

不連続性岩盤における進行性破壊に対する等価連続体解析

Equivalent Continuum Analysis for progressing fracture of Rock masses with cracks

井上 岳*・堀井秀之**

Gaku INOUE and Hideyuki HORII

It is important to consider the behavior of joints's opening and sliding in order to grasp the behavior of progressing fracture. But there are so many joints in rock that we can't consider them individually. So new method of analysis is necessary. In this study, I propose the new way that the problem for progressing fracture of rock with cracks is substituted for the problem for progressing fracture of equivalent continuum in mechanical. The feature of this analysis method is that strength, direction and continuity of joints can be all considered.

1 はじめに

北海道古平町豊浜トンネルにおいて、崩落した岩盤が通行車両を直撃し、多数の被災者が出る不幸な事故があった。それを契機に全国に多数分布する岩盤斜面の安定性評価・崩落に対する危険予知への要請が社会的に高まっている。

岩盤崩壊はジョイント・弱面といった岩盤内の不連続面が一部分ではすべり、一部分では開口し、それらが連鎖・連結して全体崩壊に至るものと理解される。従って、不連続性岩盤における進行性破壊を正確に捉えるためには、それを支配する局所的なジョイントのせん断・開口変形に着目することが重要である。個別要素法などの解析手法を用いる場合、使用可能な要素数に制限があり、少ない要素数で現実を近似しなければならない制約があることから、解析結果が要素分割の方法に大きく依存する問題が指摘されている。本研究ではこの問題を解消し、実際の不連続性岩盤における進行性破壊の問題を力学的に等価な連続体における進行性破壊の問題に置き換えることを基本的な概念としながら、ジョイントの方向と破壊面の方向との関係・ジョイントの強度分布・局所的破壊領域の幅・ジョイントの連続性などの影響がすべて反映される新しい等価連続体解析手法を提案した。

解析例として不連続性の硬岩で卓越するジョイントセットを有する仮想的な岩盤斜面を想定し、解析結果として岩盤崩壊に対する安定性の示標となる限界水平加速度と岩盤斜面の崩壊挙動を示した。ここで得られる限界水平加速度の値が、風化などによってジョイントが低減した場合、斜面崩壊に対する危険性が高まるなど、岩盤崩壊に対する危険性判定の評価示標となり得ることを示し、解析手法の有効性を示した。

2 解析手法

2.1 解析手法の概念

不連続岩盤における進行性破壊では、岩盤内に多数含まれる不連続弱面が一部ですべり一部で開口し、さらにそれらが連鎖・連結することにより局所的な破壊領域が進展することによって全体の崩壊に至るものと理解される。このような現象を捉えるためには局所的なジョイントのせん断・開口変形に着目することが重要である。しかしながら、岩盤に含まれるジョイントの数は膨大であり、個々のジョイントを個別的に扱うことは到底不可能である。そこで本研究では図1のように実際の不連続性岩盤における進行性破壊における進行性破壊の問題を力学的に等価な連続体における進行性破壊の問題に置き換えることを基本的な概念としている。実際の問題では、局所的な破壊からさらに広がりをもたせざるを得ず、破壊領域の進展が現象を支配しているが、等価連続体ではこれを1つの破壊面であるとモデル化する。

*学生員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

**正会員 Ph.D 東京大学教授 工学部土木工学科

2つの問題の等価性をいかに確保するかがポイントとなるが、図1に示すように、局部的破壊が内部で生じている領域の挙動を代表する、岩盤要素を考えることにした。岩盤要素には実際の問題において検討する領域の条件に対応して、卓越するジョイントを統計的情報に基づいて配置し、さらに対応する応力を加え、ジョイントの局部的破壊の解析を行う。その解析結果より岩盤要素の平均応力と平均ひずみの関係を計算する。最後にその平均応力と平均ひずみの関係より等価連続体における破壊面で満足される、せん断応力とすべり量の関係にはジョイントの方向と破壊面の方向の関係、ジョイントの強度の分布、局部的破壊領域の幅、ジョイントの連続性等の影響がすべて反映されることとなる。

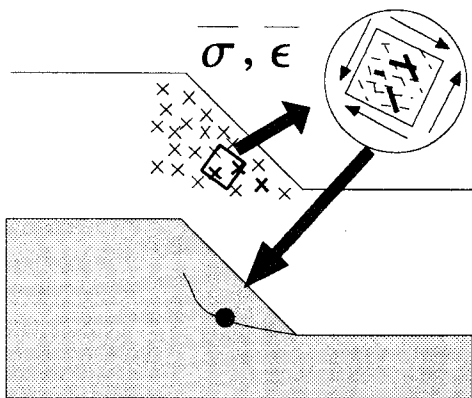


図1: 不連続岩盤と等価な連続体

2.2 等価連続体における巨視的破壊面の決定

斜面の安定解析を行う際には、巨視的破壊面(すべり面)をどのように決定するかが重要であるが、本来は破壊の局所化を判定しながら進行性破壊の解析を行うべきである。前節で述べたように本研究では、新しい解析手法の本質的な概念の提示を優先することとし、本研究では以下の方法により巨視的破壊面の決定を簡略化することとする。

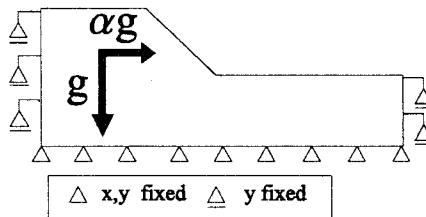


図2: 等価連続体解析の境界条件

まず、対象とする岩盤斜面を連続体とみなして弾塑性解析を行う。ここでいう連続体とは本研究で提案する力学的に等価な連続体ではなく、単に Druger-Prager 型の弾塑性構成則を満足する連続体を考える。解析の目的は巨視的破壊面が最も生じやすい場所を指定することだけである。解析の際の斜面の物性パラメタは典型的な地盤材料の物性を入力することとする。その際、物体全体に自重及び静的な水平加速度を加えることとし、水平加速度の大きさを重力加速度の α 倍とする。破壊基準として Mohr-Coulomb の破壊基準を適用し、解析結果として得られる相当塑性ひずみ分布から巨視的破壊面の位置を決定する。その他の解析の境界条件は図2に示した。

2.3 代表要素の破壊解析

前節の方法で巨視的破壊面の位置を決定することができるが、この破壊面近傍の局部的破壊が内部で生じている領域の挙動を代表する、岩盤要素を考える(図3)。要素の大きさはジョイントなどの微視構造にくらべ十分大きな領域を考えるものとする。岩盤要素には実際の問題において検討する領域の条件に対応して、卓越するジョイントを統計的情報に基づいて配置する。具体的には、図3のように巨視的破壊面の方向と卓越するジョイントセットの方向は考える岩盤要素により様々な角度をなすので、巨視的破壊面を水平に取り、それに対する卓越するジョイントセットの方向をその都度考え、弱面と潜在的な不連続面を与えられた確率密度関数に基づき分布させる。ジョイント強度の確率密度関数の与え方によって様々な状況に対応することが出来るが、不連続性岩盤では風化等によって強度の低下した弱面と強度の比較的高い潜在的な不連続面にわけられることが多い。

ジョイントの挙動特性は、図4に示すように、ジョイントのせん断変形に対して応力降下が生じ、あるせん断変位以上では応力降下が一定になるものとしてモデル化する。また、ジョイントの開口変形に対しては、開口変位

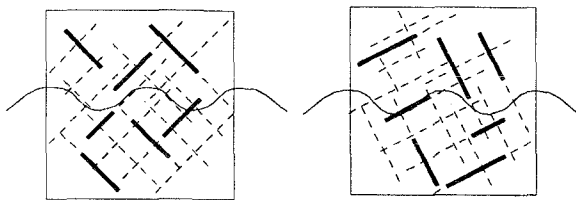


図 3: ジョイントを含む岩盤要素 (太線:弱面、点線部:潜在的な不連続面、波線部:巨視的破壊面)

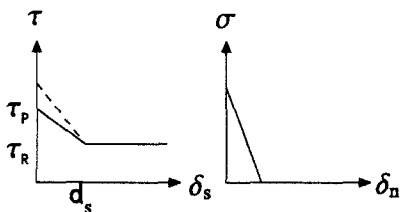


図 4: ジョイントの挙動特性のモデル化

に対して直応力が降下し、ある開口変位に達すると完全にジョイントが開くとストレスフリーになるものとしてモデル化する。

ジョイントのせん断・開口変形には、ジョイント周囲の応力状態が大きく影響を及ぼす。周囲の応力状態の影響は、前述の弾塑性解析において検討している巨視的破壊面上の点における応力履歴を岩盤要素の破壊解析における外力とすることによって考慮する。このようにして、不連続性岩盤における破壊の破壊面の方向と卓越するジョイントセットの方向との関係・卓越するジョイントの間隔・ジョイントの強度分布・ジョイントの連続性が解析に考慮されることになる。

3 岩盤斜面崩壊の解析例

3.1 解析条件

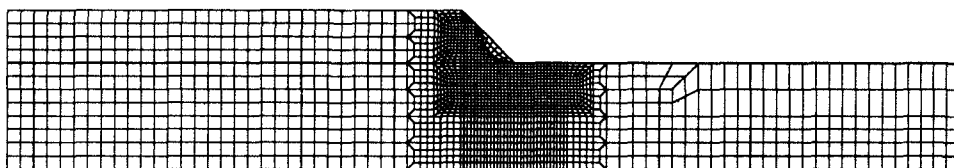


図 5: 等価連続体解析の有限要素メッシュ

想定した岩盤は不連続性の硬岩で、卓越するジョイントセットを有するものとする。ジョイント面の物性としてそのせん断強度と軟化特性・ジョイントの卓越方向及び平均間隔が与えられているものとする。基質岩盤の弾性係数・ポアソン比も予め与えられているものとする。また、斜面の形状は比高は 30m、傾斜角は 45 度とする。

岩盤斜面の巨視的破壊面決定のための弾塑性解析に使用する解析メッシュおよび等価連続体における進行性破

壊の解析に使用する有限要素メッシュを図5に示す。メッシュの数は1914、節点数は1999である。両解析ともに2次元平面ひずみの条件の下で解析を行った。

基質岩盤の弾性係数・ポアソン比などのパラメタは北海道豊浜トンネル崩落事故の際に報告された調査・試験結果を参考に、弾性係数 $E = 2220(MPa)$ 、ポアソン比 $\nu = 0.28$ 、密度 $\rho = 2.12(g/cm^3)$ とした。

ジョイントの走向、傾斜及び平均間隔はとしては仮想的な値を入力することとしたが、実際に頻繁に計測されるケースを想定し、ジョイントの走向は斜面に平行、傾斜は左落ち・右落ちともに45度、平均間隔0.1mとした。ジョイントの強度(せん断抵抗のピーク値 τ)の値は、パラメトリックスタディとして2ケースの解析を行い、解析結果特に斜面崩壊が生じる限界水平加速度の値に対するジョイントの強度の影響を評価した。(表1)

	τ^P (tf/m^2)	d_s^P $\times 10^{-4}(m)$	τ^R (tf/m^2)
弱面 (Case1)	6	0.8	3
弱面 (Case2)	24	3.2	6
潜在的な不連続面 (Case1)	9	1	3
潜在的な不連続面 (Case2)	36	4	12

表 1: ジョイントの物性パラメタ

3.2 解析結果

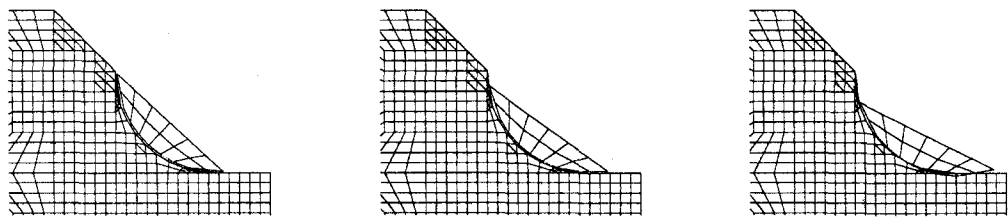


図 6: 岩盤斜面の崩壊挙動の過程 (Case1:左から $\alpha = 2.32, 2.4, 2.48$)

巨視的破壊面の挙動特性を与え、等価連続体における進行性破壊の解析を行った。図6はCase1、に関して斜面崩壊時における岩盤の崩壊挙動をプロットしたものである。加えた静的な水平加速度の値を重力の α 倍とした場合、Case1(ジョイントの強度が弱い)の場合は $\alpha = 2.48$ に至った時に崩壊挙動を示した。Case2の場合は $\alpha = 4.48$ に至った時に崩壊挙動を示した。このことは破壊面近傍のジョイントの強度の大小が岩盤斜面の安定性に大きく影響することを示している。強度が弱いジョイント特性を用いたCase1の方が小さい α の値で崩壊に至ると算定されており、解析によって得られる限界水平加速度の値が斜面崩壊に対する安定性の示標となり得ると考えられる。岩盤内の風化が進行すれば、ジョイントの強度は低下すると考えられるが、本解析手法により風化によって斜面崩壊に対する危険性が増す度合が評価できる。

4 まとめ

本研究では、ジョイントや断層といった不連続面を多数含む岩盤の斜面崩壊問題を、すべり面を含む等価な連続体問題に帰着させるという、岩盤斜面の安定解析の1つの方法を示した。不連続面を含む岩盤の崩落問題を等価な連続体問題に帰着させる際には、破壊が進行している不連続性岩盤中の一部の領域を代表要素として取り出し、平均操作を行うことで巨視的なせん断応力-せん断ひずみ関係を求め、その関係から等価連続体問題におけるすべり面の挙動特性を求め、解析を行った。不連続性の硬岩で卓越するジョイントセットを有する仮想的な岩盤を想定し、ジョイントセットの最大せん断強度を変えた解析を2通り行い、それぞれについて岩盤崩落に対する安定性の示標となる限界水平加速度と岩盤斜面の崩壊挙動を示した。

本解析手法の特徴は以下のように要約できる。まず、本解析手法は個々のジョイントの挙動を捉えた連続体解析手法であり、等価な連続体問題に帰着させる際に、卓越する各ジョイントセットの走向・傾斜・平均間隔や最大せん断強度の情報を入力データとして直接解析に反映することができる。また、解析結果として岩盤崩落に対する安定性の示標として崩落時の限界水平加速度を得られることである。従来、対象岩盤を不連続体として取り扱う離散型解析手法としてDEMやRBSMなどが提案されてきたが、それらは使用可能な要素数に限界があるため、解析結果が要素分割に大きく依存するという欠点が指摘されていたが、本研究は対象岩盤を巨視的に捉え、力学的に等価な連続体問題に帰着させることによってそれらの欠点を克服した新しい解析手法である。

斜面の安定解析を行う際には、巨視的破壊面(すべり面)をどのように決定するかが重要である。本来は破壊の局所化を判定しながら進行性破壊の解析を行うべきであるが、本研究では簡便な方法として対象岩盤の弾塑性解析を行い、解析結果から得られる相当塑性ひずみの分布からすべり面の位置を決定した。実際の岩盤斜面では、破壊の進行に伴って地山の応力状態は変化するため、岩盤要素の局所化解析と等価連続体の進行性破壊解析を練成させ、各増分に対して本研究で示した解析手法を繰り返し実行する必要がある。

また、本研究は新しい解析手法の概念とその有効性の提示に止まり、実際の岩盤斜面の安定解析に対する妥当性は検討されていない。従って妥当性を如何に検証するかが重要となってくる。現在豊浜トンネルの不幸な事故を踏まえ、危険な状態にある岩盤斜面を人工的に崩落させ、人命の安全を確保する試みがある。そのために各種の計測・現地試験等が実施されるが、そこで得られる各種の試験結果や計測結果と本解析手法によって得られる解析結果とを比較・検証する必要がある。

参考文献

- [1] 土木学会岩盤力学委員会編: 岩盤斜面の安定解析と計測, 土木学会, 1994
- [2] 地盤工学会学会岩の力学委員会編: 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, 地盤工学会, 1995.12
- [3] 地盤工学会岩盤構造物の設計法に関する研究委員会編: 岩盤構造物の設計法に関する研究報告書, 地盤工学会, 1997.12
- [4] 地盤工学会編: 北海道古平町国道339号岩盤崩落事故調査報告書, 1996