

## 불연속면을 고려한 암반의 안정변형해석

황재윤\*

Stability and Deformation Analysis Considering  
Discontinuities in Rock Mass

Jae-Yun Hwang\*

**Abstract** Rock mass includes such discontinuities as fault, joint, bedding, crack, schistosity, cleavage. The rock mass behavior, therefore, is influenced by the discontinuity behavior. In this study, a stability and deformation analysis method considering discontinuities in rock mass is proposed, and then applied to the rock collapse disaster site. As the method, the stability analysis by the stereographic projection method was carried out in an actual site, the deformation analysis program by the finite element method including the joint element was developed, and performed. To demonstrate the applicability of this developed stability and deformation analysis method considering discontinuities in rock mass, the analysis results are examined and compared with the failure behavior at the rock mass.

**Key words** Rock mass, Discontinuity, Stability and deformation analysis method, Collapse disaster site, Finite element method

**초 록** 암반에는 단층·절리·층리·균열·편리·벽개 등 불연속면이 포함되어 있다. 따라서, 불연속면을 포함한 암반의 역학적 거동은 연속체와는 다르게 불연속면의 역학적 거동에 좌우된다. 본 연구에서는 불연속면을 고려한 암반의 안정변형해석기법을 제안하고, 암반 붕괴재난현장에 적용했다. 암반 불연속면을 고려하여 평사투영법에 의한 안정해석과 개별절리요소를 포함한 유한요소법에 의한 변형해석 프로그램을 개발하여, 실제 암반 붕괴재난현장 지역에서의 해석결과와 비교 및 검토를 하였다. 암반 현장에 적용하여 결과를 비교 검토함으로써, 암반의 파괴 거동 해석에 있어서 개발한 불연속면을 고려한 암반의 안정변형해석법의 적용성에 대한 검증을 하였다.

**핵심어** 암반, 불연속면, 안정변형해석기법, 붕괴재난현장, 유한요소법

## 1. 서 론

우리나라는 외국의 지질상태에 비하여 상부 표토층이 비교적 얇게 피복 되어 있고 대부분 풍화가 적은 암반으로 이루어져 있으며, 좁은 면적과 개발에 의해 도로, 터널, 지하공간의 활용에 대한 요구는 점차 확대되고

있다.

대규모 건설공사의 경우 암반의 역할은 대단히 중요하며, 따라서 공학적인 측면에서 암반의 역학적 특성을 규명하는 것은 필수적이다.

암반의 역학적 특성은 크게 두 가지 요인에 의하여 지배를 받는다고 볼 수 있다. 첫째는 암반을 구성하는 모암 자체의 역학적 특성이며, 둘째는 구조지질학적 특성이다. 구조지질학적 특성은 단층·절리·균열·층리 등의 불연속면에 주로 지배를 받는다(Goodman et al., 1968, Zienkiewicz et al., 1970, Goodman, 1976, Ohinishi et al., 1982, Goodman, 1989, Crotty and Wardle, 1994, Hwang, 1999; Hwang, 2003; Hwang and Ohnishi, 2012).

**Received:** Feb. 9, 2015

**Revised:** Feb. 24, 2015

**Accepted:** Feb. 24, 2015

\***Corresponding Author:** Jae-Yun Hwang  
Tel) +82552492660, Fax) +825059992167  
E-Mail) hwang@kyungnam.ac.kr

Kyungnam University, 7 Kyungnamdaehak-ro, Masanhappo-gu,  
Changwon-si, Gyeongsangnam-do 631-701, Korea

설계 및 시공 부분에서 암반의 거동을 보다 합리적으로 현실적으로 해석해야 할 필요성이 절실하게 요구되고 있다. 불연속면을 포함한 암반의 역학적 거동은 연속체와는 다르게 불연속면의 역학적 거동에 좌우된다. 그러므로, 연속된 고체로서 암석과, 크고 작은 불연속면의 양자로 구성된 암반을 실제 지반의 상황과 유사하게 해석하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서의 목적은 암반 불연속면을 고려하여 평사투영법에 의한 안정해석과 개별절리요소를 포함한 유한요소법에 의한 변형해석 프로그램을 개발하여 제안하고, 실제 암반 붕괴재난현장에서의 해석결과와 비교 및 검토를 하여, 암반의 파괴 거동 해석에 있어서 개발한 불연속면을 고려한 암반의 안정변형해석법의 적용성을 검증하고자 한다.

## 2. 평사투영법에 의한 안정해석

지각의 상부에서 변형작용에 의해 생성된 지질구조를 지배하는 주요한 구조적 요소는 절리, 단층 등이 있다. 이러한 구조들의 방향성은 주향과 경사로 나타난다.

주향은 평면구조와 수평면의 교차선이 가리키는 방향을 의미하며, 교차선이 남북방향과 이루는 각도를 북을 기준으로 표시한다. 경사는 평면구조와 수평면 사이의 각을 의미하며 평면구조의 주향과 수직방향과의 사잇각으로 표시한다.

평사투영법은 암반의 구조를 표시하는 방법으로 불연속면의 방위를 경사 방향 및 경사로 표시하여 절리군의 분포 상태, 집중 또는 분산성, 탁월방향을 파악하고 불연속면 간의 상관관계를 해석하는 기법이며, 암반에 관련된 터널, 사면, 기초의 해석 등에 이용되고 있다. 스테레오 투영법에 이용되는 투영망으로는 극좌표망과 자오좌표망이 있으며, 일반적으로 극좌표망은 현장 암반에 산재하는 불연속면의 극점을 표시함으로써 불연속면의 방향에 대한 분포 상태, 집중 또는 분산성, 탁월방향을 파악하고, 자오좌표망은 불연속면의 투영도를 대원으로 표시함으로써 불연속면 간의 상관관계를 해석하는 데 이용된다.

이러한 평사투영법은 특히 사면 안정성을 해석하는 초기 단계에서 불연속면의 자료를 이용하여 사면의 파괴 가능성을 운동학적(kinematic)으로 규명하는 데 유용하게 이용되고 있다.

사면 파괴는 다양한 지질구조와 관련되므로 평사투영시 투영된 극점들은 불연속면의 분포 상황에 따라 그 파괴 양상을 알 수 있다.

사면의 방향과 불연속면의 방향, 불연속면의 마찰각

의 세 요소로서 암반사면 안정성을 평가하는 평사투영법은 신속하고 간단한 분석방법을 필요로 하는 기초조사 시에 매우 효과적인 큰 장점이 있다. 그러나 이 방법은 최종 설계목적의 조사에서는 주의해서 해석되어야 한다. 특히 상기의 3요소 외에 암반사면의 영향을 주는 그 밖의 많은 요소들(불연속면의 간격·연속성·굴곡·강도·틈새·충진물질·침투·종류 수, 암괴의 크기 및 형태 등)이 안정성 판단에 중요한 변수가 될 수도 있기 때문에 정밀조사에서는 자세히 고려되어야 한다.

## 3. 유한요소법에 의한 변형해석

유한요소해석은 대규모의 응력해석이나 그 밖의 텐서(Tensor)장 문제에 대하여 디지털 계산기를 사용하는 방법이다. 해석과 관련된 수식은 다음과 같다(Goodman, 1976, Goodman, 1989, Hwang, 2003).

전체계의 절점력과 절점변위를 고려하고, 각 절점에 작용하는 외력을

$$\{R\} = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, \dots, R_n\}^T \quad (1)$$

로 나타내면, 각 절점에서의 힘의 평형조건에 의해 다음의 강성방정식을 얻어진다.

$$\{R\} = [K]\{U\} \quad (2)$$

여기서, [K]는 전체계의 강성 매트릭스로 각 요소 강성 매트릭스의 합성으로 얻어지며, 외력은 각 요소 절점외력의 합이고, {U}는 요소의 절점변위이다.

Fig. 1과 같이 불연속면은 암괴의 표면과 표면 사이의 특별한 이음새로 인장에 대해서 분리하고 전단에 대해서 활동, 압축에 대해서 힘을 전달하게 된다. Fig. 2는 불연속면을 수치모델로 이상화한 4절점의 절리 요소를 나타낸 것이다. 이 요소는 불연속면이 불규칙하게 일정하지 않은 벽의 간격을 표시하기 위해 작은 두께(e)를 가지고 있다. 간단하게 하면 이 요소는 기본적으로는 선형이라 생각된다.

변형-변위관계식 [L<sub>0</sub>]은 절점변위벡터 {u<sub>i</sub>}<sub>s,n</sub>의 함수로서 압력 K, L과 J, I사이의 상대변위를 나타낸다. 여기서의

$$\{u\}_{s,n} = \{u_i, v_i, u_j, v_j, u_k, v_k, u_l, v_l\}^T$$

이고 u<sub>i</sub>와 v<sub>i</sub>는 국소좌표계 s, n(s축은 절리벽의 방향으로 평행, n축은 벽에 수직)에서는 절점 I의 전변위량을 나타낸다. 이 밖의 절점에 대해서도 같다. 절리 중심(s=0)의 점에서 정의되는 절리 변위라는 것을 고려한다.

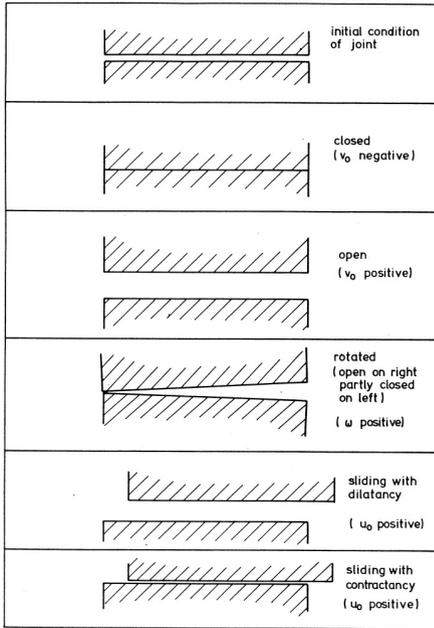


Fig. 1. Modes of Deformation of a Joint Element

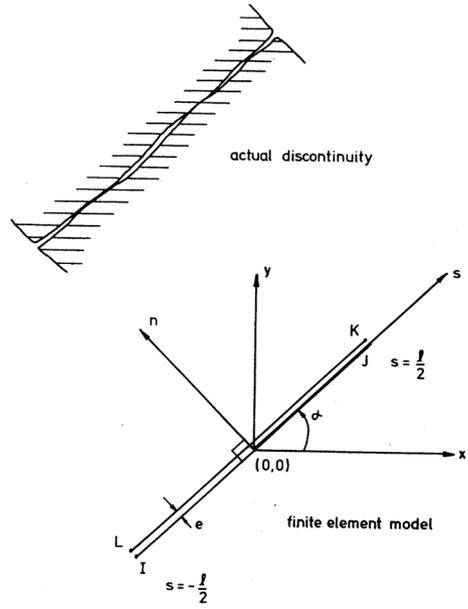


Fig. 2. Joint Element

$$\{\epsilon_J\} = \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{u_K + u_I}{2} - \frac{u_J + u_J}{2} \\ \frac{v_K + v_L}{2} - \frac{v_I + v_J}{2} \\ \frac{v_K - v_L}{2} - \frac{v_J - v_I}{2} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

상기의 설명에서 변형과 변위의 관계를 표시하는 매트릭스  $[L_0]$ 는 다음과 같이 된다.

$$\{\epsilon_J\} = \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{l} & 0 & -\frac{1}{l} & 0 & \frac{1}{l} & 0 & \frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_I \\ v_I \\ u_J \\ v_J \\ u_K \\ v_K \\ u_L \\ v_L \end{Bmatrix} \quad (4)$$

또는

$$\{\epsilon_J\} = [L_0]\{u\}_{s,n} \quad (5)$$

절리의 응력과 변형은 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\tau_{n,s} \\ \Delta\sigma_n \\ M_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & k_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \end{Bmatrix} \quad (6)$$

절리요소의 절점변위와 그것에 대응하는 외력증분과의 관계식을 나타내면, 다음과 같다.

$$\{\Delta F\}_{s,n} = [B][C_J][L_0]\{u\}_{s,n} \quad (7)$$

식 (6)을 계산하면 절리요소의 강성 매트릭스는 다음과 같이 된다.

$$[K]_{s,n}^J = \frac{1}{4}l \begin{bmatrix} k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_n \\ k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2k_n & 0 & 2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 강성 매트릭스를 전체좌표  $x, y$ 로 변환하기 위해 Fig. 2를 참조하면 임의의 절점에서

$$\{\Delta F\}_{s,n} = [T]\{\Delta F\}_{x,y} \quad (9)$$

로 되며, 여기서 [T]는 변환 매트릭스이다.

### 4. 암반 붕괴재난지역의 해석

#### 4.1 적용지역의 개요

국도 4차선 확장공사 현장에서 암반 절취사면의 원설 계단면에 대해 적용하였다(Fig. 3 참조). Fig. 3의 조사 위치평면도, Photo 1의 도로의 융기사진에 나타난 바와 같이, 기존도로면이 최고 2.5 m 융기되고 절취사면 배후의 급사면과 환경사지의 좌우에는 대규모의 인장균열이 발생하였다. 해석단면은 활동양상을 고려한 방향으로 선정하였다.



Photo. 1. Rising of Road

#### 4.2 암석물성 및 암반평가

적용지역의 주변 지질은 중생대 백악기에 속하는 낙동아층군(洛東亞層群)의 연화동층(蓮花洞層), 하산동층(霞山洞層), 동명(진주)층(東明(晉州)層) 및 일직(칠곡)층(一直(漆谷)層)과 신라아층군(新羅亞層群)의 후평동층(後坪洞層) 및 점곡층(點谷層)으로 구성되어 있으며 그리고 이를 부정합으로 피복하고 있는 신생대 제 4기의 충적층으로 구성되어 있다.

후평동층은 하부와 상부층원으로 나누어 보면 하부층

원은 역암보다는 사암과 미사암이 훨씬 우세하고 불연속적으로 역암이 협재하고, 상부층원은 적색 미사암 이외에 층리가 발달한 회색 또는 암회색 미사암과 모래질 셰일, 그리고 담녹색 이암이 협재된다.

점곡층은 주로 이질암석으로 구성되어 있고, 사질암석이 소규모로 불연속적인 분포를 보여준다.

적용지역의 암반은 절리가 심하게 발달되어 있고, 또한 전 지역에 걸쳐서 단층 파쇄대가 분포하고 있다.

지반 조사 시 시추공별 채취된 암석의 전체 및 상세

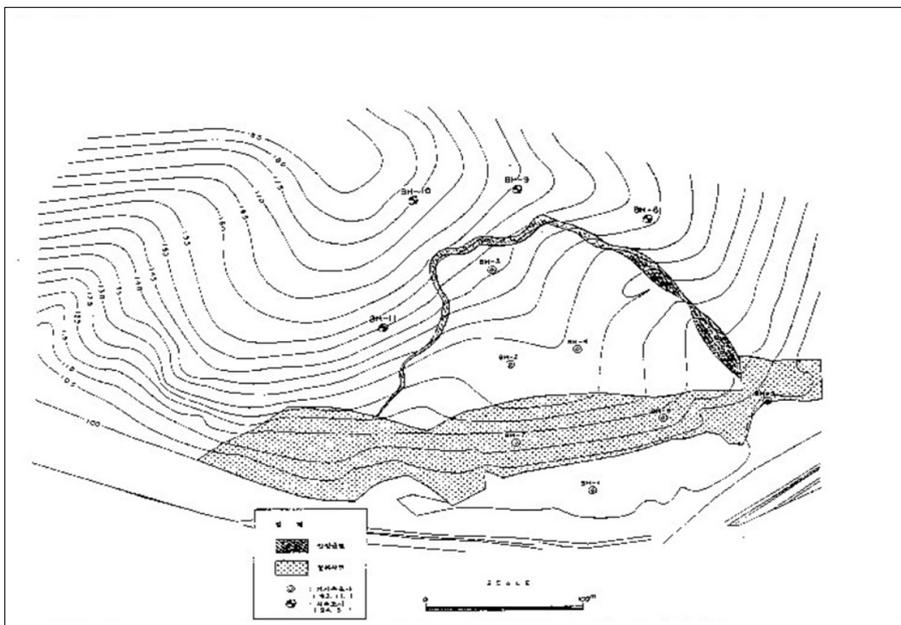


Fig. 3. Plane Figure of Site Investigation

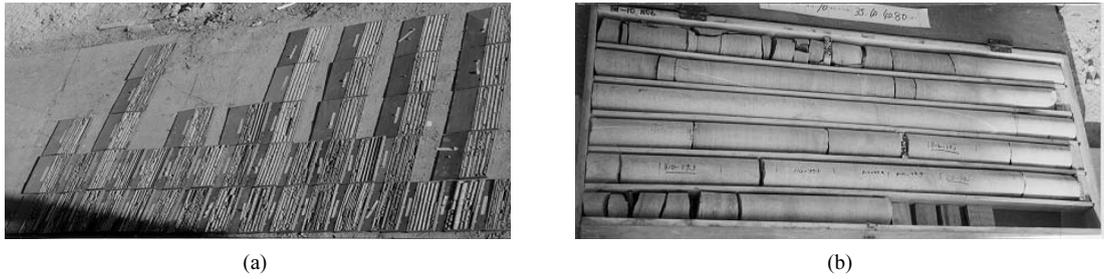


Photo. 2. Core Sample

Table 1. Summary of Mechanical Properties of Rock

Item	Specific Gravity (G <sub>s</sub> )	Water Absorption (%)	Unit Weight (t/m <sup>3</sup> )	Point Load Strength Is(50) (kg/m <sup>2</sup> )	Young's Modulus E (kg/m <sup>2</sup> )	Uni. Comp. Strength q <sub>u</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	Tri. Comp. Strength		Schmidt Hammer Value (R)	Elastic Wave Velocity V <sub>p</sub> (m/sec)
							c(kg/m <sup>2</sup> )	φ(°)		
Average	2.63	0.400	2.612	295,100	110,623,000	7,242,000	2,563,900	40.39	59.45	0.0392
Extent	2.56	0.21	2.47	156,000	53,000,000	2,354,400	1,200,000	34	48	0.0332
	2.69	0.84	2.711	420,800	194,000,000	13,284,400	4,100,000	49	65	0.0457
Number of Test	35	35	54	350,000	350,000	540,000	310,000	31	35	0.35

사진은 Photo 2와 같다.

적용지역의 실험한 암석 물성치에 관한 범위와 평균의 요약은 Table 1과 같다.

4.3 해석결과의 고찰

4.3.1 평사투영해석

본 적용지역에서 조사된 불연속면의 종류 및 발달상태 등을 통계처리하기 위해서 밀도분포도를 그려 사면에서 발달하고 있는 주요 불연속면의 방향성과 특성을 검토하였다.

불연속면의 방향성 조사결과를 토대로 하여 본 현장의 암반사면 파괴형태와 안정성을 분석한 결과는 Fig.

4와 같다.

암반사면 방향성(경사방향/경사)은 66/63, 불연속면의 마찰각은 30°로 적용시켜 해석한 결과, 평면파괴와 전도파괴가 일어날 것으로 나타났다. 평면파괴는 불연속면의 경사방향이 62°이고 경사가 41°로서 원설계사면 경사(63°)보다 작기 때문에 가능성이 큰 것으로 해석된다. 전도파괴는 248/59와 224/82의 방향성을 가진 불연속면에서 일어날 것으로 해석된다.

4.3.2 유한요소해석

현장암반사면을 Fig. 5와 7과 같이 모델화하여 해석

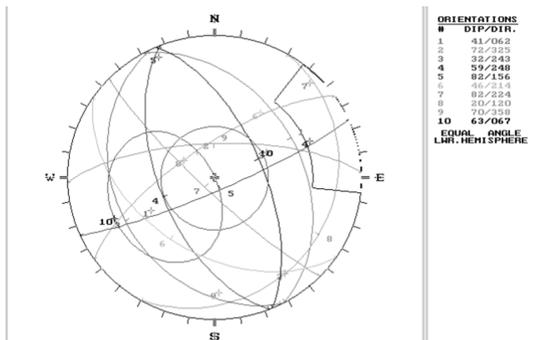


Fig. 4. Result of Stability Analysis

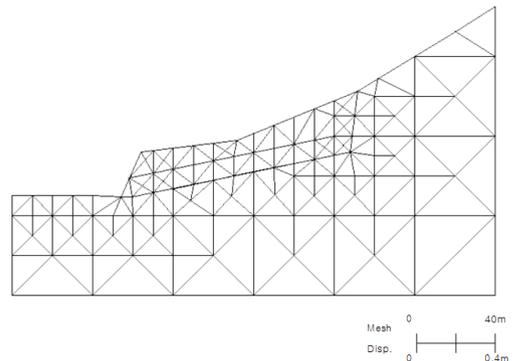
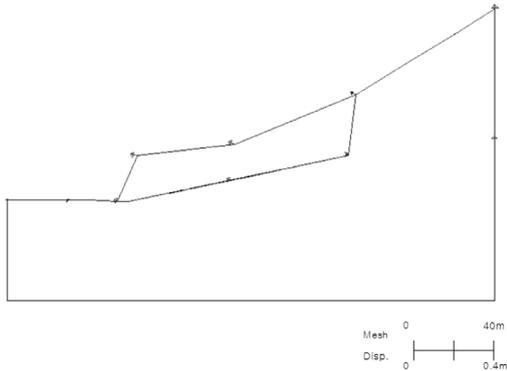


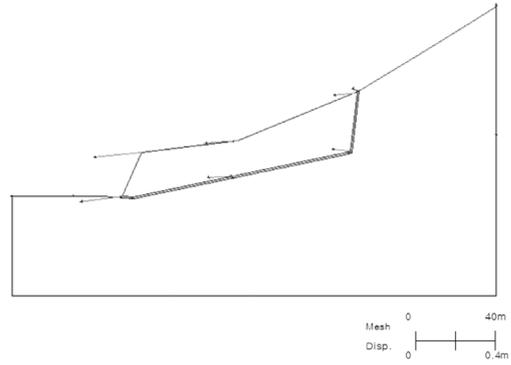
Fig. 5. Mesh Without Considering Discontinuity

**Table 2.** Input Data for Mechanical Properties of Rock

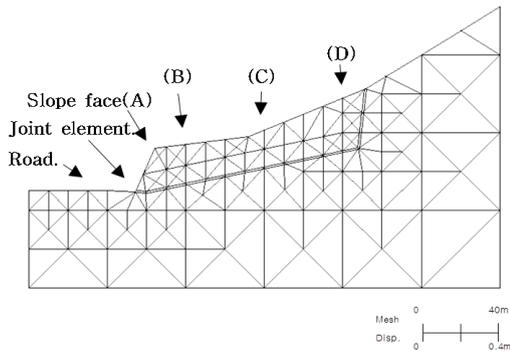
$\gamma$ ( $t/m^3$ )	E ( $kg/m_2$ )	G ( $kg/m_2$ )	qu ( $kg/m_2$ )
2.61	110,623,000	44,249,000	7,240,000



**Fig. 6.** Displacement Without Considering Discontinuity



**Fig. 8.** Displacement Considering Discontinuity



**Fig. 7.** Mesh Considering Discontinuity

하였다. 암반의 모델에 대해서는 삼각형 요소를 사용하였으며, 불연속면에 대해서는 절리요소 모델을 사용하여 요소 분할을 하였다. 본 해석에서는 208요소, 131절점으로 분할하였다.

암반의 역학적 특성에 대한 입력자료는 Table 2와 같으며, 각 수치들은 본 연구에서 제시된 적용지역의 실험에 의한 물성치를 기본으로 하였다.

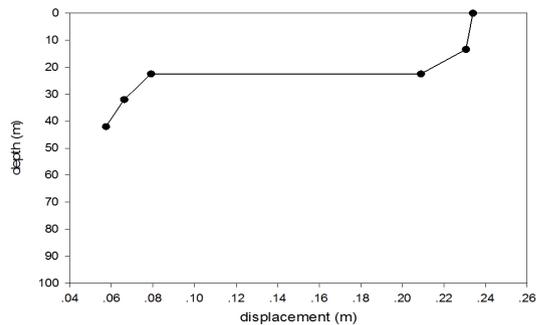
Fig. 6과 8은 절리요소를 포함한 유한요소해석 결과의 변위도로서, 각각 불연속면을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 확대된 변위를 나타내고 있다. 해석결과 그림에서 나타난 변위량을 서로 비교하면, 보이는 바와 같이 불연속면을 고려하지 않는 경우가 작은 변위가 발생하고, 불연속면을 고려한 경우는 변위를 크게 발생하며 지하로 연결된 불연속면의 방향을 따라 사면

이 활동하여 도로가 융기한 적용지역의 변위 양상과 매우 유사하였으며 불연속면의 방향을 따라 파괴가 진행되었음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 적용현장의 불연속면 자료와 붕괴현상을 근거로 불연속면을 고려하여 적용지역에 대해 변위 분포 등에 관해 상세한 해석을 하였다.

Fig. 7에 표시된 A~D지점에서 심도별 변위 분포는 Fig. 9~12와 같다. Fig. 9~12에 나타난 것처럼 지표에 가까워질수록 변위는 증가하며, 불연속면을 따라서 변위가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

적용지역의 경우, 불연속면 상부암반블록이 불연속면을 따라 절취사면 쪽으로 활동하여 도로부를 융기시켜 파괴된 현상을 잘 묘사하고 있다.



**Fig. 9.** Displacement Distribution of Point A by Depth

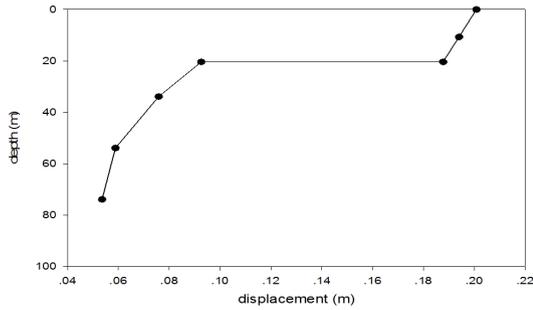


Fig. 10. Displacement Distribution of Point B by Depth

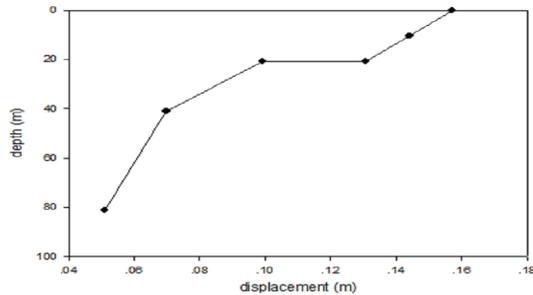


Fig. 11. Displacement Distribution of Point C by Depth

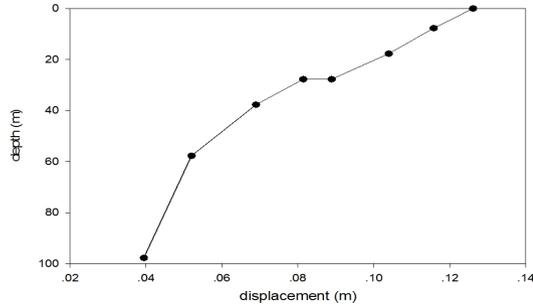


Fig. 12. Displacement Distribution of Point D by Depth

실제 붕괴가 발생한 현장에서의 조사, 관찰된 현상과 비교 분석하면, 불연속면을 고려하지 않았을 경우보다 고려할 경우 암반의 변위가 크게 발생하였으며, 적용지역의 변위 양상과 매우 유사하였다.

5. 결론

본 연구에서는 불연속면을 고려한 암반의 안정변형해석기법을 제안하고, 암반 붕괴재난현장에 적용하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

1. 본 적용지역의 불연속면의 종류와 발달 상태를 밀도 분포도를 그려 통계처리한 후, 평사투영법에 의한 안정해석 결과에 의해서 62/41의 방향성의 평면파괴와 248/59, 224/82의 방향성의 전도파괴가 인지되었다.
2. 불연속면을 고려하지 않았을 경우보다 고려할 경우 암반의 변위가 크게 발생하였으며, 적용지역의 변위 양상과 매우 유사하였다.
3. 불연속면을 고려한 암반사면의 평사투영법에 의한 안정해석과 유한요소법에 의한 변형해석을 상호 보완하는 것이 필요하였으며 동시에 수행함으로써 파괴양상 및 메카니즘을 정확하게 파악할 수 있었다.
4. 본 해석기법은 불연속면을 고려한 암반의 안정변형해석기법으로 암반사면 이외에도 도로, 터널, 지하공간 등의 암반구조물에서 안정변형해석 적용이 가능하다.

References

1. Goodman R. E. and Taylor R. L. and Brekke T. L., 1968, A Model for the Mechanics of Jointed Rock, ASCE. SM3, 637-659.
2. Zienkiewicz O. C. et al, 1970, Analysis of Nonlinear Problems in Rock Mechanics with Particular Reference to Jointed Rock System, Proc. 2nd. Congr. ISRM., Beograd, 8-14.
3. Goodman, R. E., 1976, Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Co, 449.
4. Ohnishi Y. and Kishimoto H. and Hishigaki Y. and Tanaka Y., 1982, Analysis of advancing tunnel by 2-dimension FEM, Numerical Methods Geomechanics Edmoton ed by Eisenstein E. pp. 503-512.
5. Goodman, R. E., 1989, Introduction for Rock Mechanics, Second Edition, Wiley, 554.
6. Crotty J. M. and Wadle L. J., 1994, Boundary integral analysis of piecewise homogeneous media with structure discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31, 323-345.
7. Hwang, J.-Y., 1999, Stability and Deformation Analysis of Discontinuous Rock, Master's Thesis, Pusan National University, Pusan, 116.
8. Hwang, J.-Y., 2003, Stability evaluation of rock blocks in tunnels for observational method, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Kyoto, 289.
9. Hwang, J.-Y., and Ohnishi Y., 2012, Rockfall and Toppling Failure Simulation of Rock Slopes using 3-Dimensional Discontinuous Deformation Analysis, Tunnel & Underground Space, 22, 181-187.



**황재운**

1997년 부산대학교 자연과학대학 지질학과 이학사

1999년 부산대학교 대학원 토목공학과 공학석사

2003년 일본 교토(京都)대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 055-249-2660

E-mail: [hwang@kyungnam.ac.kr](mailto:hwang@kyungnam.ac.kr)

현재 경남대학교 공과대학 교수

---