

## 論文 高速飛翔体衝突を受ける補強モルタル柱の損傷に関する基礎的研究

山口 信\*1・森島 慎太郎\*2・張 志成\*2・川合 伸明\*3

**要旨：**爆発等のシビアアクシデント時における鉄筋コンクリート柱の損傷低減技術の構築に資するため、高速飛翔体衝突を受ける小型鉄筋補強モルタル（RM）柱の損傷について実験的検討を行った。実験パラメータは帯筋間隔、アラミド繊維シート（AFRP シート）による巻立て補強の有無および飛翔体衝突速度とし、これら因子がモルタル剥落領域およびシート剥離領域の規模等に及ぼす影響について検討した。その結果として、帯筋間隔を狭くし、尚且つ AFRP シート巻立て補強を施すことによりモルタルの剥落総体積が低減されることや、帯筋間隔を狭くした場合にシート剥離総面積が低減される傾向にあること等が明らかとなった。

**キーワード：**補強モルタル柱、飛翔体、高速衝突、損傷、帯筋、巻立て補強

## 1. はじめに

火薬類の爆発を伴う災害においては、爆風に伴って飛散物が高速度で周囲に飛散するため、その衝突により構造体に二次的な損傷が生じる危険性が指摘されている<sup>1)</sup>。

このことを鑑み、昨今より、高速飛翔体衝突を受けるコンクリート部材の損傷および損傷低減技術の開発に係る研究が実施されているが、その殆どは板状部材を対象としたものであり<sup>例えば 2, 3)</sup>、柱・梁といった構造部材を対象とした検討事例は現時点で極めて限定的である<sup>4)</sup>。特に、高速飛翔体衝突を受ける鉄筋コンクリート（RC）柱の損傷を考える場合、A：剥離に伴い飛散したコンクリート片による被害を低減するための飛散物低減性能と、B：当該構造物の崩壊を抑止するための軸圧縮耐力保持性能とが必要となるものと考えられる。

本研究では、主に上記 A の性能に着目し、高速飛翔体衝突を受ける RC 柱の損傷評価および損傷低減技術の構築に資する知見を得ることを目的とした。対象とした柱試験体は実物の 1/4 程度の小型試験体であり、縮小実験の都合上コンクリートはモルタルにより模擬することとした。実験パラメータは帯筋間隔、アラミド繊維シート（AFRP シート）による巻立て補強の有無および飛翔体衝突速度とし、これら因子が鉄筋補強モルタル（RM）柱の損傷に及ぼす影響について実験的検討を行った。

## 2. 実験方法

## 2.1 使用材料・調合および素材特性

表-1 に使用材料を、表-2 にモルタルの使用調合をそれぞれ示す。モルタルの調合は、設計基準強度が 24MPa となるように調合設計したコンクリートから粗骨材を除いたものとした。補強筋として、主筋には異形鉄筋 SD295A D10 を、帯筋にはみがき棒鋼 φ4 をそれぞれ用いた。また、巻立て補強用の連続繊維シートとして、

繊維方向が単一の AFRP シートを用いた。

表-3 にモルタルの素材特性を示す。RM 柱試験体を 3 回に分けて打設したため、その都度 φ100×200mm 円柱供試体を 3 体作製して圧縮試験を行ったが、モルタルの圧縮強度は概ね 40MPa 前後の範囲内に分布していた。

## 2.2 試験体

表-4 に RM 柱試験体一覧を、図-1 に RM 柱試験体の形状・寸法および配筋をそれぞれ示す。試験体は断面 150×150mm、高さ 300mm とし、主筋量は全試験体で 4-D10 一定とした。帯筋量に関して、□型の φ4 の帯筋の間隔を 30 および 15mm の 2 水準で変化させた。また、AFRP シート巻立て補強試験体におけるシート巻立て層数は、現実的な層数として 2 層（8 層相当）とした<sup>5)</sup>。

表-1 使用材料

|                 |                                                                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| a) モルタル         |                                                                                               |
| セメント            | 普通ポルトランドセメント                                                                                  |
| 細骨材             | 砕砂<br>表乾密度：2.99g/cm <sup>3</sup> 、絶乾密度：2.96g/cm <sup>3</sup> 、<br>吸水率：1.27%、最大寸法：5mm、粗粒率：3.37 |
| b) 鉄筋および連続繊維シート |                                                                                               |
| 主筋              | 異形鉄筋 SD295A D10<br>降伏強度：370MPa、引張強度：520MPa、破断伸び：35.8%                                         |
| 帯筋              | みがき棒鋼 φ4<br>引張強度：785MPa、破断伸び：9.33%                                                            |
| 連続繊維シート         | アラミド繊維シート<br>目付量：280g/m <sup>2</sup> 、設計厚さ：0.193mm、<br>引張強度：2060MPa、引張弾性率：118GPa              |

注) アラミド繊維シートの物性値は、いずれもカタログ値である。

表-2 モルタルの使用調合

| W/C (%) | S/C (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      | Flow                                  |
|---------|---------|--------------------------|-----|------|---------------------------------------|
|         |         | C                        | W   | S    |                                       |
| 57      | 340     | 484                      | 276 | 1646 | 229 (Lot A), 239 (Lot B), 251 (Lot C) |

注) W/C：水セメント比、S/C：砂セメント比、C：セメント、W：水、S：細骨材。空気量は 2.0%。

表-3 モルタルの素材特性

| Lot | γ (kN/m <sup>3</sup> ) | σ <sub>B</sub> (MPa) | E (GPa) | ε <sub>co</sub> (μ) |
|-----|------------------------|----------------------|---------|---------------------|
| A   | 23.3                   | 43.9                 | 29.3    | 3150                |
| B   | 23.4                   | 41.9                 | 29.0    | 3120                |
| C   | 23.0                   | 39.8                 | 27.3    | 3190                |

注) γ：気乾単位体積重量、σ<sub>B</sub>：圧縮強度、E：ヤング係数、ε<sub>co</sub>：圧縮強度時のひずみ。養生条件は RM 柱試験体と同様である。

\*1 熊本大学 大学院先端科学研究部 物質材料科学部門 助教 博(工) (正会員)

\*2 熊本大学 大学院自然科学研究科 建築学専攻

\*3 熊本大学 パルスパワー科学研究所 准教授 博(工)

試験体の作製方法に関して、モルタルを側面から打設し、材齢 28 日目まで標準養生とした。その後、AFRP シート巻立て補強試験体については、1 か月程度の気中養生を経て巻立て補強を施した。補強に際しては、柱の出隅部分を面取り半径が 12.5mm となるように面取りした後、試験体表面を研磨した上で、不陸調整を経てエポキシ樹脂系接着剤によりシートを 1 層ずつ貼付した。なお、シートの繊維方向は材軸と直交するようにし、シート端部の重ね長さは 100mm とした。

### 2.3 高速衝突試験方法

高速衝突試験は、図-2 (a)に示す一段式火薬銃を用いて実施した。本器は、飛翔体を発射管の端部に設置した後、火薬室（図-2 (b)参照）内部における無煙火薬の燃焼ガス圧により飛翔体を加速させるものである。飛翔体は、図-2 (c)に示す通り、衝突部の材質：SS400、固定具の材質：超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）、先端形状：平坦、先端直径：31.8mm、総質量：約 78g（本火薬銃により発射可能な最小質量に近い値）のものとし、所定量の無煙火薬を燃焼させて飛翔体を加速させた。また、高速度カメラを用いて側面から飛翔体の飛翔状況を撮影し、撮影された画像を基に実際の衝突速度を確認した。

試験は、打設面が衝突面側から見て右側面となるように RM 柱試験体を設置し、図-3 に示す通り、試験体の上下両端から 30mm の部分をシャコ万力により試験体後方の治具に拘束した状態で実施した。また、試験体の破壊性状を把握する上での一助とするため、裏面中央とそこから材軸方向に 30mm 離れた位置に検長 10mm のひずみゲージを材軸と平行方向に貼付し、衝突直後の RM 柱裏面のひずみ応答をオシロスコープにより計測した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 破壊性状

#### (1) 普通 RM 柱

表-5 および 6 に普通 RM 柱の破壊性状を帯筋間隔ごとに示す。柱試験体の破壊性状は、裏面剝離等の局部破壊に特徴付けられる板状試験体のそれ<sup>1-3)</sup>とはやや異なり、A：飛翔体の柱内部への貫入、B：衝突面から側面に至るかぶり部分近傍のモルタルの剥落、C：衝突箇所近傍から支承位置近傍へと至る斜めせん断ひび割れ、および D：衝突箇所近傍から裏面へと至る輪切り状ひび割れ、の 4 点に特徴付けられる。但し、帯筋間隔や飛翔体衝突速度に応じて、それらの発生程度は以下のように異なる。

#### a) 帯筋間隔 30mm の場合

$V_d=400\text{m/s}$  では衝突箇所近傍のモルタルが塑性圧縮の様相を呈した程度であったが、 $V_d=600\text{m/s}$  以上になると衝突箇所近傍のモルタルが破碎され、その程度は衝突速度の増加に伴い著しくなる傾向にある。また、いずれの

表-4 RM 柱試験体一覧

| ID          | Lot | AFRP シート巻立て層数 | x (mm) | M (g) | $V_d$ (m/s) | $V_0$ (m/s) |
|-------------|-----|---------------|--------|-------|-------------|-------------|
| N-30-400    | A   | —             | 30     | 77.6  | 400         | 387         |
| N-30-600    | A   | —             | 30     | 77.9  | 600         | 576         |
| N-30-800    | A   | —             | 30     | 78.1  | 800         | 775         |
| N-30-1000   | A   | —             | 30     | 78.0  | 1000        | 965         |
| N-15-600    | B   | —             | 15     | 78.0  | 600         | 574         |
| N-15-1000   | B   | —             | 15     | 77.7  | 1000        | 982         |
| AF2-30-600  | C   | 2             | 30     | 78.1  | 600         | 583         |
| AF2-30-1000 | C   | 2             | 30     | 77.9  | 1000        | 979         |
| AF2-15-600  | C   | 2             | 15     | 77.9  | 600         | 583         |
| AF2-15-1000 | C   | 2             | 15     | 77.6  | 1000        | 960         |

注) x：帯筋間隔，M：飛翔体質量， $V_d$ ：設定衝突速度， $V_0$ ：実際の衝突速度。

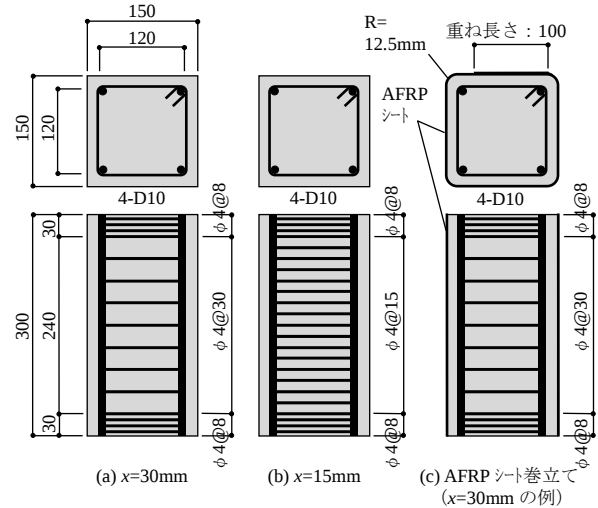


図-1 RM 柱試験体の形状・寸法および配筋

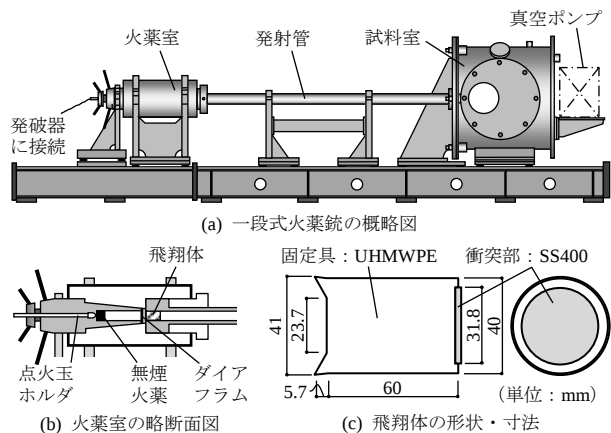


図-2 高速衝突試験装置の概要

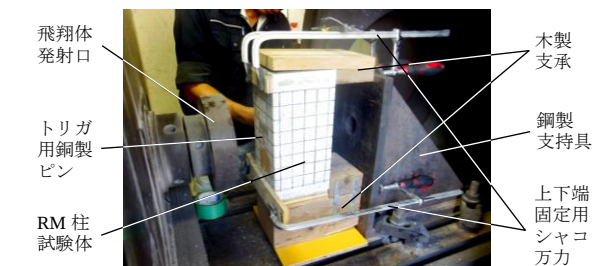


図-3 試料室内における RM 柱試験体の設置状況

衝突速度においても衝突箇所近傍から衝突面の 4 隅に向けて対角線状にひび割れが発生する傾向にあった。

鉄筋の損傷状況に関して、 $V_d=600\text{m/s}$  では飛翔体と接触した帯筋が柱内部に向かって湾曲している様相が観察

されたが、 $V_d=800\text{m/s}$  以上では同帯筋が衝突箇所近傍で破断し、更に  $V_d=1000\text{m/s}$  では破断した帯筋が横方向に大きくはらみ出す様相が確認された。なお、 $V_d=800, 1000\text{m/s}$  では衝突面側の 2 本の主筋も衝突箇所近傍で横方向にはらみ出している様相が観察される。

かぶり部分近傍のモルタルの剥落に関して、 $V_d=600\text{m/s}$  では衝突面近傍で、 $V_d=800\text{m/s}$  以上では衝突面から側面にかけて剥落が生じ、特に  $V_d=1000\text{m/s}$  では側面の大部分が剥落していた。但し、側面の剥落に関しては、必ずしもかぶり部分のみが剥落していた訳ではなく、コア内部からえぐれたように剥落が生じている様相が確認された。

斜めひび割れに関しては、 $V_d=600\text{m/s}$  以上でその発生が明確に認められ、側面の大部分のモルタルが剥落した  $V_d=1000\text{m/s}$  の試験体を見ると、コア内部にも同様のひび割れが発生している様相が観察される。また、輪切り状ひび割れに関しては、いずれも中央から上下 40mm 程度の範囲内で生じていることが確認された。

#### b) 帯筋間隔 15mm の場合

飛翔体貫入状況に関しては、上述の帯筋間隔 30mm の場合と大差は認められない。また、 $V_d=1000\text{m/s}$  において、飛翔体と接触した 3 本の帯筋の破断が認められたが、その横方向へのはらみ出しは帯筋間隔 30mm の場合ほど顕著には認められなかった。

かぶり部分近傍のモルタルの剥落に関しては、 $V_d$  が同一の帯筋間隔 30mm の試験体と比較した場合、やや広範囲で剥落が発生しているように見受けられるが、その深さは全体的にやや浅くなる傾向にあった。斜めひび割れおよび輪切り状ひび割れの発生傾向については、上述の帯筋間隔 30mm の場合とほぼ同様である。

### (2) AFRP シート巻立て補強 RM 柱

表-7 および 8 に AFRP シート巻立て補強 RM 柱の破壊性状を帯筋間隔ごとに示す。

#### a) 帯筋間隔 30mm の場合

$V_d=600\text{m/s}$  では衝突箇所近傍で AFRP シートに繊維破断が生じるとともに、中央から上下約 30mm の位置でシートが繊維方向に裂け、その裂け目に囲まれた帯状のシートが衝突面から側面にかけて剥離していた。但し、同試験体ではモルタルの剥落はほぼ完全に抑止されていた。

$V_d=1000\text{m/s}$  になると、中央から上下約 50mm の位置でシートが繊維方向に裂け、その裂け目に囲まれた帯状のシートが衝突面から裏面に至るまで剥離していた。また、普通 RM 柱の場合と同様に、衝突箇所破断した帯筋が横方向に大きくはらみ出し、剥離したシートの内側のモルタルが衝突面から側面にかけて剥落していた。

#### b) 帯筋間隔 15mm の場合

$V_d=600\text{m/s}$  の試験体では、衝突箇所 AFRP シートが押し抜かれるように破断したが、帯筋間隔 30mm で見ら

表-5 帯筋間隔 30mm の普通 RM 柱の破壊性状

| $V_d (V_0)$         | 衝突面 | 右側面 | 裏面 | 左側面 |
|---------------------|-----|-----|----|-----|
| 400m/s<br>(387m/s)  |     |     |    |     |
| 600m/s<br>(576m/s)  |     |     |    |     |
| 800m/s<br>(775m/s)  |     |     |    |     |
| 1000m/s<br>(965m/s) |     |     |    |     |

表-6 帯筋間隔 15mm の普通 RM 柱の破壊性状

| $V_d (V_0)$         | 衝突面 | 右側面 | 裏面 | 左側面 |
|---------------------|-----|-----|----|-----|
| 600m/s<br>(574m/s)  |     |     |    |     |
| 1000m/s<br>(982m/s) |     |     |    |     |

れたようなシート剥離は殆ど生じていなかった。但し、 $V_d=1000\text{m/s}$  になるとその効果は顕著には認められず、帯筋間隔 30mm の場合と類似した破壊性状を呈した。

### 3.2 裏面のひずみ応答

図-4 に代表的な RM 柱裏面のひずみ応答を示す。柱試験体のひずみ応答は、圧縮波到達後に引張側に転じる板状試験体のそれ<sup>3)</sup>とは異なり、圧縮ひずみが殆ど生じ

表－7 帯筋間隔 30mm の AFRP シート巻立て補強 RM 柱の破壊性状

| $V_d (V_0)$         | 衝突面 | 右側面 | 裏 面 | 左側面 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| 600m/s<br>(583m/s)  |     |     |     |     |
| 1000m/s<br>(979m/s) |     |     |     |     |

ることなく引張ひずみが増大する傾向にある。

帯筋間隔 30mm の普通 RM 柱に着目すると、裏面中央から 30mm 離れた位置でひずみが殆ど生じておらず、衝突から 60～80 $\mu$ s 前後以降で裏面中央に引張ひずみが検出されていることから、同箇所が局部的に押し出されるように変形していたものと推察される。これに対し、試験体 N-15-600 では、裏面中央の引張ひずみと併せて、裏面中央から 30mm の位置でも約 90 $\mu$ s 以降で引張ひずみの緩やかな増大が認められることから、帯筋間隔を狭くすることで局部応答が緩和され、若干ではあるが全体応答に近い変形状へと変化する傾向にあったものと推察される。但し、同じ帯筋間隔であっても  $V_d=1000$ m/s と衝突速度が大きい場合にはその傾向は認められず、裏面中央のみに引張ひずみが生じる局所的な変形状を示した。

AFRP シート巻立て補強 RM 柱に関しては、シートが繊維方向に裂けることで計測中に引張破断が生じたゲージが多く見られたため、必ずしも明確なことは言い難いが、帯筋間隔が狭く、尚且つ衝突速度が低い場合ほど引張ひずみが低減される傾向があるように見受けられる。

### 3.3 モルタルの剥落状況

#### (1) 剥落総体積

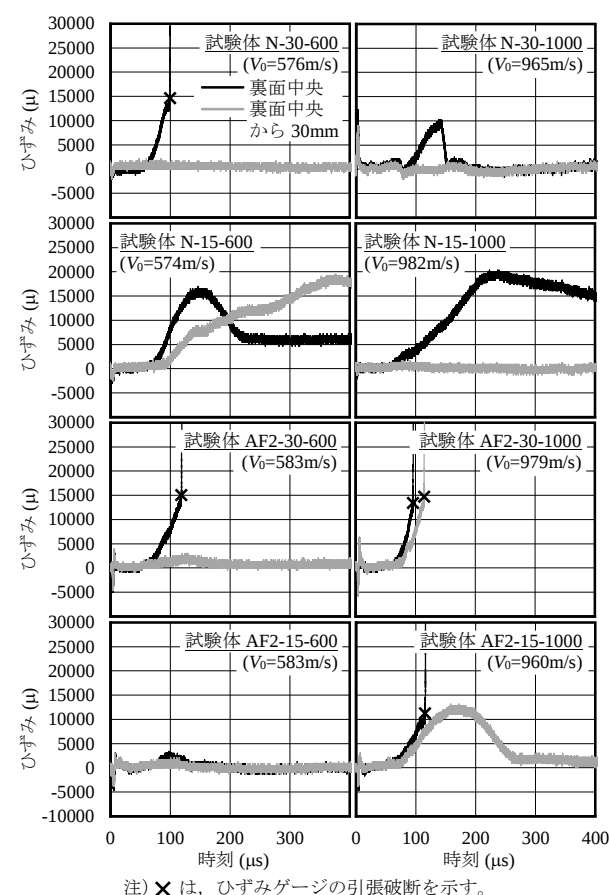
図－5 に衝突速度と剥落総体積との関係を示す。なお、剥落総体積は、高速衝突試験前後の RM 柱試験体の質量差を当該モルタルの密度で除すことで求めた。いずれの仕様においても衝突速度の増加に伴い剥落総体積が増大する性状が認められるが、その程度は、帯筋間隔が狭く、尚且つ AFRP 巻立て補強を施したもののほど小さくなっていることが判る。

#### (2) 貫入および衝突面における剥落状況

図－6 に衝突速度と貫入深さおよび衝突面における剥落面積との関係を示す。衝突速度の増加に対して貫入深さがほぼ比例的に増大する性状を示していることが判る。

表－8 帯筋間隔 15mm の AFRP シート巻立て補強 RM 柱の破壊性状

| $V_d (V_0)$         | 衝突面 | 右側面 | 裏 面 | 左側面 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| 600m/s<br>(583m/s)  |     |     |     |     |
| 1000m/s<br>(960m/s) |     |     |     |     |



図－4 代表的な RM 柱裏面のひずみ応答

また、飛翔体と接触する帯筋本数や AFRP シート巻立て補強が貫入深さに及ぼす影響は殆ど認められない。剥落面積に関しては、衝突速度に関わらず帯筋間隔の影響は殆ど認められないものの、AFRP シート巻立て補強 RM 柱において普通 RM 柱よりも低減される傾向にあり、これは、同試験体ではモルタル剥落面積が帯状のシート剥離箇所の面積によって決定されるためである。

#### (3) 側面における剥落状況

図－7 および 8 に衝突速度と両側面における最大剥落

深さおよび剥落面積との関係を示す。

帯筋間隔 30mm の普通 RM 柱に着目すると、衝突速度の増加に対してほぼ比例的に最大剥落深さが増大していることが判る。また、衝突速度 600m/s 程度では普通および巻立て補強 RM 柱の両方において帯筋間隔の影響は殆ど認められず、側面のシートが残存しているため巻立て補強 RM 柱で最大剥落深さが 0 となっているが、1000m/s 程度になるとシートが完全に剥離することで巻立て補強の効果が認められなくなり、むしろ帯筋間隔が狭いものほど最大剥落深さが低減される傾向にある。

普通 RM 柱の剥落面積に関して、衝突速度 600m/s 程度であれば、帯筋間隔が狭いものほどやや広範囲に及ぶ傾向にある。なお、巻立て補強 RM 柱において剥落面積が普通 RM 柱よりも低減されている点は、上述の衝突面の場合と同様である。

ところで、本実験では打設面が右側面となるように RM 柱試験体を設置して高速衝突試験を行ったが、最大剥落深さは右側面（打設面）の方で大きくなっているものの、剥落面積については逆に左側面（型枠面）の方で僅かに大きくなる傾向が認められた。

#### (4) 裏面における剥落状況

図-9 に衝突速度と裏面における最大剥落深さおよび剥落面積との関係を示す。本実験の範囲内で、衝突速度が約 1000m/s の普通 RM 柱において僅かに剥落が認められた程度であった。図-4 において裏面に圧縮ひずみが殆ど生じていないことも考慮すると、板状試験体<sup>1-3)</sup>に比して衝突面から裏面までの距離が大きく、尚且つ裏面よりも衝突箇所に近い位置（側面）に自由表面が存在する柱試験体においては、裏面よりむしろ側面における剥落を抑止することが重要となることが予想される。

#### 3.4 AFRP シートの剥離状況

AFRP シートの剥離は、剥離診断器<sup>6)</sup>を用いて打音により検出した。その要領としては、試験体表面に記入した間隔 30mm のグリッドの交点に診断器打撃部を当て、その際の診断結果を記録した。なお、シート剥離総面積は、上記測定点における診断結果を、同箇所を中心とする 30mm 四方の範囲の診断結果の代表値と見做して算出した。また、安全側の評価とするため、「剥離の恐れ有」の診断結果は剥離面積中に含めることとした。

表-9 および 10 にシート剥離診断結果を帯筋間隔ごとに示す。同表より、シート剥離はシートがモルタル表面から完全に剥離した帯状の部分近傍に集中的に生じていることが判る。また、シート剥離総面積に着目すると、帯筋間隔が狭いものほど総面積が低減する傾向が認められ、その傾向は  $V_d=600\text{m/s}$  において顕著である。3.1 節で述べたように、衝突箇所近傍で主筋および帯筋の横方向へのはらみ出しが認められたことも併せて考慮すると、

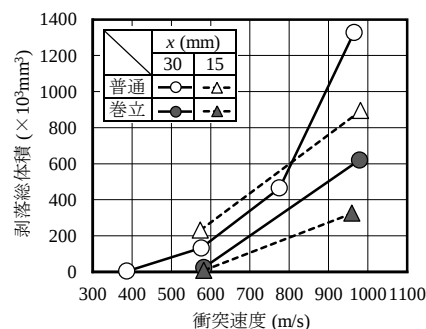


図-5 衝突速度と剥落総体積との関係

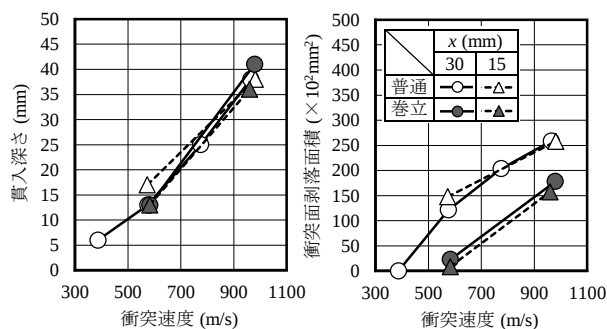


図-6 衝突速度と貫入深さおよび衝突面における剥落面積との関係

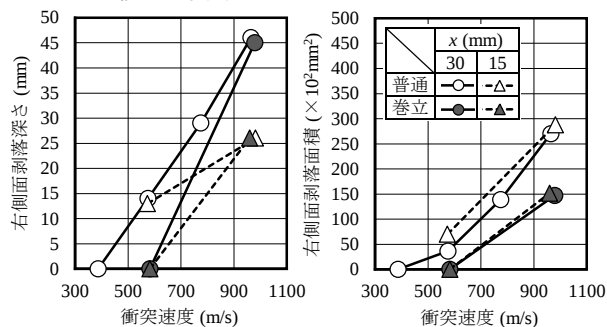


図-7 衝突速度と右側面における最大剥落深さおよび剥落面積との関係

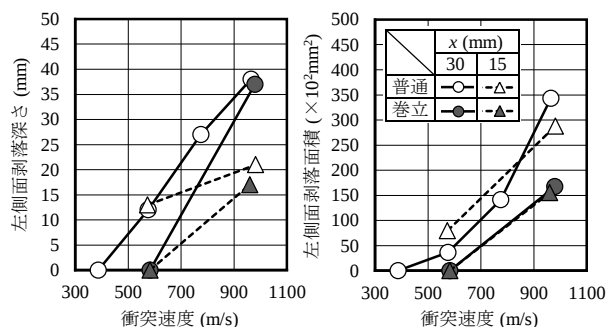


図-8 衝突速度と左側面における最大剥落深さおよび剥落面積との関係

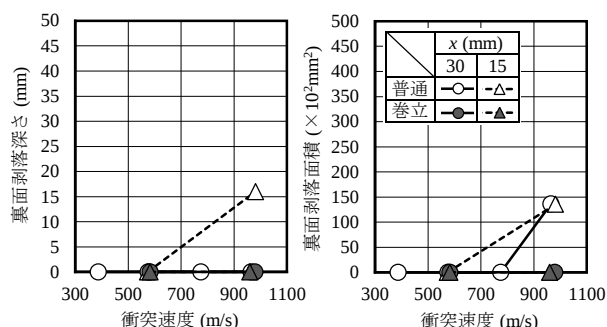


図-9 衝突速度と裏面における最大剥落深さおよび剥落面積との関係

表一 9 帯筋間隔 30mm の AFRP シート巻立て補強 RM 柱のシート剥離診断結果

| $V_d$ ( $V_0$ )     | 衝突面 | 右側面 | 裏面 | 左側面 | $s_{ad}$                 |
|---------------------|-----|-----|----|-----|--------------------------|
| 600m/s<br>(583m/s)  |     |     |    |     | 36000<br>mm <sup>2</sup> |
| 1000m/s<br>(979m/s) |     |     |    |     | 72900<br>mm <sup>2</sup> |

注) ○: 健全, ●: 剥離の恐れ有, ●: 完全に剥離,  $s_{ad}$ : 剥離総面積。

衝突箇所からその外周部へ向けてモルタルの押出しが生じ、それが帯筋によって横拘束されたためにシート剥離が軽減された可能性が推察される。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で、以下の知見が得られた。

- 1) 普通 RM 柱の破壊性状は、A: 飛翔体の貫入、B: 衝突面から側面へと至るかぶり部分近傍の剥落、C: 衝突箇所近傍から支承位置近傍へと至る斜めひび割れの発生、および D: 衝突箇所近傍から裏面へと至る輪切り状ひび割れの発生に特徴付けられる。
- 2) モルタルの剥落総体積は、帯筋間隔が狭く、尚且つ AFRP シート巻立て補強を施したもののほど低減される傾向にある。
- 3) 貫入深さは、衝突速度の増加に対してほぼ比例的に増大し、飛翔体と接触する帯筋本数や AFRP シート巻立て補強の影響を殆ど受けない。
- 4) 側面の最大剥落深さは、AFRP シートがモルタル表面から完全に剥離しない限り巻立て補強によりほぼ完全に抑止されるが、シートが剥離した場合には帯筋間隔が狭いもののほど低減される傾向にある。
- 5) 衝突面および側面の剥落面積は、AFRP シート巻立て補強を施した場合にはシートがモルタル表面から完全に剥離した箇所の面積と一致し、普通 RM 柱の場合に比して局所に抑えられる傾向にある。
- 6) 衝突面から裏面までの距離が大きく、尚且つ裏面よりも衝突箇所に近い位置に自由表面（側面）が存在する RM 柱においては、裏面よりむしろ側面の剥落を抑止することが重要となることが推察された。
- 7) 帯筋間隔を狭くするほどシート剥離が軽減される傾向にあったことから、衝突箇所からその外周部へ向けてモルタルの押出しが生じ、それが帯筋によって横拘束されたためにシート剥離が軽減された可

表一 10 帯筋間隔 15mm の AFRP シート巻立て補強 RM 柱のシート剥離診断結果

| $V_d$ ( $V_0$ )     | 衝突面 | 右側面 | 裏面 | 左側面 | $s_{ad}$                 |
|---------------------|-----|-----|----|-----|--------------------------|
| 600m/s<br>(583m/s)  |     |     |    |     | 14400<br>mm <sup>2</sup> |
| 1000m/s<br>(960m/s) |     |     |    |     | 67500<br>mm <sup>2</sup> |

注) ○: 健全, ●: 剥離の恐れ有, ●: 完全に剥離,  $s_{ad}$ : 剥離総面積。

能性が推察された。

#### 謝辞

本実験は、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）よりご支援を受け、同研究所の衝撃実験室にて実施されました。実験に際し、外本和幸教授、片山雅英客員教授、田中茂助教、草野健技術補佐員、戸田善統技術専門職員、濱崎ありさ技術職員および大学院生の長渡健之氏よりご協力いただきました。また、防衛大学校の別府万寿博教授および前田工織（株）からは有益なご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 防衛施設学会：高速衝突を受けるコンクリート構造物の局部破壊に対する設計ガイドライン（案），2014
- 2) 別府万寿博，三輪幸治，高橋順：高速衝突を受けるコンクリート板の裏面剥離発生メカニズムと連続繊維シート補強の効果，土木学会論文集 A1, Vol.68, No.2, pp.398-412, 2012.6
- 3) 山口信ほか：耐爆性能に優れる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, pp.423-428, 2015.10
- 4) 川合伸明，三澤智史，篠原保二，林静雄：高速飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート造柱部材の破壊に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, pp.889-894, 2008.7
- 5) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強設計指針，コンクリートライブラリー101, 2000
- 6) 山口信ほか：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，Vol.77, No.674, pp.637-646, 2012.4