

学位論文の要旨

氏名

昌本 拓也

学位論文題目

草本植生による法面保護工に対する可視光画像解析を利用した
品質・維持管理システムの開発

近年、降雨量の増大に伴い、道路盛土のような土工構造物では、排水溝から溢れた水による地表流が法面を侵食し、やがて崩壊に至る事例が多数報告されている。このような崩壊形態に対し、盛土や切土法面の侵食や風化を防ぐための工法として法面保護工があり、中でも、法面に草本植生の種子を散布する播種工（以下、本工種と称す）は、低価格で施工性が良く、様々な現場で適用されている。

一般に我が国では、本工種の成績判定や維持管理時における点検を実施する際の定量的な指標として、植被率が用いられる。植被率とは、植生が地表面を被覆している割合で、地表面に対する水平投影面積を百分率で示した数値であるが、植被率の計測は発注者検査員により目視で行われており、その結果は個人差が大きいことが従来指摘されている。また、植被率と法面の侵食量（土砂流出量）との関係は定量的に示されていない。従って、上述したような法面侵食に伴う災害を防ぐためには、本工種に対する、より客観的で高度な管理手法が必要であると考えられる。そこで、画像解析技術を用いた植被率の計測手法に着目し、本工種の品質・維持管理への適用可能性について検討することとした。

土木工学分野において画像解析を用いて法面の植被率を計測した研究事例では、画像の中でも近赤外域の反射光を含む画像（以下、近赤外画像）が用いられる場合が多く、近年では実務への適用事例も見られるが、近赤外画像を撮影するための機器は高価であり、安価な機器を用いる場合でもフィルターの装着等の特殊な改造を要するという課題が挙げられる。

そこで本研究では、一般に広く普及しているデジタルカメラ等の機器による、可視光画像（デジタル写真データ）解析技術を用いた植被率の計測手法に着目し、本工種に対する可視光画像解析を利用した品質・維持管理システムを開発することを目的としている。

本論文は以下の6章から構成される。

第1章では、本研究の背景や目的を明確にするとともに、本論文の構成を示した。

第2章では、道路土工構造物全体に対する法面保護工の位置付けについて述べるとともに、本工種の管理手法の現状と課題についてまとめた。具体的には、本工種は法面の標準勾配を保つために重要であり、排水溝の機能を阻害することが無いように管理する必要があるが、本工種の管理における指標である植被率の計測手法は一般に目視であること、植被率と法面の侵食量との定量的関係は、現状の道路土工構造物の設計や維持管理手法に反映されていないことを示した。

第3章では、画像解析による植被率の計測手法の概要や既往研究について整理し、本工種の品質・維持管理手法として画像解析技術を導入するための課題について述べた。そして、植被率の計測結果のばらつきを抑えるための撮影機器の設定方法と、自然光源の変化が植被率の計測結果に与える影響について、商用

別記様式第3号-2

デジタルカメラを用いて検討した。その結果、以下3点の結論が得られた。

- 3-1) 撮影機器の設定方法については、プログラムAEが採用されている機器の場合、ホワイトバランスをプリセットモードに固定し、ISO感度を最小にする設定が最適であると考えられた。
- 3-2) 様々な植生指数 (ExG, NGRDI, MGRVI, RGBVI)を用いて植被率を計測した結果、ExGを用いた場合、他の植生指数に比べて最も植被率の計測結果のばらつきが小さくなり、自然光源の変化の影響を受けづらいことが考えられた。よって、本研究において植被率を計測する際には、植生指数ExGを採用することとした。
- 3-3) 植生指数ExGを用いた場合、自然光源の変化によって植被率の計測結果は、撮影時刻や天気の違いにより±8~10% (95%予測区間) の影響を受けること、天気が変わらない同日中の撮影では、照度89lx程度が確保できる撮影条件下において、標準偏差±1.8%程度で植被率の計測が可能であると考えられた。

第4章では、第3章で示した可視光画像解析技術によって計測される植被率が、植生による法面侵食の抑制 (以下、法面保護効果) の説明に寄与するか明らかにすることを目的に、2つの条件の土試料 (繰り返し使用/非繰り返し使用) において、モデル法面を用いた室内侵食実験を実施した。その結果、以下3点の結論が得られた。

- 4-1) 土試料の条件に寄らず、植被率が増加するほど侵食量が減少するような有意な回帰式が得られたことから、可視光画像解析技術を用いて計測される植被率は、植生の法面保護効果の説明に利用可能であることを示した。
- 4-2) 土試料を繰り返し用いた条件における実験では、植被率に対する粒径区分 (細粒分と粗粒分) 毎の侵食量比 (裸地供試体に対する植生供試体の侵食量) の変化率は同程度であったため、植生による法面保護効果は細粒分・粗粒分に対して、同程度に発揮される可能性があることを示した。ただし、土試料を繰り返し用いたことで、土粒子の破碎の影響を受けて供試体にばらつきが発生し、実験結果に影響した可能性が考えられた。
- 4-3) 土試料を繰り返し用いない条件における実験では、土粒子の破碎の影響を受けないことから、植生の法面保護効果と土粒子の粒径との関係について、より詳細な検討を行った。その結果、植生の法面保護効果は土粒子の粒径区分 (粗粒分における細区分である中礫、細礫、粗砂、中砂、細砂) に寄らず、同程度に発揮される可能性が考えられた。

第5章では、第2章で示した本工程の現状の管理手法を高度化するために、第3章、第4章の結果に基づき、本工程に関する新たな品質・維持管理システムの提案を行った。具体的には、排水溝の土砂堆積量を考慮した植被率の管理値の設定方法を検討した。その結果、以下2点の結論が得られた。

- 5-1) 現状の排水溝設計で考慮されていない本工程の効果と、排水溝の土砂堆積量の関係を反映させた、排水溝の設計フローを提案した。具体的には、植被率から排水溝に流入する土砂の堆積高さを推定する式を提案し、侵食イベント前に排水溝に堆積している土砂の高さ (初期堆積係数と定義) を考慮した排水溝の排水能力算出式を導出することで、新たな排水溝の設計フローを提案した。
- 5-2) 一般的なしらす道路法面を想定したモデル法面の小段排水溝において、本章で提案した排水溝の設計フローに基づき、排水溝からの溢水を防ぐことができると考えられる植被率を、草地型播種工の管理値とする案を示した。

第6章では、各章で得られた結果をまとめて結論を示すとともに、本研究の今後の展望を述べた。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Development of a quality and maintenance control system using RGB image analysis
for slope revegetation by seeding works with herbaceous plants

Name: MASAMOTO Takuya

The recent trend of increase in heavy rainfall has resulted in damage to road embankments due to water overflowing from channel network. To mitigate this kind of damage, slope revegetation by seeding works with herbaceous plants is widely employed owing to its environmental friendliness and cost effectiveness. The Percentage of Vegetative Cover (*PVC*), the ratio of the vertical projected area of vegetation to total ground area, is an indicator of the quality evaluation of the seeding works. However, the *PVC* is usually measured manually through visual inspection. Therefore, the measurement results of the same subject might not be constant, especially when measured by different inspectors. To overcome this situation, this study proposes the use of RGB image analysis technique.

The objective of this study is to develop a quality and maintenance control system using RGB image analysis for slope revegetation by seeding works with herbaceous plants.

This dissertation has following 6 chapters.

In chapter 1, the background and the objective of this study was clarified.

In chapter 2, the role of the slope protection by seeding works with herbaceous plants for entire road embankment structure was summarized and the challenges of its current maintenance system to be resolved were clarified. Specifically, the seeding works are crucial for maintaining the standard gradient of the embankment to keep its stability. However, the *PVC*, an indicator of the quality evaluation of the seeding works, is usually measure manually. In addition, the quantitative relationship between the *PVC* and the sediment erosion from slope is not currently reflected in the design and maintenance method of road embankment.

In chapter 3, calculation methods to measure the *PVC* by image analysis techniques were organized based on previous studies, and issues need to be addressed for the inspection of slope revegetation with herbaceous plants were summarized. Specifically, the camera settings to minimize variations in the *PVC* measurement results and the impacts of natural sunlight were investigated using a consumer grade digital camera.

Following three conclusions were obtained in this chapter.

- 3-1) The camera set as minimum ISO with fixed white balance was preferable to measure the *PVC* when the equipment has program automatic exposure.
- 3-2) Four vegetation indices, namely, ExG, NGRDI, MGRVI and RGBVI were introduced to measure the *PVC*. the range of variation in the *PVC* measurement results with ExG was narrower than that with the other vegetation indices. Therefore, ExG was adopted as the optimum vegetation index for measuring the *PVC* in this study.
- 3-3) The variations in the *PVC* measurement results with ExG was found to be approximately $\pm 8 \sim 10\%$ (95% prediction intervals) under varying natural sunlight conditions, including different solar altitude and/or weather.

In chapter 4, laboratory flume experiments were conducted to investigate the capability of the *PVC* obtained by the measuring method described in chapter 3 to predict decrease in the sediment erosion from a slope due to herbaceous plants (hereafter, "slope protection effect"). The experiments were carried out with two types of soil samples, repeatedly used soil and not-repeatedly used soil.

Following three conclusions were obtained in this chapter.

- 4-1) Regardless of the types of soil samples, significant regression equations were obtained, which is indicating that the sediment erosion decreased as the *PVC* increased. This suggests that the *PVC* measured by the method of this study is available to explain the slope protection effect by herbaceous plants
- 4-2) In the experiments conducted using soil samples that were repeatedly used, it was found that the rates of variability between the *PVC* and the relative soil loss, soil loss of vegetative soil samples under certain *PVC* compared to that of bare soil, were similar. Therefore, the slope protection effect due to herbaceous plants could equally exerted on both fine fraction and coarse fraction. However, soil samples might be influenced of soil particle fragmentation due to repeated use of the soil.
- 4-3) In the experiments conducted using soil samples that were not repeatedly used, based on the absence of any influence from soil particle fragmentation, more comprehensive examination for the detached soil particles was carried out. Consequently, it was found that the slope protection effect due to herbaceous plants could equally exerted on each geomaterials (medium gravel, fine gravel, coarse sand, medium sand, fine sand).

In chapter 5, a quality and maintenance control system using RGB image analysis for slope revegetation by seeding works with herbaceous plants was proposed based on the results of chapter 3 and 4 to improve the current management system as stated in chapter 2. Specifically, a method of determine the control value of the *PVC* was proposed, taking into consideration the sediment accumulation in drainage channels

Following two conclusions were obtained in this chapter.

- 5-1) A new design flow for drainage channels that takes into account for the effect of the seeding works, which is not currently considered in the existing design flow, was proposed. Specifically, an equation to calculate the relationship between the *PVC* and the height of sediment deposition in the drainage channels was derived. In addition, the initial deposition coefficient as the height of sediment deposition in the drainage channels before erosion event was defined, and this information was incorporated into the calculation flow of the drainage capacity of the channels.
- 5-2) Assuming the model slope which designed for typical Shirasu road embankment, the method to set the management value of the *PVC* for the seeding works was proposed to prevent water overflowing from the channel network.

In chapter 6, the findings of this study were concluded, and future prospects were summarized.