建設工事のリスクマネジメント：工期に関するリスクの実例とモデルによる検討

RISK MANAGEMENT IN CONSTRUCTION : CASE STUDY OF RISK IN SCHEDULE CONTROL USING MONTE CARLO SIMULATION

山根一男 —*1 岩松 準 —*2
古屋和夫 —*2 鈴木克英 —*3

Kazuo YAMANE —*1 Jun IWAMATSU —*2
Kazuo FURUYA —*2 Katsuhide SUZUKI —*3

キーワード：
リスク・マネジメント, モンテカルロ・シミュレーション, 工程管理, 制約理論

Keywords :
Risk management, Monte Carlo simulation, Schedule control, PERT, CPM, TOC

The risk in terms of works due to dispersion in efficiency of construction works are analyzed using data in actual construction and Monte Carlo simulation method with PERT model. The improvement of production efficiency requires introduction of risk concept and theory of constraints (TOC) in schedule control. Especially, optimization of the whole schedule planning and feasible schedule control considering the resource constraints of persons or equipments are important.

1. はじめに

一般に建設生産では、現場条件を事前に予測できないことや自然の変動等により、不確実性や変動性が大きいといえる。建設経済研究所[2000b]では、この不確実性・変動性により建設現場では度々作業変更が必要となるが、特に工期に関連して「全体工程計画がフォローされておらず、工事全体にとって最適でなくなっている恐れがある」と指摘した^{註1}。また、建設経済研究所[2001b]では、このような建設工事における不確実性を「リスク」と捉え、建設現場の実態についてのアンケート、ヒアリング調査結果から、1) リスク負担の明確化、2) 計画段階でのリスクの抽出と低減、3) 施工段階でのリスクのコントロール、が重要であること等を示している。

上記報告と関連して、本稿では、実際の工事事例により施工効率バラツキを持っていることを示し、その結果を踏まえて、個々の工程にこのようなバラツキによるリスクを考慮した場合の全体工期への影響について行ったモデル・シミュレーションの成果を報告する。

また、最近、製造業を中心とする産業分野において、制約条件に合わせた全体最適化の重要性を強調した TOC (制約理論)^{註2}が注目されているが、その知見も踏まえつつ若干の考察を加えた。

2. 建設工事における施工効率の実例 ～K共同溝工事のスタディ～

最近行われた実際の工事事例を取り上げ、その工事のある工程部分の施工効率の実際を調べた。注目したのは下記工事の仮設工 (共同溝施工のための土留め工等) におけるH鋼杭打設本数であり、以下リスク・マネジメントの視点から同作業の作業効率について検討する。

○ 工事概要：

首都圏の道路延長約 400mの下に開削工法 (オープンカット) により共同溝を布設するもの。車線制限をしながら行う夜間 21 時～翌朝 6 時の工事である。

○ 工事内容：

仮設工 (山留等の準備工事) 土留め工 (H鋼杭横矢板約 4,000 m²) ほか
開削土工 (地表面から掘削) 掘削・運搬 (約 12,400 立米) ほか
構築工 (共同溝本体の施工) 型枠工、鉄筋工、コンクリート工 ほか
雑工 (土砂の埋戻、その他) 歩道切削・復旧工 ほか

2.1 H鋼杭打設の実績データの分析

現場の毎日のH鋼杭打設作業のうち、同一作業を比較的長期にわたって行った杭打機 (2号機) の施工実績に着目し、観察した全体の稼働日数を前半と後半に分けて、打設本数のヒストグラム並びに統計量を示したのが図1である。

これによると、2号機は実稼働日数 42 日間に 179 本の打設を行っている。また、後半になると、前半に比べ打設本数が平均して多くなり、安定している。

図1 「2号機」の1日当たりH鋼杭打設本数の頻度 (前・後半別)

*1 建設経済研究所 常務理事
*2 佐藤総合研究所 主任研究員
(〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)
*3 建設経済研究所 研究員

*1 Executive Director, Research Institute of Construction and Economy
*2 Senior Researcher, Sato Research Institute
*3 Research Assoc., Research Institute of Construction and Economy

2.2 2号機の作業能率に関するシミュレーション結果

図1をもとに、前・後半の効率を取り上げ、図2各図の右上に示す施工効率の確率分布を仮定した。その上で、モンテカルロ手法^{註3}を用いて、179本の打設が42日以内に終了する確率を求めた。(図2)

1) 前半の効率を想定した場合

2) 後半の効率を想定した場合

図2 モンテカルロ・シミュレーションのまとめ
(1日打設本数の仮定と打設終了日数)

シミュレーション結果において42日以内に終了する確率は、前半の効率で約30%、後半の効率で約60%となる。これは後半になると日々の工程管理の結果として作業のバラツキが減少し、施工効率が上昇していることを示す。

また、シミュレーション結果の分布形は2ケースともに、最頻値が左側に寄り右に大きく裾を引く「ベータ分布」^{註4}に似た形状を示している。一般に実作業の工数のバラツキについては、「繰返し行われる作業の作業時間の確率分布は正規分布に近似し、一過性の作業を行うプロジェクト活動の場合はベータ分布に近くなる」^{註5}とされる。

表1には既往の公共工事における4件の歩掛作成のための実態調査結果^{註6}を示す。表1のNo.3の度数分布を図3に示すが、実際の工数は上のシミュレーション結果と似た一定の形状の分布となる。

表1 歩掛りデータにおける測定値のバラツキの程度

事例の説明	単位	最小	最頻	平均	最大
No.1 ケーソン工事における1回当たりのコンクリート打設・養生日数	日	4	7	8	15
No.2 日打設量(50m ³ 以下)におけるコンクリートポンプ車作業能力	時間当たり作業量m ³ /H	4	10	11	22
No.3 日打設量(50m ³ を越え100m ³ 未満)におけるコンクリートポンプ車作業能力	時間当たり作業量m ³ /H	7	14	16	28
No.4 日打設量(100m ³ 以上)におけるコンクリートポンプ車作業能力	時間当たり作業量m ³ /H	14	21	21	31

(注) 国島・福田編著『公共工事積算学』山海堂1994.11, pp.97-99 参照

図3 歩掛りデータの頻度分布の例(表1のNo.3)

3. モデルによる工期に関するシミュレーション

次に建設工事のリスクが全体工期にどの程度影響するかについて、簡単なスケジュール・モデルを設定しモンテカルロ・シミュレーションにより定量的な試算を行った。

3.1 モデルの設定

5工区6工種からなるプロジェクトを考え、各工種の標準的な工期を2パターン設定した。図4は各パターンについて、PERT (Program Evaluation and Review Technique) ^{註7}のスケジューリング手法を用いて工期を算定したものである。図の左上から右下に工程は進む。

PERT 計算によると、パターン1の終了工期は64日、パターン2は34日となる。また、パターン1は、3番目の工種の工期(10日)が他工種に比べ長くなっており、この部分が全体工期を決定づけるクリティカルな工程(余裕のない工程)となっている。一方、パターン2は、クリティカルな部分がシステム全体に広がっており、明確なクリティカルな工程がない状況である。

1) パターン1 (各工区2, 3, 10, 2, 3, 4日の標準工期の工種からなる)

2) パターン2 (各工区2, 3, 4, 2, 3, 4日の標準工期の工種からなる)

図4 PERTを用いた工期算定モデル

3.2 各工種の工期変動

各工種の工期変動はベータ分布に近いことが予想されるが、本シミ

シミュレーションではこのような複雑な分布形状は想定せず、表1の4つの実績データの平均を求め、最頻値、最小値、最大値の3点を与える三角分布として設定する。すなわち、各工種の工期変動に関する三角分布を図5に示した「平均」（太線）の比率を用いて計算を行う。

図5 各工種の工期変動に関する三角分布確率密度関数

3.3 モンテカルロ・シミュレーションの実施

両パターンとも5工区6工種がそれぞれ独立に図5の「平均」のように変動するモデルを作成し、1,000回の乱数を発生させるモンテカルロ・シミュレーションを行った。なお、1日に満たない端数工期については、現場での実態などから、0.5日（半日）単位で次工種に引渡が可能であると仮定し、算出した。図6に計算結果を示す。

1) パターン1（→PERT 計算工期 64 日におさまる確率は 21.80%）

2) パターン2（→PERT 計算工期 34 日におさまる確率は 1.50%）

図6 モンテカルロ・シミュレーションの計算結果

3.4 主な結果

●各工種のバラツキを考慮し全体工期を算定すると PERT で求めた標準工期を上回る（計算上、工事が遅延する）

各パターンとも PERT で求めた標準工期（パターン1：64日、パターン2：34日）を上回る分布形状となる。工期内で完了する確率（度数分布の色塗りの部分）は、パターン1で21.8%、パターン2で1.5%であった。すなわち、通常起こりうると考えられる施工効率の変動を織り込んで求めた計算結果では、PERT 計算による工期内に終わる確率は低いという結果を示しており、確率的に物事を考えるリスク概念の導入の重要性を物語る。

なお、ここで行った最頻値を各工種についての標準工期とみて（一致させて）行う PERT 計算ではなく、標準工期がある程度変動することが事前に分かっている場合には、標準工期を少しずつ大きくみて PERT 計算するような対処が、現実には行われているであろう。その場合は図6で示した結果よりはその PERT 計算工期内で終わる確率は高くなるはずである。

●全体工期の変動幅は、個々の変動幅より総体的に狭まっている

各パターンの変動幅の比率をみると、パターン1の計算結果で（最大－最小）／標準工期＝（103.0－49.5）／64＝0.836、同様にパターン2で（53.5－32.0）／34＝0.632である。設定した各工種のこの値は（1.955－0.535）／1＝1.420であるため、全体工期の変動幅は個々の工種の変動幅の半分程度となっている。これは、5工区6工種の組み合わせ（複雑化したこと）により発現した効果であると思われる^{註8}。

●クリティカルとなる工程の変動を抑えると、全体としての改善効果は高い

クリティカルな工程がはっきりしているパターン1（変動係数0.15）の方がはっきりしていないパターン2（変動係数0.10）よりも変動幅は大きい。これは、図7に示す変動要因の感度グラフからもわかるように、クリティカル・パスとなるパターン1の3番目の工種（標準工期10日）の変動が全体の変動に大きく影響しているといえる。

一般に、「クリティカル・パス上の作業の期間を短縮することができればプロジェクト全体の所要時間の短縮に寄与する」^{註9}と言われている。今回のシミュレーション結果からも、クリティカルな工程の変動を抑えると全体工程を安定させる改善効果が高いといえる。

図7 全体工期変動要因の感度グラフ

（注）この図でa1～a6は6工種のうちの各々1～6番目の工種を指している（図4参照）

4. 生産効率の改善に向けての考察

上で指摘したリスク概念導入の必要性（リスク・マネジメント）や、最近話題となる TOC（制約理論：Theory of Constraints）の考え方を踏まえつつ、生産効率の改善に向けての考察を行う。

4.1 現状の工程管理手法とその限界

一般に、わが国の建設現場における「工程管理は完成期日をいかにして守るかに焦点を合わせたものである」といわれている^{註10}。異常事態が発生した場合等を除き、完成期日に間に合わなかったといった事例をほとんど聞かない^{註11}のはそのためであろう。先に少し指摘したが、このことは別の見方をすれば、実際の現場では個々の工種に変動によるリスクをある程度見込んだスケジューリングを行っているということであろう。すなわち、PERT 計算にリスク概念を暗黙的に導入しているともみられる。

PERT 理論が教えるように、クリティカルパスの重点的な管理が全体工程に重大な影響を及ぼすということは、実務的にはよく知られた

ことであり、クリティカル作業の中でいくつかのものについて完成期日の小目標をたててそれを達成するようにする「マイルストーン管理」が建設現場ではよく行われている。

パターン1のように明確なクリティカルパスが存在する場合は、この部分を重点的に管理し、改善することで全体工期のコントロールが容易になる。例えばクリティカルな工種に対して、優秀な専門工事業者を起用して能率を上げたり、さらに工区を分割すること等で、山崩しを行うといった工程管理上の工夫をすることであろう。

こうした結果、プロジェクトはパターン1のような状態から、パターン2のようなバランスがとれてロスタイムは少ない一方で明確なクリティカルパスが存在しない状況に移行していく。

パターン2のようなクリティカルパスが不明確な状況(逆にいえば、どの工程もクリティカルパスになり得る状況)になった場合、個々の工程の改善を行っても、全体工期の短縮にはあまり寄与しない結果となる(詳細は後述報告書参照)。これはPERT手法にリスク概念を取り入れた工程計画を作成するのみでは限界があることを示している。

4.2 新しいリスク・マネジメント手法の必要性

(1) 全体最適化の観点

工程計画において個々の工程のリスクを過剰に見込む結果、全体工期が過剰に伸びる傾向がある。それを改革するためには、安全余裕(バッファ)を各工種でとる「部分最適化」を図ったプロジェクト管理ではなく、プロジェクト全体で安全余裕を考える「全体最適化」の観点をとるリスク管理の考え方が重要である。

TOCの最新理論である「クリティカル・チェーン」では、プロジェクト管理においてはこのような各作業(工種)に含まれる安全余裕を取り去り、プロジェクト全体の最後にまとめて取るようにすることを奨めている。逆に各工種を定められた工期内に確実に終わらせるように安全余裕を見込む(部分最適化)と、各工種の見積工期に安全余裕があることが皆わかっていることで「学生症候群」(ぎりぎり納期が近づかないと作業をスタートさせない)のように着手を先延ばしするようなメカニズム¹²が働く。

(2) リソース制約の観点

一般にPERT計画では、各作業を担当するヒトや設備(リソースという)に無頓着なまま作成される傾向にあり、リソースの重複がある場合には同時並行作業を描いているPERT図は現実的なものではなくなる。より現実化するためには、プロジェクト管理における「リソース制約」観点の導入は重要である。

この点に関してTOCでは、リソースは一度に一つの作業しか担当できないという条件を考慮した一連のアクティビティこそが本当の「制約条件」としている。

5. 結語

先に、わが国の現場では工期遅れがほとんどないということを書いたが、リスク概念やTOC(制約理論)が教えるスケジューリングの考え方に当てはめると、改善すべき点も多いと思われる。具体的には工程管理が実際のところ全体最適になっているのか否か、事前工程計画はリソース制約を考慮してたてられた実現性の高いものであるのか、また、工期遅れを生じさせないことがコストミニマムの観点からも望ましいやり方であるのか¹³、等々の観点から工事事例を分析し、

生産効率の改善に向けた検討を行っていく必要があると思われる。

謝辞

この報告は(財)建設経済研究所の報告書『建設現場における施工管理および生産工程の効率化に関する調査業務(2):建設工事のリスクマネジメント・報告書』(平成13年3月)の一部をまとめたものである。この調査においては、学識者等による研究会を設けた。研究会の遠藤和義・工学院大学工学部助教授、岩淵常太郎・社団法人日本建設業経営協会中央技術研究所主席研究員、藤本聡・国土交通省国土技術政策総合研究所建設マネジメント技術研究官、財団法人建設物価調査会の松富泰生理事・片倉慎利理事、本田秀一・佐藤総合研究所副所長には、貴重なコメントやご指導をいただいた。記して感謝申し上げる次第である。

注

- 1 建設経済研究所[2000a]参照。これは同研究所が同年に大手・中堅の建設会社100社の建築・土木工事の現場に対して行ったアンケート(回収数340)や一部の業者ヒアリングを行った調査報告を元にした考察の一部である。
- 2 TOC(制約理論:Theory of Constraints):1990年代前半、ゴールドラット博士は、「工場の生産性はボルトネック(能力の一番低い工程・設備)工程の能力以上は絶対に向上しない」という至極当たり前の原理を提唱した。この上で、生産工程と資材調達をネックとなる工程に同期させるように生産すれば、生産性が飛躍的に高まり、在庫、仕掛かりが劇的に減少することを実証した。博士はこれをTOCと名付けて体系化し、さらにTOCをスケジューリング手法から制約条件に改善活動を集中させる改善手法へと発展させている。(加藤他『TOC戦略マネジメント』1999より)
- 3 確率変数を含むシミュレーション・モデルでは、その確率変数に実数を与えることが必要であり、このとき乱数を用いるシミュレーションのこと(土木学会編:土木用語大辞典、技報堂出版)。
- 4 ベータ分布の分かりやすい例として、同書には次のような説明がある。「家から会社まで車で通勤する人ならよく分かるでしょう。車がスムーズに流れている日で、たまたま全部の信号が青だった場合が最短時間で、それ以上早くいける場合はほとんどありません。しかしひとたび事故や工事による渋滞があると、ものすごく時間がかかる場合もあります。だから、分布が右に裾をひくかたちになるわけです。絶対に遅れてはいけな会議になどに車で行く場合、かなり余裕をみなければならないのはこのためです」(加藤他『TOC戦略マネジメント:制約条件の理論実践ガイド』1999、p176)
- 5 ibid.4
- 6 國島・福田編著『公共工事積算学』山海堂1994.11、pp97-99
- 7 最短工期や工程上のクリティカルな作業群を明らかにすることによって工程計画の評価、調整および進捗管理を行おうとするもの。CPMとともに現在もっともよく用いられている(土木用語大辞典、技報堂出版より)。
- 8 個々の工種の変動幅を組み合わせることによって全体の変動幅は減少しているが、これは母平均の推定に対して標本数を増やせば増やすほどその推定誤差が少なくなるという、統計学でいう「大数の法則」に似た現象であると思われる。
- 9 圓川・伊藤著「生産マネジメントの手法」朝倉書店、1996.3、p142による。
- 10 草柳俊二「21世紀型建設産業の理論と実践—国際建設プロジェクトのマネジメント技術」山海堂、2001.2、p109による。
- 11 海外プロジェクトでは工期延長の場合、施主や建築家にEOT(Extention of Time)を出すクレームの習慣があるが、日本では聞かれない。
- 12 その他このようなプロジェクトを遅らせるメカニズムとして、安全余裕を無駄にする仕組み(納期遅れのみが伝播し、早まった分は決して伝播しない)、マルチタスク(あてにされやすい人物は複数のプロジェクトを掛け持ちでやらざるをえなくなる)等が指摘されている。(加藤他『TOC戦略マネジメント:制約条件の理論実践ガイド』1999、p183より)
- 13 工期に間に合わせるための突貫工事は、しばしば、コストを無視して行われている実態があると思われる。

参考文献

- 建設経済研究所[2000a]「建設工事現場における施工管理および生産工程の効率化に関する調査業務・報告書」2000.3。
 ————[2000b]「建設現場における生産効率改善」日本経済と公共投資 No.35、2000.7、Pp.56-70。
 ————[2001a]「建設現場における施工管理および生産工程の効率化に関する調査業務(2):建設工事のリスクマネジメント・報告書」2001.3。
 ————[2001b]「現場生産とリスクマネジメント」日本経済と公共投資 No.37、2001.7、Pp.153-164。
 加藤他[1999]『TOC戦略マネジメント:制約条件の理論実践ガイド』日本能率協会

[2001年10月17日原稿受理 2002年2月18日採用決定]