

工事計画における支援システムの構想

ー 建築工事における工程計画を事例として ー

早稲田大学 嘉納 成男

1. 緒言

建築工事における工程計画の適正化は、工事の円滑な実施、生産性の向上、工期の短縮や工事原価の削減にとどまらず、工事の品質を確保する上で不可欠となっている。又、建築物の大規模化や複雑化にともない高度な施工技術を要する工事が近年とみに増大し、工程計画に関連して取り扱わねばならぬ計画項目はますます多様化している。

PERT/CPM手法の開発以来、工程計画に関する数理科学的手法の導入を意図し、新しい観点からこの計画手法の開発を目指す研究が数多く行われてきた。しかし、建築工事の特殊性に対する考慮に欠け、あるいは計画立案手順に無理があるなどの問題があり、十分な活用には至っていない。

本研究では、建築工事の工程計画を電子計算機を利用して綿密且つ迅速に立案するために必要な計画手法の確立を目指し、工事の順序、日程並びに工事用資源に対する計画手法の開発を目的としている。本報は、特に工程の表現法とその計算方法について示す。

2. 建築工事における工程計画

(1) 工程計画の機能

建築工事における工程を綿密且つ合理的に計画するには、工事活動を方法、順序、日程及び工事用資源の四つの計画から捉え、それぞれの有する計画項目を有機的に関連付けながら工程全体の整合性を図ることが必要である。

このため、設計図書、現場の敷地条件や工期に対する制約等を充分検討し、主要な工事について採用すべき工法を定めるとともに効率よい労働者の配置及び材料・仮設資材・工事用機械等の運用を果すようにしなければならない。又、計画時において正確に把握出来ない天候や地盤等の自然条件に対しては、それが工程に及ぼす影響を事前に充分検討し、工事

実施に際して万全の対策を作成しておくことが必要である。

工程をめぐる多岐に亘る計画項目の整合性を取りつつ工程全体の計画を立案するには、大所高所から工程を捉えるとともに計画上で隘路となる部分については細部に亘る綿密な分析を加えることが必要である。このためには、工程を図2.1に示す部分工事、要素工事、単位作業の三段階の詳細度によって計画することが必要であり、各計画段階について以下の機能を果さなければならない。

① 概略工程計画

工事の内容・規模及び敷地条件等に基づき、実行可能な工期を定めると同時にそれを実現するために必要な工法を決定し、その工事日数に従った各マイルストーンを求める。これによって、工事全体に亘って無理のない工程の枠組を作成するとともに、工程計画立案の基盤とする。

② 詳細工程計画

設計図書及び数量積算等に基づき、職種別、工区別及び工事内容別に各工事の所要日数、工事間の前後関係を定めるとともに、労働者数及び使用する材料・仮設資材・工事用機械の種類と数量を求める。そして、工事実施日及び搬入・揚重日を定める。これによって、労働者・材料・仮設資材・工事用機械の円滑な活用を果し、工事をめぐる各種手配の基礎とする。

③ 作業工程計画

工事を作業のレベルで捉え、作業場所や作業条件等を考慮し、各労働者が行うべき作業内容・手順を定め、手待ち・手戻りの無い作業工程を立案する。さらには、工事用機械の機種及び台数の選定を行うと同時にその適切な配置・運行計画を作成する。これによって、作業の無理・無駄を排除し、労働者や工事用機械の効率よい作業を達成するとともに、工事実施時における管理活動の基礎とする。

(2) 積み上げ方式と割り付け方式

前項に示す3段階の工程計画に基づいて計画を立案する場合において、積み上げ方式とは作業工程→詳細工程→概略工程の順で工程計画を進めることを意味し、割り付け方式では概略工程→詳細工程→作業工程の順で工程計画を進めることになる。このため、工事実績が豊富にある工事については、実績情報等の計画資料を整備した上で概略工程から工程計画を立案する方式を採用することが望ましい。

3. 概略工程計画

(1) 概略工程計画の機能

概略工程計画では、全体工事を主要な工区別に部分工事の細かさによって表現し、目標とする工期、各部分工事で採用すべき工法、予想される工事日数を定めるとともに、部分工事間の順序関係を明確にする。そして、これら工程の条件に立脚した各部分工事の日程及び主要なマイルストーンを求める。又、工期の短縮の可能性を検討する。

概略工程計画が果たさねばならない主たる機能は以下の6項目である。

- ① 工事の基本計画を定め、主要な工法を立案する。
- ② 部分工事の所要日数を求める。
- ③ 部分工事の範囲及び工事間の順序関係を明確にする。
- ④ 部分工事の開始日、終了日を示す。
- ⑤ 部分工事の工法を変更して工期短縮の可能性を調べる。

- ⑥ 指定工期限内に工事が完了するように部分工事の所要日数や順序関係を調整する。

(2) 概略工程の表現方法

(a) 部分工事

工事内容を概略的に表現するには、工事全体を部分工事に細分化することがまず必要である。このとき、より多くの部分工事に細分すれば工程を正確に表現することが出来る反面、複雑になり過ぎて工程全体を大局的に掌握することがむしろ困難になる。又、計画立案に要する労力及び時間が増大し、各種の代替案を十分に検討することが出来なくなる恐れがある。

このため、部分工事は、対象工事の種別、工事の難易度及び工事管理上の便宜さ等を考慮して決め、必要に応じて部分工事をさらに分割した細項目を併用して工程を簡潔に表現せねばならない。

表.3.1は、概略工程を構成する部分工事とその細項目を表わすとともに、各部分工事に必要な工区の分割の方法を示した。

(b) 部分工事間の順序関係

概略工程は、本来数多くの作業内容から構成される工程を部分工事と云う粗い工事単位で表現するため、従来のネットワーク手法で用いられる前後関係のみでは表現することが不可能である。表.3.2は、部分工事の開始日と終了日についての順序関係の種類とそれを表わすバーチャートを示したものである。又、部分工事間の順序関係におけるリードタイムは、その内容によって以下に示す三つの方法で定める。

- ① リードタイムの下限値を定める。

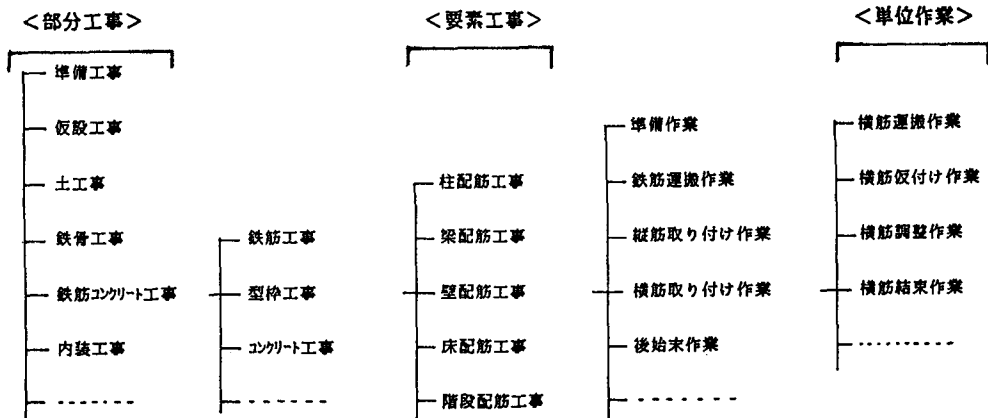
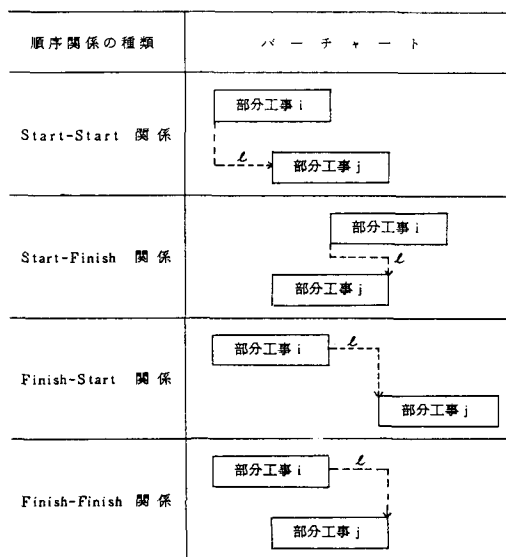


図.2.1 部分工事・要素工事・単位作業の構成 (鉄筋コンクリート工事)

表.3.1 概略工程を構成する部分工事と細項目

部分工事	部分工事の細項目	工 区
準備工事		
仮設工事		
土工事	杭 工 事	
	掘 削 工 事	掘 削 次 数
	山 止 壁 工 事	
	切 梁 工 事	切 梁 段 数
鉄骨工事		鉄 骨 節 数
鉄筋コンクリート工事		階 数
内装工事	下 地 工 事	階 数
	仕 上 工 事	階 数
外壁工事		
屋上工事		
外構工事		
設備工事	電気空調設備工事	階 数
	給排水設備工事	階 数
	昇 降 機 工 事	

表.3.2 部分工事間の順序関係の種類



② リードタイムの固定値を定める。

③ リードタイムの上限値を定める。

すなわち、表.3.2に示す4種類の順序関係と上記の3種類のリードタイムの定め方とを組み合わせ、概略工程を表現することが必要であり、以上の組み合わせは12種となる。

(3) 概略工程計画における日程計算の方法

(a) 日程計算において考慮すべき項目

部分工事とそれらの順序関係からなる概略工程について日程計算を行うには、部分工事の所要日数及び順序関係のリードタイムに基づいて計算する。さらに、厳寒期・雨期・台風期等における作業の回避、工場加工部材の製作期間や発注者の要請等によって部分工事の開始日又は終了日が制約を受ける場合には、これらを考慮して日程計算を行う。

概略工程計画で作成した工程が指定工期を越える場合には、工程を短縮してすべての部分工事が指定工期内に終了するようにしなければならない。工程の短縮に際しては、一部の部分工事のみを短縮して工程に無理を生じさせないように工程全体に亘って日程を調整する。

(b) 目標計画法による日程計算

概略工程は、部分工事間の順序関係、部分工事の指定開始日、指定終了日並びに指定工期等多くの制約条件によって構成されているため、これらすべての制約条件を満足する部分工事の開始日及び終了日の解がかならず存在する保証はない。解が存在しない場合、制約条件式の一部を修正して再度日程計算を試みることも出来るが、一回の修正で解が求まる保証は無く且つ工程計画の段階でこのような複雑な日程計算を採用することは不可能である。

このため、日程計算においては、満足させるべき制約条件に優先順序を定め、それに従って各部分工事の開始日及び終了日を目標計画法に基づき求めることにした。

この制約条件の優先順序は、以下の如く考えた。

第1目標：指定工期に関する制約条件

第2目標：部分工事の指定開始日及び指定終了日に関する制約条件

第3目標：部分工事間のリードタイムに関する制約条件

第4目標：工事集合内のリードタイムの調整に関する制約条件

第5目標：工事全体のリードタイムの調整に関する制約条件

上記の優先順序に基づき日程計算を行うということは、以下に示す手順で部分工事の日程を求めることを意味する。

まず指定工期内に工事が終了する工程を考え、次に各部分工事の指定開始日及び指定終了日を出来る

だけ満足する工程割り付けを行う。次に、各部分工事間の順序関係が成立し且つリードタイムの調整が工程全体に亘って行われるように、各部分工事の開始日及び終了日を求める。この手順は、施工技術者が行う概略工程の日程計画の作成手順に概ね対応する。

(4) 概略工程計画手法の適用

本手法に基づく概略工程計画を事務所建築工事について適用した。表.3.3は事務所建築工事の概要を示したものである。この工事について工程を部分工事に分割すると、53種類の部分工事を得た。

部分工事間の順序関係及びそのリードタイムについて工事実績データから求め、概略工程モデルを作成した後、これに対して目標計画法による日程計算を実施した。

図.3.1は発注者の指定する工期504日に工事を竣功するために、各部分工事間の順序関係を補正して求めた概略工程表である。

表.3.3 概略工程計画の対象とした工事概要

建 物 用 途	: 事務所
敷 地 面 積	: 716 m ²
建 築 面 積	: 634 m ²
延 床 面 積	: 6,437 m ²
基準階床面積	: 634 m ²
階 数	: 地上10階 地下1階
高 さ	: 地上39.460 m
基準階高	: 2.450 m
構 造	: 鉄骨鉄筋コンクリート造
基 礎	: 直接基礎

4. 詳細工程計画

(1) 詳細工程計画の機能

詳細工程計画では、職種別・工区別・作業内容別に工事工程を要素工事の細かさによって表現し、所要日数及び前後関係を計画することが先づ必要である。次に、各要素工事が必要となる工事用資源の搬入、揚重及び搬出に関する日程を調整し、労働者の生産性の向上や材料、仮設資材及び工事用機械の利用の効率化を図るとともに、無理や無駄のない工程の順序、日程を定める。

詳細工程計画で果たさねばならない主たる機能は、

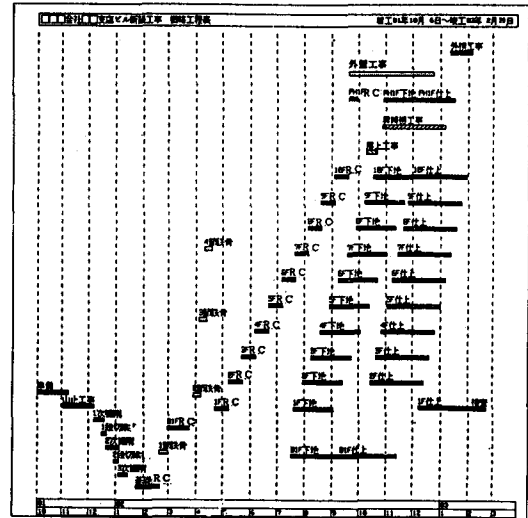


図.3.1 工期を504日として作成した概略工程表

以下の9項目である。

- ① 工事の方法・手順を要素工事の細かさで示す。
- ② 要素工事の所要日数を定めるとともに従事する労働者の職種・人数を定める。
- ③ 要素工事に必要とする材料、仮設資材、工事用機械の種類・数量を定める。
- ④ 要素工事の開始日・終了日を求める。
- ⑤ 日々の就業労働者人数を職種別に適正化する。
- ⑥ 材料・仮設資材・工事用機械の搬入・揚重・運用の日程を求める。
- ⑦ 残材・仮設資材・工事用機械の荷降し、搬出の日程を求める。
- ⑧ 各外注業者への手配内容を詳細に計画するとともに手配内容の妥当性を確認する。
- ⑨ 工事管理における工程進捗の基準とする。

(2) 詳細工程の表現方法

(a) 要素工事

建築工事では、一つの工区内で同一職種及び多職種に亘って輻輳する作業が多く、労働者や作業班が作業場所や作業対象を融通し合い作業を並行して実施する工程が多々ある。この並行して実施する工程をネットワーク手法によって表現するには、図.4.1に示す如く、作業を前半部分と後半部分に二分して表わすことが必要である。

この方法は一見論理的であるが、ネットワークを作成する計画者にとっては作業を分ける必要があり、

手間の掛かる表現方法でもある。又、分割したそれ

それぞれの作業（例えば前半部分）が具体的に何如なる作業範囲や施工数量を示しているかは曖昧として、正確に定義出来ない場合が多い。さらに、作業をデータベースから抽出する場合や、作業実績を集収して分析する際のデータ集計上の大きな障害となる。

(b) 分岐アロー型ネットワークの表現方法

分岐アロー型ネットワークとは、図.4.2に示す如く、アロー型ネットワークの表現方法に準ずるが、アローの中で別のアローが分岐又は統合することを認めるものである。この方法では、ネットワークモデルがグラフ構造とはならないために従来‘垂流’とされ、実務の中では多様されているにもかかわらず、学会等で認められておらず、その体系化も果されていない。

本研究では、この分岐アロー型ネットワークの表現方法の規則を以下の如く提案する。

- ① アロー途中より分岐するアローは、そのアローに直角に分岐する。
- ② アロー途中で統合するアローは、そのアローに直角に統合する。
- ③ 分岐又は統合する位置にはハーフノードを配置し、アローとアローとを接合する。ハーフノードの半径は、ノードの半径以下とする。
- ④ 分岐又は統合するリードタイムが指示されていない場合には、そのアローの長さに比例すると考える。

(3) 詳細工程計画における日程計画

分岐アロー型ネットワークの日程計算では、従来のネットワーク手法における計算方法に、アロー途中で分岐・統合する作業の日程を考慮するアルゴリズムを付加することが必要である。

すなわち、作業Aiに先行する作業をAkとし、後続する作業をAjとする。また、作業Aiの途中で統合する作業をAlとし、分岐する作業をAmとする。図.4.3に以上の作業間の関係を示す。

このとき、作業の日程及びその余裕は式(1)～(6)によって求めることが出来る。

$$EST_i = \max \left[\max_{k=1, N_k} (EST_k), \max_{l=1, N_l} (EST_l - L_{li}) \right] \dots (1)$$

$$EFT_i = EST_i + D_i \dots (2)$$

$$LST_i = LFT_i + D_i \dots (3)$$

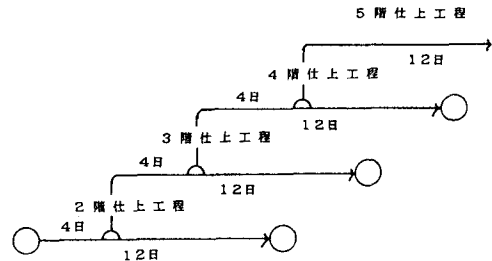


図.4.1 従来のネットワーク手法による仕上工程

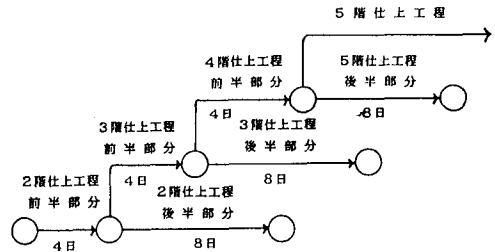


図.4.2 分岐アロー型ネットワーク手法による仕上工程

$$LFT_i = \min \left[\min_{j=1, N_j} (LST_j), \min_{m=1, N_m} (LST_m - L_{im} + D_i) \right] \dots (4)$$

$$TF_i = LST_i - EST_i \dots (5)$$

$$FF_i = \min \left[\min_{j=1, N_j} (EST_j), \min_{m=1, N_m} (EST_m - L_{im} + D_i) \right] - EFT_i \dots (6)$$

ただし、

ESTi : 作業iの最早開始日

EFTi : 作業iの最早終了日

LSTi : 作業iの最遅開始日

LFTi : 作業iの最遅終了日

Lli : 作業lと作業iとのリードタイム

Di : 作業iの所要日数

TFi : 作業iの全体余裕

FFi : 作業iの自由余裕

Nk : 作業iに先行する作業の数

Nl : 作業iに途中で統合する作業の数

Nj : 作業iに後続する作業の数

Nm : 作業iから途中で分岐する作業の数

(4) 詳細工程計画手法の適用

本手法に基づく詳細工程計画を事務所建築工事について適用した。表.4.1は事務所建築工事の概要を示したものである。図.4.4はマイクロコンピュータ

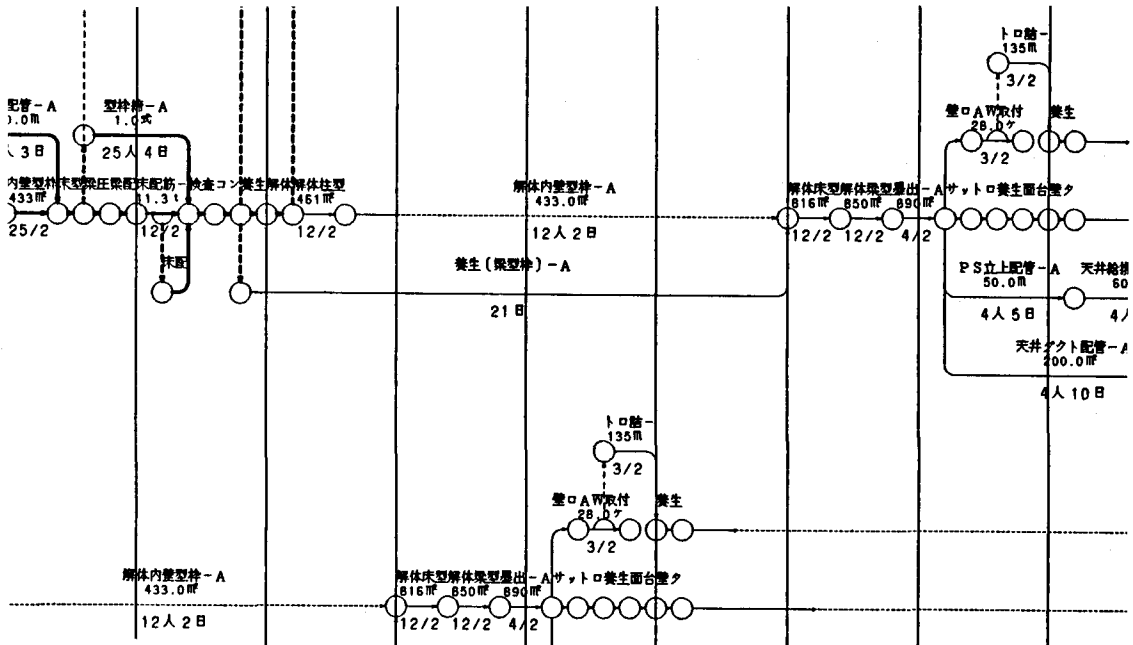


図.4.3 詳細工程ネットワーク図

を用いて立案した詳細工程を大型コンピュータによって図化したものである。

表.4.1 詳細工程計画の対象とした工事概要

工 期	昭和61年 3月27日～昭和62年11月30日	
敷地面積	1504	㎡
建築面積	1172	㎡
延床面積	14041	㎡
構造規模	SRC造 地上12階 地下1階 PH 1階	
用 途	事務所	

5. 作業工程計画

(1) 作業工程計画の意義

作業工程計画では、単位作業の細かさで作業活動を捉え、その作業方法や手順の最適化を図るとともに、工事用資源の適切な種類と数量を定める。さらに、工事現場の作業条件に適合した作業編成や工事用機械の配置等を定め、手待ちや手戻りの無い円滑な工程を確保する。工期の短縮が要求される場合には、投入する労働者の人数や工事用機械の台数等が作業時間に及ぼす影響を明らかにし、効果的な人員配置や機械構成を決めることが必要である。又、作業工程全般に亘って無理のない作業時間、順序、労働者人数等を計画し、不適切な工程に原因する工事欠陥

や工事災害を阻止しなければならない。

作業工程計画で果さねばならない主たる機能は、以下の7項目である。

- ① 日間・日内の作業活動の在り方を追求する。
- ② 作業の方法や手順を単位作業によって明確に示す。
- ③ 作業の所要時間とともに必要な労働者の人数及び工事用機械の種類・台数を求める。
- ④ 作業体制のクルーバランスについて検討を加える。
- ⑤ 人間・機械系作業の調和を図る。
- ⑥ 作業の問題点を明らかにし、その改善策を提示する。
- ⑦ 作業実施時における手配や指示に必要な管理資料を作成する。

(2) 作業工程の表現方法

(a) 工事グラフによる作業工程のモデル化

作業工程を表現する方法として、グラフ構造による表現法を提案し、各作業において従事する労働者、使用する材料、仮設資材及び工事用機械、並びに作業間の順序関係を視覚的にモデル化する。

作業工程を表わすグラフ構造（以下工事グラフと云う）では、以下に示す5種類のノードを用いることとした。

- ① 資源ノード：労働者、建築材料、仮設資材、工事用機械を表わす。
- ② 作業ノード：運搬・揚重作業、加工・組立・解体作業、計測・検査作業、保管・保全作業等の作業を表わす。
- ③ 部位ノード：建築部位及び仕掛け途中の建築部位を表わす。
- ④ 作業空間ノード：作業活動に関係する位置、工区、階等を表わす。
- ⑤ 補助ノード：工程における繰り返し作業及び不確定要因等を表わす。

各ノードの種類を視覚的に区別するため、図.5.1に示す表現方法のノードを使用する。

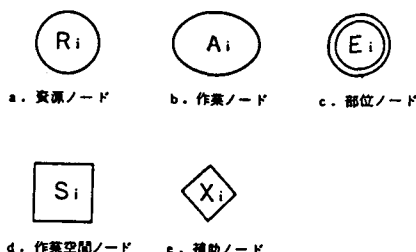


図.5.1 工事グラフのノードの種類

(b) 作業工程モデル

a. 位置に関するモデル

工事現場における材料、仮設資材、工事用機械の位置や、作業を実施する工区、作業の対象となる部位の在るべき位置などをモデル化するには、図.5.2、図.5.3、図.5.4に示す如く、空間指定アロー (SPA) を用いる。

b. 運搬・揚重作業に関するモデル

資材等の運搬作業は、作業ノードを中心として、運搬される資材、作業を行う労働者及び作業に使用する工事用機械等を表わすノードを図.5.5の如く配置する。

c. 加工・組立作業に関するモデル

加工・組立作業は、作業ノードを中心として、使用する材料、作業を行う労働者、使用する仮設資材・工事用機械及び造り出される部位等を表わすノードを図.5.6の如く配置する。

d. 作業間の関係に関するモデル

作業間の関係は、表.5.1に示す如く、作業順序アローと作業制御アローの2種の関係アローによって表わすこととした。作業順序アローはプレジデンス型ネットワーク手法の関係アローと同等の意味をも

つ。作業制御アローはある作業が特定の作業の開始又は終了時点を制御する。例えば、特定の作業を作

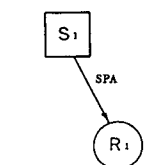


図.5.2 資源の位置に関する表現法

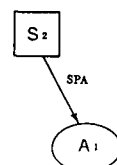


図.5.3 作業の位置に関する表現法

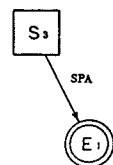


図.5.4 部位の位置に関する表現法

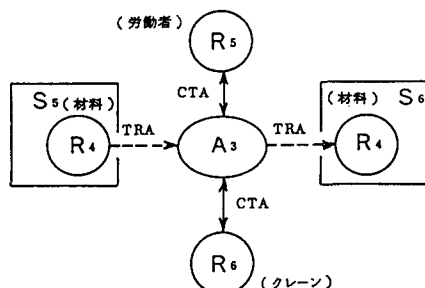


図.5.5 運搬・揚重作業を表わす工事グラフ

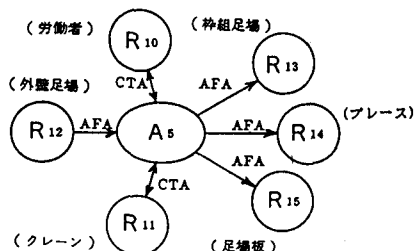


図.5.6 加工・組立作業を表わす工事グラフ

表.5.1 作業間の順序関係と制御関係

アローの種類	関係コード	関係概念	バーチャート
作業順序アロー	SS	作業 A_i が開始した時、作業 A_j を開始出来る	
	FS	作業 A_i が終了した時、作業 A_j を開始出来る	
作業制御アロー	SF	作業 A_i が開始した時、作業 A_j を強制的に終了する	
	FF	作業 A_i が終了した時、作業 A_j を強制的に終了する	

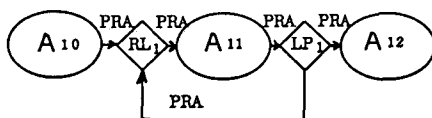


図.5.7 繰り返し工程を表わす工事グラフ

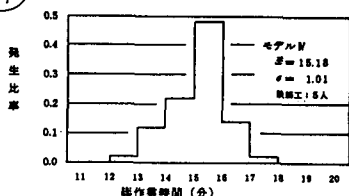
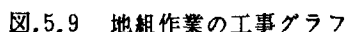


図.5.10 鉄筋工の人数別の総作業時間の分布

e. 作業の繰り返しに関するモデル

(3) 作業工程計画における日程計算方法

(4) 作業工程計画手法の適用

よって表現すると図.5.9 の如くなる。

以上に示す各単位作業に関するデータに基づいて、GPS言語によるシステムシミュレーションを実施した結果が、図.5.10に示す地組作業の所要時間の分布である。同図では、鉄筋工の人数を2人、3人、4人、5人と変化させたときの影響を調べている。

6. 結 言

又、計画手法は、その適用の効果を上げるためには、従来から工場生産において開発された各種手法の単なる導入に留まらず、工事の特質に適合するように改善又は創作するべきであることを論じている。それ由、計画手法は、その効果を充分發揮するために、工事種別、工事規模等に応じて適宜選定して使用するべきである。