

爆発位置が鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす影響

田中秀明^{*1}, 山口 弘^{*1}, 伊藤 孝^{*2}, 森下政浩^{*3}

^{*1} 技術研究本部第4研究所

^{*2} 技術研究本部技術部

^{*3} 防衛庁内部部局管理局

本研究では、鉄筋コンクリート構造物の耐爆設計法及び耐爆性評価法の精度向上に資するため、爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす爆発位置の影響を実験的に検討した。特に、接触爆発による損傷を基準として、スタンドオフ爆発により生じる損傷の評価を行った。供試体には鉄筋コンクリート正方形版を用い、高性能爆薬の一種であるペントライトを供試体のスタンドオフまたは表面で爆発させて行った。爆発実験後、供試体に生じたクレータ、スポール、貫通孔、ひび割れなどに着目して損傷を検討した。

キーワード：鉄筋コンクリート、損傷、クレータ、スポール、貫通孔

1. はじめに

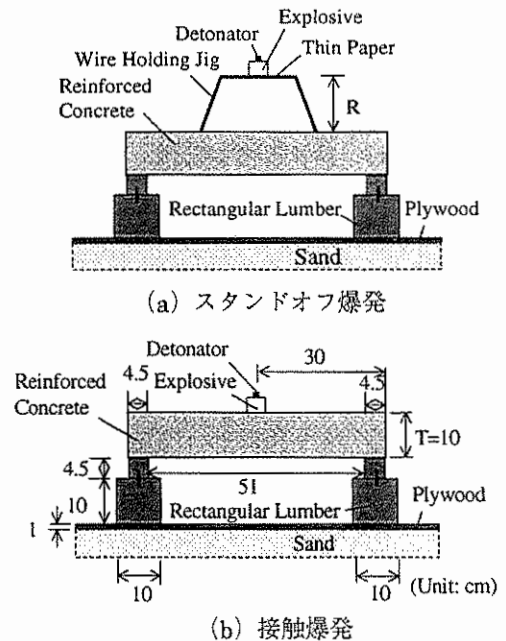
社会的に重要性の高い公共施設や防衛施設の中には、設計時において不慮の爆発や爆破テロを考慮するべきものがある。これまで筆者らはこれら施設の耐爆性評価及び耐爆設計の精度向上に資することを目的として、構造部材の基本である鉄筋コンクリート版に着目し、爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート版の損傷評価に関する実験的研究を行ってきた¹⁾。

その結果、接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版に発生するクレータやスポールの直径及び深さ、貫通孔発生の有無等の損傷が、比較的よい精度で推定可能であることが明らかになった。本研究では、鉄筋コンクリート版を用いたスタンドオフ爆発及び接触爆発実験を実施し、クレータやスポールの直径及び深さ、貫通孔発生の有無等の損傷に及ぼす爆発位置の影響に関して検討を試みた。

2. 試験方法

(1) 鉄筋コンクリート供試体及び爆薬

実験に用いた供試体は、60 cm×60 cm×10 cmの鉄筋コンクリート版で、配筋方法は複筋配置とした。主鉄筋及



図一 試験体の設置

び配力鉄筋にはD6（降伏点：362N/mm²）を用い、それぞれ11cmピッチに配筋した。主筋の純かぶり厚は、1.5cmとした。鉄筋比は約0.5%である。コンクリートの最大粗骨材寸法は10mmであり、コンクリートの28日圧縮強度は27.9N/mm²である。爆薬には、ペンスリット50%とTNT50%からなるペントライトを用いた。その形状は、直径と高さが等しい円柱形である。薬量は18g（直径φ=24mm）、47g（φ=33mm）及び113g（φ=44mm）の3種類とした。

(2) 爆発方法及び計測方法

爆発実験は、図-1に示すように角材で作製した台座の上に供試体を設置し、爆薬をスタンドオフ爆発においては供試体上の保持器具上に、接触爆発においては供試体の上面中央に設置した後、電気雷管により起爆させることによって実施した。表-1には、本実験ケースと実験回数を示している。

実験終了後、クレータ及びスポールの直径と深さを測定した。また、貫通孔が生成された場合には、その直径も測定している。なお、クレータ、スポール及び貫通孔の直径は、図-2に示す直線1-4に沿って4回測定した平均値として評価した。クレータ及びスポールの深さは、貫通孔が発生しない場合には、それぞれ供試体の爆発面及び裏面から最も深い位置での距離、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の距離とした。最後に、供試体を直線1に沿って切断し、供試体内部の損傷状況を観察した。

3. 実験結果及び損傷評価法

(1) クレータ、スポール、貫通孔及び内部損傷

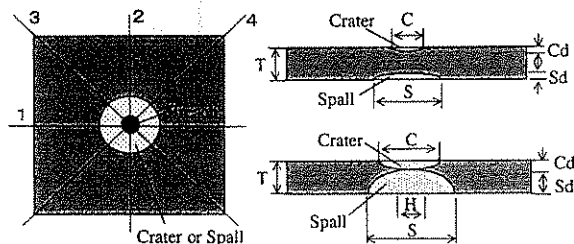
図-3、4には、爆薬量18g及び113gに着目した場合の実験終了後における各供試体の切断面写真を示す。供試体の上面が爆発面である。

最初に図-3の薬量18gの場合について見ると、接触爆発ではお碗状のクレータが供試体上面の爆点を中心として形成されていることがわかる。また、供試体裏面には、スポールは生成されていないが切断面には爆点直下の供試体裏面を中心としたドーム状のひび割れが伸展しているのが見られる。一方、スタンドオフ爆発では供試体上面にクレータが形成されるものの、その直径及び深さは接触爆発の場合に比べて小さく、かつスタンドオフ距離の増大とともに減少している。また、裏面側にはスポールのみならずひび割れも認められない。

次に、図-4の薬量113gの場合について見ると、接触爆発においてクレータ及びスポールが生成されるとともに爆点直下に貫通孔が生じている。また、スポール破

表-1 爆発条件と実験回数

Detonation Type	Standoff Distance (cm)	Charge Weight		
		18 g	47 g	113 g
Contact	0	2	2	2
Standoff	1.0		1	1
	2.5	1		2
	3.5		1	
	5.0	1	1	1
	7.5	1		1
	10.0	1	1	2
	15.0			1



T:鉄筋コンクリート厚さ, C:クレータ直径, S:スポール直径, H:貫通孔直径, Cd:クレータ深さ, Sd:スポール深さ

図-2 損傷寸法の定義等

壊面に沿って多重のひび割れも見られる。これは、生成されたスポール面が新たな自由境界面となって引張応力波を生じさせたためと考える。一方、スタンドオフ爆発では、その距離の増大に伴い、クレータ及びスポールの直径と深さが減少している。なお、スタンドオフの距離が10cmの場合には、スポールは認められない。

以上のことから、鉄筋コンクリート版のクレータ及びスポールの直径や深さ等の損傷は、スタンドオフ距離と爆薬量に大きく依存していることが明らかになった。また、スタンドオフ爆発の場合にも、その距離が短く、爆薬量が多い場合には、接触爆発の場合と同様にクレータやスポールが発生し、条件によっては貫通孔が生じることがわかった。

(2) 損傷評価法

鉄筋コンクリート構造物の耐爆設計及び耐爆性評価において、特に爆発により生じるクレータ、スポールの直径及び深さを定量的に把握し、さらに貫通孔の発生の有無を予測することは非常に重要である。

既に筆者らは、接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の場合に関して、クレータやスポール寸法及び貫通孔発生の有無の推定法、並びに損傷評価の一つとしてクレータ深さとスポール深さの和として算定される損傷深さと鉄筋コンクリート厚さを爆薬量の1/3乗で除した換算コ

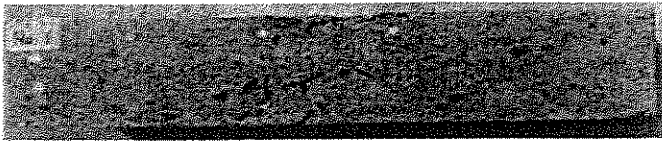
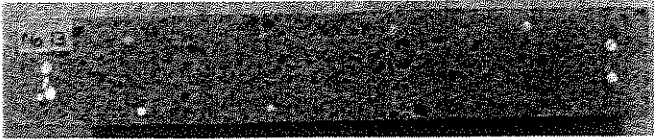
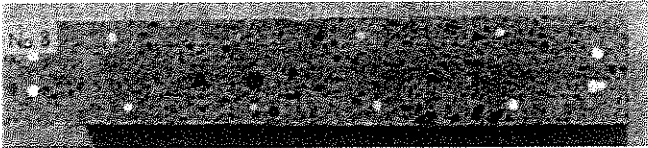
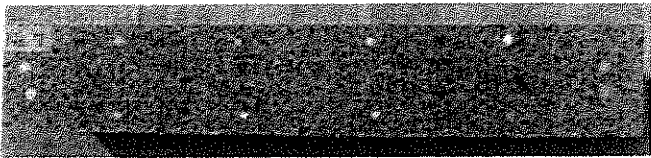
Condition	Cross Section
Contact	
Standoff Distance 2.5cm	
Standoff Distance 5cm	
Standoff Distance 10cm	

図-3 爆薬量 18g の爆発による内部損傷

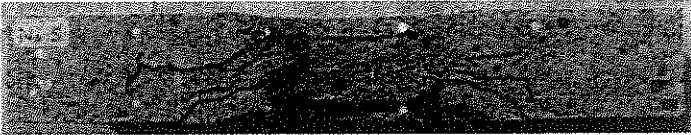
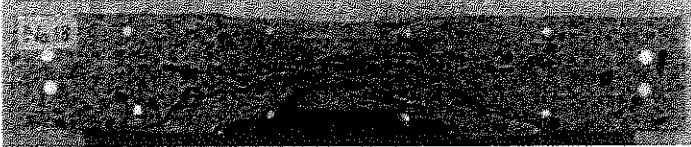


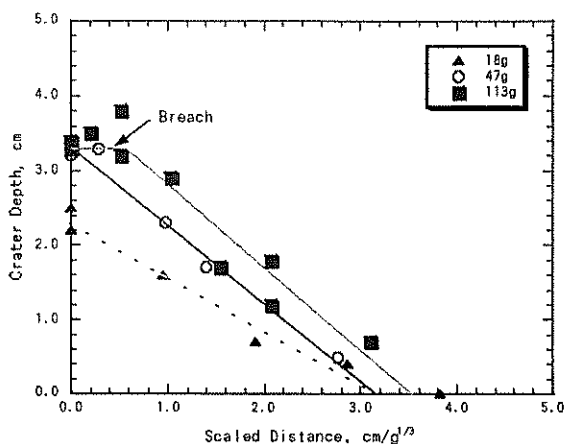
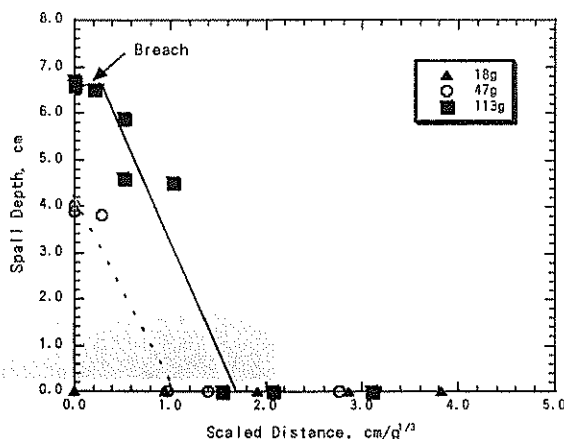
Condition	Cross Section
Contact	
Standoff Distance 1cm	
Standoff Distance 5cm	
Standoff Distance 10cm	

図-4 爆薬量 113g の爆発による内部損傷

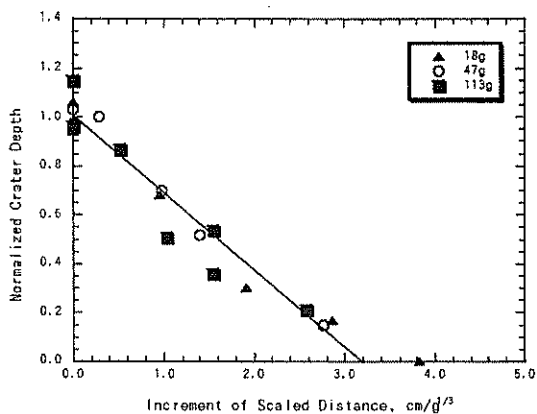


(a) クレータ

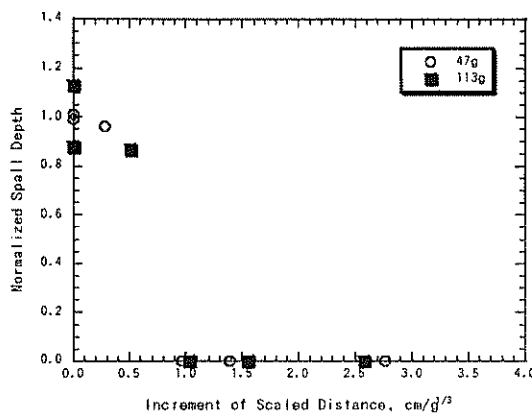


(b) スポール

図-5 クレータ深さ及びスポール深さと換算距離の関係



(a) クレータ



(b) スポール

図-6 貫通孔の生じない場合の一般化したクレータ深さ及びスポール深さ

ンクリート厚さで整理したノモグラフより、損傷評価を簡易に行う手法を提案している¹⁾。ここでは、スタンドオフ爆発に関しても同様な観点から、鉄筋コンクリート版の損傷評価に関する検討を行うこととした。以下、項目ごとに述べることにする。

a) クレータ深さ及びスポール深さと換算距離

スタンドオフ爆発及び接触爆発により生じたクレータ及びスポールの深さと換算距離の関係を図-5に示す。図中の各種直線はクレータまたはスポールの発生したデータ（貫通孔の発生したデータを除く。）について最小2乗法により求めたものである。なお、換算距離 $0\text{cm/g}^{1/3}$ は接触爆発を意味している。

まず、図-5(a)のクレータについて着目すると、クレータ深さは換算距離の増大に伴いほぼ比例して減少していることがわかる。これは爆薬量と換算距離が既知である場合には、これらを用いてクレータ深さを概略推定で

きることを示唆している。一方、著者らの接触爆発に関する既報²⁾によれば、鉄筋コンクリート版に版厚の約 $1/3$ （本実験の場合は約 3.3cm ）の深さを有するクレータが生じる場合には貫通孔の発生することが明らかになっている。ここでは、薬量 113g の換算距離 $0\sim 0.6\text{cm/g}^{1/3}$ 程度のクレータ深さがほぼ 3.3cm と一定の値となっている。これは、スタンドオフ爆発の場合も接触爆発の場合と同様に、版厚の約 $1/3$ の深さを有するクレータが生じる場合には貫通孔が発生することを意味している。

次に、図-5(b)のスポールについて検討する。薬量 18g の場合には換算距離が $0\text{cm/g}^{1/3}$ である接触爆発においてスポールは発生していないため、スタンドオフ爆発を意味する換算距離 $>0\text{cm/g}^{1/3}$ の全ケースにおいてもスポールは発生していない。データ数が限られているため明確ではないが、薬量 47g 及び 113g のスポール発生限界値は換算距離でそれぞれ約 $1.0\text{cm/g}^{1/3}$ 及び約 $1.7\text{cm/g}^{1/3}$ である。

b) 基準換算距離を用いた損傷評価法

ここでは、前述した各爆薬量に対応したクレータ深さ及びスポール深さに関する評価を爆薬量によらない方法で行うための手法を提案し、その手法の妥当性について検討を試みる。提案する手法は、貫通孔の生じない結果を基準値とし（図-5から薬量 18 g, 47 g, 113g の場合でそれぞれ換算距離 $0 \text{ cm/g}^{1/3}$, $0 \text{ cm/g}^{1/3}$, $0.52 \text{ cm/g}^{1/3}$ の結果）、全実験ケースのクレータ深さ及びスポール深さを基準値で除して整理するものである。図-6は、クレータ深さ及びスポール深さを基準となる各深さの値で除した値を縦軸に、基準換算距離に対する換算距離の増分を横軸として示したものである。

図-6(a)より、全ての実験結果が図中の直線近傍に分布していることがわかる。これは、貫通孔の発生していない範囲に限定して、基準となるクレータ深さと換算距離、並びに、評価対象とするスタンドオフ爆発の換算距離からクレータ深さが推定可能であることを意味している。

一方、図-6(b)より、スポール深さに関して図-5(b)に比べ薬量の影響は小さくなっていることがわかる。また、データ数が限られているためスポール発生限界は明確でないものの、基準値からの換算距離の増分が約 $1.0 \text{ cm/g}^{1/3}$ 以上でスポールは発生していない。これに関しては、今後さらに実験を実施して定量的に評価していく必要があると考えている。

c) McVay のスポール損傷評価法の適用

スタンドオフ爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷評価法として代表的なものに McVay のスポール損傷評価式がある²⁾。これは、版厚を TNT 換算した爆薬量の $1/3$ 乗で除した修正換算コンクリート厚さとスタンドオフ距離を TNT 換算した爆薬量の $1/3$ 乗で除した換算距離との関係を定量的に評価したものであり、スポール発生限界と貫通孔発生限界が簡易に推定可能なものになっている。

図-7は、本実験により得られた結果を縦軸に修正換算コンクリート厚さ、横軸に修正換算距離をとって整理したものである。図中、2本の直線は McVay のスポール発生限界値及び貫通孔発生限界値を示している。図より McVay の評価法により分類される損傷程度を本実験結果が比較的精度よく対応して評価していることがわかる。これより McVay の損傷評価法を用いてスタンドオフ爆発及び接触爆発により生じるスポールと貫通孔の発生の有無が、精度よく予測可能であるものと判断される。

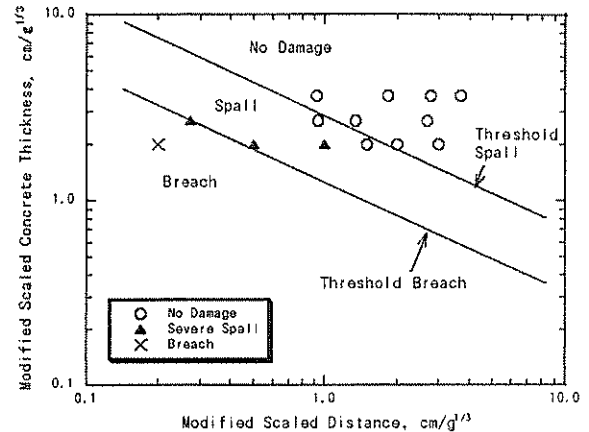


図-7 修正換算距離及び修正換算コンクリート厚さで整理した損傷程度

4. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート版のスタンドオフ爆発及び接触爆発実験を行い、損傷に及ぼす爆発位置の影響を実験的に検討した。得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 鉄筋コンクリート版のクレータ及びスポールの直径や深さ等の損傷は、スタンドオフ距離と爆薬量に大きく依存する。スタンドオフ爆発の場合にも、その距離が短く、爆薬量が大きい場合には、接触爆発の場合と同様にクレータやスポールが発生し、条件によっては貫通孔が生じる。
- (2) スタンドオフ爆発により貫通孔の発生しない場合のクレータ深さは、スタンドオフ距離の増大にほぼ比例して減少する。
- (3) スタンドオフ爆発により貫通孔の発生しない条件の範囲なら、基準となるクレータ深さと換算距離、並びに、評価対象とするスタンドオフ爆発の換算距離からクレータ深さが予測可能である。
- (4) McVay の損傷評価法を用いてスタンドオフ爆発によるスポール及び貫通孔の発生の有無を比較的精度よく予測することができる。

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, 46A, pp.1787-1797, 2000.
- 2) M.K.McVay, *Spall Damage of Concrete Structures*, Technical Report SL88-22, U.S.Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, June 1988.