

3. 무결암의 역학적 성질

3.1 정하중 하에서 강도와 변형

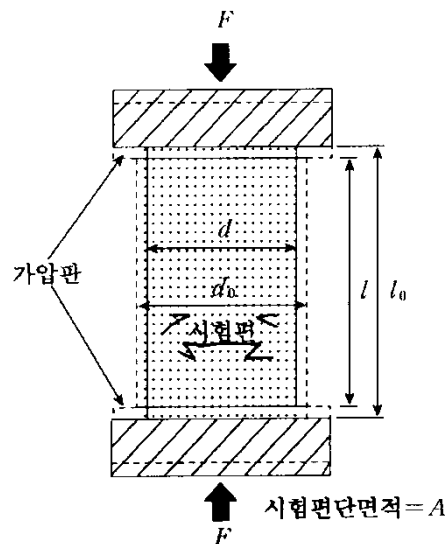
3.1.1 단축압축강도와 시험

- 정의: 시험편에 극한하중이 작용하는 시점의 축방향 수직응력

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A}$$

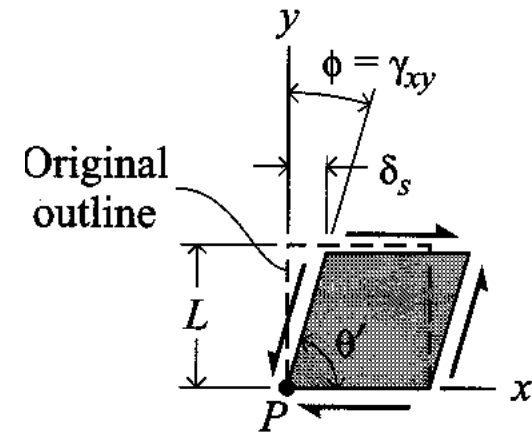
단위: Pa (N/m²), kPa (10³ Pa), MPa (10⁶ Pa), GPa (10⁹ Pa),

- 변형률 (strain) : 길이 변화율인 수직변형률 (normal strain)과 (전단응력에 의한) 직각의 변화각(라디안) 또는 그 탄젠트 값인 전단변형률 (shear strain)이 있다.



$$\epsilon_a = \frac{l_0 - l}{l_0}, \quad \epsilon_l = \frac{d_0 - d}{d_0}$$

$$\gamma_{xy} = \phi \approx \frac{\delta_s}{L}$$



3.1 정하중 하에서 강도와 변형

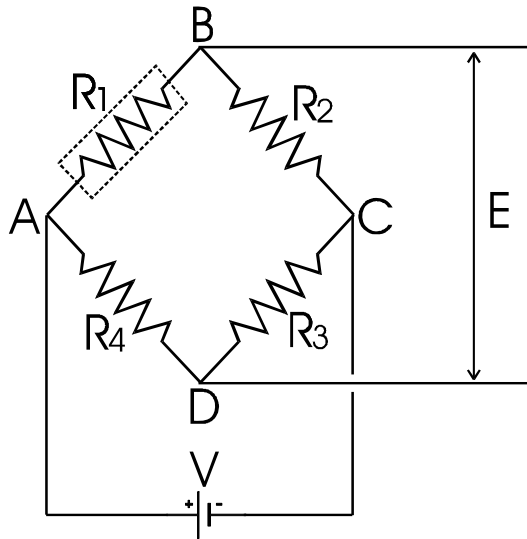
- 체적변형률(volumetric strain):체적의 변화율

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{(l_x + \Delta l_x)(l_y + \Delta l_y)(l_z + \Delta l_z) - l_x l_y l_z}{l_x l_y l_z} \approx \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

- 예제 3.1: 변형률 게이지(휘스톤브리지회로)를 통한 변형률 측정원리

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

gage factor (K): 게이지의 변형률과 저항변화율의 비



$$i_{12} = \frac{V}{2R_1 + \Delta R_1}, \quad V_1 = \frac{R_1 + \Delta R_1}{2R_1 + \Delta R_1} V$$

$$i_{34} = \frac{V}{2R_1}, \quad V_4 = \frac{R_1}{2R_1} V$$

$$E = V_1 - V_4 = \frac{\Delta R_1}{2(2R_1 + \Delta R_1)} V$$

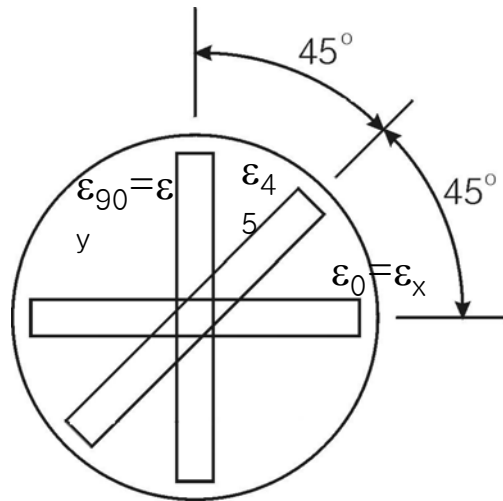
3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 예제 3.2: Rosette type strain gage를 통한 변형을 계산방법

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\rightarrow \varepsilon_{\theta} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \varepsilon_{xy} \sin 2\theta$$

$$= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta$$

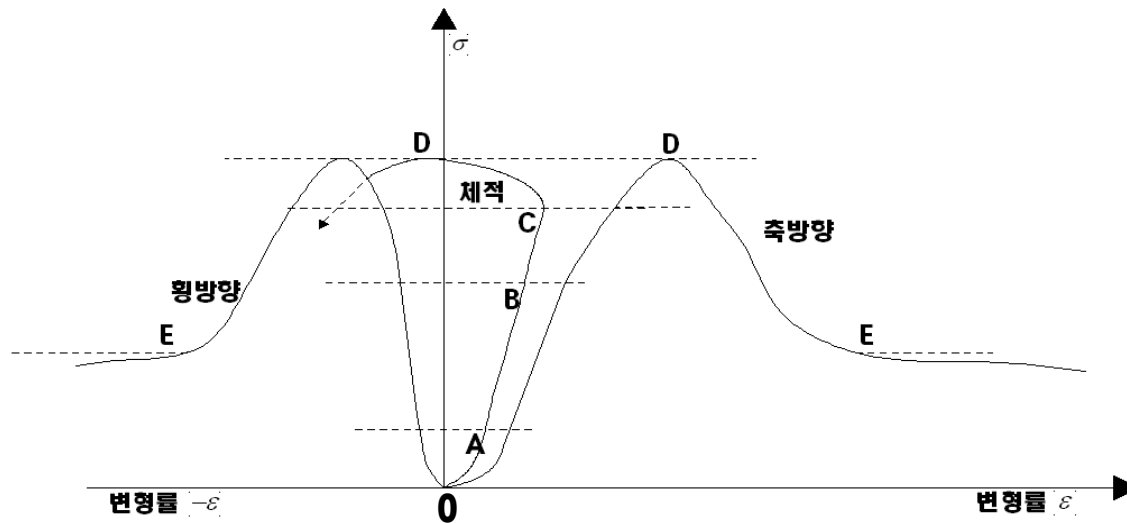


$$\varepsilon_{p1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

$$\tan 2\theta_p = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}$$

3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 응력-변형률 곡선



OA: 균열단힘

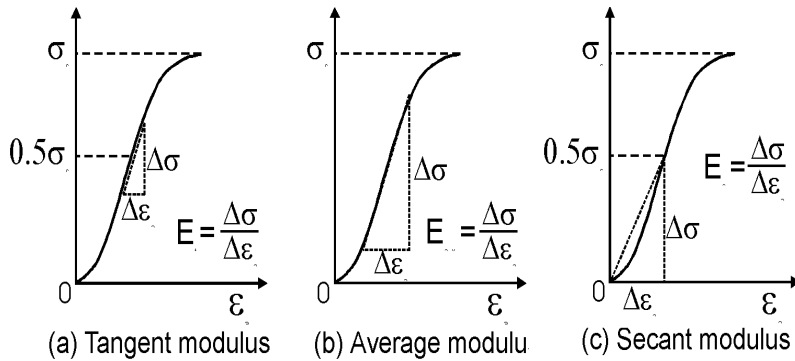
AB: 선형탄성구간, B는 강도의 약 35~40%

BC: 독립적 미세균열 발생 → 영구변형발생, C는 강도의 약 80%

CD: 균열의 연결 및 파괴면 생성, 급격한 부피팽창, D는 파괴강도로 그 이후과정의 관찰은 강성압축시험기/서보제어시험기 필요

3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 탄성정수의 계산



접선탄성계수(tangential modulus): 보통 강도의 50% 수준에서 구한 접선의 기울기 (Gpa)

평균탄성계수(average modulus): 변형률곡선의 직선구간 기울기

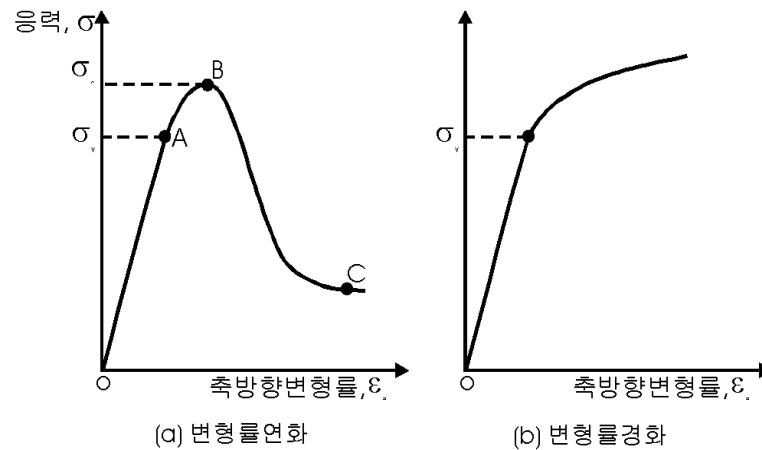
할선탄성계수(secant modulus): 원점과 (보통) 강도의 50% 점을 잇는 직선의 기울기

- 포아송비(Poisson's ratio): 단축압축 혹은 단축인장 상태에서 축방향 변형률에 대한 횡방향 변형률의 비(+, 암석은 보통 0.1~0.3)

$$\nu = -\frac{\epsilon_l}{\epsilon_a}$$

3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 취성파괴와 연성거동



A: 항복응력, B: 파괴강도, C: 잔류강도

변형률연화(strain softening): 영구변형률의 증가에 따라 시험편의 하중지지능력이 계속감소

변형률경화(strain hardening): 영구변형률의 증가에 따라 시험편의 하중지지능력이 계속증가

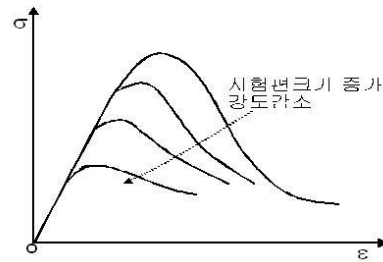
- 파괴강도이후의 응력-변형률 곡선을 관찰하기 위하여
시료보다 강성이 큰 강성하중기를 사용하거나
변형률 속도를 조정할수 있는 서보컨트롤 시험기 사용.

3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 단축압축강도에 영향을 미치는 요소

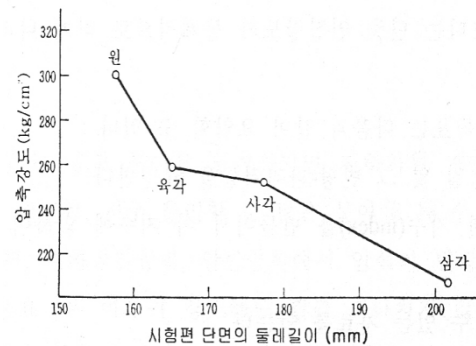
① 크기효과

시험편의 크기가 커질수록 역학적 결함이 많아지므로 압축강도가 작아진다. 이때 시험편의 크기에 관계없이 강도가 일정해지기 시작하는 지점의 시료크기를 임계치수(critical size)라 함.



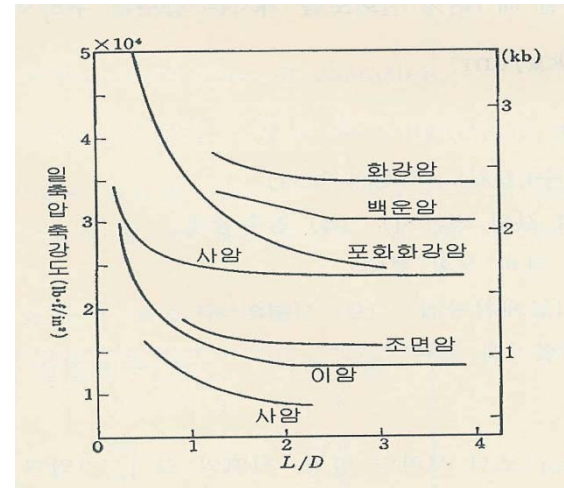
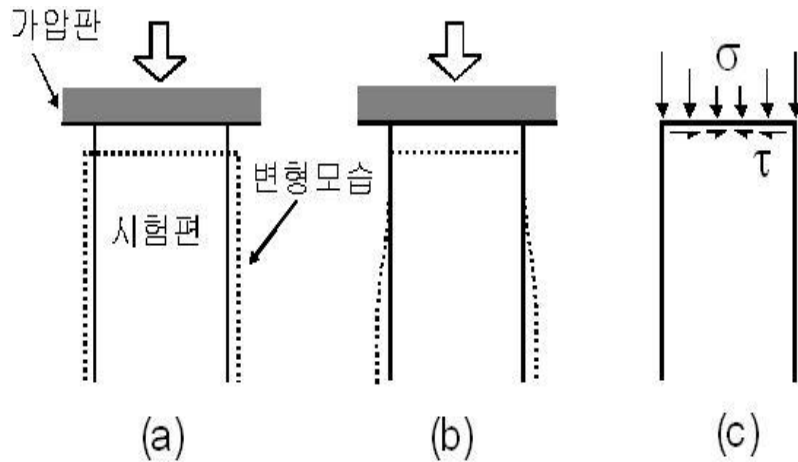
② 형상효과

• 단면형상의 경우 주변장길이가 상대적으로 클수록 강도가 낮음.



3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- NX이상의 코어에 대하여 길이/직경비가 2.5~3을 권장(ISRM), 그 이상에서는 좌굴(buckling), 이하에서는 접촉면에서의 마찰(전단)력이 단축압축강도에 큰 영향을 줌.



- 직경/길이비에 따른 강도 추정식 (US Bureau of Mines)

$$\sigma_c = \frac{\sigma_c'}{0.875 + 0.25(D/H)}$$

3.1 정하중 하에서 강도와 변형

③ 가압면의 접촉상태와 마무리 정도

- 가압면의 편평도 1/1000 in (=0.025mm)이내
- 가압면과 축방향의 수직도 오차 1/1000 라디안 이내가 되어야 함.

④ 가압속도

가압속도 0.5 ~ 1.0 MPa/sec 이하

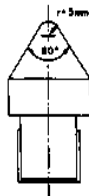
⑤ 수분함량

공극수는 교결물질을 용해시키거나(사암, 응회암 등) 수직응력을 약화시켜 강도가 저하된다.

$$\tau = c + (\sigma - \sigma_w) \tan \phi$$

- 단축압축강도의 간이 시험법: 점하중강도시험(point load test)

- 단축압축시험을 실시하기 곤란하거나 암석의 대략적인 압축강도만을 알고자 할 때 적용
- 파괴강도는 압축 및 인장강도와 관련이 있음



3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 점하중강도지수(point load strength index), I_s
코어시료의 경우: $I_s = \frac{P}{D^2}$ (MPa) P (N), D (mm)

- 표준점하중강도지수, $I_{s(50)}$: 시료직경이 50mm 일 때의 점하중강도지수

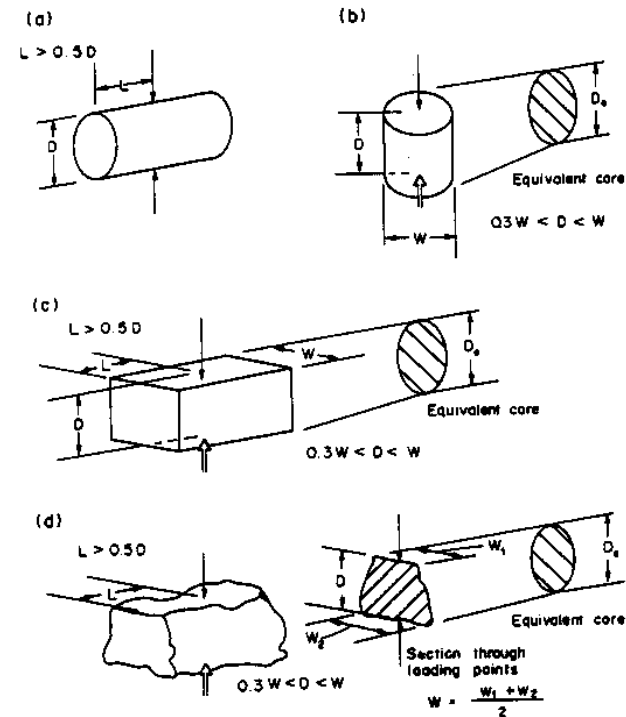
$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \text{ (MPa)}$$

$$F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45}$$

- 원주형이 아닌경우: 파단면의 폭과 높이를 W , D 라 할 때, D 대신 D_e 를 사용한다.

$$D_e^2 = \frac{4}{\pi} WD$$

- 단축압축강도, σ_c 의 추정
 $\sigma_c = (20 \sim 25) \cdot I_{s(50)}$ (MPa)

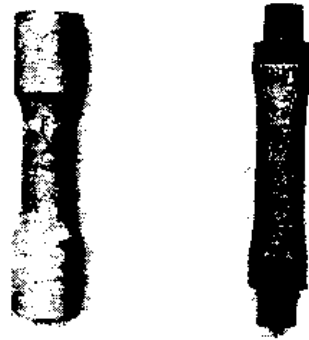


3.1 정하중 하에서 강도와 변형

3.1.2 인장강도와 시험

- 직접인장강도

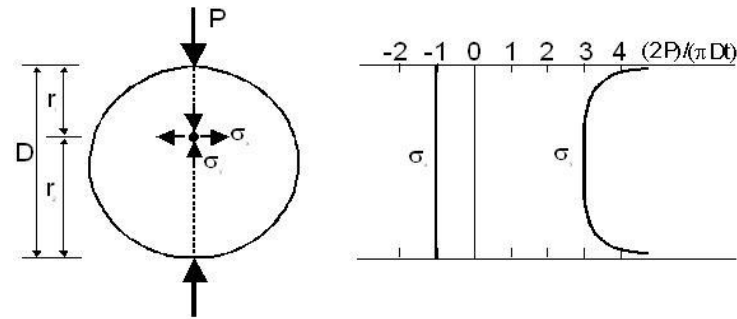
- 가압면에서의 파괴를 막기 위해 dog bone 형태로 가공하고 금속캡을 부착하여야 하나 어렵고 번거로움.
- 시험시 굴곡하중이 발생하지 않도록 유의해야 함.



- 압열인장강도

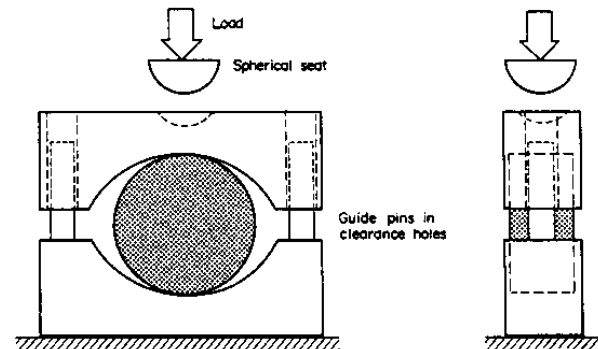
- 원판형 시험편의 상하 중심선을 따라 하중(P)를 가함. 이때 시료 두께는 반경크기.
- 수직 중심선을 따라 수평 인장력 σ_x , 수직방향으로 중심에서 압축응력 σ_y 이 작용.

3.1 정하중 하에서 강도와 변형



$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi Dt}, \quad \sigma_y = \frac{2P}{\pi t} \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{1}{D} \right] \quad (a) \quad (b)$$

$$\sigma_t = \frac{2P_{\max}}{\pi Dt}$$



3.1 정하중 하에서 강도와 변형

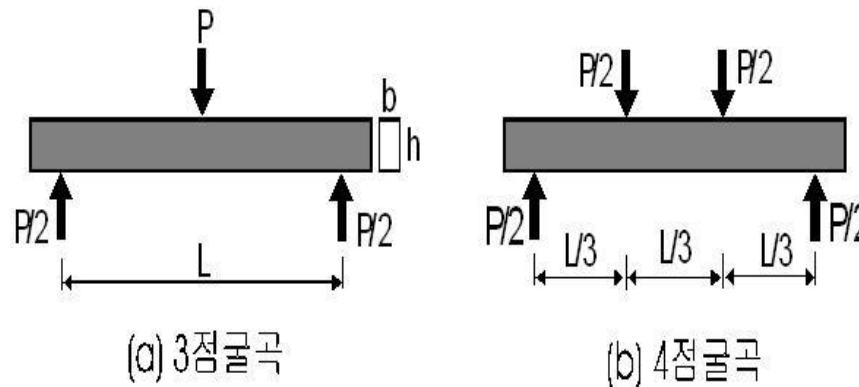
-휨강도 (bending strength)

- 빔형의 암석에 휨모멘트를 주는 굴곡시험에서 바깥면에 작용하는 인장응력에 의해 빔이 파괴되는 특성을 이용, 암석의 인장강도를 구할 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I}$$

(I 는 단면의 2차모멘트, M 은 휨모멘트, y 는 중립축으로부터의 거리
 직사각형 단면과 원형 단면의 경우 I 는 각각 $bh^3/12$, $\pi d^4/64$)

- 3점 또는 4점 휨시험을 이용한다.

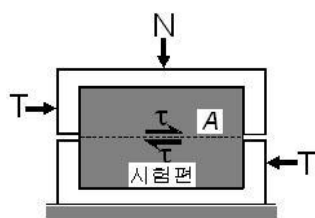


- 위 (a)와 (b)에서 중앙에 작용하는 휨모멘트(M)는 각각 $PL/4$, $PL/6$ 이므로,
 3점굴곡시험에서 사각단면과 원형단면의 굴곡강도: $\sigma_b = \frac{3 PL}{2 bh^2}$, $\sigma_b = \frac{8 PL}{\pi d^3}$
 4점굴곡시험에서 사각단면과 원형단면의 굴곡강도: $\sigma_b = \frac{PL}{bh^2}$, $\sigma_b = \frac{16 PL}{3 \pi d^3}$

3.1 정하중 하에서 강도와 변형

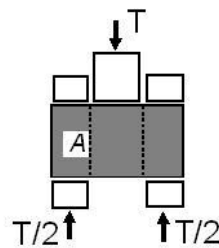
3.1.3 전단강도 (shear strength)

- 직접전단시험, 삼축압축시험, 펀치시험, 비틀림시험 등을 이용할 수 있다.
- 전단강도는 전단면에 수직하게 작용하는 수직응력의 함수이다.
- 수직응력이 0일때의 전단강도를 점착강도(cohesion)이라 한다.



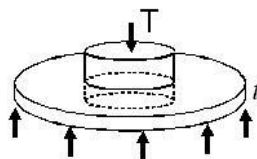
$$\tau_0 = \frac{T_{\max}}{A}$$

(c) 일면전단



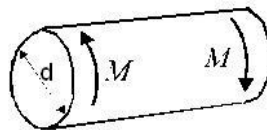
$$\tau_0 = \frac{T_{\max}}{2A}$$

(b) 이면전단



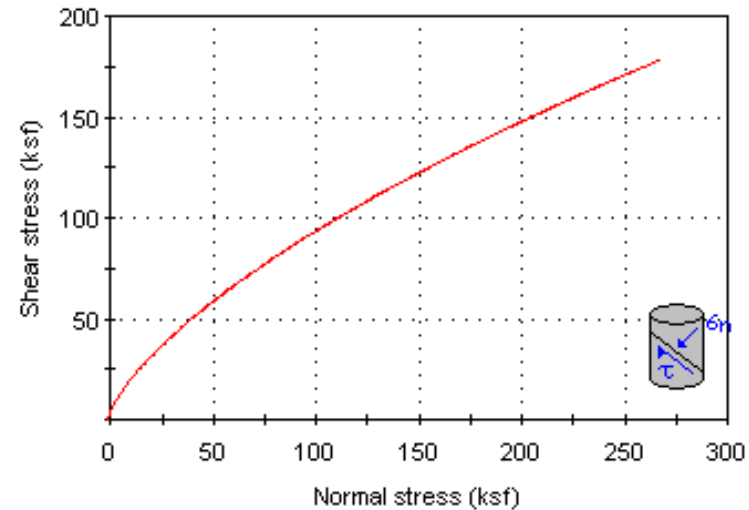
$$\tau_0 = \frac{T_{\max}}{2\pi r t}$$

(c) 펀치시험



$$\tau_0 = \frac{16M_{\max}}{\pi d^3}$$

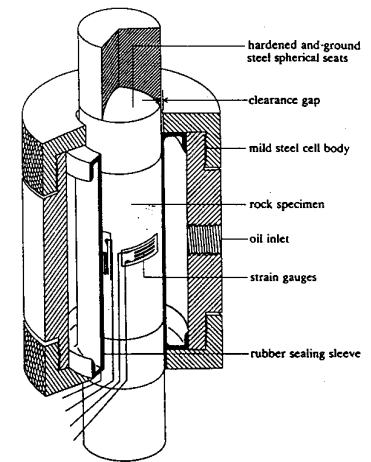
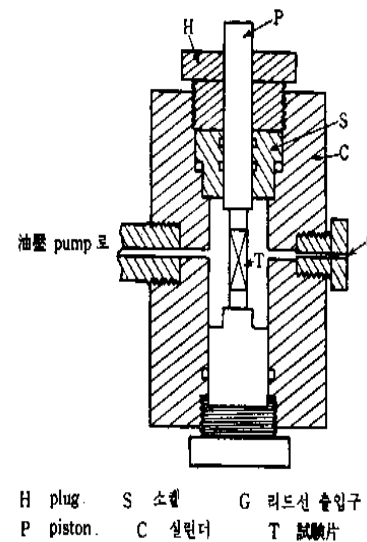
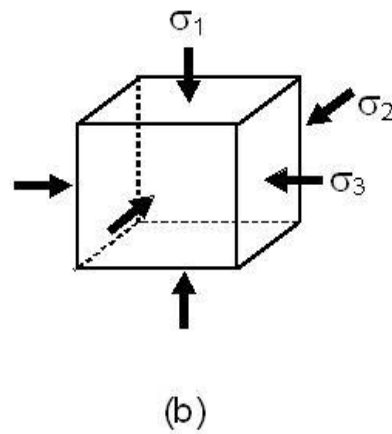
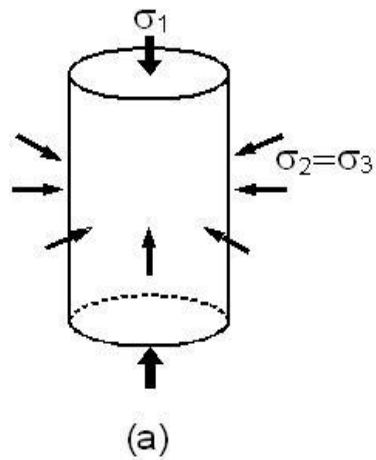
(d) 비틀림시험



3.1 정하중 하에서 강도와 변형

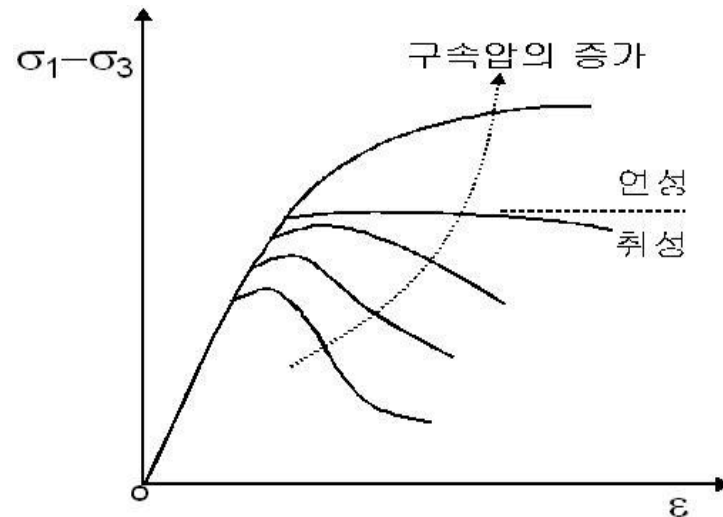
3.1.4 삼축압축시험 (Triaxial compression test)

- 원주형시험편을 초기 정수압상태로 만든 후 축방향 응력을 증가시킨다.
- 측면에서의 봉압 $\sigma_2 = \sigma_3$ 이다.
- $\sigma_2 > \sigma_3$ 인 경우 진삼축시험(true -)으로 구분하여 부른다.
- Hoek cell의 경우 시험종료후 시료교체시 기름을 교체할 필요가 없다는 장점이 있다.



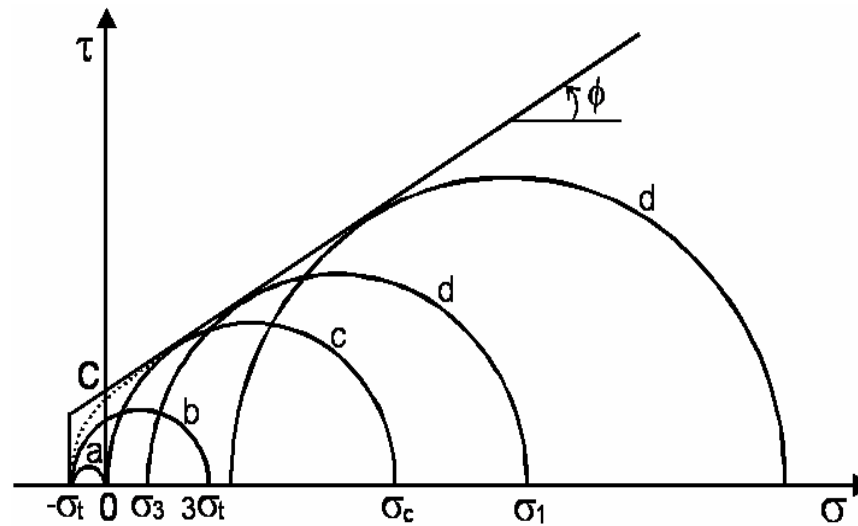
3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 축방향 주응력 - 구속압을 differential stress(주응력차, 축차응력)이라 한다.
- 구속압이 커질수록 암석의 강도가 커지며 연성적이 된다.
- 대부분의 천부지하 환경에서는 취성-연성전이(brittle-ductile transition)에 이르게 하는 구속압에 이르지 못하나 암염이나 석고 등의 증발암(evaporate rock), 또는 점토세일의 경우에는 가능하다.
- 굴착면은 삼축응력상태가 아니어서 굴착전에 비해 보다 취성적이며 굴착면에서 암반내부로 들어갈 수록 연성적이 된다.
- 굴착면에 설치하는 지보재는 구속압을 가하는 효과를 줄 수 있다.



3.1 정하중 하에서 강도와 변형

- 삼축 및 단축, 인장시험 결과를 이용하여 암석의 파괴조건에 대한 정보를 얻을 수 있다.
- 파괴시의 Mohr circle에 접하는 포락선을 직선으로 표현할 경우 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 얻을 수 있다: $\tau = \sigma \tan \phi + c$ (ϕ 는 내부마찰각, c 는 점착강도)
- 보통 인장강도에서 tension cutoff를 적용한다.
- 압열인장강도의 파괴시 Mohr circle은 σ_t 와 $3\sigma_t$ 를 지난다.



3.2 암석의 동적 특성

암석의 변형과 응력의 시간에 따른 변화를 고려한다.

3.2.1 탄성파의 종류와 동탄성계수

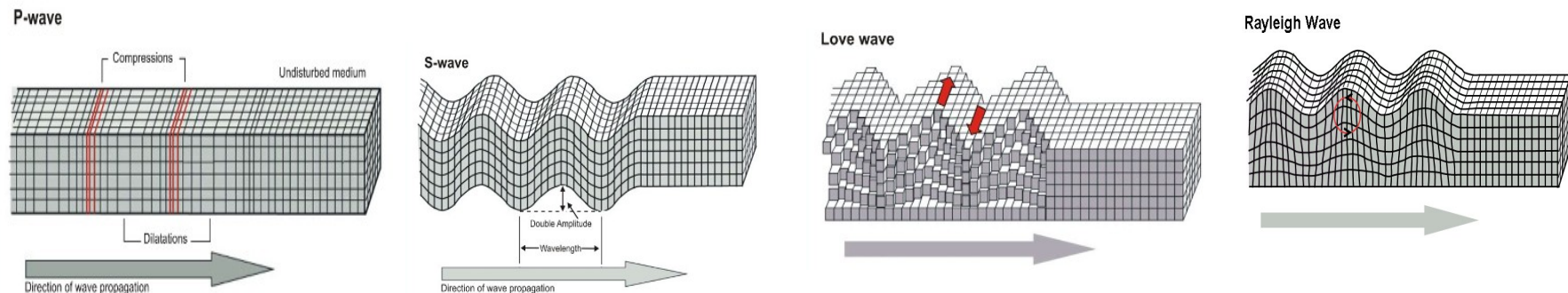
- 암반을 통과하는 탄성파는 물체파(body wave)와 표면파(surface wave)로 나눌수 있으며 전자에는 P파와 S파, 후자에는 Love파와 Rayleigh파가 있다.

- > P파: 진동방향과 전파방향 일치, 종파, 압축파, 소밀파로 불림. 5~8 km/s

- > S파: 진동방향과 전파방향이 직각, 횡파, 전단파로 불림. 4 km/s

- > Love파: 입자가 수평면상에서 운동하며 진행방향과 직교, S파 보다 느림.

- > Rayleigh파: 입자운동이 타원형이며 진행방향에 평행, Love파보다 느림.



3.2 암석의 동적 특성

- 암석의 P파 속도(v_p)와 S파 속도 (v_s), 밀도(ρ)를 알면 암석의 동탄성계수 (E_d)와 동포아송비 (ν_d)를 구할 수 있다.

$$v_p^2 = \frac{E_d}{\rho} \frac{1 - \nu_d}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)} \quad v_s^2 = \frac{E_d}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu_d)}$$

$$E_d = 2(1 + \nu_d)\rho v_s^2 \quad \nu_d = \frac{v_p^2/v_s^2 - 2}{2(v_p^2/v_s^2 - 1)}$$

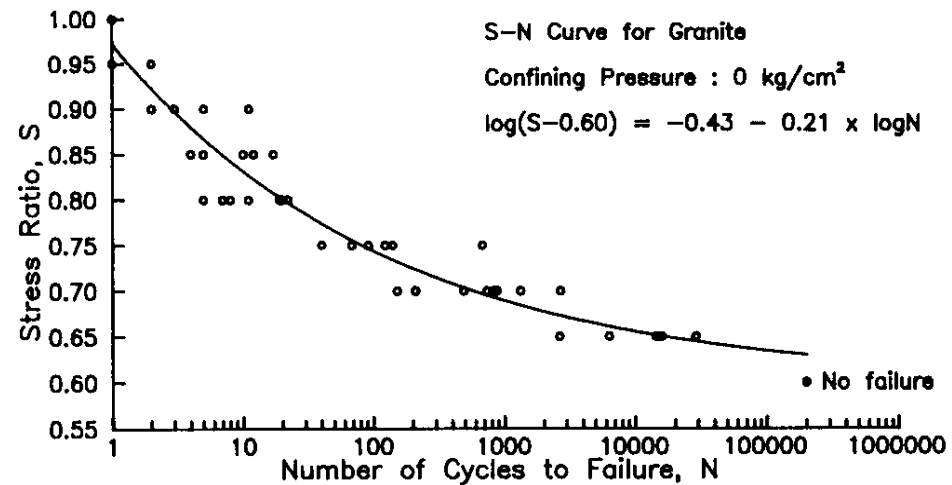
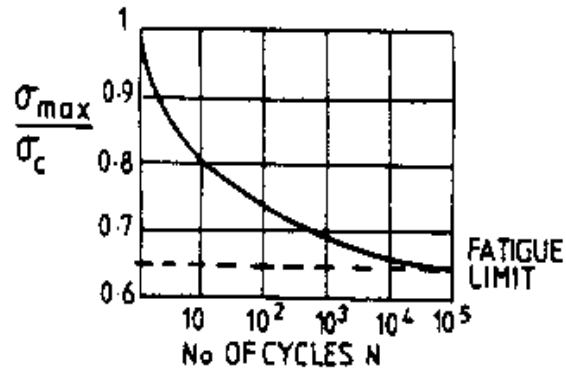
$$\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 = \frac{2(1 - \nu_d)}{(1 - 2\nu_d)}$$

- 일반적으로 동탄성계수는 정하중하에서 구한 탄성계수보다 큰 값을 보인다.
- 탄성파속도는 암석의 역학적 결함이 많을수록 감소하며 하중이 클수록 증가한다.

3.2 암석의 동적 특성

3.2.2 암석의 피로

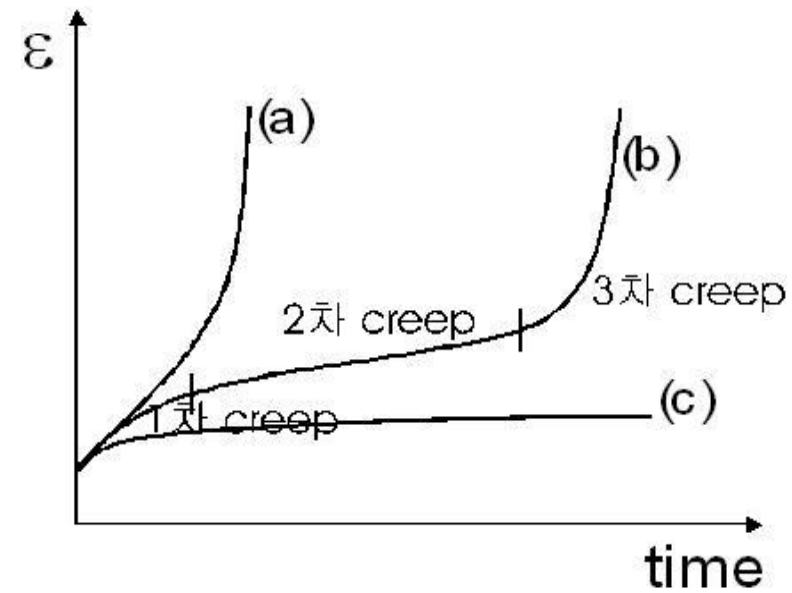
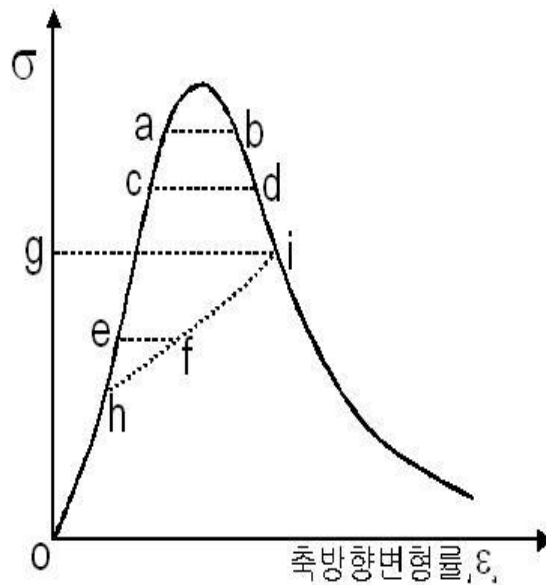
- 암석에 일정한 크기로 반복하중을 가하면 정적인 압축강도 이하에서 파괴되는 현상
- 반복횟수를 증가시켜도 파괴에 이르지 않는 응력수준을 피로한계(fatigue limit)라 한다.



3.2 암석의 동적 특성

3.2.3 암석의 creep

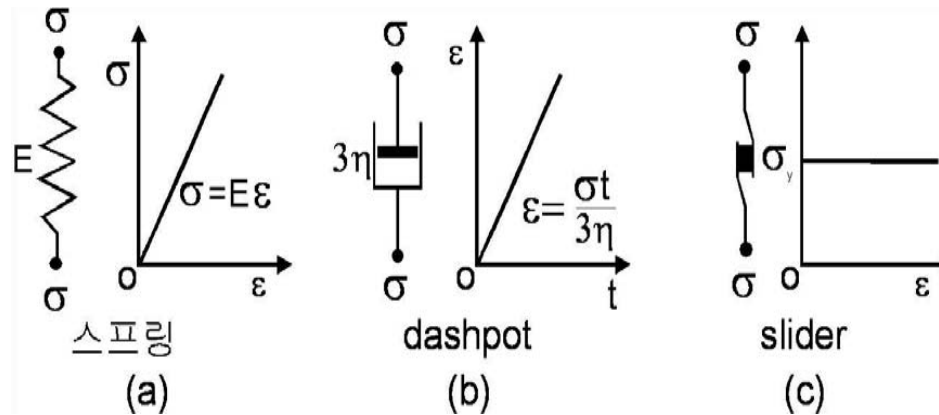
- 암석에 일정한 크기의 응력을 작용시킬 때 시간에 따라 변형이 증가하는 것
 - ※ 변형률을 일정하게 유지시킬 때 시간에 따라 응력의 크기가 감소하는 현상을 응력완화 (stress relaxation)라 함.



3.3 암석의 역학적 모형

3.3.1 기본 요소체

- 암석의 변형특성은 탄성, 점성, 소성의 3가지 기본 요소체의 결합으로 모델링(유변학적 모델, rheological model)할 수 있다.



3.3 암석의 역학적 모형

3.3.2 점성체(dashpot)의 시간에 따른 변형특성

- Newton의 점성법칙: 전단속도는 전단응력에 비례,

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

- 단축응력하 비압축재료의 수평변형률:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{1}{2} \varepsilon_1$$

- 최대 전단응력:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - 0}{2} = \frac{\sigma_1}{2}$$

- 최대 전단변형률:

$$\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{3}{2} \varepsilon_1$$

- 축방향 응력과 축방향 변형률 속도와의 관계:

$$\sigma_1 = 3\eta \dot{\varepsilon}$$

- 시간에 따른 축방향 응력과 축방향 변형률과의 관계:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 t}{3\eta}$$

3.3 암석의 역학적 모형

3.3.3 Maxwell 모형

- 스프링과 dashpot의 직렬연결

> 두요소에 작용하는 응력은 동일, 총 변형률은 각 요소에 작용하는 변형률의 합

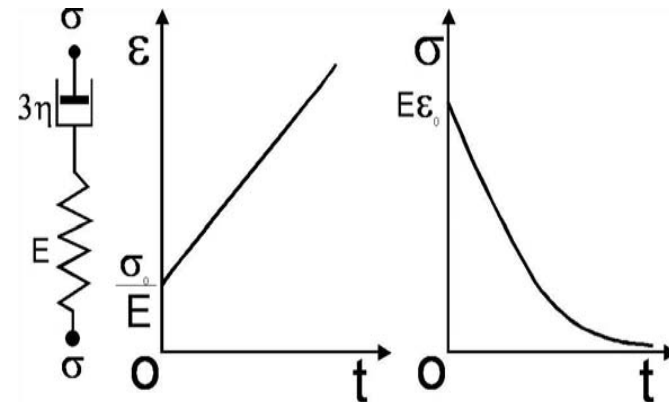
$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_s + \dot{\epsilon}_d = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{3\eta}$$

> $t = 0$ 에서 순간적으로 σ_0 를 가한 뒤 유지시킬 때($\dot{\sigma} = 0$)의 시간에 따른 변형률

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0 t}{3\eta}$$

> $t = 0$ 에서 순간적으로 ϵ_0 를 가한 뒤 유지시킬 때 ($\dot{\epsilon} = 0$)의 시간에 따른 응력

$$\frac{\dot{\sigma}}{E} = -\frac{\sigma}{3\eta} \rightarrow \sigma = E\epsilon_0 e^{-3Et/3\eta}$$



3.3 암석의 역학적 모형

3.3.4 Voigt (Kelvin) 모형

- 스프링과 dashpot의 병렬연결

> 두요소에 작용하는 변형률은 동일, 총 응력은 각 요소에 작용하는 응력의 합

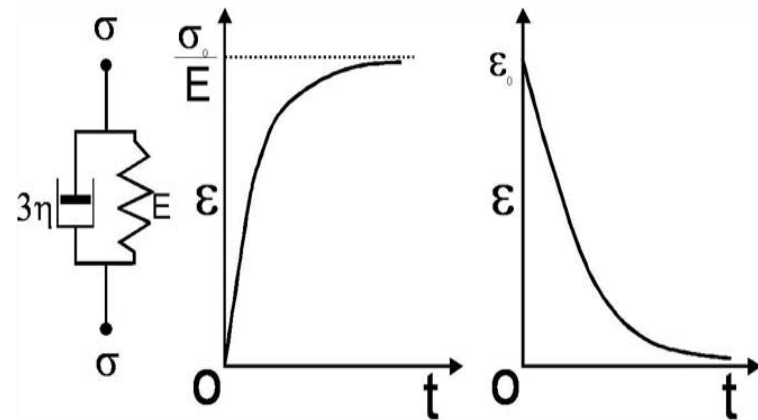
$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d = E\varepsilon + 3\eta\dot{\varepsilon}$$

> $t = 0$ 에서 순간적으로 σ_0 를 가한 뒤 유지시킬 때($\sigma = \sigma_0$)의 시간에 따른 변형률

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-Et/3\eta})$$

> $\varepsilon = \varepsilon_0$ 에서 순간적으로 응력을 제거하면

$$E\varepsilon + 3\eta\dot{\varepsilon} = 0 \rightarrow \varepsilon = \varepsilon_0 e^{-Et/3\eta}$$



3.3 암석의 역학적 모형

3.3.5 Burger 모형

- Maxwell 모형과 Kelvin 모형의 직렬연결

> $t = 0$ 에서 순간적으로 σ_0 를 가한 뒤 유지시킬 때 ($\sigma = \sigma_0$) 의 시간에 따른 변형률

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_m} + \frac{\sigma_0 t}{3\eta_m} + \frac{\sigma_0}{E_k} (1 - e^{-E_k t / 3\eta_k})$$

> $\epsilon = \epsilon_0$ 에서 순간적으로 응력을 제거하면 Maxwell 모형의 영구변형률이 남는다.

$$\epsilon = \frac{\sigma_0 t_1}{3\eta_m}$$

> 암석의 creep 현상(1,2차)을 나타내는데 널리 사용됨

