標準歩掛と情報理論を用いた新技術の生産性評価手法

国土交通省関東技術事務所　　○ 髙津　知司

１．はじめに

平成 28 年から始まった i-Construction は副題に「建設現場の生産性革命」とあり，第 1 章では「今こそ生産性向上に取り組むチャンス」と生産性向上を掲げている [1)]。それを受けて，ICT 活用を始めとする種々の生産性向上が報告されている [2)]。さらに，「働き方改革」が推進されており，あらゆる場面での生産性向上が求められている。また，生産性の向上を実現するための施策として，DX（Digital Transformation）も進められている。この DX に関しては，昨今の COVID-19 対策の有効な手段としても注目されつつある。

生産性向上には，作業手順等の改善や新技術の導入が不可欠である。一方, 新技術の導入に際しては，従来技術に対してその優位性を客観的に示さなければならない。その際に課題となるのが, 評価の視点, 評価指標, 比較対象および比較方法である。

過去の取り組み [3)]においては, 工場生産で用いられていた IE（Industrial Engineering）を発展させた CE（Constructive Engineering）等の手法が提案されている。これらの手法は, 課題の発見から解決策の評価まで, すなわち, 評価の視点から比較方法まで網羅している。評価の視点と評価指標は参考文献 3)に譲り，本論文では比較対象と比較方法を中心に考察する。

２．評価手法

2.1　評価の視点

評価の視点は参考文献 3)では，「生産性の向上」「苦渋性の低減」「安全性の向上」「品質向上」「環境保全」が与えられている。今回対象とする「生産性の向上」に関しては，表-1 のように時間短縮と省力化に分類されている。

2.2　評価指標

生産性の向上などの視点で新技術を評価する場合は，その指標は定量的に表現できる必要があり，参考文献 3)では表-2 のように示してある。

計測方法は機械運行や工事工程の記録等の帳票のような業務上残される記録を利用する方法や，ビデオメモモーションやICカード利用などの現場計測が紹介されている。

表-1　生産性向上における改善の視点

改善の視点		施工改善の内容
生産性の向上	時間短縮	目標品質等を確保しながら目標とする施工量（全施工量、日・週・月・年単位施工量）を消化する野に要する時間を可能な限り短縮する。
	省力化	投入労働力を効率的に分配したり、一人当たりの作業量を上げることにより、目標とする施工量（全施工量、日・週・月・年単位施工量）に対する投入労働力の総量を減少する。

「CEマニュアル」より抜粋

表-2　生産性向上の評価指標

改善目的	評価項目	評価指標
生産性の向上（時短）	作業時間	作業単位（工程、単位作業、要素作業、動作）別の時間
	作業効率	出来高／作業時間、工程数、動作数、工程・動作の構成比
	作業方法	協同作業時間の割合
	作業工程	工事全体に対する時間短縮の寄与の割合
	作業内容	稼働率、作業内容の構成
生産性の向上（省力化）	出来高	出来高
	作業者数	作業単位別の必要要員数
	工数	人工、作業工数
	作業効率	出来高／工数
	作業方法	工程数、動作数、工程・動作の種類別の構成比、協同作業時間の割合
	作業内容	稼働率、作業内容の構成

「CEマニュアル」より作成

2.3　比較対象

新技術を評価する場合，比較対象となる従来技術を定める必要がある。その後, 新技術と従来技術とで評価指標を計測する [3)]。多くの場合, 新技術では評価指標の計測が可能であるが，新技術の現場との施工条件が揃わない等の理由で，従来技術で

の計測が困難な場合がある。

一方，新技術の導入では，スケールメリットを考慮して多くの現場で利用できるものが効果的である。さらに，そのような新技術には，それに対応する従来技術に標準的な歩掛が存在することが期待できる。歩掛では想定される施工条件を幅広く網羅している場合があるので，その場合は試験施工の自由度が増す。また，歩掛からも現場計測からも日施工量が得られるので，それを評価指標にする。

2.4　評価方法

評価指標の日施工量を新技術での計測値と従来技術での計算値とで比較して，生産性の向上を判断する。日施工量の差による比較も考えられる[5),6)]。すなわち，標本$x_i(i=1,2,\cdots,n)$を次式で与えて，新技術と従来技術との生産性を比較する。

$$x_i \stackrel{\text{def}}{=} \text{新技術での評価指標}(\text{日施工量}) - \text{歩掛からの評価指標}(\text{日施工量}) \qquad (2.1)$$

ここで，$i=1,2,\cdots,n$，およびnは標本数（試験施工現場数）である。

これら$x_i\ (i=1,2,\cdots,n)$を処理対象とすると，統計学や情報量統計学の手法を適用できる。

3．評価の具体例

3.1　事例

今回評価指標に採用した日施工量に関して，新技術を採用した現場での計測値と標準歩掛から算出したと計算値を入手する必要がある。マイクロジョイントパイル工法（MJP 工法）においては，その建設技術審査証明報告書[4)]には 21 現場での日施工量を計測したデータと各現場条件で標準歩掛から求めた日施工量とが掲載されているので，対象事例とした。

MJP 工法では，杭の連結部の工夫と工場作業の工数増で現場作業の効率化を図っている（詳細は参考文献 4)を参照）。

3.2　統計学による評価方法

統計学における検定は，

① 帰無仮説と対立仮説の設定
② 有意水準の設定

の順で進めていく。なお，今回利用したデータは，分散が未知で小標本$(\mathrm{n}<100)$であるので，t 検定を実施する[5),6)]。

帰無仮説と対立仮説は，次のように設定する。

a) 帰無仮説：$\mu=0$　（従来技術と差が無い）
b) 対立仮説：$\mu>0$　（新技術の方が施工能力が高い）

さらに，標本$x_i\ (i=1,2,\cdots,n)$ に対する検定統計量Tは，次式で与えられる。

$$T=\frac{\bar{x}-\mu}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \qquad (3.1)$$

ここでs^2は標本の不偏分散（標本分散），$\bar{x}$は標本平均，μは母平均である。

今回は，新技術が従来技術より日施工量が多いか否かを検定するので，片側検定となる。現場計測値と歩掛からの計算値より$T=7.927$となる。自由度 20(=21-1)の片側 1%の臨界値が 2.528 なので，危険率 1%で帰無仮説は棄却され，「新技術は従来技術と比べ，生産性が向上している」と言える。

建設技術審査証明報告書に記載されているデータと t 検定による評価結果は，次節の情報量統計学の手法による評価結果と共には表-3 に示す。

表-3　評価結果

現場番号	新技術実測値（m/日）	従来技術計算値（m/日）	差 a−b	モデル1	モデル2
	a	b	x_i	$(x_i-\mu)^2$	$(x_i-\hat{\mu})^2$
1	3.484	1.444	2.040	4.162	96.694
2	18.219	4.309	13.910	193.488	4.148
3	30.842	6.018	24.824	616.231	167.720
4	24.100	4.983	19.117	365.460	52.471
5	23.850	5.514	18.336	336.209	41.766
6	18.609	4.759	13.850	191.823	3.907
7	30.627	7.926	22.701	515.335	117.238
8	24.615	5.318	19.297	372.374	55.111
9	10.509	5.410	5.099	26.000	45.892
10	5.386	5.000	0.386	0.149	131.959
11	16.941	3.981	12.960	167.962	1.181
12	17.867	5.858	12.009	144.216	0.018
13	11.275	5.694	5.581	31.148	39.593
14	13.622	6.726	6.896	47.555	24.774
15	19.971	5.160	14.811	219.366	8.630
16	15.132	4.957	10.175	103.531	2.884
17	13.716	5.280	8.436	71.166	11.815
18	13.830	4.963	8.867	78.624	9.038
19	7.714	5.895	1.819	3.309	101.090
20	23.200	6.237	16.963	287.743	25.905
21	15.750	4.487	11.263	126.855	0.373
標本平均			11.873	0	11.873
不偏分散（標本分散）			47.110		
自由度			20		
検定統計量			7.927		
片側1%点			2.528		
分散（最尤推定値）				185.843	44.867
最大対数尤度				−84.659	−69.737
自由パラメータ数				1	2
AIC値（AIC(1), AIC(2)）				171.318	143.473
BIC値（BIC(1), BIC(2)）				172.363	145.562

マイクロジョイントパイル工法建設技術審査証明報告書よりデータを引用

3.3　情報量統計学による評価方法

情報量統計学とは，次の赤池情報量規準(AIC)

$$AIC = -2 \times \text{最大対数尤度} \\ +2 \times \text{未知パラメータ数}$$

に代表される情報量規準を用いて，数理統計学の諸問題を見直す学術分野である[7),8),9)]。ここで，未知パラメータ数とは，未知数の個数から未知数に関する拘束条件数を減じたものである。AIC 以外に，ベイズの法則を基に導出された次式のベイズ型情報量規準(BIC)[8)]もよく用いられる。

$$BIC = -2 \times \text{最大対数尤度} \\ + \text{未知パラメータ数} \times log_e \text{標本数}$$

BIC と同型の MDL(Minimum Description Length)が土木分野へ応用されている事例[10)]があるので，本論文では AIC と BIC を用いる。

ここで,最大対数尤度は対象とする数学モデル（以下, モデル）の尤もらしさ（実現象とモデルとの近さ）を測る尺度で,それが大きいほど「現象を尤もらしく表現しているモデル」とされている。それに対して未知パラメータ数が小さい方が「簡潔で良いモデル」とされている。概して未知パラメータ数が大きく複雑なモデルの方が尤もらしいので, 情報量規準の値が小さいモデルが「尤もらしさ」と「簡潔さ」とのバランスがとれた良いモデルとなる。このことより，情報量規準は,簡潔に物理現象を表現するモデルを探す指標であると言える[7),8),9)]。

まず，新技術と従来技術との間で日施工量の差が無い，すなわち，その差が 0(既知)である場合をモデル 1, 日施工量に差がありその差が未知である場合をモデル 2 と設定する。双方とも分散は未知とする。

＜モデル 1＞

標本$x_i (i = 1,2,\cdots,n)$が平均値$\mu_1 = \mu (= 0)$ (既知)，分散$\sigma_1^2 (> 0)$(未知)の正規分布に従う母集団から抽出されたと仮定すると分散の最尤推定値は,

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2 \qquad (3.2)$$

となり，最大対数尤度MLL_1は

$$MLL_1 = -\frac{n}{2}(log_e 2\pi + log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) \qquad (3.3)$$

となる。未知数が$\hat{\sigma}_1^2$と 1 つでそれに関する拘束条件はなく未知パラメータ数は 1 で，AIC 値$AIC(1)$と BIC 値$BIC(1)$はそれぞれ

$$AIC(1) = -2MLL_1 + 2 \times 1 \\ = n(log_e 2\pi + log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) + 2 \quad (3.4a)$$

$$BIC(1) = -2MLL_1 + 1 \times log_e n \\ = n(log_e 2\pi + log_e \hat{\sigma}_1^2 + 1) + log_e n \quad (3.4b)$$

となる（詳細は付録参照）。

＜モデル 2＞

標本$x_i (i = 1,2,\cdots,n)$が平均値μ_2（未知），分散$\sigma_2^2 (> 0)$(未知)の正規分布に従う母集団から抽出されたと仮定すると，平均値と分散の最尤推定値は

$$\hat{\mu}_2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (3.5)$$

$$\hat{\sigma}_2^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \hat{\mu}_2)^2 \qquad (3.6)$$

となり，最大対数尤度MLL_2は

$$MLL_2 = -\frac{n}{2}(log_e 2\pi + log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) \qquad (3.7)$$

となる。未知数が$\hat{\mu}_2$および$\hat{\sigma}_1^2$の 2 つでそれらに関する拘束条件はなく未知パラメータ数は 2 で, AIC 値$AIC(2)$と BIC 値$BIC(2)$はそれぞれ

$$AIC(2) = -2MLL_2 + 2 \times 2 \\ = n(log_e 2\pi + log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) + 4 \quad (3.8a)$$

$$BIC(2) = -2MLL_2 + 2 \times log_e n \\ = n(log_e 2\pi + log_e \hat{\sigma}_2^2 + 1) + 2log_e n \quad (3.8b)$$

となる（詳細は付録参照）。

(3.2)～(3.8b)式に表-3 の具体的な数値を代入すると AIC 値および BIC 値はそれぞれ

$$AIC(1) = 171.318 > 143.473 = AIC(2)$$
$$BIC(1) = 172.363 > 145.562 = BIC(2)$$

となり, AIC 値および BIC 値が共に小さいモデル 2 が「良いモデル」として選択され，有意水準を決めなくても t 検定と同じ結果を得る。

4．まとめ

本調査研究においては, 評価の視点, 評価指標, 比較対象, 比較方法の一連の手順を示した。本報告で新たに導入した考え方は,

ｉ）評価指標を計測可能な日施工量とする
ⅱ）従来技術の日施工量を歩掛から求める
ⅲ）評価（比較）を数学的手法で実施する

の 3 点である。標準歩掛を用いることで従来技術での計測を標準的な施工法でシミュレートしたことになる。さらに, 情報量統計学の手法を用いることで，評価が(3.2)式～(3.8b)式を計算するだけで自動的かつ簡便に実施できる。

よって, 本研究では, 簡便で客観的な新技術の生産性評価手法を提案できた。

参考文献

1) 国土交通省：i-Construction報告書，平成28年4月
2) 国土交通省：ICT活用工事の実施状況（H30年度）
3) 一般財団法人先端建設技術センター：CEマニュアル，1996年3月
4) 一般社団法人日本建設機械施工協会：建設技術審査証明報告書　建設機械施工技術（建審証第1901号）マイクロジョイントパイル工法，2019年7月
5) 東京大学教養部統計学教室：統計学入門，東京大学出版会，1991年7月
6) 上田拓治：44の例題で学ぶ統計的検定と推定の解き方，オーム社，2009年5月
7) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎：情報量統計学（情報科学講座A・5・4），共立出版，1983年1月
8) 鈴木義一郎：情報量規準による統計解析入門，講談社サイエンティフィク，1995年4月
9) 小西貞則・北川源四郎：情報量規準（シリーズ<予測と発見の科学>2），朝倉書店，2004年9月
10) 長健次・髙津知司・橋本信仁：含水比の低い土砂の管路圧送における圧送特性の向上法，土木技術資料，31・10，p519-523，1989年10月

付録

A1. モデル１のAICとBIC

標本$x_i(i=1,2,\cdots,n)$が平均値$\mu_1=\mu$（既知），分散$\sigma_1^2(>0)$(未知)の正規分布に従う母集団から抽出されたものと仮定すると，その確率密度関数$p(x|\mu,\sigma_1)$は

$$p(x|\mu,\sigma_1)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}}exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_1^2}\right\}$$

なので，対数尤度LL_1は，

$$\begin{aligned}LL_1&\left(x_1,x_{2,}\cdots,x_n|\mu,\sigma_1\right)\\&=\sum_{i=1}^{n}log_e\,p(x_i|\mu,\sigma_1)\\&=-\frac{n}{2}log_e2\pi-\frac{n}{2}log_e\sigma_1^2-\frac{1}{2\sigma_1^2}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2\end{aligned}$$

となり，分散σ_1^2の最尤推定値$\hat{\sigma}_1^2$を最尤方程式より

$$\hat{\sigma}_1^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2 \qquad (A.1)$$

を得て，最大対数尤度MLL_1は次式となる。

$$MLL_1=-\frac{n}{2}(log_e2\pi+log_e\hat{\sigma}_1^2+1) \qquad (A.2)$$

以上より，このモデルでは未知パラメータ数が 1 なので，AIC 値$AIC(1)$と BIC 値$BIC(1)$は

$$\begin{aligned}AIC(1)&=-2MLL_1+2\times1\\&=n(log_e\,2\pi+log_e\,\hat{\sigma}_1^2+1)+2 \qquad (A.3a)\\BIC(1)&=-2MLL_1+1\times log_en\\&=n(log_e2\pi+log_e\hat{\sigma}_1^2+1)+log_en \qquad (A.3b)\end{aligned}$$

で求まる。

A2. モデル２のAICとBIC

標本$x_i(i=1,2,\cdots,n)$が平均値μ_2（未知），分散$\sigma_2^2(>0)$(未知)の正規分布に従う母集団から抽出されたものと仮定すると，その確率密度関数$p(x|\mu,\sigma_1)$は

$$p(x|\mu_2,\sigma_2)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}}exp\left\{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right\}$$

なので，対数尤度LL_2は，

$$\begin{aligned}LL_2&\left(x_1,x_{2,}\cdots,x_n|\mu,\sigma_1\right)\\&=\sum_{i=1}^{n}log_e\,p(x_i|\mu_2,\sigma_2)\\&=-\frac{n}{2}log_e2\pi-\frac{n}{2}log_e\sigma_2^2-\frac{1}{2\sigma_2^2}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu_2)^2\end{aligned}$$

となり，平均値μ_2と分散σ_1^2の最尤推定値$\hat{\mu}_2$および $\hat{\sigma}_2^2$は，それぞれは最尤方程式より

$$\hat{\mu}_2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \qquad (A.4)$$

$$\hat{\sigma}_2^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\hat{\mu}_2)^2 \qquad (A.5)$$

を得て，最大対数尤度MLL_2は次式となる。

$$MLL_2=-\frac{n}{2}(log_e2\pi+log_e\hat{\sigma}_2^2+1) \qquad (A.6)$$

以上より，このモデルでは未知パラメータ数が 2 なので，AIC 値$AIC(2)$ とBIC 値$BIC(2)$はそれぞれ

$$\begin{aligned}AIC(2)&=-2MLL_2+2\times4\\&=n(log_e\,2\pi+log_e\,\hat{\sigma}_2^2+1)+4 \qquad (A.7a)\\BIC(2)&=-2MLL_2+2\times log_en\\&=n(log_e2\pi+log_e\hat{\sigma}_2^2+1)+2log_en \qquad (A.7b)\end{aligned}$$

で求まる。

■