

# 令和5年度 日本応用地質学会関西支部 特別講演会・研究発表会

開催日時: 令和5年5月30日(火)14時20分～17時00分

## プログラム

◇ 開会挨拶、説明等 14:20－14:25

- ・ 開会挨拶 日本応用地質学会関西支部 三田村支部長
- ・ 注意事項説明、CPD活動証明の受け方等について

◇ 特別講演 14:25－15:50

「土砂災害の疑問55」

稲垣 秀輝（株式会社 環境地質）

日本応用地質学会 災害地質部会 部会長

◇ 一般講演(研究発表会) 16:00－17:00

特別講演 14:25－15:50

「土砂災害の疑問55」

稲垣 秀輝（株式会社 環境地質）

日本応用地質学会 災害地質部会 部会長



# 土砂災害の疑問55



一般社団法人 日本応用地質学会災害地質研究部会 編  
 みんなが知りたいシリーズ ①⑦  
 土砂災害の疑問55 出版記念講座(関西支部編)  
 2023.5.30(火)大阪  
 災害地質研究部会長(環境地質): 稲垣秀輝

1

## 出版本の内容



- 1「土砂災害とは」
- 2「斜面崩壊」
- 3「土石流」
- 4「地すべり」
- 5「地質災害と種類」
- 6「土砂災害から身を守る」

災害大国とも呼べる我が国では、防災・減災の施策が続けられています。しかし、住民一人ひとりが災害をよく理解して災害に備えることが重要です。災害を理解するためには、地形や地質をよく知って災害現象の起きやすい場所や起こり方を知ることが必要です。本書は土砂災害・地質災害を、地形地質の観点から理解することを目標に日本応用地質学会災害地質研究部会が中心にまとめたものです。

本書は、6章の章立てとして、55の疑問と19のコラムからなっています。日本で多発する土砂災害を一般の方に、分かりやすくまとめることに努めました。特に、地質の変動帯に位置する日本の土砂災害を理解するためには、地形・地質的背景が重要となります。本書は、中学生や一般市民の皆様が土砂災害を勉強する際に役立つ内容となっていますので、土砂災害の軽減に少しでもお役に立つことができれば幸いです。

## Section1 土砂災害とは



- ▶ Q1 土砂災害とはどのようなものですか？
- ▶ Q2 地質と地形は土砂災害に関係しているの？
- ▶ Q3 土砂災害はどのようなことが影響して起こるの？
- ▶ Q4 大雪、火山の噴火によっても土砂災害は起こるの？
- ▶ Q5 日本は地震大国といわれていますが、地震で土砂災害が起きやすい日本の地質を教えてください
- ▶ Q6 土砂災害はどんなところで起こるの？
- ▶ Q7 土砂災害の発生原因で最も多いものはなに？
- ▶ Q8 昔に比べて土砂災害は増えていますか、減っていますか？
- ▶ Q9 深層崩壊と表層崩壊ってなに？
- ▶ Q10 樹木と土砂崩れの関係を教えてください
- ▶ Q11 森林を活用した土砂崩れ対策はありますか？

3

## Q1 土砂災害とはどのようなものですか？



### 土砂災害とは

地震・火山噴火・豪雨や融雪などが原因で

土砂が人や建物を襲う災害

### 土砂災害の三つの分類

#### がけ崩れ【Section2】

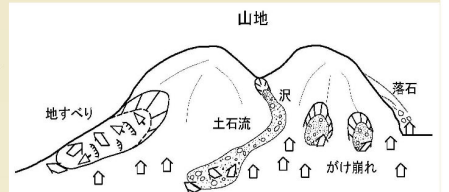
雨などが地面の中に浸み込み  
 急に斜面が崩れ落ちる

#### 地すべり【Section3】

滑りやすい地層に雨が浸み込み  
 そのまま地面が滑り出す

#### 土石流【Section4】

谷から大雨などにより土や石が  
 ものすごいスピードで流れ出る



3つの土砂災害

その他、洪水に伴って土砂が流出する被害もある

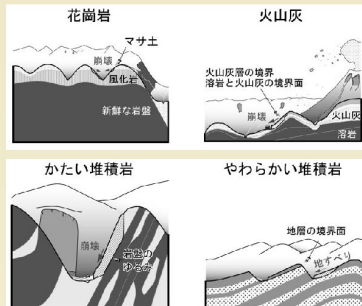
4

## Q2 地質と地形は土砂災害に関係しているの？



### 崩壊・地すべりの地質的素因

- 花崗岩・火山灰  
 ・風化部と新鮮部  
 →強度、透水性の相違  
 ・崩壊深: 薄い  
 ・小さいが多発  
 ・再現性: 10年から100年



地形断面図で見る崩壊・地すべりの地質的素因

5

## Q3 土砂災害はどのようなことが影響して起こるの？



### 土砂災害の「引き金」 = 誘因

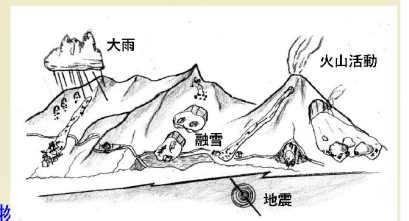
- ・大雨や地震、火山活動、急激な地形変化など

### 大雨と融雪

- ・雨水が地面から地下に浸み込む
- ・積雪地での春先の融雪

### 地震・火山噴火

- ・地震の揺れ
- ・火山噴火による噴出堆積物



様々な誘因による土砂災害

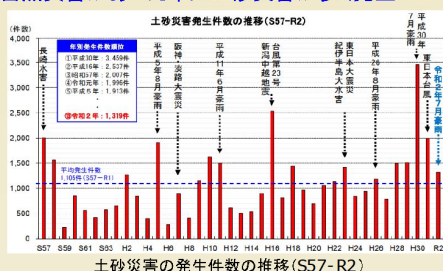
6

## Q7 土砂災害の発生原因で最も多いものはなに？



### 1982(S57)年から2020(R2)年の39年間の土砂災害

- ・発生件数は、平均1,105件/年
- ・大きな自然災害があった年に土砂災害が多く発生



7

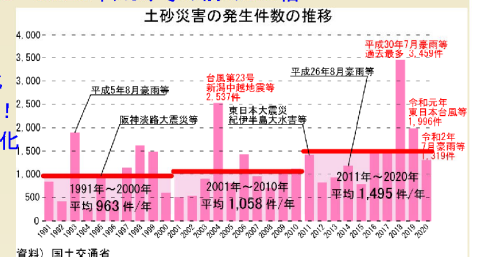
## Q8 昔に比べて土砂災害は増えていますか、減っていますか？



### 土砂災害は増えている？

- ・2018年は過去最多の3,459件(7月豪雨+北海道胆振東部地震)
- ・2019年1,996件、2020年1,319件
- ・最近10年(2011~2020年)は、その前の1.5倍

→増加している！  
 原因は地球温暖化  
 による降水の増加！  
 と地殻変動の活発化



土砂災害の年ごとの発生件数

8



## Q10 樹木と土砂崩れの関係を教えて

樹木の根茎による正の効果は大きい

斜面にとっての正の効果

- ・雨の貯留
- ・落ち葉、下層植生による侵食防止
- ・根による表土の固定

斜面にとっての負の効果

- ・風により表土を緩める
- ・根が岩の割れ目を広げる

- ・水平根が表土を緊縛する効果
- ・杭のように抵抗する効果
- 樹齢が増加すると支持力増大

伐採根の利用

・森林施業では伐根せず苗木の植樹

・伐採根は10年程度で支持力消滅

・新木の根の支持力が増加

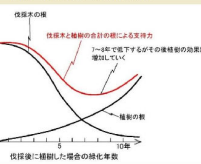
・7~8年目に要注意

里山での広葉樹の萌芽更新

・切株からの萌芽、20~30年とに利用



樹木根茎の防災効果



伐採後に植樹した場合の合計根茎の支持力 9

## Section5 地質災害と種類



## Q27 地質災害とはどのような災害ですか

地質災害とは、土砂災害より広い地質に係わる自然災害や人為災害を扱います。このため土砂災害のほかに火山噴火災害や活断層による地表の変位、地表の隆起と陥没、地下水のくみ上げによる広域地盤沈下、地震による液状化や地盤水平方向の流動、洪水や河川・海岸の浸食そして津波などが入ります。



13

## 陥没・隆起・火山噴火・液状化など

- ▶ 広域の地盤沈下のほかに、地域的な地盤の陥没があります。これは地下水が動いて地下の砂層などが浸食し、地表が突然陥没するのです。道路の陥没事故はこの現象です。また、人的な地下の掘削や土留め工事の陥没は、度々起こってニュースになります。
- ▶ 火山噴火の際には火山の周辺でマグマが上がってくるので地表が隆起します。このような隆起で道路や建物に変形してしまいます。
- ▶ 地震では、活断層（地表地震断層）が出現して地表の建物などが変形します。また、緩い砂層のある低地では液状化が発生して地表の建物や道路などが変形してしまいます。



ポーランドの炭鉱跡地の陥没



有珠山噴火で被災した建物



活断層による家屋の変形



液状化による家屋の変形

15

## Q11 森林を活用した土砂崩れ対策はありますか？

▶ 地盤の調査（土検棒）と補強（鉄根打設工法・PDR工法・ノンフレーム工法など）



10

## Section5 地質災害と種類

- ▶ Q27 地質災害とはどのような災害ですか？
- ▶ Q28 日本の地形の特徴はどのようなものですか？
- ▶ Q29 地震による災害はどのようなものがありますか？
- ▶ Q30 津波による災害とはどのようなものですか？
- ▶ Q31 火山による災害って何があるの？
- ▶ Q32 水害にはどんなものがあるの？
- ▶ Q33 地下水が影響して災害が起きるの？
- ▶ Q34 地震による液状化の仕組みと影響を教えてください
- ▶ Q35 液状化は地質災害なのですか？
- ▶ Q36 日本と欧米の地質は違う？
- ▶ Q37 欧米での地質災害を教えてください

12

## 地質災害はどうして起こるの

なぜ地質災害が起こるのかという日本は地球のダイナミックな地殻変動の中で特に活動的な変動帯に位置するからです。このような変動帯では地質は複雑で脆弱です。火山もあるし地震もあります。その上で考えないといけないのが水的作用です。日本は世界中でも雨が多い国です。それだけでなく雨が1時期に集中することが多いのです。この雨が問題で多くの地質災害を激しいものします。



破砕帯



破砕帯をすり面とした豪雨時の深層崩壊

14

## Q28 日本の地形の特徴はどのようなものですか？



- ▶ 日本列島は太平洋プレートやフィリピン海プレートの沈み込みによって押し上げられ隆起を続けています。標高200m以上の山地・丘陵地は、国土の75%、低地や台地の面積は25%にすぎません。
- ▶ 気象はモンスーン帯に位置するため降水量が多く、隆起する山地を河川が侵食して世界でも有数の起伏に富む急峻な地形が作られてきました。

16



## 山地の景観

- ▶ 脊梁 山地の陰しさはヒマラヤやヨーロッパアルプスに肩を並べるほどです。
- ▶ 我が国の脊梁山地は高さこそ2,000 ~3,000m級でヒマラヤに及びませんが、太平洋の海底から見れば7,000~8,000mの高さになります。インド平原から見たヒマラヤの高さも8,000 mですから同規模の山地の高まりを持つといえます。



## Q29 地震による災害はどのようなものがありますか？

- ▶ 揺れ: 耐震・免振・地盤改良
- ▶ 活断層による変位: 土地利用

活断層による変位

活断層

揺れによる被害



田近淳撮影

津波



## 揺れによる大規模盛土造成地の災害

- ▶ 東日本大震災ではこのほか、仙台市や福島市などで大規模造成宅地の地すべり(滑動崩落と呼ばれています)が多く発生しました。これは主に1970年代以前に台地や丘陵を削り、その土砂で谷を埋めたり盛ったりして造成した住宅地で、地震の際にその土砂(盛土といいますが)が滑るものです。



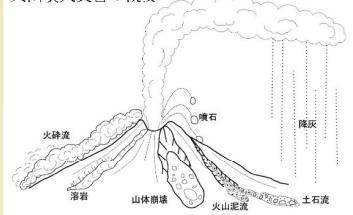
地震による谷埋め盛土すべり



東日本大震災による盛土地すべり

## Q31 火山による災害って何があるの？

火山噴火災害の概要



- ▶ 日本は火山国と言われていて、世界の7%を占める111の活火山を有しています。これらの活火山は現在も間欠的に活動が続けていて多様な火山噴火災害を引き起こしています。

## 困難なインフラ整備

- ▶ 山地は列島の背骨のように分布し、海岸に迫る場所もあって平野は分断されています。平野には主要都市が位置しており、都市間を結ぶ交通路は、脊梁山地を横断するルートはもとより、海岸沿いのルートも急峻な斜面下を通過する難所が随所にあります。
- ▶ 中京地区と北陸を結ぶ交通路が通る飛騨川の峡谷部です。また、東海道の難所といわれた由比を通る交通路です。このような急峻な斜面下を通る交通路は国内各地にあります。このため土砂災害を受けやすく維持管理に多額の費用が必要です。

飛騨川の峡谷部



上野将司撮影

交通路の集まる由比海岸



上野将司撮影

## 揺れによる液状化災害

- ▶ 地盤の液状化: 地下水に満たされた砂質の地盤で発生する液状化現象は地震による災害の原因の一つとして以前から知られていました。2011年東日本大震災では東京湾岸や利根川下流域などの海浜や河川、池沼の埋立地で集中して発生し、住宅や道路、上下水道やガスなどの埋設管が大きな被害を受けました。千葉県では浦安市の約8,700軒をはじめとして18,674軒もの住宅被害が発生しています。

液状化による浮き上がり



液状化による沈下



## 活断層と津波

- ▶ 地下の岩盤のずれが「(震源)断層」です。マグニチュードが7前後より大きく深さ10 km 前後の浅い地震では、この断層が地表に現れたり「(地表地震断層)あるいは「活断層」と呼びます)。ずれの影響で地表面が変形し、膨らんだり、割れ目ができたりすることがあります。断層がずれたり、地盤が変形すると地表の構造物は破壊されます。
- ▶ 断層が動いて海底面が大規模に隆起したり沈んだりすると発生するのが地震による津波です。東日本大震災のように我が国は繰り返し津波による被害を受けてきました。

田近淳撮影



1999年台湾集集地震の地表地震断層(逆断層)によってずれたダム。断層は水中で見えない。台湾大甲溪、石岡ダム。

## 火山災害の種類と被災形態

- ▶ 火山噴火の直接的災害としては、噴石・降灰、火砕流、溶岩流、山体崩壊、火山泥流などがあります。また、火山灰が積み重なったところに雨が降ると土石流などが発生します。火山噴火災害は活火山周辺地域に限られますが、そこでは甚大な被害を及ぼします。
- ▶ 火山災害の種類と被災形態は多様です。また、災害形態が時々刻々変化するとともに長期間続き、いつ終わるかが分からないので、減災・防災の計画を考えることが難しいのです。

| 区分   | 災害現象      | 主な被災形態                       |
|------|-----------|------------------------------|
| 直接災害 | 噴石        | 被弾による破壊・損傷・死亡                |
|      | 降灰(降下火砕物) | 被覆による窒息、荷重による建物損壊、交通障害、呼吸器障害 |
|      | 火砕流・火砕サージ | 焼損、埋没、破壊                     |
|      | 溶岩流       | 壓迫、埋没                        |
|      | 岩屑なだれ     | 完全破壊、埋没                      |
| 間接災害 | 地震・地盤変動   | 建物倒壊、道路等寸断                   |
|      | 津波        | 破壊、流失                        |
|      | 火山ガス      | 死亡、植物の枯死                     |
|      | 火山泥流      | 流失、埋没、破壊                     |
|      | 土石流       | 流失、埋没、破壊                     |
| 災害   | 河床上昇・洪水   | 取水障害、洪水被害                    |
|      | 酸性雨       | 健康障害、農作物被害                   |



## 近年の火山災害①有珠山(2000年)



- 北海道、洞爺湖の南にある有珠山は、2000年3月に噴火しました。有珠山の噴火は20～50年間隔で起きています。この噴火の直前には火山性地震や地表の隆起などが起きたため、噴火を予知しておりおよそ16,000人が避難でき、死者は0人でした。これは大きな成果であり、有珠火山の地質学者である火山ホームドクターの存在が大きかったといわれています。しかし、温泉街に大きな物的被害が出たことと長引く噴火活動で生活再建の懸念が噴出し出てきました。洞爺湖温泉では、集団移転の話も出ましたが、火山活動が落ち着くとともに現地での再建となりました。
- そして、火山噴火跡地周辺は、2009年にはユネスコ世界ジオパークに指定され、多くの観光客が訪れると共に、修学旅行などの教育の場として「変動する大地との共生」や「災害と向き合う知恵」などの学習に役立っています

25

## 近年の火山災害②三宅島(2000年)



山頂の森林は火山灰で覆われた 泥流で埋没した椎取神社

- 2000年7月8日から初まった三宅島雄山の噴火は、同年8月下旬までの度重なる噴火により大量の火山灰を島内に降らし、降雨により泥流や土石流が頻発しました。この噴火では、近年数回の噴火事例とは違ってカルデラを発生される大規模な山頂噴火となったことで、作成されていたハザードマップに基づいたシナリオを超える想定外の災害となり、火山噴火予知や火山防災の面で大きな課題を残すことになったのです。
- そして、8月29日には大変危険な火砕流が発生したことで危機感が高まり、2000年9月から全島民が島外に避難しました。その後も火山ガスが収まらず、住民の帰島が遅れに遅れ2005年2月にやっと避難指示が解除されたのです。この間、降灰や泥流・土石流の発生により道路や家屋、耕地、林地に大きな被害が及ぶとともに、防災関係者による復旧作業が続けられましたが、多量の火山ガスが復旧作業を難航させたのです。

26

## 近年の火山災害③御岳山(2014年)

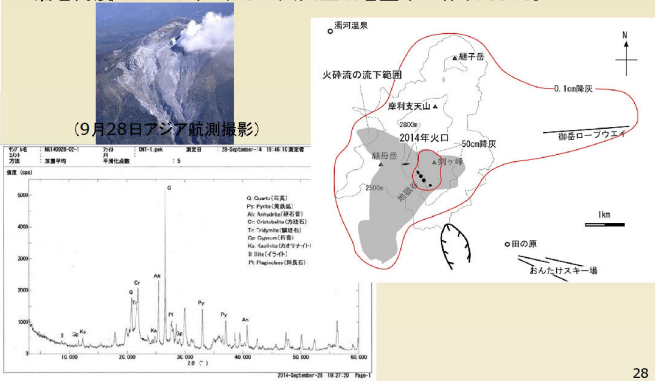
- 長野県と岐阜県にまたがる御岳山は、2014年9月に突然噴火しました。それは、噴火予知の困難な小規模な水蒸気爆発でした。しかも、噴火日時がちょうど9月の紅葉シーズン、での快晴の土曜日で、しかも昼食時である頂上には多くの登山者が集まっていた時の噴火であったため、頂上には多くの登山者が集まっていた大きな戦後最大の噴火災害となりました。御岳山は、1979年にはこれと同規模の水蒸気爆発があったのですが、噴火時期が10月下旬の冬季の早朝であったため、登山者は少なく人的被害はありませんなかったのと対照的でした。
- 2014年の噴火後、登山者に対する火山防災が注目を集めた噴火でしたので、噴火後の安全のための復旧対策としては、鋼鉄製のシェルターと避難者が設置されました。被害を受けた山小屋の噴石対策の補強と噴石対策シェルターの設置が行われました。



27

## 火山豆石はどうしてできるのか？

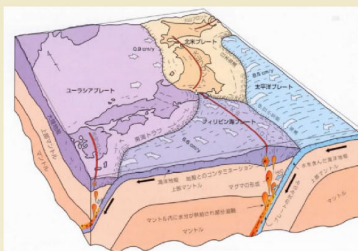
- 火山灰の中にギブサムが入っているので、灰の中の石膏が表層を何度のコーティングして火山豆石を空中で作りだした。



28

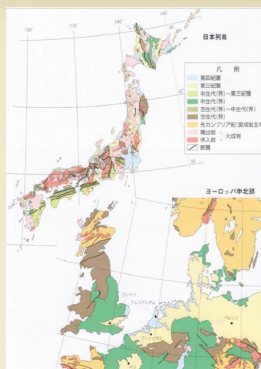
## Q36 日本と欧米の地質は違う？

- 地球の表面は十数枚のプレートに分かれており、お互いのプレートは衝突して押し合い、他のプレートの下に沈み込んだりしています。かつての日本列島は大陸の沿海部にあり、沈み込むプレートの上に載って運ばれてきた海洋の堆積物が沈み込めずにはき寄せられていました。この堆積物が付加体と呼ばれる地質です。



29

## 日本と欧米の地質分布の比較

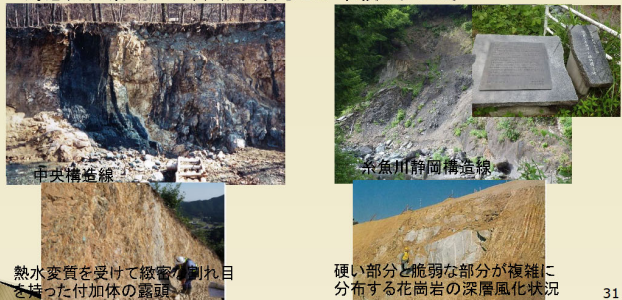


- 日本の地質分布は、火山岩や花崗岩などの深成岩が目立ちます。古生代以降に形成された堆積岩や変成岩が断層で断ち切られるなど、モザイク模様のように複雑に分布しています。火山岩の分布は日本の活火山の多さを表しています。そして、断層の多くは直下型地震を引き起こす活断層が含まれています。
- これに対して、欧米の地質は、活断層や活火山はほとんどありません。ヨーロッパ中北部では先カンブリア紀の変成岩がスカンジナビア半島に広く分布し、その他の地域も古生代以降の堆積岩が分布しています。

30

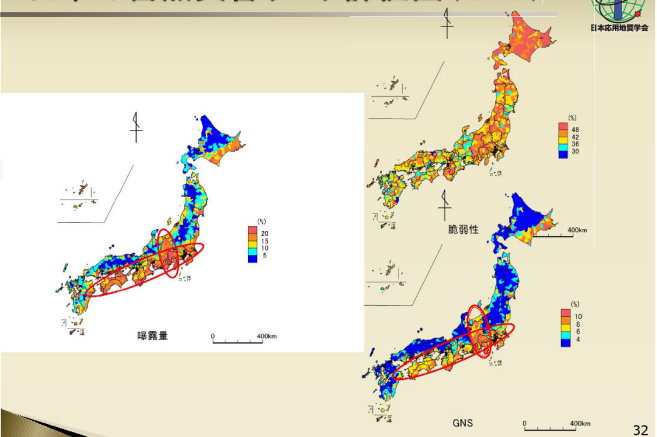
## 特異な環境(豪雨・地震・火山噴火・急峻な地形)と日本列島の脆弱性

- これらの地質を貫いて花崗岩類の活動がありました。この後、日本海の拡大が生じて日本列島は大陸から離れていき、現在の位置に落ち着く過程で中央構造線や糸魚川静岡構造線などの大断層が生まれました。東北日本は浅い海でしたが激しい海底火山活動により、凝灰岩などが堆積しました。



31

## 日本の自然災害リスク評価図(GNS)



32



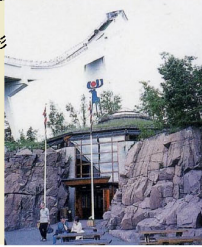
## 海外の堅岩露頭



- ▶ 欧米地域では氷河期には広く厚い氷河に覆われていました。氷河は移動するときに底面の地質を削削するため、地質表面の風化帯は削り去られて氷河の融けた後には新鮮な地質が露出することになりました。これらの地域は安定した大陸地塊で、断層や割れ目の少ない硬い地質が地表付近に分布しています。このため、高層ビルなどの建築物は基礎の杭を必要とせず、トンネルやのり面などもコンクリートなどの保護はほとんど見られない点も日本と異なる特徴です。



上野将司撮影



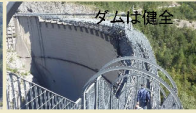
33

## 土砂災害(大規模岩盤地すべり)



- ▶ イタリアアルプス山中に1960年に建設された高さ265mのバイアントダムでは、貯水により斜面が大規模に移動しはじめ、3年後に体積が2億7千万m<sup>3</sup>もの巨大な地すべりとなってダム湖に滑り込みました。この衝撃でダム湖の水は堤体を170mもの高さで越えて流れ下り、下流の村では2,000人以上の犠牲者が出ました。堤体は、ほぼ無傷で残り背後にはダム湖を埋めた巨大な地すべり土塊が残っています。

地すべり土塊



ダムは健全



ダムから見たロンガローネ



大規模岩盤地すべり



バイアントダム

## Q37 欧米での地質災害を教えて

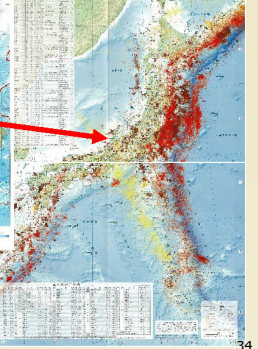


- ▶ 日本は、自然災害の多い国の1つです。特に、先進国としては異例の多さと範囲としての脆弱な国土に起因します。
- ▶ しかし、世界の中でも自然災害の多い国はあります。
- ▶ ここでは、欧米の他に、アジアの国での自然災害にも触れてみます。

世界の気候分布



地震活動

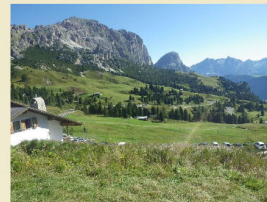


34

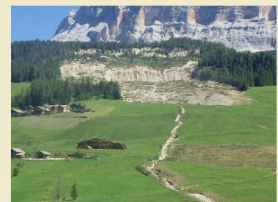
## 土砂災害(周氷河堆積物の地すべり)



- ▶ 氷河の融けた後には氷河が侵食して運んできたモレーンという礫・砂・粘土などからなる堆積物が残されています。この堆積物が地すべりとして移動することがあります。日本ようなお金をかけた対策はしていない。



大規模地すべり地形



周氷河堆積物の地すべり、観測はしているが、表面排水工主体で対応している

36

## 動きを止めない砂防対策例



- ▶ 動きを許して、土砂はある程度制御する
- ▶ 食い違いチェックダム

食い違いチェックダム



大規模地すべり:止められない



チェックダム

## ベトナムの土砂災害



- ▶ ベトナムは日本と同じく山が多く、湿潤温暖であるので風化した岩盤の多いので土砂災害が多い。

SAPA地すべり全景



対策工



ハザードマップ



ベトナムハイファン峠(地すべり地帯)を登る特急列車

ホーチミンルートの露頭すべり面観察

39

## クイッククレイと津波災害



- ▶ スカンジナビア半島やカナダでは、氷河期の厚い氷河が融けて氷河の荷重がなくなると、地盤が隆起して海底に堆積した粘土が陸上に持ち上げられてきました。この粘土中の塩分が雨水で洗い流されると粒子の結合力が弱くなり、崩れると液体状になって流れ出します。この粘土はクイッククレイと呼ばれ、小さな塊の粘土をかき混ぜると容易に液体状になります。クイッククレイの分布する地域で地すべりが発生しており、泥水の中に家屋が沈み込んだり傾いたりする被害が発生しています。
- ▶ フィヨルドの急峻な谷壁が崩れて落下すると津波が発生することがあり、1958年7月のアラスカ地震の際に3,000万m<sup>3</sup>の大量の岩塊土砂が入り江に崩れ落ちて津波が発生しました。



クイッククレイ



津波災害

38

## 大規模破砕帯と風化岩での崩壊



風化岩

崩壊

大規模破砕帯と風化岩では崩壊が多い

大規模破砕帯

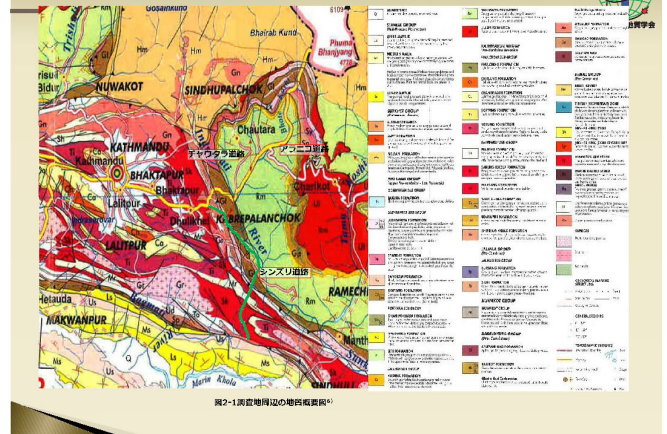
崩壊



## ヒマラヤ変動帯でのゴルカ地震



## 道路沿いの地質と土砂災害の概要



## アラニコ道路(川の道:中国援助)地震土砂災害⑦



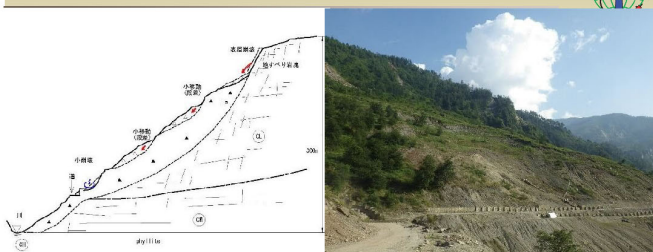
- ⑦集落背後の急崖上部の緩み岩盤が、地震時崩壊し、集落とともにギャビオン(フンカゴ)を含む道路が土砂で埋まっている。これらの土砂災害は、⑥と同様の崖上部の岩盤崩壊が主因と考えてよい。

## 地震土砂災害⑧



- ヒンディを超え、さらに下流へ向かうと、⑧橋梁上方の自然急崖からの落石が多数発生し、橋梁路面に突き刺さっている

## 地震土砂災害⑩



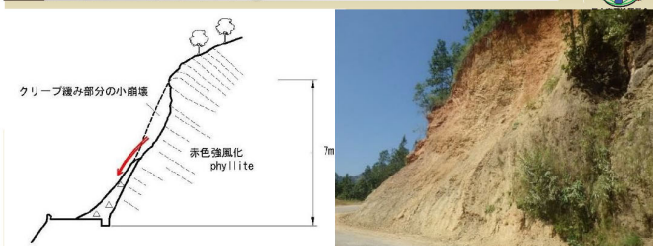
- スンコシ川左岸側に、⑩大規模な地すべり地が存在している。地震による大規模地すべりの滑動はない。
- このような小ブロックが地震によってやや変形しこれらの対策施設を破損させている。これらの対策施設がなければ、もう少し道路脇の災害が拡大していた可能性はある。

## 地震土砂災害⑪



- ⑪地点では、道路盛土の崩壊が発生している。盛土の土留工に使用されたフンカゴ工とコンクリート擁壁工の残骸が残っている。
- 地震時の盛土被害は、日本でも多いのであるが、今回の地震でも確認された。

## チャウタラ道路(山の道:ネパール政府)地震土砂災害⑬



- さらに進んで⑬切土法面法肩でもクリープ緩み部分の小崩壊が発生している。これらの法面の崩壊は川沿いの道であるアラニコ道路から尾根上の道であるチャウタラ道路に向かうアクセス部となり、チャウタラ道路が完全に尾根沿いの道となると、これらの斜面崩壊は極端に少なくなっていく。

## シンズリ道路(川の道:日本の援助)法面対策による効果(2)



- 写真左は切土法面が擁壁+法枠工で施工されており、被害はなかった。
- 写真右は橋架基礎がコンクリートで根固めされており、被害はなかった。



## 地震土砂災害のタイプ

| 道路災害タイプ      | 被災の概況                                       | 発生要因                                   |
|--------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| ① 急崖での岩盤崩壊   | 高標高位置の急崖で多発しており、大きなエネルギーを持った崩壊岩塊が道路を直撃している。 | 高角度節理面を分離面として地震動により不安定化する。             |
| ② 落石         | 日常的に発生していると推測され、多くの落石が道路に落下している。            | 地震動による転石浮石の不安定化や崩壊が発生し岩塊が落下する。         |
| ③ 地すべり末端部の崩壊 | 大規模地すべり末端部小ブロックが道路を巻き込んで滑動し、道路に変状が発生している。   | 河川浸食を受け従来から不安定化している末端部が地震動により活動する。     |
| ④ 斜面崩壊に伴う岩屑流 | 高標高域で発生した斜面崩壊の岩塊が沢谷に直下し、橋梁など道路構造物を破壊している。   | ①同様に地質構造を要因として発生。積雪の影響もあり沢谷に長距離移動する。   |
| ⑤ 切土のり面の崩壊   | 日本の切土よりも急勾配であり対策のものが多く、り面全体が崩壊しているものが多い。    | 安定勾配が確保されていない切土のり面が多く、地質構造も要因としてあげられる。 |
| ⑥ 盛土のり面の崩壊   | 急斜面上の道路谷側盛土で、崩壊延長が15m程度と短いものが確認された。         | 急勾配斜面にかこ枠+ブロック積みで構築された盛土で、もともと安定性が低い。  |

## Section6 土砂災害から身を守る

- Q38 前兆現象を知るための方法はありますか？  
 Q39 災害が発生した場所を知ることができますか？  
 Q40 土砂災害が起きたらどうすればいいのですか？  
 Q41 普段からの備えを教えてください。  
 Q42 備蓄の心得として最低限必要なものは何でしょうか？  
 Q43 外出先で土砂災害にあった場合どうすればいいですか？  
 Q44 避難情報の種類はどのようなものがあるの？  
 Q45 避難する際の注意点は？(服装、周囲の状況、避難するタイミング)  
 Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？  
 Q47 土砂災害警戒区域(レッドゾーン、イエローゾーン)とはどのような区域ですか？  
 Q48 土砂災害警戒区域の外でも油断は禁物ですか？  
 Q49 土砂災害警戒情報はいつ「どのように」発表されるの？  
 Q50 警戒レベルとは？  
 Q51 マイ・タイムライン(自身の避難計画)の作成方法を教えてください。  
 Q52 垂直避難とはどのような避難方法でしょうか？  
 Q53 知っておきたいサービス、ウェブサイトはありますか？  
 Q54 個人としての対策方法はありますか？  
 Q55 土砂災害の多い日本で暮らす工夫は何ですか？

51

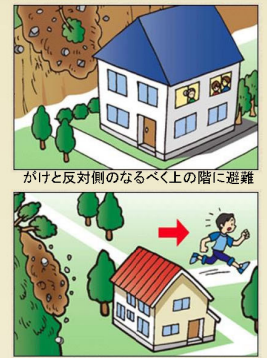
## ネパール山岳地域における防災を考慮した地域計画

- この地域を含むヒマラヤ山脈周辺は造山運動が非常に活発で、5mm/年程度の速度で隆起している。さらに年間降水量(カトマンズで1500mm/年程度)の3/4は、雨期の6~9月に集中する。このように隆起速度が大きく河川浸食が活発であることから、この地域の地形は非常に急峻であり、比高差のある大規模なV字谷やエ字谷を形成している。
- このような地形条件下において川沿いにつくられた道路(川の道)や集落は、斜面変動や土砂災害が発生すると、今回のアラニコ道路地震災害と同様な大きな被災を受けることになる。それに対しチャウタラへの道路など尾根や山腹につくられた道路(山の道)では、地震による被災は少ないとともに小規模であった。これは、斜面変動発生位置と道路との比高差が小さいことが大きな要因であり、山の道は川の道と比較して相対的に自然災害に強いと考えられる。
- 古くからのネパールの集落は尾根に点在し(郡部チャウタラなど)、山の道のネットワークが形成されていた。利便性の面では、今後も川の道を整備し集落が発展していくことになると思われるが、防災の面ではこの地形地質を活かした山の道も並行して整備していく必要があると考えられる。

## Q43 外出先で土砂災害にあった場合どうすればよいですか？

できるだけ安全な場所に、その時点で考えられる最も安全な方法で避難してください

- 土砂災害は、一度だけではなく、何度も繰り返すことがありますので、**できるだけ安全な場所に、その時点で考えられる最も安全な方法で避難してください。**
- そのために、まず自分がいる場所の土砂災害の危険性を調べてみましょう。急な斜面や崖がすぐ近くにあるでしょうか。もし急な斜面や崖のすぐ近くにいる場合は、急な斜面や崖からはできるだけ離れてください。1階は土砂で埋まりやすいので、頑丈な建物の2階以上で崖から離れた場所に移動してください。
- 大雨の場合には、自分のいる場所が崖や急斜面から離れていても、山で崩れた土砂が谷に沿って流れる土石流の被害を受ける危険性があります。地形を確認し、もし谷筋に沿ったところや渓流の近くにいる場合は、谷筋ではない場所へ避難してください。土砂崩れや土石流が発生すると、土砂で道路が寸断されることがあります。



がけからなるべく遠くへ避難  
 \* 石川県土砂災害情報システムHPより

## Q45 避難する際の注意点は？(服装、周囲の状況、避難するタイミング)

### 命を守り、命をつなぐ行動を

- 避難する際は、**避難中に被災しないこと、避難場所で命をつなぐことを考えて準備をしましょう。**大雨の中、斜面がある道路を通る場合、斜面が崩壊して道路が寸断される、**自分自身が崩壊した土砂に巻き込まれる**など様々なことが考えられます。
- 土砂災害の危険性を示す「**土砂災害特別警戒区域および土砂災害警戒区域**」がどこにあるか**予め調べておきましょう。**大雨の際、土砂災害の危険性がある道路を通過することは大変危険ですので、どこを避けてどこにいくか予め考えておきましょう。大雨の中、速くまで避難することは大変危険ですので、できるだけ近くの安全な場所に避難するようにしましょう。



土砂災害から安全に避難するために  
 (伊予市HPより)

非常持出袋を持ち寄って中身を紹介している様子。どのようなことを想定して何を用意したか話合っています

53

## Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？

### ハザードマップとは

ハザードマップとは、自然災害による被害を予測し、その被害範囲を地図上に示したものです。対象は、土砂災害、地震・津波災害、洪水災害、火山噴火災害等がありますが、日本の国土は広く災害の形態は様々なため、地域によって対象となる災害が異なります。お住まいの地域のハザードマップは、市町村のホームページ等で公開されており、確認することができます。

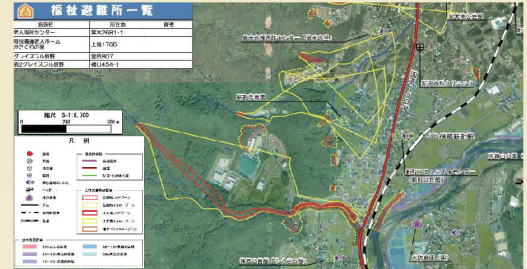


図 土砂災害ハザードマップの例(長野県辰野町HPより)

54

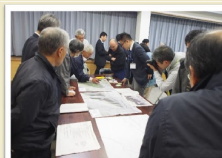
## Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？

- ハザードマップを利用して迅速に避難するためには、次の3ステップを事前に確認しておくことが重要です。

### STEP1 我が家の災害に対する危険性を確認

- まず、ハザードマップで我が家の位置を確認して、発生する可能性がある災害の種類を確認します。

#### ①わが家の災害に対する危険性を確認



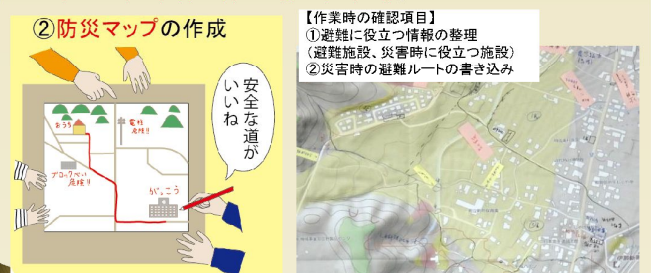
地域の危険性の話し合い状況  
 (長野県辰野町の例)

55

## Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？

### STEP2 避難場所の確認、避難経路の作成

- 次に、自治体が指定している避難場所を確認して、そこまでの避難経路を書き込みます。この時に、避難経路で危険なブロック塀やがけ、土石流危険渓流、氾濫の恐れのある水路に近い低い土地、水路など、避難時に危険な箇所も書き込むと、より地域の災害に対する理解が深まります。



【作業時の確認項目】  
 ①避難に役立つ情報の整理  
 (避難施設、災害時に役立つ施設)  
 ②災害時の避難ルートの書き込み

マップへの書き込み例(長野県辰野町の例)

56



# Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？

## STEP3 避難経路の現地確認

- 最後に、作成した避難経路を実際に歩き、避難場所まで実際に移動します。この時に、机上では分からなかった危険性が高い箇所(湧水、くぼ地、見通しが悪いなど)、近道が無いかなどを確認し、気付いたことはマップに加筆します。
- 実際の避難場所への移動時間を計っておくことも、避難時間の目安を知るために重要です。ただし、高齢者や障害者、乳幼児などの要配慮者と一緒に避難すると想定以上に時間がかかることや、移動できない経路があることから、事前に一緒に避難するメンバーも想定して避難経路を作成、確認することが大事です。

### ③防災マップの確認



防災マップによる避難訓練 (長野県辰野町の例) 57

# Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？

## ●災害に関する伝承の活用

- 災害に関する伝承などがある場合は、地域特性の理解に活用できる。

【長野県辰野町川島地区の例】



59

# Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？

## ●防災マップの作成手順の例

### 1)住民説明会の実施



地区の土砂災害特性の説明

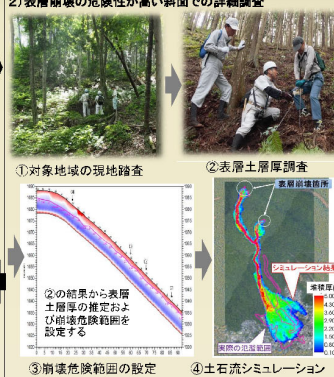
### 3)ワークショップの実施



地域情報の聞き取り

### 4)防災マップの作成

## 2)表層崩壊の危険性が高い斜面での詳細調査

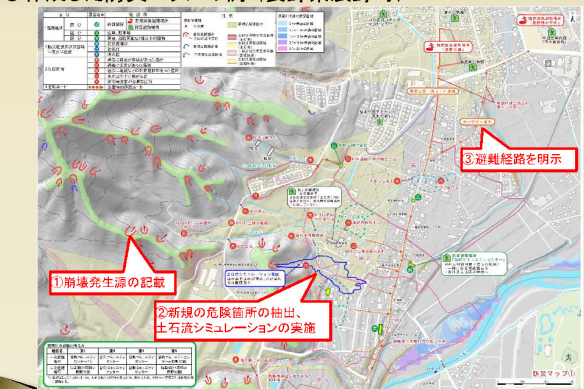


※松澤ほか、2021、水利科学誌より

58

# Q46 ハザードマップを利用して避難場所、経路を確認するためにはどうすればいいのですか？

## ●作成した防災マップの例 (長野県辰野町)



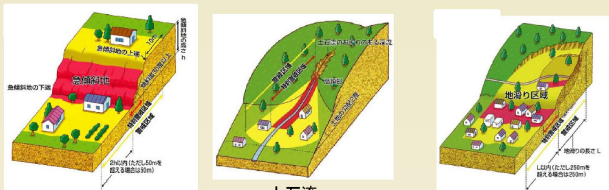
※松澤ほか、2022、水利科学誌より

60

# Q48 土砂災害警戒区域の外でも油断は禁物ですか？

- 土砂災害警戒区域は、全国を一律の基準で危険箇所を抽出し、速やかに法指定することを目的としており、都道府県は、土砂災害の危険性が特に高い箇所を「土砂災害特別警戒区域(レッドゾーン)」、高い箇所を「土砂災害警戒区域(イエローゾーン)」として指定しています。

- そのため、全ての土砂災害危険箇所を網羅できている訳ではなく、土砂災害警戒区域の外であっても土砂災害が発生した事例は多くあり、油断は禁物です。実際に、2018年7月豪雨では35%、2019年台風第19号では46%が土砂災害警戒区域外で人的被害が発生しています。



急傾斜地の崩壊 土石流 地すべり ※広島県HPより 61

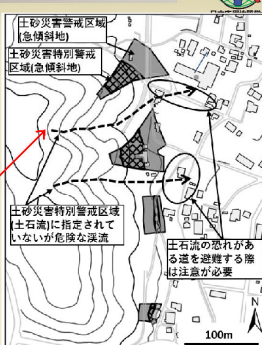
# Q48 土砂災害警戒区域の外でも油断は禁物ですか？

## 3.谷の地形が明瞭でない箇所

- 右図では、周辺の斜面は土砂災害警戒区域(急傾斜地の崩壊)に指定されていますが、間の谷は地形が不明瞭なため土砂災害警戒区域に指定されていませんでした。
- しかし、現地調査を実施した結果、下流に過去の土石流の痕跡が確認されたことから、土石流発生の危険性が高い渓流であることが分かりました。土石流が流下する恐れがある道を避難時に使う際は注意が必要です。



抽出された崩壊危険箇所



土砂災害警戒区域に指定されていないが土石流の危険性が高い渓流 (松澤ほか、2019)

63

# 土砂災害に関連の法令の経緯

| 立法の契機                   | 立法の推移                           |
|-------------------------|---------------------------------|
| 1896 河川法の制定             | 1897 砂防法・森林法(3つ合わせて治水三法)        |
| 1948 福井地震               | 1950 建築基準法(中規模の地震対応)            |
| 1957 集中豪雨による地滑り災害       | 1958 地すべり等防止法                   |
| 1961 集中豪雨で宅地造成地の崖崩れ災害   | 1961 宅地造成等規制法                   |
| 1961 乱開発・都市のスプロール化      | 1968 都市計画法(開発許可制)               |
| 1967 集中豪雨で自然斜面の崖崩れ災害    | 1969 急傾斜地法                      |
| 1967 ゴルフ場開発などで森林の乱開発    | 1969 森林法改正(林地開発許可制)             |
| 1978 宮城県沖地震             | 1981 建築基準法改正(最大規模の地震対応)・新耐震設計施行 |
| 1999 広島・呉市豪雨災害          | 2000 土砂災害防止法                    |
| 2004 台風が相次ぎ高齢者施設の被災     | 2006 土砂災害防止法改正(高齢者施設への防災強化)     |
| 2005 福岡県西部地震等で造成宅地に地盤災害 | 2006 宅地造成等規制法の改正(造成宅地の規制強化)     |
| 2008 岩手・宮城内陸地震          | 2011 土砂災害防止法改正(大規模土砂災害への防災強化)   |
| 2011 東日本大震災             | 2011 東日本大震災復興基本法                |
| 2014 広島豪雨災害             | 2015 土砂災害防止法改正(警戒避難体制の強化)       |
| 2016 岩手県岩手市の高齢者施設の被災    | 2017 土砂災害防止法改正(高齢者施設への防災強化)     |
| 2021 熊本地震               | 2022 宅地造成及び特定土等規制法              |

62

# 2020九州南部豪雨：牛淵災害は土砂法のハザードマップ適用外的事例

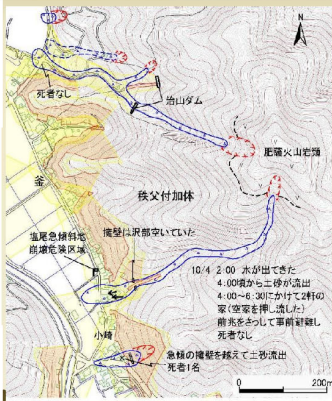
土砂災害防止法のレッドゾーン・イエローゾーンは、今回崩壊した箇所の両側には急傾斜地として指定されていた。しかし、今回はこの指定地では崩壊は発生せず、この間の0次谷の緩斜面崩壊が発生した。

この崩壊発生箇所は30度の傾斜はなく、急傾斜のレッドゾーン・イエローゾーンは指定できない。さらに、1次谷は存在せず渓流でのレッドゾーン・イエローゾーンの設定もできない。崩壊箇所には地下水の集まる0次谷集水地形に断層破砕帯と肥後火山岩の貫入岩が位置する危ない地質構造がある。それらの危ない地質構造を区域指定の要素に組み入れていない土砂災害防止法の盲点を突いた災害といえる。





## 2020九州南部豪雨：釜・小崎地区の土砂災害事例



- 小崎地区では、釜地区反対側の尾根でキャップロック型の崩壊が発生して、土石流化し小崎集落に達し多くの家を押し流した。ただし、住民は溪流に対策工がないことを知っていたため、土砂が擁壁を乗り越えて家屋が被災し1名が亡くなっている(右写真)
- それに対して、急傾斜地事業の既往擁壁下の住民は擁壁上方の斜面が秩父付加体のやや深い崩壊を起こしたため、土砂が擁壁を乗り越えて家屋が被災し1名が亡くなっている(右写真)
- ハード対策の過信は禁物



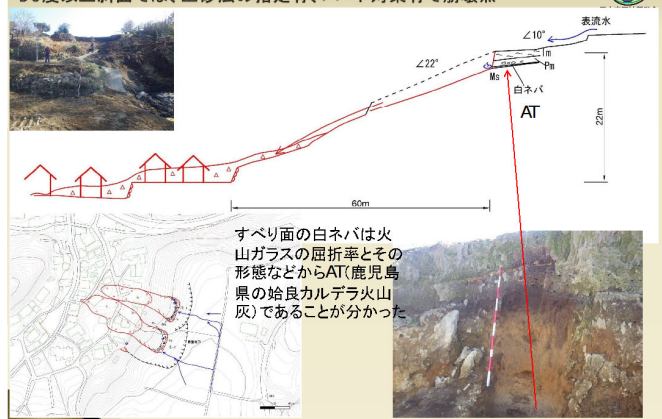
## Q51 マイ・タイムライン(自身の避難計画)の作成方法を教えて

- マイ・タイムラインとは、予定表や年表など時間経過によって変化する情報を表したものを指します。
- 防災上で使われるマイ・タイムラインは、災害時を想定し、被害を最小限に抑えるために、いつ、何をやるかという事を自分自身であらかじめ決めておく計画のことを指します。
- 具体的に「いつ」「何をやるか」を考えておく、いざという時に落ち着いて行動することができます。台風の場合、台風の進路と台風通過に伴う雨量分布情報をもとに、ご自身で決めたマイ・タイムラインを実行に移すことができます。
- また、大雨の場合は、避難しなければならないほどの状況になっていると判断する基準を設定していると、災害モードのスイッチを入れ、マイ・タイムラインに沿った避難行動が出来ますので、自分自身の命を守る大切なものです。
- マイ・タイムラインの作り方は、多くの自治体がホームページで広報しています。

マイ・タイムラインの事例  
(岡山県 玉野市HPより)

67

## 2019年台風19号の豪雨災害：群馬県富岡地区 30度無い火山灰斜面(土砂法の無指定)で崩壊発生3名死亡 30度以上斜面では、土砂法の指定有、ハード対策有で崩壊無



すべり面の白ネバは火山ガラスの屈折率とその形態などからAT(鹿児島県の始良カルデラ火山灰)であることが分かった

## Q51 マイ・タイムライン(自身の避難計画)の作成方法を教えて

- 災害の時には想定外のことが起こりますので、作成時には、是非、様々なことを想定してみよう。その際、市区町村が作成・公表しているハザードマップで土砂災害の危険性や洪水による浸水の危険性などを確認し、その情報をもとに現地を訪れ、「大雨が降ったらどこで何が起きるだろうか」「安全な場所はどこにあるか」という検討をする「防災まち歩き」を行おう。
- ハザードマップには、「水路周辺の浸水危険性」や「落石の危険性のある浮石」など局所的な情報は記載されていないため、現地の様子をご自身の目で確かめた上で避難場所や避難経路を検討しよう。
- 「防災まち歩き」は個人でもできますが、地域のグループで実施すると、より多くの観点からの検討ができます。また、地域に長くお住まいの方から、過去にこの場所でのような災害があったかをお聞きすることも効果的です。地域の災害時の危険性が調査できたら、その内容を地図にまとめてみよう。



南海トラフ地震発生時を想定して、どこでいつ何をやるか書き出している



南海トラフ地震発生時を想定した避難行動をもとに訓練で避難している様子68

## Q52 垂直避難とはどのような避難方法でしょうか？

### 垂直避難しないで被災した例

- 現在、多くの報道で、垂直避難は広く知られるようになってきました。しかし、いろいろな事情で1階がけ側に寝ることになり、被災した事例があります。
- たとえば、引っ越した日に荷物が片付かず、1階がけ側に家族が就寝し、がけ崩れに巻き込まれた例です。また、屋根の雨音がうるさいということで1階がけ側に寝た方が被災した例もあります。

### 垂直避難で助かった例

- 2018年西日本豪雨の際、愛媛県の民家ではため池の決壊で沢が増水して避難所に向かう道を閉ざされ、隣接する民家に水平避難しましたが、そこで小規模ながけ崩れが発生したため、再度自宅の一番安全と思われる頑丈な土蔵の2階に垂直避難し、一夜を過ごして助かりました。
- 「沢渡には家を建てるな(沢をまたいで家を建ててはいけない)」というまぐらの言い伝えを守って、自宅は被災しませんでした。
- 2019年東日本台風の際、福島県の川沿いの民家に土砂が流入しましたが、その民家に集まっていた多くの方が2階に垂直避難して助かりました(上図)。また、隣接する民家の住人は事前に集会所に水平避難して助かっていました(下図)。
- 早めの水平避難や状況に応じた垂直避難の大切さが伺えます。



避難が滞れたが2階に垂直避難して助かった民家



事前に水平避難した近くの安全な高台の集会所

69

## Q53 知っておきたいサービス、ウェブサイトは何がありますか？

### アプリ①: Yahoo!防災速報(ヤフー株式会社)

<https://emq.yahoo.co.jp/>

- ヤフージャパンが提供するアプリです。緊急地震速報や豪雨予報など、様々な災害情報をプッシュ通知でお知らせしてくれます。
- 2021年から「防災手帳」機能も追加されました。旅行中や移動中でも現在地の災害情報をお知らせしてくれます。



[https://www3.nhk.or.jp/news/news\\_bousai\\_app/index.html](https://www3.nhk.or.jp/news/news_bousai_app/index.html)より

### アプリ②: NHKニュース・防災(NHK)

[https://www3.nhk.or.jp/news/news\\_bousai\\_app/index.html](https://www3.nhk.or.jp/news/news_bousai_app/index.html)

- NHKが提供するアプリです。最新ニュースや災害情報をプッシュ通知でお知らせします。地震や大雨、台風のときに、NHKでは災害情報などを放送しています。
- このアプリでは、災害時に停電した際や野外に避難した際でもNHKのテレビ放送をアプリで見ることが出来ます。

## Q54 個人としての対策方法がありますか？

- 個人としての土砂災害対策は、「避難」することが第一です。土砂災害はとても強大な自然の脅威です。個人で立ち向かっていくことはとてもできません。
- 「逃げればいいのか、簡単だ」と思いましたか？それでは質問です。
- 土砂災害から避難するタイミングはいつですか？
- どこから土砂災害が発生しますか？
- どこへ、どのように避難しますか？



令和2年7月豪雨時の熊本県球磨川沿いの災害イメージ図

71

## Q54 個人としての対策方法がありますか？

### 土砂災害から避難するタイミングはいつですか？

- 土砂災害の危険が迫っている情報を見聞きした時や、前兆現象を感じたときに避難するタイミングです(がけ崩れの前兆: Q15、土石流の前兆: Q18、地すべりの前兆: Q24、前兆現象を知るための方法: Q38も再確認しておきましょう)。
- 土砂災害を引き起こす大雨の状況や地震などの情報を、ウェブサイトやスマートフォンのアプリなどを利用して確認してください(Q53)。土砂災害警戒情報(Q49)にも注意してください。
- あなたの生活圏で予想される災害に対して、マイ・タイムライン(自身の避難計画: Q51)を作成しておき、「自分、家族の避難するタイミング」を事前に考えておきましょう。「避難スイッチ」を入れるのは自分しかいません。「早めの避難」を心掛けてください。「避難」に失敗はありません。避難して何も起きないことが成功です。



土石流の前兆現象(Q18)「開東地方宮崎県川平より」

72



## Q54 個人としての対策方法がありますか？

### どこから土砂災害が発生しますか？

- ハザードマップや土砂災害警戒区域などの情報を利用して、どこに土砂災害の危険が潜んでいるのか(Q46, 47, 48), 土砂災害を引き起こしやすい地形や地質を事前に把握しておきましょう。
- 土砂災害の種類やそれぞれの特徴を事前に把握しておくことは、適確な避難判断につながります。ぜひ本書をきっかりに、土砂災害の発生について学んでください。
- 過去に土砂災害が発生した場所を知ることでも重要です(Q39)。過去に災害が発生した場所や地域は、繰り返し同じような災害が発生する可能性が高くなります。ただし、近年、雨の降り方が変わってきていますので、過去には経験したことのないような災害が発生することも考慮してください。



ハザードマップを利用した避難場所、経路の確認方法(Q46)

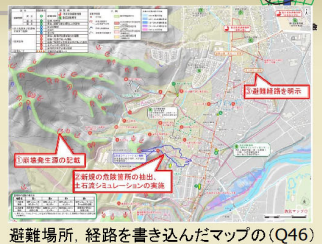


自然災害伝承碑の記号と表示例(Q39)  
(出典:地理院地図)

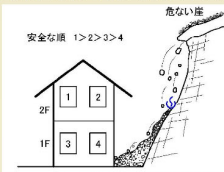
## Q54 個人としての対策方法がありますか？

### どこへ、どのように避難しますか？

- ハザードマップなどを利用して、避難場所や避難経路を確認し(Q46)、マイタイムライン(自身の避難計画:Q51)を作成しておきましょう。
- 避難する場所は、指定されている避難所だけではなく、とにかく「安全な場所」へ避難してください。その時の状況に応じて、避難場所は刻々と変化します。
- 特に夜間に突然の豪雨となった時には、事前の避難は難しいかもしれませんが、気がついたときには、自宅から逃げるのが難しい状況にあるかもしれません。そのようなときは、次善策として「垂直避難」(Q52)を思い出してください。また、土砂災害の知識を活用し少しでも「安全な避難場所」を見つけてください。たった1mの違いで、土砂災害から身を守ることができるかも知れません。
- 土砂災害に対する対策方法は、常に同じものではなく、明確な答えもありません。ぜひ、日ごろから土砂災害に対する意識を高め、自分なりの対策方法を見つけてください。



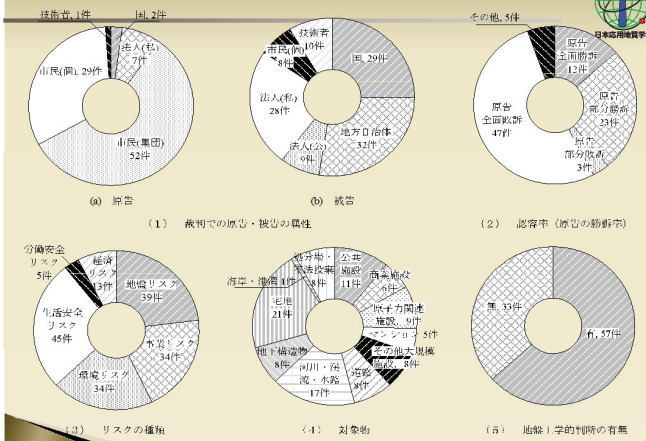
避難場所、経路を書き込んだマップの(Q46)



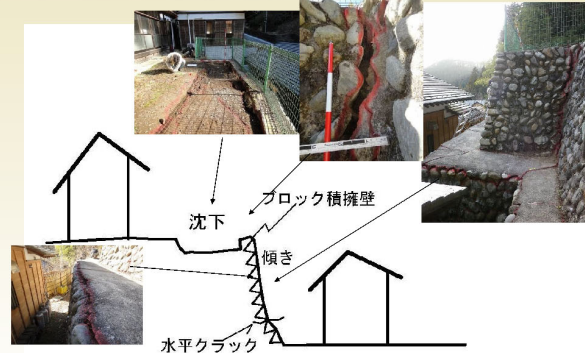
垂直避難の概念(Q52)

74

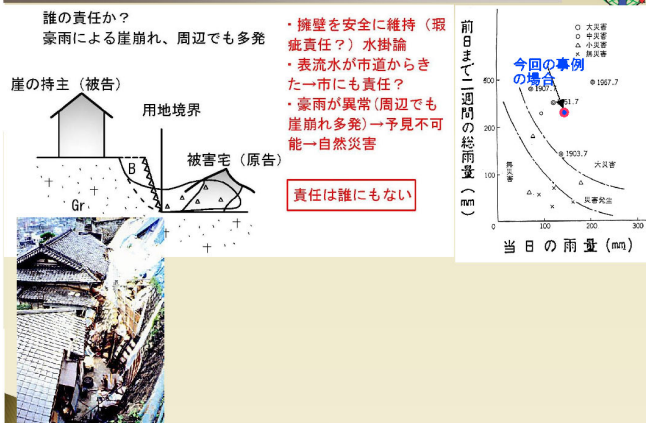
## 2005-2009年間の全国での地盤に係わる訴訟の傾向



## 住民が建設業者を訴える



## 崖崩れの訴訟で対策する

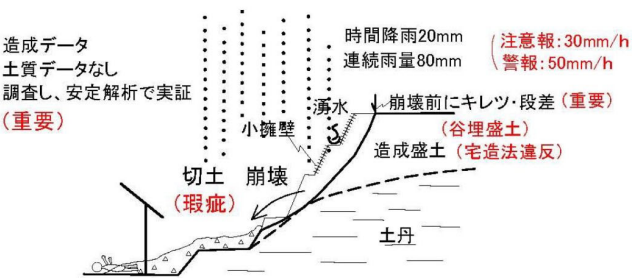


## 崖上と崖下の住民が崖の所有者を崖管理の瑕疵を求めて訴えた



## 地盤調査をして鑑定書を書き、摘発

刑事訴訟の場合



## Q55 土砂災害の多い日本で暮らす工夫は何ですか？

- 土砂災害の疑問の最後は「土砂災害の多い日本で暮らす工夫」です。ここまで多くの疑問に答えてきました。それを守っていただければよいのですが、そのコツをおさらいします。
- 日本の風景は美しく、自然豊かに感じます。それは、災害の原因となる地球の変動帯の最も激しいところに位置しているため、多様な地形と地質があるからです。つまり、厳しい災害と多様な自然環境は裏腹です(下図)。
- それは日本に住む我々の宿命といえます。いかに自然環境を享受しながら、災害による負の現象を軽減していくかのコツがいります。

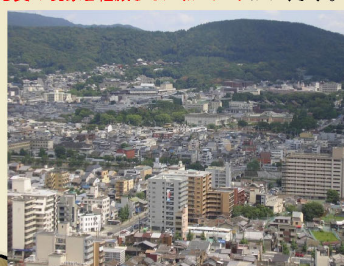


写真55-1 京都東山は自然と都市が共生した街並ですが、自然災害を起こす活断層が位置します

80



## Q55 土砂災害の多い日本で暮らす工夫は何ですか？

### 防災知識を身につけよう

- 災害から自分たちの身や財産を守るには、防災に関する知識が必要です。特に**土砂災害からこれらを守るためには、地学の知識が重要**です。近年の学校教育では、理科の勉強で地学を学ぶことが極端に減りました。
- 地学は、宇宙や地球の歴史を学ぶだけでなく、**地質災害や土砂災害から身や財産を守る科目**でもあります。是非、本事を傍らに置きながら、中学校の地学の教科書を読み直してみてください。



地学の教科書の例

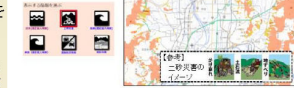
(左：数研出版、右：清水書店)※図は、同書とも出版者HPより

### 事前の準備が重要です

- 地学や防災に関する知識があれば、事前の準備をすることができます(Q41)。今、住んでいるところのような土砂災害のリスクがあるのか、リスクがあまりにも大きければ、新しい安全な住まいを見つけることもできます。
- ただ、まったくリスクがない住まいはないので、災害が起こる前に対策工事などのハード対策をしたり、災害時にすぐに避難できるように準備しておくなどのソフト対策も大事です。

#### ●土砂災害の危険がある場所

「土砂災害」のアイコンをクリック



土砂災害の危険性の確認イメージ(Q41)

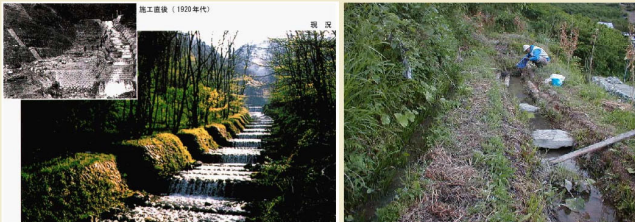
(ハザードマップポータルサイトより)

81

## Q55 土砂災害の多い日本で暮らす工夫は何ですか？

### 防災と環境の共生を進めよう

- 防災工事と環境保全は相反する考えと思われがちですが、うまく共生することは可能です。
- 江戸時代後期(1860年～)以降の乱伐と森林火災により、**はげ山と化した牛伏川流域は、フランス式階段工により緑豊かな溪谷に生まれ変わりました(左図)**。
- 四国の地すべり地では、**地すべりの動きを抑えながら、多様な生態系を生かせるビオトープ池を作る活動**が見られます(右図)。



フランス式階段工(長野県 牛伏川)  
\*国土交通省HPより

地すべり内の多様な生物を守るビオトープ活動

83

## Q55 土砂災害の多い日本で暮らす工夫は何ですか？

### ハード対策を味方につけよう

- 土砂災害を防止する法律に基づいて、**多数のよう壁や砂防えん堤などのハード対策が行われ、多くの土砂災害が防止されてきました**。
- このため、危険を感じる斜面や谷がある場合には、**国や地方自治体などに、ハード対策してもらう相談や申請をお勧めします**。
- 個人で危険な駆けつけを行う場合に、**地方自治体はその費用を助成しているところもあります**ので、その制度を利用することも有効です。



### ソフト対応を身につけよう

- 国や地方自治体、個人の予算には限りがあるため、防災施設を新たに作ることは容易ではありません。
- このため、**個人で行う土砂災害への対応はソフト対応が中心になります**。まず、自分の住まい周辺の**土砂災害ハザードマップを確認**してください。谷の出口やがけ、地すべりが近くにありませんか？
- あれば、危険性が高く、豪雨時にはうまく避難できないことが多いので、**早めの避難が必要**です。また、避難所までの道筋に危険がないかも確かめてください。

#### 土砂災害のハード対策の例

(国土交通省 神通川水系砂防事務所HPより)



土砂災害のソフト対策の例

(神奈川県HPより)

82

## ご清聴、ありがとうございます。



富士山



エベレスト

84



# 一般講演(研究発表会)

16:00～17:00 (発表 10 分/質疑 5 分)

|                                                                                                                                                                                  | 頁 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1. 応用地質学的視点からの地盤評価手法の確立と地盤の 3 次元可視化・評価の必要性<br>村橋吉晴 (村橋技術士事務所)                                                                                                                    | 1 |
| 2. 細菌叢解析を用いた地下水質の特徴と流動検討への取り組み<br>改田行司・和田茂樹・原大輔・綿谷博之・万木純一郎・畠中与一・森啓悟<br>(株) 建設技術研究所                                                                                               | 3 |
| 3. バイヨン寺院(アンコールトム)直下の比抵抗断面と地下構造 (3)<br>中川康一(大阪公立大学)・岩崎好規(地域地盤環境研究所)・房前友章(セウテック)<br>山田俊亮(安田女子大学)・下田一太(筑波大学)・福田光治(大成ジオテック)<br>原口強(大阪公立大学)・石塚充雅(早稲田大学JASA)・中川武(早稲田大学)<br>小山倫史(関西大学) | 5 |
| 4. 東京外環シールド陥没事故から学ぶ<br>岩崎好規 ((一財) 地域地盤環境研究所)                                                                                                                                     | 9 |
| 5. 質疑応答                                                                                                                                                                          |   |
| 6. その他 (委員会報告)                                                                                                                                                                   |   |



# 応用地質学的視点からの地盤評価手法の確立と地盤の3次元可視化・評価の必要性

村橋技術士事務所・村橋 吉晴

(日本応用地質学会名誉会員)

## はじめに

まずは、個人的事情で恐縮ですが、昨年6月に日本応用地質学会名誉会員証(第百十二号)を拝受致しました。ここに私の本学会名誉会員証受証に関わって下さったすべての方々に心からお礼申し上げます。

さて、応力の載荷～除荷後の対象地盤の変形挙動を詳細に予測するためには、その地盤の地質構造と工学的特性を正しく評価し、できるだけ正確なモデル化を行うことが必須の条件である。そのために、それぞれの特徴をいかした複数の探査技術を併用する“複合探査<sup>(3)～(5)</sup>”を用いて地盤を可視化<sup>(2)～(5)</sup>し、地質構造を正確に把握するとともに、その地盤の工学的特性を正しく評価すること<sup>1)</sup>が肝要となる。筆者は数十年にわたりこうした地山の可視化と地山評価について調査・研究を継続してきた<sup>(2)～(5)</sup>。その結果、数値シミュレーション結果を併用し、解析結果を正しく解釈することや予め想定される地質・地盤リスク<sup>1)</sup>への対策を検討する上で、改めて応用地質学者の知見と判断力が必須であるという結論に至った。

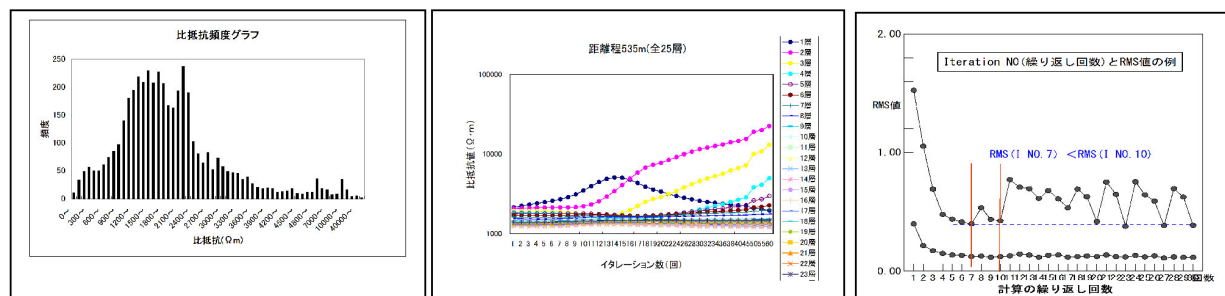
(key word: 複合探査, 地盤の可視化と地山評価, after phase の取得と波形解析, 三次元探査と解析)

## 1. 応用地質学的視点による地盤の可視化とモデル化の重要性

昨今、PCの容量の拡大と小型化、デジタル探査機の分解能の向上などにより、原位置での比抵抗～弾性波速度探査等による地盤のデジタル情報の取得が盛んにおこなわれるようになり、その結果、大量のデジタル地盤情報の取得が可能となっている。これらの観測データを用い、個々に開発されたインバージョン解析手法を用いて、地盤の地質構造図が比較的容易に作成されるようになってきている<sup>(2)～(5)</sup>。このインバージョン解析を行う際に作成される“初期モデル”が、最終的に導き出された解析断面図に大きな影響を与えるので、初期モデルをできるだけ正確に作成することが大切となる。そのためには、既存文献<sup>1)</sup>に及ばず、周辺の地表踏査結果等を加え、それらを地質学者を中心に総括～評価し、可能な限り現実に沿う、地質学にかなう初期モデルを作成することが肝要である。

## 2. 解析の過程での頻度グラフやIteration NO(繰り返し回数)の決定の際の注目点

一般に比抵抗の解析においては、解析によって予め決められたメッシュに比抵抗値が与えられ、比抵抗のコンター図が作成され、比抵抗断面図が作られる。解析結果による比抵抗の範囲は通常数千から数万におよび、かつ比抵抗値の頻度も異なる。頻度の中央値に近い範囲に注目したコンター図と頻度の少ない値(一般にはメッシュ境界に集中することが多い)まですべてを含んだコンター図では、解析断面図が大きく異なることが多い。最終的には経験豊富な技術者の総合評価を待つことになるが、比抵抗頻度グラフを十分に分析し、数ケースのシミュレーションを行い、想定される原位置の地質構造に近い結果を導き出すことが肝要である。また、インバージョン解析においては、複数回繰り返し計算を行い、予め設定された収束値(RMS 値)に収まったと解析者が判断した時点で計算を終了するのが通常の方法のようである。



頻度グラフの例

I NO の例(比抵抗解析)

I NO の例(弾性波速度解析)

図-1 比抵抗解析での頻度グラフ及び比抵抗解析及び速度解析での I NO<sup>6)</sup>

一般にはこの繰り返し回数(I NO)を大きくするほど計算精度が向上すると思われるが、計算手法によってはI NOが6～7を超えると逆に発散傾向に転じることもあるようで、I NOと収束状況をよく注視しながら終了の判断を下す必要がある。計算の終了の判断には、地質学的視点からの、現実により得る構造であるか否



かの評価を加えることが重要である。

### 3. 観測記録の after phase に含まれる地盤情報の取得の重要性

通常の屈折法弾性波探査では屈折P波の“初動”に着目されるので、同初動から後の記録はサチュレイトさせ、利用しないのが一般的で、地盤情報としては初動による情報のみである。しかし after phase にはS波の情報や反射波の情報が含まれており、技術的に波形解析<sup>7),8)</sup>が可能であれば利用することが望ましい。S波情報が取得できれば地盤のせん断特性の評価が可能になり、高土被り圧を受けた飽和状態の破碎性頁岩質岩盤(付加体中のメランジュ層など)の工学的特性の事前の想定が可能になるとか(通常の屈折法によるP波速度は高土被り圧の影響を受けて高い速度と判定されることが大半で、速度値から破碎性の割目が発達して脆弱性を有すると認識することが困難)、或いは反射構造の検出により、屈折法では認識が困難な下位の低速度層を把握することも可能となる。このためには、新たに遠方まで届く振源や、観測記録上に屈折波の初動とともに after phase が取得可能な探査機の開発～実用化が必須である。近い将来での実用化が望まれる。

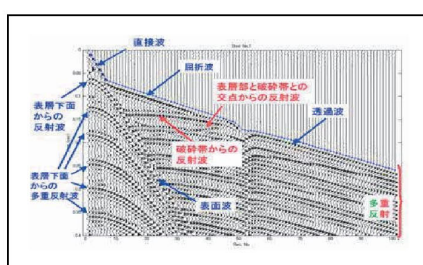


図-2 波形シミュレーション図<sup>4)</sup>

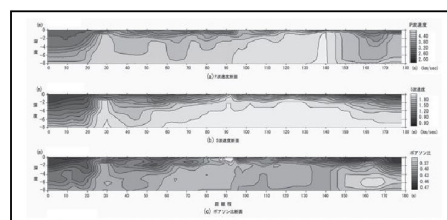


図-3 速度分布図とポアソン比分布図<sup>4)</sup>

上段:P波, 中段:S波, 下段:ポアソン比

ポアソン比  $\gamma = (k-2) / (2(k-1))$ , ( $k = (V_p/V_s)^2$ )

if  $k=3$ ,  $\gamma=1/4(0.25)$ ,  $k=4$ ,  $\gamma=1/3(0.33)$

### 4. 3次元探査～解析による地盤の構造評価の重要性

通常の地盤は不均質で、3次元構造であることが一般的である。またトンネルなど線状構造物等においては観測線直下の鉛直面上に地質構造図が作成されるが、同鉛直面を中心にその左右の地質構造が対象であることはほぼ皆無といってよい。このような地盤条件のもとで実施された比抵抗～弾性波探査を主とする地質調査では、観測線直下の鉛直面の左右の地盤の影響を受けると想定する必要がある。従って、同鉛直面上に表示された“比抵抗断面図～弾性波速度層断面図”が真の構造を反映しているとは言い難いケースに直面することが多くあり、結果として工事に“乖離”が生じ、施工計画が大きく変更されることになる。こうした“リスク”は極力避けるべきであり、そのためには3次元での探査・解析が必須となる。しかし、時間～経済性～用地条件等越えなければならない高いハードルがいくつも存在し、現状では実現性は低い。近い将来、3次元が一般的とするために、土木・建設事業に携わるすべての人の理解とご協力が望まれる。

#### 参考文献

- 1) (国法) 土木研究所編(2020), 地質・地盤リスクメントのガイドライン
- 2) (社) 土木学会関西支部(1997), 比抵抗高密度探査に基づく地盤評価, 土木学会関西支部平成9年度講習・研究会テキスト
- 3) (財) 災害科学研究所トンネル調査研究会編(2001), 地盤の可視化と探査技術, 鹿島出版会
- 4) (社) 土木学会関西支部(2005), 地盤の可視化とその評価法, 土木学会関西支部, H17講習会テキスト
- 5) (財) 災害科学研究所トンネル調査研究会編(2009), 地盤の可視化技術と評価法, 鹿島出版会
- 6) 鈴木 徹, 村橋 吉晴(2022), 未発表資料
- 7) 7) (国法) 防災科学研究所編, 三次元地震波解析ソフト「GMS」
- 8) John. W. STOCKWELL, Jr. Jack K Cohen(2008), 訳: 渡辺 俊樹(2015), 新SU ユーザーズ・マニュアル version 4.0, Colorado School of Mine



# 細菌叢解析を用いた地下水質の特徴と流動検討への取り組み

○改田行司、和田茂樹、原大輔、綿谷博之、万木純一郎、畠中与一、森啓悟  
(株式会社 建設技術研究所)

## 1. はじめに

工事による地下水影響を検討する際において、地下水流動検討は必要不可欠であり、一般的には地形による流域区分、地質構造、水質分類を指標として検討する。このうち、水質分類の手法として主流である主要イオン分析は、同一地質、隣接流域では類似した傾向を示し、地下水流動の区分が難しいことが多い。そこで近年、水質分類の新たな手法として、地下水流動と環境 DNA の関係性が注目されている。

細菌叢解析とは、対象とするサンプル中に含まれる環境 DNA を網羅的に分析し、どのような細菌がどれくらい存在しているのか(細菌のまとまり＝細菌叢)を明らかにする手法であり、地点毎の菌叢構造の比較や、特異的に存在する細菌を指標(トレーサー)とすることにより、地下水流動検討としての発展が期待されている。

本稿では、トンネル工事が予定されている周辺の利用水源や河川について、採取した水質に含まれる細菌叢解析を行うことで、地下水質の特徴及び流動検討に取り組んだ事例を紹介する。

## 2. 調査概要

### 2.1 調査目的

トンネル工事による渇水・減水の可能性を検討する上で、各利用水源の起源を探索することは重要であることから、今回主要イオン分析および細菌叢解析を実施し、詳細な地下水流動の検討にアプローチした。

### 2.2 当該地域の概要と水利用状況

当該地における利用水源の分布を図-1 に示す。周辺地質は花崗閃緑岩を基盤とし、土石流堆積物・段丘堆積物が覆っている。

周辺では湧水 4 箇所(S-1～S-4)、井戸 3 箇所(W-1～W-3)の利用水源が確認されている。S-1 および S-2 は沢源頭部の湧水、S-3 および S-4 は土石流堆積物末端部の湧水である。井戸はいずれも土石流堆積物中腹～末端部および段丘堆積物に位置する。

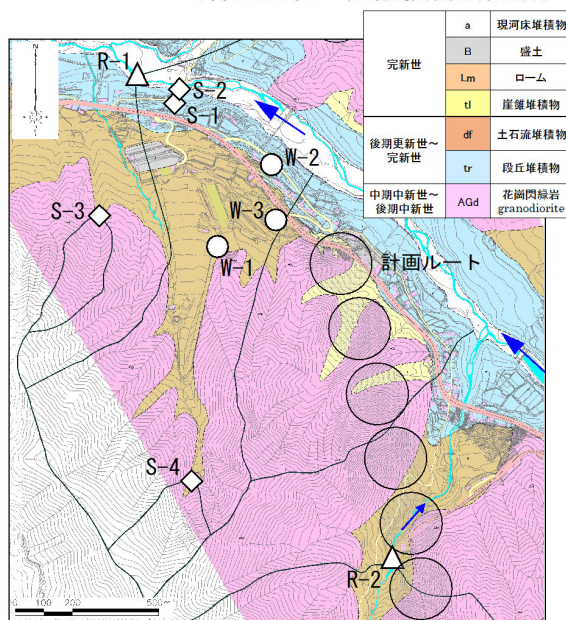


図-1 当該地における水源位置図

### 2.3 調査方法

図-1 に示す利用水源および周辺河川において採水(1L×2 試料)し、細菌叢解析及び主要イオン分析にそれぞれ供した。細菌叢解析用試料には、DNA の分解を抑制するオスバン液を添加した。

細菌叢解析の方法として、細菌がもつ 16SrRNA 遺伝子を PCR にて増幅し、次世代シーケンサーで解析し、サンプルに含まれる細菌の種類や分布を網羅的に解析する。環境調査では河川水の DNA 分析により河川に生息する生物種を特定することなどに利用されているが、地下水中の DNA は土壌フィルター効果の影響を受けるなど測定結果の解釈が難しい傾向がある。



図-2 環境 DNA 測定概念図

(引用: ㈱環境総合リサーチ HP)



### 3. 調査結果

#### 3.1 主要イオン分析

図-3 のヘキサダイアグラムから、殆どの地点で炭酸カルシウム型であり、一般的な河川水～浅い地下水タイプを呈する。概ね類似した水質分類を示し、主要イオン分析からは地下水流動の詳細な区分が困難な結果となっている。

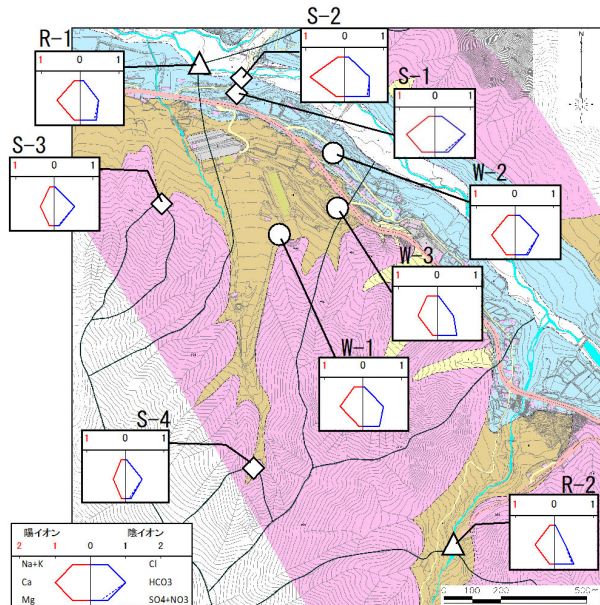


図-3 水源位置と主成分分析結果

#### 3.2 細菌叢解析

検出された細菌の門レベルにおける相対存在量を図-4 に示す。湧水 S-3 及び S-4 において *Nitrospirota* 門-*Leptospirillum* 属 (2 価鉄イオンを唯一のエネルギー源とする鉄酸化細菌) が突出して多く、地下水流動の指標として期待された。しかしながら、同流域下流側の S-1、S-2、W-1、W-2 における検出量は僅かであり、地下水流動の過程において 2 価鉄イオンが還元された結果、*Leptospirillum* 属にとって好ましくない生息環境へと変化したものと推測される。

今後、細菌叢解析と鉄イオン濃度分析を併せて実施し、*Leptospirillum* 属の検出量と鉄イオン濃度の関連性が明らかとなれば、地下水流動の 1 つの指標となり得る可能性がある。

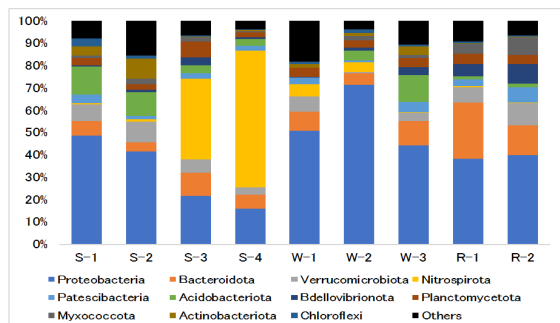


図-4 検出された細菌の相対存在量 (Top11 門)

一方で図-5 は、河川 R-1 で検出される細菌が河川近傍の井戸 W-2 及び W-3 にどの程度含まれるのか比較したものである。このうち、R-1 で 4 番目に多い *Rhodoferrax* 属は、水辺で光を栄養源に生育する細菌であり、通常は地下水には存在し難いと言われている。ただし、有光条件下では嫌氣的に、無光条件下では好氣的に生育できる通性光従属栄養という性質を有しており、地下水でも生育できると考えられている。

河川に多く生育する *Rhodoferrax* 属が河川近傍の井戸でも確認されたことは、河川水の地下水への混入の可能性を示唆するものである。

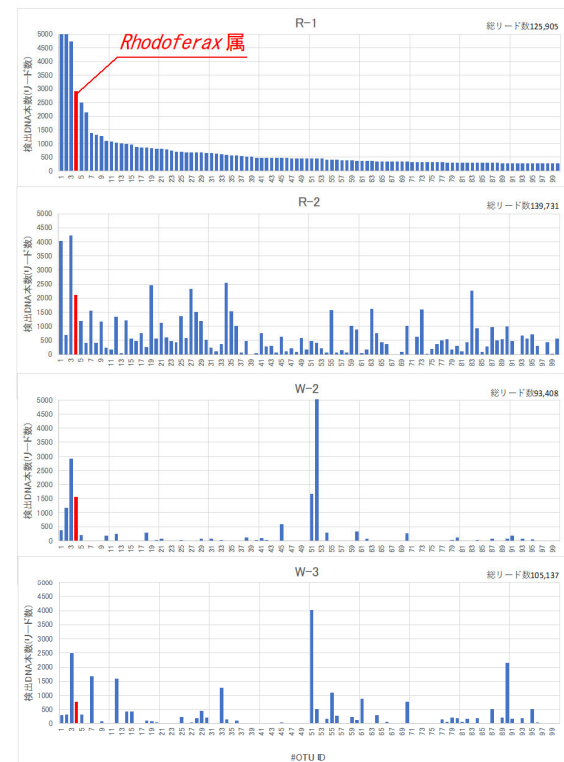


図-5 環境 DNA 測定結果

(横軸は DNA 塩基配列の違いによる区分。R-1 で検出された DNA のリード数が多い順に並べ替え、上位 100 位を表示。)

### 4. まとめ

今回実施した取り組みでは、細菌叢内に存在する特徴的な細菌に着目することで、地下水流動の検討にある程度適用できる可能性が示された。しかし現状の課題として、どの細菌が地下水流動の指標となり得るか不明な点が多い。

今後、同様の細菌叢解析が数多く実施され、知見が更に蓄積された後には、細菌叢解析は有用な地下水流動検討のツールとなると期待される。



## バイヨン寺院(アンコールトム)直下の比抵抗断面と地下構造 (3)

中川康一(大阪公立大学)・岩崎好規(地域地盤環境研究所)・房前友章(セウテック)・山田俊亮(安田女子大学)・下田一太(筑波大学)・福田光治(大成ジオテック)・原口 強(大阪公立大学)・石塚充雅(早稲田大学 JASA)・中川 武(早稲田大学)・小山倫史(関西大学)

### 1. はじめに

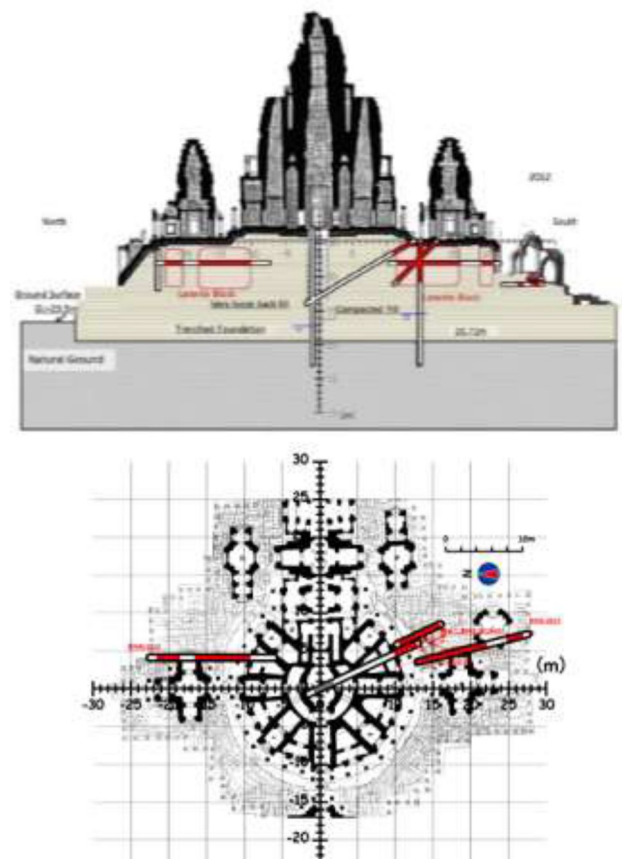
アンコール遺跡群はカンボジア北西部にあり、ユネスコの世界文化遺産に登録されている。その北西部のアンコールトムに位置するバイヨン寺院は最も代表的なものの一つである。中央塔(祠堂)および副塔の4面に彫られている人面像は非常に特徴的で、既述の首飾像と並び、その特徴(第1図)。JSA (Japanese Government Team for Safeguarding Angkor)は、長らくアンコールトム遺跡の修復と その保全に関して様々な調査研究を行ってきた。広域的な地質学的地下構造に関する調査は、JSA が 1994-1995 年にかけて実施した深度約 100m に達する数本の地質ボーリングによってその概要が判明したが、地表から約 40m ま

で第四系の砂質シルト系の土質である。その後、10 孔におよぶボーリング掘削が行われて、基壇の盛土構成の概要が明らかになってきた (Iwasaki et al., 2013)。

自然地盤(沖積層)上に突き固めた土層(版築土層)やラテライト層が分布し、その上を砂岩からなる石畳が敷設されている。フアワイトは東南アジア独特の特徴的気候の下で生成されたとみられ、



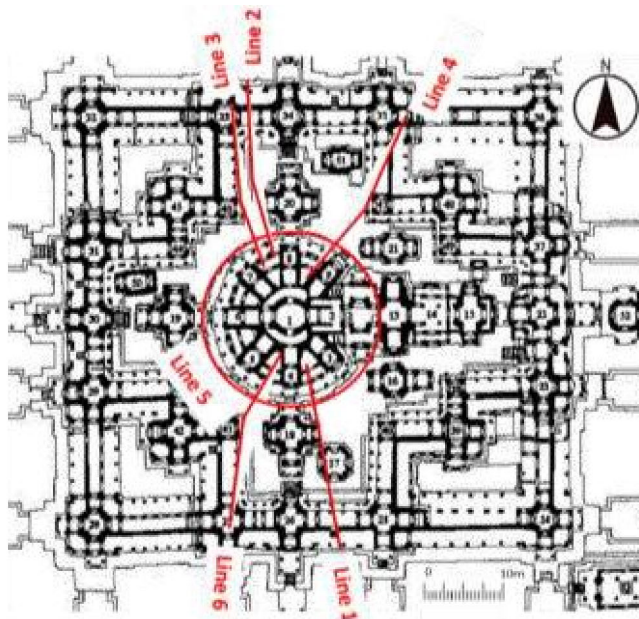
第1図 バイヨン寺院中央塔の南方からの眺望



第2図 中央塔および副塔の南北断面(上)と平面図。鉛直、水平および斜交ボーリングによる柱状図も示す。ラテライトの部分は塗りつぶされている。



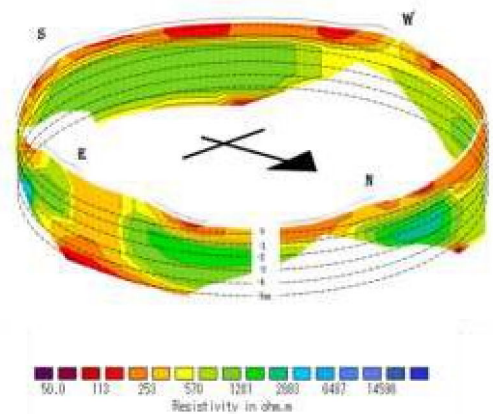
強度が高いため建設石材として利用価値がある。  
電気探査とボーリング調査との対比から、強度がより大きなラテライト層は高比抵抗を示し、中央塔の周辺に分布しているらしいことが推測された(第 2 図参照)。



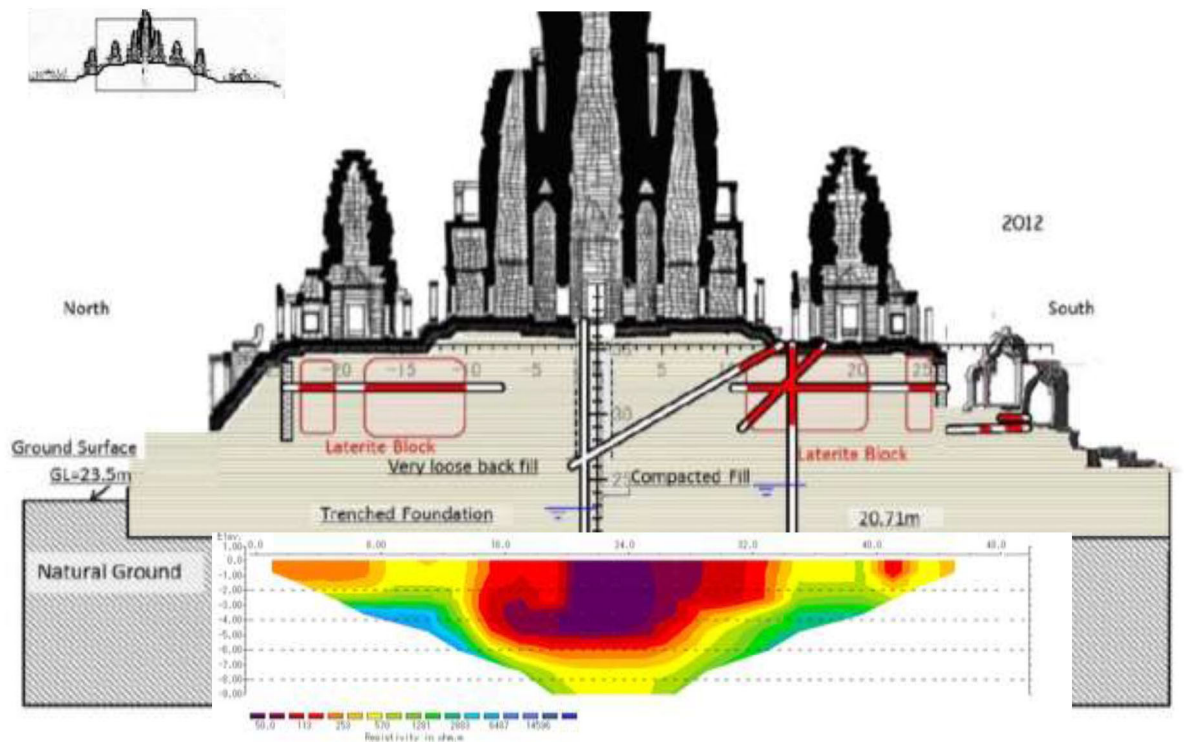
第 3 図 電気探査 (2014) の測線配置図

## 2. 電気探査と比抵抗分布

巨大石塔群の修復と安定性を考慮する上で、支持層としてのラテライト層の存在が重要なポイントとなるため、その分布や性状を明らかにすることが大きな目的となった。



第 4 図. 中央塔を取り巻く通路上測線の比抵抗断面(鳥瞰図)



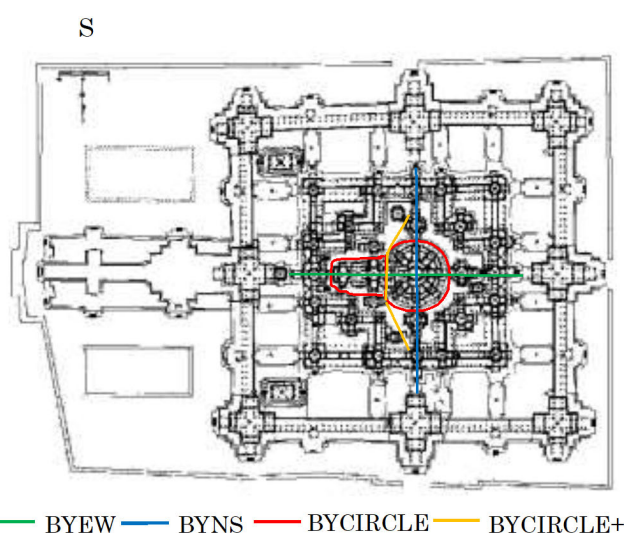
第 5 図 ボーリング調査によるラテライトの分布の南北断面と南北測線の比抵抗断面



ボーリング調査の結果から、中央塔の周辺にラテライト層がみられることから、測線は中央塔を通る東西・南北測線の他に第 3 図に示されるような円形の測線配置を設定した。

電気探査は4極法を採用し、電極数 24、基本電極間隔を 1.5m とした。計測地点は対象が文化財であるため、非破壊で電極を設置する必要があり、ここでは電極にアルミ箔を用いた。電極の接地抵抗を下げるため、アルミ箔と接地面との間に食塩水で調整した小麦粉ペーストを導電体として利用した。

ラテライトの比抵抗は  $500 \Omega \cdot \text{m}$  前後であり、版築盛土そうより高い。第 4 図に中央塔を取り巻く通



第 6 図 電気探査測線位置

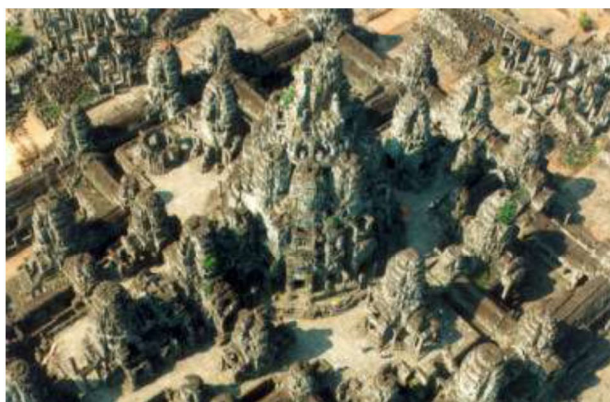
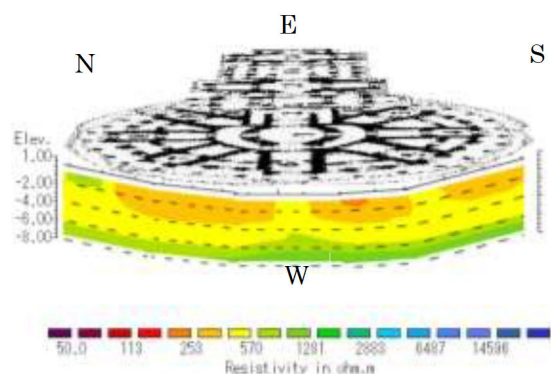
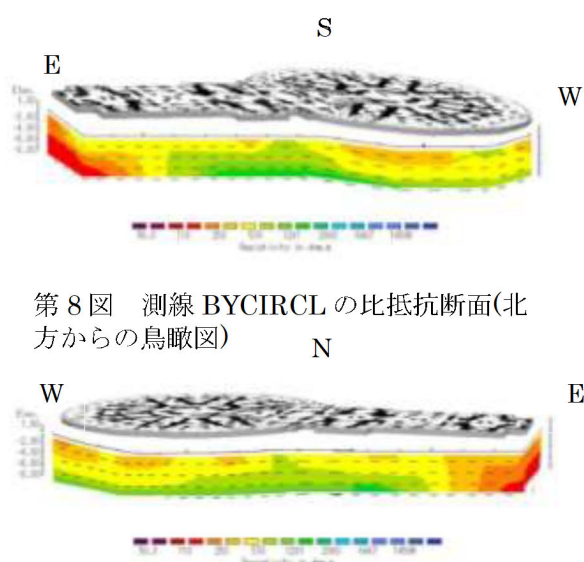


図 10. 北東上空からの中央塔の空撮写真。中央塔と東門を取り囲む鍵穴上の回廊に注目(Jana Visnovcova, et al., 2001 より)。

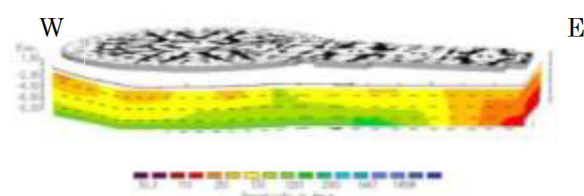
路上の測線の比抵抗分布を円筒断面として示す。この断面を見ると、約 1m 下にほぼ一様に高比抵抗



第 7 図 測線 BYCIRCL の比抵抗断面(西方からの鳥瞰図)



第 8 図 測線 BYCIRCL の比抵抗断面(北方からの鳥瞰図)



第 9 図 測線 BYCIRCL の比抵抗断面(南方からの鳥瞰図)



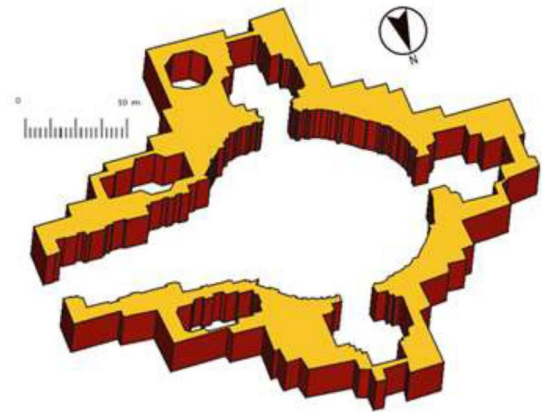
第 11 図 電気探査から推定されたラテライトブロックのイメージ (鳥瞰図)。



抗層があり、これがラテライト層に相当するものとみられる。全体にその厚さが6m 前後と推定され、これはボーリングの結果と整合する。しかし、真東と真西の地点では不連続がみられ、特に東の地点ではそのギャップが非常に大きくなっている。ここではラテライトが欠損している可能性が高い。中央塔の周りは、一応通路になっているが、東のこの地点だけは第3図にみられるように、組石により盛り上がっている。

第5図は地下構造を示す南北断面であるが、中央塔の中心を通る南北測線にはボーリング資料はないため、直接の比較はできない。この測線の中央部には極端に低い低比抵抗部が存在するが、そこに仏像を安置した大きな掘削坑があり、緩い土により埋め戻された場所である。

ボーリングの調査から、当初ラテライト層は中央塔を取り巻くようなドーナツ状の形をしていると推定されたが、第4図に示されたように、必ずしもドーナツ状ではないとの疑問が残るため、第6図に示されるような測線による探査を実施した。円測線と異なる点は中央塔と東の2つの副塔を囲むような鍵穴状通路上の測線である。得られた結果は図に示されるような比抵抗分布となった。どうやら鍵穴状の通路の真下にはラテライト層が一様に存在しているとみられる。第2図と比較して考えると、



第12図 上部テラス表面の砂岩敷石の分布から推定されたラテライト擁壁の形態。

主塔や副塔の下にはラテライトは存在せず、組石の高まりがない平坦な敷石の下だけに存在していると考えないと矛盾がないことが分かった。したがってそのような条件でラテライト層の形を求めなおすと第12図のようになる。多数の石材を組み合わせた石塔の総重量を直下の版築土層が支持し、側方を拘束することによって鉛直方向の変位のみを許容した自由沈下を念頭に置いた設計思想であると考えられる。

このようなラテライトの擁壁形態は複雑な石塔の建設以前に設計施工されたものであり、非常に緻密な解析が必要であり壮大なロマンを感じさせる。

## 文献

Iwasaki, Y., Fukuda, M., Haraguchi, T., Kitamura, A. Ide, Y., Tokunaga, T. and Mogi, K. (2013): Structure of Platform of Central Tower Based upon Boring Information, JASA 2013 Report, 39p

Jana Visnovcova, Li Zhang, and Armin Gruen (2001): Generating a 3d model of a Bayon Tower using non-metric imagery, Proc. Int. Workshop on Recreating the Past: Visualization & Animation of Cultural Heritage, Ayutthaya, Thailand (in CD)

Nakagawa, K., Shimoda, I., Yamada, S., Kanai, R., Ogawa, Y., Ohta, (Yasuda) Y., Fukuda, M., Jomori, A., Takahashi T. and Iwasaki Y. (2012): Resistivity profiles and foundation structure of Central Tower, Bayon in Angkor, Central Asian Geotechnical Symposium (IVth CAGS), Geoengineering for

construction and conservation of cultural heritage and historical sites, Samarkand, pp333-338, ISBN 9789 94 31 1199 8

中川康一・岩崎好規・房前友章・新谷真人・山田俊亮・下田一太・福田光治・原口 強・中川 武・小山倫史(2015、2017): バイヨン寺院(アンコールトム)直下の比抵抗断面と地下構造(1)、(2), 日本応用地質学会関西支部研究発表会, 25-28、

Sugimoto, Y., Yamada, N., Tokunaga, T., Mohamed, N., Mogi, K., Ohnishi, K. and Iwasaki, Y. (2008): "Geophysical Prospecting Survey at the Bayon Complex" Annual Technical Report on the Survey of Angkor Monument, 2008, Safeguarding of Bayon Temple of Angkor Thom, JASA, published by JSA, Tokyo, pp.96-107



# 東京外環シールド陥没事故から学ぶ

岩崎好規

一財) 地域地盤環境研究所

まえがき

2020年10月に発生したNEXCO 東日本の東京外環トンネル工事、本線トンネル（南行）直径16.1mの大断面シールドの東名北工事の東京都調布市つつじが丘で発生した陥没事故を検討する。シールドは事故地点を地表面下GL-47.4mで通過し、約1月後、地表地盤が陥没した。切羽は陥没地点から100m以上進んでいた。この事故を受けて、有識者委員会が結成され、チャンバー内土の塑性流動化に伴う土圧勾配および排土量についての詳細な議論がされている。

本報告は、上述委員会報告書および参考資料などに基づいて、FEMシミュレーションを中心とし、切羽の安定性という観点から検討を行ったものである。

## 1. 地質地盤状況

東京外環では地形・地質の既存資料を収集整理するとともに、調査間隔を約200m程度を目安としてボーリング調査を実施している。陥没事故付近では、調査緩解は800m程度となっているが、ボーリングによる事前調査による掘削断面における地盤状況は、東久留米層と呼ばれる第四紀洪積世の上総層群東久留米層と呼ばれる非常によく締まった砂層であるが、細粒分が10%以下、均等係数は5以下である。これらの事前調査から、流動化しやすく、自立性に乏しくなる状況であることが予想されていた。

## 2 陥没後の調査で判明したシールド直上部の緩み域

シールド施工前の地盤調査では、シールドが通過する東久留米砂層は、N値  $N \geq 50$  以上の良く締まった砂層地盤であったが、陥没事故後の調査で、陥没事故(Bor ①地点)地点を含むシールド通過直上のN値は  $N \leq 5$  程度にまで小さくなり、地盤の緩みが発生していることが判明した。図・2に示したように、シールド直上部の①点N値が小さくなり緩んでいるが、直交面で直上部から離れた⑥点や⑦点では、 $N \geq 50$  を維持している。

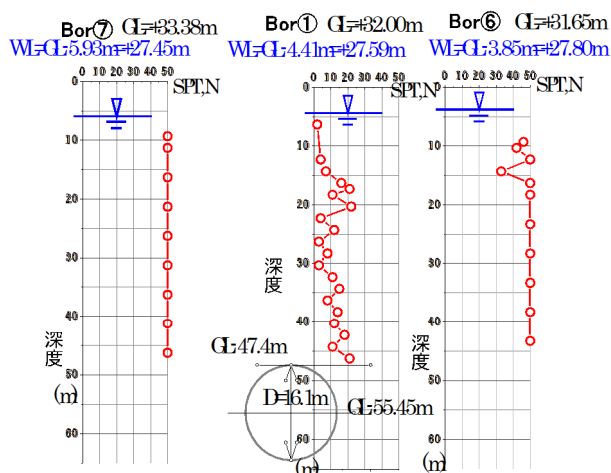


図-1 陥没点シールド直上、シールド外の標準貫入試験値

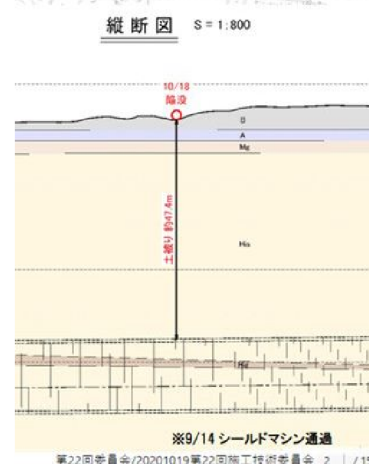
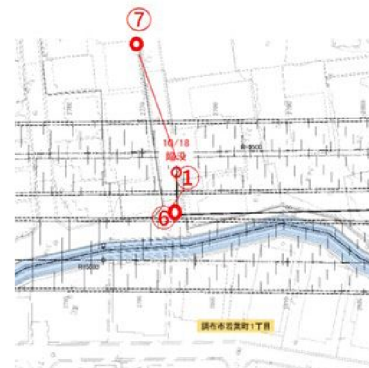


図-2 図-1 に示した調査地点位置

## 2 掘削土の粒度試験結果と切羽土圧管理値

掘削土の粒度試験結果(有識者委員会報告p5-5)を図-1の緩み域図と一緒に図-8に示した。主として砂を主成分としているが、シルト・粘土分の細粒分は、緩みの発生ヶ所と細粒分が10%-5%までに小さくなっている。

チャンバー内土圧の管理値は、図-8の最下部に、上限値、下限値、管理値(有識者委員会報告p5-7)が、チャンバー土圧のリング平均値と共に図示されている。これらの上限値、下限値、管理値をグラフから読み取ると表-1のようになる。上限値260kN/m<sup>2</sup>、下限値400kN/m<sup>2</sup>、および管理値としては220kN/m<sup>2</sup>となっている。

### 内部摩擦角

砂質土の内部摩擦角と N 値の関係は、多く提案されているが、ここでは、畑中(1998)によって提案されている関係を使用する。

N=50 で、あることから、内部摩擦角は、40 度と設定できよう。

### 粘着力

シルトおよび粘土分が、少なくなると、土の粘着力は減少する。10%以下になると、粘着力が、ほぼゼロとなるといわれているが、細粒分含有率を変化させて粘着力の変化を実験的に求めた事例(金(2017))により、図-5以下に示す。

表-1 土圧管理値

|     | 土圧値<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------------------|
| 上限値 | 580                         |
| 管理値 | 520                         |
| 下限値 | 460                         |

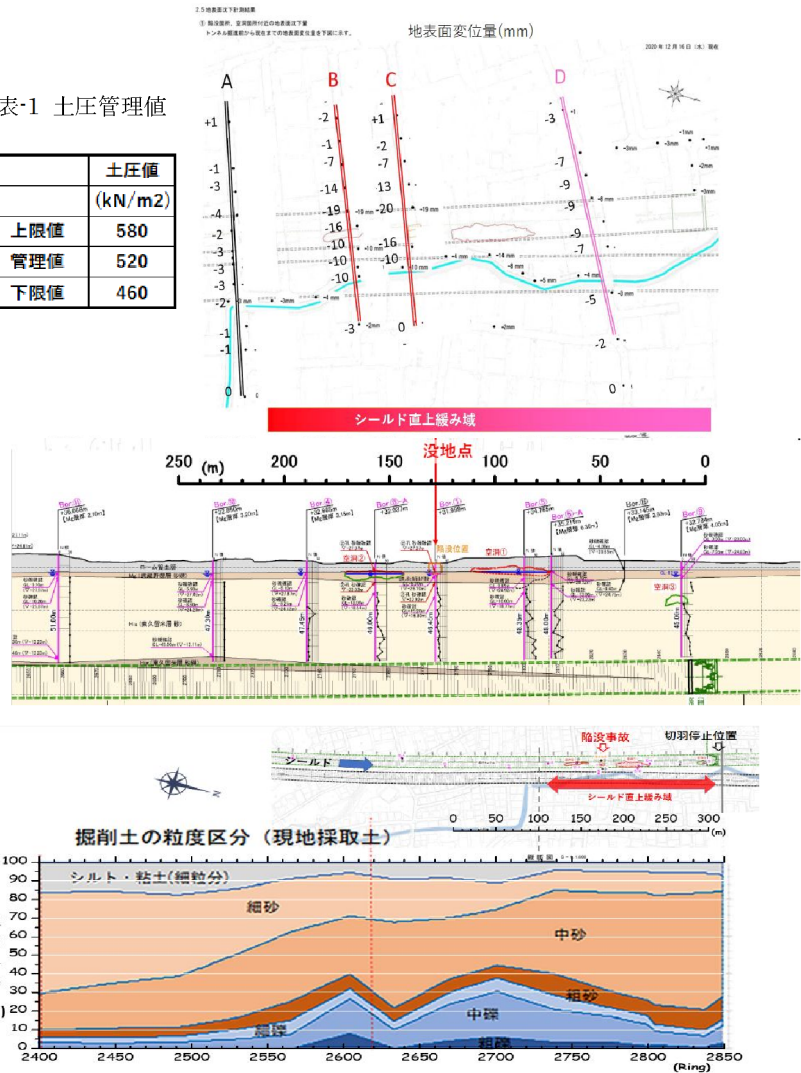
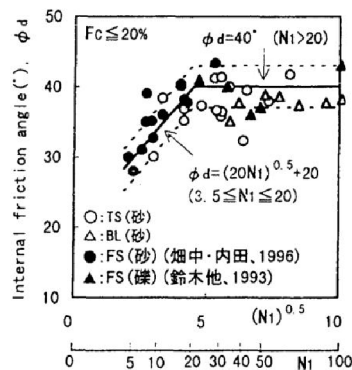


図-3 直上緩み域と粒度組成



N<sub>1</sub> ≥ 3.5における砂質・礫質地盤のφ<sub>d</sub>-N<sub>1</sub>値関係

図-4 標準貫入試験 N 値と内部摩擦角

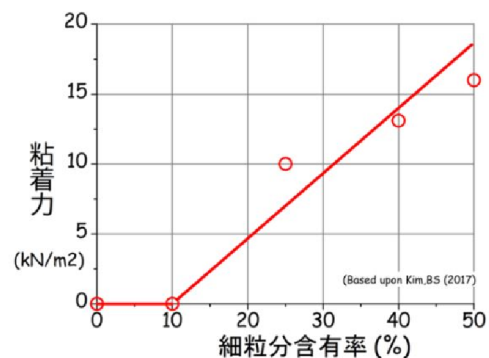


図-5 細粒分含有率と粘着力



### 3 ランキン主働土圧

切羽前面の地盤を2次元応力状態であると単純化し、鉛直土圧を一定とし、水平土圧を小さくしていくと、塑性状態となる。この状態をランキン主働土圧と称する。

内部摩擦角( $\phi$ )、粘着直( $C$ (kN/m<sup>2</sup>))の地盤に対するランキンの主働土圧( $\sigma'_a$ )は、有効鉛直土圧( $\sigma'_v$ )に対して、次のように示される。

$$\sigma'_a = \sigma'_v K_a - 2C (K_a)^{0.5}$$

$K_a$ : ランキンの主働土圧係数  $K_a = \tan^2(45 - \phi/2)$

内部摩擦角  $\phi=40^\circ$ , 粘着力を 100, 50, 100 (kN/m<sup>2</sup>)

とし、切羽に作用する水圧は、表面地下水位 GL-4.2m,

あるいは深層地下水位相当 GL-6.85m であるが、こ

れに対応したランキン主働土圧を表-1 に示した。

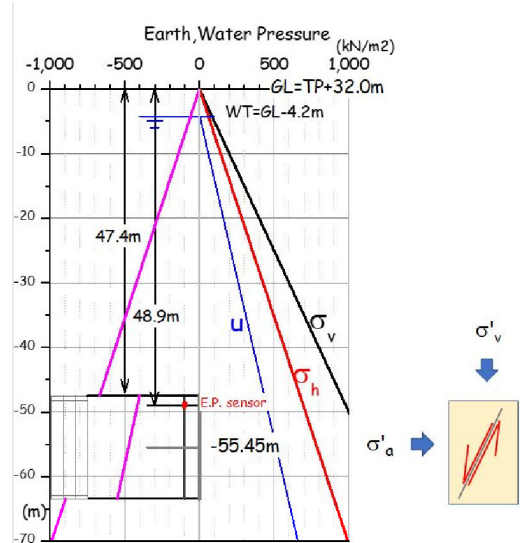


図-6 ランキン主働土圧

表-1 ランキン主働土圧

切羽水圧 地下水位GL-4.20m 相当水圧

| 鉛直応力 間隙水圧   |                      |                      |                      | ランキン主働土圧 (WT=GL-4.20m)            |                      |                                    |                      |                                     |                      |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| WT=GL-4.20m |                      |                      |                      | $\phi=40^\circ, C=0\text{kN/m}^2$ |                      | $\phi=40^\circ, C=50\text{kN/m}^2$ |                      | $\phi=40^\circ, C=100\text{kN/m}^2$ |                      |
|             | 鉛直全土圧                | 間隙水圧                 | 鉛直有効土圧               | 主働有効土圧                            | 主働全土圧                | 主働有効土圧                             | 主働全土圧                | 主働有効土圧                              | 主働全土圧                |
| Depth       | $\sigma_v$           | $u$                  | $\sigma'_v$          | $\sigma'_a$                       | $\sigma'_a + u$      | $\sigma'_a$                        | $\sigma'_a + u$      | $\sigma'_a$                         | $\sigma'_a + u$      |
| GL-(m)      | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> )              | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> )               | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> )                | (kN/m <sup>2</sup> ) |
| (上端) 47.40  | 948.0                | 432.0                | 516.0                | 112.2                             | 544.2                | 65.6                               | 497.6                | 18.9                                | 450.9                |
| (中心) 55.45  | 1,109.0              | 512.5                | 596.5                | 129.7                             | 642.2                | 83.1                               | 595.6                | 36.4                                | 548.9                |
| (下端) 63.50  | 1,270.0              | 593.0                | 677.0                | 147.2                             | 740.2                | 100.6                              | 693.6                | 53.9                                | 646.9                |

切羽水圧 地下水位GL-6.85m 相当水圧

| 鉛直応力 間隙水圧   |                      |                      |                      | ランキン主働土圧 (WT=GL-6.85m)            |                      |                                    |                      |                                     |                      |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| WT=GL-6.85m |                      |                      |                      | $\phi=40^\circ, C=0\text{kN/m}^2$ |                      | $\phi=40^\circ, C=50\text{kN/m}^2$ |                      | $\phi=40^\circ, C=100\text{kN/m}^2$ |                      |
|             | 鉛直全土圧                | 間隙水圧                 | 鉛直有効土圧               | 主働有効土圧                            | 主働全土圧                | 主働有効土圧                             | 主働全土圧                | 主働有効土圧                              | 主働全土圧                |
| Depth       | $\sigma_v$           | $u$                  | $\sigma'_v$          | $\sigma'_a$                       | $\sigma'_a + u$      | $\sigma'_a$                        | $\sigma'_a + u$      | $\sigma'_a$                         | $\sigma'_a + u$      |
| GL-(m)      | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> )              | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> )               | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> )                | (kN/m <sup>2</sup> ) |
| (上端) 47.40  | 948.0                | 405.5                | 542.5                | 118.0                             | 523.5                | 71.3                               | 476.8                | 24.7                                | 430.2                |
| (中心) 55.45  | 1,109.0              | 486.0                | 623.0                | 135.5                             | 621.5                | 113.7                              | 599.7                | 42.2                                | 528.2                |
| (下端) 63.50  | 1,270.0              | 566.5                | 703.5                | 153.0                             | 719.5                | 153.0                              | 719.5                | 59.7                                | 626.2                |

ランキン主働土圧と設定されている土圧目標値などを比較して図-7 に示した。

ランキン主働土圧は、地下水位 GL-4.2m (表層地下水) および GL-6.85m (深層地下水) に足しても設定土圧は小さく切羽前面の地盤は塑性降伏状態となっている。

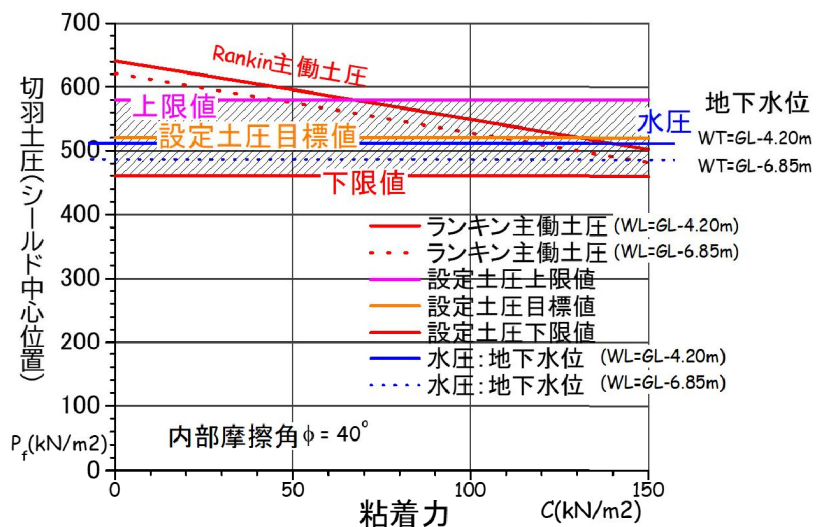


図-7 ランキン主働土圧と設定土圧の比較

#### 4 シミュレーション

標準貫入試験の  $N$  値から、ヤング率  $E=2800\text{N(kN/m}^2\text{)}$ ポアソン比  $\nu=0.3$ 、内部摩擦角 $\phi=40^\circ$ 、粘着力  $C=0.0\text{(kN/m}^2\text{)}$ として 3DFEM 解析(図-8)を実施した。その結果を図-9 に示した。陥没地点における応力状態は切羽土圧が、主働土圧より小さく、塑性域状態になっていることが分かる。

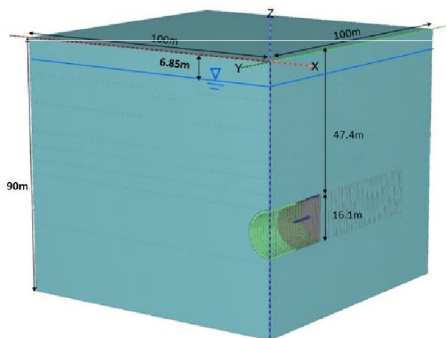


図-8 3DFEM Simulation

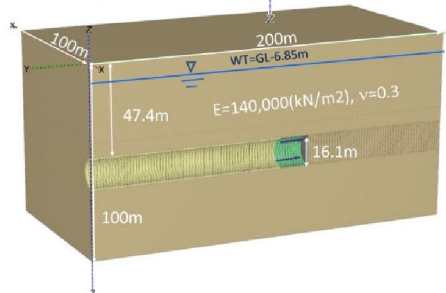


図-10 FEM Model

地盤が弾性状態である場合の地表面沈下を、図-10 に示した 100mx200mx100m(幅・長さ・深さ)のモデルで求め、図 11 に示した。図-3 に示した実測沈下量との比較を図-12 に示した。シールド直上が緩んでいない地表面では 3-4mm の最大沈下量、緩んでいる地表面では 20mm に達しており、シミュレーション結果と整合している。

**結論** 有識者委員会では議論の対象とはなっていないが、陥没やシールド直上部が緩んだ部分は、細粒分が少なく、粘着力がゼロのために、設定されていた切羽土圧管理値では切羽の安定性が保持出来なかった可能性が高い。

1) 東京外環トンネル施工等検討委員会 有識者委員会報告書、令和3年3月、NEXCO東日本企業情報サイト  
[https://www.e-nexco.co.jp/news/important\\_info/2021/0319/00009597.html](https://www.e-nexco.co.jp/news/important_info/2021/0319/00009597.html)

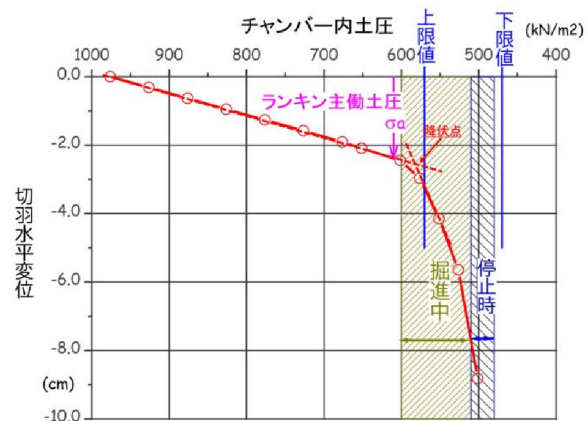


図-9 チャンバー土圧

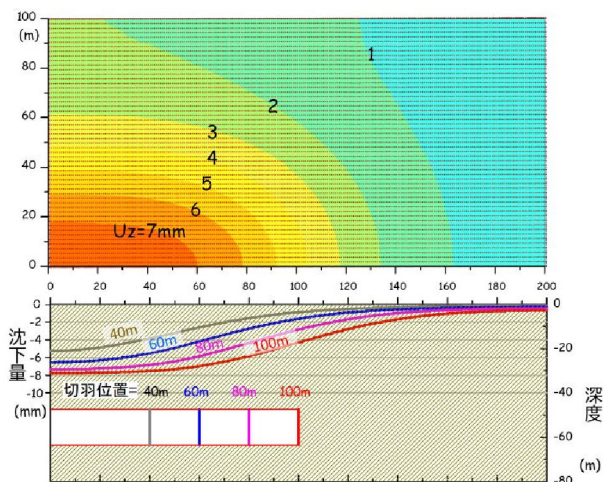


図-11 地表面沈下分布

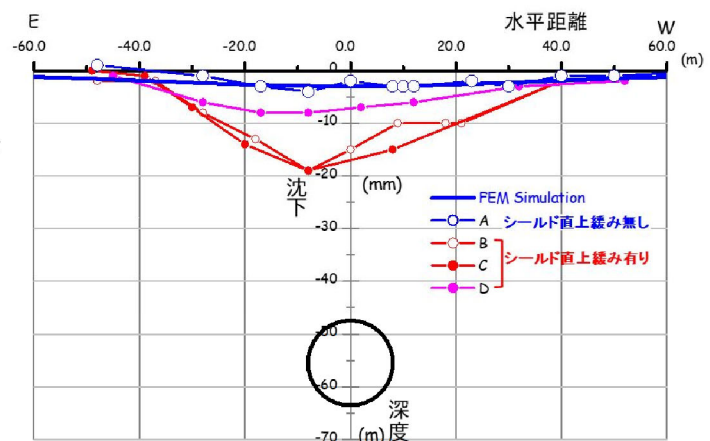


図-12 地表面沈下の実測とシミュレーション結果