

ハーモニカ工法（大断面分割シールド工法） による70mを超える曲線施工

三木 洋人¹・佐々木 俊伸¹・宮地 孝¹・安本 宣興¹・坂巻 直紀²

¹正会員 大成建設株式会社 横浜支店（〒160-0004 横浜市西区みなとみらい3-6-3）

²正会員 工修 大成建設株式会社 横浜支店（〒160-0004 横浜市西区みなとみらい3-6-3）

昨今、主要幹線道路の交差点等の地下立体交差化を非開削工法で施工する事例が増えてきているが、従来の外殻先行型の非開削工法は直線施工に限定され、距離は50m～60m程度が限界とされている。また全断面の大口径シールド工法は土被りに制限を受ける他、コスト面でも劣っている。そのような背景の中、上記課題を解決する新しい工法としてハーモニカ工法が開発され、立体化事業等において実績を積み重ねつつある。しかし、施工延長、低土被り、曲線施工といったハーモニカ工法の特徴を十分に立証できる施工事例は未だ無かった。本稿は「掘進延長73m」、「1.7mの低土被り」、「平面R=320m、縦断R=1,000mの3次元曲線」といった条件下における本工法の施工事例を報告するものである。

キーワード：ハーモニカ工法、矩形推進

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、小型のシールド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-1）



図-1 ハーモニカ工法概要図

(1) ハーモニカ工法施工手順

ハーモニカ工法の施工手順を図-2に示す。断面の分割数は、構築されるアンダーパスの寸法、現場条件、掘削機・函体の運搬条件などによって決定され

る。分割数を増やすと、掘削機械が小型になり安価になるが、段取り替え回数が増し工期が長期化し、鋼製の函体（以下鋼殻）の重量もふえる。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。この基準トンネルはアンダーパスの基準となるため慎重な施工が要求される。引き続き基準トンネルに隣接するトンネルを掘削する（STEP1）。次に構台を組み立て、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、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）。コンクリートの養生後、内部の鋼殻（主桁・縦リブおよびスキンプレート）を切断・撤去し仕上げを行う（STEP8）。

ハーモニカ工法で使用する矩形の函体は鋼製を基本とし、隣接する函体間には継手を使用し、離隔を制御するとともに止水性を高めている。また、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となり、推進は元押しジャッキ方式と、元押しジャッキとシールドジャッキを併用する方式がある。

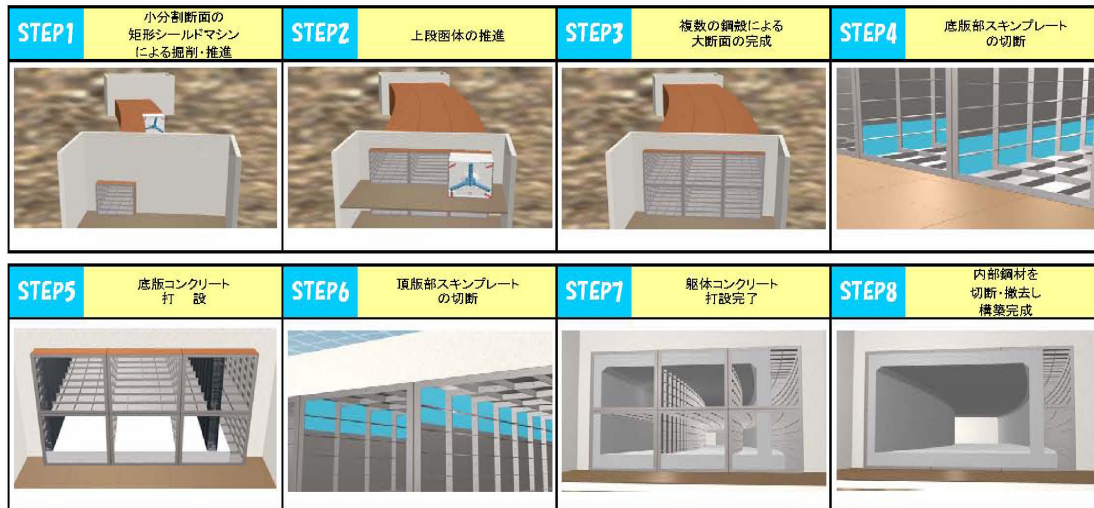


図-2 ハーモニカ工法施工手順

(2) ハーモニカ工法の特徴

ハーモニカ工法には、既存のアンダーパス構築技術であるURT工法などと比較して、以下の特長がある。

- ① 尺取掘削方式を採用することで、100mを超える距離の掘削が可能である。
- ② 曲線施工が可能である。
- ③ 密閉型のハーモニカマシンで施工を行うため、発進部・到達部以外には、基本的には薬液注入などの補助工法が不要である。
- ④ 密閉型の泥土圧式ハーモニカマシンで掘削をするため、地表面に与える影響が少ない。
- ⑤ ハーモニカマシンの掘進が完了した段階で、大断面の掘削作業が完了する。

また、全断面のシールド工法と比較した場合、以下の特長がある。

- ① 小型のハーモニカマシンを使用するので、全断面のシールドマシンに比べ安価である。
- ② 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。
- ③ テールボイドが少ないため、地表面に与える影響は少なく、かつ函体同士の接触に有効である。
- ④ 小型のハーモニカマシンを使用するので、施工時の作業基地占用が小規模となる。

(3) ハーモニカマシン



写真-1 ハーモニカマシン

ハーモニカ工法の施工箇所は低土被りであるため、ハーモニカマシンの形式は掘削時の地表面への影響が少ないとされる密閉型泥土圧式ハーモニカマシンを使用する(写真-1)。

断面寸法は鋼殻の分割と姿勢変動余裕などを考慮して決定する。また、100mを超える距離を施工する場合、掘削機は前胴・後胴に分け推進ジャッキにて接続し、尺取虫方式で掘進を行う。

さらに、曲線施工を行う場合は、線形に合致した鋼殻の使用と、中折れ装置の付いた掘削機械の使用により施工することが可能である。

(4) ハーモニカ工法鋼殻



写真-2 ハーモニカ鋼殻

小断面のトンネルの鋼殻は、継手の設置が容易であることや、隣接するトンネルを接続する時の鋼殻撤去が容易であること、および鋼殻を本体利用できる事などから鋼製を標準とする(写真-2)。個々の鋼殻間には、熱押型鋼で製作された継手部を設け、この継手部には推進時のガイド、および止水等の機能も持たせる。

鋼殻継手部の止水性能を高めるため、継手空隙部に止水材料を注入する。この止水材に要求される性能として下記項目が挙げられる。

- ① 地下水圧に耐えうる耐圧性
 - ② 地下水中でも分離しない水中不分離性
 - ③ 鋼殻切断時の不燃性と有害ガスの発生がない
- これらの条件を満たす止水材料としてアクリル系の止水材を標準としている。

2. ハーモニカ工法による施工事例

一般国道1号の横浜市戸塚区戸塚町～同区東俣野町区間は、藤沢、湘南以西と横浜以东を結ぶ交通が集中して著しい混雑状況にある。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の容量不足は著しく、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号の直進車を立地化(アンダーパス化(図-3))と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年度の全線開通を目指して工事を進めている。

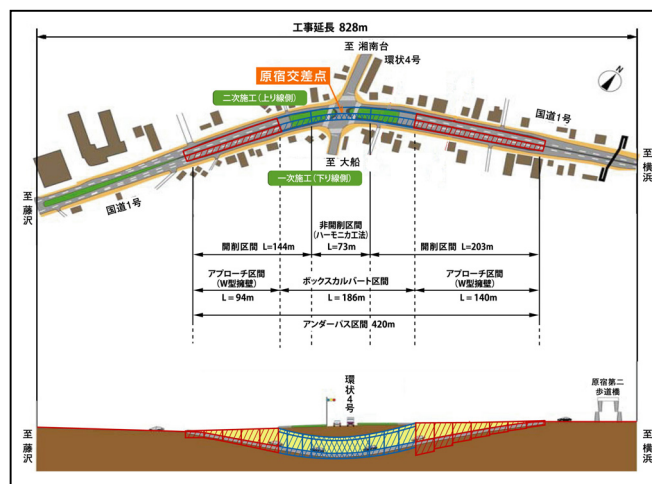


図-3 全体工事概要図

(1) 工事概要

本工事は、原宿交差点立体事業のうち、国道1号の下り線側を建設するものである。

以下に、本工事の工事概要を示す。

工事名称：国道1号原宿交差点立体工事(その1)

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

設計者：大成建設株式会社

施工者：大成建設株式会社

工期：平成18年3月18日～平成21年3月31日

工事数量：①鋼矢板打設	1,100t
②路面覆工	1,000m ²
③掘削工	28,000m ³
④土留支保工	600t
⑤コンクリート工	7,500m ³
⑥舗装工	19,700m ²
⑦ハーモニカ工法	延長73m

(2) ハーモニカ工法の選定

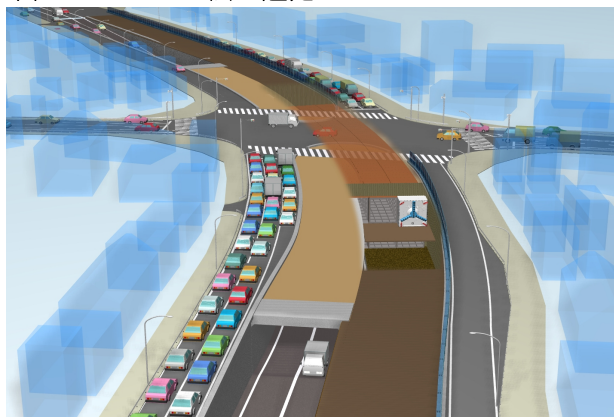


図-4 原宿交差点部施工平面図

原宿交差点部周辺の状況を図-4に示す。原宿交差点は10万台／日の交通量がある上、交差点直下には、φ600mmの水道、φ200mmのガス、N T Tの埋設管が横断している。

このような条件のもとで、

- ① 開削工法での施工では車線規制が多発し、一般交通への影響が大きい事。
 - ② 掘削時の埋設物への影響を少なく出来る事。
- などの理由から、原宿交差点部直下の延長73mの部分に非開削工法のハーモニカ工法を採用した。

(3) ハーモニカ部土質概要

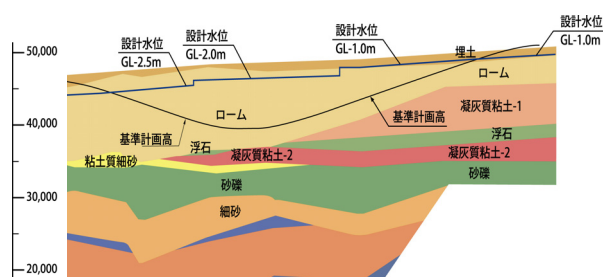


図-5 土質縦断面図（ハーモニカ工法付近）

当該付近一帯は、多摩丘陵と相模原台地、相模川低地で形成され、工事位置は相模原台地に位置する。関東平野における丘陵、台地及び低地は、火山灰層が広く堆積し、一般に関東ローム層と名付けられている。当位置においても、上部は途中浮石層を挟むが、地上より約10～15mまで関東ローム層にて構成されている。その下部には段丘礫層が基盤岩の上に厚く堆積している。図-5にハーモニカ工法区間付近の土層縦断面図を示す。

ハーモニカ工法での掘削対象地盤においては、全断面において関東ローム層で占める。関東ローム層は、N値6程度の粘性土で、地下水位（自由水）についてはGL-2.0m付近に存在する。

(4) ハーモニカ工法の施工計画

a) 全体計画

躯体の最終出来形寸法高さ7.250m×幅18.600mに対して、高さ3.980m×幅3.830mの函体を縦に2段、横に5列に10分割した（今回工事においては縦2段、横3列の6分割分を施工し、下段をB1～B3、上段をU1～U3とした）。また、立坑配置および道路線形の関係から、ハーモニカ工法区間延長を73mとした。鋼殻は、平面R=320m、縦断R=1,000mの3次元曲線を考慮し、リングの長さを1.25mとし、73mを58リン

グに分割した（図-6）。

ハーモニカ施工部の上方には、重要埋設管が存在するが、最小離隔を0.25m（水道管φ600）確保するように最小土被り1.7mと計画した。

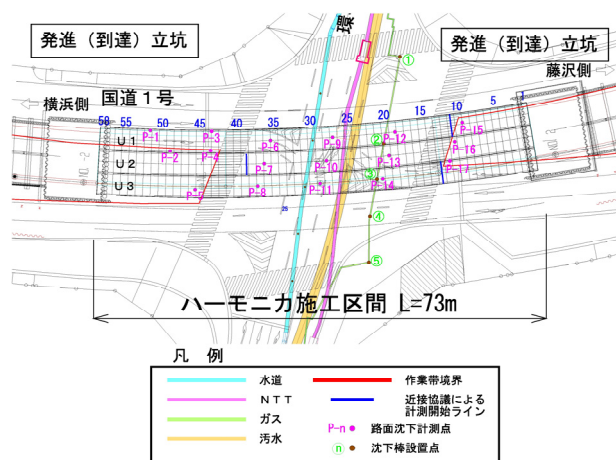


図-6 ハーモニカ工法平面図

b) ハーモニカマシンおよび推進設備

ハーモニカマシン（図-7）は、矩形断面掘削時の未切削部分を極力少なくする為に、矩形の4隅にコーナーカッタを装備した。また、方向制御ジャッキを装備し、左右・上下共に1.0°の中折れを可能とした。推進設備は、2,000kNジャッキを6本設置し、総推力12,000kNとした。

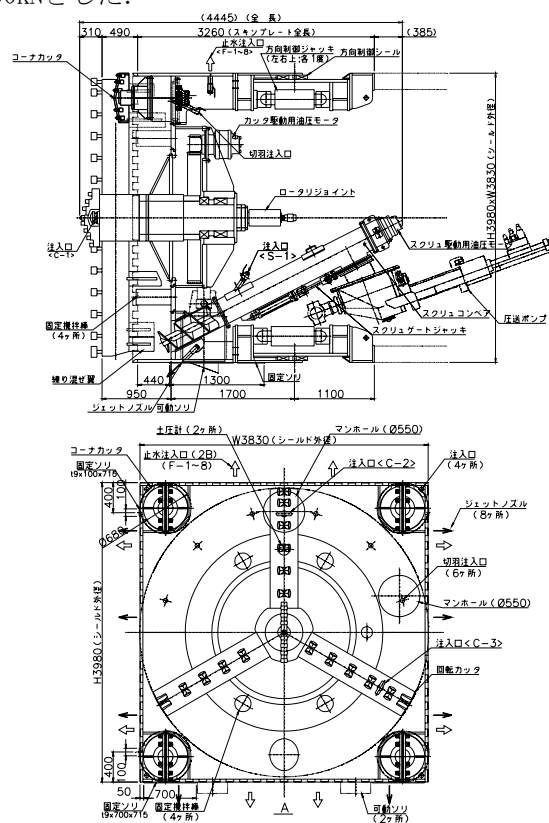


図-7 ハーモニカマシン

c) 裏込め材・滑材注入

ハーモニカ上部の埋設管への影響を最小限に施工するためには、裏込め材・滑材の注入方法及び材料の適切な選定が重要となる。また、ハーモニカ工法における隣接推進等の特殊条件もあることから、一般的な要求性能以外にも以下の観点から材料の選定を行った。

・裏込め材料

短時間で必要な強度が得られること。隣接推進時に固結して支障とならないこと。長期的な耐久性をもつこと。

・滑材

水により希釈されないこと。置換性が良好なこと。以上より裏込め材はCB充填材、滑材はアルティKを使用した。アルティKは、水溶性高分子剤で、ゼリー状の溶液である。滑材注入は、推進と同時に注入を行い、裏込め注入は各函体の到達直後に行った。

推進工法であるためマシン寸法と鋼殻寸法は等しいのでテールボイドは存在しないが、推力の軽減及び曲線施工に必要な余掘り量確保を目的として少量のオーバーカットを行っているので、オーバーカット部分への充填を目的として裏込め注入を行った。

d) 計測計画

最小土被り1.7mかつ重要埋設物下での施工管理に資するために、**図-6**に示す位置において、地表面沈下測量を行った。地表面沈下測量はノンプリズム式トータルステーションによる常時計測とした。また、重要埋設物には沈下棒を取り付け、沈下測量を行った。

(5) ハーモニカ工法の施工実績

ハーモニカ工法における施工実績を示す。

a) 進捗実績

表-1 ハーモニカ工法実施工程表

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
推進準備工	■	■	■	■	■	■	■	■
推進工		■	■	■	■	■	■	■
到達工		■	■	■	■	■	■	■
段取替工		■	■	■	■	■	■	■

進捗実績を**表-1**に示す。掘削速度は30mm/分以下で、最大10m（8Ring）/日の進捗であった。U1函体推進には、4週間程度の日数を費やしたが、小土被りのため、不明埋設物等の支障物に遭遇し、その回収作業

が発生したことによる。B2以降では、段取替えも含めた推進1函体あたりの施工サイクルは、概ね1ヶ月であった。

b) 推進力

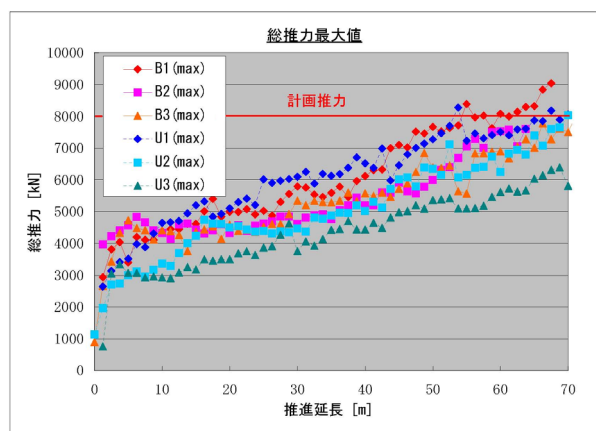


図-8 ハーモニカ工法掘削推力図

B1函体からU3函体推進までの掘削推力の実績を**図-8**に示す。8,000kN程度の設計値に対し最大推力は9,000kNであった。最大推力は掘削機の到達付近の掘削延長が最長となる時に発生した。これは、推進延長が長くなるにつれ、鋼殻周りの周面抵抗が増加したことが原因と考えられる。また、地山を掘削するB1函体と、B1函体に隣接して推進を行うB2・B3函体の推力との比較では、推力の大小関係に特段の傾向は無く、継手部分やマシンの競り等の隣接函体推進時の影響は特には見られなかった。

なお、設計推力は、矩形推進であることを考慮して、「下水道協会の修正式」を基準として、滑材効果による低減率を粘性土：0.35として算定した。

c) 施工精度

図-9～**図-10**に各函体の施工精度を示す。

水平変位・鉛直変位共、管理基準値内の精度で施工を行うことが出来た。鋼殻は隣接する鋼殻と継手にて接続されているので、B2～U3は、基準函となるB1にあわせて推進する必要があり、そのマシンの掘削精度は継手の余裕により規定され、50mm（±25mm）以内に収める必要がある。

このように、ハーモニカ工法においては、厳密な掘削管理が要求されるために、レーザートランシットにより、常時位置管理を行った。

d) 沈下量

ハーモニカ施工完了後の沈下量は、重要埋設物（φ200mmガス管）で最大35mmであり、埋設企業者との事前協議にて決定した許容値内（50mm）であった。

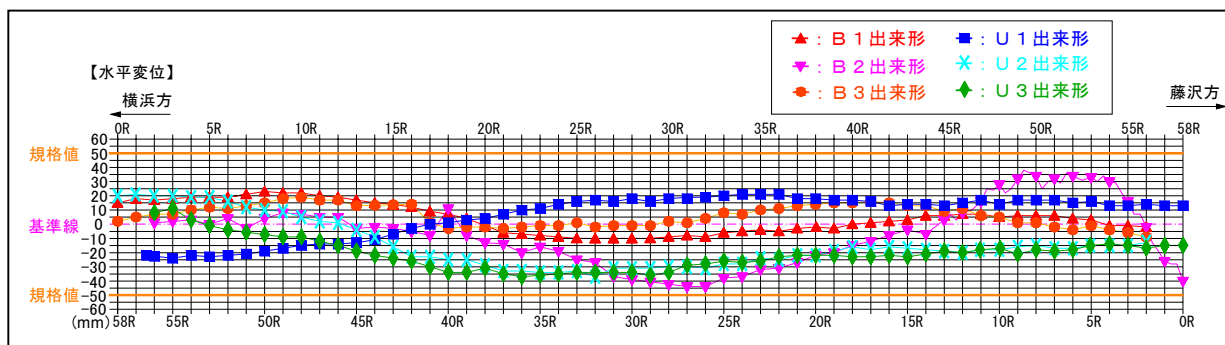


図-9 鋼殻水平精度

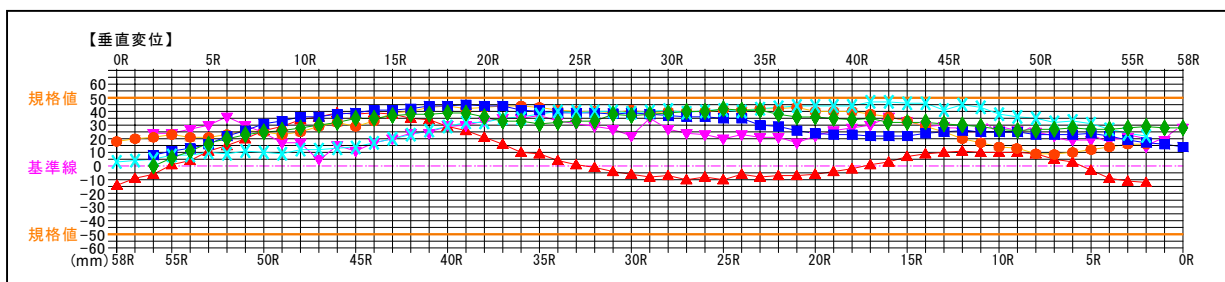


図-10 鋼殻鉛直精度

4. おわりに

ハーモニカ工法は、都市部における交通渋滞解消を目的として構築されるアンダーパス等を、安全かつ低コストで構築する技術である。現在、ハーモニカ工法の適用実績は増え、曲線施工や止水方法などの施工技術もまた進化している。今後、大断面、大深度等、更に厳しい環境下においての施工で、本工法の適用が期待される。



写真-4 ハーモニカ推進完了後の坑内



写真-3 ハーモニカ掘削機推進完了状況



写真-5 供用前のハーモニカ施工部

参考文献

加賀田 健司 他：輻輳する埋設物下での大断面分割シールド工法の施工《ハーモニカ工法》，土木学会 土木建設シンポジウム2007