

黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会
報告書

平成28年11月

黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会

〔目次〕

1 はじめに	1
2 地震発生から設備被害確認までの経緯	2
3 調査結果	3
(1) 調査の目的と内容	3
(2) 地質調査結果（斜面崩壊）	3
① 斜面崩壊の概要	3
② 地質と地質構造	4
③ 岩盤状況と崩壊形態の推定	5
④ A・B崩壊による崩壊土砂の重なり	6
(3) 構造物調査結果（水路構造物の損壊に関する調査）	7
① 構造物の損壊状況	7
② 構造物の損壊過程の推定	7
(4) 土砂到達状況調査結果（水・土砂の流下状況に関する調査）	8
① 崩壊斜面の水・土砂の流下状況	8
② 集落の水・土砂の流下状況	9
③ 水・土砂の流下推定	9
4 斜面崩壊メカニズムの推定	11
5 まとめ	12
6 おわりに	13

1 はじめに

黒川第一発電所は白川水系の支流黒川に位置する黒川調整池堰(熊本県阿蘇市)より取水し、河川側と山側の2本の導水路(両水路とも延長約3km)で白川水系の本流に位置する発電所(熊本県南阿蘇村)まで導水し発電する水力発電所である。同発電所は、大正3年3月に発電を開始し、これまで3回の増設工事を経て、現在の最大出力は4.22万kW、最大使用水量は20.3m³/sである。

平成28年4月に発生した平成28年熊本地震において、4月14日の前震(発生時刻21時26分、M6.5、黒川第一発電所近傍で震度5弱)では地震発生後の臨時点検により異常はなく発電を継続していたが、4月16日の本震(発生時刻1時25分、M7.3、黒川第一発電所近傍で震度6強)により水路やヘッドタンク等の設備が損壊し、発電用水が流出する事象が発生した。ヘッドタンク付近では、斜面崩壊、ヘッドタンク及び周辺設備の損壊により約1万m³の発電用水が流出した。水と土砂の流入によりヘッドタンク下方に位置する南阿蘇村新所区^{しんしょ}が被災した。また、阿蘇大橋付近では、斜面崩壊、同崩壊による水路埋没、埋没に伴う水路閉塞により約20万m³の発電用水が流出した。

なお、同地震では南阿蘇村を中心とした阿蘇地域において多数の土砂災害が発生している。世界でも有数のカルデラ地形をなす阿蘇地域において、今回の地震では急崖を呈するカルデラ壁付近^{たての}(立野火口瀬内に位置するヘッドタンク付近の斜面もこの地形に該当)と降下火砕物が厚く堆積した中央火口丘群での崩壊発生が顕著であった。

平成28年熊本地震により黒川第一発電所ヘッドタンク付近で発生した斜面崩壊、設備の損壊及び水の流出について、これら事象の因果関係を明らかにするため、有識者、関係行政機関の知見を取り入れ、客観性、透明性を確保しながら、検討を行うことを目的として、平成28年7月14日に「黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会」を設置した。

第1回技術検討会を平成28年7月14日に開催し、それ以降同年11月11日の第4回技術検討会まで、地震、斜面崩壊、設備損壊及び水の流出の因果関係(斜面崩壊の発生メカニズム解明)について検討してきた。

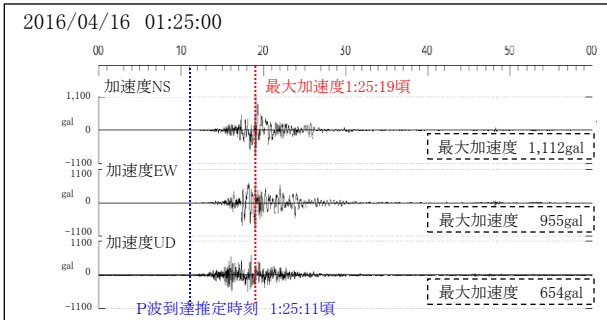
本報告書は、技術検討会が実施してきた斜面崩壊メカニズム解明について報告するものである。

2 地震発生から設備被害確認までの経緯

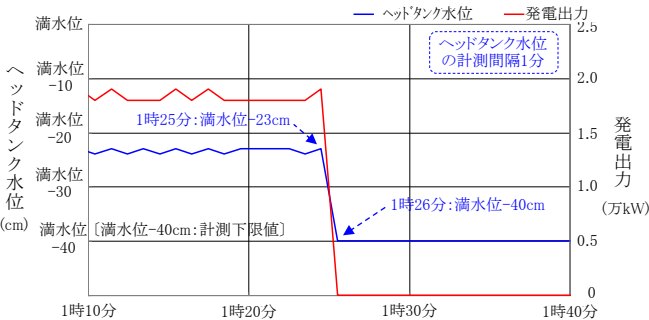
4月14日の前震時、黒川第一発電所は発電中であり、地震後の臨時点検において異常がなかったことから発電を継続した。4月16日の本震直後、送電線事故の波及により発電を停止した（表－1）。ヘッドタンク水位低下や取水ロゲート遠隔操作不能を確認したため、取水ロゲートの全閉操作を実施するために現地へ社員を派遣し、同日9時33分に河川からの取水を停止した（図－2、図－3；阿蘇大橋付近の斜面崩壊による道路遮断のため、社員の現地到達に時間を要した）。同日10時30分頃にヘリコプターによる巡視で、現場上空からヘッドタンク周辺の斜面崩壊、設備被害を確認した。

表－1 発生事象と発電状況

日時	発生事象	発電状況
4月14日(木) 21時26分	前震発生(益城町[ましき]:最大震度7) ・黒川第一発電所近傍(南阿蘇村河陽) 震度5弱	発電中 (1号機:停止中、2号機:約1.8万kW)
4月16日(土) 1時25分	本震発生(益城町:最大震度7) ・黒川第一発電所近傍(南阿蘇村河陽) 震度6強(図-1)	発電中(同上)であったが、送電線事故の波及により、1時25分に発電停止

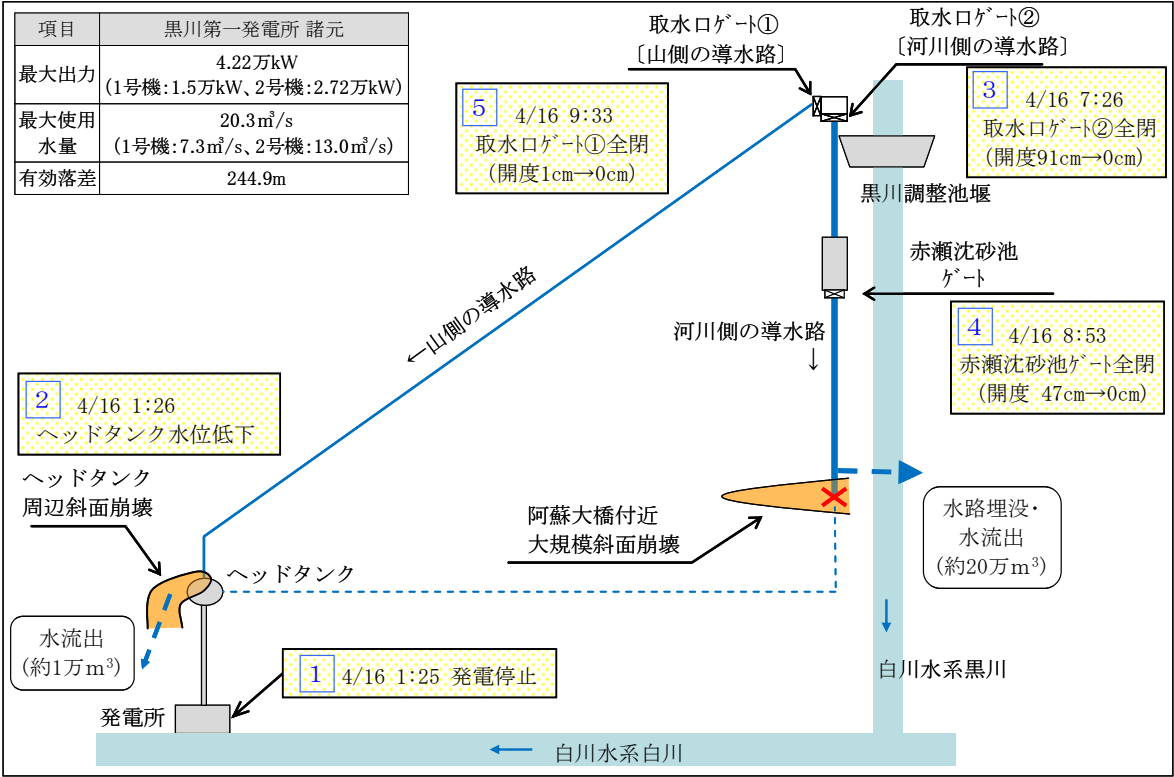


図－1 南阿蘇村河陽の地震動データ(本震)



図－2 黒川第一発電所の発電状況(本震前後)

[出典:気象庁「強震観測データ(H28.4.16 1:25):南阿蘇村河陽」の波形を加工し作成]



図－3 黒川第一発電所の概略図と対応経緯(本震:平成28年4月16日)

3 調査結果

(1) 調査の目的と内容

地震、斜面崩壊、設備損壊及び水の流出の因果関係（斜面崩壊の発生メカニズム解明）について検討するため、以下の現地調査を実施した。

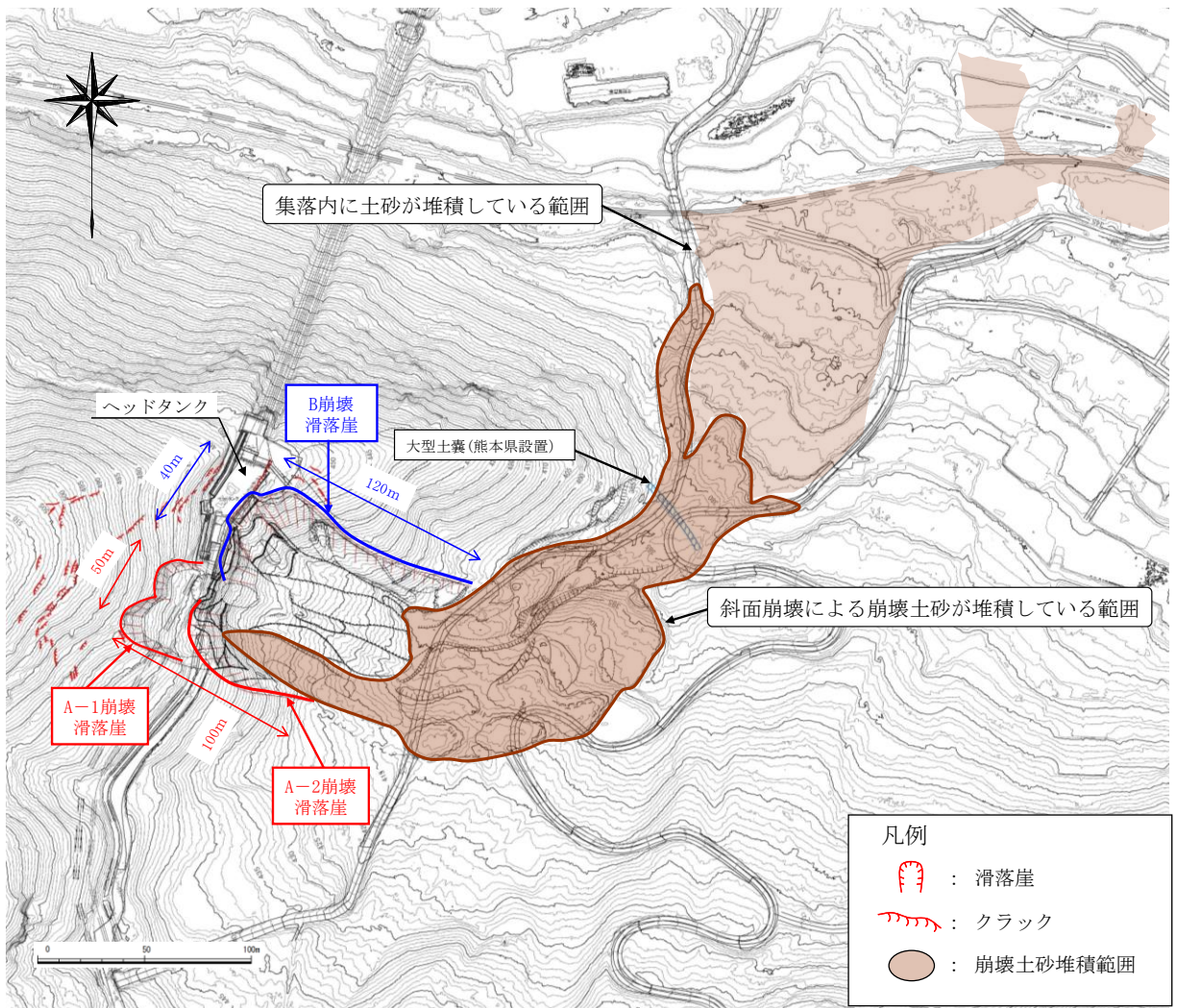
- ・地質調査（斜面崩壊に関する調査）
- ・構造物調査（水路構造物の損壊に関する調査）
- ・土砂到達状況調査（水・土砂の流下状況に関する調査）

(2) 地質調査結果（斜面崩壊）

① 斜面崩壊の概要

崩壊は大きく2箇所が発生（A崩壊、B崩壊）している。崩壊前の斜面勾配は、A崩壊斜面が $30\sim 35^\circ$ 、B崩壊斜面が $25\sim 35^\circ$ である。A崩壊の規模は、概ね長さ100m×幅50m×深さ7m、崩壊土砂量は約3.5万 m^3 と推定される。B崩壊の規模は、概ね長さ120m×幅40m×深さ9m、崩壊土砂量は約4.3万 m^3 と推定される（図－4）。

なお、A崩壊、B崩壊の上方斜面にはクラックを確認した。

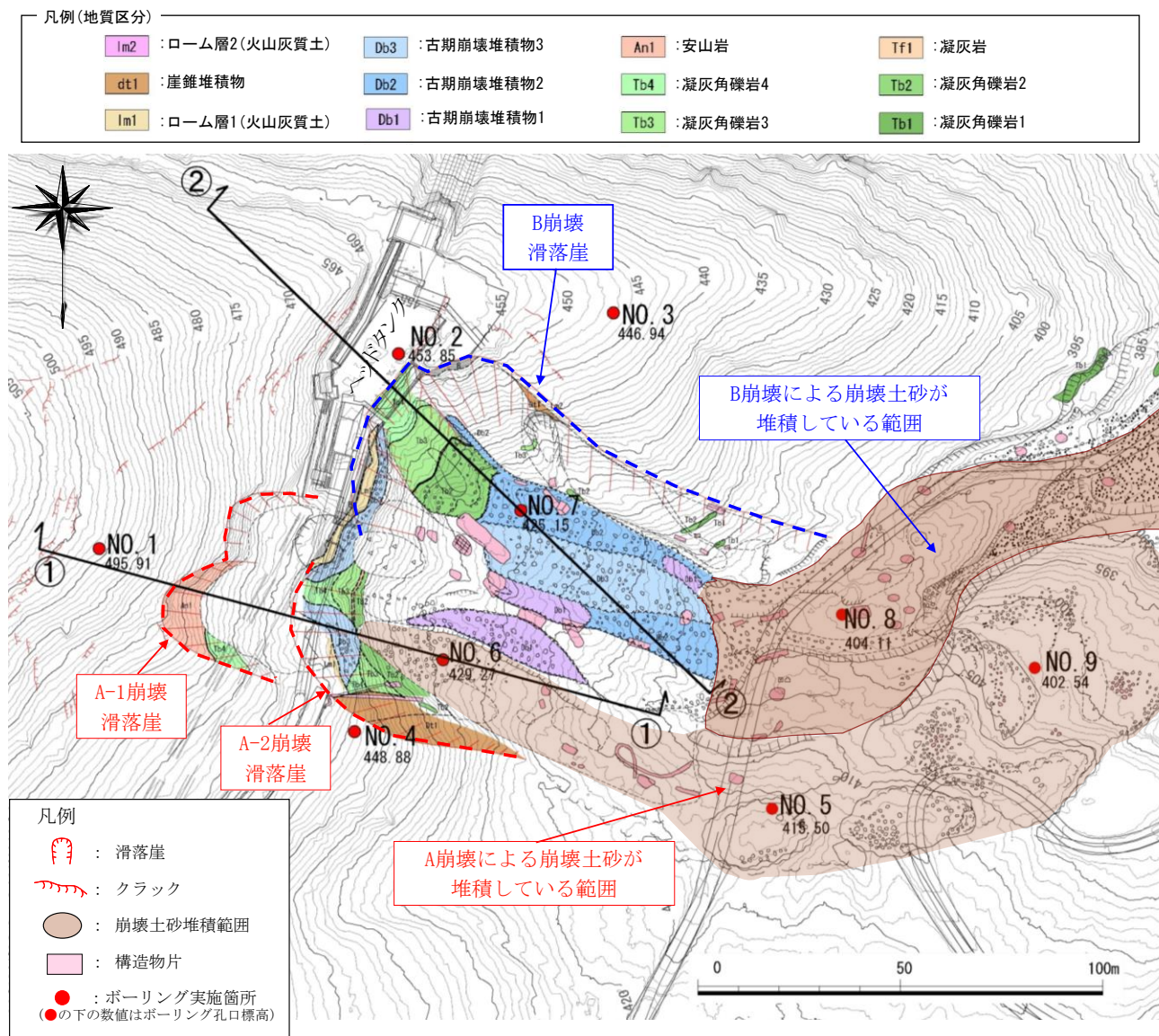


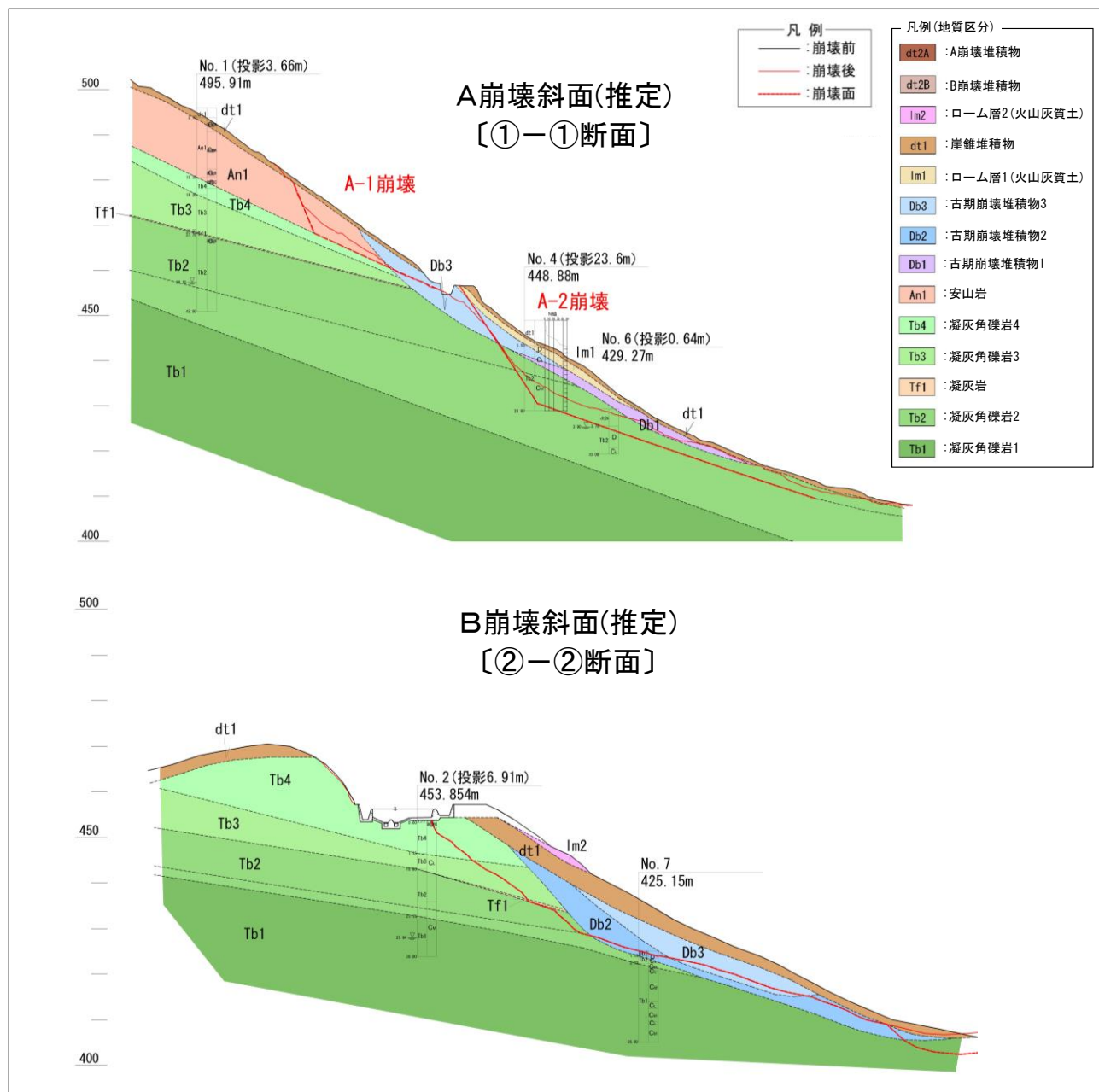
図－4 黒川第一発電所ヘッドタンク付近で発生した斜面崩壊の平面図

② 地質と地質構造

先阿蘇火山岩類(地質年代：約220～45万年前)に属する凝灰角礫岩が基盤をなしており、この層はヘッドタンクなど構造物の基礎となっている。基盤である凝灰角礫岩の層を覆うように安山岩が分布しており、この層はA崩壊斜面の頂部及び崩壊斜面上方で確認した。基盤である凝灰角礫岩の上には、安山岩や凝灰角礫岩の礫と細粒の基質部からなる層(古期崩壊堆積物)が不整合に覆っており、この層は立野火口瀬形成以降に発生した斜面崩壊や土石流などが堆積して形成されたものと推定される。表層部には、ローム層(火山灰質土)、崖錐堆積物が被覆している(図－5、図－6)。

ボーリングや露頭にみられる現況の滑落崖の地層から、今回崩壊した斜面の崩壊前の地質構造の推定を行った(図－6)。



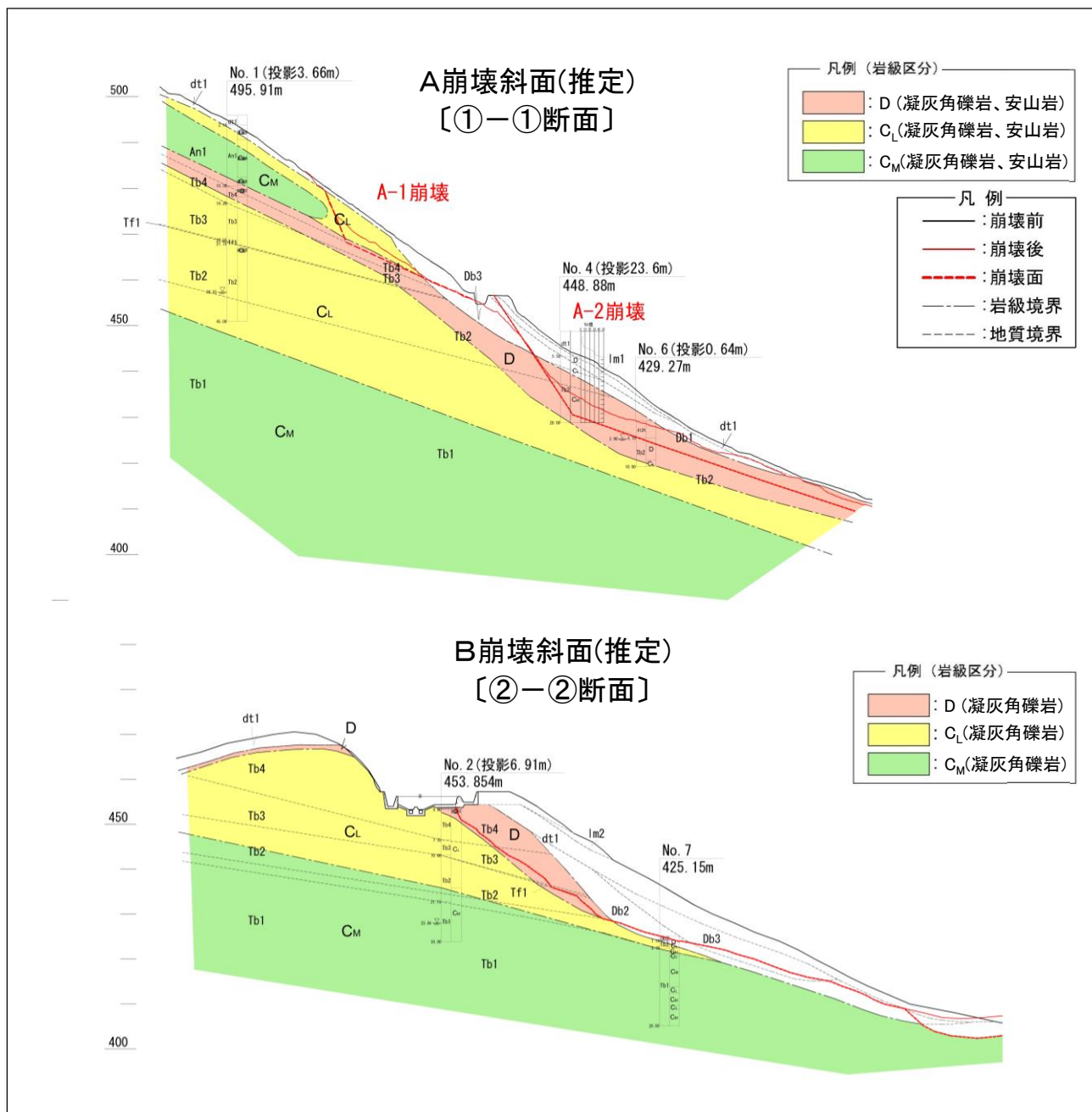


図－6 A崩壊斜面、B崩壊斜面の崩壊前の地質構造（推定）

③ 岩盤状況と崩壊形態の推定

斜面崩壊による崩壊土砂には、火山灰質土や崖錐堆積物などの表層堆積物だけでなく、地山の地層を構成する安山岩・凝灰角礫岩の岩塊も含まれることから、斜面崩壊は岩盤を巻き込んで発生したと推定される。

ボーリングや露頭にみられる岩盤状況をもとに、崩壊前の岩盤状況について推定を行った(図－7)。今回の地震により崩壊した岩盤は、A崩壊がC_L級の安山岩及びD級の凝灰角礫岩の部分、B崩壊がD級の凝灰角礫岩の部分であったと推定される。崩壊斜面内でみられる安山岩には硬質ながら著しい割れ目の開口、凝灰角礫岩には風化の影響と割れ目の開口を確認した。このことから、地震の影響で表層側の岩盤部に割れ目の開口による緩みが発生して、表層側の岩盤部が崩壊したと推定される。



図－7 A崩壊斜面、B崩壊斜面の崩壊前の岩盤状況（推定）

④ A・B崩壊による崩壊土砂の重なり

A崩壊による崩壊土砂は、表層堆積物起源の黒ボクや明褐色の火山灰質土と安山岩・凝灰角礫岩の礫から構成されており、火山灰質土内に軽石が含まれている。一方、B崩壊による崩壊土砂は、表層堆積物起源の黒ボクや暗褐色の火山灰質土と安山岩・凝灰角礫岩の礫から構成されている。

B崩壊による崩壊土砂が堆積した範囲のボーリング No.8(図－5)において、表層部はB崩壊による崩壊土砂の特徴を有しているが、約2～3mの深さの範囲には、A崩壊による崩壊土砂の特徴を有する土砂(明褐色で軽石を含む火山灰質土)の分布を確認した。このことから、斜面崩壊は先にA崩壊が発生し、その後B崩壊が発生したと推定される。

(3) 構造物調査結果（水路構造物の損壊に関する調査）

① 構造物の損壊状況

ヘッドタンク越流堤、ヘッドタンクより斜面側の道路などが損壊し、構造物の基礎地盤とともに崩落している。水が流出したヘッドタンク越流堤は、ヘッドタンク底盤との打ち継ぎ目部で崩壊している（写真－１）。



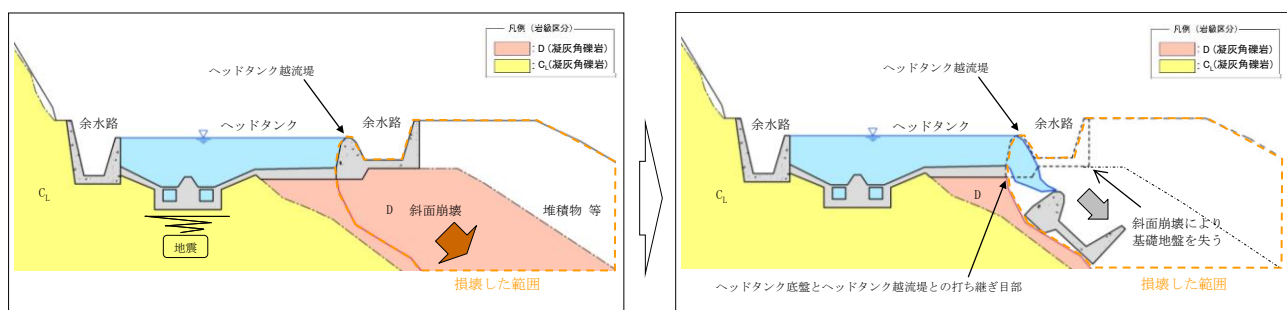
写真－１ 黒川第一発電所ヘッドタンク全景（損壊前〔空虚時〕、損壊後）

② 構造物の損壊過程の推定

ヘッドタンクは埋設構造物であり、構造物自体の損壊が直ちに大量の水の流出には直結しない構造である。この特性を有する構造であるにもかかわらず、本震直後にヘッドタンク水位が低下（図－２）していることから、斜面崩壊により基礎地盤を失ったことで短時間で構造物が崩落し、ヘッドタンクの水が流出したと推定される（図－８）。

なお、現在の基準*によりヘッドタンクの耐震性について検討した結果、ヘッドタンクは現在の基準を満たしていることを確認した。

* 電気事業法に基づく「発電用水力設備に関する技術基準を定める省令」（昭和40年、経産省）



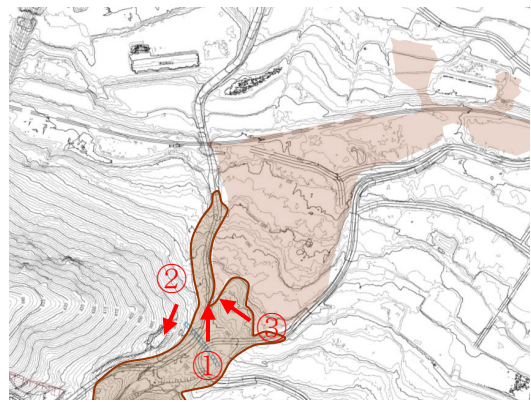
図－８ ヘッドタンク損壊過程の推定図

(4) 土砂到達状況調査結果（水・土砂の流下状況に関する調査）

① 崩壊斜面の水・土砂の流下状況

斜面崩壊による崩壊土砂は、未固結の黒ボクや火山灰質土が擾乱されずに残されたブロックと岩塊から構成されており、このような特徴を有した崩壊土砂が集落最上部付近まで堆積していることを確認した(写真－2)。この崩壊土砂の上には水が流れたことにより形成された谷状の侵食地形を確認した(写真－3)。崩壊土砂が堆積している範囲の末端付近には、立木の樹皮の特徴的な損傷(写真－4；木の根元部分の樹皮は残存、ある高さから上の部分の樹皮だけが削剥)を確認した。

これらのことから、斜面崩壊が発生した後にヘッドタンクから流出した水が斜面に堆積している崩壊土砂を巻き込みながら流下したと推定される(図－10)。



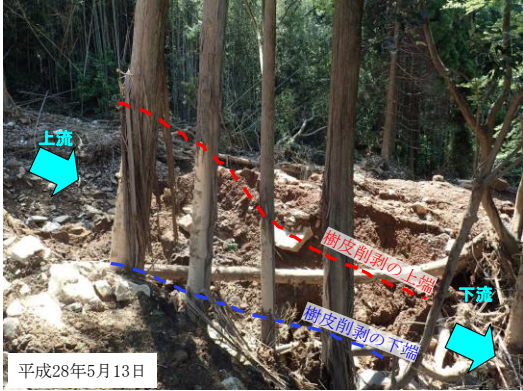
図－9 写真撮影位置(①、②、③)



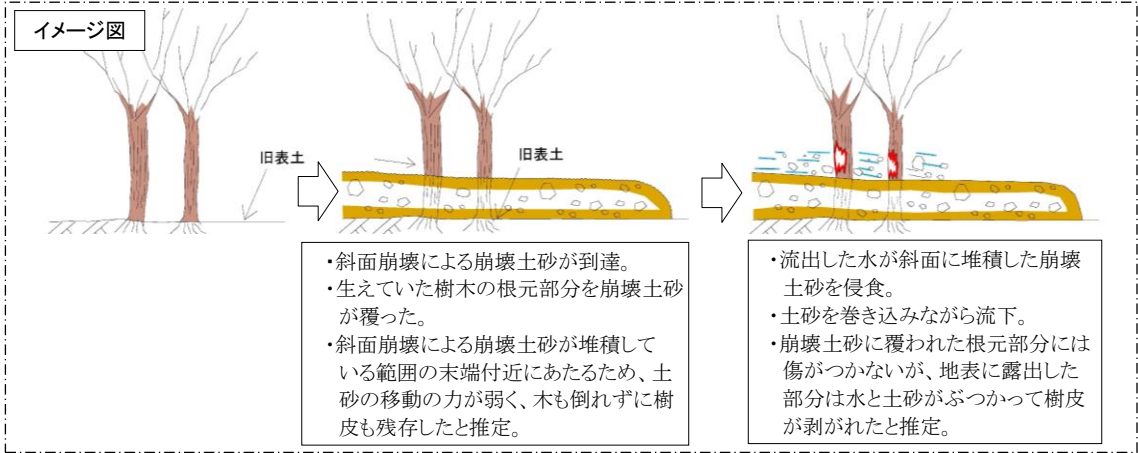
写真－2 集落最上流部付近の崩壊土砂の写真①



写真－3 斜面上に堆積した崩壊土砂の上に確認された侵食地形の写真②



写真－4 立木の樹皮の特徴的な損傷の写真③



図－10 立木の樹皮の特徴的な損傷発生メカニズムの推定

② 集落の水・土砂の流下状況

集落内には水と共に流入したとみられる土砂が堆積し、概ねJR豊肥本線の線路盛土あたりまで到達していることを確認した(図-11)。集落内に堆積した土砂は、礫質土、砂質土、粘性土が分かれて堆積しており、斜面上に堆積した崩壊土砂にみられた未固結の黒ボクや火山灰質土のブロックは確認できなかった。このことから、斜面崩壊後にヘッドタンクから流出した水が斜面上に堆積している崩壊土砂を巻き込みながら流下し、この水・土砂が集落内に流入したと推定される。

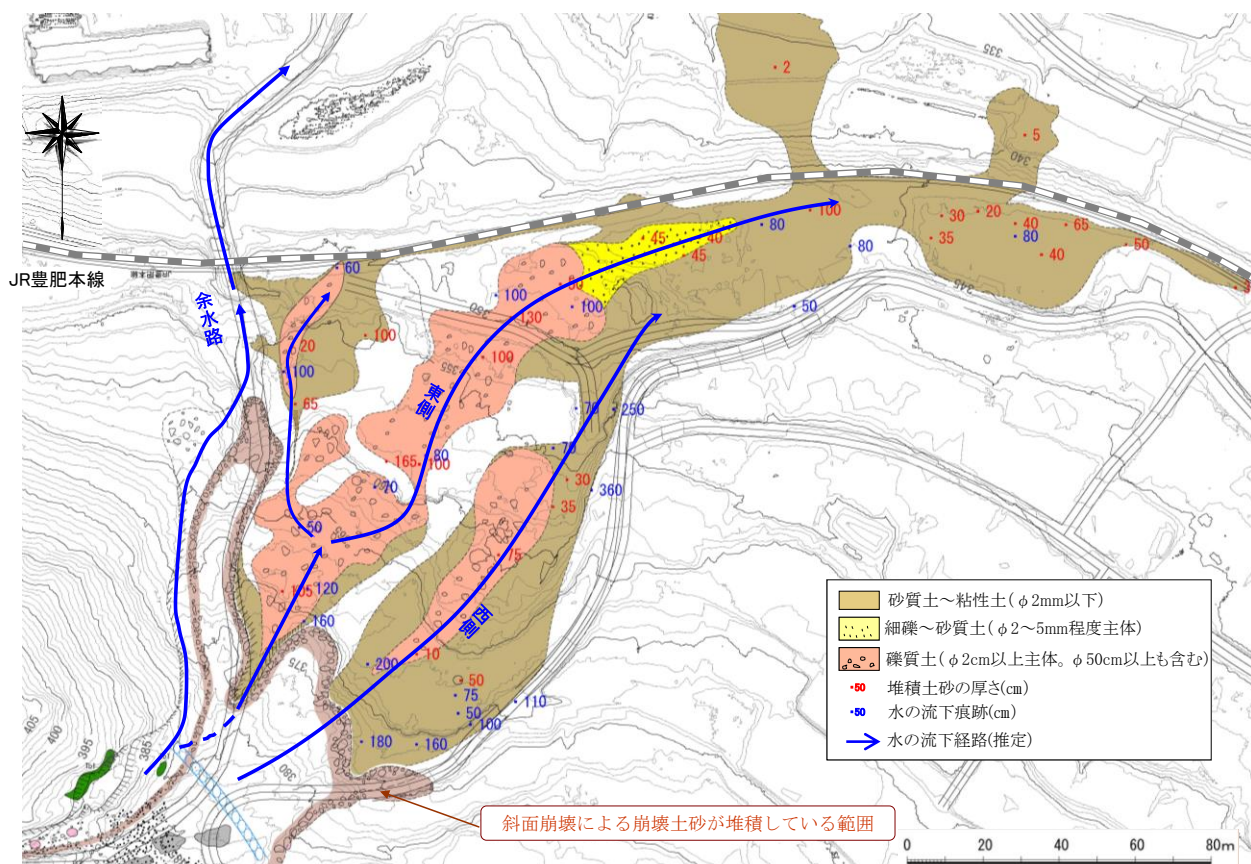


図-11 集落内の水・土砂の流下状況

③ 水・土砂の流下推定

水・土砂の集落への到達時期を推定するため、シミュレーションを実施した(表-2、表-3)。なお、シミュレーションにおいては、黒川第一発電所近傍の地震観測点である南阿蘇村河陽(ヘッドタンクから3.6km)の地震動データ(図-1)から、同地点の最大加速度が発生した4月16日1時25分19秒頃に斜面崩壊が発生、引き続き(同日1時25分20秒頃)ヘッドタンクが瞬時に損壊したと仮定した(損壊時刻・形態の最も厳しい仮定)。

計算の結果、集落への到達は4月16日1時26分30秒から1時27分20秒頃(最大加速度発生から約70～120秒後)、集落に到達した流量が0.5m³/s程度に低下するまでの所要時間は約30分であり、「大きな地震があって、その2～3分後に土砂が来た」「水の流れは約20分で止まった」との住民証言と計算結果は概ね一致し、著しい矛盾は確認できなかった(図-12)。

なお、国交省立野観測所(発電所の約1km下流)の水位記録(図-13；観測間隔:10分)をみると、4月16日1時20分から1時30分にかけて水位が低下、同日1時30分から1時50分までは水位が上昇している。水位低下は本震直後の発電停止(同日1時25分)の影響等、水位上昇はヘッドタンクから流出した水の一部が余水路を経て河川に流入した影響等と推定される。

表-2 ヘッドタンクからの水の流出シミュレーションの条件

項目	内容
計算手法	標準越流頂の越流量算定式 $Q = CBH^{1.5}$ (係数 $C=2.20$ 、越流幅 $B=14.67\text{m}$ 、水深 H =変数)
ヘッドタンクから流出した水の総量	$10,900\text{m}^3$ (地震発生時の水路内の溜り水[河川側導水路 $5,300\text{m}^3$ 、山側導水路 $2,000\text{m}^3$ 、ヘッドタンク $1,100\text{m}^3$] + 取水停止までの取水量 $[2,500\text{m}^3]$)

表-3 斜面上の水・土砂の流下シミュレーションの条件

項目	内容
計算手法	一次元不定流計算
対象流量	ヘッドタンクからの流出量を時系列で入力
地形データ	平成28年4月20日のレーザー測量結果
計算区間	ヘッドタンク～線路(JR豊肥本線) 水平距離400m
計算間隔	10m (40断面)
粗度係数	0.10 (痕跡水位と最も整合する値)

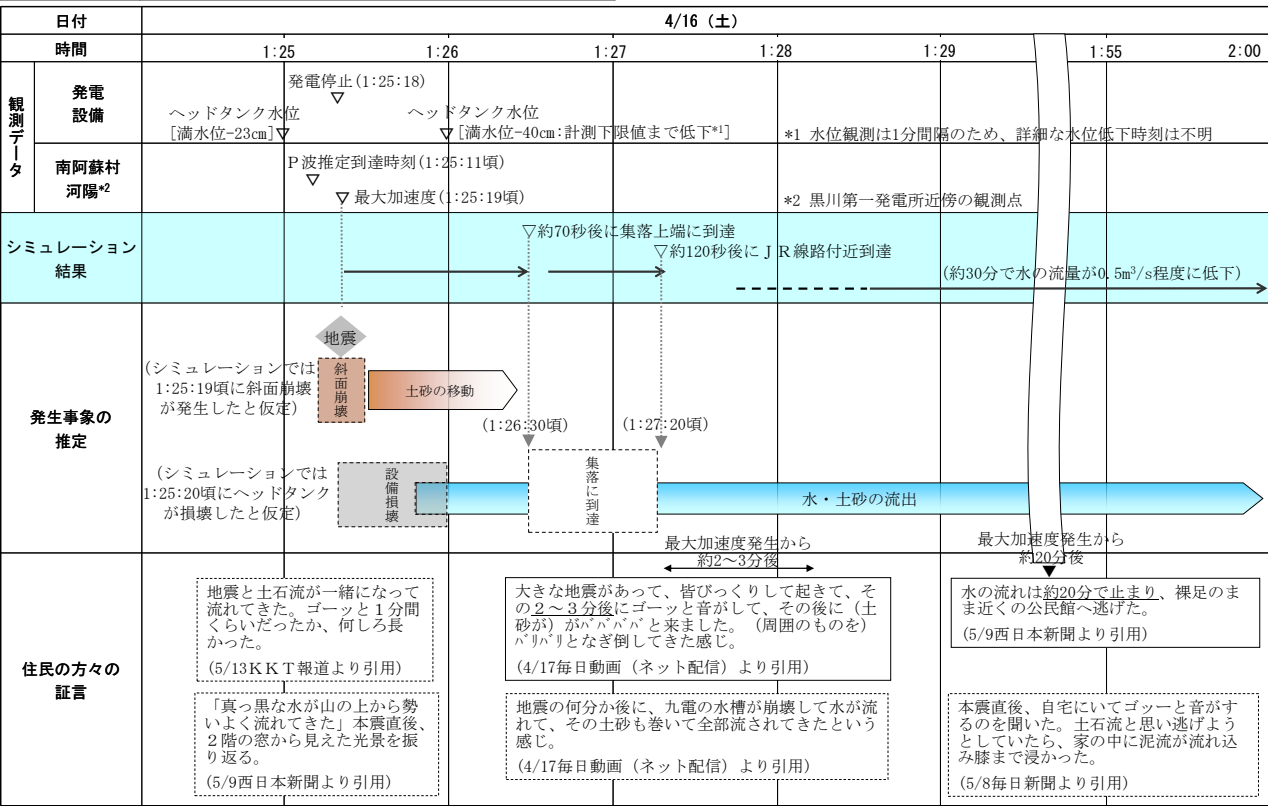


図-12 シミュレーション結果と住民の方々の証言

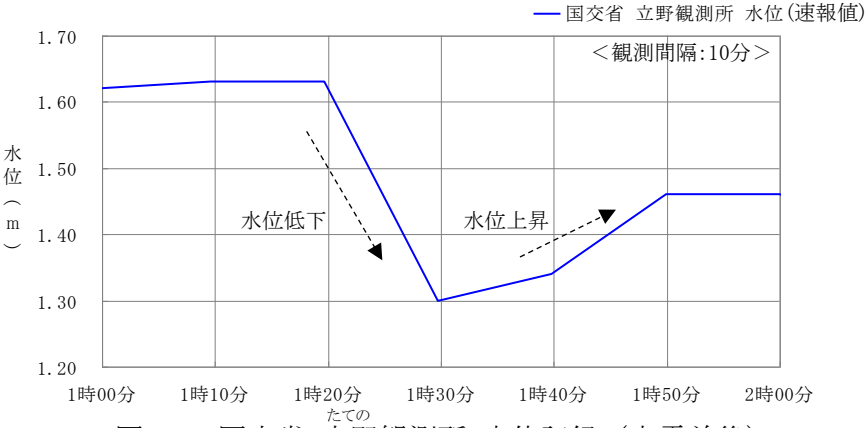


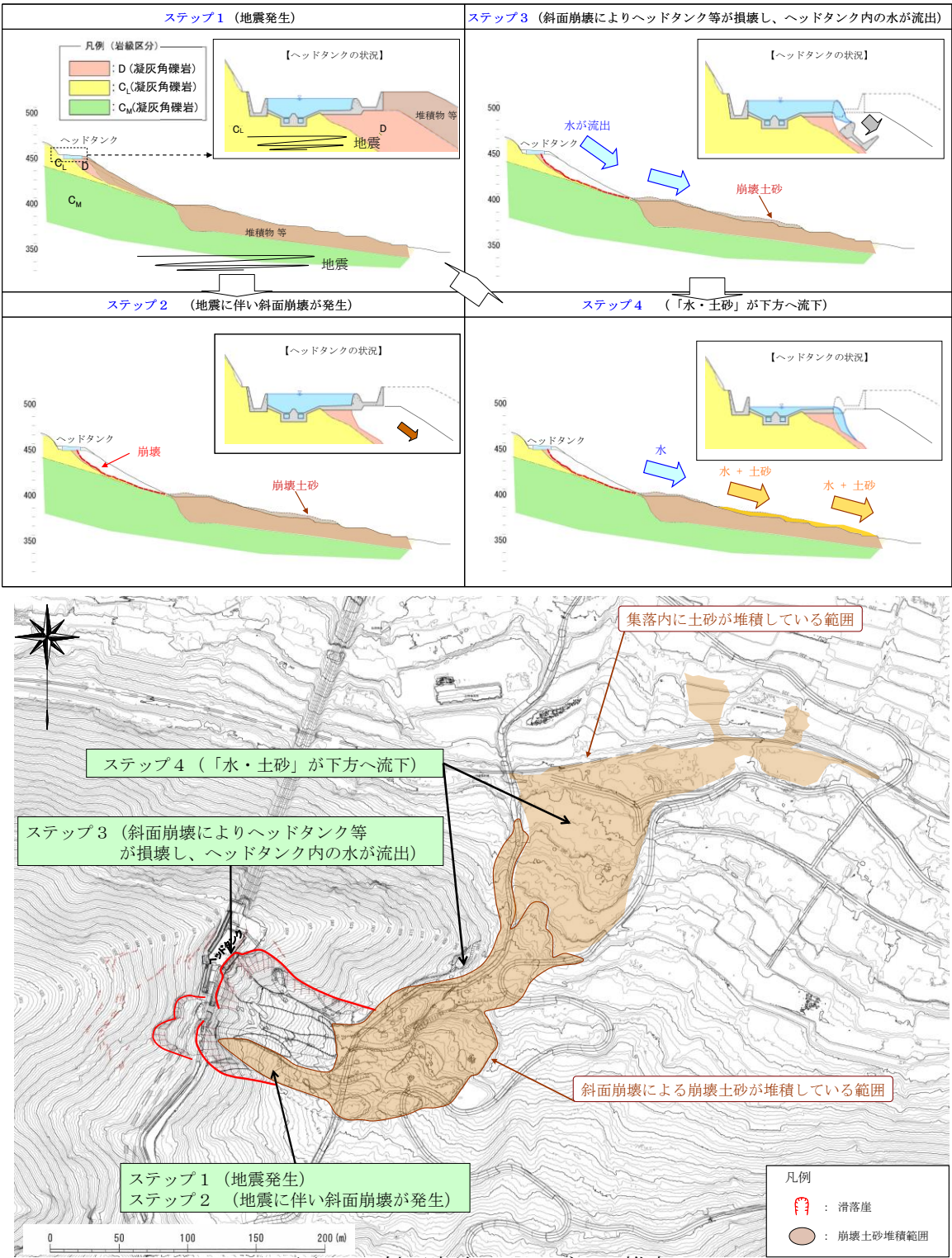
図-13 国交省 立野観測所 水位記録 (本震前後)

[出典:国土交通省「水文水質データベース:立野」のデータを加工し作成

4 斜面崩壊メカニズムの推定

今回発生した地震、斜面崩壊、設備の損壊及び水の流出の関係は、以下のとおりと推定される（図－14）。

- ① 地震のゆれにより岩盤を巻き込んだ大規模な斜面崩壊が発生
- ② 斜面崩壊により基礎地盤が失われたヘッドタンク等の設備が損壊、水が流出
- ③ 流出した水が斜面に堆積している崩壊土砂を巻き込み、下方に流下
- ④ 流下した水及び土砂が集落に流入



図－14 斜面崩壊メカニズムの推定

5 まとめ

平成28年熊本地震では、4月14日に発生したM6.5の前震、4月16日に発生したM7.3の本震で最大震度7を観測し、黒川第一発電所近傍の南阿蘇村河陽^{かわよう}では、前震で震度5弱、本震で震度6強を観測した。同地震では、黒川第一発電所の位置する南阿蘇村を中心とした阿蘇地域において同地域に特徴的な地形・地質特性により多数の土砂災害が発生した。黒川第一発電所では、本震の際にヘッドタンク付近で斜面崩壊、ヘッドタンク及び周辺設備の損壊が発生し、約1万m³の発電用水が流出した。

今回発生した地震、斜面崩壊、設備の損壊及び水の流出の関係（斜面崩壊メカニズム）は、現地踏査やボーリングなどの現地調査、当日の地震や発電状況などの記録、数値シミュレーションなどに基づき、以下のとおりと推定される。

- ① 地震のゆれにより岩盤を巻き込んだ大規模な斜面崩壊が発生
- ② 斜面崩壊により基礎地盤が失われたヘッドタンク等の設備が損壊、水が流出
- ③ 流出した水が斜面に堆積している崩壊土砂を巻き込み、下方に流下
- ④ 流下した水及び土砂が集落に流入

以上、黒川第一発電所設備損壊事象は、今回の地震で引き起こされた斜面崩壊により設備が損壊して発電用水が流出し、流出した水が斜面に堆積している崩壊土砂を巻き込み、水及び土砂が集落に流入したものと推定される。

6 おわりに

本技術検討会では、黒川第一発電所設備損壊事象における地震、斜面崩壊、設備損壊及び水の流出の因果関係(斜面崩壊の発生メカニズム解明)の検討を行い、検討結果を報告書として取りまとめた。

黒川第一発電所設備損壊事象は、地震により斜面崩壊、設備損壊、水の流出が発生するという複合災害であった。黒川第一発電所をはじめとする水力発電所で今回のような災害が二度と起きないように、この災害経験を今後を活かしていかなければならない。

今後の水力発電設備の保全においては、被害を最小化するための準備を事前に考え、備えておくことは非常に重要なことである。そのためには、地域の理解と協力を得ながら、発電所毎の立地条件等に応じて、ハードとソフトの多重化による設備の信頼性向上や地域とのリスクコミュニケーション等に取り組んでいく必要がある。

本技術検討会としては、今回の検討を通して得られた知見が、水力発電設備の安全性を高めることに寄与することを願うとともに、水力発電所が立地する地域の安全・安心の向上に役立てば幸いである。

黒川第一発電所設備損壊事象に係る技術検討会 委員

役職	氏名
熊本大学大学院 先端科学研究部 教授	松田 泰治（座長）
東京工業大学 名誉教授	大町 達夫
熊本大学 名誉教授	北園 芳人
熊本大学大学院 自然科学研究科 特任准教授	鳥井 真之
九州電力(株) 熊本電力センター 副センター長 （黒川第一発電所 電気主任技術者）	田子森 秋彦
九州電力(株) 熊本支社 技術部長 （黒川第一発電所 ダム水路主任技術者）	前嶋 龍三

