

建築施工の作業計画における最適化

松本 信二・三根 直人

1. はじめに

建築の施工を行なうための計画を施工計画という。施工計画には施工管理に必要なあらゆる計画を含むが、その中心となるのは現場における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ための計画である。

工法計画には2つの最適化問題がある。すなわち、与えられた施工条件の中で最適な工法を選択することと、その工法の運用方法を最適化するこ

とである。後者の計画を作業計画という。作業計画とは特定の工法を実現するために、どのような工区分割を行ない、どのような作業チームを構成して、どのような日程計画をたてるか、というような問題に対して最適解を求めることである。

ここでは、作業計画におけるいくつかの最適化問題について述べる。

2. マルティ・アクティビティ・チャート (MAC)

筆者らは作業計画の有効な道具として、マルテ

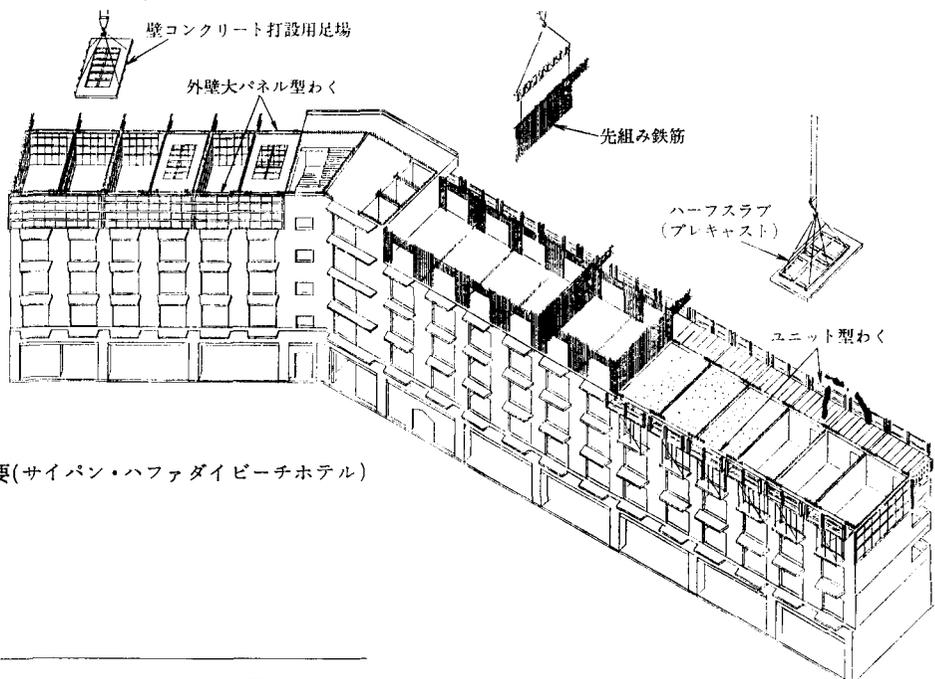


図1 工法の概要(サイパン・ハファダイビーチホテル)

ィ・アクティビティ・チャート(Multi Activity Chart: 以下MACと略す)を用いている。繰返し作業の1サイクルに含まれる作業を細かく分析し、各作業チームが行なうべき作業の時間割を作成したものがMACである。

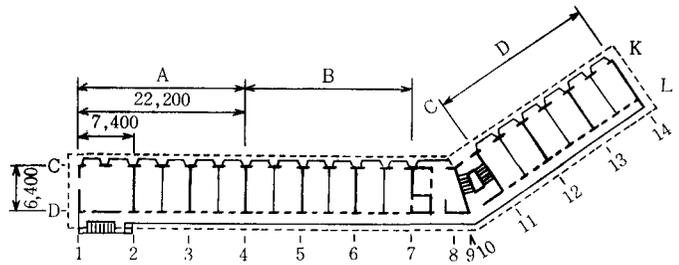


図2 工区分割

MACを用いて作業計画を行なった例を図1~3に示す。この建物はホテルであり繰返し作業が多い。図2に示すように客室部分を3つの工区に分け(A, B, D), 順次流れ作業的に作業を進めていく。図3がこの場合のMACであり、横軸に作業チーム、たて軸に時間をとっている。チーム数は5つであるが、日によって応援チ

ームが加わる。サイクルタイムは6日である。

MACを作業計画の道具として使用する場合には、2つの大きな前提がある。まず第1に、工事の遂行に当たっては、必要に応じて作業者を増減するということをせず、一定の人数の作業チームと一定の数の施工機械が毎日定期的活動できるよ

うにしなければならない。通常の製造工場の作業計画では、一定の作業チームと一定の機械設備を前提にすることは当然である。しかし、建設作業は一般に一品生産であり、しかも作業が錯綜しているため、作業チームを中心とした作業計画が困難であった。このようなさまざまなむずかしい問題はあるが、習熟効果や労務管理・安全管理等から考えても、作業チームを中心とした作業計画の利点は非常に多く、今後推進していかなければならない。図3では応援のチームがあり、完全な形にはなっていないが、このような応援のチームは最小限にすべきである。

MACを作業計画の道具として用いるときの第2の前提として、工法上の問題がある。工法に含まれる作業の特性をフィードバック可能なデータとして表現できるような工法でなければならない。したがって、在来工法による型枠工事のような場合には計画がむずかしい。柱の作業、壁の作業、床・梁の作業等が必ずしも分離しておらず、

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]	開口補強わく脱型 [n]	壁・はり鉄筋先組み	すみ出し
2	ベランダショア移動 SD・ALW配置 BU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	揚重準備 SD・ALW配置 [n+1] SD・ALW型わく取付け	[n+2] ハーフスラブ取付け [n] 先組み鉄筋建方 [n+2]	大工(2人) [n+2]
3	ハーフスラブ取付け 先組み鉄筋建方			[n+1]		
4	CI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	床配筋
5	足場 壁コンクリート打設	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]		[n+2] 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3 MAC (6日サイクル)

複雑にからみ合い、しかも作業者によって作業手順が異なるからである。その点、プレハブ化された工法の場合には作業計画を行ないやすい。

3. 工区分割の最適化

3.1 習熟効果と工区分割

建設工事をシステム化し、MACを用いて作業計画するためには、一定人数の作業チームおよび工事中機械（クレーンなど）が毎日定常的に作業を行なうことが前提となる。一般に、このような条件のもとで作業を行なうと、そうでない場合に比較して作業能率がいちじるしく向上するといわれている。

この現象は、同じ作業を何度も繰返すことによる慣れの効果と考えられており、「習熟効果」とよばれている。習熟に関して過去に行なわれた研究の結果から、ほとんどの作業の習熟効果は対数線形モデルで表現できることがわかっている。すなわち、繰返し回数 x と累計平均所要時間 A_0 との関係を示すことができる。

$$(1) A_0 = t_1 x^{-n}$$

ただし、 t_1 : 繰返し1回目の所要時間
 n : 習熟係数

建設工事を対象に行なったいくつかの調査結果からも習熟効果が対数線形モデルで近似できることが確認されている。習熟係数 n は作業の特性によって定まる係数で習熟の程度を表わしており、0.23前後の作業が多い。図4に習熟係数0.23の場合について、繰返し回数と延所要時間の関係を一般化して示す。図4から、繰返し回数が増すにしたがって延所要時間の減少することがわかる。

作業の繰返しを多くするには、同じ設計の建物を多く建てればよいが、現実にはなかなかむずかしい。そこで1つの建物の工事の中で、できるだけ繰返し作業を多くすることが考えられる。一般的な方法は1つのフロアを同じ平面パターンのいくつかの作業工区に分割することである。以下に習熟効果を考慮した場合の、工区分割の最適化に

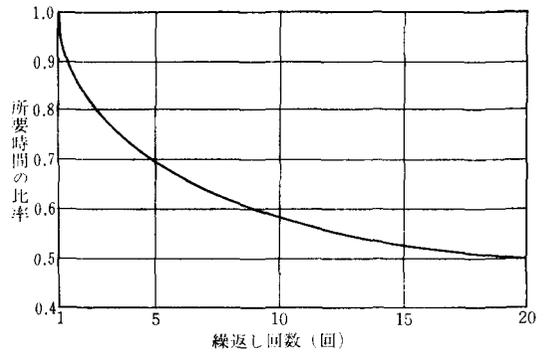


図4 繰返し回数と延所要時間の関係

ついて述べる。

工期 T_0 と繰返し回数 x は(2)式の関係にある。

$$(2) T_0 = t_1 x^{1-n}$$

また、生産量（作業量） V は繰返し回数と人数に比例するので、(3)式のように表わされる。

$$(3) V = \alpha t_1 m x$$

ただし、 α : 初期の作業能率
 m : 作業チーム人数

さらに、作業工数 W は作業チーム人数 m と工期 T_0 の積で表わされるので、

$$(4) W = m T_0$$

したがって、(2)、(3)、(4)式より、

$$(5) T_0 = t_1^n (V/\alpha m)^{1-n}$$

$$(6) W = t_1^n (V/\alpha)^{1-n} m^n$$

(5)、(6)式より、生産量が一定であれば、作業チームの人数を少なくするほど工期は長くなるが、作業工数が減少することがわかる。

実際の工事では工期が設定される場合がほとんどである。与えられた工期を T_a とすると、

$$(7) T_a \geq t_1^n (V/\alpha m)^{1-n}$$

$$(8) W \geq t_1^n (V/\alpha)^{1-n} m^n$$

したがって、 W が最小となるような作業チーム人数を m_a とすると、(9)式が成立することになる。

$$(9) T_a = t_1^n (V/\alpha m_a)^{1-n}$$

作業計画をたてる場合、工期・作業量・初期の作業能率・習熟率が与条件として与えられ、その条件下で、繰返し回数(工区分割)・作業チーム人数・1回目の所要時間を決めることになる。(2)、

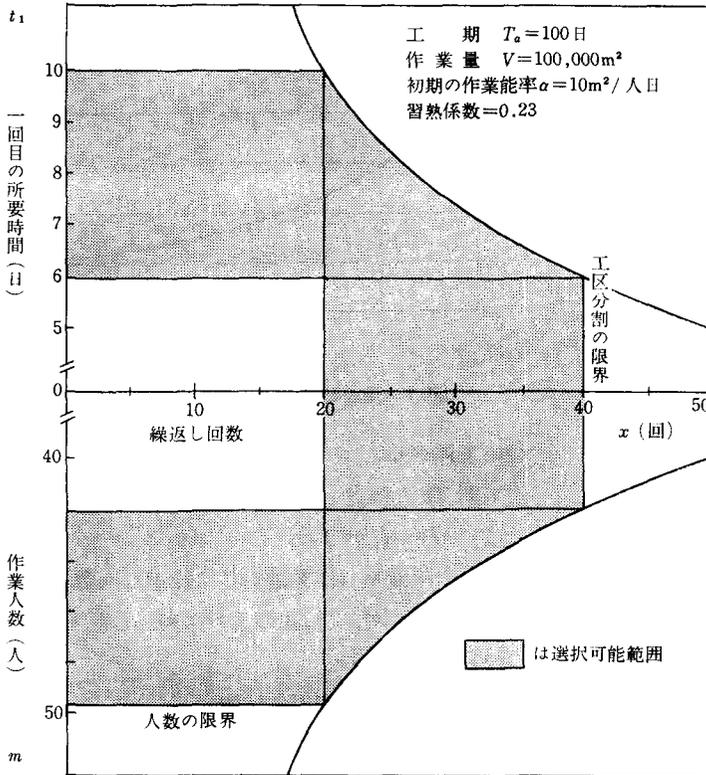


図5 t_1, x, m の関係を示す例

(3)式より,

$$(10) \quad t_1 = T_0 x^{-(1-n)}$$

$$(11) \quad m = \{V/(\alpha T_0)\} x^{-n}$$

一般的な決定手順は、建物の平面等から可能な工区分割を設定し、その繰返し回数 x から(10)、(11)式を用いて、対応する t_1 と m を求める。次に作業の特性や作業空間、労務事情によって決まる、繰返し1回目の時間や作業チーム人数の範囲内に t_1, m が入っているか否かをチェックする。そして、それを満たす x, t_1, m の組合せの中で最も繰返し回数の多い組を選択する。図5に繰返し回数 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。

3.2 工区分割にともなうコスト増を考慮した場合の最適化

習熟効果によって、繰返し回数を多くするほど作業工数が減少することを述べた。また、繰返し回数を多くするために、工事現場をいくつかの作

業工区に分割することを述べた。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、少ない作業チーム人数で繰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ともなう作業手間が増えたり、型枠等の損耗がはげしくなる。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、繰返しに対するコスト増 C_a は(11)式で表わされる。

$$(12) \quad C_a = b(x-1)$$

また、労務費 C_w は(13)式で表わされる。

また、労務単価を C とすると、労務費は、

$$(13) \quad C_w = C m t_1 x^{1-n}$$

(3)式より、 $m t_1 = V/\alpha x$ であるから、

$$(14) \quad C_w = (C V/\alpha) x^{-n}$$

したがって、工区を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 は次のようになる。

$$(15) \quad C_t = (C V/\alpha) x^{-n} + b(x-1)$$

1つの例として、 $\alpha=1, V=100, n=0.23$ の場合について、繰返し回数とコスト比の関係を図6に示す。

(15)式の極小値を求めると、

$$(16) \quad x = (n C V/\alpha b)^{1/(n+1)}$$

図6の場合と同じ条件で、1工区当りの増加コスト b とコストが最小となる繰返し回数の関係を図7に示す。

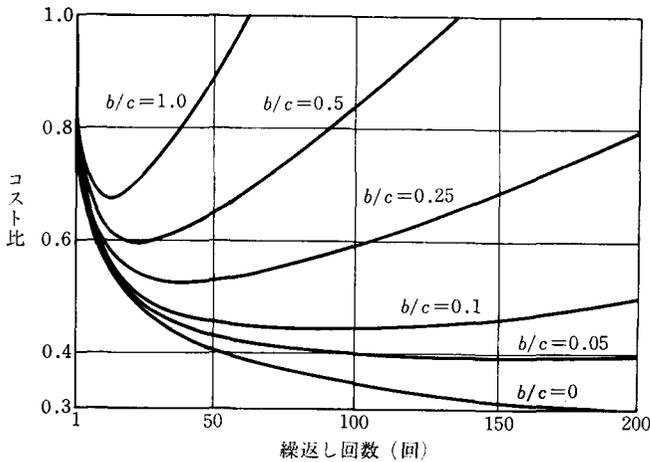


図 6 繰返し回数とコスト比との関係

4. 作業時間見積りの最適化

MACによる作業計画では、一定のサイクル時間(数日程度)を有する繰返し作業に対して複数の作業チームを編成し、各作業チームが待ち時間なしに作業できるように計画しなければならない。このような計画を行なうためには、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。ところが、建設作業は作業員や作業場所によるばらつきが大きいというところに特徴があり、計画用の時間見積・工数見積をどのように行なうかが大きな問題である。このような問題について若干検討してみたい。

まず、いくつかの仮定を行なっておく。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、ここではわかりやすくするために、すべての作業時間が正規分布するものと仮定した。筆者らのこれまでの調査によれば、習熟効果のおちついた段階では正規分布で近似しても特に問題ないと考えられる。

次に作業管理上の仮定を行なっておく。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も払わなければならない。各種の管理費(管理手間、電力等)も増加する。

逆に、計画よりも早く終わってしまった場合には、次の日の作業をやらずに早く仕事を切り上げてしまうことにする。次の日の作業が必ずしもできないというわけではないが、使用する生産設備(施工機械・仮設物)や作業場所の都合上、多くの場合には次の日の作業をすることができない。また、1日の作業ノルマが決められているので、ノルマ達成が明確になってくると作業速度を落として自動的に調整することになり、現実には定時に作業を終わるとというのが実情であろう。したがって、このように仮定しておいても非現実的なものではなく、むしろ最も実態に近い仮定といえる。

ある工事におけるある作業チームの1チームの1サイクル中の作業の合計作業時間 T は、前述のように正規分布するものとし、その平均時間を 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。

$$(17) f(T) = 1/\sigma \sqrt{2\pi} \cdot \exp[-(T-\mu)^2/2\sigma^2]$$

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、 $T \leq T_p$ のときは通常の仕事時間における作業であり、 $T > T_p$ となる場合に

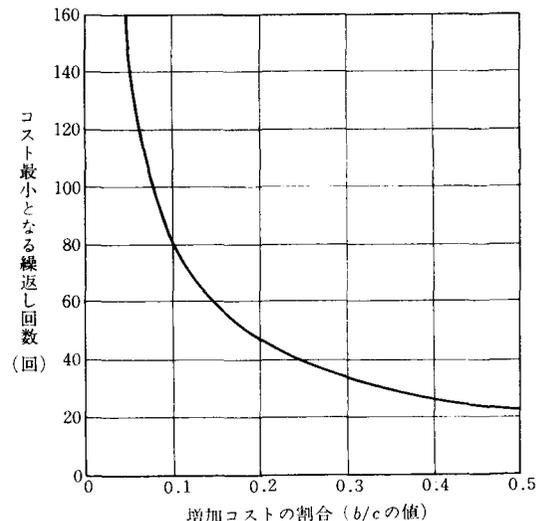


図 7 増加コストの割合 b/c とコスト最小となる繰返し回数との関係

は残業を行わなければならない。サイクル時間は与えられた工期から定められるので T_p は定数と考えがちであるが、ここでは変数と考える。労務費を最小化するような T_p を求めてから、作業チームの人数を調整することによってサイクル時間に合致させるものとする。このように、 T, T_p を定義した場合、1サイクルの作業に要する労務コスト C は次のとおりとなる。

$$(18) C = aT_p + ag \int_{T_p}^{\infty} (T - T_p) f(T) dT$$

ただし、 C : 計画用の作業時間を T_p とした労務費

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

(17)を(18)に代入して、 $x = (T - \mu)/\sigma$ とすると、

$$(19) C = aT_p + ag / \sqrt{2\pi} \int_{(T_p - \mu)/\sigma}^{\infty} (\mu + \sigma x - T_p) e^{-x^2/2} dx$$

$T_p = \mu + \alpha\sigma$ とすると、

$$(20) C = a(\mu + \alpha\sigma) + ag\sigma / \sqrt{2\pi} \int_{\alpha}^{\infty} (x - \alpha) e^{-x^2/2} dx$$

$$(21) dC/d\alpha = a\sigma - ag\sigma / \sqrt{2\pi} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-x^2/2} dx$$

(21)は単調増加関数である。したがって、(20)は最小値をもち、次の場合に最小となる。

$$(22) 1 / \sqrt{2\pi} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-x^2/2} dx = 1/g$$

こ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 が1.25~2.0のとき、 C を最小にする α の値を表1に示す。

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工法の躯体工事ではクレーン作業が中心である。クレーンを用いた作業の作業時間の変動係数 (s/\bar{x}) は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、 $g=1.4\sim 1.5$ とすると、 $T_p=0.8\mu\sim 0.85\mu$ で計画するのが最も経済的だということになる。

表1 労務費を最小化する α の値

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

5. おわりに

建築施工の作業計画の概要と、作業計画で扱われる最適化問題について述べてきたが、いずれもORというほどのものではない。建築施工はまだまだ標準化がすすんでおらず、施主の要求に応じて種々の建物を施工しなければならない。しかも、場所の条件も常に異なる。そのうえ、作業は通常下請業者にたよっており、技能も標準化されていない。このように多くの悪条件はあるが、科学的な最適化にもとづいた計画の範囲を少しでも広げていくように今後も努力していきたい。

参考文献

- [1] 松本信二, 三根直人, 内山義次: 建設工事における作業計画方法に関する研究 (その1~その3). 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1979) 361~366
- [2] 松本信二, 三根直人, 内山義次: 建設工事における作業計画方法に関する研究 (その4). 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1982), 377~378

次号予告

特集 知識工学

知識工学と第5世代コンピュータ

古川康一・淵一博

知識工学とモデル構築

大須賀節雄

知識工学の産業界への応用

佐々木浩二

知識工学とプランニング

溝口 文雄