

3. 災害応急復旧工事を支援する施工プロファイル

(株) キック ○西垣 重臣
(株) キック 才原 勝敏

1. はじめに

本論文では、災害応急復旧工事を支援するための、協働的な、情報可用性の高い施工と施工プロファイルのマネジメントの枠組みについて論述する。ここで、この枠組みを C4IM (Collaboratively, Communicative Construction and Collective Intelligence Management)と呼ぶ。施工プロファイルは、施工に伴って発生する事象の特徴、その特徴のパターンを示す指標などに関するデータ項目の集合であり、施工情報の集約を示す¹⁾。

まず、本研究の問題意識と C4IM の枠組みについて述べる。つぎに、本研究に関連する研究開発活動について報告する。そして、施工プロファイルの提供方法と考察視点について述べる。さらに、施工プロファイルの活用方法として、作業状況実時間遠隔モニタリング、作業速度の現状把握、作業間の生産ラインバランスの把握、施工资源配置の評価、管理状態の把握などについて説明する。最後に、本論文のまとめを示す。

2. 問題意識

災害応急・復旧工事の作業環境は作業に応じて変化し、作業箇所は屋外に分散している。今まで行ってきた、現在行っている、またはこれから行う作業の内容と作業全体の位置づけを理解することは非常に重要である。ここでの主なキーポイントはつぎのようである^{1), 2)}。

- ①目標管理
- ②指揮命令系統の確立
- ③優先順位、目的、戦略、戦術などが明確な作業命令
- ④コントロールの範囲と報告体系の明確化
- ⑤資源の総合管理と適時・的確な資源供給
- ⑥情報処理管理
- ⑦災害対応施設とその配備
- ⑧説明責任

しかし、災害応急・復旧工事の従事者たちは、被害拡大を防ぐための昼夜を問わない迅速な対応に迫られ、情報が錯綜し、混乱状態にしばしば陥る。そのため、彼らが前述したキーポイントを満足する活動を行うことは難しい。ここで直面する主要

な問題は、つぎのようである^{3), 4)}。

(1) トレーサビリティ確保の難しさ

土石、流/倒木、廃棄物などの仮置き場と処分場を確保し、これらの処分状況を追跡し確認することが難しい。

(2) 施工状況の把握と問題追跡調査の難しさ

- 1) 作業土工量を把握し、清算業務への反映させることが難しい。
- 2) 工程進捗状況を把握し、工程を調整することが難しい。
- 3) 情報の多様性と分散により、関係者間の連絡調整と情報共有が難しい。
- 4) 情報の信頼性と新鮮度を確保することが難しい。
- 5) 建設機械の作業能力の把握、並びに生産ラインの構成と建設機械とダンプトラックの配置数量を決定することが難しい。

そこで、施工プロファイルの活用を図り、協働的な、情報可用性の高い施工を実現する仕組みの構築を目指す。そして、上記の問題を少しでも多く解決することで、働き手(管理者、オペレータ、運転手、作業員など)を支援したい。

3. C4IM の枠組み

3.1 働き手行動の3次元考察

本研究において、図1に示すように、働き手の行動を主体特性と空間特性、そして時間的特性の3次元に分類して考察する。

それぞれの特性において注目するカテゴリをつぎに示す。

- ①主体特性：行動経験や知識、認知処理能力、自己調整能力などの処理能力
- ②空間特性：位置情報(重要管理区域、作業箇所、積込位置、荷下ろし位置、走行ルート、現在位置など)
- ③時間的特性：行動情報(デバイス、センサーの情報、事象発生検知データ、積荷運搬情報など)

本研究において、つぎに示す関係を仮定する。

- ① 主体は位置情報に空間的な見越しや先行手がかりを求め、フィードフォワード的行動をとる。

- ② 主体は、センサーの情報、事象生起検知データ、積荷運搬情報などの行動情報から、目的値と現状値の差を認識し、時間的な見越しによるフィードバック的行動をとる。
- ③ 位置情報と行動情報を組み合わせることで施工プロファイルを生成できる。前述したように、施工プロファイルは、施工に伴って発生する事象の特徴、その特徴のパターンを示す指標などに関するデータ項目の集合であり、施工情報の集約を示す。
- ④ 情報処理能力と情報の組み合わせ
主体は、施工プロファイルを活用して課題の検索と意図形成、そして仮想リハーサルを行う。

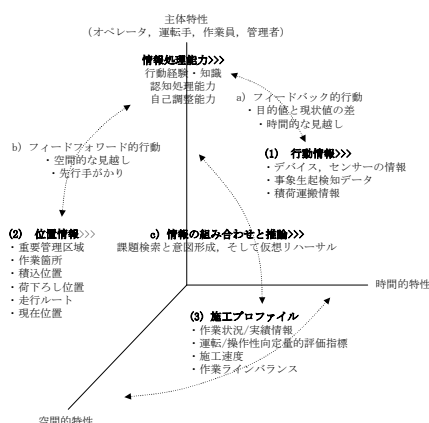


図-1 働き手行動の3次元的分類

作業現場では、天候、地震、土砂崩壊、土石流、津波、想定外の作業変更などの外部攪乱要因の影響を受ける。そのため、フィードフォワード的行動、フィードバック的行動、課題の検索と意図形成、そして仮想リハーサルなどの過程において、つぎのような人的過誤が起きるかもしれない。

- ① 知覚：情報不足、複雑さなどによる見落とし、聞き落とし、聞き間違い
- ② 記憶：混同、忘却（ラプス）
- ③ 思考・判断：ミステイク
- ④ 行動：スリップ、省略、初動対策の遅れ

C4IM は、行動情報と位置情報、そして施工プロファイルなどの提供により、人的過誤発生の低減と初動対策のタイムリーな喚起などを図る。そして、前述した「直面する具体的な問題」を一つでも多く解決することを狙う。

3.2 C4IM が想定する施工プロセスのデータモデル

C4IM が想定する施工プロセスのデータモデルを図2に示す。

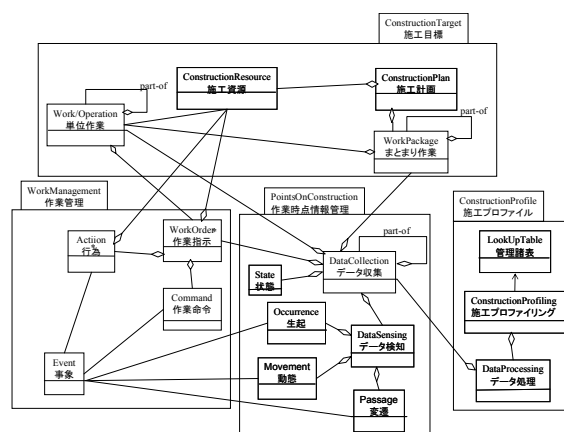


図-2 C4IM が想定する施工プロセスのデータモデル

この施工プロセス・モデルは、施工目標、作業管理、作業時点情報管理 (POC: Points On Construction)、施工プロファイルなどのクラスで構成される。POC とは、

- ① 作業時点で移動体に係る事象生起を検知する、または
- ② 動態計測データを収集し、施工情報管理システムに自動送信する、
- ③ あるいは施工情報管理システムからマスタデータや作業指示データなどを自動受信する仕組みである^{8), 9)}。

この施工プロセスの PDCA サイクル・イメージを図3に示す。

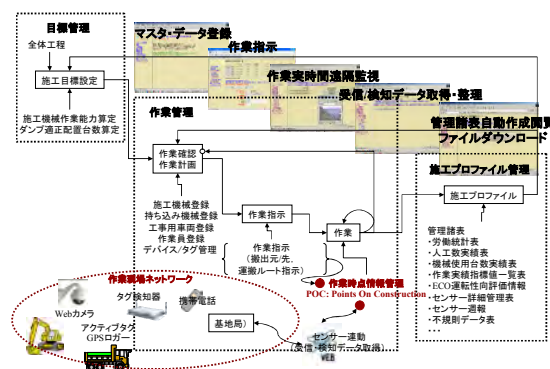


図-3 施工プロセスのPDCAサイクル・イメージ

4. 関連する研究開発

行動情報と位置情報を、可能な限り実時間で提供し、働き手のフィードバック的及びフィードフォワード的行動を支援するために、つぎの研究を行っている。

- (1) バックホウを母機としたフリート・マネジメントに関する研究⁵⁾

災害応急・復旧工事の作業箇所において、移動体はバックホウに接近してくる、またはその周辺

で稼働/作業することが多い。作業箇所におけるフリートの中心はバックホウである。ここで、フリートとは、日々の施工のために協働する建設機械、ダンプトラック、作業員などの移動体の編隊をいう。一方、風雨に晒されること、電源確保が難しいことなどから、作業箇所における情報技術の活用は難しい。そこで、情報機器類の養生と電源確保が容易なバックホウのキャビン室内に作業現場ネットワークの基地局を設置する。そして、バックホウが作業箇所において発生・収集されたデータの収集と一次保存、他の端末機器や施工情報管理システムとのデータ交換などの役割を担う研究を行っている。ここでは、バックホウは、作業箇所においてフリートの母機としての役割を担い、情報の収集と配信の効率化を図る。

(2) ECO 安全運転指導を支援するダンプトラック運行管理システム⁶⁾

ダンプトラックの ECO 運転を励行するために、急発進と急加速の回避、一定速度の走行、点検整備の充実などの定性的な指導が運転手に対して行われる。しかし、運転手の運転性向を定量的に把握して、ECO 安全運転の励行を指導する事例は希薄である。運転性向とは運転の振る舞いであり、運転手の運転態度やスキルを示す。そこで、ダンプトラック運転手の運転性向に関する定量的な指標とその評価方法を提供し、ECO 安全運転指導を支援するための、ダンプトラック運行管理システムの研究を行っている。

(3) バックホウ遠隔操作性向の定量的評価指標に関する研究⁷⁾

バックホウの遠隔操作性向を定量的に表現する評価指標の研究を行っている。ここで、遠隔操作性向とは、遠隔操作によるバックホウの振る舞いと、オペレータの操作態度やスキルを示す。これらの定量的評価指標は、オペレータの遠隔操作技能評価や遠隔操作システムのユーザ・インタフェースの有効性評価に活用できる、と期待される。

5. 施工プロファイルの提供方法

施工プロファイルの提供方法は、つぎの2つに大きく分かれる。

(1) 作業状況情報を実時間で提供する。

利用者は、手元の PC または携帯電話を利用して、施工情報管理システムにアクセスすることで、実時間ベースの作業状況情報を、いつでも、どこからでもモニタリングすることができる。

(2) 作業実績に関する指標を管理表に整理して提供する。

作業実績に関する指標値は、POC により収集されたデータに基づいて、自動生成されるとともに、管理表 (Excel ファイル) として保存される。こ

で想定している指標値を以下に示す。

- ① 作業 (積込/荷下ろし) 箇所内滞留時間
- ② 積込/荷下ろしにおける待機台数
- ③ 管理区画内走行時間
- ④ 往路走行台数
- ⑤ 復路走行台数
- ⑥ 荷積み (往路) 運行時間
- ⑦ 空荷 (復路) 運行時間
- ⑧ 積込/荷下ろし延べ台数
- ⑨ 運搬回数
- ⑩ 積込/荷下ろし間隔 (到着時間間隔)
- ⑪ 運行サイクルタイム
- ⑫ バックホウ稼働時間
- ⑬ バックホウ時間当たり積込量
- ⑭ 積込/荷下ろし量の合計
- ⑮ 積込, 荷下ろし, 運搬などに関するピッチタイム
- ⑯ 積込, 荷下ろし, 運搬などに関する作業速度
- ⑰ 作業経過時間と作業許容残時間

利用者は、手元 PC を利用して施工情報管理システムにアクセスすることで、管理表を閲覧する、または手元 PC にダウンロードすることができる。

施工プロファイルの提供は、トレーサビリティの確保と問題追跡調査能力の向上を図る。そして施工状況の把握を容易にする。

6. 施工プロファイルの考察視点

施工プロファイルの考察視点を図 4 に示す。施工プロファイルを空間、時間、生産性、価値、環境・法律などの軸で分類・整理する。そして、図 5 に示すように、横断的に、または時系列的に考察することで、利用者は前述した諸問題の解決に役立つ不具合事象や問題の原因に関する情報を得る、と期待される。

ここで想定される考察視点をつぎに示す。

考察視点 1: 作業状況を見る。

例えば、移動体 (建設機械、ダンプトラックや生コン車、作業員、建設資材など) の動向をみるとともに、早期アラーム表示有無を確認する。

考察視点 2: 作業速度を見る。

作業細別 (積込, 運搬, 荷下ろしなど) ごとの作業速度ベースラインを設定する。そして、作業速度ベースラインと現実の作業速度を比較し、両者の乖離をみて、現状を把握する。

考察視点 3: 生産ラインバランス

例えば、作業細別 (積込, 運搬, 荷下ろしなど) ごとの作業実績を把握し、これらの作業能力不均衡をみる。そして、施工資源配置の適正性を評価する。

考察視点 4: 施工資源配置状況を見る。

施工資源 (建設機械、ダンプトラック、作業員

など)の配置数量と配置位置を生産性の視点からみる。

考察視点5:管理状態をみる。

例えば、指標値の中にアウトライヤ(異常値)はないか、また、指標値のバラツキが拡大傾向にあるか、それとも縮小傾向にあるかをみる。さらに、各作業の作業速度や作業位置に関して、それぞれの先行後行関係とその干渉性をみる。

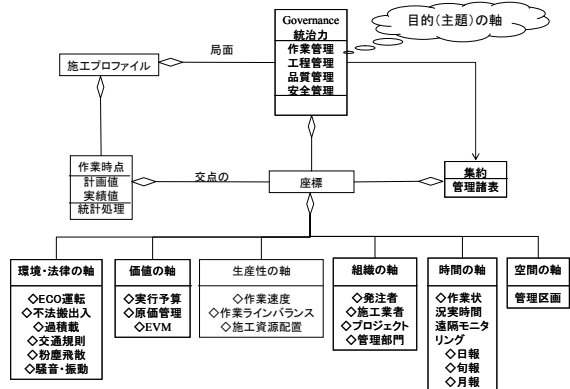


図-4 施工プロファイルの評価軸

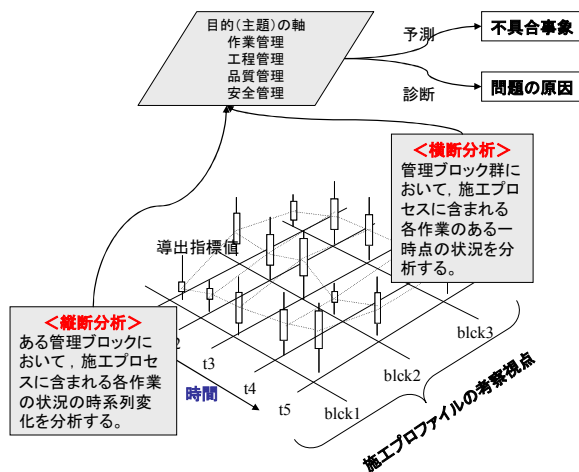


図-5 施工プロファイルの横断的・時系列的考察

7. 施工プロファイルの活用方法

以下に施工プロファイルの活用方法を示す。

7.1 作業状況実時間遠隔モニタリング

作業状況実時間遠隔モニタリングのPC画面例を図6に、携帯電話画面例を図7に、コンクリート打設速度管理PC画面例を図8にそれぞれ示す。

コンクリート打設速度管理例では、各打設エリアの打設所要時間と色別早期警告現示情報を表示する。打設が完了した区画の行を青色表示する。打設残時間が1時間以上あれば無着色、60分を切ると黄色、30分を切ると赤色で表示する。色別早

期警告現示情報は、タイムリーな初動対策のタイムリーを促す。



図-6 作業状況実時間遠隔モニタリングのPC画面例



図-7 作業状況実時間遠隔モニタリングの携帯電話画面例



図-8 作業状況実時間遠隔モニタリングのコンクリート打設速度管理PC画面例

それぞれのモニタリング画面情報は、POCで収集されたフィールドデータに基づいて1分間隔で自動更新され、作業状況情報の信頼性と新鮮度は確保される。

作業状況実時間遠隔モニタリングの目的をつぎに示す。

- ① 初期状態から目標状態に到達するまでの作業遂行状況の定量的評価尺度による表現と作

業進捗度の把握

② 早期アラームによる初動対策のタイムリーな喚起

利用者は、手元のPC また携帯電話を使用して施工情報管理システムにアクセスすることで、作業状況に関する情報を確認できる。そして作業状況の情報を関係者間で共有することで、お互いに連絡調整が容易になる。

7.2 作業速度の現状把握

積込、運搬、荷下ろしなどの作業速度の実績値とベースラインとを比較し、その乖離をみて現状を把握する。作業速度とは作業量を作業時間で除して得られる生産性指標である。

45度線（黒破線）とベースライン（赤破線）、そして作業実績（青破線）の比較イメージを図9に示す。

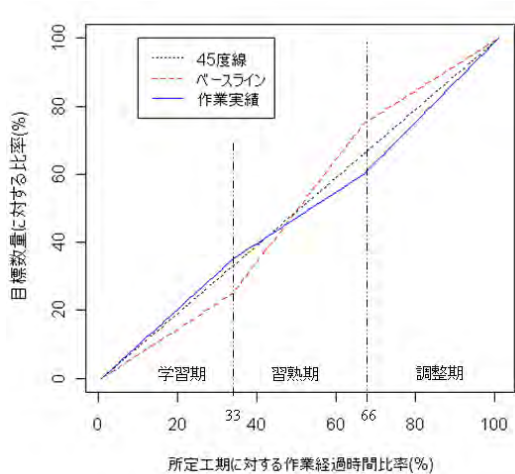


図-9 ベースラインと作業実績の比較イメージ

ここでは、目標数量の25%と75%のポイント、並びに所定工期に対する作業経過時間比率33%と66%のポイントを評価のマイルストーンとしている。作業開始から作業経過時間比率33%までを学習期、33%のポイントから66%のポイントまでを習熟期、66%のポイントから作業終了までを調整期とする。図9では、学習期で目標作業速度以上の実績を示し、習熟期に伸び悩み、調整期に突貫状態に陥った作業の例を示している。

このベースラインを次式で求める。

$$y = \alpha x + (\beta - \alpha)(x - a) + (\gamma - \beta)(x - b) \quad (1)$$

ここで、 $0 \leq x \leq 100$ かつ

$$\alpha = 25/a, \quad \beta = 50/(b-a), \quad \gamma = 25/(100-b),$$

但し、 $x \leq a$ のとき(1)式を

$$y = \alpha x \quad (2)$$

とおく。 $a < x \leq b$ のとき $\beta = \gamma$, このとき(1)式を、

$$y = \alpha x + \beta(x - a) \quad (3)$$

とおく。 $b \leq x$ のとき(1)を適用する。

前述したように、作業速度は、作業箇所、作業細別ごとに自動計算される。そのため、作業速度の現状とベースラインの比較を作業箇所、作業細別ごとに容易に行える。

さらに、所定工期の暦日スケジュールに対して、各作業の作業速度グラフを描くと、各作業間の先行後行関係の同調性や干渉性、並びに作業の残余裕時間などを確認することができる¹⁰⁾。

作業速度現状把握の容易化は、作業土工量の把握、清算業務への反映、工程進捗状況の把握、工程調整などの難しさを低減する。

7.3 作業間の生産ラインバランスの把握

(1) 作業間の生産性ラインバランスの把握

作業生産性指標としてピッチタイムを用いる。ピッチタイムは作業所要時間を作業実績量で除して得られる生産性指標であり、作業速度の逆数である。

目標とするピッチタイムを(4)式より求める。

$$PT = \frac{wrkTime}{wrkVolume} \quad (4)$$

ここで、 PT : ピッチタイム, $wrkTime$: 作業所要時間, $wrkVolume$: 作業実績量である。

ピッチタイムが大きいほど作業速度は遅い。最大ピッチタイムを持つ作業をボトルネック作業と呼ぶ。ライン全体の作業速度はボトルネック作業のピッチタイムに制約される。他の作業はボトルネック作業のピッチタイムとの差に相当するロスが発生している。

生産性ラインバランスの不均衡は、ライン編成効率とバランスロス率をみることで把握できる。

ライン編成効率を次式より求める。

$$LFEfficiency = \frac{totalWrkTime}{nbrWrkcl \times \max PT} \quad (5)$$

ここで、 $LFEfficiency$: ライン編成効率, $totalWrkTime$: 各工程の総作業時間, $nbrWrkcl$: 作業数, $\max PT$: ボトルネック作業のピッチタイムである。

バランスロス率は次式より求まる。

$$balanceLss = \frac{nbrWrkcl \times \max PT - \sum PT}{nbrWrkcl \times \max PT} \quad (6)$$

ここで、 $balanceLss$: バランスロス率, $nbrWrkcl$: 作業数, $\max PT$: ボトルネック作業のピッチタイム, $\sum PT$: 各作業の総ピッチタイムである。

生産ラインバランスに関するこれらの指標値から、不均衡の程度、ボトルネックであるワークセル（作業箇所、建設機械など）などを把握するこ

とで、生産ライン構成の問題点と改善策に関する知見が得られる。

7.4 施工資源（バックホウ、ダンプトラック）の配置評価

平均運行サイクルタイムを平均積込時間で除すと、最大積込量または最大運搬量を得るダンプトラック台数が求まる。

作業（積込）箇所内平均滞留時間の逆数を平均サービス率、平均積込間隔（平均到着時間間隔）の逆数を平均到着率、積込における平均待機台数を平均待ち行列の長さとする。これらの指標値を待ち行列モデルに適用すると、待ち行列にダンプトラックが存在しない定常確率、バックホウの積込能率、バックホウの1時間当たり期待積込量、ダンプトラックk台数のときの1時間当たり期待積込量などの指標値が求まる^{11), 12)}。

これらの指標値から、施工資源（バックホウ、ダンプトラック）の配置問題点とその改善策に関する知見が得られる。

7.5 管理状態の把握

指標値の経時的変化や横断的变化をみることで、アウトライヤ（異常値）の有無、その日次、週間、月間などの変動（周期性）、趨勢定常（トレンド）、自己相関、エルドード性などの作業特質を把握することができる。

8. まとめ

収集されたデータの編集加工と指標値算出は、退屈な、時間を浪費する作業である。C4IMは、指標値算出業務を自動化し、これらの指標値を実時間で提示する。さらに、空間、時間、生産性、価値、環境・法律などの軸で分類・整理した管理諸表を提供する。

施工プロファイルをみることで、作業速度、作業余裕時間、先行後行関係の同調性や干渉性、作業間の生産ラインバランス、施工資源配置の評価、周期性とトレンドなどの作業特質を容易に把握できる。これらの作業特質を作業箇所の現状や施工資源の配置状況と照らし合わせることで、作業の不具合事象の把握やその原因に関する知見が得られる。そして、フィードフォワード的行動、フィードバック的行動、課題の検索と意図形成、そして仮想リハーサルなどの過程における人的過誤発生の低減と初動対策のタイムリーな喚起などを図られる。

結果として、C4IMは、災害応急復旧工事において直面する作業状況と作業速度の把握、情報共有、施工資源配置、情報機器類活用などに関わる難しさを低減する、と期待される。

参考文献

- 1) S. Nishigaki et al: "Study on Framework of Construction Profile for Collaborative and Intelligent Construction," Journal of Applied Computing in Civil Engineering Vol.14, pp. 287-298, 2005.
- 2) 西垣重臣：災害応急・復旧工事を支援するICT施工管理システム，ロボット，No.198, pp. 56-62, 2011.
- 3) FEMA Emergency Management Institute: Course: IS-200 b: Introduction to Incident Command System, <http://training.fema.gov/EMIWeb/IS/is200blst.asp>
- 4) 岐阜社会基盤研究所，（社）岐阜県建設業協会：平成19年度災害時の緊急工事，応急復旧工事における技能承継事業報告書，2008，
<http://www.gifu.crcr.or.jp/kibanken/kenkyu/H19seika/11ginou.pdf>
- 5) 西垣重臣，才原勝敏：バックホウを母機としたフリート・マネジメントに関する研究，平成23年度「建設施工と建設機械シンポジウム」投稿中。
- 6) 才原勝敏，西垣重臣：ECO安全運転指導を支援するダンプトラック運行管理システム，平成23年度「建設施工と建設機械シンポジウム」投稿中。
- 7) 西垣重臣，才原勝敏：バックホウ遠隔操作性向の定量的評価指標に関する研究，平成23年度「建設施工と建設機械シンポジウム」投稿中。
- 8) S. Nishigaki, K. Saibara, F. Matsuda, H. Ogura: "Points On Construction, " 25th ISARC, Vilnius, Lithuania, pp. 796-803, 2008.
- 9) S. Nishigaki, K. Saibara, S. Kitahara, H. Satoh, M. Hasegawa, H. Ogura, F. Matsuda: "LHD Remote Monitoring and Management based on Delay/Disruption Tolerant Network, " 27th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 326-335, ISARC 2010.
- 10) M. Soini, I. Leskela, O. Seppanen, "Implementation of Line-of-Balance based Scheduling and Project Control System in a Large Construction Company," http://www.iglc2004.dk/_root/media/13060_043-soini-leskel-a-seppanen-final.pdf
- 11) A. H-S Ang, W. H. Tang: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 2, Decision, Risk and Reliability, John Wiley & Sons, Inc., 1984
- 12) D. Gross, C. M. Harris: Fundamentals of Queueing Theory, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1985.