

## 7.3 環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究③

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ（土質・振動）

研究担当者：佐々木 哲也、加藤 俊二、稲垣 由紀子

### 【要旨】

自然由来重金属等含有岩石・土壌や人為汚染土壌等の対策が必要とされる可能性のある土も含め、建設発生土のさらなる有効利用が求められている。このような建設発生土の有効利用に当たっては、地盤汚染の周辺への影響を考慮したリスク評価技術やモニタリング技術の確立と現場への導入が必要である。そこで、25年度は、適切なリスク評価手法やモニタリング手法を検討する一環として、土槽実験を行い、物質が地下水に流入した際に、地下水流速や物質の流入量が地盤内での物質移行特性に与える影響について検討した。その結果、物質が地下水中に流入した場合、地下水流により流入点付近で希釈され周辺に達する濃度が低くなるが、物質移行特性は物質の流入量による影響を大きく受けるため、有害物質の地下水への流入を抑制することが地盤汚染の拡散防止に重要となることを確認した。

キーワード：リスク評価、物質移行、土槽実験

### 1. はじめに

国土交通省の「建設リサイクル計画2008」<sup>1)</sup>において、建設発生土の有効利用率を平成17年度の80.1%から平成27年度には90%まで向上させる目標を掲げているなど、今後さらなる建設発生土の有効利用が求められる。

また、建設工事において自然由来重金属等含有岩石・土壌や人為汚染土壌、廃棄物混じり土(以下、「要対策土」)に遭遇する事例が顕在化する中、平成22年4月には土壌汚染対策法が改正され、自然由来・人為由来を問わず要対策土への厳格な対応が求められるようになり、工事区域内においては、対策が必要とされる可能性のある土も含めて建設発生土の有効利用に対するニーズが高まっている。

建設発生土の有効利用の促進に当たっては、地盤汚染に対するリスク評価技術の現場への導入により要対策土量を減らすことが求められている。そのためには、土壌汚染対策法への対応に加え、適切なハザード及びリスク評価技術や対策技術を確立する必要がある。現状では、基準値を超えて有害物質が含まれる土壌や岩石の存在する場所（発生源）における有害物質の含有量や溶出量によってリスク評価をする従来の考え方に対して、地盤汚染の周辺（保全対象や敷地境界等）への影響によりリスク評価を行う考え方は提示されている<sup>2)</sup>が、現場適用実績が不足しており、リスク評価のための解析条件の設定方法や、リスク評価に適用可能なモニタリング技術が確

立されていないといった課題がある。

例えば、盛土に封じ込めた汚染土から有害物質が溶出した滲出水が地下水に流入した場合、地下水で希釈されて濃度が低下する可能性もあるが、現状では、濃度の低下の程度が把握されておらず、リスク評価においてはその影響が考慮されていない。

そこで、平成25年度は、物質が地下水に流入し続けた場合に地下水流速や物質の流入量が物質移行特性に与える影響について、土槽実験により検討した。

### 2. 物質が地下水に溶出した後の物質移行特性について

#### 2.1 実験概要

図-1に示す模型地盤をコンクリートピット内に作製した。両端に給水タンクおよび排水タンクを設け、その間の1.90m×7.4m×2.25mの空間を地盤部分とした。各タンクは大きさが1.90m×0.3m×2.25mで、地盤に接する面に直径約1cmの穴を10cm四方当たり5～6箇所の割合で開け、不織布を貼り付けた。サイフォンの原理を用い、各タンク内は設定した水位を保つようにした。

図-1に示す地盤は、関東ロームを締め固めた難透水層の上に表-1に示す物理特性を有する山砂を1層15cmずつ締め固め度 $D_c=85\%$ を目標に締め固めて作製した。また、所定の位置に採水ポイントおよび注入ポイントを設置した。採水ポイントおよび注入ポイントは、外径6mm×内径4mmのビニールホースの先端にフィルターとして不

織布を巻きつけた部分が図-1の○の位置に来よう設置し、その外側数cmを礫で囲み、周辺を締め固めた。

山砂の盛り立ておよび締め固めの終了後、給水タンクに注水し、水頭差を利用して排水タンクに向かって浸水させ、地盤内を飽和させた。給水タンクの水位が地表面から10cm下、排水タンクの水位が地表面から20cm下に達してから地盤の見かけの透水係数を調べ、その値の収束を確認することにより、地盤が飽和したとみなした。見かけの透水係数 $k$ は、地盤全体で一様と仮定して、流路長 $L$ (=注入タンクと排水タンク間の距離=7.4m)、注入タンクと排水タンクの水位差 $h$ 、平均動水勾配 $i(=h/L)$ 、

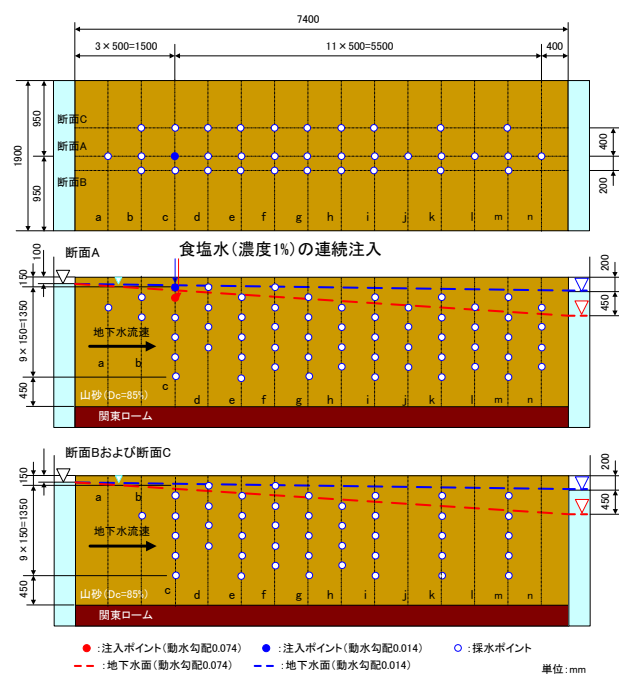


図-1 模型地盤作製状況

表-1 山砂の物理特性

土粒子密度	2.695g/cm <sup>3</sup>
最大粒径	9.5mm
60%粒径	0.214mm
50%粒径	0.179mm
30%粒径	0.125mm
10%粒径	0.00724mm
細粒分含有率	16.6%

表-2 実験ケース

	動水勾配	食塩水注入の流量 (mL/min)
ケース1	0.074	2.0
ケース2	0.074	0.2
ケース3	0.014	0.4
ケース4	0.014	0.04

排水タンクからの時間当たり排水量 $Q$ 、流路面積 $A$ (=注入タンクと排水タンクの水位の平均×流路幅(=1.90m))を用いて、 $k=Q/Ai$ より算出した。各地盤の見かけの透水係数 $k$ は、概ね $5 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であった。

地盤が飽和したとみなせることを確認後、採水ポイントから採水した。採水は、各採水ポイントから地表面に出ているビニールホースの先端に容量60mLのシリンジを取り付けて地盤中の間隙水を吸引する方法で行った。採水ポイントのホース内に滞留している水を吸引・除去してから、50mL程度採水した水を検体とし、検体中の塩化物イオン( $\text{Cl}^-$ )濃度を調べた。この時点の $\text{Cl}^-$ 濃度をバックグラウンド値とした。

バックグラウンド値の確認後、所定の地下水の動水勾配になるよう、注入タンクと排水タンクの水位差を設定して地盤への通水を続けながら、各地盤に1箇所設けた注入ポイントより、汚染物質を模擬した濃度1%の食塩水をポンプにより一定流量で観測期間終了時まで連続注入した。

この一連の実験は、地下水の動水勾配と食塩水注入の流量を変えて実施した。表-2に実験ケースの概要を示す。

ケース1およびケース2は急な動水勾配、ケース3およびケース4は緩やかな動水勾配を模擬したケースである。食塩水を連続注入した注入ポイントは、図-1に示す断面Aと断面cの交線上で地下水面付近とした。動水勾配によって地下水面の位置が異なるため、注入ポイントの位置は、ケース1およびケース2では地表面から深さ30cm、ケース3およびケース4では深さ15cmの点とした。

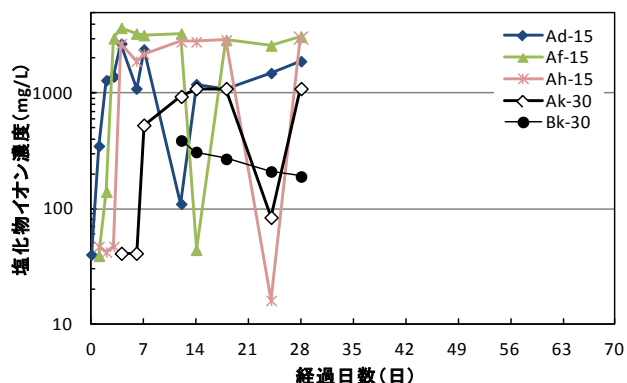
ケース1およびケース3では、地下水流量(排水タンクへの単位時間当たり排水量)と食塩水注入の流量の比を概ね合わせており、1:0.003程度とした。ケース2およびケース4では、食塩水注入の流量をそれぞれケース1およびケース3の1/10とした。

観測期間は、ケース1およびケース2で28日間、ケース3およびケース4で69日間とした。観測期間中、採水ポイントから採水した検体について $\text{Cl}^-$ 濃度の確認とバックグラウンド値との比較を行い、食塩水の到達状況を把握した。

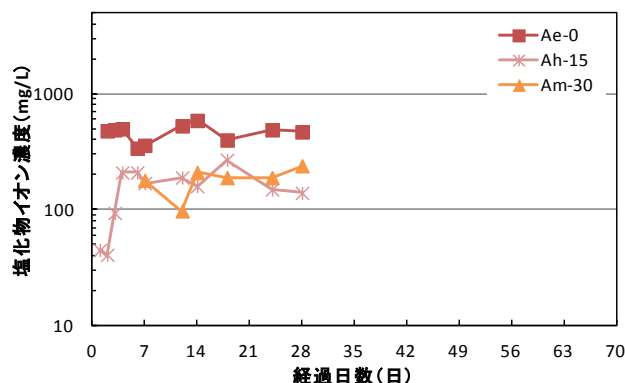
## 2.2 実験結果

### 2.2.1 各採水ポイントにおける $\text{Cl}^-$ 濃度の推移

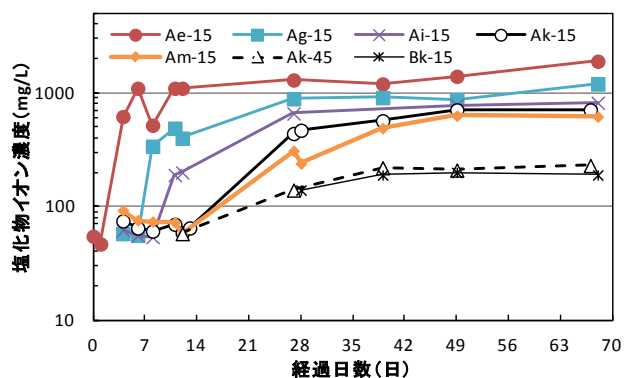
各ケースの地盤において、 $\text{Cl}^-$ 濃度のバックグラウンド値を調べた各採水ポイントにおける $\text{Cl}^-$ 濃度は、30~80mg/Lの範囲にあった。このため、観測期間中に採水が



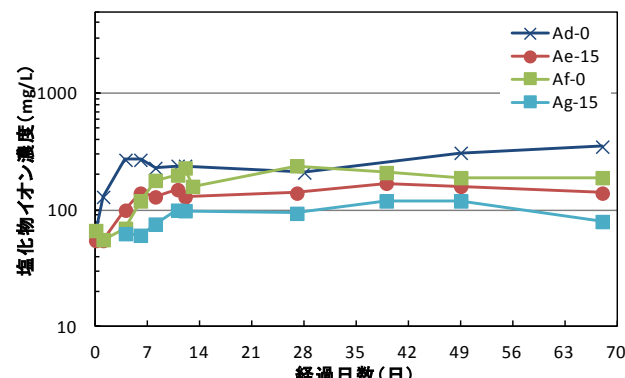
(a) ケース 1 (動水勾配 0.074、食塩水注入量 2.0mL/min)



(b) ケース 2 (動水勾配 0.074、食塩水注入量 0.2mL/min)



(c) ケース 3 (動水勾配 0.014、食塩水注入量 0.4mL/min)



(d) ケース 4 (動水勾配 0.014、食塩水注入量 0.04mL/min)

図-2 塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) 濃度の推移の例

イントから採水された検体の Cl<sup>-</sup>濃度が 80mg/L を超えた時に、注入した食塩水が到達したと判断することとした。

各ケースとも、食塩水が到達したと判断された採水ポイントは限られ、こうした採水ポイントは、多くが図-1 に示す断面 A の地下水面に比較的近い位置のものであった。また、注入した濃度 1% の食塩水中の Cl<sup>-</sup>濃度は 6068mg/L であるが、食塩水が到達した採水ポイントで観測された Cl<sup>-</sup>濃度は、全ケース、観測期間を通じて 3700mg/L 以下となった。食塩水が採水ポイントに達するまでの間に、地下水により希釈されたものと考えられる。

観測期間中に Cl<sup>-</sup>濃度が 80mg/L を超えた各採水ポイントにおける Cl<sup>-</sup>濃度の推移を、ケース毎に図-2 に示す。ケース 1 (図-2(a)) およびケース 3 (図-2(c)) については、観測期間中に Cl<sup>-</sup>濃度が 80mg/L を超えた採水ポイントのうち、食塩水の注入ポイントからの深さ 15cm にある採水ポイントと注入ポイントから 4m 下流に当たる断面 k 上にある採水ポイントにおける観測値を例示した。

ケース 2 (図-2(b)) およびケース 4 (図-2(d)) については、80mg/L を超える Cl<sup>-</sup>濃度が観測された全ての採水ポイントについて Cl<sup>-</sup>濃度の推移を示した。図-2 の凡例「アルファベット大文字・小文字-数字」は各採水ポイントの位置を示した。例えば、ケース 3 の「Ad-15」であれば、図-1 に示す断面 A と断面 d の交線上で、食塩水の注入ポイントがある深さ (地表面からの深さ 15cm) から 15cm 深い位置 (地表面からの深さ 30cm) に当たる。

ケース 1 (図-2(a)) では食塩水の注入開始後 7 日間以内に、断面 A 上で注入ポイントからの深さ 15cm の位置にある各採水ポイントで、80mg/L を超える Cl<sup>-</sup>濃度が確認された。Cl<sup>-</sup>濃度が 80mg/L を超えるまでに要した日数は、Ad-15、Af-15、Ah-15 でそれぞれ 1 日、2 日、4 日となり、注入ポイントに近い位置から順次食塩水の到達した状況が確認できた。なお、Ad-15 では 12 日目、Af-15 では 14 日目、Ah-15 では 24 日目に、一時的に Cl<sup>-</sup>濃度の低下が見られた。原因は不明だが、一時的に地下水への食塩水の供給が止まったあるいは食塩水の流入量が

減り、Cl<sup>-</sup>濃度の低い水が到達してきたことが考えられた。この影響を除けば、食塩水の到達後はCl<sup>-</sup>濃度が大きな変化がない状態で推移した。断面k上の採水ポイントAk-30とBk-30を比較すると、観測されたCl<sup>-</sup>濃度の最大値がそれぞれ1100mg/L、390mg/Lであり、食塩水の注入ポイントがある断面Aから平行に20cm離れた断面B上でCl<sup>-</sup>濃度が1/3程度となっており、食塩水が地下水流速方向中心から側方に薄まりながら到達していることが確認できた。

ケース2(図-2(b))では、観測期間中にCl<sup>-</sup>濃度が80mg/Lを超えるのが確認された採水ポイントは図-2(b)に示した3つの採水ポイントのみで、いずれも断面A上のものであった。その中で、断面A上にあるAe-0、Ah-15、Am-30では、Cl<sup>-</sup>濃度はバックグラウンド値から上昇後、200~600mg/L程度で推移した。ケース1でCl<sup>-</sup>濃度の上昇が見られた採水ポイントにおいてCl<sup>-</sup>濃度が1000mg/L以上の濃度で推移したのに比べると、数分の1の低い濃度であった。

ケース3(図-2(c))では、断面A上の採水ポイントでCl<sup>-</sup>濃度が80mg/Lを超えるまでに要した日数は、Ae-15、Ag-15、Ai-15、Ak-15、Am-15でそれぞれ4日、8日、11日、27日、27日となり、ケース1同様、注入ポイントに近い位置から順次食塩水が到達した。Cl<sup>-</sup>濃度は、各採水ポイントとも、食塩水注入開始から28日以降は大きな変化がない状態で推移し、500~1900mg/Lの範囲にあった。ケース1に比べると、食塩水の注入ポイントより15cm深い位置にある各採水ポイントで観測されたCl<sup>-</sup>濃度は低かった。また、注入ポイントに近い位置の方が高濃度になる状況がケース1に比べて明確に見られた。断面k上の採水ポイントAk-15とBk-15の比較では、観測されたCl<sup>-</sup>濃度の最大値がそれぞれ710mg/L、200mg/Lであり、食塩水の注入ポイントがある断面Aから平行に20cm離れた断面B上でCl<sup>-</sup>濃度が1/3以下となった。ケース1と同様、食塩水が地下水流速方向中心から側方に薄まりながら到達していることが確認できた。

ケース4(図-2(d))では、観測期間中にCl<sup>-</sup>濃度が80mg/Lを超えるのが確認された採水ポイントは図-2(d)に示した4つの採水ポイントのみで、いずれも断面A上のものであった。Cl<sup>-</sup>濃度が80mg/Lを超えるまでに要した日数は、Ad-0、Ae-15、Af-15、Ag-15でそれぞれ1日、4日、6日、11日となり、注入ポイントに近い位置から順次食塩水が到達した。いずれの採水ポイントでも、Cl<sup>-</sup>濃度は食塩水注入開始から12日以降は大きな変化がない状態で推移した。濃度は27日を除いて、高い順にAd-0、

Af-0、Ae-15、Ag-15となり、80~350mg/Lの範囲内にあった。ケース3で80mg/Lを超えるCl<sup>-</sup>濃度が見られた採水ポイントに比べると、低い濃度であった。

以上より、地下水中に物質が流入すると、周辺に到達する濃度が下がることが確認された。物質の到達範囲は、地下水流速や物質の流入量の影響を受け、流入量が多い場合に到達範囲が拡大した。濃度についても、物質の流入量が多いと、流入量に概ね比例して高濃度で到達した。

## 2.2.2 地盤内のCl<sup>-</sup>濃度分布

各採水ポイントにおけるCl<sup>-</sup>濃度の実測値をもとに、各地盤の断面AにおけるCl<sup>-</sup>濃度の分布図を描いた結果を図-3および図-4に示す。図-3は食塩水注入開始から約4週経過した際の各地盤内のCl<sup>-</sup>濃度の分布を示している。また、図-4では、食塩水注入開始から12日(約2週)、27日(約4週)、68日(約10週)経過した時点のケース3およびケース4の地盤内のCl<sup>-</sup>濃度の分布を示している。各分布図中の○(白丸)は、Cl<sup>-</sup>濃度の分布図を描くに当たり採水ポイントから採水した検体の実測値を用いた採水ポイントの箇所を示している。実測値は、前後1日の間に採水した検体のものがある場合にはそれも用いている。例えば、ケース3の12日経過時のCl<sup>-</sup>濃度の分布を描く際、同じ採水ポイントから12日経過時に採水してもCl<sup>-</sup>濃度に有意な差がなかったと仮定し、11日経過時および13日経過時に採水した検体の実測値も用いた。それ以外の採水ポイントの箇所については観測期間中終始バックグラウンド値付近の値であったとして50mg/Lと仮定し、分布図を描いた。また、注入ポイントにおけるCl<sup>-</sup>濃度は濃度1%の食塩水中に含まれるCl<sup>-</sup>濃度に当たる6068mg/Lと仮定した。

### (1) 地下水の動水勾配による違い

約4週間経過時においてケース1(図-3(a))およびケース3(図-3(c))、ケース2(図-3(b))およびケース4(図-3(d))でそれぞれ比較すると、動水勾配が小さく地下水流速の遅いケース3やケース4の方が、各採水ポイントで観測されるCl<sup>-</sup>濃度は低くなったが、地盤下流端以外の地下水面でCl<sup>-</sup>濃度が80mg/Lを超える範囲が広くなり、深さ方向への拡散が進む結果となった。

### (2) 物質流入量による違い

約4週間経過時で食塩水注入の流量が異なるケース1(図-3(a))およびケース2(図-3(b))、ケース3(図-3(c))およびケース4(図-3(d))をそれぞれ比較すると、食塩水注入の流量が10倍になる前者の方が、後者に比べて、Cl<sup>-</sup>濃度が80mg/Lを超える範囲が広くなり、かつ、観測

### 7.3 環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究③

● : 注入ポイント ○ : 採水ポイントから採水した実測値を用いた位置

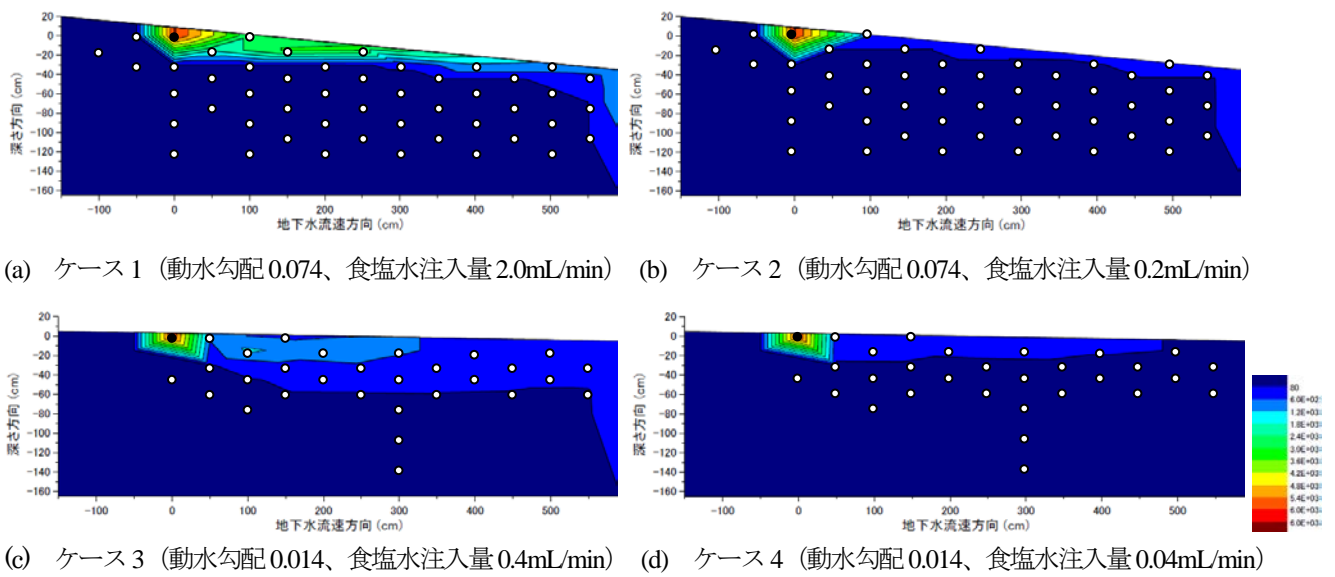


図-3 約4週経過時におけるCl<sup>-</sup>濃度分布

● : 注入ポイント ○ : 採水ポイントから採水した実測値を用いた位置

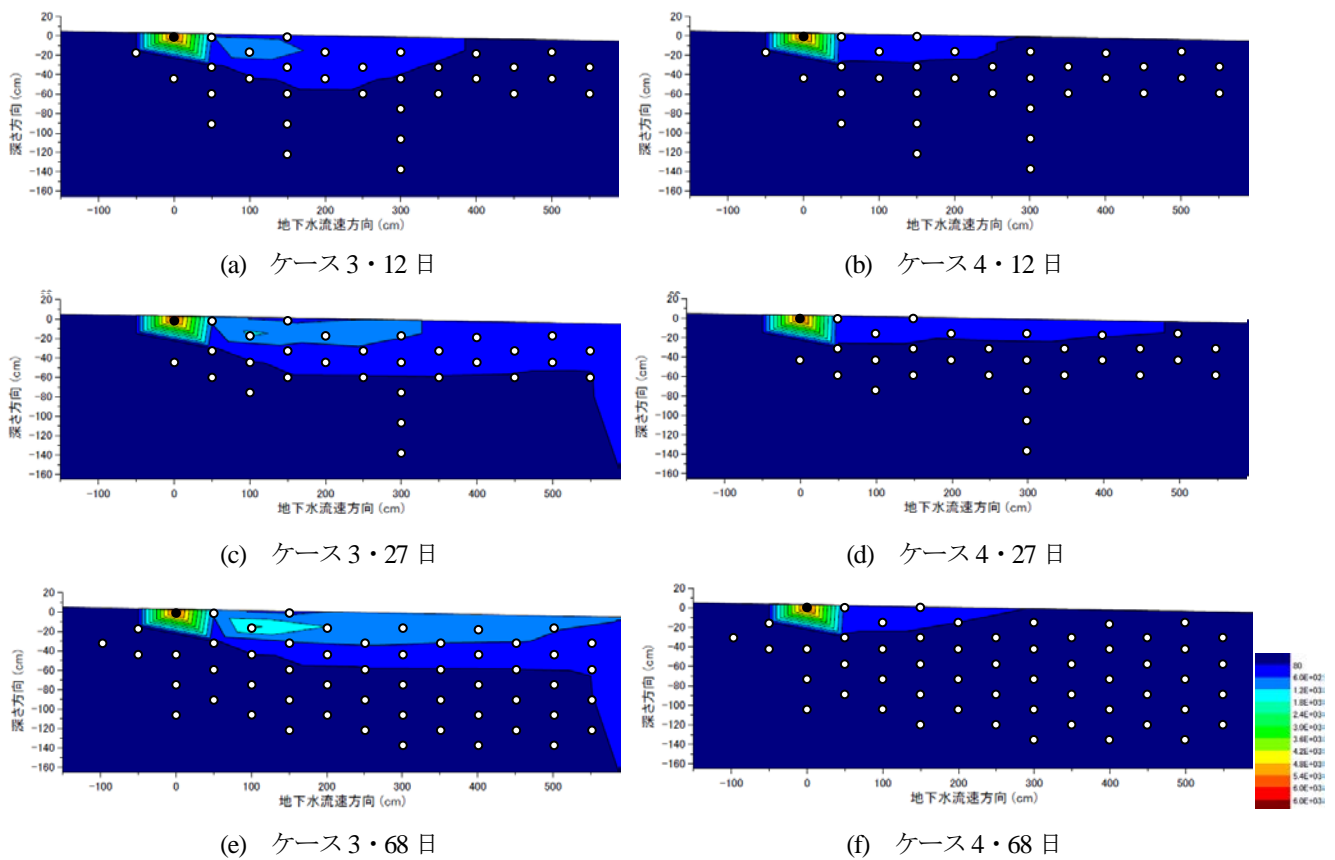


図-4 Cl<sup>-</sup>濃度分布の変化 (動水勾配 0.014 の例)

された  $\text{Cl}^-$  濃度も高い結果となった。

### (3) 物質流入の継続時間による違い

図-4 では、ケース3 とケース4 を例に、食塩水注入開始からの経過日数が 12 日、27 日、68 日での地盤中の断面 A における  $\text{Cl}^-$  濃度の分布を比較した。ケース3 では、12 日 (図-4(a))、27 日 (図-4(c))、68 日 (図-4(e)) と日数の経過に伴い、食塩水が到達して、 $\text{Cl}^-$  濃度が高い領域が拡大していく状況が見られた。一方、食塩水注入の流量がケース3 の 1/10 となるケース4 では、12 日 (図-4(b))、27 日 (図-4(d))、68 日 (図-4(f)) を比較しても、 $\text{Cl}^-$  濃度が 80mg/L を超える範囲は大きく変わらず、食塩水の注入ポイント付近で  $\text{Cl}^-$  濃度の高い領域が局所的に広がったのみで、注入ポイントから離れた位置では、 $\text{Cl}^-$  濃度が拡散によりバックグラウンド値程度まで下がった。

### 3. まとめ

本研究では、地盤汚染の周辺への影響を考慮したリスク評価や、それに向けたモニタリングの手法を検討することを目的としている。

今年度は、物質が地下水に流入し続けた場合に地下水流速や物質の流入量が物質移行特性に与える影響について、土槽実験により把握した。

実験の結果は、地盤汚染に関するリスク評価や対策、モニタリングに当たって以下のようなことを示唆するも

のとなった。

- ・有害物質が地下水中に溶出しても、地下水流によって溶出点付近で希釈され、周辺に達する濃度が低くなることわかった。

- ・有害物質が地下水中に溶出した場合の物質移行特性は、地下水の動水勾配や、溶出して地下水に流入する物質の量による影響を大きく受ける。

- ・以上より、リスク評価に当たっては有害物質の地下水への流入を抑制することが、地盤汚染の拡散防止に重要となる。

### 4. 今後の課題

地表面からの降雨の浸透等による汚染源への水の流入、汚染源からの流出が、有害物質の地盤中の移行特性に与える影響についても、今後確認を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 国土交通省：建設リサイクル推進計画 2008、平成 20 年 4 月
- 2) (独) 土木研究所編：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル (改訂版)、鹿島出版会、平成 24 年 4 月

## ENVIRONMENTAL CONSERVATION (3)

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Geology and Geotechnical Engineering

Research Group

(Soil Mechanics and Dynamics)

**Author** : SASAKI Tetsuya

KATO Shunji

INAGAKI Yukiko

**Abstract** : It is demanded that construction generated soil including soil suspected of necessity of countermeasuring on geoenvironment pollution is used more effectively. For the effective use of thus construction generated soil, it is expected that the methods of risk analysis and monitoring considered the influence of soil and ground water contamination are applied to sites. So that, leaching test were carried out for study on the methods of risk analysis and monitoring. As a result, when the substance flowed into the groundwater, the substance moved under the influence of velocity of groundwater current and the amount of the substance flowed into. It was investigated that is important controlling the amount of harmful substance flowing into groundwater for the prevention of diffusion of contamination.

**Key words** : Risk analysis, Transport of substances, Reacing test