

1. 緒言

建設工事における安全の確保、品質の向上、工期の短縮、原価の低減は、現在重要な社会的要請となっている。一方、施工技術の改革にともなって、工事の規模・複雑度はしだいに増加しつつあり、使用する建設機械・仮設資材も大型のものが現場に投入される様になった。これら諸設備と労働者・諸資材との円滑な運用が、今後増々必要になっている。

建設工事における工程計画の立案に際しては、複雑にからみ合った諸因子を総括的且つ詳細に判断しなければならず、従来から計画は長年の経験によって培われる技術とされてきた。このため、工程計画に対する科学的な手法の導入が充分図られておらず、企画・設計段階におけるアレハブ化・システム化等の技術改善が、工事段階において、十分にその効果を発揮していない現状にある。

建設工事における工程計画へのシステムシミュレーションの導入による最適化は、GPSS言語やGERTを用いて行われた研究が多くある。又、D. W. HalpinはCYCLONを開発し、建設工事のシミュレーションを行っている。しかし、これら既往の研究は、シミュレーションモデルの作成に多大の時間・マンパワーを要したり、工事における諸資源の流れや仮設状況を十分に表現出来ず、工事計画への活用を著しく妨げている。

本研究では、建設工事の工程についてのモデル化の方法を提案し、それに基づくGPSSシミュレーション実施の方法論を確立した。又、開発した実験システムによってコンクリート打設工事におけるシステムシミュレーションを行い、その有効性を検証した。

2. 工程のモデル化に関する基本的考え方

2. 1. 建設工事をめぐる諸活動

建設工事において必要な活動とは、諸資源を用いて部位（構築物）を造り出す一連の工事活動を意味する。ここで、資源とは、工事活動の主体となる労働者、作業対象となる材料（作業によって発生する残材を含む）及び作業手段となる設備（仮設資材、

工事用機械）を云う。又、部位とは、工事によって造り出される仕掛け状態の部分及び完成する構築物を意味する。

一連の工事活動をその内容によって区分すると、以下に示す三つに分類出来る。

- ① 運搬・揚重活動：労働者、材料や設備等の移動、運搬、揚重を主として行う活動
- ② 加工・組立活動：材料や設備等に対する加工、組立、分解を主として行う活動
- ③ 保管・保全活動：現場内における材料や設備の機能維持、保管を主として行う活動

運搬・揚重活動は、全工事活動の重要な部分を占め、現場内における労働者、材料並びに設備の円滑な流通を果す。加工・組立活動は、大別して、構築物を造り出す活動と工事に必要な諸設備の仮設・解体を行う活動がある。保管・保全活動は現場内に搬入した諸資源の品質及び機能の確保を図り、前述の活動①、②を支援するものである。

以上に示す3種類の工事活動と労働者、材料、設備並びに部位との関係は、以下に示す6種類で表すことが出来る。

- ① IN-TAKE関係：運搬・揚重の対象となり、存在している位置から他へ移動する。（例：仮設置場の鉄筋を他の場所へ揚重する）
- ② OUT-TAKE関係：運搬・揚重によってある位置に新たな資源が運ばれる。（例：5階の床に鉄筋が揚重される）
- ③ IN-PUT関係：加工・組立の対象となり、工事終了後は消滅するか、新たな別の資源又は部位に変化する。（例：鉄筋材料を配筋作業に使用する）
- ④ OUT-PUT関係：加工・組立によって新たな部位や残材が造り出される。（例：配筋作業によって組み上った柱配筋が出来る）
- ⑤ MAINTENANCE関係：保管・保全の対象となり、資源又は部位それ自身は変化しない。（例：搬入された鉄筋材料を仮設置場に保管する）
- ⑥ CATALYST関係：作業に従事又は利

用するが資源又は部位それ自身は変化しない。

(例：揚重作業にクレーンを使用する)

各工事活動と労働者、材料、設備及び部位の関係をシステム図で示すと、図. 1. a, b, cの如くなる。同図では、工事活動をボックスとして、上記①-④の関係を片方向アローで、⑤、⑥の関係を両方向アローで示している。

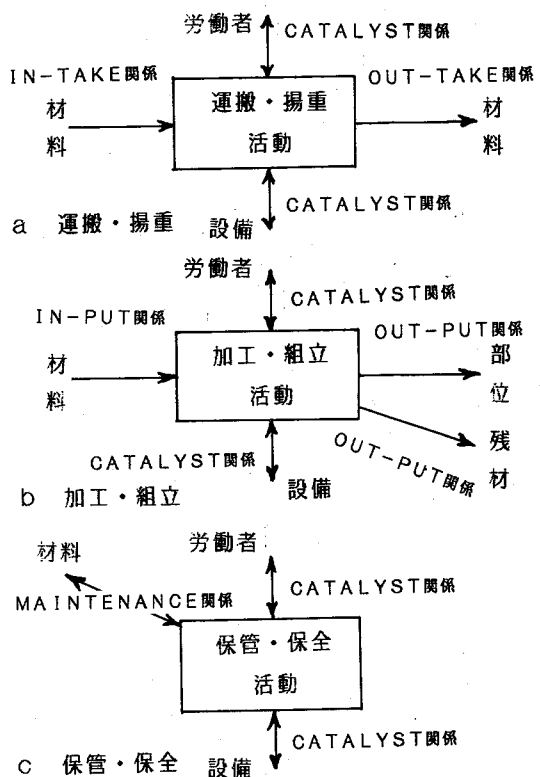


図. 1 工事活動のシステム図

2. 2 作業と工程

A. 作業

工事活動を詳細に把握するためには、全体工事の内容、時期、場所等によって細かく分解し、工事をそれらの集合として捉える必要がある。この分解のことを作業展開構造 (Work Breakdown Structure) と云う。本研究では、これを以下に示す6段階まで展開することとした。例として建築工事の場合を示す。

- ① 部分工事 (例：躯体工事、仕上工事)
- ② 単位工事 (例：配筋工事、型枠工事)
- ③ 要素工事 (例：柱配筋工事、梁配筋工事)
- ④ まとまり作業 (例：フープ取付作業、主筋取付作業)

⑤ 単位作業 (例：フープ結束作業、フープの調整作業)

⑥ 要素作業 (例：番線を束から1本引き抜く、番線をハッカで締め付ける)

本研究では、上記の展開構造に従って細分化される工事活動の単位を作業 (Activity) と呼ぶ。

B. 工程

工事を部分工事、単位工事へと分割することによって、全体工事は作業 (Activity) の集合として表現することが出来る。工事を円滑に進めるためには、これらの作業相互の諸関係が明確になっていなければならない。この作業間に存在する関係を以下に示す四つとして捉えた。

- ① 開始・終了をめぐる作業間の関係
- ② 作業間の資源の供用・転用
- ③ 資源・部位に対する作業の順序
- ④ 作業場所の作業への割当

工程は、作業、作業間の関係、並びに現場内 (作業空間) に存在する資源の集合として考える。

3. 工程のグラフ構造によるモデル化

3. 1. モデル化の基本規則

(1) 工程とグラフ構造

工程をグラフ構造で表現する方法は、すでにネットワーク手法において採用されている。しかし、同手法は作業の前後関係のみを表現するに留まっており、工事工程を充分に表すものではない。本章で提案するグラフ構造 (工事グラフと呼ぶ) は、従来のプレゼンデンス型ネットワークの表現方法に加えて、前章で述べた工程についての諸活動をグラフ構造として表現出来る様に体系化したものである。

すなわち、資源、作業、部位及び作業空間の四つの工事要素に関する情報をノッドとし、これら要素間の関係をアローとしてモデル化する。

(2) ノッド

ノッドは、資源、作業、部位、作業空間及び補助ノッドに区分され、図. 2に示す如くそれぞれ異なった形態で表す。又、各ノッドには工事要素に対応した英数字コードを付け、ノッドを識別する。

(3) アロー

要素間の関係を示すアローは、表. 1のアローコード及びアロー形式を用いてその種類を表す。又、

アローコードは、片方向型アローではアローの出发点するノッド側に、両方向型アローでは作業ノッド側に記す。

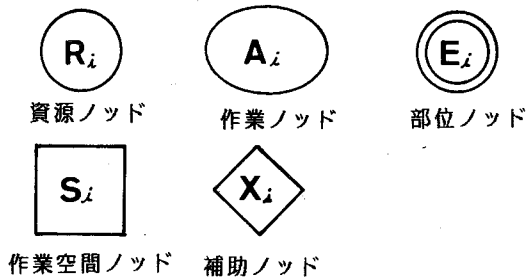


図. 2 ノッドの表現

表. 1 アローの表現

アロー名称	アローコード	アロー方向	アロー線分
空間指定アロー	SPA	片方向	実線
運搬搬重アロー	TRA	片方向	破線
資源利用アロー	CTA	両方向	破線
作業実施アロー	AFA	片方向	実線
保管保全アロー	MTA	両方向	破線
作業順序アロー	PRA	片方向	実線
作業制御アロー	CLA	片方向	実線
確率アロー	PBA	片方向	実線

3. 2. 工事要素に関する表現方法

(1) 資源

工事現場に存在する資源をモデル化するには、資源を種別、用途及び存在する位置によって区別し、各々ノッドとして表す。そして工事開始時における資源量の初期値と作業空間の占有係数をデータとして与える。

資源ノッドに関するデータは、以下の3項目である。

- ① 資源コード : 資源を表す英数字コード
- ② 初期資源量 : 工事開始時における資源量の初期値
- ③ 空間占有係数 : 資源量1単位を仮設するのに必要な作業空間の面積

(2) 作業

作業は工事活動を分解して出来る活動の単位であり、施工量、投入資源量によって作業日数(時間)が決る。又、工事現場では必要な労働者や工事用機械の数が限られるため、複数の作業を同時に開始出来ないことが多い。このとき、作業に優先度を与えて作業の開始順序を決めることとした。

作業ノッドに関するデータは、以下の6項目であ

る。

- ① 作業コード : 作業を表す英数字コード
- ② 作業日数確率分布タイプ : 作業日数を表す確率密度関数のタイプ

- i 確定値 ----- “D”
- ii 一様分布 ----- “U”
- iii 正規分布 ----- “N”
- iv 指数分布 ----- “E”

- ③ 平均作業日数 : 作業日数(時間)の平均値

- ④ 作業日数の変動 : 作業日数のバラツキを表す指標

- i 一様分布のとき、変動幅
- ii 正規分布のとき標準偏差

- ⑤ 作業優先度 : 作業開始の優先順序を表す指標。0-99の値で示し、値の大きい作業から順に開始する。

- ⑥ 作業終了タイプ : 作業終了後の取扱い方

- i 作業をモデルから取り除く
----- “0”
- ii 作業日数をゼロとする
----- “1”

(3) 部位

部位は、加工・組立活動によって造り出されるとともに、工事途中の仕掛け部位として他の工事活動のCatalystともなる。各ノッドには、その初期値(通常ゼロとなる)とそれが造り出された場合における作業空間の占有係数を与える。

部位ノッドに関するデータは、以下の3項目である。

- ① 部位コード : 部位を表す英数字コード
- ② 初期部位量 : 工事開始時における部位量の初期値
- ③ 占有係数 : 部位量1単位が造られると必要になる作業空間の面積

(4) 作業空間

工事現場内の仮設置場や作業場所などを表すためには、現場内の各場所(個所)に空間コードを付けて、ノッドとしてモデル化する。

作業空間ノッドに関するデータは、以下の2項目である。

- ① 作業空間コード : 作業空間を表す英数字コード
- ② 作業空間面積 : 作業空間が資源を仮設出来

る面積

3. 3. 位置に関する表現方法

(1) 資源の位置

工事現場を階、工区等に分割して各空間にコードを付加し、そこに存在する資源の位置を表す。

資源R1が作業空間S1に存在することをモデル化するには、作業空間ノッドから資源ノッドに至る空間指定アローを用いて、図. 3の如く示す。

資源の位置を表す空間指定アローに関するデータは、以下の2項目である

- ① アローコード : “SPA “
- ② 空間占有係数 : 資源量1単位を仮設するために必要な作業空間の面積

(2) 作業の位置

作業を行う位置を表すには、作業場所を作業空間ノッドとして表す。作業A1を作業空間S2で行う場合、作業空間ノッドから作業ノッドへ至る空間指定アローを用いて、図. 4の如く示す。

作業の位置を表す空間指定アローに関するデータは、以下の2項目である。

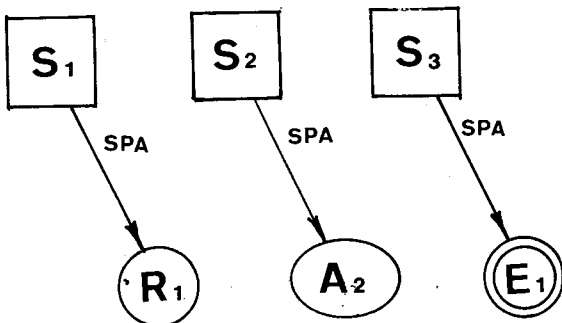
- ① アローコード : “SPA “
- ② 空間占有係数 : 作業実施中に占有する作業空間の面積

C. 部位の位置

部位の組立等の位置を示すには、資源の位置に関する表現法と同様に、部位の位置を示す特定の作業空間を定め、そのノッドから部位ノッドへ至る空間指定アローを用いる。部位E1の取り付け位置が作業空間S3である場合、空間指定アローによって図. 5の如く示す。

部位の位置を表す空間指定アローに関するデータは、以下の2項目である。

- ① アローコード : “SPA “



- ② 空間指定アロー: 部位が1単位造り出される毎に減少する作業空間の面積

3. 4. 工事活動に関する表現方法

(1) 運搬・揚重活動

現場内における資源の運搬又は揚重活動を表現するには、資材が存在する作業空間、運搬先となる作業空間及び作業の各ノッドを、運搬揚重アローで接合する。資源R2を作業空間S4からS5に運搬する作業A2は図. 6によって表す。

運搬揚重アローに関するデータは、以下の3項目である。

- ① アローコード : “TRA “
- ② 作業空間コード: 運搬・揚重活動の対象となる作業空間のコード
- ③ 資源コード : 運搬・揚重活動の対象となる資源のコード
- ④ 資源量 : 運搬・揚重活動の対象となる資源量

上記の運搬作業A2に従事する労働者と使用する仮設資材や工事用機械をモデル化する場合、各資源ノッドから作業ノッドへ至る資源利用アローを用いる。作業A2に労働者R3及びクレーンR4が必要である場合、図. 7の如く表す。

作業とCatalyst関係となる資源を表す資源利用アローに関するデータは、以下の3項目である。

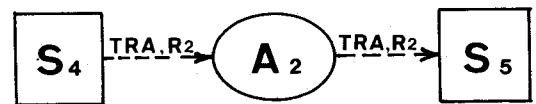


図. 6 運搬・揚重作業

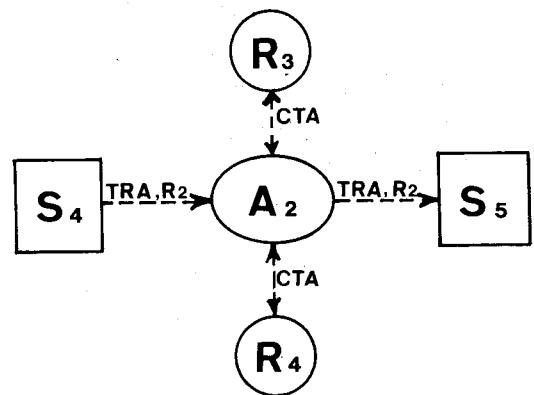


図. 3 資源の位置 図. 4 作業の位置 図. 5 部位の位置 図. 7 運搬・揚重作業における労働者

- ① アローコード : “CTA “
- ② 資源コード : 作業に利用する資源のコード
- ③ 資源量 : 作業に利用する資源の量

(2) 加工・組立活動

加工・組立作業の対象となる材料及び部位は、作業ノッドと資源ノッド、部位ノッドを作業実施アローによって接合する。労働者R5が材料R6、R7を用いて部位E2を造り出す作業A3は、図. 8によって表す。ただし、労働者R5と作業A3とは、前項(1)で述べた資源利用アローで接合する。

作業実施アローに関するデータは、以下の3項目である。

- ① アローコード : “AFA “
- ② 資源コード : 加工・組立活動の対象となる資源コード(又は部位コード)
- ③ 資源量 : 作業に必要な資源量(又は造り出される部位量)

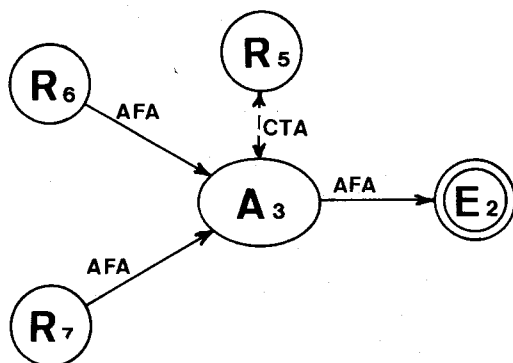


図. 8 加工・組立作業

(3) 保管・保全活動

工事現場における材料、仮設資材、工事用機械並びに部位に対する保管・保全活動は、それらを表すノッドと作業ノッドを保管保全アローによって接合して示す。労働者R8が材料R9の保管を行う作業A4は、図. 9として表す

保管保全アローに関するデータは、以下の3項目である

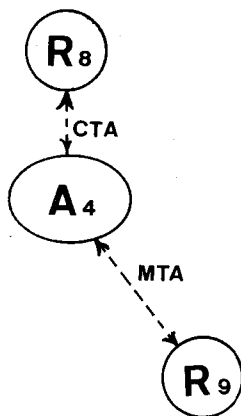


図. 9 保管・保全作業

- ① アローコード : “MTA “
- ② 資源コード : 保管・保全作業の対象となる資源(又は部位)
- ③ 資源量 : 作業の対象となる資源量(又は部位)

3. 5. 工程に関する表現方法

(1) 作業の順序

作業の順序関係は、表. 2のバーチャートに示す2種類を考える。これらの関係をグラフ構造によって表すには、作業開始の条件となる作業ノッドからその条件に制約される作業ノッドに至る作業順序アローを用いる。

作業順序アローに関するデータは、以下の2項目である。

- ① アローコード : “PRA “
- ② 順序関係コード: 順序関係を表すコード
 - i アローの出向側の作業が開始したとき入向側の作業を開始出来る “SS “
 - ii アローの出向側の作業が終了したとき入向側の作業を開始出来る “FS “

(2) 作業の制御

実施中の作業が、他の作業の進捗状況によって中断又は中止しなければならないことは多い。これを作業の制御として表. 2のバーチャートに示す2種類で表す。この関係をグラフ構造によって表すには、作業の終了時点を制御する作業ノッドから制御を受ける作業ノッドへ至る作業制御アローで示す。

表. 2 作業間の関係

種類	関係コード	関係概念	バチャート
作業順序アロー	SS	作業A1が開始した時、作業A2を開始出来る	
	FS	作業A1が終了した時、作業A2を開始出来る	
作業制御アロー	SF	作業A1が開始した時、作業A2を強制的に終了する	
	FF	作業A1が終了した時、作業A2を強制的に終了する	

作業制御アローに関するデータは、以下の2項目である。

- ① アローコード : “CLA “
- ② 制御関係コード: 作業相互間の制御関係を表すコード
 - i アローの出向側の作業が開始したとき
入向側の作業を強制的に終了する
----- “SF “
 - ii アローの出向側の作業が終了したとき
入向側の作業を強制的に終了する
----- “FF “

(3) 作業の繰り返し

作業が繰り返される場合、これを工程モデルとして表現するには2種の補助ノッドを用いる。すなわち、作業ノッドと二つの補助ノッド(再帰補助ノッド、繰り返し補助ノッド)が一つのループを構成するように作業順序アローを接合する。

図. 10はこの一例を表現するもので、作業A5の終了後作業A6を繰り返し実施し、然る後に作業A7を行う工程を示す。ただし、作業ノッドの左側に置く補助ノッドは再帰補助ノッドと呼び、コード“R“(Release)を、右側に置く補助ノッドは繰り返し補助ノッドと呼び、コード“L“(Loop)を付けて区別する。

再帰補助ノッドに関するデータは、以下の3項目である。

- ① ノッドコード : “RLN “
- ② 一次再帰アロー数: 再帰補助ノッドを最初に実現するために必要な作業順序アローの実現本数
- ③ 二次再帰アロー数: 再帰補助ノッドを2回目以降に実現するために必要な作業順序アローの実現本数

繰り返し補助ノッドに関するデータは、以下の2項目である。

- ① ノッドコード : “LPN “
 - ② 繰り返し回数 : 作業の繰り返し回数
- ### (4) 確率的条件を含む工程

作業環境によって作業方法や作業手順の変更が生じたり、確率的に補修、仕直し等の付加的作業が必要になることは少なくない。これら工程上の諸変更を確率的に捉え得ると仮定すれば、これをモデルと

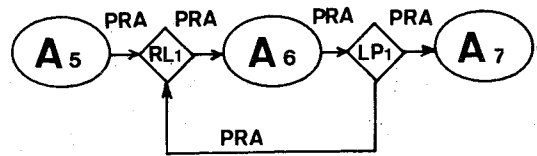
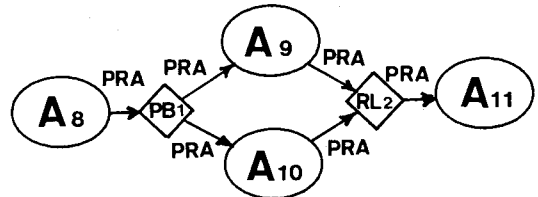
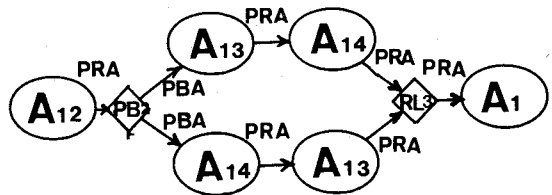


図. 10 繰り返し工程



a 確率的な作業選択



b 確率的な作業順序

図. 11 確率的条件を含む工程

して表現することが出来る。

作業方法・手順が確率的に変化したり、付加的作業が確率的に発生する場合、確率補助ノッド、再帰補助ノッド及び確率アロー、作業順序アローを用いてこれを表現する。

確率補助ノッドは、ノッドコードのみをデータとして持つ。又、再帰補助ノッドは、前項(3)に述べた作業の繰り返しで用いたデータ項目に従う。

確率アローに関するデータは、以下の2項目である。

- ① アローコード : “PBA “
- ② 採用確率 : アローで結ばれる作業が採用される確率

図. 11. aは、作業A8の後に作業A9、A10のいずれかを実施する工程を示す。図. 11. bは作業A12の後に作業A13、A14の順又は逆の順序で作業を行う工程の示している。

4. シミュレーションシステムの開発と試行

4. 1. システムの概要

本システムは、前章までに述べた工事工程のグラフ構造による表現モデルに基づく、工程シミュレーションの実施を目的としている。

本システムでは、グラフ構造モデルをGPSS (General Purpose Simulation System) 言語モデルに変換し、その後GPSSによってシミュレーションを実施する。又、グラフ構造で表現出来ない工程のロジックは直接GPSS言語で作成し、グラフ構造から変換されたものと統合した後、シミュレーションを行うことが出来る。図. 12にシステムの概要を示す。

なお、システムの開発にはPL/I言語を使用しGPSSはHITAC版を用いた。又、本システムの名称をGRAPSS (Graph-organized Planning and Simulation System With GPSS)と云う。

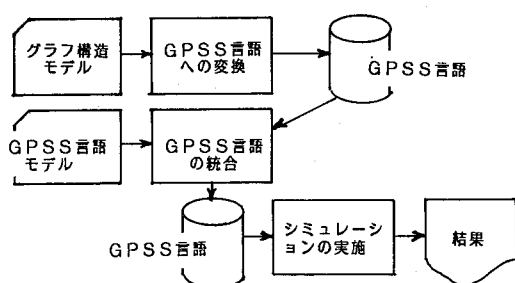


図. 12 システムの概要

4. 2. シミュレーションの試行

(1) シミュレーションモデル

本システムの有効性を検証するために、図. 13に示すコンクリート打設工事に関するシミュレーションを行った。

コンクリート打設工事は、図に示す如く、以下のサブシステムから構成される。

① バッチャープラントからのコンクリート運搬

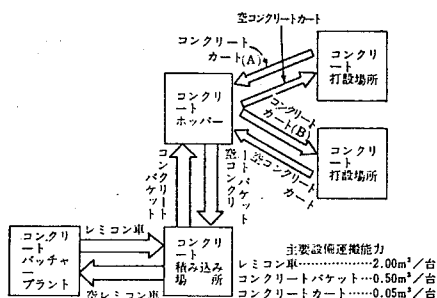


図. 13 コンクリート打設工事の概要

② 揚重機によるコンクリートの揚重

③ コンクリートカートによるコンクリートの打設

コンクリートは、バッチャープラントからレミコン車で揚重機前まで運ばれ、4回に分けて打設階まで揚重される。揚重されたコンクリートは、ホッパー内に一時蓄えられるが、ホッパーが充満していれば、その前でバケットは手待となる。一方、ホッパー内のコンクリートはカート2台で取り出されて打設されるが、ホッパー内が空であれば、カートはホッパー前で手待となる。ただしカートによるコンクリートの取り出しは、1台ずつ行うものとする。

図. 14は、上記工事をグラフ構造によってモデル化したものであり、表. 3に各作業の特性値を示した。図. 14において、R01は揚重機を表す。又、R02は運搬・打設する生コンクリートを、E01は打設した後の構築物を意味する。使用した補助ノッドは以下の通りである。

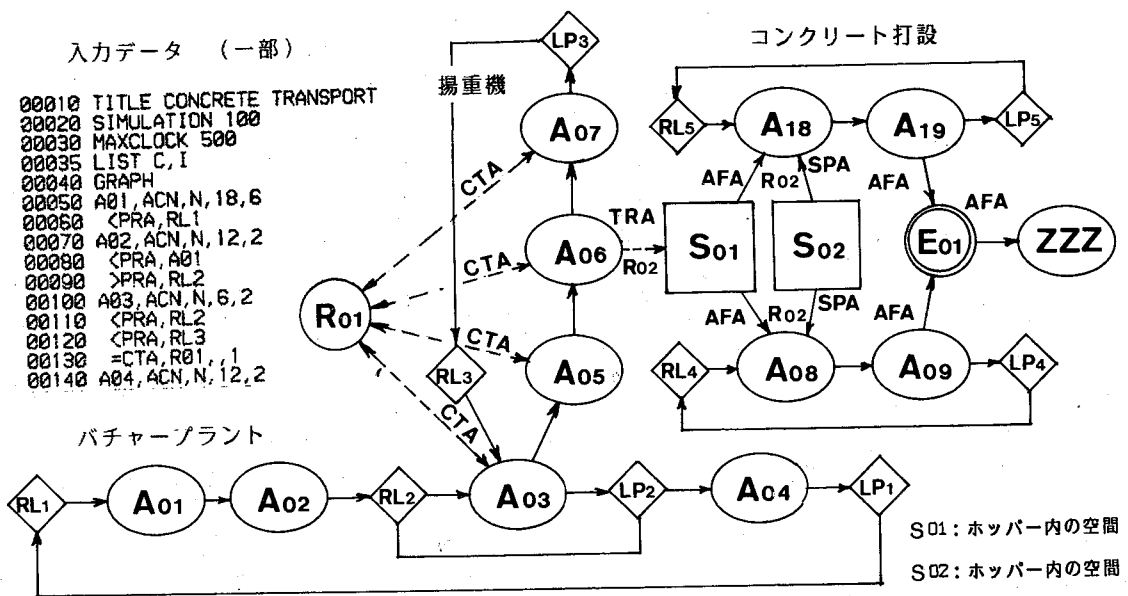
再帰補助ノッド R L 1, R L 2, R L 3, R L 4, R L 5
 繰返し補助ノッド L P 1, L P 2, L P 3, L P 4, L P 5

表. 3 作業の特性値 (単位: Sec)

作業コード	作業内容	作業時間	
		平均値	標準偏差
A01	コンクリートの積込	180	60
A02	コンクリートの運搬	120	20
A03	エレベーターへの積込	60	20
A04	レミコン車戻り	120	20
A05	バケット上り	—	20
A06	ホッパーへの積込	20	10
A07	バケット下り	—	20
A08	コンクリートの取り出し	30	10
A09	コンクリートの打設	40	20
A18	コンクリートの取り出し	30	10
A19	コンクリートの打設	40	10
ZZZ	作業終了	0	0

(2) シミュレーションの実施と考察

シミュレーションは、揚重機のを速度を6 m/sec, 2 m/sec, 1 m/sec, 0.5 m/sec, 0.33 m/secの5通りについて行い、その結果から最適揚重速度を調べた。なお、シミュレーション回数はそれぞれ100回とした。



* ZZZ * COMPLETE TIME TABLE (CLOCK)

TABLE	5	MEAN ARGUMENT	STANDARD DEVIATION	SUM OF ARGUMENTS	NON-WEIGHTED
ENTRIES IN TABLE	100	361.650	13.335	36165	
UPPER LIMIT	OBSERVED FREQUENCY	PER CENT OF TOTAL	CUMULATIVE PERCENTAGE	CUMULATIVE REMAINDER	MULTIPLE OF MEAN
300	0	0.00	0.00	100.00	0.830
310	0	0.00	0.00	100.00	0.857
320	0	0.00	0.00	100.00	0.855
330	0	0.00	0.00	100.00	0.912
340	7	7.00	7.00	93.00	0.940
350	13	13.00	20.00	80.00	0.968
360	25	25.00	45.00	55.00	0.995
370	31	31.00	76.00	24.00	1.023
380	17	17.00	93.00	7.00	1.051
390	5	5.00	98.00	2.00	1.078
400	2	2.00	100.00	0.00	1.106

REMAINING FREQUENCIES ARE ALL ZERO

図. 15 GPSSの出力

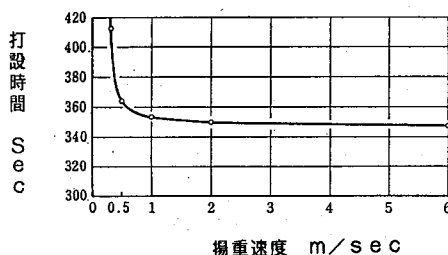


図. 16 揚重速度と打設時間の関係

図. 15は、揚重速度 1 m/sec の場合のシミュレーション結果をGPSSの出力で示したものである。4 m² 当りの打設時間は、平均値 3616.50 sec、標準偏差 133.35 sec であった。図. 16は、揚重速度と打設時間の関係を調べたものである。これから、

当工事の場合、揚重速度は 1 m/sec 以上にしてもそれ程効果が期待出来ないことが判かる。

5. 結言

本報で提案するシミュレーションの方法論は、①モデル構築の容易さ、②GPSS言語モデルとの結合、③GPSS出力の利用、の点で優れており、工事計画におけるシステムシミュレーションを迅速且つ容易に行う手段となる。

謝辞

本研究については、早稲田大学教授田村恭先生に終始ご指導を賜りました。末尾乍らここに感謝の意を表します。

(早稲田大学理工学部建築学科助教授)