建築工事の工程計画における結合率を導入したネットワーク手法

NETWORK METHOD USING CONNECTING RATIO IN CONSTRUCTION SCHEDULING

土橋 稔美*, 正村 芳久**, 吉田 知洋***

Toshimi DOBASHI, Yoshihisa MASAMURA and Tomohiro YOSHIDA

The network method of construction planning and scheduling is introduced, which is being long-continued. The network method decomposes construction work for the activity, and gives the activity sequence. However, the conventional network method is not suitable for the expression of the parallel activity which can start the succession activity in point of time when the precedence activity is un- end. This report showed the formula of network expression which uses connecting ratio in the activity sequence for the circle type network, its time calculation, and its applications. In the network method, a proposed method not only can express the conventional activity sequence, but enables expression of parallel activity.

Keywords: construction scheduling, network method, PERT, activity sequence, parallel activity
工程計画, ネットワーク手法, PERT, 順序関係, 並行作業

1. はじめに

建築工事の工程計画に数理的な方法に基づくネットワーク手法が導入されて久しく、数多くの研究やシステム開発が行われてきた。日本建築学会においても、ネットワーク手法に関する指針を 1968 年に発行している¹⁾。指針では、工程計画が手順計画と日程計画からなり^{注1)}、手順計画は「目標達成に必要な作業・作業順序・所要時間および資源などを定める計画」、日程計画は「指定工期・手持資源などの制約のもとで計画達成に必要な作業の日程を定める計画」であるとしている。指針で示されたネットワーク手法の活用は主に手書きのネットワーク工程図に基づく検討・立案であったが、近年、工程計画用のソフトウェアの導入が進みつつある。実務において、特にコンピュータ利用が進みつつあるのは日程計画であり、PERT による日程計算や労務・機械の山積計算、ネットワーク工程図の作成である。

ネットワーク手法は、建築工事を作業に分解し、作業間に順序関係（または先行・後続関係）をつけることを基本とする。作業間の順序関係は、後続作業の開始を先行作業の終了後とする FS(Finish-to-Start)タイプが最も使用される。建築工事の作業には FS タイプ以外に、作業間に先行・後続関係があり、かつ先行作業が未終了の時点で後続作業を開始できる順序関係、すなわち本報告に

て並行作業と呼ぶ関係も存在する。しかし、FS タイプは並行作業の表現に適していない。したがって、作業の実態に即した並行作業も表せるネットワーク手法、すなわちネットワーク表現のみならず日程計算の方法も求められる。

2. 既往の研究と本研究の目的

2.1. 既往の研究

嘉納による工程管理の手法や技術に関する変遷の分析から、これまでに数多くの研究開発が行われてきたことがわかる²⁾。その中で、並行作業を表すためにネットワーク手法を拡張した既往の研究開発を以下に示す。

①一般的な 4 タイプ (図-1-(1))

図-1-(1)に作業間の順序関係として一般的に採用されている 4 タイプを示す。このタイプでは、作業の開始または終了により作業間に順序関係を付けるため、「先行作業が 50%経過後に、後続作業が追いつける」といった並行作業を表せない。一般的な 4 タイプで並行作業を表現するには作業を分割して表現する必要があった。

②嘉納の分岐ネットワーク (図-1-(2))

嘉納は並行作業を表せるようにするため、アロー型ネットワーク^{注2)}においてアロー（矢線）の途中から別のアローを分岐させる分

* 鹿島技術研究所 主任研究員・工修

** 鹿島技術研究所 主管研究員

*** 鹿島東京支店 工修

Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, M. Eng.
Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute
Engineer, Kajima Tokyo Branch, M. Eng.

岐ネットワークの表現方法とその日程計算を定式化している³⁾。アローの分岐点(または合流点)は、並行する作業間で設定したリードタイムにより求められる。建築工事における複雑な工程を表現するには分岐ネットワークの採用が必要であるとしている。

③森口・若木のモデル(図-1-(3))

森口・若木は嘉納の分岐ネットワークに、「後続作業が先行作業に重複して作業を行う日数」をダブル日数として導入し、並行作業を表すモデルを提案している⁴⁾。ダブル日数は、作業の規模(作業量)で場合分けした計算式を用い、各計算式の算出結果の最小値としている。ダブル日数の考え方を示した図-1-(3)はサークル型ネットワーク^{注3)}による表現であるが、日程計算上のモデルは嘉納の分岐ネットワークが採用されている。

以上のように、既往の研究における並行作業の表現はアロー型ネットワークを対象にしたものである。その特徴は、1)アローの分岐と合流、2)リードタイムによるアローの分岐点の設定にある。しかし、グラフ理論に基づくネットワーク手法では、アローの途中から別のアローの分岐や合流を理論的に許していない。

2.2. 本研究の目的

本研究は、並行作業を表現する上でグラフ理論的にも問題のないネットワーク手法の構築を目的としたものであり、分岐ネットワー

注 破線のアロー:作業の順序関係だけを示す、所要期間=0のアローであり、ダミーアローと呼ばれる。

(1)一般的な4タイプ

(2)嘉納の分岐ネットワーク

(3)森口・若木のモデル

図-1 既往の作業間の順序関係の表し方

クと異なる基礎的手法を提供するものである。

本報告におけるネットワーク表現の特徴は、サークル型ネットワークを対象にして作業間の順序関係に結合率を導入することにより、並行作業の表現を可能としたことである。本報告ではそのネットワーク表現と日程計算の方法を示すとともに⁵⁾、詳細工程計画と作業計画への適用例を示す。

3. 結合率を導入したネットワーク表現とその日程計算の定式化

3.1. 作業間の順序関係に結合率を導入したネットワーク表現

(1)結合率を導入した作業間の順序関係

図-2に示すように、結合率は先行作業iと後続作業jの各々の所要期間に対する作業が経過した割合(%)であり、先行作業iの経過した割合を先行側の結合率 $PR_{ij}(\%)$ 、後続作業jの経過した割合を後続側の結合率 $SR_{ij}(\%)$ と定義する。この結合率を作業間の順序関係に導入すると、後続作業jの所要期間 D_j が $SR_{ij}(\%)$ だけ経過する時刻 TSR_{ij} は、先行作業iの所要期間 D_i が $PR_{ij}(\%)$ だけ経過する時刻 TPR_{ij} 以後となる。したがって、 TPR_{ij} と TSR_{ij} の関係は式(1)となる^{注4)}。

$$TSR_{ij} \geq TPR_{ij}$$

式(1)

(2)ネットワーク表現の規則

図-2に示したネットワーク表現の規則は次の2つである。

- ①ネットワーク表現はサークル型ネットワークであり、ノードであるバーの長さは作業の所要期間を表す。
- ②作業の順序関係を示すアローは結合率により、アローの始端となる先行側の接続点と終端となる後続側の接続点を結ぶ。

以上の規則は、作業を表すバーがノードであるため、ノードのどの位置からアローを発生させてもグラフ理論上、問題ない。

3.2. 結合率を導入したネットワーク表現の特徴

(1)分岐ネットワークとの違い

図-2 結合率を導入した作業間の順序関係

分岐ネットワークとの違いはネットワーク図の表現形式と並行作業の表現方法であり、具体的には以下に示す2点である。

- ①ネットワーク図の表現形式は、分岐ネットワークがアロー型ネットワークを採用しているのに対し、本手法がサークル型ネットワークを採用している。
 - ②並行作業の表現は、分岐ネットワークがリードタイムという時間で与えるのに対し、本手法が結合率という割合で与える。
- (2)利用頻度の高い並行作業の表現

結合率を利用した並行作業の表現において、先行側と後続側の結合率がともに、0より大きく100未満となる場合は考えにくい。利用頻度の高い並行作業の表現は先行作業または後続作業の一方を基準とした結合率の設定であり、以下に示す2方式が考えられる。

- ①図-3-(1)に示す先行作業を基準とした結合率の設定は、先行作業がある程度経過した後、後続作業を開始する関係である。この場合の結合率は後続側の結合率 SR_{ij} が0である。
 - ②図-3-(2)に示す後続作業を基準とした結合率の設定は、後続作業がある程度経過する時点で、先行作業が終了する関係である。この場合の結合率は先行側の結合率 PR_{ij} が100である。
- 並行作業の表現より、先行作業と後続作業がオーバーラップする期間^{注5)}は図-3に示すようになる。

(3)一般的な4タイプとその結合率による表示

結合率は、図-1-(1)の一般的な4タイプを包含したネットワーク表現である。すなわち、一般的な4タイプの作業間の順序関係は以下の結合率で表せ、結合率が特殊な場合となる。

- ①FSタイプ 先行側の結合率=100, 後続側の結合率=0
- ②FFタイプ 先行側の結合率=100, 後続側の結合率=100
- ③SSタイプ 先行側の結合率=0, 後続側の結合率=0
- ④SFタイプ 先行側の結合率=0, 後続側の結合率=100

3.3. 結合率を導入したネットワークの日程計算の定式化

(1)最早・最遅の日程計算における関係式

図-2より、先行・後続関係にある作業*i*と*j*の最早・最遅の日程計算に用いる関係式は以下の3種となる。

- ①TSR_{ij}, TPR_{ij}の関係式 式(2)

$$TSR_{ij} = TPR_{ij} + LAG_{ij}$$

- ②作業*i*, *j*の開始時刻の関係式 式(3)

$$TPR_{ij} = ST_i + D_i \times PR_{ij} / 100$$

$$TSR_{ij} = ST_j + D_j \times SR_{ij} / 100$$

- ③作業*i*, *j*の終了時刻の関係式 式(4)

$$TPR_{ij} = FT_i - D_i \times (100 - PR_{ij}) / 100$$

$$TSR_{ij} = FT_j - D_j \times (100 - SR_{ij}) / 100$$

なお、式(2)は一般的な4タイプにて活用される作業*i*と*j*のタイムラグ^{注6)}LAG_{ij}も含めた関係式にて示した。

(2)日程計算の定式化

図-4に結合率を導入したネットワークの日程計算の式を示す。ここに、(A)は各作業の最早の開始時刻と終了時刻を求める計算式であり、式(2)と式(3)を使用して求める。(B)は各作業の最遅の開始時刻と終了時刻を求める計算式であり、式(2)と式(4)を使用して求める。(C)は各作業のトータルフロートの計算式である。従来の日程計算との違いは、(A)と(B)の計算式の中で先行作業と後続作業の所要期間に、それぞれ先行側と後続側の結合率を乗じることなどである。

図-3 利用頻度の高い並行作業の表現

(A)最早時刻の計算式

$$EST_i = \max[EST_h] \quad h: \text{作業}i\text{の先行作業の集合}$$

$$= \max[EST_h + (D_h \times PR_{hi} - D_i \times SR_{hi}) / 100 + LAG_{hi}]$$

(式(3)でST_i→EST_h, ST_j→EST_hとし、式(3)を式(2)に代入)

式(5)

$$EFT_i = EST_i + D_i$$

式(6)

(B)最遅時刻の計算式

$$LFT_i = \min[LFT_j] \quad j: \text{作業}i\text{の後続作業の集合}$$

$$= \min[LST_j + D_i - (D_i \times PR_{ij} - D_j \times SR_{ij}) / 100 - LAG_{ij}]$$

(式(4)でFT_i→LFT_j, FT_j→LFT_jとし、式(4)を式(2)に代入)

式(7)

$$LST_i = LFT_i - D_i$$

式(8)

(C)トータルフロートの計算式

$$TF_i = LST_i - EST_i$$

式(9)

■記号

EST_i, EFT_i: 作業*i*の最早開始時刻と最早終了時刻
 LST_i, LFT_i: 作業*i*の最遅開始時刻と最遅終了時刻
 EST_{hi}: 先行作業*h*の最早開始時刻から求まる後続作業*i*の最早開始時刻
 LFT_{ij}: 後続作業*j*の最遅終了時刻から求まる先行作業*i*の最遅終了時刻
 D_i: 作業*i*の所要期間
 PR_{ij}: 先行・後続関係の作業*i*, *j*間での先行側の結合率(%)
 SR_{ij}: 先行・後続関係の作業*i*, *j*間での後続側の結合率(%)
 LAG_{ij}: 作業*i*, *j*間でのタイムラグ
 TF_i: 作業*i*のトータルフロート

図-4 結合率を導入したネットワークの日程計算の式

4. 本手法の適用例

4.1. PCa 工法における建方工事の詳細工程計画への適用

4.1.1. 適用対象と対象建物の概要

(1)適用対象

本適用例は、プレキャストコンクリート（以下、PCaと称す）部材を使用したPCa工法の建方における詳細工程計画^{注7)}への適用を検討したものである⁶⁾。適用対象の工法は柱をPCa、梁を鉄骨とした躯体PCa工法である。本工法の用途はショッピングセンターなどの平面的な広がりを持つ物件が多い。

本工法の建方工事は建逃げ方式（またはびょうぶ建て方式）が採用される。建逃げ方式は、移動式揚重機により1つの工区の建方を最上階まで、または階段状に組み上げ、揚重機を次の工区に移動して建方する方式である。本報告では揚重機を移動して同様に建方を行う工区を建逃げ工区と称す。工区分割の結果、1つの建逃げ工区の範囲が広い場合、柱・梁の建方と床板敷込みの順序関係のように、作業間に先行・後続関係があり、かつ先行作業がある程度経過したら後続作業が開始できる場合がある。その並行作業の表現に結合率を適用した。

(2)対象建物と工区分割の結果

対象とした建物は、延床面積が約4万7千㎡、地下1階、地上4階のショッピングセンターである。図-5に建方工事の工区分割結果を示す。分割結果は揚重機毎にⅠ工区とⅡ工区に、それぞれはさらに複数の建逃げ工区へ分割されている。

4.1.2. 建方工程における並行作業のモデル化

(1)単位工区毎の作業で表した建逃げ工区の建方工程

図-6に建逃げ工区A-3の建方工程を示す。図-6-(1)は建逃げ工区を単位工区へ分割し、単位工区毎の作業で表した建方工程である。ここで、単位工区は作業の区切りがよい1日単位を基本とする工区であり、建逃げ工区A-3の単位工区数は2である。建方工程に含まれる作業は3種類であり、作業毎にその内容を以下に示す。

- ①建方作業は PCa 柱と鉄骨梁の建方だけでなく、柱と梁の高力ボルト本締め（以下、HTB 本締めと称す）を含む作業であり、同一階の単位工区を連続して行った後、上階の建方作業を行う。
- ②デッキプレート（以下、デッキと称す）の敷込み作業は1つ下の階の建方が1工区分だけ終了後、その工区分のデッキを敷き込む。
- ③グラウト作業は PCa 柱の柱脚部におけるグラウト注入であり、1つ上の階の建方が1工区分だけ終了後に、その工区分のグラウトを注入する。すなわち、グラウト注入は1層離れており、同一の単位工区における建方作業の開始は2つ下の階のグラウト注入後となる。

図-6-(1)は以上の作業内容をもとに表した建方工程である。作業間の順序関係はすべて、先行作業が終了後、後続作業を開始する関係で表せる。すなわち、単位工区毎の作業で表した建方工程では並行作業の表現を必要としない。

(2)建逃げ工区毎の作業で表した建方工程

図-6-(2)に単位工区毎の作業を建逃げ工区毎で表した建方工程を示す。その結果、図下段の結合率の欄に示すように、3種類の順序関係で並行作業の表現が必要になる。たとえば、先行作業であるN階建方と後続作業であるN+1階デッキの関係①は、結合率の番号①に示す先行作業が50%経過後、後続作業を開始できることを表す。これは、単位工区毎に分かれていた作業を建逃げ工区毎に1つの作業で表すことにより生じたものである。

なお、3種類の並行作業の関係はすべて図-3-(1)の先行作業を基準にした設定であり、先行側の結合率が50%、後続側の結合率が0%である。結合率がその値となる理由は、単位工区毎の作業が1日であり、建逃げ工区A-3の単位工区数が2であることによる。

4.1.3. 並行作業を含むネットワーク表現とその日程・山積計算

(1)日程計算用データ

図-6-(2)に示したモデル化の方法により、並行作業を含むネットワークの日程計算用データを作成する。表-1にデータの一部として、建逃げ工区A-3の例を示す。データは、作業とその所要期間を示したデータ（表-1-(1)）と作業間の順序関係を示したデータ（表-1-(2)）からなる。ここで、建逃げ工区A-3の作業間の順序関係は、1)並行作業とならないFSタイプ、2)先行側と後続側の結合率をそれぞれ50%と0%とした並行作業、の2種類で表せる。

(2)ネットワーク表現と日程計算

図-7にⅠ工区を対象にした建方工程のネットワーク表現を示

図-5 対象建物の建逃げ工区への分割結果

階	単位工区	1日	2日	3日	4日	5日	6日
N+2	(2)	1層離れてPCa柱の柱脚部のグラウト				デッキ	建方
	(1)				デッキ	建方	
N+1	(2)			デッキ	建方		
	(1)		デッキ	建方			グラウト
N	(2)		建方			グラウト	
	(1)	建方			グラウト		

(1)単位工区毎の作業で表した建方工程

階	1日	2日	3日	4日	5日	6日
N+2					建方	
N+1			建方		デッキ	
N	建方					グラウト

結合率			
番号	先行作業	後続作業	結合率(%)
①	N階建方	N+1階デッキ	50 0
②	N+1階建方	N階グラウト	50 0
③	N階グラウト	N+2階建方	50 0

(2)建逃げ工区毎の作業で表した建方工程
—結合率による並行作業の表現—

注 建方:PCa柱と鉄骨梁の建方だけでなく、HTB本締めも含む。

図-6 結合率による並行作業の表現 —建逃げ工区A-3—

表-1 日程計算用データの一部 —建逃げ工区A-3—

(1)作業のデータ			(2)作業間の順序関係のデータ				
No.	作業名	期間 (日)	先行作業	後続作業	結合率(%)		94△7 (日)
					先行順	後続順	
1	A-3工区構台解体	2	4階A-1工区建方	A-3工区構台解体	100	0	0
2	B1階A-3工区建方	2	1階A-3工区グラウト	B1階A-3工区グラウト	100	0	0
3	B1階A-3工区グラウト	2	R階A-1工区デッキ	1階A-3工区デッキ	100	0	0
4	1階A-3工区デッキ	2	A-3工区構台解体	B1階A-3工区建方	100	0	0
5	1階A-3工区建方	2	B1階A-3工区建方	1階A-3工区建方	100	0	0
6	1階A-3工区グラウト	2	B1階A-3工区建方	1階A-3工区デッキ	50	0	0
7	2階A-3工区デッキ	2	B1階A-3工区グラウト	2階A-3工区建方	50	0	0
8	2階A-3工区建方	2	B1階A-3工区グラウト	1階A-3工区デッキ	100	0	0
9	2階A-3工区グラウト	2	1階A-3工区デッキ	2階A-3工区デッキ	100	0	0
10	3階A-3工区デッキ	2	1階A-3工区デッキ	1階A-3工区建方	50	0	0
11	3階A-3工区建方	2	1階A-3工区建方	2階A-3工区建方	100	0	0
12	3階A-3工区グラウト	2	1階A-3工区建方	2階A-3工区デッキ	50	0	0
13	4階A-3工区デッキ	2	1階A-3工区建方	B1階A-3工区グラウト	50	0	0
14	4階A-3工区建方	2	1階A-3工区グラウト	3階A-3工区建方	50	0	0
15	4階A-3工区グラウト	2	1階A-3工区グラウト	2階A-3工区グラウト	100	0	0
16	R階A-3工区デッキ	2	2階A-3工区デッキ	3階A-3工区デッキ	100	0	0
			2階A-3工区建方	2階A-3工区建方	50	0	0
			2階A-3工区建方	3階A-3工区建方	100	0	0
			2階A-3工区建方	3階A-3工区デッキ	50	0	0
			2階A-3工区建方	1階A-3工区グラウト	50	0	0
			2階A-3工区グラウト	4階A-3工区建方	50	0	0
			2階A-3工区グラウト	3階A-3工区グラウト	100	0	0
			3階A-3工区デッキ	4階A-3工区デッキ	100	0	0
			3階A-3工区デッキ	3階A-3工区建方	50	0	0
			3階A-3工区建方	4階A-3工区建方	100	0	0
			3階A-3工区建方	4階A-3工区デッキ	50	0	0
			3階A-3工区建方	2階A-3工区グラウト	50	0	0
			3階A-3工区グラウト	4階A-3工区グラウト	100	0	0
			4階A-3工区デッキ	R階A-3工区デッキ	100	0	0
			4階A-3工区建方	4階A-3工区建方	50	0	0
			4階A-3工区建方	R階A-3工区デッキ	50	0	0
			4階A-3工区建方	3階A-3工区グラウト	50	0	0

注1 日程計算は休日なしの連続日で計算しており、各作業の開始日と終了日をバーの左端上と右端上に表示している。
 注2 結合率は並行作業の関係のみ表示している。それ以外はFSタイプ、すなわち先行側と後続側の結合率がそれぞれ100%と0%である。
 注3 先行側の結合率が25%となるのは建逃げ工区C-3のみである。結合率がその値となる理由は、他の工区と同様に単位工区毎の作業は1日であるが、本工区の単位工区数が4であることによる。

図-7 並行作業を取り入れたネットワーク工程 - I 工区の建方工程の最早日程による表示 -

表-2 日程計算の結果の一部 - 建逃げ工区 A-3 -

No.	作業名	最早		最遅		トータル フロート	C.P.
		開始日	終了日	開始日	終了日		
1	A-3工区構台解体	11	12	11	12	0	*
2	B1階A-3工区建方	13	14	13	14	0	*
3	B1階A-3工区グラウト	16	17	16	17	0	*
4	1階A-3工区デッキ	14	15	14	15	0	*
5	1階A-3工区建方	15	16	15	16	0	*
6	1階A-3工区グラウト	18	19	18	19	0	*
7	2階A-3工区デッキ	16	17	16	17	0	*
8	2階A-3工区建方	17	18	17	18	0	*
9	2階A-3工区グラウト	20	21	20	21	0	*
10	3階A-3工区デッキ	18	19	18	19	0	*
11	3階A-3工区建方	19	20	19	20	0	*
12	3階A-3工区グラウト	22	23	24	25	2	
13	4階A-3工区デッキ	20	21	20	21	0	*
14	4階A-3工区建方	21	22	21	22	0	*
15	4階A-3工区グラウト	24	25	26	27	2	
16	R階A-3工区デッキ	22	23	24	25	2	

注1 時間の単位: 日
 注2 C.P.: クリティカルパス上の作業に「*」を記入している。

す。ネットワーク図は、図-4の式により休日を含まない連続日で日程計算を行った結果であり、3.1.節(2)に示したネットワーク表現の規則に従った最早日程での表示である。各作業の開始日と終了日は、作業を表すバーの始端上と終端上に表示している。日程計算に使用した結合率は並行作業への適用箇所を建逃げ工区毎に図下段の結合率の欄に示しており、それ以外はFSタイプの順序関係である。また、最早と最遅の日程、それから求まるトータルフロートとクリ

ティカルパスの計算結果の一部を表-2に示した。

以上より、次の2つを確認した。

- ① 結合率を導入したネットワークの表現と日程計算は問題なく実行できる。
- ② 建方工程を建逃げ工区毎の作業で表すと並行作業の関係が発生するが、結合率を適用することでネットワーク手法による詳細工程計画が可能となる。これより、建逃げ工区間の順序関係や工期などの全体的な把握が容易になる。
- (3) 資源の山積計算

日程計算以外に、従来のネットワーク手法が提供する機能のひとつに労務・機械などの資源の山積計算がある。

図-7の最下段は、職種別の人数を日毎に集計した結果の表示である。山積計算用に新たに必要となるデータは、作業毎に必要な職種の人数である。職種別の人数は建方作業を高工12人、デッキの敷込み作業をデッキ工4人、グラウト作業をグラウト工4人、構台解体作業を高工12人とした。以上のデータを利用し、山積計算は従来のネットワーク手法におけるそれと同様に行う。すなわち、山積計算は作業毎に、日程計算で求めた開始日から終了日の期間に対し、当該作業が必要とする職種の人数を職種毎かつ日毎に加算する。図-7の最下段は以上のデータと算出方法で求めた山積であり、結合率を導入したネットワークにおいても、従来のネットワーク手法と同様の山積計算と平準化の検討ができる。

4.2. PCa 工法における建方工事の作業計画への適用

4.2.1. 適用対象と対象建物の概要

(1) 適用対象の概要

本適用例は、PCa 工法における建方工事の作業計画^{注8)}を対象に、結合率の適用を検討したものである⁷⁾。検討対象は、建方工事の作業測定により収集したデータを利用し、結合率による並行作業の表現とそれをパラメータとした労務の平準化の可能性である。適用対象の PCa 工法は、4.1.節の適用例で示した工法と同一の躯体 PCa 工法である。

(2) 対象建物の概要

対象建物は延床面積が約 47,200 m²、地下 1 階、地上 5 階のショッピングセンターである。図-8 に工区分割を示す。図-8-(1)は建逃げ工区の分割であり、A 工区から順に建方を実施した。図-8-(2)に示すように、調査対象とした A 工区はさらに 3 つの単位工区に分割されている。各単位工区は作業区切りの良さを理由に 1 日で完了する範囲で設定されている。

4.2.2. 作業測定結果に基づく結合率の適用

(1) 建方工事の作業測定結果

A 工区の作業測定の結果、調査事例として以下の 3 点を把握した。

①単位工区は 1 日の作業であり、その作業内容は柱と梁の建方だけでなく、搬入と HTB 本締めを含む。表-3 に A-(1)工区の測定結果を示す。ここで、各作業のピース数と所要時間から 1 ピース当りの所要時間を示した。

②作業チームは鉄骨工 9 名で編成され、作業毎の必要人数は表-3 の作業人数に示す通りであった。

③A-(1)工区における労務の山積は図-9-(1)となった。山積は建方工事の 1 日の作業内容と人数で示した。

(2) 結合率による作業計画の表現

調査事例にて並行作業の関係にあるのは、梁建方と HTB 本締めである。柱と梁の建方を 1 作業とする柱・梁建方を先行作業 i、これに続く HTB 本締めを後続作業 j とし、両作業間の順序関係に結合率を導入した。結合率を建方作業の所要時間に基づき算出した結果、調査事例では先行側の結合率 PR_{ij} が 87%、後続側の結合率 SR_{ij} が 0%になる。

(3) 先行側の結合率のとりうる範囲

柱・梁の建方順序は、柱の建方が全て終了後、梁の建方が実施された。HTB 本締めを最も早く開始する場合、作業の開始時間は大梁 1 ピース目の建方を終了した時点となる。すなわち先行側の結合率の最小値は、柱全数と大梁 1 ピースの所要時間が建方の全所要時間に占める割合で算出される。

(先行側の結合率 PR_{ij} の最小値)

$$= \frac{(\text{柱建方の全所要時間}) + (\text{大梁建方 1p の所要時間})}{\text{建方の全所要時間 (柱, 大梁, 小梁)}} \\ = \frac{130.0 + 6.3}{130.0 + 81.9 + 47.2} = 53 (\%)$$

一方、最大値は全ての柱と梁の建方終了後に、HTB 本締めを着手する場合であり、その結合率は 100%である。

以上より、先行側の結合率のとりうる範囲は、 $53 \leq \text{PR}_{ij} \leq 100 (\%)$ と定義される。

図-8 対象建物の工区分割

表-3 建方工事の作業測定の結果 -単位工区 A-(1)-

作業内容	ピース数 (ピース)	所要時間 (分)	1ピース当りの 所要時間(分/P)	作業人数 (人)
柱建方	10	130.0	13.0	5
梁建方 (大梁)	13	81.9	6.3	4
(小梁)	8	47.2	5.9	4
柱搬入	10	80.0	8.0	2
梁搬入	21	84.0	4.0	2
HTB (大梁)	13	-	72.0*	5
本締め (小梁)	8	-	3.2*	5

注1 *は梁1ピースあたりの工数(人分)

注2 搬入と建方は別の揚重機を利用した。

注3 建方を行う柱部材は前日に、梁部材は当日に搬入した。

注4 全ての柱部材の建方終了後、大梁と小梁の建方を開始した。

(凡例)
 柱・梁建方
 HTB 本締め
 柱搬入
 梁搬入

注 後続側の結合率 SR_{ij} は(1)~(3)とも、0%である。

図-9 1日の作業内容と人数で示した労務山積

4.2.3. 結合率をパラメータとした労務の平準化

(1) 先行側の結合率を最小とした労務の平準化

上述の作業計画において、先行側の結合率を操作することにより労務の平準化を図ったシミュレーションを実施した。ここで、先行側の結合率 PR_{ij} を最小値である 53%とした。これは建方が完了した梁部材から、直ちに HTB 本締めを開始する計画である。

図-9-(2)に結果の労務山積を示す。HTB 本締め作業を早期に着手することで、その作業の人数を 4 名で計画でき、チーム人数も 8 名に低減される。全体の作業時間も短縮された。

(2)結合率と HTB 本締めの人数をパラメータとした労務の平準化

次に柱・梁の建方順序を変更することで結合率を変更し、かつ HTB 本締めの作業人数を作業の途中から変動させることにより、労務の平準化を試みた。建方作業は柱 4 本、梁 4 本で囲まれる 1 区画単位に実施し、これに合わせ HTB 本締めも追いかけて実施する計画とした。表-3 に示した調査事例では柱と梁の建方の人数が異なるが、本シミュレーションでは柱と梁の建方作業が交互に実施されるため、いずれも 5 名とする。このとき、先頭の 1 区画分の所要時間から、先行側の結合率 PR_{ij} は 31% となる。さらに HTB 本締めの作業人数は建方と並行する間を 2 名、建方作業終了後を 4 名で計画した。

結果としてチーム人数を 7 名で計画することができる。図-9-(3)にこの結果を示す。

5. まとめ

本報告は作業間の順序関係に結合率を導入したネットワーク手法を提案するとともに詳細工程計画と作業計画への適用例を示した。本手法はサークル型ネットワークを対象にするものであり、並行作業を表現する上でグラフ理論的に問題がなく、既存の分岐ネットワークと異なる基礎的手法である。得られた知見を以下に示す。

(1)作業間の順序関係に結合率を導入したネットワーク表現を示した。その考え方と特徴は以下の 6 つとなる。

- ①結合率は先行作業と後続作業の各々の所要期間に対する作業が経過した割合(%)であり、先行側と後続側の結合率で定義する。
- ②結合率を作業間の順序関係に導入すると、後続作業が後続側の結合率だけ経過する時刻は、先行作業が先行側の結合率だけ経過する時刻以後となる。
- ③結合率を導入したネットワーク表現の規則は次の 2 つである。
 - 1)ノードであるバーの長さは作業の所要時間を表す。
 - 2)作業の順序関係を示すアローは結合率により、アローの始端となる先行側ノードの接続点と終端となる後続側ノードの接続点を結ぶ。
- ④分岐ネットワークとの違いは、1)サークル型ネットワークの採用、2)リードタイムという時間でなく、結合率という割合による並行作業の表現である。
- ⑤利用頻度の高い並行作業の表現は、先行作業または後続作業の一方を基準とした結合率の設定になる。
- ⑥結合率は一般的な 4 タイプの作業間の順序関係を包含するものであり、結合率が特殊な場合としてその 4 タイプを表せる。

(2)結合率を導入したネットワークの日程計算を定式化した。

- ①定式化は、最早と最遅の日程計算に使用する式を示した。
- ②従来のネットワーク手法における日程計算との違いは、先行作業と後続作業の所要期間に、それぞれ先行側と後続側の結合率を乗じることなどである。

(3)躯体 PCa 工法の建方工事における詳細工程計画と作業計画を対象に、本手法の適用可能性を確認した。

- ①詳細工程計画への適用では、次の 2 つを確認した。
 - 1)結合率を導入したネットワークの表現と日程計算は問題なく実行できる。
 - 2)建方工程を建逃げ工区毎の作業で表すと並行作業の関係が発生するが、結合率を適用したネットワークとすることで建逃

げ工区間の順序関係や工期などの全体的な把握が容易となる。

②作業計画への適用では作業測定により収集したデータを利用し、結合率をパラメータとしたシミュレーションを行った。その結果、以下の 2 つを確認した。

- 1)並行作業の関係を結合率のとりうる範囲で定量化できる。
- 2)結合率は労務の平準化のパラメータとして有効である。

今後の課題は、1)本手法の適用範囲の把握、2)進捗管理段階での活用方法の検討などである。

参考文献

- 1)日本建築学会：“ネットワークによる工程の計画と管理”の指針 同解説、日本建築学会、1968 年
- 2)嘉納成男：我が国の建築生産をめぐる管理活動はどこまで進歩したか 工程の管理、第 7 回建築生産と管理技術 PD 報文集(1996 年)、pp.67-72
- 3)嘉納成男：建築工事の工程計画に関する研究(その 3) 詳細工程計画手法の開発、日本建築学会計画系論文報告集、No.423、pp.59-68、1991 年 5 月
- 4)森口五郎、若木俊男：建築工事における基本工程表作成手法に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、No.445、pp.121-131、1993 年 3 月
- 5)土橋稔美、吉田知洋、山田辰雄：作業間の順序関係に結合率を導入したネットワーク手法 その 1 結合率を導入したネットワークの定式化、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp.1141-1142、1999 年 9 月
- 6)土橋稔美、正村芳久、吉田知洋：PCa 工法における建方計画の支援手法 その 2 建方工程における並行作業のモデル化、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.1313-1314、2000 年 9 月
- 7)吉田知洋、土橋稔美、山田辰雄：作業間の順序関係に結合率を導入したネットワーク手法 その 2 プレキャスト工法における建方工事の作業計画への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp.1143-1144、1999 年 9 月
- 8)プロジェクト・マネジメント部会：プロジェクトマネジメントの基礎知識体系(Pmbok guide 和訳版)、エンジニアリング振興協会、1997 年 3 月

注

- 注1) 文献 1)では工程計画を手順計画と日程計画に分けて示しているが、プロジェクトの計画全体の中で施工方法、資源配分計画、資機材の搬入・揚重などを総合的に検討し、ネットワーク工程に表現する必要があることも指摘している。嘉納による工程管理技術の変遷を示した文献 2)においても、同様の指摘がなされている。
- 注2)アロー型ネットワークは作業をアローで示したネットワーク図のことである(文献 1))。建築工事向けに開発・販売されてきた日程計画用の国内のソフトウェアはアロー型ネットワークを採用するものが多い。
- 注3)サークル型ネットワークは作業をサークル(ノード)で、作業間の順序関係をアローで示したネットワーク図のことである(文献 1))。サークル型ネットワークは作業の順序関係の検討に利用されるだけでなく、サークルをバーとし、バーの長さを作業の所要期間で表すことで日程計画でも活用される。米国 PMI(Project Management Institute)が発行したプロジェクトマネジメント解説書の和訳版(文献 8))によると、サークル型ネットワークをプレジデンスダイアグラムと呼んでいる。
- 注4)不等号がつく理由は図-1-(1)の一般的な 4 タイプと同様に、先行作業が複数になることもあるためである。
- 注5)文献 8)では、先行作業を基準とした設定により発生するオーバーラップの期間をリードタイムと呼んでいる。
- 注6)タイムラグは、先行作業の終了時刻からどの程度遅れて後続作業を開始するかを表すものである。
- 注7)本報告における詳細工程計画は職種または専門工事業毎に作業を捉え、手順計画と日程計画を実施することである。時間軸は「日」単位である。
- 注8)本報告における作業計画は詳細工程計画の枠組みの中で、作業チームの編成と各作業チームの作業の手順と日程を計画する意味で用いる。ここで日程計画は「時」単位程度の時間割表のことである。

(2000年9月1日原稿受理、2000年10月31日採用決定)