論文　スラリー充填繊維コンクリート SIFCON の調合および耐爆性能

山口　信[*1]・村上　聖[*2]・武田　浩二[*3]・佐藤　あゆみ[*1]

要旨：スラリー充填繊維コンクリート（SIFCON）の適用によるプレキャスト耐爆構造部材の高性能化の可能性について調べるため，繊維種類や水結合材比等の調合因子が SIFCON の力学的特性に及ぼす影響ならびに SIFCON 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。その結果として，SIFCON が通常の繊維補強コンクリートに比して良好な曲げ強度および曲げ靭性を有することを確認するとともに，特に普通コンクリート版であれば貫通限界以上となる爆薬量に対して，普通コンクリートや他の各種繊維補強コンクリートに比して SIFCON が顕著なスポール低減効果を有することを実験的に明らかにした。

キーワード：SIFCON，調合，力学的特性，靭性，接触爆発，耐爆性能，裏面剥離

1. はじめに

衝突・爆発などの意図的攻撃による衝撃外乱を政治・経済・運輸・エネルギー等に関係する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)]。特に，爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート版の設計においては，コンクリート片の飛散による 2 次被害防止の観点から，版裏面における引張応力波の反射に起因する裏面剥離（スポール）を低減することが設計上の重要課題と位置付けられている [2)]。

著者らはこれまでに，繊維補強コンクリートの適用による鉄筋コンクリート版の耐爆性能向上の可能性について調べるため，各種繊維補強コンクリート版を対象とした接触爆発試験を実施し，そのスポール低減効果を明らかにしてきた [3)]。また，接触爆発を受ける繊維補強コンクリートのスポール低減効果を把握する上で，素材試験における静的曲げ靭性の大小がひとつの目安となることも実験的に明らかにしている [3)]。

一般に，繊維補強コンクリートの耐爆性能向上に要求される高靭性を得るためには，補強用繊維のアスペクト比を大きくし，尚且つ高い繊維体積率を確保することが必要とされるが [4)]，これらの因子は繊維補強コンクリートのコンシステンシーを著しく増大させる。一方，型枠に予め短繊維を敷き詰め，その間隙にグラウトを注入して製造する SIFCON（Slurry infiltrated fiber concrete）が 1980 年代に提案されており，同手法によれば，10.0%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 [5)]。また，SIFCON を対象とした爆発実験も過去に実施された経緯があるものの [例えば 6)]，2 次被害発生に直接的に関係するスポール低減効果について検討した事例は，現時点で見られていない。

そこで，本研究では，SIFCON の適用によるプレキャスト耐爆構造部材の高性能化の可能性について調べるため，以下の 2 項目について実験的検討を行った。はじめに，実験 1 では，繊維種類や水結合材比等の調合因子が SIFCON の力学的特性に及ぼす影響について実験的検討を行い，SIFCON の高靭性を得るための調合条件について調べた。次に，実験 2 では，実験 1 で選定した調合による SIFCON を対象に接触爆発試験を実施し，普通コンクリート版や既報 [3)] の各種繊維補強コンクリート版との比較から，その耐爆性能を検証した。

2. 実験 1：調合の検討

2.1 実験方法

表－1 に使用材料を示す。補強用繊維としては，両端フック付きの鋼繊維（アスペクト比 l_f/d_f=48，l_f：繊維長，d_f：繊維直径）およびロッド状のポリビニルアルコール（PVA）繊維（l_f/d_f=45）の 2 種類を用いた。セメントにはプレキャストコンクリートとしての用途を想定して早強ポルトランドセメントを用い，混和材としてシリカフュームおよび高炉スラグ微粉末の 2 種類を用いた。

表－2 に使用調合を示す。型枠内に充填可能な繊維体積率 V_fは，鋼繊維で 11.5%，PVA 繊維で 12.0%であった。シリカフュームおよび高炉スラグ微粉末によるセメント置換率は Si/B=10%および Sg/B=50%でそれぞれ一定とし，水結合材比 W/B を 40，33，25%の 3 水準で変化させた。な

表－1　使用材料（実験 1，2 共通）

セメント	早強ポルトランドセメント
混和材	シリカフューム 密度：2.22g/cm^3，比表面積：200000cm^2/g 高炉スラグ微粉末（実験 1 のみ） 密度：2.89g/cm^3，比表面積：6140cm^2/g
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）
補強用繊維	鋼繊維 形状：両端フック付き，寸法：φ0.62×30mm， 引張強度：1080N/mm^2 以上 ポリビニルアルコール繊維 形状：ロッド状，寸法：φ0.66×30mm， 引張強度：900N/mm^2，引張弾性率：23kN/mm^2

*1 熊本大学　大学院自然科学研究科環境共生工学専攻　助教　工博　(正会員)
*2 熊本大学　大学院自然科学研究科環境共生工学専攻　教授　工博　(正会員)
*3 熊本大学　大学院自然科学研究科環境共生工学専攻　准教授　工博　(正会員)

お，本実験に先立って実施した試練りにおいて，0 打フロー値が 300 程度以上の結合材ペーストであれば流し込みにより繊維間に充填可能であることが確認されたため，概ねそれが得られるように高性能減水剤を用いてペーストの流動調整を行った。また，供試体の作製にあたっては，ペーストの圧入等は特に行わず，型枠側面を加振しながら流し込みにより成形した。

供試体として，圧縮試験用に ϕ100×200mm 円柱，曲げ試験用に 100×100×400mm 角柱を各 3 体作製し，材齢 14 日目まで標準養生後，1 週程度の気中養生を経て試験に供した。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－載荷点変位曲線を測定した。

表－2　使用調合（実験 1）

繊維種類	V_f (%)	W/B (%)	Si/B (%)	Sg/B (%)	Sp/B (%)	0 打 Flow	γ (kN/m^3)
S	11.5	40	10	—	0.75	306	25.3
		33	10	—	1.50	485	26.2
		25	10	—	2.00	503	26.8
		40	—	50	0.20	320	25.6
		33	—	50	0.30	267	26.1
		25	—	50	0.50	275	27.2
PVA	12.0	40	10	—	0.75	298	17.9
		33	10	—	1.50	468	18.8
		25	10	—	2.00	445	19.2
		40	—	50	0.20	279	18.1
		33	—	50	0.30	283	18.7
		25	—	50	0.50	316	19.4

注）S：鋼繊維，PVA：PVA 繊維，V_f：繊維体積率，W/B：水結合材比，B(=C+Si or C+Sg)：結合材，Si：シリカフューム，Sg：高炉スラグ微粉末，Sp：高性能減水剤，γ：気乾単位容積重量

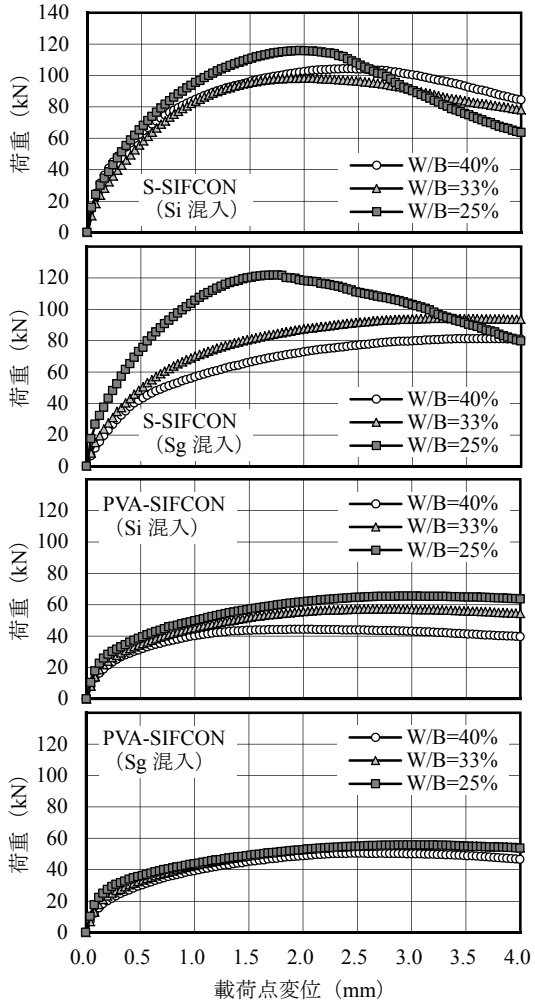
2.2 実験結果および考察

(1) 各種調合因子が力学的特性に及ぼす影響

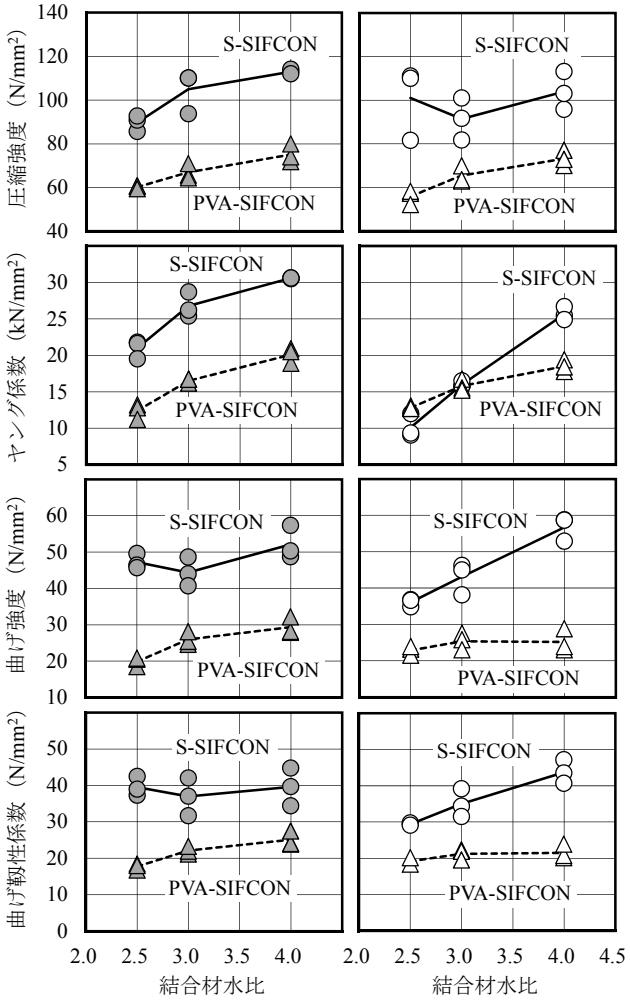
図－1 に曲げ試験における荷重－載荷点変位曲線の測定値（平均），**図－2** に結合材水比 *B/W* が各種力学的特性に及ぼす影響をそれぞれ示す。なお，**図－2** 中の曲げ靭性係数は，基準変位δ_{tb}に至るまでの平均耐力を曲げ強度に換算したものであり，δ_{tb} としてはスパン長の 1/150（2.0mm）が用いられるのが一般的であるが，検討対象とした殆どの調合において載荷点変位 2～4mm の範囲で最大荷重に達したため，ここではδ_{tb}=4.0mm とした。

圧縮強度およびヤング係数に関しては，PVA-SIFCON よりも S-SIFCON の方が，混和材として高炉スラグ微粉末を用いた場合よりもシリカフュームを用いた場合の方がそれぞれ大きくなる傾向にあることが判る。

S-SIFCON の曲げ強度に関して，*B/W*=2.5, 3.0 の調合ではシリカフュームを用いた調合の方が高炉スラグ微粉末



図－1　曲げ試験における荷重－載荷点変位曲線の測定値（平均，実験 1）



(a) シリカフューム混入　(b) 高炉スラグ微粉末混入

図－2　結合材水比が各種力学的特性に及ぼす影響（実験 1）

を用いた調合に比して曲げ強度が大きくなっているが，B/W=4.0 になると両者ともに 50N/mm^2 以上の非常に高い曲げ強度が得られている。なお，以上の傾向は曲げ靭性係数についてもほぼ同様であるが，シリカフュームを混入した B/W=2.5 と 4.0 の調合を比較した場合，曲げ強度は後者の方が大きいにも関わらず，曲げ靭性係数は大差ない結果となっている。これは，**図－1** に示す通り，水結合材比が過度に小さくなると，最大荷重は増大する反面それ以降で比較的速やかに耐力が低下するためである。

PVA-SIFCON に関して，シリカフュームを混入した調合では曲げ強度・曲げ靭性係数ともに B/W の増加に伴い増大しているが，高炉スラグ微粉末を混入した調合では B/W=3.0 以上において曲げ強度・曲げ靭性係数の増大に頭打ちが認められる。また，曲げ強度・曲げ靭性係数が最大となった調合においても，その値は S-SIFCON における最大値の 50～60%程度と顕著に小さくなっている。

(2) 各種力学的特性の関係

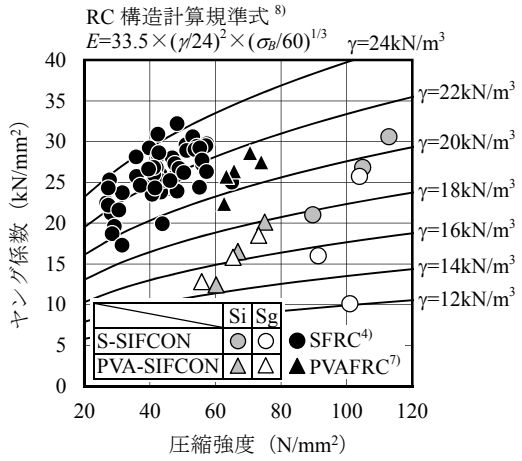
図－3～5 に SIFCON の各種力学的特性の関係を示す。なお，**図－3, 4** 中には，既報の鋼繊維補強コンクリート（SFRC）[4]および PVA 繊維補強コンクリート（PVAFRC）[7]に関するデータも併記している。ここで，コンクリートの曲げ強度は圧縮強度の関数の形で表されること [9]を考慮し，**図－4** 中には圧縮強度に対する曲げ強度比を破線で示している。また，**図－5** 中には曲げ強度に対する曲げ靭性係数比を実線および破線で示しており，上述の曲げ靭性係数の定義によれば，この値が低いほど最大荷重到達後に速やかに曲げ耐力が低下していることになる。

図－3 に示す通り，SIFCON のヤング係数は，同一圧縮強度を有する普通コンクリート, SFRC および PVAFRC のそれよりも小さくなる傾向にある。これは，繊維を多量に混入したことの直接的な影響というよりも，骨材を含まない結合材ペーストをマトリックスとして用いていることに起因するものであると推察される。

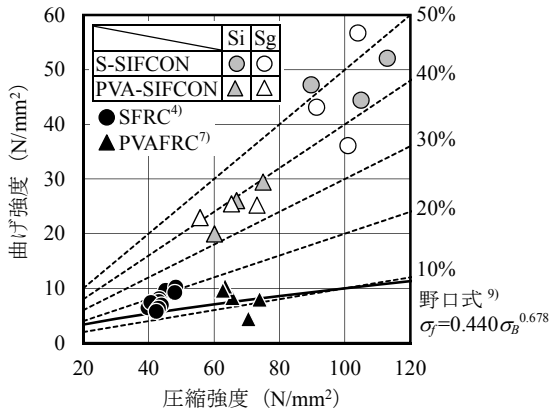
図－4 より，圧縮強度に対する曲げ強度比は，SFRC や PVAFRC の場合は 10～20%程度の範囲内にあるのに対して，PVA-SIFCON の場合は 30～40%，S-SIFCON では概ね 40%以上と，非常に高い曲げ強度が得られている。

曲げ強度に対する曲げ靭性係数比（**図－5**）は，12 データ中 10 データが 80～90%の範囲内にあるが，S-SIFCON に関する 2 データが 70～80%とやや小さくなっており，これらはいずれも W/B=25%の，最大荷重到達後に比較的速やかに曲げ耐力が低下したものである。

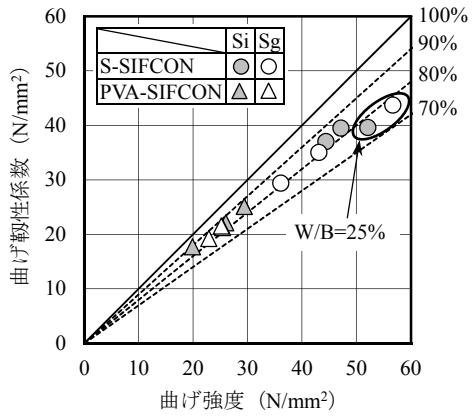
繊維補強コンクリートの耐爆性能を把握する上で静的曲げ靭性の大小がひとつの目安となるが，その曲げ性状としては，比較的大変形に至るまで高い耐力を保持できるものが望ましい [3]。そこで，本研究では，曲げ強度に対する曲げ靭性係数比が 80～90%の範囲内にある 10 データの中から，曲げ靭性係数が最大となる調合を補強用繊維の種類に応じて選定し，接触爆発試験に供することとした。最終的に選定した，接触爆発試験に供する SIFCON の調合を**表－3** に示す。



図－3　圧縮強度とヤング係数との関係（実験 1）



図－4　圧縮強度と曲げ強度との関係（実験 1）



図－5　曲げ強度と曲げ靭性係数との関係（実験 1）

3. 実験 2：耐爆性能の検討

3.1 実験方法

使用材料は実験 1 の場合と同様である（**表－1** 参照）。使用調合としては，実験 1 で選定した調合を適用したが（**表－3** 参照），試練りの結果，0 打フロー値 300 以上が得られる高性能減水剤添加率として，S-SIFCON では

Sp/B=1.50%を，PVA-SIFCON では *Sp/B*=3.00%をそれぞれ選定した（0 打フロー値の測定値は，前者で 486，後者で 453）。また，比較用の普通コンクリートとして，レディーミクストコンクリート（普通-30-18-20-N）を用いた。接触爆発試験体と同一条件で養生した供試体による素材試験結果を**表－4** に示している。

図－6 に試験体の形状・寸法および配筋を示す。試験体は幅および長さが 600mm，厚さが 100mm の平板であり，材齢 14 日目（普通コンクリートは 28 日目）まで現場湿布養生後，所定期間の気中養生を経て試験に供した。なお，配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが知られているが [2]，ここでは試験体の割れ防止程度の目的で縦横のピッチ 120mm の格子状鉄筋を版厚中央に配した。なお，SIFCON 試験体は**写真－1** に示す通り，型枠を木槌で加振しながら結合材ペーストを流し込んで製造した。

図－7 に接触爆発試験方法を示す。2 本の木製架台上に内法スパン 510mm となるように試験体を設置し，試験体上面中央で 6 号電気雷管を用いて爆薬を起爆させた。爆薬の形状は直径と高さが等しい円柱形とし，爆薬量 *W* は 100, 200g の 2 水準で変化させた。なお，森下ら [2]は，普通コンクリート版におけるスポールおよび貫通限界が下式で表せることを示している。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = 3.6\ (\text{スポール限界}),\ 2.0\ (\text{貫通限界}) \quad (1)$$

ここに，*T*：版厚（cm），W_m：爆薬の TNT 換算量（g）である。本爆薬と *T*=10cm の普通コンクリート版との組合せであれば，スポール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，普通コンクリート版であれば破壊モードがスポール（*W*=100g）および貫通（*W*=200g）となる条件である。

接触爆発試験終了後，**図－8** に示す局部破壊寸法を測定した。クレータ（爆発面破壊），スポールおよび貫通孔の直径は，形状が非対称となるために，**図－8** 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。また，クレータおよびスポールの深さは，それぞれ爆発面および裏面から，貫通孔が生じない場合には損傷最深部までの距離，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。

3.2 実験結果および考察

(1) 接触爆発試験体の破壊性状

表－5 に接触爆発試験体の破壊性状を示す。

爆薬量 100g の場合，普通コンクリート版では，版厚中央に配した鉄筋が露出し，顕著なスポールの発生が確認された。また，これに伴い生じたコンクリート片は，その大部分が質量 50g 程度とかなり細かく破砕されていた。一方，PVA-SIFCON では，爆発点直下で表層の結合材ペーストが剥離し，若干のスポールの発生が認められたものの，上述の普通コンクリート版に比して良好なスポール低減効果が認められる。更に，S-SIFCON では，爆発

表－3　接触爆発試験に供した SIFCON の調合（実験 1, 2 共通）

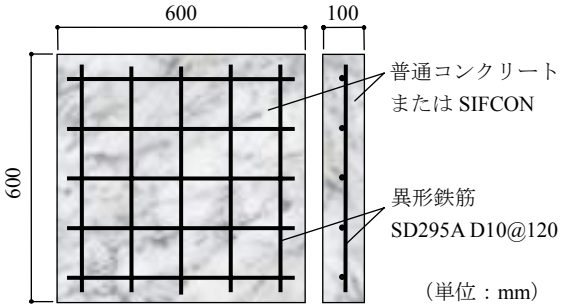
種類	V_f (%)	W/B (%)	Si/B (%)
S-SIFCON	11.5	40	10
PVA-SIFCON	12.0	25	10

注）高性能減水剤添加率 Sp/B は，0 打フロー値 300 以上が得られる範囲で試練りにより定める。

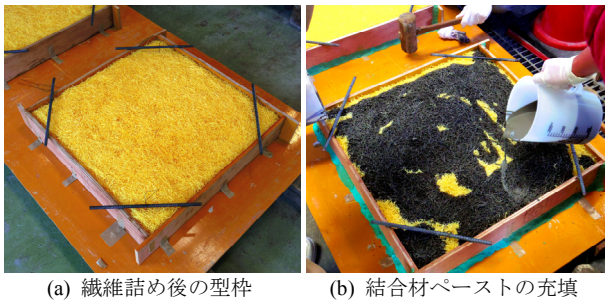
表－4　素材試験結果（実験 2）

種類	σ_B (N/mm^2)	E (kN/mm^2)	σ_f (N/mm^2)	$\overline{\sigma}_b$ (N/mm^2)
普通コンクリート	40.1	27.6	—	—
S-SIFCON	77.0	18.3	47.6	39.9
PVA-SIFCON	55.9	17.5	30.6	26.0

注）σ_B：圧縮強度，E：ヤング係数，σ_f：曲げ強度，$\overline{\sigma}_b$：曲げ靭性係数。試験方法は実験 1 と同様である。

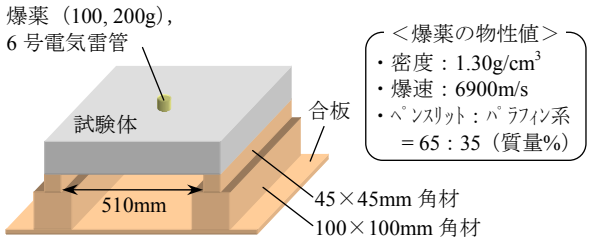


図－6　試験体の形状・寸法および配筋（実験 2）

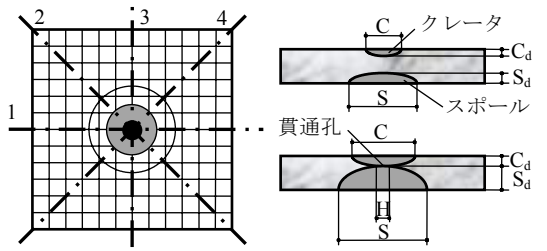


(a) 繊維詰め後の型枠　　(b) 結合材ペーストの充填

写真－1　SIFCON の製造状況（実験 2）



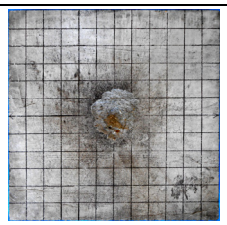
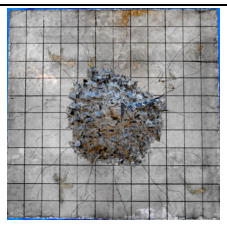
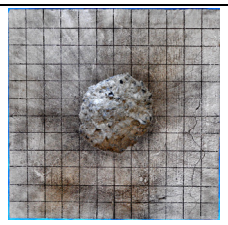
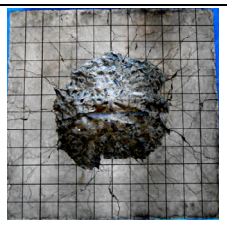
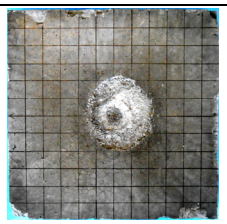
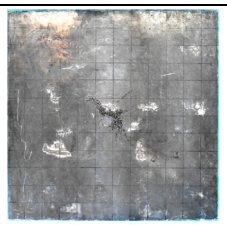
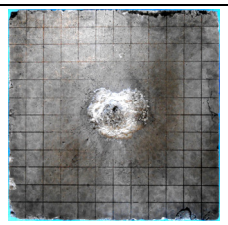
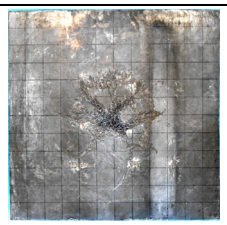
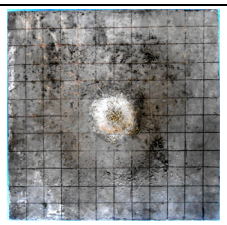
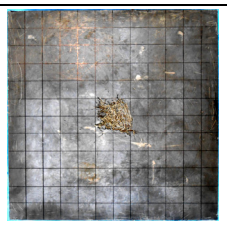
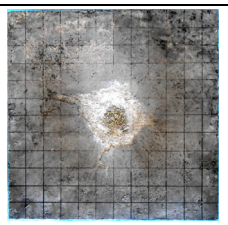
図－7　接触爆発試験方法（実験 2）



注）C：クレータ直径，S：スポール直径，H：貫通孔直径，C_d：クレータ深さ，S_d：スポール深さ

図－8　局部破壊寸法の定義（実験 2）

表－5　接触爆発試験体の破壊性状（実験 2）

種類	爆薬量 100g		爆薬量 200g	
	爆発面	裏　面	爆発面	裏　面
普通コンクリート				
S-SIFCON				
PVA-SIFCON				

注）支承位置は左右両端である。

点直下に剥離に伴う軽微な浮きが見られたが，剥落には至っておらず，スポールはほぼ完全に抑止されていることが確認された。裏面のひび割れ発生状況に関して，普通コンクリートではスポール破壊箇所を起点とする開口幅の大きなひび割れが放射状に発生していたのに対して，SIFCON ではひび割れの発生は認められなかった。

爆薬量 200g の場合，普通コンクリート版では 100g の場合に比して更に顕著なスポールの発生が認められ，それを起点として版側面にまで至るひび割れの発生が観察される。これに対して，S-SIFCON では爆発点直下の浮きが，PVA-SIFCON では裏面表層の結合材ペーストの剥離が爆薬量 100g の場合よりもそれぞれ大きくなっていたものの，いずれも普通コンクリートに比して良好なスポール低減効果を呈しており，特に S-SIFCON では，測定可能なスポールの発生は認められなかった。また，裏面のひび割れ発生状況に関しても，PVA-SIFCON において開口幅 0.05mm 程度の微細なひび割れが見られた程度で，良好なひび割れ低減効果が確認された（**表－6** 参照）。

(2) 局部破壊寸法の測定結果

表－6 に局部破壊寸法および裏面最大ひび割れ幅の測定結果を，**図－9** に既報の各種繊維補強コンクリート [3] との局部破壊寸法の比較をそれぞれ示す。なお，爆薬量 200g の普通コンクリート版では，外観上明らかな貫通孔は生じなかったものの，損傷深さ（クレータ深さとスポール深さの和）は版厚に達していた。

図－9 より，爆薬量 100g の場合については，全ての繊維補強コンクリート版においてスポール直径および深さ

表－6　局部破壊寸法等の測定結果（実験 2）

種類	W (g)	C (mm)	C_d (mm)	S (mm)	S_d (mm)	W_{cr} (mm)
普通コンクリート	100	132	30	269	54	0.40
	200	215	37	331	63	1.10
S-SIFCON	100	190	26	0	0	0
	200	156	28	0	0	0
PVA-SIFCON	100	151	27	103	10	0
	200	179	30	261	16	0.05

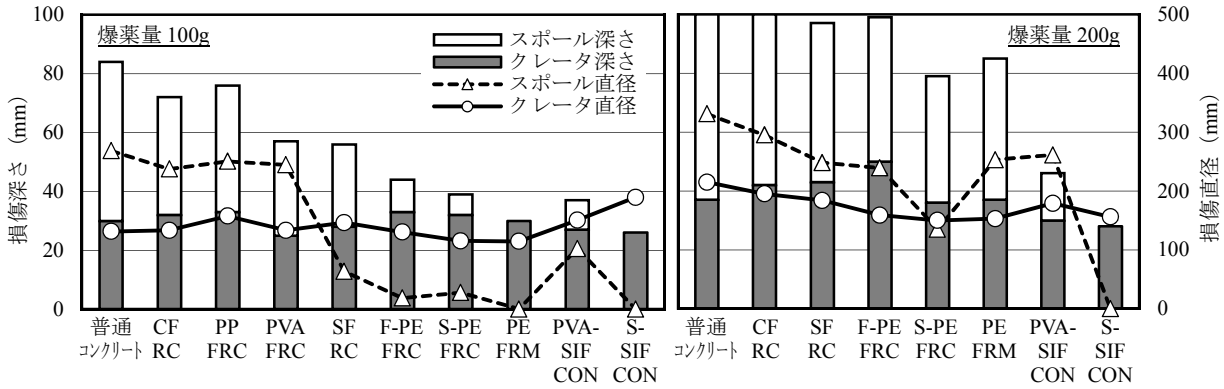
注）W：爆薬量，W_{cr}：裏面最大ひび割れ幅。貫通孔は，全ての試験体において発生しなかった。

が普通コンクリート版よりも小さくなっており，繊維補強コンクリートの適用がスポール低減の面で有効であることが確認される。但し，クレータ直径および深さに関しては，繊維補強コンクリートと普通コンクリートとの間で顕著な差異は認められない。また，爆薬量 100g では，SIFCON の局部破壊の程度は PEFRC（ポリエチレン繊維補強コンクリート）等のそれと同程度となっている。

一方，爆薬量 200g においては，SIFCON 以外の各種繊維補強コンクリートでは損傷深さが版厚近くまで拡大しているのに対して，SIFCON では良好なスポール低減効果が認められ，特に S-SIFCON では測定可能なスポールの発生は認められていない。このことから，SIFCON は普通コンクリートや各種繊維補強コンクリートに比して良好な耐爆性能を有しており，その傾向は特に爆薬量が普通コンクリート版における貫通限界以上となる範囲で顕著であることが実験的に明らかとなった。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を要約すると，以下の



注）以下の各種繊維補強コンクリートに関する実験データは，既報[3]より引用した：CFRC（炭素繊維補強コンクリート），PPFRC（ポリプロピレン繊維補強コンクリート），PVAFRC，SFRC，F-PEFRC（原糸カット繊維を用いたポリエチレン繊維補強コンクリート），S-PEFRC（集束繊維を用いたポリエチレン繊維補強コンクリート），PEFRM（ポリエチレン繊維補強モルタル）。

図－9　各種繊維補強コンクリートとの局部破壊寸法の比較（実験 2）

ようになる。

4.1 調合の検討結果

- 通常の繊維補強コンクリートと比較した場合，検討対象とした SIFCON はマトリックスに骨材を含まないためヤング係数が一様に小さいものの，V_f=11.5, 12.0%と高い繊維体積率に起因して非常に良好な曲げ強度および曲げ靭性を有する。
- 繊維体積率が同程度であれば，S-SIFCON の方が PVA-SIFCON よりも総じて良好な力学的性状を示す。
- S-SIFCON においては，マトリックス強度が過度に高くなった場合に，曲げ強度は増大する反面それ以降で比較的急速に曲げ耐力が低下する性状を示す。

4.2 耐爆性能の検討結果

- SIFCON は普通コンクリートや各種繊維補強コンクリートに比して良好なスポール低減効果を有しており，その傾向は，特に普通コンクリート版であれば貫通限界以上となる爆薬量において顕著である。
- SIFCON の適用は，接触爆発に起因する裏面ひび割れ低減の面で有効である。
- スポールの直径および深さや裏面最大ひび割れ幅の測定結果に関する限り，S-SIFCON の方が PVA-SIFCON に比して良好な損傷低減効果を有する。
- SIFCON を適用しても，クレータの直径および深さは殆ど低減されない。

謝辞

接触爆発試験は，熊本大学パルスパワー科学研究所の衝撃実験室にて実施されたものであり，実験にあたり，外本和幸教授，田中茂技術専門職員，前原弘法ポスドク研究員，六郷恵哲教授をはじめとする岐阜大学破壊診断工学研究室の皆様，熊本工業高等専門学校の浦野登志雄教授，熊本大学の戸田善統技術専門職員，池崎智美技術職員ならびに建築材料・施工研究室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 編著：基礎からの爆発安全工学－構造物の耐爆設計の基礎－，森北出版，2011
2) 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.1787-1791，2000.3
3) 山口信，村上聖，武田浩二，三井宜之：各種繊維補強コンクリートとの耐爆性能の比較検討－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，Vol.73，No.631，pp.1681-1690，2008.9
4) 村上聖，浦野登志雄，三井宜之：鋼繊維補強コンクリートの力学パラメータに及ぼす調合因子の相互作用の定量分析，コンクリート工学論文集，Vol.7，No.1，pp.23-30，1996.1
5) Lankard, D. R.: Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol.6, No.12. pp.44-47, Dec. 1984
6) Chun, P. et al.: Experimental Study on Blast Resistance of SIFCON, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, No.4, pp.144-150, Apr. 2013
7) 武田浩二，童偉光，村上聖，三井宜之：新素材繊維を用いた高靭性繊維補強コンクリートの開発研究，セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.454-459, 2005.2
8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，丸善，2010
9) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995.6