

# 道路の自動設計\*

—特に Digital Terrain Model の利用方法—

Prof. Dr. H. Kasper\*\*

## 1. 自動設計のための基礎条件

写真測量と自動データ処理および自動製図とを組み合わせる道路の自動設計システム——いわゆる Integrated Highway Design System——は、すでにいくつかの国で実用化されている。しかし、この方法はすべて完成されたわけではなく、まだ改良し、また解決しなければならない、いくつかの問題が残されている。そのうち最も重要なものは

(1) 一般的な地形の数値による表現の方法に関する問題

(2) 入りくんだ構築部たとえばインターチェンジや交差部などの形状の完全な記録の仕方などである。

Digital Terrain Model については、写真測量および補足的に行なう地上測量によって、どうすれば正確かつ経済的に Digital Terrain Model を完成できるか、いかに言えば、Digital Terrain Model の各点をどのように配置すれば、それらの中間にある点の内挿が希望どおりにできるかということである。中間点の内挿を行なうに当っては、つぎのことが要求される。

- (1) 新しく内挿された点が十分正確であること
- (2) 内挿のための計算が経済的にできること

正確さは、モデルの点の網の密度によって左右されるばかりでなく、地形が不規則に変化する、たとえば、崖、突出部などの部分をどのように記録するか、などによっても左右される。

経済性も非常に重要で、これは地形の状況によるとい

\* 本論文は、土木学会講演会のために、特に寄せられた論文の邦訳である。

\*\* スイス・チューリッヒ工科大学 (ETH) 教授。道路技術者にはクロソイド表の作製者として有名であるが、写真測量としては航空三角測量の権威であり、ドイツ道路学会における写真測量、および電子計算の道路設計への利用に関する研究委員会の委員長として新しい方法の開発に貢献している。

うより、むしろ使用する電子計算機の能力と密接な関係がある。たとえば、ヨーロッパのいくつかの計算センターでは IBM 1620 を用いているが、この計算機では不経済であったり、不可能な計算でも、パリの国立地理院の用いている IBM 7094 では、きわめて簡単な計算であることが多い。このように、内挿の経済性を考える場合、前提条件を考慮して検討することが必要である。

モデルを構成する点の測定精度についても、十分考慮しなければならない。どんな問題でも、その決定に当たっては、それぞれの国で取り扱いの基準に違いがある。土工量を決定するために必要な諸元に要求される精度を例にとっても、それは国によっていろいろで、横断面の測定にフランスでは標準偏差として  $\pm 20$  cm と規定しているのに対し、スイスでは  $\pm 5$  cm と規定している。写真測量を行なうものにとって  $\pm 20$  cm の精度は容易に得られる値であるが、 $\pm 5$  cm となるときわめて困難な作業となる。

ただ、一般的にいえることは、モデル全体としての定誤差があると、後でも述べるように、これの2倍以上の偶然誤差が含まれるよりも、結果的には悪い影響が生ずる。したがって、モデル点を測定に当たっては、定誤差の含まれないよう十分注意して作業されなければならない。

西ドイツの国際共同実験および著者の経験から、モデル点の測定に写真測量を利用する場合、つぎのような指針が必要であるという結論が得られた。

(1) Digital Terrain Model をつくる点の網は、密度の高いものであることが必要である。

(2) 自然であると人工であるにかかわらず、骨組となる特徴的な場所は、適当な密度の点の配置を必要とする。

(3) 高さの測定に定誤差を防ぐために、およそ  $\pm 2$  cm 以内の精度で標定点を設け、これに標識をつける。

(4) 植生の状態を十分に考慮しなければならない。

インターチェンジや立体交差の部分のように、こみ入ったところの土工量を計算するには、表層土を取りのぞいて再撮影することが望ましい。撮影は、草の茂った夏より、冬か春に行なうのがよい。

植生が一樣な高さのところでは、これを考慮して計算することができるが、植生の高さは撮影時に測定しておかねばならない。

## 2. 数値写真測量に基づく土量算定の誤差

ある地域を、規則正しく配列した点の網でおおって地形を近似して行く場合を考えよう。このような方式によると、写真測量で点を決めるとき、すべての操作は、走査する一方に沿って順次点を測定して行くことになるから、地形が一樣であれば、すべての点の近似はきわめて精度のよいものであることが期待できるであろう。

このように点の配置にすると、

(1) 各点に生ずる偶然誤差は、実体測定を行なうとき、測標をセットする際に生ずるもので、これは全部を含めて高さの標準誤差  $\mu_p$  として表わすことができる。

(2) 横断面のように点のグループを取り扱おう場合には、各グループごとに再三高さの標定基準点に結合することができるから、その結合に際する誤差として、各グループごとに横断面としての偶然誤差が加わる。これを標準誤差  $\mu_q$  で示す。

点が格子状に配列されている場合、横断面の間隔を  $4L$ 、一横断面上の各点間の距離を  $4B$  とし、それぞれ  $m+1$  点を含む断面が  $n+1$  ある場合、幅  $B$ 、長さ  $L$  の区域にわたって土量を求める際に生ずる偶然誤差は、写真測量による高さの測定にともなう偶然誤差だけを考えると、

$$M_V = \pm B \cdot L \cdot \frac{1}{\sqrt{m \cdot n}} \sqrt{\frac{\mu_p^2}{m} + \mu_q^2} \dots \dots \dots (1)$$

高さの測定にともなう定誤差を  $S$  とすれば、土量の定誤差  $S_V$  は式 (2) で表わされる。

$$S_V = B \cdot L \cdot S \dots \dots \dots (2)$$

( $S$  は関数で表わすこともある)

式 (2) から、土量に生ずる偶然誤差は、点の密度が増すにわたって、その点数の平方根に反比例して減少することがわかる。いま幅 100 m、長さ 1000 m の区域をとり、点間隔を 10 m、点の標準誤差を  $\pm 10$  cm、断面としての標準誤差を  $\pm 5$  cm とすると

$$M_V = \pm 100 \times 1000 \times \frac{1}{\sqrt{10 \times 100}} \times \sqrt{0.035} = \pm 190 \text{ m}^3$$

となる。

全測点に 5 cm の定誤差があれば、土量には  $5000 \text{ m}^3$  の誤差が生ずることになる。偶然誤差にくらべてきわめて

大きい値であることがわかる。したがって、土量計算にあたっては写真測量にともなう定誤差の原因を探究し、できるだけ取りのぞくことを考えなければならないのである。

このことは、Digital Terrain Model についてもあてはまる。

## 3. Digital Terrain Model から新しい点を内挿する方法

従来、道路中心線を決めるのに横断面を利用してきた。この方法にかわって、われわれは Digital Terrain Model を使おうとしている。これは、中心線を、その高さに関してでだけではなく、平面位置に関しても、随時変更ができるようにするためである。新しいルートが選定されるごとに、新たに横断が必要となるが、そのたびに全面に再測量をするという手数を省いて、既知の断面をつかって、新しい横断を内挿計算によって決めて行くのである。このような計算は現在の電子計算機の能力からすれば、きわめて簡単な作業である。

しかし、この場合、なぜ最初の横断を基本に使うのか？ そうすれば、他の方向にとった断面は同じ精度では現わせないのではないか？ という疑問が起こるだろう。

このような問題を補なう方法として、全域を一樣に配置した点でカバーし、人工によるまたは自然の不規則な地形の変化部に対しては、別に一連の点でこれを表現し、補充することを考えなければならないだろう。

いずれにしても、Digital Terrain Model を道路設計に用いる場合には新しい点を、いかに正確にかつ経済的に内挿して求めるかを考えなければならない。この方法について、ここ数年いろいろな方法が提案されていた。そのうち最も重要と思われるものについて検討しよう。

### (1) France で開発された方法

フランスでは、すでにこの方法を実際の目的に採用している。フランスでは、最初の一般計画は 1/20 000 の地図でなされ、まず予定路線が描かれる。詳細な設計を行なうために、中心線の両側 150 m の区域の 1/2 000 の地図が縮尺 1/8 000 の航空写真からつくられる。各点の高さの精度は  $\pm 15 \sim 18$  cm であるから、内挿点の精度はおおよそ  $\pm 20$  cm とみてよい。フランスでは、これ以上の精度は期待していない。

この写真で、幅約 1200 m がカバーされるから、道路中心線が相当移動するようなことがあっても、十分この写真で作業が行なえる（この点についてドイツでは 1/4 000 の写真を使い、幅約 800 m をカバーするようにしているが、細部の観察には、この方がより容易である）。

フランスでは航空三角測量は使用されない。中心線の両側約 600 m の距離にある地籍用の境界杭に標識をつけ、これを地上の標定点として使用する。しかし、中心線の近くには、新しくいくつかの標識をおくことが望ましいとしている。

これら地上標定点の精度は、 $x, y$  とも  $\pm 30 \sim 40$  cm、高さで  $\pm 15$  cm 程度であるから、それほど高くはない。作図はつぎの2段階になされる。

(1) 1 m コンターの 1/2 000 図の作成。必要などころでは現地補測の後 1/1 000 に拡大される。

(2) 地図上で 1 cm 間隔、現地では 20 m 間隔に digital model 用の点を配置する。これは 1 ha 当り 25 点の割合になる。不規則な地形のところでは、点を 1 ha 当り 40 点に、12.5 m 間隔にする。これらの点は理論上から決められるものではない。谷、崖、突起部など地形の状況を判断して決められる。

これらの点の座標は、連続して 5 チャンネル コードでパンチ テープに記録され、続いて IBM パンチ カードに 1 点ごとに転写される。もちろん同時にタイプによって数字でも記録される。

1/2 000 地形図の図化と点の記録に、1 ha 当り 1 時間かかる。各点の高さの精度はおよそ  $\pm 20$  cm であるが、植物の茂っているところでは、もっと精度が落ちる。

等高線の描画のできないような森林地帯では、地上測量で補足し、コンター図から点の平面座標を自動的に移しとって digital model をつくる。しかし、このような方法では、どうしても精度の低下は免がれない。

最後に、すべてのモデル座標は、平面位置に関しては一次のコンフォーマル変換により、高さに対しては Z 軸に平行に移動させて、地図の統一した座標系にするように座標変換される。この場合、図化した結果に正確に一致するようにするため、対地標定には手を加えない。

この変換計算は IBM 計算機で行ない、各点ごとにパンチ カードがつけられる。

フランス国土地理院では、つぎのように地形図図化が行なわれた。

1963 年 道路延長 18 km について 500 ha

1964 年 道路延長 200 km について 6 000 ha

1965 年 道路延長 440 km について 13 000 ha

以前には、在来の cross section method が用いられたが、この方法は道路の最適化には十分活用できないので、これに代って digital terrain model が用いられた。横断面を内挿するには、道路の諸要素を計算機に入れば自動的に計算され、 $x, y$  の座標が与えられると、その点の Z 座標はその近くのすでに測定されている点 (terrain point) からつぎのような方法によって自動的に計算される。すなわち、新しい点のまわりのいくつかの terrain

points から、最小自乗法によって二次曲面をつくる。最小自乗法の計算は、terrain points と二次曲面上の点の間の距離に重みを付け、これの 2 乗の総和が最小になるという条件で行なわれる。重みは新しい点とそれぞれの terrain points までの距離に反比例するものとして決める。

このようにして求めた新しい点の高さの誤差は、普通の地形の場合  $\pm 15$  cm 程度であった。この精度は terrain model をつくる点の密度が高いほどよくなり、また、写真から点の位置を測定する技術者の熟練の程度によっても支配されるが、内挿計算の影響を受けることは少ない。

現在一つの点を決めるのに、20 点ぐらいの terrain points が使われる。そして、計算された点の値が許容量以上の大きいちがいがああるものに対しては、この点は写真測定の際の誤差が含まれるものとし、その重みを 0 として計算から除外する。さらに、最も近い 6 点について、Student 検定を行ない standard error を取りのぞく。このような統計的な検定が行なわれた後、新しい一つの点の値が決定されるのである。

しかし、このような方法を行なっても、たとえば、植生または絶対標定の不完全さのために写真測定に生じた定誤差は取りのぞくことはできない。

IBM 7094 Model 2 を用いると、この計算は 1 分間に 1 000 点可能である。したがって、この程度の能力とスピードをもつ計算機を用いることができ、はじめてこのような内挿が可能であるといえる。

中心線の計算は、つぎの二つのプログラムによって行なわれる。まず最初に、あらかじめ定められた直線、円、クロソイドの組み合わせからできている中心線について幾何要素を計算する。縦断は、直線と放物線からなっている。このプログラムを TE·GI “Trace’s Electroniques en Geometrie Imposee” (与えられた線形要素にもとづく中心線) と呼ぶ。第二のプログラムは、線形要素を変えて最適化を行なうためのものである。これを TE·GO “Trace’s Electroniques en Geometrie Optimalisee” (最適化された中心線) と呼ぶ。

最初のプログラムでは、中心線の座標、標準断面に対する路盤の座標、土工量を計算する。したがって、ここで横断面の各点の位置および地面との交点の位置が、すべて計算される。

また、必要に応じて、平面図、縦断面、横断面、透視図も自動的に描かせることができる。

最適設計のプログラムは、現在完全にできあがっていない。路線の経路をいろいろ変えて、最適路線を決定する問題について、その可能を見出すべく努力がなされている。

さらに、普通の Digital Terrain Model の地形に関する幾何学的諸量に、地質または土質等の要素を付け加えてつくった、Digital Super Terrain Model の開発についても研究が進められている。

Mr. Bonneval によるフランスの道路設計に関する報告は\*\*\*、きわめて興味のあるものである。しかし、さらに広く利用するために、フランスの内挿法を基礎に、これをさらに簡単にした方式を考えることも可能であり、必要でもある。

### (2) Prof. Miller (MIT) の提案

すでに数年前、MIT の Prof. Miller が、路線選定のための Digital Super Model を提案した。しかし、実際の成果についてはまだその報告がない。

とにかく、純粋な幾何学的な部分は予備設計の段階では非常に有効であることは確かであるが、Prof. Miller の提案は、現段階では道路技術者より、むしろ測量の中でも特に理論専門家に多くの関心をもたれるものと思われる。

### (3) Sweden の方法

Sweden の Nordisk ADB の Terrain Line System は、全く異なった考え方によっている。この方法では、地性線、自然または人工的な崖などの縁、等高線、自然の特徴ある線状の地形部、水工物などを、地上実測または写真測量の方法で決め、その線上のいくつかの点の高さを測定しておく。それぞれの線には番号をつける。規則的に配置された放射線がとなりの線と交わるとき、その交点は、あらかじめ決められた線の番号であらわしておく。

新しい点の高さを内挿することは、つぎの方法による。

すなわち、線と線の間で新しい点をとる場合には、その点を通る最も短い直線が、それら2線と交わる点を求め、その高さから内挿される。線上の点の高さは、その線上の既知点の高さから求められる。

この方法は、まだ実用には供されていない。それは、非常に興味のある方法ではあるが、計算者にとっては、なかなか困難な問題があるからである。

### (4) Dr. Lang (西ドイツ) および 丸安・中村 (日本) の方法

点の配列および内挿に関して非常に簡単な方法が、Dr. Lang と Finland の Viatuk Engineering Office、および日本でそれぞれ独立に開発された。

Digital Terrain Model に対しては、規則性をもたせて選んだ地形点がいられる。たとえば、点の配置は正方形、長方形、正三角形などになるように選ばれる。

規則的に、しかも密に点を配置する場合には、写真測量の方法によるほかないが、特に森林地域などで地上実測の方が好ましいところでは、automatic code theodolite または recording tachymeter (測定結果が自動的に記録されるようになっている theodolite または視距儀) がよいだろう。このような機械は Dr. Lang によっても提案されているが、まだ生産されていない。この方法によると、地質や土質に関するデータも同時にとれる。

新しい点の内挿は、平面三角形のシステムでなされる。たとえば、新しい点のまわり  $\pm 35$  m 四方のうちで最も近い3点を選び、それらの点の  $x, y, z$  からできる平面をつくり、その平面上に新しい点の位置を求めて高さを決定する。

この方法は、フランスで実施されている既知の道路中心線と標準断面による道路設計または最適路線の選定に利用することができる。

## 4. 土量算定の方法について

フィンランドにおいてもドイツにおいても、土量の算定に新しい方法が提案された。従来非常に広く利用されてきたシンプソン法則によると、盛土の幅の変化がいちじるしい場合、高さの高い場合には、非常に間違った結果を与えることがままある。このため、盛土および切取り面の地表面との交線、および築造される構造物との交線を正確に計算する。そして、適当な水準面を基準にして、交線で囲まれた部分のものと地盤の土量を三角錐にわけて計算し、同様の方法か2断面とその間の距離とから、盛土面が囲む体積を計算し、それら二つの土量の差から、切取および盛土の量を決定する方がよい精度が得られることが経験から明らかにされた。

この方法は、工費の算定をするのにも適しており、また工事の施工が計画どおりに行なわれているかどうかを点検するのにも都合がよいといわれている。

## 5. むすび

私は、この論文で一般の Terrain Model をどのよう

\*\*\* International Symposium of Photogrammetry (Comm. IV), 1966.

な方法で記録するのがよいかについて述べただけで、道路選定や設計についての詳細について述べることはできなかった。

最後に一つ強調しておきたいことは、Digital Terrain Model が規則正しい点の配列で表現される場合でも、地形の重要な特徴を示す線は必ず測定し、かつ記録することである。これは Digital Terrain Model の利用をいっそう価値あるものとするからである。

さらに一つ強調したいのは、今日の Integrated Design Process においては、たとえば中心線の計算、標準断

面、土量の計算、視距の計算、透視図や図面の自動製図などは、も早や重要な役割を演じてはいないということである。この問題は、すでに認められたことであるし、これらの算定の可能性は保証されている。

現在重要なのは Optimizing Process——すなわち最良の可能な路線を見出す方法を完成させることである。このためには、Terrain Model の質の向上と信頼度を高めることをまず果たさなければならぬのである。

(正会員 工博 丸安隆和・訳)

## 水理公式集頒布

— 昭和 38 年増補改訂版 —

水理公式集の初版が発行されたのは昭和 17 年です。それから 2 回の改訂が行なわれましたが、昭和 38 年に刊行された本書は現在世界中で使用されている代表的な公式をすべてとり入れ、第 1 編 河川、第 2 編 発電水力、第 3 編 上下水道、第 4 編 港湾および海岸の 4 つ大項目に分け、それぞれを 7~11 の中項目を設け詳細に解説した世界でも珍しいユニークな公式集ですので参考書としてぜひご利用下さい。

体 裁：A 5 判 603 ページ  
定 価：1400 円

会員特価：1100 円  
送 料：150 円

## 好学社のマグローヒル国際版



KOGAKUSHA'S

McGraw-Hill  
International  
Student  
Editions

### CIVIL ENGINEERING

	原書定価
Chellis: PILE FOUNDATIONS, 2/e .....	¥ 1800 (¥ 6400)
Chow: OPEN-CHANNEL HYDRAULICS .....	¥ 1600 (¥ 7400)
Davis: SURVEYING, 5/e .....	¥ 1980 (¥ 5740)
Davis: HANDBOOK OF APPLIED HYDRAULICS, 2/e .....	¥ 2740 (¥ 9400)
Dunham: FOUNDATIONS OF STRUCTURES, 2/e .....	¥ 1520 (¥ 5400)
Ehlers: MUNICIPAL AND RURAL SANITATION, 5/e .....	¥ 1440 (¥ 4600)
Gaylord: DESIGN OF STEEL STRUCTURES .....	¥ 1160 (¥ 4000)
Hickerson: ROUTE SURVEYS AND DESIGN, 4/e .....	¥ 940 (¥ 3800)
Hool: STEEL AND TIMBER STRUCTURES, 2/e .....	¥ 1960 (¥ 6000)
Leonards: FOUNDATION ENGINEERING .....	¥ 2600 (¥ 10000)
Linsley: WATER RESOURCES ENGINEERING .....	¥ 1440 (¥ 5310)
Norris: ELEMENTARY STRUCTURAL ANALYSIS, 2/e .....	¥ 1300 (¥ 4200)
Powell: WATER CONDITIONING FOR INDUSTRY .....	¥ 1300 (¥ 5400)
Steel: WATER SUPPLY AND SEWERAGE, 4/e .....	¥ 1520 (¥ 5000)
Wang: STATICALLY INDETERMINATE STRUCTURES .....	¥ 940 (¥ 3800)

●この他 各分野にわたり 350 余点発行!!

●カタログ送呈(誌名ご記入の上お申込み下さい)

株式会社 好学社

東京都中央区銀座東 4-7 (77ビル)  
電話 (542) 6911 (代)・6916・6917