

繰り返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版 の損傷

森下政浩¹・田中秀明²

¹正会員 工博 防衛庁技術研究本部第4研究所 (〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺 2-9-54)

²正会員 防衛庁技術研究本部第4研究所 (〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺 2-9-54)

本研究は、鉄筋コンクリート構造物の耐爆設計法の精度向上及び残存耐爆性の評価に資するため、鉄筋コンクリート版の繰り返し爆発実験を行い、試験体に生じる損傷について検討を行った。その結果、本研究の実験条件の範囲では、単一の接触爆発を受ける処女鉄筋コンクリート版について筆者らが提案している損傷予測法を応用して、繰り返し爆発により生じるクレータ及びスポールの深さを比較的精度よく予測できることなどが明らかになった。

Key Words : reinforced concrete, multiple detonations, damage, crater, spall

1. 緒言

社会的に重要性の高い公共施設の中には、設計時に不慮の爆発事故や爆破テロを考慮すべきものもある。爆発を受ける鉄筋コンクリート構造物の局所損傷に関して種々の報告^{1) - 6)}がなされているが、その大部分は構造物表面での単一の爆発(接触爆発)を対象としたものである。筆者ら^{1), 2)}も、これまでに単一の爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷について種々の条件で検討してきており、単一の接触爆発により生じるクレータ、スポール及び貫通孔の発生限界並びに寸法は、修正換算コンクリート厚さを用いて比較的精度よく予測可能であることなどの結論を得ている。一方、爆発荷重を受けて損傷の生じた鉄筋コンクリート構造物の残存耐爆性や補修の必要性を検討する場合、複数回の爆発(繰り返し爆発)を受ける鉄筋コンクリート部材の損傷評価が重要となるが、これに関する報告例は見当たらない。

本研究では、鉄筋コンクリート構造物の耐爆設計法の精度向上及び残存耐爆性の評価に資するため、鉄筋コンクリート版の表面で2回爆発を行う繰り返し爆発実験を実施し、試験体に生じるクレータ、スポールなどに着目して検討を行った。特に、一定量の爆薬を1回で爆発させた場合と半分を2回に分けて爆発させた場合との損傷発生状況の差を明らかにするとともに、単一の接触爆発を受ける処女鉄筋コンクリート版について筆者らが提案している損傷予測法を応用して、繰り返し爆発により生じるクレータ深さ及びスポール深さを予測することを試みた。

2. 試験方法

(1) 鉄筋コンクリート試験体及び爆薬

爆破する試験体には、図-1に示すような60cm×60cm×10cmの複鉄筋コンクリート正方形版を用いた。コンクリートの材料は、普通ポルトランドセメント、砕砂(兵庫県赤穂市産)及び碎石(兵庫県島群島西島産、最大骨材寸法10mm)であり、混和剤には標準型減水剤を用いた。コンクリートの配合は水セメント比54%、細骨材率51%であり、コンクリートの28日圧縮強度は56MPaである。鉄筋比は約0.5%であり、図-1に示すように主鉄筋間隔110mmで配筋

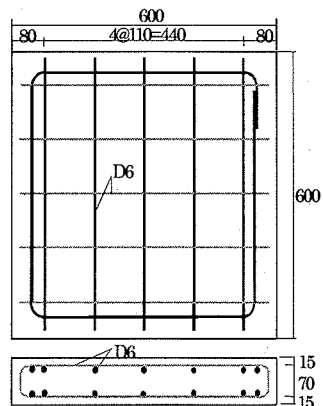


図-1 鉄筋コンクリート試験体 (単位:mm)

した。主鉄筋および配力鉄筋には異形鉄筋D 6（降伏応力 300MPa, 引張強度 419MPa, 伸び 34%）を使用し、交点はなまし鉄線で緊結した。試験体はコンクリート材令が約 4 週の時点で実験に供した。なお、試験体表面には、損傷状況の観察が容易なように 5cm 間隔でグリッドを描いた。

また、爆薬には代表的な高性能爆薬の一つであるペントライト（Pentolite）を用いた。爆薬は直径と高さがほぼ等しい円柱形で、薬量は 1 回の爆発では試験体に貫通孔の生じない程度とし、12g を基準として、その約 2 倍、4 倍及び 8 倍に当たる 23g, 46g 及び 95g の 4 種類とした。

(2) 爆発方法

爆発実験は、内径約 8m の爆破試験ドーム内で実施した。試験体は、角材で作製した 2 個の台座（支持部幅 4.5cm）の上に単に設置し、支持点間距離は 51.0cm とした。爆薬は、試験体の上面中央に置き、6 号電気雷管により発破器を用いて爆発させた。

爆発実験は、まず、爆薬量 12g 及び 95g の場合については 2 回、23g 及び 46g の場合については 3 回それぞれ実施した。次に、爆薬量 12g, 23g 及び 46g の場合には、1 回目の爆発により損傷を生じた試験体を用い、最初と同じ爆薬量で 2 回目の爆発実験（繰り返し爆発実験）をそれぞれ 2 回実施した。繰り返し爆発実験では、試験体の上下左右等の設置条件が 1 回目の爆発実験と同じになるようにした。また、爆薬を置く試験体上面中央には 1 回目の爆発によりクレータが生じるが、凹凸のあるクレータ底で爆薬を安定させるため必要最小限（数 g 程度）の砂を敷いた。

(3) 計測方法

1 回の爆発実験が終了する度に、試験体に生じたクレータ、スポールなどの損傷状況を詳細に観察し、損傷寸法の測定を行った。寸法測定は、まず試験体損傷部をエブラシで吹き、手で容易に除ける破片を取り除いた後、実施した。測定項目は、図-2 に示すように、爆発面側に生じるクレータ及び裏面側に生じるスポールの直径及び深さである。クレータ及びスポールの直径は、損傷が非対称となる可能性を考慮して、図中に示す直線 1-4 に沿って 4 回測定を行いその平均とした。また、クレータ及びスポールの深さは、貫通孔（breach）が発生しない場合には損傷部の最も深い位置で、貫通孔が発生する場合には貫通孔断面が最小となる位置で測定した。

3. 実験結果及び考察

(1) 損傷状況に及ぼす爆発回数の影響

a) クレータ深さ及びスポール深さ

薬量 23g, 46g 及び 95g の爆薬を単一で爆発させた場合

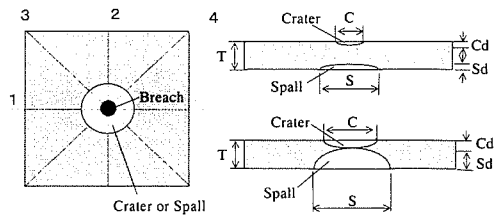


図-2 損傷寸法の測定

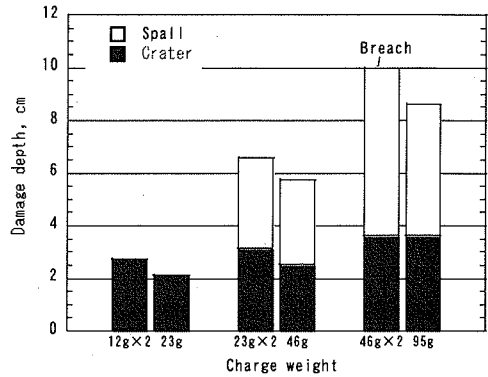


図-3 損傷深さに及ぼす爆発回数の影響

と、そのほぼ半分を 2 回に分けて爆発（繰り返し爆発）させた場合に試験体に生じたクレータ深さ及びスポール深さの平均値を、それぞれの薬量について比較した結果を図-3 に示す。まず、爆薬量 23g の単一爆発の場合に着目すると、スポールの発生はないが、深さ 2.1cm のクレータを生じることがわかる。一方、総爆薬量の対応する繰り返し爆発の場合、クレータ深さは 2.8cm となり、単一爆発の場合に比べ約 3 割増大する。次に、爆薬量 46g の単一爆発の場合については、深さ 2.5cm のクレータ及び深さ 3.2cm のスポールが生じるが、繰り返し爆発の場合、クレータ深さは 3.2cm、スポール深さは 3.5cm となり、単一爆発の場合に比べそれぞれ約 3 割、約 1 割増大する。最後に、爆薬量 95g の単一爆発の場合には、深さ 3.7cm のクレータ及び深さ 5.0cm のスポールが生じるが、繰り返し爆発の場合は、クレータとスポールが連結して貫通孔が生じる。以上のことから、板厚方向の破壊の程度は、総爆薬量が同じであれば、単一爆発の場合より繰り返し爆発の場合のほうが著しくなることがわかる。これは、繰り返し爆発の場合、1 回目の爆発により内部に生じた損傷¹⁾及びクレータ底で爆発させることによる空間の閉鎖性のため、破壊が生じやすくなるためと考えられる。

b) クレータ及びスポールの直径と深さの関係

単一爆発及び繰り返し爆発により試験体に生じたクレータの直径と深さの関係を図-4 に示す。図では、単一爆発と繰り返し爆発の 1 回目の爆発（以下、両者を合わせて

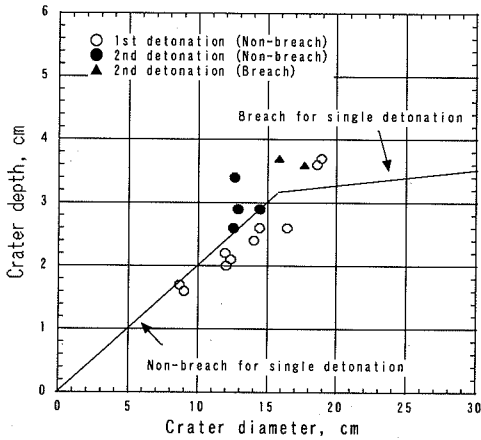


図-4 クレータの直径と深さの関係

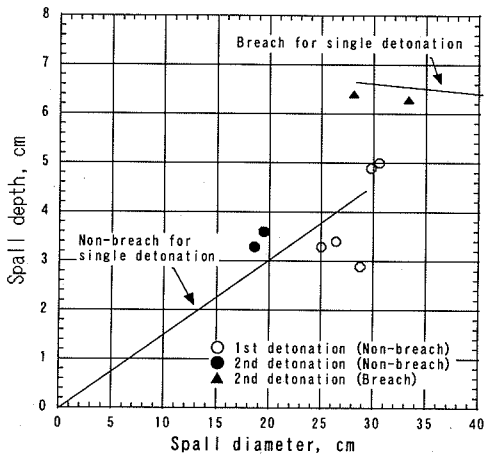


図-5 スポールの直径と深さの関係

1回の爆発とよぶ。)による実験値が同じシンボルで表されている。また、図中には本研究で得られた実験値の他、単一の接触爆発を受ける処女鉄筋コンクリート版に対する予測値²⁾が直線で示されている。1回の爆発による実験値は、全て試験体に貫通孔が生じない条件のものであり、予測値と比較的よく一致しているが、直径に対する深さが若干小さくなる傾向がある。一方、繰り返し爆発の2回目の爆発後(以下、2回の爆発とよぶ。)の実験値についても、貫通孔発生の有無に関わらず予測値と比較的よく一致しているものの、直径に対する深さは若干大きくなる傾向が見られる。すなわち、単一爆発と繰り返し爆発により試験体に生じるクレータの直径と深さの割合に大きな差はないが、2回の爆発によるクレータのほうが1回の爆発によるものに比べ若干えぐれた形状となる。これは、繰り返し爆発実験において、2回目の爆発を1回目の爆発で生じ

Charge	Order	Detonation Surface	Back Surface
23 g	1st		
	2nd		
46 g	1st		
	2nd		
95 g	1st		

図-6 試験体表面の亀裂発生状況

たクレータ底で行うためと考えられる。

次に、単一爆発及び繰り返し爆発により試験体に生じたスポールの直径と深さの関係を図-5に示す。クレータの場合と同様、図中には本研究で得られた実験値の他、単一の接触爆発を受ける処女鉄筋コンクリート版に対する予測値²⁾が直線で示されている。データ数が限られているため細かな傾向を述べることは難しいが、1回及び2回の爆発による実験値は、いずれも予測値と比較的よく一致している。貫通孔発生前の実験値に予測値との差が大きなものがあるが、これは既報¹⁾の接触爆発の場合にも見られた傾向であり、スポール破壊面が複雑になるためと考えられる。

参考のため、爆薬量 23g、46g 及び 95g の場合の代表的な亀裂発生状況を図-6に示す。図では試験体表面の破片が取り除かれており、微細な亀裂が太く強調されている。単一の爆発または繰り返し爆発により試験体表面に生じる亀裂の発生状況は、同じ総爆薬量であれば比較的差は小さいことがわかる。

(2) 繰り返し爆発により生じる損傷の予測

ここでは、単一の接触爆発を受ける処女鉄筋コンクリー

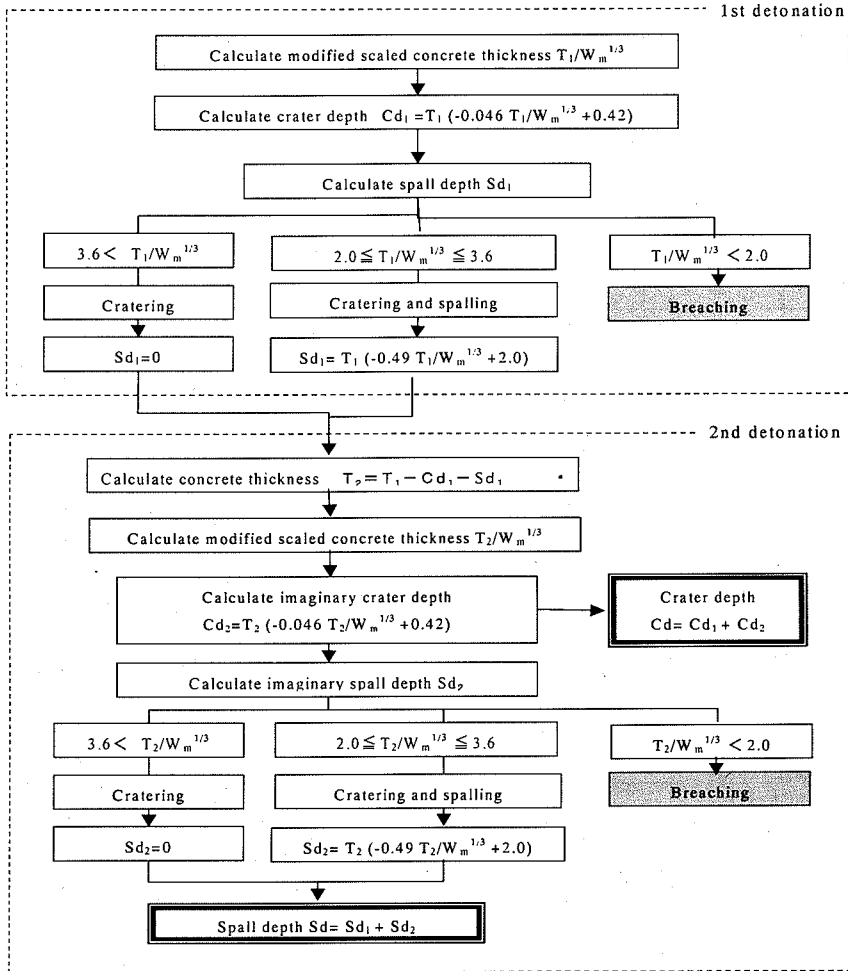
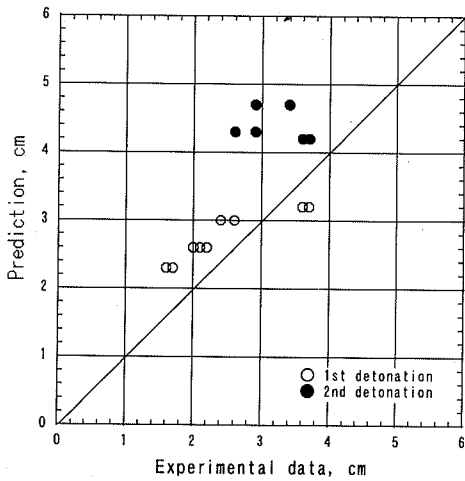


図-7 繰り返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷予測の流れ

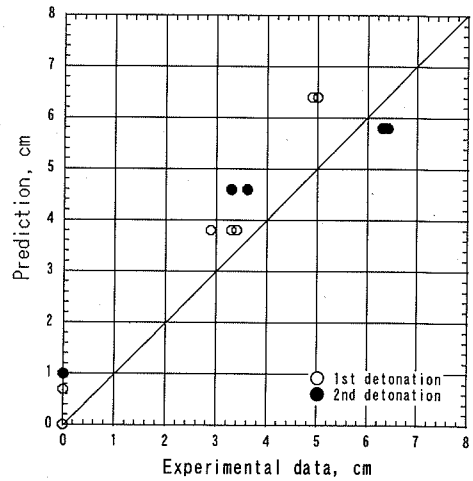
ト版に対する損傷予測法²⁾を応用して、繰り返し爆発により生じるクレータ深さ及びスポール深さを予測することを試みる。図-7に、本研究で提案する、繰り返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷予測の流れを示す。まず、単一の爆発を受ける処女版の場合と同様に、1回目の爆発により生ずる損傷量の予測を行う。すなわち、処女材の板厚 T_1 とTNT換算爆薬量 $W_m^{1/3}$ から修正換算コンクリート厚さ $T_1/W_m^{1/3}$ を計算し、その値を基にクレータ深さ Cd_1 及びスポール深さ Sd_1 を予測する。そして、貫通孔が生じないと予測される場合($2.0 \leq T_1/W_m^{1/3}$)には、2回目の爆発に対する損傷予測を行う。この場合、処女材の板厚からクレータ深さとスポール深さの予測値を除いた残りと同じ板厚 T_2 を有する処女鉄筋コンクリート版を仮想し、これに対して修正換算コンクリート厚さ $T_2/W_m^{1/3}$ を計算する。次に、1

回目の爆発の場合と同様の手順により、仮想版に生じるクレータ深さ Cd_2 及びスポール深さ Sd_2 を予測する。最後に、1回目の爆発によるクレータ深さ及びスポール深さの予測値に、仮想版に対するクレータ深さ及びスポール深さの予測値をそれぞれ加え、これらの値を2回の爆発によるクレータ深さ Cd 及びスポール深さ Sd の予測値とする。

クレータ深さ及びスポール深さの予測値と実験値の関係を図-8に示す。図中の傾き1の直線は予測値と実験値が一致することを意味する。まず、図-8(a)のクレータ深さの結果に着目する。1回の爆発による結果は、比較的精度よく予測されているが、若干安全側となる傾向があり、2回の爆発による結果ではその傾向がより顕著となる。また、図-8(b)のスポール深さの結果についても、1回及び2回の爆発について若干安全側の予測となる傾向

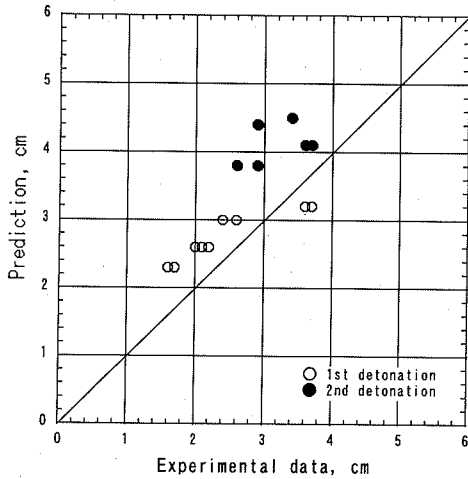


(a) クレータ深さ

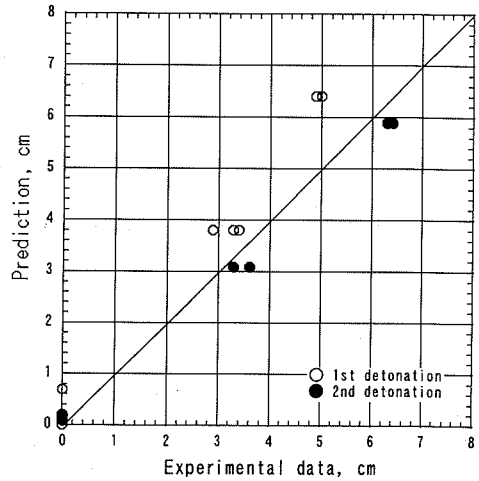


(b) スポール深さ

図-8 クレータ深さ及びスポール深さの予測値と実験値の関係



(a) クレータ深さ



(b) スポール深さ

図-9 1回目の爆発の損傷深さの実験値を用いて2回目の爆発の損傷を予測した結果

がある。2回の爆発による結果が安全側の傾向となる理由の一つとして、本研究ではクレータ深さ及びスポール深さを表面から最も深い位置で定義しているが、実際のクレータ底及びスポール底にはかなり凹凸があるため、仮想版に対する予測時に板厚の効果を過小に評価すること等が考えられる。

次に、繰り返し爆発に対する予測精度の向上を意図して、1回目の爆発により生じたクレータ深さ及びスポール深さの実験値を用いて仮想版の板厚を求め、2回目の爆発に

よる損傷量を予測した結果を図-9に示す。予測値と実験値との差は、図-8に比べクレータ深さ、スポール深さも小さくなり、より精度よく予測できることがわかる。

4. 結言

本研究の実験条件の範囲で得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 板厚方向の破壊程度は、総爆薬量が同じであれば、

単一爆発の場合より繰り返し爆発の場合のほうが著しくなる。

- (2) 単一爆発と繰り返し爆発により試験体に生じるクレータの直径と深さの割合に大きな差はないが、繰り返し爆発によるクレータのほうが単一爆発によるものに比べ若干えぐれた形状となる。
- (3) 単一の接触爆発を受ける処女鉄筋コンクリート版に対する損傷予測法を応用して、繰り返し爆発により生じるクレータ及びスポールの深さを、比較的精度よく予測することができる。

- 3) 竹田仁一, 河村 隆: 爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形・破壊の定量的予測, 工業火薬協会誌, Vol.46, No.4, pp.179-191, 1985
- 4) 岡崎一正, 竹田仁一, 藤本一男, 山上 明, 竹下 賢: 表面爆破によるコンクリート版の破壊, 工業火薬協会誌, Vol.43, No.1, pp.156-167, 1982
- 5) Fundamentals of protective design for conventional weapons, TM5-855-1, Headquarters, Department of the Army, Cha.5, 1986
- 6) Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM5-1300, Departments of the Army, the Navy and the Air Force, p4-181, 1990

参考文献

- 1) 森下政浩, 田中秀明, 伊藤 孝, 山口 弘: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1787-1797, 2000
- 2) 田中秀明, 森下政浩, 伊藤 孝, 山口 弘: 爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす爆破位置の影響, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.297-312, 2001.4

(2003. 2. 26 受付)

EFFECTS OF MULTIPLE DETONATIONS ON THE DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE SLABS

Masahiro MORISHITA and Hideaki TANAKA

In this study, the effects of multiple detonations on the damage of reinforced concrete (RC) slabs has been experimentally investigated to improve the design and damage estimation methods of RC shelters. One of main results obtained is that the crater and spall depths of the RC slabs due to two detonations may be relatively well predicted with the authors' method proposed for virgin RC slabs subjected to a single detonation.