工程順守に影響を与える作業工種の 抽出法に関する研究

鈴木 信行¹・高崎 英邦²

¹正会員 一般財団法人日本建設情報総合センター (〒107-8416 東京都港区赤坂7-10-20)

E-mail:suzukin@jacic.or.jp

²正会員 日本大学生産工学部土木工学科 (〒275-8675 千葉県習志野市泉町1-2-1)

E-mail:takasaki.hidekuni@nihon-u.ac.jp

建設施工は、野外での作業が多い。したがって、天候の変化や周辺交通状況の変化等の不確定要素が多く、計画通りの工程で進捗することは少ない。工事担当者は、進捗を監視しながら要求される品質を確保し、安全に工事が進捗できるように、そして、費用の増幅を考慮して、自身の経験に基づいて施工管理を実施することが多い。

工程管理を行う際、クリティカルパスメソッド (Critical Path Method) により時間軸を基準とした重要な作業工種の連携や流れを抽出し、監視することが一般的である。工程を変更した場合、パソコンソフトウェアを用いることにより、複雑な工程であっても、クリティカルパスを発見することは容易である。ところが、建設施工の特徴として、型枠工や鉄筋組工などの同じ作業資源が、連続的または断続的に繰り返して工事に従事することが多い。すなわち、作業工種の時間連鎖と共に作業資源にも連鎖がある。この作業資源の連鎖が、非クリティカルパス上の作業工種からクリティカルパスへ影響を与えることがある。

本研究では工程順守に影響を与える作業工種の抽出法構築を目的に、ネットワーク工程表において作業資源の連鎖をリンクとして表現し、これにグラフ理論を組み込んだモデルを考案した。本考案モデルを橋梁工事の工程管理に適用し、工程変更に伴う工程順守に影響を与える非クリティカルパス上の作業工種を特定し、クリティカルパスへの影響を抑制できることを検証した。

Key Words : Time Management, Network Programme, Relationship of Work Resources, Graph Theory

1. 研究の背景と目的

(1) 研究の背景

施工業者の責に起因する時間の遅れは、遅延補償金 (Liquidated Damage) の対象となり減額される。反対に、発注者の責に起因する時間の遅れは工期延長 (Extension of Time) の対象となり、追加の諸経費類 (Overheads) を補償してもらうことができる。例えば、政府開発援助 (ODA : Official Development Assistance) プロジェクトで使用される FIDIC 国際契約約款¹⁾の第 8 条 7 項遅延損害賠償と第 8 条 9 項工事中断の結果や、香港政庁の一般契約条項 (General Conditions of Contract)²⁾における第 83 条発注者への償還金 (Recovery of money due to the Employer) と第 63 条工事進捗の障害 (Disturbance of the progress of the Works) と契約条項に明記されている。しかしながら、契約上では、工程遅延要因については施工業者の責となるような記述が多く、また、諸経費の縮減を目的に、施工業者は可能な限り時間短縮となる施工方法を検討する

ことが多い。その際、一般的には、クリティカルパスメソッド (Critical Path Method : 以下 CPM という) を用いてクリティカルパスを抽出する。ところが全体工期の短縮を目的に、単純に時間を短縮する計画変更では、作業工種間の連鎖変動などのリスク要因が潜在化してしまう可能性が高く、ひとたび問題が顕在化した場合、潜在リスクが連鎖反応を起こす可能性が高い³⁾。

施工業者は、予測されるリスクに対して、リスクの発現頻度とリスク影響の大きさに基づいて、幾つかの対応案を想定し、施工計画に組み込むのが一般的である。これを予備計画 (Contingency Plan) と呼び、リスクマネジメント費用として、実行予算の中に位置づけることが多い。特に、海外工事では協力業者と継続した取引関係等が少なく、作業資源のコントロールが困難になることが多く、工程順守のための作業資源確保には留意しなければならない。

近年、わが国においてワンデーレスポンスのような受発注者間で協働した時間短縮の行動が、施工現場では重

視されはじめて⁴⁾。しかし、受発注者間のリスク分担が不明確な上、PERT (Program Evaluation and Review Technique) やCPMのように納期を優先し、必要な作業資源は原則的に問題視していないため、作業資源に起因する潜在リスク抽出法の研究は少ない。また、段階検査の強化や荒天による手直し等の繰返し作業に関する定量的な評価法の研究も少なく、その時々の問題に対する判断は経験や勘に依存することが多い。その結果、施工途中における状況把握が困難となり、竣工間近になるまで適切な判断ができない場合がある。すなわち、結果を見るまでマネジメント効果を評価することができず、マネジメントのチャンスを失っているといえる。

以上の研究の例として春名や池田の研究がある。

前者は、PERTやCPMを適用する際、ネットワーク工程表の全作業間順序を構造特性と捉え、工事原価、品質の関連性に関する分析法(ルート構造分析およびカット構造分析)という新たな計画手法である⁵⁾。

後者は、マスターネットワークとサブネットワークの階層型ネットワークモデルを考案し、資源の転用関係等を表現する手法である⁶⁾。

工事の大型化や複雑化に伴い、作業資源の制約を適時適切に把握し対処する必要があり、作業資源の関連性の変化に留意しなければならない。

(2) 研究の目的

本研究では、作業量は同じであるが、建設施工の特徴の一つである作業資源の移動等による関連性の複雑化に伴った制約の抽出法構築を研究目的としている。ネットワーク工程表における作業資源の連関をリンクとして表現したネットワークモデルを構築し、これにグラフ理論を組み込んだモデルを考案した。本モデルにより、作業工種の時間軸の連鎖とは別に作業資源間の連関に着目し、他の作業工種へ影響を与える可能性の高い作業工種を特定できると仮説をたてた。そして、本モデルを用いて実施工した場所打ちコンクリート・ポストテンション工法連続箱桁橋工事の工程変更に伴う工程順守に影響を与える作業工種を特定し、クリティカルパスへの影響を抑制する施工管理を実施した。

2. 工程順守に影響を与える作業工種の抽出法

(1) 作業資源の制約

建設施工は、求められる仕様を満足し、決められた期間内に、限りある事業資源で完遂しなければならない、いわゆる“プロジェクト”と同義といえる⁷⁾。

ところが、建設施工の特徴として専門化や分業化がなされており、当初の計画時に作業資源の平準化や山崩しを検討されているが、工程変更等の対応として、協力業

者に追加の作業資源を依頼することが多い。作業量の変化に関わらず、工程順守という時間軸のみで施工パーティ数等の増減を判断していることがある。作業資源の制約を無くすことは非効率な施工となる場合があり、QCT (Quality 品質, Cost コスト, Time 時間) のマネジメントをより困難にすることが多い。そこで、全体工程において、それぞれの作業資源の重要度、すなわち作業資源の制約を把握することが重要と考える。

(2) 全体の中の個別特性を把握する手法

社会という集合の中に存在する限り、必ず他者との連関が存在する。その集合全体において、個々がどのような特性や振る舞いをするのかを解析する手法の一つとしてグラフ理論の中心性指標がある。

全体の連関をネットワークモデルとして表現し、グラフ理論の代表的な中心性指標である入次数、出次数、接近性指標、そして媒介性指標等を算出することにより、個々の特性を把握する手法である⁸⁾。

特に媒介性指標は、ノード i がネットワークの中で情報等の媒介や仲介をすることによる中心性を示す指標である⁹⁾。なお、この考え方をういた電力線網等の物理的なネットワーク構造の解析¹⁰⁾や、テロリストの組織分析、学術論文の引用関連等の非物理的な関連性の解析手法としての研究成果^{11),12)}が発表されている。

次に簡単なモデルでそれぞれのモデルにおける中心性指標の違いを示す。ネットワークモデルを図-1に、各ノードの中心性指標を表-1に示す。

モデルは7つのノードで構成され、リンクは双方向、すなわち無向グラフとする。ネットワーク①は、一般的に“星型”と呼ばれ、ノードCが他の全てのノードと連関があり、重要な存在であることがわかる。それは、表-1からも全ての中心性指標が高いことでも示されている。

同じ7つのノードで構成されるが、リンクのつながり方が少し異なったネットワーク②では、他のノードとの関係の多いノードCはネットワーク①のモデルと同様に全ての指標で高い数値となっている。

注目すべき点は、ノードFとノードGを孤立させないようにつないでいるノードEの媒介性指標が、ノードCの媒介性指標と同等であることである。すなわち、ネットワーク②の構造の場合、ノードCとノードEが中心的な役割を果たしており、連関の強いノードであることがわかる。

別の見方をすると、ネットワーク①ではノードCが機能不全になるとネットワークは完全に分解してしまう。しかし、例えば、ノードCとノードEを結ぶ1本のリンクが切断されても、ネットワークとしての大半の機能は保持できる構造といえる。

図-1 7つのノードで構成されるネットワークモデル

表-1 7つのノードで構成されるネットワークモデルの中心性指標の相違

ネットワーク ①					ネットワーク ②				
ノード	入次数	出次数	接近性	媒介性	ノード	入次数	出次数	接近性	媒介性
A	0.14	0.14	0.55	0.0	A	0.43	0.43	0.55	0.0
B	0.14	0.14	0.55	0.0	B	0.43	0.43	0.55	0.0
C	0.86	0.86	1.00	30.0	C	0.57	0.57	0.75	18.0
D	0.14	0.14	0.55	0.0	D	0.43	0.43	0.55	0.0
E	0.14	0.14	0.55	0.0	E	0.43	0.43	0.67	18.0
F	0.14	0.14	0.55	0.0	F	0.14	0.14	0.43	0.0
G	0.14	0.14	0.55	0.0	G	0.14	0.14	0.43	0.0

反面、ネットワーク②では、ノードCとノードEの間のリンクが切断されると、ネットワークが2つに分断され、大半の機能を失う可能性がある。媒介性指標の高いノード、すなわちノードCとノードEが重要な存在であると判定することができる。言い換えると、媒介性指標は、当該ネットワークの中の各ノードの“橋渡し機能”、“結合機能”などを評価できる。

(3) 工程順守に影響を与える作業工種の特定法

a) ネットワーク工程表と媒介性指標

複雑な作業工程の場合、作業工種の連鎖と各作業工種の必要時間を基に、ネットワーク工程表を作成しクリティカルパスを抽出する。そのクリティカルパスを注視して、工程マネジメントを実施することが一般的である。しかし、前述したように建設施工は、同じ作業資源が継続的や断続的に繰り返し同じ工事に従事することが多い。

そこで、ネットワーク工程表に作業資源の連関も含めたネットワークモデルを作成し、それぞれの作業資源が当該工事においてどのような特性を有しているのかを検討する。このモデルは、作業工種をノード (node)、作業工種間の連関をリンク (link) とし、連関の方向を持った有向グラフと捉えることができる。

グラフ理論の中心性指標の一つである媒介性指標は、影響や情報を仲介する機能の重要度を相対的に示すことができる。すなわち、当該ネットワーク工程表において、他の作業工種へ影響を与えやすく、ひとたび問題が顕在化した場合、連鎖反応を起こす可能性の高い作業工種を抽出することが可能である¹³⁾。

媒介性指標の算出式を式-1aに示す。

$$Between-ness(i) = \sum_{j=1, k=1}^N \frac{Gpaths_{j \rightarrow i \rightarrow k}}{Gpaths_{j \rightarrow k}} \quad (1a)$$

ここに $Gpaths_{j \rightarrow k}$ はノード j からノード k までの全ての最短経路数、 $Gpaths_{j \rightarrow i \rightarrow k}$ はノード j からノード i を含んでノード k までの最短経路数である。

なお、他の指標算出式を付録に記載する。

b) 単純な工程での解析例

図-2は、3つの作業（上段、中段、下段）の流れで構成された工程例である。時間軸で評価するCPMでは、赤い連結線がクリティカルパスとなる。

ここで、青い破線で示した作業工種（上段の型枠工①、中段の型枠工②、下段の型枠工③）に連関が存在する場合、図-2をネットワークモデルと捉え、各作業工種（ノード）の媒介性指標を算出する。その結果を図-2の各作業工種の上に示している。

ここで“コンクリート”は、作業員や施工機械（ポンプ車など）は作業が必要な時に段取りをし、かつ、その当日だけの作業になることが多い。したがって、連関性検討の対象外としても大きな問題はないと考え、モデルでも連関を考慮していない。

非クリティカルパスの中段にある型枠工②の媒介性指標が高いのがわかる。これは、他の作業工種に影響を与える可能性が高いことを示している。また、上段及び下

図-2 3つの作業の流れで構成された工程例

段の作業の流れにおいても、型枠工の媒介性指標が高く、リスク連鎖を引き起こす可能性が高いと判断できる。

媒介性指標を用いた解析手法の適用により、CPMでは把握することが困難であったクリティカルパス上の作業工種に影響を与える可能性の高い、非クリティカルパス上の作業工種の特定が容易になる。すなわち、非クリティカルパス上のため工程に余裕時間が存在する。この余裕時間を監視することにより、事前に追加の作業資源の投入等のマネジメント判断支援が容易となる。これは、工程遅延という問題が発現した場合、作業工種間の連関による媒介性指標の高い作業工種の連関（リスク連鎖）を遮断することであり、効果的な損失拡大防止策になると考える。

図-3 ポストテンション工法連続箱桁橋の平面概略図

3. 橋梁工事での工程短縮検討事例

筆者等が海外で実施した橋梁工事の事例で、本手法を用いて工程順守に影響を与える工種の特定例を示す。

(1) 工事概要と工程短縮工法 (In-Fill工法)

本工事は、軽量鉄道（Light Railway Transit）用の場所打ちコンクリート・ポストテンション（以下、PC という）工法連続箱桁橋である。施工方法は固定足場工法である。場所打ちコンクリート基礎杭（径 1,000mm、全 154 本、杭の設計形式は支持杭と摩擦杭）や既設のボックスカルバートの補強工事等が含まれていた。工期は 2 年間（24 ヶ月）である。

橋梁は、南北に4連続施工支間、東西に5連続施工支間、1施工支間長は、第1施工支間が36m、最終（第5

または第4) 施工支間が 24m, 中間施工支間が 30m ずつであり, 全体は L 型形状である (図-3)。

固定支承が南北部と東西部の接合部（PC 作業の無い RC 構造部）に計画されており、そこから両端（北と西）へ向かって PC ケーブルを連結しながら 1 施工支間毎に繰返し進捗する。L 型に 90 度曲がった中央部より北向きと、西向きに 1 施工支間ずつ PC 作業を施工する計画である。したがって、5 連続施工支間が存在する西向き（EW 橋）がクリティカルパスとなる。

発注者の設計・計画に基づく EW 橋の工程表を表-2 に示す。全体工程表から 1 施工支間のみを抜粋し、13 の作業工種に分解して示している。赤い連結線はクリティカルパスを示し、着色した作業工種は PC 作業を行う専門業者を示している。

(2) 従来工法と工程短縮工法の工程差異

発注者の設計・計画に基づく EW 橋の全体工程表を表-3に示す。後述する短縮工程も併記している。

従来工法では、全ての作業工種がクリティカルパス上である。PC作業以外にも、それぞれの作業工種には異なった職種の労働者や施工機械を必要とする。したがって、労務と機械に待ち時間が多くなる可能性が高く、作業の効率化が重要課題であった。

作業の効率化手法として工程短縮の可能性を検討する。一般的な工程短縮法は、①作業資源を増やすこと（Crushing），②並行作業を可能とすること（Fast Tracking），である。

しかし、当該橋梁工事はPC鋼線が連続する設計であるため、複数施工支間の並行作業を実施することは、従来の施工方法では不可能である。また、作業できる施工支間長が30mに限定（中間施工支間）されているため、追加の作業資源を投入しても作業の効率化は困難である。

そこで、表-2に示すように、“2：型枠組からテンションシースを設置して7：ウェブ（web）と下床板のコンクリートを打設”までの日数に比べて、“8：内型枠解体から11：上床板（slab）のコンクリートを打設”までの日数が短いことに着目した。着色している作業工種は、PC作業を行う専門業者の作業工種である。従来の施工方法は、長い作業日数の必要なウェブと下床板を含んでクリティカルパスを構成している。

工程改善計画を検討するにあたり、連続PC箱桁橋という基本設計を変更する提案は、設計責任（Design Indemnity）が提案者（施工業者）に転嫁され、変更に伴う因果損失対応（Consequences）も課せられる。

施工業者にとってリスクが大きい。したがって、基本設計は変更せずに、クリティカルパスを可能な限りPC鋼線に関する作業工種だけになるように、追加のコンクリート打ち継ぎ目（Construction Joint、以下CJという）を考案した。

表-2 従来工法による工程

図-4 In-Fill 工法を採用した5連続箱桁橋

表-3 In-Fill 工法による時間短縮工程(従来工法との比較)

図-5 In-Fill 工法によるEW 橋の概略施工順序(側面)

表-4 In-Fill 工法によるEW 橋の概略施工順序

STAGE-1	第1施工支間から、足場組、型枠組、鉄筋組、テンドン挿入等の作業を順次着手。
STAGE-2	第1施工支間から5m間隔をあけて(第2_In-Fill施工支間)、第2先行支間に着手。そして、第3先行支間にも着手。
STAGE-3	第1施工支間のPC作業作業終了後、第2_In-Fill施工支間に着手、第3先行施工支間がほぼ完了するようにコントロールし、第4先行支間に着手。
STAGE-4	第2_In-Fill施工支間の作業完了後にPC作業を実施し、次のクリティカルパスである第3_In-Fill施工支間に着手。第4先行施工支間がほぼ完了、第5先行支間に着手。

橋脚から6mの継ぎ目(CJ)は、支間の5分の1であり、追加CJの位置も曲げモーメントの変更点付近である。構造上の弱点にはならず、本形式のコンクリート橋において、この位置にCJを設けることはよく採用されている¹⁴⁾。

本提案工法は、長い施工支間において固定足場を組み上げて現場で施工する“場所打ち”のプレキャストセグメント工法ともいえる。

本施工法は、先行して施工する部分(以下、先行施工支間と呼ぶ)と既に施工した部分の間を“埋め込む

(In-Fill) (以下、この部分をIn-Fill施工支間と呼ぶ)”という形式になるため“In-Fill (インフィル) 工法”と呼ぶ。基本設計の変更はなく、施工方法の提案であり、設計監理コンサルタント及び発注者の承認が得られた。

In-Fill 工法を採用したEW 橋の全体側面図を図-4に示す。In-Fill 工法の概略施工順序を表-4 および図-5に示す。表-3にIn-Fill 工法を採用したコンクリート橋上部工の全体工程を示している。従来工法では248日間を必要とした計画であったが、EW 橋の4施工支間にIn-Fill

表-5 In-Fill 工法における作業工手間の連関(抜粋)

工法を採用することにより、コンクリート橋上部工のみで 116 日間の時間短縮が可能であることが判明した。

In-Fill 工法は、クリティカルパスではない“先行施工支間”の作業とクリティカルパスとなっている“In-Fill 施工支間”の 2 つの施工系統に分かれて作業が進捗する。

また、In-Fill 工法の採用により、1 施工支間の作業工種が 13 から細分化されて 19 に増えている。すなわち、連関する作業資源（労働者や施工機械など）の移動がより複雑になり、さらに作業工種毎に受検しなければならぬ監督・検査の回数も増えることになる。

図-6 In-Fill 工法における各作業工種の媒介性指標算出モデル

(3) 工程順守に影響を与える作業工種の抽出

In-Fill 工法の採用により大幅な時間短縮の可能性が判明した。CPM によるクリティカルパスは、第 2 施工支間以降第 5 施工支間まで 5m 長の In-Fill 施工支間に移動していることがわかる。クリティカルパス上の作業遅延は、直接的に全体工程に影響を与える重要な作業工種の連続である。In-Fill 工法における作業工種の連関を短縮工程表(表-5)に青線で示している。赤い連結線はクリティカルパスを示している。

ここで、表-5 に示すような作業工種の連関を加えた工程をネットワークモデルと捉え、式-1a を用いて媒介性指標を算出する。総ノード数 93、総リンク数 133

の媒介性指標算出用のネットワークモデルを図-6 に示す。そして、各作業工種の媒介性指標の算出結果を図-7 に示す。図-7 の各ノードの数字は、表-5 左側に示した作業工種番号である。図-6 右側に集中している水色のノードは、In-Fill 施工支間の作業工種である。CPM を用いて検討した場合のクリティカルパスである。中央付近の赤い○印をつけたノードは、先行施工支間において媒介性指標の高いノードを表している。この 6 つの作業工種が、CPM では表現されないクリティカルパス上の作業工種に影響を与える可能性の高い作業工種である。

図-7より、第2施工支間から第4施工支間のクリティカルパスである In-Fill 施工支間と同等に、または、それ以上に媒介性指標が高くなる作業工種が先行施工支間にも存在していることがわかる。これらの媒介性指標の高い作業工種は内型枠組み（表-5と図-6の作業工種番号 18, 38, 60）と床板型枠組み（表-5と図-6の作業工種番号 21, 41, 61）である。他の作業工種への連関が強く、工程遅延等の影響を他の作業工種へ与える可能性の高いことが推測できる。

このように、ネットワークモデルから媒介性指標を算出することにより、クリティカルパス上の作業工種ではない“先行施工支間”の中にも、重要な作業工種または工程遅延に影響を与える可能性の高い作業工種の存在が抽出できる。

媒介性指標の高い作業工種は、作業工種の連関を考えた場合のクリティカルパスと捉えることができる。すなわち、時間軸を評価基準とした CPM で特定できる重要な作業工種と共に、本研究で提案するネットワークモデルにより、作業工種間の連関という視点で重要な作業工種の特定ができ、工程マネジメントにおいて効果的な判断支援が可能になると考える。

また、作業工種の関連を考慮した工程表ネットワークモデルにより、工程計画を作成したり、変更したり、新規の作業工種を追加する等を検討する場合、クリティカルパスに影響を与える可能性が潜在化している作業工種と、その連鎖を抽出することが可能である。これらの媒介性指標の高い作業工種は他の作業工種への影響が強く、工程遅延等の影響を他の作業工種へ与える可能性の高いことが推断できる。

ここで、媒介性指標の評価に関する留意事項がある。解析対象モデルには、有限の広さという境界を有する。その影響で、モデルの中心に位置するノードほど媒介性指標が大きくなる傾向がある。

例えば、図-7において、作業番号 45-49 付近の媒介性指標が大きく算出されている。数値上では最大であるが、施工としては必ずしも最重要ということとは限らない場合がある。相対評価をする際は、作業タイミングの近いノードと比較しなければならないことに留意する必要がある。図-7においては、同じ支間に存在する“第2_先行”と“第2_In-Fill”等のように相対比較をして重要性を判断しなければならない。

図-7 各作業工種の媒介性指標の算出結果

(4) 実施工と提案モデルを適用した効果

a) 時間短縮とコスト増減の比較検討

一般的に時間を短縮する計画にはコスト増が伴う。時間短縮効果の大きい In-Fill 工法においても、ある一定の条件下ではコスト増になることが推測できた。

主なコスト増とコスト減の要因を表-6に整理する。

表-6において、コスト増は薄い黄色の着色した項目、コスト減は黒地に白抜ききの項目である。施工対象支間数の相違により、コスト増減の効果は変化する。しかし、工程短縮による全ての効果を数値化することは困難である。特に、遅延補償金のリスク低減等の評価は困難である。In-Fill 施工対象支間数が4を超えると、表-6の上から5番目から10番目の項目において、コスト縮減および将来のリスク低減の効果が期待できると推断できた。そこで工程順守および費用削減とリスク低減の効果検討を踏まえ、5連続施工支間の存在するEW橋にIn-Fill工法を採用した。

b) 工程順守の成果

施工前に十分な検討のもとに計画された工程ではあるが、インスペクション（段階検査）をはじめ、様々な予期できない要因による工程遅延の可能性は存在する。遅延が発現してからその遅延を回復するための追加作業資源を調達することが多い。そのような場合、準備が不十分になり、期待される効果が発現されないことも多い。

表-6 In-Fill 工法を採用する場合のコスト変動要因

評価項目	施工法	施工対象支間数			
		2支間	3支間	4支間	5支間
① 追加の足場材料	従来工法	2セット	2セット	2セット	2セット
	In-Fill工法	2セット	3セット	4セット	4セット
② 追加の型枠材料 (型枠材料の転用回数は2.5回)	従来工法	2セット	2セット	2セット	2セット
	In-Fill工法	2セット	3セット	3セット	3セット
③ コンクリート打ち継ぎ目処理	従来工法	1ヶ所	2ヶ所	3ヶ所	4ヶ所
	In-Fill工法	2ヶ所	4ヶ所	6ヶ所	8ヶ所
④ 鉄筋ラップ長さ	従来工法	1ヶ所	2ヶ所	3ヶ所	4ヶ所
	In-Fill工法	2ヶ所	4ヶ所	6ヶ所	8ヶ所
⑤ 追加コンクリート打設機械 コンクリート工の作業効率	従来工法	-	-	-	-
	In-Fill工法	1回	2回	3回効率化	4回効率化
⑥ Inspection(監督・検査)手間	従来工法	-	-	-	-
	In-Fill工法	非効率	-	効率化	効率化
⑦ 現場管理費の縮減	従来工法	-	-	-	-
	In-Fill工法	▲29日	▲58日	▲87日	▲116日
⑧ 型枠工、鉄筋工の待ち時間 作業への慣れ	従来工法	-	-	-	-
	In-Fill工法	非効率	-	効率的	効率的
⑨ テンドンシースの閉塞リスクと手間	従来工法	-	-	-	-
	In-Fill工法	手間大	リスク減	リスク少	リスク少
⑩ 工程短縮の副次的効果 (作業資源の転用など)	従来工法	-	-	-	-
	In-Fill工法	期待	期待	効果大	効果大

本研究の成果である作業工種の連関性を踏まえたネットワークモデルの解析法により、クリティカルパスに影響を与える可能性が潜在化している作業工種を事前に抽出しておくことが可能となった。そして、“工程の順守→リスク発現の抑制→コストマネジメントの徹底”という効果的・戦略的な施工管理の実施が容易となった。

実施工中には様々な工程遅延の事象に遭遇することがあった。例えば、法令の改正により作業時間の制約が厳しくなったり、隣接する学校や商業施設からの新たな要望等による作業制限等があった。それらの変更に対して、CPMと媒介性指標による潜在リスクの連鎖である型枠組み工の作業を監視し、移動や過不足等の対応策を適時に講じることが可能となり、計画通りの時間短縮が遂行できた。

その結果、EW橋の西端橋台から約80m西側に位置する既存の交差点(南北6車線×東西4車線)について、車線の拡幅(南北7車線×東西5車線に変更)、中央分離帯の移設、路面(アスファルト舗装)のレベル変更および排水構造物の改修等を含んだ交差点改修工事をSupplemental Agreement(補足合意)として追加受注することができた。

なお、Supplemental Agreementとは、一般的な変更指示(Variation Order)では処理できないような規模の大きな追加工事の場合に用いられる設計変更方式である。

4. 結論

本研究では、建設施工の特徴の一つである作業資源の移動等による連関性の複雑化に伴った制約の抽出法構築を研究目的とし、ネットワーク工程表における作業資源の連関をリンクとして表現したネットワークモデルを構築した。このモデルに対してグラフ理論の媒介性指標を用いて連関性の強い作業工種の抽出法を確立した。その結果、以下のような成果が得られた。

- イ) 従来のCPMの考え方を支援し、作業工種の連関性に基づいた工程順守に影響を与える可能性の高い作業工種の特定が容易になった。
- ロ) 当初計画および工程変更等において、作業資源の制約に関するリスク連鎖を実施工前に把握することが容易となり、戦略的な施工管理が可能となった。

本研究で提案したネットワークモデルは、一般的に適用しているネットワーク工程表に作業資源の連関というリンクを追加することで作成することが可能であり、特殊な知見やテクニックを必要としない。

また、グラフ理論の中心性指標を算出するソフトウェアも広く提供されている。作業工種の多い、すなわちノードとリンク数の多いネットワークモデルに対しても、パーソナル・コンピュータでの解析は容易である。

今後、工事の複雑化や大型化、また海外への展開を踏まえ、既往の工程管理手法に加えて、本研究で確立した手法を適用することにより、より効果的な工程管理が可能になると考える。

付録:中心性指標算出式

a) 入次数指標 (In-degree Centrality)

$$In-degree(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N x_{ji} \quad (1b)$$

ここに x_{ji} はノード j からノード i に入るリンク数。

b) 出次数指標 (Out-degree Centrality)

$$Out-degree(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N x_{ij} \quad (1c)$$

ここに x_{ij} はノード i からノード j に向かうリンク数。

c) 接近性指標 (Closeness Centrality)

$$Closeness(i) = \frac{N-1}{\sum_{j=1}^N \delta_{ij}} \quad (1d)$$

ここに δ_{ij} はノード i からノード j までの最短経路。

参考文献

- 1) 国際コンサルティング・エンジニアリング連盟：建設工事の契約条件書，第一版 1999 年，（社）日本コンサルティング・エンジニアリング協会，pp.27-28，1999.11
Federation Internationale Des Ingenieurs Conseils : Condition of Contract for Building and Engineering Works Designed by the Employer, First Edition, 1999
- 2) The Government of the Hong Kong Special Administration Region : General Conditions of Contract for Civil Engineering Works , 1999Edition, pp.38(Clause 83) & pp.31(Clause 63), 1999
- 3) 森本将吉，北詰恵一：道路事業におけるリスクの連鎖性

を考慮した定量分析，土木学会建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会，講演集 pp.41-44，2006.12

- 4) 財団法人建設経済研究所：建設経済レポート No.45「日本経済と公共投資」一回復基調にある日本経済と、建設投資を巡る諸課題一，pp.6-9，2005.08
- 5) 春名功，滑川建：ネットワーク工程表の構造特性分析と最適工程計画モデル構築に関する理論研究，土木学会，建設マネジメント研究論文集 Vol.4，pp.99-112，1996
- 6) 池田将明，吉川和広，春名功：パーソナル・コンピュータを用いた工程管理システムの開発に関する方法論的研究，土木学会論文集，第 391/VI-8，pp.179-187，1988.03
- 7) 建設省記者発表資料：「公共工事へのプロジェクトマネジメント (PM) 手法導入に関するビジョン」について，1999.06.21
- 8) 安田雪：実践ネットワーク分析，新曜社，pp.35-54，2001.10
- 9) Freeman, Linton C. : A set of measures of centrality based on betweenness, Sociometry 40 ; 35-40, 1997
- 10) L.A.N.Amaral, A.Scala, M.Barthelemy and H.E.Stanley : Classes of small-world networks, Proc. Nat. Acad. Sc. USA 97, 11149 (2000)
- 11) K.Ebel, L.-I.Mielsch and S.Bornholdt : Scale-free topology of e-mail networks, Phys. Rev. E66, 035103 (2002)
- 12) S.Redner : How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution, Eur. Phys. J. B4, 131 (1998)
- 13) 鈴木信行，鈴木明人，高崎英邦：建設施工マネジメントにおける出来高管理システム (EVM) 適用法に関する一考察，土木学会，建設マネジメント研究論文集 Vol.15，pp.227-238，2008.12
- 14) F・レオンハルト：レオンハルトのコンクリート講座⑥『コンクリート橋』，鹿島出版会，pp.40-41，1983

(2012. 5. 14 受付)

A STUDY ON THE TIME MANAGEMENT METHOD UTILISING NETWORK ANALYSIS TECHNIQUE

Nobuyuki SUZUKI, Hidekuni TAKASAKI

Construction works are exposed to the external environment. Therefore it is impossible to maintain the schedule planned originally due to the sudden weather changes, traffic conditions, and many un-known factors. Site manager usually monitor the progress of works, quality required, safety condition, and construction cost fluctuation based on his experiences.

Critical Path Method (CPM) based on time-related connection is fundamentally good for the detecting and monitoring of schedule control. There are many computer soft wares available for us to find critical path easily, even on complicated construction program. However there is some special feature in construction works, such as construction resources required continuous or time-interval re-mobilization. On the other words, even time would be flowed, resources would be there. As a result, non-critical path construction items might affect critical path flow, we believe theses items have high risk potential due to schedule changes.

In this paper, we study on the detection method of high risk potential items utilizing Between-ness centrality of Graph Theory for network model including resources' relationship. Finally we verify the effectiveness of our proposed method applied on an in-situ continuous post-tension method box-typed bridge construction works carried out in oversea country.