

특별강연

암반공학 분야에서 수치해석의 적용성에 관하여

이 희 근

정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

1. 서 론

사물의 거동, 현상에 대한 해석을 실시함에 있어 해석적 해법에 대비한 수치적 해법의 장점은 재질의 성질이 불균질하고 이방성이며 구조물의 형태가 기하학적으로 복잡할 뿐만 아니라 경계조건이 복잡하여 수학적인 표현이 어려울 때 그 해석을 가능케 해 주는 것이라고 볼 수 있다. 이러한 수치 해석법의 대표적인 것으로 유한요소법과 경계요소법을 들 수 있다.

구조해석, 유체이동해석, 전기포텐셜, 열전도 등 공학이나 물리학 분야에서 나타나는 많은 문제들은 일반적으로 미분방정식의 형태로 표현되는데 해석 대상의 기하학적 형태나 물리적 성질, 경계조건 등이 매우 복잡하기 때문에 수학적 해를 얻기란 매우 어려운 일이다. 이에 수치해석법으로서 유한요소법이 이러한 어려운 문제들의 해를 구하는 수단으로 적용되게 되었다. 유한요소법은 행렬법의 하나로써 Argyris, Ritz 등의 이론을 기초로 하여 발전된 것이라고 볼 수 있다. 이러한 유한요소법이 공학에 먼저 적용된 것은 항공공학분야이며 Clough는 1960년에 평면응력 문제에, 1962년에는 중력법의 응력해석에 이 해석법을 적용하였고 Zienkiewicz와 Cheung은 판의 굴곡해석에 적용하였으며, 그 이후 컴퓨터의 발달에 힘입어 많은 학자들에 의해서 크게 발전되었다.

경계요소법은 원래 사용하기가 간단하고 많은 종류의 문제들에 대하여 매우 융통적임에도 불구하고 유한차분법과 유한요소법의 그늘에서 그의 진가를 발휘하지 못해 왔던 것이 사실이다. 그 이유는 첫째 일반적으로 유한차분 및 유한요소 컴퓨터 프로그램(혹은 팩키지)은 많은 분야에 널리 이용가능한 반면에 경계요소 프로그램은 주로 어떤 특정그룹의 사용자로 하여금 특수문제를 푸는데 사용되어 왔으며, 둘째 어떤 문제에 대하여 개발된 방법은 또한 다른 문제에도 적용된다는 것이 항상 보장되는 것은 아니고, 셋째 문제를 푸는데 사용된 수학이 문제를 풀기 위하여 접근하는 자들에게 난해하게 보이기 때문이

라고 볼 수 있다. 그런데, 유한요소법에서는 해를 얻고자 하는 지점을 포함하여 넓은 영역에 대해서 요소 분할을 해야 하기 때문에 모델 구성 작업에 많은 노력과 전자계산기에 의한 많은 시간이 소요되므로 경제적으로도 부담을 가져오는 반면에, 경계요소법에서는 우리가 해를 원하는 경계부분에 대해서만 요소분할을 하기 때문에 앞의 문제점들을 해소시킬 수 있다. 그리고 경계요소법의 수치해석은 해석적인 과정을 근거로 하기 때문에 유한요소법에 비하여 보다 좋은 정확도를 지닐 수 있을 것이다.

2. 암석의 변형, 파괴특성을 고려한 탄소성 해석법

2.1. 탄소성 해석에 적용할 항복 및 파괴조건식

암석의 파괴 조건식은 종래부터 많은 학자들, 예를 들면 Tresca, Coulomb, Mohr, Griffith, Huber, Hencky, von Mises, Nadai 등에 의하여 연구되어 왔다. 그러나 어느 경우든 암석의 변형, 파괴 특성을 충실히 고려하는데 미흡하였다. 특히 중간 주응력의 고려 여부인데 고려한 경우라 할지라도 실험에 의한 중간 주응력이 고려되지 못했다는데 문제가 있다. 그런데 Mogi에 의해서 일반적 3축 압축 시험기에 의한 중간 주응력의 특성이 규명되어 중간 주응력의 영향까지 포함하는 암석의 변형, 파괴 특성을 고려한 탄소성 해석이 가능하게 되었다.

Mogi의 암석 파괴조건과 항복 조건식은 다음과 같다.

$$\tau_{oct} = f_1(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (1)$$

$$\tau_{oct} = f_2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

여기서 τ_{oct} 는 8면체 전단응력, f_1 및 f_2 는 각각 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 및 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 의 단조 증가 함수로서 1차 또는 2차식으로 근사시킬 수 있다.

암석과 같은 취성 재료의 항복점과 파괴점(최대하중점)은 일반적으로 육안으로 구분할 수 없을 만큼 근접해 있

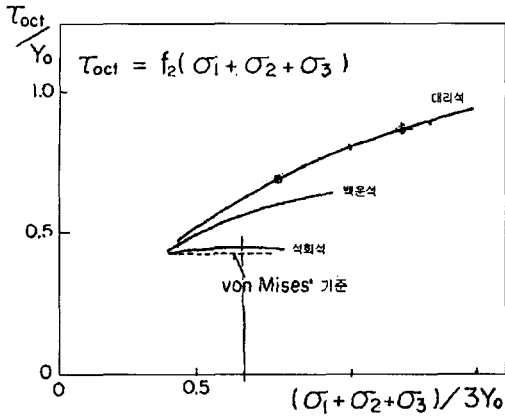


그림 1. 일반적 3축 압축시험에 의한 항복조건(Mogi, 1971).

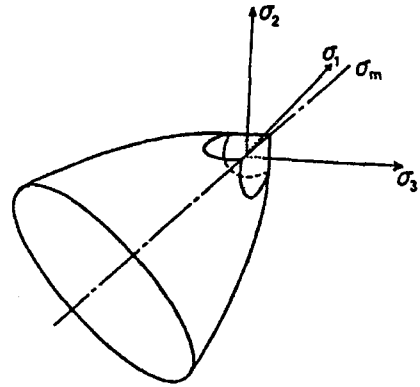


그림 2. 식 (3) 및 식 (5)에 의한 파괴곡면.

으므로 항복 및 파괴조건을 함께 나타낼 수 있는 조건식으로서 항복조건식 (2)를 채택하였다. 그리고 f_2 의 형태를 결정하기 위하여 일반적 3축 압축시험, 즉 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 의 상태에서 수행한 시험 결과를 이용하였다. 그림 1은 여러 암석에 대하여 실시한 일반적 3축 압축시험의 결과로부터 얻어진 항복조건을 표시한 거동이다.

그림 1의 항복조건을 응력불변량에 의해서 일반적 소성 포텐셜 F 로 표시하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$F = \alpha I_1 + J_2 - K = 0 \tag{3}$$

여기서 α , K 는 상수이고 I_1 , J_2 는 응력불변량으로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 &= \frac{1}{6} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \} + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \\ &= \frac{1}{6} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} \end{aligned} \tag{4}$$

식 (3)의 항복조건식은 압축의 경우에 적용할 수 있으며 인장의 경우에는 최대주응력 σ_1 이 인장강도 S_t 와 같아질 때 항복(또는 파괴)이 일어나는 것으로 한다.

$$F = \sigma_1 - S_t = 0 \tag{5}$$

파괴조건식 (3)과 (5)를 주응력 공간에 그려보면 그림 2에 나타낸 바와 같이 $\sigma_m (= \tau_{oct})$ 를 축으로 하는 회전포물면 및 주응력축과 직교하는 3개의 축으로 이루어지는 3차원 곡면이 된다.

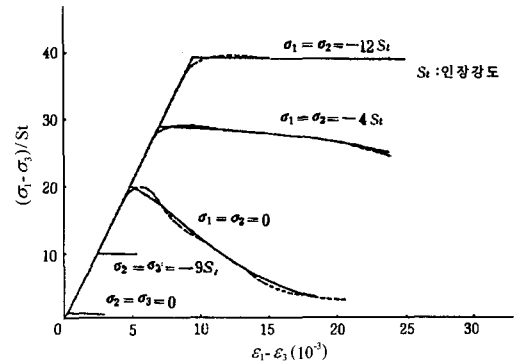


그림 3. 봉압이 암석의 변형 파괴거동에 미치는 영향.

2.2. 항복 후 또는 최대하중 이후의 변형특성

암석이나 콘크리트 같은 취성재료의 항복 후 또는 최대하중 이후의 응력-변형을 곡선은 강성압축시험기의 출현으로 잔류강도에 이르기까지 완전한 곡선을 얻게 되었다. 그 일례를 모식적으로 표시하면 그림 3의 파선과 같다.

2.3. 항복후의 변형거동의 수식 표시

암석의 항복 후 또는 최대하중 이후의 변형특성을 모두 고려해서 엄밀하게 해석하는 일은 매우 어려운 일이다. 그래서 해석에 사용할 물성방정식을 세우는 데 있어 다음과 같이 단순화하여 응력-변형을 곡선을 수식으로 표현하였다.

$$Y_0 = Y_0^* \exp \left\{ -\beta \left(\epsilon_1 - \epsilon_3 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2G} \right)^{\lambda + \mu \sigma_1} \right\} \tag{6}$$

여기서 Y_0 는 소성영역의 응력-변형률 상태에서의 항복응력 또는 최대응력, Y_0^* 는 파괴이력(破壞履歷)이 없는 암

반의 항복응력, G 는 강성률, β, λ 및 μ 는 재료 상수이다.

2.4. 탄소성 매트릭스

탄소성 해석에 있어서 변형이 진행됨에 따라 시시각각 강성 매트릭스를 변화시키는 방법과 또한 그 강성 매트릭스를 변화시키지 않고 탄성의 강성 매트릭스를 이용하여 해석을 실시하는 방법이 있다. 본 탄소성 해석에서는 후자를 채용하였다. 이 방법은 탄성 매트릭스를 변화시키지 않고 반복 계산할 수 있어서 계산 수렴이 빠르고 계산 시간도 짧으나 근사 계산이 된다.

암석은 응력 $\{\sigma\}$ 가 다음 식의 항복조건 (또는 파괴조건) F 를 만족할 때 항복(또는 파괴)이 일어난다.

$$F(\{\sigma\}, K) = 0 \tag{7}$$

여기서 K 는 변형경화 혹은 변형연화에 관한 파라메타이다. 식 (7)의 항복조건은 임의의 응력곡면을 표시하고 (그림 2참조), 2차원 응력계로 표시하면 그림 4와 같다.

소성변형률의 증분을 $d\{\epsilon\}_p$ 라고 하면 소성의 유동법칙(flow rule)은 다음과 같이 표시된다.

$$d\{\epsilon\}_p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \tag{8}$$

식 (8)은 소성변형률증분 벡터가 항복곡면에 수직인 방향을 갖는다는 것을 의미한다. 항복경계부근에서 변형률증분 $d\{\epsilon\}_i$ 이 탄성변형률증분 $d\{\epsilon\}_e$ 와 소성변형률증분 $d\{\epsilon\}_p$ 로 되어있다면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$d\{\epsilon\} = d\{\epsilon\}_e + d\{\epsilon\}_p \tag{9}$$

탄성변형률 증분은 탄성 매트릭스 $[D]$ 에 의해서 응력

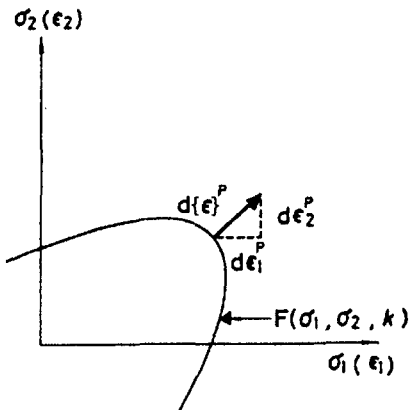


그림 4. 2차원 응력계의 항복 곡선과 소성변형률증분 관계.

증분으로부터 계산할 수 있다. 이 $[D]$ 는 대칭 매트릭스의 정수이다. 즉 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\{\epsilon\} = [D]^{-1} d\{\sigma\} \tag{10}$$

따라서 식 (9)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$d\{\epsilon\} = [D]^{-1} d\{\sigma\} + \lambda \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \tag{11}$$

이다. 위의 검토로부터 알 수 있는 바와 같이 식 (7)은 항복(파괴)이 시작되는 조건식이면서 항복 이후의 응력-변형률 관계도 표시한다.

일련의 과정을 거쳐서 얻어지는 탄소성 매트릭스는 식 (13)과 같다.

$$d\{\sigma\} = [D]_{ep} d\{\epsilon\} \tag{12}$$

$$[D]_{ep} = A [D] \left[A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\} \right]^{-1} \\ = [D] - \frac{[D] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D]}{A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}} \tag{13}$$

여기서 $[D]_{ep}$ 는 증분형의 해석에 있어 탄성 매트릭스 $[D]$ 에 대신하는 탄소성 매트릭스를 표시하며, 대칭 매트릭스이다. 식 (13)은 A 가 0인 경우에도 성립한다. 식 (12)로부터, 소성영역에서 변형률 증분이 주어지면 이에 대응하는 응력변화를 탄성문제와 같은 방법으로 구할 수 있다.

3. 조암광물입자 강도의 불균일성을 고려한 탄소성 해석

실제의 암석을 조암광물입자들의 집합체라고 볼 때 이들 광물 입자의 강도와 물성이 서로 다르기 때문에 수치 해석에서도 이러한 암석의 불균질성을 고려해야 할 것이다. 강도의 불균일성을 고려하기 위해 강도 분포를 Gauss 난수의 정규 분포로 가정해서 해석 모형의 분할된 요소에 각각 압축 강도 및 인장 강도를 분포시켜서 탄소성 해석을 실시하여 압축, 전단 또는 인장에 의한 변형, 파괴 거동을 조사하고, 하중속도와 강도, 파괴양상과의 관계, 전형적인 강성압축시험의 재현여부, 정형도의 불량 및 시험편과 가압판과의 접촉상태 불량과 파괴양상과의

관계 등을 조사하였다.

해석에서 소성유동식 (6)으로 변형증가에 따라 변형연화거동을 나타나고, 물질 상수 β, λ, μ 에 의해서 봉압과 변형연화도와의 관계를 나타내며, 파괴조건식은 식 (3)을 적용하였다. 인장파괴시에는 no tension 특성을 고려하였으며, 파괴조건식은 식 (5)를 적용하였다. 압축 및 인장파괴시에 하중속도와 파괴양상과의 관계를 조사하기 위하여 하중속도의 제어방법은 변위증분을 조절하는 방법으로 하였다.

3.1 압축시험편의 파괴거동에 대한 탄소성 해석

3.1.1 압축 하에서 최대하중 이후의 변형특성과 조압광물입자 강도의 불균일성을 고려한 수치해석

동일 시험편 내에서 조압광물입자의 상이한 압축강도와 인장의 분리파괴 및 압축의 최대하중 이후의 변형·파괴 특성을 고려하는 탄소성 해석을 실시하기 위한 해석 모델은 그림 5와 같다. 그림 5에서는 144개의 요소와 91개의 절점으로 요소분할하였다.

그림 5의 하단부의 수치들은 상이한 암석입자들의 강도들을 Gauss 난수 정규분포로 요소에 대응시킨 압축강도이다. 여기서 암석입자들의 인장강도는 평균강도로서 62 kg/cm^2 로 하였다.

그림 6과 7은 하중속도와 파괴양상과의 관계를 조사, 연구하기 위하여 압축변위의 1회 증분량을 변화시킴에 따라 달라지는 파괴양상을 도시한 것이고, 그림 8은 균

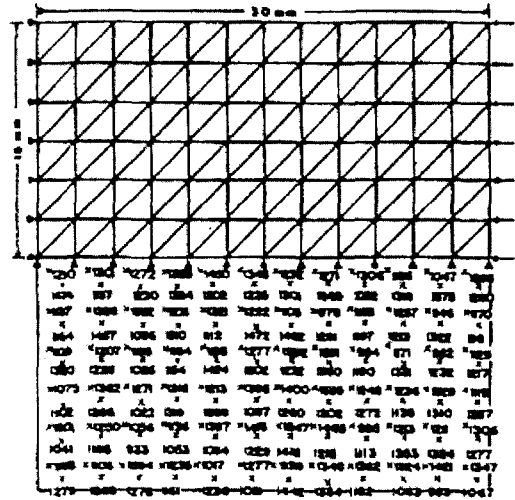


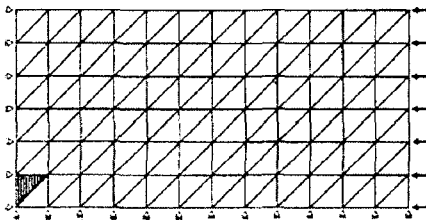
그림 5. 탄소성 해석을 위한 압축 시험편 모델 및 압축 강도 분포.

열의 발전이 특정한 요소에 미치는 영향을 조사, 연구하기 위한 해석결과이며, 그림 9는 시험편의 정형도의 불량 및 가압판과 시험편과의 접촉상태의 불량이 시험편의 파괴양상에 미치는 영향을 해석한 결과이다.

3.1.2. 수치해석 결과 및 검토

그림 6과 7에서 보는 바와 같이 압축변위의 1회 증분량이 달라질 때, 즉 하중 속도가 달라질 때 파괴양상도 달라짐을 알 수 있다. 그림 6의 하중속도는 그림 7의 4 배이다. 그림 6에서는 가장 취약한 요소 11번만이 압축

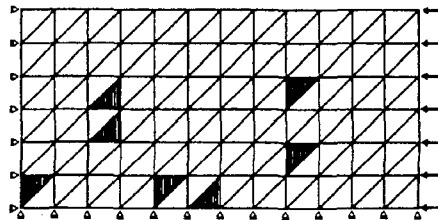
$U = -0.09 \text{ mm}$



$U = -0.1 \text{ mm}$



$U = -0.095 \text{ mm}$



압축 시험편 모델인 대리석의 물성

$E = 325000 \text{ kg/cm}^2$

$\nu = 0.25$

$S_t = 62 \text{ kg/cm}^2$

$S_c = 1240 \text{ kg/cm}^2$

$S_{cc} = 1490 \text{ kg/cm}^2$

그림 6. 압축시험편 모델에 대한 탄소성 해석 결과 (1회 변위증분량 : 0.005 mm).

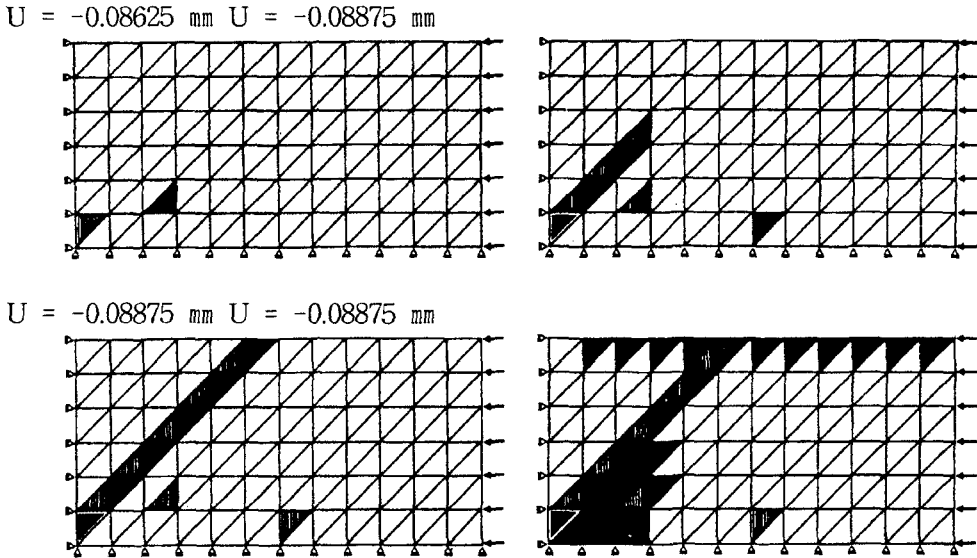


그림 7. 압축 시험편 모델에 대한 탄소성 해석 결과 (1회 변위 증분량 : 0.00125 mm).

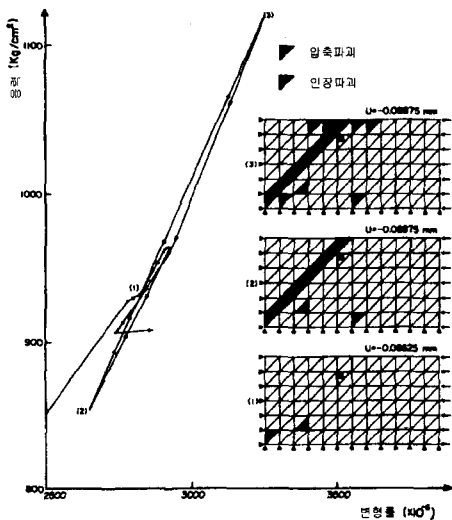


그림 8. 압축 시험편 모델에 대한 탄소성 해석에서 요소 63번의 변형 거동.

파괴되고 이후 여기저기에서 요소들이 불규칙하게 압축 파괴되고 있음을 알 수 있다. 그림 7에서는 가장 취약한 요소 11번과 34번이 압축 파괴되고, 이후 시험편의 중심부에 있는 요소 11번으로부터 균열이 방향성을 갖고 전단방향으로 발전해 가고 있음을 알 수 있다. 그림 7에서 상단의 우측 그림과 하단의 좌우 그림은 시험편 전체의 외형 압축변위가 일정하게 있는 동안에 시험편 내부에서

파괴된 요소로부터 방출되는 에너지가 인접요소에 전달되면서 균열이 발전하고 있음을 나타내고 있다. 하단의 좌측 그림에서는 시험편의 중심부에서 발생한 균열이 45° 방향의 전단방향으로 발전하여 시험편의 외부측면까지 이르렀음을 표시하고 있다. 그리고 이 전단방향의 파괴는 처음에는 압축파괴이었던 것이 균열의 발전과정에서 인장파괴를 동반하여 거의 압축파괴와 인장파괴가 동시에 일어나고 있음을 알 수 있다. 이들 결과는 실제로 대리석에 대한 강성압축시험의 과정에서 관찰된 결과와 부합한다. 즉 전단방향으로 발전하는 파괴기구는 압축의 최대 하중 이후에 파괴면의 마찰력에 의하여 응력의 개방현상이 일어나면서 하중에 대한 저항력이 감소하다가 마침내는 시험편의 외피부분이 정연하게 분리파괴를 일으킨다. 그래서 강성압축시험 후의 시험편은 상하부 2개의 원추형태의 암석편과 외피의 분리암편으로 분리 파괴된다(그림 10 참조). 하중 속도가 빠른 때에는 요소들의 파괴가 일정한 방향성이 없이 불규칙하게 일어나고 있는 반면에 하중속도가 1/4 인 때에는 전형적인 강성압축시험의 결과와 부합하는 수치해석 결과를 보이고 있다.

그림 8은 그림 7의 경우에 있어서 파괴된 요소들이 63번 요소의 변형 거동에 미치는 영향을 도기한 것으로 선형거동에서 비선형 거동으로 전이한다.

그림 9는 정형이 불량한 시험편의 압축하중하에서의 변형·파괴 거동을 도기한 것이다. 그림 7과 9를 비교해

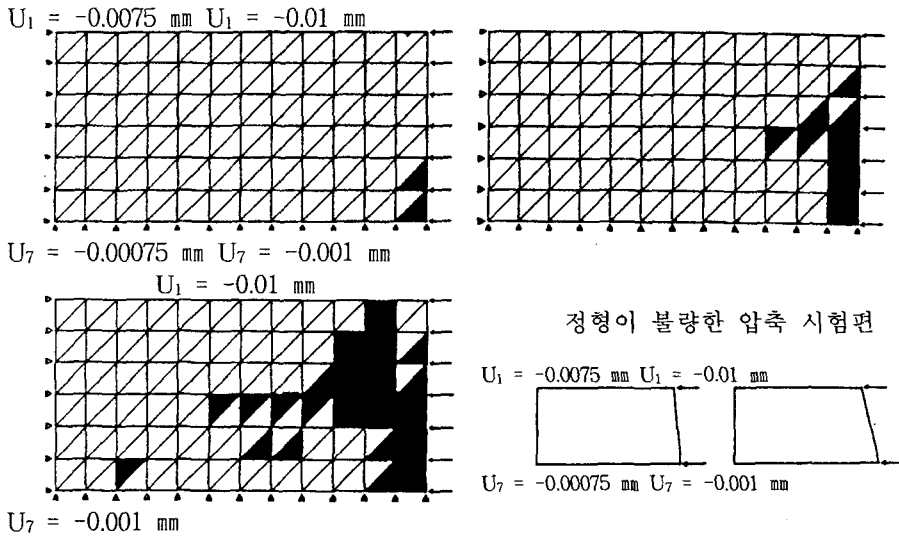


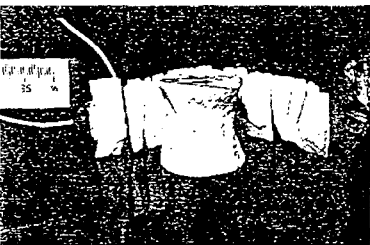
그림 9. 정형이 불량한 압축시험편 모델에 대한 탄소성 해석 결과.



(a) 사암



(b) 화강암



(c) 대리석

불 때 전자는 전형적인 강성압축과괴인데 반하여 후자는 시험편과 가압판과의 접촉부분에서 대체로 시험편의 단면에 거의 평행한 방향으로 인장파괴가 일어나고 있음을 알 수 있다. 따라서 시험편의 정형도가 불량하고 가압판과 시험편의 접촉상태가 불량하면 전형적인 강성압축시험의 결과를 얻지 못한다는 실제의 사실과 부합하는 해석 결과를 얻은 셈이다.

3.2 시험편의 인장파괴거동에 대한 탄소성 해석
단순인장 시험편, 압열인장 시험편, 4점굽곡 시험편에 대해서 조압광물입자 강도의 불균일성을 고려한 탄소성 해석을 실시하여 인장파괴 거동을 규명하고자 하였다.

3.2.1 수치해석 모형과 재료 물성

수치해석 모델의 재료는 대리석으로 단축압축강도는 1240 kg/cm^2 , 이축압축강도는 1490 kg/cm^2 , 인장강도는

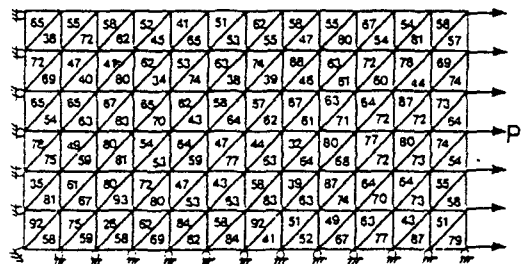


그림 11. 탄소성 해석을 위한 단순 인장 시험편 모델.

그림 10. 압축시험 후의 파괴된 시험편.

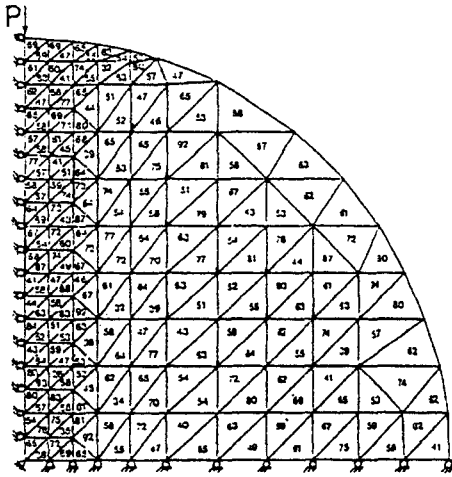


그림 12. 탄소성 해석을 위한 압열인장 시험편 모델.

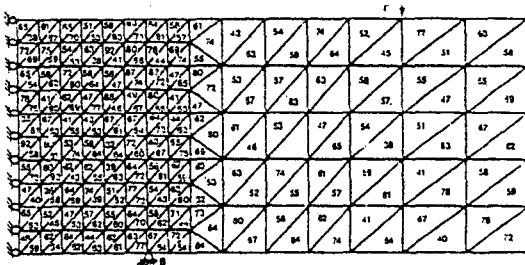


그림 13. 탄소성 해석을 위한 4점 굴곡 시험편 모델.

62 kg/cm², 영률은 3.25×10⁵ kg/cm² 및 포아송비는 0.25로 하였다. 그리고 소성 영역에서의 변형 특성에 관련된 재료상수는 β = 500, λ = 1.4, μ = 1500으로 하여 평면응력상태하에서 해석하였다. 먼저 단순인장 시험편의 경우, 그림 11과 같이 시험편을 모델화하였다. 해석 모델은 144개의 요소와 91개의 절점으로 요소분할되었다. 압열인장 시험편은 해석 모델을 207개의 요소와 126개의 절점으로 요소분할하였다(그림 12). 4점 굴곡 시험도 235개의 요소와 141개의 절점으로 요소분할되었다(그림 13).

3.2.2 수치해석결과 및 검토

그림 14는 단순인장 시험편의 수치해석 결과로, 세로

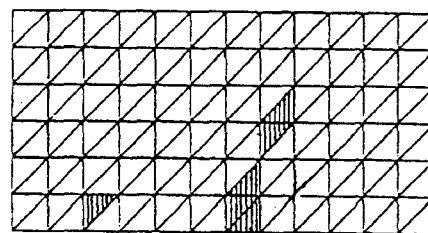


그림 15. 인장 시험 후, 파괴된 시험편.

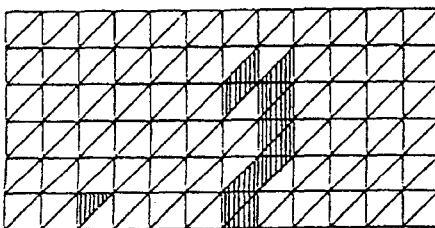
$$U_1 = 5 \times 10^{-4} \text{ mm}$$



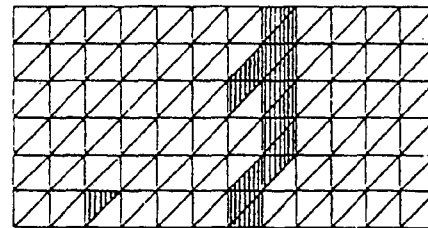
(a) U = 0.0045mm



(b) U = 0.005mm



(c) U = 0.0055mm



(d) U = 0.006mm

그림 14. 단순 인장 시험편에 대한 탄소성 해석 결과

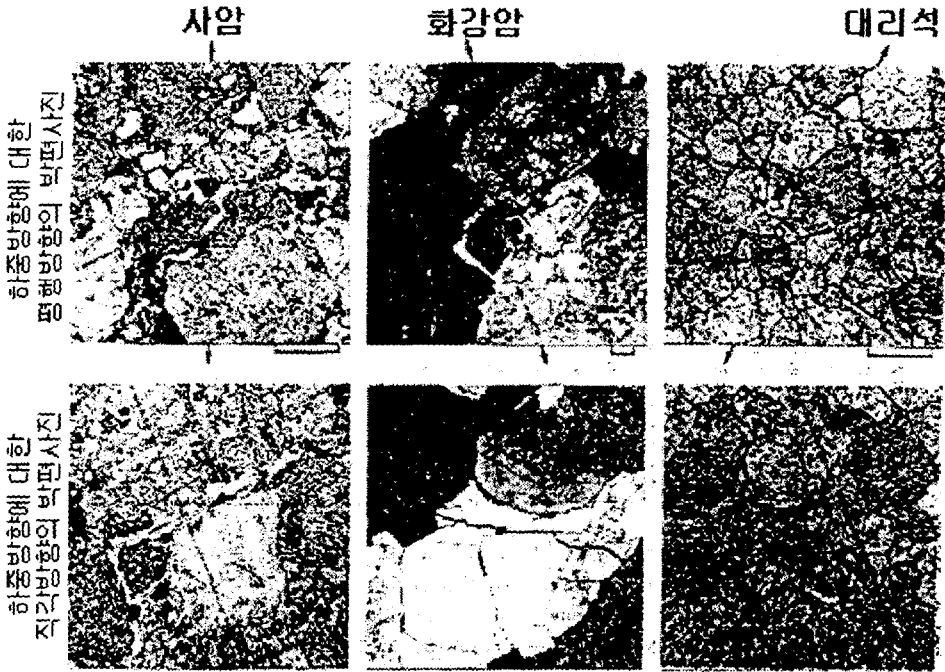


그림 16. 인장시험 후 파괴된 시험편으로부터 만든 박편의 현미경 사진(인장 시험에 의한 분리형 균열을 볼 수 있다). 화살표는 하중 방향을 나타내며 축척 길이는 0.2 mm.

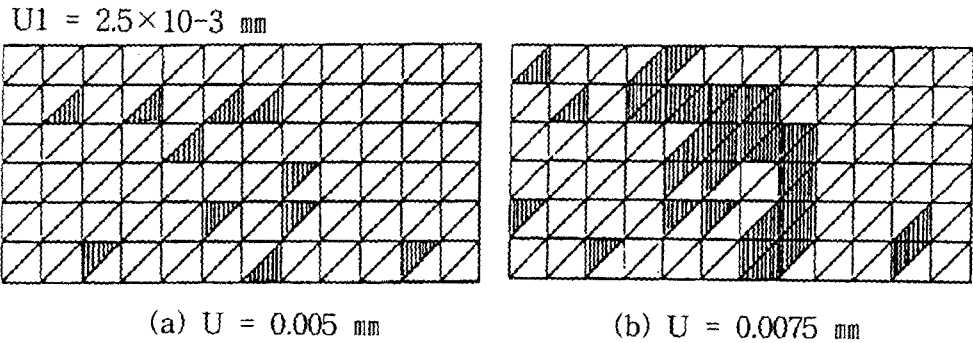


그림 17. 그림 14의 변위속도보다 5배 빠른 속도로 해석한 경우의 해석결과.

로 줄친 요소는 인장파괴된 요소를 나타낸 것이다. 취약한 요소 35번 및 모델의 중앙쪽에 위치한 요소 90번과 91번에서 파괴가 시작되고 최종적으로 파단면은 대체적으로 인장력 방향에 직각방향으로 분리파괴되었다. 이는 실제의 단순인장시험 결과와 잘 부합하여(그림 15 참조), 시험파괴된 인장 시험편으로부터 만든 박편조사에서도 분리형 균열을 확인할 수가 있다(그림 16 참조).

그림 17은 인장강도가 불균질한 시험편의 수치해석 결과로서, 그림 14의 경우에 비하여 하중속도가 5배이다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편 내부의 취약한 요소에

서 국부적으로 여기저기 불규칙하게 파괴가 일어났으며, 최종적으로는 대체로 인장력 방향에 직각방향으로 분리 파괴되었지만 파단면의 직선성이 매우 불량하다. 최종파 단강도는 더 커서 하중속도가 증가할수록 암석의 파괴강도가 증가한다는 실제의 실험사실과 부합하고 있음을 알 수 있다.

3.2.3 압열인장 시험

그림 18은 압열인장시험편 모델의 수치해석 결과이다. 새로로 줄친 요소는 인장파괴된 요소이며, 흑색으로 표시된 요소는 압축파괴된 요소를 나타낸다. 중중심선의 상단

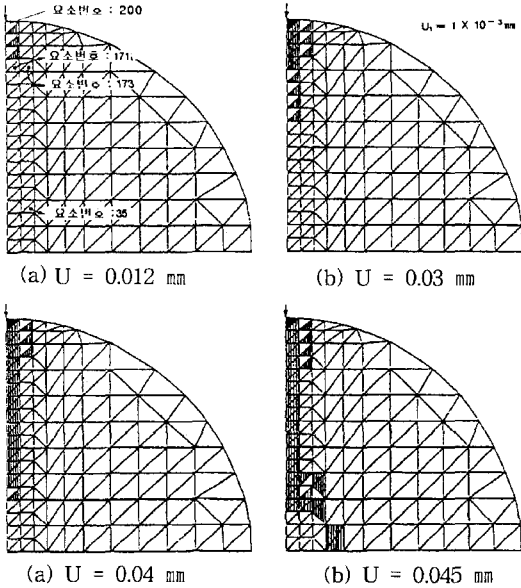


그림 18. 압열인장 시험편 모델에 대한 탄소성 해석 결과.

에서 파괴가 시작되며 하중이 증가할수록 파단면이 종중심선 아래로 확대되고 하중을 직접받는 200번 요소에서는 압축파괴가 일어났다. 중심부에서의 균열발전상태를 살펴보면 취약요소인 35번 요소에서 파괴가 일어났으며 상대적으로 낮은 강도값을 가지는 요소로 파괴가 진행되어 대체로 종중심선을 따라 최종파단이 이루어짐을 볼 수 있다. 최종파단강도는 인장강도 대표치보다 약 1.14배 크게 나타났으며 이는 실험결과와 부합하는 것으로 생각할 수 있다.

실제 실험 과정에서는 가압판과 시험편이 한 점에서만 접촉되는 것이 아니라 면 접촉을 가지게 된다. 본 해석에서는 이러한 면 접촉을 3절점에서 하중이 가해지는 것으로 가정하여 해석하였으며 그 결과가 그림 19에 있다. 대체로 일점하중과 비슷한 파괴양상을 보여주고 있는데, 압축파괴가 일어난 요소가 200, 202번 요소이며 종중심선의 이웃으로 파괴가 확대됨을 알 수 있다.

그림 20은 그림 18의 경우에 비하여 하중속도가 3배 증가할 때의 파괴양상을 보여주고 있다. 파괴양상은 하중속도가 느린 경우와 대체로 비슷하게 나타나지만 최종파단강도는 증가하여 하중속도가 증가할수록 파단강도가 증가함을 알 수 있다.

3.2.4 4점 굴곡시험

그림 21은 4점 굴곡시험편의 수치해석 결과이다. 모델

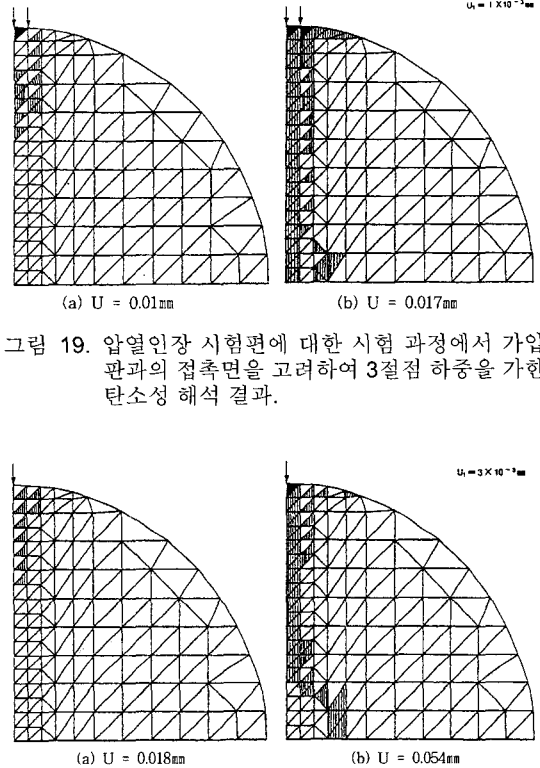


그림 19. 압열인장 시험편에 대한 시험 과정에서 가압판과의 접촉면을 고려하여 3절점 하중을 가한 탄소성 해석 결과.

그림 20. 그림 18의 변위속도보다 3배 빠른 속도로 해석한 결과.

상단부의 취약요소인 2번, 61번, 122번, 141번 요소에서 파괴가 시작되어 이 중 상대적으로 약한 요소들이 밀집한 61번 요소 주위에서 파괴가 발전하였다.

그림 22는 그림 21의 경우에 비하여 하중속도가 3배로 증가할 때의 수치해석 결과이다. 하중속도가 느린 경우에 비하여 파괴가 광역적으로 발생하면서 파단강도가 증가하였음을 알 수 있다.

4. 경계요소법에 의한 현지 암반 변형계수의 산정 및 암반거동 해석

지하 대공동 굴착, 광주회수작업 등 대규모 지하구조물의 구축 및 변경으로 유기되는 암반응력과 변위를 해석함에 있어, 현지변형계수를 산정하여 적용함이 바람직하다. 종래에는 탄성계수를 실험실에서 구하여 해석에 적용함으로써 최종적 해석결과의 정도(精度)에 의문점을 남겼다. 본 연구에서는 일본의 야나하라(柵原) 광산에서 실제로 수년간 채굴의 진행에 따른 광주의 변위를 측정한

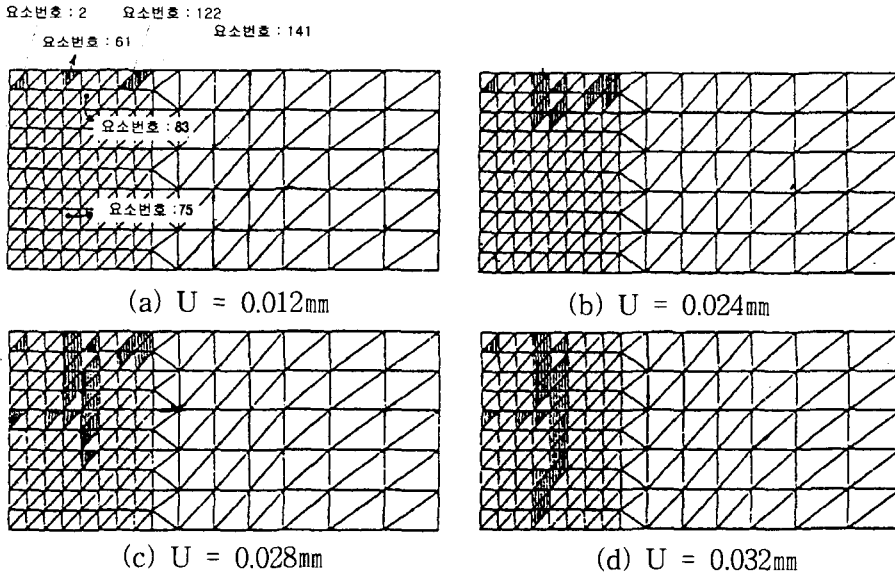


그림 21. 4점 굴곡시험편 모델에 대한 탄소성 해석 결과.

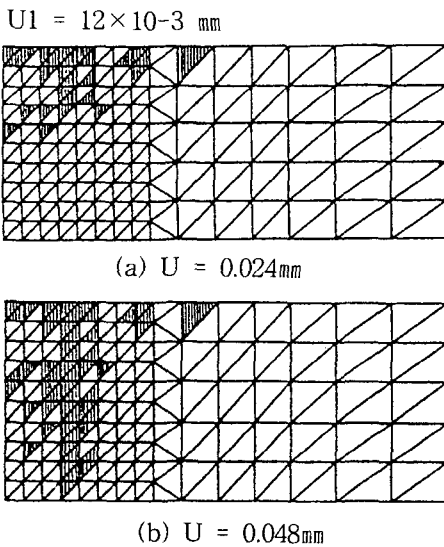


그림 22. 그림 21의 변위속도보다 3배 빠른 속도로 해석한 경우의 해석결과.

자료를 이용하여, 그 변위를 일으키는데 역할한 변형계수의 산정법을 제시하였다. 따라서 여기서 산정된 변형계수는 실험실에서 구한 탄성계수와는 차이가 있는 것으로, 현지압반의 여러형태의 취약개소를 포함하는 거시적 관점에서 압반고유의 특성은 물론, 지질학적, 지하구조물의 기하학적 특성 등으로 인한 총체적 변형계수의 성격을

갖는다. 여기서 상기의 특성들로 인한 압반의 비탄성적 성질을 최소화 또는 상쇄화하여 대상압반을 거시적으로 탄성체로 가정할 때 상기의 변형계수는 거시적 압반의 탄성계수로도 생각할 수 있다.

변형계수의 산정과정에서 경계요소법을 적용하여 수치 해석을 실시하였다. 경계요소법중에 변위불연속법은 편평 대공동주위의 응력, 변형해석에 적합한 방법으로 이 해석법에 의하여 광주회수에 따른 공동주위의 응력, 변형해석을 실시해서, 해석결과와 실측변위량과를 비교검토함으로써 변형계수를 산정하고 이렇게 산정된 변형계수를 적용하여 광주회수에 따른 압반거동을 해석하였다. 적용된 이론과 알고리즘은 Plewman 등(1969)과 Crouch(1973)의 연구를 참조하기 바란다.

4.1 판상광체의 채굴례

4.1.1 변위에 대한 수치해석치와 현지측정치로부터의 변형계수의 산정

실제 광산(日本の 柵原鑛山)에서 광주회수에 따른 광역 압반의 변형거동을 해석하고 변형계수를 산정하였다. 그림 23은 중요광체의 평면도를 단순화해서 요소분할하여 광주회수계획을 6단계로 표시한 것이다. 점선으로 연결된 원형, 3각형, 4각형, 십자형 및 X형의 표시는 수위계로 현지에서 실제의 변위를 측정할 위치를 표시한다. 그림 24는 1977년 부터 1983년까지 7년간 수위계에 의하여

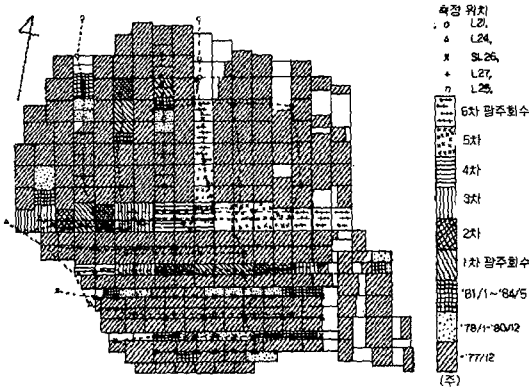


그림 23. 광주회수 순서와 수준계에 의한 변위측정위치 및 수치해석을 위하여 요소 분할한 광역채광 영역.

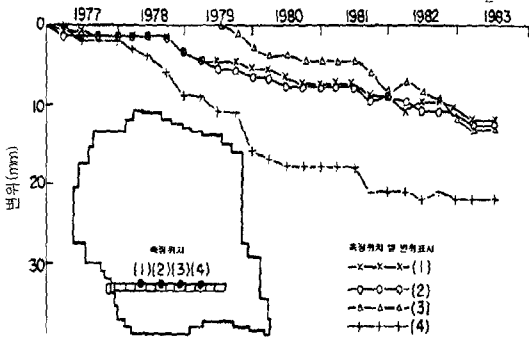
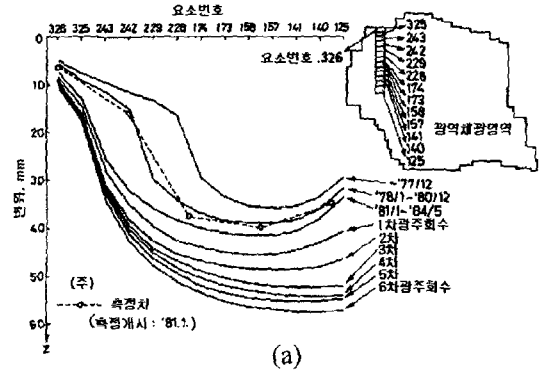


그림 24. 수준계에 의하여 측정된 변위의 예.

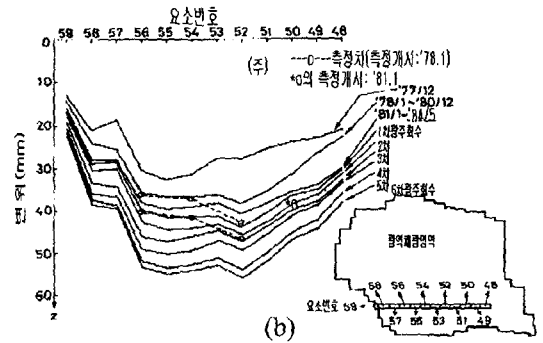
현지변위를 측정된 결과의 일례를 표시한 것이다.

그림 25는 경계요소법중의 변위불연속법에 의하여 수치해석한 변위량들이다. 중요한 입력자료로서 광체와 암반의 탄성계수를 각각 3.0×10^5 , $4.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 그리고 Poisson 비를 각각 0.20, 0.25로 하고 수직방향의 초기응력을 143 kg/cm^2 로 하였다(平松良雄 등, 1981). 실선은 경계요소법에 의한 변위량의 해석치이고 점선으로 연결된 공표는 수준계에 의한 측정치이다.

그림 25(a)는 북부광구의 21레벨에서 좌측부분을 남북 방향으로 측정한 변위량과 해석치를 비교한 것이다. 광구의 북부에서 실측치에 해석치를 부합시키기 위해서는 요소번호 326번과 242번을 예외로 취급한다면 입력자료의 Young 률을 약 2배로 증가시켜야 함을 알 수 있다. 그림 25(b)는 남부광구의 24레벨에서 중앙부를 동서방향으로 측정한 변위량과 해석치를 비교한 것이다. 광구의 남부에서 실측치에 해석치를 부합시키기 위해서는 요소번호



(a)



(b)

그림 25. 측정된 변위와 수치해석한 변위와의 비교.

219번을 예외로 취급한다면 입력자료의 Young 률을 약 1/2~2/3로 감소시켜야 함을 알 수 있다. 따라서 남북 및 동서방향으로 각각 약 400 m 규모의 광구에 대하여 광주회수에 따른 암반거동을 해석함에 있어 광체의 변형계수를 광구북부에서는 약 $6.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 남부에서는 약 $1.5 \sim 2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 로 함이 타당할 것으로 생각된다.

4.1.2 광주회수에 따라 예상되는 암반거동에 관한 해석과 고찰

전술한 방법으로 산정된 변형계수를 적용하여 6단계의 광주회수에 따라 예상되는 응력집중 및 변형률 에너지 관계를 경계요소법에 의해서 수치해석을 실시하여 검토하였다.

그림 26은 광주회수에 따라 영구광주에 예상되는 응력집중관계를 해석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 특히 영구광주 314번과 315번의 경우는 제5단계의 광주회수시에, 그리고 313번의 경우는 제6단계의 광주회수시에 응력집중이 크게 일어남을 알 수 있다. 그림 26의 좌하부의 삽화는 영구광주 324번에 대해서 광주회수에 따른 응력의 집중 및 방출관계를 나타낸 것이다. 1978년 1월부터 1980년 12월까지 채굴할 과정에서 응력

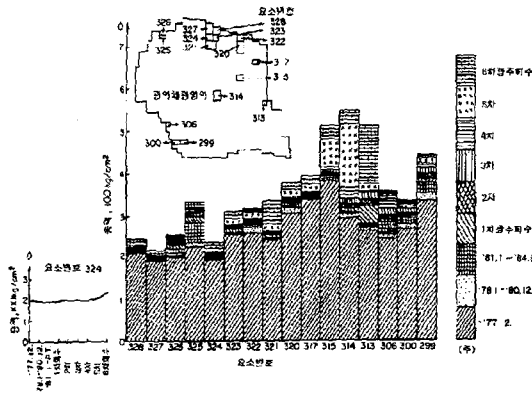


그림 26. 광주회수과정에서 영구 광주에 일어나는 응력 집중현상.

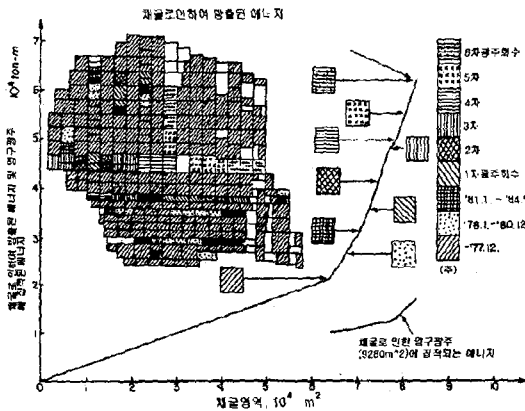


그림 27. 광주회수과정에서 회수된 부분으로부터 방출되는 변형률 에너지와 영구광주에 집중되는 변형률 에너지.

은 다소 방출하였으며 4단계 광주회수까지는 응력집중도에 거의 변화가 없고, 5단계에서 응력은 집중되기 시작하여 6단계에서는 응력이 비교적 크게 집중되는 현상을 나타내고 있다. 이러한 응력의 집중, 방출현상은 그림 23을 참조하여 채굴진행에 따른 채굴면적의 기하학적구조를 조사 검토하면 그 원인을 알 수 있다.

그림 27은 광주회수에 따른 변형률에너지의 집중 및 방출관계를 해석한 결과이다. 그림에서 방출된 총 변형률 에너지로부터 영구광주에 집중된 변형률에너지를 제외한 나머지는 대부분 모양으로 전달된 것으로 생각할 수 있다. 특히 5, 6단계의 광주회수시에는 영구광주에 변형률 에너지가 갑자기 크게 집중되고 있으므로 이들 단계에서는 안전채굴에 특별한 대책이 마련되어야 할 것이다.

5. 결 론

암석의 변형, 파괴특성을 고려한 탄소성해석법, 조압광물입자 강도의 불균일성을 고려한 탄소성해석, 경계요소법에 의한 현지 압반 변형계수의 산정 및 압반 거동해석을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 암석의 최대하중 이후의 변형거동은 다음과 같은 수식으로 표시할 수 있다.

$$Y_0 = Y_0^* \exp \left\{ -\beta \left(\epsilon_1 - \epsilon_3 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2G} \right)^{\lambda + \mu \sigma_1} \right\}$$

(2) 인장강도가 요소별로 불균일한 경우의 탄소성해석에 있어, 단순인장시험에서는 취약요소가 밀집한 곳에서 인장력 방향에 직각 방향으로, 압열인장시험에서는 종종 심선을 따라 하중방향으로, 4점 굴곡 시험에서는 취약요소가 밀집된 곳에서 하중방향으로 인장응력에 의한 분리 파괴가 일어났다.

(3) 변위증분량, 즉 하중속도가 증가할수록 위의 3시험법에서 모두 파괴양상은 보다 광역적으로 발전하면서 최종 파단 강도는 높게 나타났다.

(4) 단순인장시험, 압열인장시험, 4점 굴곡시험의 순으로 탄소성 해석에 의한 최종 파단강도는 증가하였다.

(5) 수준계에 의한 현지 변위량의 측정치와 경계요소법에 의한 수치 해석치를 비교, 검토함으로써 현지 변형계수를 역산하였다.

(6) 경계요소법에 의하여 광주회수에 따라 영구광주에 일어나는 응력집중을 해석하여 안전채굴의 감시체계를 수립하였다.

참 고 문 헌

1. 이회근, 1977, 암석의 변형·파괴특성을 고려한 탄소성 해석(I), 대한광산학회지, 14, 4, 300-316.
2. 이회근, 1978, 암석의 변형·파괴특성을 고려한 탄소성 해석(II), 대한광산학회지, 15, 2, 120-132.
3. 이회근, 1979, 암석의 시험조건에 따른 변형·파괴거동과 최대하중 이후의 거동의 수식표시에 관한 기초적 연구, 대한광산학회지, 16, 2, 142-151.
4. 이회근, 1981, 취성재료의 인장파괴특성을 고려한 탄소성 해석(제1보 및 제2보), 대한광산학회지, 17, 4, 198-207 및 18, 1, 9-17.
5. 양형식, 이회근, 1981, 암석강도의 불균일성과 no tension 특성을 고려한 탄소성 해석(제1보) - 수치해석법의 이론적 고찰과 단축인장시험에의 적용성 검토, 대한광산학회지, 18, 4, 210-218.
6. 이회근, 1982, 조압광물입자의 강도가 상이한 암석시험

- 편의 변형·파괴거동에 관한 수치해석적 연구, 대한광산학회지, 19. 1, 17-26.
7. 이회근, 水田義明, 荻野正二, 佐野 修, 1984, 수압과쇄에 의한 3차원 암반응력 측정법 및 편평대공동천반의 탄성변위해석, 대한광산학회지, 21. 4, 316-325.
 8. 이회근, 1986, 경계요소법에 의한 현지암반 탄성계수의 산정 및 암반거동해석에 관한 연구, 대한광산학회지, 23. 3, 161-171.
 9. 양형식, 이회근, 1987, 변위불연속법에 의한 준 3차원 응력 및 변위해석에 관한 연구, 대한광산학회지, 24. 3, 177-185.
 10. 조병래, 김영근, 이회근, 1992, 암석의 구성입자 강도의 불균질성을 고려한 인장파괴거동의 탄소성 해석, 대한광산학회지, 29. 3, 135-146.
 11. Rummel, F. and Fairhurst, C., 1970, Determination of the Post-Failure Behavior of Brittle Rock Using a Servo-Controlled Testing Machine, Rock Mechanics, 2, 189-204.
 12. Mogi, Kiyoo, 1971, Fracture and Flow of Rocks under High Triaxial Compression, J. Geoph. Res., 76. 5, 1255-1269.
 13. Zienkiewicz, O. C., 1971, The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, London, 369-390.
 14. Peng, S.S., 1973, Time-Dependent Aspects of Rock Behavior as Measured by a Servo controlled Hydraulic Testing Machine, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 10, 235-246.
 15. Stagg, K.G. and Zienkiewicz, O.C., 1975, Rock Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, London, 99-124.
 16. Crouch, S.L. and Starfield, A.M., 1983, Boundary Element Methods in Solid Mechanics, George Allen & Unwin, London.
 17. 平松良雄, 李喜根, 岡行俊, 1977, 單軸引張および壓縮試験下の岩石の變形舉動, 日本鑛業會誌, 93. 1078, 945-950.
 18. 水田義明, 李喜根, 岡行俊, 平松良雄, 荻野正二, 1978, 地下空洞のまわりの岩盤の新しい彈塑性 解析方法の研究, 日本鑛業會誌, 94. 1081, 151-156.
 19. 平松良雄, 青島輝夫, 龜岡美友, 1981, 柵原鑛山での 2次採掘に伴ら岩盤の變形・應力の測定, 日本鑛業會誌, 97. 1121, 37-42.

逸巖 李喜根 教授 略歷



<경력>

- 1935년 5월 11일 전라북도 김제군 금구면 출생
- 1955년-1970년 서울대학교 공과대학 광산학과 (공학사)
- 1958년-1967년 육군 학적보유병, 금구고등공민학교 교사, 육군공병 장교 복무
- 1970년-1971년 호남탄좌개발주식회사 갱내감독 근무
- 1971년-1973년 서울대학교 대학원 자원공학과(공학석사)
- 1972년-1974년 서울대학교 자원공학과 조교
- 1974년-1977년 일본 교오또대학(京都大學) 대학원 자원공학과(공학박사)
논문 「암석의 변형거동과 지하구조물에 일어나는 두세가지 지압현상에 관한 기초적 연구」
- 1978년-1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 강사, 조교수, 부교수, 교수
- 1981년-1983년, 1993년-1995년 자원공학과 학과장
- 1997년-2000년 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 재직

<학회활동>

- 1981년-1983년 국제암반역학회 한국위원회 위원장
- 1983년-1984년 일본 야마구치대학(山口大學) 공학부 자원공학과 객원연구원
- 1985년-1995년 사단법인 대한광산학회(자원공학회) 재무·편집이사, 총무이사, 부회장 역임
- 1991년-1999년 사단법인 한국암반공학회 이사, 편집위원장, 부회장, 회장 역임
- 1995년-1997년 제1회 아시아지역 암반역학 심포지엄 (1st ARMS) 조직위원장

<학술활동>

- 「터널 및 지하공간 굴착공학」, 「응용암석역학」 등 총 6권 저서 발간
 「우리나라의 국립대학 및 광산학과의 발원, 연맥과 서울대학교 자원공학과」 등 2권 집필중
 국내, 외 정기학술지 논문 97편, 학술회의지에 61편 발표

<지도실적>

30여년간 교육, 박사 16명, 석사 46명 배출

<시상>

- 1988년 4월 사단법인 한국자원공학회 학술상
- 1992년 4월 한국과학기술단체 총연합회 과학기술우수논문상
- 2000년 3월 사단법인 한국암반공학회 공로표창