牛田 貴士1・仲山 貴司2・齋藤 理沙3・寺田 賢二郎4

<sup>1</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: ushida.takashi.33@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 車両構造技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: saito.risa.51@rtri.or.jp

<sup>4</sup>正会員 東北大学 災害科学国際研究所 (〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1) E-mail: tei@irides.tohoku.ac.jp

感潮河川付近の地下構造物において、塩化物イオンに起因する鉄筋腐食が報告されている.この塩化物 イオンは、感潮河川直下だけでなく、その周囲にも分布する塩分を含む地下水に由来することが調査結果 から示唆されている.しかし、その影響範囲の推定法に関する研究はほとんど行われていない.そこで本 研究では、まず地下密度流解析のパラメトリックスタディにより、地盤の透水係数がその範囲に影響が大 きいことを把握した.次に、均質化法に基づくミクロスケール解析を用いて地盤の非均質性がマクロ透水 係数に及ぼす影響を把握した.最後に、それを用いた地下密度流解析により、地盤の非均質性を考慮する ことで感潮河川の影響範囲が狭く推定されることを示した.

Key Words: Underground concrete structure, Chloride ion, Tidal river, Microscale analysis

# 1. はじめに

地下鉄道の建設は 1920 年代頃から始まり現在では全 国で 800km 以上が供用されており,その多くが 1970 年 代にはすでに供用されている.鉄道地下構造物では,近 接施工等の特殊な場合を除いて,外力によるものはほと んどみられない.地上構造物と同様に,多くは材料的な 要因による変状事例である<sup>例えば1)</sup>.また,沿岸部や埋立 地等の海岸線付近に設置されたもののほか,潮の干満の 影響を受ける感潮河川付近において,海岸からある程度 離れた位置でも外的塩害が報告されている(図-1).

ここで、地下構造物における外的塩害は、塩分を含む 地下水が漏水することで(図-2)発生するという調査結 果が報告されている<sup>1)</sup>.また、塩分を含む漏水は感潮河 川直下だけでなく、その周囲 50m 程度が影響を受けると いう調査結果が報告されている<sup>2)</sup>.それに対して、著者 らは地下密度流解析を用いて影響範囲が 50~100 m とい う結果を示し、調査結果およびその考察の妥当性を示し た<sup>3)</sup>.この予測解析は安全側の条件で実施しており、そ 感潮河川 (潮の干満の影響を受ける河川)



図-1 塩化物イオンの影響模式図



図-2 開削トンネルにおける漏水状況の例

のひとつは一様地盤を仮定したことである.実地盤は一 般に様々なスケールの非一様性を有する.しかし,それ らを直接的に解析モデルに反映することは作業性,計算 規模の両面から現実的でない.

そこで本研究では、まず、地下密度流解析のパラメト リックスタディを実施して、透水係数が塩水分布範囲に 及ぼす影響が大きいことを把握した.次に、均質化法に 基づくミクロスケール解析を用いてマクロな透水係数を 算出し、地盤の非均質性が塩水分布に及ぼす影響を検討 した.

# 2. 地下密度流解析のパラメトリックスタディ

#### (1) 地下密度流解析の概要

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>4</sup>.

本研究では、岡山大学西垣教授らが公開している Dtransu-2D・EL<sup>5)</sup>を用いて解析を実施した。

#### (2) 解析ケース

解析条件を図-3に示す.解析対象は河川横断方向の二 次元断面であり,鉛直方向1.0m×水平方向1.0mの4節点 要素でモデル化した.節点数は9471,要素数は9000で ある.領域中央に幅40mの感潮河川を想定した塩化物イ オンの供給範囲(濃度固定境界1.0mg/L)を設定した. モデル下端は第一不透水層を想定して非排水条件を設定 し,その深度は東京都心部を想定した<sup>9</sup>.

解析ケースを**表-1** に示す. Casel を基準として,透水 係数と分散長に関するパラメトリックスタディを行った. Casel の透水係数は砂質土 (1.0×10<sup>4</sup> m/sec) とシルト

(1.0×10<sup>7</sup> m/sec) が 50%ずつの地盤を想定しての体積平 均で算出した.また,分散長は観測規模に依存すること が知られており<sup>7</sup>,縦分散長にはBeimsの観測規模100m

(調査結果<sup>2)</sup>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<sup>7)</sup>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.

それ以外の条件は, 拡散係数 1.0×10<sup>9</sup> m<sup>2</sup>/sec, 比貯留係数 1.0×10<sup>4</sup>/m, 吸着係数 1.0, 減衰係数 0.0, 有効間隙率 0.2 とした.

### (3) 解析結果

解析で得られた地下水中の塩化物イオン濃度分布コン ターを図-4に示す. Casel は解析領域全体を, Case2~9は



<b>表-1</b> 解析ケース(パラメトリックスタディ)					
Case	水平方向	鉛直方向	縦分散長	橫/縦	
	透水係数	透水係数	[m]	分散長比	
	[m/year]	[m/year]		[m/m]	
1	159.3	159.3	3.0	0.33	
2	15.93	159.3	3.0	0.33	
3	1593	159.3	3.0	0.33	
4	159.3	<u>15.93</u>	3.0	0.33	
5	159.3	<u>1593</u>	3.0	0.33	
6	159.3	159.3	<u>0.3</u>	0.33	
7	159.3	159.3	10.0	0.33	
8	159.3	159.3	3.0	<u>0.10</u>	
9	159.3	159.3	3.0	1.00	
※下線部はCasel(基準ケース)との違い					





<sup>※</sup>水平方向の縮尺を1/2にして図化 ※Case2~9は半断面を図化

半断面を図化した.水平方向透水係数が大きいほど河川 横断方向に影響範囲が大きくなる傾向,鉛直方向透水係 数が大きいほど浅い位置まで影響範囲が広がる傾向が認 められた.また,縦分散長と横/縦分散長比はコンター 図で視認できるほどの明確な差異は認められなかった.

図-4 地下水中の塩化物イオン濃度分布コンター





図-6 地下水中の塩化物イオン濃度分布(深度 200 m)

解析で得られた深度 3.0 m, 深度 20.0 m における塩化 物イオン濃度分布コンターを図-5, 図-6 に示す. パラメ ータの違いによる塩化物イオン濃度分布の影響は不透水 層に近い方が大きい傾向が確認された.

また,分散長と比較して透水係数の方が塩化物イオン 濃度に及ぼす影響が大きかった.透水係数は地盤の非均 質性や調査頻度によって,今回のパラメトリックスタデ ィ条件のように±1桁変わる可能性が考えられる.

しかし,解析領域全体の詳細な非均質性の把握,さら に直接的にそれを有限要素モデル化しての解析は,調査 や試験,数値解析の両面から実務上は困難である.そこ





で、3章では均質化法に基づいたミクロスケール解析を 適用して、地盤の非均質性が地盤中の塩化物イオン濃度 分布に及ぼす影響を検討する.

### 3. 非均質地盤のミクロスケール解析

#### (1) 均質化法に基づくミクロスケール解析の概要

ほとんどすべての物体は着目スケールを小さくすると 非均質な微視構造を有していることが認識されている. しかし、たとえば、地盤の土粒子や空隙等のミクロな分 布の影響を省略してマクロな透水係数を設定するように、 初めから非均質性を考慮せず、陰に均質体とみなすこと が、しばしば行われる.

それに対して陽に非均質性を反映させる方法で、最も 単純な方法はミクロ構造における各層の透水係数等の物 性と体積分率から算出する方法である.この方法は簡便 であるが、ミクロな流路の長さや異方性を考慮できない という課題がある.

ここで、均質化法に基づくミクロスケール解析(図-7) におけるミクロ構造とは、マクロ物性を算出するための 十分な情報を含む微小体積要素のことである.均質化法 では、ミクロ構造が周期的に並んだ構造がマクロ構造で あるとして扱う.

また、ミクロスケールは必ずしも mm, µm のような 絶対的な微小スケールを指す用語ではなく、全体構造に 対する相対的なスケールで考えられるものである.本研 究では数 100~1000 m 程度のマクロスケールに対して、 ボーリングデータ等から目視で確認できる 1 m 程度のス ケールの非均質性を想定してミクロスケール解析を実施 した.

### (2) 解析ケース

本研究では、砂質土等の透水性が高い部分(以下、透







水層)とシルト等の透水性が低い部分(以下,難透水層) の分布が異なるミクロ構造(図-8,表-2)に対してマク ロ透水係数を算出した.なお、定式化については、著者 らの既報<sup>8</sup>を参照されたい.

有限要素モデルを図-9 に示す. Casel は透水層と難透 水層が成層な地盤を想定した. Case2 は透水層に不透水 層が介在している地盤を想定した. 透水係数は透水層が 1.0×10<sup>5</sup> m/sec (3.154×10<sup>2</sup> m/year),難透水層が 1.0×10<sup>7</sup> m/sec (3.154 m/year)とした. 水平方向・鉛直方向のマクロ単位 水頭勾配を与えて定常解析を実施し,各方向のマクロ透 水係数を算出した.

### (3) 解析結果

ミクロ解析で得られた水頭コンター図を図-10 に示す. 対辺同位置の節点間の水頭差が単位勾配に一致しており,



表-3 マクロ透水係数

Case	水平方向(m/year)	鉛直方向(m/year)
1	159.3	6.2
2	129.2	57.7
体積平均	159.3	159.3

均質化法に基づくミクロスケール解析の特徴的な結果が 得られた.また、どちらのケースも透水層で水頭勾配が 大きく、難透水層で小さい結果が得られた.

ミクロ解析で得られたマクロ透水係数を表-3に示す. また、同表には体積平均で算出したマクロ透水係数も示 す. Casel は水平方向に流路のねじれがないため、体積 分率による算出と同じ結果が得られた.また、鉛直方向 は透水層が不連続であるため、難透水層に近いマクロ透 水係数が得られた. Case2 は水平方向、鉛直方向ともに 透水係数が連続しているが、流路のねじれが大きい鉛直 方向の透水係数が小さい結果が得られた.

ミクロスケール解析を用いることで、地盤の非均質性 に起因するマクロ透水係数を評価する手法を例示した. 次章では、算出したマクロ透水係数を用いた地下密度流 解析により、感潮河川の影響範囲を検討する.

# 4. マクロスケール地下密度流解析

# (1) 解析ケース

前章のミクロスケール解析で得られたマクロ透水係数 を用いて,感潮河川横断方向の二次元地下密度流解析を 実施した.

解析条件は2章のCaselを基本としており,表-4に示 す値を変更し,透水係数は3章のミクロスケール解析結 果(表-3)を用いた.また,比貯留係数は,砂質土層を



 $1.0 \times 10^4$ /m, シルト層を  $1.0 \times 10^2$ /m と仮定して<sup>9</sup>, 中間 の値とした.

### (2) 解析結果

経年100年時点の地盤中の塩化物イオン濃度分布を図 -11に示す. Casel では河川両端からの2つの下降流に発 生に伴う塩化物イオン濃度分布となっている. これは淡 水と塩水の密度差に起因する地下密度流の挙動としては 初期段階の形態であり,鉛直方向の透水係数が小さいこ とが要因と考えられる. Case2, Case3 では両端からの2 つの下降流が,河川中央に寄って1つの下降流となる段 階に移行している.

各ケースの深度 5.0m, 20.0mにおける塩化物イオン濃 度分布の経年変化を図-12 に示す.各ケース,深度に共 通して,経年に伴って,濃度分布の変化が鈍化する傾向 が認められた.また,深度 5.0mの方が鈍化傾向が強く, 第一不透水層との位置関係と鈍化傾向が関連することが 示唆された.以下では,経年 100 年時点の分布に着目し て,感潮河川の影響範囲として評価することとした.

Casel, 2における経年 100 年時点の感潮河川の影響範 囲について,体積平均のCase3 との比率を図-13に示す. なお,本解析は単位濃度を与えた解析であるため,海水 の塩分濃度を 19000 mg/L,塩害に注意が必要な漏水中の 塩化物イオン濃度を 200 mg/L として,200/19000 mg/Lを 閾値として影響範囲を判定した.Casel は深度毎に Case3 に対する比率が異なる結果が得られた.これは,Casel では 2本の下降流,Case3 では 1本の下降流となってお り,塩水の分布形状が異なることが原因と考えらえれる. 一方,Case2 は深度に寄らず比率は 0.8 でほぼ安定してた



る. これは, Case2 と Case3 は1本の下降流で同じ分布形 状であるためと考えられる.

著者らの既往研究 3では、調査結果による感潮河川の





影響範囲が河川端から 50m であったのに対して,地下密 度流解析結果は 50~100 m と安全側の結果が得られてい た.本研究の結果から,地盤の非均質性を考慮して地下 密度流解析を行うことで,より実態に近い影響範囲を推 定できる可能性が示唆された.

### 5. まとめ

本研究では、地盤の非均質性が感潮河川の影響範囲に 及ぼす影響について、均質化法に基づくミクロスケール 解析を適用して数値解析的検討を実施した.得られた知 見を以下に示す.

- ・地下密度流解析のパラメータのうち,地盤の透水係数 が感潮河川の影響範囲に及ぼす影響が大きいことを把 握した.
- ・感潮河川の影響範囲は経年とともに拡大するが徐々に 鈍化する傾向を把握した.また、その傾向は第一不透 水層から離れているほど強い傾向を把握した.
- ・ミクロスケール解析により算出されるマクロ透水係数 は体積平均で算出するよりも小さく、地盤の非均質性 が、感潮河川の影響範囲の推定精度の向上につながる ことが示唆された.また、体積平均のマクロ透水係数 を用いることで安全側に評価できることが示唆された.

本研究は地盤の非均質性に着目した検討を実施した. 都市部では周囲に地下構造物が近接する状況も多くある ため、その影響は今後の検討課題としたい.

#### 参考文献

- 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,Vol.11, pp.147-154, 2011.
- 武藤義彦,小西真治,諸橋由治,仲山貴司,牛田貴 士:地下鉄箱型トンネルの塩害範囲に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.70, No.3, pp.I\_75-I\_82, 2015.
- 3) 武藤義彦,牛田貴士,仲山貴司,小西真治: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,地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.20, pp.233-238, 2015.
- 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解析,土 木学会論文報告集,Vol.311,pp.133-141,1983.
- 5) 西垣誠,菱谷智幸,橋本学,河野伊一郎:飽和・不 飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流 の数値解析手法に関する研究,土木学会論文集, No.511/III-30, pp.135-144, 1995.
- 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.
- 7) 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/III-67, pp.53-67, 2004.
- R. Saito, Y. Yamanaka, S. Matsubara, T. Okabe, S. Moriguchi, K. Terada: A decoupling scheme for two-scale finite thermoviscoelasticity with thermal and cure-induced deformations, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.122, No.4, pp.1133-1166, 2021.
- 9) 田中幸夫,城戸由能,中北英一:京都盆地水系を対 象とした地下水流動および水質解析,京都大学防災 研究所年報, No.52B, pp.607-624, 2009.

# EFFECT OF GROUND HETEROGENEITY FOR INFLUENCE RANGE OF TIDAL RIVERS BY USING HOMOGENIZATION METHOD

# Takashi USHIDA, Takashi NAKAYAMA, Risa SAITO and Kenjiro TERADA

Underground structures around the tidal river are deteriorated by chloride ions. The ions included in ground water enter the inside of the underground structures. The field survey shows that the groundwater contains not only the under river but also on the around area. However, the few studies discuss the method for estimating the influence range. Therefore, in this study, the range is considered by the underground density flow simulation. First, parametric study clarify that the ground hydraulic conductivity has a large offect on the influence range. Next, It's clarified that the heterogeneousness of the ground has a large offect on the influence range through the simulation with the the ground hydraulic conductivity calcurated by using homogenization method.