

ハーモニカ工法による環境負荷の低減と、国道1号原宿交差点立体工事をモデルとしたCO₂排出量の評価

宮地 孝

横浜市戸塚区で施工中の国道1号原宿交差点立体工事では、トンネル築造に新技術「ハーモニカ工法」を導入している。同工法は小型の泥土圧式シールド機にて掘削した小断面のトンネルを積み上げて、大断面のトンネルやアンダーパスを構築する非開削工法である。都市部などにおいて需要が増しているアンダーパス等の工事を短期間で経済的に施工出来る技術として注目されているが、さらに同工法には、建設副産物を削減し環境負荷を低減するメリットもある。ここではそのメリットを紹介し、また同時に、実際の原宿交差点立体工事においてCO₂排出量調査を行ったので、その結果について報告する。

キーワード：ハーモニカ工法、アンダーパス、建設副産物、環境負荷、CO₂排出量

1. ハーモニカ工法の概要

ハーモニカ工法とは、矩形の大断面トンネルを複数の小断面に分割し、小型のハーモニカマシンにより繰り返し掘削した後、小断面トンネルを一体化し、その

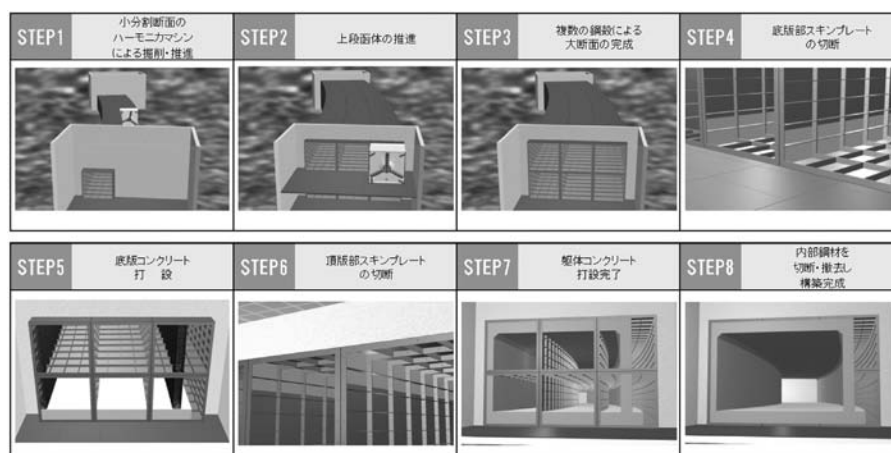


図一 1 ハーモニカ工法概要図

内部に構造物を作り上げる工法である。掘削を完了した坑口の形状が、ハーモニカの吹き口に似ていることからこの工法を「ハーモニカ工法」と命名した(図一1)。

ハーモニカ工法の施工手順を図一2に示す。ここでは矩形トンネルの断面を上下に2分割横方向を3分割、合計6分割した断面について説明する。

まず始めにハーモニカマシンで下段端部より基準トンネルを掘削する。引続き基準トンネルに隣接する下段のトンネルを掘削する(STEP1)。次に上段トンネルを順次掘削する(STEP2)。複数の鋼殻により断面が完成し(STEP3)、トンネル間の隙間に止水処理をした後、底版・壁・頂版等の躯体が貫通する部分の鋼殻の一部(スキンプレート・縦リブ)を部分的に解体しながら鉄筋を組み立て、コンクリートを打設し大断面のトンネルを構築する(STEP4～STEP7)。コ



図一 2 ハーモニカ工法施工手順

ンクリートの養生後、内部の鋼殻（主桁・縦リブおよびスキムプレート）を切断・撤去し仕上げを行う（STEP8）。

トンネル同士を接触させながら掘削を行うため、掘削方法はテール内でセグメントを組立てるシールド方式ではなく、立坑内で鋼殻を供給する推進方式である。

ハーモニカ工法の特徴を以下に示す。

環境負荷低減メリットについては別項にて述べる。

- ①掘削時のトンネル単体が小断面のため、低土被りでの施工が可能である。
- ②小型のマシンを繰り返し利用するため、全断面のシールドマシンに比べ非常に安価であり、作業基地等の設備も小規模で済む。
- ③100mを超える距離の掘削が可能である。
- ④曲線施工が可能である。
- ⑤地表面の沈下を最小限に抑える事が出来る（密閉型の泥土圧式ハーモニカマシンで掘削をすることにより切羽土圧管理が行える事と、推進方式であるため、テールボイドが無い）。
- ⑥トンネルの掘進が完了した段階で大断面の掘削作業が完了するため、内部掘削は不要。支保工架設も不要。

2. 国道1号原宿交差点立体工事の概要

(1) 事業目的

国道1号の横浜市戸塚区戸塚町～同区東俣野町区間は、藤沢・湘南以西と横浜以東を結ぶ交通が集中して著しい混雑状況にあり、なかでも、横浜市の主要幹線道路である環状4号と交わる原宿交差点における容量不足は著しく、渋滞の原因となっている。本事業は、原宿交差点を通過する交通の約80%を占める国道1号の直進車を立体化（アンダーパス化）して分離させることにより渋滞を軽減させるもので、平成22年12月

の上下線トンネル供用を目指して工事を進めている。

(2) 工事概要

工事名称：国道1号原宿交差点立体工事

施工場所：神奈川県横浜市戸塚区原宿町地先

発注者：国土交通省関東地方整備局

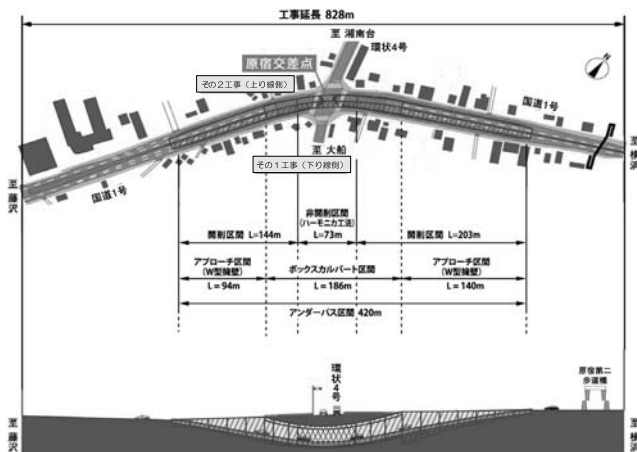
設計・施工：大成建設株式会社

工期：平成18年3月18日～平成23年2月21日

（その1工事，その2工事含む）

アンダーパス区間420mのうち、ボックスカルバートのトンネル区間が186mであり、そのうち環状4号線直下の73m部分にハーモニカ工法を採用した（図一3）。ハーモニカ工法施工部は平面線形R=320m、縦断線形R=1,000mの三次元複合曲線である。

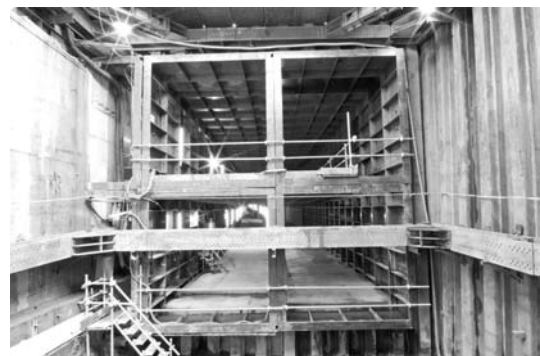
ハーモニカ部では、上下線2車線ずつのトンネルを施工するために、上下2段、横5列の合計10個の小断面トンネル（1つが約4m×約4m）に分割して施工を行った。工事は「下り線トンネル」を作るその1工事（6個の小断面トンネルを施工）と、「上り線トンネル」を作るその2工事（4個施工）に分けて行われた（図一1）。写真一1、写真二はマシンの到達状況と、その2工事でのハーモニカ掘削完了時の写真である。



図一3 全体工事概要図



写真一1 ハーモニカマシンの到達状況



写真二 その2工事で施工した4個の小断面トンネル

3. ハーモニカ工法の環境負荷低減メリット

(1) 非開削部の建設汚泥・建設発生土量の低減

代表的な非開削工法である円形のシールド工法と比べた場合、トンネル構造物としての必要断面とほぼ同程度の寸法で掘削・土留めが可能であり、施工中に発生する建設汚泥を最小限に抑えることが出来る。

例えば、原宿交差点立体工事で施工するアンダーパストンネル（以下、原宿トンネル）の下り線断面で考えた場合、仮に一般的な円形のシールド工法で施工した場合（直径約 11 m）と比較して、掘削断面比較で約 22% に当たる約 1,500 m³ の建設汚泥を削減する事が出来た（図-4）。これは、約 18 km 離れた汚泥処分場までの運搬を考慮すると、CO₂ 発生量を 9.6 t 削減した事になる。

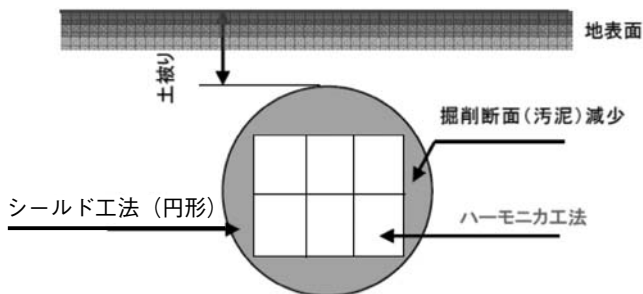


図-4 通常のシールド工法とハーモニカ工法の断面比較

また、シールド工法よりはトンネル構造物に比較的近い断面で施工可能な既存の外殻先行方式と比較しても、ハーモニカ工法は有利である。すなわち、アンダーパス部の線形に追従して曲線施工する事が可能であることから、やはり建設発生土を低減させるメリットが期待でき、曲線が急なほどそのメリットは大きくなる。仮に今回ハーモニカ工法で施工した箇所（平面線形 R = 320 m、縦断線形 R = 1,000 m の三次元複合曲線）を、既存の外殻先行方式で直線的に施工し、内部掘削後に構築を行ったと仮定したケースと比較すると、約 28% に当たる、約 1,900 m³ の建設発生土を削減する事が出来たと推定される。同様にそれらを処分場まで運搬した場合と比べると、CO₂ 発生量は 11.6 t 削減出来た事になる。

(2) 非開削部以外での発生土量の削減

シールド工法では、施工時の路面沈下や隆起の問題から、最低でもシールド直径の半分程度の土被りが必要とされている。従って、仮に通常のシールド工法で都市部のアンダーパスを計画すると、掘削箇所の深度を深くする必要が生じる（図-5）。

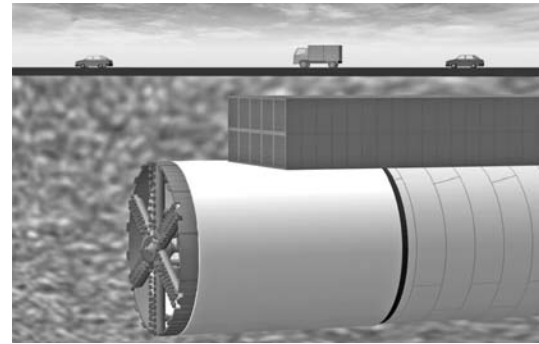


図-5 通常のシールド工法とハーモニカ工法の深度比較

このため、トンネル両側に建設する地上へのアプローチ区間の延長が長くなり、発生土量は多くなる。一方、ハーモニカ工法では低土被りでの施工が可能であるため、アプローチ区間延長を必要最低限とすることが出来、工事から発生する残土量を抑える事が出来る。

原宿トンネルにおいてその効果を試算すると、シールド工法（円形）に比べて、約 62%（約 27,000 m³）の発生土を削減し、CO₂ 発生量も 162 t 削減した事になった。

(3) 掘削機の小型化による省資源化

ハーモニカ工法は、小さい掘削機械（写真-3）を繰り返し使用するのが特徴であり、全断面のシールド工法の掘削機械に比べ、機械重量が小さくなる（原宿トンネルのハーモニカマシンの場合、4 m × 4 m の断面で約 80 t）。



写真-3 ハーモニカマシン

それにより、マシンへの鋼材使用を大幅に低減出来る。原宿トンネルとほぼ同断面のトンネルを全断面のシールドマシンで掘削した場合（機械重量約 2,000 t）と比較して掘削機械重量は 5% 以下となり、その環境負荷低減効果は大きなものとなる。ハーモニカ工法で

は仮設の鋼殻に鋼材を多めに使用（約 650 t）しているが、原宿トンネルの場合その鋼材量を全て見込んで試算しても、トンネル区間を全断面シールド工法で施工した場合に比べて約 65% の鋼材量を削減出来た。仮設の鋼殻については、その本設利用や、転用を可能にする工夫を進めていけば、その環境負荷低減メリットは大きなものになるだろう。

(4) 近隣交通への影響低下による CO₂ 削減効果

非開削工法である事と、掘削機械が小型で、作業基地・設備などの地上作業スペースが最小限に抑えられる事により、地上での車線規制工事が少なくて済む。都市部などでアンダーパスが必要とされている箇所では、そもそも交通量が多い箇所での工事が多い。こういった場所で車線規制した場合に発生する工事渋滞による CO₂ 発生量は相当なものであると推定される。渋滞を少なくし、CO₂ の発生を低減する事は環境負荷低減のメリットがある。

また、ハーモニカ工法はトンネル断面を複数の矩形断面に分割して掘進するため、掘進が終了した鋼殻内では並行して後工程であるコンクリート躯体構築作業を行えるメリットもあり、工程の短縮が可能である。原宿トンネル（その 1 工事）の場合、入札時に指定された最大施工日数の 540 日から 90 日短縮して工事を完了させる事が出来た。工事を短期間で終わらせ、早期に渋滞解消を実現する事による CO₂ 発生抑制効果も見込まれる。一日 10 万台もの交通が集中する原宿交差点の場合、渋滞解消による CO₂ 削減効果は 600 t / 年に及ぶと推定されており、90 日の工程短縮効果は約 150 t の CO₂ 削減効果となる。

(5) 環境負荷低減メリットのまとめ

今まで述べたように、都市部のアンダーパス工事などに、「低土被り」「コンパクトな設備・基地」で施工出来るハーモニカ工法は、従来工法に比べてさまざまな環境負荷低減メリットがある。それらのメリットが認められ、「平成 21 年度リデュース・リユース・リサイクル推進功労者等表彰」において、栄えある「国土交通大臣賞」を受賞する事ができた（写真—4）。

本文では、いくつかの主要なトピックスに分類して、従来工法との比較という形でハーモニカ工法の環境負荷低減メリットの大きさを確認した。その大きさを大雑把に掴む事は出来たと思われるが、厳密にはこれらのトピックス以外の項目での小さなメリット・デメリットもあり、これら全体を CO₂ 発生量の低減量として定量的に評価・把握する事は非常に困難な作業である。



写真—4 3R 国土交通大臣賞

しかし、2005 年には京都議定書が発効し、我が国も 2012 年までに温暖化ガスの排出量を 1990 年を基準として 6% 削減することが義務づけられている事などを勘案すると、建設工事における CO₂ 排出量削減を議論するためには、排出量の定量的な評価といったものが今後ますます重要となってくると思われる。

現状では、建設工事における環境評価は、評価の対象範囲や原単位などの不確実性が大きく、統一された方法が確立されている訳では無い。しかし、今後の CO₂ 削減を議論するためには、その評価事例を蓄積していく事も重要なステップであると思われる。そこで、この度 CO₂ 排出量の評価の一例として、原宿交差点立体工事をモデルとして詳細な評価を試みたので、次章にて結果をご報告する。

4. CO₂ 排出量の評価

(1) CO₂ 排出量評価の基本的な考え方

本章では、原宿交差点立体工事をモデルにした CO₂ 排出量の評価結果について報告する。なお、今回の CO₂ 排出量評価の対象は、当工事のその 1 工事（下り線トンネル施工時）とした。

報告に移る前に、建設工事における CO₂ 排出量評価に関する基本的な考え方を、簡単にまとめる事とする。国土交通省においては、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、発注時にライフサイクル全般を考慮した、環境負荷の低減を図るための施策を進めているところである¹⁾。「建設工事で発生する CO₂」についても、建設機械や資材運搬に伴う排気ガスの発生など、建設作業に直接関わるものに加え、建設に用いる資材の生産に関わるものなど、ライフサイクル全般を考慮する事が必要である。

実は、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約1%を占めるに過ぎない²⁾。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30%を占める²⁾。

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る。

上記の観点から、今回の評価では、建設資材の輸送時、重機の稼働や電力消費などの施工時、廃棄物処理時でのCO₂排出量に加え、ハーモニカ工法で使用された鋼材や鉄筋・コンクリートといった、材料の製造時のCO₂排出量についても算出を行った。

(2) CO₂ 排出量の算出方法

(a) インベントリ分析概要

アンダーパス構築によるCO₂排出量を、各種の環境負荷原単位を用いて定量的な評価を行った。CO₂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, 4)}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・燃料を製造・精製する工場の建設、および輸送車両・建設機材の製造・維持補修時の燃料消費によるCO₂排出量は考慮していない。

計算の対象としたのはアプローチ部、ボックスカルバート部、ハーモニカ工法部の施工とし、工事準備段階の付替え道路の施工などについては考慮していない。

(b) 各項目のインベントリ分析

インベントリ分析は、資材製造、輸送、施工、電力、廃棄物処理に分けて行った。

①資材製造

資材製造では、鋼鉄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CO₂量を考慮した。鋼材には、ハーモニカマシン、鋼殻、開削部の山留め材、覆工板、コンクリート構造物の鉄筋などがある。本工事では、コンクリート構造物の大部分が高炉B種コンクリートで施工されている。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⁾。鋼鉄の内、リース材は耐用年数を20年と仮定し、1年に原単位の5%ずつ排出するものとした。

②輸送

建設資材などは、建設現場に輸送されて初めて利用することができると思えなければならないため、このような輸送によるCO₂排出量も考慮する必要がある。ただし、建設資材の製造段階以前の輸送については、資材製造の方ですでに考慮されているために除外してある。生コンクリートや鉄筋などといった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考慮した。また、残土などを中間処理施設まで運搬する分もこの項目に分類した。施工機械の運搬はハーモニカマシンのみを考慮した。

③施工（電力以外）

クレーンなどの建設機械の稼働によるCO₂排出量の原単位は1時間当たりのデータである。1日あたりの建設機械の稼働時間を6時間と仮定してCO₂排出量を計算した。

④電力

排水ポンプ、橋型クレーン、ハーモニカマシンなどの建設機械は購入電力によって作動するため、購入電力によるCO₂排出量を、工事計画段階の電気使用予定量(kW)から算出した。購入電力のCO₂排出量の原単位はkW・h当たりであるため、施工の項目と同様に稼働時間を6時間として算出した。

⑤廃棄物処理

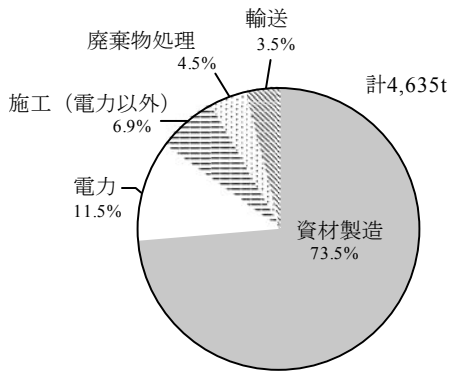
コンクリートがら、アスファルトがら、汚泥の処理によるCO₂排出量は、その発生量に処分の原単位をかけることで算出した。なお、鋼鉄のスクラップの処分については、電炉鋼として再利用され则认为、除外した。

(3) CO₂ 排出量の算出結果と評価

(a) CO₂ 排出量の算出結果

図一6に原宿交差点立体工事のその1工事でのCO₂排出量の算出結果を示す。CO₂排出量の総量は4,635tとなり、そのうち資材製造によるものが約4分の3を占める結果となった。続いて電力、施工（電力以外）、廃棄物処理、輸送の順となった。電力が施工を上回ったのは、ハーモニカマシンの稼働によるものと考えられる。

また、原宿交差点立体工事で用いられるコンクリートは主に高炉セメントが用いられているが、今回は高炉セメントの使用によるCO₂排出量の削減効果を定



図一6 CO₂ 排出量の内訳

量的に評価するため、仮に全てのコンクリートに普通セメントを使用した場合のCO₂排出量についても同時に算出した。

その結果、普通セメントを用いた場合のCO₂排出量の総量は4,635tから5,400tとなり、大幅に増加することが分かった。この5,400tを基準に見れば、高炉セメントを用いることによって4,635tにまで低下させ、CO₂排出量を14%削減できたとも言える。

ここまで大幅に効果があったことの原因として、高炉セメントは普通セメントと比較して、CO₂排出量の原単位が40%程度低くなっていること、また資材製造によるCO₂排出量が元々多くを占めていることが考えられる。

(b) 資材製造によるCO₂排出量の内訳

資材製造によるCO₂排出量が総量に与える影響が多大であることが把握できたため、今度は資材製造によるCO₂排出量の内訳について調査を行った。

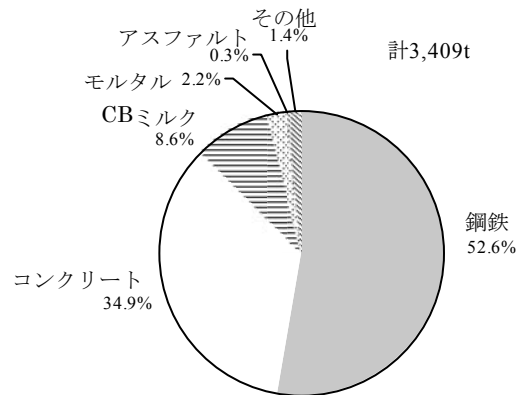
その結果を図一7に示す。

高炉セメントを使用した場合 (実際の工事) (図一7 (a)) では、鋼鉄によるCO₂排出量が最も多く、約53%を占めた。鋼鉄に起因するものが多いのは、ハーモニカ工法で鋼殻に鋼材を使用しているためであると考えられ、工法の特徴が出ている。普通セメントを用いた場合 (図一7 (b)) ではコンクリートによるCO₂排出量が逆転して最も多くなった。このように、高炉セメントの使用はCO₂排出量の削減に大きく寄与することが確認できた。

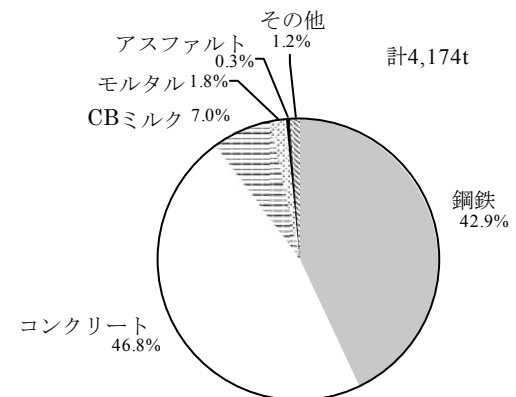
(4) CO₂ 排出量評価のまとめ

今回のCO₂排出量評価は、実際の工事をモデルとして、施工時における排出量にとどまらず、建設材料の製造などに起因する広義のCO₂排出量を定量的に算出した結果である。その結果を概略でまとめると、

①工事にて発生するCO₂排出量の総量は4,635tであった。



(a) 高炉セメントを使用



(b) 普通セメントを使用

図一7 資材製造によるCO₂排出量の内訳

②資材製造によるCO₂排出量が全体の4分の3近くを占めていた。さらに資材製造の内、約半分は鋼鉄に起因するものであった。

③普通セメントの代わりに高炉セメントを使用することでCO₂排出量を14%削減できており、高炉セメントの使用はCO₂排出量の削減に効果的である。といった事を確認する事が出来た。

今回の評価作業は現時点では「ハーモニカ工法」適用後のCO₂排出量を算出したのみであり、在来工法などと比較してどれくらいの環境負荷低減効果があるかについての詳細な比較までは至っていない。環境負荷低減効果は3章でも述べたとおり非常に多岐に渡ることから、それらを全て数値化して詳細に評価する事は非常に困難である。しかし、昨今の社会情勢を考えると、今後工事によって発生するCO₂排出量を的確に算出し、環境負荷の少ない工法を採用する事は、地球温暖化対策にとって非常に重要となるであろう。

5. おわりに

ハーモニカ工法は、都市部の交差点や鉄道横断部におけるアンダーパス構築を、低土被り・非開削で実現出来る工法として、現在非常に注目を集めている。今

後はその環境負荷低減メリットの面からも、その優位性がさらに評価されてくるであろう。

最後に、国道1号原宿交差点立体工事の施工に関して、多大なるご指導・ご協力を頂いた、国土交通省関東地方整備局の関係者の皆様に、誌面を借りて御礼申し上げます。

J|C|M|A

《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) 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/pol133/g04.html>
- 3) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2）, 土木学会コンクリー

ト技術シリーズ No.62, 2004

- 4) 産業環境管理協会：LCA 日本フォーラム HP, LCA データベース,
<http://www.jemai.or.jp/lcaforum/>
- 5) 建築学会：建物の LCA 指針, 1999
- 6) 大成建設技術センター報第 41 号：国道 1 原宿交差点立体工事での CO₂ 排出量の評価, 2008
- 7) 国土交通省 横浜国道事務所：よここくナビ <http://www.ktr.mlit.go.jp/yokohama/> より, 原宿交差点立体化 HP

【筆者紹介】

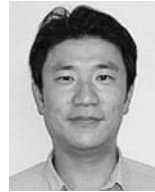
宮地 孝（みやぢ たかし）

大成建設株

横浜支店

国道 1 号原宿交差点立体工事業務所

監理技術者



橋梁架設工事の積算

——平成 22 年度版——

■改訂内容

1. 積算の体系
 - ・大都市補正地区の拡大
 - ・施工箇所が点在する工事の積算方法
2. 橋種別
 - 1) 鋼橋編
 - ・損料改定による複合損料全面改訂
 - ・FRP検査路歩掛, 鋼製排水溝設置新規掲載ほか
 - 2) PC橋編
 - ・トラス梁特殊支保工 歩掛の追加 ほか
 - 3) 橋梁架設用仮設備機械等損料算定表
 - ・損料全面改訂

■ B5 判／本編約 1,100 頁（カラー写真入り）
別冊約 120 頁 セット

■定価

非会員：8,400 円（本体 8,000 円）

会 員：7,140 円（本体 6,800 円）

※別冊のみの販売はありません。

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 600 円

沖縄県 450 円（但し県内に限る）

■発行 平成22年5月

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>