



土/水/空気連成解析によるキャピラリーバリアシステムの性能評価

中村, 翔一
河井, 克之
飯塚, 敦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 19:67-74

(Issue Date)

2015-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/81011470>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011470>



土/水/空気連成解析による キャピラリーバリアシステムの性能評価

Evaluation of a capillary barrier system with the soil/water/air coupled F.E. code

中村 翔一¹⁾
Shoichi Nakamura
河井 克之²⁾
Katsuyuki Kawai
飯塚 敦³⁾
Atsushi Iizuka

概要: 廃棄物のうち再使用, 再生利用することが困難なものは最終処分場で埋め立て処分される。最終処分場においては, 浸出水による水域汚染が大きな課題となっている。水域汚染を防ぐためには降雨による地盤浸透水を廃棄物埋め立て部へ侵入するのを防ぎ, 適切に排水することが求められる。そのための表面遮水技術としてキャピラリーバリアが注目されている。キャピラリーバリアとは土の保水性の違いによる遮水機能のことであり, 通気性がある, 側方排水性に優れている, 自然材料を用いるため経済性に優れ, 環境負荷が小さいことなどの利点が挙げられる。この工法は古くから利用されているものの, 十分な精度を持ってその能力を発揮させる手法が確立されているとは言い難い。そこで本研究では, 土/水/空気連成有限要素解析 DACSAR-MP を用いて解析を行い, 様々な条件下でのキャピラリーバリアの性能を評価した。

キーワード: キャピラリーバリア, 土の水分特性, 限界長, 体積ひずみ

1. はじめに

1.1 研究背景

近年, ごみ問題解決に向けて循環型社会の実現が目指されており, 資源の再使用, 再生利用, 廃棄物の発生抑制などの技術が進歩し, 我が国の廃棄物排出量は僅かながら減少傾向にあるが, 依然として一定量は恒常的, 安定的に排出されている状況である。廃棄物のうち再使用, 再生利用することが困難なものは最終処分場で埋め立て処分される。最終処分場の残余年数は分別, リサイクルの普及によって増加傾向にあるが, 首都圏, 近畿圏で排出される産業廃棄物をそれぞれの圏内で処分するとした場合, 残余年数は首都圏で 4.0 年, 近畿圏で 14.0 年と試算され, 依然として厳しい状況にある。加えて, 廃棄物の大量発生源である都市部周辺で新たに最終処分場を建設することは住民の反対運動により非常に困難な状況である。その要因として周辺環境への環境問題が挙げられる。最終処分場においては周辺環境への悪影響を低減することが求められるが, 浸出水による水域汚染が大きな課題となっている。浸出水の大部分は降雨によってもたらされており, 水域汚染を防ぐためには降雨による地盤浸透水を廃棄物埋め立て部へ侵入するのを防ぎ, 適切に排水することが求められている。

1.2 キャピラリーバリアシステムについて

降雨による地盤浸透水が廃棄物埋め立て部へ侵入するのを防ぐためには、表面遮水（トップカバー）が重要となる。コンクリートや遮水シート等を用いれば、浸透水を完全に遮断することは可能であるが、材料の経年劣化による機能の低下や廃棄物の安定化の面で十分とは言えない。そこで浸透水を制御でき、かつ通気性があるため廃棄物の安定化の促進が期待できるキャピラリーバリアが注目されている。キャピラリーバリアとは土の保水性の違いによる遮水機能のことである。図1に示すように上層に細粒土、下層に粗粒土を配置し、勾配をつけることにより、降雨による浸透水は上層において保水され、2層境界面を集積流となって流下する。そのことによって下層への水の浸透を抑えることができ、側方へ適切に排水することが可能となる。キャピラリーバリアを用いるメリットとして通気性があることに加え、側方排水性に優れていること、自然材料を用いるため経済性に優れ、環境への負荷が小さいこと等が挙げられる。この工法は古くは古墳の石室内部の湿潤化を防ぐために利用されていたことから長い歴史を有しているものの、十分な精度を持ってその能力を発揮させる手法が確立されているとは言い難い。

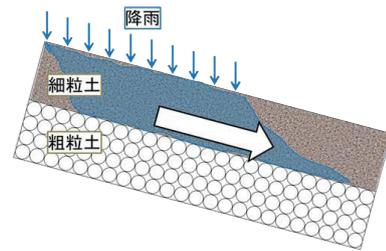


図1 キャピラリーバリアの構造

1.3 本研究の目的

キャピラリーバリアの性能は、降雨強度、斜面の勾配、層厚、地盤の材料特性に起因することが指摘されているが、具体的な遮水能力との関係性は明らかになっていない。本研究では、土/水/空気連成有限要素解析（DACSAR-MP）を用いて、キャピラリーバリアの性能を評価することを目的とする。

2. 解析条件

図2、3に解析に用いたメッシュ図および水頭・変位・空気の境界条件、試料の水分特性曲線、表1に試料の材料定数を示す。本研究では、斜面勾配、細粒層厚がキャピラリーバリアの性能に及ぼす影響を検討するため、斜面勾配は 5° 、 10° 、 15° 、細粒層厚は20cm、30cm、40cm、50cmを設定した。また降雨条件は、降雨を24時間与え、その後24時間放置とした。

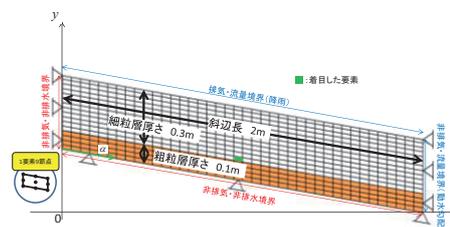


図2 解析メッシュおよび境界条件

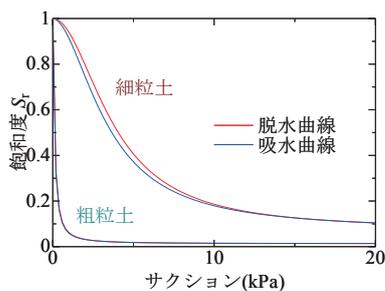


図3 水分特性曲線

表1 材料定数

	λ	κ	M	ν
細粒土	0.3	0.06	1.375	0.3
粗粒土				

	m	e_0	k_w	k_a	S_{rc}
細粒土	0.67	1.00	1.12×10^3	1.12×10^3	0.073
粗粒土	0.58	0.84	2.85×10^2	2.85×10^4	0.013

また本研究では初期状態として自然状態の斜面を想定し、図4のようにサクシオンが α 軸方向に一定で、 y 軸方向に大きくなるように設定した。その結果、初期全水頭分布は図5のようになり、上流側から下流側への動水勾配が発生している。

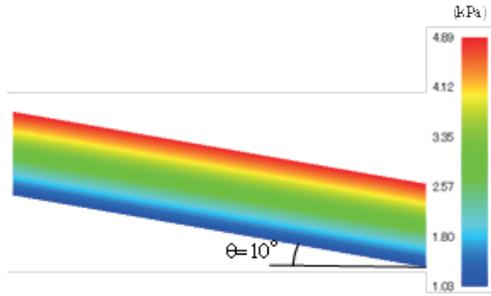


図4 初期サクシオン分布

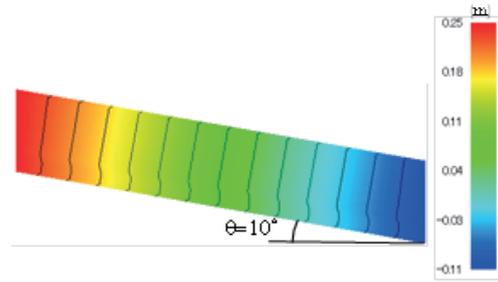


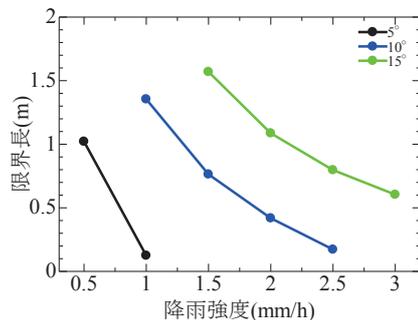
図5 初期全水頭分布

3. 解析結果

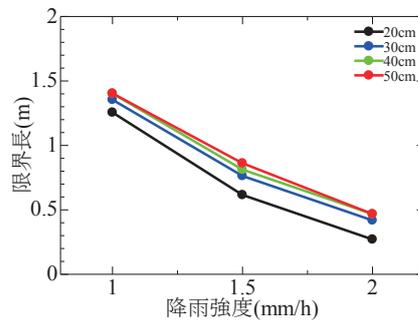
3.1 限界長について

限界長とは集積流の開始位置からキャピラリーバリアが破れ、下層への水の浸透が始まる地点までの水平距離のことをいう。これは下層への水の浸透を防ぐことができる範囲であり、実際に最終処分場においてキャピラリーバリアを設計するには重要な指標となる。本研究では、限界長が斜面勾配と細粒層厚の違いによりどのように変化するのか検討を行う。

図6に降雨強度と限界長の関係を示す。(a)が斜面勾配による影響、(b)が細粒層厚による影響である。(a)を見ると、同じ降雨強度においても、斜面勾配を大きくすることで限界長が大きくなっている。また斜面勾配を大きくすると、より大きな降雨強度においてもキャピラリーバリアが機能することがわかる。一方、(b)を見ると、細粒層厚が大きくなることで、僅かに限界長も大きくなる傾向が見受けられるが、最も差がある場合でも25cm未満であり、その効果は大きくないと言える。したがって、限界長は、斜面勾配による影響を強く受け、細粒層厚による影響は小さいと推察される。



(a) 斜面勾配による影響



(b) 細粒層厚による影響

図6 降雨強度-限界長関係

3.2 細粒層厚の違いによる影響

図7に各細粒層厚における着目した要素(図-2参照)の飽和度経時変化(斜面勾配 10°, 降雨強度 1.5mm/hr)を示す。細粒層厚が大きいほど、24時間経過時の飽和度は小さく、それが図6(b)に示す僅かな限界長の差が生じた要因だと推察される。また細粒層厚が大きくなるにしたがって、飽和度の上昇スピードが抑えられていることがわかる。よって、細粒層厚は限界長に及ぼす影響は小さいが、降雨の浸透を遅らせることができ、その結果、粗粒層へ水が浸透し始めるまでの時間を遅らせることができると考えられる。

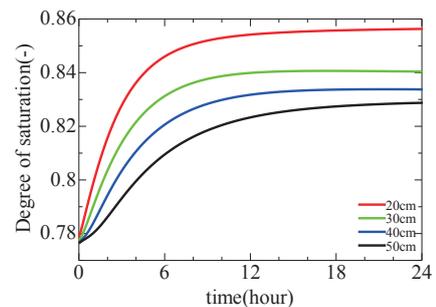


図7 飽和度経時変化

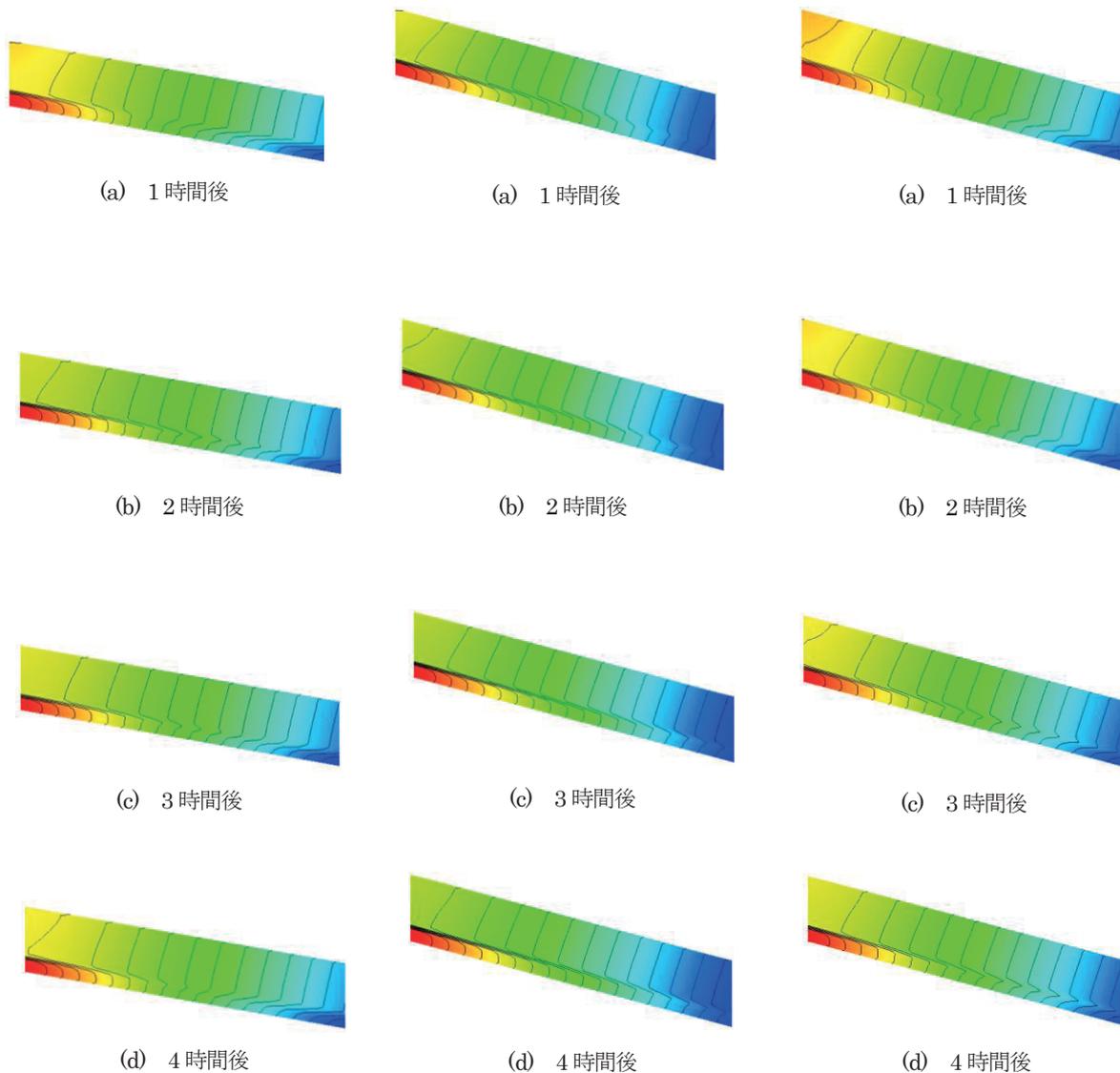
3.3 キャピラリーバリアの回復について

本項では0-24時間の降雨継続により低下したキャピラリーバリア機能が、24-48時間の降雨を停止し流量排出のみが行われる過程で、どのように回復するのかを検討する。

(1) 斜面勾配による違い

ここでは降雨強度 1.5mm/hr における斜面勾配 $\theta=10^\circ$, 15° の2通りに加えて、図 6(a)より降雨強度 1.5mm/hr における $\theta=10^\circ$ の場合と限界長が近い値となった降雨強度 2.5mm/hr における $\theta=15^\circ$ の1通りの計3通りについて検討を行う。

図 8, 9 に降雨強度 1.5mm/hr における斜面勾配 $\theta=10^\circ$, 15° の全水頭分布, 図 10 に降雨強度 2.5mm/hr における $\theta=15^\circ$ の全水頭分布を示す。降雨停止からそれぞれ(a)1時間後, (b)2時間後, (c)3時間後, (d)4時間後, (e)5時間後である。いずれの場合においても, 時間の経過とともに, 下層への浸透が起こっている領域の上流側から上向きの動水勾配が発生し, キャピラリーバリア機能が回復していくことがわかる。機能回復のスピードに関しては, 降雨強度が同じ 1.5mm/hr の場合においては $\theta=10^\circ$ のとき, 降雨停止から4時間後では下流の大部分で, まだ下向きの動水勾配が発生しているのに対し, $\theta=15^\circ$ のときでは2時間後で全領域において上向きの動水勾配が発生しており, 機能が回復している。また限界長が近い値となった図-1.1と図-1.3を比較しても斜面勾配が大きい方が上向きの動水勾配が早く発生することから, 斜面勾配が大きい方がキャピラリーバリア機能が早く回復すると推察される



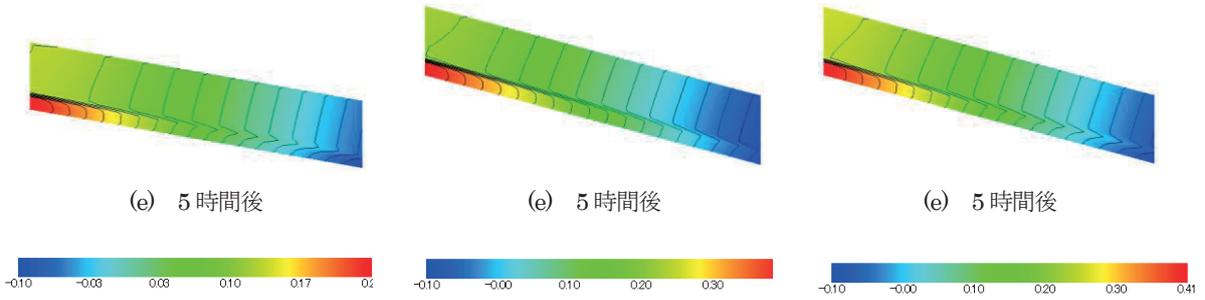


図8 全水頭分布
(1.5mm/hr, $\theta=10^\circ$)

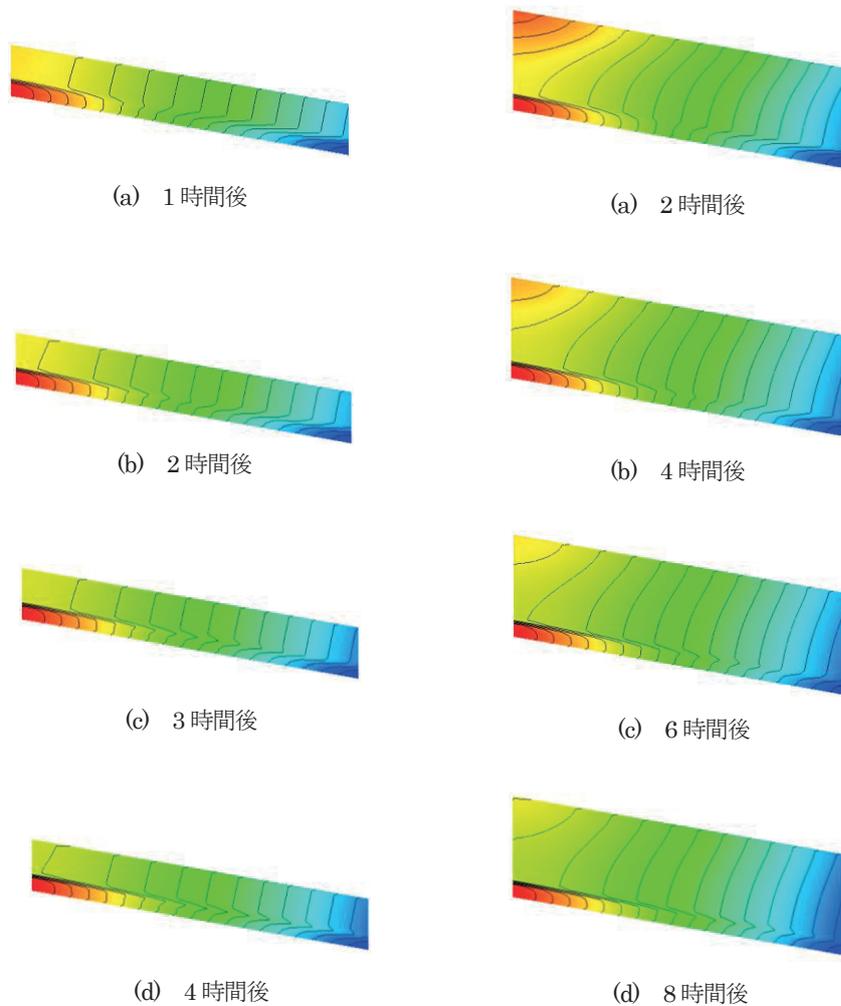
図9 全水頭分布
(1.5mm/hr, $\theta=15^\circ$)

図10 全水頭分布
(2.5mm/hr, $\theta=15^\circ$)

(2) 細粒層厚による違い

ここでは降雨強度 1.5mm/hr における細粒層厚 20cm と 50cm の 2 通りについて検討を行う。

図 11, 12 に細粒層厚 20cm, 50cm における全水頭分布を示す。細粒層厚 20cm の場合、降雨停止から 4 時間後にはほぼ全領域において上向きの動水勾配が発生し、キャピラリーバリアの機能が回復していると推察されるが、細粒層厚 50cm の場合、全領域で上向きの動水勾配となる時間は 8 時間後である。したがって、細粒層厚が大きくなるとキャピラリーバリア機能の回復に時間を要すると考えられる。



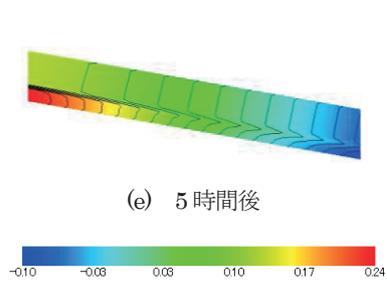


図 11 全水頭分布 (1.5mm/hr, 20cm)

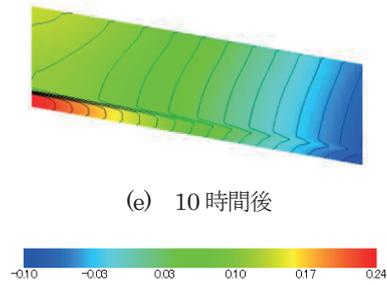


図 12 全水頭分布 (1.5mm/hr, 50cm)

3.4 変形について

(1) 降雨強度の違いによる影響

図 13 に斜面勾配 10° 、細粒層厚 30cm における 24 時間経過時の体積ひずみ分布 (圧縮が正) を示す。(a)2.0mm/hr、(b)3.0mm/hr である。降雨強度が大きくなるにしたがって、上層の下流側で圧縮のひずみが大きくなっている。この領域は集積流によって飽和度が上昇する領域であり、不飽和土が浸水によって飽和化する過程で生じる体積圧縮だと考えられる。降雨強度が大きければ、飽和度も高くなり、それによって圧縮量が大きくなったと推察される。

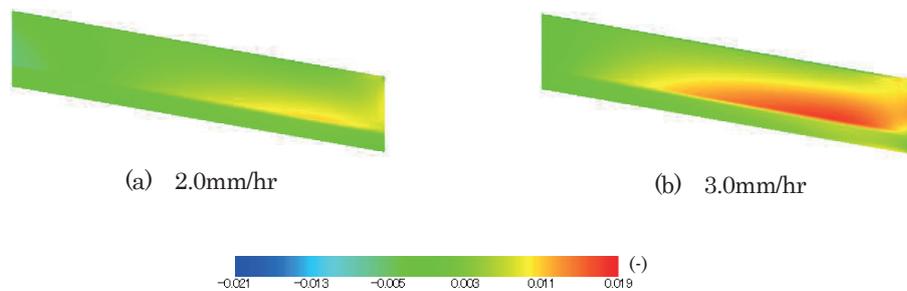


図 13 体積ひずみ分布(10° , 30cm)

(2) 細粒層厚の違いによる影響

図 14 に斜面勾配 10° 、降雨強度 3.0mm/hr における 24 時間経過時の体積ひずみ分布を示す。(a)細粒層厚 40cm、(b)細粒層厚 50cm である (図 13(b)が同条件における細粒層厚 30cm の場合)。これらの図を比較すると、細粒層厚が大きくなるにしたがって、圧縮の体積ひずみが小さくなっている。この要因として、飽和度が考えられる。3.2 で述べたように、細粒層厚が大きくなると、浸透を遅らせることができ、その結果、地盤の変形も抑制することができると推察される。

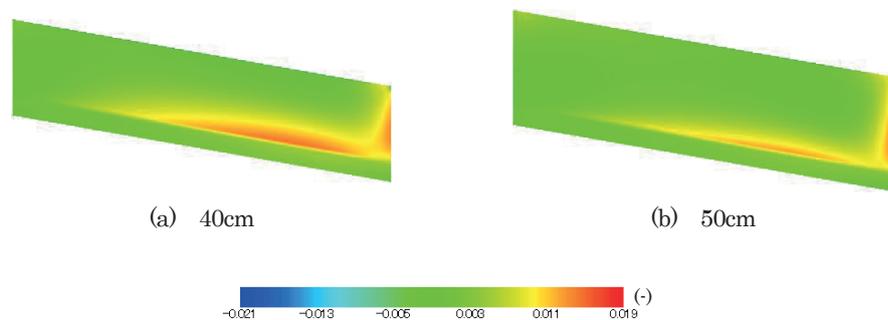


図 14 体積ひずみ分布(10° , 3.0mm/hr)

4. 結論

限界長は斜面勾配の影響を強く受け、斜面勾配を増大させることにより、限界長は大きくなり、より強い降雨強度においてもキャピラリーバリアの機能を発揮させることができる。また細粒層厚を増大させることにより、2層境界面への降雨の浸透を遅らせることができる。それによってキャピラリーバリア効果の持続時間を長くすることができるとともに、地盤の変形も抑制することができる。また、降雨浸透により低下したキャピラリーバリア機能の回復についても検討した。斜面勾配が大きい方がキャピラリーバリア機能が早く回復し、細粒層厚の増大により機能の回復に時間を要すると考えられる。

著者：1) 中村翔一，工学研究科，学生；2) 河井克之，都市安全研究センター，准教授；3) 飯塚敦，都市安全研究センター，教授

Evaluation of a capillary barrier system with the soil/water/air coupled F.E. code

Shoichi Nakamura

Katsuyuki Kawai

Atsushi Iizuka

ABSTRACT

Recently, realization of the recycling society is aimed at for a garbage solution to the problem. Techniques such as the reuse of resources, recycling, waste prevention has been advanced, albeit on the decline slightly waste emissions in Japan, still a certain amount is permanent, is stable emissions is the situation. Wastes that is difficult to reuse and recycle is landfill disposed at waste repository site. An important objective in the management of wastes is to control the amount of water percolating through the wastes there. Therefore, the cover system of repository site is very important. The use of capillary barrier system is one of promising candidates as a cover system. But, capillary barrier mechanism is not understood well. In this study, we evaluated the performance of capillary barrier system with the soil/water/air coupled F.E. code, DACSAR-MP. As a result, it was shown that slope angle and thickness of upper soil layer influence the performance of capillary barrier system.

©2015 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.