

7.7 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、石原 雅規、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要対策土も含め、建設発生土のさらなる有効利用が求められている。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それに還元可能なモニタリング技術の確立、現場への導入が期待される。ただし、これらの手法については、解析条件の設定方法が不明確であるなど、確立されていない。そこで、今年度の本研究では、解析条件の設定方法を検討する一環として、土槽実験を行い、物質周辺の透水性や地盤内水位変動の有無の条件が、地盤内での物質移行特性に与える影響について把握した。

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」¹⁾において、建設発生土の有効利用率を平成 20 年度の 79%から平成 24 年度には 87%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、要対策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²⁾が、現場適用実績が不足しており、解析条件の設定方法について詳細が不明確であることや、リスク評価に還元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。

そこで、解析条件やモニタリング手法の検討のため、土槽実験を行い、地盤中での物質の移行特性を調べた。

2. 土槽実験による物質移行特性の把握

2.1 実験概要

2.1.1 模型地盤

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 箇所割合で開け、不織布を貼り付けた。各タンクはサイフォンの原理を用い、タンク内が設定した水位を保つようにし

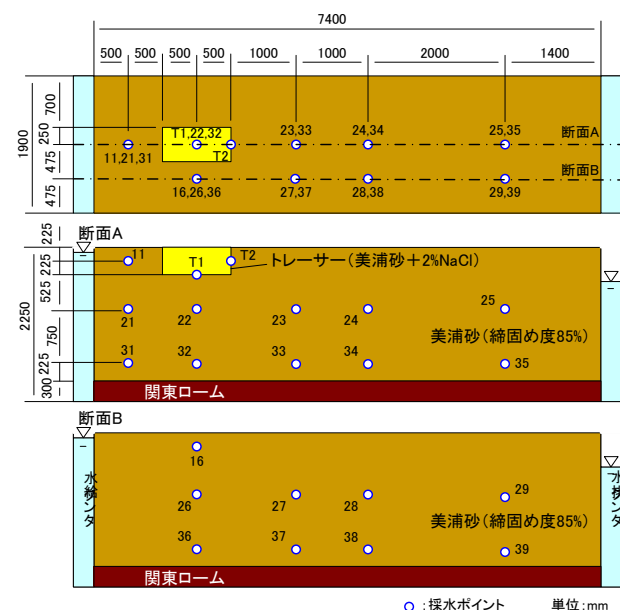


図-1 模型地盤作製状況

た。

地盤部分は、コンクリートピット底部から30cmは関東ロームを締め固めた難透水層とした。その上に表-1に示す物理特性を有する美浦砂を1層15cmずつで盛り立て、締め固め度 $D_c=85\%$ を目標に締め固めた。また、所定の位置に採水ポイントを設置した。採水ポイントには、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ものを設置し、周辺の数cmを礫で囲み、周辺も締め固めた。

美浦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2.15m、排水タンクの水位が2.05m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 ($=h/L$)、排水タンクからの時間あたり排水量 Q 、流路面積 A (=注入タンクと排水タンク水位の平均×流路幅(=1.90m)) を用いて、 $k=Q/Ai$ より算出した。

地盤が飽和したとみなせることを確認後、地盤への通水が続けながら、各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盤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程度採取した水を検体とし、検体中の塩化物イオン (Cl^-) 濃度を調べた。この時点の 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確認のための採水終了後、地盤内の水位を1m程度に下げ、トレーサー一部を作製した。トレーサー一部は、トレーサー(溶出させる物質)を含む部分で、幅0.5m×長さ1.0m×高さ0.45mとした。物質の土への吸着が無視できる場合の移行特性を把握するためトレーサー物質は食塩とし、トレーサー一部とする部分の地盤をくり抜き、そこに食塩を混ぜ合わせた美浦砂を投

表-1 美浦砂の物理特性

土粒子密度	2.689g/cm ³
最大粒径	2.00mm
60%粒径	0.1364mm
50%粒径	0.116mm
30%粒径	0.089mm
10%粒径	0.076mm
細粒分含有率	10%

入し、締め固めた。食塩は、美浦砂の乾燥質量に対して2%に相当する量を添加した。

トレーサー一部の作製後、観測を終了するまで、再度給水タンクに注水続け、排水タンク内の水位が給水タンク内の水位より0.55m低くなるようにし、水頭差を0.55mに保った。観測期間中、所定のタイミングで各採水ポイントから、 Cl^- 濃度のバックグラウンド値を確認した際と同様の方法で採水して検体中の Cl^- 濃度を分析し、その経時変化を見ることにより、各採水ポイントにおけるトレーサーの到達状況を調べた。

2.1.2 実験条件

トレーサーの土への吸着が無視できる場合に、トレーサー一部の透水性の違いと、地下水位変動の有無がトレーサーの移行特性に与える影響に着目し、表-2に示すような4ケースの実験を行った。

トレーサー一部の透水性による影響については、トレーサー一部の締め固め度 D_c を90%にしたケースと95%にしたケースを行い、結果を比較した。 $D_c=90\%$ のトレーサー一部は1層15cmずつの3層、 $D_c=95\%$ のトレーサー一部は1層9cmずつの5層で締め固めて作製した。なお、変水位透水試験により、 $D_c=85\%$ (トレーサー周辺部の締め固め度に相当)、90%、95%とした美浦砂の透水係数を調べた結果、表-3に示すとおりとなった。

いずれのケースでも、観測期間中の給水タンクと排水タンクの水頭差0.55mを保つようにしたが、給水タンク内の水位を終始2.15m、排水タンク内の水位を1.60mとし、地盤内水位を一定とした条件(ケース1およびケース2)、給水タンク内と排水タンク内の水位を0.30mずつ上下させることを繰り返した条件(ケース3およびケース4)で観測を実施した。

ケース3およびケース4では、給水タンク内の水位2.15m、排水タンク内の水位1.60mの状態と給水タンク内の水位1.85m、排水タンク内の水位1.30mの状態が交

表-2 実験ケース

	トレーサー一部締め固め度 D_c (%)	地盤内水位
ケース1	90%	一定
ケース2	95%	一定
ケース3	90%	変動あり
ケース4	95%	変動あり

表-3 各締め固め度における変水位透水試験結果(美浦砂)

締め固め度 D_c (%)	透水係数 (m/s)
85	4.10×10^{-5}
90	1.99×10^{-5}
95	8.08×10^{-6}

互になるようにして、地盤内水位を上下させた。観測の初日は地盤内の水位を高い方の水位とし、3日後に水位を0.30m下げた。この状態を3日間続けた後、水位を0.30m上げた状態を2日間続けた。その後は2日毎に1回水位を変動させ、水位の上昇と下降を交互に行った。給水タンクと排水タンク内の水位から、水位を下げた状態では、地盤内水位面はトレーサー部には接しないことになる。

まず、2.1.1に示す方法で模型地盤を2つ作製し、ケース1およびケース2を実施した。ケース1およびケース2の終了後、トレーサー部とその周囲50cmまでをくり抜き、美浦砂を投入して締固め度85%で締固めた後、模型地盤内の塩分を洗い流した。洗い流しの際には、給水タンク内の水位を2.15m、排水タンク内の水位を2.05mとして、5日間地盤内に水を流し続けた。その後、地盤内の水位を下げてトレーサー部を作製し、再び地盤内の水位を上げてケース3およびケース4を実施した。ケース1を実施した地盤ではケース3、ケース2を実施した地盤ではケース4を実施した。

2.2 実験結果

以下、各ケース・各採水ポイントにおけるCl⁻濃度の推移から、トレーサーの移行状況について考察する。各採水ポイントは、“ケース番号-図-1に示す採水ポイントの位置番号”で示すこととする。(例えば、2-24は、ケース2で、採水ポイントの位置が図-1に示す24番の位置であることを示す。)

2.1.1でCl⁻濃度のバックグラウンド値を調べたのは、ケース1およびケース2のトレーサー部を作製する前の段階であり、各採水ポイントとも、バックグラウンド値は35~45mg/Lの範囲内であった。

2.2.1 地盤内水位が一定の場合

観測期間中の地盤内水位を一定としたケース1およびケース2の各採水ポイントのうち、Cl⁻濃度の変化が顕著に見られたのは、ケース1では1-T1、1-T2、1-24、1-25、ケース2では2-T1、2-T2、2-25のみであった。いずれも、トレーサー部あるいは土槽の幅方向の中心位置であった。幅方向の中心から0.5m側方の採水ポイント(ケース1の1-16、1-26~29、1-36~39およびケース2の2-16、2-26~29、2-36~39)におけるCl⁻濃度は、観測期間中終始バックグラウンド値付近にとどまっていた。動水勾配が0.074と大きく、トレーサーが移流卓越的に移行したことが推察される。また、1-24、1-25、2-25と水平位置が同じで地盤内深さの異なる採水ポイントである1-14、1-34、1-15、1-35、2-15、2-35でのCl⁻濃度もバックグラウンド

値付近にとどまっており、トレーサーが移流卓越的に移行するのと同時に、食塩が水より重いため下へ向かう動きも伴った結果、深さ0.975mにある採水ポイント1-24、1-25、2-25のみでCl⁻濃度の顕著な変化が見られたものと考えられる。そこで、Cl⁻濃度の顕著な変化が見られた採水ポイントにおけるCl⁻濃度の推移を図-2に示す。

Cl⁻濃度は、トレーサー部底面中心に設置した採水ポイントにおいては、1-T1でバックグラウンド値付近~33000mg/L、2-T1で60~27000mg/Lの範囲で推移した。トレーサー部前面中心に設置した採水ポイントにおいては、1-T2で28000~110000mg/L、2-T2で50000~130000mg/Lの範囲で推移した。ケース1、ケース2ともに、トレーサー部底面中心よりもトレーサー部前面中心の方が、高濃度で推移した。

Dc=90%や95%の場合に、トレーサー部に用いた美浦砂の土粒子密度や乾燥密度から算出されるトレーサー部の間隙体積が水で満たされ、そこに食塩が全て溶解していると仮定した場合、食塩濃度は80000mg/L程度となる。さらに、食塩(NaCl)を構成するNaとClの原子量(Na=22.99、Cl=35.45)からトレーサー内のCl⁻濃度に換算

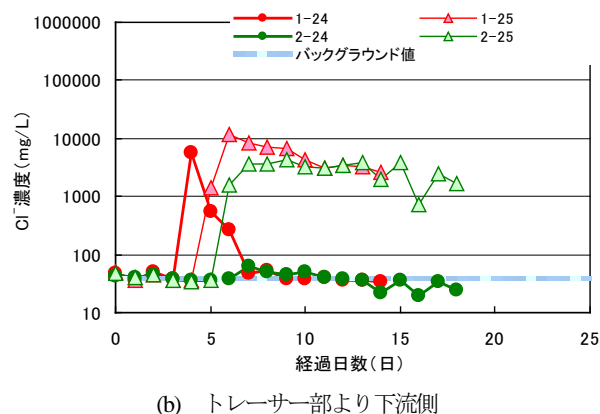
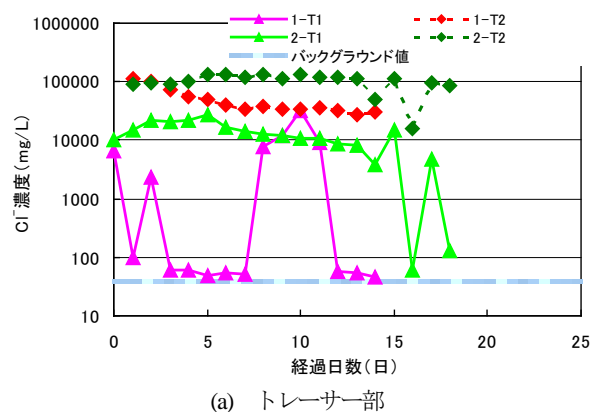


図-2 地盤内水位が一定の場合のCl⁻濃度の推移

すると、50000mg/L程度の濃度と推定される。

このように推定されるトレーサー部の間隙水中の Cl^- 濃度とトレーサー部の採水ポイントから検出された Cl^- 濃度を比較すると、ケース1、ケース2ともに、食塩は大部分がトレーサー部の間隙水に溶け、地盤内の水の流れにより、トレーサー部前面に向かって流れていたことが考えられる。

トレーサー部より下流側に設置した採水ポイントにおける Cl^- 濃度は、1-24でバックグラウンド値付近～5700mg/L、1-25でバックグラウンド値付近～12000mg/L、2-25でバックグラウンド値付近～4200mg/Lの範囲で推移した。ケース1、ケース2ともにトレーサー部前面中心に比べて1/10以下の低い濃度ではあるが、 Cl^- が検出され、トレーサーの到達が確認された。一方、トレーサー部の外側にある他の採水ポイントにおける Cl^- 濃度は観測期間中終始バックグラウンド値付近にとどまっていたことから、トレーサー部から溶出した食塩は、土槽幅方向中心から0.475m以上離れた所を伝って、地盤中の水の流れに乗りながら1-24や2-25に到達した状況が推察される。

次に、ケース1とケース2の結果の比較により、トレーサー部の透水性がトレーサーの移行状況に与える影響について考察する。なお、表-3にも示したように、 $D_c=90\%$ 、 95% のトレーサー部のみの透水係数は、トレーサー部周辺の $D_c=85\%$ の部分に対して、それぞれ、約1/2、1/5になると推定される。また、2.1.1で地盤の飽和を確認するために透水係数を調べた時と同じ方法で、地盤全体としての透水係数の推移も調べたところ、ケース1、ケース2ともに $5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 程度と、表-3に示す $D_c=85\%$ での透水係数に近い値で推移し、観測期間中ほぼ一定であった(図-3)。トレーサー部の体積は、模型地盤で美浦砂からなる範囲全体の約0.7%であり、トレーサー部の締固め度を上げることによる地盤全体の透水性への影響は見られなかった。

トレーサー部底面中心、トレーサー部前面中心ともに、

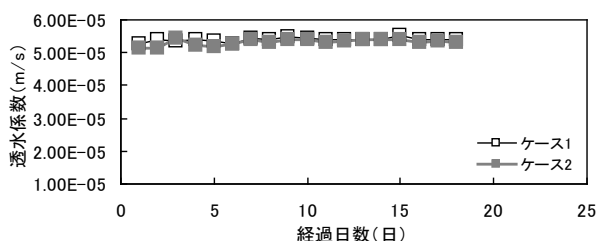


図-3 地盤の透水係数の推移 (ケース1およびケース2)

Cl^- 濃度の最高値は、ケース1およびケース2の間で大きな違いは見られなかった。しかし、 Cl^- 濃度の推移に着目すると、ケース1ではバックグラウンド値に近い Cl^- 濃度や、最高値の数分の1程度の濃度も検出されるなど、不安定であった。これに対し、ケース2では最も高い Cl^- 濃度が検出されてからも、それに近い濃度が安定的に検出された。

トレーサー部より下流側では、トレーサー部前面から2mの距離にある採水ポイントについて見ると、1-24では Cl^- 濃度が最高値の5700mg/Lに達した後に下がり、バックグラウンド値付近まで収束したのに対し、2-24では、観測期間中終始、バックグラウンド値付近で推移した。トレーサー部前面から4mの距離にある採水ポイントについては、1-25では、 Cl^- 濃度が最高値の12000mg/Lに達した後、次第に下がる傾向が見られ、観測期間の最終日の時点では2600mg/Lであった。2-25では Cl^- 濃度の最高値は4200mg/Lと1-25に比べて低かったが、 Cl^- 濃度は最高値に達した後も710～3900mg/Lの間で推移した。

これらの結果より、ケース1ではトレーサーがトレーサー部の外側へ出やすく、ケース2よりも広い範囲で到達し、到達が見られた地点での Cl^- 濃度の最高値は高かった一方、 Cl^- 濃度が最高値に達してから短時間で濃度が下がったといえる。ケース2でもトレーサーの溶出はあったが、ケース1に比べるとトレーサー部に留まる濃度が高い状態が続き、トレーサーの到達が見られた範囲がより限定的であった。トレーサーの到達が見られた地点では、 Cl^- 濃度の最高値自体はケース1よりも低かったが、 Cl^- 濃度が最高値となってからも、濃度の下がり方は少なく、最高値に近い値の状態が続いたといえる。

トレーサー部の締固め度を上げて透水性を下げたことにより、トレーサーをトレーサー部の外へ出にくくする効果、トレーサーが到達する範囲を小さくする効果があった一方、トレーサー部から離れた地点でもトレーサーの到達が見られ、 Cl^- 濃度も下がりやすくなった。

2.2.2 地盤内水位の変動がある場合

地盤内水位の変動がある場合を模擬したケース3およびケース4の各採水ポイントのうち、観測期間中に Cl^- 濃度の変化が顕著に見られたのは、ケース3では3-T1、3-T2、3-23、3-24、3-25、ケース4では4-T1、4-T2、4-24、4-25のみであった。ケース1およびケース2と同様の位置で Cl^- 濃度の変化が顕著に見られた。これらの採水ポイントにおける Cl^- 濃度の推移を図-4に示す。

まず、トレーサー部の透水性がトレーサーの移行状況に与える影響に着目し、ケース3とケース4の結果を比

較する。なお、ケース3およびケース4を実施した際の地盤全体としての透水係数は $4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 程度と、表-3に示す $D_c=85\%$ での透水係数に近い値で推移した(図-5)。

トレーサー部底面中心における Cl^- 濃度の最高値は、ケース3で2400mg/L、ケース4で8000mg/Lと、ケース4ではケース3の3倍以上となった。 Cl^- 濃度の推移も、ケース3では最高値に達した後バックグラウンド値付近まで収束する傾向であったのに対し、ケース4では1000mg/Lオーダーの濃度の状態が続いた。トレーサー部前面中心における Cl^- 濃度の最高値は、ケース3、ケース

4ともに120000mg/Lであったが、ケース3では10000mg/L未満まで Cl^- 濃度が下がったのに対し、ケース4では最高値に近い Cl^- 濃度が引き続き検出された。

トレーサー部より下流側に設置した採水ポイントにおける Cl^- 濃度は最高値が、3-23で1900mg/L、3-24で4500mg/L、3-25で12000mg/L、4-24で3900mg/L、4-25で11000mg/Lとなった。トレーサー部前面から2.0mや4.0mの位置にある採水ポイントにおける Cl^- 濃度に関しては、ケース3とケース4で大きな違いが見られなかったが、ケース3ではトレーサー部前面から1.0mにおける採水ポイントでも Cl^- 濃度の変化が確認され、より広範囲でトレーサーの到達が見られる結果であった。

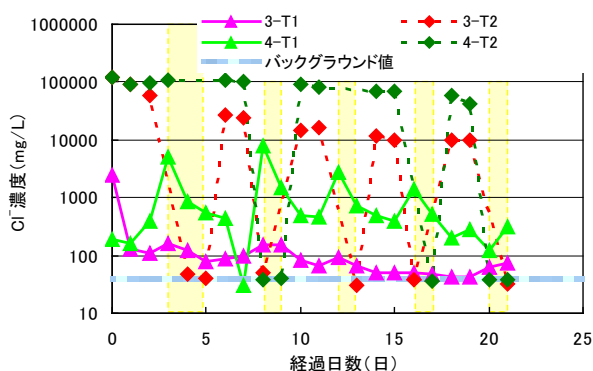
以上より、地盤内水位の変動がある場合でも、地盤内水位が一定の場合と同様、トレーサー部の締固め度が高く透水性が低い場合の方が、トレーサーをトレーサー部の外へ出しにくくする効果、トレーサーが到達する範囲を小さくする効果があったといえる。

次に、ケース3とケース1、ケース4とケース2の比較により、地盤内水位変動の有無がトレーサーの移行状況に与える影響について考察する。地盤内水位変動の有無による違いを比較しやすいよう、図-6にトレーサー部の締固め度別に Cl^- 濃度の推移を示す。

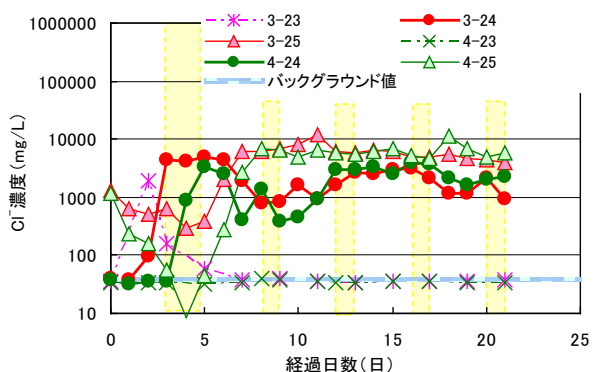
トレーサー部の採水ポイントについて、3-T1と1-T1、4-T1と2-T1、3-T2と1-T2、4-T2と2-T2の間でそれぞれ Cl^- 濃度の推移を比較すると、いずれもケース3またはケース4の方がケース1またはケース2よりも低い Cl^- 濃度で推移する傾向が見られた。トレーサー部底面中心の3-T1および4-T1では、地盤内水位が下がった時の方が Cl^- 濃度が高い傾向であった。一方、トレーサー部前面中心の3-T2および4-T2では、地盤内水位が下がると Cl^- 濃度もバックグラウンド値付近まで下がり、地盤内水位が再び上がると、 Cl^- 濃度も上がる結果であった。

地盤内水位を下げた状態の時、地盤内水面はトレーサー部底面より数cm程度下になり、トレーサー部にはかかからないため、この時に採水される検体は水の表面張力の作用により間隙中に保持された毛管水と考えられる。トレーサーである食塩は水より重いため、これが多く溶けた毛管水が下の方へ向かい、地盤内水面とは接触していないことから、トレーサー部底面付近に溜まった状況が考えられる。一方、トレーサー部前面中心には毛管水のうち、トレーサーがほとんど溶けていない部分が溜まったものと考えられる。

トレーサー部より下流側の採水ポイントについて、3-24と1-24、3-25と1-25、4-24と2-24、4-25と2-25を



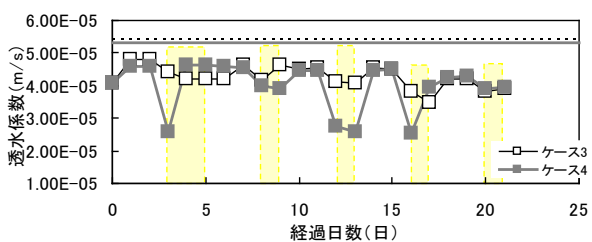
(a) トレーサー部



(b) トレーサー部より下流側

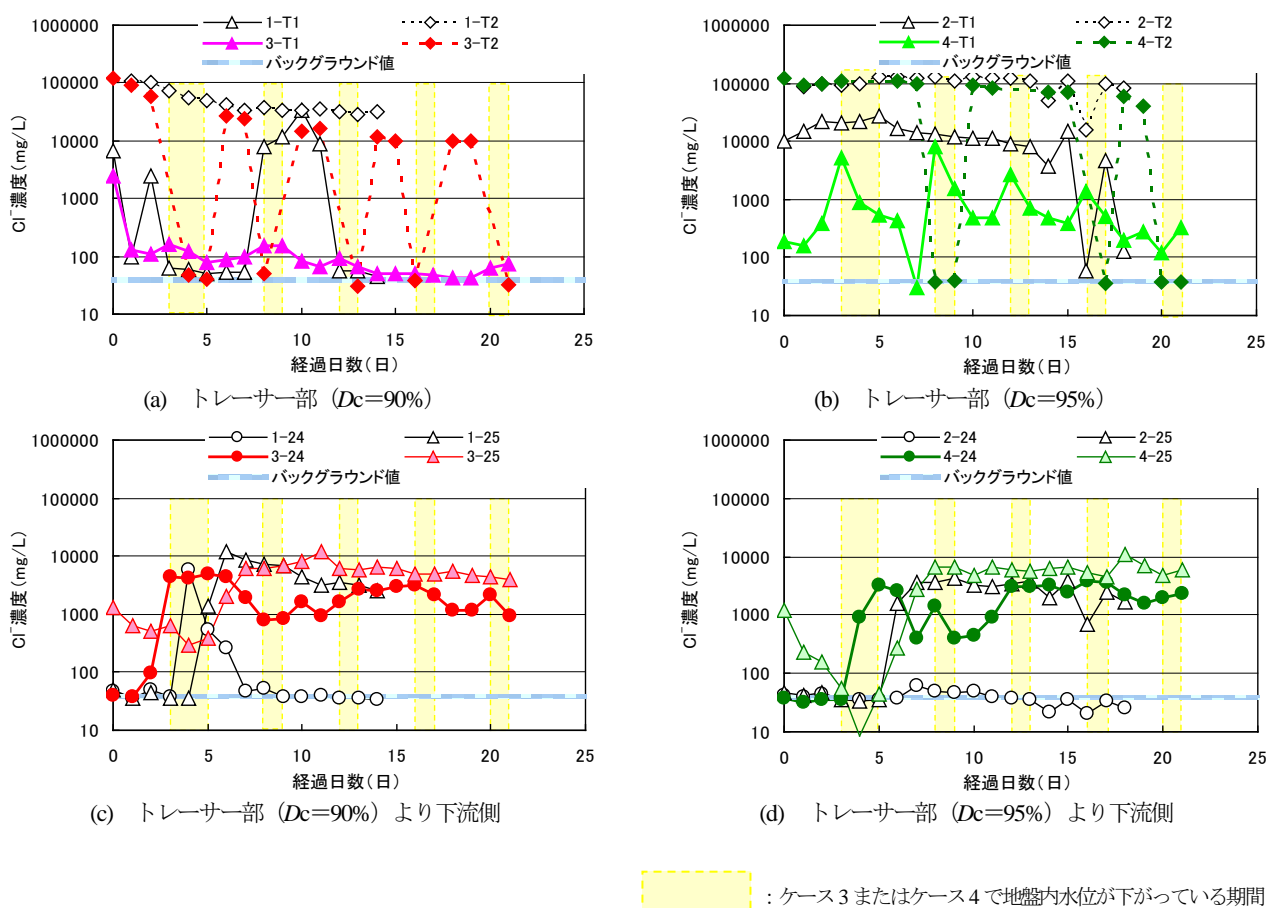
：地盤内水位が下がっている期間

図-4 地盤内水位の変動がある場合の Cl^- 濃度の推移



：地盤内水位が下がっている期間

図-5 地盤の透水係数の推移 (ケース3およびケース4)

図-6 地下水位変動の有無による Cl^- 濃度の推移の違い

それぞれ比較したところ、いずれもケース3またはケース4の方が、ケース1またはケース2に比べて Cl^- 濃度が高濃度で推移していた。3-24と1-24の比較では、1-24では Cl^- 濃度がバックグラウンド値付近に収束したのに対し、3-24では 1000mg/L のオーダーの Cl^- 濃度が継続的に検出された。しかし、ケース3およびケース4の各採水ポイントにおける Cl^- 濃度の推移には、地盤内水位に伴って見られる明確な傾向はなかった。これらの採水ポイントは地盤内水位が下がった状態でも、地盤内水面より下の位置にあるため、地盤内水位変動の影響が少なかったものと考えられる。

これらの結果より、地盤内水位の変動がある場合には、 Cl^- 濃度はトレーサー部とトレーサー部より下流側での差が小さくなっているといえる。地盤内水位の変動により、トレーサーが、トレーサー部の外に出て行きやすくなったと考えられる。地盤内水面がトレーサー部底面より下にある時に毛管水の中に高濃度で溶けていたトレーサーが、地盤内水位の上昇の際にトレーサー部の外へ押し流されることは、トレーサーが常時地盤内水面下に

あって溶出し続けることに比べて、トレーサーを短時間でトレーサー部の外へ出す効果が大きく、効果も持続的であったと考えられる。

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、リスク評価に還元可能なモニタリングの手法を検討することを目的としている。

本年度は、リスク評価における解析条件の設定手法の検討に向け、土槽実験を行い、地盤中での物質の移行特性を把握した。実験では、物質の土への吸着が無視できる条件を想定した。

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。

- ・地盤汚染の拡散防止のため、有害物質を含む部分の透水性を周辺地盤より低くすることは、有害物質の到達範囲を狭めるのには有効であるが、有害物質の到達する地点では、高濃度の状態が長く続く可能性がある。

7.7 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

・地下水位の変動により、有害物質を含む部分の浸水状況が一定でない場合には、地下水位が一定の場合と比べて長期にわたって有害物質が溶出しやすくなる可能性がある。

・このような条件では、モニタリングポイントを適切に選定のうえ、定期的・長期的なモニタリングの実施や、現地の条件に応じた適切な有害物質の許容値の設定などの対応が必要と考えられる。

4. 今後の課題

移流だけでなく拡散も想定される条件や、物質に土への吸着性がある条件での物質移行特性についても実験を

行い、詳細を把握したい。これらの実験結果と照合しながら、入力パラメータの設定方法等検討して、物質の移行特性を的確に再現できる解析手法を見出したい。

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) 山木、森、佐々木、稲垣、塚本：サイト概念モデルを用いた土壌・地下水汚染の管理・制御技術、土木技術資料、Vol.52、No.6、pp.6-9、平成 22 年 6 月

RESEARCH ON EFFECTIVE RECYCLING OF SURPLUS-SOIL WITH CONSIDERING TERRESTRIAL ENVIRONMENT

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

ISHIHARA Masanori

INAGAKI Yukiko

Abstract : It is demanded that construction generated soil is used more effectively. For the effective use of 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. But these methods are not established. For example, the methods to establish the conditions for the analysis are not distinct. As one of investigations into it, leaching tests were carried out. It was grasped how the permeability of the soil including the tracer and the change of the groundwater level have the influences on the transport of substances.

Key words : Risk analysis, Transport of substances, Model test