

粒子間ボンディング力を適用した個別要素法による 2次元岩盤斜面の崩壊シミュレーション解析[†]

大 槻 敏* 楠 見 晴 重** 松 岡 俊 文***

Two-Dimensional Simulation Analysis of Rock Slope Failure by DEM Using Bonding Force between Particles

by

Satoshi OHTSUKI^{*}, Harushige KUSUMI^{**} and Toshifumi MATSUOKA^{***}

As is known, there are many fractures in rock slope, and these fractures are often the cause of failure. Especially, the mechanism of toppling failure depends on fractures in rock slope. In this paper, two-dimensional simulation analysis and visualization for toppling failure of rock slope by distinct element method are carried out. In related with this simulation, the tensile stress of rock mass can be tried to be expressed by bonding theory. The rock slope model with this analysis can be freely setting the slope shape and the location of joints. Using this analytical model, it is tried to be simulated an actual toppling failure of rock slope. As the results of this analysis, it is recognized that this simulation can be expressed on this toppling failure phenomena. Moreover, the process of toppling failure can be visualized.

Key words : Rock slope, Distinct element method, Simulation analysis, Bonding force

1 緒 言

連続体を仮定した数値解析には有限要素法や境界要素法などがあり岩盤や地盤に対しても広く利用されている。しかし、有限要素法や境界要素法による解析では、大規模な変形や破壊を扱う際に困難が生じる。これに対し個別要素法は、Cundall¹⁾によって考案された解析手法であり不連続体解析に対して有用性が高いとされ、特に破壊を伴う大変形問題に対しての解決策として注目を浴びている。この個別要素法に関する研究は、Cundall, 伯野²⁾, 久武³⁾など多くの研究者によって行われている。Cundallは1971年にブロック挙動を追跡する数値解析⁴⁾により個別要素法の端を発した。しかし、この手法では要素間の力の伝達は反発力のみであり、コンクリートや岩盤などの連続体解析への適用は困難であった。伯野は要素の間隙物質を考慮できるように、従来のばねとは別に独立した間隙ばねを設定した拡張個別要素法を提案している。地盤やコンクリートなどの粒状物質の集合体において見られるダイレタンシー効果や、応力やひずみの局所化の効果を自然に取り込むことができるなどの点に優れている。久武らは個別要素法の考え方を発展させ、CEM(Contact Element Method)を開発した。これは、粘性地盤への適用を想定したものである。このように、個別要素法はより洗練されたものとなり、近年のコンピュータ技術の発達により膨大な要素数の解析も可能となった。

一方、岩盤斜面内部には多くの不連続面が存在しており、それらの不連続面はしばしば崩壊の原因となる。特に、トッピング崩壊は受け盤方向の不連続面に支配されているが、その複雑な崩壊メカニズムが完全に解明されているとは言えない。また、既往の研究では、基礎的な実験や単純形状のモデルによる解析が行なわれていることが多い。

以上のような背景から、本研究では、不連続面を有する岩盤斜面をモデル化し、個別要素法でシミュレートすることで、その適用性の検討と崩壊メカニズムの解明を試みた。解析対象である岩盤斜面は、不連続面においては不連続体であるが岩質部は連続体であるため、従来の反発力のみを考慮した個別要素法の適用は相応しくない。そこで、本研究では不連続体解析手法である個別要素法にボンディング力⁵⁾の概念を導入し、連続体に対しても適用可能な解析手法とした。また、斜面形状および不連続面の位置を任意に設定することが可能なプログラムを構築することで、実際の岩盤斜面を粒状体によって忠実にモデル化した。この解析モデルを用いて、実際に発生したトッピング崩壊をシミュレートすることを試みた。本解析手法を用いてシミュレーションを行なうことにより、トッピング崩壊の崩壊過程の再現および岩盤斜面内部における亀裂の進展を評価することが可能となった。

[†] 原稿受理 平成18年12月18日 Received Dec. 18, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Dept. of Civil & Earth Resource Eng., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

** 正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 〒564-8680 吹田市山手町, Dept. of Civil, Environmental and Applied System Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-8680

*** 正会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Dept. of Civil & Earth Resource Eng., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

2 解析手法

2.1 個別要素法

個別要素法とは、Cundallによって考案された解析手法であり、主に岩盤や地盤といった不連続体を対象としている。数値シミュレーション対象を微小な粒子の集合体として巨視的に捉えることにより、岩盤などの動力学的挙動を解析する方法である。個々の粒子間に仮想のばねを配し、その作用力から加速度、速度、変位を算出し粒子の挙動を追跡する解析手法である。Fig. 1に、粒子モデルの微視的な関係を示す。本解析手法では、ばね定数を接触距離 (Δn) に乗ずることによって、粒子間の反発力を算出している。

2.2 ボンディング力

岩盤のような固体に対して粒状体のモデルを適用する場合、粒子間に作用する力は反発力のみではない。そこで、本研究ではボンディング力を導入することにより、引張力を表現した。Fig. 2に示すように、 r_{b1} と r_{b2} の2種類のボンディング半径を定義する。 r_{b1} は引張力が降伏に至る距離、 r_{b2} はボンディングが破断する距離を示している。つまり、接触点である r から r_{b1} まで引張力は一次的に増加し、 r_{b1} を境に r_{b2} まで一次的に減少する。さらに、 r_{b2} に至るとボンディングは破断し、引張力は0となる (Fig. 3)。以上のように定義された反発力およびボンディング力は、以下のように定式化できる。

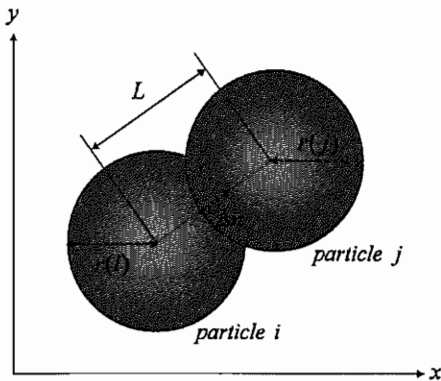


Fig. 1 Relationship between the particles.

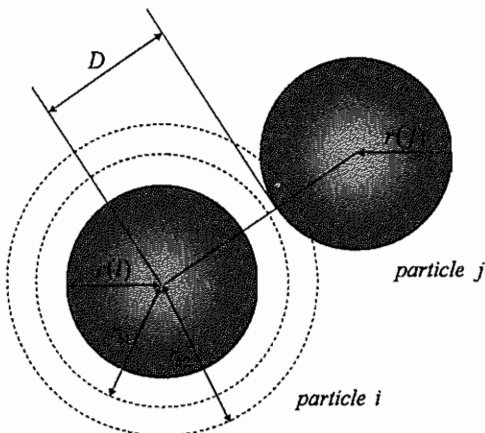


Fig. 2 Region where the bonding force acts.

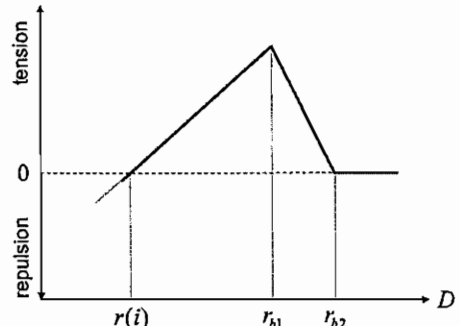


Fig. 3 Force between the particles.

$$F_{ij} = \begin{cases} K \cdot \Delta n & (D < r(i)) \\ K \cdot (D - r(i)) & (r(i) < D \leq r_{b1}) \\ K \cdot (r_{b2} - D) & (r_{b1} < D \leq r_{b2}) \\ 0 & (D > r_{b2}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 F_{ij} : 粒子*i*と粒子*j*に作用する接触力、 K : ばね定数、 Δn : 接触距離、 D : 粒子間距離、 r_{b1} ボンディング半径1、 r_{b2} : ボンディング半径2である。

なお、粒径の異なる粒子間のボンディング力は、2つの粒子の粒径の平均値を用いて算出することにする。

3 解析対象とした斜面崩壊

本研究では、和歌山県天鳥橋西地区で発生した岩盤斜面崩壊を取り上げた。この斜面は海岸沿いの国道を挟んだ山側の急崖であり、全岩体は最大高さ約17mの砂岩で、前面ブロックとの亀裂は大きく開口していた (Fig. 4)。1999年3月、ブロック・トップリングの様相を呈して転倒崩壊したことが確認されている。⁶⁾

4 岩盤材料の力学定数の決定手法

4.1 二軸圧縮試験シミュレーション

個別要素法では、シミュレーション対象の物性値は粒子間のパラメータに支配される。しかし、本解析手法におけるパラメータ決定方法は確立されていないのが現状である。そこで、崩壊シミュレーションに先立って個別要素法で二軸圧縮試験のシミュレーションを行ない、解析対象とした砂岩を表現できるパラメータを検討した。

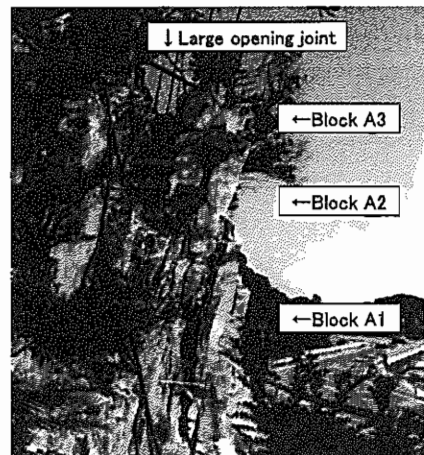


Fig. 4 Side-view of the slope.

Table 1 Analytical condition and result.

case	$\left\{ \frac{r_{b1}}{r(i)} - 1 \right\} \times 100$	$\left\{ \frac{r_{b2}}{r(i)} - 1 \right\} \times 100$	friction coefficient	cohesion	internal friction angle
	(%)	(%)			
1			0.10	3.196	1.398
2	5.0	7.5	0.25	4.032	13.342
3			0.50	6.414	27.587
4			0.10	5.831	1.398
5	10.0	15.0	0.25	8.683	4.615
6			0.50	11.166	24.586
7			0.10	9.535	2.729
8	15.0	22.5	0.25	11.804	8.035
9			0.50	22.091	5.216

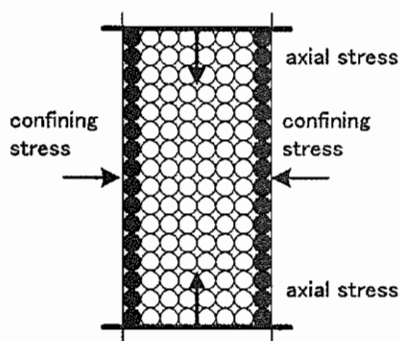


Fig. 5 Biaxial compression test.

4・1・1 パッキング 平均粒径 0.5mm のランダム径粒子をおよそ 5000 個用いて解析モデルを作成する。このランダム径粒子を六角形格子状に発生させ、重力落下によりパッキングを行なう。減衰関数により粒子の振動が停止状態に入った後、高さ 10cm、幅 5cm となるように粒子群を切り取った。

4・1・2 シミュレーションの概要 Fig. 5 に二軸圧縮試験シミュレーションの模式図を示す。拘束圧を作用させる粒子を選定し、その粒子に拘束圧に見合う水平力を作用させた。その後、圧縮壁を一定のひずみ速度で降下させ、供試体モデルを圧縮する。

4・1・3 解析条件 ボンディング力と岩盤の物性値、特に粘着力との間には、何らかの相関関係があると考えられる。そこで、ボンディング半径および粒子間の摩擦係数を変化させ、粘着力にどのような影響を与えるかを検討した。Table 1 および Table 2 は、解析条件並びに解析結果をまとめたものである。なお、粘着力および内部摩擦角は、各ケースそれぞれについて、2 種類の拘束圧 (1.0MPa, 5.0MPa) で二軸圧縮試験シミュレーションを実施し、モール・クーロンの破壊基準から求めた。

4・1・4 解析結果 二軸圧縮試験シミュレーションで得られた結果を Fig. 6 に示す。どの摩擦係数のケースにおいても、ボンディング半径の増加に伴い、粘着力の大きさが上昇する結果となった。よって、ボンディング力と粘着力の間には比例関係があり、ボンディング半

Table 2 Analytical condition.

time interval	$1.0 \times 10^{-5} (s)$
damping coefficient	$100.0 (N \cdot s / m)$
density	$2500 (kg / m^3)$
spring stiffness (normal)	$2.5 \times 10^7 (N / m)$
spring stiffness (shear)	$2.3 \times 10^7 (N / m)$

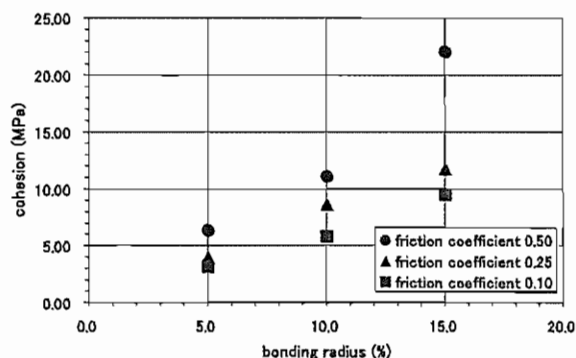


Fig. 6 Relationship between cohesion and bonding radius.

径を変化させることによって、様々な粘着力の岩盤を表現できると考える。

4・2 パラメータの決定

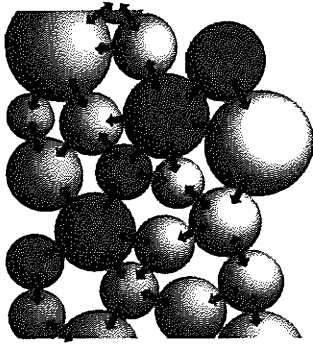
一般に、解析対象である砂岩の粘着力および内部摩擦角は、それぞれ 1 ~ 20 (MPa), 25 ~ 35 (deg) である。⁷⁾そこで、先に述べたシミュレーション結果より、最も砂岩に適する case 3 のパラメータを崩壊シミュレーションに用いることにした。

5 亀裂の表現

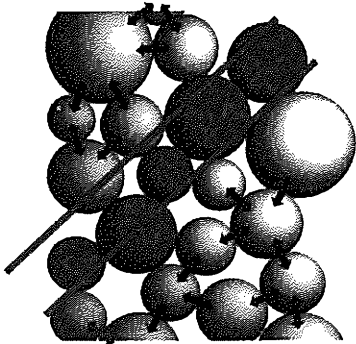
斜面モデルは、二軸圧縮試験シミュレーション同様、パッキングした粒子群 (およそ 12000 個、平均粒径 5.7cm) を斜面形状に切り取り作成した。さらに、崩壊シミュレーションにおける亀裂の取り扱いについて、以下に述べる。

5・1 既存の亀裂

本研究では、既存の亀裂の位置に相当する粒子のボンディング力を強制的に解除することにより、粒子間の引



(a) Before the bonding force is removed.



(b) After the bonding force is removed.

Fig. 7 Pre-existing fractures.

張力を無効化し、この部分を既存の亀裂と見なしている (Fig. 7).

5・2 亀裂の進展

斜面の崩壊過程において、粒子間に作用するボンディング力が破断することを利用して、これを視覚的に表現することによって、崩壊中の亀裂の進展の可視化を試みた。つまり、タイムステップ毎にボンディング力が破断した粒子の色を変化させ、これを巨視的に捉えることにより、その粒子の位置を亀裂の発生ポイントと見なしている。Fig. 8は、ボンディング力が破断し、粒子の色が変化することを示した模式図である。

(a)は、初期状態を示しており、粒子は白色である。

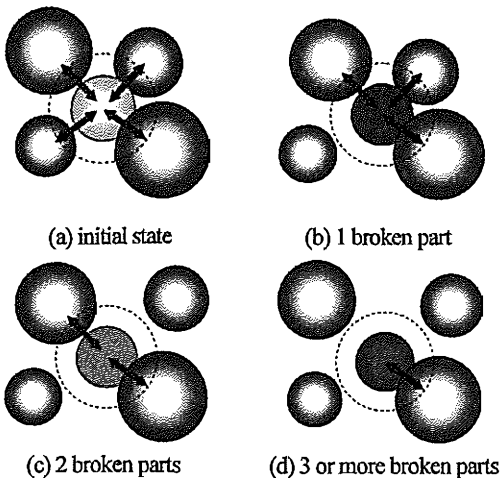


Fig. 8 Rupture number of the bonding force.

(b)~(d)は、それぞれ着目粒子のボンディング力が1箇所、2箇所、3箇所以上で破断した状態であり、粒子は青色から緑色、さらに赤色に変化する。

6 崩壊シミュレーション結果

6・1 崩壊挙動と亀裂進展

Fig. 9, Fig. 10に解析で得られた崩壊挙動および亀裂進展を示す。崩壊の全過程を完全に再現させるには至っていないが、A3ブロック背後の亀裂の開口幅が徐々に大きくなり、転倒している。また、A1ブロック前面の薄い岩体が剥離していく様子も確認することができる。

一方、A1ブロックの背後では、A2ブロックがその下部を中心に大きく傾動し、A1ブロックに覆い被さるような挙動を示している。これが、A1ブロックの周辺に著しく発生した亀裂進展に大きな影響を与えていると考えられる。

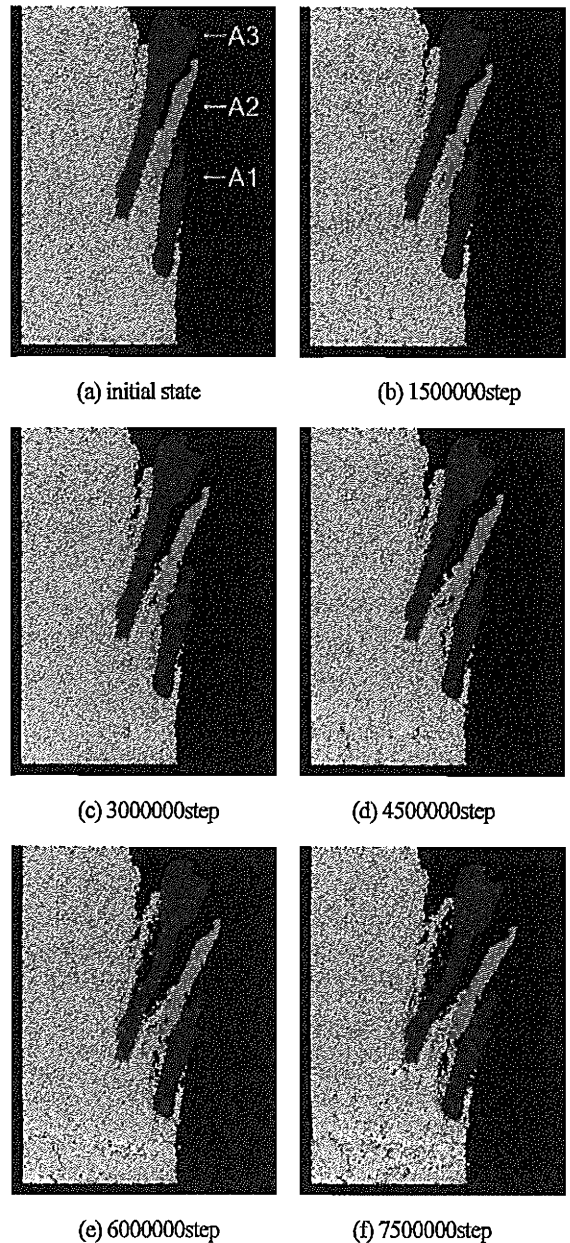


Fig. 9 Behavior of toppling failure ($\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$ s).

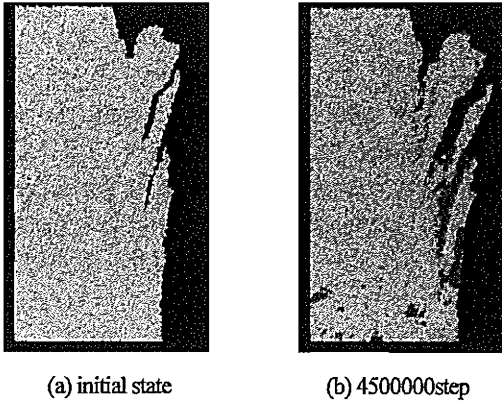
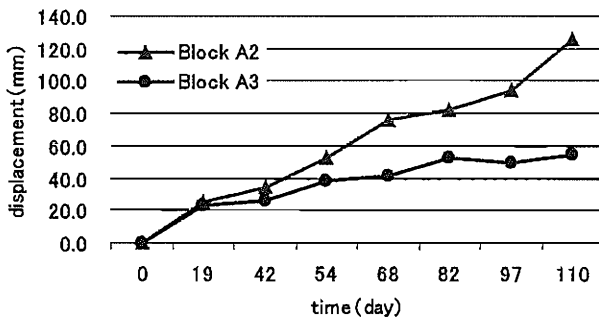
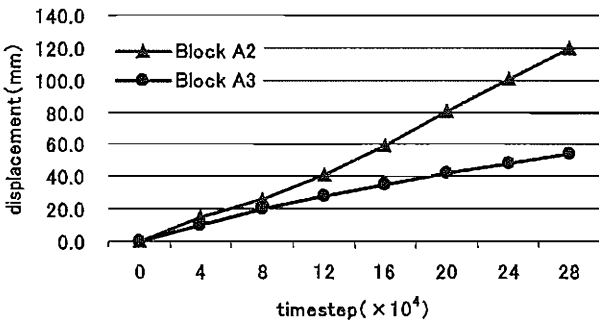


Fig. 10 Progress of fractures ($\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$ s).



(a) Actual phenomenon



(b) Simulation ($\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$ s)

Fig. 11 Displacement of blocks.

6・2 実現象との比較

次に、A2ブロックとA3ブロックの変位に関して実現象 (Fig. 11 (a)) とシミュレーション結果 (Fig. 11 (b)) を比較した。これによると、A2ブロックの変位量がA3ブロックの変位量を上回っている。つまり、A2ブロックの傾動速度が速く、先に崩壊が進行したことがわかる。また、シミュレーション結果もA2ブロックの変位量がA3ブロックの変位量を上回っており、実現象をある程度再現できていることが確認された。

7 結 論

本研究は、個別要素法を用いて岩盤斜面崩壊のシミュレーション解析を行なったものである。以下に、本研究で得られた知見を示す。

(1) 個別要素法にボンディング力を導入し、連続体と不連続体の双方を解析できるプログラムを構築した。これにより、岩盤斜面モデルの作成が可能となった。

(2) 不連続面の位置に相当する粒子に作用するボンディング力を強制的に破断させることにより、既存の不連続面をモデル化することが可能となった。

(3) 崩壊中にボンディングが破断した粒子を着色することで、亀裂の進展の可視化を可能とした。

(4) 崩壊ブロックの変位について、シミュレーション結果を実現象と比較することにより、その妥当性を検討した。その結果、定性的ではあるが実現象との一致を確認することができた。

(5) 二軸圧縮試験のシミュレーションを実施し、粘着力および内部摩擦角の観点から解析対象に最適なパラメータの検討を行なった。また、ボンディング半径の増加が岩盤の粘着力の増加に影響を及ぼすことを把握できた。

参 考 文 献

- 1) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, Vol.29 (1), pp.47-65 (1979).
- 2) K. Iwashita and M. Hakuno, "A modified distinct element analysis for progressive failure of a cliff", *Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.30, No.3, pp.197-208 (1990).
- 3) M. Hisatake and T. Murakami, "An analytical method of continuous and discontinuous behavior of the ground", *Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineering*, No.523, III-32, pp.175-180 (1995).
- 4) P. A. Cundall, "A computer model for simulating progressive, large scale movement in blocky rock system", *Symp. ISRM Nancy France Proc.*, Vol.2, pp.129-136 (1971).
- 5) F. Donze, P. Mora and S. Magnier, "Numerical simulation of faults and shear zones", *Geophys. J. Int.*, Vol.116, pp.46-52 (1979).
- 6) Y. Ohnishi, "Rock Mass Failure - State of the Arts and Future of the Works - [Guide for Practitioner and Scientist]", CD-ROM, (2004) Japan Society of Civil Engineers.
- 7) E. Hoek and J. W. Bray, "Rock Slope Engineering", p.13 (1979) Asakura Publishing Co., Ltd.