

建築工事編成最適化システムの構築

OPTIMIZATION SYSTEM OF SUB-PACKAGE PROBLEM IN BUILDING CONSTRUCTION PROJECT USING MATHEMATICAL PROGRAMMING

則武讓二^{*1}, 古阪秀三^{*2}, 藤澤克樹^{*3}, 金多 隆^{*4}

Joji NORITAKE, Shuzo FURUSAKA, Katsuki FUJISAWA and Takashi KANETA

This paper describes the sub-package problem in the building construction project which is defined to combine various resources under some constrained conditions and multipurpose. Multipurpose includes the term of works, the cost, the quality, the safety, and so on. Various resources include the labor, the material, and the temporary facilities and machinery, etc. The sub-package is currently arranged through the personal judgment of the site manager. However, this way of arrangement comes to the limitation. In this paper, the methods of the sub-package in construction firms are collected through interviews and surveys. Then, the decision-making support system of the sub-package is developed to achieve the optimization with mathematical programming model where the evaluation criteria are the overhead cost and the management time in sub-package problem.

Keywords: sub-package, scope of work, specialist contractor, overhead cost, management time, optimization
工事編成、業務範囲、専門工事業者、間接費、管理手間、最適化

1. 序論

1.1 研究の背景

工事編成は、総合建設業者（以下ゼネコン）の作業所長が、自らの経験と直感に基づいた主観的判断で計画・実行する状態にある。その判断基準は、いわば経験則の積み重ねであって、客観的方法論としては必ずしも明確に示されていない。

近年では、発注方式の多様化の進展や専門工事業者（以下サブコン）の業務範囲の拡大などによって、工事編成の複雑性・多様性が増す傾向にある。このような工事編成を主観的判断のみに基づいて行うことには限界があり、あらゆる発注方式に適用できる工事編成の一般的な理論、およびそれに基づいた工事編成の支援システムが求められている。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、以下の3つである。

多様な発注方式下における工事編成の実態を把握すること
現行の工事編成方法を理論化し、工事編成モデルを構築すること
工事編成支援システムを開発し、最適化結果と実際の編成の比較、およびケーススタディを通してモデルの有効性を検証すること

1.3 研究の方法

研究の方法をまとめると以下のようになる。

工事編成の実態把握

ゼネコン5社、PM/CM会社5社に対するアンケート調査、およびサブコン4社に対するヒアリング調査を行い、多様な発注方式下における工事編成の実態を把握する。

工事編成方法の理論化、および工事編成モデルの構築

調査結果をもとに工事編成方法を理論化し、工事編成モデルを構築する。

工事編成支援システムの開発

構築した工事編成モデルをもとに、工事編成支援システムを開発する。システムは、C言語で記述したプログラムと整数計画問題を解くための数値計画ソルバーで構成される。

モデルの有効性の検証

実プロジェクトを対象として、最適化結果と実際の編成の比較およびケーススタディを行い、モデルの有効性を検証する。

1.4 用語の定義

本論文では、用語を以下のように定義する。

工事編成

工事編成は「建築物を施工するために、一定の制約条件下で、多

^{*1} コンパックコンピュータ株式会社 工修

^{*2} 京都大学大学院建築学専攻 助教授・工博

^{*3} 京都大学大学院建築学専攻 助手・博(理)

^{*4} 京都大学国際融合創造センター 助教授・博(工)

^{*1} Compaq Computer K.K., M. Eng.

^{*2} Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Systems, Kyoto University, Dr. Eng.

^{*3} Instructor, Dept. of Architecture and Architectural Systems, Kyoto University, Dr. Sc.

^{*4} Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Systems, Kyoto University, Dr. Eng.

目的なものとして各種資源を組み合わせること」¹⁾と定義する。

業務の水平展開

近年、ある業種で許可を受けているサブコンが、他の業種の工事をも受注する方向に業務の範囲を拡大する指向が見られる。このような業務の展開方法を水平展開という。

業務の垂直展開

近年、サブコンが労務以外に材料調達、品質管理、工程管理なども含めて受注する方向に業務の範囲を拡大する指向が見られる。このような業務の展開方法を垂直展開という。

2. 既往研究

2.1 国内における研究成果

国内の既往研究は、以下のように位置づけられる。

佐々木¹⁾は、建築プロジェクトにおける業務分担範囲の操作性の様式と、その際に必要な各種考慮事項に対する知見を提供している。この論文は、建築プロジェクトを取り巻く環境の分析が研究の中心であり、本論文における工事編成モデルの制約条件設定のベースとなっている。

Furusaka²⁾は、工事編成決定問題を、作業所における各種工事とそれら各々に発生する責任（例えば、労務、材料、機械、管理など）の組合せに関する問題（サブ・パッケージ問題）として定義している。本論文では、この論文で提案された工事編成マトリクスという概念をもとに、調査や工事編成モデルの構築を行っている。

遠藤³⁾は、工事編成決定問題に存在する合理的な政策基準、決定方法を見出し、さらにそれを工事編成支援システムとして再構成している。しかし、その主眼は概念の構築と設計にあり、具体的なシステムの提案には至っていない。また、施工チームの編成モデルを提案し、その振る舞いを分析しているが、そのモデルは数理的最適化に至るものではない。

橋本⁴⁾は、サブコン業界の動向分析とその将来的方向性の検討を行い、その中でサブコンの担当可能業務範囲の拡大傾向を明らかにしている。サブコンの業務範囲の拡大によって工事編成の選択肢が増加し、その選択肢の増加が工事編成多様化の一因となっている。

和田⁵⁾は、管理費と管理手間に焦点を当て、ゼネコンによる一式請負方式における工事編成の最適化手法を、数理計画モデルを用いて構築し、その意思決定支援システムを提案している。しかし、そのシステムは、発注業者を指定できないなど機能面の課題や、PM/CM方式、分離発注に対応するためのシステムの拡張という課題を残している。モデルが複雑で、柔軟性を欠くことがその原因と考えられ、改良の余地がある。

2.2 海外における研究成果

米国には、ワークパッケージ（Work Package）の実態やその管理手法に関する研究がいくつか見られる。しかし、文献調査を行った範囲では、本研究と同様の問題意識を持つ研究は存在しなかった。英国においても、同様である。これは、両国ではユニオン（職種別労働組合）による制約があるため、業務の分担範囲の操作ができないと目される。

3. 工事編成最適化問題の構造

3.1 工事編成プロセス

工事編成は、以下の手順で行われる。

ゼネコンのマネジメント組織の編成

工事編成の与条件の把握

サブコンの担当業務範囲と発注単位および発注先サブコンの決定
本研究は、とを対象とする。

3.1.1 工事編成与条件の把握

工事編成は、全てを自由に決められるわけではない。工事を実施するためには、コストや長期的取引関係等の各種要因、およびプロジェクトを取り巻く環境条件を考慮して、ゼネコンとサブコンの担当業務範囲と発注単位および発注先サブコンを決定せねばならない。工事編成担当者は、まず、こうした与条件を把握する。

3.1.2 サブコンの担当業務範囲と発注単位および発注先の決定

発注単位と発注先の決定手順には、以下の2つがある。

発注先サブコンの決定 サブコンへの発注単位の決定

サブコンへの発注単位の決定 発注先サブコンの決定

両者はプロジェクトや工種によって異なり、工事編成担当者の過去の経験や方針に依存するとされる。

3.2 工事編成最適化問題とは

最適化問題には、以下の2つが含まれる。

最適な発注先サブコンの決定

この問題は、コスト、長期的取引関係、管理のしやすさなどの多くの決定要因を多目的に評価して、最適な発注先サブコンを決定する問題である。定性的な要因が、特に大きな意味を持つ問題である。

最適な発注単位の決定

この問題は、プロジェクトを取り巻く環境による制約の中で、でも挙げた多くの要因を多目的に評価して、サブコンへの最適な発注単位を決定する問題である。

3.3 工事編成マトリクス

3.3.1 工事編成マトリクスの構成

3.2で述べたとおり、工事編成最適化問題は、最適な発注先サブコンの決定と最適な発注単位の決定という2つの問題に分けられる。これら2つの問題を扱うことができるように、工事編成最適化問題を縮約したものが工事編成マトリクスである。工事編成マトリクスを表3.1に示す。横軸は工種を、縦軸は業務を意味する。

工事編成最適化問題は、このマトリクスの各セルの担当サブコンを決定することと考えることができる。表3.1において、同色セル群は、それらの業務を1社のサブコンが担当することを意味する。全てのセルをいずれかのサブコンに割り付けることによって、プロジェクトの遂行が可能となる。

表 3.1 工事編成マトリクス

	工種 1	工種 2	工種 3	工種 4
業務 1				
業務 2				
業務 3				
業務 4				
業務 5				

3.3.2 本研究における工事編成マトリクス

工事編成問題を縮約して表現するのに適当な縦軸、横軸を吟味した結果、本研究では以下のように定義した。例として、躯体工事の工事編成マトリクスを表 3.2 に示す。表中の「-」は、当該セルが指す業務が存在しないことを意味する。

縦軸（業務）

仮設・資機材、 労務、 材料、 副資材、 施工図、 工程管理、 品質管理

横軸（工種）

躯体工事： 土工、 とび（仮設足場）、 とび（鉄骨建方）、 コンクリート、 型枠、 鉄筋、 鉄骨

仕上工事： 防水、 石、 タイル、 木工、 屋根、 金属、

左官、 木製建具、 金属製建具、 ガラス、 塗装、 内装

設備工事： 電気、 給排水・衛生、 空調、 昇降

表 3.2 本研究における工事編成マトリクス（躯体工事）

	土工	とび		コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨
		仮設足場	鉄骨建方				
仮設・資機材							
労務	a	a	a	a	a	a	a
材料	a	a	-	a	a	a	a
副資材	a	a	a	a	a	a	a
施工図	a	a	-	-	a	a	a
工程管理	a	a	-	-	a	a	a
品質管理	a	a	a	a	a	a	a

4. 工事編成の実態

多様な発注方式下における工事編成の実態を把握するために、ゼネコン 5 社、PM/CM 会社 5 社に対するアンケート調査、および躯体系サブコン 4 社に対するヒアリング調査を行った。ここでは、その調査結果に考察を加える。調査結果の詳細については、別途発表する予定である。

4.1 ゼネコンによる工事編成

ゼネコンによる工事編成の一例として、ゼネコン A 社の B プロジェクトの躯体工事における工事編成マトリクスを表 4.1 に示す。同一のアルファベットが記載されているセル群は、それらの業務を 1 社のサブコンが担当することを意味し、空欄のセル群は、その業務をゼネコンが担当することを意味する。

表 4.1 ゼネコン A 社の B プロジェクトの工事編成マトリクス（躯体工事）

	土工	とび		コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨
		仮設足場	鉄骨建方				
仮設・資機材							
労務	a	b	b	b	c	d	e
材料	a		-		c		e
副資材	a				c		e
施工図			-	-		d	e
工程管理	a	b	-		c	d	e
品質管理	a	b	b		c	d	e

表 4.1 によると、サブコン b は、とび（仮設足場）工事、とび（鉄骨建方）工事、コンクリート工事の 3 つの工事を担当している。これは業務の水平展開の一例である。また、サブコン e は、鉄骨工事のほぼ全ての業務を担当している。これは業務の垂直展開の一例である。他のサブコンを見ても、労務以外の多くの業務を担当している。このように業務の水平・垂直展開は特殊なものではなく、現在

では一般に広く見られる傾向である。

得られた 24 プロジェクトの調査結果によれば、躯体工事の編成はプロジェクトによって大きく異なるが、仕上工事、設備工事においては、垂直展開の程度は多少異なるものの、水平方向の分担関係に大きな差がないことが分かった。これは、サブコンの垂直展開指向は顕著であるが、水平展開指向が弱いことが一因と考えられる。

4.2 PM/CM 会社による工事編成

PM/CM 会社による工事編成の一例として、PM/CM 会社の C 社が D プロジェクトの躯体工事において行った工事編成マトリクスを表 4.2 に示す。

表 4.2 PM/CM 会社 C 社の D プロジェクトの工事編成マトリクス（躯体工事）

	土工	とび		コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨
		仮設足場	鉄骨建方				
仮設・資機材	a	a	a	a	a	a	a
労務	a	a	a	a	a	a	a
材料	a	a	-	a	a	a	a
副資材	a	a	a	a	a	a	a
施工図	a	a	-	-	a	a	a
工程管理	a	a	-	-	a	a	a
品質管理	a	a	a	a	a	a	a

表 4.2 によると、発注単位 a に発注可能なすべての工種・業務が含まれていることが分かる。D プロジェクトの場合は、発注単位 a の発注先はサブコンではなく、ゼネコンである。ゼネコンは、発注された工種・業務に関して独自に編成を行っている。つまり、実態としては、このプロジェクトの編成はほとんどゼネコンが行っているのである。他の PM/CM 会社のプロジェクト事例を見ても、D プロジェクト同様、ほとんどのプロジェクトにおいて実質的にはゼネコンが工事編成を行っていた。

このように、現在のわが国では、ゼネコンによる一式請負方式以外の発注方式における工事編成の事例が少なく、モデル化を検討するために十分なデータを集めることができない。したがって、多様な発注方式へ適用できる拡張性を視野に入れつつも、本研究の範囲ではゼネコンによる一式請負方式に限定して工事編成モデルの構築、および工事編成支援システムの開発を行うこととした。

4.3 サブコンの業務範囲の拡大

サブコン E 社の最大・最小担当範囲を表 4.3 に示す。表中の はあらゆるプロジェクトで常に担当する業務を、 は、サブコン E 社が担当可能な業務を意味する。つまり、 が記載されているセル群は業務の最小担当範囲を表し、その最小担当範囲に、 が記載されているセル群を加えたものが業務の最大担当範囲である。

表 4.3 サブコン E 社の最大・最小担当範囲

	土工	とび		コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨
		仮設足場	鉄骨建方				
仮設・資機材							
労務							
材料			-				
副資材							
施工図			-	-			
工程管理			-				
品質管理							

表 4.3 によれば、1社のサブコンで躯体工事のほぼ全ての工種を担当可能である。また、労務だけでなく、仮設・資機材や材料、工程管理、品質管理など幅広い業務を担当可能である。このようなサブコンの担当範囲の拡大は、サブコン E 社だけの現象ではなく、多くのサブコンに共通するものであり、その担当範囲の拡大が、工事編成の選択肢が増加する背景となっている。

5. 工事編成のモデル化

5.1 モデル化の方針

工事編成のモデル化は、以下の方針で行う。

定量的に扱うことが可能なプロジェクト全体の間接費と管理の手間を目的関数とする。

品質など定量化の難しい工事編成決定要因やプロジェクト与条件、建設業界の現状、および発注単位決定に先立つ発注先サブコンとその担当業務範囲の決定（業者指定）を制約条件とする。

工事編成は、に示す各種制約条件のもとで、プロジェクト全体の間接費と管理の手間を最小化するようなゼネコンの担当業務範囲と発注単位を決定することと考えることができる。

本モデルでは、3.3.2 で定義した工事編成マトリクスを用いる。

5.2 問題の限定

本モデルでは、扱う問題を、ゼネコンによる一式請負方式下での躯体工事の編成に限定する。

ゼネコンによる一式請負方式に限定する理由は、PM/CM 方式を採用した場合でも実質的に工事編成はほぼゼネコンが行っていること、および PM/CM 方式の事例が少なく十分なデータが集まらないことによる。

躯体工事に限定するのは、サブコンの業務の水平・垂直展開が見られる躯体工事について工事編成をモデル化し、その有効性を示すことができれば、仕上・設備工事にも容易に拡張できるためである。

5.3 その他の仮定

実態の反映とモデルの縮約のために、以下の仮定を設ける。

1つのセルを複数主体が担当することはない。

1つの工種を複数のサブコンが担当することはない。

直接工事費は、当該セルの担当者（ゼネコンまたはサブコン）や、発注単位に含まれる業務の数によって変動しない。

より、直接工事費は変動しないのだから、プロジェクト全体の間接費を低減することが、プロジェクト全体のコストを低減することになる。

5.4 本モデルの位置付け

あらゆる発注方式下における工事編成に適用可能なモデルを「一般モデル」と呼ぶ。一般モデルを構築することが理想ではあるが、一般モデルは最適化を行うには複雑すぎるため、前項に述べた3つの仮定を設けてモデルを単純化した。仮定の設定により、モデルの一般性が損なわれる懸念はあるが、これらの仮定は建設業界の現状を踏まえたものであり、むしろ現実的なモデルになったといえる。そこで、これらの仮定を設けたモデルを「現実モデル」と呼ぶ。3つの仮定を設けたとはいえ、現実モデルが、あらゆる発注方式下に

おける工事編成を扱うことができることは言うまでもない。さらに、5.2 で述べた理由により、扱う問題をゼネコンによる一式請負方式下での躯体工事の編成に限定したものが本モデルである。その本モデルに各種制約を加え、工事編成最適化問題を定式化している。

このように本モデルでは扱う問題を限定しているが、モデル構築に際しては、PM/CM 方式などの多様な発注方式下における工事編成や、仕上・設備工事などの他の工事における工事編成への拡張を考慮し、以下の点に留意した。

ゼネコンによる一式請負方式に特有の項目の使用を避ける。

躯体工事に特有の項目の使用を避ける。

6. モデルの概要

モデル構築の際に必要な各種数値は、全て、文献⁶⁾・¹⁷⁾、サブコンに対するヒアリング調査結果、および和田⁵⁾によるヒアリング調査結果をもとに設定している。

6.1 変数の設定

本モデルでは、ゼネコンおよび各サブコンが、各セルを担当するかどうかを変数とする。ここでセル ij とは、「工事編成マトリクス上の i 行 j 列のセル」を指す。また、工事編成マトリクスは、7行7列である。

$$x_{ij}^{GC} = \begin{cases} 1 & \text{ゼネコンが工事編成マトリクスのセル } ij \text{ を担当する} \\ 0 & \text{担当しない} \end{cases}$$

$$x_{ij}^p = \begin{cases} 1 & \text{サブコン } p \text{ が工事編成マトリクスのセル } ij \text{ を担当する} \\ 0 & \text{担当しない} \end{cases}$$

$i = 1, 2, \dots, 7 \quad j = 1, 2, \dots, 7 \quad p = 1, 2, \dots, 7$

6.2 プロジェクト全体の間接費

(1)式に示すように、ゼネコンの間接費と各サブコンの間接費の和が、プロジェクト全体の間接費となる。

$$OC = OC^{GC} + \sum_{p=1}^7 OC^p$$

$$= \left\{ CC \cdot \sum_{j=1}^7 H_{j,US}(s) \cdot OR_{US}^{GC}(s) + \sum_{p=1}^7 \left\{ \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 (C_{ij} \cdot x_{ij}^p) \cdot OR^p \right\} \right\} \dots(1)$$

$$C_{ij} = CC \cdot V_{ij} \cdot H_{j,US}(s) \dots(2)$$

OC : プロジェクト全体の間接費 (万円)

OC^{GC} : ゼネコンの間接費 (万円)

OC^p : サブコン p の間接費 (万円)

CC : 工事原価 (万円)

$H_{j,US}(s)$: 用途・構造別の横軸構成比 (各工種の工事費が工事原価に占める割合)

s : 延床面積 (㎡)

US : 用途・構造を特定する変数

$OR_{US}^{GC}(s)$: ゼネコンの間接費率

C_{ij} : セル工事費 (万円)

OR^p : サブコン p の間接費率

V_{ij} : 縦軸構成比 (各工種の工事費の業務別構成比)

セル工事費とは、工事編成マトリクス上の各セルが指す業務を実施するのに要する費用を意味する。

ゼネコンの間接費率については、建築工事原価分析情報に記載さ

れているデータから、延床面積とゼネコンの間接費率の関係を表す
 回帰式を用途・構造別に算出した。

サブコン p の間接費率については、サブコンに対するヒアリング
 調査結果をもとに、工事規模に対応する間接費率を設定した。

6.3 管理手間ポイント

工事の管理手間を表す数値として、工事における間接費率（現場
 経費率）がある。ゼネコンの管理手間は、管理するサブコンの数や、
 担当する業務の管理に要する手間によって増減する。また、サブコ
 ンの管理手間は、業務の水平展開や垂直展開の影響を受け増減する。
 しかし、実際の工事では、このような管理手間の増減が正確に間接
 費率に反映されていない。工事の規模に応じて間接費率が決定され
 ているのが現状である。そこで、サブコンの業務展開の影響を組み
 込んだ間接費率を求め、それをもってゼネコンおよび各サブコンの
 管理手間を表す数値とし、その数値を「管理手間ポイント」と呼ぶ。

(3)式に示すように、ゼネコンとサブコンの間接費率を、「水平展
 開の影響を受ける要素」、「垂直展開の影響を受ける要素」、「その
 他の要素」に分け、各々に数値化した水平展開効果、垂直展開効果
 を乗じることによって、サブコンの業務展開の影響を組み込んだ間
 接費率を算出する。これにプロジェクトの工種数、もしくは担当工種
 数を乗じたものを管理手間ポイントと定義する。

$$\begin{aligned}
 MT &= MT^{GC} + \sum_{p=1}^7 MT^p \\
 &= NP_{\max}^{GC} \cdot OR_{US}^{GC}(s) \cdot \left\{ a^{GC} \cdot HE^{GC} + (b^{GC} \cdot VE^{GC}) + c^{GC} \right\} \\
 &+ \sum_{p=1}^7 \left[NW^p \cdot OR^p \cdot \left\{ a^{SC} \cdot HE^p + (b^{SC} \cdot VE^p) \right\} \right] \dots(3) \\
 a^{GC} + b^{GC} + c^{GC} &= 1 \dots(4) \\
 a^{SC} + b^{SC} &= 1 \dots(5)
 \end{aligned}$$

- MT : プロジェクト全体の管理手間ポイント
 - MT^{GC} : ゼネコンの管理手間ポイント
 - MT^p : サブコン p の管理手間ポイント
 - NP_{\max}^{GC} : ゼネコンが管理するサブコンの数の最大値
 - a^{GC} : ゼネコンの管理業務において、サブコン間の調整に要する
 時間の割合
 - b^{GC} : ゼネコンの管理業務において、直接的な管理業務に要する
 時間の割合
 - c^{GC} : ゼネコンの管理業務において、その他の業務に要する時間
 の割合
 - HE^{GC} : ゼネコンの管理手間に対する水平展開効果
 - VE^{GC} : ゼネコンの管理手間に対する垂直展開効果
 - NW^p : サブコン p が担当している工種の数
 - a^{SC} : サブコンの管理業務において、工種間の調整に要する時間
 の割合
 - b^{SC} : サブコンの管理業務において、直接的な管理業務に要する
 時間の割合
 - HE^p : サブコン p の管理手間に対する水平展開効果
 - VE^p : サブコン p の管理手間に対する垂直展開効果
- ゼネコンの管理手間に対する水平展開効果は(6)式で表される。

$$HE^{GC} = \frac{(NP_{\max}^{GC} - NP_{\min}^{GC})(HE_{\max}^{GC,US,s} - HE_{\min}^{GC,US,s})}{NP_{\max}^{GC} - NP_{\min}^{GC}} + HE_{\min}^{GC,US,s} \dots(6)$$

- NP^{GC} : ゼネコンが管理するサブコンの数
 - NP_{\min}^{GC} : ゼネコンが管理するサブコンの数の最小値
 - $HE_{\max}^{GC,US,s}$: 水平展開効果の最大値（用途・構造別）
 - $HE_{\min}^{GC,US,s}$: 水平展開効果の最小値（用途・構造別）
- ゼネコンの管理手間に対する垂直展開効果は(7)式で表される。

$$VE^{GC} = \frac{(DT^{GC} - DT_{\min}^{GC})(VE_{\max}^{GC,US,s} - VE_{\min}^{GC,US,s})}{DT_{\max}^{GC} - DT_{\min}^{GC}} + VE_{\min}^{GC,US,s} \dots(7)$$

$$DT^{GC} = \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 (dt_{ij} \cdot x_{ij}^{GC}) \dots(8)$$

- DT^{GC} : ゼネコンの直接管理手間ポイント
- DT_{\max}^{GC} : ゼネコンが可能なかぎり業務を担当したときのゼネコン
 の直接管理手間ポイント
- DT_{\min}^{GC} : サブコンが可能なかぎり業務を担当したときのゼネコン
 の直接管理手間ポイント
- $VE_{\max}^{GC,US,s}$: 垂直展開効果の最大値（用途・構造別）
- $VE_{\min}^{GC,US,s}$: 垂直展開効果の最小値（用途・構造別）
- dt_{ij} : セル ij の直接管理手間ポイント

各セルが指す業務の管理に要する手間を数値化したものを「セル
 ij の直接管理手間ポイント」と呼ぶ。一般的に、管理の手間は工事
 の規模が大きくなるほど増える。(9)式に示すように、各工種の管理
 業務の時間配分比を表す st_{ij} と、各工種の工事規模を表す $H_{j,US}(s)$
 の積を、セル ij の直接管理手間ポイントとする。

$$dt_{ij} = H_{j,US}(s) \cdot st_{ij} \dots(9)$$

- st_{ij} : 工種 j の管理業務の時間配分比

サブコン p の管理手間に対する水平展開効果は(10)式で表される。

$$HE^p = \frac{(NW^p - NW_{\min}^p)(HE_{\max}^p - HE_{\min}^p)}{NW_{\max}^p - NW_{\min}^p} + HE_{\min}^p \dots(10)$$

- NW_{\max}^p : サブコン p の担当工種数の最大値
- NW_{\min}^p : サブコン p の担当工種数の最小値
- HE_{\max}^p : 水平展開効果の最大値
- HE_{\min}^p : 水平展開効果の最小値

サブコン p の管理手間に対する垂直展開効果は(11)式で表される。

$$VE^p = \frac{(DT^p - DT_{\min}^p)(VE_{\max}^p - VE_{\min}^p)}{DT_{\max}^p - DT_{\min}^p} + VE_{\min}^p \dots(11)$$

$$DT^p = \sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 (dt_{ij} \cdot x_{ij}^p) \dots(12)$$

- DT^p : サブコン p の直接管理手間ポイント
- DT_{\max}^p : サブコン p が可能なかぎり業務を担当したときの、サブ
 コン p の直接管理手間ポイント
- DT_{\min}^p : ゼネコンが可能なかぎり業務を担当したときの、サブコ
 ン p の直接管理手間ポイント
- VE_{\max}^p : 垂直展開効果の最大値
- VE_{\min}^p : 垂直展開効果の最小値

6.4 目的関数と制約条件

目的関数 F を以下のように設定した。

$$\text{最小化 } F = \alpha \cdot \frac{OC}{OC_0} + (1-\alpha) \cdot \frac{MT}{MT_0} \dots(13)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1 \dots(14)$$

α : 管理の手に比べて、コストを重視する度合い

OC_0 : プロジェクト全体の間接費の基準値

MT_0 : プロジェクト全体の管理手間ポイントの基準値

伝統的な工事編成を採用した場合のプロジェクト全体の間接費と管理手間ポイントを、間接費と管理手間ポイントの基準値とする。

以下の6つが、最適化を行う際の制約条件となる。

1つのセルを複数主体が担当することはない。

業務として存在しないセルは誰も担当しない。

RC造のときは、鉄骨に関わる工事は存在しない。

あるサブコンが担当する業務範囲をあらかじめ指定する。

ゼネコンおよびサブコンが常に担当するセルを指定する。

現実の建設業界には存在しない工種の組合せを排除する。

7. 工事編成支援システム

7.1 システムの特長

工事編成モデルを用いて、工事編成担当者が入力した制約下において最適な工事編成を求めることにより、工事編成業務を支援するシステムを工事編成支援システムと定義する。

本システムには、以下の2つの特徴がある。

各種制約、データを自由に設定できること

各種制約およびデータは、本システムの使用者が実状に即していないと判断すれば、容易に変更できるようになっている。また、各種制約およびデータを変更しつつ、何度も最適化を行うことにより、工事編成の検討を行うことが可能である。

業者指定機能を持つこと

業者指定とは、発注単位を決定する前に、発注先サブコンとその担当業務範囲の決定を行うことを指す。本システムでは、最適化に先立って、業者指定の対象となるサブコンの担当工種と担当業務範囲を入力すれば、指定の対象となっていないセルに関してのみ最適化を行うことが可能である。もちろん、業者指定を全く行わないことも可能である。

7.2 システムの仕様

工事編成モデルで解くべき組合せ最適化問題は2つある。

7つの工種を何社のサブコンにどのように分けて発注するかという組合せ最適化問題

工事編成マトリクスの49個のセルのゼネコン・サブコン間での担当組合せ最適化問題

この2つの組合せ最適化問題を解くために、本システムは以下の3つで構成されている。

0-1整数計画問題を解くための数理計画ソルバー

定式化を行い、数理計画ソルバーを起動して0-1整数計画問題を解き、その結果を自動集計するプログラム(C言語で記述)

各種データファイル

本システムでは、の組合せ最適化問題にはプログラムによって組合せを全て列挙することで対応し、の組合せ最適化問題をソルバーに計算させている。つまり、プログラムによって数式を繰り返し作成して、ソルバーで0-1整数計画問題を解き、結果の集計を行っている。

7.3 プログラムの仕様

プログラムは、以下の機能を有する。

制約によって禁止したパターン以外の全ての組合せパターンを列挙し、のプログラムにデータを渡す。

から受け取った組合せパターンをもとに、0-1整数計画問題に定式化し、数理計画ソルバーに渡す。

計算結果の集計を行う。

8. 実プロジェクトへの適用と検証

8.1 対象プロジェクトの概要

対象プロジェクトの概要を表8.1に示す。

表8.1 対象プロジェクトの概要

工事原価(万円)	150450
延床面積(m ²)	9718.17
用途	集合住宅
構造	SRC

8.2 実際に採用された工事編成の評価

対象プロジェクトで実際に採用された工事編成と、それを工事編成モデルによって評価した結果を表8.2に示す。評価結果に目的関数の値を記載していないのは、目的関数の値がコスト重視度によって決まるためである。

表8.2 実際に採用された編成と評価結果

	土工	とび		コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨
		仮設足場	鉄骨建方				
仮設・資機材							
労務	A	A	B	A	C	D	B
材料			-		C	D	B
副資材							B
施工図			-	-			B
工程管理							
品質管理	A	A	B	A	C	D	B
コスト評価値				0.973788			
管理手間評価値				1.004061			

8.3 最適化結果

コスト重視度を0から1まで0.1刻みで変化させながら最適化を行った。結果の一例として、コスト重視度が0.5の場合の最適化結果、および実際の編成を採用した場合の目的関数の値を表8.3に示す。

表8.3 最適化結果および実際の編成を採用した場合の目的関数(=0.5)

	土工	とび		コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨
		仮設足場	鉄骨建方				
仮設・資機材				B			
労務	B	A	A	B	A	A	A
材料			-		A	A	A
副資材		A			A	A	A
施工図			-	-	A	A	A
工程管理							
品質管理		A	A		A	A	A
目的関数の値		0.915926	コスト評価値		0.929253		
			管理手間評価値		0.902599		
実際の編成を採用した場合							
目的関数の値		0.988925					

8.4 考察

全てのコスト重視度において、最適化結果の目的関数の値の方が、実際の編成を採用した場合の目的関数の値より低い値を示し、

総合的に見て優れた編成となった。

コスト評価値が改善された要因として、発注先サブコンの数を減らすことで発注する工事の規模を大きくし、その結果としてサブコンの間接費率が低減したことが挙げられる。このとき、ゼネコンによるサブコン間の調整手間が減少している。また、サブコンに多くの業務を担当させることにより、ゼネコンの管理手間低減も図っている。

最適化結果をコスト重視度の各値ごとに見ると、コスト重視度が減少、すなわち、管理手間の重視度が増加するにつれて、サブコンの担当業務範囲が拡大していた。この現象は、サブコンの担当業務範囲拡大による間接費の増加よりも、ゼネコン側の管理手間の低減を重視していることのためであり、本モデルが重視度に対応した編成を導き出していることを示している。

また、コスト重視度による発注先サブコンの数の変化を見ると、コスト重視度が0.0~0.7の場合は2社、0.8以上の場合は1社であった。これは、発注先サブコンを1社にすることによる間接費率低減を狙ったものと思われるが、発注先サブコンを1社にすると、サブコンの工種間調整手間が大きくなりすぎるため、発注先サブコンの数を1社にするという編成が最適となるのは、コスト重視度を大きくした場合のみとなっている。

以上述べたように、最適化を行うことで、コスト、管理手間の点から見てより優れた編成を求めることが可能で、その編成が優れている理由も説明可能である。

9. ケーススタディ

次に、前章と同じプロジェクトについて、とび(仮設足場)工事、とび(鉄骨建方)工事を、業者指定で発注するケースを想定した。本システムの業者指定機能を用いて、これらの工事のある1社のサブコンへ発注するように指定した上で最適化を行い、業者指定を行わずに最適化を行った結果と比較し、考察を加える。コスト重視度は0.5とする。

9.1 最適化結果

業者指定を行った場合の最適化結果を表9.1に示す。業者指定を行わなかった場合の最適化結果は、既に表8.3に示している。

表9.1 業者指定を行った場合の最適化結果(=0.5)

	とび		コンクリート	型枠	鉄筋	鉄骨
	仮設足場	鉄骨建方				
仮設・資機材			A			
労務	A	B	A	A	A	A
材料		-		A		A
副資材	A		A	A	A	A
施工図		-	-	A	A	A
工程管理		-				
品質管理	A			A	A	A
目的関数の値	0.934375		コスト評価値		0.939871	
			管理手間評価値		0.928879	

結果を見ると、1つのサブコンに5工種を、もう1つのサブコンに2工種を発注するという発注パターンは同じであるが、業者指定を行わなかった場合の方が、コスト評価値、管理手間評価値とも低い値を示しており、コスト、管理手間の両面において優れた編成となっている。

業者指定を行った場合の方が、コスト評価値が高くなった要因としては、SRC造の集合住宅の工事においては工事規模の小さいとび(仮設足場)工事と、とび(鉄骨建方)工事を1社のサブコンへ発注することとしたため、1社のサブコンが担当する工事規模が業者指定を行わなかった場合よりも小さくなり、その結果、間接費が高くなってしまったことが挙げられる。

9.2 考察

業者指定を行った場合の方が、管理手間評価値が高くなった要因としては、業者指定を行った結果、本来サブコンが幅広い業務を担当すべき工種において、サブコンの担当範囲が狭くなり、逆に、ゼネコンが幅広い業務を担当すべき工種において、サブコンが多くの業務を担当することになったため、垂直展開効果が大きくなってしまったことが挙げられる。これは、ゼネコン・サブコン間の業務分担がうまくいっていないことを示している。

9.3 まとめ

以上のように、本システムを用いて最適化を行うことで、コスト、管理手間の点から見て、最適な編成を求めることが可能であり、その編成が優れている理由も説明可能であった。このことは、本モデルおよびシステムの有効性を示しているといえる。

10. 結論

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

工事編成のプロセスを整理し、本研究が対象とする工事編成最適化問題の構造をまとめ、工事編成を行う際に解くべき2つの問題を明らかにした。さらに、これら2つの問題を扱うことができるように、工事編成最適化問題を縮約した工事編成マトリクスを構築した。

ゼネコン、PM/CM会社、およびサブコンに対する調査を行い、多様な工事編成が存在する現状、およびその多様さの背景となっているサブコンの担当可能業務範囲の拡大現象を明らかにした。実態の反映とモデル縮約のための仮定を設けた上で、扱う問題の範囲をゼネコンによる一式請負方式下での躯体工事の編成に限定し、ここに適用可能な工事編成モデルを、コストと管理手間を評価指標として構築した。

構築した工事編成モデルをもとに、工事編成業務を支援する工事編成支援システムを開発した。

開発した工事編成支援システムを実プロジェクトに適用し、最適化結果と実際に採用された編成の比較、およびケーススタディを通じて、モデルおよびシステムの有効性を検証した。

最後に、今後の研究において取り組むべき課題を以下に示し、結論とする。

躯体工事だけでなく、仕上工事、設備工事など工事全体を扱うことができるように、モデルおよびシステムを拡張する。

ゼネコンによる一式請負方式だけでなく、PM/CM方式、分離発注方式など他の発注方式へも適用できるように、モデルおよびシステムを拡張する。

関係の深い複数の業務を1つのサブコンが担当した場合の、コストと管理手間への影響を評価できるように、モデルを改良する。

多様な発注方式における工事編成の実態を継続して把握し、各種データや工事編成の事例および定石とされる知識を収集する。

謝辞：

アンケート調査、ヒアリング調査にご協力いただいた各企業の方々より、貴重な情報の提供を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 佐々木良和：建築の工事編成に関する研究、京都大学学位論文、1988.4
- 2) Shuzo Furusaka：Sub-package Problems of Building Construction, HABITAT INTL, vol.14, No.2/3, pp.245-253, 1990
- 3) 遠藤和義：総合工事業者の工事編成決定問題に関する研究、東京大学学位論文、1992.11
- 4) 古阪秀三、橋本貴史、金多隆：日本の建築生産システムの特性に関する研究（1）専門工事業者の企業行動と協力会に対する意識、第15回建築生産シンポジウム論文集、pp.125～132、1999.7
- 5) 和田祐考、古阪秀三、藤澤克樹、金多隆：建築プロジェクトにおける工事編成最適化問題に関する研究 - 工事編成支援システムの提案 -、第16回建築生産シンポジウム論文集、pp.235～242、2000.7
- 6) 建設工業経営研究会：経研：53 建築工事原価分析情報、大成出版社、1981.1
- 7) 建設工業経営研究会：経研：54 建築工事原価分析情報、大成出版社、1981.9
- 8) 建設工業経営研究会：経研：55 建築工事原価分析情報、大成出版社、1982.9
- 9) 建設工業経営研究会：経研：56 建築工事原価分析情報、大成出版社、1983.9
- 10) 建設工業経営研究会：経研：57 建築工事原価分析情報、大成出版社、1984.6
- 11) 建設工業経営研究会：経研：58 建築工事原価分析情報、大成出版社、1985.6
- 12) 建設工業経営研究会：経研：61 建築工事原価分析情報、大成出版社、1988.6
- 13) 建設工業経営研究会：経研：62 建築工事原価分析情報、大成出版社、1989.7
- 14) 建設工業経営研究会：経研：63 建築工事原価分析情報、大成出版社、1990.7
- 15) 建設工業経営研究会：経研：01 建築工事原価分析情報、大成出版社、1991.9
- 16) 建設工業経営研究会：経研：03 建築工事原価分析情報、大成出版社、1993.7
- 17) 建設工業経営研究会：経研：09 建築工事原価分析情報、大成出版社、1999.4