الخواص الفيزيائية والهندسية للصخور
Physical and engineering properties of the rocks

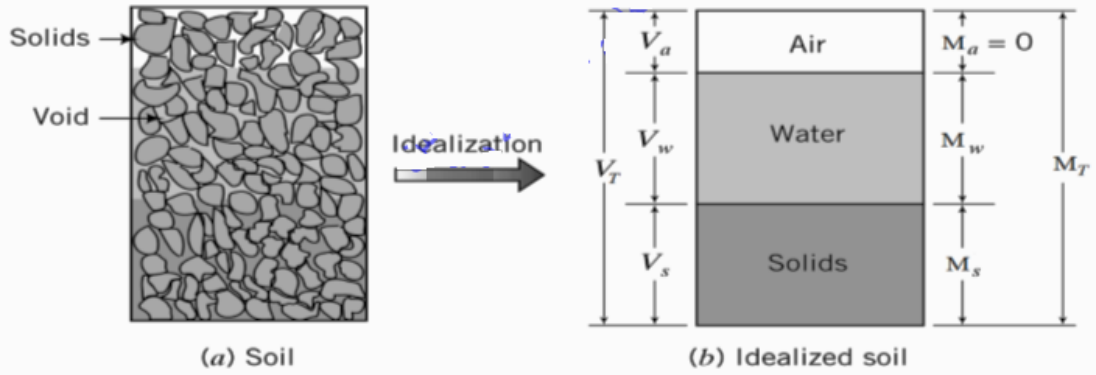
يعتمد سلوك التربة والصخور في ظروف معينة علي خصائصها الفيزيائية (الطبيعية) والهندسية (الميكانيكية) للمواد (المعادن) المكونه لها، ولهذا يمكن تصنيف هذه الخصائص او الصفات الى:

1. **خصائص فيزيائية** Physical properties : وهي مجموعة من الخصائص التي تؤثر على قيمها العوامل الجيولوجية الطبيعية مثل نوع الصخور Rock type والتركيب المعدني Mineral composition وحجم الحبيبات Grain size ومن امثلة هذه الخصائص الكثافة والمسامية والمحتوى المائي.. الخ.

2. **خصائص ميكانيكية** :Mechanical properties وهي الخواص التي تصف السلوك الهندسي للصخور او التربة مثل المرونة ومقاومة الصخور للاجهادات المختلفة.

مكونات الصخور او التربة Rocks (Soil) Phases :

تتكون الصخور والتربة من ثلاثة مكونات (اطوار phases) هي المكونات الصلبة Solids والفراغات Voids التي قد تحتوي على الهواء Air او الماء water او كلاهما في التربة غير المشبعة. يمكن التعبير عن هذه المكونات بشكل وزني (كتلي) او حجمي وتحدد هذه المكونات وعلاقتها ببعضها خصائص الصخور والتربة بشكل كبير

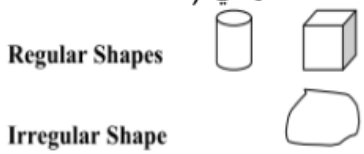


Rocks (Soil) Phases

حساب الحجوم:

تعتمد العلاقات النسبية بين مكونات التربة او الصخور على قياس الحجوم ويتم ذلك:

1. **الاشكال غير المنتظمة**: يتم غمر العينة في حجم معلوم من الماء في المختبر باستخدام اسطوانة مدرجة حيث ان الماء الزائد يمثل حجم العينة.
2. **الاشكال المنتظمة**: يتم حساب الحجم باستخدام القوانين الرياضية كحجم المكعب (الطول*العرض*الارتفاع) وحجم الشكل الاسطواني (مساحة القاعدة*الارتفاع).



الخصائص الفيزيائية:

هناك خصائص فيزيائية اهمها:

1. ألكثافة Density

هي النسبة بين كتلة الصخرة وحجمها وتقاس بوحدة g/cm^3 او Kg/m^3 ولمعظم الصخور القريبة من سطح الارض كثافة تتراوح بين ($1.5\text{-}3.0\ g/cm^3$).

Density= Mass/Volume

$$\rho = \frac{M}{V}$$

M: Mass, V: Volume

وتقسم الى انواع:

(A) الكثافة الكلية Bulk Density

هي النسبة بين كتلة المواد الكلية في الصخرة (معادن وماء) M_w و M_s الى الحجم الكلي V_T.

$$\rho_b = \frac{M_s + M_w}{V_T}$$

(B) الكثافة الجافة Dry Density

هي النسبة بين كتلة المادة الصلبة M_s في الصخور عندما تكون الفراغات خالية من الماء وحجمها الكلي V_T.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_T}$$

2. الوحدة الوزنية Unit Weight

وتسمى ايضا الكثافة الوزنية وهي النسبة بين وزن الصخرة وحجمها وتقاس بوحدة نيوتن/م^3 (N/m^3).

Unit Weight= Weight/Volume

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Weight= *M.g*

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{M.g}{V} = \rho.g$$

حيث g هو التعجيل الارضي ($9.8\ m/s^2$) .

3. الوزن النوعي (Specific Gravity)

هو النسبة بين كثافة الصخرة ρ وكثافة الماء ρ_w وهي بدون وحدات يرمز لها G.

$$G = \frac{\rho}{\rho_w}$$

$$G = \frac{\rho.g}{\rho_w.g} = \frac{\gamma}{\gamma_w}$$

مثال: كتلة صخرية منتظمة ذات ابعاد 85.5cm, 79cm, 43.8cm ولها كتلة مقدارها 953Kg، جد الوزن النوعي للصخرة؟

Volume V= 0.855X0.79x0.438

= $0.2958 m^3$

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{953\ Kg}{0.2958\ m^3} = 3222\ Kg/m^3$$

$$G = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{3222\ Kg/m^3}{1000\ Kg/m^3} = 3.22$$

يتم حساب الوزن النوعي (النسبة بين وزن حجم معين من المواد الصلبة الى وزن نفس الحجم المساوي له من الماء) في المختبر باستخدام العلاقة التالية:

الوزن النوعي = وزن العينة الجافة W1 /(وزن العينة الجافة W1 - وزن العينة وهي مغمورة في الماء W2)

$$G = \frac{W1}{W1 - W2}$$

4. المسامية Porosity

هي النسبة المئوية لحجم الفراغات في الصخرة V_V الى الحجم الكلي للصخرة V_T .

$$n = \frac{V_V}{V_T} x100$$

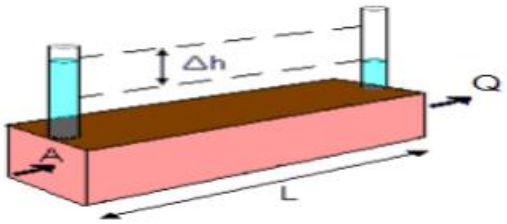
مسامية الصخور قد تكون اولية او ثانوية وتعتمد على عوامل منها:

1. شكل الحبيبات المعدنية المكونة للصخور.
2. تدرج احجام الحبيبات.
3. درجة تراص الحبيبات وتجمعها.

وتحسب في المختبر من خلال جمع عينة باستخدام اسطوانة معدنية معلومة الحجم ويمثل ذلك الحجم الكلي V_T للعينة ثم يتم تحديد حجم المكونات الصخرية الصلبة بدون فراغات بوضعها في اسطوانة مدرجة يضاف اليها الماء الى حد معلوم ليتم بعدها حساب حجم الفراغات V_v من خلال الحجم الكلي مطروحا منه حجم المكونات الصلبة، تحسب بعد ذلك المسامية حسب العلاقة السابقة.

5. النفاذية Permeability

وهي قابلية التربة او الصخور على امرار السوائل عبر مساماتها المتصلة وتحسب باستخدام قانون دراسي:



Q=KIA

Q: Discharge, K: Hydraulic conductivity

I: Hydraulic gradient, A: Cross section area

6. نسبة الفراغات Void Ratio

هي النسبة بين حجم الفراغات Volume of voids الى حجم المواد الصلبة Volume of solids .

$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

7. المحتوى المائي Moisture (water) content

وهو كمية المياه في الصخرة او محتوى الرطوبة الذي يمكن التعبير عنها بصورة وزنية (Gravimetric moisture content) او حجمية (Volumetric moisture content):

Gravimetric moisture content

هو النسبة المئوية بين كتلة الماء M_w في الصخرة الى كتلة المادة الصلبة M_s

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

Volumetric moisture content

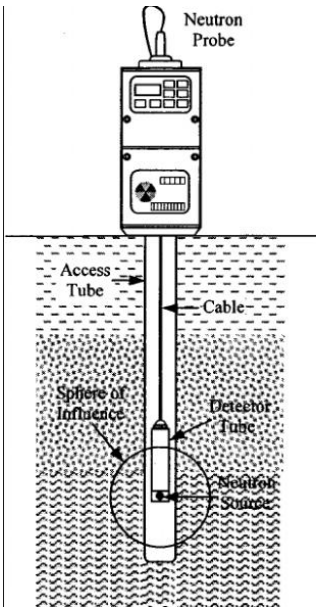
هو النسبة المئوية بين حجم الماء V_w في الصخرة الى حجمها الكلي V_T

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \times 100$$

يتم حساب المحتوى المائي في المختبر بطريقة مباشرة من خلال قياس كتلة العينة قبل وبعد تجفيفها في فرن بدرجة 105 درجة مئوية لمدة 24 ساعة واستخدام العلاقة:

$$w = \frac{M_w}{M_s} x100 = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100$$

او باستخدام طرق غير مباشرة كأستخدام المجسات المختلفة مثل مجس النيونترون Neutron Probe وبعض الطرق الجيوفيزيائية مثل طريقة المقاومة النوعية الكهربائية والتحسس النائي..



8. درجة التشبع Degree of saturation

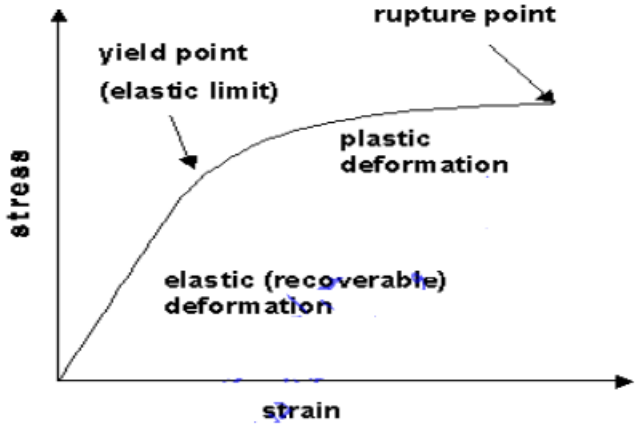
وهي النسبة بين حجم الماء في الصخرة V_w نسبة الى حجم الفراغات فيها V_v وتتراوح قيمته (1-0).

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_T.n} = \frac{\theta}{n}$$

الخواص الهندسية للصخور Engineering Properties of Rocks

وهي الخواص التي تصف السلوك الهندسي (الميكانيكي) للصخور التي تساعد في اختيار الموقع الملائم لاي منشأ هندسي وتساعد في تقييم المخاطر المحتملة وتقديم الحلول لها اضافة الى اهميتها عند استخدام هذه الصخور كمواد بناء لاقامة المنشآت الهندسية المختلفة.

تعرف القوة المسلطة على مساحة من الصخور بالجهد Stress الذي قد ينتج عنه تشوه يعرف بالاجهاد Strain الذي يمثل اي تغير في الشكل او الحجم لصخرة نتيجة لتعرضها للقوى الخارجية، وتحدد طبيعة العلاقة بين الجهد والاجهاد السلوك الهندسي للصخور، اذ ان الاجهاد يتناسب طرديا مع الجهد المسلط ضمن حدود المرونة Elasticity التي يحكمها قانون هوك Hook's Law، كما مبين في الشكل، وبعد زيادة القوة المسلطة الى حد معين فان الصخرة لايمكن ان تستعيد او تسترجع شكلها او حجمها الاصلي فيحصل تشويه دائمي تكون فيه الصخرة عندها في نطاق اللدونة Ductile or plastic وعند زيادة القوة المسلطة اكثر تصل الى حد لايمكن ان تتحمله فتتعرض للانهيار او الكسر Rupture.



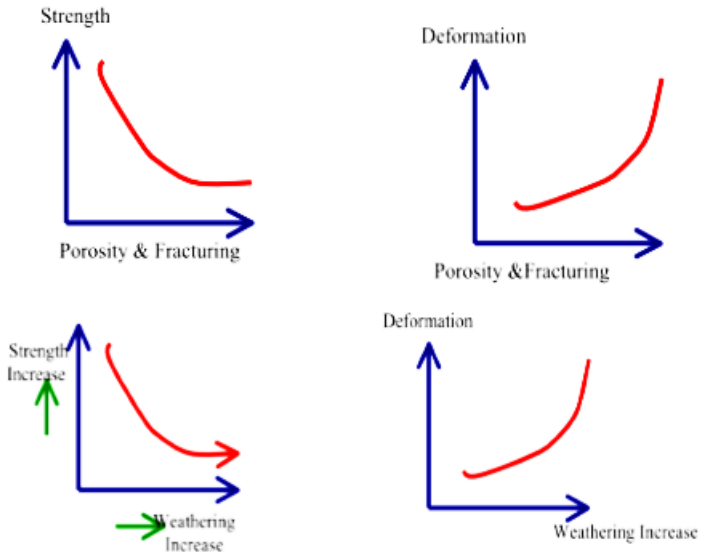
Stress- Strain relationship

مقاومة الصخور Strength:

تحاول القوة المسلطة على وحدة مساحة من الصخرة (الجهد) ان تغير من شكلها او حجمها وتعرف قابلية الصخرة على تحمل او مقاومة القوى الخارجية المسلطة عليها بمقاومة او قوة الصخرة Strength وتفيد في تحديد قابلية الصخرة لتحمل الاحمال الناتجة عن اقامة المنشأت الهندسية المختلفة، تتحكم في مقاومة الصخور العديد من **العوامل الجيولوجية Geological factors** اهمها:

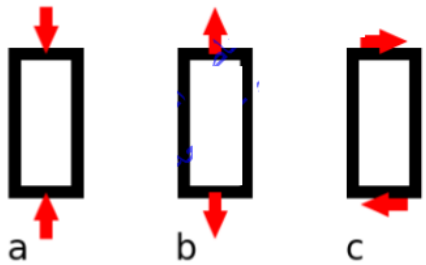
1. نوع الصخور Rocks type
2. حجم الحبيبات Grain size
3. التركيب المعدني Mineral composition
4. درجة التجوية Weathering degree
5. المسامية Porosity والنفاذية Permeability
6. الفواصل والصدوع joints and Faults
7. المحتوى المائي Water Content ودرجة التشبع Saturation

بالاضافة **عوامل هندسية** Engineering Factors مثل مقدار الحمل rate of loading ونوعه Load Type ، وابعاد الصخرة Dimensions.



وتصنف مقاومة الصخور تبعا الى طبيعة القوى المسلطة عليها الى ثلاثة اقسام رئيسة:

(a) مقاومة الانضغاط Compressive Strength
(b) مقاومة الشد Tension Strength
(c) مقاومة القص Shearing Strength



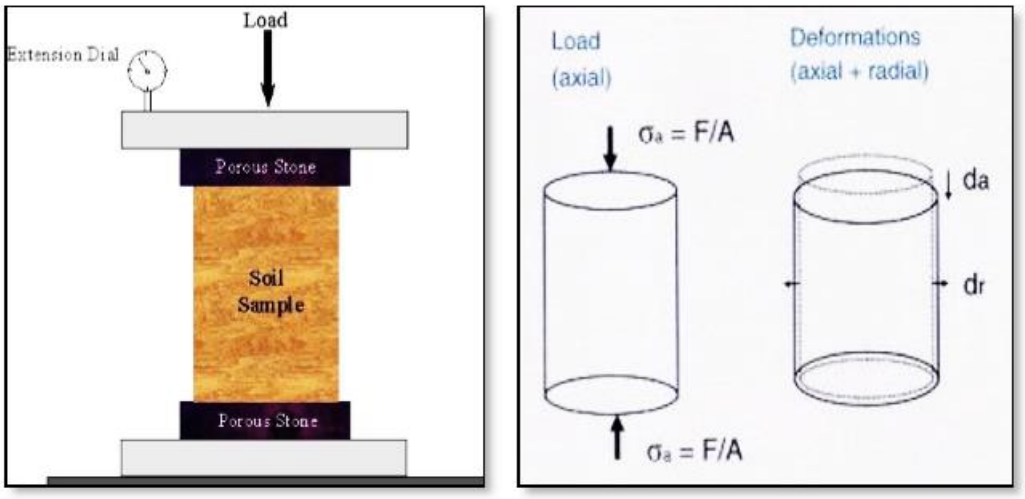
1. **مقاومة الانضغاط Compressive Strength** هي مقاومة الصخرة للقوى التضاغطية التي تحاول تقليص او نقصان حجمها وتتعرض الصخور في الطبيعة الى قوى تضاغطية تسبب التواءها وتكسرها وضعف مقاومتها للاحمال الهندسية وهي على نوعين:

أ) مقاومة الانضغاط الاحادي المحور Uniaxial Compressive Strength

يمكن تتعرض الصخرة الى قوى او احمال باتجاه محور واحد فقط دون وجود احمال اخرى عمودية على محور التحميل وتعرف مقاومة الصخرة لهذه القوى بمقاومة الانضغاط الاحادي المحور وتقاس مقاومة الانضغاط بالقوة المسلطة على الصخرة حتى تعرضها للتكسر اوالفشل (Failure)، ويعبر عنها بقوة الانضغاط لوحدة المساحة:

$$\sigma = \frac{F}{A} = N/m^2$$

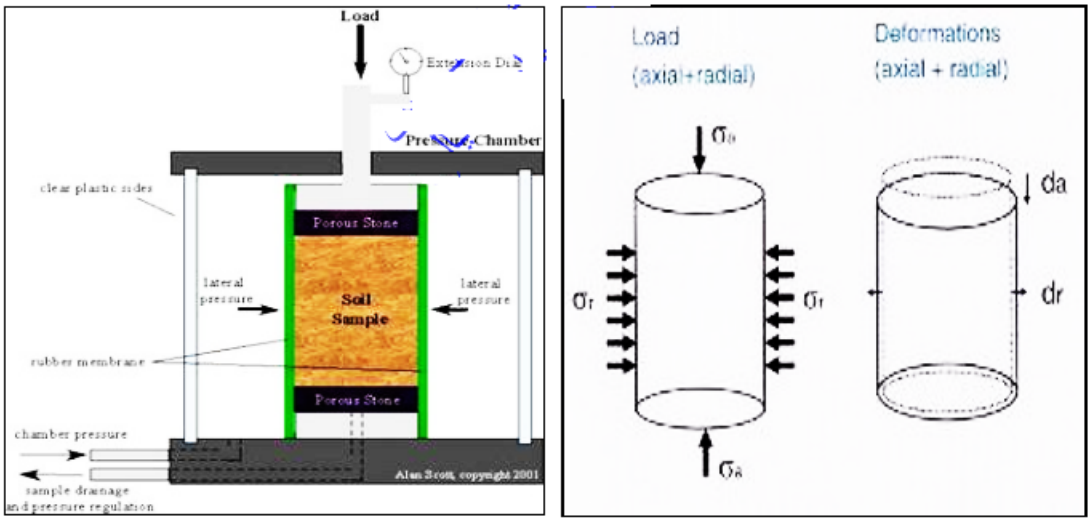
σ: Stress, F: Force, A: Area,



Uniaxial Compressive Strength

ب) مقاومة الانضغاط الثلاثي المحور (المحصور) Triaxial Compressive Strength (confined)

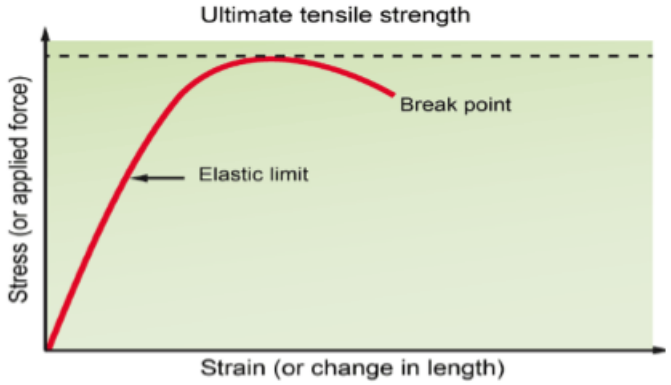
تتعرض الصخور عادة في الطبيعة الى قوى باتجاه اكثر من محور واحد، وغالبا ماتتعرض الى اجهادات من ثلاثة اتجاهات متعامدة. وعندما تتعرض الى ضغوط من جميع الاتجاهات فيعرف بالضغط الهيدروستاتيكي او الليثوستاتيكي.



Triaxial compressive strength

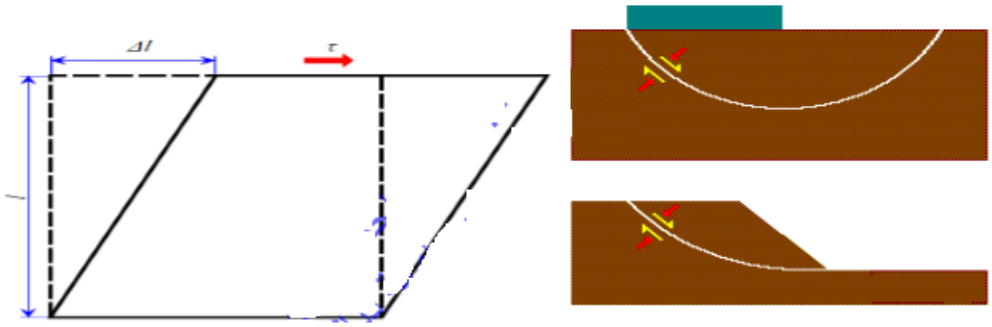
2. مقاومة الشد Tensile Strength

وتعرف على انها اكبر جهد لقوى شد يمكن ان تتحمله الصخور وغالبا ما تتعرض الصخور الى قوى شدية تؤدي تشقق وتصدع الصخور والتي تمثل مناطق ضعف في التراكيب الهندسية كالسدود والانفاق والمناجم وتؤثر عوامل كدرجة الحرارة ووقوع الزلازل على مقاومة الصخور في هذه المواقع.



3. مقاومة القص Shear Strength

وهي مقاومة الصخرة لقوى تعمل بشكل متوازي على امتداد سطح يعرف بمستوى القص وتميل لإنتاج فشل الانزلاق Sliding failure بامتداد مستوى موازي لاتجاه القوة كحصول الصدوع او الانزلاقات الارضية في المنحدرات عندما تفوق الاحمال القصية قوة تحمل الصخور لها كما تحصل في الانفاق والسدود وتعتمد مقاومة القص على مقاومة الاحتكاك على امتداد مستوى القص ومدى ترابط الحبيبات وتماسكها وتساهم عوامل عديدة مثل وجود التصدعات وزيادة المحتوى المائي والنفاذية في ضعف مقاومة القصية.



+Shear stress

التشوهاتDeformations:

هو اي تغيير في شكل او حجم الصخور نتيجة لتعرضها لقوى التي قد تكون تضاغطية compressive او شديه tensile او قصدية shear.

التشوهاتDeformations:

هو اي تغيير في شكل او حجم الصخور نتيجة لتعرضها لقوى التي قد تكون تضاغطية compressive او شديه tensile او قصدية shear.

انواع التشوهات Deformation types

اعتمادا على نوع من الصخور، وحجمها وشكلها وخصائصها المختلفة والقوى التي تتعرض لها هناك أنواع مختلفة من التشوهات:

1. تشوه مرن Elastic Deformation

وهو تشوه وقتي في شكل او حجم الصخرة التي تعود الى حالتها الاصلية بعد زوال القوى المؤثرة و يخضع الى قانون هوك Hook's Law الذي ينص على ان التشوه يتناسب طرديا مع الجهد ضمن حدود المرونة:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Where σ is the applied stress, E is a material constant called Young's modulus, and ε is the resulting strain

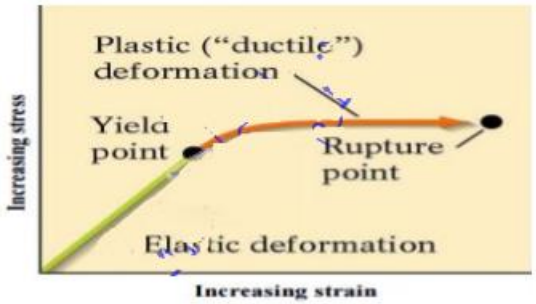
Elastic deformation

2. تشوه لدن Plastic (Ductile) Deformation

هو تشوه دائمي في شكل او حجم الصخرة لاتعود فيه الصخرة الى حالتها الاصلية بعد زوال القوى المؤثرة نتيجة لتحرك الذرات من مواقعها الاصلية دون ان تفقد الصخرة تماسكها Cohesion.

3. تشوه هش Brittle Deformation

عند ازدياد القوى المسلطة على الصخور وتصل الى حالة لم تعد تتحمل فيها الجهد المسلط يؤدي الى فشل في تحمل المادة فينتهي التشويه اللدن مع كسر او تهشم Rupture في الصخرة وهو نوع من التشويه لا رجعة فيه يحدث بعد وصول المواد نهاية الحالة المرنة، ومن ثم اللدنة لتصل الى نقطة تتراكم القوى حتى تكون كافية للتسبب في فقدان تماسك الذرات وتحركها مؤدية الى التهشم وجميع المواد تصل الى هذه الحالة في نهاية المطاف، إذا تم تسليط قوى كافية.



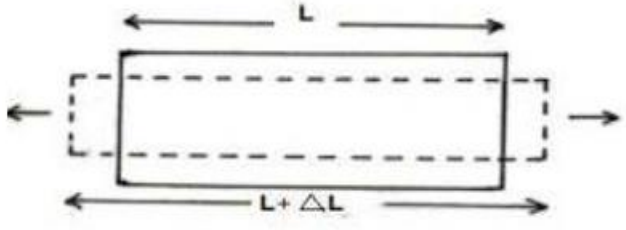
Plastic deformation

معاملات المرونة:

1. المرونة الطولية Longitudinal Elasticity

وتمثل مقاومة الصخور للقوى المؤثرة باتجاه محور واحد وتحاول تغيير طولها ويعبر عنها بمعامل يونك Young's Modulus.

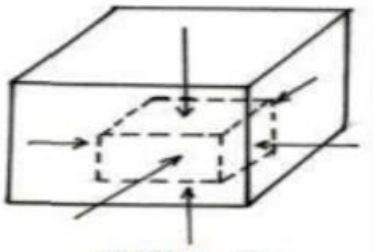
$$E = \frac{\text{Longitudinal Stress}\ (\text{Force/Unit area})}{\text{Longitudinal Strain}\ (\text{elongation or shortening})} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$



Young's Modulus

2. **المرونة الحجمية (الكلية) Volume or Bulk Elasticity**

تعرف المرونة الحجمية على انها مقاومة الصخور للقوى المؤثرة على عدة محاور والتي تحاول تغيير حجمها.

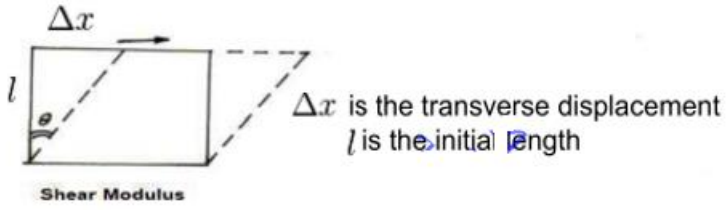


$$K = \frac{Volume\ Stress}{Volume\ Strain} = \frac{F/A}{\Delta v/v}$$

ويعرف مقلوب معامل المرونة الحجمية بالانضغاطية (Compressibility) B=1/K.

3. **المرونة الشكلية او القصية Shear Elasticity** وتمثل مقاومة الصخور للقوى التي تبدل شكلها وتعرف بالمرونة القصية لكونها ناتجة عن قوى قصية على امتداد مستوى معين.

$$\mu = \frac{Shear\ Stress}{Shear\ strain} = \frac{F/A}{\Delta x/l}$$



تحدد عوامل مثل نوعية الصخور وخصائصها، درجه الحرارة، ومقدار ونوع الجهد المسلط شكل وطبيعة التشوهات في الصخور في الحقل مما يؤدي الى نشوء تراكيب مختلفة كالطيات (تشوهات لدنة Ductile) والصدوع (تشوهات هشة Brittle) والتي يمكن ان تنتج عن قوى تضاغطية او شدية او قصية كما مبين في الشكل، هذه التراكيب يجب ان تؤخذ بنظر الاعتبار في التصميم الهندسي لذا يجب دراسة خصائص الصخور الفيزيائية والهندسية ليتم تقدير التشوهات المحتملة ووضع تصاميم هندسية توفر متانة وسلامة عالية بحيث تصبح التراكيب الهندسية ذات مقاومة عالية للاحمال التي تتعرض لها، ولهذا وقبل الشروع باي مشروع هندسي لابد من دراسة الجهود الاولية initial stresses او ما يعرف الجهود الموقعية in situ stresses التي غالبا ماتكون افقية اكبر من العمودية قرب سطح الارض وتصبح متساوية على اعماق كبيرة حيث يصبح الضغط هيدروستاتيكي متساوي ويتم ذلك باستخدام طرق حقلية ومختبرية لتقييم السلوك الهندسي للصخور ومدى ملائمتها لاقامة المنشأت الهندسية وتقييم المخاطر المحتملة وكيفية حل المشاكل الناتجة.