大規模災害のリスクと評価例 --爆破テロ---

市野 宏嘉, 別府 万寿博

爆破テロへの対策は喫緊の課題であるが、爆破テロの脅威にさらされるすべての構造物に対策を施すことは不 可能であり、限られた資源での対処が必要となる.したがって、対策の優先順位を適切に定めるとともに、費用 対効果を努めて大きくすることが求められる.このためにリスク評価が重要な役割を果たす.本稿では、建築構 造物に対する爆破テロによるリスクを算定する基本的な手順を紹介する.

キーワード:爆破テロ,リスク評価,等価1質点系モデル

1. はじめに

世界各地において爆破テロによる広範囲にわたる建 築物などの構造物の破壊や死傷者の発生といった大 きな被害がしばしば報告されており,爆破テロへの 対策は喫緊の課題である.爆破テロは天災とは異な り,発生する場所と爆発の規模は行為者の意思に委 ねられているため,それらの予測が困難であるとい う特徴がある.このため,爆破テロの脅威にさらされ るすべての構造物に対策を施すことは不可能であり, 限られた資源での対処が必要となる.したがって,対 処の優先順位を適切に定めるとともに,費用対効果 を努めて大きくすることが求められる.その費用対 効果を分析するためにリスク評価が重要な役割を果 たす.

リスク評価を爆破テロに対して適用する場合,ハザー ドの評価において行為者の意思が寄与する部分も統計 的に取り扱われる点が大きな特徴となる.ここでは, ある建築構造物(以下,単に「構造物」と呼ぶ)に対 する爆破テロによるリスクを算定する基本的な手順を 紹介する.

2. リスク評価の流れ

図1に、リスク評価の手順を示す.まず、ある規模 の外力が発生する頻度(ハザード H(w))を評価する. その一方で構造物の脆弱性、すなわち、ある規模の外 力によって生じる構造物の被害の程度(フラジリティ)

いちの ひろよし, べっぷ ますひろ 防衛大学校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 ichino@nda.ac.jp beppu@nda.ac.jp



図1 リスク評価の手順

を評価する. このフラジリティを基に,構造物の被害の程度を損失額(ロスL(w))として評価する. この損失の期待値が「リスク R」であり,次式で表される.

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}(w) \times \mathbf{L}(w) \tag{1}$$

ここで「外力」とは、構造物が受ける作用を「力(あ るいは圧力)」として評価したものである、爆破テロに よって生じる外力の規模は爆薬量との相関が強いため、 外力を爆薬量 w により表すと取扱いが容易となる。

リスクを求める手順は以下のとおりとなる.まず, 過去に発生した爆破テロの発生頻度と死者数に基づ いて,爆破テロに関する超過確率と爆薬量 w の関係 であるハザード H(w)を求める.次に,建築構造物 を柱,はりおよび床スラブ部材に分割し,これらの応 答解析を行うことで爆破テロの際の被害レベルごと の損傷確率と爆薬量の関係,すなわちフラジリティ を求める.さらに,それぞれの被害レベルに対する損 失額を求め,損失額と爆薬量の関係であるロス L(w) を求める.最後に,爆薬量 w を媒介変数として爆破 テロの超過確率と損失額の関係であるリスク R を求 める.



図2 爆破テロの年発生頻度と死者数との関係

3. ハザードの評価

爆破テロにおける爆薬量を直接予測することは困 難なので、まず、全世界における爆破テロの発生頻 度(実際には超過確率)と死者数の関係を求める、次 に、その死者数から爆薬量を類推するという手順を 踏む、

爆破テロに関する統計データ [1] から,2000 年か ら2014 年の15 年間に発生した全世界の爆破テロ (35,701 件) に関して死者数別に発生件数を整理した. 15 年間の死者数別の発生件数を15 で割ることによ り,図2に示す各々の死者数の爆破テロの年発生頻度 f_w(n)(件/年)を得て,爆破テロによる死者数n(人) との関係を次式で近似した.

$$f_w(n) = 1,530n^{-2.13} \tag{2}$$

次に,1年間においてある死者数を超える爆破テロが 発生する頻度(年超過頻度)を求める.図3に,年超 過頻度 f_{we}(n)(件/年)と死者数n(人)との関係を 示し,次式で近似した.

$$f_{we}(n) = 1,770n^{-1.12} \tag{3}$$

年超過頻度と死者数の関係はばらつきのあるデータから求めることになる.そのため,式(3)は統計値より も安全側の値を示すように係数を設定した.

次に, 死者数を爆薬量へと変換するため, 清野ら [2] による過去のテロ統計から得られた爆薬量 w (kg) と 死者数 n (人) に関する次の関係式を用いる.

$$w = 5.55n \tag{4}$$

式 (3) および式 (4) から,ある爆薬量 w (kg) による 爆破テロの年超過頻度 fwe(w) (件/年)は次式で近似 できる.



$$f_{we}(w) = 12,100w^{-1.12} \tag{5}$$

図4に,全世界における爆破テロの年超過頻度と爆薬 量の関係,すなわち式(5)を示す.福島と矢代[3]は, 年発生頻度と爆薬量の関係における勾配は,世界全体 と対象構造物において等しいと仮定しており,ここで もこれを踏襲する.ここで,対象構造物に対して「爆薬 量20kg以上の爆破テロが少なくとも100年に1度は 起きる(年超過頻度は0.01件/年)」と設定すると,対 象構造物における相対頻度入は以下のように求まる.

$$\lambda = \frac{0.01}{f_{we}(20)} \approx 2.37 \times 10^{-5} \tag{6}$$

よって,対象構造物においてある爆薬量 w (kg) によ る爆破テロの年超過頻度 f_{te}(w) (件/年) は次式で求 められる.

$$f_{te}(w) = \lambda f_{we}(w) = 0.29w^{-1.12} \tag{7}$$

式(7)を図4に示す.これをそのままリスク評価に 用いることもできるが、縦軸を無次元の年超過確率に 変換しておくと、地震などのほかの災害との比較評価 に便利である.ポアソン過程による年超過確率への変 換を行うと、リスク評価の対象とする期間(基準期間)

508 (26) Copyright C by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

オペレーションズ・リサーチ

N年間における超過確率 $P_N(w)$ は、次式から求めら れる.

$$P_N(w) = 1 - [1 - P_1(w)]^N$$
(8)

ここに, P1(w) は爆薬量 w (kg) 以上の爆破テロが1年 間に少なくとも1回は発生する確率(年超過確率)で、

$$P_1(w) = 1 - e^{-f_{te}(w)} \tag{9}$$

である.図5に、対象構造物における爆破テロの年超 過確率と爆薬量の関係を示す.



図5 爆破テロの年超過確率と爆薬量の関係

4. フラジリティの評価

4.1 構造物および爆発荷重のモデル化

ここでは、ある爆薬量の爆発が生じたときの対象構 造物の損傷確率を求める.対象構造物の条件を図6に 示す.対象構造物は幅,奥行きが35m,高さが12m の鉄筋コンクリート造3階建てとする.この構造物は 柱 (C), はり (B), 床スラブ (S) および窓ガラス (G) から構成されるものとし、壁は考慮しない. 部材の境 界条件は、柱およびはりは両端固定、床スラブは周辺 固定の2方向スラブとした. コンクリートの圧縮強度 は 24 N/mm², 引張強度は 2.4 N/mm² とした. 部材 数 N は、それぞれ $N_C = 108$, $N_B = 180$, $N_S = 150$, $N_G = 60$ とした、爆発を受ける構造物の損傷確率を 求めるには、構造物の各部材が爆発によってどの程度 損傷されるのかを把握する必要がある. 損傷の程度は, 柱やはり、床スラブであれば部材の最大変位から把握 できる。なお、窓ガラスは圧力がある値に達した際に 割れる(=損傷する)と考える.

柱、はりおよび床スラブ部材の最大変位を求める際 に用いられる簡易的な方法として,等価1 質点系モデ ルを用いた応答評価がある.その概念図を図7に示す. この評価法は、外力として爆発による分布荷重が作用

	部材		はり	床スラブ	
柱: $N_{c}=36 \times 3=108$ はり: $N_{B}=60 \times 3=180$	部材姿図	N=500kN H D D			
	部材寸法 (m)	$B0.7 \times D0.7 \times H4.0$	$B0.4 \times D0.8 \times L6.3$	$a3.15 \times b6.6 \times D0.18$	
床スフフ: N _c =50×3= 150	積載荷重	1.8 kN/m ²	1.8 kN/m ²	2.9 kN/m ²	
	主鉄筋	12-D25	引張:5-D25 圧縮:5-D25	上端筋:D10-@200 下端筋:D10-@200	
$N_G = 20 \times 3 = \underline{60}$	主鉄筋降伏強度F _y	345 N/mm ²	345 N/mm ²	295 N/mm ² 引張強度440N/mm ²	
	せん断補強筋	D13@200 (p _w 0.18 %)	D13@200 (p _w 0.32 %)	-	
	せん断補強筋降伏強度	295 N/mm ²	295 N/mm ²	_	

図6 対象構造物の条件



2021 年 8 月号

、爆発位儀 (0,0,0)

хX



図8 爆風圧のモデル化

する部材を, ばね-質点のモデルに置換して質点の運 動方程式, たとえば

$$K_{LM}M\ddot{y} + k_By = F(t) \tag{10}$$

を解いて $y = v_{x=l/2}$ として部材の変位 $v_{x=l/2}$ を求め るものである.このとき,部材の質量 M,最大荷重 Fおよび曲げ剛性 k_B は,それぞれ換算係数 K_M , K_L に より,質点の質量 $M_e = K_M M$,集中荷重 $F_e = K_L F$ およびばね定数 $k_e = K_L k_B$ にそれぞれ等価に変換さ れる.また $K_{LM} = K_M / K_L$ である.これらの換算 係数 K は,実際の部材とばね – 質点モデルで運動エ ネルギーおよび外部仕事が等価であるとして決定され, その値は支持条件や荷重条件により異なる [4].

式 (10)の解を得るためには、F(t)および k_B を決める必要がある。爆風圧~時間関係を図 8 中の直角三角形状と仮定すると、最大圧力(受圧面積を乗じて最大荷重を得る)と力積がわかればF(t)が得られる。構造物の各位置における圧力の大きさおよび力積は、爆薬量のほか、爆薬の種類、爆薬と構造物との距離などの条件によって異なり、すでにこれらの条件から圧力と力積を求めるチャートが公開されている [5]ので、これを利用する。なお、ここでは爆発位置は固定し、爆薬量は TNT 爆薬換算 1~10,000 kg で 37 点を設定する。

抵抗関数 $k_{By} = R_e(y)$ は、弾性限界点と降伏点で 折れるトリリニア型と仮定する、弾性限界および降伏 点での曲げモーメント M_B を算出し、それに対応する R_e を得て剛性 k_B を求める、 M_B は部材の寸法、材料 の強度、鉄筋量、支持(固定)条件の影響を受ける、こ の計算自体は爆発特有のものではなく鉄筋コンクリー ト構造物の設計において一般的に用いられる手法であ るので既往の知見を参考にすればよい、表1に、以上 の条件および手順を適用して求めた部材ごとの最大抵 抗力、剛性および弾性限界変位を示す。

表1 各部材の最大抵抗力

部材	最大抵抗力	剛性	弾性限界変位
柱	$2,200\mathrm{kN}$	$135{,}300\mathrm{kN/m}$	$16.3\mathrm{mm}$
はり	$1,900\mathrm{kN}$	$56{,}600\mathrm{kN/m}$	$33.6\mathrm{mm}$
床スラブ	$1,850\mathrm{kN}$	$100{,}000\mathrm{kN/m}$	$18.0\mathrm{mm}$

表2 各部材の損傷区分

		小損傷	中損傷	大損傷	甚大損傷
		(i' = 1)	(i'=2)	(i' = 3)	(i' = 4)
柱・はり	材端回転角	降伏耐力	$0.010 \sim$	$0.017 \sim$	0.033~
	θ (rad)	~ 0.010	0.017	0.033	0.000 -
床スラブ	材端回転角	降伏耐力	$0.010 \sim$	$0.033 \sim$	$0.067 \sim$
	θ (rad)	~ 0.010	0.033	0.067	0.007
窓ガラス	店炫阻炅值	最大圧			
	心石政介胆	$7\mathrm{kPa}{\sim}$			



図9 抵抗関数の例(床スラブ)

4.2 部材および窓ガラスの損傷判定基準

部材の損傷レベルは材端回転角の大小から判定する [6]. 1 質点系モデルによる運動方程式から最大応答 変位 ym を求め,材端回転角 θ を算出した.

$$\theta = \frac{2y_m}{L} \tag{11}$$

ここに, θ : 材端回転角 (rad), y_m : 部材の最大応答変 位 (m), *L*: 部材の長さ (m) である.

表2に,鉄筋コンクリート部材の損傷レベルと材端 回転角の関係を示す.窓ガラスは、「小損傷」ですでに 割れた状態であるので、「小損傷」についてのみ損傷度 判定を行った.文献[6]には、材端回転角の大きさに 対応する具体的な部材の損傷状態が説明されている. 図9に、床スラブ部材を代表例として曲げ破壊に対す る抵抗関数と損傷レベルの関係を示す.この図は、前 項で求めた各抵抗関数をバイリニア型に変換したうえ で,表2の損傷レベルを示す応答値を対応させたもの である.



表3 構造物全体の損傷レベルと各部材の損傷との対応

		1-4	NER A IL			
	構造物全体の被害レベル					
	微被害	軽被害	小被害	中被害	大被害	甚大被害
	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6
柱・はり			小損傷	中損傷	大損傷	甚大損傷
床スラブ		小損傷	中損傷	大損傷	甚力	大損傷
窓ガラス	小損傷	中損傷	大損傷		甚大損傷	1

4.3 部材種別ごとのフラジリティ評価

爆薬量 w の爆発荷重に対する各部材別の損傷確率 f_{i's}(w) は次式のように算定する.

$$f_{i's}(w) = \frac{N_{i'sw}}{N_s} \tag{12}$$

ここに、i':損傷レベル(i' = 1: 小損傷, i' = 2: 中損傷、<math>i' = 3:大損傷、i' = 4:甚大損傷)を表す変数、 s:部材種別(柱(C), はり(B), 床スラブ(S), 窓ガ ラス(G))を表す記号、 $N_{i'sw}$:損傷レベルi'以上と なる部材の個数、 N_s : 部材種別sの総数である、たと えば、はり(総部材数180)において、ある爆薬量wの爆発が生じた際に小損傷(i' = 1)以上となる点が構 造物全体で 60 箇所あった場合、小損傷以上となる損 傷確率は $f_{1B}(w) = 60/180 = 0.33$ と求める。

上記の計算を爆薬量1kg~10,000kgの37ケースに 対して繰り返すと、部材種別ごとのフラジリティカー ブが得られる.図10には代表例として床スラブのフ ラジリティカーブを示す.

4.4 構造物全体のフラジリティ評価

各部材種別の損傷レベルから構造物全体の被害レベ ルを判定するために、表3に示す各部材種別の損傷レ ベルと構造物全体の被害レベルの関係[6]を用いた. ここで、部材種別によって、構造物の被害レベル*i*に 対応する損傷レベル*i*'は異なっている.たとえば、構 造物全体で中被害となるときに対応する損傷レベルは、 主要構造部材(柱・はり)では「中損傷」となるが、補



図11 構造物全体のフラジリティカーブ

助構造部材 (床スラブ) では「大損傷」となる. また, 「微被害」については,窓ガラスの損傷レベルのみと 関係づける. iを構造物全体の被害レベルを表す変数 (i = 1: 微被害, i = 2: 軽被害, i = 3: 小被害, i = 4:中被害, i = 5: 大被害, i = 6: 甚大被害) として,ある爆薬量 <math>w の爆破テロによって,構造物全体の被害レ ベルが i 以上となる損傷確率 $F_i(w)$ は次式のように求 められる.

$$F_i(w) = \frac{\sum g_s \cdot N_{i'sw}}{\sum g_s \cdot N_s} \tag{13}$$

ここに, g_s は各部材の重要度係数, すなわち部材種別ご との構造全体への影響度である.ここでは, 柱部材, は り部材および床スラブ部材について, それぞれ 3, 2 お よび1とした.

構造物全体のフラジリティカーブは,各被害レベル に対して式 (13) から求めることができる.得られた結 果を図 11 に示す.

5. ロスの評価

ロス評価では、ある爆薬量 w によって構造物が被る 被害レベルiごとに、建物損失額 C_{Bi} および人的損失 額 C_{Hi} を算定し、合計損失を求める、そして、被害レ ベルの割合を重みとした加重和を求めることで、その 爆薬量に対する損失を求める、すなわち、ある爆薬量 wの爆破テロにおけるロス L(w) は次式で与えられる、

$$L(w) = \sum_{i=1}^{5} C_i (F_i(w) - F_{i+1}(w)) + C_6 F_6(w) \quad (14)$$
$$C_i = C_{Bi} + C_{Hi} \quad (15)$$

爆薬量 w に対し,対象構造物と人が被る損失を算定 する.算定の基礎となる対象構造物の価格および人的 損失の価格への換算,それらの被害レベルとの関係の 設定に決まったルールはなく、実情に沿って適宜決め る.以下はその一例である.

ここでは、対象構造物の建物価格を 82 万円/m² と し、その内訳を表 4 のとおり設定した. 被害レベル *i* と建物損失額 *C_{Bi}* の関係の一例を表 5 に示す. たとえ ば、柱およびはり部材の損失額については、小被害の ときに軽微な補修費として調達価格の 20%とし、これ 以上の被害レベルに対しては徐々に増大させて甚大被 害のときに 100%となるよう設定した. これらのパー センテージは、項目ごとに異なる値を設定でき、被害 レベルに応じた各項目の補修の難易の違いなどを反映 できる.

次に,構造物の被害レベル *i* と人的損失 *C_{Hi}*の関係 を表 6 のように設定した.ここでは,まず構造物の被 害に対し何らかの人的被害が発生すると考え,表 5 の 再調達価格に対する割合 *C_{bi}* と同数の人的被害発生率

表4 各部材などの価格および所在人数

	設定項目	設定値	備考
	建築面積	$1,225\mathrm{m}^2$	$35\mathrm{m}\times35\mathrm{m}$
	延床面積	$3{,}675\mathrm{m}^2$	建築面積 × 3 階
	調達価格	3,000,000 千円	約 82 万円/m ²
内訳	①柱・はり	1,200,000 千円	調達価格 × 0.4
	②床スラブ	900,000 千円	調達価格 × 0.3
	③窓ガラス	300,000 千円	調達価格 × 0.1
	④設備類	600,000 千円	調達価格 × 0.2
	構造物内人数	300 人	$12.3{ m m}^2$ /人

を設定した.各負傷レベルの割り当てについては,重 傷者は軽被害以上で発生すると考え,各被害レベルに 対して構造物内の人数の5%(軽被害)~60%(甚大 被害)を割り当てた.死亡者は甚大被害において構造 物内人数の20%とし,被害レベルが減少するにしたが い半減するように設定した.軽傷者は,全被害者から 重傷者と死亡者を差し引いて求めた.人的損失は軽傷 (治療に1か月未満),重傷(治療に1か月以上),死亡 の3段階で設定した.表6に例示するように,死亡の 場合は死亡した人員の経験年数を有するまでに支払わ れる給与,軽傷および重傷の場合は通院や入院の間の 代替要員の給与相当額とした.

表5および表6に基づいて,被害レベル*i*における 建物損失額*C_{Bi}*と人的損失額*C_{Hi}が*求められるので, 式(14)および式(15)を用いて爆薬量*w*の爆破テロ におけるロス*L*(*w*)を求めることができる.図12に, 対象構造物におけるロスカーブを示す.以上のように, 爆破テロによる構造物の被害レベルと損失の関係を設 定することにより,経済的な指標を用いて損失を評価 することができる.

6. リスクの評価

これまでに算出したハザード,フラジリティおよび ロスを用いて,リスクカーブを作成する.リスクカー ブは,損失の年超過確率と損失額の関係を示したもの であり,図5に示す基準期間1年における超過確率と 爆薬量の関係と,図12に示すロスカーブから爆薬量

表5 被害レベルに対応する各部材などの損失額

	損失額(千円)【割合】					
	微被害 $i = 1$	軽被害 $i = 2$	小被害 $i = 3$	中被害 $i = 4$	大被害 $i = 5$	甚大被害 $i = 6$
①柱・はり部材	0	0	240,000 [0.2]	360,000 [0.3]	600,000 (0.5)	1,200,000 [1.0]
②床スラブ部材	0	180,000 [0.2]	360,000 [0.4]	540,000 [0.6]	900,000 [1.0]	900,000 [1.0]
③窓ガラス	60,000 [0.2]	120,000 (0.4)	240,000 [0.8]	300,000 [1.0]	300,000 [1.0]	3,000,000 [1.0]
④設備類	60,000 (0.1)	180,000 [0.3]	360,000 [0.6]	480,000 [0.8]	600,000 [1.0]	600,000 [1.0]
建物損失額 CBi	120,000	480,000	1,200,000	1,680,000	2,400,000	3,000,000
再調達価格 に対する割合 <i>C_{bi}</i>	0.04	0.16	0.4	0.56	0.8	1

表6 被害レベルに対応する人的損失額

	損失額(千円)【割合】					
	微被害 $i = 1$	軽被害 $i = 2$	小被害 $i = 3$	中被害 $i = 4$	大被害 $i = 5$	甚大被害 $i = 6$
人的被害発生率	0.04	0.16	0.4	0.56	0.8	1
軽 傷	2,520 [0.04]	6,930 [0.11]	17,640 [0.28]	19,530 (0.31)	18,900 [0.30]	12,600 [0.20]
重傷	0	16,500 [0.05]	33,000 [0.10]	66,000 [0.20]	132,000 (0.40)	198,000 [0.60]
死 亡	0	0	327,600 [0.02]	819,000 [0.05]	1,638,000 (0.10)	3,276,000 [0.20]
人的損失額 C_{Hi}	2,520	$23,\!430$	378,240	904,530	1,788,900	3,486,600





を媒介変数として得ることができる.図 13 に,対象 構造物における爆破テロに関するリスクカーブを示す. リスクカーブを用いると,たとえば年超過確率が 1% および 0.1%の場合の爆破テロに対する合計損失額は それぞれ約 1.3 億円および約 3.5 億円と算定されるよ うに,発生確率の異なる爆破テロに関するリスクを損 失額によって評価することが可能となる.

7. おわりに

本稿では、爆発災害の代表例として爆破テロを選び、

建築構造物に対する爆発災害のリスク評価の基本的な 手順を示した.紙面の都合上,本稿では手順の概略の 紹介にとどめたが,文献 [7] には評価の過程が詳細に 記述されている.また,リスクの算出に際して使用し たハザード,フラジリティおよびロスの算出にあたっ ては,より実際に即した条件を与えることで評価の高 度化が可能である.

謝辞 本稿をまとめるにあたり, 元防衛大学校理工 学研究科後期課程学生の永田真氏には多大なご助力を いただきました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- [1] National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism, Global Terrorism Database, http://www.start.umd.edu/gtd/(2021 年 4 月 30 日 閲覧)
- [2] 清野純史,岡本直剛, Charles Scawthorn, "爆弾テロのリ スク評価手法について,"社会技術研究論文集, 4, pp. 84–93, 2006.
- [3] 福島誠一郎,矢代晴実,"人為災害リスクの定量化に関する基礎的研究,"地域安全学会梗概集,23, pp. 114–117,2008.
- [4] P. D. Smith and J. G. Hetherington, *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Elsevier Science Ltd, 1994.
- [5] U. S. Department of Defense, Unified Facilities Criteria (UFC) UFC-3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Chapter 2, 2014.
- [6] 日本建築学会、『建築物の耐衝撃設計の考え方』、pp. 71-116, 2015.
- [7] M. Nagata, M. Beppu, H. Ichino and H. Yashiro, "Proposal on risk assessment of reinforced concrete structures subjected to explosive loads," *International Journal of Protective Structures*, 8, pp. 407–432, 2017.