

長大岩盤斜面の掘削における節理特性の影響と法面設計に関する一考察

INFLUENCE OF JOINTS DURING EXCAVATION OF LARGE ROCK SLOPE AND CONSIDERATION OF SLOPE DESIGN

木戸研太郎*・吉中龍之進**・佐々木 猛***

Kentaro KIDO, Ryunoshin YOSHINAKA and Takeshi SASAKI

The authors are evaluated of the influence of joint characteristics during the excavation of large rock slopes by finite element analysis using the multiple yield model. Analysis of a model of a simplified shape reveals that the joint sets that are either parallel or perpendicular to the gradient of the natural slope have a great influence on the deformation of the slope and the changes in stress in the slope. Measurement on two large slopes with different joint characteristics identify deformation exhibiting the same tendency as that found by model analysis. Thus, the proposed method proves effective and its applicability to design in the field is confirmed.

Key words: rock slope, excavation, joint

1. 研究の目的および内容

本研究では、まず、等価連続体解析手法による二次元有限要素法解析を用い、形状および物性を単純化した岩盤斜面モデル(以下「一般モデル」という。)を構築し、長大斜面掘削時における岩盤の節理特性の影響を明らかにする。つぎに、節理特性の異なる2つの長大掘削斜面の計測事例において、一般モデルでみられる傾向が表れていることを示す。さらに、それらをふまえて、掘削法面設計において節理特性を考慮することの重要性について、基本的な考察を行う。

2. 一般モデルによる解析

2.1 複合降伏モデルの概要

複合降伏モデル¹⁾(multiple yield model)は、二次元有限要素法による等価連続体解析の1手法であり、弾性コンプライアンス法を拡張したものである。その概念

は図-1のとおりであり、岩盤の変形は、母岩の変形(無指向性)と節理群の変形(指向性)の和とする。また、それらのうち最も早く破壊に達したモードを岩盤の降伏モードとする。

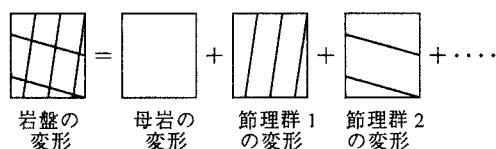


図-1 複合降伏モデルの概念

2.2 解析モデルおよび解析ケース

解析モデルを図-2に示す。掘削高さは200m(20m/ステップ×10ステップ)である。著者らはこの形状

* 正会員 水資源開発公団試験研究所

** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

*** 正会員 工博 鹿島建設(株)情報システム部

のモデルを用いて、節理群を考慮しない長大岩盤掘削斜面の一般的特性の検討を行っており²⁾、今回はそれを複合降伏モデルに拡張した。

物性条件は、一般的なダムサイト岩盤(C_M ~ C_H 級)を想定して表-1のとおりとした。節理特性として、節理群の角度に着目して様々なケースを設定した。なお、今回は母岩、節理群とも弾性とした。

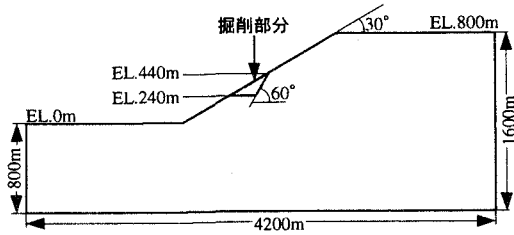


図-2 解析モデル(掘削勾配60°の例)

表-1 岩盤物性値

母岩	単位体積重量 ρ	2.50t/m ³
	弾性係数 E	200,000tf/m ² (1960MPa)
	ポアソン比 ν	0.25
節理	初期垂直剛性 K_{ni}	20,000,000tf/m ³ (196,000MN/m ³)
	初期せん断剛性 K_{si}	20,000tf/m ³ (196MN/m ³)
	節理間隔 d	1.0m
	最大閉合幅 V_m	0.001m

*応力に依存する双曲線近似式を適用

$$\text{垂直剛性 } K_n = K_{ni} \{1 - \sigma / (V_m K_{ni} + \sigma_n)\}^2$$

$$\text{せん断剛性 } K_s = K_{si} \sigma_n (1 - \tau / \tau_p)^2$$

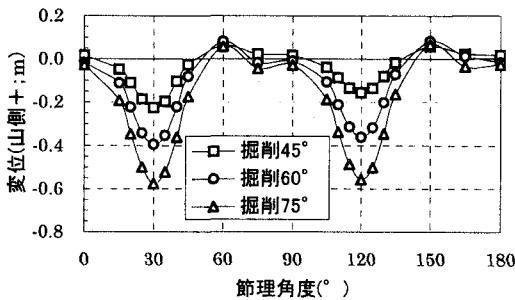
(τ_p : 最大せん断強度)

2.3 解析結果

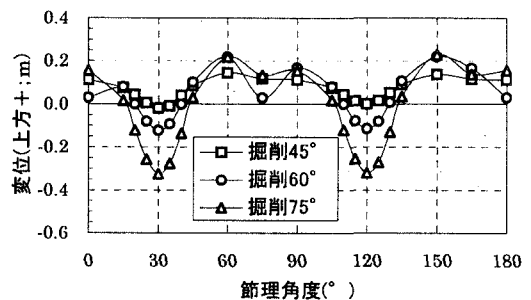
(a) 1 節理系の場合

地山勾配を 30°、掘削勾配を 45, 60, 75°とし、節理群の角度 θ (水平から反時計回りを正とする。)を変化させたときの、掘削高さ H=200m 時の法肩の変位を図-3 に示す。これによれば、水平変位は、掘削勾配によらず、 $\theta=30^\circ$ (地山斜面に平行)、 120° (地山斜面に直交)付近で谷側への大きな変位を生じる。またその傾向は、掘削勾配が急なほど著しい。鉛直変位も同傾向であり、 $\theta=30, 120^\circ$ 付近で斜面下方への変位を生じるが、45 ~ 105°、135 ~ 15°の間では斜面上方への変位となる。

次に、応力への影響を考察する。応力集中を生じる法尻隅角部の要素(水平 10m × 鉛直 5m)中心の、最大主応力の値を図-4 (1)に、それぞれの掘削勾配で節理なしとした場合の応力値の比較を図-4 (2)に示す。

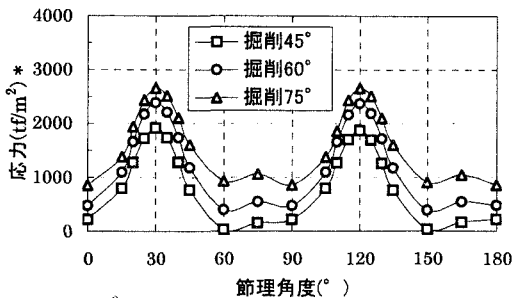


(1) 水平変位

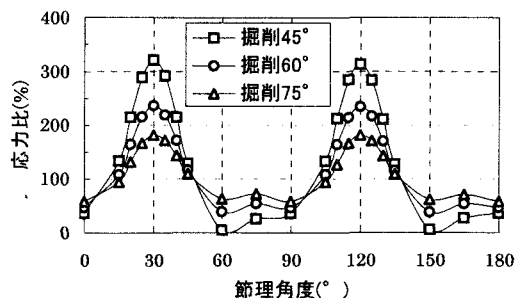


(2) 鉛直変位

図-3 法肩の変位(1 節理系、H=200m)



(1) 応力値



(2) 節理なしとの比較

図-4 法尻の最大主応力(1 節理系、H=200m)

* 注) 100tf/m²=0.98MPa

図-4 (1)は法肩の変位と同様の傾向を示し、 $\theta=30, 120^\circ$ 付近でピークを示す。その大きさは掘削勾配が急なほど大きくなり、掘削勾配 45° で約 1900tf/m^2 (18.6MPa)、 75° で約 2700tf/m^2 (26.5MPa) と極めて大きい。一方、(2)では、掘削勾配が緩いほど節理群の角度による変化の度合いが大きく、掘削勾配 45° では、節理群の角度により、節理なしの場合の最大約3倍に達する。

また、図-5に、掘削勾配 60° の場合の、 $\theta=30^\circ$ および節理なしの場合の最大せん断応力分布を示す。節理のない場合は最大せん断応力は法尻の直上部でピークを示す分布となるが、 30° の節理群を考慮すると、掘削面のほぼ全域で表面付近ほど大きい分布となり、その値も極めて大きくなることわかる。

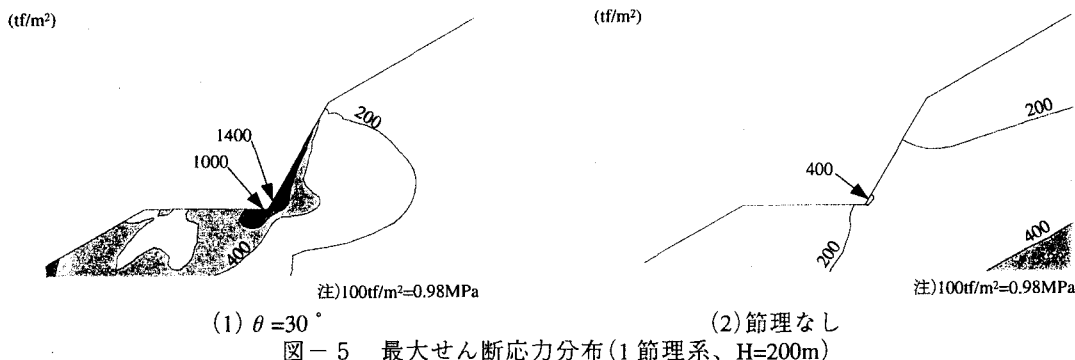


図-5 最大せん断応力分布(1節理系、 $H=200\text{m}$)

(b)2 節理系の場合

実際の岩盤では、斜交(直交を含む)する2系列以上の節理群が存在するのが一般的である。そこで、2系列の節理群モデルを検討した。組み合わせは無限に考えられるが、今回は、(a)において変位、応力とも最大値を示す $\theta=30^\circ$ (これはシーティング節理の角度と一致する。)の場合、および極大値 ($\theta=30, 120^\circ$) の中間に位置する $\theta=75^\circ$ の場合に着目する。すなわち、 30° あるいは 75° の節理群を与条件(以下「節理1」という。)とし、もう1つ別の節理系(以下「節理2」という。)の角度を変えて重ねる。

掘削勾配 60° の場合について、図-6に法肩の変位を、図-7に法尻の最大主応力を示す。

これらによれば、節理2の角度 θ_2 に対する変化の傾向は、節理1の角度 θ_1 によって異なる。 $\theta_1=30^\circ$ の場合は、節理1のみの場合(図-3,4)と同様の傾向で、変形、応力とも全般に値が大きくなる。変位は水平、鉛直とも約2倍以上、最大主応力は約1.5倍となる。ただし、 θ_2 により、節理1のみの場合よりも応答が小さくなる場合もある。一方、 $\theta_1=75^\circ$ の場合は、 θ_2 によらず応答の変化は小さく、節理1のみの場合とおおむね同程度である。

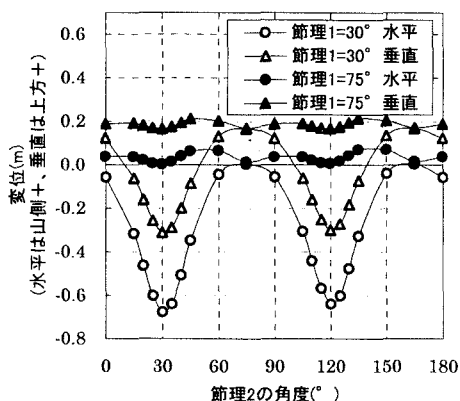


図-6 法肩の変位(2節理系、 $H=200\text{m}$)

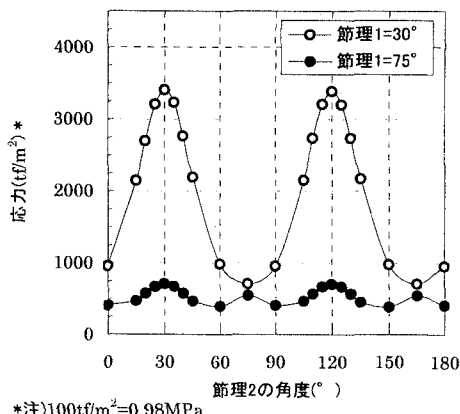
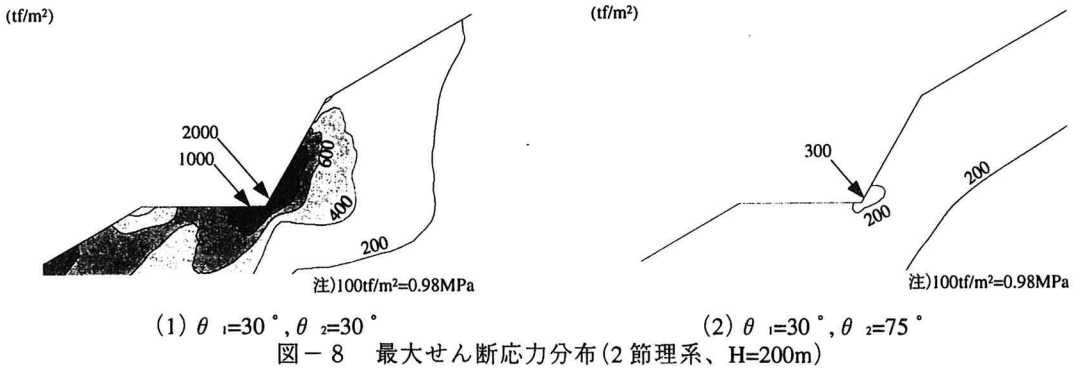


図-7 法尻の最大主応力(2節理系、 $H=200\text{m}$)

また、図-8に、(1) $\theta_1=30^\circ, \theta_2=30^\circ$ の場合、(2) $\theta_1=30^\circ, \theta_2=75^\circ$ の場合の、最大せん断応力分布を示す。(1)は 30° 1節理系の場合の傾向をより顕著にした形状となり、逆に(2)は、節理なしの場合よりも応力集中が小さくなっている。

以上から考えると、斜面挙動に大きな影響を及ぼす方向(地山斜面に平行あるいは直交)の節理系が存在するかどうかが第一に重要であり、さらに、その他にどの角度の節理系を考慮するかにより、節理群の角度に対する変位、応力の値が変化するといえる。



3. 計測事例との比較

ここで、一般モデルの妥当性を検証するため、一般モデルにおおむね該当する2つの実際の掘削斜面計測結果を比較する。

3.1 差し目構造の斜面の例

斜面A(図-9参照)は、砂岩、粘板岩互層からなり、地層は約 $40 \sim 60^\circ$ 傾斜の差し目構造である。節理方向は、地層の層理方向(差し目)およびその共役方向の節理が発達している。

法面表面の水平変位は光波測量で、岩盤内の変形は孔内傾斜計等で計測されており、掘削の進捗に伴って斜面は谷側に変形した³⁾。

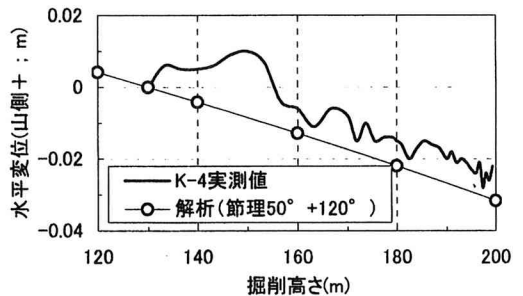
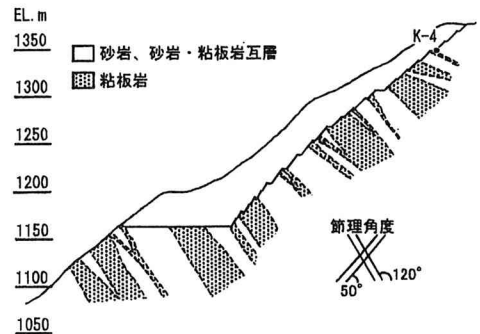
モデルは、地山勾配 30° 、掘削勾配 45° の一般モデルとし、 $\theta_1=50^\circ, \theta_2=120^\circ$ の2系列の節理群を考慮する。物性値は、節理間隔を 0.5m とし、他は表-1と同じとした。

一般モデルの法肩の水平変位と、測点K-4の実測

値を比較すると、図-10のとおりである。掘削高さの増分に対する変位の割合は、実測と解析ではほぼ同じであり、形状や物性値を模擬したモデルでないにもかかわらず、よい一致がみられる。

3.2 高角度の節理が発達した斜面の例

斜面B(図-11参照)は、チャート、シャールスタイン、粘板岩からなり、チャート内には高角度の割れ目が発達している。



掘削に伴う斜面の変形は、3成分岩盤変位計等によって計測された。この結果は鷹取ら⁴⁾が報告しており、計測断面内では山側上方向きのリバウンド挙動が卓越していた。

地山勾配 30°、掘削勾配 45°の一般モデルを用い、節理群を $\theta_1=50^\circ, \theta_2=120^\circ$ の 2 系列(3・1で使用)、 $\theta_1=70^\circ, \theta_2=110^\circ$ の 2 系列、および節理なしとした 3 とおりの比較を行う(物性値は 3・1 と同じ)。

一般モデル(法肩)および斜面 B(測点 T-2)の変位を図-12に示す。一般モデルの結果より、節理の方向や組み合わせにより、変位の方向が大きく異なることがわかる。また、斜面 B の変位方向は、実際の高角度節理の方向を考慮した場合におおむね一致している。なお、同じ掘削高さにおける変位の大きさは、実測と解析で差異があるが、これは物性値や物性区分等を合わせていないことによると考えられる。

4. まとめ～法面設計における節理特性の影響

以上の結果に基づき、岩盤斜面掘削の調査、設計、計測における、節理群の影響についての留意点を考察すると、次のような事項があげられる。

①岩盤内の節理群の方向性と地山形状

掘削による斜面挙動は節理群の角度に大きく依存する。地山表面に平行または直交に近い角度の節理群が卓越する場合は、変形、応力変化ともに大きくなり、特に法尻付近の安定性に注意する必要がある。

②掘削形状と節理の影響

法面および地山の応力状態、すなわち法面の安定性は、掘削形状(高さ、勾配)に依存する²⁾が、節理群の方向性も大きな影響を及ぼす。特に掘削勾配が緩い場合では、節理群の影響が支配的となる。

③掘削時の挙動計測

掘削時の変形挙動が節理特性に応じたものか、また弾性的挙動の範囲内かどうかを、掘削の進捗に追随した計測により予測し、不安定現象の兆候の早期発見に役立てることが極めて重要であるといえる。

5. 参考文献

- 1) 佐々木猛ら：有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究，土木学会論文集，No.505/Ⅲ-29, pp.59-68, 1994.12
- 2) 木戸研太郎ら：岩盤斜面掘削に伴う長大法面および地山の応力変化に関する解析的基礎研究，ダム工学，Vol.9 No.4, 1999.12
- 3) R.Yoshinaka et al.: Stability and long-term monitoring of large excavated rock slopes, Proc. 9th Intern. Congress on Rock Mech., pp.1443-1446, 1999.8
- 4) 鷹取正頭ら：浦山ダムの堤体掘削に伴う堤敷岩盤の挙動特性について，大ダム，No.143, pp.64-74, 1993.3

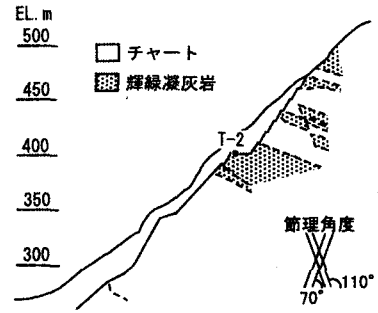


図-11 地質断面(斜面 B)

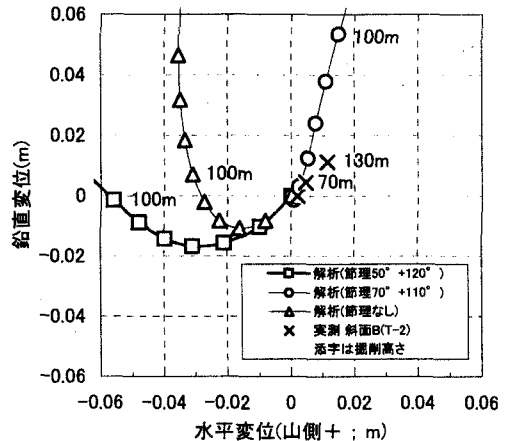


図-12 変位方向の比較(斜面 B)