

曲線部における土工量算定法の比較

田中良明・山口智・鈴木秀典・中澤昌彦・吉田智佳史 (森林総研)

要旨: 曲線部の土工量の算定法について、断面積平均法を曲線部の補正を行わないで計算する方法と、ボクセルを使った方法を比較した。断面積平均法を曲線部の補正を行わないで用いると、その誤差は地形、曲線半径、道幅、地山傾斜、のり面傾斜に影響をうける。道幅が長くなるほど、曲線半径が短くなるほど、地形傾斜が増大するほど、誤差の割合は増大する。したがって道幅が狭い森林作業道であっても傾斜の急な箇所で半径 R の短い道を計画する場合には誤差の補正を行ったほうが良いことが明らかになった。一方、ボクセルを用いた方法では、誤差は傾斜や曲線半径などの影響を余り受けないと考えられ、大きさ 10cm 以下のボクセルを用いれば誤差は、曲線部の補正をしない断面積平均法よりも小さくなった。

キーワード: 土工量, 断面積平均法, ボクセル

Abstract: Two methods for calculating the earthwork volume in the curve of a forest road were compared. One method involves the calculation of the earthwork volume using the cross section and the road length without any correction. The other method involves the use of a voxel (volumetric pixel)—a volume element in a three-dimensional space. The error rate of the former method is a function of the curve radius, road width, terrain slope, cut slope, and fill slope. It is found that the error rate increases with an increase in the road width and the terrain slope. Further, the error rate increases with a decrease in the curve radius. Therefore, even when calculating the volume of a forest spur road, which usually has a narrow road width, error correction is needed when the curve radius is small and the terrain surface is steep. The latter method seems to be less vulnerable to factors such as the curve radius, and its accuracy is higher than that of the former method when a voxel with a size of 10 cm or less is used.

Keywords : earthwork volume, cross section, voxel

I はじめに

平成 22 年度に、林業専用道作設指針、森林作業道作設指針が林野庁によって相次いで示され、森林路網を開設して森林作業のコスト削減をはかる機運が高まっている。こうした路線の作設においては、切土、盛土の土工量の均衡、総土工量の最小化、構造物をできるだけ使わないことが重要である。そのため、路線の計画に数値地形モデル (DEM) を用いて平面線形、縦断線形、路線断面、土工量等を検討する方法が有効であると考えられる。

森林総合研究所では森林作業道に対する路線選定支援プログラムを開発しているが (4)、これはユーザーが選んだ路線に対して断面積平均法を適用するものであり、曲線部における誤差の評価が必要である。

また近年、航空機レーザーによる 1m や 2m といった高解像度の DEM も路線選定に使用されているが (1)、このレベルの解像度であれば地形、路面、のり面を一定の体積をもった立方体 (ボクセル) として近似して、土

工量を算定する方法も有効であると考えられる。この研究の目的は、曲線部の土工量の算定において、補正を行わない断面積平均法を用いる方法とボクセルを用いる方法の比較を行うことである。

II 方法

1. 曲線部の土工量 道幅の中央の位置がちょうど地山で、そこを XY 平面の原点にとり、半径 $R(\text{m})$ の円曲線、道幅 $W(\text{m})$ 、区間長 $L(\text{m})$ の区間の土工量を考える (図-1)。地山の傾斜角 α (度)、盛土のり面の傾斜角 β (度)、切土のり面の傾斜角 γ (度) とする。盛土、切土の断面が点 C の周りに回転した場合の体積がそれぞれ盛土量、切土量である。図-1 に示した断面図、平面図は盛土が曲線の外側にある曲線部であり、尾根部において見られるものである。これに対して谷部で見られるような、盛土が曲線部の内側にある曲線部も考えられる。便宜上これらを、尾根型、谷型と区分する。尾根型の断面図において

Yoshiaki TANAKA, Satoshi YAMAGUCHI, Hidenori SUZUKI, Masahiko NAKAZAWA and Chikashi YOSHIDA (For. and Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305-8687)

Comparison between two methods for calculating earthwork volume in the curve of a forest road

は、地山、盛土のり面、切土のり面、路面はそれぞれ数式で表すことができる。

$$y = -\tan \alpha \cdot x$$

$$y = -\tan \beta \cdot (x - w/2)$$

$$y = -\tan \gamma \cdot (x + w/2)$$

$$y = 0$$

谷型においても符号の異なる同様の数式が得られる。

2. 断面積平均法と補正法 断面積平均法は土工量算定区間のそれぞれの断面の平均値に区間長 L をかける方法である。断面が平行でその変化が直線的であれば、正確な値を与えるが、曲線部では回転の影響で誤差が生じる。曲線部における誤差には補正法がある。補正には各断面の重心位置が必要である。盛土、切土の各断面の重心から、中心までの距離をそれぞれ d_1 、 d_2 とする。尾根部における盛土量、切土量の補正率はそれぞれ、

$$r_1 = (R + d_1) / R$$

$$r_2 = (R - d_2) / R$$

となる。谷型の補正率は土の符号が逆になる。これらの補正率を断面積平均法で求めた体積に乘じれば、それぞれの曲線部の土工量を計算することができる。補正率をかけることは断面積平均法で使った曲線長 L を重心の回転による移動距離に補正するものである。軸を中心に回転する平面図形の体積は、その平面図形の重心の移動距離に平面図形の面積を乗じたものであるという Guldin の法則により補正が行われる (5)。したがって、この補正率を調べれば曲線部において断面積平均法を使った場合の誤差が評価できる。断面の重心を求めるには先に数式で示した各直線の交点からもとめる。各断面の交点の座標は原点、路面とのり面の交点、のり面と地山の交点であり、したがって曲線部の補正率にかかわる因子は R 、 W 、 α 、 β 、 γ である。

3. ボクセルを使った方法 ボクセルは画像を構成するピクセルに対して物体の体積を単位化した立方体である (6)。厚さ、幅、高さを持つ形状の物体であれば、十分に小さなボクセルを使えばその形状を近似することができる。曲線部をボクセル化することで土工量を計算する方法を述べる。まず整数の二次元配列を二つ用意して、それぞれが図-1の平面図に示した大きさ $D(m)$ の格子を表すものとする。曲線部に含まれていない格子は計算から除外する。これは区間長 L 、半径 R 、もともと外側のり面の半径を使って判定することができる。次に2つの配列に地山の値を書き込む。各ボクセルの中心からの距離と傾斜角 α に相当する地山の高さである。高さの値も D 単位で整数化する。つまりボクセル何個分に相当するかで表す。一方の格子に対して路面に相当する部分に

路面高を書き込む。これは各ボクセルの中心からの距離が $R \pm W/2$ の範囲にあるかで判定できる。最後に、のり尻や路肩に相当する半径を使って盛土のり面や切土のり面の値を書き込む。二つの格子を比較して路面や盛土が地山より高ければ盛土として数え、地山より低ければ切土として数える。最後にボクセルの体積を乗じて、盛土量、切土量を算定する。

III 結果と考察

1. 曲線部の土工量と補正率 土工量とその補正率の算定にあたって道幅 W は、森林作業道と曲線部の拡幅を行う林業専用道を想定して、それぞれ $3m$ 、 $6m$ とした。文献では曲線部の誤差の補正は半径 $20m$ 以下で必要とされており (2)、曲線の半径 R は $20m$ と $12m$ とした。のり面の勾配は盛土1割2分、切土の勾配は6分、区間長 L は $10m$ とした。

図-2、3に道幅 $3m$ の尾根型、谷型の曲線部の土工量を示す。30度付近で土工量が急増することがわかる。特に尾根では 35° で 30° の3倍となり、これまでも指摘されているように傾斜角 30° というのは土工による道づくりの難易度が急変する値であるといえる (3, 7)。盛土では切土よりも、のり勾配を大きくするので、断面は盛土のほうが大きい。その断面が曲線の外側にある尾根型ではより多くの盛土量が必要になることがわかる。谷型では逆に盛土が縮小され、20度近くまでは土量のバランスがとれていることがわかる。半径 R が大きくなると曲線区間は直線区間に近づき、外側の土工量は縮減され、内側の土工量は増大する。したがって尾根型では R が大きくなると盛土量は減少し、切土量は増加する。谷型では逆である。道幅 $6m$ の場合も同様のグラフとなるので図は省略したが、尾根型の土工量の最大値が $300m^3$ を超え、土工量の桁が上がる。

図-4に道幅 $3m$ の尾根型の補正率を示す。尾根部で断面積平均法を使うと盛土は過小評価、切土は過大評価される。したがって盛土の補正率は1以上、切土では1以下となる。1から補正率を引いた値の絶対値、つまり補正率の値1からの離れ具合を誤差率と考える。曲線の半径が大きくなると曲線は、次第に直線に近づくので曲線半径が大きいほうが1に近く誤差率は小さい。傾斜については誤差率は次第に上昇するが、盛土で30度を境に急変する。重心の位置は尾根と谷では符号が異なるだけなので谷型と尾根型の補正率のグラフは値1の直線を境にして上下対称となる。グラフから曲線部に補正なしで断面積平均法を用いれば半径 $12m$ では1割から2割程度の誤差率が盛土と切土に生じることがわかる。しかし、

森林作業道では 12m より小さな半径で曲線部を作設することが場合が多く、その場合補正率の曲線が半径 12m の外側に来て誤差率が増えることになる。そのため傾斜が急な場所で、小さな R の土工量の計算値が実態とかけ離れたものになる恐れがある。そのような条件下では補正を行うべきである。図-5 は幅が 6m の補正率である。3m の場合と比べてさらに補正率が 1 より遠ざかり、誤差率が增大する。道幅 W が広がると断面積の重心は外側へ移動するため、林業専用道の土工量算定では補正を行うべきである。

2. ボクセルを使った結果 図-6, 7 に D を 50cm とした場合の曲線部の地山およびそれに土工を行ったものをボクセルとして出力したものを示す。50cm 程度のボクセルであっても路面の平坦な部分や盛土の構造が表現されていることがわかる。問題は、土工量の計算を正確にするために、どの程度まで D を小さくすればよいかということである。のり面、路面、地表面の交わる部分には鋭いエッジがあり、ある程度の細かさにはないと曲線部の地表面を近似できない。谷型で半径 R12m, 道幅 W3m, 6m で計算した結果を表-1, 2 に示す。D の値を 1m から初めて 50cm, 25cm と半分にしていったところ、誤差はそれに伴って減少していくことがわかる。断面積平均法で補正しない場合は、1 割程度の誤差が生じていた。したがって盛土量の誤差が数パーセントのオーダーになる 10cm 程度にまで細かくすれば、修正を行わない断面積平均法よりも正確になることがわかる。断面積平均法では誤差に半径 R, 道幅 W, 地山傾斜角 α 等が影響していたが、他の条件での計算でも同じような計算結果を示すことから、ボクセルによる方法はこれらの因子による影響を受けることは少ないと推察された。

IV まとめ

道幅の中心を地山とした曲線部の土工量の 2 つの算定法を比較した。曲線部における土工量、補正率は傾斜 30° 付近で急変する傾向があり、また曲線部における土工量は、尾根部において盛土量が不足しやすい。道幅 3m 程度の森林作業道であっても、傾斜が急な場所で、半径の小さな曲線部では補正を行うべきであろう。ボクセルによる方法は、10cm 以下であれば補正を行わない断面平均法よりも正確である。大きな配列が必要となるため計算機の記憶容量を多く必要とする欠点がある一方で、DEM のメッシュが 1m 程度になっても同じ記憶容量で対応できる。またボクセルでは、DEM と作設された路面、のり面を一体化できるので、森林作業道での森林作業のシミュレーションなどにも応用が可能であろう。

引用文献

- (1) ARUGA,K SESSIONS,J and AKAY,A (2005) : Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes : J. For. Res. 10(2):pp.113-123
- (2) 南方康・秋谷孝一 (2006) 森林土木ハンドブック, 林業土木コンサルタンツ : pp.1282
- (3) 酒井秀夫 (2004) 作業道, 全国林業改良普及協会 : pp. 281
- (4) 鈴木秀典・山口智・田中良明 (2011) 数値地図から求めた土工量の精度, 第 122 回日本森林学会大会学術講演集 CD-ROM.Pb1-82
- (5) 高木貞治 (1996) 解析概論, 岩波書店 : p.371
- (6) 谷尻豊寿 (1996) パソコンによる最新画像処理入門, 技術評論社 : p.176
- (7) 梅田修史・鈴木秀典・山口智 (2007) : 作業道路網の開設に関する一考察 : 森林利用学会誌 22(3) : pp.143-152

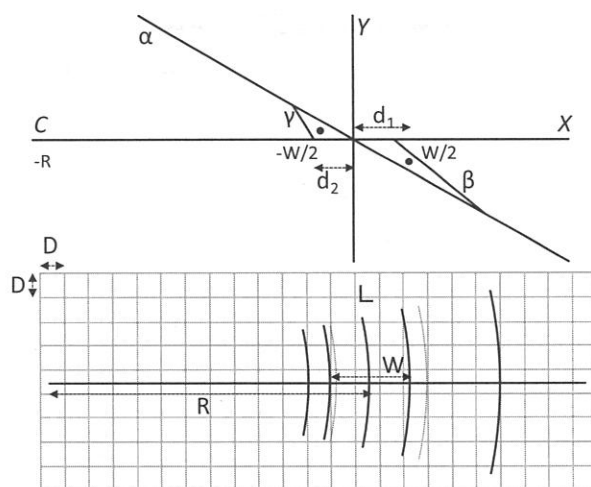


図-1 曲線部の断面図と平面図

Fig.1 Plan and cross section of curve

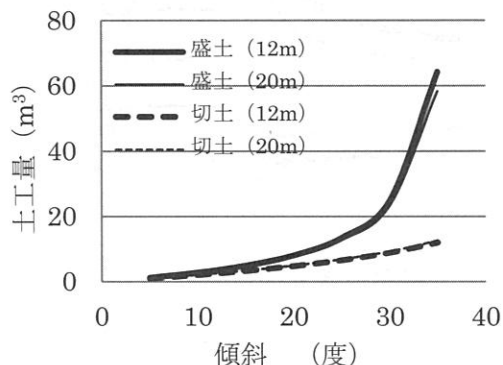


図-2 土工量 (尾根型)

Fig.2 Earthwork volume on ridge

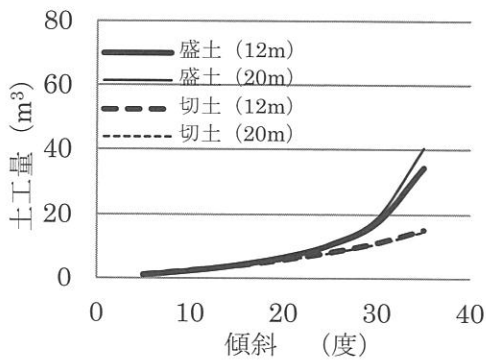


図-3 土工量 (谷型)

Fig.3 Earthwork volume in valley

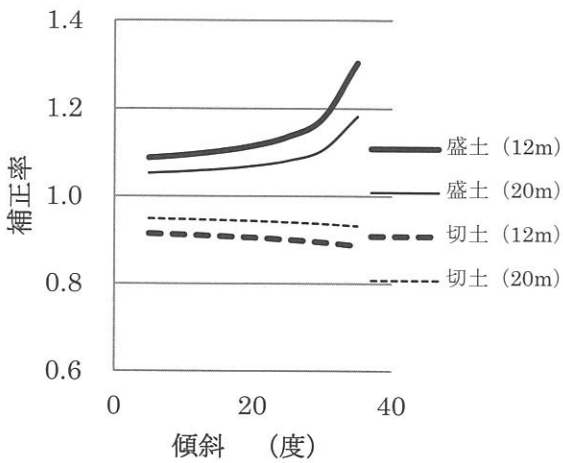


図-4 補正率 (尾根型, 道幅 3m)

Fig.4 Correction rate on ridge (R=3m)

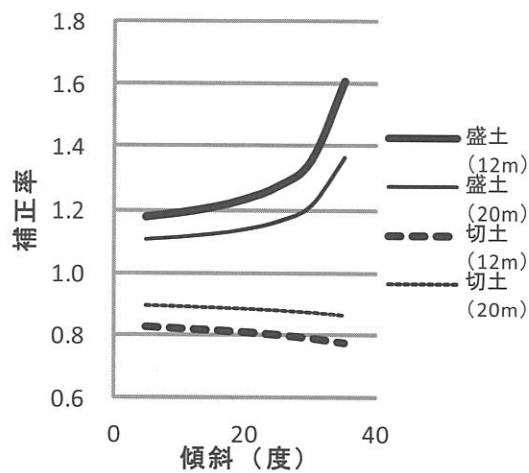


図-5 補正率 (尾根型, 道幅 6m)

Fig.5 Correction rate on ridge (R=6m)

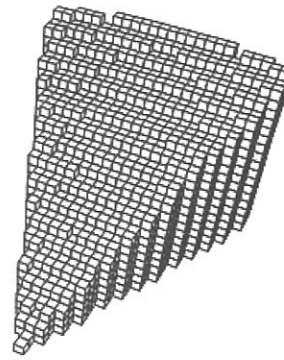


図-6 地山のボクセル

Fig.6 Voxels of terrain

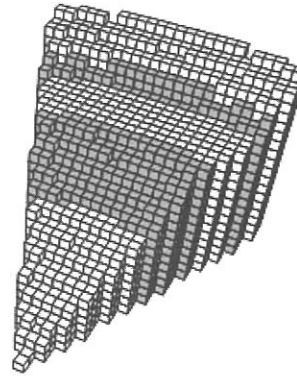


図-7 土工を行ったボクセル

Fig.7 Voxels of earthwork

表-1 ボクセルによる結果 (道幅 3m)

Table.1 Result of method using voxel (R=3m)

盛土量=17.396m³, 切土量=10.985m³

D (m)	算定値		誤差	
	盛土 (m ³)	切土 (m ³)	盛土 (m ³)	切土 (m ³)
1.000	7.000	11.000	10.396	0.015
0.500	11.375	11.250	6.021	0.265
0.250	14.109	11.000	3.286	0.015
0.125	15.705	10.988	1.690	0.003
0.063	16.528	10.982	0.867	0.004
0.031	16.963	10.984	0.433	0.001

表-2 ボクセルによる結果 (道幅 6m)

Table.2 Result of method using voxel (R=6m)

盛土量=54.585m³, 切土量=48.132m³

D (m)	算定値		誤差	
	盛土 (m ³)	切土 (m ³)	盛土 (m ³)	切土 (m ³)
1.000	35.000	50.000	19.585	1.868
0.500	42.375	48.250	12.210	0.118
0.250	48.328	48.219	6.257	0.087
0.125	51.365	48.190	3.220	0.058
0.063	52.951	48.141	1.635	0.009
0.031	53.774	48.132	0.811	0.000