

爆発荷重を受ける RC 建造物のフラジリティ曲線に関する研究

防衛大学校 学生会員 ○永松 秀章 上野 裕稔 正会員 別府 万寿博

1. 緒言

近年、不測の爆破テロや工場等における爆発事故が増加している。RC 建造物が爆発荷重を受けると、爆発の規模（爆薬量、爆破位置）に応じて様々なレベルの被害を受ける¹⁾。したがって、爆発発生シナリオを設定した上で、建造物の被害程度を評価する手法を確立し、効果的な対策を検討する必要がある。本研究は、リスク評価²⁾における RC 建造物のフラジリティ曲線の作成手法について検討したものである。

2. フラジリティ評価のプロセス

建造物のフラジリティを評価する過程を以下に示す。

- (1) 評価の対象とする建造物モデルの設定
- (2) 爆発荷重の評価
- (3) 部材の応答解析
- (4) 材端回転角による部材の損傷度判定
- (5) 建物全体の被害状況の判定

3. フラジリティ曲線の作成例

- (1) 評価の対象とする建造物モデルの設定

本研究の建造物モデルは、図-1 に示すように、柱、梁、スラブから構成される縦・横 35m、高さ 12m の 3 階建てとした。構造は RC ラーメン構造とし、耐震壁は設けず、荷重に対しては柱と梁により抵抗するものとした。爆薬は、図-1 に示すように、地上 1 階、中央部に設置した。

- (2) 爆発荷重の評価

本研究では、爆薬の TNT 換算質量 w を 1kg~10,000kg の範囲で検討した。設定した各ケースにおいて爆薬と部材までの距離 R から換算距離 $z(=R/w^{1/3})$ を求め、既往の実験式³⁾から最大爆風圧 P_r と力積を求め、最大爆風圧 P_r と力積 i_r から、建造物に作用する圧力~時間関係が図-2 に示す三角パルスとして得られる。すなわち、荷重継続時間 t_r は式 (1) から求めた。

$$t_r/w^{1/3} = 2/P_r \cdot i_r/w^{1/3} \approx 0.4841z^{0.724} \quad (1)$$

- (3) 部材の応答解析

それぞれの部材を図-3 に示すように等価な 1 質点系モデルに置換する。爆発荷重により、各種の材料にはひずみ速度効果が

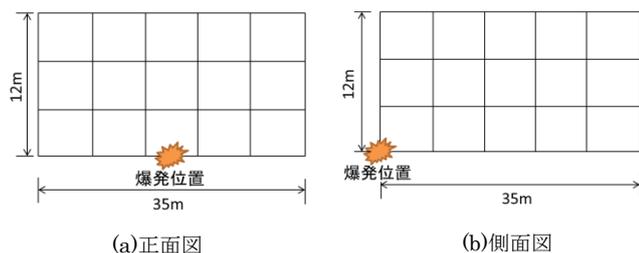


図-1 モデル建物

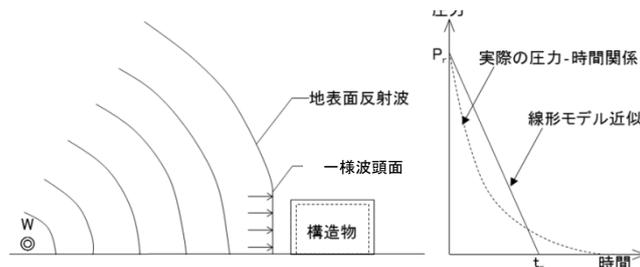


図-2 圧力 - 時間関係の線形

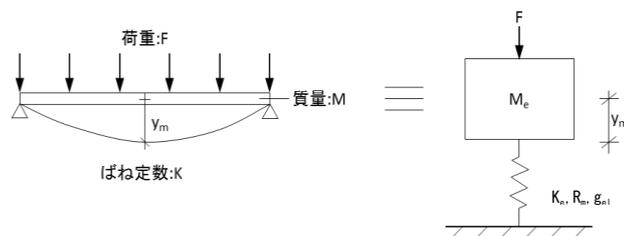


図-3 部材の 1 質点モデルへの変換

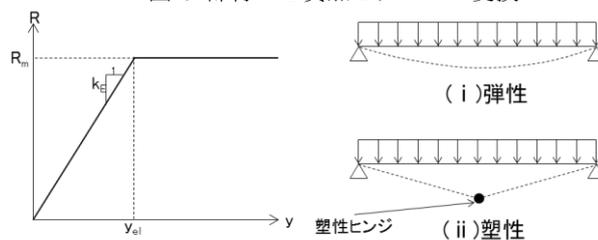


図-4 柱の抵抗関数

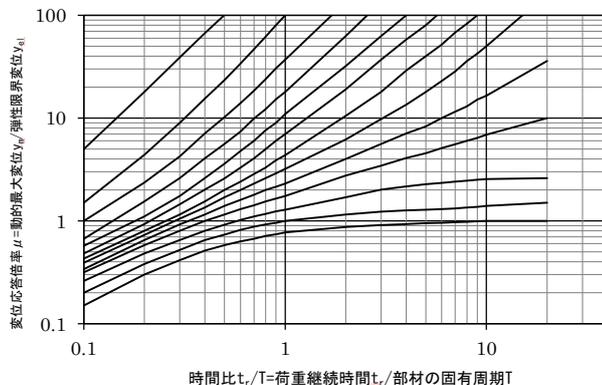


図-5 変位応答倍率 μ と時間比 t_r/T の関係

キーワード：爆発荷重，リスク，フラジリティ曲線，1 質点系モデル

連絡先：〒239-0811 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 Tel：046-841-3810 E-mail：hide58487@gmail.com

生じ、材料強度が増加する。そのため、強度増加係数および動的増加係数を材料強度に乘じる。その値を用いて、最大抵抗 R_m 、弾性限界変位 y_{el} および固有周期 T を設定する。なお、柱については軸力の影響を考慮して最大抵抗力を求めた。一例として、柱の抵抗関数を図-4 に示す。爆発荷重が作用した際の部材の最大変位 y_m は、図-5 に示す変位応答倍率 μ と時間比 t_r/T の関係から求める³⁾。設定した複数の TNT 換算質量の数に対してこれらの応答解析を行った。

(4) 材端回転角による部材の損傷度判定

部材の最大変位 y_m から、図-6 に示すように材端回転角 θ を求める。次に、表-1 に示す RC 部材の損傷程度と材端回転角の関係をj用いて、個々の部材の損傷度を「無損傷」、「小損傷」、「中損傷」、「大損傷」および「甚大損傷」に分類する。部材個々の損傷結果から、部材種別ごとに条件付損傷確率をj求める。横軸に TNT 換算質量を、縦軸に部材の条件付確率とする fragility 曲線の一例として、柱の fragility 曲線を図-7 に示す。

(5) 建物全体の被害状況の判定

構造物の被害状態が i 以上となる条件付損傷確率を $F_i(w)$ とすると、建物全体の fragility 曲線は式 $F_i(w) = \sum_s N_{isw} / \sum_s N_s$ から求めることができる。ただし、 i は損傷程度を表す変数、 s は部材種別を表す変数、 N_{isw} は損傷度 i 以上となる部材の個数、 N_s は部材 s の総数を表す。部材ごとの損傷程度から構造物の被害状態と建物全体の被害状況を判定する。表-2 に、部材の損傷程度と建物の被害状態のj関係の例を示す。次に、対数正規分布関数を用いて建物全体の fragility 曲線の近似を行った。これは上式から求められた値と対数正規分布で推定した値の残差平方を取り、残差平方の和が最小となるときのパラメータ (対数平均値及び対数標準偏差) を設定することで求められる。建物全体の fragility 曲線を図-8 に示す。この曲線から TNT 換算質量に対する損傷確率をj求めることができる。

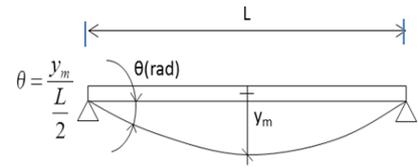


図-6 部材の最大変位 y_m と材端回転角 θ の関係

表-1 RC 部材の損傷程度と材端回転角のj関係

損傷程度	応答値 θ (rad)	
	主要構造材 (柱・梁・耐力壁)	補助構造材 (床・せん断壁)
小損傷	降伏耐力~	降伏耐力~
中損傷	0.010~0.017 (1/100~1/60)	0.010~0.033 (1/100~1/30)
大損傷	0.017~0.033 (1/60~1/30)	0.033~0.067 (1/30~1/15)
甚大損傷	0.033~ (1/30~)	0.067~ (1/15~)

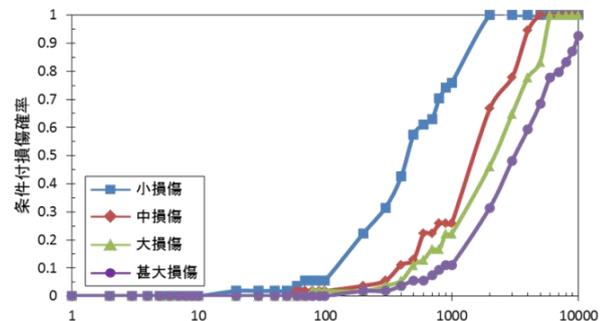


図-7 柱の fragility 曲線

表-2 部材の損傷程度と建物全体の被害状態のj関係

	建物全体の被害状態					
	微被害	軽被害	小被害	中被害	大被害	甚大被害
①主要構造材 (柱・梁)			小損傷	中損傷	大損傷	甚大損傷
②補助構造材 (床・壁)		小損傷	中損傷	大損傷	甚大損傷	
③非構造材 (窓・建具)	小損傷	中損傷	大損傷	甚大損傷		

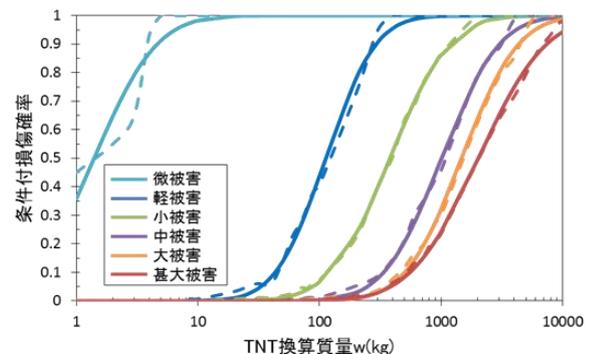


図-8 建物全体における fragility 曲線

4. 結言

1 質点系モデルを用いた爆発応答解析結果に基づいて、建物全体の fragility 曲線を作成する手法を提案した。提案した手法によって、TNT 換算質量と構造物の損傷確率のj関係を求めることができた。

参考文献

1)大野友則編書：基礎からの爆発安全工学，森北出版，2011
 2)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
 3)Headquarters, Department of the Army:TM5-855-1,Fundamentals of Protective Design For Conventional Weapons, 1986