

費用便益分析による現場計測システムの導入効果の研究

A STUDY ON EFFECT OF INTRODUCTION OF OBSERVATIONAL CONSTRUCTION SYSTEM BY COST-BENEFIT ANALYSIS

苦瀬博仁*・長谷幸一**・鈴木明人***・指田健次****

By Hirohito KUSE, Kouichi NAGAYA, Aketo SUZUKI and Kenji SASIDA

In recent years, Observational Construction System (OCS) supported by monitoring and data processing system has increased importance for construction management. The purpose of OCS is to ensure safety and quality control and further to find out the optimum construction method by promptly feeding back the results of measurement to design. In spite of the importance of the method, there are few evaluation method for OCS because of the difficulty in analyzing the effect of the system.

The aim of this study is to take up the method of quantifying the effects of the use of the OCS from a view point of prompt alteration of construction method by monitoring and processing data. This paper discusses the characteristic of OCS and the method of quantifying such effects by cost-benefit analysis. Finally, this paper also shows the availability of the proposed method through the application for actual NATM works.

Keywords: observational construction system, quantifying effect, cost-benefit analysis, NATM

1. はじめに

わが国は地形や地盤が複雑であるため、諸外国に比べて土木構造物の施工管理にあたって注意すべきことは多い。しかも近年では、土木構造物が巨大化してきていること、および都市部やウォーターフロントにおける工事が多くなっていることにより、輻輳した条件下における施工が多くなっている。

このためより厳密な施工管理が要求されており、施工状態をリアルタイムに把握し施工を進めていく情報化施工が、一般的となりつつある。そして、情報化施工の重要な要素である現場計測システムも、安全管理や品質管理を行ううえで不可欠のものとなっている。

このような現場計測においては、計測精度や計測頻度などの面において、より正確かつ精密な計測が要求されており、計測機器やパソコンの進歩により、現場計測シ

ステムは急激に発展してきた。

この一方、施工対象が複雑になるにつれ、計測対象も多岐にわたるようになり、必ずしも最適な現場計測システムが導入されていないことも多い。

この最適な現場計測システムとは、第一に工種の特徴に合わせて適切な計測対象を選定し、最適な計測機器の配置により最適な計測頻度で行われるものであること、第二に現場計測システムの導入が、工事の安全・施工管理のうえでも、工事の費用の面からも効果的なものであることである。このうち前者については、工種ごとに各学協会や企業者の指針などにより種々の考え方が示されているが¹⁾、後者の現場計測システムの導入効果については、重要であるにもかかわらず、十分な検討がなされていない。

そこで本研究では、現場計測システムを導入することによる効果についての考え方を整理し、計測効果の算出方法を明らかにするとともに、実際の工事例について分析を行うことにより、算出方法の有効性を明らかにすることを目的としている。

なお本研究は、土木学会建設マネジメント委員会マネジメント技術小委員会計測情報分科会における計測効果ワーキンググループにおいて検討された内容を整理したものである。

* 正会員 工博 東京商船大学助教授 商船学部流通管理工学講座 (〒135 江東区越中島 2-1-6)

** 正会員 工修 (株) 間組情報システム部開発二課 (〒107 港区北青山 2-5-8)

*** 正会員 工博・技術士 大成建設(株) 技術本部技術開発部情報化施工開発室長 (〒163 新宿区西新宿 1-25-1)

**** 正会員 技術士 日本国土開発(株) エンジニアリング本部技術部副課長 (〒243-03 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1)

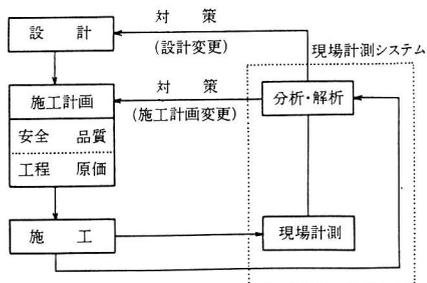


図-1 設計・施工における現場計測システムの役割

2. 現場計測システムの内容と特徴

(1) 現場計測システムの内容

現場計測システムとは、構造物および構造物周辺の状態を計測し、計測結果の分析を行い、管理基準値に照らし合わせて施工時の安全の確認と品質の確保をするとともに、設計や施工計画段階で不明確だった事実が明らかになった場合には、速やかに設計ないし施工計画に反映させることで、経済的・技術的に適した工法を採用する目的をもっている（図-1参照）。

このため単に計測を行うだけでなく、計測結果の分析と、分析結果の設計や施工計画への反映が重要であるが、近年に至るまで計測技術に比較して分析技術が遅れがちであり、結果として現場計測システムが有効に機能していなかった面も多くみられた。

しかしながら、大規模掘削や複雑な地盤条件下での工事が多くなることで、高度な現場計測システムが要求されるとともに、分析技術も著しく進歩し、いわゆる情報化施工が実現している。

(2) 現場計測システムの実態

現場計測システムの費用は、工事の高度化に伴い増加しているが、実態調査によれば工種にかかわらず工事費の約2%（工事内容によっては、1.0~8.0%に分布している）を占めている²⁾。これは、土木工事の原価管理のうえでも無視できない値である。

しかしながら、一部の工種を除いて、現場計測システムの費用が独立費目とならずに工事管理費に組み込まれた積算体系となることが多いため、実際の費用が明確に把握されていない³⁾。このことが、現場計測システムの費用効果を測定する必要性が表面化しない原因の一つであるとともに、施工計画や積算においても、施工管理の重要性に比較して現場計測システムの重要性が認識されていない原因にもなっている。

(3) 現場計測システムの効果に関する従来の研究

従来からの現場計測システムの効果の解明は、次のようなアプローチに分類される。

① 計測効果の実態の把握

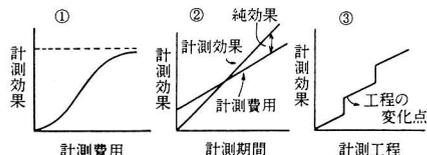


図-2 現場計測システムの計測効果の考え方

- ② 工事関係者の立場による計測効果の認識の把握
- ③ 計測目的と計測効果の相互関係
- ④ 現場計測システムの導入に関する意志決定
- ⑤ 導入した現場計測システムの費用効果の算出

①は、現場計測システムの実態調査を通じて、計測効果を把握しようとするものである^{4),5)}。②は、設計者と計測担当者の計測に対する意識の違いが、現場計測システムの重要性の認識の差に現われ、結果として計測効果の把握が共通認識とならないことに着目し、これらの意識の差の解明を行おうとするものである⁶⁾。③は、ある計測目的により現場計測システムが導入されたとき、目的に沿った直接効果以外にも間接的な効果が生じることに着目し、計測目的と計測効果の因果関係を解明することで、計測効果を把握しようとするものである⁷⁾。

これら①~③の考え方は、いずれも実態の把握や定性的な分析を主体としたもので、費用と効果の相互関係の説明は困難であった。

④は、工事計画段階で現場計測システムの導入の是非を判断しようとするものであり、これについて信頼性解析理論を用いて破壊確率等を計算し、現場計測システムを導入しない場合と導入した場合とで工事の費用を比較した例⁸⁾、および意志決定技法を用いて工事中の対策工事の必要確率が計測を実施した場合と計測を実施しない場合とで異なるとして、計測効果を求めた例^{9),10)}がある。

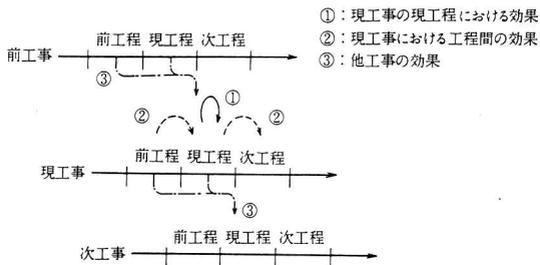
⑤は、現場計測システムを工事に導入した場合、費用に対する効果の面から、計測効果を把握しようとするものである。これについては、公表されたものがほとんどない。

以上のように種々の試みがあるが、これらの研究は初歩的な段階を脱していないものが多く、現場計測システムの効果を示すものとしては十分とはいえない¹¹⁾。

(4) 現場計測システムの効果の考え方

現場計測システムの費用に対する効果の解明（上記の⑤）は、以下の点が考えられる（図-2参照）。

- ① 現場計測システムの費用の大小と効果の大小の相互関係（図-2①）
 - ② 工事期間と計測効果の相互関係（図-2②）
 - ③ 計測結果に基づく、計測方法や施工方法の変更による効果（図-2③）
- ①は、計測効果はわずかな費用では十分に得られない



図—3 工程間と工事間の計測効果の考え方

が、費用をかけただけ計測効果が得られるものではない。このため計測費用の増加に対して計測効果が徐々に増加し、さらに計測費用が増加すると費用の増加の割合に比較して計測効果が得られないことが考えられる。この結果、仮説として計測効果は計測費用に対して成長曲線を描くことが考えられ、この傾向を分析することで効果を解明しようとするものである。

②は、一度現場計測システムを設置し、その後にシステムの追加がない場合、工事が長期にわたるほど計測効果が増加することが考えられる。この結果、仮説として、工事が長期にわたるほど、費用に対する効果が増加すると考えられ、この傾向を分析することで効果を解明しようとするものである。

③は、現場計測を行うことで、工事施工中での現場計測システムの変更や、施工方法の変更が行われることがある。このことは、計測結果に基づく現場計測システムの変更や施工方法の変更を、計測効果と考えることができる。この傾向を分析することで、計測効果を解明しようとするものである。

(5) 対象とする工事数と工程数の考え方

計測効果の分析は、対象とする工事と工程の数により、以下の分類が可能である (図—3 参照)。

- ① 1つの工事の1つの工程に着目する場合
- ② 1つの工事の複数の工程に着目する場合
- ③ 複数の工事の複数の工程に着目する場合

①は、計測効果をあくまでも当該工事の当該工程に限定して考えようとするものである。

②は、対象を現在の工事に限定し、現工程が事前の工程の計測結果を利用していたり、事後の工程への反映を考慮して計測が実施されている場合である。

③は、現在の工事が、過去の類似工事の計測結果を利用していたり、将来の類似工事への反映を考慮して計測が実施されている場合である。

(6) 計測効果研究における本研究の位置づけ

現在までにおいて、上記の(3)~(5)で示したように、計測効果の全体像を明らかにすべく種々の検討を重ねている。

このうち本研究は、導入した現場計測システムの費用効果について ((3)の⑤)、計測方法や施工方法の変更による効果 ((4)の③)を、測定しようとするものである。このとき、工事と工程については、単一工事における複数工程に着目している ((5)の②)。

3. 現場計測システムの費用便益分析

(1) 計測費用と計測効果の考え方

a) 計測費用の考え方

計測費用は、直接費用と間接費用に分類できる。

このうち直接費用は、現場計測システムそのものの費用であり、計測機器の費用や計測人件費などである。

また間接費用は、計測技術の研究にかかる費用や解析技術の蓄積にかかる費用などのうち、当該システムが負担すべき費用である。

これらは、以下のように設定できる。

$$C_m = C_{ma} + C_{mi} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 C_m ：現場計測システム費用

C_{ma} ：現場計測システム費用のうちの直接費用

C_{mi} ：現場計測システム費用のうちの間接費用

b) 計測効果の考え方

現場計測システムの計測効果も、計測費用と同様に、直接効果と間接効果に分類できる。

直接効果は、計測目的に沿って得られる効果で、現工程において計測結果を反映させ、地盤沈下の防止など品質管理や安全管理に役立てたり、最適な施工計画の立案に役立てるものである (図—3①参照)。

また間接効果は、直接効果に付随して得られる効果であり、設計法の確認や技術データの蓄積などのように、次工程以降において計測結果を利用しようとする場合の効果である (図—3②参照)。

これらは、以下のように設定できる。

$$E_m = E_{ma} + E_{mi} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 E_m ：計測効果

E_{ma} ：直接効果

E_{mi} ：間接効果

(2) 工事費の構成と計測効果の算出

a) 工事費の構成

原価管理においては、土木工事の費用を工種別 (例：準備工、仮設工など) ないし要素別 (例：労務費、資材費など) で集計することが一般的である。

工種別原価管理の場合、先述したように計測工が独立して積算されることは少ないが、ここでは簡便のために工事費を分解し、次式のように現場計測システムの費用を抽出する。

$$C_t = C_m + C_o \dots \dots \dots (3)$$

$$C_o = C_p + C_d + C_k \dots \dots \dots (4)$$

$$C_t = C_m + C_p + C_a + C_k \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C_t ：総工事費

- C_m ：現場計測システム費用
- C_o ：現場計測システム以外の工事費
- C_p ：仮設工事費
- C_a ：直接工事費
- C_k ：工事管理費

b) 工事費の削減による計測効果の算出

現場計測システムを導入した場合と、導入しない場合について2つのケースを想定した場合、式(3)を利用すると、以下となる。

$$C_t^m = C_m^m + C_o^m \dots\dots\dots (6)$$

$$C_t^o = C_m^o + C_o^o \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 m ：現場計測システムを導入した場合

o ：現場計測システムを導入しない場合(すなわち、 $C_m^o = 0$ の場合)

このとき、計測効果が金額換算可能とすれば、計測効果(E_m)から現場計測システムの費用(C_m^m)を差し引いたものを、現場計測システムの導入による便益(B)とすることができる。

よって

$$B = E_m - C_m^m \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 B ：現場計測システム導入による便益となり、式(1)、(2)を代入すると、

$$B = (E_{ma} + E_{mi}) - C_m^m \dots\dots\dots (9)$$

となる。

ここで、直接効果(E_{ma})は前工程までの計測による現工程への影響を除いた効果であるから、前工程と現工程のいずれにおいても計測をしない場合の工事費用(C_o^o)と、前工程において計測しない場合で現工程で計測する場合の工事費用(C_o^m)の差額とすることができる(図-3①参照)。

また間接効果(E_{mi})は、前工程までの計測による現工程への影響であるから、前工程で計測をせずに現工程で計測をする場合の工事費用(C_o^m)と、両工程のいずれも計測をする場合の工事費用(C_o^m)の差額と考えられる(図-3②参照)。

そして式(2)より、計測効果の全体(E_m)は、前工程と現工程のいずれにおいても計測をしない場合の工事費用(C_o^o)と、両工程のいずれにおいても計測をする場合の工事費用(C_o^m)の差額となる。

よって、効果と便益(B)は、以下の式となる。

$$E_{ma} = (C_o^o - C_o^m) \dots\dots\dots (10)$$

$$E_{mi} = (C_o^m - C_o^m) \dots\dots\dots (11)$$

$$E_m = (C_o^o - C_o^m) \dots\dots\dots (12)$$

$$B = \{(C_o^o - C_o^m) + (C_o^m - C_o^m)\} - C_m^m \dots\dots\dots (13)$$

ここで、

o^o ：前工程で計測しない、現工程で計測しない

o^m ：前工程で計測しない、現工程で計測する

m^m ：前工程で計測する、現工程で計測する

このとき、式(4)を参考にすると

$$C_o^o = C_p^o + C_a^o + C_k^o \dots\dots\dots (14)$$

$$C_o^m = C_p^m + C_a^m + C_k^m \dots\dots\dots (15)$$

$$C_o^m = C_p^m + C_a^m + C_k^m \dots\dots\dots (16)$$

と分解でき、さらに

$$\Delta C_{pa} = C_p^o - C_p^m \dots\dots\dots (17)$$

$$\Delta C_{pi} = C_p^m - C_p^m \dots\dots\dots (18)$$

$$\Delta C_{da} = C_a^o - C_a^m \dots\dots\dots (19)$$

$$\Delta C_{di} = C_a^m - C_a^m \dots\dots\dots (20)$$

$$\Delta C_{ka} = C_k^o - C_k^m \dots\dots\dots (21)$$

$$\Delta C_{ki} = C_k^m - C_k^m \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 ΔC_{pa} ：仮設工事費の差額による直接効果

ΔC_{pi} ：仮設工事費の差額による間接効果

ΔC_{da} ：直接工事費の差額による直接効果

ΔC_{di} ：直接工事費の差額による間接効果

ΔC_{ka} ：工事管理費の差額による直接効果

ΔC_{ki} ：工事管理費の差額による間接効果

とおくと、以下のように整理できる。

$$\Delta C_p = \Delta C_{pa} + \Delta C_{pi} \dots\dots\dots (23)$$

$$\Delta C_a = \Delta C_{da} + \Delta C_{di} \dots\dots\dots (24)$$

$$\Delta C_k = \Delta C_{ka} + \Delta C_{ki} \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 ΔC_p ：仮設工事費の差額による計測効果

ΔC_a ：直接工事費の差額による計測効果

ΔC_k ：工事管理費の差額による計測効果

よって、式(13)の便益(B)は、次式に変形できる。

$$B = (\Delta C_{pa} + \Delta C_{pi}) + (\Delta C_{da} + \Delta C_{di}) + (\Delta C_{ka} + \Delta C_{ki}) - C_m^m \dots\dots\dots (26)$$

すなわち、現場計測システムによる便益(B)は、前工程・現工程の両方で計測しない場合と両方で計測する場合の、各工事費の差額を合計した値から、現場計測システムの費用を差し引いたものとしても表現できる。

(3) 費用便益分析の考え方

システムの投入費用に対する効果は、システムの費用(C)とシステムがもたらす便益(B)を比較し、便益費用比(B/C)ないし純便益($B-C$)を求めることで算出できる¹²⁾。

よって、式(26)より現場計測システムの便益費用比(B/C)は、

$$(B/C) = \frac{(\Delta C_p + \Delta C_a + \Delta C_k) - C_m^m}{C_m^m} \dots\dots\dots (27)$$

となり、同様に純便益($B-C$)は、

$$(B-C) = (\Delta C_p + \Delta C_a + \Delta C_k) - 2C_m^m \dots\dots\dots (28)$$

となる。

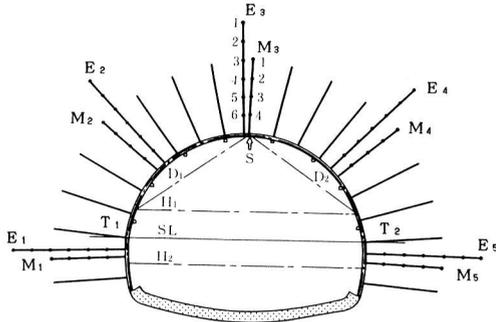
4. NATM 計測における費用便益分析の適用

(1) 工事概要と計測内容

ケーススタディを行ったトンネル工事は、内空断面約 90 m² で、延長 1 011 m の道路トンネルであり、昭和 58 ~ 61 年にかけて施工された。

この工事の計測標準断面の概要は図-4 のとおりであり、計測項目はその必要度に応じて、計測 A と計測 B に分類し、計測を実施した (表-1 参照)。

建設地点は、断層破碎帯の影響を受けて地層の走行・傾斜が一定せず、地質構造の攪乱の激しい地域である。岩質は、砂岩・泥岩・頁岩の互層であるが、断層の影響で破碎・脆弱化が激しい。また地下水を伴うと泥岩と頁



計測項目	記号
内空変位測定	H ₁ , H ₂ , D ₁ , D ₂
天端沈下測定	S
ロックボルト軸力測定	M ₁ ~ M ₅
地中変位測定	E ₁ ~ E ₅
覆工応力測定	T ₁ ~ T ₂
支保工応力測定	□

図-4 NATM 掘削における計測標準断面図

表-1 NATM 掘削における計測目的と計測項目

計測区分	計測項目	計測目的
NATM (日常計測 A)	坑内観察調査	地質、変状等を観察記録することにより計測結果とともに設計、施工法の確認
	内空変位測定	掘削方法、ロックボルト、パターン、吹き付けコンクリート、覆工の時期判定
	天端沈下測定	内空変位測定の補助 インバートの要否、効果判定
	盤膨れ測定	
	ロックボルト引抜試験	引抜耐力の確認、ロックボルトの種類、長さの検討
	ロックボルト軸力測定	ロックボルトの長さ、本数の検討および応力の把握
NATM (詳細計測 B)	地中変位測定	周辺地山の変状、緩み領域の把握、ロックボルトの長さの検討
	覆工応力測定	覆工の応力、土圧の大きさおよび分布の把握、覆工の安定性の把握
	支保工応力測定	支保工にかかる応力により、支保工の必要性、サイズ、ピッチの判断、土圧の大きさ、方向、側圧係数の推定
	地山試料試験	設計検討資料の採取

岩は泥ねい化し、未固結な砂岩は流出する傾向があった。

このため、NATM 掘削は計測結果に応じて、図-5 に示すように 3 段階に分けて施工された (図-6 参照)。

なお、本トンネルの内空変位は平均 100 mm と大きく、場所によっては 300 mm を超える値が観測された。

(2) 計測効果の算出方法

a) 計測費用の算出

先述したように計測費用には直接費用と間接費用があるが、間接費用は金額換算しにくいので、ここでは、直接費用のみを考慮する。

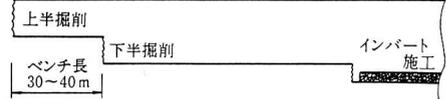
すなわち、式 (1) において $C_{mi}=0$ として、

$$C_m = C_{ma}$$

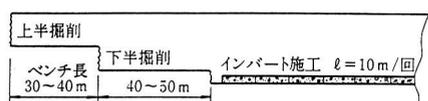
と仮定する。

このとき、直接費用としては、

1 段階 上・下半同時進行の上半先進ショートベンチ施工



2 段階 上・下半およびインバート同時併進施工



3 段階 上・下半交互併進施工

切羽で吹付コンクリートによるインバートを施工……上・下半

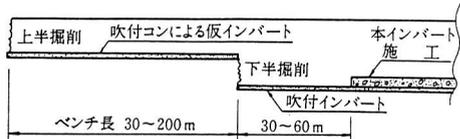


図-5 NATM 掘削における施工パターン

表-2 NATM 計測 B の費用 (仮想単価)

計測項目	単価
地中変位測定 A ※	1,310,000 円/断面
地中変位測定 B ※	1,200,000 円/断面
覆工応力測定	1,050,000 円/断面
支保工応力測定	900,000 円/断面
地山試料試験	140,000 円/回

※ 地中変位測定 A と B は、岩盤区分に合わせてセンサの数を変更したものである。

表-3 NATM 計測 A の測定人件費 (仮想単価)

項目	単価
技術者 A	22,000 円/方
技術者 B	15,000 円/方
1 か月当たりの費用	1,776,000 円/月

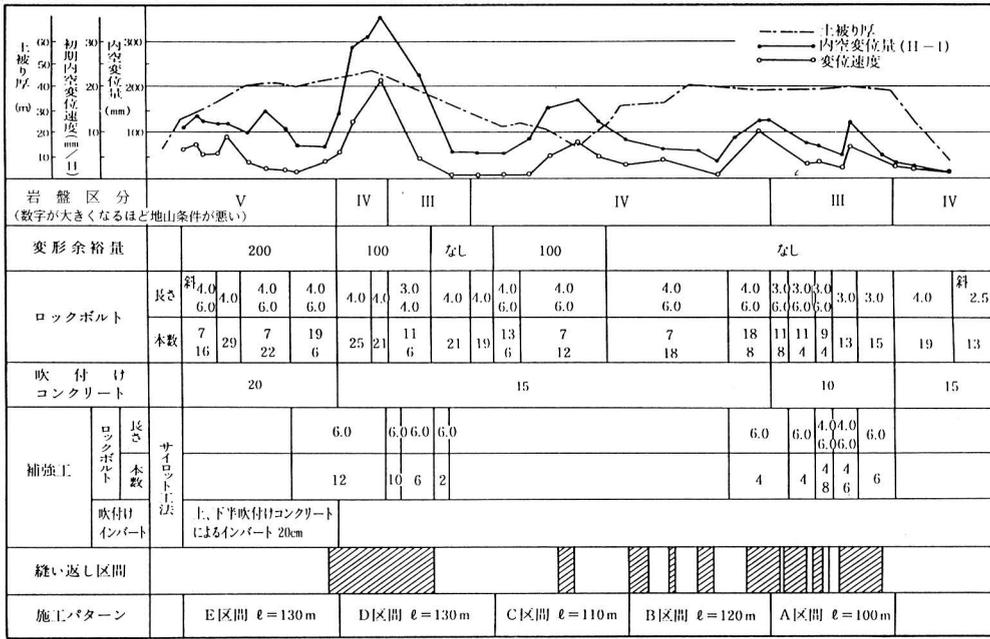


図-6 ケーススタディのトンネルの工事概要 ← トンネル掘進方向

表-4 ケーススタディのトンネル工事の計測内容・計測費用・計測効果と費用便益

	A 区 間	B 区 間	C 区 間	D 区 間	E 区 間	
延 長	100m	120m	110m	130m	130m	
施工方法	・上下半同時併進の上半 先進ショートベンチ NATM工法	・上下半およびインバート 同時併進の NATM工法	・上下半およびインバート 同時併進の NATM工法	・上下半およびインバート 同時併進の NATM工法	・上下半交互併進の NATM工法	
計測項目	・A計測 内空変位測定 天端沈下測定 ・B計測 地中変位測定A×1ヶ所 覆工応力測定 ×1ヶ所	・A計測 内空変位測定 天端沈下測定 ・B計測 地中変位測定B×1ヶ所 覆工応力測定 ×1ヶ所	・A計測 内空変位測定 天端沈下測定 ・B計測 地中変位測定B×1ヶ所 地山試料試験 ×1ヶ所	・A計測 内空変位測定 天端沈下測定 ・B計測 地中変位測定A×2ヶ所 覆工応力測定 ×3ヶ所	・A計測 内空変位測定 天端沈下測定 ・B計測 地中変位測定B×1ヶ所 覆工応力測定 ×1ヶ所	
計測を実施し ない場合	予想不具合： トンネルの延長の70%にわたって内空断面が確保できない 手戻り作業： 施工全延長の70%の縫い返しが必要(全断面縫い返し)					
計測を実施した 場合	計測時の 対策工事 内容	・増し打ちロックボルト	・増し打ちロックボルト ・インバートの打設順序 の変更	・変形余裕量の設定	・変形余裕量の設定 ・増し打ちロックボルト	・変形余裕量の設定 ・増し打ちロックボルト ・仮インバートの打設
	ロックボ ルト本数	・1=4m 136本 ・1=6m 526本	・1=6m 120本		・1=6m 716本	・1=6m 80本
	不具合	発生した不具合： 部分的に内空断面が確保できない				
	手戻り	手戻り作業： 部分的な縫い返し				
数量	693㎡	536㎡	129㎡	739㎡	74㎡	
計測費用 (C _m)	680万円	758万円	622万円	1168万円	802万円	
C _o	6300万円	7560万円	6930万円	8190万円	8190万円	
C _o m	3150万円	3969万円	3638万円	4177万円	4914万円	
C _o mm	3150万円	2443万円	881万円	3857万円	4887万円	
直接効果 (E _{md})	3150万円	3591万円	3292万円	4013万円	3276万円	
間接効果 (E _{mi})	0万円	1526万円	2757万円	320万円	27万円	
計測効果 (E _m)	3150万円	5117万円	6049万円	4333万円	3303万円	
便益費用比 (B/C)	3.63	5.75	8.73	2.71	3.12	
純便益 (B-C)	1790万円	3601万円	4805万円	1997万円	1699万円	

- ① 計測機器および設置の費用
 - ② 計測人件費（データ整理、単純な解析を含む）
 - ③ その他の費用（特殊解析に関する費用等）
- が考えられ、①については計測 B の費用（表—2 参照）を計上し、②については計測人件費および計測 A の費用（表—3 参照）を計上する。また③は考慮しない。

これにより、各施工区間における計測費用は、表—4 の C_m^m となる。

b) 計測効果の算出

先述したように計測効果は、仮設工事費 (C_p)、直接工事費 (C_d)、工事管理費 (C_k) などの費目別に計上することができる。このとき計測に伴う仮設工事費や工事管理費の増分は、計測費用に計上しているの、その他の仮設工事費は計測の有無にかかわらず等しいと仮定し、また工事管理費も同様に仮定し、式を変形する。

すなわち、式 (14)~(16) において

$$C_p^{o.o} = C_p^{o.m} = C_p^{m.m}$$

$$C_k^{o.o} = C_k^{o.m} = C_k^{m.m}$$

として、式 (23)、(25) は、

$$\Delta C_p = 0, \quad \Delta C_k = 0$$

となり、式 (26) の便益 (B) は、次式に変形できる。

$$B = \Delta C_d - C_m^m \\ = \Delta C_{da} + \Delta C_{di} - C_m^m \\ = (C_d^{o.o} - C_d^{o.m}) + (C_d^{o.m} - C_d^{m.m}) - C_m^m \dots \dots \dots (29)$$

よって、直接効果 (E_{ma}) と間接効果 (E_{mi})、および全体効果 (E_m) は、式 (10)~(12) より以下となる。

$$E_{ma} = C_d^{o.o} - C_d^{o.m} \dots \dots \dots (30)$$

$$E_{mi} = C_d^{o.m} - C_d^{m.m} \dots \dots \dots (31)$$

$$E_m = E_{ma} + E_{mi} = C_d^{o.o} - C_d^{m.m} \dots \dots \dots (32)$$

以上に基づき、計測効果を次の手順で算出する。

- ① $C_d^{o.o}$ の算出
- ② $C_d^{o.m}$ の算出
- ③ $C_d^{m.m}$ の算出
- ④ E_{ma} , E_{mi} , E_m など計測効果の算出

①では、現場計測システムを導入しなかった場合の直接工事費 ($C_d^{o.o}$) を算出する。その際、地山の崩壊による工事停止や人身事故は考慮せず、トンネル総延長の 70% の区間で縫い返しの手戻り作業が発生したものとする。

②では、前工程で計測が行われておらず、現工程で計測を行った場合の直接工事費 ($C_d^{o.m}$) を算出する。その際、前工程がなく現工程で計測を行った A 区間の単位施工長当たりの工事費に、岩盤区分による地山の種別に応じた係数（岩盤区分Ⅲは 1.0、Ⅳは 1.05、Ⅴは 1.2）を乗じた値を工事費とする。

③では、実際に現場計測システムを導入し、計測を行いながら施工した場合の直接工事費 ($C_d^{m.m}$) を算出する。

表—5 施工速度および施工単価（仮想単価）

項目	施工速度および施工単価
平均掘削速度	40 m/月
ロックボルト l=4m	10,900 円/本
ロックボルト l=6m	13,200 円/本
インバートコンクリート打設順序変更費用	5,000,000 円/式
変形余裕量10cmの場合に発生する余振り費用	20,000 円/m
変形余裕量10cmの場合に発生する余吹きコンクリート費用	21,000 円/m
変形余裕量20cmの場合に発生する余振り費用	40,000 円/m
変形余裕量20cmの場合に発生する余吹きコンクリート費用	42,000 円/m
仮インバート打設費用	275,000 円/m
全断面縫い返し費用	900,000 円/m
部分的縫い返し費用	33,300 円/m ²

④では、以上を式 (30)、(31) に代入し、直接効果 (E_{ma}) と間接効果 (E_{mi}) を算出し、次に式 (32) より全体の計測効果 (E_m) を算出する（表—4 参照）。

なお直接工事費の算出にあたっては、表—5 の施工単価（本論文における仮想単価）を用い、計測の有無にかかわらず一定と考えられる工事費（例：手戻り工事の生じない掘削工事費など）を削除している。

c) 費用便益分析

便益費用比 (B/C) は、式 (27) と式 (29) より

$$\begin{aligned} (B/C) &= \frac{\Delta C_d - C_m^m}{C_m^m} = \frac{\Delta C_{da} + \Delta C_{di} - C_m^m}{C_m^m} \\ &= \frac{(C_d^{o.o} - C_d^{o.m}) + (C_d^{o.m} - C_d^{m.m}) - C_m^m}{C_m^m} \dots \dots \dots (33) \end{aligned}$$

となり、これと同様に、純便益 ($B-C$) は、

$$\begin{aligned} (B-C) &= \Delta C_d - 2 C_m^m \\ &= \Delta C_{da} + \Delta C_{di} - 2 C_m^m \\ &= (C_d^{o.o} - C_d^{o.m}) + (C_d^{o.m} - C_d^{m.m}) - 2 C_m^m \dots \dots \dots (34) \end{aligned}$$

と変形できる。

(3) 分析結果

a) 単一工程に着目した費用便益分析

実際の NATM 工事に費用便益分析を行ったところ、各施工区間の便益費用比 (B/C) は、表—4 に示されるようにすべて 1.0 以上であり、計測効果が認められた。

b) 複数工程に着目した場合の費用便益分析

各施工区間の便益費用比 (B/C) を施工順にみると、A、B、C 区間の順に大きくなっている。このとき、直接効果 (E_{ma}) には大差がないことから、便益費用比が大きくなった理由は、間接効果 (E_{mi}) が大きくなったためである。この間接効果は、B、C 区間の対策工に前区間の技術ノウハウが含まれていることを意味する。すなわち A 区間の技術ノウハウが B 区間の施工に反映され、B 区間のそれが C 区間に反映されたものである。

一方 D 区間においては、便益費用比 (B/C) が最も小

さいが、これは図-6に示すように、この区間の内空変位が他の区間に比較してきわめて大きく、A, B, C区間の技術ノウハウに基づく間接効果(E_{mi})が小さいことによる。また、純便益($B-C$)ではE区間が最も小さくなっているが、これは図-6に示すように岩盤区分がVと地山が悪く、D区間と同様に前区間の技術ノウハウに基づく間接効果(E_{mi})が小さいことによる。

以上のように、施工条件が類似している場合に間接効果が大きくなり、類似していない場合には間接効果が小さくなっている。

(4) 考察

3. で提示した計測効果の算出方法を NATM 工事に適用した結果、各工程（各施工区間）ごとに直接効果と間接効果が明らかになった。特に類似した地山の状態においては、前工程の計測結果に基づく現工程の間接効果が算出できることが明らかになった。

以上のことから、提示した費用便益分析による計測効果の算出方法は、工事の実態を表現できる可能性を示しており、他の工事への適用例を増すことで、実用化に近づくものと考えられる。

5. おわりに

本研究は、現場計測システムの導入効果の測定方法を明らかにすることを目的として、現場計測システムの役割と特徴、および現場計測システムの費用と効果について分析を行ってきた。

この結果、

- ① 現場計測システムの計測効果に関する考え方の整理と計測効果の解明の方法
- ② 費用便益分析に基づく計測効果の算出方法
- ③ ケーススタディによる算出方法の有効性

が明らかになった。

先述(2.)したように、現場計測システムの効果の解明には種々の方法があり、ここで示した考え方はそのうちの一部にすぎない。よって他の考え方も含め、今後と

も計測効果の全体を解明するために研究を進めていく予定である。

なお本研究は、当初述べたように、土木学会建設マネジメント委員会における研究活動の一環として進められてきたものである。研究の機会を与えて頂いた建設マネジメント委員会の委員各位に、感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 土質工学における情報化施工研究小委員会：土質工学における情報化施工研究報告書，土木学会，1988.
- 2) 土木学会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，土木学会，1986.
- 3) 1) に同じ。
- 4) 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，土木学会，1985.
- 5) 岩田 誠：土留め工事の計測管理手法に関するアンケート調査結果について，第7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，土木学会，1989.
- 6) 猪狩哲夫・伊東祐二・落合辰巳・苦瀬博仁・久保 滋・結城知史：現場計測システム活用のための課題と解決方法，第5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，土木学会，1987.
- 7) 長谷幸一・苦瀬博仁・鈴木明人・指田健次：現場計測システムの導入目的と効果に関する分析，第8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，土木学会，1990.
- 8) 黒田勝彦ほか編：現場計測計画の立て方，第2章 現場計測工法と信頼性設計，土質工学会，1990.
- 9) 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，土木計画学研究・講演集，No.10，土木学会，1987.
- 10) 苦瀬博仁：現場計測システム導入のための評価方法，第5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，土木学会，1987.
- 11) 松尾 稔・川村国夫：盛土の情報化施工とその評価に関する研究，土木学会論文報告集，第241号，1975.
- 12) 吉川和広編：土木計画学演習，森北出版，1985.

(1990.11.26・受付)