■澄川地すべりにおける大口径鋼管杭施工事例

A case of construction with large-bore deterrent piles in Sumikawa landslide

国土防災技術(株)／小野由紀光

Japan conservation engineers Co. Ltd./Yukimitsu ONO

東北森林管理局／江坂文寿

Tohoku regional forest office/Fumitoshi ESAKA

国土防災技術(株)／磯貝尚弘

Japan conservation engineers Co. Ltd./Naohiro ISOGAI

キーワード：地すべり，抑止杭，熱水変質，二段階肉厚杭

Key words：landslide, deterrent piles, hydrothermal alteration, double thickness pile

1. 澄川地すべりの概要

澄川地すべりは、秋田県鹿角市八幡平宇熊沢国有林135林班に位置し、平成9年に5月10日に地すべり活動が活発化し、翌11日に大規模な地すべり災害が発生したものである。押し出した土砂は土石流となって下流域を襲い、澄川温泉、赤川温泉の宿泊施設16棟が全壊するとともに、約1km下流にある国道341号の赤川橋が埋没した（写真－1）。地すべりの規模は、斜面長650m、幅150～350m、すべり面深度50～70m、活動面積0.17km²、地すべり土塊量600万m³である。（写真－2）

秋田営林局（現東北森林管理局）では調査ボーリング28本を中心とした地すべりの発生機構調査を行い（図－1）、学識経験者を含めた澄川地区土砂災害対策検討委員会による助言を経て対策工法を決定した。

災害発生直後に生じた水蒸気爆発に象徴されるように、当該箇所は随所から温泉が湧出する地熱帯にあり、この熱水変質が当該地すべりの発生機構に大きく関わっていたため、対策工法はそれらにも配慮したものである。本稿で紹介する大口径鋼管杭による抑止工はその中の基幹となる一工法である。

2. 地すべり機構調査結果

2.1 地質

地すべり地内の地質は、新第三紀中新統の遠部層（凝灰岩・頁岩・砂岩・礫岩互層）を基盤とし、これを覆う第四紀の澄川凝灰岩および焼山火山噴出物の曾利ノ滝溶岩（安山岩）から構成される（図－2）。地すべり地内の地質構造は、新第三紀層が冠頭部で北傾斜、末端で南傾斜を示す。また、新第三紀層上面の形状は、災害時に滑動したブロックの中央付近が最も深くなる盆状を呈している。この上位に節理や亀裂が発達した硬質の安山岩溶岩が覆うキャップロック構造となる。地すべり左側壁に露出する安山岩層には、NW－SE方向の節理が発達する。とくに上部緩斜面と下部緩斜面の間において、安山岩内に破碎された断層が形成されていて、破碎部には熱水変質による鉱物（モンモリロナイト）が生成されている。

写真－1 地すべり発生時の状況

写真－2 災害発生直後の地すべり全景

図-1 調査ボーリング配置図

図-2 地質図

2.2 すべり面

機構調査の実施期間内に、動態観測で捉えられた地すべり移動は生じなかったため、すべり面は、水文地質上有意と思われる要因を突き合わせて判定した。ただしこのすべり面の形成には、当該地特有の熱水変質が強く関わっていることが調査結果より判明しており、このため精度高くすべり面が推定できたものと考えられる。すな

写真-3 ボーリングコア写真(BV-9-15)

図-3 孔内水温の深度分布(BV-9-15)

わち、後述するようにボーリングを利用した種々の調査において、深度方向における特異要因が、特定の深度に収斂する特徴がみられ、それに相当する深度のボーリングコアに鏡肌や擦痕などの有意な情報が確認されている。

写真-3にボーリングコア写真の例(BV-9-15)を示し、図-3、図-4、図-5にその孔で測定した孔内水温、pH、モンモリロナイト検出量を示す。同孔で判定したすべり面深度は、基盤岩の遠部層(変質凝灰岩)上面のGL-68.0mであるが、その相当深度付近でいずれの測定値も飛躍的に大きな値を示す特徴がみられる。このうち孔内水温は、掘削中に蒸気が噴出する恐れがあるため、作業の安全対策として測定していたものであるが、安山岩を掘り抜いたあたりから水温が上昇し、基盤の変質凝灰岩に達すると80~100℃以上の高温を示した。そしてこの基盤岩における高温状態は掘削した全孔に共通してみられた。

図－４ ボーリングコアのpH値の深度分布(BV-9-15)

図－５ ボーリングコアに含まれるモンモリロナイト検出量の深度分布(BV-9-15)

図－６ 地すべり断面図(E側線)

表－１ 安定解析結果

	C 測線	D 測線	E 測線	F 測線
間隙水圧条件	初期安全率時 ($F_0=1.00$)			
Janbuの修正係数	1.0547	1.0551	1.0525	1.0578
断面積 A (m^2)	8,692.89	18,859.66	27,320.79	23,637.44
地すべり抵抗力 ΣS (kN/m)	16,906.17	36,696.29	53,650.02	47,940.40
地すべり力 ΣT (kN/m)	22,594.13	41,681.01	59,459.09	42,529.19
粘着力 c' (kN/m ²)	0			
せん断抵抗角 $\tan \phi'$	0.139027 ($\phi' = 7.9149^\circ$)			
二次元安全率 F_2	0.7892	0.9289	0.9497	1.1924
三次元安全率 F_3	1.000			

これらの測定結果は、すべり面の形成に基盤岩の熱水化作用が大きく関わっていることを示すものと考えられる。すなわち、第四紀層が地熱に対して帽岩となっていることから基盤岩との間で熱水変質作用が異なり、層界付近において熱水変質によりモンモリロナイトが形成され、亀裂に富んだ上位の安山岩から供給された地下水により土質強度の低下が生じていたものと推定される。

推定した主測線における地すべり断面図を図－６に示す。すべり面形は、主動的滑動を示したと考えられるA-1ブロックにおいては第三紀層（遠部層）上面に沿った円弧状、瞬時に誘発されたと思われるその上部では平板に沿って滑落した形態を示し、その形状は図－６中に示すように災害前からの地形変化をよく説明するものとなる。

2.3 安定解析

安定解析の対象は、今後予想されるすべりを全体が一体化したものとして想定したため、図－６中のAブロックを主とした。なお、A-1ブロックについても対策工の安全性の検証対象として位置づけている。安定解析式には、4本の測線(C, D, E, F)をいたLambe-Whitmanによる近似三次元安定解析法を用い、各々の二次元安定解析には簡易Janbu法を用いた。解析結果を表－１に示す。

3. 対策方針の検討

災害発生時にみられた直接的被害の甚大さや、その後も下流域において数ヶ月にわたり住民が避難生活を余儀なくされた事態を考慮して、対策には万全を期す必要があった。そのため、最も信頼性が高い抑止工を主工法に位置づけ、目標安全率を $F_s=1.2$ に設定した。

ただし、安定解析結果にみるように、地すべり接線分力の総和は膨大であり、目標までの不足分の安全率を抑止工のみでまかなうことは困難かつ著しく不経済となる。したがって、抑止工と抑制工との組合せを検討した。抑制工としては、地すべりの主たる部分のすべり面形が円弧状を示すことから、その受動部における盛土は押さえの効果が大きく期待できるため、頭部の排土工とその土砂による押さえ盛土工による工法を選定した。なお検討当時には、抑制工の補完工法として、1本あたり最長

410mにおよぼボーリング暗渠工（横ボーリング工）の施工を地すべり末端付近に計画していた。しかしながら、時間の経過とともに施工予定斜面内で蒸気やガスの噴出が顕著となったため（写真－４），作業の著しい危険が予想されたことから採用をとりやめた。その代わりに排土工と押さえ盛土工の土量を増加させる方向で計画を見直し，最終的な排土形状を決定している。（図－７）

一方，抑止工としては，以下の理由によりアンカー工の採用は困難と判断し，大口径鋼管による杭工を採用するものとした。

- ① アンカー受圧版を設置すべき斜面内は総じて高温で，前述のように蒸気やガスが噴出するため，施工が極めて困難である。
- ② 基盤岩が高温で変質も著しいため，定着部の確実な造成が難しい。
- ③ １本当たりのアンカー長が100m近くなる上，多段施工を必要とするため，極めて不経済となる。

写真－４ 地すべり末端側における噴気の様子

図－７ 対策工平面図

大口径鋼管杭については，その当時でシャフト杭に匹敵する口径の縦坑を掘削する工法（全周回転式オールケーシング工法）が開発されており，当該地すべりのすべり面形状からみて，杭工の適性が高いものと考えられた。また，後述するように，当初懸念された強酸性や高温による障害要因に関しては，地すべり地内で測定したpHがおおむね7前後の中性を示すこと，地すべり中腹より上流側においては，基盤岩の温度が相対的に低くなることから，施工位置の慎重な見極めにより施工は可能と判断した。

以上の検討より対策工による安全率計画を以下のように設定した。

初期安全率	$F_0 = 1.00$
大口径鋼管杭工	$F_1 = 1.05$
排土工・押さえ盛土工	$F_2 = 1.20$

ここで，初期安全率を $F_0 = 1.00$ としたのは，災害後に地すべりの滑動が認められないことや，規模の膨大さにとまなう経済性に配慮したものであるが，対策途上において滑動の兆候が見られた際には，それに基づき初期安全率を含めた見直しを行うことを前提としたものである。

4. 大口径鋼管杭工の設計

4.1 施工位置の検討

既往文献における澄川温泉のpHは2.1の強酸性を示していたため，鋼管杭の防食を予め検討する観点より，調査孔内を含むさまざまな位置から採水し水質分析を行った。調査孔の孔内水で測定されたpHは，1孔を除き6.3～7.3でほぼ中性を示しており（表－２），BV-9-23のみpH11.6となるものの，酸性による浸食性には問題ないものと考えられた。他のマグネシウムイオン(Mg^{2+})，硫酸塩(SO_4^{2-})についても浸食性が問題とならないため，鋼管表面の防食措置は必要がないものと判断した。

したがって，問題要因を地熱のみに絞って施工位置を検討した。前述のとおり，調査孔掘削時における孔内水温はすべり面付近に達すると急激に上昇し，とくに地すべり下流側では地表近くから100℃を超えることが確認されていたため，計画は不適当と判断された。これに対して中腹より上流側においては相対的に温度が低くなることから，その範囲内で杭工の設計が可能な位置を検討した。図－８にすべり面直下付近で測定した孔内水温の等温線を示す。図－９は主測線（E測線）における孔内

表－２ 孔内水の水質分析結果

分析項目	単位	孔名 深度	BV-9-6 GL-36m	BV-9-10 GL-44m	BV-9-15 GL-67m	BV-9-16 GL-67m	BV-9-18 GL-70m	BV-9-20 GL-51m	BV-9-23 GL-57m	BV-9-24 GL-56m
温度	℃		27.7	39.5	71.5	62.0	57.1	50.1	34.3	35.7
pH			6.7	6.3	6.6	6.7	7.3	6.9	11.6	6.7
RpH			7.1	8.4	8.7	8.3	8.2	7.9	11.6	7.7
HCO ₃ ⁻	mg/l		11	210	460	180	96	50	250	30
Cl ⁻	mg/l		3.5	970	370	1400	4.1	4.4	3400	170
SO ₄ ²⁻	mg/l		53	130	7.2	28	32	57	79	51
Mg ²⁺	mg/l		5.7	17	6.6	9.3	4.4	7.1	0.54	6.6
Ca ²⁺	mg/l		11	56	55	29	16	16	79	16
Na ⁺	mg/l		6.1	670	340	950	23	11	2300	100
K ⁺	mg/l		1.3	6.5	15	6.4	2	2.7	20	3.2

水温の温度分布を示す等温線である。鋼管杭工の施工位置は、設計が可能な範囲内で地中温度が80℃を超えないことを目安として、最も効率的な位置を選定したものである。

なお、杭の中心線は、地形条件や地中温度等に対する施工性を考慮して、主測線との直交方向から10°斜交させ、それに応じて杭間隔を補正している。

4.2 二段階肉厚杭の設計

厚肉鋼管の普及により単列施工による杭工の選択幅が拡大し、長尺の鋼管杭工の施工例が多く見られるようになってきている。ただし、同時に長尺大口径の厚肉鋼管は相当の重量となり、施工性、経済性に相応の負担をとまなうこととなる。ことに本ケースで採用した鋼管杭の仕様では、1mあたりの重量が624(kg)にもなることから、少しでもその軽量化を図る意義は大きいものと考えられた。

ここで、抑止杭に発生する曲げモーメントに着目すれば、すべり面を挟む上下のある高さにその最大値が現れ、

図－8 すべり面掘削直後の孔内水温等値線図

それぞれのピーク位置から上または下でのモーメントは漸減する。二段階肉厚杭はそれに着目して、所要の肉厚を必要としない区間について薄肉の鋼管を使用するものであり、本ケースでもその考え方に基づいた検討を行った。

二段階肉厚杭の設計方法は、地すべり工学・最新のトピックス（申潤植，1995，山海堂）に準拠し、設計式は補強杭の設計式を用いた。

設計結果は表－3，図－10に示すとおりである。採用した杭仕様は以下のとおりである。

杭 材：SKK490相当品
杭 外 径：800mm
肉 厚：33mm，薄肉区間10mm
施工間隔：6.4m
杭 本 数：49本
杭総延長：2,465m

杭施工横断の展開図を図－11に示す。全体の杭総延長2,465mに対し、薄肉区間長は1,110.5m(45%)となり、これにより軽減された杭重量は476tである。

なお、鋼管杭の接合は、接合部に「裏当て金具」を当て、ターニングロールを用いた下向き溶接を基本とし、数本つないだものをクレーンで吊りながら溶接して建て込んでいる。また、接合部はすべり面深度と最大曲げ

表－3 杭工設計表

杭工施工前安全率	F = 1.158 (排土工，押え盛土工施工後想定)			
杭工による目標安全率	F _s = 1.200			
設計N値	移動層：30，不動層：50			
鋼管杭規格区分	厚肉部 (SKK490相当)		薄肉部 (SKK490相当)	
径・肉厚	D800mm・t33mm		D800mm・t10mm	
鋼材断面積 A (cm ²)	795.17		248.19	
鋼材断面係数 Z	1464.55		484.12	
断面	C測線	D測線	E測線	F測線
接線力総和 ΣT (kN/m)	29,719.1	38,883.3	45,845.8	33,093.6
(二次元)杭工施工前安全率 F ₂₀	0.7029	0.9750	1.0910	1.5446
(二次元)杭工目標安全率 F ₂	0.7594	1.0175	1.1267	1.5941
設計推力 P _s (kN/m)	1,540.82	1,540.82	1,540.82	1,540.82
すべり面深度 h (m)	42.56	50.98	62.13	54.74
所要根入れ長 (m)	10.94	11.02	10.87	10.76
上部薄肉区間長 (m)	23.5	28.0	34.5	30.5
下部薄肉区間長 (m)	5.0	5.5	5.0	5.0
杭長 (m)	53.5	62.0	73.0	65.5
地盤合力 R _s (kN/m)	2,050.08	1,537.49	1,390.29	985.37
許容水平推力 r _s (kN/m)	9,200.80	26,427.45	33,651.42	44,101.39

図－9 孔内水温分布の等値線図(E側線)

モーメント発生位置を避け、さらに隣り合った杭間で接合位置が重複しないような杭の組合せを検討している。

5. 反省および課題

全周回転式オールケーシング工法による施工状況を写真－5に示す。当該工事の施工中あるいは施工後に現場からヒアリングされた問題点は以下のとおりである。

- ① 杭掘削中に予想外の有毒ガスが発生した。
- ② 地すべり土塊の大部分を占める安山岩が、見かけから想定した以上に硬質で、掘削方式やケーシングチップの選定に試行錯誤が繰り返された。
- ③ 杭建て込み後の検収において一部にわずかな沈降を生じた。

当該地が冬期に3 mを超える豪雪に見舞われるため、積雪前に施工を終えるべく緻密な工程計画が立てられていた中で、①への対処のために3週間工程が遅延した。さらに②の要因も相まって全体で1ヶ月もの遅れを生じ、最後は極寒の積雪下の施工を余儀なくされたと聞かれた。

有毒ガスについては、踏査やボーリングなどの調査段階には確認されていなかったが、火山周辺の蒸気噴出地帯においては十分可能性は考えられる要因ではある。同様のケースがあれば、調査着手段階から確認手段等につ

図－10 杭の応力図

写真－5 全周回転式オールケーシング工法による施工状況 (杭番号37)

図－11 杭施工横断の展開図

いて十分に留意すべき事項と思われる。

安山岩の硬度については，施工性に関する調査が欠けていたものと反省される。地すべり調査における一般的な調査概念には含まれないものの，大規模な工事や特殊な工種については，事前に施工性に関する必要十分な調査の必要性が感じられる。

鋼管杭挿入後の杭の沈下（10cm前後）に関しては，施工前にチェックボーリングはされているものの，根入れ岩盤における局所的な劣化が存在していた可能性があり，正確な予測は困難であったものと考えられる。

ちなみに，上記問題への対処内容を，ヒアリング結果からまとめ以下に示す。

- ① 有毒ガスの種類は硫化水素，炭酸ガス，二酸化炭素であり，とくに硫化水素の濃度は1,000ppm（作業の安全上の基準値は10ppm）を超えるため，きわめて危険な状態と判断された。その対策として，ガスの希釈実験をふまえた上で，掘削箇所への注水と送風によるものとし，作業員にはエアラインマスクを着用させ，もっとも困難な局面を切り抜けた。その後これら有毒ガスは進捗とともに濃度が低下し事なきを得ている。
- ② 硬質安山岩の掘削対策としてダウンザホールハンマーの準備を進めたが，ケーシング径に見合ったビットの入手が困難で抜本的な解決はみられず，日平均掘進量は8～12m程度であった。
- ③ 沈下の原因は，掘削に用いたクラムバケットでは余堀り量の管理が難しかったこと，変質凝灰岩の風化，鋼管杭の自重が考えられ，底蓋を取り付けることにより解決した。

6. 結 び

写真－6は排土工や押さえ盛土工を含め，主たる地すべり対策工がほぼ終了した平成15年秋の空中写真である。また図－12は，その中における杭工施工位置を透視的に示したものである。

押さえ盛土により出現した平坦面は広大なグラウンドを思わせるものがあり，災害直後の光景はあとかたもない。ただ排土した斜面のU字谷状の形態は，2万5千分の1地形図でも明瞭に認識されるほどであり，またおびただしい噴気が立ち上る末端部の峨々たる景観や，下流1km以上にわたり整備された溪間工の存在は，ここに地すべりにともなう水蒸気爆発や土石流災害があったことを静かに物語るものである。

災害があった翌年の融雪期には，直下の澄川を挟んだ対岸の斜面でも地すべりの滑動が確認されたため大規模な対策事業が実施されている。また，澄川地すべりの東

写真－6 対策がおおむね終了した澄川地すべり地区全景

図－12 大口径鋼管杭施工位置の透過図

西に隣接した斜面もそれぞれ地すべり地形を示している。とくに泥火山の噴出がみられる西側斜面では，澄川地すべりが発生した後に小規模な地すべりの兆候が認められたため，調査・監視が継続して実施されている。

このように，付近一帯あるいはここに限らず火山周辺では熱水変質を背景とした地すべり発生の素因を常に持ち合わせているものと理解すべきと思われる。今後の温泉地すべりの未然防止や緊急時の対策に，当該事業の経験が生かされれば幸いと考える。

引用文献

- 1) 小川内良人，他（1998）：澄川地すべりの発生機構について～澄川地すべり調査結果と対策工の概要，地すべりVol. 35，No. 2，pp. 38～45.
- 2) 秋田営林局（1998）：八幡平地区地すべり機構調査報告書.
- 3) 申調植（1995）：地すべり工学－最新のトピックス－，山海堂，pp. 320～347.
- 4) 東北森林管理局（2004）：澄川地すべり地区の治山事業.
- 5) 山田正雄，小野由紀光，井上真吾，山口徳武，郎寛華，江坂文寿（2004）：地すべりGIS構築例，（社）日本地すべり学会第43回研究発表会及び現地見学会実行委員会現地見学会資料集。（原稿受付2005年11月30日，原稿受理2006年3月10日）