

掘削斜面内の応力・変形挙動ならびに安定性評価に関する研究

中村 吉男¹ 山口 雅弘² 成田 国朝³

Stress-Deformation and Safety Evaluation in Cut Slopes

Yoshio NAKAMURA Masahiro YAMAGUCHI Kunitomo NARITA

掘削時の応力解放に伴って抑え効果が消失すると、拘束圧低下や吸水膨張に起因してせん断抵抗力が低下し、斜面の不安定化を引き起こす。膨張性の泥岩などで構成される地盤では、応力解放に伴う膨張変形や風化作用によって材質的な劣化が生じ、斜面の不安定化を一層助長する。本研究は、地山掘削に伴う斜面内の応力解放や膨張変形の挙動、ならびに局所的な安全率の分布特性を有限要素解析で明らかにし、円弧すべり破壊との関連性に言及しながら、掘削斜面の保護・補強工の考え方を整理するものである。

キーワード：掘削，応力解放，膨張変形，先行圧縮，斜面安定，有限要素法

1. はじめに

掘削により応力解放が行われると、抑え効果が消失してせん断抵抗力が低下し、斜面の不安定化を引き起こす。と同時に、応力解放により多かれ少なかれ吸水膨張が起こるので、やはり強度低下の原因になる。このように通常の地盤掘削で斜面が不安定になる要因には、おもに拘束圧低下と吸水膨張の2つの側面が考えられる。膨張性あるいはスレーキングしやすい泥岩で構成される地盤では、応力解放が行われることによる材質変化が斜面の不安定化に影響する¹⁻³⁾。つまり、応力解放に伴う膨張変形や風化作用によって経時的な材質劣化が生じ、上記の要因と重複して斜面の不安定化を一層助長するようになる。

本研究は、地山掘削に伴う斜面内の応力解放の特性や膨張変形の挙動、ならびに局所的な安全率の分布特性を有限要素解析で明らかにし、円弧すべり破壊との関連性に言及しながら、掘削斜面の保護・補強工の考え方を整理するものである。

話題は二つに大別される。一つは膨張性泥岩から成る地山の切土問題であり、掘削による膨張変形や風化

を助長する応力解放が斜面内のどの範囲に集中して生じるか等を議論する。ほかは、掘削により斜面内に生じられる過圧密効果が斜面内の強度分布にどう反映され、結果的に斜面全体の不安定化にどう関わるかを議論する。掘削に伴う過圧密の効果は、粘性土盛土が転圧締固め時に保有する先行圧縮効果⁴⁾と類似するものであるから、後者では掘削および盛土斜面の挙動比較を通じて、これらの効果特性が応力配分の様相や安定性評価に及ぼす影響についても若干考察を加える。

2. FEM 掘削解析

2.1 掘削・膨張解析の概念と手順

地山の掘削に伴う応力変化や膨張変形を求めるためのFEM解析は、以下のような概念と解析手続きに基づいて行われる(図-1)。

① 掘削前の自重応力(σ_v)計算

掘削前の地山形状に単位体積重量 γ の作用に相当する載荷重を加え、初期の自重応力 σ_v を計算する。地山内各点の鉛直応力は土かぶり圧に一致する。

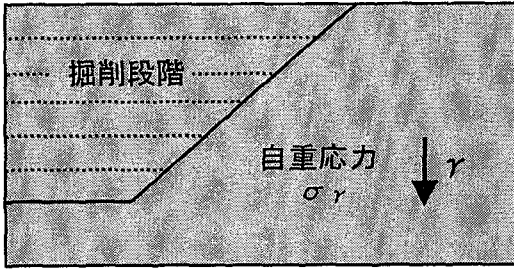
② 掘削段階毎の斜面載荷重 $\Delta p_r(s)$ 計算

¹ (株)アイコ技術部長

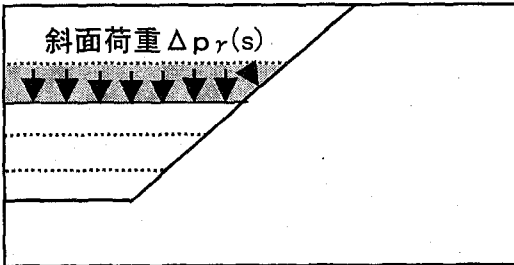
² 日本技研(株)技術研究所調査部長

³ 愛知工業大学土木工学科教授

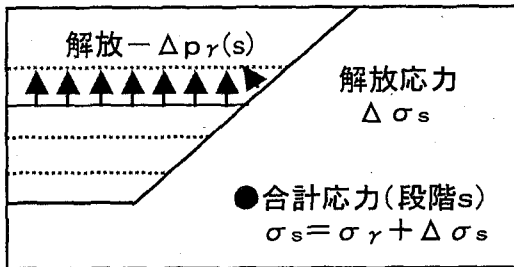
① 自重応力計算



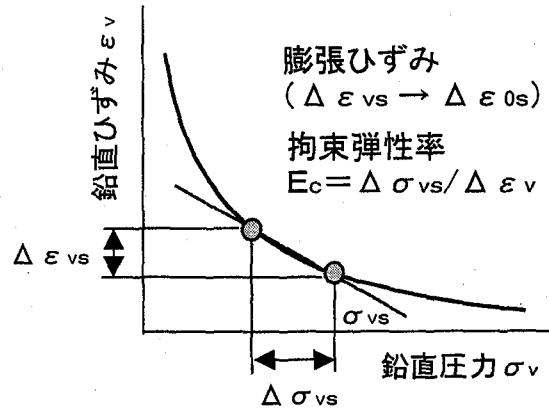
② 掘削に等価な斜面荷重



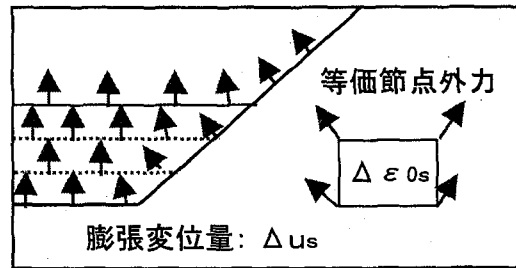
③ 掘削計算 / 段階(s)



④ 一次元圧縮試験



⑤ 膨張計算 / 段階(s)



⑥ 応力補正值: $\{\Delta\sigma_0\}_s = [D]\{\Delta\varepsilon_0\}_s$

図-1 掘削・膨張解析の概念図

掘削過程は、上記の自重応力 σ_r から、掘削により解放される応力 $\Delta\sigma_s$ (掘削段階 s) を順次差し引く形で表現される。そこで、解放応力 $\Delta\sigma_s$ を計算するために掘削面に負荷すべき載荷重 $\Delta p_r(s)$ を、各掘削段階毎に①の自重応力解 σ_r を用いて計算する。

③ 各掘削段階における斜面内の応力・ひずみ計算

掘削段階毎に②で求めた掘削面載荷重 $\Delta p_r(s)$ を逆方向に載荷して斜面内の解放応力 $\Delta\sigma_s$ を計算し、初期の自重応力に加算する ($\sigma_s = \sigma_r + \Delta\sigma_s$)。

④ 膨張変形量および対応する弾性率の計算

応力解放に伴う膨張変形の計算には、一次元圧縮・圧密試験における除荷過程の応力～ひずみ関係を用いる。具体的には、段階 s で鉛直応力が σ_{vs} から応力解放分 $\Delta\sigma_{vs}$ だけ減少したとすると、膨張曲線に沿って鉛直ひずみの増加量 $\Delta\varepsilon_{vs}$ が定まり、両者の比で拘束弾性率 E_c が求まる。一次元圧縮時のひずみ量 $\Delta\varepsilon_{vs}$ と無拘束状態のひずみ量 $\Delta\varepsilon_{0s}$ の関係、および拘束弾

性率 E_c と通常の方応力状態での弾性率 E の関係は、弾性学の法則より以下の形で表される。

$$\Delta\varepsilon_{0s} = \Delta\varepsilon_{vs} / (1 + 2\nu) \quad (1)$$

$$E = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \times E_c \quad (2)$$

⑤ 膨張変形を与える等価節点力と変形量の計算

応力解放に伴う膨張変形は、熱膨張など初期ひずみの発生と同等に扱ってよいから、段階 s で応力解放に伴う等方の膨張ひずみ $\Delta\varepsilon_{0s}$ に相当する掘削斜面内の変形を求めるためには、 $\Delta\varepsilon_{0s}$ を発生させる等価な節点外力を計算し、荷重載荷問題に置き換えて処理する必要がある。平面ひずみ問題において $\Delta\varepsilon_{0s}$ に対応する直角座標のひずみ成分を $\{\Delta\varepsilon_0\}_s$ と置くと

$$\{\Delta\varepsilon_0\}_s = (1 + \nu) \Delta\varepsilon_{0s} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

と表され、これを初期ひずみと見なしたときの等価節点外力 $\{\Delta q\}$ は次の形で与えられる⁵⁾。

$$\{\Delta q\} = \int [B]^T [D] \{\Delta \epsilon_0\}_s dV \quad (4)$$

ここで、 $[B]$ は要素形状に関する定行列、 $[D]$ は弾性行列である。膨張計算では $[D]$ の作成に際し、式(2)で求めた弾性率 E を用いる。

⑥ 応力の補正

等価節点力の载荷によって掘削斜面内には膨張変形と共に新たな応力が発生するが、これは膨張を表現するために見かけ上発生した応力であり、掘削後の値から差し引いておく必要がある。すなわち、初期ひずみ問題を参照すると、段階 s では所要の応力増分解が

$$\{\Delta \sigma\}_s = [D] (\{\Delta \epsilon\}_s - \{\Delta \epsilon_0\}_s) \quad (5)$$

と表されるので、第2項の $[D] \{\Delta \epsilon_0\}_s$ を掘削計算後の増分応力から差し引くことになる。なお、以上の解析手続きは実際のプログラム上の解析手順と必ずしも一致しない部分があることを断っておく。

2.2 解析内容

図-2のプロットと実線は圧密試験装置を用いて泥岩の膨張特性を調べた実験結果の一例⁶⁾である。初期状態が同じ供試体をいくつか用意して異なる鉛直圧 p_v を約300 kPaの範囲まで与え、 p_v 一定のまま吸水させて膨張ひずみ量 ϵ_v の経時変化を測定すると、 ϵ_v の収束値と p_v 値の関係として図の曲線を得る。この2試料は同種の泥岩であるが、試料Aは採取時の自

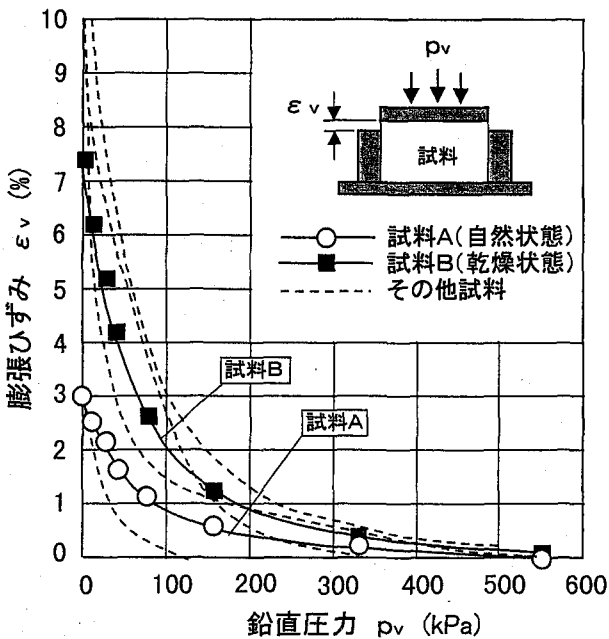


図-2 泥岩の膨張特性

然含水状態を保持した試料、試料Bは室内常温(約25度)で一週間乾燥させた後の試料である。このように拘束圧力 p_v が小さくなると膨張変形量 ϵ_v が急激に増加し、その特性は同じ組成の泥岩でも初期状態によって大きく異なることがわかる⁷⁾。なお、破線で示したいくつかの曲線は他の現場の泥岩試料⁶⁾に対する実験結果であり、概括的にいえば、試料Aは膨張性が比較的小さい泥岩の代表、試料Bは膨張性に富む泥岩の代表と見なしてよいと思われる。

以下の前半の解析では、図-2の関係曲線をそのまま用いて、これら材質的な膨張特性の相違が、掘削斜面内の膨張変形の伝播や分布挙動にいかにか影響するかを議論する。解析対象の掘削斜面は、高さ $H=20$ mの単純斜面であり、1:1.5を標準として斜面勾配を変えて計算し、斜面の傾角が応力解放や膨張変形の挙動に与える影響を調べた。なお、地盤材料は、単位体積重量 $\gamma=19.6$ kN/m³、ポアソン比 $\nu=0.4$ 、自重応力計算時の弾性率 $E=50$ MPaと仮定したが、この E は弾性計算の応力配分だけに関わる量であるから、数値的な意味はほとんどないと考えてよい。

自然堆積した粘性土地盤が掘削に伴い過圧密状態になると、多かれ少なかれ、その変形・強度特性に先行圧縮効果が現れる。一方、粘性土の盛土では、転圧締固めに伴って過圧縮効果が蓄積され、同種の力学特性がみられる⁴⁾。せん断強度に及ぼす先行圧縮効果の影響を概念図として描くと図-3のようになる。現況応力 σ と先行圧縮応力 p_c を対比して、 $\sigma > p_c$ の高圧縮域では正規圧縮(NC)状態で、強度線は原点を通る直線で表され、 $\sigma < p_c$ の低圧縮域では過圧縮(OC)状態で、同一の σ 値に対しNC状態より高い強度を

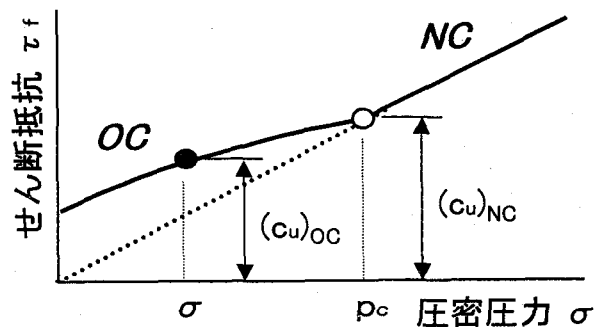


図-3 先行圧縮効果と強度特性

保持する。強度線の具体的な表示として、飽和粘土の非排水強度 c_u に関しては次式が提案されている⁸⁾。すなわち、NC 状態と OC 状態の強度増加率 $(c_u/\sigma)_{NC}$ および $(c_u/\sigma)_{OC}$ は、過圧密比 $OCR = p_c/\sigma$ を介して

$$(c_u/\sigma)_{OC} = (c_u/\sigma)_{NC} \cdot OCR^\lambda \quad (6)$$

なる関係があると考えられる。

前半と同様に $H=20$ m の掘削斜面に対して斜面勾配をいくつか変えて計算を進めるが、複雑な要因を排除して考察を単純化するために、後半の解析では硬質岩盤上に堆積する水平地盤を全深さ掘削して斜面を構築する場合を対象とした。また、掘削による応力解放と先行圧縮効果は主として応力配分の問題であり、前半の膨張変形と独立に議論してよいので、図-2 のような膨張曲線を取り入れず、掘削時の挙動はほぼ線形であると仮定して計算した。後半の計算に必要な材料定数は、式 (6) における NC 状態の強度増加率 $(c_u/\sigma)_{NC}$ と実験定数のべき乗数 λ である。これらの値については正規圧密粘土を念頭に、既往の実験結果を参考にして、 $(c_u/\sigma)_{NC}=1/3$ 、 $\lambda=0.8$ を仮定した。

3. 計算結果と考察

3.1 予備計算

前章で提示した解析手法の妥当性を検証するためには、本来は実験結果や現場の観測データと比較して整合性を検討すべきであるが、現段階では入手し得る有用なデータが少なく、照査論議はきわめて困難である。そこで、以下ではやや単純な掘削計算を行い、理論的背景から本解析手法の有効性を調べた。

図-4 は解析対象とした簡略モデルである。図-2 の試料 B の膨張曲線と前述の諸数値を用いて、掘削部

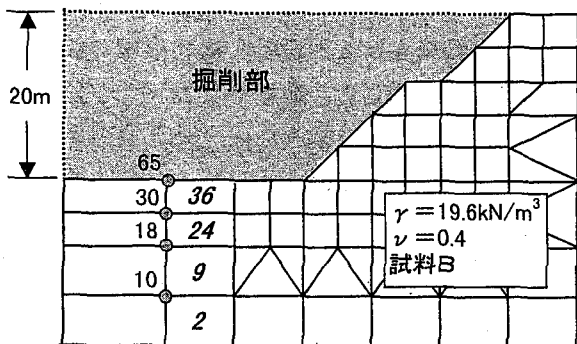


図-4 例題解析

表-1 例題計算の精度

要素	掘削前	掘削後	①-②	土かぶり圧
	① σ_{v0}	② σ_{v1}	③ $\Delta\sigma_v$	④ γz
36	430	42.2	388	39.2
24	511	129	382	118
9	607	247	360	255
2	725	376	349	333

※応力 (kPa)

節点	鉛直変位	相対変位	相対ひずみ	膨張ひずみ
	⑤ v	⑥ Δv	⑦ $\Delta\epsilon_v$	⑧ $\Delta\epsilon_v'$
65	38.2	20.8	5.19	4.14
30	17.4	9.42	2.36	1.74
18	7.98	6.12	1.02	0.76
10	1.87	1.87	0.31	0.23

※変位 (cm), ひずみ (%)

を一挙に1段階で取り除く計算を行い、図中番号で示した代表要素および節点の諸量を表-1 にまとめて数値の動向を吟味した。まず上段で、① σ_{v0} と② σ_{v1} が掘削前後の各要素の鉛直応力であり、掘削後の②の値が掘削底面から計算した理論土かぶり圧④ γz と良く対応している。①と②の差の③ $\Delta\sigma_v$ が、掘削により解放される鉛直土圧であり、この値は全要素において掘削土層の重量に相当する全土圧 $\gamma H = 392$ kPa に近似している。

一方、下段の⑤ v は各節点の掘削後の鉛直変位量、⑥ Δv は上下の節点の鉛直変位差 (相対変位)、そして⑦ $\Delta\epsilon_v$ は、⑥の値を対応する層厚で除して求めた鉛直ひずみ量である。これに対し⑧ $\Delta\epsilon_v'$ は、上段の①から②への応力解放に伴い膨張曲線に沿って計算される鉛直ひずみ量であり、FEM の計算途中でも出力される。両者を比較すると 20~25% の差がみられるが、外形状の変化で定義される前者のひずみには周囲の要素との相対挙動や境界の影響が含まれており、応力変化だけから決まる後者のひずみとは性質が異なるので、この程度の誤差 (というより定義に基づく差) は十分あり得ると考えられる。

3.2 掘削斜面内の応力解放

さて、膨張性泥岩のように、拘束圧不足によって風化が進み強度低下を起こす可能性がある材料を扱う場合は、地盤を掘削して斜面を形成したとき、斜面内での程度の応力解放が起こるかをしておく必要がある

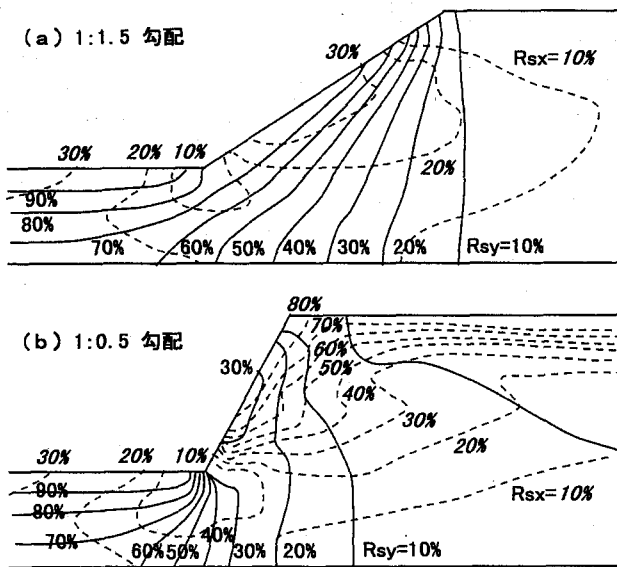


図-5 掘削斜面内の応力解放

る。この視点から、掘削解析で得られた斜面および掘削底面内の応力分布を、応力解放率という形で整理したのが図-5である。すなわち、先の例題解析と同様なモデルを用いて、掘削前の水平地盤内の応力 σ_0 と掘削後の同地点の応力 σ_1 を比較して

$$R_s = \left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right) \times 100(\%) \quad (7)$$

より応力解放率 R_s を定義し、水平応力 σ_x および鉛直応力 σ_y の各成分に対応して解放率を R_{sx} および R_{sy} と表して破線および実線で分布図を描いた。

図-5は深さ $H=20$ mの掘削であり、(a)は通常設計される程度の緩勾配の斜面、(b)はアンカー等の保護工を前提とするような急勾配の斜面の代表例として示した。まず、掘削底面の水平部では、当然のことながら（斜面勾配に関係なく）鉛直応力の解放が大きく、表面では解放率が100%になる。水平応力の解放は全体的に小さいが、法先から離れるに従って徐々に大きくなる。一方、斜面内の分布をみると、緩勾配の斜面では全般的に鉛直応力の解放が大きく、 R_{sy} の高い値が斜面内部にまで広がるが、水平応力の解放は比較的小さい。これに対し、急勾配の斜面では全く逆に、水平応力の解放が斜面表面に集中して大きくなるが、鉛直応力の解放は小さい。実際問題を考えると、通常の堆積地盤は水平に広がる薄い土層が経年的に幾重にも積み重ねられて構成されると考えてよい。とす

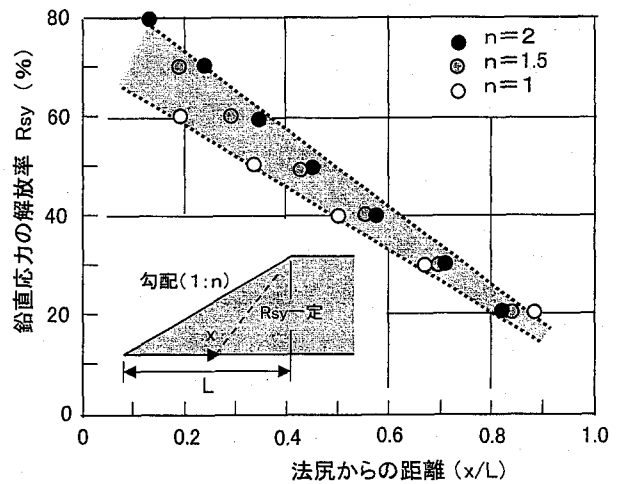


図-6 鉛直応力の解放率

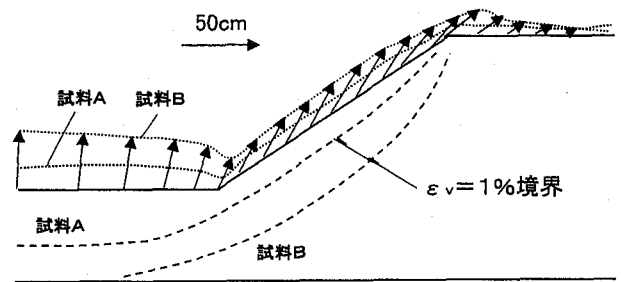


図-7 掘削に伴う斜面の膨張変形

ると、この種の地盤では鉛直方向の先行圧縮が卓越しているため、拘束圧不足に伴う風化や強度低下を防止するためには、急勾配に掘削してアンカー等の保護工を施工した方が有利という結論になる。

図-5 (a) をみると、鉛直応力の解放率 R_{sy} の等値線は、法肩から発して斜面に沿う放射状の曲線になる。そこで、図-6では、 R_{sy} の各等値線の値を縦軸に、その等値線が斜面底部と交わる点の法尻からの距離 x を（斜面部の水平長 L で正規化して）横軸にとって、鉛直応力の解放が斜面内にどのように広がるかを調べてみた。図には通常範囲の斜面勾配（1:1~1:2）の結果をまとめたが、この程度の範囲では解放率の変動は小さく、概括的には $R_{sy}=50\%$ が $x/L=0.5$ に対応すると考えておけばよい。

3.3 掘削斜面の膨張変形

上と同じ1:1.5勾配のモデル斜面に対し、図-2の試料A、Bの膨張特性を取り入れた掘削解析を行い、斜面内の膨張変形の挙動を調べた。図-7は掘削底部および斜面部の表面点の動きを変位ベクトルとして表

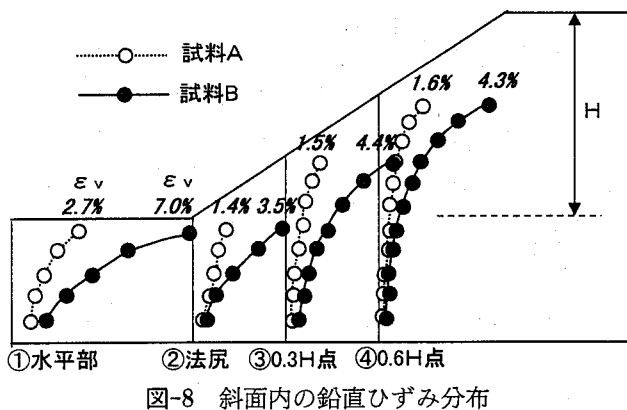


図-8 斜面内の鉛直ひずみ分布

したものであり、試料 A と試料 B では場所によらず約 2 倍程度の変位量の差がみられている。図で、とくに斜面上の各点が斜面の内側（右側）へ向かって変位しているのは、水平部の相対的に大きな鉛直変位が、斜面方向への浮き上がりに影響したためと考えられる。

図-8 は①～④の代表的な 4 地点において、地盤内の鉛直ひずみの分布を描いたものである。ここで鉛直ひずみとは、地盤内に区切った水平層の上下点間の相対変位を層間距離で除して計算される。図から、各位置では地表面に近づくと、ひずみ量が急激に増加する傾向がみられる。また、ひずみ量で比較すると、試料 B は試料 A の 2～3 倍、水平部は斜面部の 2 倍程度の開きが確認される。なお、図-7 に示した $\varepsilon_v = 1\%$ 境界の曲線は、図-8 の分布図において鉛直ひずみが 1% になる点を連ねた曲線であり、この線と地表面に挟まれる領域で $\varepsilon_v \geq 1\%$ になることを意味する。こう整理すると、試料 A では表面のごく薄い部分が膨張に寄与するのに対し、試料 B ではかなり深いところまで膨張域が拡大することがみてとれる。

以上の計算および考察は、実験値や実測値との整合性を追究するための議論ではないので、これ以上進めなくても決して有用とは考えられない。先に述べたように、本項ではむしろ、膨張性が比較的小さい泥岩の代表としての試料 A と、膨張性にきわめて富む泥岩の代表としての試料 B の材料特性の差が、掘削時の変形挙動にいかなる形で、どの程度に反映されるか、という視点で議論を活用できればよいと考えている。

3.4 掘削斜面内の応力状態と安定性

掘削に伴う応力解放によって斜面内は過圧密状態に

移行し、図-3 の OC 線に沿って強度が変化することは前に述べた。本項では、掘削による抑え効果の消失、すなわち外力変化と、過圧密に伴う強度変化が、斜面内の局所および全体的な安定性にいかなる影響を及ぼすかを調べる。なお、本項の解析では複雑な要因を排除して考察を単純化するために、硬質岩盤上の水平堆積地盤を全深さ掘削して斜面を構築する場合、つまり図-5 のような水平の掘削底部がない場合、を対象とした。また膨張過程は考慮せず、掘削時の挙動はほぼ線形であると仮定して計算を行った。

図-9 は深さ $H=20\text{ m}$ の掘削を行って、(a) 1:1.5 勾配と (b) 1:0.5 勾配の斜面を形成したときの、斜面内の過圧密比 OCR と局所安全率 F_{sl} の分布を調べたものであり、前者を点線で、後者を実線で描いた。この OCR 値は式 (7) で定義される応力解放率と

$$OCR = \sigma_{oy} / \sigma_{1y} = 1 / (1 - R_{sy}) \quad (8)$$

の関係にあり、式 (6) と鉛直応力解 σ を通じて各要素の過圧密強度 $(c_u)_{oc}$ を与える。したがってもう一つの応力解である最大せん断応力 τ_{max} と比較して

$$F_{sl} = (c_u)_{oc} / \tau_{max} \quad (9)$$

より局所安全率 F_{sl} が定義できる。

さて、(a) 図では OCR 値が斜面に沿って集中し、高い OC 状態に移行する様子が伺われるが、この分布状況は図-5 の鉛直応力の解放率 R_{sy} の分布形とほぼ

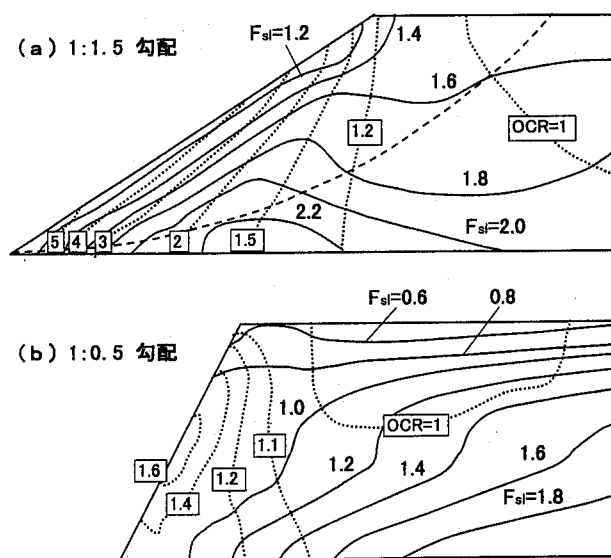


図-9 OCR 値と局所安全率 F_{sl}

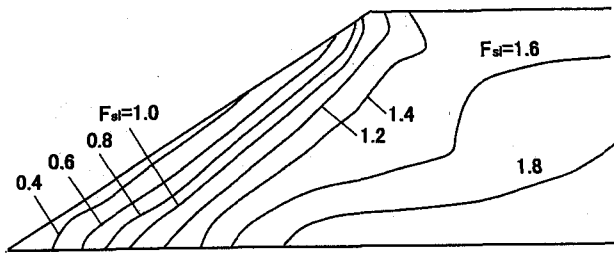


図-10 過圧密効果解消の影響

対応している。そして、斜面右側の水平地盤へ向かうにつれ $OCR=1$ の NC 状態が残留し、掘削の影響をほとんど受けないことがわかる。一方、 F_{sl} の分布をみると、斜面にほぼ平行に F_{sl} の小さい領域が、また掘削底部において F_{sl} の大きい領域が集中する傾向がみられる。これは、表面付近の拘束圧が低い領域では、先行圧密効果により保持されるせん断抵抗より、掘削によって増加する滑動せん断応力が卓越するためと考えられる。(b) 図の急勾配の斜面では、当然のことながら滑動せん断応力の発達によって F_{sl} の値は全般的に低減し、斜面は不安定になる。しかし、斜面の表層部分を除けば緩斜面と比較して F_{sl} 値に大差ないから、アンカー等の補強工法を考えれば安定性が向上する余地は十分残されているとみてよい。

図-10の F_{sl} 値の分布は、1:1.5勾配の掘削解析において式(6)の λ をゼロと仮定した場合、つまり掘削後の風化作用や吸水膨張等の経年変化に伴って過圧密効果が消失した場合を想定した計算例である。当然考えられることであるが、正規圧密強度への低下の影響を受けて、斜面表面の圧密圧が低い部分に F_{sl} 値の小さな値が集中する。しかし、斜面内部ではそれほど大きな安定性の低下はみられない。このように、図-9(a)と対比すれば、せん断強度の増加および安定性の向上に及ぼす過圧密の効果は明白である。

次に掘削に伴う過圧密の効果と粘性土盛土が転圧締固め時に保有する先行圧縮の効果との類似性を比較考察するために、図-11には前報⁴⁾の計算結果の一例を再掲した。(a)図は高さ $H=30$ m、1:1.5勾配の盛土内の OCR 値と F_{sl} 値の分布、(b)図は同形状の斜面で過圧縮効果を見捨てた場合であり、それぞれ条件的には掘削計算の図-9(a)と図-10と対応する。盛土の計算では先行圧縮応力を一定値に設定したこと、

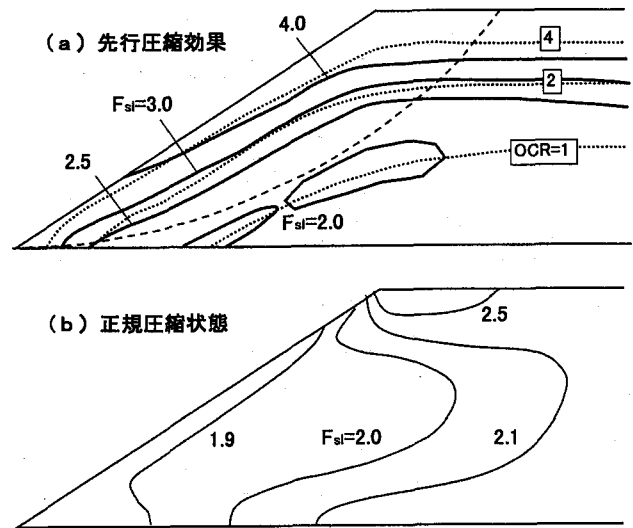


図-11 転圧による盛土の先行圧縮効果

局所安全率をモール円と破壊規準線の接近度で定義したことなど、本解析の論法とはかなり異なる面があるので、 OCR 値や F_{sl} 値を数値的に直接比較することはできないが、盛土内の応力配分や安定性に及ぼす過圧縮効果を定性的に議論することは可能と思われる。

さて、(a)図では、転圧による過圧縮効果 (OCR 大) によって F_{sl} 値の大きな領域が斜面表面に広がるが、盛土内部に至るに従って F_{sl} 値が低下し、正規圧縮領域との境界 ($OCR=1$) 付近に最危険領域が集中する。したがって、円弧すべりを想定すると、図中に破線に示したような正規圧縮領域近辺を通るすべり面が最危険円になる。一方、過圧縮効果を見捨てた (b) 図の計算 (浸水飽和に伴う過圧縮効果の消失を想定) では、強度増加が見込めないため、(a) 図に比べて斜面表層部を中心として F_{sl} 値が全般的に低下し、浅いすべり破壊が卓越する。この傾向は図-10の掘削計算で過圧密効果を見捨てた場合の特性と対応している。

3.5 全体安全率の評価

図-9などで得た局所安全率 F_{sl} と、通常の斜面設計で行われる円弧すべり計算の安全率 (全体安全率と称する) との対応関係について、以下に若干の考察を加えたい。その前に、まず単純な例題計算を行って局所安全率と全体安全率との関係について整理しておきたい。

表-2は、図-12に示した盛土斜面内の3つの円弧す

表-2 FEM と慣用法の全体安全率比較

		すべり面：A		すべり面：B		すべり面：C	
		慣用法	FEM	慣用法	FEM	慣用法	FEM
砂	$c=0$	1.02	1.05	1.56	1.45	1.81	1.90
	$\phi=30^\circ$	1.10	1.12	1.61	1.61	2.07	2.05
一般土	$c=50 \text{ kPa}$	1.81	1.75	1.98	1.81	1.94	1.93
	$\phi=20^\circ$	1.85	1.86	2.00	2.02	2.10	2.08
粘土	$c=100 \text{ kPa}$	2.33	2.17	1.98	1.80	1.59	1.46
	$\phi=0$	2.33	2.31	1.98	2.00	1.59	1.57

慣用法 (上段： F_c /下段： F_b)，FEM (上段： $F_{\tau \max}$ /下段： F_τ)

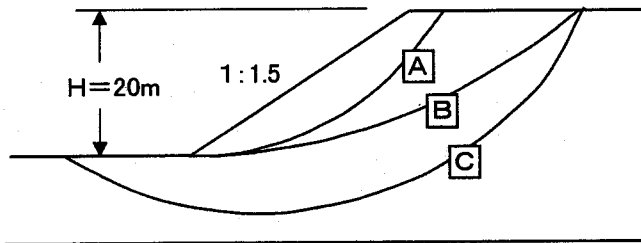


図-12 全体安全率の試算

べり面 (A~C) について、極限平衡法に基づく慣用計算法 (簡便分割法： F_c 、簡易ビショップ法： F_b) の安全率と、FEM 解析で得られる応力解を用いて計算した安全率を比較したものである。後者については、円弧すべり面が通過する個々の有限要素内のせん断応力 τ_i とせん断強度 τ_{fi} に、通過長さ l_i を乗じて、すべり面に沿うそれらの合力 S および S_f を求め、これらの比をもって安全率を定義している。

$$F = \frac{S_f}{S} = \frac{\sum \tau_{fi} \times l_i}{\sum \tau_i \times l_i} \quad (10)$$

ただし、分母の滑動せん断応力 τ_i については、式 (9) に準じて要素内の最大せん断応力 τ_{\max} を用いる場合と、すべり面に沿って作用するせん断応力 τ を用いる場合の二つの方法が考えられ、前者の F を $F_{\tau \max}$ 、後者の F を F_τ と称して区別する。表-2 では、図-12 の形状の盛土斜面に自重荷荷が行われた場合の弾性応力解 ($E=50 \text{ MPa}$, $\nu=0.4$, $\gamma=19.6 \text{ kN/m}^3$) を用いて FEM 安全率を計算し、3つの円弧すべり面に対し、代表的な3つの土試料の c , ϕ 値を設定して慣用法と比較している。このように単純な弾性応力解の下では、慣用法と FEM の安全率が大差なく対応しているが、どちらかといえば、 F_c が $F_{\tau \max}$ に、

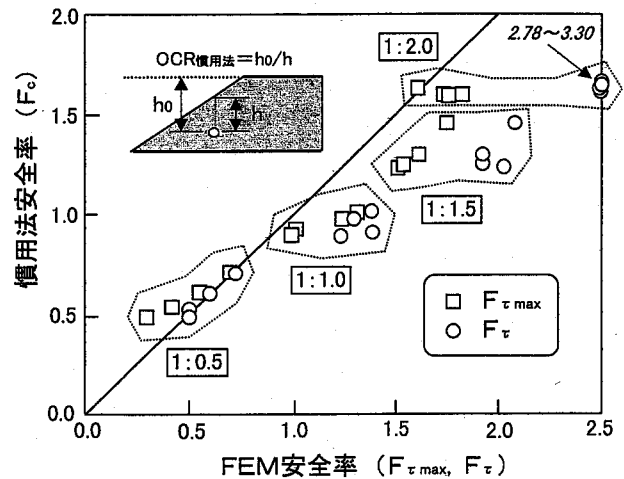


図-13 全体安全率の比較 (掘削解析)

F_b が F_τ に近似する傾向が見受けられる。

図-13 は勾配 1:0.5~1:2.0 の掘削解析の応力解を用いて計算した FEM 安全率と慣用法の安全率 (非排水強度を用いるため $F_c=F_b$) を比較したものである。各勾配に対して、図-12 に示す A, B のような法尻を通る円弧すべり面を4つ設定し、局所安全率 F_{s1} の分布と対照しながら、慣用法計算との対応性を調べた。なお慣用法計算では、図中に示したように、掘削前後の直上土かぶり高さの比をもって OCR 値としている。図-9 の F_{s1} 分布から推定されるように、1:2.0 勾配の計算を除いて、すべり面が深くなるほど安全率が大きくなる傾向がみられる。また、本解析では最大せん断応力に基づく $F_{\tau \max}$ 安全率の方が慣用法計算に近く、勾配が緩くすべり面が深くなる (換言すれば安全率が向上する) に従ってすべり面に沿うせん断応力を用いた F_τ 安全率との差が拡大することが知られる。

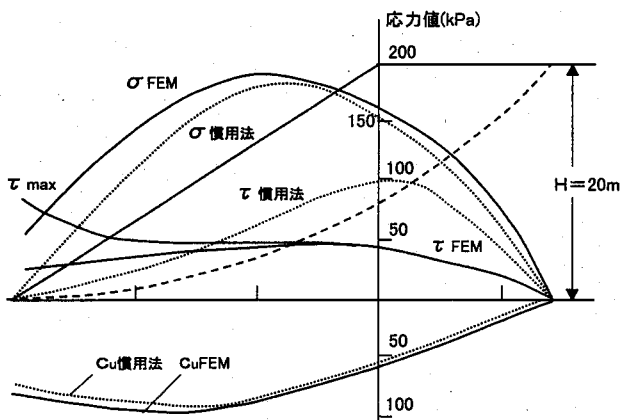


図-14 すべり面に沿う応力分布

図-14はもう少し詳細に調べるために、図-9(a)に破線で示したすべり面に沿って、FEM計算と慣用法計算の各種応力分布を比較したものである。 σ は垂直応力、 c_u はOCR値に応じて式(6)から決まる非排水強度であり、両者は計算法に寄らず良く対応していることが知れる。一方、すべり面に沿って作用するせん断応力 τ や最大せん断応力 τ_{max} の値は、法先や法肩直下で両計算法に大きな差がみられており、これが安全率の差に直接影響したと考えられる。図には示していないが、FEM計算の τ 分布は表-2の弾性解で計算しても緩やかな山形状になり、慣用法のように法肩付近で τ が卓越して大きくなることはない。

FEM応力解を用いて円弧すべり計算をする意味は、局所安全率の分布の仕方が斜面の全体的な安定性にいかなる影響を及ぼすかを一つの指標値で表現しようとするところにあり、定義が異なる慣用法計算との数値的な直接比較を目的とするものではない。むしろ、盛土や切土など種々の問題において、両者の安全率の対応関係や変動傾向がいかなる状況にあるかを把握しておくことが、設計計算を行う上で重要な判断材料になると考えられる。この点は、本稿の範囲では議論を十分行ったとは言えないので、今後の検討課題として順次取り組んでいきたいと考えている。

4. 結論

膨張性泥岩から成る地山の切土問題として、掘削に伴う応力解放の特性や膨張変形の挙動を有限要素解析で調べた。また、掘削により斜面内に生じられる過圧密効果が斜面内の強度分布や安定性にどう関わるかを

論じた。本研究で得られたおもな知見を整理すると以下のようなものである。

1) 応力解放の特性は斜面勾配に強く依存し、緩勾配の斜面では全般的に鉛直応力の解放が大きい。急勾配の斜面では逆に、水平応力の解放が斜面表面に集中して大きくなるが、鉛直応力の解放は小さい。通常の堆積地盤は鉛直方向の先行圧縮が卓越しているため、風化や強度低下を防止するためには、急勾配に掘削してアンカー等の保護工を施工した方がよい。

2) 膨張性の小さい泥岩(試料A)と膨張性にきわめて富む泥岩(試料B)では、掘削時の膨張変形量に数倍程度の開きが現れる。また、試料Aでは表面のごく薄い部分が膨張に寄与するのに対し、試料Bではかなり深いところまで膨張域が拡大する。

3) 斜面内の局所安全率 F_{s1} の分布をみると、緩勾配の場合は斜面にほぼ平行に F_{s1} の小さい領域が集中する。急勾配の斜面では滑動せん断応力がさらに発達するため F_{s1} の値は全般的に低減し、斜面は一層不安定になる。しかし、表層部分を除いた斜面内部では緩斜面と比較して F_{s1} 値に大差なく、表面保護工を考えれば安定性が向上する余地は残されている。

4) 風化作用や吸水膨張により過圧密効果が消失した場合を想定した計算では、正規圧密強度への低下の影響を受けて、斜面表面の圧密圧が低い部分に F_{s1} 値の小さな値が集中する。しかし、斜面内部ではそれほど大きな安定性の低下はみられない。

5) 盛土の場合は、転圧による過圧縮効果で F_{s1} 値の大きな領域が斜面表面に広がるが、盛土内部に至るに従い F_{s1} 値が低下し、正規圧縮領域との境界付近に最危険領域が集中する。過圧縮効果を見逃した場合は強度増加が見込めないため、斜面表層部を中心に F_{s1} 値が全般的に低下し、浅いすべり破壊が卓越する。

6) 単純な盛土の弾性応力解を用いたFEM安全率は慣用法安全率と大差なく対応する。掘削斜面の場合は、最大せん断応力に基づく $F_{\tau_{max}}$ 安全率の方が慣用法計算に近く、勾配が緩くなるに従ってすべり面に沿うせん断応力を用いた F_{τ} 安全率との差が拡大する。この相違は主としてせん断応力の評価方法に起因する。

参考文献

- 1) 大根義男：盛立て材料としての岩塊の諸問題，土と基礎，**32**(7)，3-8，1984
- 2) 島 博保，今川史郎：スレーキング材料（ぜい弱岩）の圧縮沈下と対応策，土と基礎，**28**(7)，45-52，1980
- 3) Yamaguchi, M., and Narita, K.: Stress state and safety evaluation of fill and cut slopes, *Proc. 11th ARC SMFE*, **1**, 107-108, 1999
- 4) 成田国朝，山口雅弘：締め固めた土の先行圧縮特性と斜面安定評価について，ダム工学，**9**(1)，13-20，1999
- 5) Zienkiewicz, O.C.: The finite element method in engineering science, MacGraw-Hill, 1971
- 6) 日本舗道㈱：泥岩を対象とした切・盛土工事に関する設計・施工指針，1998
- 7) 植本直之，大塚康範，満 弘之：膨潤性地山における変形挙動と対策工の効果，土と基礎，**36**(5)，43-48，1988
- 8) 土質工学会編：設計における強度定数 c ， ϕ ， N 値一，土質基礎工学ライブラリー 32，25-30，1990

(2000年4月12日受理)

Stress release produced by excavation in the ground causes reduction in confining pressure, which in turn results in swelling of soils and the decrease in the shear strength required for slope stability. In the natural ground composed of a soft sedimentary rock like mud stone, which is more or less expansive and/or ready to show weathering, change in soil properties, weakening and softening, due to stress release can be another influential factor for slope instability in addition to the mechanical factors noted above. This paper concerns behavior of stress release and expansion deformation in the ground due to excavation, and the distribution of local safety to discuss mechanism of instability of cut slopes. FEM excavation analysis was carried out for several representative simple slopes by taking pre-compression effects on strength into account. The overall safety against circular sliding surfaces was also discussed by comparing the results from FEM and those by a conventional limit equilibrium approach of slope stability.

Key words: excavation, stress release, expansion, pre-compression, slope stability, FEM