

衝撃作用の発生確率の考え方と国際規格への位置付け

Concept of the occurrence probability of impact load and its introduction in the international standard

西田明美*, 向井洋一**, 濱本卓司***
Akemi Nishida, Yoichi Mukai, Takuji Hamamoto

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

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

*** 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)

Key Words: impact load, occurrence probability, Eurocode, ISO standard

キーワード: 衝撃荷重, 発生確率, ユーロコード, ISO 規格

1. はじめに

建築学会から2015年に出版された「建築物の耐衝撃設計の考え方」¹⁾では確率論的な記述は見られず、シナリオ型の決定論的な設計体系になっている。同年に出版された日本建築学会「建築物荷重指針・同解説(2015)」²⁾の「11章 衝撃荷重」においても、「衝撃荷重の基本値は年超過確率1% (再現期間100年に相当)の事象に対する荷重値とするが、現時点ではまだデータの蓄積が十分でないため確率論的な荷重組み合わせは行わない」という記述にとどまっている。しかしながら、いち早く衝撃荷重を構造設計における設計荷重として取り入れたユーロコード³⁾においても、現在ユーロコードの内容を発展・拡張しまでもなく発行が予定されているISO規格⁴⁾においても、衝撃荷重と耐衝撃設計は確率論をベースとした信頼性設計を前提に議論されている。したがって、国内の荷重指針等においても将来的に確率論的な視点の導入は避けて通れない流れとなっている。

衝撃荷重には、高速で移動する固体が別の固体に作用するときに発生する衝突と、急速に膨張する気体が固体に作用するときに発生する爆発がある。建築物に作用する衝突体には、自動車、列車、航空機、ヘリコプター、フォークリフトなどがある。いずれも事故が引き金になるが、そのあとに建築物に到達して初めて衝撃荷重となる。爆発は、衝突に比べると広範囲に影響が及び、影響範囲内にある建築物に衝撃荷重として作用する。このとき、閉鎖的な内部爆発か開放的な外部爆発か、燃焼速度が爆轟か爆燃か、さらに爆源の種類が何かにより建築物への影響は大きく異なる。

衝撃荷重には、衝突であれ爆発であれ、極めてまれに発生し、極めて短時間に極めて大きな荷重として作用す

るという特徴がある。さらに、近代になってから登場した人工荷重であるためデータの蓄積期間が短く、そのう え時代とともに巨大化するという傾向があり、地震や風のような自然荷重とは異なる視点が要求される。以下では、まもなく発行予定のISO規格ISO 10252「構造物の設計の基本—偶発作用」の概要を紹介するとともに、建築物の耐衝撃設計に確率論的アプローチを導入する際にまず問題となる衝撃荷重の発生確率について整理する。なお、本稿は文献5)-7)を基にまとめたものである。

2. ISO 規格の概要

2.1 はじめに

偶発作用に関するISO規格ISO 10252は、現在発行準備中である。日本からもISO 10252の国際委員会に参加し、2015年から規格の策定に協力してきた。冒頭で述べたように、ISO規格はユーロコードと同様、衝撃荷重と耐衝撃設計は確率論をベースとした信頼性設計を前提に議論されている。本規格は、基本的に人間の活動によって引き起こされる偶発作用の発生の可能性に関わる構造設計と評価のための要件とガイドラインを提供するものである。ただし、火災と(爆発等による)人為的な地震等は含まれないとしている。

ISO 10252の主な構成を以下に示す。

はじめに

- 1 スコープ
- 2 規範となる文献
- 3 用語と定義
- 4 記号と略語
- 5 一般原則と概念的アプローチ

- 6 衝突 (車両, 脱線列車, 船舶, 航空機, ヘリコプター, フォークリフト, 落下物等)
- 7 爆発 (内部爆発, 外部爆発等)
- 8 想定外作用

附属書A 衝突

附属書B 爆発

附属書C 衝撃設計

参考文献

本規格は、附属書が多く含まれていることが特徴的である。衝突については、衝突体として車両、脱線列車、船舶、航空機、ヘリコプター、フォークリフト、そして落石や土石流を含む落下物等を扱っている。ユーロコードでは扱っていない航空機を、「建築物の耐衝撃設計の考え方」では扱っていない船舶を含んでいるのが特徴的である。

爆発については、内部爆発、トンネル内の爆発、粉じん爆発、外部爆発が含まれている。ユーロコードでは内部爆発のみ、「建築物の耐衝撃設計の考え方」では内部爆発及び外部爆発のみを扱っているのに対し、より広範囲な対象を扱った事例が示されている。

本規格を策定するWG4の上部組織であるTC98では、ISO 2394「構造物の信頼性に関する一般原則」⁸⁾に基づき、確率論をベースとした信頼性設計を前提とした議論がなされている。本規格でも、ISO 2394に準拠し、リスクに基づいた意思決定と確率的な設計と評価に関する情報を提供している。ここでは、本編の一般原則と概念的アプローチを中心に述べる。

2.2 一般原則と概念的アプローチ

偶発作用に関わる一般原則と概念的アプローチとして、偶発作用の種類、概念的アプローチ、偶発作用のモデリング、偶発作用に伴う構造解析等が記述されている。

(1) 偶発作用の種類

人間の活動による偶発作用は、建物およびその他の土木構造物の設計および評価において考慮されるものとしている。これらの作用には次のものが含まれる。

- ・ 車両、列車、船舶、航空機、ヘリコプター、フォークリフト、落下物 (落石、土石流、クレーンからの落下物)、転倒クレーンなどの機械関連の衝突、タービンブレード等
- ・ ガス、塵、TNT、ダイナマイトなどの様々な原因による内部および外部爆発
- ・ 以下のような作用
 - 設計上のエラー、建設中のエラー、メンテナンスと修理活動に関連するエラー等
 - 妨害行為、破壊行為、テロなどの行為とその結果生じる作用等

偶発作用の発生に関する設計および評価の決定は、

ISO 2394の原則に従って行われる。本規格は、一連の関連作用について、事故シナリオ、荷重及び構造モデル、作用からの保護システム、および計算手順に関する情報を提供している。

(2) 概念的アプローチ

1) 目標信頼性レベル

ISO 2394に従い、破壊による影響、関連費用、破壊のリスクを減らすために必要な労力と手順のレベルを考慮し、適切な信頼度を選択する必要がある。

2) ストラテジー

偶発作用の特性を考えると、以下を防止または制限するために、設計のアプローチは構造的および非構造的の手段の組み合わせに焦点を当てなければならないと述べられている。

- ・ 作用の発生
- ・ 作用の程度
- ・ 構造物への荷重に関する作用の効果
- ・ さまざまな直接的および間接的な影響

ここで直接的な影響とは、作用によって直接引き起こされる破壊である。間接的な影響は、偶発作用自体に関係なく、直接的な影響 (破壊) によって引き起こされる影響のことをさす。直接的な影響と間接的な影響の比率は、robustness (冗長性) の尺度とみなすことができる (ISO 2394を参照)。多くの場合、ある程度の直接的な局所的損傷を受け入れることは経済的であり、また、バリアや衝撃吸収材などのデバイスは損傷の低減や回避に非常に役立つことが述べられている。

3) 想定内および想定外の作用

想定内の作用の場合、構造のクラスに応じて、物理モデル、信頼性の考慮、およびリスク解析に基づいた評価が実行されなければならない。考えられるすべての作用を十分に詳細に予測できるわけではないため、構造は十分な冗長性を備えている必要がある。想定外の作用では、任意の偶発作用による局所的破壊の発生に対して、建物が不安定となり崩壊にいたることがないように留意する必要がある。

4) 解析の種類

構造の機能と、破壊の場合に起こりうる影響に応じて、物理モデリングと信頼性とリスクの側面の両方に関して、解析の種類とレベルを選択するものとする。適用されるリスク/信頼性の側面に応じて、次のタイプの解析を使用できる (ISO 2394参照)。

- ・ 完全なリスク解析
 - ・ 定義済みの目標信頼性レベルに基づく確率的解析
 - ・ 作用または破壊特性の半確率的仕様
- 物理モデリングに応じて、次のタイプの解析を使用可能

である。

- ・荷重と構造の相互作用を含む非線形動解析
 - ・指定された外力または破壊特性に基づく非線形動解析
 - ・準静的作用または破壊特性を使用した静的解析
- 上記の各解析カテゴリ内で、さらに簡略化することができる。

リスクと信頼性の解析は、可能な限り統計データに基づいて行う必要がある。それが不可能な場合は、工学的判断に基づいた最適な推定を行う必要がある。

5) 影響度に基づく構造の分類

ISO 2394の分類システム附属書Fに従うものとする。このシステムは、影響度を5つのクラスで区別する。影響度のクラスはCC 1 (主に軽微な物的損害) からCC 5 (壊滅的な損失と多数の被害者) に分類されており、一般に、安全対策のレベルと適用される解析方法の両方の有用な指標となる。

信頼性の観点から、簡略化されたモデルは保守的である限り常に使用できる。保守の程度が受け入れられるかどうかは、意思決定者が決定する経済的問題による。

(3) 偶発作用のモデリング

1) 想定内作用

特定の偶発作用をもたらす衝突や爆発などのリスクのモデルは、以下に基づいている。

- ・ある時点と場所での起回事象
 - ・イベントに関係するエネルギー量およびその他の関連パラメータ
 - ・イベント、環境、構造間の物理的相互作用
- 上記の3つの側面はすべて、次のようにランダムな量/ランダムなプロセスとして扱われる。
- ・起回事象の発生は、空間と時間の単位あたりの強度 λ (t, x) のポアソン過程のイベントとしてモデル化されることが多い。 t は時間、 x は空間座標である。
 - ・エネルギーの量は、(多次元) 確率分布によって記述されるランダムな量として扱うことができる。
 - ・最後に、不確実な変数と特性を使用して、作用と構造応答の詳細を決定する物理的相互作用もモデル化できる。

これらの不確実性を考えると、建物の破壊確率 (一定の λ 及び非常に小さい確率の場合) は次のように表現できる。

$$P_f(T_{\text{ref}}) \approx \lambda T_{\text{ref}} \int_0^{\infty} P(f|U=u) f_U(u) du \quad (1)$$

ここで、

- λ 単位時間あたりの起回事象 (通過する車両など) の生起率
- T_{ref} 検討対象とする参照期間 (通常は1年または建物の使用期間)
- f 破壊事象
- $f_U(u)$ 起回事象が与えられた場合のハザードの衝

撃荷重の大きさ (エネルギー) u の確率密度関数

- U ハザードの重大度 (エネルギー量)
- u U の特定値

破壊確率は、構造とイベントの場所との間の距離に依存する。その場合、関心のあるエリアまたは範囲を明示的に統合する必要がある。複数のハザードがある場合は、考えられる相関を考慮して、破壊確率を追加するものとする。式(1)の表す意味については、第3項で詳しく述べる。

2) 想定外作用

想定外の偶発作用の場合、作用効果は特定部材の破壊としてモデル化されなければならない (例えば、特定の梁または柱の除去)。構造物の残りの部分については、比較的短い期間 T_e (たとえば、建物から人々を避難させる時間、または修理する時間として定義される) の間、構造物は通常考えられる様々な作用に耐えるものとする。破壊は、以下の式で示される規定の目標信頼性を超えてはならない。

$$P\{R < E \text{ in } T_e \mid \text{local damage}\} \quad (2)$$

ここで、

R : 偶発作用発生後の破壊した構造の耐力

E : 偶発作用発生後の荷重効果

この場合の目標信頼性は、偶発作用下でない建物の安全目標、検討中の期間 T_e (時間、日または月)、および検討中の局所破壊の発生可能性の推定確率と整合しなければならない。

3) 偶発作用の指標値

確率論的アプローチに基づいて、動的または準静的な偶発作用の適切な指標値 λ を導き出し、簡略化された半確率的設計および解析で使用することができる。統計的手法またはその他の手法に基づいて選択された偶発作用の指標値は、附属書AからCに示されている。本稿では、3.3項において具体的な指標値の例を示す。

(4) 偶発作用を伴う構造解析

偶発作用を伴う構造解析は、適切な範囲で以下を考慮しなければならない。

- ・幾何学的非線形効果
- ・非線形材料の挙動
- ・構造要素の完全な破壊の可能性
- ・動的効果
- ・作用と構造間の相互作用
- ・システムを保護する効果

簡略化された解析は、適切な正当化に基づいて行われる必要がある。たとえば、多くの場合、動的解析は準静的解析に置き換えることができる。

衝突の場合、衝突を与える物体（衝突体）、構造物、該当する場合は保護システムを含む統合モデルを使用することにより、最も正確な影響を得ることができる。解析を簡略化するために、衝突体または構造物のいずれかによって衝突エネルギーが完全に吸収されると（保守的に）仮定することができる。

爆発の場合、作用は気圧の突然の上昇と場合によっては風の影響によって特徴付けられる。次の相互作用の影響を考慮する必要がある。

- ・ 反射および乱流につながることで、爆発プロセスに影響を与える可能性のある構造/その他の障害物の存在
 - ・ 空気圧の変化につながる可能性のある（ガラス等の）脆弱な構造要素（偶発的または意図的）の崩壊
- 衝撃を与える物体および構造物の材料特性を決定するために、上限または下限の特性値を使用する必要がある。必要に応じて、ひずみ速度の影響も考慮する必要がある。

3. 衝撃荷重の発生確率の考え方

ここでは、ISO やユーロコード等の国際規格及び建築学会の書籍「建築物の耐衝撃設計の考え方」等に基づき、衝撃荷重の発生確率の考え方について整理する。

3.1 衝突による衝撃荷重の考え方

自動車、列車、航空機、ヘリコプター、フォークリフトはいずれも乗り物であり、建築物から離れたところを移動しているため、通常の場合で建築物への衝突が発生するようなことは考えられない。乗り物による建築物への衝突は偶発作用である。それがまれに起こってしまう原因は、運転中に機器故障が突発的に発生するかヒューマンエラーが引き金となって発生する事故である。しかし、事故が発生しただけで乗り物が建築物に衝突するわけではない。建築物に衝突するのは、さらに事故後に乗り物が建築物に向かって接近するルートをとった場合である。このため、衝撃荷重の発生確率とは、事故が発生する確率と乗り物が事故発生地点から建築物の位置へ到達する確率を乗じたものになる。事故の発生確率は小さく、発生したとしても建築物に到達する確率も小さい。このため、建築物に衝撃荷重が作用する確率は極めて小さくなる。

2015年の建築物荷重指針の改定まで、衝撃荷重は建築物の設計荷重とは考えられていなかった。しかし、都市化とともに、建築物が稠密に立ち並ぶようになり、地上でも空中でも乗り物の数（密度）が急増し、衝撃荷重の発生確率とその影響度（consequence）を無視できない時代に突入している。さらに、WTCビルへの航空機衝突のように、事故ではなく乗り物を使った意図的なテロも発生しており、建築物の設計荷重としての衝撃荷重の位置づけは大きく変化している。

乗り物が建築物に衝突すると、衝突時における衝突体の運動エネルギーは、衝突後の建築物および衝突体の運

動エネルギーと変形・破壊に伴うポテンシャルエネルギーに変換される。衝突という現象は衝突体と建築物の複雑な相互作用である。したがって、衝撃荷重の評価にあたっては、本来、建築物と衝突体を一体として扱う必要がある。しかし、ここでは問題を単純化して、建築物は剛で衝突後も移動や変形をすることはなく、衝突体のみが変形・破壊すると考えて衝撃荷重を評価する。すなわち、「建築物の耐衝撃設計の考え方」でも採用されているハードインパクトを仮定する。この仮定の導入は、衝突体と建築物の複雑な相互作用を無視することにほかならない。ただし、ハードインパクトの仮定は設計荷重の設定としては安全側の結果を与える。

3.2 衝突による衝撃荷重の確率論的表現

衝突体が建築物に衝突する確率は、単位時間当たりの生起率 λ のポアソン過程としてモデル化することができる。衝突体が建築物に衝突して衝撃荷重が発生し、建築物が破壊する確率は次式で与えられる。

$$P_f(T) \approx P_{\text{impact}}(T) \cdot \int_0^\infty P(F|M=m) f_m(m) dm \quad (3)$$

ここに、 $P_f(T)$ は期間 T における破壊確率、 $f_m(m)$ は衝撃荷重の大きさ M の確率密度関数、 F は破壊事象、 $P_{\text{impact}}(T)$ は期間 T における衝撃荷重の発生確率である。上式の $P_{\text{impact}}(T)$ を λT と置いたものが式(1)と同じであることを確認できる。以下においては、それぞれの乗り物の衝撃荷重の発生確率 $P_{\text{impact}}(T)$ を具体的に求めることにする。

3.3 衝突による衝撃荷重の発生確率

(1) 自動車衝突の発生確率

建築物が自動車道路の近くにある場合を考える。自動車が本来走行すべき道路を逸脱してしまうと、それが建築物に近い場所であれば自動車は建築物に衝突する可能性がある。道路を逸脱した自動車の状態を記述する主要な運動学的パラメータは、図-1に示すように、逸脱時の速度と角度である。逸脱後の自動車の進行方向は維持され、かつ減速度（負の加速度）は一定と仮定する。

ユーロコードでは、対象期間 T において、自動車が道路を逸脱し、減速しながら建築物に衝突する確率 $P_{\text{car}}(T)$ を次式で評価している。

$$P_{\text{car}}(T) = nT\lambda \cdot \Delta x \cdot P(v_0^2 > 2ar) \quad (4)$$

ここに、 n は単位期間当たりの自動車の通過数、 λ は自動車が逸脱する道路単位距離当たりの生起率、 Δx は自動車が建築物に衝突する可能性のある道路区間、 $P(v_0^2 > 2ar)$ は自動車が建築物に距離として到達する確率である。式(4)において、 nT は対象期間 T に建築物の近くを通過する自動車の総数、 $\lambda\Delta x$ は道路区間 Δx を通過する自動車が逸脱する確率になる。ISOでは生起率 λ の指標値を $10^7/\text{台}\cdot\text{km}$ としている。

ユーロコードでは道路橋脚に衝突する場合も考えている。建築物に衝突する確率は、道路橋脚に衝突する確率よりも明らかに小さくなると考えられる。オランダでは、自動車が建築物に衝突する件数は年間で100件程度である。建築物の総数を2,000,000棟として、年間衝突確率は 5×10^{-5} と推定されている。イギリスでは、自動車が住居に衝突する年間衝突確率は 2×10^{-6} 、ほかの建物で 6×10^{-6} と推定されている。

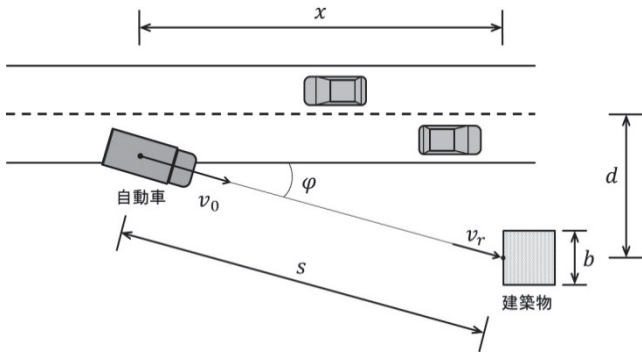


図-1 自動車事故による建築物への衝突

(2) 脱線列車衝突の発生確率

建築物が鉄道軌道の近くにある場合を考える。ユーロコードでは脱線列車衝突の発生確率に関する具体的な記述は見られない。しかし、脱線列車が建築物に衝突するプロセスは、図-2に示すように、基本的に自動車衝突の発生確率と同じように考えることができるので、対象期間 T の間に、脱線列車が建築物に衝突する確率は次式で与えられる。

$$P_{train}(T) = nT\lambda \cdot \Delta x \cdot P(v_0^2 > 2ar) \quad (5)$$

ここに、 n は単位期間当たりの列車の通過数、 λ は列車が脱線する線路単位長さ当たりの生起率、 Δx は列車が建築物に衝突する可能性のある線路区間、 $P(v_0^2 > 2ar)$ は脱線列車が建築物に距離として到達する確率である。式(5)において、 nT は対象期間 T の間に建築物の近くを通過する列車の総数、 $\lambda\Delta x$ は線路区間 Δx を通過する列車が脱線する確率である。建築物に衝突する可能性のある線路区間 Δx は次式により与える。

$$\Delta x = b / \sin \mu(\varphi) \quad (6)$$

ここに、 b は建築物の幅、 $\sin \mu(\varphi)$ は逸脱角度 φ の平均値である。ISOでは生起率 λ の指標値を 0.25×10^{-8} /本・kmとしている。

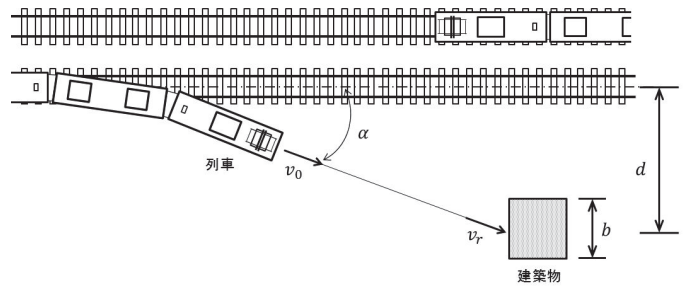
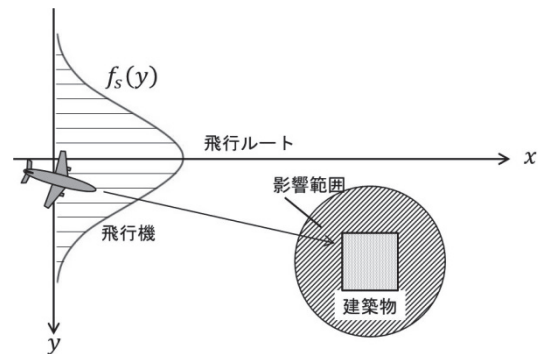


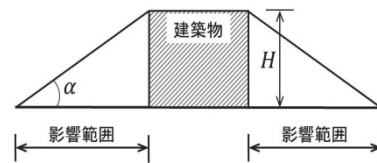
図-2 脱線列車による建築物への衝突

(3) 航空機衝突の発生確率

「建築物の耐衝撃設計の考え方」において、航空機の衝突を検討する建築物は高さ60m以上の高層建築物に限定されている。航空機の建築物への衝突確率の評価においては、建築物の上空を飛行するあらゆる航空機が対象になる。航空機の衝突確率を考えるときは、自動車や列車のように限定された道路や軌道上を移動する乗り物と大空という面的広がりの中を移動する乗り物との違いを認識する必要がある。国内外を問わず原子力発電所への航空機衝突の発生確率に関する検討は見られるものの、一般建築物を対象とした検討はほとんど行われていない。ここでは、図-3に示す高層建築物への航空機による衝突と、図-4に示す飛行場での離着陸事故による周辺建築物への衝突を考えることにする。



(a) 飛行ルートからの逸脱



(b) 影響範囲

図-3 飛行中の航空機事故による建築物への衝突

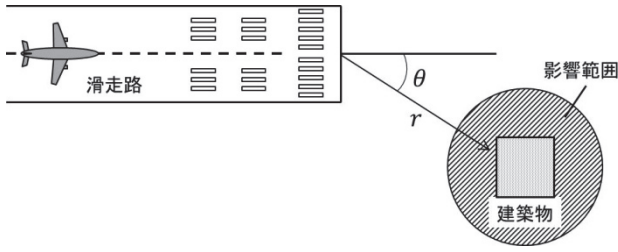


図-4 離発着時の航空機事故による建築物への墜落

1) 高層建築物への航空機衝突の発生確率

ユーロコードでは航空機の建築物への衝突は扱われていないが、「建築物の耐衝撃設計の考え方」では扱っていない船舶が橋脚や岸壁に衝突する確率についての記述が見られる。航空機も飛行ルートに幅が与えられていると考え、航空機が建築物に衝突する確率は、船舶が建築物に衝突する確率と同じように考えることができる。そこで、航空機の進行方向を x 座標、それに直交する方向を y 座標にとり、上空を通過する航空機の事故により高層建築物に衝突する確率を次式により与える。

$$P_{craft}(T) = nT(1 - P_a) \iint \lambda(x)p_c(x,y) f_s(y) dx dy \quad (7)$$

ここに、 n は単位期間あたりに飛行ルートを運行する航空機の数、 T は対象期間、 $\lambda(x)$ は位置 x における単位距離当たりの航空機事故の生起率、 $p_c(x,y)$ は位置 (x,y) における単位面積当たりの建築物への衝突確率、 $f_s(y)$ は位置 x における飛行ルートの y 方向確率分布、 P_a は人間の介入により衝突を回避できる確率である。積分領域は建築物及びその周辺の影響範囲である。式(7)は、飛行ルートの幅のどこにいるかを確率分布 $f_s(y)$ として表現している点に特徴がある。

一方、ISOでは、上空を通過する航空機の事故により建築物に衝突する確率として、現在、以下のような評価式が検討されている。

$$P_{craft}(T) = nT\lambda P_{na} A_b p_c \cdot f_s(y) \quad (8)$$

ここに、 n は単位期間あたりに飛行ルートを運行する航空機の数、 T は対象期間、 λ は航空機の位置 x には独立な単位距離当たりの事故の生起率、 A_b は影響範囲を含む建築物の面積、 $P_{na} = 1 - P_a$ は衝突を回避できない確率、 $f_s(y)$ は飛行ルートに直交する地上衝突の確率分布である。航空機事故の生起率 λ の参考値は、軍用機の場合 10^{-8} /機km、民間機の場合 10^{-9} /機kmとしている。

2) 飛行場での離着陸事故による周辺建築物への衝突

飛行場での離着陸事故により建築物に衝突する確率についてもユーロコードの船舶衝突の発生確率の考え方に基づき式(7)をベースに考える。原因は飛行場での離発着事故であるので、飛行場を中心としたある半径内の領域にある建築物が対象になる。このため、デカルト座標系 (x,y) ではなく極座標系 (r,θ) を用いることにする。極座標系 (r,θ) の原点は飛行場内の滑走路の端部とする。このと

き、飛行場での離着陸事故により建築物に衝突する確率は以下のように表すことができる。

$$P_{craft} = nT(1 - P_a)\lambda \iint p_c(r,\theta) rd\theta dr$$

$$= nT(1 - P_a)\lambda \cdot A_b p_c \quad (9)$$

ここに、 n は飛行場で離発着する単位期間あたりの航空機の数、 T は対象期間、 λ は離着陸時の事故の生起率、 $p_c(r,\theta)$ は位置 (r,θ) にある建築物への単位面積当たりの衝突確率、 P_a は人間の介入により衝突を回避できる確率、 A_b は影響範囲を含む建築物の面積である。確率分布 $p_c(r,\theta)$ は積分領域では一定 p_c として二重積分の外側に出し、 y 方向における航空機の位置の確率分布 $f_s(y)$ も必要ないので外している。

一方、ISOでは、飛行場での離着陸事故による建築物への衝突確率として次式が検討されている。

$$P_{craft}(T) = nTP_{na}\Lambda(r) \cdot A_b p_c \quad (10)$$

ここに、 n は飛行ルートを運行する単位期間当たりの航空機の数、 T は対象期間、 P_{na} は衝突を回避できない確率、 A_b は建築物を含む影響範囲の面積、 $\Lambda(r)$ は飛行場から半径 $r < R$ 以内における平均事故発生確率であり、以下のように与えられる。

$$\Lambda(r) = \bar{\Lambda}R/2r \quad (11)$$

ここに、 r は空港までの距離、 R は空港影響圏の半径、 $\bar{\Lambda}$ は空港から距離 $R=8\text{km}$ の円形領域内における墜落事故の発生確率である。この生起率 $\Lambda(r)$ に関する表現を除けば、式(9)と式(10)は同じ評価式になっている。

(4) ヘリコプター墜落の発生確率

ユーロコードやISOではヘリコプターの墜落確率に関する記述は見られない。「建築物の耐衝撃設計の考え方」では、ヘリコプターの墜落確率はヘリポートを有する建築物のみを対象にしている。ヘリポートを有する建築物における離発着時の墜落事故では、ヘリコプターの事故発生位置とヘリポートへの衝突位置は同じ（高度 h のみ異なる）になる。このため、事故発生位置とヘリコプターの墜落位置との関係を考える必要はなくなり、事故の生起率は建築物に墜落する確率に等しくなる。すなわち、ヘリコプター墜落の発生確率は次式で与えることができる。

$$P_{heri}(T) = nT\lambda \quad (12)$$

ここに、 n は単位期間当たりのヘリコプターの離着陸回数、 T は対象期間、 λ は離着陸時の事故の生起率である。

(5) フォークリフト衝突の発生確率

ユーロコードやISOではフォークリフト衝突の発生確率に関する記述は見られない。フォークリフトの衝突は、作業エリア内における建築物の構造材・非構造材だけでなく什器・設備等を含めて考える。フォークリフトは作業エリア内を自由に移動できると考えると、航空機衝突の発生確率で考えた式(7)における進行方向だけの事故

の生起率 $\lambda(x)$ を作業エリア内で面的にランダムに発生する事故の生起率 $\lambda(x,y)$ として読み変えることにより次式を得る。

$$P_{lift}(T) = nT \iint \lambda(x,y) p_c(x,y) dx dy \quad (13)$$

ここに、 n は単位期間当たりのフォークリフトの稼働数、 T は対象期間、 $\lambda(x,y)$ は位置 (x,y) における単位面積当たりの事故の生起率、 $p_c(x,y)$ は位置 (x,y) における単位面積当たりの衝突確率である。人間の介入により衝突を回避できる確率 p_a は0とした。

式(13)において、事故の生起率 $\lambda(x,y)$ と衝突確率 $p_c(x,y)$ が位置 (x,y) にかかわらず一定と考え、 $\lambda(x,y) = \lambda$ 、 $p_c(x,y) = p_c$ とおくと次式になる。

$$P_{lift}(T) = nT\lambda A p_c \quad (14)$$

ここに、 A は作業エリアの全面積である。

3.4 内部・外部爆発の発生確率

内部・外部爆発の発生確率は衝突の発生確率とは異なるアプローチにより求める。爆発現象が構造物に衝撃荷重として作用するシーケンスは、事故発生地点と構造物との位置関係だけでなく、事故発生前の抑止対策、事故の発生プロセス、事故時の周辺環境の状況など、多くの要素が時系列的に関与し複雑になる。このような場合は、多様なシナリオの相互関係を一目で把握できるイベントツリーが有効である。イベントツリーは、事故の発端となる初期事象を出発点として事故が拡大していくシーケンスを枝分かれ的に展開しながら表現する手法である。具体的なイベントツリーの例を図-5に示す。初期事象の発生は、平常時と地震や強風による非常時に分けられるが、ここでは平常時に限定して考える。

その後の事象の分岐確率の推定にはフォールトツリーを用いる。フォールトツリーは、対象となる事象を頂上事象として、その原因となる要因事象をANDゲート(事象Aと事象Bの両方が起こる)とORゲート(事象Aと事象Bのどちらかが起こる)を使いながらトップダウン的に展開する手法である。フォールトツリーの末端事象の発生確率を与え、ANDゲートとORゲートに応じて加算・乗算することにより頂上事象の発生確率を算出する。具体的なフォールトツリーの例を図-6に示す。

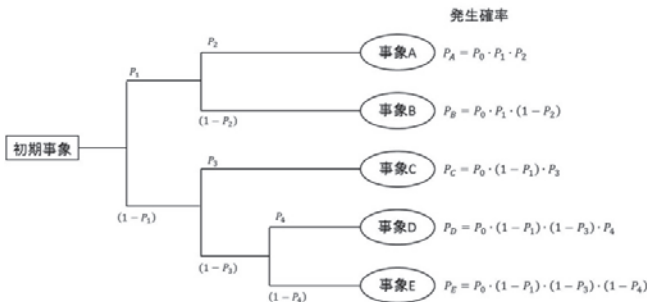


図-5 イベントツリーの例

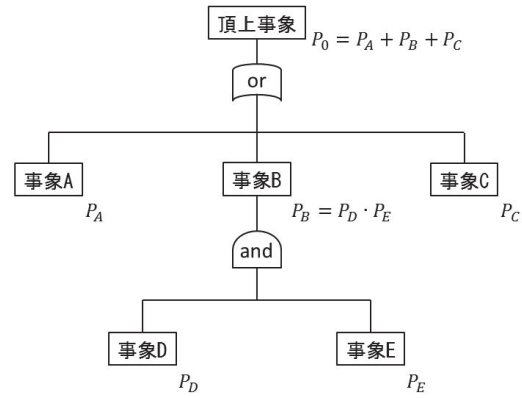


図-6 フォールトツリーの例

一方、ISOでは爆発の発生確率を以下の式で表している。

$$P_{expl} = 1 - \exp(-\lambda T) \approx \lambda T \quad (15)$$

T は対象期間、 λ は単位時間当たりの事故の生起率である。ここで、 λ の値は、爆発のタイプによって異なる。一部建物での内部爆発については、英国で実施された広範な調査で興味深いデータが得られている。 λ の値として、住居では年間 2×10^{-6} 、店舗や工業ビルでは年間6から 14×10^{-6} が示されている。米国では、住宅の建物でより高い値(18×10^{-6})が得られている。オランダでは、毎年約20の爆発が観測されており、住居/建物あたりの平均として年間 $\lambda \approx 5 \times 10^{-6}$ とされている。ただし、発生確率は、小さな爆発(損傷がほとんどない)を考慮するかどうかによっても異なる。

3.5 想定外事象に対する考え方

衝撃荷重に対する設計において、想定内作用だけでなく想定外作用を考慮することは大切である。想定外作用の場合、例えば衝撃荷重を受けて損傷した梁部材や柱部材を取り除くといったように、作用荷重の大きさには依存しない損傷状態を設定してモデル化する必要がある。この場合、損傷部材を取り去った残存部分が、少なくとも必要な短期間(たとえば、人々が建築物から避難するのに要する期間、あるいは建築物を修復するのに要する期間)は通常時に作用する荷重のもとで十分な安全性を維持できなければならない。すなわち、局所的な損傷(local damage)が生じた状態であっても、少なくともある短期間 T は建築物の耐力が荷重効果を十分に上回る必要がある。すなわち、確率論的に表現すると次式で表すことができる。

$$P(R < S \text{ in } T | \text{local damage}) < P_{target} \quad (16)$$

ここに、 R は耐力、 S は荷重効果、 P_{target} は規定した目標確率である。上式は式(2)と対応する。

ユーロコードやISOにおいても同様に、想定外事象に対する考え方が示されている。

4. 結び

本稿では、ユーロコードやISO規格等の流れに沿う形で、衝撃荷重の原因となる衝突現象と爆発現象の発生確率に関する現時点における整理を試みた。衝突現象に関しては、自動車、列車、航空機、ヘリコプター、フォークリフトが建築物に衝突する確率を評価する考え方を示した。一方、爆発現象に関しては、時系列的に多くの要素が複雑に関与することになり衝突荷重のような共通の枠組みを与えることが難しいことから、爆発原因別に事故発生から衝撃荷重が発生するまでのシーケンスをイベントツリーとして表現し、フォールトツリーにより分枝確率を求めて爆発による衝撃荷重の発生確率を評価する方法を用いることにした。

設計荷重や構造設計に確率論的アプローチを導入するには、方法論だけでなく実際の統計データの蓄積が不可欠である。衝撃荷重は近代になってから登場した人工荷重でありデータの蓄積期間が短い上に、自然荷重と異なり時代とともに巨大化する傾向がある。このため、統計データの蓄積が進まず、確率論的な視点の導入によっての大きな障壁になっている。この問題を克服するためには、ローカルな統計データではなく全地球的な空間スケールで統計データを蓄積することが望まれる。その第一歩として、まずは衝撃荷重に関する国内のデータベースを構築することが必要と考えられる。

本規格が発行されることで、衝突や爆発による衝撃荷重に対する衝撃設計に関する考え方が広く普及すること

が期待される。普及とともに、偶発作用の発生確率の元となる基礎データの蓄積が進むことを期待したい。

参考文献

- 1) 建築物の耐衝撃設計の考え方, 日本建築学会, 2015.1.
- 2) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2015.3.
- 3) Eurocode 1 – Action on Structures -Part 1-7: General action – Accidental actions, BS EN 1881-1-7, British Standards, 2006
- 4) ISO/DIS-10252:2019(E): Bases for Design of Structures - Accidental actions
- 5) 濱本卓司, 衝突・爆発による衝撃荷重の発生確率, 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「衝撃作用低減への合理的アプローチ」, 2018.9.
- 6) 濱本卓司, 衝突・爆発に伴う衝撃荷重の発生確率の合理的評価に向けて, シンポジウム「耐衝撃設計の合理化に向けて—現状と新しい流れ, 今後の課題—」(日本建築学会衝撃低減対策小委員会・土木学会構造工学委員会共催), 2019.11.27-28.
- 7) 西田明美, ISO-Accidental Actions策定の概要, シンポジウム「耐衝撃設計の合理化に向けて—現状と新しい流れ, 今後の課題—」(日本建築学会衝撃低減対策小委員会・土木学会構造工学委員会共催), 2019.11.27-28.
- 8) ISO 2394: General principles on reliability for structures, 4th edition, 2015.