鉄筋コンクリート版の耐爆性能に及ぼす SIFCON 積層補強の効果

スラリー充填繊維コンクリート (SIFCON) の接触爆発に対する耐爆性能

CLAD-REINFORCING EFFECT OF SIFCON ON BLAST RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLABS

Blast resistance of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) against contact detonation

山口 信*, 長渡 健之**, 森島 慎太郎**

Makoto YAMAGUCHI, Takeyuki NAGATO and Shintaro MORISHIMA

The objective of this study is to develop an efficient blast-resistant strengthening method of reinforced concrete (RC) slabs using slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON). Contact detonation tests were carried out on RC slabs in which the concrete near the rear was replaced with SIFCON. As a result, the SIFCON cladding effectively reduced spalling damage of RC slabs, and the spall-reducing effect was raised by reducing the thickness of the SIFCON layer. Further, the spall-reducing mechanism of the RC slabs with SIFCON cladding was qualitatively discussed, based on the propagation behavior of the stress wave in a one-dimensional wave model and the punching-shear strength of the SIFCON layer.

Keywords : Slurry infiltrated fiber concrete, Reinforced concrete, Clad-reinforcement, Blast resistance, Contact detonation, Local failure

スラリー充填繊維コンクリート, 鉄筋コンクリート, 積層補強, 耐爆性能, 接触爆発, 局部破壊

1. はじめに

衝突・爆発等に起因する衝撃荷重を重要構造物の設計において考慮し, より高い安全性を確保することの必要性が生じている^{1,2)}

特に, 接触・近接爆発を受ける鉄筋コンクリート (以下, RC と略記) 版の局部破壊を考える場合, コンクリート片の飛散による 2 次被害防止の観点から, 裏面剥離を低減することが設計上の重要課題と位置付けられる¹⁾. この現象は, 一般的には, 爆発荷重の作用により版厚方向に伝播した圧縮応力波が反対側の自由境界面で反射した際に逆位相の引張応力波へと変化し, このときの引張応力がコンクリートの破壊強度を超えることにより生じると考えられている (例えば 3, 4). また, 近年になり, 裏面剥離が反射引張応力波と最大せん断応力面に沿った斜めひび割れとに起因する複合的な破壊であることも報告されている (写真 1 参照)^{5, 6)}.

裏面剥離を低減するための手段の 1 つとして, 昨今より, 繊維補強セメント系複合材料 (以下, FRCC と略記) の耐爆性能に関する研究が実施されている (例えば 7-10). しかし, 後述する鋼繊維補強モルタル (以下, SFRM と略記) を含む通常の FRCC (混練時に短繊維を分散混入するセメント系複合材料) であれば, 繊維体積率が過度に高くするとフレッシュ時のコンシステンシーが著しく増大するため, 2% 程度以下の繊維体積率が適用される場合が多い. これに対し, 型枠中に予め短繊維を敷き詰め, その間隙にグラウト材を充填して製造するスラリー充填繊維コンクリート (以下, SIFCON と略記) が 1980 年代に提案されており, 同手法によれば, 繊維形状によっては

10% を超える高い繊維体積率を確保できることが示されている¹¹⁾.

著者らは, 前報¹²⁾において, SIFCON を対象とした接触爆発試験を実施し, 他の各種 FRCC^{7, 9)} に比して SIFCON が良好な裏面剥離低減性能を有することを明らかにしている. しかし, 他の各種 FRCC と同様に, SIFCON を適用しても爆発面破壊は殆ど低減されないことも併せて確認されており, SIFCON の適用により効率的に当該部材の耐爆性能向上を図るためには, 裏面剥離の発生が想定される部位に限定して SIFCON を用いる等の部材構成方法の工夫が必要となるものと考えられる.

そこで, 本研究では, SIFCON を用いた効率的な RC 版の耐爆性能向上技術の構築に資するため, 版厚 100mm の RC 版の裏面側コンクリートを SIFCON に置換し, その補強厚を 0, 25, 50, 75, 100mm の 5 水準で変化させた SIFCON 積層補強 RC 版の接触爆発に対する耐

- ① 爆発荷重の作用によって生じた圧縮応力波が自由境界面で引張応力波となって反射し, コンクリートに引張破壊が生じる. ② 同時に, 爆発面から裏面に向かって円錐状の最大せん断応力面に沿った斜めひび割れが発生し, 裏面剥離領域を形成する.

注) 文献 5, 6) に示されるメカニズムを, 本実験データに記入して示している.

写真 1 RC 版の裏面剥離発生メカニズムの模式図

* 熊本大学大学院先端科学研究部 助教・工博

** 熊本大学大学院自然科学研究科 大学院生

Assist. Prof., Dept. of Advanced Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.

爆性能について実験的検討を行った。また、補強厚 25mm のケースについては、主に補強層の繊維体積率の違いが裏面剥離低減性能に及ぼす影響について検討するため、補強材として繊維体積率 2.0% の SFRM を用いた場合についても同様の検討を行った。損傷評価は、試験体に形成された爆発面破壊および裏面剥離の形状・寸法や、爆発面、裏面および内部のひび割れ発生状況等の評価を中心に実施した。更に、1 次元波動モデルにおける応力波伝播挙動および補強層の押抜きせん断耐力に関する検討結果に基づき、SIFCON 積層補強による RC 版の耐爆性能向上メカニズムについても若干の考察を加えた。なお、本部材構成は、SIFCON をハーフプレキャスト RC 部材に適用することを想定したものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料・調査および製造方法

表 1 に使用材料を示す。前報¹²⁾と同様に、SIFCON の補強用繊維として両端フック付きの鋼繊維（アスペクト比：48.4）を用い、グラウト材の高流動性および材料分離抵抗性確保を目的に、シリカフェームと高性能減水剤を併用した。また、SFRM の補強用繊維および結合材は SIFCON と同様とし、細骨材として川砂を用いた。

SIFCON には、表 2 に示す通り、高靱性かつ良好な耐爆性能を確保する上で適切と判断された調査¹²⁾を適用した。SFRM の調査に関して、繊維体積率 V_f は混練が可能な範囲で 2.0% とし、水結合材比 W/B およびシリカフェームによるセメント置換率 Si/B は SIFCON と同様とした。また、普通コンクリートとしては、圧縮強度 30N/mm² クラスのものを現場打ちにより製造した。

普通コンクリートおよび SFRM の混練には容量 55L の強制 2 軸攪拌型ミキサーを用い、最初に結合材および骨材を 30 秒間空練りした後、水（普通コンクリートでは水および化学混和剤）を加えて 90 秒間混練し、SFRM にあつては更に短繊維を加えて 3 分間練り混ぜた。SIFCON におけるグラウト材の混練には容量 30L のオムニミキサーを使用し、最初に結合材を 30 秒間空練りした後、水および化学混和剤を加えて 3 分間練り混ぜた。また、SIFCON の製造にあたっては、予め型枠中に所定量の短繊維を詰め、型枠底板を木槌により加振しながら爆発面側からの流し込みによりグラウト材を充填させた。

2.2 素材特性

各種セメント系材料の静的力学特性を調べるため、圧縮試験用に $\phi 100 \times 200$ mm 円柱供試体を、曲げ試験用に $100 \times 100 \times 400$ mm 角柱供試体を各 3 体作製し、普通コンクリートは材齢 28 日目まで、SIFCON および SFRM は材齢 42 (=14+28) 日目まで現場湿布養生後、気中養生を経て各種試験に供した（但し、普通コンクリートに対しては曲げ試験は行わず、圧縮試験のみを実施した）。なお、曲げ試験では、スパン長 300mm の中央 3 点曲げ載荷による荷重-載荷点変位曲線を計測した。

以上のようにして測定した、各種セメント系材料の素材特性を表 3 に示す。曲げ靱性は、繊維補強により顕著に改善される力学特性であるが、本実験で用いた SIFCON は SFRM に比して繊維体積率が約 6 倍と大きいために、曲げ靱性係数も SFRM の約 6 倍と高い値を示していることが確認される。

2.3 試験体

図 1 に接触爆発試験体の形状・寸法および配筋を、写真 2 に

表 1 使用材料

a) 普通コンクリート		
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³	
骨材	川砂 表乾密度：2.56g/cm ³ 吸水率：3.85% 最大寸法：2.5mm 粗粒率：2.31	碎石 2005 表乾密度：2.97g/cm ³ 吸水率：1.24% 最大寸法：20mm 実積率：58.0%
化学混和剤	AE 減水剤（変性リグニンスルホン酸化合物）	
b) SIFCON および SFRM		
セメント	早強ポルトランドセメント 密度：3.14g/cm ³	
混和材	シリカフェーム 密度：2.22g/cm ³ 、比表面積：200000cm ² /g	
細骨材*	川砂（物性値は上述の通り）	
化学混和剤**	高性能減水剤（ポリカルボン酸エーテル系化合物）	
短繊維	鋼繊維（両端フック付き） 密度：7.85g/cm ³ 、直径×長さ：φ0.62×30mm、 引張強度：1080N/mm ² 以上、引張弾性率：205kN/mm ²	

注) *: SFRM のみに使用、**: SIFCON のみに使用。

表 2 使用調査

a) 普通コンクリート								
Batch	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE-W/C (%)	Slump (cm)
			C	W	S	G		
A	58	46.0	312	181	795	1084	1.50	17.5
B	58	46.0	312	181	795	1084	1.50	20.0
b) SIFCON								
V _f (%)	W/B (%)	Si/B (%)	単位量 (kg/m ³)			Sp/B (%)	0-Flow	
			C	Si	W			
11.5	40	10	1230	137	547	1.25	395	
c) SFRM								
V _f (%)	W/B (%)	Si/B (%)	S/B (%)	単位量 (kg/m ³)				Flow
				C	Si	W	S	
2.0	40	10	60	932	103	414	621	165
注1) W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, C: セメント, W: 水, S: 細骨材, G: 粗骨材, AE-W: AE 減水剤, V _f : 繊維体積率 (外割), W/B: 水結合材比, B=(C+Si): 結合材, Si: シリカフューム, Si/B: シリカフュームによるセメント置換率, S/B: 砂結合材比, Sp: 高性能減水剤.								
注2) 普通コンクリートの Batch A は無補強および SIFCON 積層補強試験体の製造に, Batch B は SFRM 積層補強試験体の製造にそれぞれ使用.								
注3) 0-Flow: フレッシュ状態のグラウト材単体に関する 0 打フロー値 (フローテーブルに落下運動を与えることなく測定したフロー値), Flow: フレッシュ状態の SFRM のフロー値.								

注 1) W/C：水セメント比、s/a：細骨材率、C：セメント、W：水、S：細骨材、G：粗骨材、AE-W：AE 減水剤、 V_f ：繊維体積率（外割）、W/B：水結合材比、 $B=(C+Si)$ ：結合材、Si：シリカフェーム、Si/B：シリカフェームによるセメント置換率、S/B：砂結合材比、Sp：高性能減水剤。
注 2) 普通コンクリートの Batch A は無補強および SIFCON 積層補強試験体の製造に、Batch B は SFRM 積層補強試験体の製造にそれぞれ使用。
注 3) 0-Flow：フレッシュ状態のグラウト材単体に関する 0 打フロー値（フローテーブルに落下運動を与えることなく測定したフロー値）、Flow：フレッシュ状態の SFRM のフロー値。

表 3 素材特性

種類	Batch	γ (kN/m ²)	σ_B (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	ϵ_{co} (μ)	σ_f (N/mm ²)	$\bar{\sigma}_b$ (N/mm ²)
普通コンクリート	A	22.8	32.2	21.7	2580	—	—
	B	23.2	33.2	25.3	2410	—	—
SIFCON	—	25.2	99.9	17.2	17200	44.5	38.0
SFRM	—	21.4	73.6	23.7	3740	8.30	6.29

注 1) γ ：気乾単位体積重量、 σ_B ：圧縮強度、E：ヤング係数、 ϵ_{co} ：圧縮強度時のひずみ、 σ_f ：曲げ強度、 $\bar{\sigma}_b$ ：曲げ靱性係数。
注 2) 普通コンクリートの Batch A は無補強および SIFCON 積層補強試験体の製造に、Batch B は SFRM 積層補強試験体の製造にそれぞれ使用。
注 3) 曲げ靱性係数算出にあたっての基準変位は 4.0mm。

SIFCON 層の製造状況をそれぞれ示す。試験体は、600mm 四方の平板とした。試験体の総厚は 100mm で一定とし、裏面側の SIFCON 補強厚を 0 (無補強)、25, 50, 75, 100 (全体補強) mm の 5 水準で変化させた。また、補強厚 25mm のケースについては、比較のため、補強材として SFRM を用いた試験体も作製した。ここで、配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが森下らの研究^{13,14)}により明らかにされているが、ここでは試験体の割れを防止し、尚且つ普通コンクリート層と補強層とを機械的に接合することを目的に、爆発面および裏面からのかぶり厚さが各 9mm となるように格子状（上端筋・下端筋ともに鉄筋間隔は 120mm）の鉄筋かごを配した。

試験体の作製にあたっては、先に SIFCON または SFRM を所定の厚さになるまで打設し、材齢 14 日目まで現場湿布養生後、普通コンクリートを打継いで更に 28 日間の現場湿布養生を行った。普通コンクリートおよび SIFCON 単体で構成される試験体については、現場

湿布養生材齢はそれぞれ 28 日および 42 (=14+28) 日とした。なお、積層補強試験体において接合界面の処理は特に行っておらず、SIFCON または SFRM の打設面にそのまま普通コンクリートを打ち継いだ。また、補強効果の目安とするため、既報¹⁵⁾を参考に裏面中央から 100mm 離れた位置に検長 90mm のひずみゲージを貼付した。

2.4 接触爆発試験方法

図 2 に接触爆発試験方法を示す。試験体を内法スパン 510mm となるように 2 本の木製台座上に設置し、試験体上面中央で 6 号電気雷管を用いて発破器により爆薬 (SEP) を起爆させた。なお、応力波の伝播が支配的な要因となる接触爆発問題において、局部破壊が支持条件の影響を受け難いことが知られており、試験は 2 辺支持により実施されるのが一般的である^{6-10, 12-15)}。また、オシロスコープを用いて、図 1 に示した箇所の起爆直後のひずみ応答を計測した。

爆薬の形状は直径と高さが等しい円柱形であり、爆薬量は 100、200g の 2 水準とした。ここで、森下ら^{13, 14)}は、接触爆発を受ける普通 RC 版の裏面剥離限界および貫通限界が下式で表せることを明らかにしている。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} = \begin{cases} 3.6 \text{ cm/g}^{1/3} & (\text{裏面剥離限界}) \\ 2.0 \text{ cm/g}^{1/3} & (\text{貫通限界}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 T : 版厚 (cm), W_m : 爆薬のトリニトロトルエン (TNT) 等価質量 (g), W : 使用爆薬量 (g), K_{TNT} : TNT の Chapman-Jouguet (C-J) 爆轟エネルギー (=4.29MJ/kg), K : 使用爆薬の C-J 爆轟エネルギー (=3.71MJ/kg) である。式(1)を用いて計算した場合、本爆薬と $T=10\text{cm}$ の RC 版との組合せであれば、裏面剥離限界および貫通限界となる爆薬量はそれぞれ 25 および 145g となる。従って、本実験条件は、無補強の RC 版であれば破壊モードが裏面剥離 ($W=100\text{g}$) および貫通 ($W=200\text{g}$) となる条件であることが判る。

2.5 局部破壊寸法の測定方法

接触爆発試験終了後、試験体に発生した局部破壊の寸法を測定した。測定項目は、図 3 に示す通り、爆発面破壊および裏面剥離の直径および深さと、貫通孔が生じた場合にはその直径とした。なお、後述するように、外観上は裏面剥離が低減された場合においても内部に顕著なスポール破壊が発生しているケースが存在するが、本研究では裏面剥離片の飛散による 2 次被害を防止することを重要視し、外観上明らかな裏面剥離を測定対象とした。

局部破壊の直径は、形状が非対称となるために、図 3 中に示す直線 1-4 に沿って 4 箇所測定しその平均値とした。爆発面破壊および裏面剥離の深さは、貫通孔が生じない場合にはそれぞれ爆発面および裏面から局部破壊最深部までの距離、貫通孔が生じた場合には貫通孔断面が最小となる位置までの距離とした。その後、図 3 に示す直線 1 に沿って試験体を切断し、試験体内部の損傷状況を観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

表 4 に接触爆発試験体の破壊性状を示す。なお、同表中において支承位置は左右両端であり、目視で確認できた爆発面および裏面のひび割れを強調して示している。

(1) 爆薬量 100g の場合

無補強試験体では、爆発点直下に顕著な裏面剥離が生じ、これを

図 1 接触爆発試験体の形状・寸法および配筋

写真 2 SIFCON 層の製造状況

図 2 接触爆発試験方法

図 3 局部破壊寸法の定義

起点とする放射状のひび割れと、中央付近を通る下端筋に沿った付着割裂ひび割れの発生が認められる。また、爆発面の局部破壊箇所からやや離れた外周部近傍には、版側面に対して平行方向にひび割

表 4 (a) 接触爆発試験体の破壊性状

		爆薬量：100g		爆薬量：200g	
無補強	左：爆発面 右：裏面				
	切断面				
SIFCON 補強厚 ：25mm	左：爆発面 右：裏面				
	切断面				
SIFCON 補強厚 ：50mm	左：爆発面 右：裏面				
	切断面				
SIFCON 補強厚 ：75mm	左：爆発面 右：裏面				
	切断面				
SIFCON 補強厚 ：100mm	左：爆発面 右：裏面				
	切断面				

表 4 (b) 接触爆発試験体の破壊性状

れが発生している様相が観察されるが、これは、版側面で反射した引張応力波に起因するものと推察される。なお、切断面を見ると、裏面剥離面に沿うように数本の斜めひび割れが発生している様相が確認される。

これに対し、SIFCON を用いて補強した試験体においては、無補強試験体に比して明確に裏面剥離が低減されており、SIFCON による補強が RC 版の耐爆性能向上の面で有効であることが明らかである。また、その破壊性状の特徴的な点として、以下が挙げられる。

- ・ 接触爆発を受ける SIFCON の破壊性状の特徴として、外観上は裏面剥離が十分に低減された場合であっても、爆発点直下の裏面近傍に内部損傷領域が形成されることが確認されているが¹²⁾、その規模は、SIFCON 補強厚の減少に伴い低減される傾向にある。同様に、外観上明らかな裏面剥離の規模も、SIFCON 補強厚の減少に伴いやや小さくなる傾向にあった。
- ・ SIFCON 補強厚 25mm の試験体においては、普通コンクリート層に斜めひび割れの発生が認められるが、それらは SIFCON 層を貫通することなく、途中から普通コンクリート-SIFCON 界面に沿うように幅方向に進展していることが判る。また、SIFCON 補強厚 50mm の試験体においても、爆発点直下近傍から幅方向に付着剥離が進行している様相が確認される。なお、SIFCON を用いて補強した試験体全てにおいて、押抜きせん断破壊に類似した SIFCON 層の貫通は確認されなかった。
- ・ 無補強試験体において見られた版側面に平行なひび割れは、SIFCON を用いて補強した試験体では観察されないことから、裏面の SIFCON 層が普通コンクリート層のひび割れ開口を抑制するように機能していた可能性が推察される（但し、爆薬量 200g ではその効果は認められていない）。また、SIFCON 層の裏面には、無補強の場合に見られた付着割裂ひび割れの発生が殆ど認められない。

ところで、SFRM 補強厚 25mm の試験体においても、補強厚が同一の SIFCON 積層補強試験体と同様に外観上明らかな裏面剥離は十分に低減されたが、裏面の付着割裂ひび割れや放射状ひび割れの発生量は SIFCON の場合に比して多くなる傾向にあった。なお、SFRM の場合も押抜きせん断破壊に類似した補強層の貫通は認められておらず、普通コンクリート層で発生した斜めひび割れが途中から接合界面に沿って進展している点で SIFCON 積層補強試験体と類似した破壊性状を示している。

(2) 爆薬量 200g の場合

無補強試験体では、爆発面破壊と裏面剥離とが連結することで貫通孔が生じた。貫通孔近傍のコンクリートには著しいひび割れの発生が認められ、また、中央付近を通る下端筋が面外方向に大きく湾曲している様相が認められる。

これに対して、SIFCON を用いて補強した試験体においては、爆薬量 100g の場合よりも損傷が拡大しているものの、無補強試験体に比して明確に裏面剥離が低減されていることが判る。また、爆薬量 100g の場合と同様に、SIFCON 補強厚が減少するほど SIFCON 層の内部損傷領域の規模が低減され、それと併せて外観上明らかな裏面剥離の規模も小さくなる傾向にあった。なお、本爆薬量においても、押抜きせん断破壊に類似した SIFCON 層の貫通は認められていない。

SIFCON 補強厚 25mm の試験体においては、普通コンクリート層に無補強の場合とほぼ同規模のスポール破壊が発生しているが、SIFCON 層に貫通が生じていないためスポール片は飛散には至っていない。また、同試験体では、普通コンクリート層で発生したスポール片が直下の SIFCON 層を押圧することで SIFCON 層にたわみ変形が生じ、裏面には曲げひび割れに類似した放射状ひび割れおよび付着割裂ひび割れの発生が観察されたが、SFRM 補強厚 25mm の試験体においては、SFRM 層に押抜きせん断破壊に類似した円錐状の貫通破壊が生じている様相が確認された。なお、これら試験体では、爆薬量 100g の場合と同様に、斜めひび割れが補強層を貫通することなく、接合界面に沿って幅方向に進展している様相が観察される。

3.2 局部破壊寸法

表 5 に、局部破壊寸法の測定値を示す。

(1) 補強厚および補強材の違いが局部破壊寸法に及ぼす影響

図 4 に SIFCON 補強厚の違いが局部破壊寸法に及ぼす影響を示す。

表 5 局部破壊寸法の測定値

W (g)	補強材 種類	補強厚 (mm)	C (mm)	C _d (mm)	S (mm)	S _d (mm)	H (mm)
100	—	0	181	32	200	45	—
	SIFCON	25	167	35	52	7	—
	SIFCON	50	176	31	71	10	—
	SIFCON	75	214	25	114	10	—
	SIFCON	100	159	24	81	8	—
	SFRM	25	162	29	25	2	—
200	—	0	222	36	324	64	90
	SIFCON	25	179	39	119	10	—
	SIFCON	50	200	32	179	21	—
	SIFCON	75	211	25	226	21	—
	SIFCON	100	134	29	182	38	—
	SFRM	25	187	16	190	84	119

注) W：爆薬量。

SIFCON を用いて補強した全ての試験体において、裏面剥離の規模が無補強の場合に比して顕著に低減されており、本補強方法が RC 版の耐爆性能向上の面で有効であることが確認される。また、SIFCON 補強厚 75mm と 100mm との間でその差は明確でないが、SIFCON 補強厚 25~75mm の範囲では、補強厚が小さくなるほど裏面剥離の規模が低減される傾向にある。なお、SIFCON 補強厚 75mm の試験体において、爆発面破壊の深さが他に比して僅かに低減され、尚且つその直径がやや大きくなっているが、総体的に見て SIFCON による補強が爆発面破壊の規模に及ぼす顕著な影響は認められない。

次に、図 5 に補強材の違いが局部破壊寸法に及ぼす影響（補強厚 25mm 一定）を示す。爆薬量 100g においては、補強材として SIFCON を用いた場合と SFRM を用いた場合との間で局部破壊寸法に顕著な差異は認められておらず、両者ともに良好に裏面剥離が低減されている。このことから、無補強 RC 版であれば貫通限界以下となる範囲の爆薬量に対しては、繊維体積率 2.0% の SFRM であっても十分な耐爆補強効果を有するものと考えられる。しかし、爆薬量が 200g になると、SIFCON 積層補強試験体では依然として裏面剥離の規模が小さくなっているのに対して、SFRM 積層補強試験体では全損傷深さ（爆発面破壊深さと裏面剥離深さの和）が版厚（100mm）に到達していることが確認される。

(2) 爆発面破壊および裏面剥離の形状

森下ら^{13, 14)}は、接触爆発を受ける普通 RC 版の実用的な損傷評価法を提案しており、同方法によれば、普通 RC 版に生じる爆発面破壊および裏面剥離の直径と深さとの関係は、下式により表される。

$$\frac{C_d}{T} = 0.20 \frac{C}{T} \quad (\text{貫通孔が生じない場合；} \frac{C}{T} \leq 1.6) \quad (2)$$

$$\frac{C_d}{T} = 0.016 \frac{C}{T} + 0.30 \quad (\text{貫通孔が生じる場合；} \frac{C}{T} \geq 1.6) \quad (3)$$

$$\frac{S_d}{T} = 0.15 \frac{S}{T} \quad (\text{貫通孔が生じない場合；} \frac{S}{T} \leq 2.9) \quad (4)$$

$$\frac{S_d}{T} = -0.017 \frac{S}{T} + 0.71 \quad (\text{貫通孔が生じる場合；} \frac{S}{T} \geq 2.9) \quad (5)$$

ここに、 T ：版厚（cm）、 C_d ：爆発面破壊深さ（cm）、 C ：爆発面破壊直径（cm）、 S_d ：裏面剥離深さ（cm）、 S ：裏面剥離直径（cm）である。図 6, 7 に、本実験データと上式による計算値との対応を示す。

爆発面破壊の形状に関して、SIFCON 補強厚 75mm において他に比してやや扁平な形状の爆発面破壊が発生する傾向にあり、これは、前掲の表 4 から確認される通り、SIFCON 補強厚が爆発面破壊箇所に掛かるほど大きい場合には接合界面に沿うように爆発面破壊が進行するためであると考えられる。但し、総体的に見てその逸脱の程度は小さく、SIFCON により補強した試験体に関するデータは式(2)、(3)による計算値と概ね良く一致する傾向にある。

裏面剥離形状に関しては、無次元裏面剥離直径 S/T が 2.3 程度以下の範囲で、補強した試験体に関する 10 データ中 8 データが式(4)による計算値をやや下回る傾向にあった。これと同様の傾向は SIFCON 単体を対象とした接触爆発試験でも確認されており¹²⁾、特に裏面近傍では型枠との接触により短繊維が裏面と平行方向に二次元的に配向し易いために、やや薄い層状の裏面剥離が発生する傾向にあるものと推察される。

なお、図 6, 7 において、爆薬量 200g、SFRM 補強厚 25mm の試験

図 4 SIFCON 補強厚の違いが局部破壊寸法に及ぼす影響

図 5 補強材の違いが局部破壊寸法に及ぼす影響（補強厚：25mm）

図 6 爆発面破壊の直径と深さとの関係

図 7 裏面剥離の直径と深さとの関係

体に関する実験データ（図中で破線で囲んで示している）が式(2)~(5)による計算値からやや大きく逸脱しているが、その理由として、同試験体では裏面剥離が SFRM 層と普通コンクリート層とに跨って生じたために、裏面剥離の形状が他に比して複雑になったことが考

えられる。

3.3 裏面のひずみ応答

図 8 に、SIFCON を用いて補強した試験体裏面のひずみ履歴（爆薬量 200g）を示す。なお、計測に際しては、電気的なフィルタを設定せずにデジタルデータを取り込み、その後データに対して周波数領域法によるフィルタリング¹⁰⁾を施した。図中では、計測波形とデジタルフィルタ通過後の波形とを重ねて示している。但し、計測時の局所的なノイズによりフィルタリングの際に波形が変化してしまった箇所が存在するため、同箇所を破線で囲んで示している。

起爆直後に大きなノイズが発生しているため第 1 波の到達時刻は必ずしも明確でないが、いずれの試験体も起爆からの経過時間 0.1～0.13ms 前後で圧縮ひずみが最初のピークに達しており、その際のひずみ計測値は 5000～7000μ程度である。しかし、それ以降のひずみ履歴は SIFCON 補強厚に応じて以下のように異なる。

- ・ 無補強試験体では、時刻 0.3ms 前後で引張ひずみが発生した直後に一旦圧縮側に転じ、0.6ms 前後で再び引張側に転じて引張ひずみがピークに達した。
- ・ SIFCON 補強厚 75、100mm の試験体においては、前者の 0.4～0.6ms 前後で大きなノイズが発生しており、その原因は現時点で明確でないが、それを除けば 0.6～0.8ms 前後まで圧縮ひずみが継続した後に引張側に転じ、補強厚 75mm の試験体ではひずみゲージの引張破断が生じた。
- ・ SIFCON 補強厚 25、50mm の試験体においては、ひずみが殆ど引張側に転じることなく、その傾向は補強厚 25mm の試験体において顕著である。短繊維の架橋作用のみによって裏面剥離が低減されたのであればひずみは引張側に転じると考えられるため、これら試験体ではそれとは異なるメカニズムが同時に作用することで裏面剥離が低減されていた可能性が推察される。

3.4 SIFCON 積層補強による裏面剥離低減メカニズムに関する一考察

上述の考察より、SIFCON 補強厚が小さい試験体においては、短繊維の架橋作用とは別のメカニズムが同時に作用することで裏面剥離が低減されていた可能性が考えられる。そこで、本節では、SIFCON 積層補強による裏面剥離低減メカニズムを、前掲の写真 1 に示した普通 RC 版の裏面剥離発生メカニズムに準拠し、(1) 応力波伝播挙動および(2) 補強層の押抜きせん断耐力に分類して考察する。

(1) 応力波伝播挙動に関する考察

ここでは、本問題を図 9 に示す 1 次元波動問題に置き換え、先端に厚さ x の補強層 (Case-1 では SIFCON, Case-2 では SFRM) を有する普通コンクリート棒の中を波長 λ 、強さ σ_i の圧縮応力波が自由端へ向けて伝播する場合について考察する。

ここで、物体 1 から物体 2 へ応力波が入射する場合の物体界面における反射率 α および透過率 β は、各物体に固有のインピーダンス z ($=\rho c=\rho\sqrt{E/\rho}$, ρ : 密度, c : 応力波速度, E : ヤング係数) を用いて、下式により算出される。

$$\alpha = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} = \frac{A_2 z_2 - A_1 z_1}{A_1 z_1 + A_2 z_2} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{2A_1 z_2}{A_1 z_1 + A_2 z_2} \quad (7)$$

ここに、 σ_i : 入射応力, σ_r : 反射応力, σ_t : 透過応力, A_1, A_2 : 物体

図 8 SIFCON を用いて補強した試験体裏面のひずみ履歴 (爆薬量 200g)

a) Case-1

	① 普通コンクリート (Batch A)	② SIFCON
E (N/mm ²)	2.17×10^4	1.72×10^4
ρ (kg/m ³)	2320	2570
c (m/s)	3060	2590
z (N·s/m ³)	7.10×10^6	6.65×10^6

b) Case-2

	① 普通コンクリート (Batch B)	② SFRM
E (N/mm ²)	2.53×10^4	2.37×10^4
ρ (kg/m ³)	2370	2180
c (m/s)	3270	3300
z (N·s/m ³)	7.74×10^6	7.19×10^6

注) E : ヤング係数, ρ : 密度, c : 応力波速度, z : インピーダンス。

図 9 1 次元波動モデル

1, 2 の断面積, z_1, z_2 : 物体 1, 2 のインピーダンスである。本問題では $A_1=A_2$ であることを考慮した上で、図 9 に示す各物体のインピーダンスを用い、式(6), (7)により反射率および透過率を計算した。その結果を表 6 に示すが、Case-1, 2 ともに、応力波が普通コンクリート層から補強層へ入射する場合、補強層から普通コンクリート層へ入射する場合のいずれにおいても透過率が 100%に近い値を示しており、反射率は高々数%である。従って、接合界面における応力波の反射は Case-1, 2 のいずれにおいても支配的な要因でなく、界面に入射した応力波はほぼ完全に透過するものと考えられる。

以上の考察に準拠し、接合界面における透過率を 100%と見做した場合の応力波の伝播挙動を表 7 に示す。なお、実際には物体間で応力波速度がやや異なるが、透過率 100%であれば応力波速度の差異は応力波到達時刻に僅かに影響するのみであることを考慮し、ここでは簡略化のため、各物体の応力波速度は等しいものと仮定している。普通コンクリート層から補強層へと透過した圧縮応力波は、自由端において逆位相の引張応力波となって反射するが、自由端近傍では圧縮応力波と引張応力波とが干渉し合うために、合成波の引張応力は自由端よりもやや内側で最大となる。従って、図 10 に示すように、補強厚 x が応力波長 λ の 1/2 以下であれば、補強層に発生する最大引張応力は x の減少に伴って低減されることになる。このことは、前掲の表 4 において、SIFCON 補強厚が小さくなるほど SIFCON 層の内部損傷領域の規模が低減される傾向にあったことと符合している。この場合、引張応力のピークは普通コンクリート層で発生するため、補強層には僅かなスポール破壊が生じるのみで、普通コンクリート層で甚大なスポール破壊が生じることになる。

(2) 補強層の押抜きせん断耐力に関する考察

写真 1 に示した、最大せん断応力面に沿って形成される斜めひび割れは、いわゆる押抜きせん断ひび割れであると考えられるが¹⁵⁾、補強層のせん断抵抗が普通コンクリート層のそれに比して充分に大きい場合には、普通コンクリート層で発生した斜めひび割れは補強層を貫通することなく、途中から脆弱な接合界面に沿って進展するものと考えられる。また、(1)で述べたように、補強層の厚さが応力波長に比して充分に小さく、普通コンクリート層で甚大なスポール破壊が生じた場合には、そのスポール片が直下の補強層を押圧し、補強層に押抜きせん断に類似した荷重が作用すると考えられる。

ここで、東山ら¹⁷⁾は、鋼繊維補強 RC 版における押抜きせん断耐力の評価式として、下式を提案している。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot (f'_{pcd} + f_b) \cdot u_p \cdot d \quad (8)$$

ここに、 V_{pcd} : 押抜きせん断耐力 (N), β_d : 寸法効果の係数 ($=\sqrt[4]{1000/d}$, 但し $\beta_d \leq 1.5$), β_p : 鉄筋比の影響を表す係数 ($=\sqrt[3]{100p}$, 但し $\beta_p \leq 1.5$), β_r : 載荷板周長の影響を表す係数 ($=1+1/(1+0.25u/d)$), f'_{pcd} : コンクリート強度の影響を表す係数 ($=0.2\sqrt{\sigma_B}$, 但し $f'_{pcd} \leq 1.2$), f_b : 繊維の引抜き強度 ($=0.41\tau \cdot F$), u_p : 載荷面から $d/2$ だけ離れた位置での照査断面の周長 (mm), d : 有効高さ (mm), p : 平均鉄筋比, u : 載荷面の周長 (mm), σ_B : 圧縮強度 (N/mm²), τ : 繊維マトリックス界面の付着強度 ($=4.15\text{N/mm}^2$), F : fiber factor ($= (L/D) \cdot V_f \cdot d_f$), L : 繊維長さ (mm), D : 繊維直径 (mm), V_f : 繊維体積率, d_f : bond factor (両端フック付きでは 1.0) である。

図 11 に示す押抜きせん断破壊モデルを想定し、補強層が普通コン

表 6 接合界面における応力波の反射率および透過率の計算値

	入射方向	α (%)	β (%)
Case-1	普通コンクリート (Batch A) $\rightarrow$ SIFCON	-3	97
	SIFCON $\rightarrow$ 普通コンクリート (Batch A)	3	103
Case-2	普通コンクリート (Batch B) $\rightarrow$ SFRM	-4	96
	SFRM $\rightarrow$ 普通コンクリート (Batch B)	4	104

注) α : 反射率, β : 透過率。

表 7 1 次元波動モデルにおける応力波の伝播挙動

注) 引張を正, 圧縮を負でそれぞれ表示している。

図 10 補強層に生じる最大引張応力と補強厚との関係

クリート, SFRM および SIFCON で構成される場合の補強層の押抜きせん断耐力を式(8)によりそれぞれ求めた (同式は土木学会示方書式¹⁸⁾を拡張したものであるため、 $f_b=0$ とすることで普通コンクリートに対しても適用可能である)。繊維マトリックス界面の付着強度 τ は、両端フック付き鋼繊維であれば繊維自体の幾何学形状に大きく依存すると考えられ、また、砂結合材比 60%程度であれば細骨材の有無がマトリックスの化学的付着力に及ぼす影響は比較的小さいと判断されたため、SIFCON および SFRM とともに同一値 (4.15N/mm²) とした。なお、実際にはスポール片が補強層を押圧するよりも先に反射引張応力波によって補強層にある程度の損傷が生じると考えられるが、ここでは考察の一助とするため、無損傷の補強層に対して荷重が作用するケースを対象とした。

はじめに、補強厚 25mm 一定の条件下で求めた、各種セメント系

材料で構成される補強層の押抜きせん断耐力の計算値を表 8 に示す。なお、載荷面の周長 u は、図 11 に示す通り、直上の普通コンクリート層に発生したスポール破壊箇所底面の周長（実測値）とした。また、補強層に生じる最大せん断応力面の角度については現時点で明確なことが言い難いが、ここでは普通コンクリート層に発生した斜めひび割れの角度 α （25°、実測値）と同一であるものと仮定して照査断面の周長 u_p を求めた。同表より、裏面から 25mm の範囲の普通コンクリートを SIFCON および SFRM に置換することによって、同箇所の押抜きせん断耐力はそれぞれ 9.39 倍および 2.47 倍に増大することが判る。このことから、補強材として SIFCON を用いた場合には、その高い繊維体積率に起因して補強層の押抜きせん断耐力が非常に高くなるために、無補強であれば貫通が生じる範囲の爆薬量（200g）であっても、普通コンクリート層で発生したスポール片を十分に捕縛することができたものと考えられる。一方、SIFCON に比して押抜きせん断耐力が小さい SFRM を用いた場合には、爆薬量 100g であれば十分なスポール片捕縛効果を有するものの、200g になると、普通コンクリート層で発生したスポール片の作用により、反射引張応力波によって予め損傷を受けていた箇所を中心に補強層に貫通が生じたものと推察される。

次に、補強層を構成する材料を SIFCON で一定とし、補強厚を 25 ～60mm の範囲で変化させた場合の補強層の押抜きせん断耐力の計算値を表 9 に示す。なお、載荷面の周長 u および照査断面の周長 u_p は、上述の補強厚 25mm の場合を基準とし、補強厚に関わらず最大せん断応力面の角度 α が等しいものと仮定して求めた。同表より、補強厚の増加に伴い補強層の押抜きせん断耐力が増大することが明らかである。しかし、補強厚が大きくなると、(1)で述べたように、反射引張応力波に起因する補強層の損傷は逆に大きくなると考えられる。従って、補強設計に際しては、SIFCON 層に押抜きせん断破壊が生じない範囲で、SIFCON 補強厚を出来る限り小さくすることが要件となることが推察され、本件については今後更に検討を進める必要がある。

(3) 裏面剥離低減メカニズム

以上の考察を総括すると、補強厚が応力波長の 1/2 以下と充分に小さい場合の SIFCON 積層補強による裏面剥離低減メカニズムは、写真 3 に模式的に示す通り、① SIFCON 層内で、反射引張応力波に起因する引張応力が小さくなるために、同箇所でも甚大な裏面剥離が生じないこと、② SIFCON 層のせん断抵抗が普通コンクリート層のそれに比して大きいために、普通コンクリート層で発生した斜めひび割れが SIFCON 層を貫通せず、途中から脆弱な接合界面に沿って進展すること、③ SIFCON 層の高い押抜きせん断耐力に起因して、普通コンクリート層で発生したスポール片を SIFCON 層で捕縛可能であること、の複合によるものであると推察される。また、以上のメカニズムを考慮した場合、SIFCON 積層による耐爆補強設計に際しては、SIFCON 層に押抜きせん断破壊が生じない範囲で SIFCON 補強厚を出来る限り小さくすることが要件となることが推察され、今後検討を継続していく必要がある。

4. まとめ

本研究では、SIFCON を用いた RC 版の効率的な耐爆性能向上技術の構築に資するため、裏面側に SIFCON による断面積層補強を施

注) 上端筋は、計算に直接関係しないため、ここでは記載していない。

図 11 補強層の押抜きせん断破壊モデル

表 8 補強材の違いが補強層の押抜きせん断耐力の計算値に及ぼす影響（補強厚：25mm）

	補強材種類	補強厚 (mm)	f_{pcd} (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)	V_{pcd} (kN)	耐力比
Case-1	普通コンクリート (Batch A)	25	1.13	0	16.5	1.00
	SIFCON	25	1.20	9.47	155	9.39
Case-2	普通コンクリート (Batch B)	25	1.15	0	16.7	1.00
	SFRM	25	1.20	1.65	41.3	2.47

注) f_{pcd} ：コンクリート強度の影響を表す係数、 f_b ：繊維の引抜き強度の影響を表す係数、 V_{pcd} ：押抜きせん断耐力。

表 9 補強厚の違いが補強層の押抜きせん断耐力の計算値に及ぼす影響（補強材：SIFCON）

	補強材種類	補強厚 (mm)	β_s (-)	β_c (-)	u_p (mm)	V_{pcd} (kN)	耐力比
Case-1	SIFCON	25	1.33	1.06	687	155	1.00
		30	1.14	1.09	631	188	1.22
		35	1.03	1.12	620	229	1.48
		40	0.953	1.15	609	268	1.73
		45	0.895	1.18	599	304	1.97
		50	0.850	1.21	588	340	2.20
		55	0.812	1.25	577	374	2.41
		60	0.781	1.28	566	407	2.63

注) β_s ：鉄筋比の影響を表す係数、 β_c ：載荷板周長の影響を表す係数、 u_p ：照査断面の周長。

② SIFCON 層のせん断抵抗が普通コンクリート層のそれに比して大きいために、普通コンクリート層で発生した斜めひび割れが SIFCON 層を貫通せず、途中から脆弱な接合界面に沿って進展する。

- ① SIFCON 層内で、反射引張応力波に起因する引張応力が小さくなるために、同箇所でも甚大な裏面剥離が生じない。
- ③ SIFCON 層の高い押抜きせん断耐力に起因して、普通コンクリート層で発生したスポール片が SIFCON 層に捕縛される。

写真 3 SIFCON 積層補強による裏面剥離低減メカニズムの模式図

した RC 版の接触爆発に対する耐爆性能について実験的検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見は、以下のように要約される。

- 1) 普通 RC 版であれば破壊モードが裏面剥離および貫通となる接触爆発条件下において、SIFCON 積層補強による顕著な裏面剥離低減効果が認められた。また、本実験の範囲内で、押抜きせん断破壊に類似した SIFCON 層の貫通は認められなかった。
- 2) SIFCON 補強厚が減少するほど、反射引張応力波に起因するものと思われる SIFCON 層の内部損傷が低減され、尚且つ外観上明らかな裏面剥離の規模も小さくなる傾向にあることが示された。但し、その場合も普通コンクリート層には無補強の場合とほぼ同規模のスポール破壊が生じることが確認された。
- 3) SIFCON 補強厚が爆発面破壊箇所にかかるほど大きい場合にやや扁平な形状の爆発面破壊が発生する傾向にあったが、SIFCON 積層補強が爆発面破壊に及ぼす影響は総じて小さいこ

とが確認された。

- 4) SIFCON 補強厚が応力波長の 1/2 以下と充分に小さい場合の SIFCON 積層補強による裏面剥離低減メカニズムは、① SIFCON 層内で、反射引張応力波に起因する引張応力が小さくなるために、同箇所です大な裏面剥離が生じないこと、② SIFCON 層のせん断抵抗が普通コンクリート層のそれに比して大きいために、普通コンクリート層で発生した斜めひび割れが SIFCON 層を貫通せず、途中から脆弱な接合界面に沿って進展すること、③ SIFCON 層の高い押抜きせん断耐力に起因して、普通コンクリート層で発生したスポール片を SIFCON 層で捕縛可能であること、の複合によるものであると考えられた。

なお、上述の裏面剥離低減メカニズムを考慮した場合、SIFCON 積層による耐爆補強設計に際しては、SIFCON 層に押抜きせん断破壊が生じない範囲で SIFCON 補強厚を出来る限り小さくすることが要件となることが推察され、今後は実大規模の部材への適用性も視野に入れた上で検討を継続していく必要がある。

謝辞

本研究は、熊本大学パルスパワー科学研究所（研究所長：秋山秀典教授）より研究支援を受け、接触爆発試験は同研究所の衝撃実験室にて実施されました。実験にあたり、外本和幸教授、川合伸明准教授、田中茂助教、草野健技術補佐員、村上聖教授、武田浩二准教授、佐藤あゆみ助教、戸田善統技術専門職員、池崎智美技術職員（当時）ならびに安部匠氏、張志成氏、尾園健斗氏、古澤有大氏をはじめとする当時の学生諸氏より多大なご協力を賜りました。また、本研究は平成 25 年度科学研究費補助金若手研究 (B)（課題番号：25870551、研究代表者：山口信）の助成を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大野友則：飛翔体の衝突に対する RC 版の挙動に関する研究の現状、コンクリート工学, Vol.41, No.4, pp.20-28, 2003.4
- 2) 日本建築学会：建築物の耐衝撃設計の考え方、丸善、2015
- 3) 林卓夫、田中吉之助 編：衝撃工学、日刊工業新聞社、1988
- 4) 横山隆 編著：衝撃工学の基礎と応用、共立出版、2014
- 5) 石川信隆ほか 3 名 共著：基礎からの衝撃工学、森北出版、2008
- 6) 澤田晃平ほか 2 名：接触爆発を受けるコンクリート板の裏面剥離発生メカニズムに関する基礎的研究、第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, Vol.38, No.1, I-57, 2011.3
- 7) 山口信ほか 3 名：各種繊維補強コンクリートとの耐爆性能の比較検討ー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ー、日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.631, pp.1681-1690, 2008.9
- 8) Coughlin, A. M., et al.: Behavior of Portable Fiber Reinforced Concrete Vehicle Barriers Subjected to Blasts from Contact Charges, International Journal of Impact Engineering, Vol.37, pp.521-529, 2009.12
- 9) Yamaguchi, M., et al.: Blast Resistance of Polyethylene Fiber Reinforced Concrete to Contact Detonation, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No.1, pp.63-71, 2011.2
- 10) Garfield, T. T. et al.: Performance of RC and FRC Wall Panels Reinforced with Mild Steel and GFRP Composites in Blast Events, Procedia Engineering, Vol.10, pp.3534-3539, 2011.6
- 11) Lankard, D. R.: Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol.6, No.12, pp.44-47, 1984
- 12) 山口信ほか 4 名：スラリー充填繊維コンクリート (SIFCON) 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, Vol.80, No.718, pp.2033-2043, 2015.12
- 13) 森下政浩ほか 3 名：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.48A, pp.1787-1797, 2000.3
- 14) 森下政浩ほか 3 名：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, Vol.15, No.2, pp.89-98, 2004.5
- 15) 別府万寿博ほか 3 名：接触・近接爆発を受け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, 2010.10
- 16) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用、構造工学シリーズ 15, 丸善、2004
- 17) 東山浩士ほか 1 名：鋼繊維補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力式の提案と比較、第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.105-110, 2012.6
- 18) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕2012 年制定、丸善、2013

CLAD-REINFORCING EFFECT OF SIFCON ON BLAST RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLABS

Blast resistance of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) against contact detonation

Makoto YAMAGUCHI^{*}, Takeyuki NAGATO^{**} and Shintaro MORISHIMA^{**}

^{*} Assist. Prof., Dept. of Advanced Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr.Eng.

^{**} Grad. Stud., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.

When designing important structures such as industrial plants and public facilities, it is necessary to ensure their safety against accidental or intentional explosions, which happen rarely but can cause severe damage. In particular, the fracture modes of reinforced concrete (RC) slabs subjected to blast loadings are characterized by spalling, which is caused by a combination of reflected tensile stress waves and diagonal cracks created along the maximum shear stress surface, as shown in Photo. 1. To protect the lives of humans inside a structure under such conditions, it is necessary to prevent the launch of concrete fragments that accompanies spalling. Therefore, reducing spalling damage is the most important problem faced by the designers of blast-resistant RC structures.

In a previous study, we clarified that slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) exhibits better spall-reducing performance than normal concrete and other fiber-reinforced cementitious composites (FRCCs). However, it was also confirmed that the SIFCON, as well as the other FRCCs, had no effect on reducing crater damage during a detonation. Therefore, for more efficient blast-resistant strengthening of RC slabs using SIFCON, it may be necessary to adapt the SIFCON to a region in which the occurrence of the spalling damage inside the RC slab is expected.

The objective of this study was to develop an efficient blast-resistant strengthening method of RC slabs using SIFCON; to this end, experimental investigations were conducted to evaluate the blast resistance of RC slabs in which the concrete near the rear was replaced with SIFCON. The total thickness of the RC slabs was fixed at 100 mm, and the behaviors at different thicknesses of 0 (un-reinforcement), 25, 50, 75, and 100 (overall-reinforcement) mm of the SIFCON layer near the rear side was studied, as shown in Fig. 1. Contact detonation tests were carried out using two different amounts of explosives (SEP) 100 and 200 g. After the tests, the fracture behaviors of each specimen were observed in detail, and then the sizes of the local failures in all specimens were measured and compared. Further, the spall-reducing mechanism of the RC slabs with SIFCON cladding was qualitatively discussed, based on the propagation behavior of the stress wave in a one-dimensional wave model and the punching-shear strength of the SIFCON layer. The main results obtained are as follows:

- (1) The SIFCON cladding effectively reduced spall damage of the RC slabs under conditions in which the failure modes of un-reinforced RC slabs with the same thickness were “spalling” and “perforation”.
- (2) Both, the damage inside the SIFCON layer and the spall damage created in the rear side, decreased upon reducing the thickness of the SIFCON layer. However, even if the SIFCON layer was not perforated, the scale of the spalling damage in the normal concrete layer became almost as large as that in un-reinforced RC slabs.
- (3) When the thickness of the SIFCON layer was sufficiently smaller than the wavelength of the stress wave, spalling damage in the rear side of the RC slabs with SIFCON cladding was reduced by a combination of the following three mechanisms: (a) Since the tensile stress attributed to the reflected tensile stress wave became small inside the SIFCON layer, serious spalling damage did not occur in the rear side of the slab. (b) Diagonal cracks, which formed in the normal concrete layer, did not penetrate the SIFCON layer and propagate along the interface between the normal concrete layer and SIFCON layer because the punching-shear strength of the SIFCON layer was considerably higher than that of the normal concrete layer. (c) The launching of the spall fragments formed inside the normal concrete layer was prevented by the SIFCON layer of high punching-shear strength.

(2016 年 8 月 10 日原稿受理, 2016 年 11 月 14 日採用決定)