

排水トンネル施工による地すべり地の地下水の挙動
—地山の含水比と地下水中のラドン濃度を指標とし
て—

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人農業工学研究所 公開日: 2024-03-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 石田, 聡, 土原, 健雄, 今泉, 眞之 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002000058

排水トンネル施工による地すべり地の地下水の挙動

地山の含水比と地下水中のラドン濃度を指標として

石田 聡*・原 郁男**・土原健雄*・今泉眞之*

目 次			
緒 言	91	試験結果	95
調査地区の概要	92	1 含水比測定結果	95
1 地形・地質	92	2 ラドン濃度測定結果	95
2 地すべり防止工	93	3 トリチウム濃度測定結果	96
試験方法	93	考 察	96
1 試験目的	93	結 言	97
2 含水比の測定	93	参考文献	97
3 地下水中のラドン濃度の測定	94	Summary	99
4 地下水中のトリチウム濃度の測定	94	Appendix	100

緒 言

地すべり防止対策として、我が国では一般的に抑止工および抑制工が現場に応じて組み合わされて実施されている。一方で、近年国営事業等で対象となっている大規模地すべりに対しては、想定しているすべり面深度が深い場合抑止工の施工が難しいため、抑制工、特に地下水排除工中心の対策が行われている。地下水排除工の施工による地すべり地内の地下水流動状況の変化は、観測井の地下水位変化によって推定されることが一般的であるが、地すべり地においては地すべり地塊が過去の運動により攪乱され透水性が著しく不均質に分布している場合があること（吉松1992）、すべり面の深度が深い場合岩盤内の亀裂の発達状況等に地下水流動が規制されることなどから、観測井での地下水位観測によってすべり面及びその周辺の地下水流動状況を正確に観測することは困難であり、地下水位観測以外の手法ですべり面周辺の地下水流動を把握する手法が求められている。竹内ら（1993）は地下水排除工の効果判定手法として、電気探査、地温測定調査（1m深地温）、排水量測定の実施例と効果を示している。このうち電気探査、地温測定調査は主に浅層地下水を調査対象としており、

排水トンネルが施工される深度50m以深における地下水流動状況の変化を捉えることは難しい。また、排水量測定についても、単純に排水量の大小が抑制効果に比例するとは言えない（竹内ら1993）。

一方仲野ら（1993）は新潟県東頸城丘陵の椎谷・寺泊層泥岩の地すべり地を対象として、地すべり粘土の完全軟化状態における有効応力と含水比の関係が採取地点によらず一定の直線関係にあることを明らかにして、その関係（完全軟化状態含水比曲線）と、泡式ボーリング・3重管式サンプリングによって得られた試料の自然含水比測定によって得られた含水比プロファイルの結果との比較から、すべり面の位置およびそこにかかる過剰間隙水圧やパイピングなどによる空洞的なみずみちの存在を推定した。また北陸農政局（1996）は、同じ第三紀層地すべり地の泥岩を対象として、自然含水比を測定することによりすべり面位置及び間隙水圧が推定できることを示した。このことは、すべり面の含水比変化を測定することによりすべり面にかかる間隙水圧の変化を捉えられる可能性を示唆している。一方、今泉（1996）は、地すべり地内のボーリング孔内において中性子水分検層を行い、孔内の鉛直含水比分布と、仲野ら（1992）が示した完全軟化含水比曲線を比較し、すべり面を特定出来ることを示した。この方法を用いれば同一箇所の含水状況の連続測定が可能であり（測定値を変化させる要因としては測定部周辺の水分量変化のみと考えられる）、中性子水分計による水分量のモニタリングを行うことによりすべり面付近の含水比変化、すなわち間隙水圧の変化をとらえることも可能と考えられる。

また、排水トンネル等の大規模地下水排除工が施工され

* 地域資源部地下水資源研究室

** 北陸農政局上越農地保全事業所

* 平成16年1月14日受理

キーワード：地すべり・排水トンネル・ラドン・中性子水分計・含水比

た場合、施工およびその後の水抜き効果で地すべり地内の地下水流動状況が変化し、地下水の水質にその影響が現れる場合がある。浅層の地下水の場合、ボーリング施工直後には存在していなかった塩水が、掘削後徐々に地下深部から上昇する事例が報告されている(今泉1996)。また、ラドン濃度の変化によって地すべり地の地下水流動状況を推定している事例も報告されている(今泉ら1993)。

ラドン(^{222}Rn)は岩石や土粒子に極微量に含まれているラジウム(^{226}Ra)の崩壊によって発生する半減期約3.8日の放射性的な気体である。地下水のラドン濃度は帯水層のラジウムの含有量、粒子サイズ、風化度、間隙率、地下水の流速等によって規定される、帯水層からのラドン放出量によって放射平衡濃度が決まり、地層ごとに固有の濃度(泥岩: $10^0\sim 10^1$ ~花崗岩: $10^2\sim 10^3$ Bq/lのオーダー)を持つ(放射平衡濃度は地質条件が同じ場合、単位体積あたりの地下水と岩盤との接触面積が大きい程増加する)。これに対して地表水では供給が絶たれ濃度が非常に小さくなる($10^{-2}\sim 10^0$ Bq/lのオーダー)。地表から浸透した水のラドンの濃度は徐々に上昇し、数週間で放射平衡に達して帯水層固有の値となるので、地表水が比較的短時間で地下水面に到達する場合はラドン濃度が浸透水のトレーサーとなりうる(濱田ら1997)。逆にかん養から排水まで数十年以上の非常にゆっくりとした地下水流動が起こっている場合は、半減期が約12.3年と比較的長いトリチウムがその指標となり、地下水のトリチウム濃度を測定してかん養期間を推定することが出来る(Andersenら1974,今泉ら2000など)。



Fig. 1 調査地位置図
Location map of study area.

本論文では北陸農政局によって施工された地すべり排水トンネルにおいて、中性子水分計を用いたトンネル周辺岩盤の含水比測定および地下水のラドン濃度の測定等を行い、試験結果よりトンネル施工後の地下水流動状況の変化について考察するとともに、それぞれの手法の有効性について検討した。

本論文は北陸農政局上越農地保全事業所よりの依頼研究および受託研究の一部である。また、研究を進めるにあたっては関係各位のご指導、ご協力を頂いた。ここに、感謝の意を表す。

調査地区の概要

1 地形・地質

調査地は新潟県新井市の南東約5kmに位置する中頸城郡板倉町の南部山間地帯(東頸城丘陵)の釜塚・段子差地すべり地内であり、標高200~300m前後の丘陵性山地である(Fig. 1)。これら釜塚・段子差地すべり地を取り囲む様に大規模地すべり地形が発達しており、調査地には二次・三次ブロックと推定される地すべりブロックが複数見られる。対策工の中心となっている地すべりブロックの規模は幅1km、長さ2km、最大厚厚140m以上で、年間1~2cm程度の速度での移動が確認されている(楠本ら1999)。

調査地周辺の地質は、新潟県標準層序によると新第三紀中新世後期寺泊層および椎谷層が分布しており、移動土塊の大部分が同層の泥岩・砂質泥岩からなる。これらの地層は構造運動によって著しい隆起を受けている。その結果褶曲・断層作用や風化作用を受け、続成作用の過程で形成された膠着物質が破壊され、軟弱化して地すべりを発生させる要因となっている(仲野ら1989)。本地区域においてはさらに、ため池等によって地下水が常時供給されていること、年間降水量が多く特に融雪時や豪雨時に地下水位が上昇すること等が要因となって、地すべりが発生していると考え

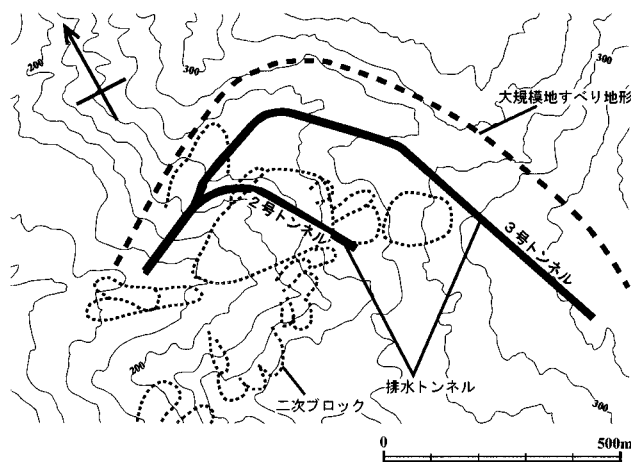


Fig. 2 排水トンネル位置図
Location map of drain tunnels.

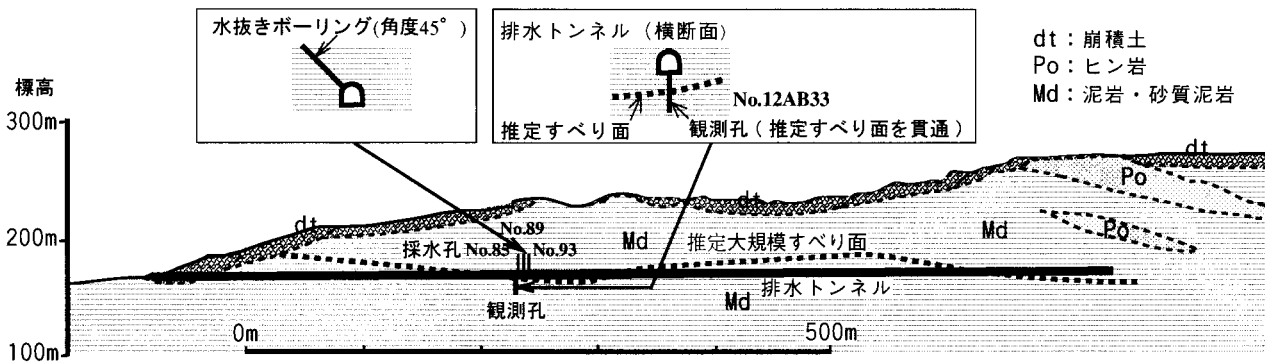


Fig. 3 2号排水トンネル地質断面図
Geological section of drain tunnel.

られている。

2 地すべり防止工

現在、当該地すべり地においては農林水産省直轄による対策事業が実施されており（細谷1992），地すべりの原因となっている深層地下水の排除を行うため大規模抑制工として排水トンネルが施工されている。排水トンネルは1号トンネルから3号トンネルまで3本施工されており，今回の調査対象である2号トンネルは本体掘削，水抜きボーリングのいずれも施工は完了している。Fig. 2 に2号トンネル及び隣接する3号トンネルの位置を示す。

Fig. 3 に2号トンネルに添った地質断面図，Fig. 4 にトンネル施工断面図を示す。2号トンネルは推定大規模すべり面とほぼ同じ標高で掘削され，トンネル内から45度上向き（一部下向き）で排水ボーリングが施工されている。Fig. 3 で推定すべり面が波打っているのは，地層の褶曲の影響である。

試験方法

1 試験目的

本研究の目的は，排水トンネル施工による地すべり地内

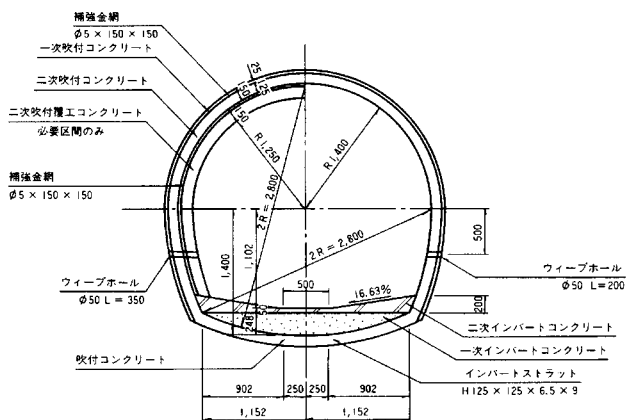


Fig. 4 排水トンネル断面図（単位mm：北陸農政局2001）
Section of drain tunnel.

の地下水流動状況の変化と，地下水排除工としての効果を判定するための手法を検討することであり，トンネル掘削後から定期的に中性子水分計によるすべり面付近のトンネル周辺地山の含水比の測定，地下水中のラドン濃度およびトリチウム濃度の測定を行った。

Table 1 に2号排水トンネルの施工期間を示す。トンネルの本体掘削は1995年9月から約2ヶ年間で施工された。水抜きボーリング工はトンネル本体の掘削後，1998年3月から約9ヶ月間で施工された。

Table 1 2号排水トンネル施工期間
Construction term of the second drain tunnel

工事内容	開始	終了
トンネル本体掘削	1995.9.4	1997.10.30
水抜き工事	1998.3.31	1998.12.25

2 含水比の測定

地下水排除工施工後のすべり面付近の含水比変化を測定することにより地下水排除工の効果を評価する方法について検討を行うことを目的として，排水トンネルから掘削されたボーリング孔周辺の含水状況について中性子水分計によるモニタリングを行った。観測孔は2000年に事業所によって水分検層専用掘削されたNo.12AB33孔で，排水

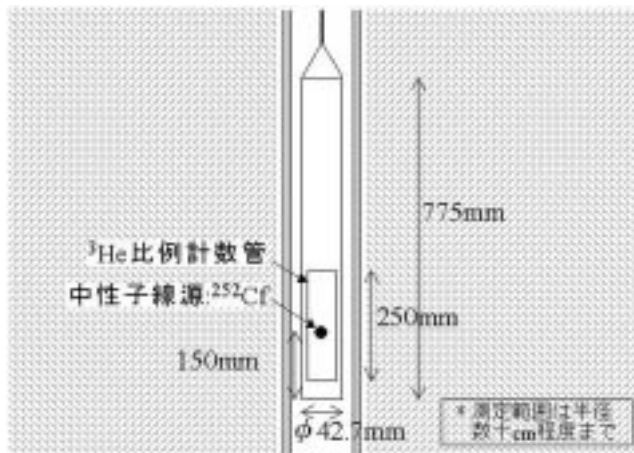


Fig. 5 中性子水分計構造図
Structure of neutron moisture meter.

トンネル底面から推定すべり面(トンネル底面からの推定深度約6m)を貫く様に鉛直下方にノンコア掘削されており(Fig.3),保孔管は無孔塩ビパイプ(VP50)で水分検層が可能な仕上げとした。

中性子水分計は中性子線源と検出部から構成され,水素が地層の主要元素に比べて100倍以上も高い中性子減速能を持つことを利用している。Fig.5に中性子水分計の構造図を示す。線源から放出された中性子は地層中の様々な元素の原子核と衝突し減速を繰り返して最後に熱中性子となるが,水素の原子核の減速効果は他の原子に比べて大きいいため,線源から放出された中性子が熱中性子になる割合は地層中に含まれる水素原子の割合,すなわち水分率に支配される。この熱中性子の入射数を検出器で計測することにより地層中の水分の割合を測定し,土壤水分の深度分布を調べる方法を中性子水分検層という(Gardner and Kirkham 1952, 落合 1965)。

中性子水分計を使用する場合,測定値と水分率の関係をあらかじめ求めておかなければならない。ここでは今泉(1996)の方法を参考に,径650mm,高さ1,000mmのドラム缶(容積約200l)に観測孔と同じ孔径,材質のケーシングパイプを立て,周りに一定の水分状態に調整された試料を詰めした後,中性子水分計をパイプに挿入して測定を行った。試料には粘土,砂,礫を用い,試料の水分状態を変化させ,計数率比と含水比の関係を図化し(Fig.6)キャリブレーション式を求めた。この式により現地で得られた測定値を含水比に換算した。

現地測定に用いた中性子水分計はソイルアンドロック社製SRM-1d型(外径42.7mm)である。この測定器は ^{252}Cf を線源とし熱中性子検出器に ^3He 比例計数管を用いている。測定深度はプローブの線源位置で代表させた。なお線源は半減期2.65年で減衰していくため,測定時期の異なる計数値を単純には比較できない。このため現地測定の前後にstandard boxでの測定を行い標準値を求め,標準値に対する現地測定値を計数率比として算出し,測定時期の異なるデータの対比に用いた。

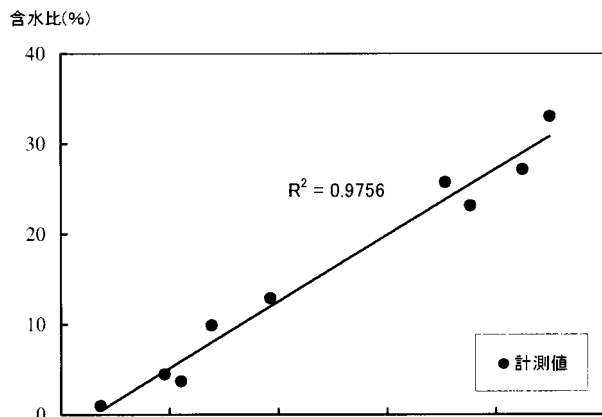


Fig.6 中性子水分計校正実験結果
Calibration result of neutron moisture meter

現地測定はNo.12AB33孔において観測孔掘削直後,2ヶ月後,4ヶ月後,7ヶ月後,12ヶ月後,18ヶ月後の計6回行った。測定は孔口から5または10cm間隔とし,それぞれの位置での測定時間は10秒間とした。本調査における測定誤差は相対誤差で $\pm 2 \sim 3\%$ 程度であった。

3 地下水中のラドン濃度の測定

地すべり深部の地下水流動状況を評価する手法として地下水ラドン濃度測定の有効性について検証を行うため,2号排水トンネルにおいて施工された上向き集水ボーリング孔のうち,地下水の排出量が比較的多いNo.93, No.89, No.85の3孔について採水を行い,ラドン濃度を測定した。これらの3孔はいずれも中性子水分検層を行った12AB33孔の近傍に位置している(Fig.3)。

ラドン濃度の測定にはトルエン抽出法を採用した。この方法はラドンが水よりもトルエンに溶けやすい性質を利用した測定法であり,現地で500mlの試料を採水し,40mlのトルエンを加えて攪拌,静置し,分離したトルエン20mlをガラスバイアルに回収する(この時,空気に触れるとラドンが空气中に飛散するため,採水作業はなるべく空気に触れないように注意する)。トルエンを回収したバイアルは研究室に持ち帰り,液体シンチレーションカウンタ(パッカード社製2250CA)で測定を行った。測定時間は1試料50分で,検出限界は約 0.037Bq/l である。測定誤差は高濃度の場合は小さく,低濃度の場合は大きくなる。今回の調査では約3%であった。なお,本論文ではラドン濃度の単位に Bq/l を用いた。 Bq (ベクレル)とは1秒間に1回の放射性壊変が起こる量を示し, Bq/l は1lの試料水中で,1秒間に1個ラドン原子がポロニウム原子に変わる事を表す。

4 地下水中のトリチウム濃度の測定

掘削直後の2号排水トンネルから排出される地下水について,滞留時間および施工後の変化を把握するため,ラドン濃度を測定した集水ボーリング孔と同じNo.93, No.89, No.85の3孔について概ね1年毎に採水を行い,トリチウム分析を行った。

トリチウムは水素の放射性同位体で,主に窒素原子と宇宙線の核反応で生成し,降水に含まれて地上に到達する。水分子の構成元素であることから,水の理想的な追跡者とされている。降水中のトリチウム濃度は1960年代に世界各地で行われた水爆実験の影響で高濃度を示しているが,近年ではその影響がなくなり $10 \sim 20\text{TU}$ の値を推移している。地上に到達した降水の一部は,地下に浸透し,含まれているトリチウムは半減期12.3年の速さで減衰していくことから,地下水のトリチウム濃度を測定し過去の降水のトリチウム濃度と比較して地下水の滞留期間を推定する事が出来る(今泉ら2000)。

天然の水に含まれるトリチウムは低濃度であるため測定では電気分解によって試料を濃縮した。そのため、1サンプル当たり約3lの試料を採取し、電気分解によって2,500mlの試料を二段階の濃縮で約10mlまで減容した。その濃縮試料5.4mlをガラスバイアルに移し、シンチレーター（発光剤）14.6mlを加え、液体シンチレーションカウンタで測定した。なお、本論文ではトリチウム濃度の単位にTU（トリチウムユニット）を用いた。TUはトリチウム濃度を表す単位で、水素原子 10^{18} 個中のトリチウム原子の数である。SI単位であるベクレルとの関係は、1TU = 0.12Bq/lである。

試験結果

1 含水比測定結果

Fig. 7に12AB33孔において測定された地山の含水比の変化を示す。最初に観測した2000年8月には深度1.0～2.0mで含水比は25～27%程度を推移し、深度2.1m付近に28%弱の極大値が観察された。それ以降、深度3.0mまで急激に減少し、深度3m付近で極小値を取る。それ以降4.0mまでは一旦25%程度まで増加した後、また減少して4.0m付近で16%程度の極小値を取った。深度4.0～5.3mの範囲では含水比は18～20%の範囲で推移し、深度5.3m以深で含水比は急増し、5.7mで約29%の極大値を取り、それ以降急激に減少して6.4m付近で16%程度の極小値を

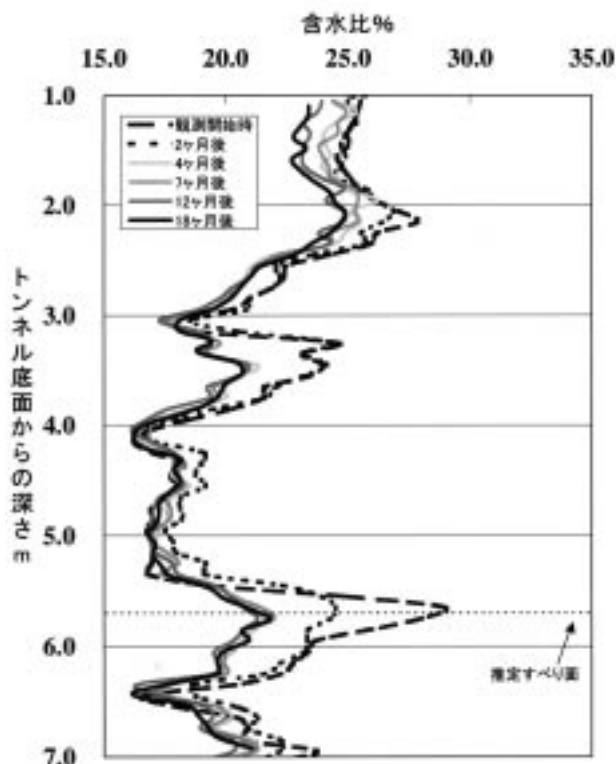


Fig. 7 12AB33孔における含水比の経時変化
Fluctuation of water contents. at 12AB33.

取った。

4ヶ月後の2000年12月の観測では深度1.0～4.2mの範囲と、5.3m以深において含水比の減少が見られた。特に深度2.1m付近、5.7m付近の値が顕著に下降した。それ以降は孔口付近の含水比が漸減し、それ以深については7ヶ月後、12ヶ月後、18ヶ月後ともに大きな変動は見られなかった。

Fig. 8に観測孔12AB33における含水比の全区間平均値の経時変化を示す。含水比は掘削当初の4ヶ月間で2%弱減少し、その後も僅かずつではあるが減少を続けている。

以上より本孔においては水抜きボーリングの排水効果によって観測開始当初顕著に含水比が減少し、その後は漸減しながらも含水比の減少は収束しつつあり、安定した状態にあると考えられる。また、深度5.7m付近は掘削当初の含水比が局所的に高い事からすべり面であると考えられ、その後は水抜きボーリングの排水効果によって含水比が減少したと考えられる。

2 ラドン濃度測定結果

Fig. 9に2号トンネルNo.85, No.89, No.93水抜きボーリング孔における排水中のラドン濃度の経時変化を示す。

測定は1998年12月10日から2003年12月3日まで5年間、延べ19回行われた。No.85孔におけるラドン濃度は1998年12月～2001年1月の期間、約4.5～6.5Bq/lの範囲を推移していたが、2001年8月以降は約3.0～5.0Bq/lの範囲を推移し、5.1Bq/lを越える値は観測されなかった。No.89孔におけるラドン濃度は1998年12月～2001年1月の期間、約3.5～5.0Bq/lの範囲を推移していたが、2001年8月以降は約1.5～4.0Bq/lの範囲を推移し、4.0Bq/lを越える値は観測されなかった。No.93孔におけるラドン濃度は1998年12月～2001年1月の期間、約3.0～4.5Bq/lの範囲を推移していたが、2001年8月以降は約1.5～

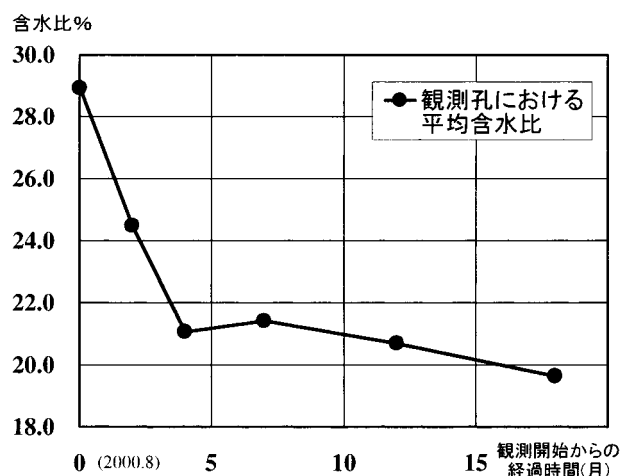


Fig. 8 平均含水比
Average of water content

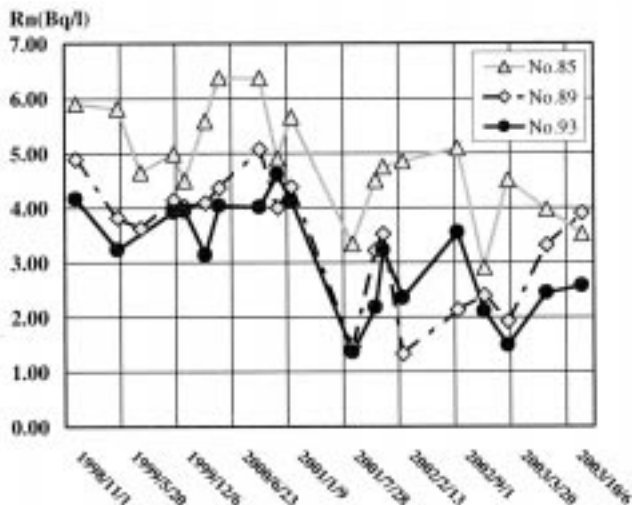


Fig.9 2号排水トンネルにおけるラドン濃度
Fluctuation of Rn concentration at second drain tunnel.

3.5Bq/lの範囲を推移し、3.6Bq/lを越える値は観測されなかった。いずれもラドン濃度は2Bq/l程度の変動幅を持つが、季節等との関係は特に見いだせなかった。

Fig.10に各排水ボーリング孔のラドン濃度の年間平均値の年変動を示す。ここでは1998年12月の測定値は1999年に含めた。ラドン濃度はいずれの排水ボーリング孔においても全体的に低下傾向が窺えた。

3 トリチウム濃度測定結果

Table 2に2号トンネルNo.85, No.89, No.93水抜きボーリング孔における排水中のトリチウム濃度の観測結果を示す。

トリチウム濃度は概ね年1回の測定を行ったが、測定値はいずれも3.0~6.0TUの範囲内にあり、特に大きな変動は見られなかった。

Table 2 2号排水トンネルにおけるトリチウム濃度測定結果
Fluctuation of tritium concentration at second drain tunnel.

孔名	1998/12	1999/5	2000/5	2001/8
No.85		3.5TU		5.1TU
No.89	3.0TU		5.1TU	6.0TU
No.93		5.5TU		5.2TU

考 察

調査地域に分布する第三紀層地すべりの母岩である泥岩は、粘土粒子が水中に非常に厚く堆積し、自重によって圧密された後、隆起現象などにより水面上に上昇し、その後更に浸食作用によって上載荷重が失われ、現在の過圧密状態に至ったものである。このような過圧密粘土の排水せん

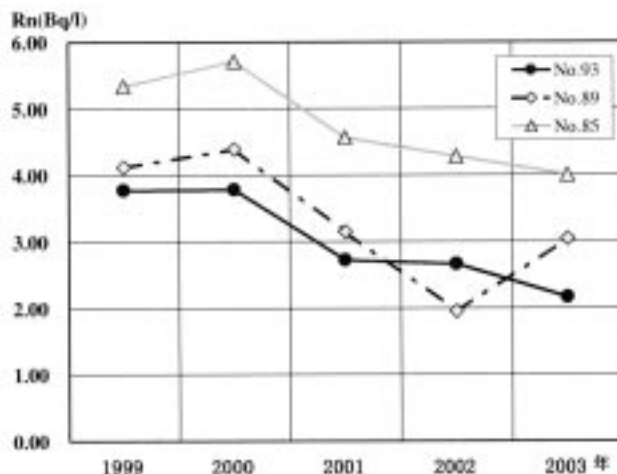


Fig.10 2号排水トンネルにおけるラドン濃度年変動
Fluctuation of annual Rn concentration at second drain tunnel.

断試験を行うと、ピーク強度に達した後、ダイレイタンスー(容積膨張)による含水比の増加により、体積歪変化が全く見られない状態に到達する。この状態を「完全軟化状態」といい、このときの強度を「完全軟化強度」という(北陸農政局1993)。その後、更にせん断変位が大きくなり、粘土鉱物の再配列が完了するとせん断応力がほぼ一定の値に落ち着く。この時の強度を「残留強度」といい、初生地すべりは完全軟化強度に、再活動地すべりは残留強度にまで、すべり面の強度が低下していると考えられる(仲野1980)。

仲野ら(1992)は新潟県東頸城郡下の寺泊層、椎谷層のボーリングコアで採取した泥岩を対象とした実験によって、完全軟化状態での含水比と、平均有効応力の関係を明らかにした。今泉ら(1996)はこの実験結果を参考に、中性子水分検層によって測定した含水比を間隙水圧に換算して、完全軟化含水比曲線との比較を行った。Fig.11に今

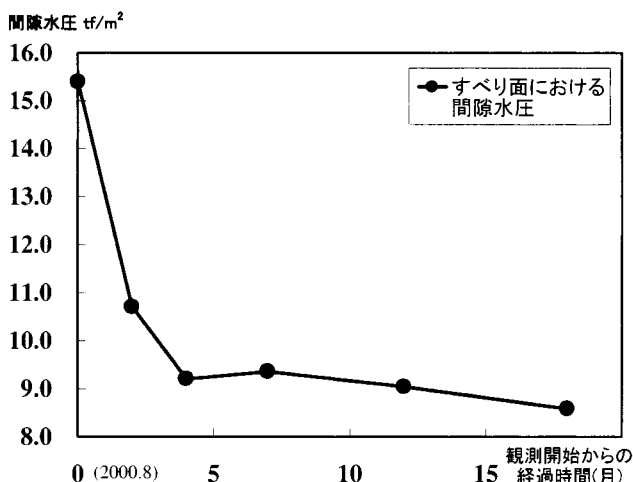


Fig.11 すべり面における間隙水圧の経時変化
Fluctuation of pore water pressure.

回測定した12AB33孔においてすべり面と考えられる深度5.77m地点における含水比を、今泉（1996）の方法によって間隙水圧に換算した値の経時変化を示す。仲野ら（1992）、北陸農政局（1993）の概略はAppendixに示すので参照されたい。

間隙水圧は当初約 15.4tf/m^2 （ $15.1 \times 10^4\text{Pa}$ ）であったが、4ヶ月後には約20%減少し、その後はほぼ横ばいの傾向を示した。これはトンネルの排水効果によると考えられる。

Fig.12に、東京都および茨城県つくば市における降水の月別トリチウム濃度を示す。1961～1975年の値は東京都、1978年3月から現在までは農業工学研究所が分析した濃度である。このデータは新潟県の測定データでは無いが、降水のトリチウム濃度はこの20年程度は10TU前後である。本試験地における降水のトリチウム濃度が概ねこの値に近いと仮定すると、Table2に示す水抜きボーリング孔における排水中のトリチウム濃度は3.0～6.0TUの範囲内であり、トリチウムの半減期が12.3年であることを考慮すると、採取された試料は、少なくとも降雨による浸透後10年以上が経過している地下水であり、比較的長期的な水循環が起こっていることを示唆している。

Fig.9、Fig.10は長期的なラドン濃度の変化を示しており、その濃度は漸減傾向にある。地下水のラドン濃度は数Bq/l～数十Bq/lの帯水層固有の放射平衡濃度を示し、供給が絶たれる地表水のラドン濃度は殆ど0となる。一般的にラドンをトレーサとして利用する場合はこのコントラストを利用する。ラドン濃度が時間の経過と共に漸減するという事は、排水トンネル施工によって地下水の流動状況が変化し、濃度の低い地表水（降水を含む）が、放射平衡に達する前に排水ボーリングから排出されている可能性を示すが、本調査地区の場合排水ボーリングの深度が50m以上と深いこと、トリチウム濃度によって推定される地下水の滞留時間が、ラドンの放射平衡期間より遙かに長いことから、2週間以内という短い地下水流動は生じていないと考えられる。ラドン濃度の遞減の理由は帯水層そのもの（地下水単位体積あたりの岩盤との接触面積など）の変化や、地下水流速の増加などが考えられるが、本調査結果からは特定する事が出来ない。

以上、今回の調査に用いた手法のうち中性子水分検層はトンネル掘削後に増加したと考えられる周辺岩盤の含水比が、水抜きボーリングの効果によって減少する様子を捉える事が出来た。また、すべり面付近では顕著な含水比の減少も観測され、地下水排除工の評価手法として用いる事が出来ることを示した。また、ラドン濃度、トリチウム濃度測定では地すべり地の地下水の滞留時間を推測出来、特別な観測孔を必要としない事から簡便な地下水流動状況の調査手法として評価することができる。

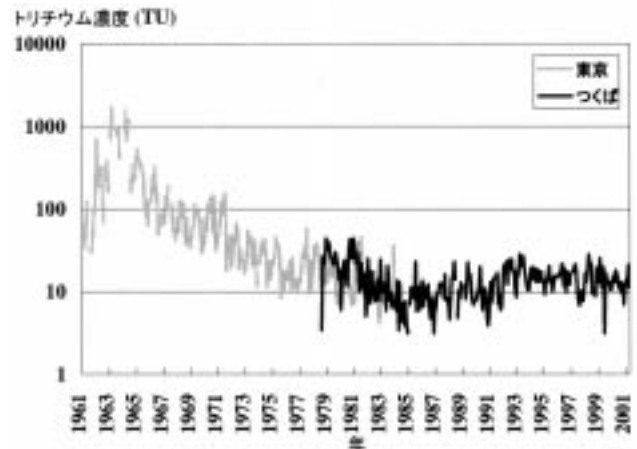


Fig.12 東京都及びつくば市における降水のトリチウム濃度
Fluctuation of tritium concentration of precipitation at
Tokyo and Tsukuba City.

結 言

本研究では調査地は新潟県中頸城郡板倉町の地すべり排水トンネル内に掘削された観測孔および水抜きボーリング孔において中性子水分検層、地下水中のラドン・トリチウム濃度測定を行い、地下水排除工の施工による地下水流動状況の変化を推定した。

トンネル周辺地山の含水比測定からは、すべり面の深度が推定された。含水比は当初4ヶ月間で大きく減少し、その後は漸減した。またすべり面と推定される高含水率帯が消失する様子が観測され、地下水排除工の効果を明らかにすることが出来た。

ラドン及びトリチウム濃度測定からは、調査地内では地表水が短期間で排水トンネルに排出される様な地下水流動は起こっていないこと、トンネル掘削によってラドンの放射平衡に影響を与える帯水層及び地下水流速の変化が生じていることが推定された。ラドン濃度の遞減の理由は帯水層そのものの変化や、地下水流速の増加などが考えられるが、本調査結果からは特定する事が出来ない。

以上より、中性子水分検層によるトンネル周辺岩盤の含水比の繰り返し測定、地下水中のラドン・トリチウム測定はそれぞれ地下水排除工の効果判定、地下水流動状況（水循環速度）の推定に有効な手法であると言える。

参考文献

- 1) Andersen, L.J. and T.Sevel (1974) : Six years' environmental tritium profile in the unsaturated and saturated zones, Grohøj Denmark., Isotope Technique in Groundwater Hydrology Vol.1, IAEA, 3～20
- 2) 落合敏郎（1965）：放射能式地下水探査法，昭晃堂，234

- 3) 濱田浩正・今泉眞之・小前隆美 (1997) : ラドン濃度を指標とした地下水調査・解析法, 農業工学研究所報告, 36, 17-50
- 4) 北陸農政局計画部資源課 (1993) : 農地保全基礎調査特殊地すべり対策調査北陸地区報告書 資料編, 83-84
- 5) 北陸農政局上越農地保全事業所 (2001) : 農林水産省直轄地すべり対策事業板倉地区概要図
- 6) 細谷裕士 (1992) : 直轄地すべり対策事業板倉地区 (農林水産省構造改善局所管) における地すべり抑止杭について, 地すべり, 29 (1), 31-37
- 7) 今泉眞之・小前隆美・二平 聡 (2000) : 東京都における被圧地下水の涵養機能 - 長期間のトリチウム濃度変化による涵養機能評価 -, 応用地質, 41 (2), 87-102
- 8) 今泉眞之 (1996) : 中性子水分検層による第三紀層泥岩地すべり地のすべり面の判定方法, 地すべり, 32 (4), 9-18
- 9) 今泉眞之・濱田浩正・金子文宜・奥山武彦・小前隆美 (1993) : 千葉県鋸南町の地すべり地小流域における渓流水の水質形成機構, 地下水学会誌, 35 (3), 165-183
- 10) Gardner, W. and Kirkham, D. (1952) : Determination of soil moisture by neutron scattering, Soil Sci., 73, 391-401
- 11) International Atomic Energy Agency (1969, 1970, 1971, 1973, 1975, 1979, 1983) : Environmental Isotope Data No.1-7, World Survey of Isotope Concentration in Precipitation, IAEA
- 12) Nakano, R. et al (1996) : Estimation of pore pressure in disturbed mudstone from natural water content with special reference to landslide and squeezing swelling tunnel, Soils and foundations, 36 (4), 81-89
- 13) 仲野良紀・中里裕臣 (1993) : 地すべり粘土の自然含水比と間隙水圧, 第32回地すべり学会研究発表講演集, 279-282
- 14) 仲野良紀・清水英良・西村真一 (1992) : 断層粘土化した新第三紀層凝灰岩質泥岩の力学的性質, 農土論集 (157), 95-104
- 15) 仲野良紀・嶋崎藤雄・清水英良 (1989) : 珪藻土質泥岩の力学的異方性と限界伸びひずみについて, 農土論集, (141), 121-130
- 16) 仲野良紀 (1980) : 軟岩をめぐる諸問題 - 泥岩の力学的性質 -, 土と基礎, 28 (7), 1-10
- 17) 仲野良紀 (1964) : 由比地すべり母岩 (泥岩) の軟弱化と物性の変化について (その1), (その2), 土と基礎, 12 (11), 27-33, 12 (12), 3-8
- 18) Nakano Ryoki (1967) : On Weathering and Changes of Properties of Tertiary Mudstone Related to Landslide, Soils and foundations, (1), 1-14
- 19) 中村和善 (1982) : 新潟県高田平野南方地域における後期新生代の構造運動, 地質学雑誌, 88 (3), 155-175
- 20) 楠本岳志・川上勝幸 (1999) : 巨大地すべりのすべり面付近の含水比, 平成11年度地すべり学会研究発表会講演集, 115-118
- 21) 竹内篤雄・内藤光雄 (1992) : 地下水排除工と効果判定とその実例, 地下水学会誌, 34, 13-30
- 22) 吉松弘之 (1992) : 地すべり地の地下水特性と地下水排除工の効果, 地下水学会誌, 33, 235-264

Behaviors of groundwater flow caused by construction of drain tunnel in landslide area

- Using the water content of the bedrock and the radon concentration in the groundwater as an indicator -

ISHIDA Satoshi, HARA Ikuo , TSUCHIHARA Takeo , IMAIZUMI Masayuki

Summary

Monitoring of water content using neutron moisture logging was carried out for 18 months after the construction of drain tunnel with 2.5m (diameter) × 500m (length) × 50m(depth) in order to develop the evaluation method for efficiency of draining superfluous water around active landslide slip plane in landslide area in Niigata Prefecture. ^{222}Rn concentration and tritium concentration in groundwater as additional evaluation method was also monitored for five years. Consequently, the location of landslide slip plane was determined by distribution and fluctuation of water content of mudstone. About 2 % of average water content of mudstone around the tunnel decreased, that is, 20% of the pore water pressure in the landslide slip plane decreased for the first four months. Afterwards, it decreased gradually. It was assumed that the groundwater around the tunnel was recharged from rain before 10 yearer on the basis of the tritium and ^{222}Rn concentration. Therefore, these techniques are effective as the technique for investigating the effect of the drain tunnel.

Keywords : Landslide, Drain tunnel, Radon, Neutron moisture logging, Water content

Appendix

第三紀層泥岩地すべり地の含水比と間隙水圧

仲野ら (1992) は新潟県東頸城郡下の寺泊層, 椎谷層のボーリングコアで採取した泥岩をすり潰して加水し, スラリー状にしたものを懸垂型一面せん断試験器に入れて種々の鉛直圧力で正規圧密した後, 0.001mm/minの速度で排水せん断を行い, そのピーク強度をとって完全軟化強度とし, その時の含水比と次式の平均有効応力 (p' :kgf/cm²)

$$p' = \frac{(s_1' + 2s_3')f}{3} = \frac{(s_1' - s_3')f}{3} + s_3' \dots (1)$$

の関係を調べた。以下に仲野ら (1992), 北陸農政局 (1993) の結果を概略する。詳細は文献を参照されたい。

本調査地域に分布している寺泊層や椎谷層は 2 μm以下の粘土鉱物を60%以上含んでいる。このような粘土において, 土かぶりによる有効鉛直応力 s_1' は, すべり層 (シヤバンド) における平均有効応力 p' と等しく,

$$s_1' = p' \dots (2)$$

の関係がある。また, 完全軟化状態での含水比 (%) と, 平均有効応力 p' (kgf/cm²) の間には,

$$w = A - B \log p' \quad (A, B: \text{定数}) \dots (3)$$

の関係がある。寺泊層や椎谷層の泥岩では, 実験式,

$$w = 41.0 \pm 0.5 - 11.31 \cdot \log p' \dots (4)$$

が得られている。

完全軟化状態では, 側方土圧係数を $k_0 = 1$ とし, 土の湿潤単位体積重量 s_t を tf/m³, 深度 h を m の単位で表すとき,

$$s_1' = \frac{s_t \cdot h}{10} = p' \dots (5)$$

である。したがって (4) 式は,

$$\begin{aligned} &= 41.0 \pm 0.5 - 11.31 \cdot \log \frac{s_t \cdot h}{10} \\ &= 52.31 \pm 0.5 - 11.31 \cdot \log (s_t \cdot h) \dots (6) \end{aligned}$$

となる。また, 地下水位が地表面までであるとき (またはそれぞれの深さで間隙水圧を水頭換算した場合, その水頭が丁度地表面に達するとき), 本地域の泥岩の s_t は土質試験より 1.9tf/m³ 程度であるのでこの値を代入し, 水の単位体積重量 $s_w = 1\text{tf/m}^3$ とすると,

$$p' = \frac{(s_t - s_w) \cdot h}{10} = 0.9 \cdot h \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots (7)$$

である。したがって (4) 式は

$$\begin{aligned} &= 41.0 \pm 0.5 - 11.31 \cdot \log \left(\frac{0.9 \cdot h}{10} \right) \\ &= 63.61 \pm 0.5 - 11.31 \cdot \log (0.9 \cdot h) \dots (8) \end{aligned}$$

となる。(8) 式は限界状態である完全軟化含水比曲線 (Fc) を示す。

ところで, 間隙水圧を u (tf/m²) とするとき,

$$s_1' = p' = \frac{s_t \cdot h - u}{100} \dots (9)$$

である。したがって,

$$u = s_t \cdot h - 10 \cdot p' \dots (10)$$

である。(4) 式より

$$\log p' = \left(\frac{41.0 \pm 0.5 - w}{11.3} \right) \dots (11)$$

であるから, 自然含水比 w (%) がわかれば, その時の平均有効応力 p' は,

$$p' = \exp \left(\frac{41.0 \pm 0.5 - w}{11.3} \right) \dots (12)$$

として求められる。したがってこの値を (10) 式に代入すれば, その点に作用していた間隙水圧 u が求められる。