

(28) 接触・近接爆発荷重を受けるコンクリート版の破壊

FAILURE IN CONCRETE SLABS SUBJECTED TO BLAST LOADINGS
OF CONTACT OR CLOSE DETONATION BY C4 EXPLOSIVES

大山浩代*, 大野友則**, 別府万寿博***

Hiroyo OHYAMA, Tomonori OHNO and Masuhiro BEPPU

* 防衛大学校理工学研究科前期課程学生 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 博(工) 防衛大学校講師 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: C4 爆薬, 接触爆発, 近接爆発, コンクリート版, 局部破壊

(C4 explosive, contact detonation, close detonation, concrete slab, local failure)

1. 緒言

近年, 世界各地で爆破テロが多発し, また国内では花火工場等における爆発事故が増加している. このような爆発荷重に対する防護設計法を確立するためには, 爆発荷重を受けるコンクリート構造物の破壊メカニズムや耐爆性能に関する検討が必要である. この観点から行われた国内における既往の研究として, 森下らのペントライト爆薬を用いたコンクリート版に対する接触および近接爆発実験^{1),2),3)}がある. この研究では, 接触爆発時の鉄筋コンクリート版の損傷に, 配筋や鉄筋間隔が与える影響について調べ, 損傷予測法を提案している. しかし, 近接爆発時におけるこれらの影響についてはまだ検討が行われていない.

そこで, 本研究は, コンクリート版に対してC4爆薬を用いた接触・近接爆発実験を行い, 版厚, スタンドオフ, 鉄筋間隔, 薬量がコンクリート版の損傷に与える影響を調べたものである.

2. 無筋コンクリート版に対する爆発実験

2.1 実験の概要

供試体は, 縦50cm×横50cm, 厚さt=3, 5, 10cmの3種類のコンクリート版である. コンクリートの配合を表-1に示す. なお, 実験時点での圧縮強度は25.9MPaであ

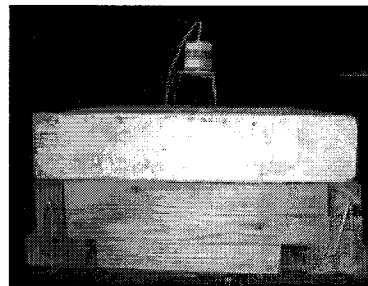


写真-1 供試体設置状況

表-2 実験ケース

番号	t (cm)	W (g)	S (cm)	番号	t (cm)	W (g)	S (cm)
1	10	20	0	6	5	50	7
2	10	50	0	7	5	50	10
3	10	50	4	8	5	50	15
4	10	50	7	9	3	50	15
5	10	180	7	10	3	50	15

る. 供試体および爆薬の設置状況を写真-1に示す. 供試体は木製の支持台で4辺を単純支持し, コンクリート版中央にC4爆薬を設置し起爆した. その際, スタンドオフ(爆薬とコンクリート版表面までの距離)は専用の治具で高さを調整した. 実験ケースは, 表-2に示すように薬量Wは20~180g, スタンドオフSは0~15cmの範囲で設定した.

表-1 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G	AE減水剤
20	18	57	48.8	172	302	874	947	3.02

2.2 実験結果および考察

接触または近接爆発荷重を受けるコンクリートの局部破壊は、図-1に示すようにクレータ（表面）破壊、スポール（裏面）破壊、貫通に分類される³⁾。本研究でもこの分類に従って、爆発条件と破壊の関係を調べた。

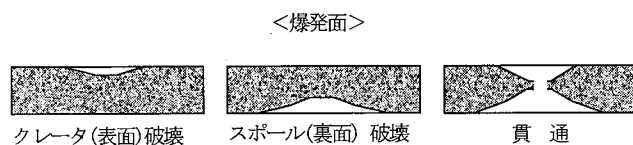


図-1 破壊の種類

(1) 接触爆発による破壊（版厚 10cm）

厚さ 10cm のコンクリート版に対して、薬量 20, 50g を接触爆発させたときに生じた破壊状況を写真-2 に示す。表面に残された爆発痕から、爆発による圧力は版中央に集中して作用していることがわかる。いずれの薬量においても破壊は局部的に発生しており、全体的な破壊は小さいことがわかる。薬量 20g ではクレータが発生し、50g になるとクレータに加えスポール破壊が生じた。

(2) 近接爆発による破壊（版厚 10cm, 5cm, 3cm）

厚さ 10cm のコンクリート版に対して、薬量 50g, スタンドオフ 4, 7cm の条件で近接爆発させた。破壊状況を写真-3 に示す。スタンドオフ 4cm の近接爆発の場合は同量の接触爆発に比べ、局部破壊は小さくなっているが、版の対角線に沿った構造物全体の曲げひび割れが大きくなっていることがわかる。また、スタンドオフ 4cm のときにはクレータが生じたが、スタンドオフを 7cm にすると破壊は生じなかった。しかし、同じスタンドオフ（7cm）でも薬量を 180g にすると貫通破壊とともに、全体破壊に至った。

次に、版厚 5cm のコンクリート版に対して、薬量 50g, スタンドオフ 7, 10, 15cm の条件で近接爆発させた。破壊状況を写真-4 に示す。スタンドオフ 7cm のときにはスポール破壊が生じたが、スタンドオフ 10, 15cm のケースでは、顕著な局部破壊は確認できなかった。ただし、いずれも全体的な曲げ破壊が認められる。スタンドオフの相違は作用する爆風圧の大きさに影響する。例えば、C4 爆薬の最大爆風圧の評価式⁴⁾ $p_s = 5258.6K^{-1.9155}$ (p_s : 最大爆風圧, K : 換算距離) を用いて最大爆風圧を求めると、スタンドオフ 7, 10, 15cm に対して、それぞれ 126.584, 63.924, 29.401 (MPa) となる。すなわち、距離の比が 1:1.43:2.14 のとき、最大爆風圧比は 1:0.5:0.23 である。したがって、最大爆風圧は距離比の 2 乗に逆比例することがわかる。

なお、厚さ 3cm のコンクリート版に対し、薬量 50g, スタンドオフ 15cm の爆発実験では、2 回とも貫通破壊と曲げ破壊が生じた。この破壊状況を写真-5 に示す。

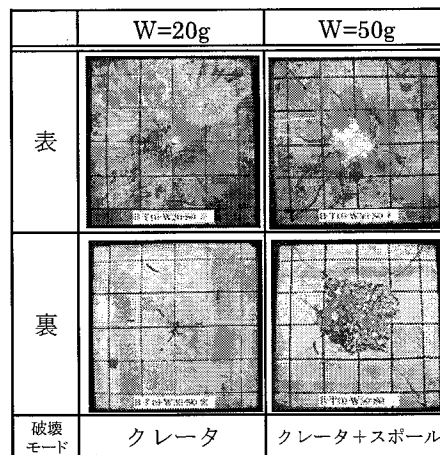


写真-2 版厚 t=10cm の接触爆発

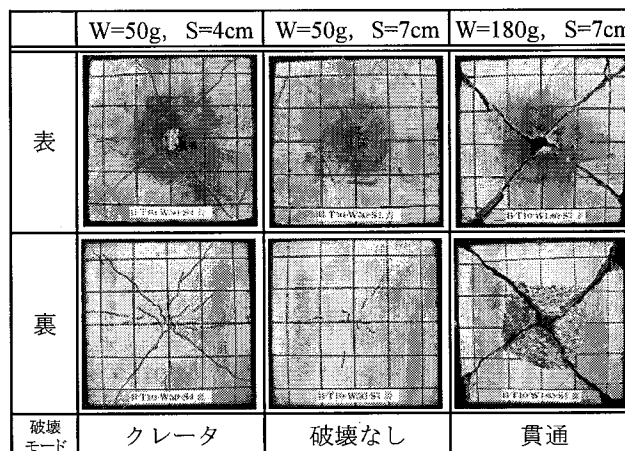


写真-3 版厚 t=10cm の近接爆発

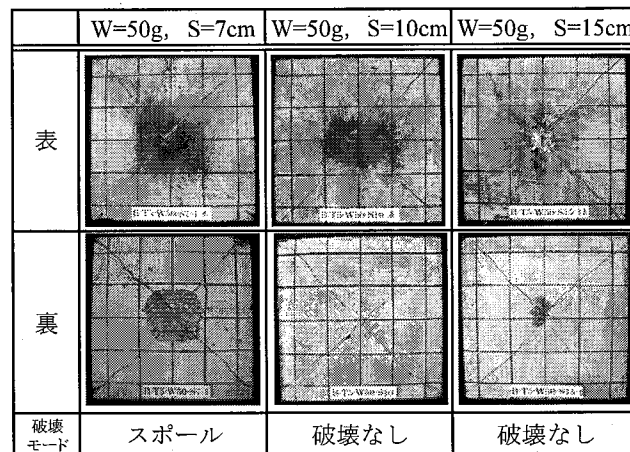


写真-4 版厚 t=5cm, 薬量 W=50g の近接爆発

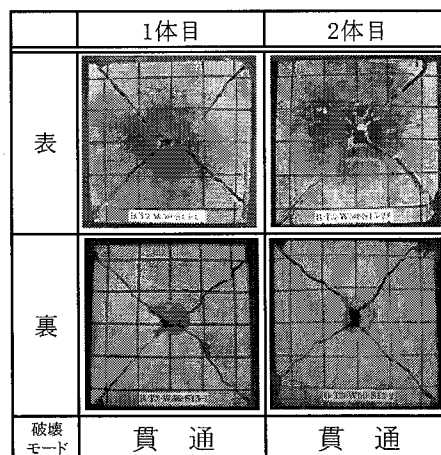


写真-5 版厚 t=3cm, 薬量 W=50g の近接爆発 (S=15cm)

2.3 既往の評価式との比較

近接爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷予測法として McVay⁹⁾の式が知られている。森下らは、この式を準用して接触爆発およびクレータ発生限界を予測する式を提案している³⁾。これらは次式で表される。

(スポール限界)

$$\text{接触爆発: } T/W_m^{1/3} = 3.6 \quad (1a)$$

$$\text{近接爆発: } T/W_m^{1/3} = 2.80(R/W_m^{1/3})^{-0.59} \quad (1b)$$

(貫通限界)

$$\text{接触爆発: } T/W_m^{1/3} = 2.0 \quad (2a)$$

$$\text{近接爆発: } T/W_m^{1/3} = 1.24(R/W_m^{1/3})^{-0.59} \quad (2b)$$

$$\text{(クレータ発生): } R/W_m^{1/3} \leq 3.1 \quad (3)$$

(T:版厚(cm), R:スタンドオフ(cm), W_m :TNT換算量(g))

本実験による局部破壊のモードを、上式で与えられる予測線と比較して図-2に示す。なお、式(1)、(2)、(3)は TNT 爆薬に対する評価式であるため、本実験で用いた C4 の質量に換算係数 1.4(爆轟圧力基準)を乗じて TNT に換算した。図から、本実験によるクレータ発生限界は換算距離 1.5 付近となり評価式の値 3.1 よりも小さいが、貫通、スポール限界の傾向は評価式による予測とほぼ対応していることがわかる。すなわち、異種の爆薬でも TNT 換算して上式を用いることにより、貫通、スポール破壊の発生を予測することができるといえる。ただし、表面破壊については、爆薬の種類の影響が大きいことも考えられるので、今後検討する必要がある。

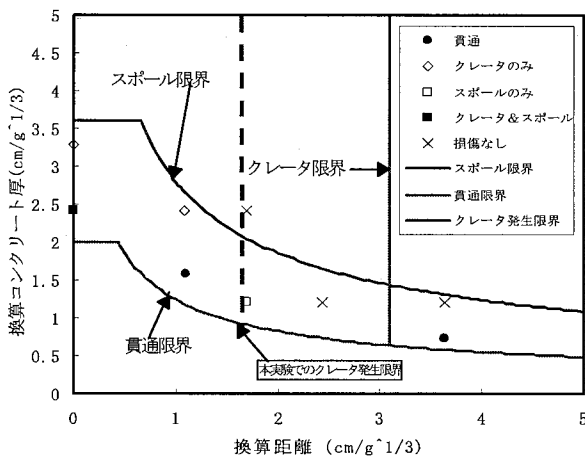


図-2 破壊結果に対する実験と評価式の比較

表-3 RC版に用いたコンクリートの配合

粗骨材最大寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比W/C(%)	細骨材率s/a(%)	単位量(kg/m ³)				
				水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G	AE減水剤
20	18	49.5	44.4	178	360	764	996	0.8

3. 鉄筋コンクリート版に対する爆発実験

3.1 実験の概要

実験に用いた鉄筋コンクリート版は、縦50cm×横50cm、厚さ3, 5, 10cmの3種類であり、D6鉄筋で引張側のみ補強した。コンクリートの配合および鉄筋間隔はそれぞれ表-3、図-3に示すとおりである。なお、本実験では鉄筋間隔をパラメータとしているが、同一径の鉄筋(D6)を使用しているため、鉄筋比(鉄筋量)は異なっている。また、版厚10cmについては、10cm間隔の複鉄筋コンクリート版も作製した。圧縮強度は30MPaである。実験ケースを表-4に示す。薬量Wは50gとし、版厚t、スタンドオフSを変化させた。供試体と爆薬の設置状況は無筋コンクリート版実験と同様である。

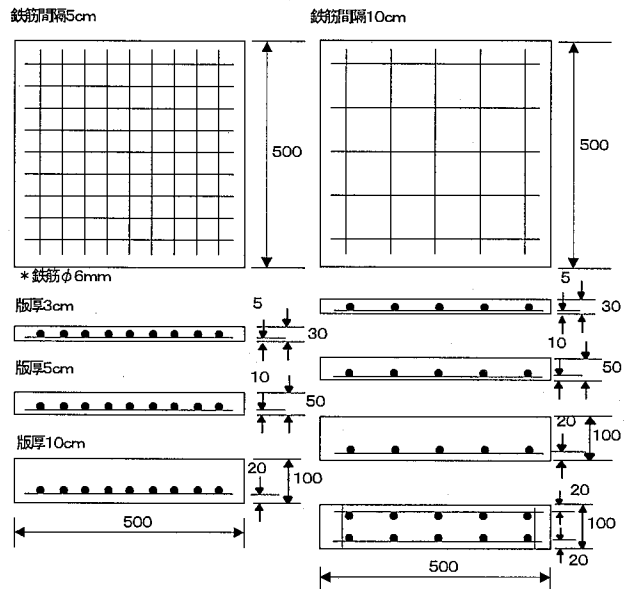


図-3 供試体配筋

表-4 実験ケース *○は複鉄筋を示す

番号	版厚 t (cm)	配筋 l (cm)	薬量 W (g)	スタンドオフ S (cm)	番号	版厚 t (cm)	配筋 l (cm)	薬量 W (g)	スタンドオフ S (cm)
1	10	10	50	4	8	10	10	50	0
2	10	5	50	4	9	10	5	50	0
3	10	ⓐ	50	4	10	10	ⓐ	50	0
4	5	10	50	4	11	5	10	50	7
5	5	5	50	4	12	5	5	50	7
6	3	10	50	4	13	3	10	50	15
7	3	5	50	4	14	3	5	50	15

3.2 実験結果および考察

(1) 接触爆発による破壊 (版厚 10cm)

厚さ 10cm (鉄筋間隔 10, 5, 10 (複) cm) のコンクリート版に対して、薬量 50g を接触爆発 (S=0cm) させた。破壊状況を写真-6 に示す。鉄筋間隔 10cm の単鉄筋および複鉄筋では局所的なクレータおよびスポールが生じた。鉄筋間隔 5cm ではクレータのみが発生したが、写真よりスポールが生じる限界であることが推測できる。

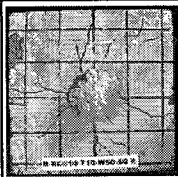
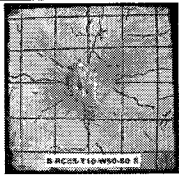
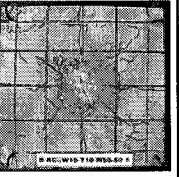
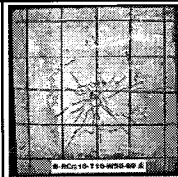
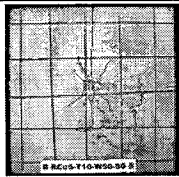
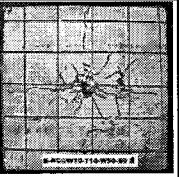
	@10	@5	@10(複)
表			
裏			
破壊モード	クレータ+スポール	クレータ	クレータ+スポール

写真-6 版厚 t=10cm の接触爆発 (W50g)

(2) スタンドオフ 4cm の近接爆発による破壊

版厚 10, 5, 3cm, 鉄筋間隔 10, 5cm (版厚 10cm のみ 10 (複) cm) のコンクリート版に対し、スタンドオフ 4cm で近接爆発させたときに生じた破壊状況を写真-7 に示す。これより、同じ版厚であれば、鉄筋間隔の大きさにかかわらず、同じ破壊モードを示していることがわかる。また、スタンドオフが同じときは版厚が薄くなるに従い、局部破壊、全体破壊ともに大きくなることがわかる。ただし、鉄筋間隔が小さい (鉄筋量が増加する) ほど、構造全体の曲げひび割れは減少した。

(3) スタンドオフ 7cm の近接爆発による破壊

版厚 5cm (鉄筋間隔 10, 5cm) のコンクリート版に対して、薬量 50g, スタンドオフ 7cm で近接爆発させた。破壊状況を写真-8 に示す。鉄筋間隔 10cm ではスポールが生じたが、鉄筋間隔 5cm では破壊が生じなかった。ただし、写真より、鉄筋間隔 5cm はスポールが生じる限界であると推測できる。また、写真-7 のスタンドオフ 4cm の破壊と比べると、スタンドオフが大きくなることによって局部破壊および全体的な曲げひび割れはいずれも小さくなることがわかる。


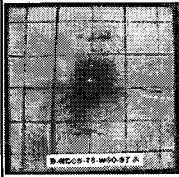
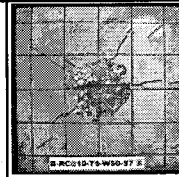
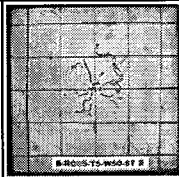
	@10	@5
表		
裏		
破壊モード	スポール	破壊なし

写真-8 版厚 5cm の近接爆発 (W50g-S7)

(4) スタンドオフ 15cm の近接爆発による破壊

版厚 3cm (鉄筋間隔 10, 5cm) のコンクリート版に対して、薬量 50g, スタンドオフ 15cm で近接爆発させた。破壊状況を写真-9 に示す。この場合、鉄筋間隔 10, 5cm ともスポール破壊が生じ、破壊モードは同様であった。

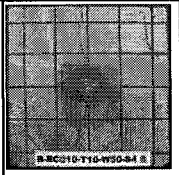
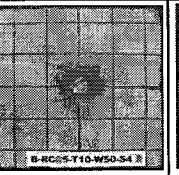
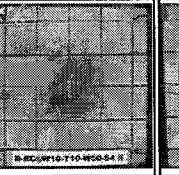
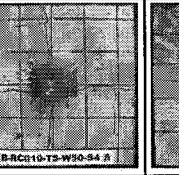
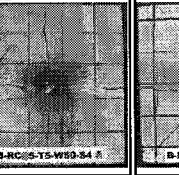
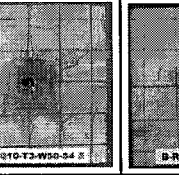
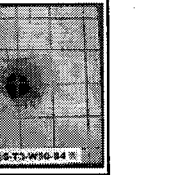
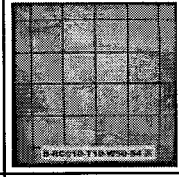
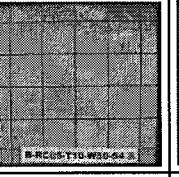
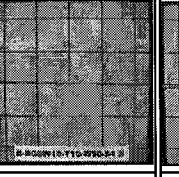
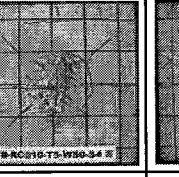
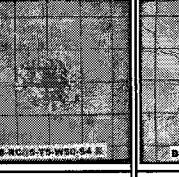
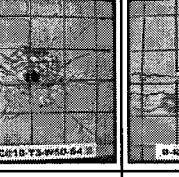
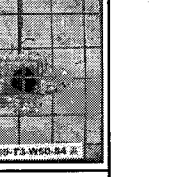
	版厚 10cm			版厚 5cm		版厚 3cm	
	@10	@5	@10(複)	@10	@5	@10	@5
表							
裏							
破壊モード	クレータ	クレータ	クレータ	スポール	スポール	貫通	貫通

写真-7 薬量 50g, スタンドオフ 4cm の近接爆発

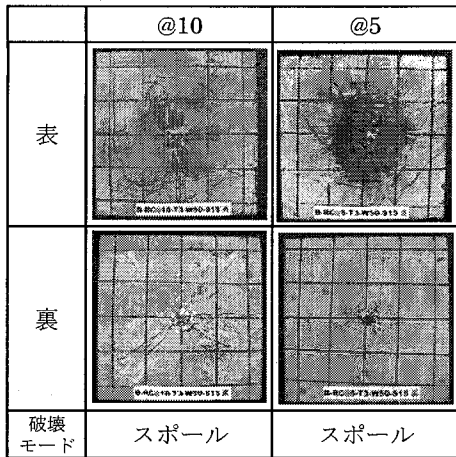


写真-9 版厚3cmの近接爆発 (W50g-S15)

3.3 既往の評価式との比較

無筋コンクリート版に対する実験と同様に、鉄筋コンクリート版に対する実験結果をMcVay・森下らの評価式(1)~(3)と比較したものを図-4に示す。図より、無筋の場合と同様、鉄筋コンクリート版のクレータ発生限界は評価式よりも小さいが、貫通、スポール限界の傾向は評価式とほぼ対応している。すなわち、本実験条件の範囲では、鉄筋の有無にかかわらず、評価式により貫通およびスポール限界を予測できるといえる。

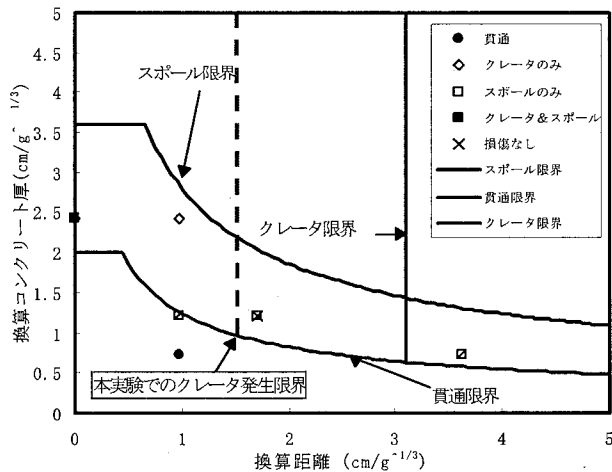


図-4 破壊結果に対する実験と評価式の比較 (鉄筋)

4. スタンドオフおよび鉄筋が全体および局部破壊に与える影響

接触および近接爆発に対する破壊モードは、図-1に示した局部破壊とともに、版全体の曲げ破壊も生じた。そこで、破壊を図-5に示すように全体破壊と局部破壊に区分し、スタンドオフや鉄筋量がそれぞれの破壊に及ぼす影響を調べる。図-5(a)に全体破壊の分類を、図-5(b)にクレータ、図-5(c)にスポールの分類を示す。また、この分類に応じて表面と裏面の破壊を整理して、表-5, 6, 7に示す。

表-5の全体破壊において、接触爆発(S=0cm)においては、鉄筋の有無にかかわらず、全体破壊はほとんど生じていないことがわかる。一方、近接爆発になると、全体破壊の程度が大きくなることがわかる。ただし、鉄筋間隔を小さくすることで破壊の程度は軽減されている。

次に、表-6, 7の表面および裏面の局部破壊において、接触爆発の場合は配筋を施すことで、表面のクレータは抑制できないが、裏面のスポールをやや軽減しているようである。近接爆発のケースでは、版厚10cmでスタンドオフ4cmおよび版厚5cmでスタンドオフ7cmのケースでは、破壊モードは変わらないが、その程度を小さくする効果があることがわかる。

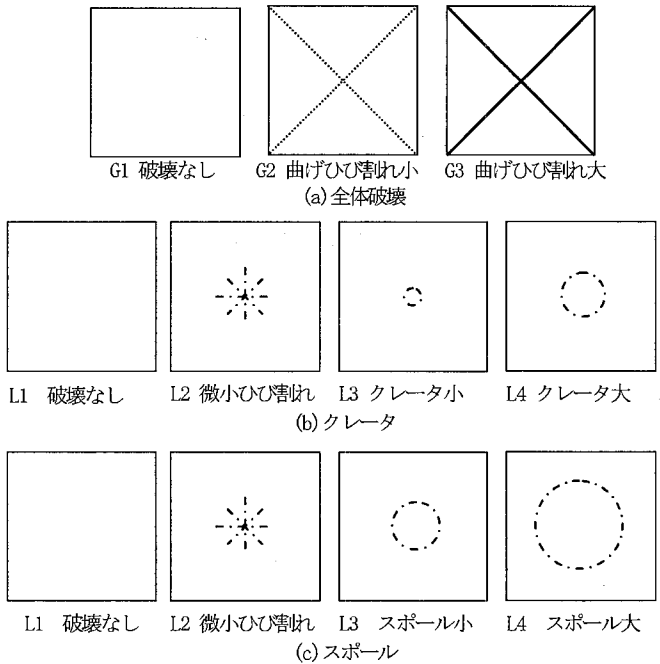


図-5 破壊モード細部分類

表-5 全体破壊モード (薬量一定: 50g)

t (cm)	S (cm)	破壊モード			
		無筋	鉄筋間隔 (cm)		
			10	5	W10
10	0	G2	G1	G1	G2
	4	G2	G1	G1	G1
5	7	G3	G2	G1	
3	15	G3	G2	G1	

表-6 表面の局部破壊モード (薬量一定: 50g)

t (cm)	S (cm)	破壊モード			
		無筋	鉄筋間隔 (cm)		
			10	5	W10
10	0	L4	L4	L4	L4
	4	L4	L3	L3	L3
5	7	L1	L1	L1	
3	15	L4	L1	L1	

表-7 裏面の局部破壊モード
(薬量一定:50g)

t (cm)	S (cm)	破壊モード			
		無筋	鉄筋間隔 (cm)		
			10	5	W10
10	0	L4	L3	L2	L3
	4	L2	L2	L1	L1
5	7	L4	L4	L2	
3	15	L4	L4	L4	

5. 結言

本研究は無筋および鉄筋コンクリート版に対し、C4 爆薬を接触および近接爆発させ、破壊に対する鉄筋およびスタンドオフの影響を調べたものであり、本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

(1) 接触爆発では、破壊は局部的な破壊が大きく、全体的な破壊は小さい。一方、近接爆発では、局部破壊が小さくなり、全体破壊が大きくなる。すなわち、スタンドオフが大きくなるにつれ、局部破壊よりも全体破壊が大きくなる。

(2) 鉄筋間隔の大小(鉄筋量の多少)は局部破壊に与える影響は少ないが、全体破壊に与える影響は大きい。すなわち、鉄筋間隔の大小が破壊モードに及ぼす影響は小さい。ただし、鉄筋間隔が小さいほど構造全体の変形を抑制する効果がある。

(3) 無筋、鉄筋コンクリート版に対して、実験結果を TNT 換算して McVay の式と比較したところ、クレータ以外の破壊はほぼ対応した。クレータについては、爆薬の種類の影響が大きいと考えられ、今後検討する必要がある。

(4) 今後、鉄筋径、鉄筋間隔、鉄筋比等を変えて、これらの影響を検討する必要がある。

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, Vol. 46A, pp. 1787-1797, 2000
- 2) 森下政浩, 田中秀明, 安藤智啓, 萩原浩之: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響, コンクリート工学論文集, 第15巻第2号, pp. 89-98, 2004. 5
- 3) 森下政浩, 阿曾沼剛, 齊藤和伸, 松尾啓: 近接爆発による RC 版の局所損傷, 防衛施設学会平成 17 年度年次研究発表会, pp. 35~39, 平成 18 年 1 月
- 4) 安全工学講座 2: 爆発, 安全工学協会編, 海文堂.
- 5) M. K. McVay: Spall Damage of Concrete Structures, Technical Report SL88-22, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station, June 1988