

近接爆発を受ける RC 梁の曲げ変形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の確立が求められている。構造物から十分に離れた位置で爆発が発生する場合は、構造物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、爆破テロのように構造物に近接した状態で爆発が生じる場合は、検討例が少ないのが現状である。そこで本研究は、RC 梁に対して爆薬形状の異なる近接爆発実験を行い、爆薬形状が爆発荷重の分布特性および RC 梁の破壊性状に与える影響について検討した。さらに、近接爆発による分布荷重を考慮した RC 梁の曲げ変形評価を行った。

2. 実験の概要および結果

図 1 に、実験の概要を示す。RC 梁の寸法は、梁幅 120 mm、梁高 180 mm、支点間距離 1100 mm である。軸方向鉄筋には降伏強度 388 N/mm^2 の D10 異形鉄筋を用いた。コンクリートの圧縮強度およびヤング係数は 27 N/mm^2 および 33 kN/mm^2 である。支点は、梁の回転を許容しピン支持に近い構造とした。爆薬には充填密度 1.4 g/cm^3 の C4 爆薬を用いて、球形または直径および高さが等しい円柱形に成型し、RC 梁中央の上部に設置した。計測については、RC 梁の直交方向で梁上縁と同じ高さに圧力センサを配置し、梁中央から 100 mm 間隔の位置に作用する圧力（反射圧）を計測した。また、梁中央の残留変位を計測した。表 1 に実験ケースを示す。

図 2 に、離隔距離 154 mm のケースにおける各計測位置の最大反射圧と力積の値を示す。RC 梁の中心部については、別途数値解析を行った値を示している。図から、いずれも梁中央からの距離が離れるにしたがい、最大反射圧および力積が減少する不均一な分布特性を示している。また、円柱形爆薬は球形爆薬と比べて、梁中央の位置における最大反射圧が約 5.5 倍、力積では約 2.8 倍の値を示すのに対して、端部側ではやや小さい値を示した。ここで、近接爆発による分布圧力を次式により近似した。

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

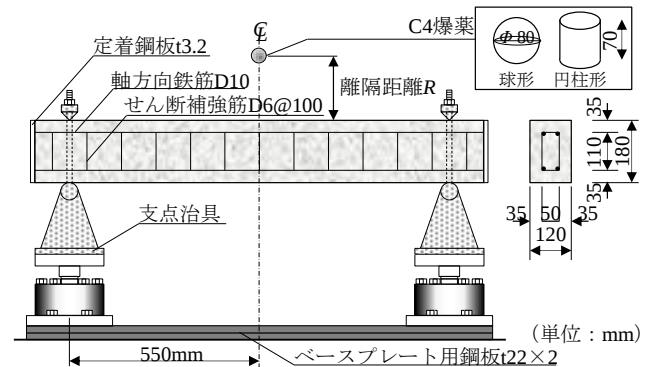


図 1 実験の概要

表 1 実験ケース

番号	ケース	爆薬形状	C4爆薬量	離隔距離R
1	S231	球形	375 g	231 mm
2	C231	円柱形		231 mm
3	S154	球形		154 mm
4	C154	円柱形		154 mm

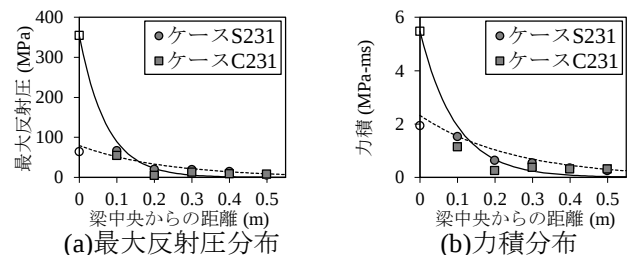


図 2 最大反射圧および力積分布の比較 (R=231 mm)

ここに、 P_m は中心部における最大反射圧(MPa)、 α_p は圧力分布係数、 L は梁の支点間距離(m)、 x は梁中央からの距離(m)、 $P(x)$ は梁中央からの距離 x における最大反射圧(MPa)を示す。なお、圧力分布係数 α_p は、球形爆薬に対しては爆薬量、離隔距離および部材長の関係から求めることができる¹⁾。一方、円柱形爆薬に対する圧力分布係数は定式化されていないため、数値解析で求めた梁中央部の最大反射圧および実験結果を台形積分して求めた最大反射圧の総和と、式(1)を積分した値が等しくなるよう圧力分布係数 α_p を決定した。図 2 に、近似式による結果を重ねて示す。

梁全体に作用する最大荷重 F_t は、式(1)で得られる値を RC 梁上面の面積で積分することで求められる。同様にして、単位面積あたりの力積(MPa·ms)の分布および梁全体に作用する全力積 i が得られる。表 2 に、各分布係数、RC 梁に作用する最大荷重 F_t および全力積 i の推定値を示す。

キーワード 近接爆発、爆薬形状、分布荷重、RC 梁、曲げ変形評価

連絡先 〒239-8686 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:beppu@nda.ac.jp

表3に、各ケースにおけるRC梁の破壊性状および残留変位を示す。表から、同一の離隔距離では球形爆薬に比べて円柱形爆薬を用いた方がRC梁の残留変位が大きいことがわかる。また、離隔距離が154 mmのケースでは、円柱形爆薬によるケースC154にのみ梁中央部に局所的な破壊が確認された。

3. エネルギー基準による曲げ変形評価

近接爆発による分布荷重を考慮したRC梁の残留変位の評価法について検討する。RC梁の応答は、図3に示すように一質点系モデルを用いて解析した。荷重～時間関係は、図4に示す三角形パルスでモデル化し、RC梁の抵抗関数は図5に示すバイリニア型とした。RC梁に瞬間的に作用する全力積*i*による仕事が全て図5に示す台形OADCの面積で求まるひずみエネルギーに変換されたとすると、残留変位 δ_{re} は次式から求められる。

$$\delta_{re} = \frac{i^2}{2K_{LM}MR_m} - \frac{R_m}{2K} \quad (2)$$

ここに、 M はRC梁の質量、 K_{LM} は荷重質量係数で、ケースS231, C231, S154, C154に対してそれぞれ、0.61, 0.51, 0.57, 0.51である。ばね係数 K は式(1)に示す分布荷重を考慮すると次式で表される。

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

ここに、 E はコンクリートのヤング係数、 I_i はコンクリートの引張域を無視した断面二次モーメントを示す。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。

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

表2および表3から、ケースC231と比較してS154の全力積*i*が大きいにも関わらず残留変位が減少している。これは、圧力分布係数 α_p の差異により、S154において式(4)に示す最大抵抗力 R_m が増加したためと考えられる。

図6に、実験で得られた残留変位と式(3)を用いて求めた結果を比較して示す。エネルギー基準による解析結果をみると、実験ケースC154において最大約50%の誤差が生じているが、全体的にある程度再現することができた。

4. 結言

本研究は、RC梁に対して爆薬形状の異なる近接爆発実験を行い、爆薬形状が爆発荷重の分布特性およびRC

表2 爆発荷重の推定値

ケース	圧力分布係数 α_p	力積分布係数 α_i	最大荷重 F_i (kN)	全力積 i (kN-ms)
S231	2.40	2.24	3,940	123
C231	7.60	4.76	5,290	139
S154	3.52	3.85	5,330	150
C154	8.22	7.69	6,700	185

表3 破壊性状および残留変位

ケース	破壊性状	残留変位
S231 (球形)		1.0 mm
C231 (円柱形)		6.0 mm
S154 (球形)		3.5 mm
C154 (円柱形)		8.0 mm

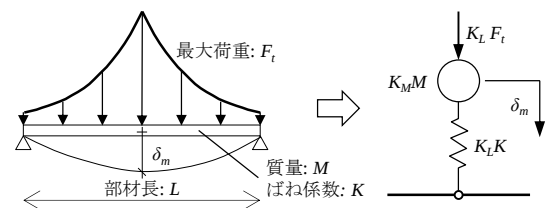


図3 一質点系モデルの概要

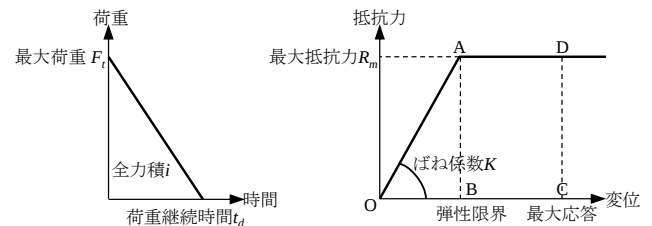


図4 荷重～時間関係

図5 抵抗関数

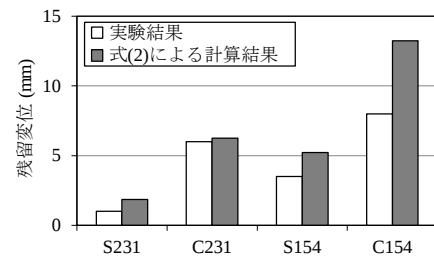


図6 残留変位の比較

梁の破壊性状に与える影響について検討したものである。また、近接爆発による分布荷重を考慮したRC梁の曲げ変形評価を行った。実験の結果、円柱形爆薬では球形爆薬と比べてRC梁中央に作用する荷重が大きく、RC梁の残留変位も増加することがわかった。また、分布荷重を考慮した曲げ変形評価モデルを用いて、RC梁の残留変位をある程度再現できることがわかった。

参考文献

- 1) 永田真, 別府万寿博, 市野宏嘉, 近接爆発による爆風圧分布特性の評価に関する基礎的研究, 第44回土木学会関東支部技術研究発表会梗概集, I-25, 2017.