■破砕帯地すべりにおける移動体の変形特性と抑止工の機能に関する考察

Deformation characteristics of landslide body and effect of prevention works at fractured zone

木下篤彦 Atsuhiko KINOSHITA／林野庁治山課（現所属：独立行政法人土木研究所）

Forestry Agency (public works research institute)

榎田充哉* Mitsuya ENOKIDA／国土防災技術株式会社 Japan Conservation Engineers & Co., Ltd

山田泰弘 Yasuhiro YAMADA／国土防災技術株式会社 Japan Conservation Engineers & Co., Ltd

岩田恭志 Yasusi IWATA／国土防災技術株式会社 Japan Conservation Engineers & Co., Ltd

キーワード：リフトオフ試験，変成岩，移動特性

Key words: field lift-up test, metamorphic rock, movement characteristics

1. はじめに

破砕帯地すべりは四国地方をはじめ，紀伊半島や長野県南部など日本各地に分布しているが，移動体の地表付近に破砕された変成岩などが厚く分布することが多いことから，亀裂や陥没・隆起などの移動に伴う地表現象が不明瞭なことが多く，ブロック範囲の特定さえも難しい事例が多い。年間数cm以上の変動が見られる活発な地すべりでも，同じブロック内の箇所毎の変動時期がずれることがあり，破砕された変成岩等の集合体として特異な移動形態を示すことが，筆者らが担当した各地の動態観測で断片的に確認されている。八木ほか（1989）は粘土のクリープ特性に基づいた破砕帯地すべりの変形挙動解析を行っているが，移動体内の変形ではなく移動体全体の移動特性に関する研究である。山田ほか（2000）は全国の5カ所の地すべり地における地下水位と地すべり変動の関係を示しており，その中に徳島県美馬郡の漆日浦地すべりの変動特性を示している。このように破砕帯地すべりの移動体全体の移動特性に関する研究成果はいくつか発表されているが，移動体そのものの変形特性に関してはほとんど研究がなされていない。移動体の深度方向の変形特性は孔内傾斜計などで確認できることが多いが横断方向や平面的な変形特性はあまり把握されていない。

一方，杭工やアンカー工などの地すべり抑止工の抑止機能は移動体の変形特性に大きく影響を受ける。杭工やアンカー工は設置箇所毎の地すべり変形量がほぼ同じという前提で設計されており，設置箇所毎の変形量が大きく異なる場合は，それを考慮した設計が必要となる。特に杭工は設置した直後の抑止力はゼロであり，地すべりの移動量に応じて受動的に抑止力が発揮されることから，移動体の変形特性の把握は重要である。

本研究ではそのような破砕帯地すべりの移動体内の変形特性をアンカーのリフトオフ試験や過去の移動杭観測

結果から検討する。また，その変形特性に基づいた抑止工の抑止機能の発現機構及び適切な抑止工設計手法に関する考察を行った。

2. 調査地及び調査の概要

2.1 調査地の概要

調査地は長野県下伊那郡大鹿村鹿塩地内の小塩地すべりである。図-1に位置図と全体の移動ブロックの分布及び地質分布を示す。対象としたブロックは長さ100m，幅70m，深さ8mの局所ブロックで斜面傾斜は約20°となっている。長さ820m，幅380m，深さ30mの本体ブロックの移動体の頭部に発生した小ブロックで，さらにそれを覆うように局所拡大ブロック，そのさらに外側の浅層ブロックがあり，各移動ブロックが積み重なる積層構造となっている（図-1，図-2参照）。地質は三波川帯に属する泥質片岩・塩基性片岩および珪質片岩（黒色・淡緑色），御荷鈴帯に属する緑色岩類・超塩基性岩・蛇紋岩で構成される。

図-3に当地区周辺の地質構造の模式図を示す。当地区末端下流に位置する鹿塩川とほぼ平行に中央構造線があり，その構造運動によると思われる向斜軸構造が当該地に認められている。この地質構造に起因すると思われる大規模な地すべりが過去に繰り返し発生したことが空中写真判読や地表の古い亀裂などからわかっている。本体ブロックの移動層は過去に何度も繰り返されたと思われる地すべりの崩積土であると考えられる。写真-1は平成18年に局所ブロックに施工したアンカー工のチェックボーリング時のコア写真（CB18-1802孔）のひとつである。このコアでは12m付近がすべり面であるが，移動層も不動層も砂礫と粘性土が混じり合った状態である。

2.2 調査内容

平成16年に局所ブロックの地すべり活動が確認され，平成18年度にアンカー工が2段施工されている。アンカー工の施工条件は表-1に示す通りである。

* 連絡著者／corresponding author
〒330-0074 さいたま市浦和区北浦和2-12-11
2-12-11, kitaurawa, urawa-ku, saitama, 330-0074, Japan

図ー1 小塩地すべり周辺の地質と移動ブロック

図ー2 小塩地すべりの断面構造 (A-A'測線)

図ー3 小塩地すべりの周辺の地質構造模式図

写真ー1 局所ブロックのボーリングコアの状況

表ー1 アンカー設計諸元

項目	諸元
アンカー体	(下段) SSL-35CE 型φ15.2-1 パッカー無し (上段) SSL-35CE 型φ17.8-1 パッカー無し
掘削口径	φ115mm
アンカー材	(下段) P C鋼より線φ15.2 mm×1 本 (上段) : P C鋼より線φ17.8 mm×1 本
施工幅	(下段) 68.0 m, (上段) 60.0 m
打設間隔	2.0 m
打設角度	73.3°
打設本数	(下段) 34 本, (上段) 30 本
設計荷重	(下段) 145 kN/本, (上段) 165 kN/本
定着荷重	(下段) 70 kN/本 (設計引張荷重の50%) (上段) 80 kN/本 (設計引張荷重の50%)
アンカー体長	(下段) 6.0m, (上段) 7.0m
パッカー長	(下段) 6.0m, (上段) 7.0m

その後、平成20年に上段アンカーの中央付近の3本の破断が確認された。原因は破断した3本のアンカー体の定着位置が深く、局所ブロックを取り巻く局所拡大ブロックのすべり面以深まで達していたことから、局所拡大ブロックの滑動によりこの3本に過荷重が発生して破断したものである。その他のアンカーの健全性を確認するために平成20年と平成22年の2回、リフトオフ試験が実施された。リフトオフ試験の実施日は以下の通りである。

第1回目：平成20年1月27日～28日

第2回目：平成22年8月23日～24日

図-4に局所ブロックの断面図とアンカーの配置を示すが、2段のアンカーのうち、上段のアンカーは設計荷重165kN（ tendon降伏荷重330kN）に対して初期緊張荷重は約50%の80kNで定着されていた。一方、下段のアンカーは設計荷重145kN（ tendon降伏荷重222kN）に対して初期緊張荷重は約50%の70kNで定着されていた。リフトオフ値によって試験実施時点での緊張荷重を確認し、初期緊張力との差を調べた。

この他、局所ブロックが含まれる本体ブロックについては移動が活発であった昭和62年～昭和63年に移動杭観測が実施されている。

3. 調査の結果

3.1 リフトオフ試験の結果

リフトオフ試験結果の良否を判断するために使用した荷重-伸び曲線について、代表的な事例を図-5に示す。

図-5にはリフトオフ値が定着荷重より大幅に大きくなった事例と大幅に減少した事例、若干低下した事例の3事例を掲載している。いずれの事例でも明瞭なリフトオフ値が計測されている。平成20年と平成22年に実施したリフトオフ試験の何れのアンカーについてもリフトオフ値が明瞭に現れていることから、2回のリフトオフ試験はどちらも極めて良好な試験であり、リフトオフ値の判定誤差（測定誤差）も小さいと判断した。

リフトオフ試験のリフトオフ値を元に各アンカーの定着時からの荷重差を調べた結果を図-6に示す。2回の試験結果について記号を分けて表示している。縦軸は初期緊張力との荷重差で、横軸はアンカーNoとなっている。横断方向での上段と下段のアンカーの相対的な位置が合うように調整してある。ほとんどのアンカーが定着時より緊張力が増加しているが、上段アンカーは向かって右側のアンカーに極端な荷重落ちが確認できる。これは現地の地表変状から局所ブロック内の末端の小崩壊の頭部に位置し、受圧版位置の表土が抜けたことによる。

3.2 本体ブロック全体の変形特性

図-7は平成6年から平成19年までの本体ブロックの年間移動量の経年変化である。平成7年の年間移動量は429.9mmである。本体ブロックの年間移動量は対策工

図-4 局所ブロックの縦断面図とアンカー配置

の効果により平成8年頃から減少に転じたが、それ以前は非常に活発であった。図-8は移動杭観測における昭和62年～63年の2年間の累積移動量の分布である。最上部のG測線では最大2m以上の累積移動量となっている。その移動量は側面に近い位置では小さく、中央付近では大きくなる傾向にある。また、全体的な傾向として頭部の移動量が大きく、末端に近くなると移動量が小さくなっている。その末端付近のF測線の最大移動量は50cm程度である。

(a)荷重が大幅に増加したケース(H22,上段 No.8)

(b)荷重が大幅に低下したケース(H20,上段 No.25)

(c)荷重が若干低下したケース(H22,下段 No.15)

図-5 代表的なリフトオフ試験結果 (H20, H22)

図-6 定着時からの荷重差の分布と規則性

図-7 本体ブロックの年間移動量の経年変化

3.3 リフトオフ試験による地すべり移動体の変形量分布の推定と変形特性

先ほど示した図-6には測定値を多項式で補間した曲線を併記している。上段アンカーは荷重が増加した箇所と減少した箇所の差が大きく測定値を補間しても明瞭な特徴はない。下段アンカーに着目すると平成20年度の結果も平成22年度の結果もsin曲線のような分布形となっている。また、平成20年度の結果では初期緊張力からの荷重増加がほぼゼロの箇所も中央部と両端に存在する。

図-9は平成20年に第1回目のリフトオフ試験を実施した時点での局所ブロック内の地表変状とアンカーの配置を示した平面図である。局所ブロックの中に小さな小崩壊が複数発生し、小ブロック化している。上段アンカーで緊張荷重が減少している位置は、局所ブロック末端に発生した小崩壊の頭部に位置している。平成20年度の下段アンカーで荷重増加がゼロの位置が中央部にあるが、その位置は並んで発生した2つの小崩壊(A-1, B-2ブロック)の間に位置している。

図-10は下段アンカー施工時の展開図である。アンカー体長は5mで、全体の掘削長は11.5m~14mとなっており、アンカー毎の自由長に大きな差はない。このことから図7に示す荷重差の違いはアンカー位置での移動体内の変位の違いに起因すると考えられる。

図-11は図-6の測定結果を元に定着時からのアン

図-8 本体ブロックの移動杭観測結果(昭和63年度)

図-9 局所ブロック内の地表変状とアンカー配置

カー材の伸び量を下段アンカーについて算定したものである。アンカー材の伸び量は初期緊張力からの荷重変化量がアンカー材の軸方向の弾性変形に直接寄与するとしてフックの法則より単純に伸び量を求めたものである。自由長における摩擦損失や地すべり滑動に伴うアンカー材の屈曲の影響などは考慮していない。

平成20年度の値で荷重が増加している範囲は局所ブ

図-10 下段アンカーの施工時の展開図

図-11 定着時からの下段アンカーの伸び量

ロック内の小ブロックであるA-1ブロック及びB-2ブロックの範囲と一致している。つまり、このアンカー材の伸び量は2つの小ブロックの移動体内の変形量を反映したものであると考えられる。1つの小ブロック内のアンカー材の伸び量は中央部が大きく両端で小さい分布型を示しているが、この分布は前章で示した本体ブロック全体の変形量の分布（図-8）と類似している。この点からもアンカー材の伸び量が小ブロック内の移動体の変形を反映した量であると推定できる。

一方、平成22年度の伸び量の分布は、平成20年度に伸び量がほぼゼロであった両端や中央部にも伸び量の増加がみられ、全体が平成20年度の値を平行移動したような分布となっている。つまり、平成20年度からの2年間は両端や中央部にも移動体の変形が発生し、その間の変形速度は同程度だと判断することができる。

本体すべりの移動特性と小ブロックの変形特性から当該地すべりの移動体変形の特徴をまとめると以下のようになる。

- ① 1つの移動ブロックの初動時においてはブロック中央部での変形量が大きく側壁部で小さい曲線形の変形量分布となる。
- ② 地すべり変位が継続して中央部と側壁部の変形速度が同程度となっても、総変形量は初動時の変形量の違いがそのまま残る。

4. 移動体変形特性と抑止工の抑止機能に関する考察

アンカー工は抑止力を人為的に操作可能であり、施工

完了直後から設計荷重の100%の抑止力を発揮することが可能であるが、実際には設計荷重の30~80%など、設計荷重より小さい初期緊張力とすることが多く、施工直後は設計荷重の100%の抑止力を発揮していない。これは施工後の各アンカー位置での地すべり移動体の変位量が同一になることを期待した施工方法である。よって、各アンカー位置での地すべり変位が大きく異なる場合、この施工方法の前提が満たされなくなるという重大な問題が発生する。一方、杭工は施工直後の抑止力は常にゼロであり、地すべり移動体の変形に応じて杭材にタワミが発生し、そのたわみ量に比例して抑止力が発揮される。よって、杭施工位置毎の地すべり変形量が大きく異なると、全ての杭材の抑止力が設計荷重に達する前に、一部の杭材が破断するという問題が発生する。よって、抑止工が十分な抑止機能を発揮するためには移動体の変形分布の把握が重要である。当該地すべりの移動特性をこのような抑止工の抑止機能発現の観点から検証する。

本体ブロックの変形特性と局所ブロックの変形特性で共通する点は、①移動体内の変形特性は均一でなく場所によって変形量に大きな差が生じること、②中央部の変形量が大きく、側壁に近づくと徐々に変形量が小さくなる、ということである。

図-12は局所ブロックの下段アンカーの緊張力そのものの変化を表したものである。平成22年度の緊張力が部分的に150kNで並んでいるのはテンドンの安全性を考慮して最大載荷荷重を150kNとしたためである。145kNが設計荷重であるが、平成22年度の時点では一部のアンカーではすでに設計荷重に達しているものの一部のアンカーはまだ設計荷重に達していない。この事例では2つの小ブロックの影響で、局所ブロック中央部でのアンカーが設計荷重の70%程度にとどまっている。このままでは全アンカーが設計荷重に達する時点で一部のアンカーは過荷重で破断する可能性がある。これらのことからアンカー工の抑止機能に関する留意点を整理すると以下ようになる。

- ① 移動体の変形量が横断方向で大きく異なる地すべ

図-12 アンカー緊張力変化と設計荷重の関係

りにおいて, 初期緊張力と設計荷重に大きな差がある場合, 全アンカーが設計荷重に達する時点の変形量が箇所毎に異なり, 同時に設計荷重を確保することは難しい。

- ② このような地すべりでは, 全アンカーが同時に設計荷重となるためには初期緊張力と設計荷重の差を極力小さくする必要がある。

一方, 杭工は設置直後の抑止力はゼロであり, 設置箇所毎の変位量の大きさに応じて設置後徐々に抑止力が発揮される。そのため, 本事例のように設置箇所毎の変形量が大きく異なる地すべりにおいて杭工の抑止機能を十分に発揮させることは非常に難しい。

5. おわりに

本報告ではアンカー工のリフトオフ試験の結果を元に以下の事を示すことができた。

- ① アンカー工のリフトオフ試験結果から, アンカー工施工後の移動体の変形量の分布を推定することができる。
- ② 移動体の横断方向の変形量分布が場所によって大きく異なる破碎帯地すべりの事例が存在する。

杭工 (シャフト杭工を含む) や初期緊張力を設計荷重の100%未満とするアンカー工の抑止機能は対策工施工後の移動体の変形特性に大きく左右される。今回紹介した事例のように移動体の変形量が横断方向で大きく異なる地すべりにおいては, その移動特性を考慮した抑止工の設計が必要となる。例えばアンカー工を設計する場合, 初期緊張力を設計荷重の100%と指定するなどの対応が必要である。杭工については工法採用の是非についても検討する必要がある。

このように, 抑止工を設計する場合は, 対象の地すべり地の移動特性を事前に十分に把握することが重要である。また, 施工直後から設計荷重と同等の抑止力を発揮できない抑止工については, 抑止機能を検証するために対策工施工後の動態観測が重要である。移動杭などの高密度の動態観測によって移動体の変形特性を把握することは可能であるが, 通常, 抑止工を導入した地すべり地については, 動態観測が短期間で打ち切られることが多い。また, 動態観測が長期間継続されたとしても必要最小限の観測ポイントでの観測がほとんどであり, 移動体の変形が把握できるような高密度の動態観測体制を長期間継続することは無い。

アンカー工の場合は維持管理の目的でリフトオフ試験が以前より頻繁に実施されるようになっている。今回示したようにリフトオフ試験結果も動態観測の代用として利用することが可能である。この試験結果を単に個々のアンカーの健全性の判断のみに用いるのではなく, アンカー工導入後の移動体の変形状況の把握やアンカー工全体の抑止機能の検証にも活用すべきである。また, 複数の地すべり地におけるそれらの結果を取りまとめることによって, 地すべりの特徴とアンカー工の適否の関係が明確となり, 地すべりの特徴に合わせた適切なアンカー工設計方法への改良など, 新たな技術の展開が生まれると考えている。

参考文献

- 八木則男, 榎明潔, 矢田部龍一 (1989): 破碎帯地すべりの移動量予測, 土木学会論文集, 第406号, pp. 53-60.
- 山田正雄, 山崎勉, 山崎孝成 (2000): 地下水流動と地すべり変動の特徴について, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 22-31.
- (原稿受付2012年4月4日, 原稿受理2013年10月3日)