

現場計測システム導入のための評価方法

An Evaluation Method for an Introduction
of a Construction Site Observational System

苦 瀬 博 仁 （東京商船大学）

by Hirohito KUSE

土木工事における現場計測システムは、構造物とその周辺の状態を計測することで、工事着工前には把握できない事実を明らかにし、これを設計や施工計画に反映させることで、技術的・経済的な不合理性を避けるものである。そのため、工事の内容が複雑になるにつれて現場計測システムの重要性も増し、品質管理や安全管理に不可欠のものとなってきている。しかしながら、現場計測システムを導入すべきか否かについては、合理的に判断する方法がほとんどないため、工事担当者の経験に委ねられていた。

そこで本論文では、施工計画を立てる際に目安となるような現場計測システムの評価方法の確立を目的とし、計算例をまじえて考察をおこなっている。

この結果、現場計測システム導入のための評価方法として、①工事担当者の意志決定の過程をトリー構造で表現し、②デシジョンアナリシス（意志決定技法）を用い、③現場で生じる費用の増加を、現場計測システムの費用、および対策工事を必要とする確率とその費用で表現しえるとして、④現場費用が最小となるような意志決定方法を提案している。

ここで示した方法は、実際の土木工事の複雑な諸要因のすべてを含むものではないが、実用に供しえるものである。

〔キーワード：施工計画、現場計測システム、デシジョンアナリシス〕

1、はじめに

土木工事を安全にかつ高品質におこなうために、現場計測システムは施工管理の重要な要素のひとつである。

この現場計測システムの内容は、工事の着手前の施工計画によって定められるものであるが、現場計測システム自体が複雑で高価となり、加えて工事が複雑になってきているため、計測費用が工事費の約2.0%（工事内容によって1.0%～8.0%に分布している）を占めるようになってきている。このため、現場計測システムを導入するか否かの意志決定は、施工計画担当者の頭を悩ませる問題である。^{1) 2)}

一般に現場計測システムの導入は、工事担当者の

長年にわたる経験にもとづき決定されているが、これは現場計測システムの導入について合理的に評価・判断できる方法のなかったことが一因としてあげられる。

そこで本論文では、現場計測システムの目的と効果について考察するとともに、施工計画を立てる際に目安となるような、現場計測システム導入のための評価方法について考察することにする。^{3) 4)}

2、現場計測システムの評価方法の必要性

（1） 現場計測システムの特徴

現場計測システムは、構造物の挙動と構造物周辺の状態（例、地盤など）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。（図一1、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、施工中の設計変更は主に仮設構造物に多く、それも安全管理に支障がある場合においてのみ設計変更がなされてきて、それ以外については設計変更があまりなされなかったことによる。⁵⁾

そのため現場計測システム導入の意志決定は、「現場計測システムの導入が省力化につながるか否か」や「安全管理上必要か否か」などにもとづくことが多かった。

ところが、近年の施工技術の発達や環境問題などによって、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。

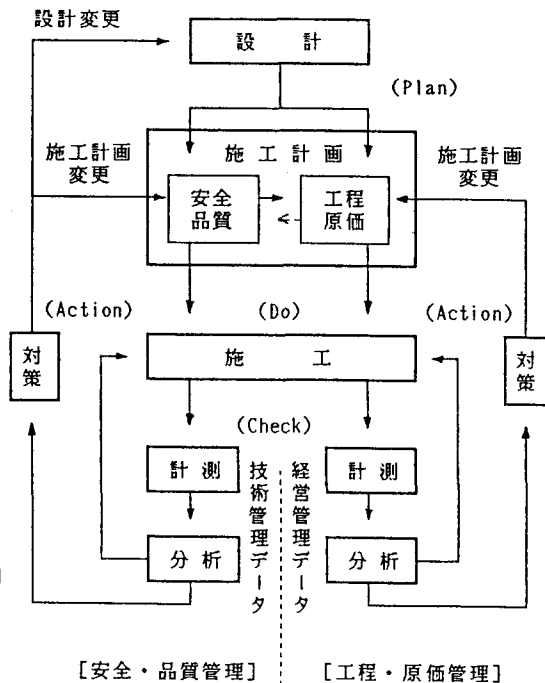
それゆえ現場計測システムの導入に際して、設計変更などの施工計画に与える影響を考慮した合理的な意志決定をおこなうための評価方法が、必要とされている。⁶⁾

（2） 評価方法の具備すべき条件

上記のことからも明らかなように、現場計測システムは、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あり、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。

そのため現場計測システムの評価方法は、システムの導入にかかる費用と設計変更にもとまう工事費慮し、結果として現場で生じる費用の増加を最小にするようなものでなければならない。

ここでは、これらの条件を含んだ評価方法を以下に示す手順で考えていくことにする。



図一1 施工管理と現場計測システム

3、現場計測システムの評価方法

（1） 評価のための仮定と定式化

a) 現場計測システム導入の意志決定

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をとまう対策工事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、次のように4つの状態を想定することができる。（図一2、参照）

すなわち、

- ① 現場計測システムを導入し、対策工事を必要とする場合。
- ② 現場計測システムを導入し、対策工事を必要としない場合。
- ③ 現場計測システムを導入せず、対策工事を必要とする場合。
- ④ 現場計測システムを導入せず、対策工事を必要としない場合。

の4つである。⁷⁾

b) 定式化のための仮定

【仮定1】 現場における費用の増加分（DC）は、現場計測システムの導入による費用の増加分（CM）、設計変更にともなう対策工事の費用（CC）、設計変更により対策工事を必要とする確率（ p_{xy} ）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、現場計測システム導入の有無にかかわらず等しいと仮定する。

【仮定3】 設計変更にともなう対策工事を必要とする確率（ p_{xy} ）は、現場計測システムの導入の有無によって異なると仮定する。

たとえば、施工中の構造物にある変化が生じたとき、現場計測システムを導入している場合は、構造物の挙動のメカニズムを把握でき変位の予測も可能であるが、現場計測システムを導入していない場合は、挙動のメカニズムの把握や変位の予測もしにくい。これにより、まったく同じ変化が生じたとしても、対策工事を実施するか否かは現場計測システムの有無によって異なるであろう。

この違いを確率で表現したものが、仮定3である。

c) 定式化

以上の仮定1～3より、次式を得ることができる。

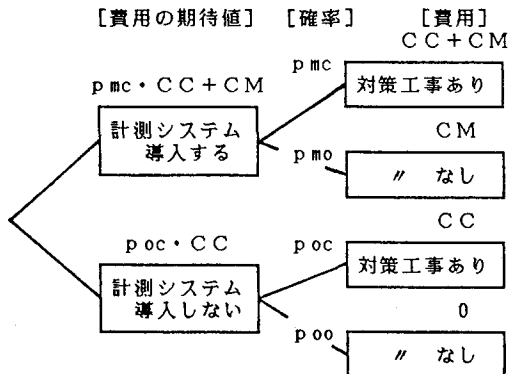
$$DC = p_{xy} (CC + CM) \quad (1)$$

ここで、DC：現場における費用の増加分

CM：現場計測システム導入による費用

CC：設計変更による対策工事の費用

p_{xy} ：対策工事を必要とする確率



図一2 現場計測システム導入の意志決定

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とする。たとえば p_{oc} は、現場計測システムを導入せず対策工事を必要とする場合の確率を示す。よってここで、 $p_{mc} + p_{mo} = 1.0$ 、 $p_{oc} + p_{oo} = 1.0$ 、となる。

また、対策工事を必要とする確率（ p_{xy} ）は、現場計測システムを導入した場合（ p_{mc} ）の方が、導入しない場合（ p_{oc} ）よりも小さいと考えることができる。すなわち、 $p_{mc} \leq p_{oc}$ である。

もしも、両者が等しいときは、現場計測システムの効果はないと判断できる。

これにより、4つの状態での費用増はそれぞれ

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

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

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

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

となり、計測システムを導入する場合の期待値は、(2)+(3)式なので、 $p_{mc} + p_{mo} = 1.0$ の条件から、

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

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

ここで、 DC_m ：計測システムを導入する場合の、費用の期待値

となる。

また導入しない場合の期待値は、(4)+(5)式より

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

ここで、 DC_o ：計測システムを導入しない場合の、費用の期待値

となる。

d) 評価式と評価方法

評価にあたっては、費用の期待値 DC_m と DC_o を比較し、値の小さいものを選択すれば良い。

ここで、選択の分岐点は(6)式と(7)式を等しいと

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

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

となる。

すなわち、図一3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場合と、導入せずに対策工事の実施する場合のいずれかを、決定することができる。

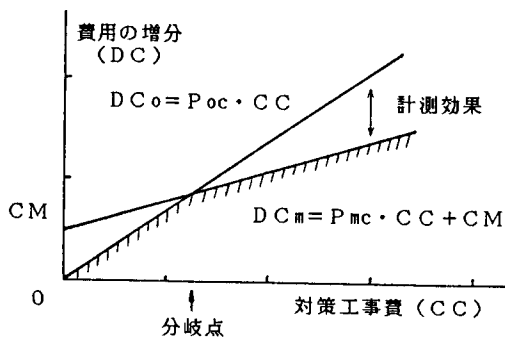


図-3 現場計測システム導入の評価方法
(表-1、参照)

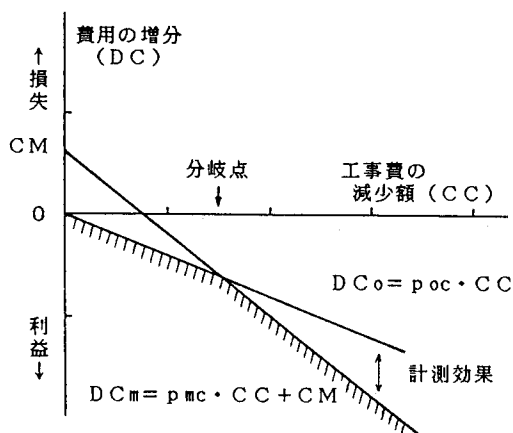


図-4 工事費が減少する場合の評価方法
(表-2、参照)

表-1 現場計測システム導入の評価方法

(単位：万円)

ケース	計測システム導入に る費用増 (CM)	対策工事の必要確率		対策工事費 (CC)	評価式 $CM = (p-p)CC$ 8,10,11式 参照	対策工事費に よる分岐点 $CC = CM / (p-p)$ 9式 参照	意志決定
		計測なし (poc)	計測あり (pmc)				
NO. 1	400	1.0	0.5	1000	$400 < 500$	800	現場計測システムを 導入する
No. 2	500	0.7	0.3	1200	$500 > 480$	1250	現場計測システムを 導入しない

表-2 工事費が減少する場合の現場計測システム導入の評価方法

(単位：万円)

ケース	計測システム導入に る費用増 (CM)	工事費削減の確率		工事費の 減少額 (CC)	評価式 $CM = (p-p)CC$ 8,10,11式 参照	対策工事費に よる分岐点 $CC = CM / (p-p)$ 9式 参照	意志決定
		計測なし (poc)	計測あり (pmc)				
NO. 3	300	0.5	1.0	-500	$300 > 250$	-600	現場計測システムを 導入しない
No. 4	600	0.4	0.8	-1800	$600 < 720$	-1500	現場計測システムを 導入する

(2) 現場計測システム導入の評価方法

a) 評価方法

この方法を実際に適用する場合は、(8)式において、現場計測システム導入にかかる費用増(CM)と、確率の差($p_{oc} - p_{mc}$)と対策工事費(CC)の積(対策工事費の期待値)を比較し、費用の少ない方を選択する。(図-3、表-1、参照)

すなわち、

$$CM < (p_{oc} - p_{mc}) \cdot CC \quad (10)$$

のとき、現場計測システムを導入し、

$$CM > (p_{oc} - p_{mc}) \cdot CC \quad (11)$$

のとき、現場計測システムを導入しない、と意志決定する。

b) 設計変更により工事費が減少する場合

上記の例と異なり、現場計測システムの導入により過剰な設計と判断できる場合は、設計変更により工事費の減少が予想される場合がある。

このときは設計変更によって生じる対策工事の費用(CC)を、工費の減少分(負)と捉えればよい。また、このときの設計変更をおこなう確率は、 $p_{mc} \geq p_{oc}$ と考えられるので、 $(p_{oc} - p_{mc})$ も負になる。(図-4、表-2参照)

これにより、先とまったく同じに(10)(11)式を用いて、意志決定をすることができる。

c) 評価方法の特徴と範囲

この評価方法は、(8)式からも解るようにCMとCCと p_{oc} と p_{mc} より構成される。

このときCMは、現場計測システム導入にかかわる費用であるが、システム導入による人件費の減少などによる省力化の効果も含めたものとして考えることができる。つぎにCCは対策工事による費用増を示すが、設計変更により工事費が減少する場合は、工費増を示すCCを負とすれば良い。

また確率 p_{oc} と p_{mc} は、それぞれ0.0~1.0の値をとるが、設計変更により工事費が減少する場合も含めて考えると、 $(p_{oc} - p_{mc})$ は-1.0~1.0の値をとる。

この結果、(6)式と(7)式は、図-5のような範囲をとることになる。

なお従来、現場計測システムを導入する場合は、

現場計測システムそのものによる費用の増加(例、システムの機器やプログラムの費用)と導入による経費(例、人件費)の減少を比較する場合があったが、これは設計変更の確率がそれぞれ等しいとした場合に相当する。

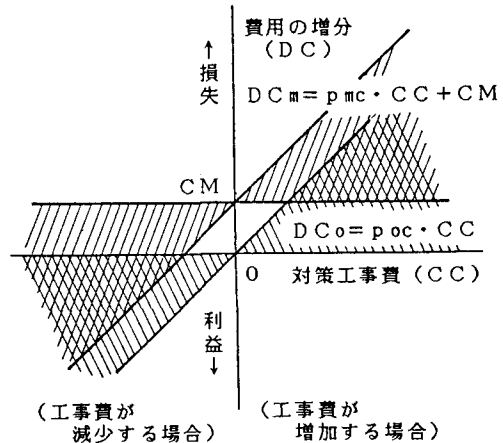


図-5 評価方法の特徴と評価式の範囲

4、評価方法の拡張と一般化

(1) 複数の代替案による一般化

いままで、現場計測システムの導入の有無について考慮してきたが、施工計画段階において現場計測システム導入を検討する際は、複数の代替案が作られ比較される場合がある。たとえば、計測の精度をより高めることで費用(CM)は上昇するが、設計変更の確率(p_{mc})は小さくなるような代替案との比較である。

そこで代替案のうち仮に第2案を計測による費用増がより多い案として、第1案と第2案をそれぞれ添字1と2を用いると、(6)式は次の二式となる。

$$DC_1 = p_1 \cdot CC + CM_1 \quad (12)$$

$$DC_2 = p_2 \cdot CC + CM_2 \quad (13)$$

これを等しいとおけば、(8)、(9)式は、

$$\therefore (CM_2 - CM_1) = (p_1 - p_2) \cdot CC \quad (14)$$

$$\therefore CC = \frac{(CM_2 - CM_1)}{(p_1 - p_2)} \quad (15)$$

となる。

すなわち、現場計測システムの導入費用の差と対策工事を必要とする確率の差の商によって判断できる。

なお、現場計測システムを導入しない場合は、計測による費用増が 0 の場合 ($CM_1=0$) と解釈できるので、(14)式は (8)式を代替案の比較として表示しなおしたことになる。

これにより、図-6 と表-3 に示すように、複数の代替案の比較が可能となる。

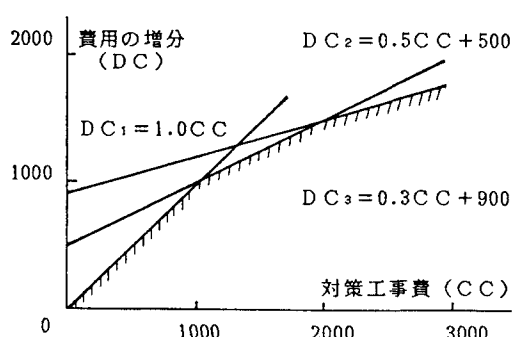


図-6 現場計測システムの代替案がある場合 (ケース No.5)

表-3 現場計測システムの代替案がある場合 (ケース No.5)

(単位: 万円)

代替案	代替案 1	代替案 2	代替案 3
評価手順	現場計測システムを導入しない案	簡易な現場計測システムを導入する案	高度な現場計測システムを導入する案
現場計測システム導入による費用増 (CM)	0 (CM_1)	500 (CM_2)	900 (CM_3)
対策工事が必要となる確率 (p)	1.0 (p_1)	0.5 (p_2)	0.3 (p_3)
(15)式 交点 = $\frac{CM - CM}{p - p}$	1000		2000
意志決定	対策工事費が 1000万円以下で代替案 1 を採用	対策工事費が 1000~2000万円 で代替案 2 を採用	対策工事費が 2000万円以上で代替案 3 を採用

(2) 対策工事費に関する仮定の追加と一般化

a) 対策工事費が異なる場合の仮定

いままで現場計測システムの代替案の内容にかかわらず対策工事の内容は変わらないとしてきたが、工事の種類によっては、対策工事費 (CC) が、現場計測システムの内容によって異なる場合がある。

つまり簡易な現場計測システムを導入した場合 (第1案) は、より信頼性の高い現場計測システムを導入した場合 (第2案) に比較して、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考えられる。

よって、仮定2のかわりに次の仮定を追加する。

【仮定4】 現場計測システムの代替案を添字1と2を用いて、対策工事費をそれぞれ CC_1 と CC_2 と仮定する。そして、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。

$$CC_2 = \alpha_1 \cdot CC_1 \quad (0 \leq \alpha_1 \leq 1.0) \quad (16)$$

b) 着工前の対策工事費を考える場合の仮定

実際の工事においては、現場計測システムの有無にかかわらず、工事着工前に対策工事 (CI) をおこなうことがある。しかもこの場合、現場計測システムの内容によって対策工事費が異なる場合がある。

つまり簡易な現場計測システムを導入した場合 (

第1案)は、より信頼性の高い現場計測システムを導入した場合(第2案)に比較して、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。

これについて、仮定5を追加する。

【仮定5】 現場計測システムの代替案を添字1と2を用いて、着工前の対策工事費をそれぞれ $C I_1$ と $C I_2$ と仮定する。

c) 仮定4と5を含めた一般化

以上のことから、(12)、(13)式は、次式となるが

$$D C_1 = p_1 \cdot C C_1 + C M_1 + C I_1 \quad (17)$$

$$D C_2 = p_2 \cdot C C_2 + C M_2 + C I_2 \quad (18)$$

ここで(18)式に(16)式を代入すると、

$$D C_2 = \alpha_1 \cdot p_2 \cdot C C_1 + C M_2 + C I_2 \quad (19)$$

となり、(17)と(19)式を等しいとおいて、

$$\begin{aligned} \alpha_1 \cdot p_2 \cdot C C_1 + C M_2 + C I_2 \\ = p_1 \cdot C C_1 + C M_1 + C I_1 \end{aligned}$$

$$(C M_2 - C M_1) = (p_1 \cdot C C_1 - \alpha_1 \cdot p_2 \cdot C C_1) + (C I_1 - C I_2)$$

$$\therefore (C M_2 - C M_1) = (p_1 - \alpha_1 \cdot p_2) \cdot C C_1 + (C I_1 - C I_2) \quad (20)$$

となり、第1案の対策工事費について式を整理すると、次式となる。

$$\therefore C C_1 = \frac{(C M_2 + C I_2) - (C M_1 + C I_1)}{(p_1 - \alpha_1 \cdot p_2)} \quad (21)$$

なお、この(20)式と(21)式が、一般式となる。

また、(20)式において $\alpha_1 = 1.0$ (つまり、(16)式で $C C_2 = C C_1$)で、かつ $C I_2 = C I_1$ のとき、(20)式は(14)式と、(21)式は(15)式と同じとなる。

d) 一般式の適用方法

いま得られた一般式を用いて、代替案が1～3案ある場合について考えてみる。このとき、第3案の現場計測システムがもっとも費用が高く、次に第2案が高いとし、さらに(16)式を変形して次式を仮定する。

$$C C_3 = \alpha_2 \cdot C C_1 \quad (0 \leq \alpha_2 \leq 1.0) \quad (22)$$

これにより、3つの代替案は次のようになる。

$$D C_1 = p_1 \cdot C C_1 + C M_1 + C I_1 \quad (17)$$

$$D C_2 = \alpha_1 \cdot p_2 \cdot C C_1 + C M_2 + C I_2 \quad (19)$$

$$D C_3 = \alpha_2 \cdot p_3 \cdot C C_1 + C M_3 + C I_3 \quad (23)$$

ここで第1案と第2案の比較は、(20)、(21)式を用いる。

また第2案と第3案の比較は、(19)、(23)式より

$$\begin{aligned} \therefore (C M_3 - C M_2) &= (\alpha_1 \cdot p_2 - \alpha_2 \cdot p_3) \\ &\quad \cdot C C_1 + (C I_2 - C I_3) \end{aligned} \quad (24)$$

となり、第1案の対策工事費 $C C_1$ について整理すると、次式となる。

$$\therefore C C_1 = \frac{(C M_3 + C I_3) - (C M_2 + C I_2)}{(\alpha_1 \cdot p_2 - \alpha_2 \cdot p_3)} \quad (25)$$

以上のように、(21)、(25)式を用いることで、第1案の対策工事費 $C C_1$ にもとづき、各代替案の選択分岐点が求められ、評価することが可能となる。

(図-7、および次頁の表-4、参照)

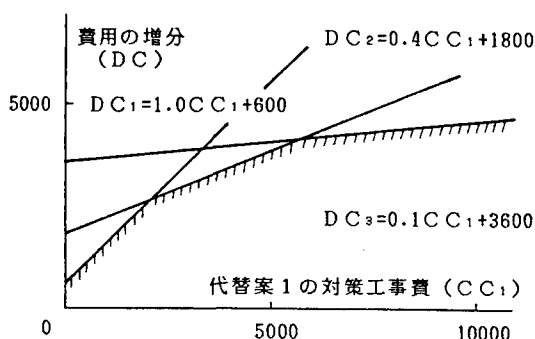


図-7 一般式による評価方法(ケース No.6)

5. おわりに

以上のように本論文では、現場計測システムの導入についての意志決定方法について考察してきた。

この結果、次のような方法が提案できた。

すなわち、①現場担当者の意志決定の過程をトリ-構造で示し、②デジジョンアナリシスを用い、③現場で生じる費用の増加を、現場計測システムの費用、および対策工事を必要とする確率とその費用で示し得るとして、④結果として生じる現場費用を最小にしようとする方法である。

そして、仮定の追加と一般化を試みることで、より実際の意志決定に近づけている。

この一方ここに提案した考え方と方法は、実際の

表-4 一般式による評価方法(ケース No.6)

(単位:万円)

代替案	代替案 1	代替案 2	代替案 3
評価手順	現場計測システムを導入しない案	簡易な現場計測システムを導入する案	高度な現場計測システムを導入する案
現場計測システム導入による費用増(CM)	0 (CM ₁)	1400 (CM ₂)	3400 (CM ₃)
着工前の対策工事費(CI)	600 (CI ₁)	400 (CI ₂)	200 (CI ₃)
費用増 ① (CM+CI)	600 (CM ₁ +CI ₁)	1800 (CM ₂ +CI ₂)	3600 (CM ₃ +CI ₃)
費用増の差 (①の差) ②	1200 (1800-600)		1800 (3600-1800)
着工後に対策工事が必要とする確率(p)	1.0 (p ₁)	0.5 (p ₂)	0.2 (p ₃)
対策工事費の係数(α)	1.0	0.8 (α ₁)	0.5 (α ₂)
確率の差 (αp-α ₁ p) ③	0.6 (p ₁ -α ₁ ・p ₂)		0.3 (α ₁ ・p ₂ -α ₂ ・p ₃)
評価式 CC ₁ =②/③	(21)式 2000		(25)式 6000
意志決定	代替案1の 対策工事費が 2000万円以下で 代替案1を採用	代替案1の 対策工事費が 2000~6000万円で 代替案2を採用	代替案1の 対策工事費が 6000万円以上で 代替案3を採用

土木工事における複雑な諸要因をすべて含んでいるものではないので、実用に際して考慮すべき点も残されている。たとえば、①着工前の対策工事の費用(CI)と着工後に予想される対策工事の費用(CC)の間に考えられる相関関係、②類似した他の工事への利用を前提とした現場計測システムの導入とその効果の考え方、などである。

しかしながらここに提案した範囲においても、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評価方法に関する数多くの議論を通じて、有益な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の皆様、および同委員会の現状調査ワーキンググループの皆様に対して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 現場計測システム小委員会、「現場計測 I : 現場計測システムの現状と課題」、B5 153ページ、昭和61年4月、土木学会建設マネジメント委員会
- 3) 苦瀬博仁、「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」、昭和62年11月、第10回土木計画学研究・講演集、土木学会
- 4) 結城、苦瀬、猪狩、久保、落合、伊藤 「現場計測システムの現状と課題」、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) 松尾聡、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
- 7) 竹村伸一 「システム技法ハンドブック」 1981年、オーム社