招待論文

社会基盤整備における建設用ロボットの役割と展望

ROLE AND PROSPECT OF CONSTRUCTION ROBOTS IN SOCIAL INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT

神崎 正¹

Tadashi KANZAKI

¹ 正会員 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科(〒761-0396 高松市林町 2217-20)

E-mail: kanzaki@eng.kagawa-u.ac.jp

Key Words : shield tunneling method, advanced information system, Tunnel Boring Machine, future vision of earthwork, unattended construction work

建設用ロボットは、先端技術、情報技術の進歩に支えられ発展しており、また同時にそれは新たな建設システムとしての展開に大きな役割を果たしてきている。一方、わが国は、今後より豊かな社会環境の整備、都市防災機能の再構築など多くの取り組むべき課題を抱えている。それを担う建設産業においては、少子高齢化、熟練技能者の不足、技術の継承の問題を解決しつつ、より安全で迅速に、かつ経済的に社会資本整備を整備していくことが求められている。建設用ロボットは、こうした期待と役割を担っている。

本論文は、これらの背景を踏まえて、建設ロボットの役割、ロボティクス発展の経緯、用途、技術に関する今後の展望、社会資本整備におけるロボット技術への期待と提言を骨子として、建設用ロボットの歩んだ道を概観し、現状分析を行い、今後の社会資本整備における役割と将来像についての考察と提言を行うものである。

1. はじめに

建設用ロボットに関する研究開発は、1980年代を皮切りに多方面で行われようになり、以来建設分野における情報化、自動化、ロボット化が、建設システムの高度化を支え、建設生産手法の革新と向上に寄与してきた。その結果、圧倒的な効率性の向上と苦渋作業からの解放、そして安全性の向上を実現してきている。その背景には、情報技術の高度化、多様化、低コスト化があげられ、それを取り入れて着実に新しい建設システムとして成熟してきている。このように、先端技術の進歩と情報技術の普及に支えられ、機械化から産声を上げた建設用ロボットは今日まで大いなる発展を遂げてきた。

一方、建設分野は今大きな転機を迎えている。世代交代による技能の継承の問題、地震・津波などに対する都市防災機能の整備、交通渋滞や劣悪な住環境からの都市再構築、社会基盤の老朽化の問題等々である。

新たな社会基盤の整備と再構築にあたり、建設システムの高度化への期待は高まり、それを支える情報化・システム化・ロボット化の役割はますます大きくなるものと思われる。

本論文は、発展を遂げてきた建設システムの高度化の歴史を振り返り、建設用ロボットの役割を概観し、今後の社会基盤整備の中でそれらがさらにどう展開して

いくか、その展望について、土木学会建設用ロボット委員会の活動成果も踏まえて述べるものである。

2. 社会基盤整備における建設用ロボットの役割

建設生産は一般の工場における生産活動と異なり、自然条件や地域特性などに左右される特殊性を持った一品手作り生産であり、標準化、規格化が最も難しい業態と言える。すなわち、他産業に比べ自動化・ロボット化が難しい産業のひとつである。自動化・ロボット化を進める上でも、工場のような整然とした環境で、いわゆる2次元的な繰返し作業は少なく、時々刻々と変わる環境の中での極座標系とも言うべき動きと、複雑で多機能な作業を求められることが多い。したがって、多くは人手に頼らざるを得なく、重労働で危険な作業を強いられ、いわゆる典型的な3K産業の体をなしている。

こうした背景から、建設業の労働災害は全産業の中で際立って多い。図-1は、全産業と建設業の労働災害を比較したもので、死亡災害は全産業のおよそ40%を占めている。これは、全就労者に占める建設業就労者の割合が9.4%であることを考えると、極端に高い数字である。

こうした中、労働災害の全体の傾向としては、死傷

図-1 労働災害データ (出典：建設業労働災害防止協会)

図-2 労働力人口比率の推移 (出典：厚生労働省平成 17 年版労働経済白書)

者数、死亡者数ともに年々着実に減少しているといえる。建設業に関しては、TQC などによる生産性向上や、安全性に関する教育、啓蒙に関する取り組みとともに、自動化・ロボット化技術の普及によるところも大きいものと思われる。それらは IT 情報技術の進歩に支えられ、新たな建設システムとして広く発展したことによるとも言うことができ、安全性の向上に大きく貢献したことは明らかである。

一方、少子高齢化社会は、特に建設業の今後に大きな影響を及ぼすと言われている。図-2 に示すようにわが国の労働力人口の比率は減少の傾向にあり、その中でも 65 歳以上の高齢者の増加と出生率の低下が指摘されている。また、こうした年齢構成の変化だけでなく、団塊の世代が現役を去ることにより、これまで培われてきた熟練技能の消滅の危機も懸念されている。

建設用ロボットは、建設生産における安全性の向上、生産性の向上とあわせ、熟練技能を継承する新たな建

設システムの次世代新領域を担う大きな役割を期待されている。

3. ロボット化施工と建設システムの高度化

建設用ロボットは、産業用ロボットに対応して命名されたものである。単に、「建設ロボット」と呼ぶのは、ロボット機能をもった単体そのものを指す意味合いを持っている。それに対し、「建設用ロボット」は建設システムの一環として自動化の機能を有するものとして広義の意味合いを持つものとして定義している。すなわち、建設システムを支える情報化・システム化をも包括してとらえている。

図-3 は、その建設用ロボットの定義を示したものである。現場の情報を入手（センシング）し、そのデータを送り、認識、判断（解析）して次工程へと繰り返す情報化、システム化の機能に、メカトロ化の機能を

図-3 建設用ロボットの定義

もたせたものをロボット化施工すなわち建設用ロボットとしている。その認識と判断を繰り返し行うのがいわゆる情報化施工である。その確立された生産システムを建設システムと呼んでいる。自動化・ロボット化を効率よく取り入れ、この建設システムとしていかに高度化を図っていくかが、生産性、安全性、品質などの管理項目を向上させることにつながっていると言える。すなわち、「建設ロボット」個々の話ではなく、「建設用ロボット」は、ソフト、ハードを包括するコンセプトを持って建設システムを革新していくものなのである。

4. 建設用ロボットの歩んだ道

(1) シールド工事の自動化・ロボット化

シールド工法は、建設用ロボットの中で最も自動化・ロボット化が進んでいる工種である。1970年代、それまでの人力による開放型から、機械掘り式の密閉型が普及を始めた。1980年代には大型化が進み、その後目覚ましい技術革新を経て今日のロボット化施工を実現している。このようにシールド工法に関しては、1980年代はまさにこの飛躍のはじまりであり、セグメントの自動組立て、セグメントの自動搬送、シールドの自動方向制御など自動化・システム化に関する研究開発が広く実施された。1990年代には、さらにその高度化が図られるとともに、急曲線や縦横自在に進められる工法や、複数の円形を組み合わせて駅ホームを建設する工法、断面が自在に変化する工法など多くのアイデアを具現化する技術開発が行われ現在に至っている。

建設用ロボット委員会では、シールド工法においてこ

れまで実用化された自動化の分析を行っている²⁾。42の工程、工種に関して、それぞれの自動化のレベルと現状の問題点を抽出した。表-1は、それらのうち完全自動化を達成している5工程、半自動化の4工程、自動化と人力が混在している7工程について分析結果をまとめたものである。表の中の数字は、全体を10割としたときの現状の自動化レベルの割合を、専門家の分析評価によって按分したものである。

完全自動化を達成したのは、泥水式シールドの掘進（切羽水圧制御・流体輸送・掘削土量管理）と残土処理であり、いずれも優れた機器性能をもって標準化を達成し、その結果メンテナンスが容易で、経済的なシステムが実現している。

半自動化が普及している工程は、掘進時における4項目があげられる。それらは、省力化、品質の向上を目的として自動化が図られている。しかし、「シールド機位置・姿勢」における補正測量、「土圧式加泥材混練」における配合の決定、「土圧式フィルタープレス二次処理」における清掃管理、「余掘り検知」における状況の把握など、人の判断が必要な部分については人手に頼っている。この部分まで全自動化するには、経済的な問題、信頼性や安全性の問題などが大きく、必ずしも合理的とはいえない。

完全自動、半自動、人力が混在している作業には、土圧式シールド工法の掘進管理に関するものが多い。切羽安定制御においては、チャンバー内土圧に対する「スクリュウコンベア回転数」の自動制御があるが、小口径ではまだ自動化されていないことが多い。「加泥材注入量管理」では、掘削土質を確認しつつ行う経験的な要素が強く、人による判断に頼らざるを得ない状況で

表-1 シールド工法自動化の分析 (1)

工 程			自動化レベル			目 的					評 価					
			全自動	半自動	人力	コスト削減	省力化	安全性向上	品質向上	工期短縮	コスト	維持管理	規模	稼働率	機器性能	標準化
完全自動化	掘進	切羽安定	10			2	5		3		○				○	○
		流体輸送	10				3		6	1	○				○	○
		土量計測	10								○					○
	残土処理	泥水輸送	9	1								○				○
		濁度調整	10									○				○
半自動化	掘進	位置・姿勢	0.5	8.5	1		4		6				×		×	
		加泥材混練		10			6		4		○	○			○	○
		フィルタプレス	1	7	2		6	4			×	○				○
		余掘り検知	1	9					10							
自動化と人力が混在	掘進	切羽安定	5		5	2	5	1	2							○
		加泥材管理		2	8	2			8		×				×	
		ポンプ圧送	5	5		1	5	2		2	×	×	×	×		
		土量計測		3	7			5	5						×	
	残土	固化処理		2	8	2	4		4		×	○			×	○
	裏込注入	材料混練	6	4			6	2	2							
		注入	2	5	3		5	2	3							

注 1) 数字は全体を 10 点として配分 2) ○は促進, ×は阻害

表-2 シールド工法自動化の分析 (2)

工 程			自動化レベル			目 的					評 価					
			全自動	半自動	人力	コスト削減	省力化	安全性向上	品質向上	工期短縮	コスト	維持管理	規模	稼働率	機器性能	標準化
自動化が試行段階	掘進	掘進制御	※		9.9		8		1	1	×		×		×	
		出来形計測	※		9.9		2	3	3	2	×				×	
		泥水制御		※	9.9		2		7	1	×				×	
		残土搬出		※	9.9		5	2		3				×		
	セグメント	自動組立	※		9.4		3	5	1	1	×	×	×	×		×
		自動増締		※	9.9		5	2	3		×			×		
	資材搬送	地上	※	※	9.8		5	5			×		×	×		×
		立坑	※	※	9.8		5	5								
		坑内	※		9.4	1	4	4		1	×	○	×	×		
	仮設備	レール延伸		※	9.9		5	5								
		配管延伸	※		9.4		5	4		1	×		×			
	二次覆工	シート張り		※	9.9		6	4				×		×		
		鉄筋組立	※		9.9		6	4			×		×			
	その他	前方探査	※		9.4			3		7						
		土質判別	※	※		2		5	3		×				×	
		ビット交換		※	9.9	5	3	1		1						

注 1) 数字は全体を 10 点として配分 2) ○は促進, ×は阻害 3) ※は試験的には施工実績あり

ある。「ポンプ圧送」は近年普及し、レンタル制度も充実してきたが、いまだ高価であり消耗品も多くメンテナンス費用も高いなど、小口径への適用も含め普及には課題が多い。

表-2 は、自動化が試行段階の作業工程をあげたもの

である。これらはシールド工事の大型化、大深度化、長距離化に向けて開発されたものが多く、目的も大型化に対応して省力化と安全性向上を主眼としている。いずれも、高い自動化システムを実現したものの、一般の規模に採用するにはコストの制約が多いとしている。

図-4 山岳トンネル工事における死亡労働災害件数
(建設業労働災害防止協会データを加工)

例えば「セグメント自動組立て」に見られるように、セグメント供給から位置決め、ボルト締結まで完全自動化するには長距離でなければイニシャルコストがかかりすぎる。また、工事全体に占める稼働率が低すぎることも一般への普及の阻害要因として指摘されている。

こうした開発技術の一般工法への普及は、現状では施工者側の企業努力によるところが大きく、採算面で断念せざるをえない場合も多い。採用機会が多ければ、標準化も進み、稼働率も上がり、その結果コストも下がりリース体制等が進み、普及が促進されるものと考えられる。発注者側の積算体系を含めた理解が必要であると考えられる。

(2) 山岳トンネル工事における自動化・ロボット化

山岳トンネルや地下空間の施工においては、閉鎖された空間での粉塵・騒音・出水などの劣悪な環境と、頻発する労働災害が従来より指摘されてきた。当初は人力に頼っていたものが、工法の変遷とともに機械化・自動化が進み、その結果省人化が図られ、トンネル工事の安全性は大きく向上した。このように、安全性の向上に自動化・ロボット化は大きな役割を担ってきた。

図-4は、山岳トンネル工事における死亡事故による労働災害件数の推移を示したものである。図より、1970年代に多かった災害件数がそれ以降大きく減少していることがわかる。これは、NATMの普及と時を同じくしており、大空間の実現とそれに対応した自動化、省人化の普及が安全性の向上をもたらした大きな要因であったとも言える。

しかし、その後死亡労働災害件数は減少せず2000年くらいまでは横ばいで推移している。1993年のデータによれば、トンネル工事の死傷者数255件に対し、図-4に示すように死亡災害が20件となっている。その内訳としては、発破、土砂崩壊、重機によるものが14件を

占めている。このことから、切羽付近における危険性が高く、また狭い坑内における重機や運行車両による危険性も大きいものと推測できる。事実1990年代には、支保工の建て込み時における重大災害の発生が頻発している。こうした背景を踏まえ、最近では支保工建て込みロボットの開発が行われ、従来手作業で行われた危険作業の改善が図られてきた。その後、その成果によるものと見られ、2004年以降は災害件数は大きく減少している。

一方、トンネル坑内の環境が劣悪な原因の一つは粉塵である。特に、ずりを運搬する車両は、坑内の粉塵とあわせて排気ガスをも排出し、環境の悪化を増長させる。こうした作業環境を改善する方法として、連続ベルトコンベアによる方法が注目されている。時間当たり1000t級の大容量の掘削ずりを搬送するベルトコンベアシステムが開発され、低粉塵で環境にやさしい自動化システムを実現している。

しかしながら、山岳トンネルの施工法として一般的に普及しているNATM工法は、多くの工程・工種より成り立っていること、また削孔、装薬および発破作業は火薬取締法によってさまざまな制約を受けることなど、全自動化は難しい状況にある。こうした背景から、TBM (Tunnel Boring Machine) や自由断面掘削機による施工のロボット化が積極的に進められるようになってきた。

TBMは、欧米で1800年代に実用化され、日本では1964年に発電所の導水路トンネルで初めて採用された。しかし、わが国の不均質で破碎帯等が介在する複雑な地質や膨張性地山の影響などにより工事は困難をきわめ、その利用は一時低迷した。こうした中、複雑な地山条件や軟弱地山に対応できるようシールド技術が取り入れられ、安全で安定した急速施工法として改良され、1980年代以降その利用は急増している。

図-6 TBM 地山評価・施工支援システム

写真-2 硬岩自由断面掘削によるロボット化施工

を実現している。

一方、発破を使わない環境にやさしい硬岩掘削法として、硬岩自由断面掘削機がある。環境問題だけでなく、近接構造物への影響が少なく、また水密性が要求される場合の地山を傷めない無発破工法として注目されている。また、TBM が同一断面の連続施工であるのに対し、自由断面掘削機は規模に関わらず自由な空間

の施工が行えるのが特長である。写真-2 のように、4本のグリッパーと2箇所の地盤サポートで反力を取り、縦横に動くディスクカッターにより岩盤を圧砕する。コンピューター制御により掘削からずり積込みまで全自動運転を行うもので、省力化、品質の向上、効率化が図られている。

(3) 大規模土工における自動化・ロボット化

建設施工の自動化・ロボット化は、大規模土工における機械化施工が嚆矢と言われている。以来、圧倒的な生産性の向上と苦渋作業からの解放を実現した点では、とりわけこの土工における効果は大きいと言えることができる。

大規模土工の自動化・ロボット化は、雲仙普賢岳の無人化施工で大きな発展を遂げた。1993年2億立方メートルともいわれる火山噴出物の除石工事に着手し、ブレーカー、バックホウ、ブルドーザー、ダンプトラックを無人で遠隔操作する、まさにロボット化施工を実現した。この背景には、GPS (Global Positioning System) をはじめとする各種情報技術の進歩があげられる。特

写真-3 雲仙普賢岳無人化施工

図-7 コンクリート砂防ダムのロボット化施工

図-8 締め固め転圧管理の自動化システム

に、GPS は試験運用段階を終え衛星数が充実し始めた頃で、RTK (Real Time Kinematic) -GPS と呼ばれる動的測位法が実用化された時期でもあった。それにより、写真-3、図-7 に示すように、堤長 870 m の砂防ダムを、RCC (Roller Compacted Concrete) 工法により無人化施工で構築した。

このとき初めて実用化された GPS 転圧管理システムは、その後広く使われるようになっており、関西空港

図-9 レーザー画像制御による地形計測・動態観測ロボット

第 2 期工事においては、図-8 に示すように、加速度計による地盤剛性管理も含めた転圧管理を行い、高品質で効率よい施工管理を実現している。

一方、土工において最も大切なもののひとつに日々の出来形管理がある。設計図にそって土質別の運土計画を策定し、最適な重機計画をたてることが直ちに工期短縮、コスト縮減に直結する。

図-9 は、画像上で設定されたエリアの範囲の 3 次元地形を、レーザー制御で自動計測するシステムを示したものである。遠く離れた事務所において、オペレータが所定の計測範囲と計測間隔を画像上で設定し、それに従って測量を行うものである。重機が錯綜する昼間を避け、夜間に自動で動く無人測量ロボットである。また、このシステムは崖面の特徴点を画像処理で記憶し、それらのポイントを自動追尾して計測する動態観測の機能も持っている。土工に限らず防災システムなどへの利用や、今後のロボット化施工の要素技術として注目されている。

(4) 基礎工における自動化・ロボット化

ケーソン、連続地中壁などの基礎工は年々大型化しており、苦渋・危険作業からの解放、品質・精度そして施工効率の向上をめざして、自動化・ロボット化が積極的に行われてきている。

地中連続壁では、LNG 地下タンクの山留め止水壁として大型化が進み、東京湾横断道路川崎人工島では深さ 119 m、厚さ 2.8 m が実現した。こうした大深度化、大型化に伴い、構築精度の向上、施工効率の向上を図るべく、計測管理をはじめさまざまな施工工程の自動化が進められている。

大型基礎の一つにニューマチックケーソンがある。地中連続壁による構造物構築と違い、直接構造物を構築しつつ沈めていく方法のため、掘削深度の増加とと

図-11 ネットワークによる海洋工事の情報化・自動化施工

図-10 ニューマチックケーソンのロボット化施工

写真-4 歩行式浚渫ロボット

もに気圧が上昇する劣悪な作業環境となり、従来は作業員の健康が大きな問題になっていた。その対策として、図-10のような無人化ケーソンシステムを実現している。図に示すシャベルが前後左右に移動し、高気圧下における掘削、積込み、排土作業などを行うもので、それらの一連の作業は地上遠隔操作室からの操作によって行われる。さらに最近では、掘削機の軌跡や掘削土の形状を自動計測する機能を備えるなど、ロボット機能の一層の高度化が図られている。

(5) 海洋工事の自動化・ロボット化

東京、横浜、大阪をはじめ、わが国の都市の多くは海に開かれており、古来われわれの生活は海と密接に関係してきている。さらに現在では、過密化した都市機能の拡大を海洋立地に求めてきており、羽田空港の沖合い展開、関西空港や中部国際空港などの人工島の建設が進められてきた。

これらの例からわかるように、大水深で軟弱な地盤上での立地が多くなってきており、より厳しい条件下での施工を余儀なくされている。また、海中作業に不可欠な潜水夫も高齢化と人手不足のため、海洋における施工の自動化・ロボット化は大きな課題となっている。こうした背景により、写真-4に示す歩行式の浚渫ロボットが開発されている。陸上からの管制により8本の脚で海底を自動歩行し、安全で効率的に浚渫作業を行うことができる。

一方、海洋工事は、沖合人工島をはじめ広域なエリアにおいて建設されることが多く、多数の船舶や工事サイトを結ぶ相互の情報の連携が安全性、効率性からもきわめて大切である。個々の作業の自動化・ロボット化を進めると同時に、図-11に示すように、その情報ネットワークによって情報化、システム化を進めることにより、全体システムとしての一層の効率化がもたらされるようになってきた。図は、中部国際空港にお

いて、土砂の産出、供給情報、作業船の運航情報、重機械等の施工情報など多くの情報をネットワークし、総合的に集中管理するシステムを示したものである。関西空港二期、中部国際空港、神戸空港の建設に際しては、こうしたIT情報技術の導入により工期の大幅な短縮化を実現しており、次世代施工システムに向けての幕が開かれたと言える。

5. 社会基盤整備における建設用ロボットの将来展望

(1) 建設用ロボットの現状分析と課題

土木学会建設用ロボット委員会は、1985年設立以来、調査研究の一環として建設施工の自動化・ロボット化についての現状分析、課題抽出、各種提言を行ってきた。ここでは、今までの研究報告書に記された活動内容を中心に以下紹介していきたい。

自動化施工の現状について、さまざまな工種について技術レベルの調査を行った。工種ごとに、技術レベルを、判断に基づいて自動的に動作する「A」、判断は人間が行う自動化を「B」、単なる機械化もしくはそれ以下を「C」と区分して分析したその結果、シールド工事ではレベルAの工種が多いが、その多くは実証実験段階で、普及にはさまざまな課題があることがわかった。同時にレベルCもかなり多く見られ、自動化の進んでいる印象の強いシールド工法でも、多くは人間の介入や判断に頼っていることがわかった。また、わずかな自動化レベルの上昇に相当なコストアップが伴うこともあり、場合によっては全自動化を目指すのではなく、人が介入した、人と協調したロボット化施工も考えていくべきとしている。

重力式ダム工事や海洋工事では、レベルAは少なく、レベルBとCがほとんどである。これは、いずれも多くの違った作業から成り立っており、シールドのような連続性を持った作業工種とは性質が異なっていることによるものと思われる。今後、さまざまな分野での自動化・ロボット化を進めていく上では、単に個々の工種の自動化だけでなく、情報技術によりシステム全体の高度化を図ることも大切であるとしている。

ロボット化を進める上での阻害要因は、コストの問題、規模の問題そして標準化の問題が大きいと調査結果が指摘している。コストの問題を解決するには、転用回数や施工延長を増やすことが効果的である。それには細切れでない適正規模の発注とし、また設計段階から、施工を考えた規格化と標準化を進めていくべきである。さらに、積極的に利用していく姿勢が自動化・ロボット化技術の利用回数を増やし、ひいてはそれが

コストダウンにつながることも考慮すべきである。当初は高額が避けられない自動化・ロボット化技術も、発注時の仕様にその利用を盛り込めば、安全な標準化工法として普及し、一般的なコストに落ち着いていくものである。そのためには、安全性をコスト評価に取り入れる積算体系をとるなど、将来の少子・高齢化、技能者不足を見据えた促進方策を進めるべきであると提言している。

(2) 情報技術による次世代IT化施工

先に述べた雲仙普賢岳における無人化施工技術は、さまざまな治山工事や伐採、除石、ブロック積工、型枠・コンクリート工などの危険箇所における施工、そして災害復旧などに多く利用され大きな成果をあげている。

これをさらに発展させ、情報技術を駆使した、より高精度でより安全な施工システムの構築を、国土交通省は総合技術開発プロジェクトの一環として進めている。「ロボット等によるIT施工システム研究委員会」は、2003年度より、3次元空間データを用いた施工技術の開発と、建設機械のIT施工技術の開発の2つの研究課題を掲げ研究活動を行っている。

研究の概要は、図-12のように、掘削エリアの地形形状や寸法などの3次元空間データを計測し、ロボット重機の位置、方向、姿勢制御をリアルタイムに行うものである。掘削に関しては、図-13に示すように、現状断面と計画断面の差分を、熟練オペレータの操作要領を学習して自動制御により施工するシステムをめざしている。認識と制御、まさに情報化と自動化・ロボット化の融合であり、次世代施工技術として期待される。

山岳トンネルにおいても、情報化を駆使した制御システムが未来の建設システムとして注目される。

図-14は山岳トンネル施工の将来像を示したものである。さまざまな情報を総合的に判断して計画を行い、その後掘進中に得られる現位置情報により計画を順次更新しつつ自動化施工を進める、言わばTBMのインテリジェント施工である。

21世紀の建設用ロボットは、情報化とシステム化を両輪として高度システム化を図り、さらなる効率化、生産性、安全性の向上をめざしていくであろう。システム化とは、単なる機械化ではなく、人と協調する新しいコンセプトを持った自動化制御システムを指すものである。このことによって、建設用ロボットは、建設生産を支える重要な役割を担って、今後もさらに発展していくものと考えられる。

掘削状況計測技術（機械位置・姿勢計測含む）

計測情報：掘削エリアの地形形状、寸法の計測データ更新頻度高

計測情報：ロボット重機的位置、方向、姿勢情報（リアルタイム）

図-12 掘削制御のIT化・ロボット化

図-13 掘削の自動制御アルゴリズムの開発

図-14 TBM の次世代インテリジェント施工

図-16 セグメント搬送の自動化・ロボット化

図-15 超大断面・超長距離シールド

写真-5 大断面地下空間構築工法 MMST

(3) 都市の再構築：大深度地下への挑戦

2001年4月、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」、通称大深度地下使用法が施行され、新たな大深度地下利用の時代を迎えている。これまでの地下利用は、1934年、深度-16mの地下鉄銀座線を皮切りにその輻輳化が進み、年々より深い地下の利用を余儀なくされてきている。大江戸線では、50m近い深さとなっている。また、首都圏外郭放水路など、大深度における地下河川の利用も進められている。また、図-15に示す例のように、内部から自由な形状の大断面を構築する工法など、多様な要請に対応できる工法開発が行われている。このように、シールド工法に関してはさまざまな技術開発が提案され実用化されており、まさに百花繚乱と言える状況にある。

今後も、高速道路、共同溝などの国家的プロジェクトや、清掃工場、地下発電所などの地下立地も積極的に推進されていくものと思われる。特に高速道路や鉄

道などは、これまでの道路直下に限定されたルート選定の制約がなくなり、自由な線形をとれることによる経済的なルートや最短ルートなどを自由に選択できるメリットを有するようになる。

大深度地下では、1) 深度に比例する水圧、土圧への対応、2) 長距離化への対応、3) ジャンクションの建設など、さまざまな課題の解決が必要である。特に、長距離化に際しては、資材、残土などの搬入、搬出をはじめ、セグメントの搬送・組立て、カッター交換などの効率化が課題であり、自動化・ロボット化への期待が大きい。図-16に示すように、セグメント自動搬送などさまざまな取り組みが行われている。

大断面地下構築技術として注目されているのにMMST (Multi-Micro-Shield-Tunnel) 工法がある。写真-5は、外殻と呼ばれる外側の壁を、複数の小型シールドマシン

図-17 立体交差構築の急速施工 (1) 上下部一体型
折りたたみ架設

図-18 立体交差構築の急速施工 (2) 上下部一体型
エアーキャスター架設

で掘削し、これらを相互につなぎ合わせて大断面の構造体を構成するものである。小断面の掘削は、写真のように縦型と横型の2種類の掘削機を用いて行う。大断面の構築後に内部の土を掘削し、大空間を実現する新工法である。この工法は、首都高速川崎縦貫線のジャンクション工事に適用されている。

(4) 都市の再構築：渋滞解消をめざして

わが国の都市機能は、交通渋滞によって大きく阻害されている。全国の開かずの踏切は1000箇所以上のぼり、東京23区の踏切数700箇所はロンドンの50倍である。また、東京23区の9400の交差点のうち、立体交差は81箇所、1%にも満たない。このように、都市の交通機能は逼迫した状況にあり、東京、大阪の年間交通渋滞損失はそれぞれ1km当たり4.35、3.38億円と試算されている。

立体交差の構築は、輻輳する交通の中での施工を余儀なくされ、従来法では長い工期がかかるため実施に踏み切れない状況にある。こうした中、立体交差急速施工工法が近年多方面で開発されてきた。2005年の調査では、43もの工法が提案されている。

急速施工を行うために、それぞれさまざまな工夫が考えられている。全体工程を簡素化するため、上下部の一体化、上下部の同時施工、サイクル施工などが提案されている。架設の効率化では、図-17に示すような折りたたみ架設や、回転架設、エアーキャスター架設、そのほかには自走台車による架設方法がとられている。また、基礎と橋脚とを同断面とし基礎のスリム化を図る工夫や、接合方法で効率化を図るなどの工夫をしている。図-17、図-18は、ともに上下部一体型で、架設についてはそれぞれ自走台車による方法、エアーキャスターによる方法をとっている。

国土交通省が管轄する、大阪、岡山そして香川、高知、松山の中四国方面では、わが国に先駆け、すでに上

大断面分割シールド

外殻先進トンネル

図-19 アンダーパスによる立体交差の急速施工

下部一体工法などの急速施工工法が採用されており、大幅な工期の短縮をもたらしている。

立体交差は、アンダーパスによる方法も提案されている。図-19の上図は、計画断面を小断面シールド機で分割掘削し、その後全断面大空間に躯体を構築する「大断面分割シールド」である。下図は、トンネル外殻に沿って複数の小断面欠円形エレメントをラップさせ

図-20 高速道路におけるトンネル延長の増加

アルゴンレーザーによる画像計測

3 CCD による画像計測

写真-6 高速道路点検の自動化・自動化

ながら推進し、各エレメントを地中で接合し、一体化してトンネル覆工を構築する「外殻先進トンネル」である。立体交差構築工法のバリエーションとして実用化され、注目されている。

(5) 老朽化する社会基盤の維持管理

社会基盤を構成する代表的なものにライフラインがある。ライフラインとは、道路、鉄道、地下鉄、上下水道、電気、ガス、通信などを指し、文字通り市民生活の動脈ともいえる。ライフラインのストックは、1970～90年代に大きく増加し膨大なものになっており、経年30年以上を超える構造物が多くなってきている。

旧日本道路公団が管理する高速自動車国道および一般有料道路のネットワークは図-20のように平成15年度末で7300kmに達しており、トンネル延長は道路延長で約700km、上下線をあわせたチューブ延長では

約1300kmに達している。鉄道の延長は、普通鉄道が約25000km、新幹線が約2000km、その他鉄道が約150kmで、このうちトンネルは、普通鉄道が全延長のほぼ10%の2500km、新幹線およびその他鉄道においては全延長の約3分の1で、それぞれ650km、50kmとなっている。古いトンネルでは経過年数100年を超える。

トンネル点検においては、「目視点検」や「ハンマーによる打音点検」など、従来は人手に頼る方法が多いが、高速道路トンネルの点検においては、写真-6に示す3CCDビデオカメラあるいはレーザーにより60km/hで走行しながらひび割れ形状、幅、長さを自動計測する最新のシステムを実用化している。東京地下鉄(株)では図-21に示す赤外線カメラ、CCDカメラを使用したトンネル検査システムを実用化し、コンクリートの剥離、漏水、クラックの検知に関する自動化を図って

全長：約20 m (全編成にて)
幅：2 450 mm
高さ：3 450 mm

図-21 赤外線によるトンネル検査システム

写真-7 トンネル打音診断の自動化ロボット化

いる。

写真-7 は、油圧駆動の打撃装置により、トンネル覆工コンクリートから発生する打音を、人間の聴覚アルゴリズムを利用した手法により解析し、コンクリートの健全性を「確実に」「迅速に」診断する自動化システムである。

ライフラインの維持管理には、トンネル以外にも通信、送電線や上下水道などさまざまな形状、構造をしたものがあり、現状ではそれぞれの診断方法や判断基準も管理機関によりまちまちである。そのため、それらの個別の技術の高度化と標準化を図るとともに、判断を含めた評価の規格化、標準化を進め、診断技術の信頼性を上げていくことが今後の課題であると考えられる。

6. おわりに

筆者が所属する土木学会建設用ロボット委員会は、1985年に設立された。当時の活動は、機械化が目標であり、人手に頼った作業を機械化へと置き換える活動でもあった。この時期は、産業用ロボットが大いに脚光を浴びた時代でもあり、それをめざした建設用ロボットの揺籃期でもあった。以来20年の活動を経て、世界に誇れる現在の技術レベルを考えたとき、隔世の感を禁じえない。

建設用ロボットの進歩は、単にハードな機械化にとどまらず、建設システム全体の高度化を促進し、新たな建設領域の拡大を実現する上で大きな役割を果たしてきたものと考えられる。例えば、シールドを例にとっ

でも、人力による開放型から密閉型による機械化を進め、さらに情報化・システム化を達成し、今や方向、大きさを自在に操れる、百花繚乱ともいうべき工法が活躍している。建設用ロボットは、これからも進化し続けるであろう。情報化、知能化によりさらなる高度化を図り、新しい建設システムの構築への展開に今後も寄与していくものと思われる。そして都市機能の再構築、都市の老朽化、脆弱で劣悪な都市環境の改善に大きく貢献していくであろう。そのためにも、今後の技術開発と普及方策の積極的な推進が大いに期待される。

謝辞：本論文の作成に際しましては、土木学会建設用ロボット委員会の全面的な支援を受けました。また同時に、下記の機関、企業から資料、情報の提供をいただきましたことを記し、ここに厚く御礼申し上げる次

第です。

・国土交通省総合技術開発プロジェクト「ロボット等による IT 施工システム研究委員会」・関西国際空港用地造成(株)・中部国際空港(株)・東京電力(株)・大成建設(株)・五洋建設(株)・中日本高速道路(株)中央研究所・三菱重工業(株)・JFE エンジニアリング(株)・鹿島建設(株)・(株)奥村組・東京地下鉄(株)

参考文献

- 1) 飯倉督夫：RT が土木施工分野へ与えるインパクト，土木施工，Vol.47, No.4, pp.2-7, 2006.
- 2) 土木学会建設用ロボット委員会：21 世紀における建設工事の自動化・ロボット化への展望，pp.33-57, 2001.6.
- 3) 土木学会建設用ロボット委員会地下技術小委員会：地下技術における建設用ロボットと IT，pp.1.1-4.4, 2004.3.

(2006. 5. 16 受付)

The expressways, railways, and various lifelines constructed during the high economic growth period in the 1960s make up a large proportion of the infrastructures in Japanese cities. Measures against aging infrastructures and to restore the functions of infrastructures have become a major problem. As solutions to the problems, attention is focused on the construction of new urban infrastructures. The challenge to these solutions is the various unprecedented constraints, so automation and robotics in construction are highly expected. This paper describes about the role of construction robot and circumstances of robotics development and offers for the future direction in the technological development and issues to deal with.