

近接爆発荷重を受ける RC 梁の損傷評価に関する基礎的研究

防衛大学校 学生会員 ○西川 祐徳 正会員 永田 真 市野 宏嘉 別府 万寿博

1. 緒言

近年、世界各国で爆破テロや爆発事故が多発しており、省庁の施設や原子力発電所などの重要施設に対しては合理的な耐爆設計法が求められる。爆発荷重を受ける構造部材の簡易な応答解析手法として、図-1 に示すように等分布荷重が作用すると仮定した 1 質点系モデルを用いて時刻歴応答解析を行う方法が提案されている¹⁾。しかし近接爆発を受ける場合は、構造部材に等分布荷重が作用するという仮定が成立しないことが推測される。そこで本研究は、RC 梁に対する近接爆発実験を行うとともに、RC 梁の損傷評価に関する基礎的研究として、荷重分布特性を考慮した 1 質点系モデルの提案を行い、その妥当性について検討したものである。

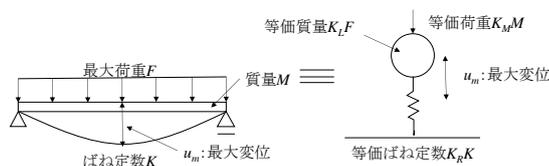


図-1 1 質点系モデル

2. 実験概要と結果

写真-1 および図-2 に、それぞれ実験の概観および RC 梁の概要を示す。RC 梁の寸法は幅 120mm、高さ 180mm、支点間距離 1100mm とした。主鉄筋に D10 異形鉄筋、せん断補強筋に D6 異形鉄筋を用い、引張鉄筋比を 0.82%、せん断補強筋比を 0.5% とした。コンクリート圧縮強度は 27.1N/mm² である。爆薬には C4 爆薬 376g を用い、爆薬位置は梁中央の上部に設置し、爆薬の下端から梁上端までの距離は 196mm とした。RC 梁は、回転を許容する支点治具で固定し、ピン支持に近い構造とした。



写真-1 実験の概観

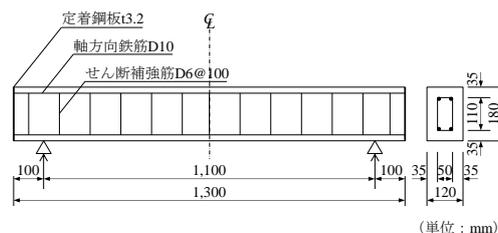


図-2 RC 梁の概要

写真-2 に、爆発実験後の RC 梁の損傷状況を示す。破壊性状は小規模な表面破壊およびひび割れのみで、スポール破壊のような局所的な損傷は生じなかった。梁には軽微な曲げ変形が生じており、梁中央の残留変位は 6mm であった。



写真-2 爆発実験後の RC 梁の損傷状況

3. 荷重分布を考慮した等価 1 質点系モデルの提案

(1) 荷重分布および荷重継続時間の算定

米軍の耐爆設計マニュアルにおいて、爆薬からの距離および爆風圧の入射角度を考慮して、圧力および単位面積当たりの力積を算定する手法が提案されている²⁾。図-3 および図-4 は、その手法を用いて梁の片スパンに作用する最大圧力および単位面積当たりの力積をプロットしたものである。梁軸方向の最大圧力および単位面積当たりの力積の分布が与えられれば、梁全体に作用する最大荷重 F および力積 I は、次式のように求められる。

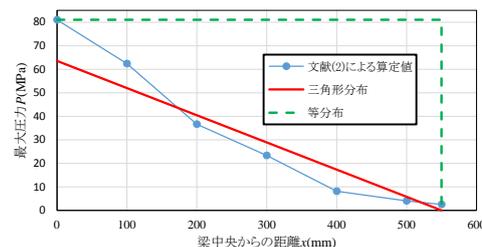


図-3 最大圧力の分布

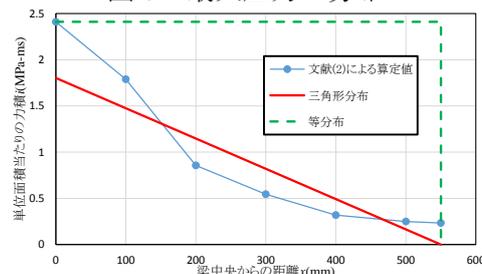


図-4 単位面積当たりの力積の分布

$$F = 2B \int_0^{L/2} P(x)dx \quad (1) \quad I = 2B \int_0^{L/2} i(x)dx \quad (2)$$

ここに P は最大圧力、 i は単位面積当たりの力積、 x は梁中央から

キーワード 近接爆発, 1 質点系モデル, 三角形分布荷重

の距離、 B および L は RC 梁の幅および支点間距離を示す。

ここでは、プロットデータを線形補完し、その面積から得られる最大荷重 F_1 および力積 I_1 が等価となる三角形分布を仮定する。一方、緒言で述べたようにこれまでの簡易的手法では、梁中央での最大圧力および単位面積当たりの力積が梁全体に一樣に作用すると仮定するため、図中の破線で示すような形状となる。次に、爆発により作用する荷重～時間関係を三角形パルスとしてモデル化する。ここで、荷重継続時間 t_d については次式により求められる。

$$t_d = 2I/F \quad (3)$$

以上の手順から、図-5 に示すような荷重分布形状に応じた最大荷重 F 、力積 I 、荷重継続時間 t_d が求まる。

(2) 1 質点系モデルの提案

三角形分布の圧力が作用した場合に、RC 梁の中央点と変位が等しくなる等価 1 質点系モデルの提案を行う。ここでは、図-6 に示すバイリニアの抵抗関数を用いた。ばね係数 K は次式から求めた。

$$K = F/u_m \quad (4)$$

ここに、 u_m は荷重 F が静的に作用した場合の RC 梁の中央点における最大変位であり、三角形分布荷重の場合の最大変位 u_{m1} は、次式で表される。

$$u_{m1} = F_1 L^3 / 60EI_a \quad (5)$$

ここに、 E はヤング係数、 I_a は有効断面二次モーメントを示す。最大抵抗力 R は次式から求めた。

$$R_1 = 6M_p/L \quad (6)$$

ここに、 M_p は降伏モーメントを示す。

1 質点系モデルの運動方程式は次式で表されるので、式(7)を用いて変位の時刻歴応答解析を行った。

$$K_{LM} M \ddot{u} + R(u) = F(t) \quad (7)$$

ここに、 M は RC 梁の質量、 u は RC 梁の中央点における変位、 K_{LM} は荷重質量係数 ($=K_M/K_L$ 、 K_M は質量係数、 K_L は荷重係数) を示す。

RC 梁と 1 質点系モデルの運動エネルギーを等価とすることで質量係数 K_M が求まり、外部仕事を等価とすることで荷重係数 K_L が求まる。なお荷重質量係数は、三角形分布荷重に対して $K_{LM1} = 0.62$ 、等分布荷重に対して $K_{LM2} = 0.78$ となる。

4. 解析結果および考察

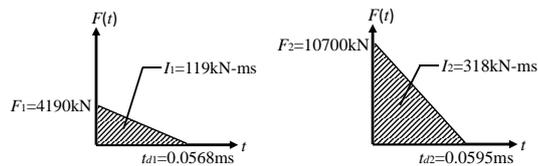
図-7 に、解析によって得られた RC 梁の中央点における変位～時間関係および実験で得られた残留変位との比較を示す。残留変位は、三角形分布荷重の場合が 5.2mm、等分布荷重では 24.1mm であった。実験結果と解析結果の差は、三角形分布荷重が約 13%、等分布荷重が約 300% となり、荷重分布を三角形分布に近似したモデルの方が実験の再現性が高いことがわかる。

5. 結言

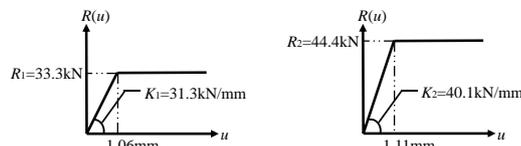
本研究は、RC 梁に対する近接爆発実験を行うとともに、近接爆発による荷重分布を三角形分布に近似した 1 質点系モデルを提案したものである。提案モデルにより実験結果の残留変位をある程度良好に再現できた。

参考文献

- (1) John Biggs; Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill Companies, 1964.1
- (2) Department of Defense; UFC 3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, 2014.9



(a) 三角形分布荷重 (b) 等分布荷重
図-5 荷重～時間関係



(a) 三角形分布荷重 (b) 等分布荷重
図-6 抵抗力～変位関係

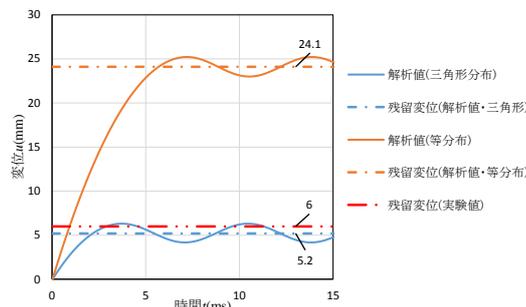


図-7 変位～時間関係