# 論文 プレキャストパネルの耐衝撃性に対する損傷評価

長沼 明彦<sup>\*1</sup>·神谷 隆<sup>\*2</sup>·萩野谷 学<sup>\*3</sup>·大野 友則<sup>\*4</sup>

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プレキャストパネルの耐衝撃 性を,河川漂流物の衝突を想定した繰返し衝突実験による損傷で評価した。その結果,標準的な護岸工法に 用いられている無筋コンクリートのブロック積試験体は繰返し衝突載荷によって背面土砂の吸い出しに繋が るような有害なひび割れが生じるのに対して,プレキャストパネル試験体は初期段階においては微細なひび 割れは生じるものの,その後の繰返し衝突載荷によってひび割れが大きく発達しないことが確認できた。そ れは,鉄筋比が大きいほど,裏込めコンクリートを有するほど効果的である。 キーワード:補強土工法,プレキャストパネル,衝突実験,損傷評価

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。 特に,令和元年に発生した台風19号においては,東日 本を中心に国が管理する一級河川,県が管理する二級河 川で堤防が決壊する甚大な被害が数多く確認された。こ うした状況から,豪雨対策としての河川護岸はこれまで 以上に重要となっている。

現行の護岸には数多くの工法があり、護岸工の設計施 エマニュアル 1)には、工法の選択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慮して, 強度,耐久性及び経済性などの観点から最も適応したも のを選定しなければならないことが示されている。また, 護岸構造の河岸法面を保護する法覆工については、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ことが示されている<sup>2)</sup>。また, 最近では護岸への適用を目的とした法覆工 3),4),5)が数多 く開発されている状況にある。しかしながら、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や裏込 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>6</sup> 無筋コンクリート構 造物が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。この理由としては、河川護岸に関する現行基 準 <sup>7)</sup>では, 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」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。

一方,集中豪雨等によって河川が増水する際には,護 岸に流木や巨礫等が衝突することが懸念される。コンク リート護岸の場合には,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と,表面材の背 面に河川水が浸入し,最悪の事態としては背面土砂の吸 出しを誘発し,護岸の安定性が損なわれ崩壊に至る<sup>8)</sup>。

したがって,護岸構造を考える場合には,耐衝撃性を 把握することは重要な要素になると考えられる。こうし た状況を踏まえ,筆者らは高強度コンクリートと鉄筋で 構成されたプレキャストパネルを用いた表面材を提案し, これまでに護岸構造に適用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を確認し, 衝撃に対して有効であることを確認した<sup>9,10)</sup>。

実際に工法として護岸構造に適用する場合には、衝突 によって生じるひび割れ等の損傷度を評価する必要があ ると考えられるが、こうした研究事例は比較的少ない。 また、公共土木施設の維持管理に関する研究委員会報告 書の河川護岸維持管理マニュアル(案)<sup>8)</sup>では、護岸ブ ロックの亀裂について、ブロックに沿った亀裂幅が2mm 以上に発達していると水密性に影響を与えるだけでなく、 背面土砂の吸い出しによる護岸施設としての性能低下の 進行に繋がる、と懸念している。

そこで本研究では,護岸構造の表面材としてプレキャ ストパネルを適用するために衝突実験を行い,ひび割れ 幅が 2mm に達した時点を損傷限界と定義し,プレキャ

\*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

ストパネルの耐衝撃性の評価を行った。

# 2.提案する工法の概要

提案する工法(以下,本工法と略す。)は、地山およ び不安定化した斜面等の崩壊防止対策として、著者らが 既に開発した地山補強土工法<sup>11)</sup>を護岸に対しても適用可 能としたものである。本工法の特徴は、表面材のプレキ ャストパネルが高強度の鉄筋コンクリート構造であるこ とから、無筋コンクリートより断面厚さを比較的薄くで きること、補強材を背面地盤に対して定着させることで 表面材と背面地盤を一体化できること, さらには断面厚 さを薄くできることから1枚当りのプレキャストパネル は軽量で施工性に優れていること、などが挙げられる。 本工法の概要図を図-1に示す。

## 3. 実験概要

## 3.1 試験体概要

本実験では、プレキャストパネルの耐衝撃性を損傷度 で評価するために、プレキャストパネル試験体とコンク リートブロック試験体を製作し、衝突実験を通して比較 検討することとした。

試験体の諸元を表-1 に、試験体図を図-2 に示す。 試験体の寸法は、実用サイズ(矩形形状,長辺1790mm, 短辺 1190mm) のプレキャストパネルを実験施設の制約 から長辺方向を半分に切断した大きさ(長辺 1190mm, 短辺 895mm) とし、コンクリートブロック試験体も同じ 寸法とした。ただし、本実験では低レベルの衝突エネル ギーにおける試験体の挙動を詳細に把握するため、試験 体の表面は凹凸や模様のない形状とした。

プレキャストパネル試験体は、実用品と同様の配筋ピ ッチ(D16@200mm, 鉄筋比 1.40%)と, 鉄筋比を大き くした配筋ピッチ(D16@100mm, 鉄筋比 2.52%)の2 種類とした(@100mm ピッチの試験体名に"S"付記)。 また、実用ではパネルと地山の間に裏込め材が施工され るため、本実験においてもプレキャストパネルの背面に 無筋で低強度の裏込めコンクリート(Fc=10N/mm<sup>2</sup>,厚 さ 100mm)を増打ちしたタイプ(試験体名に"BF"付 記)も用意した。コンクリートブロック試験体について は、試験体の表面を出来る限り凹凸の無い滑面とするた めに割り面仕上げの製品ブロックを利用した。ブロック 試験体の厚さはブロック控え長さ 35cm に裏込めコンク リート 10cm 加えた総厚 45cm とした。なお、ブロック試 験体の作製方法は実際の施工方法とは異なるが、製品ブ ロックの表面を下向きに並べた後、その上から胴込コン クリートと裏込コンクリートを打設した。また、実際の ブロック積み工法は連続体で施工されるため、試験体周 囲(4側面)を鋼材で拘束したタイプについても行った。



図-1 本工法の概要図

表-1 試験体の諸元

	種類	試験体							
試験体名		寸法			仕様				
		短辺 方向 長さ 子	長辺	厚さ	コンクリ ート強度 (材料強度)		裏込め		
			式 方向 長さ			配筋 (鉄筋比)	厚み	強度	拘束 条件
		mm	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>		mm	N/mm <sup>2</sup>	
PW-B-31	プレキャスト パネル	895	1190	120	46.4	D16 @200mm (1.40%) D16 @100mm (2.52%)	無し	-	し
PWBF-B-31					42.6		100	14.2	焦し
PWS-B-31					44.2		無し	-	焦し
PWSBF-B-31					42.6		100	14.2	し
BL-B-31	コンクリート ブロック			450	49.4	-	100	33.1	有り
BL-B-32							100	33.1	無し



061

短辺断面図

▽衝突面 20 8 895





# 3.2 衝突載荷方法

衝突載荷実験装置を図-3に示す。円形鋼管(φ232mm ×12mm)を落下ガイドとする自由落下方式で、重錘の 落下高さは 1m とした。筆者らがこれまでに行ってきた 護岸構造の表面材を想定したプレキャストパネルに対す る衝突実験<sup>9)10)</sup>では、河川設計流速10m/sを再現するた めに落下高さ 6m としてきたが、本実験では繰返し衝突 による損傷の進行を観察するために実験可能な最小落下 高さである 1m とした。衝突載荷状況を写真-1 に示す。 重錘の落下は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。落下に使用した重 錘は先端の衝突部が曲率半径 82mm の半球体形状 (S45C 硬鋼, 焼入れ)の鋼製構造で, 重錘質量も損傷の進行観 察のため、これまでの実験 910)で用いた組立式重錘を改 良した最小質量の75kgとした。載荷は落下高さ, 重錘質 量を変えずに最終載荷まで繰返し行った。PW 工法,ブ ロック積み工法とも実用では壁面背面に地盤があるため, 実際に近い支持条件とするため土槽支持とした。使用し た土槽は長辺 1300mm, 短辺 1000mm, 深さ 600mm の鋼 製枠である。この土槽枠内に地盤材料を充填し平坦に均 した地盤上に試験体を水平に静置した。地盤材料には洗 砂(コンクリート用骨材)を用いた。地盤の突き固めは, 2層に分けて1層(300mm)ごとに質量 30kgのビブロプ レートと型枠バイブレータを用いて行い、地盤の仕上が り品質が均一になるよう、巻き出し層ごとに設置した土 圧計の数値が同程度の値を示すことを確認した。2体目 以降の試験体設置時には、同様の地盤状態を確保するた め実験ごとに地盤上半 300mm 部分を解して再度突き固 めを行った。

試験体の損傷状況の確認については、ひび割れ幅を表面,裏面,側面ごとにクラックスケールを用いて計測し、 ひび割れ状況を写真とスケッチにより記録した。

## 4. 実験結果

#### 4.1 試験体の損傷・破壊状況

各試験体の衝突回数とひび割れ幅の関係を図-4 に示 す。ここで,裏込め有り試験体の背面のひび割れ幅は裏 込めコンクリート背面のひび割れ幅であり,表面は衝突 面を,西面・東面は長辺方向の側面を示している。

**写真-2** は載荷終了後の損傷状況で,試験体の衝突面と 背面の様子を示している。なお,裏込め有りの試験体の 背面は,最終載荷後に裏込めコンクリートを除去して確 認したパネル本体の背面である。プレキャストパネル試 験体の背面の損傷状況,ひび割れ幅の確認では,載荷ご とに試験体を静かに吊り上げて確認した。一方,コンク リートブロック試験体では,吊り上げることにより変形 に影響を与えてしまう恐れがあったため,背面の確認を



図-3 衝突載荷実験装置



写真-1 衝突載荷状況



行わなかった。衝突回数については、これまでに行った 落下高さ 6m の衝突実験<sup>9)10)</sup>でプレキャストパネル試験 体の重錘貫通に至るまでの累積入力エネルギーは、落下 高さ 1m の本実験での衝突回数 36 回に相当し、同等以上 の累積入力エネルギー条件での評価とするために衝突回 数 37 回を上限とした。各試験体の損傷状況は以下である。

(1) プレキャストパネル試験体

いずれの試験体についても衝突回数 37 回まで衝突載 荷を行ったが、背面のコンクリートが剥落することもな く、重錘が貫通するには至らなかった。また、発生した ひび割れ幅も 2mm 以下に留まっていた。PW-B-31 と PWS-B-31 について衝突面および側面のひび割れ発生状 況を見ると、鉄筋比の小さい PW-B-31 では、4 回目の衝 突でひび割れ幅が 0.15mm となったが、5 回目以降は最 終衝突までひび割れ幅が発達することはなかった。鉄筋 比の大きい PWS-B-31 では、ひび割れ幅が5回目の衝突 で 0.15mm に,7回目の衝突で 0.2mm まで発達したが,8 回目以降は最終衝突までひび割れ幅が発達することはな かった。一方、背面のひび割れ幅を比較してみると、双 方とも1回目の衝突で放射状のひび割れが発生し,2回 目の衝突でひび割れ幅が 0.2mm に発達した。3 回目以降 の衝突では、PW-B-31は7回目の衝突で円形状のひび割 れが生じ始め、25回目の衝突で最大ひび割れ幅 0.95mm を示し、最終衝突後の円形状ひび割れの範囲は平均直径 620mm であった。PWS-B-31 は PW-B-31 と比較して明確 な円形状のひび割れは生じなかったが、14回目の衝突で 最大ひび割れ幅 0.45mm を示し、その後最終衝突まで拡 大しなかった。このことから,鉄筋比が大きいほど衝突 によるひび割れ幅や円形状ひび割れ範囲の拡大抑制に寄 与するものと考察される。

# (2) プレキャストパネル(裏込め有り) 試験体

PWBF-B-31 と PWSBF-B-31 について衝突面および側 面のひび割れ発生状況を見ると、PWBF-B-31 では 30 回 目の衝突でひび割れ幅 0.2mm となり, PWSBF-B-31 では 6回目の衝突でひび割れ幅 0.15mm となった。以降はい ずれの試験体とも最終 37 回目の衝突までひび割れ幅は 拡大しなかった。一方, 裏込めコンクリートの背面状況 については写真を掲載していないが、PWBF-B-31 および PWSBF-B-31 ともひび割れは放射状に発生しただけであ り,最大ひび割れ幅はそれぞれ 0.65mm および 0.3mm で あった。パネル本体の背面の損傷状況については、最終 衝突後に裏込めコンクリートを除去して比較した。 PWBF-B-31 は放射状および円形状にひび割れが確認で き、最大ひび割れ幅は 0.25mm で円形状ひび割れの範囲 は平均直径 265mm であった。PWSBF-B-31 は放射状のひ び割れのみで円形状のひび割れは見られず、最大ひび割 れ幅は0.25mmであった。このことから、裏込め有り試



#### (3) コンクリートブロック試験体

いずれの試験体についても衝突回数 18 回まで衝突載 荷を行ったが,側面中央部に生じたひび割れが貫通して, その後の衝突で拡大していった。側面拘束無しの BL-B-32は、8回目の衝突で側面中央部に幅 0.15mm のひ び割れが生じ、9回目の衝突で衝突面に幅 0.95mmのひ び割れが生じて貫通した。11回目の衝突で衝突面および 側面のひび割れ幅は 3.0mm まで発達し、18 回目の最終 衝突ではひび割れ幅は9.0mmまで発達した。一方,側面 拘束有りの BL-B-31 は,8回目の衝突で側面中央部に幅 0.03mm 以下の微細なひび割れが生じ、11 回目の衝突で 衝突面に幅 0.7mm のひび割れが生じて貫通した。13 回 目の衝突で衝突面および側面のひび割れ幅がそれぞれ 2.0mm および 3.0mm となり、18 回目の最終衝突でまで ひび割れ幅は拡大しなかった。このことから、コンクリ ートブロック試験体では,試験体側面を拘束することで ひび割れ幅の発達には若干寄与するものの、破壊につい て大きな差異は無かった。

すなわち, プレキャストパネル試験体は初期段階から 微細なひび割れが分散して発生するが, その後の載荷で もひび割れ幅が拡大することはなかった。さらに, 鉄筋 比が大きく, 背面に裏込めがあると, ひび割れの拡大が 顕著に抑制される傾向を示した。

一方,コンクリートブロック試験体の場合は,初期段 階ではひび割れは生じないが,一旦ひび割れが発生する とひび割れの進展・拡大が大きく,脆性的に破壊に至る 傾向を示した。

#### 4.2 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。 これは,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考え方である<sup>12)</sup>。そこで, 本実験における衝突に対してもこの考え方を適用し検討 を行うこととする。ここで,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する。また,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)と定義する。 衝突回数と累積入力エネルギーの一覧を**表-2**に示す。

ここで,累積入力エネルギーは各試験体の最終衝突の回 数までの累積値としている。なお,本実験では,表面の ひび割れ幅が 2mm 以上に発達した時点を損傷限界と定 義していることから,表面のひび割れ幅が 2mm 以上に 達した衝突回数における累積入力エネルギーと,最終衝 突壊時の損傷状況も**表-2**中に併せて示している。また, プレキャストパネル試験体については、衝突回数が 37 回までに貫通破壊,もしくは幅 2mm 以上の表面ひび割 れの発生には至らなかったことから,本実験では 37 回を 最終衝突回数としている。

この結果, すべてのプレキャストパネル試験体の累積 入力エネルギーは 27,195J であった。最終的な損傷状況 は, 衝突面には重錘衝突部の窪みを形成する程度で,背 面は放射状および円形状のひび割れを形成するものの, 背面土砂の吸い出しを誘発するような幅 2mm 以上のひ び割れは生じていない。また, 4.1 節で述べたように, 裏込めコンクリートが無い場合は,鉄筋比が大きいほど 比較的損傷が小さくなり,裏込めコンクリートが無い場

表-2 衝突回数と累積入力エネルギー

試験体名	重錘 質量	落下	<b>最</b> 終 突数	ひび割れ 幅2mm時 の 衝突回数	入力 エネル ギー	最終衝突 時の 累積入力 エネル ギー	ひび割れ 幅2mm時 の 累積入力 エネル ギー	最終衝突 時の 損傷状況	
	kg	m	П	回	J	J	J		
PW-B-31		75 1	37	_	735	27,195	l	(衝突面) 重錘の窪	
PWBF-B-31								4	
PWS-B-31	75							<ul><li>(背面)</li><li>放射状・</li></ul>	
PWSBF-B-31								円形状の ひび割れ	
BL-B-31			10	13		13,230	9,555	貫通ひび 割れ	
BL-B-32			18	11			8,085		

合は、鉄筋比が大きいほど比較的損傷が小さくなり、さらに裏込めコンクリートを有することで損傷が小さくなる傾向を示した。しかしながら、本実験では最終破壊までは確認できていないことから、鉄筋比の違いによる影響までは明確にできなかった。また、最終破壊まで確認しなかった理由としては、本実験の目的は河川護岸維持管理マニュアル(案)において、水密性に影響を与えるだけでなく背面土砂の吸出しが発生する可能性がある有害な亀裂は2mm以上と記載されていることより、本実験では、ひび割れ幅が2mm以上発生した場合を試験体の破壊と定義したが、プレキャストパネルについては、衝突回数37回の段階ではひび割れの進展が確認されなかったため、載荷を終了するに至った。よって、破壊に至らない原因等については、破壊メカニズムを把握する上で重要なことであるため、今後の課題としたい。

次に、コンクリートブロック試験体については、衝突 回数 9~11 回でひび割れが試験体全周に貫通し、衝突回 数 11~13 回でひび割れ幅が 2mm 以上に達している。こ の時の累積入力エネルギーは 8,085~9,555J となった。本 実験で定義した河川護岸での使用限界(ひび割れ幅 2mm 以上)に対する累積入力エネルギーを比較すると、コン クリートブロック試験体に対してプレキャストパネル試 験体の方がおよそ3倍大きい値を示す結果となった。こ の差異は鉄筋の有無による違いが大きく影響したものと 考察される。

よって、エネルギー的観点からの護岸工の機能に対す るブロック積み護岸の健全度(要求される機能)につい ては、表面材に幅 2mm 以上の表面ひび割れが生じない ことを踏まえると、プレキャストパネル試験体は漂流物 の衝突に対する護岸の健全度を保つことは有効であると 考察される。

#### 5. まとめ

本研究では,護岸構造の表面材に必要とされる機能の うち耐衝撃性に対して,護岸構造として本工法を適用す るために土槽支持による重錘質量75kg,落下高さ1mで の繰返し衝突実験を行い,本工法に使用するプレキャス トパネルの衝撃による損傷度の把握を行った。得られた 知見を以下に示す。

1) 裏込めコンクリートが無いプレキャストパネル試験体は、衝突によって試験体背面に放射状および円形状のひ び割れが発生する。

2) プレキャストパネル試験体は、初期の衝突段階から微 細なひび割れが発生するものの、ある程度ひび割れが進 展すると、その後の衝突によってひび割れ幅が発達しな い傾向を示す。

3) 裏込めコンクリートが無いプレキャストパネル試験体は,鉄筋比が大きいほど試験体の損傷を抑制する効果がある。

4) プレキャストパネル試験体は,裏込めコンクリートを 有することで損傷を抑制する効果がある。

5) コンクリートブロック試験体は,初期の衝突段階では ひび割れが発生する傾向を示さない。しかしながら,一 旦ひび割れが発生するとひび割れの進展が早く, 脆性的 に破壊に至る傾向がある。

6) プレキャストパネル試験体は、コンクリートブロック 試験体に比べて、より大きな累積入力エネルギーに耐え ることを確認した。

以上のことから、プレキャストパネルの衝撃による損 傷度は、ブロック積みと比較して小さくできることを確 認した。また、プレキャストパネルは河川護岸の機能低 下として懸念される背面土砂の吸い出しを誘発するよう な有害なひび割れの発生する可能性は比較的小さいこと が確認できた。

よって、本工法は河川漂流物などの衝突に対して護岸 の健全度を保つには有効な表面材を有しており、実用化 へ導くデータの蓄積が出来たものといえる。しかしなが ら,現状では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ことから,引き 続きプレキャストパネルに対する耐衝撃性に関する衝突 実験を実施し,最終的には本研究の成果として,河川護 岸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ように導 きたいと考えている。

#### 謝辞

本研究では、㈱テクノサポートの西尾信行氏の協力に より試験体を提供していただきました。また、実験実施 にあたっては、矢作建設工業㈱エンジニアリングセンタ ーの桐山和也主席研究員、野村敬之主席研究員、武藤裕 久主任研究員に多大な協力を得ました。ここに記して深 くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 国土交通省東北地方備局:設計施工マニュアル(案)
  [河川編・道路編], p.1-2-10, 2003.4
- 2) 同上, pp.1-2-14~15, 2003.4
- 3) 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
- 4)太田均,木村隆志,関屋智明,沢田和秀: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,2011.7
- 5)太田均,木村隆志,関屋智明,沢田和秀: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,2011.7
- 6)(社)日本道路協会:道路土工擁壁工指針, p.168, 2012.7
- 7)(社)日本河川協会:河川砂防技術基準(案)同解説設 計編, p.32, 1997.10
- (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, 2012.7
- 長沼明彦ほか: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,2018.8
- 長沼明彦,神谷隆,萩野谷学,大野友則:プレキャストパネルの耐衝撃性に関する実験的検討,第41
  回コンクリート工学講演会,2019.7
- 11) 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
- 12) 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