

岩盤崩壊メカニズムを評価するための 不連続変形法の適用に関する研究

門間 敬一¹・千田 容嗣²・馬 貴臣³・進士 正人⁴・大西 有三⁵

¹正会員 東亜グラウト工業株式会社 (元国土交通省土木研究所 砂防技術総括研究官)
(〒153-0042 東京都江東区木場3-7-10) E-mail:keiichi.momma@toa-g.co.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 (元急傾斜地研究室主任研究員)
(〒305-8516 つくば市南原1-6)

³正会員 博(工) 応用地質株式会社 技術本部 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5)

⁴正会員 学博 山口大学工学部 助教授 社会建設工学科 (元応用地質株式会社)
(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁵正会員 工博 Ph. D. 京都大学大学院 教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

岩盤崩壊の予知を行うために、数値解析による岩盤挙動の再現と予測は、工学上極めて有用な手法である。しかし、現場状況および試験結果をどこまで数値解析に反映させれば崩壊挙動が再現できるかは不明確である。本論文では、全国で実施されている岩盤崩壊モニタリングのうち、岩盤崩壊(自然崩壊)に至った天鳥橋西地区の実測データを不連続変形法により再現することにより、岩盤崩壊のプロセスの再現において、岩盤をどのようにモデル化すればよいかおよび力学試験との関連性について論述する。そして、今後の岩盤崩壊予知に関する数値解析の有効性を検討する。

Key Words : numerical analysis, rock slope monitoring, jointed rock mass, analytical parameter, laboratory test

1. はじめに

岩盤は一般に複雑な地質構造が伴うため、断層、節理、層理など、様々な不連続面の形態が存在する。そのため、岩盤斜面の力学的安定性は、多くの場合、岩盤を構成する不連続面の変形・強度特性に大きく支配される。従って、岩盤崩壊現象は、発生予測や規模、その影響範囲の評価が一般に困難である。さらに、破壊が一旦始まると、急激に進展するため、効果的な安定対策を実施することも難しい。その上、岩盤崩壊機構は、既存の不連続面の挙動のみならず、風化・豪雨などによる岩盤強度の低減に起因する新たな不連続面の発生によっても影響を受けると考えられている。

このような岩盤特有の性質を数値解析に取り込み、岩盤崩壊の前兆現象の把握や崩壊の予知・予測に関する研究が重要課題になっている。その取り組みの一つとして、全国に13箇所(現在10箇所)を岩盤崩壊モニタリング地点とし、現地岩盤斜面に各種計測機器を設置し、岩盤斜面の崩壊直前直後の挙動を

計測中である。そして、その中の一地点である天鳥橋西地区において、岩盤崩壊挙動の計測に成功した¹⁾。

一方、数値解析分野においては、不連続面を直接モデル化する幾つかの数値解析方法が提案されている。その中では、ジョイント要素を用いたFEM(JFEM)²⁾、剛体バネモデル(RBMS)³⁾、個別要素法(DEM)⁴⁾、不連続変形法(DDA)^{5),6)}などの解析手法が挙げられる。しかしながら、一般に不連続面のすべての物性を明確に把握することは極めて困難であるため、これらの数値解析では、多くの場合、不連続面を力学的に区分せずに一様な確率分布を持ったものとしてモデル化する方法や、具体的な個々の不連続面を地質学的連続性の観点に立ち、モデルに表現する方法等が採用されている。このような方法は、均一な不連続面により構成された岩盤の挙動を評価するには有効と考えられるが、連続性及び密着度が異なる不連続面により構成された岩盤斜面の崩壊メカニズムの評価に適さない点が多い。従って、現在の数値解析の技術ではこのような不連続面をすべて

モデル化することや多数の不連続面のなかで岩盤の崩壊の誘因となる不連続面を事前に抽出することは極めて困難であると言わざるを得ない。

本論文では、数値解析法として不連続変形法を用い、この方法を岩盤崩壊挙動のシミュレーション手法として用いるには、岩盤内の応力状態を正確に再現するための解析上の工夫が必要となることを示す。そして、岩盤崩壊により新たに発生する不連続面および既存不連続面の力学特性と室内試験との関係を検討することにより、岩盤崩壊モニタリングによって得られた岩盤崩壊プロセスを再現できる可能性があることを示す。

2. 岩盤崩壊挙動解析への不連続変形法の適用法の提案

(1) 基本的考え方

不連続変形法^{5),6)}は、ポテンシャル最小化原理を利用して剛性マトリックスを作成し不連続な力学モデルを数値解析する方法であり、解の唯一性が保証されている。また、任意形状の個々の岩盤（要素）ブロックの重心点で定義するひずみ、剛体変位、剛体回転を未知数としており、各々の岩盤ブロックの運動方程式に基づいて系全体の動的な力学挙動（状態）を解析することができる。

また、ブロック間の接触・貫入判定は Penalty 法を用いている。すなわち、岩盤ブロックが食い込んだ場合には、1方向または2方向への動きを固定するための地山の弾性係数あるいはせん断弾性係数に相当するバネを釣り合い方程式に自動的に取り込むメカニズムを採用している。このようなバネを適用する物理的な意味は、食い込んだ岩盤ブロックを不連続面の強度特性に対応し、最も短いパスに沿って押し戻すことにある。剛性バネを P 、食い込み量を d とすると、接触バネのひずみエネルギーは以下の式で表される。

$$\Pi_k = \frac{1}{2} P d^2 \quad (1)$$

このポテンシャルエネルギーを変位変数 d で微分し、連立方程式に組み込み、食い込み量が計算精度を満たすまで、繰り返し連立方程式を解くことになる。

(2) 初期応力解析

不連続変形法では、初期応力を入力値として考慮できるが、岩盤斜面のように初期応力状態が位置により変化する場合などは、解析を実行することにより初期応力状態を再現している。従来、この解析では、動的解析を行っている。なお、静的解析と動的解析の違いは、静的解析では各時間ステップ計算の初速度を毎回ゼロとして解析するのに対して、動的解析では時間ステップ計算の初速度に一段階前の時間ステップ計算による速度を受け継ぐ点である。動的解析では、最初の数ステップにおいて、岩盤ブロックの自重及び岩盤ブロックの変形から岩盤ブロック内の応力及びブロック間の接触力が不安定な状態となる場合がある。すなわち、元々安定な岩盤であっても、不安定となる可能性があり、限界状態における岩盤の安定評価が困難になる。

したがって、本研究においては、静的解析と動的解析の不連続変形法を組み合わせで行っている。すなわち、解析の最初数ステップにおいて、静的解析を行い、その後動的解析を実行する。静的解析を実施することにより、自重をかける際に生じる岩盤ブロックの変位速度を最大限に低減させながら、自重による初期応力状態を解析する。これにより、現状では安定している岩盤斜面はもちろん、岩盤崩壊直前の岩盤斜面の応力状態も再現できる。その後の動的解析では、岩盤ブロックの変形や岩体間の接触時の力学関係をステップ毎に計算し、各ブロックの動きを追跡し、崩壊時の挙動や崩壊後の軌跡・形状を解析する。

(3) 不連続面のモデル化

不連続変形法では、岩盤不連続面は岩盤ブロックの境界面として取り扱われる。言い換えれば、岩盤ブロックは不連続面で囲まれ、ブロック自体は、全く不連続面がない均質な岩盤となる。従って、不連続面の強度評価とは、岩盤ブロックの接触・分離における力学関係を表現したものであり、既存の不連続面及び崩壊に伴って新しく発生する不連続面それぞれの力学モデルを検討する必要がある。両者とも不連続面の力学モデルとしては、Mohr-Coulomb 則に従うが、破壊基準がそれぞれ異なると仮定している。既存不連続面のモデル化に関しては、現在までに提案されている解析手法^{2),7),8)}の多くは、数少ない室内試験から一律に一定条件として評価している場合が多い。このような方法は、割れ目の性状が単純な場合にはさほど問題がないが、岩盤斜面のように割れ目のそれぞれが風化・劣化により異なる強

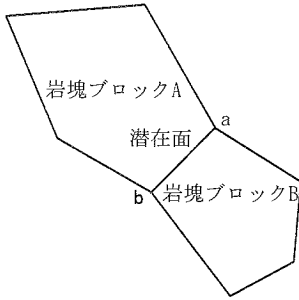


図-1 潜在面の定義

度特性を持つ場合には適用できない。その上、それぞれの割れ目の性状を現場実験または室内試験によりすべて調べるのは不可能に近い。したがって、まず、岩盤斜面のモデル化は岩盤を領域により区分することではなく、不連続面を密着度合い及び強度特性によりグループに区分し、グループ毎に代表的な不連続面を室内で試験を行うこととした。

実際の岩盤には、潜在的な不連続面などが内包されているため、ここで取り扱う岩盤ブロックの力学的性質はインタクトな岩石とは異なると考えられる。次に、岩盤崩壊により新たに発生する不連続面について述べる。一般に、岩盤の亀裂発生・進展解析には、亀裂の発生条件としてエネルギー基準を用いる動的な方法⁹⁾と強度基準を用いる静的な方法^{10), 11)}がある。提案手法では、割れ目の発生条件に強度基準を用い、静的な平衡状態を維持しながら安定的に割れ目が発生する問題を取り扱う。従って、動的、衝撃的な荷重を受ける問題は対象としない。現状の不連続変形法をそのまま利用しながら、新たに発生する不連続面を評価するため、地質の変化や既存不連続面の分布状況等を考慮して、最初のモデル化の段階から岩盤崩壊により新たな不連続面になることが予想されるいろいろな位置や方向にあらかじめ不連続面を岩塊ブロックの境界面として定義する。本論文では、このような解析の途中段階から不連続面になる岩塊ブロックの境界面を「潜在面」と称することとする。すなわち、潜在面は、図-1に示すように、応力状態により不連続面となり得る不連続面であり、隣接する2つの岩塊ブロック(図ではAとB)が接する1つの境界面(図中にab)と定義する。与えられた不連続面の発生条件により新規不連続面の発生と判定されるまでは潜在面の連続性を維持するため、ここに周囲の岩塊ブロックと等価な強度を与える。

新規不連続面の発生条件は Mohr-Coulomb の法則

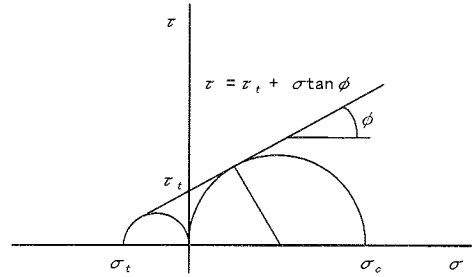


図-2 Mohr-Coulomb の法則の概念

に従うものと仮定する。潜在面のせん断応力を τ 、垂直応力を σ とすると、不連続面の発生機構は下式で表される。

$$\begin{aligned} \text{引張領域 (引張破壊)} \quad & \sigma \geq \sigma_t \\ \text{圧縮領域 (せん断破壊)} \quad & \tau \geq \tau_t + \sigma \tan \phi \end{aligned} \quad (2)$$

ここでは、 σ_t は潜在面周辺の岩盤の引張強度、 τ_t はせん断強度、 ϕ は内部摩擦角である。図-2に Mohr-Coulomb 則の概念を示す。図に示すように、 ϕ 及び τ_t は以下の式のように引張強度 σ_t 及び圧縮強度 σ_c で表される。

$$\sin \phi = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (3)$$

$$\tau_t = \frac{\sigma_t}{2} \cdot \frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi} \quad (4)$$

不連続変形法では、ブロック間の接触については点と辺との接触条件により割れ目の発生を判断する。図-1に示すように、岩塊ブロックAとBの間ではaとbが接触点となる。潜在面abは2等分され、それぞれ部分の破壊条件はそれぞれの接触点a及びbの接触条件で決められる。また、割れ目が発生と判断された時、潜在面のせん断強度及び引張強度は共にゼロとなるが、内部摩擦角は変化しないと仮定している。破壊後は、既存割れ目と区別され新規割れ目として挙動する。

(4) 岩盤強度の推定

潜在面周辺の岩盤の強度(σ_c, σ_t)は風化、浸食及び寸法効果などにより、インタクトな岩石を用

いた岩石試験より得られた強度より遥かに小さくなっている。これについて、池田は、岩盤の弾性波速度と岩石の弾性波速度との比を割れ目指数とし、岩石試験片の強度に割れ目指数の2乗を乗じることにより岩盤の強度を算定する方法を提案している¹²⁾。また、瀬崎は、岩盤データベースを用いて、岩盤の弾性係数及び一軸圧縮強度と岩石のそれとの関係を統計的に評価している¹³⁾。ここでは、池田ら、瀬崎の考え方を参考にして、岩塊の一軸圧縮強度及び引張強度は、岩石の一軸圧縮強度 (σ_c') 及び引張強度 (σ_t') と同じ比率で低下すると単純に仮定し、その係数kを「強度低減率」と呼ぶ。すなわち、

$$\begin{aligned}\sigma_c &= k \cdot \sigma_c' \\ \sigma_t &= k \cdot \sigma_t'\end{aligned}\quad (5)$$

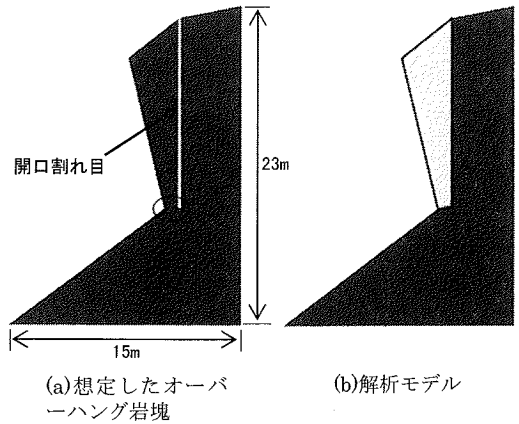


図-3 想定した解析モデル

3. 数値実験による提案手法の検討

岩盤の背面に不連続面が存在し、かつオーバーハングした岩盤を想定した数値実験を行い、限界状態にある岩盤状態を再現するための今回の提案手法に関する検討を行う。

(1) 解析モデルおよび物性値

図-3に想定した解析モデルを示す。この岩盤斜面は、風化、浸食により、図中○印で示されている箇所付近でいずれ割れ目が発生し、転倒崩壊が発生する可能性が考えられる。ここでは、不連続面及び岩石強度は後述の天鳥橋西地区の岩盤斜面における岩石試験の試験値を用いる。試験結果では、岩石の一軸圧縮強度 σ_c' は 63.9MPa、引張強度 σ_t' は 10.6MPa、不連続面の摩擦角 ϕ は 32° である。表-1に解析に用いた物性値及び解析パラメータを示す。

(2) 解析手順および結果

不連続変形解析は、当初に静的解析を10ステップ(約0.7秒)実施した場合と、最初から動的解析を行った解析を比較した。強度低減率として、k=1%、5%、10%の3ケースを検討した。図-4に、k=5%とした岩盤の変形挙動解析結果を、図-5に転倒する岩塊の応力と各ステップの変位増分の経時変化を示す。図-4から明らかのように、静的解析を行わない従来の不連続変形解析の結果では岩塊が明らかに転倒崩壊的な変形を示すことに対し、静的解析と動的解析を組み合わせる解析を行う場合には、崩壊が

表-1 解析に用いた物性値及び解析パラメータ

項目		値	
解析パラメータ	許容変位比 ⁵⁾	0.001	
	バネ剛性P (MN/m)	20000	
	ステップ数	300	
	静的解析ステップ数	10	
岩盤ブロック	弾性係数E (GPa)	24.5	
	ポアソン比 ν	0.2	
崩壊に伴い発生する新規の割れ目	k=10%	内部摩擦角 ϕ (°)	45.7
		せん断強度 τ_t (MPa)	1.30
		引張強度 σ_t (MPa)	1.06
	k=5%	内部摩擦角 ϕ (°)	45.7
		せん断強度 τ_t (MPa)	0.65
		引張強度 σ_t (MPa)	0.53
	k=1%	内部摩擦角 ϕ (°)	45.7
		せん断強度 τ_t (MPa)	0.13
		引張強度 σ_t (MPa)	0.11
開口割れ目	摩擦角 (°)	32.0	
	粘着力	0	

発生せず、岩塊は安定した状態を保つ。

図-5から分かるように、静的解析を行わない場合、岩塊の最小主応力は、時間と共に変動する。このような変動は、岩盤ブロックの自重によるブロック間接触力の変動及び岩塊自身の変形が原因であると考えられる。変動に伴い、解析ステップ毎の変位増加量が増加する。それに対して、静的解析と動的解析を組み合わせる解析を行う場合には、岩塊の最小主応力がほぼ一定で変動が無い。また、解析ステップ毎の変位増分も発生しない。なお、図としては示していないが、k=10%のケースでは、どちらの解析を実施しても安定している。同様に、k=1%のケースでは、両者とも転倒する。これらの結果から、既

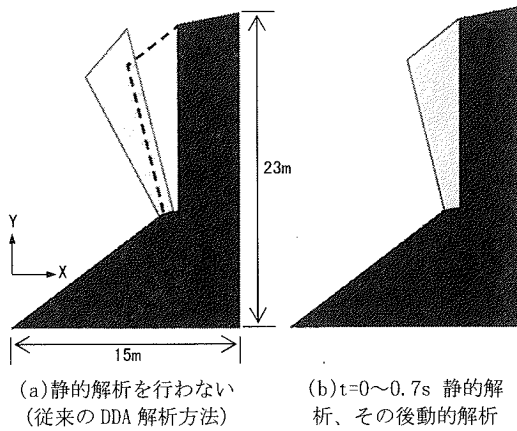


図-4 DDAによる解析結果(k=5%)

往の不連続変形解析では動的解析を当初より実行するため、岩盤ブロックの主応力が周期的に変動することが分かった。その影響により、元来安定しているべき岩盤斜面が転倒破壊を生じる場合があることが分かった。このような変動は、多くのブロックより構成する複雑なモデルの場合ではさらに大きくなることが考えられる。従って、ある時間ステップまで静的解析を実施し、岩塊の自重発生によるブロック間の変動が収束することを待って通常の動的解析を実施すれば、岩盤が安定状態から転倒崩壊に至るまでの岩盤挙動を安定的に解析することができると考えられる。

4. 天鳥橋西地区における岩盤崩壊挙動実態への不連続変形法の適用

(1) 天鳥橋西地区岩盤崩壊

図-6に天鳥橋西地区岩盤斜面の側面写真及びスケッチ図を示す。図中、側面スケッチ図により認められた岩盤ブロックを破線で示す。図に示す、a~dブロックは平成11年2月27日に、eブロックは3月15日にほぼ2週間の間隔をおいて相次いで2回転倒崩壊し、岩盤斜面の計測のために設置していたITVによる崩壊の画像が得られた。録画ビデオによると、1回目の崩壊は、dブロックが徐々に前傾し、最終的に支えとなっていた前面のcブロックが剥がれるように破壊されて崩落するという、将棋倒し状のトップリング崩壊形式が見られた。また、2回目の崩壊は、eブロックが最初に徐々に前傾し、その後わずか5~6秒間でブロックが一体となって鉛直下方へ傾いて崩落した。また、崩壊の途中にブロッ

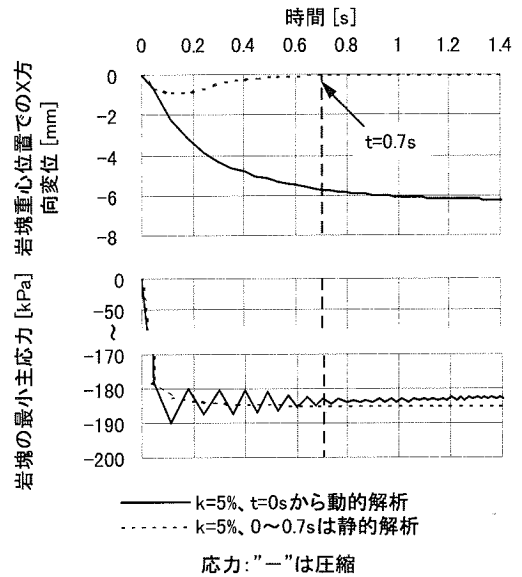


図-5 転倒岩塊の応力と重心位置でのX方向変位の経時変化

ク上部ほど大きく回転するように右に捻る形で転倒していくことが確認された。今回は、不連続変形法により、岩盤崩壊シミュレーションを行い、岩盤崩壊モードの再現により、数値解析による岩盤崩壊形態の予知・予測の可能性を検討する。

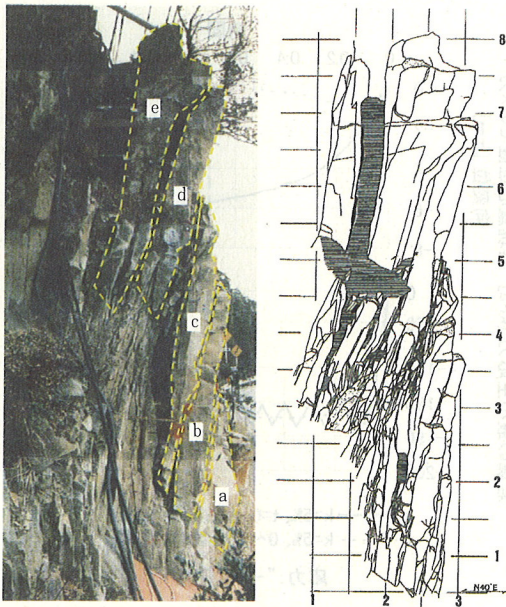
(2) 解析モデルと解析条件

a) 解析モデル

図-7に解析モデルを示す。図中、a~eブロックは図-6に示したブロックにそれぞれ対応している。これらのブロックは崩壊の際に、それぞれに幾つかの小部分に破壊されると想定して、モデル作成の際に、それぞれのブロックを予め分割し、不連続面を設置する。ただし、後述するように、ブロックを分割するための割れ目の強度は岩盤強度を用いる。

図-8に解析モデルにおけるブロック物性値及び不連続面物性値の設定範囲を示す。図に示すように、物性値の違いにより岩盤ブロックを2区分、不連続面を3区分と想定する。

ここでは、崩壊前の調査結果により、ブロックcとdの間、dとeの間及びeの背面は、空洞となっているか、碎石で充填されている。解析では、これらの部分を不連続体として認識するが、その物性値を岩塊の物性値と区別して想定する。図-8(a)に示すように、区分Aは岩塊部分(岩塊)、Bは粘土か碎石で充填されている部分を示す(充填物)。



数値の単位：m

(a)側面写真 (b)スケッチ図

図-6 天鳥橋西地区岩盤斜面

また、崩壊前後の調査により、不連続面は、既存のもの及び崩壊による新たに生成したものの2種類に大別できる。また、既存不連続面は完全に開いている不連続面と密着している不連続面に分けられる。完全に開いている不連続面は、不連続面同士の粘着力は無いが、噛み合わせなどによる摩擦抵抗力はまだ残っていると考える。これらの考察により、不連続面に関しては以下の3区分と想定する。図-8 (b)に示すように、区分Iは完全に開いている不連続面、IIは密着している不連続面、IIIは崩壊による新たに生成したと考えられる不連続面を指す。

b) 岩石試験結果

岩盤及び不連続面の物性値を求めるため、対象岩盤のボーリングコアから供試体を採取し、岩石の一軸圧縮実験、圧裂引張試験及び既存不連続面を含む供試体の多段階一面せん断試験により岩石の一軸圧縮強度、引張強度及び不連続面の粘着力、摩擦角を調べた。表-2に岩石試験の結果を示す。

表-3に解析に用いた物性値及び解析パラメータを示す。ここでは、岩盤ブロック区分Aに関しては岩石試験値を採用し、充填物である区分Bに関しては、その弾性係数を岩石の弾性係数の1/10と、ポアソン比を0.3と想定する。

また、不連続面に関しては、区分Iの摩擦角は岩石試験値の摩擦角を採用し、粘着力はゼロと想定する。区分IIは岩石試験値の摩擦角と粘着力を採用す

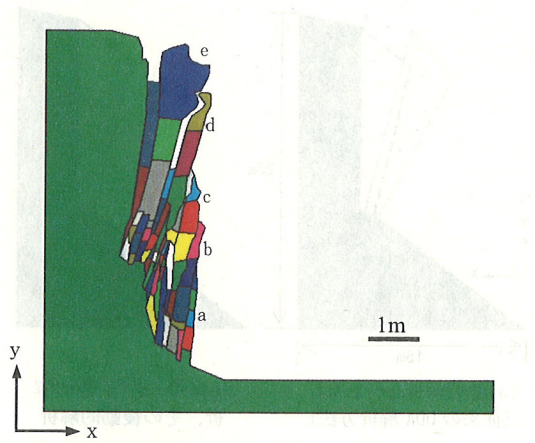
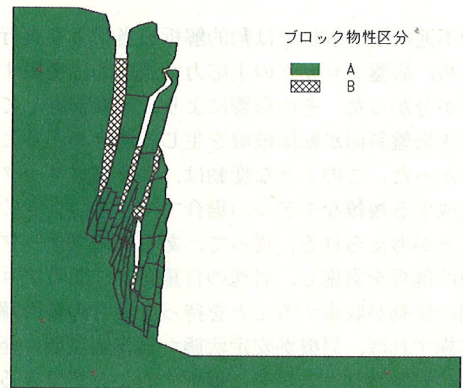
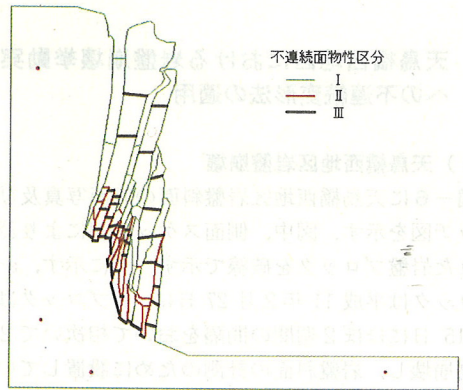


図-7 想定した解析モデル



(a)ブロック物性値の設置範囲



(b)不連続面物性値の設置範囲

図-8 物性値の設置範囲

る。不連続面区分IIIは、岩石強度から Mohr-Coulomb 破壊基準 (式(3), (4)) により求める。ただし不連続面の引張強度は、岩石の自身の風化や劣化などにより、インタクトな岩石を用いた室内試験から得られた引張り強度より小さいものと想定され

る。しかし、正確にその値を設定する方法が無い
ため、今回は、崩落状況の再現を目的とした簡単な
数値実験を繰り返し行い、引っ張り強度を想定した。

(3) 岩盤崩壊挙動の解析結果

図-9に各時間毎の岩盤崩壊状況を示す。この解
析結果を図-10に示す実際の崩壊イメージ図¹⁴⁾
と比較すると、解析結果の各ブロックの崩壊モード
は実際の崩壊モードとよく一致していることが分
かる。より詳細に検討すると以下のことが分かる。

図-9(a)に示すように、時間 3.28s では、d ブ
ロックとeブロックが同様な運動を示す。これは、
崩壊前にブロックの変位に関する実際の岩盤モニ
タリング計測結果においてもdブロックとeブロック
の相対運動がほとんどなかったことと一致する。

図-9(b)に示すように、時間 4.25s では、e ブ
ロックはほとんど転倒しないことに対して、d は大
きく転倒する。この傾向は岩盤崩壊モニタリング1
回目の崩壊挙動と対比してみると、dブロックの転
倒と実際崩壊において最初にdが徐々に前傾する
ことと一致する。

図-9(c)に示すように、時間 4.99s では、a ブ
ロックは上部から下部まで順序に破壊され、b ブ
ロックを支えきれなくなって剥がれるような破壊の
様子を示す。b~dブロックは垂直方向の水平方向
の移動せず、単純な転倒崩壊である。これは実際
崩壊の将棋倒し状のトップリング崩壊形式とよく
一致する。

図-9(d),(e)に示すように、時間 5.86s 及び
時間 5.92s では、b, c 及び d の各ブロックが
地面に衝突する前後の様子を示す。各ブロックは、
それぞれが3~4つの小さな岩塊に予め分割され
てモデル化されているが、地面に到達する前まで
ほとんど分離せず、地面に衝突後に幾つかの小
さな岩塊に分離することが明らかになる。これは、
実際の崩壊モードとよく一致する。また、これま
でに、eブロックはほとんど運動しなかったこと
も実際の崩壊が2回に分かれて発生することと一
致する。

図-9(f),(g)に示すように、時間 7.77s 及び
時間 7.82s では、eブロックが崩壊する。b~d
ブロックと同様に、地面に衝突する瞬間に幾つ
かの小さな岩塊に分離する。このように、崩壊
が2回発生することや、また、それぞれの崩壊
範囲も実際の崩壊モードと良好に一致する。

図-9(h)は、時間 9.10s における崩壊前後
の状況を示したものである。

表-2 岩石試験結果(岩種:粗粒砂岩)

岩石	一軸圧縮強度 σ_c' (MPa)	63.9
	引張強度 σ_t' (MPa)	10.6
	弾性係数(GPa)	24.5
	ポアソン比	0.2
不連続面	摩擦角 ϕ (°)	32.4
	粘着力 c (MPa)	0.056

表-3 解析に用いた物性値及び解析パラメータ

項 目		値	
解 析 パ ラ メ ー タ	許容変位比	0.001	
	バネ剛性 P(MN/m)	200	
	ステップ数	8000	
	静的解析ステップ数	300	
	動的解析の時間ステップ幅(s)	0.001	
岩盤 ブ ロ ッ ク	区分 A	弾性係数 E (GPa)	24.5
		ポアソン比 ν (-)	0.2
	区分 B	弾性係数 E (GPa)	2.45
		ポアソン比 ν (-)	0.3
不 連 続 面	区分 I	摩擦角 ϕ (°)	32.4
		粘着力 c (MPa)	0
		引張強度 σ_t (MPa)	0
	区分 II	摩擦角 ϕ (°)	32.4
		粘着力 c (MPa)	0.056
		引張強度 σ_t (MPa)	0
	区分 III	内部摩擦角 ϕ (°)	45.7
		せん断強度 τ_t (MPa)	3.90
		引張強度 σ_t (MPa)	3.18

(4) 考察

本論文で提案した解析方法の妥当性を検証する
ため、従来手法に基づいて解析を実施した。図-11
に解析結果例を示す。この解析の解析モデルは、
前述の解析モデル(図-7)の a~e ブロックに予
め設置した不連続面を除いたものである。また、
岩盤及び不連続面はその密着度と強度により区
分せず、不連続面強度は表-3に示されている区
分 II、岩盤ブロックは表-3の区分 A と同様な
不連続面と岩盤強度を想定した。また、解析は
動的解析のみを実施することにした。図-11(a)
には時間 0.32s、(b)は時間 0.48s の岩盤崩
壊の状況を示す。図に示すように、a~e ブロ
ックはほぼ同時に動き出す様子を
示している。なお、図としては示していないが、
不連続面強度を表-3に示す区分 I と同様な不
連続面強度を想定したケースも、図-11とほぼ
同様な結果となる。

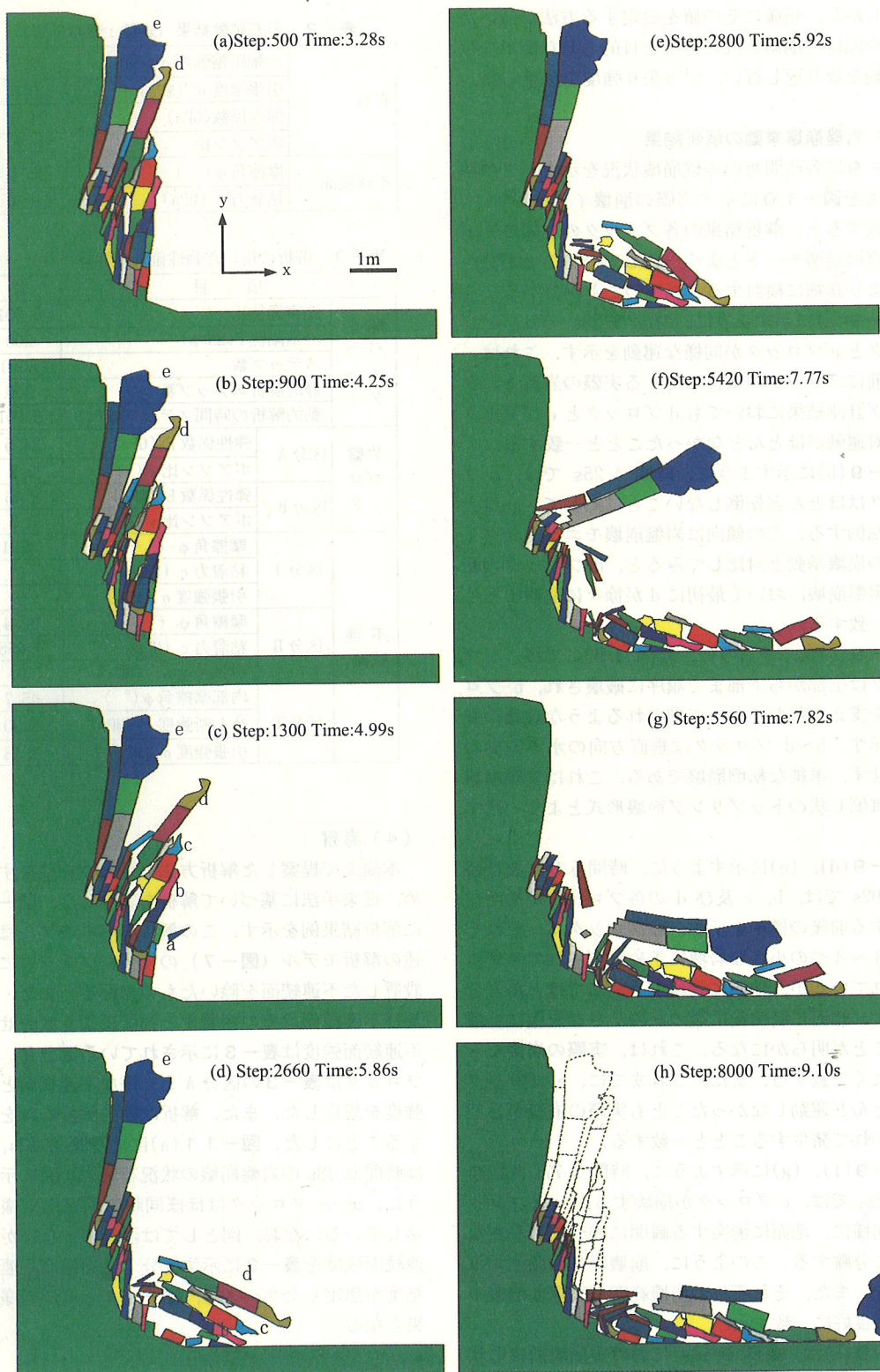
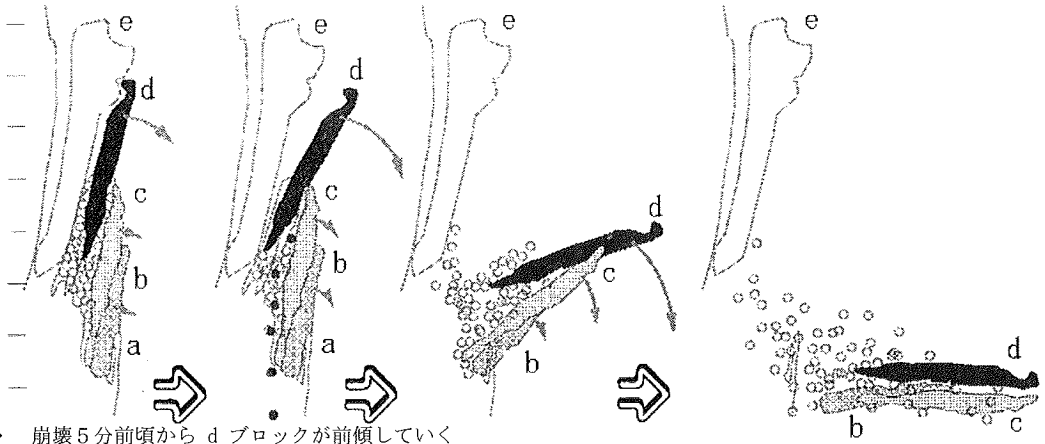


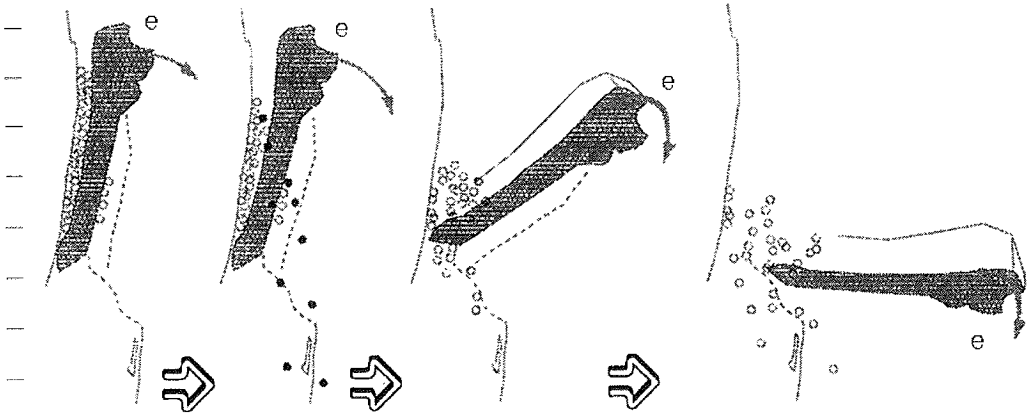
図-9 DDAによる岩盤崩壊挙動解析結果 (k=30%)



- ・ 崩壊5分前頃から d ブロックが前傾していくのが目に見えて分かるようになる。
- ・ この頃から AE イベントも多くなる。
- ・ 1分15秒前に b, c と d ブロック間から小落石が発生オス

- ・ 転倒 d ブロックに押されるように、前面 c, b と a ブロックの一部が剥離転倒する。

(a) a, b, c と d ブロック



- ・ 崩壊4時間前頃から転倒速度UP.
- ・ 崩壊1時間前に落石があり、これ以後速度再加速.
- ・ 10分前頃から AE イベント多くなる.
- ・ 5分前頃から落石多発.

- ・ e ブロック下端を支点として前方に真っ直ぐ倒れるように崩壊し始める.
- ・ 崩壊（破壊）の過程で、やや右にひねるよう回転し、頂部から落下.

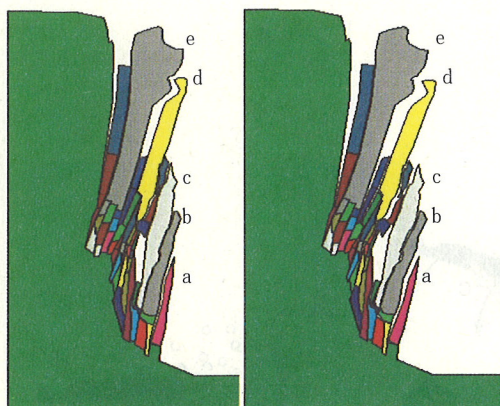
(b) e ブロック

図-10 実際の崩壊イメージ図¹⁴⁾

一方、実際の崩壊過程（図-10）では、a～eの岩盤ブロックは、2回に分けて崩壊したことが分かっている。すなわち、a～dの崩壊は、まず、崩壊5分前頃からdブロックが前傾し、その後、転倒dブロックに押されるように前面c, bとaブロックの一部が剥離転倒すると観察されている。図-11に示す通り、従来の方法ではこのような崩壊過

程を再現できていないことが分かる。これに対して、本論文で提案する数値解析の適用法による解析結果（図-9）は、このような崩壊過程と良好な一致を示している。したがって、室内試験結果を参考に、本手法を用いて、うまくモデル化を行えば、岩盤崩壊過程が予測できる可能性があることが分かる。

次に、モデル化におけるもっとも重要な不連続面



(a)Time:0.32s (b)Time:0.48s

図-1 1 従来の不連続変形法の解析結果

及び岩盤強度がどの程度まで低下すると岩盤が崩壊するかを検討するため、不連続面及び岩盤強度の低下率を変化させ定量的に評価することを試みる。ここでは、前述の強度低減率(k)を 100%と 50%と想定し、他の解析条件を変化しないの 2 ケースの計算を行った。

図-1 2 に $k=100\%$ の場合、図-1 3 に $k=50\%$ の場合における最終の岩盤の状況を示す。図-1 2 では、ブロック a~d は大きな転倒変位を示したが、崩壊まで至らなかった。また、図-1 3 は岩盤が崩壊までに至るが、印○で囲んでいるブロックは、ブロックと地面との衝突により、予め分割した小さな岩塊に分離されなかった。一方、崩壊の実績(図-1 0)では、a~d ブロックは地面に到達するまでにはそれぞれのブロックが小ブロックに分割しなかったが、地面に到達後にはそれぞれのブロックが 3~4 分割程度の小ブロックに割れている。この結果から、岩盤の平均的な強度がインタクトな岩石を用いた室内試験値より 50%~30%まで低下したため、当地区岩盤は図-1 0 に示すような崩壊が発生したと推定される。しかしながら、今回の不連続変形法の適用においては、崩壊に伴う新規割れ目の発生を潜在面として表現するアプローチを試みた。今後、岩盤ブロックをもっと多くの小ブロックに分割する等の工夫をすることにより、亀裂進展を表現できる岩盤崩壊への解析法の展開が期待される。

5. まとめ

岩盤崩壊モニタリングにおいて得られた岩盤崩壊プロセスを明らかにするため、本論文では、岩盤の

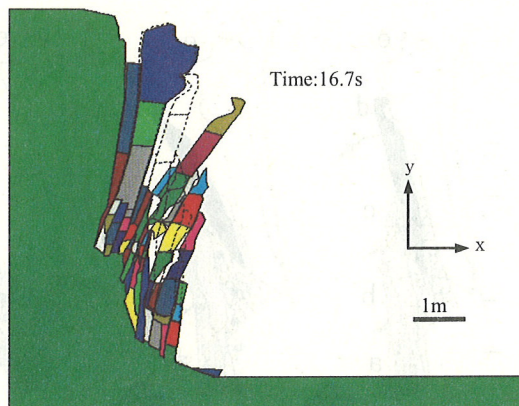


図-1 2 DDA 解析結果 ($k=100\%$)

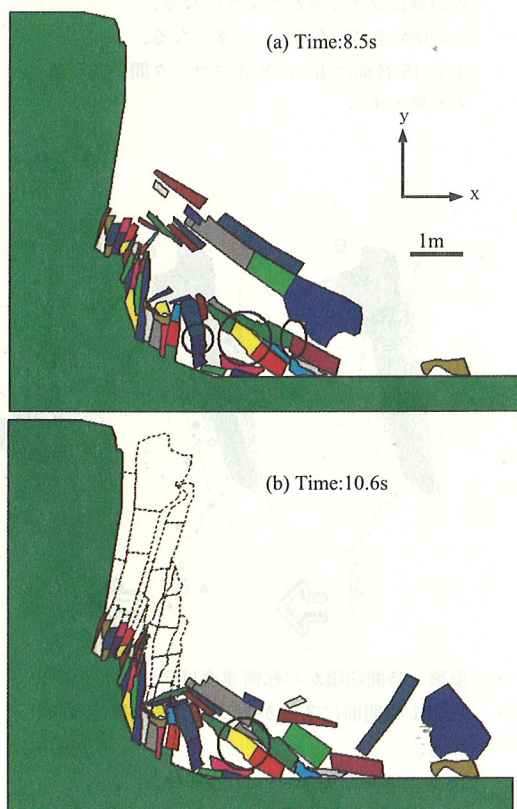


図-1 3 DDA 解析結果 ($k=50\%$)

既存不連続面及び崩壊に伴って新たに発生する不連続面に対し、Mohr-Coulomb 則に基づく破壊判定基準を適用した。そして、不連続面を破壊判定基準ごとにグループ化する不連続面モデルを作成した。また、不連続変形法を実行する際に発生する岩盤の自重による初期応力の揺らぎが、岩盤斜面のように極限の安定状態を再現する場合には解析結果に大きな影響を与えるため、それを避けるための解析手法の

適用の工夫を行った。そして、岩塊の崩壊モデルによる数値実験により、岩盤の自重による初期応力分布が滑らかに発生すると共に、岩盤強度の低減により岩盤挙動が安定状態から転倒崩壊に至るまでの解析ができることを確認した。

また、天鳥橋西地区の岩盤崩壊モニタリングへの適用事例では、不連続面の強度特性を室内試験結果の約 30%程度とすれば、岩盤ブロックの崩壊モード、崩壊範囲などの崩壊挙動が不連続変形法により再現できることが分かった。また、岩盤崩壊挙動解析では、既存割れ目だけではなく、崩壊に伴って生じる割れ目の位置の設定及びその強度特性にも大きく依存することが分かった。しかし、今回はあくまでも唯一得られた崩壊事例に適用を試みたに過ぎない。したがって、斜面崩壊を予知・予想するには、岩盤崩壊事例並びに力学試験結果を収集し、強度低下をどの程度とするかなどの基礎的データの収集が不可欠である。

参考文献

- 1) 門間敬一, 小野田 敏, 落合達也, 荒井健一, 綱木亮介, 浅井健一: 岩盤崩壊モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の計測例, 地すべり学会誌(報告), Vol.139, No. 1, pp. 62-69, 2002.
- 2) Goodman, R.E.原著, 赤井浩一, 川本眺万, 大西有三共訳: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978.
- 3) 川井忠彦: 離散化極限解析法に関する最近の話題, 生研セミナーテキスト, 1986.
- 4) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Blocky Rock System, ISRM Symposium, Nancy, France, pp. 11-18, 1971.
- 5) Shi, G.H.: Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis, Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng., 1989.
- 6) Goodman, R.E. and Shi, G.H.: The Application of Block Theory to the Design of Rock Bolt Support for Tunnels, Felsbau 5, 1987.
- 7) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 地下空洞安定解析における岩盤不連続面の力学的挙動モデルの提案と適用, 土木学会論文集, No.603/III-44, pp. 53-66, 1998.
- 8) Bhasin, R.K. and Heeg, K.: Parametric Study for a Large Cavern in Jointed Rock Using a Distinct Element Model(UDEC-BB), Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No.1, pp. 17-29, 1998.
- 9) 石塚与志雄, 木下直人: 破壊力学を用いたLPG岩盤内貯蔵空洞の亀裂進展解析に関する研究, 土木学会論文集, No.388/III-8, pp. 171-178, 1987.
- 10) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素法解析, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp. 3-12, 1985.
- 11) 大西有三, 河野正雄: ボロノイ分割法を適用した岩盤の個別要素解析について, 土木学会論文集, No.376/III-6, pp. 231-239, 1986.
- 12) 池田和彦: 割れ目岩盤の性状および強度, 応用地質, Vol. 40, No. 4, pp. 20-32, 1979.
- 13) 瀬崎満弘, Aydan, Ö., 市川康明, 川本眺万: 岩盤データベースを用いたNATMの事前設計のための物性値, 土木学会論文集, No.421/VI-13, pp. 125-133, 1990.
- 14) 建設省土木研究所: 平成11年度天鳥橋西地区岩盤崩壊挙動解析業務報告書, 2000.

(2001. 5. 10 受付)

STUDY ON THE APPLICATION OF DISCONTINUOUS DEFORMATION ANALYSIS TO EVALUATE THE MECHANISM OF ROCK SLOPE INSTABILITY

Keiichi MONMA, Yoji CHIDA, Gui-chen MA, Masato SHINJI and Yuzo OHNISHI

In order to foresee collapse of rock slope, numerical method will be extremely useful. However, it will be difficult to simulate collapsed, considering difficulties of rock parameter, such as geology, fracture, fault and laboratory testing into numerical calculation. This paper deals with the relevance of numerical modeling with respect to mechanical properties of rock proposed by authors. The actual data of Amatoribashi west district is referred in this paper, which was the representative case of our field monitoring studies, 13 sites in Japan.