

施工計画・管理と現場計測システムの評価方法 に関する基礎的研究

A Study on Construction Control and Evaluation Method
for Construction Site Observational System

苦 瀬 博 仁 *

By Hirohito KUSE

In recent years, construction site observational system (CSOS) supported by monitoring and data processing system has become vital factor for construction control.

The purpose of CSOS is to ensure the safety and quality control and further to make clear the optimum construction method by promptly feeding back the results of measurement to the design.

But, there are few evaluation methods for CSOS because it is difficult to analyze the effect of the system.

In this paper, one of the useful evaluation methods based on Decision Analysis is proposed.

1、はじめに

土木工事が複雑でかつ高度になっている今日、現場における計測システムは施工管理をおこなう上で不可欠となってきた。

従来、現場計測システムは安全管理に主眼がおかれてきたが、現場計測システム自体が複雑で高価となり、かつ得られるデータは多岐にわたるようになって、安全管理以外への計測データの活用と過剰ないし不十分な計測を排除することが要求されるようになってきている。そのため、計測データの活用方法や現場計測システムの評価方法が必要となっているが、現場計測システム自体にも多くの課題があり、これらに関する検討は現在のところ不十分である。

そこで本論文では、現場計測システムの現状を整理し、施工計画・管理との関連を明らかにしながら、

計測データ活用方法と現場計測システムの評価方法について考察することにする。

2、施工計画・管理と現場計測システム

2、1 工事の流れと施工計画・管理

土木工事の計画から完成までを、事業化決定・発注・着工・竣工の4時点で区分できると、構想計画・設計・計画・施工・運営管理の5段階に分けることができる。(図-1、参照)¹⁾

このうちの施工段階では施工管理がおこなわれているが、これを土木構造物の特徴を含めて概括すれば、次のようになる。

すなわち土木構造物の生産管理(施工管理)は、自然現象や自然生成物などに付随する危険の回避(安全管理)や、単品生産物それぞれの品質の確保(品質管理)、自然現象を考慮した工期の確保と生産地における資機材の確保(工程管理)、生産地点での経営(原価管理)などである。

* 正会員 工博 東京商船大学助教授
(〒135 江東区越中島 2-1-6)

そして施工計画とは、施工に先だって施工管理の方法を定めるものであるが（着工前の施工計画）、この一方施工後においても施工前に予想しえなかった現象に対応するべく施工計画を立て直すことが多い（施工中の施工計画）。

2、2 施工管理と現場計測システム

現場計測システムとは、構造物の挙動と構造物の周辺の状態（例、地盤）の挙動を計測することで施工管理に役立ようとするものであり、設計や施工計画（着工前）段階で不明確だった事実が明らかになったことを、速やかに設計ないし施工計画に反映させ、経済的、技術的不合理性を避けようとする点で重要な意味を持っている。（図一2、参照）

しかしながら、現場計測システムは施工時の安全や構造物の品質確保の目的以外には、あまり使われなかったものと判断できる。これは、工事担当者が長年にわたる経験を基礎に施工計画を立案し、施工管理を進めてきたことと、工事発注時に工法および仮設工法が指定されることが多いため、安全に支障をきたす場合においてのみ設計変更がなされてきたことによる。

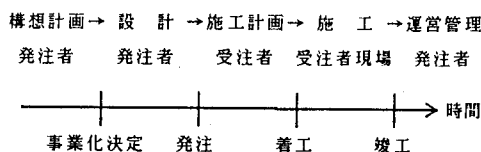
ところが、近年の施工技術の発達と環境問題などにより、複雑かつ高度な施工管理技術が要求されるようになり、これによって現場計測システムの本来の役割である設計・施工計画への反映が、重要視されてきている。

3、現場計測システムの課題

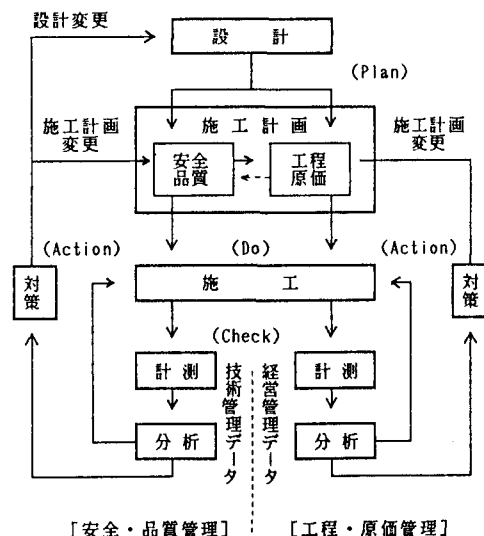
3、1 計測データの施工計画・管理への利用方法の確立

現場計測システムの実態調査を見ると、計測の目的には安全管理（44.9%）とともに、品質・工程・原価管理（33.2%）も多いが、計測の効果は当該工事（66.7%）が第一位であり、同時に他の工事（13.4%）やノウハウの取得（21.0%）は少ない。これは、計測データを安全管理以外の施工管理や、他の工事へ利用するなど、計測データの活用が図られている面もあるが、現状では安全管理に付随したものにすぎないことを示している。^{2) 3)}

本来計測データは、多目的に効果的に用いるべきものである。このためには、施工計画（着工前）段



図一1 土木工事の流れと段階区分



図一2 施工管理と計測管理

階において、計測データの施工計画（施工中）・施工管理への利用や設計への利用についての検討が不可欠であるが、その方法についての論議は少ない。

よって、計測データの利用方法を考察する必要がある。

3、2 現場計測システムの評価方法の確立

上記と同じ調査において、計測データの精度については、充分（86.0%）としているものの、計測器の故障率は高く（計測点数でみて3.6%、最大はトンネル工事の9.8%）、計測の頻度（何時間ごとに計測するか）は同じ工種や計測対象においても一様な傾向はない。また工事費に占める計測費用の割合は、工種にかかわらず約2.0%（工事内容によって1.0%～8.0%に分布している）であり、一般に計測はコストがかかるものと受け止められている。⁴⁾

類似した条件下での類似した工事には、同じ様な計測方法や計測頻度が適用されるべきであり、また計測コストについては、これを高いと見るか否かは計測によって得られる効果と比較して考えられるべきものであるが、このような検討はあまりなされない。

これは、最適なシステムのあり方や現場計測システムの評価方法が確立していないことが原因と考えられ、これについての検討が必要である。

4. 計測データの施工計画・管理への利用方法

4.1 現場計測システムのデータの特徴

現場計測システムとは、前述したように構造物の挙動を計測することで施工管理に役立ようとするものである。したがって、図-3のように圧力やひずみをセンサーで検出し、伝送・収録・処理をへて応力、変位などに変換し、これを管理値・設計値・予測値と対比することで施工管理をおこなっている。

すなわち現場計測システムで得られるデータは、技術管理用のデータ（例、応力、変位、等）である。

このように取り扱うデータから、原価、工程、品質、安全の4つの管理は、①経営管理用のデータ（例、資材価格、施工日数）を扱う経営管理（原価、工程）と、②技術管理用のデータ（例、応力、変位）を扱う技術管理（品質、安全）に区分できる。

よって、計測データの施工計画・管理の利用については、経営管理（工程・原価管理）と技術管理（安全・品質管理）の二つについて考えていく必要がある。

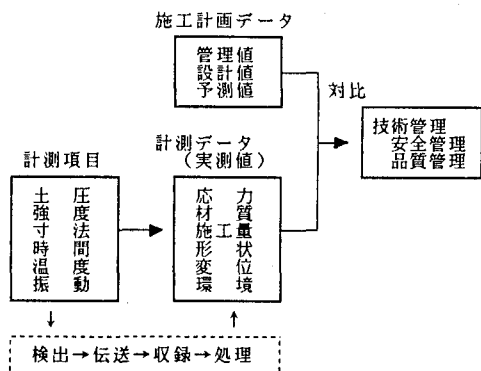


図-3 現場計測システムの構成

4.2 計測データと経営管理（工程・原価管理）

現場計測システムから得られるデータは、技術管理用のデータであるから、直接的に経営（工程・原価）管理に影響を与えることはない。影響を与えるのは、安全管理や品質管理上の対策として施工計画や設計変更がおこなわれ、これにより工程計画や原価計画の変更を必要とする場合である。

この一方、経営管理による施工計画変更が技術管理に影響を与えることは、技術管理上の対策によって工程計画が変更され、この変更によって更に別の技術管理上の対策が必要となるような場合を除いて、極めて稀である。

また、経営管理における出来形の計測（ないし測量）のように、技術管理と同じ項目（例、寸法）を計測することも多いが、計測精度、計測頻度、計測点数などの面で大きな違いがあり、経営管理用のデータと技術管理用のデータを共通して計測することは、極めて困難である。

よって、計測データによる経営管理への影響は、施工計画変更や設計変更の場合にのみ考慮すれば良い。

4.3 技術管理に対する計測データの利用方法

計測データの技術管理への利用は、計測している工事（以下、当該工事とする）に利用する場合と、類似した他の工事（以下、他工事とする）に利用する場合がある。

（1） 当該工事への利用

当該工事への利用は、着工前の施工計画段階における種々の不確定な問題がある場合、もしくは施工中に問題が生じた場合、施工中の計測データを分析しながら、施工のみならず設計までも最適化を図ろうとするもので、いわゆる情報化施工である。

計測データを施工計画に反映させることは一般的におこなわれており、むしろ問題は、計測データを設計に如何にフィードバックさせるか、である。

これについては、得られた計測結果に合致するように設計パラメーターを逆解析して以後の設計に利用する方法と、確率論的立場から設計パラメーターを再推定する方法があげられているが、いずれも土質工学や地盤工学等の成果を応用することになる。⁵⁾

(2) 他工事への利用

他工事への利用は、過去における類似した条件下での工事の計測例を参考にしようとするものである。

(図-4、参照)

このためには、第一に計測データの構成と分類の明示が必要である。一例として原価管理のデータが、要素別、工種別の違いはあったとしてもある程度体系だてられているように、計測データについても体系だてて必要がある。

第二に、計測データの収集が必要である。

第三に、工事施工条件の分類とランク付け、およびこれを用いた統計的な分析が必要である。これは、原価管理における歩掛りの問題と似ている。つまり一つの工事における実績歩掛りは、その工事の最終結果を予測するには非常に有効であるが、他の工事の施工計画に利用するには、類似した数多くの工事の実績歩掛りと合わせて統計的な分析をおこない「標準歩掛り」としなければならない。

これと同じく、計測データから当該工事における予測値を導くことは良くおこなわれているが、他の工事への利用にあたっては、多くの類似した計測例の統計的な分析が必要であろう。

このような分析があって、初めて他の工事へのデータの活用が可能となる。

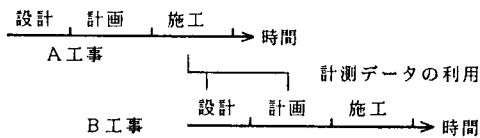


図-4 計測データの他工事への利用

5、現場計測システムの評価方法

5、1 評価方法の具備すべき条件

現場計測システムは、施工中の計測データを分析しながら、施工のみならず設計までも最適化を図ろうとするものであるから、①計測データにもとづいて挙動の予測、原因の分析が可能でこと、さらにこれにもとづく対策として、設計および計画の変更が可能であること、②広い意味でコストダウンとなること、の二点を満足していなければならない。

よって、現場計測システムの評価方法も、この二点を備えたものでなければならない。⁶⁾

5、2 評価のための仮定と定式化

いま、ある現場で現場計測システムを導入する場合としない場合を考え、いずれの場合も設計変更が必要な場合と必要でない場合があるとする。これにより、図-5のように4つのケースが想定できる。

そして単純化のために、以下の仮定をおく。

【仮定1】 現場における費用の増加分(DC)は、現場計測システム導入による費用(CM)、設計変更によって生じる対策工事の費用(CC)、設計変更にともない対策工事を必要とする確率(pxy)で表されると仮定する。

【仮定2】 設計変更によって生じる対策工事の費用(CC)は、現場計測システムの有無にかかわらず等しいと仮定する。

【仮定3】 設計変更にともない対策工事を必要とする確率(pxy)は、現場計測システムの有無によって異なると仮定する。

というのは、施工中の構造物にある現象が生じたとき、現場計測システムによって構造物の挙動のメカニズムを把握している場合は、システムを導入せずにメカニズムを把握できない場合に比べて、対策工事をおこなう確率(pxy)が小さくなる(後出の $p_{mc} \leq p_{oc}$)と考えられるからである。

たとえば、ある構造物にある変位が生じたとき、現場計測システムを導入している場合は、変位の予測も可能なため、対策工事をおこなうケースは、現場計測システムを導入していない場合に比べて少ないであろう。この両者の違いが、現場計測システムの効果ということになる。これを確率で表現したものが仮定3である。

以上の仮定1～3より次式を得ることができる。

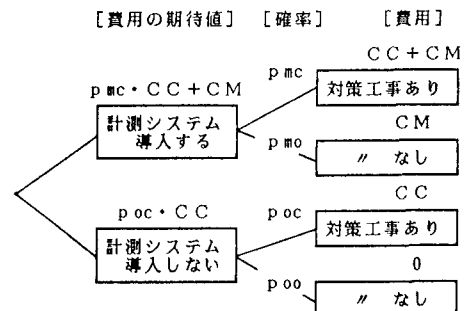


図-5 現場計測システム導入の意志決定

$$DC = p_{xy} (CC + CM) \quad (1)$$

ここで、DC：現場における費用の増加分。

CM：現場計測システムの費用

CC：設計変更によって生じる対策工事の費用。

p_{xy} ：対策工事を必要とする確率。

このとき、添字xはm,oにより計測実施の有無を表し、添字yはc,oにより対策工事の有無を表す。

また $p_{mc} + p_{mo} = 1.0$ 、 $p_{oc} + p_{oo} = 1.0$ 、 $p_{mc} \leq p_{oc}$ 、である。

これにより、4つのケースでの費用増はそれぞれ

$$DC = p_{mc} (CC + CM) \quad (2)$$

$$DC = p_{mo} \cdot CM \quad (3)$$

$$DC = p_{oc} \cdot CC \quad (4)$$

$$DC = 0 \quad (5)$$

となり、システムを導入する場合としない場合の費用増の期待値は、(2)+(3)式、(4)+(5)式から、

$$DC_m = p_{mc} \cdot CC + CM \quad (6)$$

$$DC_o = p_{oc} \cdot CC \quad (7)$$

ここで、 DC_m ：現場計測システムを導入する場合の、費用増の期待値。

DC_o ：現場計測システムを導入しない場合の、費用増の期待値。

となる。これにより DC_m と DC_o を比較し、費用増の小さいものを選択すれば良いことになる。よって、選択の分岐点は、(6)式と(7)式を等しいとして、

$$CM = (p_{oc} - p_{mc}) \cdot CC \quad (8)$$

$$\therefore CC = \frac{CM}{(p_{oc} - p_{mc})} \quad (9)$$

となる。すなわち、図-6における二直線 (DC_m と DC_o) の交点を分岐点とし、現場計測システムを導入するか否かを、決定することができる。

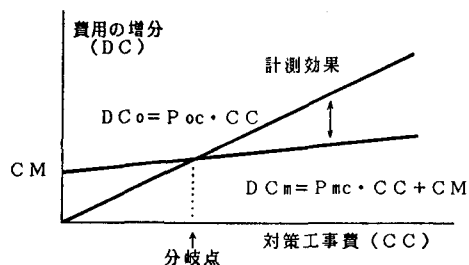


図-6 現場計測システムの効果と現場費用の増加

5、3 現場計測システムの評価方法

この方法を実際に適用する場合は、(9)式を変形し、次式を用いばよい。

$$\therefore \frac{CM}{CC} = (p_{oc} - p_{mc}) \quad (10)$$

すなわち、左辺において現場計測システムの費用 (CM) と対策工事の費用 (CC) の比をとり、右辺の確率の差 ($p_{oc} - p_{mc}$) と比較する。ここで、「 $(CM/CC) < (p_{oc} - p_{mc})$ のときは、現場計測システムを導入する。また、 $(CM/CC) > (p_{oc} - p_{mc})$ のときは、現場計測システムを導入しない。」と意志決定することになる。

たとえば、 $p_{oc} = 1.0$ (システムを導入しない場合は必ず対策工事を必要とする)、 $p_{mc} = 0.5$ と想定できるとすると、(10)式は、

$$(CM/CC) = 0.5 \quad (11)$$

となり、現場計測システムの費用 (CM) が、対策工事費 (CC) の半分以下であれば、現場計測システムを導入すべきとなる。また $p_{oc} = 0.7$ で $p_{mc} = 0.4$ のときは、現場計測システムの費用 (CM) が対策工事費 (CC) の3割以下のとき導入となる。

5、4 評価方法の拡張と一般化

評価方法の一般化のために、次の仮定を追加する。

【仮定4】(仮定2の拡張) 工事の内容によっては、対策工事費 (CC) が、現場計測システムの有無によって異なる場合がある。つまり現場計測システムが導入されていない場合は、より安全率が高く費用も高い対策工事をおこなうことがある。

この場合、添字m と oを用いて、対策工事費をそれぞれ CC_m と CC_o とし、両者の費用の違いを比で示しえるとして、次式のように仮定する。

$$CC_m = a \cdot CC_o \quad (0 \leq a \leq 1.0) \quad (12)$$

【仮定5】 現場計測システムの導入の有無にかかわらず、着工前に対策工事 (費用 CI) をおこなうことがある。この場合現場計測システムの導入が決定されていなければ、導入される場合 (費用 CI_m) に比べて、より安全率が高く費用も高い着工前の対策工事 (CI_o) をおこなうことが考えられる。この両者の費用の違いも、次式のように仮定する。

$$CI_m = b \cdot CI_o \quad (0 \leq b \leq 1.0) \quad (13)$$

ここで、 CI ：着工前の対策工事費

この仮定4と5により、(6)式と(7)式は、

$$d_{cm} = C I_m + p_{mc} \cdot C C_m + C M \quad (14)$$

$$d_{co} = C I_o + p_{oc} \cdot C C_o \quad (15)$$

となり、両式を等しいとおいて、(12)式と(13)式を用いて変形すると、

$$b \cdot C I_o + a \cdot p_{mc} \cdot C C_o + C M \\ = C I_o + p_{oc} \cdot C C_o$$

$$\therefore C M = (p_{oc} - a \cdot p_{mc}) \cdot C C_o \\ + (1.0 - b) \cdot C I_o \quad (16)$$

が得られる。この式が一般式といえるものである。

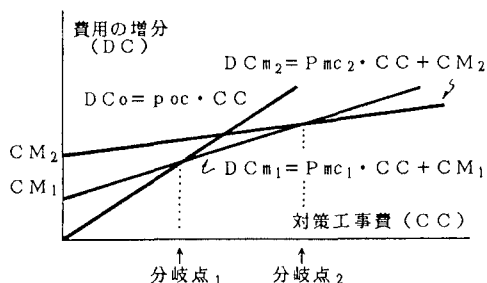
この式で、 $C M < (\text{右辺})$ のときにおいて、現場計測システムを導入すればよい。

なお、 $a = 1.0$ (つまり、(13)式で $C C_m = C C_o$) で、かつ $b = 1.0$ (つまり、(14)式で $C I_m = C I_o$) のとき、(16)式は (8)式と同じとなる。

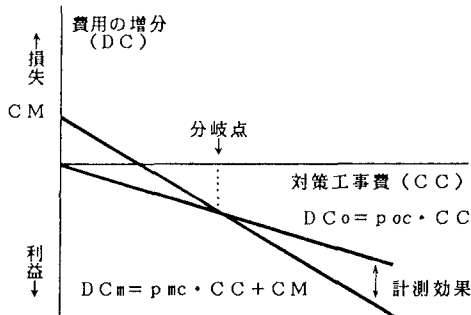
5. 5 評価方法についての二・三の追加

(1) 複数の現場計測システムの評価について

現場計測システム導入を検討する際に、複数の代替案が比較される場合がある。この場合は、代替案ごとにシステムの費用 (CM) と設計変更の確率 (p_{mc}) を設定し、代替案ごとに (6)式を算出することで、同様に評価できる。(図一7、参照)



図一7 現場計測システムの代替案のある場合



図一8 現場計測システムの効果と現場費用の減少

(2) 設計変更により工費の減少する場合

現場計測システムの導入にともなう設計変更により工費の減少が予想される場合は、 $C C$ (設計変更によって生じる対策工事の費用=損失) を、工費の減少分 (負=利益) とすればよい。これにより、先と同じく図一8のように分岐点が得られる。

6. おわりに

以上のように本論文では、現場計測システムについて、次の二つのことが提案できた。

第一は、現場計測システムによって得られる計測データ活用のために、計測データの構成と分類・計測データの収集・施工条件の分類にもとづく統計的な分析という手順、である。第二は、現場計測システムの導入の意志決定に関する評価方法、である。

このいずれも現場計測システムの発展には必要不可欠の課題であるが、提案した内容は基礎的な範囲にとどまっている。

しかしながら、現場計測システムの導入に関する評価方法は、実用に供しえるものと考えている。

なお本論文をまとめるにあたって、現場計測システムのあり方やその評価方法と定式化に関する数多くの議論を通じて、有益な助言と数多くの示唆をいただいた石原哲哉氏 (日本国土開発技術研究所) に、心より感謝いたします。

また日頃の研究活動を通じて多くの示唆をいただいている、土木学会建設マネジメント委員会の現場計測システム小委員会、および同委員会の現状調査ワーキンググループの各位に、謝意を表します。

- 参考文献 1) 春名攻 「土木工事のマネジメントシステムの開発研究活動の考え方」 土木工事のマネジメント問題に関する研究討論会講演資料集 pp 1~8 昭和58年11月 土木学会、 2) 苦瀬博仁 「実態調査にもとづく現場計測の現状と課題」 第3回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集 pp19~26 1985年11月 土木学会、 3) 現場計測システム小委員会 「現場計測Ⅰ：現場計測システムに関するアンケート調査報告書」 昭和61年 4月 土木学会、 4) 結城、苦瀬、猪狩、久保、落合、伊藤 「現場計測の現状と課題」、第4回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集 pp129~138 1987年 1月 土木学会、 5) 松尾 稔、川村 國夫 「情報化設計・施工システムの基本的考え方と分析」 土と基礎 30-7 pp11~16 1982年 7月、 6) 苦瀬、指田、石原 「施工計画への利用を前提とした現場計測システムの課題」 建設とマネジメント V pp48~49 昭和62年 6月 土木学会