محاور المحاضرة (المدة ساعة وعشرون دقيقة)

1- المقدمة 2- التحليل الجيوتكنيكي وعلاقته بالتحليل الانشائي 3- البرامج المستخدمة في التحليل الجيوتكنيكي

4- البرامج المستخدمة في التحليل الانشائي- الجيوتكنيكي 5- أمثلة محلولة

أولا- المقدمة:

- التخطيط العمراني والهندسة المدنية من التخصصات التي تواجه تحديًا كبيرًا حيث تصبح تنمية المدن أكثر تعقيدًا، وهذا التحدي له أبعاد فنية واقتصادية وبيئية.

- إن الحاجة إلى استخدام البرامج الحاسوبية في حل المسائل الجيوتكنيكية والإنشائية تتزايد مع زيادة التطور والنمو العمراني للمدن وبسبب عدم وجود مساحات سطحية كافية، فإن التطوير الحضري يشمل إنشاءات جديدة (مباني عالية، جسور، أنفاق...الخ) مجاورة للمباني والخدمات القائمة (مثل الأنفاق وخطوط أنابيب الغاز والمياه ...الخ) وبالتالي تنشأ مسألة التأثير المتبادل بين المنشآت مع بعضها والتربة والتي تتطلب حساب القوى والانتقالات المتولدة في المنشآت القائمة نتيجة الانشاءات الجديدة والتحقق من استقرارها.

- إذا كانت حاجة الهندسة الانشائية إلى برامج حاسوبية كبيرة فإن حاجة الهندسة الجيوتكنيكية أكبر لما يلي:

1) عدم توفر طرق حل يدوية مباشرة ودقيقة (حل تحليلي) أو طرق حساب تجريبية إلا للمسائل البسيطة التي تعتمد على نظرية المرونة (حالة المرونة الخطية)، فالمسائل الصعبة والمعقدة كمسائل التأثير المتبادل الستاتيكي والديناميكي تحتاج للطرق العددية في التحليل.
2) حجم المسألة وعدد البراميترات المستخدمة كبير جدا.
3) تطور الطرق الرياضية العددية المستخدمة في حل مسائل الهندسة الانشائية والجيوتكنيكية اللاخطية والقابلة للبرمجة.
4) ضرورة الاستفادة من التطور الكبير قي طاقة الحواسيب على المعالجة بسرعات هائلة.

ونورد الأمثلة التالية التي يمكن مصادفتها أثناء تطوير المدن:

مثال (1) – إنشاء مبنى جديد مجاور لطريق وأنفاق خدمات قائمة:

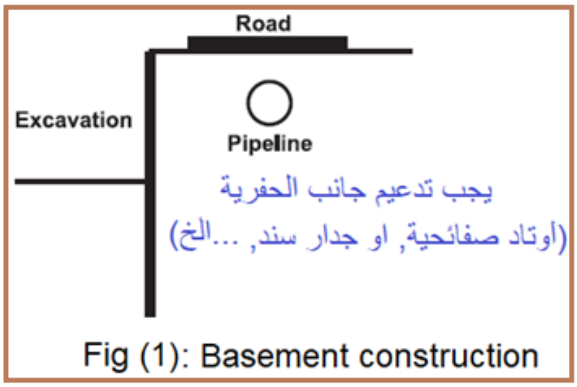


Fig (1): Basement construction

مثال (2) – إنشاء مبنى جديد مجاور لمباني قائمة وفوق أنفاق قائمة:

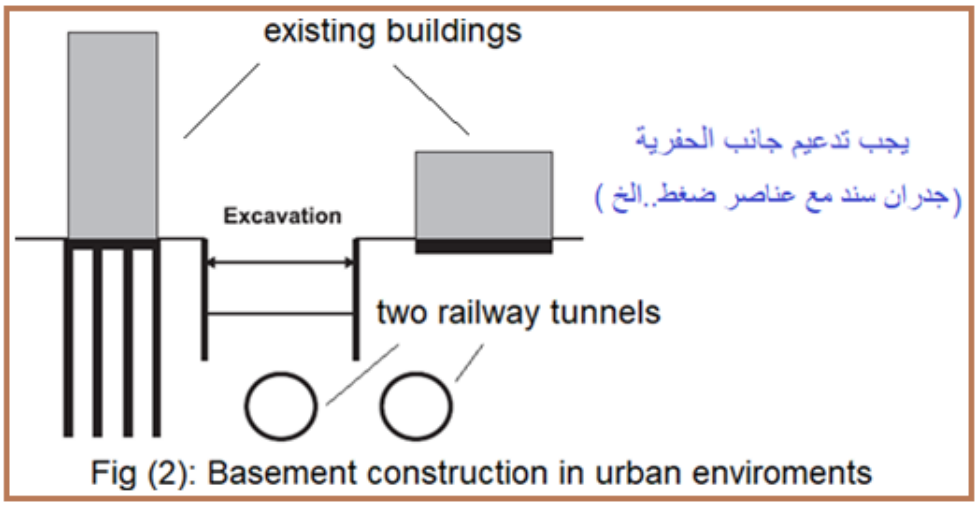


Fig (2): Basement construction in urban enviroments

مثال (2) – إنشاء نفق مترو جديد أسفل مبنى قائم:

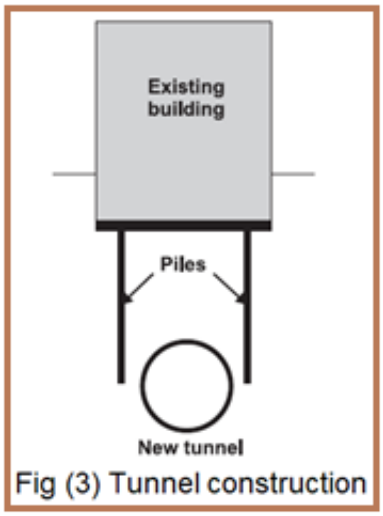


Fig (3) Tunnel construction

ثانيا– التحليل الجيوتكنيكي وعلاقته بالتحليل الانشائي:

1– مقدمة:

- يجب على المهندس الجيوتكنيكي الذي سيعمل في مجال التصميم أن يمتلك الخبرات التالية:

1) فهم سليم لميكانيك التربة والهندسة الإنشائية والنظرية الرياضية الكامنة وراء الطرق العددية.
2) فهم عميق وإدراك لمحددات وشروط موديلات السلوكية البنيوية المتوفرة حاليا لأنواع الترب والمواد المستخدمة لمعرفة معايير الانهيار المحتملة.
3) خبرة عميقة في استخدام البرامج المتوفرة وطريقة عملها.

- يجب على المهندس الجيوتكنيكي الزلزالي الذي سيعمل في مجال التصميم أن يمتلك إضافة لما سبق الخبرات الإضافية التالية:

1) فهم عميق لديناميك التربة.
2) فهم عميق لديناميك المنشآت.
3) فهم مبادئ علم الزلازل.
4) فهم مبادئ الجيولوجيا الهندسية.

جميع منشآت الهندسة المدنية تتصل بالأرض بطريقة ما وتنقل حمولاتها للأرض:

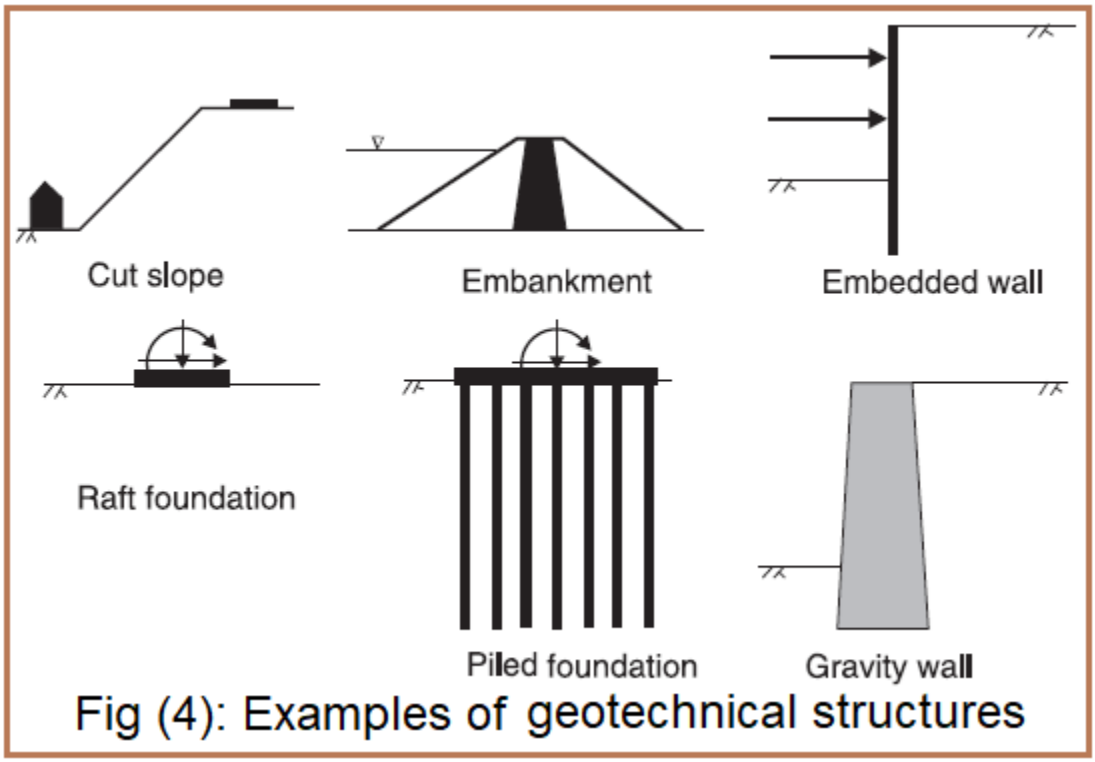


Fig (4): Examples of geotechnical structures

- يجب على المهندس المصمم حساب القوى والانتقالات المطبقة على التربة والعناصر الانشائية في الحالتين الحدية والاستثمارية.
- نتيجة التحليل يتم حساب القوى الداخلية والانتقالات في كل من العناصر الانشائية والتربة.
- يجب على المهندس المصمم تصميم المقاطع لكافة العناصر الانشائية.
- يجب على المهندس المصمم التأكد من ثبات واستقرار المنشأ، يمكن أن يتخذ الاستقرار عدة أشكال:

1) أولاً– الاستقرار الموضعي: يجب أن يكون المنشأ ومنظومة استناده (تربة استناده) مستقرًا ككل، يجب ألا يكون هناك خطر حدوث انهيار دوراني أو رأسي أو انتقالي (انظر الشكل 5).

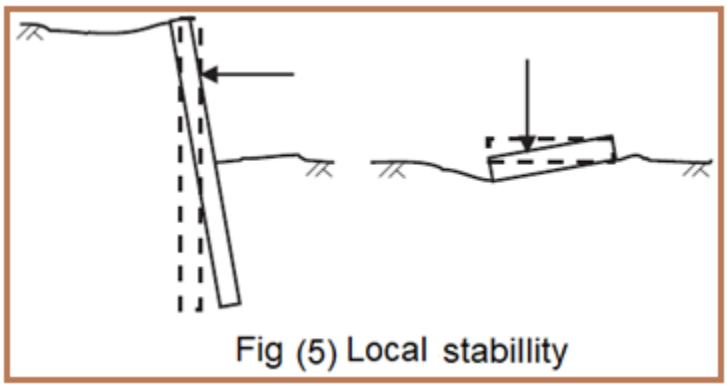


Fig (5) Local stabillity

2) ثانياً– الاستقرار العام: يجب إرساء الاستقرار الشامل، على سبيل المثال، إذا كان الجدار الاستنادي يسند الأرض المنحدرة، فينبغي التحقق من حجم البناء المحتمل الذي يؤدي الانهيار الكلي للمنحدر (انظر الشكل 6).

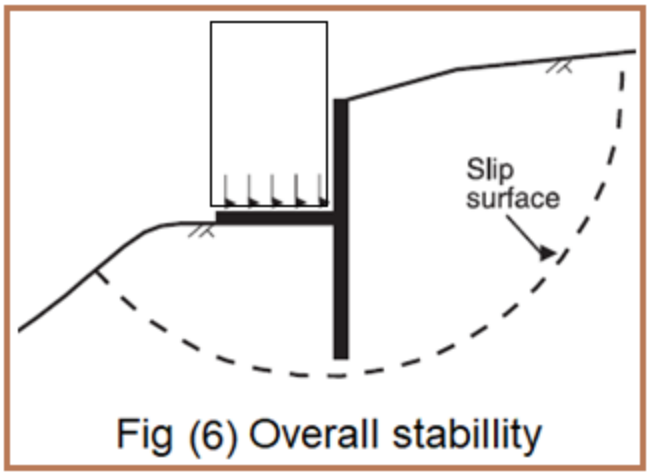


Fig (6) Overall stabillity

2- متطلبات التصميم: Design requirements

حسب نوع المشروع يجب اجراء ما يلي

1) إجراء استكشاف الموقع: تحديد طبقات التربة وخصائصها.
2) تحديد مقاومة التربة على القص والانتقال (الهبوط) المتوقع وقدرة تحمل التربة وقساوة التربة.
3) تحديد منسوب المياه الجوفية وتغيراته المحتملة.
4) تحديد المنشآت وخطوط الخدمات المجاورة للموقع.
5) تحديد نوع الأساس (منعزل، مستمر، حصيرة، أوتاد) والهبوط المسموح حسب الكود.
6) تحديد النظام الانشائي للمنشأ وطريقة التحليل والتصميم المناسبة.
7) تحديد عمر المشروع ومدة التنفيذ وطريقة الانشاء.
8) تحديد الشروط المحيطية وظروف التحميل.

3-متطلبات الحل العام: Requirements for a general solution

بشكل عام يجب أن يحقق الحل العام:

1) معادلات التوازن، انظر الشكل (7).
2) معادلات التوافق (الاستمرار)، انظر الشكل (8).
3) معادلات البنية للمادة (السلوكية).
4) الشروط المحيطية (للقوى والانتقالات).

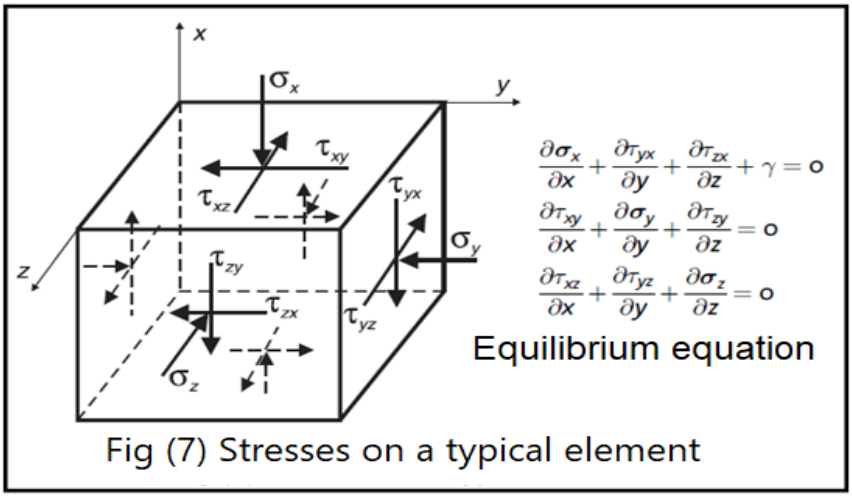
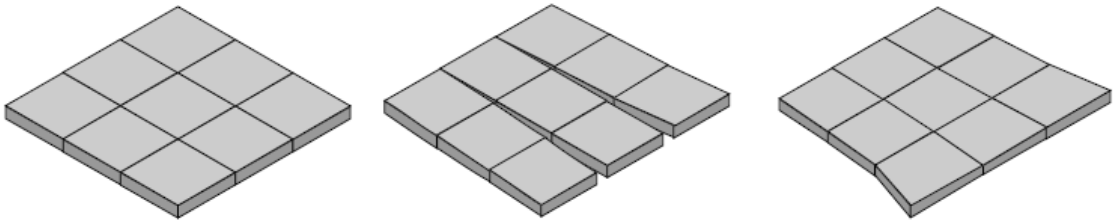


Fig (7) Stresses on a typical element

Strain: التشوهات

$$\varepsilon_x = -\frac{\partial u}{\partial x}; \qquad \varepsilon_y = -\frac{\partial v}{\partial y}; \qquad \varepsilon_z = -\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = -\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}; \qquad \gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}; \qquad \gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}$$



(a) Original (b) Non-compatible (c) Compatible

Fig (8) Models of deformation

Combining the equilibrium (Equations) and compatibility conditions (Equations), gives:

Unknowns:	6 stresses + 6 strains + 3 displacements	= 15
Equations:	3 equilibrium + 6 compatibility	= 9

To obtain a solution therefore requires six more equations. These come from the constitutive relationships.

Constitutive equations

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{xz} \\ \Delta\gamma_{zy} \end{Bmatrix}$$

or $\quad \Delta\boldsymbol{\sigma} = [\mathbf{D}]\ \Delta\varepsilon$

For example, for a linear elastic material the [D] matrix takes the following form:

$$\frac{E}{(1+\mu)} \begin{bmatrix} (1-\mu) & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & (1-\mu) & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & (1-\mu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1/2-\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1/2-\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1/2-\mu) \end{bmatrix}$$

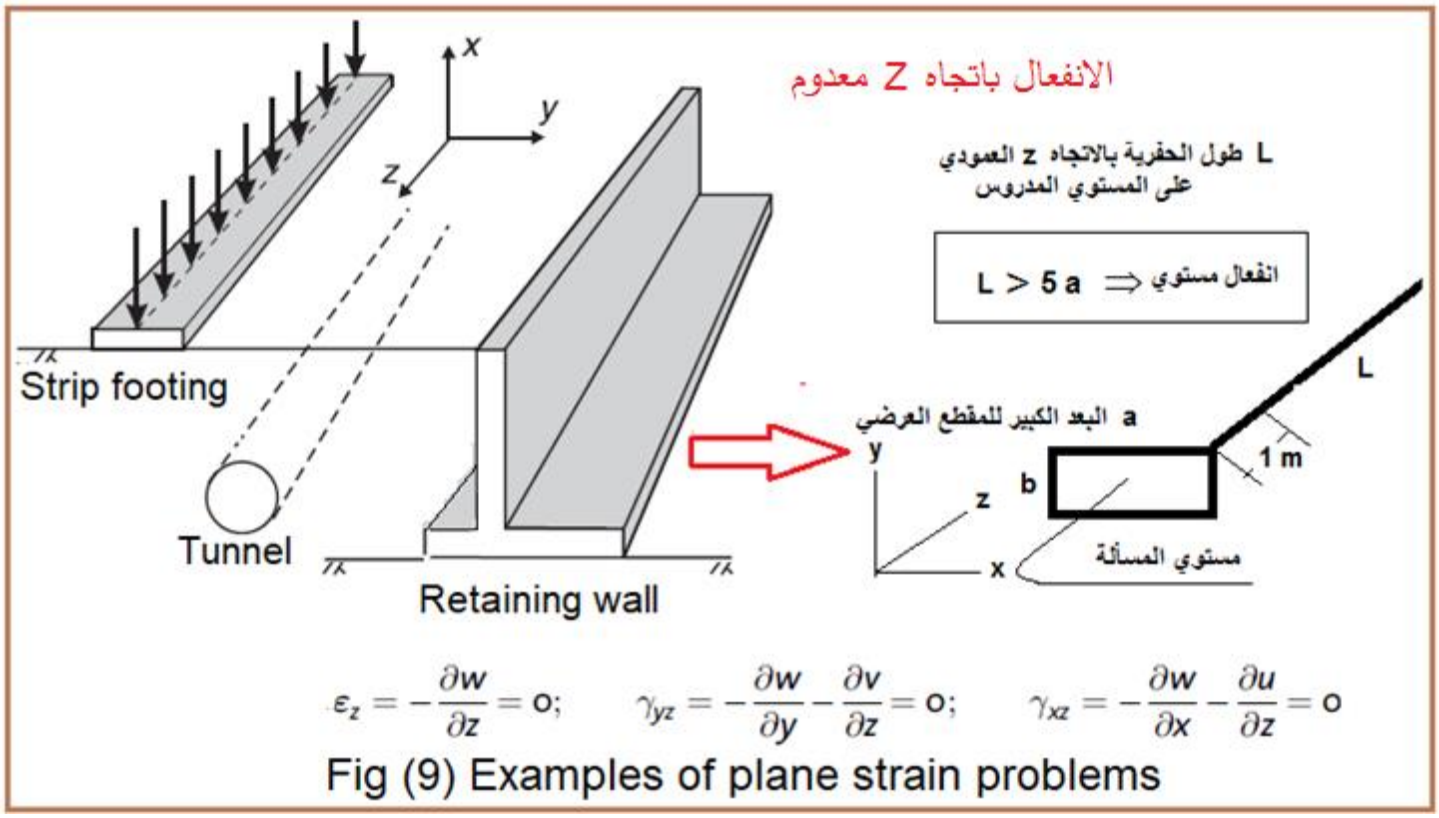
where E and μ are the Young's modulus and Poisson's ratio respectively.

4- نمط التحليل Analysis Type:

لدينا في مسائل الجيوتكنيك الحالات التالية:

1) مسألة الانفعال المستوي Plane Strain:

تنطبق هذه المسألة على تحليل الجدران الاستنادية، والقواعد المستمرة، وتوازن المنحدرات، والأنفاق حيث لها بُعدًا واحدًا كبيرًا جدًا مقارنة بالبعدين الآخرين (انظر الشكل 9) ويكون الانفعال وفق هذا البعد معدوما وندرس واحد متر من البعد الكبير وتعتبر هذه المسائل ثنائية البعد.

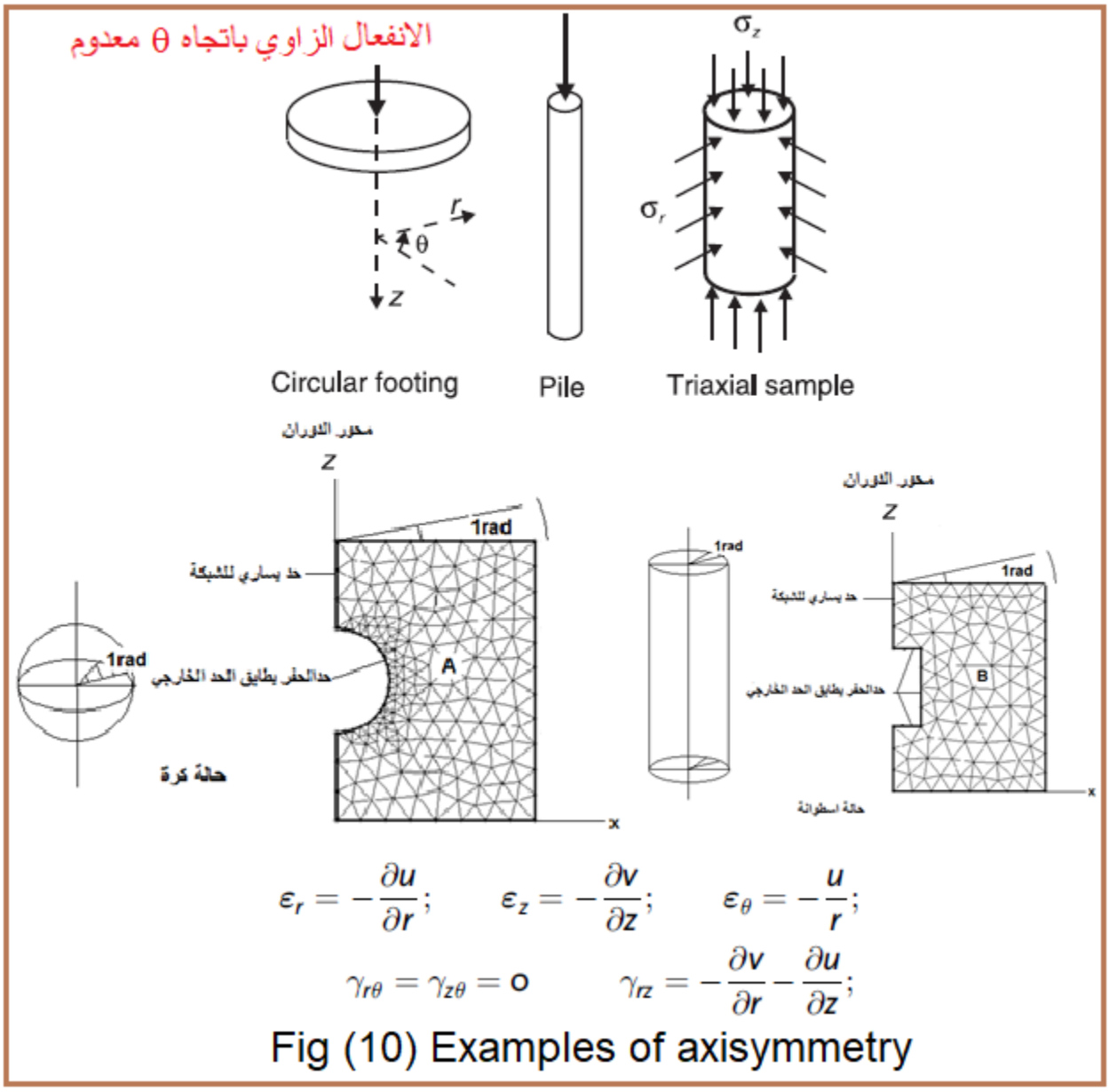


$$\varepsilon_z = -\frac{\partial w}{\partial z} = 0; \qquad \gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \qquad \gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

Fig (9) Examples of plane strain problems

2) مسألة التناظر المحوري Axisymmetric:

هذه المسألة تسمح بتحليل مسائل ثلاثية البعد لها محور تناظر دوراني مثل حالة نفق دائري، خزان كروي أو أسطواني حفرية بئر أسطواني، وتد، أساس دائري...الخ، فبالرغم من أن الادخالات ثنائية البعد فان نتائج التحليل تطبق على مسائل ثلاثية البعد، حيث بسبب محور الدوران تؤول المسألة ثلاثية البعد الى مسألة ثنائية البعد وندرس واحد راديان حول محور الدوران.



$$\varepsilon_r = -\frac{\partial u}{\partial r}; \qquad \varepsilon_z = -\frac{\partial v}{\partial z}; \qquad \varepsilon_\theta = -\frac{u}{r};$$

$$\gamma_{r\theta} = \gamma_{z\theta} = 0 \qquad \gamma_{rz} = -\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z};$$

Fig (10) Examples of axisymmetry

5- طرق التحليل: Methods of analysis

للحصول على حل نظري دقيق، يجب تلبية متطلبات التوازن والتوافق والسلوك المادي والشروط المحيطية، سواء للقوة أو للإزاحة. لذلك نورد في الجدول (1) التالي طرق التحليل المستخدمة حاليًا مقابل هذه المتطلبات النظرية وفي الجدول (2) نورد طرق التحليل المستخدمة مقابل متطلبات التصميم.

Table 1 Basic solution requirements satisfied by the various methods of analysis

Method of analysis	Solution requirements				
	Equilibrium	Compatibility	Constitutive behaviour	Boundary conditions[a]	
				Force	Displacement
Closed form	S	S	Linear elastic	S	S
Limit equilibrium	S	NS	Rigid with a failure criterion	S	NS
Stress field	S	NS	Rigid with a failure criterion	S	NS
Limit analysis:					
Lower bound	S	NS	Ideal plasticity with associated flow rule	S	NS
Upper bound	NS	S		NS	S
Beam–spring approaches	S	S	Soil modelled by springs or elastic interaction factors	S	S
Full numerical analysis	S	S	Any	S	S

[a] S - Satisfied; NS - Not satisfied

Table 2 Design requirements satisfied by the various methods of analysis

Method of analysis	Design requirements		
	Stability	Movements	Adjacent structures
Closed form (linear elastic)	No	Yes	Yes
Limit equilibrium	Yes	No	No
Stress field	Yes	No	No
Limit analysis:			
Lower bound	Yes	No	No
Upper bound	Yes	Crude estimate	No
Beam-spring approaches	Yes	Yes	No
Full numerical analysis	Yes	Yes	Yes

6- طرق التحليل العددي: Numerical analysis methods

1) طريقة جائز – نابض Beam–spring approach

يتم تمثيل التربة بنوابض ذات قساوات تكافئ التربة ويتم بذلك حل مسألة التأثير المتبادل بين التربة والمنشأ بالمجال المرن، يمكن على سبيل المثال حل مسائل الوتد المحمل محوريا وجانبيا، والأساسات كالحصائر والجدران الاستنادية.

مثال: حساب صلابات النوابض لحالة أساس:

$$Ksoil\ (t/m3) = 1000^{*}\ B.C\ (kg/cm2) \qquad (1)$$

$$Ae\ (m2) = A\ total\ (m2)/N\ total \qquad (2)$$

A total = مساحة الاساس

N total = عدد العقد الاجمالي

Ae = مساحة العنصر المحدود المقابل للعقدة الواحدة

$$Kz\ (t/m) = Ksoil\ (t/m3)\ ^{*}Ae\ (m2) \qquad (3)$$

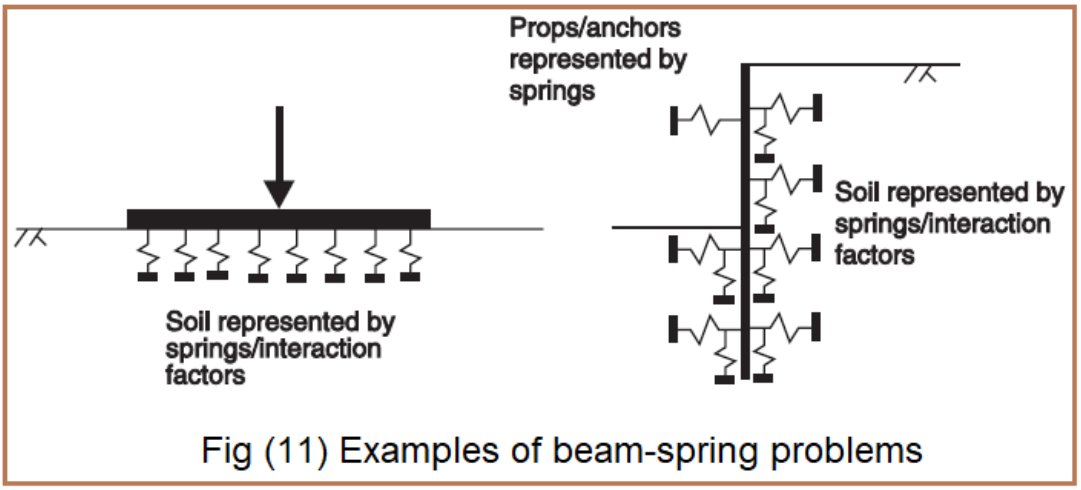


Fig (11) Examples of beam-spring problems

2) طريقة الفروق المحددة: Finite difference method (FDM)

3) طريقة العناصر المحدودة: Finite element method (FEM)

4) طريقة العناصر المحيطية: Boundary element method (BEM)

الطرق الثلاث الأخيرة سنستعرضها اثناء شرح البرامج.

7- موديلات البنية: Constitutive models

1) السلوك الأساسي للتربة: Basic soil behaviour

1=1) مقدمة:

التربة مادة معقدة (تحتوي على اطوار المادة الثلاث) ويعتمد سلوكها، كما لوحظ من الاختبارات في المختبر أو في الموقع على عدد من القضايا، أهمها تكوين التربة (حجم الحبات، محتوى الغضار، إلخ)، تاريخ التحميل (درجة الانضغاط ومسارات التحميل وما إلى ذلك) وظروف الصرف وبالتالي ليس لها سلوكية ثابتة.

1-2) انضغاط هيكل التربة: Compression of the soil skeleton

نميز بين سلوك الترب المفككة (الرملية) والترب المتماسكة (الغضارية) أثناء الانضغاط

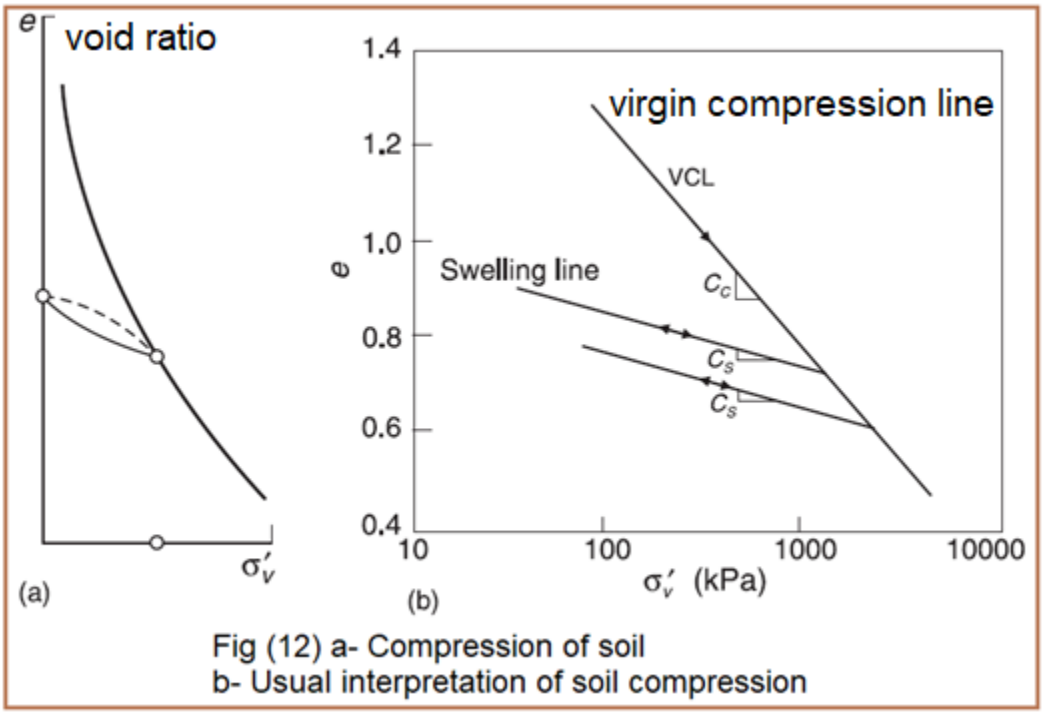


Fig (12) a- Compression of soil
b- Usual interpretation of soil compression

1-3) قص هيكل التربة: Shearing of the soil skeleton

نميز هنا بين السلوك المصرف والسلوك غير المصرف للتربة، التجربة يجب أن تحاكي الواقع الفيزيائي.

1-3-1) الترب الانكماشية: contracting soils

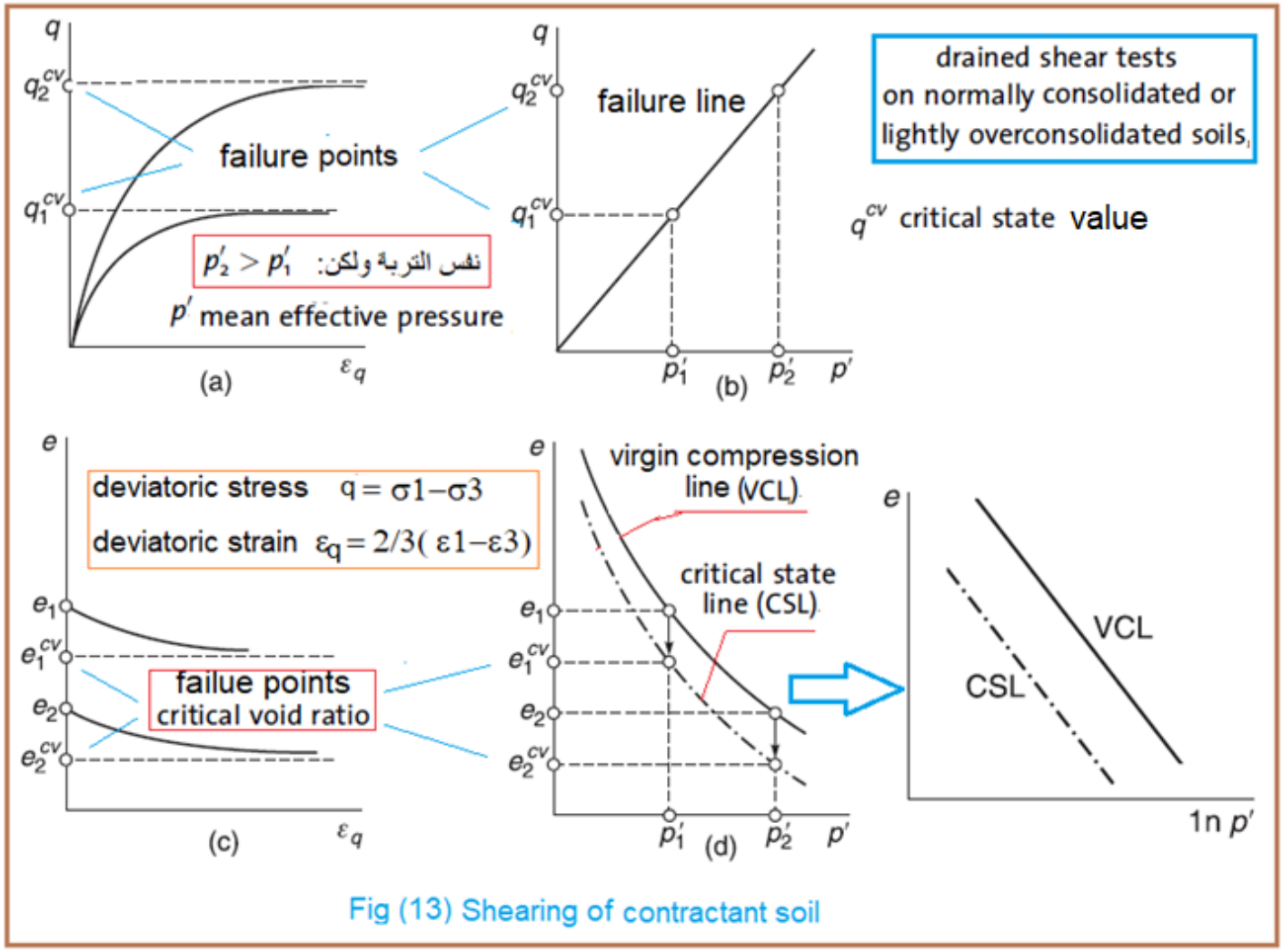
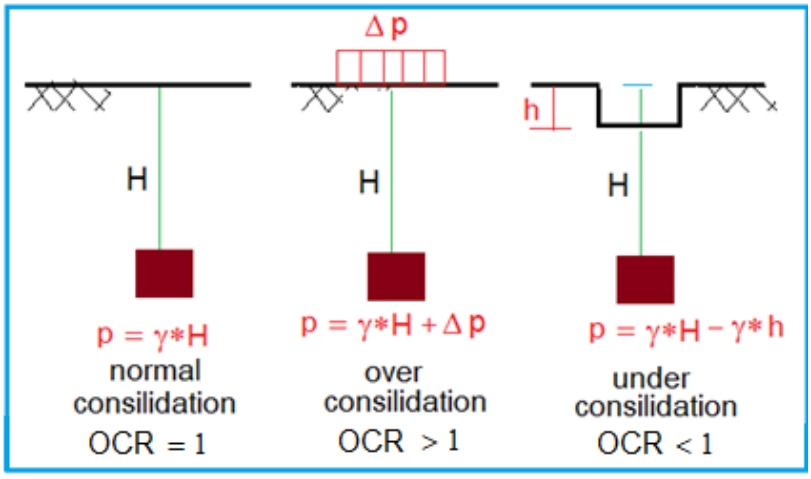


Fig (13) Shearing of contractant soil



1-3-2) الترب الانتفاخية: Dilatant soils

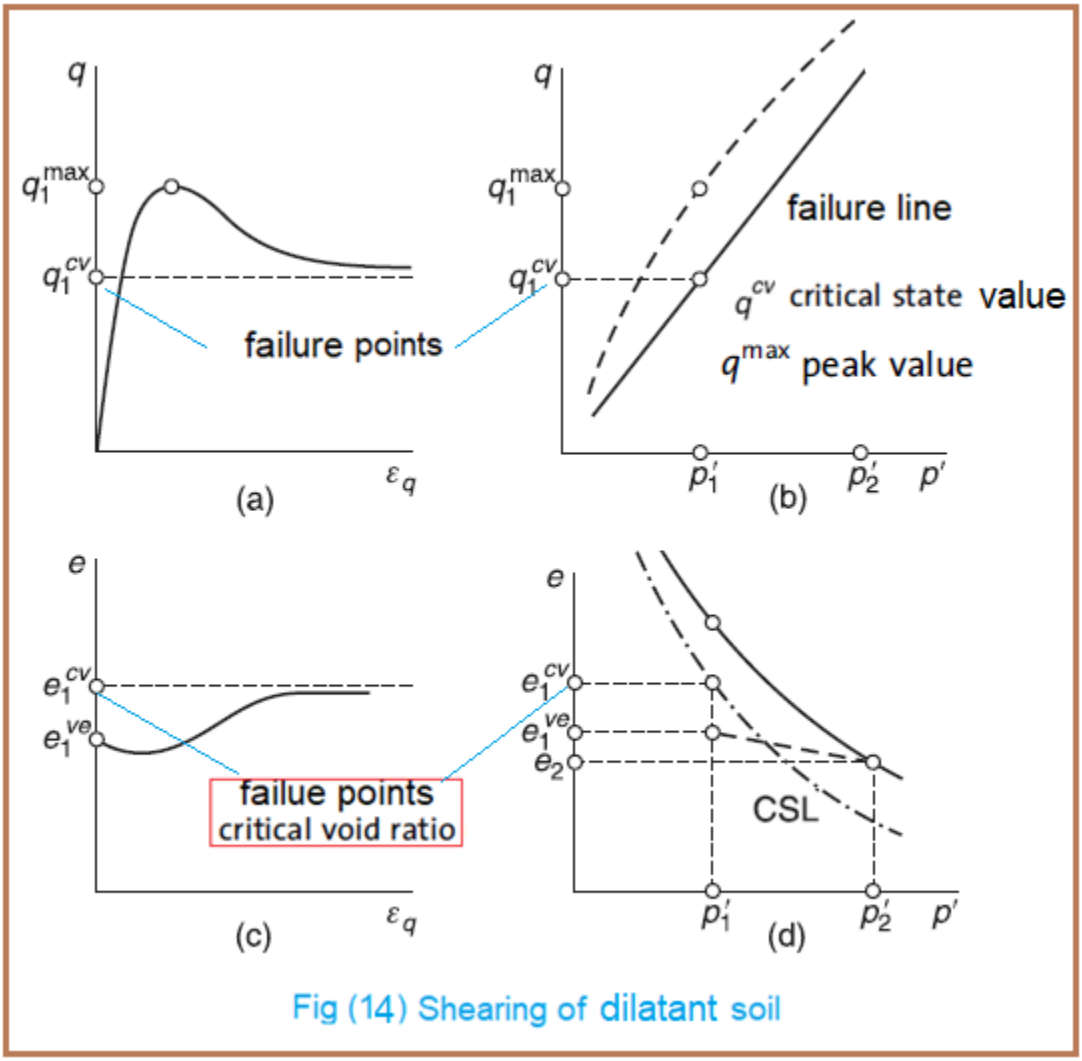


Fig (14) Shearing of dilatant soil

1-3-3) السلوك الحقيقي للتربة الغضارية والرملية: Real soil behaviour: clays and sands

قد يختلف سلوك الترب الحقيقي في حالتي القص والانضغاط عن الحالتين النموذجتين السابقتين نوعا ما ويعتمد ذلك بشكل رئيسي على تاريخ تحميل التربة ودرجة الضغط المسبق الذي تعرضت له مع الزمن degree of preconsolidation.

1-4) السلوك غير المصرف للترب: Undrained behaviour of soils

- نجد هذا السلوك في الترب المشبعة ضعيفة النفوذية كالترب الغضارية.

- دائما التجارب المخبرية يجب أن تحاكي الواقع.

2) نماذج (موديلات) التربة: Soil models

– موديل التربة يمثل بالعلاقة التي تربط الاجهاد بالانفعال وبرامترات الحالة الحدية للتربة (حالة الانهيار) وبالتالي باختيار موديل التربة يتحدد معيار الانهيار.

– نختار موديل التربة بحيث يكون عاما (يمثل ترب متنوعة) ولا يتعلق بطبيعة المسألة.

– لا نختار موديل التربة بسيطا بحيث لا يعبر عن الخصائص الأساسية لسلوك التربة.

– لا نختار موديل التربة معقدا يتطلب تحري خصائص وتفاصيل مبهمة لا تؤثر كثيرا سلوك التربة.

– يجب أن تكون الصيغ الرياضية للموديل قابلة للاستخدام بصورة تزايدات (تفاضلات) في الطرق الرياضية العددية (كطريقة العناصر المحدودة).

– الخصائص الميكانيكية للتربة أو الصخر مثل (معامل يونغ، زاوية الاحتكاك. التماسك) يجب أن تبقى ثابتة عند استخدام الموديل في الحل لأنها تتعلق بالمادة.

– برامترات الحالة الحدية تكون متغيرة اثناء الحل وتحسب اعتبارا من الحالة الابتدائية (من هذه البراميترات: الاجهاد، التشوه، المسامية، نسبة الفراغ، زاوية التماس للحبات، درجة الحرارة، معدل التشوه...الخ).

– يمكن أن نذكر من هذه الموديلات:

1– ***Mohr-Coulomb model (MC)***: linear-elastic-perfectly-plastic

2– ***Jointed Rock model (JR)*** : anisotropic elastic-plastic model

3– ***Hardening Soil model (HS)***

4– ***Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall)***

5– ***Soft Soil Creep model (SSC)***

6– ***Soft Soil model (SS)***

7– ***Modified Cam-Clay model (MCC)***

ثالثا- البرامج المستخدمة في التحليل الجيوتكنيكي:

- برامج تستخدم في البحث العلمي:

1 - برنامج ABAQUS ويعتبر من برامج النمذجة الرياضية عالية المستوى حيث يستخدم في كافة الاختصاصات الهندسية ولجميع أنواع المسائل في الهندسة المدنية والكهربائية والميكانيكية...الخ ويستخدم لأغراض البحث العلمي ولا يستخدم في المكاتب الهندسية لأغراض تجارية ويصنف من البرامج الصعبة والمعقدة.

2- برنامج ANSYS يشبه كثيرا برنامج ABAQUS ومن نفس السوية العلمية والفنية ودرجة الصعوبة.

- برامج تستخدم في المكاتب الهندسية لأغراض تجارية:

1- مجموعة برامج شركة PLAXIS الهولندية:

تم تطويرها من قبل Technical University of Delft ويتم تحديثها باستمرار وتعتبر س البرامج السهلة نسبيا وتضم البرامج التالية:

- PLAXIS 2D وله عدة إصدارات V8.5 و V9.
- PLAXIS 3D FOUNDATION.
- PLAXIS 3D TUNNEL.

2- مجموعة برامج شركة Rocscience الكندية:

تم تطويرها من قبل جامعة تورنتو وتستخدمها 450 جامعة في أكثر من 120 دولة حول العالم وتعتبر من البرامج السهلة وذات الإمكانيات الكبيرة في نمذجة أدق التفاصيل في كافة مسائل الجيوتكنيك وتضم مجموعة كبيرة من البرامج:

- phase2 وله إصدارات محدثة.
- examine2d.
- examin3d.
- examin3d.
- Slide.
- RocLab & RocData.
- Dips 8 Unwedge & Swedge.

3- برنامج FLAC يستخدم طريقة الفروق المحددة ويستخدم مع برنامج SHAKE في حساب تأثير الموقع على الإشارة الزلزالية.

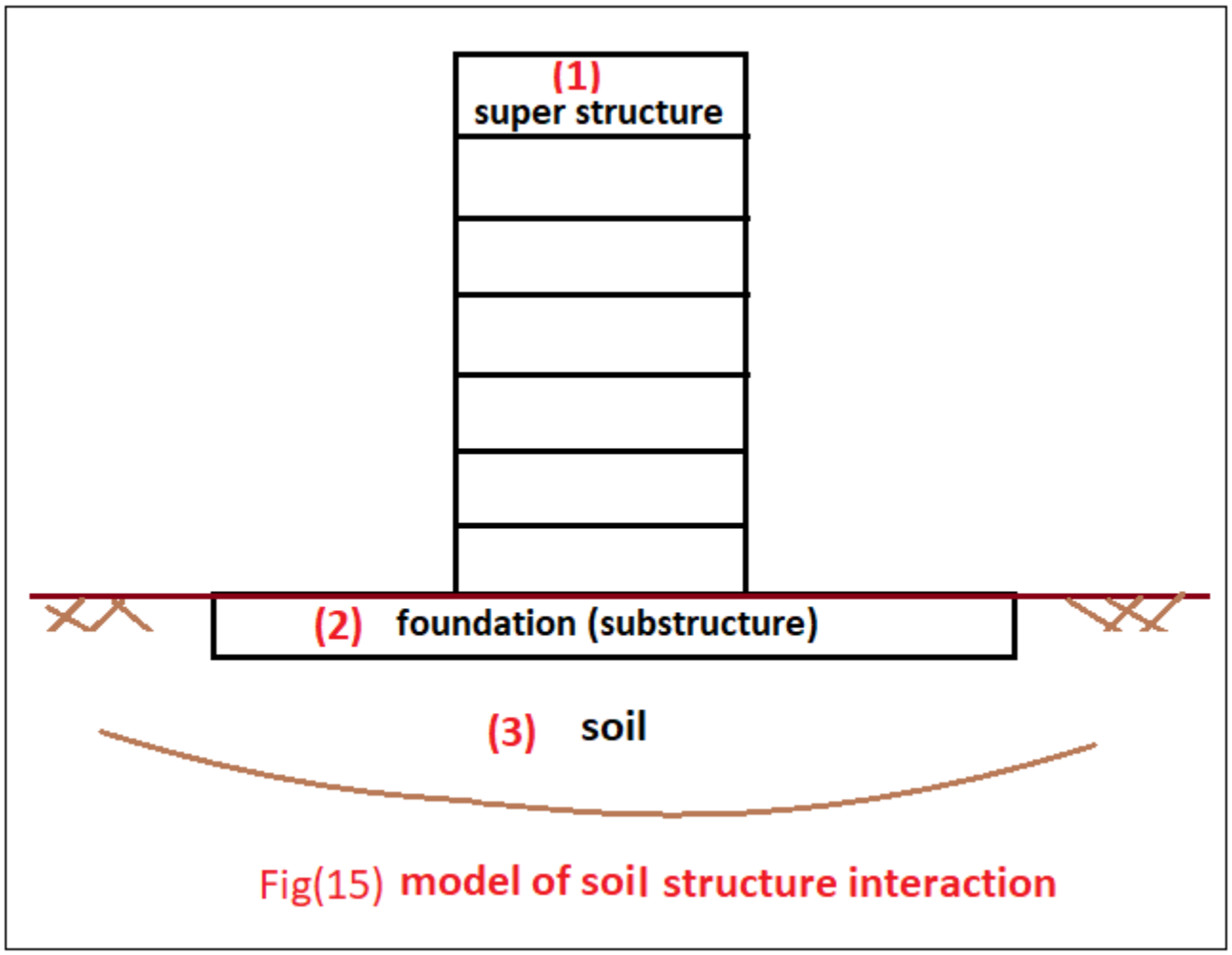
4- البرامج المستخدمة في التحليل الانشائي- الجيوتكنيكي

1- برنامج شركة CSI: SAP 2000 الإصدارات الحديثة منذ عام 2018 وما بعد.

2- ABAQUS،

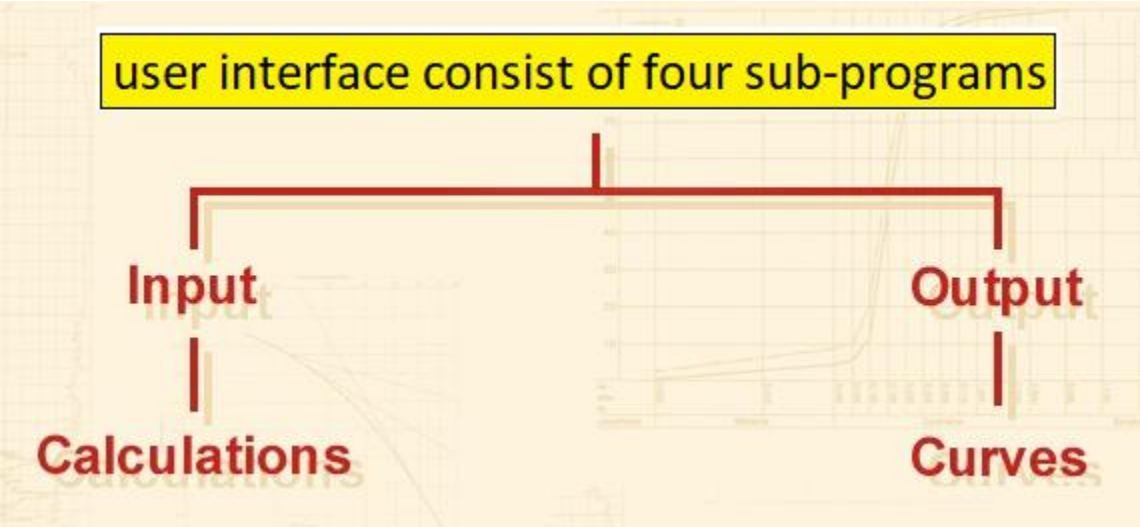
3- ANSYS.

تعتبر التربة المحيطة بالقاعدة جزءا من التربة ويتم نمذجة طبقات التربة والاساس والمنشأ فوق الأرض لحساب التأثير المتبادل بين المنشأ والتربة سواء في الحالة الستاتيكية أو الديناميكية.



Fig(15) model of soil structure interaction

PLAXIS 2D



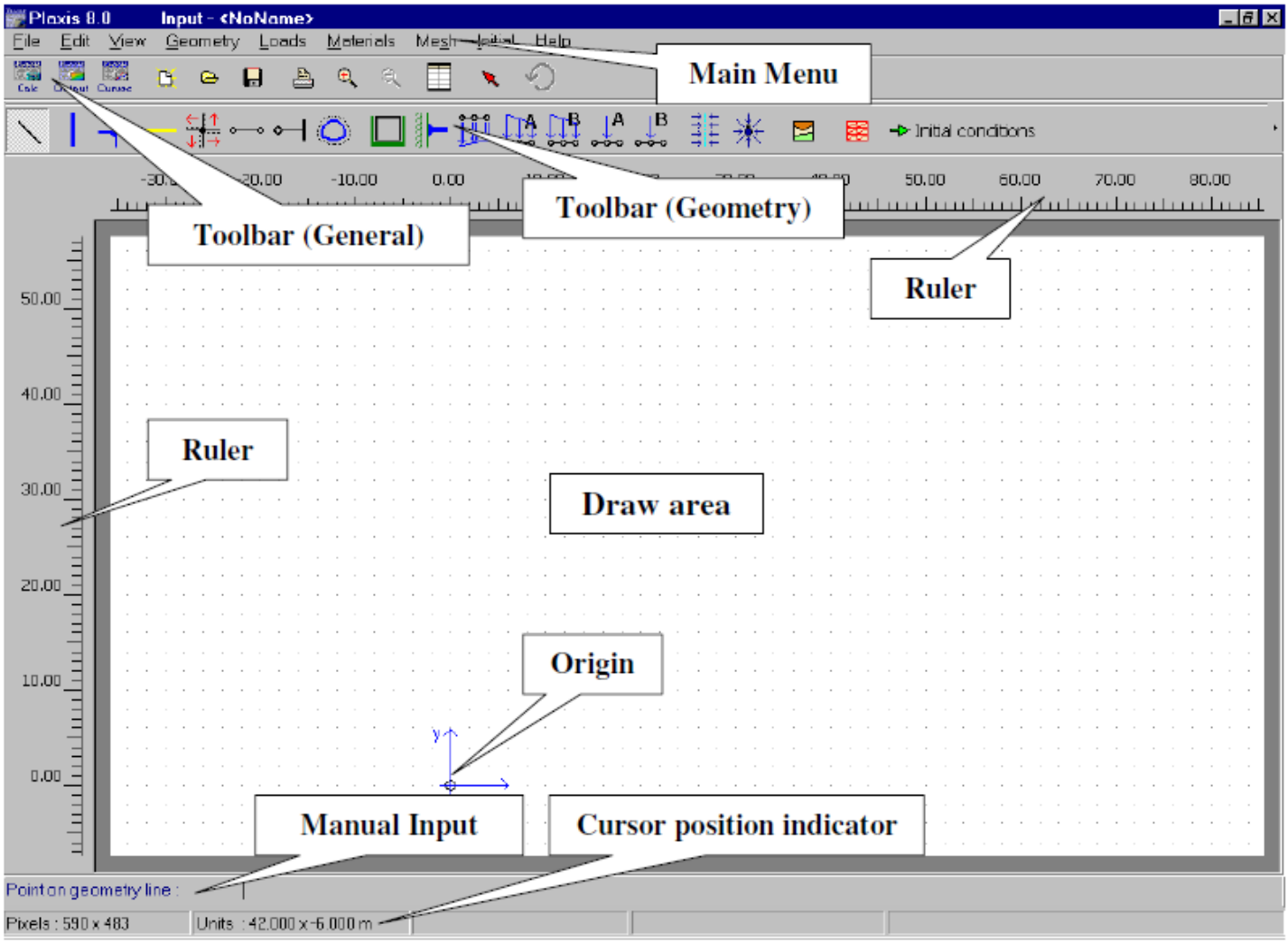


Fig (16) Main window of the Input program (Geometry creation mode)

Features

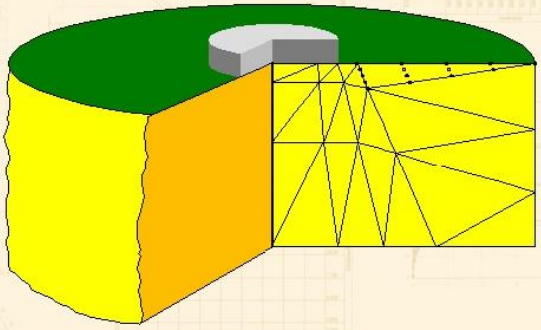
- Different modelling types
  - plane strain
  - axisymmetry
- Element types
  - soil elements
  - walls, plates & shells
  - interface elements
  - anchor elements
  - geotextile elements

Features

- Different modelling types
  - plane strain
  - axisymmetry

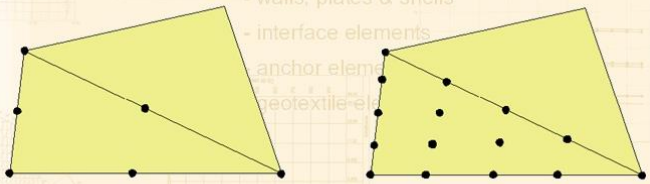
Features

- Different modelling types
  - plane strain
  - axisymmetry



Features

- Different modelling types
  - plane strain
  - axisymmetry
- Element types
  - soil elements
  - walls, plates & shells
  - interface elements
  - anchor elements
  - geotextile elements



6-node elements 15-node elements

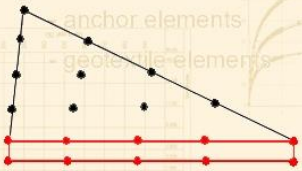
Features

- Different modelling types
  - plane strain
  - axisymmetry
- Element types
  - soil elements
  - walls, plates & shells
  - interface elements
  - anchor elements
  - geotextile elements

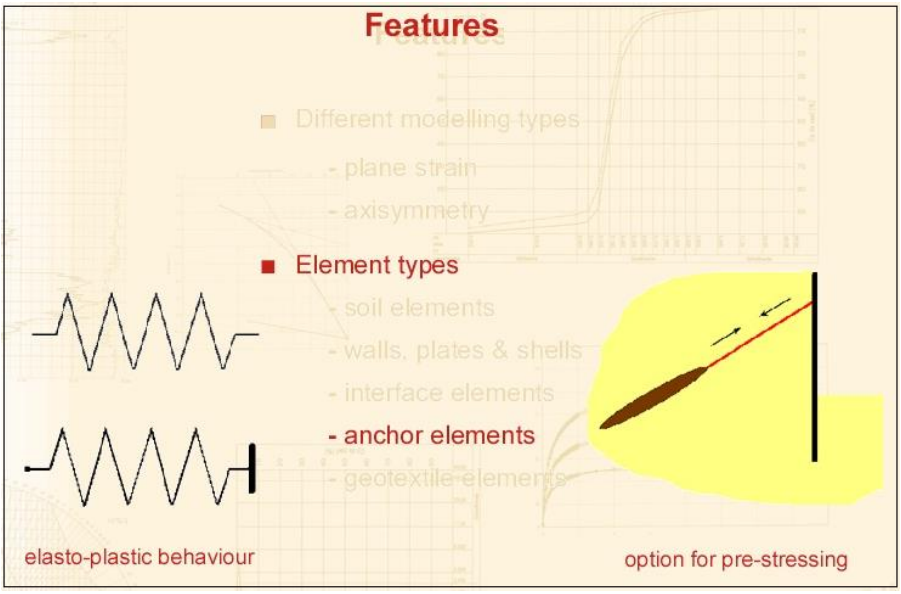
3-node beam elements 5-node beam elements

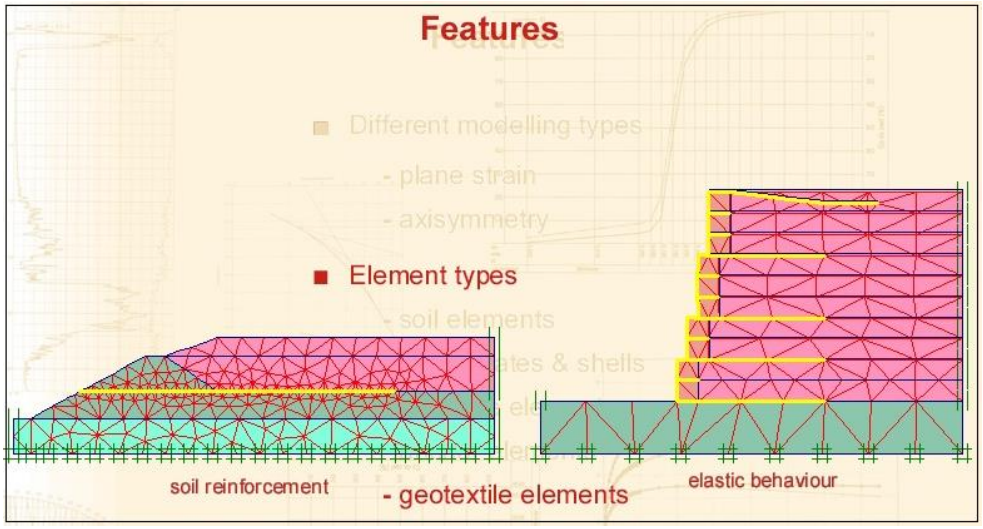
Features

- Different modelling types
  - plane strain
  - axisymmetry
- Element types
  - soil elements
  - walls, plates & shells
  - interface elements
  - anchor elements
  - geotextile elements



for accurate modelling of soil-structure interaction


Features
Different modelling types
- plane strain
- axisymmetry
Element types
- soil elements
- walls, plates & shells
- interface elements
- anchor elements
- geotextile elements
elasto-plastic behaviour
option for pre-stressing

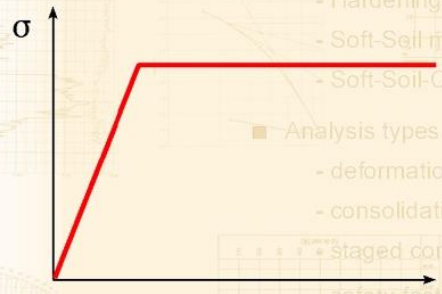

Features
Different modelling types
- plane strain
- axisymmetry
Element types
- soil elements
soil reinforcement
- geotextile elements
elastic behaviour

Features

- Constitutive models
  - Mohr-Coulomb model
  - Hardening-Soil model
  - Soft-Soil model
  - Soft-Soil-Creep model
- Analysis types
  - deformation
  - consolidation
  - staged construction
  - safety factor
  - groundwater flow
  - updated mesh

Features

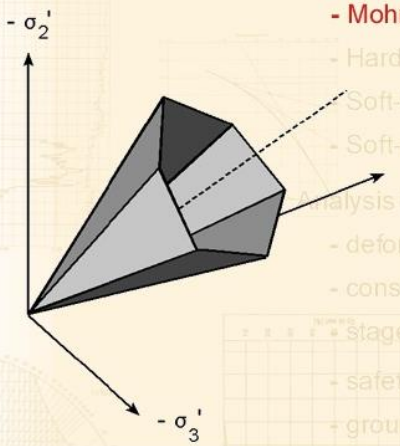
- Constitutive models
  - Mohr-Coulomb model



- General model for soil and rock
- Well-known parameters
- Generally accepted model

Features

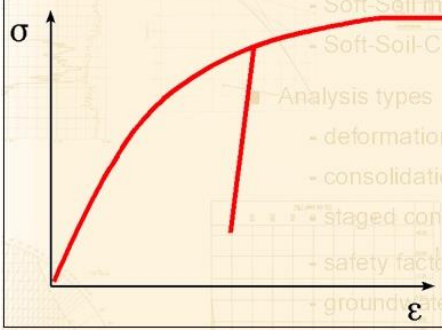
- Constitutive models
  - Mohr-Coulomb model



- General model for soil and rock
- Well-known parameters
- Generally accepted model

Features

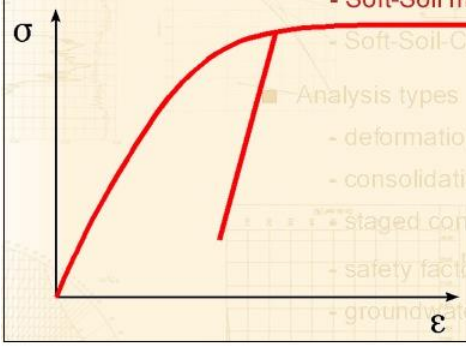
- Constitutive models
  - Hardening-Soil model



  - Advanced model for various types of soil
  - Friction hardening
  - Compaction hardening

Features

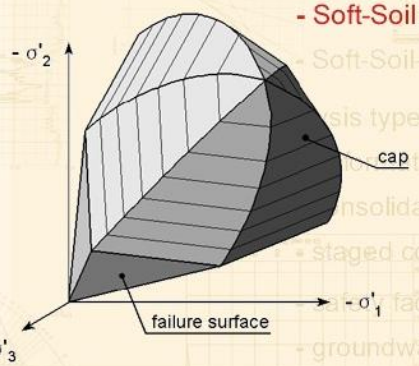
- Constitutive models
  - Soft-Soil model



  - Model for compression of clay and peat
  - Cam-Clay type model
  - Preconsolidation stress

Features

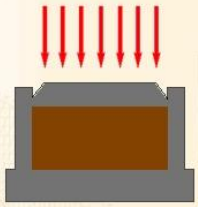
- Constitutive models
  - Soft-Soil model

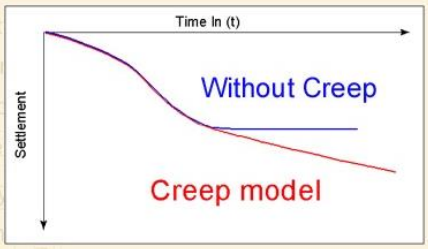


  - Model for compression of clay and peat
  - Cam-Clay type model
  - Preconsolidation stress

Features

- Constitutive models
  - Mohr-Coulomb model
  - Hardening-Soil model
  - Soft-Soil model
  - Soft-Soil-Creep model
- Analysis types
  - deformation
    - elasto-plastic behaviour
    - time independent deformation
    - drained/undrained behaviour
    - updated mesh



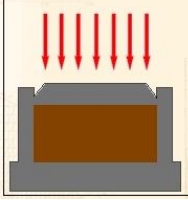


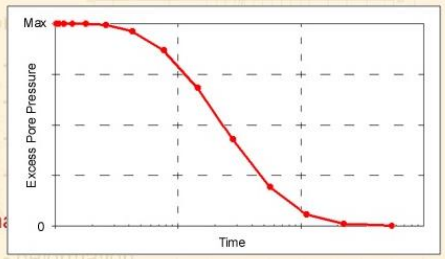
Features

- Constitutive models
  - Mohr-Coulomb model
  - Hardening-Soil model
  - Soft-Soil model
  - Soft-Soil-Creep model
- Analysis types
  - deformation
    - elasto-plastic behaviour
    - time independent deformation
    - drained/undrained behaviour
    - updated mesh

Features

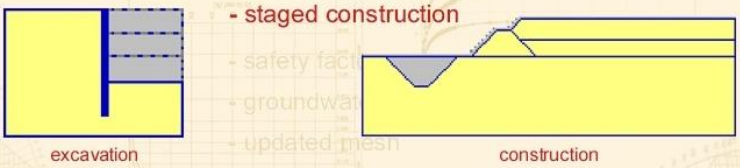
- Constitutive models
  - Mohr-Coulomb model
  - Hardening-Soil model
  - Soft-Soil model
  - Soft-Soil-Creep model
- Analysis types
  - deformation
  - consolidation
    - decay of excess pore pressures
    - available for all constitutive models
  - groundwater flow
  - updated mesh





Features

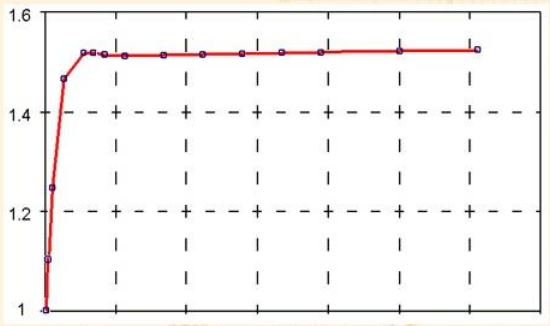
- Constitutive models
- Analysis types
  - deformation
  - consolidation
  - staged construction
  - safety factor
  - groundwater flow
  - updated mesh



realistic modelling of:

Features

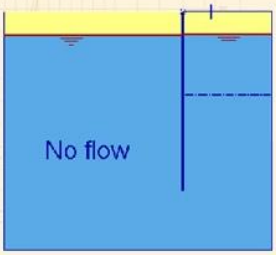
- Constitutive models



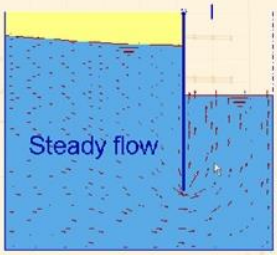
- staged construction
- safety factor
  - safety factor by means of strength reduction
  - safety factor is 1.58

Features

- Constitutive models
  - Mohr-Coulomb model
  - Hardening-Soil model
  - Soft-Soil model
  - Soft-Soil-Creep model



- Analysis types
  - deformation
  - consolidation
  - staged construction
  - safety factor
  - groundwater flow
  - updated mesh

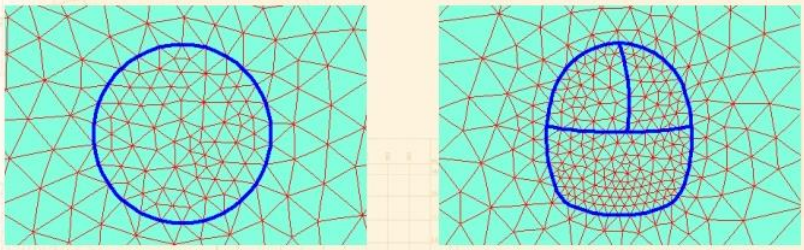


Features

- Tunnel designer
  - various tunnel shapes
- Automatic load-stepping
  - robust calculation procedures

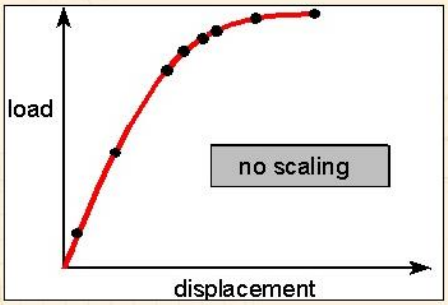
Features

- Tunnel designer
  - various tunnel shapes
- Automatic load-stepping
  - robust calculation procedures

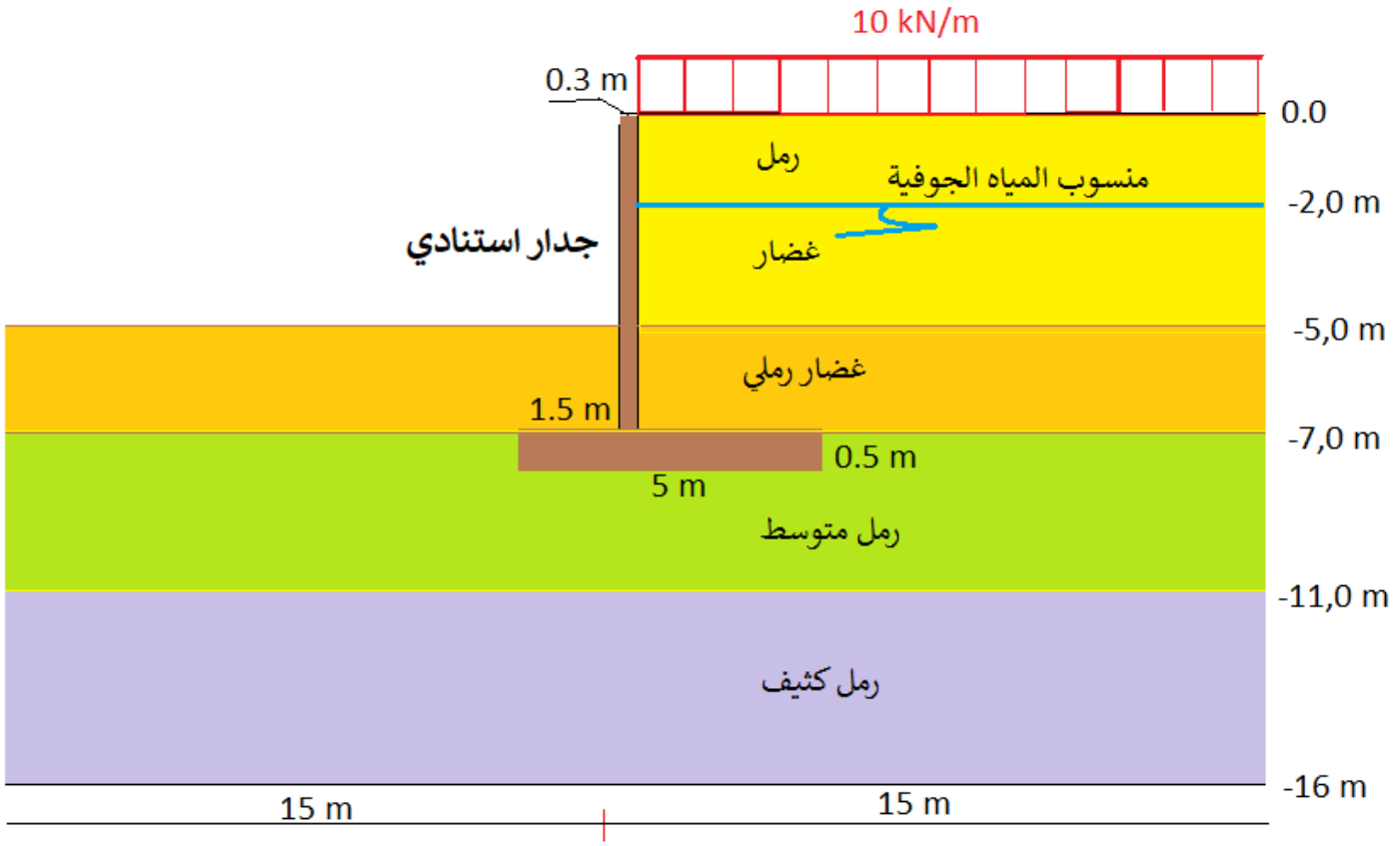


Features

- Tunnel designer
  - various tunnel shapes
- Automatic load-stepping
  - robust calculation procedures



مثال محلول



هذا المثال سيتم حله في برنامج plaxis وسيتم حل مثال توازن منحدر في برنامج phase2