接触・近接爆発を受けるコンクリート板の 局部破壊に対する裏面補強法とその効果

市野 宏嘉¹・永田 真²・別府 万寿博³・大野 友則⁴

¹正会員 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丁目10番20号)

E-mail: ichino@nda.ac.jp

²正会員 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1丁目10番20号)

E-mail: f15008 @nda.ac.jp

³正会員 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丁目10番20号)

E-mail: beppu@nda.ac.jp

⁴正会員 防衛大学校名誉教授 (〒238-0011 神奈川県横須賀市米が浜通1丁目2)

E-mail: ohno@drive.ocn.ne.jp

本研究は、火薬庫や重要構造物などのコンクリート構造物に対する耐爆設計法の確立に資するため、各種材料で裏面を補強したコンクリート板の接触・近接爆発に対する耐爆性能について実験的に検討したものである。補強材料としては、1)ヤング係数および引張強度が大きいシート状材料、2)ヤング係数が小さく破断伸びが大きい高分子系材料、を用いている。実験結果から、コンクリート板に対する裏面補強が接触・近接爆発によって生じる局部破壊の低減に有効であることを確認した。また、補強材料の引張剛性が補強コンクリート板の耐爆性能の向上に影響していることが認められ、補強材料の引張剛性を指標として裏面補強の効果を評価した。

Key Words : *explosive load, local damage, fiber sheet reinforced concrete, polymer strengthened concrete, tensile stiffness*

1. 緒言

近年、爆破を伴うテロ行為や不測の爆発事故による構造物の被災が頻発している。コンクリート構造物が爆発荷重を受けると、爆薬量や爆発位置等の条件に応じて、曲げやせん断変形による全体破壊や、クレータ・スポール・貫通といった局部破壊が生じる。ここで、クレータとは爆発荷重が作用する面に生じる表面破壊を示し、スポールとは爆発荷重の作用面とは反対の面に生じる剥離破壊を示す。したがって、構造物内部の人命・財産を防護する観点から、爆発荷重に対するコンクリート構造物材の局部的な耐爆性能としてはスポールを防ぐことが求められる。このような局部破壊を生じる爆発の種類は、接触爆発と近接爆発に分類される。接触爆発は構造物材の表面に接した爆薬が爆発する事象であり、近接爆発は構造物材から少し離れた位置で爆薬が爆発する事象である。

爆発によって生じるコンクリートの局部破壊に関しては、TM5-855-1¹⁾やTM5-1300²⁾に、コンクリートに生じる

クレータ寸法、貫通孔の直径および裏面剥離限界の予測式が示されている。また、換算距離や換算コンクリート厚さを指標とした局部破壊限界予測の研究も行われている^{3,8)}。これらの評価式は、いずれもコンクリート強度、鉄筋量がパラメータに入っていないことから、コンクリートの高強度化や高い鉄筋比によって局部破壊を効果的に低減することはできないことを示している。そこで、山口ら⁹⁾は、集束タイプのポリエチレン繊維を混入したコンクリート版に対する接触爆発実験を行っている。その結果、高靱性材料であるポリエチレン短繊維混入コンクリート版は、繊維を混入しないコンクリート版と比べてスポールが低減することを示している。Maoら¹⁰⁾は、超高強度繊維補強コンクリート(UHPFRC)に対して近接爆発実験を行い、UHPFRC版ではスポールの発生は認められず、繊維を混入しないコンクリート版と比較して耐爆性能が優れていることを確認している。しかし、短繊維補強コンクリートは一旦破壊が生じると破壊片が飛散するなどの問題も有している。このため、コンクリート版の裏面にシート状補強材を貼付する補強法が提案さ

れている。別府ら¹¹⁾は、カーボンおよびアラミド繊維シートで裏面を補強したコンクリート板の耐爆性能について、波動反射理論および繊維シートによる押し抜きせん断耐力向上の観点から検討し、繊維シートによる耐爆補強が有効であることを報告している。Haら¹²⁾は、裏面補強コンクリート板に対する近接爆発実験を行い、裏面補強材料としてカーボン繊維シートとポリウレア樹脂を組み合わせた材料を提案し、その有効性を確認している。しかし、防護設計法の観点から、補強材料の力学特性と補強効果を調べた研究は少ない。

本研究は、火薬庫や重要構造物などのコンクリート構造物に対する耐爆設計法の確立に資するため、接触・近接爆発を受けるコンクリート板の局部破壊に対する裏面補強の効果について検討している。補強材料として、1) ヤング係数および引張強度が大きいシート状材料、2) ヤング係数が小さく破断伸びが大きい高分子系材料、の2種類の材料を用いた。まず、裏面補強したコンクリート板に対する接触・近接爆発実験を行い、補強材料の種類や力学特性が局部破壊の低減および破片の飛散防止に及ぼす影響を調べた。次に、実験結果に基づいて、補強材料の引張剛性を指標として局部破壊の評価式を定式化した。さらに、補強材料による効果を定量的に表す指標として等価コンクリート厚を定義し、補強効果を評価した。

2. 実験方法、補強材料および計測項目

(1) 実験方法

図-1に、実験に用いたコンクリート板を示す。コンクリート板供試体の寸法は、縦500 mm、横500 mmおよび厚さ80 mmで、実験時のコンクリートの一軸圧縮強度は28.9 N/mm²である。なお、取り扱い中の供試体の損傷を防ぐためにD6鉄筋をコンクリート板の周囲に配置した。コンクリートの配合を表-1に示す。

図-2に、接触爆発および近接爆発実験の概要を示す。コンクリート板は単純二辺支持（支持幅は各辺50 mm、支間長400 mm）とした。コンクリート板の裏面は、後述する各種の補強材料によって補強した。また比較のため、裏面補強を行わないプレーンコンクリート板に対しても実験を行った。実験では、高爆速（7,000 m/s～8,000 m/s）が得られるとともに衝撃や熱に対する安全性に比較的に優れ、成型が容易なC-4爆薬を使用した。C-4爆薬の質量は、森下ら⁹⁾が提案した式を用いて、プレーンコンクリート板の破壊性状が貫通限界（コンクリート板が爆発を受けて貫通されるかどうかの状態）となるように設定した¹⁰⁾。接触爆発の場合、板厚80mmのコンクリートの板に対して貫通限界となる質量は46 gとなる¹⁰⁾。近接爆発の場合は、スタンドオフ距離を70 mmとすると、

板厚80 mmのコンクリート板が貫通限界となる質量は125 gとなる¹⁰⁾。このC-4爆薬を、直径と高さが等しい（直径 / 高さ = 1/1）円柱形に成型し、6号電気雷管により起爆した。

(2) 補強材料

コンクリート板の裏面補強には、1) ヤング係数および引張強度が大きいシート状材料（以下、「高強度材料」と呼ぶ。）、2) ヤング係数が小さく破断伸びが大きい高分子材料（以下、「高伸長材料」と呼ぶ。）、2種類の材料を用いた。高強度材料として鋼板（SS400）、ステンレスメッシュ補強エポキシアクリレート樹脂シート（以下、ステンレス補強樹脂シートと呼ぶ。）、カーボン繊維シートおよびアラミド繊維シートを用いた。ステンレス補強樹脂シートは、シート状に加工したエポキシアクリレート樹脂の中に細径のステンレスメッシュを挿入して引張強度を付加した材料である。カーボン繊維シートおよびアラミド繊維シートは、母材の繊維に樹脂を含浸させて所望の部材に接着するものであり、構造物の耐震補強やトンネルなどにおけるコンクリートの剥落防止のために使用されている¹³⁾。表-2に、高強度材料の力学特性を示す。繊維シートの貼付に際しては、1方向1枚の場合は繊維が1方向に揃えられたシートを支間方向に繊維の向きが沿うように1枚貼付し、1方向2枚の場合はこのシートを支間方向と支間直角方向に1枚ずつ貼付した。2方向1枚の場合は2組の繊維が直交するように織られたシートを1枚貼付し、2方向2枚の場合はこのシートを2枚貼付した。繊維シートの接着にあたっては、コンクリートとの接着面を研磨し、エポキシ樹脂のプライマーを塗布して接着面を水平にした。その後、エポキシ樹脂を下塗りし、繊維シートを貼り付け、さらに繊維シートの上からエポキシ樹脂を上塗りして含浸させた。この際、コンクリート裏面と繊維シートが一樣に接着するために十分な量のエポキシ樹脂を使用した。

高伸長材料としては、ビニロン繊維補強エポキシアクリレート樹脂シート（以下、ビニロン補強樹脂シートと呼ぶ。）、高分子材料である特殊アクリル樹脂およびポリウレア樹脂を用いた。ビニロン補強樹脂シートは、エポキシアクリレートの中にビニロン繊維シートを挿入したもので、耐震補強やコンクリートの剥落防止用として使用されている。特殊アクリル樹脂はコンクリート構造物に対するひび割れ等の補修材料として用いられ、ポリウレア樹脂はビルの屋上、橋梁における床版や構造物の防水材等として用いられている¹⁴⁾。表-3にこれらの材料の力学特性を示す。いずれもヤング係数および引張強度が極めて小さいが、破断伸びが極めて大きい特徴があり、特殊アクリル樹脂およびポリウレア樹脂の破断伸びはそれぞれ50 %および450 %である。図-3に、高強度材料と

高伸長材料の材料特性の分布を、破断伸びとヤング係数との関係として示す。また、実験ケースを表-4に示す。

(3) 計測項目

実験結果の評価にあたり、コンクリート板の破壊モードを図-4のようにクレタ、スポールおよび斜めひび割れに分類した。斜めひび割れは、プレーンコンクリート板では発生せず、裏面を補強した場合に生じる損傷状態である¹²⁾。スポールと斜めひび割れの違いは、破壊されたコンクリート片がコンクリート板から完全に分離した場合をスポール、分離はしていないがコンクリート内にひび割れが生じている場合を斜めひび割れと分類した。

図-1 実験に用いたコンクリート板

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 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	46.7	173	354	817	960	3.54

図-2 実験の概要図

表-2 高強度材料の力学特性

種類	方向	目付量(g/m ²)	密度(g/cm ³)	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)	破断伸び (%)
鋼材	-	-	7.7	400	200000	21.0
ステンレス補強樹脂シート	-	-	2.64	168	12600	2.2
カーボン繊維シート	1	200	1.7	3400	245000	1.3
	2	200		2500		
アラミド繊維シート	1	280	1.45	2060	118000	2.0
	2	650				

表-3 高伸長材料の力学特性

種類	密度(g/cm ³)	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)	破断伸び (%)
ビニロン補強樹脂シート	1.11	56.0	570	12
特殊アクリル樹脂	1.09	2.0	50	50
ポリウレア樹脂	1.09	30.0	250	450

図-3 材料特性の分布

図-4 コンクリート板の損傷状態の計測

クレタおよびスポールの深さは、破壊箇所の最も深い位置での値とした。加えて、斜めひび割れの長さ、高さを計測した。斜めひび割れの長さは切断した断面における斜めひび割れの最大直径とし、斜めひび割れの高さは同じ断面における斜めひび割れの最高位置からコンクリート板裏面までの高さとした。

3. 局部破壊の性状

(1) プレーンコンクリート板の場合

接触および近接爆発実験で得られた損傷・破壊性状の代表例を、図-5に示す。図中の△印および実線は板の支持方向を示しており、以降に示す写真も同様の方向で示

表-4 実験ケース

番号	爆発条件	補強材料			
		種 類	枚数	厚さ(mm)	
1	接触	なし (プレーンコンクリート板)	-	-	
2	爆発		-	-	
3	近接		-	-	
4	爆発		-	-	
5	接触 爆発	高強度 材料	鋼板	1	0.3
6			ステンレス補強樹脂シート	1	1.6
7			ステンレス補強樹脂シート	2	3.2
8			1方向カーボン繊維シート	2	0.111
9			2方向カーボン繊維シート	1	0.0556
10			2方向カーボン繊維シート	2	0.111
11			1方向アラミド繊維シート	1	0.193
12			1方向アラミド繊維シート	2	0.193
13			2方向アラミド繊維シート	1	0.193
14			ステンレス補強樹脂シート	1	1.6
15			ステンレス補強樹脂シート	2	3.2
16			2方向カーボン繊維シート	1	0.0556
17	近接 爆発		1方向アラミド繊維シート	1	0.193
18			2方向アラミド繊維シート	1	0.193
19			ビニロン補強樹脂シート	1	2.0
20			ビニロン補強樹脂シート	2	4.0
21	接触 爆発	高伸長 材料	特殊アクリル樹脂	-	2.0
22			特殊アクリル樹脂	-	4.0
23			特殊アクリル樹脂	-	8.0
24			ポリウレア樹脂	-	2.0
25			ポリウレア樹脂	-	4.0
26			ポリウレア樹脂	-	8.0
27	近接 爆発		ビニロン補強樹脂シート	1	2.0
28			ビニロン補強樹脂シート	2	4.0
29			特殊アクリル樹脂	-	2.0
30			特殊アクリル樹脂	-	8.0
31			ポリウレア樹脂	-	2.0
32			ポリウレア樹脂	-	4.0
33			ポリウレア樹脂	-	8.0
34			ポリウレア樹脂	-	8.0

している。爆発によるコンクリート板内部の破壊性状を確認するため、実験後にコンクリートカッターを用いてコンクリート板の中央断面を通るように切断した。

接触爆発を受けるプレーンコンクリート板の破壊モードは、実験番号1が「クレタ、スポール」、実験番号2が「貫通」であった。コンクリート板の損傷は、断面を貫通するかしないかの限界、すなわち貫通限界を示している。近接爆発荷重を受けるコンクリート板は、実験番号3、4のいずれも局部的なクレタとスポールが生じるとともに、曲げ破壊が生じた。実験番号4ではクレタ

番号	爆発条件	表面	裏面	断面	破壊モード
1	接触爆発				クレータ スポール
4	近接爆発				クレータ スポール (曲げ破壊)

図-5 近接・接触爆発を受けたプレーンコンクリート板の損傷・破壊性状

の深さは11 mm, スポールの深さが55 mmであった。断面の破壊性状から、クレータとスポールは連接するかわからないかの状態であり、本実験条件も貫通限界であることがわかる。近接爆発実験において曲げ破壊が生じた理由は、爆薬とコンクリートの間に70 mmのスタンドオフがあることから、コンクリート板全体に爆発荷重が作用したためと考えられる。

(2) 高強度材料による補強の場合

a) 接触爆発

図-6に、接触爆発時における高強度材料で裏面補強したコンクリート板の破壊性状の例を示す。厚さ0.3 mmの鋼板で補強したコンクリート板の破壊モードは、「クレータ、斜めひび割れ」となった。ステンレス補強樹脂シート1枚で補強したケース（実験番号6, 7）の破壊モードは、実験番号6が「クレータ、スポール、斜めひび割れ」、実験番号7は「クレータ、斜めひび割れ」であった。このことから、ステンレス補強樹脂シート1枚で補強した場合がスポール限界であると考えられる。また、爆薬直下の裏面において樹脂シートにひび割れが生じたが、破壊には至らず破片の飛散は防止されていた。ステンレス補強樹脂シート1枚で補強したケースと2枚で補強したケース（実験番号8）のコンクリート板内部の破壊の程度を比較すると、シート2枚で補強した方が内部の破壊に対する低減効果が大きいことがわかる。

1方向カーボン繊維シート2枚で裏面補強したコンクリート板の破壊モードは、実験番号9, 10ともに「クレータ、斜めひび割れ」であった。すなわち、1方向カーボン繊維シート2枚で補強することによって、スポールが発生せず、破片の飛散も生じないことがわかる。2方向カーボン繊維シート1枚で補強した場合の破壊モードは、実験番号11が「クレータ、スポール、斜めひび割れ」であり、実験番号12は「クレータ、斜めひび割れ」であっ

た。つまり、2方向カーボン繊維シート1枚で補強した場合もスポール限界であると言える。次に、2方向カーボン繊維シート2枚で補強したケースの破壊モードは、いずれのケースもスポールは発生せず、「クレータ、斜めひび割れ」であった。1方向カーボン繊維シート2枚で補強したケースと2方向カーボン繊維シート1枚で補強したケースの破壊を比較すると、破壊の程度はほぼ同等であった。

1方向アラミド繊維シート1枚で補強したケースの破壊モードは、いずれも「クレータ、スポール、斜めひび割れ」であった。また、1方向アラミド繊維シート2枚で補強したケースの破壊モードは、スポールは発生せず「クレータ、斜めひび割れ」であった。すなわち、1方向アラミド繊維シートで補強することによって破片の飛散防止効果があり、1方向アラミド繊維シート2枚では破片の飛散防止に加えスポールも防止する効果がある。2方向アラミド繊維シート1枚で補強した場合についても、破片の飛散を防止するとともにスポールを防止することができた。1方向1枚の場合にのみスポールが生じたが、これは、1方向のみの補強ではスポールを抑制するための効果が小さいことを示している。

b) 近接爆発

図-7に近接爆発における、高強度材料で裏面補強したコンクリート板の破壊性状の例を示す。すべてのケースでスポールおよび破片の飛散は生じなかった。ステンレス補強樹脂シート1枚および2枚で補強したケースの破壊モードはいずれもスポールが発生せず「クレータ、斜めひび割れ」であった。接触爆発と同様に、ステンレス補強樹脂シート1枚で補強したケースでは、爆薬直下の裏面において樹脂シートにひび割れが生じていたが、破壊には至らず破片の飛散を防止することができた。ステンレス補強樹脂シート1枚で補強したケースと2枚で補強したケースのコンクリート板内部の破壊の程度を比較する

実験 番号	補強材料	表面	裏面	断面	破壊モード
5	鋼板0.3mm				クレータ 斜めひび割れ
6	ステンレス 補強樹脂 シート 1枚				クレータ スポール 斜めひび割れ
8	ステンレス 補強樹脂 シート 2枚				クレータ 斜めひび割れ
9	1方向 カーボン 繊維シート 2枚				クレータ 斜めひび割れ
11	2方向 カーボン 繊維シート 1枚				クレータ スポール 斜めひび割れ
13	2方向 カーボン 繊維シート 2枚				クレータ 斜めひび割れ
15	1方向 アラミド 繊維シート 1枚				クレータ スポール 斜めひび割れ
17	1方向 アラミド 繊維シート 2枚				クレータ 斜めひび割れ
19	2方向 アラミド 繊維シート 1枚				クレータ 斜めひび割れ

図-6 高強度材料で補強したコンクリート板の破壊性状 (接触爆発)

実験 番号	補強材料	表面	裏面	断面	破壊モード
21	ステンレス 補強樹脂 シート 1枚				クレータ 斜めひび割れ
23	ステンレス 補強樹脂 シート 2枚				クレータ 斜めひび割れ
24	2方向 カーボン 繊維シート 1枚				クレータ 斜めひび割れ
25	1方向 アラミド 繊維シート 1枚				クレータ 斜めひび割れ
27	2方向 アラミド 繊維シート 1枚				クレータ 斜めひび割れ

図-7 高強度材料で補強したコンクリート板の破壊性状（近接爆発）

と、両者には顕著な相違は認められなかった。

2方向カーボン繊維シート1枚で補強したケースの破壊モードは、「クレータ，斜めひび割れ」であった。近接爆発においては，2方向カーボン繊維シート1枚で補強したケースでも飛散物を防止するとともにスポールの発生を防止したことがわかる。

1方向アラミド繊維シート1枚および2方向アラミド繊維シート1枚で補強したケースの破壊モードは，いずれも「クレータ，斜めひび割れ」であった。1方向アラミド繊維シート1枚と2方向アラミド繊維シート1枚で補強したケースの斜めひび割れの数と比較すると，斜めひび割れ数は2方向アラミド繊維シート1枚で補強したケースの方が少なかった。1方向および2方向アラミド繊維シート1枚で補強したケースも，破片の飛散防止およびスポールの発生防止に効果があることがわかる。

c) まとめ

高強度材料で裏面を補強したすべてのケースで破片の飛散を防止することができた。接触爆発では，鋼板0.3 mm，ステンレス補強樹脂シート2枚，2方向カーボン繊維シート2枚，1方向アラミド繊維シート2枚，2方向アラ

ミド繊維シート1枚で補強したケースはスポールを防止することができた。近接爆発では，裏面補強したすべてのケースでスポールを防止することができ，曲げ破壊を生じることもなかった。これらの理由は，裏面補強材料のインピーダンスおよび変形によって補強材に生じた引張応力の影響により，コンクリート裏面における自由端反射による引張応力の発生を抑制したこと，また，補強材料によりコンクリート板の剛性を増加したこと¹⁾が考えられる。

(3) 高伸長材料による補強の場合

a) 接触爆発

図-8に，接触爆発時における高伸長材料で裏面補強したコンクリート板の破壊性状の例を示す。

ビニロン補強樹脂シート2 mmおよび4 mmで補強したケースの破壊モードは，「クレータ，スポール，斜めひび割れ」であった。いずれのケースも爆薬直下の裏面でビニロン補強樹脂シートに放射状の亀裂が生じていたが破片の飛散は防止された。また，ビニロン補強樹脂シートは爆薬直下において膨らんでいた。ビニロン補強樹脂

実験 番号	補強材料	表面	裏面	断面	破壊モード
29	ビニロン 補強樹脂 シート 2mm				クレータ スポール 斜めひび割れ
31	ビニロン 補強樹脂 シート 4mm				クレータ スポール 斜めひび割れ
32	特殊 アクリル 樹脂 2mm				貫通
33	特殊 アクリル 樹脂 4mm				貫通
34	特殊 アクリル 樹脂 8mm				クレータ スポール
36	ポリウレア 樹脂 2mm				クレータ スポール 斜めひび割れ
38	ポリウレア 樹脂 4mm				クレータ スポール 斜めひび割れ
40	ポリウレア 樹脂 8mm				クレータ 斜めひび割れ

図-8 高伸長材料で補強したコンクリート板の破壊性状(接触爆発)

シート4 mmで補強した場合、スポール破壊が生じた範囲は、1枚で補強した場合よりも小さくなっている。

特殊アクリル樹脂で補強したケースでは、塗膜厚さがそれぞれ2 mmおよび4 mmの場合、破壊モードはいずれも「貫通」であった。樹脂の厚さをさらに増加させた8 mmで補強すると破壊モードは「クレータ、スポール」

となった。特殊アクリル樹脂による補強では、厚さに関わらず破片の飛散防止効果および局部破壊を低減させる効果は認められなかった。この理由は、アクリル樹脂の引張強度が非常に小さい(2 N/mm²)ためと考えられる。

ポリウレ樹脂で補強したケースでは、塗膜厚さがそれぞれ2 mmおよび4 mmの場合、破壊モードはいずれも

実験 番号	補強材料	表面	裏面	断面	破壊モード
41	ビニロン 補強樹脂 シート 2mm				クレータ 斜めひび割れ
43	ビニロン 補強樹脂 シート 4mm				クレータ 斜めひび割れ
44	特殊 アクリル 樹脂 2mm				貫通
45	特殊 アクリル 樹脂 8mm				クレータ スポール
46	ポリウレア 樹脂 2mm				クレータ 斜めひび割れ
47	ポリウレア 樹脂 4mm				クレータと 斜めひび割れ
48	ポリウレア 樹脂 8mm				クレータと 斜めひび割れ

図-9 高伸長材料で補強したコンクリート板の破壊性状(近接爆発)

「クレータ、スポール、斜めひび割れ」であった。ポリウレア樹脂には爆薬直下の位置で大きな膨らみが生じていたが、樹脂塗膜にはまったく破壊が生じなかった。したがって、スポールが生じても破片は飛散しなかった。樹脂の塗膜厚さを8 mmに増加すると、スポールの発生も防止でき、「クレータ、斜めひび割れ」のみが生じた。

b) 近接爆発

図-9に、近接爆発時における高伸長材料で裏面補強したコンクリート板の破壊性状の例を示す。ビニロン補強樹脂シート2 mmおよび4 mmで補強した場合の破壊モー

ドは、いずれも「クレータ、斜めひび割れ」であった。接触爆発と同様に、爆薬直下の裏面において樹脂シートに亀裂が生じていたが破片は飛散しなかった。また、ビニロン補強樹脂シート4 mmで補強した場合には、斜めひび割れの数にはビニロン補強樹脂シート2 mmで補強したケースよりも低減されていた。

特殊アクリル樹脂2 mm厚で補強した場合の破壊モードは、「貫通」であった。樹脂の厚さを増加させた8 mmの場合は、「クレータ、スポール」であった。爆発位置直下の特殊アクリル樹脂はいずれのケースでも破片

化しているが、接触爆発の場合と比較して破片の飛散は低減されている。しかし、補強する樹脂の塗膜厚さを4倍(2 mmから8 mm)に増加させても局部破壊を低減させる効果は小さいことがわかる。

一方、ポリウレア樹脂の塗膜厚さが2 mm, 4 mmおよび8 mmでそれぞれ補強した場合、すべての実験ケースにおいて破壊モードは「クレータ, 斜めひび割れ」であった。接触爆発と同様に、ポリウレア樹脂にはまったく損傷がなく、爆発直下の位置で大きな膨らみ変形が生じていた。また、補強する樹脂の厚さを増加させると、コンクリート中の斜めひび割れの数が低減された。

c) まとめ

高伸長材料で裏面を補強した場合、接触爆発、近接爆発を問わず特殊アクリル樹脂補強を除くすべてのケースで破片の飛散を防止することができた。特殊アクリル樹脂で補強したケースにおいては、特殊アクリル樹脂の引張強度が小さいため、耐爆性能が向上しなかったと考えられる。ビニロン補強樹脂シートおよびポリウレア樹脂で裏面を補強した場合には、コンクリート裏面における自由端反射による引張波の発生が多少抑制され、スポールによる損傷がプレーンコンクリート板と比較してやや低減されるとともに、コンクリート板の損傷による膨らみに追従して補強材料が変形するため、破片の飛散を防止したものと考えられる。

(4) まとめ

本章では、裏面を補強したコンクリート板の局部破壊の性状について検討した。コンクリート板裏面における破片の飛散を防止するためには、高強度材料または高伸長材料によって裏面を補強することが有効である。この際、補強材料の方向、枚数および厚さを増大させることにより、スポールの発生が低減される。スポールの低減には、とくに高強度材料による補強が有効である。

4. 局部破壊の特徴

(1) 高強度材料による補強の場合

図-10に、クレータの深さと直径の関係を示す。図中には、次式に示す森下⁹⁾らが提案した、貫通孔が生じない場合のクレータ深さ C_d (mm)と直径 C (mm)の関係を評価する式を実線で示している。

$$\frac{C_d}{T} = 0.20 \frac{C}{T} \quad (1)$$

ここに、 T は板の厚さ(mm)である。

図-10(a)より、接触爆発の場合は補強材料の違いによらずクレータの直径は139 mm~163 mm、クレータの深さは23 mm~28 mmであることがわかる。図-10(b)に示す近接爆発の場合は、クレータ直径が52 mm~66 mmで深さは7 mm~11 mmである。いずれも、クレータの深さおよび直径は補強材料の種類に関わらず同程度であり、接触爆発および近接爆発時に生じるクレータの深さおよび直径の関係は式(1)で評価できるといえる。つまり、高強度材料による裏面補強はクレータの深さと直径の比にあまり影響を与えないことがわかる。

図-11に、接触爆発に対するスポールの深さと直径の関係を示す。図中には、森下⁹⁾により提案されたスポールの深さ S_d (mm)と直径 S (mm)の関係式を示している。

$$\text{貫通孔が生じない場合} \quad \left(\frac{S}{T} < 2.9 \right)$$

$$\frac{S_d}{T} = 0.15 \frac{S}{T} \quad (2a)$$

(a) 接触爆発

(b) 近接爆発

図-10 クレータ深さと直径との関係 (高強度材料)

貫通孔が生じる場合 $\left(\frac{S}{T} \geq 2.9\right)$

$$\frac{S_d}{T} = -0.017 \frac{S}{T} + 0.71 \quad (2b)$$

図-11より、プレーンコンクリート板の場合、スポールの直径は225 mm、深さは53 mmである。これらは、式(2b)に示す貫通孔が生じる場合の関係式に近い値を示している。ステンレス補強樹脂シート補強においてスポールが発生した場合、プレーンコンクリート板のケースと比較すると、そのスポールの直径は同等であるが、深さは26 %低減した。また、1方向アラミド繊維シート1枚で補強したケースのスポールの直径および深さは、プレーンコンクリート板に対して直径が2ケースの平均で9 %、深さが同じく38 %低減した。さらに、2方向カーボン繊維シート1枚で補強したケースでは、2ケース中1ケース(実験番号11)でスポールが生じ、プレーンコンクリ

図-11 接触爆発におけるスポール深さと直径との関係 (高強度材料)

(a) 接触爆発

(b) 近接爆発

図-12 斜めひび割れ高さと長さとの関係 (高強度材料)

ト板に対して直径は18 %、深さは31 %低減した。また、スポールの直径よりも深さの方が大きな割合で低減された。貫通限界のコンクリート板に高強度材料で裏面補強を行った場合のスポール深さおよび直径は、式(2a)に示す貫通孔が生じない場合の予測式に近い結果を示しており、鋼材または繊維シートによる裏面補強によって損傷が低減したものと考えられる。近接爆発の場合、高強度材料により裏面を補強したコンクリート板ではスポールは生じなかった。

図-12(a)に、接触爆発時における斜めひび割れの長さおよび高さの関係を示す。ステンレス補強樹脂シートの枚数、繊維シートの方向および枚数を増加させることにより斜めひび割れの高さは減少するが、斜めひび割れの長さは増加することがわかる。これは、裏面補強によってスポール破壊は抑制されたが、板のせん断変形が増大して斜めひび割れが進展したものと考えられる。ここで、スポールが生じる場合は、板が全体変形する前に局所的にコンクリート板の裏側に損傷が生じるため、斜めひび割れの発生位置は爆薬直下の近傍の範囲にとどまると考えられる。一方、スポールが生じない場合は、板に比較的大きな全体変形が生じるため、爆薬から離れた位置にも斜めひび割れが進展すると考えられる。

図-12(b)に、近接爆発時における斜めひび割れの長さおよび高さの関係について示す。近接爆発時においても、ステンレス補強樹脂シートの枚数、アラミド繊維シートの方向を増加させると斜めひび割れの高さは低減するが、斜めひび割れの長さは増加することがわかる。

(2) 高伸長材料で補強した場合

図-13に、クレータの深さと直径との関係を示す。図中には、森下⁹⁾が提案した、貫通孔が生じない場合の

図-13 クレータ深さと直径との関係 (高伸長材料)

図-14 スポール深さと直径との関係 (高伸長材料)

クレータ深さ C_d と直径 C との関係の評価式(式(1))を実線で示している。図-13(a)に示すように、接触爆発において高伸長材料で裏面補強を施した場合のクレータの直径は153 mm~184 mm、深さは25 mm~30 mmの範囲にある。図-13(b)に示す近接爆発の場合については、高伸長材料で裏面補強を施した場合のクレータの直径は56 mm~60 mm、深さは6 mm~10 mmであり、補強を施すことでクレータ深さは多少低減される傾向が認められる。しかし、クレータ深さ、直径ともに補強の種類、枚数、塗膜厚さによる明瞭な傾向は認められない。すなわち、高伸長材料で補強を施した場合も、近接爆発、接触爆発ともにクレータの直径と深さの関係は、式(1)で評価できると言える。

図-14に、スポールが生じたケースにおけるスポールの深さと直径との関係を示す。図中には森下ら⁹⁾により提案されたスポールの深さ S_d と直径 S の関係式(式(2))を示している。接触爆発においては、貫通孔が生じなかつた

ったビニロン補強樹脂シートおよびポリウレタ樹脂による補強の場合、塗膜厚さを増加させるとスポール深さ、スポール直径ともに低減される傾向がある。これらの材料で補強することにより、プレーンコンクリート板の場合と比較して、スポール深さは2 mm~14 mm、スポール直径は15 mm~87 mm低減された。一方、図-11に示した高強度材料で補強した場合は、プレーンコンクリート板の場合と比較してスポール深さが14 mm~20 mm、スポール直径は0 mm~42 mm低減された。すなわち、高強度材料による補強と比較して、高伸長材料による補強では、スポール直径の低減量に比して、スポールの深さの低減量が小さいことがわかる。この結果、実験結果と式(2a)との乖離が生じている。なお、特殊アクリル樹脂で補強した場合のスポール深さは、接触爆発、近接爆発の別および塗膜厚さに関わらず、無補強の場合と大差が認められない。

図-15に、斜めひび割れの高さと長さとの関係を示す。

図-15 斜めひび割れ高さと長さとの関係（高伸長材料）

接触爆発、近接爆発のいずれに対しても、ポリウレア樹脂で補強した場合の斜めひび割れ高さは、塗膜厚さを2mmから8mmに増大させると、接触爆発時は18mm、近接爆発時は15mmそれぞれ減少する一方、斜めひび割れ長さは接触爆発時で16mm、近接爆発時は8mmそれぞれ増大する。ビニロン補強樹脂シートで補強した場合は、接触爆発時は厚さを2mmから4mmに増加しても斜めひび割れ高さ、長さに明瞭な変化は認められなかったが、近接爆発時には斜めひび割れ高さが低減される一方で斜めひび割れ長さは微増した。

5. 補強材料の引張剛性による局部破壊の評価

等方性材料でコンクリート板の裏面補強を行った場合、コンクリートと補強材料とのインピーダンス比に応じて引張応力波が低減され、爆発を受けた際のコンクリート板の局部破壊は低減されると考えられる⁹⁾。また、繊維シートのような異方性材料による裏面補強に関して、別府ら¹⁰⁾は補強材料に生じる引張応力や剛性の増加によって、コンクリート板の局部破壊が低減されることを示している。これらは、補強材料の引張に対するヤング係数やシート厚により、爆発を受ける裏面補強コンクリート板の局部破壊を評価できる可能性を示唆している。

そこで、ヤング係数とシート厚の積である引張剛性とスポールおよび斜めひび割れの寸法との関係を調べ、引張剛性を指標として各種補強材料による補強効果を検討する。通常、引張剛性とは引張に対するヤング係数に厚さおよび幅を乗じた特性値とされている¹⁵⁾が、本研究ではヤング係数 E (kN/mm²)に厚さ t (mm)を乗じた「単位幅あたりの引張剛性」を単に「引張剛性」と呼び、検討に用いることとする。各補強材料の引張剛性は、表-5に示

表-5 各補強材料の引張剛性の値

補強材料	方向、枚数 および厚さ	引張剛性 (kN/mm)
鋼板	0.3mm	60.00
ステンレス補強樹脂シート	1枚	20.16
	2枚	40.32
カーボン繊維シート	1方向2枚	27.20
	2方向1枚	13.62
	2方向2枚	27.20
アラミド繊維シート	1方向1枚	22.77
	1方向2枚	22.77
	2方向1枚	22.77
ビニロン補強樹脂シート	2.0mm	1.14
	4.0mm	2.28
特殊アクリル樹脂	2.0mm	0.10
	4.0mm	0.20
	8.0mm	0.40
	2.0mm	0.50
ポリウレア樹脂	4.0mm	1.00
	8.0mm	2.00

すとおりである。

(1) 高強度材料で補強した場合

図-16に接触爆発におけるスポール深さ S_d (mm)と引張剛性 E_d (kN/mm)との関係を、図-17にスポール直径 S (mm)と引張剛性 E_d (kN/mm)との関係をそれぞれ示す。図中において、スポールが生じなかったケースについては、 $S_d = 0$ 又は $S = 0$ としてプロットしている。図-16より、引張剛性が大きくなるほど、スポール深さは低減される。スポールが生じたケースのみを対象として、スポール深さと引張剛性との関係について回帰分析を行うと次式が得られる。

$$S_d = -0.788E_d + 51.0 \quad (3)$$

図-16 接触爆発におけるスポール深さと引張剛性との関係（高強度材料）

図-17 接触爆発におけるスポール直径と引張剛性との関係（高強度材料）

(a) 接触爆発

(b) 近接爆発

図-18 斜めひび割れ高さと引張剛性との関係（高強度材料）

相関係数は-0.91であり、スポール深さは引張剛性の影響を強く受けることがわかる。また、スポールが発生するケースとしないケースが混在する引張剛性13.62 kN/mm～22.77 kN/mmがスポール限界に相当する。引張剛性22.77 kN/mmではスポールが発生するケースとしないケースがあるが、3.(2) b)で述べたとおり、支間直角方向の補強の有無による影響と考えられる。22.77 kN/mmよりも大きな引張剛性のもとでは、スポールが発生したケースは認められない。以上より、接触爆発に対する裏面補強コンクリート板に生じるスポール深さは、補強材料の引張剛性の値により評価できると言える。また、図-17より、接触爆発におけるスポール直径と引張剛性との間には明瞭な相関は認められない。なお、近接爆発においては、スポール破壊は認められなかった。

図-18に、斜めひび割れ高さ D_d (mm)と引張剛性 E_a (kN/mm)との関係を示す。図-18より、接触爆発、近接爆発ともに斜めひび割れ高さは引張剛性を増加させるとともに低減されていることがわかる。図中の回帰式を以下に示す。

接触爆発の場合

$$D_d = -0.157 E_a + 47.6 \quad (4a)$$

近接爆発の場合

$$D_d = -0.153 E_a + 51.2 \quad (4b)$$

これらの相関係数は(4a)で-0.59、(4b)で-0.65であり、斜めひび割れ高さはスポール深さほど引張剛性の影響を強く受けにくいといえる。

(2) 高伸長材料で補強した場合

図-19、20に、スポール深さ S_d (mm)と引張剛性 E_a (kN/mm)との関係およびスポール直径 S (mm)と引張剛性 E_a (kN/mm)をそれぞれ示す。図-19より、接触爆発、近接爆発の場合ともに引張剛性が大きくなるほど、スポール深さが低減される。接触爆発においては、引張剛性が2.00 kN/mmでスポールが生じていないケースがあった。

図-19 スポール深さと引張剛性との関係（高伸長材料）

図-20 スポール直径と引張剛性との関係（高伸長材料）

一方、引張剛性が1.14 kN/mmおよび2.28 kN/mmのケースではスポールが生じている。この結果から、高伸長材料におけるスポール限界となる引張剛性は、2.00 kN/mmの近傍にあるものと考えられる。近接爆発においては、引張剛性0.50 kN/mm以上ではスポールが生じていない。スポールが生じたケースのみを対象として、スポール深さと引張剛性との関係について回帰分析を行うと次式が得られる。

接触爆発の場合

$$S_d = -6.15E_a + 51.2 \quad (5a)$$

近接爆発の場合

$$S_d = -24.2E_a + 57.0 \quad (5b)$$

相関係数は、(5a)で-0.94、(5b)で-0.86である。高強度材料で補強した場合と同様、スポール深さと引張剛性の間には強い相関が認められる。

また図-20より、接触爆発の場合は、引張剛性が大き

くなるほどスポール直径が低減されることがわかる。スポールが生じた場合のみを対象として、スポール直径と引張剛性との関係について回帰分析を行うと次式が得られる。

$$S = -47.5E_a + 243 \quad (6)$$

相関係数は-0.88であるが、補強材料別に検討すると、引張強度が低い特殊アクリル樹脂で補強した場合は、引張剛性が変化してもスポール直径の大小に影響しない。一方、近接爆発の場合は、引張剛性が増加するとスポール直径が大きくなっている。接触爆発の場合とは反対の傾向を示しており、今後さらに実験を行い検討する必要がある。

図-21に、斜めひび割れ高さ D_d と引張剛性 E_a との関係を示す。図-21より、接触爆発、近接爆発のいずれも、斜めひび割れ高さは引張剛性が増加するとともに低減されていることがわかる。図中の回帰式を以下に示す。

図-21 斜めひび割れ高さと引張剛性との関係 (高伸長材料)

接触爆発の場合

$$D_d = -6.86E_a + 60.9 \quad (7a)$$

近接爆発の場合

$$D_d = -6.44E_a + 55.6 \quad (7b)$$

相関係数は(7a)で-0.76, (7b)で-0.77であり, 斜めひび割れ高さと引張剛性との間の相関は, スポール深さと引張剛性との間の相関よりも小さい. この傾向は, 高強度材料で補強した場合と共通している. 斜めひび割れ高さはスポール深さほど引張剛性の影響は強く受けないといえる.

(3) 等価コンクリート厚

コンクリート構造物が接触および近接爆発荷重を受けた際, 構造物内部の安全を確保する観点からスポールの発生と, それに伴う破片の飛散を評価することが極めて重要である. 前項の検討から, 高強度材料, 高伸長材料ともに補強材料の引張剛性とスポール深さに強い相関があることがわかった. コンクリート板に対する裏面補強の効果を定量的に評価するため, 引張剛性を指標として補強材料がコンクリートの厚さに換算してどの程度であるかを検討する. 本研究では, この厚さを等価コンクリート厚と呼ぶ.

森下ら⁹⁾が提案したスポール限界に対し, 本実験の条件 (接触爆発において, 爆薬量46 g) を適用すると, 接触爆発に対するスポール限界厚 T_d (mm)は次式で表すことができる.

$$T_d = 36W^{1/3} = 139 \quad (8)$$

高強度材料の場合, 接触爆発においてスポール限界を示した補強方法は, 2ケース中1ケースでスポールが発生した, 「ステンレス補強樹脂シート1枚」, 「2方向カーボン繊維シート1枚」であった. 爆薬量46 gの接触爆発

においてプレーンコンクリート板のスポール限界厚は, 式(8)より139 mm, 試験体の板厚は80 mmである. したがって, 板厚とスポール限界厚の差は $139 - 80 = 59$ mmとなる. すなわち裏面補強によりスポール限界となった実験ケースでは, プレーンコンクリート板のコンクリート厚が59 mm増加したと等価補強効果が得られたと考える. 59 mmを補強材料の引張剛性で除すると, 引張剛性1 kN/mmあたりの等価コンクリート厚が得られる. すなわち, ステンレス補強樹脂シート1枚 (引張剛性20.16 kN/mm) の等価コンクリート厚は2.9 mm/(kN/mm), 2方向カーボン繊維シート1枚 (引張剛性13.62 kN/mm) の場合は4.1 mm/(kN/mm)となる. この2ケースを平均した等価コンクリート厚3.5 mm/(kN/mm)によって高強度材料の等価コンクリート厚を代表させると, 表-6に示す各種の高強度材料で補強したコンクリート板の等価コンクリート厚が得られる. たとえば, 厚さ80mmのコンクリート板を0.3 mm厚の鋼板で補強した補強板の等価コンクリート厚は, $80 \text{ mm} + 60.00 \text{ kN/mm} \times 3.5 \text{ mm/(kN/mm)} = 290 \text{ mm}$ と求められる.

高伸長材料の場合, 接触爆発におけるスポール限界は, 2ケースともにスポールが発生した「ポリウレア樹脂4 mm」と2ケースともにスポールが発生しなかった「ポリウレア樹脂8 mm」の間に存在すると仮定した. そこで, ポリウレア樹脂6 mmで補強した場合をスポール限界と考える. ポリウレア樹脂6 mmの引張剛性は1.50 kN/mmなので, 引張剛性1 kN/mmあたりの等価コンクリート厚は, 59 mmを1.50 kN/mmで除して39.3 mm/(kN/mm)となる. 高強度材料 (ステンレス補強樹脂シートとカーボン繊維シートの平均) と高伸長材料 (ポリウレア樹脂) の等価コンクリート厚を比較すると, 高伸長材料の方が9~14倍大きい. この理由としては, ポリウレア樹脂の破断伸びが450 %と大きく, 爆発の際に補強材料が変形することにより爆発によるエネルギーを吸収できるため, 引張剛

表-6 接触爆発における補強コンクリート板の等価コンクリート厚と破壊モード (高強度材料)

補強材料	方向, 枚数 および厚さ	引張剛性 (kN/mm)	補強板の 等価コンク リート厚(mm)	生じた主要な破壊モード (発生したもの○印)		
				クレータ	スポール	貫通
鋼板	0.3mm	60.00	290	○		
ステンレス補強樹脂シート	1枚	20.16	151	○	○(限界)	
	2枚	40.32	221	○		
カーボン繊維シート	1方向2枚	27.20	175	○		
	2方向1枚	13.62	128	○	○(限界)	
	2方向2枚	27.20	175	○		
アラミド繊維シート	1方向1枚	22.77	160	○		
	1方向2枚	22.77	160	○		
	2方向1枚	22.77	160	○		

表-7 接触爆発における補強コンクリート板の等価コンクリート厚と破壊モード (高伸長材料)

補強材料	塗膜厚さ	引張剛性 (kN/mm)	補強板の 等価コンク リート厚(mm)	生じた主要な破壊モード (発生したもの○印)		
				クレータ	スポール	貫通
ビニロン補強樹脂シート	2.0mm	1.14	125	○	○	
	4.0mm	2.28	170	○	○	
特殊アクリル樹脂	2.0mm	0.10	84	○	○	○
	4.0mm	0.20	88	○	○	○
	8.0mm	0.40	96	○	○	
ポリウレア樹脂	2.0mm	0.50	100	○	○	
	4.0mm	1.00	119	○	○	
	8.0mm	2.00	159	○		

性が小さい材料でも補強効果が得られたものと考えられる。高伸長材料においても、高伸長材料の等価コンクリート厚をポリウレア樹脂の値39.3mm(kN/mm)で代表させる。高強度材料の場合と同様に、高伸長材料で補強したコンクリート板の等価コンクリート厚を求めると、表-7に示す各値が得られる。

表-7から、等価コンクリート厚が貫通限界80mmに近い特殊アクリル樹脂2mmおよび同4mmでは、破壊モードが貫通である。これら2ケースを除く等価コンクリート厚がスポール限界である139mmを下回るケースでは、すべてスポールが発生している。また、等価コンクリート厚がスポール限界139mmを20mm上回るポリウレア樹脂8mmではスポールが発生していない。ただし、等価コンクリート厚がスポール限界を31mm上回るビニロン補強樹脂シート4.0mmのケースではスポールが生じている。これは、ビニロン補強樹脂シートの破断伸びが12%と高伸長材料の中では小さいにもかかわらず、破断伸びが大きいポリウレア樹脂の実験データから推定した等価コンクリート厚を用いてスポール限界を評価したためである。今後、使用する樹脂の破断伸びを考慮した評価法について検討する必要がある。以上から、引張剛性の値から換算した等価コンクリート厚と森下ら⁹⁾が提案した貫通限界およびスポール限界の評価式により、裏面補強コンクリート板の接触爆発に対する耐爆性能の評価がおおむね可能といえる。ただし、提案した等価コンクリ

ート厚は、限られた実験条件下で誘導したため、その適用範囲が厚さ80mm、爆薬量46gの接触爆発において引張剛性13.62~60.00kN/mm(高強度材料)、0.10kN/mm~2.28kN/mm(高伸長材料)に限られている。なお、高伸長材料のうち比較的破断伸びが小さいビニロン補強樹脂シートを用いた場合は、裏面補強コンクリート板の等価コンクリート厚が危険側に評価された。このため、更なるデータの蓄積が望まれる。

また、コンクリート板厚と爆薬量が異なる場合の局部破壊を評価する指標として、コンクリート板厚 t を爆薬量 w の3乗根で除した換算コンクリート厚さ($t^* = t/w^{1/3}$)が提案されている^{9~8)}。本研究で提示した等価コンクリート厚は、換算コンクリート厚さと同様の形式で表現されることが設計上有用であると考えられる。このためには、種々の厚さの裏面補強コンクリート板に対して爆薬量を変化させた接触爆発実験を行う必要がある。

なお、近接爆発においては、スポール限界を示した実験ケースが存在しないため、近接爆発のデータから等価コンクリート厚を評価するには至らなかった。

6. 結言

本研究は、コンクリート構造物に対する耐爆設計法の確立に資するため、接触爆発および近接爆発下における

裏面補強コンクリート板の局部破壊および破片の飛散について実験的に検討したものである。実験結果から、裏面補強が接触・近接爆発によるコンクリート板の局部破壊低減に有効であることを確認し、等価コンクリート厚によるスポール限界の評価法を提案した。本研究の成果を以下に要約する。

(1) ヤング係数および引張強度が大きい材料（高強度材料）による裏面補強について

- a) 補強材料の枚数および方向を増すことにより、スポール深さ、スポール直径、斜めひび割れ高さが低減した。一方、斜めひび割れ長さはより増大した。
- b) スポールが生じた実験ケースを含め、すべてのケースで破片の飛散は防止された。
- c) 接触爆発においては引張剛性が20.16 kN/mmより大きい補強材料を使用し、近接爆発においては引張剛性13.62 kN/mm以上の補強材料を使用してそれぞれ裏面を補強することにより、スポールを防止できた。

(2) ヤング係数が小さく破断伸びが大きい材料（高伸長材料）による裏面補強について

- a) 貫通孔が生じなかったポリウレア樹脂およびビニロン補強樹脂シートによる補強の場合、塗膜厚さを増加させるとスポール深さ、スポール直径、のいずれも低減する。とくに、スポール直径の低減が顕著である。
- b) 破断伸びが大きいポリウレア樹脂および比較的引張強度が高いビニロン補強樹脂シートを使用すると、スポールが生じた場合でも破片の飛散を防止できた。
- c) 接触爆発においては、引張剛性が2.00 kN/mmの補強材料を使用した場合にスポールを防止できたケースがあった。近接爆発においては0.5 kN/mm以上の補強材料を使用してそれぞれ裏面を補強すれば、スポールを防止できる。

(3) スポール深さおよび斜めひび割れの高さと引張剛性との関係を定式化した。ただし、斜めひび割れ高さは、スポール深さに比して引張剛性の影響は大きくない。

(4) コンクリート板厚80mm、爆薬量46gの接触爆発において、補強材料の引張剛性が13.62～60.00 kN/mm（高強度材料）、0.1 kN/mm～2.28 kN/mm（高伸長材料）の範囲に対して、裏面補強による局部破壊の低減効果を等価コンクリート厚で評価できた。このとき、高強度材料に対する等価コンクリート厚は、3.5 mm(kN/mm)であった。また、高伸長材料に対する等価コンクリート厚は39 mm(kN/mm)であったが、比較的破断伸びが小さいビニロン補強樹脂シートで裏面補強した場合

の効果が危険側に評価された。

- (5) コンクリート板裏面における破片の飛散を防止するためには、高強度材料または高伸長材料によって裏面を補強することが有効である。また、スポールの発生を防止するためには、補強材料の引張剛性を増大させることが有効である。

謝辞：本研究にあたり、補強材料を提供していただいた前田工織株式会社、IMARI株式会社に謝意を表します。また、爆発実験に際してご協力いただいた防衛大学校蓮江和夫元教授、甲賀誠教授、伊達新吾准教授に御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Headquarters, Department of the Army : Fundamentals of protective design for conventional weapons, TM5-855-1, Cha.5, 1986.
- 2) Headquarters, Departments of the Army : Structures to Resist the Effects of Accidental Explosion, TM5-1300, pp. 4-181, 1990.
- 3) 竹田仁一，立川博之，藤本一男，工藤利昭，出田孝二：爆発による RC 版の変形と破壊，土木技術研究会報第 16 号，pp.67-74，1976.
- 4) Lonnqvist, L. : The effects of high explosives in contact with reinforced concrete slabs, *6th International Symposium on Interaction of Non Nuclear Munitions with Structures*, pp. 221-226, 1983.
- 5) McVay, M. K. : Spall Damage of Concrete Structures, Technical Report SL88-22, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station, 1988.
- 6) 森下政浩，田中秀明，伊藤孝，山口弘：接触爆発を受ける RC 版の損傷，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1787-1797，2000.
- 7) 田中秀明，森下政浩，伊藤孝，山口弘：爆発を受ける RC 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.
- 8) 森下政浩，田中秀明，安藤智啓，萩原浩之：接触爆発を受ける RC 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.
- 9) 山口信，村上聖，武田浩二，三井宜之：ポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能，日本建築学会構造系論文集，No.619，pp. 187-194，2007.
- 10) Mao, L., Barnett, S. J., Tyas, A., Warren, J., Schleyer, G. K. and Zaini, S. S. : Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading, *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 822-830, 2015.
- 11) 別府万寿博，大野友則，大久保一徳，佐藤和幸：接触・近接爆発に対する繊維シート補強コンクリート板の耐爆性能，土木学会論文集 A，Vol.66，No.4，pp.700-716，2010.12.
- 12) Ha, J.-H., Yi, N.-H. Choi, J.-K. and Kim, J.-H. J. : Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading, *Composite Structures*, Vol.

- 93, pp. 2070-2082, 2011.
- 13) 朝倉俊弘, 小島芳之, 高橋徹, 吳智深, 吉澤弘之 :
連続繊維シートによるトンネル覆工補強に関する研
究, トンネル工学研究論文・報告集, 第 8 巻, pp.
209-214, 1998.
- 14) 野中資博, 三品文雄, 宇野祐一 : 上下水道施設のコ
ンクリート防食実務, 森北出版, pp.47-55, 2005.
- 15) 経済産業省 : 日本工業規格, JIS A 1192, 2005.
- (2015. 8. 17 受付)

EFFECTS OF REINFORCING BACK SURFACE OF CONCRETE PLATES ON LOCAL DAMAGE CAUSED BY EXPLOSIVE LOAD

Hiroyoshi ICHINO, Makoto NAGATA, Masuhiro BEPPU and Tomonori OHNO

To establish a protective design for concrete structures, the explosive-resistant performance of concrete plates and the reinforced back surface of concrete plates were experimentally examined. In this study, explosion tests are conducted to examine the failure modes of concrete plates subjected to the contact explosion and the close-in explosion. Fiber sheet or polymer coating is used for the reinforcement of back surface of concrete plate. Generally, fiber sheet has high strength (high elastic modulus) and polymer coating has high braking strain. From test results, it is found that the reinforcement employed for these materials has remarkable effectiveness to reduce the local damage of concrete plates. Moreover, reinforcement of back surface can prevent the scattering of concrete fragment. The effect of reinforcement is formulated as a function of tensional stiffness of materials.