

鋼繊維補強無孔性コンクリートパネルを用いた 落石防護擁壁の耐衝撃性向上効果に関する重錘衝突実験

Weight-impact loading test on upgrading effects of Porosity-Free Fiber Reinforced Concrete panels
on impact resistance capacity of rockfall protection retaining walls

室蘭工業大学大学院 ○正員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai) 室蘭工業大学大学院 正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
太平洋セメント(株) 正員 河野 克哉 (Katsuya Kono) 太平洋セメント(株) 正員 岸良 竜 (Ryo Kishira)
太平洋セメント(株) 正員 溝口 愛実 (Manami Mizoguchi) 太平洋セメント(株) 正員 小島 克仁 (Katsuhito Kojima)
室蘭工業大学大学院 学生員 松原 涼 (Ryo Matsubara) 室蘭工業大学大学院 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国の海岸線や山岳部の道路沿いには、小規模落石等に対する道路防災対策として、落石防護擁壁(以下、擁壁)が数多く設置されている。現行設計法では、擁壁を剛体と仮定し、落石衝突によって擁壁に伝達される運動エネルギーと基礎地盤の弾性応答エネルギーが等価となる水平変位および回転が生じるものとして設計が行われている。しかしながら、実擁壁は重力式の無筋コンクリート構造であるため、実際に落石が衝突した場合には設計では考慮されていない局部破壊が生じるとともに、コンクリート片の剥落に伴う第三者被害の発生も懸念されている。また、近年では温暖化に伴う異常気象や斜面の経年劣化などにより、落石災害が大型化する傾向にあり、既設落石防護擁壁に関する耐衝撃性向上法の確立が急務となっている。

一方で、現在、国内外において超高強度コンクリートに関する研究が推進されており、圧縮強度 400 N/mm² 以上を有する無孔性コンクリートに鋼繊維を混入させた鋼繊維補強無孔性コンクリート (Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete, 以下、PFFRC) が開発され、一部実用化されつつある。この超高強度特性や鋼繊維の架橋効果に基づき、補強材や緩衝構造の芯材として利用することにより既設構造物の耐衝撃性を大幅に向上できる可能性があるものの、それらについて十分に検討が行われていないのが現状である。

このような観点から、本研究では、既設落石防護擁壁の耐衝撃性向上法として PFFRC で製作したパネルに着目し、PFFRC パネルと発泡スチロール材 (EPS 材) を併用した緩衝構造を提案し、その効果に関して実験的に検討を行った。ここでは、高さ 2 m の落石防護擁壁に厚さ 50 mm の PFFRC パネルおよび材料特性の異なる 2 種類の EPS 材を擁壁衝突面に設置し、重錘衝突衝撃荷重実験を行うことで、重錘貫入量や擁壁の損傷状況に着目して検討を行うこととした。なお、比較のために、提案の緩衝構

造を適用しない場合についても同様に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 PFFRC の概要

表-1には、PFFRC に用いた材料を示している。結合材には、最大粒子の低熱ポルトランドセメントと最小粒子のシリカフェームに対して中間粒子となる粉体(石英微粉末)を加えて最密粒度とした PFC 専用プレミックス結合材(B)²⁾を、細骨材には珪砂(S)を、混和剤には高性能減水剤(SP)ならびに消泡剤(DF)を用いている。また、短繊維には引張強度 2,800 MPa の高強度鋼繊維(F)を用い、体積比の外割で 3.5 % 混入した。表-2には PFFRC の配合を示している。水結合材比(W/B)は 15 % とした。

PFFRC は、オムニミキサ(容量 30 ℓ) に F を除く材料を投入した後に 6 分間の練混ぜを行い、その後 F を投入し、さらに 2 分間の練混ぜを行った。練混ぜ終了後、型枠に打設し封緘養生(20℃)を行い、材齢 48 h で脱型した。

脱型後、セメントの水和反応を促進するため PFFRC を水を満たした容器内に水没させ、水中にボイラー蒸気を引き込んで 30 分間煮沸し、そのまま水中で外気温まで自然放冷することで、外表面から内部に水の供給を行った。その後、蒸気養生(最高温度 90 °C, 保持時間 48 h, 1 気圧)を行い、さらに加熱養生(最高温度 180 °C, 保持時間 48 h, 1 気圧)を実施した。その他、詳細については文献 1), 2) を参照されたい。

2.2 試験体概要

図-1には、本研究で対象とした擁壁に PFFRC パネル

表-2 PFFRC の配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤添加量 [*] (kg)	
	W	B	S	F	SP	DF
15	199	1331	934	157	B × 1.05%	B × 2%

*: W の一部に内割置換

表-1 使用材料の一覧

種類	名称	略号	成分ならびに物性
結合材	PFC 専用プレミックス粉体	B	最密度粉体, 密度: 2.97 g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法: 0.3 mm, 密度: 2.61 g/cm ³
短繊維	高強度鋼繊維	F	直径 0.2 mm, 長さ 15 mm, 密度 7.84 g/cm ³ 引張強度: 2,800 N/mm ² , 引張弾性率: 200 kN/mm ²
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF	ポリアルキレングリコール誘導体

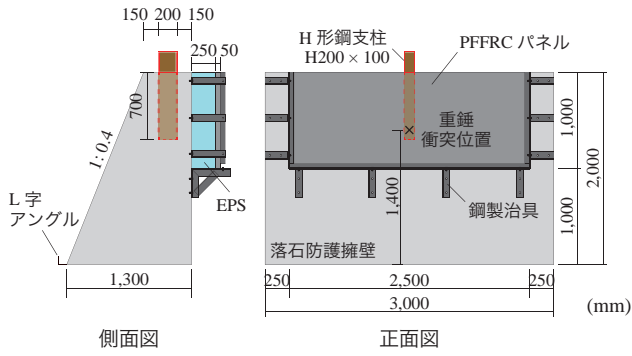


図-1 Ps試験体の形状寸法

表-3 実験ケース一覧

試験体名	PFFRCパネル設置の有無	鋼繊維混入率 (%)	設定重錘落下高さ H (m)	設定重錘衝突速度 V (m/s)	実測重錘衝突速度 V' (m/s)
N-H10	無し	3.5	10	14.0	13.9
P20-H10	有り (EPS:D20)				14.0
P35-H10	有り (EPS:DX35)				13.6

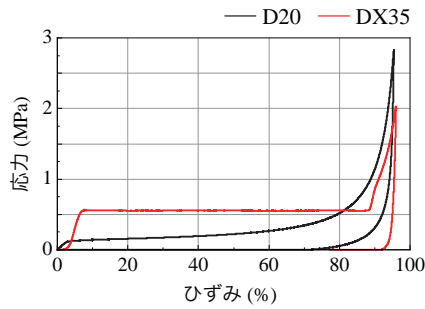


図-2 EPS材料の応力-ひずみ関係

(以下、パネル) および EPS 材を設置した Ps 試験体の形状寸法を示している。擁壁の形状寸法(幅×高さ×奥行き)は、3,000×2,000×1,300 mm であり、防護柵支柱を模擬し H 形鋼支柱 (H200×100×700) を幅方向中央部に埋設している。なお、材料試験結果より擁壁の圧縮強度は $f'_c = 33 \text{ MPa}$ であった。

提案の緩衝構造を設置した Ps 試験体の場合には、図-1 に示すように重錘衝突面には擁壁に接するように EPS 材(厚さ 250mm)を、さらにその上に荷重分散用にパネル(厚さ 50 mm)を設置している。パネルの形状寸法(幅×高さ)は 2,500×1,000 mm である。なお、図に示すように、擁壁にはパネルおよび EPS 材を固定するために山形鋼などによる鋼製治具が取り付けられている。また、EPS 材は、製作の都合上、擁壁中央部に長さ 2,000 mm を 1 枚、左右に 250 mm を 1 枚ずつ計 3 枚配置している。

表-3 には実験ケース一覧を示している。ここでは、パネル設置の有無および EPS 材の種類を変化させた 3 ケースの実験を実施した。試験体名に関して、第一項目はパネル設置の有無 (N: パネル無し, Ps: パネル有り) を表しており、Ps に後続する数値は EPS 材の種類(20: 後述の



写真-1 Ps試験体の設置状況

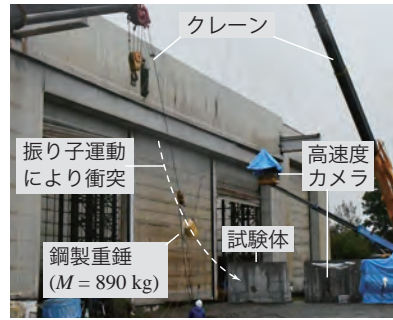


写真-2 実験状況

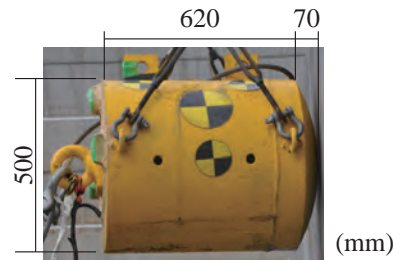


写真-3 重錘の形状寸法

D20; 35: 後述の DX35) を示している。第二項目に関しては、設定重錘落下高さ (m) を表しており、いずれのケースも 10 m 落下とした。

図-2 には、本実験で使用した 2 種類の EPS 材に関する応力-ひずみ関係を示している。ここでは、単位体積重量が 0.2 kN/m^3 (D20) あるいは 0.35 kN/m^3 (DX35) の EPS 材を用いることとした。図より、いずれの EPS 材においても、ひずみが 10% 程度から 70~90% 程度に至るまで応力がほぼ一定値を示していることが分かる。また、その値は D20 の場合よりも DX35 の場合の方が大きく、かつ初期の応力勾配も大きいことが確認できる。

2.3 実験方法

写真-1, 写真-2 には、試験体の設置状況および実験状況を示している。図より、実験は 2 台のクレーンを用いた振り子運動によって重錘を擁壁に衝突させる形で実施した。重錘は、ロープを介して 1 台目のクレーンに接続し回転中心を決定した後、2 台目のクレーンによって重錘底部に取り付けた脱着装置を介して所定の高さまで吊り上げている。写真-3 には、重錘の形状寸法を示している。重錘は質量 890 kg の鋼製であり、直径 500 mm、全長 690 mm の円柱状となっている。図より、載荷部は高さ 70

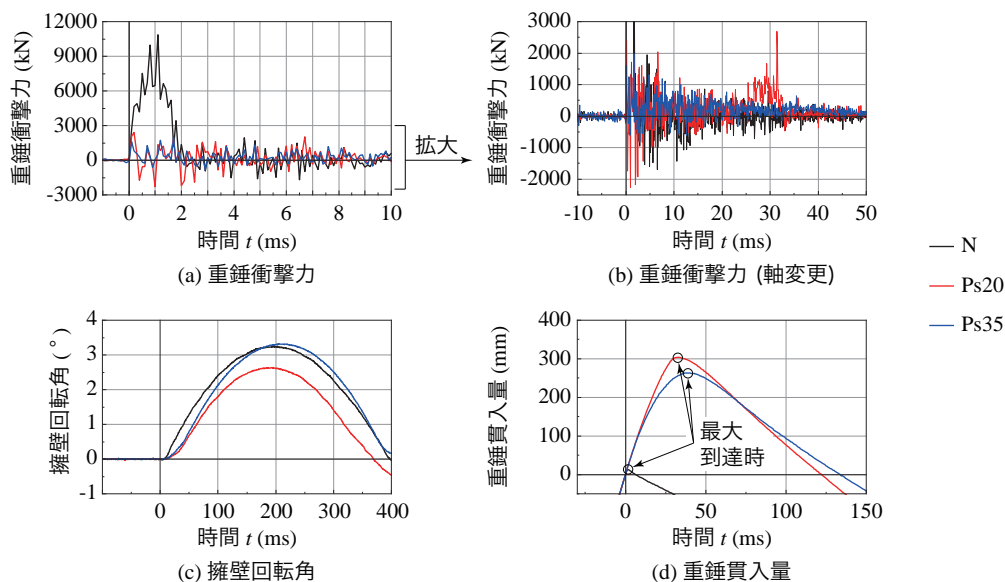


図-3 各時刻歴応答波形

mm が球面状となっている。重錘衝突位置は、図-1に示すように、擁壁幅方向中央部とし、高さは底部から2/3の位置(=1,400 mm)とした。また、コンクリート基盤上には擁壁つま先部にストッパー(L字アングル)を設置し、擁壁の水平方向移動を拘束しつつ、回転を許容する形で載荷を行った。

本実験の測定項目は、1) ひずみゲージ式加速度計による重錘衝撃力、2) 高速度カメラの画像による重錘貫入量、3) 重錘衝突速度、および4) 擁壁回転角である。なお、擁壁回転角に関しては擁壁側面に貼り付けた2点のターゲットマーカの移動量から算出した。また、実験終了後には、試験体のひび割れ分布も観察・記録している。

3. 実験結果および考察

3.1 各時刻歴応答波形

図-3には、本研究で実施した全3ケースに関する各時刻歴応答波形を示している。なお、重錘衝撃力に関しては軸を変更した2つの波形を示している。また、(d)図に示す重錘貫入量波形は、擁壁回転角波形を基に擁壁移動分を除去した結果を示している。

(a),(b)図より、重錘衝撃力波形を見ると、パネルを設置していないN試験体の場合には、最大10,500 kN程度を示す正弦半波の波形性状を呈しており、その継続時間は2 msと非常に短い。一方で、パネルを設置しているPs試験体に着目すると、Ps20およびPs35試験体ともに、高周波成分を多く含んだ波形性状を示している。また、その継続時間はPs20/35試験体に関してそれぞれ、35, 50 ms程度となっており、Ps35試験体の方が長く示されている。最大衝撃力を見ると、Ps試験体はいずれも2,000~3,000 kN程度であり、N試験体の場合と比較すると、パネルおよびEPS材を設置することによって最大衝撃力を1/4~1/5程度まで大きく低減可能であることが分かる。

(c)図より、擁壁回転角波形を見ると、N試験体の場合には、10 ms経過後に回転運動を開始し、200 ms程度で最大3.3°まで到達していることが分かる。その後、擁壁つま先部を中心として、逆回転を始め、400 ms程度で復元

している。なお、400 ms程度以降においては減衰自由振動状態に至っていることを確認している。一方で、Ps20試験体に着目すると、N試験体と同様な波形性状を示しているものの、その最大値は2.6°程度と小さく示されている。これは、後述するように、PFFRCの高強度特性とともに鋼繊維の架橋効果による高靱性特性によって衝撃荷重の分散化が図られEPS材の圧縮変形に伴う緩衝効果が大きく発揮されるとともに、パネル自体の損傷によって衝突エネルギーが効率よく吸収されたことによるものと推察される。Ps35試験体の場合には、Ps20試験体と同様に、N試験体に比較して若干遅く回転が生じていることが分かる。また、50 ms程度まではPs20試験体とほぼ類似の挙動を示しているものの、最大回転角はN試験体とほぼ等しい。これは、Ps35試験体においてもPs20試験体と同様に衝突エネルギーが吸収されるものの、EPS材における降伏棚の応力がPs試験体と比較して大きいことや、重錘衝突位置が他の試験体と比較して150 mm程度上方であったことによるものと推察される。

(d)図より、重錘貫入量波形に着目すると、N試験体の場合には、重錘衝撃力波形と対応して、重錘は1 ms時に最大15 mm程度擁壁に貫入していることが分かる。一方で、Ps20/35試験体の場合には、N試験体の場合と比較すると、最大貫入量到達時刻が40 ms程度となっている。これは、重錘がパネルやEPS材に徐々に貫入しながら最大値に到達していることによるものと推察される。なお、最大貫入量に着目すると、Ps20/35試験体の場合にはそれぞれ、300, 260 mm程度を示し、Ps35試験体の方が小さい。これは、1) 前述の通り、Ps35試験体の場合にはPs20試験体の場合よりも擁壁上部に衝突していること、および2) 図-2に示すように、Ps35試験体で用いたEPS材料の方がPs20試験体で用いたものより初期剛性が大きいこと、等によるものと推察される。

3.2 実験終了後における試験体の損傷状況

図-4には、全3ケースに関する実験終了後のひび割れ図およびパネルの損傷状況写真を示している。なお、N試験体の場合には損傷があった面を、Ps試験体については

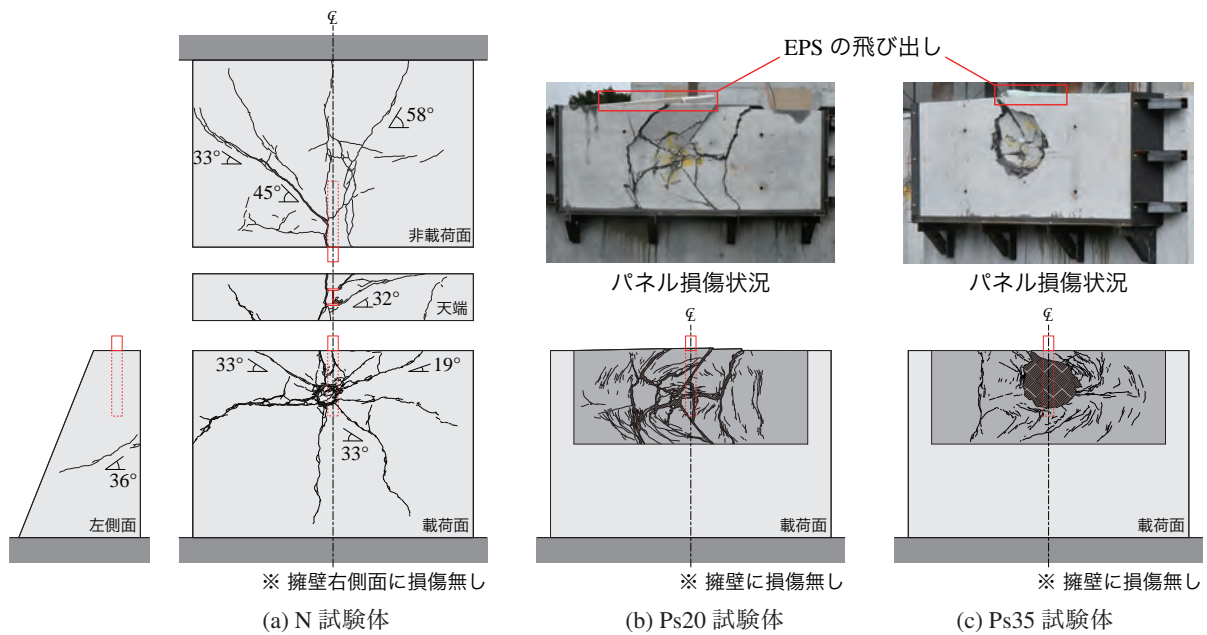


図-4 実験終了後のひび割れ分布および PFFRC パネルの損傷状況

擁壁に損傷が確認されなかったことよりパネルの損傷状況のみを示している。

(a) 図より、N 試験体の場合に着目すると、荷荷面には重錘衝突によって形成された円形のひび割れが確認できる。また、重錘衝突位置を中心に上下左右にひび割れが進展しており、かつ上方には斜め 20～30° 程度の傾きで斜めひび割れの発生も確認できる。天端に着目すると、重錘衝突位置から発生した斜めひび割れがそのまま進展しており、押し抜きせん断破壊に至っていることが推察される。支柱基部からは非荷荷面に向かって斜めひび割れが生じる傾向もうかがえる。非荷荷面に着目すると、支柱埋設部を囲うようなひび割れの形成が確認されるとともに、コンクリート基盤面に向かって斜めに数本のひび割れも発生している。これらを総合的に判断すると、N 試験体の場合には $H = 10\text{ m}$ 落下衝突によって終局状態に至っているものと判断される。

次に、(b) 図に示す Ps20 試験体の場合に着目すると、擁壁には損傷が全く確認されなかった。一方で、パネルの損傷は、重錘衝突点から放射状にかつ荷荷点を中心として円形状に大きなひび割れが開口していることが分かる。また、パネルの重錘衝突部から左右 0.5 m 程度の位置において上下に進展するひび割れが生じているものの、PFFRC の高強度・高靱性特性によって、衝突部近傍を除きパネルの完全な分離には至っていない。さらに、鋼繊維の架橋効果によってパネル全体には多数の微細なひび割れの進展も確認できる。

最後に、(c) 図に示す Ps35 試験体の場合に着目すると、Ps20 試験体と同様に擁壁に損傷は確認されなかった。パネルの損傷は、EPS 材の剛性が Ps 20 試験体よりも大きいことにより、衝突部において円形状に押し抜きせん断破壊が生じやすい傾向にあることが分かる。ただし、ひび割れ分布を見ると、Ps20 試験体と同様にパネル全体に多数の微細なひび割れが生じていることより、PFFRC の高靱性特性が発揮されているものと判断される。なお、(b)、

(c) 図より、EPS 材に関しては、重錘衝突による擁壁天端側からの飛び出しを確認している。

4. まとめ

- 1) 重錘を直接衝突させる N 試験体に関しては、入力エネルギー 87 kJ (≈ 重錘 890 kg, 10 m 落下相当) において押し抜きせん断破壊が発生し、終局に至る。
- 2) 一方で、擁壁衝突面に PFFRC パネルと EPS 材を併用した緩衝構造を設置することで、同一入力エネルギー下においても、擁壁には損傷が全く発生しないことが明らかになった。
- 3) これより、本緩衝構造を採用することで、既設落石防護擁壁の耐衝撃性を飛躍的に向上させることができる可能性が示された。

謝辞

本研究は、土木研究所寒地土木研究所が所有している角山実験場にて実施したものであり、擁壁模型は勇建設(株)によってご提供頂いた。また、実験を実施するにあたり、(株)構研エンジニアリングの牛渡裕二氏からは技術的なアドバイスを頂いた。さらに、PFFRC パネル接着作業に関しては(株)えがお石川浩行氏より多大なるご支援を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。なお、本研究は JSPS 科研費 JP21K04229 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450 N/mm² 以上の圧縮強度を発現するセメント系材料の製造方法と硬化組織の変化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp.1443-1448, 2016.
- 2) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 圧縮強度 400 N/mm² の最密充填マトリクスを有する繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp.279-284, 2016.