# 論文 プレキャストパネルの耐衝撃性に関する実験的検討

長沼 明彦\*1・神谷 隆\*2・萩野谷 学\*3・大野 友則\*4

要旨:河川護岸への適用性検証の一環として,地山補強土工法の表面材である既製のプレキャストパネルの 耐衝撃性について落下衝突実験を行った。なお,本研究ではエネルギー吸収容量を指標としてパネルの耐衝 撃性を評価した。その結果,繰返し衝突載荷によるプレキャストパネルの最終破壊状況は,裏面剥離を生じ て貫通孔形成という局部的な破壊に留まり,全体破壊には至らないことがわかった。また,鉄筋比が大きい ほど損傷が抑制でき,終局に至るまでのエネルギー吸収容量が増加することがわかった。そのエネルギー吸 収容量の大きさは,載荷方法によらずほぼ等価となることも確認された。

キーワード:補強土工法,プレキャストパネル,衝突実験

#### 1. はじめに

近年,日本各地の限定された狭い地域に,異常気象の 影響と考えられる集中豪雨が頻繁に発生している。それ に伴って山地斜面が崩壊して樹木を含む土石流が発生し, あるいは河川の急激な増水や氾濫によって堤防が破堤す るといった災害が人々の生活に甚大な被害を与えている。 こうした状況から,河川護岸の豪雨対策はこれまで以上 に重要な要求事項であると考えられる。

現行の護岸には多くの工法があり、使用される素材、 構造の外観等は様々である。護岸工の設計施工マニュア ルには、工法の選択にあたっては施工する河川の規模, 緩急流の別、流況などを十分調査し、更に工期、実施時 期,背後地からの制約および施工の難易等を考えて強度、 耐久性及び経済性など最も適応したものを選定しなけれ ばならないことが示されている<sup>1)</sup>。また,護岸構造の河 岸法面を保護する法覆工には、河道特性や作用する流速 などを考慮して、河川環境に適したものを選定する必要 がある<sup>2)</sup>。法覆工には**表-1**に示す工種があり、その中 でもブロック積みはコンクリート系の護岸として一般的 に多く用いられている。ブロック積みは、コンクリート 製のブロックを積み重ねて胴込コンクリート、裏込めコ ンクリートによってブロック相互の一体化を図り、控え 長が 35cm 以上に規定された<sup>3)</sup> 無筋コンクリート構造物 である。この法覆工は、地盤に対してアンカー等によっ て定着させることは無く,構成している部材の自重によ って護岸の安定を図っている。

一方,最近では護岸への適用を目的とした法覆工<sup>4)、5).0</sup>も開発されている。しかしながら,これらの工法に用いられる壁面コンクリートの断面厚さは、ブロック積みと同様に控え長を35cmにすることが規定されている。 集中豪雨等によって河川が増水する際には、護岸に流木

表-1 法覆工の種類

工種				
張り護岸	練石張り			
	練ブロック張り			
	平張りコンクリート			
	法枠コンクリート張り			
積み護岸	練石積み			
	練ブロック積み			
連節型	大型連節ブロック張り			
ブロック護岸	連節型ブロック張り			
その他護岸	植生・シートエなど			

や巨礫等が衝突することが考えられる。コンクリート護 岸の場合、これらの衝突によって法覆工(以後、表面材 と呼ぶ。)にひび割れが生じる可能性がある。一旦,表面 材にひび割れが生じ、これが進展して大きくなると、表 面材の背面に河川水が浸入して背面土砂の吸出しを誘発 し、最悪の事態として護岸の安定性が損なわれ崩壊に至 る<sup>7)</sup>。したがって,護岸構造を考える場合,適用する工 法による護岸機能、特に耐衝撃性を把握しておくことは 重要である。河川護岸に関する現行基準の中には、護岸 の安全性の設計条件として, 礫や流木の衝突による破 損・劣化に対する照査項目が示されているが、設計照査 の詳細については、「過去の経験や類似河川の実績、ある いは新しい工種に関しての試験施工・模型実験、調査研 究の成果等を利用して設計する」<sup>8)</sup>といった内容が示さ れているだけで,具体的な設計方法や要求性能は明確に 示されていない。そのため、河川構造物の衝突性能の検 証についての事例は少なく、各々で独自の検証方法と評 価基準を設定して実施しているのが実状である。

著者らは、地山及および不安定化した斜面等の崩壊防 止対策として既に開発した図-1に示すような地山補強 土工法<sup>9</sup>(以下、本工法と略す。)を、今後は護岸へ適用 するための研究<sup>10),11)</sup>をこれまで行ってきた。本工法は表 面材にプレキャストパネルを使った逆巻き施工により、

\*1 矢作建設工業(株) エンジニアリングセンター (正会員)

- \*2 矢作建設工業(株) 建築事業本部 (正会員)
- \*3 矢作建設工業(株) エンジニアリングセンター 博士(工学) (正会員)
- \*4 大野防衛工学研究所 工博

切土完了と同時に永久構造物として構築する地山補強土 工法である。表面材のプレキャストパネルは鉄筋コンク リート構造であることから,①断面厚さを比較的薄くで きる,②補強材を背面地盤に対して定着させることで表 面材と背面地盤が一体化されている,ことが特徴である。 本研究では,護岸構造として本工法の有効性と適用性を 確認するために衝突実験を行い,プレキャストパネルの 衝突に対する破壊性状および耐衝撃性の把握を行った。

#### 2. 実験概要

実験では、図-1に示すような本工法の表面材の一部 を切り出したプレキャスト板試験体に対して剛体を衝突 させる実験を行い、ひび割れから貫通破壊に至る試験体 の耐衝撃性能について検討を行った。

## (1) 試験の種類

衝撃荷重を受けるコンクリート板部材の設計(コンク リート強度,鉄筋配筋,板厚など)に係る動的特性を調 べる際,一般には静的載荷試験および動的・衝撃載荷試 験を行い,曲げやせん断などの動的耐力を静的耐力との 対比で評価することが多い。しかしながら,本研究では, 既製品であるプレキャスト板の耐衝撃性を調べるために, 衝撃載荷試験だけを行っている。したがって,曲げやせ ん断などの力学特性は,本研究では検討の対象としてい ない。

## (2) 衝撃載荷条件の設定

一般に, 護岸は川の流れ方向と平行であり, 漂流物が あっても通常は,護岸に衝突することなく沿って流れる。 しかしながら,増水時における流木などの河川漂流物は, 護岸に対して斜め方向からの衝突(柔衝突体)となる可 能性がある。護岸に対して斜め衝突(垂直を90°とする とき、角度 30~60°)となる場合、河川流速を 10m/s<sup>12)</sup> とすると、護岸への衝突速度は約5~8.7m/sになる。そ こで本実験では、それより厳しい条件として、鋼製重錘 (剛衝突体)の垂直衝突とし衝突速度を10m/sに設定し た。衝突載荷には、図-2に示すような自由落下式の衝 突実験装置を用いた。重錘の質量は,装置の能力の制約 もあり、1個24kgの基本重錘を組み合わせて57kgから 202kg まで増加できるようにした。これは、流木に換算 すると,直径20cmの丸太で約2~6mの長さに相当する。 また、重錘の落下高さは、設定衝突速度の最大約 10m/s となるように、高さを6mとした。載荷は、①基本重錘 を1個ずつ増加させて破壊に至るまで衝突を繰り返す質 量漸増衝突載荷 (Aシリーズ), ②所定の質量の重錘を破 壊に至るまで衝突させる繰返し載荷 (B シリーズ), の2 種類とした。載荷は、重錘を電磁石で吸着して所定の高 さまで吊り上げた後,電源の OFF で自由落下させた。

#### (3) 試験体

図-1 に示すように、本工法の実際の表面材は一定の 大きさのプレキャスト板で、その寸法は短辺 1190mm、 長辺 1790mm の矩形形状である。施工では、プレキャス ト板1枚ごとに補強材によって地盤に定着される。実験 では、実際の本工法のプレキャスト板を、実験施設の制 約から長辺方向を半分に切断した大きさ(矩形形状、寸 法:長辺 1190mm、短辺 895mm)とした。実験に用いた プレキャスト板試験体の諸元を表-2 に示す。本実験に 用いた試験体図を図-3 に示す。ここで、図-3 にはロー ドセル配置位置を併せて示している。試験体の呼び名は、 PW-1 (表面に小岩模様入、鉄筋比 1.40%), PW-2 (表面 に小岩模様入、鉄筋比 2.52%), PW-3 (表面模様無し、 鉄筋比 1.40%)および A (質量漸増の繰返し衝突), B (同 一質量の繰返し衝突載荷)で区別している。載荷位置は 試験体の中央である。

## (4) 試験体の支持と計測

衝突実験においては、試験体の支持条件の相違によって 破壊状況、荷重・変位・加速度などの応答が大きく異な ることが知られている<sup>13)</sup>。そこで、本実験では板自体の 耐衝撃性能を調べる目的から4点単純支持とし、衝突時 の試験体の跳ね上がりを防ぐために、短辺方向に2本



図-1 プレキャストパネルを用いた地山補強土工法



図-2 衝突実験装置の概要



のH鋼(RH-200×200)で基礎盤に拘束した。支持具と して用いた4個のロードセルはセンターホール型で、支 持部(受圧部)が直径 9.4cm (1 個の接地面積約 41cm<sup>2</sup>) である。実際には表面材の背面には地盤が存在している が、地盤の影響を考慮することなく表面材自体の耐衝撃 性を調べるために底部の拘束も行っていない。計測は, 試験体の支持具に設置した4個のロードセルを用いて支 点反力(4個の計測値の合計)を計測した。その際の計 測は 0.1msec 間隔とした。

#### (5) 載荷に用いた重錘の概要

鋼製重錘の構造と重錘一覧を図-4 に示す。先端の衝 突部は曲率半径 82mm の半球体(S45C 硬鋼, 焼入れ)で、 重錘質量は1個24.15kgの基本重錘(SS400鋼)を組み 合わせて 57kg (=衝突体: 33kg+基本重錘: 24.15kg×1 個)から 202kg(=33kg+24.15kg×7 個)まで増加できる 構造とした。

## (6) 実験パラメータ

- 1) 載荷条件: 落下高さ一定(6m), 重錘質量: 57kg~ 202kg, 衝突回数, 載荷方法
- 2) 試験体:表面の状況(小岩模様の有無),鉄筋量

#### 3. 実験結果

# 3.1 試験体の損傷・破壊状況

重錘の垂直衝突による本工法のプレキャスト板試験体 の最終破壊状況を写真-1に示す。なお、写真の各試験 体の最終破壊状況は、衝突面の状況を上側、裏面の状況 を下側に示している。以下に結果の概要を示す。

位置

U

T

3359

4780

6202

7626

9048

10469

11893

238

100

100

100

100

090

重錘4個形状

238

00

8

100

8

00

8

8

60

048

エネルギ

落下

高さ

Н

m

6.0

6.0

6.0

6.0

6.0

6.0

6.0

一般に、剛体の衝突に対するコンクリート試験体の破 壊は、①衝突位置のコンクリート表面に凹痕の形成、② 顕著な表面ひび割れ,③表面から裏面へのひび割れ進展, ④裏面剥離,⑤貫通孔の形成,のプロセスとなる。例え ば、ブロック積み護岸の健全度評価指標である背面土砂 の吸出しの発生を目安にすると、 漂流物の衝突によって 表面に 2mm 以上のひび割れが生じないことである<sup>14)</sup>。 したがって、本工法を護岸へ適用するには、上述③の顕 著なひび割れに至る過程と耐衝撃性能の検討が重要とな る。ただし、本実験では本工法の耐衝撃性能を基本的に 検討することを目的としているので,最終破壊状態を上 述の⑤の貫通孔の形成と定義し、載荷条件と破壊状態と の関係を調べている。

なお、構造部材の力学特性を実験的に調べる際、静的

載荷や高速載荷では入力荷重に対する加速度・変位・反 力などを計測することが行われる。しかしながら、衝撃 載荷においては、これらの計測方法や得られたデータの 解析評価は非常に困難であることが知られている。そこ で本研究では、入力に対する破壊を入力荷重(力)では なく、入力するエネルギー量(重錘の位置エネルギー) を指標として評価した。すなわち、重錘による入力エネ ルギー(=重錘質量×落下高さ)を部材の吸収エネルギ ー量と等価とみなし、損傷状況との関係を検討した。

# (1) 質量漸増衝突載荷

(A シリーズ:高さ約 6m, 重錘質量を回数ごとに増加)1) PW-1-A

- ・1回目の衝突で表面の短辺方向に軽微な曲げひび割れが生じ、裏面には小さな剥離が生じた。
- ・2回目の衝突で表面ひび割れ幅が僅かに拡大し、試験体の裏面の剥離も拡大した。
- ・3回目の衝突で表面のひび割れ幅は0.9mmで,重錘が 試験体を貫通した。

#### 2) PW-2-A

- ・1回目の衝突で表面に軽微な曲げひび割れが生じ、裏面には放射状のひび割れが生じた。
- ・2回目の衝突で試験体表面の曲げひび割れ幅が 0.3mm に拡大し,裏面に剥離が生じた。
- ・3回目の衝突で裏面剥離が拡大した。
- ・4回目の衝突で重錘が試験体を貫通した。
- 3) PW-1-A 試験体と PW-2-A 試験体の比較

表-3 に衝突回数と入力エネルギーの一覧を示す。 PW-1-A 試験体は,最終破壊の時点までに加えられた入力 エネルギーの総和は 1,469J, PW-2-A 試験体の場合は 2,302J であった。これは, PW-2-A 試験体の鉄筋量が PW-1-A 試験体の 1.75 倍(配筋ピッチが 1/2 で密配置) になっていることによると考察される。

# (2) 質量一定繰返し衝突載荷

(Bシリーズ:高さ約6m,重錘質量57kgで一定)1) PW-1-B

- ・1回目の衝突で表面の短辺方向に軽微な曲げひび割れが生じ、裏面には放射状のひび割れが生じた。
- ・2回目の衝突で表面ひび割れ幅が 0.45mm に進展し, 試験体の裏面に剥離が生じた。
- ・3回目の衝突で裏面剥離が拡大し,軽微な貫通孔が確認された。
- ・4回目の衝突で重錘が貫通した。
- 2) PW-2-B
- ・1回目の衝突で表面に軽微な曲げひび割れが生じ,裏 面には放射状のひび割れが生じた。
- ・2回目の衝突で試験体表面の曲げひび割れ幅が 0.2mm に拡大し,裏面に剥離が生じた。

- ・3回目の衝突で表面の曲げひび割れの進展はなく、裏 面剥離が拡大した。
- ・4回目の衝突で裏面剥離が拡大した。
- ・5回目の衝突で表面の陥没孔が拡大した。
- ・6回目の衝突で重錘が試験体を貫通した。

3) PW-1-B 試験体と PW-2-B 試験体の比較

PW-1-B 試験体は4回, PW-2-B 試験体は6回で最終破壊 に至った。これは,質量漸増衝突載荷の結果と同様に,



(PW-1-B)

(PW-3-B1)

衝突4回目:裏面



**街突1回目:**裏面 (PW-3-B2)

衝突6回目:裏面

(PW-2-B)

写真-1 最終破壊状況

PW-2-B 試験体は PW-1-B 試験体に比べて 1.75 倍の鉄 筋量が配筋されていることによると考えられる。

#### 4) PW-3-B1

板表面に小岩模様(厚 35mm)の有無による影響を調べるため、模様が無い試験体 PW-3-B1 に対して、質量 57kgの重錘による繰返し衝突を実施した。

- ・1回目の衝突で短辺方向にひび割れが生じ,試験体の 裏面には裏面剥離が生じた。
- ・2回目の衝突ではひび割れによる大きな進展は無いが、 重錘による表面コンクリートの欠損が生じた。また、 試験体裏面の剥離範囲がやや拡大して大きくなった。
- ・3回目の衝突で重錘が試験体を貫通して破壊に至った。5) PW-3-B2

質量 178kg の重錘による単一衝突載荷で短辺方向にひ び割れが生じ,試験体の裏面においては裏面剥離が生じ ると同時に重錘が試験体を貫通し破壊に至った。

6) PW-3-B1 試験体と PW-3-B2 試験体の比較

PW-3-B2 試験体は入力エネルギー1,045 J で最終破壊に 至った。PW-3-B1 試験体は1回の入力エネルギーが352 J で3回の衝突で最終破壊に至った。このときの入力エネ ルギーの総和は1,056 J (=352 J×3) であり, PW-3-B2 試 験体の入力エネルギーとほぼ等価である。

# 3.2 最終破壊に対するエネルギー評価

コンクリート構造物の耐震性を評価する上で, 地震の 入力エネルギーに対する構造物固有のエネルギー吸収容 量という指標を用いて最終破壊を検討することがある。 この考えは、地震によって構造物に入力する総エネルギ ーと構造物固有のエネルギー吸収容量との比較で構造物 の損傷や破壊が評価できるというものである<sup>15)</sup>。そこで、 衝突事象に対してもこの考えの適用性の可否を検討する。 衝突実験における入力エネルギーは、重錘質量に落下高 さを乗じた(位置エネルギー)値であり、これを入力エ ネルギーとみなした。繰返し載荷の場合は、各回の入力 エネルギー値を加算したものを累積入力エネルギー(回 数の増加毎にその値を加えた値)と定義した。衝突回数 と入力エネルギーの一覧を表-3に示す。1回の衝突で最 終破壊に至った場合(PW-3-B2)は、その大きさが試験 体のエネルギー吸収容量(=入力エネルギー)とした。 なお、PW-3-B2 試験体は模様が無いプレキャスト板であ り、エネルギー吸収容量を評価する上で繰返し衝突によ る累積エネルギーと単一衝突による入力エネルギーが等 価となることを確認するために行った。

# (1) 載荷方法の違いによるエネルギー吸収容量

衝突載荷による入力エネルギーは,破壊と耐衝撃性を直 接示す指標ではないが,最終破壊までの過程で興味深い 関係が認められる。

表-3 衝突回数と入力エネルギーの一覧

	衝突	重錘	入力エネルギー	
試験体	回数	質量	各値	累積値
	口	kg	J	J
PW-1-A	1	57	339	1,469
	2	81	492	
	3	105	638	
PW-1-B	1	57	352	1,408
	2	57	352	
	3	57	352	
	4	57	352	
PW-2-A	1	57	352	2,302
	2	81	500	
	3	105	648	
	4	130	802	
PW-2-B	1	57	352	2,112
	2	57	352	
	3	57	352	
	4	57	352	
	5	57	352	
	6	57	352	
PW-3-B1	1	57	352	1,056
	2	57	352	
	3	57	352	
PW-3-B2	1	178	1,045	1,045

表-3より, PW-1シリーズ、PW-2シリーズ、PW-3シ リーズとも、プレキャスト板試験体に貫通孔が生じる最 終破壊までの衝撃耐力は、載荷方法によらず一定のエネ ルギー吸収容量(入力に対して試験体が保有するエネル ギー耐力として定義)の大きさが存在すると言える。逆 に言えば、PW-1シリーズの試験体とPW-2シリーズの試 験体とでは、PW-2の鉄筋量が PW-1の1.75倍であり、 エネルギー吸収容量は1.53倍である。PW-3シリーズは 表面側に模様がないため PW-1 試験体の厚さより 35 mm 薄く、エネルギー吸収容量は27%小さくなったと考えら れる。すなわち、プレキャスト板のエネルギー吸収容量 の大きさは、鉄筋量および板厚に依存する。

(2)エネルギー的観点からの護岸工の機能に対する評価

ブロック積み護岸の健全度(要求される機能)は、表 面材に幅 2mm 以上のひび割れが生じないことである。 本実験で対象としたいずれの試験体も、最初の1回目の 衝突で軽微なひび割れが生じている。1回の衝突で加え られた入力エネルギーは、339~352J(=57kg×約6m) である。言い換えると、質量57kgの剛な漂流物が護岸 に対して速度約10m/sで垂直に衝突した場合でも表面材 のひび割れは軽微(幅 1mm 以下)であり、本実験条件 の範囲においては衝突に対する健全度は十分であると言 える。

# 4. まとめ

本研究は、護岸構造の一つとして本工法の適用性を検

討するため, 法覆工に必要とされる機能のうち耐衝撃性 について実験的に調べた。得られた知見を以下に示す。 1)本実験の載荷条件において, プレキャスト板試験体は, 質量 57kg, 衝突速度約 10m/s の1回の衝突で表面に軽微 なひび割れが生じている。ただし, ひび割れ幅は 1 mm 以下であり, 2mm 以下という護岸としての健全度は十分 に満足している。さらに, その後の繰り返し衝突で局部 的な裏面剥離・貫通孔が生じるものの, プレキャスト板 全体が崩壊するような全体破壊には至らない。

2) 試験体 PW-2 シリーズ (D16@100mm, 鉄筋比 2.52%) の最終破壊に至る累積エネルギー, すなわちエネルギー 吸収容量の大きさは PW-1 シリーズ (鉄筋比 1.40%)の 試験体に比べて 1.53 倍である。

3) プレキャスト板試験体は鉄筋が密に配筋されていると, 試験体の損傷を抑制することができる。すなわち,エネ ルギー吸収容量が増加する。

4) プレキャスト板試験体のエネルギー吸収容量は、載荷 方法の違い(質量漸増の繰り返し衝突載荷と同一質量の 衝突繰返し載荷)によらずほぼ等価である。

5) 衝突に対するプレキャスト板試験体の最終破壊は,エ ネルギー吸収容量値で評価できる。ただし,その定量化 についての検討が必要である。

今後は、実際と同じように背面地盤がある場合を対象 として本工法を適用した場合の優位性や問題点等を把握 し、実用化へ向けた基礎的データの蓄積を行う必要があ る。なお、プレキャストパネルの耐衝撃性に関する研究 例は非常に少なく、未解明の部分も多い。本研究による 成果は河川における法覆工としてだけではなく、落石や 車両等の衝突が懸念される構造物の対策工へ応用できる と考えている。

## 参考文献

- 国土交通省東北地方整備局:設計施工マニュアル(案)
  [河川編・道路編], p.1-2-10, 平成15年4月
- 2) 同上, pp.1-2-14~15, 平成 15 年 4 月

- 3)(社)日本道路協会:道路土工擁壁工指針, p.168, 平 成24年7月
- 4) 多数アンカーW 工法カタログ:多数アンカー式補強 土壁協会
- 5) 太田,木村,関屋,沢田:テールアルメ壁に要求され る耐衝撃性能について(その1),第46回地盤工学研 究発表会,2011年7月
- 6)太田,木村,関屋,沢田:テールアルメ壁に要求される耐衝撃性能について(その2),第46回地盤工学研究発表会,2011年7月
- 7)(一社)建設コンサルタンツ協会近畿支部:公共土木 施設の維持管理に関する研究委員会報告書, p.3-1-9, 平成24年度7月
- (社)日本河川協会:河川砂防技術基準(案)同解説設 計編, p.32,平成 9.10
- 9) 土木学会:表面工にプレキャストコンクリート板を用いた地山補強土工法に関する技術評価,技術推進ラ イブラリー, No14, 2013.11
- 10)長沼,武藤,神谷,萩野谷,西尾,今井,小高:地 山補強土工法の表面工への衝突実験,平成 28 年度 土木学 会中部支部研究発表会, 2017.3
- 長沼,神谷,野村,萩野谷,大野:補強土工法表面 材の耐衝撃性に関する実験的研究,土木学会第73 回年次学術講演会,平成30年8月
- 12) 国土交通省中部地方整備局河川部:河川構造物設計 要領, p.2-3-59, 平成 28 年 11 月
- 13)岸,三上,栗橋:支持条件と版厚が鉄筋コンクリート版の衝撃耐荷挙動に及ぼす影響,構造工学論文集, Vol.58A, 2012.3
- 14) (一社) 建設コンサルタンツ協会近畿支部:公共土木 施設の維持管理に関する研究委員会報告書, p.3-1-39, 平成24 年度7月
- 15) 大野友則:エネルギー論的考察に基づく構造物の耐 震安全性に関する研究,筑波大学博士論文, 1987.3