既存の維持修繕記録を用いた 吹付のり面の劣化機構と劣化予測に関する検討 —群馬県内の中古生層分布地域を例にして—

Mechanism and prediction of shotcrete slope deterioration using inspection and repair records —Examples from the Meso-Paleozoic bedrocks distributed in Gunma Prefecture—

宇次原雅之^{a)*}, 関 晴夫^{b)}, 若井明彦^{c)}, 畠中 優^{c)}, 江口喜彦^{b)}, 中野 亮^{a)}

Masayuki UJIHARA, Haruo SEKI, Akihiko WAKAI, Yu HATANAKA, Yosihiko EGUCHI and Ryou NAKANO

Abstract

This study was carried out for the purpose of clarifying the deterioration mechanism of the shotcrete slopes and getting the basic documents that were useful for future maintenance based on the existing inspection and repair records. Since generally the deterioration mechanism of the shotcrete slopes is apt to be varied according to a geological feature or climate condition and so on, this study focused on the road slope in the Meso-Paleozoic bedrocks distributed in Gunma Prefecture. From the result, the schematic deterioration mechanism of the shotcrete slopes in the Meso-Paleozoic bedrocks distributed in the study area was found out and the applied method to the effective maintenance including the deterioration prediction was examined.

Key words : shotcrete slope, maintenance, deterioration mechanism, deterioration prediction

和文要旨

コンクリート・モルタル吹付工（以下、吹付工）は、のり面保護工として古くより多用されており、現在その老朽化が問題となっている。効率よく維持管理を行うためには、吹付工が適用されたのり面の劣化機構を明らかにし、精度のよい健全度評価や劣化予測を行うことが重要となる。本研究は、これまでに蓄積されてきた維持修繕に関する記録をもとに、吹付のり面の劣化機構を明らかにして、今後、維持管理を行っていく上で有用となる基礎資料を得ることを目的として実施した。吹付のり面の劣化機構は地質や気候条件などにより異なるため、本研究では、群馬県内の中古生層分布地域における道路吹付のり面に研究対象を絞った。その結果をもとに、対象地域の吹付のり面の劣化機構を模式的に示し、劣化予測を含む効率的な維持管理への応用方法について検討を行った。

キーワード：吹付のり面、維持管理、劣化機構、劣化予測

1. はじめに

吹付工は、表面浸食・風化の進行や小規模な落石の発生を防止する目的で、のり面の表面にモルタルやコンクリートを吹付けるのり面保護工である。背面地山からの土圧が作用しない安定したのり面に対して適用される。昭和30年代より多用されており、これまでに吹付工が適用されたのり面（以下、吹付のり面）は、膨大な数に上っている。近年、その老朽化が問題となっており、効率的に維持管理を行うことが求められている。

構造物の維持管理を効率よく行うためには、劣化状態に応じた最適な対策を、効果的なタイミングで行うことが重要である。そのためには、対象となる構造物の劣化機構を明らかにし、それにもとづいて現状の劣化状態の評価や、将来の劣化進行の予測を行うことが必要となる。このような方法は、道路構造物では橋梁や舗装などの維持管理において実現場への適用が進められており、土構造物においても適用が検討されている^{1)~3)}。しかし、吹付のり面では、従来、劣化の進行により対策実施の緊急

性が高くなったのり面を抽出し、事後保全的に打換え等の更新対策を行う方法が取られてきたため、劣化機構にもとづく評価や劣化の予測、それを考慮した効率的、合理的な対策選定はほとんど行われていない。

一般に既設構造物の劣化予測方法は、理論的検討や経験則にもとづいて導いた予測式を用いる方法と、既存の維持管理データの統計解析結果等から構築した劣化モデルを用いて行う方法に大別される⁴⁾。しかし、吹付のり面では、いずれの方法も適用が難しい。吹付自体の劣化だけではなく背面地山の劣化（緩みや風化等）の影響を強く受けるため劣化機構が複雑であることや、地形、地質、気象、のり面の形状等のさまざまな要因が劣化の進行に影響を及ぼすこと、加えて点検、除草、補修、補強など維持修繕に関する記録（以下、維持修繕記録）の整理・解析が十分進んでいないことなどがその原因である。このため高速道路の切土のり面などで検討が行われた例^{5)~8)}があるほかは、研究例も少ない。

本研究は、このような状況を踏まえ、道路吹付のり面における既存の維持修繕記録を用いて、吹付のり面の効率的な維持管理を行う上で役立つ基礎資料の取得とその取得方法を検討することを目的として実施した。さらに得られた基礎資料を効率的な維持管理に応用する方法について、劣化予測の可能性も含めて検討を行った。

* 連絡著者 / corresponding author

a) 日特建設株式会社
Nittoc Construction Co., Ltd.
〒104-0044 東京都中央区明石町13-18
Chuoku Akasi-cho 13-18 Tokyo, Japan

b) 日本サーベイ株式会社
Nihon-Survey Co., Ltd
群馬大学

c) 群馬大学
Gunma University

2. 研究方法

2.1 研究対象

吹付のり面の劣化は地質や気候の影響を強く受けることから、劣化機構の検討はこれらの違いによる影響をできるだけ除外して行う必要がある。このため、本研究では、研究対象を群馬県内の中古生層分布地域を走る国道122号、国道462号の吹付のり面に絞った（図－1）。

2.2 研究に用いる維持修繕記録と健全性評価基準

本研究に用いる既存の維持修繕記録を表－1に示す（表中の「略称」は、本研究において各記録に対して用いたものである。以下、本文中でもこの略称を用いる）。また、今回の研究に際し、原位置で目視による調査を行っており、以下、「今回調査」と称する。

点検Ⅰは、全国共通の点検基準¹⁰⁾を用いて実施された

図－1 群馬県の地質分布と研究ルート
（地質分布は文献⁹⁾を元に作成）

Fig.1 Geological map of Gunma prefecture and the study route (The geological map is a compiled map of reference 9)

表－1 本研究に用いる吹付のり面の維持修繕記録

Table 1 Existing inspection and repair records of the shotcrete slopes used in this study

略称	報告書名
点検Ⅰ	平成8年度 道路防災総点検・カルテ
点検Ⅱ	単独道路維持修繕事業(道路法面崩壊対策) 道路吹付法面点検調査委託 報告書
点検Ⅲ	平成17年度 単独公共 単独道路維持修繕事業(道路災害防除) ライフライン路線の安全性検討業務 報告書
点検Ⅳ	平成20年度 単独公共 単独道路維持修繕事業(道路災害防除) 道路防災点検等調査業務委託 (孤立化のおそれのある路線) 報告書
点検Ⅴ	平成21年度 補助公共 地域活力基盤創造(効果促進事業) 道路防災点検等調査委託 報告書
調査Ⅰ	平成18年度 単独公共 単独道路維持修繕事業(道路法面崩壊 対策)設計業務委託 国道122号 報告書
調査Ⅱ	平成23年度 国道462号 単独公共 単独道路維持修繕事業(道 路災害防除)測量及び法面設計委託 設計報告書

防災総点検の結果である。点検結果は、「対策が必要と判断される」、「点検カルテを作成し対応する（カルテ対応）」、「対策を必要としない」に評価・区分され、以後の維持管理が行われる。点検Ⅲ、Ⅳ、Ⅴでは、各々の点検目的に沿った評価のほか、点検Ⅰで「カルテ対応」と判定されたのり面の変状の進行状況の確認が行われている。

点検Ⅱは、平成17年度に群馬県内の道路吹付のり面に対して、独自の点検基準（表－2に点検項目と評価指標を示す）を用いて行われた健全度調査の結果である。評価指標をもとに、対策の必要度が点数で評価できるように整理されている。

異なる基準により行われた点検結果を用いて劣化の進行過程を検討するためには、共通の指標を用いて点検結果を整理する必要がある。本研究では、目視点検により得られる健全度を共通の評価指標とし、表－3に示す評価表を評価の基準として適用する。この評価表では、健全度はのり面に現れる変状の状態・特徴により評価されている。また、劣化に伴う安全性の低下と合わせ、吹付工が本来目的としているのり面保護工としての機能についても評価できるように工夫されている^{11),12)}。今回調査はこの評価表を用いて実施した。

表－4に、点検Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴと点検Ⅱ、および表－3に示す健全度評価との対比を示す。表－3に示す評価

表－2 点検Ⅱで用いられた点検項目と評価指標

Table 2 Check indicators and evaluation index used in the inspection II

	項目	細目と選択肢
のり面の形状・地山地質	形状	平均勾配
		1:0.8 以下
		1:0.5 程度
		1:0.3 以上
		明瞭なオーバーハングあり なし／あり
のり面の形状・地山地質	地山地質	小段や中段にステージがある なし／あり
		不陸・凹凸 なし／多少／中位／顕著
		・中～硬岩(中生層、花崗岩、安山岩、溶岩など) ・軟岩(第三紀堆積岩、火砕岩など) ・土砂・土質(段丘堆積物、ローム、崖錐、崩積土)
		規模
		5m 未満／5m 以上～10m 未満／10m 以上～20m 未満／ 20m 以上～30m 未満／30m 以上～50m 未満／50m 以上
のり面の現状実態	変状	ヘアクラック なし／多少／中位／顕著
		遊離石灰 なし／多少／中位／顕著
		薄層の剥離 なし／多少／中位／顕著
		植物よるオープンクラック なし／あり
		構造的なオープンクラック なし／頻度小／頻度中／頻度大
		陥没・剥落 なし／あり
		明瞭かつ顕著な段差 なし／あり
		のり面に植生が繁茂する なし／多少／中位／顕著
		付帯構造物(側溝・擁壁など)が破損あるいは変状する なし／多少／中位／顕著
		崩壊跡を含むあるいは崩壊後に隣接する なし／あり
	打音	濁音の有無 確認できず／多少／中位／顕著
	湧水・湧水跡	・排水孔からの湧出および湧出跡がある ・のり面への湧水および湧水跡がある ・亀裂などからの湧水および湧水跡がある ・土砂の流出および流出跡がある
		対策工
		・通常の落石防護工あるいは柵 ・大規模待受工
	道路からの距離	・1m 以上 2m 未満のポケットがある ・1 車線(2～3m)程度の分離がある ・2 車線(4～6m)程度の分離がある

表では、健全度ランクごとに変状の状態、特徴が示されているので、それを参照して対比を行った。また、点検Ⅱでは、「健全度（対応の緊急度）」と「被災形態」の組み合わせにより対応の必要性が評価されているが、ここでは前者のみを用いた。

なお、劣化に伴って吹付に生じる主要な変状現象である割れ目に対して、亀裂、クラック等、点検により異なる表現がなされているが、本研究では「ひび割れ」に統一して用いることとする（ただし、開口していない微細なひび割れに用いられている「ヘアクラック」はそのまま用いる）。同様に、「薄層の剥離」、「肌落ち」は、「表層剥離」に統一する。

2.3 研究ルートの特徴

2.3.1 国道122号

国道122号では、福岡大橋から草木ダムサイトまでの約20kmの区間に、足尾帯に属する中古生層が分布する（図－2）。この間に存在する52箇所の吹付のり面を研究対象とする（以下、箇所数は点検Ⅱにもとづく）。

表－3 本研究で用いる健全度評価表¹⁾

Table 3 Standard of soundness evaluation used for the shotcrete slopes in this study

健全度	性能の保持状態(健全性)	
	風化・浸食防止性能	安全性能
A (健全)	変状がない、あっても保護工としての性能低下は見られない。	変状がない、あっても、のり面の安定性に問題がない。
B (軽微な低下)	保護工としての性能の低下が生じているが、軽微な段階である。	変状は現れていないが、のり面の不安定化に至る兆候が存在(伏在)する。
C (低下)	保護工としての性能が低下しており、放置すると地山の風化・浸食が進む可能性がある。	地山の風化、吹付と地山の密着性の低下に起因する変状が現れており、のり面の安定性が低下している。
D (著しく低下)	保護工としての性能が著しく低下しており、地山の風化・浸食が生じている。	地山の風化、吹付と地山の密着性の低下に起因する変状が進行し、のり面の安定性が著しく低下している。
E (危険)	(完全に失われている。)*	のり面の安定性が損なわれており、危険な状態にある(剥落、滑落、表層崩壊が発生する恐れがある)。

*風化・浸食防止機能が失われてもすぐに危険な状態となるわけではないが、その状態を放置することにより安全性能が失われ危険となる。

地質は頁岩を主体とし、砂岩やチャート、石灰岩を伴っている。頁岩では層理面やそれと同方向の節理、破砕面が明瞭に認められることが多い。道路は、福岡大橋から黒保根町宿廻までの間では北東－南西方向を示す地層の走向とほぼ直交する方向に建設されており、黒保根町宿廻から草木ダムまでの間では走向方向とほぼ平行に建設されている。吹付のり面の建設時期は、草木ダム（昭和52年完成）や近接する橋梁の施工年から、昭和45～50年頃であると推定される。

図－2 国道122号に分布する地質（文献⁹⁾をもとに作成）

Fig. 2 Geologic map of National highway No. 122 in this study area (The geological map is a compiled map of reference 9)

表－4 健全度評価の対比表

Table 4 Comparison table of the soundness evaluation index used for the shotcrete slopes in this study

健全度	表-3に基づく確認ポイント	点検ⅠおよびⅢ～Ⅴ	点検Ⅱ
A (健全)	変状がない(性能の低下がない)。	変状の記載がない。健全である。	変状がほとんど確認されない。 (軽微な「ヘアクラック」、「表層剥離」程度)
B (軽微な低下)	軽微な性能低下がある。	調査票等に「亀裂」の記載がある。	「ヘアクラック」、「表層剥離」の両方が確認される。
	安定性低下の兆候がある。		「開口ひび割れ」はないが、ハンマー打診で濁音がある。
C (低下)	性能が低下しており、地山の風化・浸食が進行する恐れがある。	「防災カルテ対応」に区分されている。調査票等に「開口亀裂」の記載がある。	「ヘアクラック」もしくは「表層剥離」が「顕著」に確認される。
	安定性の低下に伴う変状が現れている。		「開口ひび割れ」、「陥没・剥離」、「段差」が確認される。「中位」程度の「濁音」が認められる。
D (著しく低下)	風化・浸食防止性能、安定性が著しく低下している。	「対策が必要」に区分されている。調査票等に「はらみ」、「段差」の記載がある。	対応の緊急性がC(点数が20点以上)に区分されている、または「構造的な開口ひび割れ」、「陥没・剥離」、「段差」が複合して存在する。
E (危険)	風化・浸食防止性能が失われている。安定性が損なわれ危険な状態である。	— 実際にすぐに対策が行われている。	対応の緊急性がA、B(点数24点以上)に区分されている。

*点検Ⅱの「点数」は、表-2に示した「のり面の現況実態」各項目に対する評価に応じて点数化されているもので、対策の緊急度を表す。

2.3.2 国道462号

国道462号では、下久保ダムのダムサイトから神ヶ原までの約25kmの区間に、秩父累帯北帯に属する弱～非変成の中古生層が分布する（図－3）。この間に存在する81箇所の吹付のり面を研究対象とする。

地質は、頁岩、珪質頁岩、砂岩、緑色岩、チャート、石灰岩や、これらからなる混在岩である。層理面と平行に劈開や片理が発達している場合が多い。道路は、琴平橋から赤岩橋までの間では北西－南東方向の地層の走向に平行に、それ以外の区間では斜交～直交する方向に建設されているが、カーブが多いため、のり面に出現する見かけの地質構造はのり面ごとに変化する。

吹付のり面の多くは神流川に沿って形成された急崖に施工されており、一般的に国道122号ののり面よりもり高が大きく、勾配の急なのり面が多い。また、下久保ダムの湛水池である神流湖沿いは大規模な地すべり地帯であり、その影響を受けている吹付のり面も存在する。本国道は、下久保ダムの建設時（昭和42年完成）に付替・整備が行われていることから、吹付のり面の多くは、昭和

40年前後に建設されたものであると推定される。

なお、両ルートともに、建設されて以降、継続して防災工事が行われており、新しく建設されたのり面、補修補強が行われたのり面が含まれている。これらについては維持修繕記録や今回調査結果等から、可能な限り区分した。

3. 維持修繕記録の整理および今回調査結果

3.1 劣化進行状態

2つの研究ルートの吹付のり面における各健全度の出現率を、点検Ⅱの結果をもとに図－4に示す。いずれのルートでも、健全度A、Bののり面が全体の4割以上を占め、対策実施の検討を要する健全度D、Eののり面は、国道122号で15%程度、国道462号で20%程度となっている。

図－5は、122号ののり面の健全度別出現数を点検Ⅰ、Ⅱ、今回調査の順に並べたものである（点検Ⅰ、Ⅱののり面の総数が若干異なっているのは、個々ののり面の範囲が2つの点検で完全には同じではないためである）。途中で補修補強を行ったものは、性能が回復してもそのま

図－3 国道462号に分布する地質（地質分布は文献⁹⁾をもとに作成）
Fig. 3 Geologic map of National highway No. 462 in this study area
(The geological map is a compiled map of reference 9)

図－4 吹付のり面の健全度の出現率（点検Ⅱ）

Fig. 4 The appearance ratio of soundness degree on the shotcrete slopes in this study route (inspection II)

図－5 健全度別出現数の経年変化（国道122号）

Fig. 5 Transition of the appearance ratio of soundness degree with the time progress on the shotcrete slopes (National highway No. 122)

まのレベルとした。年数が進むにつれて、健全度の低い
のり面の割合が増える傾向が認められるが、少なくとも
建設後40年くらいまでは、8割以上ののり面で、急激な劣
化が進んでいないことがわかる。

前述の両ルートの建設時期を考慮すると、点検Ⅱ実施
時（平成17年）には、国道122号では建設後30年程度、
国道462号では40年程度経過しているとみなすことがで
きる。したがって本研究ルートでは、建設後40年経過し
ても、全体の8割近いのり面では、対策実施の検討が必要
なレベルまでの劣化は生じていないといえることができる。

両ルートの吹付のり面で認められる主な変状とその状
態を、点検Ⅱの結果をもとに図-6に示す。ヘアクラッ
ク、表層剥離は、吹付自体の劣化に伴う変状、また、構
造性の開口ひび割れ、陥没・剥落、明瞭かつ顕著な段差、
打音（濁音の有無）は、吹付のり面の安定性が低下して
現れている変状であると考えられる。いずれのルートでも
、ヘアクラックはほぼすべてののり面で、また表層剥
離は、60～80%程度ののり面で確認されている。構造的
の開口ひび割れ、陥没・剥落や段差が顕著に生じている
ものは、全体の5～10%程度である

両ルートにおいて、確認できた更新や補修補強の実施
状況を表-5に示す。点検Ⅱで確認されたものと、今回
調査（平成24年）で確認されたものに区分して示した。
直線化工事等により健全度の低いのり面を迂回するよう
に道路改修が行われたケースもあるが、直接対策された
ものではないのでカウントしていない。平成17年時点では
更新や補修補強が行われたのり面は少ないが、平成24
年までの8年間に増えていることがわかる。

3.2 劣化機構の検討

更新や補修補強が実施されたのり面、および劣化が進
んでいると判定されるのり面について、その劣化原因と

図-6 吹付のり面における変状発生状況

Fig.6 The appearance ratio of the damage on the shotcrete slopes in this study route

劣化過程を整理し、劣化機構の検討を行う。

3.2.1 国道122号草木ダム周辺の吹付のり面の劣化

国道122号では、草木ダムサイトに近いK122M074の
り面（高さ約10m、延長約93m、勾配約75°）において、
平成18年に崩壊が発生した。またその周辺でも、更新や
補修補強が実施されたり、健全度が著しく低下したりし
た吹付のり面が複数確認される。

K122M074のり面の崩壊に至るまでの点検結果の経緯
を表-6に示す。平成9年の点検Ⅰの段階で健全度はか
なり低下していたが、のり面の規模が小さかったため「カ
ルテ対応」とされた（したがって、本研究では、健全度
をDに区分した）。点検Ⅱ、Ⅲでは、点検Ⅰで確認され
なかった縦方向のひび割れの段差、水平方向の開口ひび
割れ、のり面のはらみ出しが新たに確認された。点検Ⅱ
ののちに2本の調査ボーリングを含む詳細調査（表-1

表-5 更新や補修補強の実施が確認できた吹付のり面
Table 5 Number of shotcrete slopes which confirmed the repair in this study route

	国道462号(全数81)		国道122号(全数52)	
(件数)	～平成17年	平成18年 ～平成24年	～平成17年	平成18年 ～平成24年
更新・全面補強	1	5	0	4
補修補強	1	3	2	2

表-6 K122M074のり面の点検結果
Table 6 List of inspection results of the shotcrete slope K122M074

時期	評価	状況
昭和50年頃	A 建設	
平成9年 点検Ⅰ	D	「カルテ対応」(規模が小さいため「要対策」とならず)
平成17年 点検Ⅱ	D	対策の緊急性A(安定性の確保必要)、調査の必要性指摘
平成18年 詳細調査	-	スケッチ、ボーリング調査ほか。
平成18年 点検Ⅲ	E	「カルテ対応」から「要対策」に変更
平成18年 崩壊	E	2回にわたり崩壊(詳細は本文記述参照)

図-7 調査Ⅰに示されたK122M074のり面のスケッチ

Fig.7 Sketch of the state of damage on the shotcrete slope K122M074 (investigation I)

の調査Ⅰ)が行われ、吹付背面の地山に最大厚さ2.9mの緩みゾーンが確認されたほか、のり面に対して流れ盤をなす破碎帯の存在が確認された。この際に行われた吹付面の変状スケッチを図－7に示す。

崩壊は、のり長10m、側方幅5m程度の規模で、隣接した2箇所で連続して発生した。いずれも縦方向、水平方向の開口ひび割れが連結し、ひび割れの段差やはらみ出しが生じていた箇所が発生している(図－7)。崩壊箇所の地質は、風化により細片状となっている頁岩であった。崩壊面には2方向の割れ目が現れており、交差線の方向はのり面延長方向にほぼ直交する。崩壊形態は、この2方向の割れ目をすべり面として発生したくさび崩壊であると推定される。このうち一方の割れ目面の方向は、周辺の広域的な層理面方向および確認された破碎帯の構造とほぼ調和的である。崩壊時は降雨がなかったものの、4日前には170mmの日雨量があり、崩壊の30日前からの積算雨量が400mm近くになっていた。

以上より、崩壊は、緩んだ岩盤が層理面方向およびこれに斜交する割れ目面をすべり面とし、地下水位の上昇などを誘因として生じたものであると推定される。

表－7、図－8に、K122M074のり面と周辺の吹付のり面の点検履歴を整理した。各のり面の位置と地形・地質条件は図－9に示した。K122M074のり面の上流側に隣接するK122M075のり面では、健全度の低下に伴い平成19年に大規模な補強対策が実施されている。K122M076

のり面では、開口ひび割れに対し部分的に増厚吹付が行われている。両のり面は、K122M074のり面と同様、背面地山が流れ盤をなす頁岩を主体とした地質であり、これが他ののり面に比べ早期に劣化が進行した原因であると考えられる。劣化の進行速度はのり面により異なり、のり面延長方向に直交する交差線を持つ2方向の割れ目が存在するK122M074のり面だけが、早期に崩壊したといえる。K122M077～K122M080のり面では顕著な変状は現れていないが、背面地山がチャートでありK122M074のり面とは地質が異なることから、劣化機構が異なっていると考えられる。

以上の結果より、本研究ルートの吹付のり面では、流れ盤方向の破碎帯や層理面といった、もともと背面地山が有する崩壊要因が原因となり進行する劣化機構が存在することが確認された。緩みや風化の進行により、崩壊要因を原因とする地山の不安定化が進み、吹付背面に土圧が作用することによって劣化が進行すると考えられる。ここでは背面地山が流れ盤をなすケースを例示したが、背面に地すべりや岩盤崩壊といった崩壊要因が伏在していたような場合や、土砂層に吹付けたような場合にも、

表－7 草木ダムサイト周辺の吹付のり面の変状の進行過程
Table 7 Process of the damage progress on the shotcrete slopes around Kusaki-damsite

健全度	のり面に現れる変状現象	該当するのり面 (点検Ⅱ時点)	主な対処
A (健全)	・なし		日常点検
B (軽微な低下)	・(縦方向の)開口ひび割れが生じる。		全体的に安定・日常点検 (カルテ対応)
C (中程度)	・(縦方向の)開口ひび割れの連続性・開口量が進展する。 ・ひび割れが地山まで貫通する。	K122M070 K122M072 K122M083	カルテ対応
D (著しく低下)	・ひび割れに変位が生じる(段差)。 ・水抜き孔、ひび割れからの砂の流出がある。	K122M071	対策、調査が必要
E (危険)	・開口ひび割れが連結し密集する。 ・はらみ出し、押し出しが発生する。	K122M075 K122M074	優先度・緊急性大 対策が必要

図－8 草木ダムサイト周辺の吹付のり面の劣化進行過程
Fig.8 Process of the deterioration on the shotcrete slopes around Kusaki-damsite

図－9 K122M074のり面周辺の地質構造
Fig.9 Geological structure around the shotcrete slope K122M074

表－8 K462M010のり面の点検結果
Table 8 List of inspection results of the shotcrete slope K462M010

時期	評価	状況
昭和40年頃	A 建設	
平成9年点検Ⅰ	C 「対策が必要」とされているが、既往崩壊部の崩壊・落石対策	吹付のり面下部に剥離、ひび割れが認められるが概ね健全。
平成17年点検Ⅱ	D 対策の緊急度C(点数は22点) 調査の必要性指摘	構造的な開口ひび割れおよびそれに伴う変位(段差)が生じている。
平成18年点検Ⅲ	D 新たな変状が確認され「対策が必要」と評価	平成9年に設定した着目点に開口ひび割れが発生。また、新たな着目点が追加設定されている
平成23年点検Ⅴ	E 「対策が必要」と評価	吹付のずり落ちにより、ひび割れが変位(開口幅6cm)。
平成24年調査Ⅱ	—	背面からの土圧は作用していないが空洞が広範囲に点在(熱赤外線映像法、はざ取り調査ほか実施)。

背面からの土圧の作用に伴って進行するといった劣化機構が考えられる。

なお、吹付工は、安定が確保されているのり面に適用される工法であるので、背面から土圧が作用するようなケースは「構造上の不適格」に該当し、吹付のり面の劣化評価とは切り離して扱うべきであるという考え方もある⁸⁾。しかし、吹付のり面の維持管理を行う上では、このようなケースが問題となることが多いことから、本研究では吹付のり面の劣化に含めて扱った。

3.2.2 国道462号神ヶ原～生利地区の吹付のり面の劣化

国道462号の神ヶ原～生利にかけての万場サブユニット分布地域には、高さが30mを超えるような急崖をなす吹付のり面が複数存在し、剥落が発生したものや、大規模な補強工事が実施されたものが含まれる。

平成24年に大規模な補強工事が行われたK462M010のり面（高さ約45m、延長約140m、勾配約70°）の、これまでの点検結果の経緯を表-8に示す。平成9年の点検Ⅰの段階では、表面剥離やひび割れが存在するが顕著な開口ひび割れは認められず、概ね健全と評価されていた（したがって、本研究では健全度をCに区分した）。点検Ⅱ、Ⅲでは、新たに開口ひび割れが確認されており、平成24年に行われた詳細調査（表-1の調査Ⅱ）では、吹付背面に空洞が広範囲に点在することが確認された。ただし、はざとり調査の結果、地山の風化深度は浅く、地山からの土圧は吹付には作用していないとされている。

このK462M010より10km程度下流にあるK462M200のり面（高さ約60m、延長約180m、勾配約85°）では、点検Ⅰで概ね健全であると評価されていたが、点検Ⅱ、Ⅲでは、開口ひび割れ等の多くの変状が確認された。平成19年には、吹付の一部で剥落が発生し、平成20年に全面的に補強工事が実施された。

これらののり面では、背面地山から吹付へ作用する大きな土圧は生じていないが、岩盤表層部の風化等により吹付と地山の密着性が低下したり、吹付背面に空洞が生じたりすることによって吹付自体が不安定となり、変状や崩壊が発生していると推定される。このような高さ30mを超える急勾配ののり面の点検の履歴を整理すると表-9、図-10のようになる。

一方、吹付と地山の密着性の低下は、ひび割れやのり肩等からの植物の侵入によっても助長されと考えられる。神ヶ原～生利地区ののり面では、点検Ⅲの記載において、前出のK462M010、K462M200のり面で樹木の侵入による剥離の進行が顕著であり、監視や伐採が必要であるとされている。また、国道122号における点検Ⅱにおいて、植物の侵入によりひび割れの開口が進んでいるとされているのり面は16件（全体の約30%）ある。これらのことは、吹付と地山の密着性の低下による劣化は、植物の侵入による影響が大きいことを示している。

以上の結果より、本研究ルートの吹付のり面には、吹付と地山の密着性が低下することにより進行する劣化機

表-9 神ヶ原～生利地区の吹付のり面で確認される変状の進行過程

Table 9 Process of the damage progress on the shotcrete slopes in the area from Kagahara to Syouri

健全度	のり面に現れる変状現象	該当するのり面 (点検Ⅱ時点)	主な対処
A (健全)	なし。		
B (軽微な低下)	・開口ひび割れが生じる。		全体的に安定 (カルテ対応)
C (中程度)	・開口ひび割れの連続性・開口量が進展する。地山に貫通する。 ・一部に背面空洞が生じる。	K462M100 K462M120 K462M140 K462M200	カルテ対応
D (著しく低下)	・ひび割れに変位が生じる。 (段差、陥没、ずり落ち) ・地山との密着性が失われる。 ・背面に広範囲に空洞が生じる。	K462M110 K462M130 K462M150	対策、調査が必要
E (危険)	・開口ひび割れが連結する。 ・変位が大きく進行する。 (段差、陥没、ずり落ち) ・吹付がめくれ上がる。	K462M010 (点検Ⅳ)	優先度・緊急性大 対策が必要

図-10 神ヶ原～生利地区の吹付のり面の劣化進行過程
Fig.10 Process of the deterioration on the shotcrete slopes in the area from Kagahara to Syouri

構が存在することが確認された。密着性の低下は、背面地山の風化や、植物の侵入等が原因となると考えられる。

3.2.3 吹付自体の劣化

国道122号では、建設から約20年経過後に実施された点検Ⅰで、大部分ののり面において、表層剥離、ひび割れの発生が確認されている。ただし、「対策」も「カルテ対応」も不要と評価されているのり面のうちの7割で、「老朽化は進んでいるが、概ね安定である」と記載されている。これらのことは、吹付自体に劣化は生じているが、のり面の安定性に影響を及ぼすほどではないということを示している。

また、国道122号で点検Ⅰから約10年経過した後に実施された点検Ⅲでは、点検Ⅰの結果に比べ変状が進行したとされているのり面が3件あるが、いずれも先述した背面からの土圧により変状が現れているケースである。建設から約30～40年が経過している今回調査においても、表層剥離やひび割れなどの吹付自体の劣化だけを対象として補修がなされているケースは確認できなかった。

したがって本研究ルートでは、吹付自体の劣化も進行しており、少なくとも建設後20年経過頃までには、表層剥離、ひび割れといった吹付自体の変状が、点検者に「老朽化した」と判断される程度の状態になっているという

ことができる。しかし、その後の進行は比較的緩やかで、建設後30～40年経過しても、8割程度ののり面で表面保護工としての機能がほぼ保持されている。

3.3 のり面の条件と各劣化現象の出現状況

更新、補修補強が実施された吹付のり面、および点検Ⅱや今回調査により健全度がD、Eに評価された吹付のり面において、対策実施根拠や劣化が進行した理由を推定し、表－10に整理した。いずれも、最も主要な理由のみを示している。

更新、補修補強は、吹付に土圧が作用し変状が生じたのり面、および背面の地山との密着性が失われ吹付自体

表－10 吹付のり面における対策および劣化進行原因
Table10 The cause of the repaired or awfully deteriorated shotcrete slopes in this study route

		更新・補修補強実施			健全度D、E		
		462号	122号	計	462号	122号	計
吹付に背面から土圧が作用	流れ盤	2	3	5	4	1	5
	地すべり	0	0	0	1	0	1
	岩盤緩み	1	1	2	0	0	0
	その他	1	1	2	0	0	0
吹付と地山の密着性が低下	剥離	4	2	6	8	1	9
	湧水の影響大	0	0	0	0	1	1
その他(不明含む)		2	1	3	2	0	2

図－11 劣化が進行している吹付のり面の形状の特徴
Fig.11 Characteristics of the shape of the shotcrete slopes which awfully deteriorated in this study route

が不安定となったのり面で実施されている。劣化の進行により健全度D、Eに評価されたのり面も、表面からは理由が判定できないものを除いて、ほとんどがこの2つの理由により劣化が進行したものである。吹付自体の劣化により、対策が行われたり、健全度D、Eに評価された吹付のり面は確認できなかった。

2つの理由で劣化が進行しているのり面の形状の特徴を把握するために、点検Ⅱの「形状」に記録された、平均勾配、高さ、不陸・凹凸について、劣化の理由に分けて図－11に整理した。吹付と地山の密着性の低下により劣化が進んでいるのり面は、平均勾配が急で、凹凸・不陸が大きく、のり高が大きい場合に出現する比率が多いことがわかる。このようなのり面のほうが、密着性の低下が進行しやすく、それに伴う変状も生じやすいためであると考えられる（ただし、のり高の大きいのり面や急勾配ののり面の対策が優先的に実施されているということを反映している可能性もある）。

一方、背面からの土圧の作用により劣化が進んでいるのり面は、勾配や凹凸、高さとの関係が明瞭ではない。流れ盤等の崩壊要因による影響が非常に強いためであると考えられる（崩壊要因があるため、もともと、高く、急なのり面が少ないことも考えられる）。また、土圧の作用による劣化が進んでいるのり面では、不陸・凹凸が大きいのり面が多い。これは、流れ盤をなすのり面では、表面からの岩塊の抜け落ちが生じやすいことから、吹付実施前から凹凸が大きくなる傾向があるためであると考

図－12 本研究ルートにおける吹付のり面の劣化機構（模式図）
Fig.12 The deterioration mechanism of the shotcrete slopes in this study route (schematic view)

えられる。

4. 群馬県の中古生層分布地域における吹付のり面の劣化機構

4.1 劣化機構の類型化

個々の吹付のり面では，多くの要因が複雑に複合して劣化が進行していると推定される¹³⁾。しかし，膨大な数ののり面の維持管理を行うためには，劣化機構をある程度類型化して扱うことが必要であると考ええる。

前章の結果から，本研究ルートの中古生層の吹付のり面の劣化機構は，以下の3つに大別できる。

- ①吹付背面の地山からの土圧によるもの
- ②吹付と背面地山との密着性の低下によるもの
- ③吹付自体の劣化によるもの

3つの劣化機構を，図-12に模式的に示す。

①は，背面の地山から吹付に土圧が作用することにより吹付に変状が現われ，劣化が進行するものである。もともと地山内に，崩壊要因（例えば「切土のり面建設時に注意が必要な地盤条件」¹⁴⁾）が含まれており，風化の進行等によりそれらの要因に伴う不安定化が進んで，吹付への土圧が生じると考えられる。

②は，吹付と地山の密着性が低下し吹付が不安定となることにより変状が現われ，劣化が進行するものである。密着性が低下する原因としては，吹付背面の地山表層の風化や，吹付背面への植物の侵入のほか，本研究ルートのような寒冷地では，凍上による吹付の浮き上がりが考えられる。劣化が進行した場合は，吹付が剥落するようなタイプの崩壊に至ると推定される。

背面地山から地下水がもたらされる場合は，①，②いずれの機構においても劣化を助長する要因となる。

③の吹付自体の劣化は，乾燥や熱による膨張収縮，凍結融解，あるいは中性化，塩害等による吹付自体の物理的・化学的变化により進行するものである。劣化に伴って現れる変状現象としては，表層剥離，ヘアクラック，ひび割れ等があげられる。なお，本研究では，中性化や塩害については検討の対象としなかった。これは，通常の点検では中性化や塩害に関する確認は行われないため

既存の点検記録が存在しないことや，一般に吹付のり面では，対策が必要となるまで中性化や塩害が進んでいることは少ないとされていることによる^{5), 15)}。

4.2 劣化の進行過程

図-13に，本研究ルートの吹付のり面の劣化に伴う健全度の低下過程を模式的に示す。図-4で示した点検Ⅱによる健全度の出現率を合わせて示した。なお，建設後21年間はデータが欠如しているため淡色の線で示した。

曲線aは，劣化機構①の健全度の低下過程を示すものである。吹付背面からの土圧が原因で更新や補修補強が実施された9ケースのデータにもとづいて，近似曲線を示した。本研究ルートでは，建設後21年経過頃までは，このような劣化機構により変状が明瞭となるのり面が認められる。30年を経過する頃には全面補強・更新を必要とするまで健全度が低下し，一部では崩壊が発生している。今回調査実施時点（平成24年）において，劣化機構①により崩壊，不安定化が生じているのり面の割合は，122号（約40年経過），462号（約50年経過）ともに全体の11%であった。

曲線bは，劣化機構②の健全度の低下過程を示すものである。国道462号において，吹付と地山の密着性の低下が原因で補修補強が実施された4ケースのデータにもとづいて，近似曲線を示した。本研究ルートでは，概ね建設後30年を過ぎた頃から，このような機構で変状が明瞭となるのり面が出現し始めている。40年を経過する頃には，全面的な補強・更新を必要とするまで健全度が低下し，一部では吹付の剥落が発生している。今回調査実施時点において，劣化機構②により崩壊，不安定化が生じているのり面の割合は，122号で全体の8%，462号で17%であった。

一般的には，地質により風化に対する抵抗特性が大きく異なるため，吹付と地山の密着性の低下は地質の影響を強く受けると推定されるが，本研究では地質を中古生層に限定したことから，地質による影響は小さいと考えられる。しかし実際には，曲線bに示されるように，ほかののり面よりも密着性の低下に伴う劣化が早く進むのり面が存在しており，密着性の低下と劣化の進行に強く影響を与える地質以外の要因の存在が示唆される。本研究ルートでは，急勾配でのり面高さが高いというのり面形状が，その要因の一つとなっている可能性が高い。

吹付と地山の密着性の低下は，植物の侵入によっても発生・進行する。その場合，健全度の低下過程を示す曲線は，次に述べる吹付自体の劣化を示す曲線cから，ある時点で分離していくような曲線として表現されることが考えられる（図中点線b'で例示した）。bに示したケースとは異なり，のり面の条件（勾配が緩い等）によっては，健全度D，Eまで達しない可能性もある。

曲線cは，地山の崩壊要因や密着性の低下等の影響が小さい場合の健全度の低下過程を示すもので，劣化機構③による健全度の低下過程に相当する。建設から20年経

図-13 研究ルートにおける模式的な劣化進行過程

Fig. 13 The schematic deterioration progress process of the shotcrete slopes in the study route

過後に実施された点検Ⅰで確認された健全度の低下進行状況にくらべ、それ以降の点検で確認される低下の進行状況が緩やかであることが確認された。したがって、吹付自体の健全度の低下は、施工後の比較的早い段階でやや急速に進み、その後、緩やかに進行すると推定される。

吹付の表層剥離は、主に凍結融解や乾湿繰り返しが原因となって発生するが、吹付内で微小な空隙を伴っている部分や、表層付近の低強度の部分等で生じやすいと考えられる。そのような部分では、施工後の比較的早い段階で剥離が進行する。また、ヘアクラックやひび割れは、主な発生原因として乾燥収縮が考えられるが、これも施工後の比較的初期に発生しやすい現象である。これに対し、吹付が密実な部分では表面剥離の進行は遅くなり、ひび割れも、いったん乾燥収縮によって生じると新たなひび割れは生じにくくなると考えられる。このような理由により、吹付自体の劣化は速い段階でやや急速に進み、その後緩やかに進行するようになるものと推定される。

5. 得られた基礎資料の維持管理への応用に関する検討

5.1 劣化予測の可能性

既設構造物の劣化予測の方法には、力学的手法、統計的手法等があるが、吹付のり面では要因ごとの理論的解析は十分行われていないこと、既存の維持修繕記録を用いることができることから、後者の方法が現実的であると考えられる。橋梁等では、既存の点検記録をもとに健全度を評価指標とした劣化曲線を作成し、維持管理計画の策定や、それに基づく予算計画の立案に適用する方法が示されている^{16), 17)}。吹付のり面でも継続的に点検記録が収集されている場合は、同様の手法の適用を検討することは可能であると考えられる。

しかし、吹付のり面では、前述のように、地質や気象条件を絞っても異なる機構で進行する劣化現象が混在しており、さらに劣化の進行は、地形やのり面形状の違い、植物の侵入の影響も受ける。このため、点検記録を単純に統計的に処理して得られた劣化曲線は、巨視的な維持管理計画・予算計画のための参考とはなるが、対策の効果的な実施時期を検討する資料とするための十分な精度は確保されていないと考える。

加藤ほか(2014)は、地域や条件を絞って維持管理の目安となる劣化曲線の作成を検討することが現実的であるという提案を行っている⁸⁾。ここでは、この考え方にもとづき、図-13に示した劣化過程をもとに、目安となる劣化曲線の作成と劣化予測の可能性について検討する。

吹付自体の劣化は、材料の性状、厚さのほか、勾配・高さ・凹凸のようなのり面の形状、湧水、気温・降水量・日照といった周辺環境等により影響を受けるが、背面地山の影響は小さいと考えられる。表層剥離やヘアクラック等、表面に現れた変状により劣化の進行状況の把握が可能であるため、のり面形状や湧水状況等の違いに配慮しながら点検記録を統計処理することにより、比較的精

度のよい劣化曲線の構築が可能であると考えられる。ただし、表面剥離の誘因となる凍結融解に関しては気象条件により大きく影響されるため、地域的な区分が必要である。

これに対して、地山の崩壊要因や吹付と地山の密着性の低下に伴う劣化の進行過程は、地山の崩壊要因の種類とその状態、のり面形状、植生の影響等により大きくばらつくことが予想される。このため、現状では、最適な対策実施時期の検討に供することが可能な精度を期待できる劣化曲線の作成は難しく、図-13に示したような、早い段階で劣化が進行したケースを対象としたものに限られるのではないかと考える。その場合も、地山の地質による影響が大きいため、地質毎に把握することが必要である。

目安となるものでも、劣化曲線が得られれば、維持管理のために役立つ知見を得ることができると考える。例えば、国道122号では、これまで吹付が剥落するようなタイプの災害はほとんど発生していないが、今後、建設後40年を超えるため、国道462号と同様の吹付の剥落の発生に注意が必要となる可能性がある。特に急勾配でのり面が高が大きいのり面において注意が必要であるという提言が可能である。

5.2 対策選定への応用

本研究では、吹付自体の劣化の進行は緩やかで表面保護工としての機能を長期間保持していること、吹付と地山の密着性の低下が原因で急速に健全度が低下すること、しかしその健全度の低下過程は多くの条件により影響を受けるため予測が難しいことが確認された。これらを考慮すると、効率的な維持管理の基本は、吹付自体の劣化進行過程からできるだけ外れないように維持修繕を行っていくことであると考えられる(図-14のⅠ)。例えば、

図-14 対策選定の考え方

Fig. 14 The schematic repair plan of the shotcrete slopes in the study route

伐採や開口ひび割れのシールにより樹木の侵入・成長を抑制することや、ひび割れ充填工・被覆工により水の侵入防止を図ること等により、密着性の低下の進行を抑制することが吹付のり面の延命化に大きな効果があると考ええる。

一方で、吹付自体の劣化進行過程からはずれ、健全度の急速な低下が始まったのり面に対しては、密着性の回復を目的とした対策、例えば鉄筋挿入工や、空洞充填工等を実施することが考えられる(図-14のⅡ)。劣化が進行し使用限界に達してから更新を行う方法(図-14のⅢ)も選択しうる。

これらの方法の中から最も効率のよい対策を選定することになる。現段階では、補修補強工法による性能回復効果や耐久性向上効果がどの程度あるか不明確な部分が残されているが、今後維持修繕記録の収集・解析を行ってこれらについて解明することにより、より合理的に補修補強対策の選定が可能になると考える。

5.3 点検方法への応用

上記のような対策選定の考え方にもとづけば、吹付と地山の密着性の低下を原因とする劣化進行の兆候を早期に見つけることが重要となる。崩壊要因により劣化が進行しているのり面についても同様に、早い段階で抽出ができれば、効果的な対策に加え、防災上も大きなメリットが得られると考えられる。しかし、吹付と背面地山の密着性の低下や背面の地山の風化の進行は、表面からでは直接評価することができない。熱赤外線映像法や穿孔調査などにより確認するのがよいが、これらを日常的に実施することは、現状では困難である。

本研究では、崩壊要因による不安定化の進行や吹付と地山の密着性の低下を原因とする劣化が進行することにより、表-7、表-9のような過程で吹付表面に変状が現れることが確認された。剥落や崩壊に至るようなのり面では、劣化の初期段階から変状が現れ、劣化の進行に伴って状態が変化していく。したがって、確認されたデータをもとにして、ひび割れ等を指標にした日常点検基準を設けることにより、劣化進行の兆候を早い段階でとらえることができる可能性がある。

従来の点検基準では、対策の必要性や緊急性を検討することを目的として、変状を点数化する等の方法により、点検時ののり面の安定性を評価することに主眼が置かれていた。しかし、劣化の兆候、進行状況を把握することを目的とする場合には、確認される変状がどのような劣化機構のどの段階にあるもので、今後どのように進行して行くかを評価・予測できるような基準とすることが望まれる。本研究で得られた資料は、そのような基準を作るための基礎資料として有用であると考ええる。

6. まとめ

本研究は、既存の吹付のり面の維持修繕記録を用いて、効率的な維持管理を行う上で役立つ基礎資料の取得とそ

の取得方法を検討すること、および得られた基礎資料を劣化予測、対策の選定、点検基準の策定等へ応用する方法の検討を目的に実施した。研究対象は、群馬県内の中古生層分布地域の吹付のり面とした。研究の結果、以下のような成果を示すことができた。

- ①従来、対策が必要なのり面を検出する目的で行われてきた点検の結果から、劣化機構・劣化過程に関する情報の抽出を試みた。その結果、研究の対象とした群馬県の中古生層分布地域の吹付のり面の劣化機構は、大きく3つに類型化できることがわかった。
- ②それぞれの劣化機構について、劣化進行過程と出現比率を示した。
- ③得られた劣化進行過程を目安にして、そこから劣化予測に寄与できるどのような情報が得られるかを示した。
- ④劣化機構・劣化過程に関する資料を、対策の選定や点検方法にフィードバックさせて、効率的な維持管理に役立たせる方法について示した。

道路のり面では、防災総点検結果をはじめとする膨大な維持修繕記録が蓄積されている。本研究では、これらの記録を分析することにより、今後の維持管理に有用となる基礎資料が得られることを、その方法も含めて例示することができたと考える。

今回は、中古生層分布地域の吹付のり面に絞って検討を行ったが、今後、別の地質についても研究範囲を広げ、吹付のり面の効率的な維持管理のための手法について検討を進めたい。

謝 辞

本研究の実施にあたり、群馬県県土整備部道路管理課、桐生みどり振興局桐生土木事務所、多野藤岡振興局藤岡土木事務所、吾妻振興局中之条土木事務所の皆様には、資料の閲覧および助言等多くのご助力をいただいた。独立行政法人土木研究所加藤俊二氏、日特建設株式会社上野雄一氏には多くの貴重なご意見をいただいた。また、本研究で用いた健全度評価表は、三木博史氏をはじめとするのり面診断・補修補強研究会の皆様方のご議論により作成されたものであり、本研究での使用を快くご承諾いただいた。記して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 大津宏康 (2011): 地盤工学分野における維持管理とアセットマネジメントの取り組み, 地盤工学会誌, Vol. 59, No. 9, pp. 1-5.
- 2) Kristen L., J. Erik Loehr and Daniel Huaco (2003): Asset Management Framework for Geotechnical Infrastructure, Journal of Infrastructure System, ASCE, pp. 107-116.
- 3) Mark Vessely (2013): Geotechnical Asset Management Implementation Concepts and Strategies, FHWA-CFL/TD-13-003, 62p.
- 4) 貝戸清之・青木一也・小林潔司 (2010): 実践的アセットマネジメントと第2世代への展望, 土木技術者実践論文集, Vol. 1, pp. 37-82.
- 5) 松山裕幸・天野浄行・山本高司 (2006): 吹付けコンクリート

- の安定性と劣化状況，土木学会論文集F, Vol. 62, No. 3, pp. 445–458.
- 6) 大津宏康・赤木舞・松山裕幸・大谷芳輝 (2006)：吹付けコンクリート斜面の維持補修費評価に関する研究，土木学会建設マネジメント研究論文，Vol. 13, pp. 301–314.
 - 7) 周建敏・横田漠・瀬崎満弘・矢ヶ部秀美・安田泰二・満倉忠勝 (2000)：老朽化したモルタル吹付のり面の維持管理システムと修復工に関する研究，土木学会建設マネジメント研究論文集，Vol. 8, pp. 149–159.
 - 8) 加藤俊二・佐々木哲也 (2013)：吹付けのり面工の劣化モデルに関する一考察，第48回地盤工学会研究発表会(CD)，pp. 77–78.
 - 9) 群馬県地質図作成委員会 (1999)：群馬県10万分の1地質図，内外地図株式会社，114p.
 - 10) 道路保全技術センター (1996)：平成8年度道路防災総点検要領（豪雨・豪雪等），160p.
 - 11) のり面診断・補修補強研究会 (2013)：吹付のり面の診断・補修補強の手引き（配布物），181p.
 - 12) 宇次原雅之・山田浩・窪塚大輔 (2013)：吹付のり面の効率的な補修・補強対策の検討，第48回地盤工学会研究発表会(CD)，pp. 81–82.
 - 13) 石橋晃睦・三木博史・高田和典・川崎達郎・谷口龍司・南雲政博・宍戸一・安田永昌 (1995)：吹付のり面の老朽化メカニズムと熱赤外線映像調査，第22回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp. 618–619.
 - 14) 日本道路協会 (2009)：道路土工—切土工・斜面安定工指針（平成21年度版），丸善出版株式会社，521p.
 - 15) 全国特定法面保護協会 (2013)：のり枠工の設計・施工指針（改訂版第3版）平成25年10月，付録pp. 21–24.
 - 16) 道路保全技術センター道路構造物保全研究会編 (2008)：道路アセットマネジメントハンドブック，鹿島出版会，148p.
 - 17) 貝戸清之・阿部允・藤野陽三 (2003)：実測データに基づく構造物の劣化予測，土木学会論文集，No. 744/IV–61，pp. 29–38.
（原稿受付2014年4月1日，原稿受理2014年7月23日）