

甘楽町空石積み護岸の力学的特性 と修復に関する研究

竹田 知樹¹・関 文夫²・松井 均³・田中 睦宏⁴

¹学生会員 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻（〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14,
E-mail: cst010166@g.nihon-u.ac.jp）

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科（〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14,
E-mail: seki@civil.cst.nihon-u.ac.jp）

³非会員 群馬県甘楽町 健康課 国保係（〒370-2292 群馬県甘楽郡甘楽町大字小幡161-1,
E-mail: h-matui@town.kanra.lg.jp）

⁴非会員 群馬県甘楽町 振興課 建設係（〒370-2292 群馬県甘楽郡甘楽町大字小幡161-1,
E-mail: m-tanaka@town.kanra.lg.jp）

石積みには、農家が仕事の合間に積むものから職人が専門の職として積むものまで、様々な種類がある。本研究では、これらの間にあたる小堰の護岸石積みに着目した。この石積み護岸は、後継者不足や技術の伝承がなされなくなったことで、崩れてもそのまま放置されるケースが増えてきている。本研究では、試掘調査と耐荷力実験により石積みの技法と力学的特性を明らかにし、その結果を基に実際に崩壊箇所の積み直しを実施した。

キーワード: 空石積み, 穴太衆積み, 摩擦係数実験, 耐荷重実験, 力学的挙動

1. はじめに

江戸時代の初め、防火・生活用水を目的とした水路網が各地の城下町に構築された。現在も代表的なものとして群馬県甘楽町小幡、長野県松代町、福岡県甘木市秋月にその存在が確認されている¹⁾。これらの水路網は、近代に入り上下水道が整備されたことで役目を果たさなくなり、道路整備の際に側溝に代替えされたり、埋め立てられたり、暗渠化された。しかし、その中でも群馬県甘楽町小幡の小堰は、現在も構築当初の水路網が残存しており、その護岸は、一部改変された箇所もあるものの、構築当初の空石積み護岸の4割程度が良好に残されている。

この空石積み護岸を保全・修復するために、周辺の関連する神社仏閣や歴史的背景を調査し、空石積み護岸の技法の試掘調査、記録を行った。次に、空石積み護岸の積み方を分析し、試作で作成した空石積み護岸について実験を行い、空石積み護岸の力学的挙動を分析したものである。現在は、損傷の激しい護岸の修復作業を実施した。本研究では、これらの調査概要、分析概要、修復作業について報告する。

2. 水路網の概要

(1) 流路

小幡には、西側を迂回するように一級河川雄川が流れているが、崖下を流れている為、その水を直接利用することができない。この雄川の上流に堰を設け、小幡陣屋内に水を引いたものが雄川堰である(図-1)。雄川堰は、大堰と呼ばれる全長3.4kmの幹線流路と、大堰から水を引いた小堰と呼ばれる総延長6.1kmの水路網から成り立っている。小堰の取水口は1番口・2番口・3番口の3つがあり、それぞれから取り入れた水は分水路で互いに交わっている。この分水路には、流量調節のための石があり、1つの取水口を掃除や修理などで止めてもこの石の配置を変えることで、水を流し続けることが出来るようになっている。また、矢羽分水路付近では、土地の勾配が上がってっている場所を、掘割にすることで水を流している逆勾配の箇所があり、当時の測量技術や土木技術が高度なものであったこと垣間見ることが出来る。小堰は、小幡の防火・生活用水の為だけでなく、群馬県唯一の回遊式庭園である楽山園に流れ込み池の水となったり、松浦邸や高橋邸などの武家屋敷に流れ込んで庭の泉水として利用されている(図-3)。

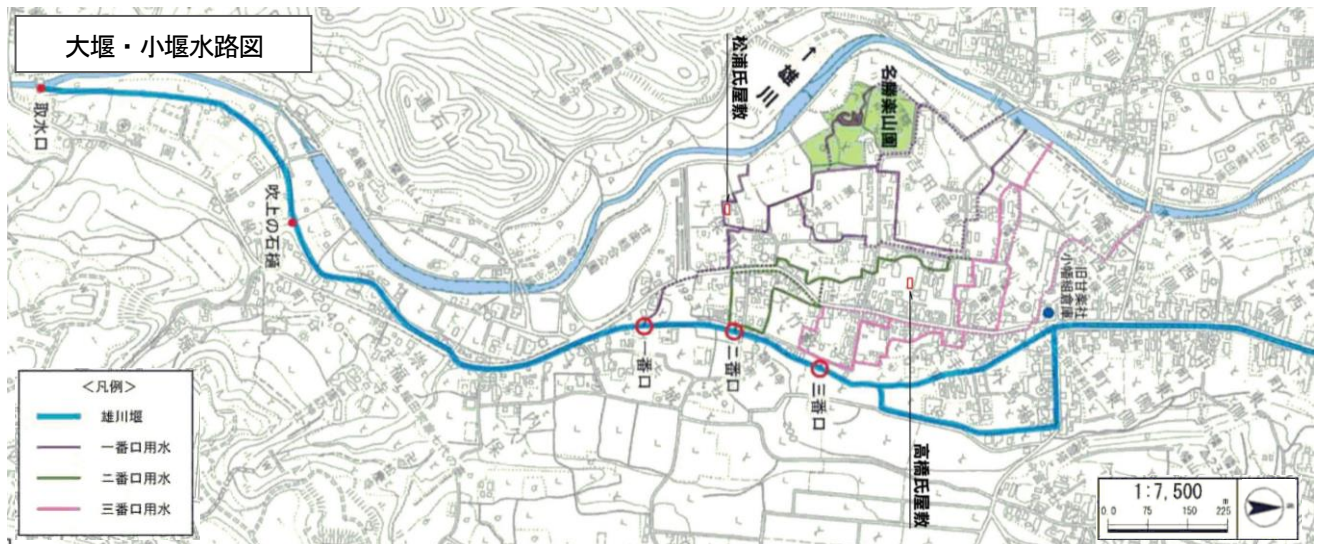


図-1 大堰・小堰水路図²⁾

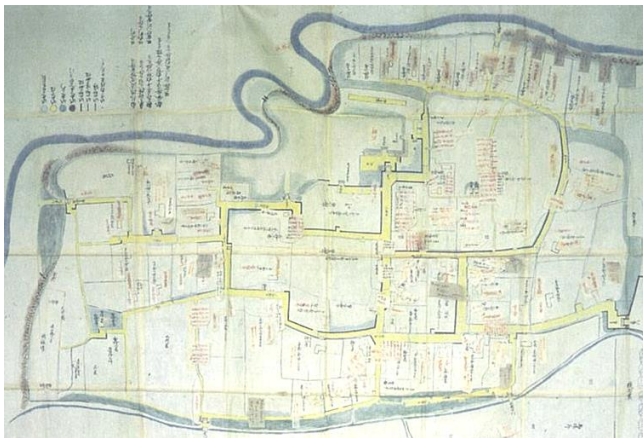


図-2 小幡陣屋内絵図²⁾

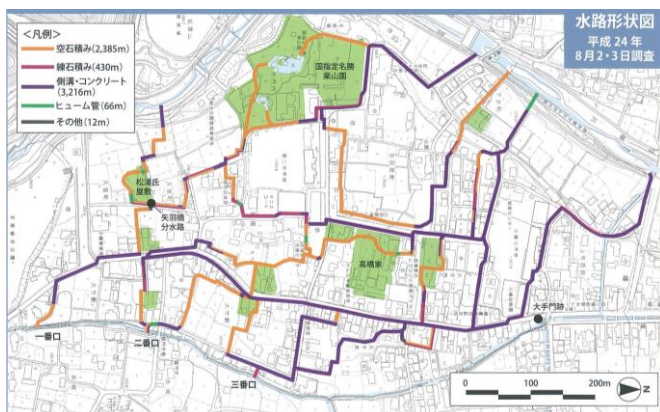


図-3 小堰水路形状図²⁾

(2) 小幡藩の成り立ち

群馬県甘楽町小幡は、織田信長の次男である織田信雄が1615年、大阪冬の陣で豊臣宗家を滅ぼしたことで徳川家康より賜った土地である。織田宗家はこの地を1767年まで治めた。小堰は1642年、3代目信昌の代に上州福島の大陣屋から小幡藩邸へ陣屋を移した際に構築されたと考えられている。この時期は、全国の藩で城郭が完成し、

石工の仕事が徐々に仕事が無くなっていった時期と重なる。小幡には、小堰の護岸石積みや小幡八幡宮の石垣に見られるように、高度な技法をもって積まれたものはいくつかある。ここから、織田宗家が石工集団を伴って小幡藩に入り、石工集団が小幡の石積みを構築したのではないかという推理を立てることが出来る。

3. 周辺調査

(1) 大堰

大堰は、幅1m、深さ 0.5mの大きさの水路である。大堰は、上流の町屋地区では野菜や養蚕の籠を洗ったりするために、下流では田畑に水を引くために利用されている。大堰は、県道197号線と並行している区間が多く、暗渠化された箇所も多いが、伝建地区である町屋地区には空石積み護岸がまとまって現存する。この石積みは、無加工の川原石を用い、積み石に人頭大の小さい石を積んだ後に天端石に50～60kg程の大石を載せて安定させている(写真-1)。



写真-1 大堰の石積み

(2) 小堰の石積み

小堰は、幅0.3m、深さ0.4mの水路である。全体の39% (2385m)に空石積み護岸が現存している。小堰の石積みは、無加工の川原石を用い、人頭大の石を3段積んで構築されている(写真-2)。



写真-2 小堰の石積み

(3) 小幡八幡宮の石積み

1645年、織田信昌の代に造営された小幡八幡宮には、本殿裏の境内に高さ3m程の石積みが存在する。これは、人頭より大きな無加工の川原石を積み上げて構築されており、この石積みは穴太衆積みの技法である(写真-3)。



写真-3 小幡八幡宮境内の石積み

4. 試掘調査

(1) 「かね」の使用

小幡の地盤は山土である為、水はけが良く、そのままでは用水路を構築することが出来ない。このため、縦1.5m、幅2.5mの大きさに地盤を掘削し、そこに小幡から南に2km離れた上州福島で採取した粘土に石灰を混ぜた「かね」と呼ばれる土で地盤改良を行っている(図-4)。今回、石積み背面を掘削したところ、石積みの背面や石と石の間に「かね」が詰められている事が確認された(写真-4)。

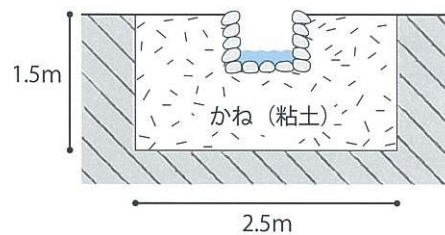


図-4 小堰断面図³⁾



写真-4 「かね」の使用³⁾

(2) 石積みの技法

今回の調査により、石の尻を下げて積む胴下げと呼ばれる技法が用いられている事、合端が2番で噛ませてある事、石の顔が上がりすぎないようにするために鱧介石が入れている事が確認された。これらの技法は、織田信長が安土城を築城する際に起用した滋賀県坂本の穴太衆の積み方に共通するところが多く見られる。

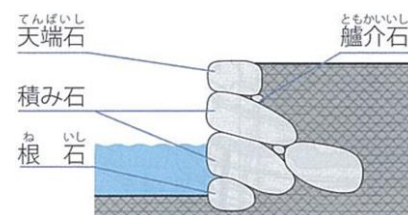


図-5 小堰断面図²⁾

5. 耐荷重実験

試掘調査で判明した石積みの技法の有用性を確認するため、摩擦係数実験・載荷実験の2種の実験を行った。

(1) 空石積み供試体

甘楽町上州福島の造成地に深さ0.4m、幅1m、長さ2mの溝を掘削し、小堰空石積み護岸の供試体を製作した(写真-5)。この空石積み供試体は小堰で実際に使われていた石を使用した。使用した石の諸元は以下の通りである(図-6、表-1)。



写真-5 実験に使用した石積み

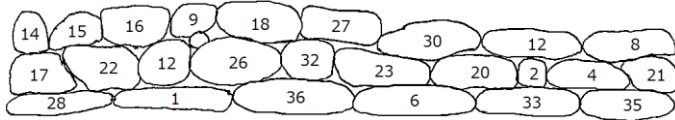


図-6 石番号図

表-1 石の計測結果

番号	種類	重量(N)	胴囲(mm)	外寸(mm)		
				長さ	幅	高さ
27	天端石	178.36	640	340	250	140
30		268.52	710	490	300	100
32		145.04	580	380	250	150
23	積み石	317.52	790	530	350	140
20		327.32	800	460	370	110
36	根石	107.8	830	390	200	110
6		60.76	850	400	140	70

(2) 摩擦係数実験

a) 実験手順

ロードセルを組み込んだジャッキで供試体の石を正面から水平に押し込んだ(写真-6)。石の水平変位は架台に固定した変位計を石の正面から当て、計測した。記録には、データロガーを用い、リアルタイムで計測値を記録した。



写真-6 摩擦係数実験

b) 実験結果

積み石(32番)の水平荷重 - 水平変位の関係を示したグラフを(図-7)に示す。このグラフから、水平荷重が0.9kNを越えたあたりで傾きが変化していることが読み取れる。これは、水平荷重が石の最大静止摩擦力を越え、摩擦力が静止摩擦から動摩擦に切り替わったことを計測することが出来た。静止摩擦係数は、ばらつきがあるものいずれも $\mu=1.37\sim 2.98$ の高い値を示した(表-2)。これは水平荷重を受けた石が周囲の石と噛み合い、水平

荷重に抵抗した為であると考えられる。特に、石を長手方向に積んで胴下げをした23番の積み石が高い値を示した。

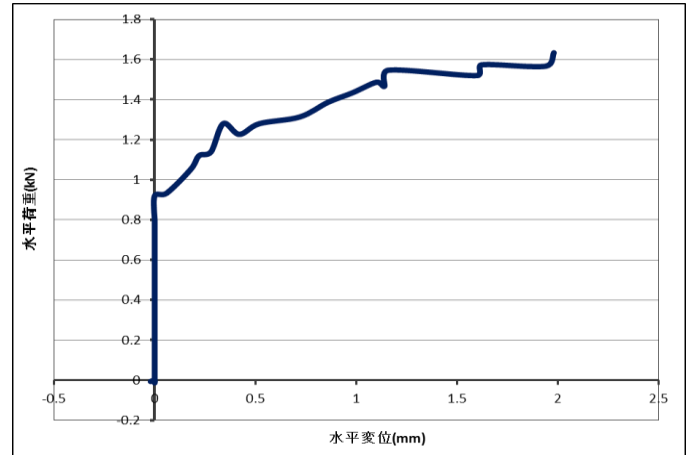


図-7 水平荷重 - 水平変位グラフ

表-2 最大摩擦係数・摩擦係数

石番号	石の種類	垂直抗力(N)	最大静止摩擦力(N)	静止摩擦係数	動摩擦係数
23	積み石	541	1.20	2.22	2.31
32		307	0.913	2.98	0.44
27	天端石	178	0.366	2.05	0.06
30		269	0.366	1.37	0.12
36	根石	531	1.25	2.35	0.53
6		544	0.980	1.80	0.31

(3) 載荷実験

a) 実験手順

架台に固定した変位計で石の水平変位を、ロードセルで荷重を計測した(写真-7)。実験は①～③の3種類を行った(表-3, 写真-8)。記録には、データロガーを用い、リアルタイムで計測値を記録した。



写真-7 載荷台と変位計

表-3 接地圧表

実験番号	荷重の種類	接地圧 (kg/cm ²)
①	人	0.43
②	軽トラック後輪	0.57
	軽トラック 前輪	0.86
	軽トラック後輪+人	1.31
③	ダンプトラック前輪	3.77



写真-8 載荷実験

b) 実験結果

接地圧は表-4のようになった。土圧は接地圧に正比例する⁴⁾が、実験①～②と実験③の積み石の水平変位を比較すると、正比例の関係では無い事が分かる(図-7)。これは、実験②で上載荷重による地盤内水平応力が最大静止摩擦力を下回っていたものが実験③では上回った為と考えられる。実験③では積み石の変位が大きかったが、中でも載荷点に一番近い中央の積み石が2.4mm変位した。これに対し天端石は0.2mm、根石は0.3mmのみ変位した。これより、土圧は積み石に一番多くかかることが判明した。今回の実験では石積みは崩れるまでに至らなかったが、荷重の大きさによって変位をしていることも計測で確認された。

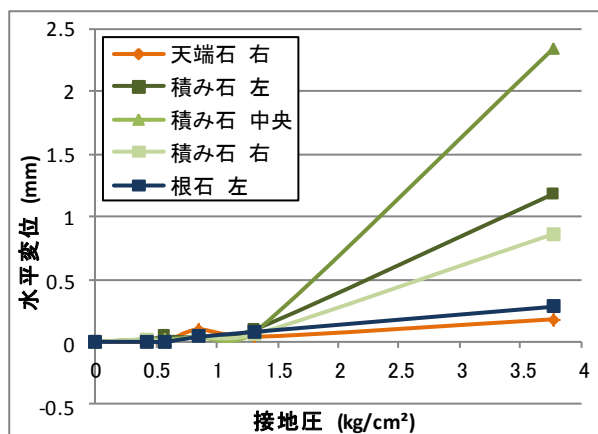


図-8 水平変位-接地圧グラフ

(4) 分析

載荷実験により、背面土に上から荷重がかかった際、積み石に一番大きな土圧が作用することが分かった。小堰の護岸損傷箇所は、積み石が前に迫り出しているものが多い。これは農耕具が走行する箇所に多く発生しており(写真-9)、今回の実験により、農耕具が繰り返し走行したことで、次第に石が変位し、損傷に至ったと推測す

ることが出来た。これに対し、摩擦係数実験において、石を長手方向に積み、胴下げをした積み石は高い摩擦係数を示しており、胴下げをすることで地盤内の応力に抵抗できることが分かった。また、人の荷重でも農耕具が入らない所においても護岸に損傷が生じている箇所があり、ここは小堰が築造されてから400年弱という期間に繰り返された乾湿による風化で石が押し出された可能性もある。



写真-9 石積み損傷箇所

5. 石積み講習会及び仮組研修

(1) 石積み講習会

石積み講習会は、甘楽町役場の会議室を利用し、石積みの原理、石積みの構造、石の選定方法を学習した。根石、積み石、天端石の3つの石の役割を理解し、適切な形状の石を選定する方法を学ぶ講習会となった。

	平石	大石	中石(人頭大)	小石
絵			A: B:	
特徴	平で奥行きのない石	大人一人で持ち運べる程度	A: 奥行きがあり、腰となる面がある B: 奥行きのない中石	片手で持て、なるべく平たい石
サイズ	高さが50mm～100mmで横長	250mm～350mm程度	人の頭ぐらいの大きさ	50mm～100mm程度
役割	根石(礎石)	天端石	A : 積み石 B : 止め石	臈介石

表-4 石の選び方³⁾

(2) 仮組研修

コンクリート側溝等に置き換えた空石積み護岸の石材は、町の集積箇所に山積みされている。ここの集積所から、根石・積み石・天端石・臈介石にそれぞれ適切な石を選定し仮組を行った。(写真-10)。小堰の護岸石積みと同じ3段の石積みを2mの長さで作成した。3人の班を3

つ作り，それぞれ作業をしたが，いずれの班も1時間半で積むことが出来た．石の積み方は，習熟度や技術の理解度により個体差が見られた(写真-11, 12)．



写真-10 石選びの様子



写真-11 仮組試験体 A



写真-12 仮組試験体 B

(3) 崩れた空石積み護岸の修復

a) 作業前の記録

積み直しを行う前に，崩れた箇所の記録(写真撮影、測量)を行った．修復作業では，これら元の位置の石を優先的に戻すことを前提としているが，根石の他、積み石が1, 2個に天端石を加えて仕上げ高さとなるため，難解のパズルのような状況となる．つまり積み石が高ければ様々な工夫をすることが出来るが，積み石が少ない本護岸では，極めて難解となる．

b) 修復作業

空石積み護岸の修復作業では，石と石の隙間に粘土を詰め，一段石を積むごとに背面土を突き固めながら埋戻していく．積み直し直後は粘土の色が目立っていたが，1年位の時間が経過すると色が落ち着き，周囲と馴染むようになった(写真-14)．



写真-13 積み直し前



写真-14 積み直し後1年経過

7. 今後の展望

本研究では，2011 年から試掘調査を開始し，耐荷力実験・仮組試験を経て，実際に崩壊箇所を積みなおすまでに至った．2013 年には小堰シンポジウムと小堰見学会を同時開催し，町民の関心を啓発した．これにより，最近では地元の人が作業を見学するようになった．今後は町民とともに石積みの補修を行い，地域のコミュニティを強化することを考えている．損傷している石積みを1つでも修復し，更に，コンクリートのU字側溝を空石積みに戻したいと考えている．石積みを観光資源，土木遺産として活用し，石積みのまち，甘楽町を支援したいと考えている．

参考文献

- 1) 佐々木邦博，米林由美子，平岡直樹：城下町の庭園と庭園を結ぶ水路の特性，pp. 27-31, 2004
- 2) 甘楽町 振興課 振興室：織田宗家ゆかりの歴史的水路 雄川堰「小堰」 pp. 9-25, 2013
- 3) 関文夫，森泉論：甘楽町の空石積み護岸の特徴とその再現に関する研究，日本大学理工学部土木工学科卒業研究論文集，pp. 24-49, 2012
- 4) 大成・五洋・フジタ 第二名神高速道路甲南トンネル上り線工事共同企業体：甲南トンネル明かり部に係る伝統法「穴太衆積み」の検討 実験結果報告書，pp. 13-20, 2003