

保水容量最大化を目的とする蒸発冷却システム用舗装ブロックの形状最適化

Shape Optimization of the Evaporative Cooling System for Pavement Block Subjected to Maximum Water Retaining Capacity

西村 督^{*1}, 刀根 一将^{*2}, 円井 基史^{*3}
Toku Nishimura^{*1}, Kazumasa Tone^{*1} and Motofumi Marui^{*3}

*1 金沢工業大学建築学科 教授 博士 (学術)

Professor, Department of Architecture, Kanazawa Institute of Technology, Ph.D.

*2 金沢工業大学工学研究科建築学専攻 博士前期課程

Graduate Student, Graduate School of Eng. Kanazawa Institute of Technology

*3 金沢工業大学建築学科 准教授 博士 (工学)

Associate Professor, Department of Architecture, Kanazawa Institute of Technology, Dr.Eng.

Summary: An evaporative cooling pavement system using a ceramic arched block has been proposed to acquire a prescribed water retaining capacity. In this paper, the flexural strength of the ceramic block and the boundary condition between the block and roadbed were experimentally investigated. Moreover, the block shape, which secures the required strength and increases the water retaining capacity, was studied by the cellular automaton method. The results are shown as follows:

- [1] Experimental load-displacement curves show hardening type. Because of frictional resistant increases in accordance with increase of loading value. The friction coefficient between the block and roadbed can be considered as 0.65. In the boundary, the block is fully compressive state.
- [2] Maximum principal stress shows minimum value with respect to stress control parameter for optimization.
- [3] There may be a block shape with the required strength and larger water retaining capacity rather than the proposed block.

キーワード: 建築材料; 舗装ブロック; 保水容量; 形状最適化; セルオートマトン

Keywords: Architectural material; pavement block; water retaining capacity; shape optimization; cellular automaton.

1. はじめに

建築、都市工学の分野で用いられる材料は屋内外の環境負荷に対する耐久性と必要強度を有し、且つ環境調整機能が要求される。例えば都心部のヒートアイランド現象対策として(1)屋上・壁面緑化、(2)建物の表面温度上昇を緩和する塗料、(3)温度に依存して給排水を行う感温性材料、(4)地表面からの放熱を抑制する保水性舗装などの材料の開発やシステムの検討がなされている。

(4)に関する材料としてコンクリート系ブロックを用いた蒸発冷却舗装システムが提案されている。円井、梅干野ら¹⁾は Fig.1 に示す歩道や広場等において雨水を面的に貯留し、舗装体の毛管現象により吸水・蒸発を長期間にわたり持続させる「蒸発冷却舗装システム」の基本構成を提案し、直方体のセメント系ブロックを用いて屋外実験で高い蒸発冷却性能を確認した。更にはブロックの形状を Fig.2 に示すアーチ型に変更した場合、夏季晴天日の連続無降雨期間(約2週間)の蒸発量に相当する保水容量を確保するとともに、保水した雨水を効果的に

舗装表面まで吸水し、従来のものに比べ長期間、蒸発冷却効果が発揮されることを確認した²⁾。文献 1,2 で性能を確認したブロックはセメント系ブロックである。材料の経年変化を円井ら³⁾が検討した結果、セメント系ブロックは屋外暴露実験により、数ヶ月で表面に炭酸カルシウムが析出する白華が生じ、表面温度の上昇が確認されている。この実験結果は材料の主成分の化学反応が蒸発冷却効果というブロックの要求性能を低下させたことを意味する。その後、円井⁴⁾は材質をセラミック系に変更することで3年間、白華が確認されないことを実験的に実証し、蒸発冷却効果が高いと期待される材質を見出した。しかしブロックの形状は環境工学の観点から合理性を有するが力学的見地から合理的形状であるかを包括的には検討されていない。

建築材料は熱、空気、音、光の環境工学に関する設計条件(断熱、反射、放射、遮音、吸音等)以外に構造(剛性、強度、靱性)、施工、コストの各条件を満足することが要求され、多機能化する傾向にある。設計条件の中に



Fig.1 Outdoor space using the Evaporative cooling pavement system¹⁾

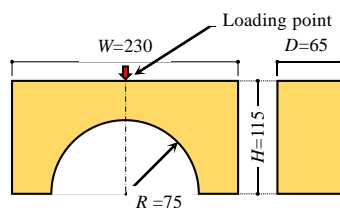


Fig.3 Specimen and loading point



Fig.4 Loading machine

は一般に相反する条件も含まれるため、建築材料の開発は多目的最適化を考慮した設計が必要となる。文献4で提案された材質のブロック形状決定問題は保水量と強度のいずれの設計仕様を満たす形状を決定する多目的最適化問題である。

本論文では文献4で提案されたアーチ形状のセラミック系ブロックの強度を載荷実験で確認し、レンガ脚部の境界条件を検討する。路盤上に設置されるレンガと路盤との接触領域と摩擦抵抗は解析結果に影響する。レンガ脚部の境界条件のモデルを検討する際、実験結果との照合が必要となる。接触領域と摩擦抵抗を考慮した解析モデルにて必要強度を確保し、保水容量を増加せるブロック形状を最適化手法で検討する。その際、ESO法のように要素の除去のみによる最適化手法では最適化過程の応力計算によりレンガ脚部の適合条件（接触、離反）が変更となった場合、除去した要素が必要となる可能性もありうる。本論では要素の除去と再生の双方向の最適化手法の一つであるセルオートマトン法を用いる。

2. アーチ型ブロックの載荷試験

文献4より冷却効果の持続期間と白華に対する目標を満足するセラミック系ブロックの内、淡色レンガのアーチ型ブロックの曲げ強度を載荷実験で確認する。

2.1 実験方法と実験結果

試験体は Fig.3 に示すアーチ型に加工したセラミック系淡色ブロック（高さ $H=115\text{mm}$ 、幅 $W=230\text{mm}$ 、厚さ $D=65\text{mm}$ 、空洞部半径 $R=75\text{mm}$ ）を3体用いた。

加力試験機を Fig.4 に示す。試験機の鋼製ベッドに孔

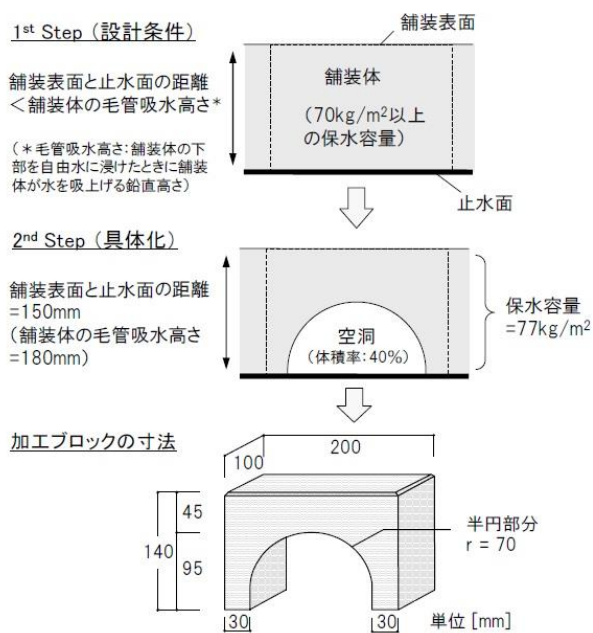


Fig.2 The Evaporative cooling system block²⁾

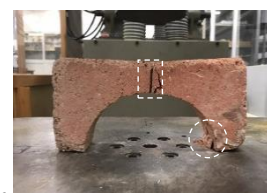
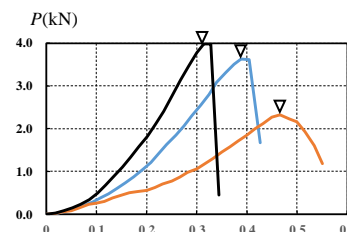


Fig.5 Load P - displacement v Fig.6 Fracture of specimen

があるため、H型鋼を置き、その上に試験体を設置した。載荷は JIS A 5371 に倣い試験体上部中間に集中鉛直荷重（Fig.3中の赤矢印）を与える。アーチの正面から奥行き方向に均等に力が作用し平面応力状態となるように直径18mm、長さ170mmの円形断面の棒鋼をアーチ中央に置き、載荷位置がずれないようにテープで固定した（Fig.4）。

計測項目は荷重 P と加力位置の鉛直変位 v である。試験体3体の実験結果を Fig.5 に示す。最大荷重は Fig.5中の記号 ∇ で生じ、その値は 3.631, 2.269, 3.984kN、平均 3.294kN、標準偏差 0.7394 である。3体の曲げ強度は 9.950, 6.218, 10.92N/mm² である⁵⁾。保水性舗装用ブロックの必要曲げ強度は 3.0N/mm² であり¹⁾、いずれの値も規格値を満たしている。荷重-変位曲線は3体とも硬化型を示している。Fig.6は破壊時のブロックである。ブロック中央の割裂（Fig.6の四角破線）による曲げ破壊と右側脚部内側隅部に破砕（丸破線）を確認した。

3. アーチ型ブロックの形状最適化

Fig.3に示すブロックの全保水量 w は次式⁶⁾で示される。

$$w = \alpha_1 H + (1 - \alpha_1) \frac{R^2 \pi}{2W} \quad (1)$$

ここに α_1 はブロックの体積含水率である。環境性能目標を蒸発冷却効果7日間以上持続とし、1日 5kg/m^2 の蒸発量を仮定すると、有効保水量は 35kg/m^2 以上必要である。さらに80%以上の効率化を図るためには $35/0.8=44\text{kg/m}^2$ 以上の全保水量を必要とする。Fig.3より $H=115\text{mm}$, $W=230\text{mm}$, $R=75\text{mm}$ 、レンガの仕様から体積含水率 $\alpha_1=18\%$ である。このとき式(1)で算定される全保水量は 52kg/m^2 であり、目標性能値 44kg/m^2 以上を満たす。

蒸発冷却効果を高めるには全保水量 w を増加する方策を考える。材質を変えずにレンガ形状の基本寸法である高さ H と幅 W を一定とすれば全保水量 w は式(1)よりアーチの半径 R を増加させればよい。半径の増加はレンガ固体部を減少させることを意味する。レンガの必要曲げ強度を満たし、全保水量を最大化する最適化問題を考える^{5),7)}。

3.1 セルオートマトン法を用いたブロックの形状最適化

セルオートマトン法⁸⁾は設計領域をセルとよばれる格子状の領域に分割し、該当セルのおよび近傍のセルの状態によってセルを活性化、不活性化させる局所規則で系全体を組織化する最適化手法である。

本論で対象とする近傍セルはFig.7に示す上下左右のノイマン近傍のセルとする。セルの局所規則は要素中央位置の相当応力 σ_m が最小値 σ_L 以下の場合には構造体への剛性の寄与が低いと考えて不活性化（材料定数 E を零として要素を除去）させる。一方、不活性化した要素の近傍要素のいずれかが最大値 σ_U 以上あれば除去した要素は剛性の寄与が高いと判断し、活性化（要素の材料定数を基に戻し出現）させる。有限要素は定みずみ四角形要素とする。なお材料定数を零とすると数値的不安定で剛性方程式が解けないため、数値不安定が生じず零に近い値として初期値 $\times 10^{-10}$ を用いた。

応力解析するための材料定数、要素分割、境界条件を設定する。レンガは直交する3方向で強度が異なる異方性材料である⁹⁾。文献9では直交する3方向の圧縮強度を示している。試験体レンガの厚さ方向（文献9図3の③の方向）の圧縮強度は 23N/mm^2 （メーカー規格値）である。文献9の図5(a)から②の方向（曲げ破壊が実験で確認された本解析で x 方向）の圧縮強度は③の圧縮強度の約80%とすると、レンガの x 方向の圧縮強度は $23\text{N/mm}^2 \times 0.8 = 18.4\text{N/mm}^2$ である。またヤング係数は文献9の図6(a)の角柱試験体の圧縮強度と静弾性係数との関係式に適用し x, y 方向とも $1.306 \times 10^3\text{N/mm}^2$ とし、ポアソン比は0.015とする。引張強度は文献調査¹⁰⁾から得られた統計値を参考に圧縮強度の $1/10 \sim 1/8$ の 2.0N/mm^2 （推定値）とした。解析領域はFig.8に示す1/2対称モデルとし、セルは縦横ともに23分割（1セル $5 \times 5\text{mm}$ ）する。

解析モデルは複雑な3次元形状でなく、押出成形によりある方向に同一断面の形状（以下、2次元形状と称す）で検討する。舗装用ブロックは路床に敷かれた路盤（碎石）上に敷き詰めるため、上面、高さ方向の側面、底面（Fig.8の橙色のセル）は不活性化させない。レンガの上面は舗装面、側面は隣り合う煉瓦との接触面、底部は路盤の上に位置する。舗装面は歩行をする上で凹凸や空洞

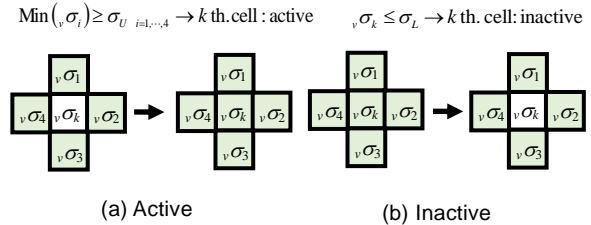


Fig.7 Cell for Neumann neighborhood and local rule

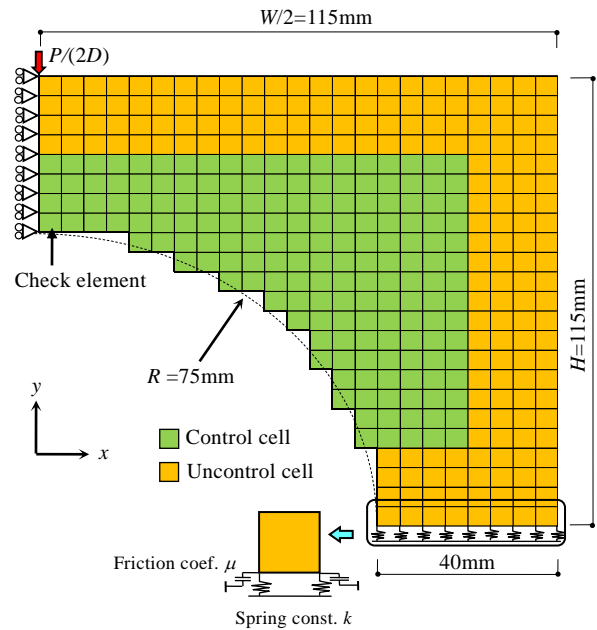


Fig.8 Numerical model for shape optimization

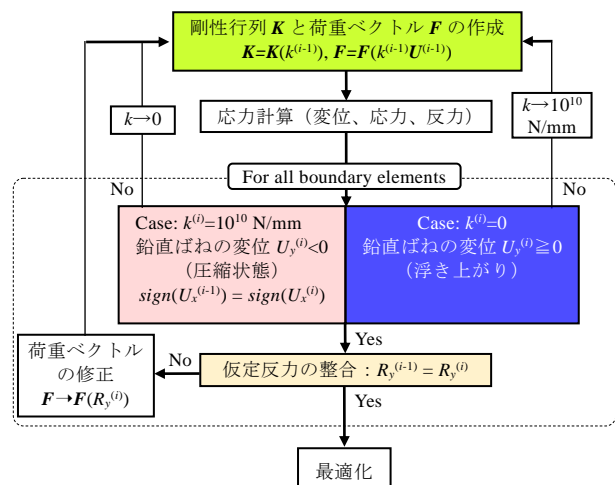


Fig.9 Flow for boundary condition

が無く平らな面が望ましい。側面は同型のブロックを平面内に整列配置するために、また底面は砕石上にレンガを敷いた際、舗装面に凹凸が生じないように平らな面が望ましい。以上の理由から3カ所の要素は最適化の際に不活性化させないとする。

局所規則を適用するセルは Fig.8 の緑色のセルである。境界条件は対称軸上の節点で y 方向ローラー、脚部はレンガと鋼材の摩擦抵抗があり、圧縮領域のみ鉛直方向に抵抗するばねと水平方向に摩擦要素を設ける。鉛直ばねのばね定数 k は十分大きな鉛直抵抗値として 10^{10} N/mm とする。摩擦要素の摩擦抵抗は鉛直ばねの反力 R_y に比例し、比例定数を摩擦係数 μ とする。摩擦抵抗力は前繰り返しステップ（第 $(i-1)$ ステップ）の当該節点の水平変位 $U_x^{(i-1)}$ と逆向きに荷重項として次式で与える。

$$F = -\text{sign}(U_x^{(i-1)})R_y^{(i-1)} = -\text{sign}(U_x^{(i-1)})k^{(i-1)}U_y^{(i-1)} \quad (2)$$

なお鉛直ばね反力は未知変数である第 i ステップ要素変位 U の関数であり応力計算前に確定していないため、暫定値として式(2)にて与え、以下のように評価・決定する。

- ①剛性行列と荷重ベクトルの作成：鉛直ばねの評価プロセスの第 i ステップにおいて、鉛直ばね定数と鉛直反力をそれぞれ前繰り返しステップの鉛直変位 $U_y^{(i-1)}$ と鉛直反力値 $R_y^{(i-1)} (=k^{(i-1)}U_y^{(i-1)})$ から仮定し、剛性行列 $K^{(i)}$ と荷重ベクトル $F^{(i)}$ を作成する。
- ②応力計算：第 i ステップの剛性方程式を解き、変位 $U^{(i)}$ 、応力 $\sigma^{(i)}$ 、反力 $R^{(i)}$ を求める。
- ③適合条件の確認（鉛直ばねの位置と摩擦力の方向）：鉛直ばねを設定している脚部の境界要素節点の鉛直変位 $U_y^{(i)}$ が $U_y^{(i)} < 0$ であれば当該位置は圧縮状態で鉛直ばねを有効とし、 $U_y^{(i)} \geq 0$ であれば要素が浮き上がりとしてばね定数を $k \rightarrow 0$ に変更する。ばね定数が $k=0$ の箇所で $U_y^{(i)} \geq 0$ のとき、ばね定数を変更せず、 $U_y^{(i)} < 0$ であれば $k \rightarrow 10^{10}$ N/mm に変更する。摩擦力の方向は、前ステップの水平変位 $U_x^{(i-1)}$ と第 i ステップの水平変位 $U_x^{(i)}$ の方向が同じであるかを確認し、異なっていれば式(2)の符号を $\text{sign}(U_x^{(i)})$ へ変更する。全ての境界要素で整合するまで①～③のプロセスを繰り返す。

- ④適合条件の確認（鉛直反力の確認）：第 i ステップの摩擦係数設定で用いる第 $(i-1)$ ステップの鉛直ばね反力 $R_y^{(i-1)}$ と第 i ステップの適合条件を満足した応力計算後の鉛直ばね反力 $R_y^{(i)}$ が等しければ応力解析を終了し、最適化を行う。 $R_y^{(i-1)} \neq R_y^{(i)}$ であれば鉛直反力を $R_y^{(i)}$ と仮定し、摩擦係数の設定を変更後、応力計算をする。全ての支持点で $R_y^{(i-1)} = R_y^{(i)}$ となるまで繰り返す。

Fig.9 に境界条件の設定フローを示す。

摩擦係数 μ をパラメータとして実験結果と対応する摩擦係数を検討する。Fig.10 は摩擦係数 μ と最大主応力 σ_{\max} との関係である。最大主応力は Fig.5 の実験結果より最

大荷重を平均値の 3.294kN としたとき、曲げ破壊が生じる対称軸上の下端の要素（Fig.8 中の矢印で示す要素）の

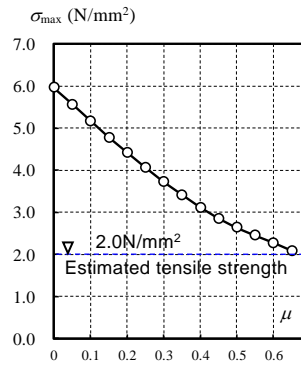


Fig.10 Coefficient of friction μ – Maximum principal stress σ_{\max}

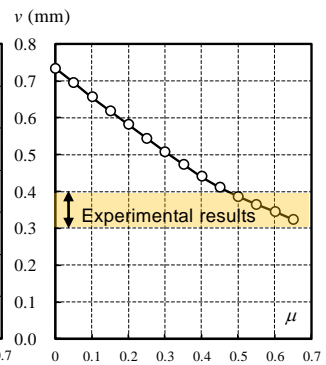


Fig.11 Coefficient of friction μ – Vertical displacement at loading point

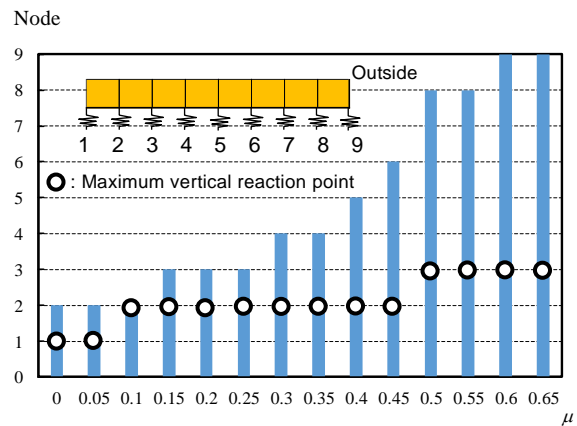


Fig.12 Coefficient of friction μ – Compressive region

Table.1 Numerical parameter

Case	σ_U	σ_L
A	2.0	1.5
B		0.8
C		0.5

(N/mm²)

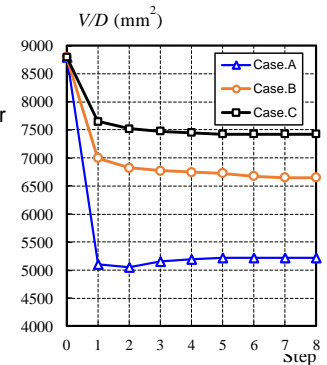


Fig.13 Volume of block

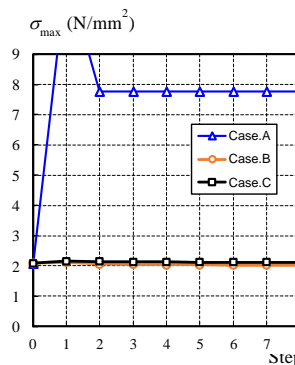


Fig.14 Maximum principal stress

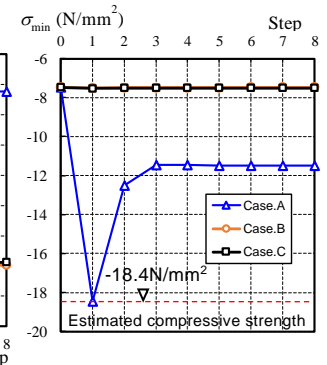


Fig.15 Minimum principal stress

値である。Fig.10 より摩擦係数 $\mu=0$ の場合、レンガの最大主応力は 5.964N/mm^2 でレンガの推定引張強度を超える。摩擦係数の増加に伴い最大主応力は低下する。摩擦係数が 0.65 で最大主応力は 2.084N/mm^2 であり、レンガの推定引張強度 2.0N/mm^2 に近い。

Fig.11 は摩擦係数 μ と加力位置の鉛直変位 v との関係である。 $\mu=0$ の場合は $v=0.734\text{mm}$ で Fig.5 の実験結果（最大荷重時で $0.3\text{mm}\sim 0.4\text{mm}$ ）より大きい変位が生じる。摩擦係数の増加に伴い鉛直変位は低下する。最大荷重時の変位と対応する摩擦係数値は $0.5\sim 0.65$ である。

Fig.12 は摩擦係数 μ と脚部の圧縮領域との関係である。摩擦係数が小さいときは脚部内側端部（節点 1,2）に圧縮領域が生じる。摩擦係数の増加に伴い圧縮領域が外側へ進展し、 $\mu\geq 0.5$ で脚部はほぼ全断面圧縮となる。○は最大鉛直反力の位置を示す。摩擦係数値に関わらず、最大反力は内側の節点 1~3 で生じる。実験から硬化型の荷重-変位曲線が得られていること、脚部が破碎していることから載荷過程で支持領域が変化した可能性がある。 $\mu=0.65$ で $P=1.0\text{kN}$ のとき、節点 1 の鉛直反力が 0.1N 以下であった。荷重が小さいときは左端の鉛直ばねはほとんど寄与していない。荷重増加により左端の鉛直ばねが鉛直力を負担するが支持領域は大きく変化しない。硬化型の荷重-変位曲線は荷重増に伴い、摩擦抵抗が増加したためと考えられる。

以降、Fig.5 の実験結果と対応する摩擦係数 $\mu=0.65$ のモデルを基本モデルとして局所規則をパラメータとする形状最適化を行う。載荷試験ではレンガが路盤上に敷かれた状況を想定し、最も曲げ耐力が低くなると考えられる中央集中載荷を実施した。また理想的にレンガ同士が隙間無しに敷き詰められれば、レンガ間に横方向の拘束力が生じるが経年によりレンガ間にわずかな隙間が生じると考えられる。レンガは延性材料でなく微小変形の範囲で曲げ破壊を生じるとすると図 4 に示したレンガ単体の載荷実験はレンガが敷かれた状況の最小曲げ耐力を安全側に評価し得ると考えられる。レンガの形状最適化は最も曲げ耐力が低くなる荷重および境界条件に対して必要な形状を求めることとした。なお後述する最適化で得られた図 16 の形状に対して等分布荷重時（全面合計で 3kN ）の最大主応力が推定引張強度 2N/mm^2 以下であることを確認している。

解析パラメータを Table.1 に示す。セルを活性化する相当応力値 σ_v を推定引張強度 2.0N/mm^2 とし、セルを不活性化させる相当応力値 σ_L を σ_v の $3/4$, $2/5$, $1/4$ とする。Fig.13 に最適化によるブロックの体積変化を示す。縦軸は体積 V を厚さ D で除している。CaseA, B, C の体積は初期体積に対して 59.4% , 75.6% , 84.4% といずれの Case も体積は減少し 7 ステップまでに収束する。セルを除去する相当応力値 σ_L が大きいほど収束時の体積 V は小さい。

Fig.14, 15 はそれぞれ最大主応力と最小主応力の変化である。Fig.14 より体積が最小の Case.A は最大主応力が 7.776N/mm^2 で推定引張強度を超える。Case.B の場合、初期形状での最大主応力 2.084N/mm^2 から最適化により 2.032N/mm^2 へ減少する。更に σ_L を下げると最大主応力は低下するわけではなく、Case.C では 2.125N/mm^2 と微増する。Fig.15 より最小主応力の収束値はいずれの Case もメーカー規格値からの推定強度- 18.4N/mm^2 を超えていない。Fig.16 は最適化で得られた形状と応力分布（相当応力、最大主応力、最小主応力）である。□は不活性のセルである。相当応力の図から収束時のセル配置は Case.A の場合、制御対象としない上面と側面のセルでほぼ占められ、隅部にハンチを有するラーメン構造を形成していると考えられる。また脚部外側の境界要素のみに鉛直ばねが配置される。載荷点近傍はせん断力が大きく、Case.B, C では載荷点近傍にセルが集中する。Case.B は載荷点と脚部支持部をつなぐにトラス構造、Case.C はアーチ構造を形成しているように見える。Case.B, C とも脚部の境界要素の節点全てに鉛直ばねが配置される。但し、左端節点のみ鉛直反力は 0.2N 以下でほとんど鉛直支持に寄与していない。Case.B, C の場合、載荷点と境界節点間が黄色および橙色であり、相当応力が比較的均等に分布する。またセルを不活性化させない隅部は濃い青色で

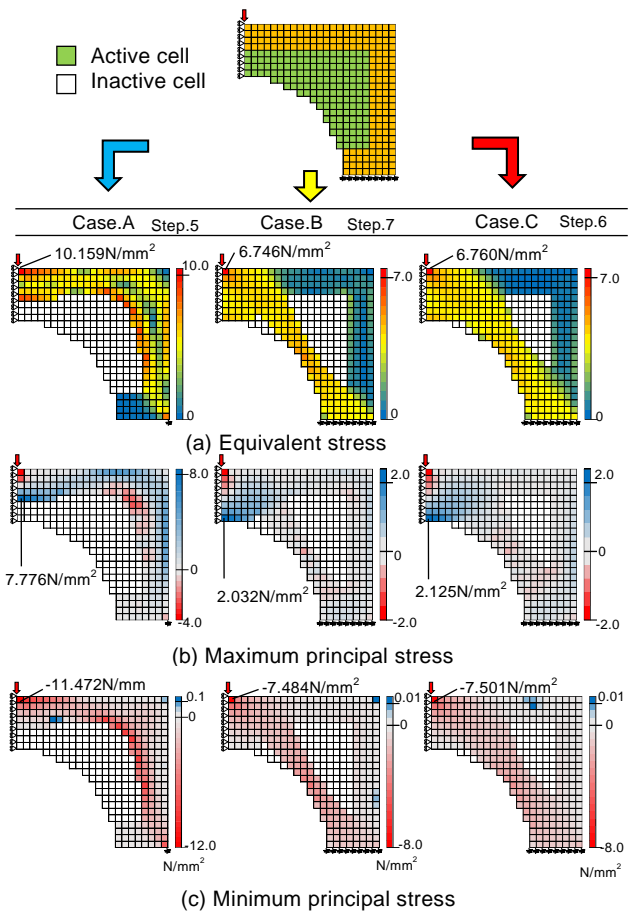


Fig.16 Result of shape optimization

あり Case.A と異なり、応力がほとんど生じていない。最大主応力の位置は Case.A の場合、曲げ引張側となる載荷点下、隅部と側面外側に濃い青色として確認できる。Case.B, C の場合、載荷点の下に推定引張強度 $2.0\text{N}/\text{mm}^2$ に近い値の領域が確認できる。最小主応力の位置は Case.A の場合、最大主応力と反対側に濃い赤色として確認できる。

Fig.16 より Case.B, C の最適化の結果は実験結果とほぼ同等の曲げ破壊強度を有し、力の伝達に寄与しない箇所に空洞を形成する。文献 1,2 で円井らが提案している「蒸発冷却舗装システム」は、舗装体の底面および側面に遮水シートを設置し、水を貯留するシステムである。雨等で舗装体に流入した水はブロック底部から上面に向かって貯水され、流入水の水位が今回の論文で提示した空洞に達するとその空洞にも貯水される。空洞内の自由水はブロックの毛管吸水によりブロック内を移動し、表面で蒸発する。また自由水の水位が下がれば、文献 2 のアーチ形ブロック同様に中央下の切り欠き部に重力により自由水が降りてくる。よってこの空洞は保水領域と見なすことができる。さらに図 13, 14 より Case.B は必要強度を有し、保水量を増加させる有効な形状と言える。

図 16 の Case.B で得られた形状では細いトラス形状が得られている。セラミック系ブロックやレンガは 2 次元の形状であれば型枠を作製し、押出成形で製作が可能である。ただし型枠による製作時の形状でも段々の形状は隅部に応力集中が生じやすく、延性材料でないため隅部が破損し易い為、製作形状は直線もしくは滑らかな曲線形状へ微調整することが望ましい。

Fig.13 よりセルを不活性化させる応力値 σ_c の増減と最適化されたブロックの体積の大きさは対応するが、Fig.14 より曲げ強度に関わる最大主応力はあるパラメータ値で極小値を示す。適切なパラメータの設計方法は、複数パラメータ（セルの出現、除去を設定する応力の上下限值）に対してブロック体積、最大主応力という複数の目的関数を最小化させる GA 等の発見的な手法を適用した多目的最適化手法が有効と考え、今後の課題とする。

4. 結論

本論文では蒸発冷却効果が確認されているアーチ型セラミック系ブロックの曲げ強度を載荷実験で確認し、レンガ脚部の境界条件を検討した。またレンガの必要曲げ強度を確保し、保水量を増加させるブロック形状をセルオートマトン法で調査した。得られた結果を以下に示す。

[1] 脚部境界で摩擦抵抗を考慮したモデルを検討し、摩擦係数 0.65 の解析結果が実験結果と対応し、実験時は脚部がほぼ全面圧縮状態と考えられる。実験で得られた硬化型の荷重 - 変位曲線は荷重増に伴い、摩擦抵抗が増加したためと考えられる。

[2] 曲げ強度に関わる最大主応力はセルを不活性化させる応力制御パラメータに関して極小値を示す。

[3] 蒸発冷却効果が確認されているアーチ型ブロックと比較して保水量が多く、必要曲げ強度を満足するブロック形状が存在する可能性がある。

式(1)によれば最適化で除去された体積が同一であれば全保水量は等しくなる。保水量が同じであってもブロックの空洞位置、空洞の個数によって毛管現象のプロセス、および蒸発冷却期間に差異が生じる可能性がある。本手法は蒸発冷却期間を最大化させる空洞のトポロジー最適化問題に適用可能と考える。

謝辞

アーチ型ブロックの加工および載荷試験において、金沢工業大学学部生（当時）小林舜氏、土屋幹氏、三宅匠氏の多大な協力を得ました。本研究に際し株式会社伊藤工務店より研究助成を受けました。ここに深謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史, 板津佳恵: 蒸発冷却舗装システムの基本性能に関する夏季屋外実験 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 600 号, pp.51-58, 2006.2
- 2) 梅干野晃, 円井基史, 松本明広, 浅輪貴史: 雨水貯留と毛管吸水に着目した蒸発冷却舗装システムにおける夏季屋外実験による舗装体の形状と断面構成の検討, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.6, pp.30-38, 2011.11
- 3) 円井基史, 湯浅昇, 梅干野晃: 蒸発冷却舗装システムにおける舗装ブロックの白華と細孔径分布, 第 61 回セメント技術大会講演要旨, pp.184-185, 2007.5
- 4) 円井基史, 鈴木琢也: 蒸発冷却舗装システムにおける白華、ブロック強度、夏期ヒートアイランド緩和度合いに関する検討, 日本建築学会北陸支部研究報告, 第 61 号, pp.200-203, 2018.7
- 5) 刀根一将, 西村督, 円井基史: 必要強度を有し保水容量最大化を目的とする蒸発冷却システム用舗装ブロックの形状最適化の検討, 日本建築学会北陸支部研究報告, 第 62 号, pp.1-4, 2019.7
- 6) 西村督, 円井基史, 後藤正美: 多目的最適化を目指した建築エンジニアリング分野のプロジェクトデザインにおける協働, KIT Progress, No.27, pp.355-364, 2019.3
- 7) 刀根一将, 西村督, 円井基史: セルオートマトン法による蒸発冷却システム用舗装ブロックの形状最適化, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 I, pp.191-192, 2019.9
- 8) 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄: 発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム, コロナ社, pp.95-166, 2004.7
- 9) 中浜貴生, 三島直生, 畑中重光: レンガの圧縮強度の異方性とその発生メカニズムに関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 677 号, pp.1021-1028, 2012.7
- 10) 貴志拓哉: 無補強レンガ造壁体の面内曲げ及びせん断力の算定法に関する考察, [http://www.hues.kyushu-u.ac.jp/education/student/pdf/2015/2/HE14086T.pdf#search=%27E8%B2%B4%E5%BF%97%E6%8B%93%E5%93%89+%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%AC%27,\(参照 2019-06-30\)](http://www.hues.kyushu-u.ac.jp/education/student/pdf/2015/2/HE14086T.pdf#search=%27E8%B2%B4%E5%BF%97%E6%8B%93%E5%93%89+%E3%83%AC%E3%83%B3%E3%82%AC%27,(参照 2019-06-30))