けたそれぞれの損傷状態の言語表現を以下のように与える。また、曲げ破壊の場合における、これらの損傷状態を部材の応答限界値（材端回転角 θ ）ないし（材端塑性率 μ ）について定量化したものを表一八に示す。

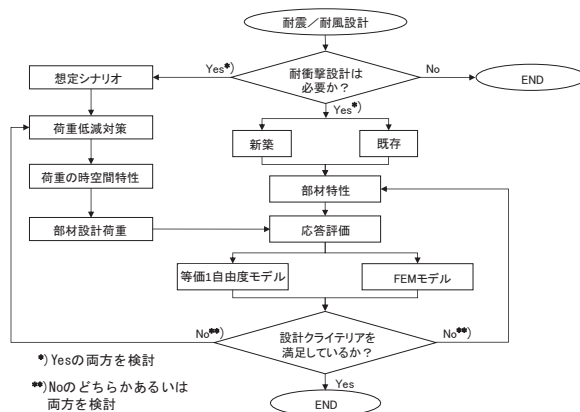
鉄骨部材・1次元部材（梁と柱）：

- ・無損傷：部材端部は未降伏。
- ・微損傷：部材端部が降伏開始。
- ・小損傷：柱梁パネルゾーン以降伏。部材に小さな局部座屈。

- ・中損傷：接合部にき裂発生。部材に中程度の局部座屈。
- ・大損傷：フランジ接合部の破断。部材に大きな局部座屈。

5.3 想定内作用に対する一般的な設計フロー

想定内作用に対しては、設計荷重を設定して各部材の損傷制御設計を行う。すなわち、想定内作用に関する限り、部材レベルの損傷は許容しても破壊を許容しない。想定内作用に対する耐衝撃設計の一般的な設計フローを図一九に示す。最初に耐衝撃設計を行う必要の有無を判定する。耐震設計および耐風設計を通じて、衝撃荷重に対する要求性能が十分付与されていると判断される場合には耐衝撃設計の必要はない。耐衝撃設計を行う際には、周辺環境と当該建築物の状況を調査し、衝撃荷重が作用する場合の想定シナリオを作成する。想定シナリオに基づき、敷地計画および建築計画の段階で衝撃荷重を低減しうる方策を考えた上で設計荷重を決定する必要がある。設計荷重は動的荷重として与えられるので、各部材の応答は動的応答解析あるいはエネルギー法により算定される。算定された、部材の最大応答値を各部材の設計クライテリアと比較することにより損傷制御設計を進める。



図一九 想定内作用に対する設計フロー

5.4 非構造部材の耐衝撃性能の評価

(1) 非構造部材の設計クライテリア

表一三に示した非構造部材の要求性能に応じて設計クライテリアを与える。非構造部材には多くの種類があるが、ここでは、一例として衝撃荷重に対して特に重要なガラス窓について設計クライテリアを示す。窓ガラスの損傷状態を 6 段階に分け、各損傷状態の言語表現を以下のように与える。

窓ガラス：

- ・無損傷：ガラスのわれが全く認められない。
- ・微損傷：ガラスのわれがわずかに生じるが、窓枠に永久変形は見られない。
- ・小損傷：ガラス落下の可能性があり、窓枠に永久変形が見られる。
- ・中損傷：ガラスの割れが激しくなるが範囲は限定される。修復は可能である。

- ・大損傷： 広範囲にガラスの激しいわれが認められる。修復は不可能である。
- ・甚大損傷： ほぼ全てのガラスが割れて飛散する。

表-9 非構造部材の被害低減対策方法

非構造部材	タイプ1： 部材に作用する衝撃荷重低減	タイプ2： 部材の強度向上	タイプ3： 部材損傷による被害低減
ガラス	【共通】 ・車両が衝突する可能性の高い場所にガラス窓を配置しない。車両の侵入を防止対策をする。 ・外部爆発の原因となる施設（化学工場等）がある方向には大型の開口部を設置しない。 ・屋内に爆発源となるものを設置しない（ガス、灯油類の使用禁止等）	高強度ガラスの使用、窓枠の強化	合わせガラス等の使用、カーテンを常時引く
扉		強化扉の使用	扉の脱落防止
天井		強度を上げる	落下防止策
外装材		強度を上げる	落下・転倒防止策
間仕切り壁		強度を上げる	倒壊防止策
ダクトスペース・EVシャフト	—	—	シャフト類の配置を検討、ブローアウトパネル等の設置

(2) 非構造部材の損傷レベルと人的被害の関係

非構造部材の耐衝撃性能は、非構造部材の破損の可能性を考慮し、総合的な人的被害の低減を目的として設定される必要がある。すなわち、非構造部材において部材損傷の評価基準となるのは、その損傷が及ぼす人的被害の程度とする。個々の建物設計においては、この関係に基づき、当該建物で使用される非構造部材の状況（設置位置、損傷時の直接被災範囲、建物の使用目的等）や衝撃荷重源の可能性を勘案し、人的被害を合理的に可能な限り低減する努力を行うべきである。つまり、非構造材により人的被害を軽減するのではなく、非構造材の破壊による人的被害を軽減する対策を検討することが重要となる。表-9 に非構造部材による人的被害低減のための対策方法の例を示す。

6. 想定外作用に対する進行性崩壊回避の確認

想定外作用に対しては、部材レベルの破壊を許容する。ただし、想定外作用による局所的な破壊が、架構の全体崩壊あるいは部分崩壊という不釣合いに大きな被害へと進展することがないように、設計荷重の大きさには関係なく進行性崩壊を回避するための方策を設計プロセスに取り入れる。

一部の構造部材が破壊して荷重伝達能力が失われても、別の荷重伝達経路が安定的に確保されれば進行性崩壊は生じない。進行性崩壊の回避を保証するための代表的な方法は、鉛直荷重伝達部材（柱や軸力を負担する耐震壁）のうち、一部材あるいは複数部材を取り除いても、想定

した範囲を超えて破壊が広がらないことを確認する方法である。進行性崩壊を回避するための一般的な対策としては、荷重伝達経路の複数化（リダンダンシーの確保）、部材と接合部のダクティリティの確保、キーエレメントの導入などがある。進行性崩壊回避の考え方は、鉄筋コンクリート造でも鉄骨造でも基本的には同じであるが、鉄骨造の場合は、特に衝撃荷重作用後に発生する火災による温度荷重の影響にも留意する必要がある。

7. 合理的な耐衝撃設計法に向けて

「考え方」では、建築物の耐衝撃設計を行うための基本的な考え方を構造設計者の参考となるように、事故により生じる衝突と爆発（内部爆発・外部爆発）について想定内作用に対しては、定量的な設計荷重を示している。一方、衝突や爆発による構造体の破壊現象を実証的に示した実験等の既往の検証事例は希少であり、こうした実証的研究結果のみから設計に用いる衝撃荷重を提示することができない。そのため、設計用荷重については、FEMモデル等を用いた衝撃応答解析結果に基づくことになるが、現状では、衝突等による衝撃荷重が建物に作用する際に、衝撃作用を受ける構造体側の局部損傷や変形によるエネルギー吸収効果を考慮しない荷重効果を、設計用の衝撃荷重と定めており、実際の設計上は非常に厳しい保守的な設計荷重を用いることになる。

しかしながら、衝突や爆発に伴い、建築物の構造部材、非構造部材に作用する荷重効果に関しては、衝撃作用を受ける部材の損傷・変形状況による実際の荷重低減効果の考慮し、衝撃体（衝突物や爆風など）と荷重を受ける部材との間に衝撃作用を遮蔽・低減する装置・設備等のバリア効果による正味の荷重効果を考慮することが、より合理的な耐衝撃性能評価のために必要である。

日本建築学会では、こうした観点から、2016年度より新たに「衝撃低減対策小委員会」を設立して、衝突体および衝撃を受ける部材の材料特性を考慮したエネルギー吸収効果、衝突体からの荷重作用の遮蔽・低減のための装置・設備等の設置効果、を考慮した正味の衝撃力についての検討を進め、設計用の衝撃荷重としての類型化・定量化に取り組んできた^{12,13)}。

(1) 構造部材への衝撃低減

設計荷重の算出においては、衝突体が建築物や構造部材に直接衝突する場合を想定している。そこで、建築物の周辺に衝突防護対策部材を配置し、衝突エネルギーの低減や衝突自体の回避により、衝突荷重を低減する方法を考える。一例として、普通車がガードレールに前面衝突した場合の衝突シミュレーションにより、衝突防護対策部材による緩衝効果を検討する。

普通車とガードレールの衝突時の最大変形を図-10に、衝突荷重の時刻歴を図-11に示す。ガードレールの

変形により、剛壁への衝突に比べて車体の変形量が小さくなっていることが確認できる。ガードレールの変形による緩衝効果により、剛壁への衝突に比べて衝突により生じる衝突荷重の値が小さくなり、作用時間が長くなる。衝突速度が速くなり、衝突エネルギーが大きくなるに従い、ガードレールの変形は大きくなるので、緩衝材の変形量と衝突速度の低減量（あるいは、衝突荷重の低減量）の関係性を定量的に示すことで、衝突荷重の緩和効果を荷重評価に考慮することが可能となる。



(a) 剛壁への前面衝突 (b) ガードレールへの前面衝突
図-10 ガードレールと剛壁への自動車の前面衝突

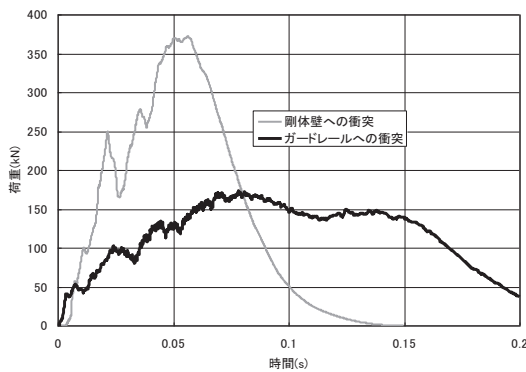


図-11 自動車の前面衝突による衝突荷重の時刻歴

(2) 構造安定性の確保

進行性崩壊を防止する場合、建物の衝突作用を受ける周辺の構造部材に大きな余裕度を付与する代わりに敷地計画等により衝突事象そのものを防止するなど、建物コスト合理化と進行性崩壊発生リスク低減の両者への対応が可能となる。例えば、駐車施設における自動車の衝突事故を考えれば、車両の走行可能なフロアレベル以外の階層や車両のアプローチが出来ない部位における耐衝撃設計は不要となる。耐衝撃設計を必要とする位置を限定し対策を施すことで、少ないコストで耐衝撃性能の向上（図-12）が期待できる。

8. まとめ

建築物の耐衝撃設計においては、今後は、衝撃作用という偶発的な事象についての発生確率の面からも類型化することが、合理的な耐衝撃設計を考える上で必要な取組みとなる。その上で、衝突や爆発に伴い、建築物の構造部材、非構造材に作用する荷重効果の低減を対策を積

極的に取り入れることで、より合理的な設計荷重の評価が可能となる。こうした考え方を具体的に示す取組みをさらに継続していく必要がある。

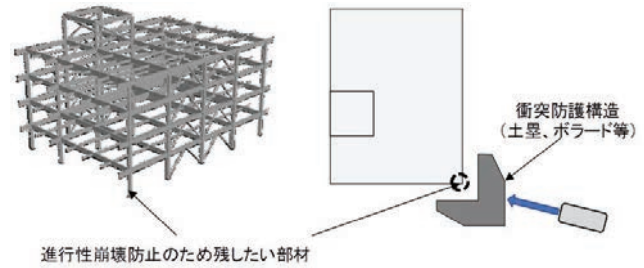


図-12 建物外の対策による耐衝撃性能の向上の例

参考文献

- 1) 日本建築学会：重要構造物の耐衝突・耐爆性能評価と防止対策，2006年度日本建築学会大会（関東）構造部門（応用力学）パネルディスカッション資料，2006.9.
- 2) Eurocode 1- Actions on Structures – Part 1-7: General actions – Accidental actions, BS EN 1991-1-7, British Standards, 2006.
- 3) 日本建築学会・土木学会：構造物の耐衝撃設計に関するシンポジウム，同資料，建築会館ホール（東京），2010.11.
- 4) 日本建築学会：建築物の耐衝撃設計を考える，2012年度日本建築学会大会（東海）構造部門（応用力学）パネルディスカッション資料，2012.9.
- 5) 日本建築学会：建築物の耐衝撃設計の考え方，日本建築学会，2015.1.
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2015）「11章 衝撃荷重」，日本建築学会，pp.593-626，2015.2.
- 7) 土木学会：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，2007.
- 8) Harris, R. J.: The investigation and control of gas explosions in buildings and heating plant, E&FN Spon Ltd, New York., 1983.
- 9) TM5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, US department of the Technical Manual, 1991.
- 10) Baker W.E. et al., Explosion hazards and Evaluation, Elsevier, Amsterdam, 1983.
- 11) P.D. Smith & J.G. Hetherington, Blast and Ballistic Loading of Structures, Elsevier Science, 1994.
- 12) 日本建築学会：建築物への衝撃作用による影響と被害の低減対策に関する研究会，同資料，建築会館（東京），2017.11.
- 13) 日本建築学会：衝撃作用低減への合理的アプローチ，2018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，2018.9.