

リアルタイム性を考慮した土量計算モデルに関する検討

日本国土開発株式会社 正会員 ○中村 裕希
日本国土開発株式会社 正会員 佐野 健彦

1. はじめに

平成 28 年に制定された ICT 土工に関する 15 の新基準では, UAV やレーザースキャナによる 3 次元計測を活用した出来形評価法や, 3 次元データを活用した具体的な土量計算法が示され, 既に多くの活用事例が報告されているが, 盛土の締固め品質管理の高度化に関しては言及されていない. UAV やレーザースキャナは, 信頼性の高いデータを取得できるが, 写真解析や点群処理が必要なことから, フィードバックにはタイムラグが発生する. 施工データを即時利用するといったリアルタイム性が要求される場合は, 15 の新基準に示される計算手法を単純に適用できない.

本稿では, 盛土の締固め品質管理の高度化といった応用展開を視野に入れ, マシンコントロールブルドーザに代表される ICT 建機の位置座標から接地部分の座標を抽出し, 簡易に算定できリアルタイム性を有する土量管理について検討した. 具体的には, 15 の新基準に示される土量計算法と比較して誤差評価によりその有効性を確認するとともに, 複雑な地表面形状への適用性と精度に与える影響について検討した.

2. 計算手法の概要

本計算モデルは, 対象範囲を図-1 のように x, y 座標を持つメッシュで分割し, 各メッシュ内に標高管理点を複数点設けた. 標高管理点は自身の平面座標における地表・基準サーフェスそれぞれにおける標高を取得し, FEM 等で利用されている Gauss-Legendre 公式と一般的な土量計算手法である平均断面法の 2 パターンの積分モデルを用いて近似計算することでメッシュ土量を計算した. 標高管理点は, 各積分モデルに合わせて配置した. 各点の標高は UAV 出来形管理要領に記載される「グリッドデータ化」の項目¹⁾を参考に, 点群データからは最近隣法で, TIN データからは TIN 法で取得した.

(1) Gauss-Legendre 積分モデル

Gauss-Legendre 公式は, 無次元化された自然座標系 $[-1, 1]$ において式(1)で表すことができ, 任意多項式 $f(x)$

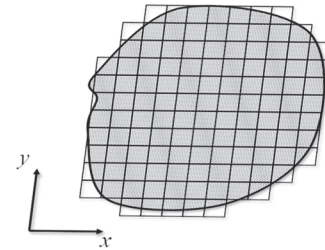


図-1 エリアのメッシュ分割

表-1 Gauss-Legendre関数の重み関数値

m, n	x_i, y_j	重み関数 W_i, W_j
1	0.000	2.000
2	± 0.577	1.000
3	0.000	0.889
	± 0.775	0.556

について $2n-1$ 次以下の多項式で近似できる場合に精度の良い近似解を得られる²⁾ことが知られている. 本検討では, 地表面上の平面座標 (x, y) における標高 h が, Legendre 多項式を用いて $h=f(x, y)$ と近似できると仮定した. ここで変数 (ξ, η) を用いて, $(-1 \leq \xi \leq 1, -1 \leq \eta \leq 1)$ で表される平面直角座標系を考える. 仮定により公式に適用される Legendre 多項式の直交性から前述の平面座標系における積分値は式(2)で表される. 本稿では, これを Gauss-Legendre 積分モデルと称する.

$$I = \int_{-1}^1 f(x) dx = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(x(\xi, \eta), y(\xi, \eta)) d\xi d\eta \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i w_j f(x_i, y_j) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに, m, n は ξ, η 方向の積分点数, x_i, y_j はメッシュ内の各積分点における x 座標及び y 座標, w_i, w_j は ξ, η 軸方向の各積分点における重み関数を表す. m, n の積分点数毎の重み関数を表-1 に示す. 本モデルの積分値は $m=n$ とし, メッシュ毎に前述の平面座標系に座標変換し, 式(2)によって計算した.

(2) 平均断面モデル

平均断面モデルはメッシュ内の各軸方向に標高管理点を等間隔にそれぞれ m, n 点設け, 一般的な平均断面法と同様, 標高管理点を通る断面において, 図-2 のように管理点の座標を通り, 線形的に変化するモデルと

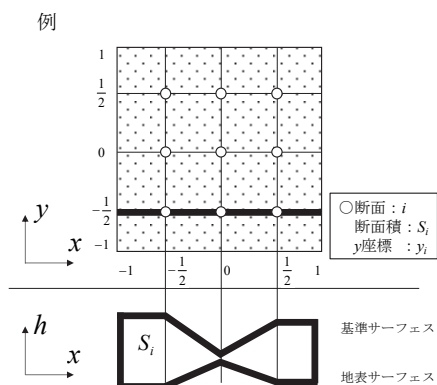


図-2 平均断面モデル

した。ただし、本検討では標高管理点数は $m = n$ とし、端点の標高は一定とした。本モデルの積分値は y 軸方向 i 番目の管理点を通り、地表サーフェス・基準サーフェス・メッシュ境界で囲まれる領域を断面 S_i と定義し、メッシュの一边の長さを w として式(3)で計算した。

$$V = \left(\sum_{i=1}^{n-1} (S_i + S_{i+1}) \frac{y_{i+1} - y_i}{2} \right) + (S_n + S_1) \left(\frac{w - y_n + y_1}{2} \right) \quad (3)$$

ここで、 y_i は i 番目の断面における y 座標を表す。

また、式(3)の第2項は断面両端部分の体積を示す。

(3) モデルを用いた検証方法

本検討では、土工現場の UAV 写真測量データから変換処理によって生成した測量モデルと計画図から 3 次元モデル化した TIN モデルに対して、前者を地表サーフェス、後者を基準サーフェスとする比較土量計算を行った。測量モデルには、生成した点群データと点群データを TIN に変換した TIN データを用いた。各積分モデルについて、各軸方向の管理点数は $n=1,2,3$ について検討した。 $n=1$ における Gauss-Legendre 積分モデルと平均断面モデルについては同値であるため省略した。

3. 各モデルによる計算結果

地表面形状が計算精度に与える影響を考慮し、平坦な箇所と急斜面等で複雑な地表面形状をした箇所の 2 パターンについて誤差評価を行った。誤差評価における真値には、TIN モデル間において精度の高い差分土量が得られるプリズモイダル法¹⁾を用いた。計算結果を表-2 に示す。表から、地表面形状によらず高い精度で反映できていることが確認できる。また、TIN データと比較して点群データは管理点の密度による影響を受けやすい傾向が見られる。さらに、積分モデルのメッシュサイズを変えた結果、表-3 の通り、 $n=3$ の Gauss-Legendre

表-2 計算結果(1mメッシュ)

地表サーフェスのデータ形式	地表面形状	土量区分	誤差(%)				
			Gauss-Legendre積分モデル			平均断面モデル	
			$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=2$	$n=3$
TINデータ	平坦	盛土部	0.01	0.29	0.28	0.24	0.29
		切土部	0.00	0.06	0.06	0.04	0.06
		全体土量	0.00	0.00	0.01	-0.02	0.00
	複雑形状	盛土部	0.00	0.11	0.11	0.09	0.11
		切土部	0.05	0.08	0.07	0.08	0.07
		全体土量	0.19	-0.01	-0.04	0.07	-0.04
点群データ	平坦	盛土部	1.06	-0.32	0.61	-0.32	0.05
		切土部	-0.42	0.18	-0.07	0.16	0.07
		全体土量	-0.79	0.30	-0.25	0.28	0.07
	複雑形状	盛土部	0.14	-0.16	0.17	-0.20	0.01
		切土部	-0.10	0.25	0.02	0.25	0.13
		全体土量	-0.69	1.24	-0.35	1.35	0.40

表-3 メッシュサイズの検討(全体土量)

地表サーフェスのデータ形式	地表面形状	メッシュの辺長(m)	誤差(%)				
			Gauss-Legendre積分モデル			平均断面モデル	
			$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=2$	$n=3$
TINデータ	平坦	25.00	6.145	-17.329	-3.547	-6.469	-8.567
		10.00	-11.621	5.985	-0.737	2.480	2.550
		5.00	2.480	-0.855	-0.274	0.247	-0.546
		1.00	0.000	0.002	-0.010	0.016	-0.001
		0.50	0.016	-0.010	0.002	-0.005	-0.003
		0.25	-0.005	0.001	0.000	0.000	0.000
	複雑形状	25.00	90.661	-16.750	6.791	-12.424	-10.271
		10.00	7.643	-0.669	-0.976	-1.826	0.105
		5.00	-1.826	-0.536	-0.920	-0.760	0.239
		1.00	-0.188	0.007	0.042	-0.070	0.043
		0.50	-0.070	0.030	-0.005	0.019	0.019
		0.25	0.019	0.000	0.003	0.005	0.001

積分モデルでは平坦部と複雑形状部両方で一辺 10.00m まで 1.0%以下、 $n=3$ の Gauss-Legendre 積分モデル以外の積分モデルでも一辺 5.00m 以下では 3.0%以下の誤差で計算できていることがわかる。

4. まとめ

本稿では、リアルタイム性を有する土量管理法を検討した。今回の検討範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 管理点を設けたメッシュを用いた土量計算では、一辺 1m の場合、点群と TIN データ共に精度良く土量を求められる。TIN データでは一辺 5m 以下のメッシュで、3.0%以下の高い精度で土量を求められる。
- 2) 「盛土の締固め管理要領」に示される転圧管理に用いるブロックと同じ 0.25m~0.50m のサイズでは今回の計算結果では全てのモデルで誤差 0.07%以下であり、本手法でも高い精度を有している。

今後は、ブルドーザ等による転圧管理に対して本計算モデルを適用し、沈下量の推定や検証等、締固め品質管理の高度化へ向けた応用展開を検討する予定である。

参考文献

- 1)国土交通省: 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), p.20, p.41, 2016.03
- 2)Jacob fish, Ted Belyt schko: 有限要素法 A First Course in Finite Elements, pp.104-108, pp.213-215, 2008