

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

田中秀明¹・森下政浩²・伊藤孝¹・山口弘³

¹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)

²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)

³正会員 工博 防衛庁技術研究本部企画部 (〒162-8830 東京都新宿区市谷本村町 5-1)

本研究では、鉄筋コンクリート防護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、近接爆発及び穿孔爆発により生じる損傷の評価を行った。試験体には鉄筋コンクリート正方形版を用い、3種の重さの高性能爆薬ペントライトを試験体の近接位置、表面または穿孔内で爆破させて行った。試験後、試験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詳細に検討した。

Key Words : reinforced concrete, detonation, damage, spall, crater

1. 緒言

防衛施設や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防護構造物の局所損傷を考えた場合、爆発位置は大きく3つに分類される。すなわち、構造物の極至近距離で爆発（近接爆発）する場合、構造物表面で爆発（接触爆発）する場合及び構造部材内部で爆発する場合である。これらの中で接触爆発は、構造物の損傷評価を行う上で他の場合の基準として、特に重要視されている。そのため、爆発を受けるコンクリート版または鉄筋コンクリート版の損傷評価に関して種々の報告^{1) - 16)}がなされているが、その大部分は接触爆発を対象としたものである。しかしながら、各研究者及び研究機関はそれぞれの目的及び制約に応じて様々な条件で実験・解析を行っているため、それらの結果を単純に比較したり直接的に設計に適用することは一般に難しい。また、防護構造物の現場設計者の間では、代表的な爆発条件における鉄筋コンクリ

ート構造物のクレータ、スポール及び貫通孔の寸法を、図表や計算式により簡易的に評価したいという要望が強い。このような背景で、筆者らもこれまでに鉄筋コンクリート版の接触爆破実験を行い、試験体損傷を詳細に観察するとともに¹⁾、比較可能な他者の実験結果と合わせてクレータ、スポール及び貫通孔の寸法に関して検討を行っている^{2), 3)}。

鉄筋コンクリート構造物の耐爆設計及び耐爆性評価を考えた場合、近接爆発及び構造部材内の爆発も重要であるが、前述したように報告例は少ない。近接爆発に関連して、米陸軍テクニカル・マニュアル TM5-1300⁴⁾では基礎的な理論に基づいたスポール限界予測式が示されている。この式は、コンクリート版内部の裏面側に生じる反射応力波の最大値及び力積を用いるが一般にこれらの値を求めることは難しく、実用的とは言い難い。また、McVay⁵⁾は鉄筋コンクリート版を用い種々のスタンドオフ距離（爆薬と試験体表面との距離）で爆破試験を行い、300以上の既往の実験データと合わせて検討することにより、換算距離及び換算コ

ンクリート厚さを用いて損傷程度が予測可能であることを示した。しかしながら、この予測法によりクレータ、スポール等の寸法を評価することはできない。竹田・河村⁶⁾及び Hader⁷⁾も同様な試みを行っているが、検討に用いたデータは McVay に比べ限られている。一方、構造部材内部での爆発に関連して、米陸軍テクニカル・マニュアル TM5-855-1⁸⁾には、マスコンクリートの表面または内部で爆発が爆発した場合に生ずるクレータ寸法を予測するためのノモグラフが示されている。これは実験結果に基づいており、標準的な強度のコンクリートを対象としている。しかしながら、有限厚さの鉄筋コンクリート版に対するこのノモグラフの適用性は明らかでない。なお、鉄筋コンクリート構造物の部分的な補修・改修を目的とした発破解体法の1つとして、部材の切断線に沿って穿孔を適当な位置に開け爆薬を装てんして発破する方法(穿孔法)がある^{17) - 19)}。これは、爆薬を分散させて部材を完全に切断するためのものであり、1カ所に爆薬が集中した場合の構造部材の損傷評価に応用することはできない。

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、接触爆破試験、近接爆破試験及び穿孔爆破試験を行い、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、試験体に生じるクレータ、スポール、貫通孔、表面及び内部のひび割れ発生状況などに関し、接触爆発により生じる損傷を基準として近接爆発及び穿孔爆発の損傷評価を行い、これらの特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 実用的な損傷評価法

この節では、単一の爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷評価法に関して、実用的なものについて概要を述べる。接触爆発に関しては筆者ら³⁾の提案する損傷寸法評価法を説明し、近接爆発に関しては McVay⁵⁾のスポール損傷評価式について述べる。なお、穿孔爆発に関する実用的な損傷評価法は見あたらない。

(1) 接触爆発

接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷寸法評価法に関し、筆者ら³⁾の最近の研究成果について概説する。筆者らは、自ら行った接触爆破試験の結果を他者の結果と合わせて検討することに

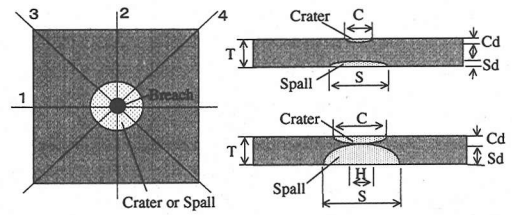


図-1 損傷寸法の定義

より、爆薬の量及び種類、並びにコンクリート厚さから、クレータ深さ、スポール深さ等が定量的に表せることなどの結論を得た。この検討は、板厚に対する横幅の比が3以上の鉄筋コンクリート正方形版の上面中央で爆薬が爆発し、生じるクレータ及びスポールの直径が試験体幅の1/2以下となるような場合を対象とした。解析に用いたデータの試験条件は、コンクリート強度18MPa~50MPa、試験体厚さ4cm~58cm、爆薬25g~12kgであり、爆薬には高性能爆薬であるペントライト(Pentolite)、ペンスリット(PETN)、トリニトロトルエン(TNT)、NSP71(プラスチック爆薬の1種)の他、一般に広く用いられている産業火薬であるアンホ(ANFO)も含んでいる。後述する損傷評価式(1)~(13)の適用範囲をより明確にするためには更なるデータの蓄積が必要であるが、筆者らの知る限り鉄筋コンクリート版に生じるクレータ、スポール等の寸法を評価する唯一の手法である。

耐爆設計では、構造部材板厚方向の損傷程度を評価することが最も重要となる。クレータ深さ及び損傷深さの和(クレータ深さとスポール深さの和)は、それぞれ次式で表すことができる。

(a) クレータ深さ

$$\frac{Cd}{T} = -0.047 \frac{T}{W^{1/3}} + 0.43 \quad (1)$$

(b) 損傷深さの和

(スポールの発生なし, $3.6 < \frac{T}{W^{1/3}}$)

$$\frac{(Cd+Sd)}{T} = \frac{Cd}{T} \quad (2)$$

(クレータ及びスポール, $2.1 \leq \frac{T}{W^{1/3}} \leq 3.6$)

$$\frac{(Cd+Sd)}{T} = -0.51 \frac{T}{W^{1/3}} + 2.1 \quad (3)$$

(貫通孔の発生, $\frac{T}{W^{1/3}} < 2.1$)

$$\frac{(Cd+Sd)}{T} = 1.0 \quad (4)$$

ここで、**図-1**に示すように、Cd はクレータ深さ (cm), Sd はスポール深さ (cm), T は鉄筋コンクリート厚さ (cm), W は爆薬量 (g) であり, $T/W^{1/3}$ は換算コンクリート厚さ ($\text{cm}/\text{g}^{1/3}$) と呼ばれる。換算コンクリート厚さ約 $3.6\text{cm}/\text{g}^{1/3}$ でスポールが発生し始め, 約 $2.1\text{cm}/\text{g}^{1/3}$ でクレータとスポールが連結し貫通孔が生じる。

クレータ深さ及び損傷深さの和をより安全側に評価するためには, 爆薬の種類を考慮し補正する必要がある。この場合, それぞれの寸法は次式で表される。

(a) クレータ深さ

$$\frac{Cd}{T} = -0.046 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 0.42 \quad (5)$$

(b) 損傷深さの和

$$(\text{スポールの発生なし, } 3.6 < \frac{T}{W_m^{1/3}})$$

$$\frac{(Cd+Sd)}{T} = \frac{Cd}{T} \quad (6)$$

$$(\text{クレータ及びスポール, } 2.0 \leq \frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 3.6)$$

$$\frac{(Cd+Sd)}{T} = -0.49 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 2.0 \quad (7)$$

$$(\text{貫通孔の発生, } \frac{T}{W_m^{1/3}} < 2.0)$$

$$\frac{(Cd+Sd)}{T} = 1.0 \quad (8)$$

ここで, W_m は Chapman-Jouquet 爆轟エネルギー (MJ/kg)²⁰⁾ を基にした爆薬の TNT 換算量 (g) であり, $T/W_m^{1/3}$ を修正換算コンクリート厚さ ($\text{cm}/\text{g}^{1/3}$) と呼ぶ。なお, 式 (1) ~ (4) と式 (5) ~ (8) を比べてもわかるように, 換算コンクリート厚さが爆薬量の 3 乗根に逆比例するため, 補正の効果は比較的小さい。

式 (1) ~ (4) または式 (5) ~ (8) を用いて, 貫通孔発生の有無, 並びに, クレータ深さ及びスポール深さを求めれば, 次式によりクレータ直径 C (cm) 及びスポール直径 S (cm) が与えられる。

(a) 貫通孔の生じない場合

$$\frac{C}{T} = 5.0 \frac{Cd}{T} \quad (\text{クレータ直径}) \quad (9)$$

$$\frac{S}{T} = 6.7 \frac{Sd}{T} \quad (\text{スポール直径}) \quad (10)$$

(b) 貫通孔の生じる場合

$$\frac{C}{T} = 62.5 \frac{Cd}{T} - 18.8 \quad (\text{クレータ直径}) \quad (11)$$

$$\frac{S}{T} = -58.8 \frac{Sd}{T} + 41.8 \quad (\text{スポール直径}) \quad (12)$$

また, 貫通孔の生じる場合, 貫通孔直径 H (cm) は次式で与えられる。

$$\frac{H}{T} = -6.7 \log \left(\frac{T}{W_m^{1/3}} \right) + 2.7 \quad (13)$$

以上示したように, 式 (1) ~ (13) を用いて接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷寸法が予測可能である。

(2) 近接爆発

近接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。McVay⁵⁾ は種々の条件で壁の近接爆破実験を行い, 壁裏面に生じるスポール損傷を損傷なし, スポール限界, 中程度のスポール (スポール深さが壁厚の 1/3 以下), 著しいスポール及び貫通孔発生の 5 段階に分類した。そして, 実験結果から既往の理論的及び経験的損傷評価法の有効性を検討し, 換算距離および換算コンクリート厚さを用いた損傷評価法が精度に優れ実用であるとの結論を得た。さらに, McVay は比較可能な他者の実験結果も合わせてこの損傷評価法の検討を行い, スポール限界及び貫通限界が次式のように表せることを図示した。

(a) スポール限界

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = 2.80 \left(\frac{R}{W_m^{1/3}} \right)^{-0.59} \quad (14)$$

(b) 貫通限界

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = 1.24 \left(\frac{R}{W_m^{1/3}} \right)^{-0.59} \quad (15)$$

ここで, T は壁厚 (cm), R は壁表面と爆薬との距離 (cm), W_m は爆薬の TNT 換算量 (g) であり, 本研究では $T/W_m^{1/3}$ 及び $R/W_m^{1/3}$ をそれぞれ修正換算コンクリート厚さ及び修正換算距離と呼ぶ。これらの式の推奨適用範囲は, スタンドオフ距離で 0~152cm, 爆薬の TNT 換算量で 13g~13.6kg, 壁厚で 6.4~110cm, コンクリート圧縮強度で 17.2~48.2MPa, 鉄筋比で 0.066~0.830% である。

3. 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-2**に示すような 60cm

表-1 コンクリートの配合

Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Mass (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad.*
6.1	3.1	42.1	47.9	165	392	851	956	3.92

* Water reducing agent

表-2 鉄筋の機械的性質

Steel Designation	Nominal Diameter (mm)	Young's Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SD295A	6.0	206	362	501	29

×60cm×10cmの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（京都府亀岡市産）及び砕石（京都府亀岡市産、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、表-1に示すように水セメント比 42.1%、細骨材率 47.9%である。また、コンクリートの 28 日圧縮強度は 27.9MPa である。鉄筋比は 0.5% であり、図-2に示すように配筋した。縦筋及び横筋には異形鉄筋 D6 を用いた。鉄筋の機械的性質を表-2に示す。試験体はコンクリート材令が約 4～6 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 間隔でグリットを描いた。

爆薬にはペントライト (Pentolite) を用いた。ペントライトは、ペンスリット (PETN) 50% とトリニトロトルエン (TNT) 50% から成る代表的な高性能爆薬である。爆薬は直径と高さが等しい円柱形で、薬量 18g (直径 φ=24mm)、47g (φ=33mm) 及び 113g (φ=44mm) の 3 種類を用いた。

(2) 爆破方法

爆破試験は内径約 8m の爆破試験ドーム内で実施した。接触爆破試験、近接爆破試験及び穿孔爆破試験のいずれの場合も試験体は、図-3に示すように角材で作製した 2 個の台座の上に設置し、支持点間距離 51.0cm の両端単純支持とした。台座は、ドーム内の平坦な砂地盤に敷かれた厚さ 1.0cm のベニヤ板上に置き、試験体裏面から生ずる破片の跳ね返りを避けるのに十分な高さ 14.5cm とした。爆薬は 6 号電気雷管により発破器を用いて爆破させた。

爆破条件を表-3に示す。爆破条件は、接触爆発試験による損傷を基準として、近接爆破及び穿孔爆破による損傷傾向を評価するための条件とした。まず、接触爆破試験の場合、爆薬位置は図-

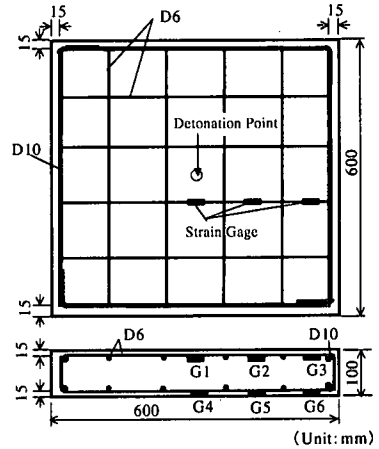


図-2 鉄筋コンクリート試験体

3 (a) に示すように試験体の上面中央とし、薬量 18g、47g 及び 113g で 2 回ずつ行った。

次に、近接爆破試験の場合、図-3 (b) に示すように爆薬は試験体上の保持治具上に設置し、治具の高さを定めることによりスタンドオフ距離（爆薬表面と試験体表面との距離）を調整した。また、治具は試験体の爆発損傷に影響を与えないような構造とし、直径約 1mm の針金と薄紙（コピー紙）で作製した。薬量は 18g、47g 及び 113g とし、それぞれスタンドオフ距離 2.5cm～10.0cm、1.0cm～10.0cm 及び 1.0cm～15.0cm で、一部を除き各条件 1 回ずつ試験を行った。

最後に、穿孔爆破試験の場合、爆薬は図-3 (c) に示すように試験体上面の円孔内中央に置いた。薬量は 18g 及び 47g とし、穿孔深さ 0.5cm、1.0cm、2.5cm 及び 5.0cm で 1 回ずつ試験を行った。穿孔はコンクリート打設時に予め開けられており、穿孔内に爆薬を挿入することを考慮して、爆薬直径に対して穿孔の直径を約 1.1 倍とした。穿孔の直径は薬量 18g (直径 φ=24mm) 用が 27mm、薬量 47g (φ=33mm) 用が 37mm である。なお、薬量 18g の穿孔深さ 2.5cm 及び 5.0cm の場合と薬量 47g の穿

表-3 爆破条件

Detonation Type	Charge Weight (g)	Standoff Distance (cm)	Hole Depth (cm)	Number of Specimens	
Contact	18	0	0	2	
	47	0	0	2	
	113	0	0	2	
Standoff	18	2.5	-	1	
		5.0	-	1	
		7.5	-	1	
		10.0	-	1	
	47	1.0	-	1	
		3.5	-	1	
		5.0	-	1	
		10.0	-	1	
	113	1.0	-	1	
		2.5	-	2	
		5.0	-	1	
		7.5	-	1	
10.0		-	2		
Internal	18	-	0.5	1	
		-	1.0	1	
		-	2.5	1	
		-	5.0	1	
	47	-	0.5	1	
		-	1.0	1	
		-	2.5	1	
		-	5.0	1	
		-	-	-	-
		-	-	-	-

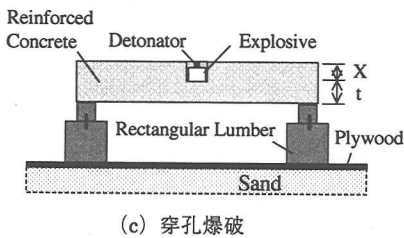
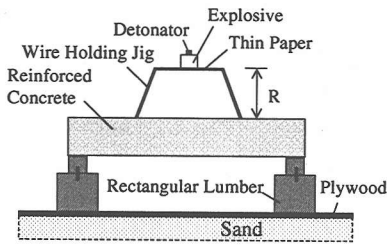
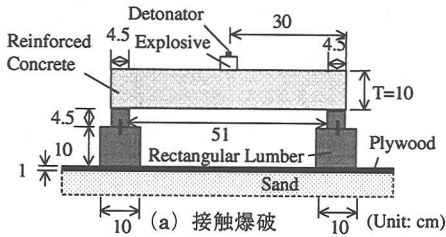


図-3 試験体の設置

孔深さ 5.0cm の場合を除き、爆薬の一部は試験体上面より上側となっている。

接触、近接、穿孔いずれの爆破試験の場合も、同一条件下の試験回数が1回または2回と少ないが、経費的、時間的な制約の中でより広範な条件で試験を行うことを意図したためである。

(3) 計測方法

爆破終了後、試験体に生じたクレータ、スポール、表面ひび割れなどの損傷状況を詳細に観察し、クレータ、スポール及び貫通孔の寸法測定を行った。寸法測定は、まず試験体損傷部をエアブラシで吹き、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-1に示すようにクレータ及びスポールの直径及び深さの他、貫通孔が生ずる場合の直径である。クレータ、スポール及び貫通孔の直径は、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、貫通孔が発生しない場合には、それぞれ試験体の爆発面及び裏面から最も深い表面位置で、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。そして最後に、損傷の生じた試験体をコンクリート・カッターにより図-1の直線1に沿って切断し、試験体内部の

損傷状況の観察を行った。

4. 実験結果

(1) クレータ、スポール及び貫通孔

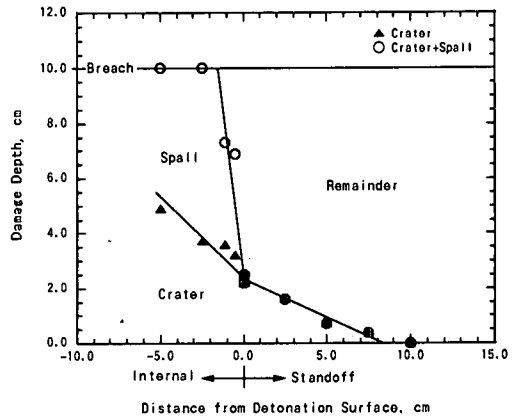
各爆薬量の場合について爆発位置と損傷程度との関係を図-4に示す。図の横軸は鉄筋コンクリート版上面と爆薬下面との距離であり、接触状態を基準としてスタンドオフ距離を正、穿孔深さを負としている。また、縦軸は版表面からのクレータ深さ及びスポール深さとなっており、両者の和が10cm(版厚)となると貫通孔が生じる。なお、図中の直線は、クレータ、スポール及び貫通孔の発生の有無に着目して、クレータ深さ及びスポール深さの特徴を定性的に表すため補助的に描いたものである。

まず、図-4(a)に示す爆薬量18gの場合、接触爆発により爆発面にクレータが生じる。そして、近接爆発では、スタンドオフ距離にはほぼ比例してクレータ深さは減少し、スタンドオフ距離10cmではクレータは発生しない。一方、穿孔爆発では、穿孔深さ0.5cmでもスポールが著しく生じ、深さ2cmで貫通孔が生じる。この場合のクレータ深さは穿孔深さにはほぼ比例して増大するが、その傾きは近接爆発の場合に比べ若干大きい。しかしながら、最初の孔深さを考慮すると、穿孔深さの増大とともにクレータ深さが増大しにくくなる傾向が認められる。例えば、穿孔深さ5cmの場合、クレータ深さも約5cmでほとんど変化はない。

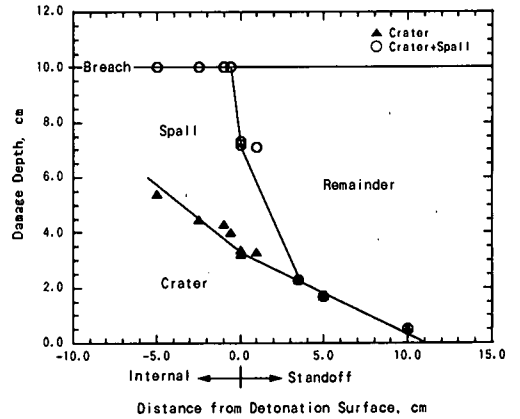
次に、図-4(b)に示す爆薬量47gの場合、接触爆発により爆発面及び裏面にそれぞれクレータ及びスポールが生じる。スタンドオフ距離3.5cmではスポールは生じず、爆薬量18gの場合と同様、クレータ深さはスタンドオフ距離にはほぼ比例して減少している。穿孔爆発では、穿孔深さ0.5cmで貫通孔が生じる。穿孔爆発のクレータ深さについても、爆薬量18gの場合と同様の傾向であり、近接爆発の場合に比べ若干大きな傾きで穿孔深さにはほぼ比例して増大している。

最後に、爆薬量113gの場合を図-4(c)に示す。接触爆発により試験体には貫通孔が生じる。スタンドオフ距離1cmではなお貫通孔が生じるが、2.5cmでは生じず、10cmではスポールの発生もない。貫通孔の発生しない場合のクレータ深さは、他の薬量の場合と同様、スタンドオフ距離にはほぼ比例して減少している。

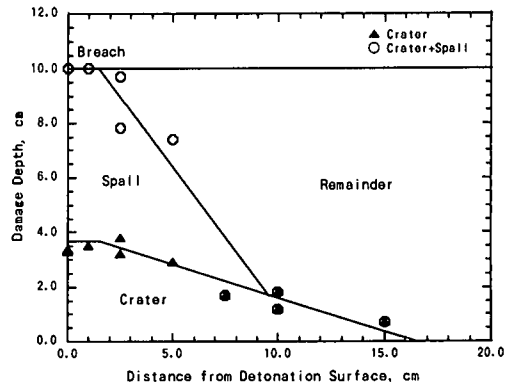
なお、いずれの爆薬量の場合も、接触爆発によ



(a) 爆薬量 18g



(b) 爆薬量 47g



(c) 爆薬量 113g

図-4 爆発位置と損傷程度の関係

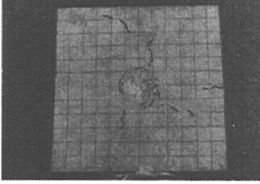
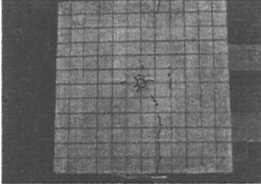
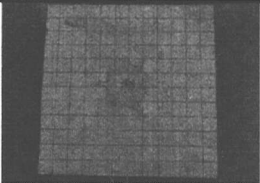
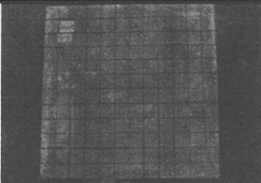
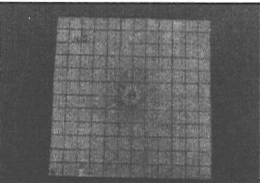
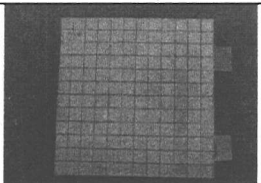
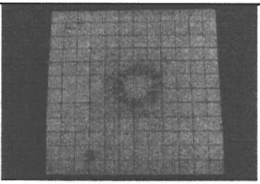
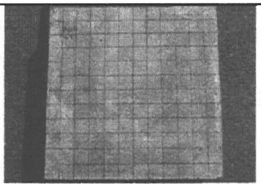
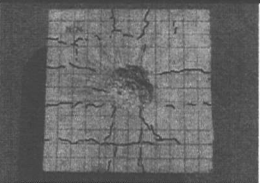
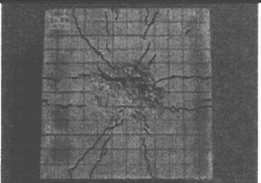
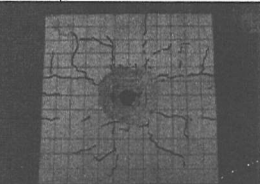
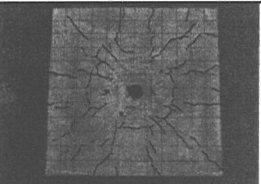
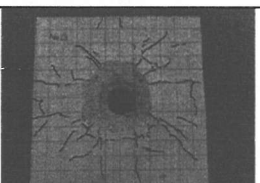
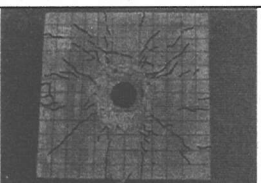
Condition	Detonation Surface	Back Surface
Contact		
Standoff Distance 2.5cm		
Standoff Distance 5cm		
Standoff Distance 10cm		
Hole Depth 1cm		
Hole Depth 2.5cm		
Hole Depth 5cm		

図-5 爆薬量 18g の爆発によるひび割れの発生状況

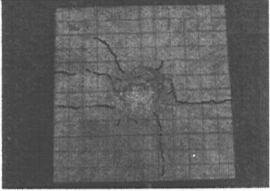
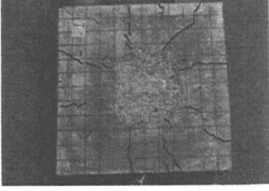
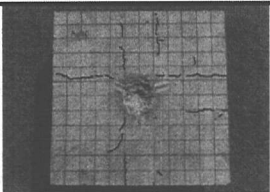
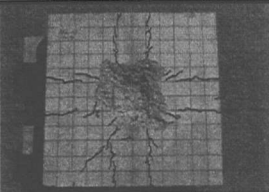
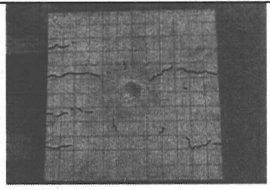
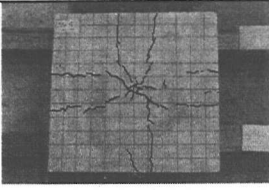
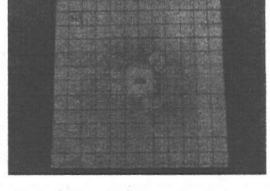
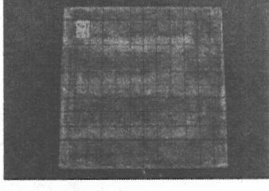
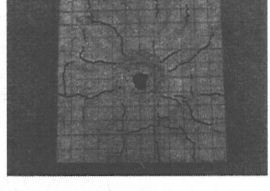
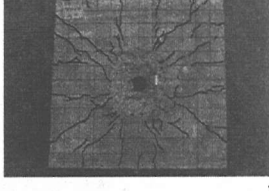
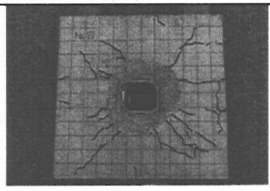
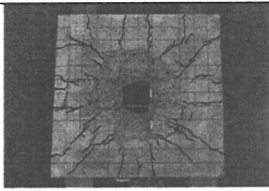
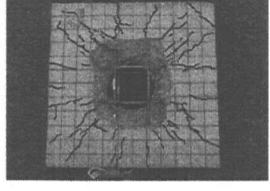
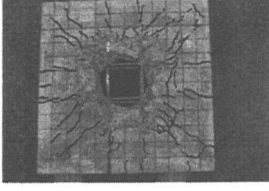
Condition	Detonation Surface	Back Surface
Contact		
Standoff Distance 1cm		
Standoff Distance 3.5cm		
Standoff Distance 10cm		
Hole Depth 1cm		
Hole Depth 2.5cm		
Hole Depth 5cm		

図-6 爆薬量 47g の爆発によるひび割れの発生状況

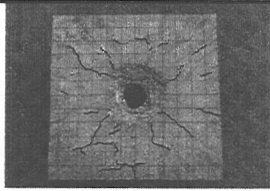
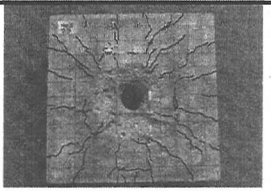
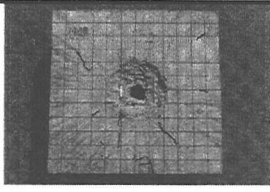
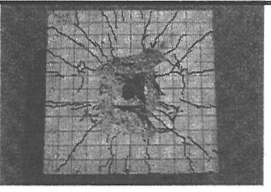
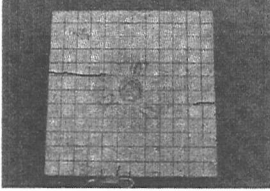
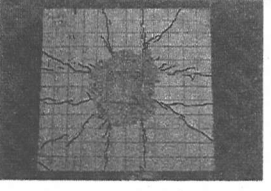
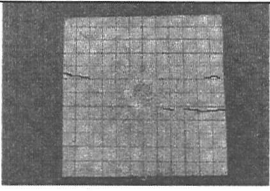
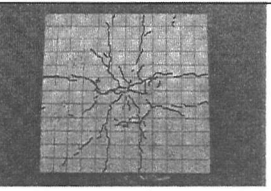
Condition	Detonation Surface	Back Surface
Contact		
Standoff Distance 1cm		
Standoff Distance 5cm		
Standoff Distance 10cm		

図-7 爆薬量 113g の爆発によるひび割れの発生状況

り生じたクレータ深さ及びスポール深さは、式(1)～(8)による予測値とほぼ一致する。

(2) 試験体表面のひび割れ

爆発による試験体表面の損傷状況をひび割れに着目して述べる。代表的な爆破条件のひび割れ発生状況を図-5～7に示す。図では試験体表面の破片が取り除かれており、微細なひび割れが太く強調されている。また、試験体は爆発時には図中の左端及び右端で支持されていた。

最初に、爆薬量 18g の爆発によるひび割れ発生状況を図-5に示す。接触爆発の場合、爆発面にはクレータ周辺部を中心に若干のひび割れが生じており、裏面中央部には小さな円形状のひび割れが見られスポール限界に近いことを示唆している。スタンドオフ距離 2.5cm 以上では、爆発面にクレータが生じる場合も含めて、爆発面及び裏面にひび割れは認められない。なお、近接爆発の場合に

爆発面中央部に見られる円環状の様子は、爆発により付着したすすである。次に、穿孔爆発の場合に着目すると、穿孔深さ 1cm では爆発面及び裏面にそれぞれクレータ及びスポールが生じるが、両表面ともほぼ鉄筋に沿った縦横のひび割れが見られる。これは、主に鉄筋のかぶり量の少なさに起因するものと考えられる²¹⁾。穿孔深さ 2.5cm 以上では貫通孔が生じ、鉄筋に沿った縦横のひび割れ他、中央部から放射状のひび割れも見られ、ひび割れ発生程度は爆発面よりも裏面のほうが著しい。放射状ひび割れは、コンクリートの膨張により爆発点を中心に円周方向に引張応力が作用するため生ずると考えられる²²⁾。

爆薬量 47g の爆発の場合を図-6に示す。基準となる接触爆発では爆発面及び裏面にそれぞれクレータ及びスポールが生じ、両表面ともほぼ鉄筋に沿った縦横のひび割れが主に認められる。これらのひび割れは近接爆発の場合にも見られるが、発

生程度はスタンドオフ距離が増大するほど、そして、裏面より爆発面のほうが少ない傾向にある。スタンドオフ距離 3.5cm では裏面中央部に小さな円形状のひび割れが見られる。また、スタンドオフ距離 10cm では爆発面に小さなクレータが生じるが、爆発面及び裏面にひび割れは認められない。穿孔爆発では貫通孔が生じ、穿孔深さが浅い場合にはほぼ鉄筋に沿った縦横のひび割れが、深い場合には中央部からの放射状ひび割れが支配的となる傾向がある。

最後に、爆薬量 113g を用いた近接爆発によるひび割れ発生状況を図-7 に示す。基準となる接触爆発の場合には貫通孔が生じ、中央部から放射状にひび割れが認められるが、ひび割れの発生程度は爆発面よりも裏面のほうが著しい。ひび割れはスタンドオフ距離の増大とともに減少する傾向があり、爆発面に比べ裏面のほうが格段に多い。また、スタンドオフ距離の増大とともに、放射状ひび割れよりもほぼ鉄筋に沿った縦横のひび割れのほうが支配的となる傾向がある。スタンドオフ距離 10cm では、裏面中央部に円形状のひび割れが見られる。

以上のことから、爆発位置に関わらず、およそスポール発生限界から貫通孔発生限界までの損傷程度ではほぼ鉄筋に沿ったひび割れが、大きな貫通孔の生じる場合には中央部からの放射状ひび割れが支配的となる傾向がある。また、ひび割れの発生は爆発面より裏面のほうが多く、爆源が試験体から離れ試験体応答がより全体的となる近接爆発でこの傾向が著しい。なお、鉄筋は、応力波の伝播に起因したクレータ及びスポールの発生にはあまり影響しないが、全体的な割れの拘束などには有効であるとされている⁶⁾。

(3) 試験体内部のひび割れ

各爆破条件により破損した試験体の断面写真を図-8～10 に示す。いずれの試験体も上が爆発面側で、ひび割れが太く強調されている。まず、図-8 に示す爆薬量 18g の場合に着目すると、裏面に小さな円形状のひび割れが認められた接触爆破試験体では、内部裏面側にひび割れが生じておりスポール限界に近いことがわかる。表面にひび割れの認められなかった近接爆破試験体では、内部にもひび割れは認められない。穿孔爆破試験体について、穿孔深さ 1cm の場合にはスポール破壊面に沿うように内部にひび割れが見られる。このようなひび割れは、筆者ら^{1), 3)}の過去の接触爆破試験でも観察されており、スポール破壊面が新た




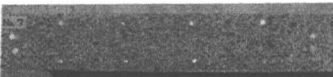
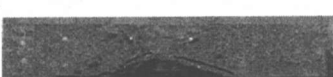


Condition	Cross Section
Contact	
Standoff Distance 2.5cm	
Standoff Distance 5cm	
Standoff Distance 10cm	
Hole Depth 1cm	
Hole Depth 2.5cm	
Hole Depth 5cm	

図-8 爆薬量 18g の爆発による内部損傷

な自由表面となり多重にスポールが生じるためと考えられる^{2, 2)}。貫通孔の生じる穿孔深さ 2.5cm 及び 5cm の場合にも、スポール破壊面に沿うように多重にひび割れが見られる。穿孔深さ 5cm の場合には、クレータ破壊面に沿ったひび割れも認められる。これは、本研究では爆発条件によらず爆発面側及び裏面側の窪みをそれぞれクレータ及びスポールと称しているが、穿孔深さが大きくなると爆発面側では通常のクレータ生成機構である圧壊の他、応力波の反射によるスポール破壊も生じるためと考えられる。また、穿孔深さ 5cm の場合、露出した内部の上下の鉄筋は若干外側に塑性変形しており、内部から爆発面側及び裏面側の両方に爆圧が強く伝播したことを示している。

次に、爆薬量 47g の場合の断面写真を図-9 に示す。接触爆発及びスタンドオフ距離 1cm の近接爆発では、スポール破壊面に沿うようにひび割れが見られる。試験体裏面に小さな円形状のひび割

れが認められたスタンドオフ距離 3.5cm の場合、内部裏面側にハの字状のスポールひび割れが生じている。また、表面にひび割れが生じないスタンドオフ距離 10cm の場合には、内部にも明瞭なひび割れは認められない。一方、貫通孔の生ずる穿孔深さ 1cm の穿孔爆発の場合、スポール破壊面に沿うように多重にひび割れが見られる。穿孔深さ 2.5cm 及び 5cm の場合には、スポール破壊面及びクレータ破壊面に沿うようにひび割れが生じるとともに、露出した上下の鉄筋も外側に大きく変形している。

最後に、**図-10** に示す爆薬量 113g の場合の内部ひび割れについて述べる。貫通孔の生ずる接触爆発及びスタンドオフ距離 1cm の近接爆発の場合、スポール破壊面に沿った多重ひび割れが認められる。貫通孔の生じないスタンドオフ距離 5cm の場合にもスポール破壊面に沿った多重ひび割れが見られる。また、スポール破片は生じないが試験体の裏面中央にひび割れが生じたスタンドオフ距離 10cm の場合には、内部裏面側にハの字状のスポールひび割れが生じている。

以上のことから、爆発条件によらず外観的なクレータ、スポール及びひび割れの発生状況が類似であれば、試験体内部のひび割れ発生状況も類似となることがわかる。すなわち、貫通孔の開く場合を含めスポールの発生する場合には、スポール破壊面に沿って多重にひび割れが生じる。また、穿孔深さの大きな穿孔爆発では、爆発面側のクレータ破壊面に沿ってもひび割れが生じる。さらに、スポール破片は生じないが裏面中央部にひび割れが生じる場合には、内部にハの字状のスポールひび割れが生じるが、裏面にひび割れが生じない場合には、内部にも明瞭なひび割れは生じない。

5. クレータ、スポール及び貫通孔の損傷評価結果

鉄筋コンクリート防護構造物の耐爆設計及び耐爆性評価において、爆発により生じるクレータ及びスポールの寸法、並びに、貫通孔発生の有無が損傷程度を表す指標として特に重要である。ここでは、これらに関して近接爆発及び穿孔爆発の場合の損傷評価を行い、接触爆発の場合と比較することによりその特徴を述べる。

(1) 近接爆発

近接爆発により生じたクレータ深さ及びスポー

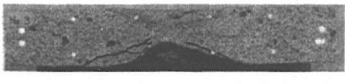
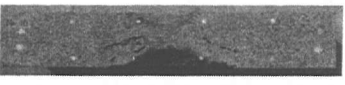
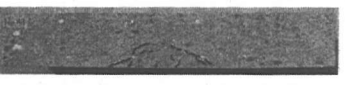
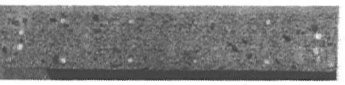



Condition	Cross Section
Contact	
Standoff Distance 1cm	
Standoff Distance 3.5cm	
Standoff Distance 10cm	
Hole Depth 1cm	
Hole Depth 2.5cm	
Hole Depth 5cm	

図-9 爆薬量 47g の爆発による内部損傷

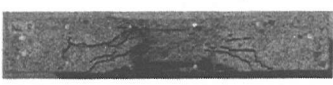
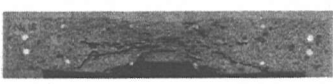
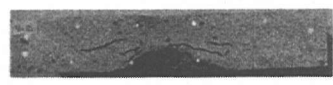

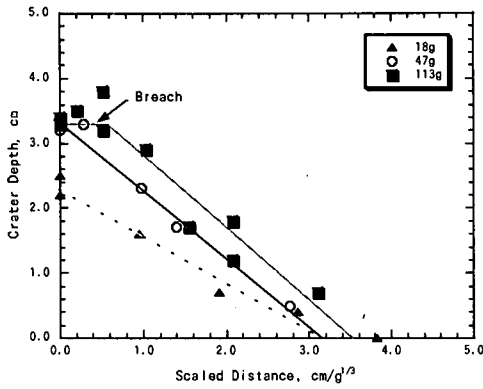
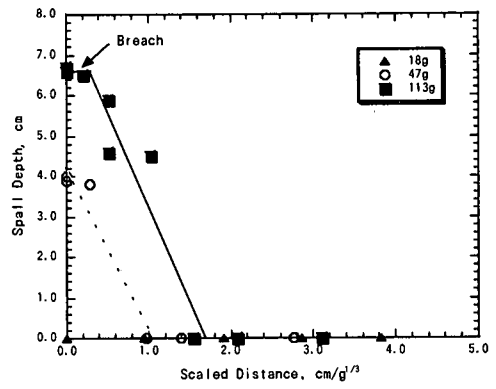
Condition	Cross Section
Contact	
Standoff Distance 1cm	
Standoff Distance 5cm	
Standoff Distance 10cm	

図-10 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-11 近接爆発によるクレータ深さ及びスポール深さと換算距離の関係

ル深さと換算距離の関係を図-11に示す。換算距離 $0\text{cm/g}^{1/3}$ は接触爆発を意味している。図中の各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。

まず、図-11(a)のクレータについて着目すると、いずれの爆薬量の場合も換算距離にほぼ比例してクレータ深さが減少することがわかる。ただし、薬量113gの貫通孔の発生する場合のクレータ深さは、接触爆発に関する既報の結果^{2)・3)}と同様、版厚の約1/3(約3.3cm)となっている。薬量18g及び47gの場合のクレータ発生限界は換算距離で約 $3.2\text{cm/g}^{1/3}$ であり、薬量113gの場合は約 $3.5\text{cm/g}^{1/3}$ である。

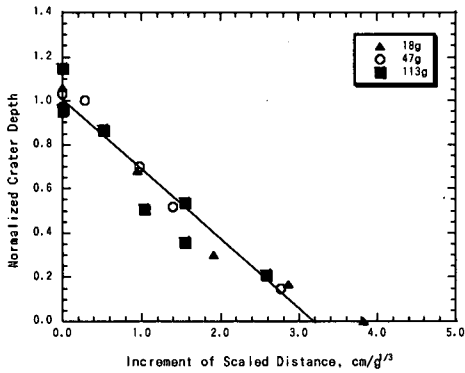
次に、図-11(b)に示すスポールについて見ると、接触爆発によりスポールが生じない薬量18gの場合には近接爆破でもスポールは生じない。また、データ数が限られているため明確ではないが、薬量47g及び113gのスポール限界値は換算距離でそれぞれ約 $1.0\text{cm/g}^{1/3}$ 及び約 $1.7\text{cm/g}^{1/3}$ である。

前述したように、貫通孔の発生しない範囲では、いずれの爆薬量の場合も換算距離にほぼ比例してクレータ深さが減少する。そこで、ここでは薬量18g及び47gの場合は貫通孔の生じない接触爆発(換算距離 $0\text{cm/g}^{1/3}$)の結果を基準とし、薬量113gの場合は本研究の範囲で貫通孔の生じない最小スタンドオフ距離 2.5cm (換算距離 $0.52\text{cm/g}^{1/3}$)の近接爆発の結果を基準としてデータ整理を行った。それぞれの薬量について、基準条件での損傷深さを縦軸とし、基準換算距離に対する換算距離の増分を横軸として図-12に示す。図-12(a)より、無

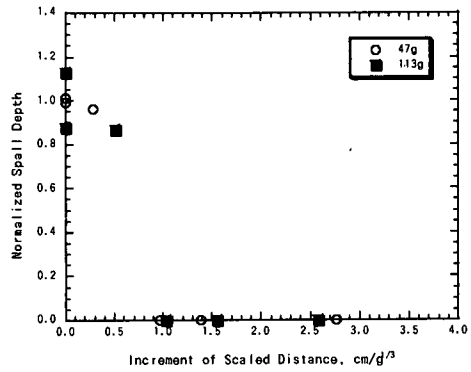
次元化したクレータ深さは最小2乗法による1本のマスター・カーブで表すことが可能であり、クレータ発生限界は約 $3.2\text{cm/g}^{1/3}$ であることがわかる。すなわち、貫通孔の発生しない条件の範囲なら、接触爆発または近接爆発の基準とするクレータ深さ及び換算距離、並びに、評価対象とする近接爆発の換算距離からクレータ深さが予測可能である。次に、スポール深さに関して、クレータ深さの場合と同様な整理を行った結果を図-12(b)に示す。ただし、薬量18gの場合は接触爆発及び近接爆発によりスポールを生じないため、図中には薬量47g及び113gの結果のみが示されている。図-11(b)に比べ薬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。

近接爆発によるクレータ及びスポールの直径と深さの関係を図-13に示す。図には、本研究で得られた接触爆発のデータ及び式(9)～(12)で与えられる接触爆発の予測値が併せて示されている。

まず、図-13(a)に示すクレータについて、貫通孔の発生しないデータは接触爆発の場合より若干大きくなる傾向がある。これは、同じクレータ深さであれば近接爆発のほうが接触爆発の場合よりもクレータ直径が若干小さくなることを示しており、爆源が試験体から離れることにより、ある一定以上の圧力が加わる試験体の範囲が小さくなるためと考えられる。一方、貫通孔の生じたデータは、本研究では1つしか得られなかったため傾向を述べることは難しいが、接触爆発の予測値とは

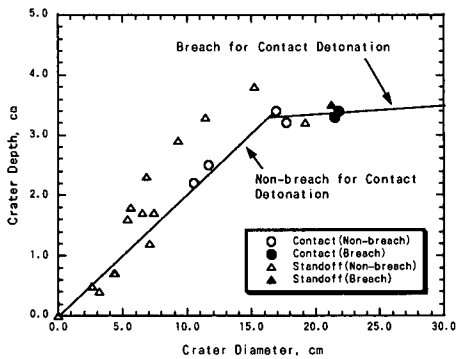


(a) クレータ

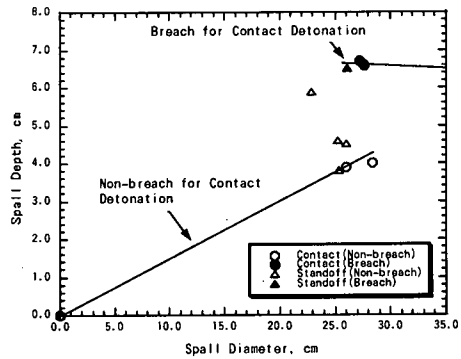


(b) スポール

図-12 近接爆発により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



(a) クレータ



(b) スポール

図-13 近接爆発によるクレータ及びスポールの直径と深さの関係

ば一致した。次に、スポールの直径と深さの関係を図-13(b)に示す。データ数が限られてはいるが、貫通孔発生前のデータのばらつきは大きい。この傾向は既報^{2), 3)}の接触爆発の場合と同様であり、スポール破壊面が複雑になるためと考えられる。

McVay にならって試験体に生じた損傷を分類し、修正換算距離及び修正換算コンクリート厚さを用いてデータ整理した結果を図-14に示す。なお、修正換算距離及び修正換算コンクリート厚さの算出に用いる TNT 換算量は Chapman-Jouguet 爆轟エネルギー基準で求めた。また、図中には、式(14)及び式(15)でそれぞれ与えられる、スポール限界及び貫通限界が併せて示されている。図より McVay の損傷評価法により比較的精度良く損傷程度を予測可能であることがわかる。ここで、McVay の損傷評価法の物理的意味について若干の考察を試みる。図-11に示したように近接爆発によるクレータ及びスポールの深さは、接触爆発の場合を

最大にして、換算距離すなわち修正換算距離とともに減少する傾向がある。一方、接触爆発による損傷深さは、式(5)~(8)に示したように修正換算コンクリート厚さの関数となっている。すなわち、McVay の損傷評価法は、接触爆発を基準として近接爆発により生じる損傷程度を評価する方法とも考えられる。なお、McVay は自らの損傷評価法の物理的意味について言及していない。

(2)穿孔爆発

穿孔爆発によるクレータ深さ及びスポール深さと換算コンクリート厚さの関係を図-15に示す。ただし、換算コンクリート厚さの算出には、試験体厚さから穿孔深さを除いた残り厚さを用いた。また、図中には比較のため、式(1)~(4)で与えられる接触爆発の予測値も示されている。クレータ深さのデータは、爆薬量及び穿孔深さの違いにより爆圧の拘束条件が異なるにも関わらず直

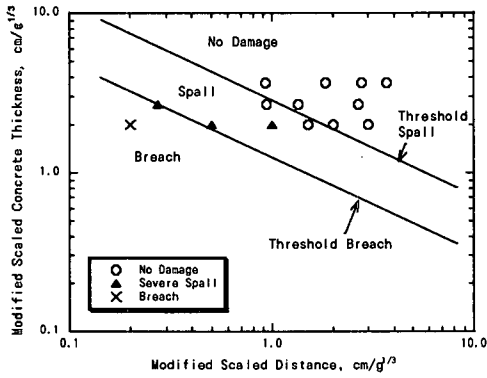


図-14 修正換算距離及び修正換算コンクリート厚さで整理した損傷程度

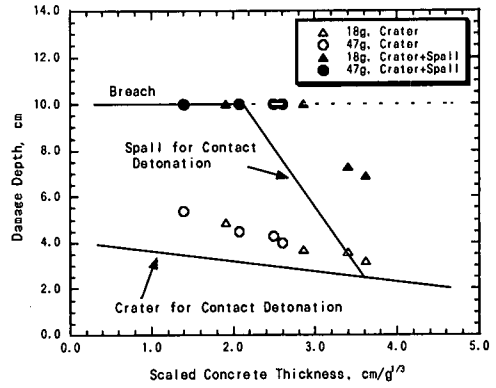
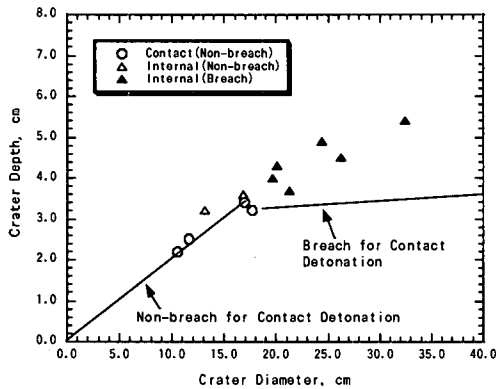
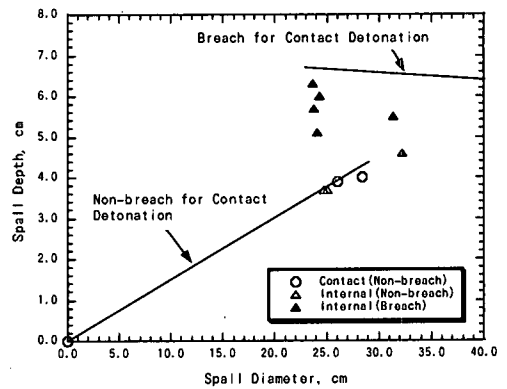


図-15 穿孔爆発による損傷深さと換算コンクリート厚さの関係



(a) クレータ



(b) スポール

図-16 穿孔爆発によるクレータ及びスポールの直径と深さの関係

線の、同じ換算コンクリート厚さに対し接触爆発の場合の約 1.4 倍となっている。貫通限界に対応する換算コンクリート厚さは、データが限られているため明確でないが、接触爆発の場合より大きく約 $2.9\text{cm/g}^{1/3}$ である。すなわち、穿孔爆発では接触爆発に比べ容易に貫通孔が発生する。

次に、穿孔爆発によるクレータ及びスポールの直径と深さの関係を図-16 に示す。図には、本研究で得られた接触爆発のデータ及び式(9)～(12)で与えられる接触爆発の予測値が併せて示されている。まず、図-16(a)に示すクレータについて、貫通孔の生じないデータは接触爆発の結果とほぼ一致している。一方、貫通孔の生じたデータは、貫通孔の生じない接触爆発の予測値のほぼ延長線上にあり、貫通孔の生じた接触爆発の予測値と比べると同じ直径に対して深い。これは、主に穿孔

深さの影響と考えられる。

次に、スポールの直径と深さの関係を図-16(b)に示す。貫通孔の生じないデータは、接触爆発の予測値とほぼ一致している。一方、貫通孔の生じたデータは接触爆発の予測値より小さくなるが、これは前述したようにクレータ深さが相対的に大きくなるためである。

最後に、穿孔爆発により生じた貫通孔の直径と換算コンクリート厚さの関係を図-17 に示す。図中の曲線は最小 2 乗法により求めたものである。貫通孔直径は換算コンクリート厚さと比較的相関が良いことがわかる。ここで注目すべきは、貫通孔の発生限界が約 $3.5\text{cm/g}^{1/3}$ となっている点である。これは、図-15 で示した損傷深さで評価した値より大きい。設計への応用を考えた場合、損傷程度を安全側に評価する必要があるため、貫通限

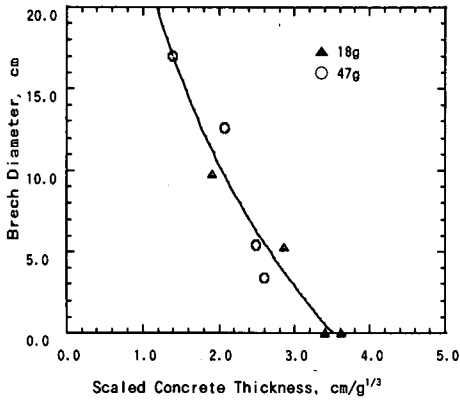


図-17 穿孔爆発による貫通孔直径と換算コンクリート厚さの関係

界には損傷深さで評価した値を用いるのが適当と言える。

6. 結 言

本研究では、鉄筋コンクリート版の接触爆破試験、近接爆破試験及び穿孔爆破試験を行い、損傷に及ぼす爆発位置の影響を実験的に検討した。特に、接触爆発による損傷を基準として、近接爆発及び穿孔爆発により生じる損傷の評価を行った。得られた主な結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 近接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。また、穿孔爆発によるクレータ深さは、穿孔深さにほぼ比例して増大する。
- (2) 試験体表面に生じるひび割れは、爆発条件に関わらず、およそスポール発生限界から貫通孔発生までの損傷程度の場合にはほぼ鉄筋に沿って生じ、大きな貫通孔の開く場合には中央部から放射状に生じる傾向がある。
- (3) 爆発条件に関わらず外観的な損傷状況がほぼ同じであれば、試験体内部のひび割れ発生状況もほぼ同じとなる。試験体内部には爆発条件によりスポールひび割れが生じる。
- (4) McVayの損傷評価法を用いて近接爆発によるスポール及び貫通孔の発生を比較的精度良く予測することができる。
- (5) 近接爆発により貫通孔の発生しない条件の範囲なら、基準とする接触爆発または近接爆発のクレータ深さ及び換算距離、並びに、

評価対象とする近接爆発の換算距離からクレータ深さが予測可能である。

- (6) 穿孔爆発によるクレータ深さを換算コンクリート厚さで整理するとほぼ直線で近似することができ、同じ換算コンクリート厚さに対し接触爆発の場合の約1.4倍となる。
- (7) 穿孔爆発による貫通孔直径は換算コンクリート厚さと比較的相関が良い。

参考文献

- 1) 森下政浩, 田中秀明, 伊藤孝, 山口弘: 鉄筋コンクリート版の接触爆破, 第29回安全工学シンポジウム講演予稿集, pp.275-228, 1999.
- 2) 田中秀明, 森下政浩, 伊藤孝, 山口弘: 鉄筋コンクリート版の耐爆性評価, 第7回機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム論文集, pp.46-49, 2000.
- 3) 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.
- 4) *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, TM5-1300, Departments of the Army, the Navy and the Air Force, p4-181, 1990.
- 5) McVay, M. K.: *Spall Damage of Concrete Structures*, Technical Report SL88-22, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, June 1988.
- 6) 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, 46-4, pp.179-191, 1985.
- 7) Hader, H.: *Effects of Bare and Cased Explosive Charges on Reinforced Concrete Walls*, *Symposium on the Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures*, pp.221-226, 1983.
- 8) *Fundamentals of protective design for conventional weapons*, TM5-855-1, Headquarters, Department of the Army, Cha.5, 1986.
- 9) 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, 43-1, pp.156-167, 1982.
- 10) 森下政浩, 山口弘, 安藤智啓: 接触爆発を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷評価, 第28回安全工学シンポジウム講演予稿集, pp.217-220, 1998.
- 11) Lonquist, L.: *The effects of high explosives in contact with reinforced concrete slabs*, 6th international symposium on interaction of nonnuclear munitions with structures, pp.262-266, 1993.

- 12) Eible, J. and Ockert, J.: Response of concrete structures to shock loading, *7th international symposium on interaction of nonnuclear munitions with structures*, pp.31-38, 1995.
- 13) Eible, J. and Ockert, J.: Problems concerning constitutive laws for shock waves in concrete, *Specialty symposium on structures response to impact and blast*, pp.174-183, 1996.
- 14) Kraus, D., Roetzer, J. and Thoma, K.: Effect of high explosive detonation on concrete structures, *Nuclear engineering and design*, 150, pp.304-314, 1994.
- 15) Kraus, D. and Roetzer, J.: A computational model for concrete structures subjected to high pressure and high strain-rates, *7th international symposium on interaction of nonnuclear munitions with structures*, pp.381-388, 1995.
- 16) Kraus, D., Roetzer, J., Ruppert, M. and Carl, D.: Material behavior of concrete subjected to high pressure and high strain rates, *Specialty symposium on structures response to impact and blast*, pp.184-195, 1996.
- 17) 中原正二: 火薬学概論, 産業図書, pp.234-237, 1983.
- 18) 日本産業火薬会資料編集部編: 産業火薬, pp.232-233, 1980.
- 19) スティグ・オロフソン (発破技術委員会監修): 最新発破技術ハンドブック, 山海堂, pp.252-253, 1992.
- 20) Lee, E.L., Horning, H.C. and Kury, J.W.: *Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-50422*, 1968.
- 21) 田村博, 富士岳, 笠井哲郎: わかりやすいコンクリート構造物の非破壊検査, オーム社, pp.92-95, 1996.
- 22) Rinehart, J.S. and Pearson, J.: *Behavior of Metals under Impulsive Loads*, ASM, pp.123-145, 1954.

(2000.6.29 受付)

EFFECTS OF DETONATION POINTS ON THE DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE SLABS

Hideaki TANAKA, Masahiro MORISHITA, Takashi ITO and Hiroshi YAMAGUCHI

In this study, effects of detonation points on the damage of reinforced concrete slabs subjected to detonations has been experimentally investigated to improve the design and damage estimate methods for reinforced concrete shelters. Especially, the damage due to standoff and internal detonations was discussed in comparison with that due to contact detonations. Three different amounts of high explosive Pentolite were detonated above, on or inside square reinforced concrete slabs. After the tests, the damage caused in the slabs was observed in detail and analyzed for the crater, spall, breach, crack and so on.