

基 調 講 演

テーマ：異常気象による土砂災害の新しい安定評価法

講 師：西垣 誠



略歴

昭和 52 年 4 月 岡山大学工学部工学研究科 助手
昭和 56 年 10 月 岡山大学工学部工学研究科 講師
昭和 59 年 4 月 岡山大学工学部工学研究科 助教授
平成 6 年 10 月 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 教授
平成 17 年 4 月 岡山大学大学院環境学研究科 教授（現在に至る）

活動・著書他

主な研究分野：環境学，地盤工学，土木工学

著書：「地下水シミュレーション－これだけは知っておきたい基礎理論－」（技報堂出版，2010 年 2 月，
分担共著）

「地下水のトレーサー試験－地下水の動きを知る－」（技報堂出版，2009 年 6 月，分担共著）

「入門シリーズ 34 地下水を知る」（地盤工学会，2008 年 5 月，分担共著）

「続・土壌地下水汚染の調査・予測・対策」（地盤工学会，2008 年 4 月，分担共著）

「地下水流動保全のための環境影響評価と対策－調査・設計・施工から管理まで－」（地盤工学会，
2004 年 10 月，分担共著）

「地盤環境工学ハンドブック」（朝倉書店，2007 年 9 月，嘉門雅史・日下部治・西垣誠）

賞罰：昭和 53 年 5 月 土木学会論文賞受賞，平成 15 年 5 月 ダム工学会論文賞受賞

平成 20 年 5 月 電力土木技術協会高橋賞受賞，平成 23 年 5 月 日本地下水学会学会賞受賞

講演内容

異常気象により、豪雨による斜面崩壊や洪水による堤防崩壊等の自然災害が、我国だけでなく、全世界で多発している。このような豪雨災害から、住民をいかに守るかが、これからの大きな課題である。

本報告では、このような現状に対して、危険と考えられる斜面に対して、どのようにその斜面の危険度を予測するかについての新しい研究について論述する。

具体的には、光ファイバーケーブルを用いた、土中の水分量のモニタリング手法の適用性について紹介し、斜面安定を評価する従来の手法の難点を指摘して、新しい安定評価法を提案する。

異常気象による土砂災害の新しい安定評価法

岡山大学大学院環境学研究科

西垣 誠

平田洋一

藤田貴文

1. 序論

1-1 緒言

近年、世界各地で局地的な集中豪雨が発生し、洪水や堤防の決壊、斜面崩壊といった土砂災害を引き起こしている。特に我が国は自然災害に対して脆弱な国土条件にあり、欧米諸国と比べ、豪雨による激甚災害の頻発が懸念されている。平成21年7月の中国・九州北部豪雨や8月の台風第9号等により、各地で被害が生じたことは記憶に新しいところであり、これ以前にもそれまでの観測記録を更新する豪雨が多発し、多くの尊い命が失われている。

このような激甚災害を予防、軽減するためには、ハード面での対策とソフト面での対策がある。ハード面での対策とは堤防補強工事、擁壁設置等の社会資本の整備によるものであり、ソフト面での対策とは、モニタリングによる警戒避難体制の確立、整備等を行うものである。我が国では、このハードとソフトの両面での対策を組み合わせることで、一層の土砂災害対策の充実を図っているが、ハード的な対策は急激な変化やコスト面から費用対効果が少ないと言われている。そのため、近年では平成12年5月に公布された「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」に代表されるように¹⁾、降雨状況や地盤状況のモニタリングにより、通行規制や住民を避難させるといったソフト面での対策を重視し、より充実した土砂災害対策を行う傾向がある。

そのため、豪雨時における実際の地盤状況を正確に把握し、周辺住民に事前に警報や避難情報を伝達する斜面崩壊予測システムの構築が求められており、その一例として平成16年6月には「河川堤防モニタリング技術ガイドライン」が示されている。

斜面崩壊メカニズムの詳細は次節で述べるが、斜面崩壊は斜面内の水分量の変化が大きく影響を及ぼしている。そのため、地盤内の飽和度や間隙水圧を計測することで、斜面崩壊予測のモニタリングが可能となる。しかし、モニタリングによって斜面崩壊を事前に予測し、対処できたという報告は未だ存在していない。地盤内の水分量を正確かつ長期的に把握できる手法は未だ確立しておらず、それらの課題を克服した、局所的な集中豪雨に対応できる土中水分量計測器の開発が求められている。

1-2 本研究の目的と内容

本研究では、斜面崩壊の予測システムの構築を目指し、これまでになく正確かつ長期的に地盤状況を把握する手法の提案を目的としている。

ここで提案する斜面崩壊予測システムは、これまでに開発され、現在用いられている地盤状況把握手法の課題を考慮し、光ファイバを用いた土壌水分量計測器を開発することを根幹にしている。既往の土壌水分量の計測手法は大きく2つに分けられる。1つはテンシオメータを用いた負の間隙水圧の計測による土壌水分量計の把握であるが、この方法は月に1回程度のメンテナンスが必要であり長期計測に対して不向きと言える。もう1つは、ADRやTDRといった誘電率を用いて土壌の水分量を計測する手法であるが、周囲の電氣的ノイズや、土中水の塩分濃度が計測値に多大な影響を及ぼす等、設置場所に制限がある。また、斜面崩壊予測のモニタリングを目的とするので、リアルタイムのデータ転送が求められ、そのための通信システムを新たに構築する必要があり、膨大な費用が見込まれる。

それらの問題に捉われない手法として、本研究では光ファイバ式土中水分計を開発するために必要な各種の基礎的な試験や検討を行った。

2. 従来の研究

2-1 概説

序論でも少し述べたが、豪雨時に斜面崩壊を予測するシステムは未だ確立されていない。そこで、本章では斜面崩壊の発生メカニズムについて述べ、その上で予測するために従来に行われてきた研究について、その特徴と課題をまとめる。また、光ファイバに関する研究についてもまとめ、光ファイバを土中水分量計に用いる上でのその有用性についても論述する。

2-2 豪雨時の斜面崩壊に至るメカニズム

豪雨時の斜面崩壊現象は力学的には雨水の浸透と土の力学的安定問題の複合問題である。雨水浸透に伴う力学的な変化のうち、斜面安定に大きく影響するのは、①間隙水圧の発生、②せん断強度の低下、③自重の増加である²⁾³¹⁾。

(1) 間隙水圧の発生

浸潤前線が基盤等の不透水面に達した後、飽和浸透流が発生することにより、間隙水圧が増加し、それを主要因として崩壊が発生するという崩壊機構が明らかにされている。

(2) せん断強度の低下

不飽和土では、サクシオンに起因する見掛けの粘着力が見込めるが、飽和度が上昇することによってサクシオンによる粘着力が低下して崩壊に至ることが明らかにされている。

(3) 自重の増加

雨水の浸透により崩壊土塊自重が増加して、斜面が不安定になる。

2-3 斜面崩壊モニタリング手法に関する研究

小橋・酒匂らは、斜面崩壊予測に関して、「含水量」、「変位置」、「地下水位」を計測対象としており、そのモニタリング技術の現状、課題についてまとめているので以下にその概要を示す⁴⁾。

a) 含水量の測定技術

① 現状

「含水量」を計測する技術としては、大きくサクシオンと土壤水分量を計測する機器の2つに分け、各測定器について測定原理、範囲等を整理している。サクシオンおよび土壤水分量を計測する機器は表-2.1に示すように各種存在するが、現状ではテンシオメータ法、誘電率を用いた手法(ADR, FDR法など)が自然斜面および道路法面、鉄道盛土、河川堤防などの人工斜面といった実地盤へ活用が試みられている。

しかしながら、サクシオンや土壤水分量単独での斜面崩壊の予知や警戒に対する成果は得られておらず、降雨量や変位置、数値シミュレーションを組み合わせて斜面崩壊を予知していくことが提案されている。

② 課題

測定機器は精度を向上させるために、キャリブレーションや定期的なメンテナンスが必要であり、長期モニタリングでは、設置や維持に関する労力や費用を軽減する手段を考える必要がある。

b) 変位置の測定技術

① 現状

「変位置」の計測技術について、傾斜計、光ファイバセンサ、GPS測位技術、リモートセンシング、Acoustic Emission(AE)を挙げ、各技術の測定原理、特徴についてまとめている。その一部を示すと、まず傾斜計は、これまで多くの斜面に使用されており、「道路土工のり面工・斜面安定指針」により変動レベルの判断基準も提案されている。

光ファイバセンサは、主に長い線状の対象範囲を観測する手法として開発が進められ、絶縁性、耐久性に優れているという特徴を有する。微小変位の蓄積、降雨時の斜面崩壊を捉えた計測データが数箇所の斜面で得られ、更なる精度向上に向けて日常変化の影響(降雨量とひずみ量・温度等)の棄却方法などの考察がなされている。その他、GPSやリモートセンシング、AE技術も実地盤への設置が進んでおり、計測データより有用性の検証が行われている。

② 課題

各測定技術の課題を以下に列挙する。

- i) 傾斜計、光ファイバセンサは、温度依存性の計測、補正の必要性がある。
- ii) GPSは、地中、水中では計測ができず、高層ビル群・深い谷間・密生した森林などでは利用不可能である。
- iii) リモートセンシングは、地上分解能の精度向上を図った次世代人工衛星の開発が待たれる。

表-2.1 含水量計測技術の各種手法および計測原理⁴⁾

測定対象	測定手法		測定原理など
サクシヨン	①	テンシオメータ法	セラミック製のポーラスカップを介し土中水の圧力と平衡したテンシオメータ内の脱気水の圧力を計測。測定範囲：～約-0.1MPa
	②	サイクロメータ法	熱電対の特性を用い、相対湿度を測定し、土の水ポテンシャルを直接計測。測定範囲：約-0.1～約-100MPa
	③	熱散逸法	熱伝導率と土中水のマトリックスポテンシャルが-10kPa よりも乾燥した範囲で線形関係であることを利用。測定範囲：約-0.1～約-100MPa
土壌水分量	①	電気抵抗法	土の電気抵抗を測定し、水分量を計測。
		2極法	電極付き多孔質ブロックを埋設し、ブロックの吸湿水分と土中水分の平衡時における電極間の電気抵抗値を測定。 校正式として、電気抵抗値、温度、体積含水率の関係式が必要。
		4極法	電極を土中に直接挿入し、電極間の電位差を測定することで土中の比抵抗を求め、水分量を測定。塩分濃度が変化しないことが前提条件。
	②	誘電率を用いた手法	比誘電率と体積含水率の関係に基づく計測手法
		静電容量法	電圧を測定し、水分量を求める。予め、土の水分保持状態に対応した比誘電率から静電容量、周波数を求める。周波数を電圧に変換する電子回路を用いて、測定電圧と含水比の関係を求める。
		時間領域反射率測定法(TDR法)	一定周波(30MHz～3GHzの高周波)の電磁波が土中に埋設したロッドを往復する速度を時間領域で測定し、比誘電率を求める方法。 校正式として、比誘電率と体積含水率の関係が必要。
		周波数領域反射率測定法(FDR法)	連続的な種々の周波数(100MHz～1.7GHz)の電磁波が土中のロッド部分での往復に発生する合成干渉波を周波数領域で測定し、そのピーク特性から、比誘電率を求める方法。 校正式が必要。
		振幅領域反射率測定法(ADR法)	一定周波数の電磁波(100MHz)が土中のロッド部分を往復するときに発生する電圧差を振幅領域で測定し、比誘電率を求める方法。 校正式として、比誘電率と体積含水率の関係が必要。
	③	中性子散乱法	中性子の水素原子による減速効果を利用して、土中の水分量を測定。校正式として、対象土に対する中性子の係数比率と体積含水率の関係が必要。
	④	ガンマ線を用いた方法	ガンマ線の土を透過する際に測定領域の密度が高いほど透過率が減少する性質を用いた方法。 校正式として、相対透過率と湿潤密度の関係が必要。
	⑤	地中レーダ法	送信アンテナから地盤内に発射した電磁波が反射して受信アンテナに戻るまでの伝播時間を計測。地盤内の比誘電率が異なる境界面(地下水面など)を推定評価する方法。電磁波伝播速度と比誘電率の関係式から体積含水率も求まる。
⑥	熱伝導率を用いた方法	気相の熱伝導率が、液相や固相の熱伝導率よりもはるかに小さいという性質を用いた方法。校正式として、含水率と熱伝導率の関係が必要。同一の土で、土中温度変化が小さい場合に適用。	

iv) AE は、降雨などの気象条件に起因するノイズを検出しない設置条件や地電流の影響に対する対策などについて検討する必要がある。

c) 地下水位の測定技術

① 現状

これまでにひずみゲージ式間隙水圧計を用いた室内・現地実験が行われ、水圧計による崩壊予知の有効性が確認されている。

近年は、光ファイバを用いた水位計・水圧計やケーブルレスの水圧計が開発されている。

② 課題

測定値が大気圧変動の影響を受けるため、補正計算または大気開放チューブを内蔵する必要があり、海岸付近では、潮位変動の影響および孔内水の比重にも注意が必要である。

また、飽和・不飽和の双方に対応した水圧計の開発も望まれている。

d) 含水量、変位置量、地下水位の計測に共通した課題

最後に各モニタリング技術に共通する課題についてまとめ、今後のモニタリングシステム構築に向けた要点としている。以下にその内容を列挙する。

- i) 異常現象を察知するために、地盤中の「含水量」、「変位置量」、「地下水位」などの日常の変動について実証データからおさえる必要がある。
- ii) 土の挙動の検討より、計測機器の挙動をイメージしておくことが必要となる。

- iii) 警報検知型のモニタリングか、比較的中長期に発生する事象を把握して事前対策を講じる日常管理のモニタリングかが明確になっていないなど開発目標が不明確であることが多い。
- iv) 計測機器の劣化破損による計測精度の低下状況などについて、実証データで示し、機器のメンテナンスの頻度や方法を明らかにする必要がある。
- v) 現地でのモニタリングでは、電源の問題がある。低消費型センサの開発や電力供給方法の検討が必要となる。

2-4 光ファイバに関する研究

(1) 光ファイバの構造と測定方式

a) 光ファイバの構造⁵⁾

光ファイバは、屈折率の異なるコアと呼ばれる芯とその周辺を覆うクラッドと呼ばれる部分の二重構造になっている。直径は、0.125mmと髪の毛程度の細さであり、材質は光に対して透過性が非常に高いガラスまたはプラスチックでできている。コアの屈折率はクラッドの屈折率に対しやや高くなっており、光がコア内を全反射しながら極めて低損失で伝播していく。クラッドの周囲は光ファイバの補強・機械特性の改善などのため使用目的に応じて各種の被覆層が施されている。図-2.1に断面図を示す。

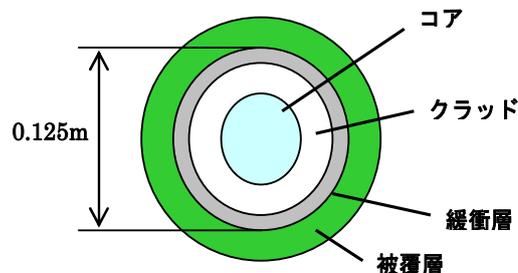


図-2.1 光ファイバの断面

また、コアおよびクラッドの屈折率分布形状とコア内を伝播するモードの数により図-2.2に示すシングルモードとマルチモードに分けられている。

シングルモードは、コアの直径が $10\mu\text{m}$ 以下と細く、一つのモードのレーザー光を伝送する。光の分散が少なく高速・長距離の伝送が可能のため、主に、通信用の光ファイバに利用されている。

それに対してマルチモードは、コアの直径が $50\mu\text{m}$ と大きく、異なるモードのレーザー光を伝送する。シングルモードに比べ、内部での光の分散や到達時間のズレが生じるため、伝送距離が短くLANなどの内部通信に利用されている。

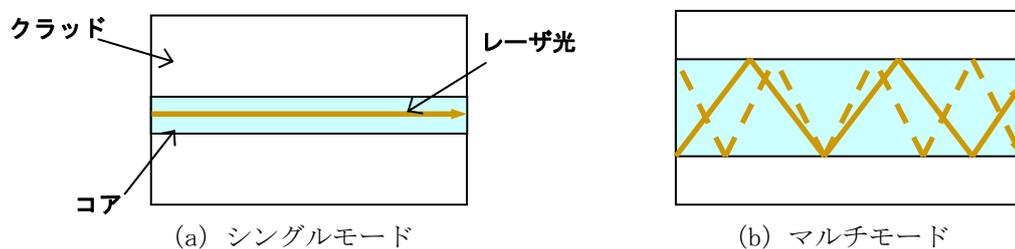


図-2.2 光ファイバの種類⁵⁾

b) 光ファイバセンシングの測定方式⁵⁾

ここで光ファイバセンシングとは、特に光ファイバを直接変形（ひずみ、振動等）や温度などを検出するセンサとして用いることを表している。測定原理によっていくつかの方式が存在し、それぞれ特徴が異なるため測定対象合わせて使い分ける必要がある。表-2.2に各方式と特徴について示す。

表-2.2 光ファイバセンシング方式と特徴⁵⁾

方式	計測長	計測時間	計測方法	計測対象	波長
FBG	1本のケーブルで 多点計測可能	0.02秒 動的計測が可能	点計測	歪み・温度・圧力	Bragg 波長
BOTDR	区間で連続的に 計測可能	5分～10分	線・面計測	歪み分布・ 温度	ブルリアン散乱光
OTDR	区間で連続的に 計測可能	5分	線・面計測	歪み・ 光損失分布	レイリー散乱光
ROTDR	区間で連続的に 計測可能	1～5分	線・面計測	温度分布	ラマン散乱光
MDM	区間で連続的に 計測可能	秒単位の 変化に対応	線・面計測	変位分布	漏光に伴う 透過光

(2) 光ファイバの地盤工学への応用

a) Alessi らの研究⁹⁾

Alessi らは、光の空気と水の屈折率の違いから石英ロッド内を通る光の伝達様相が周りの水分量に関係することに着目し、石英ロッドと発光ダイオード、光ファイバを用いて土壌モデルの含水量の計測を行っている。実験概要図を図-2.3に示す。土壌モデルはガラスビーズと砂質土からなり、ガラスビーズが測定器の先端部である石英ロッドと砂質土が直接接することを防いでいる。この土壌モデルに0～18.67kPaの範囲で空気圧を加え、各圧力での排水量が一定となったときの圧力、排水量、装置電圧、発光ダイオードのバイアス電圧・温度、時間を計測している。得られたデータより光ファイバを用いた土壌水分量計測が可能であるか検討している。

実験は8サイクル行い、測定データから圧力と電圧、土壌モデルの体積含水率の関係を求めている。その結果は図-2.4のように5～8サイクルにおいて期待できる統計が出ている。Alessi らはこの実験を通し、光ファイバによる土壌の水分量計測の可能性を見だし、今後更なる研究が必要であると結論を出している。

問題点は、直径1mmの光ファイバセンサで土中の水分量を正確に測定できているのかという点である。過度に局所的な値を求めている可能性がある。

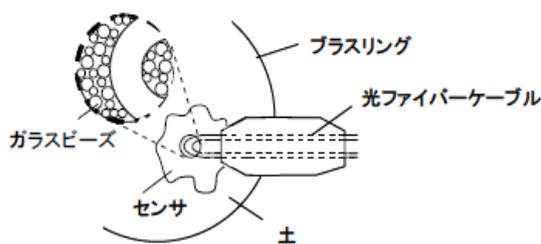


図-2.3 実験概要図⁹⁾

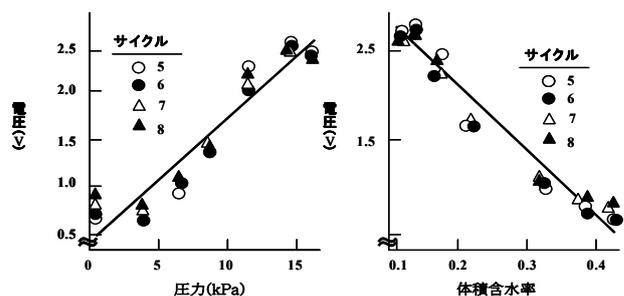


図-2.4 5～8サイクルの実験結果⁹⁾

b) Pamukcuらの研究¹⁰⁾

Pamukcuらは、分布型ブルリアン散乱光ファイバセンサを用いて密詰め粘性土の含水率測定を行った。

測定は、親水性ポリマーの特性と結び付けられた光ファイバ中のブルリアン散乱の特性に基づいている。トランスデューサーとして、ポリマーが土の水分を吸収し膨張することによりファイバに引っ張り歪み、または、乾燥することによりファイバに圧縮歪みを加え、この歪みはブルリアン散乱のシフト量として計測される。このような原理で、土の水分量が光ファイバセンサによって計測可能となっている。

水分センサとしてのプロトタイプの実験では、含水率30%以内の測定を実証した。また、システム上の測

定されたロス（光損失量）は、数kmのファイバ上に、何百ものセンサを実装することが可能であることを示した。

課題として、現時点での計測可能な含水率が0~30%までであり、飽和状態に近い含水率の計測が可能であるか不明であることと、計測データそのものから含水率を判断できないことである。

図-2.5に各含水率の粘性土への測定器の設置、取り出し両過程を行った場合のブルリアン散乱シフト量の計測結果を示す。

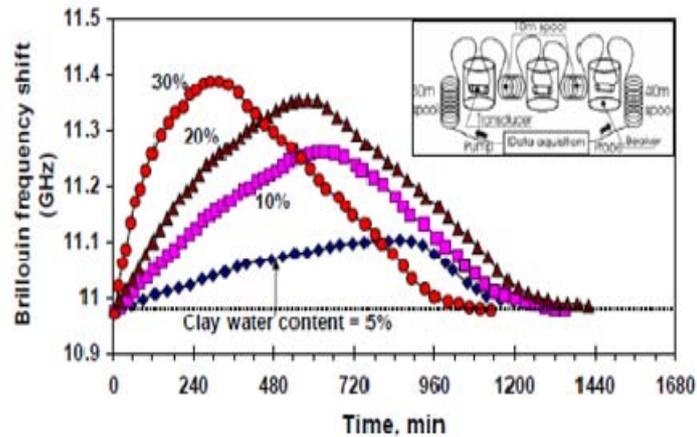


図-2.5 各含水率での粘性土でのブルリアン散乱シフト

c) Garrido らの研究¹¹⁾

Garrido らは、実地盤の局所的な水分量の計測に関して、先端部がミニプローブからなる光ファイバセンサ(以下:FOMP)を提案し、研究を行っている。FOMPは、先端部のプローブから一定強度のレーザ光が放射される構造となっており、放射されたレーザ光が対象物に反射されることによる、光強度の変化を測定し、諸物性を計測するシステムとなっている。土に放射されたレーザ光は、土の含水量の増加により強度が減少するという相互関係を有している。Garrido らは、この関係を利用し、局所的な含水量計測を行うため、各土質に対してキャリブレーション試験を行った。図-2.6に実験概要を示す。試験装置は、塩化ビニール製のチャンバーに給水用とプローブ設置用の口が各4ヶ所、計8ヶ所つけられている。これにより、乾燥状態の試料をできるだけ均質に吸水を行え、測定誤差を生む要因をできるだけ小さくできる構造となっている。試験は、3種の土質に対して行われた。図-2.7にシリカに対する試験結果を示す。各種土質で計測値は吸水量に付随して光強度も減少しており、キャリブレーションも $R^2 > 0.98$ で行うことができた。

今後課題としては、キャリブレーション精度の維持やポーラスな構造を持った土の中では、FOMPの機能が明白に低下することなどが挙げられている。

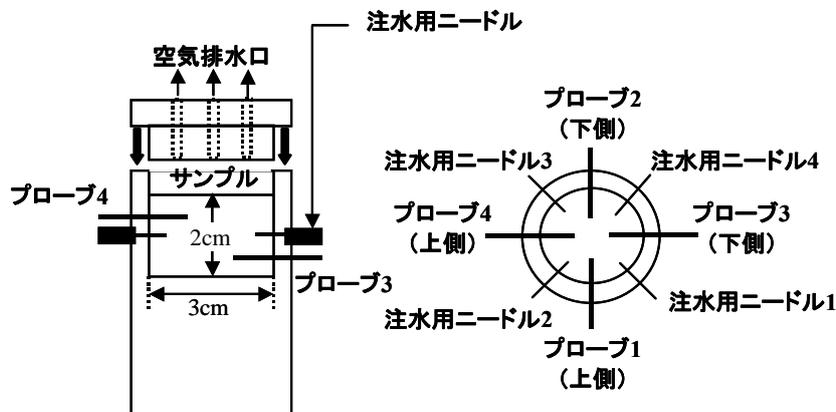


図-2.6 キャリブレーション試験概要図⁷⁾

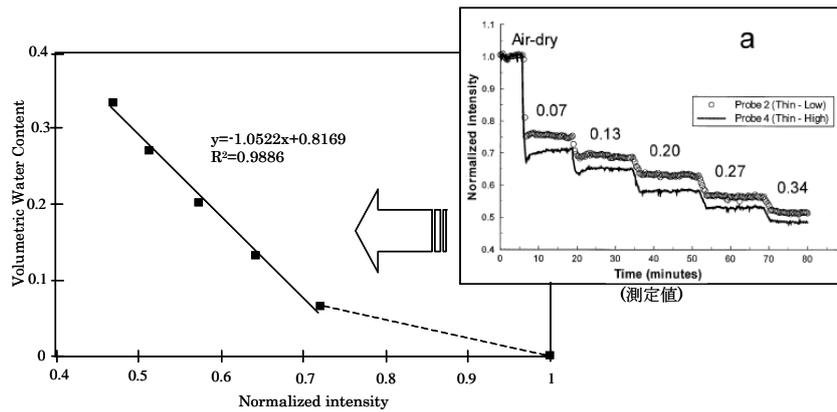


図-2.7 シリカに対するキャリブレーション試験結果¹¹⁾

d) 佐々木らの研究¹²⁾

堤防の管理技術の高度化に向けた「河川堤防モニタリング技術ガイドライン」が国土交通省によって策定され、地域通信ネットワークプランに沿った河川管理用光ファイバの整備が進められている。そこで、堤体内の水位観測を行うにあたり、河川管理用光ファイバを利用した光ファイバーネットワークシステムに適合する光ファイバ水位計の開発とモニタリングシステムの構築について研究が行われた。水位計には以下の条件が求められる。

- ①河川管理用光ファイバを経由して管理事務所から遠隔測定ができる。
- ②10m 程度までの水位を長期的に安定して計測できる。
- ③複数の水位系を直列で接続することにより河川管理用光ファイバを有効に活用できる。

耐浸透機能の安全性照査として行うモニタリングのイメージは、図-2.8 に示すとおりであり、少なくとも3箇所の堤体内水位観測と1箇所の地下水位観測、雨量観測および河川水位観測を行うものとしている。

光ファイバセンサの基本方式としては、上記の開発の目的で述べた遠隔測定と直列の連結方式を考慮してFBG方式を採用している。FBG方式では、最大20kmまでの遠隔測定の実績があり、河川管理用光ファイバを通じて河川管理事務所まで遠隔測定するのに十分な性能が期待できる。FBGの直列配置は原理的には問題がないものの、小口径の水位観測孔に設置した水位計を、他の水位計と直列配置することは容易ではない。すなわち図-2.8に示すような水位計配置において直列配置を実現するためには、水位計に入った光ファイバケーブルを水位計の内部で折り返して再び観測孔の孔口まで引き出す必要があるため光ファイバにFBG加工したものを使用して、水位計内部での光ファイバの折り返しを実現した。なお、FBG方式は温度補償が必要であるため温度補償用のFBGも水位測定用FBGと直列に接続し、水位計に内蔵した。

以上の研究より河川管理用光ファイバを利用した堤体内水位観測を光ファイバネットワークで実現するシステムを開発した。今後の課題として、FBGの温度補償を周辺材料の熱膨張係数の組合せで機械的に自己補償できる機能を付加してソフトウェアに拠る温度補償を最小限に留めることにより、信頼性と耐久性をより高めることが必要だという結論に至っている。

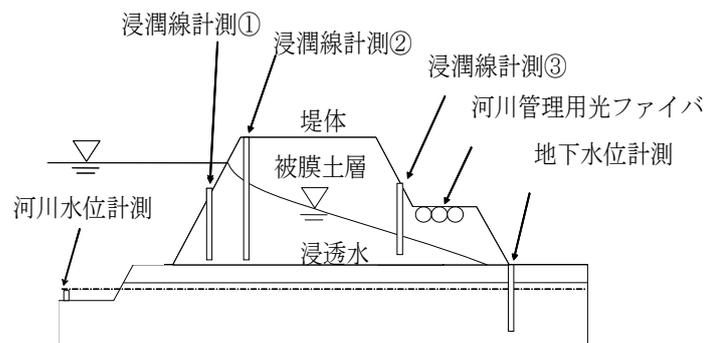


図-2.8 耐浸透機能モニタリングイメージ¹²⁾

e) 西垣らの研究¹³⁾¹⁴⁾

局所的な集中豪雨による斜面崩壊を予測するため、従来の地盤状況モニタリング手法の抱えている課題を解決した、光ファイバを用いた土壌水分計の開発を目的とした。

光ファイバセンサは、多点計測が可能であるFBG式光ファイバセンサを用い、**図-2.9**に示すように水分反応材でセンサを挟み込んだものを土中に埋め込んで土中の水分量を計測する。水分反応材 MDW(material deformation with water)は、土中の水分量に応じて伸縮し、ひずみを発生する材料のことである。

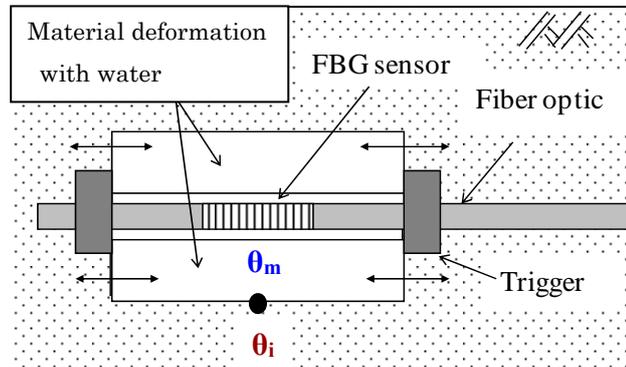


図-2.9 FBG式ファイバセンサ土壌水分計概念図¹³⁾

この水分反応材を用いたFBG式光ファイバセンサを用いた土壌水分計の測定原理を**図-2.10**に示す。矢印の手順に沿うように土中の体積含水率を求める。①土中の含水量に応じて発生したMDWのひずみ ϵ_0 をFBG式光ファイバセンサが読み取る。このとき、FBG式光ファイバセンサとMDWのひずみは連動しているため、光ファイバセンサのひずみがわかれば良い。②MDWにおける体積含水率とひずみの関係を事前に把握しておくことで、センサに発生したひずみに応じた体積含水率 θ_m を求めることができる。③水分反応材における水分特性曲線を事前に把握しておくことで、 θ_0 の時のサクション ϕ_0 を求めることができる。④測定対象である地盤の土質の水分特性曲線より、 ϕ_0 の値の時の θ_a がわかり、体積含水率から各計測地点の飽和度を求めることができる。このような流れでセンサに発生したひずみを把握することで、測定地盤における各地点の飽和度を把握することができる。

しかし、この測定原理を用いるためには、①MDWの体積含水率とひずみの関係、②MDWの水分特性曲線を計測する必要がある。

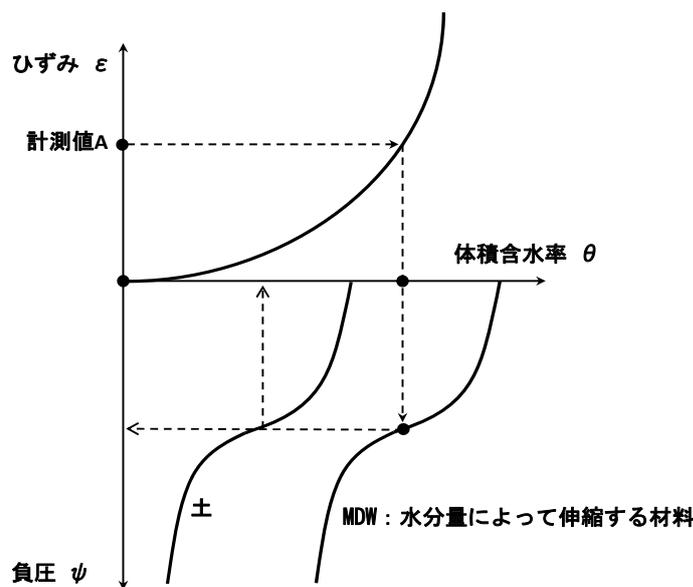


図 2.10 FBG式光ファイバセンサを用いた土壌水分計の計測原理

3. 木材片をMDWとして用いた場合

3-1 材料の選定

(1) 木材の選定

樹種としては、針葉樹から、日本でよく採れる木材であるスギ・ヒノキ・アカマツの3種類、広葉樹からは同じく日本でよく採れるクワ・ケヤキ・サクラの3種類、また、広葉樹は高密度なものが多いため、広葉樹の中でも低密度であるブナ・キリを加えた計8種類を試験に用いて、その水分特性曲線を図-3.1、3.2に示すように求めた。

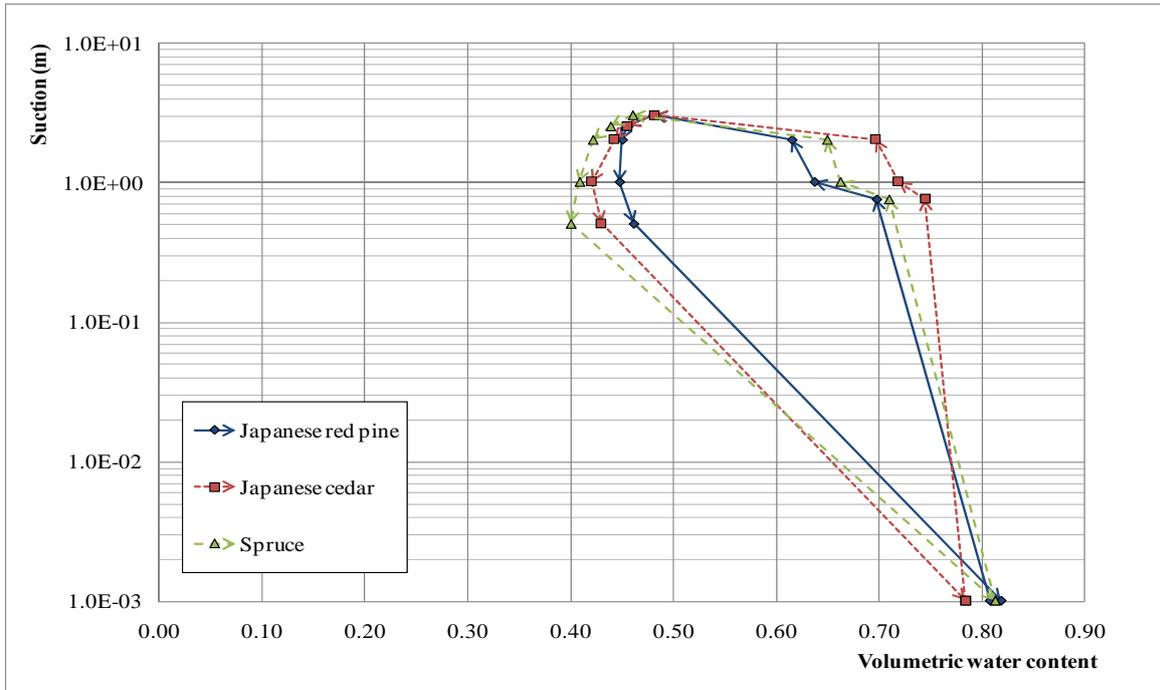


図-3.1 針葉樹の水分特性曲線

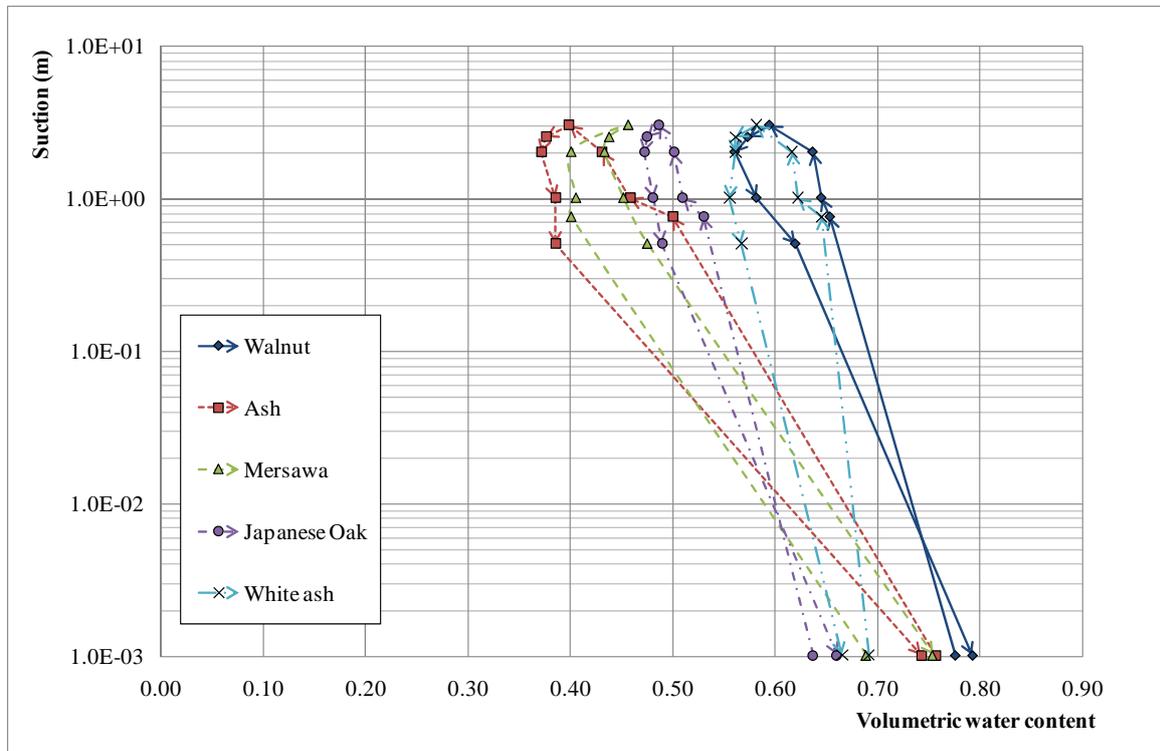


図-3.2 広葉樹の水分特性曲線

(2) 木目の選定

木材は木目の方向によって伸縮性が違う。土中水分のセンサとしては、ここでは図-3.3のように接線方向、半径方向、繊維方向の3つが考えられる。図-3.4は種々の木材について乾燥状態から完全飽和状態にした時の伸び量を測定した結果である。種類に関係なく接線方向がもっとも伸び、ついで半径方向、繊維方向は伸びが悪くヒノキでは伸びが測定できなかった。一方で光ファイバの伸び量は限界があるので、両者のバランスが重要である。結論として接線方向は光ファイバを切断する恐れがあるので中間的な伸びを示す半径方向を採用することとした。

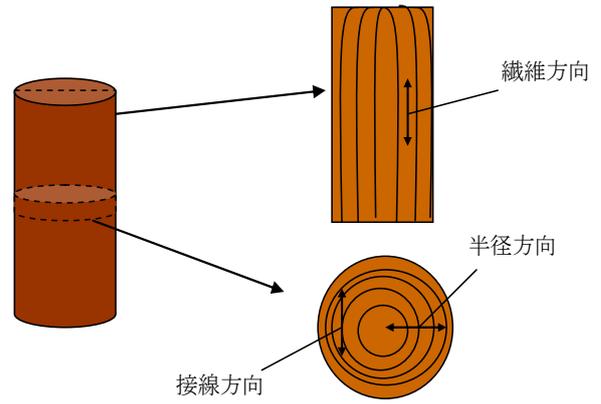


図-3.3 木材の木目方向

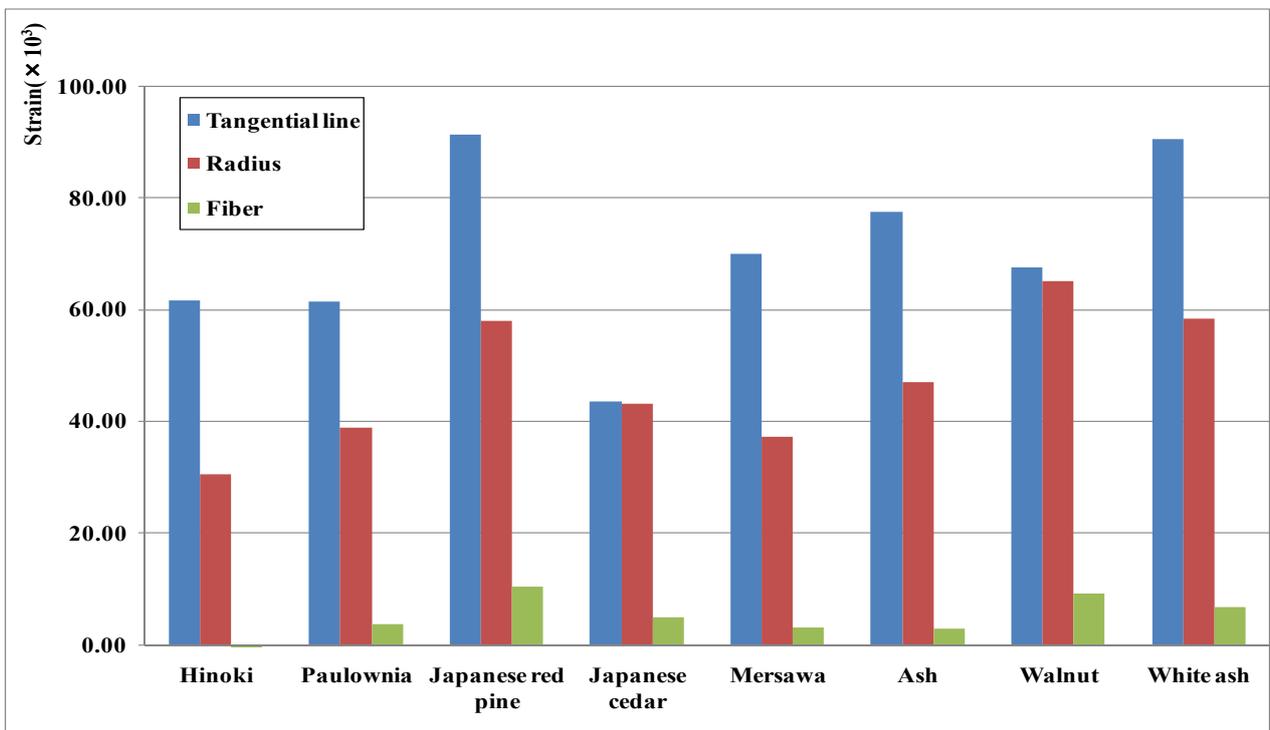


図-3.4 各木目方向における木材の絶乾→水没による水分伸縮試験

3-2 薬剤注入による長期耐久性の付与

木材のpF試験において、写真-3.1のような木材の腐食が見受けられた。腐食はセンサとしての不安定要素であるので抑制することが必要である。具体的方法として、防腐剤を加えることで長期耐久性を付与させようと考えた。用いた防腐剤は銅を主成分とするものである。木材を真空脱気した後、この薬液を加圧注入させることで強制的に木材に浸透させ、それを乾燥させることにより、木材内部に銅を付着させて抗菌作用を付与させる。また、この薬剤を注入することにより、木材の基本的物性は変化せず、約5年間の長期耐久性を見込むことができるとしている。

3-1で述べた木材に薬液を注入させた結果を表-3.1に示す。



写真-3.1 木材の腐食

表-3.1 センサ用木材の防腐薬剤注入試験結果

樹種	番号	T	W	L	初期重量	減圧時間	加圧時間	注入後重量	注入量	有効成分注入量	備考
		mm	mm	mm	g						
スギ		10.49	10.06	49.92	2.13	90	30	6.09	752	2.6	予備試験
ヒノキ		10.54	10.06	49.94	2.57			6.21	687	2.3	予備試験
アカマツ		10.39	10.07	49.94	2.84			6.51	702	2.4	予備試験
キリ		10.41	10.09	49.84	1.39			5.19	726	2.5	予備試験
クワ		10.47	10.02	49.81	3.42			5.23	346	1.2	予備試験
ケヤキ		10.47	10.08	49.79	3.74			5.15	268	0.9	予備試験
サクラ		10.53	10.00	49.95	3.11			5.72	496	1.7	予備試験
ブナ		10.54	10.01	49.86	3.61			6.89	624	2.1	予備試験
		10.52	10.05	50.04	2.44			6.00	673	2.3	
スギ	1	10.52	10.10	49.97	2.41	90	30	5.96	669	2.3	
	2	10.52	10.10	49.93	2.44			5.94	658	2.2	
	3	10.55	10.10	49.93	2.44			5.94	658	2.2	
ヒノキ	1	10.52	10.02	49.85	2.56	90	30	6.22	697	2.4	
	2	10.52	10.02	49.88	2.55			6.20	694	2.4	
	3	10.52	10.05	49.94	2.57			6.19	686	2.3	
アカマツ	1	10.36	10.03	49.83	2.77	90	30	6.39	699	2.4	
	2	10.48	10.08	49.89	2.89			6.45	675	2.3	
	3	10.46	10.09	49.88	2.85			6.47	688	2.3	
キリ	1	10.48	10.12	49.82	1.31	90	30	5.10	717	2.4	
	2	10.48	10.11	49.89	1.30			5.04	708	2.4	
	3	10.50	10.12	49.89	1.31			4.99	694	2.4	
ブナ	1	10.55	10.10	49.72	3.55	90	30	6.89	630	2.1	
	2	10.56	10.09	49.68	3.56			6.90	631	2.1	
	3	10.53	10.08	49.65	3.52			6.81	624	2.1	
クワ	1	10.56	10.11	49.77	3.39	90	90	5.65	425	1.4	
	2	10.48	10.09	49.76	3.38			5.54	411	1.4	
	3	10.55	10.13	49.87	3.30			5.79	467	1.6	
ケヤキ	1	10.52	10.03	49.33	3.63	90	90	5.40	340	1.2	
	2	10.46	10.04	49.40	3.62			5.31	326	1.1	
	3	10.53	10.00	49.53	3.75			5.16	270	0.9	
サクラ	1	10.48	9.98	49.72	3.06	90	90	5.87	540	1.8	
	2	10.46	9.98	49.67	3.02			5.90	555	1.9	
	3	10.56	9.96	49.74	3.05			5.93	551	1.9	

3-3 含水率とひずみの関係

最も密度の小さい桐、広葉樹として桑、針葉樹として赤松を選び、含水率と伸びの関係を調べた。試験片は表-3.1の番号1を用いた。試験の方法は乾燥状態から初め、少しずつ水を加えながらその時の重さと、1/100mmのデジタルノギスで長さを測った。測定結果は以下の図-3.5~3.7に示す。

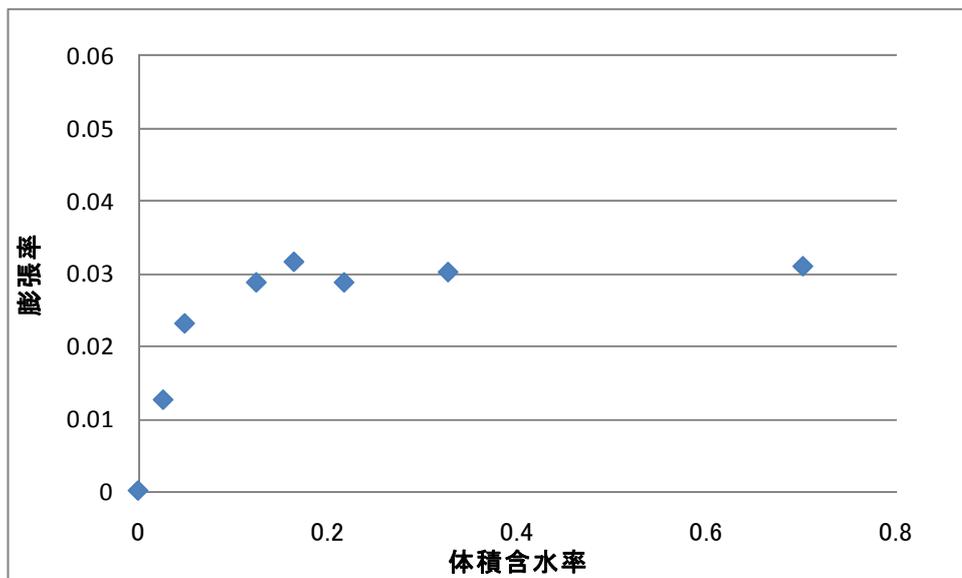


図-3.5 桐の体積含水率と膨張率の関係

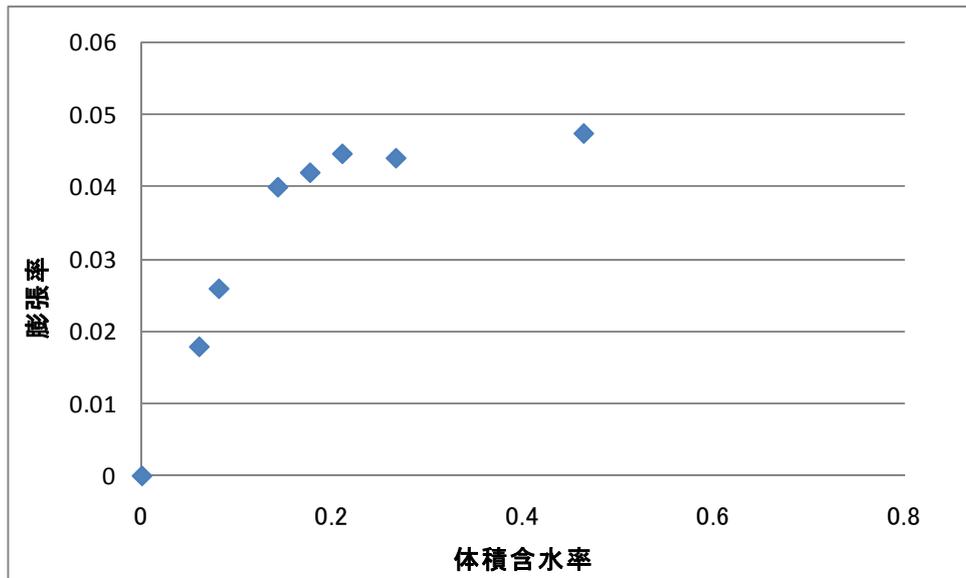


図-3.6 桐の体積含水率と膨張率の関係

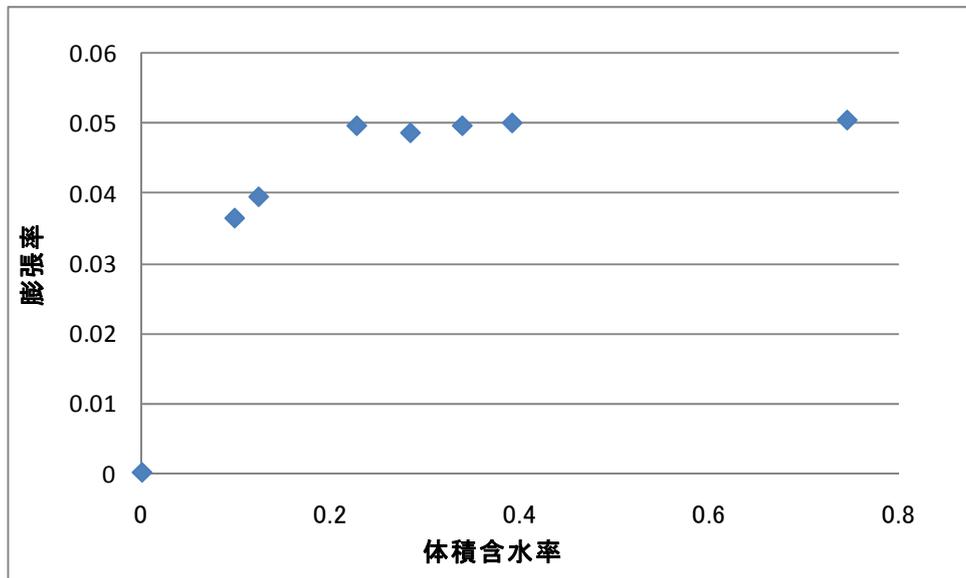


図-3.7 赤松の体積含水率と膨張率の関係

桐は含水率 0.2 程度まで急激に膨張するが、その後頭打ちになりレンジが狭いと見られる。桑は含水率 0.4 程度まで急激に膨張するが、その後も緩やかに膨張し続けており、ここでは最もセンサとして良い傾向を示している。赤松は含水率 0.4 程度まで急激に膨張しており、その後やはり頭打ちとなっている。

対象とする土壌の性質にもよるが、桐はレンジが狭すぎセンサとして不適と考えられる。

3-4 各種木材の水分特性曲線

土に似た pF を示す木材を調査するため、以下の試験を行う。

(1) 加圧板法を用いた木材の pF 試験

i) 木材供試体概要

木材供試体概要図を図-3.8 に示す。この図のように、木材を 10mm 四方に加工し、コンパクトにすることで、水分の供試体内への浸透を促すと共に複数の供試体について同時測定できるようにした。

ii) 試験方法

地盤工学会規定の土の保水試験加圧板法を応用し、水分特性曲線を求めるものである¹⁵⁾。試験装置概要図を図-3.8 に示す。

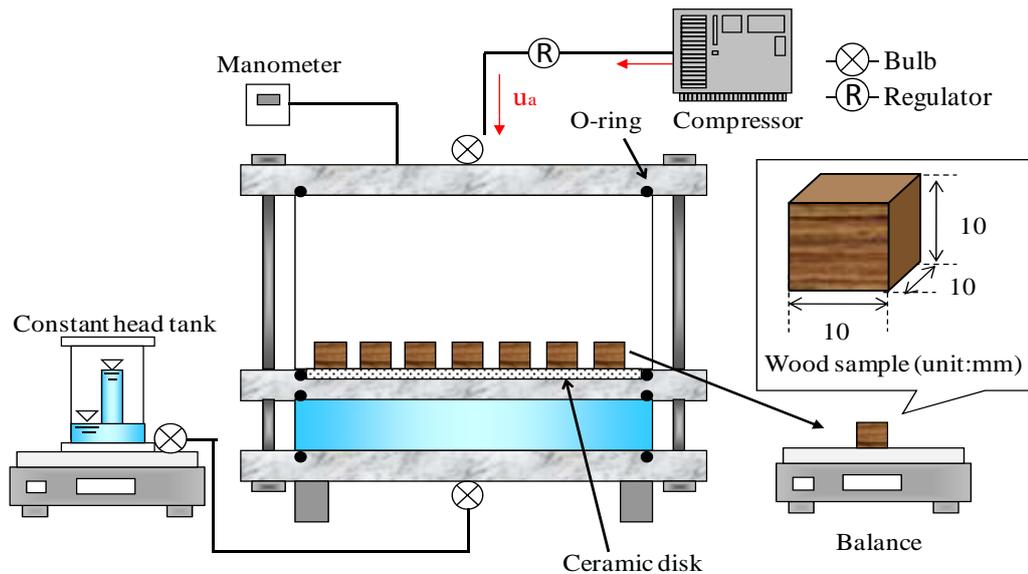


図-3.8 加圧板法を用いた木材の pF 試験装置概要図

3-5 光ファイバ式土壌水分計測器における妥当性の検証

ここでは、FBG 式光ファイバセンサを用いた土中水分量計測器の妥当性を検証するための試験方法を提案する。

(1) 供試体概要

供試体概要図を図-3.9 に示す。これまでの試験結果や調査より、最も MDW に適していると考えられた木材を供試体として用いた。底面積 1cm^2 、高さ 5cm の四角柱を図-3.3 に示すように、高さが木材の半径方向になるように加工したものを、底面中央部には、光ファイバを挿入できるように直径 2mm の孔を開け、上述の銅を主成分とした防腐剤を用いて防腐処理を施した。また、光ファイバセンサは基本的には木材が絶乾状態時に装着するものとする。これは、浸潤状態の木材に光ファイバセンサを装着すると、乾燥時に木材の内孔内で、光ファイバがたわんでしまい、正確かつ安定したひずみが求められなくなることを避けるためである。

光ファイバを固定するため、ステンレス製の金属板を片側に 2 枚用いて挟み込み、金属板の内側には緩衝材としてゴムを装着した。

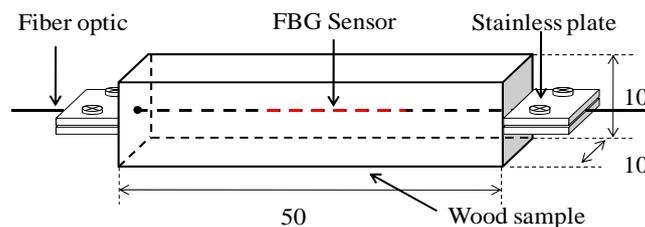


図-3.9 光ファイバ土壌水分計検証試験用木材供試体

(2) 光ファイバ式土壌水分計検証試験概要

a) 予備試験概要

本試験を行うまでに、以下に提案した 2 つパラメータを求める必要がある。これは、光ファイバは 1% のひずみがかわると切れてしまうため、木材における最大ひずみを求めることで本試験に適した木材を検討することができる。

- ①各木材における浸潤過程の水分量とひずみの関係の解明
- ②光ファイバ装着時の各木材における最大ひずみ

各木材の最大ひずみが1%以上であるとしても光ファイバの装着時では、未装着時と同じ最大ひずみが発生するとは考えにくい。これは木材が光ファイバを引張る力に対して、光ファイバがそれを妨げようとする抵抗力が発生するからである。これにより、たとえ光ファイバ未装着時の各木材の最大ひずみが1%以上であったとしても、装着時では1%未満になるかもしれない。また、これらのパラメータを知ることによって、光ファイバ装着時にバネを緩衝材として入れる、または、装着時の木材の体積含水率を調整し、例えば最大ひずみの中間点で装着することで、最大ひずみを半分にするといった対処方法を採用することができる。

b) 本試験概要

試験装置概要図を図-3.10に示す。地盤工学会規定の土の保水性試験加圧膜法を応用した¹⁵⁾。これまではpF試験装置にセラミックディスクを用いていたが、空気侵入値370kPaのメンブレンフィルタを採用することで試験期間の短縮化を図った。また、加圧によるメンブレンフィルタの破損を避けるため、その下部にはメンブレンフィルタよりも孔径の大きなプラスチック製のフィルタを取り付けた。

本試験装置には同様のチャンバーが4つ繋がっている。これはFBGアナライザのチャンネル数は一般的に4つであり、4種類の木材供試体について同時に試験を行うことで、試験期間の短縮化を図ったためである。

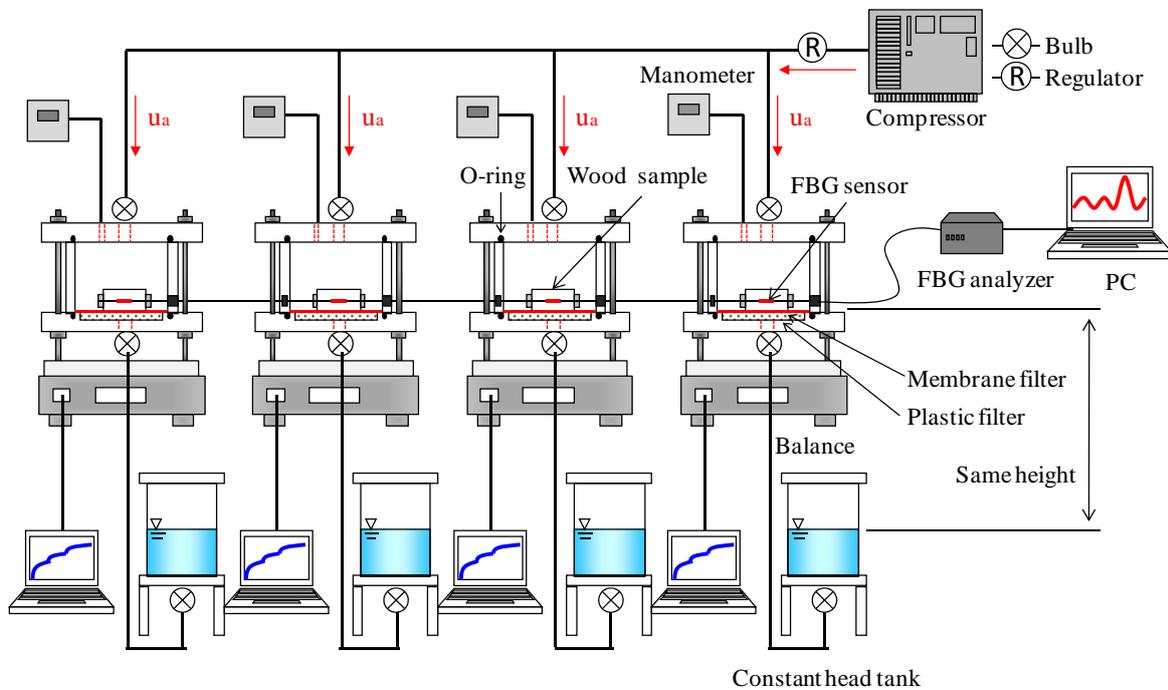


図-3.10 光ファイバ土壌水分計検証試験概要図

4. まとめ

本研究では、集中豪雨による土中の水分量の変化を従来の電気的な手法とは異なり、光ファイバセンサを用いて計測するという極めて斬新な計測手法を提案した。

本研究で得られた結果を以下に列挙して結論とする。

- (1) 豪雨等の浸透による土中の水分量の変化を光ファイバセンサの内のFBGセンサによって水分反応材(MDW)の変位を計測することによって推定する手法を提案した。
- (2) MDWとして、自然界にある木材片を対象として、その水分変化による変位を計測した。その結果木材の接線方向、半径方向、繊維方向の水分変化による変位量が大きく異なることが判明した。
- (3) 光ファイバセンサでは、水分によってあまり大きく変化するMDWは、センサの伸長限界以上に変化してしまうため、半径方向の木材片が有効であることが分かった。
- (4) 木材片を土中に埋設したことによる木材片の腐食を防止するために、木材片に防腐剤を注入した。その

結果は、今回の短い実験期間では確認されなかったが、異なる土槽中に木材片を埋設して防腐剤の効果についての探求は今後実施する予定である。

- (5) 木材片の水分量と負の圧力水頭である水分特性曲線を針葉樹と広葉樹の8種類について計測し、その結果を示した。
- (6) 木材片の体積含水率の変化とそのひずみの変化の関係を代表的な3種類の材料について計測した。
- (7) これらの結果より木材片をMDWとして用いて、土中の水分量の変化を本研究で提案する方法で計測できることが分かった。

5. 今後の課題

本研究で提案する方法で豪雨時の土中の水分変化の計測が可能であることが分かったが、今後の実施しなければならない研究課題を以下に列挙する。

- (1) 木材片の土中での腐食に対する耐久性を探求する。
- (2) 木材片に乾湿繰り返し試験を実施して、そのヒステリシス等の再現性について探求する。
- (3) 木材片を用いたMDWにFBGセンサを接着して、時々刻々と変化する水分量の計測精度の探求。
- (4) MDWとして木材片を用いたが、もっと浸潤側でも膨張する材料を対象として検討する必要がある。

また、斜面内への浸透状況が計測できるとなると、計測したセンサを設置する時に、対象としている斜面の土の強度特性を調べる手を進める。さらに、過去の豪雨データを参考にして斜面の安定評価を実施して、不安定とされれば最低でも法尻に排水用のドレーンを設置する対策を検討すべきである。

謝辞

本研究を実施するにあたって大変な実験を実施してくれた、本学大学院博士後期課程の平田洋一君、中本淳君（岡山大学大学院博士課程前期修士、現鳥取県庁）、藤田貴文君（岡山大学大学院博士課程前期1年生）に感謝を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局砂防部:「土砂災害警報区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」, 2000.
- 2) Fredlund, D. G, H. Rahardjo: Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, INC, pp. 64-105, 1993.
- 3) Tindall, J. A., J. R. Kankel: Unsaturated zone hydrology, Prentice Hall, pp. 371-372, 1999.
- 4) 小橋秀俊・酒匂一成: 各種機器による斜面モニタリング技術の現状, 土と基礎, Vol. 55, No. 9, Ser. No. 596, pp. 7-10, 2007.
- 5) 独立行政法人土木研究所他: 光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する共同研究報告書「光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル(改訂版)」, 独立行政法人土木研究所共同研究報告書第 352号, pp. 144-156, 2007.
- 6) Takeuchi, S. Kashiwai, Y. Nishigaki, M.: Feasibility study for a multi-level pore water pressure monitoring system using FBG sensors, Fibers and Optical Passive Components, 2005. Proceedings of 2005 IEEE/LEOS Workshop on, pp. 393-398, 2005
- 7) 社団法人地盤工学会: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, pp. 3-34, 2006.
- 8) 菅井栄一・高木登・藤田清一・渡部清昭: FBG 亀裂変位計を用いた岩盤斜面挙動計測について, 土木シンポジウム発表資料.
- 9) Alessi, R. S. Prunty : Soil-water Determination Using Fiber Optics, Soil scl. soc. AMT. vol. 50, pp. 860-863, 1986.
- 10) Sibel Pamukcu・Sylvain Texier・Jean Toulouse: Advances in Water Content Measurement With Distributed Fiber-optic Sensor, GeoCongress 2006 「Geotechnical Engineering in the Information Technology Age」, pp. 1-6, 2006.
- 11) Fernando Garrido・Masoud Ghodrati・Michael Chendorain: Small-Scale Measurement of Soil Water Content Using a Fiber Optic Sensor, *Soil Science Society of America Journal* 63, pp. 1505-1512, 1999.
- 12) 佐々木理・奥津晃一・大丸修二・柏井善夫: 光ファイバ水位計による河川堤防モニタリングシステムの開発, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp. 247-248, 2005.
- 13) 西垣誠・平田洋一・中本淳・奥津晃一: 光ファイバーによる土中の水分量の計測に関する研究, 2009 年秋季講演会講演要旨, 日本地下水学会, pp. 76-77, 2009
- 14) 西垣誠・平田洋一・中本淳・藤田貴文: 光ファイバセンサを用いた土中の水分量に関する基礎的研究, 2010 年秋季講演会講演要旨, 日本地下水学会, pp. 70-73, 2010
- 15) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説, pp. 118-135, 1990.
- 16) 日本木材加工技術協会関西支部編: 木材の基礎科学, 海青社, 1992