

(43) 斜面掘削工事における情報化施工管理について

神戸大学工学部	正会員	櫻井春輔
関西電力㈱総合技術研究所	正会員	岸本修治
〃	正会員	○ 藤田修一
㈱阪神コンサルタンツ	正会員	末廣匡基

Observational Construction Control in Slope Excavations

Shunsuke SAKURAI, Kobe University
Shuji KISHIMOTO, Shuichi FUJITA, The Kansai Electric Power Co., Inc.
Masaki SUEHIRO, Hanshin Consultants Co., Ltd.

Abstract

At Okawachi Hydroelectric Power Station, now under construction by The Kansai Electric Power Company, Incorporated, a back analysis introducing an anisotropic parameter proposed by one of authors was applied to a long-distance excavation. In this application, measurements of excavating slope site, collecting measured results, analyzing existing conditions and a predictive analysis after finishing the construction were systematized to be able to carry out in a site.

As the result of this, modelling of appropriate slopes could be derived from the deformation behaviors in initial excavations, basing on this, the ground conditions of slopes could be grasped and predicted by the analysis. From the fact, with the availability of observational construction of which core is the above back analysis method confirmed, the details are reported with field data.

1. はじめに

最近の建設工事においては、施工時の現場計測が盛んに行われ、計測結果から例えば地盤の挙動等を把握し、迅速かつ経済的に工事を進めるいわゆる「情報化施工」が実施されている。関西電力が本施工を本格的に用いたのは、著者の一人の提案した逆解析法（直接ひずみ評価法）を導入した水力発電所地下空洞（発電所用）の掘削工事においてであり、その後もこの手法による同構造物、あるいはダムグラウチング工事などに積極的に取り組んでいる。

本論文は、関西電力が取り組んだ「情報化施工」の中で、種々の施設建設にあたって、しばしば発生する斜面掘削において、地盤の異方性を考慮できるまでに発展させた逆解析法を使用した結果について報告するものである。

2. 安定性評価手法の概要

ここで適用した、斜面の逆解析に用いる力学モデルは、地山の応力～ひずみ関係を平面ひずみを条件とし、座標軸として全体座標 $X-Y$ および局所座標 $X'-Y'$ を図-1 のように定める。

$X'-Y'$ 座標に対し、応力 $\{\sigma'\} = \{\sigma_x' \ \sigma_y' \ \tau_{xy'}\}^T$ を定義すると、それに対応するひずみ $\{\varepsilon'\} = \{\varepsilon_x' \ \varepsilon_y' \ \delta_{xy'}\}^T$ との間に次の関係が成立する。

$$\{\sigma'\} = [D'] \{\varepsilon'\} \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで、 $[D']$ は次のように与えられるものとする。

$$[D'] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & m(1+\nu)(1-2\nu) \end{bmatrix} \quad \text{--} \quad (2)$$

ここで、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 m は異方性を表すパラメータである。 m は G/E (G :せん断弾性係数)で、 $m=1/2(1+\nu)$ ならば材料は等方弾性体となる。

全体座標での応力-ひずみ関係は次のように求められる。

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad \text{-----} \quad (3)$$

ここで、

$$[D] = [T] [D'] [T]^T \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -2\sin \alpha \cos \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & 2\sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad \text{--} \quad (5)$$

式(3)の応力-ひずみ関係によって表される材料は、 $m < 1/2(1+\nu)$ の時、ある方向(角度 α)に対してせん断剛性のみが低い異方性材料となる。従って m 、 α は滑り挙動を表現するひとつのパラメータであり、その分布等を適正に決めることにより、斜面の代表的な3つの変形パターン、すなわち①弾性型②滑り型③転倒型を表現し得る。

上記の逆解析を利用した斜面の安定性評価手法においては掘削前の地山自重により初期せん断ひずみが生じるものとし、掘削によって生じるひずみ増分との和として掘削途中の地山の最大せん断ひずみ分布を求めるとともに、その時の解析値を使用して掘削完了時の変位、ひずみ分布を予測する。斜面の安定性は最大せん断ひずみ分布と設定した管理値とを比較することにより評価する。

解析に必要な入力定数の内、単位体積重量と強度定数は物性試験で求め、弾性係数は逆解析で得られる等価弾性係数と同じとし、ポアソン比は掘削前後で一定と仮定する。また、 m の分布および α は地質調査結果、変位計測結果から工学的な判断により決定する。

ただし、実際の現場施工管理においては、力学モデルの作成に当たり異方性パラメータの最適化が実施できる、図-2に示すプログラムの開発を行い、実際の計測結果に適用した。

3. 適用斜面の概要

(1) 斜面形状と施工

本手法を適用した斜面は、関西電力が現在建設中の大河内水力発電所(1992年11月運転開始予定、最大出力128万kwの純揚水式発電所、兵庫県神崎郡)の開閉所背後斜面であり、図-3、4にその形状を示す。斜面の施工高さ最大55m、掘削土量6万 m^3 で施工は1989年4月~1990年2月の11ヶ月で実施され、掘削工法は3m毎の発破ベンチカット工法であった。

(2) 斜面の地質

建設地の地質は主に中世代の生野層群および中世代~新世代第三紀の石英閃緑岩により構成される。対象斜面の地質構造は事前の調

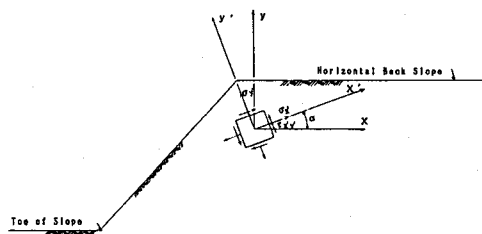


図-1 モデル化における座標軸

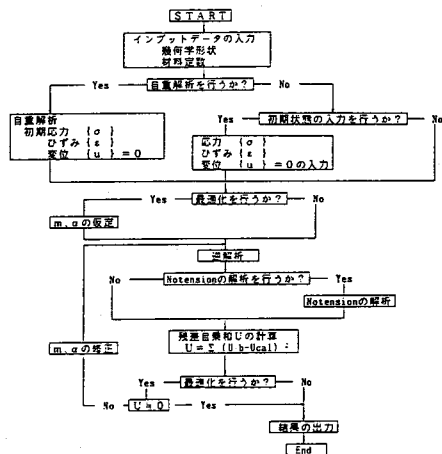


図-2 最適化プログラムフロー

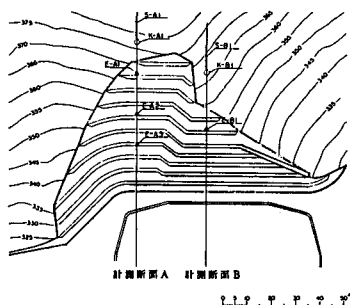


図-3 斜面平面図

すなわち、地盤の表層には崖錐堆積層が分布し、その下部に非常に亀裂の発達した風化岩層、そして新鮮な硬岩層となる。

		彈性波速度 (km/s)		備 考
		P 波速度	S 波速度	
崖錐堆積層		0.2~0.8	——	C=0.4kgf/cm ² ϕ=26
岩 盤	風化帶	1.25~1.30	0.37~0.65	——
	中硬岩	1.41~1.59	0.71~0.86	——
	硬 岩	2.50~4.35	0.93~2.38	——

图-4 斜面断面图 (A断面)

(1) 斜面計測計画

表-2 計測の実施

	目 的	仕 様	計 測 計 画
伸縮計	掘削法肩部上方の変位測定	SRI 計測範囲：300 (mm)	測線長 10 m
傾斜計	斜面掘削に伴う全変位置の計測	QティルトS型 計測範囲：±30° 分解能：10'以下	測線長 20 m 測定50 cm間隔
地中変位計	高精度な斜面内変位置の計測	PV-100-6SG型 計測範囲：100 (mm) 感度：0.1%R.C以上	測線長 15 m 6点測定

解析（安定性評価手法）結果を現場施工管理に反映させるため、計測から解析結果の出力までの作業を現場で、且つ迅速に実行できる図-5に示すシステムを作成した。

Diagram illustrating the configuration of a personal computer system (パーソナルコンピュータシステム) connected to a central processing unit (PC19801).

The system components and their connections are as follows:

- Measurement Items (計測項目):**
 - 増量変伸検計 (自記式) (Incremental strain detection (self-recording))
 - 孔中傾斜計 (Borehole inclination meter)
 - 地中変位計 (Ground displacement meter)
- Data Logger (データロガー):** Receives data from the measurement items and sends it to the PC19801.
- Personal Computer System (パーソナルコンピュータシステム):**
 - キーボード (Keyboard)
 - データ入力 (Data input)
 - CRT (Cathode Ray Tube)
 - プロッター (Plotter)
 - プリンター (Printer)
 - ハードディスク (Hard disk)
 - 電源装置 (Power supply unit)

The central processing unit (PC19801) is connected to the Data Logger and the Personal Computer System.

図-5 現場システム

この章以後の報告は対象2断面のうち掘削最大断面であり、計測値にある程度有意な値が認められたA断面について報告する。

各計測結果の概要は以下のようであった。

伸縮計測　――　斜面掘削の開始時に約0.4 mmの変位が生じたが、その後掘削完了に至るまで変位の累積傾向は少なく、その累積変位量は約0.5 mmと非常に小さいものであった。

傾斜計計測 ——— K-A1地点-掘削開始後約3ヵ月後(3段目掘削完了時)に深度17.5m付近に累積傾向を持つ変位が現れた。変位はこの時期における多量の降雨と共に増加し、1ヵ月間で約2mmの変位量となった。しかし、その後掘削完了に至るまで変位の累積傾向は少なく、ほぼ同じ状態で継続した。

(図-6に計測結果を示す)

地中変位計計測 ——— 各地点において非常に僅かながら全体の計測深度で累積傾向が認められる程度であり、特定の深度において有意の変位は見られなかった。また、その変位量は全体でも1mm程度の微小なものであった。

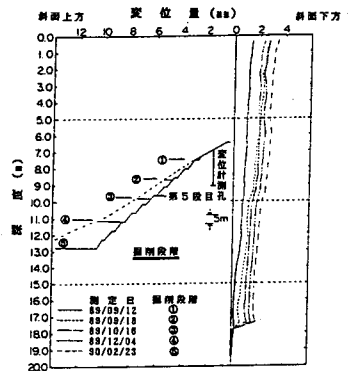


図-6 傾斜計計測結果

このように当該斜面においては地質が全般的に良好であり、かつ地山に対する掘削規模が小さいため傾斜計のK-A1を除いて有意な変位は得られなかった。

(2) 力学モデルの作成と安定性の評価

計測結果で述べた傾斜計K-A1地点での有意の変位、具体的には上部第5段目の掘削時(GH=351m)深度17.5m付近での約1.5mmの局所的な変位を含む変位計測結果を用いて逆解析を実施した。

逆解析にあたって使用するメッシュ割りは当斜面の地質構造を考慮して図-7に示すように定めた。

傾斜計の計測結果を用いて逆解析を行った結果、得られた m 、 α の値は図-7に併記したとおりである。

また、この力学モデルにより求められる変位と実測変位の比較を図-8、この時のせん断ひずみ分布を図-9に示す。図-8には参考として地盤を均質な等方弾性体として解析した結果も併せて示したが、実測変位への適合性において本力学モデルの有用性がわかる。また、この逆解析結果をもとに最終掘削完了時の予測せん断ひずみ分布を図-10に示す。これらの結果に地山自重解析によって得られるせん断ひずみを掘削以前における初期せん断ひずみとして加算することにより表-3に示す現状及び掘削完了時の斜面の状態が把握される。

ここで、管理値はトンネルにおいて提案されている「ひずみの管理基準値」の考え方を参考として、 $\varepsilon \leq 2.0\%$ と設定した。

以上の解析について、各計測結果の経時変化を把握しながら、掘削の節目毎に実施することにより掘削を完了させた。

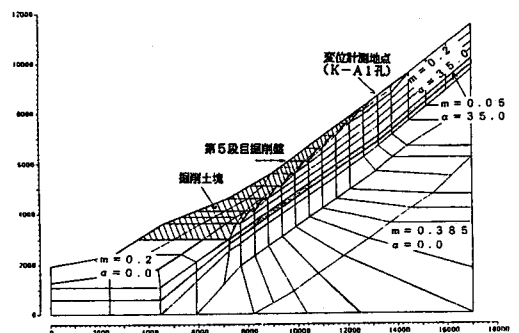


図-7 作成した力学モデル

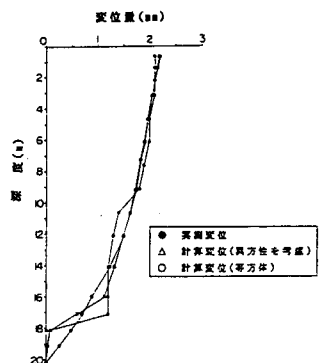


図-8 変位図

表-3 斜面の安定性評価

掘削段階	初期せん断 ひずみ値	解析せん断 ひずみ値	最大せん断 ひずみ値	管理値	判 定
5段終了時 (現状)	0.19 %	0.27 %	0.46 %	$\leq 2.0 \%$	O K
掘削完了時 (予測)	0.01 %	1.33 %	1.34 %	$\leq 2.0 \%$	O K

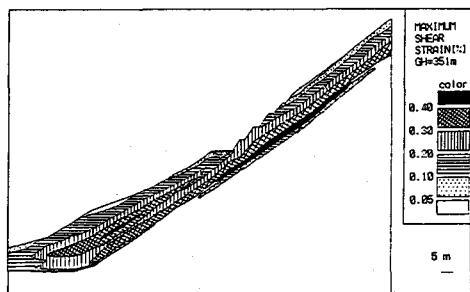


図-9 せん断ひずみ分布図
(5段掘削完了時)

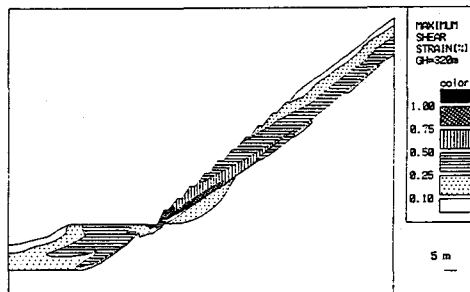


図-10 せん断ひずみ分布図
(掘削完了時予測)

6. 現場施工管理の評価

今までに述べたように、ここで紹介した適用斜面においては掘削に伴う変位があまり生じなかったため、最大せん断ひずみ値が管理値を上回るような時点がなく工事としてはスムーズに進行した。

しかし、従来の斜面掘削工事における現場計測が変位量の経時変化を把握するに留まっていたのに比べ、今回変位計測結果をベースとして対象とする斜面の変形パターンのモデル化、及び定量的な評価が現場で速やかに技術者に提供されるようになったことは、工事管理面で非常に有益なものであった。今回構築したシステムがパソコンレベルであったため、計算能力にある程度限界があり、より高い解析レベルの検討ができればという思いもあるが、昨今のコンピュータの発達によりこれは早い時点で解消されるものと思われる。

7. おわりに

関西電力においては今後とも他の斜面掘削工事に適用することにより本手法の適用性を確認していくと共に、計測手法及び計測・解析のより高度なシステム化を進めるものである。

最後に本検討を進めるに当たって御協力頂いた方々諸氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 櫻井・Deeswasmongkol.N.進士:現場計測結果に基づく切取り斜面の安定性の評価、第7回岩の力学国内シンポジウム講演概要集・PP.307~312,1987.
- 2) 櫻井:斜面の逆解析、土木学会関西支部年次学術講演会、1986
- 3) 櫻井・武内:トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法、土木学会論文報告集、第337号、P137~145,1983
- 4) 櫻井:NATMにおける現場計測と管理基準値、土と基礎、34-2、PP.5~10,1986