

城郭石垣における石材間の摩擦特性と個別要素法解析によるシミュレーション*

Friction characteristics of masonry walls identified by the full-sized experiment and its numerical simulation using the distinct element method

山本浩之** 西形達明*** 八尾眞太郎**** 西田一彦***** 笠博義*****

By Hiroyuki YAMAMOTO Tatsuki NISHIGATA Shintaro YAO Kazuhiko NISHIDA and Hiroyoshi KASA

概要

城郭石垣の安定性に関する研究における数値解析では、構造のモデル化とともに要素となる物性値の設定が結果に大きく影響する。そこで本研究では、城郭石垣を構成する石材間の摩擦特性を把握および間詰効果の確認のために、実際の城郭石垣および実験用に構築した模擬石垣において石材の原位置摩擦実験を行った。さらに、ISRM 指針に示されているせん断強度の推定式より簡便に石材間の摩擦角を類推する方法を検討し、指針に基づく表面粗さを考慮した個別要素法 (DEM) による摩擦試験シミュレーションを行うことで、石材間の摩擦特性を精度良く再現できることが明らかになった。

1 はじめに

城郭石垣の多くは、400 年以上経過し文化財的な価値を持つと同時に土木構造物としての機能も有する。しかし、長い年月を経ていることから、老朽化が著しいものも多く、さらに現存する城跡の多くは公園として多数の人々が訪れる場所となっていることから、石積構造物としての安定性を正確に評価し維持管理することは、城郭石垣の修復および保存の立場からも重要である。

しかし、不連続体としての石積構造物において、安定性を適切に評価する技術は確立されておらず、さらに城郭石垣は、文化財的価値があるため現場での実験や損傷をとまなう調査が困難であり、解析上必要な石材の物性値には経験的な数値が用いられていることが多い。

このような背景において、本研究では実際の城郭石垣および実験用に構築した模擬石垣において、代表的な石積み構築技法である「野面積み」「打込みはぎ」「切込みはぎ」の3種類の石材間の原位置摩擦実験を行い、石材間の摩擦特性の把握および間詰効果を確認した^{1) 2)}。

さらに実験によって得られた石材間の摩擦角と ISRM 指針に示されているせん断強度の推定式³⁾により得られる石材間の摩擦角との関係より、簡便に石材間の摩擦角を類推する方法を提案した。また、ISRM 指針に基づく石材の表面粗さを考慮した解析モデルを構築することで、個別要素法 (DEM) を用いて精度の良く石材間の摩擦特性を再現する方法について検討した。

2 原位置摩擦実験の概要

原位置摩擦実験は、実験用石垣において「野面積み」「切込みはぎ」、実際の城郭石垣補修工事の現場において「打込みはぎ」の石材間の摩擦特性の把握および間詰効果の確認を目的として実施した。実験概要の代表例として、「野面積み」の実験用石垣の場合を図-1に、各石積構築技法における実験状況を写真1～3に示す。

実験用石垣は、石材を2段積みとし、下段の石材は滑動しないようにモルタルで底盤に固定した以外は、通常の城郭石垣の構築方法と同様に伝統的な石積み技法で構築した。間詰石は、長径10～30cm程度の垂円礫を半割したものを使用した。また、反力壁とした擁壁と石垣との間は栗石で充填した。実験方法は、図-1に示すように、計測対象の石材の背面に油圧ジャッキを設置し、一定の速度でゆっくり载荷し、そのときの変位量を石材前面に取付けた変位計で測定した。

また、城郭石垣補修工事の現場における「打込みはぎ」の実験では、実際の石垣2段を対象として、反力をバックホウで取り、実験用石垣と同様の方法で計測した。間詰石は、実際に使用されている10～20cm程度のものを設置もしくは除去して効果を確認した。実験条件を表-1に、対象とした石材の概要を表-2に示す。

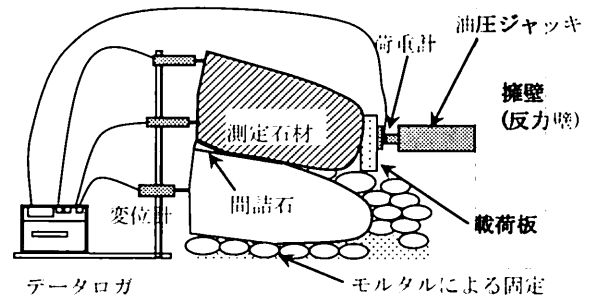


図-1 実験概要図（「野面積み」の場合）

*keyword: 城郭石垣、石材間の摩擦角、個別要素法

**正会員 ハザマ土木事業本部

(〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

***正会員 工博 関西大学准教授環境都市工学部

**** 工博 関西大学教授環境都市工学部

*****正会員 工博 関西大学名誉教授

関西地盤環境研究センター

*****正会員 博士(工学) ハザマ技術・環境本部



写真1 「野面積み」の実験状況（実験用石垣）

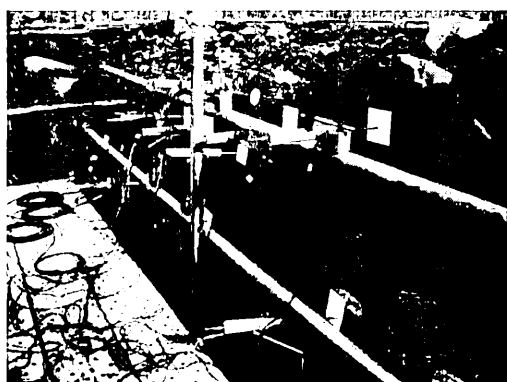


写真2 「打込みはぎ」の実験状況（城郭石垣）

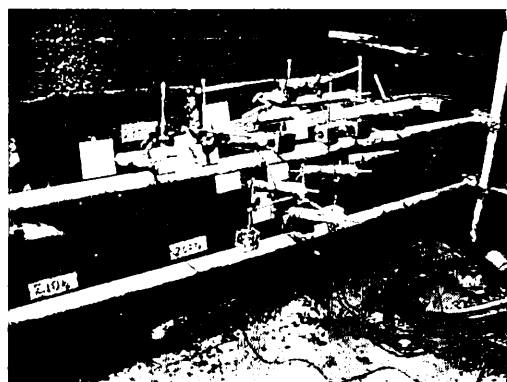


写真3 「切込みはぎ」の実験状況（実験用石垣）

表－1 実験条件一覧表

実験条件	加工状態	接触面積 (m ²)	初期重量 (kN)	上載荷重 (kN)	間詰石の有無	左右の石材の有無
1-1	野面積み	0.25	1.96	0	○	○
1-2				0.74	○	○
1-3				1.67	○	○
1-4				3.14	○	○
1-5				0	×	○
1-6				0	×	×
2-1	打込みはぎ	0.27	2.65	0	×	○
2-2				1.05	×	○
2-3				1.97	×	○
2-4				0	○	○
3-1	切込みはぎ	0.13	1.81	0	×	○
3-2				0.74	×	○
3-3				1.67	×	○
3-4				3.14	×	○

表－2 対象とした石材の概要

加工状態	野面積み	打込みはぎ	切込みはぎ
外観 (底面)			
寸法(cm)	60(W)×60(L)×48(H)	50(W)×70(L)×45(H)	37(W)×48(L)×37(H)
重量(kN)	1.96	2.65	1.81
岩種	安山岩	花崗岩	安山岩

表－1に示すように、3種類の石材の加工状態に対して上載荷重を変化させた実験ケース、さらに「野面積み」「打込みはぎ」において間詰石等の影響を変化させた実験ケースを行い、各ケースの実験終了後に石材を元の状態に戻してから改めて次のケースの載荷を行なった。

3 石材間の摩擦角の検討

対象石材間の力学的安定性に注目すると、図－2に示すように背面からの土圧（側圧）に対し、石材間のせん断強度でバランスを図っており、式（1）より得られる内部摩擦角 ϕ_p に相当する石材間の摩擦角（ここでは ϕ_s と呼ぶ）の値が重要であり、精度の良い石材間の摩擦角 ϕ_p を得ることが、力学的安定性を評価する上で必要となるものと考えられる。

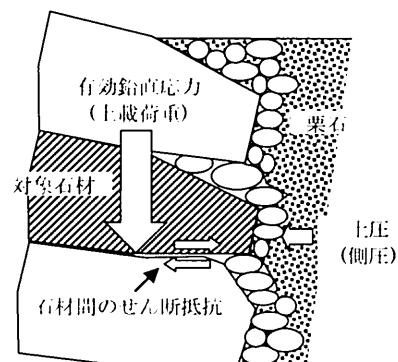
$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi_p \quad (1)$$

τ_p ：せん断強度（ヒーク）
 c ：粘着力
 σ_n ：有効鉛直応力
 ϕ_p ：内部摩擦角（ヒーク）

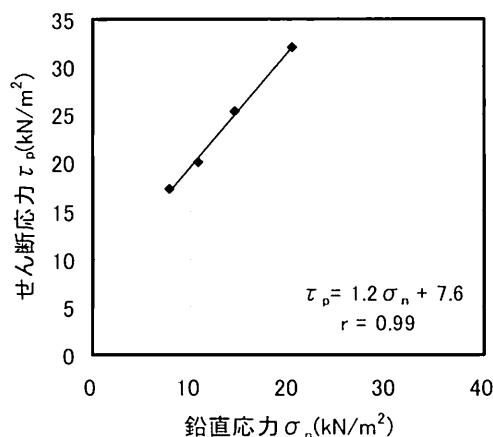
そこで、石材の加工状態ごとに上載荷重を変化させ、せん断応力と鉛直応力の関係より石材間の摩擦角を確認する実験をした。なお、鉛直応力については、初期重量（石材の自重）＋上載荷重を接触面積で除した値とした。

（1）実験結果

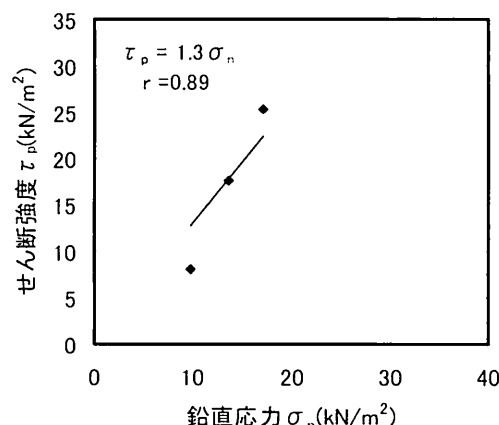
せん断応力と鉛直応力との関係について整理したものを図－3～5に示す。図－3～5より、石材の加工状態ごとに得られた石材間の摩擦角（実験値）を表－3に示す。なお、図－4に示す「打ち込みはぎ」については、測定値より回帰直線を近似すると切片（粘着力）が負の



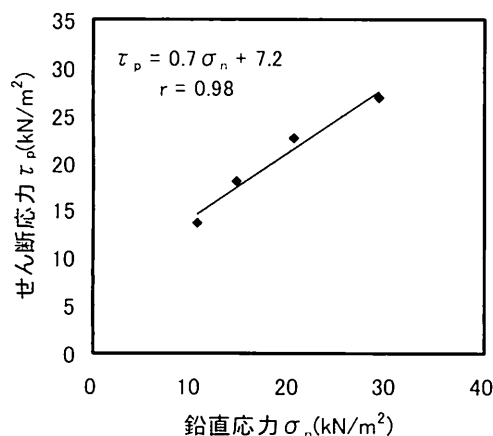
図－2 石積構造物の力学的概念図



図－３ 垂直応力とせん断応力との関係（野面積み）



図－４ 垂直応力とせん断応力との関係（打込みはぎ）



図－５ 垂直応力とせん断応力との関係（切込みはぎ）

表－３ 加工状態ごとの石材間の摩擦角（実験値）

加工状態	野面積み	打込みはぎ	切込みはぎ
石材間の摩擦角 ϕ_s	50.1°	52.6°	34.9°

値となり、現実的でないことから、ここでは切片を 0 とし、原点を通る回帰式で表すこととした。

表－３より、石材の加工状態が最も良い「切込みはぎ」の石材間の摩擦角が最も小さく 35° 程度を示し、加工状

態の粗い「野面積み」「打込みはぎ」は 50～53° 程度を示す結果が得られた。これより、加工状態により石材間の摩擦角は約 20° 程度異なり、石材表面の凹凸が最も大きい「打込みはぎ」が、データが少なく精度は十分ではないが、今回の実験においては 3 ケースの中で最も大きい数値を示すことがわかった。

（２） ISRM 指針による石材間の摩擦角の推定方法

今回実施したような原位置摩擦実験は手間がかかり、特に文化財的な価値のあるものでは、解体修復時以外は実施することが極めて困難である。

そこで、ISRM 指針に示されている不連続面の粗さから岩石の内部摩擦角 ϕ_p を求めるせん断強度の推定式(2)を用いて、簡便に精度良く石材間の摩擦角 ϕ 、(= ϕ_p)を得る方法について検討した。

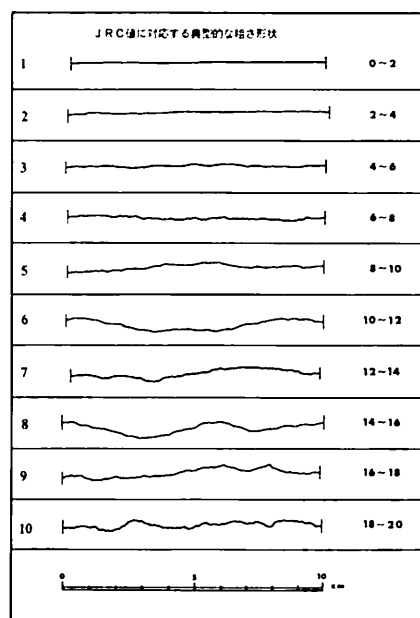
$$\phi_p = JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma'_n} + \phi_r \quad (2)$$

ϕ_p : 内部摩擦角（ピーク） JRC : 節理の粗さ係数
 JCS : 節理面の圧縮強度 σ'_n : 有効鉛直応力
 ϕ_r : 内部摩擦角（残留）

a) 各設定数値

JRC 値（節理の粗さ係数）は、図－６に示す ISRM 指針に示されている JRC 値に対応する典型的な粗さ形状より、その中間値を採用することとした。

具体的には、非接触 3 次元デジタイザ（ミノルタ製 VIVID910）により対象石材の 3 次元形状を取込み、石材表面の粗さ形状を図化することで求めた。実験に使用した各石材の三次元形状および石材表面の粗さ形状断面を図－７～９に示す。例えば、図－７に示す「野面積み」の場合、石材表面は 3 区分（ JRC 値＝4～6：”波状で、滑らか”）に属するものと判断し、中間値 5 とした。



図－６ 粗さ形状と、それに対応する JRC 値の範囲³⁾

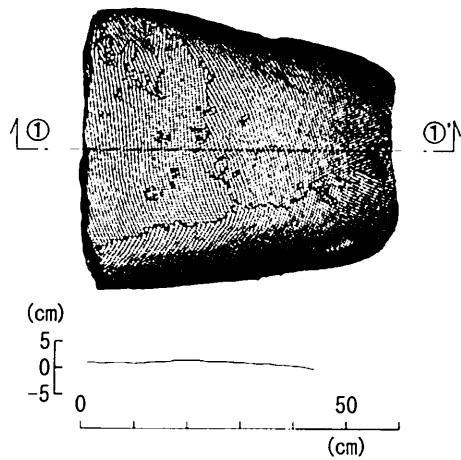


図-7 石材三次元形状および表面の粗さ形状断面
(野面積み)

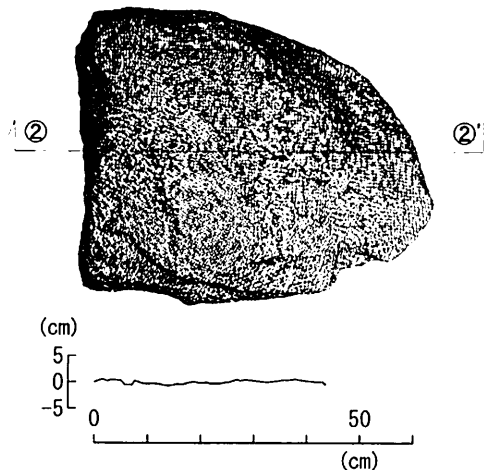


図-8 石材三次元形状および表面の粗さ形状断面
(打込みはぎ)

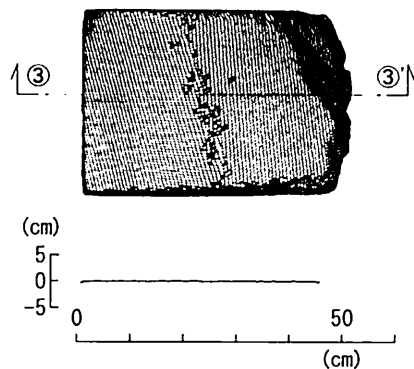


図-9 石材三次元形状および表面の粗さ形状断面
(切込みはぎ)

一方、 JCS 値（節理面の圧縮強度）は、シュミットロックハンマー試験を実施することにより、1 石材に対し 5 回の反発度の平均換算値から一軸圧縮強度を得た。

また有効鉛直応力 σ'_n は、図-3～5 に示す鉛直応力の試験範囲より、「野面積み」および「打込みはぎ」は $10 \sim 20 \text{ kN/m}^2$ 、「切込みはぎ」は $10 \sim 30 \text{ kN/m}^2$ とした。

残留内部摩擦角 ϕ_r は、ISRM の指針に従い 30° とした。

b) 推定式による石材間の摩擦角

石材の加工状態ごとに今回の実験から得られた石材間の摩擦角 ϕ （実験値）と ISRM 指針に基づく推定式から得られた石材間の摩擦角 ϕ_p （推定値）を整理したものを表-4 に示す。

表-4 より、ISRM 指針に基づく推定式から得られる各石材間の摩擦角は、 $\pm 2^\circ$ 程度の誤差はあるもののほぼ実測値と同程度の数値が得られた。この結果より、今回の計測対象については、ISRM 指針に基づく推定式は、精度良く石材間の摩擦角が推定できることがわかった。

c) 石垣高さと石材間の摩擦角の関係

今回の検討では ISRM 指針に基づき、石材表面から JRC 値を推定し、シュミットロックハンマー試験より JCS 値を測定することで、石材間の摩擦角が得られた。そこで、この結果を用いて石垣の高さ H と石材間の摩擦角 ϕ の関係について整理した。具体的には、各加工状態の異なる石材（単位体積重量 $\gamma: 26 \text{ kN/m}^3$ ）について、 JCS 値を $50,000 \text{ kN/m}^2$ と仮定し、 JRC 値を「野面積み」の場合 5、「打込みはぎ」の場合 7、「切込みはぎ」の場合 1 とした。有効鉛直応力が石垣高さに比例すると仮定した場合の石垣高さ H （最大 20m）と石材間の摩擦角 ϕ との関係を図-10 に示す。

図-10 より、ISRM 指針に基づく簡便な計測を実施することで、石垣の鉛直高さに応じた石材間の摩擦角が得られるものと考ええる。

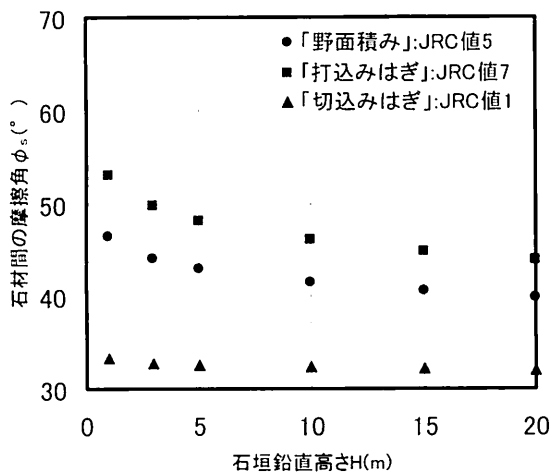
4 石垣の安定性向上における間詰石効果

間詰石は、石垣の安定性の向上において経験的には効果があるものと考えられる⁴⁾。しかし、定量的にどの程度効果があるかを計測した事例はない。

そこで「野面積み」「打込みはぎ」の石材に対して、間詰石の効果を考察するため、表-1 に示す「間詰石あり+左右の石材あり（ケース 1-1）」「間詰石なし+左右の

表-4 石材の加工状態ごとの石材間の摩擦角（実験値と推定値）

項目 加工状態	実験値	ISRM 指針に基づく推定値				
	$\phi_s (= \phi_p)$ ($^\circ$)	JRC	JCS (kN/m^2)	σ'_n (kN/m^2)	ϕ_r ($^\circ$)	ϕ_p ($^\circ$)
野面積み	50.1	4～6 (中間値 5)	114、700～302、000 (平均値 193、620)	10～20	30	49.9～51.4
打込みはぎ	52.6	6～8 (中間値 7)	26、200～51、600 (平均値 37、880)	10～20	30	52.9～55.0
切込みはぎ	34.9	0～2 (中間値 1)	10、100～28、140 (平均値 17、286)	10～30	30	32.7～33.2



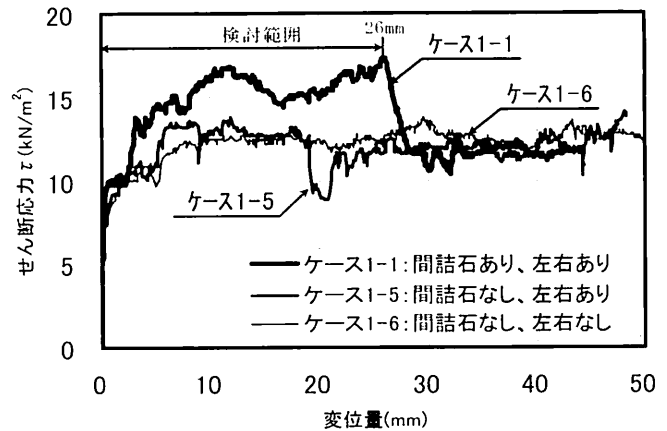
図－１０ 石垣高さと石材間の摩擦角との関係

石材あり（ケース 1-5）」「間詰石なし＋左右の石材なし（ケース 1-6）」の 3 ケース、「打込みはぎ」の石材に対して、表－１に示す「間詰石あり＋左右の石材あり（ケース 2-4）」「間詰石なし＋左右の石材あり（ケース 2-1）」の 2 ケースにおいて石垣背面からの荷重が作用した条件下で実験した。

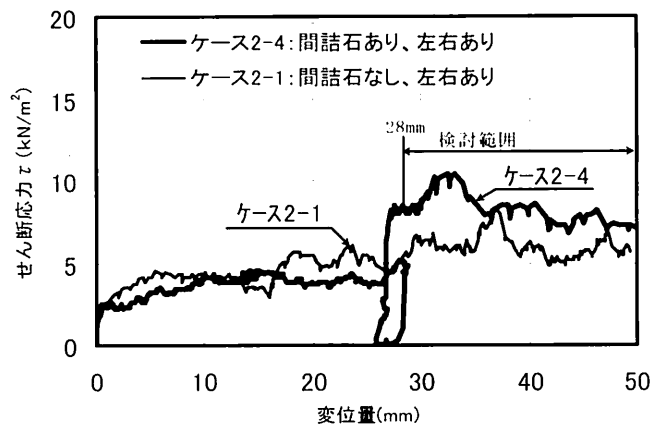
（１）実験結果

「野面積み」および「打込みはぎ」における変位量とせん断応力について整理したものを図－１１、１２に示す。なお、図－１１に示す「野面積み」においては、間詰石が大きく変位し始める前の 0～26mm を検討範囲とした。また、図－１２に示す「打込みはぎ」においては、「間詰石あり」のケースで約 28mm の変位量の位置で大きく載荷荷重が変化しているが、これはこのケースでは本来なかった間詰石を現場で加工し設置したため、0～28mm の範囲はいわゆる「遊び」の部分に相当していたものと考えられる。このため、本検討では 28mm 付近の立ち上がり部分以降のデータについてのみ検討することとした。

実験結果を表－５に示す。表－５より、「野面積み」の場合、通常の状態であるケース①「間詰石あり、左右の石材あり」のピーク値は 17.3kN/m²（平均値 13.8kN/m²）が得られた。これに対してケース②「間詰石なし、左右の石材あり」のピーク値は 13.8kN/m²（平均値 11.4kN/m²）、



図－１１ 間詰効果の実験結果（野面積み）



図－１２ 間詰効果の実験結果（打込みはぎ）

ケース③「間詰石なし、左右の石材なし」のピーク値は 13.8kN/m²（平均値 11.4kN/m²）を示す結果が得られた。

また「打込みはぎ」の場合、通常の状態であるケース①「間詰石あり、左右の石材あり」のピーク値が 10.4kN/m²（平均値 6.8kN/m²）を示すのに対して、ケース②「間詰石なし、左右の石材あり」のピーク値は 8.4kN/m²（平均値 5.9kN/m²）を示す結果が得られ、「野面積み」「打込みはぎ」とも間詰石がある場合の方が、せん断強度が増加する結果が示された。さらに、左右の石材の効果については、「野面積み」の場合のみであるが、ピーク値、平均値とも左右の石材の有無に関わらずほぼ同数値の結果が得られた。

表－５ 間詰石効果の実験結果一覧表

ケース 項目 加工状態	①間詰石あり ＋左右の石材あり		②間詰石なし ＋左右の石材あり		③間詰石なし ＋左右の石材なし		①／②	
	せん断応力 τ (kN/m ²)						せん断応力 τ の増加率 (%)	
	ピーク値	平均値	ピーク値	平均値	ピーク値	平均値	ピーク値	平均値
野面積み	17.3	13.8	13.8	11.4	13.8	11.5	26	21
打込みはぎ	10.4	6.8	8.4	5.9	---	---	23	16

*せん断応力の増加率 (%) = (①間詰石ありの数値－②間詰石なしの数値) / ②間詰石なしの数値 × 100

（２）間詰石の効果

表－５より、いずれの石材の実験結果においても「間詰石あり」のケースにおいてせん断応力が全体的に増加しており、具体的にはピーク値で23～26%、平均値で16～21%の増加が見られる。これらの結果は、これまでの実験報告^りで示されている15～30%程度とほぼ同等の値であり、間詰石によるくさび効果により石材が背面からの荷重に対する抵抗力が大きくなったものと考えられる。

５ 個別要素法（DEM）解析による石材間の摩擦特性

城郭石垣の安定性を検討する上で、最も重要であることは正確なモデルの作製である。そこで今回、原位置摩擦実験で行った「打込みはぎ」に注目し、（１）石材の形状のみを考慮したモデルと（２）ISRM 指針による石材表面粗さを考慮したモデルで、それぞれ個別要素法（DEM）による摩擦シミュレーション数値解析を行い、解析結果と実験結果とをそれぞれ比較した。

（１）石材の形状のみを考慮したモデルによる解析

a) 石材モデル

DEM 解析における要素は円形であるので、石材は円形要素を組み合わせることで表現した。具体的には、輪郭部分の円形要素を半径2.5cmとし、その内側には比較的大きな要素を発生させた。石材モデルを図－１３に示す。なおモデルの石の質量は、実験と同じ2.65kNとなるようにした。

b) 摩擦試験シミュレーション結果

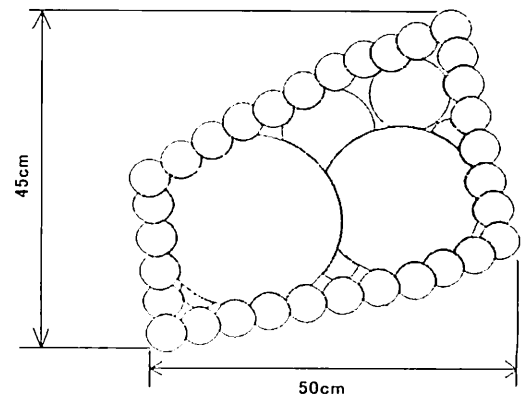
図－１４に DEM 解析での摩擦試験シミュレーションモデルを示す。解析は、摩擦実験と同様に油圧ジャッキで背面から载荷した部分がある一定の速度で動かすことで行った。また、原位置摩擦実験条件と同様に上载荷重を3ケース変化させて、変位量とせん断力の関係を調べた。解析条件を表－６に示す。

図－１５は、図－１４の解析モデルを使用して上载荷重なし（ケース１）の場合のせん断力と変位量の関係をシミュレートしたものである。解析と実験の両結果を比較すると、数値はかけ離れたものではないが、不規則な関係が解析結果では再現できていない。これは図－１３の石材モデルでは、石材表面の不規則な形状が考慮されておらず、周期的な表面形状をもっていることが原因と考えられる。

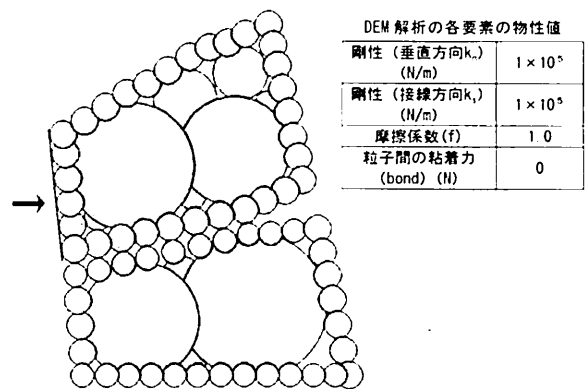
（２）ISRM 指針による石材表面粗さを考慮したモデル

a) 石材モデル

従来の研究により、石材同士の接触面積の大小による地震時の石垣挙動の違いが報告されている⁵⁾。これは、実際に石材の表面粗さが地震時における石材の水平変位量に関係しているということである⁶⁾。この点からも、石材表面の粗さをできるだけ正確に表現する必要があるものと考えられる。そこで、上段と下段の石垣石の接触面に非常に小さな要素を付加することで実物の石材表面粗さを表現することにした。具体的には、原位置摩擦実験で使った「打込みはぎ」の石材表面の粗さは、表－



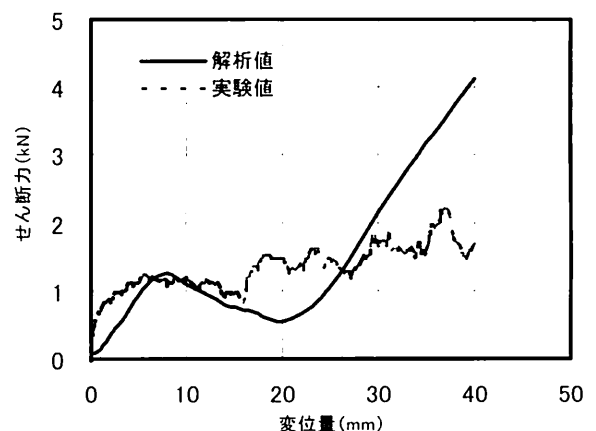
図－１３ 石材モデル（形状のみ考慮）



図－１４ 解析モデル（形状のみ考慮）

表－６ 解析条件（打込みはぎ）

解析条件	接触面積 (m^2)	上载荷重 (kN)	合計荷重 (kN)
ケース１ (载荷なし)	0.27	0	2.65
ケース２		1.05	3.70
ケース３		1.97	4.62



図－１５ せん断力と変位量との関係（ケース１）

４より ISRM 指針に基づく JRC 値で6～8（中間値7）が得られている。そこで、石垣表面に付着させた要素の大きさを1.5～4.5mmとして、上部と下部の接触面にランダムに発生させた後、要素の数を調整して JRC 値が6～8に該当するようにした。その他は、石材表面粗さを考慮

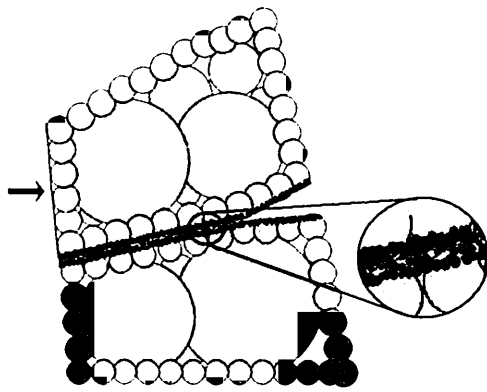


図-16 石材モデル（石材表面粗さを考慮）

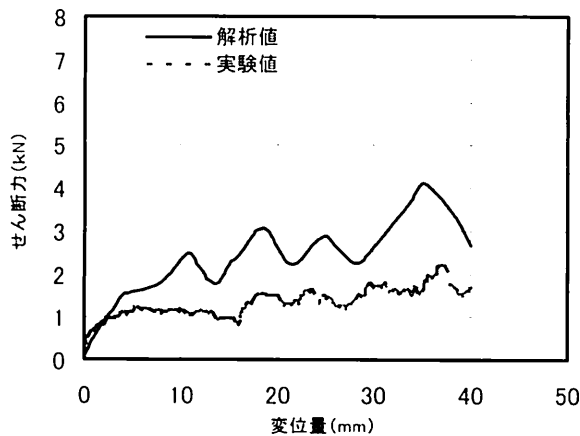


図-17 せん断力と変位量との関係（ケース1）

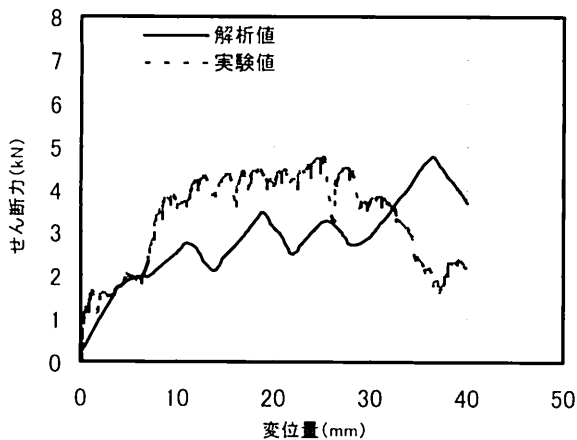


図-18 せん断力と変位量との関係（ケース2）

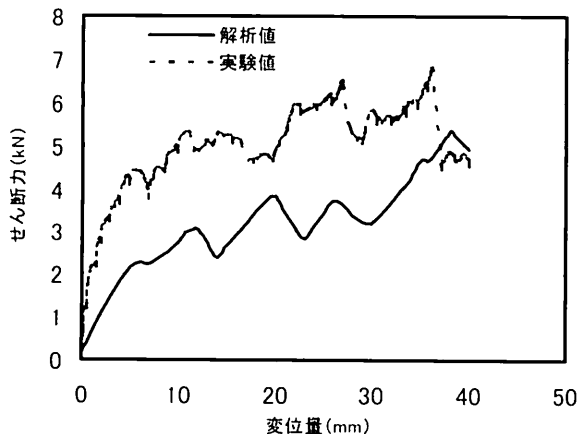


図-19 せん断力と変位量との関係（ケース3）

していない(1)の摩擦試験シミュレーションモデルと同条件とした。図-16に DEM 解析での摩擦試験シミュレーションモデルを示す。

b) 摩擦試験シミュレーション結果

図-17～19は、石材の表面粗さを考慮した場合のせん断力と変位量の関係である。実験値と比較すると、数値に多少の違いはあるが、図のモードには類似する部分が見られ、石材表面の粗さを考慮していないモデルの解析結果（図-15）よりも実験値をうまく表現できていることがわかる。このような解析モデルを作製することによって、石垣間の摩擦特性をほぼ再現できることが明らかとなった。

c) せん断応力と鉛直応力との関係

図-20は原位置摩擦実験と同様に、せん断応力と鉛直応力（土裁荷重）との関係を表したものである。解析結果は、石材間の摩擦角が小さくかつ粘着力が出ているようであるが、せん断応力と鉛直応力の数値は実験結果とほぼ等しい値が得られている。原位置摩擦実験の結果では、 $c=0\text{kN/m}^2$ と想定し求めた石材間の摩擦角は約 52° であったが、同じ考え方で整理すると解析値でも実験値とほぼ等しい石材間の摩擦角が得られており、検討ケースは少ないものの、再現性の良い解析モデルの作製が可能となった。

6 まとめと今後の課題

国内に現存する城郭石垣を含めた石積構造物の補修や維持管理をしていく上で、石積構造物の定量的な安定性評価を行うことが重要となる。

そこで今回、実際の城郭石垣および実験用に構築した模擬石垣における石材間の原位置摩擦実験を行い、さらに個別要素法（DEM）による解析での再現を試みた。その結果、今回の実験条件において以下の知見が得られた。

- (1) 代表的な石積み構築技法である3種類の石材間の原位置摩擦実験を行い、実際の石材間の摩擦角を測定し、「野面積み」で 50.1° 、「打込みはぎ」で 52.6° 、「切込みはぎ」で 34.9° が得られた。

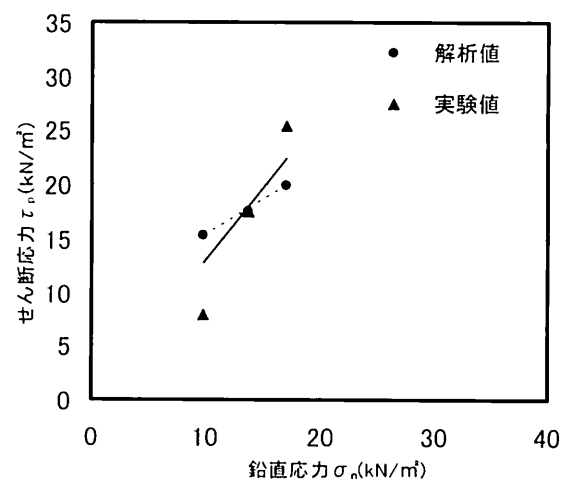


図-20 石垣高さと石材間の摩擦角との関係

- (2) ISRM 指針の簡便なせん断強度の推定式から得られる石材間の摩擦角の推定値が実験値とほぼ一致し、簡便に石垣の鉛直高さに応じた石材間の摩擦角を推定できる可能性があることが示された。
- (3) 間詰石の安定性効果が示され、石材の加工精度に関わらず、背面からの静的な荷重増加に対して少なくとも 10～20%程度のせん断抵抗の増加が期待できる結果が得られた。
- (4) ISRM 指針による石材表面粗さを考慮した解析モデルで、個別要素法 (DEM) による摩擦試験シミュレーションを行い、石垣間の摩擦特性を定量的にほぼ再現できることが明らかとなった。

今後、これらの結果から得られた物性値を城郭石垣等石積構造物の地震時挙動の解析に適用することにより、安定性評価の精度の向上が図れるものと考ええる。また、個別要素法 (DEM) により、石材間の摩擦特性が数値シミュレーションできたことから、これらの集合体である石垣全体としての挙動についても、定量的にシミュレーションできる可能性がある。

参考文献

- 1) 笠博義、山本浩之、阿波谷宣徳、西田一彦、西形達明、和田行雄：城郭石垣における間詰石の安定性向上効果についての実験的検討、土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集、pp.467-468、CS12-003、2007.9
- 2) 山本浩之、笠博義、猪狩哲夫、西田一彦、西形達明、和田行雄：城郭石垣における石材の内部摩擦角推定方法の一提案、土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集、pp.465-466、CS12-002、2007.9
- 3) 岩の力学連合会：日本語訳 ISRM 指針 vol.3 岩盤不連続面の定量的記載方法、pp.37-51、1985.
- 4) 笠博義、阿波谷宣徳：櫓直下の石垣補修技術について、土木学会土木建設技術シンポジウム 2006 論文集、pp.73～78、2006.
- 5) 引場啓太：城郭石垣の安定性に及ぶす積み石形状と盛土構造の影響、関西大学大学院修士論文、pp.50-56、2008.
- 6) 社団法人日本材料学会：ロックメカニクス、単一岩盤不連続面の力学特性評価、技報堂出版、pp.103-108、2002.