

「河川堤防の安定を考える」

西垣 誠

岡山大学大学院

環境学研究科 教授



【西垣委員】 きょうはこんな機会をいただきまして、ありがとうございます。「河川堤防の安定を考える」と題して講演します。

これは平成16年の福井県の足羽川の堤防決壊です。河川水がオーバーフローして洗掘して決壊したと言われています。そんなに立派な堤防じゃないんですけども、堤防の内

H16. 7月福井県足羽川の堤防決壊



H16. 7月福井県足羽川の堤防決壊



部が分らないで、50メートル置きに堤防内をボーリング調査をしていただき、診断をしました。そのときに、河川堤防というのは国民の命を守っていることを改めて感じました。

今70歳以上の人間が30%で、あともう少ししばらくしますと、今20歳の方が65歳ぐらいなる訳です。平成16年の刈谷田川の水害では、70歳以上の方が亡くなっておられます。私ももう高齢の域になるんですけども、100年先になったら洪水が来てもほとんど逃げられない人間ばかりになる。そんなときの河川というのは一体我々どう考えたらいいのかなということが重要だと思います。現在の河川堤防はこういうことで設計していますよということを国民に理解してもらう必

河川堤防の安定を定量的に 評価するために何が必要

- 堤防内の情報を得る(診断工学)
 - 物限探査 **Diagnostic Engineering**
- 堤防が国民の命を守っている

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 4

少子高齢化社会¹⁾

2020年 70歳の高齢者の人々が30%

2055年 現在(2010年)20歳→65歳が約40%

100年の計を考えると、どうなるのか？

参考 1) 西垣千春,「老後の破綻」,中央公論新書,2011,pp.92-93

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 5

要がなんかあるような気がします。この間、9月3日のときの新潟の信濃川の洪水で、テレビでは「信濃川の水、満杯です、満杯ですって」と何回も報道していました。現場の国交省の副所長にアナウンサーが危険性を質問していましたが、副所長は「大丈夫です」と一言言っているだけでした。報道は何かものすごく雨が降って、異常気象でこれからどうなるんだという感じで、住民をむしろけしかけているような感じがしました。私は、もう少し報道機関に教育をしてもらえないかと思いました。

- 現在の設計思想
基本思想 } を国民に理解してもら
100年確率？1000年確率？
- それぞれの流域の住民に理解してもら
異常気象にどこまで対応できるか



昔、1986年に京都大学の村本先生が委員長で、洪水における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究を行っています。そのときの資料なんですけれども、堤防の決壊は越流が多く、浸透により崩壊するようなことはあんまりないんだよと言っておられたんです。最近でも越流して崩壊するケースが随分あります。

将来に向けて、越流しても、越水しても守れるような堤防というのは少し考えておく必要あると思います。

破綻の原因²⁾

表2.1 被災形態別分類

被災形態	越水	非越水	計
破堤	183	62	245
表欠壊	26	184	210
裏法崩壊	19	37	56
軽・無被害	78	0	78
計	306	283	589

参考(2) 村本嘉雄(研究代表者),「洪水時における河川堤防の安定性と水防技術の評価に関する研究」,文科省自然災害特別研究成果,1986,pp.9.

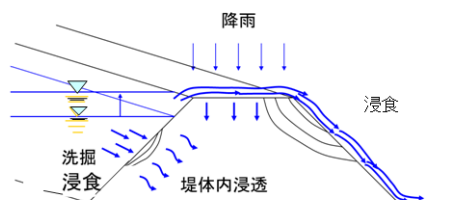


図-1 河川堤防の崩壊例

February 6, 2012

本題に入ります。雨が降り、洪水時に堤防の中に浸透して入っていく浸透現象を考える場合、堤防の透水係数が重要となります。不飽和の浸透特性をどうしよう。前回の竹下先生の資料にもたくさんこの内容がございました。それから、透気性の問題も重要な課題です。堤防の中で空気が抜けるかというような、エアークエンリーバリュウというのも考えていこうというふうなお話がございます。

堤体の安定を力学的に議論する 浸透に関する課題

- (1)河川水や降雨浸透の経時的な変動を予測するために、堤体内の構成材料の浸透特性を把握する。
- (a)透水係数
 - (b)不飽和土の浸透特性
 - ①不飽和土の透水係数
 - ②不飽和土の水分特性
 - (c)不飽和土の透気特性
 - ①不飽和土の透気係数
 - ②エアークエンリーバリュウ

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 9

さらに、堤防の中の初期の飽和度はどうなっているんだろうかと。あるときに雨が降ってきました、その雨がこれからどれだけ浸透していきますかということは、堤防の中の初期飽和度がわからないと、私たちは時間的な予測はなかなかできないということが大切です。ですから、堤防の中の現在の状況から、モニタリングしていくような方法ないだろうかということで、TDR, ADRという、誘電率によるモニタリングセンサー等がありますが、そういうふうなものを入れておいて、初期の状態はこうで、雨がこうなってきて、河川水位はこうなってきて、この中はこんなだよというふうなモニタリングをすることが必要となります。

浸透に関する課題

- (2)堤体内の初期飽和度の予測
- (a)堤体内の飽和度の原位置での計測
 - ①誘電率による計測 (TDR, ADR, FDR)
 - ②光ファイバーによる計測 (FBGセンサー)
 - (b)物理探査による飽和度の予測
 - ①電磁波トモグラフィー
 - ②比抵抗トモグラフィー
 - ③EM法
 - (c)ボーリングによるサンプリング
 - ①無水掘り
 - ②スクスクによる掘削

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 10

我々の岡山大学では、光ファイバーで土中の水分をはかれないかというふうな研究もやっています。この光ファイバーでやる研究というのは、既に高梁川などで光ファイバーのFBGのケーブルが入っていますので、これと接続し、光ファイバーをセンサーと活用し、水圧や誘電率をモニタリングできるようなシステムがつかれるんじゃないかなということをやっております。

物理探査に関しましては、電磁波とか、比抵抗でも計れます。飽和度をコンスタントにモニタリングするのは、物理探査装置を現地に設置しなきゃならないので大変と考えています。ですから、ある一瞬の状態を $t=0$ として、この時、堤防の中はこんな状況ですよというふうな方法で、中を知るといのは非常に有力な行為じゃないかなと思います。

それから、ボーリングでサンプリングして飽和度を計る方法です。普通にボーリングを掘ってみますと、どうしても水を使って掘りますので、初期の飽和度がわからないという

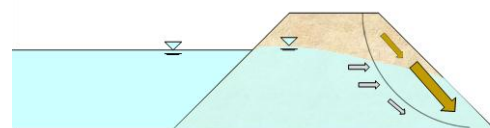
課題があります。関西大学の西田先生たちは、法面のボーリングの掘方で大口径で掘ったらいいでしょうとか、気泡で掘ったらいいでしょう。そうしたら、そのサンプルの飽和度はわかりますよと言っております。最近、汚染関係の現場では、パーカッションみたいな感じで、無水掘りでサンプルするような安い技術もありますから、それで結構掘れるところまで掘れるんじゃないかと思っています。ただ、れきとかになった場合には、なかなか小さなエネルギーで掘っていきますので、土をどういうふうな形で持ち上げてくるかというのが、これからの大きな課題になってくると思います。

一方、堤防の安定を考えるとときに、一般的には浸透により堤防内に生じる浸潤線、水面を想定し、水面より下のところと上に分けて、円弧すべりで、安全率を出して安定評価をしている。ですから、斜面の安定の評価が定常水位を想定して評価しているというのが現状です。

本当に定常状態で安定を検討していいのかという話ですね。河川水位がこうになってい

ますよと、上から雨が降ってきていますのでこんな感じで、この浸透線が到達して、自由水面は曲がってきますけれども、これが、到達した瞬間には、この堤防の中というのはほぼ全体が飽和な状態になります。例えばA点での水圧の上昇を見ていただきましたら、上からの浸潤線が地下水面に到達した瞬間に水圧は上がる。それまではあんまり水圧は変化しないで、急に上がってくるといような現象ですね。

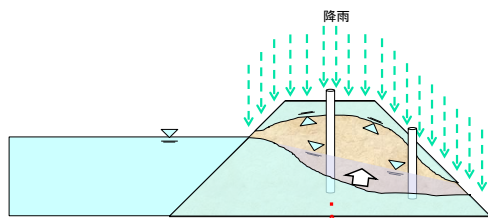
(c)浸透水圧の評価



斜面安定の評価
定常水位を設定して評価している

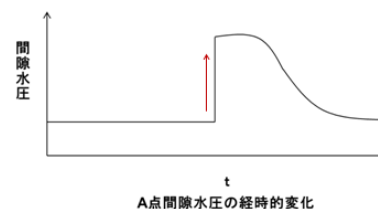
Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 11

本当に定常状態の評価で良いのか



Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 12

A点での間隙水圧の変動



A点間隙水圧の経時変化

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 13

この浸潤線が到達して、この中が全部飽和になって、この上の領域が正になったときに、全体の地下水が向こうへ流れようとする、これが下向いている間は結構堤防は安全だと。

浸潤線が到達して、この中の圧が全部正になってしまって、それで用意ドンで、浸透水圧がこの堤体に全部かかって、こちらに移動しようとした瞬間が一番不安定な状況じゃないかなと私は思うんです。そういうことを考えると、今、私がやっている飽和、不飽和の浸透とか、不飽和上の力学は何も要らないんじゃないかと思います。極論すると、堤防がまず水でいっぱい、正までドンと移動しているときに、大丈夫かというような簡単な議論をしていってもいいんじゃないかと思います。一番危険な状態というのはそんな時じゃないかなと考えます。ですから、そのときはもう飽和で結構ですよと考えることもできます。

定常から非定常を考えるんですけども、どんなような条件、降雨による浸潤線が地下水面到達したときが一番危険で、そのときの浸透水圧を考えるのであれば、岡先生がやっているカップリングの問題でやってみれば評価できるというふうに思います。ですから、堤体はもう飽和の状態、地下水の流動による浸透水圧は、カップリングやれば堤体の安定評価ができることになります。

ただし、浸透と力学をカップリングしただけでは、安全率に結びつかないことも課題です。ですから、鵜飼先生がやっているように、粘着力を何か順番にずっと下げていって、安全率いくらかというふうな評価手法があるのか、その辺は考えなければいけないんですけど、とにかくカップリングでこれからは検討する必要があるんじゃないかなというふうに思います。

堤体の安定を議論

- (1) 定常解析→非定常解析
- (2) 降雨の浸透前線が地下水位面に到達した時が一番危険である。
- (3) 浸水圧を考慮するため飽和領域での地下水の流れを考慮した安定評価をする。

まとめ

堤体の安定評価する方法

- (1) 堤体内がすべて飽和状態を計測して地下水流動による浸透水圧を考慮して堤体の安定評価をする

- (2) 堤体の安定評価に関する物理特性は飽和状態のせん断特性で評価する

- (3) 降雨浸透状況や堤体内の水位などをモニタリングして、降雨による将来状況を予測する

- (4) 浸透と力学のカップリング解析で説明できるのでは

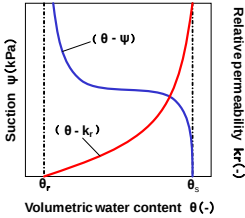
地下水より上の地盤がどれほど水を保水しているか、飽和度によって透水係数がどのような変化をするのか、を何とかとりたいと思いチャレンジしています。ダムセンターコアが最初結構飽和な状態なんですけど、それがしばらくしたら流れていってどうこうなっ

いくというようなことも随分問題になっていますので、土木研究所の山口さんなんかそういうようなお話を、どんどん今、私のところに持ち込まれたりしておられます。



不飽和状態の地盤の
浸透特性をどのように求めるか。

- ①室内透水試験
- ②原位置透水試験



不飽和浸透特性の模式図

室内の透水試験法というのは、定常法と非定常法があります。これは1972年にkluteが整理してくれた手法です。定常法というのは、結構時間かかるし、もっと格好いい方法ないかなということで、非定常法で、水分を計測するInstantaneous Profile Methodなどがあります。飽和のサンプルがあつて、それから、水を排水していく、あるいは上から水を入れることによって、この中の水分量がどんどん変化してくるのを、Tensiometerとかで水分量をはかる。この場合、FDRと書いてありますけど、別に出発点は中性子を使ったり、ガンマ線使ったり、いろいろなものでこの中の水分量をはかりましょうということです。指定情報でやっていこうじゃないかとい

うふうな形で随分提案したんですけども、なかなか技術は普及しないですね。邪魔くさ過ぎるのと、難し過ぎるのと、特殊な試験装置が必要などが原因だと思います。RIを使って水分量をはかる方法だって結構大変だし、誘電率によって水分量をはかる、例えばADRとかTDRというのは結構使われているんですけども、1箇所あたり十何万円とか何かになってくると、2カ所、3カ所それを設置して、水分量をはかるんですよとなって

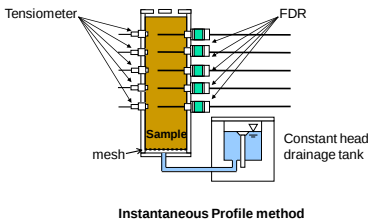


室内透水試験法

原理	方法	
定常法	圧力制御	索引法
	流量制御	加圧法
	流出流入計測	透過制御法
		加圧逆流法
非定常法		One-step法
	水分分布計測	Boltzman Transform Method
		Moisture moment Method
		Vertical infiltration Method
		Crust-topped columns Method
		Sorptivity Method
		Hot Air Method
		Instantaneous Profile Method
	逆解析	Multi-step Outflow Method



■ 非定常法
瞬時水分計測法(IPM)



くると、コンサルの方も随分大変だという。ですから、もう非定常をやめて、定常でもいいから、もうちょっと何かこう簡単な手法で、計測に長い時間かかってでもいいから、簡単な手法でやれないだろうかということで、1957年、Richardsが提案している定常法でもう一遍やれないだろうかというところへ、私も今帰っていています。

供試体内の体積含水率の 経時的な変化をどのように計測するのか？

- (a) RIIによる計測法, γ 線, 中性子
- (b) 誘電率による方法, TDR, ADR, FDR

これらは、水分量の計測に特殊な装置が必要になる。
一般的な試験法として、普及しにくい。

February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 21

負の圧力水頭を現地で計測しているのが、Richardsの手法なんですけれども、最も原始的な方法なんです。サンプルにTensiometersとこのを入れて、上から水を送って、この間の水頭差で幾ら水の量が流れてましたということをはかりましょうという。さらに、空気圧を加えることによって、この中をドライにしていって、乾燥側のやつをどんどんはかっていきましょうという方法がRichardsの方法です。これは最もシンプルな方法なんですけれども、現位置から室内に持ち込んだものにどうやってこのTensiometersをくっつけるんだろうかと。こういう試験装置ですので、水が高フィルターセラミックディスク、後でこれも悩みの種になるんですけれども、セラミックディスクをつけますと、この境界のところに水が流れないようにと、我々、現位置から持ってきたものには、メンブレンを張り付けて、この中を流れてくれるようにやります。メンブレンをつけた状態でどうやってTensiometersをつけるんだという、これもな

定常法は？

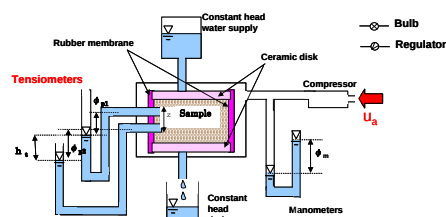
- (a) 比較的簡単な手法である。
- (b) 計測に長い時間を要する。

February 6, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 22

Richardの方法(定常法)

- (a) 供試体内の負の圧力水頭の計測方法
 - i) 長時間の負の圧力水頭の計測は困難である。
 - ii) 間隙水圧計の先端のポーラスカップの土との接触によって、値が変化する。
 - iii) 不飽和土中のその値を計測した結果より、導水勾配を求める事は困難か？
 - iv) 供試体にどのように間隙水圧計を設置するのか？

February 6, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 23



Richards型不飽和透水試験装置図

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 24

なかなかできない仕様となってきました。

昔は、メンブレンのところにゴムへそをつけて、それで中の水圧をはかるというふうなことをしていました。これは、信州の阿部先生のドクター論文なんですけど、先生は、横から入れるのが大変だったら上と下につけませんかというような装置をドクター論文の中で研究していました。供試体の上から空気圧をかけて、この中をある飽和度にして、水を流してやって、上と下の動水勾配で水がどれくらい入ってますかというのを、カウンターウェイトを両方つけてはかりましょうというような方法を使っておられます。非常におもしろい方法なんです。

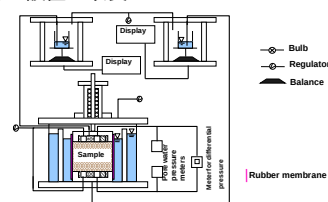
これは小野先生と杉井先生がやられた方法です。これはどこにも間隙水圧計はついてないんですけど、この供試体の上と下の水の流れて、幾ら水が流れたかで、ここの透水係数をはかる方法です。ヘッド差によってセラミックディスクの透水係数を補正してやれば、透水係数がはかれますよというようなことで、間隙水圧計をつけなくて済むという、非常にシンプルな手法です。入った量と出ていった量の水の量は、このマノメーターではかる方法でございます。

まず、このセラミックディスクによって透水係数の補正をされるんですけど、例えば粘着力のあるというか、粘性のある透水係数の低い物質を用いたときに、それ自身のエアークエンリーバリュウがものすごく高い場合には、なかなかこの試験で我々が空気圧をかけたぐらいで、不飽和に持ち込むことは難しい

供試体に間隙水圧計が 設置できるのか？

February 6, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 25

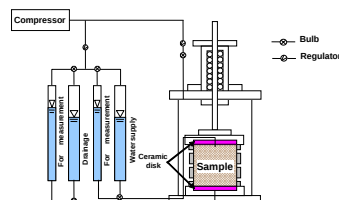
供試体の側方からの 間隙水圧計の設置の改良



阿部らによる加圧型不飽和透水試験装置図

February 6, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 26

間隙水圧計の設置を諦める



宇野らによる加圧型不飽和透水試験装置図

February 6, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 27

セラミックディスクを薄くする。 素焼のセラミックディスクー薄膜のセラミックディスク

TAIF(Thin Air Impermeable Filter)

- TAIFの透水特性
- TAIFの厚さ
- TAIFの空気侵入値(A.E.V)
- 素焼のセラミックディスクは250kPa
- 薄膜の半透膜(400kPa)のものまで開発されている。

February 6, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 28

我々は関西ですので、まさ土を用いる場合に、
 どうしても試験のときに破れてしまうんです
 ね、このまさ土の中の石英とか何かピシッと
 当たってしまいますと破れてしまうというこ
 とで、何か使えないかということで、間にSt
 ainless meshを入れてみました。ただし、サ
 ンプルの下にげた履かせてしまいますとなか
 なかPFははかれないですね。げたを履かし
 ていますのは、これは飽和ですから、このCa
 pというのは多孔質のものが、これを一緒にく
 っつけていくんですけど、ここに少し何か入
 れて浮かしてしまうと、ここに空気圧を加え
 てもこの中からなかなか水が排水しないとい
 うつらさがあるんですけれども、一応、破れ
 るんよりましだろうということで、一遍使っ
 てみようと思ってやってみました。



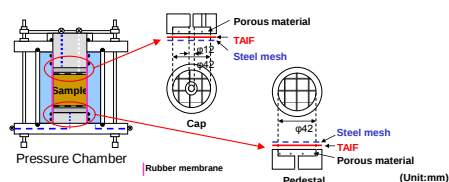
NO 30

–9–

応この間に $70\text{ }\mu\text{m}$ ぐらいの薄いステンレスメッシュを入れて、きつと供試体の何かがメッシュにめり込んできて、フィルムと接していくんじゃないかと思う、これで一応水の動きはとれる、供試体の両方につけて、排水するというので、あとは、さっき申し上げておりましたが、このセラミックディスクができるだけ薄ければ、少々この透水係数が悪くても、最終的にこの供試体の透水係数を求めるときに、この部分の影響が非常に小さな値になっていく。透水係数が悪くなったとしても、小さな値になっていきますので、キャンセルできて、ほぼこの供試体の透水係数が、それから流量から判定できるというふうな形がとれますので、できるだけ薄いセラミックディスクを用いることが合理的だろうというふうに考えています。

■ 改良点①

従来の空気導入値 250kPa のセラミックディスクに代わり、空気導入値 400kPa の TAIIF (Thin Air Impermeable Filter) と合成樹脂製硬質多孔体 (フィルター) を用いる。



キャップ及びベDESTAL部分

February 5, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 32

■ 改良点②

テンシオメーターを供試体内に設置せず供試体とフィルターを合わせた透水係数から **フィルター補正** を行い供試体の透水係数を求める。

Table-2 TAIIFと

合成樹脂製硬質多孔体の特性

TAIIF (Thin Air Impermeable Filter)	
材質	排水板ポリエーテルスポンジ (PER)
孔径 (μm)	6.1
厚さ (mm)	0.132
透水係数 (m/s)	7.72×10^{-10}
空気導入値 (kPa)	400

Table-3 フィルターの特性

フィルター特性	
透水係数 (m/s)	3.2×10^{-2}
厚さ (mm)	5.13

合成樹脂製硬質多孔体	
孔径 (μm)	100
厚さ (mm)	2
透水係数 (m/s)	1.28×10^{-2}

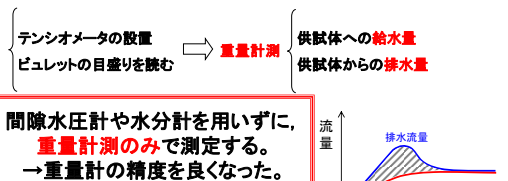
February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 33

もう1つ、先ほどマノメーターで排出流量と流入流量をはかるのを、最近はいろいろなところの重さの計量器がフルスケールの10万分の1ぐらいまでに精度よくなってきています。また、コストも安くなっていますので、重量計測で対応する方法があります。供試体の上下で入る量と、排水する量、この場合、空気圧を加えているけど、排水する量と中に入ってくる量のこの差の分だけ供試体の中から水が出ていったと考えれば、水分計を使わなくても、供試体の飽和度が測れるだろうというふうな考え方で設計しました。

当初、 $5\text{ cm} \times \Phi 5\text{ cm}$ ぐらいなんですけど、実際現位置から 6 cm の供試体がきますので、現在は $6\text{ cm} \times \Phi 6\text{ cm}$ につくり変えた装置で透水係数を求めております。これが某ダム現場のセンターコアでの試験例です。原位置から供試体を持ち込み、水を加えて、飽和の領

■ 目的

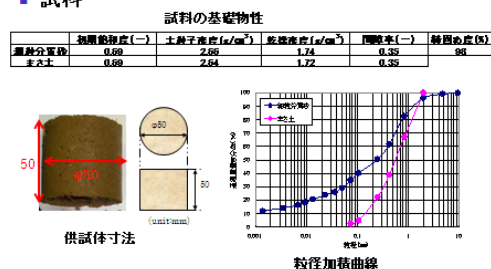
不飽和透水試験の簡易化



February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 31

域まで持ち込んで、透水試験して、さらに飽和にしたければ、空気圧、水圧をかけて、中の気泡を小さくして、飽和度高めていくという、加圧型の普通の透水試験をやっているというものです。もう一つは、飽和に近い状態から順番に空気圧を供試体にかけて、飽和度を減らしていった、不飽和のRichards型の定水位の透水試験をやりたいというようなサイクルです。

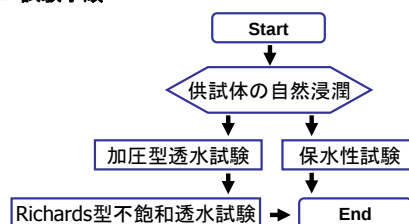
■ 試料



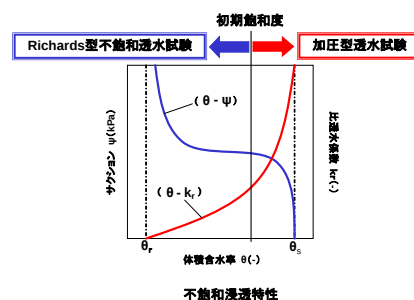
February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 34

この試験の途中に保水特性も同時にはかる必要がありますので、水分特性曲線を別途にはかる必要はないんです。これはJIS規格がございすので、その水分特性曲線は別の供試体についてはかっておけば、どのぐらいの圧をかければどのぐらいの飽和度になるというのはある程度目安がついてきます。それもやってみようということで、今のところPF曲線からいきますと、原位置試料の初期飽和度がここにあります。これに水を浸潤させて、フィールドの飽和度のところまでいかしめよう。それをさらにグリルから水圧でバックプレッシャーをかけて中の気泡を小さくして飽和度をどんどん高めて、100%飽和のところまでいきたいと思います。それを今度は、圧を下げていきますと、どんどんまた中の気泡が大きくなっていきますから、それで透水係数をはかっていった、この飽和度に対する透水係数を求めていきたいと思いますという方法です。

■ 試験手順



February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 35

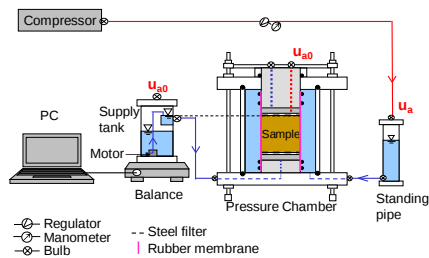


February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 36

試験の方法

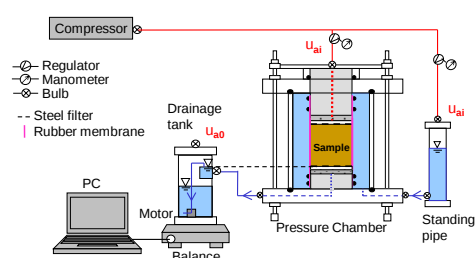
- 不飽和状態における供試体を設置する。
- 供試体を飽和にする為に給水する。
- 供試体の吸水後の疑似飽和透水係数を計測する。
- 供試体によるバックプレッシャーをかけて、供試体の飽和度を高くして、それぞれの段階の透水係数を求める。
- uaに対する供試体内の体積含水率(θ)の値により、供試体の水分特性曲線(SWCC)を求める。

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 37



自然浸潤時における試験装置

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 38

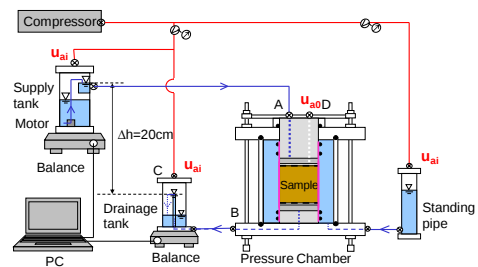


保水性試験装置

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 39

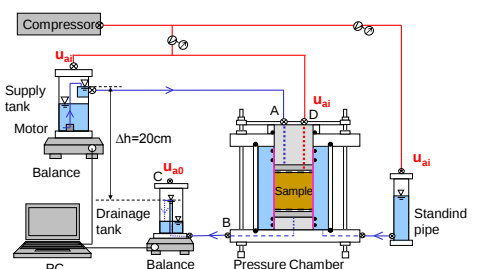
この辺から先は、先ほど申しましたが、Richards型の不飽和の透水試験、中に空気圧をかけて、中の水を排水してはかっていけばいいじゃないですかという考え方です。これは自然に脱水させた状態です。

ここに供試体があります。これは水につけてほぼ飽和に近いところまでした状態です。これは上流が装置になっています。水を補給する装置です。これが下流側の水を補給。ですから、上流側と下流側の動水勾配はこの動水勾配で、この場合、我々20cmぐらいにしているんですけども、ここに空気圧をかけます。下流側にも空気圧をかけます。ここに空気圧をかけたものはこの水を伝わって、この供試体に空気圧がかかる、下からも同じように、ですから、この供試体側の気泡が順番に小さくなっていく状態で、加える圧によって気泡をどんどん小さくして行って、ここのバックプレッシャーを加えることによって、飽和度が増していきますよね。その状態での透水係数を加えた各空気圧についてはかっていきます。できれば完全飽和のところまでの透水係数を求めていきます。そしてそれから空気圧を下げて行って、同時にここの透水係



加圧型定水位透水試験装置

February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 40



Richards型不飽和透水試験

February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 41



キャップおよびフィルター、供試体上端部分

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 42

数をはかる。その次に、ここから供試体に今度は空気圧を加えます。当然、加えた圧は同じ圧は加えるんですけど、ここは一応我々は負にしています。ですから、ここに加えた圧が、これが空気がここから逆流しないようにということで、同じ空気圧を加えています。

水頭差は20cmですけれども、加えた分だけヘッドがどんどんふえて不飽和の中から出てくる水の量は極めて小さな量ですので、加えた量だけ水頭差は増えるというような状態で、この透水試験を求めています。

これは出ていった水の量と入った水の量ですね。おそらく空気圧を加えますから、そこから水はある安定状態まで絞り出されている量と、透水試験を同時にやっていくという、両方の同じものを圧力を両方ともバランスではかっていけば、透水係数が求まりますよということなんです。

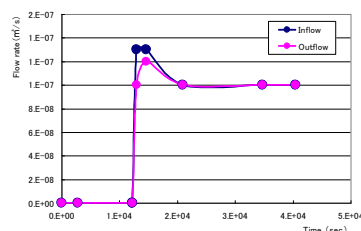
これは一例ですけれども、ちょっとこの辺もう少し伸ばしていけばよかったんですけども、全体でこれが入っていく量、この場合は入っていく量と流れ出る量の差を求めて、飽和度を求めて、一定になったところがちょうど量が一定ということで、それから透水係数を求める、動水勾配を同じような形でやっていって、最終的にこのようなデータにより透水係数を求めていく。それに見合った圧が加えたときの幾らの飽和度になったかというのではかって、PF曲線が求まると。これは1回行って我々は排水していきましてから、もう一辺今度加えている空気圧を下げていきまして、本来ここまできたらこれから我々は浸潤側が非常に大事ですので、浸潤側の透水係数と、PF曲線を求めていくという作業が必要になってきます。そんなことをやっていけば、いろいろな土の材料の不飽和浸透特性が求まります。ですから、原位置からサンプリングしてきた供試体の水分特性と透水係数



ペDESTALおよびフィルター、供試体上端部分

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 43

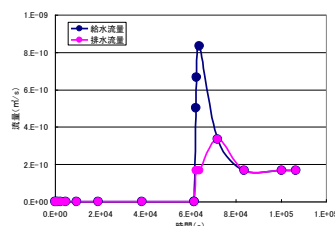
■ Masa sand (Richards method) $U_a=10\text{kPa}$



Inflow and outflow

February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 44

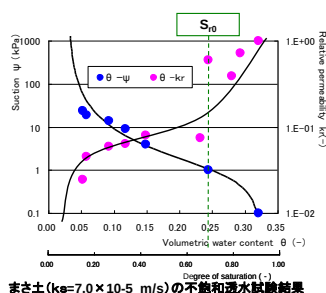
■ Fine sand (Richards method) $U_a=10\text{kPa}$



Inflow and outflow

February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 45

は、結構楽に求まるんじゃないだろうかというふうに思っております。



まき土 ($k_a=7.0 \times 10^{-5}$ m/s) の不飽和透水試験結果

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 46

サンプリングした供試体の試験

(A) 保水性試験

- (1) 空気浸入値250kPaのセラミックディスクに替わり、空気浸入値400kPaのTAIFを用いて保水性試験(加圧膜法)を行った。
- (2) TAIF上にステンレスメッシュを設置することにより、TAIFを破損しないで保水性試験(加圧膜法)ができることがわかった。
- (3) コア材(細粒分質砂)のような低透水性供試体の水分特性曲線を求めることができ、本試験法が有効であることがわかった。

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 48

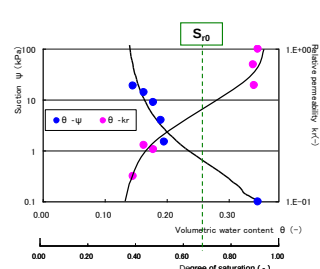
試験法の特徴

- (1) 現場よりサンプリングした供試体に間隙水圧計やテンションメーターを設置しないで不飽和土の水分保持曲線と透水係数を計測する方法を提案した。

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 50

- (3) 供試体の透水係数を精度良く求めるために、 $2\mu\text{m}$ 程度の薄い膜をセラミックディスクの代わりに用いた
供試体への流入流量と流出流量の計測

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 52



細粒分質砂 ($k_a=2.0 \times 10^{-5}$ m/s) の不飽和透水試験結果

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 47

(B) 不飽和透水試験

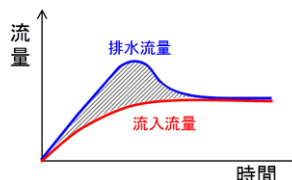
- (1) 定常法による不飽和透水試験法を改良し、加圧型透水試験とRichards型不飽和透水試験により、間隙水圧計や水分計を用いずに2つの重量計測によって試料の不飽和透水係数を求めることで、試験を簡易化した。
- (2) テンションメーターを供試体内に設置せずに、供試体とフィルターを合わせた透水係数からフィルター補正を行い供試体の透水係数を求めることで、試験を簡易化した。
- (3) 加圧型透水試験によって、初期飽和度より高飽和度域の不飽和透水係数を、Richard型不飽和透水試験によって、初期飽和度より低飽和度域の不飽和透水係数を求めた。

February 8, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 49

- (2) 透水係数を求める供試体の飽和度の変化をガンマ線、中性子誘電率計測器(TDR,ADR,FDR)などを用いなくて高精度の電子天秤を2台用いて示した。

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 51

供試体への流入流量、流出流量の精度の高い計測から供試体内の飽和度を求める。



February 8, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 53

ある時間 t における供試体内の体積含水率の値(θ)

$$\theta = \theta_0 + \left[\int_0^t q_{in} dt - \int_0^t q_{out} dt \right] / V$$

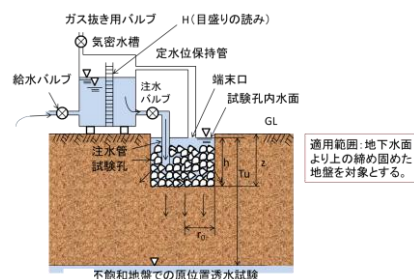
ここで、 θ_0 空気圧(P_i)を加えて透水係数をする前の体積含水率の値、 q_{in} は流入流量、 q_{out} は流出流量。



次に、現場透水試験の話をしてします。私の思想としては、現場で透水試験やる場合には、設計、あるいは危険側を考え、できるだけ大きな透水係数を求める必要があると思います。今、地盤工学会では、E 1 9 法という、アメリカの工兵隊がやっている方法を示しています。大体 3 0 cm ぐらいの孔を開けて、水位を 2 0 cm ぐらい保っていきます。一定の水位を保つために、幾ら水が入りますかというのをこのマンメーターを読んでいて、これはマリオットサイフォンをここに付けていますけど、それで流量が一定になるまではかって、ここの透水係数を求めるという方法です。これは多くのダムのセンターコアの透水係数の原位置での品質管理に使われています。もしこれが緩ければ、もう一度上の層を削って行って、もう一度締め固めるというふうなことをやっています。

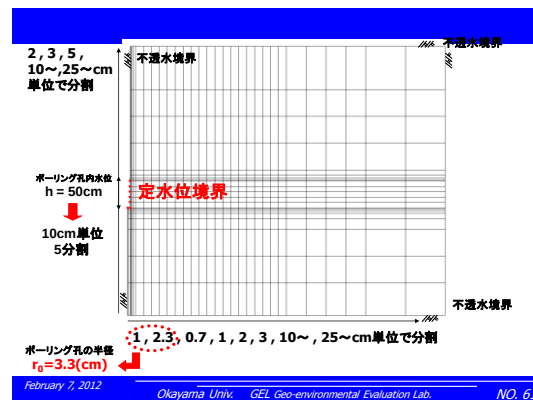
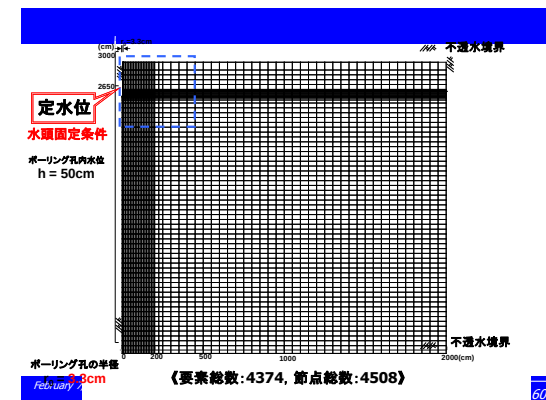
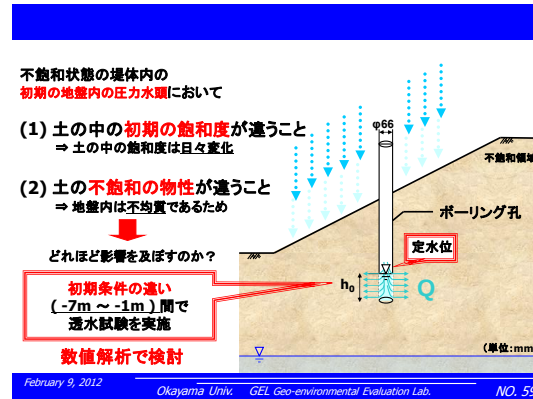
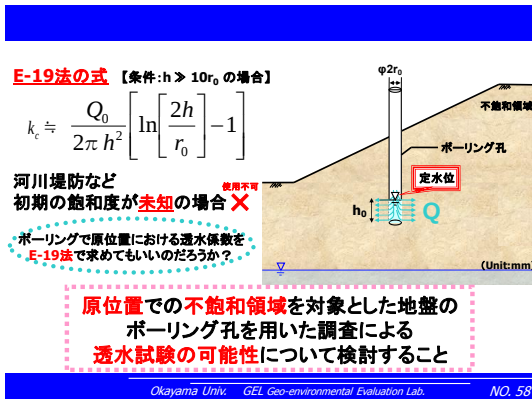
原位置試験

地盤内の飽和度を高め、
最大の透水係数を求める方法は？



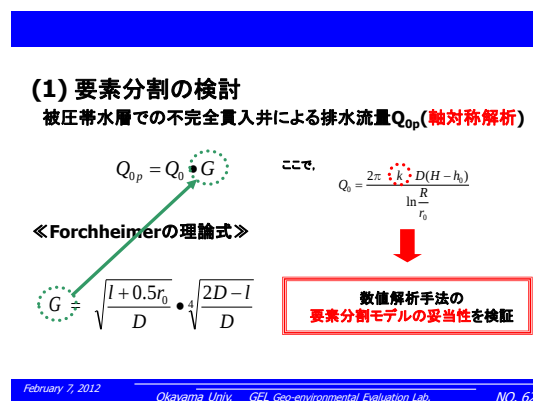
土木研究所の山口さんは、それでもこれをやると、1 日程度かかってしまうので、最初の二、三時間の流量の時間的変動をはかるだけで透水係数が予測できないかというふうな

ご研究をされておられます。このE19法は、地盤工学会のマニュアルでは、必ず締め固めた地盤を対象としますとしています。一般の斜面の不飽和とか堤防も締め固めたものですが、堤防に関してのというのじゃなしに、地下水がものすごく深いところになるという状態での試験として定義しています。



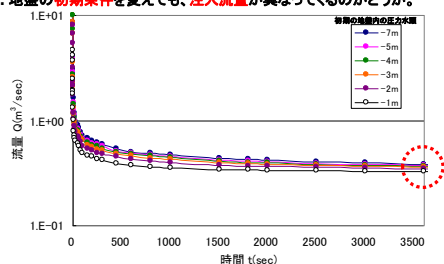
今回堤防で使えるだろうかということを試しました。E19法で河川堤防の透水係数をはかっておられる方もいますけど、学会ではまだそれは認知してないんですよね。実際にこれは数式が成り立っているんですから、口径が小さくても、そのまま全部使えるんじゃないか。ですから、このH、口径が10倍以上であれば、E19法で、後ろのややこしい

係数を全部キャンセルアウトしていけるんじゃないかという話で、不飽和の状態でいろいろな初期条件、飽和度が雨降った後とかで変わるんだと、その初期条件で、その土自身がいろいろな不飽和の透水係数で、数値解析で実際に遊んでいって、メッシュの切り方によ



り、有限要素解析の結果が影響しますから、飽和の状態でも理論式がありますから、それと比較してメッシュの分割が正しくやっていくのを見た後、不飽和の状態でも分割の妥当性を確認してはかかっていきますと、この場合はある一例ですけど、初期の水分特性、飽和度が全然違うような状態でやっていっても、何時間かたってくると一定の状態に達することがわかりました。

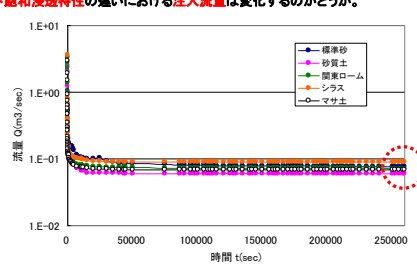
Q. 地盤の初期条件を変えても、注入流量が異なってくるのかどうか。



A. 定常に近い状態における流量にはあまり影響しない

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 63

Q. 不飽和浸透性の違いにおける注入流量は変化するのかどうか。



A. 定常に近い状態における流量にはあまり影響しない

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 64

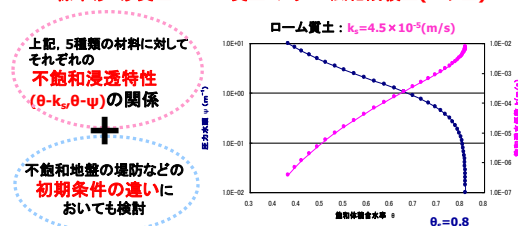
同じように、標準砂、ローム、シラスとか、いろいろな土についての不飽和の物性をほうり込んでいっても、まあそんな色々な状態にならないで、計測した流量をE19法に入れて透水係数を求めたものと、数値解析の入力データで入れたものとの比較をやってみても、この求まってきた θ から k を求めたのと、自分

が数値解析に入力データで入れたものを比較してみても、そんなに悪い結果じゃない。これは入力データと結果を見てみると大体同じぐらいの値になってくるじゃないかというふうなことをほぼ確認させていただいたので、ボーリング孔の中でも透水試験をやってもいいんじゃないかなというふうな気がしております。

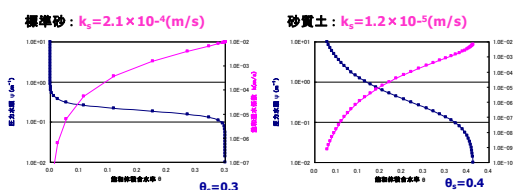
(2) 不飽和地盤での数値解析の検討

＜対象とする地盤＞

標準砂・砂質土・ローム質土・シラス・風化残積土(マサ土)

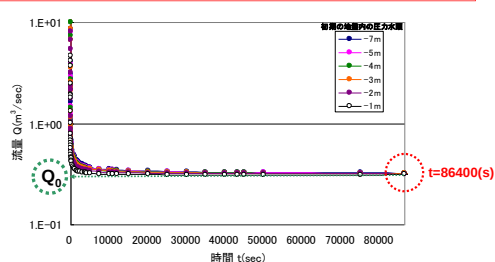


February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 65

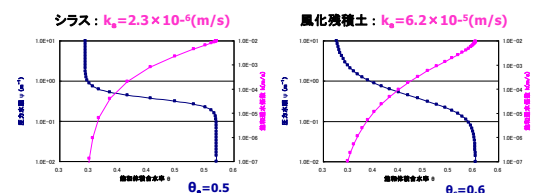
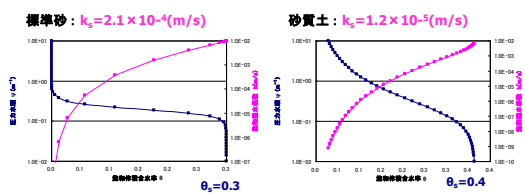
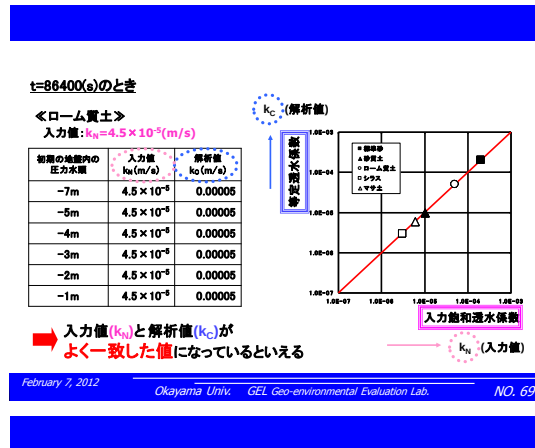
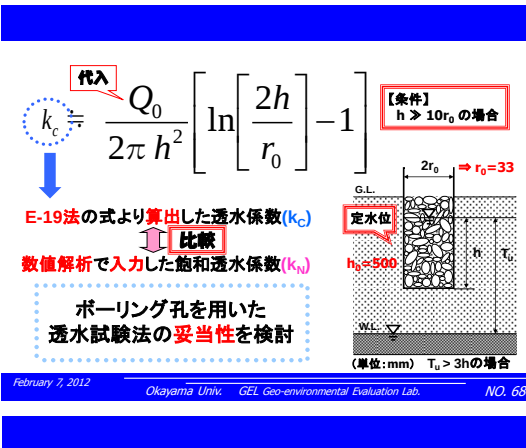


February 9, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 66

条件: $tk \approx 0.02m$ 程度で、ほぼ定常に近い状態とみなすことができる。



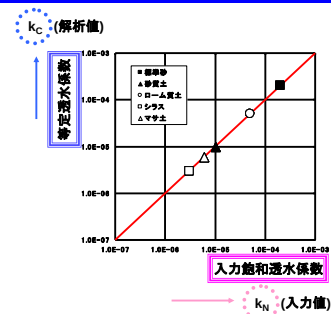
February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 67



原位置透水試験結果の評価

- (1) 地盤の初期の飽和度の差が異なる場合においても、定常に近い状態における注入流量にはあまり影響しないことが分り、求められる透水係数は同じであることが分かった。
- (2) 堤防などの不飽和地盤の初期含水(初期圧力水頭)の条件が異なる場合でも、定常に近い状態における注入流量には、あまり影響しない。
- (3) 不飽和の浸透特性($\theta - \psi, \theta - k$)が変わっても、飽和透水係数が同じ場合は、定常に近い状態における注入流量には、影響しない。

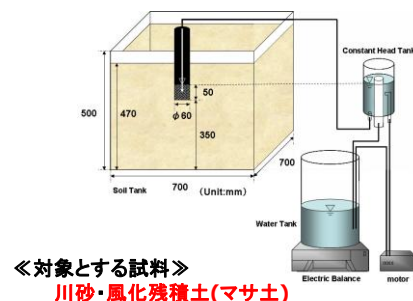
February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 72



ボーリング孔を用いた透水試験より得た流量(Q_0)と
E-19法の解析式より得た透水係数(k_c)は、
入力飽和透水係数(k_N)によく一致した値になっている。

E-19法の妥当性及び、不飽和地盤内に
地質調査として実施されるボーリング調査孔を用いて
定水位透水試験を実施し、その注入流量(Q)より
透水係数を測定する方法は適していると判断できた。

February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 74

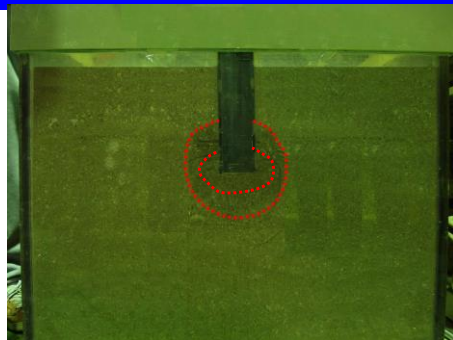


February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 75

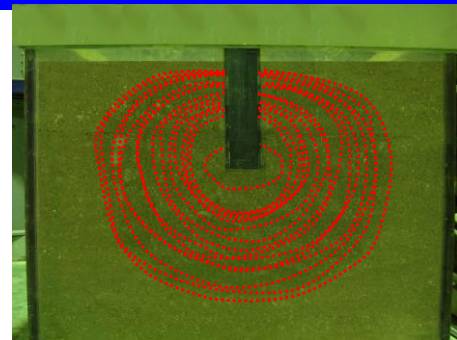
- (1) 不飽和状態でのボーリング孔を用いた試験を行い、その結果をE-19法で解析した結果と、そのモデル地盤からサンプリングしてきた供試体の透水係数とを比較し、ボーリング孔による手法の妥当性と検証する必要がある。
- (2) 実際にフィールドで実施する際には、深い孔内で定水位を保ち、流入流量とどのように計測するかが大きな課題となる。
- (3) 不飽和状態の土に水が浸透して飽和状態になるときは、初期の土の飽和度によって、最終的な透水係数の値が異なってくる。



February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 76



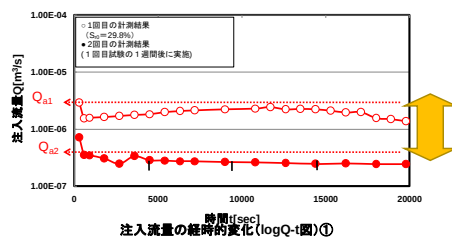
Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 77



Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 78

初期の飽和度が変わった状態で試験しても、同じ結果が出てくるだろうということで、実際にやらしていただいたんですが、これがその結果の一例でございます。こちらが一番最初ほぼ30%ぐらいの飽和度で透水試験した結果です。それを試験した後、1週間ぐらいその場所置いておいて、もう一度試験しますと、こんなふうになってしまうということです。何回か試験していると、ワンオーダー、この場合でしたら7分の1ぐらいですかね、

試験結果



79 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 79

試験結果

表-2: 不飽和地盤での単孔式透水試験のモデル実験結果

試験回数	1回目 ($S_0=29.8\%$)	2回目 (1回目試験の1週間後に実施)
流量	$1.86 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$	$2.58 \times 10^{-7} [\text{m}^3/\text{s}]$
透水係数	$7.32 \times 10^{-5} [\text{m/s}]$	$1.06 \times 10^{-5} [\text{m/s}]$

約1/7倍

80 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 80

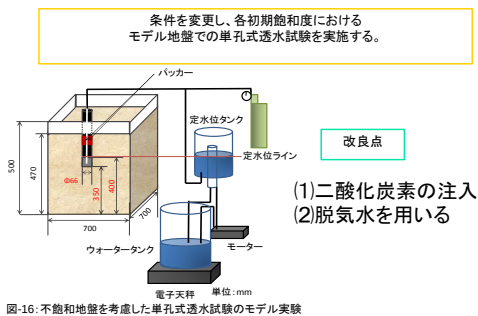
ワンオーダーぐらい違う透水係数が同じ場でも求まってしまうというふうなことが起きました。我々はできるだけ大きな透水係数をその場で求めたいんですけども、なかなかできないということで、初期の飽和度が違うことによって、求められる透水係数が違って

しまうというのなかなかわんというふうに思っております。

どうするかということです。砂の飽和度を高めるために、我々、三軸試験の中でどうしているかといったら、CO₂を入れて、脱気水入れて飽和度高めたりしています。実際にこの前、まだ室内実験の段階でございますけれども、改良点として、この中に最初にCO₂で、この周囲の不飽和の状態の空気を押し出してしまうと、その後、脱気水を実際に使ってやると、これがその例でございますけれども、そんなにばらつかないぐらいの値、2倍ぐらいに落ちてきます。1回目、2回目、3回目とずっとやっていっているんですけど、3.8、5、4.5となり、1回目は確かに $7 \times 10^{-5} \text{m/s}$ なんですけど、そんなに大きな変動なく求まってくることから、現地でも同じようにCO₂を入れて、脱気水を持ち込んでや

考察

- (1)地盤の初期飽和度が異なると、計測される透水係数が変化する。
- (2)地盤の初期飽和度が異なることにより、得られた透水係数を安定評価にどう使用するかを考える必要がある。



改良点

- (1)水を浸潤させる前に、二酸化炭素を注入した。

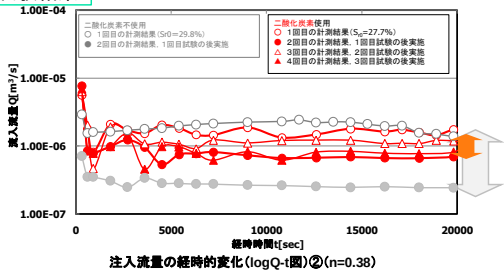
表-3: 室温25℃における空気と二酸化炭素の水への溶解度

気体	air	CO ₂
溶解度 (ml/水溶液1cm ³)	0.78	34

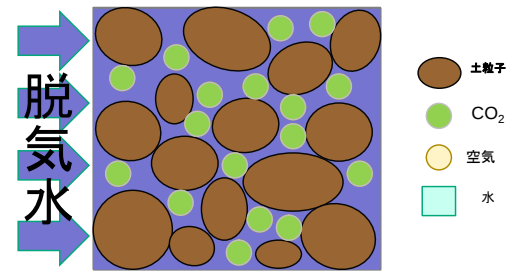
約44倍

- (2)使用する水を脱気水に切り替えた。

試験結果



脱気水



試験結果

表-4: 不飽和地盤を考慮した単孔式透水試験のモデル実験結果

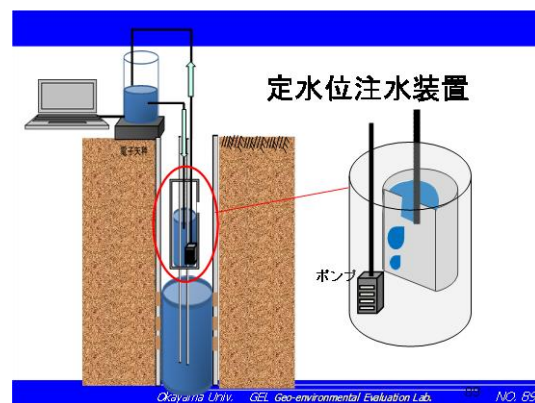
試験回数	1回目 ($S_{w0}=27.7\%$)	2回目 (1回目試験の 後に実施)	3回目 (2回目試験の 後に実施)	4回目 (3回目試験の 後に実施)
流入流量 [m ³ /s]	1.69×10^{-6}	7.86×10^{-7}	1.26×10^{-6}	1.01×10^{-6}
透水係数 [m/s]	7.36×10^{-5}	3.83×10^{-5}	5.12×10^{-5}	4.17×10^{-5}

約1/2倍

れば良いと考えています。やっぱり中にある空気が邪魔しているんじゃないかなというふうに思っております。

ですから、初期飽和度の違いによって変わってきますので、試験する場合には、 CO_2 の注入モニタリングをして、透水試験を何回かやったんですけども、そんなに大きな、先ほどぐらい、2倍ぐらいの変動しかなくて、使わなかったらやっぱりワンオーダーぐらい変動したという例を、2011年の地下水学会で発表させていただきました。

実際は、飽和の状態でボーリングを掘りますので、ボーリングの孔の周囲をどう洗うとか、そういうふうな問題がまた入ってきます。それから、実際に試験したときに、濁水がボーリングの孔の中に入りますので、凝縮剤を入れて沈殿させます。その濁水が底と周囲に、この場合は、アスペクト比、縦と径が、径が随分小さいですから、下に沈殿していきますけれども、その辺の水回りの問題とか、孔内で一定水位に保つのにどうしたらいいんかというふうな課題が入ってきます。これは以前やったんですけども、孔の中に一定水位に上から水を送ってやって、オーバーフローしたやつをこっちからポンプアップして、そんなに大きな動水勾配を与えないで、透水試験するというような手法をやってみてどうかということを確認したいというふうに思っています。



原位置透水試験のまとめ

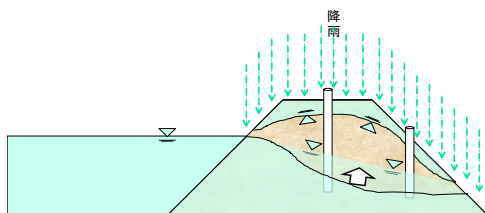
- (1)原位置の透水試験では、初期飽和度の違いによって、得られる透水係数が大きく変化することがわかった。
- (2)初期飽和度の違いによる透水係数の変化を小さくする方法がわかった。また、原位置透水試験のモデル実験でもこれを証明することができた。

今後の課題

- (1)孔内の水位を一定に保つ方法を考える必要がある。
- (2)掘削による孔内の損傷を軽減する方法を考える必要がある。
- (3)地下水位の高さの違いを考える必要がある。
- (4)ボーリング孔の目詰まりの問題を解決する必要がある。

最後に、堤防にはドレーンを入れることが有効と考えます。宇野先生は前から言っておられますけど、ドレーンを入れるということで、のり面に水がきませんし、さっき私が言

いましたように、これがここまで到達して、上がってきても、地下水の動きは下向きになってきますので、結構堤防には安定な方向にいくんじゃないかなということです。



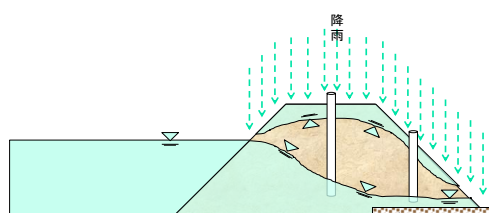
堤体内の地下水

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 93

また、越流することにより表面が浸食されるのかどうかというのは、今後の大きな課題であり、越流による堤防のり面をどう守るかというような研究を福岡先生や土木研究所がしておられますが、植生工法で対応できるのか、あるいは崩壊が生じたらどんどん浸食を受けるんじゃないかということ課題です。今、考えているのは、堤防の中に、極超微粒子セメントを注入することです。岡山の旭川の堤防というのはほとんど砂です。ですから、砂地盤でも注入できるようなセメント材料ができてきましたので、天端はアスファルトで道路とか使っておられるんですけど、堤防の中がなかなかきちんと改良できない。それで表面を張りブロックとかいろいろなことをやってきまして、これは、この流れによってここに使う材料というのはいろいろ基準で決まっていますけれども、堤防の中に何かを注入する工法を考えています。

浸食に関しては没していきますよ、雨も入りませんよと、河川水も入りません。ただ、



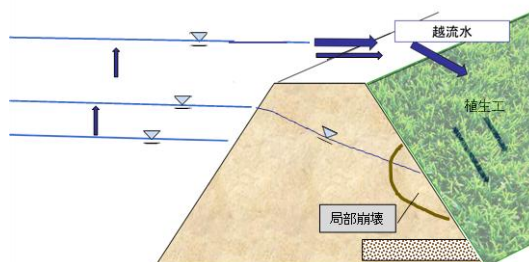
排水層がある時の堤体内の地下水位

排水施設

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 94

越流する堤防の保全



February 7, 2012

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 95

- (1) 植生工法で十分か？
- (2) 浸入水の浸出による崩壊が生じた後は？
- (3) 部分崩壊した後は浸食を受けやすい

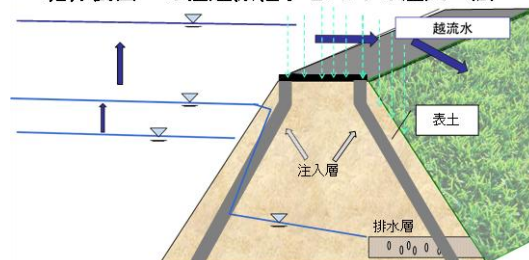
February 7, 2012

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 96

今後の堤体の補強

堤体表面への極超微粒子セメントの注入工法



February 7, 2012

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 97

耐震性だけはかなわんという。堤体に水を入れないで、入れた水は速やかに排水するというのは、宇野先生がいつも言っておられますけれども、越流してもこの浸食されない堤防というのはどうしてつくっていくかというのが、もう1つ次の我々の課題かなと。あんまり見栄えの悪くない状態でやれないかなというふうに考えています。

砂質土の固化	
(1)浸食防止	
(2)降雨浸透防止	(1)堤体内には水を入れない。
(3)河川水浸透防止	(2)入った水はすみやかに排水する。
(4)耐震性は？	(3)越流しても浸食されない堤防。
February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 98	February 7, 2012 Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 99

どうもご清聴ありがとうございました。