

# 塩化物の地中移流拡散を考慮した 地下鉄トンネルの塩害範囲の検討

## STUDY ON SUSPICIOUS AREA OF CHLORIDE ATTACK OF SUBWAY TUNNEL FROM THE VIEW POINT OF ADVECTIVE DIFFUSION OF CHLORIDE ION

武藤 義彦<sup>1</sup>・牛田 貴士<sup>2\*</sup>・仲山 貴司<sup>2</sup>・小西 真治<sup>1</sup>

Yoshihiko MUTOU<sup>1\*</sup>, Takashi USHIDA<sup>2</sup>,  
Takashi NAKAYAMA<sup>2</sup> and Shinji KONISHI<sup>3</sup>

The main causes for deterioration of subway tunnels are chloride ion and carbonation. Tokyo Metro Co.,Ltd. has been studying on the two causes with investigation of tunnel bodies and countermeasure methods. As for chloride attack, it had become clear that relationships between leakages with chloride ion, chloride attack and affect by tidal rivers. Through the field investigation, the distance which have the risk of chloride attack is 50 m from the edge of tidal rivers. From the results of the ground water density flow analysis, the distance is 50 ~ 100 m from the edge of tidal rivers. Since these results are in the same range, they are considered the valid result.

**Key Words :** chloride attack, subway tunnel, tidal river, advective diffusion of chloride ion, ground-water density flow analysis

### 1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、「東京メトロ」という。）は現在 9 路線、営業キロ 196.1km で一日に約 645 万人という大勢のお客様に利用していただいている。このうち、85%の 166.8km がトンネルであり、適切な維持管理により安全・安定運行を保っている。しかし、トンネルは地上構造物と比べて更新が難しいため、予防保全を施し経年劣化を防ぐことが重要である。

地下鉄のトンネルが経年劣化する主な原因は塩害と中性化であるため、東京メトロではこれらに対する調査と対策方法の検討を進めてきた<sup>1)</sup>。このうち塩害については、塩化物を含んだ漏水と塩害の関係や感潮河川の影響等がわかってきた<sup>2,3)</sup>。その結果から、感潮河川の直下および河川端から約 50m の範囲が地下鉄トンネルにおける外的塩害の要注意範囲であると判断した。

しかし、一般的な地下鉄に適用するには、地形やトンネルの土被り等の異なる様々な条件で当てはまるかどうか確かめる必要があった。そこで、感潮河川を源とする塩化物イオンの移流拡散現象を、地下密度流解析により



図-1 河川等との交差区間

シミュレーションして、この判断が妥当であることを確認した。本論文では、この解析による検討方法と結果について述べる。

### 2. 現地調査

#### (1) 調査概要

図-1に東京メトロのトンネルが河川等（河川、運河、

キーワード：塩害、地下鉄トンネル、感潮河川、塩化物イオン、地下密度流解析

<sup>1</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 Tokyo Metro Co.Ltd. Structure Division (E-mail: y.mutou@tokyometro.jp)

<sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 Railway Technical Research Institute, Structure Engineering Division

<sup>3</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 Tokyo Metro Co.Ltd. Structure Division

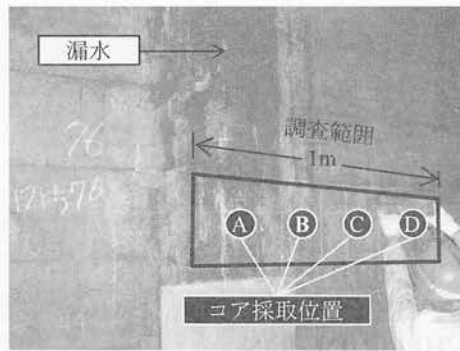


図-2 漏水位置における塩分量調査

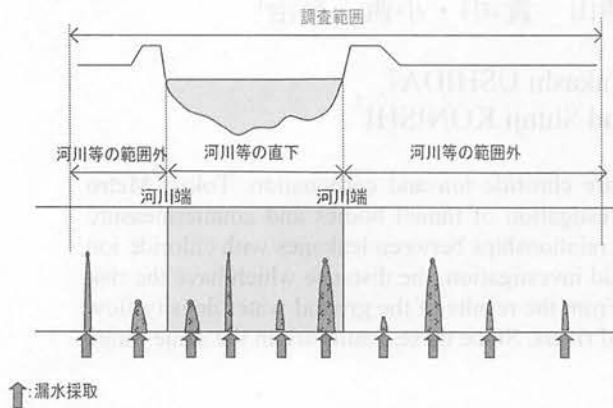


図-3 漏水の塩分量調査範囲

埋立地等)の下を通過する位置を示す。全路線で75区間存在し、49区間が箱型トンネル、29区間がシールドトンネル(3区間は両方を含む)である。これらの区間を対象に、コンクリート中の塩分量、鉄筋の腐食度、漏水の塩分量の現地調査を行った<sup>3)</sup>。

図-2に、塩分量調査状況を示す。本調査では、塩化物を含んだ漏水と塩害の関係を調べるため、漏水による湿潤箇所から横に1mを調査範囲とした。塩分量測定のためのコアを200~300mm間隔で4本採取した後で、鉄筋をはつり出し、コンクリート内の鉄筋の腐食度を目視調査した。

図-3に、漏水の塩分量調査範囲を示す。感潮河川付近の20区間について打継ぎ目からの漏水の塩分量測定を実施した。具体的には、河川等の直下と河川端から100~500mを対象として調査し、漏水が生じていた100~200mmの範囲で漏水を採取し試料とした。

## (2) 調査結果

表-1に、現地調査結果の一例を示す。漏水直下のコアAは、表面・鉄筋位置ともに塩分量が高く、鉄筋位置濃度が、発錆限界である $1.2\text{ kg/m}^3$ <sup>4)</sup>を超過している。漏水範囲外では、漏水位置に近いコアBで、表面濃度が $3.6\text{ kg/m}^3$ と高いものの、鉄筋位置濃度はいずれも $0.0\text{ kg/m}^3$ であった。

表-1 塩分量測定結果

| コア                       | A    | B   | C     | D   |
|--------------------------|------|-----|-------|-----|
| 表面濃度 $[\text{kg/m}^3]$   | 11.1 | 3.6 | 0.3   | 0.1 |
| 鉄筋位置濃度 $[\text{kg/m}^3]$ | 6.9  | 0.0 | 0.0   | 0.0 |
| 備考                       | 漏水範囲 |     | 漏水範囲外 |     |

※すべてのコアでかぶり50mm程度(はつり調査)

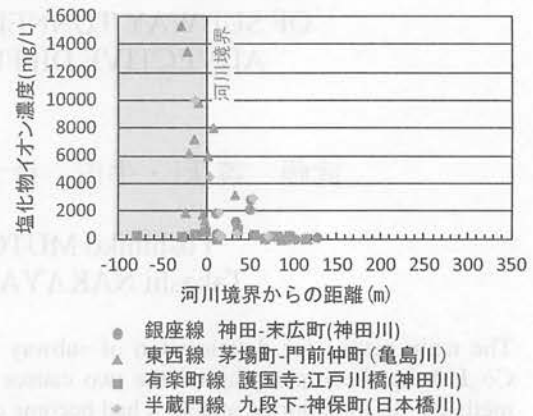
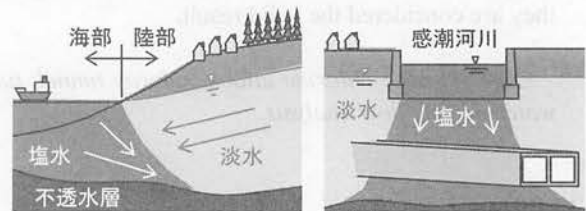


図-4 漏水の塩分量



a) 塩水くさび b) 本研究の対象

図-5 地下水(淡水)への塩水侵入のイメージ図

はつり出した鉄筋の目視調査によると、漏水範囲で湿潤環境化にある鉄筋では、断面欠損が認められた。しかし、その周囲では、部分的で軽微な腐食が発生しているのみであった。

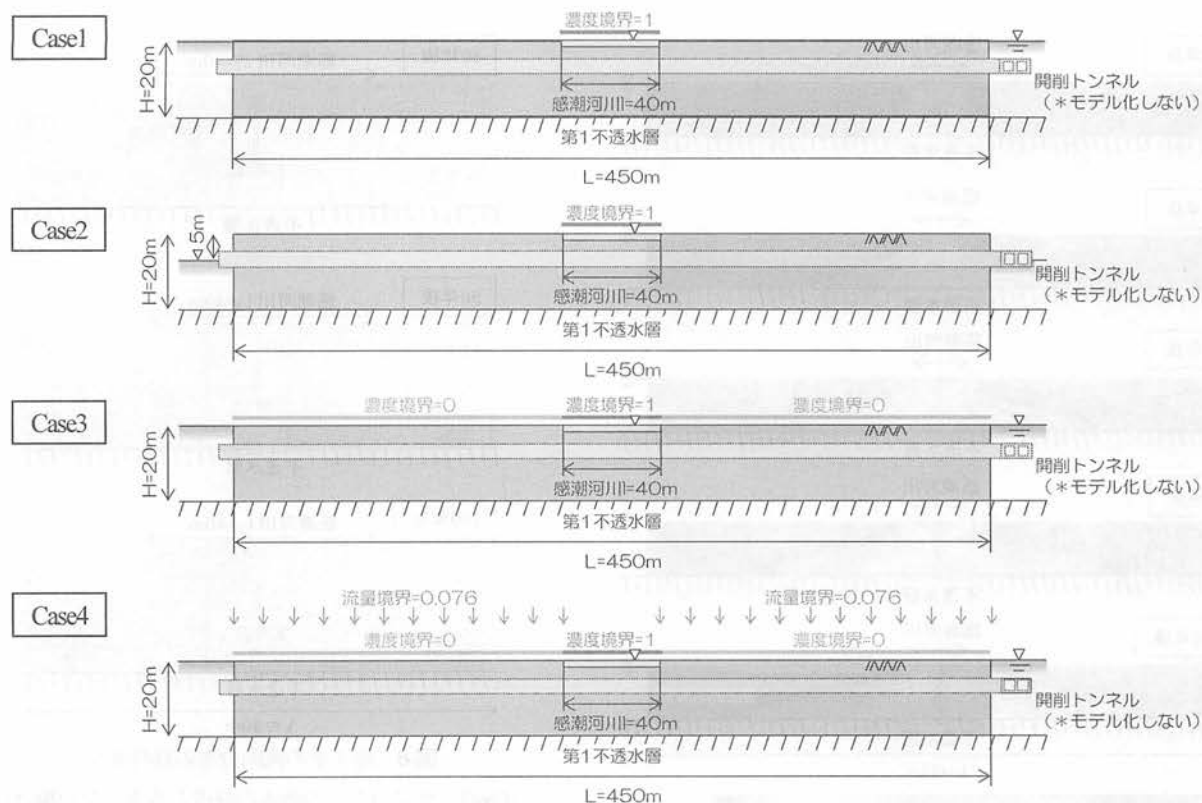
図-4に、調査した20区間のうち、感潮河川直下に位置する4区間における漏水の塩分量を示す。塩分量は、河川直下で高い場合であっても、河川から50m以上離れれば、極めて低くなる傾向が見られた。

本調査より、地下トンネルの場合、飛来塩分の影響を受ける地上の構造物とは異なり、塩害は漏水近傍の局所的な範囲で進行するケースが殆どであることがわかった。

## 3. 塩害の要注意範囲に関する解析方法

### (1) 検討概要

前章の調査結果から、塩害の生じる可能性がある範囲は、感潮河川の直下と河川端から50m以内であることがわかった。そこで、地形やトンネルの土被り等の異なる



※地盤中の初期塩化物イオン濃度はすべて  $0\text{kg/m}^3$

図-6 解析モデルのイメージ図

様々な条件に適用できることを確認するために、地下密度流解析による解析的な検証を行った。

地下密度流解析とは、地下水中の塩水挙動を、A) 地水流動および淡水と塩水の密度差によって生じる「移流」と、B) 淡水への塩分の「拡散」で表現するものであり、密度勾配を考慮したダルシー則と移流拡散方程式を連成させた有限要素解析手法が構築されている<sup>9)</sup>。

地下密度流解析は、海岸地域の地下水（淡水）への海水侵入（塩水くさび現象と呼ばれる：図-5a）<sup>6)</sup>の挙動を検討するためには適用されてきたが、本研究の対象である感潮河川からの塩水浸透とトンネル位置での塩化物イオン濃度の分布（図-5b））を、調査結果を交えてシミュレーションするのは初めての試みであった。

## (2) 地下密度流解析

解析モデルの範囲や境界条件のイメージを図-6、表-2に示す。東京都心部の深度 $20\text{m}$ <sup>7)</sup>に第一不透水層がある地盤を想定して、地表面中央に塩水の供給源である感潮河川（幅 $40\text{m}$ ）がある幅 $450\text{m}$ の範囲を解析対象とした。なお、感潮河川位置には濃度 $1.0$ の固定境界条件を与えて解析を実施し、解析後に海水の塩化物イオン濃度 $19,000\text{mg/L}$ を乗じて、地盤中の塩化物イオン濃度とした。感潮河川の塩化物イオン濃度は潮の干満の影響を受けて経時変化するが、河川の流速と地下水の流速は大きく異なるため、境界条件に及ぼす影響は限定的と考えて固定

表-2 解析ケース

|       |                                                                                             |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Case1 | 地表面から地盤への雨水の浸透は考慮しない。地下水位はG.L. $0.0\text{m}$ とする。                                           |
| Case2 | 地表面から地盤への雨水の浸透は考慮しない。地下水位はG.L. $-5.0\text{m}$ とする。                                          |
| Case3 | 感潮河川外の地表面の塩分濃度を0とし、地表面から地盤への雨水の浸透は考慮しない。地下水位はG.L. $0.0\text{m}$ とする。                        |
| Case4 | 感潮河川外の地表面の塩分濃度を0とし、東京の年降雨量、路面（舗装）の流出係数に基づき、地表面から地盤への雨水の浸透を考慮する。地下水位はG.L. $0.0\text{m}$ とする。 |

表-3 解析に用いる地盤物性値

|      |                           |                      |                                            |
|------|---------------------------|----------------------|--------------------------------------------|
| 浸透流  | 透水係数 $k(\text{m/sec})$    | $1.0 \times 10^{-5}$ | 文献 <sup>4)</sup> を引用                       |
|      | 比貯留係数 $S_s(\text{m}^3)$   | $1.0 \times 10^{-3}$ |                                            |
|      | 有効間隙率 $\theta$            | 0.25                 | 文献 <sup>10)</sup> を引用                      |
| 移流拡散 | 塩水の比重                     | 1.025                |                                            |
|      | 縦分散長 $\alpha_L(\text{m})$ | 3.0                  | Beimsの観測規模 $100\text{m}$ の値 <sup>11)</sup> |
|      | 横分散長 $\alpha_T(\text{m})$ | 1.0                  |                                            |

境界条件を与えた解析を実施した。

地表面の降雨と地下水位変動の影響については幾つかの解析ケースを設けて検証した。

Case1およびCase2は、降雨がなく、地下水位をG.L.  $0\text{m}$ とG.L.  $-5\text{m}$ に設定したケースであり、地下水位のみの影響を確認することを目的としたものである。

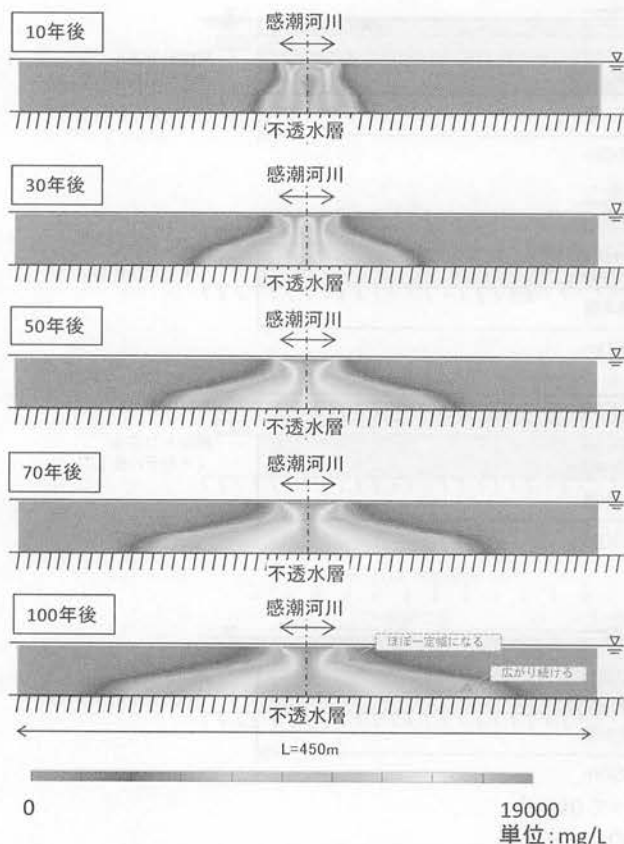


図-7 塩化物イオン濃度分布の経時変化  
(Case3: 地表面からの雨水の浸透を考慮しない場合)  
※水平方向のスケールは1/2倍

Case3は、地下水位をG.L.-0mとし、雨水の地盤への浸透は考慮しないものの、地表面では降雨により塩水が洗い流されていると仮定し、感潮河川以外の地表面の濃度境界を0.0としたケースである。

最後のCase4は、降雨の影響を精緻に表現することを目的としたケースである。地下水位をG.L.-0mとし、地表面の濃度境界はCase3と同様に0にするとともに、雨水の地盤への浸透を考慮した。

この地表面からの雨水の浸透量は、降雨の観測記録と地表面の舗装の影響を考慮して定めた。東京都千代田区大手町の観測資料（1981年～2010年の30年間の平均値）を取り纏めた資料によれば、東京の年降水量は $1.5288\text{m}^{\text{⑧}}$ であることがわかる。また、路面（舗装）の流出係数は0.70～0.95である。

流出係数を最小値の0.95と仮定すると、浸透量は $1.5288\text{m}/\text{年} \times (1-0.95) = 0.076\text{m}/\text{年}$ となる。

次に、解析に用いた地盤物性値を表-3に示す。浸透流解析では東京都心部の砂質土相当の地盤を想定して、関東全域を調査した文献<sup>⑨</sup>より物性値を定めた。また、移流・拡散解析の縦・横分散長とは、拡散係数と地下水流との比例定数である。室内実験では数cm程度となるが、観測精度や地盤の不均一性の問題から、観測規模に応じ、

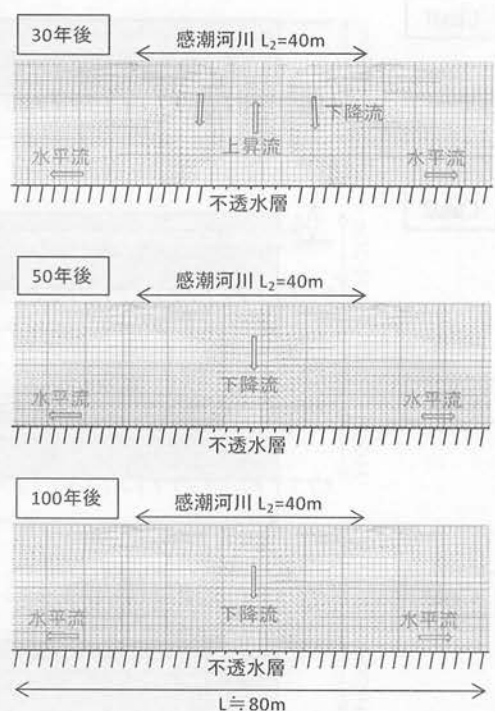


図-8 地下水の流向分布の経時変化  
(Case3: 地表面からの雨水の浸透を考慮しない場合)

大きくする設定する必要があることが知られている<sup>10)</sup>。そこで、縦分散長にはBeimsの観測規模100m（調査結果で得られたトンネル片側の要注意範囲の2倍）の値を用い、横分散長は既往文献の範囲のなかで、安全側に水平方向の濃度分布が最大となる横分散長/縦分散長=1/3とした。なお、本検討で使用した解析コードは、岡山大学西垣教授らが公開しているDtransu-2D・ELである。

### (3) 地盤内の塩化物イオン濃度の経時変化

図-7のCase3の解析結果を用いて、地盤内（解析モデル全域）の塩化物イオン濃度分布の経時変化を考察する。

解析開始から30年までは、感潮河川位置から地盤内への塩化物イオン浸透が始まり、塩水が徐々に降下して不透水層に到達していく段階である。その特徴として、感潮河川両端の2箇所以降下流が生じていることがわかる。

30年から70年までは、感潮河川両端での降下流が徐々に中央に寄り始め、感潮河川中央での1箇所のくびれた下降流に移行する。

70年以降には、不透水層に到達した塩水は水平方向に広がり続けるが、感潮河川中央での降下流の形状はほぼ安定する。

このような淡水と塩水の密度差に起因する複雑な濃度挙動は、地下密度流解析の特徴の一つといえる。

図-8には解析モデル中心付近（水平方向に約80mの区間）の地下水の流向分布の経時変化を示したものである。初期は感潮河川両端で下降流、中央で上昇流が生じていることがわかる。このような流速分布に起因して、感潮



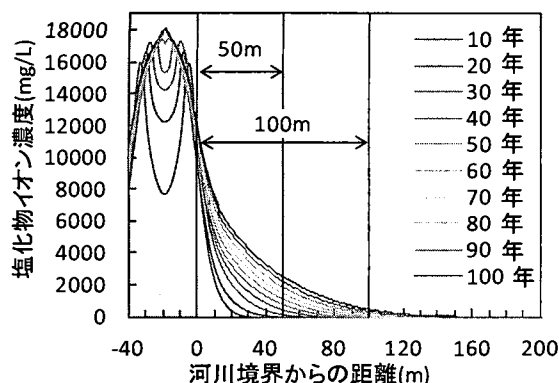


図-9 深度3mの塩化物イオン濃度分布の経時変化  
(Case1 : GL-0.0m, 地表面濃度フリー)

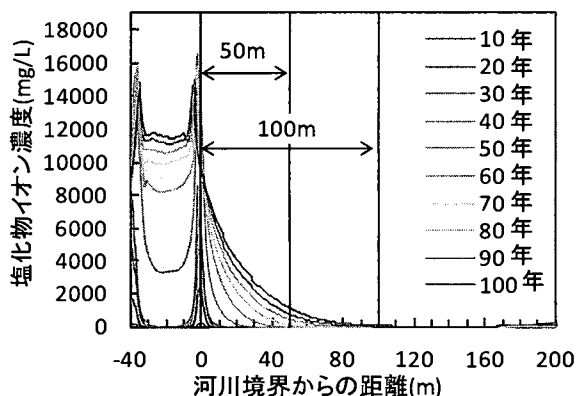


図-10 深度3mの塩化物イオン濃度分布の経時変化  
(Case2 : GL-5.0m, 地表面濃度フリー)

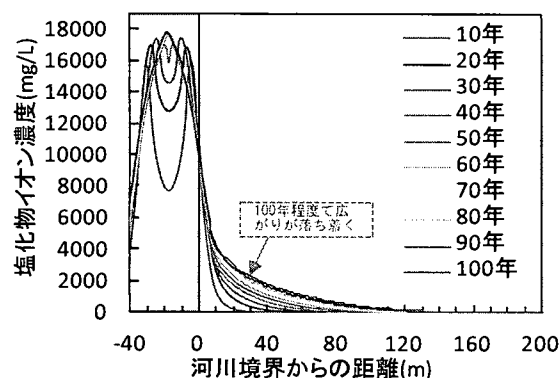


図-11 深度3mの塩化物イオン濃度分布の経時変化  
(Case3 : GL-0.0m, 雨水浸透なし)

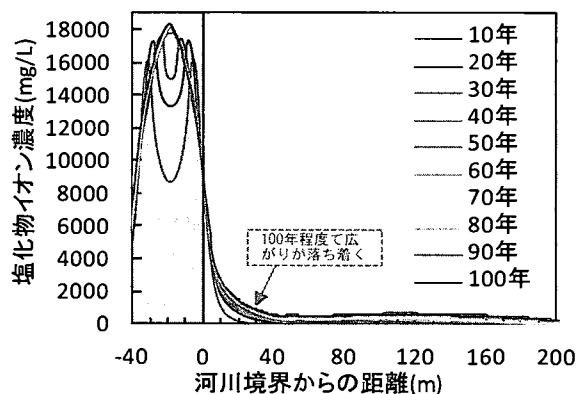


図-12 深度3mの塩化物イオン濃度分布の経時変化  
(Case4 : GL-0.0m, 雨水浸透あり)

河川両端での濃度の降下が生じたものと考えられる。さらに、時間の経過とともに、感潮河川中央に下降流が発生する地下水の流向分布に遷移するため、濃度分布は深度方向にくびれた濃度分布になったと考えられる。

このような濃度挙動はElderらが室内実験で測定して判明した「Elder問題」と呼ばれとる現象と一致する<sup>1)</sup>。

なお、他のケースにおいても同様な経時化であった。

## (2)トンネル位置における塩化物イオン濃度の分布

解析の結果から、浅深度では塩化物イオン濃度の移流・拡散の水平距離はほぼ一定であるが、第一不透水層との境界では広がり続けることがわかる。そのため、トンネルと第一不透水層の位置関係によっては、塩化物を含む漏水が発生する範囲は異なり、第一不透水層に近い場合には、経年とともにその範囲が広がるものと考えられる。

図-4の4路線の土被りは、銀座線が約1m、その他の路線が約3mであり、図-9～図-12には深度3mにおける、各ケースの河川境界からの距離と濃度分布の経時変化の関係を描いた。

Case1とCase2の水平方向の濃度分布を比較すると、感潮河川の範囲内(-40m～0の範囲)では傾向が異なるものの、感潮河川の範囲外(0m～200の範囲)ではほぼ同

様な傾向を示していることがわかる。つまり、この程度の地下水位の違いであれば、感潮河川の範囲外の濃度分布に及ぼす影響が小さいことがわかる。

また、Case1とCase3、Case4を比較すると、Case1は経年とともに塩化物イオン濃度が水平方向に広がり続けるのに対し、Case3、Case4では100年程度で変化しなくなることがわかる。Case3、Case4では、塩水くさびの現象と同様に、地表面の降雨に関する境界条件により均衡状態になったと考えられ、地表面の境界条件が水平方向の濃度分布に与える影響が大きいためである。

図-13、図-14に、調査結果とCase3、Case4で均衡状態に達した解析結果との比較を示す。水平方向の塩化物イオン濃度に着目すると、深度3mでは概ね100年で50m～100m程度で落着く傾向にあることがわかる。深度1mでも同様の傾向を示しており、調査における要注意範囲の考察の妥当性を解析でも証明することができていることがわかる。

なお、地下密度流解析のほうが要注意範囲が広いのは、地表面に一樣な条件を設定していることが原因と考えられ、地表面や第一不透水層の深度、地下水流向・流速を精度よくシミュレートすることで、より調査結果に近い結果が得られるものとする。

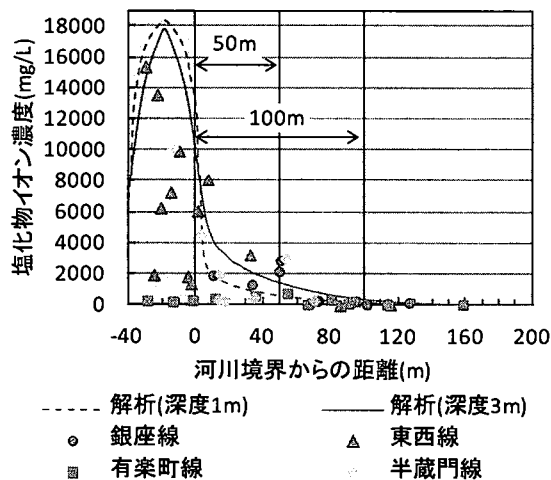


図-13 調査結果と解析結果の比較  
(Case3 : G.L.-0.0m, 雨水浸透なし)

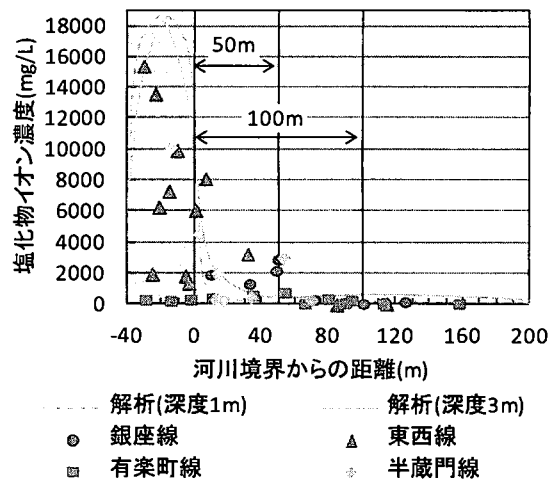


図-14 調査結果と解析結果の比較  
(Case4 : G.L.-0.0m, 雨水浸透あり)

## 5. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 調査結果から、開削トンネルの塩害に対する要注意範囲は、感潮河川の直下および、河川端から50m程度の範囲と考えられる。
- (2) 調査結果から、コンクリート中の塩分量は、漏水位置で高いものの、その周囲にはほとんど認められず、開削トンネルの塩害は局所的な劣化現象であると考えられる。
- (3) 感潮河川域の地下密度流解析を実施したところ、地下水位の影響は小さく、地表面の降雨に関する境界条件の影響が大きいことがわかった。
- (4) 地下密度流解析では、安全側に厳しく条件設定した場合にも外的塩害が生じる可能性のある要注意範囲は100年で50m～100m程度となり、調査における要注意範囲の考察は妥当と考えられた。
- (5) なお、地下密度流解析のほうた要注意範囲が広いのは、地表面に様な条件を設定してるためと考えられ、地表面や第一不透水層の深度、地下水流向・流速を精度よくシミュレートすることで、より調査結果に近い結果が得られるものと考ええる。

謝辞：本調査・検討にあたっては、東京工業大学の大即信明教授、東京大学の岸利治教授、石田哲也教授、東京地下鉄国際課の山本努氏、(株)国際建設技術研究所の葛目和宏社長、(株)CORE技術研究所の小椋紀彦氏をはじめ多くの関係者の方々に多大なるご指導、ご協力を賜りました。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 帝都高速度交通営団，工務部のあゆみ（土木編），pp.735-745, 2005.7
- 2) 牛田貴士，仲山貴司，津野究，焼田真司：鉄道開削トンネルの材料劣化に関する事例調査，土木学会第68回年次学術講演会，2013.
- 3) 山本努，武藤義彦，小椋紀彦，葛目和宏，大即信明：地下鉄トンネルにおける塩害発生条件の検討，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集，第11巻，pp.147～154, 2011.10
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007.
- 5) 河野伊一郎，西垣誠，田中慎一：飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象の有限要素法，土木学会論文報告集，vol.311, 1983.
- 6) 高山裕介，齋藤雅彦：臨海部の塩水侵入現象における地盤の不均一性の影響，土木学会第64回年次学術講演会，pp.303-304, 2009.
- 7) 落合敏郎：関東平野における地下水の年代測定とその水文地質学的研究，日本地下水学会会誌，Vol.14, pp.11-23.1968.
- 8) 東京管区気象台ホームページ：jma-net.go.jp
- 9) 小橋秀俊，三木博史，平山光信，菱谷智幸，山本博之，大北康治：地盤汚染の影響予測に用いる分散長の決定方法について，土木学会論文集No.764, 2004.
- 10) 井尻裕二，小野誠，茨木希，久保真神：混合有限要素法を用いた塩水密度流解析コードの開発，土木学会第58回年次学術講演会，pp.401-402, 2003.
- 11) Elder, J. W.: Transient convection in a porous medium, J. Fluid. Mech., Vol. 27(3), pp.609-623, 1967.