

1. まえがき

地盤中を広がる物質の挙動は、地盤の透水特性や拡散特性に依存する。このうち、拡散挙動は分散係数によって特徴付けられている。これは、物質の物理的あるいは化学的性質、土粒子や地盤の種類と拡散物質との相互作用、さらに、地盤の構造的異方性（堆積構造）や土要素の置かれた状態（自重による拘束圧等）の影響を受けるものと考えられる。しかしながら、従来の地盤中を拡散する物質の挙動を調べる要素試験では、土要素の拘束圧や地盤の構造的な異方性に着眼して実施された試験例は少ない。そこで、本文では、土要素が原地盤において受ける拘束圧の影響や、堆積過程による異方性を調べることができる要素試験装置を用いて物質の拡散特性への影響を把握する。さらに、得られた結果を数値予測解析に入力し、境界値問題における拘束圧や異方性の影響を調べる。

2. 要素試験

地盤中での物質の拡散特性を把握するには、通常カラム試験あるいは破過試験と呼ばれる試験が実施される。以下にここで実施した要素試験を記述する。

1) 要素試験装置

本文における破過試験は、土要素に対する分散特性への拘束圧や異方性の影響を調べる目的から、3軸セルを改良した試験装置を用いる。試験装置の概要を図1に示す。なお、本試験装置は文献1)の装置をさらに改良した設計となっている。この試験装置は供試体を3軸セル内に設置することの他に、定水位を維持し、閉じた形試験を実施するため、マリオット管を使用した。また、本試験装置は、真水と物質混入液とを別の経路で供試体に通水するために、通水経路を2つ有している。

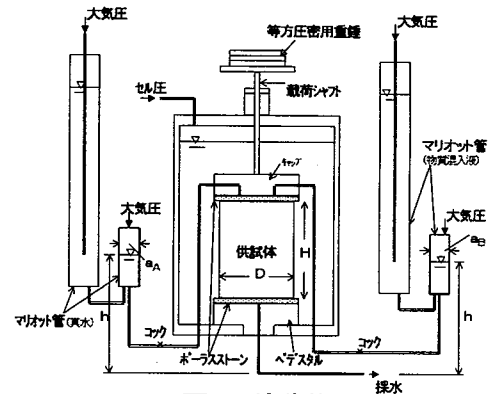


図1 試験装置

2) 土試料及び拡散物質

本試験では、標準砂と細粒分を多く含んだ粘性土（藤ノ森土）を混合して供試体を作成した。これは、土試料の細粒分含有率が拡散特性に及ぼす影響を調べるために、供試体の細粒分含有率を調整するためである。

また、供試体は、所定の細粒分含有率に調整した土試料を突き固めによって作成した。突き固め目標値は最大乾燥密度であり、規定の突き固めエネルギーを加えた後モールドから脱型し、試験装置に設置している。なお、ここでの拡散物質は簡単のため、食塩水（100ppm）を使用している。

3) 試験方法

供試体は、モールドから脱型した後、試験装置に設置している。その際、初期拘束圧を 20.0kN/m^2 とした。この状態で供試体が飽和するまで真水を通し、破過試験を開始した。試験は、拘束圧を段階的に上昇させ、所定の各拘束圧で実施している。各拘束圧においては透水試験も実施している。破過試験は、真水を通水して供試体内の流れが定常的になってから供給水を物質混入液に通水経路を変えることで試験の開始とした。以後、供試体から採水する物質混入液の濃度の時間変化を計測し、破過曲線を得ている。なお、供試体は、拘束圧が拡散特性に及ぼす影響を調べるものに対し $\phi 75 \times 50$ とした円柱形状を用い、異方性が拡散特性に及ぼす影響については一辺が 78mm の立方体形状とした。

Effect on Confining Pressure and Anisotropy for Transportation Behavior of Contamination in Ground

Fujita Corporation Takeshi Nakazawa and Shinji Fukushima

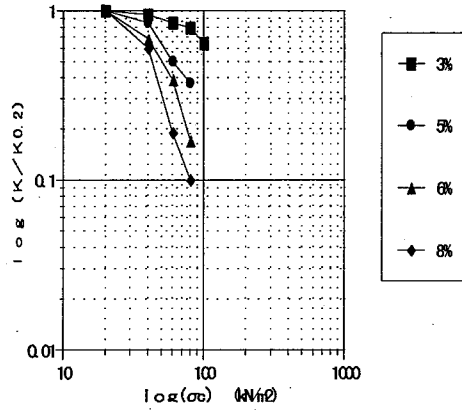


図2 正規化透水係数と拘束圧の関係

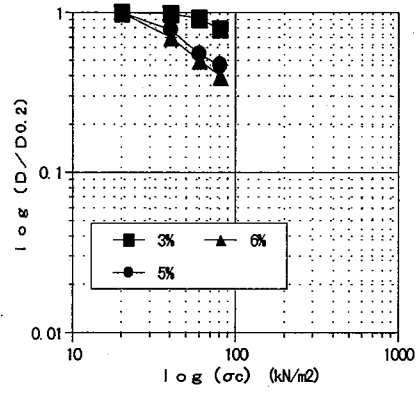


図3 正規化分散係数と拘束圧の関係

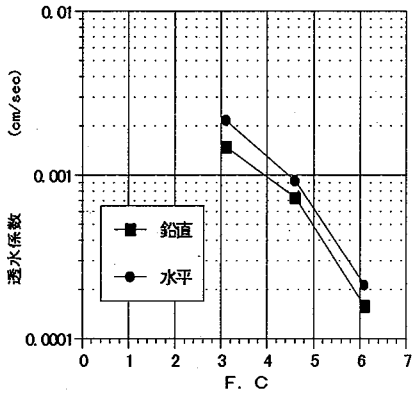


図4 細粒分含有率と透水係数の関係

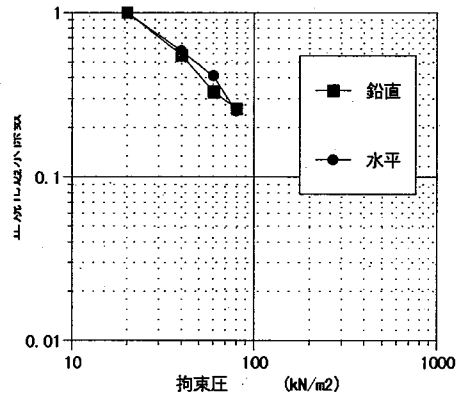


図5 正規化透水係数と拘束圧の関係
(細粒分含有率6%)

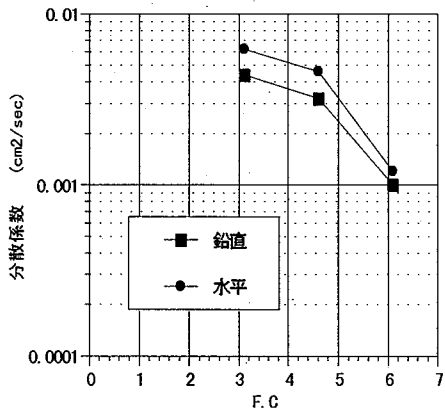


図6 細粒分含有率と分散特性の関係

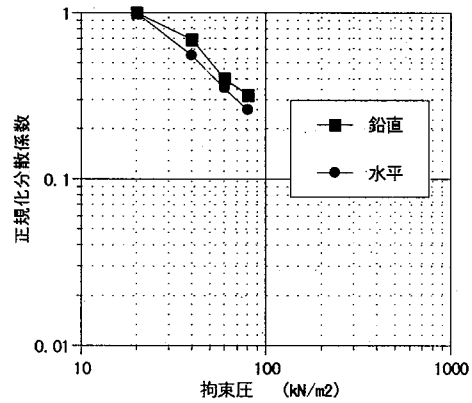


図7 正規化分散係数と拘束圧の関係
(細粒分含有率6.0%)

表-1 拘束圧の影響における試験結果

細粒分含有率 (%)	透水係数 (cm/sec)	分散係数 (cm²/sec)
3.0	2.1E-4	2.3E-3
5.0	1.2E-4	1.8E-3
6.0	1.9E-5	1.4E-4
8.0	1.2E-5	7.3E-5

表-2 異方性の影響における試験結果

細粒分含有率 (%)	鉛直透水係数 k_V (E-3cm/sec)	水平透水係数 k_H (E-3cm/sec)	k_H/k_V
3.1	1.490	2.150	1.44
4.6	0.729	0.920	1.26
6.1	0.159	0.213	1.34
細粒分含有率 (%)	鉛直分散係数 D_V (E-3cm/sec)	水平分散係数 D_H (E-3cm/sec)	D_H/D_V
3.1	4.37	6.21	1.42
4.6	3.27	4.58	1.40
6.1	0.911	1.23	1.35

4) 試験結果

①拘束圧の影響²⁾

この試験では、細粒分含有率を 3.0%、5.0%、6.0%、8.0%に各々調整し、拘束圧の影響を調べている。透水性に関する試験結果を示したものが図2である。この図では、透水係数を初期の拘束圧 20.0kN/m² における値で正規化して両対数グラフ上に表している。その初期の拘束圧での透水係数を表1に示す。この図から、拘束圧が透水性へ及ぼす影響は、細粒分含有率が増えるに従い大きく生じていることがわかる。

次に拡散特性の結果を図3に示す。この図も、分散係数を初期の拘束圧における値で正規化したものを両対数グラフに示している。なお、分散係数は、破過試験から得られる濃度の時間変化曲線、いわゆる破過曲線の様子を1次元の物質移行拡散方程式の解析解と同定することにより算定している。この図から、透水特性と同様に、拘束圧が分散特性へ及ぼす影響は、細粒分含有率が増えるに従い大きく生じていることがわかる。なお、初期の拘束圧における分散係数を表1に示す。

②異方性の影響³⁾

透水特性や分散特性に及ぼす異方性の影響は、立方体形状の供試体を所定の締め固めエネルギーを加えた後、モールドから脱型して試験装置に設置した。その際、供試体の設置方向を変えることで異方性の影響を調べた。すなわち、締め固め方向と締め固め方向に鉛直な方向とに設置することで、異方性の影響を調べている。ここでの土試料は、細粒分含有率を各々3.0%、4.5%、6.0%に調整して供試体を作成している。なお、細粒分含有率が3.0%と4.5%の供試体は、初期の拘束圧における試験を実施して異方性の影響を調べているが、細粒分含有率6.0%の試料における試験では、異方性の影響とともに拘束圧の影響も調べている。

図4に細粒分含有率と透水係数の関係を示す。ここに、鉛直ならびに水平とは、締め固め方向に設置した供試体を鉛直、締め固め方向と鉛直に供試体を設置したものを水平として表している。細粒分含有率が多くなるに従って、透水係数が小さな値となる他、各細粒分含有率で鉛直と水平での透水係数の比がほぼ一定な割合となる挙動を示している。図5は、細粒分含有率6.0%の土試料における正規化透水係数と拘束圧の関係を両対数で示している。図4と図5より、鉛直透水係数と水平透水係数の絶対値に違いはあるとしても、拘束圧の影響はほぼ同じ傾向にある。すなわち、構造異方性によって透水係数の絶対値は異なっているが、拘束圧の透水係数への影響はほぼ同じ傾向として生じている結果を得た。

次に拡散特性への異方性の影響を示す。細粒分含有率と分散係数の関係を図6に示す。透水特性と同様に、細粒分含有率が多くなるに従って分散係数が小さな値となる他、鉛直と水平での分散係数の比がほぼ一定な挙動となっている。図7には、細粒分含有率が6.0%の土試料における正規化分散係数と拘束圧の関係を両対数で示している。図6と図7より、鉛直分散係数と水平分散係数の絶対値に違いはあるとしても、その拘束圧への依存性はほぼ同じ傾向にあることは、透水特性と同様であった。以上より、地盤中の透水・拡散特性は、その堆積過程より異方性を持つものとしても、拘束圧の影響は、細粒分含有率に依存するものと考えられる。なお、異方性の影響により得られた試験結果を表2にまとめて示す。

③試験結果の整理

以上の試験結果から、透水係数や分散係数に拘束圧と異方性が影響することが示された。そこで、ここでは、これらの影響の強さを定量化して表すことを試みる。透水特性や分散特性が拘束圧に依存する様子を示した試験結果は図2と3及び図5と7であるが、これらを両対数グラフ上において1次近似として直線とみなすと、次式で表すことができる⁴⁾。

$$(k/k_{0.2}) = a (\sigma c)^b \quad (1)$$

$$(D/D_{0.2}) = \alpha (\sigma c)^\beta \quad (2)$$

ここに、係数 a 、 b 、 α 、 β は両対数グラフ上での拘束圧の影響を直線とみなした時の特性を表すパラメータである。係数 a と α は基準係数を表し、係数 b と β はその直線の傾きを表している。従って、係数 b と β が拘束圧の影響の強さを表すパラメータと考えられる。

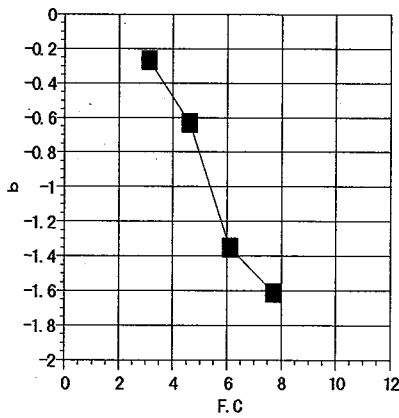


図8 細粒分含有率と係数bの関係

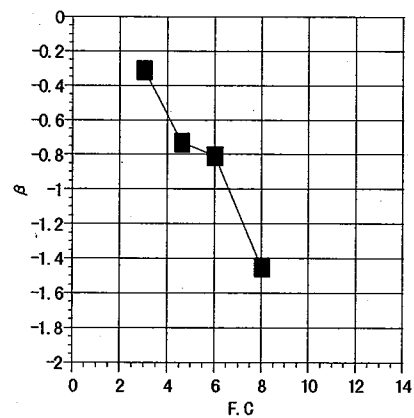


図9 細粒分含有率と係数βの関係

透水特性に関する係数bを細粒分含有率との関係で表したものが図8である。図8より、係数bは細粒分含有率の上昇にともなって拘束圧の影響が強くなるという傾向を示しているが、数値的には負の値で得られることとなる。

次に拡散特性について記す。拡散特性の拘束圧依存性については、係数βで特徴付けられるが、図9に係数βと細粒分含有率の関係を示す。これらの傾向は透水特性とほぼ同様なものであると考えられる。

3. 予測解析技術への試験結果の適用

要素試験より、拘束圧や異方性が地盤の透水特性や分散特性に影響を及ぼす結果を得た。そこで、予測解析にこの結果を入力し、その効果を検討する。

1) 解析対象および条件

ここで考える解析対象は、山岳地域において汚染源から浸出する汚染物質の拡散状況を模擬したものである。化学薬品を用いる工場での薬品処置や底部の遮水性に対する規制が施行される前に建設された小規模な廃棄物処分場についての計算例である。解析メッシュを図10に示す。

解析ケースは表3に示す10ケースとした。すなわち、ケース1からケース4は拘束圧が解析結果に及ぼす影響を調べるものであり、ケース5は異方性が解析結果に及ぼす影響を調べるものである。また、ケース6は拘束圧と異方性の影響を同時に考えた解析例である。以上は、拡散過程における異方性や拘束圧の影響を調べる解析例である。この他に、対策工の効果を調べる解析例を示す。ケース7からケース10は止水壁の効果を調べる目的で実施した計算例である。止水壁の打設深さを2種類とし、地山の拘束圧や異方性の影響と止水壁の深さの関連を検討する。ケース7、8は拘束圧や異方性を考慮しない場合の解析例で、ケース9ならびにケース10は拘束圧と異方性の両者の影響を考慮したものである。本文での実験結果から、細粒分含有率の変化とともにβはほぼ-0.3から-1.5と得られているが、この解析ではβ=-0.5とした。この値は細粒分含有率がほぼ4%近辺の値と考えられる。また、異方性については、 k_x/k_y は細粒分含有率にほとんど依存しない形で、ほぼ1.5と得られていることからこの値を解析で採用している。

2) 解析結果

解析結果として、拡散過程における相違をまず示す。ケース1からケース4において、図10中の点Cの時間的な濃度変化を示したものが図11である。また、ケース1とケース5ならびにケース6の点Cにおける結果を示したものが図12である。さらに、図13から

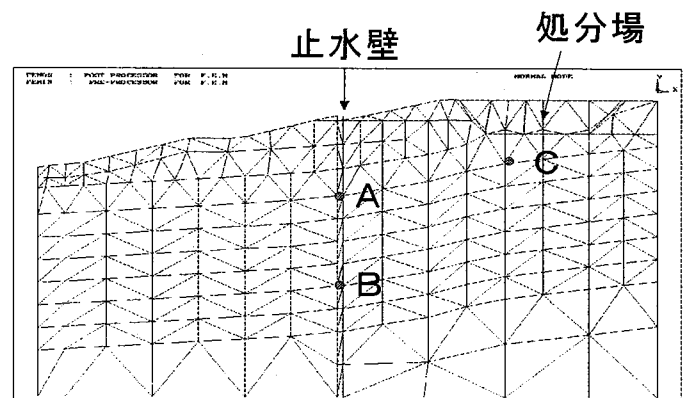


図10 解析メッシュ

図18は経過時間が等しい場合の物質の拡散状況を示している。これらより、拘束圧を考慮した場合の拡散挙動は如実にその影響範囲が狭くなっていることがわかる。また、その影響は β の値の絶対値が大きくなるほど顕著となる。

次いで、異方性の影響については、拡散挙動の影響範囲は拘束圧の影響に比べて如実には表れていないが、図12から、その内部の濃度の時間的变化には影響しており、異方性を考慮しない場合より濃度の時間的变化が低くなるという結果を示している。また、図19から図22は遮水壁の効果において、拘束圧や異方性の影響を調べた計算例である。これらより、拘束圧や異方性等の影響を考慮することによって、物質の拡散濃度の範囲が異なることがわかる。すなわち、遮水壁によって物質の拡散を抑制しようとする時、原地盤での拘束圧や異方性を考慮すると、遮水壁の深さを軽減できるという可能性を図20と図21は示している。

4. まとがき

地盤中の拡散物質の挙動を、拘束圧や異方性の影響を調べることができる要素試験と実施し、数値解析例を示した。その結果、拘束圧や異方性は土要素の透水・拡散特性、および、予測解析の結果に影響することを把握した。さらに、地盤中の物質拡散を制御する際に、原地盤の拡散抑制の効果を検討できる可能性を示すことができた。拘束圧や異方性の影響が地盤中の拡散挙動に及ぼす影響について調べたが、今後は、物質の吸着特性等の地盤との相互作用についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) S. Fukushima and T. Ishii: An Experimental Study of the Influence of Confining Pressure on Permeability Coefficients of Filldam Core Material, Soils and Foundations, Vol.26, No.4, 1986
- 2) 仲沢, 福島: 地盤特性を考慮した物質移行拡散に関する研究, 第35回地盤工学研究発表会講演概要集, 2000
- 3) 仲沢, 福島: 地盤の異方性を考慮した物質移行拡散特性, 第55回土木学会年次学術講演会講演概要集, III, 2000
- 4) 近藤, 八木, 小林, 福島: 盛立中のフィルダム遮水ゾーンの透水性の拘束圧依存性と強度特性, ダム工学, Vol.8, No.4, 1998

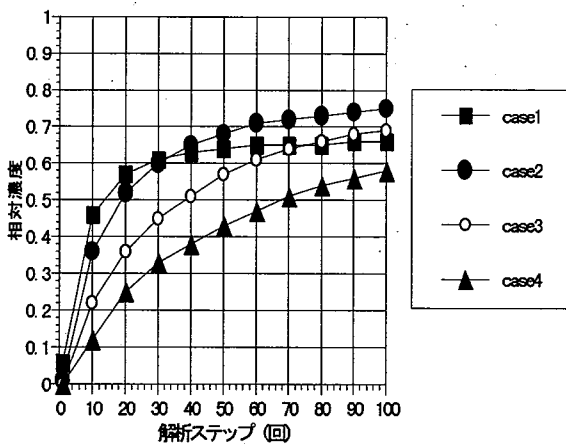


図1.1 地盤中の拡散挙動に及ぼす拘束圧の影響

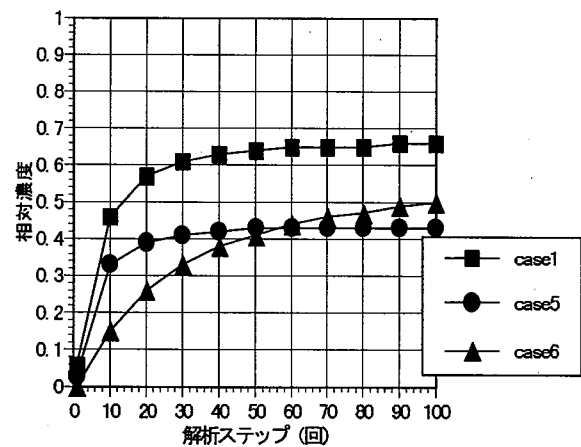


図1.2 地盤中の拡散挙動に及ぼす異方性の影響

表3 解析ケース

解析ケース	α	β	k_x/k_y	止水壁	解析ケース	α	β	k_x/k_y	止水壁
1	1.00	0.00	1.00	—	6	4.50	-0.50	1.50	—
2	4.50	-0.50	1.00	—	7	1.00	0.00	1.00	浅
3	20.0	-1.00	1.00	—	8	1.00	0.00	1.00	深
4	90.0	-1.50	1.00	—	9	4.50	-0.50	1.50	浅
5	1.00	0.00	1.50	—	10	4.50	-0.50	1.50	深

