

建設技術の総合評価システム

The Comprehensive Evaluation System of Construction Technology

東京大学 ○ 國島 正彦^{*}
東京大学 渡邊 法美^{*}
Samwoo Eng. 申 鉉稷^{*}
東京大学 堀田 昌英^{*}

By Masahiko KUNISHIMA, Tsunemi WATANABE, SHIN Hyun Yang and Masahide HORITA

公共事業の入札・契約制度をめぐる数多くの議論を受けて、我が国でも技術力を重視した入札方式が導入されつつある。この合理的な運用のためには建設技術の総合的な評価手法の開発が必要不可欠である。本研究は、建設技術の基本的特性として経済性（初期建設費）・施工性・耐久性・供用性の4要素に着目し、これらの要素を詳細な定量的指標によって独立に評価し、4つの指標を貨幣単位に換算した総合費用を算定することによって一元的な総合評価を可能にする評価手法を提案した。この評価手法を、現時点における代表的なコンクリート新技術である締固め不要コンクリートに適用し、評価手法の妥当性を検証した。あわせて、新技術が使用される際の諸条件が評価結果に及ぼす影響を算定するために、経済成長の程度、社会経済環境や気象条件等を種々のパラメーターによって表現することによって感度分析を行った。

【キーワード】公共調達制度、建設技術評価システム、総合費用

1. はじめに

近年、外国企業の建設市場参入等による国際化の進展に伴う新たな社会経済情勢から、建設事業における公正な競争の確保や民間開発技術の積極的活用等の要請が高まりつつある。

このような状況に的確に対応するためには、社会的要請に応えられる技術そのものの開発と共に、それを円滑かつ合理的に実施するための入札・契約制度の在り方は重要である。

公共事業の入札・契約制度をめぐる数多くの議論を受けて、平成4年11月に建議された建設省中央建設業審議会答申¹⁾で、建設事業の執行において単に価格だけでなく、品質や安全あるいは美観等の総合的な技術評価を行って受注者を選定する等、各種の入札方式が提唱された。しかし、建設技術評価の手法は未だ十分に確立されていないのが現状である。

^{*} 工学部土木工学科 03-3812-2111

^{**} Laboratory 522-1700 (Seoul, Korea)

中建審答申でも指摘されているように、技術を重視した入札方式の導入に当たっては、建設技術を総合評価するための評価要素の抽出及び的確な算定方式の構築、実施に当たっての手続きなどについて十分に検討する必要がある。

建設新技術の導入にあたっては、それが長期的観点から見て社会的に有用性が高いと思われる場合でも、従来から一般的に行われてきた初期建設費にのみ重点を置いた評価方法では、採用されない可能性が高くなる。すなわち、現在の我が国の建設技術開発の基本的ビジョン、省人化施工、省エネルギー、メンテナンスフリーを念頭におけば、初期建設費が多少高くても、維持管理費を低減させる耐久性の向上や、工期、安全性、美観などのほかの要素に優れていれば、積極的な導入を図るべきと考えられる。

このような背景から、本論文では建設技術の基本的特性として施工性・経済性（初期建設費）・耐久性・供用性に着目し、各要素を定量的かつ総合的に評価する体系を構築することを試みた。

施工性、経済性、耐久性および供用性を以下に示すように定義した。

① 施工性

全体の建設事業過程で、施工段階に着目した時間、労働力、安全性、環境保全、資機材の資源活用への建設技術の適応性。

② 経済性

建設技術の費用最小化能力。

③ 耐久性

建設技術を用いて建設された構造物が供用中に顕著な劣化を伴わずに長期間使用され続ける程度。したがって、高い耐久性は構造物のライフタイムを延ばし、供用中の維持・補修費用を低減させる。

④ 供用性

建設技術を用いて建設された構造物が、その供用期間に利用者に供する便益の大きさ。たとえば、自然環境への配慮や、技術の社会的意義、国家的威信や建設産業のイメージ向上なども含まれる。

経済性及び耐久性については既にいくつかの評価手法が提案されており、本論文においても既存の手法を参照した^{2),3)}。施工性及び供用性の評価は、その特性の内容を厳密に検討し、その特性を成分(Component)・要素(Element)・属性(Attribute)の三段階の階層に分解して表現した。評価手法の基本的枠組みは、新技術の保有する属性に関して、標準的な技術との得失を考慮しつつ評価得点を与え、各評価項目の重要度に応じた重みづけを行なって総得点を算出し、それを施工性指数及び供用性指数として定量的に表現した。

総合的な建設技術評価は、様々な特性や要因の評価結果を一元的な指標によって表現することができれば、より透明性のある公共調達制度の構築に有用であり、貨幣換算した一元的な指標とすることが実用的と考えられる。

本研究は、施工性、経済性、耐久性および供用性の特性に着目した建設技術評価手法と、それらを一元的に全て貨幣単位に換算する手法を提案した。

2. 施工性

施工性の評価項目を、建設現場の実態調査や聞き取り調査及び既存の研究結果などに基づき、表-1

に示すように整理した。

(1) インデックス法を用いた新技術の施工性評価

インデックス法は、施工性の指標の、それぞれの項目を、ある建設技術がどの程度達成しているかを算定することによって評価を行うものである。表-1に示す属性は、実験や実態調査等によって比較的容易に算定できるものと、現場の施工条件や自然・社会・経済環境にたいする依存性が大いという建設技術の特性のために、定量的に算定することが困難なものがある。この問題に対応するため、いくつかの新しい概念を加えて、総合的な施工性評価システムを構築した。

a) 基準技術の概念の導入

建設新技術の内容をより明示的に表現するために、基準技術の概念を導入した。ある新技術の評価するときには、一般的に同分野における既存の技術との比較を行うことになる。この比較対象となる標準的な水準の技術を基準技術と呼ぶこととした。

b) 属性の評点化

本研究は、各属性に1点から5点までの得点を与え、それを評価値とすることとした。

評点付けの手順は以下の通りである。

① 基準技術を想定する。

② 基準技術の全ての属性に得点3を与える。

③ 可能な項目は、属性の効用関数を決定する。

④ 効用関数が決定された場合、新技術の評点を関数によって求める。効用関数が決定できない場合は、基準技術と比較を行い、工学的判断に基づき次のように評点を決定する。即ち、

5…非常に優れている

4…優れている

3…同程度

2…劣る

1…非常に劣る

c) 重みづけ

工事に伴って内在する内部条件のみならず、社会的背景、国家的条件、地域条件等の外部条件もまた、技術の評価に大きな影響を与える。本研究は新技術に関する施工性の成分・要素・属性それぞれの階層において、各評点に重み係数を与えることにより外部条件を取り扱うこととした。重み係数は、階層にかかわらず、一対比較法を用いて決定した。い

表-1 施工性の評価項目

No	成分	要素	属性	No	成分	要素	属性
1	労働力	1.労働意欲促進	1.雇用保証	4	作業環境 及び 安全性	1.危険	1.きつさ
			2.賃金				2.スリップ
			3.労働価値				3.コミュニケーション
			4.作業速度				4.騒音
			5.きつさ				5.作業活動範囲
			6.学習期間				6.作業高度
			7.補修作業頻度				7.特定機器
			8.作業継続性			2.きつい	1.きつさ
			9.作業高度				2.退屈さ
		2.必要熟練度低減	3.騒音				
2	作業時間	1.作業時間低減	1.必要熟練度				4.作業活動範囲
			3.労働者数低減			1.必要労働者数	5.作業速度
		2.損失時間低減	1.学習期間			6.修理作業頻度	
			2.悪天候への適応性			7.作業継続性	
			3.作業アクセス			3.汚い	1.開放性
			1.信頼性				2.排気ガス
		2.修理作業頻度	3.油				
		3.突発事故	4.直接接触手作業				
		4.迅速な資源動員	5	品質	1.耐久性向上	1.単純性	
		3.省略可能作業				1.標準化可能性	2.標準化可能性
						2.モジュール作業化可能性	3.モジュール作業化可能性
						3.単純性	4.作業アクセス
		4.不確実性低減				1.作業過失	5.悪天候への適応性
2.サボタージュ	6.信頼性						
3.資材不足	7.学習期間						
4.自然災害	6					近隣への 影響	1.周辺環境への 影響
3		省資源					
			3.大気汚染				
			4.作業者数				
			2.危険事故防止	1.特定機器			
				2.非固定機器の重量			

ま、成分要素属性の重みづけを例に取ると、

① 要素*j*に属する諸属性の中で、全体の技術評価値と最も相関が小さいと思われるものを選び、それを基準属性とする。

② 基準属性に係数1を与える。

③ 他の任意の属性を基準属性と比較し、任意の属性が基準属性と比較して、評価項目としての重要性が W'_{jk} 倍高いと考えられた場合、その属性に係数 W'_{jk} を与える。

④ 最後に、各係数を全属性の係数の総和で除して正規化したものをある属性の重み係数とする。即ち、成分要素属性の重み係数 W_{ijk} は式(1)によって求められる。

$$W_{ijk} = \frac{W'_{ijk}}{\sum_{k=1}^{n_j} W'_{ijk}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

n_j : *i*成分*j*要素に属する属性の項目数

d) 施工性評価の一般式

以上のようにして求められた各階層ごとの評価値と重み係数を用いると、式(2)(3)により新技術の施工性に関する総合的な評価指標を得ることが出来る。

$$R_0 = 3 \dots\dots\dots (2)$$

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_{ij}} W_i W_{ij} W_{ijk} R_{ijk} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

R_0 : 基準技術の総合的評価値

R : 新技術の総合的評価値

i : 成分

j : 要素

k : 属性

R_{ijk} : 新技術の、 i 成分/ j 要素/ k 属性の評点

W_i : i 成分の重み係数

W_{ij} : i 成分/ j 要素の重み係数

n : 成分の項目数

n_i : i 成分に属する要素の項目数

n_{ij} : i 成分/ j 要素に属する属性の項目数

このように、新技術の総合的評価値は各属性の評点の重みづけ和によって表される。基準技術の総合的評価値は定義から常に3に等しいので、新技術の有効性は R と3との差によって表現することができる。

3. 供用性

供用性は建設技術の重要な目的の一つであるにもかかわらず、歴史的知見の不足や将来予測の困難性により、その評価は非常に難しい。本研究は、施工性と同様にインデックス法を用いてその定量化を試みた。但し、それぞれの重み係数は全て等しいと仮定した。

供用性の概念は地球環境への影響、社会的影響や社会基盤施設の機能など広範な範囲に及んでいるが、ここでは供用性を3つの成分に大別。即ち、

- ① 快適性の向上
- ② 社会的便益の創出
- ③ 地球環境との調和

である。具体的な成分、要素の各項目を表-2に示す。

4. 耐久性

土木学会コンクリート委員会によって提唱されたコンクリート構造物の耐久設計指針³⁾は、コンクリート構造物のみならず、広く技術評価に応用可能な評価システムである。

耐久設計指針の概念は次のように要約される。コ

表-2 供用性評価項目

No	成分	要素
1	快適性の向上	1.安全
		2.利便性
		3.美観
		4.時間節約
		5.減税
2	社会的便益の創出	1.国家的威信
		2.建設産業のイメージ改善
		3.雇用拡大
3	地球環境との調和	1.土壌汚染
		2.CO2
		3.騒音
		4.水質汚染
		5.自然破壊

ンクリート構造物の設計時において、環境指数と耐久指数とがそれぞれ定義される。ここで、環境指数とは塩害の可能性、凍結融解作用、必要とされるメンテナンスフリーの期間等によって決定される指数である。耐久指数は材料の選定、設計及び施工方法に関する全ての項目に対する評価値の和で与えられる。

即ち、

$$Tp = 50 + \sum Tp(I,J) \dots\dots\dots (4)$$

$$Sp = S_0 + \sum \Delta Sp \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

I : 成分

J : 要素

$Tp(I,J)$: 成分I要素Jの耐久性ポイント

Tp : 耐久指数

Sp : 環境指数

S_0 : 通常の施工環境下における環境指数

ΔSp : 塩害、凍害等を考慮した施工環境条件に応じて加えられる数値

耐久設計指針によると、コンクリート構造物が50年間メンテナンスフリーであるとした場合、 $S_0=100$ が与えられる。これにより求められた Tp と Sp を比較し、 $Tp \geq Sp$ が成り立つとき、その構造物に、所要の耐久性があるとしている。

5. 経済性

一般に、工事費は直接工事費、共通仮設費、現場管理費、一般管理費の4つに大分類される。この内、現場管理費の内容は施工性と大きく関係するものである。したがって、技術評価を総合的に行う過程において各要素の重複算定を避けるために、経済性を表す指標として直接工事費と共通仮設費のみからなる、純工事費を採用することがよいと考えた。

6. 各評価指標の貨幣単位への換算

4つの評価指標の内、施工性、耐久性、供用性の3つを貨幣単位に換算する。

(1) 施工性

経済性・施工性・耐久性・供用性の包括的評価という観点からすると、6つの成分に分けられた施工性評価項目の内、成分3（省資源）及び5（品質）はそれぞれ経済性、耐久性においても考慮されている項目であるため、これらを施工性に含めると重複算定を行うことになる。したがって、ここでは施工性として以下の4項目のみを採用することとした。即ち、

1. 労働力
2. 作業時間
3. 作業環境及び安全性
4. 近隣への影響

である。

施工性に含まれる評価項目のいくつかについては、既存の研究に基づいた統計資料及びサンプリングデータ等の活用が可能である。得られたデータを用いると、各成分・要素に与えられた評点は以下の手順によって貨幣単位へと換算される。

1. 各成分・要素に与えられた評点の最高点（5点）が表す技術レベルを具体的に定義し、理想技術(IDT)とする。

2. 基準技術（対象の新技术と同目的の技術の中で現在最も普及している技術：STD）を用いて行われた場合の費用を各成分・要素ごとに算定する。統計資料等の入手可能なデータは全て現状に基づくものであり、したがってこれらのデータは全て基準技術を用いて行われた結果であると仮定することができる。この仮定の下で、各成分・要素における基準

技術の費用を算定することができる。

3. 新技术を用いて行われた場合の費用を算定する。ここでは、データによって得られた費用と各項目の評点との関係は1次関数で近似できると仮定し、基準技術及び理想技術の費用と新技术の評点から、新技术の費用を算定する。

以上のような考え方と手順に基づき、各成分・要素に与えられた評点の貨幣単位換算を以下に示すように行う。

C.1 労働力

成分「労働力」は表-1より3つの要素、即ち「労働意欲促進」「必要熟練度低減」「労働者数低減」に分解される。

要素「労働意欲促進」は、ある新技术が導入されたことによって、労働者が勤労意欲を増したときの非作業時間の減少として現れると考えられる。Thomas⁴⁾は現場の実態調査によって、現状における平均的な非作業時間の相対的な割合を求めている。非作業時間の減少から生じる超過費用額を以て労働意欲促進の指標とする。非作業時間の減少はC.2の総作業時間の減少とも関わっているが、ここでは非作業時間の減少は総作業時間の減少に比べて十分に小さいとし、成分間の独立性は保たれていると仮定した。

要素「必要熟練度低減」では、新技术によって要求される各作業員の技能水準が低くなる場合も、労働意欲を促進する結果になると考え、この要素も同様に非作業時間の減少によって表されると想定した。したがって、成分C.1は非作業時間で一元的に表されると考えた。

C.2 作業時間

E.1 作業時間低減

本要素は「学習期間」「悪天候への適応性」「作業アクセス」の3つの属性からなる。この中で「悪天候への適応性」については、基準技術を用いて工事を行ったときの悪天候の日数や、休日および祝日などによって決定される一種の重み係数⁵⁾を用い、損失作業日数を計算することによって定量化が可能である。損失作業日数は、施工者が受け取る工事費の現在価値の差額として貨幣単位に換算することができる。理想技術では悪天候によって作業工程が左右されることはないとは仮定した。

「学習期間」は作業自体が十分に容易なものであれば技術間の差は無視できるので、ここでは「悪天候への適応性」のみを考えることとした。

E.2 損失時間低減

後に述べるケーススタディのようなコンクリート工事においては、その作業の単純性から、「信頼性」「修理作業頻度」「突発事故」「迅速な資源動員」の各属性に因る大きな問題が起こるは非常に稀であると予想される。したがって、本研究では損失時間の低減は考慮しないこととした。

E.3 省略可能作業

ここでは、ある技術の分野において、必要作業数の観点から最も理想技術に近いと思われるものを選定し、その技術の作業日数が施工性評点の5点に相当すると仮定する。基準技術の作業日数は既存のデータから得られるので、その日数と理想技術との日数の差が基準技術の省略可能作業から起こる損失であると考えられる。

この損失を貨幣単位に換算する方法はE.2と全く同様である。ここで、施工性の評点と施工性に伴うコストは比例関係にあると仮定しているので、他の技術の損失費用もE.2と同様にして求められる。

E.4 不確実性低減

不確実性低減の要素は「作業過失」「サボタージュ」「資材不足」「自然災害」の4つの属性に分解される。これらの可能性は日本国内の場合は決して大きくはないものの、ひとたびこの状況が起きると再作業等によって工事費に多大な影響を及ぼすことになる。ある新技術が上のような状況に陥る可能性を低減させることができたとき、ここではそれを「不確実性の低減」と定義する。

ここでは、理想技術を用いた場合の不確実性から生じる超過的な費用は0であると仮定する。一方、基準技術の不確実性から生じる費用とは、その基準技術が使用され、かつ上のような状況に陥った特定の工事が、その事柄によって負担した超過的な費用のことであるとする。ここでも同様に施工性の評点と超過費用の比例関係から、各技術についての不確実性から生じる超過的な費用を算定する。

C.3 作業環境及び安全性

作業環境及び安全性を表す指標として、ここでは保険費用を採用する。建設産業の労働災害に伴う費

用に関する研究はすでに行われているが、Hinzeら⁹⁾によると労働災害に伴う間接費用は、何らかの医療措置を必要とする災害事例については保険費用の4.2倍、作業遂行に支障をきたす程度の災害については20.3倍であるという。労働災害の伴う費用は工事費の大きさに比例すると仮定すると、この係数を用いることによって、現状の統計資料に基づいた保険費用の総額から労働災害に伴う全費用が推計される。

理想技術を用いた工事では、労働災害は起こらないと仮定し、その労働災害費用は0であるとする。これより、比例関係を用いて施工性の評点から各技術の労働災害費用が求められる。

C.4 近隣への影響

E.1 周辺環境への影響

工事に伴う騒音によって周辺地域の多数の住民が被害を被る恐れのある場合は、締め固め作業等で使用される建設機械の機種をより低騒音のものにしなければならない。これらの低騒音機械は通常の機械よりも費用が高いため、この差額は周辺環境を保全するための費用と考えることができる。したがって、基準技術を用いた場合の環境保全に関する超過費用は、それぞれの機械費の差額から求められる。

理想技術については、周辺環境に悪影響を与える要因は存在しないと仮定し、環境保全に伴う超過費用は0とする。他と同様に、これより施工性の評点から各技術の超過費用を求める。

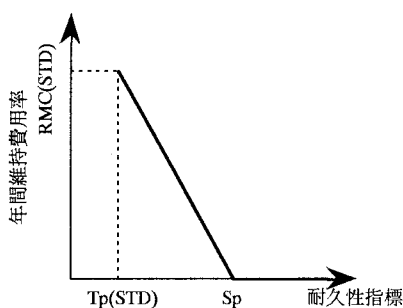
E.2 危険事故防止

周辺住民の事故が起きることによって生じる超過費用はC.3の「作業環境及び安全性」と全く同様の手順によって求められる。

(2) 耐久性

維持作業とは構造物が常に同じ品質レベルに保つために行う補修作業である。一般に、耐久性が優れていればいるほど維持作業の費用は低いと考えてよい。耐久性の評価指標として、土木学会のコンクリート構造物の耐久設計評価指針³⁾による耐久性指標(T_p)を用いたが、この耐久性指標は構造物の維持費と強い相関があると考えられる。したがって、構造物の維持費に関する統計から、耐久性指標と維持費との関係が推計できる。

耐久設計評価指針の考え方に基づくと、ある構造



図－1 耐久性指標と年間維持費用の関係

物の耐久性指標が施工条件によって規定される環境指標(S_p)を上回っている場合、その構造物の維持費は0になるとされる。耐久性指標が環境指標を下回っているとき、耐久性指標と新技術を用いたときの維持費用率は比例関係にあると仮定すると、その関係は図－1のように表される。

この様にして求められた構造物の年間維持費を年ごとに加えることによって最終的な維持費が求められる。ただし、年間維持費は社会的割引率によって現在価値に換算される。

(3) 供用性

供用性は「快適性の向上」「社会的便益」「地球環境との調和」の3成分に分解されたが、「快適性の向上」に関しては、その特質上貨幣単位への換算が非常に難しいため、本研究では割愛した。「地球環境との調和」に関しても、施工技術が地球環境に重大な影響を及ぼす場合は外部費用を考慮に入れる必要があるが、建設技術の多様性を考慮して、その算定方法を一般化することはできなかった。実際には個々の事例に応じた様々な手法を用いることによって、地球環境の社会的費用を評価すべきであり、今後の重要な研究課題である。

社会的便益を考える場合、貨幣単位への換算が最も重要な意味を持つのは「雇用拡大」の要素である。

慢性的な人手不足に悩む日本の労働市場においては、ある新技術によって必要作業員数が減少するということは、建設産業のみならず、その減少分の人手を確保することが可能になる他のあらゆる産業についても大きな便益が生じることを意味する。

ある労働者の産出能力は全ての産業において等し

いと仮定すると、新技術によって節約された労働力は他の産業に投入され、1人当りのGNPに等しい価値の生産を行えると想定できる。この産出量は結果的にGNPの増加分として現れる。したがって、本研究ではこのGNP増加分を新技術の供用性の持つ貨幣価値であると考えた。

7. ケーススタディ

本研究で提案した技術評価体系の妥当性を検証するために、ケーススタディを行った。事例として近年の代表的な新技術の一つである締固め不要コンクリートを選定し、締固め不要コンクリートを用いて異なる工法を適用した鉄筋コンクリート橋脚(図－2)の建設について検討した。

(1) 基準技術(STD)

基準技術として木製型枠と標準的なコンクリートを用いた場合を設定した。工程の中には次の作業が含まれる。

- ① 足場組立
- ② 鉄筋組立
- ③ 型枠組立
- ④ コンクリート打設
- ⑤ 養生
- ⑥ 型枠解体
- ⑦ 鉄筋加工

(2) 木製型枠と締固め不要コンクリート(HPC)⁷⁾を組合せた場合

一般の型枠と締固め不要コンクリートを組合せた場合、工程は基準技術の場合と同様であるが、締固め作業が不要になるために、必要とされる作業員数の低減が見込まれる。

(3) ポリマー含浸コンクリートプレキャスト(PIC)⁸⁾を用いた締固め不要コンクリートを組合せた場合

ポリマー含浸コンクリート型枠(PIC)はコンクリート構造物の耐腐食性を高めるための技術である。

PICのプレキャストを埋設型枠として構造物の表面に配置する工法である。

埋設型枠は構造物の一部として恒久的に使用されることになるため、型枠解体作業に相当する時間及び労働力も省略できる。

(4) 鋼製エレメントを用いた鋼・コンクリート合成

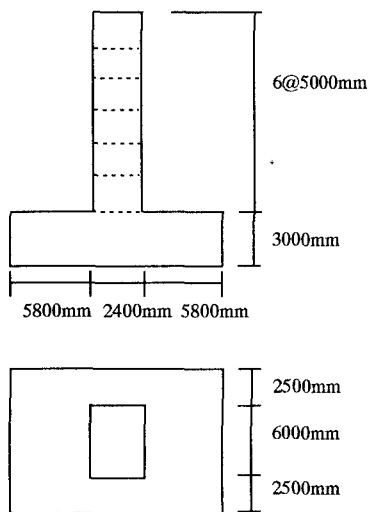


図-2 モデル橋脚

表-4 各技術を用いたモデル橋脚工事における推定作業日数・推定作業人数

技術	STD	HPC	PIC	SEM
セグメント数	6個	6個	6個	3個
セグメント毎必要日数	11日	11日	9日	8日
クリティカルパス上必要日数	70日	70日	58日	24日
ヤード作業必要日数	17日	11日	9.5日	0日
セグメント毎必要労務者数	58人・日	52人・日	34人・日	28人・日
クリティカルパス上必要労務者数	365人・日	337人・日	223人・日	84人・日
ヤード作業必要労務者数	110人・日	110人・日	66人・日	0人・日
クレーン作業必要労務者数	70人・日	70人・日	58人・日	24人・日
必要労務者数	545人・日	517人・日	347人・日	108人・日

構造 (SEM)⁹⁾の場合

鋼・コンクリート構造とは、鋼材がフレッシュコンクリートの側圧に耐えるのみならず構造部材としても機能するように設計された構造をいう。したがって、型枠及び鉄筋の組立・解体各作業も省略できる。

鋼材がフレッシュコンクリートの側圧に十分に耐えられるだけの強度を持っていると仮定すると、1回のコンクリートの打設高はブリージングの悪影響の程度によって制限されることになる。HPCのブリージングの影響は通常のコンクリートのそれよりも著しく小さいので、各リフト高さはHPCの使用によって大きくすることができる。これに伴って打継目の処理等の作業が減少し、その工期はさらに短縮できる。

以上4つの建設技術を用いた場合の推定作業日程、作業人数等を標準積算基準や日本道路公団等の公共企業体における施工実態調査資料を基に算定して整理した結果は表-3に示す通りである。

8. 評価結果

(1) 施工性

施工性の重み係数は種々の条件に伴って変化するが、ここでは重み係数を発展途上国と先進国の2つ

の場合に分類して考える。各々の外部条件を考慮して決定した重み係数とケーススタディの事例の施工計画に基づき決定した対象技術の属性に与えられた評点を表-4に示す。

これらの重み係数と評点から各技術の施工性が総合的に評価できる。評価結果を表-5に示す。

この結果から、重み係数が全て等しいと仮定した場合、及び、先進国の外部条件に相当する重みを付加した場合においては、HPC、PIC、SEMいずれの新技術も基準技術よりも施工性において優れていることが分かる。

途上国においては成分3の「省資源」の重要性が大きいと想定すると、その影響で基準技術が他に比べて最も優れた施工性があるという評価結果となる。

(2) 供用性

供用性に関する各要素の評点及び評価結果を表-6に示す。供用性において最も優れた技術はPICであるという結果となった。SEMがそれ程傑出した供用性を示していない理由は、要素1.3に相当する「美観」の評価結果にあると考えられる。したがって、今後SEMの表面防蝕技術などが開発されれば、供用性の評価結果を高めることができる。

(3) 耐久性

コンクリート構造物の耐久性設計指針に基づいて求められた耐久性ポイントの結果、及び耐久性指標

表-4 施工性評価項目重み係数と評点

項目	評点				重み係数	
	STD	HPC	PIC	SEM	先進国	途上国
C1	労働力				0.08	0.10
E.1.1					0.08	0.14
A.1.1.1	3	3	3	3	0.08	0.24
A.1.1.2	3	3	3	3	0.25	0.30
A.1.1.3	3	4	4	4	0.03	0.03
A.1.1.4	3	3	4	5	0.08	0.06
A.1.1.5	3	3	4	5	0.13	0.09
A.1.1.6	3	2	4	4	0.08	0.06
A.1.1.7	3	4	5	5	0.13	0.06
A.1.1.8	3	2	2	2	0.13	0.06
A.1.1.9	3	3	3	3	0.13	0.09
E.1.2					0.15	0.71
A.1.2.1	3	3	4	4	1.00	1.00
E.1.3					0.77	0.14
A.1.3.1	3	4	5	5	1.00	1.00
C2	作業時間				0.17	0.10
E.2.1					0.40	0.40
A.2.1.1	3	2	4	4	0.14	0.14
A.2.1.2	3	4	4	5	0.71	0.71
A.2.1.3	3	3	3	2	0.14	0.14
E.2.2					0.30	0.30
A.2.2.1	3	5	5	5	0.63	0.63
A.2.2.2	3	3	3	3	0.13	0.13
A.2.2.3	3	3	2	1	0.13	0.13
A.2.2.4	3	3	3	3	0.13	0.13
E.2.3					0.20	0.20
A.2.3.1	3	3	5	5	0.33	0.33
A.2.3.2	3	3	3	5	0.50	0.50
A.2.3.3	3	3	5	5	0.17	0.17
E.2.4					0.10	0.10
A.2.4.1	3	4	4	4	0.13	0.08
A.2.4.2	3	3	3	3	0.13	0.08
A.2.4.3	3	3	3	3	0.13	0.77
A.2.4.4	3	3	3	3	0.63	0.08
C3	省資源				0.08	0.50
E.3.1					0.11	0.04
A.3.1.1	3	3	3	2	1.00	1.00
E.3.2					0.33	0.04
A.3.2.1	3	3	4	5	1.00	1.00
E.3.3					0.22	0.12
A.3.3.1	3	4	4	3	1.00	1.00
E.3.4					0.22	0.77
A.3.4.1	3	2	1	1	1.00	1.00
C3.5					0.11	0.04
A.3.5.1	3	3	3	3	1.00	1.00
C4	作業環境及び安全性				0.17	0.10
E.4.1					0.50	0.50
A.4.1.1	3	3	4	5	0.25	0.25
A.4.1.2	3	3	3	3	0.21	0.21
A.4.1.3	3	3	3	3	0.18	0.18
A.4.1.4	3	4	4	3	0.14	0.14
A.4.1.5	3	4	4	5	0.11	0.11
A.4.1.6	3	3	3	3	0.07	0.07
A.4.1.7	3	3	3	3	0.04	0.04
E.4.2					0.33	0.33
A.4.2.1	3	3	4	5	0.25	0.25
A.4.2.2	3	4	4	5	0.21	0.21
A.4.2.3	3	4	4	3	0.18	0.18
A.4.2.4	3	4	4	5	0.14	0.14
A.4.2.5	3	3	5	5	0.11	0.11
A.4.2.6	3	4	5	5	0.07	0.07
A.4.2.7	3	2	2	2	0.04	0.04
E.4.3					0.17	0.17
A.4.3.1	3	3	4	5	0.40	0.40
A.4.3.2	3	3	3	2	0.30	0.30
A.4.3.3	3	3	3	3	0.20	0.20
A.4.3.4	3	4	4	4	0.10	0.10
C5	品質				0.17	0.10
E.5.1					1.00	1.00
A.5.1.1	3	4	5	5	0.25	0.25
A.5.1.2	3	3	5	5	0.21	0.21
A.5.1.3	3	3	3	5	0.18	0.18
A.5.1.4	3	3	3	3	0.14	0.14
A.5.1.5	3	4	4	5	0.11	0.11
A.5.1.6	3	5	5	5	0.07	0.07
A.5.1.7	3	2	4	4	0.04	0.04
C6	近隣への影響				0.17	0.10
E.6.1					0.67	0.50
A.6.1.1	3	4	4	3	0.40	0.40
A.6.1.2	3	3	3	2	0.30	0.30
A.6.1.3	3	3	3	2	0.20	0.20
A.6.1.4	3	4	5	5	0.10	0.10
E.6.2					0.33	0.50
A.6.2.1	3	3	3	3	0.50	0.50
A.6.2.2	3	3	3	2	0.50	0.50

の評価結果を表-7に示す。

評価結果によると、標準的な施工条件の下においては、基準技術を含む全ての技術に十分な耐久性が認められた。ケーススタディで想定した高さ(30m)の

橋脚が、厳しい環境条件の下で建設されるとした場合、塩害を考慮した環境指標の増分($\Delta Sp=70$)を Sp_i に加えて、 $Sp=170$ が得られる。この条件では、基準技術の耐久性が問題になるものの、他の新技術は依然

表-5 施工性評価結果

	STD	HPC	PIC	SEM
重みなし	3.00	3.25	3.66	3.64
先進国	3.00	3.48	3.97	4.03
発展途上国	3.00	2.85	2.71	2.70

として十分な耐久性が期待されることが分かる。

(4) 経済性

標準積算基準に基づいて純工事費を算定した結果を表-8に示す。新技術の初期建設費はいずれの場合も基準技術を上回っていることが分かる。

(5) 貨幣単位への換算

a) 施工性

C.1 労働力

基準技術の労務費($L.C.=¥13,970,229$)より、各技術の非作業時間に伴う超過費用が求められる。

C.2 作業時間

E.1 作業時間低減

基準技術の実質作業日数は70日となる。ここでは工事が3月から9月の間に行われると仮定し、天候、旧祝日に関する係数を定めた。この係数と、総建設費および社会的割引率(6%)を用いると、損失作業日数が算定される。

E.3 省略可能作業

この要素に関する評価結果は、SEMが最高点(5点)を評点として与えられているので、ここではSEMを理想技術であると仮定する。これより、各技術の超過費用を基準技術とSEMの作業日数の差、及び建設費から求めた。

E.4 不確実性低減

6節において示した手順に従い、ここでは同分野の特定の工事としてマレーシアのパナン橋プロジェクトを採用する^{10),11),12)}。このプロジェクトでは、ある橋桁へのコンクリートの打設中に台風に伴う豪雨に見舞われ、打設途中でタワークレーンのオペレーターが現場から避難してしまった。後の検査によってそのコンクリートは強度上の問題があることが明らかになり、2ヶ月を費やしてその桁を撤去し、再度打設を行った。即ち、工期に2ヶ月の遅延が生じたわけである。この事例は、属性「作業過失」に相当すると考えられる。

表-6 供用性評価結果

No	成分	要素	STD	HPC	PIC	SEM
1	快適性の向上	1.安全	3	3	3	3
		2.利便性	3	3	3	3
		3.美観	3	4	5	2
		4.時間節約	3	3	3	3
		5.減税	3	2	1	1
2	社会的便益	1.国家的威信	3	4	4	4
		2.建設産業の イメージ改善	3	4	5	5
		3.雇用拡大	3	4	5	5
3	地球環境との調和	1.土壌汚染	3	3	3	3
		2.CO2	3	3	3	3
		3.騒音	3	4	4	4
		4.水質汚染	3	3	3	3
		5.自然破壊	3	3	5	5
評価結果			3.00	3.40	3.76	3.56

本研究では、このプロジェクトを基準技術を用いた典型的な工事であると考え、この作業過失が起きた確率を以て基準技術の不確実性とする。パナン橋プロジェクトにおいて建設された全橋桁数76セグメントの内、作業過失により撤去された桁は1セグメントである。これより、基準技術の不確実性は $1/76=1.3\%$ とする。この確率に基づき、不確実性に伴う超過作業日数=5日を得た。C.2 作業時間：E.1 作業時間低減の項で扱った方法を用いると、損失日数から被る超過的な費用が算定できる。

さらに、撤収及び再打設に伴う費用もまた超過分として扱うべきである。撤収及び再打設にかかる費用はそれぞれ等しいとすると、この超過費用は次のようにして求められる。

$$RC = 0.013 \times NC \times 2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

RC：不確実事項による超過工事費

NC：モデル橋脚の純工事費

表-8より得られる純工事費を用いると、式(6)よりRCが求められる。したがって、不確実性にもなう費用は損失日数による超過費用と、再履行費用RCの和によって与えられる。

C.3 作業環境及び安全性

労働省¹³⁾の調査によると、1992年の日本で発生した建設労働災害に関する保険費用の総額は、医療措置を必要とした災害事例については¥64,276×

表－7 耐久性評価結果

項 目		STD	HPC	PIC	SEM	項 目		STD	HPC	PIC	SEM
Tp(1,J)	コンクリート材料					Tp(4,3)	鉄筋の段数およびあき				
Tp(1,1)	セメント	0	10	10	10	Tp(4,3.1)	鉄筋の段数およびあき	4	4	4	30
Tp(1,2)	骨材の吸収率	-3	-3	-3	-3	Tp(4,3.2)	内部振動機の届かない深さ	0	0	0	0
Tp(1,3)	骨材の粒度	0	0	0	0	Tp(4,4)	用心鉄筋	3.3	3.3	3.3	0
Tp(1,4)	混和材料					Tp(4,5)	打継目	-6	-6	-6	-6
Tp(1,4.1)	混和材料 1	0	20	20	20	Tp(4,6)	設計図	0	0	0	0
Tp(1,4.2)	混和材料 2	0	0	0	0	Tp(5,J)	コンクリート工				
Tp(2,J)	コンクリートおよび補強材					Tp(5,1)	主任技術者	5	5	5	5
Tp(2,1)	ワーカビリティ					Tp(5,2)	受入れ	0	5	5	5
Tp(2,1.1)	流動性	15	28	28	28	Tp(5,3)	運搬・打込み・締固め	0	0	0	0
Tp(2,1.2)	材料分離抵抗性	-9	5	5	5	Tp(5,4)	表面仕上げ・養生	0	-5	-5	-5
Tp(2,2)	堅硬性	5	20	20	20	Tp(6,J)	鉄筋工・型枠・支保工				
Tp(2,3)	単位水量	3	5	5	5	Tp(6,1)	鉄筋加工	0	0	0	5
Tp(2,4)	塩化物含有量	5	5	5	5	Tp(6,2)	鉄筋の組立て	0	0	0	0
Tp(2,5)	コンクリート製造工場の管理状態	0	10	10	10	Tp(6,3)	型枠	0	0	10	5
Tp(2,6)	防錆した補強材	Tp(4,2)で考慮				Tp(6,4)	支保工	0	0	0	0
Tp(3,J)	設計ひびわれ					Tp(8,J)	防護工				
Tp(3,1)	温度ひびわれ指数	4	7	7	7	Tp(8,1)	表面防護工	0	0	5	0
Tp(3,2)	曲げひびわれ幅	10	10	10	10	計（耐久性ポイント）		66	153	168	126
Tp(4,J)	部材の形状・鉄筋詳細・設計図					耐久指数(Tp)		115	203	218	176
Tp(4,1)	部材の形状・寸法	Tp(2,1)で考慮				環境指数(Sp)		100	100	100	100
Tp(4,2)	かぶり	30	30	30	-30	結果		良	良	良	良

表－8 経済性評価結果

項目	STD	HPC	PIC	SEM
直接工事費				
労務費	13,970,229	13,132,449	8,556,784	2,481,600
材料費	12,710,817	17,045,217	24,259,664	44,553,307
機械費	19,164,287	19,164,287	15,493,487	4,355,891
計	45,845,333	49,341,953	48,309,935	51,390,798
共通仮設費				
運搬費	724,356	769,734	758,466	796,557
準備費	1,159,887	1,228,615	1,207,748	1,264,214
仮設費	-	-	-	-
事業損失防止施設費	-	-	-	-
安全費	408,023	429,275	425,127	441,961
役務費	-	-	-	-
技術管理費	646,419	680,919	671,508	704,054
営繕費	1,687,108	1,766,442	1,743,989	1,808,956
計	4,625,794	4,874,985	4,806,839	5,015,742
純工事費	50,471,127	54,216,937	53,116,774	56,406,540

10⁶、作業遂行に支障をきたす程度の災害については
¥258,904×10⁶である。これにより、基準技術を用
いた工事の労働災害費用を算定する。

C.4 近隣への影響

本ケーススタディのモデル橋脚は、その高さが
30mと仮定されている。通常、30m以上の高さを持
つ橋脚は河川部或いは海中にて使用されることが
多く、この場合、施工現場周辺に居住地が存在して

表－9 各技術の総合費用 (単位：円)

	STD	HPC	PIC	SEM
純工事費	50,471,127	54,216,937	53,116,774	56,406,540
施工性費用	8,453,991	6,915,442	5,330,887	4,324,017
耐久性費用	8,203,755	0	0	0
準総合費用	67,128,873	61,132,379	58,447,661	60,730,557
供用性費用	0	-277,488	-1,962,234	-4,330,790
総合費用	67,128,873	60,854,891	56,485,427	56,399,767

表－10 各パラメーター及びその意味

パラメーター名	意味	取り得る値
1 労務費	経済状況	0.2～1.0
2 維持費用比率	天候・自然環境条件及び技術レベル	0.008～0.002
3 社会的割引率	経済状況	0.20～0.02
4 非作業時間率	国民性	0.06～0.15
5 作業日数の重み係数	季節及び国家的気象	3.1～2.3
6 保険費用	国民性及び経済状況	0.1～1.0

いることは希である。したがって、この成分の貨幣単位への換算は省略することができるとした。

b) 耐久性

維持費用は、供用期間、社会的割引率、年度別の橋梁工事総投資額、ある年の全橋梁工事に投資された総維持費などから求めた¹⁴⁾。

ケーススタディの橋脚工事を海中で施工されると仮定した。したがって、その環境指数は170となる。これより、各技術の耐久性指標を用いて年間維持費用が求められる。結果として、基準技術の総維持費¥8,203,755を得た。残りの3つの技術については、図－1より耐久性による超過費用は¥0と算定した。

c) 供用性

供用性に関しては、「雇用拡大」についてのみ評価を行った。前稿において既に各技術を用いることによって削減可能な労働力の推計を行った。これら値及び1991年の日本の一人当たりGNP(¥3,617,250)からGNPの増加額が得られる。ここでGNPの増加額は社会的便益と考えられるので、各々の値の負値をとり、総合費用に加算した。

d) 総合費用

建設新技術の特性を全て貨幣単位へ換算することによって、経済性・施工性・耐久性・供用性の各費用の和を求め、各技術の総合費用を算定した。ここで、経済性・施工性・耐久性費用の和によって定義される準総合費用の概念を導入する。この準費用は、プロジェクトのオーナーにとって意志決定に必要な全ての情報を含んでいる重要な指標の一つになり得る。その結果を表－9に示す。

9. 感度分析

本研究において使用された統計の多くは、日本の建設産業に関するものであるので、この評価システムを他国などで適用する際には、仮定条件に何らかの変更を加えなくてはならない場合が多いと考えられる。即ち、定量化の際に使用された種々のパラメータは国家或いは地域の自然・経済・社会条件などによって規定されるものである。

本評価システムの目的は政策的意志決定を支援することにあるので、これが実用に供されるためには次のような問題に対処できることが必要になる。

1. データの変化によってどの程度評価結果が影響を受けるのか。

2. 評価対象の新技術はどのような条件の下でその性能を発揮できるのか。

これらの問題に答えるために感度分析を行った。評価において使用したパラメータはそれぞれの技術が使用される環境を表しているので、感度分析を行うことにより、ある特定の条件下において如何なる技術を選択することが最適なのかという判断がある程度は可能になる。表－10に本分析で考慮するパラメーターの一覧とそれらの取り得る値の範囲を示した。

ここで使用されたパラメーターはその値によって国家の社会・経済発展段階を示していると考えられる。それぞれの発展段階にある国家は固有のパラメータ値の組によって表現されたとし、パラメーターが取り得る値の範囲をほぼ10等分することによって発展レベルを10段階に分類した。各発展レベルは C_i で表わしている。 C_i が1に近ければ近いほど発展途上にあるといえ、逆に10に近ければ近いほど日本の発展レベルに近いことを意味している。

この C_i の変化に伴って各技術の準総合費用がどのように変化するかを示したものが図－3である。

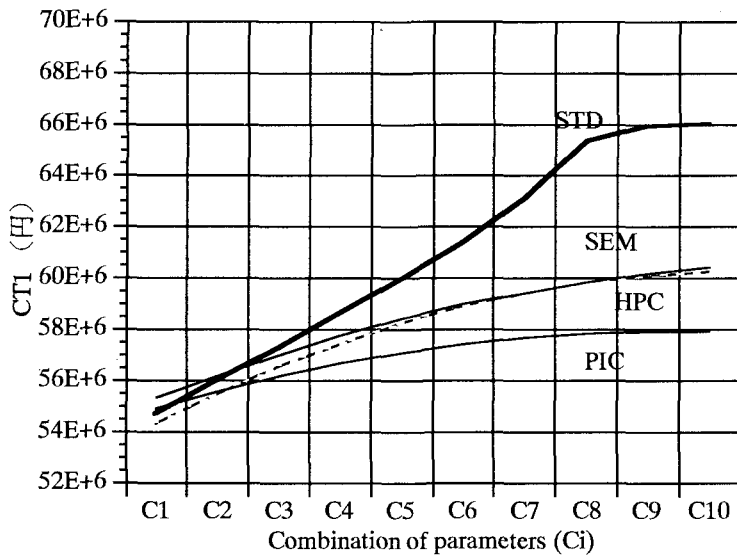


図-3 感度分析評価結果

建設新技術の評価結果は発展段階が進めば進むほど従来の技術と比較したときの差が大きくなるといえる。とりわけ発展レベルが $C_i=3$ に満たない国家では、各建設技術間の総合費用に関する格差が小さいので、厳密な技術評価を行う上で、本評価システムが意志決定に関する非常に有用な情報を提供していることが明らかとなった。

10. 結論

本研究では、建設技術を4つの特性に分類し、各々の指標を表わす項目を決定することによって定量的評価ができる評価体系を構築した。施工性と供用性に関しては新たにインデックス法を用いた手法を提案し、より総合的な評価方法を開発することを試みた。

建設技術の持つ多元的、多局面的、長期的な側面を一元的な指標で表すことによって、この評価手法は各技術の序列化を可能にしたが、このことは現在社会的な関心の集まっている「透明性の高い公共調達制度」の実現に大いに貢献するものと考えられる。

質量両面で高水準な社会基盤の急速な整備が要求されている現在のわが国において、総合的品質の向

上が期待されつつ、初期建設費が幾分高いために新しい建設技術が導入されにくいというジレンマを抱える現状の制度を、再度検証し直すことが急務であるという事実を本研究は示唆している。

本研究で提案した一元的総合評価手法の妥当性を向上させるために、今後は統計資料の整備や種々の調査等によって、定量化の過程をさらに合理化していくことが課題となる。昨今の社会的状況を考えると、本研究における建設技術評価手法の構築に関する議論が、今後多くの技術者によって益々活発になることが強く望まれる。

最後に、本研究にあたって、有益な御指導と御助言を賜わった東京大学工学部 岡村 甫教授、同小沢 一雅助教授に厚く御礼申し上げます。また、清水建設株式会社 加藤和彦氏から賜わった多大な御支援に心より感謝致します。

【参考文献】

- 1) 建設省中央審議会：新たな社会経済情勢の展開に対応した今後の建設業の在り方について（第1次答申） 入札・契約制度の基本的な在り方、1992年11月
- 2) 土木工事電算研究会編：建設省土木工事積算基準、建設省、1992年

- 3) 土木学会コンクリート委員会耐久性設計小委員会：コンクリート構造物の耐久設計指針（試案）、コンクリートライブラリー第65号、土木学会、1989年
- 4) Thomas, R.H. et al : Crew Performance measurement via activity sampling, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol.109, No.3, 1983
- 5) Hinze, J. et al : Weather in construction contracts, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol.115, No.2, 1989
- 6) Hinze, J. et al : Cost of construction injuries, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol.117, No.3, 1991
- 7) 小沢 一雅：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、東京大学工学部博士論文、1990年
- 8) 内藤 隆史他：ポリマー含浸コンクリートによる高耐久性埋設型枠の開発、土木学会論文集、No.435, VI-15、1991年
- 9) 松田 哲夫他：鋼製エレメント合成構造の橋脚への適用性に関する検討、日本道路公団試験研究所報告第29巻、1992年
- 10) Hammarl, Y. et al : Quality failure cost in building construction, CIB International Symposium Paper, 1990
- 11) Report of Penang Bridge Project, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd., 1986
- 12) Hadipriono, F.C. et al : Analysis of causes of falsework failures in concrete structures, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Vol.112, No.1, 1986
- 13) 労働大臣官房政策調査部編：労働統計要覧 1992、1992年、大蔵省印刷局
- 14) 建設省道路局監修：道路統計年報1992、全国道路利用者会議、1992年