

# 論文 高速衝突によるセメント系材料の損傷と変性に対する含水率および混和材の影響

菊地 晃平\*1・酒井 雄也\*2・渡辺 圭子\*3・勝木 太\*4

**要旨**：本研究は、飛翔体衝突によるセメント系材料の損傷と変性に対する含水率や混和材の影響を理解することを目的とした。セメントペーストおよびモルタルを対象に高速衝突試験を実施した結果、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を使用した試料では、衝突によるひび割れ本数が抑制される傾向が見られた。飽水条件のセメントペーストでは衝突部付近の空隙が粗大化する一方、含水率の低いペーストでは緻密化したことから、衝突が空隙構造に与える影響は含水率により異なるものと考えられる。一方、モルタルでは飽和した供試体と乾燥した供試体の両方で空隙構造が粗大になった。

**キーワード**：高速衝突, 損傷, 変性, 含水率, 混和材, 空隙構造分析, 熱分析, 温度測定

## 1. はじめに

コンクリート構造物には自重や地震荷重などの様々な荷重が作用するが、その1つとして衝撃荷重がある。衝撃荷重を受けるコンクリートとして、例えば自動車の衝突が想定されるコンクリートフェンスや落石などの落下物を防護するロックシェッド<sup>1)</sup>、台風や竜巻、爆発などによる飛翔体が衝突する構造物<sup>2)</sup>がある。また、施設によっては、銃弾やミサイルなどの高速飛来物に対する安全性を担保する必要がある。上記のように、コンクリート構造物には様々な衝撃荷重が作用しうするため、これまでに衝撃荷重に対するマクロな応答や挙動、設計手法の構築<sup>3)</sup>、衝撃数値シミュレーション<sup>4)</sup>が精力的に進められてきた。数値シミュレーションでは、高速衝突におけるコンクリートの応答を再現するため、衝突により空隙が緻密化することを仮定して、衝突時にコンクリートの剛性を増加させることがある<sup>5)</sup>。

一方、衝撃により生じるセメントペースト内のミクロな構造や組成の変化については、ほとんど検討がなされていない。Sakai et al.<sup>6)</sup>は、セメントペーストに対して高速衝突試験を行い、衝突によりセメントペーストの空隙構造が粗大化する一方で、組成や結晶構造にはほとんど変化が生じていないことを報告している。J.Granら<sup>7)</sup>によって、飛翔体の衝突でコンクリート内に約200MPaという高い三軸応力が発生することが確認されており、また酒井ら<sup>8)</sup>は、セメントペーストを対象とした高圧条件下での三軸試験で空隙構造が緻密化することを確認しているため、力学的な影響のみでは、衝突による空隙の粗大化を説明することは困難である。Sakai et al.<sup>6)</sup>は、衝突によるプラズマの発生を報告し、衝突に伴う熱の発生によって、ペースト内の自由水が蒸発し、乾燥が生じたこ

とにより空隙が粗大化する一方で、気化熱により温度上昇が抑制されたことで、組成などの変化が生じなかった可能性を指摘している。衝突により空隙構造が粗大化するのであれば、数値シミュレーションにおいて衝突部の緻密化を仮定することは不適切ということになる<sup>5)</sup>。ただ、空隙構造が粗大化する条件については明らかになっていない。

そこで本研究では、セメントペーストおよびモルタルの衝突部の空隙構造が、どのような時に粗大化するかを確認することを目的として、配合や含水率を変化させた検討を実施した。また酒井ら<sup>9)</sup>による高圧条件下での三軸試験において、高炉スラグ微粉末（以下、BFSと記す）や高炉スラグ細骨材（以下、BFSSと記す）を用いた場合に变形性能が向上することが報告されていることから、本研究ではこれらの材料が損傷や空隙構造の変化に与える影響についても併せて検討した。さらに、衝突時に生じる熱が水和物相に与える影響を理解するため、熱分析を実施するとともに、衝突時のペースト内の温度測定も実施した。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用した材料の組成および物性

本研究は普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント、密度 3.15g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3480cm<sup>2</sup>/g）、普通細骨材として砕砂（表乾密度 2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.32%、粗粒率 3.04）、BFS（高炉スラグ微粉末 4,000cm<sup>2</sup>/g 相当）、BFSS（JIS BFS5、絶乾密度 2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率 2.55%、粗粒率 3.27）を使用した。

### 2.2 分析用の供試体作製

本研究では、セメントペーストとモルタル供試体を作

\*1 芝浦工業大学 工学部土木工学科 (学生会員)

\*4 芝浦工業大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

\*2 東京大学 生産技術研究所講師 工博 (正会員)

\*3 立命館大学 理工学部機械工学科教授 工博

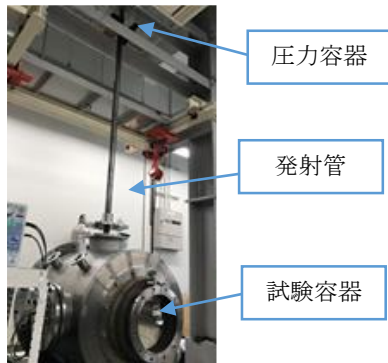


図-1 縦型無被膜ガス銃の外観

製した。セメントペーストの水結合材比 (W/B) は 40%、モルタルの W/B は 45% とし、供試体の寸法は高さ 10cm、直径 10cm とした。当初はセメントペーストの W/B も 45% で実施する予定であったが、打設時に分離が見られたため 40% に変更した。セメントペースト供試体で普通セメントと BFS を使用した。普通セメントを BFS に置換した割合を 0, 30, 70% とし、それぞれの供試体名を C0, C30, C70 とした。いずれも打設後、24 時間で脱型し、20°C で水中養生を開始した。C0 と C70 は、材齢 8 週で、C30 は、材齢 5 週で水中養生を終了し、衝突試験を実施した。また、後述する低速での衝突試験用の普通セメントペーストは、打設後 24 時間で脱型し、28 日間の水中養生を与えた後に衝突試験を実施した。モルタル供試体の作製には、普通セメントと BFS、BFSS、砕砂を使用した。普通モルタル(M0)と、普通細骨材を BFSS で 100% 置換したモルタル(M0\_100)、細骨材を BFSS で 100% 置換し、普通セメントを BFS で 50% 置換したモルタル(M50\_100)を作製した。打設から 24 時間後に脱型して、9 週間水中養生した後に、衝突試験を実施した。

含水率を変化させる供試体は、水セメント比 40% の普通セメントペーストで作製した。打設から 24 時間後に脱型し、1 週間水中養生した。その後、硫酸カリウム、炭酸カリウムの飽和水溶液により相対湿度(RH)をそれぞれ 90%、62% に調湿したポリエチレン製の袋の中で密封保存し、3 週間後に衝突試験を実施した。加えて、40°C (10%RH) 乾燥させた普通セメントペーストおよび普通モルタルについても検討した。いずれも打設から 24 時間後に脱型し、20°C の水中養生をした。普通セメントペースト(C0-Dry)は材齢 7 週で水中養生を終了し、1 週間 40°C で乾燥してから衝突試験を実施した。普通モルタル(M0-Dry)は材齢 13 週で水中養生を終了し、15 日間 40°C で乾燥してから衝突試験を実施した。40°C に設定した理由は、40°C であれば水和物に大きな変性を生じさせないことが報告されているためである<sup>10)</sup>。衝突試験に用いるガス銃を使用可能な日時が限られており、各試験条件で養生期間や乾燥期間が一定でないため、考察の際に注意が必要

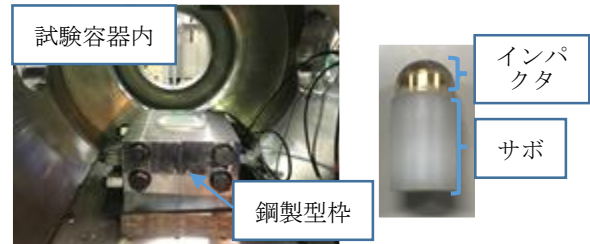


図-2 試験容器内の鋼製型枠

図-3 飛翔体

である。これらの乾燥した供試体の含水率は以下の方法で算出した。供試体から 10g 程度の破片を採取し、湿潤質量( $M_t$ )を測定した。次に、24 時間での質量変化が 0.01g 以下になるまで水に浸漬させて、その時の質量を飽和質量( $M_{sat}$ )とした。その後、24 時間での質量変化が 0.01g 以下になるまで 105°C 乾燥させた。その時の質量を絶乾質量( $M_d$ )とした。含水率  $n$  の計算式を以下の式(1)に示す。

$$n(\%) = \frac{M_t - M_d}{M_{sat} - M_d} \times 100 \quad (1)$$

式(1)を用いて算出した結果、C0-RH90, C0-RH62, M0-Dry, C0-Dry はそれぞれ含水率が 95%, 86%, 67%, 60% であった。

### 2.3 高速衝突試験

衝突試験には縦型無隔膜ガス銃を用いた。一般的なガス銃では、高压ガスにより隔膜が破れて飛翔体が発射されるため、破れた隔膜の破片も飛来し、供試体に損傷を与える可能性がある。本研究で用いたガス銃では、隔膜を使用せずに飛翔体を発射するため、上記の問題を回避している。図-1 に縦型無隔膜ガス銃の外観を示す。最上部は圧力容器であり、ヘリウムガスの圧力により発射された飛翔体は発射管を通り、下部の試験容器内に設置された円柱試験体上面の円の中心に衝突する(図-2)。飛翔体の外観を図-3 に示す。飛翔体のインパクタは真鍮製であり、直径 15mm の半球状である。飛翔体のサボはポリエチレン製であり、直径 15mm、高さ 20mm の円柱状である。飛翔体質量は約 15g である。飛翔体のサボ部には磁石が入っており、発射管と試験容器の接続部にあるコイル内を飛翔体が通過する際に、電磁誘導が生じる。この電磁誘導による信号の時間差から飛翔体の速度を算出した。飛翔体の速度は約 420m/s とした。ただし、衝突速度の影響を検討するため、低速の衝突試験として約 200m/s に設定した試験も実施した。

衝突試験においては、供試体を鉄製のリングの上に設置することで、供試体の底面が拘束されないようにするとともに、鋼製の型枠を使用して側方から拘束を与えることで、高速衝突後に供試体が飛散して分析が困難なることを回避した(図-2)。衝突の瞬間はハイスピード

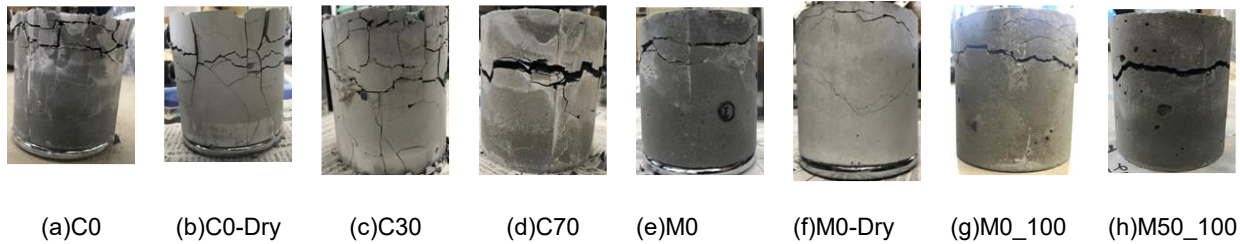


図-4 衝突後の各種供試体の外観（側面）

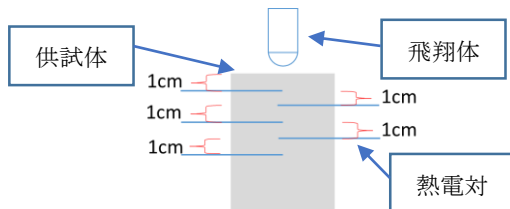


図-5 熱電対の配置イメージ図（側面）

カメラを用いて撮影した。

## 2.4 分析方法

### (1) 試料採取方法

本研究では、衝突による供試体の変性を分析するため、衝突により影響を受けた領域（以下、衝突部と記す）とそうでない部分（以下、非衝突部と記す）を区別する必要がある。Sakai et al.<sup>6)</sup>により、衝突部では変色が生じることが報告されていることから、衝突試験後に変色が確認された場合には、その部分を衝突部とみなして試料を採取した。また非衝突部に関しては、変色領域から離れた位置からサンプルを採取した。

### (2) 空隙構造分析

水銀圧入法により空隙構造分析を実施した。衝突試験における変色部と非変色部のサンプルを砕いて 5mm 角程度とし、それをアセトンに 24 時間浸せきして水和を停止させた。そして、D-dry 法により 24 時間、試料を乾燥させたのちに空隙構造分析を行った。

### (3) 熱分析

衝突試験後に衝突部と非衝突部から採取した試料を対象に、TG-DTA による分析を実施した。200 $\mu$ m 以下に粉砕した約 10mg の粉末を対象に、窒素雰囲気下で毎分 20 $^{\circ}$ C の速度で 30 $^{\circ}$ C から 1000 $^{\circ}$ C まで上昇させることで TG-DTA を実施した。分析前に乾燥処理は行っていない。

## 2.5 衝突時のペースト試料の温度測定

衝突によるセメントペースト内の温度変化を、熱電対（種類：K、熱接点形状：接地型、常用限界温度：600 $^{\circ}$ C）により測定した。図-5 に示すように、衝突面から深さ 1cm ごとに合計 5 本の熱電対を埋め込んだ。円柱供試体を上部から見た際に、円の中心に温測接点の先端が位置するように熱電対を配置した。飛翔体衝突面から深さ 1～5cm に配置された熱電対を、それぞれ D1、D2、D3、

D4、D5 とする。打設から 24 時間後に脱型し、プラスチック製のフィルムで供試体を密封した。そして、15 日間の封緘養生（20 $^{\circ}$ C）を行った後に試験を実施した。本供試体においても、衝突試験時には底面に鋼製のリングを設置し、拘束用の鋼製型枠を使用した。熱電対による測定値はスコープコーダで 0.5ms ごとに記録した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 衝突試験

#### (1) 衝突時の現象

Sakai et al.<sup>6)</sup>によって、高速衝突時のプラズマの発生と衝突部の変色が報告されているが、本検討のいずれのケースにおいてもプラズマと変色が確認された。さらに、衝突試験後の C0（低速）の衝突部と非衝突部で含水率を測定したところ、それぞれ 8.7%、19.9%であり、衝突部では非衝突部より乾燥していることが確認された。

#### (2) 各種供試体の耐衝撃性能評価

まず、セメントペースト供試体やモルタル供試体の衝突試験後のひび割れの様子を図-4 に示す。供試体の円周方向に存在する大きなひび割れは、型枠を外す際に広がったものである。まず、BFS 置換率を変えた C0 と C30 ではほとんど差異はなかったが、C70 では、ひび割れ本数が抑制されていることが確認できる。セメントペースト C0 と比較するとモルタル M0 においてひび割れが抑制されていることが確認できる。またモルタル間でも、特に M50\_100 のひび割れ本数が少ない。以上の結果より、セメントよりモルタルにおいてひび割れ本数が抑制され、また BFS を高置換した供試体において衝突によるひび割れ本数が抑制される傾向が見られた。BFS を高置換したペースト供試体では三軸試験において高い変形性能を示すことが報告<sup>9)</sup>されており、これによりひび割れ本数が抑制された可能性がある。

### 3.2 衝突試験後の分析

#### (1) 空隙構造分析

空隙構造の測定結果を図-6 に示す。まず、セメントペーストの空隙構造分析結果を見ると、Sakai et al.<sup>6)</sup>の研究と同様に飽水条件のセメントペーストでは、衝突部の空隙構造が粗大化している。空隙構造の粗大化は 420m/s

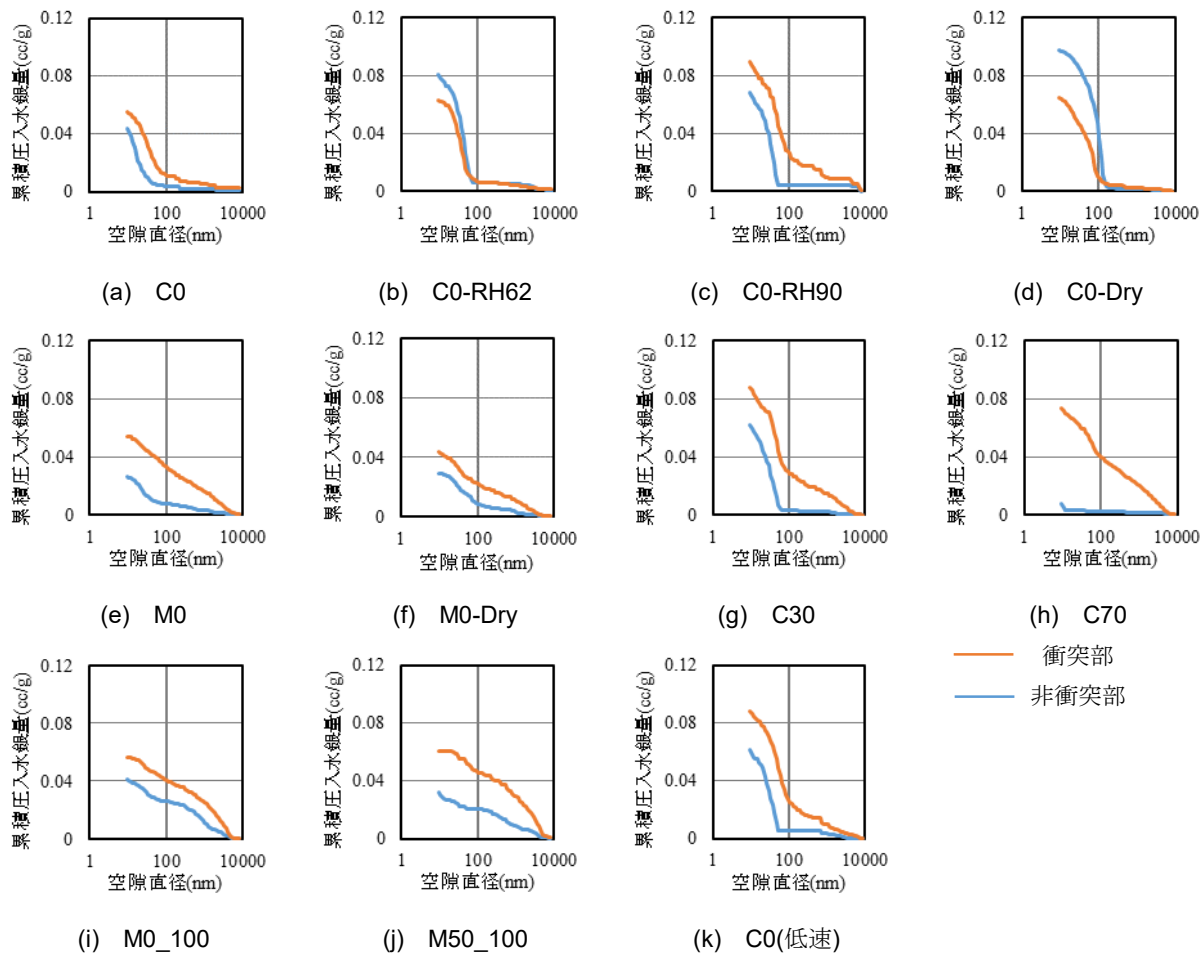


図-6 MIP 分析結果

のみでなく、200 m/s での衝突でも生じた (図-6 (k))。

BFS を置換したセメントペースト供試体においても、C0 と同様に空隙の粗大化が生じた (図-6 (g), (h))。ここで、C70 の非衝突部の結果で累積圧入水銀量がほぼ 0 になっているが、2 度の測定で同様の結果が得られたため、測定ミスではなく、非常に緻密になっているものと考えられる。ポズラン反応によるものと考えられるが、詳細は不明である。BFS の使用により空隙率が大幅に減少する例は過去にも報告されている<sup>11)</sup>。C70 は衝突試験後に大きく粗大化する結果となった。

ここで、空隙構造の粗大化の原因について考察する。空隙の粗大化が起きた供試体において、広い範囲の空隙径で粗大化が生じる (図-6)。一方、空隙の緻密化が生じたセメントペースト (図-6 (b), (d)) では、100nm 以下という狭い範囲の空隙が緻密化した。黒沢ら<sup>12)</sup>は、乾燥による C-S-H の構造変化では直径 10nm から 100nm の空隙が粗大化することを報告している。よって、単純な乾燥による空隙の粗大化では、100nm 以上の比較的大きな空隙が粗大化するような現象は起こりにくいと考えられ、乾燥以外の要因も存在するものと考えられる。衝突部で含水率が低下しているため、乾燥以外の要因として

は、飛翔体の衝突により生じる熱によって空隙内の水分が蒸発し、それに伴う水蒸気の膨張圧の影響が考えられる。衝突により C70 が大きく粗大化したのは、空隙構造が緻密なため、水蒸気の逃げ道が少なかったためと推察される。乾燥により含水率を減少させた供試体では、上記原因による空隙の粗大化が抑制され、衝突によって生じる三軸応力の力学的な影響により緻密化したと考えられる。三軸応力による緻密化は、酒井ら<sup>8)</sup>が実施した高圧三軸試験において報告されている。RH62%で乾燥した供試体の空隙構造は緻密化する一方で、90%RH で乾燥した場合には粗大化したことから熱的な影響により粗大化させる作用と、三軸応力により緻密化させる作用の均衡する点が 90%RH と 62%RH の間に存在する可能性がある。

モルタル供試体では、飽水条件の普通モルタルや BFS と BFSS を置換した供試体でも、セメントペースト供試体と同様に空隙構造が粗大化した (図-6 (e), (i), (j))。しかし、40°C 乾燥させたモルタルは、セメントペーストの場合と異なり緻密化せず、空隙構造が粗大化した (図-6 (f))。この結果も、分析を 2 回実施することで測定ミスではないことを確認した。モルタルでは乾燥状態でも

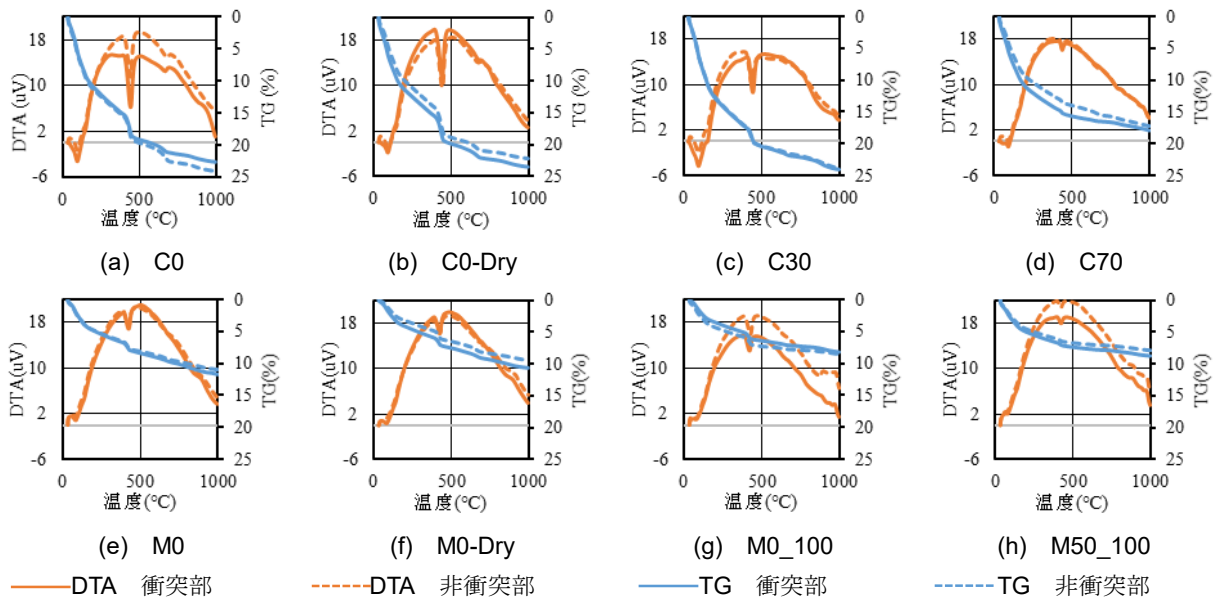


図-7 熱分析結果

空隙が粗大化した原因は不明であるが、衝突に起因する応力の状態が細骨材の存在により複雑となり、組織に損傷が生じた可能性が考えられる。

## (2) 熱分析

熱分析の結果を図-7に示す。いずれの供試体においても熱重量分析(TG)では顕著な違いは見られなかった。示唆熱分析(DTA)においても、形状に大きな違いがないことから、Sakai et al.<sup>6)</sup>の報告と同様に、衝突により生じた熱は空隙構造を変化させた一方、セメントペーストの水和物相の種類には影響を及ぼさなかったものと考えられる。3.1(1)でも述べたように、衝突部では非衝突部より含水率が低いことが確認されたが、TG-DTAでは100°C以下でほとんど違いが見られなかった。原因として、試料の粉碎処理の間に乾燥した影響や、熱分析では測定を30°Cから開始しているため、それ以下の温度で、水分がある程度蒸発した影響が考えられる。

## (3) 温度測定

衝突による温度測定の結果を示す(図-8)。温度測定の結果において、衝突前に温度に幅があるが熱電対が600°Cまで測定できるため、数°Cの誤差が生じ、ノイズが入っている。衝突による変色領域はD3にまで及んでいたことを確認した。衝突面付近の熱電対D1は衝突により温度が低下したことを示しているが、衝突によってD1が破損したため、正確な温度測定ではないと考えられる。一方、熱電対D2、D3は損傷しておらず、供試体への飛翔体の衝突直後に、D2は約56°C、D3では約50°Cとなった。またD4の温度も30°C程度に上昇しているが、D4より深い箇所に埋め込んだ熱電対には、衝突によって生じる熱の影響はほとんど見られなかった。

衝突による粗大化の原因の1つとして、3.2(1)におい

て衝突に起因する熱により水分が気化することを挙げた。通常、短期間での水の気化には100°C以上の温度が必要であるが、今回は56°C程度にとどまった原因として、熱電対の温度測定部の全体が水に接しておらず、ペーストや不飽和の空隙にも接していたため、それらを平均化した温度が測定されたという可能性が考えられる。酒井らはパルスレーザーを使用しごく短時間の加熱によるセメントペーストの変化を検討しており<sup>13)</sup>、衝突部と同様の変色を確認された時点での温度が約60°Cまで上昇したこと、この場合に空隙構造は粗大化する一方で、加熱された部分と未加熱部分でTG-DTAによる違いがほとんどなかったことを確認している。上記実験は水中養生後にパルスレーザーで加熱していることから、空隙構造の粗大化の原因として、水和物の乾燥と急激な水分気化による膨張圧が考えられる。本測定で得られた温度は、上記と対応する結果となった。したがって、衝突から深さ1cmの箇所では測定値が得られなかったものの、本検討で得られた温度変化の値はいずれも、セメントペーストの水和物相の変化が生じる温度に達していなかったものと考えられる。

## 4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- セメントペーストと比較して、モルタル供試体では高速衝突によるひび割れ本数が抑制された。またBFSを高置換したセメントペーストおよびモルタルにおいても、ひび割れ本数が抑制される傾向が見られ、耐衝撃性能が高い可能性を指摘した。
- 飽和したセメントペーストでは高速衝突により空隙構造が粗大化する一方で、乾燥したセメントペー

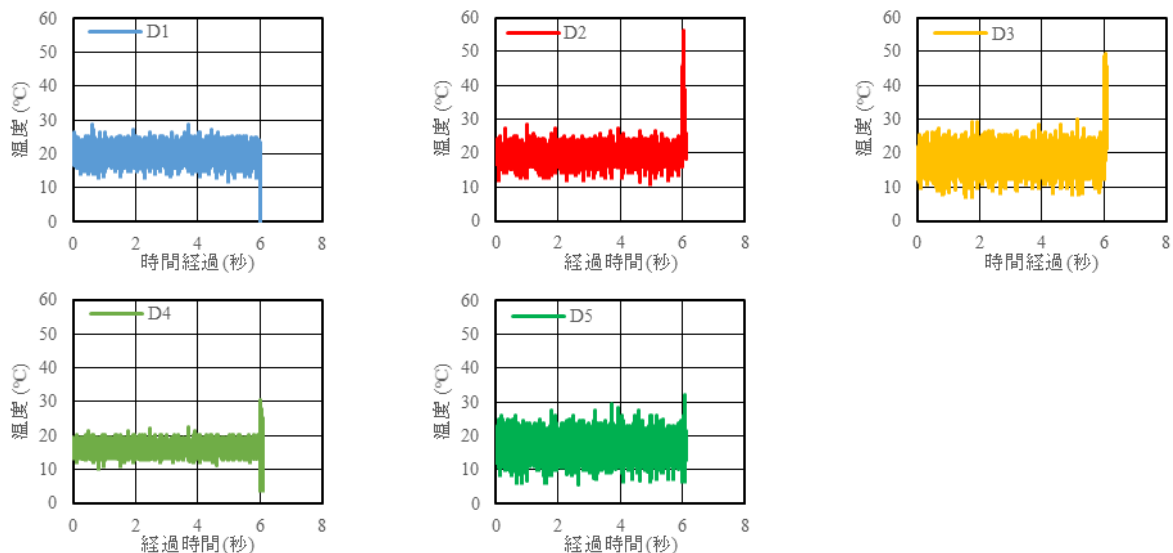


図-8 温度測定結果

ストでは空隙構造が緻密化した。原因として、衝突時の熱により供試体内部の水分が蒸発し、その際の気体の膨張圧が影響している可能性を指摘した。

- ・ 飽和したモルタルでも高速衝突により空隙構造が粗大化した。乾燥させた場合にも空隙構造が粗大化した。細骨材の存在により、力学的に空隙を緻密化させる作用が抑制された可能性を指摘した。
- ・ 熱電対による衝突時の温度測定を行った結果、温度上昇は50°C程度にとどまった。TG-DTAの結果、衝突部と非衝突部での違いはほとんど見られなかったが、これは温度上昇が小さかったためと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学—構造物の衝撃設計の基礎, 森北出版, 2008
- 2) 別府万寿博: 高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊とその評価方法, 高圧力の科学と技術, Vol.24, No.1, pp.21-28, 2014
- 3) 社団法人土木学会 構造物の性能照査型衝撃設計に関する研究小委員会: 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計, 2013
- 4) 園田佳巨, 後藤航: SPH法を用いたコンクリート版の衝撃貫通破壊に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp1141-1148, 2017.3
- 5) L.F.Pereira, J.Weerhejirn, L.J.Sluys: Simulation of compaction and crushing of concrete in ballistic impact with a new damage model, International Journal of Impact Engineering, Vol.111, pp.208-221, Jan.2018
- 6) Y. Sakai, I. Sikombe, K. Watanabe, H. Inoue: Microscopic Change in Hardened Cement Paste Due to High-Speed Impact, Preprints, 2018120074, 2018
- 7) J.Gran and D.Frew: In-target radial stress measurements from penetration experiments into concrete by ogive-nose steel projectiles, International Journal of Impact Engineering, Vol.19, No.8, pp715-726, 1997
- 8) 酒井雄也, 中谷正生, 竹内昭洋, 岸利治: 高圧条件下におけるセメントペーストの挙動と変形機構の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.199-206, 2016
- 9) 酒井雄也, 岸利治: 高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたセメントペーストおよびモルタルの高圧作用下での変形挙動, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, No1, pp.342-348, 2017
- 10) セメント硬化体委員会報告書: Report of committee on properties and micro structure of hardened cement, セメント協会, pp.273-289, 2001.5
- 11) 辛軍青, 呉承寧: セメント硬化体の細孔構造に及ぼす各種混和材の影響, プレストレストコンクリート工学会 第24回シンポジウム論文集, pp. 551-556, 2015
- 12) 黒沢利仁: C-S-Hの構造変化に及ぼす外的要因の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.65, No.1, pp.146-152, 2011
- 13) 酒井雄也, Ivwanaji SIKOMBE, 井上博之: パルスレーザーによるごく短時間の加熱によるセメントペーストの変化, 生産研究, Vol.70, No.4, pp.333-336, 2018