

## 論文の内容の要旨

論文題目 林内道路の路面侵食と適切な横断溝間隔に関する研究

氏名 宗岡 寛子

林業生産活動の基盤として林道・作業道（以後、「林内道路」とする）を整備する上で、開設費と将来の維持管理の負担を総合的に考慮して適切な規格・構造を検討することが重要である。林内道路は開設後様々な形で劣化・損壊し、維持管理作業が必要になるが、中でも路面が舗装されていない林内道路では、雨水の流下による路面侵食が問題となる。これまで多くの研究で、路面侵食を防止するための「適切な横断溝間隔の目安」が提案されてきた。しかし、路面侵食の進行速度は様々な要因の影響を受けて空間的に大きくばらつくため、ある目安に従って横断溝を配置してもすべての場所で路面侵食が防止できるわけではなく、路面補修が必要になる場所も存在すると考えられる。しかし、「適切な横断溝間隔の目安」を提案した既往研究は、その目安を適用した場合に生じる将来的な補修の負担について言及していない。本研究は、確率と期待値の考え方を応用し、大量のデータを活用して「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を確立した。

第1章ではまず、近年林道・作業道が林業生産活動の基盤として整備されるようになってきているという背景を踏まえ、開設費と将来の維持管理の負担を総合的に考えて適切な規格・構造を検討する必要性が生じていることを指摘した。その上で路面侵食に関わる既往研究を整理してその課題を指摘した。既往研究では、林内道路の路面侵食を防止するための対策として「適切な横断溝間隔の目安」が検討されてきた。その目安導出の基になっているのは、「縦断勾配  $x$ 」及び「横断溝からの距離  $y$ 」の2因子からなる路面侵食量予測モデルである。一方、路面侵食が「縦断勾配  $x$ 」及び「横断溝からの距離  $y$ 」の2因子以外にも様々な要因の影響を受ける複雑な現象であることも明らかにされてきた。そのため、2因子からなる路面侵食量予測モデルと実際の路面侵食量にはずれ（残差）が生じると考えられるが、残差についての定量的な分析はほとんど行われていない。本研究ではこの残差を定量的に把握し、確率と期待値の考え方を応用することで「将来の路面補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する手法を確立することを目的とした。

第2章では、既往研究で提案された「適切な横断溝間隔の目安」と、実際の林道で観察された横断溝間隔とを比較し、「将来の補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」導出の必要性について検討した。上記のとおり路面侵食には様々な要因が影響を及ぼすため、縦断勾配が同じであっても侵食防止に必要な横断溝間隔は場所によってばらつくと考えられる。既往

研究の中には、すべての場所で確実に侵食を防止するためにそのようなばらつきの下限值（すなわち最も侵食が進行しやすい環境下で必要とされる横断溝間隔）を一般的な目安として提案したものもある。そのような「安全側をとった横断溝間隔の目安」が容易に実現できるのであれば、確実な侵食防止が可能であり、本研究で目的とする「将来の補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」導出の必要性は薄い。しかし、実際の林道で観察された横断溝間隔は既往の「安全側をとった横断溝間隔の目安」よりも平均的に 20m 程度長かった。調査を行った林道には長年の維持管理の中で簡易な横断溝が多数追加されていたが、既往の目安はさらに高密度な横断溝配置を求めるものであった。すなわち、既往の「安全側をとった横断溝間隔の目安」は実態に対して要求水準の高いものであり、容易に実現できないことが示唆された。

第 3 章では、確率と期待値の考え方を応用し、「将来の補修の負担に応じた横断溝間隔の目安」を導出する方法を提案した。その方法は以下のようなものである。

- ①開設から  $N$  年を経た林内道路上の多数の地点で「縦断勾配  $x$ 」及び「横断溝からの距離  $y$ 」の 2 因子と路面侵食量  $z$  を計測し、回帰式を推定する。
- ②その回帰式の残差分布を何らかの分布関数で近似することで、ある「縦断勾配  $x$ 」及び「横断溝からの距離  $y$ 」の地点において、許容水準  $\gamma$  を超える路面侵食が発生する確率  $P_{x,y}(z > \gamma)$  を表現する。
- ③ $P_{x,y}(z > \gamma)$  を  $y$  で偏微分し、横断溝からの距離  $y$  の地点における  $P_{x,y}(z > \gamma)$  の増加率を表す関数  $p_{x,y}(y)$  を求める。この  $p_{x,y}(y)$  は、上流側横断溝から許容水準  $\gamma$  を超える路面侵食が新たに開始する地点までの距離  $y$  の確率密度関数と捉えられる。
- ④長さ  $d$  の排水区間（横断溝に挟まれる区間）において、上流側横断溝から距離  $y$  の地点で許容水準  $\gamma$  を超える侵食が開始した場合、補修が必要になる延長  $w$ （以下「要補修延長  $w$ 」とする。）は、 $d - y$  である。先ほどの  $p_{x,y}(y)$  を用いて、この要補修延長  $w$  の確率密度関数  $h_{x,d,\gamma}(w)$  を表現する。
- ⑤ $h_{x,d,\gamma}(w)$  を用いて、縦断勾配  $x$ 、長さ  $d$  の排水区間における要補修延長  $w$  の期待値  $E_{x,d,\gamma}(w)$  を求める。 $E_{x,d,\gamma}(w)$  を排水区間の長さ  $d$  で除したものを「要補修率  $R_r$ 」と定義する。
- ⑥この要補修率  $R_r$  として林内道路の開設主体が適切と考える水準  $R_{ropt}$  を代入して  $d$  について解くことで、要補修率  $R_{ropt}$  に応じた横断溝間隔の目安が得られる。

第 3 章で提案した方法で「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出するためには、「縦断勾配  $x$ 」及び「横断溝からの距離  $y$ 」の 2 因子からなる回帰式の残差分布が、何らかの分布関数で近似できることが前提となる。そこで第 4 章では、実際の林内道路 4 路線（東飯田支線林道、仙郷林道、広根場支線林道、菅谷作業道）における路面侵食量の計測データからモデルを推定し、その残差分布を検討した。その結果、4 路線のいずれの計測データを用いてモデルを推定した場合も、残差分布は正規分布で近似できることが明らかとなった。また、土質や降雨の履歴等が異なる 4 路線の計測データを混合して一つのモデルを推

定したところ、モデルの標準誤差は大きくなるものの、残差分布はやはり正規分布で近似することができた。

第5章では、残差分布が正規分布で近似できるという第4章の結果を踏まえ、第3章で提案した「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」導出方法を具体化した。そして例として仙郷林道で得た路面侵食量の計測データを用いて、「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出した。正規分布の累積分布関数が解析的に解けないことに起因して近似計算が必要になる部分があるが、その部分の処理方法を具体化した結果、実際に「要補修率に応じた横断溝間隔の目安」を導出することができた。仙郷林道の例では、要補修率を15%とした時の横断溝間隔の目安はおおむね現実的なものであったが、要補修率を10%とすると横断溝間隔の目安はごく短くなり、実現が困難と考えられる水準であった。したがって要補修率を極端に低く抑えようとするよりも、ある程度路面の補修が必要になることを許容して横断溝間隔を決定した方が、開設時に横断溝の設置にかかる費用と将来の路面補修の費用の和を抑制できる可能性があるかと推察された。

そこで第6章では、開設時に横断溝の設置にかかる費用と将来の路面補修の費用の和を最小化する観点から、最適な要補修率  $R_{\text{ropt}}$  を求める方法を検討した。まず、ある林内道路において「要補修率  $R_r$  に応じた横断溝間隔の目安」に従って横断溝を配置することを想定し、開設時に横断溝の設置にかかる費用  $C_c$  と、将来の路面補修にかかる費用  $C_r$  の和  $C_t$  を表現した。その際、 $C_c$  は横断溝の設置数に比例すること、 $C_r$  は要補修率  $R_r$  に比例することを仮定した。そして、要補修率  $R_r$  の変化に伴う  $C_t$  の変動を表す関数  $C(R_r)$  (費用関数) を導出し、これを最小にする最適要補修率  $R_{\text{ropt}}$  を検討した。費用関数  $C(R_r)$  には、路面侵食量の許容水準  $\gamma$ 、路線の平均縦断勾配  $x_m$ 、横断溝1箇所あたりの設置にかかる費用  $c_c$  (円/箇所) と要補修延長1mあたりの補修費用  $c_r$  (円/m) の比  $B$  (以後、省略して「単価の比  $B$ 」とする。)、林内道路の維持管理期間  $N_t$  (年) がパラメータとして含まれる。本章では、路面侵食量の許容水準  $\gamma$  は0.10 mで一定とし、それ以外のパラメータを様々に変化させて最適要補修率  $R_{\text{ropt}}$  の検討を行った。その結果、平均縦断勾配  $x_m$  や単価の比  $B$  が大きくなるほど最適要補修率  $R_{\text{ropt}}$  は上昇した。平均縦断勾配が大きい路線や、補修単価に比べて高額な横断溝(コンクリート製横断溝等)を多く用いる路線では、要補修率を極端に低く抑えようとする横断溝の設置にかかる費用が跳ね上がるため、補修に力を入れた方がトータルコストを抑制できると考えられる。一方、維持管理期間  $N_t$  が長くなるほど最適要補修率  $R_{\text{ropt}}$  は低下した。林内道路を長期間維持管理する予定がある場合は補修の負担を低く抑えることが重要となる。このように、最適要補修率  $R_{\text{ropt}}$  は一律に定まるものではなく、個々の林内道路路線の属性や維持管理の方針によって変化する。そのため、林内道路の開設主体は個々の路線に適した最適要補修率を検討する必要がある。本章で導出した費用関数は、そのための有用なツールとなる。

最後に第7章では本研究の総括を行った。