

地すべりのせん断強度に影響を及ぼす間隙水の異常流体圧と塩分濃度
Anomalous fluid pressure and salinity of pore water affecting shear strength of landslide.

○渡部直喜・佐藤壽則・西山成哲・古谷 元・王 功輝・千木良雅弘

○Naoki WATANABE, Hisanori SATO, Nariaki NISHIYAMA, Gen FURUYA, Gonghui WANG
and Masahiro CHIGIRA

The southwestern area of Niigata Prefecture is the highest landslide densities in Japan. Saline groundwater emerges from several landslides in this area and is an influential factor to the occurrence of these landslides. The geochemical approaches to groundwaters and the electromagnetic surveys revealed the hydrogeological structure of the large-scale landslides which was located on the outlet of saline waters from deep reservoirs and landslide-prone area where wide zonal distributions of saline water at depths of more than 50–100 m and fresh water at depths of shallower than 50–100 m. It is most likely that the saline groundwater emerging in the large-scale landslides is controlled by injections of the geopressed saline waters from deep reservoirs. The injection of the geopressed waters into the landslide-mass likely results in excess pore pressure, which is possible cause of landslide occurrence. On the other hand, the shallow fresh groundwater is inferred to be meteoric water that replaced the saline groundwater, which likely weakened the bedrock, resulting in landslides. Thus, pore saline water plays an important key role in the occurrence of landslides, both large-scale landslides with low frequency and common landslides.

1. はじめに

新潟県をはじめとする日本海側の新第三紀層（主に泥岩）分布地域は、地すべり多発地帯として知られる。地すべりの多くは、豪雨や融雪によって引き起こされ、地表水の浸透に伴う間隙水圧の上昇によって発生すると考えられてきた。しかし、まれに豪雨や融雪を誘因とせずに発生する地すべりもある。さらに、巨大～大規模地すべりの発生メカニズムについては、いくつかの仮説があるものの、学界で確立された定説はない。一方、この地すべり多発地帯は油田・ガス田地帯でもあり、石油・ガス付随水を起源とする高塩分濃度の地下水が大規模地すべり地に限定的に出現する。高塩分濃度地下水（塩水）は、化石海水起源であり、地表から浸透した雨水・融雪水ではない。高塩分濃度地下水の分布状況を把握するため、新潟県南西部、東頸城丘陵の地すべり地多発地帯において、CSMT法およびCSAMT法電磁探査を実施した。これにより、深度約1000mまでの電気抵抗の鉛直断面、つまりは高塩分濃度地下水の分布状

況が明らかになった。これらの結果を踏まえ、本研究では、地すべり、とくにせん断強度と高塩分濃度地下水の関係について考察する。

2. 異常高圧流体と地すべり

調査対象の地すべり（新潟県上越市の釜塚-段子差地すべり、同市宇津俣地すべり、沖見地すべり）に出現する高塩分濃度地下水は、化石海水を起源とする地球化学的特徴をもつ（例えば、渡部ほか、2009）。これらは本来、石油・ガス付随水と同様に、難透水性の厚層泥岩を帽岩とする条件下に貯留され、流体圧が静水圧を大きく上回る異常高圧流体として存在している。例えば、釜塚-段子差地すべりの高塩分濃度地下水は、塩化物イオンを約16,000 mg/kg含む。2002～2013年までの断続的調査の結果、これらの地下水の水質、酸素・水素同位体組成はほぼ一定であった。このことは、塩水が地下深部の貯留層から、天水（降雨・融雪水）起源の地下水で混合・希釈されることなく、持続的に供給されていることを示唆する。さらに、塩

化物イオン濃度および酸素・水素同位体組成には、膜ろ過作用の痕跡が認められる。それは、異常な流体圧の条件下で、逆浸透膜としての難透水性泥岩を塩水が通過したことを意味する。

釜塚-段子差地すべり地における CSMT 探査の結果、低比抵抗帯 ($< 10 \Omega \cdot m$) は地表から-300m ~ -50m の深度に広く分布していた。本地すべりのすべり面深度は 140 m であり、低比抵抗帯の分布域に位置する。宇津俣地すべりにおける CSMT 探査では、深部の貯留層にある異常高圧の塩水が断層等の亀裂や高透水性の地層を通じて地すべり土塊まで上昇する経路が可視化された (佐藤ほか, 2017)。高塩分濃度地下水が確認された沖見地すべり (古谷, 2005) における CSMT 探査の結果も前述の両地すべりと同様であった。

3. 間隙水の塩淡境界と地すべり

多数の地すべり地形が認められる新潟県東頸城丘陵の長倉山 (上越市安塚区真萩平~朴の木) 周辺地域において、CSAMT 法探査を実施した結果、泥岩分布域の深度 50~100 m 以深には高塩分濃度地下水が広く分布し、それ以浅には天水起源の地下水が賦存する状況が明らかとなった (Nishiyama et al., 2020)。両者の境界を塩淡境界と呼ぶ。

Tiwari and Ajmera (2015) や Di Maio et al. (2015) 等は、土質試験に基づき、地下水の塩分濃度と地すべり発生の関係について言及した。彼らの研究によれば、間隙水の塩分濃度の低下にともない、土・岩石試料のせん断強度や一軸圧縮強度は顕著に低下する。つまり、地下水の塩濃度の低下は、斜面の不安定性に関与する可能性を指摘した。

塩淡境界以浅の高比抵抗 ($> 20 \Omega \cdot m$) 領域の成因は、間隙の塩水が淡水で置換された結果と考えられる。間隙塩水の淡水への置換によって、岩石の強度が有意に低下することから、この現象は地すべりや斜面変形の素因となっている。

4. 考察

CSMT/CSAMT 探査および地下水の地球化学的研究の結果は、塩水の湧昇域での大規模~巨大地

すべり発生を示唆する。これまで謎であった巨大~大規模地すべりの発生には、強い地震動などを誘因とする異常高圧流体の急激な湧昇が関与している可能性がある。すなわち、異常高圧流体の塩淡境界付近への注入は、大規模な土塊をも不安定化させる過剰間隙水圧を生じさせることで、地すべり発生の主因になると考えられる。

他方、深度 50~100 m に定置する塩淡境界は、地表から浸透した地表水 (淡水) の循環を制御している。静水圧を大きく上回る間隙塩水を有する低比抵抗領域が 50~100 m 以深に分布することで、雨水・融雪水の浸透が阻害され、淡水の循環経路は短くなり、短時間の循環となる。この現象がむしろ塩水から淡水への置換と岩石の強度低下を促進し、さらには小~中規模の地すべり発生頻度を高めていると考えられる。

発生頻度の低い巨大~大規模地すべりにおいても、あるいは発生頻度の高い小~中規模地すべりにおいても間隙水としての塩水が発生要因の鍵となっている。巨大~大規模地すべりでは過剰間隙水圧として、小~中規模地すべりでは間隙水の淡水化によって、斜面の不安定化と密接に係るせん断強度の低下に重大な影響を及ぼしていると考えられる。

謝辞：本研究には、京大防災研一般共同研究 2021G-08 と科研費 22H01739C の一部、科研費 22K18867 を使用いたしました。

文献

- Di Maio et al. (2015) : *Landslides*, 12, 657-667.
古谷 元ほか (2005) : *応用地質*, 45, 281-290.
Nishiyama et al. (2020) : *Island Arc*, 29, 1-20.
佐藤壽則ほか (2017) : *日本地すべり学会誌*, 54, 209-214.
Tiwari and Ajmera (2015) : *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1), 04014086
渡部直喜ほか (2009) : *地学雑誌*, 118, 543-563.