

ベントナイト混合土遮水工の変形挙動と遮水性評価に関する研究

宇都宮大学工学研究科 学生会員 ○篠崎 康人
 宇都宮大学工学研究科 正会員 今泉 繁良
 宇都宮大学工学部技術部 正会員 吉直 卓也

1. はじめに

わが国の廃棄物最終処分場に用いられる遮水工構造の一つとして、透水係数が 10^{-6}cm/s 以下で厚さが 50cm 以上の粘性土の上に、厚さが 1.5mm 以上の遮水シートを敷設する構造が定められており、天然粘性土が少ない我が国では、現地発生土にベントナイトを混合して基準を満たすようにしたベントナイト混合土が使用されている。遮水工の基盤が変形したりすると、ベントナイト混合土層自体も変形し、一定の変形量になるとクラックが発生し、透水係数が基準値を満たさなくなる恐れがある。前回の報告では¹⁾ 供試体厚さを 10 cm として落とし戸幅を $L=30, 40, 50\text{cm}$ と変化させて落とし戸実験を行い、 $L=30\text{cm}$ ではクラックが発生しないが、 $L=40, 50\text{cm}$ では約 11 mm 沈下でクラックが発生することを示した。本研究では、ベントナイト混合土層の厚さを $H=10, 20\text{cm}$ 、落とし戸幅を $L=30, 40, 50\text{cm}$ と変え、せん断速度も緩速 (1mm/day) と急速 ($1\text{mm}/2\text{min}$) と変えて落とし戸実験を行い、それぞれのベントナイト混合土層の変形挙動の観察をした。そして、ベントナイト混合土層を両端固定はりとして想定した理論計算値と実験値との比較を行った。また、試験後に直径 10cm の供試体をクラック有部と無部でサンプリングし、透水試験を行い流入量、流出量や透水係数の比較を行った。

2. 材料特性

実験には、均等係数 $U_c=237.5$ 、曲率係数 $U_c'=13.92$ 、液性限界 $w_L=23.3\%$ 、塑性限界 $w_p=15.4\%$ 、塑性指数 $I_p=7.9$ で、土粒子密度が 2.712g/cm^3 の碎石砂に、アメリカ産の Na 型ベントナイトを 10% 添加させた混合土を用いた。ベントナイト混合土に対する A-c 法による締固め試験の結果として、最適含水比 $w_{opt}=11.5\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.848\text{g/cm}^3$ が得られた。

また、締固め度 95% を目標として締固めた供試体の透水係数は図-1 のようになり、3 つの試料の平均値として $k=1.88 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ が得られた。

さらに一軸圧縮試験を実施し、その応力-ひずみ曲線の代表的なものを図-2 に示した。この図から、一軸圧縮強度と変形係数を求め、 $qu=99.9\text{kN/m}^2$ 、 $E_{50}=4233\text{kN/m}^2$ を得た。

また、コンクリートで用いられている曲げ試験機を参考にして、土の一軸圧縮試験機を改良した試験機で実験を行った結果、曲げ強度として $60 \sim 80\text{kN/m}^2$ が得られた。

3. 落とし戸実験装置、実験方法

用いた実験装置は、図-3 に示すように内側寸法が横 80cm×縦 30cm×奥行き 20cm の鋼製土槽である。エアバックをベントナイト混合土層の上に置き、空気圧による上載圧をかけた状態で、落とし戸（沈下鉄板幅 $L=30, 40, 50\text{cm}$ ）の下に設置したジャッキを制御して、ベントナイト混合土層に変形を与えることができる構造となっている。ベントナイト混合土層の沈下量は、ベントナイト混合土と砂の間に薄い鉄板を置き、そこからワイヤーを鉛直方向に張って上部変位計に接続して計測される。

土槽内に、締固め度 95% を目標として、厚さ $H=10, 20\text{cm}$ となるような条件で締固めたベントナイト混合土層を置き、その上に砂を 10.5cm 敷いた。その上にエアバックを置き、鉄製の上蓋をボルトで

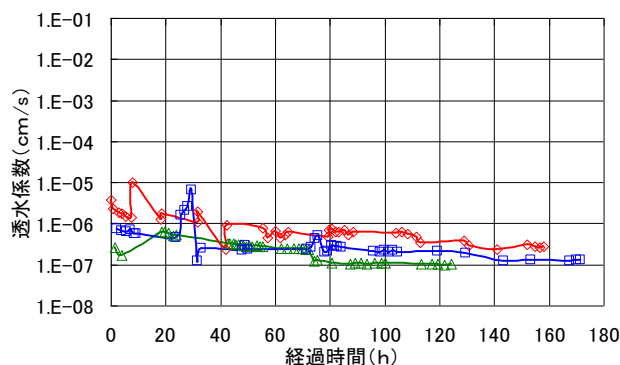


図-1 透水係数の時間的な変化

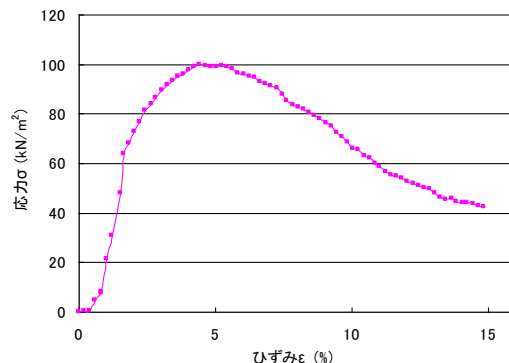


図-2 応力-ひずみ曲線

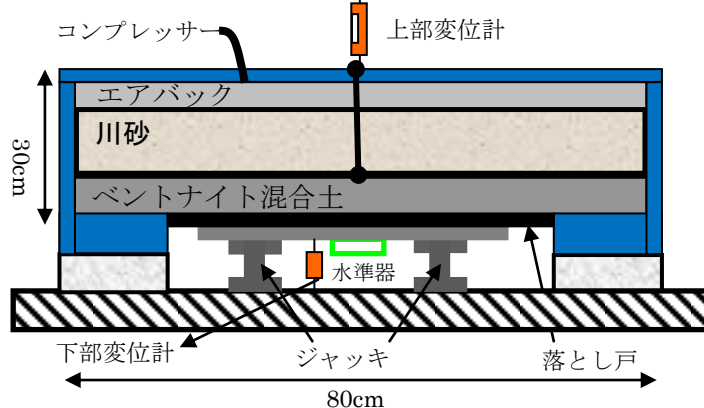


図-3 変形実験装置

固定した後、エアバックに 107.8kN/m^2 の圧力を掛けた状態で、下部変位計の読みが 1mm/day (緩速) または 1mm/2min (急速) となるようにジャッキで落とし戸を 1mm ずつ下げた。

実験の終了は、ベントナイト混合土層にクラックが発生し、それが混合土層を貫通して遮水工の機能を果たさなくなったと判断した時点とした。

4. 実験結果

クラックが生じたケースとして、図-4 に緩速沈下で $H=10\text{cm}$, $L=50\text{cm}$ の場合、図-5 に急速沈下で $H=10\text{cm}$, $L=50\text{cm}$ の場合の例を示した。またクラックが生じなかったケースとして、図-6 に緩速沈下で $H=10\text{cm}$, $L=30\text{cm}$ の場合の例を示した。これらの図で、上部変位計の値は混合土層の沈下幅中央のたわみ量を示している。なお、この値が下部変位計の値を上回っているが、これは上載荷重によって供試体に圧縮と形状変化に伴う伸びが生じたためと考える。

図-4 において、落とし戸を沈下させ、混合土層の中央たわみ量が 12mm となったとき、写真-1 に示すクラック A, B がベントナイト混合土層中央から発生した。層の中央で発生したクラック A は 13mm で上部へ、 15mm で下部に達し層を貫通させる状態となった。その後、中央たわみ量が 18mm となったときに、クラック C と D が層の下部から発生し、同時にクラック B が層の下部に貫通した。

図-5 では、混合土層の中央たわみ量が 18mm となったときに写真-2 に示すクラック a がベントナイト混合土層下部から発生した。中央たわみ量が 32mm となったときに、クラック b が層上部に貫通した。

図-6 では、上載荷重 107.8kN/m^2 で 4mm 、その後上載荷重を 137.2kN/m^2 に上昇させても 8mm 、上載荷重を 156.8kN/m^2 に上昇させても 9mm までしか沈下しなかった。

すべての条件で実験を行い得られた結果を表-1 に示す。表-1 の発生箇所欄で、「右肩」や「左肩」と記しているものは、落とし戸を正面から見て端の位置を意味している。

表-1 からクラック発生までの沈下量は急速実験の方が、緩速実験よりも大きいことが分かる。これは土の強度がせん断速度に依存していることと関連していると考えられる。クラックが発生しなかったものは、緩速・急速実験での $H=10\text{cm}$, $L=30\text{cm}$ 、緩速実験での $H=20\text{cm}$, $L=40\text{cm}$ のケースである。

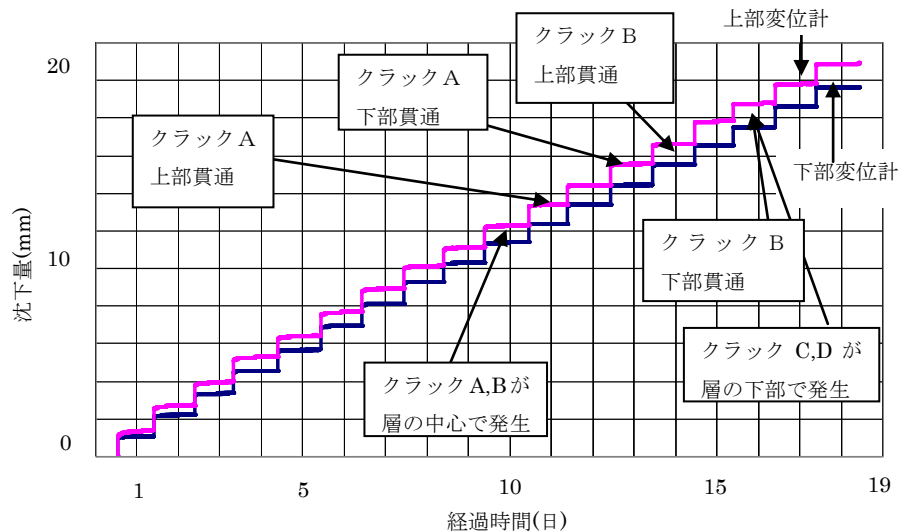


図-4 時間-沈下量関係：緩速 $H=10\text{cm}$, $L=50\text{cm}$

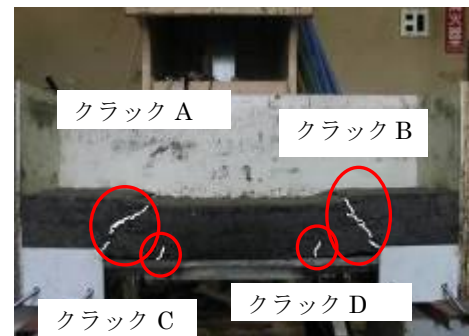


写真-1 緩速： $H=10\text{cm}$, $L=50\text{cm}$ の実験後の様子

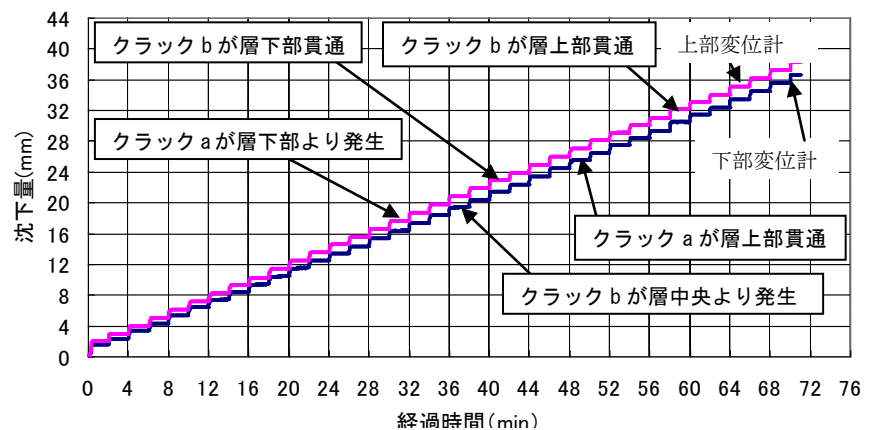


図-5 時間-沈下量関係：急速 $H=10\text{cm}$, $L=50\text{cm}$

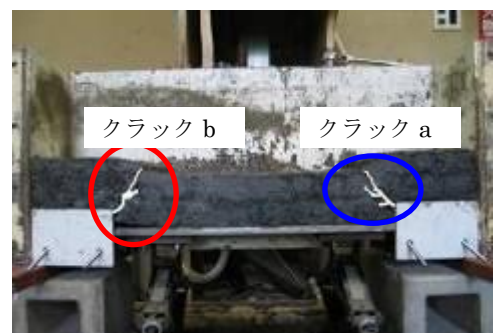


写真-2 急速： $H=10\text{cm}$, $L=50\text{cm}$ の実験後の様子

5. 混合土層を両端固定はりとして仮定した計算値の導出

落とし戸実験におけるベントナイト混合土層を、図-7 に示すような、高さ $H=10,20\text{cm}$ 、幅 $b=20\text{cm}$ 、スパン長 $L=30,40,50\text{cm}$ の両端固定はりとして仮定し、落とし戸実験での上載荷重に相当する等分布荷重 $q_0=13.7\text{kN/m} \sim 31.36\text{kN/m}$ （上載荷重×奥行き 20cm で計算）がはり上に作用すると想定すると、位置 x でのたわみ量、ベントナイト混合土層中央下部に生じる曲げ応力 σ_{tc} 、固定部上面に生じる曲げ応力 σ_{tl} 、 $=\sigma_{tr}$ 、固定部の最大せん断応力 τ_{max} が計算ができる²⁾。ヤング係数 E の値として、一軸圧縮試験での変形係数の値 4000 kN/m^2 を用いて、たわみ量、曲げ応力、せん断応力を計算した結果を表-2 に示した。また、表-2 には落とし戸実験でのクラック発生直前までの計測沈下量も示した。

図-8 にクラック発生直前までの沈下量と計算たわみ量の比較、図-9 にクラックが発生しなかった条件のそれぞれの圧力における沈下量と計算たわみ量の比較を示す。図では値の横に、実験の種類、混合土の厚さ cm 、スパン長 cm を示した。図-9 のクラックが発生しなかった実験ケースに関しては、上載荷重も示してあるが、上載荷重の上昇に伴って計測沈下量と計算たわみ量とも増大し、両端固定はりの理論で沈下量を推定できることがわかった。

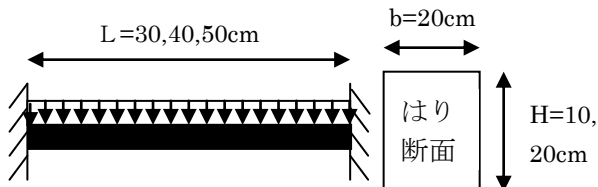


図-7 仮定した両端固定はり

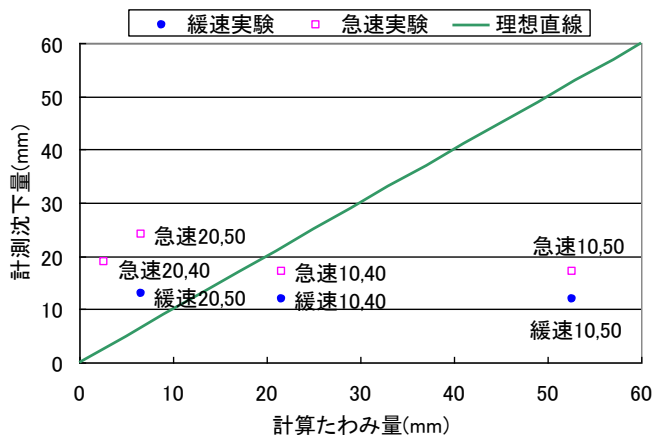


図-8 クラック発生条件でのたわみの実験値・計算値

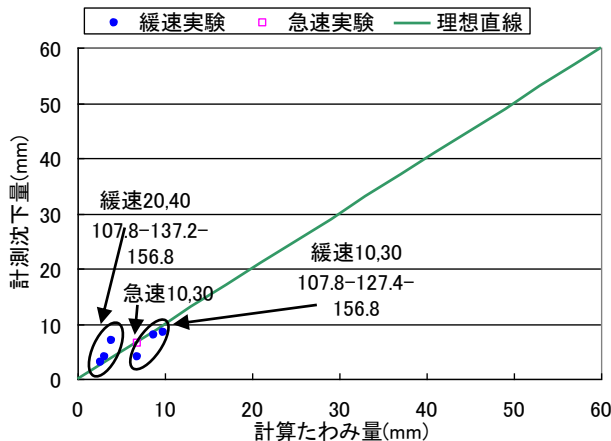


図-9 クラック未発生条件でのたわみの実験値・計算値

クラックが発生したケースに関しては、図-8 の緩速・急速 $H=10\text{cm}, L=50\text{cm}$ のケースでは、計算たわみ量の方がかなり大きい。他方、 $H=20\text{cm}$ の場合は、実験値のほうが計算値より大きい。この原因等について今後検討していきたい。またクラックが発生したケースでは、混合土の厚さ $H=10\text{cm}$ と 20cm のクラックの発生の沈下量がほぼ等

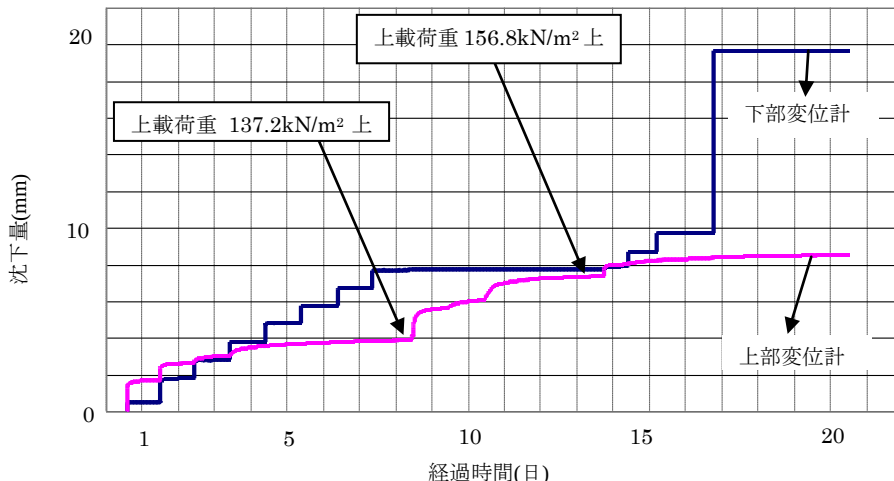


図-6 時間-沈下量関係：緩速 $H=10\text{cm}, L=30\text{cm}$

表-1 落とし戸実験結果

	供試体条件(cm)	乾燥密度(g/cm^3) / 練固め度(%)	クラックの発生有無	発生箇所	初期のクラックが発生したときの混合土層の沈下量(mm)
1mm/day (緩速)	$H=10, L=30$	1.77/95.7	無し	-	-
	$H=10, L=40$	1.74/94.0	有	左肩・層下部	12
	$H=10, L=50$	1.77/95.5		左肩・右肩層中部	12
	$H=20, L=40$	1.76/95.3	無し	-	-
	$H=20, L=50$	1.78/96.1	有	左肩・層下部	13
1mm/2min (急速)	$H=10, L=30$	1.768/95.7	無し	-	-
	$H=10, L=40$	1.74/94.4	有	右肩・層中部	18
	$H=10, L=50$	1.76/95.4		右肩・層下部	18
	$H=20, L=40$	1.753/94.8		右・左肩・層下部	20
	$H=20, L=50$	1.794/97.1		右肩・層下部	25

表-2 両端固定はり計算結果と弾性体までの沈下量

供試体厚さH(cm)	10			20		
落とし戸幅L(cm)	30	40	50	40	50	
上載圧力 $q(\text{kN}/\text{m}^2)$	107.8	137.2	156.8	107.8	107.8	127.4
中央の計算たわみ $v(\text{mm})$	6.8	8.7	9.9	21.6	52.6	2.7
緩速実験でのクラックの有無と種類	無し			有	有	無し
緩速実験での計測沈下量(mm)	4	8	8.5	11	11	3
急速実験でのクラックの有無と種類	無し			有	有	有
急速実験での計測沈下量(mm)	6.5	-	-	17	17	19
$\sigma_c(\text{kN}/\text{m}^2)$	242.6	308.7	352.8	431.2	673.8	53.9
$\sigma_{tr}, \sigma_{tl}(\text{kN}/\text{m}^2)$	485.1	617.4	705.6	862.4	1347.5	107.8
$\tau(\text{kN}/\text{m}^2)$	242.6	308.7	352.8	323.4	404.3	161.7

しいことから、ベントナイト混合土には限界沈下量が存在するのではないかと考えられる。急速と緩速ではその値は異なり、緩速が 12～15mm、急速が 18～25mm の間にあると推察される。

計算された曲げ応力の値と実験値を比較してみると、供試体の厚さが 20cm のものに関しては小さいが、供試体厚さが 10cm のものに関しては計算値の方が大きい。これをクラックの発生時期と関連して、計算値との比較を行ったが相関性は現在のところなかった。

表-3 透水試験の供試体条件

タイプ	供試体厚さ(cm), 沈下幅(cm)	クラック 有無	含水比(%)	乾燥密度 (g/cm ³)	締固め度 (%)
緩速: (1mm/day)	10,40	有	17.2/-	1.626/-	88
		有②	17.2/-	1.589/-	86
	10,50	有	16.5/-	1.699/-	91.9
		有②	16.5	1.701	92
	20,40	無	16.6	1.721	93.2
		無	14.8	1.755	95
	20,50	有	15.4	1.784	96.5
		無	15.6	1.747	94.5
		有②	16	1.698	91.9
		無②	15.1	1.761	95.3
急速: (1mm/2min)	20,50	有	14	1.785	96.6
		有②	13.7	1.712	92.7

6. 透水特性の検討

落とし戸実験終了後に、直径 10cm のカッターリングを用いて円柱供試体をサンプリングし、供試体としたものに対して、たわみ性壁透水試験機を用いて、動水勾配 $i=20$ にて実験を行った。表-3 はサンプリングした供試体の条件を示している。締固め度が低下しているのはサンプリングもしくはベントナイトの膨潤によるものと考えられる。

図-10 は、透水試験を行った際の飽和時までの流入量と流出量を棒グラフで示し、最終的な透水係数を線グラフとして示したものである。

まずクラック有部と無部の透水係数に着目してみると、透水係数はおおよそ $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ の値となっており、クラック有部と無部で最終的な透水係数の差はほとんどないこと、そして両者とも粘性土系の遮水工の基準である 10^{-6}cm/s 以下の条件を満たしていることがわかった。

一方、飽和までの流入量と流出量に着目してみると、ほとんどの供試体においてクラック有部の方がクラック無部の供試体よりも流入量と流出量の差が大きい。

この「流入量－流出量」は、ベントナイトが膨潤することで供試体の間隙やクラックの隙間を埋めるのに要した水量を示していると考えられ、クラック有部の方が供試体内の間隙や空間を埋めるため多くの水量を要することがわかった。

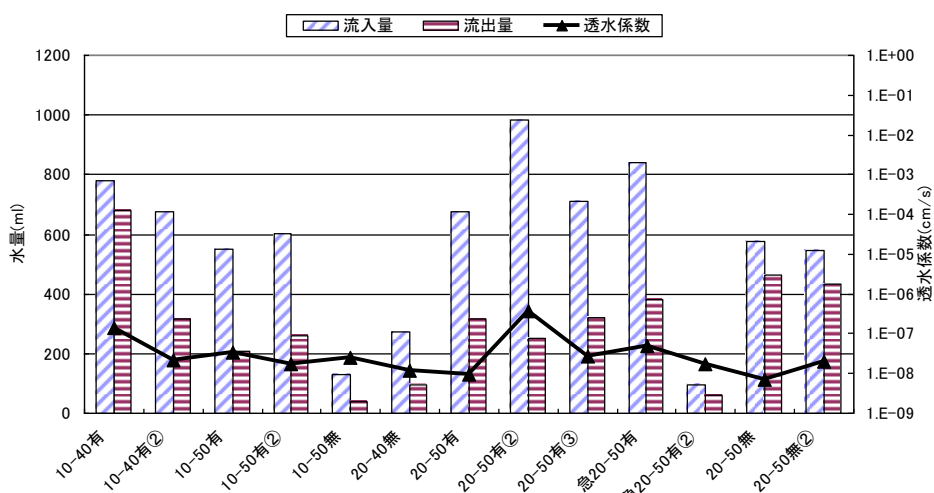


図-10 飽和時の流入量・流出量と最終的な透水係数

7. まとめ

得られた見解を以下に示す。

- ① 落とし戸実験にてクラックが発生するまでの沈下量は急速の方が緩速よりも大きかった。
- ② 落とし戸実験について、クラックが生じないケースでの荷重と沈下関係は、ベントナイト混合土層を両端固定梁と仮定して計算できることが推察された。
- ③ クラック有部・無部から採取した試料に対する透水試験の結果、最終的な透水係数に関しては両者の差が小さく、すべての条件において基準を満足することがわかった。

謝辞

本研究は宇都宮大学平成 20 年度特定重点研究基金ならびに、NPO 最終処分場技術システム研究会の支援によって実施したものである。記して感謝します。

参考文献

- 1) 篠崎 康人、今泉繁良、吉直卓也：上載圧をうけるベントナイト混合土層の変形挙動実験、第 35 回土木学会関東支部論文、第 7 部門論文番号 39、2008
- 2) 青木徹彦：土木系 大学講義シリーズ⑤ 構造力学、pp134－137、2003