■奥大栄地すべりにおける超大口径鋼管杭の設計と施工

Design and Construction of Super Large Diameter Steel Pipe Pile in Okuoee Landslide

国土防災技術株式会社／磯貝尚弘

Japan Conservation Engineers Co., Ltd.／Naohiro ISOGAI

国土防災技術株式会社／藤田耕二

Japan Conservation Engineers Co., Ltd.／Kouji FUJITA

キーワード：急傾斜，退行性地すべり，超大口径，抑え杭，

Key words：Steep Slope, retrogressive failure slide, Super Large Diameter, the cantilever type Pile

1. はじめに

奥大栄地すべりは，愛媛県松山市の南西20km伊予灘に面した伊予市双海地域事務所の南東約4kmに位置する。(図-1)

当地すべり地は，昭和初期の頃から地元民により「石こけ場」と称され，危険な箇所として認識されていた地区である。昭和18年7月21～24日の豪雨により下流「久保」地区まで大被害を受けた記録があり，この豪雨による斜面崩壊を契機として地すべりが発生したと推測され

ている。

当地すべり地は昭和49年8月31日農林省告示826号で8.40haが地すべり防止区域に指定され，愛媛県により調査・対策工事が実施されていたが，昭和62年に再び活発化した地すべり滑動を機に，抜本的な対策が推進されることとなった。

その後，平成元年3月と平成2年1月の2度の急激な滑動により，地すべり滑動土塊全体の抜け落ちが予想される危険な状態となったため，排土工・アンカー工・堰堤

図-1 位置図・周辺地形図(国土地理院発行2万5千分1地形図：上灘・中山及び電子国土地図に加筆)

写真-1 対策工施工中の全景

工を主体とした災害関連緊急対策工事が平成2年と3年の2回おこなわれ、地すべり・土石流災害が食い止められた。

その間、平成3年9月10日には農林省告示第1179号によって37.87haが地すべり防止区域に追加指定されている。

奥大栄地すべり最大の特徴は急傾斜面に発生した最大地すべり推力45,900kN/mの地すべりということである。

ここでは、地すべりの概要とともに、斜面末端部の地すべりブロックが抜け落ちた場合に、その影響が斜面上方のブロックへ及ぶのを防ぐとともに地すべりを抑止するために施工された超大口徑鋼管杭の設計と施工について報告する。

2. 地形・地質概要

奥大栄地すべりは、愛媛県伊予市双海町をほぼE-WからNE-SW方向に横断する「中央構造線」の南約2kmにあり三波川帯内に位置するため、南側のENE-WS方向に走る背斜軸と中央構造線に挟まれた地域内にあって、全体的に北側に傾斜する変成岩が分布している。

また、安山岩質火成貫入岩体が中央構造線付近に存在しており、地すべり地対岸側に分布が認められる。

当地すべり地は、緑色片岩を主体とする結晶片岩と緑色片岩黒色片岩互層が分布し、走向傾斜は、 $N70\sim90^{\circ}E \cdot 15\sim30^{\circ}N$ であり地すべり斜面に対しては、 $45\sim60^{\circ}$ 北側へ斜交しているが、流れ盤となっている。(図-2)

地すべり地は、中央構造線に対して直角方向であるS-N方向に流下する奥大江川の右岸・西向き斜面に当り、凸状、散水斜面形を示し、標高が低くなり奥大江川に近くなるほど斜面傾斜が急になっている。

地すべりは、標高220~440mに発生しており、亀裂と斜面傾斜から3つの大ブロックに区分される。

- ・下部ブロック：標高220~285m：傾斜約 43°
- ・主体ブロック：標高285~395m：傾斜約 $35\sim30^{\circ}$
- ・拡大ブロック：標高395~440m：傾斜約 23°

図-2 周辺地質図

図-3 ブロック区分図

図-4 A測線断面図

また、すべり面傾斜の緩い退行性地すべりブロックとして、拡大I・拡大II・拡大II-2・拡大IIIブロックが区分されている。(図-3, 4)

3. 地すべりの履歴と対策工法の変遷

地すべり地の末端・奥大江川の右岸には、地すべり地より上流の奥大栄集落に通じる唯一の生活道路である旧町道「奥大栄線」が通っており、旧町道の交通を常に確保することが対策工選定の前提条件であった。

地すべり対策工法は地すべり滑動の履歴および旧町道迂回路の開設に伴い、地下水排除主体の抑制工から抑制工（地下水排除工）＋抑止工（シャフト杭工）、抑制工（排土工）＋抑止工（アンカー工）へと2回の変更を経て現在に至っている。表-1にブロック別移動量の推移と併せて概略を示す。

4. 設計対象ブロックの安定解析と設計条件

無降雨期においても活動を停止しない地すべりに対する対策工法の基本方針は、以下の4点である。

- ①排土工による安全率のUPと地すべり推力の低減
- ②アンカー受圧版¹⁾背面地盤の地耐力確保
- ③アンカー工による斜面上方からの地すべり抑止
- ④大きな移動量を示す下部ブロックが抜け落ちた場合に施工済み対策工に影響が及ぶ事を防止する

以上の基本方針の内、④の方針に対応するため、下部ブロックの頭部に杭下流側の地盤反力を期待しない杭打工を計画した。具体的な工種比較としては工事用作業道

路の開設により施工機械の搬入が可能となった超大口径鋼管杭とアンカー付きシャフト杭を比較し、経済性および施工の安全性から超大口径鋼管杭の採用を決定した。

4.1 安定解析

超大口径鋼管杭工の設計対象ブロックは、主体ブロックの内、下部ブロックの抜け落ちを考慮した上部ブロックである。

安定解析は

- ① 地すべり幅が130mと広い
- ② 地すべりブロック内をとる断面ごとにすべり面深度・傾斜・地すべり推力が異なる

ことから、

- ① 排土工の形状・効果が測線毎に異なることを考慮する必要がある
- ② 副測線断面の地すべり推力は一般に主断面の地すべり推力より小さく、主断面のみによる解析・設計は過大設計となりやすい

ため、地すべりを三次元的に捉えて経済的な対策工の検討が可能となるよう、A～Eの5測線を用いLambe & Whitemanの提案する近似三次元解析法²⁾³⁾によっておこなっている。また、各断面の二次元安定解析には簡易ヤ

表-1 地すべり履歴と対策工の変遷

区分	年度	地すべりブロック・移動量: mm/年	対策工
		下部ブロック 主体ブロック 上部ブロック	
	S48		町道落石対策・土留工
地すべり対策 着手前	S49～55	S52～54	30～42
	S55	下部ブロック・地すべり性崩壊発生	
		B-1 1,709	310
地すべり対策 第1期	S56～57	S56	203
		S57	97
	S58～61	地すべり活動鎮静化	
	S62	地すべり活動活性化・新たなキレツ発生・大口径落し込みボーリング切断	
地すべり対策 第2期	S63	B-1:52.6 A-2:32.7 計85	363 59 集水井5基70m
抑制工＝ 集水井工	H1・3&9	下部ブロック活動活性化: H1・1月＝B-1ブロック活性化, H1・9月＝B-1ブロック活性化	
抑止工＝ シャフト杭工	H1	B-1:1,357 B-2:7,000 計73	拡大I:56.4 集水井7基110m 拡大II:15.2 B-2単独対策: 杭打工35本275m, アンカー工101本5,471m
	H2・1	下部ブロックおよび主体ブロック活動活性化	
地すべり対策 第3期	H2	B-1:5,903 A-2:326 計6,249 B-2:94	792 拡大I:47.9 拡大II:7.2 計55 2回目対策工法変更: 排土工を併用したアンカー工 ・排土工15万m ³ (超大口径鋼管杭施工ステップまで) ・排土工8.4万m ³ (超大口径鋼管杭施工ステップ以下) ・盛土工1.3万m ³ (流路工部工に使用) ・アンカー工25段1,060本 ・超大口径鋼管杭工29本
抑制工＝ 排土工	H3・7	拡大II-2ブロック発生	移動量:657
抑止工＝ アンカー工＋ 超大口径鋼管杭工	H3	B-1:582.5 A-2:241.8 計824 B-2:67	30 0 ・拡大II-2ブロック対策 ・アンカー工3段126本 ・杭打工39本 ・集水井工5基157m 土石流対策 ・堰堤工1基H=17.5m ・谷止工1基H=14.5m
	H4	計114 B-2:42	変動なし 変動なし
	H5	計114 B-2:3	変動なし 変動なし
	H6	B-1:3	変動なし 変動なし
	H7	B-1:4	変動なし 変動なし
	H8～11	変動なし	変動なし 変動なし
地すべり対策 第4期	H9	変動なし	変動なし 変動なし
	H10	変動なし	変動なし 変動なし
	H11	変動なし	変動なし 変動なし

※年間移動量における変動なしは、移動杭観測による測定において、地すべり地外に設置した測定点と同程度の変動量が観測された場合の判定である。

図-5 A測線対策工断面図

図-6 対策工平面図

ンブ法を用いている。安定解析の結果を表-2に示す。

なお、粘着力 c' は、地すべりブロックの移動量が1m以上に達し、側壁亀裂も明瞭に連続している事から残留強度に低下しているとして $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ とした。また、間隙水圧 u は卓越した有圧地下水が無く、地下水が観測されるのは一部のボーリング孔に限られ、無降雨状態でも地すべりの滑動が観測されることから、地下水排除工による安全率の向上はほとんど期待できない事から $u = 0$ とした。

4.2 達成安全率と負担推力

超大口径鋼管杭工による水平負担荷重は、上部ブロックの排土工およびアンカー工(6段)施工後、下段ブロック抜け落ち状態($F3 = 1.05$)より安全率 $F3 = 1.12$ を達成するものであり、アンカー工6段の効果を除いた場合の超大口径鋼管杭工による達成安全率は $F3 = 0.9362$ である。

したがって、水平負担推力 Hu は表-2上部ブロック:排土状態の各測線の地すべり力 ΣT より杭の水平負担推力 Hu を引き、三次元安全率が $F3 = 0.8874 \rightarrow 0.9362$ になる値として 482.98 kN/m を求めた。

4.3 設計条件

超大口径鋼管杭工設計の設計条件を示す。

- ①杭下流側の地盤反力を考慮しない片持梁杭=抑え杭として設計する
- ②杭とボーリング孔壁の間の余掘空間はモルタルで充填する
- ③杭は、せん断破壊に対しても、曲げ破壊に対しても安全
- ④杭の許容最大たわみ量: 2 cm以下
- ⑤杭と杭の間が中抜けを生じてはならない

表-2 安定解析結果

主体ブロック:初期

測線	B	D	A	E	C
間隙水圧	U=0				
修正係数:fo	1.0492	1.0408	1.0368	1.033	1.0285
断面積:A(m ²)	2,898.1	3,791.6	3,733.9	3,425.4	3,147.0
地すべり抵抗力:ΣS(kN/m)	33,430.18	42,257.44	40,957.57	37,183.87	34,234.33
地すべり力:ΣT(kN/m)	33,036.64	44,207.79	45,888.75	41,966.58	40,940.21
粘着力:c'(kN/m ²)	0.000				
内部摩擦角:tanφ'	0.596707(φ'=30.2480°)				
二次元安全率:F2	1.0617	0.9948	0.9254	0.9153	0.8600
三次元安全率:F3	0.9500				

上部ブロック:排土(主体ブロック排土、下部ブロック抜け落ち)

測線	B	D	A	E	C
間隙水圧	U=0				
修正係数:fo	1.0613	1.0502	1.0208	1.0297	1.0343
断面積:A(m ²)	693.8	736.7	727.4	731.6	635.5
地すべり抵抗力:ΣS(kN/m)	8,320.45	8,478.73	7,948.29	8,011.54	6,952.62
地すべり力:ΣT(kN/m)	8,638.19	9,678.97	10,500.96	9,867.06	8,055.57
粘着力:c'(kN/m ²)	0.000				
内部摩擦角:tanφ'	0.596707(φ'=30.2480°)				
二次元安全率:F2	1.0222	0.9200	0.7727	0.9153	0.8600
三次元安全率:F3	0.8874				

5. 超大口径鋼管杭の設計

5.1 設計計算式

地すべり鋼管杭設計要領(社団法人 地すべり対策技術協会 発行)の抑え杭の式⁹⁾により設計をおこなった。

この設計における特徴的な項目について示す。

①水平地盤反力係数: k_h

N値により港研式により推定した。

なお、基岩層のN値は標準貫入試験が不能であったため、一軸圧縮試験値より換算した。

$$q_u = 12.26 \times N$$

$$N = q_u / 12.26$$

ここに、 q_u : 一軸圧縮強度(N/cm^2) = 4,108

N : N値

$$\therefore N = 4,108 / 12.26 = 335$$

$$k_h = 1,961 \times N = 1,961 \times 335 = 656,935 \text{ kN/m}^3$$

②移動層の厚さ: l_e

A~E測線までの最大厚さ(A測線)19.0mを用いる。

③杭の根入長: l_r

$$l_r = (1.0 \sim 1.5) \pi / \beta$$

根入部分の緑色片岩は強度が均質であることから1.0を採用した。

6. 比較と設計結果

設計比較をおこなった杭径と杭材・肉厚は、

- ・掘削外径2,000mmと1,500mmに挿入できる最大径のφ1,800mmとφ1,300mm
- ・SKK-400: $t = 9 \sim 30 \text{ mm}$
- ・SKK-490: $t = 9 \sim 28 \text{ mm}$

でおこなった。

比較設計の結果を表-3に示す。

杭間の地盤が破壊されることを防止して杭間中抜けを起こさないよう杭の許容たわみ=2cmを採用したことから、剛性が大きくたわみ難い口径の大きな杭が経済的となる。

なお、杭の中詰めは多量の掘削土砂が発生することから、掘削土砂を埋め戻すこととし、杭底と杭頭部に厚さ1mのコンクリートを打設して密閉する設計とした。

7. 工法採用の条件

当工法の掘削に用いる全周回転式オールケーシング掘削機と施工に用いるクローラークレーン(当現場では80t吊り)は大型かつ重量もあるため、現場条件(施工ヤード)と資機材の搬入条件が整わないと採用できない。

7.1 現場条件

現場で施工に要するヤード幅は、標準で15m、最低でも10mを要する。(図-7)長さは30m程度を必要とするが、鋼管杭施工の場合、当工法を採用するのは大規模地すべりであり、ヤード長さが問題となることは無い。奥大栄の場合、排土工施工途中のステップ幅17mの時点

表-3 比較設計結果

項目	単位	掘削径2,000mm	掘削径1,500mm
仕様		SKK-400 $\phi 1,800 \times t30\text{mm}$	SKK-400 $\phi 1,300 \times t28\text{mm}$
すべり面深度	m	19.0 (A測線, 最深)	19.0 (A測線, 最深)
根入長	m	8.17 以上	6.85 以上
杭長	m	$19.00+8.17=$ 27.17	$19.00+6.85=$ 25.85
施工幅	m	100	100
杭間隔	m	3.45→ 3.40	1.02→ 1.00
杭本数	本	29	100
杭総延長	m	$27.17 \times 29=$ 787.93	$25.85 \times 100=$ 2,585.00
掘削単価	円/m	228,831	157,240
総掘削費	千円	180,303	406,465
杭鋼材総重量	t	$1,309 \times 787.93=$ 1,031.4	$0.909 \times 2,585.00=$ 2,349.8
鋼材単価	円/t	134,000	131,000
杭鋼材費	千円	$1,031.4 \times 134,000=$ 138,208	$2,349.8 \times 131,000=$ 307,819
機械運搬費: 往復 片道距離180km	千円	クローラークレーン80t 掘削機 14,928	クローラークレーン60t 掘削機 12,406
直接工事費	千円	333,439	726,690

※掘削単価は杭1本当たりの平均であり、土質別の比率は、礫混り土20.4%、軟岩Ⅰ37.7%、軟岩Ⅱ41.9%である。

図-7 使用資機材配置模式平面図

で施工をおこなっている。(写真-1 最下段のステップが施工地である)

7.2 資機材の搬入搬出条件

使用する資機材の内、特に大型で重量のあるものは掘削機械とクローラークレーンである。

奥大栄で使用した $\phi 2,000\text{mm}$ オールケーシング掘削機と80t吊りクローラークレーンの重量は、それぞれ、35.7tと74.6tであり、20tを超えるため分解運搬が必要となる。

通常の運搬ではセミトレーラーを使用するが、山間部の県道では、まず通行不可な場合が多い。奥大栄では最小幅員3.0mの作業道を開設したが、県道通行の重量制限より12tトラックによる運搬が可能な分解をおこなって搬入・搬出をおこなった。

$\phi 2,000\text{mm}$ オールケーシング掘削機と80t吊りクローラークレーンの通常分解運搬と、12t分解運搬の経費差は運搬距離180kmで片道当たり262万円である。12t車の通行が可能であれば比較検討工法に採用できる。

- ・通常分解180km片道運搬=7,464千円
- ・12t分解180km片道運搬=10,080千円 (見積もり)

8. 超大口径鋼管杭の施工

8.1 主要機械・資材⁵⁾

施工に用いる主要機械および資材を示す。

主要機械

- ①オールケーシング掘削機：RT-200：1台
- ②80t吊りクローラークレーン：KH300：1台
- ③バックホウ：0.45 m^3 ：1台

主要資材

- ①発動発電機：60KVA：1台
- ②ケーシング保護キャップ： $\phi 2,000\text{mm}$ 用：1
- ②特殊ケーシングチューブ： $\phi 2,000\text{mm}$ 用
：各6～1m1式 (最長掘削長+3m)
- ③特殊ファーストチューブ： $\phi 2,000\text{mm}$ 用：2本
(特殊ビット付き、予備1)
- ④ハンマングラブ： $\phi 2,000\text{mm}$ 用：1
- ⑤ハンマークラウン：：1
- ⑥チゼル：4t：1 (砕岩用)
- ⑦ミニクリートポンプ：4～7 m^3/h ：1
(モルタル注入用)
- ⑧水中ポンプ：3インチ、2インチ：各1
- ⑨水槽：3 m^3 ：1

図－8 オールケーシング掘削機 掘削姿勢

- ⑩ハイウォシャー：1（洗浄用）
- ⑪敷鉄板：5'×10'：10枚
- ⑫全自動溶接機：W4410A
- ⑬ガス器具一式
- ⑭その他雑機材：1式

8.2 施工方法

施工手順の概略を記す。

①掘削機の据え付け

クローラークレーンにて施工位置に掘削機を設置し、反力ウェイトをセットする。

②ケーシングセット・鉛直確認

掘削機を設置した後、クレーンにて1本目のケーシングをセットし、2方向よりトランシットで鉛直性を確認する。鉛直性の調整は掘削機の水平ジャッキによりおこなう。

③ハンマーグラブセット

1本目のケーシングセットが完了した後、クレーンにハンマーグラブをセットし掘削を開始する。

④掘削・排土

ケーシングを徐々に回転し、鉛直を確認しながらケーシングを下げる。この時再度鉛直性を確認する。1本目のケーシングチューブの押し込みが完了した後、第2ケーシングチューブをクレーンで吊込みセットし、ロックピンで固定する。ケーシングを全周回転させ押し込み、ケーシング内の掘削土砂・岩塊をハンマーグラブにて排土する。排土した土砂・岩塊は水切りした後鋼管中詰に用いる。岩塊が大きく排土できない場合はケーシング内にチゼルを落下させて小割りし、排土する。

⑤ケーシングの継ぎ足し

掘削・排土の進行に従い随時ケーシングを継ぎ足す。

⑥設計深度到達

写真－2 施工状況

写真－3 鋼管 φ1,800×t30, L=9.00m

写真－4 超大口径鋼管杭工完成

設計深度まで掘削するときは、掘り過ぎないように注意して掘削する。鋼管杭全重量は最大35.998tあり、天端標高を調整することは容易ではない。

⑦検尺

スライム処理が完了した後、検尺テープにより所定の深さまで掘削がおこなわれていることを確認する。

⑧鋼管の建て込み・溶接

鋼管をケーシング内に建て込み、吊り金具をケーシ

グ天端に掛け下杭を仮置きする。上杭を建て込み全自動溶接機をセットして溶接する。溶接等の作業が掘削機の上部でおこなえる様、ケーシングの全長は掘削長+2.8mないし3.3mとなる様にケーシングを組み合わせた。

溶接に際しては防風設備を設けて溶接をおこなった。

⑨中詰工および外周モルタル打設

鋼管の建込みが完了し、天端高さを確認した後、杭底に1mコンクリートを打設する。岩盤部分のケーシングを抜き上げた後、この量に見合うモルタルをサニーホースとミニクリートポンプにて打設する。その後ケーシングを1本ずつ抜き上げモルタル打設を繰り返す。

水切りの完了した掘削土砂を鋼管内に天端より1m下まで投入し、最後に1mのコンクリートを打設する。

⑩次の杭への移設

奥大栄では掘削機の大きさ4.16×6.72mに対して杭間隔が3.40mと狭いため1本飛ばしに施工をおこなっている。

9. おわりに

超大口径鋼管杭工は、使用機械の運搬がネックであるが、奥大栄地区の事例では、12t車分解運搬と通常の分解運搬の差は運搬距離180kmで262万円/片道しかなく、大規模地すべりの抑止工では検討に値する工法であると

言える。

また、掘削の概算単価を平成5年当時の愛媛県単価で@229千円/m^⑥と示した。平成17年度では労務単価が平成5年度の80%程度、機械損料で85%程度となっているので@190千円/m程度と考えて良いであろう。

本ケースは、急傾斜地に発生した大規模地すべりに採用した抑え杭という特殊なケースであるが、これに対比できるシャフト杭工に比べて、施工効率・安全性・静粛性および経済性においても優れた工法であった。

本報告が大規模地すべりの抑止工を検討する場合の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 申 潤植(1989)：地すべり工学 理論と実践，山海堂 p.842
- 2) 申 潤植(1989)：地すべり工学 理論と実践，山海堂 p.649
- 3) 申 潤植(2001)：新版地すべり工学 最新のトピックス，山海堂 p.113, p.136
- 4) 地すべり鋼管杭設計施工要領検討委員会 (1990)：地すべり鋼管杭設計要領，(社)地すべり対策技術協会 p.64
- 5) (社)地すべり対策技術協会 (1996)：地すべり対策技術設計実施要領 p.291
- 6) (社)日本建設機械化協会 (平成5年度版)：大口径岩盤削孔工法の積算 p.59

(原稿受付2005年11月30日，原稿受理2006年6月12日)