

터널 掘鑿時 考慮해야 할 周邊 岩盤의 媒介變數와 進行性 破壞
Considerable Parameters and Progressive Failure of Rock Masses due to the Tunnel Excavation

任 壽 彬, Soo-Been Im*, *李 成 民, Seong-Min Lee**, 李 濟 宇, Jea-Woo Lee***, 白 榮 植, Young-Shik Paik****

- * 동부엔지니어링(주) 기술연구소 소장, 토질 및 기초 기술사, Professional Engineer, Institute of Construction Technology, Dongbu
- ** 동부엔지니어링(주) 기술연구소 지반구조연구실 책임연구원, 공학박사, PhD, Institute of Construction Technology, Dongbu
- *** 동부엔지니어링(주) 기술연구소 지반구조연구실 주임연구원, Junior Engineer, Institute of Construction Technology, Dongbu
- **** 경희대학교 토목공학과 교수, 공학박사 PhD, Civil Engineering Professor, Kyunghee University

SYNOPSIS : Concentrated stresses due to the tunnel excavation easily cause failure around opening in the soft rock mass layer. Thus, while excavating tunnel in the soft rock mass layer, it is very important to predict the possibility of failure or yielding zones around tunnel boundary. There are two typical methods to predict these: 1) the analysis of field monitoring data and 2) numerical analysis.

In this study, it was attempted to describe the time-dependent or progressive rock mass manner due to the continuous failure and fracturing caused by surrounding underground openings using the second method. In order to apply the effects of progressive failure underground, an iterative technique was used with the Hoek and Brown rock mass failure theory. By developing and simulating, three different shapes of twin tunnels, this research simulated and estimated the proper size of critical pillar width between tunnels, distributed stresses on the tunnel sides, and convergences of tunnel crowns. Moreover, results out of progressive failure technique based on the Hoek and Brown theory were compared with the results out of Mohr-Coulomb theory.

1. 서론

현재 국내에는 지하철터널, 도로터널, 수로터널 등 다양한 종류의 터널에 대한 설계 및 시공실적을 많이 갖고 있다. 그러나 실제적으로 설계시의 수치해석 결과치와, 현장의 계측 결과치를 비교해 보면 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 설계시의 수치해석을 위한 암반의 조건인 매개변수(E, γ , c, ϕ 등)를, 암반의 특성인 절리 및 균열같은 불연속면을 고려할 수 없는 신선한 암석시료로부터 얻은 실내암석시험 결과에 감소요소 등의 보정계수를 적용하여 추정하기 때문이다.

한편, 시공 현장에서의 터널 굴착에 따른 지반의 삼차원 거동에 의한 지중 변위를 계측하기 위해선 터널 굴진 전방에서의 지중 변위 측정과 터널 통과시 및 통과후의 천단변위 모두를 측정하여 상호 보완해야 하지만, 거의 대부분의 계측에 있어서는 터널 통과후의 천단변위만을 측정하므로, 실제로는 수렴 시점에서의 작은 변위만이 측정되고 있는 실정이다. 이러한 현장계측의 문제점은 어렵지 않게 시정될 수 있을 것으로 사료되나, 설계시의 수치해석에 적용되는 매개변수 선정에 대해선 많은 연구가 있어야 할 것이다.

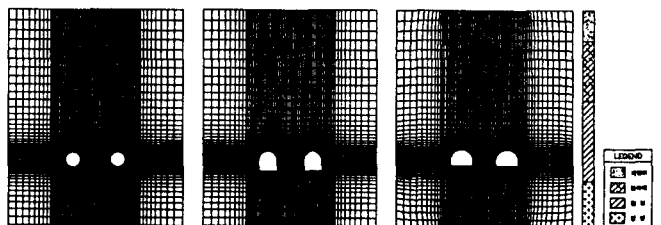
현재 터널 설계시의 수치 해석을 위해 사용되는 많은 Programs 들의 파괴 기준으로는 Mohr-Coulomb, Druker-Prager의 파괴 이론이 주로 적용되고 있으나, 이는 암반내의 불연속면을 고려하기에는 충분치 못하므로, 이를 보완하기 위한 파괴이론 및 매개변수 선정에 대해서 재고할 필요가 있다고 생각된다. 본 연구에서는 암반의 불연속성과 굴착후 시간에 따라 변하는 암반의 연속적인 파괴거동을 좀더 현실적이고 객관적으로 산정하기 위하여, RMR 암반 분류법을 이용한 Hoek-Brown의 경험적 암반파괴 이론을 적용한 진행성 암반파괴기법(Progressive Rock Mass Failure Technique)을 지하 30m 아래의 연암층을 통과하는 터널

설계에 적용하였다. 특히, 암반의 점착력 및 내부 마찰각을 Hoek-Brown이 제시한 이론에 근거를 두고 산정하여, Mohr-Coulomb 이론을 사용한 수치해석 결과와 진행성 암반 파괴 기법을 적용한 수치해석을 상호 비교 검토하였다.

2. 해석 자료

2.1 해석에 사용된 수치모델

수치모델의 크기는 폭35m x 높이43.5m이며, 터널은 직경(D)이 3m인 원형 복열터널과 바닥의 길이가 3.5m와 4.1m인 두가지 형태의 마제형 복열터널을 모델화하였다. 터널 굴착시 응력의 변화가 클 것으로 예상되는 터널 주변과 Pillar 주변은 격자망을 세분화하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있도록 모델링하였다. 본 논문에서 사용된 터널의 해석 모델과 지질 주상도는 <그림 2-1>과 같다.



a) 원형 터널 b) 마제형 터널-A c) 마제형 터널-B

<그림 2-1> 터널 해석 모델 Mesh와 지질 주상도

2.2 Hoek-Brown 파괴이론

Hoek-Brown (1980)은 암반 거동 해석에 있어서 불연속성을 포함하고 있는 취성 암반에 대한 이론과 경험을 바탕으로 암반 파괴시 나타나는 주응력 사이의 관계를 정립하여 암반의 파괴이론을 유추하였다. 즉, 암반의 허용강도($\sigma_{1,allhb}$)는, 암반의 최소주응력(σ_3), 암석의 일축압축강도(σ_c)와 RMR⁽³⁾ (Rock Mass Rate)로부터 얻어진 암반상수 'm'과 's'에 의해 결정된다는 것으로 그 이론⁽⁴⁾은 다음과 같다.

$$\sigma_{1,allhb} = \sigma_3 + (m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (1)$$

이 식(1)에 ' $\sigma_3 = 0$ '를 대입하여 암반의 일축압축강도($\sigma_{c,mass}$)를 구하고, ' $\sigma_{1,allhb} = 0$ '를 대입하여 암반의 인장강도($\sigma_{t,allhb}$)를 구하면, 다음과 같이 각각의 강도에 대한 식(2)와 (3)을 유도할 수 있다.

$$\sigma_{c,mass} = s^{1/2} \sigma_c \quad (2)$$

$$\sigma_{t,allhb} = 0.5 \sigma_c \{m - (m^2 + 4s)^{1/2}\} \quad (3)$$

2.3 Progressive Rock Mass Failure

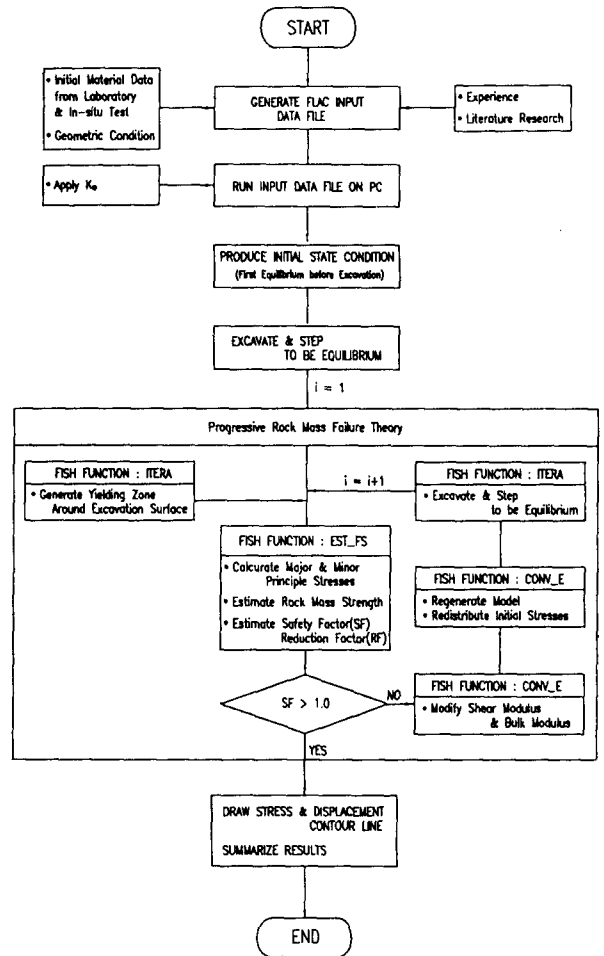
지하공동 굴착에 의해 고관된 암반의 파괴는 일순간에 발생하는 경우도 있으나, 대부분의 경우는 시간의 흐름에 따른 연속적인 파괴형태로 나타난다. Pricakov⁽⁶⁾와 Park⁽⁷⁾등은 Progressive Rock Mass Failure 기법을 이용하여 이러한 현상을 수치해석을 통해 잘 나타내었다. 따라서, 본 논문에서는 FDM(Finite Difference Element) Code인 FLAC과, FLAC에 내장된 Program Language인 FISH를 이용하여, Hoek-Brown 파괴 이론과 Progressive Rock Mass Failure 기법을 수치해석 Model에 적용할 수 있도록하였다. 본 논문에 응용된 Progressive Rock Mass Failure 기법의 응용 방법은 <그림 2-2>의 Flow Chart와 같다.

3 터널 周邊 岩盤의 媒介變數

터널이 지표로부터 지하 수심m 사이의 얇은 연암층에 굴착될 경우, 굴착에 의해 발생되는 집중응력은 터널 측벽암반의 허용 응력을 쉽게 초과하여 터널측벽 주변암반에 Yielding을 발생하게 하는 것을 현장에서 쉽게 발견할 수 있다. 따라서 이러한 현상을 수치 해석을 통해 보다 현실적으로 나타내기 위해서는, 수치 해석시 주 Input Data로 사용되는 암반의 매개변수를 정확히 추정해야 한다.

수치해석에 사용될 암반의 매개변수는 암반의 파괴기준에 따라 각기 다르다. 즉, Hoek-Brown의 암반 파괴 이론을 Progressive Rock Mass Failure 기법에 적용할 경우에는, 암석의 실내시험 및 현장 측정 결과를 정량적으로 평가한 암반의 RMR 값으로부터 산출한 암반 상수 'm'과 's'와, 암석의 일축압축강도가 중요한 매개변수이다. 따라서, 본 논문에서는 터널 통과 대상 지역의 정확한 암반의 RMR 값을 유추하도록 노력하였으며 그 결과를 수치해석의 매개변수로 이용하여 터널 단면의 수치해석을 실시하

였다. 그 결과, 첫번째 Iteration시 터널 Crown 주변 암반에서는 응력 해방이 발생하고 측벽주위의 암반에서는 응력 집중이 발생함을 확인하였다. 또한 계속 Iteration이 진행됨에 따라 측벽 주위 암반에 Yielding 지역이 형성됨과 동시에 집중응력의 감소와 응력전이가 발생함을 알 수 있었다.



<그림 2-2> Progressive Rock Mass Failure 기법의 응용 방법

한편, Mohr-Coulomb 이론을 암반의 파괴 기준으로 적용할 경우에는, 암반의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)이 수치해석의 주요 매개변수이다. 그러나 암반의 'c'와 ' ϕ '값은 현장에서 암반의 직접 전단시험으로부터 구해야 하는데 이는 현실적으로 어려워서 대부분의 경우는 암석의 'c'와 ' ϕ '값에 감소요소(Reduction Factor)를 적용하여 암반의 'c'와 ' ϕ '값들을 유추하고, 그 결과들을 수치해석의 입력 Data로 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 본 논문에서는 위의 사실에 근거를 두고 암반의 변형계수와 더불어 여러 Set의 'c'와 ' ϕ '값들을 Mohr-Coulomb 이론을 적용한 수치해석의 입력 Data로 사용하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 즉, 암반의 'c'값은 암석의 'c'값에 비해 수십배 이상 작지 않는 한, 터널 주변 암반에 소성변형은 나타나지 않으며, 본 연구에서와 같이 터널이 얇은 연암층에 굴착되는 경우는 'c'값이 ' ϕ '값보다 암반의 파괴를 규정하는 데 더 중요한 요소임이 확인되었다.

또한, 본 논문에서는 암반의 특성을 규정하기 위해 균열계수를 적용하는 방법 이외의 방법을 찾기 위해 Hoek-Brown 이론에 여러 가지의 Confining Pressure를 적용하여 그에 대응하는 암반의 허용강도를 산출한 뒤 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 완성함으로써 암반의 'c'와 'φ'값을 추정하였다. 그 결과, 암반의 'c' 값은 암석의 'c' 값의 수십분의 일에 해당하였다. 그러나 φ값은 변화가 거의 없었다. 위의 결과로부터 산출된 암반의 점착력과 내부마찰각은 연암에서 $c=2.19 \text{ kg/cm}^2$ 과 $\phi=33^\circ$ 그리고 경암에서 $c=5.14 \text{ kg/cm}^2$ 과 $\phi=50^\circ$ 를 얻었다. 다음 <표 3-1>은 본 터널 단면 해석에 사용된 암석 및 암반의 역학적 물성치와 암반 상수 를 나타낸 것이다.

<표 3-1> 지반의 물성치

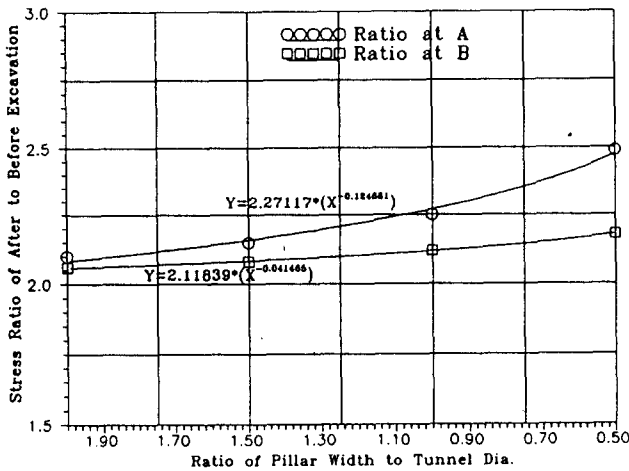
항 목	단위중량 γ (t/m^3)	탄성계수 E (t/m^2)	포아송비 ν	일축압축강도 σ_c (t/m^2)	m	s
풍 화 토	1.90	8,000	0.35	10	0.219	0.2×10^{-4}
풍 화 암	2.25	10,000	0.32	153	0.313	0.2×10^{-4}
연 암	2.45	100,000	0.29	1,000	0.782	0.2×10^{-4}
경 암	2.70	400,000	0.27	5,000	1.598	1.9×10^{-4}

한편, 본 논문에 적용된 풍화토와 풍화암의 물성치는 터널굴착에 의해 직접적인 영향을 받지 않는 관계로, 서울지역에서 실시된 지반조사의 결과에 바탕을 두고 임의로 선택하였다.

4 해석 결과

4.1 원형터널간 이격거리와 그변화에 따른 영향

터널간 이격거리가 터널과 주변 암반에 미치는 영향을 알아보기 위해, 본 논문에서는 암반을 균질한 등방성 탄성체라고 가정하고, 원형 터널 모델을 이용하여 터널 이격거리를 변화시켜 해석하였다. 그 결과, 터널의 이격거리와 터널 양측벽에 걸리는 집중응력은 <그림 4-1>



<그림 4-1> 터널 이격거리와 터널 양측벽에 걸리는 집중응력과의 관계

과 같이 서로 비선형적으로 반비례함이 나타났다. 즉, 터널 직경을 D로 할 경우, Pillar의 두께가 1.5D 이상 되는 경우는 굴착전과 굴착후의 응력비가 거의 유사하게 나타났으나, 1D이하가 되었을 경우는 응력비가 현저히 증가함을 보였다.

또한, Iteration 단계마다 터널 측벽부에 집중된 과다응력이 지보할 능력이 있는 Abutment Place로 이동함이 나타났으며, 그로 인한 과다응력의 크기가 크게 감소하는 것을 보여 주었다. 최종 Iteration에서는 과다응력이 발생한 위치가 측벽 끝단으로부터 터널 외부쪽, 또는 Pillar의 중앙부로 약 30cm~60cm 정도 이동하였음이 나타났다. 과다응력의 감소를 및 내공변위의 증가율은 <표 4-1>과 같다.

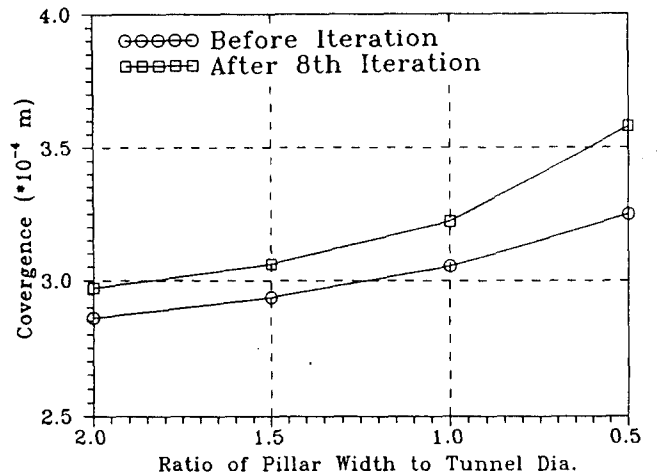
<표 4-1> 이격거리 변화에 따른 과다응력 감소율과

내공변위 증가율

항 목	이격거리 (0.5D)	이격거리 (1.0D)	이격거리 (1.5D)	이격거리 (2.0D)
과다응력 감소율(%)	33.43	26.35	23.46	21.70
내공변위 증가율(%)	166.67	50.45	10.81	0

터널 이격거리가 터널 직경보다 작은 경우에는 과다한 응력의 재분배가 이루어진 Pillar 중앙에 또다른 과다응력이 발생하였고, 터널 공내에도 영향을 미쳐 터널내공변위가 터널 이격거리를 2D로 기준할때 이격거리의 감소에 따라 현저히 증가함을 보여 주었다. 이는 <표 4-1>에서 잘 나타나 있다.

터널간 이격거리 결정 방법으로는 터널 Crown의 침하율의 수렴상태에 따라 결정하는 방법⁽¹⁾이 있으나, 본 연구에서는 Pillar에 걸리는 응력의 분포나 Yielding 상태, 또는 파괴의 가능성에 근거를 두고 결정하는 방법을 이용하였다. 따라서, 본 연구 지역에 원형터널 굴착시의 Critical Pillar 두께는 Pillar에 걸리는 응력분포와 Yielding 범위 및 이격거리 감소에 따른 터널내공변위 증가율을 보여주는 <그림 4-2>을 고려할때 Critical Pillar 두께는 터널직경의 1D 이상은 되어야 안정하다고 판단되었다.



<그림 4-2> 터널 이격거리 감소에 따른 터널 내공변위 증가율

4.2 터널 주변 암반의 Progressive Failure

터널 굴착후 터널 측벽에 발생할 수 있는 암반의 진행성 파괴 거동을 알아 보기 위해 본 논문에서는, Progressive Failure Technique을 적용한 Hoek-Brown 암반 파괴 이론을 원형 복원 터널 이외에 2종류의 마제형 터널에 적용시켰다. 그 결과, 원형 터널 해석시와 같이 초기 Iteration에서 발생한 터널 측벽 주위의 응력 집중이 Iteration을 거듭할 때마다 감소하였고, 측벽 주위 암반의 Yielding은 계속 진행하여 그 범위가 측벽으로부터 약 60cm 정도까지 진행되었다. 또한 암반의 진행성 파괴에 따라 변하는 터널 내공의 거동을 파악하기 위해 암반내의 응력전이와, Yielding이 완전히 발생한 후의 수직/수평 변위와 Yielding이 발생하기 전의 수직/수평 변위를 비교하여 공내 수직/수평 변위율을 계산해보았다. 그 결과, 수평내공 변위율이 수직내공 변위율보다 크게 나타났다. 더욱이, 수직 측벽을 갖고있는 마제형 터널 A의 경우는 수평변위가 수직변위의 1.5배 이상 크게 나타났다. 이는 수직측벽을 갖고 있는 터널 주변 암반은 일반적인 원형 형상의 터널 주변 암반보다 집중응력에 민감히 반응한다는 사실을 보여주는 것이다. 따라서, 이러한 터널의 지보나 계측시에는 터널 천단부 침하 이외에 측벽 변형(Swelling)에 더욱 주위해야 한다.

한편, 본 논문에서 적용한 암반의 진행성 파괴의 정당성을 검토하기 위해 FLAC내의 Mohr-Coulomb 탄소성 이론을 이용하여 위의 모델들에 적용한 후, 그 결과를 내공변위율과 측벽내의 응력 감소율을 비교하여 <표 4-2>에 수록하였다.

<표 4-2> 터널형상에 따른 내공변위율과 측벽내의 응력 감소율

항 목	수직내공 변위율(%)	수평내공 변위율(%)	집중응력 감소율(%)		내공변위비 (수평/수직)	
			A	A'		
원형 터널	Hoek-Brown (Progressive)	3.88	21.01	20.19	21.69	34.69
	Mohr-Coulomb (FLAC)	31.14	27.00	12.13	13.23	28.84
마제형 터널A	Hoek-Brown (Progressive)	11.29	287.40	77.03	84.13	151.30
	Mohr-Coulomb (FLAC)	67.21	25.92	17.41	22.89	32.73
마제형 터널B	Hoek-Brown (Progressive)	9.44	96.81	49.30	35.60	42.50
	Mohr-Coulomb (FLAC)	61.29	55.94	52.40	38.79	20.17

<표 4-2>에 의하면 Mohr-Coulomb 이론을 해석에 적용할 경우 터널 형상에 관계없이 터널 내공변위의 비가 거의 일정함을 보였으며, 내공변위율에 있어서도 그 서로의 차이가 암반의 진행성 파괴에 비해 그리 크지 않게 나타났다.

5. 결론

1) Progressive Rock Mass Failure 기법을 적용한 Hoek-Brown의 파괴이론을 FLAC 내의 FISH Function을 이용하여 자동화하였으며 3가지 형태의 터널에 적용하여 Pillar의 Critical 이격거리와 측벽의 거동을 분석하였다.

2) Mohr-Coulomb 파괴 기준에 여러 종류의 점착력과 내부마찰각을 수치해석의 입력 Data로 적용한 결과 암반의 점착력이 암석의 점착력에 비해 수십배 작지 않는 한 터널 주변의 암반에는 소성 변형이 일어나지 않음을 확인하였다.

3) 터널이 얇은 암반층을 통과할 경우에는 암반의 점착력값이 내부마찰력값보다 암반의 파괴를 규정하는데 더 중요한 요소임을 확인했다.

4) 암반의 직접 전단 시험을 실시하지 않은 경우에는 Hock-Brown 이론을 이용하여 암반의 'c' 와 'φ'값을 추정할 수 있음을 확인했다. 본 연구대상에서는 연암층의 'c'값은 2.19kg/cm²로 'φ'값은 33°로 추정되었고, 경암층의 'c'값은 5.14kg/cm², 'φ'값은 50°로 추정되었다.

5) 터널이 연암층에 굴착될 경우 고려해야 하는 터널 측벽부에 발생하는 암반의 Yielding 범위와 터널간 Critical 이격거리를 63cm와 1D로 각각 예측하였다.

6) 수직측벽을 갖고 있는 터널 주변 암반이 일반적인 원형 형상의 터널 주변 암반 보다 집중 응력에 민감히 반응하며 수평변위가 수직변위의 1.5배 이상 크게 나타났다.

한편, 본 연구의 과정과 결과는 좀더 많은 실내 및 현장 시험에 근거를 두고 계속될 필요가 있으며, 더 나아가 현장에서의 체계적인 계측결과와 그를 통한 역해석등을 통해 확인되어야 할 필요가 있다고 사료된다.

6. 참고문헌

- (1) 백영식, 김홍택, 임수빈 (1993). "산악지 쌍굴 수로터널 해석에 대한 고찰," 지반공학과 터널기술, 한국지반공학회93 봄 학술발표회 논문집, pp. 21~26.
- (2) Anon, (1993). Flac User's Manual, Itasca Consulting Group.
- (3) Bieniawski, Z. T., 1984, Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, Balkema, 272 pp.
- (4) Hoek, E., and Brown, E. T.(1988), "The Hoek-Brown Failure Criterion - a 1988 Update," Proceedings of 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, 8 pp.
- (5) Hoek, E., 1990, "Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion," Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr., 27(3), pp. 227-229.
- (6) Kripakov, N. P., 1981, "Finite Element Analysis of Yield Pillar Stability," Computers and Structures, Vol.13, pp. 575-593.
- (7) Park, D.W. and Lee, S.M., 1992, "Application of Three-Dimensional Numerical Modeling for Longwall Mine Design," 121st SME Annual Meeting, Pre-print 92-169, Phoenix, AZ. 10 pp.