

一質点系モデルによる近接爆発を受ける RC 梁の応答評価に関する基礎的検討

防衛大学校 学生会員 ○永田 真 正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉

1. 緒言

近年、爆破テロや爆発事故が世界的に増加しており、構造物の合理的な耐爆設計法が求められている。構造物から十分に離れた位置で爆発が発生する場合は、構造部材に等分布荷重が作用すると仮定した一質点系モデルによる応答評価法が提案されている。しかし、近接爆発荷重を受ける構造物の応答に関しては検討例が少ないのが現状である。そこで、本研究は RC 梁に対する近接爆発実験を行い、爆発荷重を近似的に評価するとともに、荷重分布を考慮した一質点系モデルによる RC 梁の応答評価法について検討を行ったものである。

2. 実験概要および結果

図 - 1 に、実験の概要を示す。RC 梁の寸法は、幅および高さを 120 mm、支点間距離を 1,100 mm とした。軸方向鉄筋およびせん断補強筋には降伏強度が 323 N/mm² の D6 異形鉄筋を用い、引張鉄筋比およびせん断補強筋比をそれぞれ 0.59% および 0.53% とした。コンクリートの圧縮強度およびヤング係数はそれぞれ 35.6 N/mm² および 38.9 kN/mm² である。支点治具は砂地盤の上に鋼板を介して設置し、支点は梁の回転を許容しピン支持に近い構造とした。爆薬には C4 爆薬を用いて RC 梁中央の上部に設置した。また RC 梁の直交方向に、梁上縁と同じ高さに設置した鋼板に圧力センサを配置し、RC 梁中央から 100 mm 間隔の位置に作用する圧力を計測した。実験後には、梁中央の残留変位を計測した。表 - 1 に実験ケースを示す。実験は爆薬量を一定とし、離隔距離を変化させて各ケース 2 回ずつ実施した。

図 - 2 に、ケース 2 の各計測位置に対して最大圧力と力積の値をプロットしたものを示す。RC 梁の中心部については、米軍の耐爆設計マニュアル(UFC)¹⁾から得られた値で補完している。図から、梁中央からの距離が離れるにしたがい、最大圧力および力積が減少していることがわかる。また、爆発荷重を評価するため、本実験で得たデータと文献¹⁾による値を次式により近似した。

$$P(x) = P_m e^{-\frac{2\alpha_p}{L}x} \quad (0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \alpha_p \geq 0) \quad (1)$$

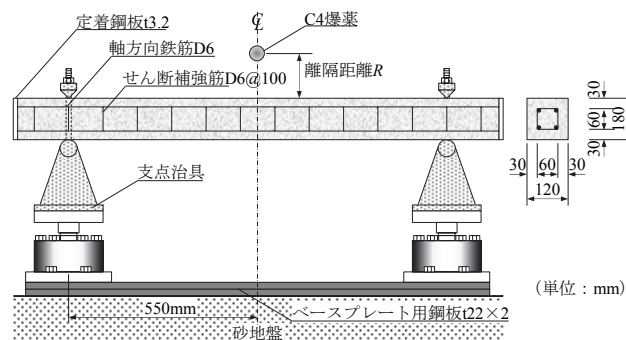


図 - 1 実験の概要

表 - 1 実験ケース

ケース	C4 爆薬量 (g)	離隔距離 (mm)
1-1, 1-2	160	118
2-1, 2-2		103
3-1, 3-2		88

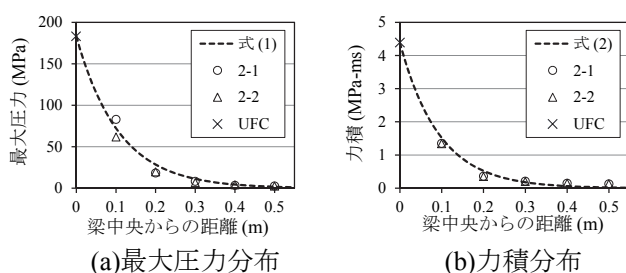


図 - 2 最大圧力および力積の分布 (ケース 2)

$$I(x) = I_m e^{-\frac{2\alpha_i}{L}x} \quad (0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \alpha_i \geq 0) \quad (2)$$

ここに、 P_m および I_m は中心部における最大圧力(MPa) および力積(MPa-ms)、 α_p および α_i は圧力分布係数および力積分布係数、 L は梁の支点間距離(m)、 x は梁中央からの距離(m)、 $P(x)$ および $I(x)$ は梁中央からの距離 x における最大圧力(MPa) および力積(MPa-ms)を示す。梁全体に作用する最大荷重 F_t と力積 I_t は、それぞれ式(1)および(2)で得られる値を RC 梁上面の面積で積分することで表 - 2 に示すように得られる。

写真 - 1 に、各ケースにおける RC 梁の損傷状況および残留変位を示す。写真 - 1 および表 - 2 から、離隔距離が小さくなるにしたがい力積が増大し、残留変位も増加していることがわかる。

キーワード 一質点系モデル, 近接爆発, RC 梁, 荷重分布

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 Tel:046-841-3810

3. 荷重分布を考慮した一質点系モデルによる応答評価法の提案

近接爆発時の荷重分布を考慮した一質点系モデルの提案を行う。なお、砂地盤による減衰効果を考慮するため、図-3に示すようにバネとダッシュポットでモデル化した。一質点系モデルの運動方程式は次式で表される。

$$K_{LM}M\left(\frac{d^2q_1}{dt^2} + \frac{d^2q_2}{dt^2}\right) = F(t) - Kq_1 \quad (3)$$

$$Kq_1 = C \frac{dq_2}{dt} + K_0q_2 \quad (4)$$

ここに、 M はRC梁の質量、 q_1 および q_2 はそれぞれRC梁および地盤の変形量、 K_{LM} は荷重質量係数で、ケース1, 2, 3に対してそれぞれ0.55, 0.54, 0.53である。 C は地盤の減衰係数で20 kN/(m/s), K_0 は地盤の剛性で5000 kN/mとし、地盤は弾性モデルとした。 $F(t)$ は時刻 t における荷重で、荷重～時間関係は図-4に示すように三角形パルスでモデル化した。RC梁の抵抗関数は図-5に示すように第2勾配を持つバイリニア型とした。剛性 K は式(1)に示す荷重分布を考慮すると次式で表される。

$$K = \frac{96EI}{L^3} \cdot \frac{(1 - e^{-\alpha_p})\alpha_p^3}{(2\alpha_p^3 + 3e^{-\alpha_p}\alpha_p^2 - 6\alpha_p - 6e^{-\alpha_p} + 6)} \quad (5)$$

ここに、 E はヤング係数、 I は断面二次モーメントを示す。抵抗関数の第2勾配は剛性 K の1/100とした。最大抵抗力 R_m は降伏モーメント M_p を用いて次式から求めた。

$$R_m = \frac{4M_p}{L} \cdot \frac{(1 - e^{-\alpha_p})\alpha_p}{\alpha_p + e^{-\alpha_p} - 1} \quad (6)$$

図-6に、実験で得られた残留変位と一質点系モデルから得られた変位～時間関係を比較して示す。なお、実験の残留変位は、2回実施した実験の平均値を用いている。RC梁の残留変位を比較すると、一質点系モデルの解析結果は実験値に対してケース1において最大約30%の誤差が生じているが、ある程度再現することができた。

4. 結言

本研究はRC梁に対する近接爆発実験を行い、近接爆発による荷重分布を近似的に評価した上で、荷重分布特性を考慮した一質点系モデルの提案を行ったものである。提案したモデルを用いて、RC梁の変位応答をある程度再現できることがわかった。

参考文献

- 1) US Department of Defense, Structures to resist the effects of accidental explosions, UFC-3-340-02, Washington DC, USA, 2014.

表-2 最大荷重および力積

ケース	C4爆薬量(g)	離隔距離(mm)	最大荷重 F_t (kN)	α_p	力積 I_t (kN-ms)	α_i
1-1, 1-2	160	118	4230	4.56	84.3	4.89
2-1, 2-2		103	4500	5.13	87.6	5.82
3-1, 3-2		88	4680	5.92	92.2	7.08

ケース	損傷状況	残留変位
1-1		7.0mm
1-2		6.0mm
2-1		11.0mm
2-2		10.0mm
3-1		13.0mm
3-2		13.5mm

写真-1 RC梁の損傷状況と残留変位

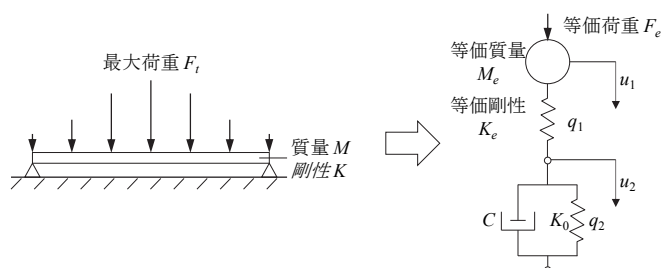


図-3 一質点系モデルの概要

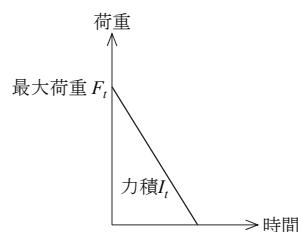


図-4 荷重～時間関係

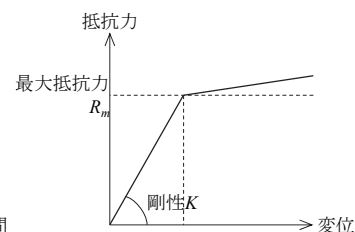
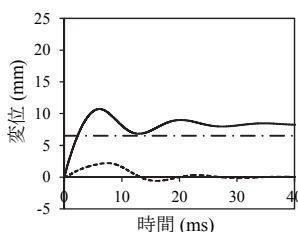
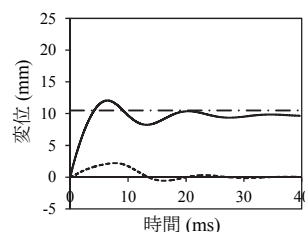


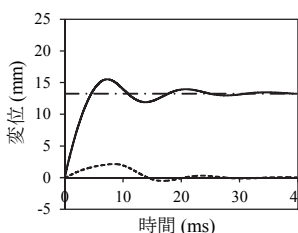
図-5 抵抗関数



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

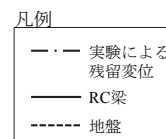


図-6 1質点系モデルの解析による変位～時間