

장벽식 석탄광의 운반갱도 지보수치해석

김민규¹⁾

1. 서론

본 연구는 국내의 기업이 1992년부터 50%의 자본참여를 통해 개발 중인 호주의 스프링베일탄광(Springvale Coal Mine)에서의 장벽식 채탄막장과 연결되는 탄층의 대형 주운반 갱도의 안전성을 확보하고자 설계된 지보방식에 대한 수치해석을 통하여 지보의 유효성을 분석하였다.

2. 지질

가. 일반지질: 스프링베일 탄광은 호주 시드니로부터 북서쪽 155km 위치하고 있으며 인접한 리트고우(Lithgow) 시로부터는 약 10km가 떨어져 있다. 스프링베일 탄광의 구성암반층에는 NW 9-10도, NE 25-27도 방향으로 두 개의 뚜렷한 구조선이 발달하고 있고 이 방향으로 단층선이 발달하였고 석탄층에서의 2개의 뚜렷한 탄리(cleat)가 불연속면을 만들어 낸다. 특히 스프링베일 탄광에서 스윌리(Swilly)라 별명이 붙은 불규칙한 탄층이 석탄층에 끼어들면서 안정성에 불리하게 작용한다. 스윌리는 굴곡상태에서 횡압과 수직압을 받으면서 곡면부에 균열이 발달하여 있는 탄층이다. 그러므로 이 스윌리와 갱도가 만나는 탄층은 연약대로 갱도의 붕락을 일으키는 지질적인 요소가 된다.

나. 석탄층과 주변 암석층의 물성: 장벽 채탄막장(Longwall #1)에서 가행 중인 리트고우탄층(Lithgow Seam)의 두께는 약 7m 이다. 갱도 천정을 구성하는 석탄층은 응회암질의 사암이 협재하고 있는데 그 두께는 다양하며 최대의 두께는 약 300mm이다. 석탄층 위로는 다음의 아이런데일(Irondale) 탄층까지 수평으로 층리를 이루고 있는 실트암과 사암이 교대로 나타난다. 바닥에는 1m 두께의 두꺼운 사암층이 있는데 이 사암은 입자가 매우 굵은 조립질

<Table1> Mechanical properties of coal and rock strata

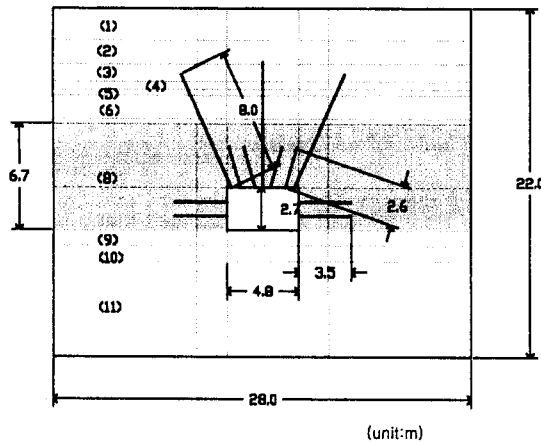
No.	Strata	Location (m)	Sc (MPa)	Y.M. (MPa)	Sc ₀ (MPa)	IFA(°)
(1)	ST+SS	12.0 이상	28	6400	5.6	46.1
(2)	ST+SS	10.5~12.0	31	9400	6.4	45.3
(3)	ST	9.4~10.5	19	3050	4.2	42.5
(4)	ST+SS	8.9~9.4	20	3350	4.4	42.5
(5)	ST	8.5~8.9	13	3250	2.7	45.3
(6)	ST+SS	7.0~8.5	6	4900	1.4	39.8
(7)	Tuff	6.7~7.0	5	2000	1.4	39.8
(8)	Coal	0.0~6.7	7	3750	2.26	24.1
(9)	ST	-1.0~0.0	21	4050	5.0	39.2
(10)	SS	-2.0~-1.0	6	3500	1.85	26.6
(11)	ST+SS	-2.0 이하	22	5000	5.6	46.1

의 사암이고 실트암이 층상으로 협재하고 있다. 이 사암은 물을 품을 수 있는 대수층로 작용할 수 있다. 석탄층과 암석층의 구성은 <Table 1>에 제시되어 있다.

리트고우 석탄층의 직상부에서 3m까지는 수평의 층상으로 되어있는 실트암과 사암이 연속으로 교대하면서 그 강도는 20 MPa 보다 작은 범위에서 변하고 있다. 층리면의 강도 및 잔류강도의 성질, 즉 내부마찰각과 점착력 등은 층리면에 30° 각도로 시추편을 뽑아내어 실험

에 의해 구한 값을 인용하였다. 이 시험편들은 응회암과 석탄의 접촉면과 층상을 이루고 있는 실트암과 사암의 접촉면을 포함하고 있는데 항복 점착력은 1.4~4.4 MPa, 내부마찰각은 25° ~ 38° 범위이다.

1) 한국자원연구소, 자원연구부



<Fig.1> The gate road model of Springvale Coal Mine

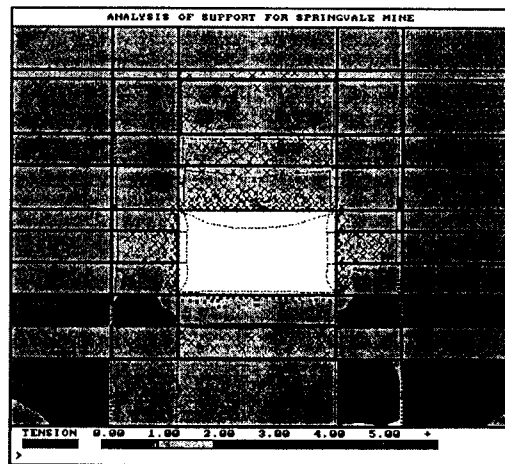
다. 초기지압: 수평으로 작용하는 최대 주응력 14 MPa로 경사 7°, 주향 272°로 거의 동서 방향으로 작용하고 있고 채준갱도(gate road)의 방향과 직각을 이루고 있다. 최소주응력은 6 MPa, 경사 74°, 주향 156°로 거의 수직으로 작용하고 있다.

3. 갱도의 수치해석

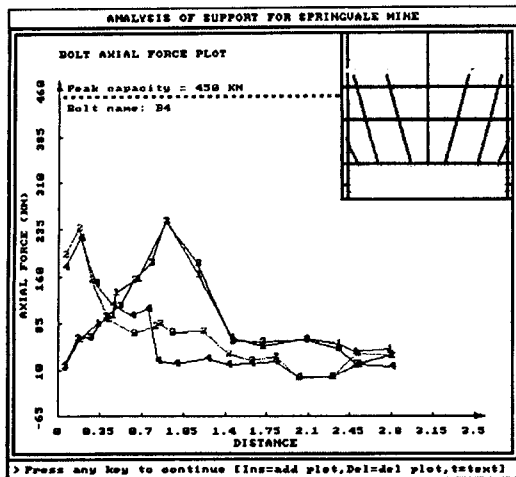
가. 수치해석모델: 스프링베일 탄광의 채준갱도(gate road)에서 응력분포, 변형 및 적절한 지보대책을 해석할 목적으로 <Fig.1>과 같이 주운반갱도를 모델로 구성하였다. 수치해석에는 2차원 탄소성해석이 가능한 Phase2 프로그램을 사용하여 탄층 및 인접한 암석층의 응력과 변형을 계산하였다.

나. 이완대 해석: <Fig.2>는 탄중갱도 주변에서 이완된 영역을 보여주는 그림이다. 이완대는 갱도 벽의 절리 내에서 갱도의 약 상부로 발달하였는데 이 경우 굴진 갱도의 단위길이(m) 당 발달하는 이완대의 하중은 대략; 갱도 폭(m)×이완대 높이(m)×석탄의 밀도(ton/m^3) = $5 \times 4 \times 2.0 = 40$ 톤/m 으로계산된다. 검은점(●)으로 표시된 부분은 전단, 곱표(x)는 인장에 의한 파괴이다. 하부의 바닥에서는 전단에 의한 파괴가 바닥에서 30-50cm 깊이로 발달하고 바닥 아래의 약한 조립질 사암층은 절리 내에서 횡압을 받아 굴곡인장이 발달하면서 모두 이완되었다. 갱도의 모서리에서는 수평의 층리와 수직의 절리가 미끄러지면서 항복을 일으키고 직상부의 절리와 그 윗쪽에서의 이암, 사암, 실트층의 층리가 모두 항복하고 있다. 천반에서부터 굴곡의 처짐(sagging) 발생하고 층리가 서로 떨어지고 있다. 이러한 파단은 현장에서 발생하는 현상과 잘 일치한다. 아래쪽에 명암으로 나타나는 숫자는 응력에 대한 암석의 강도 비(比)이다. 암석의 강도와 재분포된 지압과의 비는 1~2 정도여서 언제든지 파단이 발생할 수 있다. 갱도를 중심으로하여 모델의 경계선인 상부의 14m, 하부8m, 좌우14m의 모든 부분이 이완이 가능하다. 천반이 붕락을 시작하면 갱도의 전주변이 무너질 수 있다는 것을 보여준다. 상부로는 천반으로부터 14m 이상 더 높이 이완대가 발전할 수 있다.

굴착 후 충분히 이완이 이루어지고 난 다음 1차로 천정에 4개, 측벽 2개씩 모두 8개의 볼트를 설치했다. 천정에 설치한 4개의 볼트는 전면접착형의 레진볼트로 설치 인장력(pre-tension)을 가하지 않았다. 직경 28mm, 길이 3m, 용량 45톤으로 스프링베일 탄광에서 사용중인 스피نبolt(Spinbolt)를 모델화한 것이다. <Fig.3>은 갱도에 측벽과 천장에 설치한 볼트에 걸리른 축하중을 도시한 그림이다. 측벽의 볼트에는 1/3되는 지점에, 모서리에 설치한 볼트는 천정벽 선단 가까이에서 약 16톤의 축하중이 걸리고 있다. 천정이 더 이상 무너지지 않는다면 이



<Fig.2> Released zone around gate road



<Fig.3> Axial load on the bolts

트에는 8.5톤, 좌우의 케이블 볼트에는 5.1톤, 4.8톤의 축력이 작용하고 있다. 측벽의 볼트에는 중상에 있는 것이 좌우로 각각 4.2톤, 8.6톤 그리고 중하측벽에 설치한 볼트에는 각각 13.4톤, 13.7톤의 축력이 작용하고 있다. 이 축력들은 모두 각 볼트의 용량에 전혀 미달되는 낮은 수준이다. 1차지보에 비해서 이 측벽에 작용하는 축력들은 2~3가량 증가하고 있다. 모형에서는 각층에 대한 시간적인 물성변화를 주지 않았기 때문에 이완영역이 추가되지는 않는다.

그러나 갱도를 굴착한 이후 즉시 볼트를 시공해 보면 모든 볼트는 항복을 하고 말았다. 중앙에 용량 64톤의 메가볼트를 동시에 설치할 해도 이 역시 항복했다. 즉 지반반응곡선에서 보듯이 초기에 적당한 변위를 허용해주지 않으면 이 변위를 억제할 만한 지보는 불가능하고 또 너무 조기에 지보를 해도 과지보가 될 수밖에 없다. 그러나 굴착이후 지보 시기를 이상적으로 맞춘다면 1차지보만으로도 천반을 안정시킬 수 있다. 그러나 그 지보의 시기는 알 수 없기 때문에 1차 지보를 한 후 계측을 하여 안정성을 검토하고 2차지보 여부를 결정해 가야 할 것이다. 그리고 천반의 안정이 안정이 이루어지면 암질평가와 시공한 지보를 기록하여 암질등급과 대응지보수준을 분류하는 자료로 활용해야만 한다.

4. 결론

호주의 스프링베일 탄광의 석탄 중에서 대형 장비가 이동하는 규격의 갱도를 굴착하기에는 지질조건이 불리하여 천반이 붕락하는 경우가 빈번하였고 이로 인한 생산의 차질은 바로 수익성에 영향을 미쳤다. 그러나 지보의 분석과 해석을 통해 본 연구에서는 해당 탄광에서의 주운반 갱도가 적절히 유지될 수 있다는 결론을 얻었고 지보설계와 감시계측을 결합하여 능동지보의 개념에 충실하면 최적의 지보수단을 찾을 수 있다고 판단하였다.

참고문헌

- [1] Johnnie Williams, 1996. 3, Analysis of Springvale Geology ; Sumsung Development (Aust.) PTY. LTD. Cyprus Coal Australia
- [2] ACIRL, 1993.1, Geotechnical Testing - UCS & Triaxial Strength: Springvale Colliery
- [3] Springvale Coal, 1997.11, Roof Control Management Plan : Roof Support Systems
- [4] 스프링베일 탄광 계측자료

볼트는 파단이 없다. 천정이 무너지지 직전에 최적으로 이 볼트만을 설치해도 천정은 유지가 잘 될 수 있음을 보여준다. 그러나 이곳에 설치한 볼트의 용량이 16톤 보다 작다면 볼트는 항복을 하고 말 것이다. 측벽에 설치한 볼트는 선단고정형의 앵커볼트로 직경 28mm, 길이 2.5m, 용량 45톤으로 스프링베일 탄광에서 사용중인 플렉시볼트(Flexibolt)를 모델화한 것이다. 설치하중은 2톤의 인장력을 가했다. 측벽의 계속적인 이완을 억제하고 있는 이 볼트에는 중상쪽의 것에는 2.7톤, 중하쪽의 것에는 4.2톤의 축력이 작용하고 있다. 용량이 부족하여 항복을 하는 볼트는 없다.

이 후에 2차로 중앙에 3개의 케이블 볼트를 설치하여 보았다. 이 경우 중앙의 케이블 볼트