建築生産情報の計画的確定手法の開発と GA の適用可能性

DEVELOPMENT OF STRATEGIC DECISION MAKING SYSTEM
OF BUILDING DETAIL DESIGN AND EXPLORING
A SCHEDULING SYSTEM ON GENETIC ALGORITHM

峰 政 克 義*, 伊 藤 健 司**, 古 阪 秀 三***

Katsuyoshi MINEMASA, Kenji ITO and Shuzo FURUSAKA

Contractors and suppliers make shop drawings to start construction and parts production.. Approving those shop drawings by architects and clients is just decision making process of detail design during construction process. The approval of shop drawings tend to be delayed because of a client and architects' endless re-examination of design. If almost of all shop drawings decided in advance actual limits at several stages, construction cost and term would be stably controlled.

In this paper we want to clarify above process, and develop a schedule planning system which timely offers clients and architects coherent shop drawings to stimulate them to make decision easily at early stage. Therefore we explore the scheduling system on genetic algorithm to find optimum solution both clients-architects side and contractors-suppliers side.

Keywords : shop drawings, decision making of detail design, collaborative working system, genetic algorithm, scheduling system,

生産情報、生産情報確定工程、同時並行検討、遺伝的アルゴリズム、生産情報確定工程作成システム

1. はじめに

1. 1 背景

設計内容の詳細部分は、生産段階において、施工図や製作図などの生産情報として確定される。確定時期の遅延は後続の現場工程の不安定要因となるため、生産担当者^{注1)}は可能な限り早期に決められるよう、多くの努力を払ってきた。その過程は、詳細部分の検討を続行する発注者や設計者の合意を得て、多種多様な作成者による施工図や製作図を生産工程にあわせて確定していくものである。そして、生産情報を可能な限り早期に確定することによって、発注者の工程短縮への要求に応えることとともに、工事コストの抑制を図ってきた。しかし、それらの工夫は作業所長の個人的ノウハウとして蓄積され、建設産業としての標準化はなされてこなかった。

1. 2 本論文の目的

本論文では、工事費の抑制、工期の短縮などを可能にするために、生産情報の計画的早期確定を支援する工程表の作成手法を提案する。

具体的には、同時並行検討される生産情報が多段階で確定される性質を利用した情報群の前倒しによる計画的早期確定手法とその最適解^{注2)}を GA (Genetic Algorithm, 遺伝的アルゴリズム) によって求める手法を提案する。

1. 3 本論文の概要

本論文は、生産現場の作業所長が担当するプロジェクトに最適な生産情報確定工程を作成するための手法の構築を目指すもので、具体的には下記の内容を含む。

- ・生産情報の確定過程の詳細な分析から、その構造を明らかにし、生産情報確定工程のモデル化に活用する。
- ・生産情報の計画的早期確定への動機、そのための仕事量の増加と早期化に対する抵抗要因を、経験豊富な実務者のヒアリングによって明らかにし、生産情報確定工程作成に活用する。
- ・以上を基に GA 手法を使って最適解を求める方法を提案する。

2. 生産情報の計画的早期確定の要件

2. 1 生産情報確定の基本的な要件

生産情報の確定順序は生産工期からの逆算と発注者や設計者が確定しやすい順序とを勘案して決まる。その要点は下記のとおり。

1) 生産情報の相互関係の特定

生産情報の相互の関係としては、①特定の情報に基づいて後続の情報が確定する先行・後続の関係、②デザイン上の調和や設置場所の近接、機能上のつながりにより、同時並行検討し整合を図るべき

* 財団法人住宅総合研究財団 専務理事

** 清水建設株式会社情報システムセンター 主査

*** 京都大学工学研究科建築学専攻 助教授・工博

Senior Managing Director, JYUSOKEN (Housing Research Foundation)
Chief Engineer, Information Systems Center, Shimizu Corporation
Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Systems, Kyoto University,
Dr. Eng.

関係、の2つが挙げられる。

生産情報の先行・後続および同時並行検討の関係を各図面ごとに経験豊富な実務者のヒアリングを基に取りまとめたものを表1に示す。当該情報より早く確定すべき先行情報(A)、当該情報と同時に検討すべき同時並行検討情報(B)、後続して決めるべき情報(C)を、情報の内容ごとに記載したものである。それを基に、ISM(Interpretive Structural Modeling)およびDEMATEL(Decision Making and Evaluation Laboratory)分析を行い、情報全体の先行・後続と同時並行検討の関係を表わしたものを図1に示す。

2) 生産情報確定工程の詳細

生産情報の確定過程で設計者が行う作業は「設計内容の詳細な検討」とそれに基づいて、施工者からの生産情報を「検討・承認」することであり、主施工者が行うべき作業は生産情報の「作成」と各専門技術別施工者や部品製造者が作成したものの「整合チェック」である。その過程は、図2に示すように、設計者、主施工者の間で、数度にわたるチェック、検討、打ち合わせ、作図修正の後、設計者の検討・承認が行なわれ情報が確定する。

しかし、実際の生産情報の確定工程では、煩雑を避けるため、設計者の検討に入るまでを主施工者の整合チェックも含めて「作図」とし、検討開始以後を設計者による詳細な検討も含めて「検討・承認」とみなしている。そして、それぞれの中に、不確定要素を持つ打ち合わせ時間、待ち時間が含めて表現される。この不確定要素および作業の短縮可能な部分がフロートを構成する。

図2 単位工程の詳細 (アルミサッシ標準品の工程例)

2. 2 生産情報の早期確定への動機とその要件

生産情報を早期に確定することができれば、時間的に余裕を持って最適の製造担当者や工法の選択が可能になり、コスト抑制などの可能性を生むと同時に、工期短縮の要望に合理的に応えることができる。また、生産途上の不測の事態にあっても時間的余裕により、計画外の工事コスト増の防止に役立つことが期待される。

表1 生産情報確定の先行・後続および並行検討の関係

情報の内容別分類	先行・後続、同時並行情報	A. 先行する情報		当該生産情報	B. 同時並行検討情報 (他の生産情報)		C. 後続工程		
		A1. 設計図書情報	A2. 生産情報				C1. 後続の生産情報	C2. 部品・部材の製造(調達)	C3. 現場施工(組立・取付)
0. 基本情報	0a. 生産情報の初期化	一般図、構造図	—	基本情報図(芯関係、構造体)	—	—	躯体図	—	—
1. 構造体関係	0b. 各種生産情報の位置付け	一般図、構造図	基本情報図(芯関係、構造体)	プロット図	設備施工図(初期)	—	平面詳細図、鉄骨製作図	—	—
	1a. 現場での施工情報	一般図、構造図	プロット図	躯体図	平面詳細図(初期図)	—	平面詳細図、型枠、鉄筋加工図	鉄筋加工、コンクリート打設	コンクリート打設
	1b. 工場での生産情報	一般図、構造図	プロット図	鉄骨製作図	平面詳細図(初期図)	—	型枠製作	鉄骨建て方	鉄骨建て方
	2a. 現場での施工情報	一般図、構造図	躯体図	鉄筋加工図	型枠加工図	—	鉄筋加工	コンクリート打設	コンクリート打設
2. 外装関係	2b. 工場での生産情報	一般図、矩形図、立面詳細	躯体図	タイル、石工事施工図	外壁PC版製作図(打込みがある場合)	—	タイル製造、石加工、打込み	タイル、石張り込み	タイル、石張り込み
	3a. 現場での施工情報	一般図、矩形図、立面詳細	躯体図	外壁PC版製作図	打込み材(タイル、石)施工図	—	PC版製作	PC版取付	PC版取付
	3b. 工場での生産情報	一般図、矩形図、立面詳細	躯体図	カーテンウォーム、建具製作図	躯体図、タイル、石工事施工図	—	カーテンウォーム、外装建具製造	カーテンウォーム、外装建具取付	カーテンウォーム、外装建具取付
	4a. 現場での施工情報	平面詳細図(設計図)	平面詳細図(初期図)	平面詳細図、天井伏せ図	躯体図、鉄骨製作図、設備施工図	断面、展開詳細図、部分詳細図	(市販部品・部材調達)	各部施工	各部施工
3. 内装関係	4b. 工場での生産情報	一般図、展開図、平面詳細図	平面詳細図、天井伏せ図、断面、展開詳細図	断面、展開詳細図	躯体図、設備施工図	部分詳細図	(市販部品・部材調達)	各部施工	各部施工
	5a. 現場での施工情報	一般図、展開図、平面詳細図	平面詳細図、天井伏せ図、断面、展開詳細図	部分詳細図	設備施工図	—	(市販部品・部材調達)	細部施工	細部施工
	5b. 工場での生産情報	一般図、展開図、平面詳細図	平面詳細図、天井伏せ図、断面、展開詳細図	部分詳細図	設備施工図	—	(市販部品・部材調達)	細部施工	細部施工
	6a. 現場での施工情報	一般図、展開図、平面詳細図	平面詳細図、天井伏せ図、断面、展開詳細図	部分詳細図	設備施工図	—	(市販部品・部材調達)	細部施工	細部施工
4. 設備関係	6b. 工場での生産情報	設備設計図	設備設計図	設備施工平面図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	現場施工	現場施工
	7a. 現場での施工情報	設備設計図	設備設計図	設備施工平面図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	現場施工	現場施工
	7b. 工場での生産情報	設備設計図	設備設計図	設備施工平面図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	現場施工	現場施工
	8a. 現場での施工情報	設備設計図	設備設計図	設備施工平面図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	設備機器・部品製作図	現場施工	現場施工

図1 ISM, DEMATELによる先行・後続、同時並行検討関係の確認

これらは、工事費の抑制、工期の安定化で最終的には発注者の利益に繋がるものである。

次ページの表2は高層集合住宅の事例に基づき、早期確定に期待される効果を各生産情報別に記述したものである。この事例では、早期確定により、生産情報確定コストの削減も含めて工事費はおおよそ8.5%程度の削減が可能と考えられる。

1) 早期確定による工事費の抑制

早期確定により、主施工者にとってはコストネゴシエーションの時間の確保、早期確定による技術検討、最適工程の選択、などが可能となるため、コスト抑制の可能性が拡大する。

各専門技術別施工者にとっては、生産情報の早期確定により、最適の時期を選んで、低コストの労務、資材の調達、部品・部材の製造をすることが可能になる。

コスト削減の可能性が大きいものとしては、部品製造、設備工事関係に関するものが挙げられる。

表2 生産情報別の早期確定に見込まれる効果

生産情報図種別	費用・時間の増減	工事費(%)	前倒しで見込まれる工事費減(最大限)		生産情報作成費		前倒しで見込まれる生産情報作成費減(最大限)	
			工事毎の節減手段・節減比率(%)	工事費節減比率	各工事内生産情報費比率	対工事費比率	節減手段	節減比率(%)
0 基本情報	平面詳細図、天井伏せ図(総合図)、プロット図等	—	(他の項目で効果)	0	—	—	基本情報の早期提供、設備施工図情報の同時提供	20
1 構造関係	躯体図	3	型枠(間に合わせることが原則)	0	—	2	—	0
	鉄骨製作図	14	(間に合わせることが原則)	0	—	2	0.28	0
2 外装関係	金属雑具製作図、施工図	6	早期確定	10	0.6	3	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	25
	PCカーテンウォール図	4	PC版 早期確定	10	0.4	3	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	25
	金属工事図	—	早期確定	10	—	5	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	25
	石・タイル施工図	—	早期確定	10	—	5	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	25
3 内装関係	木工事施工図	7	早期確定	10	0.7	6	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	25
	内装工事施工図	4	早期確定	20	0.8	2	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	25
	家具・造作図	—	早期確定	0	—	0	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	10
	塗装工事色リスト	—	早期確定	10	—	2	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	10
	ユニットバス製作図	—	早期確定	10	—	2	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	10
4 設備関係	設備施工図	16	下図提供、早期確定	30	5	10	下図作成手間の削減	50
	各種設備機器製作図	—	上に含む 早期確定	20	上記に含む	3	打ち合わせ、修正の回数、時間節約	20
合計・備考		54	発注物が多いほど節減可能	7.5	下図利用と打ち合わせ、修正の回数、時間の節約	—		0.93

2) 早期確定による生産情報確定コストの抑制

複数の情報を前倒して同時並行検討し、確定するために、個別に確定する場合に比べ、主施工者にとっては情報を参照、照合する時間と手間が省ける。また、先行する情報の早期確定により、後続の生産情報の作成、確定が確実に行なわれるようになり、先行情報の不確実な状態に起因する手戻りなどの手間が減る。

具体的には、施工図や製作図の下図として活用可能な基図の早期提供などにより、平面図系の図面が多いものほど手間の削減が可能で、表2に見られるように前項と同様に部品製造、設備工事関係に関するものに与える影響が大きい。

3) 工期の安定化

① 予め発注者、設計者と合意することにより工期が安定すること、② 各段階の工程上重要な情報が確実に確定されること、③ 各情報の確定以後の工程それぞれにフロートを確保できること、などにより生産途上における不測の工事費増加や工期遅延を回避できる可能性をもたらす。

4) 計画的早期確定の範囲と効果

生産情報確定の計画的早期化の程度は、前項の阻害要因解消をどこまで行うことができるかに依存する。

その範囲は、① 各段階ごとの情報をその段階内で前倒しすることから、② 発注者や設計者の合意を得て、それぞれの段階の情報を群ごと前倒して、大幅な早期確定化を図ること、まで可能であり、得られる効果はその前倒しの程度による。

a. 段階内での前倒しの場合

各段階の情報確定の前提となる情報を基に、相互の先行・後続、同時並行検討の関係を維持しながら、各情報それぞれのフロートを活用した確定工程の前倒しを行うことができる。この場合の予想される効果は、一般的に表2に示す8.5%のうちの3分の1程度が見込まれる。

b. 複数の段階の情報をまとめて前倒し確定する場合

複数の確定段階をまとめて前倒しすることも、発注者や設計者の合意が得られれば可能となる。発注者や設計者が大幅な意思決定の前倒しに合意しやすい機会やイベントが提案され合意される必要が

ある。通常、構造体関係、外装材関係の段階にその後の内装関係の段階の情報をまとめて前倒して確定することが行なわれる。前述、8.5%の効果はこの前倒しにより想定されるものである。

3. 新しい生産情報確定工程のしくみ

すでに一部の建設会社で活用されている生産情報確定工程の工程表の多くは、主として現場の作業工程を制約条件として、生産情報の作成に関する工程表を作成するものであり、各生産工程相互の調整を行いながら、工程全体を改善するような機能を有してはいない。ここでは、前章で明らかにした、生産情報確定の順序と計画的に早期確定する要件を基に、生産情報確定工程を構築するルールや制約条件を設定し、新しい生産情報確定工程のしくみを考える。

3. 1 生産情報確定工程を構築するルール

生産情報の確定順序は確定工程を作る上での基本的なルールとなる。前章で述べた要件を従来からの生産情報確定工程の作成システムに組み込むべきルールとして設定する。

1) 生産情報確定工程を構成する基本的なルール

a. 生産情報相互の関係による制約

生産情報の確定順序に関する制約は、先行・後続と同時並行検討の関係である。

先行・後続の関係による工程構成上の制約を図3に示す。後続の情報の検討・承認は、先行する情報の確定後でないと着手できない。

また、同時並行検討による工程構成上の制約は図4に示すように、検討承認期間が重なることが必要である。

図3 先行・後続の場合の制約条件

図4 同時並行検討の場合の制約条件

b. フロートを活用して工期短縮を行うルール

ここでは、2章で述べた要件を基に、工程上のフロートを、費用の増加を伴わないで短縮可能な

explicit フロートと、労務の追加投入などのために工事費の増加を伴う implicit フロートに分けて考える。図5に示すように、通常の工程短縮にあたってはexplicit フロートを、大幅な短縮にあたってはimplicit フロートをも使い、圧縮の程度によっては大幅な工事費増を伴うと考える。

図5 フロートの概念図

図5に示すように、通常の工程短縮にあたってはexplicit フロートを、大幅な短縮にあたってはimplicit フロートをも使い、圧縮の程度によっては大幅な工事費増を伴うと考える。

2) 多段階確定のルール

筆者らは、すでに、生産情報は同時並行検討する情報ごとについて、いくつかの段階でまとめて確定されること、具体的には検討・承認される過程で、構造関係の情報、外装関係の情報、内装関係の情報、毎にまとまりがみられ、それらが順序を追って確定していく多段階の確定過程を構成すること、を明らかにしている。¹⁾

a. 確定段階の設定ルール

生産担当者は、確定の段階分けを発注者や設計者の意思決定過程にそった形で、しかも可能な限り少ない段階で早期にまとめるよう工夫する。一般的にそれらは、基本情報の確定段階、構造関係情報の確定段階、外装関係情報の確定段階、内装関係情報の確定段階、設

備関係情報の確定段階に分けられる。実際の工程では、外装が工業化部品による場合、構造と外装関係が重なり、構造・外装関係確定段階となり、内装関係は部品製造に関するものと、現場施工に関するもので確定すべき時期をずらすことが可能で、分割される傾向にある。図6はその事例を示すもので、①基本情報確定段階、②構造・外装関係情報確定段階、③内装(部品製造)関係情報確定段階、④内装(現場施工)関係情報確定段階の4段階に分けている。

図6 生産情報確定の各段階と情報群のなかで先行確定する情報

b. 各段階の確定を先導する情報

それぞれの段階においては、その段階の情報の基本となる生産情報が先行して作成、検討、確定され、それが当該段階のその他の情報確定の前提となる。

構造関係情報の確定にあたっては芯関係などの基本情報や主な設備の配置を示すプロット図などの情報、外装関係情報の確定にあたっては躯体図などの情報、さらに、内装関係情報の確定にあたっては平面詳細図に示される内装に関する基本的な内容の情報、が先行して確定する。図6に示すように、各段階の情報を先行して確定されるべき情報の確定時期を超えた前倒し確定はできない。したがって、図のモデルで示すように、すべてのdは正の値をとる。

3. 2 計画的早期確定の制約条件

生産情報の計画的早期確定を検討する上で、発注者・設計者に起因する阻害要因解消のための手間やコストの増大、作業の集中、作業の早期開始への圧力などが制約条件となる。早期化の程度は2.2項で述べた期待される利益とのバランスで決まる。

1) 発注者、設計者による早期確定阻害要因への対応

早期確定を阻害する要因としては、詳細な設計内容の未定部分について発注者や設計者による意思決定が残っていること、その確定にあたって生産担当者の技術に基づいて実現される内容を参照して確定したいこと、実現内容を現場で現物で確認したいこと、さらに確定対象の特定の生産情報のみでなく関連する生産情報とあわせて常に全体像を確認しながら決定したいこと、などが挙げられる。これらの阻害要因への対応を考え、生産情報の計画的早期確定の制約条件を明らかにする。

a. 設計詳細内容の検討続行への対応

生産情報の計画的早期確定には、作成から検討・承認の工程までの工程表を作成し、生産情報確定期限に間に合うように、詳細な設計内容の決定について、予め合意しておくことが前提となる。実際に採用する技術や内容を施工図や製作図で確認可能とするため、各生産担当者は保有する技術に基づき、施工法、実現する内容の詳細を記載した生産情報を提案し、設計内容の確定を促進する。生産情報確定工程の制約条件としては、生産情報確定早期化のための活用可能なフロートの量、および専門技術別施工者や部品製造者の早期決定の限界が挙げられる。

b. 現場、現物での確認志向への対応

発注者、設計者ともに、設計意図・デザインの細部を実際の建物で確認しようとする傾向がある。この傾向への対策として、実大模型、部分見本を作成し、出来上がりの姿に代え、確定する方法がとられ、発注者や設計者の早期意思決定の支援手段として活用される場合が多い。実大見本や実物の部分模型などを作成、提供するための費用は当該部分の実際の工事費の数パーセント程度と考えられ、多額に及ぶ場合は追加の費用が認められる場合が多い。

これらの方法は段階ごとの前倒しに大幅な早期確定が期待される場合に採用される。実施に伴う費用と時間は少なくはないが、それを見込んでも、前述のとおり早期確定の利益は大きいと考えられている。なお、たとえば模型作成用の図面の作成、検討・承認は製作図などの検討過程で行なわれるため、作業の集中を考慮する必要があり、それが制約条件となる。

c. 全体像確認志向への対応

発注者や設計者は特定の生産情報を検討・承認する場合においても、それらに関する情報を一覧し、常に全体像を確認する志向を持つ。

現在、全体像における特定の生産情報の位置づけを確認するために、平面系の基本的な情報を記載する「総合図」が作成されるようになってきている²⁾が、同時に、関連する情報との関係を確認するための情報の取り揃え、整合チェックが必要となり、そのための手間の増大と集中も制約条件となる。前出の図6に示すように生産情報の確定を各段階で同時並行検討すべき群ごとに確定していくことで対応可能となる。

2) 生産情報の作成、照合チェックおよび検討・承認の工程能力上の制約

生産情報の計画的早期確定のためには、そのための作成、整合チェックおよび検討・承認作業の早期集中が生じる。ここでは、これに対応する能力を工程能力という。早期確定を支障なく行うための工程能力の確認は、同時期に集中する作図および整合確認作業の総量と、活用可能な担当者の工程能力を比較することによって行なわれる。工程能力が不足する場合、それが工期短縮の限界であり、不足工数を調達すれば割増コストが必要となる。いずれにせよ、これらが制約条件となる。

生産情報作成に要する工数、整合チェックに要する工数、設計者が検討承認に要する工数を実態の分析から推定したものを表3に示す。表中、専門技術別施工者や部品製造者が作成する図面のうち、専ら自らの作業のための図面を除いたものが、主施工者の整合チェック、および設計者の検討・承認の対象となる。また、主施工者の整合チェックの工程は前出の図2に示すように、各生産情報の作成工程の後半部分に含めて考える。

生産情報確定を早期化する場合、二つの作業集中が発生する。その一つは個別の情報の工期を短縮することによる作業の集中であり、二つ目は複数の生産情報の作成、整合チェック、および検討・承認の作業が重なる場合の作業の集中である。

個別の情報の作業集中をまねく工程短縮は、その工程に含まれるフロートの範囲で対応される。主施工者の躯体図・平面詳細図・天井伏せ図など早期に作成しなければならないもの、専門技術別施工者および部品製造者の施工図、製作図などで大量に作成しなければ

表3 生産情報の図面枚数と主施工者の必要実工数の設定

モデル 高層集合住宅、延べ面積 40,000m ²										工数単位 人・日			
各担当者の必要工数		専門技術別施工者、部品製造者情報作成工数			主施工者による情報作成、チェックの工数			設計者による検討・承認工数					
生産情報・図種別		図面数		単位工数	必要工数	対象図面数		単位工数	必要工数	対象図面数		単位工数	必要工数
0. 基本情報	基本情報図	—	—	—	—	1.5	0	20	0.5	10	—	—	—
	プロット図	—	—	—	—	20	1.5	30	20	0.5	10	—	—
	平面詳細図	—	—	—	—	100	2.0	200	100	0.5	50	—	—
	(総合図)	—	—	—	—	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
	天井伏せ図	—	—	—	—	50	1.0	50	50	0.5	25	—	—
1. 構造関係	躯体図	—	—	—	—	130	1.5	195	130	0.5	65	—	—
	鉄骨製作図	2000	0.5	1000	150	0.2	30	150	0.2	30	—	—	—
2. 外装関係	金属建具図	100	1.0	100	100	0.2	20	100	0.2	20	—	—	—
	PCカーテンウォール図	4000	0.5	2000	150	0.2	30	150	0.1	15	—	—	—
	金属工事図	350	1.0	350	150	0.5	75	150	0.2	30	—	—	—
	石・タイル施工図	15	1.0	15	15	1.0	15	15	0.5	8	—	—	—
3. 内装関係	木工施工図	—	—	—	—	平詳	1.5	0	平詳	0.5	0	—	—
	内装工事施工図	—	—	—	—	200	1.0	200	100	0.2	50	—	—
	塗装工事色リスト	—	—	—	—	10	1.5	15	10	1	10	—	—
	家具・造作製作図	20	1.5	30	20	1.0	20	20	0.5	10	—	—	—
	ユニットバス製作図	20	1.0	20	20	0.5	10	20	0.5	10	—	—	—
4. 設備関係	電気設備設備施工図	150	1.0	150	150	0.5	75	150	0.5	75	—	—	—
	給排水設備施工図	200	1.0	200	150	0.5	75	150	0.5	75	—	—	—
	各種設備機器製作図	50	0.5	25	30	0.5	15	30	0.5	15	—	—	—

ならないものでは、生産情報の作成作業が集中するため、早期確定を考えると、特に工程能力に照らして確認する必要がある。

複数の情報の作図、整合チェックの作業の重複については、主施工者および設計者の生産情報に関わる工程能力が重複の程度を制約する条件となる。

a. 主施工者の工程能力による制約

主施工者は図面を作成するとともに、専門技術別施工者によって作成される図面の整合チェックも行う。したがって、それら2つの作業の重複に対する工程能力によって、主施工者による工程の前倒しは制約される。担当者の工程能力の補強可能な範囲がその作図および整合チェック作業集中の限界となる。

b. 設計者の工程能力による制約

設計内容の詳細検討作業の集中、生産情報の検討・承認のための作業の早期集中に対して工程能力上、対応可能であるかどうか問われる。

3) 専門技術別施工者、部品製造者決定上の制約

生産情報の作成、整合チェックなどの作業の早期集中のほかに、生産者側に起因する阻害要因として、専門技術別施工者や部品製造者への発注の遅れによる作図開始時期の決定の遅れが挙げられる。主施工者の早期決定への姿勢が制約条件となる。

4. 生産情報確定工程の作成

4. 1 新しい生産情報確定工程作成のフロー

すでに開発、利用されてきた一般的な工程計画作成システムに、3. 1 1) bで述べた2種類のフロートならびに後述のGAによる最適解の探索を組み込んだ、新しい生産情報確定工程システムの処理フローを図7に示す。

新しいシステムでは、まず現場の作業工程作成時に、個々の現場作業に対する explicit フロートを明確化するとともに、労務状況などを考慮した implicit フロートを定義できるようにしている。また、この現場の作業工程に合わせた標準

的な生産情報確定工程作成時に、個々の生産情報確定作業に対して explicit フロートならびに implicit フロートを定義する。

次に、この2種類のフロートを持つ生産情報確定工程を初期工程として、5章で述べるGAを利用して生産情報確定作業の前倒しおよびフロートの短縮を行い、生産情報確定工程の作業日数やコストの評価から最適解を求めるものである。

4. 2 新しい確定工程のモデル

現場の作業工程に2種類のフロートを組み込んで作成した工程表を図8に示す。平面詳細図などの基本的な情報が確定するタイミングで、情報が確定するまとまり（生産情報群）が形成され、先行する情報群に引き続き後続の情報群が確定していく情報確定の仕組みがうかがえる。

この工程は、図7に示した新しい生産情報確定工程システムの処理Aの結果である、「生産情報確定工程を含む工事工程の提示」に該当するものである。

さらに、この工程に、2. 2 4) a項で述べた段階内での前倒しを、3. 1 項に列記したルール、3. 2項の制約条件を考慮して行ったものを図9に示す。これは、次章のGA分析により、計画的早期確定を行った結果をモデルとして図化したものである。

図7 新しい生産情報確定工程作成フロー

図8 生産情報の多段階にわたる確定工程 (モデル：地上40階建、S+RC造、延べ面積40,000m²)

図9 各段階で各情報を前倒して同時並行検討の情報を群として取り纏めた工程表

5. GAを利用した計画的早期確定工程の生成

GA (Genetic Algorithms: 遺伝的アルゴリズム) は自然界における生物の進化過程を応用して、問題環境への適合度が高い解を発見していくものである。^{3) 4)} 本論文においては、個々の作業の固まりを繋ぎあわせたものを遺伝子1個体ととらえ、これらの個体群に対する遺伝子の組み替えや突然変異を利用して、より最適な工程(作業に対する開始日および日数の組み合わせ)を生成する。

5. 1 GA分析の前提

1) GA分析の目的

本論文では、当該プロジェクトに最適なバランスと思われる前倒し確定の程度を求めるため、GAによる分析を試みる。プロジェクトの特徴、設計者や発注者の傾向を、計画的早期確定を行う際の制約条件とした上で、可能な限り前倒しに向かうよう評価関数を設定し、最適解の集合を求めようとするものである。

2) GAによる計画的早期確定の前提

a. 評価対象モデル

- ・評価対象の項目は図8に示す13の生産情報作業とする。
- ・生産情報確定工程の前後関係は前出の図1に示したISMおよびDEMATEL分析による。このモデルでは、一部図面名称が異なるが、検討対象となる内容の一致するもので考慮した。
- ・各生産情報作成に関する初期工程は、フロートおよび同時並行検討を考慮した前項の工程表システムの処理Aから導かれる。
- ・各生産情報確定作業の作業内訳(作図、検討・承認、製作)に関するコスト情報、および各生産情報に対する制約条件(最遅日付)は前項の新工程システムから導かれる。

b. GAシステムで入力すべき情報

- ・前倒し戦略(図6に示す、先行して確定すべき平面詳細系の図面予定完成日)を指定する。これによりISMの分析結果から各作業の前倒し限界日付が求まるので、これを前倒しの制約条件とする。
- ・同時並行検討作業(複数の作業の間で、検討・承認時期がラップ)を指定する。
- ・implicitフロート削減時の費用増および作業日数削減による費用減の度合いを比率として定義するとともに、計画的早期確定に対する各種の定性的な抵抗要因(設計者の検討続行志向や労務制約など)をフロート日数の削減限界値(日数)として与える。
- ・GA処理に対する評価戦略(工期優先の評価を行うか費用優先の評価を行うか)を指定する。
- ・各生産情報確定工程を前倒しすることによるメリットを費用減の比率として与える。

c. GA処理における評価尺度

- ・各生産情報確定作業は、作業内訳(作図、検討・承認、製作)ごとにexplicitフロートとimplicitフロートを持ち、各フロートは削減限界値(前倒しに対する抵抗要因の定量化)を持つため、この日数の増減を計算する。
- ・個別の作業に対しては、各フロート日数が初期日数を上回らないこと、作業全体に対しては、総作業日数が初期総作業日数を上回らないことを評価尺度とする。
- ・個別の作業に対しては、各作業の開始日が前倒し限界および同時並行の制約を超えないこと、また最早開始日と最遅終了日の

間に含まれるかどうかを評価尺度とする。

- ・評価された作業内訳の総日数と各フロートの削減日数によるコストの増減から作業ごとのコストを計算し、初期作業コストとの比較を行う。
- ・作業全体に対して労務制約の山積み評価を行い、複数の作業が同時並行で行なわれる際の労務のラップが限界を超えないことを評価尺度とする。
- ・作業全体に対して、総コスト(作業ごとのコストの合計)が初期総コストを上回らないことを評価尺度とする。

5. 2 GA分析における評価

1) 染色体の構成

個体の染色体の表現については、ビット列{0,1}に基づく2進数表現を用いる。この時、個々の染色体は、遺伝子配列を構成する各作業の、作業開始日、作図日数、承認日数、および製作日数のビット表現で表わされる。その際、総遺伝子配列数を押さえるために、各作業の内訳日数に関しては、作図・承認・製作それぞれのimplicitフロート日数(短縮することにより費用が発生する)の削減限界からの日数およびexplicitフロート日数(短縮しても費用が発生しない。逆に短縮することにより作業日数を短くできるため、費用が減少する可能性がある。)の削減限界からの日数で遺伝子配列を作成する。つまり、implicitフロート日数が10日間であり、労務状況などからその削減限界が6日(4日間は短縮可能)の場合、遺伝子配列として表現される日数は4日(000100)となる。したがって、1個体の染色体のうち、各作業を表わす遺伝子配列は図10のように表わされるため、各個体の染色体の表現は図11のようになる。しかしながら、本研究においては、GA処理の効率化を図るために、各作業の開始日付を表現する遺伝子配列部分と作業日数を表現する遺伝子配列を図12の様に分けて、初期遺伝子を作成している。

この時、

$$\alpha_{ijk} \geq 0 \quad (i=\text{個体数}, j=1 \text{ to } 13, k=1 \text{ to } 3, l=1 \text{ to } 2)$$

$$\beta_{ij} \geq 0 \quad (i=\text{個体数}, j=1 \text{ to } 13)$$

となり、各 α_{ijk} は6ビット、各 β_{ij} は10ビットで表現されるため、1つの作業を表わす配列は46ビット、1つの染色体配列のビット数は598ビットとなる。

図10 各作業を表わす染色体配列

図11 各個体を表わす染色体配列

図12 本研究で採用した染色体配列

2) 遺伝子の評価方法

上記の各染色体に対して、作業日数の増減、作業開始日の前倒し程度および各染色体に対する費用の増減が、以下の観点から評価さ

れる。

- ・各内訳作業の日数（フロート日数）が削減されているか。
- ・各作業の作業日数合計が削減されているか。
- ・各染色体の総作業日数が、初期染色体の総作業日数よりも削減されているか。

・implicit フロート日数削減による費用増と作業日数減による費用減の結果はどうか。

- ・各作業の開始日が当該工事の最早開始日より早くないか。
- ・各作業の終了日が当該工事の竣工日より遅くないか。
- ・各作業の承認終了日が、その段階で先行確定する情報（平面詳細系の図面）の確定よりも早くないか。

・同時並行検討作業間においては、承認期間が重複するところまで作業が前倒しされているか。

・複数作業が同時並行検討される部分において、担当者の労務山積みによる作業集中度はどうか。

・前倒しによる費用減および、前倒しによる費用増の評価はどうか。

これらの評価項目を、それぞれ日数に関する評価関数、開始日付に関する評価関数、および費用に関する評価関数として定義し、それぞれの評価関数にペナルティ値を加えたものの分数をとった上で、それらの合計により各染色体の評価関数とした。

つまり、日数に関する評価においては、各 α_{ijk} に対して

$$\cdot ND_{ij} = \sum_{k=1 \text{ to } 3} \sum_{l=1 \text{ to } 2} (\alpha_{ijk} + \text{実働日数} + \text{内部フロート限界} + \text{外部フロート限界})$$

が各作業ごとの作業日数となり、

$$\cdot WD_i = \sum_{j=1 \text{ to } 13} ND_{ij}$$

が染色体の作業日数の総和となる。これに対して、各 α_{ijk} と α_{0ijk} （初期データ）とを比較し、日数が増加した作業に対してその差分 P_i を作業日数の増加に対するペナルティ値とした。ここで、

$$\cdot P_i = \sum_{j=1 \text{ to } 13} \sum_{k=1 \text{ to } 3} \sum_{l=1 \text{ to } 2} |(\alpha_{ijk} - \alpha_{0ijk})|$$

で与えられる。

また、開始日付に関しては、各内訳作業の開始日を

- ・ $\theta_{i1} = \beta_{i1}$ (各作業の開始日)
- ・ $\theta_{i2} = \beta_{i1} + \text{作図日数}$ (承認作業の開始日)
- ・ $\theta_{i3} = \theta_{i2} + \text{承認日数}$ (製作作業の開始日)
- ・ $\theta_{i4} = \beta_{i1} + \text{作業日数}$ (各作業の終了日)

とすると、各染色体の作業日数は（作業の最遅終了日－作業の最早開始日）、つまり

$$\cdot TD_i = \max_{j=1 \text{ to } 13} \theta_{ij4} - \min_{j=1 \text{ to } 13} \theta_{ij1}$$

で求められる。これに対して、日数評価と同様にペナルティ値 Q_i を考えると、この場合のペナルティ値 Q_i は、

・各作業の開始日 $\theta_{i,j,k}$ が ISM 分析から導かれた前倒し限界を超えていないか。

- ・各作業の終了日 $\theta_{i,j,4}$ が入力された最遅終了日を超えていないか。
- ・ユーザーが指定した同時並行検討作業に対し、

$$\theta_{i,j,2} \leq \theta_{i,j+1,2} \leq \theta_{i,j,3} \quad \text{または} \quad \theta_{i,j,2} \leq \theta_{i,j+1,3} \leq \theta_{i,j,3} \quad (1 \leq j \leq 12)$$

などによって与えられる。

したがって、作業日数および開始日付に関する評価関数は、前述の各作業日数の総和、染色体の作業日数、およびそれらに対するペナルティ値の和の分数として以下のように定義した。

$$\cdot EV1_i = 1 / (WD_i + P_i + TD_i + Q_i)$$

次にコストに関しては、各作業に対してコスト γ_{ijk} が以下のよう

- ・ $\gamma_{ijk} \geq 0$ ($j=1 \text{ to } 13, k=1 \text{ to } 3, l=1 \text{ to } 3$)
 - ・ γ_{ijk} は必ず固定（実稼働日数に対する費用は常に固定とする）
 - ・ γ_{ijk} は内部フロート短縮に伴う費用増率
 - ・ γ_{ijk} は外部フロート短縮（または作業日数削減）に伴う費用減率
- したがって、各作業に対する費用は初期データに対する「初期コスト＋内部フロート日数削減によるコスト増－作業日数減によるコスト減」によって評価される。つまり染色体の作業コストは
- $$\cdot WC_i = \sum_{j=1 \text{ to } 13} [(\gamma_{ijk} * ((\alpha_{i02} - \alpha_{ijk}) * \gamma_{ijk2} - (\alpha_{i03} - \alpha_{ijk3}) * \gamma_{ijk3}))]$$

となる。ここで、 α_{i02} および α_{i03} は、初期状態における各作業の内部フロートおよび外部フロート日数とする。一方、作業の前倒しによるコストの増減については、

$$\cdot DC_i = \sum_{j=1 \text{ to } 13} \{(\theta_{i01} - \theta_{ijk1}) * (1 + \text{コスト増率} - \text{コスト減率})\}$$

となるため、この2つの作業コストの和の分数をとり、以下のようにコストに関する評価関数を定義した。

$$\cdot EV2_i = 1 / (WC_i + DC_i)$$

したがって、前述の作業日数と開始日付に対する評価値との和

$$\cdot EV_i = A * EV1_i + (1-A) * EV2_i \quad (A: \text{工期優先度}, 0 \leq A \leq 1)$$

を、個々の染色体に対する選択確率とすることができる。

3) 遺伝子操作

染色体の選択については、各個体の選択確率の割合から個体を選

択するルーレット選択を用いる。また、遺伝子の交叉については、開始日の染色体と作業日数の染色体は別に扱い、それぞれのなかで交差させる変則的な1点交叉とした。本システムでは収斂する世代数が最小になるように、交差確率は、0.5 から 1.0 の間で試行し、0.6 とした。同様に、突然変異率は 0.002 から 0.01 の間で試行し、0.005 とした。その結果、世代数は収斂する最小限の世代として 200 とした。遺伝子操作のプロセスを図13に示す。

4) GAによる最適解集合の探索

GAの処理は、以下のような条件で実行し、作業日数、開始日付の評価を総合すると、図9で想定したような結果を得た。

・作業数	13作業
・各染色体のビット数	598ビット
・初期個体数	50個体
・交叉確率	0.6
・突然変異確率	0.05
・世代数	200世代

上記の条件によりGA処理を行った結果、explicit フロートおよび implicit フロートの削減による日数短縮のコスト削減効果と、implicit フロート削減に伴うコスト増加を評価し、総作業日数を初期日数から5%程度、削減することができた。さらに、前倒し限界

図13 GA処理のフロー

および同時並行検討の制約にそった作業開始日の移動により、全体作業工期を初期日数から20%程度、削減することができた。

5) 残された課題

生産情報の計画的早期確定への今回のGA分析は、まず段階内での前倒しへの適用可能性について検討するために、各段階の生産情報群の前倒しに大きく影響する基本的な情報（平面詳細図など）の確定時期を予め入力し、その段階の範囲内で前倒しに向かう傾向を確かめたものである。この平面詳細図などの情報確定がプロジェクトの状況や、現場の規模、工事長の経験などに左右されるため、工事長による入力という形態を採用したものである。したがって、ここではより大きな効果が期待される2. 2 4) b項で述べた複数の段階の情報をまとめて前倒しする方法の適用可能性の検討は行っていない。

また、評価項目のうち、生産情報確定を前倒しする際の抵抗要因の一つである、複数作業の集中に対する担当者の作業能力の評価（山積み評価）からの制約を反映していない。これは、今回の段階内での前倒しにおいては予め入力する基本的な情報の確定時期がその段階生産情報群に対する前倒しの限界となり、山積み評価を行うメリットがあまりないと考えられるためである。

しかしながら、各段階を先導する基本的な情報の確定時期も前倒しの対象となるものであり、その結果として、生産情報確定工程の大幅な前倒しが期待されるものである。今後は、そのために発生する複数の作業の集中に起因する制約条件による評価も組み込め、再度GA処理を行い、自在に計画的早期確定を組み込むことのできる生産情報確定工程の適用可能性について分析を続ける予定である。

6. 生産情報工程表の活用により期待される効果

本論文で提案した新しい生産情報確定工程の活用、およびGAによる最適解探索による計画的早期確定の効果を検討する。

6. 1 新しい生産情報確定工程の活用による効果

1) 生産情報確定期限の合意への活用

提案するシステムで作成した生産情報確定工程を工事着工時に発注者、設計者に提示し、設計内容の確定期限の打ち合わせに活用する。また、explicit フロートを活用して、特定の事項に関しては確定時期を限界まで遅らせるなど、不満の残らない形での合意が可能となる。

2) 生産情報の同時並行検討の支援

各段階ごとに、生産情報の検討・承認の期間を重複させることにより、より幅の広い検討が可能で、検討の落ちを防止し、その後の変更などの手戻りの計画的防止に役立つ。

6. 2 生産情報の計画的早期確定支援システムの活用

1) 計画的早期確定によって得られる利益

計画的早期確定により予想される利益は、すでに3. 1項の動機で述べたとおりであり、作業所長の最大関心事である、コスト抑制を、発注者や設計者の合意の下で合理的に可能にするものであり、下記の3点に要約される。

- ・ 工事コスト、生産情報確定コストの合理的抑制
- ・ 同時並行検討を伴うため、生産情報の確定のための手間の削減と内容の整合性の向上
- ・ 早期確定による工期の安定と不測の遅延などへの余裕ある対応

2) GAによる最適解の探索手法による効果

建築プロジェクトは内容、工期、工事費ともにそれぞれ異なり一般的に条件の標準化はできない。ここで提案した方法によれば、個別のプロジェクトごとの特徴を作業所長の判断により入力し、得られた解を評価し、その中から、その現場に最適の案を選ぶ事が可能な最適解近傍のプロジェクト特有の解を見つけることができる。

7. まとめ

生産情報の作成から確定に至る構造を明らかにし、最終的に、発注者、設計者と協働し、お互いに満足を得ながら、計画的に、かつ早期に生産情報を確定していく、生産担当者にとっての戦略的な生産情報確定工程システムを構築した。その結果をモデルプロジェクトに適用し、本システムの妥当性と有効性を確認した。

今後の課題は以下のとおりである。

- (1) GA分析で残された課題である、①複数の情報群をまとめて前倒しすることへの適用可能性、②重複作業の集中による工程能力の制約による評価の導入③突然変異、交叉率などのパラメータの設定を実務に照らして妥当なものにすること、などについて、引き続き研究を行う。
- (2) 現場や工場の実生産工程と連携した生産情報確定工程システムの構築を行う。
- (3) 各プロジェクトごとに妥当な定量化が行えるように、前倒しの手間や費用と得られる効果については、実例データを積み重ねていきたい。

謝辞

本論文作成にあたり、清水建設の多くの作業所長の方から示唆をいただいた。特に高岡敏明工事長からは前倒し確定による実例をお示しいただくとともに、本論構成上重要な助言をいただいた。和泉研究室の林康裕氏にはGAの使用にあたって多くの示唆をいただいた。さらに、京都大学長岡弘明教授からは論文全体の構成、GA 手法について示唆をいただいた。ここに心から謝意を表します。

注

注1) 本論文では生産を担当する主体を右記のような階層構成で考える。

注2) GAでいう最適解とは、必ずしも最善の策を意味せず、次善の策尾も含む概念である

参考文献

- 1) 峰政克義、伊藤健司、古阪秀三、建築プロジェクトにおける生産情報の確定過程、日本建築学会計画系論文集、No502, p187-194, 1997, 12
- 2) 峰政克義、服部克洋、坂本正史、古阪秀三、建築プロジェクトにおける生産情報の共有と整合のしくみ、日本建築学会計画系論文集、No504, p179-186, 1998, 2
- 3) 長岡弘明、古阪秀三、山崎雅裕、金多隆、李永稿、岡本啓照、建築工事における労務平準化への遺伝的アルゴリズムの適用、日本建築学会計画系論文集、No491, p183-187, 1997, 1
- 4) 李永稿、長岡弘明、古阪秀三、山崎雅裕、金多隆、労務コストに基づく建築工事の労務資源配分最適化、日本建築学会計画系論文集、No504, p187-194, 1998, 2

(1998年2月9日原稿受理、1998年8月21日採用決定)