

I-23 縦断線形設計におけるデジタル地形データを用いた土量高速計算法

Fast Calculation Method of Earthwork Quantity for Vertical Alignments from Digital Terrain Data

山崎元也¹ 本郷廷悦² 比屋根一雄³ 谷田部智之⁴Motoya YAMASAKI¹, Teietu HONGO², Kazuo HIYANE³, Tomoyuki YATABE⁴

【抄録】日本道路公団では高速道路設計のコンピュータ支援に向け、工費や土工量バランス等を最小化する縦断線形最適化システムの研究を進めている。最適線形探索の過程では数十万本の縦断線形を生成し、デジタル地形データからそれぞれ土工量を計算する必要がある。従来のCADを用い人手で横断面を作成する平均断面法では、1線形の土量計算に日単位の時間を要し、多くの縦断線形を比較できなかった。本研究では、デジタル地形データから直接土工量を計算するセル平均法を開発し、土工量関数テーブルを作成することで、1線形の土工量を0.1秒未満で算出可能となった。既往設計例において平均断面法と比較し、本手法の有効性を検証した。

【Abstract】Japan Highway Public Corporation has been developing the "vertical alignment optimization system" to minimize construction cost and earthwork quantity balance that aims at computer support for highway design. In that system, it is necessary to calculate earthwork quantity from digital terrain data for millions of vertical alignments. We couldn't compare many vertical alignments, because it took days to calculate earthwork quantity of each vertical alignment by means of the former average cross section method. In this paper, we propose a new method that can calculate earthwork quantity only within one tenth second for each vertical alignment. By comparing with the average cross section method, we verified availability of our method as for the actual design.

【キーワード】縦断線形, デジタル地形データ, 平均断面法, 土量計算, DXF

【Keywords】Vertical alignment, Digital terrain data, Average cross section method, Earthwork quantity calculation, and DXF

1. はじめに

近年の情報処理技術の発展に伴って、ネットワークによる情報交換が一般化してきている。これを背景に、業務プロセス間や企業間でデータを円滑に交換し、再利用することにより、事業執行を効率化し、経費の節減を実現しようとする建設CALS (Continuous Acquisition and Life-cycle Support) という活動が活発化している。様々な情報の標準化が行われているが、日本国内の建設業界においてもCADデータ交換標準が開発され、設計図面などを電子データとして交換できる環境が整いつつある。

日本道路公団(以下、JHと記す)では、建設CALSの導入に向け、CAD (Computer Aided Design: コンピュータを利用した設計支援)による図面の電子化、つまり、デジタル地形データ(地形情報をCAD

で利用しやすい3次元データで表現したもの)の開発を進めている¹⁾²⁾。デジタル地形データの活用により地形の面積計算や土量計算などの数値計算、横断面図や縦断面図の作成を迅速かつ正確に行なうことができる。

高速道路事業のプロセスにおいて、高速道路の事業費に大きな影響を与えるのは、大まかな道路線形を決定する路線選定の段階である。道路線形の「コスト縮減」への対応は、単に建設コストだけの問題ではなく、道路構造令や設計要領などの規定を満足しながら、経済性、安全性、快適性、環境負荷の低減などの多くの評価項目をバランスよく満足した上で、渋滞解消、道路沿線の環境保全や安全性、走行性などの要求にも配慮したものでなければならない。

¹ 正会員, 工修, 日本道路公団 試験研究所 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1, TEL 042-791-1621, FAX 042-791-3717)

² 正会員, 日本道路公団 試験研究所

³ 工修, 株式会社三菱総合研究所 情報通信研究部 (〒100-8141 東京都千代田区大手町 2-3-6, TEL 03-3277-0750, FAX 03-3277-3479)

⁴ 工博, 株式会社三菱総合研究所 情報通信研究部

経験豊富な道路設計者であれば、豊富な経験から与えられた地形とさまざまな制約条件、高速道路への要求を考慮し、土工量バランスや安全性、快適性などを一定レベルまで確保できる縦断線形を試行錯誤の中から選定することができる。しかし、経験が乏しい道路設計者が線形設計をする場合は、いくつかの縦断線形を与えられた地形に対して設定し、縦断図と横断図を作成し、土量を求め、代替案を比較検討しなければならない。この方法は多くの時間と労力を要する。また、経験豊富な道路設計者であっても、最近の急峻な山岳地帯を通過する高速道路の線形設計においては、制約条件が厳しくなり、線形のわずかな変化が土工量に大きな影響を与えるため、最適な線形の探索には、多くの時間を要することになる。

そこで、JHでは最適設計の自動化を目標に「縦断線形最適化システム」の開発を進めている。従来の設計手法では、いくつかの線形のみを対象に評価を行い、最適なものを選択していたが、本システムでは、多数の線形について、自動的に評価を行なうことにより設計者の負担を軽減することを目指している。その実現のためには、まず実際の地形データを基に線形をシミュレートすることになるが、多数の線形について従来の評価方法を逐一適応することは実行時間的に困難である。そこで、現実的なシステムの実現のために、①線形の評価方法、②線形を評価するパラメータの一つである土量の高速算出方法、③遺伝的アルゴリズムを用いた最適縦断線形探索手法の開発を行なっている(図 1)。

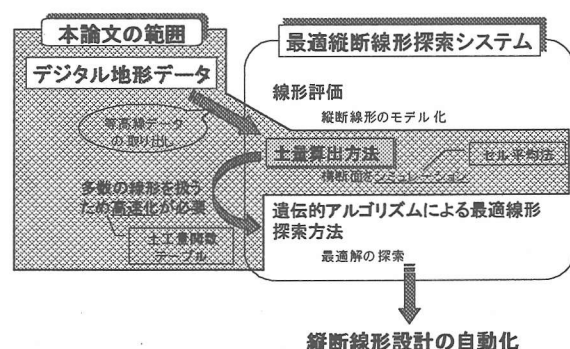


図 1 最適縦断線形システムの概略および本論文における高速土量算出法の位置付け

そのシステムでは、多数の線形をシミュレートして、それぞれを評価する。それぞれの線形について、従来の設計用CADと同様に、一定の間隔で横断面を作成し、切土盛土の断面積を計算する平均断面法により土量を算出することは、計算に時間がかかりすぎるため現実的ではない。そこで、本稿では、線形を評価するためのパラメータである土量を高速に算出するための手法である「セル平均法」および多数の線形を評価する際の高速化手法である「土工量関数テーブル」を提案する。

なお、本論文では、遺伝的アルゴリズムによる最適線形探索手法については扱わないものとする。

2. デジタル地形データ

道路設計CADで地形データの取り扱いを簡単にするため、等高線を含む地形図をデジタル化し、コンピュータで取り扱いが容易な3次元の数値データ(x, y, z座標)にする方法が研究されている³⁾⁴⁾。

「デジタル地形データ」は、航空測量で得られた地形情報(航空測量結果)を道路設計CADで利用できる電子データ化するための仕様である「デジタル地形データ作成要領(暫定案)」(日本道路公団試験研究所 平成11年2月作成、なお実証実験に適用)に基づいて作成されている。

「デジタル地形データ」には、次の特徴がある。

- ① 電子データのフォーマットに、現在、最も汎用性が高いDWG形式とDXF形式を採用
- ② 等高線、標高、道路、宅盤、田畑、凹地、水涯線、などは、3次元データである。
- ③ 主曲線、計曲線、標高点、2次元データ、グリッド線および図枠にそれぞれレイヤーを設定
- ④ 平面直角座標系を使用

現在の「公共測量作業規程」⁵⁾においては、数値地形データの表現方法として、等高線法と数値地形モデル法が採用されている。3次元CADによる道路設計を考えると、地形情報は数値地形モデルであることが望ましい。

しかし、数値地形モデルから自動標高抽出技術を用いて、等高線データを作成することは認められていない。(公共測量作業規程 第4編 第297条 地形データの運用基準)

このため、測量した地形を数値地形モデル法によ

り、地形を表現した場合には、等高線データを作成することができない。よって、「デジタル地形データ」の作成仕様では、測量した地形は等高線法によって表現することになっている。



図 2 デジタル地形データの例

(1) デジタル地形データのファイル構造

DXF (Data eXchange Format)形式は、多数のCAD 相互でデータ交換するために規格化された、共通ファイルフォーマットである。バイナリ形式ではなく、テキスト形式であるため、比較的容易に内部を解析し、必要な情報を取り出すことができる。

デジタル地形データのファイルフォーマットはAutoCAD R13 のDWG 形式と定められている。しかし、DWG 形式はAutoCAD特有のバイナリ形式であるため、他のプログラムでDWG形式を扱うのは面倒である。そこで、DWG 形式のデジタル地形データを一旦AutoCAD (今回はAutoCAD LT 2000 を用いた)で読み込み、それをDXF 形式で出力したファイルを対象とした。

DXF では、データはテキスト形式で表現されており、6つの部分で構成されている。等高線に関する情報が記述されているのは、このうちエンティティ部と呼ばれている部分である。ただし、必ずしも6つの部分があるわけではない。

また、DXF では、グループコードと呼ばれる整数のみの行と文字列、浮動小数点、整数などのデータを表す行の、2行1組で表現されている。例えば、6つに分けられる各部の先頭は次のようになる。

```
0
SECTION
2
```

ENTITIES

0 は各部の区切りを意味するグループコードで、組となる次の行にはキーワードが来る。ここではSECTION である。さらに、次の行に現れる 2 は名称を表す文字列を組とするグループコードで、HEADER やENTITIES などのキーワードが続く。各部の最後は、やはり区切りとなる 0 に続けて、SECTION の終りを示すENDSEC が続く。

なお、DXF 形式では、1行目がグループコード、2行目がデータとなり、2行で1組になっており、以後の説明では、グループコードとデータを合わせ、次のように1行にまとめて書くことにする。

```
0 SECTION
2 ENTITIES
```

(2) デジタル地形データの形式

デジタル地形データは、表 1のような定められた様式に従ってCAD で作成されていることから、地形データ中で必要とする図形情報に対応した画層(レイヤー)、線種および色を参照して、それぞれの条件にあったデータをDXF形式のファイルのエンティティ部から抽出する。

表 1 デジタル地形データの記述形式(一部)

地形図での名称	レイヤー	線の種類	色
計曲線	DPLN_LOCON	ポリライン	緑
主曲線	DPLN_HICON	ポリライン	黄
既存高速道路	DPLN_EXIST	ポリライン	マゼンタ
既存一般道	DPLN_EXIST	ポリライン	赤
建設物	DPLN_EXIST	ポリライン	シアン

線の一つであるLWPOLYLINE は多数の頂点を持つひと続きの線を書くのによく用いられる。そのため、等高線を多数持つデジタル地形データではLWPOLYLINE が推奨されている。図 3のような形式で、エンティティ部に記録される。デジタル地形データにおける等高線は同じx座標になるため、それぞれを表す各LWPOLYLINEでは、各頂点のx座標、y座標のみが記述される。

(3) 等高線データの抽出

実際には、このようなDXFファイル中からタグの配置パターンに基づき等高線(主曲線、計曲線)に関わる部分だけを取り出した。

実際のデジタル地形データを対象に、位置情報の

抽出アルゴリズムを適用した結果、ファイルサイズ約360MBのDXFファイルから、約18,000本の等高線と、約80万点の等高線頂点を抽出することができた。計算時間はペンティアムIII 800MHzのパソコンで約440秒であった。

0	LWPOLYLINE	
5	37	←ハンドル番号
330	1F	
100	AcDbEntity	
8	DPLN_LOCON	←属するLayer
6	Continuous	←線の種類(実線)
62	5	←色
100	AcDbPolyline	
90	54	←頂点の数
70	0	
43	0.0	←線の幅
38	696.0	←z座標
10	XXXXXXXXXXXX	←x座標
20	YYYYYYYYYYYY	←y座標
10		
20		
(頂点の数だけx, y座標の組が連続する)		
.....		

図 3 等高線の記述方法例

3. 土量算出法

抽出された位置情報を用いて、ある平面線形および縦断線形が与えられたときに、横断面を作成し、切土量・盛土量を算出するアルゴリズムを検討する。

(1) 土量の高速計算法（セル平均法）

セル平均法は、断面を毎回計算することなく、3次元の数値データ（x座標、y座標、標高）から直接、土工量を計算する手法である。

a) 路線沿いメッシュ

土工量の算出を容易にするために、図 4 のような道路の平面線形の中心線に直交し、中心線に沿ったメッシュ（以後、「路線沿いメッシュ」と呼ぶ）を考える。路線沿いメッシュの測点方向をL座標とし、法線方向をM座標とする。メッシュ間隔は測点方向(L)は横断面のピッチと同じ20m、法線方向(M)は2mとする。縦断方向の範囲は道路の始点～終点である。横断方向の範囲は、7段の切土でも入るように±100mとする。

計算の高速化のために、カーブ区間も直線区間と同様に、一つのセル（メッシュの1マス）を20m × 2mの長方形とみなす。この方法では、カーブの内側で土工量が実際よりも多めに、外側では少なめに計算される。しかし、円曲線の半径が十分に大きければ、その誤差は無視できる。また、道路中心線で対称な地形であればカーブの内外で誤差が相殺され、最終的な土工量の誤差は小さいと考えられる。

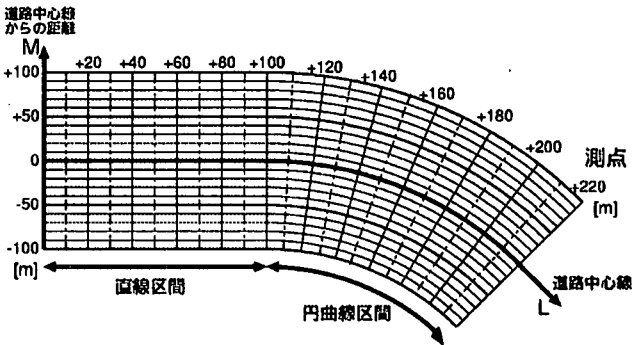


図 4 路線沿いメッシュ

b) セル内の平均地盤高の計算法

従来の縮尺1/1,000の地形図に相当するデジタル地形データは、標高1m間隔の等高線を数m間隔でデジタル化した折線データの集まりである。セル平均法では、折線ではなく各地点の標高を表すポイントデータの集まりであると考えられる。そして各セルの平均地盤高は図 5 に示すように、セル内に存在する等高線頂点標高の平均値として計算する。

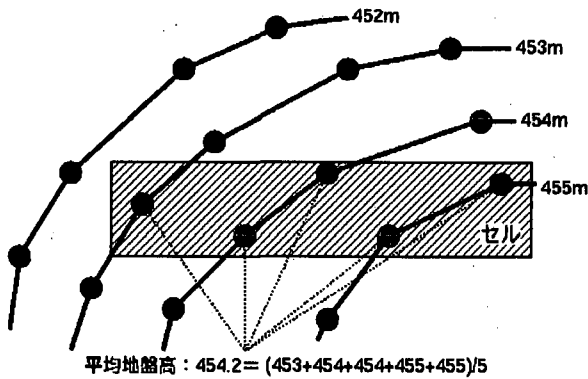


図 5 セル平均

c) 各区間の計算

セル内に存在する等高線頂点の判定は、測点の前後10mの20m区間ごとに行なう。一つの区間に帯状に並ぶ左右50個ずつのセルについて判定する。

①測点Pにおける単位方向ベクトルの計算

路線の沿ったセルの方向を決めるため、図 6に示すように、測点Pにおける接線方向の単位方向ベクトル e_1 (e_{1x}, e_{1y}) を、直前の測点S (s_x, s_y)と直後の測点T (t_x, t_y)を結ぶ方向として近似する。測点Sから測点Tへのベクトルを w (w_x, w_y)とすると、単位方向ベクトル e_1 は次式で表される。

$$e_1 = \frac{w}{|w|} = \left(\frac{w_x}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}}, \frac{w_y}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2}} \right)$$

道路が直線あるいは円弧であれば、 e_1 は測点Pの線の接線方向に完全に一致する。

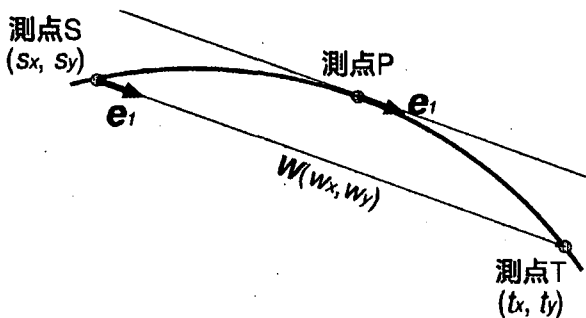


図 6 測点における単位ベクトル

図 7において、道路に垂直な単位ベクトル e_2 (e_{2x}, e_{2y}) は e_1 から求められる。

$$e_2 = (-e_{1y}, e_{1x})$$

②各等高線頂点の計算

すべての等高線頂点について、以下を繰り返す。
判定すべき等高線頂点を $Q(q_x, q_y)$ とする。

・等高線頂点Qの入るセルの判定

測点Pから等高線頂点Qへのベクトルを v (v_x, v_y) $= (q_x - p_x, q_y - p_y)$ とする。ここで測点Pを原点とする点Qの路線沿いメッシュ上の座標 (r_1, r_2) は、単位方向ベクトル e_1, e_2 との内積を用いて、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} (r_1, r_2) &= (v \cdot e_1, v \cdot e_2) \\ &= (v_x e_{1x} + v_y e_{1y}, v_x e_{2x} + v_y e_{2y}) \end{aligned}$$

セルの存在する範囲は区間長が20m、道路の両側100mであるから、 $-10 \leq r_1 < +10, -100 \leq r_2 \leq +100$ がいずれかのセルに入る条件となる。そして、点Qの入るセルの番号 n は次のように表される。ただし、 $[]$ は少数以下を四捨五入して整数にすることを意味する。

$$n = \left[\frac{r_2}{2} \right]$$

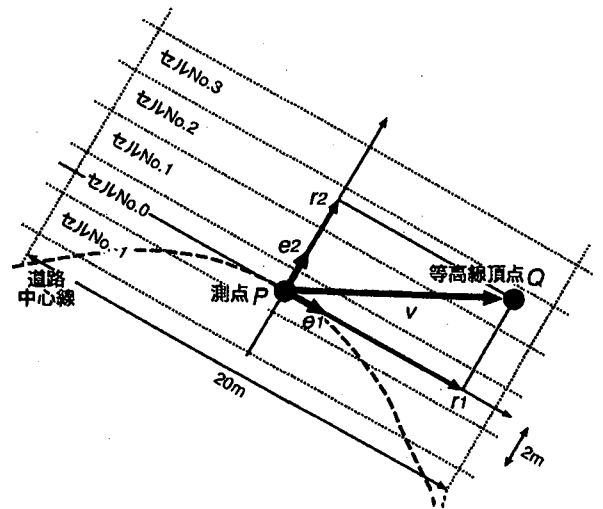


図 7 各頂点のセル位置

③各セルの平均地盤高の計算

すべてのセル n について、以下を繰り返す。

・等高線頂点標高の平均

セル n に入る等高線頂点が一つでも存在すれば、それらの平均標高をセル n の平均地盤高とする。

・平均地盤高の補間

もしセル n に等高線頂点が存在しなければ、平均地盤高が求められた最も近い両側のセルの地盤高

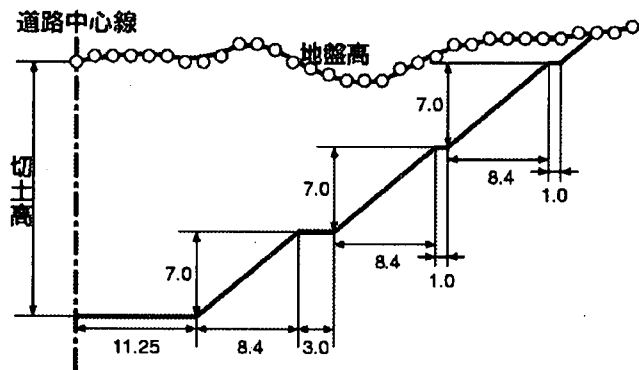
から線形補間により、セル n の平均地盤高を求める。

実際には、各区分ですべての等高線頂点を判定する処理は無駄が多い。あらかじめ等高線頂点を複数の領域に分割しておき、ある領域が測点 P から100m以上離れていれば、その領域に含まれるすべての等高線頂点を除外することができる。

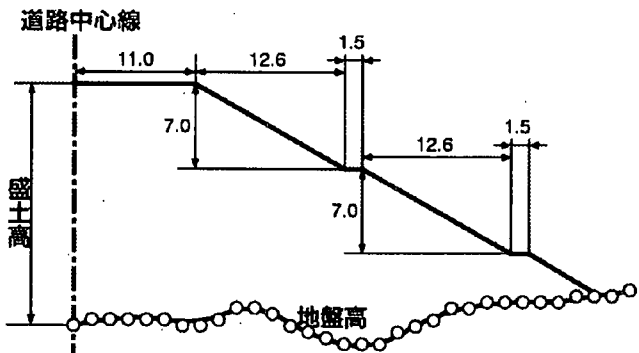
この方法の長所は、等高線頂点が十分密に存在すれば、セル内が傾斜地であっても複数の等高線頂点標高の平均値となるので、比較的正確に平均地盤高を求められることである。一方、等高線頂点の少ない平坦地では、周囲から補間しても元々等高線間隔(1m)以上の誤差が発生しないので、やはり誤差は少ない。

(2) 横断面に基づく土量計算

横断面上に一定間隔(例えば、2m間隔)で求めた標高値を用いて、土工量を計算する。道路中心線上の計画高と地盤高の差がプラスであれば盛土であり、マイナスであれば切土である。高速道路における切土および盛土ののり面は図8に示すような形状をしている。土工量は地盤高とのり面ではさまれた領域の面積として表される。



(a) 切土のノリ面



(b) 盛土のノリ面

図8 切土と盛土ののり面

この面積を求めるには、切土・盛土ののり面の高さを道路中心線から2m間隔であらかじめ求めた「のり面高さ表」(表2)を利用する。ある切土高・盛土高が与えられたとき、計画高と地盤高の差を道路中心線に近い方から順に計算し、のり面高さ表をチェックする。切土高・盛土高を越えたところでのり面と地盤が交わることになるので、それまでののり面標高(=計画高-のり面高さ)と地盤高の差を積分すれば、平均断面法による同じ土工量を得ることができる。

表2 のり面高さ表

道路中心線からの距離[m]	2	4	6	8	10	12	14
のり面高さ(切土)[m]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	2.202
のり面高さ(盛土)[m]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.556	-1.667

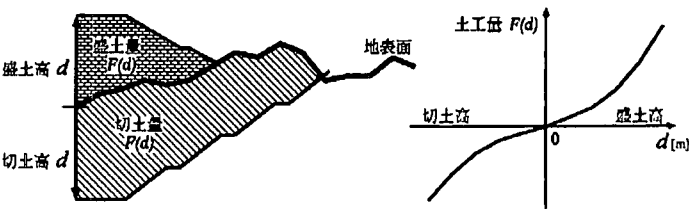
道路中心線からの距離[m]	16	18	20	22	24	24	...
のり面高さ(切土)[m]	4.792	6.453	7.000	7.000	8.125	9.792	...
のり面高さ(盛土)[m]	-2.775	-3.888	-5.000	-6.111	-7.000	-7.000	...

(3) 土工量算出のための土工量関数テーブル

縦断線形検討では、多数の縦断線形を生成し、その都度土工量が繰り返し計算される。つまり、各測点について、縦断計画高と縦断現況地盤高(道路中心線における現況地盤高さ)の差 d [m]から土工量 $F(d)$ [m^3]を高速に計算できる必要がある。平坦地であれば数式として与えることもできるが、地表の凹凸があるために毎回セルの縦断現況地盤高にアクセスしなければならない。

そこで、すべての20m区間について、盛土高(切土高) d をある間隔ごとに求め、土工量関数 $F(d)$ をあらかじめ数値計算しておく。その例を図9に示す。

図9 土工量関数



その結果を表3のような土工量関数テーブルに格納する。この場合、 d を1mとしている。このようにすれば土工量は、土工量関数テーブルにアクセ

スするだけで求めることが可能になる。切土は7段49m, 盛土は4段28mまでとした。

測点	切土[m]					盛土[m]				
	-49	...	-2	-1	±0	1	2	...	28	
80+40										
80+60										
80+80										
...										
284+40										

表 3 土工量関数テーブル

4. 提案手法と既往設計例との比較

(1) 比較検証対象とした既往設計例

既往設計と比較検証した実験対象は日本道路公団佐久工事事務所で実施した道路概略設計(1/1,000)中部横断自動車道佐久南IC～八千穂ICの約14kmの区間である。対象区間のデジタル地形データの具体的数値を表4に, 既往設計の計画高および当該路線の地盤高を図10に示す。道路両側約300mの範囲の地形がデジタル化されている。デジタル地形データは等高線を約18,600本含み, 約80万の頂点があり, DXF形式で約360MBのファイルサイズを持つ。

表 4 中部横断自動車道の佐久南IC～八千穂IC

区間のデジタル地形データ

区間	佐久南IC～八千穂IC
測点	80+00～227+40
区間点数	738
等高線数	18,644
等高線上頂点数	794027
ファイル	約355MB(DXF形式)

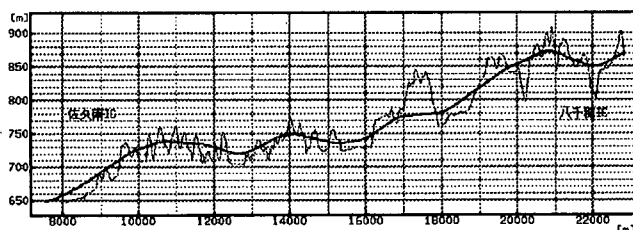


図 10 対象路線の地盤高と計画高

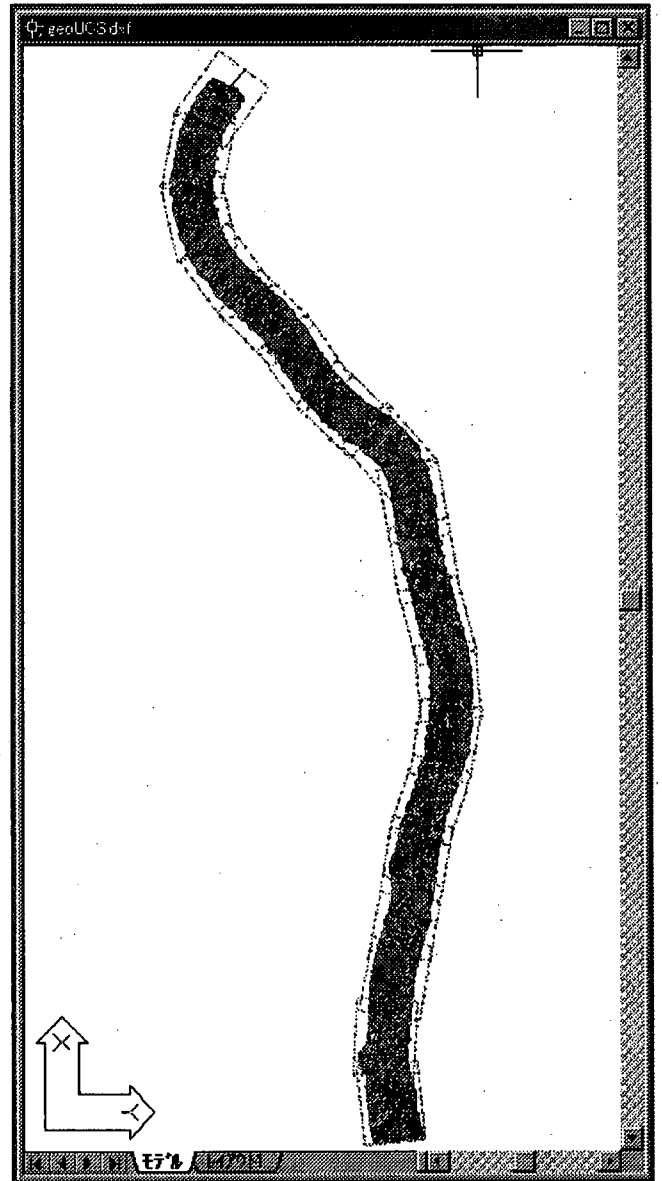


図 11 対象区間の地形データ

(2) 土量算出手順

土工量の算出までは, 以下の5つのステップで行った。これらは既往設計データに基づき, すべて自動的に計算できる。

[Step1] 等高線頂点の取り出し

デジタル地形データのDXFファイルは等高線以外にも建物や河川などの情報を含む。等高線頂点座標だけを取り出す前処理である。

[Step2] 道路沿いメッシュの地盤高の作成

既往設計の平面線形を用いて, セル平均法により道路沿いメッシュの各セルについて平均地盤高を計算する。

[Step3] 土工量関数テーブルの作成

道路沿いメッシュの平均地盤高から, 各区間の土工量関数テーブルを計算する。

[Step4] 土工量の算出

既往設計の計画高を用い、各区間の土工量を土工量関数テーブルから検索する。

[Step5] 横断図の作成

既往設計の計画高を用い、道路沿いメッシュ地盤高から各区間における横断図を作成する。

(3) 土量算出結果

表 5に、上記の手順に従って算出した土工量関数テーブルの一部を示す。盛土4段あるいは切土7段で横断現況地盤高に達しない場合には、橋およびトンネルになる。

(4) 既往設計例との比較

a) セル平均法により算出した地盤高

図 12にセル平均法で求めた道路中心における地盤高と既往設計時に得られた縦断現況地盤高を示す。縦断現況地盤を従来の平均断面法とセル平均法で求めた場合について評価した。738個のセルにおける地盤高の平均誤差は-0.03mであり、標準偏差は0.98mであった。95.4%のセルは±2m以下の誤差に収まっている。

b) セル平均法による横断図

既往設計データを用い、738区間のそれぞれの横断図を作成し、土工量を算出した。その一例として、図 13に測点140+00における横断図を示す。ここでは、縦断現況地盤高が776m、縦断計画高が748mであり、西側3段東側4段の切土が必要である。

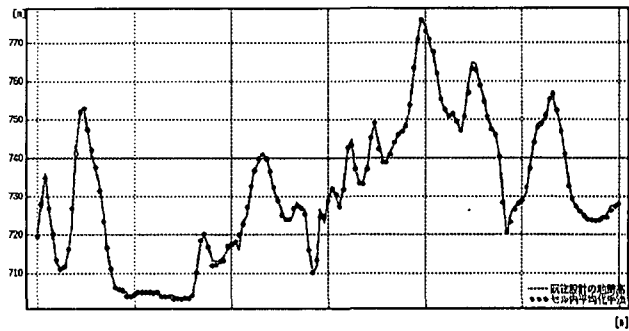


図 12 セル平均法により求めた現況地盤

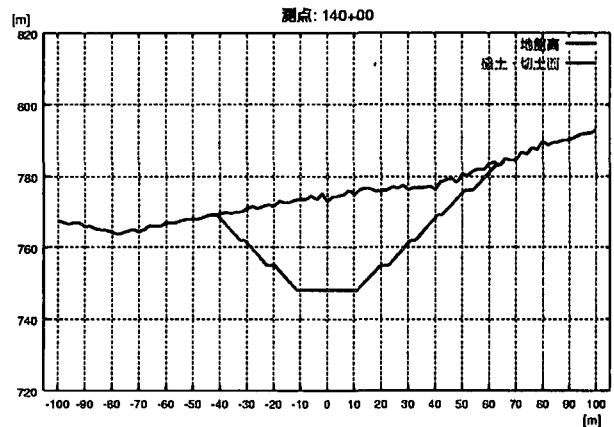


図 13 セル平均法で求めた横断面 (測点 140+00)

表 5 土工量関数テーブル[単位: m³]

測点	切土 [m]												± 0	盛土 [m]							
	-48	-44	-40	-36	-32	-28	-24	-20	-16	-12	-08	-04		+04	+08	+12	+16	+20	+24	+28	
140+00	トン	トン	トン	トン	2457	1961	1522	1138	821	557	335	159	35	75	242	483	798	橋	橋	橋	
140+20	トン	トン	トン	トン	2228	1758	1353	1003	703	451	248	100	11	132	328	595	916	1300	橋	橋	
140+40	トン	トン	トン	トン	2177	1714	1309	977	685	438	237	91	16	143	343	611	942	1333	橋	橋	
140+60	トン	トン	トン	トン	トン	1866	1443	1071	747	467	249	87	12	145	325	559	860	1213	橋	橋	
140+80	トン	トン	トン	トン	トン	トン	トン	1249	889	585	337	149	7	80	270	486	767	1089	1464	橋	
141+00	トン	トン	トン	トン	トン	トン	トン	1223	797	501	271	100	16	154	353	598	900	1253	橋	橋	
141+20	トン	トン	トン	トン	トン	トン	トン	1252	841	542	310	128	7	148	352	616	940	橋	橋	橋	
141+40	トン	トン	トン	トン	トン	トン	1670	1241	875	575	338	145	6	163	388	668	1003	橋	橋	橋	
141+60	トン	トン	トン	トン	トン	2278	1811	1384	1006	683	420	215	53	99	315	577	897	橋	橋	橋	
141+80	トン	トン	トン	トン	トン	2181	1705	1273	891	563	303	127	8	110	293	549	871	橋	橋	橋	

※ トンは「トンネル」を意味する

単位: [m³]

c) 計算時間

各手順にかかった計算時間を表 6にまとめた。計

算に使用したコンピュータは、DOS/Vパソコンである。CPUはペンティアムIII 800MHz、メモリ256MB、ハードディスク 70GB を搭載している。ソフトウェアはスクリプト言語PERLおよびC言語で開発した。OSとしては、Windows98/NT/2000 および Linux を利用可能である。

4つの計算手順のうち、デジタル地形データから等高線頂点の取り出しが約440秒と最も時間がかかった。これはDXFファイルが計算に不要な標高以外のデータや各種の属性データを含むためファイルサイズが巨大になり、ハードディスクからのファイルの読み込みに時間がかかるためである。セル平均法によるメッシュ地盤高の計算は約180秒であり、土工量関数テーブルの作成は約10秒を要した。

しかし、最終的な土工量の算出および横断面の作成はわずか0.1秒以内で完了した。従来は、各測点ごとに毎回横断面を作成し、土工量を算出していたのに対し、考えられる横断面をあらかじめ作成し、セル平均法を用いて土工量を求めておくことができる。それぞれの線形では、土工量関数テーブルから計画高に対応する値を検索するだけであるため、どの線形についても高速に土工量を求めることが可能になっている。

表 6 計算時間

処理	計算時間[秒]
Step1: 等高線上の頂点抽出	440
Step2: メッシュ地盤高の算出	180
Step3: 土量関数テーブル生成	10
Step4: 土量算出	0.1 以下
Step5: 横断面生成	0.1 以下

d) 計算精度

土工計画では、切土土工量算出の精度が重要である。そこで、大量の切土土量が発生するため、従来から誤差が大きくなりがちな複雑な地形を持つ切土区間の土工量（切土部）をセル平均法と平均断面法で求め、その精度を比較した。まず、ある区間の切土土量を1m間隔で平均断面法により求め基準値(m³)とした。次に、各切土区間について、測点間隔20mで、セル平均法と平均断面法により、切土土工量(m³)を算出し、先に求めた基準値との差を計算

し、その差を基準値で割って誤差(%)とした。その結果を表 7に示す。

表 7に示したように、切土土工量を従来の平均断面法で算出した場合、約±2%程度の誤差が発生している。セル平均法で算出した場合でも、誤差の範囲は約±2%程度となり、地形が複雑に変化する切土区間においても、平均断面法と同程度の精度を確保でき、十分実用性があることが確認できた。

表 7 複雑な地形における平面断面法とセル平均法の精度比較

地点	精密値[m ³]	平均断面法[m ³] (誤差 [%])	セル平均法[m ³] (誤差 [%])
A	167,609	167,331 (-0.166%)	165,028 (-1.540%)
B	108,554	105,989 (-2.362%)	108,934 (0.400%)
C	95,584	96,129 (0.503%)	95,840 (0.267%)
D	58,376	58,260 (-0.199%)	57,578 (-1.367%)
E	129,997	131,712 (1.319%)	130,314 (0.244%)
F	136,529	136,375 (-0.113%)	134,828 (-1.246%)
G	75,426	73,208 (-2.941%)	74,548 (-1.16%)

本手法の最大の特徴は、土工量を繰り返し計算する場合において、一回の計算時間が極めて短いことである。従来ならば、道路設計CADソフトで数分かっていた横断面の作成と土工量計算が、Step1～3の前処理を終えた二回目からは、ほぼ瞬時に完了する。

5. まとめ

本稿では、3次元の数値データで地形情報を表したデジタル地形データと土量計算を高速化するため、セル平均法を考案し、その実用性を検討した。得られた成果を要約すると、以下のようになる。

(1) 土量計算の高速化

デジタル地形データとセル平均法により、従来の道路設計CADを使用した場合と比較してはるかに早い時間内で土量を求めることが可能であることが確認できた。

(2) 道路設計CADによらない土量計算

本手法を用いることにより、土量計算には高価な道路設計用専用CADを用いることなく、汎用パソコンにより短時間で算出することを可能とした。

今後解決すべき問題点として次の2点があげられる。

・セル内の平均地盤高の精度低下

セル平均法においては、あるセルの内部を等高線が横切るにも関わらず、等高線頂点が存在しない場合には、その等高線データが当該セルの平均地盤高に反映されないことがあるので、今後の検討事項としたい。

・土工量関数テーブルの精度

今回セルの横断面を2mピッチで表し、盛土切土の水平部分や斜面形状が誤差となるため、ピッチについては検討を行っていく必要がある。

今後は本手法のいくつかの問題点を解決し、道路計画の最適化システム構築を実現したいと考えている。

謝辞

最後に、本研究を行なうにあたり、ご協力を頂いた北海道大学大学院、加賀屋誠一教授、東京大学空間情報科学研究センター、柴崎亮介教授をはじめ皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山崎元也・本郷廷悦・高橋広幸・安達伸一・大友正晴・加藤哲：新しいDMデータ仕様による道路設計CADへの活用と今後の展開，土木学会論文集，No.674/IV-51, pp.73-82 (2001)
- 2) 田中克則・高橋広幸・加藤潔：建設CALSを目指した道路設計図面の電子標準化に関する研究，土木情報システム論文集，Vol.7, pp.49-56 (1998)
- 3) 新井伸博・雑賀康治・岡林隆敏：数値地形モデル (DTM) の道路設計への適用，土木情報システム論文集，Vol.7, pp.153-160 (1998)
- 4) 村上修一・田中克則・加藤潔：JH技術業務におけるDTM (数値地形モデル) の活用に関する調

査，日本道路公団試験研究所報告，Vol.34 (1997)

- 5) 建設省公共測量作業規程，(社)日本測量協会 (1996)
- 6) 落合重紀，新DXFリファレンスガイド，日経BP社