

# 論文 剛および柔飛翔体の高速衝突を受けるプレパックドコンクリートの 局部破壊に関する実験的研究

市野 宏嘉\*1・小笠原 瑞紀\*2・別府 万寿博\*3・森島 慎太郎\*4

**要旨**：本研究では、板状のプレパックドコンクリート試験体に、剛および柔な金属製の飛翔体を 674～780m/s で衝突させる実験を行った。その局部破壊の状態から、プレパックドコンクリートでは、材料を混練して製造する一般的なコンクリートと比較して貫入深さが低減され、特に剛飛翔体による衝突に対してその低減の度合いが大きいことがわかった。さらに、既往の高速衝突を受けるコンクリートの局部破壊評価式について、プレパックドコンクリートへの適用の可能性を検討した。

**キーワード**：プレパックドコンクリート、高速衝突、局部破壊、貫入深さ

## 1. 序言

近年頻発する爆破テロ事件や爆発事故等においては、数百 m/s に達する高速度の飛来物が生じることがある。コンクリート部材がこのような飛来物の衝突を受けると、局部破壊、すなわち飛来物の貫通およびコンクリートの裏面剥離による人命や財産への被害が問題となる。この問題の発生を抑止、低減できるセメント系の材料として、高強度コンクリートや繊維補強コンクリート等が知られており、世界各国で様々な検討が進められている<sup>1)3)</sup>。

高速衝突への対策について、コンクリートの施工法の視点から考える。粗骨材を型枠に詰め、その空隙に特殊なモルタルを注入してコンクリートを作る方法がある。このような方法で施工されたコンクリートはプレパックドコンクリート<sup>4)5)</sup>、two-stage-concrete<sup>5)</sup>、grouted aggregate concrete<sup>5)</sup>などと呼ばれる。プレパックドコンクリートでは、施工法の特長上、一般的なコンクリートと比較して粗骨材の使用割合が大きくなる。粗骨材は普通強度のコンクリートに使用されるモルタルと比較して硬質の材料であるため、飛来物の貫入に対してモルタルよりも大きな抵抗をもたらす、プレパックドコンクリートでは一般的なコンクリートと比較して衝突に対して部材の局部破壊をより低減できると考えられる。しかしながら、プレパックドコンクリートが衝突を受けた際の応答に関する研究は数少なく、重錘落下等の比較的低速度領域での研究<sup>6)</sup>が知られているに過ぎない。

本研究では、板状のプレパックドコンクリート試験体に剛および柔な金属製の飛翔体を衝突させ、その損傷、特に局部破壊の状態を調べ、材料を混練して製造する一般的なコンクリートのそれとあわせて検討する。さらに、コンクリートに対する既往の局部破壊評価法と実験結果

との比較を行った。

なお、本研究ならびに参考文献 5)の一部および 6)で用いられた試験体はコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>に定義されたプレパックドコンクリートと混和剤やフレッシュ性状が一部異なるが、その主要な材料と粗骨材の投入後にモルタルを充填する施工法が共通し、その力学的な性質が類似することから、本稿ではこれらも含め、「プレパックドコンクリート」と呼称する。

## 2. 衝突実験の方法

### 2.1 試験体

実験に使用した試験体を図-1 に示す。試験体の寸法は縦 400mm×横 400mm である。この寸法は、予備実験や Brown ら<sup>7)</sup>の研究を参考にして、飛翔体の衝突による試験体の破砕が生じず、境界条件による影響が局限できる範囲でできる限り小さい値として設定した。試験体取り扱時の破損を防ぐ目的で、試験体の四周には D6 鉄筋を配した。図に示すように、溝形鋼を用いて試験体の 2 辺を支持し、その中心付近に飛翔体を衝突させた。

プレパックドコンクリート試験体の製造にあたっては、型枠にあらかじめ  $G_{max}=20\text{mm}$ 、密度  $2.65\text{g/cm}^3$  の粗骨材（石灰岩碎石）と鉄筋を配置し、図-2 に示すように、型枠上面からモルタルを流し込み、その自重により充填した。同様に製造した円柱供試体の質量を計測することにより、粗骨材の空隙にモルタルが十分に充填されていることを確認した。このモルタルは高炉スラグ微粉末（6000 ブレーン品石膏添加有）でセメントの半分が置換されている。その構成材料を表-1 に示す。粗骨材のかさ容積は  $0.560\text{m}^3/\text{m}^3$  である。コンクリート試験体には、表-2 のレディーミクストコンクリートを使用し、パイ

\*1 防衛大学校 建設環境工学科准教授 博士（工学）（正会員）

\*2 防衛大学校 防衛大学校理工学専攻第 68 期学生

\*3 防衛大学校 建設環境工学科教授 博士（工学）（正会員）

\*4 日鉄高炉セメント（株）SL 事業部 東京グループ 統括主任 博士（工学）（正会員）

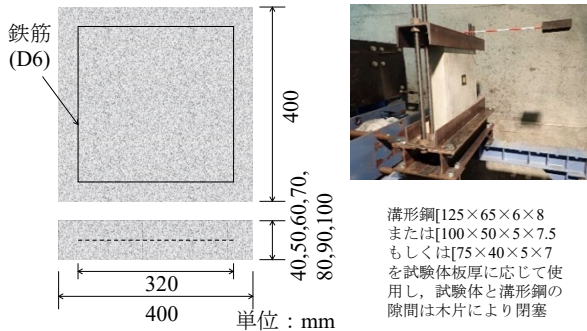


図-1 板状試験体

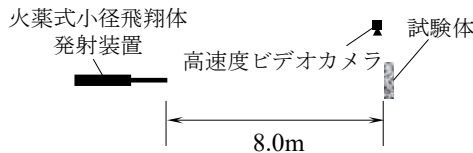


図-3 発射装置と試験体の位置関係

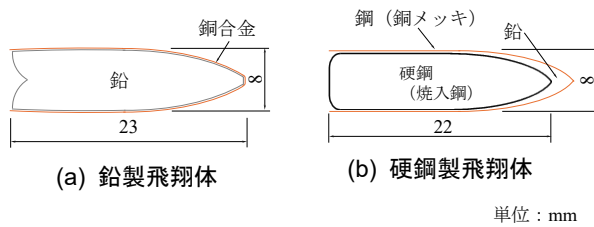


図-4 飛翔体の概要

プレーターにより締固めた。粗骨材はプレパックドコンクリートと類似した  $G_{max}=20\text{mm}$  の石灰岩 (密度  $2.69\text{g/cm}^3$ ) を使用した。したがって粗骨材のかさ容積は  $0.354\text{m}^3/\text{m}^3$  である。試験体と同ロットで製造した円柱供試体の一軸圧縮強度は、プレパックドコンクリートでは  $41.8$  または  $40.1\text{N/mm}^2$ 、レディーミクストコンクリートで  $29.1\text{N/mm}^2$  である。試験体の板厚は、試験体の材料と後述する飛翔体の種類に応じて  $40, 50, 60, 70, 80, 90$  および  $100\text{mm}$  から複数選択した。

## 2.2 発射装置および飛翔体

本研究では、火薬式小径飛翔体発射装置を使用した。図-3 に示すとおり、試験体と発射装置の先端との間は  $8.0\text{m}$  とした。本装置は、薬室内に充填された発射薬の燃焼によって生じたガス圧により飛翔体を管内から射出するものであり、質量  $8\text{g}$  の飛翔体を約  $730\text{m/s}$  の速度で衝突させることができる。飛翔体の概要を図-4 に示す。飛翔体の芯部は鉛製、硬鋼 (焼入鋼) 製の 2 種類であり、鉛製は銅合金で、硬鋼製は鋼でそれぞれ被覆されている。先端形状は図示したような尖頭形である。鉛は衝突時に変形し、硬鋼は衝突時に変形しないことを想定した飛翔体である。2 種類とも直径は  $8\text{mm}$ 、質量は  $8\text{g}$  である。

## 2.3 計測項目

本実験では、飛翔体の衝突速度および衝突で生じた局部破壊の計測を行った。衝突速度は高速ビデオカメラ (Photoron Fastcam SA-Z) により撮影した画像から算出



(a) モルタルの製造 (b) モルタルの充填  
図-2 プレパックドコンクリート試験体の製造

表-1 プレパックドコンクリートの材料

単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
水	早強ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材
158	220	220	352	1484

表-2 レディーミクストコンクリートの材料

単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材
188	330	806	952

した。この際の撮影速度は  $10,000\text{fps}$ 、シャッター速度は  $1/50,000\text{ s}$ 、撮影範囲は  $1024 \times 512$  ピクセルとした。

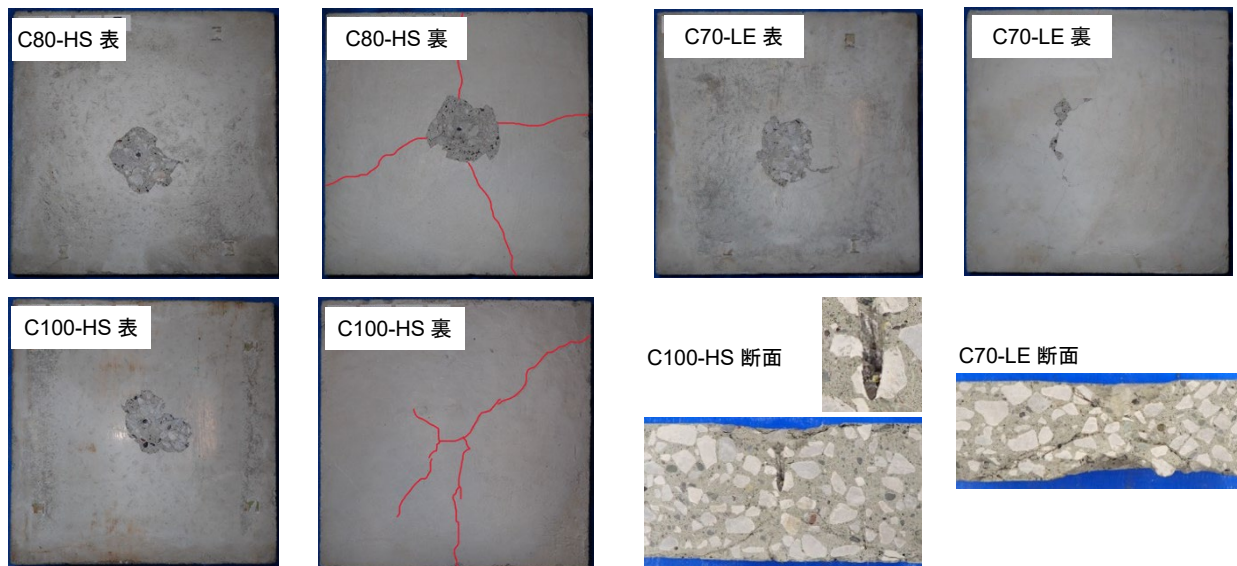
本実験では、飛翔体が衝突した位置付近に以下に述べるような損傷、すなわち局部破壊が生じる。試験体の板厚が十分に厚い場合、試験体の損傷は衝突面 (表面) のクレータ状の破壊 (表面破壊) にとどまり、裏面にはごく微細なひび割れを除き損傷はない。これより試験体を薄くして実験を行うと、試験体の裏面のひび割れが顕著となり、その限界を下回る厚さになると裏面のコンクリートが剥落してクレータ状を呈する。これを裏面剥離とよぶ。さらに試験体が薄くなり、ある限界を下回ると試験体に穴があき、条件によっては飛翔体が試験体を貫通する。それぞれの破壊の具体的な状況は次章で示す。

実験後、試験体の形状にゆがみが生じないように撮影した写真に対して、面積計を用いて表面破壊と裏面剥離の面積を計測した。加えて、試験体表面における飛翔体の貫入深さの計測を行った。貫入深さは、飛翔体が試験体に残存していない場合は表面破壊の最深部までの深さ、飛翔体が試験体に残存している場合は試験体を切断して断面において飛翔体先端までの深さを計測した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 局部破壊の外観上の特徴

表-3 に飛翔体の速度を含む実験結果の一覧を、図-5、図-6 に代表的な試験体の表裏面、および衝突位置付近の断面をそれぞれ示す。説明に用いた記号は、C: レディーミクストコンクリートによる試験体、P: プレパックドコンクリート試験体、数字は板厚(mm)、LE: 鉛飛翔体、HS: 硬鋼飛翔体をそれぞれ示す。表中の破壊性状は、表面破壊のみが生じた場合を「表面破壊」、表面破壊に加え



図－5 実験後の C 試験体の外観（裏面の写真では赤でひび割れを強調）

表－3 実験結果

記号	板厚 (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	速度 (m/s)	破壊性状	貫入深さ (mm)	表面破壊面積 (cm <sup>2</sup> )	裏面剥離面積 (cm <sup>2</sup> )
C50-LE	50	29.1	693	貫通	-	38	119
C60-LE	60	29.1	722	裏面剥離	28	87	114
C70-LE	70	29.1	674	裏面剥離限界	28	66	-
C80-LE	80	29.1	710	表面破壊	29	97	-
C80-HS	80	29.1	778	貫通	-	64	80
C90-HS	90	29.1	753	貫通限界	-	94	118
C100-HS	100	29.1	780	表面破壊	43	66	-
P40-LE	40	40.1	716	貫通	-	51	201
P50-LE	50	41.8	709	貫通限界	22	99	294
P60-LE	60	41.8	714	裏面剥離限界	23	83	-
P70-LE	70	41.8	716	表面破壊	20	62	-
P60-HS	60	40.1	750	貫通	-	86	185
P70-HS	70	40.1	734	裏面剥離限界	35	94	-
P80-HS	80	40.1	766	裏面剥離限界	38	66	-
P90-HS	90	41.8	758	表面破壊	45	165	-

て裏面剥離が生じた状態を「裏面剥離」、それらに加えて試験体に穴があいたものを飛翔体の貫通の有無を問わず「貫通」とした。「裏面剥離」および「貫通」となるかどうかの境界でいずれとも判別がつかないものをそれぞれ「裏面剥離限界」および「貫通限界」とした。

図－5 より、C80-HS の場合、飛翔体は試験体をまっすぐ貫き、「貫通」と判定される。表面および裏面にはクレータ状の破壊が生じている。C100-HS では、表面には破壊が生じているが、裏面にはひび割れが生じているのみで「表面破壊」と判定される。断面の状態からは、飛翔体が粗骨材に貫入して停止していることがわかる。また、飛翔体の先端付近から裏面方向に 2 本の斜めひび割れが生じている。これは、飛翔体によってコンクリートが板厚方向に押し出されるような力を受け、短時間で局所的に変形されたために生じたひび割れであると考えられる。速度数百 m/s の飛翔体がコンクリートに衝突した場合、飛翔体の衝突に伴って発生した圧縮応力波が裏面で自由

端反射して引張応力波に転じ、この作用により裏面に沿う水平方向の層状のひび割れが引き起こされる場合がある<sup>8)</sup>が、C100-HS は板厚が全ケース中最大の 100mm であり、圧縮応力波が自由端反射を起こす前に十分に減衰されたためかそのようなひび割れは認められない。C70-LE では、表面のクレータ状の破壊痕と裏面のひび割れが生じ、切断すると裏面のコンクリートが剥落する「裏面剥離限界」の状態を呈している。衝突後の LE 飛翔体は原形をとどめておらず回収できなかった。C70-LE の切断面を観察すると、先に述べた引張応力波による損傷と推察される薄い皿形の破壊による剥落が生じている。これは、C100-HS と比較して板厚が小さく応力波の減衰が小さくなったことに加え、飛翔体が柔である影響を受けたと推察される。さらに、斜めひび割れも発生している。

図－6 に示す P 試験体において、P60-HS では破壊性状は「貫通」であるが、表裏面の写真の右下にある衝突痕の状態から、飛翔体は貫通の過程で方向を変えていることがわかる。P 試験体では C 試験体と比較して粗骨材が密に存在するため、飛翔体の軌道の変化が生じやすいと考えられる。P90-HS の断面では、飛翔体が試験体に貫入後、粗骨材に衝突して停止していることがわかる。また、粗骨材によって斜めひび割れの進展が妨げられている。P60-LE では、C 試験体と同様に、引張応力波による損傷と推察される薄い皿形の破壊による剥落が生じている。

### 3.2 表面破壊および裏面剥離面積

図－7, 8 に、表面破壊および裏面剥離の面積を示す。図より、表面破壊面積には飛翔体や試験体の種類および厚さに対して明瞭な傾向が認められず、P90-HS を除き 38～99cm<sup>2</sup> の範囲にある。裏面剥離面積は C 試験体で 80～119cm<sup>2</sup>、P 試験体で 185～294cm<sup>2</sup> であり、P 試験体でより大きい。これは、P 試験体の場合、裏面剥離を生じる

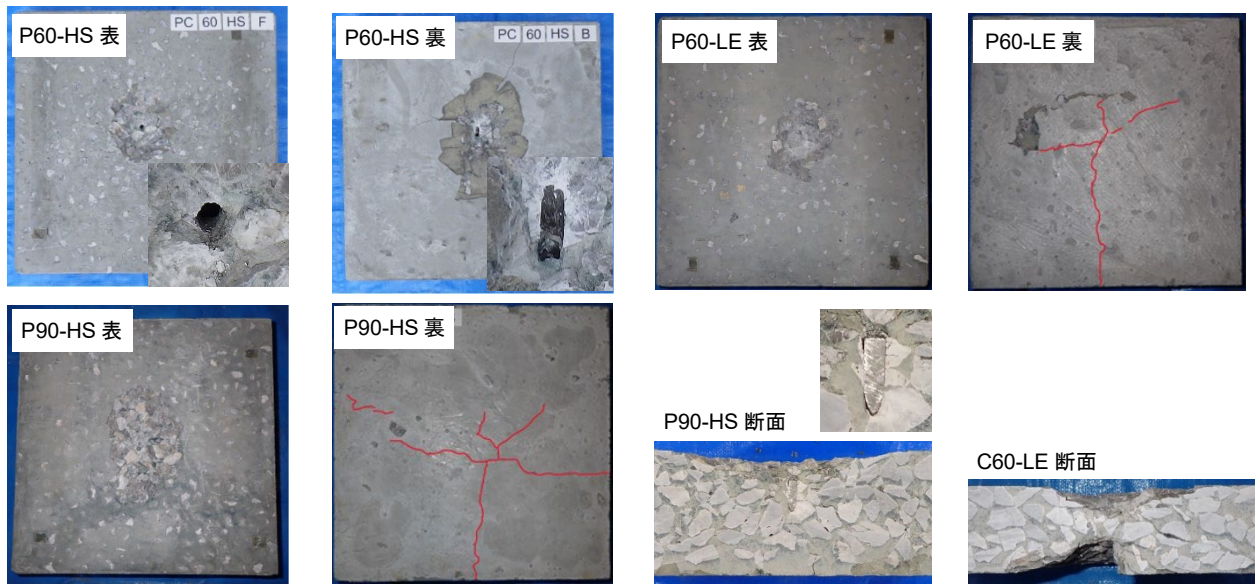


図-6 実験後の P 試験体の外観（裏面の写真では赤でひび割れを強調）

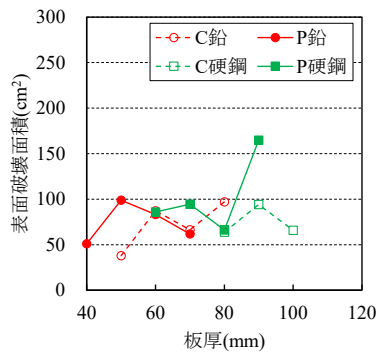


図-7 表面破壊面積

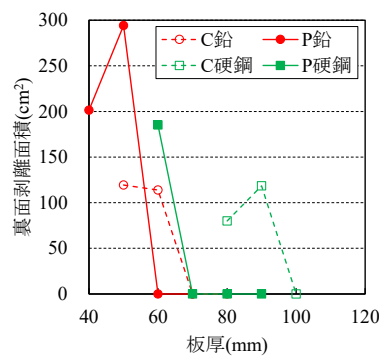


図-8 裏面剥離面積

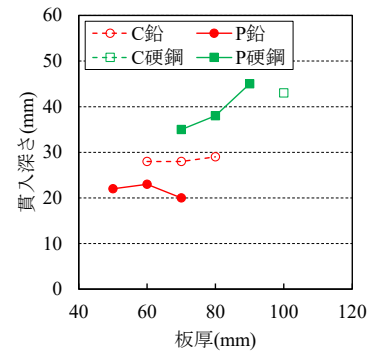


図-9 貫入深さ  
（「貫通」のケースを除く）

際に粗骨材ごと剥落するために損傷範囲が大きくなりがちであることによると考えられる。なお、P、C 試験体ともに、裏面剥離と表面破壊の両方が発生した場合には表面と比べて裏面の破壊面積がより大きくなり、表-3 の面積の各値より、個々の試験体の表面と裏面の破壊面積の比は、HS 飛翔体で表面の 1.3~2.2 倍、LE で 1.3~3.9 倍に及ぶ。この倍率は LE でより大きく、層状の破壊が広範囲にわたる引張応力波による裏面剥離による影響が大きかったと考えられる。

### 3.3 貫入深さとその評価

試験体への貫入深さはセメント系材料への飛翔体の衝突に対する抵抗の度合いを示す指標として重要である。図-9 より、C 試験体の貫入深さは LE で 28~29mm、HS で 43mm、P 試験体に対しては LE で 20~23mm、HS で 35~45mm である。全般的には P 試験体でより貫入深さが小さい結果となる。これは、P 試験体では粗骨材が密に存在するため、飛翔体がモルタルと比べて硬質な粗骨材に衝突するためである。また、この結果には P 試験体のモルタルマトリックスの強度が C 試験体のそれと比較

して大きいことも寄与していると考えられる。本研究では P 試験体の水結合材比が 36%で、C 試験体の 57%を大きく下回ることから、仮に同等の水結合材比で実験を行った場合には、P 試験体と C 試験体の貫入深さの差は縮小する可能性がある。C100-HS では図-5 に示した通り、P 試験体の場合と同様に飛翔体が粗骨材を貫通して停止しており、モルタル部分を貫入していれば貫入深さは実際の計測値の 43mm より大きくなったと考えられる。

一般的なコンクリートに飛翔体が衝突した場合における貫入深さを求める評価式は種々提案されている<sup>9)</sup>。ここでは、その一つである ACE (米国陸軍工兵隊) 式による計算値と実験結果を比較して、その適用性について検討する。ACE 式は直径 12.7~155mm の弾丸状の飛翔体をコンクリートに衝突させる実験を基にした評価式<sup>9)</sup>であり、本実験で使用した飛翔体よりも大きな径を対象とした式ではあるが、飛翔体の先端形状が類似していると考えられ、ここで本実験に対する適用性を検討する。

ACE 式における貫入深さ  $x(\text{in})$  は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

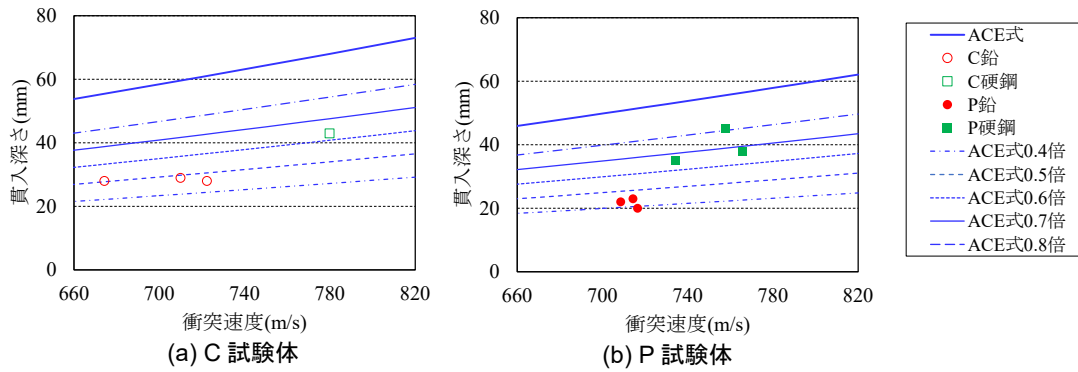


図-10 ACE式による貫入深さとの比較（貫通孔が生じたケースを除く）

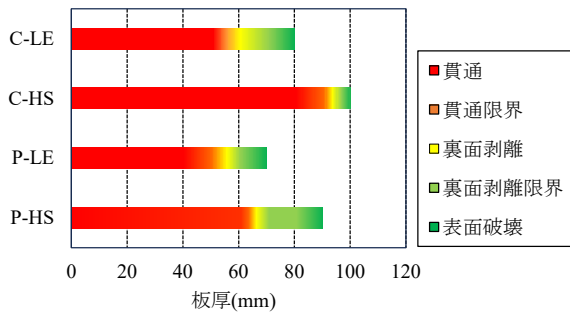


図-11 板厚に応じた局部破壊性状の変遷

$$\frac{x}{d} = \left( \frac{282 D d^{0.215}}{f'_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{V}{1000} \right)^{\frac{3}{2}} + 0.5 \quad (1)$$

ただし、 $D=W/d^3$ 。ここに、 $d$ は飛翔体の径(in)、 $W$ は飛翔体の重量(lb)、 $f'_c$ はコンクリートの圧縮強度(lb/in<sup>2</sup>)、 $V$ は飛翔体の衝突速度(ft/sec<sup>2</sup>)である。

図-10に、実験で得られた貫入深さとACE式との比較を示す。ACE式の計算において、P試験体の $f'_c$ は2ロットの平均値である41.0N/mm<sup>2</sup>とした。ACE式による貫入深さは、すべての実験結果に対して安全側の評価を与えている。C試験体では、LE飛翔体で貫入深さはACE式の0.5倍程度にとどまる。これは、LE飛翔体はACE式が想定する飛翔体よりも著しく柔らかいためであると考えられる。HS試験体のデータはC100-HSの1点のみで、ACE式の0.63倍となる。既述の通り、C100-HSでは飛翔体が粒径の大きな粗骨材に直撃して停止された影響を受け、ACE式による評価と乖離したと考えられる。P試験体の貫入深さは、LE飛翔体でACE式の0.4倍程度、HS飛翔体では約0.6倍から0.8倍の範囲にある。P試験体でも、ACE式のような一般的なコンクリートを対象とした実験式に低減係数を乗じる等の補正により貫入深さを評価できる可能性がある。

### 3.4 貫通限界・裏面剥離限界とその評価

貫通限界・裏面剥離限界は耐衝撃設計における限界状態として重要な評価の対象となる。表-3に基づき、図-11に板厚の変化に伴う局部破壊性状の変遷を示す。貫通限界となる試験体の厚さは、C試験体ではLE飛翔体

で50~60mmの間、HS飛翔体で90mmである。Sovjákら<sup>1)</sup>は、質量8g、直径7.9mmの鉛製飛翔体を約700m/sで厚さ50mm、圧縮強度69N/mm<sup>2</sup>のコンクリートに衝突させる実験を行った結果、「貫通」であったと報告しており、本実験と概ね符合した結果が得られている。C試験体の裏面剥離限界は、LEで70mm、HSで90~100mmの間にある。貫通限界および裏面剥離限界についても、ACEにより評価式が提案されている<sup>9)</sup>。コンクリートの貫通限界 $e$ (in)および裏面剥離限界 $s$ (in)は式(1)の $x$ 、 $d$ を用いて次式より得られる。

$$\frac{e}{d} = 1.23 + 1.07 \left( \frac{x}{d} \right) \quad (3 \leq \frac{e}{d} \leq 18) \quad (2)$$

$$\frac{s}{d} = 2.28 + 1.13 \left( \frac{x}{d} \right) \quad (3 \leq \frac{s}{d} \leq 18) \quad (3)$$

図-12に貫通限界および裏面剥離限界の比較を示す。図-12(a)より、ACE式による貫通限界は速度760~770m/sで81~82mmであり、裏面剥離限界は93~94mmである。すなわち、C試験体に対しHS飛翔体を用いた場合、ACE式による貫通限界は実験結果(90mm)よりも8~9mm小さく評価される。これは、ACE式の適用範囲と本実験の条件の差異や、材料の不均質性による影響を受けた可能性がある。一方、裏面剥離限界は概ね妥当な評価である。LE飛翔体に対するACE式による評価は、飛翔体が柔であることを反映して貫通限界、裏面剥離限界ともいずれも実験結果より大きく算定される。

図-12(b)より、実験でのP試験体での貫通限界はLE飛翔体で50mm、HS飛翔体で60~70mmの間にある。裏面剥離限界は、LE飛翔体で60mm、HS飛翔体で70~80mmの間にある。貫通限界、裏面剥離限界のいずれもP試験体ではC試験体と比べて低減される。その低減の度合いはHS飛翔体でより大きく、プレパックドコンクリートの密実な粗骨材の配置が硬質の飛翔体による損傷の低減に効果大きいことがわかる。ACE式による評価結果は、速度730~770m/sで貫通限界が67~71mm、裏

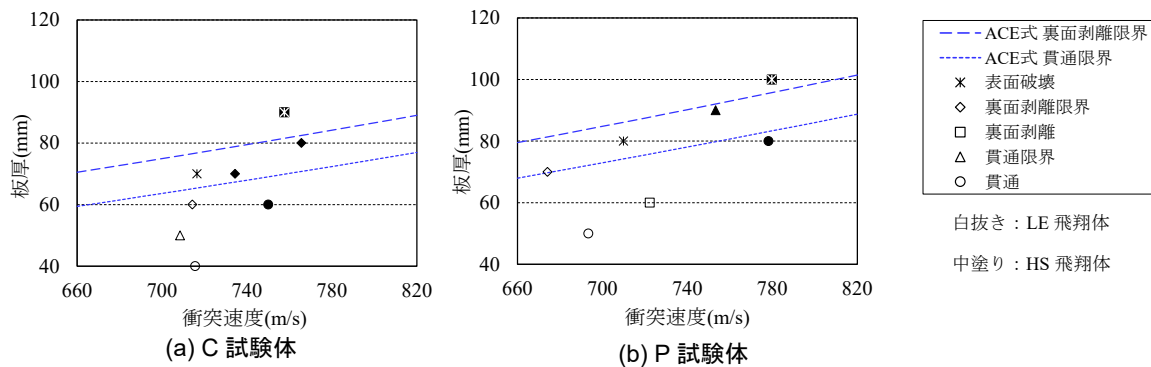


図-12 ACE 式による裏面剥離限界および貫通限界の比較

面剥離限界が 78～83mm である。すなわち、P 試験体では HS 飛翔体に対して貫通限界、裏面剥離限界ともに実験結果とほぼ一致し、LE 飛翔体に対して過大となる。

#### 4. 結言

本研究では、板状のプレパックドコンクリート試験体に剛および柔な金属製の飛翔体を衝突させ、その局部破壊の状態を調べるとともに、既往のコンクリートに対する既往の局部破壊評価法と実験結果の比較を行った。主要な結果を以下に述べる。

- (1) P 試験体では C 試験体と比較して貫入の過程での飛翔体の軌道の変化、粗骨材による斜めひび割れの進展の抑制が生じやすい。
- (2) P 試験体では C 試験体と比較して裏面剥離面積が大きくなる。P, C 試験体ともに、裏面剥離と表面破壊の両方が発生した場合には表面と比べて裏面の破壊面積がより大きくなり、HS 飛翔体で 1.3～2.2 倍、LE 飛翔体で 1.3～3.9 倍に及ぶ。
- (3) P 試験体では C 試験体と比較してより貫入深さが小さい傾向がある。また、貫通限界、裏面剥離限界のいずれも P 試験体では C 試験体と比べて低減される。その低減の度合いは HS 飛翔体でより大きい。ただし、両者のモルタルマトリックスの強度の差異が及ぼす影響の検討は今後の課題である。
- (4) プレパックドコンクリートでも、ACE 式を補正することにより、貫入深さを評価できる可能性がある。また、ACE 式の貫通限界、裏面剥離限界は HS 飛翔体の実験結果とほぼ一致し、LE 飛翔体に対して過大となった。

謝辞：実験にあたって、防衛大学校理工学専攻第 68 期学生の野村悠斗氏、同 69 期学生の重松慶太郎氏、林泰成氏のご助力をいただきました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Sovják, R., Vavříník, T., Zatloukal, J., Máca, P., Micunek, T.,

- Frydryn, M. : Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets, *International Journal of Impact Engineering*, 76, 166–177, Feb. 2015.
- 2) Wu, H., Fang, Q., Chen, X. W., Gong, Z. M., Liu, J. Z. : Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1320 m/s, *Construction and Building Materials* 74, 188–200, Jan. 2015.
- 3) Li, P. P., Brouwers, H. J. H., Yu, Q. : Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance, *International Journal of Impact Engineering*, 136, 103434, Feb.2023.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編, 2023.
- 5) Najjar, M. F., Soliman, A. M. and Nehdi, M. L.: Critical overview of two-stage concrete: Properties and applications, *Construction and Building Materials*, Vol.62, pp.47-58, Apr. 2014.
- 6) Murali, G., Abid, S. R., Amran, Y. H. M., Abdelgader, H. S., Fediuk, R., Susrutha, A., Poonguzhali, K.: Impact performance of novel multi-layered prepacked aggregate fibrous composites under compression and bending, *Structures* 28, 1502–1515, Dec. 2023.
- 7) Brown, J. L., Howard, I. L., Frank, A. O., M. Roth, M. J.: Assessment of confinement’s influence on a concrete target’s ability to approximate semi-infinite perforation performance, *International Journal of Protective Structures*, Vol.12, Issue 3, pp.331–346, Sep. 2021.
- 8) Beppu, M., Miwa, K., Itoh, M., Katayama, M, Ohno, T.: Damage evaluation of concrete plates by high-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, 76, 1419–1426, Jul. 2008.
- 9) Kennedy, R. P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, *Nuclear Engineering and Design* 37, 183–203, May 1976.