

# 1. 空気圧連通試験と高密度電気探査の組合せによる不飽和の高透水域の抽出方法

## に関する一考察

新村 卓也 Takuya NIIMURA (パシフィックコンサルタンツ株式会社)  
 館川 逸郎 Itsuro TATEKAWA (パシフィックコンサルタンツ株式会社)  
 藤吉 秀彰 Hideaki FUJIYOSHI (パシフィックコンサルタンツ株式会社)  
 斉藤 泰久 Yasuhisa SAITO (パシフィックコンサルタンツ株式会社)  
 西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学名誉教授, IMTERA 理事長)

気候変動による洪水外力の増大が懸念される中、生命財産等を洪水被害から守るため、河川堤防は連続する線状構造物として機能することが求められる。一方、河川堤防は複雑な基礎地盤上に嵩上げ・拡幅を繰り返し形成された土構造物であり、連続堤として機能するためには、弱点箇所（ここでは、浸透破壊に起因し堤防決壊に至る可能性の高い箇所）を抽出し、必要範囲に対して必要な規模の対策工を行うことが求められる。本論文では、浸透対策範囲・規模を明確にするための試みとして、①新たな調査法の空気圧連通試験と高密度電気探査を組合せた手法による高透水域（水ミチ）の分布範囲の抽出事例、および、②高密度電気探査による遮水矢板の打設深度の把握事例について報告する。

キーワード：河川堤防、空気圧による連通試験、高密度電気探査、パイピング

### 1. はじめに

河川堤防に対し浸透対策工の効果を確実に発揮させるためには、事前調査に基づき対策範囲（区間・深度等）を設定する必要がある。本報では、表-1 に示す調査目的とした現地調査事例を報告する。

表-1 調査目的

現地実験	調査目的
事例1	脈流的に広がる水ミチ（高透水範囲）が形成された範囲の把握、対策区間の設定
事例2	堤防縦断方向における土層変化把握、遮水工先端深度の設定

#### (1) 事例1について

漏水箇所では一般に経験則に基づき、漏水地点から上下流45°の範囲に対策工を行っている。しかし、確実に対策効果を得るためには、漏水の原因となる水ミチの分布が想定される範囲（以下、「高透水範囲」と記す。）を包括する範囲を把握することが重要である。一方、堤体直下のような不飽和領域に対し、高透水性範囲を抽出する調査手法は確立されていない。ここでは、不飽和領域に潜在する高透水性範囲を抽出する新たな調査手法として「空気圧連通試験と高密度電気探査を組み合わせた調査法」について、実施事例を紹介する。

#### (2) 事例2について

一般的に遮水矢板の先端深度は、一定間隔で行うボーリング調査結果から土層構成を推定し、必要な深度に設定する。一方、基礎地盤に玉石の混入する土層が厚く堆積する場合等は調査費用が非常に高価となる。また、遮水矢板を貫入させるための灘透水層がない場合には、透水層における透水係数の分布状況に応じた打設深度設定が求められる。

ここでは土層構成を連続的に把握する手法として「高密度電気探査」結果を活用した二次微分解析事例を紹介する。

### 2. 事例1 (新たな組合せ調査法による弱点箇所の抽出)

#### 2.1 概要

「高透水性範囲の抽出」を目的とした現地調査はT川水系O川で行った。作業性を優先し図-1に示す土層構成の堤防前面の高水敷で行った。図-2に示す平面配置で空気圧連通試験および高密度電気探査を行った。空気圧連通試験は半径10mの同心円上に4箇所の受信孔と、円の中心に1箇所発信孔を配置した。高密度電気探査の測線は発信孔と受信孔の中間付近に2測線を配置した。

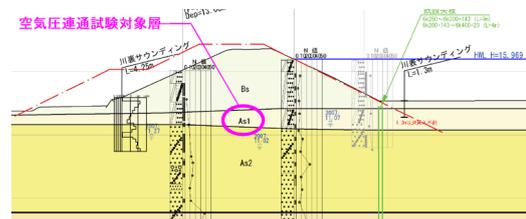


図-1 周辺既往調査の地層断面

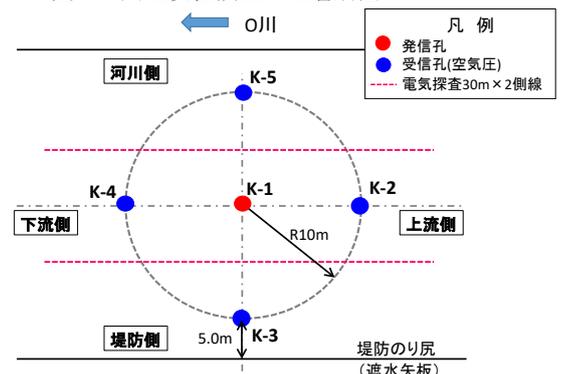


図-2 平面配置図 (左岸 高水敷)

## 2.2 調査方法

### (1) 空気圧による連通試験

#### a) 測定原理

「空気圧を用いた連通試験」イメージを図-3 に示す。本手法は不飽和地盤を対象に空気を注入し、空気圧の伝播状況から、水ミチ等の有無、高透水路の連続性を把握するものである。

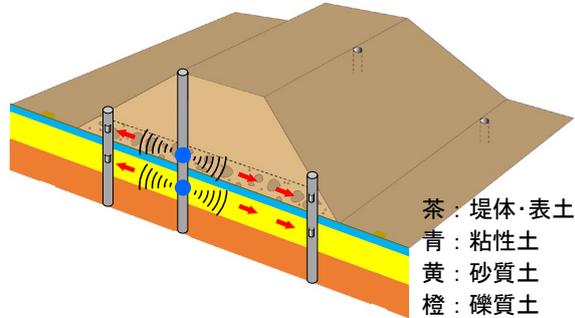


図-3 空気圧を用いた連通試験イメージ図

#### b) 試験装置

本手法は図-4 に示すように、発信孔から対象層へ直接空気を注入すると共に、周辺に配置した受信孔における空気圧の伝播状況の相対比較により、地盤内に潜在する高透水路や水ミチ等の連続性を把握するものである。試験装置は地盤内へ空気を注入する発信孔、および、注入空気圧を検知するための受信孔で構成する。写真-1 は実証実験で行った際の発信孔および配置機器の事例を示したものである。

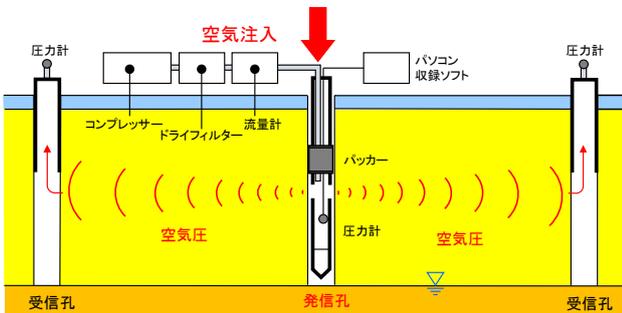


図-4 調査孔の配置イメージ

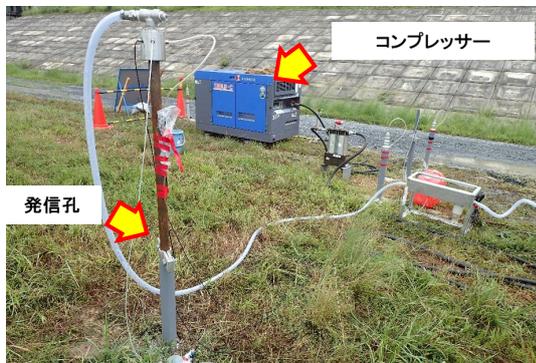


写真-1 発信孔および配置機器

### (2) 高密度電気探査

高密度電気探査は比抵抗の分布により地盤の状況（水分量・細粒分含有率・相対密度）を判定する手法である。本調査では電極間隔を 50cm で配置し、計測を行った。

## 2.3 調査結果

### (1) 空気圧による連通試験

「空気圧を用いた連通試験」における注入空気量の時間変化を図-5 に、発信孔および受信孔における空気圧の時間変化を図-6 に示す。空気注入は 2 回実施し、最終的に注入空気量は段階的に 2000L/min まで上昇させた。この時、発信孔内の空気圧は 1.0kPa 程度まで上昇した。受信孔の空気圧は下流側で 0.049 kPa, 上流側で 0.12 kPa, 河川側で 0.022 kPa, 堤防側で 0.059 kPa まで上昇した。

なお、実験中に受信孔ではパッカーの不具合で局所的に空気漏れが生じた。このため、パッカーを補修しつつ計測を続けたため受信孔の空気圧の計測データは安定していない。

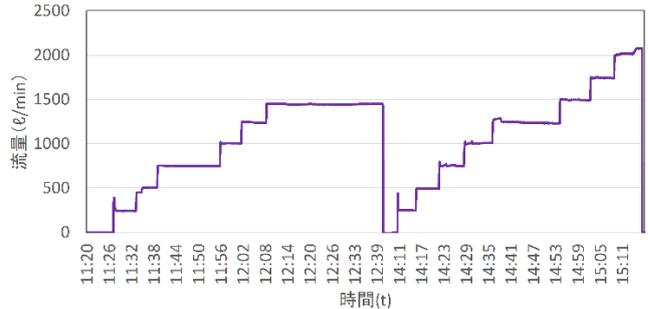


図-5 注入空気量の時間変化

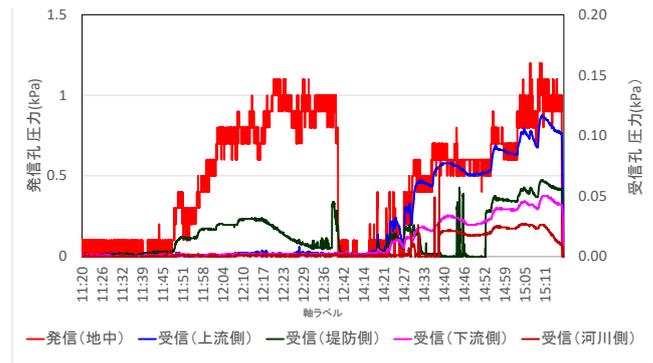


図-6 調査孔における空気圧の時間変化

空気圧を注入した GL-2.0~2.5m 付近の調査孔位置における細粒分含有率 FC および空気圧連通試験において計測された空気圧を表-2 に示す。K-1(発信孔)および K-3(堤防側受信孔), K-4(下流側受信孔)では細粒分含有率は数%であった。それら 3 孔における空気圧の計測値は類似する値を示した。一方、K-2(上流側受信孔)および K-5(河川側受信孔)では細粒分含有率が 20%前後と相対的に高かった。ただし、空気圧の計測値は K-2(上流側受信孔)が 4 孔中で最も高い値を示し、K-5(河川側受信孔)では最も低い空気圧を示した。

表-2 空気圧 (最大値) および細粒分含有率

調査孔	空気圧(最大) (Kpa)	細粒分含有率 FC(%)
K-1(発信孔)	1.1	3
K-2(上流側 受信孔)	0.117	19
K-3(堤防側 受信孔)	0.059	3
K-4(下流側 受信孔)	0.049	1
K-5(河川側 受信孔)	0.022	24

(2) 高密度電気探査

高密度電気探査結果を図-7(1)(2)に示す。

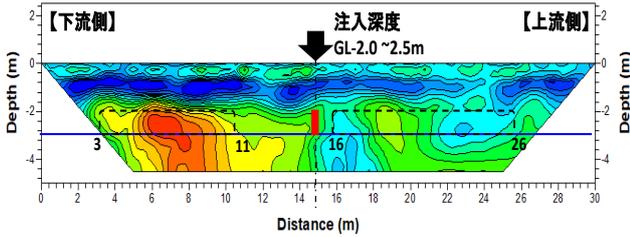


図-7(1) 測線1(河川側) 高密度電気探査結果

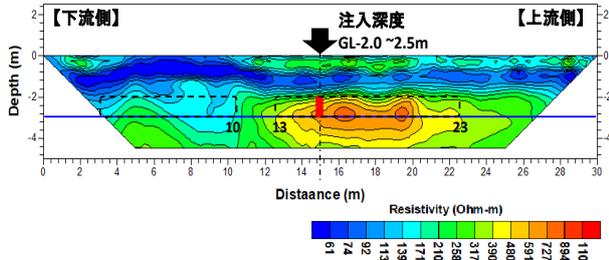


図-7(2) 測線2(堤防側) 高密度電気探査結果

測線1, 2ともに深度1m前後付近に、比抵抗100Ωm前後の砂混じりの細粒土主体の土層が分布していると想定され、その下位に空気注入を行った砂主体の土層が分布していると想定される。砂主体の土層の中で、測線1(河川側)の3m~12m付近および測線2(堤防側)の13m~23m付近には比抵抗の相対的に高い範囲が分布し、粗粒土・礫質土が堆積していると想定される。

2.4 調査結果の分析

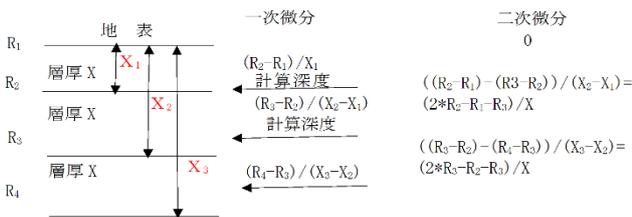
(1) 高密度電気探査の二次微分による土層評価

比抵抗値が急変する部分(二次微分値がプラスからマイナス、もしくはその逆に変化し、微分値がゼロ(白領域)となる)では、地層境界と一致する結果が報告されている<sup>1)</sup>。二次微分の計算方法は図-4及び以下に示す通りである。

$$\text{一次微分} = (R_i - R_{i-1}) / (X_i - X_{i-1}) \quad (\text{式-1})$$

$$\text{二次微分} = ((R_i - R_{i-1}) - (R_{i+1} - R_i)) / (X_i - X_{i-1}) \quad (\text{式-2})$$

Xは等間隔なので分母はXとなり、Xが1m間隔のとき以下の式となる。



試験孔の柱状図を用いてキャリブレーションを実施した高密度電気探査結果(二次微分)に基づく土層断面を図-8(1), (2)に示す。電気探査結果は柱状図の砂質土層と粘土層の区分と一致し、層境界(断面図の白い部分<黒線は後から追記>)が明確である。また、透水性が高い(比抵抗値の変化が大きい)箇所は、この断面では赤色のコントラストが強く表示されている。

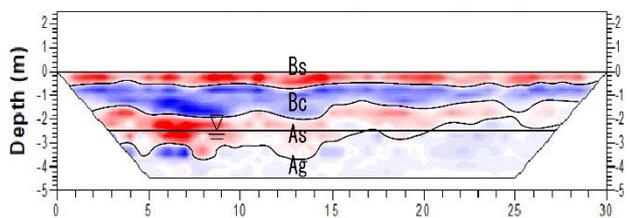


図-8(1) 測線1(河川側) 電気探査結果に基づく断面

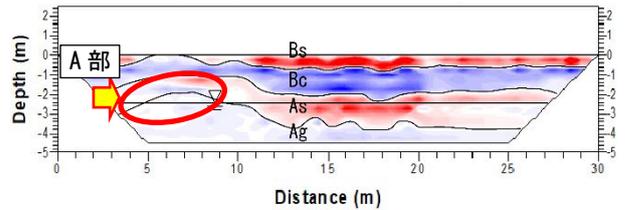


図-8(2) 測線2(堤防側) 電気探査結果に基づく断面

(2) 空気圧による連通試験前後の比較

空気圧による連通試験前と試験直後に行った高密度電気探査結果の差分図を図-9に示す。(1)河川側, (2)堤防側共に、変化が表れている深度はGL-1.0~2.0m付近に分布している。特に図-11(2)のA部は、二次微分手法により透水性の高い礫質土層が分布すると推定され、比抵抗値の差分でも変化率が高い領域であったことから、高気水性(高透水性)地盤の分布する範囲と推定できる。なお、表層付近では試験中に降雨が観測されたことが影響している可能性も考えられる。

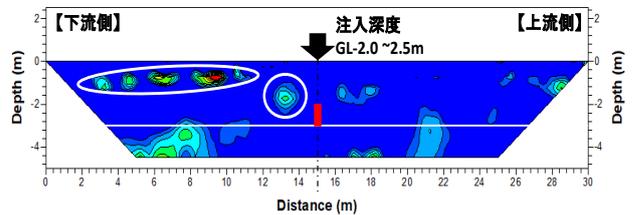


図-9(1) 測線1(河川側) 高密度電気探査差分図

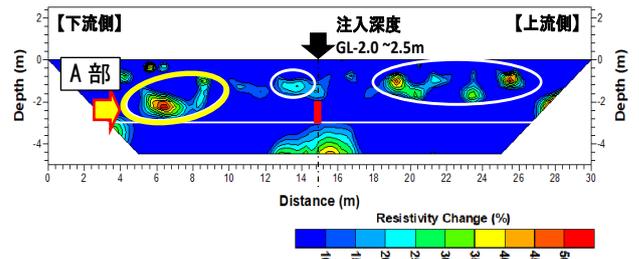


図-9(2) 測線2(堤防側) 高密度電気探査差分図

2.5 考察

空気圧連通試験、高密度電気探査及び、調査孔設置時の採取土を基に実施した粒度試験結果を踏まえ、空気注入深度(GL-2.0~2.5m)における、土層分布を図-10に示す。

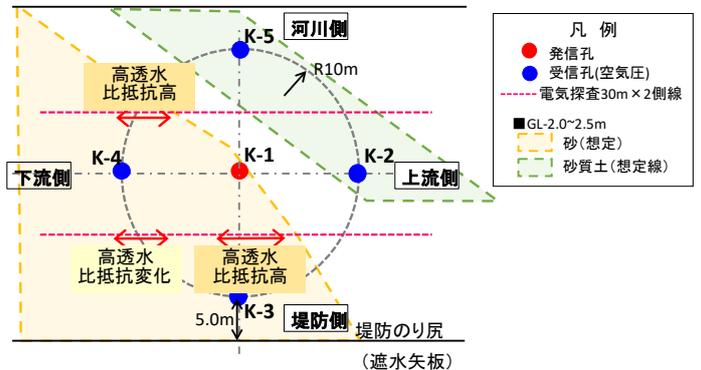


図-10 空気注入深度における土層平面分布

発信孔(K-1), 堤防側(K-3), 下流側(K-4)には細粒含有率1~3%の砂層が堆積し、類似範囲で高密度電気探査において比抵抗の大きな層が確認されており、堤防から河川に向かい斜め下流方向に同砂層が堆積しているものと推定される。空気圧連通試験結果における空気圧の分布からも、堤防側(K-3), 下流側(K-4)で類似した値を確認できた。また、高密度電気探査結果の二次微分および空気圧注

入前後の差分から、砂層の分布範囲の中でも礫質土が一部浅層部に分布する可能性が示唆された。

### 3. 事例2(二次微分解析手法を用いた土層構成の把握) 3.1 概要

「堤防縦断方向における土層変化把握」を目的とした現地調査は、T川水系T川で行った。近傍の既往ボーリングから、沖積砂礫地盤が10m程度堆積し、その下位に洪積礫地盤の堆積する左岸堤防である。当該区間における沖積砂礫層(Ag)の飽和透水係数は $3 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 程度、洪積礫層(Dg2)は $3 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 程度である。地下水位はGL-2.5m付近であった。漏水対策として遮水矢板を打設予定があり、矢板先端は洪積礫層に貫入させる計画であった。図-11に高密度電気探査の測線配置を示す。川表のり尻付近を対象にL=130mの範囲で計測を行い、土層構成を把握する共に、比抵抗値の深度方向における変曲点に着眼した土層境界を把握し、矢板打設深度を設定するための基礎情報を取得した。

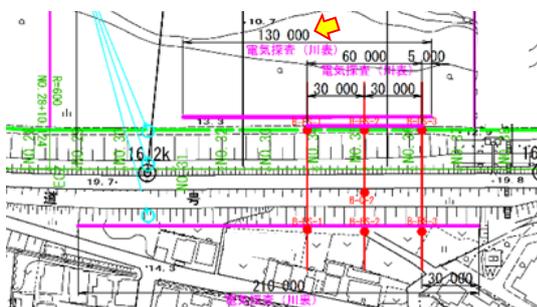


図-11 調査位置図

### 3.2 調査・分析方法

#### (1) 高密度電気探査

本調査では4極法のダイポール・ダイポール電極配置とし、電極間隔は0.5mとして計測を行った。また、野中ら<sup>9)</sup>の提案する二次微分解析手法による土層境界の推定を行った。

### 3.3 調査結果

図-13に川表の比抵抗断面・一次微分・二次微分の結果を示す。図中には柱状図を記載し、二次微分の結果には土層線を示した。比抵抗値が高く赤色の部分は礫主体で非常に高透水(透水係数が $10^{-3} \text{m/s}$ オーダー以上)、黄緑色の部分は砂主体でやや高透水( $10^{-5} \text{m/s}$ 程度)、青色の部分は粘性土主体で難透水( $10^{-6} \text{m/s}$ 程度以下)に区分される。

二次微分結果より、高透水域はAs~Ag層・Dg1層が相当し、Dg1の下位の難透水域はDg2層が相当するとして想定した。Dg2の上端は標高-4mに連続的に分布するものの、距離55m付近を境に上流側で浅くなる。

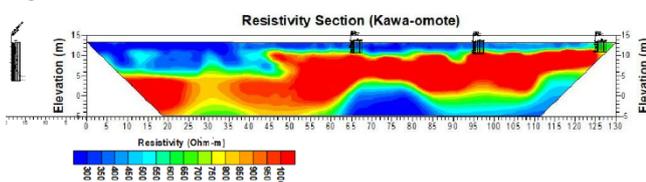


図-12 高密度電気探査結果

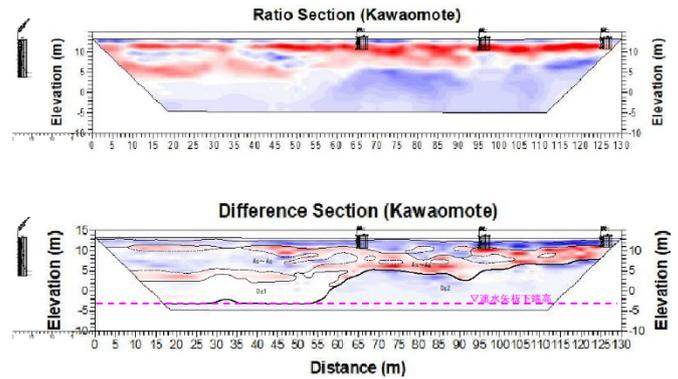


図-13 高密度電気探査(上段:一次微分,下段:二次微分)

### 3.4 考察

二次微分を行った結果から透水性の相対的に低いDg2層(遮水矢板を貫入させる層)の上面の想定線を明瞭に把握することができた。

### 4. まとめ

河川堤防の浸透対策工の範囲(区間・深度等)を効果的・効率的に設定するための事前調査事例として、本報では2事例を報告した。

事例1より、空気圧連通試験と高密度電気探査による組合せ調査法は、河川堤防の弱点箇所となる「高透水性範囲」を把握する手法として有効であることが示唆された。同範囲をもとに、浸透対策工の実施区間を設定できると考える。

事例2より、高密度電気探査により得られた比抵抗値の深度方向における変曲点に着眼する分析手法は、土層境界を把握する手法として有効であり、浸透対策工としての遮水矢板の打設深度を設定するための基礎情報として活用できると考えられる。

一方、これらの調査手法は長大な河川堤防の中から弱点箇所を絞込・抽出する組合せ調査手法としても有効と考えられる。今後は実用化に向けて、以下の観点から実績を重ねたいと考える。

- ① 実用的な調査手法の確立: 実用化に向け、調査機器プロトタイプ改良を進める。
- ② 三次元解析ソフト開発: 現地調査で得た計測データおよび、地盤条件を入力条件に、堤体内の空気圧分布、および連続する水ミチ・高透水域が分布する可能性を判定可能なソフト開発を行うと共に、調査・解析方法を示したマニュアルを作成し、実用化を進める。

### 謝辞

本調査の実施にあたっては国土交通省岡山河川事務所よりフィールドを提供して頂いた上に、貴重な資料を提示して頂いた。ここに厚く感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) 野池・松澤・南・斉藤, 浅層電磁探査法を用いた土層厚推定手法の検討, 平成30年度砂防学会研究発表会概要集, 2018

## 2. 河川堤防内の長期水位計測実績に基づいた原位置における不飽和土中の水分計測の意義

Significance of the unsaturation soil moisture measurement based on the long term water level measurement in the river levee.

片山輝彦 Teruhiko Katayama ((株)アサノ大成基礎エンジニアリング)

一級河川高梁川(延長111km,流域面積2,670km<sup>2</sup>)では,国土交通省岡山河川事務所において,河川堤防の状況把握として,一部試験的に堤防内部にFBG光ファイバー式水位計を設置し,2006年より現在に至るまで長期間の堤体内水位計測を,2020年からは土壌水分計測を行っている。

本研究では,国土交通省岡山河川事務所から提供頂いたデータを基に,堤体内水位および土壌水分の計測結果から明らかになったこと,および計測結果から得られた堤体内部の不飽和部における土壌水分の挙動に関して,実際の計測結果を示しながら述べる。

キーワード:河川堤防,長期計測,不飽和土,土壌水分

### 1. はじめに

一級河川高梁川(延長111km,流域面積2,670km<sup>2</sup>)では,国土交通省岡山河川事務所において,河川堤防の状況把握として,一部試験的に堤防内部に水位計を設置し,2006年より現在に至るまで長期間の水位計測を継続している<sup>1)~3)</sup>。図-1に計測測線の平面位置(高梁川左岸10k200)を示す。水位計測は,河川に沿って配置している光ファイバー網を利用しており,計測器の形式は後述するFBG光ファイバー水位計を用いている。このような取り組みは全国でも例がなく,加えて10年以上の長期計測の事例も見当たらない。

河川堤防内の水位計測の目的は,豪雨時などの河川水位上昇と降雨による堤防の安全性を監視することである。特に河川堤防の安定性監視で真に計測しなくてはならないのは,何時発生するか分からない強雨時であるため,長期間の継続的な水位観測が重要である。

今回の長期計測では,2018年7月の西日本で起きた集中降雨と同年9月の台風24号による強雨時の堤体内水位を計測することができた。

一方で,従来の研究<sup>4)</sup>によると,河川堤防内の水位線より上部において,降雨などの影響により80%に至る飽和の分布が存在していることが分かっている。そこで土中の水位線の発生と高い飽和度の関係性を考え,河川堤防内の水位計測の他に堤内の飽和度を測定すれば,河川堤防の安定性評価の一助につながると考えた。

このことから,当該区域では2020年2月に当該測線(10k200)における4カ所において土壌水分計を国土交通省岡山河川事務所により設置し,継続的に計測を実施している。

本論文では,高梁川河川堤防での水位計測システムの内容を説明するとともに,2018年7月の西日本集中降雨時の河川堤防内水位の計測結果と評価,土壌水分計の必要性ならびに土壌水分計の計測結果を示し,最後に河川堤防内の原位置における不飽和土中の土壌水分計の計測意義に関して述べる。

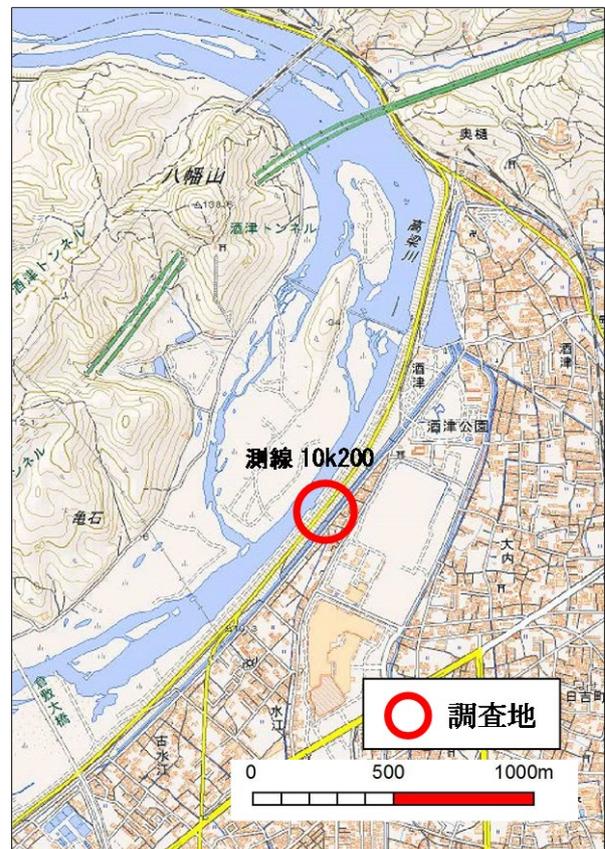


図-1 計測測線の平面位置

## 2. 光ファイバーを用いた河川堤防内の水位計測システム

### 2.1 光ファイバーを用いた水位計の計測システム

今回用いた光ファイバー水位計は、FBG（Fiber Bragg Grating）式センサー<sup>5)</sup>である。

FBGの原理は、光ファイバーに光の位相変化を起こす素子を設置し、そこにレーザー光を照射して光ファイバーの屈折率を感知する方式である。図-2にFBG光ファイバーセンサーの概念図を示す。

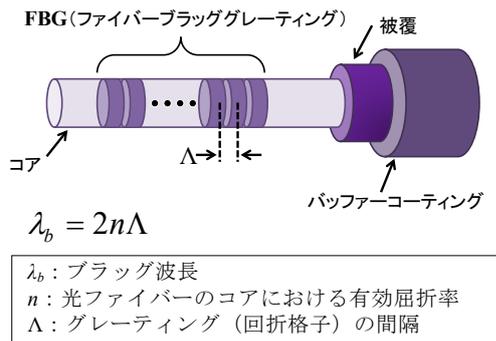


図-2 FBG光ファイバーセンサーの概念図

$n$  は一定値である。光ファイバーケーブルが引張りを受けて伸びると  $\Lambda$  が変化し、結果として  $\lambda_b$  が変化する。光ファイバーの伸縮によるセンサー  $b$  の変化と線形関係にあることから、FBG光ファイバーセンサーを圧力や変位を計測する各種センサーに置きかえることができる。今回の水位計も上記のメカニズムを利用した水位計として現場に設置している。

FBG光ファイバー水位計は観測井戸内の所定深度に吊り降ろして設置し、水位計が地下水に浸水したときに受ける水頭圧をFBGのひずみに変換して計測する(図-3)。

計測は常時監視を基本とし、計測データは、岡山河川事務所高梁川出張所に設置したパーソナルコンピュータに保管され、さらにネットワークより関係各所に共有できるシステムとなっている。

### 2.2 長期計測を可能にした光ファイバー水位計の特長

FBG光ファイバー水位計は、電気式の間隙水圧計のように電源が必要でなく、データの伝送が光ファイバーケーブルでできることが特徴であり、長期モニタリングで高く求められる耐久性や安定性を有した優れた間隙水圧計である。

また、この水位計は直接地盤内に埋設できるため、地盤内の間隙水圧計としての計測が可能である。今回の水位計測では、以下に示すFBG光ファイバーセンサーが有する5つの特徴を生かし、10年以上の長期計測を可能にしている。



図-3 FBG光ファイバー水位計の外観

#### (1) 電気耐性

光ファイバー水位計は、センサー内部に電子回路を持たないことから落雷による故障がほとんどない。そのため、雷をともなう豪雨時での計測に対して高い耐久性を有する。

#### (2) 高い耐水性

光ファイバーは、電気式計測と比較して水に強く、長期間に渡る堤防堤体内の高湿度環境や地下水以下における計測に対しても長期安定性および健全性を確保しやすい。

#### (3) 長距離通信能力

光ファイバーは、計測可能な遠隔距離が10~20kmと長距離なため、高梁川の堤防堤体内の水位計測など広域計測や遠隔計測が可能である。

#### (4) 広域計測における施工性

FBG光ファイバー水位計は、センサー1本のラインに最大10台程度の計測器を直列で接続できるため、規模の大きい計測は、経済的に優位である。

#### (5) 河川堤防における光ファイバー計測の利点

FBG光ファイバー水位計は、高梁川に整備されている情報通信用光ファイバー網を利用できるため計測システム構築において効率的かつ経済的な計測ができる。

## 3. 河川堤防内水位計測の実績

### 3.1 高梁川での計測概要

計測は、高梁川の左岸に配置された光ファイバー網を利用し、FBG光ファイバー水位計で実施されている。計測データは、測線10k200の堤体内水位である(図-1)。図-4に計測断面を示す。

堤防内の水位は、各深度に配置された井戸に設置した水位計によって計測した。図中の赤丸と赤文字は、水位計の先端計測部の高さ(TP)を示している。堤防内の地下水位は、常に水位計先端より上にあるとは限らない。

そのため、水位が水位計先端部より低い場合の計測値は、水位計の設置高さで固定される設定になっている。計測データの整理では、このことに注意が必要である。

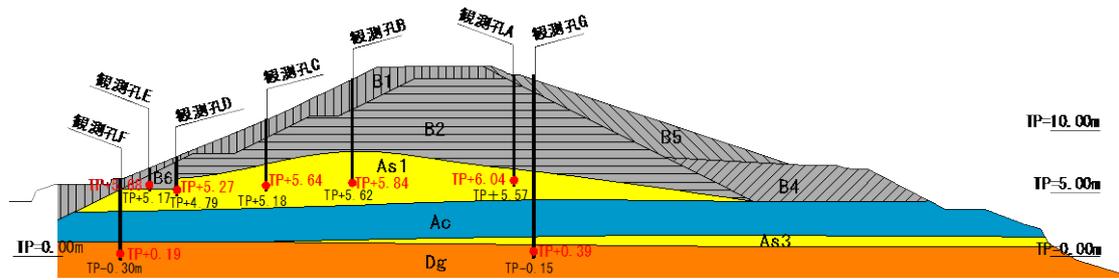


図-4 計測断面と水位計測位置

なお、観測井戸 F と G は、河床地盤と同一層の Dg1 層に設置されており、これらの観測値は河川水位とほぼ同一であることが確認されている。

### 3.2 河川堤防内水位の計測実績

河川堤防の水位計測の目的は、強雨時などの河川水位上昇と降雨による堤防の安全性を監視することであり、測線 10k200 では、2006 年から現在に至るまで長期間の水位計測を継続している<sup>1)~3)</sup>。測線 10k200 で長期間の計測を実現したことで、2018 年 7 月の集中降雨時において、河川内水位と河川堤防内の水位を計測することができた。以下にその結果に関して述べる。

### 3.3 2018 年 7 月の西日本豪雨時の計測

2018 年 7 月 6 日～7 月 8 日未明にかけて発生した強雨時の降雨量と測線 10k200 における河川水位、堤防内水位の時刻歴を図-5 に示す。

河川水位データは、測線 10k200 に隣接した河川水位観測点のデータを使用した。降雨量は、気象庁の公開デー

タ<sup>4)</sup>のうち高梁地点のデータ測点のデータを引用した時間降雨量である。

図より、降雨にともない上昇する河川水位に対して観測井戸 A と C の水位が敏感に反応していることがわかる。特に観測井戸 C の地下水上昇が早い。一方、観測井戸 B の水位は河川水位に対して遅れて上昇していることが分かる。さらに、これらの水位は、河川水位が下がっても暫く低くなることはなく、遅れて反応していることが確認できる。これらの状況を断面図にプロットし、河川水位の分布を調べた。図-6 にその結果を示す。図中の分布は、図-5 に示した 7 月 7 日 2:00 と 7 月 7 日 16:00 の堤体内水位分布と河川水位である。図より、計測期間中一番高い 7 月 7 日 2:00 の河川水位から 7 月 7 日 16:00 の河川水位の下降に対して堤防内の水位の上昇が遅れて発生していることがわかる。

このことから、河川堤防の安定性が堤防内水位分布に起因することを考えれば、河川水位の上昇と低下を観察するだけでは、河川堤防の安定性を捉え切れないのではないかと考える。

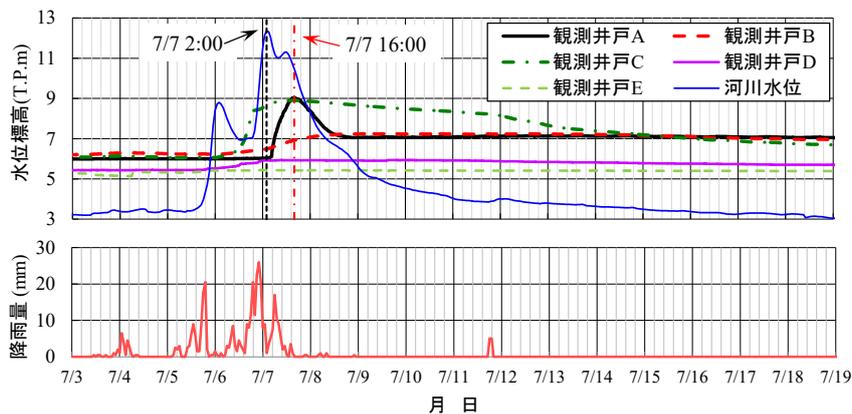


図-5 計測値の時刻歴 (2018 年 7 月 6 日～7 月 8 日)

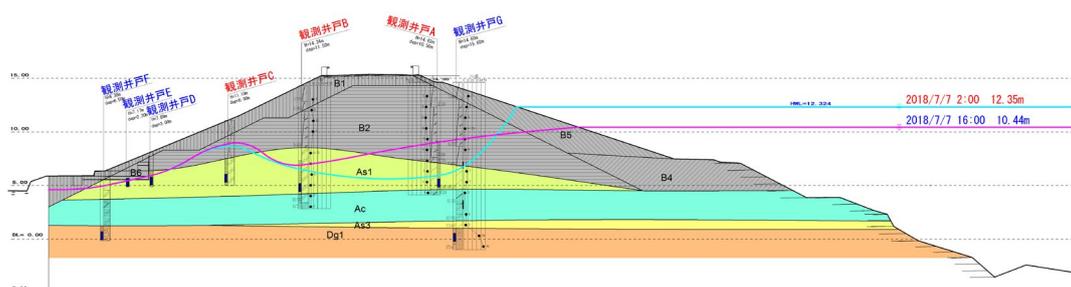


図-6 堤防内水位分布と河川水位の関係 (7 月 7 日 2:00 と 16:00)

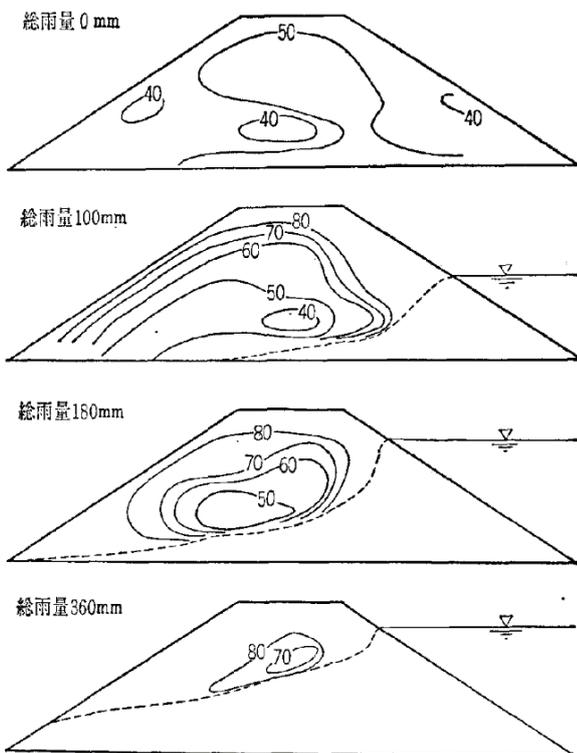
なお、このような観測傾向、すなわち河川水位に対して堤内水位が遅れて変化する傾向は、大きくは河川堤防の透水係数によって影響されるものと考えるが、降雨浸透の影響もあると想定される。特に観測井戸Cで水位が河川水位の減少に対して上昇しているのは、河川水位と降雨浸透の両方による影響によるものと考えた。

#### 4. 水位計測結果から見てきた堤防安定性の課題

河川水位と降雨を模した模型実験<sup>7)</sup>では、降雨によって河川堤防内の水位より上の堤体内に飽和度 80%を越える部分が発生していることが確認されている(図-7)。これは、河川水位のみならず強雨による堤体への雨水浸透が深く関係していることが原因といえる。

この場合、堤体内水位より上部、即ち不飽和な部分が飽和状態に近くなることによる有効応力低下とそれともなうせん断強度低下が発生し、これによって堤体が崩壊する可能性も出てくる。そのため、降雨や河川水位に対する堤防の安定性評価を行う上では、堤防内水位の計測だけでなく、飽和度も把握する必要があると考える。

そこで筆者は、平成 30 年 7 月の集中降雨時の水位観測データを再現した飽和・不飽和浸透流解析<sup>8)</sup>を実施し、観測当時の堤体内水位より上部の飽和度分布の状態を予測してみた。図-8 に解析結果を示す。解析は、比較的簡易な 1 相流の浸透流解析で実施した。解析における水分特性曲線などのパラメータは、既往の一般的な条件を用いた<sup>8)</sup>。解析は、1 相流であることから、堤体内水位より



(注) 破線は浸潤線を示す

図-7 堤防内の飽和度及び湿潤線の変化<sup>7)</sup>

上部の不飽和土の部分に降雨時にどのような飽和度であったかの予測はできていない。堤体内の観測も同様に、不飽和土の部分(河川堤防内水位より上部の箇所)での飽和度が観測されていないということは、上述した模型実験の結果のような状況が本当に起きているかどうか、それによって堤体内の安定性がどのような状態なのかどうかを判断することは難しいと考える。即ち、堤体内水位変化と堤体内の飽和状態を精度良く予測し、河川水位変化と降雨の影響による堤体の安定性を評価するためには、堤体内水位だけでなく堤体の飽和度(土壌水分)の観測データも必要であると考えられる。

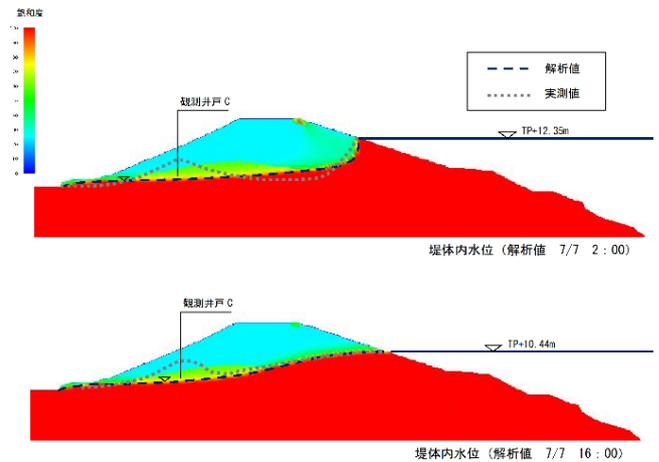


図-8 逆解析結果

#### 5. 河川堤防内に設置した土壌水分計

上述した長期的な観測経験や考察を受けて、河川水位変化と降雨の影響による堤体の安定性を精度よく評価することを目的として、河川堤防内の 4 カ所の土壌水分計設置、河川堤防内の水位と水位より上部の不飽和箇所の土壌水分の計測を行っている。

以下に、計測設置箇所、設置方法および設置から現在までの観測結果に関して概説する。

##### 5.1 河川堤防への土壌水分計の設置箇所と設置方法

図-9 に土壌水分計の設置地点を示す。今回設置したのは、静電容量式の小型土壌水分センサーである。このセンサーは、電極間での静電容量の変化を計測する方式であり、土粒子の存在や間隙水の存在によりセンサーの静電容量(センサー計測値)が変化することを利用している(図-10)。

土粒子の存在にも反応するため、乾燥状態でもセンサーは何らかの計測値を発生することに注意が必要である。即ち、土壌水分計による堤体内の土壌水分の計測は、一定の乾燥密度の地盤内に浸潤した雨水などによって間隙水が加水された状態にセンサーが反応し土壌水分量として計測しているということを理解しておく必要がある。

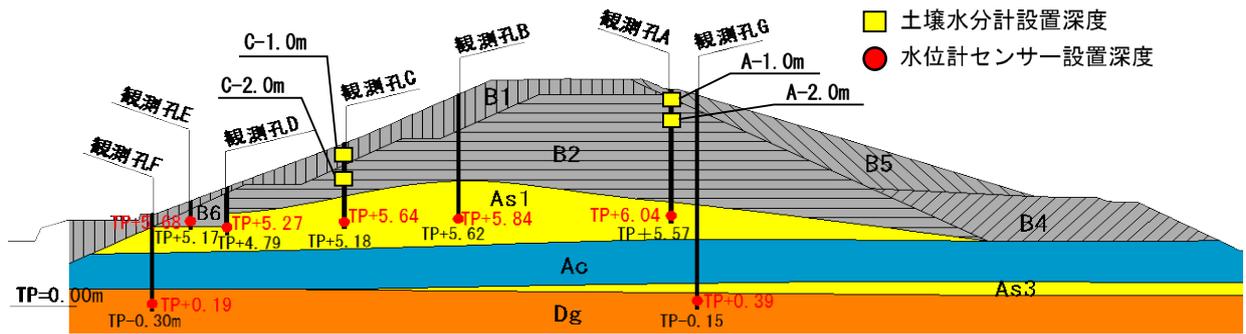


図-9 土壌水分計設置位置図

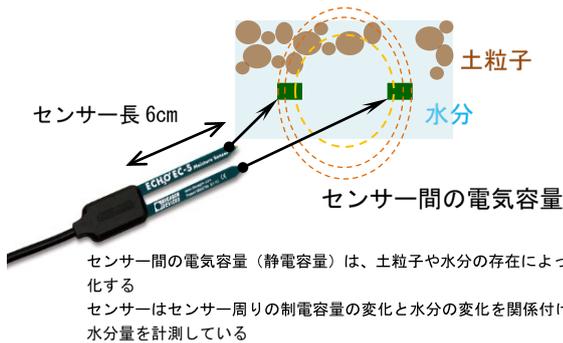


図-10 静電容量式の土壌水分計の計測原理

後述する体積含水率とセンサー計測値のキャリブレーションでは、乾燥状態（体積含水率  $\theta=0$ ）でセンサーが反応しているのは、センサーが土粒子の密度に反応していることを示している。

土壌水分計の堤体内への設置方法を図-11 に示す。センサーの設置は、設置孔の土を用い、その土を埋めたモールドに土壌水分センサー埋め込み、凍結させ、計測深度に設置するとともに掘削孔から採取した現地土で埋設した。これによって、現地の状態（土質と密度）を再現し、そこに土壌水分計を配置した状態を実現した。このことにより、現地の土壌水分の挙動が他の要因（土質の違い、掘削設置埋め戻して生じた地盤の不均一性など）によって計測のばらつきが生じないように配慮した。

なお、計測された土壌水分の計測値は、データの無線通信とクラウドサーバへの保管を行い（図-12）、効率のよい計測とデータ保管を実施している。

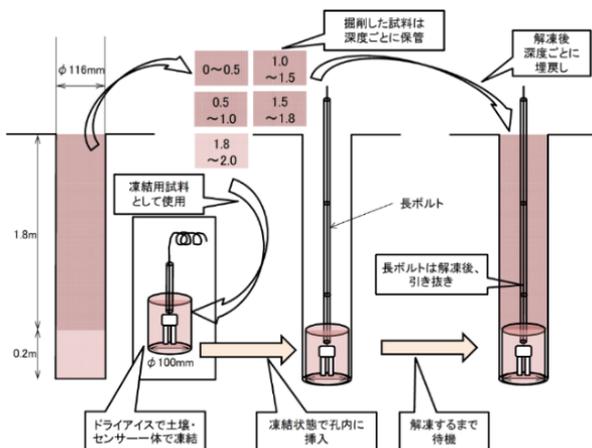


図-11 土壌水分計の設置方法

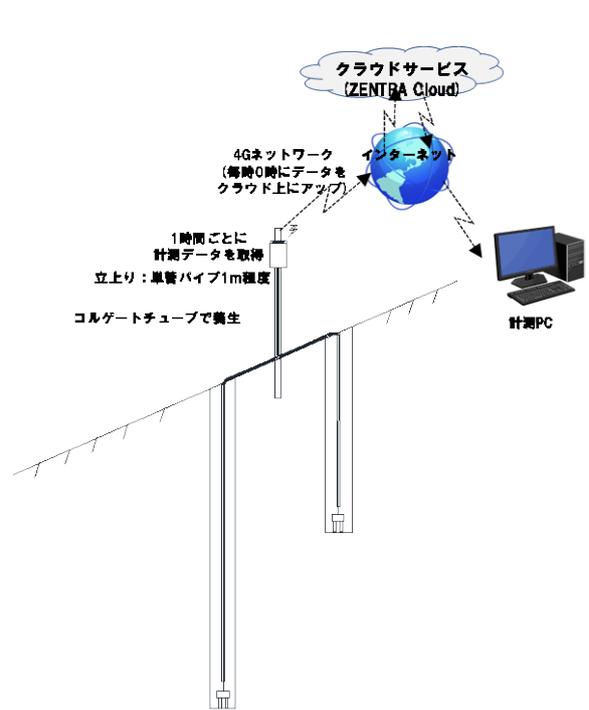


図-12 土壌水分計のデータ通信システム

## 5.2 設置箇所の土質特性

センサー設置孔の掘削土を利用して、土質特性を把握した。その結果を表-1 と図-13 に示す。土質特性としては、A-1.0m, 2.0m および C-1.0m は類似する傾向が見えるが、C-2.0m はその他の特性とは違った傾向を示していると判断できる。

表-1 土壌水分計設置深度の物理試験結果

土壌水分計地点名	A-1.0m	A-2.0m	C-1.0m	C-2.0m
試料番号	A-1-1	A-1-2	C-3-1	C-3-2
(深さ) m	0.80~1.00m	1.80~2.00m	0.80~1.00m	1.80~2.00m
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.679	2.661	2.669	2.66
礫分 (2~75mm) %	5.3	17.3	5.9	2.5
砂分 (0.075~2mm) %	83.5	71.4	57	95.8
シルト分 (0.005~0.075mm) %	18.5	8.3	23.7	0.2
粘土分 (0.005mm未満) %	12.7	3.0	13.4	1.5
最大粒径 mm	19	19	19	19
均等係数 $U_c$	245.0	13.7	108.1	1.9
D <sub>20</sub> (mm)	0.0199	0.199	0.0125	0.4
地盤材料の分類名	礫まじり粘性土質砂	粘性土まじり礫質砂	礫まじり粘性土質砂	分類された砂
分類記号	(SCs-G)	(SG-Cs)	(SCs-G)	(SP)

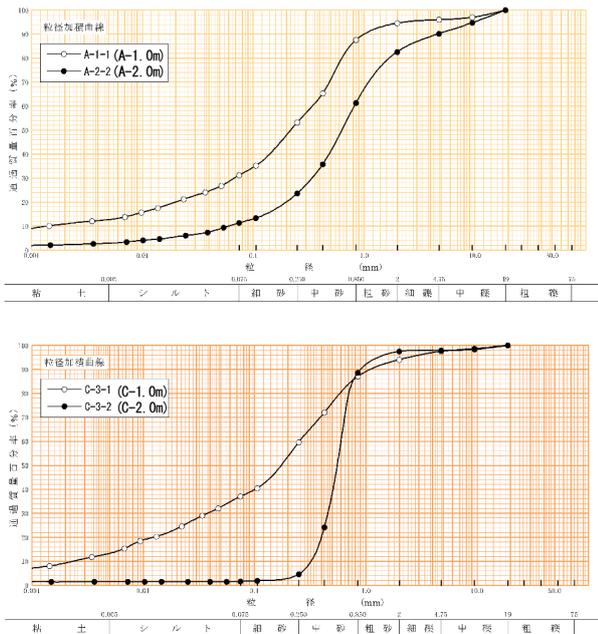


図-13 土壌水分計設置深度の堤体盛土の粒度分布  
(上: A-1.0m, A-2.0m 下: C-1.0m, C-2.0m)

### 5.3 体積含水率と土壌水分計の計測値

キャリブレーションによって得られた、体積含水率とセンサー測定値の関係を図-14 に示す。

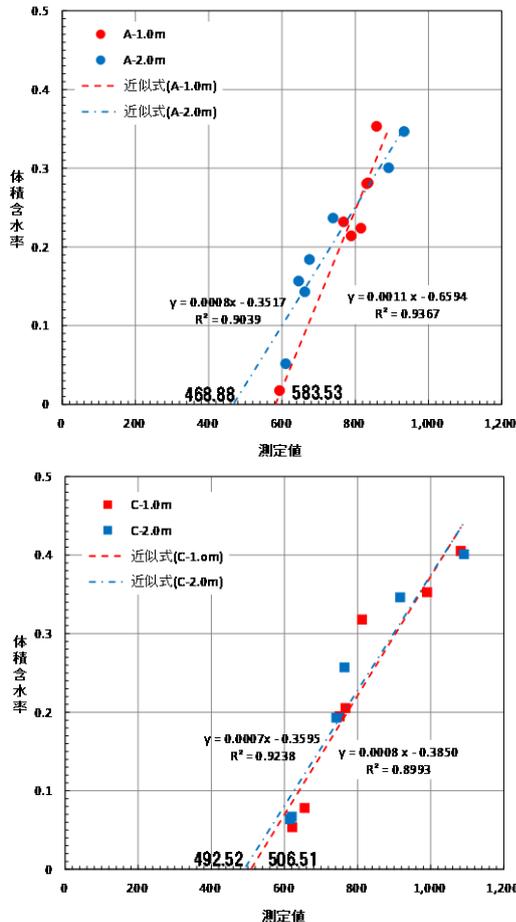


図-14 体積含水率と測定値の関係  
(上: A-1.0m, 2.0m 下: C-1.0m, 2.0m)

どの測点も体積含水率とセンサー測定値は、比較的高い相関係数で直線近似できている。そのため、今後の土壌水分計の測定値からの体積含水率の算定は、これらの近似式を利用することとした。

なお、体積含水率  $\theta=0$  の時でも測定値がゼロとなっていない原因は、図-10 で説明した通り、静電容量型のセンサーが土粒子の存在でも反応するからであると考えられる。ただし、現場は、乾燥密度が一定条件で間隙に水分が入ってくるという条件であり、センサーの反応値は、純粋に水分の変化のみを測定していると考えられるため、左記に示した相関関係をそのまま利用しても問題ないと判断できる。

### 5.4 飽和度と体積含水率の関係

土壌水分計の計測値から、体積含水率  $\theta$  および飽和度  $S_r$  を算定する際のキャリブレーションを考える。

体積含水率  $\theta$  および飽和度  $S_r$  は、図-15 に示した(1)式と(2)式の関係式で定義されている。図に示した通り、今回の測定条件では、土粒子の密度  $\rho_s$ 、間隙比  $e$ 、および水の単位体積重量  $\rho_w$  は、一定状態で計測されるため、これらは一定数として取り扱える。しかし、体積含水率は土の中に水が入ることで変化する湿潤密度を考慮していることから、体積含水率  $\theta$  と飽和度  $S_r$  の関係は、完全な直線関係にはならないことに注意が必要である。

今回は、便宜的に直線近似にて体積含水率と飽和度の関係を設定した。なお、理論上、飽和度ゼロ = 体積含水比率ゼロ且つ  $0\% \leq \text{飽和度} \leq 100\%$  であるため、近似直線は、原点を必ず通る、且つ飽和度 100%以上の値は 100% とする条件にした。

一定の乾燥密度状態に水分が浸透する現象を計測するため以下の項目は一定となる。

- ・土粒子の密度  $\rho_s$
- ・間隙比  $e$
- ・水の単位体積重量  $\rho_w$

$$\theta = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( \frac{\omega}{1+\omega} \right) \quad (1) \text{式}$$

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} \omega \quad (2) \text{式}$$

$$\rho_t = \frac{\rho_s + \rho_w \cdot e \cdot S_r}{1+e} \quad (3) \text{式}$$

(3)式から体積含水率は湿潤密度を含んだ式であるため、(1)式と(2)式で示した体積含水率と飽和度の関係は、完全な直線関係にはならない。  
そのことを踏まえ、今回は敢えて直線関係を近似した。

図-15 飽和度と体積含水率の関係式

### 5.5 現状における土壌水分計の計測結果

上述のキャリブレーション結果を基に、「降雨量」、「河川水位」、「堤体内の飽和度(土壌水分)」の時刻歴を図-16 に示す。図は、2020年2月から7月までの時刻歴と、特に降雨が多かった6/9から7/16までの時刻歴をクローズアップした図に分けて示している。

降雨量は、気象庁の公開データ<sup>6)</sup>のうち高梁地点のデータを引用した時間降雨量である。

図-16 より、A-1.0m と A-2.0m は、降雨量が多かった6/19、7/8 頃に短期的に飽和度 100%に達していることがわかる。

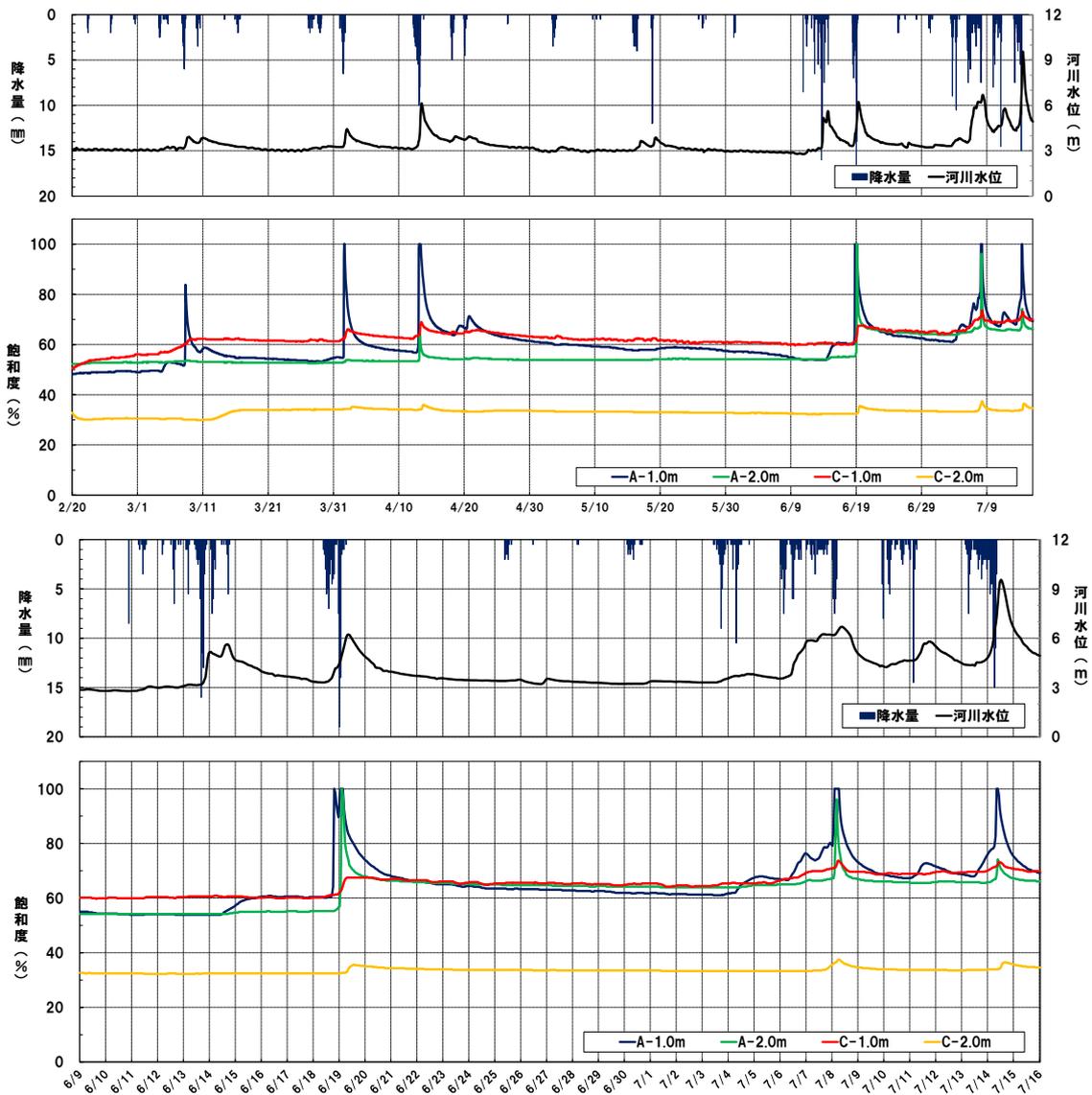


図-16 降雨量・河川水位と堤体内飽和度の時刻歴（上：2/20～7/16、下：6/9～7/16）

しかし、7/14 頃は、A-1.0m のみが飽和度 100%に達し、A-2.0m の飽和度は低い。それ以外の C-1.0m と C-2.0m の土壌水分（飽和度）は殆ど上昇していないことがわかる。

A-1.0m と A-2.0m が飽和度 100%に達した後の消散の様子も一定ではなく、堤体表層部付近や深度 2m 付近でどのような現象が起きているのか、堤防に与える影響はどうかの判断をするには情報が不足していると考えられる。今回、データを順調に収集できていたが、点データであり、堤体全体の土壌水分（飽和度）の傾向を把握するためには、面的な情報を収集する必要があると考える。

## 6. 河川堤体における不飽和土中の水分計測の意義

長期間の安定した計測により、2018年7月の西日本で起きた集中降雨と同年9月の台風24号による強雨時の堤体内水位を計測することができた。

計測の結果から、河川水位の上昇・下降の変化に比べ堤体堤防内の水位の変化が遅れて発生していることが確認できた。

また、今年新たに設置した土壌水分計での飽和度計測で、堤体内の状況や計測値から堤体の安定性を評価するために、以下のことが明らかとなった。

- (1) 土壌水分（飽和度）の点情報ではなく、面的な情報を収集する必要がある。
- (2) 堤体全体の土壌水分（飽和度）の傾向を把握する必要がある。

そのため、点での限定的な計測情報を面的情報に変えるために、今後、多点計測を実施し堤体内の土壌水分の時間的な分布を把握する必要がある。これにより、時間的に変化する強雨時の土壌水分の面的情報を得ることが可能になると考える。

## 7. まとめ

本研究結果を以下にまとめる。

- (1) 長期間の継続計測により、強雨時の堤体内水位の変化を捉えることができた。
- (2) 河川堤防内に新たに設置した静電容量式小型土壌水分センサーによって、不飽和部の飽和度の計測が可能となった。
- (3) 飽和度計測を実施したことにより、「降雨量」「河川水位」「河川堤防内の不飽和部の飽和度」の関係を得ることができた。

また、今後研究を進めるにおける課題も確認された。課題を以下にまとめる。

- (1) 不飽和部の土壌水分の計測においては、土壌水分(飽和度)の点情報ではなく、面的な情報を収集し、堤体全体の土壌水分(飽和度)の傾向を把握する必要があると考える。
- (2) 今後は、測線を増やすなど多点計測を実施することで、堤体全体の「土壌水分」「堤体内水位」を長期間計測するとともに、不飽和部の物性を逆解析によって推定することで、強雨時の堤体の安定状況を明らかにしていく必要があると考える。
- (3) 河川堤防の安定性評価のため、IoT 技術を活用した低コストで高精度な計測システムを開発することが今後の目指すべき技術であると考え。さらに、将来的には工学的メカニズムを背景にしたAIによる評価基準・防災基準をまとめたシステムの構築にも取り組んでいく必要があると考える。

## 謝辞

国土交通省岡山河川事務所からは研究に不可欠な測定データを提供頂きました。

また、岡山大学西垣誠名誉教授ならびに西山哲教授には、貴重なご助言を頂きました。

ここに、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐々木泰典・山口寛央・大森将樹・加藤ありさ・小久保達生・熊本勝史・西垣誠(2017): 高梁川の堤防水位計測に関する長期耐久性について(その1), 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.201-202.
- 2) 小久保達生・佐々木泰典・山口寛央・佐藤毅・大森将樹・加藤ありさ・熊本勝史・西垣誠(2017): 高梁川の堤防水位計測に関する長期耐久性について(その2), 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.203-204.
- 3) 立石亮・片山輝彦・佐藤毅・野口直人・阿部貴史・西山哲・西垣誠(2019): 豪雨時における高梁川の堤防内水位の挙動について, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集
- 4) 前田健一・柴田賢・今瀬達也・馬場千児・榊尾孝之(2011): 豪雨による砂堤防内の間隙空気の挙動と透気遮水シートの敷設効果, 土木学会第66回年次学術講演会, III-211, pp.421-422.
- 5) 光ファイバセンサ入門: 光防災センシング振興協会
- 6) 気象庁: 地点毎の過去降雨量, [http://www.jma.go.jp/jp/amedas\\_h/map49.html](http://www.jma.go.jp/jp/amedas_h/map49.html)
- 7) 久楽勝行・斎藤義章・石塚広史(1980): 大型盛土による浸透模型実験, 土と基礎, vol.268, No.1170, pp.33-38.
- 8) 河川堤防の構造検討の手引き(平成14年7月): 財国土技術研究センター

### 3. ジョイント・インバージョン法を使った岡山県南部の 三次元 S 波速度構造モデルの作成に関する研究

The study on 3D S-wave Velocity Model Construction of Southern Okayama Prefecture  
by using Joint-inversion Method

杉本芳博 Yoshihiro Sugimoto (株)ダイヤコンサルタント

岡山県南部の3次元S波速度構造を解明するため、既往の微動アレイ探査、PS検層、ブーゲー異常、N値、VS30、地震データを収集するとともに、新たに7地点において微動アレイ探査を実施した。収集したデータのうち、ボーリングデータは深度約200mまでの速度情報を、また微動アレイ探査データは深度数100mまでの速度情報を与えている。これら深度方向の速度情報に加えて、重力データやVS30データといった対象領域を二次元的にカバーするデータを使い当該地域の三次元S波速度構造モデルを作成した。異なる種類の多数のデータを手作業によって統合することは大きな困難を伴う。本研究では、ジョイント・インバージョン法を使って三次元S波速度構造モデルを作成する方法について検討した。これにより、H/Vスペクトルをはじめとした種々の観測データを精度よく説明しうる三次元モデルを構築することができた。

キーワード：ジョイント・インバージョン、三次元S波速度構造、岡山県南部、  
微動アレイ探査、H/Vスペクトル、重力、N値

#### 1. はじめに

岡山県南部の児島湾や倉敷に広がる干拓地では、1946年昭和南海地震において大きな被害が記録されている。これらの被害は浅部の軟弱地盤による地震動の増幅や砂質地盤における液状化の発生によるものとされている。一方、1995年の兵庫県南部地震以降、深部S波速度構造による地震動の増幅が無視できないケースが多く報告されており、被害想定において深部構造の重要性が指摘されている。本地域では直下型地震を発生させるような活断層は報告されておらず、地震調査研究推進本部の重点的調査観測の対象からは外れているため反射法地震探査や大深度ボーリング等による深部構造に関する調査は実施されていなかった。深部構造に関するデータの不足を補完する目的で、古賀・他(2009)ならびに西村・他(2011)は岡山県南部において広範な重力探査を実施している。彼らは重力データから求めた2層構造の地盤モデルを使ってシミュレーションを実施し、地震基盤の形状によるフォーカシングの発生と実際の被害分布との間に有意な相関が認められることを示した。これらの結果から、岡山県南部の干拓地にける昭和南海地震の被害は、深部の地震基盤形状に伴うフォーカシングの影響と浅部の軟弱地盤による増幅と複合して被害を大きくしたものと考えられている。

本研究では、浅部および深部構造による増幅効果を詳細に検討するため、重力データや微動アレイ探査のような深部データとN値データやAVS30といった浅部データを使って浅部・深部統合地盤モデルを作成するための

手法の開発を目指した。本研究の一部は杉本(2021)により公表されているが、今回は岡山市南部や倉敷市の7地点で新たに実施した微動アレイ探査の結果やH/Vのデータを加えて再検討を行った。

#### 2. 使用データ

三次元モデル作成に使用したデータを表-1に示す。微動アレイ探査データのうち5地点は公表されている論文の図面から分散曲線をデジタル化した。また令和3年度には7地点において3m~400mの7種類の半径で微動アレイ観測を実施した。取得したデータから分散曲線を抽出するとともに、半径3m~24mの小アレイについてはH/Vスペクトルのメディアン値を求めて、これをアレイ中心点のH/Vスペクトルデータとした。また、K-netおよびKiK-netの地震観測点については観測開始から2019年度までの地震データからコーダ波区間のH/Vスペクトル(メディアン値)を求め、インバージョンのデータとして使用した。

重力データは日本重力データベースDVD版(地質調査総合センター編, 2013)として公表されているブーゲー異常(仮定密度2.67g/cm<sup>3</sup>)のグリッドデータを使用した。この中には古賀・他(2009)や西村・他(2011)によって測定された重力データの情報が含まれている。

防災科学研究所はK-netおよびKiK-net地点の速度柱状図を公表している。速度柱状図データからダウンホール速度検層の理論走時を計算したものを逆解析のデータ

として使用した。なお、今回の検討では S 波検層データのみを使用した。

浅層部の情報としては、Kunijiban 等で公開されている N 値データ、防災科学研究所から公開されている AVS30 データ、および西部以技術コンサルタントから公開されている岡山県地質図を使用した。岡山県地質図には沖積層と更新層、更新層と中新層の境界のコンター図が記載されており、これをデジタル化して深度データとして使用した。また、ボーリングで花崗岩が確認されている地点が地質図に記載されており、これも深度データとして使用した。これらの他、標高を考慮した重力計算を行うための地形データを使用した。

表-1 三次元モデル作成に使用したデータ

データの種類	入手先
微動アレイ探査データ	①論文に記載された分散曲線図からデジタル化 田中他(2001)、井上他(2009)、三浦他(2014) ②新規に7地点で微動アレイ観測を実施した(2021)
H/Vスペクトルデータ	微動アレイ探査観測、K-net、Kik-netデータから求めた
重力データ	日本重力データベースDVD版(産業技術総合研究所地質調査総合センター)2013年度版
PS検層データ	K-netおよびKik-net地点の速度柱状図(防災科学研究所)
N値データ	国土交通省Kunijiban他
地震データ	防災科学研究所のK-net、Kik-netデータ 観測開始~2019年 H/Vスペクトルを計算しデータとした
AVS30	地震ハザードステーション:表層地盤データ(防災科学研究所)
地形データ	国土地理院数値地図(国土基本情報):10mDEMデータ 海上保安庁日本海洋データセンター:海域500mメッシュ水深データ
地層境界に関する情報	岡山県地質図(西部技術コンサルタント) 沖積層・洪積層下面深度分布コンター図、花崗岩上面深度データ

するため、非線形最小二乗法によるインバージョン解析を実施した。

解析の手順は次のとおりである。まず、各測定データについて、初期モデルを使ってフォワード計算を行って理論値を求める。次に、求めた理論値と観測値の差が小さくなるように、非線形最小二乗法を使って各グリッド点の速度と層厚のパラメータを修正する。このような修正を収束するまで繰り返して最終的な三次元モデルを作成した。

図-1 の三次元モデルからそのままフォワード計算を行って全データの理論値を求めるためには膨大なコンピュータ資源が必要である。そこで、測定データの種に応じて一次元から三次元のローカルモデルを切り出してそれぞれのフォワード計算を実施した。

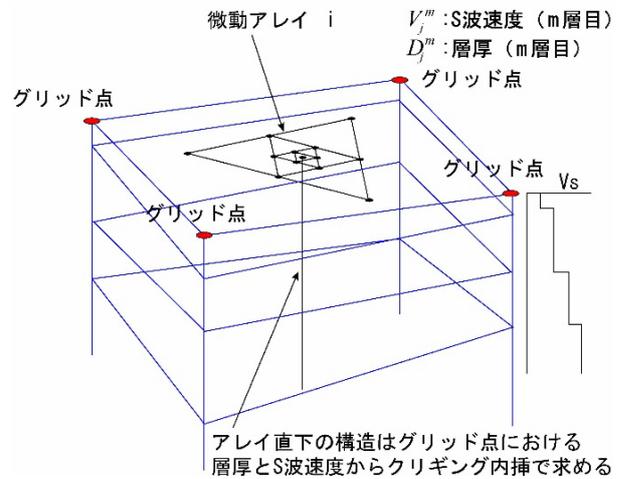


図-1 三次元モデルの構造

### 3. 解析方法

地下構造モデル作成にあたっては、地質、地形、物理探査等の多くの種類のデータをまとめ、データ間の矛盾を調整しながら最適なモデルを構築する必要がある。しかし手作業によるモデル作成では試行錯誤による作業量が膨大になり全データに含まれる情報を生かしたモデル作成は困難である。そこでジョイント・インバージョン法による三次元モデル作成について検討した。

#### 3.1 三次元モデルの表現方法

様々なデータを統一的に検討するため、図-1 に示すような三次元モデルを考えた。モデルは複数地点に設定したグリッド点を使って記述される。グリッド点直下の一次元構造は S 波速度と層厚のパラメータを使って記述され、任意の地点の Vs と層厚はグリッド点からクリギング内挿して与えるものとした。

#### 3.2 非線形最小二乗法によるインバージョン

三次元モデルにおける層厚や速度のパラメータを決定

#### 3.3 各種データの取り扱い

##### 3.3.1 微動アレイ探査、H/V スペクトル、S 波検層の解析

微動アレイ探査や H/V スペクトルのフォワード計算は水平成層構造を仮定した。その時に使用する一次元モデルは三次元モデルから切り出した観測点直下の一次元構造である。S 波検層の解析も同様である。

微動アレイ探査についてはレーリー波の基本モードのみを考慮し、DISPER80<sup>1)</sup>によって位相速度を計算した。H/V スペクトルは Arai and Tokimatsu (2004) に従い表面波(レーリー波およびラブ波)の水平動と上下動のスペクトル比として取り扱った。それぞれ 3 次モードまでのメディアムレスポンスを計算して H/V スペクトルを求めた。レーリー波とラブ波の比は初期値を 0.7 とし、未知数として取り扱うことで最適値を推定した。

##### 3.3.2 重力データの解析

重力のフォワード計算は一辺 200m の角柱モデルを使って行った。三次元モデルから切り出した角柱は、それぞれ地表から基盤までの層に分割され、速度層毎に Ludwig et al.(1970) の式を使って S 波速度から推定した密度値を与えた。フォワード計算にあたっては地形を考

慮して重力値を計算し、さらに地形補正およびブーゲー補正(仮定密度 2.67g/cm<sup>3</sup>)を行った。また、全地点の計算ブーゲー異常の平均値がデータの平均値と一致するようにバイアス補正を行った。

ブーゲー異常データに含まれる地下深部の密度構造の影響を除去するため、あらかじめ長波長成分を除去しておく必要がある。当該地域における既往研究では、古賀・他(2009)が児島湾周辺地域の重力解析にあたって5kmの上方接続フィルターを適用して長波長成分を除去している。また西村・他(2011)は水島地区の重力解析において1.1kmの上方接続フィルターを適用している。杉本(2021)では2kmのフィルターを適用しているが、今回、H/Vデータを加えてジョイント・インバージョン解析を実施したところ、残差の収束がよくないことが判明した。そこで予察的なテスト解析を行って1kmの上方接続フィルターを適用することに決めた。

### 3.3.3 N値データの解析

ボーリングデータからN値および土質データを抽出して、太田・後藤の式(1978)を使って各層のS波速度を求めた。得られたS波速度と層厚からS波検層の走時データを作成してこれを解析データとしたN値データの解析はS波検層データのそれと同じ方法によったが、N値から推定されたS波速度の系統的な誤差を考慮するため次式のような補正を加えた。

$$V_{sn} = a \times V_s + b \quad (1)$$

ここで、 $V_s$ はモデルのS波速度、 $V_{sn}$ はN値から推定したS波速度、またaとbは補正係数である。補正係数の初期値をa=1.0、b=0.0として逆解析の未知数として取り扱った。最終的な解析結果ではa=0.89、b=0.07(m/s)の値が得られた。

### 3.3.4 AVS30データの解析

AVS30は地表から深度30mまでの平均S波速度である。フォワード計算はS波検層の解析と同様に深度30mまでの走時を計算し、その後で平均速度AVS<sub>cal</sub>に変換した。AVS30は微地形区分から経験的に推測された値であり系統的な誤差を含む可能性がある。モデルから計算されたAVS<sub>cal</sub>をAVS30データと比較する前に次式で補正した。

$$AVS30 = \alpha \times AVS_{cal} + \beta \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ と $\beta$ は補正係数である。どちらも逆解析の未知数として取り扱った。最終的な解析結果では $\alpha=1.15$ 、 $\beta=-0.33$ (m/s)の値が得られた。 $\beta$ はほとんど寄与せず、 $\alpha=1.15$ 、すなわち15%程度の補正が必要であることが分かった。

### 3.3.5 速度層境界深度データの解析

任意の地点の地層境界深度はその地点の層厚の和として計算される。沖積層基底、洪積層基底および花崗岩上

面の深度が既知の地点については、モデルの地層境界深度がデータに一致するものとした。

## 4. ジョイント・インバージョン解析

### 4.1 解析モデル

解析に使用したグリッド配置を図-2に示す。微動アレイやボーリング地点に優先的にグリッド点を配置し、AVS30の値が一定値を示す領域や海域のようにデータがない領域ではグリッド点の密度を小さくした。総グリッド数は7293である。

インバージョンに使ったモデルは5つの速度層からなり、第2速度層は工学基盤、第5速度層は地震基盤に相当する。第1~3速度層については、さらに4つのサブ層に等分割し、また第5速度層については5つのサブ層に等分割した。

図-3に各グリッド点における初期モデルを示す。全グリッド点に同じ次元速度構造を初期モデルとして与えた。

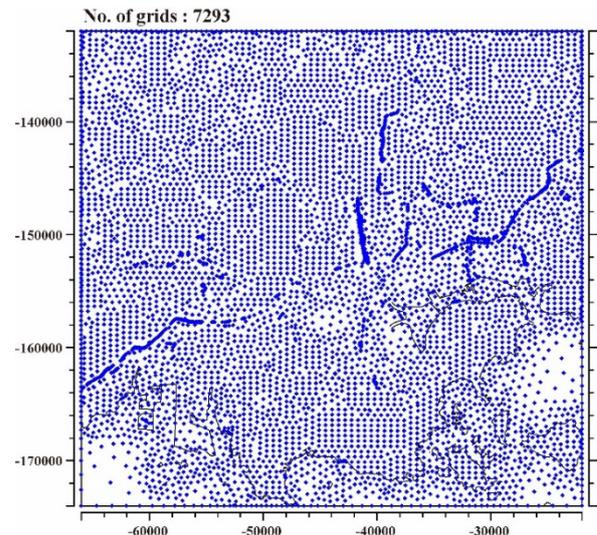


図-2 グリッド配置

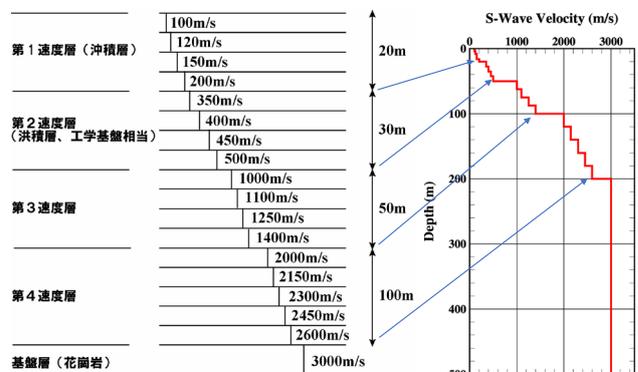


図-3 初期モデル

## 5. 解析結果

解析は3つの段階に分けて行った。第1段階では各層

の速度を場所によらず一定とし、各層の速度と各グリッド点における層厚と各層の速度を未知数とした。15回のイタレーションにより概ね収束した後に、基盤上面深度にスムージングを適用し、さらに第2段階の解析に進んだ。第2段階ではグリッド点毎に各層の速度が変化するものとし、15回のイタレーションを繰り返した。さらに第3段階では、各サブ層の層厚を独立に変化させた。途中、収束状況を見ながらデータの重みを調整した。図-4にイタレーション毎の解析残差を示す。イタレーションの経過とともに残差が減少している。以上のように求めた三次元モデルの第5速度層の上面深度（工学基盤深度に相当）とAVS30の比較を図-5に示した。ボーリングデータのない領域では、両者は概ね一致しており、AVS30の情報がそのままモデルに反映されて

いることがわかる。一方、岡山市南部や倉敷南部に広がる干拓地では、沖積層・洪積層下面深度分布のデータやボーリングのN値データを使用しているためAVS30の分布とは異なる傾向を示している。

図-6に地震基盤深度分布図と代表的な3つの東西断面を示す。東北東-西南西方向とこれに直行する方向のリニアメントが支配的であり、古賀・他(2009)の結果と概ね一致する。古賀・他(2009)によると藤田六区付近のボーリングにおいて深度375mに花崗岩が確認されている。この周辺で基盤が一番深くなっていることが分かる。全体として大きな矛盾は認められず、浅部・深部統合地盤モデルの作成においてジョイント・インバージョン法が有効であることを示している。

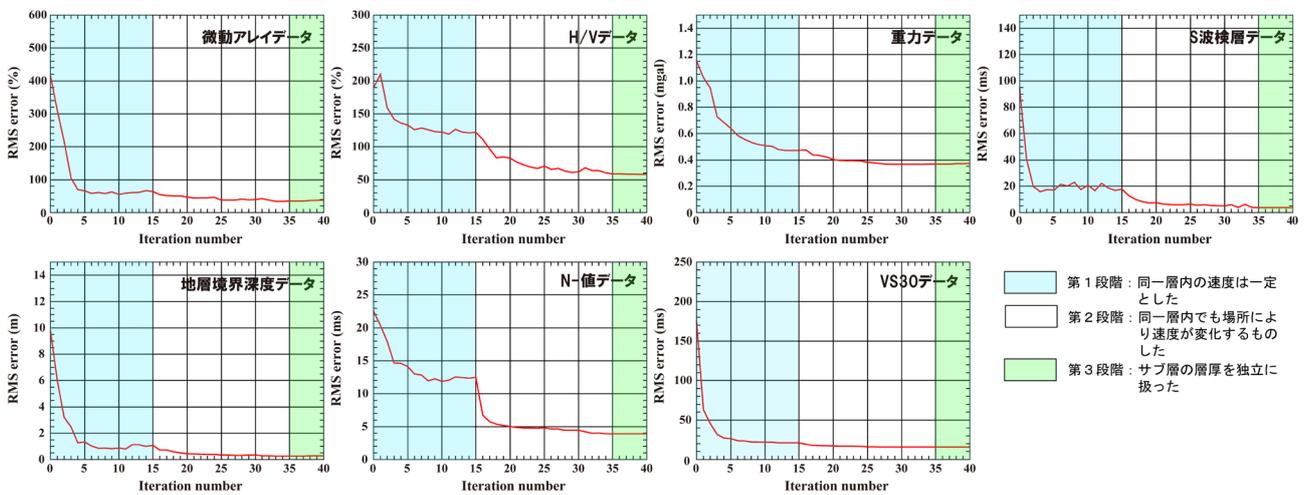


図-4 解析残差の収束状況

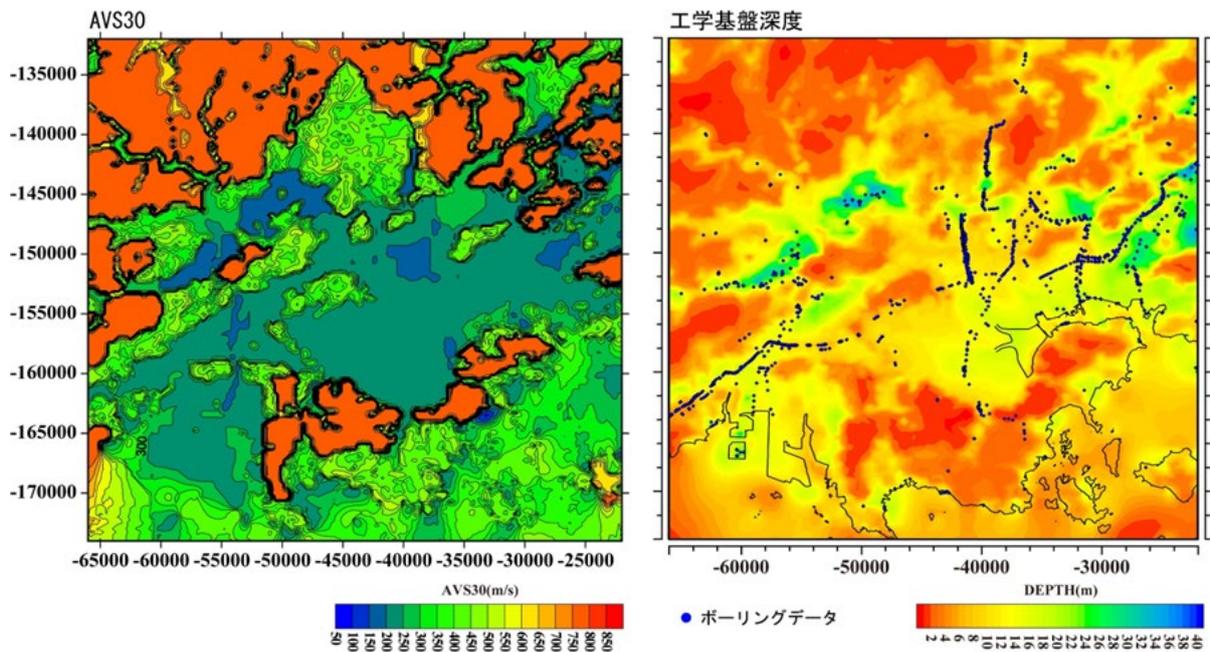


図-5 第2速度層（工学基盤相当）上面深度とVS30の比較

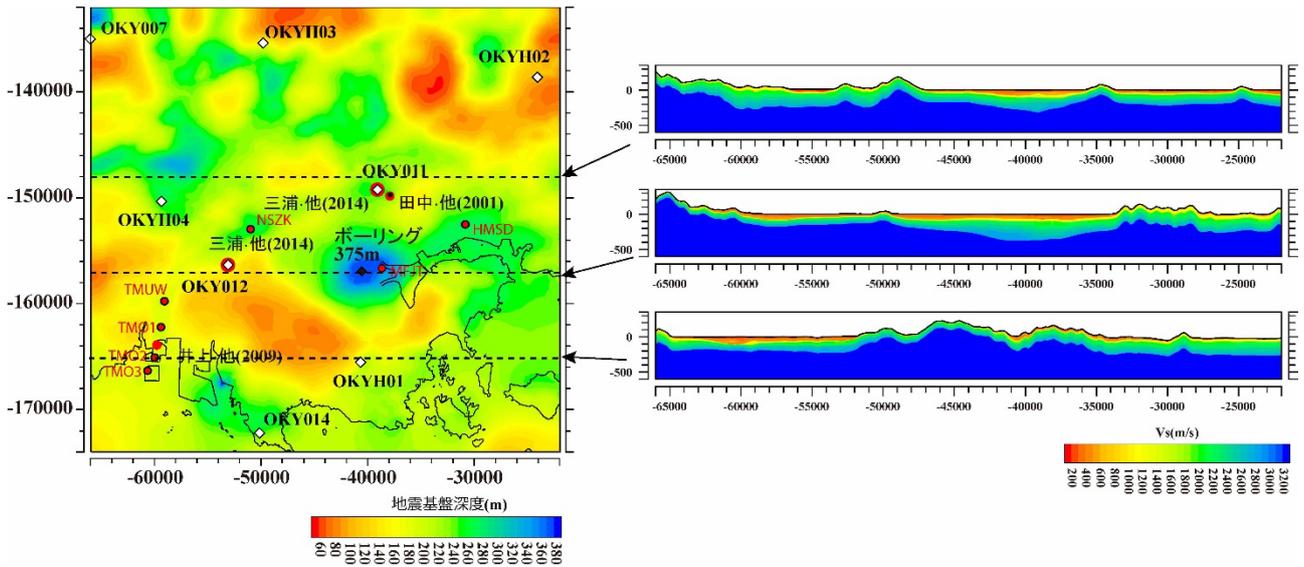


図-6 ジョイント・インバージョンによって得られた地震基盤深度分布と主要なS波速度断面

観測データとモデルのH/Vスペクトルのフィッティングを図-7に示す。黒線は観測H/Vスペクトル、赤線は作成した三次元から計算した理論H/Vスペクトルである。また、青線はH/Vデータを使用しないで作成したモデルの結果である。青線で示したケースでは重力データの上方接続フィルターのパラメータを2kmとしている。H/V

データを使わないで解析した青線の場合、上方接続フィルターの値が適切でなかったこともあり、スペクトルのピーク周波数は観測H/Vスペクトルから大きくずれている。地震動の予測においてH/Vスペクトルの確認は非常に重要であるとされており、今回の検討によってモデルの精度が向上したものと考えられる

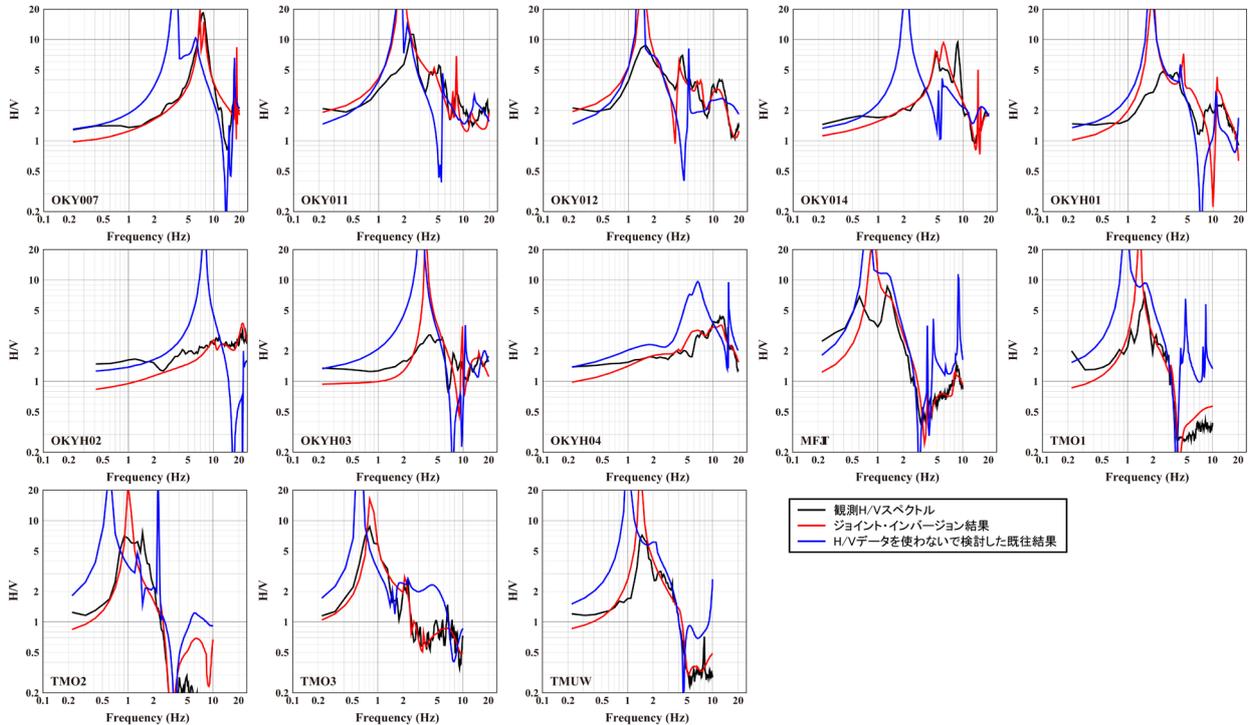


図-7 H/Vデータのフィッティング

6. まとめ

岡山県南部で入手したボーリングデータや探査データを使い、ジョイント・インバージョンによってS波速度

構造モデルを作成した。重力や微動アレイ探査のデータに加えてN値やAVS30といった浅部のデータを使用することで浅層から深部までのモデルを作成することができた。工学基盤や地震基盤の形状は杉本(2021)の結果と

大きく変わらないが、新たにH/V データを加えたことで、既往のモデルよりも、H/V スペクトルのフィッティングが向上した。

今後、地震観測データを使った検討も行ったうえで、三次元波動シミュレーションによる地震動予測を予定している。

#### 謝辞

令和3年度に実施した微動アレイ探査の現地測定は統合物性モデル技術研究組合から研究費を提供していただいで実施した。測定作業は元・中央開発株式会社の杉山長志氏の御指導の下、当社の神薊めぐみ氏（現・九州電力株式会社）ならびに三石隼也氏が担当した。御協力いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Academic Press: Seismological Algorithms Computational Methods and Computer Programs, 293-319, 1988.
- 2) Arai, H. and Tokimatsu, K.: S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53-63, 2004.
- 3) 井上慎二, 松井創, 白井博己, 西田芳浩, 細川浩志: 常時微動観測を用いた地盤構造の推定について, 沿岸技術研究センター論文集, No.9, 17-20, 2009.
- 4) 太田 裕, 後藤典俊: 横波速度を推定するための実験式とその物理的背景, *物理探査*, 31, 1978.
- 5) 古賀史康・西村敬一・赤松純平・駒沢正夫・奥津佑都: 岡山平野・児島湾干拓地の3次元重力基盤構造と地震災害の関係, *物理探査学会第120回学術講演会*, 2009.
- 6) 西村敬一, 赤松純平, 駒田正夫: 岡山倉敷市の3次元重力基盤構造, *物理探査学会第125回学術講演会*, 253-256, 2011.
- 7) 三浦弘之, 真鍋良輔, 神野達夫, 阿比留哲生: 地震記録から抽出された地盤増幅特性とレシーバーファンクションの同時逆解析によるS波速度構造モデルの推定, *日本地震工学会論文集*, 14巻5号, 5\_31-5\_49, 2014.
- 8) 杉本芳博, 山内泰知, 高岡宏之: 物理探査データのジョイント・インバージョン-三次元速度構造モデル構築手法-, *物理探査*, 第71巻, 86-102, 2018.
- 9) 杉本芳博: ジョイント・インバージョンによる岡山県南部地域の三次元S波速度構造モデルの作成, *物理探査学会第125回学術講演会*, 48-51, 2021.
- 10) 田中均, 山田悦子, 入江紀嘉, 福元俊一, 小西純一: 微動アレイによる岡山市内の地下構造推定, *地盤工学研究発表会講演集*, 2333-2334, 2001.
- 11) Ludwig, W.J., Nafe, J.E. and Drake, C.L.: *Seismic refraction, in the Sea* edited by Maxwell, A.E., Vol. 4, Wiley-Interscience, New York, 74, 1970.

## 4. 2022年3月福島県沖地震等の近年の地震における地震動分布推定

Estimation of Map of Vs30 and JMA Seismic Intensity Scale during Recent Damaged Earthquakes in Japan

末富岩雄 Iwao SUETOMI ((株) エイト日本技術開発)  
 福島康宏 Yasuhiro FUKUSHIMA ((株) エイト日本技術開発)  
 尾茂淳平 Junpei OSHIGE ((株) エイト日本技術開発)

著者らはこれまで、表層地盤の揺れやすさを表す指標としてよく用いられる深さ 30m までの平均 S 波速度 (Vs30) のデータを、地震ハザードステーションの地形分類とボーリングデータを統合して構築し、近年の国内の代表的な被害地震における震度分布を距離減衰式をトレンドとするクリギング法により算定してきた。2022 年 3 月に福島県沖で発生した地震についても同様に震度分布を算定し、同じような場所・規模の 2021 年 2 月に発生した地震についても算定して比較した。

キーワード：平均 S 波速度、震度増分、表層地盤、震度分布、福島県沖地震

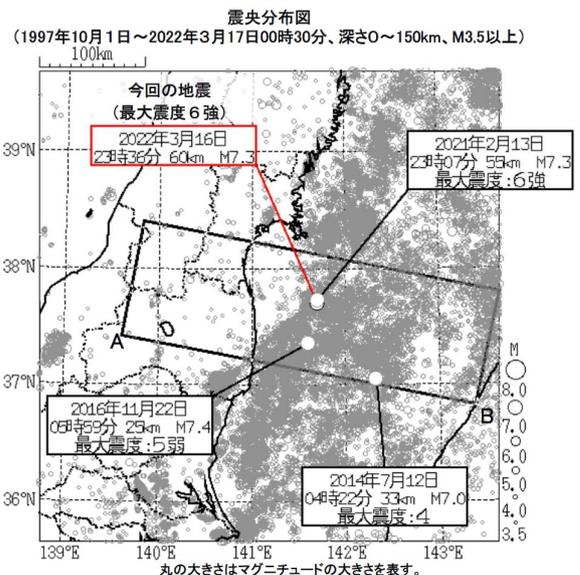
### 1. はじめに

災害初動時には被害情報は断片的にしか得られないことから対応方針を決定する判断支援として、気象庁や(国研)防災科学技術研究所(以下、防災科研)から地震発生後の早期に震度分布が公表されている<sup>1)2)</sup>。一方で、交通やライフラインのように面的に広がる施設の被害と地震動の大きさの関係(被害推定式)を検討するためには、震源断層面との位置関係や表層地盤の増幅を考慮した、より精度の高い地震動分布が必要となる。2011年東日本大震災及び2016年熊本地震については、国土技術政策総合研究所により多くの観測記録を用いた最大地動分布が算定され公開されている<sup>3)</sup>が、これも地盤情報は文献1)2)と同様に、防災科研の地震ハザードステーション(J-SHIS)<sup>4)</sup>の250mメッシュ地形分類およびAVS30(深さ30mまでの平均S波速度)のデータである。著者らは、これまで近年の国内の主要な被害地震について、様々な機関による観測データやボーリング情報を用いた地盤情報の高度化を行って、最大地動分布の推定を行って各種の検討に活用してきた<sup>5)6)7)</sup>。

2022年3月16日23時36分頃、福島県沖でM<sub>J</sub>7.4の地震が発生した。この地震で観測された最大震度は6強で、消防庁災害対策本部<sup>8)</sup>によると3月21日10時現在で3人の死者(災害関連死1名含む)、21名の重傷者、半壊3棟等の被害が報告されている。また、東北新幹線は白石蔵王～福島駅での脱線等の被害による運転を見合わせ、高速道路も盛土部等での被害があり常磐道等で通行止めとなった。停電、断水等も多く発生するなど社会インフラ施設で様々な被害が多く発生した。本報は被害分析等を行う上での基礎となる地震動について、昨年2月の福島県沖地震と比較しつつ、速報として検討したものである。

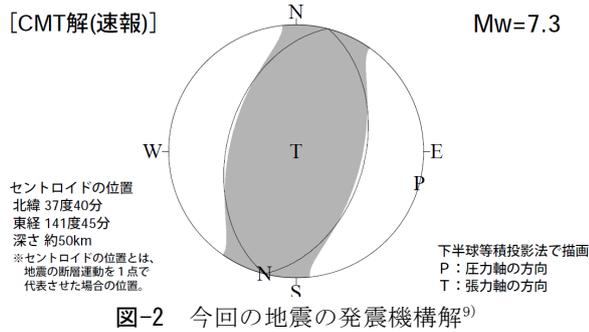
### 2. 地震の概要

気象庁地震火山部<sup>9)10)</sup>によると、発震時間は2022年3月16日23時37分、震源は福島県沖の深さ57km、地震規模はM<sub>J</sub>7.4と発表されている。震央位置を図-1に、メカニズムを図-2に示す。西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、沈み込む太平洋プレート内の地震であった。2021年2月13日には、今回の地震の震央付近でM<sub>J</sub>7.3の地震(今回と同様の太平洋プレート内の地震)が発生している。



注) 今回の地震の地震規模は速報値ではM<sub>J</sub>7.3だった。

図-1 2022年3月16日福島県沖の地震の震央位置(気象庁地震火山部<sup>9)</sup>を引用)



### 3. 観測された地震動

防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net<sup>11)</sup> 強震観測点および気象庁<sup>12)</sup> 震度観測点での強震観測点における強震記録から算定した計測震度を図-3 に示す。震源に近い太平洋岸で宮城県・福島県の県境付近で震度6強の強い揺れが観測されている。

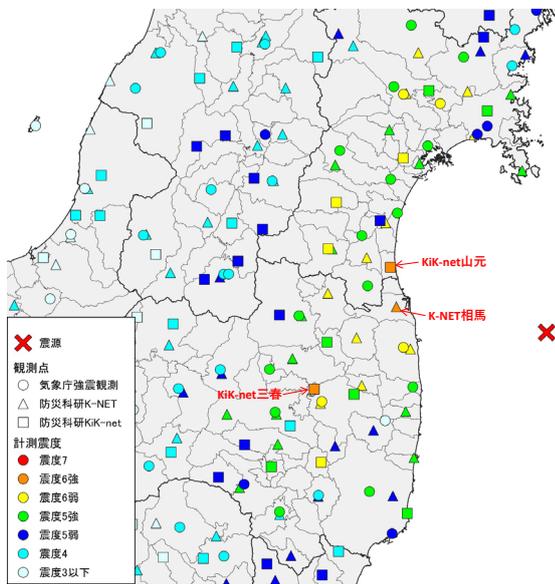


図-3 2022年3月の福島県沖地震における観測震度

### 4. 地震動分布推定

#### (1) 地動分布推定の流れ

図-4に最大地動分布の推定フローを示す。距離減衰式をトレンド成分として、観測値との誤差を補間するクリギング(Kriging)法が、観測点が疎になる地域でも信頼性があることから広く用いられてきており、今回もこれを用いる(プログラムRasmo<sup>13)</sup>を使用)。精度よく評価する上では、①の観測記録は当然として、②揺れやすさを表す地盤指標、③②をパラメータとする地盤増幅度、④トレンドとする距離減衰式、が重要となる(図では緑色で着色)。②については、将来的には卓越周期等のより地震動特性と関連が強い指標を用いることが考えられるが、本研究ではJ-SHISで全国を対象に整備され利用可能なVs30を用いる。

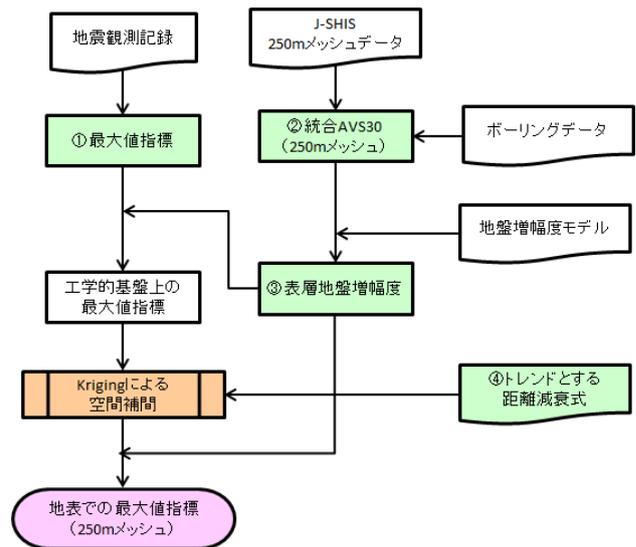


図-4 最大地動分布の推定フロー

#### (2) 計算条件

計算条件を表-1と表-2に示す。なお今回は速報であり必ずしも最適の計算条件ということではなく、今後精査し改善していく予定である。

表-1 震源情報等

項目	2021年2月の地震	2022年3月の地震
震源情報	気象庁	気象庁
Mw (モーメント・マグニチュード)	7.1	7.3
断層形状	国土地理院 <sup>9)</sup> 南東傾斜のモデルを採用	国土地理院 <sup>10)</sup> 東傾斜の暫定モデルを採用
使用した観測データ	194地点 (防災科研 K-NET, KiK-net, 気象庁直轄観測点, 港湾強震観測)	276地点 (防災科研 K-NET, KiK-net, 気象庁直轄観測点, 港湾強震観測)

※Mwも国土地理院の断層モデルに基づく

表-2 計算条件 (2地震共通)

補間方法	Kriging法 (相関距離 10km)
距離減衰式 (トレンド成分)	片岡ら(2006)の海溝型 (M, D, X の式) <sup>14)</sup>
表層地盤増幅度	計測震度・SI値・最大加速度PGA: 末富ら(2010) <sup>15)</sup> により増幅度の非線形性を考慮 最大速度PGV: 藤本・翠川(2006) <sup>16)</sup> PGVでは地盤の非線形化の影響は無視できると考え線形モデルを採用
250mメッシュ Vs30 (深さ30mまでの平均S波速度)	末富ら(2017) <sup>17)</sup> : J-SHISのV3微地形区分に基づくVs30とボーリングデータによるVs30を統合したデータ

### (3) 推定震度分布

2021年2月の地震と今回の地震における地震動分布を観測値の補間により推定した。末富ら<sup>17)</sup>によるVs30の分布を図-5に示す。旧北上川流域で表層地盤が軟らかく揺れやすいエリアが広がっている。また、脱線があった白石市付近にもみられる。赤く表示されているような箇所はボーリングデータを反映したものとなっており、微地形区分の情報にボーリングデータ等の地点情報を加えることで詳細化できることがわかる。震度分布を図-6と図-7に示す。全体に似たような分布であるが、Vs30が小さい石巻市から登米市の旧北上川に沿って今回の地震の方が大きく揺れている。沿岸部では、2021年の地震では宮城県側の山元町付近で大きく、今回の地震では福島県側の相馬市付近で大きいなど全体傾向は似ているものの細部で違いがみられる。内陸も郡山市での揺れは今回の方が大きい。

なお、本検討で用いていない自治体の震度計では、登米町など数点で震度6強が観測されている。図-5で揺れやすいとされているところで、大きな揺れとなっているので傾向は整合しているものの、Vs30に基づく評価以上に実際は強く揺れているものと考えられる。

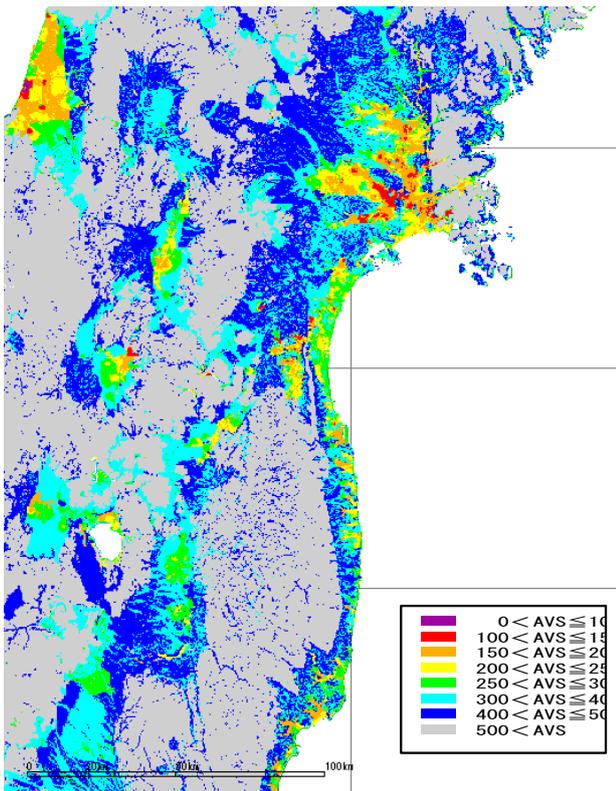


図-5 Vs30の分布<sup>17)</sup>

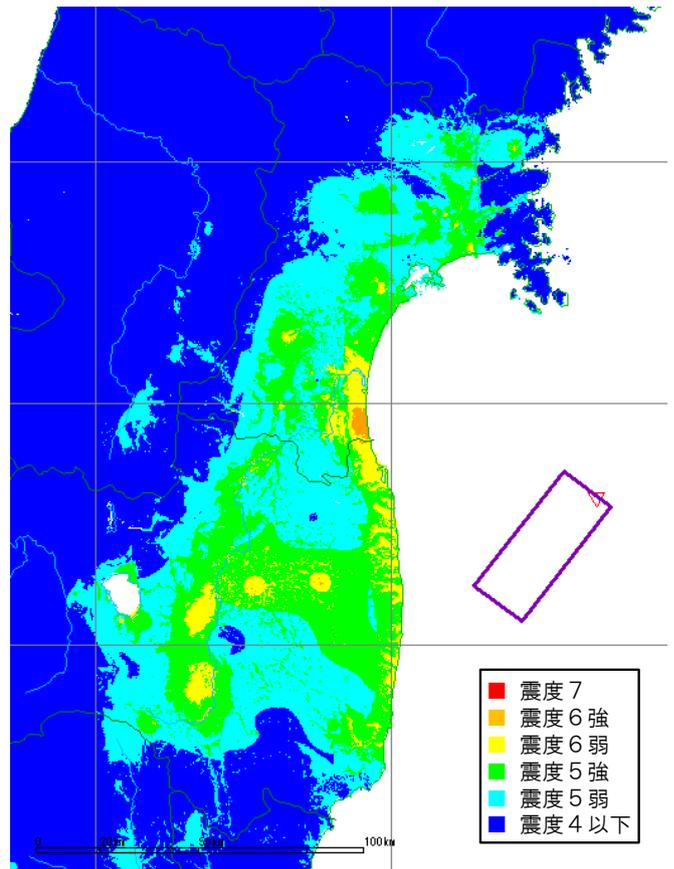


図-6 推定震度分布 (2021年2月の地震)

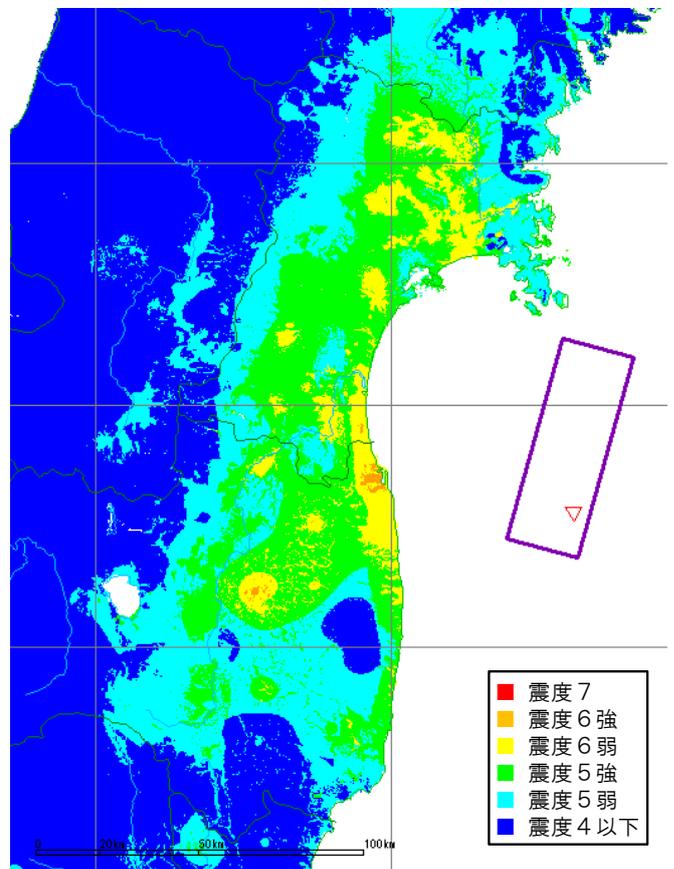


図-7 推定震度分布 (2022年3月の地震)

## 5. まとめ

2022年3月に発生した福島県沖地震における震度分布推定の検討を行った。得られた知見を以下に記す。

- (1) 地震後速やかに震度分布を推定することで、大きな被害が発生するエリアをある程度把握できる。
- (2) 推定精度を上げるためには、観測点の密度を高めるとともに、不適切な設置条件での観測点がないことを確認しておく必要がある。
- (3) 推定精度を上げるためには、地盤増幅度の精度を高めることが重要であり、地盤情報を多く取得する必要がある。また、強震時の非線形化を適切に考慮することは今後の課題である。

### 謝辞

本論の作成に当たっては、ボーリングデータとして、(国研)土木研究所の kunijiban、「みちのく GIDAS」、強震観測記録として、(国研)防災科学技術研究所、気象庁、港湾地域強震観測、等を利用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 気象庁:推計震度分布図, <http://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/suikci/eventlist.html>
- 2) 防災科学技術研究所:J-RISQ 地震速報, <http://www.j-risq.bosai.go.jp/report/>
- 3) 国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室:東日本大震災地震動分布, 2016年熊本地震地震動分布, <http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm> (2017.8.7閲覧)
- 4) 防災科学技術研究所:地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2017.8.7閲覧)
- 5) 末富岩雄, 石田栄介, 福島康宏, 磯山龍二, 澤田純男:地形分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅度評価と2004年新潟県中越地震における地震動分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第3号, pp.1-12, 2007.
- 6) 末富岩雄:2011年東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた最大地動分布の推定, 第14回日本地震工学シンポジウム, PS1-Thu-34, 2014.
- 7) 末富岩雄, 福島康宏, 尾茂淳平:2016年熊本地震における最大地動分布の推定, 日本地震工学会大会, 2016.
- 8) 消防庁災害対策本部:福島県沖を震源とする地震による被害及び消防機関等の対応状況(第11報), <https://www.fdma.go.jp/disaster/>
- 9) 気象庁地震火山部:令和4年3月16日23時36分頃の福島県沖の地震について, 2022. (<https://www.jma.go.jp/jma/press/2203/17a/kaisetsu202203170130.pdf>)
- 10) 気象庁地震火山部:令和4年3月16日23時36分頃の福島県沖の地震の震源要素更新について, 2022. (<https://www.jma.go.jp/jma/press/2203/17d/oshirase.pdf>)
- 11) 防災科学技術研究所:強震観測網 K-NET・KiK-net (<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)
- 12) 気象庁:長周期地震動に関する観測情報 (<https://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/ltpgm/20220316233646/index.html>)
- 13) (独)防災科学技術研究所 川崎ラボラトリー:文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「Ⅲ.1 震災総合シミュレーションシステムの開発」公開ソフトウェア, 2007.
- 14) 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅明:短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.740-757, 2006.
- 15) 末富岩雄・石田栄介・福島康宏:全国即時地震動分布推定のためのモデル構築に関する一検討, 第13回日本地震工学シンポジウム, 2010.
- 16) 藤本一雄, 翠川三郎:近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 第6巻, 第1号, pp.11-22, 2006.
- 17) 末富岩雄・塚本博之・福島康宏・尾茂淳平・大保直人:近年の被害地震における表層地盤の AVS30 と震度分布評価に関する一検討, 第37回土木学会地震工学研究発表会, 2017.

## 5. 小型震動センサーの開発と計測事例

### Development of Small Seismometer Using MEMS Accelerometers and Its Case Study

橋本和佳 Kazuyoshi HASHIMOTO (中央開発 (株))  
 王寺秀介 Shusuke OJI (中央開発 (株))  
 王林 Lin WANG (中央開発 (株))

著者らは、MEMS 等の新しい技術による小型三軸加速度計や微動計を適宜搭載し、地震動と常時微動を計測できるモニタリング技術の開発を進めているところである。現在、いくつかの現場で実際の斜面および構造物を対象として、センサーを多点配置し、観測を継続している。これらの事例においてセンサーの精度を検証した結果、従来の汎用的な地震計と遜色ない精度で長期計測にも耐えること、構造物の多点計測を行うことで固有周期等の振動性状を把握できることが分かった。

キーワード：地盤防災，加速度センサー，常時モニタリング，震動計測

#### 1. はじめに

我が国では、近年、地震や豪雨などの自然災害が多発している。更に、既存のインフラ施設や建物等の老朽化や人口減少・高齢化も加速化しており、日本社会の継続が脅威にさらされているといっても過言ではない。このように、防災・減災や国土強靱化の重要性が認識される中、国はデジタルトランスフォーメーション (DX) と人間の想像・創造力との融合による「経済発展と社会的課題解決を両立する未来社会 (Society 5.0) <sup>1)</sup>」の実現と国連が掲げる「持続可能な開発目標 (SDGs) <sup>2)</sup>」の達成に向けた取り組みを推進している。

地盤工学分野における SDGs の一つに、防災・減災に向けた DX の活用が挙げられる。特に、近年のコンピュータ技術の進歩及び数値解析技術の高度化により、シミュレーションの大規模化や高分解能化、高速化が進んでいる状況にある。このため、防災・減災ならびに国土強靱化を目的とする設計・検討にあたっては、地盤災害に関するシミュレーションが活用されていくと言っても過言ではない。しかしながら、シミュレーションの精度向上には、入力データである地盤モデルを適切に評価する必要がある。地盤のモデル化はボーリングや各種土質試験に基づくが、不確実性の大きい地盤災害を対象とする場合には、地盤調査データだけでは必ずしも実挙動を再現できるとは限らないため、現場での現象を網羅的に把握することが重要である。一方、モニタリングデータの利活用・共有の観点からは、各種技術 (センサー・IoT・通信、ビッグデータ処理・AI 等) の進化などにより、地盤の挙動計測とこれに基づく災害や維持管理上の安全性評価の高度化が可能になりつつある。特に、近年急速な進化を遂げているセンシング技術 (小型・軽量、省電力、低コスト等) の活用が必須であると考えられる。

著者らは、このようなセンシング技術のうち MEMS 等の新しい技術による小型加速度計を適宜搭載し、地震動と常時微動を計測できるモニタリング技術の開発を進めているところである <sup>3)</sup>。本報告では、開発した小型震動センサーの概要とその計測事例について報告する。

#### 2. 小型震動センサー及び計測システムの概要

小型震動センサーを含む計測システムには、図-1 に示すように一軸および三軸加速度計 (表-1 及び図-2 参照) を組み込んでおり、計測の目的に応じて常時微動や地震動の観測を組み合わせ、GNSS 受信機によるシステムの時刻補正を行いながら、地盤、斜面または土木構造物を対象とした常時モニタリングを行うものである。また、データ取得後には、スペクトル解析を随時に行い、卓越周期を算出し、計算結果を LoRa モードまたは FSK モード無線で監視センターへ転送することでリアルタイムな計測管理が可能である。

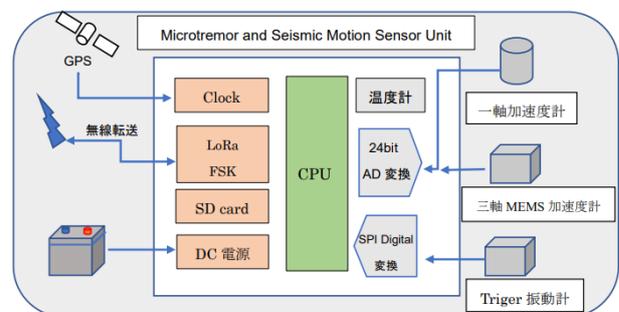


図-1 計測システムの概要<sup>3)</sup>

これまでに、常時微動や地震動を活用して、地盤種別や速度構造を判定・分析する方法が研究されている。例

例えば、沖村ら<sup>4)</sup>は基礎地盤の常時微動を観測し、その結果から、地盤の卓越周期を算出して、地盤種別を判定する手法を提案している。また、地震動を活用した既往研究として、例えば、Kawase et al.<sup>5)</sup>は、平面波に対する拡散波動場理論に基づいて、地表1地点の地震観測記録の水平上下スペクトル比から、速度構造を推定する手法を提案している。このような既往手法と、著者らの提案する多点計測技術により、地盤特性を面的に評価でき、地震動予測や液状化のシミュレーションの精度向上に有効である。このような評価において地盤の常時微動観測や地震観測は有効であり、省電力・低コストの小型一軸・三軸加速度計(微動計/強震計)を組み込んだリアルタイム計測システムを開発し、その性能確認を2019年から実施している。

表-1 微動・震動センサーの主な仕様<sup>3)</sup>に加筆

仕様	①小型微動計 (一軸加速度計)	②小型三軸 MEMS 加速度計
計測値	1 軸加速度	3 軸加速度
加速度範囲	0.5G	±2/±4/±8G 1
感度	10V/G 24bit AD	400mV/G 24bit AD
ノイズレベル	2Hz:0.28µg/√Hz 10Hz:0.09µg/√Hz 100Hz:0.03µg/√Hz	25µg/√Hz
周波数特性	0.2- 1,300Hz(±3dB) 0.05-450Hz(±3dB)	3dB <1500Hz



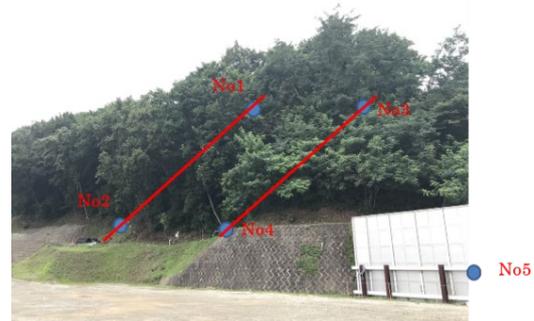
図-2 小型一軸・三軸加速度計<sup>3)</sup>

### 3. 計測事例

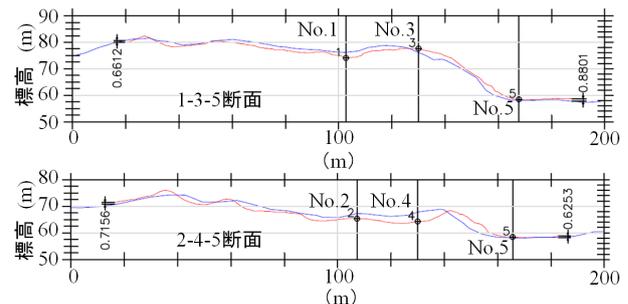
開発した小型震動センサー及び計測システムをいくつか現場に適用し、地震観測を継続している。ここでは、前節で示したセンサーのうち、3成分の地震観測が可能な小型三軸 MEMS 加速度計を主として、斜面を有する地盤震動の計測事例(事例.1)と構造物を対象とする計測事例(事例.2)を紹介する。

#### (1) 地盤震動の計測事例(事例.1)

観測地点は、小田原市の東部に位置する大磯丘陵南部地域の二宮層と不動山礫岩部層の境界に位置する自然斜面である。斜面部の表層にはローム層が堆積する一方、斜面の法尻付近の平坦部では、谷地形を造成した約8m厚さの盛土の下位に、密実な砂礫層と泥岩が互層状に堆積することが、当該地点のボーリング調査で確認されている。計測対象斜面の概要を図-3に示す。当該斜面に、合計5つの三軸加速度計と一軸加速度計を設置し、法尻の1箇所(図中、No.5)には、観測記録の比較確認用の従来型強震計(加速度、図中、No.E)を併設して、2019年以降、計測を継続している。隣接するセンサーの離間(水平距離)は、24m~35m、計測範囲の斜面の傾斜角度は、概ね25度~35度である。現地ですべてに10波を上回る地震観測記録を取得している。なお、No.5付近において、従来型微動計(速度)を用いた微動アレイ探索を行い、表層付近のS波速度は450m/s程度であることが分かっている。また、常時微動の水平上下スペクトル比には、周期1秒付近に、レイリー波基本モードの水平動の卓越と考えられるピークが確認されている。



(a) 計測斜面とセンサー配置



(b) センサー設置位置と計測断面の比較

図-3 計測対象斜面とセンサー設置位置<sup>3)</sup>

2021/3/20 宮城県沖の地震 MJ 6.9 と例として、三軸加速度計の観測結果を、従来型強震計の観測結果と比較して図-4に示す。最大加速度4Gal程度の観測記録だが、波形と周波数特性のどちらも、三軸加速度計により、従来型強震計と遜色がない計測が広帯域で可能であることが確認できる。

山体の斜面部の地盤増幅特性を調べるために、2020/5/6 千葉県中部の地震 MJ 5.0 について、法尻平坦部に設置し

た No.2 と、斜面上方の No.1 で得られた観測記録の加速度フーリエ振幅スペクトルを図-5 に示す。山体斜面部の地盤構造により、周期 0.15 秒付近が卓越することが分かった。今後、観測記録を山体斜面部の S 波速度構造の推定に活用する予定である。

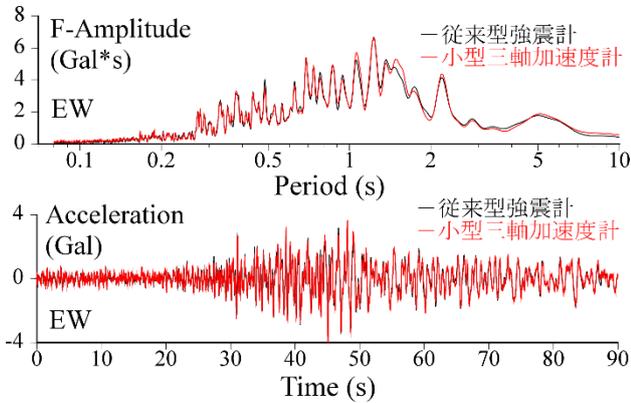


図-4 三軸加速度計の精度検証例<sup>3)</sup>  
(2021/3/20 宮城県沖の地震 Mj6.9)

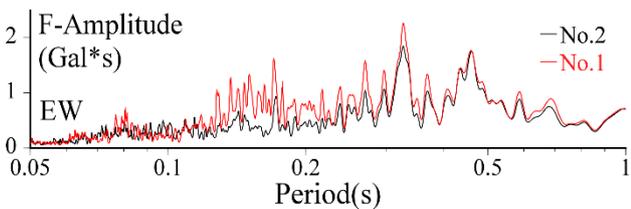


図-5 斜面上(No.1)と斜面下(No.2)の  
加速度フーリエ振幅スペクトルの比較<sup>3)</sup>  
(2020/5/6 千葉県中部の地震 Mj5.0)

(2) 構造物の計測事例 (事例. 2)

本事例は、本計測システム及び小型三軸 MEMS 加速度計の構造物ヘルスマonitoringの適用性について検討するため、2020 年より図-5 に示す中央開発株式会社本社ビル (東京都新宿区西早稲田, 6 階建て RC 造, 1976 年竣工) を対象に地震観測を継続している<sup>6)</sup>。小型三軸 MEMS 加速度計は、地表面 (1 階)、3 階および屋上階に設置した。

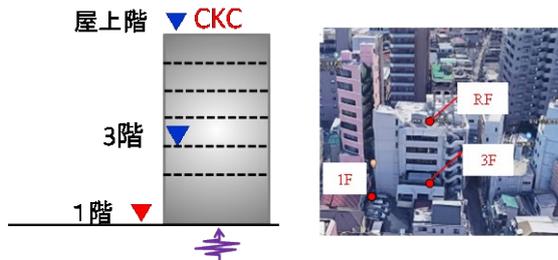


図-5 センサー設置位置箇所 (中央開発本社ビル)

図-6 に示すように、当該地は東京都新宿区の中央北部に位置しており、表層に関東ローム層が分布する豊島台地上に位置しており、比較的硬質な地盤条件である。既往

の地盤調査結果よれば、当該地の層序は立川・多摩ローム層、武蔵野段丘層、東京層および江戸川層の順で堆積しており、ローム層の下位は硬質な粘性土と良く締まった砂礫層が確認されている。

計測開始以降、関東地方では数回の地震が発生しており地震記録が得られている。ここでは、比較的当該地と震源が近い地震観測記録 (2021/10/7 千葉県北西部地震, MJ5.9, 深さ約 75km) について示す。各階の三軸加速度計による加速度波形 (NS 成分) を図-8 に示す。

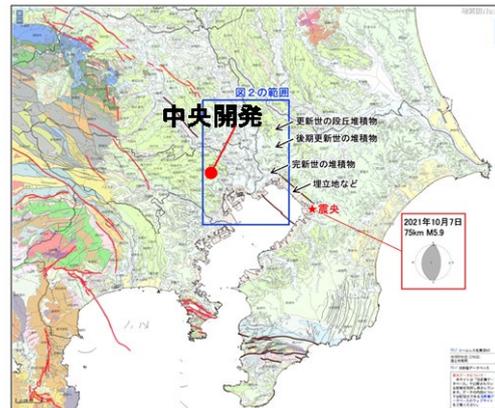


図-6 観測位置図(広域図)  
及び 2021 年千葉県北西部地震の震源情報<sup>7)</sup>

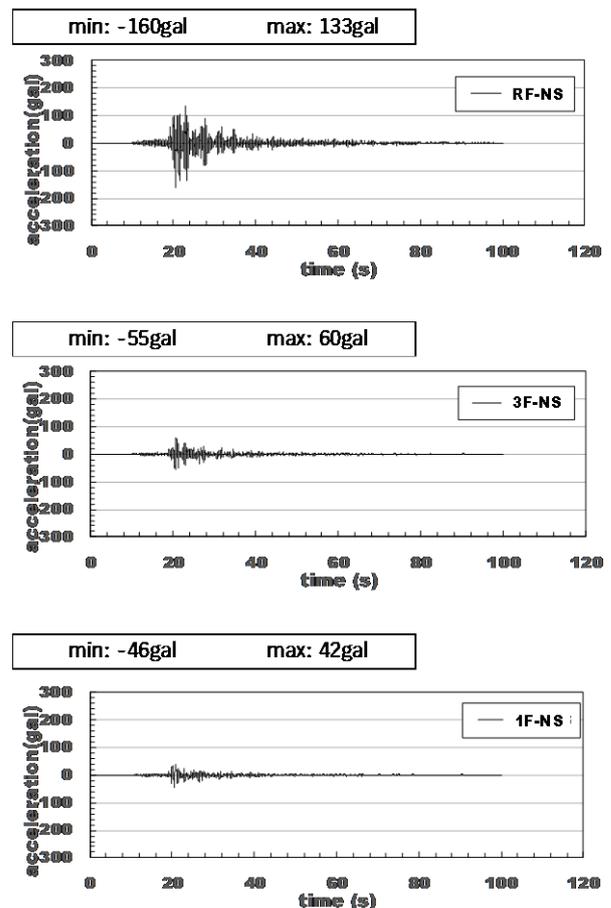


図-7 加速度波形  
(2021/10/7 千葉県北西部地震, MJ5.9)

地表面（1階）で最大 46gal、最上階で最大 160gal が得られており、前述の地盤震動の観測記録と比較して大きい揺れの観測結果である。また、構造物や地盤の固有周期は、振動数領域における入力と応答の比率である応答伝達関数（共振曲線あるいは周波数応答関数）のピークから推定することができる。図-8の加速度波形より、地表面（1階）の加速度記録を入力として、最上階の応答値に対する伝達関数の算定結果を図-9に示す。なお、伝達関数の算定にあたっては、各階のスペクトルを Parzen Window（バンド幅 0.6Hz）で平滑化している。図-9に示すように伝達関数の増幅率のピークは  $f=2.8\text{Hz}$  であり、一次固有周期は概ね  $T=0.3\text{sec}$  前後と推定される。また、ピークに対応する位相差も概ね  $90^\circ$  となっており、位相情報と併せてこのピークが一次固有周期に対応すると判断される。なお、構造物の階数（ $N$ ）と一次固有周期は  $T=0.049N$  の関係がある<sup>8)</sup>と言われており、この関係から推定される中央開発本社ビルの一次固有周期は  $T=0.29\text{sec}$  となる。あくまでも概略値ではあるが、地震観測記録より推定される一次固有周期と構造物の階数から推定される一次固有周期は概ね一致していることから、小型三軸加速度計を用いた多点計測を行うことで構造物の固有周期を推定することが可能であることを確認した。

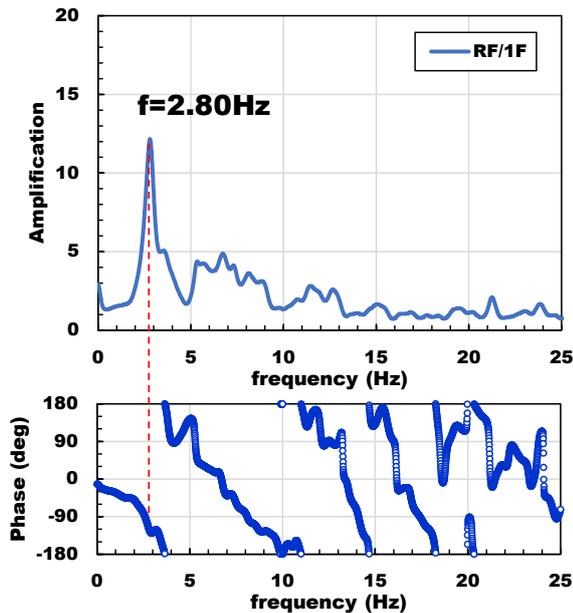


図-8 伝達関数（最上階/地表面）  
（2021/10/7 千葉県北西部地震，MJ5.9）

#### 4. まとめ

本報告では、MEMS 加速度計を用いた小型地震計の開発とその計測事例について報告した。実際の斜面およ

び構造物を対象に、センサーを多点配置し、観測を継続、さらにセンサーの精度を検証した結果、従来の汎用的な地震計と遜色ない精度で長期計測にも耐えること、構造物の振動性状を把握できることが分かった。したがって、本報告で紹介した小型震動センサーを適宜搭載する計測システムは既の実装できる段階にあると評価している。特に、不確実性が大きく予測が難しい地盤災害に取り組む場合、小型で安価かつ信頼できるセンシング技術の普及とその結果の利活用が災害シミュレーションの高度化や既設構造物の維持管理手法の強化に繋がると考えている。

#### 謝辞

本論の作成に当たっては、事例.1 で示した従来地震動記録との比較分析結果（図-4～5）は、鹿島建設（株）より提供頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 内閣府：Society5.0，科学技術政策，  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html)
- 2) 外務省：持続可能な開発目標（SDGs）と日本の取組，  
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/SDGs\\_pamphlet.pdf](https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/SDGs_pamphlet.pdf)
- 3) 王林，橋本和佳，山田岳峰，笠松健太郎：小型加速度センサを用いた地盤の微動・震動の計測事例，地盤工学会誌，Vol.69，No.8，pp.37-40，2021.
- 4) 沖村孝，鳥居宣之，堀江啓，余川千咲：地盤種別判定への常時微動測定の適用，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第11号，2007.
- 5) Kawase, H., Sánchez-Sesma F. J., and Matsushima S.: The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Wave, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 5, pp. 2001-2014, 2011.
- 6) 陶尚寧，王林，福原誠，湯志君：微動・振動センサーによる建物の健全度診断への活用について，第18回地盤工学関東支部発表会(GeoKanto-2021)，2021.
- 7) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：令和3年（2021年）10月7日に千葉県北西部で発生した地震の関連情報，  
<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/chibahokuseibu2021/index.html>
- 8) 気象庁：固有周期と建物の関係について，  
[https://www.data.jma.go.jp/cew/data/ltpgm\\_explain/about\\_period.html](https://www.data.jma.go.jp/cew/data/ltpgm_explain/about_period.html)