جامعة دمشق
المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية
قسم علم الزلازل
ماجستير تأهيل وتخصص
العام الدراسي 2019-2020

Site Response Analysis (3)
تحليل استجابة الموقع (3)

د. رامي ابراهيم

Analytical methods used to estimate site response
الطرق التحليلية المستخدمة في حساب تأثير الموقع

We presented in previous lecture about the linear approach of estimating site response and we mentioned that the linear approach is applicable for small strains and neglects the nonlinear dynamic behavior of the soil. It is noticed that the nonlinear dynamic behavior appears at large strains which could happen during big earthquakes.

There are two methods account for soil **nonlinearity**

- Equivalent linear approach
- Nonlinear approach

تطرقنا في المحاضرة السابقة للمنهجية الخطية في تقدير استجابة الموقع وأن تلك المنهجية فعالة في حال الإجهادات الصغيرة ولكنها لاتأخذ بعين الاعتبار السلوك الديناميكي اللاخطي للتربة.
تجدر الإشارة إلى أن السلوك اللاخطي يظهر في حال تطبيق إجهادات عالية والتي يمكن أن تنتج خلال الزلازل الكبيرة القدر.

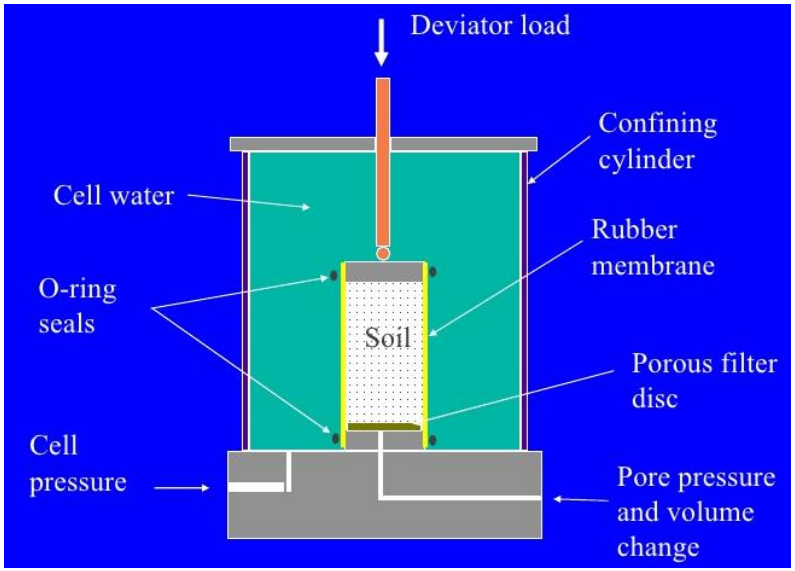
توجد طريقتين مطبقتين حالياً تأخذان بعين الاعتبار السلوك **اللاخطي** للتربة

- المنهجية الخطية المكافئة
- المنهجية اللاخطية

Dynamic deformation test

اختبار التشوه الديناميكي

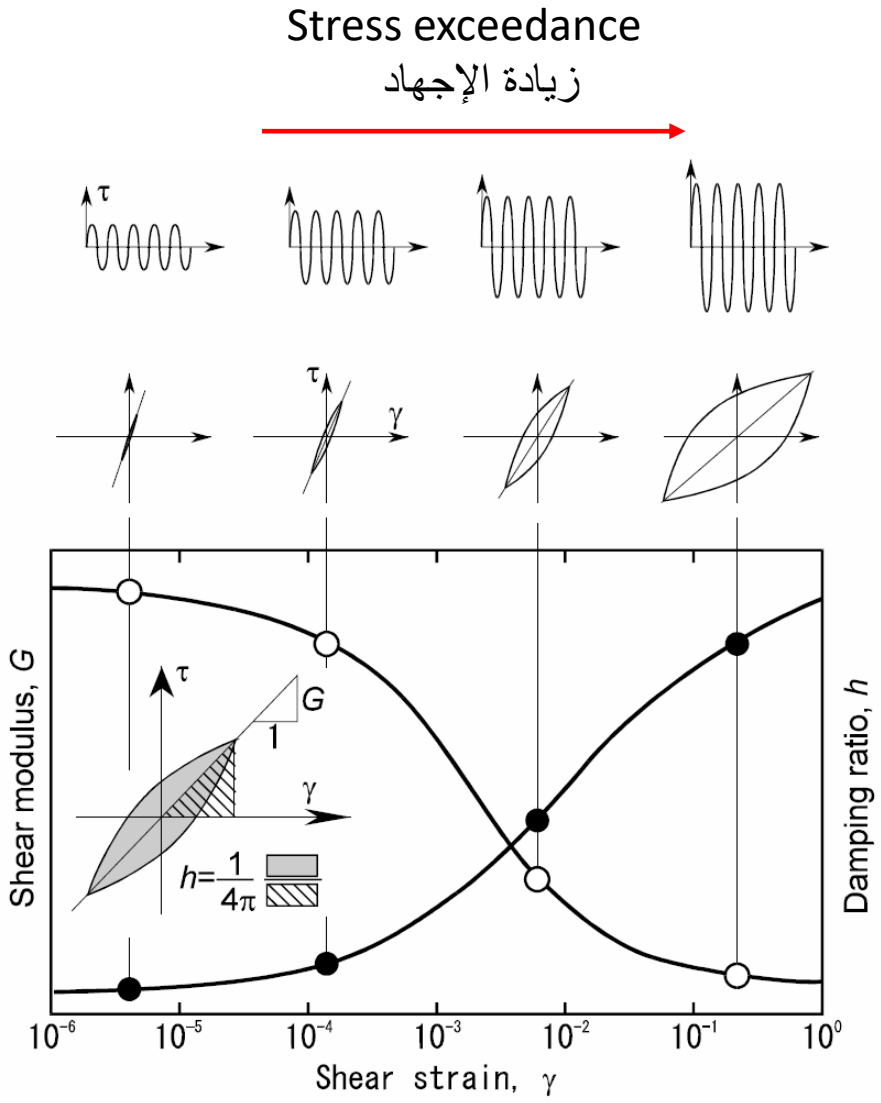
It is used in the laboratory for measurement of soil properties under static loading conditions. A cylindrical specimen is placed between the top and bottom loading platens and surrounded by a thin rubber membrane. The specimen is subjected to an axial stress and a radial stress and the difference between them is called deviator stress. The stress are applied cyclically and the stresses and strains measured in the test can be used to compute the shear modulus (G) and damping ratio (h).



Triaxial Test

تتم هذه التجربة في المخبر لقياس خصائص التربة تحت تطبيق أحمال ستاتيكية. توضع عينة دائرية بين صفيحتين من الأعلى والأسفل محاطة بغشاء مطاطي رقيق. تتعرض العينة لإجهادات محورية وأخرى شعاعية من الجوانب ويسمى الفرق بينهما بالإجهاد الرئيسي. تطبق الإجهادات بشكل تكراري وتستخدم قيمة الإجهادات والانفعالات المقاسة لحساب معامل القص (G) ونسبة التخامد (h).

Dynamic deformation test
اختبار التشوه الديناميكي



Stress-strain relation: at small strains the relation is almost linear and it takes a hysteresis shape at large stresses. τ is the stress, γ is the strain.

علاقة الإجهاد-إنفعال : تأخذ العلاقة شكلاً خطياً في حال تطبيق إجهادات صغيرة وشكلا أهليلجيا أو هيستيرياً في حال تطبيق إجهادات كبيرة. تشير τ إلى الإجهاد و γ إلى الإنفعال.

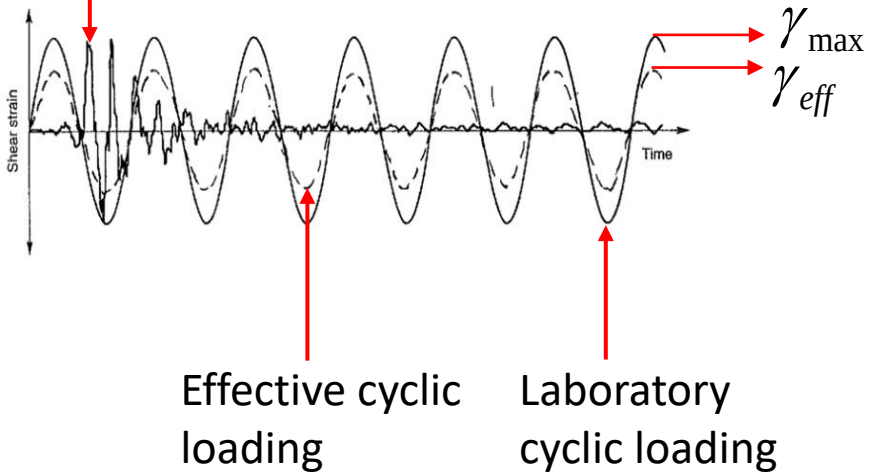
From the test we obtain shear-modulus (G) versus shear-strain (γ), and damping ratio (h) versus shear-strain relationships.

نحصل من التجربة على العلاقة التي تربط معامل القص بالإنفعال القصي وكذلك على العلاقة التي تربط نسبة التخامد بالإنفعال القصي.

Dynamic deformation test

اختبار التشوه الديناميكي

Transient earthquake loading



Shear modulus and damping curves can be determined in a laboratory where cyclic harmonic loading is applied.
However, this loading is significantly different than transient earthquake loading.
So we use an effective shear strain to "convert" the transient shear to a laboratory-equivalent shear calculated as follow,

يتم تحديد معامل القص ومنحنيات التخامد في المخبر بتطبيق أحمال متوافقة دورية. ولكن يجب الانتباه إلى أن هذه الأحمال تختلف عن الأحمال المطبقة أثناء الزلزال والتي تأخذ شكل إشارة عابرة تتخامد مع الزمن ولذلك فإننا نحدد الإنفعال القصي الفعال لتحويل أوتقريب الإشارة الزلزالية العابرة إلى قصية مكافئة مقاسة من خلال التجارب المخبرية كما في العلاقات التالية

$$\gamma_{eff} = R_{\gamma}(\gamma_{max})$$

$$R_{\gamma} = \frac{Magnitude - 1}{10}$$

Equivalent Linear Approach (ELA)
المنهجية الخطية المكافئة

In the equivalent linear approach, we use a single shear modulus and damping value for each layer that represents the average shear response during the earthquake.

How does ELA account for nonlinearity?
The solution is iteratively obtained by fitting with modulus reduction and damping curves

في الحسابات وفق المنهجية الخطية المكافئة نستخدم قيمة واحدة لمعامل القص وقيمة واحدة لمعامل التخامد وذلك لكل طبقة على حدا وتمثل تلك المعاملات متوسط الاستجابة القصية أثناء حدوث الزلزال.

كيف يتم احتساب اللاخطية باستخدام الطريقة الخطية المكافئة؟
يتم إيجاد الحل بشكل تكراري بإجراء مطابقة مع معاملات القص ومنحنيات التخامد.

Equivalent Linear Approach (ELA)
المنهجية الخطية المكافئة

The ELA is a modification of the linear approach available for a better estimate of the site response, especially in problems involving moderately large strains such as those caused by moderate to strong earthquakes.

Analysis is done in the frequency domain on a 1D soil column idealized as a continuum of infinite horizontal lateral extent.

It is directly applicable for layers modelled as a linear elastic material.

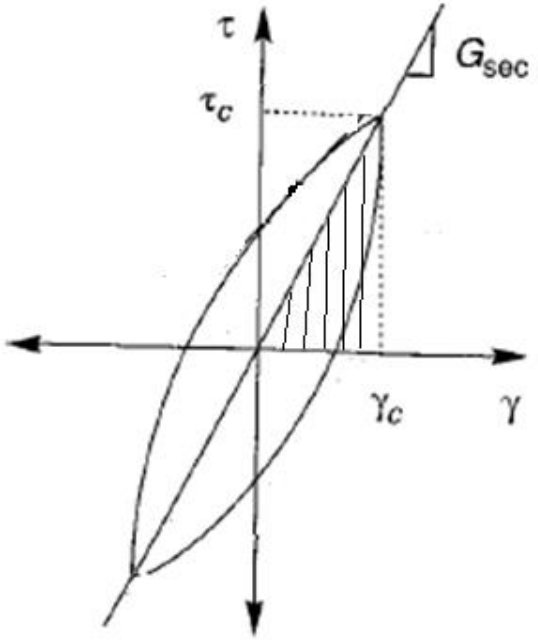
تعتبر المنهجية الخطية المكافئة عبارة عن تعديل للمنهجية الخطية للوصول إلى تقدير أفضل لإستجابة الموقع وخصوصاً في حال حدوث إنفعالات عالية كتلك الناتجة عن الزلازل المتوسطة والقوية.

تجرى التحاليل في المجال الترددي لعمود طبقي أحادي البعد ممثل بطبقات أفقية ممتدة بشكل غير محدود النهايات.

تطبق هذه الطريقة على اعتبار أن الطبقات منمذجة كمواد مرنة ذات سلوك خطي.

Equivalent Linear Approach (ELA)

المنهجية الخطية المكافئة



Actual hysteretic stress-strain behavior is approximated by equivalent soil properties: secant shear-modulus G_{sec} and ξ = hysteretic damping ratio. The two parameters are shear-strain dependent. There is thus a need to deal with them iteratively. An objective strain level is needed to select these parameters.

Invariably, computer codes are necessary to conduct the ELA

$$\xi = \frac{1}{4\pi}\frac{A_{loop}}{A_{triangle}} = \frac{1}{2\pi}\frac{A_{loop}}{G_{\sec}\gamma_c^{\,2}}$$

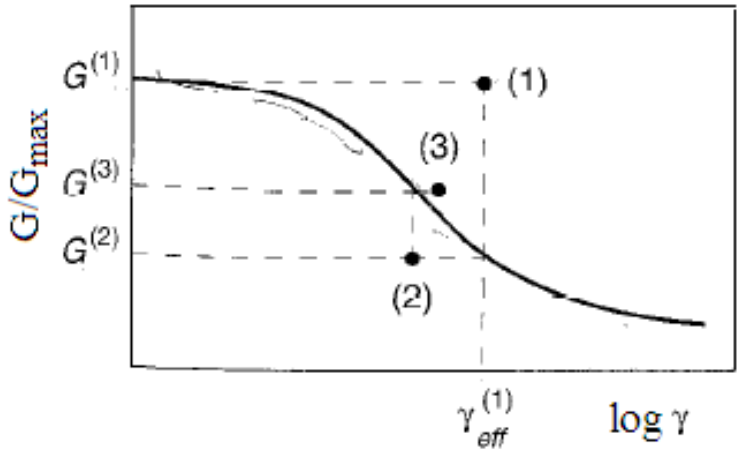
ξ = hysteretic damping ratio

يتم تقريب سلوك اجهاد-انفعال وفق المنهجية الخطية المكافئة إلى خصائص التربة المكافئة وهما معامل القص القطعي G_{sec} ونسبة التخامد ذات السلوك الهستيري ξ. وهذان المعاملان تابعين للانفعال القصي. وهنالك حاجة لإيجاد الحل باستخدام الطريقة التكرارية ولابد من اختيارمستوى إنفعال موضوعي لإختيار هذه المعاملات. من المؤكد أنه لابد من استخدام برامج حاسوبية لانجاز الحسابات وفق المنهجية الخطية المكافئة.

Equivalent Linear Approach (ELA)
المنهجية الخطية المكافئة

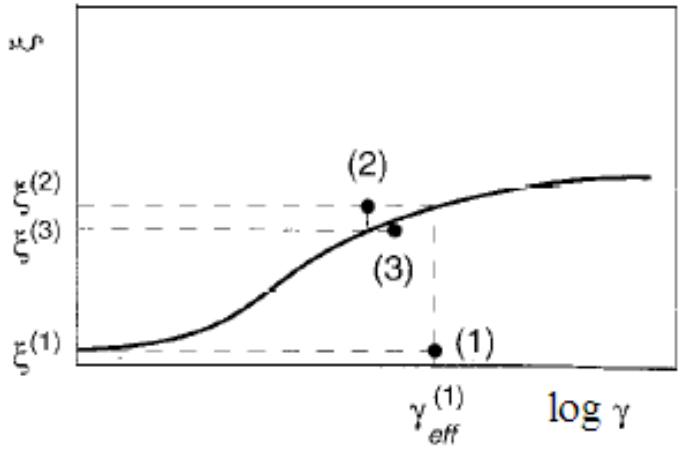
Since computed strain values depend on the equivalent linear properties, the iterative approach takes place as shown schematically. This is illustrated below:

بسبب أن قيمة الإنفعال المحسوب تعتمد على الخصائص الخطية المكافئة فإن المنهجية التكرارية تتم كما هو موضح في الشكل الموجود في الأسفل



Shear-modulus ratio versus shear strain.

منحني يوضح توزع نسبة معامل القص إلى معامل القص الأعظمي مع الإنفعالات القصية



Shear-modulus ratio versus shear strain.

منحني يوضح توزع معامل التخامد مع الإنفعالات القصية

Equivalent Linear Approach (ELA)
المنهجية الخطية المكافئة

1. Initial estimates of G and ξ are made for each layer. The initially estimated values usually correspond the same strain level; the low- strain values are often used for initial estimate (see point 1 above).

1.يتم تقدير أولي لكل من G و ξ لكل طبقة. تتطابق القيم المقدرة مع نفس مستوى الإنفعال وعادة مايتم استخدام قيم الإنفعالات الصغرى للتقدير الأولي (النقطة 1 في الشكل الموجود في الشريحة السابقة).

2. The estimated G and ξ are used to compute the ground response, including time histories of shear strain for each layer.

2. تسخدم القيم المقدرة لكل من G و ξ في حساب الاستجابة الأرضية متضمنة السجل الزمني للإنفعالات القصية لكل طبقة.

3. The effective shear strain in each layer is determined from the maximum shear strain in the computed shear strain time history for layer j.

$$\gamma_{eff\ j} = R_\gamma \gamma_{\max j}$$

where j refers to the iteration number and R_γ is the ratio of the effective shear strain to the maximum shear strain. R_γ depends on earthquake magnitude and can be estimated from

$$R_\gamma = \frac{M-1}{10}$$

Equivalent Linear Approach (ELA)
المنهجية الخطية المكافئة

3. يتم تحديد الإنفعال القصي الفعال لكل طبقة j من الإنفعال القصي الأعظمي للسجل الزمني للإنفعال القصي المحسوب. J متغير يشير إلى رقم العملية التكرارية R_γ نسبة الإنفعال القصي الفعال إلى الإنفعال القصي الأعظمي.

4. From the effective shear strain, new equivalent linear values, $G^{(i+1)}$ and $\varsigma^{(i+1)}$ are chosen for the next iteration (see points 2 and 3 above).

4. من قيمة الإنفعال القصي الفعال يتم تحديد قيمة خطية مكافئة جديدة لكل من معاملي القص والتخامد ليتم استخدامهما في العملية التكرارية التالية (انظر إلى النقطتين 2 و 3 في الشريحة قبل السابقة).

5. Steps 2 to 4 are repeated until differences between the computed shear modulus and damping ratio values fall below some predetermined value in all layers.

5. تكرر الخطوات 2 إلى 4 حتى يصبح الفارق بين قيم الإنفعال القصي ونسبة التخامد أصغر من القيم المحددة مسبقاً لكل الطبقات.

Equivalent Linear Approach (ELA)
المنهجية الخطية المكافئة

Even though the process of iteration toward strain compatible soil properties allows nonlinear soil behavior to be approximated, it is important to remember that the method is still a linear method of analysis. The soil properties are constant through out the duration of the earthquake, regardless of whether the strains at a particular time is small or large.

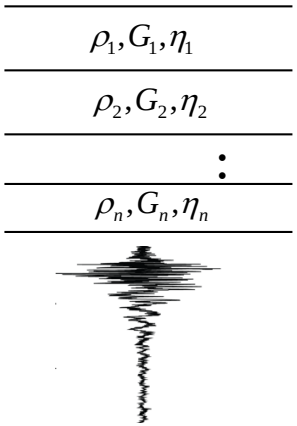
على الرغم من أن عملية التكرارية تهدف إلى التقريب من السلوك الخطي للتربة بالمطابقة مع خصائص التربة المعتمدة على تغير الإنفعال فلابد أن نتذكر أن طريقة التحليل لاتزال طريقة خطية. ففي هذه الحالة فإن خصائص التربة تكون ثابتة خلال فترة الزلزال غير مكترثين فيما إذا كانت الإنفعالات عند زمن معين صغيرة أو كبيرة.

The procedure was first coded in the widely-used software **SHAKE** (Schnabel et al, 1972) and in its subsequent variants such as SHAKE91 (Idriss and Sun 1991) and other more recent codes like **DEEPSOIL** or **DYNEQ**, ….

كتبت مجموعة برامج لحساب المنهجية الخطية المكافئة وكتب أول برنامج وهو برنامج SHAKE (شنابل وآخرون 1972) ومن ثم عدل من قبل (أدريس وصن 1991) وسمي SHAKE91 وهنالك برامج أخرى مثل DEEPSOIL و DYNEQ.....

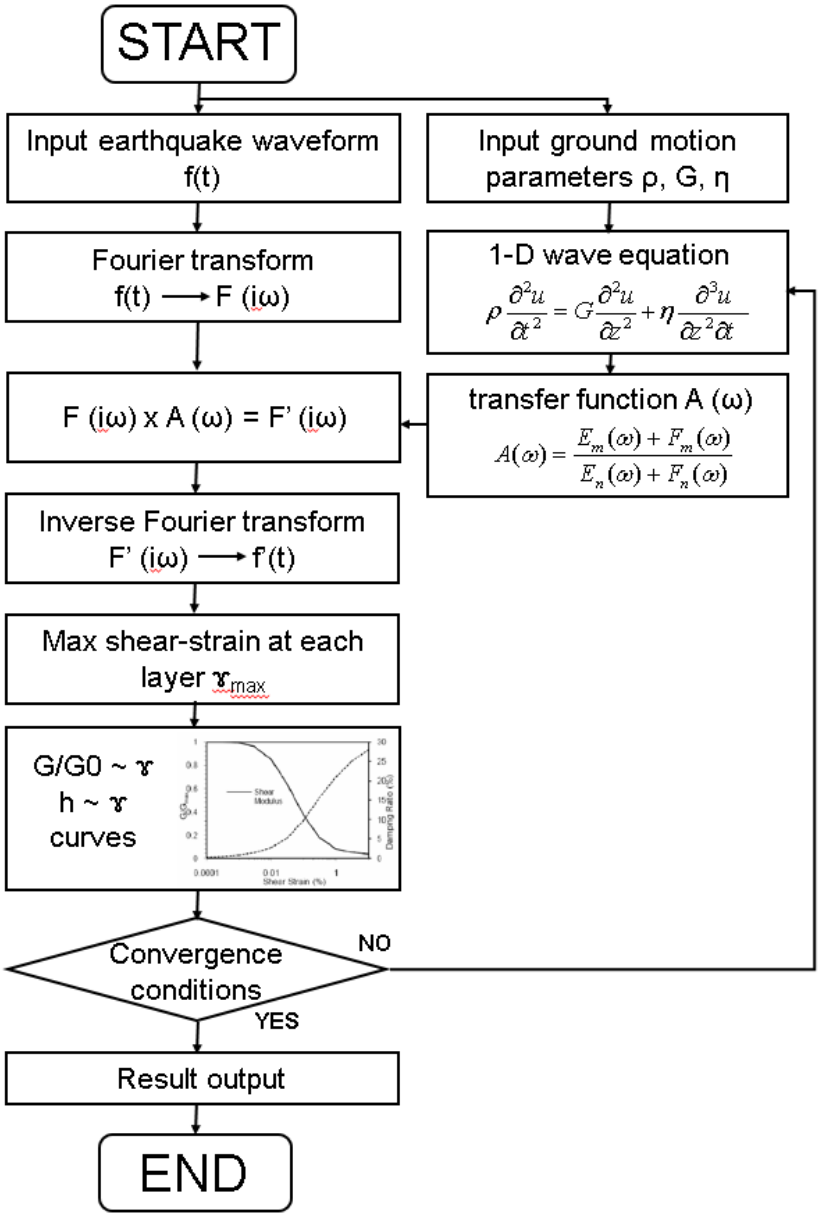
Flowchart of equivalent linear approach steps

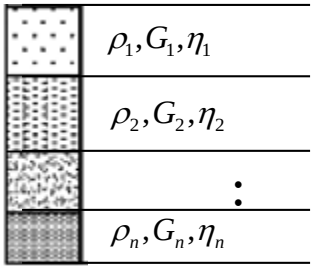
مخطط يوضح خطوات المنهجية الخطية المكافئة



According to ELA layers are horizontal and input motion is vertically transferred from bedrock to the free surface.

طبقاً للمنهجية الخطية المكافئة فيجب اعتبار الطبقات أفقية وانتشار الأمواج بشكل شاقولي من صخر الاساس إلى سطح الأرض





Transfer function between bedrock and free surface is based on 1-D wave equations

يحسب تابع التحويل بين صخر الاساس والسطح الحر بناءاً على المعادلات الموجية في المجال أحادي البعد.

Nonlinear approach
المنهجية اللاخطية

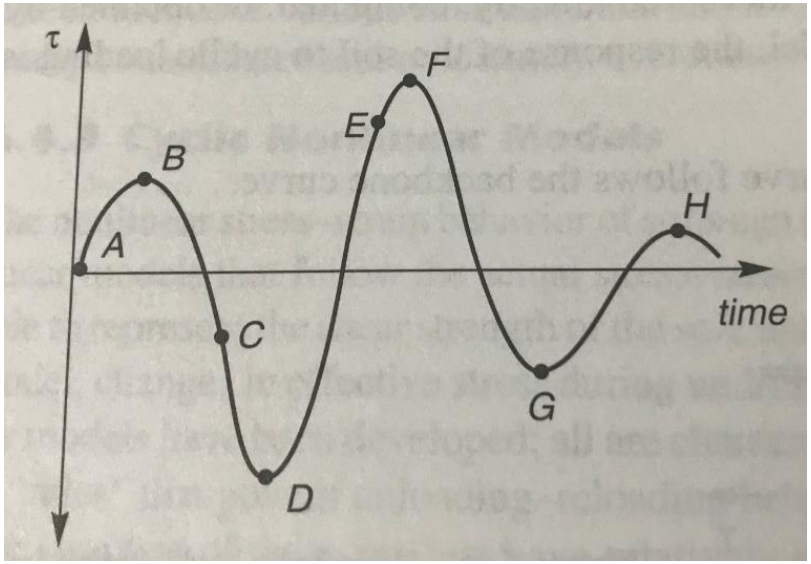
Although the equivalent linear approach is computationally convenient and provides reasonable results for many practical problems, it remains an approximation to the actual nonlinear process of seismic ground response. An alternative approach is to analyze the actual nonlinear response of a soil deposit using direct numerical integration in time domain. By integrating the equation of motion in small time steps a nonlinear stress-strain relationship or advanced constitutive model can be used. For practical use, most models attempt to directly trace the actual stress-strain hysteresis loops.

على الرغم من أن المنهجية الخطية المكافئة فعالة ومريحة أثناء إجراء الحسابات وتزود بحلول عملية إلى أنها تبقى طريقة تقريبية للعلميات اللاخطية الفعلية الهادفة لحساب الاستجابة الأرضية.
ففي هذا السياق هنالك مناهج بديلة تقوم بحساب الاستجابة اللاخطية الفعلية لتوضعات التربة مستخدمين عمليات تكامل رقمي مباشر في المجال الزمني. تتم التكاملات للمعادلات الموجية في فواصل زمنية صغيرة مستخدمين علاقات إجهاد-انفعال لاخطية أو موديلات تأسيسية متقدمة.
عملياً تقوم معظم الموديلات بأخذ منحني الإجهاد-الإنفعال ذو السلوك الهيستيري بعين الإعتبار في حساب السلوك اللاخطي للتربة.

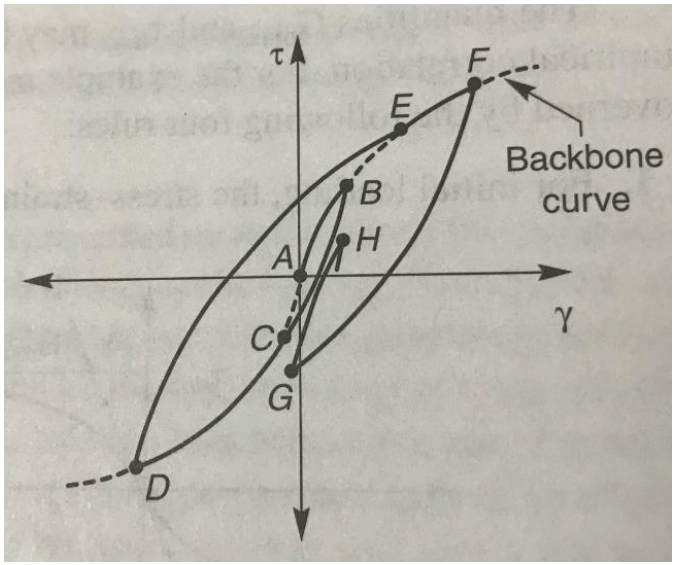
Nonlinear approach
المنهجية اللاخطية

In order to define the hysteretic rule, the method relies on a mathematical relationship for the backbone curve and the loading-unloading curves.

تستخدم علاقات رياضية لكي يتم تحديد السلوك الهيستيري ومنحني الإجهاد الوسطي والمنحنيات الناتجة عن تطبيق وإزالة الأحمال

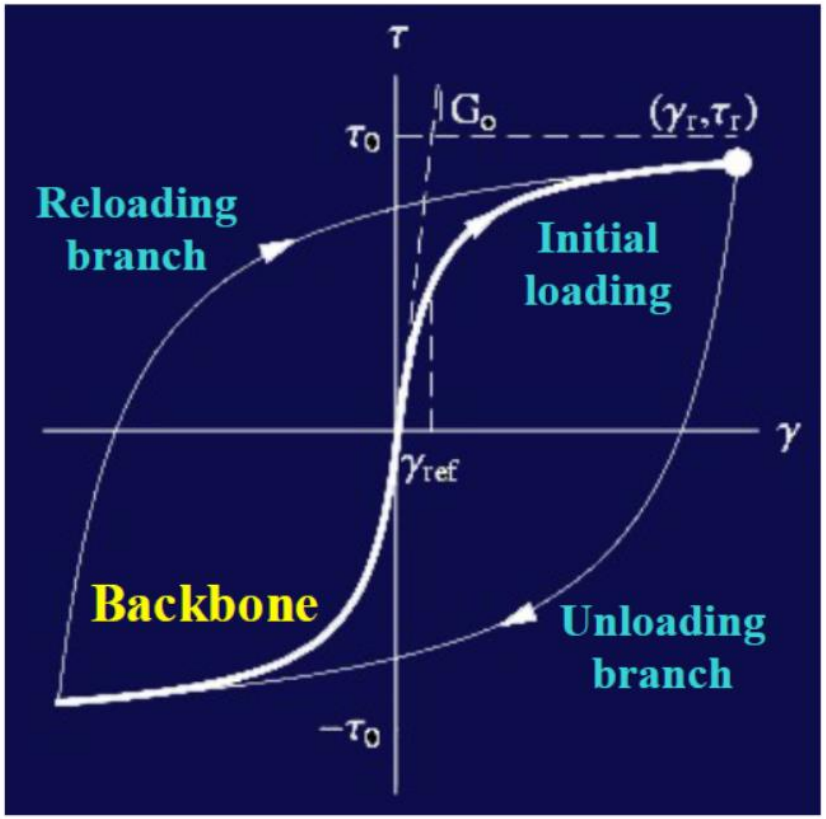


Variation of shear stress with time
تغيرات الإجهادات القصية مع الزمن



Resulting stress-strain behavior
(backbone curve indicated by dashed line)
يمثل سلوك الإجهاد-إنفعال
(منحني الإجهاد-انفعال الوسطي الموضح بالخط المنقط)

Nonlinear approach
المنهجية اللاخطية



Common improved backbone curve is the multi-parameter Matasovic-Kondner-Zelasko (MKZ) model after we apply loading and unloading :

العلاقة التي تستخدم لحساب المنحني الوسطي بعد تطبيق وإزالة الأحمال

$$\tau = \frac{G_{max} \cdot \gamma}{1 + \alpha \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s}$$

Here, α and s are additional parameters introduced with the aim to better fit actual stress-strain curves.

تعطي المتحولات في المعادلة للحصول على أفضل ملاءمة مع منحنيات الأجهاد-انفعال

Nonlinear approach
المنهجية اللاخطية

Some computer programs that use non-linear models are listed below

نعرض بعد البرامج المستخدمة في حساب الاستجابة اللاخطية للتربة

Program	Soil Model	Reference
CHARSOIL	Ramberg–Osgood	Streeter et al. (1973)
DESRA-2	Hyperbolic	Lee and Finn (1978)
DYNA1D	Nested yield surface	Prevost (1989)
MASH	Martin–Davidenkov	Martin and Seed (1978)
NONLI3	Iwan-type	Joyner (1977)
TESS1	HDCP	Pyke (1985)

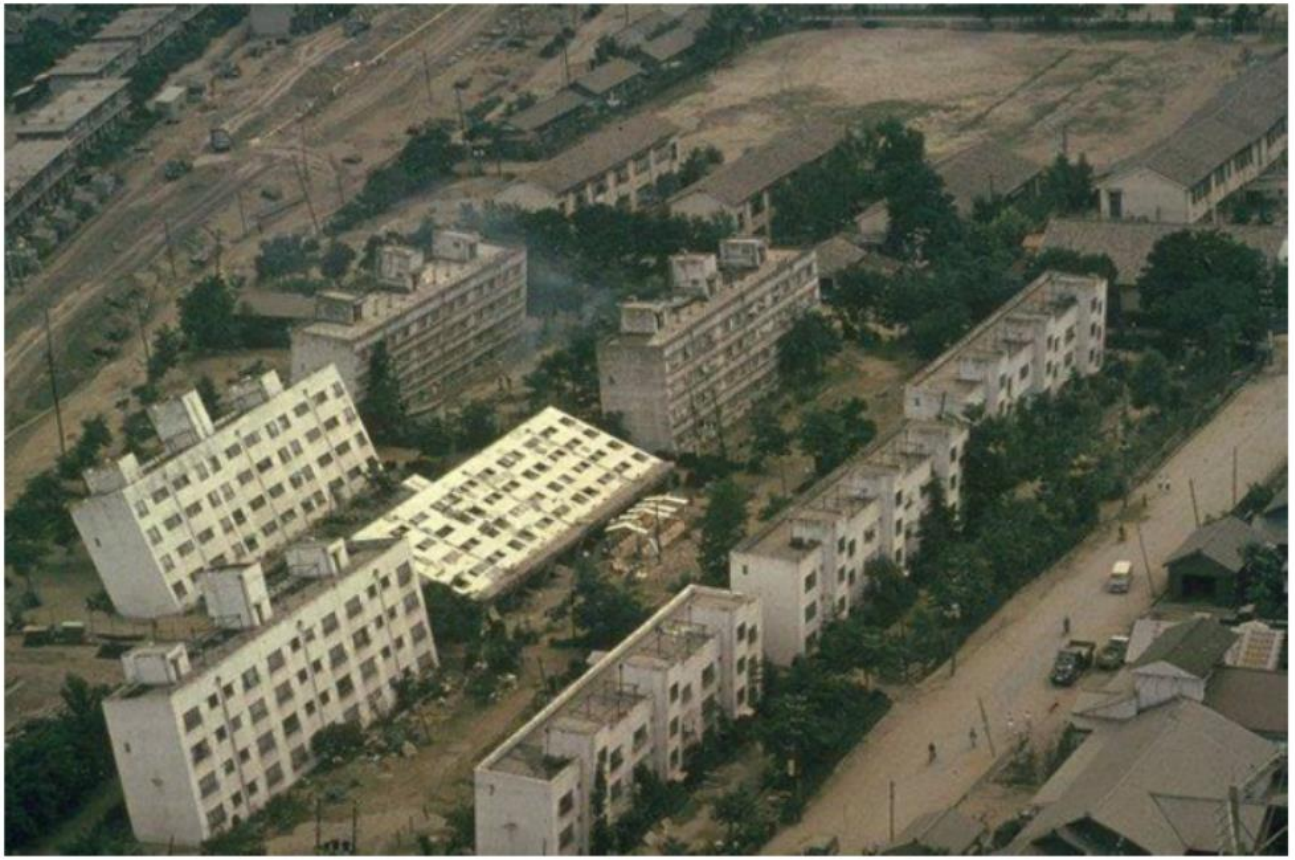
Nonlinear behavior of soil
السلوك اللاخطي للتربة

Soil deformation during the 1999 Chi-Chi Taiwan earthquake.
تشوهات التربة خلال زلزال 1999 الذي وقع في منطقة تشي تشي تايوان.

Nonlinear behavior of soil
السلوك اللاخطي للتربة

Free-field soil liquefaction
تميع التربة على السطح الحر

Nonlinear behavior of soil
السلوك اللاخطي للتربة



Soil liquefaction occurred during the 1964 Niigata earthquake in Japan. The buildings were tilted because of soil liquefaction.

تميع التربة الذي حدث خلال زلزال 1964 والذي وقع في منطقة نيغاتا في اليابان. أدى تميع التربة الذي حدث إلى ميل بعض المباني.

References
المراجع

- Nozomu Yoshida. DYNEQ. A computer program for dynamic response analysis of ground level by Equivalent method.

- Steven L. Kramer. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.