

建設工事における建設コストと施工条件を 踏まえたCO₂排出量の評価手法の検討

大野 剛¹・鈴木 伸²・藤原 靖³

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: oongu-00@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)
E-mail: shin@ce.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: yasushi.fujiwara@sakura.taisei.co.jp

建設工事では、標準的なCO₂排出量の評価手法が整備段階であることや、CO₂排出量を入札時に反映する仕組みが整っていないことから、建設コストを優先した工事が行われる傾向がある。しかし、近い将来、CO₂排出量の評価が建設工事に導入されることは容易に想像できる。本研究は、施工方法をCO₂排出量を建設コストと施工条件を踏まえて評価する手法（以下、本手法）を提案するものである。NATMトンネルの掘削ずり搬出を事例に本手法を適用したところ、評価項目間の相互関係を把握することができた。評価結果は評価項目間の重みが考慮されていないため、AHPによる重み付けを実施したところ重みを考慮した評価結果を得ることができたが、AHPの一対比較の値の決定方法が課題となった。

Key Words : CO₂ emission , construction costs, processing condition, AHP, importance

1. はじめに

地球温暖化をはじめ、環境への社会的な関心は高まりつつある。地球温暖化への対応として、2005年に京都議定書が発効され、我が国は2012年までに温暖化ガスの排出量を基準年である1990年比で6%削減することが義務付けられている。しかし、2010年の削減割合は基準年比で-0.3%にとどまってい¹⁾。そのため、今後、より一層の削減努力が求められてくる。

二酸化炭素の排出量の内訳を産業別にみると、輸送部門が全体の約20%、民生部門が約30%を占めている。建設部門は民生部門に区分され、建設工事全体のLCCO₂（施工時だけでなく、資機材の調達、資機材の運搬、施工、廃棄物の運搬処理を含める）は全産業の約14%を占めている²⁾。そのため、建設部門においてもCO₂排出量を評価する重要性が認識されている。

建築分野では、日本建築学会が作成した「建物のLCA指針」³⁾や国土交通省住宅局などが中心に作成したCASBEE⁴⁾などの標準的な評価手法が普及しており、CO₂排出量に配慮して施工が進められるケースがある⁵⁾。土木分野では、社会資本LCAに関する報告書⁶⁾から標準的

なID（インベントリデータ）は入手できるが、評価手法が整備段階であることや、CO₂排出量を入札時に反映する仕組みや制度が整っていないことなどから、CO₂排出量に特段の配慮をせず、建設コストを重視して工事が行われる傾向がある。

また、施工時のCO₂排出量の算出における変動要因として、同一の構造物の施工であっても施工条件により算出値が異なることが挙げられる。特に土木工事では、地盤の硬さ、騒音・振動などへの制約の有無などの施工条件に応じて工法や数量などが決定される。施工時のCO₂排出量の算出・評価を行っている既往研究⁷⁾⁸⁾はあるが、施工条件との関係について触れているものは少ない。そこで著者らはCO₂排出量、建設コスト、施工条件を複合的に評価する方法について検討を進めている⁹⁾¹⁰⁾。

本研究は、NATM（New Austrian Tunneling Method）トンネル工事の代表的な掘削ずり搬出方法である3工法を評価事例として、CO₂排出量を建設コストと施工条件を踏まえて評価する手法（以下、本手法）を提案することを目的とした。また、得られる評価結果は重みが考慮されていないため、AHP（階層分析法）を用いた重み付けを行い、本手法の有効性を検討した。

2. 評価手順と評価結果～掘削ずり搬出を事例とした場合～

本手法は、(1)比較評価する施工方法の選定と制約条件の整理、(2)評価項目の決定、(3)境界条件の設定、(4)CO₂排出量と建設コストの算出、(5)施工条件に関する値の決定、(6)ランク付け、(7)評価結果の明示の手順で実施する（図-1）。本章では、NATMトンネル工事の代表的な掘削ずりの搬出を評価事例として評価手順の詳細と評価結果を示す。NATMトンネルは掘削した地山を吹付コンクリートとロックボルトで支保する工法で構築したトンネルである。

(1) 比較評価する施工方法の選定と制約条件の整理

a) 施工方法の選定

土木構造物の種類とその構造物を構築、または解体する際の工種を設定し、比較評価する施工方法を選定する。本事例は、NATMトンネルの構築工事における掘削ずりの搬出とし、評価する工法は代表的な搬出方法である23tダンプトラックによる搬出（以下、ダンプ工法）、コンテナ式運搬車による搬出（以下、コンテナ工法）と連続ベルトコンベアによる搬出（以下、ベルコン工法）の3工法とした。トンネルの断面図を図-2に示す。高さは約8.9m、幅は10.3m、断面積は約72m²である。3工法の概要を図-3と表-1に示す。3工法とも切羽の掘削とずりの積み込みはホイールローダ（山積み3.0m³）とバックホウ（山積み0.8m³）で行うこととした。ダンプ工法は23tダンプトラックを最大5台で、コンテナ工法は5台のコンテナと2台のコンテナ運搬車で、掘削ずりを運搬することとした。連続ベルコンは搬出量300t/h、ベルト幅610mmのベルトコンベアで延長2,700mまで土砂を運搬し、坑口から300mは23tダンプトラックで運搬することとした¹⁾。

b) 制約条件の整理

施工時の制約条件について整理する。本事例では運搬経路の地盤は強固で運搬に支障がなく、工事に障害となる架空線、埋設物は無く、施工ヤードは十分広いこととした。また、振動・騒音に対する制約は無いものとした。

(2) 評価項目の決定

評価項目をCO₂排出量、建設コスト、施工条件から決定する。施工条件は国土交通省が示す土木工事の施工条件に関する手引きを参考に決定した¹²⁾。本事例では、評価項目をCO₂排出量、建設コスト、および粉じんの発生量、掘削ずりのリサイクル性および騒音振動の大きさとした。施工条件の選定は、NATMトンネル工事に特有で各工法間で相違が見られる項目に注目して抽出した。

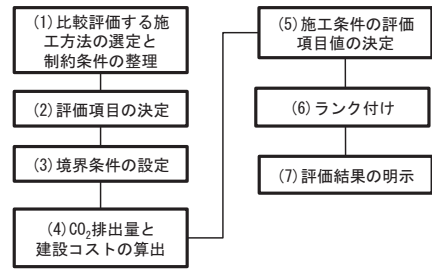


図-1 評価手順

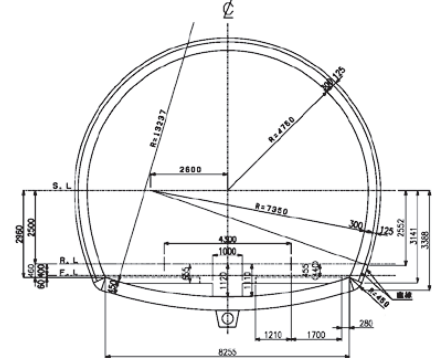


図-2 トンネル概要図

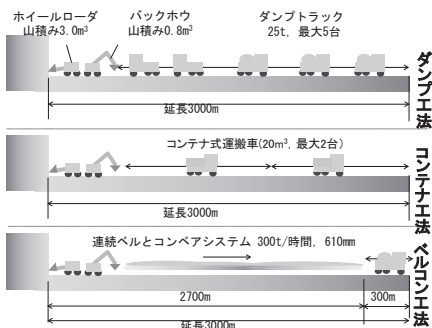


図-3 掘削ずりの搬出方法

表-1 各工法の特徴

施工方法	使用重機の仕様等	施工条件に関する値		
		粉じん発生量	リサイクル性	騒音振動
ダンプ工法	ホイールローダ(サイドダンプ式、ホイール型、山積み3.0m ³)、バックホウ(クローラ型、山積み0.8m ³)、23tダンプトラック	多	低	大
コンテナ工法	ホイールローダ(サイドダンプ式、ホイール型、山積み3.0m ³)、バックホウ(クローラ型、山積み0.8m ³)、コンテナ式運搬車、コンテナ(20m ³)	多	低	中
ベルコン工法	ホイールローダ(サイドダンプ式、ホイール型、山積み3.0m ³)、バックホウ(クローラ型、山積み0.8m ³)、連続ベルコン(メインドライブ、中間ブースタードライブ、ストレージカセット貯蔵量300m、テールピース30kw級、中間部ベルト610mm)、自走式クレッシャー(300t/h,90kw級)	少	高	小

ライフサイクルの観点から土木工事を考慮した場合、その範囲は事業の構想、計画、設計、計画、施工、維持管理、解体と広範であり、各段階においても更に分類できる(図-4)。例えば施工の場合、資機材の製造、搬入、施工、搬出、廃棄処理となる。そのため、どの範囲のCO₂排出量と建設コストを算出するのかを明確にする必要があるが、明確にした範囲を境界条件としている。本事例では、NATMトンネル工事の施工時の切羽の掘削、掘削ずりの積み込み、ずりの坑口までの運搬を境界条件とし、その時のCO₂排出量と建設コストを求めることとした(図-4破線部)。

境界条件に従いCO₂排出量と建設コストを算出する。本事例では、CO₂排出量は、重機の燃料消費量¹¹⁾¹³⁾および使用電気量にそれぞれの原単位を乗じた。燃料の種類は各重機とも軽油であり、原単位は2.59kg-CO₂/L²⁾とした。電気の前単位は0.56kg-CO₂/kwh²⁾とした。建設コストは、標準歩掛り¹¹⁾に施工数量と施工単価¹³⁾¹⁴⁾を乗じて求めた。

図-5から、CO₂排出量と建設コストの関係は読み取ることは可能だが、粉じん発生量や騒音・振動の大きさなどの施工条件との関係を直接読み取ることは困難である。

評価項目に設定した施工条件の値を決定する。施工条件に関する値は、国や地方自治体の積算資料や土木工事の専門書、工事用重機のカatalogなどに掲載されている値や、関係者からのヒアリングにより得た値などを使用する。本事例では工事関係者からのヒアリングをもとに定性評価を行った（表-1右側）。粉じん発生量と騒音振動の大きさはダンプ工法とコンテナ工法のほうがバルコン工法より大きく、掘削ずりのリサイクル性はバルコン工法の方が他の2工法に比べて高くなっている。

複合評価に用いる値を算出するために、CO₂排出量、建設コスト、施工条件のランク付けを行う。ランク付けとは（個別の値－最小値）／（最大値－最小値）により0～1の範囲に換算することである。本事例では、CO₂排出量、建設コストは(4)で算出した値を用いた。施工条件は、いずれも定性的な評価をしたため定量的に再評価した値を用いてランク付けした。具体的には、粉じんの発生量は「多」を3、「少」を1とした。リサイクル性は「高」を3、「低」を1とした。騒音・振動の大きさは「大」を3、「小」を1とした。



(7) 評価結果の明示

ランク付けした値をレーダーチャートにプロットして明示する。図化により、評価指標間の相互関係を把握することができ、現場の制約条件などを考慮して最適な施工方法を選定することが可能となる。結果を図-6に示す。

ダンプ工法とコンテナ工法は施工条件の粉じん発生量が大きく、掘削ずりのリサイクル性が小さく、騒音振動の大きさが大きい。建設コストとCO₂排出量はダンプ工法の方が大きいことが確認できる。また、ベルコン工法は建設コストが高いが、CO₂排出量と粉じんの発生量が少なく、騒音振動の大きさが小さく、掘削ずりのリサイクル性が高い。環境負荷が小さい工法であることが一目で確認できる。本結果より、建設コストを優先するのであればコンテナ工法、環境負荷を低減することを優先するのであればベルコン工法に優位性があることを容易に確認することができた。

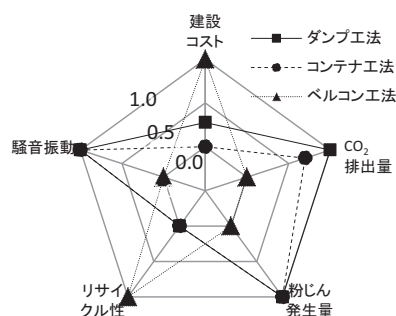


図-6 評価結果

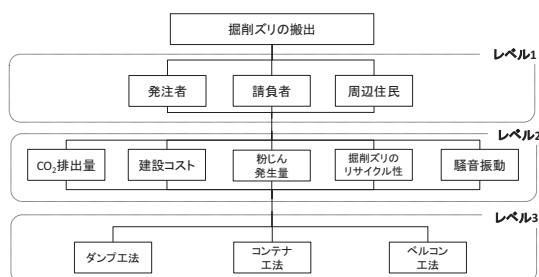


図-7 階層構造

3. AHPによる重み付け

前章では、評価項目間の重みをすべて同等とした評価値を可視化した。様々な利害関係者が本手法を適用することを想定すると、評価項目間で重みを考慮することが必要と考えられる。そこで、評価基準が多数考えられる場合や主観的な判断が求められる場合などに有効な手法であるAHP(Analytic Hierarchy Process:階層分析法)を用いて重み付けを実施した。

AHPは、評価項目（判断基準）間の重要度（重み）を評価するものであり、一対比較により評価項目間の重要度を決定し、最終的な選定の対象となる複数個の代替案を一つにし絞り込む（重み付けで順位を付ける）手法である¹⁵⁾¹⁶⁾。

今回、3章の事例に対して、工法の選定者を発注者、請負者、周辺住民の3者と仮定してAHPにより重み付けを行った。工法の選定における階層構造を図-7に示す。レベル1は意思決定者の3者（工事の発注者、請負者、周辺住民）を、レベル2は評価項目、レベル3は施工方法を示している。各レベルの一対比較を表-3、表-4に示す。一対比較は、要素間の重み付けを一対一で行うものである。レベル1の一対比較は3者間の力関係を示したものであり、レベル2は各立場から見た評価項目の重要度を示したものである。一対比較の値は、1（同程度の重要）、3（少し重要）、5（かなり重要）で評価し、一対比較表は1～5の評価値とその逆数を用いて作成した。例えば、表-2中の破線部の5は、周辺住民は発注者に対して「かなり重要（強い）」な立場にあること（逆数の1/5は、発注者が周辺住民に対して「かなり弱い」立場であること）、表-3中の破線部の3は、発注者にとって建設コストは、粉

表-2 レベル1の一対比較

	発注者	請負者	周辺住民
発注者	1	5	1/5
請負者	1/5	1	1/3
周辺住民	5	3	1

じんの発生量よりも「少し重要」と考えていること（逆数の1/3は、粉じんの発生量は建設コストに対して「あまり重要でない」こと）をそれぞれ示している。今回、レベル1、レベル2の一対比較の値は、著者らが仮定した値を、レベル3は、3章のランク値を1～5に再度振り分けた値をそれぞれ採用した。レベル1は、周辺住民、発注者、請負者の順で力関係があるとした。レベル2は発注者、請負者は建設コストを、周辺住民は粉じんの発生量と騒音振動の大きさを重要視すると仮定した(表-2)。具体的には、発注者は、建設コストを最重要とし、CO₂排出量と掘削ずりのリサイクル性はそれほど重要でないとした。請負者は、建設コストを最重要とし、粉じん発生量と騒音振動の大きさはそれほど重要でないとした。周辺住民は、粉じん発生量と騒音振動の大きさを最重要とし、建設コストはそれほど重要でないとした(表-3)。

AHPは、一対比較から最大固有値と固有ベクトルを算出し、各評価項目の重要性を示す重みを計算する。レベ

ル1, レベル2から求めた重みを3章の結果(図-6)に乗じたものを図-8に示す。図-8で得られた値は重みが考慮されたため, 全評価項目に共通した値として扱うことが出来る。本事例では, 粉じん発生量と騒音振動の大きさに対する重みが2.67と他の評価項目に比べて大きいため, 評価値も大きくなっていることが読み取れる。図-9は全階層(レベル1からレベル3)を踏まえて算出した各工法の重みであり, 工法の優先順位を示している。今回設定した仮定のもとでは, ベルコン工法が最も有効であり, 以下, コンテナ工法, ダンプ工法であった。

このように, 設定した条件に依存するものの, 本手法にAHPを用いることで, ①評価項目間の重み付けが可能であること, ②重み付した評価値は全評価項目に共通の評価値として扱うことが出来ること, ③工法の順位付けが可能であることをそれぞれ確認した。ただし, 各レベルの一対比較の値は著者らが仮定した値である。今後は, 一対比較の値を客観的に決定する方法を課題として検討を進める。

5. おわりに

CO₂排出量と建設コストの関係を施工条件を踏まえて評価する手法を提案した。本手法をNATMトンネル工事の掘削ずり搬出方法3工法に適用したところ, 各工法のCO₂排出量, 建設コスト, 施工条件の関係を把握することができた。そのため, 本手法は施工現場の条件に相応しい施工方法を選定できる可能性があることを確認した。また, AHPにより重み付けを行い, 本手法の有効性を考察したところ, 評価項目の重要性を可視的に把握し, 設定した条件下における評価項目および工法の順位付けが可能であることを確認した。ただし, AHPの一対比較の値により重みが異なるため, 今後は一対比較の値の決定方法について検討を進めていく。

参考文献

- 国土交通省総合政策局環境政策課：国土交通省における地球温暖化対策について【概要】，
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000006.html.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所：社会資本のライフサイクルをととした環境評価技術の開発に関する報告，2012.
- 社団法人日本建築学会：建物のLCA指針，
<http://news-sv.ajij.or.jp/tkankyo/s0/site/arc08.html>.
- 建築環境・省エネルギー機構：CASBEE 建築環境総合性能評価システム，<http://www.ibec.or.jp/CASBEE/index.html>.
- 伊香賀俊治：建築物のLCA・LCC同時評価ツールの国・

表-3 レベル1の一対比較

a) 発注者による一対比較

	CO ₂ 排出量	建設コスト	粉じん発生量	リサイクル性	騒音振動
CO ₂ 排出量	1	5	1/3	1	1/3
建設コスト	5	1	3	5	3
粉じん発生量	3	1/3	1	3	1
リサイクル性	1	1/5	1/3	1	1/3
騒音振動	3	1/3	1	3	1

b) 元請者による一対比較

	CO ₂ 排出量	建設コスト	粉じん発生量	リサイクル性	騒音振動
CO ₂ 排出量	1	1/3	5	1	5
建設コスト	3	1	5	3	5
粉じん発生量	1/5	1/5	1	1/3	1
リサイクル性	3	1/3	3	1	3
騒音振動	1/5	1/5	1	1/3	1

c) 周辺住民による一対比較

	CO ₂ 排出量	建設コスト	粉じん発生量	リサイクル性	騒音振動
CO ₂ 排出量	1	3	1/3	1	1/3
建設コスト	1/3	1	1/5	1/3	1/5
粉じん発生量	3	5	1	3	1
リサイクル性	1	3	1/3	1	1/3
騒音振動	3	5	1	3	1

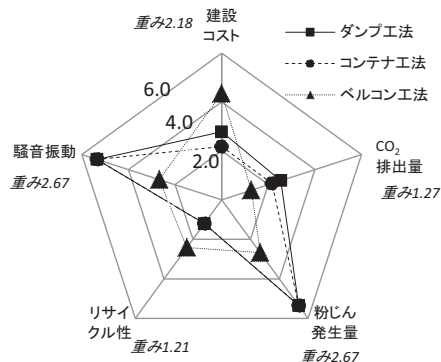


図-8 重み付した評価結果

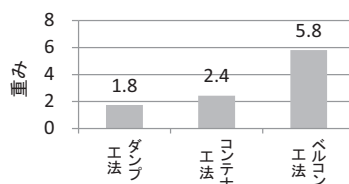


図-9 工法の重み付け

- 自治体・企業での活用状況，第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集，pp6～9，2005.
- 6) 奈良松範，吉田一真，吉川繁，千田光：橋梁解体工事のオンサイト環境負荷調査研究，土木学会地球環境研究論文集，Vol.18，pp13-18，2010.
 - 7) 瀧加藤真紀，三浦秀一，外岡豊：建築工事及び土木工事におけるCO₂排出量の地域特性に関する研究，第62回日本建築学会東北支部研究報告集，pp.347-350，1999.
 - 8) 水守隆司，瀧下芳彦，草木貴巳：建設現場の環境負荷算出ツールの開発，第2回日本LCA学会研究発表会講演要旨集，pp.206-207，2011.
 - 9) 大野剛，鈴木伸，藤原靖：鋼矢板打設をモデルとした建設コストとCO₂排出量と施工条件の統合評価，土木学会第20回地球環境シンポジウム講演集，pp55-58，2012.
 - 10) 大野剛，鈴木伸，藤原靖：工法選定を目的とした建設コストとCO₂排出量と施工条件による複合評価～橋梁の杭基礎工事を事例として～，第8回日本LCA学会研究発表会講演要旨集，pp220-221，2013.
 - 11) 鉄道・運輸機構：土木関係積算標準・積算要領 6-3（開削・シールド・トンネル）平成24年版，2012.
 - 12) 国土交通省北陸地方整備局：条件明示の手引き（平成20年4月改訂），<http://www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/kijyun.html>.
 - 13) 日本建設機械化協会：平成23年度版建設機械等損料表，2011.
 - 14) 建設物価調査会：建設物価 2011年12月，2011.
 - 15) 入門AHP—決断と合意形成のテクニック—，日科技連出版社，2000.
 - 16) 刀根薫，関口吉男：AHPによる地盤改良工法の合理的な選定法，第21回土木情報システム講演集，pp.73-76，1996.

(2013. 7. 19 受付)

Study on Evaluation of CO₂ Emission Based on Construction Cost and Processing Condition at Construction Work

Go OHNO, Shin SUZUKI and Yasushi FUJIWARA

At the time of civil construction bidding, prior consideration is focused on the construction cost as there is not proper mechanism to reflect about the CO₂ emission. However we expect that CO₂ emission will be introduced in the near future. In this study, we proposed evaluation of CO₂ emission based on the construction cost and processing condition and we applied this method to NATM tunnel as the case study. Through that, we identified a relationship among CO₂ emission, construction cost and processing condition clearly. However, these results are not included the importance. Hence, we investigated the importance by AHP method, and we could get the results including the importance. However, further improvements are necessary for the pair-comparison values since it depends on the person preferences.