

下水道に学ぶ地下構造物の維持・再生

Methods for maintaining and renovating underground structures learned from sewerage systems

高瀬行廣*・亀村勝美**・安藤慎一郎***・梨本 裕****

Yukihiro TAKASE, Katsumi KAMEMURA, Shinichiro ANDO, Yutaka NASHIMOTO

In Japan, the public facilities that have been developed intensively since mid 1960s to service increasing population are all expected to be aging in the near future, imposing a heavy burden such as the cost of maintenance and renovation. In response, the Yokohama municipal government is aiming at alleviating such a burden by extending the lives of public facilities.

In the city of Yokohama, Japan's first modern sewerage system by the Japanese for the Japanese was excavated. Methods for its reservation are now being assessed.

In this study, lessons are learned from the old sewerage system and the approach to the elongation of sewerage systems of the city of Yokohama, and the future direction of the maintenance and renovation of underground structures is examined.

Key words ; sewerage ,underground structures, maintenance and renewal, renovation, life cycle cost

1. はじめに

我が国の大都市においては、高度成長に伴う昭和 40 年代以降の人口急増に対応して集中的に整備してきた公共施設が今後一斉に老朽化の時期を迎え、維持更新費がかさむなど大きな負担となってくる。その対策として、横浜市では公共施設の長寿命化を推進することにより、今後の負担軽減を目指している。

下水道も、長寿命化^{1),2)}への取り組みとして、ライフサイクルコスト (LCC) 評価^{3),4)}を取り入れ、道路陥没や溢水などの事故が発生してから修繕、清掃などを行う「発生対応型の維持管理」から、予め計画的な点検・調査により欠陥・異常箇所を発見して補修する「予防保全的な維持管理：計画的維持管理」への脱皮を試みている。

また、横浜市では「我が国最初の日本人による日本人のための近代下水道」の遺構の一部⁵⁾が発掘され、その保存方法の検討が進められている。

その遺構と横浜市下水道の長寿命化への取り組みに学び、今後の地下構造物の維持・再生のあり方について考察する。

以下の報告において「下水道」を「今後の地下構造物」に置き換えれば、課題と解決策が見えてくる。

キーワード；下水道、地下構造物、維持再生、ライフサイクルコスト

- * 正会員 横浜市下水道局
- ** 正会員 大成建設株(株) 土木本部
- *** 正会員 ㈱竹中土木 技術本部
- **** 正会員 前田建設工業株(株) 土木本部

2. 下水道の役割

我が国の下水道は、明治 10 年代のコレラ大流行の衛生対策として始まった。横浜市は国際貿易港を有していたことから、他の都市より早く 1869 年に、英国人技師ブラントンの設計・監督により、関内・山下町の外国人居留地において、陶管(写真-1)による下水道の整備に着手した。その後、1881 年から 1887 年にかけて、神奈川県御用掛の三田善太郎は、この陶管をレンガ瓦造卵形管に全面改修する他、居留地周辺の関内日本人街で下水道を整備した。この下水道は我が国最初の日本人による日本人のための近代下水道⁶⁾とされている。

これらのレンガ瓦造卵形管(写真-2, 3, 4)は 1999 年までにすべての種類が発掘されているが、2001 年 10 月には臭気対策を施したレンガ造りの下水道マンホール(写真-5)が発掘された。このマンホールは、横浜市文化財保護審議会専門委員から、三田善太郎の設計により 1881 年から 1883 年に建造された「人孔」の遺構と判定されており、臭気対策用の炭箱もほぼ完全な形で残っている。これらの遺構から当時の設計施工技術の高さが読みとれる。

このように下水道は衛生対策として始まったが、現在は以下に挙げる役割と機能^{6), 7)}を持っている。

2-1 生活環境の改善

下水道の最も基本的な役割は汚水を速やかに排除することである。この役割が果たされず、汚水が住宅地周辺に滞留すると、悪臭や蚊・ハエなどの発生源となり、伝染病の発生の可能性も増大する。これらを防止するためにも水洗化を図っていく必要がある。

污水处理施設の整備に当たっては、水質保全に及ぼす効果や費用効果などそれぞれの污水处理法に関する適切な情報に基づいて地域が自らその手法および時期を選択し、計画を定める仕組みの構築が重要である。

また、下水道はその放流物質、放流方法をはじめとする下水道システムの見直しを行い、水系における生態系を保全するとともに、より良い生息空間を形成する必要がある。そして、都市化の進展に伴って失われた水辺を復活させ、水と人とのふれあいを確保することが望まれている。

下水道は、本来、人間が汚した水を自らの手で元に戻すための施設であり、また、汚濁物質が公共用水域にそのまま排出されることを防ぐ最後の砦としての役割を担っている。従って、下水道は、公共用水域の水質を保全する最も基本的な施設であるが、この役割が明確に示されたのは、昭和 45 年の下水道法改正の時である。以降、下水道の整備が急速に進められ、公共用水域の水質も多くの場所で大幅に改善された。例えば、全国の河川における代表的水質指標である BOD 環境基準達成率は、昭和 49 年当時 51.3%であったものが、平成 11 年度には 81.5%となっており、また、環境基準の未達成水域においても水質を表す各指標の値は大きく改善されている。この結果、水質や水辺環境が改善されたばかりでなく、昔からの水に係わる伝統行事が数十年ぶりに復活するなど、様々な効果も発現している。

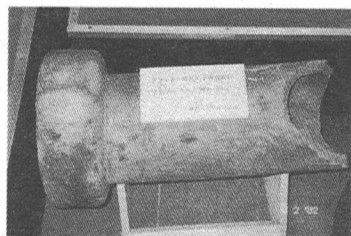


写真-1 保存されている陶管

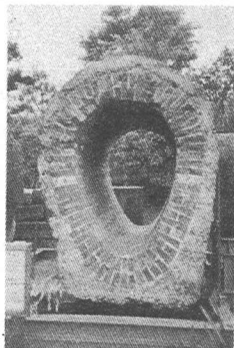


写真-2 レンガ瓦造卵形管

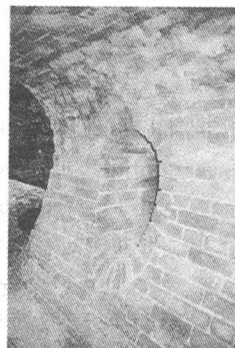


写真-3 卵形管内部



写真-4 卵形管の梯子胴木



写真-5 地下に保存されているレンガ造りの下水道マンホール

さらに、下水道管きよは、各家庭やオフィスビルなどを直接結ぶ施設であり、全国 7,000 万人の家庭で接続可能であることなどから、光ファイバーの収容空間として注目されている。平成 12 年度末現在で、敷設実績は総延長 101km となっている。管きよ空間を光ファイバーの敷設空間として開放し、光ファイバーネットワークにより都市・地域の情報化および活性化を支援することが望まれている。

2-2 浸水の防除および安全・安心の確保

近年の都市化の急速な進展に伴い、緑地・空地などが減少し、道路・宅地が増加して雨水の浸透が少なくなることにより、短時間に多量の雨が流出するようになってきた。このため、市街地において少なくとも 5 年に 1 回程度の大雨に対する浸水防除を図るべく下水道の整備が進められている。

この整備においては施設の耐震化などを図り、災害発生時にも当該地域および下流地域の汚水の収集・処理と雨水の流出抑制・排除などの機能を確保する必要がある。

また、処理場などの下水道施設を防災拠点として整備し、処理水の生活用水への活用などにより都市防災機能を向上させる必要がある。

さらに、多様な都市活動や社会活動により様々な物質が下水道に流入している。このため、クリプトスポリジウムなどの病原性微生物や環境ホルモンなどの微量有害物質に対するリスク管理の精度・信頼性をさらに向上させる必要がある。

2-3 資源利用

環境基本法により、各主体が環境負荷を削減するために、資源を循環利用し、消費エネルギーを削減することが求められるようになった。しかも、資源の循環利用・廃棄物の適正処分の原則を定めた循環型社会形成推進基本法が成立したところであり、下水道事業においても循環型社会構築のための施策が一層求められることになった。

下水道は、水、汚泥、熱などの多くの利用可能な資源・エネルギーを有しており、それらを再利用することによって、省エネルギー・リサイクル社会の実現に向けて大きな役割を果たすことができる。例えば、下水および下水処理水は、気象などによる影響が少なく、外気に比べて水温が安定しているなどの特徴を有しているため、その熱を利用したヒートポンプによる経済的・効率的な冷暖房の実施が可能である。現在、下水処理施設そのものだけではなく、地域冷暖房へも活用されている。また、処理水の放流落差を利用した水力発電も行われている。

下水汚泥の発生量は下水道事業の進展により年々増大する一方だが、廃棄物最終処分場の残余空間の逼迫によりその処分が困難な状況になってきている。下水汚泥は有機性資源・エネルギーを豊富に含んでいるので、下水汚泥の効率的処理・処分による減量化と同時に、緑農地利用や建設資材利用、エネルギー利用など多様な資源利用を推進する必要がある。

従来は緑農地利用が中心であったが、近年はセメント原料としての利用や熔融スラグの利用などの建設資材利用が進んできている。最近では、焼却灰と掘削残土を用いて改良土を製造する技術が実用化されている他、下水汚泥焼却灰だけで、他の材料を添加することなく、レンガやタイルなどを製造する技術も開発されている。

また、下水汚泥の嫌気性消化過程において発生する消化ガスを発電に利用している。消化ガス発電は欧米において実施例が多いが、我が国でも北見市や長岡市において消化ガスを処理場外でも利用している。この他にも、下水汚泥中の有機物などの可燃物を燃料として利用する下水汚泥の燃料化、下水汚泥焼却排熱の利用などが行われている。

なお、下水道の終末処理場やポンプ場の上部空間は過密化した都市における貴重な空間であり、資源でもある。これを複合的に有効活用することが求められている。上部利用例としては、テニスコートなどのスポーツ施設や公園、広場が多く見られるが、処理場を防災空間（川崎市）として利用したり、上部に市民プラザ（横浜市）、武道館（鎌倉市）を建設するなどの新しい取り組みも行われている。

2・4 循環を基調とする環境負荷の低減

都市における新規水資源開発の困難性や環境への負荷の低減などを考慮し、下水道は都市における安定した雑用水の供給源として処理水の再利用を促進する必要がある。

当然ながら、下水道は使った水を水環境への影響を小さくして戻していくことも大きな課題だが、下水道整備の進捗の結果、多くの水が下水道を経由するようになり、下水道が水循環系に対して大きな影響力を有することとなった。

しかも、下水道は都市の汚水を集めて処理することによって水のみならず物質の循環にも大きな役割を担っている。限られた物質を処理し、放流する静脈機能に加え、下水道システムを経由する様々な物質について、何をどこまで処理し、どこに還元するかということを判断して実行する動脈機能も併せ持つことで、健全な水循環系の維持・回復に大きな役割を果たす必要がある。

また、ライフサイクルアセスメントの観点から、施設の建設や管理の各段階における資源・エネルギーの消費抑制および施設からの温室効果ガスの発生抑制を強化する必要がある。

さらに、処理水や汚泥の持つ熱エネルギーおよび原材料としての価値を有効に活用し、併せて、メタンガス回収などによるエネルギーの有効利用やビルピット対策による臭気問題の解消を図ることで、環境負荷の低減や循環型都市の形成に貢献する必要がある。

3. 今後の地下構造物の維持・再生のあり方

下水道は「住みやすい暮らしの場づくり」、「健全な水循環・良好な水環境の創造」、「持続可能な都市の構築」に貢献することが期待されている^{6),7)}。一方、地下開発・利用には、「健全な社会環境の創造」、「都市の維持・再生」に貢献することが期待されている。

地下開発・利用に求められていることは下水道に求められていることと同じである。今後の地下開発・利用あるいは地下構造物の維持・再生にとって必要な考え方は、下水道の役割と機能の歴史を見れば浮かんでくると考えられる。

そこで、下水道の役割と機能の歴史について整理すると、2章で述べたように、下水道はコレラ大流行の衛生対策として始まった本来の役割・機能だけではなく、様々な役割・機能を補強してきたことがわかる。その内容は以下の通りである。

- 施設の耐震化および防災拠点としての整備に代表される都市防災機能の向上
- 多様な有害物質に対するリスク管理の精度・信頼性の向上
- 光ファイバーネットワーク構築による都市・地域の情報化と活性化
- 資源の循環利用および消費エネルギーの削減
- 良好な環境の創造と環境負荷の低減

ところで、明治時代の初期に横浜で整備された、我が国最初の日本人による日本人のための近代下水道は、現在、利用されていない。すなわち、構造物としては堅固であり、長期にわたる使用に充分耐えられる施設であっても、ネットワークシステムとして機能しなくなれば、維持・再生を図るよりも再構築による機能アップが得策となる実例でもある。

したがって、地下構造物の維持・再生においても、常に、次のことに努めることが必要不可欠と考える。

- 社会情勢の変化への対応に伴う役割・機能の拡大
- 未利用機能・資源の徹底活用および短所の見直し・活用
- 環境負荷の低減
- 新しい役割・機能の創出
- 安全・安心の確保

4. 不確実性を考慮したライフサイクルコストの評価

以上のように横浜市における下水道事業の変遷は、これからの地下構造物の維持・再生を考えるにあたって何を考慮しなければならないかについて多くの示唆を与えている。

公共性の高い地下構造物の維持・再生の基本は、求められる性能（機能）とそれへの対価としてのコストとを、社会的な合意の下に如何にバランスさせていくかにある。しかも、この性能とコストのバランスを構造物の建設時だけでなく、その後の長期にわたる供用期間中を通して評価しなければならない。ここにライフサイクルコスト（LCC）評価の意義があり、現在様々な構造物についてそのLCC評価の試みが進められている。

横浜市においてすでに進められている下水道事業における維持・再生の基本方針は、LCCを評価した上で意志決定されたものであり、LCCを様々な構造物の維持再生に活用しようとしている多くの技術者と意志決定者にとって参考になるものとする。ここでのLCCの定義は、

$$LCC = C_i + \sum_{m=1}^n C_m$$

であり、初期の建設コスト C_i とその後の維持管理コスト C_m が、供用期間 n 年について評価されている。この定義は、最も基本的なものであるが、将来にわたって生じるであろう不確実性に起因する要素は含まれていない。

地下構造物のように長期間にわたり公共の用に供する施設においては、台風や地震などの自然現象に起因する災害に伴うコスト、事故などの人為的な要因により発生するコストも無視できない。勿論こうしたコストは必ず発生するものではない。むしろ確率的には小さなものである場合が多い。しかし、一旦それが発生すると大きな損害を生じ、場合によってはその時点でその構造物の性能を完全に失ってしまうことも考えられる。こうしたことからLCCの評価項目にリスクを加え、

$$LCC = C_i + \sum_{m=1}^n C_m + \sum_{r=1}^k C_r$$

として評価する事も試みられている。ここに C_r は、 k 種類のリスク項目によるコスト（＝発生確率×損害額）である。

しかし、3章までに述べてきた事例は、LCCをこうした項目だけで評価するのではまだ不十分であることを示している。すなわち、自然災害や材料の劣化などによる純粋なリスクだけではなく、社会環境の変化や、人々の価値観の変化など施設管理者が直接的には管理できないような不確実要素によって生じるリスクも評価する必要がある。また、時間の経過とともに経済価値そのものも変化してくるため、ファイナンス分野のリアルオプションの考え方や、現在注目されているアセットマネジメント的な考え方⁸⁾についても検討していく必要もある。

このように、LCCの評価においては、不確実性に起因する要素をどう評価するのか、また、その妥当性をどう評価するのかなど検討すべき課題は多い。しかし、LCCの評価は、今後の地下構造物の維持管理を考えるに当たって不可欠であり、関連するデータの蓄積、評価方法の研究を継続していきたい。

5. おわりに

我々の身近にあって毎日利用している重要な施設であるにも関わらず、直接目に触れるのはわずかにマンホール程度である。しかし、地下空間には膨大なネットワークを構築し、かつ、土木構造物としての価値も高い。ストックの多い大都市を中心として多くの老朽施設も抱えている。本論では、下水道のこのような特徴に着目し、今後の地下構造物の維持・再生のあり方を検討した。

下水道は、誰の目にも必要不可欠な施設・構造物であるが、その機能を維持するだけではなく、役割や機能の拡大・向上・創出および環境への配慮に精力を注いできた。このことは、他の地下構造物にも同じことが要求されていると考えられる。

一般の構造物だけではなく地下構造物に対する要求性能も、生活様式、価値観、社会情勢などの影響を受けて常に時代とともに変化する。これを慎重に予測して建設することが重要であるが、維持・再生においても要求性能の変化に対応していく必要がある。いつかは継続と改築のどちらが得か判断・評価する局面に遭遇することになるが、どちらを選択しても役割・機能の拡大・向上・創出および環境への配慮を常に心がける必要があり、改築を選択した場合には不要となる地下構造物の新たな利用法を考える必要がある。

都市の再生に地下空間の開発・利用は不可欠なものとされているが、これまでの「都市の地下利用」⁹⁾は決して満足できるものにはなっていない。従来通りの手法で今後も地下開発を続けるならば、将来に大きな禍根を残すことになりかねない。改築案が選択されたからと言って、簡単に既設構造物を解体・廃棄すべきではない。環境負荷を最小限に押さえながらその潜在的な資源価値を生かし切るという方針を前面に出し、既設の地下構造物と長く上手に付き合っていくことが大切である。

構造物の建設・維持・再生における判断・評価基準として有効な手段と見なされているのがライフサイクルコスト（LCC）であるが、下水道の歴史を見ると、LCCの算定においては、構造物およびそれが構成するネットワークに対する要求性能の変化およびその潜在価値を考慮することが必要不可欠であると考えられる。地下構造物の維持・再生および地下空間の開発において「もの造りの技術」より「もの使いの技術」が求められていることを強く認識する必要がある。

謝辞：本報告は、土木学会・地下空間研究委員会・維持再生小委員会の活動の一環としてとりまとめたものです。ご指導およびご助言をいただきました委員の皆様には感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 横浜市下水道局：横浜市における下水道施設の維持管理，建設新聞，2000
- 2) 横浜市企画局：公共施設の長寿命化の基本方針の策定，記者発表資料，2000.12.4
- 3) 岡村光政・亀村勝美他：地下構造物の維持・再生に関する技術的手法について，地下空間シンポジウム論文・報告集 第6巻，2001.1
- 4) 高瀬行廣・亀村勝美・岡田正之・安藤慎一郎：下水道施設の維持管理の現状と今後の地下構造物の維持・再生のあり方，地下空間シンポジウム論文・報告集 第7巻，2002.1
- 5) 高瀬行廣他：土木学会誌，これからの都市の地下利用，Vol.87，2002.8
- 6) 国土交通省都市・地域整備局下水道部監修：日本の下水道－その現状と課題，平成13年
- 7) 田中修司（執筆者代表）：知りたいことがここにある下水道管渠学，環境新聞社
- 8) 中村孝明：リスク・リターンによる耐震投資の効果とマネジメント，第4回地震災害マネジメントセミナー，土木学会，2002.11
- 9) 亀村勝美他：土木学会誌，これからの都市の地下利用，Vol.87，2002.8