

論文 大断面分割シールド工法における環境負荷評価

宮原 茂禎^{*1}・村田 裕志^{*2}・宮地 孝^{*3}・堺 孝司^{*4}

要旨：大断面分割シールド工法（ハーモニカ工法）を採用する交差点の立体化工事において、工事計画図書をもとに環境負荷を評価した。その結果、排出される CO₂ の約 80% が工事に使用する資材の製造に起因し、特に鋼材製造時の排出量が多いこと、統合化評価の結果、資材製造時に発生する温室効果ガスや資源消費が環境負荷の大きな割合を占めることを明らかにした。また、計算結果に大きな影響を与える鋼材やコンクリートの原単位の変動に関する感度解析を実施し、特に CO₂ 排出量の低減に向けた技術的課題や、排出量評価で生じる変動を明らかにした。

キーワード：アンダーパス工事、大断面分割シールド工法、環境負荷評価、CO₂ 排出量、LIME

1. はじめに

2005 年に京都議定書が発効され、わが国は温室効果ガスの排出量を 2012 年までに 1990 年を基準として 6%削減することが法的拘束力をもつ課題となった。日本政府は 2050 年までに温室効果ガスを現状から 60～80%削減することを目標に掲げており、先の北海道洞爺湖サミットはポスト京都議定書に向けての新たな展開を予感させるものであった。

建設産業でもこの社会的な課題への取組みとして、リサイクルの推進、構造物の耐久性の向上、副産物の利用などの環境配慮がなされ、これらを推進するための指針などが制定されてきた。国土交通省は従来の工事コストのほかに、環境の改善、リサイクルの推進などを社会的コストとする新たな概念を提示し、発注時に環境負荷の低減を図るための施策を進めている¹⁾。

コンクリートの環境影響に対する評価手法についても検討が進んでおり、土木学会ではライフサイクルアセスメントの手法を用いて評価する手法^{2),3)}や環境性能を照査するための指針（試案）⁴⁾が示された。

国内における、狭義の建設産業の CO₂ 排出量、すなわち施工時における排出量は全産業の排出量のうち 1.3%

を占めるに過ぎない⁵⁾。一方、建設材料の製造や構造物の供用時のエネルギーに由来する CO₂ 排出量は、全産業の総排出量の約 1/3 を占める⁵⁾。

効果的に CO₂ 排出量を削減するためには、構造物の設計時に構造物のライフサイクルを踏まえて使用材料や供用時のエネルギーを考慮することが必要である。使用材料の面からは、資材量の削減や副産物の使用などが CO₂ 排出量削減に有効であると考えられている。このように、建設工事における CO₂ 排出量削減を議論するためには、現状における CO₂ 排出量の定量的な評価が必要である。

本論文では、建設工事における環境負荷評価の一例として、神奈川県内の国道 1 号の原宿交差点立体化工事における I 期工事（下り線構築時）について、CO₂, SO_x, NO_x, ばいじんの各大気排出物質（以降、排出物質とする）の排出量を集計し、環境負荷を評価した。また、特に CO₂ 排出量の観点からみた本工法の特徴や、排出量評価における課題について考察した。

2. 工事の概要

図-1 にアンダーパス化工事の概要を示す。原宿交差

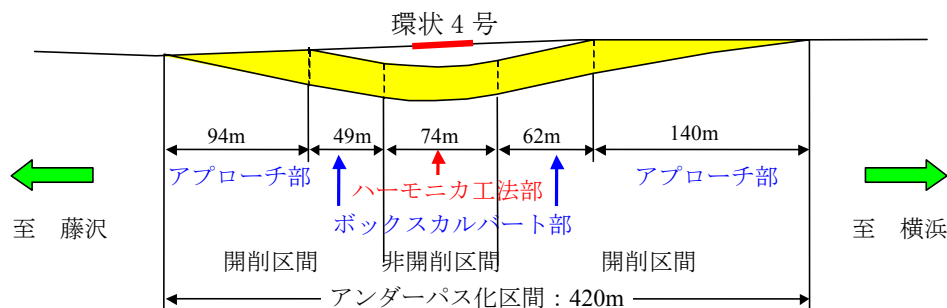


図-1 原宿交差点アンダーパス化工事の概要

*1 大成建設（株） 土木技術研究所 土木構工法研究室 工修（正会員）

*2 大成建設（株） 土木技術研究所 土木構工法研究室 工博（正会員）

*3 大成建設（株） 横浜支店（非会員）

*4 香川大学 安全システム建設工学科 工博（正会員）



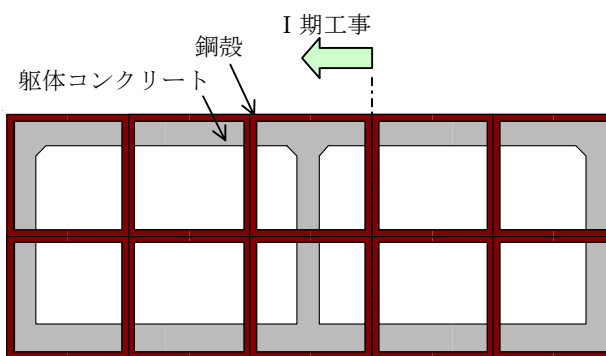
図ー2 ハーモニカ工法の概要

点立体工事は、国道1号と環状4号が交差する当交差点において、慢性的に生じている渋滞を緩和する目的で国道1号をアンダーパス化する工事である。完成後は渋滞の解消により年間約600tのCO₂削減が見込まれている⁶⁾。

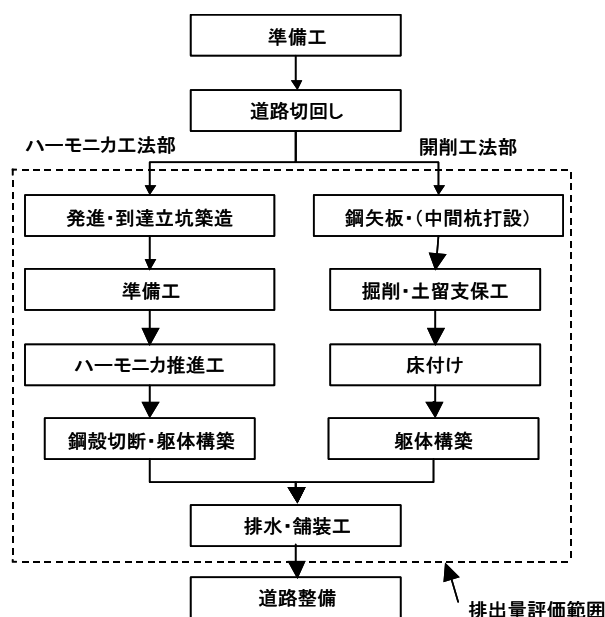
工事の全長は420mであり、大きく分けて開削工法で施工されるアプローチ部とボックスカルバート部および、非開削で施工される大断面分割シールド工法^{7),8)}(以降、ハーモニカ工法とする)部からなる。本工事では非開削区間にハーモニカ工法を採用することにより急速施工を可能としている。ハーモニカ工法の概要を図ー2、図ー3に示す。小型の矩形掘削機と鋼殻と呼ばれる仮設セグメントを用いて、推進工法により小断面のトンネルをハーモニカのように連結させて施工したのち、内部の鋼殻を切断して躯体の構築を行い、大断面トンネルを完成させる工法である。ボックスカルバート部の一部をハーモニカ掘削機の発進・到達用の立坑として利用し、1つの小断面トンネルの掘削を完了したハーモニカ掘削機は、反転して次のトンネルを折り返し施工する。掘削機が小型であるため、低土かぶりでの施工、発進・到達立坑の小型化、機械コストの削減などが可能となる。環境負荷評価の観点からはハーモニカ掘削時の鋼殻に鋼材を多く用いることが特徴である。

開削工法部は掘削したのちに、約20mを1ブロックとしてRC躯体を構築する。

I期工事は将来の下り線部分を施工するものであり、図ー3に示すように、ハーモニカ部は上下線合わせて10個(2行×5列)の小断面トンネルのうち、6個(2行×3列)の施工と、躯体の構築および舗装を行う。図ー4に概略の施工手順を示す。本論文で環境負荷評価の対象としたのは開削区間のアプローチ部、ボックスカルバート部およびハーモニカ工法部の施工であり、工事準備段階での樹木の移設や切回し道路の施工などについては考慮していない。また、供用期間中の維持管理や供用後



図ー3 ハーモニカ工法部の断面



図ー4 施工手順および評価の対象範囲

の解体・廃棄段階の評価は行っていない。

3. 大気排出物質量の計算方法

3.1 インベントリ分析の概要

排出物質の量は、工事着工前に作成される実施段階の計画図書から資材量や建設機械の稼働時間などをそれぞれ集計し、それに排出量の原単位をかけることで計算した。

排出量の原単位には、基本的に資源の採掘から輸送までを含む積み上げ法に基づく原単位^{3),9),10)}を用いた。ただし、積み上げ法による原単位が得られないものに関しては産業連関表に基づいた原単位¹¹⁾を用いた。積み上げ法では、原料の採掘、原料の輸送、加工、製品の輸送、さらには製造時に用いる燃料の採掘から消費までを調査対象としているが、採掘時に用いる掘削機械の製造や、各種材料・燃料の製造・精製する工場の建設、および輸送車両・建設機材の製造・維持補修による排出量は考慮していない。計算で使用した排出物質の原単位のうち主

表-1 使用した原単位³⁾

項目	単位	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /*)	SO _x 排出量 (kg-SO _x /*)	NO _x 排出量 (kg-NO _x /*)	ばいじん 排出量 (kg-PM/*)
普通セメント	t	7.67E+02	1.22E-01	1.55E+00	3.58E-02
高炉セメント B 種	t	4.59E+02	8.09E-02	9.19E-01	2.18E-02
購入電力	kwh	4.07E-01	1.30E-04	1.60E-04	3.00E-05
10t ダンプ トラック	km・t	1.22E-01	9.41E-05	9.14E-04	7.68E-05
廃棄処分 (管理型)	t	3.36E+00	4.47E-03	2.55E-02	1.98E-03

要なものを表-1 に示す。なお、転炉鋼および電炉鋼の原単位は文献 10)を用いた。

3.2 インベントリ分析

インベントリ分析は、資材製造、輸送、施工、電力、廃棄物処理の評価項目に区分して行った。

(1) 資材製造

資材製造では、鋼材やコンクリート材料のセメントや骨材などを製造する時に発生する排出物質を考慮した。

鋼材にはハーモニカ掘削機や鋼殻、コンクリート構造物の鉄筋などがある。排出量の計算においては、鉄筋は電炉鉄筋を使用するものとし、その他の鋼材については転炉鋼が使用されるものとした。鋼材のうち、開削区間の山留め材や覆工板などのリース材は 20 回転用できると仮定して、製造時に発生する排出物質の量の 1/20 を本工事で負担することとした。

コンクリート構造物は大部分を高炉 B 種コンクリートで施工する計画であり、強度レベル毎の配合と打設数量を集計し排出量を計算した。

(2) 輸送

建設資材を工場や倉庫から建設現場に輸送するとき発生する排出物質の量は「輸送」の区分として考慮した。ただし、建設資材の製造段階以前の輸送については、資材製造ですでに考慮されているために除外している。レディーミクストコンクリートや鉄筋などの建設現場で消費されるものは片道分を、リース材は往復分を計算した。レディーミクストコンクリートは複数のプラントから供給されるが、それぞれの供給量は未確定のため、輸送距離は各プラントから現場までの距離の平均値を用いた。また、掘削土などの廃棄物を処分施設まで運搬する分も考慮し、処分施設までの距離と 10t ダンプトラックによる輸送の原単位から排出量を計算した。施工機械の運搬はハーモニカ掘削機のみを考慮した。

(3) 施工

クレーン、バックホウなどの建設機械の稼働による排出量は「施工」の区分として計算した。ここでは軽油などの燃料で作動する建設機械を対象とし、電力で稼働

するものは「電力」の評価項目で考慮した。建設機械の排出量の原単位は 1 時間当たり (kg/h) として設定されている。それに対し、施工計画での機械の使用期間は日単位で示されているため、1 日あたりの建設機械の稼働時間を 6 時間と仮定して、各施工機械の運転時の原単位を用いて排出量を計算した。

(4) 電力

建設機械のうち、ハーモニカ掘削機、排水ポンプ、ハーモニカ掘削機の設置・反転のための橋型クレーンなどは電力によって作動する。これらの建設機械と坑内の照明、事務所で使用する電力による排出量を考慮した。これらは工事計画時の電気使用予定量 (kW) から算出したが、購入電力の排出量の原単位は kW・h 当たりであるため、施工の評価項目と同様に稼働時間を 6 時間/日として算出した。

(5) 廃棄物

廃棄物の処理により発生する排出物質は「廃棄物」の評価項目で計算した。掘削により発生する土砂は土と汚泥で処分方法が異なるが、その量比は明らかでないため、ここではすべてを汚泥として管理型処分するものとした。既存の道路を撤去したアスファルト殻は再生処理されるが、処理で発生する排出物質による環境負荷は処理後の使用者が負担するものと考えて計算から除外し、処分場への輸送までを「輸送」の項目で考慮した。また、切断後の鋼殻はスクラップ処分されるが、電炉鋼として再利用する場合の処理で発生する排出物質もアスファルト殻と同様に取り扱った。このような評価範囲の設定方法については今後規則作りがなされていくものと考えられる。

3.3 統合評価

統合評価は、総合的な環境負荷量を評価するために、

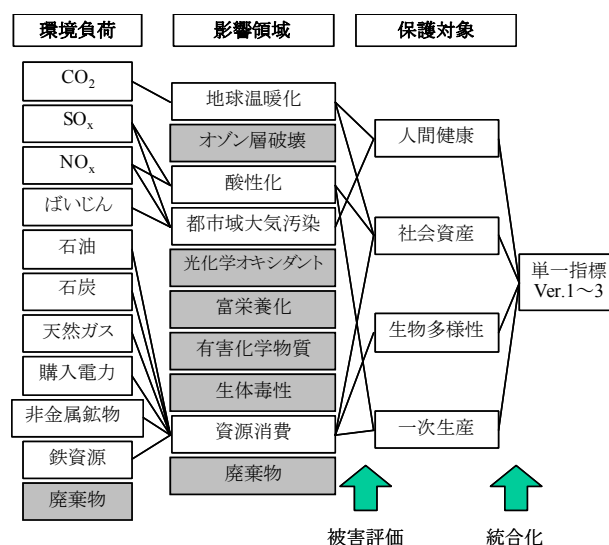


図-5 統合化評価の適用範囲

各排出物質量に重み付けを行って単一の指標とする評価方法である。本研究ではその手法の一つとして代表的な LIME¹²⁾による統合評価を行った。本検討における評価範囲を図-5 に示す。ここでは、CO₂、SO_x、NO_x、ばいじんの4種類の大気排出物質から計算可能な影響領域として、地球温暖化、酸性化、都市域大気汚染、資源消費を考慮し、排出量に統合化係数³⁾を乗じることにより、単一指標を算出した。図中に網掛けで示す、オゾン層破壊や廃棄物などの項目は検討から除外した。

4. 大気排出物質量の計算結果および統合化評価
4.1 大気排出物質量の計算結果

上述の設定のもとで算出した本工事における工事全体の各排出物質の量を表-2 に、このうち、CO₂の排出量に占める各評価項目の割合を図-6 に示す。CO₂の総排出量は 6611t となり、このうち 81.5%にあたる 5388t を資材製造が占めている。次いで電力による排出量が大きくなっており、施工や輸送などの割合は小さいものと

表-2 大気排出物質量の計算結果 (t)			
CO ₂	SO _x	NO _x	ばいじん
6611	2.2	11.2	0.9

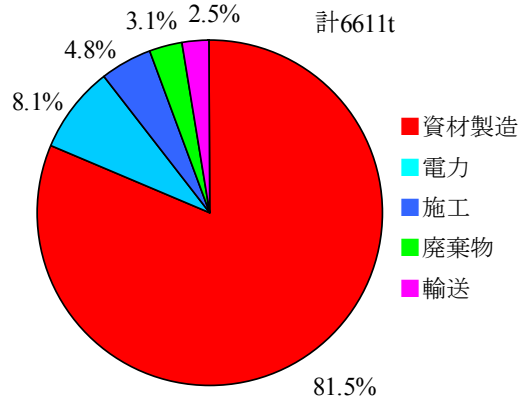


図-6 CO₂ 排出量の計算結果

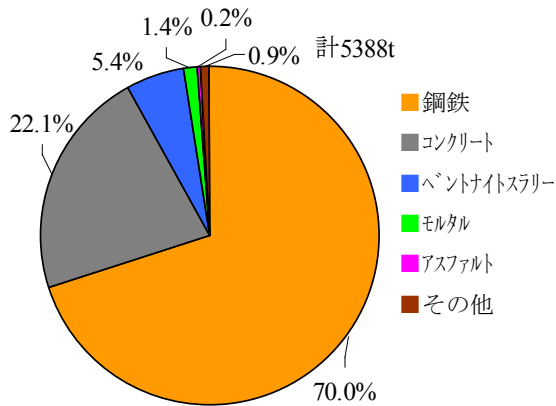


図-7 資材製造の内訳

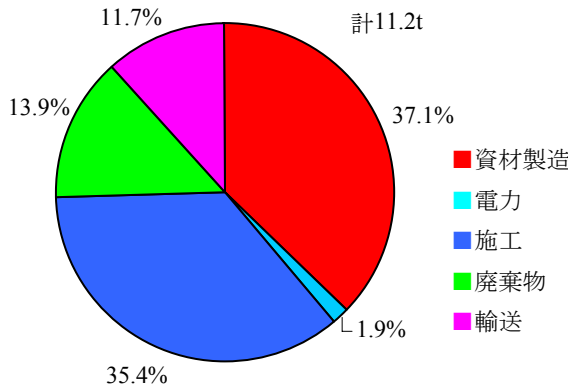


図-8 NO_x 排出量の内訳

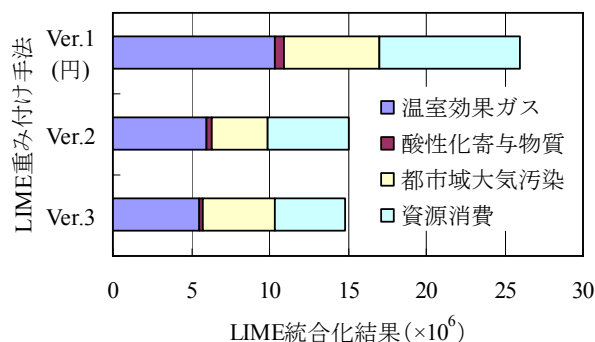
なった。電力はハーモニカ掘削機で多く使用されるため、施工や輸送を上回る CO₂ 排出量となっている。図-7 に資材製造の CO₂ 排出量の内訳を示す。5388t のうちの 70% を鋼材が占めており、それに次いでコンクリートとなった。鋼材の CO₂ 排出量が多いのは、ハーモニカ工法で鋼殻を大量に使用するためである。

このように、CO₂ 排出量の計算結果には工法の特徴が強く反映されている。本工事において今後 CO₂ 排出量を低減するためには、鋼材の使用量を低減していくことが有効であることがわかる。

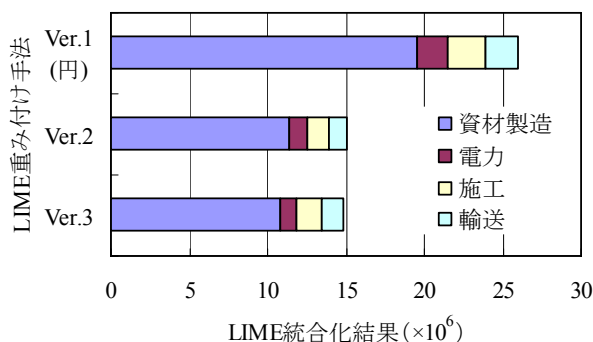
NO_x 排出量に占める各評価項目の割合を図-8 に示す。CO₂ が材料製造に起因するものがほとんどを占めていたのに対し、NO_x はそれ以外の項目の割合が高まり、資材製造と施工はほぼ同程度の NO_x 排出量となった。これは、資材製造においては製造工場での SO_x や NO_x の排出量を抑えることができているため、重機による施工やダンプトラックでの輸送と比べて、SO_x や NO_x の排出量の割合が小さくなるためと考えることができる。

4.2 統合化評価の結果

各排出物量から総合的に環境負荷量を検討するために、LIME による統合評価を行った。LIME では3つの統合化係数により単一指標 (Ver.1~3) を得ることができる。Ver.1 および Ver.2 はコジョイント法により得られた重み付け係数 (貨幣価値換算値および無次元値) で求められ、Ver.3 はアンケートから AHP (階層化分析法) により得られた無次元の重み付け係数によって得られる。結果を図-9 に示す。図の a. は LIME 評価において一般的に示される影響領域毎の統合化結果を示したものであり、図の b. は評価項目ごとに集計したものである。影響領域毎の評価では温室効果ガスと資源消費が大きな割合を占めた。評価項目毎にみると資材製造が統合評価に与える影響が大きく、a. の温室効果ガスは鋼材やセメントなどの資材製造の段階で排出される CO₂ に起因するものであることがわかる。また、資源消費の中では資材製造の段階でセメントや鋼材として消費される非金属



a. 環境影響毎の計算結果



b. 評価項目毎の計算結果

図-9 LIMEによる環境負荷統合化の結果

資源や鉄資源による環境負荷が大きな割合を占めていた。このように、本工事においては統合化評価の結果からも資材製造による環境負荷が大きいことが示され、これを低減することが工事全体の環境負荷低減に有効であることが示唆される。

5. 感度解析

ここまでの環境負荷評価で、発生するCO₂の多くが資材製造時に排出され、統合化評価においても、資材製造時のCO₂排出量に起因する温室効果ガスと、資源消費が大きな割合を占めることが明らかになった。ここでは、資材製造時のCO₂排出量に論点を絞り、CO₂排出量に及ぼす影響が大きいと考えられる鋼材やセメントの原単位の設定を変更して感度解析を行った。

5.1 鋼材の原単位の変動

前項までは鉄筋を除いたすべての鋼材に転炉鋼を使用しているものとして計算した。しかし、建設産業では資源の再利用が推進されており、鋼材に関しては鉄スクラップから製造される電炉鋼の利用が進んでいる。このため、現在の設定では鋼材に起因する排出量を過大に見積もっている可能性がある。電炉鋼の正確な利用割合は明らかになっていないが、例えばH鋼はその7割弱に電炉鋼が用いられているとされている¹³⁾。ここでは、鋼材のすべてに電炉鋼を使用した場合と、電炉鋼と転炉鋼を50%ずつ使用した場合についてCO₂排出量を計算した。

結果を図-10 および図-11 に示す。鉄筋を除くすべての鋼材を転炉鋼とした場合(図-6)の6611tと比較して、すべてに電炉鋼を利用した場合は約2300t(34%)、転炉鋼と電炉鋼を50%ずつ使用した場合には約1100t(17%)のCO₂削減となり、工事全体に占める資材製造の割合が大きく低下する。電炉鋼の製造時に排出されるCO₂は転炉鋼よりもはるかに小さいため、その利用率が拡大すれば工事のCO₂排出量を大きく低減することが可能となる。このように鋼材の使用量の多い工事では、その種類、すなわち原単位の設定でCO₂排出量が大きく変

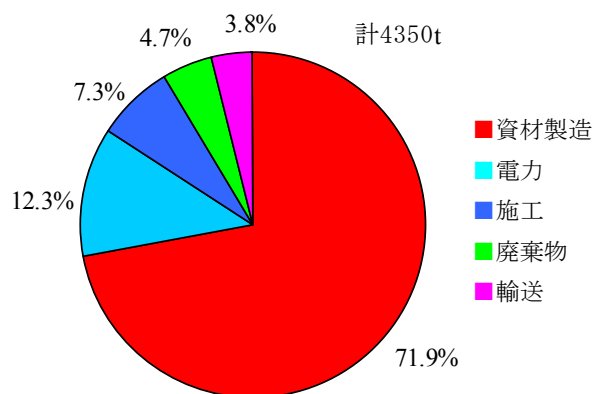


図-10 電炉鋼を100%使用した場合のCO₂排出量

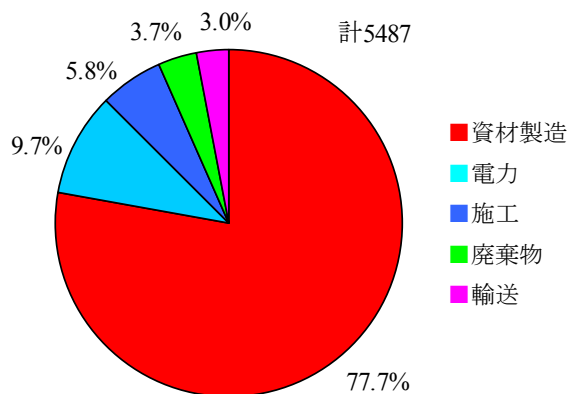


図-11 電炉鋼を50%使用した場合のCO₂排出量

化する。今後、転炉鋼、電炉鋼の利用率の把握や原単位の精査がCO₂排出量評価の精度向上のために重要となってくる。

5.2 コンクリート種類の影響

本工事では、グリーン調達観点から高炉B種コンクリートを使用する計画としている。高炉セメントは、製鉄所の高炉での副産物である高炉スラグを利用しているため、CO₂排出量の原単位は普通セメントと比較して40%程度低くなっている³⁾。コンクリート種類がCO₂排出量に及ぼす影響を検討するために高炉セメントを普通セメントに変更した場合のCO₂排出量を計算した。工

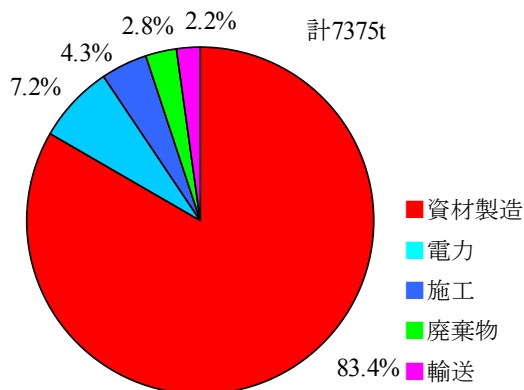


図-12 高炉B種セメントを普通セメントに変更した場合のCO₂排出量

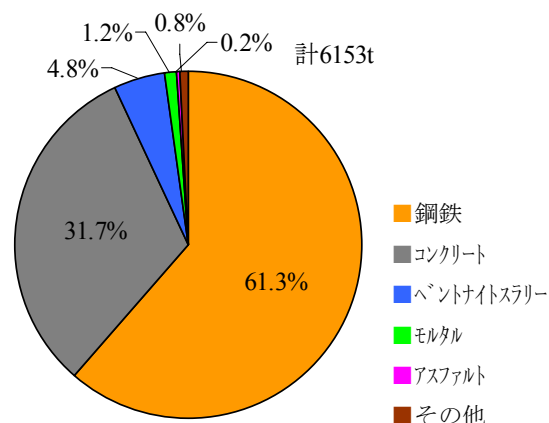


図-13 高炉B種セメントを普通セメントに変更した場合の資材製造の内訳

事全体のCO₂排出量の計算結果を図-12に、資材製造におけるCO₂排出量を図-13に示す。普通セメントを用いた場合のCO₂排出量は、高炉セメントを使用する場合(図-6)と比較して、760t程度増加する結果となった。資材製造時に発生するCO₂のうちセメントの占める割合も大きく増加しており、普通セメントの使用を基準として考えると、高炉B種セメントを使用することにより資材製造で発生するCO₂を12%削減できていることになる。CO₂削減の観点からは高炉スラグの使用は効果があることがわかる。しかしながら、現在我々が手にできる高炉スラグの原単位の内容は必ずしも明確になっていないことから、その精度に関する精査が今後の課題となる。

6. まとめ

ハーモニカ工法を採用する原宿立体工事（I期）において、施工計画段階における環境負荷を評価した。また、本工事においてCO₂排出量に大きな影響を与える項目に関して原単位の設定を変更して感度解析を行った。これらの評価を通して、本工事において環境負荷へ大きな影響を与える要因を明確にするとともに、排出量削減の観点からみた技術課題も見出すことができた。主な結果を以下に示す。

- 1) ハーモニカ工法では鋼材を大量に使用するために、工事全体のCO₂排出量に占める資材製造の割合が大きくなる。また、統合化評価における単一指標の中でも資材製造に起因する温室効果ガスや資源消費が大きな割合を占めた。今後、環境負荷の観点からは、資材量、特に鋼材の使用量を低減するための技術開発が必要である。
- 2) 鋼材は転炉鋼・電炉鋼などの種類により計算結果が大きく異なる。CO₂排出量評価の精度向上のためには、それらの利用率の把握が重要である。
- 3) 高炉セメントはCO₂削減に大きく寄与するため、CO₂

削減の面からは利用の促進が有効であると考えられるが、原単位についての精査が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通省 HP，環境ポータルサイト <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/>
- 2) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ，No.44，2002
- 3) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2），コンクリート技術シリーズ，No.62，2004
- 4) 土木学会：コンクリート構造物の環境影響照査指針（試案），コンクリートライブラリ 125，2005
- 5) 日本経済団体連合会：経団連環境自主行動計画，建設，<http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/pol1133/g04.html>
- 6) 国土交通省 横浜国道事務所：原宿交差点立体化 HP，<http://www.harajuku-underpass.go.jp>
- 7) 大久保英也ほか：輻輳する地下埋設物下での大断面分割シールド工法，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，第VI部門，pp.239-240，2007
- 8) 足立英明ほか：大断面分割シールド工法（ハーモニカ工法）の施工実績，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，第VI部門，pp.477-478，2007
- 9) LCA日本フォーラム：JLCA-LCAデータベース 2004年度2版
- 10) 産業環境管理協会：JEMAI-LCA Pro 用オプションデータベース
- 11) 建築学会：建物のLCA指針，1999
- 12) 産業環境管理協会：ライフサイクル環境影響評価手法，LIME-LCA，環境会計，環境効率のための評価手法・データベース，2005
- 13) 普通鋼電炉工業会：普通鋼電炉工業会 HP，<http://www.fudenkou.jp/index.html>