施工計画作成プロセスに関する一考察

京都大学工学部　正員　工博　吉川 和広
京都大学大学院　学生員　工修　春名 攻
京都大学大学院　学生員　○笹嶋 博

1.はじめに

土木工事においては，施工技術的な側面や外部的な施工条件によって決定できる技術的な順序関係と，各種資源の運用に基づく管理的な順序関係が存在する。しかしながら，従来のネットワーク手法を用いた施工計画作成プロセスにおいてはこれら2つの順序関係の区別が混乱しあるいは全く考慮されていなかった。このため一部の現場ではネットワーク手法が，計画・管理手法としてとらえられず，現場への定着に支障をきたしていた。このような計画・管理上の問題を解決して，ネットワーク手法を土木工事の有効な計画・管理手法として定着させるために上記2種の順序関係を明確に区別して，合目的な施工計画を作成するプロセスに関する一考察を述べる。

2.順序づけ問題の定式化

さて，技術的順序関係$P^{(T)}$は，設計施工法が与えられるならば，ほぼ一意的に定められる。ところが，管理的順序関係$P^{(R)}$は，各種資源の運用に基づいて決定できるものであるから，資源の投入量と配分方法によって種々のものが考えられる。作業グループℓの順序関係を$P^{(R_\ell)}$ $(\ell=1,2,\cdots,L)$とすれば，

$$
① \begin{cases}
P^{(T)}=(p_{ij}^{(T)}), & p_{ij}^{(T)}=\begin{cases}1, & i \ll j\ (i\text{が}j\text{に直接先行}) \\ 0, & \text{その他}\end{cases} \\
P^{(R)}=(p_{ij}^{(R)}), & p_{ij}^{(R)}=\begin{cases}1, & i \ll j \\ 0, & \text{その他}\end{cases} \\
P^{(R_\ell)}=(p_{ij}^{(R_\ell)}), & p_{ij}^{(R_\ell)}=\begin{cases}1, & i \ll j \quad \textit{for all } \ell \\ 0, & \text{その他} \quad (\ell=1,2,\cdots,L)\end{cases}
\end{cases}
$$

したがって，プロジェクトの順序マトリックスは，

$$② \quad P=P^{(T)}+P^{(R)}=P^{(T)}+\sum_{\ell=1}^{L} P^{(R_\ell)}$$

ここで，演算の加法則としては，

$$③ \quad 1+1=1, \quad 1+0=1, \quad 0+0=0$$

を用いる。また，完了時刻λは，$P^{(T)}$が与件として与えられているから，

$$④ \quad \lambda=\lambda(P)=\lambda(P^{(T)}, P^{(R_1)}, \cdots, P^{(R_L)})=\lambda(P^{(R_1)}, \cdots, P^{(R_L)})$$

と，管理的順序関係のみの関数となる。また，作業グループℓの競合作業数をn_ℓ，投入する作業グループ数をr_ℓとすれば，プロジェクトが実行可能であるためには，つぎのような制約条件式を満足させなければならない。

$$
⑤ \begin{cases}
ⓐ \ \sum_{i \in J^{(R_\ell)}} p_{ij}^{(R_\ell)} \leqq 1, \quad \sum_{j \in J^{(R_\ell)}} p_{ij}^{(R_\ell)} \leqq 1 \\
ⓑ \ L(P)=0, \quad L(P^{(R)})=0 \\
ⓒ \ \sum_{i \in J^{(R_\ell)}} \sum_{j \in J^{(R_\ell)}} p_{ij}^{(R_\ell)} = n_\ell - r_\ell
\end{cases}
\qquad \textit{for all } \ell \ (\ell=1,2,\cdots,L)
$$

ただし，ⓑはサイクル非構成条件である。したがって最適ネットワークは，⑤の制約条件の下で，目的関数④を最小にするような$P^{(R)}$あるいは$\{P^{(R_\ell)}\}$を求めれば決定できる。

3.ブランチ・バウンド法による解法

$P^{(R)}$あるいは$\{P^{(R_\ell)}\}$を求めるための解法としては，ブランチ・バウンド法を用いる。

Ⓐ作業グループが1種の場合

$$⑥ \quad \bar{P}^{(R)}=(\boldsymbol{g}_1 \boldsymbol{g}_2 \cdots \boldsymbol{g}_n), \quad \boldsymbol{g}_1, \boldsymbol{g}_2, \cdots, \boldsymbol{g}_n \in E$$

ここで，$E=\mathfrak{E}_k \cup \mathfrak{O}$，ただし

$$
\mathfrak{E}_k=\begin{array}{c}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}\end{array}\begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ k \\ \vdots \\ n \end{array}, \quad
\mathfrak{O}=\begin{array}{c}\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}\end{array}\begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{array}, \quad
P^{(R)}=\begin{pmatrix} \bar{P}^{(R)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \underbrace{0 & \cdots & 0}_{N-n} \end{pmatrix}\Big\} N-n
$$

$k=1,2,\cdots,n$

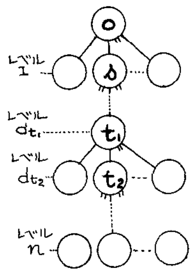
と定義する。いま，図のようなトリー表現を用いたブランチ図のノードtにおいて，一定ベクトルを与えるベクトル集合Ω_tを対応させる。Ω_tは，

$$\Omega_0=\Phi\text{(空集合)}, \quad \Omega_1=\{\boldsymbol{g}_1\}, \cdots$$

⑦ $\Omega_{t_1}=\{g_1,\cdots,g_k,\ k=d_{t_1}\},\ \Omega_{t_2}=\{g_1,\cdots,g_{k'},\ k'=d_{t_2}\}$

のように表わす。このようにΩtを定めると，ブランチ図の最終レベルnにおいては，$\Omega=\{g_1,g_2,\cdots,g_n\}$であるから，$\bar{P}^{(R)}$が決定できることがわかる。したがって，プロジェクト完了時刻は，

［ブランチ図］



⑧ $\lambda(P^{(R)})=\lambda(\bar{P}^{(R)})=\lambda(\Omega)$

のようにΩの関数として表わされる。また，一般のノードt_1とt_2の間には，

$$⑨\begin{cases}\lambda(\Omega_{t_2})=\lambda(\Omega_{t_1})+\Delta\lambda(\Omega_{t_2}-\Omega_{t_1})\\ \Delta\lambda(\Omega_{t_2}-\Omega_{t_1})=\begin{cases}\max(EF_i^{(t_1)}-ES_j^{(t_1)}-TF_j^{(t_1)},0),\ \Omega_{t_2}-\Omega_{t_1}=\oplus_k\\ 0\ ,\ \Omega_{t_2}-\Omega_{t_1}=\Phi\end{cases}\end{cases}$$

なる関係式が成立する。したがって，実際の計算手順において，まず始めにノード0からのブランチによってノード$s_1,s_2,\cdots$を求める。つぎに⑦式より$\Omega_{s_h}(h=1,2,\cdots)$を定める。つぎに$\lambda(\Omega_{s_h})$を⑨式によって計算し，$\lambda(\Omega_s)=\min_h\{\lambda(\Omega_{s_h})\}$を与えるノードsからレベル2へのブランチを行なう。同様に，一般のノードt_1からのブランチによって得られたノードt_2において，⑦式より$\Omega_{t_1},\Omega_{t_2}$を定め，⑨式によって完了時刻を求める。また，このようなブランチ操作を最終レベルnまでくりかえすと，$LB^{(*)}=\lambda(\Omega)$が求められる。いま一般のノードtにおいて$LB^{(t)}=\lambda(\Omega_t)$とおけば，

⑩ $\lambda(\Omega_s)=\min\{LB^{(t)};\ LB^{(t)}<LB^{(*)}\}$

を与えるノードsをつぎのブランチノードとして求め，上と同様のブランチ操作をくりかえす。⑩式を満たすようなsが存在しなくなれば，その時の$LB^{(*)}$を与えるノードにおいて求められている順序関係が，最適ネットワークを与える。

Ⓑ作業グループがL種の場合

この場合には，上述のブランチ操作を，作業グループ$l=1$から始めて，$l=2,3,\cdots$の順に配分順序を決定していけばよい。ここで各作業グループが配分される競合作業を$J^{(R_1)},J^{(R_2)},\cdots,J^{(R_L)}$，競合作業数を$n_1,n_2,\cdots n_L$とすれば，最終レベルnはつぎのようになる。

⑪ $n=\sum_{l=1}^{L}n_l$

さらに計算途中においてブランチノードsを定めたときノードsのレベルをd_sとすれば，

⑫ $\sum_{m=1}^{l-1}n_m\leq d_s<\sum_{m=1}^{l}n_m$

によって，どの作業グループの配分に関係しているかがわかる。lが求められれば，⑤式をみたすようにブランチ操作を行なえば，それ以外は，作業グループが1種の場合と全く同様にして解を求めることができる。

4.合目的施工計画作成プロセス

以上のような管理的順序関係決定の第1要素としては，費用の面から，機械と人よりなる作業グループの配分をとるのが適当であろう。いま，上記のプロセスで，機械と人よりなる作業グループの配分によって得られた$\lambda_{opt}=LB^{(*)}$に対して何らかの基準によってδλを考え

⑬ $\lambda_{opt}\leqq\lambda\leqq\lambda_{opt}+\delta\lambda$

を満足するようなλを完了時刻としてもつネットワークを試案(alternative)として採用する。つぎに，これらの試案が実行可能であるかどうかを機械以外の他の工事計画を評価することによって，最終的に施工計画を1つ選択すれば，合理的な施工計画を作成することができると考える。ここに他の評価項目としては，(1)要員の山積表を作って検討，(2)型枠などの材料使用状況での検討，(3)月々の出来高図での検討，(4)月々の収入収支のバランスの検討，(5)在庫量による検討，などをあげることができる。以上のプロセスの橋梁下部工事への適用例については，講演当日示すこととする。