

動態観測に基づく地下水排除工の計画手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 15～平 18

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：藤澤和範、小原嬢子

【要旨】

現在の地すべり対策計画は、目標とする安全率を設定して対策工の規模を決定しているために、施工の進捗による地すべり滑動の沈静化を必ずしも対策計画に反映できていない。そのため、本調査は、地下水排除工の計画目標の設定手法の検討を行うとともに、工事中の動態観測結果から地下水排除工の効果を評価する指標について検討するものである。

その結果、地下水排除工の計画目標の設定手法の検討では、滑落した地すべりと滑落しない地すべりの日雨量の確率年に差は見られなかった。また、滑落した限界歪量も誤差が大きく、計画目標として滑落限界歪量を用いることは困難であることが分かった。動態観測による地下水排除工の効果の評価は、地すべりの挙動のしきいとなる雨量指標値によることができ、対策工計画の達成状況は指標の上昇量として評価することができることが分かった。

キーワード：地すべり、実効雨量、地下水、地下水排除工、動態観測

1. はじめに

現在の地すべり対策計画において対策工の規模は、事前の調査結果に基づき目標とする安全率により決定されている。このため、施工中の動態観測結果から対策工の効果が計画以上に発揮されていると考えられても、地すべり現象に不明な点がある場合、その効果を必ずしも対策計画に反映することができず、その結果、全ての事例で対策工の計画が十分見直されているとは言いがたい。

これまで地下水排除工の効果評価に関しては、水収支の検討¹⁾などさまざまな研究がなされてきた。しかし実務上は、地下水排除工による地下水排除効果を安定計算に織り込むための地下水位の計画低下高には、実態把握^{2)、3)}を通じて得られた経験的な値が用いられてきた。計画水位に到達させるための地下水排除工の数量が大きくなるものとなる大規模な地すべりでは対策工の施工期間が長くなる。このため、施工済の施設の効果を反映することなど、計画手法の一層の合理化が望ましい。また、動態観測結果に基づき地下水排除工の効果を評価し、地下水排除工の計画規模を逐次修正することが重要である。

本調査では、動態観測に基づく地下水排除工の計画手法を提案するため、地下水排除工の計画目標の設定手法の検討を行うとともに、動態観測結果から地下水排除工効果評価指標を検討するものである。

地下水排除工計画目標の検討では、地すべりが滑落する限界の地盤の歪量（以下、滑落限界歪量と記す）を求め、ある確率雨量に対して生じる歪を滑落限界歪量以下にするため、限界歪量の設定手法に関して検討をした。

地下水排除工効果評価指標の検討では、動態観測結果をもとに、主に動態観測結果を降雨の確率現象として取り扱い、合理的に地下水排除工の効果を表す指標について検討をした。

2. 地下水排除工の計画目標の検討

2. 1 調査方法

ある確率雨量に対して地すべりが安全を保つように地下水排除工計画目標を設定するため、地すべり災害が発生した 10 地区（表-1）において資料の整理・解析を行い、滑落限界歪量、確率日雨量と滑落の関係について検討した。解析に用いたデータは、降水量、地盤変位量である。

まず、滑落限界歪量の検討では、滑落した 3 事例については、2 次クリープ、3 次クリープのときの歪量を求め、森脇⁴⁾による限界歪量との整合性を検討した。また、斉藤⁵⁾、福園⁶⁾により提案されている既往崩壊予測式の適合性について検討した。

また、確率日雨量と滑落の関係については、各地区近隣の降水量を用いて解析期間中の日雨量の大き

かったものについて確率日雨量を計算し、滑落の有無と確率日降雨量について整理した。

2.2 検討結果

滑落した事例の歪量の検討結果を表-2に示す。森脇らによる方法⁴⁾では崩壊の規模を把握するときの誤差が限界歪みに影響し、指標となる歪み量より小さい値で崩落が発生している事例がみとめられた。また滑落時刻の予測⁵⁾では地すべりが加速中という前提があるが、実際には一時減速する場合があります。滑落時刻の予測適用結果に大きな誤差が生じることがわかった。このため、滑落限界歪量の算出は精度的に課題があると言える。

また、表-3は、日雨量の確率年と滑落の有無を示したものである。今回の事例では、日雨量の確率年の大小に関係なく滑落が発生していることがわかる。

これらの結果から、ある確率雨量に対して滑落限界歪量を生じないように計画目標を定めることは困難であることがわかった。

表-1 歪量検討地区の地すべり諸元

| 地区名 | 所在 | 地すべりブロック諸元 | | | | |
|-----|-------------|--------------|-------------|-------|-------|------|
| | | 地質 | 型 | 幅 | 奥行き | 層厚 |
| 地附山 | 長野県長野市 | — | — | 500m | 290 m | 50 m |
| 下的場 | 鹿児島県阿久根市 | 古第三紀層 | 流れ盤 | 40 | 30 | 8 |
| 山館 | 岩手県江刺市 | 新第三紀層 | 第三紀 | 125 | 270 | 25 |
| 椿山 | 高知県池川町椿山 | — | 強風化 | 240 | 450 | 30 |
| 地原 | 石川県鳳至郡門前町 | 新第三紀層 | 第三紀 | 116.5 | 40 | 5 |
| 伯母谷 | 奈良県吉野郡川上村 | 古第三紀層(四万十層群) | 流れ盤 | 40 | 50 | 18 |
| 一之貝 | 新潟県栃尾市 | 新第三紀層 | 第三紀 単斜構造 | 100 | 140 | 12 |
| 細入 | 新潟県東頸城郡蒲川原村 | 新第三紀層 | 第三紀 単斜構造 | 100 | 170 | 12 |
| 出雲崎 | 新潟県三島郡出雲崎町 | 新第三紀層 | 第三紀 背斜構造 | 30 | 40 | 4 |
| 柏尾 | 長野県東筑摩郡明科町 | 新第三紀層 | 第三紀 強風化 | 100 | 120 | 33 |

表-2 滑落予測法の適用結果比較

| 出典 | 森脇 (2001) | 斉藤 (1987) | 福園 (1985) |
|------------------|---|--|--|
| 名称 | 限界歪法 | セミログ法 | 表面移動速度逆数法 |
| 解析手法 | 滑落時の限界歪が地すべりによらず一定であることを利用。 滑落時刻の予測ではなく、危険度評価に利用 | 滑落時刻を想定したlog(tr-t) : 累積変動量グラフが直線になる時期を試行決定して滑落時刻を予測。 3次クリープ以降が対象 | 移動速度の逆数(1/v)の経時変化グラフで滑落時刻を1/v=0の時の時刻として予測 |
| 適用制限 | 特に無し。 ただし、実際には移動中の地すべりが対象となる | 移動が加速中であること。 2次クリープ、3次クリープの識別ができること | 移動が加速中であること |
| 各地区の滑落状況への予測適用結果 | | | |
| 地附山地区 | 実際の滑落状況とよく一致している | ・実際より若干(1日以内)早め ・1日前でも予測は微妙である | ・実際より3日遅れ ・10日前から予測可能 |
| 山館地区 | 指標より小さい値で滑落発生 | ・実際より若干(1日以内)遅れ ・2日前でも予測は難しい | ・実際とほぼ一致 ・10日前から予測可能 |
| 伯母谷地区 | 指標と比較的よくあっている | 実際より若干(1日以内)遅れ | 実際とほぼ一致 |
| 適用時に問題となった事項 | ・崩壊範囲がわからないと歪量が求まらない ・歪量蓄積開始時点の取り方が評価に影響する ・指標となる歪量より一桁小さい値でも滑落が発生する例がある。 | ・直線判定が微妙である 特に、 <u>滑落以前の判断は難しい</u> ・滑落後でない直線が確定できない ・滑落前ほどグラフが短いため、長期の予測は困難である ・3次クリープの取り方(想定時刻)が予測に影響する可能性がある ・結果的には1日以内の幅で説明できる | ・グラフが揺らぐことがあり、直線外挿に幅がある。 ただし、包絡線を利用すればある程度解決できる。 ・比較的实际に近い予測が得られるが、やや遅れることもある。 |
| 手法の利点、欠点 | ・定速移動でも適用可 ・危険度評価であり事前対策に利用可能 ・崩壊範囲の確定が必要 | ・事前判断は困難 ・3次クリープという微妙な判断を要する。 | ・個人差が入りにくい ・予測には移動量観測データ以外の想定が必要 ・比較的長期の予測ができる |
| 適用性 | ○ | × | ◎ |

表-3 確率日雨量計算結果および滑落の有無

| 地区名 | 解析期間中多雨日 | | 日雨量の確率年 | | 滑落の有無 |
|-----|----------------|--------|---------|--------|-------|
| | 年月日 | 雨量mm/日 | Thomas法 | Hazen法 | |
| 地附山 | S60. 7. 20 | 59 | 126.0 | 130.7 | 有 |
| | S60. 7. 8 | 43 | 58.8 | 60.5 | |
| 下的場 | H10. 10. 16 | 121 | 54.4 | 55.8 | 無 |
| | H10. 10. 17 | 103 | 40.9 | 41.9 | |
| 山館 | H10. 10. 1 | 33 | 29.0 | 29.5 | 有 |
| | H10. 10. 8 | 31 | 25.7 | 26.2 | |
| 椿山 | H14. 8. 31 | 324 | 240.3 | 249.1 | 無 |
| | H14. 8. 30 | 158 | 60.0 | 61.5 | |
| 地原 | H11. 6. 17, 27 | 86 | 134.6 | 138.3 | 無 |
| | H11. 7. 3 | 54 | 46.4 | 47.3 | |
| 伯母谷 | H14. 7. 10 | 123 | 59.9 | 62.3 | 有 |
| | H14. 7. 25 | 38 | 9.4 | 9.6 | |
| 一之貝 | H14. 10. 28 | 85 | 75.0 | 76.5 | 無 |
| | H14. 10. 29 | 75 | 56.3 | 57.3 | |
| 細入 | H14. 7. 10 | 78 | 58.5 | 59.7 | 無 |
| | H14. 10. 1 | 65 | 39.6 | 40.3 | |
| 出雲崎 | H14. 11. 13 | 50 | 25.9 | 26.3 | 無 |
| | H14. 11. 14 | 48 | 24.0 | 24.3 | |
| 柏尾 | H14. 10. 1 | 66 | 63.9 | 65.7 | 無 |
| | H14. 9. 17 | 50 | 36.5 | 37.5 | |

3. 動態観測による地下水排除効果評価指標の検討

3. 1 調査方法

地すべりの挙動を誘因である雨量に着目して、地下水排除工の効果を整理することができれば、地下水排除工の効果を確率現象として評価することが可能となり、より合理的に地下水排除工の計画規模・数量の逐次修正が可能となる。

そこで地下水排除効果評価指標として動態観測結果を降雨指標により表すことを検討した。

検討は、これまで長期間観測が行われており、現在も対策工が施工中である、谷の内（たにのうち）地すべり防止区域（高知県高岡郡越知町）の観測結果を用いて行った。

3. 1. 1 谷の内地すべりの概要

谷の内地すべりは、1級河川仁淀川水系谷の内川右岸の南東向き斜面に位置する。地すべりは、標高250m付近を末端とし、比高450m、延長1200m、平均勾配23°、面積131.2haであり、移動層厚は平均で60m、最深部で150m以上に達する。斜面下部から上部にかけて順に1次から4次までのブロックと、最上部の全体すべりブロックとに区分される（図-1）。

谷の内地すべりにおける地質は秩父古生層（二疊系）北帯の白木谷層群に属し、チャートや苦鉄質凝灰岩などを挟む粘板岩を主とする。地質構造は、緩やかな流れ盤であると推定されている。

谷の内地すべりは、現在も年間19mm程度の移動が認められる地すべりであり、昭和33年以来、地すべり対策事業が行われている。現行の対策工全体計画は、平成11年度から平成13年度まで開催された

委員会において検討された抑制工の計画に基づき、平成15年度に13号集水井（深度34.5m）、平成16年度に16号集水井（深度48.0m）の施工が行われた。



図-1 谷の内地すべり 対策工・観測位置図

3. 1. 2 対策工の効果評価指標の検討方法

図-2は、昭和60年から平成18年までの年間降水量と、谷の内地すべりで観測された孔内傾斜計の年間変位量の最大値を示した⁷⁾。概ね5年毎の観測値の平均をとるように直線で近似したところ、観測値にばらつきはあるものの、過年ほど直線の勾配はきつく、平成12年～平成18年の直線は緩くなっている。これは、年間降水量が多くても変位が出づらいう傾向になってきていることを示しており、対策工が進むにつれて同程度の雨量であっても変位量が少なくなっている傾向がわかる。

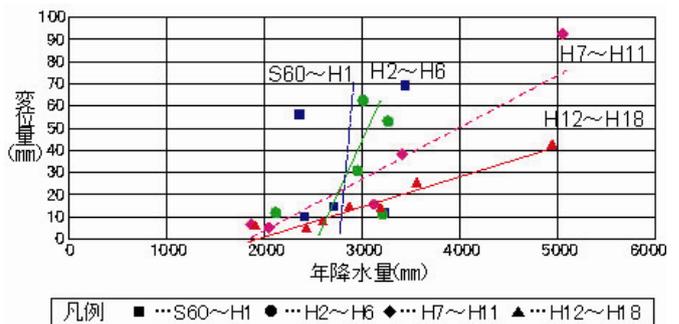


図-2 年降水量と年変位量の相関図

降雨による地下水排除工の効果評価指標の検討は、谷の内地すべりの10基の地盤伸縮計および22基の孔内水位計の動態観測データ及び日雨量データを用いて行った。

検討に用いたデータの期間は、地盤伸縮計と4基の孔内水位計が平成8～17年、その他18基の孔内水位計が平成14～17年、日雨量が平成8～17年である。

対策は現在も継続して行われているが、1次プロ

ック、2次ブロックの境界付近に施工された13号井(図-1)の施工により、地下水位が低下した観測孔が多く認められている。そこで、13号集水井の施工を境として、平成15年9月10日までを施工前、平成16年3月23日からを施工後として取り扱った。

地下水排除工の効果評価指標として、日雨量から実効雨量(半減期5日)及び地すべりの挙動のしきいとなる実効雨量(以下、しきい実効雨量と記す)を計算し、動態観測結果を整理した。しきい実効雨量の計算方法⁸⁾を以下に示す。

①地盤変位しきい実効雨量

地盤伸縮計で検知可能な0.1mm/日以上、地盤変位があった日および地盤変位がなかった日の実効雨量(半減期5日)について、度数をそれぞれ実効雨量1mmから300mmまで1mm毎に集計した。地盤変位を観測した日の累積相対度数と観測日全体の累積相対度数との差が最大となる実効雨量(図-3)を、地盤変位の発生確率が增加する実効雨量しきい値という意味で、地盤変位しきい実効雨量と称する。

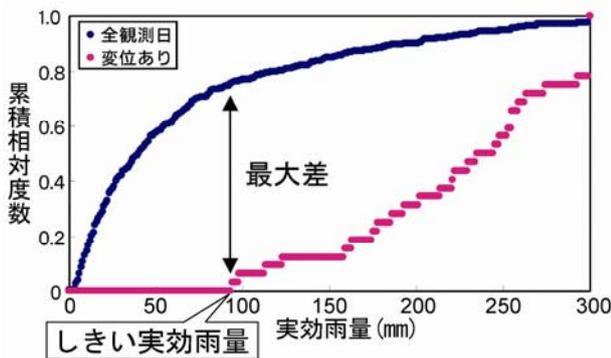


図-3 地盤変位の累積度数分布(例)

②水位上昇しきい実効雨量

水位上昇しきい実効雨量も地盤変位しきい実効雨量と同様の計算手順により求めた。地下水位上昇を観測した日の定義は、0.1m/日、0.5m/日、1.0m/日以上の地下水位上昇を観測した日とし、それぞれの地下水位上昇に対するしきい実効雨量として、水位上昇しきい実効雨量と称する。

3.2 対策工の効果評価指標の検討結果

1) 実効雨量による指標の検討

地盤変位や孔内水位が実効雨量に対して相関があるかどうかを調べた。谷の内地すべりでは、地盤変位と実効雨量については、明確な相関は認められなかった。孔内水位と実効雨量については、全体的にやや相関があり、集水井の施工前後で相関係数を比較すると、集水井の周辺にある地下水位観測孔では、

相関が低くなる傾向が見られた(図-4)。

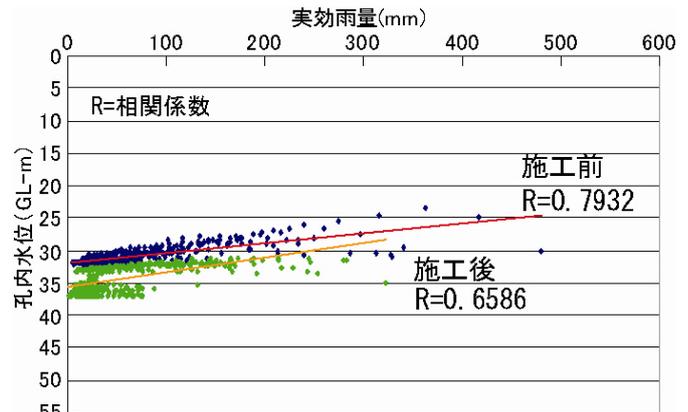


図-4 BV6-5の実効雨量と孔内水位相関図

図-5は、静岡県藤枝市にある滝沢地すべりにおける実効雨量と地盤変位の相関について調査結果である。変位量の大きい滝沢地すべりでは、実効雨量と地盤変位の相関が高く、また施工前と抑制工施工中を比較すると、相関係数が低くなっていることが分かった。

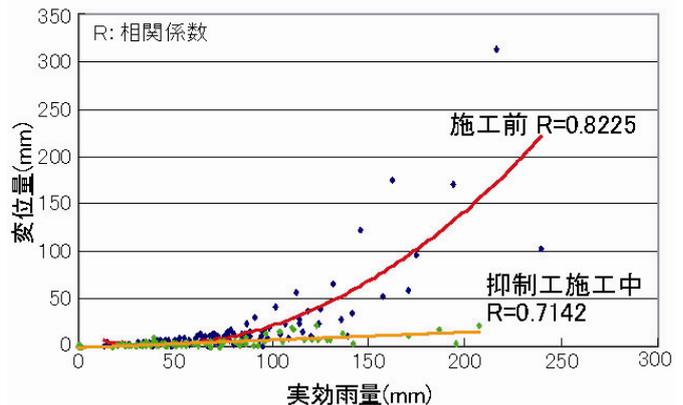


図-5 実効雨量と地盤変位相関図(滝沢地すべり)

表-4 岩井法による確率水文学

| 確率年 (年) | 最大日雨量 (mm) | 実効雨量 (mm) |
|------------|---------------|--------------|
| 1.1 | 11.8 | 211.1 |
| 1.2 | 126.2 | 229.3 |
| 1.5 | 151.4 | 263.1 |
| 2 | 176.1 | 297.9 |
| 5 | 239.4 | 393.2 |
| 10 | 282.5 | 462.5 |
| 50 | 380.3 | 630.1 |
| 100 | 423.0 | 707.3 |

滝沢地すべりが発生した平成17年7月9日の最大日雨量は173.0mm、実効雨量274.4mmであり、これ

を表-4に示した確率水文量と比較すると、1.5～2年確率の雨量に相当する。

滝沢地すべりでは、実効雨量と地盤変位は、相関が高く回帰直線から一定の地盤変位量を生じる実効雨量を確率年で評価でき、実効雨量を対策工効果評価指標として考えることができる。しかし、谷の内地すべりのように実効雨量と地盤変位の相関があまり良くない場合、地下水排除工の効果は、対策工施工前後の実効雨量と地盤変位の相関性の変化で評価するしかなく、合理的な対策工効果評価指標とは言えないことがわかる。

2) 地盤変位しきい実効雨量の検討

図-6は、地盤変位しきい実効雨量の計算により、谷の内地すべりの地盤伸縮計で0.1mm/日以上、の地盤変位を観測した日の地盤変位しきい実効雨量の経年変化である。図には、各ブロックのしきい実効雨量の中央値を示した。

13号集水井の施工前の平成14年度以前と施工後の平成16年度の地盤変位しきい実効雨量を比較すると、13号集水井が位置する1次ブロックの地盤変位しきい実効雨量は、施工後に高くなっている傾向がある。しかし、2次ブロック、3次ブロックでは、解析した全期間で地盤変位しきい実効雨量が大きくばらついている様子が認められ、対策工施工前後の地盤変位しきい実効雨量の上昇が、対策工の効果によるものか、地盤変位しきい実効雨量のばらつきによるものかは判然としない。

しかしながら、地盤変位しきい実効雨量を用いることにより確率評価ができる指標として合理的な対策工の効果の評価ができる可能性が提示された。

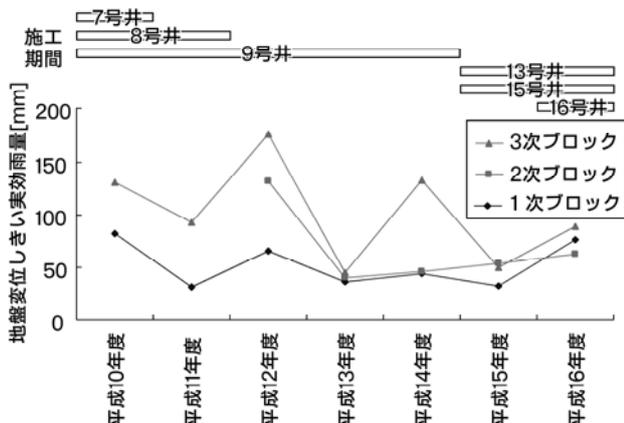


図-6 ブロック毎の地盤変位しきい実効雨量

3) 水位上昇しきい実効雨量の検討

図-7は、0.1m/日、0.5m/日、1.0m/日以上の地下

水位上昇を観測した日の水位上昇しきい実効雨量について、13号集水井の施工前の平成14年度と施工後の平成16年度の水位上昇しきい実効雨量を比較したものである。図には、各ブロックのしきい実効雨量の中央値を示した。

水位上昇しきい実効雨量は、13号井施工前の平成14年度に比べ、施工後の平成16年度の方が全般に高くなっている。対策工の効果により地下水位を上昇させるのに必要な実効雨量が高くなったと考えられる。

図-8は、BV6-5孔について実効雨量と地下水位の時系列を示したものである。この孔の場合、13号井施工の効果は平成16年度に明らかな地下水位低下として表れている。BV6-5孔水位で1.0m/日上昇する日の水位上昇しきい実効雨量を計算すると、対策工施工前の平成14年では203mm、施工後の平成16年度では279mmであり、平成14年度より76mm高いと計算された。つまり、対策工施工後と施工前のしきい実効雨量の差の76mmが、地下水排除工の効果であると評価することができる。

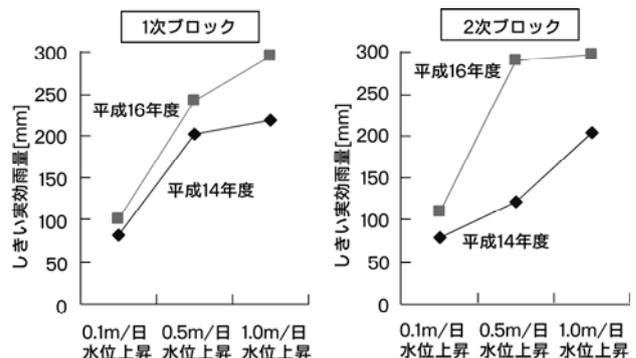


図-7 水位上昇しきい実効雨量 (3次ブロックは計算可能なケースが少なかったため省略)

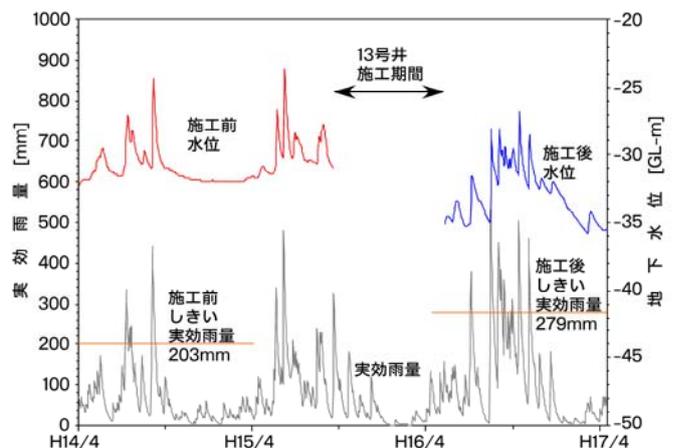


図-8 BV6-5孔の水位、実効雨量および1.0m/日水位上昇しきい実効雨量

したがって、動態観測による地下水排除工の効果の評価は、地すべりの挙動のしきいとなる雨量指標値によることができる。

4. まとめ

今回、地下水排除工の計画目標の検討及び、地下水排除施設の効果評価指標の検討を行った。

地下水排除工の計画目標の検討では、以下のことがわかった。

1) 滑落限界歪みの推定は、誤差が大きく、日雨量の確率年もばらつきが大きいため、計画目標として滑落限界歪み量を用いることは困難である。

また、地下水排除施設の効果評価を定量的に指標として、実効雨量、地盤変位しきい実効雨量、水位上昇しきい実効雨量の適用性を検討した結果、以下のことがわかった。

1) 実効雨量は観測地と相関性が良い場合、実効雨量からの確率評価が可能である。

2) 実効雨量では相関性の変化により対策工の効果を評価できる。

3) しきい実効雨量により、対策工の効果を確率として評価できる可能性があることがわかった。計画目標を超過確率として設定することにより、しきい実効雨量を指標とすることで、合理的に計画規模を修正することが可能となることが考えられる。

今後、地下水排除工の追加投資は年間平均何日の

安全性向上にあたるか、といった観点から評価を行うためにも、観測データの整理解析手法についてさらなる検討が望まれる。

【参考文献】

- 1) 寺川俊治、水谷宣明、西田彰一：谷地地すべりーとくに岩盤地すべり地における地下水の挙動一、地すべり、Vol. 19、No. 1、pp. 34-43、1982
- 2) 奥園誠之、緒方春樹：地すべり地における地下水排除工の効果とその調査法、基礎工、Vol. 13、No. 9、pp. 33-39、1985
- 3) 秦 耕二、丸山清輝、北島義則：集水井施工による地下水水位低下量の実態、第34回地すべり学会研究発表会講演集、pp. 291-294、1995
- 4) 森脇 寛：地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価、地すべり、Vol. 38、No. 2、pp. 11-18、2001
- 5) 斎藤迪孝：斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について、地すべり、Vol. 24、No. 1、pp. 30-38、1987
- 6) 福園輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法、地すべり、Vol. 22、No. 2、pp. 8-13、1985
- 7) 高知県中央西土木事務所：平成18年度地すべり第11-1号谷の内地すべり観測委託業務報告書、pp. 84、2007
- 8) 鈴木将之、藤澤和範：降水指標による地すべり警戒基準に関する調査（第2報）、土木技術資料、Vol. 47、No. 9、pp. 64-69、2005

Abstract

The safety factor of a landslide slope determined from investigation before applying countermeasures is changeable following the progress of their installation. This study examined a method to design ground water drainage systems considering recurrence intervals of rainfall events, and proposed an index to evaluate the effect of those systems from monitoring data.

The results suggested there was no clear relationship between recurrence intervals of daily rainfall and landslide behaviors during the study period. Estimation of ground distortion until a landslide collapses was impractical to be employed in designing a drainage system because of numerous assumptions to be made in calculation. Monitoring data showed that the installation of countermeasures raised threshold antecedent precipitation index for landslide movement, suggesting that the potential of the index in evaluating the effect of drainage systems.

Keywords: landslide, antecedent precipitation index, ground water, drainage works, monitoring