

繰り返し型建築工事における TOC を用いた工程計画に関する研究

CONSTRUCTION PLANNING OF REPETITIVE WORK WITH THEORY OF CONSTRAINTS

植田浩二^{*1} 古阪秀三^{*2} 藤沢克樹^{*3} 室谷泰蔵^{*4} 金多 隆^{*5}

Koji UEDA, Shuzo FURUSAKA, Katsuki FUJISAWA, Taizo MUROYA and Takashi KANETA

The daily number of work labor is radical changeable in a jobsite when the contractors build a construction project. To improve this situation, various construction-planning methods were studied. But in recent years, because the building become high-rise and large-scale, it is very difficult to plan schedule with effective building production using past planning method, and construction planning included repetitive schedule is frequently planned. There are many past studies about construction planning of repetitive work, but until now, schedule planning is still depended on experience of the manager of construction site. Then, in this paper, the authors build a model of repetitive work, and search the optimization of this schedule planning with theory of constraints.

Keywords: *theory of constraints, repetitive work, construction planning, proficient effect, optimization*

TOC、繰り返し型建築工事、工程計画、習熟効果、最適化

1. 序論

1.1 研究の目的

建築工事は、総合工事業者、各専門工事業者の役割分担によって実施されているため、現場作業員の日々の出面は大きくばらついており、実際の工事現場では各種工事は平準化できないことが多い。こうした状況を改善するために、建築工事の工程計画には、様々な工程計画手法が利用されてきた。しかし、建物の超高層化、大規模化に伴い、従来の方法では満足のいく工程計画を行うことはできなくなりつつあり、同一の工事内容を繰り返して行う繰り返し型工程を組み込んだ工事計画を立案することが多くなっている。これに対応するため、こうした繰り返し型の建築工事における工程計画手法に関しては、多くの研究が行われているが、実際の現場の工程計画に適用される例は少数で、経験に依存した方法が主流である。繰り返し型建築工事では、常に新たな工程計画手法が求められている。

本研究の目的は、繰り返し型建築工事のモデル化を行い、TOC (Theory of Constraints: 制約の理論) を用いてコストの最小化を目的とした工程計画を作成する手法を提案することである。TOCの最も得意とする領域は、フロー・ショップ型生産の生産計画およびその改善である。フロー・ショップ型生産とはコンベアー上での流れ生

産、つまり繰り返し同一工程と同一加工順序を持った製品を同一ロットで生産するタイプの生産である。本研究では、繰り返し型建築工事では繰り返し同一の作業が行われるため、プロジェクト型生産の建築工事でありながら、フロー・ショップ型生産の性格を持っていると考え、TOCが適用可能であるとした。TOCの概要については、補で示す。また、現実のプロジェクトに最適化手法を適用して、得られた結果から当工程計画手法の有効性の検討を行う。

1.2 用語の定義

『繰り返し型工程』

決められた作業空間ごとに同じ作業を繰り返して行うよう計画された工程 (図1-1)。超高層RC造建築工事に採用される。

『工区』

ある時間的まとまりの中で作業を行う対象となる単位空間。

『工区分割』

作業空間を幾つかの工区に分割して、多くの工種が同時に作業できる状況を作ること。施工のスピードアップ、労務資源や設備資源の平準化が可能となる。

『習熟効果』

^{*1}住友信託銀行

修(工)

Sumitomo Trust Bank, M. Eng.

^{*2}京都大学大学院建築学専攻 助教授・工博

Associate Prof., Dept. of Architecture and Architectural Systems, Kyoto University, Dr. Eng.

^{*3}京都大学大学院建築学専攻 助手・博(理)

Instructor, Dept. of Architecture and Architectural Systems, Kyoto University, Dr. Sc.

^{*4}京都大学大学院建築学専攻 大学院生

Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Systems, Kyoto University.

^{*5}京都大学国際融合創造センター 助教授・博(工)

Associate Prof., International Innovation Center, Kyoto University, Dr. Eng.

同じ作業を繰り返し行くと、慣れによって次第に能率が上がってくる。これを習熟効果という。

『完全同期化工程』

繰り返し型工程において、1工区内の作業数と作業チーム数が同一で、かつ全作業が同期化されており、同ピッチで工程が繰り返し行われる。遊び時間が生じず、高い生産性が得られる(図1-2)。

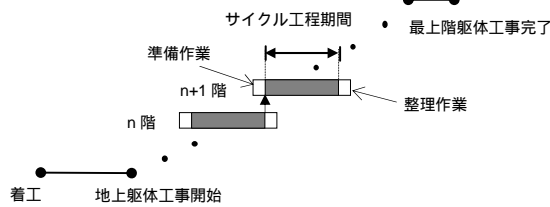


図1-1 繰り返し型工程

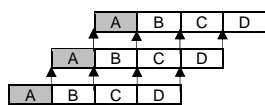


図1-2 完全同期化工程

1.3 既往の研究

本研究は、次のことを目的としている。

繰り返し型建築工事のモデル化

繰り返し型建築工事の工程計画手法の提案

提案した計画手法で作成した工程計画の最適化

そこで、本研究と関連のある繰り返し型建築工事の工程計画に関する研究成果を以下にあげる。

繰り返し型建築工事の工程計画においては、タクト方式、ラインバランシング方式といった計画手法が用いられてきた。タクト方式は、図1-3に示すように、各作業チームが各工区で1つの作業を担当し、同一のタイムモジュールで各作業を進行させることで、作業チームに手待ちを生じさせないよう計画することが可能となる。この方式によって作成される工程は、表1-1に示すような遊び時間のない工程、つまり完全同期化工程である。一方、ラインバランシング方式は、図1-4に示すように、いくつかの作業チームをつくり、各工区内の作業を各作業チームにバランスよく配分し、手待ちが生じないように計画を行う方式である。この方式によって作成された工程表を、表1-2に示す。

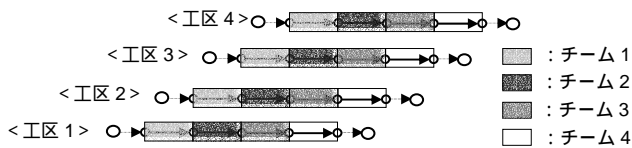


図1-3 タクト方式による工程

表1-1 タクト方式による工程表(数字は工区)

チーム1	1	2	3	4	5	6	7	...
チーム2		2	3	4	5	6		...
チーム3		1	2	3	4	5		...
チーム4			1	2	3	4		...

こうした繰り返し型建築工事の工程計画手法の分析を行った研究として、土橋ら¹⁾の研究がある。

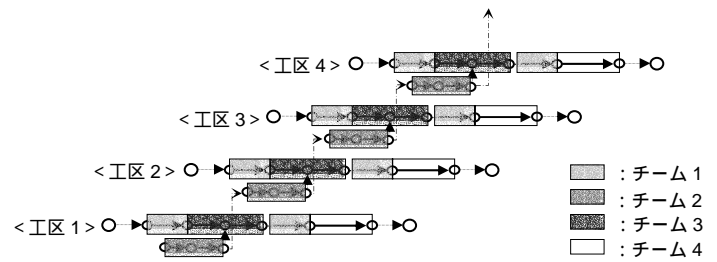


図1-4 ラインバランシング方式による工程

表1-2 ラインバランシング方式による工程表(数字は工区)

チーム1	1	2	1	3	2	4	3	5	4	6
チーム2	1	2	3	4	5					
チーム3	1	2	3	4	5					
チーム4		1	2	3	4					

土橋らは、この多工区分割工程における資源配分問題を、2つの問題に分割して捉えることが可能であるとしている。それは、「ジョブ工区分割問題」と、「有限資源下での各ジョブ工区に属するアクティビティの使用資源及び割付時間を求めるスケジューリング問題」である。ジョブ工区分割とは、単一工区での全アクティビティをいくつかのサブネットワークに分割する問題とする。このように多工区分割型工程の資源配分問題を2つに分割することによって、ジョブ工区分割問題はラインバランシング問題として、また、スケジューリング問題はジョブ・ショップ・スケジューリング問題として扱うことが可能となり、この問題を既存の問題として扱えることを示した。ここで、ラインバランシング問題とは、「1工区に含まれる全作業を幾つかの作業群に分解し、作業チームに対して作業群の配分を行う問題」、ジョブ・ショップ・スケジューリング問題とは、「有限資源下で各作業の使用資源および割付時間を求める問題」である。

また工区分割を扱った論文として、安藤ら²⁾³⁾の研究がある。安藤らは多工区同期化工法に関する研究を行い、ジョブ工区とサイト工区という、二つの工区概念を提示している。それぞれ、ジョブ工区とは作業区分を表し、サイト工区とは位置区分を表す。安藤らは多工区同期化工法の成立する条件、及び工区分割数、サイクル工期、タイムモジュール、稼働人数等を主要な変数として、目的に応じた変数の組み合わせを得る方法を明示した。また、工程要素間のインターフェイスにより、ジョブ工区への工程の割付を行う方法を提案した。

ジョブ・ショップ・スケジューリング問題としてモデル化した研究に、鎌田⁴⁾の研究がある。鎌田は、GA (Genetic Algorithm) を用いて、労務コストの観点で最適な工程計画を合理的に作成する手法を提案している。これは、GAを用いることによって、コストを最小化する、作業の先行後続関係、各作業への投入人数、各作業の開始・終了時刻の組み合わせをもつ工程計画を求めるというものである。さらに、実プロジェクトに適用し、その有効性を示している。

一方、ラインバランシング問題を含めたスケジューリング問題としてモデル化した研究としては、松本⁵⁾の研究がある。この研究の目的は、著者が試行錯誤により改良してきたMAC (Multi Activity

Chart)の作成手順を提案し、作業の習熟や作業時間の変動を考慮したときの最適化問題の考察を行うことである。MACとは、繰り返し作業のサイクルに含まれる作業を細かく分析して担当する作業チームを編成し、チームごとに作業順序・作業時間を割り当てたものである。しかし、MACの作成において、前後する作業にラップ部分を設けて全体の短縮を行ったり、工法を変更したりするなど、合理的な工程計画手法であるとは言えない。

これらの研究は、習熟効果を計画に反映させていない。つまり、工事を通して同一の作業を含む工程を繰り返し行う計画である。この場合、工事の後半における作業に関して、実際よりも作業時間を長く見積もったり、不必要に作業員を投入したりすることとなり、実際には工事途中の計画の変更が必要である。そこで、事前に習熟効果を考慮し、繰り返しが進むごとに工程を短縮したり、また、作業員数を減少させたりすることで、ムリやムラのない工程計画を作成することが可能である。このように習熟効果を考慮した計画に関する研究として、木本ら⁶⁾の研究がある。

木本らの研究は、工程計画を変更するタイミングをラインバランシングを用いて最適化するものである。まず、表計算ソフトを用いて各工区の工程表を作成し、さらに作業上の制約を守るための計画の変更や残業時間の割付をユーザーが行う。作成された工程計画を、各工区について、作業編成が含む余裕時間と作業のばらつきで評価し、最適な計画を決定する。この手法を実プロジェクトに適用し、手法の有用性を証明している。木本らは、習熟効果を考慮した計画の有効性は示したが、この研究の最適化の過程で何度もユーザーによる入力が必要であり、最適化システムとしては難点が多い。

1.5 本研究の特徴

1) TOCを用いる

フロー・ショップ型生産の計画・改善手法であるTOCを、プロジェクト型生産である建築工事現場の工程計画に対して適用する。

2) モデル化について

繰り返し型建築工事の工程計画問題を、ラインバランシング問題と、ジョブ・ショップ・スケジューリング問題の組み合わせと考える。

3) 工程計画手法

タクト方式、ラインバランシング方式を用いて、2通りの工程計画の作成が可能である。また、習熟効果を考慮する場合、考慮しない場合の両方の計画の作成を行うことが可能である。

4) 最適化手法について

工程計画の最適化手法として、TOCを用いる。具体的には、TOCの考えをLocal Searchに組み込み、それを用いて最適化を行う。

2. 繰り返し型建築工事の工程計画の作成

2.1 繰り返し型建築工事のモデル化

2.1.1 前提条件と作業ネットワークの構築

シミュレーションモデルの前提条件を、以下のように設定する。

1日の正規の現場作業時間、残業の有無を設定する。

クレーンの台数を敷地条件から決定する。

工事は、1フロアを同じ作業量を含む幾つかの工区に分割することによって行う。

型枠はシステム型枠を使用し、何セットか用意して転用する。

2.1.2 各変数の設定

工程計画作成者が、繰り返し型建築工事の工程計画を作成する上で決定する事項は、以下の通りである。本研究の繰り返し型建築工事モデルでは、これらを全て変数として設定する。それぞれの変数の説明および設定の方法について、 α 、 β 、 γ の各資源制約に関しては次項、その他の項目に関しては2.2.6で示す。

工区分割数

クレーンの台数

各システム型枠(柱、梁)のセット数

現場投入作業員数

作業担当工種

各工種の作業チーム数

各作業チームの人数

各作業の担当チーム

各作業の作業員増減数

各作業の作業開始遅れ時間

各作業の残業時間

ずらし日数

経験的に確定する作業の先行後続関係

2.1.3 制約条件の設定

本研究では、制約条件を、労務資源制約、設備資源制約、作業上の制約の3つに分類している。労務資源制約は、現場に調達可能な最大限の作業員数である。設備資源制約は、各作業に使用されるクレーンの台数、システム型枠のセット数である。作業上の制約は以下の通りである。それぞれの詳細については、2.2.6で述べる。

型枠作業に関する制約条件

コンクリート打設作業の制約条件

型枠解体作業に関する制約条件

墨出し作業に関する制約

また、本研究ではTOCに基づき、工程計画の改善とは、『制約条件工程の徹底活用』と、『制約条件工程に対する投資を伴った改善』であると考えられる。そこで、労務資源制約、設備資源制約は、工程計画を作成する上では守られるべき制約条件であるが、コストの増減を伴うことで変更することが可能であるとする。つまり、労務資源制約、設備資源制約を変数として扱うこととする。

2.2 工程計画の作成手順

2.2.1 工区分割

繰り返し型建築工事における労務の平準化や生産性の向上には、工区分割が有効である。工区分割数の検討は、作業量、コンクリートの打設量、作業能率などを中心に行う。

2.2.2 習熟効果

メンバーを固定された一定人数の作業チームが、毎日定期的に同一作業の繰り返しが行われると、作業能率が上昇する。工区数が a の繰り返し型工事では、 a 回の繰り返しが行われる。これによる作業能率上の習熟効果 me_a は下式で与えられる(文献^{7) 8)})。また、それによって工区 a の作業 i の作業工数 $W_{a,i}$ は下式で与えられる。

$me_a = \{a^k - (a-1)^k\}$ ただし、
 $W_{a,i} = \frac{V_i}{n} \cdot \frac{1}{bp_{a,i}} \cdot me_a$ k : 習熟係数 (本研究では 0.234)
 V_i : 作業 i の 1フロアの作業量 [t, m²]
 $bp_{a,i}$: 想定歩掛 [t, m²/人時]
 n : 工区分割数
 c : 工種

2.2.3 作業チーム編成

次に、作業チーム編成を行う。現場に投入される作業員数を、それぞれの工種 c (1:型枠工,2:鉄筋工,3:土工,4:鷹,5:解体工)について、 M_c と設定する。 M_c は労務資源制約 $M_{c,max}$ までの範囲内で設定される。次に、それぞれの工種について作業チーム数 t_c を指定し、現場に投入された作業員を t_c 個の作業チームに分割する。 t_c は、1 から工種 c が 1 工区内で担当する作業数の間で決められる。それぞれのチームの作業員数を $M_{c,t}$ とすると、下式で表すことができる。このように編成された作業チームは、常に同じメンバーで構成されており、同じメンバーで作業を担当することとなる。この作業チーム編成は、作業員の固定による習熟効果や労務の平準化をねらいとしたものである。

$$M_c = M_{c,1} + M_{c,2} + M_{c,3} + \dots + M_{c,t_c} = \sum_{t=1}^{t_c} M_{c,t} \quad (M_c \leq M_{c,max})$$

2.2.4 作業配分

1 工区内に含まれる全ての作業について、担当工種を担当可能な工種から選択する。次に、それらの作業を作業チームにそれぞれ配分する。ここで、1 工区で、あるチームが担当した作業は、全工区でその作業チームが担当することとする。つまり、それぞれの繰り返し作業は、常に同じ作業員によって担当されることとなる。各作業への作業員投入数 $L_{a,i}$ は、その作業が配分されたチームの作業員数 $M_{c,t}$ と、作業員の追加投入や削減による作業員の増減 $A_{a,i}$ の合計で与えられる。これによって、各作業の作業時間 $D_{a,i}$ が得られる。

$$L_{a,i} = M_{c,t} + A_{a,i}$$

$$D_{a,i} = \frac{W_{a,i}}{L_{a,i}} = \frac{1}{L_{a,i}} \cdot \frac{V_i}{n \cdot bp_i} \cdot me_a$$

ただし、 $L_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の担当作業員数
 $A_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の作業員の増減
 $D_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の作業時間

2.2.5 作業開始・終了時刻の確定

1 つの工区に含まれる全ての作業に関して、作業間の先行後続関係、作業間での設備資源、労務資源の競合、作業上の制約を考慮して、開始・終了時刻を決定する。それぞれ次式で与えられる。待ち時間は、資源の競合や作業上の制約によって生じる遊び時間である。また、下式のように残業時間を引くのは、残業が工程計画表上にない時間に行われるためである。2 工区目以降では、工区内の最初の作業の開始は、労務を平準化させるために、最早作業開始時刻にずらし日数 LT_a を加えて、開始時刻を遅らせることとする。

$$ST_{a,i} = EST_{a,i} + WT_{a,i} + DT_{a,i}$$

ただし、 $ST_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の作業開始時刻
 $EST_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の最早作業開始時刻
 $WT_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の待ち時間
 $DT_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の作業開始遅れ時間

$$FT_{a,i} = ST_{a,i} + D_{a,i} - OT_{a,i}$$

ただし、 $FT_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の作業終了時刻
 $OT_{a,i}$: 工区 a 、作業 i の残業時間

$$EST_{a+1,1} = EST_{a,1} + LT_a$$

2.6 各作業の制約条件に関する処理

1) コンクリート打設作業に関する制約

コンクリート打設作業は 2 日にまたがって行われることが禁じられている。この制約により、残業を行って一日で作業を終了させるか、作業の開始を次の日に繰り越すかによって対応する。

2) 型枠解体作業の期間に関する制約

柱型枠の解体作業はコンクリート打設日に行うことはできない。また、支保工の解体は必要な存置期間を経て行われる。その存置期間は強度試験で定まる値で、経験的に妥当と思われる 5 日間とする。

3) 型枠資源の転用に関する制約

システム型枠は解体後、清掃・整備し、再度使用される。型枠資源が m セット用意されると、 $m+1$ 工区以降では転用された型枠が使用され、型枠資源が十分すぎる場合を除き、 a 工区の型枠組立作業は、 $a-m$ 工区の型枠整備作業終了後に開始可能となる。

4) 墨出し作業に関する制約

ある工区の墨出し作業は、その工区の下階にある同じ位置の工区のコンクリート打設作業が終了するまで開始できない。

2.3 工程計画の評価

全作業の開始・終了時刻を確定させると、プロジェクトの全体工期 $Term$ が求められる。これより、総コスト $Cost$ を求めることが可能である。総コストは、労務コスト LC 、クレーンコスト CC 、型枠コスト MC 、残業コスト OC 、現場経費 SC の合計で与えられる。

本研究は、TOCの目的であるスループットを最大化する工程計画を作成することを目的としている。繰り返し型建築工事におけるスループットの最大化は、総コストの最小化であるといえる。

$$Cost = LC + CC + MC + OC + SC + FC \quad \text{最小化}$$

$$LC = \sum_d \sum_{c=1}^5 nw_{c,d} \cdot lc_c$$

$$CC = Term \cdot cc$$

$$MC = m_h \cdot mc_h + m_v \cdot mc_v$$

$$OC = \sum_{a=1}^N \sum_{i=1}^{job} (OT_{a,i} \cdot oc_{class_i})$$

$$SC = Term \cdot sc$$

$$FC = \sum_{a=1}^N \sum_{i=1}^{job} (A_{a,i} \cdot lc_{class_i})$$

ただし、
 $nw_{c,d}$: d 日の工種 c の作業員の出面
 lc_c : 工種 c の作業員の労務単価
 cc : 1日あたりのクレーンコスト
 m_h, m_v : 柱、梁型枠のセット数
 mc_h, mc_v : 柱、梁型枠 1 セットのコスト
 sc : 1日あたりの現場経費
 oc_c : 工種 c の作業員の残業単価
 $class_i$: 作業 i の担当工種
 N : 工区数
 job : 1 工区内の作業数

2.4 本研究の工程計画手法の特徴

1) 工程計画作成者の決定事項を全て変数として扱う

工程計画作成上、作成者が検討する全ての事項を、本モデル内で変数として扱い、多様な条件下で工程計画を作成することができる。

2) タクト方式とラインバランシング方式による工程計画の作成

1 工区に含まれる作業数と同数の作業チームを編成する場合は、タクト方式、一方、1 工区に含まれる作業数よりも少ない作業チー

ムを編成する場合は、ラインバランシング方式による工程計画であり、この両方の手法による計画の作成が可能である。

3) 習熟効果の考慮

本計画手法では、習熟効果を考慮する場合、考慮しない場合の両方の計画の作成が可能である。

3. 最適化プログラムの開発

ここでは、2で述べた手順で作成された繰り返し型建築工事の工程計画を、最適化する手法について述べる。その最適化手法とは、TOCの概念を取り入れた多点出発の2段階構成によるLocal Search (局所探索法) である。

3.1 繰り返し型建築工事のデータ構造

3.1.1 入力値と出力値

[入力値]

作業データ

- ・フロア作業量：1フロアに含まれる各作業の作業量
- ・担当可能な工種：各作業について、担当可能な工種を設定
- ・技術的先行関係：技術的観点から決定される作業の先行関係
- ・担当可能最小人数：作業の担当に最低限必要な作業員数(人)

クレーン作業データ

- ・クレーン作業量：1フロアに含まれる各作業の部材数(ピース)
- ・クレーン性能：部材1ピース辺りクレーン使用時間(時/ピース)

コストデータ

- ・各工種の作業員の1日あたり労務単価(万円/日)
- ・クレーン1機の1日あたりのコスト(万円/機・日)
- ・各システム型枠の1セットあたりのコスト(万円/セット)
- ・各工種の作業員の1時間あたりの残業単価(万円/人・時)
- ・1日あたりの現場経費(万円/日)

[出力値]

工期(日)

総コスト(万円)

3.1.2 変数の設定

本モデルで使用する変数は2.1.2で示した13個である。それぞれの変数の決定方法については、3.2.4で示す。

3.2 本研究の最適化手法

3.2.1 最適化手法の特徴

本研究における最適な工程計画とは、TOCの生産計画手法であるDBRに基づいた工程計画であると考えられる。DBRに基づく工程計画とは、ドラム、バッファ、ロープのみに注目して作成された工程計画である。本研究の最適化では、DBRの考え方とTOCの生産改善の考え方を取り入れたLocal Searchを用いて、工程計画の最適化を行う。そこでまず、繰り返し型建築工事における、ドラム、バッファ、ロープの3要素、TOCの改善手法を次のように解釈する。

1) ドラム(制約条件工程)

ドラムを労務資源制約上、最も能力の低い作業であるとする、これは『作業間での労務資源の競合によって生じる、各工区での待ち時間の合計が最も大きい作業』と考えられる。労務資源の競合によって生じる待ち時間が最も大きい作業は、他の作業に遊び時間を

発生させ工程の生産性を下げる、制約条件工程である。

2) バッファ

制約条件工程の生産が停止することを防ぐために、制約条件工程の前に置くバッファ(計画的在庫)を、『待ち時間』と考える。制約条件工程の待ち時間が常にゼロにならないように管理する、つまり、制約条件工程の先行作業を余裕を持って終了させることで、制約条件工程を担当する作業員の活動が停止しないように管理する。

3) ロープ

ロープとは、制約条件工程の生産ペースに同期させて材料を先頭工程に投入させるしくみである。これは、繰り返し型建築工事では、『ずらし日数』である。ずらし日数を管理することで、制約条件工程の待ち時間を管理することが可能である。つまり、制約条件工程の待ち時間(バッファサイズ)が小さい場合は、ずらし日数を小さくして、工区先の先頭作業の作業開始のタイミングを早くすることで、待ち時間がゼロにならないようにすることが可能である。

4) TOCによる生産改善方法

制約条件工程を徹底的に活用する

制約条件工程を徹底的に活用する方法として、(a)ロット分割による負荷分散、(b)他の設備による代替、などがある。これらを行うことによって、制約条件工程の生産能率を向上させることが可能である。これを、(a)工区分割による負荷分散、(b)他工種、他の作業チームによる担当、と考える。

制約条件工程以外を制約条件工程に従わせる

制約条件工程以外の作業では仕掛りは不要であるので、資源の過剰投入を抑え、制約条件工程の生産ペースにあわせた計画を行う。つまり、制約条件工程以外の作業の資源の投入量を減少させる。

制約条件工程の能力を向上させる

制約条件工程の能力を向上させる投資を行い、工程計画の変更を行う。制約条件工程、つまり、各工区の待ち時間の合計が最大の作業について、資源の追加投入を行う。

繰り返し型建築工事の工程計画に対するTOCの適用についてまとめると、図3-1に示す通りである。

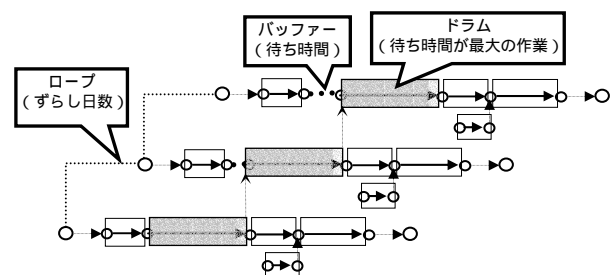


図3-1 DBRによる工程計画

また、上述のTOCに基づく工程計画の変更の方法をまとめると、以下の通りである。

工区分割数の変更

制約条件工程を担当するチームの変更

制約条件工程を担当する工種の変更

制約条件工程に対する資源投入量の増加

制約条件工程以外の工程に対する資源投入量の減少

制約条件工程の待ち時間が適当でない場合のずらし日数の変更
 制約条件工程の待ち時間が適当でない場合でかつ、制約条件工程
 が型枠作業である場合の型枠資源数の変更

ここで、本研究の工程計画最適化問題とは、総コストを最小化する、13種類の変数の組み合わせを決定する問題である。本最適化手法では、これらの変数の組み合わせを Local Search を用いて決定するが、この過程に TOC の考えを取り入れる。つまり、本研究の Local Search では、初期解の近傍にある近似解とは、『初期解となる工程計画に対し、上記の ~ による改善によって得られる工程計画である』と定義する。しかし、 、 による改善、 、 におけるクレーン資源の変更による改善は、工程計画全体を大きく変更させるため、これらを変更して作成した工程計画は、初期解の近似解であるとは言えない。そこで、初期解の近傍にある近似解を、『初期解に対して、労務資源量、ずらし日数、型枠資源数の変更を行った解』に限定する。 、 による改善、クレーン資源の変更による改善は、これらを変更した初期解を多数生成することで対応する。

3.2.2 第一段階の最適化

各作業チームの人数の変更に基づく最適化では、総コストを最小とする工程計画の作成を目的としている。本最適化の具体的な方法は、まず、労務資源制約、設備資源制約、作業上の制約に関し実行可能な工程計画を初期解として生成する。近傍探索として、1つの作業チームの人数を変化させ、制約条件を守っているかを判定した上で工程計画を作成し、作業チーム人数の増減による総コストの増減を算出し、初期解との比較検討を行う(図3-3)。

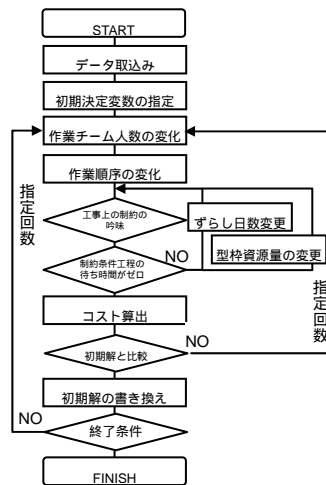


図3-3 第一段階の最適化のフロー

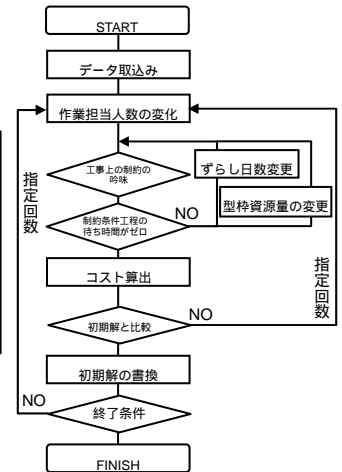


図3-4 第二段階の最適化のフロー

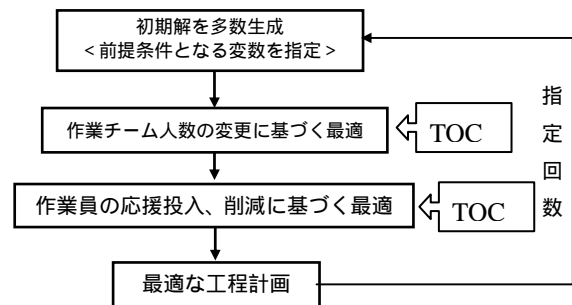


図3-5 本研究の最適化と TOC の関係

3.2.3 第二段階の最適化

作業に対する作業員の応援投入、削減に基づく最適化は、3.2.2「第一段階の最適化」の後に行う。本最適化も、総コストを最小とする工程計画の作成を目的としている。本最適化の具体的な方法は、まず作業チーム人数の変更に基づく最適化によって得られた工程計画を初期解とする。この初期解は、労務資源制約、設備資源制約、作業上の制約に関し実行可能な工程計画である。近傍探索として、1つの作業の作業投入人数を変化させ、制約条件を守っているかを判定した上で工程計画を作成し、作業投入人数の増減によるコストの増減と、工期の変化による、クレーンコスト、労務コスト、現場経費の増減を算出し、初期解との比較検討を行う(図3-4)。

3.2.4 本研究の最適化のプロセス

まず、初期解生成においては、工区分割数、クレーンの台数、工種別現場投入作業員数、作業担当工種、各工種の作業チーム数、各作業の担当チームがランダムに指定され、実行可能な初期解が生成される。この初期解に対し、第一段階の最適化、第二段階の最適化を、連続して行うことによって、最適解として、総コストが最小化された工程計画を得る。ずらし日数、各システム型枠のセット数は、最適化の過程で、最適値の決定を行う。以上で、改良アルゴリズムを終了し、初期解生成段階から再び探索をはじめ、これを繰り返す。以上、2種類の最適化を行い、労務資源制約、設備資源制約、作業上の制約を守った総コストが最小な工程計画が作成される。

4. 実プロジェクトへの適用と検証

4.1 対象プロジェクトの概要

本研究では、提案した工程計画手法を、実際に行われたプロジェクトに適用する。適用対象プロジェクトの概要を表4-1に示す。

表4-1 対象プロジェクトの概要

対象プロジェクト	
用途	... 共同住宅、商業施設等
工期	...1994年7月~1997年10月
構造	... 鉄筋コンクリート造
階数	... 地下3階、地上26階、塔屋1階
延床面積	... 55,261 m ²

4.2 評価の方法

工程計画の評価は、工事に要した総コストによって行われる。コストに関するデータは、表4-2に示す。(文献⁹⁾より)

表4-2 コストデータ

労務単価 (万円/人・日)		現場コスト (万円/日)	
型枠工	1.9	66	
鉄筋工	1.8	揚重機コスト (万円/機・日)	
土工	1.8	30	
鷹	1.9	型枠コスト (万円/セット)	
残業コスト (万円/人・時)		柱	100
各工種	0.5	梁	150

ここで、計画の評価を行う上での本モデルの問題点を挙げる。本モデルでは図4-1に示す3作業が同工種によって担当される作業である場合、N日の午後では、5人の作業員がその日の現場での作業を終了させ現場を去った後、後続の作業を行うために同工種の全く別の2人の作業員が現場に投入されることとなる。これによって、N日午後の最大出面が5人であるのに対し、7人分の労務コストが支払われることになり、労務コストが高く計算されるが、実際の現場でこうした事が行われることは考えにくい。そこで、労務コストの計算においては最大出面を元に計算することとする。

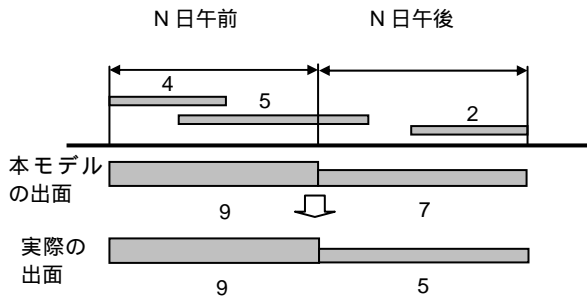


図4-1 コスト計算上の問題点

4.3 実際に検討された計画案と最適化結果の比較

[前提条件]

1 日の作業時間を6時間とするが、残業は認める。

2 工区に分割して工事を行う。

敷地条件によりクレーンは2台とする。

柱、梁システム型枠はそれぞれ、1、3セット用意する。

本研究では最適化手法を適用する際には、前提条件を変数として計画を行った。実際に検討された計画案を本モデルで評価した結果と、表4-3に示す。また、本最適化手法によって作成された計画の評価結果を表4-4、4-5に示す。表4-4に示される計画は、習熟効果を計画に反映させずに計画を作成した最適化結果である。一方、表4-5に示す計画は、習熟効果を考慮して作成した工程計画表である。ここでは習熟率を85%として計算した。

表4-3 実計画案の評価結果

工期(日)	208
総コスト(万円)	36617
労務コスト	9859
型枠コスト	550
クレーンコスト	12480
現場経費	13728

表4-4 習熟効果を考慮しない最適化計画の評価結果

工期(日)	214
総コスト	39784
労務コスト	12070
型枠コスト	750
クレーンコスト	12840
現場経費	14124

表4-5 習熟効果を考慮した最適化計画の評価結果

工期(日)	149
総コスト	28954
労務コスト	9180
型枠コスト	1000
クレーンコスト	8940
現場経費	9834

表4-6 タクト方式による最適化計画の評価結果

工期(日)	150
総コスト	30824
労務コスト	10920
型枠コスト	1000
クレーンコスト	9000
現場経費	9900

4.4 考察

4.4.1 コストについて

表4-3、表4-4、表4-5を比較すると、表4-5が最良の計画であるのは明らかである。この理由は、習熟効果によって労務コストが大きく減少したことが考えられる。具体的には、工事開始当初は2日にまたがっていた作業が1日に収まるようになったり、1日作業であった作業が半日作業になったこと、また、本研究の2段階目の最適化によって、工区が進むにつれて作業チームの人数が減少させたことなどである。これによって、本研究の計画手法が、習熟効果を考慮した計画を行える点で有効であることを示したといえる。

4.4.2 工期について

表4-3、表4-5を比較すると、工期において、本最適化手法による最適な計画が、明らかに優秀な解であることが分かる。習熟効果を考慮して計画を行うことが有効であることがさらに明らかになったといえる。一方で、表4-3、表4-4の比較では、実計画案の方が優秀な計画であり、この理由としては、実計画案が習熟効果を考慮しない場合のみに対応して繰り返し同一工程を作成することを得意としていたためであると考えられる。

また、実計画案においては型枠資源数が柱、梁で1、3であったが、本研究の最適化結果においては、それぞれ4、4であった。TOCの制約条件に関する考え方を適用する事によって、本来は実行不可能解として考えられていた計画を最適解として作成した。

4.4.3 タクト方式とラインバランシング方式の工程計画の比較

タクト方式によって作成した最適な計画と、ラインバランシング方式によって作成した最適な計画を比較する。タクト方式による最適な計画の評価結果を、表4-6に示す。表4-5と表4-6の比較によって、タクト方式による計画の評価が、ラインバランシング方式による計画を下回る結果となった。これは、対象プロジェクトのように工事が2工区分割である場合、墨出しを担当する作業チームをとってみれば、2工区目までは作業を連続して行うことが可能であるが、3工区目の作業は、1工区目のコンクリート打設作業が終了してからでなければ、開始することは出来ない。この制約条件によって、墨出し作業を担当する作業チームは、3工区目の作業の開始がすぐに開始できず、生産性の高い工程の作成が不可能であった。

4.5 まとめ

3で提案した最適化プログラムを、実プロジェクトに適用することによって、次の結果が得られた。

本最適化プログラムは、工程計画者が工程計画を作成する上で決定する全ての事項を変数として扱っており、様々な条件で工程計画を作成することで、計画の決定を支援するプログラムとなり得る可能性を示した。

また、TOCの考え方を最適解探索に取り入れることで、型枠資源制約や労務資源制約に関して非常に柔軟に対応することが可能となった。これによって実行可能な工程計画が増えたこと、さらに指標を用いたLocal Searchを行ったことなどによって、的確に広域に解を探索することが可能となった。

また、習熟効果を考慮しない工程計画の作成に対して、習熟効果

を考慮した計画が有効であることが明らかとなった。

また、本研究の工程計画手法では、タクト方式による計画の作成と、ラインバランシング方式による計画の作成を同時に行ったが、繰り返し型建築工事において、完全同期化工程の作成は困難であることが分かった。

最後に、本モデルの問題点を挙げる。実際に検討された計画案では、作業チームの合併・分割や、作業期間に実行可能な作業量を上回る作業を割り付ける、「まるめ」と呼ばれる行為が行われているが、こうした現場所長による計画上の柔軟な行為は本モデルでは考慮することの出来ないものである。

5. 結論

本研究では、繰り返し型建築工事のモデル化を行い、TOC(Theory of Constraints: 制約の理論)を用いてコストが最小化された工程計画を作成する手法を提案した。さらに、現実のプロジェクトに最適化手法を適用して、得られた結果から当工程計画手法の有効性の検討を行った。得られた知見を以下に示す。

本研究の工程計画最適化手法は、工程計画作成者が決定する全ての事項を変数として扱っている。これによって、様々な条件下で工程計画を行うことが可能となった。さらに、従来、制約条件は「守るべき条件」として捉えられていたが、TOCの理論に従って、「コストの増減を伴うことで変更可能な条件」であるとする事で、計画者が本来考慮することのなかった範囲をも含めて幅広い範囲内で最適な工程計画を作成することが可能となった。

繰り返し型建築工事の要素とTOCの理論を照らし合わせることで、変数間の関係を明らかにすることが可能となった。さらに、Local SearchにTOCを組み込むことで、TOCによって意味付けられた3種類のパラメータを同時に効率よく変更しながら最適解探索を行うことが可能となった。また、制約条件工程を探索する指標を与えて探索を行うことで効率よく解を探索することが可能となった。

また、TOCは本来、進行中の生産現場において、現場所長が日々、制約条件工程を見つけ、その日の生産計画を作成する行為を支援するための手法である。本研究では、このTOCの考え方を工程計画の段階に採用した。つまり、TOCの考え方をを用いることで、事前に工程計画上の問題点を把握し、日々の計画の変更を行う必要のない工程計画を作成することをねらいとしていた。しかし、実際の現場においては、事前に想定した歩掛りや習熟効果の通りに作業が進行するわけではない。こうした場合、生産状況に合わせて計画の途中変更を行う必要が出てくる。本研究の最適化プログラムでは、こうした状況に対しては、現場作業開始後の毎日の作業終了後に、それまでの作業の進行状況を入力値として翌日以降の最適な工程計画を作成し、それに沿って生産を行うことで対応する。しかし、このような度重なる計画の変更によって、実際にプロジェクト全体としてムリ、ムラのない工程計画となるかどうかは、実際の現場で採用して確認する必要がある。また、他の最適化手法との細部にわたる比較検討も行う必要がある。

補. TOC の概要 (文献¹⁰⁾より)

1) TOC とは

収益をあげるということを目的とし、組織全体の中でどこをどの

ように注目すべきかを示す経営改善の理論。目的は、スループット(売上 - 資材費)を最大化することにある。TOCは組織内に制約を見つけ、そのみを改善することによって組織の経営を改善する理論である。TOCの生産改善のステップを以下に示す。

制約条件を見つける

制約条件を徹底的に活用する

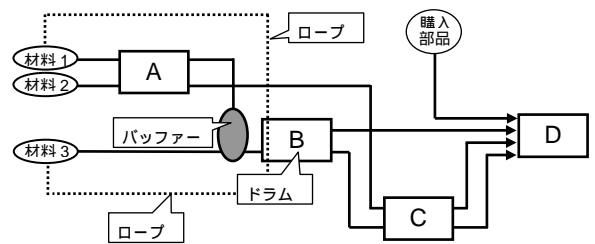
制約条件以外を制約条件に従わせる

制約条件の能力を向上させる

惰性に注意しながら繰り返す

2) TOC スケジューリング

TOC スケジューリングは、DBR (drum-buffer-robe: ドラム・バッファ・ローブ)とも呼ばれ、全工程の同期化をはかり、仕掛を最小化し、生産リードタイムを短縮し、生産能力を100%引き出そうとするものである。DBRの概念図は下図に表すとおりである。



ドラム：制約条件工程に相当
バッファ：制約条件を守るために制約条件の前に設置する在庫
ローブ：制約条件の生産ベースに同期させて材料を先頭工程に投入

図 DBR の概念図

参考文献

- 1) 土橋裕美、石井勇、探索モデルによる多工区分割型工程の資源配分アルゴリズム、第17回情報システム利用技術シンポジウム、pp.55~60, 1994
- 2) 安藤正雄、崔 民権、浦江真人、成田道紀、多工区同期化工法に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.475~476, 1983
- 3) 浦江真人、安藤正雄、遠藤裕造、河谷史郎、同期化された水平多工区分割方法の計画に関する研究、第一回建築生産と管理技術シンポジウム、pp.45~52, 1985
- 4) 鎌田元信、古阪秀三、金多 隆、勝山典一、繰り返し型工事における遺伝的アルゴリズムを用いた工程計画手法の考察と実プロジェクトへの適用、日本建築学会計画系論文集、第522号、pp.255~262, 1999
- 5) 松本信二、建築施工の計画方法に関する研究、清水建設研究報告別冊第21号、1987
- 6) 木本健二、遠藤和義、岩下智、田中愛輔、木村義彦、小森隆司、小野吉郎、高層建築工事における基準階工程シミュレーションシステムの開発、第16回建築生産シンポジウム、pp.161~166, 2000
- 7) 三根直人、野中稔、建築施工管理の合理化に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.131~132, 1974
- 8) 室英治、人見亨、佐々木良和、三島富生、沢田日出海、谷出直義、大規模高層集合住宅建設工事の生産システムに関する調査研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1925~1926, 1978
- 9) 積算資料2001年1月、財団法人経済調査会
- 10) 加藤治彦、竹之内隆、村上悟、TOC 戦略マネジメント、日本能率協会マネジメントセンター、1999