

名古屋工業大学 正員 山本幸司
東 京 都 正員 紅林章史

【1】 はじめに 都市市街地の土木工事現場から発生する掘削残土は、当該現場において直接埋戻し材として用いられることは少なく、盛土を必要とする他現場へ輸送したり、適当な土捨場へ残土処理されることが多い。このため残土輸送問題が生じるが、現実の問題としては、掘削残土の需給時期や需給量が確定しないため、計画立案に際して確率的な取扱いをしなければならない。しかしながら、古典的な輸送問題の解法をそのまま適用するのは無理がある。そこで本稿では、まず残土の需要供給発生パターンを分類整理するとともに、そのいくつかに対して確率的輸送問題や確率的計画法などのOR手法の適用を試みる。

【2】 都市土木工事における残土処理の現状 掘削残土を当該現場付近へそのまま留置し、必要に応じて現場内で埋戻し材として利用するのが理想的であるが、都市部では工事現場近くに残土留置用地を確保することが、経済的・物理的に、また環境公害上からも不可能に近くなってきている。最近の名古屋市内の地下鉄工事でみると、残土の平均輸送距離は11kmにも達しており、今後ますます延長することが予想されている。また残土処理費用も1400～1500円/㎥に達しており、そのほとんどが輸送費用であることを考えると、輸送距離の延伸は残土処理費用の増大に直接影響する重大な事項である。また残土や埋戻し土は、必要な時期に必要な量が需給されなければならない、このことは合理的な残土処理・輸送計画の立案を困難化している一因となっている。

ところで残土処理方法としては、自由処分と指定地処分があるが、東京・大阪とは異なり、名古屋市では自由処分が多く、現在の地下鉄工事では指定地処分は10%程度にすぎない。このような自由処分では、各請負業者が独自に処分地を確保しなければならず、業者単位での限られた情報のもとでは合理的な残土処理計画の立案が困難である。さらに、アスファルト瓦礫等を埋戻し材として使用する場合には埋戻し基準を満足するための再処理が必要となり、この再処理施設関連の費用を含めて考えるならば、ますます工事現場単位でなく、数多くの都市土木工事を統括する立場での残土処理・輸送計画の立案が望まれることになる。

【3】 残土処理計画のパターン分類 残土処理計画は、複数の掘削地から複数の埋戻し地もしくは処分地への輸送問題となるため、輸送型モデルとして扱うことができる。本稿では、まず残土輸送計画を、需要供給量の確定性および再処理地の有無によってパターン分類し、図-1を得た。パターン分類の要因としては、これら以外にも計画目的の内容や計画期間の多段階性等が考えられたが、本稿では上述の二つを取上げた。

【4】 需要が確率的要素を含む場合の残土輸送計画モデルの定式化および解法 図-1に示した8パターンの中には古典的輸送問題によって容易に定式化できるものもあるが、確率的要素を含むことから最適計画を容易に見出すことが困難なパターンが多い。特に再処理地を設ける場合には一種の積替え問題とも考えられ、定式化がやや複雑になってくる。ここではシステムズアプローチの一例として、図-1で下線を引いたパターンに対する定式化を試みることにする。このパターンは、 m 箇所の掘削残土発生地から n 箇所の残土処理地への残土輸送問題であるが、特に『各需要地における需要量はできる限り過不足なく充足すること』という前提条件を設け、確率的に扱う需要量に過不足が発生した場合には、正のペナルティを課すこととし、目的関数として総輸送費ならびにペナルティの総和の最小化を取上げることにした。

まず式①、②のような線形計画問題を考える。そして式②の等号が成立しない時に、式③のようなペナルティを課す。式③の上式は必要な需要量が満たされない場合のペナルティで、 u_i 値は埋戻し材の新規購入あるいは工事の遅れ等にかかわる費用と考える。また

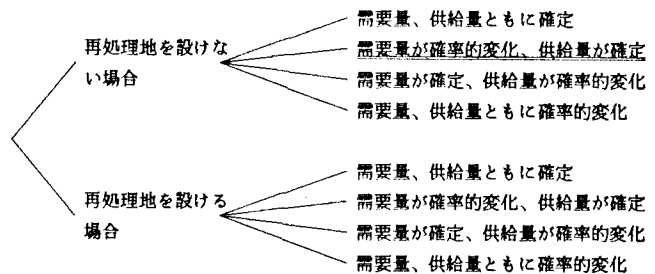


図-1 パターン分類

下式は供給超過の場合で、 o_j は臨時的な残土留置地の確保等の費用である。いまこれらの値を式①、②の中に組込むと、目的関数、制約条件式は式④、⑤のようになる。次にこれらを二段階計画法で表わすと式⑥、⑦となる。さらに式⑥の第一項を取出し、式⑥、⑦のように定式化しなおす。いまこれらを主問題と考えれば、その双対問題は式⑩、⑪のようになる。ここで主問題の最適解を $X^*(d)$ 、双対問題の最適解を $\pi^*(d)$ とすれば、当然 $CX^*(d)=d'\pi^*(d)$ という関係が成立するので、これを用いて式⑥を書きかえると式⑫のようになる。これを需要が確率的に変化する場合の目的関数にとり、図-2のような解法アルゴリズムを提案した。この解法は、式⑥の第2項は d が与えられると定数となることから式⑧、⑨は式⑥、⑦と同一最適解を持つこと、式⑫を最小化する d が式⑥の最適解を与える d と同一ならば結果的に式⑥が解けたことになること等を利用した解法であり、非線形計画問題を線形計画問題に逐次置かえて繰返し計算するアルゴリズムである。本研究ではこのモデルを簡単な事例に適用したが、 d の初期値の与え方にかかわらず収束性が高いことが明らかとなり、残土輸送計画モデルとして十分に有効であると判断した。しかし需要量 b_j の周辺分布関数やペナルティの与え方など今後解決すべき問題も多いといえる。

【5】 おわりに 本稿は需要量が確率的に変化する場合の残土輸送計画についてシステムズアプローチを試みたものであるが、今後の課題としては、実用化に向けてモデルの改善を行うこと、他のパターンに対しても同様にモデル化を試みること、多段階意思決定問題としてのアプローチを行うこと等を考えている。なおモデルの詳細と適用事例については、紙面の都合上講演時に示す。

$$\begin{aligned}
 Z &= C'X \rightarrow \text{Min} \dots \textcircled{1} & AX &= b & X &\geq 0 \dots \textcircled{2} \\
 \text{ここに} & C' : n \text{ 次係数ベクトル} & X & : n \text{ 次変数ベクトル} \\
 & A : m \times n \text{ 係数行列} & b & : m \text{ 次定数ベクトル} \\
 u_j \{ b_j - (A_j)' X \} & & b_j &\geq (A_j)' X \text{ の時} \\
 o_j \{ (A_j)' X - b_j \} & & b_j &\leq (A_j)' X \text{ の時} \dots \textcircled{3} \\
 Z &= C'X + E \{ \text{Min} (O'y^o + U'y^u) \} \dots \textcircled{4} \\
 AX - I'y^o + I'y^u &= b & X, y^o, y^u &\geq 0 \dots \textcircled{5} \\
 \text{ここに, } O, U & : \text{ペナルティベクトル, } E : \text{需要量 } b \text{ に関するペナルティ期待値} \\
 y^u & : \text{右辺が優越する時それを等号条件化するためのスラック変数, } y^o : \text{左辺が優越する時それを等号条件化するためのスラック変数,} \\
 Z &= C'X + \sum_{j=1}^n \{ o_j (d_j - b_j) d F_j(b_j) + u_j \int_{d_j}^{\infty} (b_j - d_j) d F_j(b_j) \} \\
 & \rightarrow \text{Min} \dots \textcircled{6} \\
 (A_j)' X &= d_j, X \geq 0 \dots \textcircled{7} \\
 \text{ここに } F_j(b_j) & : b_j \text{ の周辺分布関数} \\
 Z' &= C'X \rightarrow \text{Min} \dots \textcircled{8} & AX &= d & X &\geq 0 \dots \textcircled{9} \\
 G &= d'\pi \rightarrow \text{Max} \dots \textcircled{10} & A'\pi &\geq C \dots \textcircled{11} \\
 \Phi(d) &= d'\pi^*(d) + \sum_{j=1}^n \{ o_j \int_{-\infty}^{d_j} (d_j - b_j) d F_j(b_j) \\
 & + u_j \int_{d_j}^{\infty} (b_j - d_j) d F_j(b_j) \} \dots \textcircled{12}
 \end{aligned}$$

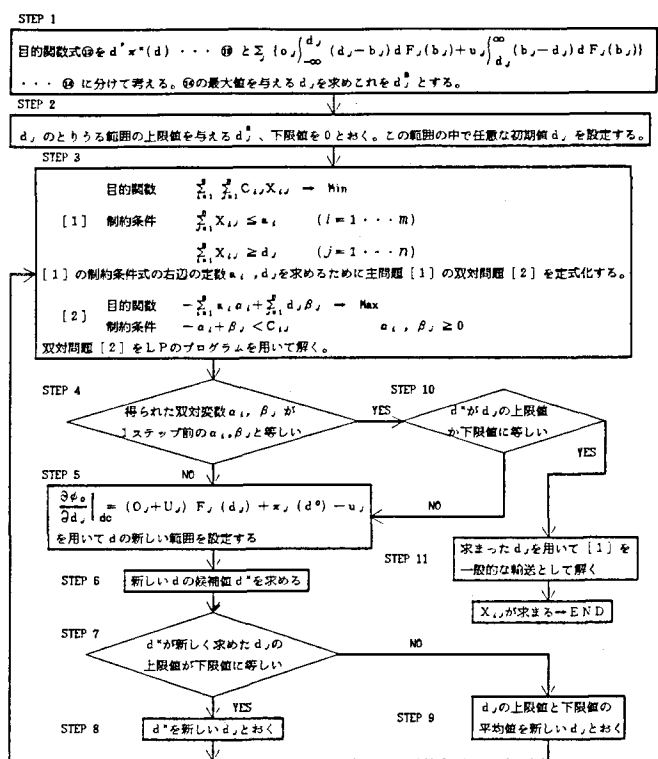


図-2 解法アルゴリズム