HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 埋立地内水分移動シミュレーションによる埋立構造と底部負荷水圧の関係 |
| Author(s) | 東條, 安匡; 田中, 信壽; 松藤, 敏彦 他 |
| Description | 第8回衛生工学シンポジウム（平成12年11月16日（木）-17日（金） 北海道大学学術交流会館） . 1 廃棄物 . P1-11 |
| Citation | 衛生工学シンポジウム論文集, 8, 57-62 |
| Issue Date | 2000-11-01 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/7208 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 8-1-11_p57-62.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# 1−11 埋立地内水分移動シミュレーションによる埋立構造と底部負荷水圧の関係

北海道大学大学院　東條安匡、田中信壽
松藤敏彦、松尾孝之

## 1. はじめに

最終処分場の建設に際して住民合意を得るためには，安全で信頼できる埋立地を作る必要がある。中でも特に浸出水の管理には長期間安定した性能を保持し，リスクを回避できる機能が要求される。これは，住民の懸念が，埋立地の浸出水が漏洩し周辺水域を汚染するのではないかというところにあるからである。そのため今日では，浸出水の漏洩を回避するために，規制する立場の国や自治体も遮水構造等の基準を強化しているほか，関係各業界でも遮水システムに関する様々な開発が進められている。

浸出水の漏洩は汚染された浸出水が処分場の底部に存在し，そこで遮水シートを越えて外部に出ようとするポテンシャルが存在するために生ずる。したがって，底部に浸出水が存在しない状態にする，あるいは存在しても外部に出ようとする力が無い状態にすることで浸出水の漏洩の可能性を減らすことができると考えられる。そのためには，浸出水が底部遮水シート付近にまで移動する前に強制的に排除するか，底部に水圧を生じさせないことが必要となる。

著者らはこれまで埋立地内での水分排除および浸出水量削減，底部負荷水圧の回避のために，最終処分場表面での浸透抑制，処分場内部での廃棄物層内における水分挙動，中間覆土との相互関係，処分場底部におけるキャピラリーバリアによる水分排除等を対象に検討を行ってきた[1~11]。そこで，本研究では，こうした埋立地における各部位での水分排除技術を総合化した場合，処分場底部での水圧の発生をどの程度回避できるのかを数値計算を元に検討した。

## 2.埋立地内水分移動モデル

各部の水分移動式は以下の式を用いた。

①覆土上表面流での水分移動式

覆土上に生成する表面流は開水路の非定常流に関する連続方程式を元に，

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q_s}{\partial y}=\gamma_e-q_{z0} \tag{1}$$

で表され，ここで，h：表面流水深[L]，t：時間[T]，$q_s$：単位幅当たりの表面流流量[L2/T]，$\gamma_e$：有効降雨強度[L/T]，y：斜面方向の距離[L]，$q_{z0}$：覆土表面から覆土内へ浸透するフラックス[L/T]である。表面における覆土層内への浸透フラックス $q_{z0}$ が有効降雨強度 $\gamma_e$ よりも大きければ層内への浸透が生じ，小さいときには表面に湛水が発生して勾配により斜面方向への表面流となる。このとき地表流の表面流流量フラックス $q_s$ は，開水路非定常流の運動量方程式における摩擦損失項 $I_f$ が Manning の粗度係数 n を用いて，

$$I_f=\frac{2gn^2}{h^{4/3}}\cdot\frac{v^2}{2g} \tag{2}$$

と表され，斜面が緩勾配の場合には $I_f=i_0-(\partial h/\partial y)$ の拡散波近似（ここで，$i_0$：斜面勾配）が仮定できることから，流量フラックスは下式となる。

$$q_s=vh=\frac{\sqrt{i_0-(\partial h/\partial y)}}{n}\cdot h^{\frac{5}{3}} \tag{3}$$

また，覆土層内の浸透フラックスは Darcy 式の不飽和への拡張式により，

$$q_{z0} = -K\frac{\partial \phi}{\partial z} = -K\frac{\partial \psi}{\partial z} + K\cos\alpha \qquad (4)$$

ここで，K：不飽和透水係数，$\phi$：全ポテンシャル[L]，$\psi$：サクションポテンシャル[L]，$\alpha$：斜面の傾斜角[rad]である。

②覆土内とキャピラリーバリア砂層内の２次元飽和－不飽和水分移動式

覆土層とキャピラリーバリアの砂層に関しては土壌の飽和－不飽和浸透理論が適用できることが既往の研究により確認されており[5]，その水分収支式は下式で表される。

$$\left(S_w S_s + C(\psi)\right)\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \qquad (5)$$

ここで，$S_w$：飽和度[-]，$S_s$：比貯留係数[1/L]，$C(\psi)$：比水分容量[1/L]，$\psi$：圧力水頭[L]，z：斜面に対して鉛直方向の距離[L]である。

覆土層内の斜面方向及び斜面と直角方向の水分移動式は，覆土内が均質で等方性であり，流れが Darcy 則に従うとすると，傾斜斜面での全水頭 $\phi$ は $\phi = \psi - y\sin\alpha - z\cos\alpha$ と表されるから，それぞれ，

$$q_y = -K\frac{\partial \phi}{\partial y} = -K\frac{\partial \psi}{\partial y} + K\sin\alpha \qquad q_z = -K\frac{\partial \phi}{\partial z} = -K\frac{\partial \psi}{\partial z} + K\cos\alpha \qquad (6)$$

となる。ここで $K$ ：不飽和透水係数，$K=K_r \cdot K_s$，$K_r$：相対透水係数，$K_s$：飽和透水係数である。

覆土層内の不飽和浸透に関わる各種パラメーターは、水分特性曲線をもとに、不飽和透水係数、比水分容量を van Genuchten または Brooks-Corey の推定式により算出した。

③廃棄物層内とキャピラリーバリア砂利層内の２次元不飽和浸透モデル

廃棄物層や砂利層のような毛管帯の発達の小さな媒体に関しては，その内部で生ずる水分移動を不飽和浸透理論に基づく式（上記(5)(6)）では良好に表現できないことが確認されている。[3,4,5]そのため，鉛直方向，水平方向の水分移動式はそれぞれ，過去の研究成果[5,9]を元に

（鉛直方向）

飽和の場合 $(\Psi > 0)$ $\quad q_z = -K_s\frac{\partial \Psi}{\partial z} + K_s\cos\alpha$

不飽和の場合 $(\Psi < 0)$ $\quad q_z = -K_{zf}(\theta_f)\cos\alpha$

ここで，$K_s$：飽和透水係数，$Kzf$：膜状流れ理論に基づく不飽和透水係数，$\theta_f$：膜状流れ含水率（$\theta_f = \theta - \theta_r$，$\theta$：体積含水率，$\theta_r$：残留水分率），$K_{zf}$は１次元の流速制御法による不飽和透水係数測定から，$K_{zf}(\theta_f) = a_v\theta_f^{b_v}$

とし，$a_v, b_v$は実験結果に対してパラメーターフィッティングして決定した。

（水平方向）

飽和の場合 $(\Psi > 0)$ $\quad q_y = -K_s\frac{\partial \Psi}{\partial y} + K_s\sin\alpha$

不飽和の場合 $(\Psi < 0)$ $\quad q_y = -D_f(\theta_f)\frac{\partial \theta_f}{\partial y} + K_{zf}(\theta_f)\sin\alpha$

ここで，拡散係数 Df は，$D_f(\theta_f) = a_h\theta_f^{b_h}$

とし，$a_h, b_h$は２次元浸透実験結果を基に simplex 法により決定した。

水分収支式は圧力ではなく，含水率により，$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}$で計算した。

④境界条件の設定

覆土層と覆土層，覆土層と砂層の様にいずれの層も不飽和浸透理論の圧力を元にした式で解ける媒体に関しては境界条件をポテンシャル連続の条件とし，廃棄物層と廃棄物層，廃棄物層と砂利のようないずれも膜状流れ理論を適用し，含水率で解く媒体に関しては，フラックスの連続条件を適用した。覆土層と廃棄物層やキャピラリーバリアにおける砂層と砂利層のような

解析対象の式が異なる場合には以下のように設定した。

（上部に廃棄物層，下部に覆土層（中間覆土層等）の場合）は，

$$q_z = -K_z^L \frac{\Psi^L - \Psi^u}{dz/2} + K_z^L \cos\alpha$$

（上部に覆土層（砂層），下部に廃棄物層（砂利層）の場合）は，

$$q_z = -K_z^u \frac{\Psi^L - \Psi^u}{dz/2} + K_z^u \cos\alpha$$

$K_{zL}$：下部層不飽和透水係数，$K_{zu}$：上部層不飽和透水係数，$\Psi^L$：下部層境界面ポテンシャル，$\Psi^u$：上部層境界面ポテンシャルとした。ここで，廃棄物層や砂利層は含水率で解いているためポテンシャル値が不定である。含水率から圧力水頭を算出することも試みたが，その場合砂利層側（廃棄物層側）へ水分が強く吸引される傾向が確認された。砂利・廃棄物層いずれも水分特性曲線の特性が，残留水分率以外の含水率領域においては含水率変化に対して圧力変化が極めて小さく，また，毛管吸引力の大きな砂や覆土層と接した場合に，その境界において砂利層側へ吸引する圧力が砂層と釣り合うまで発達するとは考えがたい。そこで，互層の土柱法を実施し，釣り合い状態において砂利層側への曲線が低下する分を砂利層（廃棄物層）のポテンシャルとし一定値を仮定した。またこの圧力は飽和した時点で正圧に変換するようにした。

## 3.計算結果と実測値の比較

モデルの整合性を確認するために，覆土層，砂層，廃棄物層，覆土層という４層構造に対して行った降雨流出実験の結果との比較を行った。

1)実験装置・実験の概要

図１の大規模実験装置（横幅 3500mm，高さ 1000mm，奥行き 200mm，下部 20cm は仕切版で 20 コンパートメントに分割）に図の様に廃棄物・砂・覆土を合計４層充填した。充填は最下層に中間覆土層，その上に廃棄物層として破砕残渣，その上に砂層，そして最上部に最終覆土層を充填した。No1, No2, No3 の流出口位置には集排水系を模擬するために砂利を充填した。また，最上部覆土上には表面流の発生に伴い浸食が生ずるために下流端付近に砂利を充填した。各層の充填試料と充填条件を表１に示す。上部から供給する降雨は，上部の降雨散布用パイプに取り付けた 40 本の注射針から給水する形態とした。実験は，各層を充填する毎に降雨を与え，互層構造が発達するのに従って流出分布の状況が変化していく様子を確認するようにした。すなわち（step1）２層充填，(step2) ３層充填，(step3) ４層充填で実験を実施した。なお実験はすべて勾配 5%の条件下で行った。降雨は各実験において，3～5 段階(約 1, 5, 10, 12, 20mm/h)で変化させた。

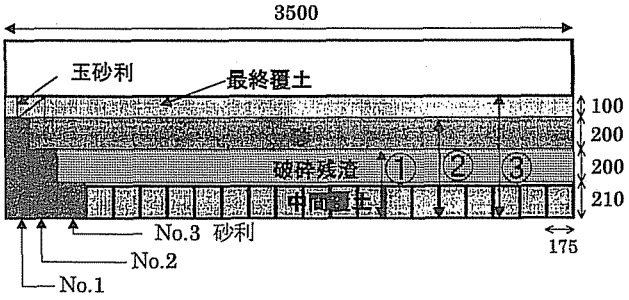


図１　実験装置と充填構造

表１　充填試料の特性

| | 試料名 | 充填厚さ (cm) | 充填密度 (g/cm3) | 飽和透水係数 (cm/s) |
|---|---|---|---|---|
| 最終覆土層 | 覆土 | 10 | 1.81 | $4.9\times10^{-6}$ |
| 砂層 | 砂C | 20 | 1.1 | $9.3\times10^{-3}$ |
| 廃棄物層 | 破砕残渣A | 20 | 0.64 | $2.2\times10^{0}$ |
| 中間覆土層 | 覆土 | 21 | 1.79 | $4.7\times10^{-6}$ |

2)実験結果と数値計算結果の比較

以上の大規模 2, 3, 4 層実験に対して，構築した計算モデルを用いてシミュレーションを行い実験値との適合性を検証した。各 step 毎に各層での流出割合を実測値と計算値で比較した結果を表２に示す。３層実験での少降雨において砂層流出が計算値の方が高くなっているが，２

層構造での中間覆土上流出割合と下方流出割合，および４層構造での各層流出割合は概ね一致する結果が得られている。但し，廃棄物層と砂層との境界面における側方流に関する計算値は実測値に較べて高くなっており，計算上は，４層状態では，100%砂層内で排除される結果となっている。昨年度のキャピラリーバリアに関する検討[11]においても，バリアの効率は負荷総水量に極めて強く影響され，負荷総水量を低くできれば，100%バリア内で側方排除できるという結果が得られている。実測値が100%の効率で側方排除できなかった理由として考えられることは実験間隔の短さによる排水の問題が挙げられる。このことは，実測値においても後段で実施した実験ほど排水効率が上昇する傾向にあることから，排水が不十分であったことが強く疑われる。

表２　実測流出割合と計算値の比較

各層からの流出割合(%)

| | | 実験結果 | | | | 計算結果 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | qin (mm/h) | 表面流出 | 砂層流出 | 中間覆土上流出 | 下方流出 | 表面流出 | 砂層流出 | 中間覆土上流出 | 下方流出 |
| ２層実験 | 5.83 | — | — | 98.43 | 1.57 | — | — | 97.13 | 2.87 |
| | 12.98 | — | — | 99.10 | 0.90 | — | — | 98.74 | 1.26 |
| | 20.79 | — | — | 99.76 | 0.24 | — | — | 99.24 | 0.76 |
| ３層実験 | 5.81 | — | 29.48 | 68.86 | 1.66 | — | 56.48 | 42.04 | 1.48 |
| | 13.50 | — | 19.29 | 79.86 | 0.85 | — | 27.27 | 71.61 | 1.12 |
| | 20.81 | — | 16.19 | 83.25 | 0.56 | — | 19.51 | 79.76 | 0.72 |
| ４層実験 | 5.64 | 94.97 | 3.60 | 0.66 | 0.77 | 94.97 | 5.03 | 0.00 | 0.00 |
| | 12.62 | 97.84 | 1.89 | 0.11 | 0.15 | 97.81 | 2.19 | 0.00 | 0.00 |
| | 13.52 | 97.24 | 2.15 | 0.25 | 0.36 | 97.95 | 2.05 | 0.00 | 0.00 |
| | 20.54 | 98.76 | 0.92 | 0.17 | 0.15 | 98.67 | 1.33 | 0.00 | 0.00 |

## 4. 実規模埋立地の埋立構造の変化による底部負荷水圧の評価

前節では，覆土・廃棄物を互層に充填した４層での降水試験に対して作成した計算モデルが，実験値を概ね再現できることを確認した。そこで，埋立地全層の２次元モデルを作成し，任意の降雨条件における流出状況，及び底部に負荷される水圧に関する検討を実施した。

1)計算対象とした埋立層モデル

計算を行う埋立層のモデルとして図２のような４種類の構造を仮定した。横幅はいずれも 20m とし，各層は廃棄物層の厚さを 3m，中間覆土層，保護砂層，ｷｬﾋﾟﾗﾘﾊﾞﾘｱ層の厚さをそれぞれ 60cm とした。層厚は，６層構造で合計 10.8m，７層構造で 11.4m である。type1,2 は従来型の構造で，最下部層は保護砂を想定して砂層とした。type2 は，type1 と同じ層構成であるが，下流側に竪型管を模擬した鉛直層を配置している。鉛直層を有さない type1 での排水は，最下部の砂層内の下流端に配置した砂利層の排水溝のみである。type3 は type1 と同じく鉛直層の無い構造であるが，最下層の砂層の下に砂利層を配置しキャピラリーバリアを表現した。type4 は type3 の下流側に鉛直層を設けたモデルとした。

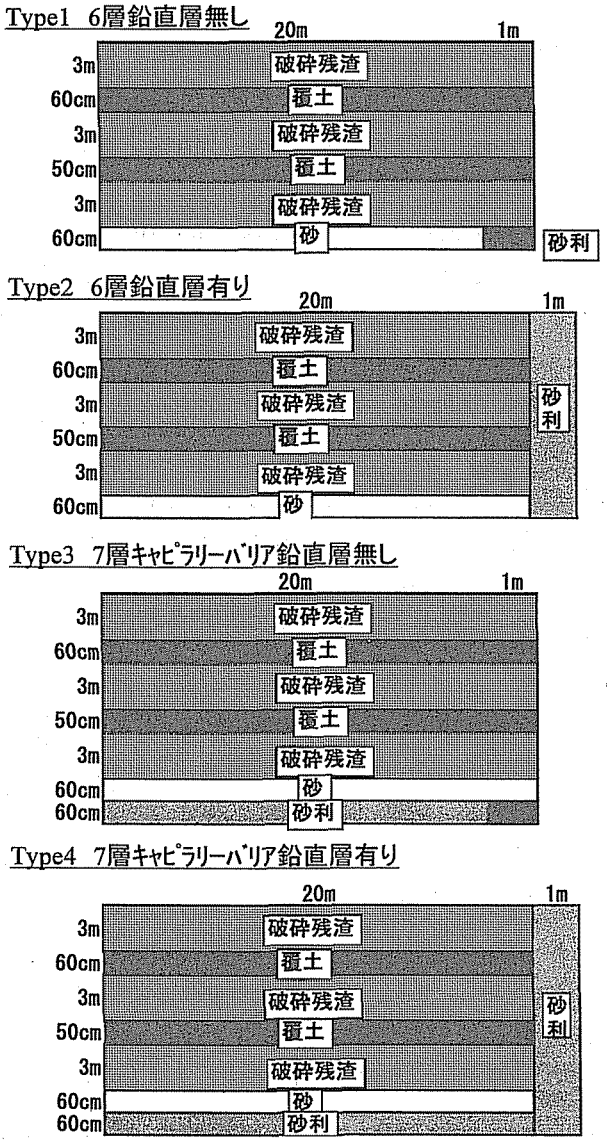


図２　埋立地全層計算モデルで仮定した埋立層構

本検討においては廃棄物層として破砕残渣を，覆土層としては 1.0E-4cm/s の透水係数を有する覆土材を仮定した。上部に最終覆土を設けたモデルや覆土層の透水係数を 1E-5,1E-6cm/s としたモデルについても検討したが，覆土材の透水係数を低くすると，最下層まで浸透が生ずるのに極めて長い時間がかかり，またそのような条件で鉛直層を設けると大半が鉛直層から流出する結果となったためここでは報告しない。各条件において，勾配を 0,5,10%の各 3 段階で計算を試みた。

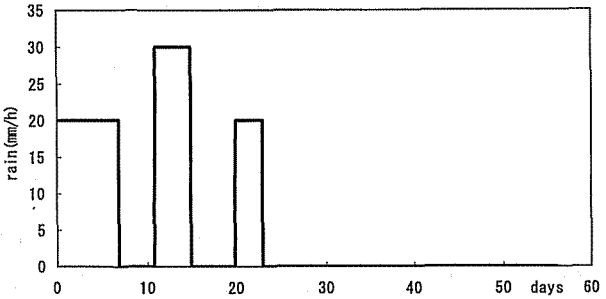

図 3　与えた非定常降雨

降雨パターンは図 3 に示すような条件で与えた。最初に 7 日間 20mm/h の降雨を与え，その後 10 日まで無降雨，11 日目から 30mm/h を 4 日間，15 日から再度無降雨，そして，20 日目から再度 20mm/h を 3 日間与えた。最後の降雨が終了した 23 日目以降，排水期間として第 56 日(約 2 ヶ月)まで計算を行った。なお，計算の開始は自然排水状態から開始した。

2)計算結果

図 4 に，type1 の勾配 0%，type4 の勾配 5%での流出パターンを示す。type4 は下流側に鉛直層があるために，覆土/廃棄物の境界に生ずる側方流による排除が促進され，降雨に対して非常に早い流出応答を示している。中間覆土の透水係数が大きいのにも関わらず，側方流が生じているのは，計算を自然排水状態から開始しているために厚さ 60cm の中間覆土では，廃棄物層の境界面に接する覆土内不飽和透水係数が小さく，覆土の不飽和透水係数が十分に大きくなるのに時間を要するためであり，覆土内へ浸透する水分によって覆土内の飽和度が上昇する前に侵入水が側方排除されてしまうからである。一方，type1 の勾配 0%では，降雨に対して約 2 日程度の遅れが生ずる。一時的に流出にピークが見られるのは，勾配がないために，第 1 層，第 3 層の覆土境界上に水分が溜まり，宙水を形成することにより，一時的に大きな水圧が覆土上にかかり，それが覆土層の飽和度の上昇に伴って解放されるためである。

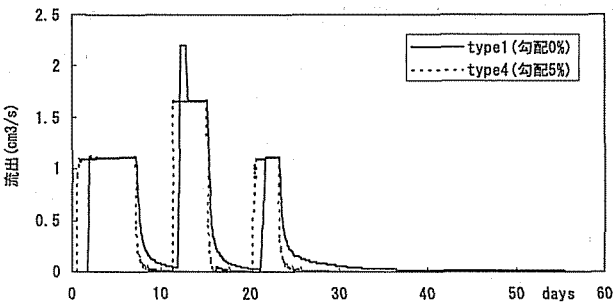

図 4 非定常降雨に対する type1(勾配 0%)と type4（勾配 5%）の流出パターンの比較

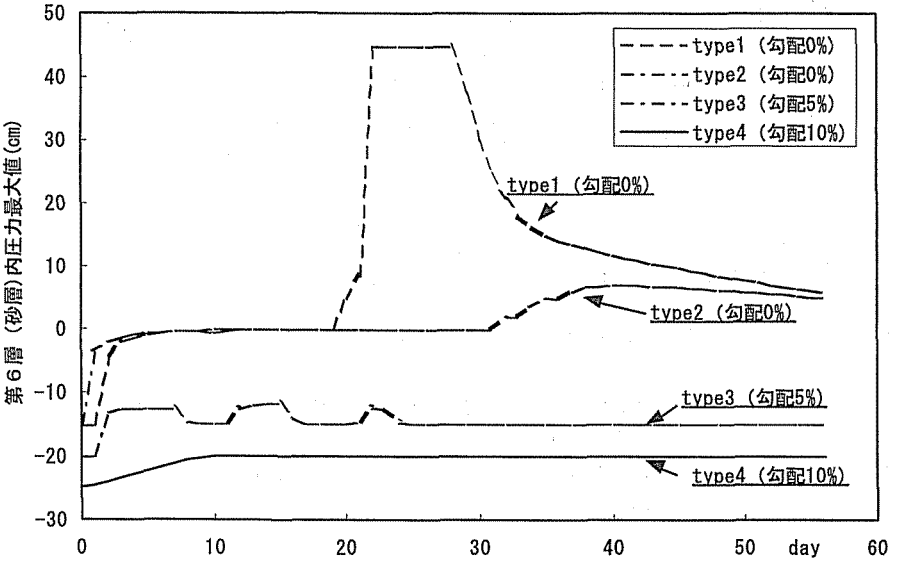

図 5　type1,type2,,type3,type4 での第 6 層（砂層）の中央位置における圧力最大値の経日変化

本研究における主要な目的は，埋立地からの浸

出水漏洩リスクの回避であり，過去の種々の検討は埋立地内部の水分貯留を防止して水圧負荷を阻止することであった。そこで，これら，４種のパターンで埋立地底部にかかる水圧について検討を試みた。

図５は，各構造における第６層の砂層内中央（砂層内 30cm の位置）における圧力の最大値を示したものである。

鉛直層を持たず，底部が保護砂である type1 では，排水が進まないために最下層内に水分が停滞し，20 日目以降に約 45cm の水圧が負荷される。一方，同様の構造に鉛直層を設けて排水を促進させた type2 では，type1 ほどの圧力上昇は見られないが，鉛直層を流れている水分を砂層が吸引するために徐々に砂層内の水圧が上昇し３０日目以降は正圧に変化し最大で約 10cm 程度の水圧が発生している。キャピラリーバリア型の type3 は鉛直層が無いが，砂層内での側方排除が促進されるために正圧は生じず不飽和のまま推移している。但し，キャピラリーバリアは勾配を設けなければ効果を発揮しないため，勾配が０の時は最下層砂利層内に正圧部分が生ずる。鉛直層が加わる type4 では，さらに排水が促進され，圧力は低くなっている。

以上の検討で，底部に水圧を負荷させないという目的を満たす構造には，次のような要素が必要となると考えられる。type1 と type2 の比較から，鉛直層があっても最下層が砂層であると砂層内への水分吸引が生ずるために正圧の発生を免れない，また，type1 と type3 からは，キャピラリーバリアを設けても勾配をつけなければ最下層に正圧が生ずる。従って，正圧回避の方策の一つは最下層を砂層のみにしないことであり，そのためにキャピラリーバリアなどを適切な勾配の元に設けることであると考えられる。鉛直層の設置は，各層内部をを鉛直下方浸透する水量を減少させるためには極めて効果的であるといえ，流出の応答は急激になるものの層内の水分量を減らすことや，底部水圧負荷の抑止をより効果的にするために機能を発揮すると考えられる。

（文献）


1) 東條安匡，田中信寿他：廃棄物充填層の２次元不飽和浸透に関する研究，廃棄物学会第４回研究発表会講演論文集,pp.531-534,1993

2) 東條安匡，田中信寿他：焼却灰の不飽和水分特性と不飽和透水係数の測定，土木学会第５０回年次学術講演会講演論文集 2-A,pp.1220-1221,1995

3) 東條安匡，田中信寿他：焼却灰層内における含水率と不飽和移動水分の関係，土木学会第５１回年次学術講演会講演論文集 7,pp.570-571,1996

4) 東條安匡，松藤敏彦他：焼却灰充填層の２次元不飽和水分移動とそのモデル化，　廃棄物学会第８回研究発表会講演論文集,pp.735-737,1997

5) 河野孝志,田中信寿他：キャピラリーバリアを利用した廃棄物処分場底部浸出水集排水構造に関する基礎的研究,廃棄物学会第８回研究発表会講演論文集,pp.837-839，1997

6) 東條安匡，毛利慎也他：埋立廃棄物層の浸透能の現位置測定，環境工学研究論文集,Vol,35,pp.11-19,1998

7) 東條安匡，菅原淳他：多層型底部集排水構造の排水効果に与える影響因子に関する実験的研究，廃棄物学会第９回研究発表会講演論文集,pp.878-880,1998

8) 東條安匡,相楽光宏他：廃棄物処分場底部の水分移動制御に関する研究,第 54 回土木学会年次学術講演会,pp.454-455,1999.9

9) 寺澤孝,東條安匡他：各種廃棄物充填層の水分特性値の把握,廃棄物学会第 10 回研究発表会,pp.1051-1053,1999.10

10) 毛利慎也,東條安匡他：ごみ埋立地表面流の生成機構とその排除に関する研究,廃棄物学会第 10 回研究発表会,pp.1042-1044,1999.10

11) 東條安匡,相楽光宏他：キャピラリーバリアを利用した廃棄物処分場排水システムの開発,第７回衛生工学シンポジウム,pp.59-63、1999.11