

# フィルダム浸透量を定量的に評価するための 貯水位と降雨の影響評価

石黒 順司<sup>1</sup>・川地 悟<sup>2</sup>・曾田 英揮<sup>2</sup>・太田垣 晃一郎<sup>3</sup>

1. 国土交通省 水管理 国土保全局（〒100-8918東京都千代田区霞が関2-1-3中央合同庁舎第3号館）
2. （独）水資源機構 総合技術センター（〒338-0812埼玉県さいたま市桜区大字神田936番地）
3. （独）水資源機構 利根導水総合事業所（〒361-0004埼玉県行田市大字須加字船川4369番地）

フィルダムの安全管理において浸透量の計測は最も重要な計測項目の一つであり、常時監視が望まれている。これまでの浸透量に関する評価は時間経過と共に浸透量が低下していくこと、ある水位以上で浸透量が急増しないことなど定性的な評価の手法に留まっていた。本報では、今後の常時監視に資することを目的として、過去の降雨および貯水位の変化に伴う浸透量の変化を整理分析し「降雨の影響が無い場合の貯水位と浸透量の関係」を求め、降雨の影響の無い状態での浸透量の基準を作成した。加えて降雨時の浸透量データに基づき「降雨が浸透量に与える影響」を評価した。これらの検討の結果は実ダムにおける常時監視に採用されている。

キーワード：フィルダム、浸透量、常時監視、管理基準、降雨の影響

## 1. はじめに

近年、高度成長期に建設された構造物の老朽化が話題になり、社会的インフラ設備の補強、改築の実施や検討が行われている。これら施設を適切に維持管理し、適切な補強や改築を実施するには、構造物の現況を把握しておくことが重要である。水資源機構においては竣工から50年以上が経過しているダムもあることから、総合技術センターでは、これまで機構が所管する8基のロックフィルダムの堤体計測データの蓄積を実施することにより、横断的な安全性の確認や堤体挙動の評価を行ってきた。<sup>1) 2) 3)</sup>

これら堤体計測のうち浸透量の計測は河川砂防技術基準に定められている必須項目であり、フィルダムの安全管理において最も重要な計測項目の一つである。しかしながら浸透量は、地山からの「湧水」も計測している可能性があること、測定施設位置・構造により計測される浸透量が異なることなどから、各ダムにより浸透量の大きさや水位との関係が異なる。

加えて浸透量は降雨の影響をも受けやすく、降雨前の浸透量に戻るまでに多くの日数を要することから、常時監視を行い難いと言う課題がある。

以上から本検討においては、試験湛水以後相当年数経過しているフィルダムの浸透量の計測値を整理分析する

ことで、①降雨の影響の無いときの浸透量を評価する手法、②降雨の影響があるときに浸透量から降雨の影響を除去する手法、の2つの手法を検討し、フィルダム浸透量の常時監視に使用できる手法の開発を試みた。

## 2. 降雨の影響の無いときの浸透量の評価手法

### (1) 概要

フィルダムの浸透量はダムサイト下流に集水堰を設置し計測している場合が多い。このため、浸透量は貯水池からの浸透水のほか、降雨による影響、地山からの湧水、測定設備の位置等による影響などにより、計測値にかなりの差が生じることが考えられる。本検討では、浸透量を①貯水池からの浸透量、②降雨による影響、③その他の影響（地山からの湧水、測定施設位置などによる基底量）に大きく分類し、それらの影響について計測値の整理分析を行うことで評価手法を提案するものである。

### (2) 貯水池からの浸透量

一般的には、貯水池からの浸透量はコア内や基礎岩盤内においてDarcyの法則に従って浸透する<sup>4) 5)</sup>と考えられているため、貯水位を変数とする関数となる。このことから、貯水位～浸透量の相関図により整理・分析する。

### (3) 降雨による影響

降雨による影響は、ダムサイトおよびその周辺に降った降雨により、浸透量が増えるものであるため、降雨の後十分な時間が経過すれば無視出来るほど小さくなると考えることが出来る。本検討においては、当該ダムにおいて「降雨の影響が小さいと考えられる状況」とはどのような状況であるかについて浸透量の計測値を整理・分析した。

計測値の整理は、試験湛水期および試験湛水終了後を5年間隔で各期間に分類した上で、期間毎に雨量を「当日雨量」、「2日雨量」～「10日雨量」と「0mm」、「10mm」、「30mm」、「50mm」で整理した。（表-1）

分析にあたっては、常時の監視を考慮するとともに、サンプル比率が小さい場合には代表性の問題が生じると考え、サンプルが50%（=条件に当てはまる計測値数/全計測値数）を下回らないこと、そのうちで、貯水位～浸透量の相関図において指数関数型の近似式を当てはめて決定係数の最も大きくなるものを選定することとした。

その結果「7日雨量50mm以下」となる状況が、試験湛水期を除く各期間において決定係数が最も大きかったため、上記状況を降雨による影響が小さい状況として選定した。

### (4) その他の影響

「その他の影響」を整理・分析するために、前節にて「降雨の影響が小さいと考えられる状況」として整理した「7日雨量50mm以下」の状況における貯水位～浸透量相関図（図-1）を作成し確認した結果、かなりのバラツキがあることが確認された。

なお、バラツキの確認は、図中に分布する各点より「傾き」および「幅」を設定し、対象降雨別の「幅」変化の程度により、その他（地山からの浸透量、測定施設位置などの影響）の影響による浸透量のバラツキについて評価するものとする。なお、「傾き」および「幅」については以下により設定する。

- ①「傾き」は各年の貯水位～浸透量関係の傾きを直線近似の最小二乗法で求めた。
- ②「幅」は先に求めた「傾き」を持ち、対象データの重心（貯水位・浸透量の単純全平均）を通過する直線を定め、全ての対象データのうち、95%が入る範囲を定めた。

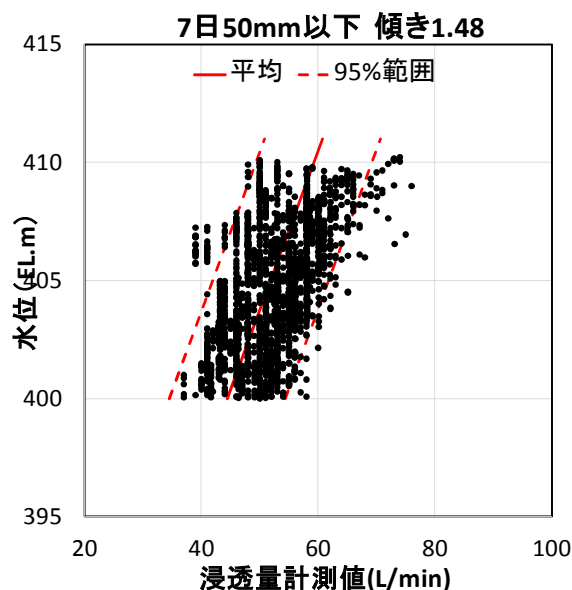


図-1 貯水位～浸透量の相関図（7日雨量 50mm 以下）

表-1 各期間での決定係数の比較

| 試験湛水 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm | 0.84160 | 0.84252 | 0.83226 | 0.82326 | 0.78715 | 0.68343 |
| 30mm | 0.83058 | 0.81709 | 0.79146 | 0.72357 | 0.44768 | 0.13774 |
| 10mm | 0.83533 | 0.82612 | 0.79890 | 0.68239 | 0.14815 | 0.10039 |
| 0mm  | 0.81109 | 0.79312 | 0.75670 | 0.56507 | 0.10792 | 0.24727 |

| 1977-1982 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm      | 0.63521 | 0.64596 | 0.65162 | 0.67150 | 0.67945 | 0.66908 |
| 30mm      | 0.63286 | 0.64563 | 0.65017 | 0.67299 | 0.66290 | 0.61850 |
| 10mm      | 0.64028 | 0.64786 | 0.64445 | 0.64467 | 0.64245 | 0.54622 |
| 0mm       | 0.65244 | 0.65673 | 0.62342 | 0.52146 | 0.60853 | 0.73363 |

| 1982-1987 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm      | 0.61145 | 0.66034 | 0.68504 | 0.70545 | 0.71031 | 0.74573 |
| 30mm      | 0.62156 | 0.66421 | 0.69030 | 0.71120 | 0.72293 | 0.76458 |
| 10mm      | 0.62803 | 0.67942 | 0.69488 | 0.69007 | 0.69595 | 0.65403 |
| 0mm       | 0.63613 | 0.66831 | 0.67159 | 0.65150 | 0.64096 | 0.48800 |

| 1987-1992 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm      | 0.50715 | 0.56143 | 0.60317 | 0.64390 | 0.66365 | 0.66727 |
| 30mm      | 0.50560 | 0.55755 | 0.59471 | 0.61592 | 0.60415 | 0.58550 |
| 10mm      | 0.50256 | 0.56292 | 0.59107 | 0.58145 | 0.57099 | 0.53431 |
| 0mm       | 0.50686 | 0.56971 | 0.59897 | 0.65087 | 0.62009 | 0.66683 |

| 1992-1997 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm      | 0.47870 | 0.50827 | 0.53023 | 0.56176 | 0.57485 | 0.58648 |
| 30mm      | 0.47050 | 0.50220 | 0.53275 | 0.57472 | 0.59450 | 0.64105 |
| 10mm      | 0.47042 | 0.51113 | 0.55218 | 0.59815 | 0.62425 | 0.69105 |
| 0mm       | 0.48805 | 0.52523 | 0.57301 | 0.62326 | 0.66474 | 0.77352 |

| 1997-2002 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm      | 0.45833 | 0.62329 | 0.65818 | 0.69719 | 0.71307 | 0.72179 |
| 30mm      | 0.45852 | 0.62282 | 0.66091 | 0.71077 | 0.72886 | 0.71554 |
| 10mm      | 0.43608 | 0.62907 | 0.67394 | 0.66276 | 0.65154 | 0.58836 |
| 0mm       | 0.60660 | 0.65732 | 0.67752 | 0.62434 | 0.40780 | 0.22044 |

| 2002-2007 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm      | 0.44120 | 0.49751 | 0.52374 | 0.54803 | 0.55052 | 0.53853 |
| 30mm      | 0.46477 | 0.50474 | 0.52346 | 0.53282 | 0.53553 | 0.54346 |
| 10mm      | 0.46965 | 0.51199 | 0.51199 | 0.52078 | 0.47872 | 0.39844 |
| 0mm       | 0.48594 | 0.49949 | 0.48433 | 0.48421 | 0.49061 | 0.60008 |

| 2007-2012 | 当日雨量    | 2日雨量    | 3日雨量    | 5日雨量    | 7日雨量    | 10日雨量   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 50mm      | 0.40200 | 0.45845 | 0.49472 | 0.52658 | 0.52827 | 0.53327 |
| 30mm      | 0.40690 | 0.47956 | 0.51463 | 0.53646 | 0.53673 | 0.53367 |
| 10mm      | 0.43645 | 0.47399 | 0.50650 | 0.50708 | 0.47773 | 0.47086 |
| 0mm       | 0.43121 | 0.46239 | 0.48139 | 0.46386 | 0.48777 | 0.66133 |

サンプル率50%に満たない雨量の組み合わせ  
各期間での決定係数の上位3位の組み合わせ

バラツキの原因が「降雨による影響」によるものかを確認するため、「7日雨量10mm以下」、「7日雨量20mm以下」、「7日雨量40mm以下」についても同様に貯水位～浸透量相関図を作成（図-2～4）し確認したが、表-2で示すとおり、各7日雨量で同様な幅を有していることが確認されるため、バラツキの原因は「降雨による影響」でなく、「その他の影響」とであると判断した。

また、各7日雨量におけるバラツキの傾向に一定のパターンが無いことも確認されるため、その他の影響の除去は困難であると判断した。

表-2 対象雨量毎の傾きと幅

| 7日雨量<br>(mm) | 傾き<br>(L/min/m) | 幅<br>(L/min) |
|--------------|-----------------|--------------|
| 10           | 1.55            | 20.09        |
| 20           | 1.47            | 19.19        |
| 40           | 1.45            | 19.48        |
| 50           | 1.48            | 19.94        |

#### (5) 評価項目の設定

(2)～(4)の検討結果から、対象とする評価項目は、貯水位と降雨量とし、その他の影響については、幅を持った基準値として設定することにした。

以上の検討結果より、7日降雨量50mm以下における貯水位～浸透量の基準を定めた。基準を表-3に、過去の挙動と基準値の関係を図-5に示す。なお図-5の貯水位～浸透量の関係が上位標高部分では相対的に「傾き」が大きくなっているため、基準は「傾き」および「幅」を標高毎に区切り、各標高毎に設定した。

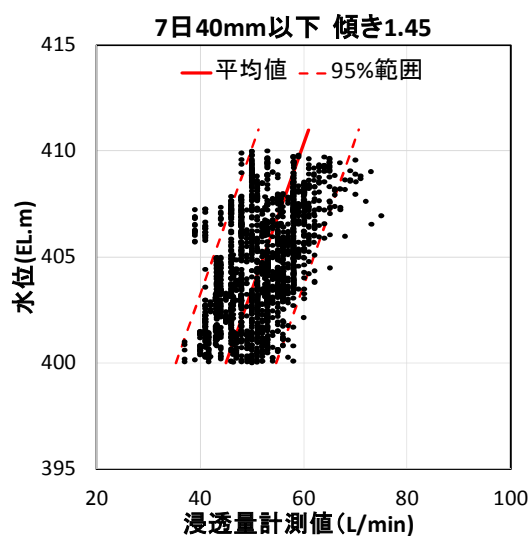


図-2 貯水位～浸透量の相関図（7日雨量40mm以下）

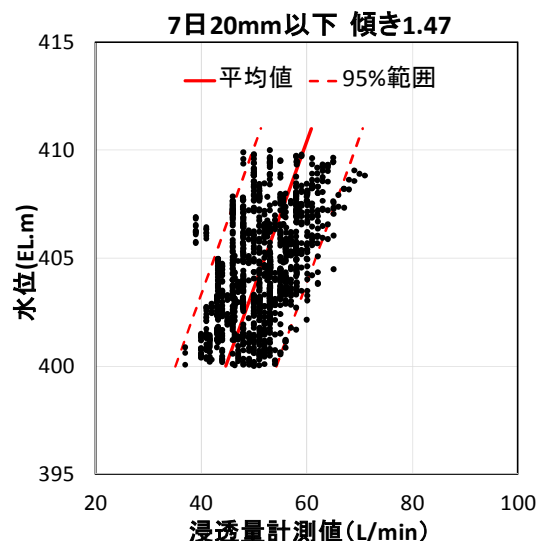


図-3 貯水位～浸透量の相関図（7日雨量20mm以下）

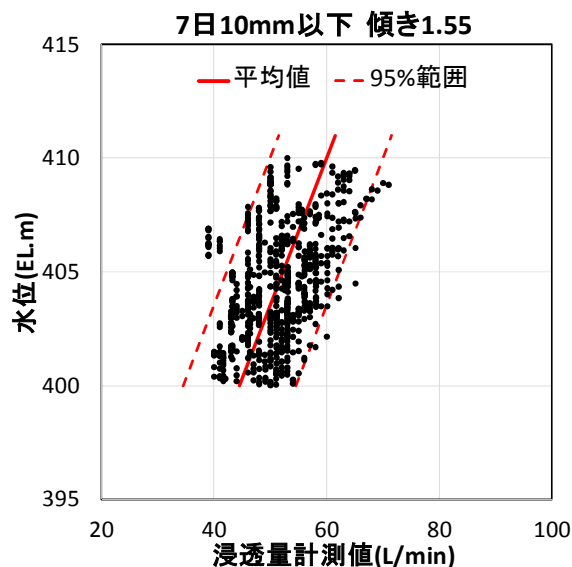


図-4 貯水位～浸透量の相関図（7日雨量10mm以下）

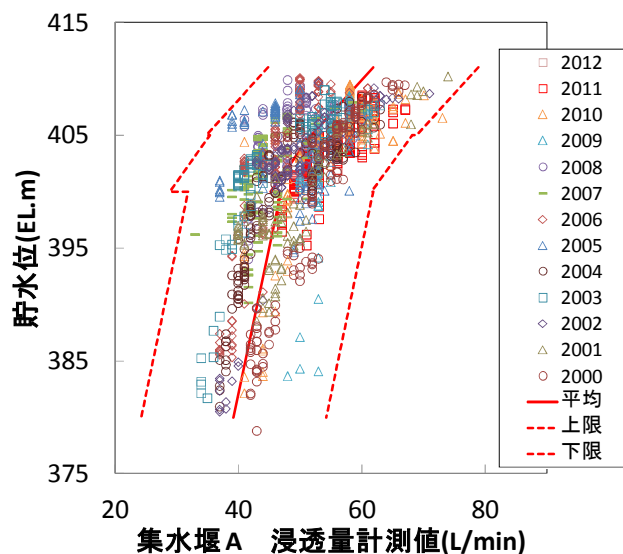


図-5 モデルダムにおける基準値と過去の関係

表-3 モデルダムにおける基準値

| 貯水位<br>(EL.m) | 傾き<br>(L/min/m) | 平均<br>(L/min) | 上限<br>(L/min) | 下限<br>(L/min) | 幅<br>(L/min) |
|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 411           | 1.66            | 61.85         | 78.91         | 44.80         | 34.11        |
| 405           |                 | 51.88         | 68.94         | 34.83         | 34.11        |
| 405           | 1.31            | 51.81         | 68.18         | 35.44         | 32.74        |
| 400           |                 | 45.24         | 61.61         | 28.87         | 32.74        |
| 400           | 0.38            | 46.95         | 61.95         | 31.95         | 30.00        |
| 380           |                 | 39.28         | 54.28         | 24.28         | 30.00        |

### 3. 浸透量から降雨の影響を除去する手法

#### (1) 概要

フィルダムの浸透量は降雨による影響が避けられないものとなっている。降雨の影響を少なくするための浸透量計測装置の配置<sup>6)</sup>や、重回帰分析により影響を除去する方法<sup>7)</sup>について幾つか提案があるものの、完全に降雨の影響を排除することとはなっていない。

本検討では、モデルダムの計測データのうち、2006年から2014年までの26出水に対し、浸透量や降雨を時間データで分析し、リアルタイムの降雨の浸透量への影響予測を試みた。その手法として、実効雨量<sup>8)</sup>、降雨が発生してから浸透量に影響するまでの遅延時間、および浸透量に影響しない無効な降雨を考慮し、浸透量の実測に基づく経験的な予測手法を提案するものである。<sup>9)</sup>

#### (2) 各定数を定めるための手法

当該ダムにおける降雨による浸透量の影響状況として、①50 mm程度以下の降雨では浸透量への影響が発生しないこと、②降雨の影響により浸透量が増加し、ピークが発生してから元の浸透量に戻るまでの期間に分類されること、③降雨のピークと浸透量のピークは必ずしも一致せず、堤体や周辺地山での貯留による遅延が発生することが確認された。本検討では、これらの傾向を考慮し、過去の浸透量と降雨の関係から各期間に無効雨量、浸透量に影響する降雨、遅延時間などの式や定数をパラメータスタディにより定めていく手法をとった。

#### (3) 検討結果

降雨の影響が時間経過により逓減していくモデルとして、浸透量の変化が詳細に捉えられるよう毎正時記録により検討を実施した。図-6に示す実測データより、降雨終了後の浸透量への影響を指数関数で示すことが出来ると考え、地すべり観測で用いられている実効雨量の考え方を導入した。実効雨量の式は式(1)のとおりである。

$$Re = \sum_{n=1}^{\infty} a^n \cdot r_n \quad (1)$$

ここに、 $Re$ は実効雨量、 $a$ は定数、 $r_n$ は $n$ 時間前の降雨である。

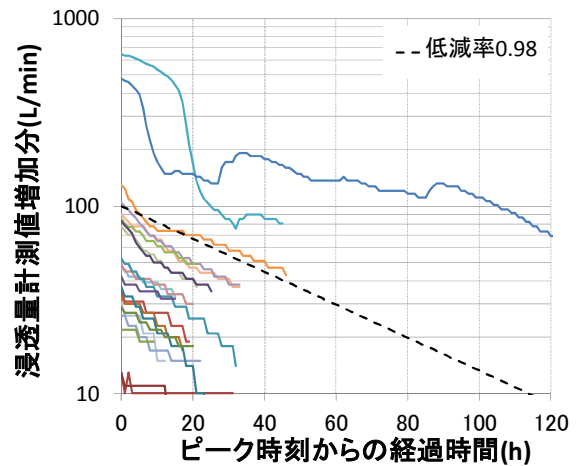


図-6 降雨による影響量の逓減状況

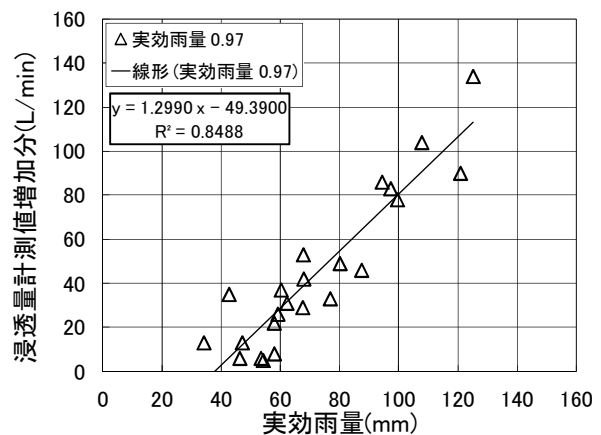


図-7 浸透量の増加分と実効雨量の相関

降雨もピークを伴うことが多く、浸透量と降雨のピークを合わせることは容易であるが、逓減量については、周辺地山の地下水状況などにも影響されると考えられる。そこで、図-6に示すように、浸透量の既存データにより浸透量のピークからの逓減状況を確認したところ、一部の大きな降雨を除き、概ね同様の傾きを示していることが確認できる。これより、実効雨量の低減値を示す定数 $a$ は実測の浸透量と概ね一致する傾き(0.95～0.99)を設定した。また、浸透量の増加と実効雨量の関係は、線形の関係よりも、二次関数の方がより相関が高いことから、式(2)を用いて浸透量の増加分を計算することとした。

$$\Delta Q = b \cdot Re^2 + c \quad (2)$$

ここで、 $\Delta Q$ は浸透量の増加量、 $b$ 、 $c$ は定数とする。

つぎに無効雨量については図-7に示すとおり、浸透量の増加と実効雨量の関係を見ると浸透量の増加に繋がらない降雨があることが確認された。無効雨量・遅延時間および式に用いる定数は、実際の浸透量との相関が最も高いものを使用した。

各パラメーターの検討において、無効雨量、実効雨量定数  $a$ 、および遅延時間について、他のパラメーターを固定し、求めたいパラメーターを変化させ、予測式の浸透量が実測値と最も決定係数が高いものを採用した。無効雨量を 0～50 mm とした場合、遅延時間を 0～4 時間とした場合、実効雨量の定数  $a$  を 0.95～0.99 とした場合でそれぞれ比較した。無効雨量の検討結果を図-8 に、遅延時間を図-9 に、実効雨量定数  $a$  を図-10 にそれぞれ示す。これらの検討の結果から、実測の浸透量との相関において最も相関性の高かった ( $R^2=0.8985$ ) 定数を採用した。この時の定数はそれぞれ  $a:0.98$ ,  $b:0.0068$ ,  $c:1.9$ , 無効雨量:35mm, 遅延時間:3 時間とし、当該ダムにおける降雨による浸透量増加量の予測式とした。

#### (4) 検討結果の再現性

図-11 に今回予測に用いた降雨毎の浸透量増加分の最大値と、予測式による増加量の最大値の比較を示す。実測の浸透量が極端に小さいまたは大きい例を除き、概ね一致する結果を得ることができた。また、図-12 には実測値と予測式による降雨の浸透量の経時変化を示す。雨によって浸透量が増加し、ピークから通減するまでの一連の状況が概ね再現されている。

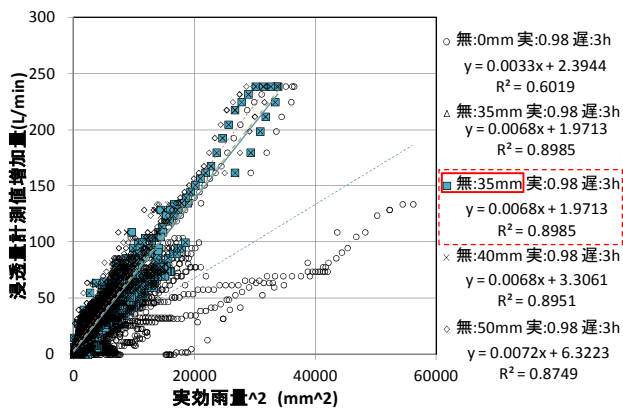


図-8 無効雨量に関する検討結果

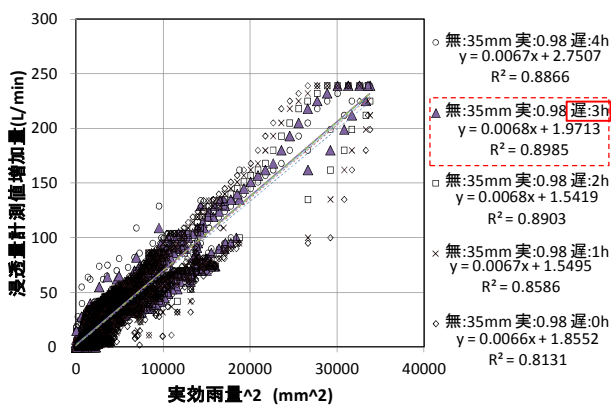


図-9 遅延時間に関する検討結果

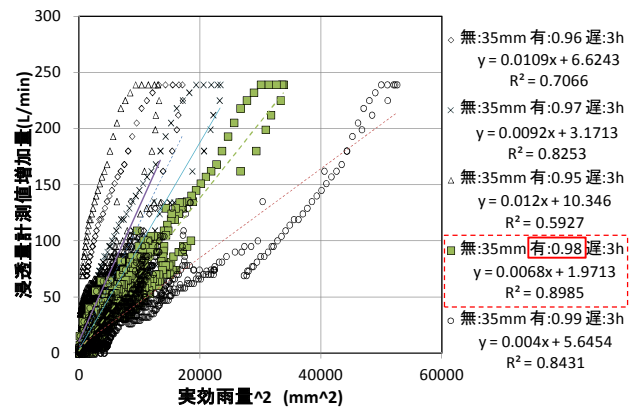


図-10 実効雨量に関する検討結果

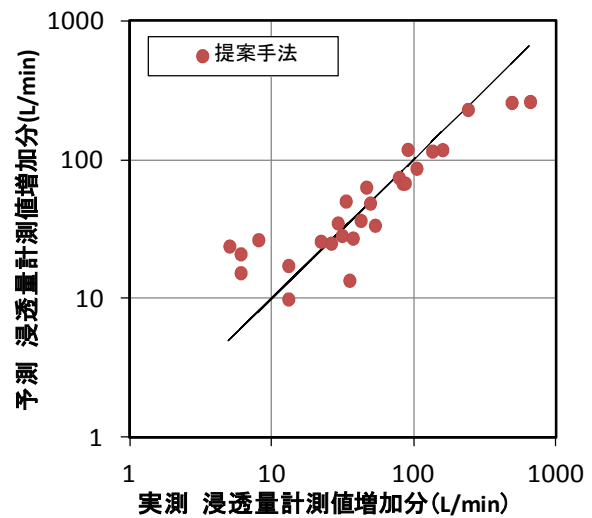


図-11 降雨による影響の実測値と予測値の相関

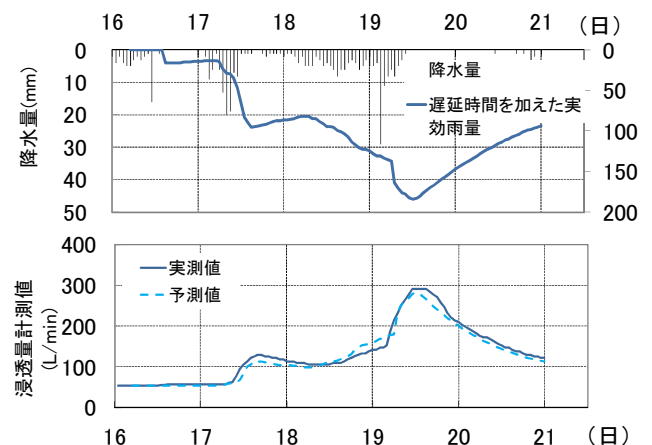


図-12 浸透量実測値と予測値の経時変化

## 4. モデルダムにおける適用結果

### (1) モデルダムにおける評価

モデルダムにおいて、近年浸透量がある時期を境に急増し、それ以後は増加した浸透量で安定した挙動を示しているため、評価する際には、急増前の計測値の整理分析を行った上で、急増前後の浸透量の平均値の差分を上乗せし、浸透量の常時監視の基準値として採用している（図-13）。

### (2) 適用結果

モデルダムにおいては、フィルダムにおいて最も警戒すべき現象の一つである浸透量の急増という緊急事態において、増加後の浸透量の安定性について基準値を設けて常時監視することが可能となった。この常時監視に基づき防災態勢の判断を行うこととして現在では通常体制に移行し効率的・効果的なダムの安全管理を実施している。

## 5. おわりに

本検討では、①降雨の影響の無いときの浸透量を評価する手法、②降雨の影響があるときに浸透量から降雨の影響を除去する手法、の2つの手法の開発を行い、モデルダムにおいて、今回開発した評価手法により常時監視が可能であることを確認した。

今後は、ロックフィルダムにおける浸透量は、地形、地質、盛立材料、測定施設位置・構造により、異なってくると考えられるため、今回提案した評価手法について、他のロックフィルダムにおける適用性を確認していきたいと考えている。それら試みにより浸透量に関する常時監視、ひいてはダム管理の高度化・効率化に資することが出来れば幸いである。

**謝辞：**本論文の作成に当たり、京都大学 岸田准教授、国総研 佐々木河川構造物管理研究官、佐藤主任研究官をはじめとする「岩屋ダム浸透量に関する調査検討会」の各委員にご指導賜りました。末尾ながら感謝します。

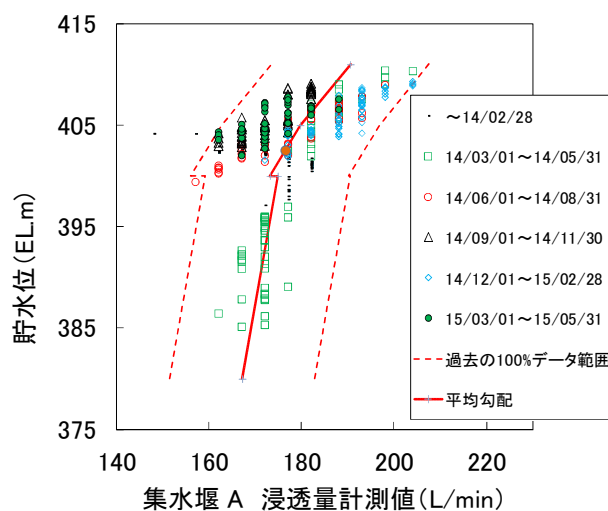


図-13 モデルダムにおける浸透量の常時監視状況

- 1) 曾田英揮, 太田垣晃一郎, 佐藤信光: ロックフィルダム計測結果による安全性評価手法, 2012, 水資源機構 技術研究発表会
- 2) 太田垣晃一郎, 曾田英揮, 佐藤信光: ロックフィルダムにおける堤体挙動の安全性評価手法に関する検討, 2013, 水資源機構 技術研究発表会
- 3) 曾田英揮, 太田垣晃一郎, 佐藤信光: GPS 計測を用いたロックフィルダムの計測精度向上の取り組み, 2014, 水資源機構 技術研究発表会
- 4) 坂本忠彦: 中央コア型ロックフィルダムの漏水量観測値の一解析法, ダム工学, Vol.8, No.4, 1998, pp.244-259
- 5) 飯田隆一: ダムの基礎グラウチング, 2002, (財)ダム技術センター
- 6) 例えば ロックフィルダムの漏水計測装置の計画の考え方及び漏水量計測の留意点(その2), 1991, 建設省土木研究所フィルダム研究室, ダム技術, No.54, pp.124-127
- 7) 荒砥沢ダム工事誌, 1999, 東北地方農政局, pp.556-557
- 8) 地すべり観測便覧, 1996, 社団法人地すべり対策技術協会, pp.310
- 9) 太田垣晃一郎, 曾田英揮, 岸田 潔: 降雨がフィルダム浸透量に与える影響の経験的予測手法, 2015, 地盤工学会研究発表会