メンテナンス及びリサイクルに有利な 軽交通路用自然石舗装の開発

菊池 祥一¹・加納 陽輔²・秋葉 正一³・佐藤 克己⁴

¹正会員 日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

E-mail: kikuchi324@yamamotokensetsu.jp

²正会員 日本大学助教 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

E-mail: kanou.yousuke@nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

E-mail: akiba.shouichi@nihon-u.ac.jp

⁴正会員 日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

E-mail: k_satou@nakanihon.co.jp

景観整備に対する社会的要請を背景に、道路舗装分野では軽交通路に適応可能な景観舗装技術の開発が期待されている。なかでも、自然石舗装は自然景勝と調和する主に歩道を対象とした工法であるが、車両の乗入れによって頻繁に補修を要するなど、結果的に景観を害し、不経済となる場合もある。本研究では、経年とともに風合いを増す石構造物の環境・景観的価値を見直し、石板の繰返し利用を前提とした軽交通路用自然石舗装の開発を試みた。この結果、目地部へのアルミナボールの挿入によって石板の沈下や傾斜、移動に対する耐久性が向上し、さらに目地砂として少量のアスファルトを締固めることで雨水等による流失が抑制されることを確認した。また、実施工に先立って、目地材の配合と品質を明らかにし、現場で実施可能な品質管理試験について検討した。

Key Words : block pavement, landscape maintenance, stone block, low volume road, shock absorption, maintenance and recycling

1. はじめに

現在、わが国では観光立国の実現に向けた“ビジット・ジャパン事業”や“国際競争力ある観光地づくり”を推進するため、官民一体となった景観整備への取り組みが望まれている¹⁾。一方、地域機能を維持・再生するインフラ整備事業においても、新規・更新を問わず環境や景観に対する配慮が求められており、今後も、これらに対応した技術的方策を示し、積極的に選択していかねばならない²⁾。特に、景観形成の一役を担う道路舗装分野では、自然石平板を用いたブロック式舗装（以下、自然石舗装）等の景観に配慮した舗装（以下、景観舗装）に対するニーズが高まりつつあり、軽交通路に適応可能な景観舗装技術の開発が期待されている³⁾。

景観舗装のなかでも、自然石舗装は石特有の質感が史跡名勝や自然景勝と調和し、古くから参道や境内の石畳に採用される伝統工法を原点とする。また、現代において自然石舗装を採用する利点は、例えば図-1のように、

図-1 電鉄敷石を活用した自然石舗装の例（松山市）

地域の歴史が刻まれた石材を活用する機会とともに、舗装自体に新たな観光資源としての付加価値を創出し、景観形成に寄与することと考える⁴⁾。しかし、現状では多くが歩道を対象とした工法であるため、観光車両等の乗入れによって頻繁に補修を要する場合や、ライフライン

図-2 既往の自然石舗装の構造と破損形態

図-3 提案工法の構造

等の改修に伴って一部をアスファルト舗装で打ち換えざるをえない場合もあり、結果として景観を損ねる可能性がある。今後も、環境や景観に配慮したインフラ整備を進めるうえで景観舗装の必要性は高く、施工性に優れ、軽交通路に適応可能な自然石舗装の確立が地域活性化にも寄与するひとつの方策と考える。

著者らは、石橋や石垣と同様に経年によって風合いを増す石構造物特有の環境・景観的価値を見直し、石板の繰返し利用を前提とした自然石舗装工法の開発に取り組んでいる。このため、石板をセメントモルタル等で固着せず、下地及び目地に粗砂等の粒状材料を締固めて固定する工法（以下、固定型工法）に着目しているが、現状では特に耐久性の問題から軽交通路への適用は困難である。

本研究では石板の繰返し利用が可能で、かつ耐久性や施工性に優れた自然石舗装工法の確立を目指して、アルミナボールと少量のアスファルトを混合した砂（以下、As.砂）を応用する新たな工法を提案し、メンテナンスとリサイクルに有利な軽交通路用自然石舗装の開発を試みた。

2. 提案工法及び研究概要

既往の自然石舗装の構造と破損形態を図-2に示す。自然石舗装は一般にセメントコンクリート版や既設舗装面を施工基盤として、下地及び目地に粒状材料を用いた固定型工法と、セメント系あるいはポリマー系の固着材を充填して石板を固着する工法（以下、固着型工法）とに大別される。

軽交通路への適応にあたって、固定型工法は下地及び目地の支持力不足に起因した石板の沈下や傾斜、移動、さらに雨水による目地の流失等が課題であり、現状では主に歩道を対象としている。他方、固着型工法では石板の固着に起因したメンテナンスやリサイクルに関する課題があり、下地及び目地の材料によっては繰返しの輪荷重を受けて連鎖的に破壊する可能性を残している。また、固着型工法は固定型工法に比べて耐久性に優れるが、一般に施工費が高く、解体・処分が容易でないためライフサイクルを通じてコスト高となる場合がある。

このように、特に固定型工法では耐久性に関する問題、固着型工法ではメンテナンスとリサイクルに関する問題が未解決であり、さらに両工法とも景観舗装としての位置付けから、補修・修繕に際しては本来の美観を保持することが前提となる³⁾。

提案工法の構造を図-3に示す。提案工法は、固定型工法の目地に電気部品等の粉碎用（ボールミル）として市販されるアルミナボールを挿入し、噛み合わせ効果によって石板をより強固に固定することで、固定型工法の課題である沈下や傾斜、移動等の耐久性改善を期待したものである。さらに、この構造は固着型工法の破損要因である繰返しの輪荷重を、長期的に受容することが可能と考えた。ここで、本工法の構造に至った経緯として、まずはメンテナンスとリサイクルを容易に行うため、さらに補修に伴う美観を保持するために石板の固着を避け、固定型工法による耐久性の改善を検討した。つぎに、固定型工法の耐久性を改善するには石板同士、すなわち目地の噛み合わせを向上させ、輪荷重を分散する必要があると考え、目地幅とほぼ同径で、かつ耐久性のある材料を目地部に挿入する構造を考案した。

目地部に挿入する材料の選定にあたっては、石板を固定するために十分な硬度と耐摩耗性、耐腐食性を有すること、施工性に配慮して均質、かつ均一な球形であること、さらに経済性を考慮して安価で、安定供給が可能な市販品であることを必要条件とし、粉碎用アルミナボールの応用を提案するに至った。なお、本工法で用いるアルミナボールは硬度、靱性が高く、磨耗減量が極めて低いためボールミルや振動ミル等の粉碎機に採用されており、品質の安定した工業製品として直径1～50mmの範囲で市販されている。また、本工法では目地の流出対策と

表-1 石板の物性

鉱物種	圧縮強度 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
輝石安山岩	10.3	2.553	1.14

表-2 粗砂及びAs砂の物性

	粗砂	As. 砂
含水比 (%)	0.37	0.61
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.718	1.500
透水係数 (cm/sec)	8.553×10^{-3}	1.611×10^{-2}
アスファルト量 (%)		2.0

表-3 アルミナボールの品質

比重	3.6以上
硬度	9 (旧モース硬度)
構成成分	アルミナ純度92%以上

して、舗石用サンドクッション材や目地材に用いられているAs.砂の活用を併せて検討した⁹⁾。

本工法の開発にあたって、まずは室内試験から石板の沈下、傾斜、移動に対するアルミナボール及びAs.砂の効果とともに、衝撃吸収性や透水性などの付加的性能を確認した。さらに、この結果を踏まえて、耐久性と施工性を現場試験によって評価し、As.砂の配合と品質を明らかにしたうえで、経済性と供用性を実施工により検証した。

3. 室内試験による効果及び性能の確認

(1) 試験方法及び供試体

はじめに、固定型工法に対するアルミナボールとAs.砂の効果を確認するため、ホイールトラッキング試験機による室内シミュレーション試験を実施した。試験輪の接地圧及び走行速度はホイールトラッキング試験⁹⁾に準拠し、目地直上を15000輪(7500往復)走行させて、走行輪数に伴う石板の沈下量、傾斜量、移動量から耐久性を評価した。ここで、走行輪数はN₂交通量区分(台/日・方向:15以上40未満)における本工法の適用を目標として、当該区分の疲労破壊輪数(7,000回/10年)から供用期間20年に相当する14,000輪を目安に15,000輪までの耐久性を評価した。また、付加的性能の確認として、衝撃吸収性を舗装路面の弾力性試験⁷⁾(ゴルフボール反発試験)より、透水性を現場透水試験⁸⁾より評価した。なお、各試験とも1条件につき3回の平均値を評価している。

【下地の締固め】
模擬路盤上に厚さ30mm分の粗砂を敷き均し、パイプレータで締固める。

【石板の敷き並べ】
四方の目地幅が約10mmとなるよう、下地上に全ての石板を敷き並べる。

【目地の充填及びアルミナボールの挿入】
目地に厚さ20mm分の粗砂を充填し、アルミナボールを2段に重ねて挿入する。

【目地の締固め】
目地深さ一杯に粗砂を充填し、目地を石板とともにパイプレータで締固める。

図-4 供試体の作製手順

図-5 供試体の構造及び測定点

石板の物性を表-1に示す。石板は自然石舗装や石積み等で実績がある秋田県産の輝石安山岩(通称:男鹿石)を使用し、実施工での実績を踏まえて石板厚さを50mm、目地幅を10mmとして、ホイールトラッキング試験用型枠(内寸:300×300×100mm)に縦横3列で配置できるよう整形した。

下地及び目地に使用した粗砂と市販のAs.砂の物性を表-2に、アルミナボールの品質を表-3に示す。目地に挿入したアルミナボールは、粉碎用として市販される標準寸法のうち、供試体の目地幅に基づいて8mmのものを選定した。

供試体の作製手順を図-4に、供試体の構造及び測定点を図-5に示す。アルミナボールの数量と挿入深さは、施工性と経済性に配慮し、ボール径と目地延長から上下2段の構成となる個数を求めて、目地深さの中央に重ねて配置した。供試体の断面構造は自然石舗装の実績を踏まえて、最も簡易的な構造に対する効果を評価することとした。なお、模擬路盤は厚さ20mmの範囲で碎石の配置や形状による影響を避けるため、直径15mmの均質なアルミナボールを碎石に代用し、同質量の粗砂と配合して締固めた。測定点は中央a点の鉛直変位を沈下量とし、縦断方向両端b, c点の鉛直変位差(絶対値)を縦断傾斜量、横断方向両端d, e点の鉛直変位差(絶対値)を

表-4 下地及び目地の構成と供試体の名称

	供試体名称	下地材の構成	目地材の構成
固定型工法	Type S-S	粗砂	粗砂
	Type S-Sb	粗砂	粗砂 + アルミナボール
	Type A-A	As.砂	As.砂
固着型工法	Type C	セメントモルタル

図-6 走行輪数と沈下量

横断傾斜量, さらに a 点の水平変位から縦断移動量, 横断移動量を評価した. ここで, 沈下量と移動量は f~j 点を同様に測定しているが, 四方が石板に隣接する a 点で最大値となるため, これを評価対象とした.

下地及び目地の構成と供試体の名称を表-4 に示す. 固定型工法は下地及び目地に粗砂を用いた Type S-S を基準供試体とし, 目地にアルミナボールを挿入した Type S-Sb, 下地及び目地に As.砂を用いた Type A-A を比較して, As.砂とアルミナボールによる効果を確認した. また, 参考として下地及び目地ともにセメントモルタル (普通ポルトランドセメントによる) を用いた Type C についても同様に試験した.

(2) 耐久性に関する評価結果

a) 沈下抑制効果について

走行輪数と沈下量を図-6 に示す. 凡例は, 固定型工法のうち目地が粒状材料のみによる結果を破線, アルミナボールを挿入した結果を実線, 固着型工法を一点鎖線で記している. 下地及び目地に粗砂を用いた Type S-S 及び As.砂を用いた Type A-A は, 初期圧密を含む 2000 輪後の沈下量がおおよそ 3mm に達し, 以降も走行輪数に伴って沈下量が増加している. 一方, 目地にアルミナボールを挿入した Type S-Sb は, 2000 輪後の沈下量が約 1mm であり, 2000 輪から 15000 輪にかけて沈下の進行は見られない. これは, アルミナボールの挿入によって石板との噛

図-7 走行輪数と横断傾斜量

図-8 走行試験後の供試体 (Type S-S)

み合わせが向上し, 隣接する石板同士が一体となることで沈下抑制効果が発現したと考える. なお, 各条件による 3 回の標準偏差は最大でも 0.8mm 未満である.

以上から, 石板の沈下抑制に対して, 下地及び目地に用いた As.砂の効果は認められないものの, 目地にアルミナボールを挿入することで沈下抑制効果が得られることを確認した.

b) 傾斜抑制効果について

走行輪数と傾斜量の関係のうち, 供試体ごとの特徴が見られた横断傾斜量の結果を図-7 に示す. 沈下量と同様に目地が粒状材料のみによる Type S-S 及び Type A-A は, 走行輪数に伴い傾斜量が増加する傾向が見られ, 試験後の供試体には図-8 のように石板の傾斜と移動に伴う競り上がりが生じている. 他方, アルミナボールを挿入した Type S-Sb は, 2000 輪以降に傾斜の進行は見られず, 15000 輪後の傾斜量は約 1mm である. なお, Type S-Sb では 3 回の標準偏差が 0.3mm 程度であり, 一定の効果が得られている.

以上の結果から, 石板の傾斜に対しても目地にアルミナボールを挿入することによる抑制効果が認められるが, 下地及び目地に As.砂を用いたことによる明らかな効果は確認されなかった.

c) 移動抑制効果について

走行輪数と移動量の関係のうち, 比較的大きな変位が見られた横断移動量を図-9 に示す. 15000 輪後の移動量は, 粗砂による Type S-S が約 2mm に対して, Type A-A

図-9 走行輪数と横断移動量

図-10 GB係数 (反発係数)

が約 1mm, Type S-Sb では約 0.5mm まで減少し, As.砂とアルミナボールによる移動抑制効果が見て取れる. また, Type S-Sb では 2000 輪以降に移動の進行は見られなかった. これは, 下地及び目地に As.砂を用いたことで石板との摩擦が増加し, アルミナボールとの噛み合わせによって石板がより強固に固定されたためと考える. なお, Type S-Sb では 3 回の標準偏差が最大でも 0.2mm 未満である.

以上から, 下地及び目地に As.砂を用いること, さらに目地にアルミナボールを挿入することによる石板の移動抑制効果を確認した.

(3) 付加的性能に関する評価結果

a) 衝撃吸収性について

GB 係数 (反発係数) を図-10 に示す. 固定型工法である Type S-S, Type S-Sb, Type A-A の GB 係数はいずれも 45% 前後であり, 一般的なアスファルト舗装 (GB 係数が 55~65% 程度⁷⁾) に比べて小さく, ポリウレタン系舗装 (GB 係数が 30~50% 程度⁷⁾) と同程度の衝撃吸収性が期待できる. なお, Type S-Sb は固定型工法のなかでも GB 係数が僅かに大きく, アルミナボールの噛み合わせ効果が発現したものとする. 一方, 固着型工法である Type C は GB 係数が 80% 程度であり, 衝撃吸収性は期待できない.

以上から, 固定型工法の付加的性能として衝撃吸収性が得られる可能性を確認し, 例えば歩道と一体となった軽交通路用景観舗装の整備において, 本工法の有用性が認められる.

b) 透水性について

透水量を図-11 に示す. 固定型工法である Type S-S, Type S-Sb, Type A-A は, 透水量が 35~55ml/15 秒程度であり, 本工法によって雨水を路面下に浸透させる性能が得られることを確認した. ここで, 固定型工法のうち透水量が比較的小さい Type A-A は, アスファルト被膜によって目地表面が疎水性となり, また空隙が減少したため吸水・浸透能が低下したものとする. なお, 試験後の Type S-S, Type S-Sb には, 流水によって目地の一部が側

図-11 透水量 (ml/15 秒)

方へ移動した形跡が見られたが, Type A-A では試験前後における目地の外観に大きな変化は確認されなかった. 一方, 固着型工法である Type C は, 目地部がセメントモルタルによって充填されるため透水量は得られない.

以上から, 固定型工法の付加的性能として透水性が得られる可能性を確認し, さらに As.砂を用いることで目地の流失を抑制する効果が期待できる.

4. 現場試験による耐久性及び施工性の評価

(1) 試験方法及び供試体

室内試験より確認した As.砂とアルミナボールの効果を実証するため, 疲労破壊輪数の標準荷重である 49kN の輪荷重が得られるよう車両総重量を 20ton とした実輪荷重による現場試験を実施し, 耐久性及び施工性を評価した.

現場試験の様子と断面構造を図-12 に, 路面構成と測定点を図-13 に示す. 断面構造は自然石舗装の基本構造に基づいて, 交通量区分を N₂ に設定し, 路盤以下で目標等値換算厚 (設計 CBR : 20) を満足するよう設計した. 路面構成は, 石板サイズや敷設パターンが及ぼす影響を把握するため, 一般に使用されている 300×300×60mm (以下, Pattern A) 及び 600×300×60mm (以下, Pattern B) を比較評価した. また, 各工区は試験ループの直線区間に延長 2000mm, 幅員 3100mm で舗装し, 隣接する工区

図-12 現場試験の様子と断面構造

図-13 現場試験の路面構成と測定点

が互いに干渉しないよう四方をコンクリート枠で遮蔽した。

測定点は石板中央 a 点の鉛直変位量を沈下量として、同石板の縦断方向両端 b・e, c・d 点の鉛直変位差（絶対値）を縦断傾斜量、横断方向両端 b・c, d・e 点の鉛直変位差（絶対値）を横断傾斜量、さらに、a, f, g 点の縦断方向水平変位量の最大値を縦断移動量、a, f, g 点の横断方向水平変位量の最大値を横断移動量として、疲労破壊輪数（交通量区分： N_2 ）を参考に、供用 4 年間にあたる 2800 輪までの耐久性を評価した⁹⁾。なお、石板は図-13 のとおり、OWP と IWP とで四方が石板に隣接する各 3 枚を対象とし、評価項目ごとに石板配置（配置 A, B）と損傷程度を確認したうえで損傷部について比較評価した。

下地及び目地の構成と工区の名称を表-5 に示す。下地及び目地ともに粗砂を用いた Type S-S を基準供試体とし

表-5 下地及び目地の構成と工区の名称

	供試体名称	下地材の構成	目地材の構成
固定型工法	Type S-S	粗砂	粗砂
	Type S-Sb	粗砂	粗砂 + アルミナボール
	Type A-A	As.砂	As.砂
	Type A-Ab	As.砂	As.砂 + アルミナボール
	Type S-Ab	粗砂	As.砂 + アルミナボール
固着型工法	Type P	ポリマー系固着材	
	Type C	セメントモルタル	

て、Type S-S の目地にアルミナボールを挿入した Type S-Sb, 下地及び目地に As.砂を用いた Type A-A, Type A-A の目地にアルミナボールを挿入した Type A-Ab, 下地に粗砂、目地に As.砂を用いてアルミナボールを挿入した Type S-Ab の 5 種類の固定型工法を比較した。また、下地及び目地にポリマー系固着材を用いた Type P, セメントモルタル（普通ポルトランドセメント）を用いた Type C の 2 種類の固着型工法についても同様に試験した。なお、石板や下地及び目地に用いた素材（表-1～3）と施工の手順（図-4）は室内試験と同様である。

(2) 耐久性に関する評価結果

a) 沈下抑制効果について

沈下量は走行部直下で載荷面積がより広い配置 A において大きくなることを確認し、OWP と IWP の縦断方向中央に位置する石板の平均値を損傷部の沈下量として評価した。なお、損傷部の沈下量は同工区の OWP と IWP に大きな差異は見られなかった。

Pattern A の沈下量を図-14 に、Pattern B の沈下量を図-15 に示す。凡例は室内試験と同様に、固定型工法のうち目地が粒状材料のみで構成される工区を破線、アルミナボールを挿入した工区を実線、固着型工法を一点鎖線で記している。固定型工法の沈下量は石板サイズが小さく、下地への接地圧が大きい Pattern A が、Pattern B に比べて大きく進行する傾向にあり、特に目地が粒状材料のみによる Type S-S, Type A-A は 1000 輪までの沈下量が比較的大きい。ここで、Pattern A の結果を詳しく見ると、1000 輪後の沈下量は固着型工法が平均 0.8mm 程度であるのに対し、固定型工法のうちボールを用いた工区は平均 2.9mm, ボールを用いていない工区では平均 4.2mm であり、いずれも 2800 輪にかけて沈下の進行は見られない。

図-14 走行輪数と沈下量 (Pattern A)

図-16 走行輪数と横断傾斜量 (Pattern A)

図-15 走行輪数と沈下量 (Pattern B)

図-17 走行輪数と横断傾斜量 (Pattern B)

なお、今回の試験は路盤以下で目標等値換算厚を満足する構造であり、このような施工基盤（図-3）上に自然石舗装を施工した場合、各工法とも沈下が大きく進行しない可能性をこの結果が示唆している。また、ボールを用いた工区はボールを用いない工区に比べて沈下量が30%程度減少する傾向が見られ、これはボールの挿入によって目地部の噛み合わせが向上し、石板同士が一体となることで荷重の分散効果が発現したものと考えられる。

他方、Pattern Bは各工区とも2800輪後の沈下量が比較的小さいが、Pattern Aと同様にボールを用いた工区では沈下量が30%程度減少している。また、Pattern A、Pattern Bとも、固定型工法において2800輪までに1mm程度の沈下が見られたことから、路盤以下の構造で圧密が生じた可能性が考えられる。なお、各工区とも載荷面積が一端に偏る測定点では沈下量が損傷部に比べて2~4割程度小さく、特にPattern Bは走行部の沈下が傾斜として発現している。

以上の結果から、固定型工法では石板サイズが小さく、下地への接地圧が大きい敷設パターンにおいて沈下が進行しやすい傾向にあり、アルミナボールによる沈下抑制効果が期待できる。なお、石板中央の沈下量が石板間の段差として生じた場合もボールを用いた工区はインターロッキングブロック舗装の補修基準である段差量5mmに達していない¹⁰⁾。

b) 傾斜抑制効果について

傾斜量は載荷面積が一端に偏る配置Bにおいて横断方

向に傾斜が生じることを確認した。このため、OWPとIWPで配置Bにある石板の平均値を損傷部の傾斜量とした。なお、損傷部の傾斜量は同工区の計4枚に大きな差異は見られなかった。

Pattern Aの横断傾斜量を図-16に、Pattern Bの横断傾斜量を図-17に示す。横断傾斜量は、Pattern Aに進行は見られないものの、横断方向に石板サイズが大きく、モーメントが大きいPattern Bでは下地及び目地が粒状材料のみによるType S-S、Type A-Aで大きく進行し、2800輪後に約4mmに達している。しかし、Pattern Bのなかでもアルミナボールを挿入したType S-Sb、Type A-Ab、Type S-Abは、2800輪後の横断傾斜量が2mm以下であり、1000輪以降2800輪までに傾斜の進行は見られない。なお、縦断傾斜量に関してはPattern A、Pattern Bの各工区とも2800輪にかけて傾斜は進行していない。

以上から、固定型工法は石板サイズが大きい敷設パターンで、特にモーメントが大きい方向に石板の傾斜が進行する可能性を確認し、アルミナボールの挿入による傾斜抑制効果が発現している。また、横断傾斜量が石板間の段差として生じた場合も、ボールを用いた工区はインターロッキングブロック舗装の補修基準である段差量5mmに達していない¹⁰⁾。

c) 移動抑制効果について

移動量は工区や石板の配置に関係なく、横断方向にはほとんど生じなかった。一方、縦断方向にはPattern A、Pattern Bとも局所的な移動が見られたため、OWPとIWP

図-18 走行輪数と縦断移動量 (Pattern A)

図-19 走行輪数と縦断移動量 (Pattern B)

の各最大値を損傷部の移動量として、これらの平均値を比較評価した。なお、OWP と IWP における損傷部の移動量は、Type S-S、Type A-A の工区で最大1.6mm程度の差異が見られたものの、それ以外の工区では差が1.0mm未満である。

Pattern A の縦断移動量を図-18 に、Pattern B の縦断移動量を図-19 に示す。ここで、縦断移動量は走行方向と逆向きを正として図示している。縦断移動量は、Pattern A、Pattern B ともに下地及び目地が粒状材料のみによる Type S-S、Type A-A で進行が見られるものの、アルミナボールを挿入することで 2800 輪後の移動量が 50%程度に抑制できた。

以上から、固定型工法では石板の敷設パターンに関係なく、縦断方向（走行方向と逆向き）に石板の移動が進行する可能性があり、目地にアルミナボールを挿入することによる移動抑制効果を確認した。

(3) 施工性に関する評価結果

現場試験から新設時及びメンテナンス時における施工性と石板及び目地砂のリサイクルについて確認した。固着型工法は下地及び目地の養生に通常タイプで 12 時間、速硬タイプでも 3 時間以上を必要とし、かつ施工単位（新設時は 75m²/日が目安）が大きいため、交通規制が大掛かりとなる。一方、固定型工法では養生を必要としないため早期の交通開放が可能であり、かつ特別な設備や装置を使用せず、小規模施工への対応が可能である。

図-20 走行試験後の補修工程 (Type A-Ab)

図-21 補修に伴って取り外した石板の側面及び底面

なお、現場試験ではアルミナボールの挿入作業に 5～10 分/m² 程度を要したが、市販のロートや木杵などを活用することで、より効率的に施工を行うことが可能と考える。

本工法によるメンテナンス及びリサイクルの確認として、走行試験後の Type A-Ab を一部補修した工程を図-20 に示す。補修に際して、石板は目地の噛合せ効果によって強固に固定されており、単に石板に力を加えても解体することはできない (図-20(A))。このため、まずは石板を囲む目地の一边からアルミナボールを取り除いた後、その一边に石板をスライドして直交する目地を取り除く手順で解体した (図-20(B))。なお、解体作業には一人の作業者によって 20～30 分/m² 程度を要した。

補修に伴って取り外した石板の側面及び底面を図-21 に示す。石板の側面及び底面に、As.砂の付着やアルミナボールによる損傷は見られず、石板を現場でそのままあるいは裏返してリサイクルできることを確認した (図-20(D))。また、目地に用いた As. 砂とアルミナボールに関しては、ふるいによる分級・分別を行うことで、繰返し利用することが可能である (図-20(C))。ただし、特に Type S-S、Type S-Sb では排水溝 (図-13) の周辺に、

目地に充填した砂（以下、目地砂）が雨水等によって流失した痕跡が見られた。なお、粗砂ほどではないが、Type A-A、Type A-Abの目地にも若干の流出が見られたため、全工区ともメンテナンスに伴って目地砂を補充した。

以上から、本工法は新設のみならず、目地の補修や解体、再構築が容易に行えること、また、再構築に際して石板や目地砂、アルミナボールを現地で繰返し利用できることを確認した。

5. As.砂の配合及び品質に関する検討

(1) 試験方法及び供試体

室内試験及び現場試験から、固定型工法の課題である目地砂の流失を確認し、目地砂としてのAs.砂の有用性が認められた。しかし、現場試験ではAs.砂による目地の一部にも流失が見られ、点検及びメンテナンスの一環として目地砂を補充した。

市販のAs.砂は、粗砂に乾燥質量比で1.5～2.5%程度のアスファルトを添加して製造されるのが一般的であり、前章までのAs.砂は粗砂に2.0%のアスファルト（ストレートアスファルト 60-80）を加熱混合（170℃）したものである。ただし、As.砂の配合は経験的に定められたものであり、素材の性状と配合との関係が不明確なため、製造されるAs.砂の品質は素材の影響を受けてバラツキが生じる。本章では、実施工に先立って、As.砂の素材とアスファルト量が施工性や耐流失性に及ぼす影響を評価し、目地砂としての実用に適した管理試験・指標を検討した。

はじめに、As.砂の施工性に関する評価として、目地への充填や締固めの効率に着目し、アスファルトの量と種類がAs.砂の団粒化に及ぼす影響を確認した。試験は、約500gのAs.砂を直径10cmに締固めた供試体をそのままふるいに乗せて、ロータップ式ふるい振とう機によって10分間振とう後のふるい残留質量（ふるい目：9.5mm）を測定した。ここで、供試体の締固めに際しては、現場試験から測定した目地砂の密度（ $1.5 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ 程度）を参考に、同程度となるようパイプレーターで締固めた。試験結果は、供試体質量に対するふるい残留質量の百分率を団粒率として、目地砂及びアスファルトによる影響を比較評価した。

次に、耐流失性に関する評価として、室内試験用供試体（図-5）に対する散水から、アスファルト量が目地砂の流失に及ぼす影響を確認した。試験は、供試体に高さ3mから1時間降水量が200mmに相当する散水を15分間行い、表面からの排水をふるい（ふるい目：75 μm ）で受け止めて残留物の乾燥質量（以下、流失量）を測定した。ここで、供試体は実用上、勾配が急となる乗入部（車道

表-6 砂の物性

		粗砂	エコスラグ
表乾密度	(g/cm^3)	2.565	2.840
吸水率	(%)	3.06	0.31
損失質量百分率	(%)	2.1	0.4
通 貨 質 量 百 分 率 (%)	4.75 (mm)	100	100
	2.36 (mm)	82	99
	0.6 (mm)	36	42
	0.3 (mm)	16	15
	0.15 (mm)	6	5
	0.075 (mm)	2	2

表-7 アスファルトの物性

	ストレート アスファルト 60-80	ポリマー改質 アスファルト H型
密度 (g/cm ³)	1.041	1.024
針入度 (25℃) (1/10mm)	62	5
軟化点 (℃)	49	96
伸度 (cm)	100以上	100以上

から歩道を横断する傾斜部）に合わせて型枠ごと15%傾斜させた。

また、施工性と耐流失性の結果を踏まえて、現場で実施可能な品質管理試験・指標を検討した。試験は、スランプコーン（JIS A 1101）に3層50、100、150回で突固めたAs.砂のスランプ値を測定し、流失量との相関から試験条件及び判定基準を確認した。

As.砂の素材とした砂の物性を表-6に、アスファルトの物性を表-7に示す。ここで、エコスラグは都市ゴミから生成される溶融固化物であり、粗砂に比べて密度が大きく、吸水率が小さい特性から、目地砂としての耐流失性とアスファルト量の低減を期待した。なお、使用したエコスラグは事前に溶出試験、含有量試験等を実施し、環境安全性を確認している。また、アスファルトは室内試験及び現場試験で用いたストレートアスファルト60-80（以下、ストレートアスファルト）のほか、ポリマー改質アスファルトH型（以下、改質アスファルト）をそれぞれ0～3.0%の範囲で混合したものを比較した。素材の構成と供試体の名称は、表-8に示すとおりである。

(2) 施工性に関する評価結果

アスファルト量と団粒率の関係を図-22に示す。ここで、凡例はストレートアスファルトによる目地砂を実線、

表-8 下地及び目地の構成と供試体の名称

供試体名称	目地砂の種類	アスファルトの種類
Type S(st.)	粗砂	ストレートアスファルト
Type S(mod.)	粗砂	ポリマー改質アスファルトH型
Type E(st.)	エコスラグ	ストレートアスファルト
Type E(mod.)	エコスラグ	ポリマー改質アスファルトH型

図-22 アスファルト量と団粒率

改質アスファルトによるものを破線で示している。粗砂を素材としたAs.砂は、アスファルト量が2.5%以上になると団粒化が生じる一方、エコスラグによるものは1.0%のアスファルト量で同程度の団粒率が得られている。これは、エコスラグがガラス質で吸水率が小さい特性から、少量のアスファルトによって被膜され、付着力が発揮したためと考える。また、粗砂、エコスラグともに、改質アスファルトによるAs.砂はストレートアスファルトによるものと比べ、同アスファルト量での団粒率が大きく、付着力が向上する結果となった。

以上から、アスファルトの量と種類がともにAs.砂の団粒率に影響すること、エコスラグと改質アスファルトを用いることで、少量のアスファルトによって団粒化が生じることを確認した。ただし、目地への充填を考慮した場合、単に団粒率の高いものが適当とはいえず、経済的な観点からも付着力を発揮するアスファルト量のうち少量の配合が目安となる。なお、目地に配合するアスファルトは適度な粘着性による砂またはスラグの定着を目的としており、交通荷重を直接負担しないこと、石版への固着力を要求しないことから、はく離抵抗性を考慮していない。

(3) 耐流失性に関する評価結果

アスファルト量と流失量の関係を図-23に示す。粗砂によるAs.砂はアスファルト量が1.0%以上となると流失量が減少する傾向が見られ、2.0%以上では流失量が50g

図-23 アスファルト量と流失量

図-24 スランプ値(100回)と流失量の関係

程度でそれ以上の減少は見られない。一方、エコスラグによるAs.砂は、アスファルト量が0.5%で流失量が大きく減少し、1.0%以上では粗砂と同様に流失量が50g前後で一定となる。これは、団粒率にも見られたエコスラグの特性から、少量のアスファルトによって被膜され、付着力が生じたことで流失抑制効果を発揮したと考える。また、粗砂、エコスラグともに、改質アスファルトを混合したAs.砂はストレートアスファルトによるものと比べて流失率が小さい傾向にある。

以上から、耐流失性に関してはアスファルト量の増加に伴って一定量まで向上し、この境界は目地砂の品質によって異なることを確認した。このため、耐流失性に着目したAs.砂の配合は、流失量が一定となる境界点のアスファルト量を目安とし、この値は団粒率による配合の目安と概ね一致致している(図-22、図-23の横軸丸印)。

(4) 品質管理試験に関する検討結果

突固め回数が100回によるスランプ値と流失率の関係を図-24に示す。スランプ値は、前述の流失量と極めて高い相関関係($R=0.96$, $p<0.01$)にあり、この関係は目地砂とアスファルトの種類によらず、同一直線状に分布している。このことから、As.砂の耐流失性を評価・判定する簡易な試験法として、スランプ試験の適用性を確認した。

アスファルト量と突固め回数100回によるスランプ値との関係を図-25に示す。スランプ値はアスファルト量

図-25 アスファルト量とスランプ値 (100回)

の増加に伴って減少する傾向が見られ、団粒率及び流失量と同様に、エコスラグによる As.砂は比較的小量のアスファルトで付着力が発現している。また、粗砂、エコスラグともに、アスファルト量の増加に伴ってスランプ値が減少し、一定となる境界点は、団粒率と流失率による配合の目安と一致する。なお、ストレートアスファルトと改質アスファルトによるアスファルト量の差異は見られない。

以上を踏まえて、スランプ値を指標に As.砂の品質を判定した場合、スランプ値がそれ以降一定となるアスファルト量を基準として、粗砂は 2.5%，エコスラグは 1.0%を最適なアスファルト量と決定した。

6. 実施工による経済性及び供用性の検証

(1) 試験方法及び供試体

前章までの知見を踏まえて、ボールを用いた本工法の軽交通路用自然石舗装としての経済性及び供用性を実施工（施工年月：2010年10月，工期：1ヶ月，施工者：株式会社寒風）から検証し、総合的に評価した。施工箇所は、現存最古の芝居小屋として国の重要文化財に指定されている康楽館周辺（秋田県小坂町）の車道部及び駐車場乗入部である。なお、この箇所は従来からセメントモルタルによる固着型工法（以下、従来工法）が採用されていたが、交通荷重のほか、凍上や除雪に伴う破損が問題となっており、補修を頻繁に要していた。なお、ボールを用いない固定型工法に関しては、事前に室内試験及び現場試験から耐久性に劣ることを確認しており、特に石板の傾斜と移動による安全上の理由から車道には不適と判断して実施工の対象工法から除いている。

施工区間の概略図と車道部調査区間の構成を図-26に、工区境界部の断面構造を図-27に示す。ここで、概略図（図-26上図）の網掛けは車道部及び乗入部の調査箇所を示している。車道部は工区延長が石板の移動に及ぼす影響を確認するため、観光施設に面した延長約40mを調

図-26 施工区間の概略図と車道部調査区間の構成

図-27 工区境界部の断面構造

査区間として片側一車線を 10m ピッチで 4 工区，対向する車線を 20m ピッチで 2 工区に区分した。なお、工区の境界部は、図-27 のとおり既設コンクリート路盤の一部を切削し、無収縮モルタルで接着した止め石によって隣接する工区と隔てている。また、各工区の下地及び目地には前章同様の粗砂またはエコスラグにストレートアスファルトを混合した As.砂を用い、表-8 に示す名称の末尾に工区延長 (m) を付して記した（図-26 下図）。乗入部に関しては、I に Type S(st.) を、II に Type E(st.) を敷設し、特に目地砂の流失に留意して観察した。

As.砂の配合は前章の検討結果に基づいて、粗砂には 2.5%，エコスラグには 1.0%のストレートアスファルトを混合した。また、現場におけるスランプ試験（突き固め回数 100 回）から、実施工に用いる As.砂が図-25 と同等の品質が得られることを事前に確認している。

(2) 経済性に関する評価結果

現場試験及び実施工を踏まえて、表-9 に各種自然石舗装工法の経済性を比較した。ここで、ライフサイクルコストは実施工における実績と標準歩掛に基づいて算出し、具体には新設費を標準歩掛より、維持費を実施工で目地等の補修に要した費用より、修繕費を解体・処分と再構築に要する標準歩掛より、供用期間を 20 年として試算

表-9 各種自然石舗装工法の経済性比較

		Type A-Ab	Type C	Type P	Type B	
					普通タイプ	速硬タイプ
新設費 (円/㎡)	施工費	11,440	7,000	12,110	12,540	22,460
	材料費	15,450	15,450	15,450	15,450	15,450
	新設費計	26,890	22,450	27,560	27,990	37,910
維持費 (円/㎡/年)		180	680	0	0	0
修繕費 (円/㎡)	解体・処分費	1,220	5,580	5,580	5,580	5,580
	施工費	11,440	7,000	12,110	12,540	22,460
	材料費	180	15,450	15,450	15,450	15,450
	修繕費計	12,840	28,030	33,140	33,570	43,490
ライフサイクルコスト ※設計期間20年補修含む (円/㎡)		43,150	63,400	60,700	61,560	81,400

している。工法の構成と名称は表-5と同様であり、固着型の新工法のうち、施工実績が多い瀝青系固着材による工法をType Bとして併記した。

新設費は下地及び目地にモルタルを用いた従来工法 (Type C) と比べて、本工法 (Type A-Ab) は2割程度、Type Bの速硬タイプでは施工費が増大するため4割程度高価となる。また、維持費は本工法による目地砂が流失した場合の補充、または従来工法による目地が破損した場合の一部補修を想定したものである。さらに、修繕費は大掛かりな修繕や張替えを考慮したもので、再構築が容易で、かつ石板の再利用が可能な本工法では解体・処分費と材料費が大きく削減できるため、メンテナンス及びリサイクルにおいて経済的にも有利となる。

以上から、維持・修繕を含むライフサイクルコストを比較した場合、本工法は固着型工法の3～5割程度安価となり、経済性に優れる可能性を確認した。

(3) 供用性に関する評価結果

供用開始から3年経過後における調査区間の様子を図-28に示す。ここで、供用性に関しては舗装が供用に伴って提供するサービス性能を指し、具体には石板の傾斜や移動、目地部の破損等の耐久性をはじめ、利用者の走行・歩行快適性、さらに新設から維持・修繕における施工性を考慮している。

目視及び走行試験による点検の結果、車道部には石板の沈下や傾斜、移動による段差、ガタつき等は見られなかった。また、目地砂の異なるType S(st.)とType E(st.)とで大きな差異は見られず、Type S(st.)10及びType S(st.)20、Type E(st.)10及びType E(st.)20において工区延長による違いも確認されなかった。しかしながら、乗入部ではType

図-28 供用開始から3年経過後の調査区間

表-10 各種自然石舗装工法に対する総合評価の比較

		耐久性	透水性	施工性		再利用	経済性
				新設	修繕		
固定型工法	Type S-S	×	○	◎	◎	◎	△
	Type A-Ab	○	○	◎	◎	◎	◎
固着型工法	Type M	○	×	△	△	×	△
	Type P	◎	×	○	○	×	○

S(st.)、Type E(st.)とも、端部に若干であるが目地砂の流失が見られたため、点検と合わせて目地砂を補充した。これは、下地及び目地の締固め不良による原因が考えられ、目地砂の締固め方法や出来形管理が今後の課題といえる。なお、今回の実施工は積雪寒冷地におけるものであるが、従来工法に対して懸念される凍上、除雪による石板の破損及び路面の変状等の問題¹⁰⁾も見られなかった。

(4) 各種自然石舗装に対する総合評価

室内試験及び現場試験、実施工の結果を踏まえて、各種自然石工法に関する総合的な評価結果を表-10に一覧で比較した。ここで、各工法の構成と名称は表-5と同様である。固着型工法は石板の沈下や傾斜、移動等の耐久性に優れるものの、目地が固着材によって充填されるため透水性は期待できない。一方、固定型工法はアルミナボールによる耐久性の改善が可能であり、養生を必要としないため施工が容易で、かつ石板及び目地材の再利用が可能であることを確認した。また、経済性に関しては、ライフサイクルコスト (20年間の維持補修と修繕を考慮したもの) を試算した結果、石板の繰返し利用が可能な提案工法 (Type A-Ab) が最も有利となった。

以上から、本工法の軽交通路用自然石舗装としての

適用性が概ね認められるが、今後も追跡調査を継続し、実施工における沈下量や傾斜量、移動量等の計測結果に基づいて長期的な供用性を評価する。

7. まとめ

本研究では石板の繰返し利用が可能で、かつ施工性や経済性に優れた景観舗装技術の確立を目指して、アルミナボールと As.砂を目地部に応用した新たな工法を考案し、軽交通路用自然石舗装の開発を試みた。各検討から得られた知見を以下に取りまとめる。

- (1) 固定型工法の目地にアルミナボールを挿入することで、石板の沈下や傾斜、移動を抑制することが可能である。
- (2) 固定型工法は衝撃吸収性や透水性等の付加的性能を有し、補修が容易で、かつ石板及び目地材の繰返し利用が可能である。
- (3) 固定型工法の目地に As.砂（アスファルトを混合した粗砂、エコスラグ）を用いることで、雨水等による流失を抑制することが可能である。
- (4) As.砂のスランプ値（突固め回数 100 回）は流失量と高い相関関係にあり、スランプ値を指標とした As.砂の配合及び品質判定が可能である。
- (5) As.砂及びアルミナボールを用いた固定型工法によって、維持・補修を含むライフサイクルコストを 3～5 割程度削減することが可能である。

以上の成果から、メンテナンス及びリサイクルに有利な軽交通路用自然石舗装として本工法の有用性が認められた。今後も、追跡調査から長期供用性を明らかにするとともに、As.砂の配合や出来形等の管理試験・指標に関するデータを蓄積し、具体的な検討を継続する。

謝辞：本研究は株式会社寒風、山本建設株式会社、日本大学との共同研究（2008～2011 年度）の成果を取りまとめたものであり、資材の調達から施工、調査に至るまで、株式会社寒風からの多大なる御協力と御支援により結実したものである。ここに、深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、国土交通省官公庁：観光立国推進基本法（2007 年 1 月施行）、観光立国推進基本計画（2012 年 3 月閣議決定）
- 2) 例えば、国土交通省総合政策局：魅力ある観光地域づくりの秘訣（2008 年 3 月）、観光地における社会資本整備の配慮事項に関する事例集（2009 年 3 月）
- 3) 例えば、中村遥子、黒田乃生：伝統的建造物群保存地区における街路舗装の現状と課題、日本建築学会計画系論文集、Vol.75, No.657, pp.2729-2735, 2010.
- 4) 岡田幸子、樋口明彦、仲間浩一：北九州における路面電車の敷石の流通と利用に関する研究、土木学会土木計画学研究・論文集、Vol.23, No.2, pp.381-388, 2006.
- 5) 菊池清二、荒井安治：舗石用サンドクッション材及び目地材とそれを用いた舗石の施工方法、日本国特許庁、公開番号 特開 2002-356803.
- 6) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、第 3 分冊、pp.39-56, 2007.
- 7) 日本道路協会：舗装性能評価法別冊、pp.218-227, 2008.
- 8) 日本道路協会：舗装性能評価法、pp.75-83, 2013.
- 9) 日本道路協会：舗装設計便覧、pp.30, 2008.
- 10) インターロッキングブロック舗装技術協会：インターロッキングブロック舗装設計施工要領、pp.80, 2007.
- 11) 福島秀哉、松田泰明、石田樹：景観機能からみた積雪寒冷地の舗装に関する一考察、平成 23 年度国土交通省国土技術研究会、自由課題（一般部門）、環境、2011.

(2014. 3. 14 受付)

DEVELOPMENT OF STONE BLOCK PAVEMENT FOR USE AS A PROFITABLE LOW VOLUME ROAD IN MAINTENANCE AND RECYCLING

Shoichi KIKUCHI, Yosuke KANO, Shoichi AKIBA and Katsumi SATO

With the society's demand for landscape maintenance in the background, development of landscape paving technologies capable of adapting to low volume road in the field of pavement is anticipated. Among them, natural stone block pavement is a construction method which also matches a natural picturesque scenery by its unique texture. However, under the present circumstances, frequent repair is necessary due to driving of vehicles resulting in turn of spoiling the scenery and becoming uneconomical. This study were verified about the effect of insert alumina ball in the joint part with granular material in natural stone block pavement by laboratory tests and test construction. As a result, it was confirmed the effect which controlled the subsidence, inclination and movement of the stone block by insert for ball to the joint, and that this construction method have more excellent shock absorption and permeability than the existing construction method of mortar. In addition, we confirmed that a mixture of asphalt and sand has the effect on the outflow of the material from the joint.