

都市の地下工事

Underground Construction in Urban Area

杉 本 隆 男 (すぎもと たかお)

東京都土木技術研究所 副参事研究員

1. ま え が き

1995年の国勢調査によると、我が国の総人口は約1億2557万人である。このうち、大都市を抱える都道府県の人口は、東京都が1177万人、大阪府が880万人、神奈川県が825万人、埼玉県が676万人、千葉県が580万人の順である。東京圏（東京都、埼玉県、千葉県および神奈川県の1都3県）の人口は3258万人で、全国人口に占める割合は25.9%である。また、東京圏の面積は、13546 km²で、国土総面積377727 km²の約3.6%である。これらの数字から、東京圏が広域的な巨大都市圏を形成していることをうかがい知ることができる。

ところで、都市は集積の利便性と効率性という点で優れた特徴を有しており、我が国では、戦後今日までの約半世紀間の経済成長を支える重要な役割を果たしてきた。反面、一極集中による都市環境の悪化、交通渋滞や通勤・通学の混雑など、負の経済効果をもたらしたことも否めない。現在、東京都心部に集中している都市機能の再構築と分散化（業務核都市化）、そして分散化に必要な交通のネットワーク化や通信施設の整備など、都市施設の充実が図られつつある。ここでは、都市の地下施設と地下工事について、考えてみたい。

2. 整備完成が待たれる都市施設

都市施設は、都市における市民の生活、産業の活動などにあたって必要不可欠な施設であり、都市の骨格を形づくるものである。都市施設の種類の、おおまかに分けると¹⁾表—1に示すように、①交通施設、②公園・緑地、③供給処理施設、④河川等施設、⑤その他の施設となる。具体的には、道路、鉄道、地下鉄、駐車場、公園、上下水道、電気、電信・電話、ガス、ごみ焼却場、都市河川・運河、物流施設等、多様である。

都市施設は、都市域に合理的かつ有機的に配置されて初めて、その機能が効果的・効率的に発揮される。東京圏は、既に、かなりの都市施設を整備蓄積してきた。しかし、その多くは、いまだ、住民の需要を満たす水準に至っていない。これに派生して、未解決のまま残された都市問題がある。例えば、未完成な幹線道路は、自動車交通の渋滞を招き、排ガスによる大気汚染や騒音・振動などの環境問題の解決を先延ばししている。都市化の進展は下水道の整備を促したが、降水の地下浸透を阻害し、

表—1 都市施設の種類の

種 類	具 体 的 な 施 設
①交通施設	1)道路、2)鉄道、3)地下鉄、4)空港・港湾、5)駐車場 6)新交通、7)モノレール
②公園・緑地	1)都市公園、2)自然公園、3)動物園・水族園、4)霊園
③供給処理施設	1)上水道、2)下水道、3)電気、4)電信電話、5)ガス 6)ごみ焼却場、7)地域冷暖房
④河川等	1)河川、2)運河、3)防潮施設
⑤その他の施設	1)市場、2)と畜場、3)火葬場、4)一団地の住宅施設（集団住宅、通路等）、5)一団地の官公庁施設、 6)流通業務付地（トラックターミナル、倉庫、市場、卸売業等）

都市河川への負荷を高め、ヒートアイランド現象を引き起こしている。温暖化が進む都市では、水循環や緑化が重要な課題となっている。

これらは一例であるが、我が国の都市の多くは、東京圏に限らず、欧米に比べ都市施設の整備が十分な水準に至っていない。加えて、時代の変遷とともに、都市機能にも変化が求められている。古くなって機能の低下した既存施設に新たな機能を付加させて、機能の更新を図る必要も生じている。さらに、既存の施設を有機的に連関させる新たな施設も必要となる。基本的な都市骨格の一日も早い整備完成が待たれる。

3. 東京の地下施設の概況

様々な都市施設のうち、東京の地下に配置されている施設の現状を調べてみると、表—2のようになる。

このうち、主な地下施設について概観してみる。

3.1 地下鉄

JR 東日本や私鉄などの地上部鉄道を除いた都市高速鉄道としての地下鉄の総延長は266.2 km に達しており^{1),2)}、都民や近隣県民の通勤通学の主要な交通手段となっている。これからは、東京を広域的に均衡のとれた多心型都市とするために、都営12号線のように、交通機関相互間、地域間を結ぶ交通ネットワーク化が必要となる。

3.2 下水道

下水道普及率³⁾は、区部が平成6年に概成100%、多摩地域で平成9年度89%を達成した。下水道管の総延長は14986 km、日量629万 m³の処理能力を有してい

表—2 東京都の地下空間利用の概況

施 設	総延長、面積等	内 訳		備 考
1) 地下鉄等	総延長 266.2 km	営団 198 km	その他 68.2 km	平成10年 3月現在
2) 下水道管	総延長 14,986 km	幹線 1,150 km	小径下水 13,836 km	平成10年 3月現在
3) 上水道配水管	総延長 22,329 km	配水本管 2,040 km	配水小管 20,289 km	平成10年 3月現在
4) 都道トンネル等	総延長 24.6 km	トンネル 22km	地下歩道等 2.6 km	平成 9年 9月現在
5) 道路下占用管路	総延長 31,078 km	電話20,437km、電力8,450km、ガス 2,191km		平成 8年度の集計
6) 共同溝	総延長 28.6 km	東京都共同溝 12.6km	臨海共同溝 16 km	平成 9年 4月現在
7) 地下街・駐車場等	23区計 549,700m ²	地下駐車場 326,600m ²	地下街 223,100m ²	平成 9年 4月現在
8) 地下河川・調節池 分水路	総貯留 851,900m ³ 総延長 11km	調節池17箇所+環7 合計 851,900 m ³	分水路 7箇所合計 延長 11km	平成 9年 2月現在
9) 首都高速道路	総延長 255.8 km	高架橋部 209.8 km 平面土工部 14.4 km	トンネル部 14.3 km 半地下部 17.3 km	平成10年 5月現在

注) 本表は、下記の資料をもとに作成した。

- 1) 東京都都市計画局：都市計画のあらまし、平成10年度版
- 2) 帝都高速度交通営団：'98営団地下鉄ハンドブック、平成10年 8月
- 3) 東京都下水道局：事業概要、平成10年度版
- 4) 東京都水道局：事業概要、平成10年度版
- 5) 東京都建設局道路管理部：データブック、平成 9年11月
- 6), 7) 5)に同じ
- 8) 東京都建設局河川部：東京河川ハンドブック、平成 9年 3月
- 9) 首都高速道路公団：保全データブック、平成10年

る。今後は、「下水道は生態系や自然の循環システムを健全に保つための重要な構成要素と位置づけ、環境を守ることを使命とする基本的社会資本」として、高度処理の推進や合流式下水道の改善など、水循環を意識した事業への転換が図られていくであろう。

3.3 水道

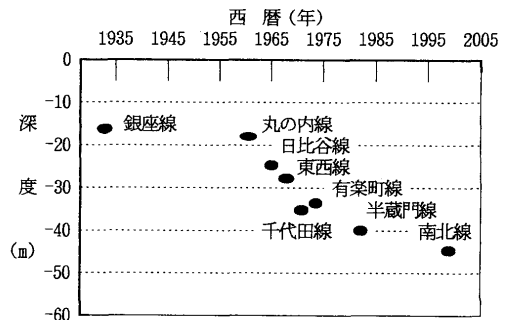
水道普及率⁴⁾は、平成10年 3月時点で概成100%である。平成 9年度における配水管の総延長は22 329 kmで、総配水量は16億8 881万 m³、1日最大配水量541万 m³、施設能力日量696万 m³となっている。21世紀にふさわしい「安心できる水道」の構築にむけ、安定した水源確保、ゆとりある施設能力の整備など、高性能水道を担保する施設の充実が求められる。

3.4 道路

都内の道路総延長は23 319 km（うち都道2 156 km）である^{5), 6)}。このうち、トンネル構造の道路は都道で延長22 km、首都高で14.3 kmと非常に短い⁷⁾。道路交通の渋滞を解消する立体化や幹線道路網の整備による交通ネットワークの形成が急がれる。ところで、道路には交通機能に加え、空間機能という重要な役割がある。都市生活に必要な電気、通信、ガス、上下水道等の公共施設を収容し、通風、採光を確保して、災害時には延焼遮断帯、避難道路の役割を果たす機能である⁶⁾。表—2に示したほとんどの地下施設は道路下の利用であり、縦横に埋設されている。

3.5 都市河川

都市型水害がひとたび発生すると、家屋や家財の浸水にとどまらず、大規模な地下室や地下街に大きな影響を与え、その被害は甚大かつ広範囲に及ぶことが予想される。このため、治水安全度を高める河川施設が建設されている。調節池や分水路は、そうした重要な河川施設の一つであり、地下構造物である。具体例として、環状第



図—1 営団地下鉄のトンネル最大深度の推移

七号線道路下約40 mの地下に建設した環七地下調節池や17箇所の調節池等があり、その貯留量は851 900 m³である⁸⁾。現在、1施設の貯留量が80 000～460 000 m³の調節池整備が9箇所で進められている。

このように、東京の地下は既に高密度な土地利用が進んで、輻輳している。このため、新たな地下施設の設置深度は年々深くなっている。この状況を地下鉄の設置深度の推移で見ると、図—1のようである。新たな都市施設の建設はますます深くなることになる。大深度地下利用に着目した研究や構想が提案されるのも^{9)～11)}、こうした東京の地下空間の利用実態を背景にしたものと考えてよいであろう。

4. 深部地盤情報の蓄積が必要～東京を例に～

ところで、地下空間利用の基礎的資料として、地下の地層構成と地下水状況についての詳しい地盤情報が欠かせない。東京都土木技術研究所は、東京都の建設行政や防災行政を進める上で必要不可欠な基礎的情報である地質、地下水などの地盤調査資料を収集し、地盤に関する電子データ化を図ってきた。現在、地質柱状図の基となる55 000本のボーリング資料をデータベース化した地盤

情報システムを稼働している。このうち、深井戸柱状図数は約2 000本である。これらのデータを基に、1975年に「東京都総合地盤図（Ⅰ）」、1990年に「東京都総合地盤図（Ⅱ）」を刊行し、地下工事の基礎資料として活用してきた。これらの地盤図は、公共構造物や建築物の支持地盤確認のボーリング調査資料を基とするため、主に地表面から深さ約40 m までであった。

都市の地下空間利用が叫ばれ始めた平成元年頃から、東京の深部地盤構造を知る必要性が増し、1996年に「東京都（区部）大深度地下地盤図」¹²⁾を刊行した。この「地盤図」では、今後の開発が予想される台地部の地下約30 m から100 m 付近まで、および低地部の地下約50 m から100 m 付近までを大深度地下と呼んで、深部の地盤構造をまとめている。また、大深度地下工事で重要な検討課題の一つは、地下水の問題である。深部地盤の被圧地下水位の経年変動状況もこの地盤図中に掲載している。

深部地盤情報の蓄積は始まったばかりであり、高精度の大深度地盤調査技術の開発や地下工事の施工実績の共有化が必要であり、組織相互間の情報交換を活性化していくことが求められる。

5. 都市地下工事の技術課題～東京の地下工事例～

都市の地下工事で使用される主な工法は、シールド工法と山留め工法である。最近の工事内容は、大深度化、大規模化しており、従来の設計基準の適用範囲を越えたものが増えている。例えば、山留め工事の例であるが、文献13)に掲載された工事では、新たに開発した技術の導入や水中掘削など、様々な工夫を凝らして地下工事を進めている。ここでは、最近、著者が関わった東京都の工事例を介して、地下工事に係わる技術課題を考えてみたい。

5.1 環七・地下調節池工事（シールド、立坑）

東京都では、より高い治水安全度を確保するため、環状第七号線の地下約40 m 以深に東京湾まで通す地下河川方式の治水計画を策定した。神田川・環状第七号線地下調節池（貯留量24万 m³）はその一環として造られた都市施設の一つである。事業内容は文献14)に譲り、この工事の地盤工学上の技術課題を幾つか見てみよう。

a) シールド工法

トンネル工事は、大深度・大断面であること、地下水圧が392 kN/m²{=4 kgf/cm²} と高水圧であること、そして *N* 値50以上の東京層群を貫くことなどから、泥水式シールド工法を採用した。シールド推進機は、外径13.94 m、機長11.82 m、スキンプレート板厚160 mm、総重量2 800 t で、当時世界最大級であった。ここでの課題は、まず高水圧下推進ゆえに、①シールド機本体の強度、耐久性、②カッターシール、テールシールの止水性、耐久性、③セグメント強度、④セグメント継手部の構造と止水性等であった。また、締まった砂質地盤中の長距離推進を行う必要性から、①切羽安定方法、②カッター

ビット、カッターヘッドの磨耗・破損対策、③テールシールの耐久性とその交換技術、④礫・玉石の処理方法（切羽での破碎、取込み）等の課題であった。今後、地下河川を完成させるには、建設コスト縮減などを含め一層の技術開発が求められており、上述した課題にこれまで以上に合理的・効果的に対応できる技術の開発や、セグメントの薄型化、継手構造の合理化などが求められる。

b) 立坑（大深度山留め）

シールド機の発達立坑は、土圧・水圧に対し躯体のリングコンプレッションで対抗する円形立坑である。この工事の規模は、外径28.2 m、構築深さ59.9 m、壁厚さ1.1～2.6 m であった。これを構築するための山留めには地下連続壁工法を採用した。形状は、外径30.6 m、壁厚が1.0 m、深さ98.0 m の多角形（28エレメント）である。掘削は1エレメント・1ガット方式で掘削し、継手は仕切鉄板方式である。ここでの地盤工学上の課題として、次のようなものを挙げることができる。

①盤ぶくれ防止対策上の根入れ長算定法や山留めと地盤との摩擦評価、そして大深度薬液注入技術、②円形山留めに作用する背面側土圧・水圧の大きさと分布、そして掘削側（抵抗）土圧・水圧、③偏土圧の大きさと分布、④掘削前静止土圧の評価および工事後の背面側土圧の再配分とその後の静止土圧の大きさなどである。これらは、設計上の基本的課題でもある。また、山留め壁を本体利用する場合の課題として、⑤山留め壁と本体壁の荷重分担、⑥山留め壁の鉛直継手の剛性、⑦山留め壁と内壁コンクリートの温度ひずみ、⑧躯体と山留め壁の一体化にあたっての合理的な設計法の開発など、今後の重要な研究課題である。

5.2 地下水の流動阻害と復水工法の開発（山留め）

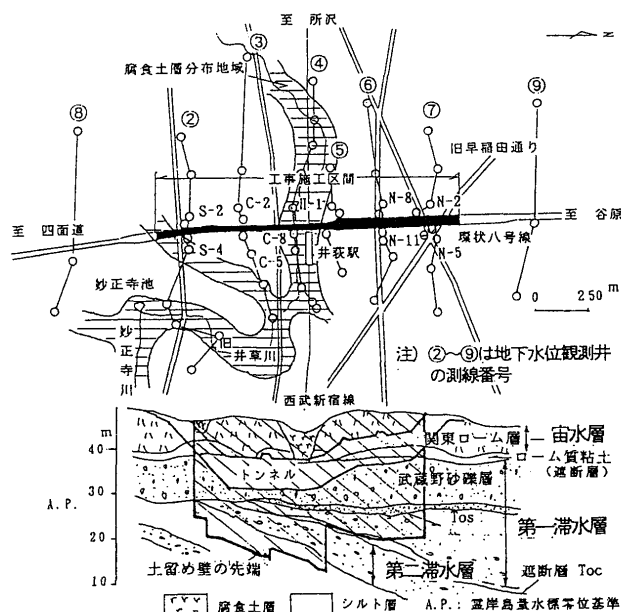
道路のアンダーパスや開削トンネルなど、浅層地下水位より深い掘削を行い、延長の長い都市施設を構築する工事が増えている。このような工事では、遮水性の山留め壁によって地下水の流れを遮断したり、流向の変化を与えるなどの影響が懸念される。

ここに紹介するのは、延長約1 500 m の道路アンダーパス工事での事例である¹⁵⁾。トンネルは開削工法で構築され、山留め壁には地下連続壁工法とソイルミキシング工法が採用された。いうまでもなくこれらは遮水性山留め壁に区分される。周辺の浅層地下水の流れは山留め壁にほぼ直行するため、地下水の流れの上流側では堰上げによる水位上昇が、下流側では供給量の減少に伴う水位低下が生じる。

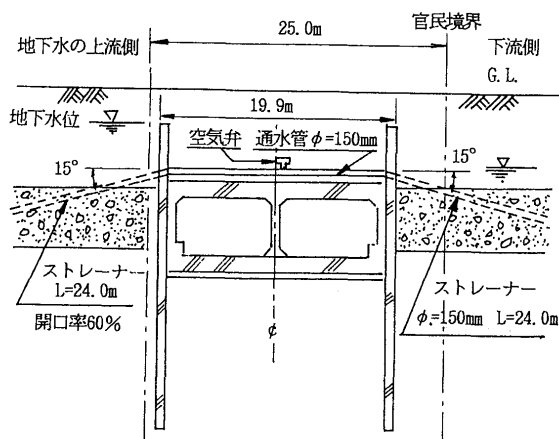
これに対処するため、周辺の地形や地下水位調査に基づき地下水の流れの方向や水みちを調査した（図—2）。その結果、工事区間に直交して流れていた旧河谷低地の下の砂礫層付近に有望な水みちがあることを確認した。図—3に示すような①斜め通水管の設置、②躯体底板中への水平通水管の設置、③ソイルミキシング工法芯材間固結土の高圧水による切削など様々な通水装置を設置し、工事中に低下した下流側水位の回復を図っている。

地下工事の成否は、現場ごとにいかに効果的な地下水

総 説



図一 地形区分と滞水層区分



図一 3 斜め通水管の設置

対策工をとれるかにかかっているといっても過言ではない。有効な対策をとるには、①広域的になる地下水調査を簡易かつ高精度で行う技術、②掘削時の湧水量や遮水壁による地下水位変動量の予測解析法、③効果的な復水対策工法の開発など、解決すべき技術課題が多い。また、大深度地下工事で土丹層（固結シルト層）を掘削する場合、④土丹層中に挟まれる薄い砂層確認や高水圧状態の調査技術、そしてその止水技術の開発が急がれる。

5.3 建設発生土、建設汚泥

平成7年度の建設副産物実態調査データ¹⁶⁾によると、「建設工事現場からの建設発生土の搬出量は、全国で年間約4億4600万 m^3 で、東京ドームの約360個分に相当する。関東地方が一番多く9900万 m^3 で、全国の22%を占めている。リサイクル率は全国平均で32%である」。平成8年度の東京都および23区発注の施工済工事調査¹⁷⁾では、建設工事現場からの建設発生土の搬出量は672万 m^3 である。工事種類別に見ると、上位から下水道工事、鉄道軌道工事、道路工事の順になっている。一方、土砂利用量は183万 m^3 で、工事種類別では下水

道工事、上水道工事、空港港湾工事の順となっている。総土砂使用量に占める再生資源（建設発生土、土質改良土等）の利用率は、東京都全体で62%と比較的高い値である。

利用率を高めるには、シールド工事、地下連続壁や場所打ち杭工法を使う工事などで発生する、①高含水状態の廃泥水の効果的な処理技術や、②細粒土の粗粒土化技術など、新しい再利用技術の開発が求められる。併せて、③建設発生土情報の活用も重要である。

6. あとがき

ここでは、主に東京の都市地下施設の現況を踏まえつつ、シールド工法や地下連続壁工法等に代表される山留め工法を念頭に、大規模、大深度、近接施工といった点に主眼を置いて、深部地盤情報や地下工事上の技術課題を概観した。ところで、すべての施設は竣工直後から劣化が始まり、やがては耐用年数を迎えることになる。これまでに建設した都市地下施設の多くは、地表から地下30mの範囲に設置されている。今後、大深度地下開発の技術に加え、地下構造物の耐震補強技術、地下空洞や埋設物の探査技術の精度向上、鉄筋コンクリート造り地下構造物の補修技術、漏水に対する確実な止水技術など、地下施設の維持管理や更新技術の開発が重要度を増してこよう。

参考文献

- 1) 東京都都市計画局：都市計画のあらまし、平成10年度版。
- 2) 帝都高速度交通営団：'98営団地下鉄ハンドブック、平成10年8月。
- 3) 東京都下水道局：事業概要、平成10年度版。
- 4) 東京都水道局：事業概要、平成10年度版。
- 5) 東京都建設局：事業概要、平成10年度版。
- 6) 東京都建設局道路管理部：データブック、平成9年11月。
- 7) 首都高速道路公団：保全データブック、平成10年。
- 8) 東京都建設局河川部：東京河川ハンドブック、平成9年3月。
- 9) 鉄道総合技術研究所：大深度地下鉄道中間報告、1993.3。
- 10) 鉄道総合技術研究所：深部地下鉄道駅の構造計画と構築工法に関する研究、鉄道総研報告、特別第2号、1995.9。
- 11) 早稲田大学理工学総合研究センター：東京都心部の大深度地下利用具体的提案、1997。
- 12) 東京都土木技術研究所：東京都（区部）大深度地下地盤図、1996。
- 13) 地盤工学会：山留めの挙動予測と実際、地盤工学実務シリーズ8、1999。
- 14) 高橋康夫・仲澤 徹：神田川・環状七号線地下調節池の建設、土と基礎、Vol. 46, No. 6, pp. 34~36, 1998。
- 15) 杉本隆男：開削トンネル工事における地下水復水対策の一例、地下水地盤環境に関するシンポジウム'98—地下水の流動保全と環境問題—、地下水地盤環境に関する研究協議会、発表論文集、pp. 61~74, 1998。
- 16) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合的建設副産物対策—現場での実効ある対策の推進のために—、平成10年度版、1998。
- 17) 東京都都市計画局：建設副産物実態等調査報告書、平成10年3月、1998。

(原稿受理 1999.3.29)