

空石積み護岸の 積み石の引き抜き耐力の評価と設計手法

EVALUATION OF THE PULL-OUT RESISTANCE AND DESIGN METHOD OF DRY MASONRY REVETMENTS

竹内えり子¹・大石銀司²・林博徳³・池松伸也⁴・島谷幸宏⁵

Eriko TAKEUCHI, Ginji OISHI, Hironori HAYASHI, Shinya IKEMATSU, Yukihiro SHIMATANI

¹正会員 九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡744),
株式会社建設技術研究所東京本社環境部 (〒330-0071 さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

²学生会員 九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 工博 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 九州大学工学部技術部 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁵フェロー会員 工博 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

Dry masonry revetments had been used long time as traditional Japanese river revetments. However, there is little knowledge about their strength and design method currently, it is difficult to select the method in case of revetment construction. From the landscape design and ecological view, there is still a lot of demand for dry masonry revetment. For installation of dry masonry revetment, it is necessary to conduct scientific verification of the destruction behavior and strength of the method. We examined by the pulling out experiment the strength when the stacking stones of the dry masonry revetments leaving by fluid force. And we obtained the following result.

- ・ In the case of there were two steps of masonry on top, the pull-out resistance required about five times the weight of the stone. This was about three times as strong as without stone interlocking.
- ・ The pull-out force required the larger force when pulled 45 degrees to the flow axis direction than when pulled at 90 degrees.

Key Words : Dry masonry revetment, Pull-out resistance, Design methods

1. はじめに

空石積み護岸は日本の伝統的な河川護岸として、現在多く使用されているコンクリート護岸や練石積み護岸が普及するまで長く使われてきた¹⁾。また平成18年に「多自然川づくり」が全ての川づくりの基本とされ²⁾、歴史的な価値だけでなく景観デザインや生態学的観点からの需要は依然として高い。しかし、その強度や設計法に関する知見が少ないことから護岸工法として選択されにくい現状にある。

護岸の力学設計法³⁾では、法勾配が1:1.5よりも急な場合を石積みと定義している。石積みの破壊の要因は護岸背後の土圧が主要因とされ、土圧に対する滑動、転倒の安定性を照査することが示され、これに従い設計が行われている。流速に対しては、美しい山河を守る災害復旧基本方針⁴⁾において、経験則から空石積みは設計流速

5m/sまでの箇所に適用が可能と位置付けられているが、物理的な根拠は示されていない。また、空石積み进行现场で用いる場合は、1つの石の移動限界粒径よりも大きな粒径を用いるのが一般的である。これは経験的な工法であり、噛み合わせは考慮されていない。

そこで本研究では、空石積み護岸の積み石が流体力により離脱する際の耐力を引き抜き実験の結果から、定量的に評価し、設計手法を提案することを目的とした。

2. 実験方法

引き抜き実験は長径5~7cmの自然石を用いて、幅36.5cm、4段積み、高さ12cmの空石積み護岸の模型を製作し、積み石を引っ張り、積み石が石積みから離脱した時の力を計測した(図-1)。模型は、護岸の両端が固定されるように、底面と両側面をコの字型で囲った木枠を作

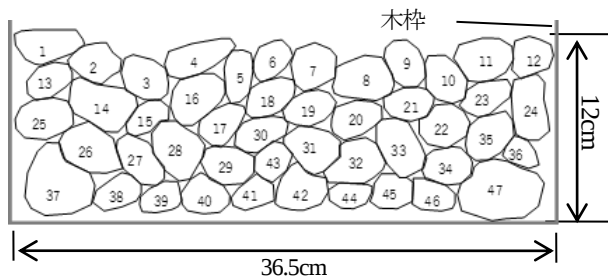


図-1 引き抜き実験用護岸模型（正面）

表-1 引き抜き実験ケース

ケース	引き抜き段数	引き抜き方向	積み石No.
1	4段中2段目	流軸に対して90°	29,32,27, 43,34,26
2	4段中2段目	流軸に対して45°	29,32,27, 43,34,26
3	4段中3段目	流軸に対して90°	14,16,19,22
4	2段中2段目	流軸に対して90°	29,32,27, 43,34,26

成し、その内側に自然石を法面勾配3分で積んだ。積み石は長径5～7cm、短径2～4cmの自然石を用い、裏込材として粒径5～10mmの砂利を使用した。また、石積みは谷積みとして、下の3石で積み石1石を支えるように積み、各実験ケースで同質の石積みとなるように、積み石に番号を振り、同じ積み石を同じ箇所に積むようにした。

引き抜き耐力を計測するために積み石にリングを接着剤で固定し、リングにワイヤーロープを通し、計測機と接続して引張力を計測した(図-2)。

実験は、引き抜く石積みの段数と引き抜き方向を変えて実施した。引き抜き方向は、引き抜き時の耐力が最小になると考えられる流軸に対して90度と、実際の河川において流体力により力がかかることを想定した流軸に対して斜め45度とし水平方向に引き抜いた。表-1に実施した実験ケース一覧を示す。なお、各ケース5回の計測を実施した。ケース1は、4段積んだ石積みの2段目を流軸に対して90°の方向に引き抜いた。ケース2は、ケース1と同様の積み石を流軸に対して45°方向に引き抜いた。ケース3は、4段積んだ石積みの3段目を流軸に対して90°方向に引き抜いた。ケース4は、2段積んだ2段目を流軸に対して90°方向に引き抜いた。なお、ケース3以外は、同様の積み石を引き抜いている。

3. 実験結果

各ケースの実験の前にまず、礫上に石を設置し、引っ張り実験を行ったところ、平均で石の重さの約0.5倍の力で移動し、石と礫の摩擦係数が約0.5であることを確認した。

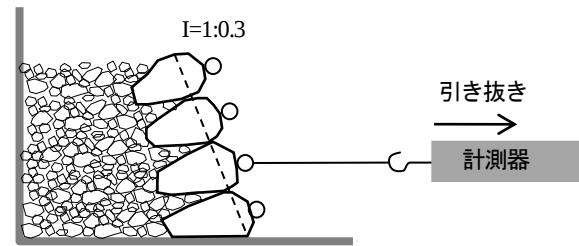


図-2 積み石と計測機の接続（断面）

引き抜き耐力の計測結果を表-2にまとめて示し、各ケースの結果を以下に述べる。

(1) ケース1：4段中2段目を流軸に対し90°に引き抜き

2石の積み石が上に載った状態の積み石のうち6石をNo.29,32,27,43,34,26の順番に引き抜いた結果、1石目の引き抜き耐力が他の2～6番目よりも高く、積み石の重さに対して5.34倍の力であった。全積み石の引き抜き耐力の中央値は4.88であった。

(2) ケース2：4段中2段目を流軸に対し45°に引き抜き

ケース1と同様の条件で、引き抜き角度を45°にした場合は、ケース1よりも引き抜きに必要な力にばらつきが生じた。5回の平均では、3石目に引き抜きを行ったNo.27の積み石が最も大きく、積み石の重さの8.77倍の力となり、流軸方向に対し90°に引き抜いた場合の1.97倍の値であった。No.27の積み石は、石積み正面から見た際に縦長の楕円形状で、石の側面の接点が多い。

引き抜いた6石のうち、No.34を除く5石は、90°方向に引き抜いた場合より、45°方向に引き抜いた方が引き抜きに大きな力が必要であった。全積み石の中央値と比較すると、90°方向に引き抜いた場合より約1.2倍の力が必要であった。

(3) ケース3：4段中3段目を流軸に対し90°に引き抜き

1石の積み石が載った状態の4石の積み石を、順番に引き抜いた。4石の引き抜きに必要な力の中央値は、積み石の重さに対して2.7倍の力であった。

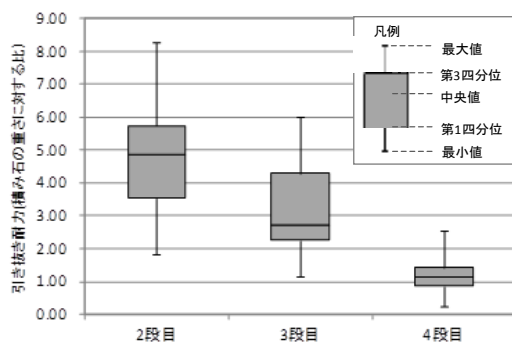
No.22の引き抜き耐力が大きな値であるが、積み石の形状が若干「くの字」に曲がっているため、引き抜く際に下段の石に引っかかっている感触があった。

(4) ケース4：2段中2段目を流軸に対し90°に引き抜き

2段目まで積んだ石積みの2段目、1段目の積み石の上にあり上に積み石がない状態の石を引き抜いた。上からの荷重は掛っていないが、礫の上で積み石を引くよりも大きな力が必要であった。全積み石の中央値は、積み石の重さに対して1.15倍であり、礫の上での摩擦係数0.5の2倍以上の値であった。本ケースで耐力の数値が小さいNo.34の積み石は、丸みを帯びた形状であり、ケース2でも他と比べて小さい値であった。

表-2 引き抜き耐力の計測結果

ケース	引き抜き の 順番	積み石No.	重さ(N)	引き抜き耐力(積み石の重さに対する比)						中央値
				1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均値	
1	1	29	0.71	6.08	5.68	5.75	4.08	5.10	5.34	4.88
	2	32	1.13	4.39	4.86	5.87	5.69	5.34	5.23	
	3	27	0.84	1.82	7.11	3.76	6.04	3.51	4.45	
	4	43	0.69	3.90	1.89	4.66	2.63	3.62	3.34	
	5	34	0.80	4.96	8.27	2.45	4.89	2.62	4.64	
	6	26	0.96	5.37	7.20	2.93	3.30	5.90	4.94	
2	1	29	0.71	2.79	7.04	9.83	8.42	4.72	6.56	5.36
	2	32	1.13	8.99	5.48	7.34	5.92	9.24	7.39	
	3	27	0.84	6.32	7.66	8.89	13.20	7.79	8.77	
	4	43	0.69	2.61	2.79	4.99	2.42	5.24	3.61	
	5	34	0.80	4.07	2.99	2.17	4.42	2.46	3.22	
	6	26	0.96	1.08	2.85	3.15	6.42	11.49	5.00	
3	1	19	0.76	2.41	2.68	3.28	2.27	3.58	2.84	2.70
	2	22	0.82	5.27	6.01	5.44	5.48	5.80	5.60	
	3	14	1.03	2.73	2.54	3.97	3.97	1.14	2.87	
	4	16	0.89	2.18	2.49	2.24	1.83	1.30	2.01	
4	1	29	0.71	0.79	0.92	2.54	1.08	0.85	1.23	1.15
	2	32	1.13	2.06	1.38	1.68	1.30	1.70	1.62	
	3	27	0.84	1.17	1.38	1.38	1.44	1.24	1.32	
	4	43	0.69	1.04	1.11	0.79	1.08	1.13	1.03	
	5	34	0.8	0.68	0.32	0.69	1.30	1.63	0.92	
	6	26	0.96	1.54	1.10	0.31	0.25	2.49	1.14	



2段目：上部に2段の積み石あり (n=30)

3段目：上部に1段の積み石あり (n=20)

4段目：上部には積み石なし (n=30)

図-3 各石積みの段数における引き抜き耐力

4. 引き抜き実験に関する考察

図-3に4段積みの場合の石積みの段数に応じた流軸方向に90°で引き抜きいた際の引き抜き耐力の値を示した。ここでの引き抜き耐力は、積み石の大きさに対する引き抜きに必要な力とした。中央値をみると上部に2段の石積みがある場合には積み石の4.88倍、上部に1段の石積みがある場合は2.70倍、上部に石積みがない場合には1.15倍の値であった。

噛み合わせがない場合は垂直荷重に対して摩擦力が生じるため、上部に2段の石積みがある場合、2石分の重量を合わせて1.5倍程度の抵抗力になると推定されるが噛み合わせにより、その3倍以上の大きな耐力を発揮した。

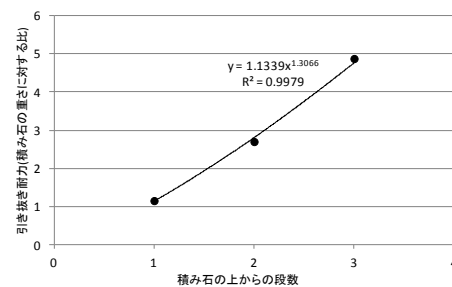


図-4 積み石上からの段数と引き抜き耐力の関係

実験では積み石の周囲を6つの石で囲むことを基本に積んでいるため、上部に2段の石積みがある場合、上下を除く左右の4石の石の噛み合わせで、積み石の重さの3.38倍分(4.88-1.5)の力が作用していると考えられる。中央値で引き抜き耐力と積み石の上からの段数をみた場合、以下の関係式が成り立ち立つことを確認した(図-4)。

$$y = 1.1339x^{1.3066} \quad (1)$$

xは積み石の上からの段数、yは引き抜き耐力とする。

5. 設計手法の検討

(1) 既往事例での設計と流体中の石材の安定条件

護岸設計では、流速5m/s以上の箇所に空石積み護岸を採用することはほぼなく、5m/s以下の箇所においては、標準設計を用いることが一般的である。安定性を照査する場合、石積みは「積み」モデルであるため滑動・転倒を対象として、使用する石材の控え長を設定する。

流速5m/s以上箇所において、石積み護岸を設計した経験から、使用する石材が単体または群体で設計流速に対

して安定することを条件することが妥当と考える。このとき福留⁹⁾ が用いている単体の石材が流速 V において安定するための石材の空中重量の条件式(2)を用いた。抗力係数と揚力係数は石材の形状により異なるが、ここでは計算上単純化して控え長を面の一辺の2倍の正角柱で取り扱っている。抗力係数と揚力係数は、正角柱の部材に側面から流れが当たる場合の係数を用いている。

$$W > \frac{V^2 \cdot \rho_0}{2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)} \left(\frac{S_F \cdot C_D \cdot A}{\mu} + C_L \cdot A_L \right) \quad (2)$$

ここに、

V ：流速(m/s)

A ：流れ方向の石材の投影面積(m²)

A_L ：流れに垂直方向の石材の上方投影面積(m²)

C_D ：抗力係数（正角柱の $C_D=1.08$ ）

C_L ：揚力係数（正角柱の $C_L=0.3$ ）

μ ：静止摩擦係数

ρ_0 ：流体の密度(kg/m³)

ρ ：石材の密度(kg/m³)

W ：石材の空中重量(kN)

S_F ：安全係数($S_F=1.2$)

上記の式に基づき、引き抜き実験で得られた摩擦係数0.5を用いて流速5m/sにおいて安定する石材の重量と形状を試算すると、単体で重量5.3t、形状は正角柱で短辺1.0m、長辺(控え長)2.0m以上の大きさが必要になる。上記の式では投影面積を0.5倍にして群体として扱うため噛み合わせは考慮していない。群体で計算した場合は、重量0.67t、形状は短辺0.5m、長辺(控え長)1.0mとなる。

(2)噛み合わせ耐力を考慮した設計手法の案

上記の石材の安定条件に噛み合わせ耐力の中央値を用いて単体の場合の必要な石材の重量と形状を試算すると、石積みの天端部分は4.6t、短辺0.95m、上から2段目は1.9t、短辺0.7m、上から3段目は1.2t、短辺0.6mの石材であれば安定するという結果となり、より小さな石材を用いることが可能になる。引き抜き耐力にばらつきがあることを踏まえ、石材の大きさの算定には実験で得られた引き抜き耐力の最小値を採用すると、上段から3段目より下の段ではより小さな石材を採用できる可能性がある。

しかし、この結果をそのまま護岸の石材の大きさの決定に用いると、石積みの段毎に積み石の大きさが異なり、見た目に不安定な印象を与える可能性がある。また、噛み合わせ耐力と石積みの段数の関係式からは、石積みの下段ほど小さな石材を用いてもよいことになるが、伝統的な空石積みでは石積みを支える根石が動かずに安定することが重要であるため、石積みの要所を踏まえた必要な石材の重量の設定方法が課題となる。

なお、これは1つの実験から得られたものであり、実

験においても噛み合わせ耐力にばらつきがみられた。設計では、土圧に対する安定性も検証する必要である。これらを総合的に検討し、実河川における事例での検証等を通して護岸の構造、設計手法を検討していく必要がある。

7. 結論

本論は空石積み護岸を研究対象とし、石積みの噛み合わせに着目し、引っ張り耐力の計測と噛み合わせを考慮した設計手法の検討を行った。以下に本論から得られた結論を示す。

- 1) 噛み合わせ耐力を考慮した石材の引き抜き耐力は、上部に2段の石積みがある場合は積み石の重さの4.9倍程度であった。
- 2) 引き抜き耐力は、引き抜き方向が流軸方向に対し45°の方が90°に比べて1.2倍の力を要する。
- 3) 1)、2)より、護岸の石材の大きさ決定する際には、噛み合わせ耐力を考慮した方法とすべきとの結論に至った。
- 4) 噛み合わせ耐力を考慮した設計手法の案では、単体で安定する石材の重量を、噛み合わせ耐力で除したものを試算した。
- 5) 設計手法として確立するには、石積み護岸の高さに応じた土圧に対する安定性と、石積みの要所を踏まえて必要な石材の大きさを選定する方法を検討する必要がある。

謝辞：九州大学技術職員の池松伸也氏には実験装置の作成にご協力いただいた。ここに感謝いたします。本研究は、河川基金の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 田中尚人, 川崎雅史：河川護岸を形成するコンクリート製品の変遷に関する研究, 土木計画学研究・論文集, vol.15, p.433-442, 1998.
- 2) 多自然川づくり研究会著：多自然川づくりポイントブックⅢ 中小河川に関する河道計画の技術基準；解説, 公益社団法人日本河川協会, 2011.
- 3) (財)国土技術研究センター編：護岸の力学設計法, 山海堂, 2006.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局防災課：美しい山河を守る災害復旧基本方針, 2018.
- 5) 福留脩文, 有川崇, 西山穂, 福岡捷二：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計, 土木学会論文集 F, Vol.66 No.4, p.490-503, 2010.

(2019. 4. 2受付)