

◇技術トピックス 「快適な都市環境をめざして」
交通インフラ整備のための技術開発
Technical Development for Transport Infrastructure
Improvement

副島 紀代 Michiyo Soejima
 佐藤 清 Kiyoshi Sato

1. はじめに

近年、都市再生の流れに呼応して、鉄道・道路などの交通インフラの整備が盛んに行われている。中でも、既設設備のリニューアルなどに加え、新設として新交通システムが日本のみならず世界各国でも脚光を浴びている。

ここでは、新交通システムに着目し、その特徴と適用の現状を述べると共に、今後新交通システムの建設に寄与が期待される最新の技術開発事例について紹介する。

2. 新交通システムの概要

2.1 新交通システムの特徴

新交通システムとは、従来の鉄道とは違った方式による軌条式輸送システムのことで、主に都市近郊で建設されている。しかし、“新”と言ってもその概念は新しいものではなく、今から四半世紀以上前の昭和 49 年度運輸白書 (1974 年)¹⁾の中で、

- ・路面交通の混雑激化、交通公害の増加等による、輸送効率の低下、都市環境の悪化
- ・ニュータウン、空港、港湾等における施設内部における交通、あるいはこれらと市街地を結ぶ輸送、新幹線駅と既存鉄道を結ぶ輸送等、新しい交通需要の発生という問題への対応策として、新交通システムの導入について言及されている。

最近では主に、軌道系のモノレール・AGT (Automated Guideway Transit ; 案内軌条式鉄道)・LRT (Light Rail Transit ; 軽量軌道交通)・HSST (High Speed Surface Transport ; 磁気浮上式輸送システム) ・ガイドウェイバス・スカイレール等を新交通システムと称し、交通網の建設コスト節減を目的に導入されることが多い。

これらの新交通システムは、バスと鉄道の間程度程度の輸送力を持ち、一般的に次のような特徴がある^{2),3)}。

- 1) 安全性：専用軌道を走るため、交通渋滞や交通事故の心配がない。
- 2) 快適性：振動・騒音が少なく快適な乗り心地。高頻度、定時運転により利便性に優れる。
- 3) 低公害性：電気を動力とするため排気ガスがない。車輪はゴムタイヤを使用し騒音・振動などの公害がない。
- 4) コンピュータの高度利用：運転・駅業務の自動化による大幅な省力化と需要に応じた柔軟な運行が可能。
- 5) 経済性：車両の小型軽量化により軌道構造物の建設費を節減。他の交通機関と比べて輸送効率が高い。

これらの特徴はさらに次節で述べるシステムの形式によっても違いがある。

2.2 新交通システムの主な形式

現在新交通システムは、2.1 節に示したように主に下記の 6 つの形式に分類されている。それぞれの形式について述べる⁴⁾。

(1) モノレール 1本のレール上を走行するシステムであり、レール上にまたがり走行する跨座式とレールにぶら下がって走行する懸垂式がある。特徴は、レールが 1 本なので少ない占有空間で運行できることと急曲線・急勾配への対応が可能なこと、走行音が小さいことである。

日本では昭和 32 年に初のモノレールが上野動物園内に開業 (上野懸垂線) した。以降、全国各地でモノレールが建設され、現在も新交通システムのひとつとして建設される一方、老朽化する施設も多く、採算性が低いため廃止された路線もある。

(2) AGT (案内軌条式鉄道) 側方または中央に設けられた案内軌条 (ガイドウェイ) を持つ高架橋などの専用軌道上を、ゴムタイヤを装備した小型軽量の車両が走行するシステムである。コンピュータによる自動運行が可能であること、ゴムタイヤによる走行音の低減が特徴である。日本で初めて実用化されたのは、1981 年に開業した神戸市のポートライナーと大阪市のニュートラムである。

(3) LRT (軽量軌道交通) いわゆる路面電車のイメージであるが、路面だけではなく、場所によって路上・地下・高架をうまく組み合わせながら、既存交通との連携を重視して電車を走らせるシステムである。特徴は静かで速く、低床式で乗り降りがしやすいことであり、加えて地平面で乗換えができることからバリアフリー面でも注目されている。ヨーロッパなどで積極的に導入されてきており、トランジットモール (公共交通機関に開放されている歩行者専用道路)、パーク&ライド等の都市交通政策と連携し効果を上げている。日本での本格的な LRT の実績はまだないが、2006 年春に JR 富山港線 (約 8km) が第 3 セクター化され、LRT の富山ライトレール線として開業予定である。

(4) HSST (磁気浮上式輸送システム) 車体を磁気で浮上させ、リニアモーターで推進力を得て走行するシステムで、2005 年 3 月に日本初の HSST として愛知高速交通東部丘陵線 (Linimo) が愛知万博のアクセス路線

として開通した。車輪がないため、車輪と軌道との摩擦に伴う騒音や振動がなく、高速運転も可能なことが特徴である。

(5) ガイドウェイバス 通常のバス車両が専用軌道（ガイドウェイ）を走行するシステムである。専用軌道上では車両に取り付けた案内装置の誘導で走行するが、案内装置を格納すれば通常のバスとして一般道路もそのまま走行することができ、その自由度の高さが特徴である。日本では唯一、2001年3月に開業した名古屋ガイドウェイバス志段味線（ゆとりーとライン）が実用化されている。

(6) スカイレール 懸垂式のモノレール車両をワイヤロープで駆動する、ロープウェイとモノレールを融合したようなシステムである。急カーブ・急勾配の走行が可能なことが特徴である。日本では1998年8月に開業した広島市のスカイレールみどり坂線で採用されている。

Table 1 各システムの特徴
Specification of New Transportation Systems

名称	特徴	最大輸送力 (人/h)	表示速度 (km/h)
モノレール	AGTに比べ、占用空間が少ない 急曲線・急勾配に対応可能	2000～22000 ⁵⁾	20～45 ⁵⁾
AGT	完全自動運行システムによる無人運転が可能	1000～13000 ⁵⁾	21～31 ⁵⁾
LRT	従来の路面電車の発展型であり、建設費が安く、乗降が容易	6000～20000 ⁵⁾	18～40 ⁵⁾
HSST	車輪がないため、車輪～軌道間摩擦に伴う騒音・振動がない 高速運転が可能	3500 ⁷⁾	100～300 ⁷⁾
ガイドウェイバス	専用軌道・一般道路のどちらでも走行でき自由度が高い	4000 ⁵⁾	30 ⁵⁾
スカイレール	急カーブ・急勾配の走行が可能	1000～3200 ⁶⁾	18～25 ⁶⁾

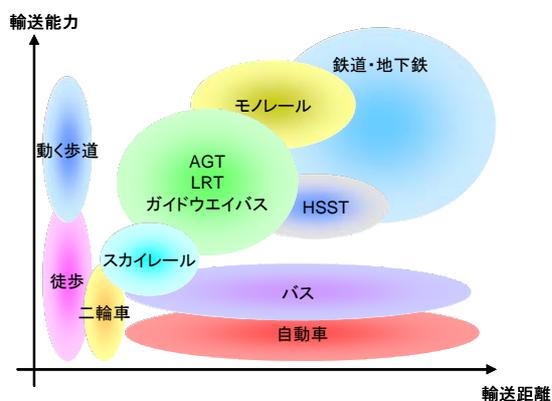


Fig. 1 交通システムの輸送能力と輸送距離の関係
(⁵⁾を参考に作成)

Capacity and Distance of Transportation Systems

る。

各システムの特徴を Table 1 に示す。また、形式による輸送能力と輸送距離の特徴を Fig. 1 に示す。この図から、長距離の大量輸送は、既存の鉄道・地下鉄が適していることがわかる。一方、都市内交通のように輸送距離が比較的短い場合は、必要とされる輸送能力に応じて、適切な形式を選択することができる。

2.3 新交通システムの現状

現在、日本で営業されている主な新交通システムの路線一覧を Table 2 に示す。形式は AGT が 11 例、モノレールが 10 例と多く、中でも 1980 年代～90 年代の主流は AGT (16 例中 11 例) であったことがわかる。2.2 節でも

Table 2 日本の主な新交通システム
List of Major New Transportation Systems in Japan

都市名	路線名	導入システム	開業年月	営業キロ
東京都	上野懸垂線 (上野動物園内)	モノレール (懸垂式)	1957年12月	0.3km
愛知県	モンキーパーク モノレール線	モノレール (跨座式)	1962年3月	1.2km
東京都	東京モノレール 羽田線	モノレール (跨座式)	1964年9月	17.8km
神奈川県	湘南モノレール	モノレール (懸垂式)	1970年3月	6.6km
神戸市	ポートアイランド線	AGT	1981年2月	6.4km
大阪市	南港ポートタウン線	AGT	1981年3月	6.6km
千葉県	ユーカリが丘線	AGT	1982年11月	4.1km
埼玉県	ニューシャトル	AGT	1983年12月	12.7km
北九州市	小倉線	モノレール (跨座式)	1985年1月	8.8km
埼玉県	レオライナー	AGT	1985年4月	2.8km
千葉県	千葉都市モノレール (タウンライナー)	モノレール (懸垂式)	1988年3月	15.2km
横浜市	金沢 シーサイドライン	AGT	1989年7月	10.6km
神戸市	六甲アイランド線	AGT	1990年2月	4.5km
大阪市	大阪モノレール線	モノレール (跨座式)	1990年6月	23.8km
小牧市	桃花台線 ピーチライナー	AGT	1991年3月	7.4km
広島市	アストラムライン	AGT	1994年8月	18.4km
東京都	東京臨海新交通 (ゆりかもめ)	AGT	1995年11月	12.0km
大阪市	ニュートラム テクノポート線	AGT	1997年12月	1.3km
広島市	スカイレール みどり坂線	スカイレール	1998年8月	1.3km
東京都	多摩都市モノレール	モノレール (跨座式)	1998年11月	16.0km
名古屋市	志段味線	ガイドウェイバス	2001年3月	6.5km
浦安市	ディズニー リゾートライン	モノレール (跨座式)	2001年7月	5.0km
那覇市	沖縄都市モノレール	モノレール (跨座式)	2003年8月	12.9km
愛知県	東部丘陵線 (リニモ)	HSST	2005年3月	8.9km

(2005年6月現在)

述べたように、ゴムタイヤによる騒音低減、走行性の向上が期待されて各地で導入された AGT は、ゴムの劣化のため維持管理費がかかるという問題も抱えている。また、供用年数の長い AGT・モノレールには、共に老朽化の問題もあり、今後維持管理の問題がクローズアップされるものと思われる。

一方で、それ以外のガイドウェイバス、スカイレール、HSST はそれぞれ 1 例ずつであり、いずれも 1990 年代後半から登場した新しいものである。ただし、建設はされたものの、採算性が問題となっている路線もあり、計画中の路線について、今後運用面での見直しが要求されることも懸念される。

LRT は、ハードだけでなくソフト面の対応（都市計画・地域計画等による政策的な位置付け）も要求されることから、実現に時間を要するものと思われる。しかし、既存の施設を最大限に活用できることや、路線選定の自由度が高いこと、そしてバリアフリー化された車両による利用者の利便性向上から、国でも建設を推進する動きがある。施設の形式も他の交通システムと比較して、高架・地下・路面という幅広い選択肢があるため、様々な建設技術の適用が可能であるが、いくつかの課題もある。

ひとつは、既存交通施設との連携が重要なコンセプトであるため、既存主要駅などの交通量の多い場所での施工が要求されることである。既存の交通をできるだけ妨げずに建設を行う技術が必要となる。すなわち、急速施工や施工中の一部供用開始など早期運用が重要な技術開発目標になっている。また、占用空間をできるだけ小さくすること、建設コストを低減することも重要な課題である。加えて、維持管理コストも考えたコスト低減を図る必要がある。

それらを踏まえて、次章では、新交通システムの建設に貢献が期待される当社の保有技術を紹介する。

3. 交通インフラ整備に関連する技術開発

一般的に、新交通システム建設では軽量化・小型化されるため、従来型の工法が基本的に適用可能である。ただし、既に開発が進んでいる区域の建設になるため、環境および空間制限などの近隣施設からの制約条件をクリアすること、供用中のサービスへの影響を最小限に留めることが重要である。ここでは、工事期間中および供用期間の占有空間を小さくできる工法としてシートパイル基礎を、既存交通を阻害せず工期短縮が図れる工法として、URUP 工法と REFO 工法を一例として紹介する。

3.1 基礎の小型化に供する技術（シートパイル基礎）

比較的良好な地盤上では、直接基礎が安価であるが、設計上、地震時保有耐力の確保の面からその底面積が決定される場合がしばしばある。シートパイル基礎（財団法人鉄道総合技術研究所との共同開発）は、Fig. 2 に示すようにフーチングとそれに接合されるシートパイルで

構成される。元来、この工法は、直接基礎の適用は望ましくないが杭基礎にするほど軟弱でない地盤を対象に、フーチングの支持力不足をシートパイルで補うものである。そのため、シートパイルの負担を大きくすると、フーチングすなわち基礎の底面積は小さくできる。

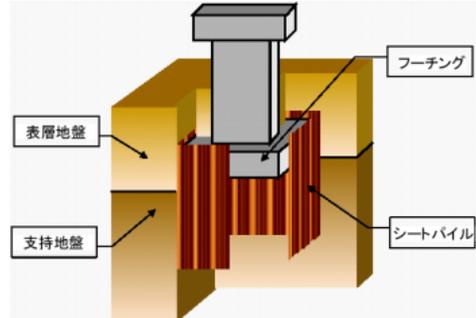


Fig. 2 シートパイル基礎の構成
Components of Sheetpile Foundation

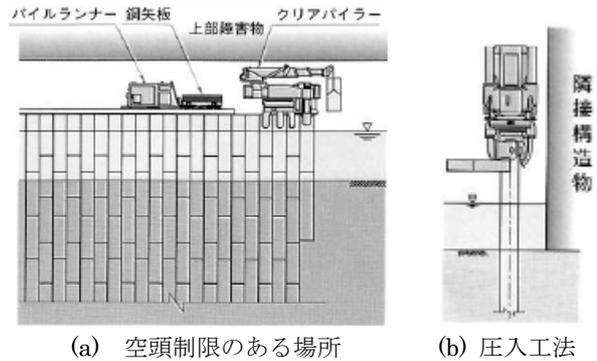


Fig. 3 シートパイルの打設方法
Piling Method of Sheetpile Foundation

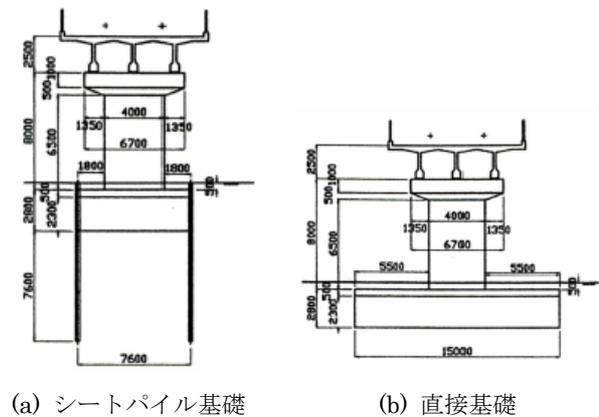


Fig. 4 同条件下での基礎の大きさ比較
Comparison of Sheetpile Foundation and Spread Foundation

シートパイル基礎の特徴は、下記の通りである。

- ・ 仮土留め用シートパイルを基礎の一部として本設利用することによって、施工性・経済性が向上する。
- ・ シートパイルによって閉合された地盤の拘束効果によって全体の支持力が向上する。
- ・ 水平抵抗が上昇するため、高い耐震性を発揮する。
- ・ 全体剛性が上昇することで、制振性が向上するため走行性が改善できるとともに、環境振動にもよい。
- ・ 掘削幅を最小にすることができ、大幅に建設発生残土量を削減することが可能である。

これまで、模型実験や原位置載荷試験を通して、その支持力特性は明確にされてきた⁸⁾。その結果、耐震性に大きく寄与する水平力の分担はシートパイルが大きく占め、シートパイルの先端支持力も期待できることから、シートパイル長は比較的短くすることができる。具体的には、フーチング施工時の土留め機能を確保することでシートパイル長さが決まる場合が多い。

また、施工法においても、低振動・低騒音型の圧入工法や空頭制限のある場所でのクランプクレーンの適用も可能である (Fig. 3)。

最大の特徴である基礎の小型化に関しては、降伏震度が高い (大きな地震まで耐えられる) 場合、Fig. 4 に示すように幅単位で 15m→7.6m (約 50%減)、面積単位で 74%減となる。また、要求される降伏震度が低い場合、シートパイルの長さは短くてすみ、更に幅単位で 12m→7.6m (約 37%減)、面積単位で 60%減となる。

3.2 交差点の立体化技術

既存の交通インフラの整備において、交差点や踏切部での慢性的な交通渋滞の緩和は重要な課題のひとつである。交通渋滞は時間的損失や経済的損失だけでなく、窒素酸化物や二酸化炭素の排出による環境悪化などの弊害をもたらす。このような交通渋滞の緩和に有効な方法が立体交差化である。当社では交差点の立体交差化技術として、トンネルによるアンダーパス施工技術「URUP 工法」、橋梁によるオーバーパス施工技術「REFO 工法」を開発した。「URUP 工法」は世界初となる立坑不要のシールドトンネル掘削技術であり、「REFO 工法」は既存技術の組合せによって開発した工法である。開発におけるアプローチは異なっているが、どちらの工法も①工期の短縮、②施工時制約条件 (施工機械、工事占有地など) の最小化、③環境負荷の低減を開発のコンセプトとしている。以下、各工法の概要と特徴を紹介する。なお、以下に示す各図 (Fig. 5～Fig. 12) は当社の社外公開ホームページ^{9), 10)}より引用した。

3.2.1 URUP (Ultra Rapid Under Pass) 工法

URUP 工法は立坑を不要とした地上発進、地上到達によるトンネル構築技術である。Fig. 5 に URUP 工法によるトンネル断面図を示す。トンネルは両端のアプローチ部と、中

央のトンネル部によって構成されており、それぞれを 1 台のシールドマシンによって連続的に施工する (Fig. 6 および Fig. 7)。以下に主な特徴を示す。

- ・ 立坑を必要とせず、地上から発進して地上に到達するため、工期を大幅に短縮できる (Fig. 7)。
- ・ 交差点付近での占有工事がなく、二次渋滞を抑制できる。
- ・ 杭打機を使用しないため、工事に伴う騒音や振動を抑制できる。
- ・ 非開削、立坑不要により建設発生土が低減され、環境負荷を抑制できる。

URUP 工法の大きな特徴は立坑を必要としないことであるが、この世界初の技術により、開削工法や立坑を必

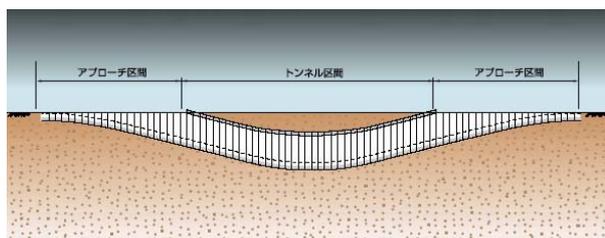


Fig. 5 URUP工法によるトンネル断面図
Vertical Section of Tunnel

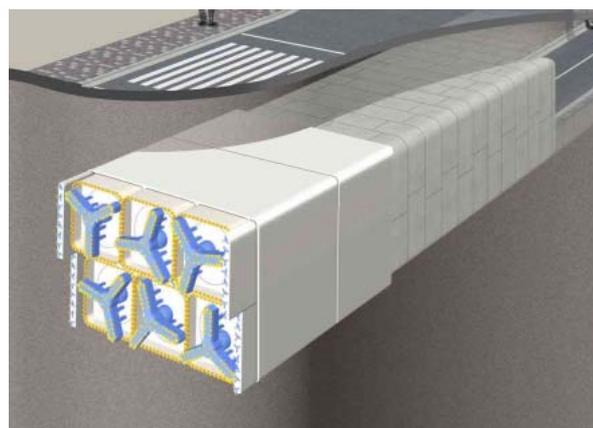


Fig. 6 URUP工法の概要図 (トンネル部の施工)
Image of URUP (Tunnel Section)

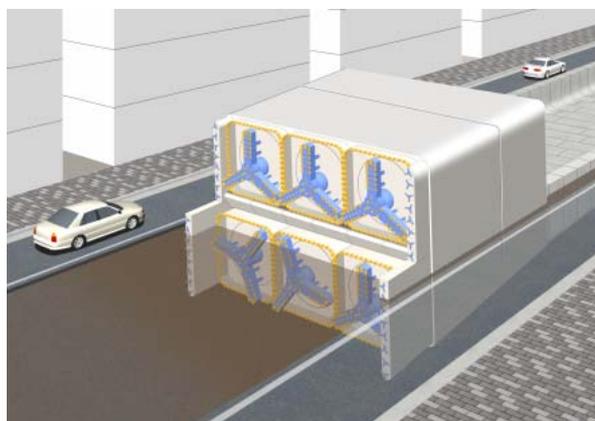


Fig. 7 URUP工法の概要図 (アプローチ部の施工)
Image of URUP (Approach Section)

要とする非開削工法などの従来工法に対して、工期を約1/3にすることが可能となった。立坑を不要とするための技術的な課題は、低土被りでの安定した掘削の実現である。一般的なシールド工法では、掘削断面の直径とほぼ等しい土被りが最低限必要とされ、それよりも低土被りの場合は掘進土圧の管理が難しく、地表面の隆起や沈下などを引き起こす可能性がある。URUP工法では低土被りでの施工における地盤変状を抑制するために、マトリックスシールドを採用した。Fig. 8はマトリックスシールドの断面を示している。マトリックス状に配置された個別の矩形シールドを独立して操作することで、切羽での土圧管理を容易にし、地表面の変状を最小限に抑えることを可能にした。マトリックスシールドは分解および再組立が可能であり、複数の工事に転用することでコストダウンを図ることもできる。また、アプローチ部の掘削時における側方地盤の変状を防止するため、マシンの両サイドに側部カッターを配置していることも大きな特徴である。地盤変状を抑制するためのこれらの方法は、二次元および三次元 FEM による予測解析を行い、その効果を確認した。

2004年度には Fig. 9 に示す実験機を製作し、当技術研究所の敷地内にて実証実験を行った。実験ではアプローチ部とトンネル部を含め全長 100m の掘削を行い、以下の点に着目して施工技術の実証と各種計測データの取得を行った。

- ・マトリックスシールドによる低土被り掘削の有効性
- ・側部カッターによる側方地盤変状の抑制効果
- ・掘進中の姿勢制御
- ・切羽の土圧管理

現在は実証実験で得た計測データ（土圧、地盤変状など）の整理分析の他、地震応答解析による耐震性の評価なども行い、実施工に向けた準備を整えている。

3.2.2 REFO (Rapid & Eco Fly Over) 工法 REFO工法は橋梁によりオーバークロスを構築する工法である。先に述べたコンセプトのもと、既存の要素技術の組合せによって開発しており、技術的な検証は十分になされた工法である。以下にその特徴を列記する。

- (1) 工期の短縮 橋桁はプレキャスト化したコン

クリート橋と鋼橋の複合形式 (Fig. 10) とし、橋脚は鉄筋や型枠支保工を省略できる CFT (Concrete Filled Tube : コンクリート充填鋼管) 柱、基礎はフーチングを省略できる一柱一杭形式 (Fig. 11) とすることにより、工期の短縮を図った。CFT 柱をつなぐ RC 地中梁は後施工が可能である。盛土部 (アプローチ部) は軽量コンクリートブロックを積み重ねることで基礎構造を省略した (Fig. 12)。これらの技術により、従来 1~2 年を要する工期を約 3 ヶ月に短縮した。

- (2) 二次渋滞の抑制 橋梁部の施工では、側径間コンクリート桁を先行施工し、中央の鋼桁部分をコンクリ

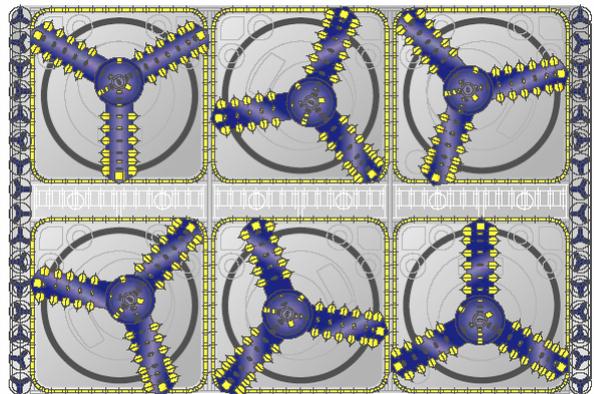


Fig. 8 マトリックスシールド
Matrix Shield Machine



Fig. 9 URUP工法実証実験
Figure of Experimental Machine

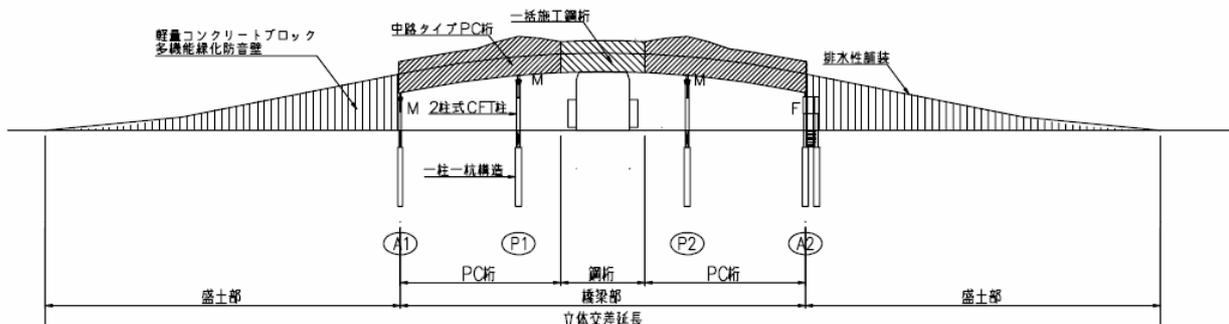


Fig. 10 REFO工法の構造概要
Vertical Section of REFO

ート桁上で組み立てる。鋼桁の架設は短時間で可能なため、交差点の全面通行止めは一晩のみである。

(3) メンテナンスミニマム 橋桁の一部をメンテナンス性に優れたコンクリート製とし、鋼桁部には耐候性鋼板を使用することでメンテナンスフリーとし、ライフサイクルコストを低減した。

(4) 騒音振動の低減ならびにヒートアイランド現象の抑制 騒音振動対策として、コンクリート製橋桁、排水性舗装の他、アプローチ部側面には多孔質ボードによる防音効果が期待できる多機能防音緑化壁（打ち水ウォール）を採用した。また、多機能防音緑化壁が持つ水分の蒸発冷却による打ち水効果によって、ヒートアイランド現象の抑制効果も期待できる。多機能防音緑化壁は多孔質保水性セラミックボードを主材としており、ボードを立てた状態でも、毛細管現象による給水により保湿および植物の育成を可能にしている。

(5) 設置自由度の向上 橋桁の中央部に路面を設ける中路形式の橋桁（Fig.11 参照）を採用することで、路面高さを低くするよう工夫している。路面高さを低くすることで縦断線形全体が下がり、立体交差延長を短くできる。これにより、隣接する交差点との距離が近く、取合いが問題になる場合において設置自由度を広げることが可能となる。

以上、「URUP 工法」と「REFO 工法」について紹介したが、両工法とも従来工法に比べて大幅な工期短縮や二次交通渋滞の緩和を期待できる。これらの効果は工事中における道路利用者の時間的・経済的損失を最小とし、事業者だけでなく利用者にも有利な工法であると言える。

4. まとめ

交通インフラ整備のための技術開発について、新交通システムを切り口として、その特徴と実用化の動向、必要な技術開発について述べた。新交通システムの中でも近年注目されているのは LRT である。LRT はハードだけでなくソフト面の対応も要求されることから、国内での事例はまだないが、海外でも脚光を浴びているシステムである。欧州では導入が進んでおり、既存の施設を最大限に活用することができることや、路線選定の自由度が高いことから、日本でも各地で建設を推進する動きがある。

LRT は高架・路面・地下を問わない路線選定が可能であり、現在保有しているさまざまな技術を活用することが可能である。その中で、周辺への影響を最小限に建設を進めることができる技術として、シートパイル基礎、URUP 工法、REFO 工法を紹介した。今後、都市再開発等を機に、国内外で LRT を初めとした新交通システムの需要が高まる可能性は大いにあり、省コスト・工期短縮を目指した更なる技術開発が望まれる。

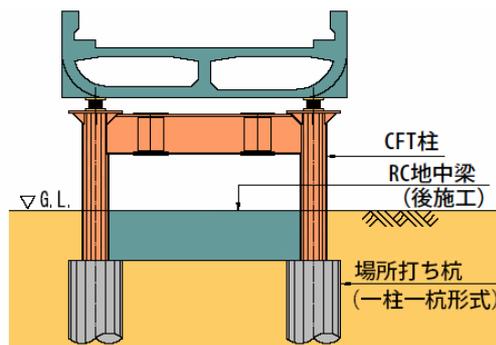


Fig. 11 REFO工法の下部構造
Substructure of REFO

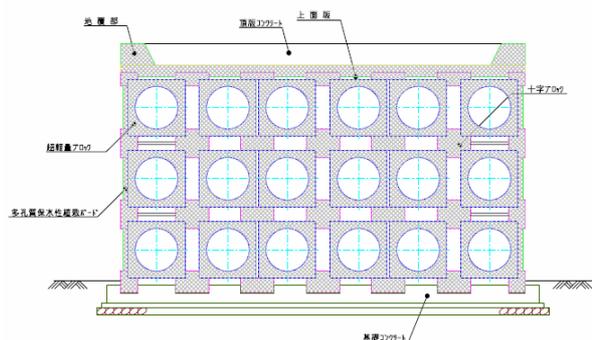


Fig. 12 軽量コンクリートブロックによるアプローチ部
Approach Section of REFO

参考文献

- 1)国土交通省：昭和49年度運輸白書，第3章 伸び悩む運輸関係施設整備／第2節 運輸におけるシステム化の現状／5 新交通システム；<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/transport/shouwa49/ind020302/005.html>
- 2)東京都建設局：新交通 日暮里・舎人線；<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/douken/tanken/toneri.html>
- 3)宇都宮市：新交通システム；<http://www.city.utsunomiya.tochigi.jp/kikaku/Shinkotsu/nani.htm>
- 4)フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』；<http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- 5)国土交通省中部運輸局：公共交通システムの特性比較；http://www.mlit.go.jp/chubu/kikaku/chikousin/godo3_shi/godo3_shi5.pdf
- 6)株式会社神戸製鋼所：ロープ駆動式短距離交通システム スカイレール；http://www.kobelco.co.jp/p103/products/seihin_05.htm
- 7)中部エイチ・エス・エス・ティ開発株式会社：東部丘陵線；<http://www.meitetsu.co.jp/chsst/tobu-j.html>
- 8)田中，樋口他：シートパイル基礎の耐震性に関する模型実験，第58回土木学会年次学術講演会，2003.9.
- 9)株式会社大林組：「URUP 工法」；<http://www.obayashi.co.jp/technology/urup/index.html>
- 10)株式会社大林組：「REFO 工法」；<http://www.obayashi.co.jp/technology/refo/index.html>