

암석공시체의 역학적 거동 해석에 미치는 변형률게이지 위치 및 단면구속 영향에 대한 연구

A Study of the Influence of Strain Gauge Location and Contact Conditions by Loading Platens on the Mechanical Behavior of Rock Specimens

정 교 철 (Gyo Cheol Jeong)

안동대학교 지구환경과학과

요약 / ABSTRACT

LVDT에 의해 전체변형율이 측정되었고, 국부적 변형율은 변형률게이지에 의해 측정되었다. 또한 공시체에서의 응력 분포를 알기 위하여 유한요소법에 의한 축대칭 탄소성 해석을 하였다. 단면구속영향을 고려하면 $H/D=1$ 인 경우에 특히 구속영향을 크게 받는다. 또한 공시체 직경에 대한 공시체 길이가 길어질수록 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다. 공시체와 재하판과의 접촉면에서 응력 및 변위 분포는 접촉하고 있는 두 재료의 탄성계수비와 접촉면의 마찰저항에 크게 좌우된다. 즉 암석공시체에 대한 재하판의 영향은 경압에서보다 연압에서 더 현저하다. 또한 단면구속이 변형률 분포에 미치는 영향 및 치수효과는 강성이 큰 암석에서 현저하게 나타난다.

주요어 : 변형율, 탄소성, 치수효과, 단면구속

In this study, total strain was measured by LVDTs and local strains on the surface of specimens were measured by strain gauges. And axi-symmetrically elasto-plastic FEM analyses was carried out for cylindrical specimens. Considering the influence of the restraint induced by the loading platen, in the case of $H/D=1$, the strain distribution on the side of a specimen is obviously affected by the condition of platen contact. Furthermore, it is clear that the larger H/D ratio becomes, the smaller the influence to the strain distribution is. For the smooth contact condition, the strain on the side is not influenced by the stiffness of the specimen, the shape and the scale effect, the strain distribution coincides with

the nominal total strain. Whereas, in the case of rough contact condition, the strain distribution is remarkably affected. It is made clear that strain responses of hard rock specimens may more sensitive than these of soft rock specimens as a results of interaction between loading platens and specimen and the uniaxial strength of specimens may strongly depends on this interaction and stress-strain relation is affected by the contact condition.

Key Words : Strain, Elasto-plastic, Scale Effect, Restraint

서 론

최근 방사성폐기물 지하동굴처분, 지반내에서의 산업 및 생활쓰레기 처분, 산업화에 따른 대규모 구조물 설치등의 지하공간 개발은 21세기 국토의 효율적인 이용을 위하여 우리나라 뿐만아니라 전세계적인 과제라 할 수 있다. 이들은 대부분 암반을 대상으로 하고 있기 때문에, 암반공학에 있어서 보다 정확한 해석을 위하여 치수효과(scale effect) (Bieniawski, 1968; Hudson et al., 1971; Lundborg, 1967)등 - 이들 연구는 대부분 파괴전 탄성거동보다는 파괴후 거동에 대하여 고려하였음 - 암반을 구성하고 있는 암석재료의 정량적 평가에 대한 연구가 국외에서는 미국, 일본, 스웨덴 등을 비롯한 선진국에서 활발히 수행되고 있다. 특히 우리나라 지반은 대부분 토층이 얇아 대부분의 지하 구조물이 암반에 위치하고 있음에도 불구하고 암석재료에 대한 보다 정확한 특성 파악 - 특히 재하판과 공시체와의 강성비에 대한 영향 - 을 위한 연구가 아직 미미한 상태라 하겠다.

암반역학에 있어서 암석재료의 강도정수를 측정하기 위해 사용되는 가장 일반적인 시험은 일축압축시험, 삼축압축시험, 직·간접 인장시험 및 직접전단시험 등을 들 수 있다. 이들 시험에 있어서는 응력, 변형을 성분의 방향은 재하 성분의 방향과 일치한다는 것과 이들 성분들이 암석공시체 내에 일정하게 분포한다는 것을 기본적인 가정으로 하고 있다.

암반의 강도정수를 결정하기 위해서는 일반적으로 현장에서 신선한 노두로부터 암석시료를 채취하고, 실내에서 공시체를 제작한 다음 일축 내지는 삼축압축시험을 실시하게 된다. 이때 공시체를 하나의 요소로 보아 그 강도 및 변형정수는 공시체 전체의 평균 응력-변형을 관계에서 결정된다. 그러

나 실제로는 공시체의 단면경계에서의 마찰영향 때문에 공시체내 변형을 분포는 일정하지 않다. Pickett(1944), Balla(1960) 및 Peng(1971) 등에 의하면 재하판과 암석공시체 사이 접촉면에서의 경계영향 때문에 응력과 변형을 어느 것도 암석공시체 내에 일정하게 분포하지 않는다고 하였으나 접촉면에서 재하판과 암석공시체와의 강성비에 대한 영향을 가지고 정량적으로 제시하지는 못하였다. 특히 최근 Natau et al.(1995)은 재하판과 암석공시체 사이에서의 접촉상태에 의한 영향보다 암석내부의 결합에 의한 영향이 더 크다고 하였으나 이것은 불연속면을 포함하는 이방성암반자체를 대상으로 하였기 때문으로 생각된다. 이들 공시체의 크기는 일반적으로 탄성계수를 구하기 위하여 실내시험용으로 사용되는 미소결합을 포함하는 신선한 NX코아 크기와는 큰 차이가 있다고 생각된다.

본 연구의 목적은 암석재료에 대한 실내시험과 수치해석을 통하여 측정된 변형율이 시험공시체내 어느정도 분포하고 있는가를 파악함과 동시에 재하판과의 강성비에 의한 거동, 즉 물성이 다른 암석공시체의 역학적 거동에 미치는 변형을 및 단면구속영향에 대한 고찰에 목적이 있다.

실 내 시 험

암석공시체에서의 위치에 따른 축변형을 변화를 검토하기 위하여 우선 암석의 각주공시체에서 횡적 및 종적 변형율게이지 위치변화에 따른 변형율을 측정하여 종·횡위치에 따른 변형율 차이를 확인한 다음 원주공시체를 제작하여 일축압축시험을 실시하였다. 이때 LVDT(Linear Variable Differential Transducer)를 이용하여 공시체 전체의 축변형율을 측정함과 동시에 암석공시체의 양단부근과 중앙부에 변형율게이지를 부착하여, 공시체 각부분의 축

변형율을 측정하였다. 그 다음 공시체와 재하판을 모델화 하여 유한요소법에 의한 축대칭 탄·소성해석을 하였다. 그 결과로부터 재하판과 공시체의 강성비, 탄성계수 및 변형율의 상관관계를 고찰하였다.

각주 공시체

각주 공시체에서의 변형율 측정은 재하판과 공시체와의 탄성계수 차에 의한 응력 및 변위 영향을 고찰하기 위한 시험을 실시하기 전에 공시체 축방향 및 횡방향에서의 변형률게이지 위치에 따른 변형율 차를 시험하였다. 이 시험은 본 연구의 목적인 축방향으로의 변형률게이지 위치에 의한 단면구속 영향을 검토하기 위하여 우선 횡방향에서의 변형율 차를 시험한 것이다. 이를 위해 공시체는 비교적 등방성인 화강암을 이용하였다. 공시체의 크기는 $5\text{mm} \times 20\text{mm} \times 40\text{mm}$ 로서 단면의 평행 및 직각정도는 $4/1000\text{mm}$ 이내로, 접촉면은 1000mesh 이상으로 가공·연마하였다(日本地科學社에서 가공 및 연마하였음). 공시체 측면에서의 축변형율 분포는 길이 3mm 의 변형률게이지를 Fig. 1과 같이 상단부근 2개, 중앙부근 3개 및 하단부근 2개 총 7개를 부착하여 측정되었다. 재하는 소형공시체에 맞게 새로이 제작한 시험기에 수동식 유압펌프를 부착하여 시험하였다(Jeong et al., 1994).

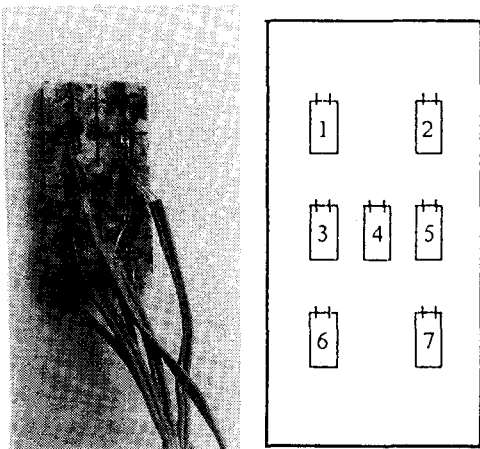


Fig. 1. Locations of strain gauges on prism specimen.

원주 공시체

암석공시체의 크기는 직경 3.5cm , 높이 7.0cm 의 원주공시체로 제작하였다. 공시체의 단면은 평행도의 오차가 $4/1000\text{mm}$ 이하가 되도록 하였고, 접촉면은 800mesh 이상으로 가공하였다. 시험장치는 $3.12 \times 10^3 \text{KN/mm}$ 의 강성프레임을 갖는 최대 980KN으로 재하가능한 고강성압축시험기를 이용하였고, 재하속도는 0.1mm/min 로 하였다. 하중은 재하판(loading platen)(측정가능한 최대하중 490KN, 비선형성오차 0.07%)으로, 공시체 전체의 축변형율은 LVDT(stroke 길이 10mm , 비선형성오차 0.1%) 2개를 사용하여 Fig. 2와 같이 측정하였다. 공시체 측면에서의 축변형율 분포는 길이 6mm 의 변형률게이지를 공시체 상단부근 2개, 중앙부근 2개, 하단부근 2개 총 6개를 부착하여 측정하였다. 모든 측정기기는 디지털 변형율 측정기(TDS-302)의 터미널에 연결하고, 퍼스널컴퓨터에 의해 제어하였다. 자동계측된 시험 데이터는 컴퓨터의 하드디스크에 저장하였다.

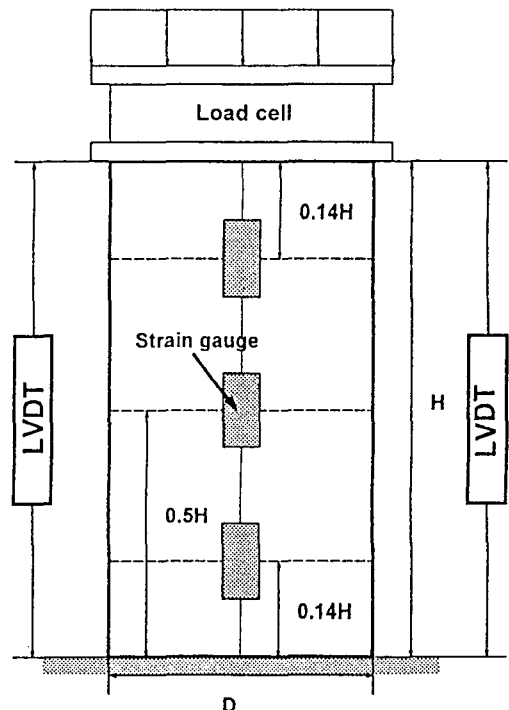


Fig. 2. Schematic view of cylindrical specimen.

결과 및 토의

실내시험

각주공시체에서 응력-변형을 관계는 Fig. 3과 같다. 변형률게이지 번호 1, 2는 공시체의 하단부근에, 변형률게이지 번호 3, 4, 5는 중앙부근에, 6, 7은 공시체 상단부근에 위치한다. 축응력 방향은 Fig. 1의 공시체를 횡으로 고정시켜 번호 6, 7번쪽에 축응력을 주어 파괴과정을 현미경으로 기록할 수 있도록 고안된 시험기이다. 시험 결과 모든 위치에서 탄성거동을 나타내면서 변형률게이지 부착 위치가 종적으로 다를때는 변형률 차이가 현저하게 나타난다. 공시체 양단 부근에서의 변형률은 재하판에서의 구속효과 때문에 유사하게 나타나야 하나 본 시험에서의 변형률차는 공시체 특성상 변형률게이지 부착위치에 따른 광물 및 그 경계부에서의 미소결합등의 효과 및 하단 축응력에 대한 응력 전달에 있어서의 구속력 차이에 의한 것으로 생각된다. 반면 횡적으로 부착위치가 다를때는 변형률에서 약간의 차이를 보이나 거의 같게 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 변형률게이지 부착위치가 공시체 재하축방향 즉 종적위치 변화만을 가질 때의 응력, 변형을 및 재하판과의 마찰 특성을 고찰하였다.

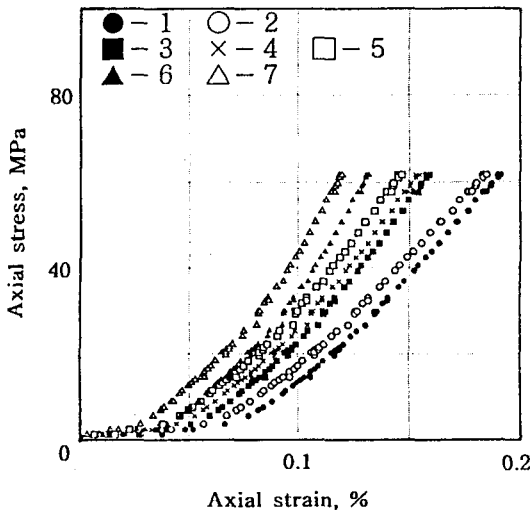


Fig. 3. Stress-strain relation of prism specimen.

원주공시체의 응력-변형을 관계는 Fig. 4와 같다. 실험결과는 일축파괴직전까지의 응력-변형을 관계로서 탄성거동을 나타내고 있다. LVDT와 변형률게이지에 의한 측정결과는 LVDT에 의한 변형률이 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 측정결과에서 보면 공시체 중앙부근의 축변형률 크기가 상단부근, 하단부근의 축변형률에 비해 약 1.2 배 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이것은 공시체 상단부 및 하단부가 재하판과의 강성차 때문에 수평방향의 변형이 구속되어 일어나는 것으로 Brady et al.(1985)의 결과와 일치한다. 이에 비해 공시체 중앙부에서는 단면구속의 영향을 적게 받기 때문에 LVDT로 측정된 전체변형률과 약간의 차는 보이지만 근사하게 나타나고 있다.

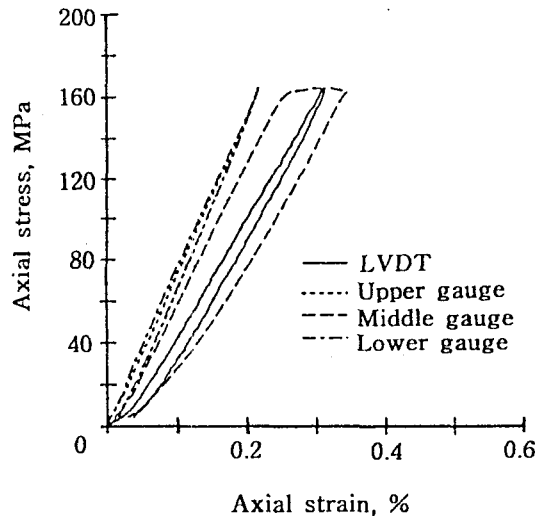


Fig. 4. Stress-strain relation of cylindrical specimen.

공시체 상단부, 중앙부 및 하단부의 탄성계수와 LVDT에 의한 탄성계수를 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. LVDT에 의한 탄성계수 E_t 는 공시체 중앙부에 부착한 변형률게이지에 의한 탄성계수 E_m 과 가장 근사하게 나타나고 있다. 이것 또한 공시체 중앙부에서의 변형은 단면구속의 영향이 적기 때문에 거의 순수한 일축응력상태로 되어 전체변형률로부터 계산한 결보기 탄성계수와 가장 근사하게 나

타나는 것으로 생각된다. 또한 공시체 중앙부에서의 변형률 크기는 LVDT에 의한 변형률에 반드시 일치하지는 않았다. 이 사실은 LVDT에 의해 공시체 전체의 변형률을 측정하면 공시체 단면 부근에서 일어나는 변형률의 혼란을 흡수하여 강성이 감소하기 때문에 일어나는 것으로 생각된다. 또한 암석공시체는 균질, 등방성이 아닐 뿐만아니라 LVDT와 변형률계이지 구조상의 정밀도차 때문도 있다고 생각된다.

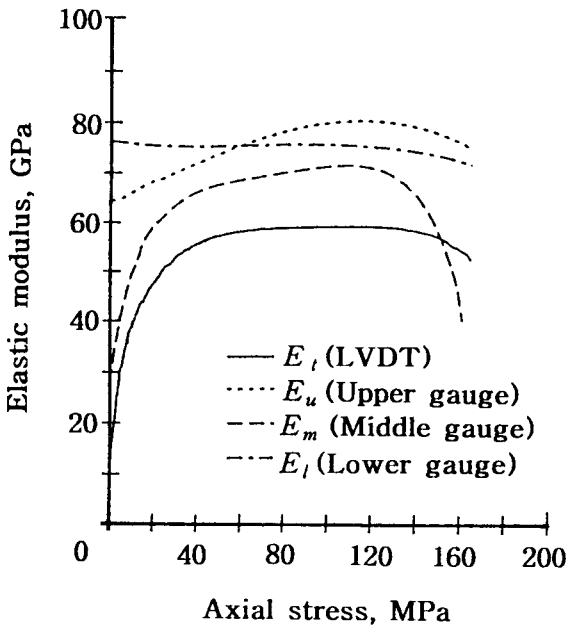


Fig. 5. Axial stress-elastic modulus relation.

수치해석

실내시험에 의해 얻어지는 암석재료 정수(定數)와 변형은 암석 내부에 분포·존재하는 미소구조의 이방성, 공시체 자체 형상의 정밀성 및 공시체와 재하판과의 접촉상태등에 크게 영향을 받는다. 공시체와 재하판과의 접촉상태에 의한 영향보다는 암석자체의 이방성과 형상문제에 의한 영향이 크기 때문에 지금까지 이방성 및 형상문제에 대한 많은 연구가 우선적으로 수행되어 왔다. 그러나 암석공시체의 강도와 파괴는 접촉면에서의 경계치 문제로 나타나는 접촉상태에 의해 영향을 받는다는 것은 Balla(1960), Pickett(1944)등에 의한 연구에서도 보

여주듯이 분명한 사실이다. 그러나 이들은 재하판과 공시체 사이 접촉면에서의 밀착상태 및 탄성계수비에 따른 영향은 언급하지 않았고 또한 접촉면과 중앙부와의 차이도 제시하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 이들 영향을 정량적으로 명확히 하기 위하여 축대칭 탄소성 유한요소법에 의해 해석하였다 (Fig. 6).

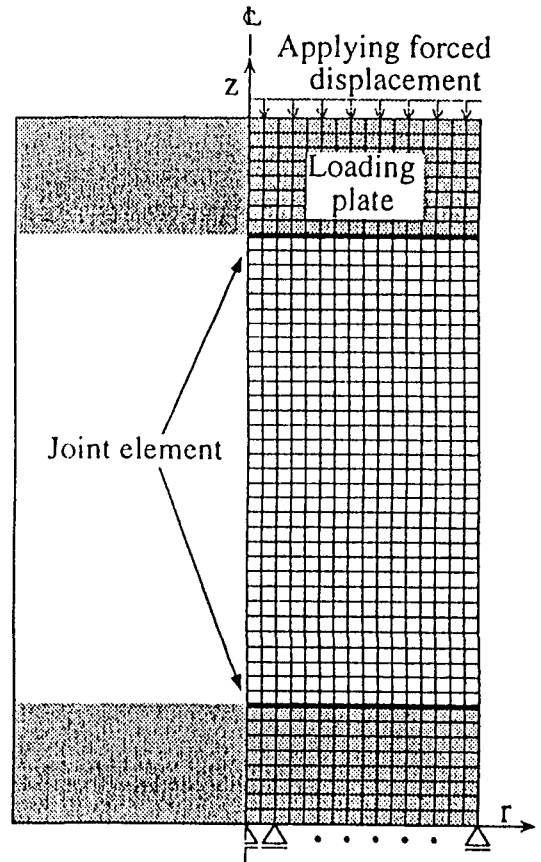


Fig. 6. Mesh for axi-symmetric FEM.

암석공시체 단면과 시험기 재하판과의 단면구속의 영향은 재하판 강성과 시험공시체의 강성 및 재하판과 공시체 단면과의 마찰에 의존한다. 재하판과 공시체 단면사이의 접촉상태를 완전히 알 수 없기 때문에 본 연구에서는 재하판과 공시체 단면이 완전히 밀착되어 공시체의 단면 횡변위가 구속된 상태(rough contacted condition)와 자유로운 상태

(smooth contacted condition)로 나누어 양극단적인 경우에 대하여 해석하였다.

우선 완전히 밀착된 상태에서 재하판의 포아송비를 0.3, 암석공시체의 포아송비를 0.25로 하고, 재하판의 탄성계수를 E_P , 암석공시체의 탄성계수를 E_R 로 했을때의 E_P/E_R 을 10, 100 및 1000 등 3단계로 변화시켰다.

공시체 측면에서의 축변형률 ϵ_z 는 $E_P/E_R = 10$ 일 때 영향을 받는 범위가 가장 크게 나타나고, E_P/E_R 가 증가함에 따라 영향을 받는 범위가 작아진다. 이것은 강성이 큰 암석일수록 재하판의 구속영향을 받기 쉽다는 것을 나타내고 있다. 또한 어떤 강성비에서도 공시체 단면부근에서의 축변형률이 급격히 증가하고 있고, E_P/E_R 가 100 일때 축변형률 ϵ_z 는 공시체 중앙부에서 전체 축변형률 ϵ_t 와 거의 일치한다(Fig. 7). 이 결과로부터 공시체 중앙부에서의 축변형률은 공시체 전체 축변형률과 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

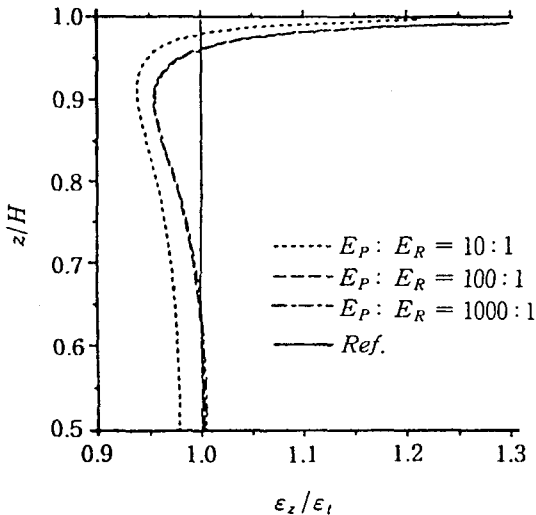


Fig. 7. Relation between ϵ_z/ϵ_t and z/H ($H/D=2.0$).

공시체 길이를 H, 공시체 직경을 D로 했을 때, D를 일정하게 하고 H만을 2, 3배로 하였을 경우

축변형률 분포를 비교하여 보면, $E_P/E_R = 100$ 일 때는 차가 거의 보이지 않지만(Fig. 8), $E_P/E_R = 10$ 의 경우에는 공시체 축변형률은 H를 2배로 하였을 때가 크게 나타난다(Fig. 9). 이것은 공시체의 강성이 클수록 변형률 분포에 영향을 주는 치수효과가 크다는 것을 알 수 있다.

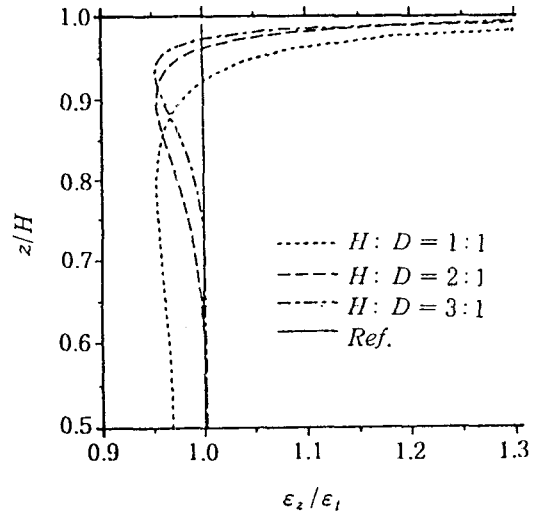


Fig. 8. Relation between ϵ_z/ϵ_t and z/H ($E_P/E_R=100$).

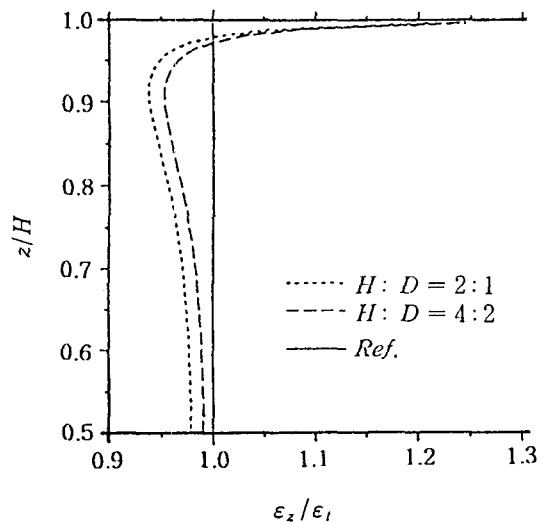


Fig. 9. Relation between ϵ_z/ϵ_t and z/H ($E_P/E_R=10$).

재하판과 공시체가 완전히 밀착된 상태에서 $E_P/E_R=10$ 의 조건하에 H/D를 변화시켰을 때의 응력-변형을 관계는 Fig. 10과 같다. H/D=1일 때가 다른 것에 비해 다소 차이를 보이고 있어서, 정확한 자료를 얻기 위해서는 H/D가 중요하게 작용한다는 것을 보여주고 있다. 이와반면 재하판에 의한 양단면의 구속이 없는 경우인 완전히 밀착되지 않은 공시체에서는 별다른 차이를 보여주지 않는다(Fig. 11). 또한 완전히 접촉된 상태에서는 변형율경화(strain-hardening)를 수반하는 소성상태로 나타나는 반면 그렇지 않은 상태에서는 전형적인 소성거동을 보이고 있다.

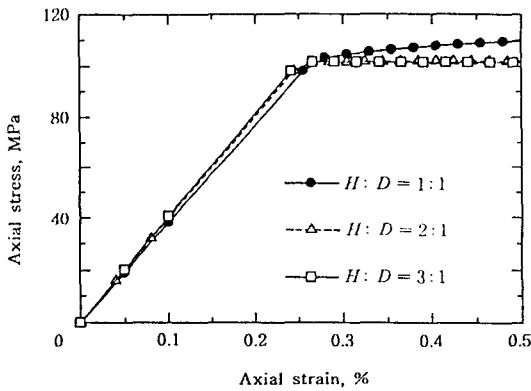


Fig. 10. Stress-strain curve for the investigating the ratio of the specimen height to its diameter ($E_P/E_R=10$: rough condition).

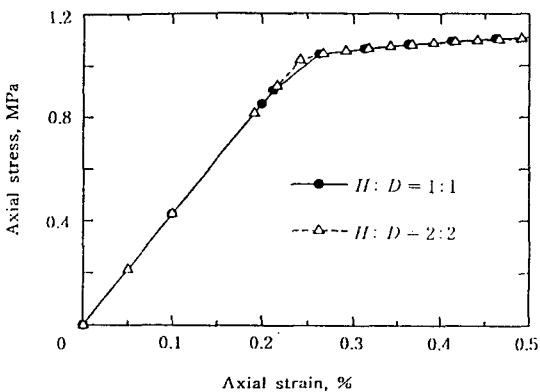


Fig. 11. Stress-strain curve for scale effect ($E_P/E_R=10$: smooth condition).

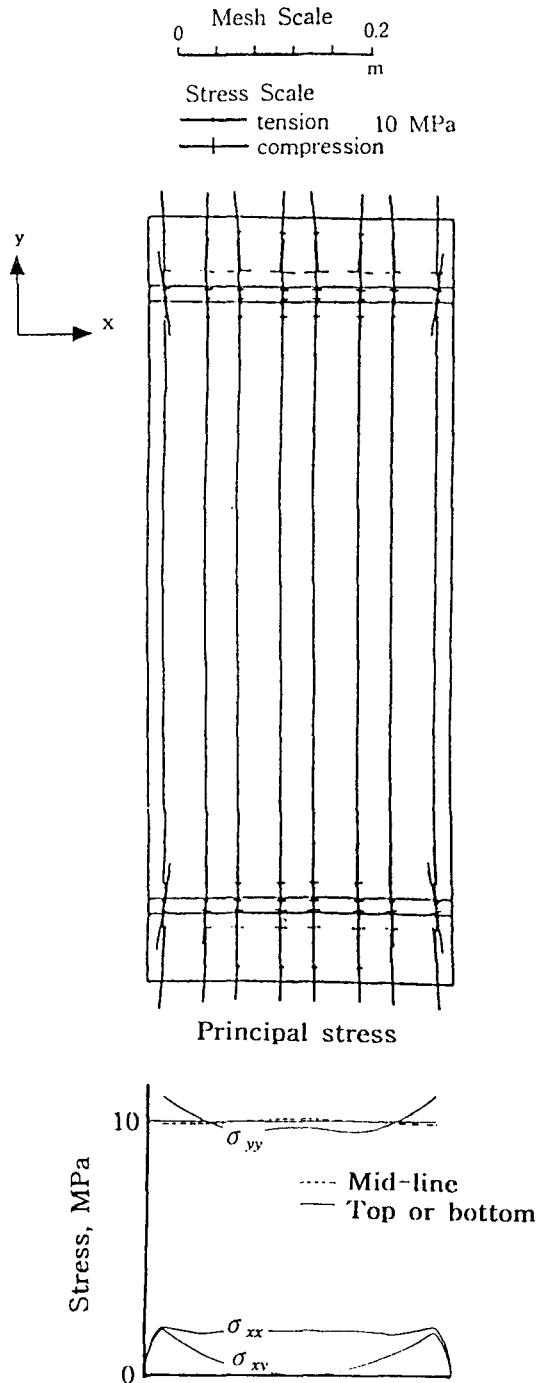


Fig. 12. Distributions of deformation and stresses in uniaxially loaded samples ($E_P/E_R=10$).

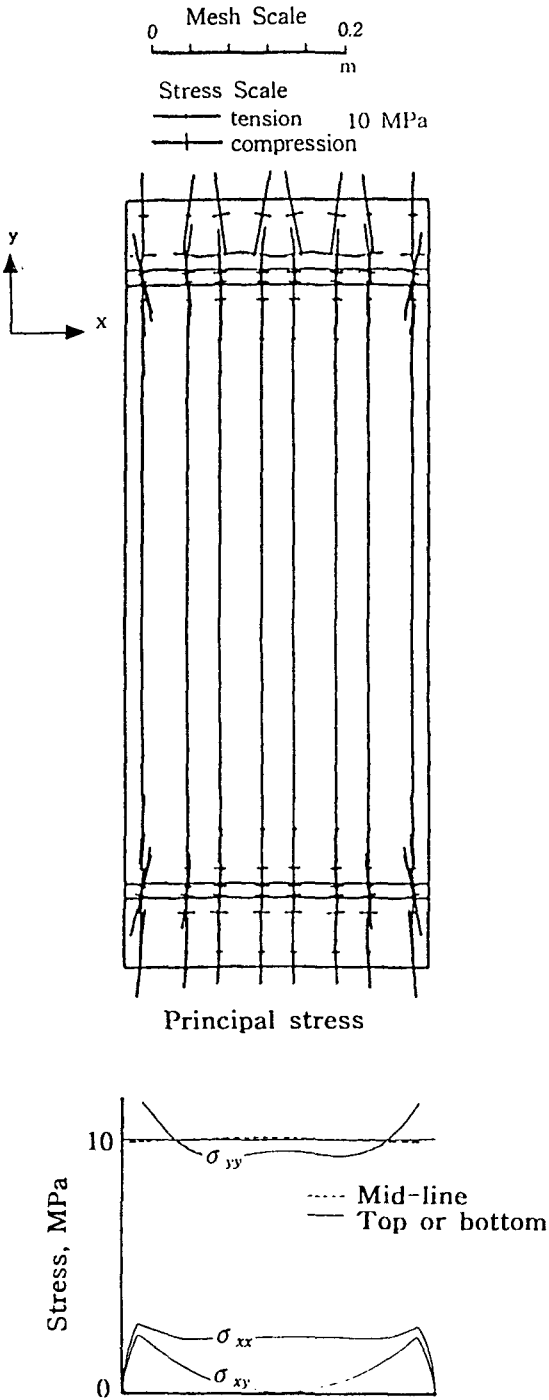


Fig. 13. Distributions of deformation and stresses in uniaxially loaded samples ($E_P/E_R=100$).

Fig. 12 및 Fig. 13은 일축압축시험에서 재하판과 공시체와의 밀착된 접촉면에서 평면응력 및 변위변화를 보여주고 있다. 평면응력에서는 압축응력과 인장응력으로 표시하였다. 재하판의 탄성계수와 공시체 탄성계수와와의 비를 10, 100으로 변화시켰을 때 응력분포와 변위는 이들 탄성계수의 비에 크게 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다. 실내 시험을 실시할 때 일반적으로 가정되는 응력장 분포는 공시체의 중앙부에서 얻어질 수 있다. 이 결과는 역시 공시체에서의 초기 항복은 재하판과 공시체의 접촉면에서의 외측부분이 특이점(singularity)으로 작용한다는 것을 의미하고 있다. 또한 재하판의 영향은 경압에서 보다는 연압에서 보다 현저하게 나타난다.

일정한 변형율로 압축을 가할 때 연질 상태에서는 공시체에서 초기항복후 갑자기 파괴되는 특성을 보여주는 반면 완전히 밀착된 상태에서는 초기항복 후 파괴가 점차적으로 진행된다는 것을 보여준다.

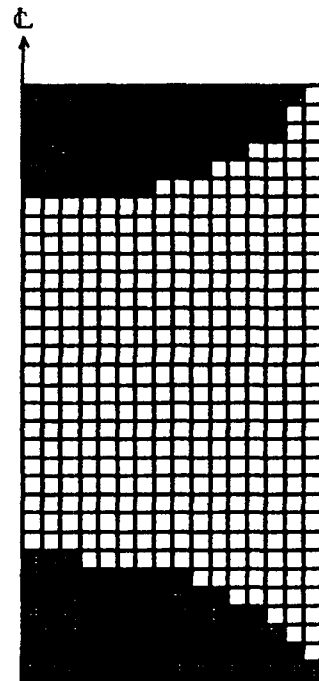


Fig. 14. Yielding zone(unshaded area) ($E_P/E_R=10$).

이는 재하판의 구속에 의한 효과 때문으로 생각된다. Fig. 14는 완전히 밀착된 상태에서 재하판 바로 아래에서의 썩기형 파괴를 나타내고 있다.

결 론

암석공시체에 대한 변형율게이지 부착위치 및 재하판과 공시체단면과의 마찰에 의한 영향을 검토하기 위해 일축압축시험과 축대칭 탄소성해석을 실시하였다. 실내시험에서는 공시체내 변형을 분포에 주목하여 공시체 전체의 변형율은 2개의 LVDT로 측정하였고, 공시체 각부의 변형율은 상단부, 중앙부, 하단부에 부착된 변형율게이지에 의해 측정되었다.

암석공시체에서 변형율게이지 부착위치에 따른 변형율의 변화와 탄성계수 E_{50} 의 비교로부터 LVDT에 의한 탄성계수가 변형율게이지에 의한 탄성계수보다 작게 측정되었다. 또한 공시체 측면에서의 탄성계수는 중앙부의 탄성계수가 가장 작고 단면구속의 영향을 가장 적게 받는다는 것을 알 수 있다.

실내시험시 마찰영향을 알기위해 암석공시체에 대한 시험기재하판의 상태를 모델화 하여, FEM에 의한 축대칭 탄소성해석을 실시하였다. 접촉면에서의 단면구속이 변형율 분포에 미치는 영향은 연암에서 보다 경암에서 현저하게 나타난다.

단면구속영향을 고려하면 $H/D=1$ 인 경우에 특히 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 $H/D=2$ 혹은 3의 경우에 있어서도 공시체 단면에 있어서 변형율 분포가 공시체의 단면구속에 영향을 받고 있지만, 공시체 직경에 대한 공시체 길이가 길어질수록 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다.

공시체와 재하판과의 접촉면에서 응력 및 변위 분포는 접촉하고 있는 두 재료의 탄성계수비와 접촉면의 마찰저항에 크게 좌우된다. 즉 암석공시체에 대한 재하판의 영향은 경암에서 보다 연암에서 보다 현저하다. 또한 단면구속이 변형율 분포에 미치는 영향 및 치수효과는 강성이 큰 암석에서 현저하게 나타난다.

사 사

저자는 실내시험과 수치해석에 많은 도움과 조언을 해준 Professor Y. Ichikawa, Dr. T. Seiki(Dept. of Geotechnical and Environmental Engineering, Nagoya University), O. Aydan(Dept. of Marine Civil Engineering, Tokai University) 그리고 N. Tokashiki(Dept. of Civil University, University of the Ryukyus)께 감사드린다. 본 연구는 1996년도 안동대학교 기성회연구보조비 지원에 의하여 수행되었다.

참 고 문 헌

- Balla, A., 1960, Stress conditions in triaxial compression, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 86, 57-84.
- Bieniawski, Z. T., 1968, The effect of specimen size on compressive strength of coal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 5, 325-335.
- Hudson, J. A., E. T. Brown and C. Fairhurst, 1971, Shape of the complete stress-strain curve for rock, Proc. 13th Symp. on Rock Mechanics, 773-795.
- Jeong, G. C., and Y. Ichikawa, 1994, An experimental study on damage propagation of intact granite, 43, 317-323.
- Lama, R. D., V. S. Votukuri and S. S. Saluja, 1992, Handbook on mechanical properties of rocks I, Trans. Tech. Publications.
- Lundborg, N., 1967, The strength-size relation of granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 4, 269-272.
- Natau, O., Fliege, O., Mutschler TH. and Stech H. -J., 1995, The triaxial tests of prismatic large scale samples of jointed rock masses in laboratory, Int. Cong. on Rock Mech. ISRM, 353-358.
- Peng, S, D., 1971, Stresses within elastic circular cylinders loaded uniaxially and triaxially, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 8, 399-432.
- Pickett, G., 1944, Application of the Fourier

정교철

method to the solution of certain boundary problems in the theory of elasticity, J. Appl. Mech., 11, 176-182.

Yuan, Z. and K. M. Chua, 1992, Exact formulation of axi-symmetric interface-element stiffness matrix, J. Geotech. Eng. ASCE, 118, 1264-1271.

정 교 철

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

760-749, 경북 안동시 송천동 388

TEL : (0571) 850 - 5753

FAX : (0571) 841 - 1627

e-mail : jeong@anu.andong.ac.kr