

期間番号：17401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011~2013

課題番号：23560675

研究課題名(和文) 鉄筋コンクリート部材の耐爆補強に関する研究

研究課題名(英文) Study on blast-resistant reinforcement of RC member

研究代表者

村上 聖 (MURAKAMI Kiyoshi)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：80182088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000 円、(間接経費) 1,080,000 円

研究成果の概要：

ポリエチレン繊維補強コンクリート(PEFRC)を用いた各種構造版および連続繊維シート補強 RC 版の耐爆性能に関して実験および解析的検討を行い、その結果として中空 2 層構造や空洞ブロック構造版が迅速施工性と損傷低減効果にすぐれることを明らかにし、シート破断エネルギーと修正換算コンクリート厚さに基づきスポール抑止限界シート補強量を定量的に示した。

Experimental and analytical investigations were conducted regarding blast resistance of various composite PEFRC slabs and RC slabs with continuous fiber sheet strengthened. As a result, it was shown that a void slab and a hollow block of PEFRC combined with rapid construction have better blast resistance and reinforcement quantity of the sheet necessary for preventing spall failure of RC slabs can be estimated based on rupture energy of the sheet and modified-scaled concrete thickness of the slab.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：耐爆補強、鉄筋コンクリート部材、接触爆発試験、繊維補強コンクリート、連続繊維補強材、連続繊維シート、修正換算コンクリート厚さ、シート破断エネルギー

1. 研究開始当初の背景

近年、衝突・爆発等の偶発的事故や意図的攻撃による衝撃外乱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必要性が高まっている。特に、爆発荷重を受ける RC 版の局所的損傷を考えた場合、版裏面での衝撃波の反射で生じる引張応力波に起因したコンクリート飛散片による人的被害を防止することが、耐爆設計上の許容限界となる。しかし、圧縮強度に比べて引張強度が非常に小さいコンクリートでは、いくら版厚を大きくしたり、また鉄筋量を増やしても、コンクリートそのものの脆性的性質により、版の裏面剥離(スポールと呼ばれる)を完全に抑制することはできない。コンクリートそのものの脆性的性質を改善し、引張応力に対して高靱性を付与する手段として、各種素材の短繊維をコンクリート中に分散混入した繊維補強コンクリート(FRC)やコンクリート表面への連続繊維補強材による接着あるいは増厚補強工法が RC 構造物の耐震補強として実用化されており、耐爆補強に対してもその適用性が期待されている。

筆者らは、本研究以前に短繊維補強コンクリートの耐爆構造物への適用を目的に、各種 FRC 版の耐爆性能について接触爆発試験を行い、スポールの顕著な損傷抑制効果を明らかにするとともに、FRC の曲げタフネスを考慮した損傷寸法の予測式を提案した。さらに、施工迅速性を考慮した各種構成のプレキャスト FRC 版の耐爆性能についても検討を行い、FRC 版の場合には中空層を設けることがスポールの損傷低減に顕著な効果を有することを実験的に明らかにした。ただし、FRC

版および中空層による損傷低減効果のメカニズムについては実験結果の考察だけにとどまり、その解明が今後の重要な課題となっていた。また、筆者らは、別件で各種連続繊維補強材による RC 部材の曲げおよびせん断補強工法の開発を手掛けており、それらの工法による耐爆補強についても、循環型社会形成のための既存 RC 構造物の長寿命化に貢献する技術と考え、一部ではあるが連続繊維シート接着工法による RC 版のスポール損傷低減効果を実験的に明らかにしたが、スポール抑止限界補強量の定量的な評価・予測手法の確立や実設計への適用性については未知数の状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、爆発荷重を受ける RC 部材の衝撃による損傷制御を目的に、高靱性 FRC を用いた各種プレキャスト構成版の耐爆性能ならびに連続繊維補強材による RC 版の耐爆補強に関して接触爆発試験による実験的検討を行い、その結果に基づいて爆発荷重に対する損傷低減効果にすぐれ、迅速施工性を兼ね備えたプレキャスト RC 部材の開発や、衝撃・爆発等の偶発的事故や意図的攻撃による衝撃外乱に対してより高い安全性を確保するための既存 RC 構造物の耐爆補強設計の確立に寄与することを目的としている。

前者については、これまでに、各種 FRC 版の耐爆性能の比較検討により、ポリエチレン繊維補強コンクリート(PEFRC)のスポール損傷抑制に対する有効性を明らかにしているが、本研究では、迅速施工を目的に各種構成のプレキャスト PEFRC 版(一体型 2 層構

造版、中空層付き絶縁型2層構造版、プレキャストブロックおよび空洞プレキャストブロック組積版等)について接触爆発試験を行い、普通コンクリート版との比較でプレキャスト PEFRC 各種構成版の損傷低減メカニズムを有限要素解析により明らかにする。

後者については、耐震補強として実用化されている連続繊維補強材(ロッド、シート、プレート、メッシュ等)による各種補強工法の耐爆補強としての適用性に関して接触爆発試験による実験的検討を行い、実験結果と有限要素解析による解析的検証を通じて、スポール抑止限界補強量の定量的な評価・予測手法の確立を目指すものである。

3. 研究の方法

(1) シリーズ I

本シリーズでは、各種構成のプレキャスト PEFRC 版について接触爆発試験による耐爆性能の比較検討を行うとともに、普通コンクリート版を対象に汎用衝撃解析コード ANSYS AUTODYN による有限要素解析を実施し、各種構成 PEFRC 版の損傷低減メカニズムについて定性的な考察を行った。

① 試験体作製

表 1 に PEFRC の使用材料および調合、表 2 に試験体の仕様、図 1 に試験体作製方法を示す(なお、詳細については発表論文を参照)。

表 1 PEFRC の使用材料および調合

| | | | | | |
|--------------------|--|-----------------------|---------|------------------------|----------|
| セメント | 早強ポルトランドセメント | | | | |
| 細骨材 | 川砂:最大寸法 1.2~2.5mm | | | | |
| 粗骨材 | 砕石 6号:最大寸法 15mm | | | | |
| 混和材 | 高炉スラグ微粉末:比表面積 6140cm ² /g | | | | |
| 混和剤 | 高性能 AE 減水剤 | | | | |
| 繊維 | ポリエチレン繊維:密度 0.97g/cm ³ PP/PE カバーリング集束タイプ、繊維長 30mm、引張強度 1870N/mm ² 、引張弾性率 43kN/mm ² | | | | |
| V _f (%) | W/B (%) | S _g /B (%) | s/a (%) | W (kg/m ³) | Sp/B (%) |
| 4.0 | 33 | 50 | 65 | 325 | 0.5 |

* V_f: 繊維体積率、W/B: 水結合材比、W: 単位水量、B: 結合材、S_g: 高炉スラグ微粉末、s/a: 細骨材率、Sp: 高性能 AE 減水剤

* 試験体によって作製時期が異なるが、PEFRC の圧縮強度、曲げ強度、曲げタフネスの平均値は、59.4~64.3N/mm²、9.37~11.4N/mm²、38.6~46.3kNmm の範囲である。なお、試験方法については発表論文参照。

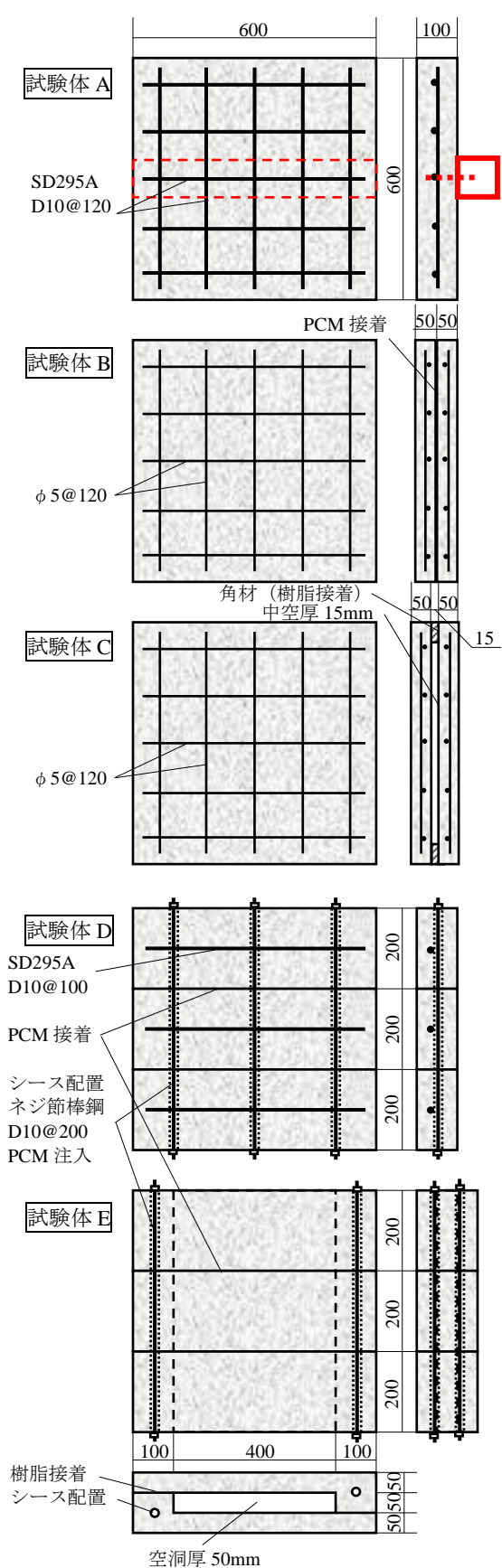
表 2 試験体の仕様

| 記号 | 試験体の仕様 | 版厚 (mm) | 爆薬量 (g) |
|----|--------------------------------|---------|---------|
| A | 単版 | 100 | 200 |
| B | 一体型2層構造版 *各層厚 50mm、PCM 接着 | 100 | 200 |
| C | 絶縁型2層構造版 *各層厚 50mm、中空厚 15mm | 100 | 200 |
| D | プレキャストブロック版 | 100 | 200 |
| E | 空洞プレキャストブロック版 *空洞厚 50mm | 100 | 200 |
| F | 鋼管付き単版 *版裏面中央に角型鋼管取付 | 100 | 200 |

* 版厚は、PEFRC 実質部の合計厚さを示す。

* 爆薬: 密度 1.30g/cm³、ペンシリット 65%、パラフィン系 35%、爆轟速度 6900m/s

* 試験体 F は、カーテンウォールへの適用を想定し、鋼構造躯体への影響を把握するために検討項目に加えた。



試験体 F: 試験体 A の裏面中央に角形鋼管 (STKR400、□-100×100×4.5) をフック付きアンカーボルトで2箇所固定(試験体 A に赤線で示す)

図 1 試験体作製方法

② 接触爆発試験方法

図 2 に試験体の接触爆発試験方法を示す。試験体は、内法スパン長が 510mm の角材支承部上に設置し、試験体上面中央位置で電気雷管を用いて爆薬（密度 1.30g/cm^3 、ペンスリット 65%、パラフィン系 35%、爆轟速度 6900m/s ）を起爆させた。なお、爆薬の形状は、直径と高さが同一の円柱形とした。

図 3 に爆発試験後の損傷寸法の測定方法を示す。寸法測定は、爆発面のクレータ直径および最深深さ、裏面のスポール直径および最深深さとし、直径は 4 方向の測定値の平均値として求めた。

(2) シリーズ II

本シリーズでは、耐震補強として実用化されている連続繊維補強材（ロッド、シート、プレート、メッシュ等）による各種補強工法の耐爆補強としての適用性に関して接触爆発試験による実験的検討を行い、実験結果と有限要素解析による解析的検証を通じて、既存 RC 構造物に対する耐爆補強設計への適用を念頭にスポール抑止限界補強量の定量的な評価・予測手法の提案を行った。

予備実験として、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) ロッド補強およびポリエチレン繊維 (PEF) ネット補強高靱性ポリマーセメントモルタル増厚工法、CFRP プレート接着補強工法、CFRP および PEF シート接着補強工法を施した試験体について接触爆発試験を行った結果、爆発荷重に対しては、試験体裏面のスポール破壊によるコンクリート飛散片を完全に捕縛しうる補強形態でなければ、補強材の隙間を縫ってコンクリート片が飛散し、試験体にスポール破壊あるいは貫通孔を生じることが分かった。その意味で、試験体裏面を隙間なく密着補強が可能な連続繊維シート接着補強工法の有用性が確認された。ただし、連続繊維シート接着補強工法の場合も、シート破断が生じなければスポール破壊によるコンクリート片の飛散が完全に抑止できるが、破断を生じた場合は、無補強の場合と損傷程度に差異はないことが分かった。予備実験結果については紙面の都合で割愛するが（詳細は発表論文を参照）、本報では、連続繊維シート接着補強 RC 版の耐爆補強効果について、シート接着補強量とシート破断によるスポール発生の有無について定量的な考察を行った。

① 試験体作製

表 3 に使用材料を示す。コンクリートは、一貫して呼び強度が 30N/mm^2 のレディーミクストコンクリート（普通-30-18-20-N）を使用した。試験体の作製時期が異なるため、試験体と同一の現場湿布養生材齢 28 日後気中養生のコンクリートの圧縮強度の範囲は $36.0\sim 42.0\text{N/mm}^2$ 、平均値は 39.5N/mm^2 、変動係数は 6.43% である。連続繊維シートには CFRP シートを用い、高強度タイプ（以下、HSS と称する）および高弾性タイプ（以下、HMS と称する）の 2 種類とした。

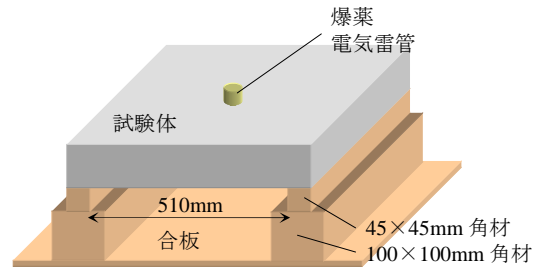
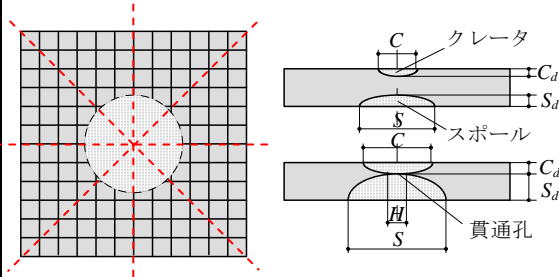


図 2 接触爆発試験方法



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

図 3 損傷寸法の測定方法

表 3 使用材料

| | |
|---------|---|
| コンクリート | レディーミクストコンクリート 普通-30-18-20-N |
| 連続繊維シート | 高強度タイプ CFRP シート (HSS) 目付量: 300g/m^2 公称厚さ: 0.167mm 引張強度: 3430N/mm^2 引張弾性率: 230kN/mm^2 破断エネルギー: 4.27N/mm 高弾性タイプ CFRP シート (HMS) 目付量: 300g/m^2 公称厚さ: 0.152mm 引張強度: 1940N/mm^2 引張弾性率: 704kN/mm^2 破断エネルギー: 0.406N/mm |
| 接着剤 | エポキシ系樹脂 |

* シートの破断エネルギーは、破断時まで線形弾性を仮定して単位断面積当たりで算出。



写真 1 シートの接着補強方法

シートの接着補強方法は、RC 版裏面をディスクグラインダーにより研磨、プライマー塗布、24 時間養生後エポキシ系樹脂接着剤によってシートを 1 層ずつ積層・接着した（写真 1）。なお、シート補強層数が複数の場合、前層に対して繊維方向が直交するように後層を貼付した。RC 版は、図 1 中の試験体 A の仕様をベースとして、版厚が 100mm 未満のものは鉄筋 SD295A、D10@120mm に代え

てみがき棒鋼φ5@120mmを版中央に配筋した。表4に試験体一覧を示す。

表4 試験体一覧

| 記号 | 仕様 | 補強層数 | RC版厚(mm) | 爆薬量(g) |
|-------|--------|------|----------|--------|
| N | 無補強 | 0 | 75 | 200 |
| HMS-2 | 高弾性タイプ | 2 | | |
| HMS-4 | 高弾性タイプ | 4 | | |
| HMS-6 | 高弾性タイプ | 6 | | |
| N | 無補強 | 0 | 100 | 100 |
| | | | | 200 |
| HMS-2 | 高弾性タイプ | 2 | 100 | 100 |
| | | | | 200 |
| HSS-2 | 高強度タイプ | 2 | 100 | 100 |
| | | | | 200 |
| N | 無補強 | 0 | 100 | 100 |
| HMS-2 | 高弾性タイプ | 2 | | |
| HMS-4 | 高弾性タイプ | 4 | | |
| HMS-6 | 高弾性タイプ | 6 | | |
| HMS-2 | 高弾性タイプ | 2 | 100 | 40 |
| | | | | 60 |
| | | | | 80 |
| HSS-2 | 高強度タイプ | 2 | 75 | 200 |
| | | | 80 | |
| | | | 85 | |
| | | | 90 | |
| | | | 95 | |
| | | | 100 | |

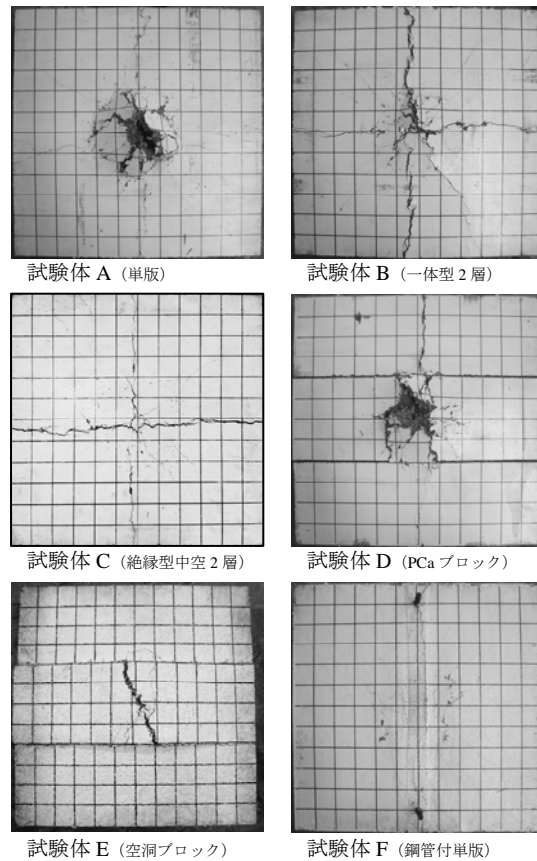


図4 試験体のスポール損傷状況

② 接触爆発試験方法

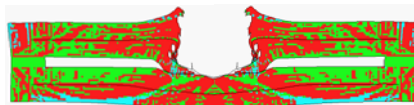
本シリーズの接触爆発試験方法や損傷寸法の測定方法については、シリーズIと同様である。

4. 研究成果

(1) シリーズI

図4に各試験体のスポール損傷状況を示す。図より、同厚のPEFRC単版(試験体A)と比べて、薄肉PEFRC版の2層構造版(試験体B)やPEFRCブロック組積版(試験体D)のスポールの損傷低減は同等以上であり、特に中空2層構造版(試験体C)や空洞ブロック版(試験体E)のように中空層を設けることがPEFRC版のスポール損傷低減にかなり大きな効果があることが分かった。なお、普通コンクリートを用いた中空2層構造版の場合には、上下版の両方に貫通孔を生じ、爆発荷重に対しては中空層の効果はまったく認められなかった。

ここで、中空層が普通コンクリート版には効果がなく、PEFRC版で大きな効果をもたらす理由について、爆発荷重を受ける普通コンクリート中空2層構造版の汎用衝撃解析コードANSYS AUTODYNによる有限要素解析結果を図5に示す。なお、解析モデルは2次元軸対称とし、要素分割や材料モデルの詳細については割愛する(発表論文を参照)。また、PEFRCの材料構成法則や応力のひずみ速度依存性等が現状では未解明のため、解析は普通コンクリートに限定している。図より、普通コンクリート版の場合には、上版裏面でスポール破壊によるコンクリート飛散片が下



解析による最終破壊状況 (T=0.5ms)

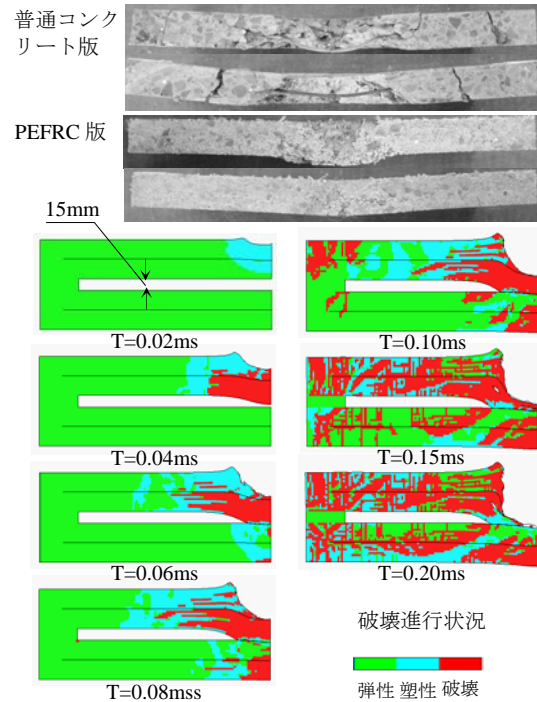


図5 爆発荷重を受ける普通コンクリート中空2層構造版の衝撃解析結果

版表面に2次飛翔体として作用し (T=0.02ms)

～0.04ms で赤色で示される破壊領域が下版表面に達していることから、少なくともコンクリート片の飛散速度は 750m/s と考えられる)、下版にスポール破壊および貫通を生じている様相が観察される。一方、PEFRC 版の場合には、繊維の架橋効果により上版裏面のスポール部が破片として飛散することなく延性的な変形状を示し、下版表面への衝突力が緩和されたことで下版のスポール発生が抑止されたものと推察される。このことは、図 5 の PEFRC 版の破壊状況から分かるように、上版裏面で押しぬけるはずのスポール片が中空層において下版表面で圧密され、その圧密荷重により下版裏面に曲げひび割れが発生するものの、衝撃波によるスポールの発生が完全に抑制されている。

(2) シリーズ II

図 6 に CFRP シートで接着補強された RC 版の破壊状況の一例を示す。図より、シート破断が生じなければスポール破壊によるコンクリート片の飛散が完全に抑止できるが、破断を生じた場合は、無補強の場合と損傷程度に差異はないことが分かる。そこで、本研究では、シート接着補強量とシート破断によるスポール発生の有無を定量化するために、既往の研究で森下、田中らによって提案された損傷評価パラメータである次式に示す修正換算コンクリート厚さを用いた。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right) \quad (1)$$

ここに、 W_m : 使用爆薬のトリニトロトルエン (TNT) 換算量 (g)
 W : 使用爆薬量 (g)
 K_{TNT} : TNT の爆轟エネルギー (=4.29MJ/kg)
 K : 使用爆薬の爆轟エネルギー (=3.71MJ/kg)

また、シート破断条件として、表 3 中に示すシートの破断エネルギーを用いた。なお、この適用性を調べるために、シートの引張構成則を完全弾塑性とし、破断ひずみを数水準で変化させシートの破断エネルギーを変えた場合のシート破断の有無について有限要素解析によるパラメトリックスタディを行った (なお、解析の詳細は発表論文参照)。図 7 に解析結果を示す。図より、本解析の範囲内では高強度タイプ CFRP シートにおいて、破断ひずみ (あるいは、破断エネルギー) がある値以上でシート破断が生じない結果となり、シート破断条件としてシート破断エネルギーを用いる根拠が見いだされた。

図 8 は、各試験体におけるシート破断の有無と修正換算コンクリート厚さおよびシート破断エネルギーとの相関を示す。なお、シート破断無を○、破断およびスポール発生有を×、破断が局所的に認められるがスポール

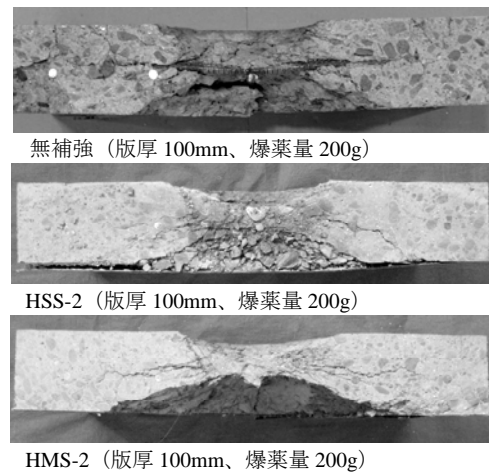


図 6 CFRP シート接着補強 RC 版の破壊状況

| CF シートの種類 | 高強度 | 高弾性 |
|--|----------------|----------------|
| 参照密度 ρ_{ref} (g/cm ³) | 1.796 | 1.974 |
| ヤング率 E (GPa) | 230 | 704 |
| 体積弾性率 K (GPa) | 127.8 | 391.1 |
| 横弾性率 G (GPa) | 95.83 | 293.3 |
| 降伏応力 σ_s (GPa) | 3.43 | 1.94 |
| 破断ひずみ ϵ_f (%) | 1.0, 5.0, 10.0 | 1.0, 5.0, 10.0 |
| エロージョン則 (塑性ひずみ (%)) | 1.1 | 1.1 |

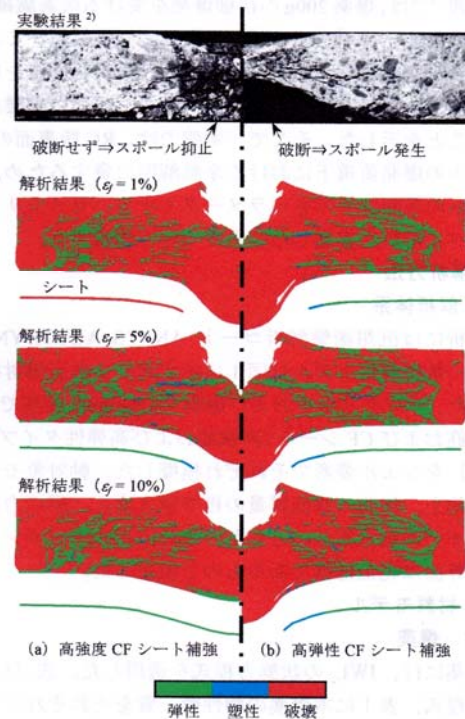


図 7 シート破断のパラメトリックスタディ

無を△で示している。図より、シート破断によるスポール発生限界についてコンターラインが引けそうである。そこで、シート破断エネルギーが 10N/mm 以内 (○と×が近接する) の○印の下限値について修正換算コンクリート厚さとシート破断エネルギーとの関係を累乗近似で求めると (図 9)、スポール発生限界として次式が得られた。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} \leq 3.75(G_s + 1)^{-0.416} \quad (2)$$

ここに、 G_s : シート破断エネルギー (N/mm)

最後に、実設計への適用性については、RC版厚と爆薬量を与条件として、上式よりスポール発生限界のシート破断エネルギーを算出し、与えられたシート1層の破断エネルギーより必要な接着補強層数を求めることができる。

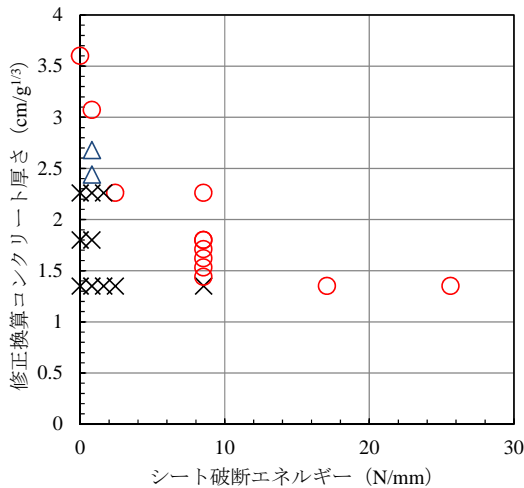


図8 シート破断有無の条件

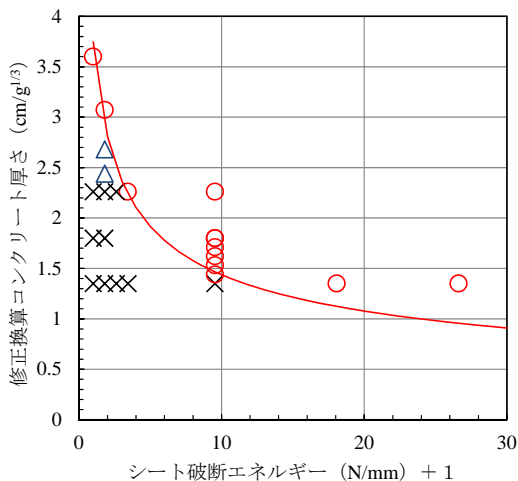


図9 スポール発生限界のコンターライン

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、三井宜之、久部修弘、補強量の違いが耐爆補強効果に及ぼす影響 連続繊維補強材を用いた鉄筋コンクリート版の耐爆補強に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol.79、No.702、掲載決定、2014
- ② 山口 信、村上 聖、武田浩二、ポリエチレン繊維補強コンクリートの耐爆構造材としての用途開発、繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法に関するシンポジウム、日本コンクリート工学会、査読有、pp.361-368、2012

- ③ 山口 信、村上 聖、武田浩二、三井宜之、平居孝之、プレキャスト小型要素による部材構成方法の違いが耐爆性能に及ぼす影響 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、査読有、Vol.77、No.678、pp.1347-1355、2012
- ④ 山口 信、村上 聖、武田浩二、三井宜之、久部修弘、平居孝之、連続繊維補強材を用いた鉄筋コンクリート版の耐爆補強に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol.77、No.674、pp.637-646、2012

〔学会発表〕(計6件)

- ① 山口 信、村上 聖、武田浩二、佐藤あゆみ、井形友彦、本山翔也、久部修弘、連続繊維シートを用いた鉄筋コンクリート版の耐爆補強に関する実験的研究、日本建築学会九州支部研究報告、第53号、pp.177-180、2014年3月2日、佐賀大学
- ② 中尾嘉克、山口 信、村上 聖、武田浩二、久部修弘、連続繊維シート/メッシュ補強 RC版の耐爆性能に及ぼす補強量の影響 その1 実験方法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.673-674、2013年8月30日~9月1日、北海道大学
- ③ 山口 信、村上 聖、中尾嘉克、武田浩二、久部修弘、連続繊維シート/メッシュ補強 RC版の耐爆性能に及ぼす補強量の影響 その2 実験結果および考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.675-676、2013年8月30日~9月1日、北海道大学
- ④ 中尾嘉克、山口 信、村上 聖、武田浩二、久部修弘、補強量の違いが連続繊維シート/メッシュ補強 RC版の耐爆性能に及ぼす影響 (その1 破壊過程)、日本建築学会九州支部研究報告、第52号、pp.209-212、2013年3月3日、大分大学
- ⑤ 山口 信、村上 聖、中尾嘉克、武田浩二、久部修弘、補強量の違いが連続繊維シート/メッシュ補強 RC版の耐爆性能に及ぼす影響 (その2 最終的破壊)、日本建築学会九州支部研究報告、第52号、pp.213-216、2013年3月3日、大分大学
- ⑥ 山口 信、村上 聖、武田浩二、接触爆発を受ける連続繊維シート補強 RC版の損傷解析に関する研究 その2 シートの破断ひずみに関するパラメトリックサーベイ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.113-114、2012年9月12日~9月14日、名古屋大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

村上 聖 (MURAKAMI Kiyoshi)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：80182088