

博士論文

断層破砕帯による地下水供給を考慮した  
盛土排水対策に関する技術的対応

(Technical study on embankment drainage countermeasures  
considering groundwater supply from fault fracture zones)

2019年3月

竹 國 一 也

山口大学大学院創成科学研究科



# 断層破碎帯による地下水供給を考慮した盛土排水対策に関する技術的対応 目次

第1章 序論	
1.1 研究の背景と必要性	1
1.2 盛土構造物の災害事例	2
1.2.1 はじめに	2
1.2.2 地形的要因	2
1.2.3 盛土材料と形状の要因	2
1.2.4 災害要因	3
1.2.5 大規模盛土災害の分析	4
1.2.6 盛土における災害傾向のまとめ	5
1.3 研究の目的	6
1.4 用語の定義	7
1.5 論文の構成	9
第1章の参考文献	10
第2章 断層破碎帯が地下水を供給する事例	
2.1 はじめに	11
2.2 岩国災害での事例	11
2.2.1 災害概要	11
2.2.2 地形・地質概要	12
2.2.3 被災箇所の道路構造と現地調査	13
2.2.4 盛土崩壊メカニズムの究明	14
2.2.5 災害原因	15
2.2.6 災害復旧対策工	15
2.3 宝塚北 SA 盛土での事例	16
2.3.1 宝塚北 SA 盛土概要	16
2.3.2 地形・地質概要	16
2.3.3 水文調査	17
2.3.4 盛土構造の検討	18
2.3.5 盛土排水対策工	20
2.4 まとめ	21
第2章の参考文献	22
第3章 岩国災害復旧盛土での現地計測	
3.1 はじめに	23
3.2 計測概要	23
3.2.1 計測期間と計測項目	23
3.2.2 流量計測地点と集水流域	23
3.2.3 流量計測方法	25
3.3 計測結果	26
3.3.1 降雨量	26
3.3.2 地下水流量	28
3.3.3 地表水流量	35
3.3.4 のり尻工流量	40
3.3.5 簡易水質試験	43
3.4 計測結果の精度検証	46

3.4.1 実測流量と計測流量の対比 .....	46
3.4.2 計測異常値とその原因 .....	47
3.4.3 計測異常値への対応 .....	48
3.5 まとめ .....	48
第3章の参考文献 .....	50
 第4章 宝塚北 SA 盛土での現地計測	
4.1 はじめに .....	51
4.2 計測概要 .....	51
4.2.1 計測期間と計測項目 .....	51
4.2.2 流量計測地点と集水流域 .....	52
4.2.3 流量計測方法 .....	52
4.3 計測結果 .....	53
4.3.1 降雨量 .....	53
4.3.2 実測流量と計測流量の対比 .....	55
4.3.3 流末総流量 .....	56
4.3.4 実測地下水流量 .....	57
4.3.5 計測地下水流量 .....	58
4.4 岩国災害復旧盛土と宝塚北 SA 盛土での計測対比 .....	60
4.5 盛土施工中のモニタリング .....	60
4.5.1 地下水位観測 .....	60
4.5.2 流末総流量観測 .....	62
4.6 維持管理でのモニタリング .....	63
4.6.1 維持管理段階での監視体制の必要性 .....	63
4.6.2 モニタリング項目と監視頻度 .....	63
4.6.3 モニタリングでの着目点 .....	64
4.7 まとめ .....	67
第4章の参考文献 .....	68
 第5章 盛土排水対策の技術的対応に関する提案	
5.1 はじめに .....	69
5.2 断層破碎帯による地下水供給量の推定 .....	69
5.2.1 計測流量による水収支からの推定 .....	69
5.2.2 計測地下水流量とタンクモデルとの対比による推定 .....	71
5.2.3 ピーク計測地下水流量と $q_2+q_3$ 流量の対比 .....	74
5.2.4 地下水供給量の予測手法の提案 .....	74
5.2.5 地下水流量特性と流出係数の推定 .....	75
5.3 盛土排水対策工設計手法の提案 .....	79
5.4 維持管理段階でのモニタリング手法の提案 .....	80
5.5 まとめ .....	82
第5章の参考文献 .....	82
 第6章 結論	
6.1 研究のまとめ .....	83
6.2 今後の課題と展望 .....	86
第6章の参考文献 .....	87
研究の関連論文 .....	88

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景と必要性

2005年9月の台風14号に伴う豪雨によって、山陽自動車道岩国IC~玖珂IC間の岩国市甘木地区の盛土が崩壊する災害<sup>1)</sup>(以降:岩国災害と呼ぶ)が発生し、盛土直下に居住されていた3名の方が犠牲となり、また災害を受けた当該IC区間は、3ヶ月にわたっての長期通行止めを余儀なくされた。日本道路公団(西日本高速道路(株)の前身)は、山口大学村田教授を委員長とする山陽自動車道災害調査検討委員会<sup>2)</sup>を設置して災害の原因究明や応急復旧、本復旧対策工などについて検討を行った。その検討過程において、災害原因の1つに断層破砕帯に沿って他流域から地下水が供給されたことが判明した。断層破砕帯に伴う地下水の供給が災害の大きな引き金になったという点<sup>3)4)</sup>は、それまでの災害で注目されることがなく、この災害において初めて挙げられた原因である。岩国災害以降に発生した災害の中にも断層破砕帯による地下水供給を原因とする事例として、2006年4月山口県道銭壺山公園線での災害<sup>5)</sup>と2006年7月山陰自動車道松江市玉湯地区での災害<sup>6)</sup>が報告されている。

一方、2018年3月18日に全線開通した新名神高速道路高槻JCT~神戸JCT間の路線上にも断層破砕帯が幾つかあり、その中でも宝塚北SA箇所の大規模盛土(以降:宝塚北SA盛土と呼ぶ)直下には活断層である十万辻断層が位置していることが机上調査にて判明した。宝塚北SA箇所は、岩国災害の経験から断層破砕帯が地下水を供給する可能性があるため、現地調査を行ったところ、降雨時でなくとも断層破砕帯に沿って線上に地下水が常時自噴していることが分かった<sup>7)</sup>。このように岩国災害箇所と極めて類似した地形・地質条件であることを踏まえて、従来では設計施工に反映することのなかった断層に沿って供給される地下水に配慮した排水計画を立てるための検討を行った。検討にあたっては、流域の水文調査や河川流量観測を実施し、それらの調査結果をもとに三次元水収支解析および盛土の安定解析によって、通常降雨時と豪雨時における盛土内の地下水分布を予測し、予測値に対して安定を確保する排水対策工を選定した<sup>8)</sup>。このように建設時において設計段階で他流域からの地下水供給を加味した設計は、過去に例のない初めての試みである。

ここでいう断層破砕帯が地下水を供給する事象とは、透水性の高い断層破砕帯自体が水道となる場合と透水性の低い断層破砕帯が止水層となって地下水を堰き止めてダムアップされる場合が想定される。いずれも地下水が地形の高い側から低い側へ地形的流域を超えて供給される事象を対象としている。

国土交通省による調べ<sup>9)10)</sup>によると、土石流等、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害の発生件数は2007年から2017年の年間平均で1,000件を超え、特に2016年、2017年は過去10年間で最大規模の災害発生件数となっている。さらに、2018年は平成30年7月豪雨や台風20号、21号、24号などにより、36年振りに国内で数多くの被害をもたらした。近年、国内では土砂災害に対する様々な研究や対策<sup>11)</sup>がとられているものの、このように災害発生件数は減じるところが増えるとともに激甚化しているのが現状である。本研究は、全国的に大規模な災害が後を絶たず、特に地球温暖化の影響と思われる降雨に起因する土砂災害が多発していることを踏まえて、盛土構造物を対象とした防災、減災、縮災の観点から、断層破砕帯による地下水の供給という新たな視点を加えた設計手法の確立を目指すものである。

他流域からの地下水供給に関する研究を進めるにあたり、研究対象としたのは、高速道路における岩国災害後に復旧された盛土(以降:岩国災害復旧盛土と呼ぶ)と宝塚北SA盛土の2箇所である。検討にあたっては、上記2箇所の盛土での地下水と地表水の常時現地流量計測を行った。これらの計測によって、土砂災害の要因として考えられる断層破砕帯が他流域から地下水を供給する事実とその供給される地下水流量の推定についての考察を加え、さらに流量予測方法の提案を行った。地下水流量の推定については、供給される地下水流量は盛土流域の地形的分水界のみならず、断層破砕帯が影響する地下水分水界としての隣接流域も対象流域として加えた設定が推定の一助になることを明らかにした。また、排水対策工の効果として常時排水には地下排水溝が、そして高強度降雨時の排水にはより尻工(フトンカゴ)の設置が有効であることを明らかにした。さらに、地下水供給量に対応した具体的な排水盛土対策工の設計手法と維持管理段階において必要となるモニタリング手法についても示した。

## 1.2 盛土構造物の災害事例

### 1.2.1 はじめに

近年、豪雨や地震等により切土や盛土、自然斜面などの土構造物が被害を受けることが多くなってきている。その要因として、地球温暖化による局地的集中豪雨の多発、土構造物の経年劣化などが考えられる。

㈱高速道路総合技術研究所では、高速道路で過去に発生した土構造物の災害事例から降雨による災害がどのような条件下で発生しているかの分析<sup>12)</sup>を2007年に行っている。ここでは、㈱高速道路総合技術研究所が行った分析の中から、盛土災害に着目し、かつ盛土の排水対策を検討する上で必要となる要因と点検時の着目点について取りまとめを行った。

1991年から2004年の12年間に高速道路で発生した盛土災害に対して、さまざまな要因に注目した分析を行い、その傾向を明らかにした。これらの災害事例の地形的要因、盛土形状や材料、災害原因、大規模盛土災害についての分析を行い、考察を加えた。

### 1.2.2 地形的要因

過去12年間に発生した盛土災害1,103件の事例から盛土災害箇所の地形的要因別に調査した被災件数内訳結果を図-1.2.1に示す。同様に地形的要因ごとの1件当たりの平均被災土量を集計したものを図-1.2.2に示した。地形的要因による災害の傾向は以下のとおりである。

- 1) 傾斜地盤での災害事例は全体の約7割と多く、1件当たり平均被災土量は400m<sup>3</sup>と他の地形と比べて極端に規模が大きくなっている。
- 2) 平坦地盤における災害発生率は全体の約1割と多くはないものの、被災土量は1件当たり平均200m<sup>3</sup>と意外に大きいことが分かった。
- 3) ただし、平坦地盤で発生した災害規模の8割は、100m<sup>3</sup>以下の小規模な被災であった。

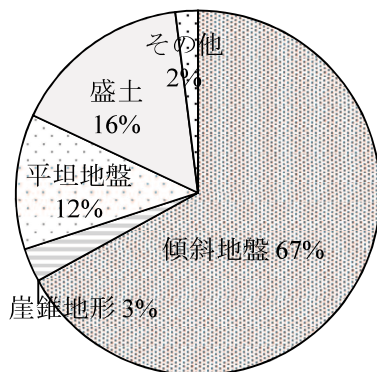


図 1.2.1 盛土災害の地形的要因

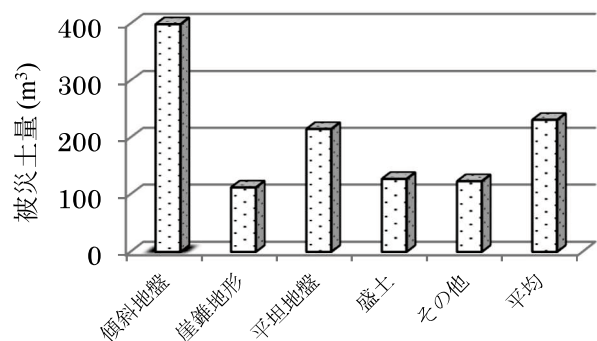


図-1.2.2 地形的要因ごとの被災土量

### 1.2.3 盛土材料と形状の要因

盛土材料による災害の傾向を把握するため、盛土材料ごとの災害件数を分析した結果を図-1.2.3に、同じく盛土材料ごとの災害1件当たりの平均被災土量を図-1.2.4に示した。盛土材料の中で災害件数の多かった粘性土、まさ土、しらす、泥岩について各々の被災規模の内訳を図-1.2.5に示し、同様に盛土材料と地形との関係を図-1.2.6に示した。

その結果、以下のような傾向が明らかとなった。

- 1) まさ土、山砂、など砂質系盛土材料での災害が約5割であった。
- 2) 盛土材料ごとの1件当たり被災土量は、泥岩が最も大きく650m<sup>3</sup>、まさ土としらすで300m<sup>3</sup>程度と他の材料に比べて大きな被災規模であった。
- 3) 粘性土の災害発生件数は全体の約3割と多いものの、1件当たりの被災土量は小さく、規模の小さな災害が多い。一方、まさ土、しらす、泥岩は規模の大きな災害が多く、特に泥岩での被災土量は600m<sup>3</sup>を超え極めて被災規模が大きい。しかもその傾向は傾斜地盤での発生が顕著である。

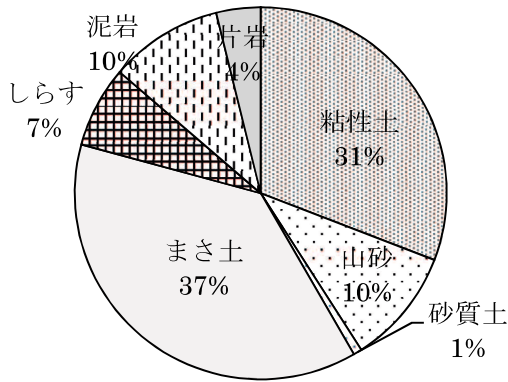


図-1.2.3 盛土材料別の災害件数

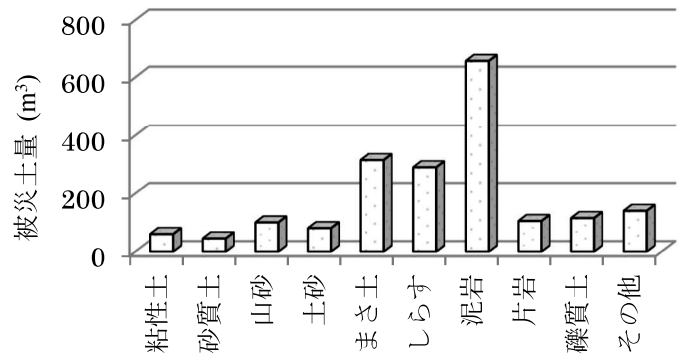


図-1.2.4 盛土材料別の被災土量

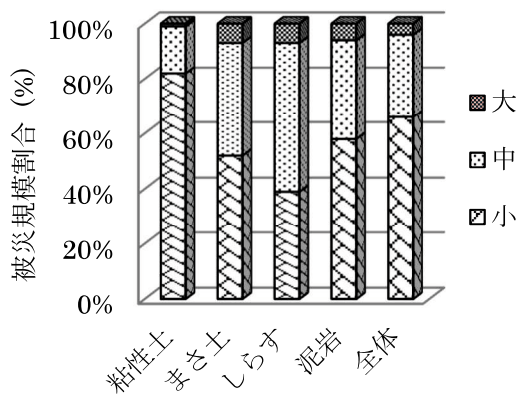


図-1.2.5 盛土材料別の被災規模

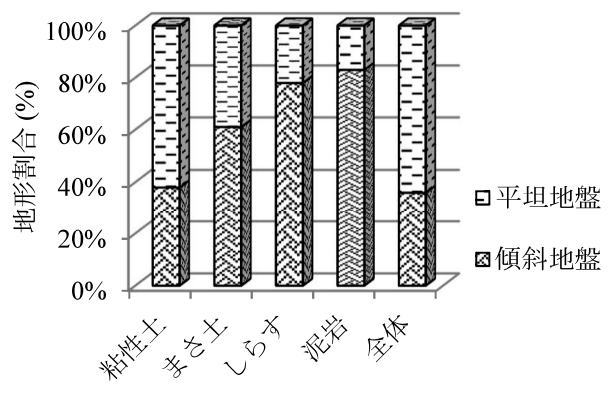


図-1.2.6 盛土材料と地形との関係

#### 1.2.4 災害要因

災害の発生原因の傾向を把握するため、原因別の災害件数の分析を行い、その結果を図-1.2.7 に示した。ここで、地山の含水比とは地山の含水比が飽和状態となり崩壊したものである。排水施設とは、排水施設が問題となり崩壊したもの、区域外とは高速道路区域外からの土砂流入などにより崩壊したもの、のり面保護工とはのり面保護工が問題となり崩壊したものである。また、災害発生原因ごと1件あたりの被災土量について整理したものを図-1.2.8 にまとめた。

災害原因による傾向は以下のとおりである。

- 1) 盛土災害発生原因は、地山の含水比と排水施設の不備による被災の割合が大きいことから、盛土は排水施設による影響を受けやすいことを意味している。

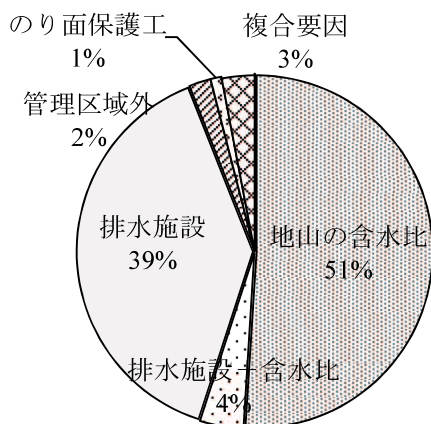


図-1.2.7 災害原因別件数

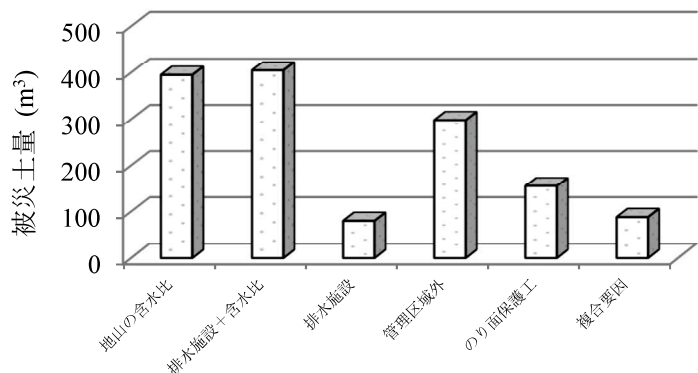


図-1.2.8 災害発生原因別の被災土量

- 2) 災害 1 件当たり被災土量は、地山の含水比によるものが多い。続いて排水施設かつ含水比、管理区域外、のり面保護工となっている。
- 3) このことから、盛土部は地山の含水比が飽和状態となることで、規模の大きな災害に至ることが分かる。一方、排水施設が原因による災害件数は多いものの、被災規模は小さい。

### 1.2.5 大規模盛土災害の分析

ここでは、災害の傾向をより詳細に把握するため、被災土量が 1,000m<sup>3</sup> 以上あるいは災害による通行止めを伴った 70 箇所の災害を抽出して盛土形状やのり尻構造による影響の 2 点に着目した分析を行った。

#### (1) 盛土形状の影響

上記 70 事例の盛土横断形状として、両盛、片切片盛、腹付け盛土、レベルバンクを有する腹付け盛土の 4 種類に分類した。また、盛土縦断形状として沢部、切盛境部、平坦部の 3 種類に分類した。これらの分類ごとに 1 件あたり被災土量を比較し、図-1.2.9 に示した。

盛土形状による災害傾向は、以下のとおりである。

- 1) 片切片盛や切盛境など切土と盛土の接点となる箇所での被災件数は少ないが、1 件当たり被災土量が極めて大きい。
- 2) 両盛および平坦な箇所の盛土は、被災件数は多いものの、被災土量は小さい。
- 3) 腹付け盛土の被災土量が少ないのは、全ての事例が 1 段から 2 段の盛土で規模が小さいことによるものと考えられる。また、レベルバンク(LB)を有する盛土は、2 段盛土以上であり相対的に規模の大きな盛土となっていることにより被災土量が大きくなっていると考えられる。

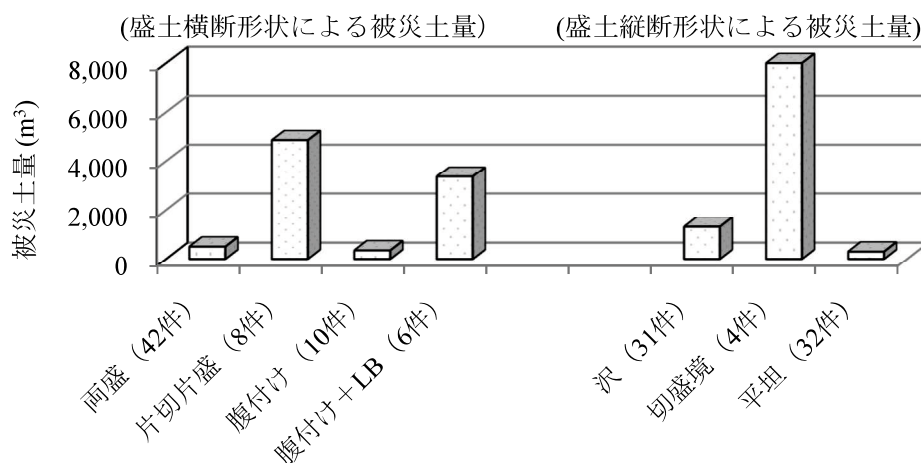


図-1.2.9 盛土形状による被災土量

#### (2) のり尻構造物の影響

のり尻構造物の有無による災害への影響度を分析するために、地山形状ごとにブロック積などののり尻構造物の有無について整理した結果を図-1.2.10 に示した。

のり尻構造物の有無による災害への影響は以下の通りである。

- 1) 排水施設に原因のある災害以外では、どのケースものり尻構造物があると被災土量は大きくなっている。
- 2) 特に、片切片盛や切盛境など急峻な地形では被災規模が極めて大きくなっている。これは地山からの地下水がブロック積により排水されにくく、ダムアップされて地下水位が上昇したものと推測される。



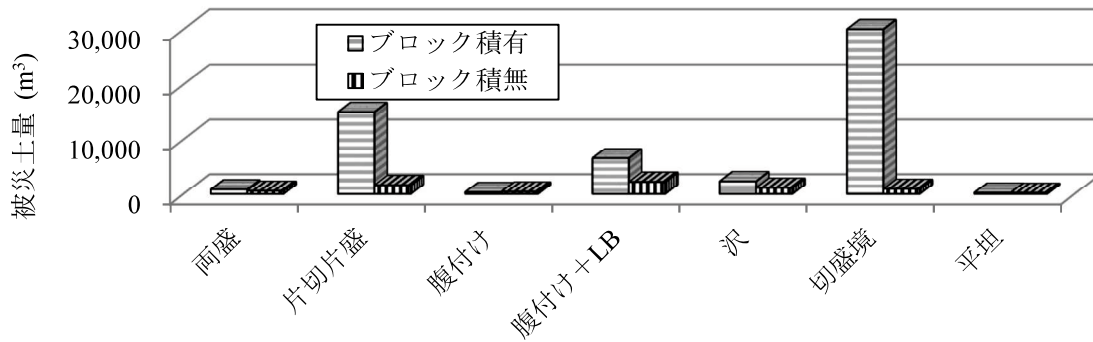


図-1.2.10 のり尻ブロック積の有無による比較 (盛土形状別)

### 1.2.6 盛土における災害傾向のまとめ

高速道路における盛土部での降雨による災害を分析した結果について、その特徴を以下にまとめる。

#### (1) 地形的要因

地形的要因に着目すると、災害事例の約7割が傾斜地盤箇所が発生しており、1件当たりの被災土量も平坦地盤の約2倍と規模の大きな災害となっている。また、過去に発生した大規模な災害も傾斜地盤上の盛土が多く、これが盛土での災害発生の最も大きな要因となっている。

#### (2) 盛土材料の要因

盛土材料に着目すると、砂質系材料での災害件数が多く発生し、被災規模からすると泥岩、まさ土、しらすなどが多い。一般的に粗粒材料と粘性土の中間の粗粒組成を有する材料は、排水性が悪く、間隙水圧の影響を受けやすく、浸透水による盛土内水位の上昇により有効応力が減少し、せん断力が極端に低下するために大規模な災害につながると考えられる。

粘性土材料は一般的に施工時に排水対策がとられていることや施工中、施工直後の安定性が最も低下することなどから、災害件数は多いものの、被災規模は比較的小さくなっていると思われる。

#### (3) 発生原因

盛土の被災原因は、他の構造物に比べて排水施設が原因となった被災件数が多い。また排水施設が原因である災害は、のり面上段部での被災が多く、盛土上部の排水施設の不備によるものと推測される。

一方、規模の大きな災害は、地山の含水比が飽和状態になったことによる災害が多く、被災土量はのり面下段部が多い。

#### (4) 大規模盛土の被災傾向

車線や高速道路区域外へ影響を及ぼすような大規模な崩壊は、片切片盛やレベルバンクを伴った腹付け盛土など集水地形における傾斜地盤上の盛土で多く発生しており、地山からの湧水が影響しているものと思われる。また、のり尻にブロック積等があるような場合には被災規模が大きくなる傾向が顕著である。

#### (5) 点検時の着目点

これまでの災害事例をもとに、盛土の点検時における着目点を以下のように整理した。

日常点検時においては、車上の目視点検時に、路肩側溝、縦溝のみ口部など、路肩部の排水状況を確認し、異常が見られれば、降車し路面上から状況を確認する。また切盛境部については地山からの湧水などにより脆弱化し、崩壊の兆候として路面に段差やクラックが生じることもあり、日常点検時には段差やクラックの有無に着目した点検が必要である。

詳細点検時においては、盛土のり尻の湧水の有無、地下排水溝からの排水状況などを重点において点検する

ことが必要である。また、異常が見つければ盛土の地下水位の監視を行うことなどで安定性を評価して、盛土の大規模な災害は防ぐことができると考えられる。

今回の検討で盛土における弱点部分が明らかになった。特に、盛土内の排水を良好にし、盛土内の地下水位を上昇させないことが、盛土の安定性確保に対して最も重要となる。

### 1.3 研究の目的

本論文で研究対象とした 2005 年山陽自動車道の岩国災害の他、2004 年新潟県中越地震<sup>13)</sup>や 2007 年能登半島地震<sup>14)</sup>において、沢を埋めた盛土で水に起因する災害が相次いだ。これを背景として降雨や地下水など水に対するより一層の配慮が求められるようになった。昨今の災害事例をもとに国や NEXCO などの技術基準類<sup>15),16)</sup>においても、排水対策に関する記述を強化し、降雨や地下水の作用に対する盛土の安定性について言及している。しかし、地下水に対する具体的な設計・照査手法までは示してはならず、過去の施工事例に基づいた経験的な手法が一般的に行われている。

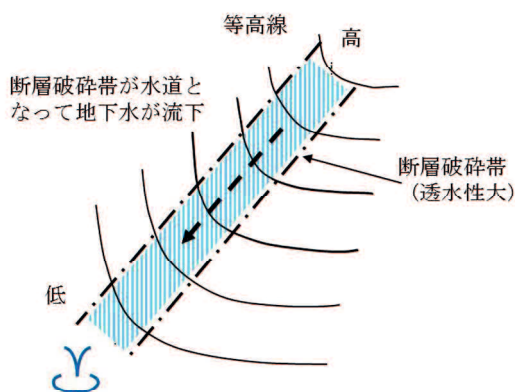
本論文の検討主眼は、断層破碎帯から供給される地下水の急増が災害の大きな引き金になったという点であり、ここでは地下水の供給メカニズムや供給量の算定など、これまで定性的な見解に留まっていたものを定量的に示し、新たな設計手法を提案することにある。

過去に盛土の排水効果を検証するための実験<sup>17)</sup>や山地を対象とした降雨流出を再現する解析<sup>18)</sup>、現地での土壌水分を計測した事例<sup>19)</sup>、地表水流量を実測した事例<sup>20)</sup>はあるものの、地下水流量を実測した事例は皆無である。そこで、岩国災害復旧盛土<sup>21)</sup>と宝塚北 SA 盛土<sup>22)</sup>の 2 箇所において、地下水と地表水の常時流量計測を 2 年間にわたって行い、盛土排水対策工の効果検証を行うとともに、断層破碎帯が地下水を供給する事象を明らかにした上で、断層破碎帯が盛土へ供給する地下水流量を推定し、さらにその供給される地下水に配慮した設計手法・維持管理のあり方についての提案を行うものである。

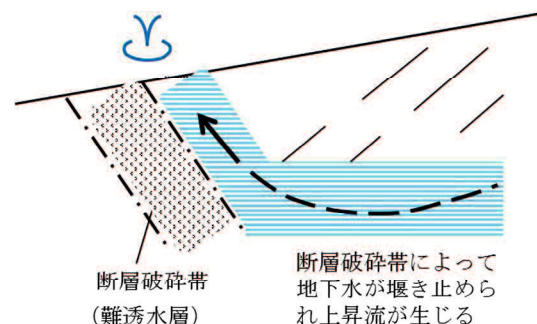
本研究で取り扱う断層破碎帯が地下水供給する事象とは、**図-1.3.1**と**図-1.3.2**に示す 2 つのケースを想定している。

**図-1.3.1**に示すケース A は、透水性が高く地下水を多く含んだ断層破碎帯が水道となって、地形の高い側（場合によっては別の流域）から低い側へ地下水が供給される事象である。ケース A の代表的事例が岩国災害であり、ボトルネック地形上部に谷埋め状態で盛土がなされ、盛土背後の集水域や断層破碎帯を介した多量の地下水が供給されて盛土崩壊に至った。山陰自動車道松江市玉湯地区での災害もケース A に該当する。このケースでは、断層延長線の下流側に地下水の流出箇所が見られる。

**図-1.3.2**に示すケース B は、難透水層である断層破碎帯が壁となりせき止められることで、断層の上流側（高い側）に地下水が貯まって高い側から低い側へ地下水が供給される事象である。ケース B の事例は山口県道銭壺山公園線での災害で、谷埋め状態で盛土がなされ盛土背後の集水域や断層破碎帯を介した地下水供給、盛土付近に貫入する花崗閃緑岩による地下水の堰上げ効果が相乗し盛土が崩壊した。宝塚北 SA 盛土もケース B に該当する。このケースでは、断層線上に沿って断層の上流側に湧水箇所が点在する形で見られる。



**図-1.3.1** 断層破碎帯が地下水を供給する概念図  
(ケース A)



**図-1.3.2** 断層破碎帯が地下水を供給する概念図  
(ケース B)

図-1.3.3 に示すように、ケース A (図-1.3.1) およびケース B (図-1.3.2) とともに地形的な流域を越えて地下水が供給される。

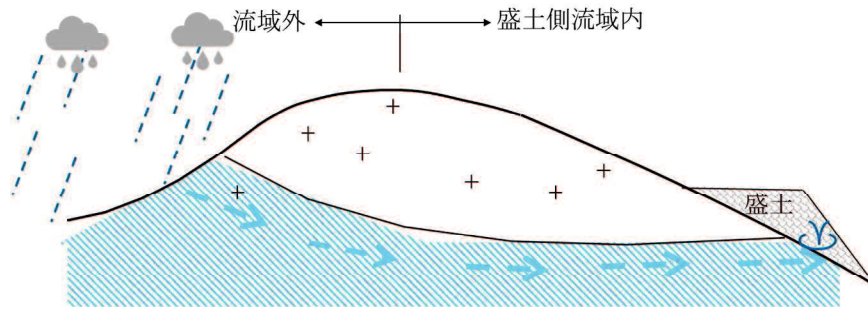


図-1.3.3 断層破碎帯が流域を越えて地下水を供給する概念図

## 1.4 用語の定義

本論文で使う用語は、以下のように定義する。

### 地下水

地下水とは、降雨によって地表面を流出する表面流出や蒸発散する水を除いた地下に浸透する水をいう。

### 地表水

地表水とは、降雨から蒸発散、浸透などによって失われたものを引いた残り、盛土のり面や自然斜面の地表面を流下する水をいう。

### 地下水流量

地下水流量とは、地下排水溝本管流末から流出する地下水の流量( $m^3$ )のことをいう。本文中では、これにのり尻工流量や雨水排水工流量を加えて地下水流量とする場合もあり、その場合は本文で注釈を加えている。

### 地表水流量

地表水流量とは盛土のり面や自然斜面・路面に降った降雨が小段排水溝やたて排水溝、用排水溝を通じて流出する流量( $m^3$ )である。地表水流量と中間水流量を区分して表示することもあるが、本論文においては両者を合わせて地表水流量としている。

### のり尻工流量

のり尻工流量とはのり尻工の流末から流出する流量( $m^3$ )である。一般的なのり尻工は、盛土のり尻箇所のみにはフトンカゴを点配置あるいは線状配置することが多いが、岩国災害復旧盛土においては、盛土のり面全体の4割程度にフトンカゴを面的配置している。そのため、岩国災害復旧盛土ののり尻工は地下水と地表水の両方を集水排水しており、のり尻工流量は地下水成分と地表水成分に分離して検討を行っている。

### 降水流量

降水流量とは、対象となる流域内に一定期間降った雨の量で、一定期間の降雨量( $mm$ ) $\times$ 流域面積( $m^2$ ) $\times$ 流出係数(1.0)で算出し、単位は  $m^3$  としている。

### 地下水流量率

地下水流量率とは、降水流量に対する地下水流量の割合(%)をいう。また、ここでいう地下水流量とは地下排水溝から流出する流量をさす場合と、これにのり尻工と雨水排水工から流出する流量を加える場合がある。その際は、本文で注釈を加えている。

### 流出率

流出率とは、降雨量に対して地表を流下する雨水の割合を表す指標をいう。降った降雨は地中に浸透したり、樹林に付着したり、蒸発散するため、地表を流れる量は降雨量より少なくなる。ここでは、降水流量に対する地表水流量の割合(%)としている。

## 流出係数

流出率と同意であるが、ここでは流出率と定義を区分して、地表面の種類や勾配などに応じて 0.1～0.95 などと降雨量に対して地表を流れる雨水の割合を表す比としている。

## 地下排水溝流量支配率

地下排水溝流量支配率とは、複数ある地下排水溝本管流末での流量の合計流量である全地下排水溝流量に対する各地下排水溝流量それぞれの率(%)をいう。

## 降雨量

雨量計で観測する降雨量とは、一定時間の間に雨量計に入った雨の量(mm)である。また、降水量は、雨、雪、霰、雹などの体積の合計を指すが、本現地計測では雨以外の降水はなく、降雨量と降水量は同義である。降雨量は 0.5mm 単位で計測され、10 分間降雨量(mm)、1 時間降雨量(mm)、日降雨量(mm)などとしている。

## 先行降雨量

先行降雨量とは、ある時刻の流量に影響を与えるある時刻以前に降った先行する一定期間降雨量のことである。本論文では、地下水流量に対しては先行する 1 週間～8 週間の累積降雨量を、またのり尻工流量に対しては先行する 1 時間～16 時間の累積降雨量を対象に分析している。

## 透水係数

透水係数とは、地層の透水性の程度を示す係数である。地層の多孔体中の層流に関する基本則のダルシーの法則を  $q=ki$  と表したとき、 $q$  を比流束（またはダルシー流速）、 $i$  を動水勾配、比例定数  $k$  を透水係数という。物理的には、多孔体中で流れの方向に直角な単位断面積を、単位の動水勾配の下で単位時間内に通過する水の量(cm/sec)として定義される。

## 浸透能

浸透能とは、ある土壌がその地表にある水分を一定の時間で吸収する（浸透させる）ことのできる割合のことをいう。この吸収できる割合は、地形や植被、土性、土湿、地温、水温といった様々な要因によって変化する。浸透能の割合は、一般的に初期で高い数値が表され（初期浸透能という）、時間がたつにつれて徐々に減少し、最終的にはほぼ一定の値を示すようになる（最終浸透能という）。

## 蒸発散

蒸発とは水の水蒸気への変換、蒸散とは植物が光合成をする際に根から吸収した水を葉の気孔から蒸発させる作用である。蒸発散量は蒸発量と蒸散量を合わせた量である。本論文において蒸発散量の推定は、ソーンスウェイト法とハモン法により求めている。

## 水収支率

斜面など地表面へ降った雨は、大きく分類して、地表面を流出する地表水流量と地中へ浸透する地下水流量、そして蒸発、蒸散する蒸発散量に分けられる。水収支率は、降水流量に対する地表水流量や地下水流量、降雨量に対する蒸発散量、これら率の和で定義される。通常の水収支は地表水流量と地下水流量、蒸発散量の和の収支率は 100%になると考えられる。

## 初期損失

初期損失とは、地表水の流出が発生するまでの累積降雨量で、地表面（舗装面、のり面、自然斜面など）から土壌中やアスファルト中の不飽和部に浸透したり、樹木に付着した降雨量と考えられる。単位は降雨量と同様に(mm)としている。

## 実測流量

実測流量とは、一定時間に流出する流量を手動で計測し、流量計測に要する時間から流量を算出するものである。岩国災害復旧盛土では、既設柵に貯留している水をポンプにより排出して水位を降下させ、その後の水位回復時間から流量を算定した。また宝塚北 SA 盛土では、排水管や三角堰から流出する流量をパイプやビニール管を通じて大バケツへ一定時間貯留し、バケツに貯留した流量と貯留に要した時間から流量を算出した。

## 計測流量

計測流量とは、水位を自動計測し、流量公式によって流量を算出している。岩国災害復旧盛土では、水位検出器で水位を自動計測し、その水位から堰の越流水位に換算して越流水位からフランシスの公式による流量式で算出した。また宝塚北 SA 盛土では、2 つの手法で計測している。1 つは、排水管や矩形ボックス管の流末底

部を削孔して塩ビ管（VP50）挿入し，その塩ビ管の中に自記式水位計（S&D Lmini）を設置して孔内水位を計測し，マンニングの式から流量を求めた．もう1つは，三角堰の越流水位を自記式水位計で計測し，トムソンの公式から流量を求めた．

### 計算流量

計算流量とは，三角堰や四角堰，全幅堰，各々の越流水深を鋼尺などによって手動で実測し，トムソンやフランスの公式により流量を算出した．

## 1.5 論文の構成

本研究の全体的な流れは図-1.5.1 に示すとおりである．

本論文は，次の6章より構成される．

- 第1章 序論
- 第2章 断層破碎帯が地下水を供給する事例
- 第3章 岩国災害復旧盛土での現地計測
- 第4章 宝塚北 SA 盛土での現地計測
- 第5章 盛土排水対策の技術的対応に関する提案
- 第6章 結論

第1章は序論であり，本研究に着手するにあたっての背景と必要性，研究の目的について述べ，本研究の概要と論文の全体構成について概説している．

第2章では，断層破碎帯が地下水を供給する事象の事例として，山陽自動車道岩国災害と新名神高速道路宝塚北 SA 盛土の2事例を取り上げた．それら2事例について，供給される地下水に対しての盛土排水対策検討の流れと対策工選定手法を示した．

第3章では，岩国災害復旧盛土において，地下水流量や地表水流量などを2年間計測し，断層破碎帯により地下水が供給される事象および盛土排水対策工の効果を検証し，結果をとりまとめた．実盛土での地下水流量計測を行った事例は過去になく，ここで新たに得られた地下水挙動などの知見を示した．

第4章では，断層破碎帯上に大規模盛土を構築した宝塚北 SA 盛土において，2年間地下水流量計測を行い，また施工中と施工後を中心としたモニタリングを行った．これに基づき，各排水施設の効果検証と今後の維持

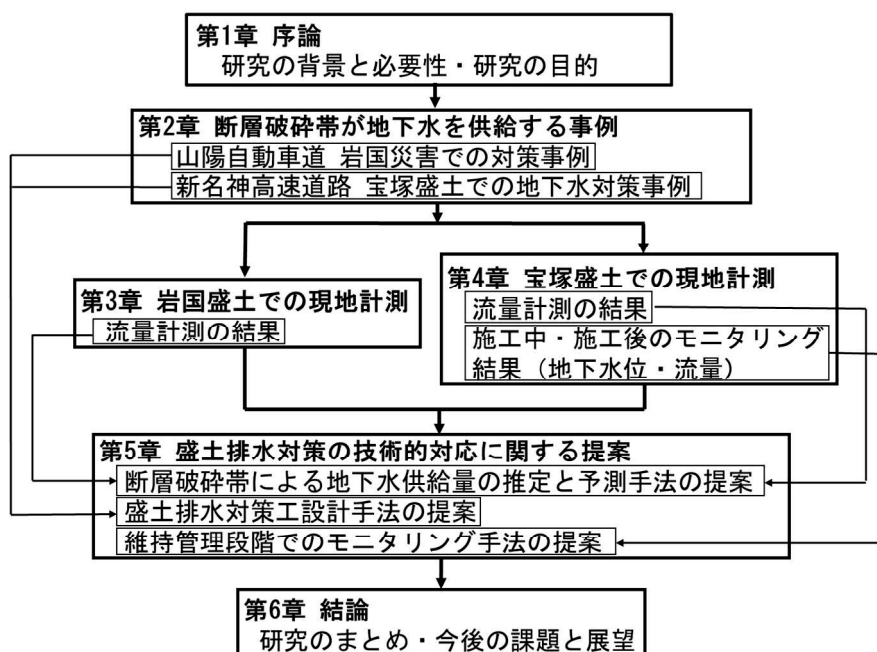


図-1.5.1 研究の全体的な流れ

管理における指標をとりまとめた。

第5章では、第3章で述べた岩国災害復旧盛土と第4章で述べた宝塚北SA盛土の現地流量計測結果から得られた地下水流量は、降水流量に対して極めて多く、降雨と時間差をもって排出されており、かつ長期間地下に賦存していることなどから、他流域から供給されている事実を究明した。その上で断層破碎帯から供給されている地下水量を算定し、地下水供給量の推定方法を提示した。さらに推定に基づいた排水対策工の設計手法と維持管理段階でのモニタリング手法の提案を行った。

第6章では、本研究の総括であり、各章の成果をとりまとめるとともに、今後の盛土の排水対策に関する課題や展望などを記述している。

## 第1章の参考文献

- 1) 村田秀一, 竹國一也, 中田幸男: 台風14号による山陽自動車道盛土法面崩壊を経験して, 土と基礎, Vol.54, No.12, Ser.No.587, pp.8-9, 2006.
- 2) 西日本高速道路㈱中国支社: 山陽自動車道災害調査検討委員会報告書, pp.17, 2006.
- 3) 竹國一也, 矢島尚彦: 高速道路の災害復旧 山陽自動車道, 基礎工, Vol.36, No.9, pp.76-79, 2008.
- 4) Murata, H, Takekuni, K. and Nakata, Y., Slope failure of embankment in Sanyo expressway due to passage of typhoon No.14 in 2005, Soils and Foundations, Vol.49, No.5, pp.797-806, 2009.
- 5) 小西義夫, 北村晴夫, 石本裕己: 傾斜地盤上の盛土崩壊における地形・地質的要因, 全国地質業協会連合会「技術e-フォーラム2008」, 高知, 論文No.105, 2008.
- 6) 渡部芳彦, 柴田佳久, 新枝幹夫, 春口孝之: 集中豪雨に伴う道路のり面の災害事例, 日本応用地質学会中国四国支部平成19年度発表論文, 論文番号13, 2007.
- 7) 岩島保: 新名神高速道路における高盛土の設計と施工ー(仮称)宝塚サービスエリアでの事例ー, 基礎工, Vol.41, No.10, pp.69-72, 2013.
- 8) 岩島保, 森英治: 新名神高速道路(仮称)宝塚サービスエリアでの高盛土における課題と対応, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, VI-270, pp.539-540, 2014.
- 9) 国土交通省: 土砂災害対策における最近の傾向 最近10年の土砂災害発生件数及び人的・家屋被害件数, 2018.3.22, ([www.milt.go.jp/river/sabo/jirei/h29dosha/H29doshasaigai.pdf](http://www.milt.go.jp/river/sabo/jirei/h29dosha/H29doshasaigai.pdf))
- 10) 国土交通省砂防部: 土砂災害対策における最近の動向, [http://www.milit.go.jp/river/sabo\\_hyoka\\_aso/09sankoshiryo1.pdf](http://www.milit.go.jp/river/sabo_hyoka_aso/09sankoshiryo1.pdf), 2018.10.3.6
- 11) 国土交通省: 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律の一部を改正する法律, 2017.5.19 公布
- 12) ㈱高速道路総合技術研究所: 高速道路における被災分析(技術資料), pp.15-66, 2007.7
- 13) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟県中越地震の被害データに基づく高速盛土の被害率と地震動強の関係, 土木学会論文集A, Vol.64, No.2, pp.208-216, 2008
- 14) 為重誠, 川村國夫, 駒田秀一, 宮村雅行, 植村強, 室井辰盛: 能登半島地震による能登有料道路の被災と～復旧盛土の被害と対策工事について～, 土木学会論文集, Vol.4, No.4, pp.289-305, 2009
- 15) 徐永強, 澤松俊寿, 林豪人, 藪雅行, 小橋秀俊, 盛土における水平排水パイプの地下水排除効果, 土木学会第64道路土工委員会道路土工指針検討小委員会盛土指針分科会: 「道路土工指針ー盛土工指針」(平成22年度版), Vol.830, pp.56-57, 2010.
- 16) 西日本高速道路株式会社: 設計要領第一集土工建設編, pp.4, pp.31-38, 2016.
- 17) 徐永強, 澤松俊寿, 林豪人, 藪雅行, 小橋秀俊: 盛土における水平パイプの地下水排除効果, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, III-299, pp.597-598, 2009.
- 18) 斎藤泰久, 鈴木章浩, 伊藤覚: 準三次元地下水浸透流解析モデルを応用した分布型水循環モデル(WCAP)の構築, 土木学会論文集, No.810, pp.1-15, 2006.
- 19) 嵯峨浩, 余湖典昭: 森林斜面域の観測に基づく流出特性と土壤水分状態に関する研究, 北海道河川財団研究所紀要, Vol.18, 2007. (<http://www.ric.or.jp/profile/works/kiyou19.html>)
- 20) 古賀博久, 堀田洋平, 大津宏康, 前田良刀, 高橋健二, 矢部満: 熱帯性豪雨に伴う斜面表層部における水収支に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, pp.341-358, 2014.
- 21) 竹國一也, 竹本将, 秦二郎, 中田幸男: 山陽自動車道盛土の降雨に対する安定性評価, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, III-482, pp.963-964, 2017.
- 22) 竹國一也, 山口卓位, 古賀泰輔: 高速道路大規模盛土における地下水流量計測, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, III-236, pp.471-472, 2018.

## 第2章 断層破碎帯が地下水を供給する事例

### 2.1 はじめに

第1章で述べた盛土構造物の災害事例から、集水地形にある傾斜地盤上の盛土において地山の含水比が飽和状態になった場合など、水に起因する災害が多く発生していることが分った。ここでは、前述の水に起因する事象以外の断層破碎帯が供給する地下水に着目した事例を収集した。

断層破碎帯が地下水を供給するという事象は、岩国災害の原因究明<sup>1)</sup>によって初めて注目された事象である。その後発生した災害の中にも同様の事象を災害原因とする事例<sup>2),3)</sup>や新規建設となる新名神高速道路事業においても断層破碎帯による地下水供給に配慮した設計施工事例<sup>4),5)</sup>がある。

本章では、それらの事例の中から、筆者が直接かかわった山陽自動車道岩国災害と新名神高速道路宝塚北SA盛土の2事例を提示する。1つ目の事例は、2005年9月に発生した山陽自動車道の災害で、この災害発生直後から、現地での原因究明調査や災害事象の再現解析や復旧対策工選定の過程を経て災害復旧を行っている。2つ目の事例では、建設中の新名神高速道路において活断層である十万辻断層上に大規模な盛土を行うにあたり、上記の岩国で被災した地形・地質に極めて類似した条件であることを踏まえて、水文調査や地質調査に合わせて解析などによって排水効果を検証した上で、排水対策工を選定した。

この2事例は、今後の地下水供給に伴う排水対策を検討する上で、非常に有益な参考事例である。このような事例から断層破碎帯によって供給される地下水が盛土の安定性にどのように影響するのか、またどのような検討過程を経て、排水対策工を選定したのかについて述べる。

### 2.2 岩国災害での事例

#### 2.2.1 災害概要

##### (1) 災害状況

前述の通り、台風豪雨によって、2005年9月7日0:50頃、山陽自動車道岩国IC~玖珂IC間の岩国市甘木地区の盛土が崩壊する岩国災害<sup>6)</sup>が発生した。崩壊形態は、写真-2.2.1に示すように高速道路本体が上り線の走行および追い越しの2車線路面を含め、道路延長方向に約50m、高さ23mにわたり約13,800m<sup>3</sup>の盛土が崩壊流出した。崩壊した土砂は、民家2軒を巻き込み、市道甘木線を覆い、さらに下流の田畑上に堆積し、崩壊土砂の先端は甘木川へと達した。崩壊の形状は、高速道路本線に平行して陥没崩壊し、崩壊底部付近から旧沢地形に沿って、盛土のり尻から谷の対岸側の山裾部にある甘木川まで約80mにわたって土塊に乱れない状態で泥水状に流動移動した。すべり面は上端部が垂直に落ちた典型的な円弧すべりである。図-2.2.1には、災害



写真-2.2.1 岩国災害被災状況写真

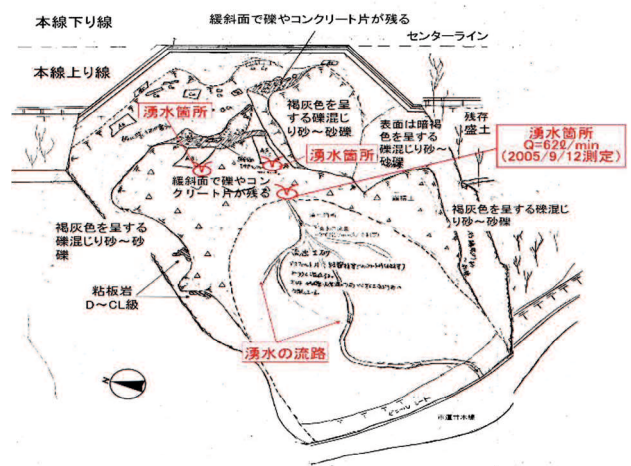


図-2.2.1 被災箇所スケッチ

発生直後の状況のスケッチ図を示した。これによると、すべり底部に3箇所の湧水地点が見られ、そのうち崩壊面中央部分1箇所の湧水量は、災害発生5日後の2005年9月12日測定で620/minと非常に多い。崩壊移動した土塊上には流木が多少傾斜しているが、原形のまま乗った状態で残存している。泥水状態で移動した形跡から盛土内には相当の水の供給、浸透水があったと思われ、盛土内の地下水位が上昇して被圧水の働いた可能性が伺える。本線横断排水のコルゲートパイプの呑口部に流水はなく、異常も見られず、コルゲートパイプおよび地下排水溝は、崩壊土に埋もれて表面には表れていなかった。

下り線側舗装路面には崩壊部と平行したクラックと沈下が見られる。比較的大きなクラックは4~5本程度で、上り線崩壊部周辺には横断クラックが発生している。中央分離帯と上り線路肩ガードレールはぶら下がった状態で残存していた。

(2) 降雨状況

災害発生当時、山口県では7観測地点で観測史上最多の日降雨量を記録し、岩国災害箇所直近の岩国市寺山観測所では、図-2.2.2に示すように災害発生時で509mm、累積降雨量524mm、最大時間雨量64mm、降雨時間約70時間を観測した。山陽自動車道岩国IC~玖珂IC間は、1992年6月の開通から災害発生まで13年を経過しており、JHでの降雨観測記録<sup>7)</sup>によるとそれまでの間に累積降雨量200mm程度、降雨時間30時間程度の大雨を数回経験しているものの、岩国災害が発生するまでのり面のすべりや崩壊は発生していない。このように災害時の豪雨は、それまでに経験した累積降雨量および降雨時間ともに2倍以上の観測値となり、過去をはるかに上回る降雨量であった。

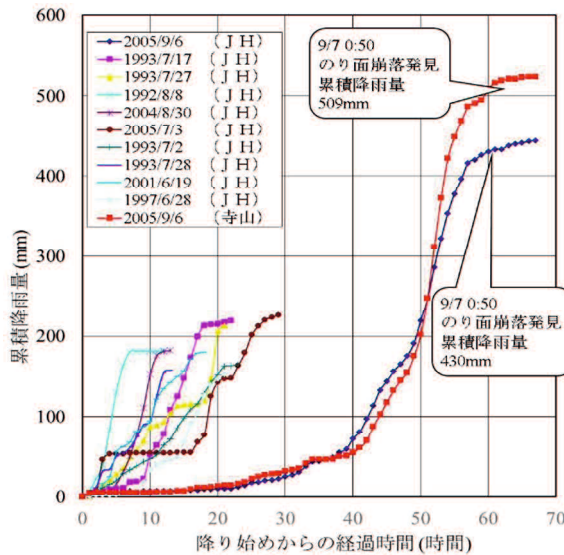


図-2.2.2 災害時降雨量

2.2.2 地形・地質概要

被災した盛土の背後には230mの山地があり、表層部の状況は山林地帯と切土のり面である。また、図-2.2.3の災害発生地周辺の地形判読図が示すように盛土内には2つのリニアメント(断層)が存在し<sup>7)</sup>、当該地および周辺地区は過去に土石流の発生した形跡が数多く見受けられる。また、表層には崖錘堆積物が薄く分布し、下に基盤岩である玖珂層群が分布している。崖錘堆積物は礫混じり粘性土が主体と推定され、基盤岩は風化が著しく進行したことで粘土化し、亀裂が多く見られる。基盤岩は領家変質岩類の砂岩・粘板岩・チャートからなり、盛土部は基盤岩を覆って崖錘堆積物(礫混じり砂)が分布している。周辺の地質は、活断層の岩国断層と大竹断層に挟まれた地域で断層間は小断層がよく発達した地質構造である。また、図-2.2.4に示すように岩国断層から分岐した甘木断層がほぼ南北方向に走行し、盛土を斜めに横断している。建設時の地質踏査では、断層面と旧沢部とがほぼ一致したところから多くの湧水が見受けられた。

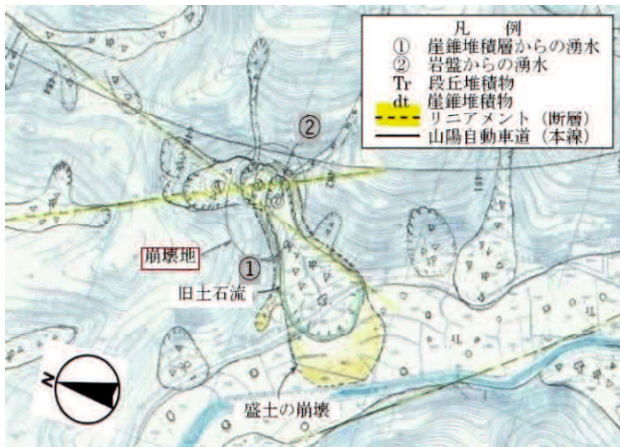


図-2.2.3 岩国災害周辺の地形判読図<sup>7)</sup>に加筆修正

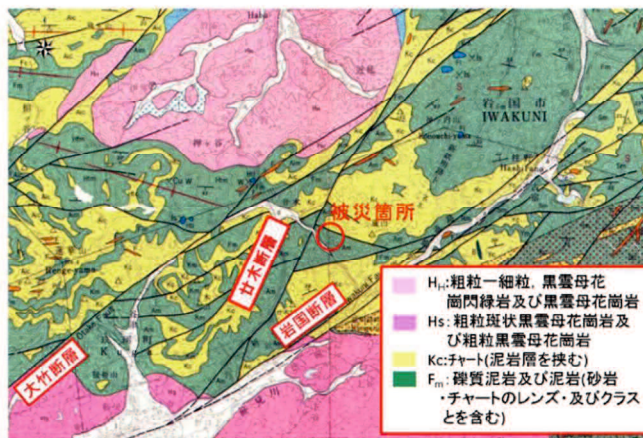


図-2.2.4 被災箇所周辺の地質図<sup>7)</sup>に加筆



## 2.2.3 被災箇所への道路構造と現地調査

### (1) 道路構造

崩壊箇所の道路構造は、図-2.2.5、図-2.2.6が示すようにのり面勾配が1:1.8で、盛土高さ約23mの盛土構造である。盛土のり尻部には、図-2.2.5に示す赤で着色した高さ1.7~2.3m、延長21.5mのコンクリートブロック積による擁壁が施工されている。また、のり尻部の第一のり面には、青色で着色したのり砕工（格子わくブロック）が施工され、それ以外については植生のり面となっている。

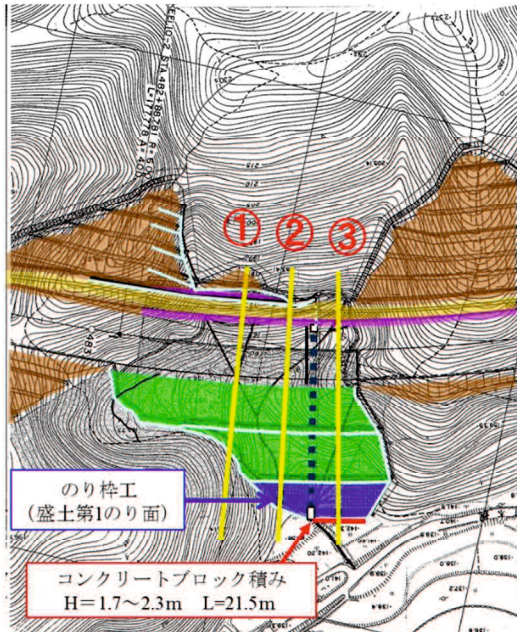


図-2.2.5 被災箇所平面図

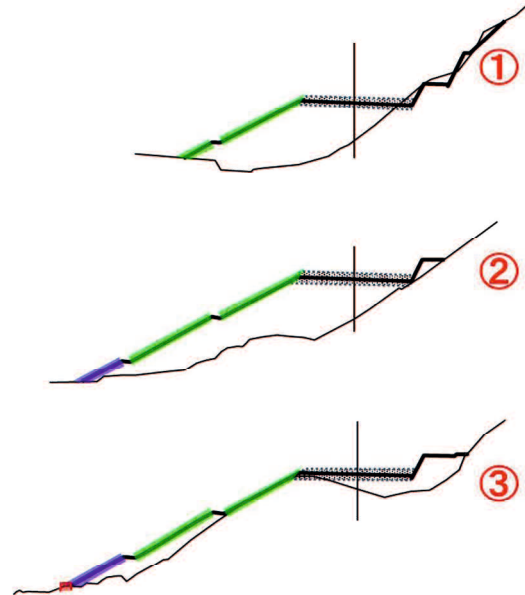


図-2.2.6 崩壊箇所断面図

### (2) 崩壊箇所の排水施設

崩壊盛土部の流域と表面排水系統を図-2.2.7に示した。これによると、切土のり面および本線外流域と路面排水を受けるA-3流域の降雨は、管径1,500mm、延長75.3m、勾配33.5%のコレゲートパイプにより本線を横

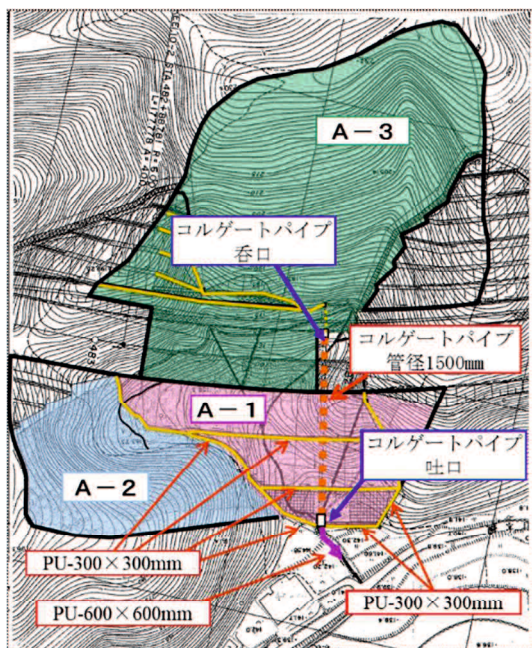


図-2.2.7 崩壊箇所の表面排水施設

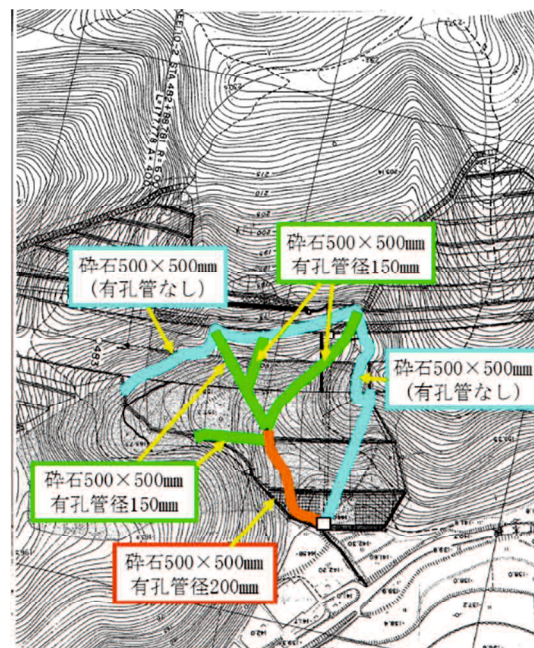


図-2.2.8 崩壊箇所の地下排水施設

断排水している。A-1 流域の盛土のり面排水は、用排水溝 (PU-300×300mm) を各小段に配置し処理している。A-2 流域への降雨については、盛土用地境界部に用排水溝 (PU-300×300mm) を設置し処理している。

各流域からの流末処理として、コルゲートパイプ吐口部集水ますから用排水溝 (PU-600×600mm) により市道甘木線側溝の用排水路に接続している。

盛土箇所は3箇所の沢部を埋土する地形である。図-2.2.8 に示すように盛土に先立ち沢部の湧水処理として沢部3箇所に有孔管付地下排水溝 (碎石 500mm×500mm, 有孔管径 150mm) が配置されている。岩国 IC 側と玖珂 IC 側の沢の合流部からは碎石 500mm×500mm, 有孔管径 200mm で Y 字形に接続され排水されている。切土と盛土境界部や湧水状況に応じて必要箇所には、有孔管なしの碎石地下排水溝 500mm×500mm を配置している。各方向からの地下排水溝は、盛土のり尻部、横断排水管 (コルゲートパイプ管径 1,500mm) 吐口付近に集約し排出されている。

### (3) 排水施設の状況調査

崩壊土砂の撤去に伴い、災害原因究明のために表面排水施設の状況確認を行った。本線背後流域と路面排水 (A-3 流域) を取り込んでいる横断排水管の状況は、盛土のり面崩壊すべり線上である横断排水管の中間部分で破断しており、中には土砂が堆積していた。しかしながら、損傷部の下流側においては、土砂堆積は見られず、盛土のり面崩壊によって破断して流入したものと判断され、通水障害を来すような状況は確認されなかった。

地下排水施設についても同様に掘削して状況を確認した。確認調査にあたっては、図-2.2.8 に示す岩国側と徳山側の2方向の沢から崩壊盛土沢深部で Y 字形に設置された有孔管入り地下排水溝の位置から下流側に向けて掘削を行った。

有孔管内には、管底に一部土砂の堆積やヘドロ状の土砂が堆積するものの有孔管およびフィルター材は健全に機能していた。ところが、Y 字形合流部から 15m 下流地点で有孔管が約 1.5m にわたり欠損している箇所が確認された。地下排水溝は有孔管の有無にかかわらず、地下水の上昇や浸透水により盛土内への水位上昇を抑制するために設置しているものであり、機能として有孔管だけでなく、フィルター材としての碎石においても通水される。地下排水溝が分断されて排水が全く機能していないというわけではない。しかし、有孔管の欠損により異常降雨時には、十分な排水機能が確保されず、ここから盛土内への浸透水供給があった可能性がある。

### 2.2.4 盛土崩壊メカニズムの究明

調査結果をもとに、盛土のり面の崩壊メカニズムについて検証を実施した。解析は、盛土のり面崩壊方向と想定される旧沢筋に沿った地質断面図 (解析主側線) を解析断面位置とした。解析方法として、盛土内の水位が崩壊に至るまで刻々と変化する降雨量および降雨の盛土内浸透や湧水条件を考慮するため、2次元の非定常浸透流解析を用いて解析を実施した。浸透流解析に適用する降雨強度は、崩壊地に最も近い位置にある山口県の寺山観測所で記録された時間降雨量を採用した。各土質定数値は、地質調査より得られた数値 (内部摩擦角  $\phi=12^\circ$ , 粘着力  $c=35\text{kN/m}^2$ ) を採用した。

解析は、降雨浸透能 1.0, 湧水範囲 57m, 湧水時間 32~48h (のり枠考慮) の条件で行った。解析の結果、安全率  $F_s$  は 1.0 を下回るものの、崖錐層下部を通る深いすべりとなった。しかし、災害調査による崩壊形態の状況は、コンクリートブロック積み擁壁の破損状況、崖錐層上部の盛土との境界付近や崖錐層下部の基盤との境界付近を通るすべり想定線を勘案すると、解析結果よりも浅いすべり線が妥当と判断される。崖錐堆積物は礫分を多く含むが、土質試験では直径 150mm の三軸圧縮試験の供試

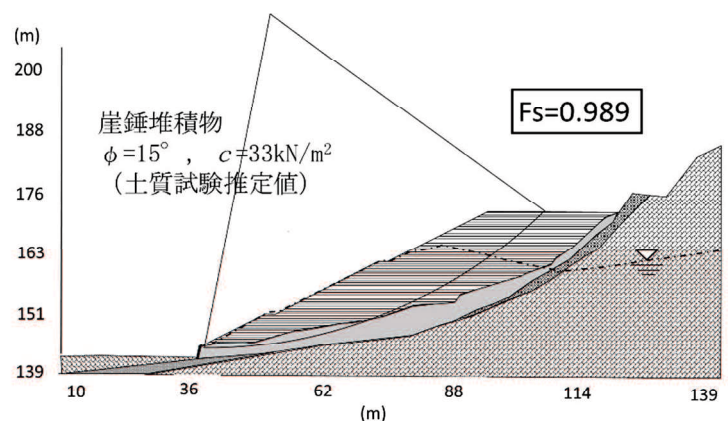


図-2.2.9 盛土のり面崩壊状況推定図

体として調整する場合は 粒径 37.5mm 以上の礫を取り除いており、その割合は全体の 6.9%である。したがって、試験値と比較すると、実際の粘着力  $c$  はやや小さく、内部摩擦角  $\phi$  はやや大きいと推定される。

よって、崖錐堆積物は土質試験推定値 ( $\phi=15^\circ$  ,  $c=33\text{kN/m}^2$ ) を使用することで、実際の盛土のり面崩壊形状に近いものとなるかを、安定解析シミュレーションにより再検証し、**図-2.2.9** に示すように実際の盛土のり面崩壊状況に近い結果が得られた。これにより、災害原因として調査検討してきた事実関係と長時間降雨が盛土内への浸透や湧水により、地下浸透水量を助長し、結果として盛土内地下水位の上昇を高めたことが、盛土のり面の崩壊に繋がったものと結論付けた。

### 2.2.5 災害原因

前述の災害後の現地調査や盛土のり面崩壊メカニズムの究明を踏まえて、「山陽自動車道災害調査検討委員会」では、災害の原因究明と復旧方法の検討にあたった。その結果、原因は以下に示す 4 つの複合的要因により崩壊に至ったと結論付けられた<sup>8)</sup>。

#### ① 観測史上初の異常降雨

降雨は、約 70 時間の降雨時間で累積降雨量が 524mm、時間降雨量 60mm 程度が 3 時間連続した。この降雨により、盛土内へ水が浸透、滞水し、地下水の上昇につながった。

#### ② 断層破碎帯による地下水供給の急増

当該盛土の背後には 2 つの断層破碎帯があり、この断層破碎帯によって盛土内へ地下水の供給が急増した。

#### ③ 地下水を排出しにくい地形・盛土構造

当該盛土は、3 つの沢が合流する箇所であり、3 方向の流域から水の供給があり、また水を排出するのり尻部が絞り込まれるボトルネック地形となっていた。さらに地下排水溝の流末は 1 箇所を集約されて地下水を排水しにくい構造であった。

#### ④ 地下排水溝の欠損

地下排水溝にあるべき有孔管の一部欠損箇所が見つかった。地下排水溝としての砕石はあったものの、有孔管欠損による排水機能の低下が地下水の上昇につながった。

これら 4 つの要因が、複合的に作用することで、長時間の降雨により浸透した水や、断層破碎帯部や 3 方向の沢地形からの地下水供給が盛土内部に集中した。その供給された地下水を排出する機能が不足したことから、盛土内水位が上昇し、盛土が大規模な崩壊に至ったものである。

### 2.2.6 災害復旧対策工

上記災害原因を踏まえてとった災害復旧対策工平面図を**図-2.2.10**、断面図を**図-2.2.11** に示す。その特徴は、以下のとおりである。なお、本災害復旧対策工は、災害時の降雨条件を与えた浸透流解析によって安定性の検証を行っている。

#### ① 地下排水溝の配置

地下排水溝本管は、盛土中央最底部に管径 1,500mm の大口徑有孔管付砕石層の地下排水溝中央本管と、そ

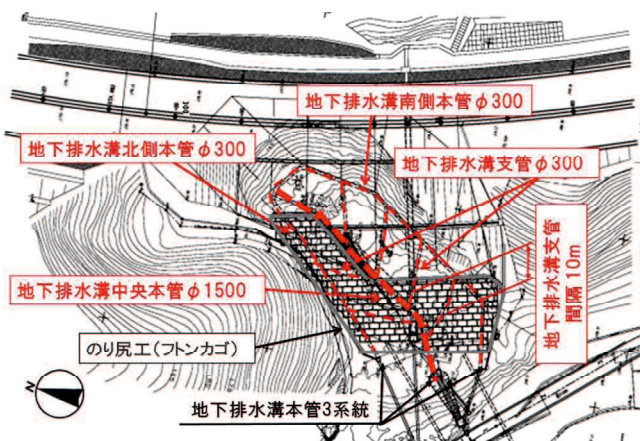


図-2.2.10 災害復旧対策工平面図

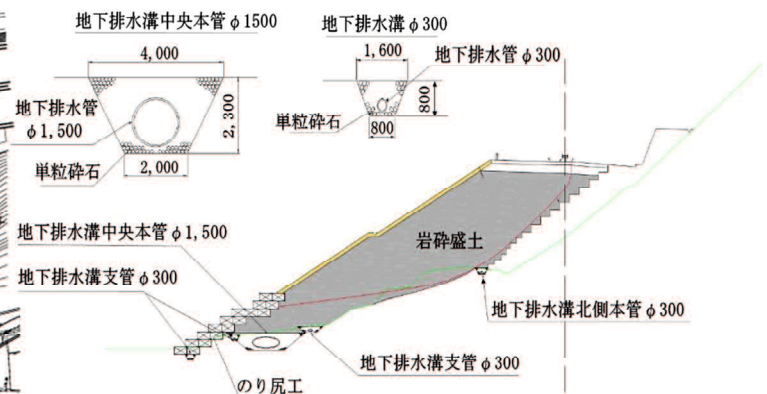


図-2.2.11 災害復旧対策工断面図

れよりも高い位置の南北斜面上それぞれに管径 300mm の有孔管付碎石層を配置した地下排水溝南側本管および地下排水溝北側本管で、本管は 3 系統とした。また支管は 10m 程度の間隔で地形沿いに配置し、集水と過剰間隙水圧上昇を抑制している。これらによって排水機能の強化を図った。

② 盛土材料

崩壊土砂はすべて取り除き、また確実な段切りを行った上で、盛土材料には、透水係数  $k=4.1 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$  と透水性の良い岩砕により盛土体を再構築した。さらに盛土下部には、地下水を確実に排水するためにのり尻工としてのフトンカゴ（以降：のり尻工と呼ぶ）を面的に配置し透水性の向上と盛土の洗掘防止を図った。

③ のり面

盛土のり面は、雨水の盛土内浸透や洗掘防止に配慮して緑化を基本とした。

2.3 宝塚北 SA 盛土での事例

2.3.1 宝塚北 SA 盛土概要

宝塚北 SA 盛土は、2018 年 3 月に開通した新名神高速道路の川西 IC～神戸 JCT 間に位置する最大高さ約 70m、土量約 400 万  $\text{m}^3$  の大規模盛土である(写真-2.3.1)。当該盛土直下には、活断層である十万辻断層が位置しており、図-2.3.1 に示すように断層上流の北側斜面では十万辻断層線上に自噴する湧水点が配列され、地質状態から断層沿いに地下水がダムアップされている湧水と推測された。

この事象は、2005 年に発生した断層破碎帯が地下水を供給したことを原因とする山陽自動車道岩国災害箇所と極めて類似した地形・地質条件である。したがって、当該箇所での大規模盛土においては、岩国災害での教訓を踏まえた検討を行うこととした。

そこで、当該断層破碎帯が当該盛土内へ地下水を供給する可能性についての検討を行うため、流域の水文調査や河川流量観測を実施した。また、調査結果をもとに三次元水収支解析によって通常降雨時・豪雨時の盛土内の地下水分布を予測し、それに基づいた排水対策工を選定した。さらに、盛土建設中および完成後のモニタリングとして地下水位および流量計測を行った<sup>10)</sup>。

本節では、上記検討内容を取りまとめた。

2.3.2 地形・地質概要

当該地点は、南北と西側を標高 200～250m の山に囲まれた僧川の支流流域であり、ボトルネック状に谷出口が絞られている地形である。谷出口は両側が比較的急斜面で囲まれているものの、上流側は周辺の平坦面に漸移するように広がっており、5°程度と勾配は比較的緩やかである。

当該箇所の地質は、図-2.3.2 が示すように中生代白亜紀の有馬層群（石英斑晶を含む溶結凝灰岩、灰



写真-2.3.1 宝塚北 SA 盛土の全景

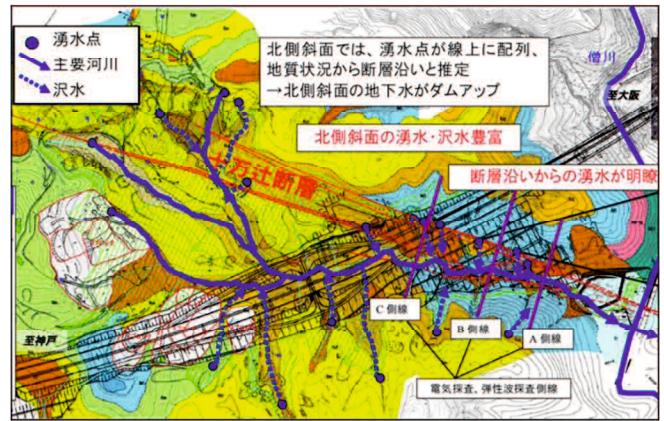


図-2.3.1 十万辻断層と湧水点の位置関係

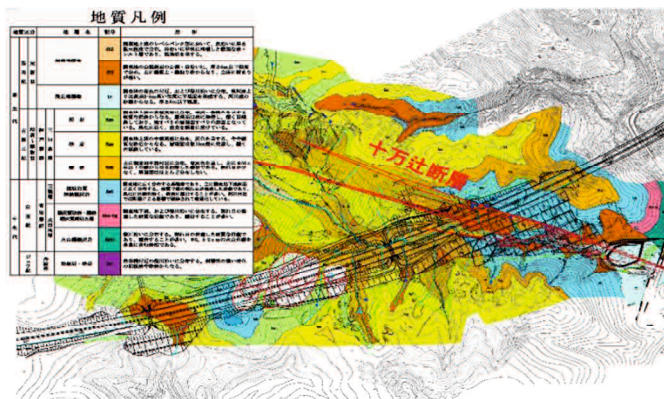


図-2.3.2 宝塚北 SA 盛土箇所地質図

色の火山礫凝灰岩)を基盤岩とし、これを覆う形で第三紀の神戸層群(泥岩、砂岩、礫岩)が高標高部に分布する。盛土谷沿いには、十万辻断層の一部である断層破碎帯が多く露頭している。断層破碎帯は、比較的硬質・固結した箇所(断層岩、一部破碎したものが再固結した岩石)と粘土薄層を多数含む軟質に変質した箇所(原岩が礫状を呈する断層角礫帯)からなる。主に前者が中央に挟まれ、後者が断層の両縁に分布するような産状である。断層破碎帯はほぼ鉛直～約80°北傾斜で地下に延びている。

### 2.3.3 水文調査

大規模盛土の基盤となる沢部は、十万辻断層破碎帯の周辺に位置し、渇水期でも豊富な水量を有する箇所である。図-2.3.3のように、北側斜面から湧水が数箇所確認され、また断層と平行して湧水地点が多く認められ、地下水が断層によってダムアップされている可能性のあることが懸念された。そこで、断層と地下水の関係や地下水の性状(滞水層、水圧変化)を確認し、地山の地下水構造を把握することとした。

ここでは図-2.3.4に示すような地表踏査、ボーリング調査および電気探査によって岩盤中における水みちの存在とその方向性を確認した。また、現場透水性試験・湧水圧試験によって表層、破碎帯、岩盤での透水性を把握し、滞水層の分布を確認した。さらに、地下水位の連続観測から滞水層毎の地下水挙動の違いを把握した。これらの調査・試験から、以下のような結果が得られた。

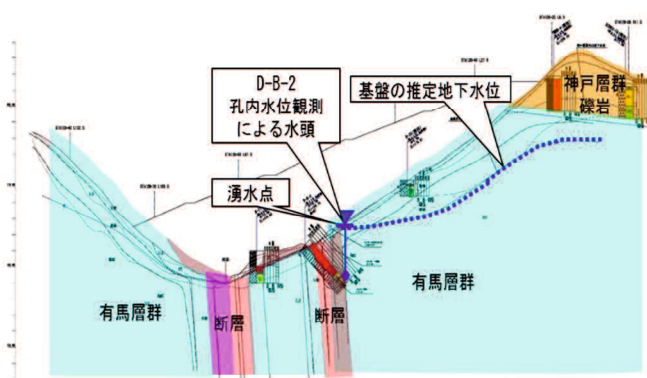


図-2.3.3 断層部の状況

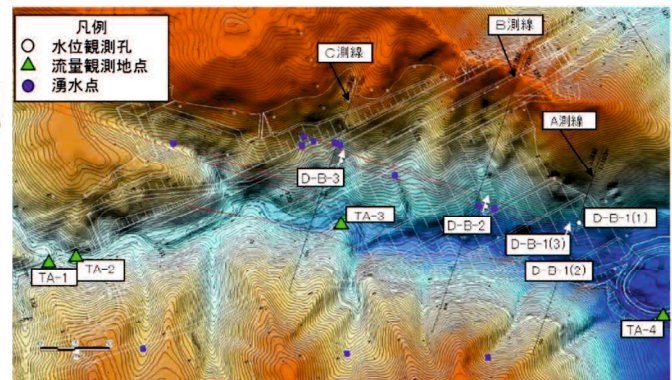


図-2.3.4 調査状況

#### (1) 断層北側基盤の地下水

断層北側基盤は年間を通じて地下水位が高く、谷の上流側では地表面以上の地下水位を有している。降雨時には図-2.3.4のD-B-3号測線(C測線)において、3m以下程度の緩やかな地下水位上昇が確認された。断層により北側斜面の地下水位をダムアップする特性が年間を通じて認められ、降雨による水圧上昇は緩やかであることを示している。

#### (2) 流域内の地表水の状況

十万辻断層沿いには、断層によって北側斜面の地下水がせき止められて、地表へ地下水が湧出している。これは、僧川合流点～高盛土～レベルバンクへと共通して認められる。

湧水点は、十万辻断層沿いの北側斜面に連続して確認され、湧水点の位置は、標高位置に大きな変化はなく安定している。断層沿いの湧水は、河川流量を大きく変化させるほどの量ではない。また、断層沿いの湧水量に明瞭な季節的变化は認められない。

#### (3) 沢流量

地下水解析に必要な資料とすることと合わせて、盛土施工中や維持管理段階でのモニタリングの指標とすることを目的に沢流量を連続観測し、基底流量および降雨に対する沢流量の応答を捉えた。

基底流量は、レベルバンク部の支流上流域で0.0035～0.001m<sup>3</sup>/sec、支流末端付近で0.0015m<sup>3</sup>/secであった。渇水期流量は、支流上流域で0.0056 m<sup>3</sup>/sec/km<sup>2</sup>に対して支流末端で0.0047 m<sup>3</sup>/sec/km<sup>2</sup>であった。これは支流中

流から下流域にかけては一部伏流区間となっていることが考えられる。ピーク流量は、支流上流域で  $0.06\sim 0.09\text{ m}^3/\text{sec}$ 、支流末端付近で最大  $0.2\text{ m}^3/\text{sec}$  であった。

対象地域に存在している地表水は、地形的に集水される地表水だけでなく、孔内水位観測結果から断層内部は地下水位が低く、断層に接する北側の岩盤中の地下水は豊富で被圧され、ダムアップされていることが観測された。現場透水係数からも北側の岩盤の透水係数は概ね  $10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$  で透水性が高く、断層破砕帯部の透水係数は概ね  $10^{-7}\text{cm}/\text{sec}$  と透水性の低いことが把握できた。このことにより、図-2.3.3 に示すように透水係数の違いから地下水がダムアップされ、自噴していることが明らかとなった。

よって、当該箇所は一般的な地表水に対する対策だけでなく、地下水の挙動を詳細に捉え、排水対策工を講じることにより、大規模盛土構造の安定性を確保することとした。

### 2.3.4 盛土構造の検討

大規模盛土の安定性を評価する上で、断層沿いに発生する地下水も含めた盛土内の地下水分布を把握することが必要となる。そこで、各種調査結果をもとに基礎地盤の水理環境を再現した上で、豪雨や湧水による盛土への浸透水を考慮した三次元水収支解析によって盛土内水位を推定し、その水位上昇を考慮した安定解析によって盛土の安定性を評価した。

ここでの三次元水収支解析は、有限差分法を用いたプログラムである GETFLOWS で行った。水理定数は、原位置試験、既往文献を参考に設定し、水文観測結果の再現解析結果を踏まえて決定している。解析モデルは、図-2.3.5 のように盛土部分は  $3\text{m}$ 、盛土周辺部は  $10\text{m}$  メッシュでモデル化した。なお、解析領域は、現況分析によると分水嶺を超えた地下水の流れは微小であり、東西方向  $1\text{km}$ 、南北方向  $0.8\text{km}$  の分水嶺および沢に囲まれる範囲、深度方向は水理基盤である有馬層群が底面に十分露出する  $55\text{m}$  とし、境界条件として地下は閉境界（水の出入りなし）、地表面は大気圧固定とした。地下水モデルの構築においては調査結果を踏まえた十万辻断層沿いの地下水の影響も重要であることから、三次元水収支解析を用いて地下水の挙動を把握した。領域初期化シミュレーションより、現状に合致する最適な物性値の組み合わせを試行的に設定し、影響の大きい物性値（飽和透水係数、有効空隙率、粗度計数など）を変化させた。

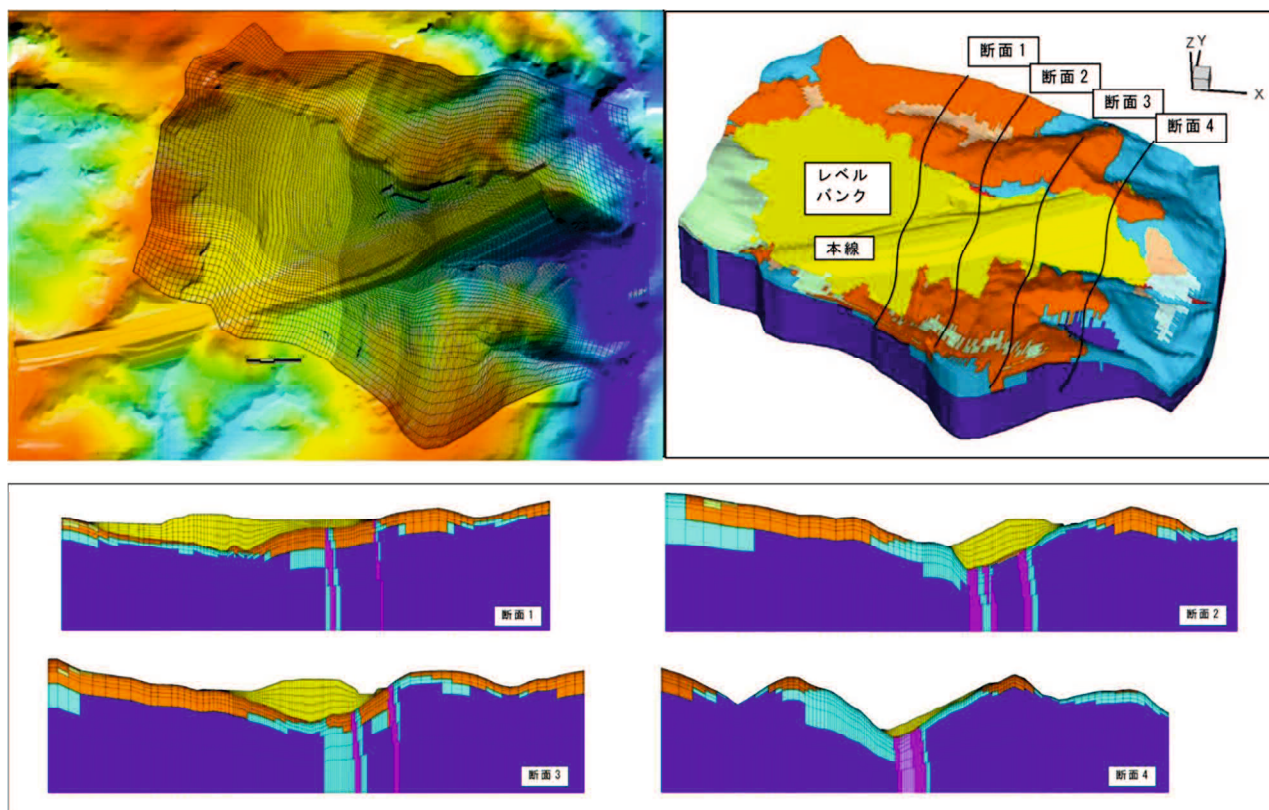


図-2.3.5 三次元水収支解析モデル

盛土の透水係数は、浸透した雨水や地下水が排出されにくい条件として  $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 、浸透しやすい条件として  $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$  の 2 パターンを設定した。また、盛土内に配置する雨水排水工、地下排水溝の透水係数は、管径に応じて  $\phi 200$  が  $4.5 \times 10^3 \text{cm/sec}$ 、 $\phi 300$  が  $5.9 \times 10^3 \text{cm/sec}$ 、 $\phi 400$  が  $7.2 \times 10^3 \text{cm/sec}$  とした。また、埋設管に該当する解析メッシュの等価透水係数は、10m メッシュで  $1 \times 10^{-1} \sim 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、3m メッシュで  $5 \times 10^{-1} \sim 3 \times 10^{-0} \text{cm/sec}$  とした。また、雨水排水工と地下排水溝が将来目詰まりによって機能が低下した状態を再現する際の等価透水係数は、 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  とした。

解析に適用する降雨は、通常降雨時と豪雨時を想定した。通常降雨時は、近傍で観測されたアメダス三田の 10 年間平均有効降雨量 543.3mm に基づく日有効降雨量を溪流の流量が平衡状態となるまで恒常的に与えた。また、豪雨時には、図-2.3.6 に示すような 2 つの豪雨パターンを設定した。図中の 100 年確率降雨（後方集中型）は、兵庫県の 100 年確率の降雨強度式を補正して 24 時間雨量が 247mm（武庫川流域の 1/100 確率規模の計画降雨量）になるようにし、これから後方集中降雨のハイエイトグラフを設定した。2 段階降雨時には、2009 年に発生した大宰府豪雨災害時の降雨を採用した。ここで、後方集中型を採用したのは中央集中と後方集中の両方を試算し、後方集中の方が地下水位の方がより上昇する傾向にあったため、後方集中型によって盛土内水位を推定することにした。

三次元水収支解析によって盛土内の水位上昇を推定し、その水位上昇を反映し、かつ地震時を考慮した円弧すべりによる盛土の安定解析結果を表-2.3.1 に示した。安定解析の結果は、通常降雨時であっても、雨水排水工、地下排水溝の両方の排水機能が低下した場合には、地下水位がのり尻から 2m 以上上昇して地震時の安全率を満足できないことが分かった。

また、豪雨時においては、地下排水溝の機能のみが機能低下しても盛土内水位は上昇すると予測され、盛土の安定性確保が困難であることが判明した。一方、施工途中段階では、地表排水および地下排水に最も不利な条件での予測計算を行った結果、計画した排水対策にて対応可能であることを確認した。言い換えると、設計

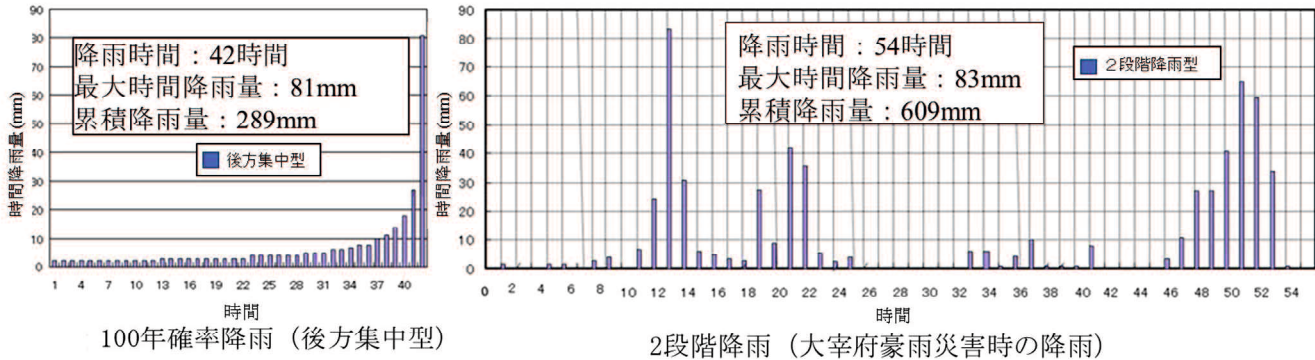


図-2.3.6 豪雨時条件

表-2.3.1 盛土内水位推定と安定解析結果

検討項目	排水設備のモデル化	降雨条件	盛土の透水係数	計算結果	盛土の安定解析結果
排水設備が機能低下した場合（舗装施工済）	地下排水溝機能低下 雨水排水工機能低下	通常降雨時	$10^{-4} \text{cm/sec}$	全ての検討断面でのり尻よりも2m以上水位が上昇	×
			$10^{-2} \text{cm/sec}$	谷沿い断面でのり尻よりも2m以上水位が上昇	×
	地下排水溝機能低下 雨水排水工機能正常	通常降雨時	$10^{-4} \text{cm/sec}$	地下水位の上昇はない	○
			$10^{-2} \text{cm/sec}$	地下水位の上昇はない	○
		100年確率 後方集中	$10^{-4} \text{cm/sec}$	地下水位の上昇はない	○
			$10^{-2} \text{cm/sec}$	谷沿い断面でのり尻よりも2m程度水位が上昇	×
	2段階降雨	$10^{-4} \text{cm/sec}$	地下水位の上昇はない	○	
		$10^{-2} \text{cm/sec}$	数m程度水位が上昇	×	
地下排水溝機能正常 雨水排水工機能正常	2段階降雨	$10^{-4} \text{cm/sec}$	地下水位の上昇はない	○	
		$10^{-2} \text{cm/sec}$	地下水位の上昇はない	○	
盛土施工中（舗装未施工）	地下排水溝機能正常 雨水排水工機能正常	通常降雨時	$10^{-2} \text{cm/sec}$	雨水排水工で排出される最大流量は $0.44 \text{m}^3/\text{sec}$ と予想されるが、現計画の雨水排水管で十分排水可能	○
	100年確率 後方集中				





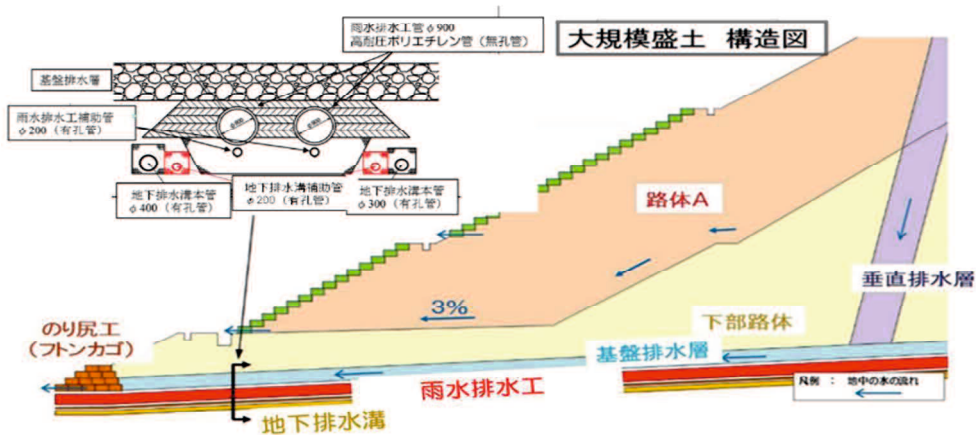


図-2.3.8 宝塚北 SA 盛土排水施設断面図

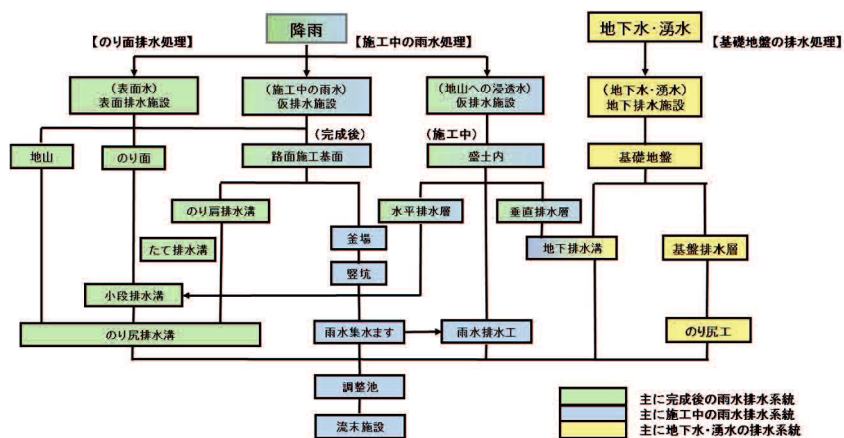


図-2.3.9 排水計画

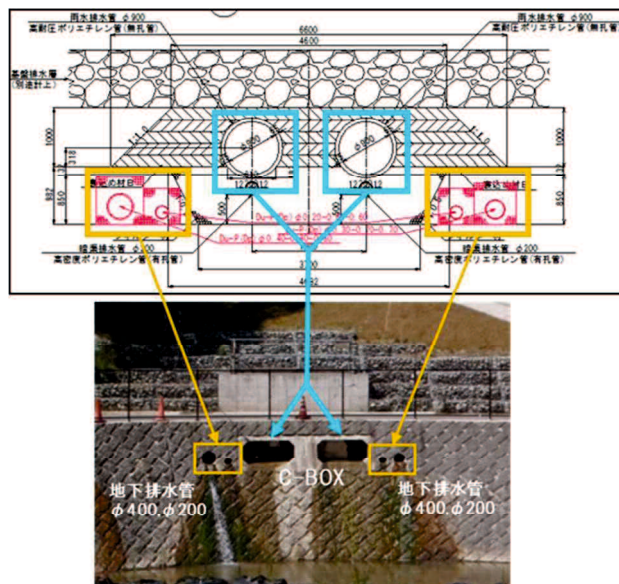


図-2.3.10 宝塚北 SA 盛土調整池箇所

## 2.4 まとめ

本章では、岩国災害を受けた盛土復旧検討事例と新名神高速道路で断層破砕帯が地下水を供給することに配慮した盛土排水対策設計の2事例を示した。断層破砕帯が地下水を供給することに着目した設計事例は過去に無く、ここに示した2事例から今後の教訓として活かすべき留意点を、以下にまとめる。

## (1) 岩国災害盛土

災害が一度発生すると、原因究明と早期復旧、再発防止が求められる。災害発生直後より原因の特定と復旧計画を立てるため、崩壊箇所の入念な観察と調査が重要である。特に、崩壊面のスケッチや湧水状況の確認、建設時の情報収集、地形地質や地盤物性値の把握、などを急ぐべきである。

盛土の崩壊は水に起因することが多いため、崩壊箇所のみならず広範囲に湧水地点や水道などの水量調査を行うことが必要となる。災害原因の特定にあたっては、設計施工上に排水設備の不備、不具合がないかを確認すべきである。また、崩壊原因を概ね推定できれば、それを裏付けるために解析などを通じた検証を行うことで論理性が増す。

災害復旧の計画では、災害原因の全てを解消できる対策を計画し、その計画は解析などで豪雨時にも不安定化しないよう入念な照査が必要となる。

再発防止という観点では、今後同様の事象が2度と発生しないよう、被災した原因究明結果とともに、現場の点検などチェックポイントなどを周知することが重要である。

## (2) 宝塚北 SA 盛土

過去に例のない新たな検討を行う際には、過去の類似事例を参考としながらも、当該箇所の特殊性を加味した検討とすべきである。ここでいう類似事例とは、岩国災害復旧盛土の事例がそれにあたる。また、必要に応じて学識経験者などに意見を求めることも有効である。

ここでの検討の流れは、類似する事例の収集を行い、その事例を参考としつつ調査計画を立て、流域が広範囲に及ぶため広域の水文調査ならびに流量調査を行った。引き続き、調査に基づいて解析によって通常降雨時・豪雨時を想定した地下水分布を推定し、豪雨時においても、また将来の排水施設に機能低下が起こったとしても、盛土の安定性を損なうことのないように雨水排水工と地下排水溝はともに別系統かつ複数系統とし、かつそれぞれに補助管を設けるなど対策工を設計した。

施工段階においては、設計段階では予想し得なかった情報や条件の変更があり、臨機な対応をとることになる。また施工段階では、モニタリングを行うことで、地下排水施設に機能低下が生じていないか、想定どおりの挙動を示しているのかチェックを行うことが重要で、推定と異なる事象が発生した場合には、これらにも柔軟な対応が求められる。

## 第2章の参考文献

- 1) Murata, H, Takekuni, K. and Nakata, Y., Slope failure of embankment in Sanyo expressway due to passage of typhoon No.14 in 2005, Soils and Foundations, Vol.49, No.5, pp.797-806, 2009.
- 2) 小西義夫, 北村晴夫, 石本裕己: 傾斜地盤上の盛土崩壊における地形・地質的要因, 全国地質業協会連合会「技術 e-フォーラム 2008」, 高知, 論文 No.105, 2008.
- 3) 渡部芳彦, 柴田佳久, 新枝幹夫, 春口孝之: 集中豪雨に伴う道路のり面の災害事例, 日本応用地質学会中国四国支部平成 19 年度発表論文, 論文番号 13, 2007.
- 4) 岩島保: 新名神高速道路における高盛土の設計と施工ー(仮称)宝塚サービスエリアでの事例ー, 基礎工, Vol.41, No.10, pp.69-72, 2013.
- 5) 岩島保, 森英治: 新名神高速道路(仮称)宝塚サービスエリアでの高盛土における課題と対応, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, VI-270, pp.539-540, 2014.
- 6) 村田秀一, 竹國一也, 中田幸男: 台風 14 号による山陽自動車道盛土法面崩壊を経験して, 土と基礎, Vol.54, No.12, Ser.No.587, pp.8-9, 2006.
- 7) 西日本高速道路(株)中国支社: 山陽自動車道災害調査検討委員会報告書, pp.21-22, 2006.
- 8) 竹國一也: 盛土崩壊の復旧と対策ー山陽自動車道ー, 土木施工, 山海堂, Vol.47, No.6, pp.21-28, 2006.
- 9) 山口卓位: 高盛土における設計と施工, 新名神宝塚 SA(仮称)における取組み(特集 工事最盛期を迎えた新名神高速道路の現在), 土木施工, Vol. 57, No.4, pp.35-38, 2016
- 10) 竹國一也, 山口卓位, 古賀泰輔: 高速道路大規模盛土における地下水流量計測, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, III-236, pp.471-472, 2018.
- 11) 安藤伸, 山口卓位, 滝川龍誠, 小野稔和, 中西昭友, 遠藤司: 新名神高速道路宝塚北 SA の高盛土区間の地質状態と盛土設計, 第 53 回地盤工学研究発表会, H-06, pp.1135-1136, 2018.

### 第3章 岩国災害復旧盛土での現地計測

#### 3.1 はじめに

現地計測の目的は、断層破碎帯により地下水が他流域から供給されたことを災害原因とした岩国災害復旧盛土において、地下水供給の事象を明らかにし、かつその供給量を定量的に把握することにある。合わせて、2005年の台風豪雨により被災した盛土を再構築してから10年以上が経過した盛土の排水機能の健全性を評価し、第5章での各種提案のための基礎資料を得ることにある。ここでは、2年間にわたって、主に盛土から流出する出水期の地下水流量と地表水流量の常時計測<sup>1),2)</sup>を行い、計測結果に基づき当該盛土における地下水流量特性を明らかにした。

#### 3.2 計測概要

##### 3.2.1 計測期間と計測項目

現地計測期間は、表-3.2.1に示す通り2016年6月24日から11月10日、および2017年4月25日から11月30日まで常時行った。ただし、のり尻工流量は2016年7月7日以降より、地表水流量は2016年9月9日以降より計測を開始した。また、2016年8月22日から9月9日の間は、現地の都合により計測を中断している。本検討では、2016年と2017年に得られたデータにより分析を行っている。

ここでは、計測項目として、地下水流量、地表水流量、のり尻工流量、降雨量、電気伝導度 EC、pH を計測した。ここでいう地下水流量とは図-2.2.10に示す3箇所<sup>1)</sup>の地下排水溝本管流末から流出する流量、地表水流量とは盛土のり面や自然斜面・路面に降った雨が小段排水溝やたて排水溝、用排水溝を通じて流出した流量、のり尻工流量とはのり尻工の流末から流出する流量である。地表水流量と中間流量を区分して表示することもあるが、本論文においては両者を合わせて地表水流量としている。

電気伝導度 EC と pH の測定は、地下水や地表水の他、流量計測地周辺の河川や湧水箇所で測定している。

表-3.2.1 計測期間

年	計測期間	備考
2016年	6月24日～11月10日	のり尻工流量は7月7日より計測開始 8月22日から9月9日は現地の都合により欠測 地表水流量は9月9日より計測開始
2017年	4月25日～11月30日	

##### 3.2.2 流量計測地点と集水流域

図-3.2.1には流量計測地点の位置図を、図-3.2.2には平面図、図-3.2.3には計測地点流域図を示した。図-3.2.2の中では、赤色がA流域に対応した地下水、青色がB-1流域に対応した地表水、緑色がB-2流域に対応した地表水、それぞれの排水系統を示している。地下水の計測地点A1、A2、A3は地下排水溝本管流末の地下水流量、A4はA2とA3地下排水溝本管およびのり尻工から流出する流量の合計流量である。A5はA1地下排水溝本管の地下水流量とB-1流域地表水流量の合計流量、またA6はA4地下水流量とB-2流域地表水流量の合計流量を計測している。

また、地形的分水界を考慮した地下水流および地表水の集水流域面積を図-3.2.3、集水流域の諸元を表-3.2.2に示す。図-3.2.3図中赤色A流域は旧地形から推定される地下水の集水流域19,900m<sup>2</sup>である。青色B-1流域は下り線路面、切土のり面、自然斜面からの地表水が計測地点A5に流入する集水流域4,000m<sup>2</sup>、緑色B-2流域は上り線路面、盛土のり面と自然斜面の地表水がA6に流入する集水流域7,000m<sup>2</sup>、灰色のC流域はのり尻工の地表水の流域1,000m<sup>2</sup>である。また、桃色のD流域10,700m<sup>2</sup>およびE流域12,100m<sup>2</sup>は、図-3.2.3に示すように2つのリニアメント（断層）が盛土へ延びており、かつ基盤岩である砂岩・粘板岩が連続していることから、地下水が盛土へ流入する可能性のある流域として地下水分水界を設定した。図-3.2.4は上記流量の排水

系統図である。 B-1 流域からの地表水流量は A5-A1, B-2 流域からの地表水流量は A6-A4, のり尻工流量は A4-A2-A3 として流量を算出した。



図-3.2.1 流量計測地点の位置図

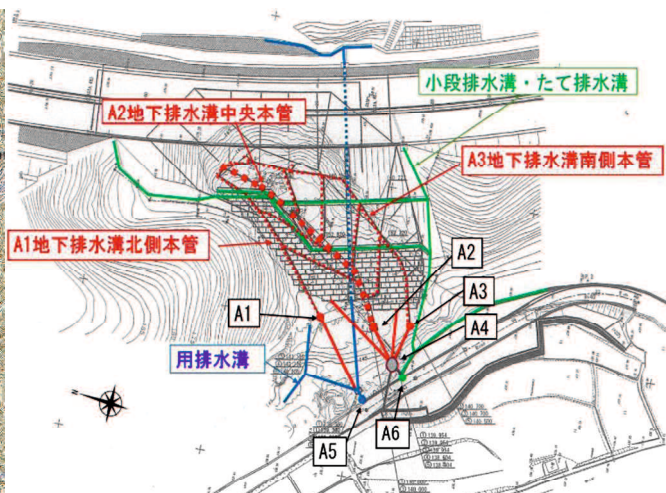


図-3.2.2 流量計測地点の平面図

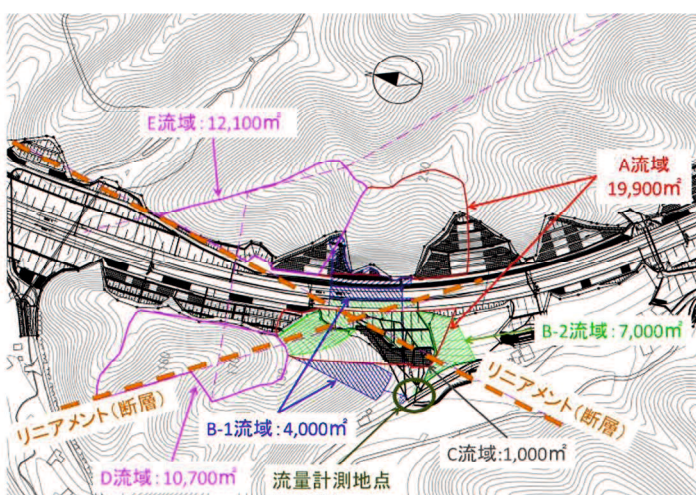


図-3.2.3 計測地点流域図

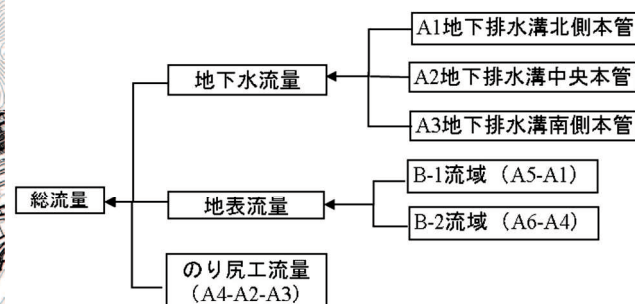


図-3.2.4 排水系統図

表-3.2.2 集水流域の諸元

流域名	内訳	流域面積	計測地点
A流域 (地下水)	地下水の集水全域	19,900m <sup>2</sup>	A1,A2,A3,A4
B-1流域 (地表水)	上り本線路面	800m <sup>2</sup>	A5
	上り側道路面, のり面	1,500m <sup>2</sup>	
	下り自然斜面	1,700m <sup>2</sup>	
B-2流域 (地表水)	下り本線路面	700m <sup>2</sup>	A6
	下り盛土のり面	2,800m <sup>2</sup>	
	下り自然斜面	3,500m <sup>2</sup>	
C流域 のり尻工 (地表水)	のり尻工設置域	1,000 m <sup>2</sup>	A4
D流域 (地下水)	リニアメント沿いの隣接流域	10,700 m <sup>2</sup>	
E流域 (地下水)	リニアメント沿いの隣接流域	12,100 m <sup>2</sup>	

### 3.2.3 流量計測方法

流量計測は、地下排水溝や用排水溝などによって集水された A1～A6 の柵内に堰を設けて行った。A6 には全幅堰を、それ以外の計測地点には四角堰を設置した。各堰の諸元は、表-3.2.3 に示すとおりであり、写真-3.2.1 には A1～A6 の各計測地点の計測状況写真を示した。各々堰の水位は、水圧計測方式による計測としており、計測機器は写真-3.2.2、表-3.2.4 の半導体圧力式水位検出器で自動計測し、その水位から堰の越流水位  $h$  に換算した。四角堰、全幅堰の概念図を図-3.2.5、図-3.2.6 に示し、それぞれの堰に対応した流量は、越流水位から JIS K 0094 に従ってフランシスの公式<sup>3)</sup> 式-3.2.1、式-3.2.2 による流量式で算出した。なお、式中の  $b$  には表-3.2.3 の幅  $b$  の値を代入している。

なお、算出した計測流量結果は、別に計測した容器法による実測流量との流量対比によって流量の精度確認を行っている。詳細は 3.4.1 実測流量と計測流量の対比にて後述する。また、当該地の平地には、写真-3.2.3、表-3.2.5 の転倒マス式現地雨量計を設置し、降雨量も計測した。計測データのサンプリング間隔は、流量計が 10 分間隔、雨量計が 5 分間隔としている。

表-3.2.3 流量堰の諸元

堰番号	堰高さ (m)	切欠の幅 $b$ (m)	堰の形状	流量式
A1	0.1	0.49	四角堰	式-3.2.1
A2	0.1	0.47	四角堰	式-3.2.1
A3	0.1	0.47	四角堰	式-3.2.1
A4	0.1	0.46	四角堰	式-3.2.1
A5	0.1	0.41	四角堰	式-3.2.1
A6	0.2	0.45	全幅堰	式-3.2.2



写真-3.2.1 各流量計測地点の状況写真

表-3.2.4 水圧形の仕様

名称	半導体圧力式水位検出器
型番	DS-7
測点範囲	0～75cm
精度測定	±0.13%FS (非直線形+ヒステリシス+再現性含む)
温度補償範囲	0～30℃
許容過負荷	フルスケール×6倍
本体材質	SUS316L
外形寸法	φ25×127mm 約120g



写真-3.2.2 水圧計

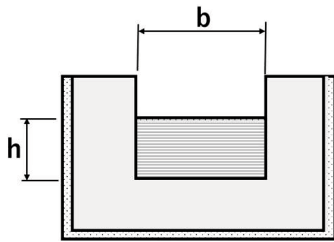


図-3.2.5 四角堰概念図

<四角堰>

$$Q = 1.84 \times (b - 0.2 \times h) \times h^{1.5} \times 60 \quad (\text{式-3.2.1})$$

ここに、Q：流量 (m<sup>3</sup>/min)，b：切欠の幅(m)，h：堰の越流水位(m)

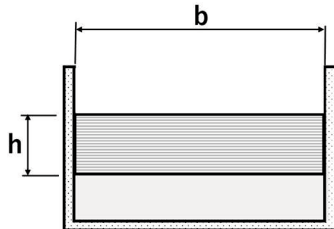


図-3.2.6 全幅堰概念図

<全幅堰>

$$Q = 1.84 \times b \times h^{1.5} \times 60 \quad (\text{式-3.2.2})$$

ここに、Q：流量 (m<sup>3</sup>/min)，b：切欠の幅(m)，h：堰の越流水位(m)



写真-3.2.3 現地雨量計

表-3.2.5 現地雨量計の仕様

検出方式	転倒マス式
測定単位	0.5mm/1 転倒 (パルス)
出力信号	無電圧メーク接点出力 (主副2 接点)
精度	20mm 以下の雨量のとき±0.5mm 以内
	20mm 以上の雨量のとき±3%以内
材質外筒	SU304
排水筒・ろ水器	樹脂
転倒ます	真鍮鍍金
受水口径	200mm

### 3.3 計測結果

#### 3.3.1 降雨量

本節では、岩国災害復旧盛土地点での現地雨量計とそこから約 400m 離れた地点に西日本高速道路(株)が設置する欽明路気象観測局の 2 つの地点での降雨量についてまとめた。過去の降雨記録がある欽明路気象観測局は岩国災害復旧盛土地点における降雨量の経年傾向を把握するため、現地雨量計は流量計測結果を分析するための降雨量とした。

欽明路気象観測局における過去 5 年間の月別降雨量と年別累積降雨量を図-3.3.1 および図-3.3.2 に示す。また、表-3.3.1 には過去 5 年間の降雨量経年比較表を合わせて示した。これによると 2016 年の年間降雨量 2,610mm は 5 年間の平均降雨量 2,289mm に比較して 114% と 5 年間で最も降雨量の多い年であった。一方、2017 年の年間降雨量 1,831mm は 5 年間平均の 80% と 5 年間で最小降雨量の年であった。また流量計測期間に限れば、2016 年 6 月から 10 月は平年の 120%、2017 年 4 月～11 月は平年の 84% の降雨量であった。月別降雨量をみると、2016 年は 4 月、6 月、9 月で平年を大きく上回っている。中でも、6 月の月別降雨量は 652.5mm と過去 5 年間の月別降雨量の最大値を記録している。2017 年は 4 月、9 月、10 月で平均値を上回っている。特に、10 月は過去 5 年間の月別降雨量で 3 番目に多い降雨量があり、10 月としては過去 5 年間の最大値を記録している。また、5 月、11 月の降雨量は少なく、特に 11 月は 32mm と月別降雨量としては 5 年間の最小値であった。以降の分析において、2016 年は 5 年間で最も降雨量の多い年、2017 年は最も降雨量の少ない年として検

討すべきである。

次に、現地雨量計による降雨量について考察を加える。現地雨量計で得られた降雨量の月降雨量、最大日降雨量、最大時間降雨量を表-3.3.2 に示す。2016年の現地雨量計による観測期間は6月24日～11月10日である。その間で6月、9月には、まとまった降雨量を記録している。最大月降雨量は9月の319.5mmである。なお、6月の月降雨量は24日に計測を開始したが、これに欽明路気象観測局の6月1日から23日までの降雨量を加えると661.0mmとなる。最大日降雨量は7月13日の123.5mm、最大時間降雨量は8月23日20:00と9月12日18:00に記録した31.5mm、最大10分間雨量は10月8日23:50の13.5mmであった。

2017年の現地雨量計の観測期間は4月25日～11月30日である。降雨状況の概要としては4月、9月、10月にまとまった降雨量を記録している。最大月降雨量は10月の506.5mm、最大日降雨量は9月17日の109.5mm、最大時間降雨量は6月30日の43mm、最大10分間降雨量は6月30日4:10の21.5mmであった。

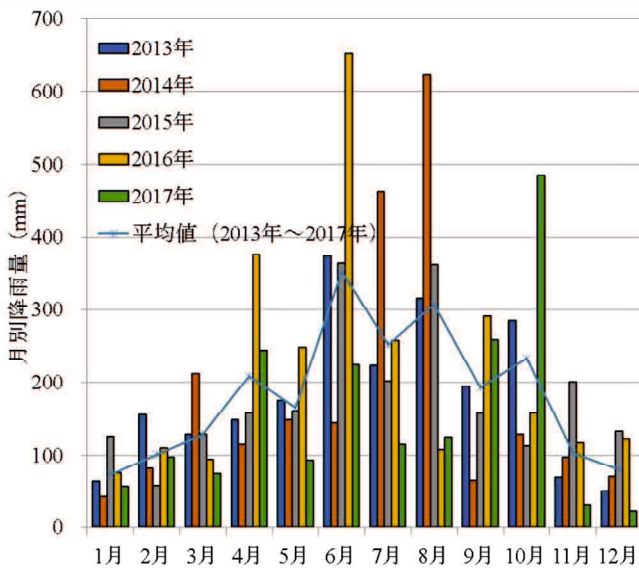


図-3.3.1 過去5年間の月別降雨量

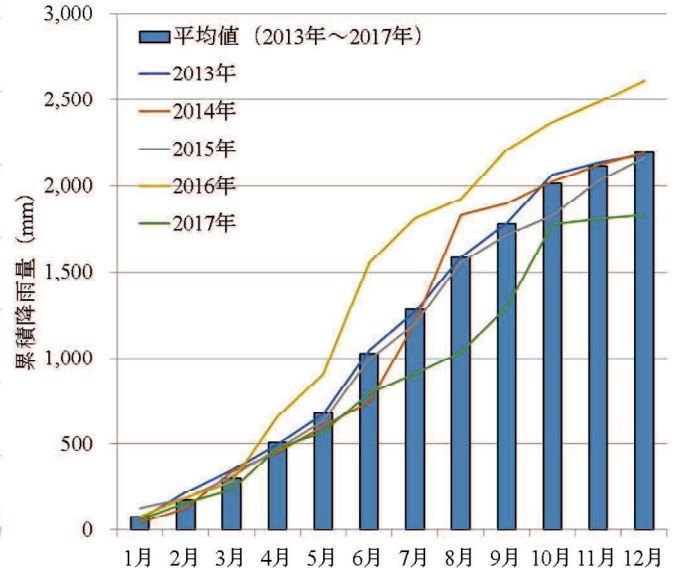


図-3.3.2 過去5年間の年別累積降雨量

表-3.3.1 降雨量経年比較（欽明路観測局）

(単位:mm)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5年間平均値 (2013～2017年)	月別降雨量	77	102	141	199	183	384	286	352	177	171	121	94
	累積降雨量	77	179	320	519	702	1,086	1,372	1,724	1,901	2,072	2,193	2,289
2013年	月別降雨量	65	156	129	149	175	375	224	316	195	285	70	51
	累積降雨量	65	220	349	497	672	1,047	1,270	1,586	1,781	2,065	2,135	2,186
2014年	月別降雨量	43	83	213	116	148	145	462	623	66	129	97	71
	累積降雨量	43	125	338	453	601	746	1,208	1,830	1,896	2,025	2,122	2,193
2015年	月別降雨量	125	59	129	158	161	364	202	362	157	113	201	133
	累積降雨量	125	184	312	470	630	994	1,196	1,558	1,715	1,828	2,029	2,162
2016年	月別降雨量	76	110	94	376	248	<b>653</b>	258	108	291	157	117	123
	累積降雨量	76	186	280	656	904	1,557	1,814	1,922	2,213	2,370	2,487	2,610
2017年	月別降雨量	58	98	75	245	93	225	115	124	259	<b>486</b>	32	23
	累積降雨量	58	156	231	475	568	793	908	1,032	1,291	1,777	1,808	1,831

表-3.3.2 降雨量（現地雨量計）

（単位:mm）

		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
2016年	月別降雨量			661.0	274.5	124.5	319.5	179.0	
	最大日降雨量			63.0	123.5	82.5	73.0	33.5	
	最大時間降雨量			20.0	28.5	31.5	31.5	19.5	
2017年	月別降雨量	265.5	98.0	245.0	124.5	130.5	284.5	506.5	34.0
	最大日降雨量	39.5	31.5	75.0	29.0	42.5	109.5	95.5	14.0
	最大時間降雨量	18.0	7.0	43.0	15.0	22.0	18.5	11.5	3.5

### 3.3.2 地下水流量

#### (1) 地下水流量と降雨量との関係

2016年と2017年の地下水流量の変動を表-3.3.3に示した。2年間の地下水流量の最大計測値は2016年7月13日の0.909m<sup>3</sup>/minで、その際の累積降雨量は252mm、7月13日以前の1ヶ月間では763.5mmの降雨量を記録している。この流量は、岩国災害時の推定湧水量1.0m<sup>3</sup>/min<sup>4)</sup>と同程度の流量となった。

岩国災害発生直前の累積降雨量が524mm、災害直前1ヶ月間降雨量が570mmであり、地下水流量最大計測値0.909m<sup>3</sup>/minを観測した際の累積降雨量は252mmと災害時ほど多くはないものの、1ヶ月降雨量で見れば763.5mmと災害時以上の降雨量があり、本計測から災害時推定流量の妥当性が検証できた。

また、最小地下水流量は2017年6月23日で、その直前12日間が無降雨であった。このように、地下水流量は、日降雨量や時間降雨量のように短期の降雨量だけでなく、もう少し長い期間の降雨履歴の影響を受けているように見える。

図-3.3.3は計測期間中の1例として2017年9月に計測された地下水流量と日降雨量との関係を示した。地下水流量は降雨量に連動して増減するが、日降雨量20mm以上の際には顕著なピーク流量が観測され、一方で降雨がなければ流量は徐々に減じているものの一気に減じることはなく、また枯れることもなかった。このようなことから、地下水流量は、直近の降雨量のみならず、先行降雨量の影響も受けていると考えられる。

A1, A2, A3 各々の地下排水溝から排出される地下水流量に着

表-3.3.3 地下水流量と降雨量の変動

年	地下水流量	観測日	計測流量 (m <sup>3</sup> /min)	備考
2016	流量最大値	7月13日	0.9088	日降雨量 123.5mm 時間降雨量 28.5mm 累積降雨量 252mm
	流量最小値	8月28日	0.0148	10日間無降雨
	流量平均値	—	0.0626	
2017	流量最大値	10月22日	0.53	日降雨量 94.0mm 時間降雨量 8.5mm 累積降雨量 223mm
	流量最小値	6月23日	0.011	12日間無降雨
	流量平均値	—	0.0526	

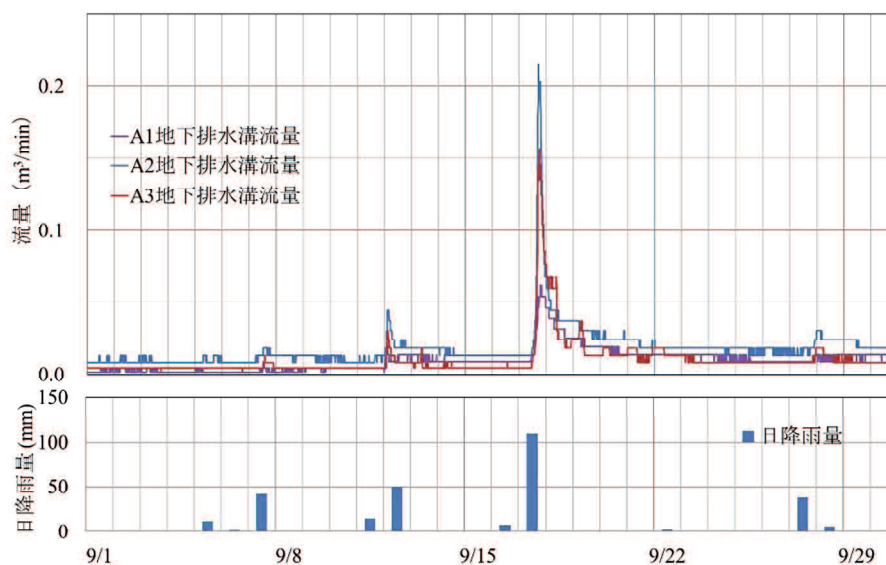


図-3.3.3 地下水流量と降雨量の変動(2017年9月)



目すると、A2 流量が最も多い傾向にある。A2 地下排水溝中央本管は、図-2.2.10、図-2.2.11、図-3.2.2 に示すとおり大口径でかつ底部に設置しているため、A1、A3 が集水できなかった地下水を集水しているものと見られる。また、A1 は A2、A3 に比較して直近の降雨量に対して流量の変動幅が小さい。

## (2) 累積地下水流量と降雨量との関係

図-3.3.4 は 2016 年、図-3.3.5 には 2017 年の計測期間中における地下水流量と降水流量（降雨量×流域面積×流出係数）の累積値を表したものである。ここでの降水流量算出には、図-3.2.3 に示す地下水の流域である A 流域面積 19,900 m<sup>2</sup>、流出係数 1.0 を用いた。表-3.3.4 は 2 年間の計測期間を 4 つの期間に区切って累積降水流量に対する累積全地下水流量（A1+A2+A3）と各地下排水溝流量（A1、A2、A3）の比率である地下水流量率を示した。同表には計測期間の週平均降雨量と流量率を（）書きで示している。ここでの週平均降雨量とは、計測期間と計測期間以前 4 週間を加えた期間の累積降雨量をその期間の週数で除した週当たり降雨量である。同表によると、2016 年前期の地下水流量率は 99.9%と流域の降水流量と盛土から排出される全地下水流量がほぼ同量の結果となった。これは、表-3.3.1 に示したとおり 2016 年 6 月には先行降雨として 600mm を超える大きな月降雨量があったことによると考えられる。それ以外の計測期間においても、地下水流量率は先行する降雨量によって大きく変動し、53~62%となった。また、表-3.3.4 から全地下水流量率は週平均降雨量に連動していることが分かり、降雨量と流量率には一定の相関があると考えられる。また、大津ら<sup>5)</sup>は、土

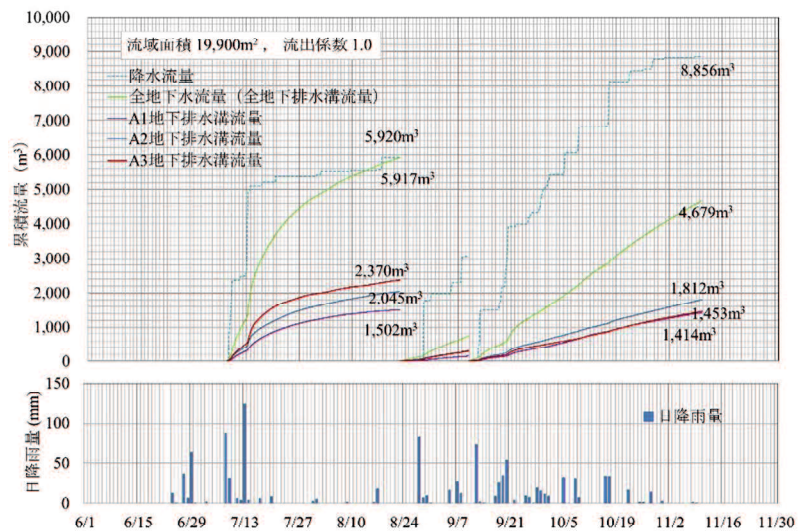


図-3.3.4 累積地下水流量と累積降水流量の変動(2016年)

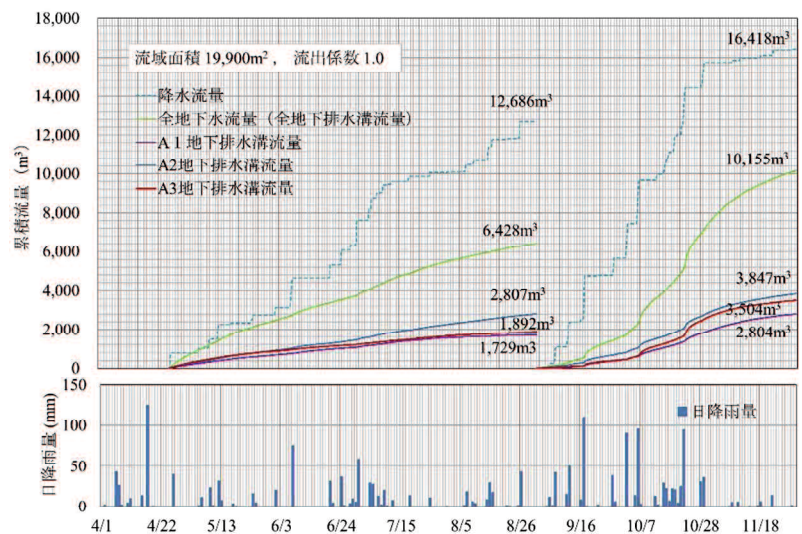


図-3.3.5 累積地下水流量と累積降水流量の変動(2017年)

表-3.3.4 地下排水溝からの地下水流量率

計測期間	降水流量 (週平均降雨量)	全地下水流量 (流量率)	A1 流量 (流量率)	A2 流量 (流量率)	A3 流量 (流量率)	各年地下水 流量率
2016/7/7-8/22 2016 年前期	5,920 m <sup>3</sup> (83.3mm)	5,917 m <sup>3</sup> (99.9%)	1,502 m <sup>3</sup> (25.4%)	2,045 m <sup>3</sup> (34.5%)	2,370 m <sup>3</sup> (40.0%)	71.7%
2016/9/9-11/10 2016 年後期	8,856 m <sup>3</sup> (49.9mm)	4,679 m <sup>3</sup> (52.8%)	1,414 m <sup>3</sup> (16.0%)	1,812 m <sup>3</sup> (20.5%)	1,453 m <sup>3</sup> (16.4%)	
2017/4/25-8/31 2017 年前期	12,686 m <sup>3</sup> (40.1mm)	6,428 m <sup>3</sup> (50.7%)	1,729 m <sup>3</sup> (13.6%)	2,807 m <sup>3</sup> (22.1%)	1,892 m <sup>3</sup> (14.9%)	57.0%
2017/9/1-11/30 2017 年後期	16,418 m <sup>3</sup> (60.4mm)	10,155 m <sup>3</sup> (61.9%)	2,804 m <sup>3</sup> (17.1%)	3,847 m <sup>3</sup> (23.4%)	3,504 m <sup>3</sup> (21.3%)	

壤水分計の計測結果に基づく一雨当たり降雨の斜面への浸透率の算定事例として 10~50%を提示している。この事例と比較しても今回計測された地下水流量率は極めて大きく、他の流域からの地下水供給が推測される。

A1, A2, A3 地下排水溝流量に着目すると、前述の通り A2 流量が多く、A1 流量は少ない。ただし、週平均降雨量が多い 2016 年前期では A2 流量よりも A3 流量が多くなっている。このことは、降雨量が多くなれば他流域からの地下水供給が多くなることで地下水流量は多くなるが、その地下水は A3 地下排水溝南側本管がより多く集水していることがわかる。すなわち、他流域からの地下水供給箇所は A3 地下排水溝南側本管配置線上にあると推測される。

表-3.3.4 から地下水流量率は、週平均降雨量と連動していることがわかったため、8 週間単位の地下水流量率と計測期間である 8 週間に先行する 5 週間を加えた 13 週間の週平均降雨量との関係を図-3.3.6 に示した。この図によると、地下水流量率と週平均降雨量には相関が認められる。

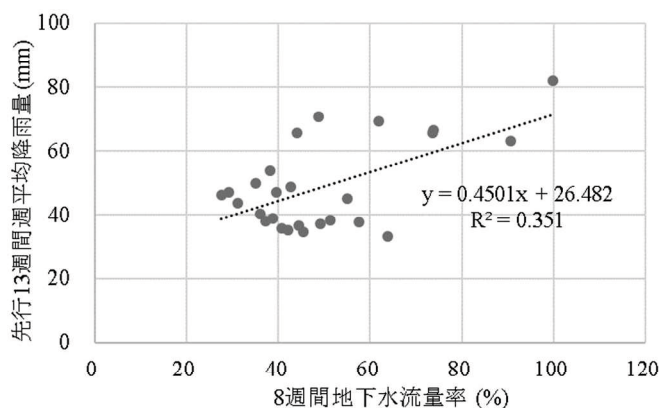


図-3.3.6 地下水流量率と降雨量の関係

### (3) ピーク地下水流量

ここでは、2016 年と 2017 年に計測された中で、累積降雨量 65mm 以上を記録した 8 つの代表的な降雨パターンの情報を表-3.3.5 に、その流量詳細図を図-3.3.7~図-3.3.14 に示した。

これらの情報によると、最大時間降雨量あるいは累積降雨量を降雨時間で除した単位時間当たり降雨量(以降:単位時間降雨量と呼ぶ)が大きければ、流量詳細図 b (図-3.3.8) や流量詳細図 e (図-3.3.11) のように顕著なピーク値を示し、降雨量と地下水流量のピーク値の時間差が短くなっている。逆に、累積降雨量が同等であつ

表-3.3.5 代表的な降雨パターンにおける地下水流量情報

	a	b	c	d	e	f	g	h
降雨ピーク日時	2016/7/8 8:40	2016/7/13 6:40	2016/9/19 15:00	2016/10/17 0:00	2016/9/17 14:10, 15:50	2017/10/2 9:30	2017/10/6 6:20, 12:50	2017/10/21~22 複数
10分間降水量ピーク値 (mm)	3	9.5	5	9	5	4	2.5	1.5
最大時間降水流量 (mm)	16	28.5	10	19.5	18.5	11.5	9.5	8.5
降水時間 (時間)	27	10	21	10	12	21	20	35
連続降水流量 (mm)	118.5	120.5	87	65	109.5	90	109.5	119
単位時間降水量 (mm)	4.39	12.05	4.14	6.50	9.13	4.29	5.48	3.40
地下水流量ピーク日時	2016/7/9 4:40	2016/7/13 10:00	2016/9/20 8:50	2016/10/17 2:40	2017/9/17 17:50	2017/10/2 18:30	2017/10/6 14:30	2017/10/22 20:40
地下水ピーク流量 $m^3/min$	0.3534	0.9088	0.2079	0.1533	0.4133	0.1942	0.3978	0.53
降雨前流量 $m^3/min$	0.1062	0.1274	0.0403	0.0451	0.0266	0.0405	0.0735	0.135
降雨による増加地下水流量 $m^3/min$	0.2472	0.7814	0.1676	0.1082	0.3867	0.1537	0.3243	0.395
降雨と地下水流量のピーク時間差 (時間)	20	3.3	17.8	2.5	2	9	8.2	
記事	ピーク時間差が大きく、比較的緩やかなピークを示す。	ピーク時間差が小さく、明瞭なピークを示す。	ピーク時間差が大きく、緩やかなピークを示す。	ピーク時間差が小さく、緩やかなピークを示す。	ピーク時間差が小さく、明瞭なピークを示す。	ピーク時間差がやや大きく、緩やかなピークを示す。	ピーク時間差がやや大きく、比較的緩やかなピークを示す。	比較的緩やかなピークを示す。

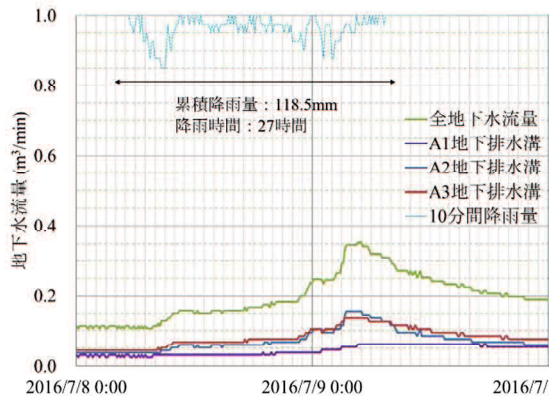


图-3.3.7 流量詳細図 a

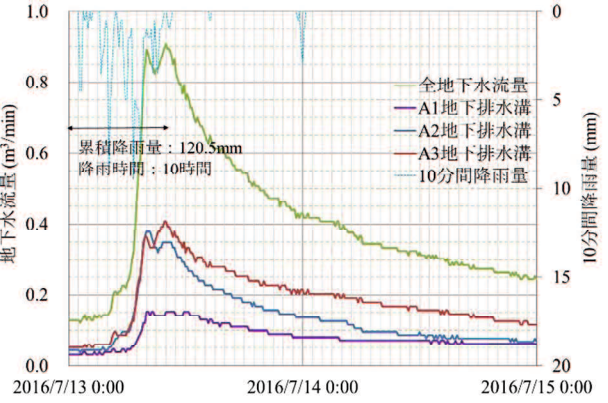


图-3.3.8 流量詳細図 b

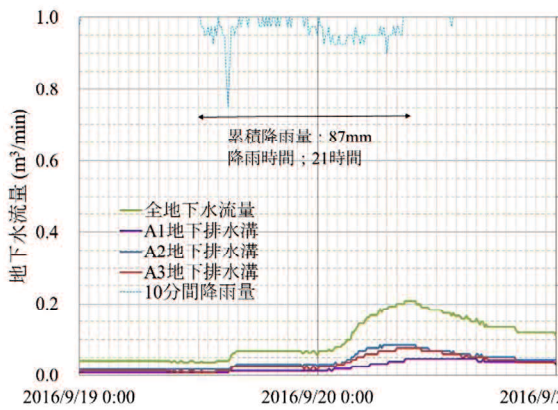


图-3.3.9 流量詳細図 c

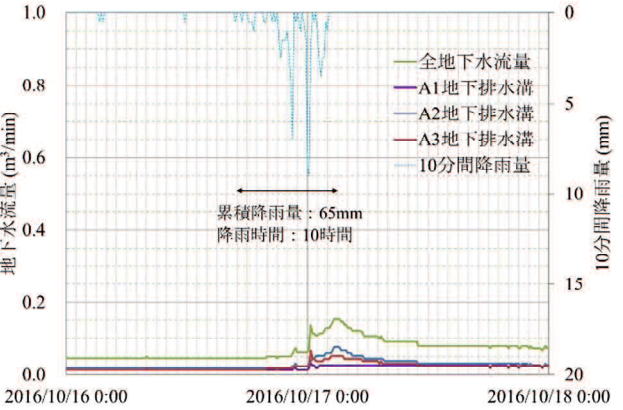


图-3.3.10 流量詳細図 d

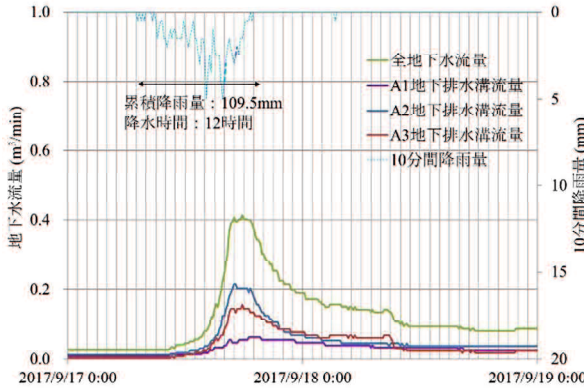


图-3.3.11 流量詳細図 e

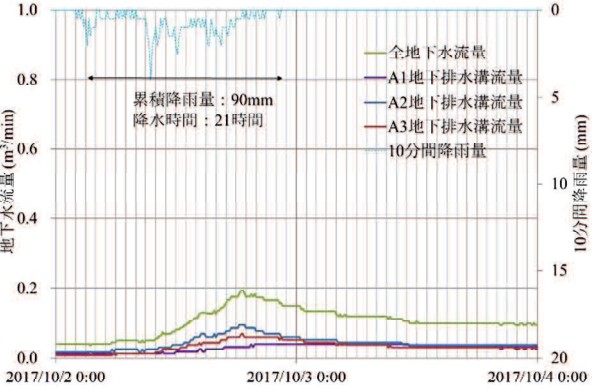


图-3.3.12 流量詳細図 f

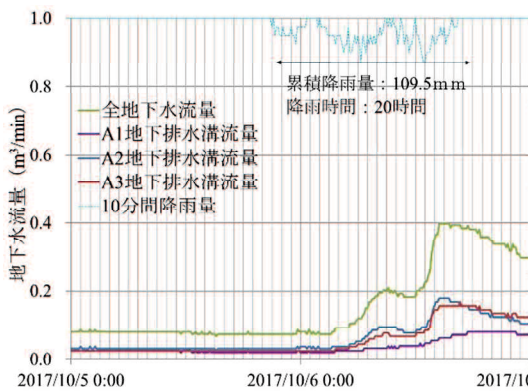


图-3.3.13 流量詳細図 g

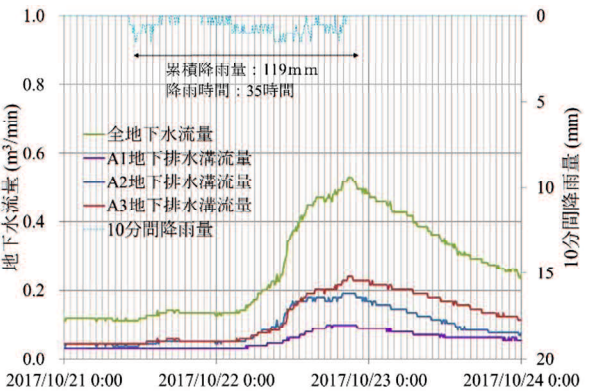


图-3.3.14 流量詳細図 h

ても低強度降雨が長く続くような場合には、流量詳細図 a (図-3.3.7) や流量詳細図 c (図-3.3.9), 流量詳細図 f (図-3.3.12) のように明瞭な地下水流量のピーク値は示さず、ピーク値の時間差も長い傾向がある。地下水流量は、降雨に伴って流量が増加するが、特に大きな降雨時には明瞭なピーク流量となっている。地下水のピーク流量は、直近の降雨量だけでなく、先行する降雨量の両方の影響を受けているように見える。

表-3.3.5 によると、降雨によって地下水流量は増加するが、降雨前と降雨によって増加したピーク時との地下水流量の差である増加地下水流量は、累積降雨量や単位時間降雨量との関係があるように見える。そのため、それらの相関をとって見たところ、図-3.3.15 と図-3.3.16 に示すように降雨による増加地下水流量は、累積降雨量や単位時間降雨量との間に強い相関が認められた。

A1, A2, A3 個々の地下水流量に着目すると、A1 流量は A2 流量や A3 流量に比して相対的に少なく、A2 流量と A3 流量がほぼ同等の大きな流量を示している。累積降雨量が 100mm に満たない流量詳細図 c, d, f は A2 流量のピーク時流量が A3 流量よりも大きい。一方、100mm 以上の累積降雨量のあった流量詳細図 a, b, e, g, h においてはピーク後に、A2 流量よりも A3 流量が大きくなっている。特に大きなピーク流量のあった b と h においては、ピーク後に A3 流量が A2 流量を大きく上回っている。このことは、A3 地下排水溝南側本管が他流域からの地下水を集水していると推測した前述の裏付けでもある。

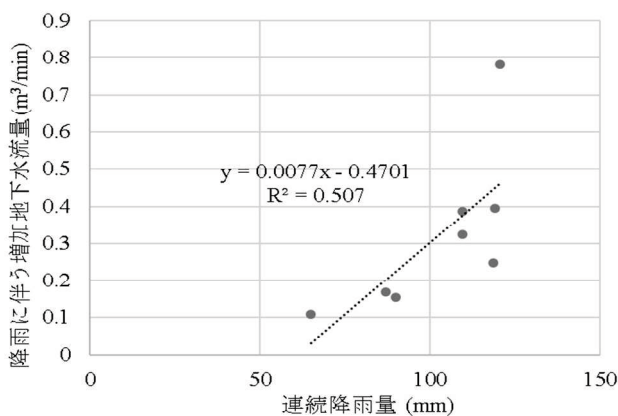


図-3.3.15 累積降雨量と降雨に伴う増加地下水流量の関係

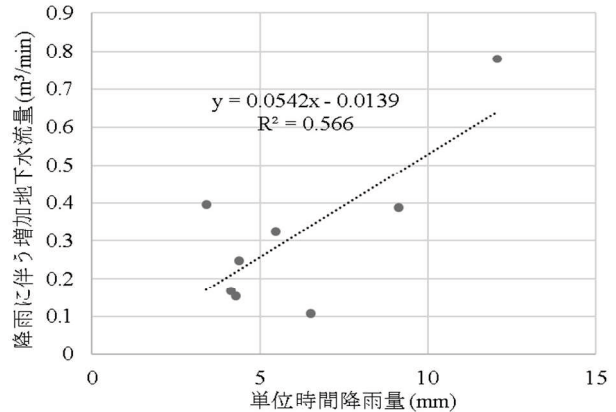


図-3.3.16 単位時間降雨量と降雨に伴う増加地下水流量の関係

#### (4) 地下水流量と先行降雨量との関係

一般に、地下水流量は直近の降雨だけではなく、先行する降雨の影響を強く受けることが報告されている<sup>6)</sup>。また、前述の通り地下排水溝流量は先行降雨の影響を受けている事実が明らかとなった。そこで 2016 年 7 月 7 日から 2017 年 11 月 30 日の間に計測された 1 週間の地下水流量 (週間地下水流量) および 1 日の地下水流量 (日地下水流量) と先行する降雨量として 2 週間から 6 週間降雨量の 1 週間あたり平均値 (先行 2~6 週間降雨量) との関係を検討し、その結果を表-3.3.6 に示した。ここでは、A1, A2, A3 各地下排水溝から排出される地下排水溝流量と、それらを合計した全地下水流量についての関係についてまとめている。また、図-3.3.17

表-3.3.6 地下水流量と先行降雨量との決定係数 ( $R^2$ )

$R^2$	全地下水流量		地下排水溝流量					
	A1+A2+A3		A1		A2		A3	
	日流量	週間流量	日流量	週間流量	日流量	週間流量	日流量	週間流量
先行 2 週間降雨量	0.502	0.458	0.498	0.426	0.552	0.526	0.432	0.404
先行 3 週間降雨量	0.566	0.517	0.590	0.533	0.593	0.565	0.487	0.450
先行 4 週間降雨量	<b>0.704</b>	<b>0.753</b>	<b>0.727</b>	0.757	0.669	<b>0.763</b>	<b>0.658</b>	<b>0.705</b>
先行 5 週間降雨量	0.625	0.709	0.679	<b>0.770</b>	<b>0.679</b>	0.689	0.550	0.652
先行 6 週間降雨量	0.570	0.663	0.629	0.745	0.534	0.622	0.512	0.614

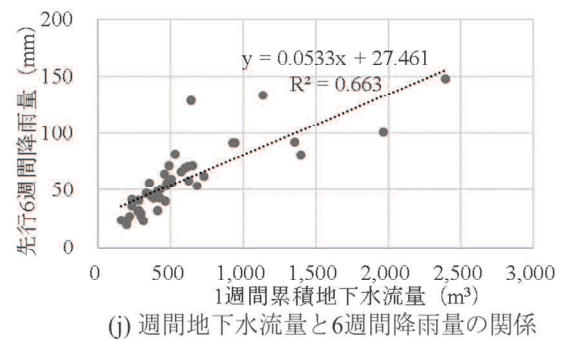
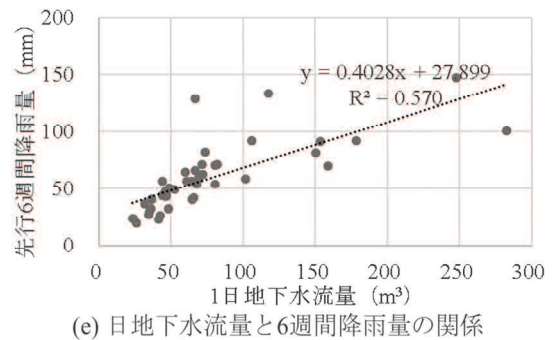
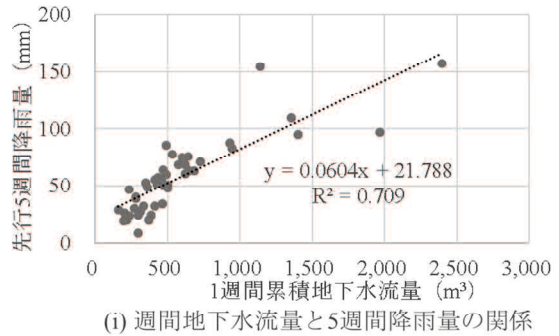
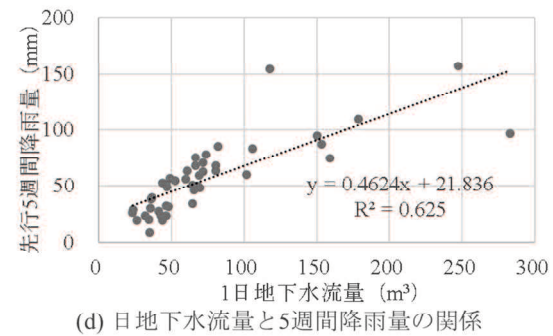
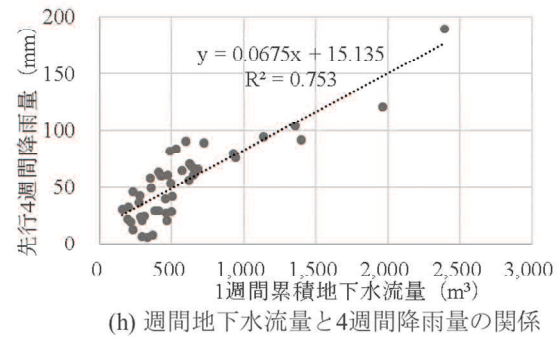
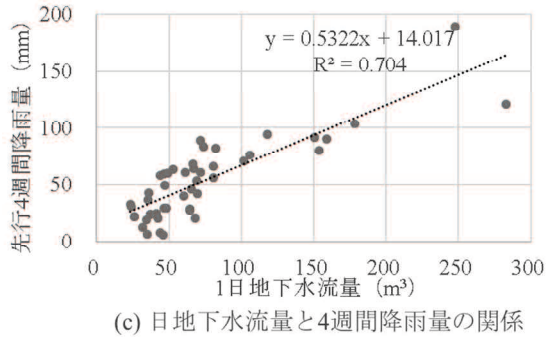
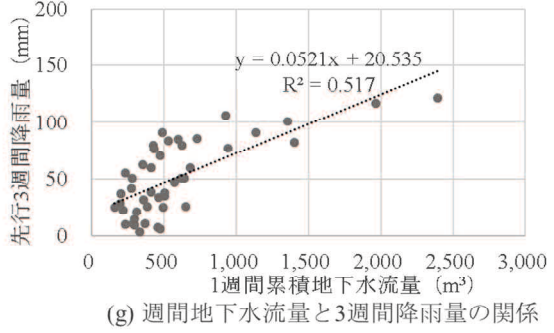
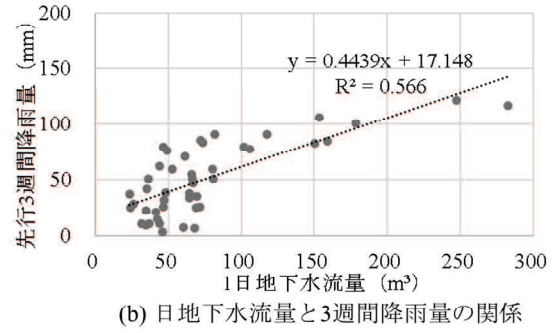
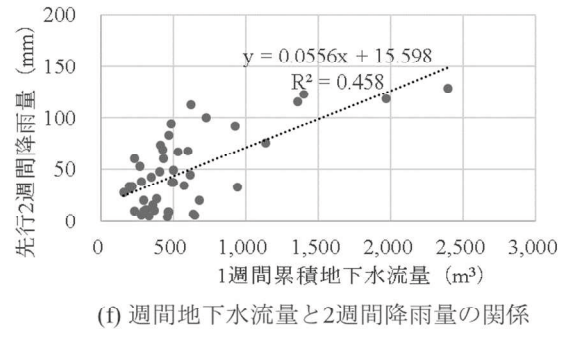
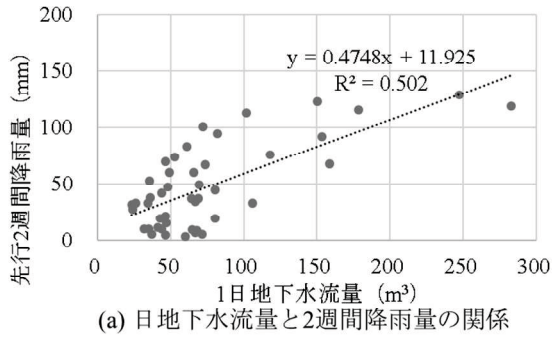


図-3.3.17 地下水流量と先行降雨量の関係

には日全地下水流量および週間全地下水流量と先行する 2～6 週間の降水流量との関係を示した。ここで抽出したデータは計測開始から 1 週間単位で区切った 1 週間の累積地下水流量とし、降雨量はその流量に対する先行降雨量とした。これによると、全地下水流量は日地下水流量、週間地下水流量ともに先行 4 週間降雨量と強い相関が認められ、それより短期でも長期でも先行降雨との相関は逆に下がる結果となった。各地下排水溝流量についても、先行する 4～5 週間の週当たり平均降雨量と強い相関のあることが分った。また、日流量と週間流量を比較すると、総じて週間流量の方が先行降雨量との決定係数が高くなった。これは、長い期間の流量を累積した方の相関が高くなった結果と言える。これらのことから、当該箇所地下水流量は、短期でなく比較的長期にわたる先行する 1 ヶ月程度の降雨量に強く影響を受けることが判明した。このことは、地下水は降雨後に相当の時間をかけて排出されており、言い換えれば降雨と盛土への地下水供給にはタイムラグがあることを意味している。以上のことから、当該盛土では広範囲の流域からの降雨が当該流域へ流入していることが想定され、断層破碎帯を通じて先行降雨に相当する深層地下水が供給されていると考えられる。

一般に高速道路における降雨通行止めを行った際の通行止め解除は、降雨が降り止んでから 6 時間連続して降雨がなく、のり面など道路本体に異常がないことを確認した上で行っている。しかし、このように降雨と地下水供給にタイムラグがある盛土にあつては、排水機能が十分でなければ降雨が止んでから地下水位が上昇することも考えられるため、地下水位の状況を監視することが重要であることを示唆している。

図-3.3.18 には、図-3.3.17 のデータを用いて 1 週間の全地下水流量 (A1, A2, A3 の合計流量) に対する 1 週間の A1～A3 各地下排水溝流量の支配率 (A1/(A1+A2+A3), A2/(A1+A2+A3), A3/(A1+A2+A3)) との関係を示した。これによると A1 地下水流量支配率には地下水流量との相関が認められず、ほぼ一定である。また、地下水流量が多くなると、A2 地下水流量支配率は小さくなる負の相関が、A3 地下水流量支配率は大きくなる正の相関が認められる。このことは、地下水流量が多くなれば断層破碎帯による他流域からの地下水供給が増加し、その地下水は A3 地下排水溝が多く集水していることを意味する。図-2.2.1 の被災箇所スケッチにあるように、岩国災害直後の高速道路路面直下の崩壊すべり面には 3 箇所の湧水地点が確認されており、この地点は A3 地下排水溝南側本管の設置位置とほぼ一致していることによると考えられる。言い換えると、断層破碎帯によって他流域から地下水が供給されている箇所は図-2.2.1 の湧水箇所であると考えられ、その湧水は A3 地下排水溝南側本管が多く集水していることになる。

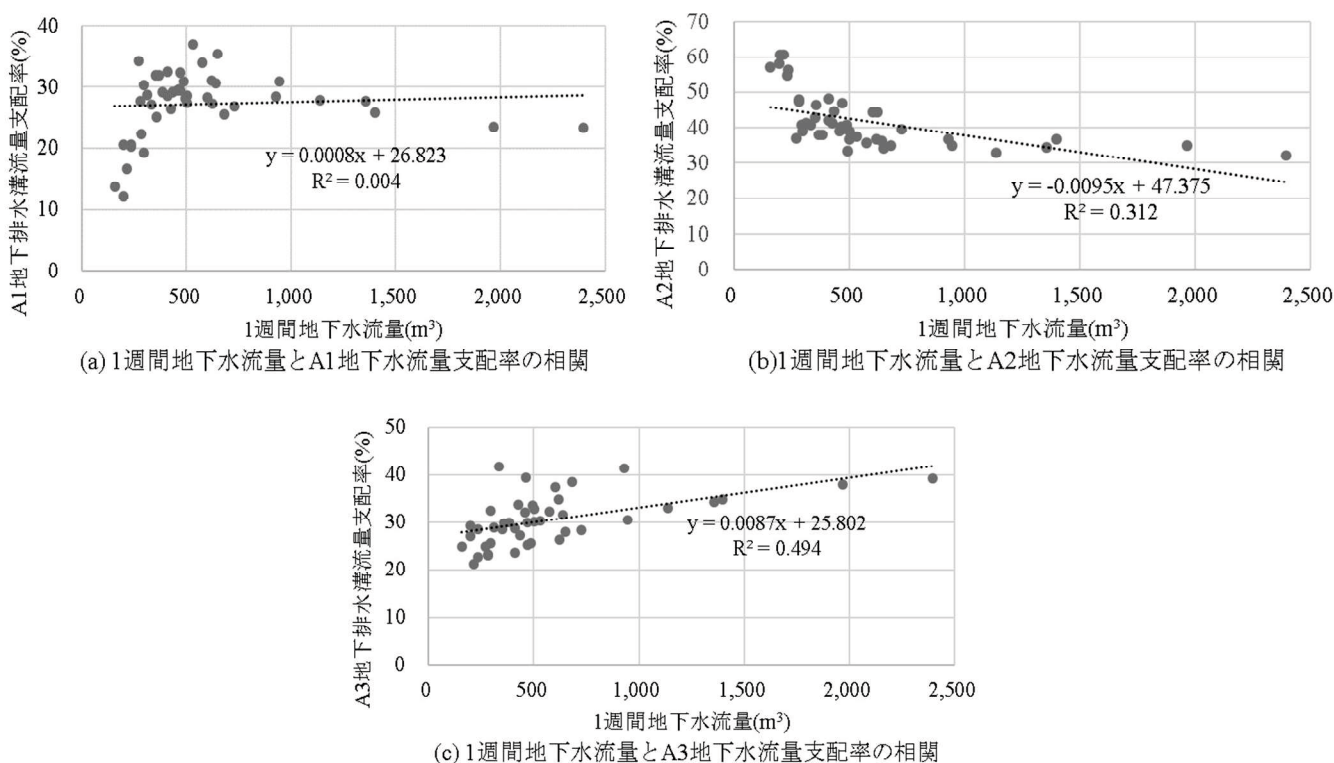


図-3.3.18 1 週間全地下水流量と各地下排水溝流量支配率との関係

### 3.3.3 地表水流量

ここでは、当該地における地表水の流出特性を把握するために計測した地表水流量の分析を行った。また、断層破碎帯からの地下水供給量を推定する際の基礎データを得るため、図-3.2.3 に示す地表水流量の B-1 および B-2 流域における降水流量に対する地表水流量の割合である流出率を算出した。

#### (1) 地表水流量と降雨量との関係

2016 年の計測期間中の地表水流量と降雨量の経時的な関係を図-3.3.19 に示し、同様に 2017 年について図-3.3.20 に示した。地表水流量は、降雨量と明瞭な関係が認められ、降雨量に応じた地表水流量が計測されている。地表水流量は、降雨にともなって急増し、ピーク流量が明瞭で、降雨がおさまれば速やかに流量を減じ、流量と降雨のピークに時間差はほとんどない。

2016 年 9 月から 2017 年 11 月までの計測期間中において、24 時間以上無降雨が連続した後の雨の降り始めから降り終わりを 1 つの単位とした一雨当たりの降雨量と地表水流量との関係を図-3.3.21 に示した。これによると、50mm を超える降雨領域では若干のばらつきが見られるものの、地表水流量と降雨量との関係には強い相関が認められる。図中の赤印

(2017 年 6 月 30 日) の地表水流量が突出して多いことが決定係数の低くなった要因で、この値を除くと  $R^2 > 0.8$  と極めて強い相関がある。なお、2017 年 6 月 30 日の降雨は、累積雨量が 64 mm と特別多くはないものの、時間降雨量が 43 mm と計測期間中で最も多かった。そのため、この降雨による降水流量の 85% にあたる地表水流量 260  $m^3$  が 1 時間で流出し、極端な集中豪雨で流出量が多く、通常の流出特性と異なる状況であったものと考えられる。

次に、初期損失について考察を加える。初期損失とは、地表水の流出が発生するまでの累積降雨量で、地表面（舗装面、のり面、自然斜面）から土壤中やアスファルト中の不飽和部に浸透したり、樹木に付着した降雨量と考えられる。図-3.3.21 によると初期損失は B-1 流域で 8.8mm と大きく、B-2 流域で 2.6mm と小さく、全流域では 4.8mm となった、実際の観測でも、5mm 程度以下の降雨量では地表水の流出はほとんど計測されていない。ここで、初期損失の算出には、図-3.3.21 中の線形近似式の  $y=0$  として、 $x$  の値（初期損失値）として求めている。

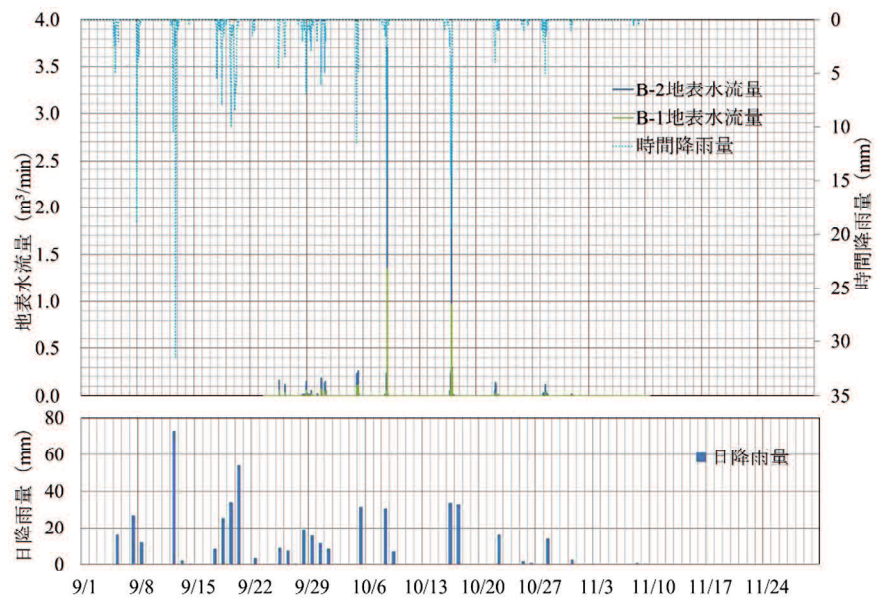


図-3.3.19 地表水流量と降雨量の関係(2016年)

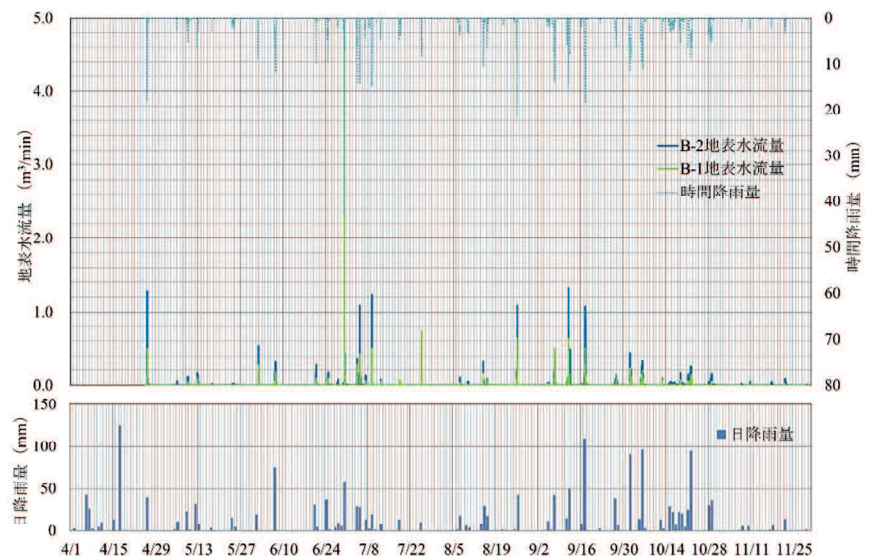


図-3.3.20 地表水流量と降雨量の関係(2017年)

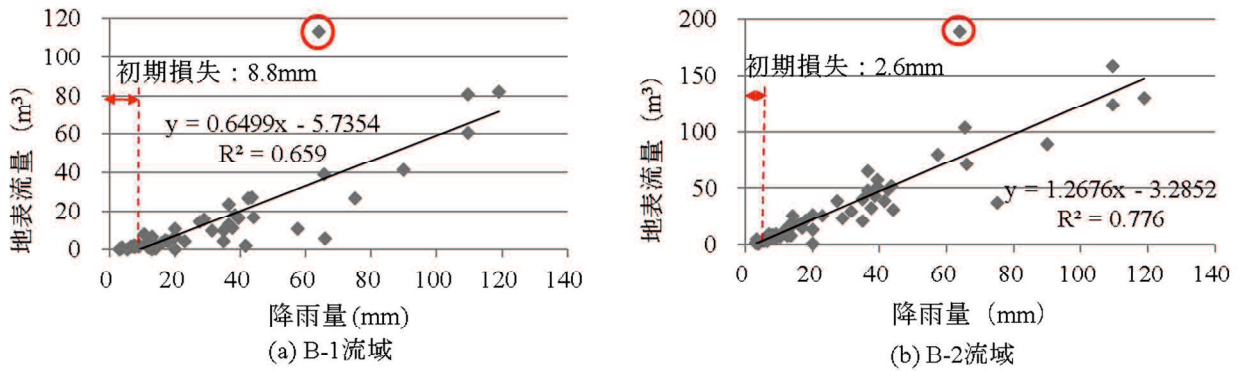


図-3.3.21 一雨当たりの降雨量と地表水流量の関係

(2) 累積地表水流量と流出率

流出率は、土壌の透水性や水分状態、植生状態、斜面勾配、蒸発散量などの現地条件のほか、先行降雨量、降雨強度、累積降雨量、降雨時間などの降雨条件によっても影響されることが報告されている<sup>7),8)</sup>。図-3.3.22は2016年9月9日から11月10日までのB-1流域およびB-2流域に対応した累積地表水流量と累積降水流量を示し、同様に図-3.3.23には2017年4月24日から11月30日までの累積流量を示した。表-3.3.7には、2016年と2017年に計測した地表水流量から流域別に流出率を算出した。ここに、降水流量の算出には、図-3.2.3に示したB-1流域面積4,000m<sup>2</sup>、B-2流域面積7,000m<sup>2</sup>、全流域面積はB-1流域とB-2流域を含めた11,000m<sup>2</sup>とし、これらの流域面積に降雨量と流出係数1.0を乗じて(降雨量×流域面積×流出係数)算出している。

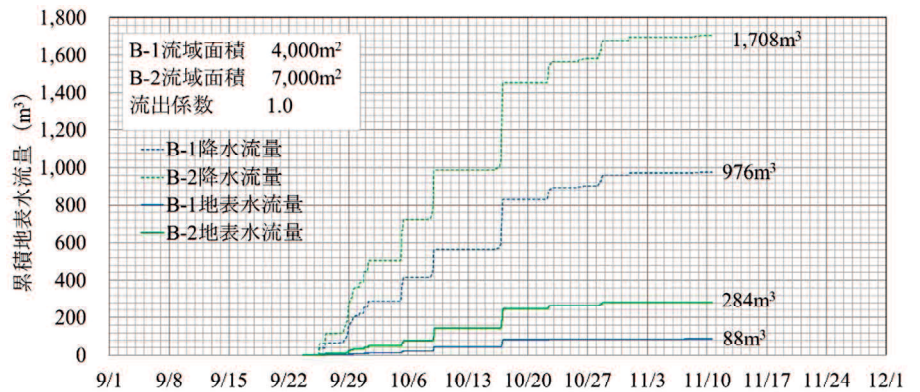


図-3.3.22 累積地表水流量と累積降水流量の変動 (2016年)

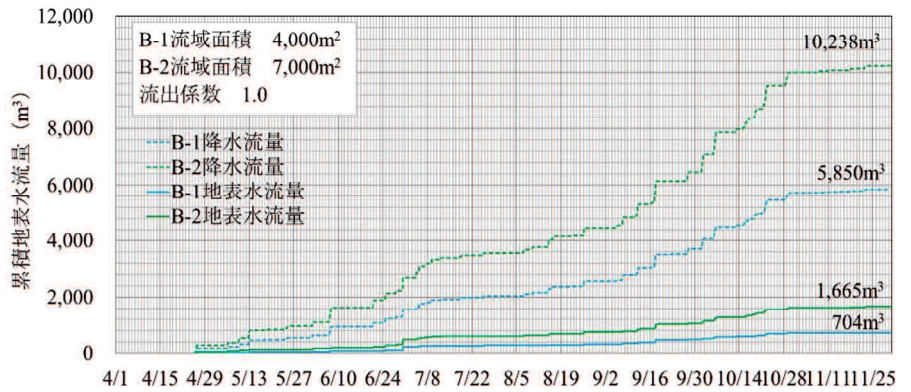


図-3.3.23 累積地表水流量と累積降水流量の変動 (2017年)

表-3.3.7 流域別の地表水流量の流出率

計測期間	B-1 流域		B-2 流域		全流域 流出率
	降水流量	地表流量 (流出率)	降水流量	地表流量 (流出率)	
2016/9/9-11/10	976 m <sup>3</sup>	88 m <sup>3</sup> (9.0%)	1,708 m <sup>3</sup>	284 m <sup>3</sup> (16.6%)	13.9%
2017/4/25-11/30	5,850 m <sup>3</sup>	704 m <sup>3</sup> (12.0%)	10,238 m <sup>3</sup>	1,665 m <sup>3</sup> (16.3%)	14.7%



降水流量に対する地表水流量の比率である流出率は9～17%であった。流域別に見ると、2016年、2017年ともにB-2流域の流出率が若干大きな結果となった。これは、B-2流域の盛土のり面には多くの小段排水溝やたて排水溝を整備し、また大きな樹木が少ないため、一般斜面に比べて地表水を集水しやすくなっているものと思われる。このことは前述の初期損失の結果とも整合している。つまり、初期損失はB-2流域が小さく、B-1流域が大きくなっており、初期損失が小さければ流出率が大きくなることを意味している。

また当該箇所の流出率は、勾配の緩い山地での流出率の標準値が10～40%とされている<sup>9),10)</sup>ことに対して、その範囲内ではあったもののやや小さめの値となった。降雨量が大きくなると流出率も大きくなるとの報告<sup>11)</sup>があるため、降雨量と流出率との関係も検討を試みたが、今回の計測からもその傾向は確認できたものの、明瞭な相関は認められなかった。これは、先行降雨など降雨形態の影響により流出率が大きく変動するためであると考えられる。

### (3) ピーク地表水流量

表-3.3.8には、2016年と2017年に計測された比較的大きな累積降雨量(31.5mm以上)について降雨と地表水のピーク流量、ピーク流量の発生時刻、合わせてピーク時の降水流量に対する地表水流量の比率である流出率も併記している。また、その中から一例として2017年6月29～30日と2017年9月11～12日の地表水流量の経時変動図を図-3.3.24および図-3.3.25に示した。降雨量や降雨形態により若干の差はあるものの、両図ともにピーク時のB-1およびB-2地表水流量はそれぞれの流域面積に概ね比例している。

表-3.3.8 地表水の代表的なピーク時流量の概要

日時	2016			2017								
	10月5日	10月8日	10月17日	4月26日	6月7日	6月30日	8月26日	9月12日	9月17日	10月2日	10月6日	10月22日
全降水流量												
発生時刻	10:00	23:50	0:10	6:30	13:20	4:10	3:50	1:30	0:10	9:30	12:50	9:10
流量 (m <sup>3</sup> /min)	3.300	14.850	9.900	6.050	3.300	23.600	8.800	7.700	9.900	4.400	2.750	1.650
全地表水流量												
発生時刻	10:20	0:00	0:20	7:00	13:20	4:30	3:40	1:50	0:20	9:50	13:20	9:50
流量 (m <sup>3</sup> /min)	0.375	5.069	3.657	1.779	0.485	12.422	1.490	1.951	3.657	0.661	0.500	0.394
流出率 (%)	11.4	34.1	36.9	29.4	14.7	52.6	16.9	25.3	36.9	15.0	18.2	23.9
B-1降水流量												
発生時刻	10:00	23:50	0:10	6:30	13:20	4:10	3:50	1:30	0:10	9:30	12:50	9:10
流量 (m <sup>3</sup> /min)	1.200	5.400	3.600	2.200	1.200	8.600	3.200	2.800	3.600	1.600	1.000	0.600
B-1地表水流量												
発生時刻	10:20	0:00	0:20	7:00	13:20	4:20	4:00	1:50	0:20	9:40	13:00	10:50
流量 (m <sup>3</sup> /min)	0.117	1.356	0.971	0.504	0.174	5.500	0.641	0.632	0.971	0.230	0.197	0.144
流出率 (%)	9.8	25.1	27.0	22.9	14.5	64.0	20.0	22.6	27.0	14.4	19.7	24.0
B-2降水流量												
発生時刻	10:00	23:50	0:10	6:30	13:20	4:10	3:50	1:30	0:10	9:30	12:50	9:10
流量 (m <sup>3</sup> /min)	2.100	9.450	6.300	3.850	2.100	15.050	5.600	4.900	6.300	2.800	1.750	1.050
B-2地表水流量												
発生時刻	10:20	0:00	0:20	7:00	13:20	4:30	4:10	1:50	0:20	9:30	12:50	9:10
流量 (m <sup>3</sup> /min)	0.258	3.713	2.687	1.275	0.312	7.385	1.082	1.319	2.687	0.443	0.325	0.250
流出率 (%)	12.3	39.3	42.6	33.1	14.9	49.1	19.3	26.9	42.6	15.8	18.6	23.8

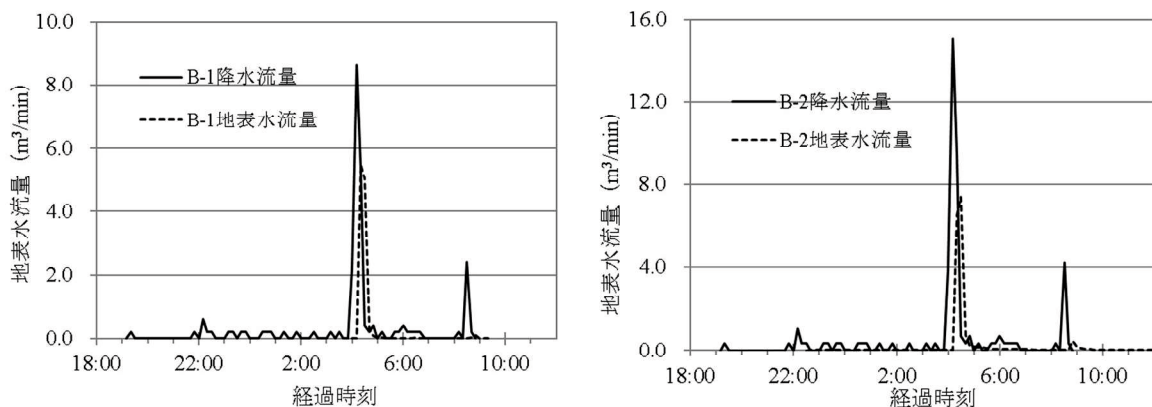


図-3.3.24 降水流量と地表水流量の経時変動 (6月29～30日)

降水流量と地表水流量のピークの時間差は、わずか0分～10分程度であった。表-3.3.8によると特異な高強度降雨を計測した2017年6月30日には全地表水流量(B-1+B-2)のピーク時の地下水流量はピーク時の降水流量の52.6%と高い値を示したが、このデータを除けば、全地表水流量(B-1+B-2)のピーク時地下水流量はピーク時降水流量の11.4%～36.9%にあたる。また、それぞれの流域別にみても、B-1流域のピーク時地下水流量はその流域のピーク時降水流量の9.8%～27.0%、B-2流域のピーク時地下水流量はピーク時降水流量の12.5%～42.6%となった。ここで得られた地下水流量の流出率も、累積地表水流量の流出率と同様にB-2流域の方が高い値となった。この理由は前述のとおりと考えられる。このことから、ここで検討した比較的大きな累積降雨量(31.5mm以上)の場合、地表水流量流出率は10%～40%と推定され、勾配の緩い山地での流出率の標準値とされる10～40%<sup>9),10)</sup>と同様の結果となった。大きな降雨時の地表水流量流出率は、前述の全期間を対象とした流出率よりも大きな値となった。

ピーク時地表水流量とピーク時降水流量の関係は図-3.3.26に示すとおり、B-1およびB-2流域ともにピーク時降水流量が増加するとピーク時地表水流量も増加し、決定係数も $R^2 > 0.9$ と極めて強い相関が認められる。図-3.3.27にはピーク時地表水流量と流出率との関係を示した。地表水流量が大きくなれば流出率も大きくなり、ここにも強い相関が認められる。前述のように、累積地表水流量と流出率には明確な相関は認められなかったが、比較的大きな累積降雨量のあった際のピーク時地表水流量と流出率には強い相関が認められる。

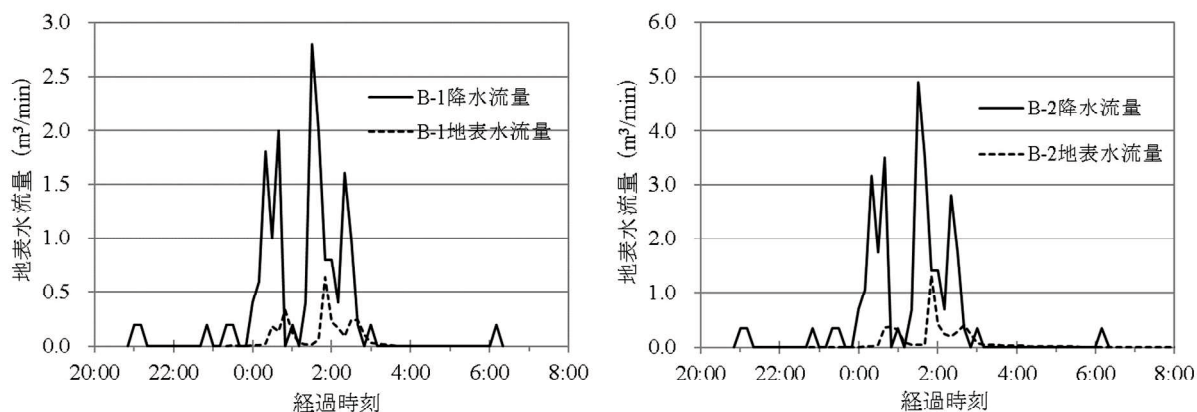


図-3.3.25 降水流量と地表水流量の経時変動(9月11～12日)

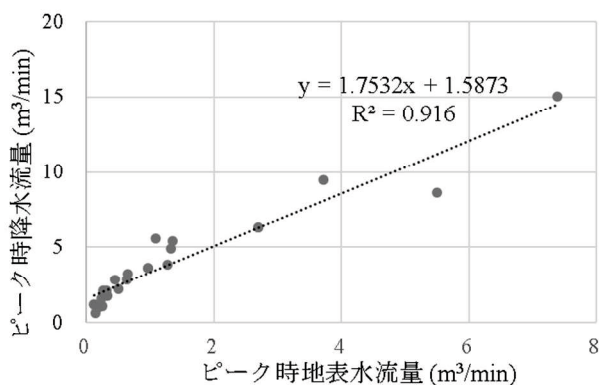


図-3.3.26 ピーク時地表水流量と降水流量の関係

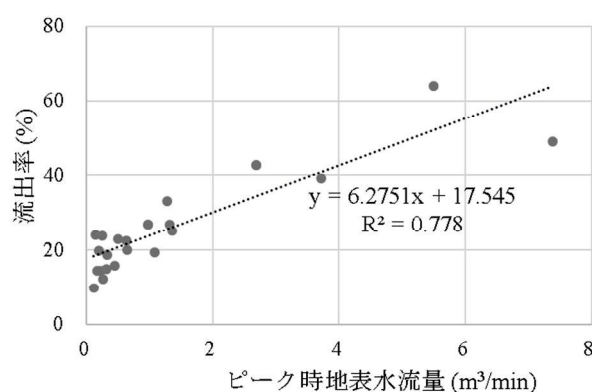


図-3.3.27 ピーク時地表水流量と流出率の関係

#### (4) 地表水流量の流出特性

土壌中への浸透能力を超過するような強い降雨量があった場合には Horton 型地表流が発生すると考えられ、Horton 型地表流が発生すると雨水は土壌に浸透することなく、そのまま流出することが知られている<sup>12)</sup>。この場合、降雨量と地表水流量の関係は累乗近似曲線(図-3.3.28 参照)や、ある値以上で関係が変化する1次線形近似線(図-3.3.29 参照)になると考えられる<sup>13)</sup>。しかしながら、前節で述べたように、一降雨単位での降雨量と地表水流量の関係は、1次式の線形近似で表され、特異な高強度降雨のあった1点を除いて降雨量が

多くなっても流出率に際立った変化はなかった（図-3.3.21 参照）。そこで、①降雨パターン別での降雨量と地表水流量の検討と、②最大時間雨量と時間地表水流量での検討を行い、本地域でのホートン型地表流の発生について考察した。

降雨パターン別の傾向を把握するため、最大時間雨量÷累積降雨量によって、降雨強度の小さい0.0～0.5と、降雨強度の強い0.5～1.0の2パターンに区別して検討した。その結果、一雨あたりの降雨量と地表水流量の関係について、累乗近似表示を図-3.3.30、線形近似表示を図-3.3.31に示した。0.50～1.0では累乗近似曲線（ $y=0.3757X^{1.5182}$ ）に対して、 $R^2=0.957$ と極めて強い相関が認められた（図-3.3.30参照）。

一方、0.0～0.50では1次式の線形近似のほうが、若干相関の強いことが認められた（図-3.3.31参照）。このことは、降雨強度の弱い降雨では線形近似となることからホートン型の地表流は発生し難いが、降雨強度の強い降雨では累乗近似となることからホートン型の地表流は発生しやすいことを意味している。

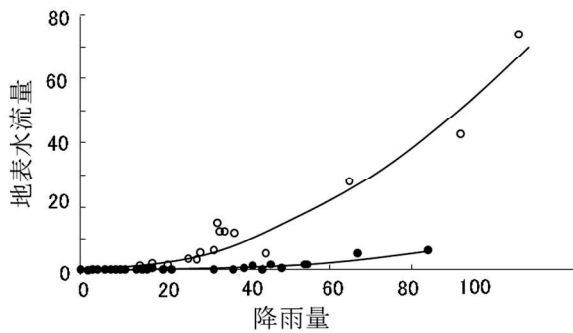


図-3.3.28 累乗近似曲線のイメージ

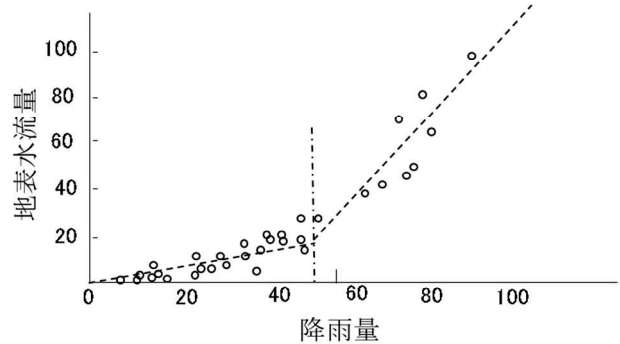


図-3.3.29 1次線形近似直線のイメージ

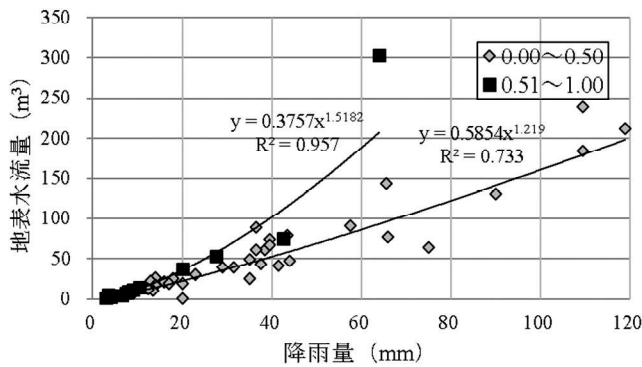


図-3.3.30 一雨当たりの降雨量と地表水流量の関係  
(累乗近似表示)

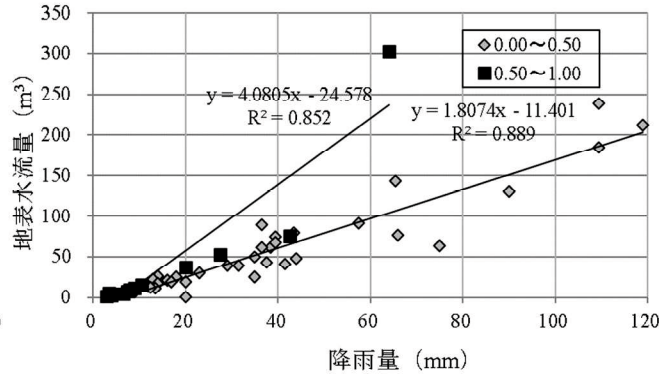


図-3.3.31 一雨当たりの降雨量と地表水流量の関係  
(線形近似表示)

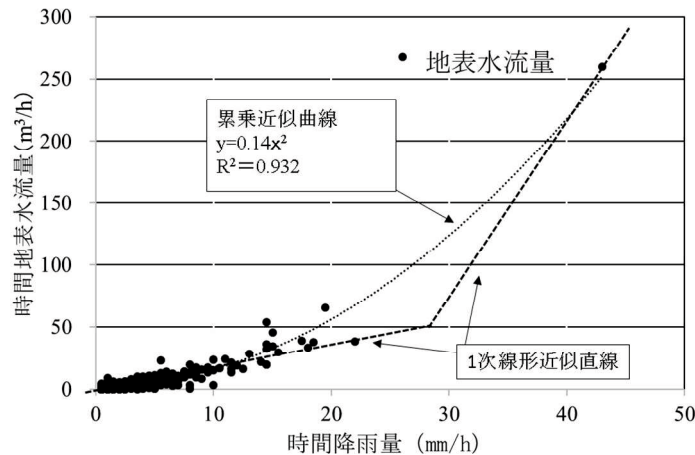


図-3.3.32 最大時間降雨量と時間地表水流量の関係

次に、最大時間降雨量と時間地表水流量の傾向を把握するため、最大時間降雨量と時間地表水流量の関係を図-3.3.32に示す。図からは、時間降雨量が22mmまでは時間流量は降雨量に比例して直線的に増加しているが、時間降雨量43mmの段階では流量が急激に増えていることが伺える。したがって、当該地においては、得られているデータ数が少ないため明言はできないものの、時間降雨量22mmから43mmの間でホートン型地表流が発生していることが考えられる。ホートン型地表流の発生に関する検討結果を整理すると以下ようになる。降雨パターン別での降雨量と地表水流量の検討結果をみると、降雨強度の強い降雨ではホートン型の地表流は発生しやすいが、降雨強度の弱い降雨ではホートン型の地表流は発生し難い。一方、最大時間降雨量と時間地表水流量の関係からみると、時間降雨量22mmから43mmの間でホートン型地表流が発生している。したがって、本地域では降雨強度の非常に強い降雨（例えば時間降雨量43mm）の時には、ホートン型地表流が発生していると考えられる。

### 3.3.4 のり尻工流量

#### (1) のり尻工流量計測値の補正

のり尻工流量は、図-3.2.4に示すようにA4流量からA2流量とA3流量を減じることにより算出した。しかし、A4流量には、図-3.3.33に示す赤色の平坦な芝地部と灰色のシールコンクリート部の水路周辺に降った雨による地表水も直接流入している（写真-3.2.1のA4参照）。そこで、これらののり尻工が集水していない盛土以外から流入する地表水を排除するために、式-3.3.2に示す式により、調整後のA4流量は調整前のA4流量から上述した範囲（芝平坦地200m<sup>2</sup>及びシールコンクリート部50m<sup>2</sup>）ののり尻工由来でない地表水流量相当分を減じることにした。

$$\begin{aligned} \text{調整後のA4流量} = & \text{調整前A4流量} - 10\text{分間降雨量} \times (\text{芝平坦地流域面積} \times \text{芝平坦地流出係数} \\ & + \text{シールコンクリート面積} \times \text{シールコンクリート流出係数}) \end{aligned} \quad (\text{式-3.3.2})$$

ここに、調整後のA4流量：盛土以外から流入する地表水流量を除いた流量（m<sup>3</sup>/10min）、A4流量：（m<sup>3</sup>/10min）、10分間降雨量：（mm/10min）、芝平坦地面積：200m<sup>2</sup>（図-3.3.33の赤色ハッチング部分）、芝平坦地流出係数<sup>9)</sup>：0.05、シールコンクリート面積：50m<sup>2</sup>（図-3.3.33の灰色ハッチング部分）、シールコンクリート流出係数<sup>9)</sup>：0.75

次に、当該地に設置したのり尻工は一般的に施工されている盛土ののり尻箇所のみ線の配置でなく、のり面全体の約4割に相当する範囲に面的配置しているため、前述のとおり地下水成分のみならず地表水成分も含んでいる。そのため、ここではのり尻工流量を地表水成分と地下水成分の分離を以下のように行った。

地表水成分と地下水成分に分離した一例に2017年9月17日～9月18日の流量を図-3.3.34に示す。この際には、累積降雨量109.5mmを記録し、雨の降り始めと降り終わり時点の流量を直線で結び、結んだ直線を越える部分を地表水流量、直線を越えない部分を地下水流量とした。この時ののり尻工流量の内訳は、のり尻工流量のピーク時流量は0.169m<sup>3</sup>/min、ピーク時地下水流量は0.152m<sup>3</sup>/min、ピーク時地表水流量は0.079m<sup>3</sup>/min、累積地下水流量31.26m<sup>3</sup>、累積地表水流量は9.32m<sup>3</sup>となった。

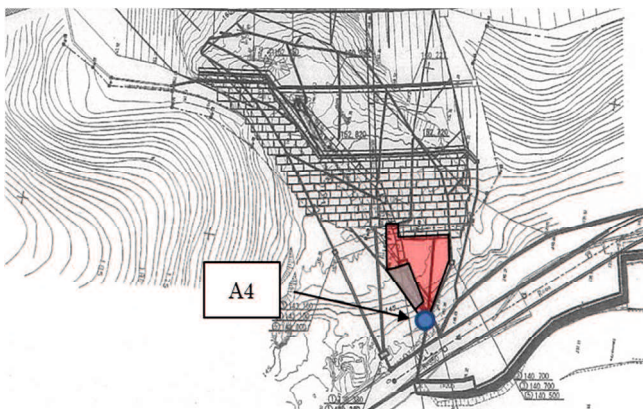


図-3.3.33 盛土以外からA4に流入する地表水の流域

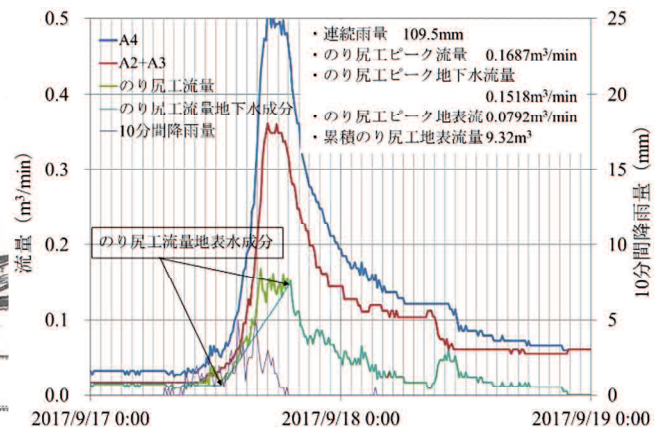


図-3.3.34 のり尻工流量の地表水流量と地下水流量の分離

## (2) のり尻工流量と降雨量との関係

一般に、のり尻工は土構造物の排水対策として有効であることが知られており、盛土のり尻箇所に多くの施工事例を見かける。しかしながら、その効果を定量的に検証した文献は見当たらない。ここでは、のり尻工から排出される流量を計測し、その排水効果の検証を行った。

のり尻工の降雨に対する反応についての考察を加える。図-3.3.35には、計測期間中で最大10分間降雨量を記録した2017年6月30日の10分間降雨量とのり尻工流量の関係を示した。これによると10分間降雨量21.5mmの20分後、10分間降雨量13.5mmの10分後にのり尻工流量に明瞭なピークが表れ、降雨に対して10～20分の短時間で反応している。このことは、高強度降雨時にはのり尻工流量の地表水成分の影響が大きく、のり尻工流量は地表水成分と地下水成分の両方を流出していることを意味している。

図-3.3.36には、計測期間の中で最も多い月降雨量を観測した2017年10月の降雨に伴うのり尻工流量の地表水成分と地下水成分の変動図を示した。ここで、のり尻工流量地表水成分に着目すると、比較的大きな降雨時には著しく増加し、特に日降雨量が20mm以上、時間降雨量5mm以上の際に顕著なピーク流量が観測され、降雨後は速やかに流量が減じている。また、地下水成分は降雨に対して短時間で反応しながらも、降雨が止んでもある一定程度の時間は流量が認められる。

2016年と2017年にのり尻工流量を計測した期間の特徴は、以下のとおりである。

2016年と2017年にのり尻工流量を計測した期間の特徴は、以下のとおりである。

2016年の地表水成分の最大値は、9月12日の0.2162m<sup>3</sup>/minで、この時の日降雨は73.0mm、最大時間降雨量は31.5mmであった。地下水成分の最大値は9月20日の0.3278m<sup>3</sup>/minで、この時の日降雨量は54.0mmであるが4日間で122mmの降雨量があり、時間降雨量は8.5mmであった。

2017年の地表水成分の最大値は6月30日の1.4315m<sup>3</sup>/minで、この時の日降雨量は64.0mm、最大時間降雨量は43mmであった。地下水成分の最大値は9月17日の0.1518m<sup>3</sup>/minで、この時の日降雨量は109.5mm、最大時間降雨量は18.5mmであった。以上のことから、降雨強度などの違いにより、地表水流量と地下水流量は変化すると考えられ、地表水成分は時間単位の降雨量に、地下水成分は数日単位の降雨量に関係していると思われる。

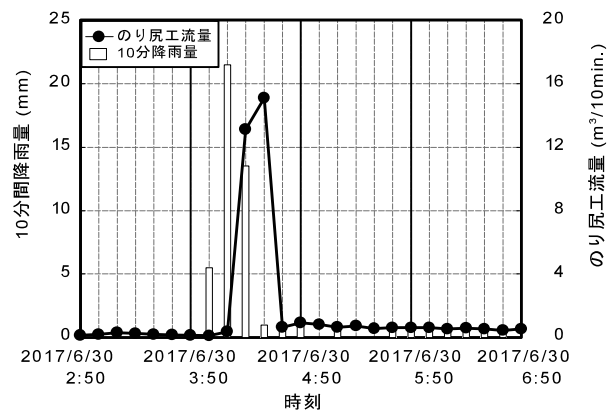


図-3.3.35 10分間降雨量とのり尻工流量の関係

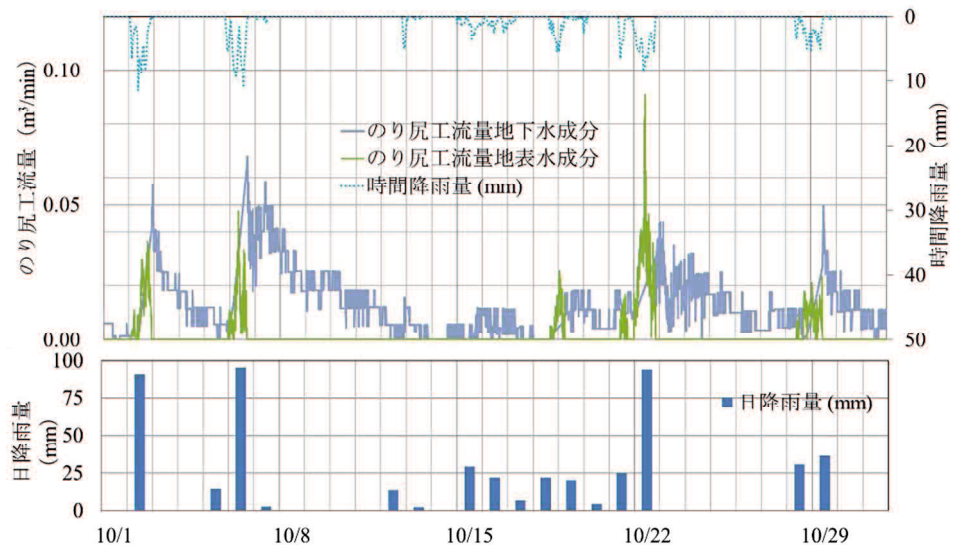


図-3.3.36 降雨量によるのり尻工流量の変動(2017年10月)

## (3) 累積のり尻工流量と降雨量との関係

図-3.3.37は2016年9月9日から11月10日までの累積のり尻工流量と累積降水流量の変動を示し、同様に図-3.3.38には2017年4月24日から11月30日までの流量変動を示した。また、これらの累積値から、のり尻工流量の降水流量に対する地表水成分と地下水成分の率であるのり尻工流出率と流量率に合わせて全地下

水流量に対するのり尻工地下水流量の率を表-3.3.9 に示す。

のり尻工地表水成分の流量は、のり尻工流量全体からみればごくわずかではあるものの、図-3.2.3 のC流域であるのり尻工流域 1,000 m<sup>2</sup> の降水流量に対する比率は 11~41%である。地下水成分の流量も A 流域 19,900 m<sup>2</sup> の降水流量に対して 8~18%程度であり、地下排水溝流量の流量率が 53~100%であることからすれば、その比率は少ない。ただし、降雨に対して短時間で反応しており、即時的排水効果を有していると言える。

また、のり尻工が排出している流量は、地下排水溝とのり尻工を合わせた全地下水流量に対して 11~24%であり、排出する地下水流量としては地下排水溝が大きな排水効果を担っていることが把握できた。

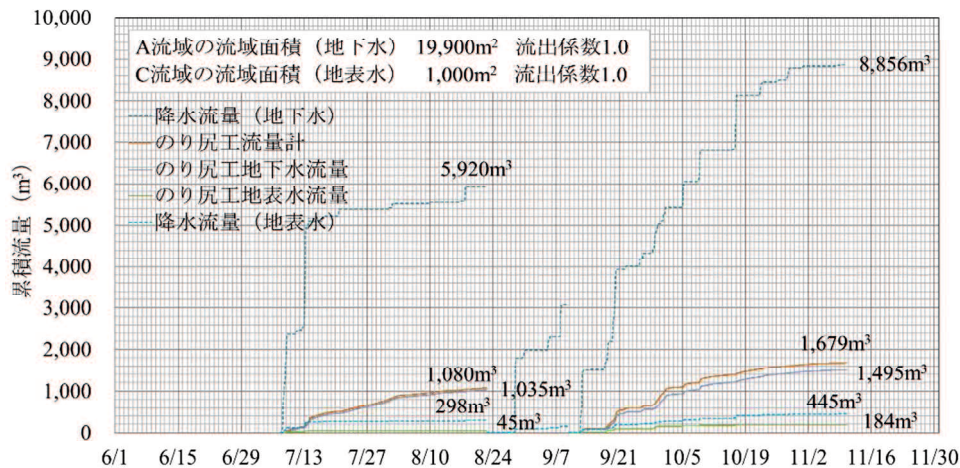


図-3.3.37 累積のり尻工流量と累積降水流量の変動(2016年)

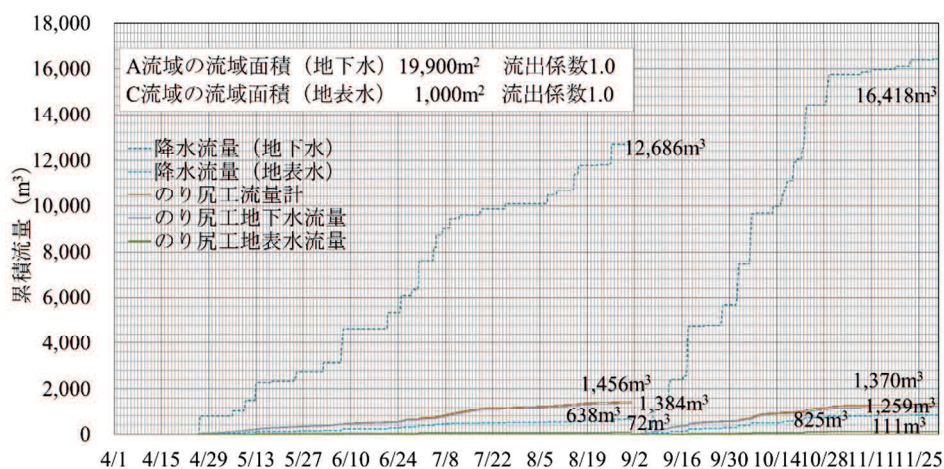


図-3.3.38 累積のり尻工流量と累積降水流量の変動(2017年)

表-3.3.9 のり尻工流量の分析

計測期間	地表水成分		地下水成分			のり尻工流量計
	降水流量	地表水流量 (流出率)	降水流量	地下水流量 (流量率)	全地下水流量 に対する 流量率	
2016年7月7日~8月22日	298 m <sup>3</sup>	45 m <sup>3</sup> (15.1%)	5,920 m <sup>3</sup>	1,035 m <sup>3</sup> (17.5%)	14.9%	1,080 m <sup>3</sup>
2016年9月9日~11月10日	445 m <sup>3</sup>	184 m <sup>3</sup> (41.3%)	8,856 m <sup>3</sup>	1,495 m <sup>3</sup> (16.9%)	24.2%	1,679 m <sup>3</sup>
2017年4月25日~8月31日	638 m <sup>3</sup>	72 m <sup>3</sup> (11.2%)	12,686 m <sup>3</sup>	1,384 m <sup>3</sup> (10.1%)	17.7%	1,456 m <sup>3</sup>
2017年9月1日~11年30月	825 m <sup>3</sup>	111 m <sup>3</sup> (13.5%)	16,418 m <sup>3</sup>	1,259 m <sup>3</sup> (7.7%)	11.0%	1,370 m <sup>3</sup>

#### (4) のり尻工流量と先行降雨量との関係

のり尻工流量の地表水成分と地下水成分が、先行降雨量や降雨強度の影響を受けると考え、先行降雨時間と降雨強度を変化させて分析を行い、その中で最も決定係数の高くなった結果を以下に示す。表-3.3.10 はのり尻工流量の地表水成分と時間当り 10mm 以上の先行降雨量との関係を示した。地表水成分の時間流量は 1 時間

降雨量との相関が強く、これは時間 10mm 以上の直近高強度降雨による地表水を速やかに排水しており、前述の裏付けでもある。

一方、表-3.3.11 にはのり尻工流量の地下水成分の時間流量と 10 時間当り 50mm 以上の先行降雨量との関係を示した。同表から地下水流量成分の時間流量は先行する 10～12 時間に相当する降雨の影響を強く受けていることがわかる。地下排水溝からの地下水流量が 4 週間分の先行降雨量の影響を受けていることからすると、のり尻工は直近 10 時間程度の短時間降雨に連動している。すなわち、のり尻工は比較的地表部に近い浅層地下水を集水していると考えられ、10 時間当り 50mm 以上の高強度降雨に対して即時的排水効果のあることがわかった。

表-3.3.10 のり尻工地表水成分と先行降雨量との決定係数 ( $R^2$ )

( $R^2$ )	先行 1 時間 降雨量	先行 2 時間 降雨量	先行 3 時間 降雨量	先行 4 時間 降雨量	先行 5 時間 降雨量
地表水流量成分 時間流量	0.645	0.204	0.147	0.004	0.001

表-3.3.11 のり尻工地下水成分と先行降雨量との決定係数 ( $R^2$ )

( $R^2$ )	先行 8 時間 降雨量	先行 10 時間 降雨量	先行 12 時間 降雨量	先行 14 時間 降雨量	先行 16 時間 降雨量
地下水流量成分 時間流量	0.601	0.777	0.768	0.661	0.567

### 3.3.5 簡易水質試験

#### (1) 試験概要

ここでは、地下水の起源、すなわち地下貯留期間を検討するための基礎資料として、降雨量および流量のデータ回収時に各流量計測地点や湧水地点などにポータブル式簡易水質計を使用して電気伝導度 EC (以降: EC と呼ぶ)、pH、水温の測定を行った結果について考察する。採水箇所は、図-3.3.39 および表-3.3.12 に示す流量計測地点の地下排水溝 (A1 地下水, A2 地下水, A3 地下水)、のり尻工、地表水 (B-1 地表水, B-2 地表水) の他、河川水や沢水および湧水地点である。また、測定回数は、2017 年 5 月から 11 月にかけて 8 回行った。そのうち、2017 年 7 月 4 日には、台風 3 号の接近によりまとまった降雨があるとの予報があったため事前準備を行い、唯一の降雨時観測を実施した。降雨時の状況としては、無降雨時には測定できないのり尻工からの実測湧水量を計測し、合わせて、地下水とのり尻工の EC と pH も測定した (写真-3.3.1 参照)。

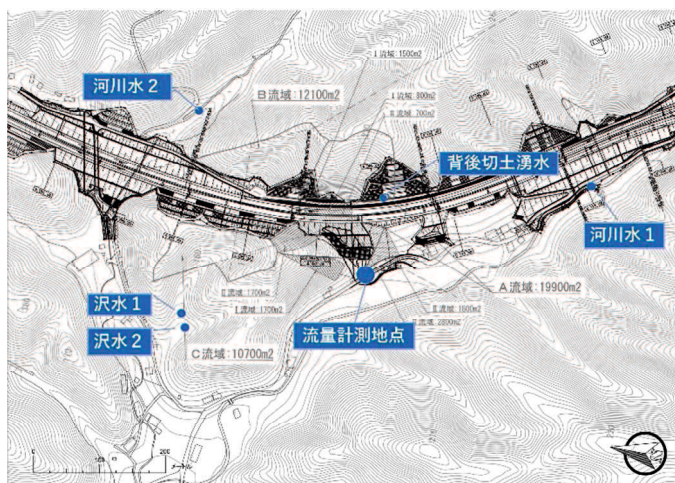


図-3.3.39 調査地周辺の採水箇所

表-3.3.12 採水箇所一覧表

採水地点	区 分	場 所
A1,A2,A3	地下水	調査地内
のり尻工	地下水・地表水 (降雨時観測)	調査地内
B-1,B-2	地表水 (降雨時観測)	調査地内
河川水 1, 河川水 2	河川水	周辺の採水地点
沢水 1, 沢水 2	沢水	周辺の採水地点
背後切土湧水	湧水 (地下水)	周辺の採水地点

(2) 電気伝導度 EC と pH

図-3.3.40 には、各採水地点での測定結果から EC と pH の関係を、地表水流量など 2017 年 7 月 4 日の降雨時測定結果を表-3.3.13 に示した。降雨時における B-1 地表水、B-2 地表水ともにピーク時の流出状況は写真-3.3.2、写真-3.3.3 のとおりで、この降雨時測定では、降雨が止んで、B-1 地表水が 40 分後に、B-2 地表水が約 3 時間後に流出のほぼ収まる状況を目視確認した。

図-3.3.40 から地下水は EC が 18~30 mS/m 程度の南側地下水グループ (A2 地下水,A3 地下水), 10~14 mS/m 程度の北側地下水グループ (A1 地下水) に 2 区分できる。例外として、10 月 27 日の測定結果において A3 地下水の EC は約 14mS/m で、A1 地下水と同程度であり通常よりも低い値を記録した。降雨時に測定した地表水の EC は 3~4 mS/m 程度で地下水に比較して極めて低い値を示した。降雨時におけるのり尻工の EC は 15 mS/m 程度で南側地下水グループと地表水との中間の値を示した。これは、のり尻工から排出される水は地下水と地表水の両方を含んでいるためと考えられる。周辺採水地点の河川水や沢水などの EC は 2~10mS/m の範囲にあり、盛土からの地下水よりも明らかに小さいことが分かった。また、pH は地表水も地下水も 5.5~7.8 の範囲にあり、弱酸性から弱アルカリ性を示した。日を変えて 8 回の水質試験を行ったが、同様の傾向となった。

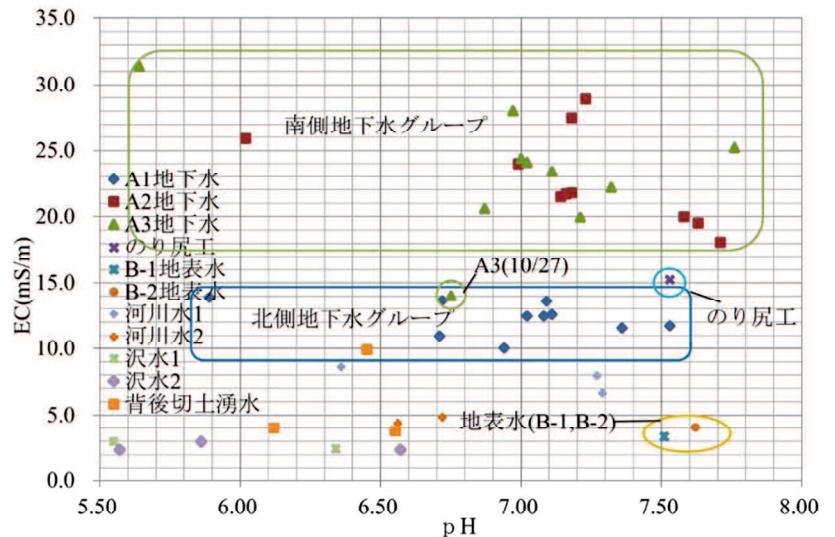


図-3.3.40 pH と電気伝導度 EC の相関図

なお、2005 年の災害直後にも崩壊面での湧水地点や河川水の EC 計測を行っている<sup>14)</sup>。その際にも北側斜面湧水からは 4.1~5.0mS/m、南側斜面湧水からは 16.5~17.9mS/m、河川水では 7.1~7.2 mS/m と、今回行った水質試験と同様の結果であった。

以上のことから、地表水に対して地下水の EC は高く、中でも南側地下水グループは特に高い値であった。地下水は地下を流動するに従って EC が高くなることが知られている<sup>15)</sup>。すなわち、南側地下水グループの源となる A2, A3 地下水は、北側地下水グルー

表-3.3.13 降雨時の測定結果

観測地点	区分	流量 (m <sup>3</sup> /min)	電気伝導度 EC (mS/m)	pH	備考
A1	地下水	0.0089	13.62	7.09	写真-3.2.1
A2	地下水	0.0241	27.50	7.18	写真-3.2.1
A3	地下水	0.0131	23.40	7.11	写真-3.2.1
A4	地下水 地表水	0.0499 0.0502	24.30	7.55	写真-3.2.1
のり尻工	地下水 地表水	0.0054 0.0057	15.22	7.53	写真-3.3.1
B-1	地表水	—	3.34	7.51	写真-3.3.2
B-2	地表水	—	4.11	7.62	写真-3.3.3



写真-3.3.1 のり尻工流量



写真-3.3.2 A5 ピーク流量時



写真-3.3.3 A6 ピーク流量時



プの A1 地下水よりも EC は高く、比較的長期間地下に貯留されていた地下水を集水していると推測される。付け加えると、3.3.2(4)地下水流量と先行降雨量との関係で述べたように地下水流量が多くなる降雨時には、A3 地下排水溝が断層破砕帯を通じて供給されている地下水を集水していることの更なる根拠でもある。

以上のことから、他流域から供給される地下水は、降雨量の少ない時には流量が少なく、大きな降雨量がある際には、貯留されている地下水が押し出される形で当該流域へより多く流入していると推測される。

### (3) 電気伝導度ECの経時変化

図-3.3.41に各採水地点のECの経時変化を示し、試験結果の特徴を以下に述べる。

南側地下水グループ（A2 地下水，A3 地下水）は北側地下水グループ（A1 地下水）と比較して EC が大きく、かつ変動幅が大きい（経時変化が大きい）。A1 地下水の変動幅は 4 mS/m 以内に収まっている（経時変化は小さい）。周辺の採水地点のうち、河川水と沢水は経時変化がほとんどなく、背後切土からの湧水は、経時変化が比較的大きい。このことから、地下水の EC は大きく降雨量や地下水流量によって変化し、地表水の EC は小さく、流量の大小によって変化することはなくほぼ一定値である。また、湧水はその中間にあることが分かった。すなわち、地下に賦存している期間が長いのは、A2・A3 地下水 > A1 地下水 > のり尻工 > 湧水 > 河川水 > 地表水という結果になる。

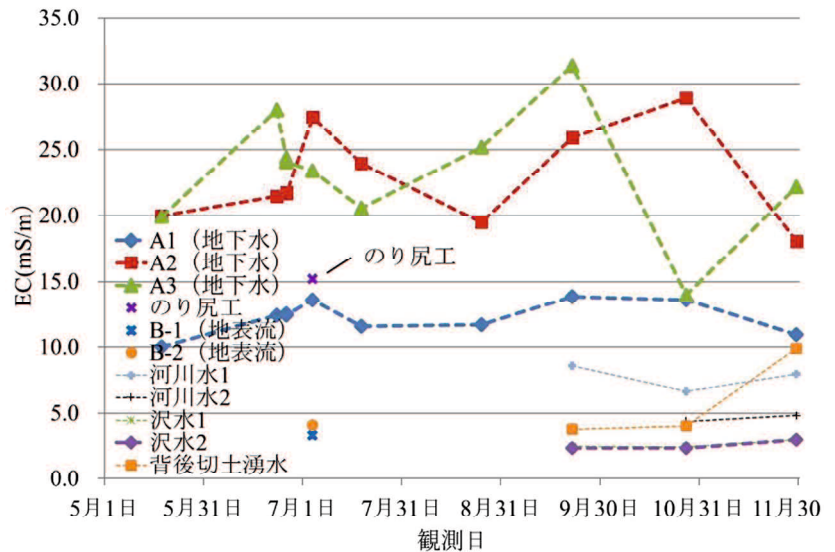


図-3.3.41 電気伝導度 EC の経時変化

### (4) 電気伝導度 EC と地下水流量との関係

地下水について、地下水流量と EC との関係を図-3.3.42 に、またそれらの相関関係式を表-3.3.14 に示した。それらの結果から得られた特徴を以下に述べる。

A1 地下水の EC は流量によって変化が少なくほぼ一定であり、流量と EC との間には相関が認められない。A2 地下水の EC は流量が増加すると EC も大きくなり、強い正の相関関係が認められる。

一方、A3 地下水の EC は流量が増加すると EC が減少する負の相関となっているが、これは 10 月 27 日の測定値のみに大きく影響された結果であり、決定係数も低く、データ数も少ないため明確な結論付けはできない。A2 地下水は流量が増加すると EC が大きくなる事実から、流量が増える場合にはより長期間地下に賦存していた地下水が流入しているとみることができ、すなわち他流域の地下水が流入していると考えられる。

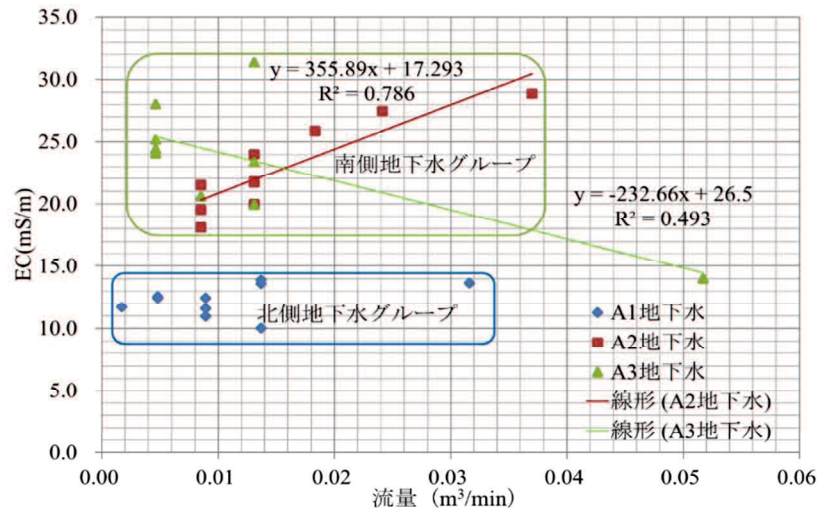


図-3.3.42 地下水流量と電気伝導度 EC の相関図

表-3.3.14 地下水流量と電気伝導度 EC の相関式

採水地点	相関式	決定係数
A2	$y=355.59x+17.293$ y:電気伝導度 EC x:流量	$R^2=0.786$
A3	$y=-232.66x+26.5$ y:電気伝導度 EC x:流量	$R^2=0.493$

### 3.4 計測結果の精度検証

#### 3.4.1 実測流量と計算流量の対比

図-3.4.1 に四角堰 A1, A3, A4, A5 の越流水位を鋼尺で実測した値（以降：実測越流水位という）と実測流量の関係を示す。また、図-3.4.2 には実測越流水位からフランシスの公式によって算出した計算流量と実測流量の関係図を示す。

実測流量の測定にあたっては、堰に貯留している水をポンプにより排出して水位を降下させ、その後の水位回復時間から流量を算定した。また計測流量図-3.4.1 中のポイントが各堰での実測流量とその実測越流水位で、曲線が各堰での越流水位からフランシスの公式によって算出した計算流量である。それぞれの堰で計算流量の曲線が異なるのは、堰幅が違うため、表-3.2.3 に示す通り流量堰の切欠き幅は、A1 が 0.49m, A3 が 0.47m, A4 が 0.46m, A5 が 0.41m である。

図-3.4.1 および図-3.4.2 より、実測流量と計算流量との関係には以下の特徴が認められる。図-3.4.2 に示されるように実測流量と計算流量は 1:1 ライン近傍にデータがプロットされており、実測流量と計算流量は概ね一致している。A4 は実測流量が 0.045 m<sup>3</sup>/min 以下では、実測流量と計算流量は概ね一致する。一方、実測流量が 0.045 m<sup>3</sup>/min を超えると実測流量のほうが若干大きくなる傾向が認められる。A5 は実測流量が 0.01 m<sup>3</sup>/min 以下において、実測流量は計算流量より小さくなる。一方、実測流量が 0.01 m<sup>3</sup>/min を超えると実測流量と計算流量は概ね一致している。

計算流量と実測流量が完全に一致しないのは、計算流量に用いたフランシスの式は、流量堰の寸法や流速などの諸条件を決められた範囲内に収めて実験から求められた式であるのに対して、現場では、堰の寸法や流速が異なる他に、野外では風の影響や気温・大気圧の変化などの諸条件が大きく異なることが考えられる。

図-3.4.3 には実測流量と計測流量との関係を示した。この関係も 1:1 ライン近傍にデータがプロットされ、実測流量と計測流量も概ね一致していると言える。

以上のようにフランシスの式での実験と現場では計測環境条件は異なるものの、各流量計で実測流量と計算流量、計測流量は概ね一致しているものと評価され、常時計測を行った計測流量を補正する必要はないものと判断した。

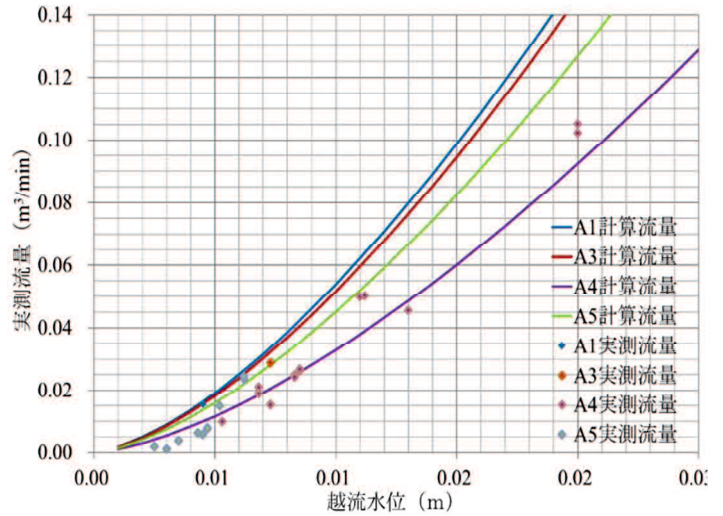


図-3.4.1 越流水位と実測流量の関係

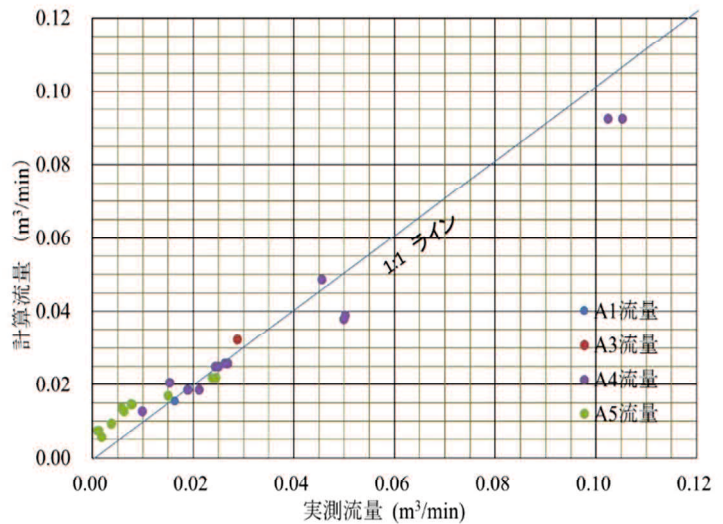


図-3.4.2 実測流量と計算流量の関係

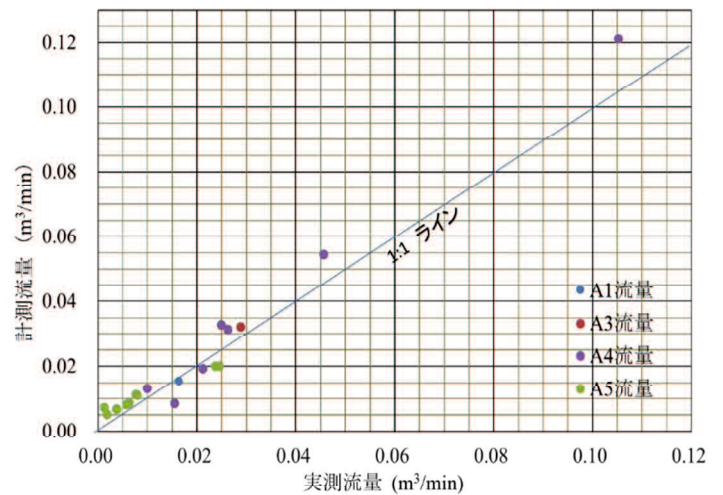


図-3.4.3 実測流量と計測流量の関係

### 3.4.2 計測異常値とその原因

2016年の計測では、計測地点 A4 の流量について9月9日～10月12日の間で降雨が無くとも流量が増加し、大きな日変動が生じるなどの異常値が見られた。

流量の異常な日変動量の原因としては、大きく2つの原因が考えられる。

原因の1つ目は、草やその切りくず等の詰まりと考えられる。9月1日には現地で草刈を行っており、9月9日と9月23日に現地に行った際にも水路等に刈った草が引かかっていた。また、柵底にも刈り取った草が溜まっていた。刈り草やその切りくずは、主に降雨時から降雨直後の越流水位に影響を与えていると思われる。降雨により水路の流量が増加した時に、水路底に引かかっていた刈り草等が、一気に柵のほうに移動して堰詰りの原因になっていたと考えられる。ただし、現地状況および刈り草を取る前と後の観測値の比較より、刈り草等の詰まりによる越流水位への影響は1～3mm程度と考えられる。

原因の2つ目は、水位計の大気開放パイプの一時的な閉塞であると考えられる。前述の通り、無降雨時に周期的な変動が繰り返される現象は葉っぱの詰まりだけでは説明できない。メーカーからのヒアリング結果と事例の多さの症状が似ていることなどから、最も有力な原因として考えられる。パイプの詰まりは、パイプが挟まれたり折れたりすることで簡単に起こるものである。10月12日以降に異常変動が認められなくなったのは、データ回収の時(10月12日)にパイプの詰まりが解消されたためと考えられる。

日変動について考察を加える。水位計メーカーのホームページ<sup>16)</sup>に記載されている日変動の原因とメーカーヒアリング調査の結果を以下に示す。日変動の最も多い事例としては、大気開放パイプが詰まることである(図-3.4.4参照)。一般的な症状としては、気温が高くなると観測水位が下がり、気温が高くなると観測水位が上昇する。本計測での症状は、毎日夕方の17時頃から水位上昇が始まり、朝の7時頃にピークとなり、15時頃が最も低くなっており、参考文献16)の紹介事例とよく似ている。

この異常値発生メカニズムを図-3.4.4に示す。大気開放パイプが詰まった状態で気温が上昇するとパイプ内の空気が膨張して圧力感知部を内側から押すようになる。この時に観測値の水位はあたかも低下したような値を示す。逆に、気温が下がるとパイプ内の空気は収縮するので、圧力感知部は内側にへこみ、あたかも水位が上昇したような値を示す。

図-3.4.5には無降雨時における水位の日変動量が大きかった10月2日～10月4日の計測地点 A4 の越流水位と欽明路観測局の気温を示す。図から、気温が上昇すると越流水位が低下し、逆に気温が低下すると越流水位が上昇する傾向が認められるため、この現象は大気開放パイプの一時的な閉塞によるものと考えられる。

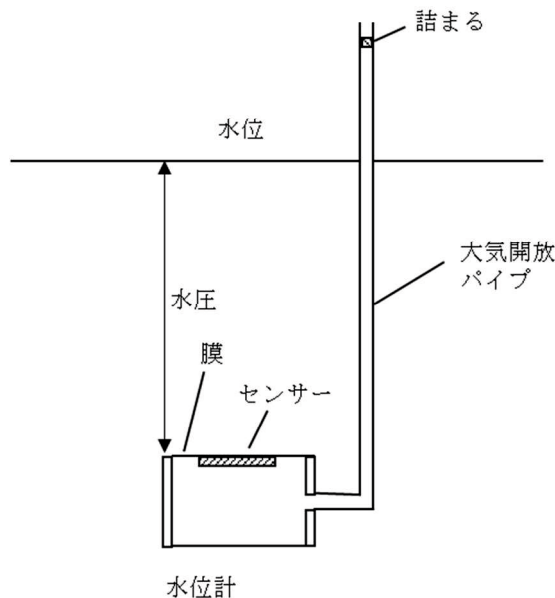


図-3.4.4 日変動による異常値発生メカニズム



図-3.4.5 越流水位と気温の関係

### 3.4.3 計測異常値への対応

計測地点 A4 での代表的な異常値を図-3.4.6 に示す。図中の A4 流量の桃色で着色した部分は、降雨がなくとも越流水位が 1mm~20mm 程度上昇している部分である。一方、この時間帯での他の流量計は全く上昇がなく、赤い着色部は異常値と判断される。

異常値の補正方法は以下に示す通りである。結果は、図中の黒線のように補正した。

- ① 1 週間の A4 流量の越流水位と 10 分間降雨量をグラフ化する。
- ② 上流側の A3 流量の越流水位をグラフに併記する。
- ③ 降雨に敏感に反応する地表水を観測している A5 流量, A6 流量もグラフに併記する。
- ④ 降雨が無く、他の流量計でも流量の上昇がないにもかかわらず、A4 流量のみ上昇する部分については、12 時から 17 時ごろまでの最低値を直線で結び、このラインを補正値とする。

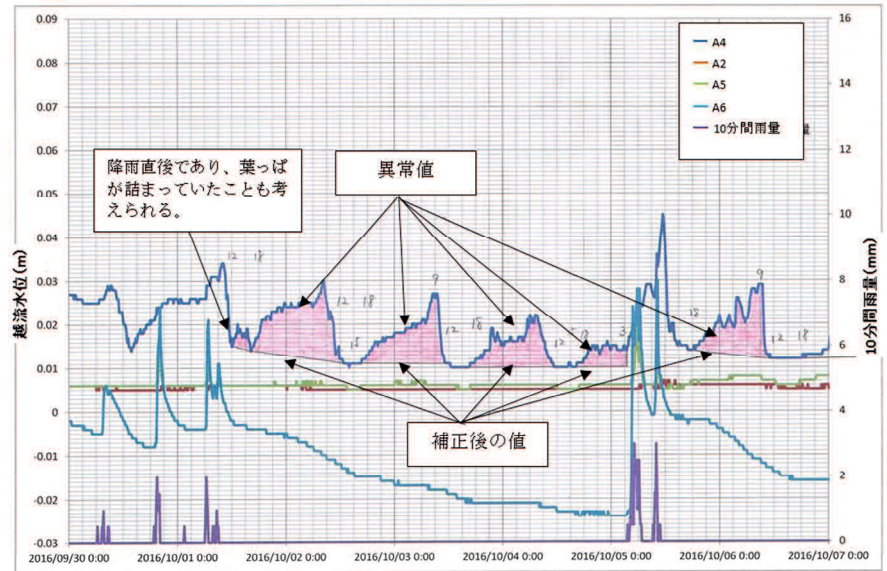


図-3.4.6 A4 異常値と補正値 (代表例)

### 3.5 まとめ

本章では、岩国災害復旧盛土において、現地での地下水流量や地表水流量を直接計測し、断層破碎帯による地下水供給事象の把握や各種排水対策工の効果検証を行った。その結果、岩国災害を受けて復旧した盛土の再構築から13年が経過しているが、その排水機能に低下はなく、健全であることが実証できた。また、他流域からの地下水供給事象についても、さまざまな視点から検討を加えることで、その事象を明らかにすることともにメカニズムについても検証することができた。

ここで得られた知見を要約すると以下のとおりとなる。

#### (1) 降雨量

##### 1) 降雨量2016年

欽明路気象観測局の2016年1月~12月までの累積降雨量は2,610mmで、過去5年の累積降雨量の平均値の120%であり、過去5年間で最も降雨量の多い年であった。

##### 2) 降雨量2017年

欽明路気象観測局の2017年の1月~12月までの累積降雨量は1,831mmで、過去5年の累積降雨量の平均値の80%であり、過去5年間で最も降雨量の少ない年であった。

#### (2) 地下水流量

##### 1) 地下水流量と降雨量との関係

地下水流量は降雨量に連動して増減し、降雨がなければ流量は減じていくものの、一気に減じることはなく徐々に減じ、また枯れることもなかった。また、日降雨量20mm以上の際に顕著なピーク流量が観測された。

##### 2) 累積地下水流量と降雨量との関係

降水流量に対する地下水流量の割合である地下水流量率は、先行する降雨量によって大きく変動し、計測期間によって53%から100%となった。計測された降水流量に対して地下水流量は極めて大きく、このことは他流域からの地下水供給が推測される。

### 3) ピーク地下水流量

ピーク地下水流量は、さまざまな降雨条件の影響を受け、特に累積降雨量と単位時間降雨量に大きな影響を受けることがわかった。また、降雨と地下水のピーク時間差は、累積降雨量が同じであっても高強度降雨の場合は短時間で、低強度降雨の場合には長時間となった。

### 4) 地下水流量と先行降雨量との関係

日地下水流量、週間地下水流量ともに先行4週間降雨量との相関が強い。このことより、地下水流量は降雨と4週間という相当な時間差をもって断層破碎帯が地下水を供給していることが考えられる。各地下排水溝の中では一般にA2流量が多いが、全地下水流量が多くなれば、A2流量よりもA3流量が多くなることがわかった。

## (3) 地表水流量

### 1) 地表水量と降雨量との関係

地表水流量は降雨量と連動して急増し、かつピークが明瞭で、ピーク降雨の概ね0分～10分後にはピーク流量を計測した。また、降雨が止むと速やかに流量を減じる。また、地表水流量は降雨量と1次式の線形近似で極めて強い相関があり、初期損失（地表流の流出が発生するまでの降雨量）は5mm程度であることが把握できた。

### 2) 累積地表水流量と流出率

当該地での地表水流量の流出率は9～17%であり、流出率の標準値10～40%に対してやや小さな値となかった。初期損失が小さければ流出率が大きく、初期損失が大きければ流出率が小さくなることが確認できた。

### 3) ピーク地表水流量

大きな降雨量のあるピーク時地表水流量の流出率は、10～40%と累積地表水流量の流出率よりも大きな値となり、流出率の標準値と同様の結果となった。また、ピーク時地表水流量は、ピーク時降水流量および流出率と強い相関関係が認められた。

### 4) 地表水流量の流出特性について

降雨強度が弱い場合にはホートン型地表流の発生はないが、降雨強度の強い降雨（例えば時間降雨量43mm）の時には、ホートン型地表流の発生が確認された。

## (4) のり尻工流量

### 1) のり尻工流量と降雨量との関係

のり尻工流量は、降雨に対して短時間で反応しており、地下水成分と地表水成分の両方を流出していることが判明した。高強度降雨時には、地表水成分の流量が多く排出されている。

### 2) 累積のり尻工流量と降雨量との関係

のり尻工の地表水成分、地下水成分ともに用排水溝や地下排水溝から流出する流量と比較すると、ごくわずかな流量しか排出していないが、即時排水効果のあることがわかった。

### 3) のり尻工流量と先行降雨量との関係

のり尻工地表水成分は、時間降雨量10mm以上の高強度降雨の際には、先行する1時間降雨量との相関が強くなり、地下水成分は10時間当たり50mm以上の降雨の際には、先行する10～12時間降雨量との相関が強かった。このことは、のり尻工は高強度降雨に対して短時間で反応しており、直近降雨に対する排水効果の高いことがわかった。すなわち、即時的な排水能力を有していると考えられる。

## (5) 簡易水質試験について

### 1) 電気伝導度ECとpH

地下水のECは18～28 mS/m程度の南側地下水グループ（A2,A3地下水）、10～14 mS/m程度の北側地下水グループ（A1地下水）に区分できる。地表水のECは3～4 mS/m程度であり、地下水のそれに対して低い値を示す。のり尻工のECは15 mS/m程度であり、地下水と地表水の間中間的な値となった。A2、A3地下水のECは高く、比較的長く地下に賦存していた地下水と言える。pHは地表水も地下水も5.5～7.8の範囲にあり、弱酸性から弱アル

カリ性を示す。

## 2) 電気伝導度ECと流量の関係について

A1地下水は流量変動によるECの変化が少なく、流量とECとの間には明瞭な相関が認められない。一方でA2地下水は流量が増加するとECが高くなる明瞭な正の相関関係が認められ、流量が多くなれば長く地下に賦存していた地下水が供給されていることが判明した。

## (6) 越流水位と流量の関係について

各流量計で実測流量と計算流量、計測流量は概ね一致する。このことで、計測流量を補正する必要のないことが明らかとなった。

## (7) 2016年の観測地点A4の異常値について

2016年9月9日～10月12日間に観測地点A4で認められた異常値は、大気開放パイプの一時的な閉塞と、9月1日の草刈りによる刈り草や切りくずが流量堰に詰まった（引っかかった）ことが原因と考えられる。

異常値の原因を解消するための補正方法を提案し、9月9日～10月12日間の計測データの補正を行った。

## 第3章の参考文献

- 1) 竹國一也, 竹本将, 秦二郎, 中田幸男: 山陽自動車道盛土の降雨に対する安定性評価, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, III-482, pp.963-964, 2017.
- 2) 竹國一也, 秦二郎, 中田幸男: 盛土構造物における地下水流と地表流の現地計測および排水対策工の効果検証, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.74, No. 3, pp.289-299, 2018.
- 3) 土木学会: 水理公式集昭和46年改訂版, pp.254-257, 1971.
- 4) 西日本高速道路㈱中国支社: 山陽自動車道災害調査検討委員会報告書, pp.79, 2006.
- 5) 大津宏康, 前田良刀, 竹國一也, 米澤裕之, 高橋健二, 矢部満: タイと日本との自然斜面崩壊要因に関する比較検討, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.67, No.3, pp.387-398, 2011.
- 6) ティハ, 土田孝, 佐々木康: 自然斜面における雨水浸透・流出の原位置観測, こうえいフォーラム第16号, pp.55-65, 2007.
- 7) 市川嘉輝, 山下彰司: 山地斜面における水分移動について, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp.694-695, 1996.
- 8) 谷誠, 野口正二, 志水俊夫: 熱帯林の環境形成の解明に関する研究(2)熱帯林の熱・水収支に関する研究, 環境省地球環境研究成果データベース, E-3(2), 1995.
- 9) 社団法人日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説, pp.63, 1994.
- 10) 道路土工委員会道路土工指針検討小委員会盛土指針分科会: 「道路土工指針—盛土工指針」(平成22年度版), Vol.830, pp.56-57, 2010.
- 11) 嵯峨浩, 余湖典昭: 森林斜面域の観測に基づく流出特性と土壤水分状態に関する研究, 北海道河川財団研究所紀要, Vol.18, 2007. (<http://www.ric.or.jp/profile/works/kiyou19.html>)
- 12) Horton, E. R.: An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity, soil Sci. Am., 5. Pp. 399-417, 1940.
- 13) 藤根基久: 森林と水の謎を解く～水源かん養機能の理解に向けて～, ([www.tonya.maff.go.jp/kanto/gizjyutu/kauzal/.../kauza-past-7.p](http://www.tonya.maff.go.jp/kanto/gizjyutu/kauzal/.../kauza-past-7.p))
- 14) 西日本高速道路㈱中国支社: 山陽自動車道災害調査検討委員会報告書, pp.77-78, 2006.
- 15) 山本荘毅: 新版地下水調査法, 株式会社古今書院, pp.385, 1983.
- 16) オサシテクス: ホームページ, <http://www.osasi.co.jp/support/faq/faq001.html>

## 第4章 宝塚北 SA 盛土での現地計測

### 4.1 はじめに

宝塚北 SA 箇所の大規模盛土の安定性を評価する上では、盛土内の排水施設が適正に機能しているかを把握することが、最も重要なポイントである。特に、当該盛土は十万辻断層が供給する地下水に対応すべく図-2.3.10 および図-2.3.11 に示すような盛土内の排水対策をとっている。それら盛土内の排水施設が適正に機能していることを確認するには、沢部全体からの流出量を継続調査し施工前のデータと比較検証することで、盛土内に滞水がないかを監視すべきである。ちなみに 2007～2010 年の施工着手前流量計測結果から基底流量は  $0.004\text{m}^3/\text{min}$  であった。以上のようなことを踏まえて、盛土内の地下水供給に対する各排水施設の健全性を確認しつつ、今後の維持管理における指標を得る目的で、2016 年と 2017 年の 2 年間にわたって各雨水排水工や地下排水溝、のり尻工などについて流末箇所継続的に流量計測を行った。

また、流量計測と合わせて、盛土内の地下水位状況を確認するための地下水位観測と流末総流量のモニタリングを行いながら盛土施工を実施した。

さらに、当該箇所で計測した結果に基づいて、今後維持管理段階においても継続して観察していくために必要となる動態観測についても提案を行った。

### 4.2 計測概要

#### 4.2.1 計測期間と計測項目

地下排水溝流量、雨水排水工、のり尻工流量、地表水流量、降雨量データの計測期間は、表-4.2.1 に示すように 2016 年 8 月 22 日～2017 年 11 月 30 日である。しかしながら、流量計測機器設置箇所における土砂の堆積や藻の発生による流量計測孔閉塞が頻繁に発生し、清掃頻度を変えながら計測を継続したものの、降雨がなくとも流量が増加し、誤差が累積するなど安定した常時計測データの取得は困難であった。その中でも、有効なデータとして取り扱えるものは、2017 年 4 月 22 日～9 月 15 日の間に計測を行った流末総流量のみであった。ここでは常時の計測流量とは別に地下排水溝、雨水排水工、のり尻工などの人力による実測流量についても計測し、分析を行っている。

図-4.2.1 には宝塚北 SA 位置図、図-4.2.2 には流量計測地点の平面図を示した。流量計測地点の状況は、写

表-4.2.1 計測期間

年	計測期間	計測項目
2016年	8月22日～10月10日	地下水流量（地下排水溝流量、雨水排水工流量、のり尻工流量）、
2017年	4月22日～11月30日	地表水流量、地下水位、降雨量



図-4.2.1 宝塚北 SA 位置図

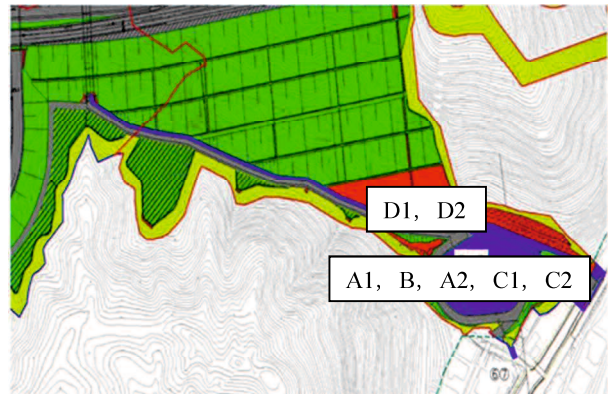


図-4.2.2 宝塚北 SA 盛土流量計測地点平面図

真-4.2.1, 写真-4.2.2 に示すとおり, 各地下水および地表水の流末箇所となる調整池周辺である. 今回流量を計測したのは, 地下排水溝の流末管 2 箇所 (A1, A2), 雨水排水工の流末矩形ボックス 1 箇所 (B), 側道・本線外の地表水の流末矩形ボックス (C1), 盛土のり面地表水の流末矩形ボックス (C2), のり尻工 (北側) の流末 U 字溝 (D1), のり尻工 (南側) の流末 U 字溝 (D2), 総流末管 (E1, E2) の 9 箇所である. ここで, 雨水排水工の流末は 2 箇所あるが, ほぼ同量の流量が認められたため, 1 箇所のみを計測し, B の計測流量を 2 倍して雨水排水工流量とした. また流末総流量は, E1 が自記式水位計, E2 が三角堰による流量計測の 2 つの計測機器での計測とし, 双方の流量を比較検証することで計測精度を高めた.

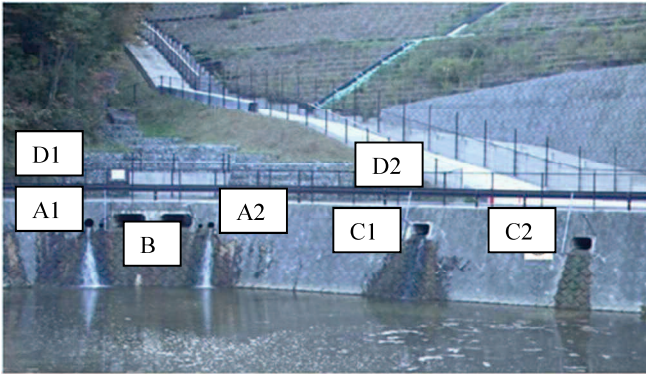


写真-4.2.1 調整池周辺流量計測状況(A~D)



写真-4.2.2 調整池周辺流量計測状況(E1, E2)

#### 4.2.2 流量計測地点と集水流域

宝塚北 SA 盛土に地下水が流入する集水流域は, 地形的分水界など分水嶺から図-4.2.3 の青線で示す 34 万  $m^2$  である. しかし, 十万辻断層が隣接流域まで伸びており, かつ神戸層群が隣接流域まで連続しており高低差の位置関係から断層沿いに隣接流域からも宝塚北 SA 盛土へ地下水が流入する可能性がある. そこで, 地形地質状況を踏まえて, 赤線で囲まれる 158 万  $m^2$  を地下水が盛土へ流入する可能性のある流域として計算領域を設定し, この 158 万  $m^2$  を対象として 3 次元水収支解析を実施した.

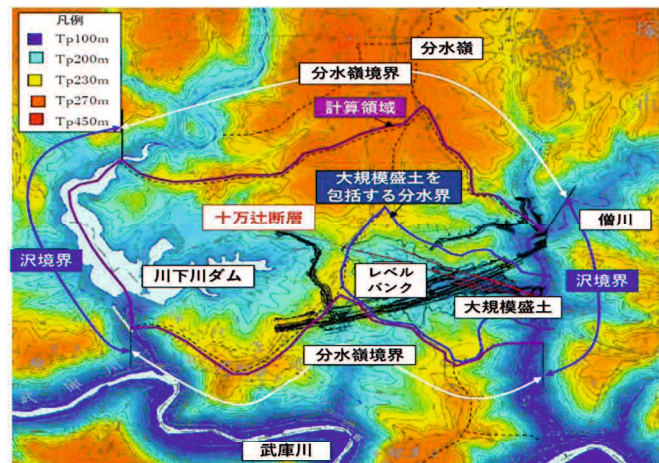


図-4.2.3 流量調査箇所の流域図

#### 4.2.3 流量計測方法

流量計測にあたっての測定方法は, 現場の状況に応じて表-4.2.2 に示す 3 つの手法で行った. ①の手法は, ピンホール流量計測であり, 排水管や矩形ボックス管の流末底部を削孔して塩ビ管 (VP50) を挿入し, その塩ビ管の中に自記式水位計 (S&D Lmini) を設置し, 孔内水位を計測することでマンニングの式から計測流量を求めた. ②の手法は, のり尻工流量 D1, D2, および流末総流量 E2 において三角堰の越流水深を手動で実測し, おおのトムソンの公式により流量を算出した. のり尻工流量を計測する三角堰 D1 および D2 は 300×200, 流末総流量を計測する三角堰 E2 は 1,300×250 である. ③の手法は容器法による計測であり, 写真-4.2.3, 写真-4.2.4 に示すように排水管や三角堰から流出する流量をパイプやビニール管を通じて大バケツへ一定時間貯留し, バケツに貯留した流量と貯留に要した時間から毎分当たりの実測流量を計測した. この容器法による実測流量値と計測流量値の精度検証を行い, 容器法から得られた流量を正值として計測流量値を換算式によって補正した.

地下水位観測孔は, 沢沿いの盛土 3 箇所に設置し, ボーリングで着岩を確認した後, セメンテーションし, 地下排水溝, 基盤排水層, 盛土下部にかけての深度にストレーナーを設置した. ストレーナー区間長は 4~10 m とし, 管底にはボトムキャップと水抜き穴を設置した.



計測頻度はピンホール流量計測が 10 分毎に記録し 1 ヶ月単位でのデータ回収を行い、のり尻工流量は手動計測となるため、無降雨時は 1 日に 1 回、降雨時には午前午後各 1～2 回の計測とした。

表-4.2.2 流量計測手法

計測地点	呼び名	流末形状	測定方法
地下排水溝流量 1	A1	φ 400	①, ③
地下排水溝流量 2	A2	φ 300	①, ③
雨水排水工流量	B	BOX (1,400×700)	①, ③
側道・本線外の地表流量	C1	BOX (800×500)	①
盛土のり面地表流量	C2	BOX (800×500)	①
のり尻工流量 1	D1	U 字溝 (300×300)	②
のり尻工流量 1	D2	U 字溝 (300×300)	②
流末総流量 1	E1	φ 1,000	①, ③
流末総流量 2	E2	開水路	②, ③

流量計測方法 ①：自記式水位流量計測 ②：三角堰 ③：容器法

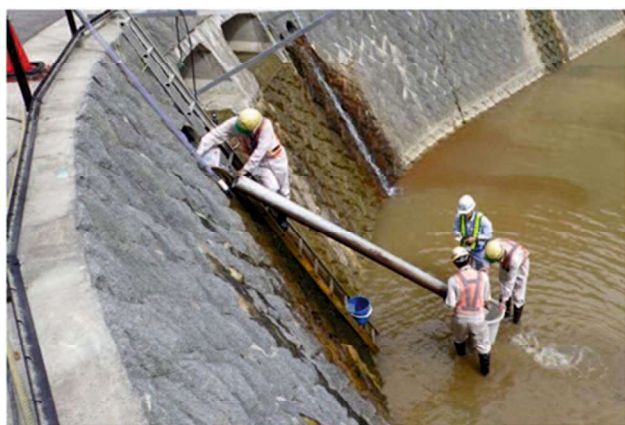


写真-4.2.3 容器法による流量計測状況 (A1)



写真-4.2.4 容器法による流量計測状況 (E2)

## 4.3 計測結果

### 4.3.1 降雨量

本節では、宝塚北 SA 盛土地点での現地雨量計と気象庁三田観測所の 2 地点での降雨量についてまとめた。過去の降雨記録がある三田観測所は、宝塚北 SA 盛土地点における降雨量の経年傾向を把握するため、現地雨量計は流量計測結果を分析するための降雨量とした。表-4.3.1 に 2017 年の流量計測期間中の現地雨量計による月別日降雨量と最大時間降雨量、図-4.3.1 には流量計測地点に近い気象庁による三田観測所で観測された過去 5 年間の月別降雨量、図-4.3.2 には過去 5 年間の年別累積降雨量を示す。2017 年の計測期間中である 4 月～10 月の降雨量としては、平年は過去 5 年間の 103%とほぼ同等であるが、分析の対象とした 4 月 22 日～9 月 15 日に限れば 5 年間平均の 73%の降雨量しか観測されなかった。特に 5 月、8 月は平年を大きく下回る降雨量であった。本観測期間中最大月降雨量を観測した 6 月ですら平年以下の降雨量しか観測されない極端に雨の少ない年であった。

この中で、最大月降雨量は 6 月の 153.5mm、最大日降雨量は 9 月 17 日の 77.5mm、最大時間降雨量は 9 月 17 日 22:00 の 49mm である。

表-4.3.1 2017年の観測期間中の月別日雨量（現地雨量計）

観測日	4月 (mm)		5月 (mm)		6月 (mm)		7月 (mm)		8月 (mm)		9月 (mm)	
	日降雨量	時間最大	日降雨量	時間最大	日降雨量	時間最大	日降雨量	時間最大	日降雨量	時間最大	日降雨量	時間最大
1	1.0	0.5	0.0	0.0	17.5	12.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.5	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.5	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	2.6	1.0	0.0	0.0	20.0	3.0	0.0	0.0	45.0	7.0	0.0	0.0
8	8.0	2.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	5.0	2.5	0.0	0.0
9	6.2	2.0	3.0	1.0	0.0	0.0	12.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0	3.5	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	9.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	55.5	38.0
13	0.0	0.0	31.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	2.5
17	46.0	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	6.5	0.0	0.0	77.5	49.0
18	3.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0	20.0	1.5	1.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	59.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	1.0	1.0	1.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	15.0	4.5	8.0	1.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
26	4.8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5
28	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.5
29	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	38.5	17.0	17.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0
31	-	-	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
月合計	81.9		50.4		153.5		102.0		76.0		148.5	

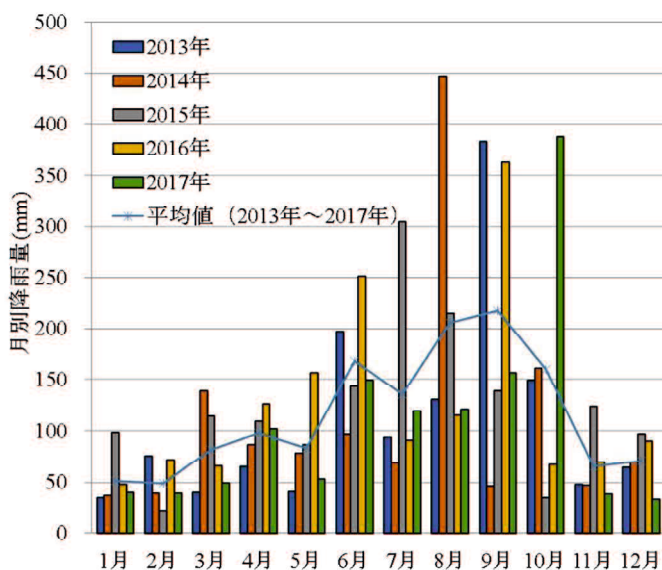


図-4.3.1 過去5年間の月別降雨量

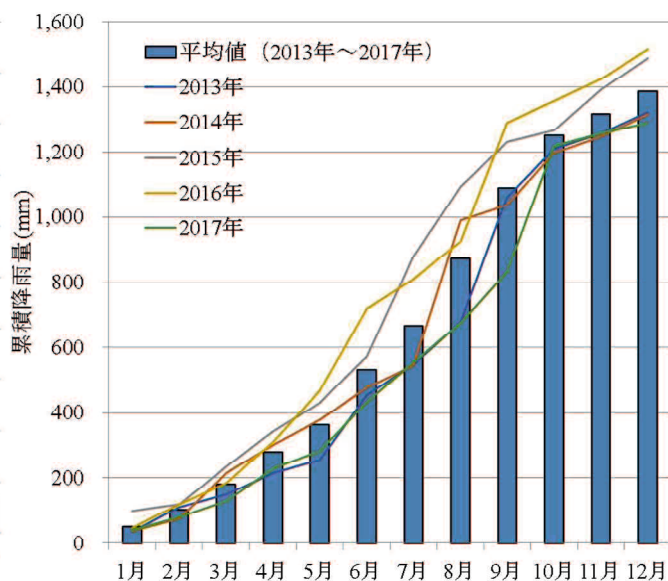


図-4.3.2 過去5年間の年別累積降雨量

### 4.3.2 実測流量と計測流量の対比

前述の通り、地下排水溝流量 A1, A2, 雨水排水工流量 B, 流末総流量 E1, E2 については、自記式水位計から算出した計測流量と容器法による実測流量との対比を行っており、以下にそれらの関係を示す。

地下排水溝 A1, 地下排水溝 A2, 雨水排水工 B それぞれの計測値と実測値の関係は、**図-4.3.3**, **図-4.3.4**, **図-4.3.5** に示す通りいずれも決定係数  $R^2 < 0.2$  と相関が認められなかった。これは、波打ちながら流下している水流の水位を現地にて自動計測したもので、計測値が安定しなかったものと思われ、また実測流量値と計測流量値の流量オーダーも異なっている。しかもデータ数が 20 程度と少ないことを考えれば、これらは分析するに値しない結果と言える。一方、流末総流量は、**図-4.3.6** に示す E1 が  $R^2=0.409$  と相関が認められ、**図-4.3.7** に示す E2 が  $R^2=0.921$  で計測値と実測値に極めて強い相関が認められる。特に E2 は大きな柵に三角堰を設けて計測したことで水位に波立ちが少なくなり、計測値が安定して相関が強くなっている。

なお、側道・本線外の地表流量 C1, 盛土のり面地表流量 C2 の地表水流量については、容器法による実計測を試みるものの、地表水流量は降雨時にしか発生せず、降雨時の地表流量は一気に流出し計測作業は危険を伴うため計測を断念した。よって、ここでの地表水流量結果については割愛する。

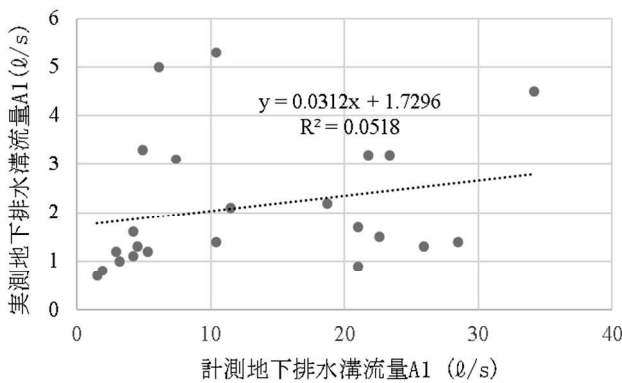


図-4.3.3 地下排水溝 A1 の実測・計測流量の関係

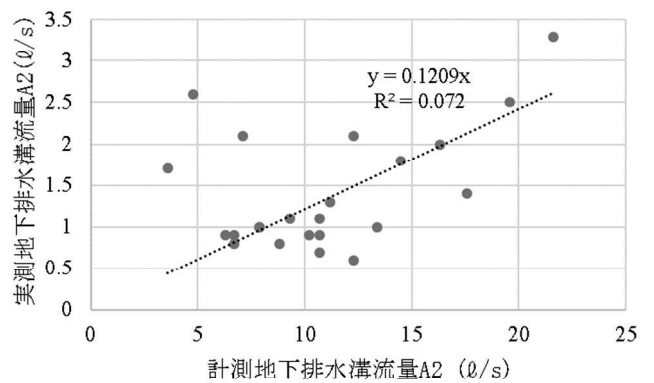


図-4.3.4 地下排水溝 A2 の実測・計測流量の関係

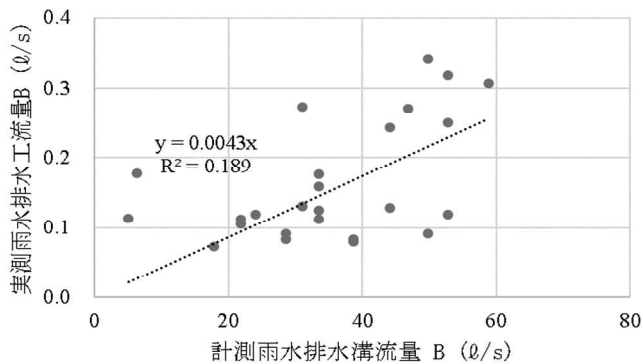


図-4.3.5 雨水排水工 B の実測・計測流量の関係

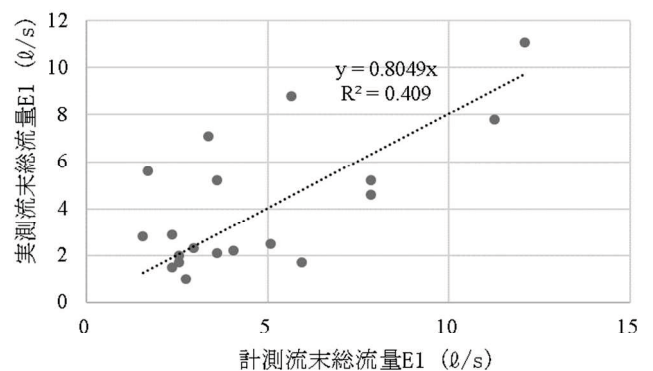


図-4.3.6 流末総流量 E1 の実測・計測流量の関係

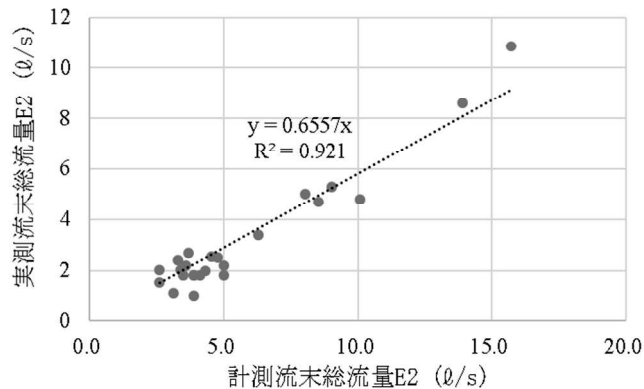


図-4.3.7 流末総流量 E2 の実測・計測流量の関係

### 4.3.3 流末総流量

流末総流量は、地下水流量と地表水流量の合計流量である。ただし、のり尻工流量は排水系統上、別の流末となっていることから、ここでの計測流量はのり尻工流量を含まない流量である。すなわち、当該地点では、地下排水溝 A1, A2, 雨水排水工 B の 2 倍、側道・本線外の地表水流量 C1, 盛土のり面の地表水流量 C2 の全体流量を計測している。流末総流量については、容器法計測による実測流量と自記式水位計 E2 による計測流量の相関が高いことから、これらの関係式 ( $y=0.6553x$ ・図-4.3.7 参照) から自記式水位計測流量 E2 を補正した。また、E2 三角堰の計測可能な越流水位は 20cm までであり、これを越える流量は計測できない。したがって、大雨時など越流水位が 20cm を超える大きな流量となる場合には、精度は若干落ちるが、E1 の自記式水位流量計測から算出した流量との関係式 ( $y=0.8049x$ ・図-4.3.6 参照) により加算補正して流末総流量とした。その補正後の降雨量に伴う流末総流量の変動結果を図-4.3.8 に示す。流末総流量から、降雨時の増加流量を地表水流量とし、それ以外を地下水流量として分離し、それぞれの累積流量を図-4.3.9 にとりまとめた。ここでの地下水流量は、地下排水溝 A1 と A2, および雨水排水工を合わせた流量で、のり尻工からの流量は含めない流量である。

図-4.3.8 に示す流末総流量は、降雨に連動して流量は増減しているが、流量が途絶えることなかった。また、大きな降雨時に顕著なピーク流量を計測している。これは地表水流量の増加によるものである。図-4.3.9 によると、計測期間約 4 ケ月間の累積地下水流量は 60,591m<sup>3</sup>、地下水に対応した降水流量 (降雨量×流域面積×流出係数)は 150,620m<sup>3</sup>であった。ここでの降水流量の算出には、図-2.3.6 に示す地下水流域 34 万 m<sup>2</sup>、流出係数 1.0 を用いた。この期間の地下水流量率は、40.2%であった。一方、累積地表水流量は 3,025m<sup>3</sup>、地表水に対応

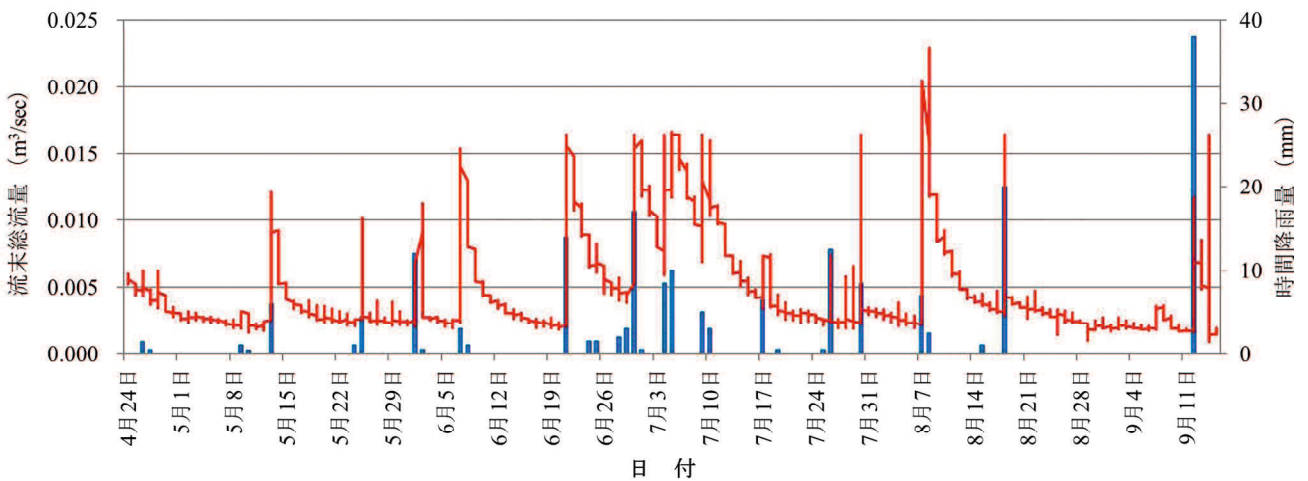


図-4.3.8 降雨量に伴う流末総流量の変動(2017年)

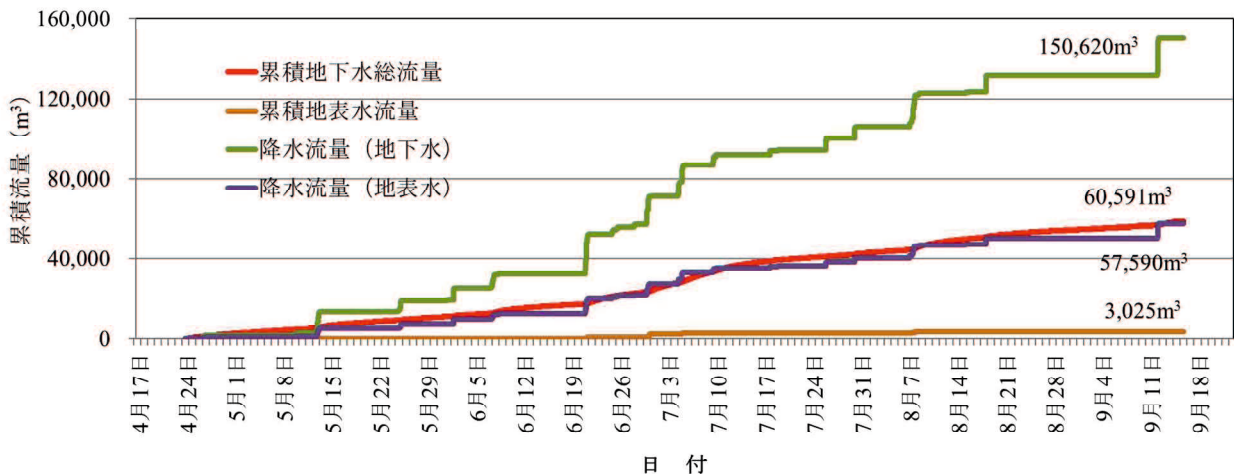


図-4.3.9 地下水流量および地表水流量の累積図(2017年)

した降水流量は 57,590 m<sup>3</sup> で流出率は 5.3% であった。流出率が極端に少ない結果となったが、これは工事中排水を切り替えながらの施工となったことで、一部の地表水流末が別の排水系統となっていたことによる影響と考えられる。

これらの結果を三次元水収支解析結果と対比して考察を加える。三次元水収支解析での降水条件は 100 年確率降雨として 42 時間で 289mm の降雨を想定している。2.3.4 盛土構造の検討のとおり、このような条件下では、地下に浸透し地下水として排出される流量は全降雨量の 60% との解析結果であったが、計測結果からは 40% となった。これは、全ての浸透水が地下水流量として排水、計測されていないことや、降雨量の違いによると考えられる。大きな降雨時の地下水流量率は、さらに大きくなると想定される。

#### 4.3.4 実測地下水流量

当該箇所での流量計測にあたっては、自記式水位計による流量計測に加えて、容器法による地下水流量を実測しているため、ここでは実測流量計測に関する考察を加える。実測した地下水流量は、地下排水溝流量、雨水排水工流量、のり尻工流量である。これらの流量計測頻度は、地下排水溝流量、雨水排水工流量が概ね 1 週間に 1 回、のり尻工流量が原則毎日で、降雨時には午前午後各々 1～2 回としている。したがって、ここで扱う流量は常時計測を行っていないため、ある一定期間の累積流量ではなく、ある時点での流量 (ℓ/sec) である。

それらの流量と先行降雨量との決定係数、および地下排水溝、雨水排水工、のり尻工の全地下水流量に対する流量割合を表-4.3.4 に示した。これによると、全地下水流量と地下排水溝流量、雨水排水工流量は先行する 2～3 週間の降雨量との相関が強く、のり尻工流量は先行 1 週間以内の降雨量との相関が強い。すなわち、地下排水溝と雨水排水工は比較的長期にわたる盛土内の地下水を排水する機能を有し、のり尻工は 1 週間以内の降雨を速やかに排水していることが判明した。今回ののり尻工流量は常時計測を行っていないため、雨の降り始め時点における流量を捉えることはできていないが、降雨に連動して即時的排水機能が高いことを示唆している。また、図-4.3.10 には地下排水溝流量と最も相関の強い先行 2 週間降雨量、また図-4.3.11 にはのり尻工流量と最も相関の強い先行 6 日間降雨量との関係図を示す。

表-4.3.4 実測地下水流量と先行降雨量との決定係数および流量割合

地下水流量区分	全地下水流量	地下排水溝流量	雨水排水工流量	のり尻工流量
先行 6 日間降雨量	0.49	0.463	0.306	0.618
先行 1 週間降雨量	0.525	0.521	0.226	0.542
先行 2 週間降雨量	0.585	0.573	0.452	0.49
先行 3 週間降雨量	0.562	0.554	0.402	0.47
先行 4 週間降雨量	0.393	0.385	0.339	0.304
先行 5 週間降雨量	0.171	0.168	0.093	0.16
流量割合	100.0%	84.7%	7.7%	7.6%

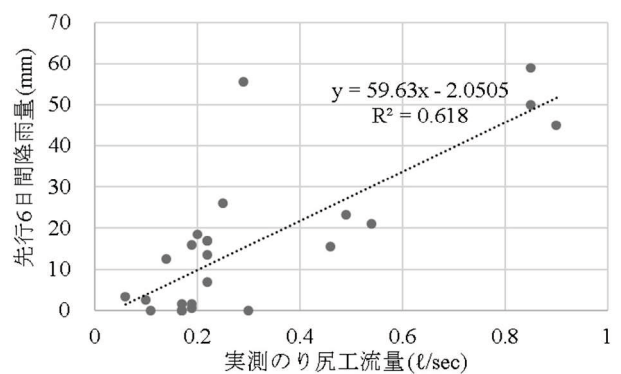
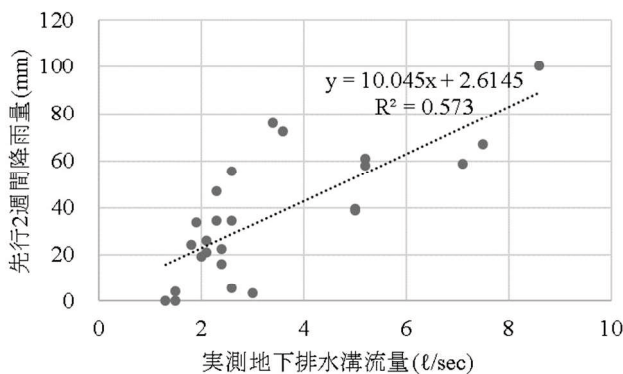


図-4.3.10 実測地下排水溝流量と先行 2 週間降雨量の関係 図-4.3.11 実測のり尻工と先行 6 日間降雨量の関係

図-4.3.12には、計測期間中の実測地下水流量および先行2週間降雨量との対比を示した。表-4.3.4によると、全地下水流量に対する地下排水溝流量の占める割合が約85%を占め、雨水排水工およびのり尻工により排水される流量割合はいずれも全地下水流量の8%程度と僅かであった。雨水排水工は、盛土施工中に工事用排水を排出していたため、降雨時に大きな流量があったものの、盛土完成後は盛土内に地下水位が上昇した際に水位低下させる機能を持たせているため、大きな流量は得られていない。また、図-4.3.12によると先行2週間降雨量は、全地下水流量と連動しており、相関の強いことが伺える。

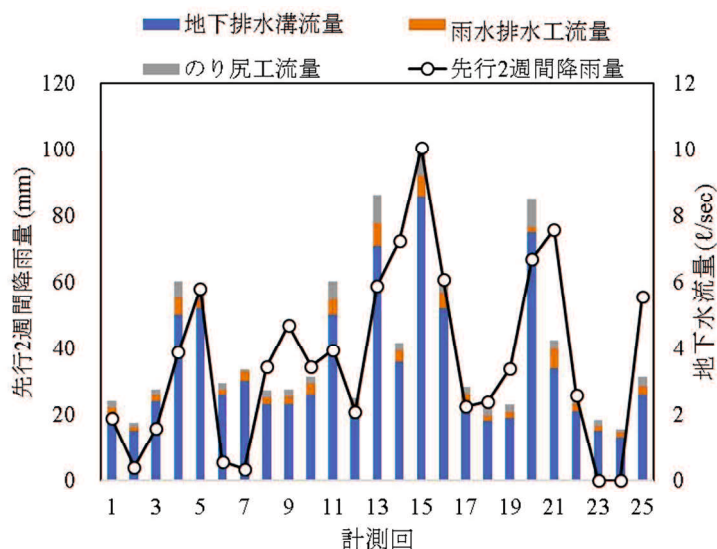


図-4.3.12 実測地下水流量の先行2週間降雨量との関係

#### 4.3.5 計測地下水流量

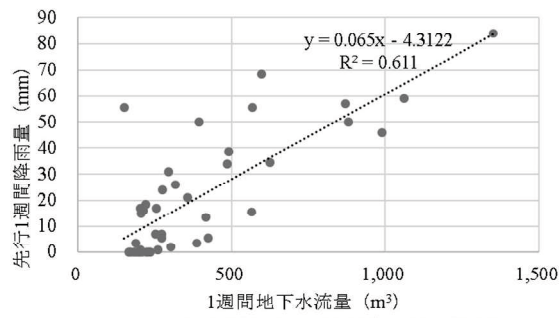
図-4.3.13には、計測地下水流量の日地下水流量および週間地下水流量と先行する1~5週間降雨量との関係を示した。また、表-4.3.5には、図-4.3.13の結果に基づいて日当たりおよび週当たりの計測地下水流量と先行する週間降雨量との関係での決定係数をまとめた。ここでの地下水流量は、のり尻工を除く、地下排水溝と雨水排水工からの流量を合わせた地下水流量を計測している。これによると日当たり地下水流量は1週間累積降雨量との相関が強く、週間地下水流量は2~4週間累積降雨量との相関が強い。その中で、最も相関の強いのは週間地下水流量と3週間降雨量の関係である。この結果は、容器法による実測流量から得られた相関と類似しているが、実測流量よりも計測流量の方が、1週間程度長期の先行降雨量との相関が強い結果となった。これは、実測流量はある時点の瞬間流量であり、計測流量は自動計測したデータから一定期間の累積流量として評価したことで、より精度の高い結果が得られたと考えられる。

このように、地下排水溝流量は比較的長期の降雨履歴と連動しており、広範囲に降った降雨が影響していることが推測される。このことは、断層破碎帯によって流域外から地下水供給があることを裏付ける結果となった。今回計測した地下水流量は降雨に伴って増加し、降雨がなければ減少するが、流量がなくなる前に降雨があれば再度増加している。この繰り返しであるため、どれだけの時間で地下水流量が枯れるのかを検証するため、20mm以上の日降雨量があり、かつその後1週間以上無降雨が継続した4つの期間(5/13-5/24, 6/6-6/20, 7/10-7/17, 8/8-8/17)の時間経過に伴う地下水流量分布を重ね合わせたものが、図-4.3.14である。この流量減衰図は対数曲線で近似され、その決定係数は $R^2=0.881$ と極めて相関が強い。また、地下水流量がなくなる時点は、この対数近似式により地下水流量のピーク時点から約31日後となった。このことは、先述のとおり地下水流量が先行する2~4週間程度の降雨量と相関が強い結果と概ね一致する。しかし、この結果はピーク時地下水流量0.02 m<sup>3</sup>/sec程度の場合の推定であり、ピーク地下水流量によって流量の減衰傾向は変化するものと思われる。

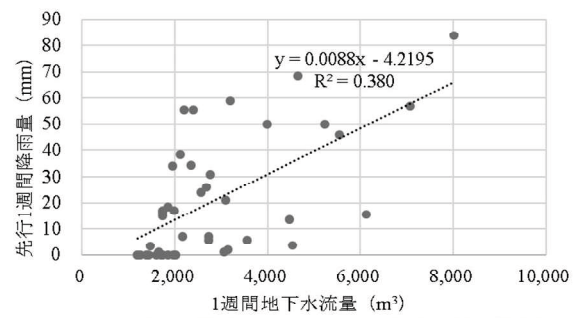
三次元水収支解析による100年確率降雨での解析結果によると、降雨ピークから3日後に90%、5日後に95%の地下水が排出され、地下水流量は管路末端で0.41 m<sup>3</sup>/secと予測された。これに対して計測流量からみると、解析で想定したよりももう少し時間をかけてゆっくりと地下水を排出していると考えられる。ただし、今回の計測では大きな降雨を計測していないため、そのような状況下での排水状況は確認できていない。

表-4.3.5 計測地下水流量と先行降雨量の決定係数

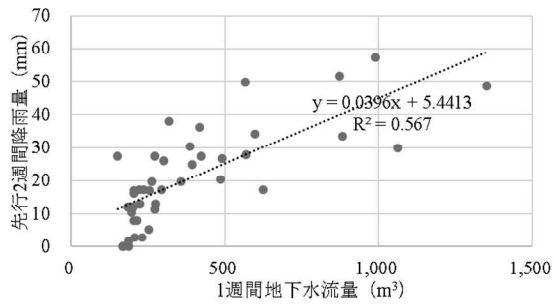
R <sup>2</sup>	計測地下水流量	
	日地下水流量	週間地下水流量
先行1週間降雨量	0.611	0.38
先行2週間降雨量	0.567	0.726
先行3週間降雨量	0.54	0.781
先行4週間降雨量	0.423	0.718
先行5週間降雨量	0.282	0.424



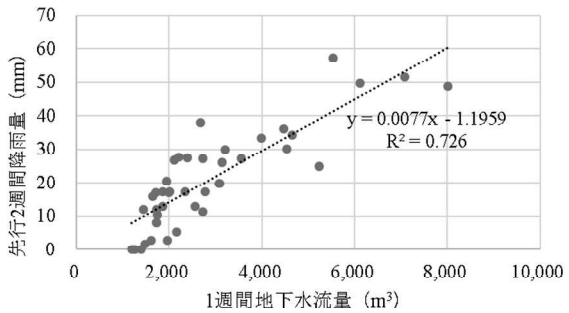
(a) 日地下水流量と1週間降雨量の関係



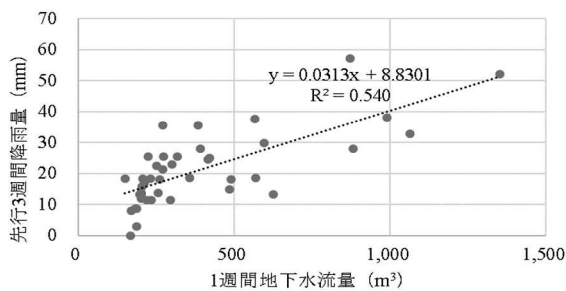
(f) 週間地下水流量と1週間降雨量の関係



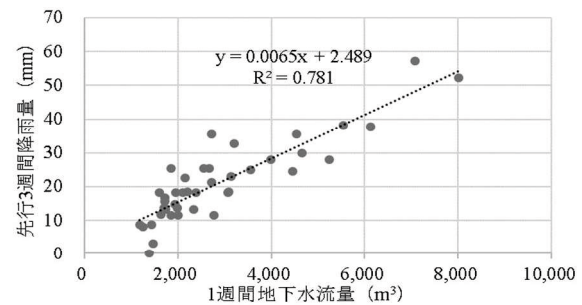
(b) 日地下水流量と2週間降雨量の関係



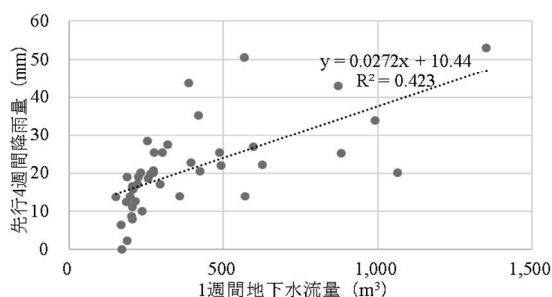
(g) 週間地下水流量と2週間降雨量の関係



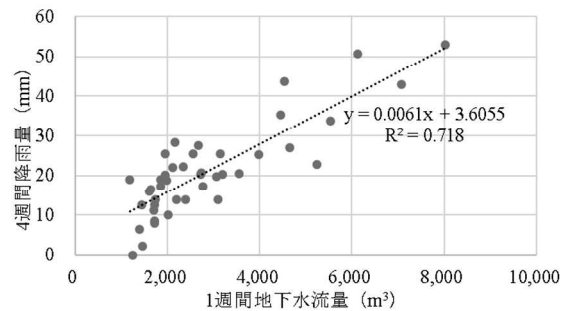
(c) 日地下水流量と3週間降雨量の関係



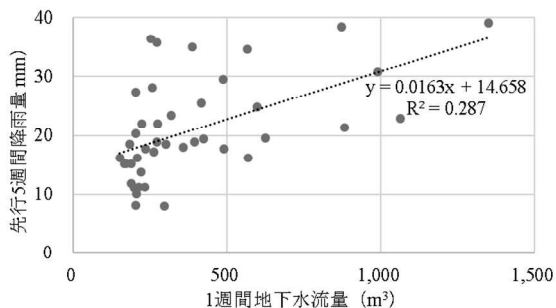
(h) 週間地下水流量と3週間降雨量の関係



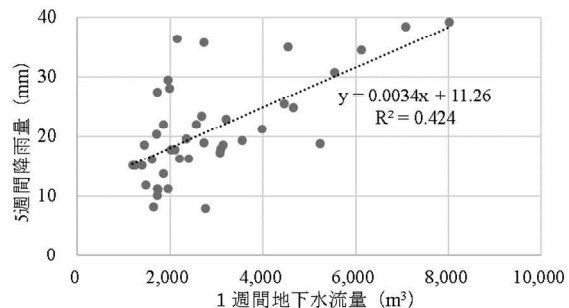
(d) 日地下水流量と4週間降雨量の関係



(i) 週間地下水流量と4週間降雨量の関係



(e) 日地下水流量と5週間降雨量の関係



(j) 週間地下水流量と5週間降雨量の関係

図-4.3.13 地下水流量と先行降雨量の関係

#### 4.4 岩国災害復旧盛土と宝塚北 SA 盛土での計測対比

岩国災害復旧盛土の地下水流量は先行する4週間の降雨量との相関が強かったが、宝塚北 SA 高盛土では3週間降雨量との相関が高くなった。いずれも長期の先行降雨との相関が強いが、より広域な流域を有する宝塚北 SA 盛土の方がさらに長期間の先行降雨と連動していると推定したが、そのような結果とはならなかった。これは、断層が地下水を遮蔽する形で地下水を供給するケースでは、断層が水道となるケースよりも地下水供給量は小さくなる可能性を示唆している。

のり尻工に着目すると、全地下水流量に占めるのり尻排水工から排出される流量は、岩国が10~25%であるのに対して、宝塚では数%に過ぎない。また、のり尻工流量と先行降雨との相関でも岩国は半日程度の降雨量との相関が良いが、宝塚は1週間程度の降雨量との相関が認められる。この点については、宝塚はのり尻部分のみにのり尻工を設置しているため地下水のみの排水に寄与しているが、岩国ではのり面全体の約4割の範囲にのり尻工を面的配置していることで地下水・地表水両方の排水に寄与している違いであると考えられる。このように、のり尻工の設置については、点あるいは線的配置よりも面的に配置することで、高強度降雨に対してより即時的排水効果の高まることが伺える。

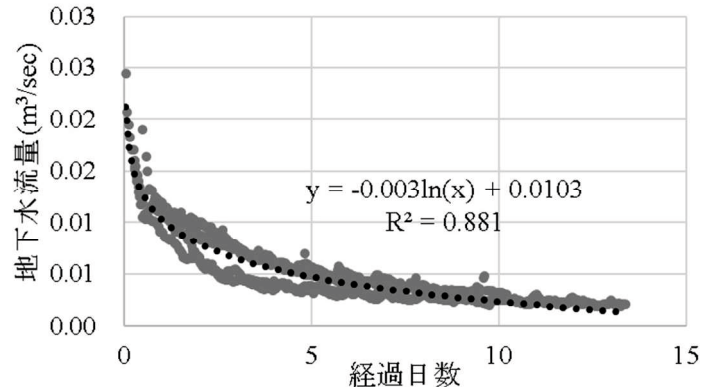


図-4.3.14 時間経過に伴う地下水流量の減衰図

#### 4.5 盛土施工中のモニタリング

宝塚北 SA 盛土は前述のとおり、大規模盛土であることに加えて、盛土直下には十万辻断層が位置し、基礎地盤の問題や断層が地下水を供給するなどの課題を有している。そのため、基礎地盤評価や盛土の排水対策、盛土安定対策の妥当性について盛土の施工中から盛土完成後のモニタリングを行った。また、その結果から維持管理段階でのモニタリング手法を提案する指標とした。

工事に行ったモニタリング項目は、地下水位、流末総流量、傾斜、沈下であるが、ここでは地下水位と流末総流量についてまとめる。

地下水位観測は、盛土施工初期から継続して計測を行っている。降雨時の盛土安定性を見極める上で地下水位観測は重要である。当該箇所における三次元水収支解析の結果から、地下水位の上昇は沢部を基点とすることがわかっている。また、解析結果からは、地下水位が2m以上上昇しなければ盛土の安定が確保できることが把握できている。そこで、排水施設が機能しているかどうかを、沢部に沿って設置する地下水位観測に加えて、盛土から排出される地下水と地表水を合わせた流量を写真-4.2.2 に示す流末箇所計測した。

##### 4.5.1 地下水位観測

地下水位観測箇所は図-4.5.1 に示すように盛土沢沿いの3箇所 (STA.130+00, STA.120+00, STA.128+60) に設置し、1時間毎の水位データを自動計測した。図-4.5.2 には、盛土施工期間である2013~2017年の5年間にわたって行った孔内水位計測による盛土内地下水位の経時変化を示す。図中の赤丸で示すように日降雨量100mm以上を記録した2013年9月、2014年8月、2015年7月には盛土内地下水位が一時的に上昇しているが、観測した3測点において基準水位であるのり尻から2m上昇 (STA.128+60 箇所では9m程度の地下水位上昇に相当する) には至っていない。また、傾向として降雨に伴い水位が一時的に上昇しても、その後速やかに地下水位が低下・復元していることから、盛土内の滞水はないと判断でき、排水機能の低下など障害のないことが確認できた。

また、図-4.5.3~図-4.5.5 には、上記施工中に大きな降雨を記録した際の、また図-4.5.6 には新名神が開通した後の2019年7月5~7日に400mmを越える豪雨がかった際の降雨量と盛土最下部 (STA.128+60) に設置し



た地下水位の関係を示した。図-4.3.4 に示す 2014 年 8 月には、累積降雨量 127mm であるが時間降雨量 77mm を記録したことで、地下水位が 4.36m 上昇した。図-4.3.5 に示す 2015 年 7 月には、累積降雨量 244mm、時間降雨量 23mm を記録し、地下水位が 4.59m 上昇した。これに対して、開通後の 2018 年 7 月には、累積降雨量 439mm、時間降雨量 28mm と上記施工中よりも大きな豪雨に見舞われたが、地下水位の上昇は 1.35m に留まり、かつ降雨後には速やかに低下回復している。このことから、開通後は高速道路路面や SA 箇所に舗装がなされ、また盛土のり面の植生がなされたこと、さらには雨水や地下水・湧水の排水対策が十分に機能していることで、施工中に比べて地下水位の上昇は抑えられていると考えられる。

3次元水収支解析によると、施工中・施工後ともに排水機能の低下がなければ地下水位の大きな上昇はなく、特に施工後は雨水の侵入が少なく排水効果によって地下水位の上昇は施工中よりも抑えられるという推定がなされていた。モニタリングからはこれらを裏付ける結果が得られ、解析結果の妥当性が確認された。

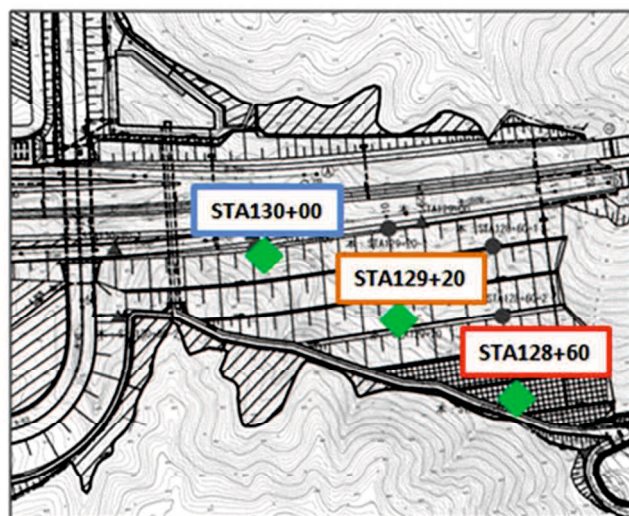


図-4.5.1 盛土地下水位観測地点平面図

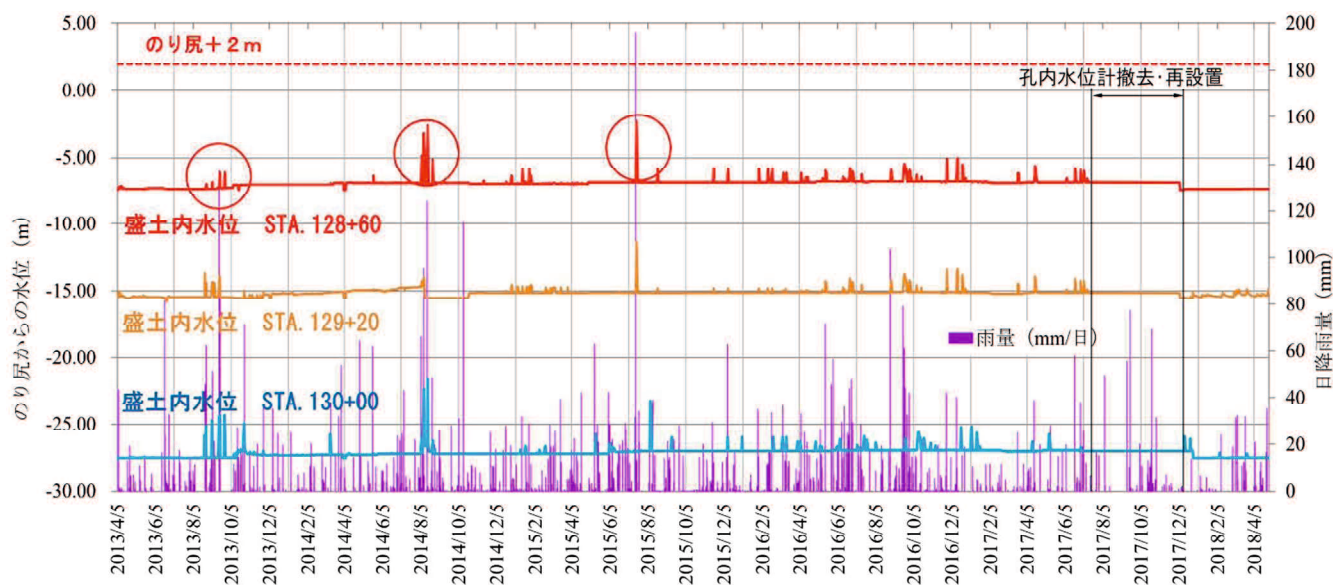


図-4.5.2 地下水位観測結果

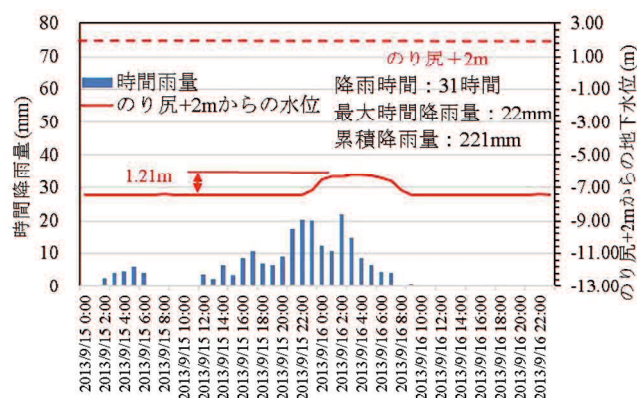


図-4.5.3 地下水位観測結果 (2013/9/15-16)

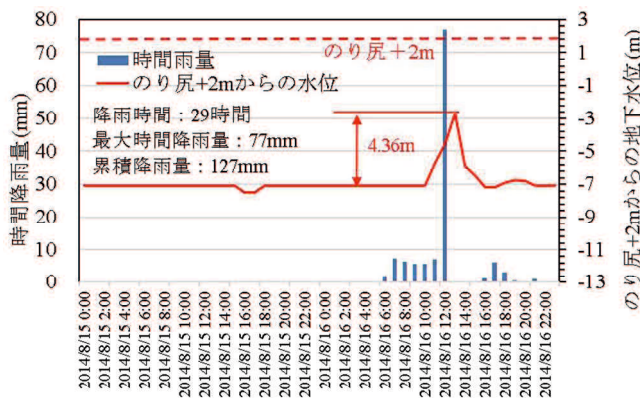


図-4.5.4 地下水位観測結果 (2014/8/15-16)

今後は、雨水排水工や地下排水溝の詰りなど排水機能の低下がないことを継続して確認していく必要のあることがあらためて分かった。

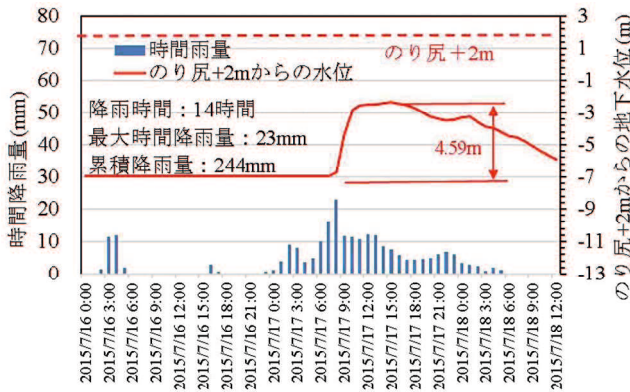


図-4.5.5 地下水位観測結果 (2015/7/16-18)

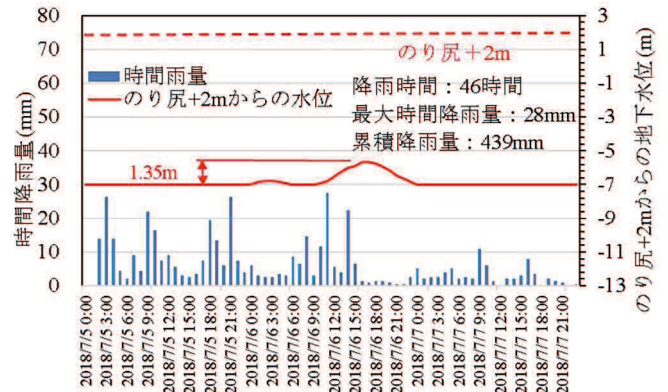


図-4.5.6 地下水位観測結果 (2018/7/5-7)

#### 4.5.2 流末総流量観測

宝塚北 SA 盛土から排出される地下排水溝，雨水排水工，基盤排水工，のり尻工，地表水排水は全て調整池を経由して普通河川僧川へ放流されている。それらの流末総流量を計測するため，僧川へ放流される直前の放水路に三角堰を設けて，越流水位を観測孔自記水位計によって常時計測を行った。流量は，常時計測した越流水位からトムソンの公式によって算定した。

盛土施工中の 2015～2017 年に計測された流末総流量の観測結果を図-4.5.7 に示す。この間の最低流量は，約  $0.06\text{m}^3/\text{min}$  であった。盛土施工着手前に沢部での流量調査を容器法で月 1 回測定していたが，その際の最低流量は前述のとおり約  $0.04\text{m}^3/\text{min}$  であった。この盛土着手前の測定は沢部に簡易な堰を作って容器法にて計測していたため，伏流水などが含まれず，沢部全体の流量はもっと多く，施工中のモニタリングでの最低流量である  $0.06\text{m}^3/\text{min}$  をあらたな基底流量とし，この流量を維持管理段階での管理基準値として監視していくべきであるとした。ただし，今後維持管理段階でのモニタリングを継続し計測流量動向を監視しながら，基底流量は常に見直しを行うべきと考える。

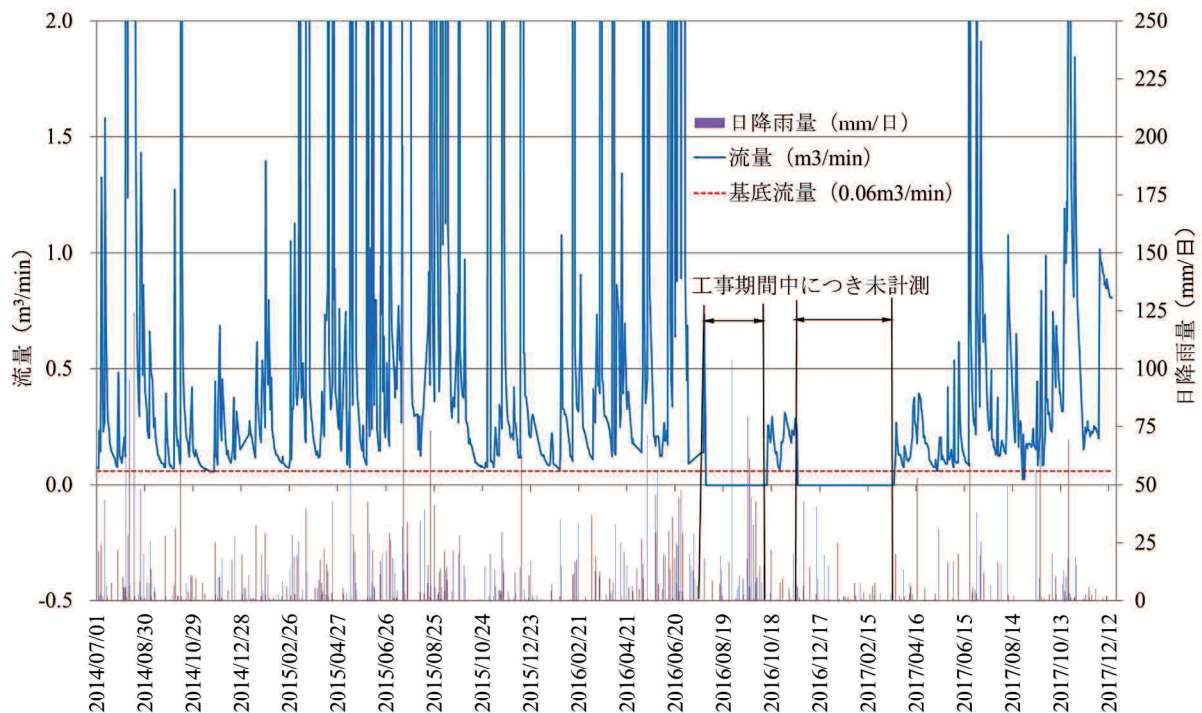


図-4.5.7 流末総流量観測結果

## 4.6 維持管理でのモニタリング

### 4.6.1 維持管理段階での監視体制の必要性

宝塚北 SA 盛土は、最大高さ約 70m、土量約 400 万 m<sup>3</sup> におよぶ大規模盛土で盛土自体の沈下・安定性の課題のみならず、盛土直下には十万辻断層が位置し断層が地下水を供給する課題も有している。また、解析結果から地下排水施設の健全性が盛土の安定を左右することが把握されている。さらに、当該盛土のり尻近傍には民家や県道が位置しており、盛土が崩壊すれば高速道路域外への被災の可能性もあるため、盛土の安定性を継続して監視していくことは最重要課題であると言える。

一方、近年大規模盛土施工箇所において発生している災害を見ると、2005 年の豪雨による盛土が崩壊した岩国災害<sup>8)</sup>や、2004 年新潟県中越地震による関越自動車道<sup>9)</sup>、2007 年能登半島地震時に能登有料道路<sup>10)</sup>で発生した盛土崩壊などがある。このように、盛土計画時における豪雨と地震に対する十分な検討が求められている。

このような背景をもとに、宝塚北 SA 盛土では、当該大規模盛土の将来的な安定性を評価するために『新名神高速道路 高盛土（玉瀬地区）安定対策検討会』を設置して 2009 年 1 月より検討を開始した。工事の経緯は 2011 年 10 月より立木伐採、2012 年 6 月より地下排水設備などの準備工事を経た後、2012 年 7 月より盛土施工を開始しており、盛土施工開始から約 5 年の歳月を経て 2017 年 8 月末には約 400 万 m<sup>3</sup> の大規模盛土施工が全て完了した。

ここでは盛土の安定対策検討経緯および施工実態や施工中の観測記録から開通後の維持管理段階で監視していくモニタリング手法についてまとめた。

### 4.6.2 モニタリング項目と監視頻度

盛土の健全性を確保するためには盛土内に供給される水を速やかに排除することが重要で、盛土の安定性評価には盛土内水位の監視が有効である。また、盛土の排水機能が低下してくると水位は高まり、盛土のり面の変状や盛土の沈下や傾きという形で表れてくる。そこで、宝塚北 SA 盛土のモニタリング項目は、盛土内水位と盛土の形状変化を把握することとした。盛土内水位を監視する項目としては、地下水位観測、流量観測、そして盛土の形状変化を監視する項目としては、孔内傾斜計、沈下計、GPS 観測、ウェブカメラによる監視、これらに合わせて簡易雨量計を設置した。

以下に盛土内地下水位と盛土の形状変化を把握するためのモニタリング項目と監視頻度について述べる。

#### (1) 盛土内地下水位を把握するためのモニタリング項目と監視頻度

##### 1) 地下水位観測（自動計測 3 基、手動計測 1 基）

レベル 2 地震時や経年による排水機能の低下で、盛土内地下水位の上昇、及び盛土内の滞水を監視することを目的として、地下水位計①、②、③（図-4.6.1、表-4.6.1 参照）において盛土内の地下水位を常時監視することとした。データ回収は、1 回/月としている。また、地下水位計④は、上記①、②、③の観測孔データを補完する役割とし、手動計測により水位を監視するもので、上記①、②、③の観測で異常が認められた際に随時監視を行うこととしている。

##### 2) 流末総流量観測

大規模盛土内の基盤排水層や地下排水溝の機能低下などによる盛土内の滞水の状況を監視することを目的に、施工中に

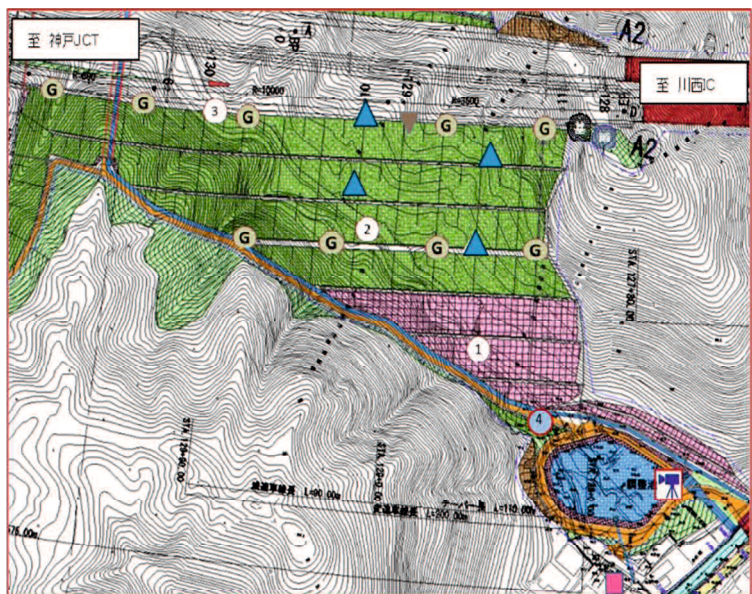


図-4.6.1 宝塚北 SA 盛土モニタリング計画計器設置位置図

設置した盛土流末で、自記水位計および三角堰を利用して流量を監視することとした。自動監視である自記水位計のデータ回収は、1回/月である。また、自記水位計データ回収時に、三角堰の流量監視も合わせて1回/月行う。

表-4.6.1 各計測機器と観測種別，計画数量

モニタリング項目	機器・手法等	記号	監視手法区分	備考
地下水位観測	水位計	①	自動	
地下水位観測	水位計	②	自動	
地下水位観測	水位計	③	自動	
地下水位観測	手動水位計	④	手動	
傾斜計	手動傾斜計		手動	全4箇所
沈下計	クロスアーム式		手動	
流量計測	自記水位計		自動	
流量計測	三角堰		手動	
ウェブカメラ監視			自動	
GPS 観測			自動	全10箇所
簡易雨量計			自動	

## (2) 盛土形状を把握するためのモニタリング項目と監視頻度

### 1) 傾斜計（4基）

盛土の形状変化を監視することを目的に、施工中に設置・計測していた傾斜計のケーシングを存置利用して盛土内部の変形を監視することとし、その監視頻度は1回/月とした。

### 2) 沈下計（1基）

盛土の形状変化を監視することを目的に、施工中に設置・計測していたクロスアーム式沈下計を存置利用して盛土層別沈下を監視することとし、その監視頻度は1回/月とした。

### 3) GPS 観測（10基）

盛土の形状変化を監視することを目的に、盛土のり肩付近および盛土の小段に沿ってGPSを約50m間隔に設置して、盛土全体の変形を面的に常時観測できる監視体制をとった。

### 4) ウェブカメラによる監視

盛土全体の監視、雨水排水工・地下排水溝・基盤排水層などからの排水状況および、調整池の状況を把握することを目的に、一定間隔でウェブカメラによる静止画像を撮影し、この静止画像によって高速道路事務所にて盛土全体の状況を確認するようにしている。

## (3) その他の観測項目と計測頻度

### 1) 簡易雨量計

盛土内の雨水排水工や地下排水溝、基盤排水層の機能低下などによる盛土内の滞水の状況を観測するための流量観測データを補完することを目的として、盛土のり肩近傍に簡易雨量計を設置し、常時観測を行うことにした。

## 4.6.3 モニタリングでの着目点

維持管理段階では頻繁に現地へ赴いて状況を把握することができないため、前述したモニタリング項目で盛土の安定性を確認していくことになる。ここでは、モニタリング項目ごとに管理基準値を設けて異常値が観測された場合の対応や対策などについて述べる。

### (1) 地下水位観測

三次元水収支解析及び盛土の安定解析の結果から、盛土内の雨水排水工、地下排水溝のいずれかが機能低下し、盛土内地下水位が盛土のり尻の標高より2m以上上昇し、かつレベル2地震動が発生した場合に、本盛土

の安全率が  $F_s=1.0$  を下回り、液状化を伴って盛土下方に大きな円弧すべりが生じる恐れのあることが事前検討で確認されている。そのため、管理目標値は地下水位を観測し、のり尻の標高より 2m の高さを基準として、盛土内地下水位を監視しながら管理することにした。

地下水位観測孔は、**図-4.6.1** に示すように①、②、③、④の 4 孔あり、そのうち①、②、③はいずれも元の沢筋で盛土の最も深い位置に設置している。盛土内ではこの箇所に水は集まりやすいが、地下排水溝が集中している箇所でもあり、**図-4.5.2** に示すとおり施工中は大きな降雨時に一時的な水位上昇が観測されたものの、降雨がおさまれば水位の低下は早く、長時間にわたって高い水位が維持されることはなかった。

そこで、地下水位観測孔①～③により、盛土内の雨水排水工や地下排水溝の健全性をモニタリングすることが有効であると考えた。宝塚北 SA 盛土における地下水位の上昇程度に応じた対応区分とその際の対応内容を**表-4.6.2** に示した。

また、地下水位観測孔④は、自記水位計で自動計測する観測孔①～③のデータを補完し、水位上昇によって不安定化しやすいのり面末端での滞水状況を確認する目的で計測対象とした。

**表-4.6.2** 地下水位計での基準値と対応区分

対応区分	基準値	対応内容
通常監視	観測地下水位が 0m 付近～2m まで上昇した時（施工中実績あり）	・特に必要なし
注意監視	観測地下水位がいずれかの観測孔で、2m～5m まで上昇した時（施工中に 2～3 回実績あり）	・地下水位計を 1 回/時間 監視 （補助的にウェブカメラで調整池の地下排水溝（φ400, φ300）双方から排水が有ることを確認）
警戒監視	観測地下水位がいずれかの観測孔で、5m 以上上昇した時 ・観測孔①で 5m～7m ・観測孔②で 5m～11m ・観測孔③で 5m～16m	・地下水位計を 1 回/10 分 監視 （補助的にウェブカメラで調整池の地下排水溝（φ400, φ300）双方から排水が有ることを確認） ・のり面点検の実施
緊急対応	観測地下水位がいずれかの観測孔で、基準水位まで上昇した時 ・観測孔①で 7m～9m ・観測孔②で 11m～17m ・観測孔③で 16m～28m	・地下水位計を 1 回/10 分 監視 （補助的にウェブカメラで調整池の地下排水溝（φ400, φ300）双方から排水が有ることを確認） ・行政への連絡 ・のり面点検の実施 ・高速道路通行止め実施体制の構築
非常対応	観測地下水位がいずれかの観測孔で、基準水位以上に上昇した時 ・観測孔①で 9m 以上 ・観測孔②で 17m 以上 ・観測孔③で 28m 以上	・地下水位計を 1 回/10 分 監視 （補助的にウェブカメラで調整池の地下排水溝（φ400, φ300）双方から排水が有ることを確認） ・行政への連絡 ・のり面点検の実施 ・高速道路通行止め実施

## (2) 流量観測

盛土から排出される雨水排水工、地下排水溝、基盤排水層（のり尻工）及び盛土表面排水は全て調整池に集水され、パイプで側道の下を通過して普通河川僧川へ放流されている。そこで、それら排水の状況を確認して盛土内への滞水の可能性を監視することを目的として、自記水位計を活用して常時の流末総流量の把握を行うことにした。三角堰は、調整池から僧川への放水路に設けており、自記水位計データを補完するため、越流水位から流末総流量を計測することとした。

盛土施工期間中の最低流量は、約  $0.06\text{m}^3/\text{min}$  であった。したがって、維持管理段階での流量観測では基底流量を  $0.06\text{m}^3/\text{min}$  とし、この値を管理基準値として監視していくことにした。

流量が基底流量を上回る場合は、問題がないとし、流量が徐々に減少するような場合には、自記水位計を挿入した観測孔が詰まっている可能性があるため目視点検し清掃を行う必要がある。清掃を行っても流量が 2～3 回連続して基底流量を下回る場合には、現地で地下排水管（φ400, φ300）およびのり尻工からの排水状況を確認する。水が出ていない場合には、目詰まりにしていることが考えられる。その際には、**図-4.6.1** に示す地下水位計①②③のデータを確認し、いずれかで水位の上昇傾向が認められた場合には、地下排水管の詰まり

による排水機能低下が考えられる。そうなれば、地下水位観測孔④を計測する。水位が高い場合には、盛土全体に滞水している可能性がある。このような状況になれば、上記対応結果と過去の降雨データ、各観測記録をもとに、対応方法について詳細な検討を行うことになる。その際には学識経験者などの有識者に報告・相談を行うことも有効である。その結果盛土の滞水が認められるようであれば、水抜きボーリングや集水井、のり尻工の範囲拡大など排水対策を講じるべきである。

### (3) 地下傾斜計、沈下計、GPSによる監視

孔内傾斜計、沈下計、GPSによる監視は、いずれも盛土内の変位をとらえる動態観測項目である。変位量については、地震直後の路面の変状に見られるような短期的な急激な変位、および圧密沈下や材料劣化に伴う盛土沈下に見られるような継続的な変位の両方を対象として計測している。大きな地震動を経験し、盛土に段差が生じた場合の変形と、経年的な圧密沈下あるいは盛土材料の劣化に伴う変形では、移動傾向やひずみ速度の現れ方が異なると予想される。

GPSによる観測データの特徴は、複数の測定値から最も確からしい位置を求めることにある。したがって瞬間のmm単位の移動量計測より、移動の傾向や平均速度を監視することに適している。

なお、現時点では明確な基準値は設定できていないが、地表面の従来型計器を用いた場合の管理基準値として、(財)高速道路調査会が提案している「維持管理段階の管理基準値」<sup>11)</sup>を参考値として運用することにしている。ここで言う参考値は、地表面の変位速度として、点検・要注意または観測強化の目安が10mm以上/30日、対策の検討の目安が5～50mm/5日である。

### (4) ウェブカメラ

盛土の地下排水溝からは、常時盛土内に流れ込んだ雨水や沢水が排水されており、常時排水の状況を確認することで盛土内への滞水の可能性を監視することを目的として行うもので、ウェブカメラを活用して、表-4.6.3に示すように雨水排水工と地下排水溝、のり尻工の排水状況や盛土のり面を観察し、常に水が出ていることや変状が発生していないことを確認する。これらによって、現場へ赴かなくても盛土完成時の初期状態と変わりのないことや現場の異常事態を速やかに把握しようとするものである。

表-4.6.3 ウェブカメラによる観察ポイント

観察採水施設	区分	常時の状態	注意点
雨水排水工	雨水排水工と補助管から流出される排水	雨水排水工は、盛土施工時に設けられた堅坑（キャッピング済）と補助管から盛土へ侵入した水の一部が調整池に排出	排水量が多くなった場合には、盛土内に雨水や地下水が浸透し、盛土が滞水している可能性がある
地下排水溝	地下排水溝で集水した基盤と盛土境界の地下水	地下排水溝は、盛土の下の基盤との境界付近の地下水が調整池に排出	排水量が減少した場合には、地下排水管に目詰まりが生じている可能性がある
のり尻工	盛土の表面に近い地下水が排水	無降雨時には排出されないが、降雨時には排出される 無降雨時であっても、のり尻工周辺は湿って苔がある	降雨時の排出量が減少したり、のり尻工周辺が乾燥したり苔がなくなるとのり尻工が機能低下を起こしている可能性がある
盛土の小段排水溝やたて排水溝	盛土の地表面水が排水	盛土完成時と同じ状態 降雨時に各排水溝に越流や跳水がない	降雨時に排水溝から越流や跳水が発生している場合には排水機能不全となっている可能性がある のり面に表層すべりやガリ浸食などの異常が発生

## 4.6 まとめ

本章では、宝塚北SA盛土で計測した各種現地計測に基づいた分析を行い、また維持管理段階において継続して行うモニタリング手法を提示した。計測・観測結果と考察を以下に整理する。

### (1) 流量計測

- 1) 三角堰と四角堰を比較すると、三角堰の計測精度は良いメリットもある反面、葉っぱの詰りなどの障害の影響を受けやすく、また大きな流量には対応できないというデメリットもある。
- 2) ピンホールなど自記式水位計による流量は、計測箇所の閉塞や流下する水面の波立ちの影響を受けて、水位結果が安定せず、流下している水流の計測には向かないことが分かった。

### (2) 降雨量計測結果

- 1) 2017年の流量計測期間降雨量は、過去5年間の平均値の103%とほぼ同量であったものの、流量分析期間である2017年4月22日～9月15に対しては平年の73%と極端に降雨量の少ない年であった。

### (3) 自動計測流量と実測流量との対比

- 1) 流末総流量の三角堰による計測流量と実測流量には、 $R^2=0.921$ と明確な相関が認められ、流末総流量の計測精度の高いことがわかった。
- 2) 上記以外の計測と実測の流量には、明確な相関は認められず、また流量のオーダーも異なっていることから、流量分析の対象外とした。

### (4) 実測地下水流量

- 1) 全地下水流量は、先行する累積2週間降雨量との相関が高く、広範囲な流域からの地下水供給が想定される。
- 2) 地下排水溝による地下水流量は、全地下水流量の85%を占め、地下排水溝の大きな排水効果が認められる。
- 3) 雨水排水工やのり尻工からの地下水流量は、全地下水流量の数%に過ぎない。しかし、のり尻工流量は先行する1週間降雨量との相関が強く、地下排水溝や雨水排水工よりも直近降雨に対する排水効果が認められる。

### (5) 計測流末総流量

- 1) 全ての流量を捉えている流末総流量結果から、計測期間の地下水流量率は40.2%、地表水流出率は5.3%であった。
- 2) 計測した2017年の流量分析を行った期間の降雨量は極端に少なかったが、それでも40.2%の地下水流量率となった。多雨年ではこの値がさらに大きくなると予想される。
- 3) 地表水流出率は、一般的な斜面に対して小さな値となった。これは、工事途中であり、工事中排水を別系統としていたことが、この結果をもたらしたと考えられる。

### (6) 計測地下水流量

- 1) 計測した週間地下水流量は、先行する2～4週間降雨量との相関が強い。実測流量が先行2週間降雨量との相関が強いのに比較して1週間程度長くなっているが、これは累積降雨量としたことで精度が高まった結果と見てとれる。
- 2) 日地下水流量は、先行する1週間降雨量との相関が強い。
- 3) 地下水流量の減衰は、対数曲線で精度よく近似可能であることが分かった。また、ピーク時地下水流量が $0.02\text{m}^3/\text{sec}$ 程度であれば、排出量がなくなるのに1ヶ月程度を要し、時間をかけて排水されている状況が把握できた。

### (7) 岩国災害復旧盛土と宝塚北SA高盛土での計測対比

- 1) 岩国災害復旧盛土と宝塚北SA盛土ともに地下水流量は降水流量に対して極めて多い。このことから、他流域からの地下水供給が考えられる。

- 2) 断層破碎帯が水道となって地下水を供給する岩国災害復旧盛土のケースは、断層が地下水を遮蔽して地下水を供給する宝塚北SA盛土のケースより供給量が多くなる。
- 3) のり尻工に関しては、のり尻箇所のみでなく、のり面に対して面的に設置することで、排水効果をより高めることができる。

#### (8) 盛土施工中のモニタリング

##### 1) 地下水位観測

盛土の工事期間である5年間盛土内の地下水位を観測してきたが、盛土の安全性に関する基準水位であるのり尻から2m上昇することは一度もなかった。降雨に伴って地下水位は上昇するが、降雨後は速やかに低下している。また、開通後の2018年7月には、400mmを越える豪雨を受けたが、地下水位の上昇は工事中の観測結果よりも小さくなった。これは盛土の雨水対策の効果により盛土内への雨水浸透が少なく、地下水の排水対策が十分に発揮されていることによると考えられる。

##### 2) 流末総流量観測

盛土施工中の流末総流量は、施工前に観測した最低流量である0.04m<sup>3</sup>/minを下回ることではなく、最低流量は施工前の観測流量より大きくなった。このことから、維持管理段階でのモニタリングでは、施工中の最低流量である0.06m<sup>3</sup>/minを基底流量とすることにした。

- 3) 以上のようなことから、当該盛土は適切に排水がなされており、排水機能の健全性を確認することができた。

#### (9) 維持管理でのモニタリング

- 1) 断層破碎帯上に構築された大規模盛土で、しかも盛土のり尻近傍には民家や県道が位置していることを考えれば、第三者被害を防ぐためにも盛土の安定性を継続して確認していく必要がある。
- 2) 安定性の確認手法としては、盛土内水位や盛土の形状変化の把握が有効である。盛土内水位の把握には、地下水位計と盛土から排出される流量を観測することとし、盛土形状の把握には変位計測によることとし、またウェブカメラによって盛土の排水状況や盛土自体に変状などが無いことを監視する体制を提案した。

## 第4章の参考文献

- 1) 岩島保：新名神高速道路における高盛土の設計と施工ー(仮称)宝塚サービスエリアでの事例ー，基礎工，Vol.41，No.10，pp.69-72，2013。
- 2) 岩島保，森英治：新名神高速道路(仮称)宝塚サービスエリアでの高盛土における課題と対応，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，VI-270，pp.539-540，2014。
- 3) 西日本高速道路株式会社：設計要領第一集土工建設編，pp.4，pp.31-38，2016。
- 4) 竹國一也，竹本将，秦二郎，中田幸男：山陽自動車道盛土の降雨に対する安定性評価，土木学会第72回年次学術講演会講演概要集，III-482，pp.963-964，2017。
- 5) 竹國一也，山口卓位，古賀泰輔：高速道路大規模盛土における地下水流量計測，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集，III-236，pp.471-472，2018。
- 6) 山口卓位：高盛土における設計と施工，新名神宝塚SA(仮称)における取組み(特集 工事最盛期を迎えた新名神高速道路の現在)，土木施工，Vol.57，No.4，pp.35-38，2016。
- 7) 竹國一也，秦二郎，中田幸男：盛土構造物における地下水流と地表流の現地計測および排水対策工の効果検証，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol.74，No.3，pp.289-299，2018。
- 8) 竹國一也：盛土崩壊の復旧と対策～山陽自動車道～，土木施工山海堂，Vol.47，No.6，pp.21-28，2006。
- 9) 丸山喜久，山崎文雄，用害比呂之，土屋良之：新潟県中越地震の被害データに基づく高速盛土の被害率と地震動強の関係，土木学会論文集A，Vol.64，No.2，pp.208-216，2008。
- 10) 為重誠，川村國夫，駒田秀一，宮村雅行，植村強，室井辰盛：能登半島地震による能登有料道路の被災と～復旧盛土の被害と対策工事について～，土木学会論文集，Vol.4，No.4，pp.289-305，2009。
- 11) 財団法人高速道路調査会：地すべり動態観測管理基準値，1988.2。



## 第5章 盛土排水対策の技術的対応に関する提案

### 5.1 はじめに

第3章と第4章で述べてきたように、岩国災害復旧盛土と宝塚北 SA 盛土で計測された地下水流量は、降水流量に対して極めて多く、これは別流域から断層破碎帯を通じて地下水供給があると考えられる。以下に、供給されている地下水流量の定量的な推定を行い、他流域から地下水供給がある場合の地下水流量算定方法について提案を行った。

本章では、断層破碎帯による地下水供給量を推定する方法として、以下に述べる(1)計測流量による水収支からの推定、(2)計測地下水流量とタンクモデルとの対比による推定、の両面からの推定を試みた。その推定に基づいて地下水供給量の予測手法とともに盛土排水対策工に対する設計手法の提案を行い、維持管理段階における盛土のモニタリング手法の提案も行った。

また、他流域から地下水供給のある場合の地下水流出特性について検討し、一般的な地下水流出特性との差異についての考察を加えた。

ここで取り扱う地下水供給量の推定については岩国災害復旧盛土で得られた計測データを主な対象としている。宝塚北 SA 盛土については、推定するに十分な計測データを得ることができなかつたため、その計測結果は、岩国災害復旧盛土の推定を裏付けするための補足データと位置付けて計測地下水流量とタンクモデルとの対比による推定のみ分析を行った。

### 5.2 断層破碎帯による地下水供給量の推定

#### 5.2.1 計測流量による水収支からの推定

斜面など地表面へ降った雨は、大きく分類して、地表面を流下する地表水流量と地中へ浸透する地下水流量、そして蒸発、蒸散する蒸発散量に分けられ、これらの水収支はさまざまな現地条件によって大きく異なる<sup>1),2)</sup>。水収支率は、降水流量に対する地表水流量や地下水流量、降雨量に対する蒸発散量、これらの率の和で定義され、図-5.2.1の水収支の考え方に示すように、通常の水収支は地表水流量と地下水流量、蒸発散量の率を合わせて100%となるが、他流域から地下水が供給されれば、それを越えることになる。すなわち、水収支率100%を越える部分が、他流域からの地下水流入分に相当すると考えた。

水収支を考える上での地下水流量には地下排水溝とのり尻工から排出される両方の流量があり、地下排水溝は表-3.3.4の地下水流量率を、のり尻工は表-3.3.9の地下水流量率を適用している。また、地表水流量流出率は表-3.3.7に示すB-1流域とB-2流域の地表水流量に表-3.3.9ののり尻工の地表水成分を加えて、それをB-1流域とB-2流域の降水流量で除した率として求めた。

蒸発散量はソーンズウェイト法およびハモン法を用いた蒸発散量の推定<sup>3)</sup>から求め、年ごとに両手法の平均値で評価し、その結果を表-5.2.1に示した。蒸発散率は、流量を計測した期間である2016年7月～10月、2017年5月～11月の欽明路気象観測局で観測された降雨量に対する同期間蒸発散量の率として算定した。蒸発散量は、蒸発散量=蒸発散能×補正係数とし、蒸発散能はソーンズウェイト法(Thornthwaite)の式は、式-5.2.1、式-5.2.2、式-5.2.3、ハモン法(Hamon)の式は、式-5.2.4となる。

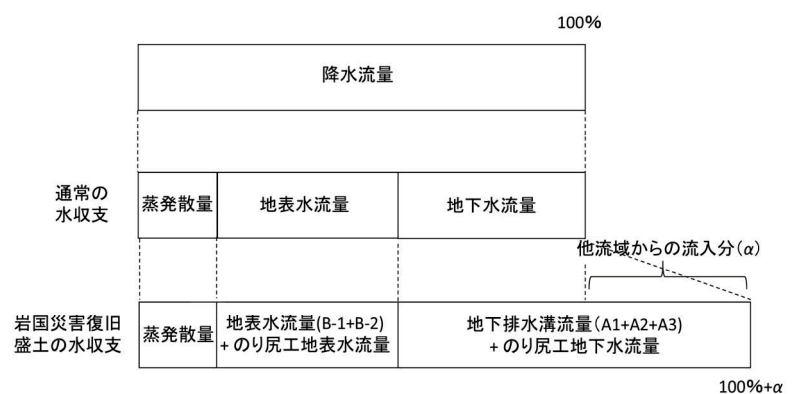


図-5.2.1 水収支の考え方

[1] ソーンズウェイト法 (Thornthwaite)

$$E_p = 0.533 D_0 (10 t_j / J)^a \quad (\text{式-5.2.1})$$

$$a = (0.675J^3 - 77.1J^2 + 17920J + 4926390)10^{-6} \quad (\text{式-5.2.2})$$

$$J = \sum_{i=1}^{12} (t_i / 5)^{1.514} \quad (\text{式-5.2.3})$$

ここに、 $E_p$  :  $j$ 月の日平均蒸発散能(mm/day),  $D_0$  : 可照時間(12hours/dayを1とする),  $t_j$  :  $j$ 月の月平均気温(°C)

[2] ハモン法 (Hamon)

$$E_p = 0.14 D_0^2 P_t \quad (\text{式-5.2.4})$$

ここに、 $E_p$  : 日平均蒸発散能(mm/day),  $P_t$  : 気温(°C)に対する飽和絶対湿度(mg/m<sup>3</sup>)

式-5.2.4中の飽和絶対湿度 $P_t$ は、文献<sup>4)</sup>を参考に求め、補正係数は中国地方の補正係数<sup>5)</sup>0.636を使用した。

2016年と2017年の流量計測結果と前記予測式に基づいて算出した蒸発散量をもとに水収支率を表-5.2.2にまとめた。

2016年と2017年の水収支率は、いずれも100%を超えており、2年間平均で132.0%となった。しかし、その比率は2016年が154.5%、2017年が121.3%と年毎の水収支率に大きな差がある。これは、2016年が平年の降雨量を20%程度上回り、2017年が平年の16%程度下回っているように降雨量の差に起因していると考えられる。しかし、平年の84%程度の降雨量であっても水収支率が100%を超えていることは注目すべき事実である。このように降雨量が多ければ、地下水流量が多くなることを示しており、降雨量の多い年にはさらに水収支率は高くなると思われる。

以上のことから、2016年では水収支率が100%を超えた54.5%、降水流量の54.5%に相当する流量が断層破砕帯によって他流域から供給されたと見込まれる。つまり、当該流域に対する地下水流量率が(71.7+17.1) - 44.8=34.3%に対し、供給された地下水流量率が54.5%である。2016年の当該流域19,900m<sup>2</sup>における地下水流

表-5.2.1 蒸発散量の推定

月	ソーンズウェイト 月別蒸発散量 (mm/月)		ハモン 月別蒸発散量 (mm/月)		平均月別蒸発散量 (mm/月)		月別降雨量 (mm/月)	
	2016年	2017年	2016年	2017年	2016年	2017年	2016年	2017年
1月	3.72	3.41	14.88	14.26	9.30	8.84	76.0	57.5
2月	4.35	4.76	15.37	14.84	9.86	9.80	110.0	98.0
3月	14.26	10.85	23.56	20.77	18.91	15.81	94.0	75.0
4月	36.60	34.50	36.30	34.20	36.45	34.35	376.0	244.5
5月	58.90	60.45	50.22	50.22	54.56	<b>55.34</b>	248.0	<b>93.0</b>
6月	75.00	71.10	60.00	56.70	67.50	<b>63.90</b>	652.5	<b>225.0</b>
7月	102.61	108.19	77.81	81.53	<b>90.21</b>	<b>94.86</b>	<b>257.5</b>	<b>115.0</b>
8月	101.99	102.30	76.88	77.19	<b>89.44</b>	<b>89.75</b>	<b>108.0</b>	<b>124.0</b>
9月	72.00	63.90	56.40	50.40	<b>64.20</b>	<b>57.15</b>	<b>291.0</b>	<b>259.0</b>
10月	46.50	40.92	40.30	35.96	<b>43.40</b>	<b>38.44</b>	<b>157.0</b>	<b>485.5</b>
11月	18.00	16.50	22.80	21.30	20.40	<b>18.90</b>	117.0	<b>31.5</b>
12月	8.37	3.72	17.36	14.26	12.87	8.99	122.5	23.0
合計	542.30	520.60	491.88	471.63	517.10	496.13	2,609.5	1,831.0
備考	月平均蒸発散量 2016年 71.81 mm/月 2017年 59.76 mm/月 年平均蒸発率 2016年 35.3% (期間: 7月~10月) 2017年 31.4% (期間: 5月~11月)							

量に対する他流域から供給される地下水流量の率は、地下水流量の  $54.5/34.3=158.9\%$ 、同様に2017年では47.5%、2年間の平均で約76.7%となる。このように、他流域から流入する地下水流量は流域内地下水流量の48～159%と推定される。

ここで注目すべき点は、流域内の地下水流量率は2016年も2017年も34～45%と大きな差はなく、土壌水分計の計測結果<sup>6)</sup>に基づく浸透率10～50%に相当する率となった。一方で、他流域からの地下水流量率は2016年が55%、2017年が21%と極めて大きな差が認められた。これは、降雨量の差による結果である。つまり、降雨量によって流域内の地下水流量率は大きく変わらないが、他流域から供給される地下水流量は降雨量に大きく左右されることを意味している。

表-5.2.2 年毎の水収支率

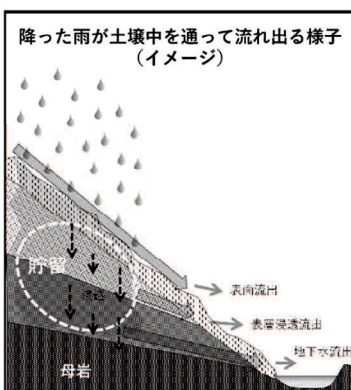
	2016年	2017年	2年間平均値
蒸発散率	35.3%	31.4%	32.9%
地表水流量 流出率	30.4%	23.8%	25.4%
地下排水溝 地下水流量率	71.7%	57.0%	61.9%
のり尻工 地下水流量率	17.1%	9.1%	11.8%
水収支率	154.5%	121.3%	132.0%
他流域から供給された地下水流量率	54.5%	21.3%	32.0%
流域内地下水流量率	34.3%	44.8%	41.7%
他流域から供給された地下水流量 / 流域内地下水流量	158.9%	47.5%	76.7%

### 5.2.2 計測地下水流量とタンクモデルとの対比による推定

当該箇所における地下水流量の流出特性を把握するためには、日本における標準的な地盤のものと比較する必要があると考えた。そこで、気象庁が全国の土砂災害予測に用いている土壌雨量指数およびその算定に適用しているタンクモデル<sup>7)</sup>から求められる地下水流出量と現場で計測した地下水流量との対比を行った。

降った雨が土壌中を通じて流出する様子のイメージとタンクモデルの対応を図-5.2.2、図-5.2.3に示した。図のイメージでは、降った雨は地表面を流下して河川へ流れ込んだり、地下に浸透したりする。その様子をモデル化したのがタンクモデルである。タンクモデルでは、3段に重ねた各タンクの側面には水がまわりの土壌に流れ出すことを表す流出孔が、底面には水がより深いところに浸み込むことを表す浸透流出孔がある。第一タンクの側面の流出孔からの流出量は表面流出に、第二タンクからは表層での浸透流出に、第三タンクからは地下水としての流出になる。なお、各タンクに残っている水分量（貯留量）は土壌中の水分量に相当し、これが土壌雨量指数である。

タンクモデルは図-5.2.3に示す直列3段で、1段目のタンクからの流出量である表面流出  $q_1$  は地表水に対応、2段目のタンクからのものは表層浸透流出  $q_2$ 、3段目のタンクからの地下水流出  $q_3$  は地下水に対応すると考えた。また、各パラメータ<sup>9),10)</sup>（流出孔の高さ、流出係数、浸透係数）の値は表-5.2.3に示すとおりである。



モデル化

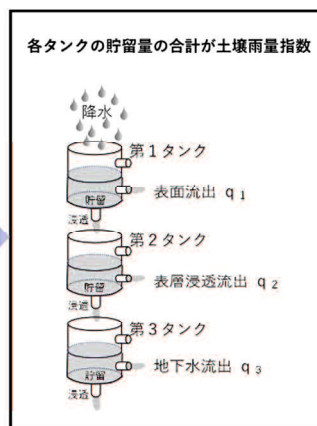


図-5.2.2 雨が土壌中に貯まっていく様子  
とタンクモデルとの対応 <sup>8)</sup>に加筆・修正

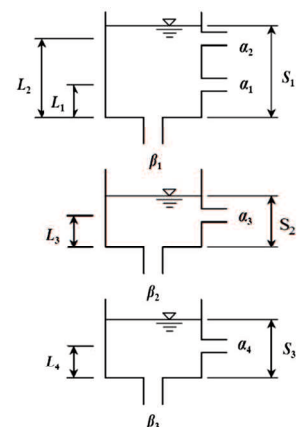


図-5.2.3 直列3段モデルタンクモデル

タンクモデルのパラメータは、地質の違いにより5種類が用意されており、土壌雨量指数の値もそれぞれ異なる。現在では、花崗岩を含む地質パラメータを全国一律にすることが一般的で、ここでも花崗岩でのパラメータを採用している。

各流出量は下式<sup>8)</sup>のようになる。

$$q_1(t) = \alpha_1 \{ S_1(t) - L_1 \} + \alpha_2 \{ S_1(t) - L_2 \} \quad \text{(式-5.2.5)}$$

$$q_2(t) = \alpha_3 \{ S_2(t) - L_3 \} \quad \text{(式-5.2.6)}$$

$$q_3(t) = \alpha_4 \{ S_3(t) - L_4 \} \quad \text{(式-5.2.7)}$$

ここに、 $q_1, q_2, q_3$  : 各タンクの流出孔からの流出量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  : 各流出孔の流出係数、 $L_1, L_2, L_3, L_4$  : 各流出孔の高さ(mm)、 $S_i (i=1, 2, 3)$  :  $i$  段目のタンク貯留量(mm)、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  : 各浸透流出孔の浸透係数。

なお、 $\alpha, \beta, L$  の各パラメーターは、表-5.2.3 に示すとおりであり、計算間隔は1時間間隔で行った。

ここでは、岩国災害復旧盛土と宝塚北 SA 盛土の2箇所について、計測地下水流量とタンクモデルの対比による推定を行った。その結果を以下に示す。

表-5.2.3 タンクモデルのパラメータ

	一段目	二段目	三段目
流出孔高 (mm)	$L_1=15$ $L_2=60$	$L_3=15$	$L_4=15$
流出係数 (1/hr)	$\alpha_1=0.1$ $\alpha_2=0.15$	$\alpha_3=0.05$	$\alpha_4=0.01$
浸透係数 (1/hr)	$\beta_1=0.12$	$\beta_2=0.05$	$\beta_3=0.01$

### (1) 岩国災害復旧盛土での推定

岩国災害復旧盛土のタンクモデル検討流域は図-3.2.3 に示す地下水の集水流域である A 流域  $19,900\text{m}^2$  である。

図-5.2.4 は2016年7月7日から11月10日まで、図-5.2.5 は2017年4月25日から11月30日までに地下排水溝とのり尻工から流出した地下水流量を合計した計測全地下水流量にタンクモデルから求めた表層浸透流出量  $q_2$ +地下水流出量  $q_3$  (以降: $q_2+q_3$ と呼ぶ)を重ねて表示したものである。図-5.2.4 および図-5.2.5 によると、ピーク計測地下水流量とピーク  $q_2+q_3$  流量の発生時刻は良好な相関が認められ、かつそのピーク流量は計測流量がわずかに上回っているものの、ほぼ同量であった。ただし、日降雨量  $20\text{mm}$  以下の降雨に対して  $q_2+q_3$  は反応していないが、計測では降雨に対応した流量増加が認められる。ここにもタンクモデルには表れていないのり尻工の排水効果が顕著に表れているものと考えられる。また、計測した地下水流量は、タンクモデルから求められる  $q_2+q_3$  と比較すると、降雨時、無降雨時ともに多いが、特に無降雨時においては特に多い。つまり、 $q_2+q_3$  は降雨が収まると比較的速やかに流量は減じているが、計測地下水流量は徐々に流量が減じていることから、計測地下水流量は  $q_2+q_3$  と比較して流量の減衰率の低いことがわかる。

図-5.2.6 および図-5.2.7 は、2016年および2017年各々の計測した地下水流量の累積値とタンクモ

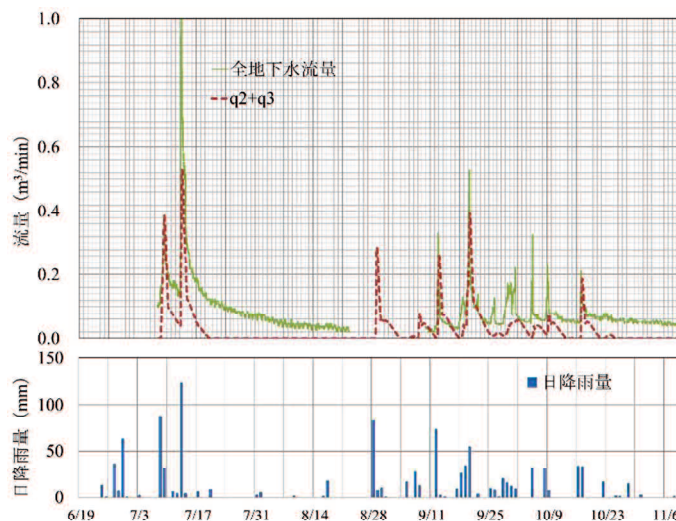


図-5.2.4 計測地下水流量と  $q_2+q_3$  の関係 (2016年)

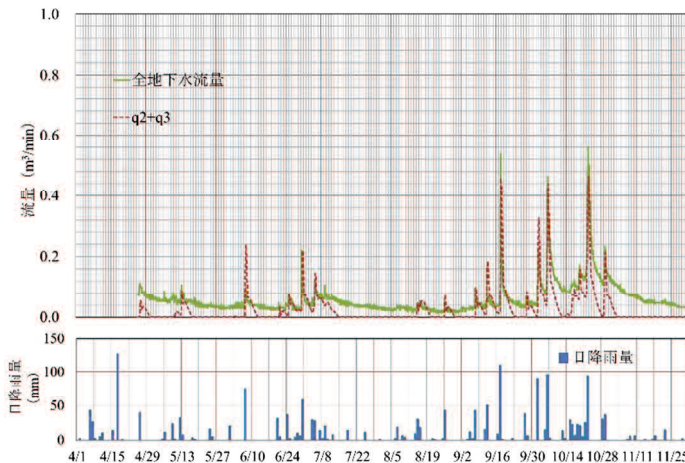


図-5.2.5 計測地下水流量と  $q_2+q_3$  の関係 (2017年)

デルによる  $q_2+q_3$  の累積値を表したものである。計測した地下水流量は、タンクモデルにより算出した  $q_2+q_3$  に相当するものである。この図-5.2.7によると、2017年の計測地下水流量と  $q_2+q_3$  を比較すると、期間前半の累積  $q_2+q_3$  は 2,739 m<sup>3</sup>、累積計測全地下水流量は 7,812 m<sup>3</sup>、期間後半の累積  $q_2+q_3$  は 5,651 m<sup>3</sup>、累積計測全地下水流量は 11,414 m<sup>3</sup> で、計測流量は  $q_2+q_3$  のそれぞれ 285%と 202%にあたる。

2016年と2017年の地下水流量と  $q_2+q_3$  を対比したものを表-5.2.4 に示す。これによると、タンクモデルから求められる地下水流量 ( $q_2+q_3$ ) に対する当該箇所での計測した地下水流量率は 202~351%で、他流域から供給された地下水流量率は 102~251%と変動があり、多くの降雨量があった期間の流量率は高くなった。

タンクモデルは日本の標準的な地盤に対する地下水流量を算出している。これに対して当該箇所での計測された地下水流量ははるかに多く、当該流域に対する他流域から供給される地下水流量の比率は、2016年が 177%、2017年が 129%となり、前述の計測流量による水収支による推定と同様の傾向となった。2年間平均では、標準的地盤での地下水流量の 146%に相当する流量が断層破碎帯によって供給されたと見込まれる。

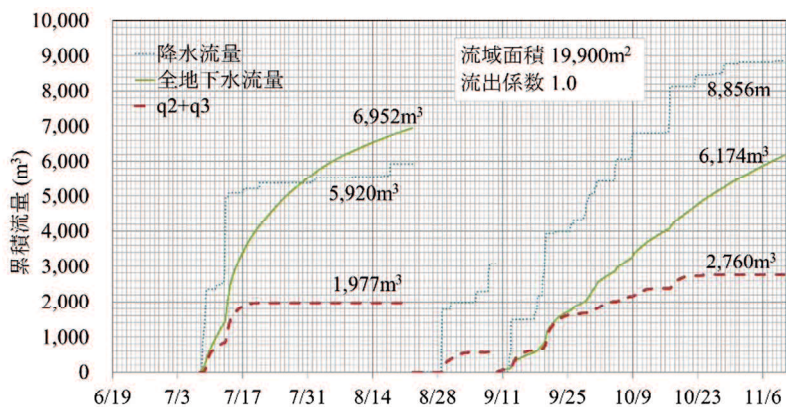


図-5.2.6 累積計測地下水流量と累積  $q_2+q_3$  の関係 (2016年)

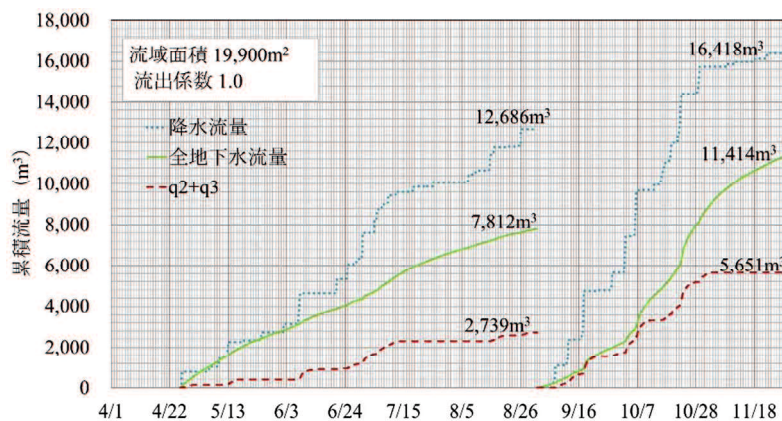


図-5.2.7 累積計測地下水流量と累積  $q_2+q_3$  の関係 (2017年)

表-5.2.4 累積計測地下水流量と累積  $q_2+q_3$  の比率

観測期間	2016年7月7日 ~8月22日	2016年9月9日 ~11月10日	2017年4月25日 ~8月31日	2017年9月1日 ~11月30日
計測地下水流量(m <sup>3</sup> )	6,952	6,174	7,812	11,414
$q_2+q_3$ (m <sup>3</sup> )	1,977	2,760	2,739	5,651
計測地下水流量 / ( $q_2+q_3$ ) (%)	351	224	285	202
	277		229	
他流域から供給された地下水 流量 / 流域内地下水流量 (%)	251	124	185	102
	177		129	
	146			

## (2) 宝塚北 SA 盛土での推定

宝塚北 SA 盛土のタンクモデル検討流域は図-4.2.3 示す地下水の集水流域である大規模盛土を包括する分水界 340,000 m<sup>2</sup> である。

図-5.2.8 は、宝塚北 SA 盛土において 2017年4月22日から9月15日までに地下排水溝と雨水排水工から流出した計測地下水流量にタンクモデルから求めた  $q_2+q_3$  を重ねて表示したものである。図-5.2.8 によると、計測地下水流量のピーク流量と  $q_2+q_3$  とのピーク流量の発生時刻は良好な相関が認められる。ただし、日降雨量

20mm 以下の降雨に対して  $q_2+q_3$  は反応していないが、計測では全ての降雨に対応した流量増加が認められる。特に日 40mm 以上の降雨のある場合には、地下水流量に顕著なピーク流量が表れている。タンクモデルにはみられない排水効果が表れている。また、計測した地下水流量は、タンクモデルから求められる  $q_2+q_3$  と比較すると、降雨時、無降雨時ともに多いが、特に無降雨時において多い。

図-5.2.9 は、図-5.2.8 の累積値を表したものである。計測した地下水流量は、タンクモデルにより算出した  $q_2+q_3$  に相当するものである。この図によると、計測地下水流量の累積値が  $60,550\text{m}^3$  に対して累積  $q_2+q_3$  は  $22,679\text{m}^3$  で、計測地下水流量は  $q_2+q_3$  の 267%となっている。

100%を超える地下水流量が他流域から供給されたとすると、流域内の地下水流量を超える 167%に相当する地下水が断層破砕帯を通じて他流域から供給されたとみることができる。

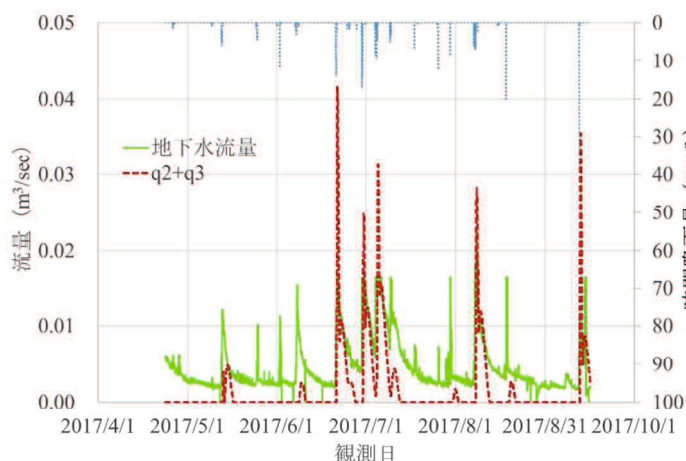


図-5.2.8 計測地下水流量と  $q_2+q_3$  の関係  
(2017年)



図-5.2.9 累積計測地下水流量と累積  $q_2+q_3$  の関係  
(2017年)

### 5.2.3 ピーク計測地下水流量と $q_2+q_3$ 流量の対比

図-5.2.4 と図-5.2.5 に示したとおり、岩国災害復旧盛土におけるピーク時の計測地下水流量と  $q_2+q_3$  流量を比較すると、大流量時には計測流量が多く、小流量時には双方の流量はほぼ同量のように見える。

そこで、降雨に伴う流量の大小によって計測地下水流量と  $q_2+q_3$  流量に変動がないかの傾向を把握するために、2016年と2017年に計測された計測流量と  $q_2+q_3$  流量のピーク時の関係を分析し、図-5.2.10 に示した。図によると、流量が小さい時点では双方の流量に大きな差は認められず、ほぼ同量であるが、流量が多くなるに従い、計測地下水流量が  $q_2+q_3$  流量を大きく上回る傾向が認められた。このことは、流量が多くなると他流域からの地下水供給が多くなることを意味しており、大きな降雨の際には断層により一層多くの地下水流量が流域外から供給される裏付けとなった。

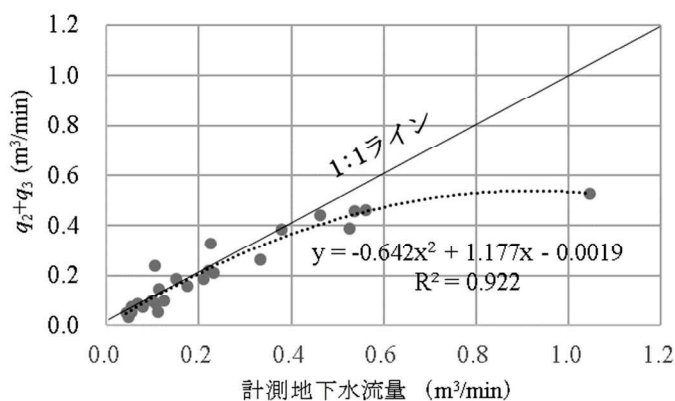


図-5.2.10 ピーク時計測地下水流量とピーク時  $q_2+q_3$  流量との関係

### 5.2.4 地下水供給量の予測手法の提案

5.2.1 および 5.2.2 での推定によると、2年間平均値として当該流域に対する地下水流量の率で表すと、水収率からの推定では 77%、タンクモデルによる推定では 146%が他流域から供給されたという結果を得た。

岩国災害復旧盛土内へ伸びる断層破砕帯が地下水を供給するとすれば、隣接流域で高低差や地形地質の連続

性を加味した流域を追加設定する必要がある。盛土に対して断層が伸びている方向に基盤岩が同地質で連続し、かつ高低差から盛土よりも高い位置にあって地下水が流下する上下の位置関係にある流域として図-3.2.3に示す桃色の D 流域 10,700 m<sup>2</sup> および E 流域 12,100 m<sup>2</sup> を合わせた 22,800 m<sup>2</sup> が地下水を供給する流域と考えた。もともと A 流域 19,900 m<sup>2</sup> を地下水流域としていたが、隣接の D 流域および E 流域からも地下水が供給されるとすれば、その割合は 22,800/19,900=1.15、すなわち 115%となる。これは、上記 77~146%の平均値 112%に相当し、供給された地下水流量の主要な流域源と推定されることを示唆している。今回対象とした現場と同様に、断層破碎帯が地下水を供給する懸念がある場合には、地形的分水界による流域設定のみでは不十分であり、隣接流域を含めた高低差や地形・地質の連続性を考慮した地下水分水界を地下水流量対象流域として設定することを提案する。

### 5.2.5 地下水流量特性と流出係数の推定

岩国災害復旧盛土箇所での地下水流量計測から、図-5.2.11 には 2017 年 9~10 月の計測地下水流量と  $q_2+q_3$  の流出特性の対比図を示した。図-5.2.11 の計測結果が示すように多雨期（高強度降雨時）のピーク時地下水流量は多く、降雨がなければ流量は徐々に減じるものの、枯れることはなかった。図-5.2.12 には、図-5.2.11 の当該計測箇所における地下水流出特性を明確にする概念図を示した。図には一般的な地下水流量の経時曲線（点線：日本の標準的地盤を代表するタンクモデルのハイドログラフ）と合わせて計測地下水流量曲線（実線）を表示した。一般的な地下水流量に比較して、当該地は、①基底流量が多い、②多雨期にはピーク流量が多い、③地下水流量の減衰率が小さい、と考えられることから計測地下水流量減衰グラフより流出係数を検討した。

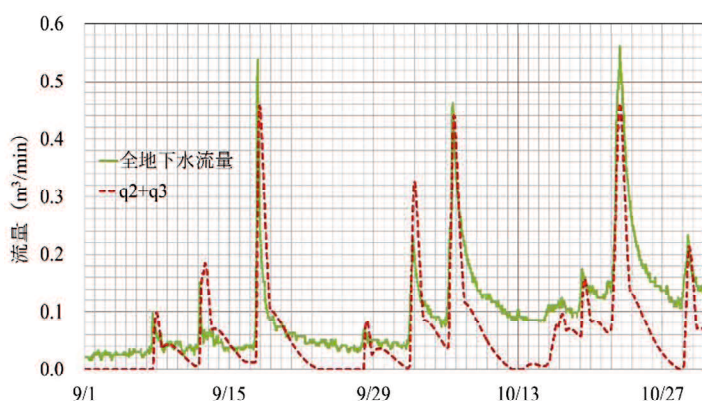


図-5.2.11 地下水流量の流出特性

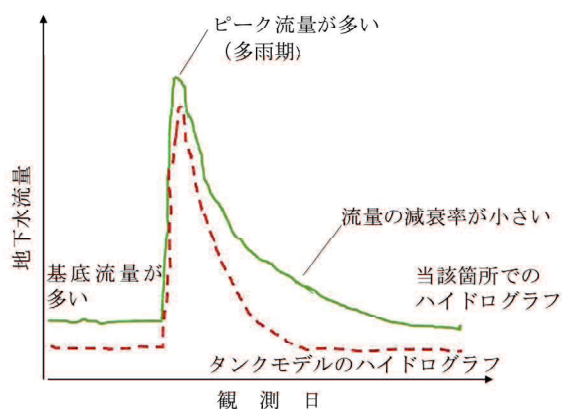
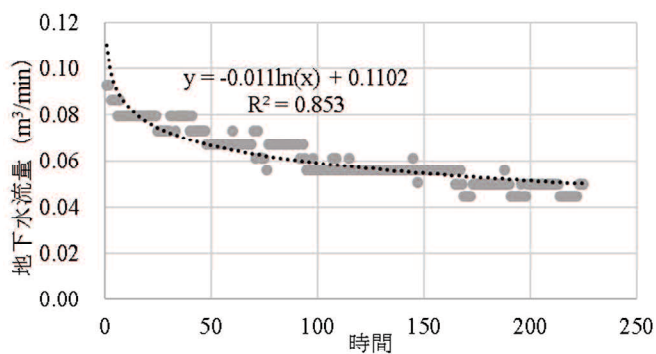


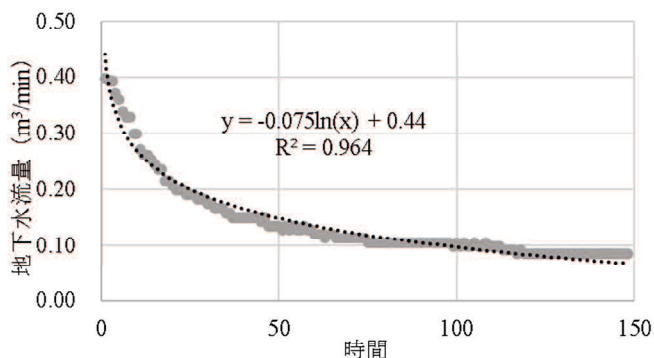
図-5.2.12 地下水流量の流出特性

表-5.2.5 流出係数の検討に用いたピーク時計測地下水流量

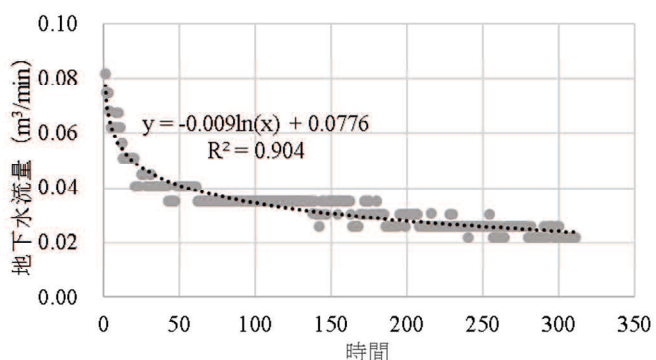
観測期間	ピーク時流量 (m <sup>3</sup> /min)	対数近似式 決定係数	累積降雨量
2017年4月26日~5月5日	0.0931	$Y=-0.011*\ln(x)+0.1102$ $R^2=0.853$	39.5 mm
2017年6月7日~6月20日	0.0819	$Y=-0.009*\ln(x)+0.0776$ $R^2=0.904$	75.0 mm
2017年8月26日~9月4日	0.0455	$Y=-0.002*\ln(x)+0.028$ $R^2=0.468$	42.5 mm
2017年9月17日~9月27日	0.4133	$Y=-0.046*\ln(x)+0.2663$ $R^2=0.807$	109.5 mm
2017年10月6日~10月12日	0.3978	$Y=-0.075*\ln(x)+0.44$ $R^2=0.964$	109.5 mm
2017年10月22日~10月28日	0.5300	$Y=-0.106*\ln(x)+0.6069$ $R^2=0.957$	119.0 mm
2017年10月29日~11月17日	0.2005	$Y=-0.024*\ln(x)+0.2118$ $R^2=0.931$	66.0 mm



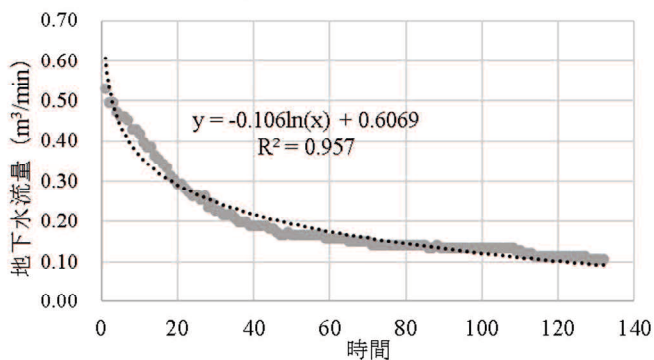
(a) 4/26~5/5グラフ



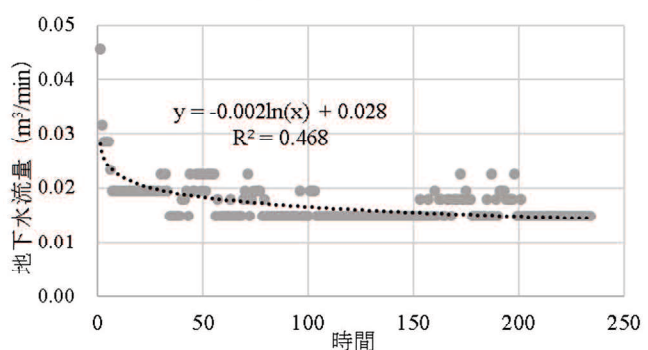
(e) 10/6~10/12グラフ



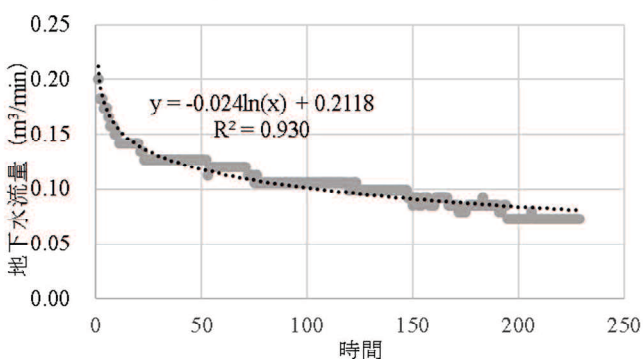
(b) 6/7~6/20グラフ



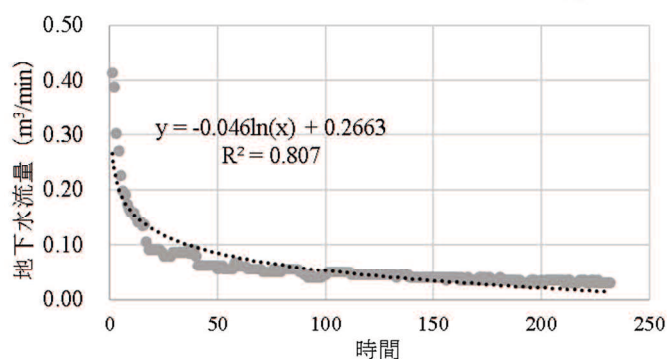
(f) 10/22~10/28グラフ



(c) 8/26~9/4グラフ



(g) 10/29~11/7グラフ



(d) 9/17~9/27グラフ

図-5.2.13 地下水流量減衰曲線



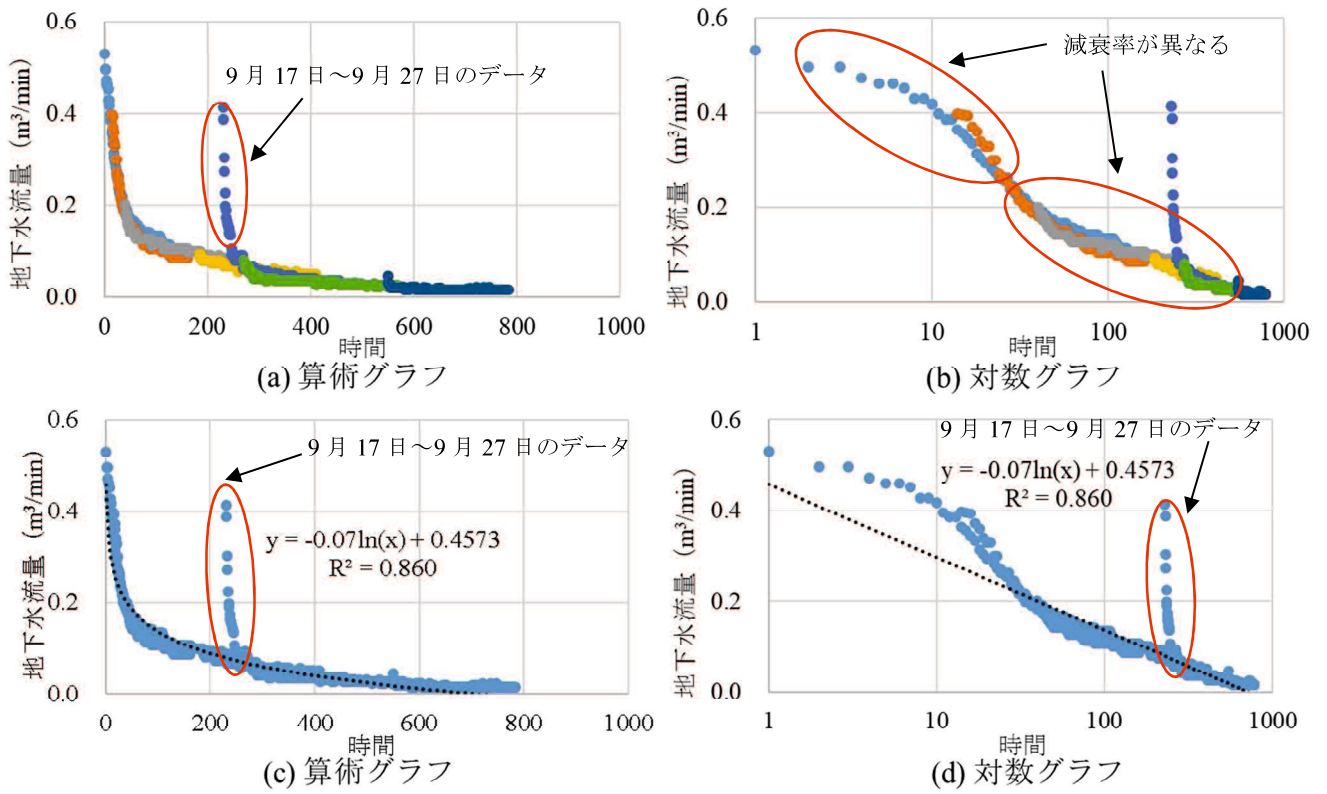


図-5.2.14 地下水流量減衰曲線の重ね合わせ図

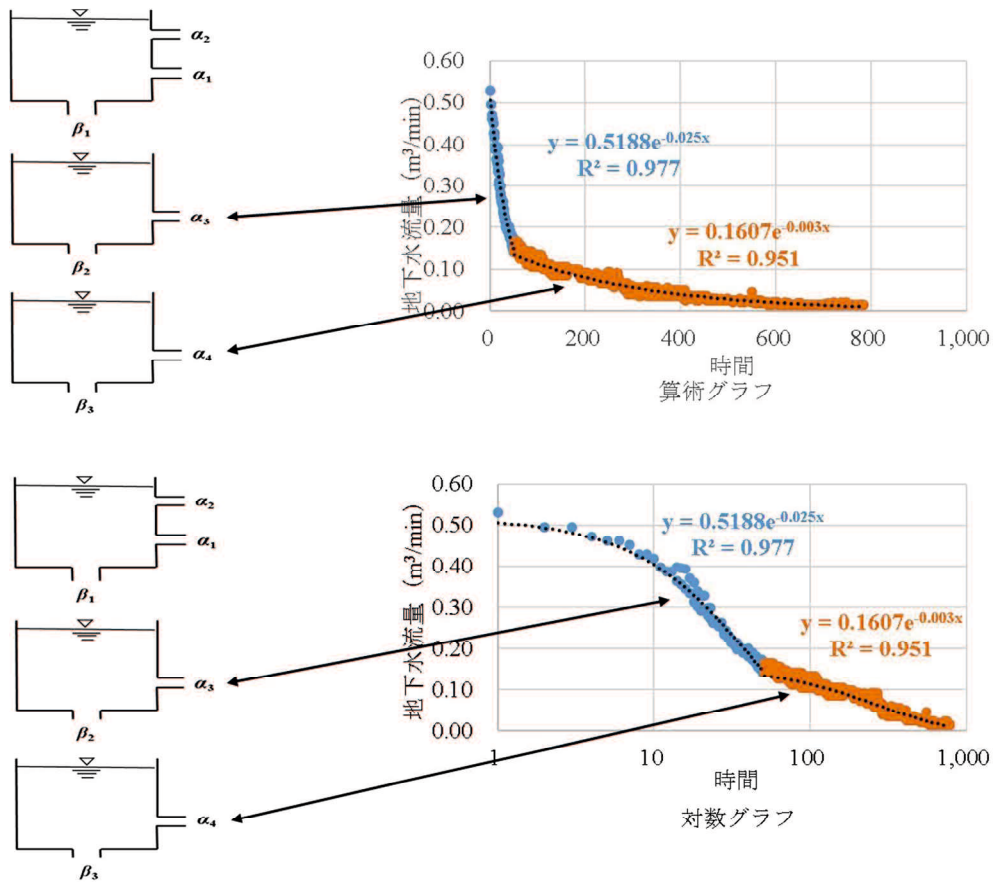


図-5.2.15 流出係数の推定

ここでの検討において、一般的な地下水流量は日本の標準的な地盤での流量算定に用いられているタンクモデルを用いた。検討に用いた7つのピーク流量は、第3章の表-3.3.5に示した地下水の代表的なピーク時流量を含めて、降雨がない場合の地下水流量の減衰状況を把握するため、2017年に計測した日降雨量35mm以上の比較的降雨量が多く、かつその後5日以上無降雨が継続した表-5.2.5に示すピーク時地下水流量を対象とした。それら各ピーク時地下水流量減衰グラフを図-5.2.13に示す。8月26日～9月4日の減衰グラフは $R^2=0.468$ と相関が弱い、このグラフはピーク流量が極端に小さいことに起因していると考えられ、これを除けば、地下水流量と時間の関係は、決定係数 $R^2>0.8$ となり、対数近似が可能であることが確認できた。

図-5.2.14は個々の流出量の減衰曲線を重ね合わせたグラフであり、個々の減衰曲線を色分けして示している。図中の右のグラフは、減衰曲線とその対数近似曲線を示したものである。対数近似式と決定係数は式-5.2.1のようになり、地下水流量と時間の関係には強い相関が認められる。図から9月17日～9月27日の流出減衰グラフを除いた6つの減衰曲線の決定係数 $R^2=0.860$ と概ね重なることが分かる。また、対数グラフの特徴から、減衰曲線は経過時間50時間を境として2つに区分できることが分かった。

対数近似式： $Y=-0.07*\ln(x)+0.4573$  (式-5.2.1)  
 決定係数： $R^2=0.860$

図-5.2.15は、地下水の流出係数を推定するために、図-5.2.14に示した流出量の減衰曲線に指数近似曲線をあてはめて、指数関数的減衰になっているか検討したものである。流出曲線は経過時間50時間を境として、2つに分かれており、それぞれの指数近似式と決定係数は表-5.2.6のようになる。決定係数はともに $R^2>0.95$ と極めて強い相関が認められる。また、近似式から求められる流出係数の検討結果を表-5.2.7に示す。

浸透係数が流出係数に比べて著しく小さいと仮定すると、第1近似式から求められる流出係数は0.025、第2近似式から求められる流出係数は0.003となる。第1近似式で示される流量をタンクモデルの $q_2+q_3$ 、第2近似式で示される流量をタンクモデルの $q_3$ に相当すると仮定すれば、計測値より求められる流出係数とタンクモデルの流出係数は表-5.2.8に示されるような関係となる。ここで計測値の流出係数( $\alpha_3, \alpha_4$ )は、計測地下水流量の減衰曲線を指数近似した表-5.2.6の値とし、タンクモデルに対する $\alpha_3, \alpha_4$ は日本の標準的な地盤として一般的に用いられている花崗岩でのパラメータである表-5.2.3の値とした。表-5.2.8が示すように、計測値の流出係数は、タンクモデルの流出係数 $\alpha_3$ の1/2、 $\alpha_4$ の1/3と明らかに小さい。当該地のハイドログラフから減衰率が小さいことが予測されたが、流出係数からも地下水流量の減衰率は小さい流出特性であることの裏付けが得られた。すなわち、他流域から断層破碎帯によって地下水が時間差をもって追加供給されること

表-5.2.6 流出係数の推定

名称	経過時間	近似式	決定係数	流出係数
第1近似式	1～50時間	$y=0.5188*e^{-0.025x}$	$R^2=0.977$	0.025
第2近似式	50時間以上	$y=0.1607*e^{-0.003x}$	$R^2=0.951$	0.003

表-5.2.7 近似式を用いた流出係数の計算

第1近似式				第2近似式			
経過時間 (h)	計測流量 (m <sup>3</sup> /min)	減衰率	流出係数 (1-減衰率)	経過時間 (h)	計測流量 (m <sup>3</sup> /min)	減衰率	流出係数 (1-減衰率)
1	0.5060			51	0.1379		
2	0.4935	0.9753	0.0247	52	0.1375	0.997	0.003
3	0.4813	0.9753	0.0247	53	0.1371	0.997	0.003
4	0.4694	0.9753	0.0247	54	0.1367	0.997	0.003
5	0.4578	0.9753	0.0247	55	0.1363	0.997	0.003
・	・	・	・	・	・	・	・
・	・	・	・	・	・	・	・
50	0.1846	0.9753	0.0247	783	0.0153	0.997	0.003

で流量は徐々に減少していることを定量的に示すことができた。また、当該地の地下水流量は、表-5.2.6 で提案した近似式によって精度よく予測することが可能となる。

表-5.2.8 流出係数の推定

計測値		タンクモデル	
名称	流出係数	名称	流出係数
第1近似式	0.025	$\alpha_3$	0.05
第2近似式	0.003	$\alpha_4$	0.01

### 5.3 盛土排水対策工設計手法の提案

本節では、前述した流域外より供給される地下水に対する排水対策工の設計手法を含めた盛土設計についての提案を行う。2.3 宝塚北 SA 盛土での事例は、建設時において断層破碎帯による地下水供給を考慮した唯一の設計事例である。そこで、本節での提案にあたっては、宝塚北 SA 盛土での事例を参考とし、また本研究で得られた知見を加えた提案とする。

図-5.3.1 には、断層による地下水供給の可能性がある場合の設計検討フローを示した。まずは、文献による断層位置、地形地質情報の把握や現地での湧水や地下水の流れを把握し、その後に現地でのボーリング調査、電気探査、現場透水試験、などにより滞水層や地下水の挙動を把握し、基底流量や降雨による沢流量の変動把握を行う。それらの情報を踏まえて、水収支解析や安定解析などで豪雨時に排水機能低下が生じた場合の盛土内地下水分布を予測し、それに基づいた地下水位に与える安定性・変形量の照査を行った上で、盛土の安定性が確保できる排水対策工を盛り込んだ盛土構造を策定することになる。

盛土構造物の安定性を損なう要因は、降雨、地下水、湧水など浸透水による水位上昇、間隙水圧の上昇である。また、大規模盛土や流域が大きな場合や、本研究で課題提起している他流域から地下水供給があるような場合の排水対策は、特に重要となる。

上記に対応した排水対策は、降雨と地下水・湧水に対応した両建てで行う必要がある。降雨に対しては、地表排水施設として小段排水溝とたて排水溝、盛土内への雨水浸透防止として水平排水層と垂直排水層を設置する。地下水・湧水に対しては、地下排水溝や基盤排水層、雨水排水工が有効となる。また、のり尻工は降雨および地表近傍の地下水に対する短時間での排水効果が期待できる。図-5.3.2 は、高盛土・大規模盛土に対応した排水対策工断面図の一例<sup>1)</sup>である。これは、今回の研究対象とした岩国災害復旧盛土でとられた排水対策工を含めて過去の実績を踏まえて定めたもので、これを基本として対策を講じていくことが適当であると考えている。

ここで注意を要する点は、図-5.3.3 に示すように、地下排水溝は本管と支管に分け、本管は流末まで複数系統で導き、支管は湧水箇所や地形から集水しやすい沢筋底部などに設けること、地下排水溝と雨水排水工は別系統とし、また各々の地下排水施設は複数系統とすることである。地下排水溝などのフィルター材は、礫質材などの透水性の良い材料を使用し、管の目詰まり防止として防砂シートを敷設することや、雨水排水工や地下排水溝に補助管を設けることが有効である。

地下排水溝の設置間隔や管径は、これまで解析や流量計算で設計することはなく、過去の地盤条件に応じた施工実績から、支管間隔 20~40m で管径φ200、本管管径φ300 を標準<sup>1)</sup>としている。ただし、他流域からの地下水供給を見込む際には、過去の施工実績だけに拠らず、盛土を含む流域に加えて地形・地質の連続する隣接流域に相当する地下水流量に対して十分な排水能力のある地下排水設備となるよう配慮すべきである。その設計にあたっては、2.3 宝塚北 SA 盛土の事例で示したように水収支解析および安定計算による地下排水設備とする必要がある。ここで他流域から供給される地下水流量の算定にあたっては、5.2.4 地下水供給量の予測手法の提

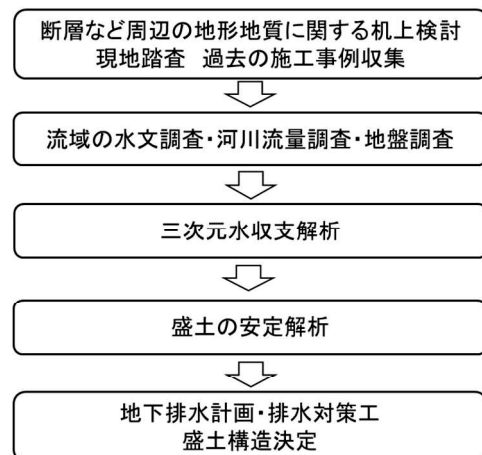


図-5.3.1 地下水供給を考慮した盛土設計検討フロー

案を参考とすべきである。その地下水供給量は、想定する降雨量によって大きく左右されることになる。その際の降雨量は第 2 章で示した 100 年確率降雨や過去に大規模災害が発生した際の豪雨を想定するなど安全を見込んだ設計とすべきである。

排水対策工の選定にあたっては、上記解析結果に基づく供給量や現地の湧水状況に応じて、地下排水溝の設置間隔狭小化や大口径化、さらにはのり尻工の設置範囲を面的に拡大することが有効で効果的と考えられる。岩国災害復旧盛土では支管間隔を 10m とし、またのり尻工は盛土のり面全体の約 4 割に面的設置したことで、十分な排水効果が得られている。

過去の経験から、盛土のり尻箇所にブロック積などの構造物を構築すると地下水が排水されにくくなることが知られており、のり尻部への構造物は避けるべきである。

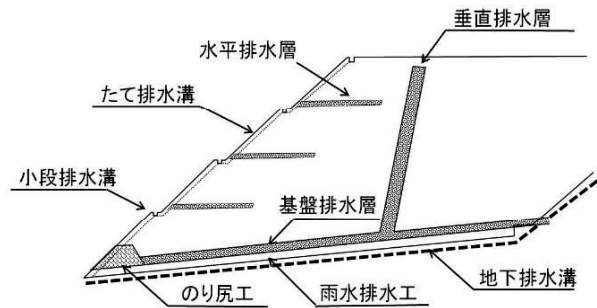


図-5.3.2 盛土排水対策工断面図の例<sup>11)</sup>を加筆修正

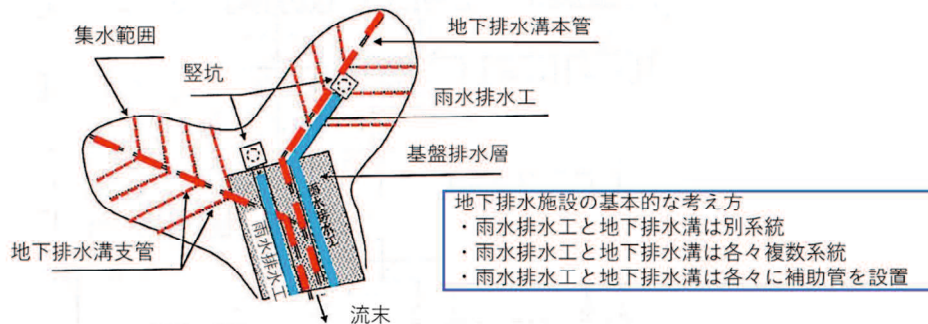


図-5.3.3 地下排水施設の例

#### 5.4 維持管理段階でのモニタリング手法の提案

ここでは、本研究で得られた知見に加えて、断層破砕帯が供給する地下水の影響を検討した新名高速道路高盛土（玉瀬地区）安定対策検討会<sup>12)</sup>での結果をも合わせて、盛土完成後の維持管理段階における排水対策工の健全性や盛土の安定性を確認していくモニタリング手法について示す。

まず、盛土構造物にとって、排水機能の低下が安定性を損なう一番大きな要因である。そのためには、盛土内の排水を常に良好な状態に維持し、地下水位を上昇させないことが盛土の安定を確保する上で最も重要である。したがって、維持管理段階においても盛土へ侵入した降雨浸透水や地下水が速やかに排出され、地下水位が異常な上昇を示していないことを確認することがポイントとなる。特に、断層破砕帯からの地下水供給が予測される盛土にあっては、第 3 章での地下水流量と先行降雨量との関係から、降雨と供給される地下水には相当なタイムラグがあることが明らかとなった。このことは、後背地から地下水が時間をかけて盛土内に供給されていることを意味している。そのため、降雨後の地下水位の変動をモニタリングする必要性は一層増してく

る。

4.6 維持管理でのモニタリングに示す宝塚北 SA 盛土でとったモニタリング項目は、工事中に監視してきた最大限の項目である。今後継続して監視する項目は、モニタリング状況を把握した上で取捨選択すべである。最低限必要となるモニタリング項目は、盛土堤体内の地下水位を監視していくことを提案する。地下水位は、盛土の安定性を評価する上で最も重要かつ監視が容易な指標である。

地下水位については、事前に盛土内の地下水位上昇に伴う盛土の安定性検討を行い、不安定となる水位を事前に定めておき、盛土完成後には不安定となる水位を管理基準値として地下水位の監視を行う。また、降雨に伴う地下水位の変化をとらえて降雨に伴って水位が上昇してもその後どの程度の時間で低下するのか、経年とともに水位の変動に変わりがいないかの監視が必要となる。

モニタリングを継続する中で、地下水位の変動に異常な状態が見られた際には、地下排水溝から流出する地下水流量を計測すべきである。流量の計測を行うに当たっては、工事中に流量計測した柵や堰を存置しておき、直ちに計測を開始できる体制をとっておくべきである。また、工事着手前の基底流量は記録として残し、管理部署へしっかりと引き継ぐことが重要であり、基底流量を下回らないことを監視していく必要がある。これは、地下排水施設に目詰まりなどがあると排水機能が低下することで盛土内に滞水が生じるため、そのような事象が発生していないことを確認するためのものである。

車上からの降雨後日常点検では、路面の冠水やオーバーフローなどの異常な状況が発見されれば、異常の原因を明らかにするために降車し、横断排水管や路肩側溝、たて排水溝のみ口部などの排水状況を確認すべきである。また切盛境部については地山からの湧水などにより脆弱化し崩壊の兆候として段差が生じることもあり、日常点検時には段差の有無に着目した点検が必要である。

また、詳細点検では、路面の異常なクラック（写真-5.4.1 参照）、沈下、水路や排水溝の点検、湧水の有無、盛土変状についての現地調査を行うことが重要である。特に地下排水溝からは常に地下水が湧出し、のり尻工からの流量は降雨時に増えることが正常な状態であり、点検時に流量がなくとも降雨時に流量のある痕跡として湿りや苔があること（写真-5.4.2 参照）、その他、初期の状態と変化がないことを確認すべきである。継続してモニタリングをする過程で初期の状態と変化があった場合には、原因を究明し、必要に応じて排水ボーリングや集水井、のり尻部への砕石工置き換えなど追加の排水対策を行う必要がある。

以上のような監視は、定期的な目視によることが一般的である。しかし、維持管理段階では頻繁に現地を監視することはできないため、可能であれば常時自動計測を行える体制構築の検討が望ましい。今後の常時自動計測には、最新の通信技術や ICT を活用した効率的、効果的なモニタリング手法の導入が求められている。

モニタリングの実施にあたって最も重要な点は、継続して監視を行うことにある。建設時には入念な検討を行って対策工をとりモニタリング計画を提案しても、維持管理段階においては、時間経過とともにその必要性・意義が忘れ去られ、モニタリング自体が中断、中止されてしまうことをよく見かける。それを防ぐには、今回のように維持管理マニュアルを作成して建設から管理へ組織として引き継ぐことと、モニタリングを業務として対応できる体制を整える必要がある。



写真-5.4.1 路面の異常なクラック例



写真-5.4.2 のり尻工からの正常な湧水例

## 5.5 まとめ

本研究では、高速道路2箇所の実盛土において地下水流量や地表水流量の現地計測を行い、断層破碎帯からの地下水の供給や各種排水対策工の効果検証を行った。ここで得られた知見は、岩国災害復旧盛土を主としてまとめ、計測地下水流量とタンクモデルとの対比による推定については宝塚北 SA 盛土についても補足としての分析を行った。これらを要約すると以下の項目が挙げられる。

- 1) 水収支から断層破碎帯による地下水供給量の推定を行ったところ、他流域から流入した地下水流量は想定した地下水流域に対する地下水流量の48~159%であることが判明した。その率は、降雨量によって大きく変動する。
- 2) 計測した地下水流量とタンクモデルから求められる地下水流量の対比から、計測された地下水流量は極めて多い。他流域から流入した地下水流量は、岩国災害復旧盛土で流域内に対する地下水流量の129~177%、宝塚北 SA 盛土で167%であることが判明した。このことから、他流域からの地下水供給があるさらなる根拠を得た。
- 3) 計測された地下水流量は  $q_2+q_3$  流量と比較するとピーク流量が大きく、かつその流量減衰率の小さいことが明らかとなった。このことから、他流域からの地下水供給が推定される。
- 4) 流域外からの地下水流量が推定される場合、地下水流域として断層破碎帯などを含めた地形地質的な地下水分水界を考慮した隣接流域の追加設定が、供給量推定の一助になることを示した。
- 5) 地下水流量特性について分析した結果、地下水流量の減衰曲線は対数曲線で精度よく近似でき、その近似式から流出係数の同定が可能となる。また、これをもって降雨後の流出量の予測が可能である。さらに、当該箇所の地下水流量の流出係数は標準的地盤と比較して、小さいことが判明した。
- 6) 上記の得られた知見に基づいて、断層破碎帯による他流域からの地下水供給に配慮した設計・維持管理のあり方についての提言・提案を示した。
- 7) 大規模盛土、流域が大きな盛土、流域外からの地下水供給が懸念される盛土に対する有効な排水対策として、地下排水溝やのり尻工を主体とすることとし、その際の留意事項として、地下排水溝や雨水排水工の設置方法や支管間隔などの設計手法についても具体的に示した。
- 8) 維持管理段階で盛土の健全性を確認する方法として、地下水位や流量をモニタリングし、点検によって初期の状態と変わりのないことを確認することを提案した。また、モニタリングを継続して行うことの重要性和、継続するための方策についても示した。

## 第5章の参考文献

- 1) 市川嘉輝, 山下彰司: 山地斜面における水分移動について, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp.694-695, 1996.
- 2) 谷誠, 野口正二, 志水俊夫: 熱帯林の環境形成の解明に関する研究(2)熱帯林の熱・水収支に関する研究, 環境省地球環境研究成果データベース, E-3(2), 1995.
- 3) 小葉竹重機: 簡易式による蒸発散量の推定, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, pp.309-317, 1989.
- 4) 小田切幸次, 小林浩, 輿水達司: 甲府盆地における蒸発散量推定法の検討, ISSN 0915-437X 山梨衛公研年報 第54号, pp.39-42, 2010.
- 5) ㈮日本道路協会: 道路土工要綱第2章 排水, pp.100-193, 2009.
- 6) 大津宏康, 前田良刀, 竹國一也, 米澤裕之, 高橋健二, 矢部満: タイと日本との自然斜面崩壊要因に関する比較検討, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.67, No.3, pp.387-398, 2011.
- 7) 田中信行, 太田琢磨, 牧原康隆: 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善, 測候時報, Vol.75, No.2, pp.35-69, 2008.
- 8) 気象庁: 土壌雨量指数, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>.
- 9) Yasuo Ishihara, Shigeyuki Kobatake: Runoff Model for Flood Forecasting, Bull. Disas. Prev. Inst., Vol.29, Part1. No.260, July, 1979
- 10) 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 斉藤清: 土壌雨量指数, 気象災害, 情報の広場, Vol.48, No.5, pp.349-346, 2001.
- 11) 西日本高速道路株式会社: 設計要領第一集土工建設編, pp.4, pp.31-38, 2016.
- 12) 山口卓位: 高盛土における設計と施工, 新名神宝塚 SA(仮称)における取組み (特集 工事最盛期を迎えた新名神高速道路の現在), 土木施工, Vol. 57, No.4, pp.35-38, 2016.

## 第6章 結論

### 6.1 研究のまとめ

本研究は、盛土構造物を対象とした防災、減災、縮災の観点から、土砂災害発生の主たる原因となる水に着目し、特に断層破砕帯による地下水の供給という新たな視点を加味した排水対策に関する設計手法の確立を目指すものである。

断層破砕帯が地下水を供給していると推定される高速道路2箇所での盛土での地下水流量と地表水流量の常時現地計測を行った。それらの計測によって、本研究の第一の目的に掲げた断層破砕帯が地下水を供給している事象を定量的に明らかにした。明らかにした根拠としては、①地下水流量は降水流量に対して極めて多い、②地下水流量は降雨に連動し先行する4週間降雨量の影響を強く受けているなど地下水は降雨と大きな時間差を持って排出されている、③地下水のECは高く特に大きな降雨時にはその傾向は顕著で長期間地下に賦存している地下水であることが分かった、④地下水流量の減衰率（流出係数）は極めて小さい、④水収支やタンクモデルとの対比により他流域から大量の地下水が供給されている、などを示した。

また、供給される地下水流量の定量的な推定方法として、盛土の地形的分水界流域のみならず、断層破砕帯が影響する隣接流域も対象流域に加えた地形地質的分水界である地下水分水界流域とすることが適切であるとの結論を導いた。

合わせて、排水対策工の効果検証を行った。排水対策としては、常時排水には地下排水溝が、そして高強度降雨時の即時的排水にはのり尻工（フトンカゴ）の設置が有効であることを、計測結果に基づいて定量的に示した。また、のり尻工を面的に配置することで、のり尻部の排水効果をより一層高めることができることも示した。

さらに、高速道路2箇所の盛土での設計事例や流量計測結果および施工中、施工後のモニタリング結果など本研究成果を踏まえて、地下水供給量に対応した具体的な排水対策工の設計手法と維持管理手法についても、具体的に示した。

本研究の結果について、各章ごとのまとめを以下に示す。

**第1章**では、研究に着手するにあたっての背景と必要性、盛土構造物の災害事例、研究の基本方針、本論文で扱う用語の定義についてまとめた。第1章での検討によって得られた結果を以下にまとめる。

高速道路盛土で過去に発生した災害事例から、災害の主たる原因は地山の滞水や排水設備の不備、のり尻に排水を阻害する構造物が存在することなどによるものが多く、地形的要因では片切片盛や切盛境など傾斜地盤上の盛土での災害が多い。このことは、盛土では水に起因する災害発生の多いことが伺え、排水対策の重要性を示唆している。

過去の災害事例などから盛土背後に断層破砕帯が位置するような場合にあっては、破砕帯が盛土内へ地下水を供給する可能性のあることが分かった。昨今頻発している土砂災害を撲滅していくためには、これまでの排水対策に加え、断層破砕帯による地下水供給という新たな視点に立った研究が必要となっている。ここでは、流域を越えて地下水を供給する断層を例示した。

上記のような背景を踏まえた事例調査や現地での地下水や地表水などの流量計測を行い、研究の目的を達成するための研究の進め方について提示した。

**第2章**では、本研究を進めるきっかけとなった断層破砕帯が地下水を供給する事例として、山陽自動車道岩国災害と新名神高速道路宝塚北SA盛土の2事例を提示した。その2事例について、供給される地下水に対しての対策検討の流れと対策工選定手法を示した。第2章での検討によって得られた知見を岩国災害復旧盛土と宝塚北SA盛土に分けて以下にまとめる。

#### (1) 岩国災害復旧盛土

災害が一度発生すると、原因究明と早期復旧、再発防止が求められる。災害原因の究明には、災害発生直後から崩壊箇所の入念な観察と調査が重要である。特に、崩壊面のスケッチや湧水状況の確認、建設時の情

報収集、地形地質や地盤物性値の把握、盛土構造物の中でも特に排水設備の調査を重点的に行うべきである。盛土の崩壊は水に起因することが多いため、崩壊箇所のみならず広範囲に湧水地点や水道などの水量調査を行うことが必要となる。災害原因の特定にあたっては、設計施工上に排水設備の不備、不具合がないかを確認すべきである。また、崩壊原因の推定を裏付けるためには解析などを通じての検証も有効である。

災害復旧の計画では、災害原因の全てを排除できる対策を計画し、その計画は解析などで豪雨時にも不安定化しないよう検証を行うべきである。また、早期復旧が求められることから、工事の稼働率が上がるような設計施工上の配慮・工夫が必要となる。

再発防止という観点では、今後同様の事象が発生することのないよう、被災した原因究明結果とともに、現場の点検方法などチェックポイントなどを周知することが重要となる。

## (2) 宝塚北 SA 盛土

過去に例のない新たな検討を行う際には、過去の類似事例を参考としながらも、当該箇所の特殊性を加味した検討とすべきである。ここでいう類似事例とは、岩国災害復旧盛土や急傾斜地での排水対策工などの過去の実施事例がそれにあたる。また、必要に応じて学識経験者などに意見を求めることも有効である。

ここでの検討の流れは、類似する事例の収集を行い、その事例を参考としつつ調査計画を立て、流域が広範囲に及ぶため広域の水文調査ならびに流量調査を行った。引き続き、調査結果に基づいた解析によって通常降雨時・豪雨時を想定した地下水分布を推定した。また解析においては、将来の排水施設に機能低下が起こったとしても、盛土の安定性を損なうことのないような対策工を試行錯誤で設計した。

施工段階においては、設計段階では予想し得なかった情報や条件の変更があり、臨機な対応をとることになる。また施工中には、盛土内の地下水位や流末総流量をモニタリングすることで、地下水が推定どおりの挙動を示しているのかチェックを行うとともに、管理段階での管理指標を得ることが重要で、またモニタリング時に推定と異なる事象が発生した場合には、その原因を究明した上で柔軟な対応が求められる。

**第3章**では、岩国災害復旧盛土において、地下水流量や地表水流量などを2年間計測し、排水対策工の効果および断層破碎帯からの地下水供給の事象を検証した結果をまとめた。過去に実盛土での地下水流量計測を行った事例は皆無であり、ここでは地下水の挙動など新たな知見が数多く得られた。第3章での検討によって得られた結果を以下にまとめる。

計測された地下水流量率は、先行する降雨量によって大きく変動し、その率は2年間の計測期間の結果から53~100%と極めて大きいことがわかった。また地下水流量は4週間に相当する先行降雨量との相関が強く、降雨と地下水は相当な時間差をもって排出されている事実を明らかにした。これらのことから、当該盛土では断層破碎帯を通じて他流域からの地下水供給が類推された。

過去にのり尻工の定量的な効果検証を示した事例はないが、本研究では、のり尻工は半日以内の高強度降雨を地下水として速やかに排出していることを示した。のり尻工を面的に配置することで、地表水を1時間以内という極めて速やかに排出する効果も明らかにした。

地下水 EC の継続的測定から、地下水流量によって EC は大きく変化し、他流域から供給される地下水は流量が増えると EC が高くなり、これは地下に長期間賦存していた地下水を供給していることの根拠を得た。このことから、地下水由来を調査するにあたっては、地下に長期間賦存していた地下水かどうかを判断する1つの指標として EC を継続調査することの有効性を示すことができた。地下排水溝の設計には、このような点を考慮すべきである。

**第4章**では、断層破碎帯上に大規模盛土を構築した宝塚北 SA 盛土において、地下水流量計測を行い、各排水施設の効果検証と今後の維持管理における指標をとりまとめた。第4章での検討によって得られた結果を以下にまとめる。

計測結果を示した2017年は極端に降雨量の少ない年であったが、地下水流量率は40%と大きな値が得られた。地下水流量と先行降雨量との関係では、2~4週間に相当する先行降雨量との相関が高かった。これらのことから、宝塚北 SA 盛土においても断層破碎帯を通じて広範囲な他流域からの地下水供給が想定される。

地下排水溝によって排出される流量は、雨水排水工や基盤排水層、のり尻工を含めた全地下水流量の85%を



占めており、地下排水溝の大きな排水効果が認められた。一方、雨水排水工とのり尻工から排出される流量は、全地下水流量の 8%程度とごくわずかであった。ただし、のり尻工流量は先行する 6 日間の降雨量との相関が強く、地下排水溝と比較して直近降雨に対する排水効果が認められた。また、のり尻工の配置方法は、岩国災害復旧盛土では面的に、宝塚北 SA 盛土では線的配置しており、この 2 箇所ののり尻工の排水状況比較から、面的配置することで表面水を排水する効果が加わり、より即時的な排水が可能となることが明らかとなった。

地下水流量の減衰は対数曲線で精度よく近似でき、宝塚 SA 北盛土から排出される地下水流量の減衰率は一般的な地盤のそれと比較して小さく、時間をかけて排出している事実が判明した。このことは、他流域の地下水を引き込んでいたさらなる根拠ともなった。

工事中の地下水位モニタリング結果から、豪雨時には水位上昇はあるものの管理基準値に達することはなく、降雨後には速やかに低下回復していることを確認した。また、開通後にはさらに大きな豪雨を受けたが、水位の上昇は工事中よりも小さく、排水対策工の効果を検証することができた。

断層破碎帯上に構築された大規模盛土の維持管理におけるモニタリング手法として、盛土内の地下水位と盛土の形状変化の把握を行うことで、建設直後の状態と変化のないことを継続して確認する提案を行った。

第 5 章では、第 3 章で述べた岩国災害復旧盛土と第 4 章で述べた宝塚北 SA 盛土の現地流量計測結果から得られた地下水流量は、降水流量に対して極めて多く、かつその流量は先行する 2~5 週間の降雨量に大きく影響を受けていることが明らかとなった。このように地下水流量は降水流量に対して多く、降雨と相当な時間差をもって長期間地下に賦存していた地下水が排出されているという事実などから、ここで対象としている 2 つの盛土箇所では断層破碎帯からの地下水供給があると結論付けた。その事実を受けて、地下水供給量の推定方法を 2 つ提示し、かつその推定方法により、他流域から供給される地下水流量の推定値を示した。合わせて、地下水流量の流出特性と流出量の予測式を提案した。さらに推定値に基づいた排水対策工の設計手法と維持管理段階でのモニタリング手法の提案についても行った。第 5 章での検討によって得られた結果を以下にまとめる。

水収支による推定では、岩国災害復旧盛土における他流域からの地下水供給量は、地形的分水界流域に対する地下水流量の 48~159%となった。同様に計測流量とタンクモデルから求められる地下水流量との対比による推定では、岩国災害復旧盛土で 102~251%、宝塚北 SA 盛土では 169%となった。

地下水流量の予測式として対数近似式を提案し、この近似式によって精度よく流量予測が可能となった。断層破碎帯による他流域から供給される地下水流量の推定には、地形地質的分水界流域の設定が妥当であり、地下水流量全体の推定には、地形的分水界流域だけでなく地形地質的分水界流域、すなわち地下水分水界としての流域設定を行う必要があるとした。

上記地下水流量を適切に排出する排水対策工の設計にあたっては、従来経験則に基づいた設計を行ってきた地下排水施設に対して、推定した地下水流量を十分排水可能な排水施設となるよう水収支解析や安定解析を通じた設計を行う必要がある。地下排水溝や雨水排水工は別系統かつ複数系統を原則とし、より効果的な排水とするには地下排水溝配置間隔の狭小化や大口径化や、のり尻工の面的配置が有効とした。

維持管理段階でのモニタリング手法については、定期的な目視点検を基本とし、大規模盛土や断層破碎帯が地下水を供給するような場合には、地下水位の監視を主として行うことが有効である。また、地下水位に異常が見られた場合には、地下水流量などを追加監視できる環境を整えておくことが必要である。いずれにしても、モニタリングによって初期の状態と変化のないことを確認すべきであり、変化が認められた際には原因を明らかにした上で、追加の排水対策を講じていくべきである。

モニタリングに際して最も重要な点は、継続してモニタリングを実施できるようマニュアルや体制などの環境を整備することにあることを明記した。

第 6 章は、本研究の総括であり、各章の成果をとりまとめるとともに、盛土の排水対策に関する今後の課題と展望などを記述している。

## 6.2 今後の課題と展望

### (1) 近年の土砂災害傾向

2008年から2017年の最近10年間に発生した土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害件数<sup>1)</sup>は、年間平均1,000件を超え、特に2016年は1,492件、2017年は1,514件と過去10年間で最も多い発生件数となっている。

また、2018年には平成30年7月豪雨によって西日本を中心として広い範囲で記録的な大雨となり、2,512件の土砂災害が発生した<sup>2)</sup>。72時間降雨量など、比較的長時間の降雨量が大きくなった地域が多く、気象庁アメダス観測所のうち最大72時間降雨量が最大値を更新した観測所は122地点となった。このように平成30年7月豪雨の特徴は、広い範囲に大量の雨が長時間にわたり降り続いたことにある。

人的被害に目を向けると、平成30年7月豪雨による死者行方不明者は、2018年10月9日現在で232人<sup>3)</sup>となっている。死者行方不明者が100人を超えた豪雨による事例は、1951年以降35回発生しているが、平成以降は死者行方不明者が100人を超える豪雨災害は発生しておらず、1982年7月豪雨(死者行方不明者345人)以来36年降りの被害規模となった。西日本の高速道路についても、この豪雨によって交通に支障となる大規模な盛土崩壊災害が2箇所<sup>4)</sup>で発生した。この災害を含めて個々の災害は過去に発生したものと同等の規模ではあるが、近年さまざまな研究が行われ、また土砂災害の発生する恐れがある土地の区域を明らかにし、警戒避難体制を整備する措置<sup>5)</sup>などの対策が進んでいるにもかかわらず、これほど広範囲にまた数多くの被害が発生したことは着目すべき点である。

このようなことから、研究などに基づく災害防止施設などのハード、居住地域制限や避難指示などソフトの両面で、より一層の対策を進めていくことが望まれる。

### (2) 今後の課題

これまで土砂災害に着目した実験や解析によって水収支などを研究した事例はあるものの、実盛土での現場計測を行った事例は皆無である。本研究は、2年間継続して実際の盛土構造物における地下水流量と地表水流量を常時現地計測し、得られた計測データに基づいたさまざまな分析を行った。ここでは過去に行われた実験や解析で示された結果と今回現地計測で得られた結果を検証した。本研究でも過去の研究成果と同様の結果が得られた部分と、定量的に示すことのできなかつた部分がある。現場では様々な条件が重なり合っているために、理論通りの結果とならなかつた部分があると思われる。この点は今後の研究課題ということになる。

本研究では、断層破碎帯が他流域から地下水を供給するという事象を問題提起し、これまであまり注目されることのなかつた視点からの検討を進めた。結果として、定量的にその事実を実証することができた。今後同様の地形地質条件下にある盛土箇所では、本研究で提案した盛土排水対策工設計手法に基づいた対策が取られることが必要であると考え。また、今後、災害の原因を究明する際には、断層破碎帯による地下水供給の可能性を追求し、災害復旧工法策定には本研究の成果が活用されていくべきであると思う。

本論文では、主に岩国災害復旧盛土での流量計測結果に基づいて、他流域から供給される地下水流量の推定手法と予測手法を提案した。この推定値はあくまでも岩国災害復旧盛土に限ったもので、これを他の箇所に適用するにあたっては、断層によって地下水を供給する形態が異なり、供給量も変わると考えられる。そのため、本論文で提案した手法によって個々個別に調査検討を行うことを強く薦める。ただし、本研究で示したような調査検討に基づいた地下水供給量を推定することが困難な場合には、本研究の成果である流域外地下水流量推定値として流域内地下水流量の2倍程度を見込むことが妥当であると考え。その根拠は、流域内地下水流量に対する流域外地下水流量の比率が水収支からの推定で48~159%、タンクモデルでの対比で102~251%であることから見込みの推定値を示した。この2倍には流量計測から得られた結果に余裕を持たせた安全側の数値である。これまで本研究のような分野での定説がない中で、他流域から供給される地下水流量は、当該流域の2倍程度を見込むべきとの規模感を示した意義は大きいと考える。

日本全国各地には、断層破碎帯や大小のリニアメントなどが数多く存在している。これら全ての断層破碎帯が他流域から地下水を過剰供給する訳ではない。断層破碎帯が地下水を供給する事象としては、宝塚北SA盛土箇所の十万辻断層のように難透水層が地下水を堰き止めてダムアップするものの他、岩国災害での透水性の

高い断層破碎帯自体が水道となって他流域の地下水を供給する事象がある。地下水を供給する断層であるか否かについては、入念な調査が必要となるが、本研究成果を広く活用するには、その可能性のあるなしについて見極めのできる判断指標が求められる。本研究の検討対象とはしていないが、考えられる手法としては、既存の文献、地形地質図により断層破碎帯の有無、走向、幅などを知り、次に航空レーザー測量などによる詳細な地形図で谷地形の方向、大きさを確認する。それらの調査の結果、断層破碎帯の存在が明らかとなれば、現地へ赴いて断層線上に沿って湧水箇所を確認し、複数年にわたって湧水や河川流量などの水に関する情報を把握すべきであろう。岩国災害復旧盛土に代表される断層が水道となるケースでは、地下水が供給される箇所では降雨がなくとも常に湧水があり、また豪雨時には多量の突発湧水のあることが特徴である。一方、宝塚北 SA 盛土に代表される断層が地下水を遮蔽するケースでは、断層に沿って断層の上流側に湧水箇所が配列されていることが特徴である。現地踏査ではそのような状況を見逃すことなく、注意深く入念な調査を行うべきである。

また、一度の現地踏査だけでは現地の状況を全て把握することが困難であり、地方自治体や近隣住民から過去の出水状況、被災状況に関する情報を聞き取ることも有効な手段である。この点は、今後の研究課題となる。

### (3) 今後の展望

災害が発生するたびに、新たな視点での検討が加えられ、災害発生箇所に対しては検討結果に基づいた対策がとられている。一方で、これまでがそうであったように同様の条件下にある他の箇所に対しても予防的に同様の対策をとるよう動きはあるものの、一斉に対策が展開していくことは少ないように感じる。そこには費用的制約の他、体制不足や関係機関との協議調整が進まないことが理由として挙げられる。今後は、技術的対応としての技術基準類の整備以外にも制度面の支援も合わせて検討を行い、対策が計画をもって実施へ移せる仕組みや法整備が求められる。

ハード対応だけでなくソフト対応として、維持管理段階でモニタリングを継続していくことの重要性を示した。しかしながら、昨今では担い手不足の中、技術者不足も深刻な課題となっている。構造物の重要性に応じたデジタル機器や無線の通信手段など、IOT を活用した効率的で効果的なモニタリング手法の導入が求められる。

気象情報は科学技術の進展と観測体制強化によって精度が向上してきており、気象予測情報を活用した防災対策は、有効な機能を発揮する手法として期待されている。降雨については、いつ、どこで、どの程度、すなわち降雨の発生する時間と場所と量に関わる予測精度の更なる向上に対する改善ニーズは極めて高い。気象庁の予測精度向上のための技術開発は、開発者シーズと防災に関わる実務者ニーズとの連携が重要となる。

本研究成果の基準化によって設計手法を定着化させ、また計画をもって対策が実施できる仕組みをあらたに構築することが、今後の豪雨時の土砂災害発生を抑えるための最善の方策であると考えられる。

## 第 6 章の参考文献

- 1) 国土交通省：土砂災害対策における最近の傾向 最近 10 年の土砂災害発生件数及び人的・家屋被害件数, 2018.3.22, ([www.milt.go.jp/river/sabo/jirei/h29dosha/H29doshasagai.pdf](http://www.milt.go.jp/river/sabo/jirei/h29dosha/H29doshasagai.pdf))
- 2) 牛山素行：平成 30(2018)年 7 月豪雨による人的被害についての調査（速報）, 2018/10/16 平成 30 年 7 月豪雨による水害・土砂災害からの避難に関する WG 資料, 2018.10.16
- 3) 内閣府：平成 30 年 7 月豪雨による被害状況等について、防災情報のページ, 平成 30 年 7 月豪雨非常対策本部会議, ([www.bousai.go.jp/updates/](http://www.bousai.go.jp/updates/)), 2018.10.9
- 4) 西日本高速道路㈱: NEXCO 西日本管内の高速道路の被災状況(8月3日 17時現在), ([corp.w-nexco.co.jp](http://corp.w-nexco.co.jp)), 2018.8.3
- 5) 国土交通省：土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律の一部を改正する法律, 2017.5.19 公布

## 研究の関連論文

### 1. 関連論文

#### (a) 査読のある雑誌等

(1)著者氏名：Murata, H, Takekuni, K. and Nakata, Y.

論文題目：Slope failure of embankment in Sanyo expressway due to passage of typhoon No.14 in 2005

学術雑誌名：Soils and Foundations

巻, 号, 頁：Vol.49, No.5, pp.797-806

発行年月：2009年10月発行

(本文との関連：本文第2章の岩国災害での事例)

(2)著者氏名：竹國一也, 秦二朗, 中田幸男

論文題目：盛土構造物における地下水流と地表流の現地計測および排水対策工の効果検証

学術雑誌名：土木学会論文集C(地圏工学)

巻, 号, 頁：Vol.74, No.3, pp.289-299

発行年月：2018年7月発行

(本文との関連：本文第3章での主体的内容, 本文第5章での主体的内容)

#### (b)その他

(1)著者氏名：竹國一也

論文題目：盛土崩壊の復旧と対策 ～山陽自動車道～

学術雑誌名：土木施工 山海堂

巻, 号, 頁：Vol.47, No.6, pp21-28

発行年月：2006年6月発行

(本文との関連：本文第2章の岩国災害での事例)

(2)著者氏名：村田秀一, 竹國一也, 中田幸男

論文題目：台風14号による山陽自動車道盛土法面崩壊を経験して

学術雑誌名：土と基礎

巻, 号, 頁：Vol.54, No.12, Ser.No.587, pp.8-9

発行年月：2006年12月発行

(本文との関連：本文第2章の岩国災害での事例)

(3)著者氏名：竹國一也, 矢島尚彦

論文題目：高速道路の災害復旧 山陽自動車道

学術雑誌名：基礎工

巻, 号, 頁：Vol.36, No.9, pp76-79

発行年月：2008年9月発行

(本文との関連：本文第2章の岩国災害での事例)

## 2. 参考論文

### (a) 査読のある雑誌等

- (1) 著者氏名：大津宏康，前田良刀，竹國一也，米澤裕之，高橋健二，矢部満  
論文題目：タイと日本との自然斜面崩壊要因に関する比較検討  
学術雑誌名：土木学会論文集 C (地圏工学)  
巻，号，頁：Vol.67, No.3, pp.387-398  
発行年月：2011年3月発行  
(本文との関連：本文第3章，本文第5章)

### (b) その他

- (1) 著者氏名：竹國一也，竹本将，秦二郎，中田幸男  
論文題目：山陽自動車道盛土の降雨に対する安定性評価  
学術雑誌名：土木学会第72回年次学術講演会講演概要集  
巻，号，頁：III-482, pp.963-964  
発行年月：2017年9月発行  
(本文との関連：本文第3章)

- (2) 著者氏名：竹國一也，山口卓位，古賀泰輔  
論文題目：高速道路大規模盛土における地下水流量計測  
学術雑誌名：土木学会第73回年次学術講演会講演概要集  
巻，号，頁：III-236, pp.471-472  
発行年月：2018年8月発行  
(本文との関連：本文第4章)