

建築施工における作業計画および管理方法に関する研究(その1)

松 本 信 二
(技術本部技術室)

三 根 直 人
(技術研究所)

内 山 義 次
(技術研究所)

§ 1. はじめに

建築施工は、機械または人間の行なう作業の集合であり、与えられた目的（建築物の生産）に対してどのような作業を組み合わせで達成するか、それらの作業をどのような手順で行なうか、どのようなタイミングで行なうかが施工計画の中心課題である。

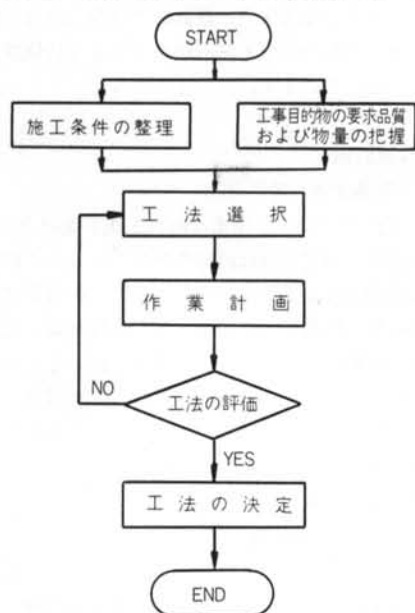
このような問題に対して最適解を得るための手法はまだ確立されておらず、もっぱら経験的に対処してきたといえる。ある一つの建築物を施工する場合でも、種々の作業の組み合わせ方が考えられる。すなわち、種々の工法を適用することができる。作業の組み合わせを決めても、いろいろな手順が考えられ、各々の作業を実施するタイミングの組み合わせもいろいろ考えられる。

ある工法が決まった場合、その工法をどのようなチーム編成で、どのようなタイミングで行なうかという計画

を作業計画という。本論は、このような作業計画に関するものであり、筆者等が実際の施工計画に参画しながら検討を進めてきたものである。

このような作業計画を可能にするためには、施工のシステム化が前提になると筆者等は考えている。ここでいうシステム化とは、一定の人数の作業チームをいくつか編成し、すべての作業チームおよび施工機械が一定のリズムで繰り返し作業を進められるようにすることである。繰り返しを多くすることによって習熟効果を期待することができ、作業能率を向上させることができる。このような考え方は製造業においては当然のことであり、改めていうまでもない。

施工をシステム化した場合、作業計画のツールとしてマルチ・アクティビティ・チャート (Multi Activity Chart: 以下、MAC と略す) が特に有効である。本論では、MAC を用いて作業計画を行なう場合のいくつかの問題について考察する。



図一 1 工法計画の手順

§ 2. 工法計画と作業計画

2.1 工法計画¹⁾²⁾

施工計画には施工管理に必要なあらゆる計画が含まれるが、その中心となるのは現場における直接的な生産活動としての工法に関するものであり、これを工法計画という。工法計画とは、与えられた施工条件の中で工法を最適化することである。ただし、与えられた施工条件も全部が全部絶対的なものではなく、工法計画の過程で逐次修正していくべきものが多い。

工法計画に当たっては次の2つの命題があり、図一1に示す手順で計画作業を進める。

- (i) どのような工法を採用するか (工法選択)
- (ii) 工法をどのようなチーム編成で、どのようなタイミングで実施するか (作業計画)

工法選択が施工方法の定性的な計画であるとすれば、

作業計画は定量的な計画といえることができる。工法が決まらなければ作業計画はできず、作業計画をしなければ工法を評価することができない。まず、施工条件にかなうあらゆる工法を洗い出すことから始める。次に、基本的な項目についてのラフな作業計画をやりながら、徐々に工法をしばり込んでいく。最後に残った有力な工法については、詳細な作業計画をやって最終的な評価を行なう。途中で適した工法がなくなってしまうような場合には、新しい工法を考え出すか、施工条件を変更することによって一連の計画作業をやり直すか、どちらかの方法を選ばなければならない。

いずれにしても、工法の選択に当たっては工法の評価を行わなければならない。工法評価を行なう場合の評価項目としては次のようなものがある。

- (1)品質
- (2)作業の安全性
- (3)生産性（コスト、工期、労働生産性など）
- (4)リスク

最後に挙げたリスクについては若干の説明が必要であろう。ここでいうリスクとは、工事を計画し実施した場合に当初の目的を達成することができなくなる危険性の程度を意味する。通常、品質・安全性・生産性の各々に対するリスクが存在する。

これら4つの評価項目の間には、種々の因果関係がある。品質を良くするためには手間がかかることが多く、生産性が低下することが多い。生産性を向上させようとすると種々のリスクが大きくなることが多い。一方、品質や作業の安全性を向上させながら、同時に生産性も向上させるような工法もある。工法計画とは、これら4つの評価項目のバランスを考えることによって総合的に最適な工法を見いだすことにほかならない。

バランスを考えるとといっても容易なことではないので次のように単純化して考える。すなわち、品質や作業の安全性については、良いか悪いかという二者択一の判断のみを行なうことにする。品質や作業の安全性の主要事項については設計図・法規等によってすでに決められており、その最低限界を設定しやすい。そこで、設定した最低限度を満足しないような工法は評価の対象からはずすことができる。このようにして品質と安全性の問題を処理することができれば、すべての工法は生産性およびリスクのみで評価することができる。必ずしもこのように単純にいかない場合もあるが、多くの場合は適用できる。仕上工事等で美観が重要な意味を持つような場合には難しい問題となる。

このように考えてくると、実質的には生産性とリスク

の評価が問題になる。この段階ではリスクも生産性にかかわるものを中心となるので、生産性の問題として一元化して考えても良い。生産性の評価項目としては次のものを考える必要がある。

- (1)コスト
- (2)工期
- (3)労働生産性

この他にも、仮設構造物や施工機械のような生産設備に特有の事項が考えられる。例えば、使用する仮設機材の量も手持ちの機種に応じて生産性の評価をしなければならない場合が多い。しかし、大部分はコストの問題として処理することができる。さもなければ、工法が可能か否かという大きな問題として処理することができる。すなわち、生産設備の問題は品質や作業の安全性と同様に工法選択の前提条件としてとらえ、生産性評価の上ではコストの問題に帰着させることができる。

上に挙げた生産性を評価する3つの項目は、互いにトレードオフの関係になっている場合が多い。工期を短縮させるにはコストが高くなり、労働生産性を高くするために繰り返し回数を多くしようとすると工期が長くなってしまふ。この場合にも、話を単純化するために工期や労働生産性を施工条件と考えると、生産性の評価とはコストの最小化ということにほかならない。

工法計画に対する筆者等の考え方について述べたが、工法計画は単に施工段階でのみ対応すべきものではなく、設計段階からの一連の作業として実施すべきものである。そのような意味で、設計および施工を含む建築生産の主要な活動の中で工法計画がどのように位置づけられるかを図-2に示す。

2.2 作業計画

2.2.1 作業計画の考え方

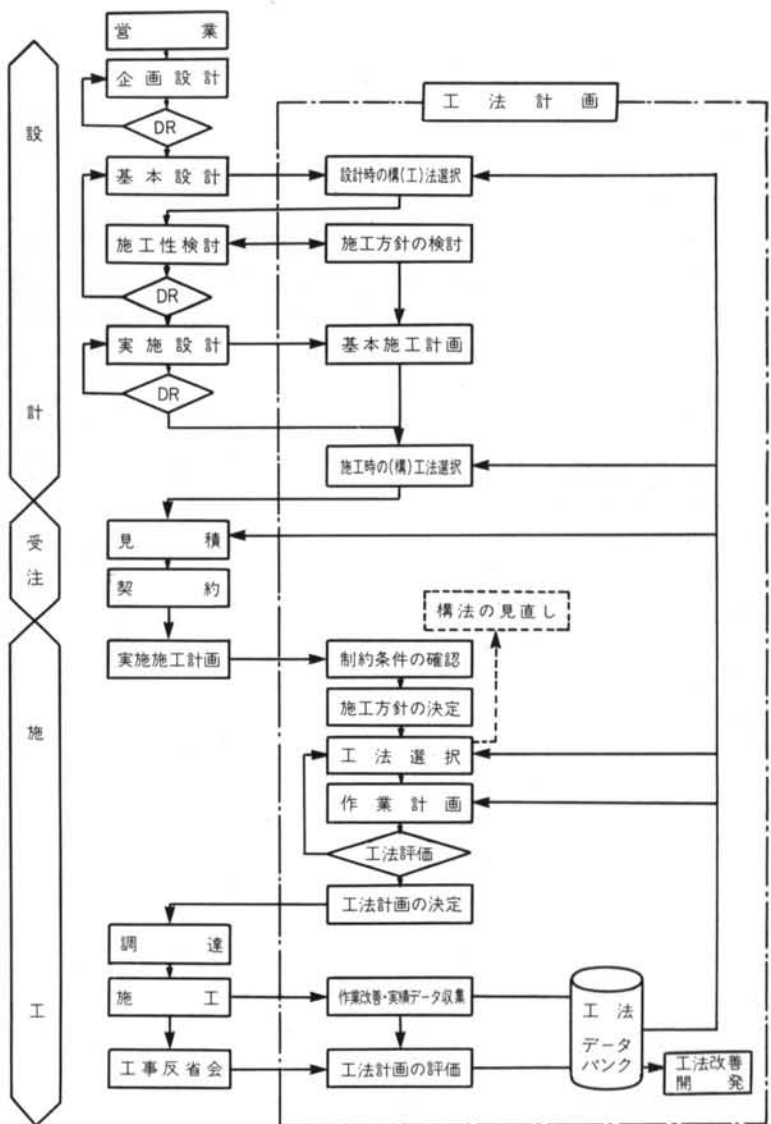
2.1に述べたごとく、作業計画は工法が選択され、施工方法の概略が設定された段階で行なわれる。工法選択の段階で選定される工法は、一般に複数の代替案である。したがって、作業計画の段階では工法代替案に対して作業面から定量的に評価し工法案を絞り込むとともに、絞り込まれた工法について最適な作業方法を設定する。すなわち、作業計画とは工法の適用方法を最適化することであり、その内容は次のとおりである。

- (1)工区分割の決定
- (2)サイクル時間の設定
- (3)作業チームの構成
- (4)各作業チームの作業手順・作業日程の計画
- (5)施工設備の転用計画

施工時に関係するコストのうちの直接費は、材料、労務、生産設備のコストである。材料費は鉄筋、コンクリート等建物を構成する材料費で、いかなる工法・作業方法を採用しても構法が変わらなければ一定である。しかし、労務費やクレーン・仮設材の損料、型枠材料費等で構成される生産設備費は同一の構法でも大きく変わる要素である。さらに、同一の工法を採用した場合でも作業者の手待ちによって労務費は上昇し、機械の稼働率、型枠転用率が低ければ生産設備費が増加する。したがって、工法の適用方法を計画する場合は主に労務費と生産設備費に着目すればよい。すなわち、作業計画をコスト面から捉えれば、労務・生産設備の稼働率を高めることによって労務費と生産設備費を最小化することである。

作業計画を行なう場合には、繰り返しの多い作業を対象にすると有効である。1回の繰り返しに対し作業員・クレーンの稼働率を高め、型枠・仮設材の転用効率を高めるような詳細な計画を立てることによって、その繰り返しで生産性を向上できる。また、同じ作業を繰り返すことによる習熟効果を期待でき、作業員の能率が向上するとともに品質が安定し安全面でも効果がある。

一般製造業においては、一定の固定した作業員が高度な機械設備を用い、繰り返し作業による習熟効果によって高い生産性を実現している。建設工事は一品生産で、作業の繰り返しの少ないことが強調されているが、1つの工事をいくつかの工区に分割することによって繰り返しを増すことが可能である。工事を適切に工区分割し、施工をシステム化することによって、建設工事においても多くの繰り返しを実現でき、一般製造業の生産方式に近づけることができる。そのためには作業の繰り返しのみでなく、作業員の固定化と標準化が必要である。



(注) DR：デザインレビュー

図一 建築生産における工法計画の位置付け

近年急増している海外工事では資材、施工機械、労働者の調達が国内の工事に比較して困難であるため、これらの工事用資源を効率良く利用することが重要な課題である。また、日本人に比較して技能の低い外国人労働者を直備することが多いので、一定人数の作業員を雇わなく働かさなければならない。このような条件のもとでは施工をシステム化して、作業員の習熟を促進させる効果は大きい。

2.2.2 MAC による作業計画

複数の作業チームが、多工区にわたって同時に異なっ



図—3 作業計画の手順

た作業を一定の繰り返しパターンに従って行なう場合の作業計画に MAC を適用できる。繰り返し作業の 1 サイクル（1 回の繰り返し）に含まれる作業を詳細に分析し、各作業チームがいつ、どの工区で何の作業を行なうかを表わしたタイムテーブルが MAC である。

MAC は、作業の実施計画を示したタイムテーブルであると同時に、机上で作業の状態をシミュレーションし、最終計画案をまとめてゆくためのツールである。図—3 に MAC を用いた作業計画の手順を示す。MAC によって作業計画を行なう場合には下記の 2 点が前提となる。

(1)一定の人数の作業チームと、一定数の施工機械が毎日定期的に作業を行なう。

(2)採用する工法に附随する作業の特性（作業手順・方法、作業能率など）をデータとして表現できる工法でなければならない（作業の切れ目が明確なプレファブ化された工法などは MAC による計画に適している）。

MAC の例を図—4 に示す³⁾⁴⁾。図—4 の MAC は躯体工事の例で、サイクル日数 6 日、作業チーム数 6 である。縦軸に日、横軸に作業チームをとってある。[] 内は工区を表わしている。この例の MAC は最終計画案であるため、作業チーム、クレーンにほとんど遊びがない。計画をまとめてゆく過程では随所に遊び・重なりがあるので、それを作業手順・方法の変更、作業チームの一時的な合併等によって調整してゆく。

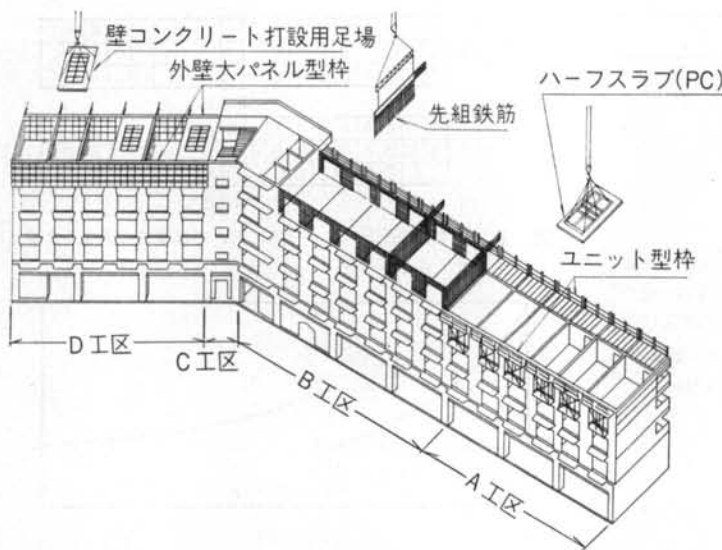
作業 チーム	クレーン	大 工			鉄 筋 工	応 援
		壁型わく	ユニット型わく	開口部先付け		
日	人数	1	9	4	2	4
1		外壁大パネル移動・取付け 内壁パネル移動 SM ショア移動	外壁大パネル移動・取付け [n→n+1] 内壁パネル移動 [n→n+1] SM ショア移動 [n]	開口部補強わく脱型 [n]	壁・はり鉄筋先組み	すみ出し 大工(2人)
2		ベランダショア移動 SD・ALW 配置 B U 配置	内 壁 型 わ く 建 込 み ベランダショア移動 [n] 廊下・ベランダ型わく建込み	掃重準備 SD・ALW 配置 [n+1] SD・ALW 型わく取付け	[n+2]	[n+2]
3		ハーフスラブ取付け 先組み鉄筋建方			ハーフスラブ取付け [n] 先組み鉄筋建方 [n+2]	
4	C 工区 使用日		[n+1]	[n]	SD・ALW 補強わく取付け	壁・はり鉄筋ジョイント [n+2]
5	足場 壁コンクリート打設 床コンクリート止めスクリーディングボード	足場 壁コンクリート打設 [n+1]	床コンクリート止めスクリーディングボード [n]		手すり配筋 [n+2]	鉄筋工 (2人) [n]
6	床コンクリート打設	壁型わく脱型 [n+1]			壁・はり鉄筋先組み [n+3]	床コンクリート打設左官 (10人) [n]

図—4 MAC の例（サイパン島ハファダイビーチホテル建設工事）

この MAC は、サイパン島ハファダイビーチホテルの建設工事で実施したものである。この工事は、与えられた施工条件の下で、施工をできるだけシステム化している。工法の概要を表—1 に示し、工法の概念図を図—5 に示す。2～7 階の客室部分を 4 工区に分割し、6 日サイクルで施工した。

§ 3. 習熟理論に基づく作業計画手法の検討

MAC を用いて作業計画を行なうためには、一定人数の作業チームおよび一定数の生産設備が毎日定期的に作業することが前提となる。一般に、このような条件で作業すると、そうでない場合に比較して作業能率が著しく



図—5 工法の概念図

工事部位	型 枠	鉄 筋	コンクリート
梁・壁	外壁大パネル 内壁框パネル	鉄筋先組工法	バケット打ち
床	ハーフスラブ工 法	現 場 組	バケット打ち

表—1 工法の概要

向上するとともに、品質管理や安全管理の上からも有効である。しかし、従来このような前提で作業計画を行なうことは少なかった。作業計画に作業者の固定化、平準化が考慮されなかった理由の一つに、その効果が定量的に把握されていないことがあげられる。本章では、一定作業を繰り返す場合の作業能率上の効果を明らかにし、その効果の作業計画への反映方法について考察する。

3.1 作業の習熟

同じ作業を繰り返し行なうと、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。習熟効果に対する従来の研究成果から、ほとんどの作業が対数線型モデルで表現できることが知られている。すなわち、作業の繰り返し回数と累計平均所要時間の関係として、次式で表すことができる⁹⁾。

$$A_c = t_1 x^{-n} \quad \dots\dots(1)$$

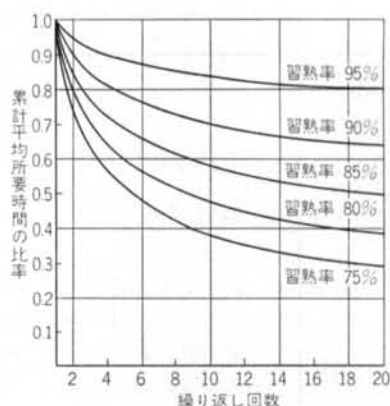
ただし、 A_c : 累計平均所要時間

t_1 : 第1回目の所要時間

x : 繰り返し回数

n : 習熟係数

この式から、何回か繰り返し作業を行なったときの総所要時間 T_c は次のように求められる。



図—6 習熟率と習熟効果

$$T_c = x \cdot A_c = t_1 x^{1-n} \quad \dots\dots(2)$$

繰り返し回数が2倍になったとき、累計平均所要時間の低減した率を習熟率といい、次式で計算することができる。

$$P = \left(\frac{1}{2} \right)^n \times 100 \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 P : 習熟率 (%)

現在までの調査結果から、建設作業の習熟率は75～95%の範囲にあることが明らかにされている^{6)~12)}。各習熟率と習熟効果の関係を図—6に、習熟に関する用語および記号を表—2に示す。なお、本論では習熟率85% (習熟係数 $n=0.234$) の場合について考察を進める。

3.2 チーム作業における習熟効果

3.2.1 作業者の固定化

建設工事において、同一工事で同一作業者を長期間固定化して手配することはあまり行なわれていない。一つの作業チームのうち一部を固定できても、何人かは入れ替わる場合が多い。このとき、入れ替わった作業者は作業に習熟していないためチームとしての習熟効果は半減してしまう。こうした状態は工事全体の労働生産性を低下させる。

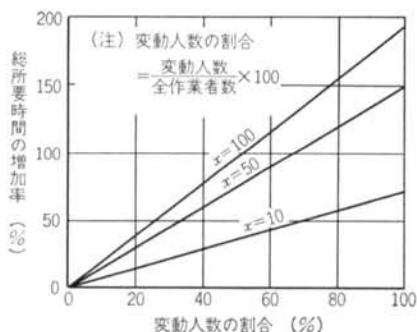
図—7は、チーム内の変動(入れ替わり)人数の割合と総所要時間の増加率(チーム内の人員がまったく変動しなかった場合に対する割合)との関係であるが、変動率が増すに従って総所要時間が増加しているのが分かる。繰り返し回数が多い場合には、総所要時間の増加が特に顕著になる。

3.2.2 作業者人数の平準化

一般に建設作業は手順が幅狭しており、さまざまな職種が交互に作業するため、各職種の人数を平準化し定常的に作業をすることが少ない。しかし、作業計画を行な

用語	記号	意	味
繰り返し回数	x		
1回目の所要時間	t_1		
累計平均所要時間	A_c	$A_c = t_1 x^{-n}$	
所要時間	T_c	$T_c = t_1 x^{1-n}$	
習熟率	P	$P = (1/2)^n \times 100$	(繰り返し回数を2倍にした時の累計平均所要時間の元の所要時間に対する割合(%))
習熟係数	n	繰り返し回数と累計平均所要時間を対数グラフ上にプロットしたときの直線の勾配	
人数	m	作業に従事した作業人数	
作業工数	W	$W = T_c \times m$	
作業量	V	$V = \alpha \cdot t_1 m x$	
初期の作業能力率	α	出来高/人・日	

表一 習熟に関する用語および記号



図一 7 チーム内の変動人数の割合と総所要時間増加率

うことによって、各職種の人数を一定にして作業を進めることが可能になる。こうした計画の利点をモデルにより検討する。

図一 8 に、2つの作業員配員モデルを示す。いずれも作業量および配員数は同じであり、A, B, Cの3職種が作業するものとする。モデル1は各職種の人数を平準化していない例であり、モデル2はそれを平準化したものである。モデル2は、モデル1に比較して繰り返し回数が3倍になっている。モデル1, 2の総所要時間 T_{c1} , T_{c2} は式(2)により以下のとおりである。

$$T_{c1} = t_1 x^{1-n}$$

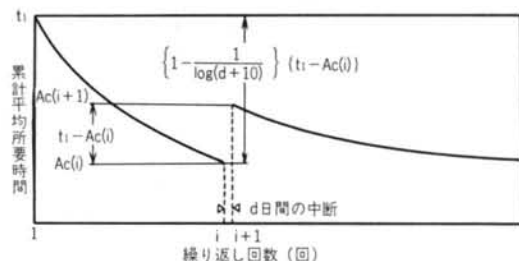
$$T_{c2} = \left(\frac{t_1}{3}\right) (3x)^{1-n}$$

$$\therefore T_{c2} = T_{c1} \cdot 3^{-n}$$

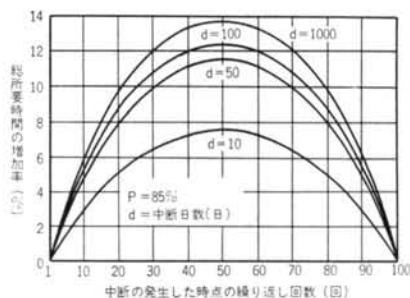
一般に繰り返し回数を k 倍にすることができれば、総所要時間は、



図一 8 作業員の配員モデル (A, B, Cは職種の異なる作業チームを示す)



図一 9 習熟過程における中断の影響



図一 10 中断発生時期と総所要時間の増加率

$$T_{c2} = T_{c1} \cdot k^{-n}$$

となる。この式は式(1)と同じ形であり、図一 6 から具体的な低減率を求めることができる。繰り返し回数を3倍にしたこの例では、モデル2のモデル1に対する総所要時間の比率は習熟率85%として0.77, 低減率は23%となる。習熟効果は、繰り返し回数が増すほど大きくなるため、作業計画に当っては多くの人数を投入して作業するよりも、少人数で繰り返しを多く作業するよう配慮することが大切である。

3.2.3 中断の影響

連続して繰り返されていた作業が何らかの理由で中断した場合、一般には作業を再開するときの所要時間は中断直前の所要時間より大きくなる。中断に関する研究は M. Gastes が行っており、本論では Gastes の提案式をもとに考察する。提案式を式(4)に示す⁹⁾。

$$A_{c(i+1)} = A_{c(i)} + \left\{ 1 - \frac{1}{\log(d+10)} \right\} \{ t_1 - A_{c(i)} \} \dots (4)$$

ただし、 d : 中断日数

この式の意味を図-9に示す。図-10に繰り返し100回の場合について、中断発生時期と総所要時間増加率との関係を示す。

図-10より、繰り返しの中間点で中断が起こった場合に総所要時間が最大になることが分かる。また当然、中断日数 d が大きくなるほど総所要時間は増加するが、中断日数100日以上はほとんど変わらない。本報で考察する習熟率85%，繰り返し100回程度の場合では、中断が作業能率に及ぼす影響は大きいとはいえず、総所要時間の増加率も10数%程度となっている。しかし、作業者の固定化、人数の平準化を図る際に労働生産性を低下させる要素となっていることは明らかである。

3.3 作業チーム人数の最適化

MACによる作業計画においては作業チームの人数、生産設備の種類や数を最適化する必要がある。一般的には、作業者の数を増すほど工期を単縮することが可能であるが、それにつれて作業工数も増加する。これは、繰り返し回数が減るため習熟効果を有効に活用できないことによる。本節では、工期が設定されている場合に作業チーム人数を最適化する方法について考察する。

3.3.1 作業チームの人数と工期の関係

ある作業チームが一定の作業を行なうときの工期 T_c と繰り返し回数 x との関係は式(2)に示した。このときの作業量は繰り返し回数と人数に比例するので、

$$V = \alpha t_1 m x \quad \dots\dots(5)$$

ただし、 V ：作業量

α ：初期の作業能率

m ：作業チーム人数

さらに、作業工数を W とするとチーム人数と作業所要時間（工期）の積で表わされるので、

$$W = m T_c \quad \dots\dots(6)$$

したがって、式(2)、(5)、(6)より、

$$T_c = t_1^n \left(\frac{V}{\alpha m} \right)^{1-n} \quad \dots\dots(7)$$

$$W = t_1^n \left(\frac{V}{\alpha} \right)^{1-n} \cdot m^n \quad \dots\dots(8)$$

作業量が一定の場合、作業チームを構成する人数を少なくするに従って工期は長くなるが、作業工数は逆に減少することが分かる。

3.3.2 工期が設定されている場合

通常の工事では、与条件として工期が設定されている場合が多い。そこで、与えられた工期を T_a とすると、

$$T_a \geq t_1^n \left(\frac{V}{\alpha m} \right)^{1-n}$$

$$W \geq t_1^n \left(\frac{V}{\alpha} \right)^{1-n} \cdot m^n$$

したがって、 W が最小となるような人数を m_a とすると式(9)が成立する。

$$T_a = t_1 \left(\frac{V}{\alpha m_a} \right)^{1-n} \quad \dots\dots(9)$$

作業計画を立てる場合、与条件としては工期・作業量・初期の作業能率・習熟率が考えられ、その条件下で繰り返し回数・チーム人数・1回目の所要時間を決めることになる。

式(2)、(5)より、

$$t_1 = T_c x^{-(1-n)} \quad \dots\dots(10)$$

$$m = \frac{V}{\alpha T_c} x^{-n} \quad \dots\dots(11)$$

一般的決定手順としては、建物の平面計画等から可能な工区分割を設定し、その繰り返し回数 x から式(10)、(11)を用いて対応する t_1 と m を求める。次に、その作業の特性、作業空間、労務事情によって決められる時間や人数の制約範囲内に、求めた t_1 、 m が含まれているかをチェックし、それを満たす x 、 t_1 、 m の組合せの中で最も繰り返し数の大きい組を選定すればよい。図-11に、繰り返し回数 x と作業チーム人数 m 、1回目の所要時間 t_1 との関係を例で示す。

3.3.3 応援による損失

前述のごとく、作業チーム人数を最適化しようとしても、実際には様々な要因で所要の人数を手配できない場合がある。また、建設工事では標準作業時間の設定が難しく、計画時に見積った作業能率と実際の能率に差が生ずることもある。こうしたことにより工事が遅れ気味になると、ある時点で応援の作業者を投入して工期中に作業を完了するようにしなければならない。このとき、

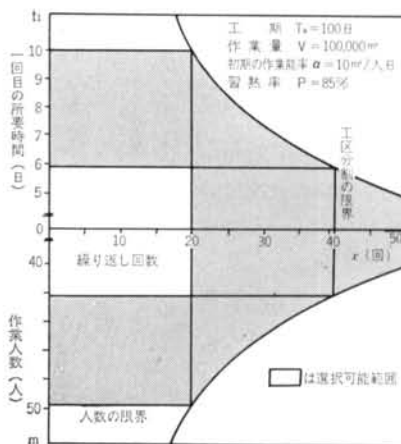
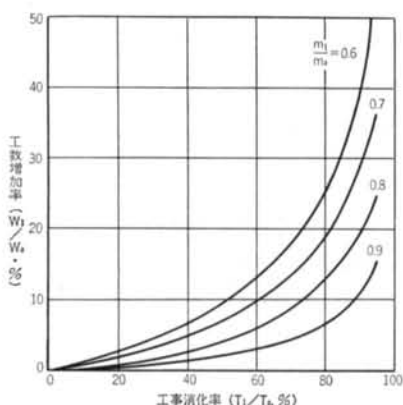


図-11 t_1 、 x 、 m の関係を示す例



図—12 応援の投入時期と作業工数

後から応援で投入される作業者は作業にまったく習熟していないので、全体の能率は低下する。ここでは、各種の条件によりどの程度生産性が低下するかを考察する。

工期が指定されている場合に生産性を最大にする（所要作業工数を最小にする）ためには、応援の作業者を投入せずに工期いっぱい作業をしてびったり完了させればよい。この場合の作業チーム人数を m_a 、繰り返し回数を x_a とすると、工期、作業量、作業工数は次のように表わすことができる。

$$\text{工期: } T_a = t_1 x_a^{1-n} \quad \cdots \cdots (12)$$

$$\text{作業量: } V = a t_1 m_a x_a \quad \cdots \cdots (13)$$

$$\text{作業工数: } W_a = m_a T_a \quad \cdots \cdots (14)$$

当初の人数を $m_1 (< m_a)$ とし、 T_1 日後に m_2 が応援に入り、そのときの繰り返し回数を各々 x_1, x_2 とすると、

$$\text{工期: } T_a = t_1 x_1^{1-n} \quad (\text{当初のチーム}) \quad \cdots \cdots (15)$$

$$T_a - T_1 = t_1 x_2^{1-n} \quad (\text{応援のチーム}) \quad \cdots \cdots (16)$$

$$\text{作業量: } V = a t_1 (m_1 x_1 + m_2 x_2) \quad \cdots \cdots (17)$$

$$\text{作業工数: } W_1 = m_1 T_a + m_2 (T_a - T_1) \quad \cdots \cdots (18)$$

生産性の低下の程度を知るためには、作業工数の比である W_1/W_a を計算すればよい。式(12)～(18)によって W_1/W_a を求めると、以下のとおりである。

$$\frac{W_1}{W_a} = \frac{m_1}{m_a} + \left(1 - \frac{m_1}{m_a}\right) \left(1 - \frac{T_1}{T_a}\right)^{-\frac{n}{1-n}} \quad \cdots \cdots (19)$$

式(19)を、習熟率 85% ($n=0.234$) として 図—12 に示す。

図—12 は、最適チーム人数より少ない人数 (m_1/m_a) で作業を始めたとき、工期内のどの時点 (T_1/T_a) で応援を入れると作業工数がどの程度 (W_1/W_a) 増加するかを示したものである。グラフが示すように、工期の 40% 以内の時点で人数の不足に対応した場合には、人数不足率が 40% 以下なら作業工数の増加は 10% 未満ですむ。しかし、工期が半分を過ぎた段階から、応援による工数の

増加は急激になる。

一般の建設工事においては、作業計画の段階で作業の正確な能率を求めることは難しい場合が多い。そのため計画自体をある程度推定値に基づいて行なわなければならないことが多く、計画時に求めた最適チーム人数が実際には最適でないことが多い。こうした場合は作業の進行とともに計画を修正していかなければならないが、図—12 はこの修正が工期の早い時期ほど有効であることを示している。

3.4 工区分割に伴うコスト増

繰り返し回数を多くするほど習熟効果により作業工数が減少すること、したがってできるだけ繰り返し回数が多くなるよう工区分割をするのが望ましいことを述べた。すなわち、与えられた条件の範囲内であれば工区分割を多くして、少ないチーム人数で繰り返して作業するほど工数の面で有利である。

一方、工区分割を多くすればするほど施工上必要となるジョイント数およびそれに伴う作業手間が増えたり、型枠等の損耗が激しくなる。これらは明らかにコストを増加させる要素で、工区分割を多くするほど、すなわち繰り返し回数を多くするほどコストが増すことを示している。

1 工区当りの増加コストを b とすれば、繰り返しに対するコスト増 C_a は、

$$C_a = b(x-1) \quad \cdots \cdots (20)$$

また、労務単価を a とすると労務コスト C_w は、

$$C_w = a m t_1 x^{1-n} \quad \cdots \cdots (21)$$

式(5)より $m t_1 = V/a x$ であるから、

$$C_w = \frac{aV}{a} x^{-n} \quad \cdots \cdots (22)$$

したがって、工区分割したことによるコスト増加分を含めた総コスト C_t は、

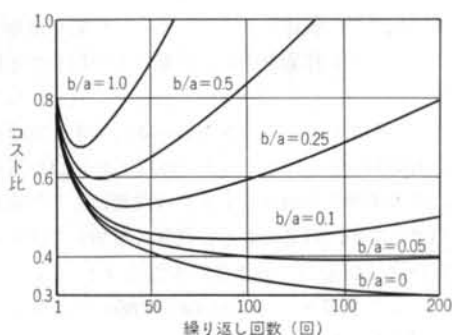
$$C_t = \frac{aV}{a} x^{-n} + b(x-1) \quad \cdots \cdots (23)$$

一つの例として、 $a=1, V=100, n=0.234$ の場合について、繰り返し回数とコストの関係を 図—13 に示す。

式(23)の極小値を求めると、

$$x = \left(\frac{naV}{ab} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \cdots \cdots (24)$$

図—9 の場合と同じ条件で、1 工区当りの増加コストの割合とコストが最小となる繰り返し回数の関係を 図—14 に示す。



図—13 繰り返し回数とコスト比

3.5 作業時間見積り

MAC によって作業計画をする場合、計画の対象となる各作業に対して精度の高い作業時間データを必要とする。しかし、建設作業は作業者や作業場所によるばらつきが大きいという特徴があり、計画用の時間見積り、工数見積りをどう行なうかが大きな問題である。本節では、大きなばらつきを有する作業時間データを用いて作業計画をするための、実用的な作業時間・工数の設定方法を考察する。

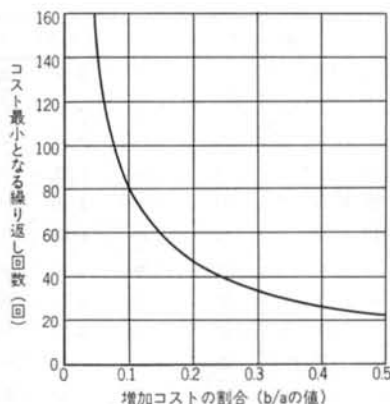
3.5.1 考察のための仮定

建設作業の作業時間の分布は必ずしも正規分布になるとはいえないが、本節ではすべての作業の作業時間が正規分布するものと仮定する。これまでの調査より、習熟がある程度進み、作業が落ちついた段階では正規分布で近似しても特に問題はないと考えられる。

次に作業管理上の仮定として、各作業チームが1日で実施するように計画されている作業はその日のうちに完了させることにする。ただし、残業を行なう場合には割増賃金が必要で、管理手間、電力等の仮設費の増加も考慮する。逆に計画より早く作業が完了しても、次の日の作業には着手せず早く仕事を切り上げることにする。次の作業が必ずしもできない訳ではないが、使用する生産設備や作業場所の都合上、他の作業チームとの調整等の問題が生ずるからである。また、1日の作業量が決められている場合、その達成が明確になると作業速度を落として調整することになり、通常の作業時間内に作業を終えるのが実状であろう。したがって、このように仮定しても非現実的なものではなく、むしろ実態に近いといえる。

3.5.2 労務費の最小化

ある工事におけるある作業チームの1サイクル中の作業の合計時間 T を、前述のように正規分布するものとしその平均を μ 、分散を σ^2 とする。すなわち、 T の確率密度関数を次のように考える。



図—14 増加コストの割合とコストが最小となる繰り返し回数

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(T-\mu)^2\right\} \quad \dots\dots 25$$

この一連の作業に対して、計画用の作業時間を T_p とする。すなわち、 $T \leq T_p$ のときは通常の作業時間における作業で、 $T > T_p$ となる場合には残業が必要となる。

式25の形で存在する T に対して、設定すべき T_p を決定するための尺度として労務コストを考える。1サイクルの作業に要する労務コスト C は次のようになる。

$$C = aT + ag \int_{T_p}^{\infty} (T - T_p) f(T) dT \quad \dots\dots 26$$

ただし、 C : 計画用作業時間を T_p した場合の労務費

a : 単位時間当りの労務費

g : 残業による労務費の割増し率

式26を式25に代入し、 $x = (T - \mu)/\sigma$ とすると、

$$C = aT_p + \frac{ag}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{T_p - \mu}{\sigma}}^{\infty} (\mu + \sigma x - T_p) e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad \dots\dots 27$$

$T_p = \mu + \alpha\sigma$ とすると、

$$C = a(\mu + \alpha\sigma) + \frac{ag\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} (x - \alpha) e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad \dots\dots 28$$

$$\therefore \frac{dc}{d\alpha} = \sigma a - \frac{ag\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad \dots\dots 29$$

式29は単調増加関数となるので、

式28が最小となるのは $dc/d\alpha = 0$ のときである。

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{g} \quad \dots\dots 30$$

式30の左辺は標準正規分布の累積曲線であり、数表より容易に求めることができる。 g の値が1.25~2.00

のとき労務コスト C を最小にする α の値を表—3に示す。

g	α
1.25	-0.84
1.3	-0.74
1.4	-0.57
1.5	-0.43
1.6	-0.32
1.7	-0.22
1.8	-0.14
1.9	-0.07
2.0	0

表—3 労務コストを最小化する α

工事	作 業	n	$\bar{x}(\text{分}/p)$	$s(\text{分}/p)$	$s/\bar{x}$
茶 屋 ヶ 坂	先組鉄筋(壁)	49	16.48	6.80	0.41
	" (梁)	113	8.75	3.97	0.45
	C 打 足 場	176	5.68	2.33	0.41
	型 枠 パネル	164	5.55	1.91	0.34
三 田 森 ビ ル	鉄 骨 建 方	29	11.73	4.56	0.39
	大 型 型 枠	54	6.68	1.88	0.28
	"	181	5.80	2.11	0.36
	床 C 打	37	14.26	5.73	0.40
	壁 C 打	42	12.76	3.33	0.26
ズ イ ラ ク ハ イ ラ イ	先組鉄筋(柱)	75	5.37	1.60	0.30
	柱 型 枠	58	6.56	2.90	0.44
	床 型 枠	73	5.87	2.63	0.45
	床 C 打	25	6.61	1.14	0.17
	柱 C 打	21	11.12	3.24	0.29

表—4 クレーン作業時間データ

3.5.3 軀体工事への適用

RC 造, SRC 造の建築物を一部 PC 化し, 型枠や鉄筋をプレハブ化する複合構法を採用する場合, MAC による作業計画が特に有効である. このような, いわゆる

システム化工法の軀体工事ではクレーン作業が重要であり, このクレーン作業を中心に作業計画を行うことになる.

クレーン作業の実績データを表—4 に示す. 実績値より, 作業時間の変動係数 ($s/\bar{x}$) はほぼ 0.3~0.4 である. また, 日本国内での通常の工事では残業による割増し率は 1.25 であるが, 残業による管理費の増加を考慮すると $g=1.4\sim 1.5$ が妥当であろう. そこで $\sigma/\mu=0.35$ とし, $g=1.4\sim 1.5$ すると, $T_p=0.8\mu\sim 0.85\mu$ で計画するのが最も経済的であることが分かる.

§ 4. おわりに

作業計画の位置付けと作業計画の基礎となる理論について述べた. MAC による作業計画によって, 作業の最適化が可能になる. MAC によるシステム化工法は, すでに数多くの工事に適用されている. 工事の実施段階においては, 計画のフォローと工事実績データの蓄積が特に重要である. これについては第 2 報で述べる.

<参考文献>

- 1) 松本: “構法計画と工法計画” 建築雑誌 Vol. 193, No. 1134 (1978年4月)
- 2) 池田, 松本: “工事管理 (新建築学大系48)” 彰国社 (昭和58年5月) pp.28~32
- 3) 丹治, 太田, 渡辺, 松本, 内山: “海外建設工事における施工のシステム化(サイパンハファダイビーチホテルの軀体工事)” 施工 (1981年7月)
- 4) 松本, 内山, 丹治: “システム工法によるホテルの建設 (サイパンハファダイビーチホテル増築工事)” コンクリート工学 Vol 19, No. 9 (1981年9月)
- 5) M. Gates & A. Scarpa: “Learning and Experience Curves” Journal of ASCE (Mar. 1972)
- 6) 三根, 野中: “建築施工管理の合理化に関する研究 (大パネル工法による型枠工事の工数と習熟について)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和49年10月)
- 7) 三根, 野中: “建築施工管理の合理化に関する研究 (大パネル工法による型枠工事の工数と習熟について)” 日本建築学会関東支部研究報告集 (昭和50年3月)
- 8) 沙川, 森: “建築生産における標準時間設定に関する研究 (その3: 建設作業における習熟について)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和49年10月)
- 9) 室, 人見, 佐々木, 三島他: “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(工業化量産化の工場生産と現場施工労務への影響)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和53年9月)
- 10) 小泉, 武井, 新井: “プレハブ集合住宅における軀体労務工数分析” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和54年9月)
- 11) 三島, 佐々木, 室, 人見: “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(その3: 帳票データによる労務工数の調査結果)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和55年9月)
- 12) 室: “設計施工競技による芦屋浜団地建設に関する調査報告 (現場労務工数と揚重機の使用効率)” 日本建築学会論文報告集 第313号 (昭和57年3月)