

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870551

研究課題名(和文) 繊維高含有コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能

研究課題名(英文) Blast Resistance of Concrete Containing High-Volume Short Fiber against Contact Detonation

研究代表者

山口 信 (Yamaguchi, Makoto)

熊本大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：80570746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：繊維補強コンクリート(FRC)を用いた耐爆構造部材の更なる高性能化の可能性について調べるため、10%以上の繊維体積率を実現可能なスラリー充填繊維コンクリート(SIFCON)の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が普通コンクリートや他の各種FRCに比して良好な裏面剥離低減性能を有することを明らかにするとともに、実験結果に基づき、SIFCONの適用による裏面剥離および貫通限界低減効率を特定した。また、鉄筋コンクリート(RC)版の裏面近傍のコンクリートをSIFCONに置換することにより、RC版の裏面剥離低減性能が顕著に向上することが示された。

研究成果の概要(英文)：To investigate the applicability of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) for use in blast-resistant structures, experimental investigations were conducted to evaluate the spall-reducing performance of SIFCON subjected to contact detonation. The test results showed that SIFCON was more effective in reducing spall damage due to contact detonation as compared with normal concrete and other various fiber reinforced cementitious composites. Based on the test results, we identified the spall and perforation limits of SIFCON slabs subjected to contact detonation. Further, it was also shown that the spall-reducing performance of reinforced concrete (RC) slabs could be remarkably raised by replacing the concrete near the rear side of the RC slab with the SIFCON.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：コンクリート 耐爆性能 接触爆発 裏面剥離 スラリー充填繊維コンクリート

1. 研究開始当初の背景

意図的攻撃や火薬類の不測の爆発等による被災事例が国内外で数多く報告されている。特に、鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)部材の耐爆設計においては、コンクリート片の飛散による2次被害防止の観点から、反射引張応力波に起因する裏面剥離を低減することが設計上の重要課題となる。

RC版の裏面剥離低減を目的とした従来の研究には、繊維補強コンクリート(以下、FRCと略記)に関する研究があるが(引用文献①)、コンクリート混練時に短繊維を分散混入する一般的な製造方法では繊維体積混入率は高々4%程度が限界であり、これらFRCを用いても爆薬量が多い場合には裏面剥離を低減するのが困難である。

2. 研究の目的

RC版の裏面剥離が反射引張応力波に起因するものであるならば、コンクリートのひび割れ面において引張応力を伝達する架橋要素数を増加させることがRC版の耐爆性能向上において重要となることは明白である。そこで、本研究では、短繊維を多量に含有させることで引張強度・靱性を大きく向上させた繊維高含有コンクリート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。その製造方法としては、型枠に予め敷き詰めた短繊維の間隙にグラウトを充填する方法を採用した(引用文献②)。以下、繊維高含有コンクリートをSIFCON(Slurry Infiltrated Fiber Concrete)と称する。

3. 研究の方法

(1) SIFCONの製造技術および基礎的力学特性の検討

これまでの研究において、FRCの耐爆性能を評価する上で、静的曲げ靱性がひとつの目安となることが示されている(引用文献①)。そこで、耐爆性能の検討に先立ち、静的曲げ靱性が最大となるSIFCONの調合条件について検討した。

表1に使用材料を、表2に使用調合をそれぞれ示す。繊維素材として、両端フック付きの鋼繊維およびロッド状のポリビニルアルコール(以下、PVAと略記)繊維を用い、型枠に充填可能な繊維量、繊維間隙に充填可能なグラウトの流動性、混和材種類および水結合材比がSIFCONの基礎的力学特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。

(2) SIFCONの耐爆性能の検討

上記(1)において選定した調合(表3)によるSIFCON版を対象に、接触爆発試験を実施した。試験体は600mm四方の平板とし、版厚中央に縦横のピッチ120mmの格子状鉄筋を配した。シリーズAでは版厚が100mm一定の条件下で爆薬量を100, 200gの2水準で変化させた。また、シリーズBでは、爆薬量が200g一定の条件下で版厚を100, 85, 70, 55mmの

4水準で変化させた。

試験は熊本大学パルスパワー科学研究所が所有する衝撃実験室にて図1に示す装置を用いて実施し、爆薬の種類はペンスリットを主成分とする安全爆薬、爆薬の形状は直径と高さが等しい円柱形とした。試験終了後、試験体に生じた局部破壊の寸法(図2参照)を測定し、普通RC版や一般的なFRC版との耐爆性能の比較・検討を実施した。更に、実験結果に基づき、SIFCONの適用による裏面剥離限界および貫通限界低減効率を特定した。

表1 使用材料(検討(1)~(3))

セメント	早強ポルトランドセメント
混和材	シリカフェューム(比表面積: 200000cm ² /g) 高炉スラグ微粉末(比表面積: 6140cm ² /g)
化学混和剤	高性能減水剤
補強用繊維	鋼繊維(両端フック付き) 寸法: φ0.62×30mm、引張強度: 1080N/mm ² ポリビニルアルコール繊維(ロッド状) 寸法: φ0.66×30mm、引張強度: 900N/mm ² 、 引張弾性率: 23kN/mm ²

注) 高炉スラグ微粉末は検討(1)、PVA繊維は検討(1)、(2)においてのみそれぞれ使用

表2 使用調合(検討(1))

繊維種類	V _f (%)	W/B(%)	Si/B(%)	Sg/B(%)	W(kg/m ³)	Sp/B(%)	0-Flow
S	11.5	40	10	—	474	0.75	306
		33	10	—	421	1.50	485
		25	10	—	350	2.00	503
		40	—	50	481	0.20	320
		33	—	50	437	0.30	267
		25	—	50	372	0.50	275
PVA	12.0	40	10	—	471	0.75	298
		33	10	—	418	1.50	468
		25	10	—	348	2.00	445
		40	—	50	478	0.20	279
		33	—	50	434	0.30	283
		25	—	50	370	0.50	316

注) S: 鋼繊維、PVA: PVA繊維、V_f: 繊維体積混入率、W/B: 水結合材比、B(=C+Si or C+Sg): 結合材、C: セメント、Si: シリカフェューム、Sg: 高炉スラグ微粉末、W: 水、Sp: 高性能減水剤、0-Flow: 0打フロー値

表3 検討(1)の結果に基づき選定したSIFCONの調合

繊維種類	V _f (%)	W/B(%)	Si/B(%)	W(kg/m ³)
S	11.5	40	10	474
PVA	12.0	25	10	348

注) 高性能減水剤添加率Sp/Bは、グラウト単体の0打フロー値300以上が得られる範囲で試し練りにより定める

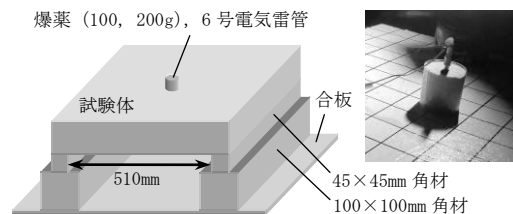
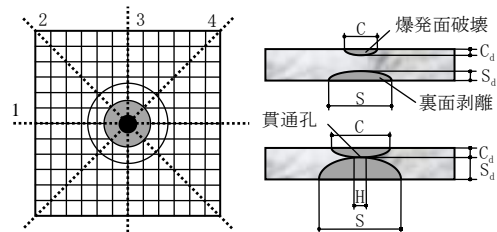


図1 接触爆発試験装置(検討(2),(3))



注) C: 爆発面破壊直径、S: 裏面剥離直径、H: 貫通孔直径、Cd: 爆発面破壊深さ、Sd: 裏面剥離深さ

図2 局部破壊寸法の定義(検討(2),(3))

(3) SIFCON 積層補強 RC 版の耐爆性能の検討
 上記(2)の検討結果より、SIFCON の適用は裏面剥離低減に有効であるものの、爆発面破壊の低減には殆ど効果を有さないことが明らかとなった。そこで、SIFCON をハーフプレキャスト RC 部材として適用することを想定し、SIFCON を用いて裏面側に断面積層補強を施した RC 版の接触爆発に対する耐爆性能について検討した。

試験体の総厚を 100mm で一定とし、裏面側の S-SIFCON (鋼繊維を用いた SIFCON、調合は表 3 と同) による補強厚を 0, 25, 50, 75, 100mm の 5 水準で変化させた。また、上記(2)と同種の爆薬を用い、爆薬量を 100, 200g の 2 水準で変化させた。試験装置および局部破壊寸法の測定方法は上記(2)と同様である。

4. 研究成果

(1) SIFCON の製造技術および基礎的力学特性の検討

① SIFCON の製造方法について検討した結果、本研究で用いた鋼繊維および PVA 繊維の繊維体積混入率はそれぞれ 11.5 および 12.0% となった。また、いずれの繊維を用いた場合も、グラウト単体の 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) が 300 程度以上であればグラウトの自重のみにより繊維間隙にグラウトを充填できることが示された (前掲の表 2 参照)。

② SIFCON の基礎的力学特性に関して、圧縮・曲げ特性ともに、S-SIFCON の方が PVA 繊維を用いた SIFCON (以下、PVA-SIFCON と略記) に比して一様に良好な力学特性を示した (表 4)。PVA-SIFCON では、水結合材比の低下に伴い曲げ強度・靱性ともに増大する傾向を示したが、S-SIFCON においては、水結合材比が過度に小さくなると曲げ強度は増大する反面、それ以降で比較的速やかに曲げ耐力が低下する性状を示した (図 4)。

ここで、FRC の耐爆性能を把握する上で静的曲げ靱性の大小が目安となるが (引用文献①)、その曲げ性状としては、引用文献③に示される炭素繊維補強コンクリートの耐爆性能から類推した場合、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と考えられる。そこで、本研究では、曲げ靱性と延性を主要な評価項目とし、接触爆発試験に供する SIFCON の調合を繊維種類に応じて選定した。その結果、S-SIFCON では W/B=40% (混和材はシリカフューム)、PVA-SIFCON では W/B=25% (混和材はシリカフューム) をそれぞれ選定した (前掲の表 3 参照)。

(2) SIFCON の耐爆性能の検討

① 図 5 に、版厚を 100mm 一定とし、爆薬量を 100, 200g の 2 水準で変化させた各種 FRC (引用文献③) の局部破壊寸法の比較を示す。爆薬量 100g においては、SIFCON を含む全ての FRC 版において裏面剥離直径および深さ

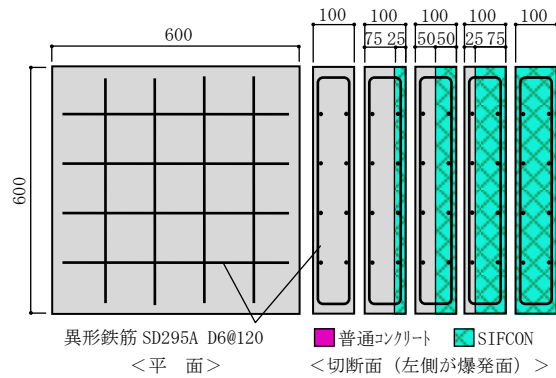


図 3 試験体の形状・寸法および配筋 (検討(3))

表 4 SIFCON の力学特性試験結果 (検討(1))

繊維種類	混和材種類	W/B (%)	γ (kN/m ³)	σ_B (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	σ_f (N/mm ²)	$\bar{\sigma}_b$ (N/mm ²)	
S	Si	40	25.3	89.7	21.0	47.2	39.5	
		33	26.2	105	26.8	44.4	37.0	
		25	26.8	113	30.6	52.1	39.6	
	Sg	40	25.6	101	10.1	36.1	29.4	
		33	26.1	91.4	16.0	43.1	35.0	
		25	27.2	104	25.7	56.7	43.7	
	PVA	Si	40	17.9	60.2	12.4	19.9	17.7
			33	18.8	66.9	16.5	26.0	22.1
			25	19.2	75.1	20.1	29.4	25.1
Sg		40	18.1	55.8	12.8	22.9	19.2	
		33	18.7	65.4	15.8	25.4	21.2	
		25	19.4	73.2	18.5	25.2	21.5	

注 1) γ : 気乾単位容積重量、 σ_B : 圧縮強度、E : ヤング係数、 σ_f : 曲げ強度、 $\bar{\sigma}_b$: 曲げ靱性係数
 注 2) 圧縮試験には $\phi 100 \times 200$ mm 円柱を、曲げ試験には $100 \times 100 \times 400$ mm 角柱 (スパン長 300mm の 3 点曲げ載荷) を使用
 注 3) 曲げ靱性係数算出にあたっての基準変位は 4mm

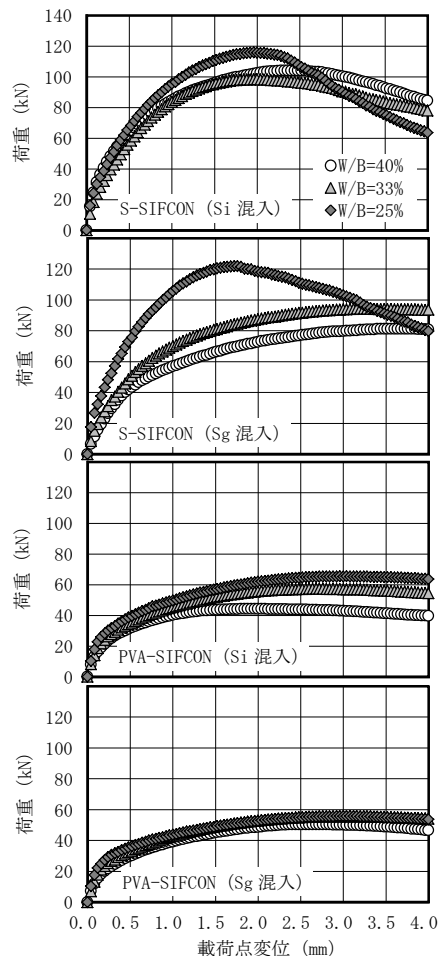


図 4 曲げ試験における荷重-載荷点変位曲線の測定値 (検討(1))

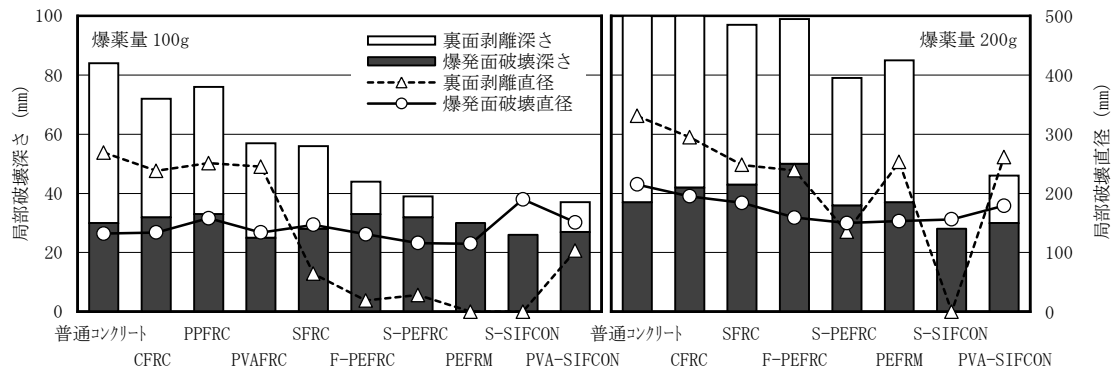


図5 各種 FRC (引用文献③に詳細を記載) との局部破壊寸法の比較 (検討(2))

が普通コンクリート版よりも小さくなっており、FRC の適用が裏面剥離低減の面で有効であることが明らかである。但し、本爆薬量であれば SIFCON の局部破壊の程度はポリエチレン繊維補強コンクリート (PEFRC) 等のそれと同程度である。

一方、爆薬量 200g においては、SIFCON 以外の各種 FRC では全損傷深さ (爆発面破壊深さと裏面剥離深さの和) が版厚近くまで拡大しているのに対して、SIFCON では依然として良好な裏面剥離低減性能が認められ、特に S-SIFCON では明確な裏面剥離の発生は認められなかった。このことから、SIFCON が普通コンクリートや他の各種 FRC に比して良好な耐爆性能を有することが明らかであり、その傾向は、版厚が一定であれば、爆薬量が普通コンクリート版における貫通限界を上回る範囲で顕著であるものと考えられる。

なお、同図より、他の各種 FRC と同様に、SIFCON を適用しても爆発面破壊は殆ど低減することが出来ないことが明らかである。

② 表 5 に、シリーズ B における代表的な試験体の内部損傷を示す。

S-SIFCON に関して、版厚 100mm では裏面の爆発点直下に顕著な膨らみが発生したが、剥落はごく僅かしか生じておらず、裏面剥離限界に近い状態にあるものと推察される。また、いずれの版厚においても、裏面中央近傍で内部のマトリックスに著しいひび割れの発生が観察され、その一部が剥落するように裏面剥離が生じている様相が確認される。

PVA-SIFCON に関して、版厚 100mm では裏面剥離面の上方に斜めひび割れの形成が認められるが、版厚 85mm 以下ではそれが確認されていない。このことから、版厚 85mm 以下の範囲では斜めひび割れ下部が脱落することで裏面剥離が生じた可能性が考えられる。

図 6 に普通コンクリート版を対象とした損傷評価式 (引用文献④) による計算値と本実験データとの対応を示す。

図 6(a) より、SIFCON の無次元爆発面破壊深さの実測値は、普通コンクリートを対象とした爆発面破壊深さ評価式(1)による計算値と概ね良く一致していることが判る。

一方、図 6(b) より、修正換算コンクリート

表 5 代表的な試験体の内部損傷 (検討(2)、シリーズ B)

種類	版厚	内部損傷状況
S-SIFCON	100 mm	
	85 mm	
	70 mm	
PVA-SIFCON	100 mm	
	85 mm	
	70 mm	

注) 支承位置は左右両端

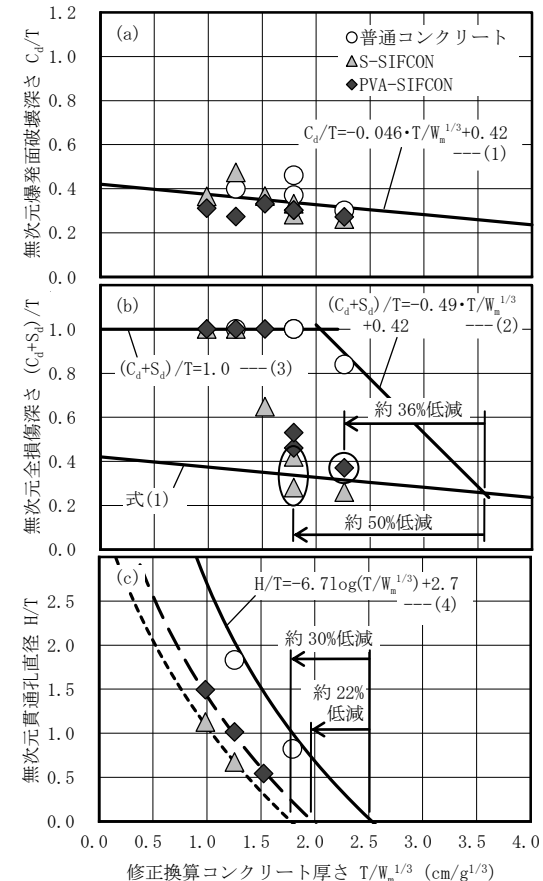


図 6 普通コンクリート版を対象とした損傷評価式による計算値と本実験データとの関係 (検討(2))

厚さ $T/W_m^{1/3}$ (T : 版厚 (cm)、 W_m : 爆薬の TNT 等価質量 (g)) が $1.5\text{cm/g}^{1/3}$ 程度以上の範囲で SIFCON の無次元全損傷深さが式(2)、(3) による計算値を下回っており、SIFCON が裏面剥離低減効果を有していることが明らかである。ここで、破壊性状の目視観察結果より、S-SIFCON および PVA-SIFCON の裏面剥離限界となる $T/W_m^{1/3}$ はそれぞれ 1.8 および 2.3 $\text{cm/g}^{1/3}$ 程度であると考えられる。従って、普通コンクリートの裏面剥離限界 $T/W_m^{1/3}=3.6$ $\text{cm/g}^{1/3}$ を基準とした場合、S-SIFCON および PVA-SIFCON を適用することにより、裏面剥離限界となる $T/W_m^{1/3}$ をそれぞれ約 50 および 36% 低減することが可能であると考えられる。

図 6(c)より、SIFCON の無次元貫通孔直径は式(4)による計算値を大きく下回っており、貫通孔が生じるような過酷な爆発条件下において、SIFCON の適用がその低減に有効であることが判る。また、式(4)を $T/W_m^{1/3}$ が小さい方にシフトさせることにより計算値は SIFCON に関する実測値と概ね良く一致し、その際の $T/W_m^{1/3}$ の低減率は S-SIFCON で約 30%、PVA-SIFCON で約 22%となる。すなわち、SIFCON を適用することにより、貫通限界となる $T/W_m^{1/3}$ を上記の比率だけ低減することが可能であると考えられる。

(3) SIFCON 積層補強 RC 版の耐爆性能の検討

① 表 6 に、試験体の内部損傷状況 (爆薬量 200g の場合) を示す。SIFCON 補強厚が 25, 50mm 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同規模のスポール破壊が発生しているが、SIFCON 層が貫通していないために飛散には至っていない。また、これら試験体では、普通コンクリート層で発生した、裏面剥離の前兆である斜めひび割れが SIFCON 層に進展することなく、接合界面に沿うように幅方向に進展している様相が確認される。なお、接触爆発を受ける SIFCON の特性として、外観上は裏面剥離が抑止された場合であっても裏面近傍の内部に著しい微細ひび割れが発生することが検討(2)において確認されているが、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。

図 7 に SIFCON 補強厚が局部破壊寸法に及ぼす影響 (爆薬量 200g の場合) を示す。無補強 RC 版では全損傷深さが版厚に達しているのに対して、積層補強 RC 版ではそれが 50mm 程度以下に抑えられており、SIFCON 積層補強が RC 版の局部破壊低減の面で有効であることが明らかである。更に、積層補強 RC 版の全損傷深さは全体補強 RC 版よりも低減されていることが判る。また、SIFCON 補強厚が減少するほど裏面剥離深さが低減される傾向にある。

② SIFCON 積層補強による裏面剥離低減メカニズムを明らかにするため、1 次元波動モデルを用いて応力波の伝播挙動を求めた結果を表 7 に示す。ここで、普通コンクリートお

表 6 試験体の内部損傷 (検討(3)、爆薬量 200g)

補強厚	内部損傷状況
0mm (無補強)	
25mm	
50mm	
75mm	
100mm (全体補強)	

注) 支承位置は左右両端

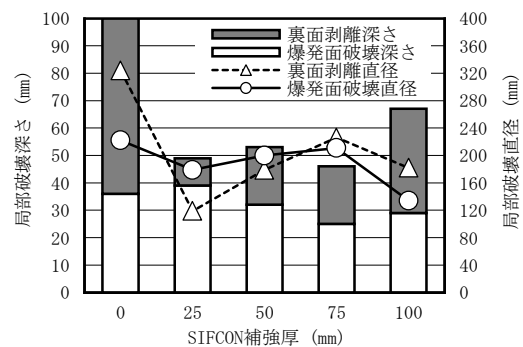
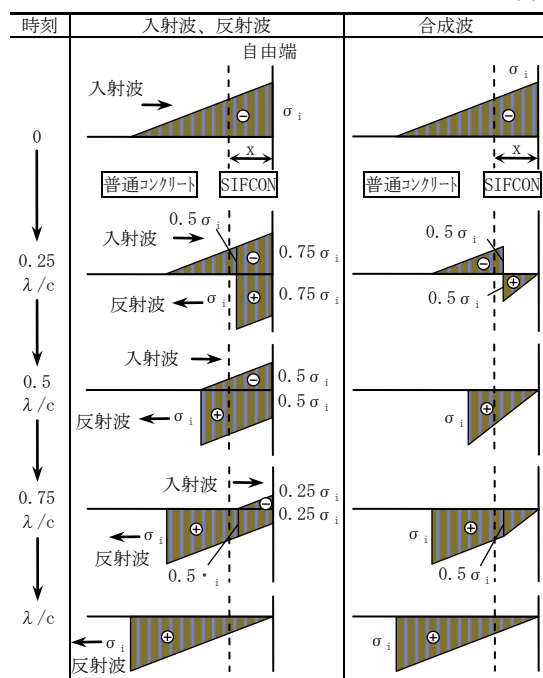


図 7 局部破壊寸法の測定結果 (検討(3)、爆薬量 200g)

表 7 図 8 のモデルにおける応力波の伝播挙動 (検討(3))



注) 引張応力を正、圧縮応力を負として記載している

よび SIFCON のインピーダンスを用いて接合界面における応力波の透過率を計算した場合、普通コンクリート層から SIFCON 層への透過率は約 97%、SIFCON 層から普通コンクリート層への透過率は約 103%となる。従って、入射波は接合界面で殆ど反射することなく、

ほぼ完全に透過するものと考えられる。

普通コンクリート層から SIFCON 層へと透過した圧縮応力波は自由端に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、SIFCON 補強厚 x が応力波長 λ の $1/2$ 以下であれば、SIFCON 層に発生する引張応力は x の減少に伴って低減されることになる。また、この場合、引張応力は普通コンクリート層で最大となる。

普通コンクリート層でスポール破壊が発生した場合、スポール破壊面を形成する斜めひび割れが裏面に向かって進展し、更に普通コンクリート層で発生したスポール片が SIFCON 層を押圧することになる。しかし、斜めひび割れが SIFCON 層内に進展せずに脆弱な接合界面に沿って進展することや、SIFCON 層のたわみ変形を伴ってスポール片が捕縛されることは①で述べた通りである。すなわち、補強厚が小さい場合の SIFCON 積層による耐爆補強効果は、図 8 に模式的に示す通り、(i) SIFCON 層に生じる引張応力が小さいため、SIFCON 層で裏面剥離が殆ど生じないこと、(ii) 接合界面の付着剥離により斜めひび割れの進展が阻害されること、(iii) スポール片の運動エネルギーが SIFCON 層の曲げ変形によって吸収されること、の複合によるものと推察される。

<引用文献>

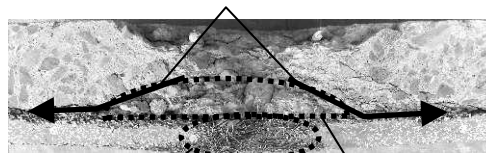
- ① 山口信、村上聖、武田浩二、三井宜之、ポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能、日本建築学会構造系論文集、No. 619、2007、187-194
- ② D. R. Lankard, Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol. 6, No. 12, 1984, 44-47
- ③ 山口信、村上聖、武田浩二、三井宜之、各種繊維補強コンクリートとの耐爆性能の比較検討—ポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能—、日本建築学会構造系論文集、Vol. 73、No. 631、2008、1681-1690
- ④ 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、2000、1787-1791

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 山口信、村上聖、武田浩二、佐藤あゆみ、合成繊維を用いたスラリー充填繊維コンクリートの基礎的力学特性に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集、Vol. 69、2016、604-610
- ② 山口信、村上聖、武田浩二、佐藤あゆみ、三井宜之、スラリー充填繊維コンクリ

(ii) 斜めひび割れの SIFCON 層への進展が付着剥離により阻害される。



- (i) SIFCON 層に生じる引張応力が小さいため、SIFCON 層内で甚大な裏面剥離が生じない。
- (iii) 普通コンクリート層で発生したスポール片の運動エネルギーが SIFCON 層のたわみ変形によって吸収される。

図 8 SIFCON 積層補強による裏面剥離低減メカニズムの模式図 (検討(3))

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、2015、2033-2043

- ③ 山口信、安部匠、村上聖、武田浩二、佐藤あゆみ、耐爆性能に優れた繊維補強セメント系複合材料の高速飛翔体衝突に対する耐衝撃性、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol. 15、2015、423-428
- ④ 山口信、村上聖、武田浩二、佐藤あゆみ、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、コンクリート工学年次論文集、Vol. 36、No. 2、2014、511-516

[学会発表] (計 14 件)

- ① 山口信、スラリー充填繊維コンクリート (SIFCON) により断面積層補強を施した鉄筋コンクリート版の接触爆発に対する耐爆性能、平成 27 年度衝撃波シンポジウム、2016. 3. 9、熊本大学 (熊本県熊本市)
- ② 山口信、短繊維を多量に含有するセメント系複合材料の接触爆発に対する耐爆性能、第 12 回日本・韓国建築材料・施工 Joint Symposium、2015. 7. 18、日本大学生産工学部 (千葉県習志野市)
- ③ 井形友彦、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に関する実験的研究 (その 2 耐爆性能の検討)、日本建築学会 2014 年度大会、2014. 9. 14、神戸大学 (兵庫県神戸市)
- ④ 山口信、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に関する実験的研究 (その 1 調合の検討)、日本建築学会 2014 年度大会、2014. 9. 14、神戸大学 (兵庫県神戸市)

[その他]

ホームページ等
<http://www.murakami-lab.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 信 (YAMAGUCHI, Makoto)

熊本大学・大学院先端科学研究部・助教
研究者番号：80570746