土石流を受ける支柱型柔構造の部材別荷重特性に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD ON EACH MEMBER OF FLEXIBLE BARRIER WITH POSTS SUBJECTED TO DEBRIS FLOW

宮原　邑太[1]・堀口　俊行[2]
Yuta MIYAHARA and Toshiyuki HORIGUCHI

[1] 防衛大学校理工学研究科後期課程（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10 番地 20 号）
E-mail: ed24010@nda.ac.jp
[2] 防衛大学校建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10 番地 20 号）
E-mail: htoshi@nda.ac.jp

Key Words: *small mountain stream, debris flow, flexible barrier, post, scale model experiment*

1. 緒　言

近年，無流水渓流 [1]における土石流災害が問題視されている．無流水渓流は人家に隣接する箇所が多く，土石流の発生が人的・物的被害に直結するおそれがある. このため対策工の整備が進められている．しかし，地形が狭隘であることから適用可能な工法は限られる．そのような条件下では，既存の透過型砂防堰堤を簡略化した構造（以降, 剛構造）に加え，**図-1** に示すような支柱強化型 [2]と呼ばれる杭基礎を有する柔構造（以降，支柱型柔構造）が活用されている．これらの構造物の設計では，土石流流体力の算定に用いる係数を調整することで構造形式の違いを考慮する事例 [3]もみられる．しかし，国内での設計実務において，剛構造と支柱型柔構造，あるいは柔構造の構造形式の違いに応じた明確な荷重評価の区分は十分に整理されていないのが現状である．

一方，柔構造と剛構造では，土石流作用時の応答特性に明確な差異があることが報告されている．例えば，筆者ら [4]は縮小模型実験により，柔構造と剛構造に作用する荷重特性に差異があることを示した．Song et al.[5]は遠心模型実験により，巨礫を含む土石流の衝突に対して，柔構造と剛構造で計測荷重が異なることを報告している．しかし，これらの既往研究では，柔な捕捉面のみを対象としており，支柱とロープ等による複合構造の検討は限られている．一部，複合構造を対象とした研究 [6]も見られるが，施設の捕捉効果の検討が主であり，支柱やロープなど各構成部材に作用する荷重特性については十分な検討がなされていない.

支柱型柔構造では, 支柱が主要な構造部材であり，支柱の損傷は構造安全性の低下に直結する. さらに，捕捉面を構成するロープ等の破断は，捕捉機能そのものの喪失につながる可能性がある．支柱型柔構造については，このような構成部材ごとの耐力等は検討されてきた [7]．一方で，支柱型柔構造として土石流を捕捉した際に支柱とロープの各部材へどのように荷重が分担・伝達されるかを把握することは，構造としての耐荷性能を適切に評価し，設計へつなげる上で重要である．しかし，支柱とロープから成る

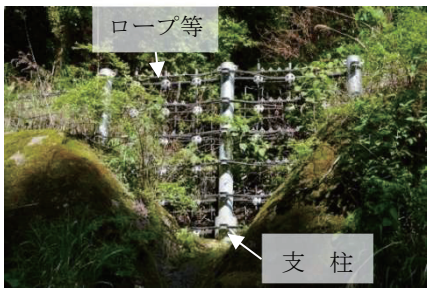
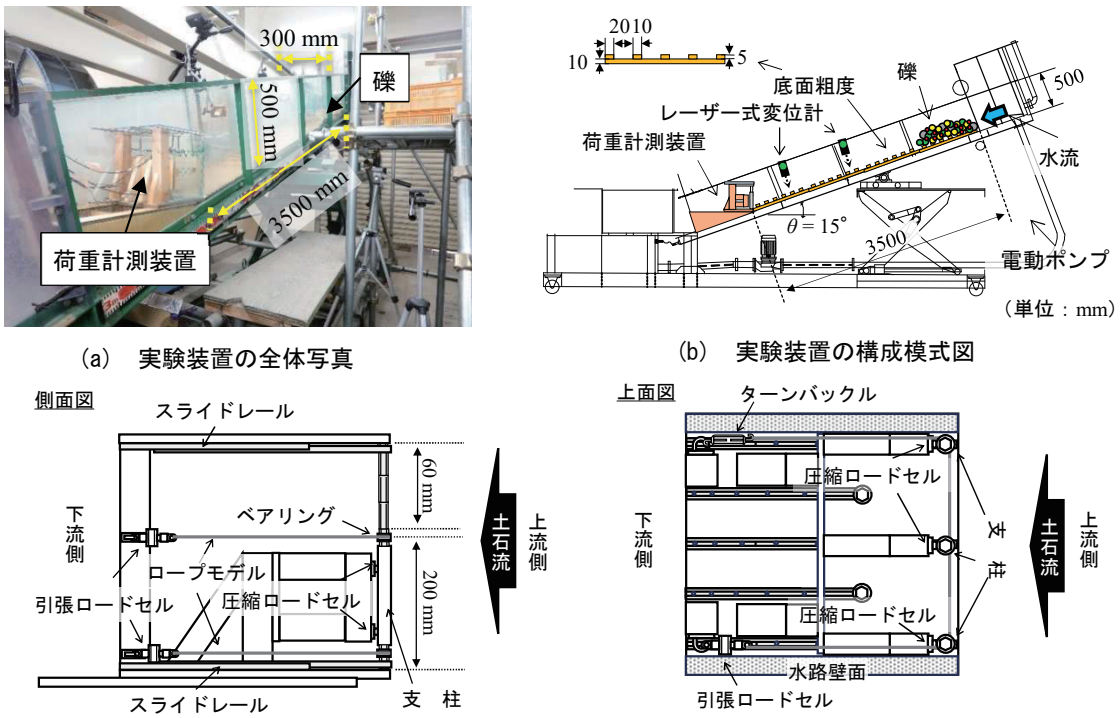


図-1　支柱型柔構造



(a)　実験装置の全体写真　　(b)　実験装置の構成模式図

(c)　荷重計測装置

図-2　実験装置

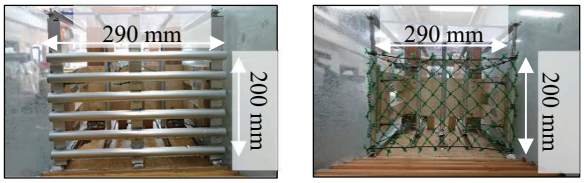
複合構造として，土石流捕捉時の部材別荷重特性を実験的に整理した研究は限られている．

そこで本研究では，土石流を受ける支柱型柔構造を対象として，支柱およびロープに作用する荷重特性を実験的に検討する．具体的には，支柱本数の異なる支柱型柔構造と剛構造を比較対象として用い，構造形式の違いが部材別荷重および荷重分担に与える影響を明らかにする．特に，ロープ張力，支柱別荷重，中間支柱の本数が作用荷重に及ぼす影響に着目し，支柱型柔構造における荷重伝達特性を整理する．さらに，得られた知見に基づき，支柱型柔構造の耐荷性能評価および設計上の留意点について考察する．

2. 実験方法

(1) 実験装置

本研究では，支柱型柔構造や剛構造に作用する土石流荷重を検討するため，**図-2** に示す実験水路を用いて縮小模型実験を行った．水路は，長さ 4,350 mm，幅 300 mm，深さ 500 mm であり，河床勾配は 15º に設定した．水路側面はガラス製であり，流下状況を側方から観察できる．また，水路底面には幅 10 mm，高さ 5 mm の桟粗度を 20 mm 間隔で設置した．上流端から発生させた土石流を，下流端に設置した荷重計測装置（**図-2(c)**）に衝突させることで，各捕捉面に作用する荷重を計測した．なお，流下区間の長さは 3,500 mm とした．流下区間の下流には設置間隔 1,000 mm で二つのレーザー式変位計（キーエンス：LB-300）を設置し，土石流流動深の計測および計測開始時間差から流速の算出を行った．



(a)　剛構造　　(b)　支柱型柔構造

図-3　捕捉面（水路上流側から撮影）

荷重計測装置の上流側には，**図-3** に示す捕捉面模型を設置した．捕捉面は，支柱型柔構造と剛構造の 2 種類とし，いずれも高さ 200 mm，幅 290 mm とした．これは原型縮尺 1/20 を想定したものである．支柱型柔構造については，捕捉面を支持する支柱本数を 2 本（左右岸のみ），3 本（中間支柱 1 本），5 本（中間支柱 3 本）に変化させて実験を行った．これが，本実験における主要なパラメータとなる．この際，それぞれ支柱部材間隔 290 mm, 145 mm, 72.5 mm を用いて結果の整理を行った．

各支柱の上下端はスライドレールにより支持されており，上下流方向に平行移動可能な構造とした．各支柱の下流側には 2 個の圧縮ロードセル（共和電業：LMB-500-N）を設置し，土石流捕捉時に支柱がロードセルを押圧することで，水路軸方向の荷重を計測した．本実験では，各捕捉面を支持する全圧縮

表-1　主要な相似比

物理量	次　元	相似比
長　さ	L	λ
質　量	M	λ^3
時　間	T	$\lambda^{1/2}$
密　度	ML^{-3}	1
加速度	LT^{-2}	1
速　度	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$
力・荷重	MLT^{-2}	λ^3
応　力	$ML^{-1}T^{-2}$	λ
ばね定数	MT^{-2}	λ^2

表-2　ロープの物性値

物理量	模　型	原　型
長　さ	290 mm	5.8 m
ばね定数	2.0 N/mm	800 N/mm

ロードセルの計測値の合計を総荷重と定義する．

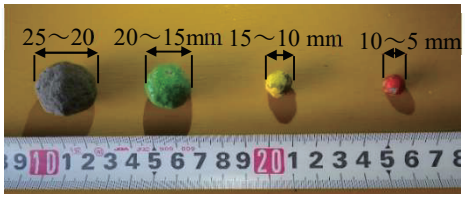
また，支柱型柔構造の捕捉面上下はロープにより支持されており，ロープ左岸側端部に引張ロードセル（共和電業 : LUR-A-200NSA1）を接続することで張力を計測した．本実験では，上段ロープと下段ロープで計測された張力をそれぞれ上段張力，下段張力と呼称する．なお，ロープの右岸側端部に設置したターンバックルにより初期張力 5 N を導入することで初期条件を統一した．各計測値の記録にはユニバーサルレコーダ（共和電業 : EDX-100A）を用い，サンプリング周波数 100 Hz で計測した．

なお，実構造では支柱基礎部が固定され，片持ち梁に近い支持条件となることが想定されるため，本実験装置とは境界条件が異なる．この支持条件の違いが支点反力の評価に及ぼす影響は比較的限定的であると考えられる．一方で，上段ロープの張力応答や変形挙動に影響を及ぼす可能性がある．

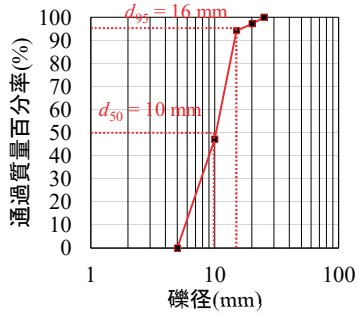
(2) 実験の相似則

本実験では，模型と実物との挙動差を可能な限り抑えることを目的として，**表-1** に示す相似比を参考に材料を選定した．基本的な相似比はフルード相似則に基づくものとした．フルード相似則では一般的に質量相似を満足するためにダミー質量を付加する方法が用いられるが，本実験では土石流側の質量を調整することが実質不可能であった．そこで，Lambert et al.[8]の研究を参考に，材料のばね定数を調整することとした．本実験では，以下の仮定に基づき縮小模型の材料を選定した．

1) 支柱および剛構造の捕捉面については剛体と仮定し剛性について考慮しない．



(a)　礫モデル



(b)　粒径分布

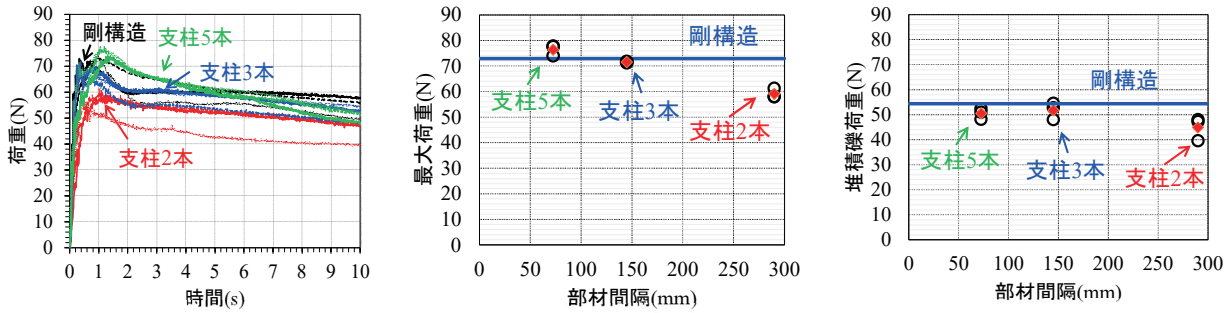
図-4　土石流の構成材料

2) 土石流中の礫も剛体と仮定する．
3) 支柱型柔構造の捕捉面として使用するロープは変形するため，ばね定数を調整する．この際，曲げ剛性および質量については考慮しない．

支柱は，直径 ϕ14 mm のアルミパイプを使用し，各捕捉面ともに共通とした．剛構造の捕捉面横材には ϕ16 mm のアルミパイプを使用した．次に支柱型柔構造のロープモデルとして，ϕ1.5 mm のナイロンロープを使用した．卓上試験機を用いて計測したロープモデルの物性値についてフルード相似則に基づいて整理すると**表-2** となる．なお，原型の材料は ϕ22 mm の 6×24 ワイヤロープを想定したものである．原型換算したロープの物性値は，実構造で用いられるワイヤロープの諸元と大きく乖離しない範囲であることを確認した．

(3) 土石流モデル

土石流の礫モデルには，**図-4 (a)** に示す 4 種類の粒径の固化石炭灰を使用した．礫材は比重 1.9，内部摩擦角 20～25º 程度，乾燥時の単位体積質量 1140 kg/m^3 である．これらの礫を総容積が 20×10^{-3} m^3 となるように混合した結果，粒度特性は d_{95} = 16 mm, d_{50} = 10 mm となった（**図-4 (b)**）．混合礫は，水路の上流端に厚さ約 50 mm，長さ約 1,300 mm となるよう台形状に設置した．この堆積礫の上流側から流量 4.9×10^{-3} m^3/s の流水を 5 s 間ほど定常供給することで，土石流を発生させた．発生した土石流の代表諸元は，流速は 1.1 m/s，先頭部の流動深は 65 mm，単位体積質量は 1570 kg/m^3 であった．ここで，単位体積質量については流下してきた土石流を 2.0×10^{-3} m^3 の枡で直接採取することで計測した．



(a) 計測波形　(b) 最大荷重　(c) 堆積礫荷重

図-5 総荷重の計測結果

実験は，この土石流条件に対して 4 種類の捕捉面に作用する荷重を比較した．なお，各条件については 3 回ずつ繰り返し実験を行った．

3. 実験結果と考察

(1) 総荷重の計測結果

荷重計測により，**図-5** に示す総荷重の結果を得た．なお，**図-5 (a)** には，各ケース 3 回分の波形を示しており，時刻 t = 0 s は荷重の立上り時点に合わせて整理した．計測波形に着目すると，支柱本数 3 本および 5 本のケースでは，剛構造と比較して総荷重波形に顕著な差異は認められなかった．一方，支柱本数 2 本のケースでは，荷重波形全体が剛構造に比べて概ね 10 N 程度小さく，最大荷重のみならず総荷重そのものの低下が確認された．支柱本数ごとの堆積後の捕捉面の下流側への最大変形量を比較すると，支柱本数 2 本では 70 mm であったのに対し，支柱本数 3 本では 35 mm と半減し，支柱本数 5 本では変形は微小であった．このことから，支柱本数 2 本では中間支柱を有さないために捕捉面の変形が大きく，衝突時に荷重伝達が緩和された可能性がある．一方，中間支柱を有する支柱本数 3 本以上では，捕捉面変形が抑制されることで，総荷重は剛構造に近い応答を示したと考えられる．Ashwood and Hungr[9]は，変形量が小さくなると，総荷重が剛構造に近づくことを示しており，本実験結果もこの傾向と整合している．ただし，同研究では流動深に対する変形量の 25 %を閾値として示しているのに対し，本実験では支柱本数 3 本の変形量が先頭部流動深に対して約 50 %であったにもかかわらず，剛構造と同程度の総荷重が得られた．このことは，支柱型柔構造では捕捉面全体が一様に変形するネット型柔構造とは異なり，中間支柱の存在が堆積礫の移動や応力再配分に影響を及ぼしている可能性を示唆する．

そこで，堆積後の荷重を準静的な堆積礫荷重とみなし，逆算した土圧係数と，クーロンの土圧理論に基づく主働土圧係数を比較した結果を**表-3** に示す．なお，理論値は堆積高さ 0.2 m，堆積勾配 15°を仮定し，壁面摩擦については考慮せずに算定した．また，逆算土圧係数は，実験で計測された堆積礫荷重を用いて算出した．この際，堆積高さは捕捉面高さである 200 mm とし，単位体積重量等の材料諸元には固化石炭灰の値を用いた．支柱本数 2 本では，逆算した土圧係数は理論値と概ね一致したのに対し，支柱本数 3 本および 5 本，ならびに剛構造では理論値よりも大きな値を示した．このことから，支柱本数 2 本では堆積礫が主働土圧状態に比較的近い荷重状態へ移行した．しかし，中間支柱を有する条件では堆積礫の側方移動や変形が拘束され，主働土圧状態への移行が抑制された可能性がある．すなわち，支柱型柔構造における総荷重は，単純に柔であるか剛であるかだけでなく，捕捉面内の変形拘束の程度，すなわち中間支柱による荷重伝達経路の違いに強く支配されるものと考えられる．

表-3 土圧係数の比較

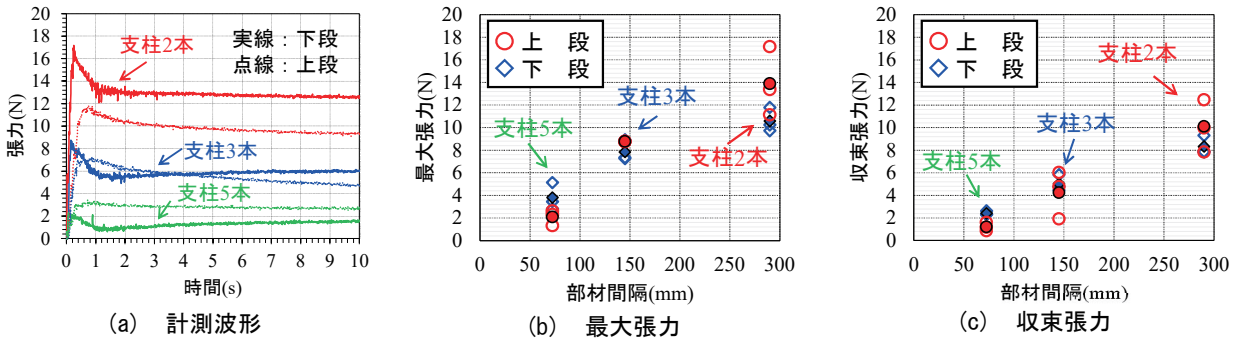
捕捉面	理論値(主働)	実験値
支柱 2 本	0.64	0.62
支柱 3 本	0.64	0.76
支柱 5 本	0.64	0.75
剛構造	0.64	0.75

このような柔構造の応答には土石流の濃度や粒子群構成の影響も指摘されており[5]，構造条件と流動条件を合わせて整理する更なる検討が望まれる．

なお，各条件における 3 回の計測値には最大で 10 N 程度のばらつきが見られたものの，多くは 5 N 以内に収まっており，本実験における荷重計測の再現性は比較的良好であったと考えられる．

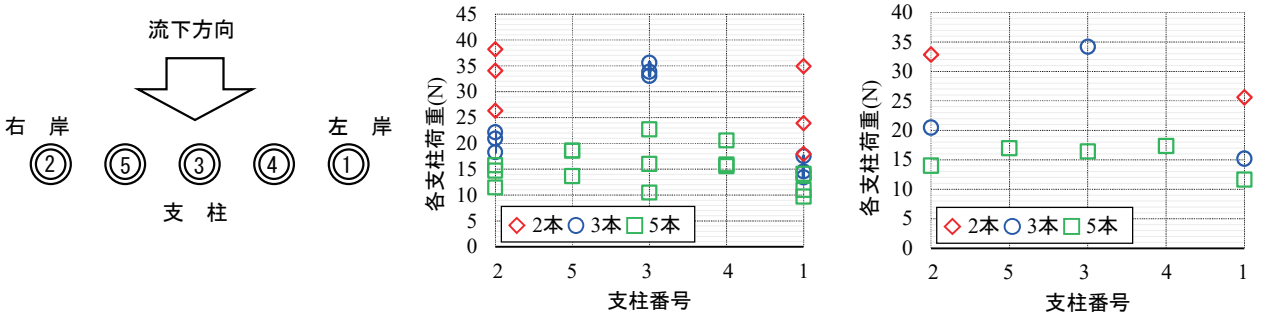
(2) 張力の計測結果

支柱型柔構造における張力の計測結果を整理すると，**図-6** となる．なお，**図-6 (a)** の実線は下段張力，点線は上段張力を表しており，代表例として 1 回分の波形を示した．ここでは初期張力を差し引いた値を示している．張力波形に着目すると，支柱本数の変化に伴って応答特性が大きく変化することが確認された．特に下段張力



(a)　計測波形　(b)　最大張力　(c)　収束張力

図-6　張力の計測結果



(a)　支柱番号の定義　(b)　支柱荷重分布（各回）　(c)　支柱荷重分布（平均）

図-7　支柱の荷重分布（最大荷重発生時）

の最大値に着目すると，支柱本数 2 本に対して，支柱本数 3 本では約 50 %，支柱本数 5 本では約 20 %まで低下した(**図-6(b)**)．これは，中間支柱の増加によって捕捉面全体の変形量が抑制され，ロープに集中していた変形・張力負担が軽減されたためと考えられる．すなわち，支柱本数の増加は総荷重の低減には寄与しないが，ロープ部材に着目した場合には有利に作用することが示唆された．

また，支柱本数 2 本では，最大値は上段張力よりも下段張力の方が 40 %ほど大きくなった．これに対し，支柱本数 3 本と支柱本数 5 本では，上下段張力の最大値は概ね同様の値であった．このことから，中間支柱を有しない条件では，衝突初期において捕捉された礫の影響をより直接的に受ける下段ロープに張力が集中しやすい．一方で，中間支柱が存在する条件ではロープ張力が上下段でより均等に分担されたと考えられる．

最終的な収束荷重は，上下段とも概ね同様であった．このことは，ロープ張力には堆積礫荷重の直接的な寄与よりも，捕捉面の変形挙動の影響が大きいことを示唆している．

(3) 支柱型柔構造の各支柱に作用する荷重

図-5(a)に示した総荷重の最大荷重発生時における各支柱の荷重分布を**図-7** に示す．図中の横軸は，**図-7(a)**に示すように定義した．支柱本数 2 本では，1, 2 番，支柱本数 3 本では 1～3 番，支柱本数 5 本では 1～5 番の支柱位置に対応する．また，図中には各回の計測値とその平均値を併せて示した．総荷重(**図-5**)では各回のばらつきは比較的小さかったのに対し，各支柱荷重には計測回ごとのばらつきが確認された(**図-7(b)**, **(c)**)．総荷重は流入する土石流全体の運動量に強く支配されると考えられるが，各支柱荷重は流下幅方向の礫分布に伴う質量の分布や衝突位置の偏りに影響されるためである．実際には，土石流が幅方向に一様に衝突するとは限らず，右岸側または左岸側から先行して衝突する場合もある．このような流下幅方向の不均一性が，各支柱に作用する最大荷重およびその発生時刻のばらつきを生じさせたと考えられる．

各支柱で計測された荷重に着目すると，支柱本数 2 本では，両方の支柱にそれぞれ 25～35 N の支柱荷重が作用することが確認された．次に，支柱本数 3 本では，中央の支柱では平均 35 N の支柱荷重が作用するものの，左右岸の支柱では 20 N 以下であった．中央の支柱では両端のロープによる張力を負担することが原因である．支柱本数 5 本では，中間支柱に作用する荷重の方がやや大きいものの，各支柱とも平均して 20 N 以下に収まっていた．この条件ではロープ張力自体が小さいことに加え，土石流荷重が複数支柱へ比較的分散して伝達されたものと考えられる．

以上より，支柱本数が少ない条件では総荷重は低下するものの，個々の部材に作用する荷重は必ずしも低下せず，むしろ支柱やロープへ集中しやすいことが示された．逆に，支柱本数を増加させることで総荷重は剛構造に近づく．一方で，部材ごとの負担は分散される傾向

を示した. したがって, 支柱型柔構造の耐荷性能評価においては, 総荷重のみを指標とするのでは不十分であり, 支柱荷重およびロープ張力を含めた部材別評価が重要である.

(4) 無流水渓流対策としての設計の留意事項

以上の結果より, 土石流対策としての支柱型柔構造を設計する際には, 以下の 3 点に留意する必要があると考えられる.

1)中間支柱が存在しない場合，総荷重は減少するものの各部材に作用する荷重は増加した. したがって, 部材の耐荷性能の観点からは支柱本数を増やすことが有利に働くと考えられる．ただし，支柱本数の増加は経済性および施工性に影響を及ぼすため，これらも含めて最適な部材配置を検討する必要がある．

2)支柱荷重について，左右岸の支柱よりも中間支柱の方が大きくなる傾向が確認された．このため，支柱の配置位置による作用荷重の差異を想定した部材設定を行うことが合理的であると考えられる．ただし，ロープ張力による影響も考慮した場合には，両端支柱の曲げ応力が増加するため，この点については検討が必要である．

3)無流水渓流では流路が不明瞭であるため，土石流が幅方向に一様に流下してくるとは限らない．このため，各支柱に作用する荷重のばらつきを考慮した設計上の検討が必要である．

ただし，本実験はフルード相似則を基本としているものの，質量相似を完全には満足しておらず，ロープの質量，支柱の剛性，礫材料の剛性および土石流中の礫衝突の影響を簡略化している．そのため，実構造への定量的な適用にあたっては，これらの影響を考慮した検討が必要である．また，本実験条件は非常に限定的であるため，様々な条件での成果の蓄積が望まれる．

4. 結　言

本研究では，水路実験により，土石流を捕捉した支柱型柔構造における部材別荷重特性について検討した．併せて，支柱本数の違いが総荷重，ロープ張力および各支柱荷重に及ぼす影響を整理した．得られた主要な成果を以下にまとめる．

1) 支柱本数 2 本の条件では，剛構造と比較して総荷重が小さくなった．一方，中間支柱を有する支柱本数 3 本および 5 本の条件では，総荷重は剛構造に近い値を示した．
2) 支柱本数の増加に伴い，ロープ張力は低下した．このことから，中間支柱の増加は，総荷重の低減には寄与しないものの，ロープ部材の負担軽減には有効であることが示された．
3) 支柱本数の増加により，各支柱に作用する荷重は低減する傾向を示した．また，支柱本数 3 本の条件では，左右岸支柱よりも中間支柱に大きな荷重が作用した．一方で，各支柱荷重には土石流の衝突状況に応じたばらつきが認められた．

参考文献

1) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 : 無流水渓流対策に係る技術的留意事項，https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/muryuusuikeiryuu_ryuuizikou_r0803.pdf，2026.5.11.
2) 土木学会 : 構造工学シリーズ 22 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－基準体系の指針－，丸善出版，2013.
3) Ng, C.W.W., Poudyal, S., Liu, H., Bhatta, A., De Silva, W.A.R.K., Jia, Z.: Investigation of debris flow impact mechanism and designs, Progress in Landslides Research and Technology, Volume 2, Issue2, Springer, 2023.
4) 宮原邑太，堀口俊行 : 石礫型土石流の流速が柔構造物に及ぼす荷重緩衝効果の検討，砂防学会誌，Vol.78，No.5，pp.14-23，2026.
5) Song, D., Choi, C.E., Ng, C.W.W., Zhou, G.G.D., Kwan, J.S.H., Sze, H.Y. and Zheng, Y.: Load-attenuation mechanism of flexible barrier subjected to bouldery debris flow impact, Landslides, Vol.16, No.6, pp.2321-2334, 2019.
6) Bi, Y.Z., Wang, D.P., Yan, S.X., Li, Q.Z. and He, S.M.: Research on the blocking effect of baffle-net structure on rock avalanches: consider the influence of particle splashing, Bull. Eng. Geol. Environ., Vol.82, No.7, 277, 2023.
7) 浦川諒大, 石井太一, 清野雄貴, 西田陽一, 山本満明, 嶋丈示 : 杭式土石流・流木対策施設の支柱継手方法に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.78，No.2，pp.39-46，2025.
8) Lambert, S., Bourrier, F., Careno-Mayo, A. R., Dugelas, L., Dubois, F. and Piton, G.: Small-scale modeling of flexible barriers. I: mechanical similitude of the structure, J. Hydraul. Eng., Vol.149, No.3, 2023.
9) Ashwood, W., and Hungr, O.: Estimating total resisting force in flexible barrier impacted by a granular avalanche using physical and numerical modeling, Can. Geotech. J., Vol.53, No.10, pp. 1700-1717, 2016.

（2026.5.29　受付）