

بخش چهارم

# رفتار خاکها تحت بارهای دینامیکی

Properties of dynamically loaded soils

دکتر سید محمد رضا امام

# مقدمه و کلیات

در بسیاری مسائل مهندسی مرتبط با بارگذاری دینامیکی خاک به خصوصیات خاکها تحت بارگذاری دینامیکی نیاز داریم. بعضی از این مسائل عبارتند از: ارتعاشات پی ها، روانگونگی خاکها، ظرفیت باربری دینامیکی خاکها، انتشار امواج زلزله در خاک، نشست خاکها تحت بارهای دینامیکی، تغییر شکل سازه های خاکی مانند سدها، دیوارهای حائل، پی ها و غیره تحت بارهای دینامیکی یا زلزله

خصوصیات دینامیکی خاک که معمولا مورد نیازند عبارتند از:

پارامترهای مقاومت برشی

مدول برشی (یا مدولهای دیگری که قابل تبدیل به مدول برشی می باشند)

نسبت میرائی

خصوصیات فوق ممکن است به سطح کرنش (strain level) و یا سرعت بارگذاری (strain rate) بستگی داشته باشند. لذا گاهی لازم است تغییرات آنها با این دو متغیر را نیز بدانیم

# مقدمه و کلیات

خصوصیات دینامیکی خاکها را معمولا با استفاده از یکی از روشهای زیر تعیین می کنند :

▪ آزمایشات آزمایشگاهی

▪ آزمایشات صحرائی

▪ روابط تجربی بین خصوصیات دینامیکی و سایر خصوصیات خاکها

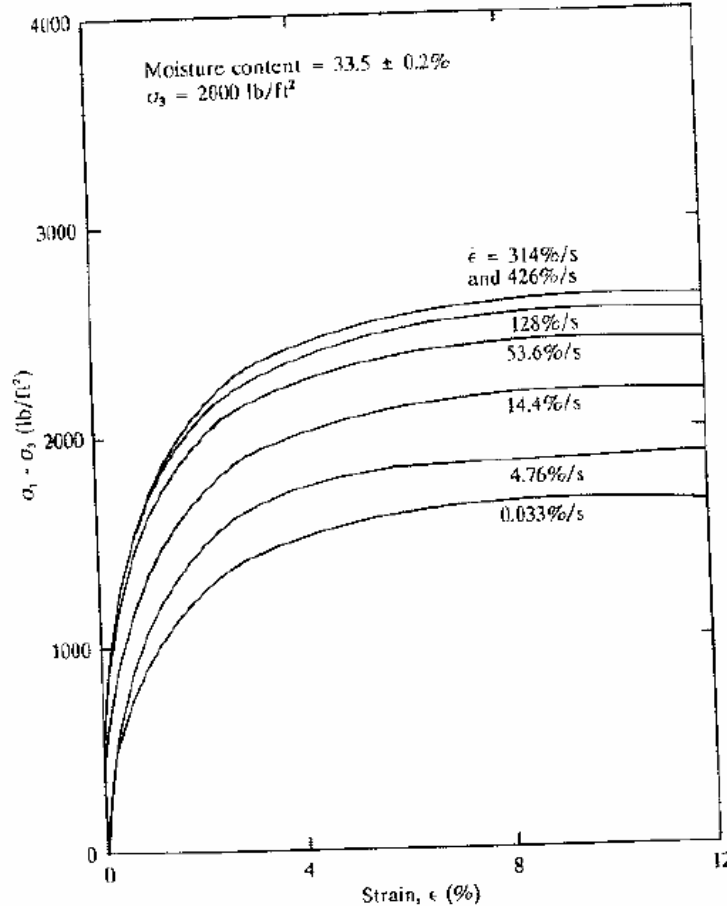
در این بخش نحوه استفاده از هریک از روشهای فوق و نتایج حاصل از آن جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت

# روشهای آزمایشگاهی برای تعیین خصوصیات دینامیکی خاکها

معمولترین آزمایشهایی که امروزه برای تعیین خصوصیات دینامیکی خاکها مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از آزمایشهای :

- | تعیین مدت زمان حرکت موج فشاری یا برشی (Travel Time Test)
- | ستون تشدید (Resonant column test)
- | برش ساده سیکلی (Cyclic simple shear test)
- | برش ساده پیچشی سیکلی (Cyclic torsional simple shear test)
- | سه محوری سیکلی (Cyclic triaxial test)
- | میز لرزان (Shaking table test)
- | سانتریفوژ (Centrifuge test)

# رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها - رفتار رس ها در بارگذاری با نرخ کرنش بالا



در رس ها مقاومت برشی و مدول تغییر شکل در حالت زهکشی نشده با افزایش سرعت بارگذاری افزایش می یابد (مانند شکل)

با استفاده از شکل می توان دید که در بارگذاری های با نرخ کرنش بیش از 300% در ثانیه مقاومت برشی تقریبا 1.5 برابر مقاومت برشی مربوط به بارگذاری استاتیکی است.

# رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها

## - رفتار ماسه ها در بارگذاری با نرخ کرنش بالا

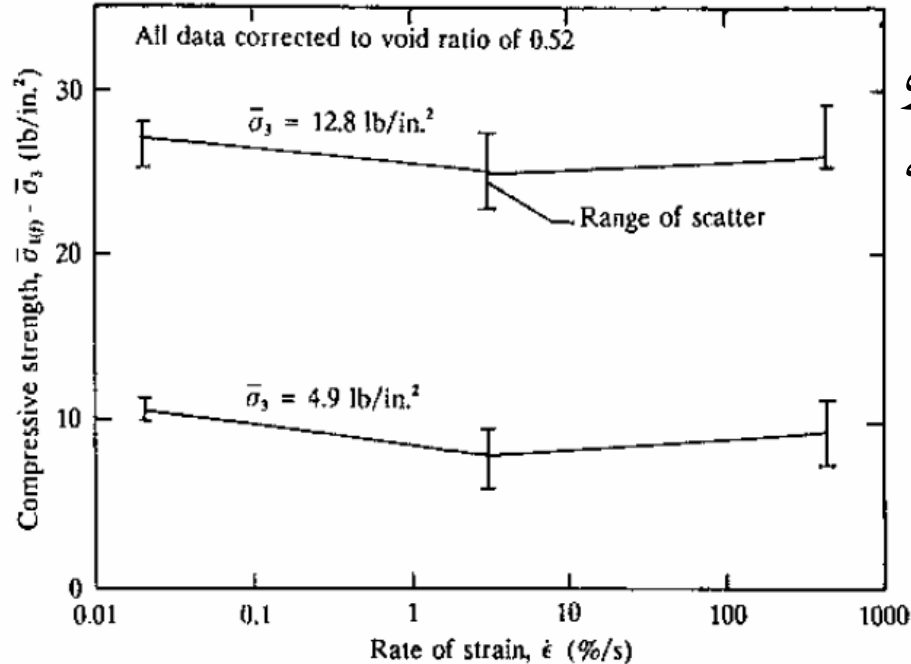


Figure 4.3 Strain-rate effect for dry Ottawa sand (after Whitman and Healy, 1963)

در ماسه ها با توجه به شکل روبرو دیده میشود که مقاومت برشی ماسه خشک با افزایش سرعت بارگذاری ابتدا اندکی کاهش یافته و سپس افزایش می یابد.

Vesic (1973) پیشنهاد کرد که حداقل زاویه اصطکاک داخلی دینامیکی دو درجه کمتر از استاتیکی در نظر گرفته شود

# رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها

## - رفتار تحت بارهای گذرا (Transient Loading)

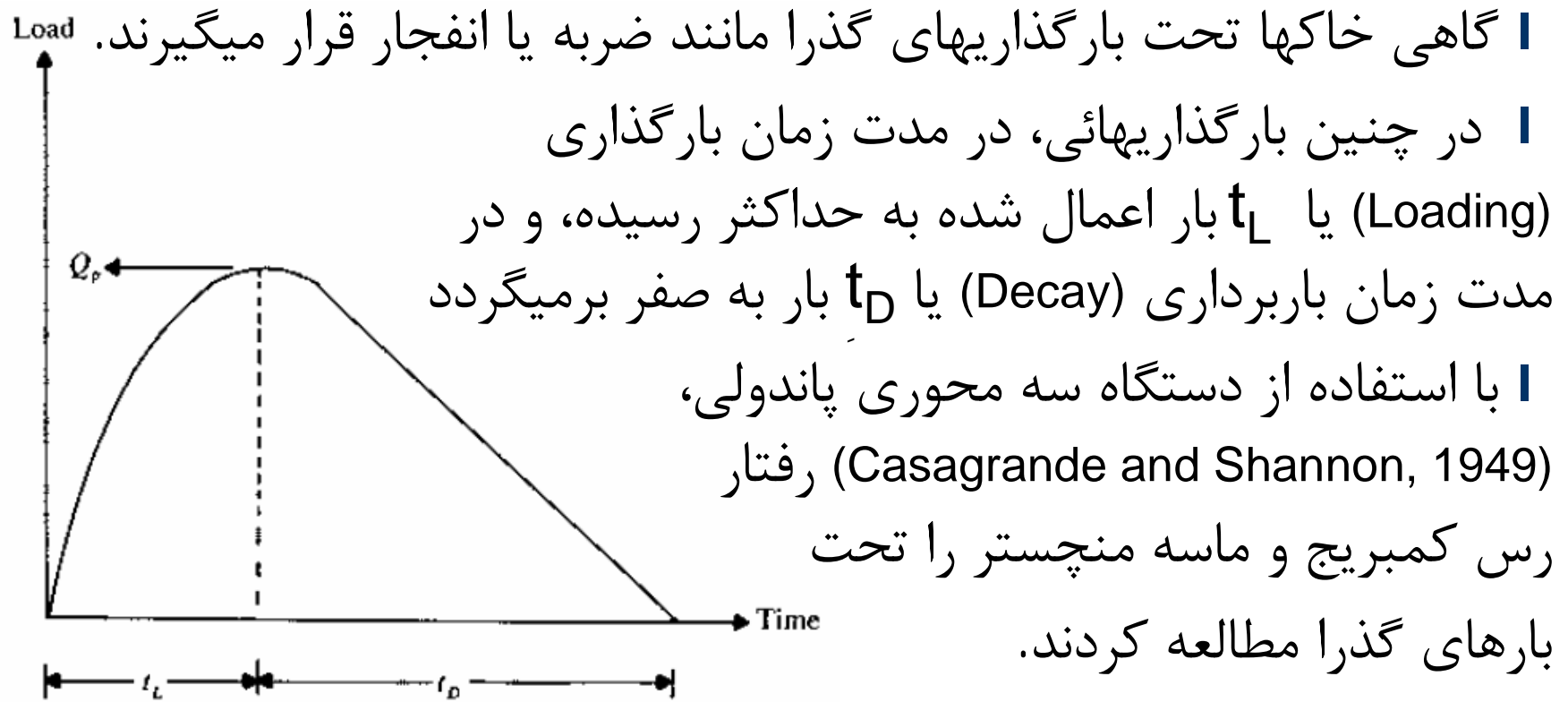
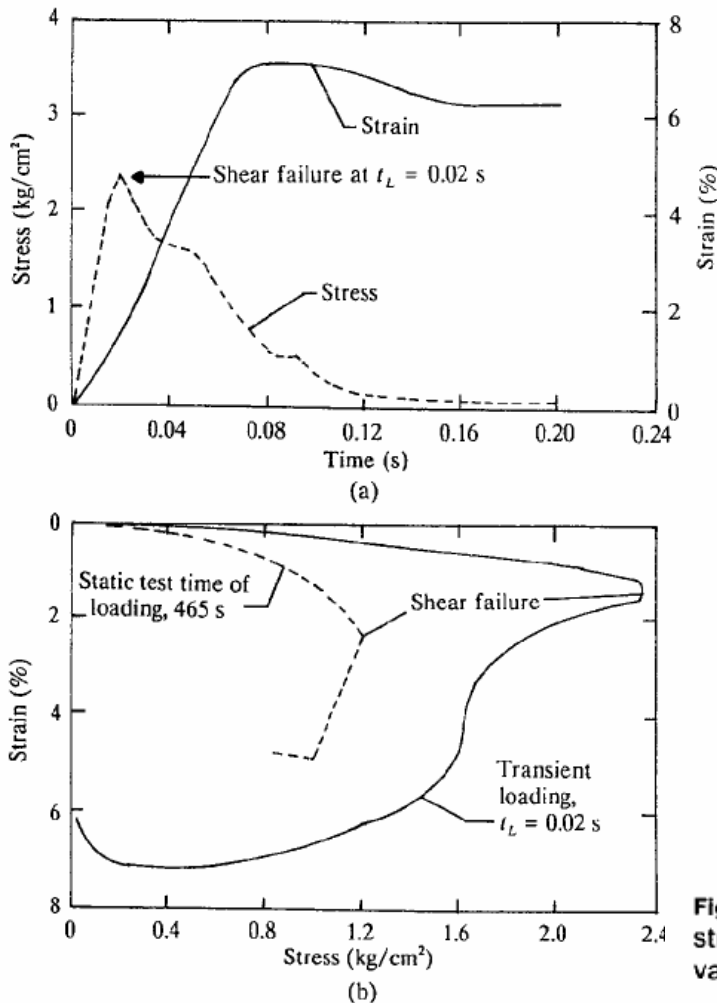


Figure 4.4 Transient load

در این آزمایشات بارگذاری با  $t_L = 0.02 \text{ sec}$  انجام شد

# رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها - رفتار رس ها در بارگذاری گذرا



نتایج آزمایشات بارگذاری پاندولی بر روی رس  
کمبریج نشان داد که:

■ مقاومت خاک رس در بار دینامیکی بمدت  
0.02 ثانیه تقریبا 1.5 الی 2 برابر مقاومت آن در  
بار استاتیکی در مدت 8 دقیقه است

■ مدول تغییر شکل که بعنوان شیب خط وصل  
کننده تنش صفر به تنش برشی برابر نصف  
مقاومت برشی نمونه تعریف میشود در بارگذاری  
گذرا تقریبا دوبرابر بارگذاری استاتیکی است

Figure 4.5 Transient loading on an unconfined specimen of Cambridge clay: (a) stress-strain-time variation for  $t_L = 0.02$  s; (b) comparison of stress versus strain variation for static and transient loadings (after Casagrande and Shannon, 1949)



# رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها - رفتار رس ها در بارگذاری گذرا

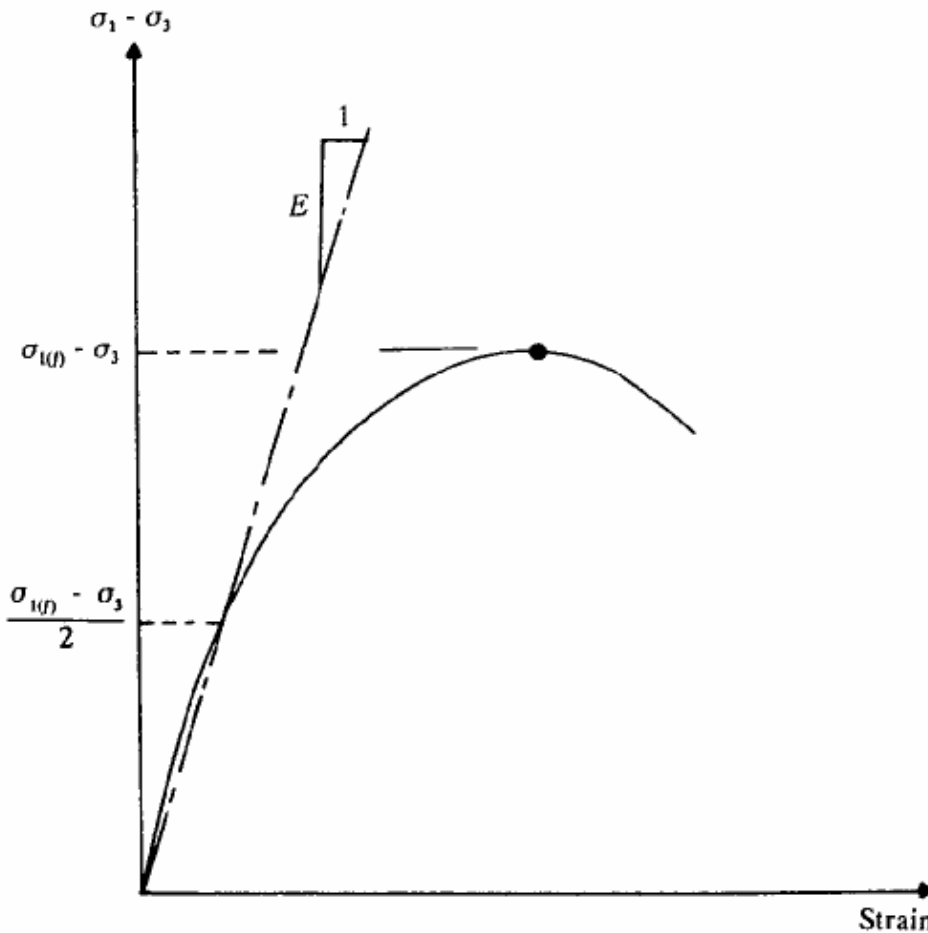
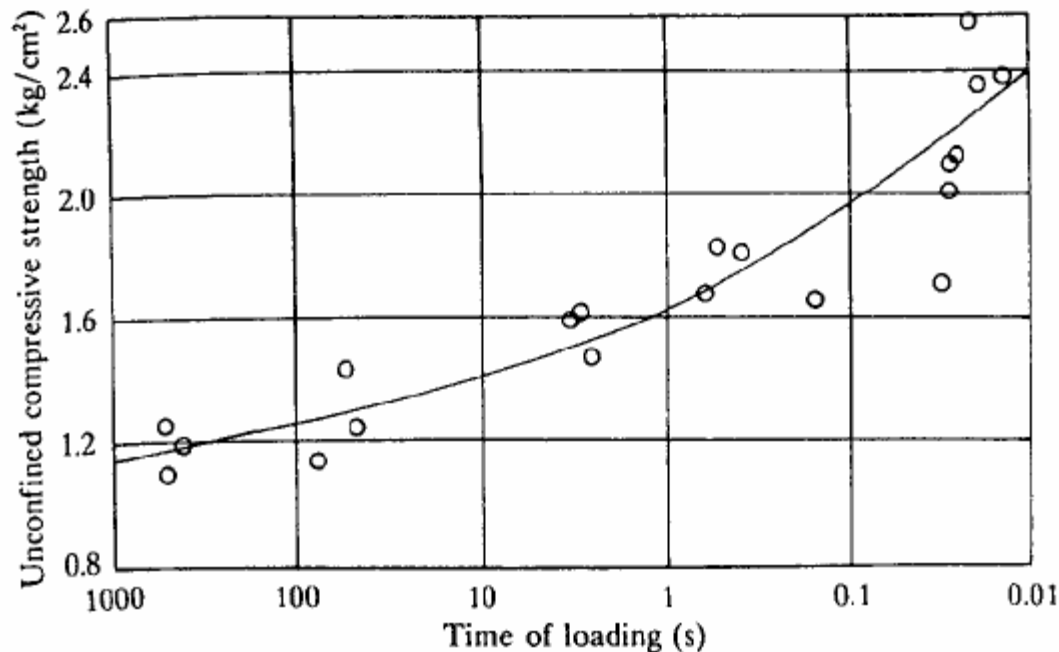


Figure 4.7 Definition of modulus of deformation,  $E$

مدول تغییر شکل در این مقایسه  
ها با توجه به شکل روبرو تعریف  
شده است که در آن  $S_{1(f)}$   
تنش اصلی بزرگتر در زمان  
گسیختگی و تنش اصلی  
کوچکتر (فشار همه جانبه در  
آزمایش سه محوری) می باشند

# رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها - رفتار رس ها در بارگذاری گذرا



مقاومت تک محوری خاک  
رس در بارگذاری دینامیکی  
گذرا 1.5 الی 2 برابر مقاومت  
تک محوری آن در بارگذاری  
استاتیکی است

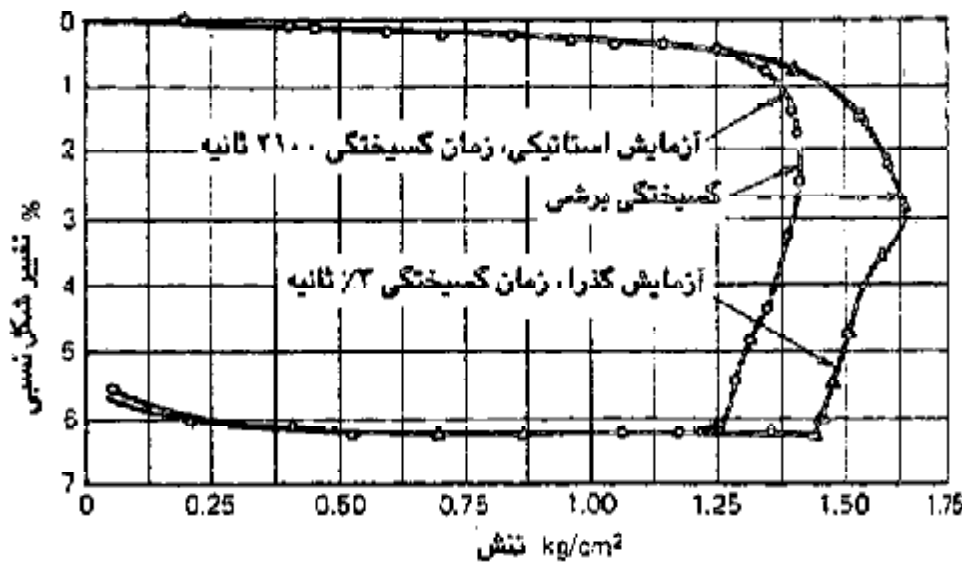
Figure 4.6 Unconfined compressive strength of Cambridge clay for varying time of loading (after Casagrande and Shannon, 1949)

# رفتار تنش - تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها

## - رفتار ماسه ها در بارگذاری گذرا

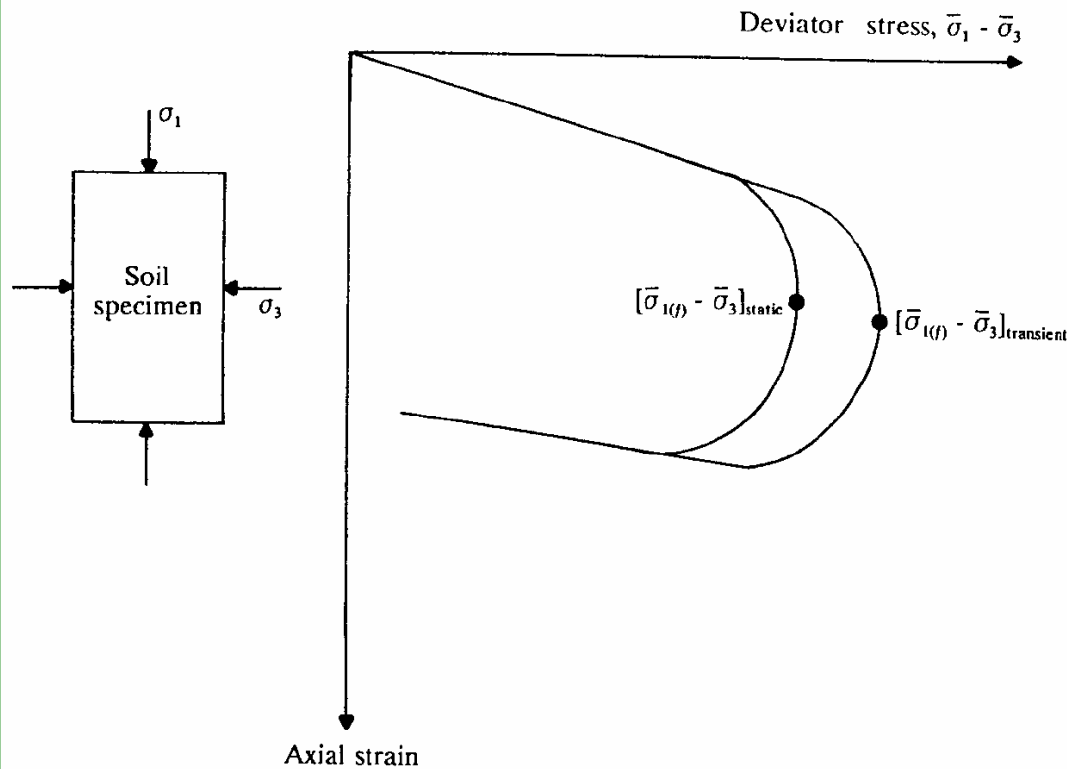
با استفاده از نتایج آزمایشات گذرای مذکور به نتایج زیر نیز می توان در مورد رفتار ماسه ها رسید:

۱ مقاومت خاک ماسه ای در آزمایش گذرای دینامیکی بمدت 0.02 ثانیه تقریباً 1.1 مقاومت آن در بار استاتیکی است



شکل (۱۰-۲) منحنی تنش - تغییر شکل ماسه منچستر در آزمایشات استاتیکی و دینامیکی (بارگذاری میرا)

# رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها - رفتار ماسه ها در بارگذاری گذرا



ا مدول تغییر شکل خاک  
ماسه ای (آنگونه که در قبل  
تعریف شد) در بار دینامیکی  
گذرا بمدت 0.02 ثانیه  
تقریبا با مدول تغییر شکل  
آن در بار استاتیکی یکسان  
است

Figure 4.8 Confined-compression test on sand—stress-versus-strain behavior under static and transient loading

## رفتار تنش-تغییر شکل و مقاومت برشی دینامیکی خاکها - رفتار خاکها در بارگذاری گذرا

در تفسیر آزمایشات گذرای مذکور در قبل باید نکات زیر را در نظر داشت:

- بار وارد شده به خاک در این آزمایشات تنها بار دینامیکی بوده است. در عمل غالبا علاوه بر بار دینامیکی، مقداری بار استاتیکی نیز بر خاک وارد میشود. رفتار خاک تحت بار مرکب استاتیکی-دینامیکی ممکن است با آنچه دیده شد متفاوت باشد
- در آزمایشات گذرای بررسی شده تنها یک سیکل بار اعمال شد در حالیکه در بسیاری بارهای گذرا در عمل تعداد بیشتری سیکل بارگذاری به خاک اعمال میشود
- در آزمایشات انجام شده، ماسه مورد آزمایش غیر اشباع و متراکم بوده است. رفتار ماسه های اشباع و غیرمتراکم تحت بارهای گذرا و سیکلی با رفتارهای مشاهده شده کاملا متفاوت بوده و در این ماسه ها ممکن است بعلت افزایش فشار آب، مقاومت برشی بسیار کم شده و خاک روانگرا شود

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

## - آزمایش زمان حرکت موج فشاری یا برشی (Travel time test)

در این آزمایش موج فشاری یا برشی را از نمونه خاک عبور داده و زمان لازم برای حرکت موج را اندازه گیری و با داشتن فاصله طی شده، سرعت موج را تعیین میکنند

$$u_c = \frac{L}{t_c} = \sqrt{\frac{E}{r}}$$

اگر موج عبوری فشاری باشد داریم:

با داشتن سرعت موج فشاری میتوان مدول الاستیسیته خاک را بدست آورد:

$$E = ru_c^2$$

در صورتیکه نمونه از اطراف محدود شده باشد و سرعت موج

فشاری در آن را با  $u'_c$  نشان دهیم مدول الاستیسیته محدود شده (constrained modulus) یا  $M$  بدست می آید:

$$M = ru'_c{}^2$$

و اگر موج عبوری برشی باشد مدول برشی را می توان با اندازه

گیری سرعت موج برشی  $u_s$  و استفاده از رابطه روبرو بدست آورد:

$$G = ru_s^2$$

## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها - آزمایش ستون تشدید (Resonant column test)

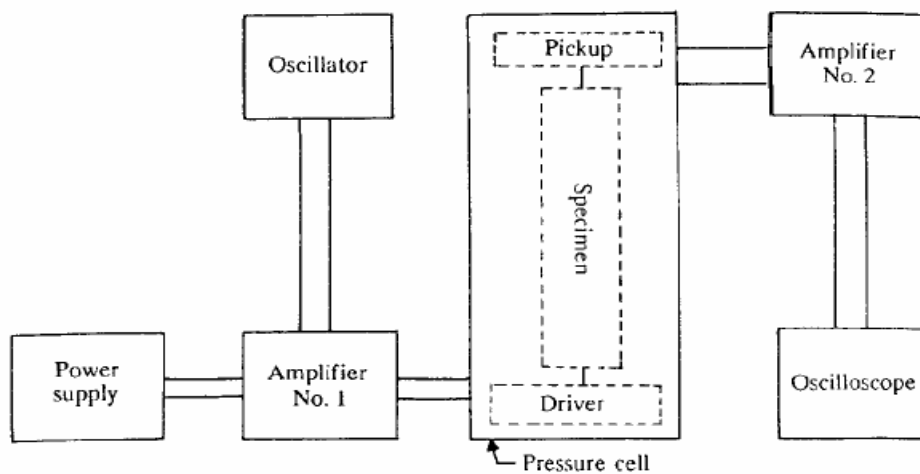


Figure 4.10 Schematic diagram of experimental setup for resonant column test of Hardin and Richart—free-free end condition

این آزمایش شامل مرتعش نمودن یک ستون خاک تحت یکی از حالت‌های (مودها)ی طبیعی آن و اندازه‌گیری فرکانس تشدید مربوط به آن است. با داشتن فرکانس تشدید، سرعت موج برآحتی قابل تعیین است.

در صورتیکه ارتعاش طولی باشد سرعت موج فشاری  $U_c$ ، و در صورتیکه ارتعاش پیچشی باشد،  $U_s$  بدست می‌آید. نتایج این روش مربوط به ارتعاش با دامنه کم می‌باشد.

نمونه ممکن است در دو انتها آزاد بوده و یا آنکه در یکطرف آزاد و در طرف دیگر گیردار باشد.

## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها - آزمایش ستون تشدید (Resonant column test)

برای ارتعاش طولی با دو انتهای آزاد می توانیم بنویسیم:

$$u_c = \frac{w_n L}{np}$$

و برای حالتیکه  $n = 1$  یعنی ارتعاش در حالت نرمال باشد خواهیم داشت:

$$u_c = \frac{w_n L}{p} = \frac{2pf_n L}{p} = 2f_n L$$

$$u_c = \sqrt{\frac{E}{r}} = 2f_n L$$

و چون:

$$E = 4f_n^2 rL^2$$

بنابراین:



## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها - آزمایش ستون تشدید (Resonant column test)

برای ارتعاش پیچشی با دو انتهای آزاد نیز به روش مشابهی می توان مدول برشی را با داشتن فرکانس تشدید (برای شرایط  $n = 1$ ) و مشخصات نمونه تعیین کرد زیرا داریم:

$$u_s = 2f_n L$$

$$u_s = \sqrt{\frac{G}{r}} = 2f_n L$$

ویا:

$$G = 4f_n^2 rL^2$$

بنابراین:

برای آزمایش با یک انتها آزاد و انتهای دیگر گیردار نیز می توان روابط لازم را برای بدست آوردن پارامترهای الاستیک خاک در کرنش های کوچک با استفاده از نتایج آزمایشهای ارتعاش فشاری و پیچشی تعیین کرد.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش ستون تشدید

- اثر تنش محدود کننده بر سرعت موج فشاری

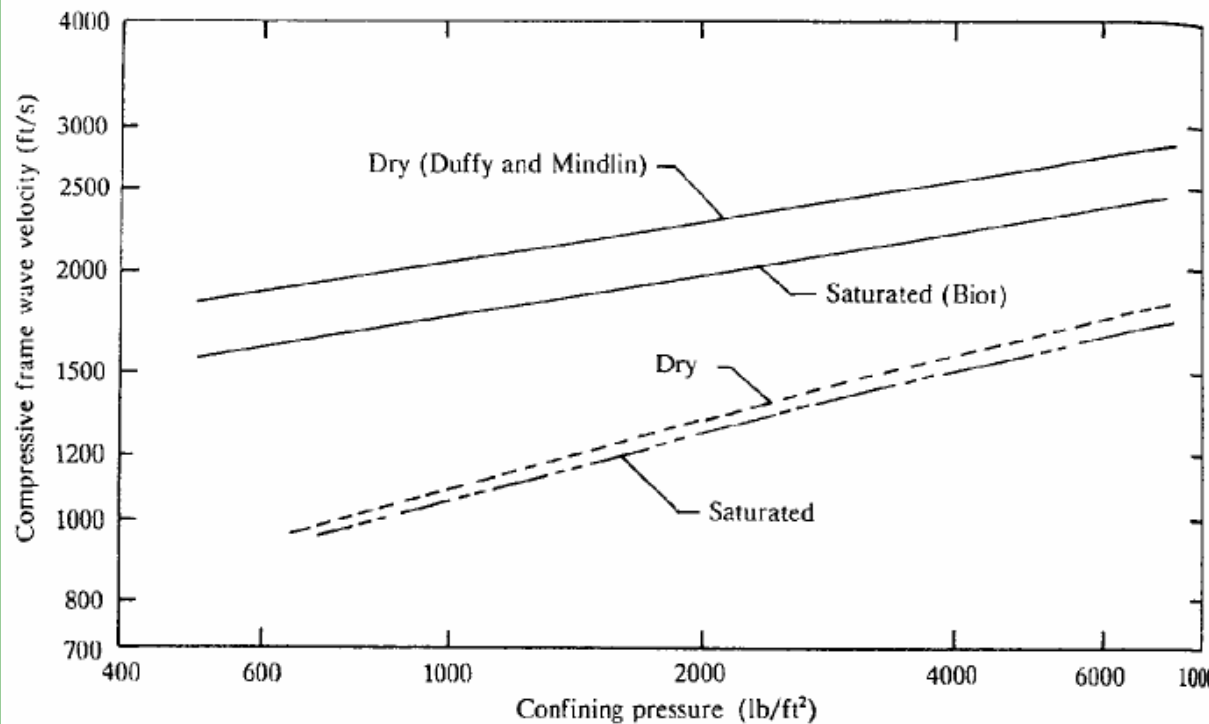


Figure 3.13 Comparison of experimental and theoretical results for compressive frame wave velocities in dry and saturated Ottawa sand (after Hardin and Richart, 1963)

آزمایش ستون تشدید  
نتایج مربوط به ارتعاش با  
دامنه کم، یعنی دامنه  
گرنش حدود  $10^{-4}$  و یا  
کمتر از آن را تعیین میکند  
| شکل روبرو تغییرات  
سرعت موج فشاری را با  
تنش موثر محدود کننده  
برای ماسه خشک و اشباع  
اتوا بدست آمده از آزمایش  
ستون تشدید را نشان

میدهد. دیده میشود که سرعت موج فشاری با افزایش تنش محدود کننده افزایش می یابد

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش ستون تشدید

- اثر تنش محدود کننده بر سرعت موج برشی

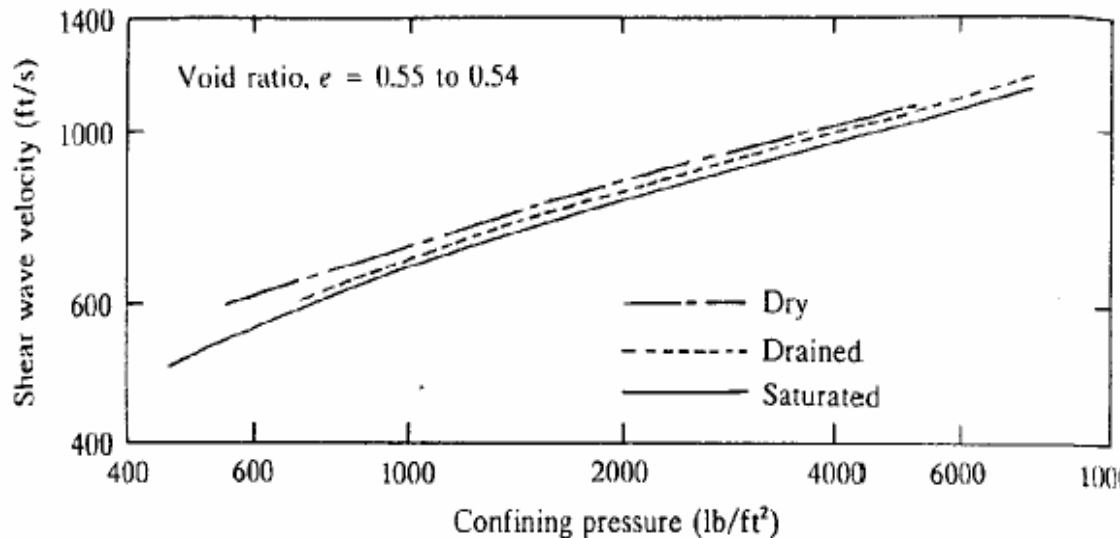


Figure 3.14 Variation of shear wave velocity with confining pressure for Ottawa sand (after Hardin and Richart, 1963)

ا شکل روبرو نیز تغییرات سرعت موج برشی را با تنش موثر محدود کننده برای ماسه اتاوا در دانسیته نسبی 55% تا 54% در حالت خشک، زهکشی شده، و اشباع نشان میدهد. این نتایج نیز با استفاده از آزمایش های

ستون تشدید بدست آمده اند. دیده میشود که سرعت موج برشی نیز مانند موج فشاری، با افزایش تنش محدود کننده افزایش می یابد و برای ماسه خشک اندکی بیش از ماسه اشباع (احتمالا بدلیل افزایش دانسیته در ماسه اشباع) می باشد.

## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش ستون تشدید

- اثر نسبت تخلخل بر سرعت موج برشی

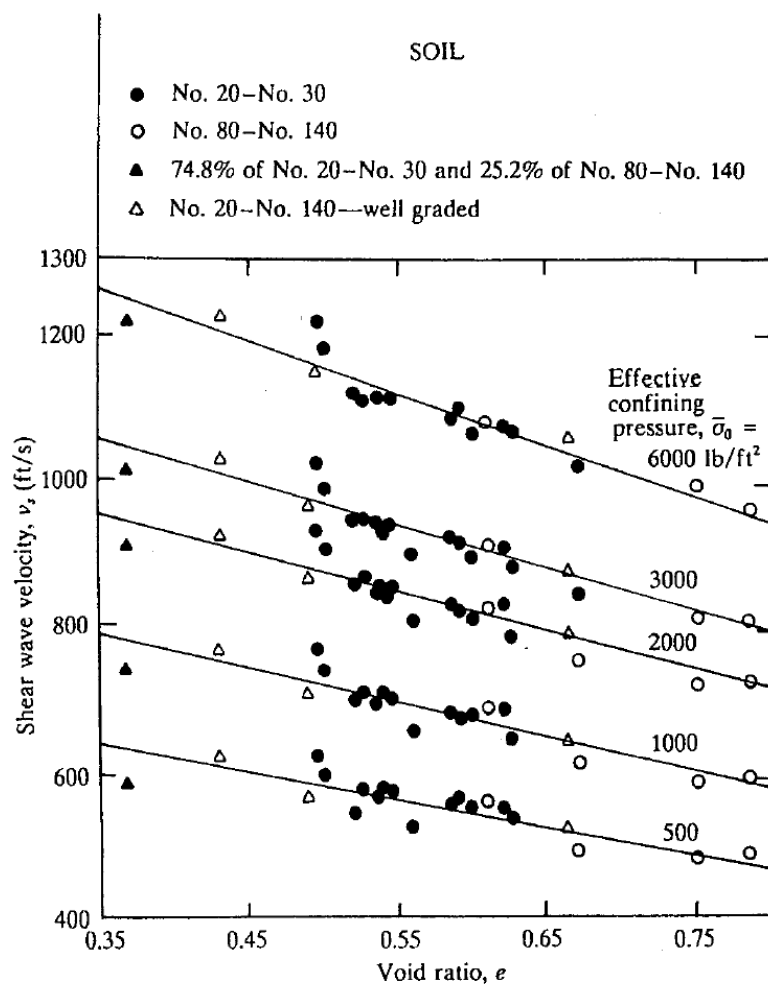


Figure 4.15 Variation of shear wave velocity with effective confining pressure  $\bar{\sigma}_0$  for round-grained dry Ottawa sand (after Hardin and Richart, 1963)

■ شکل روبرو تغییرات سرعت موج برشی با تنش موثر محدود کننده برای ماسه گرد گوشه و خشک اتاوا در نسبت های مختلف تخلخل، و برای دامنه مضاعف  $10^{-3}$  رادیان را نشان میدهد.

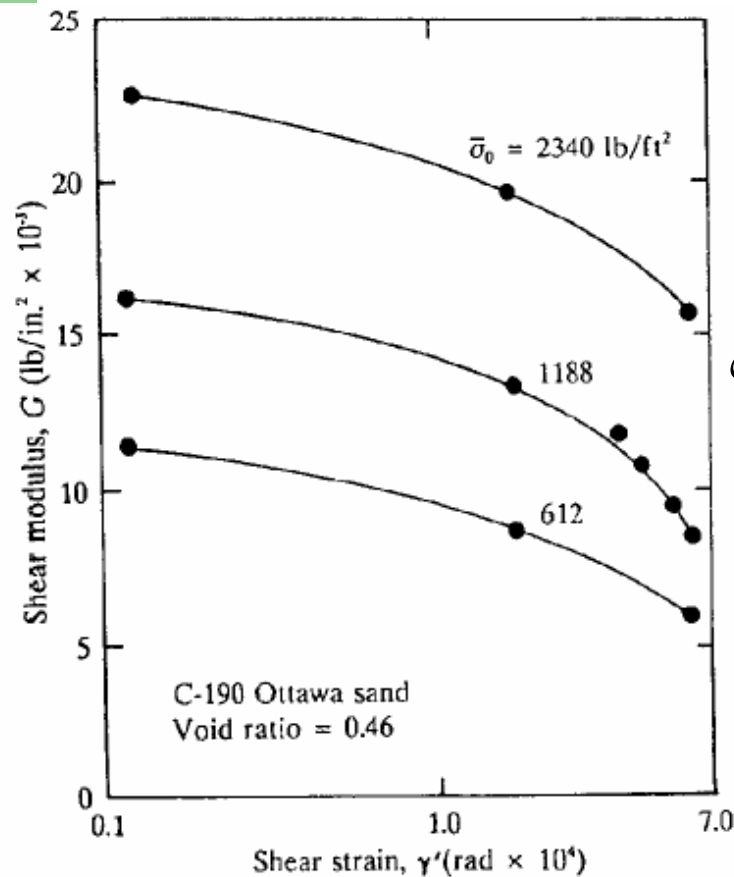
■ دیده میشود که با کاهش نسبت تخلخل، سرعت موج برشی در این خاک افزایش می یابد.

■ همچنین دیده میشود که این سرعت تابع اندازه دانه ها، توزیع دانه بندی، و دانسیته نسبی تراکم نیست.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش ستون تشدید

- اثر دامنه کرنش بر مدول برشی



در نمونه های استوانه ای توپر که در آزمایش ستون تشدید بصورت پیچشی مرتعش میشوند، کرنش برشی از صفر در مرکز تا حداکثر در محیط تغییر میکند. بنابراین یافتن کرنش متوسط برای کل استوانه مشکل است. لذا در اینموارد از استوانه توخالی استفاده کرده و شعاع دایره وسط ضخامت آنرا برای تعیین کرنش متوسط بکار میبرند.

تغییرات مدول برشی با دامنه کرنش برای ماسه اتاوا در شکل روبرو نشان میدهد که با افزایش دامنه کرنش برشی،  $G$  کاهش می یابد و این کاهش برای کرنش های بزرگتر از  $10^{-4}$  بیشتر است. این موضوع برای کلیه خاکها صادق است.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش ستون تشدید

- اثر دامنه کرنش بر مدول برشی

شکل روبرو تغییرات رابطه تنش-کرنش برشی را نشان میدهد.

در اندازه گیریهای آزمایشگاهی، مدول برشی سکانتی اندازه گیری میشود که از وصل کردن نقاط انتهائی حلقه های نشان داده شده بدست میآید.

با توجه به شکل دیده میشود که با زیاد شدن دامنه کرنش، مدول برشی سکانتی کاهش می یابد

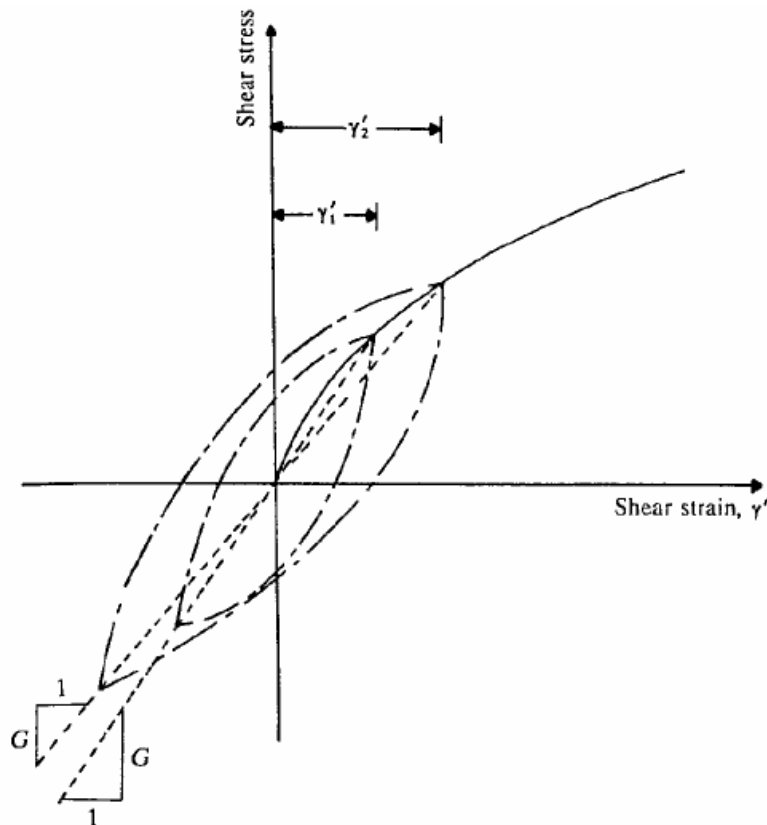


Figure 4.18 Nature of variation of shear stress versus shear strain

## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش ستون تشدید

- تعیین نسبت میرائی

با استفاده از آزمایش ستون تشدید می توان میرائی خاک را برآورد کرد

برای ارتعاشات آزاد، در شرایط معمولی که در آنها میرائی کم است، کاهش لگاریتمی دامنه از رابطه روبرو بدست می آید:

$$d = \ln\left(\frac{Z_n}{Z_{n+1}}\right) = 2px$$

$$x = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2\sqrt{km}}$$

از طرفی نسبت میرائی عبارت است از:

$$d = \frac{pC}{\sqrt{km}}$$

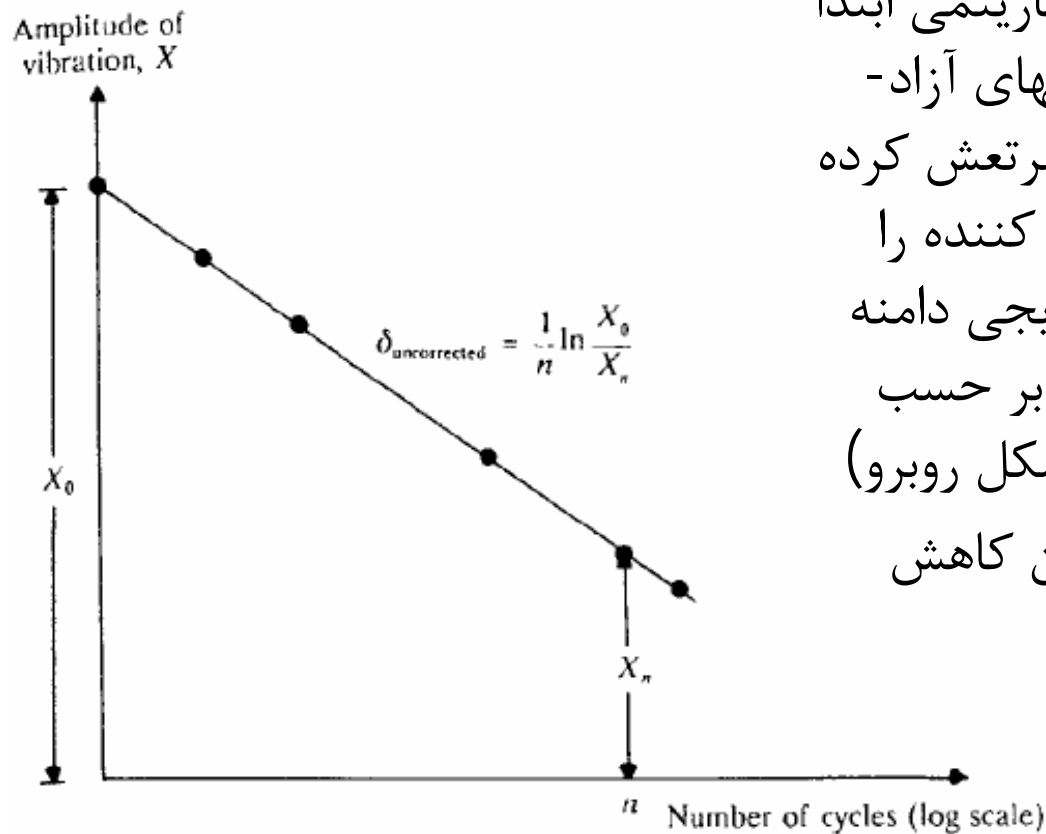
با ترکیب دو رابطه فوق خواهیم داشت:

بنابراین با داشتن کاهش لگاریتمی، جرم، و سختی فنر برای سیستم مرتعش شونده، میتوان میرائی آنها از رابطه فوق تعیین کرد.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش ستون شدید

## - تعیین میرائی هندسی



۱ برای بدست آوردن کاهش لگاریتمی ابتدا یک سیستم ستون شدید با انتهای آزاد- گیردار را تحت ارتعاش جبری مرتعش کرده و سپس نیروی خارجی مرتعش کننده را خاموش می کنند و کاهش تدریجی دامنه ارتعاش را در سیکلهای مختلف بر حسب تعداد سیکلها رسم می کنند (شکل روبرو)

۱ با استفاده از رابطه زیر میتوان کاهش لگاریتمی را بدست آورد:

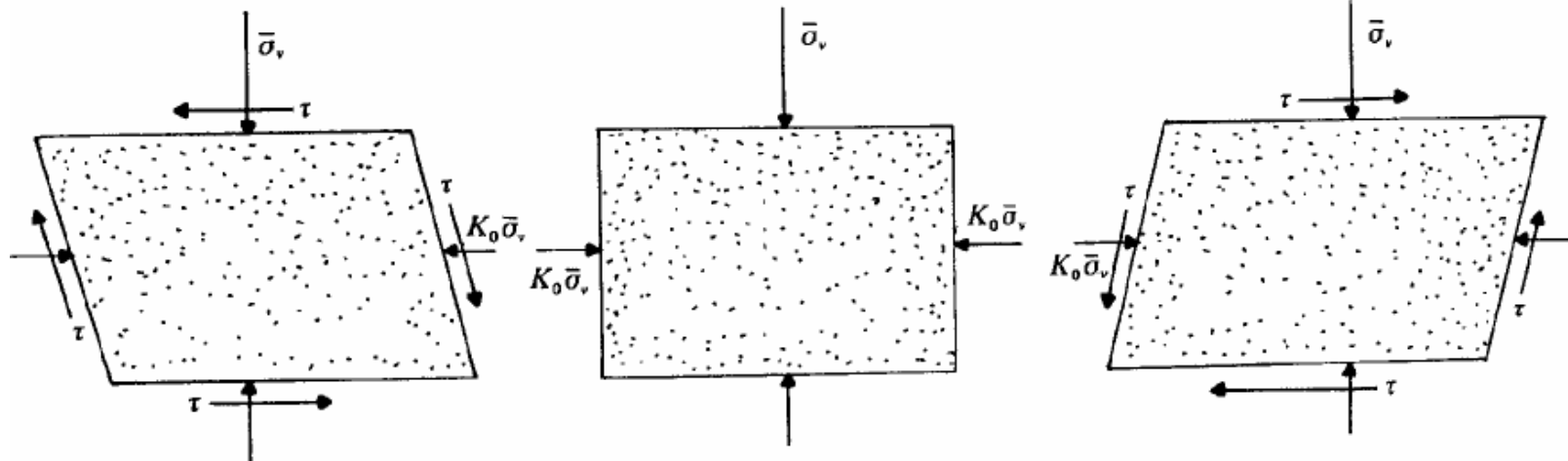
$$d = \frac{1}{n} \left( \ln \frac{Z_0}{Z_n} \right)$$



## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها - آزمایش برش ساده سیکلی (Cyclic simple shear test)

این آزمایش روش ساده ای برای بدست آوردن مدول برشی و نسبت میرایی خاکهاست و میتواند برای مطالعه رفتار خاکها تحت بار زلزله مفید باشد

در این آزمایش تنش عمودی ثابتی به نمونه وارد کرده و سپس با اعمال تنش برشی در نمونه تغییر شکل برشی ایجاد می کنند. در اینحال تنش و تغییر شکل برشی را در ضمن آزمایش ثبت می کنند.



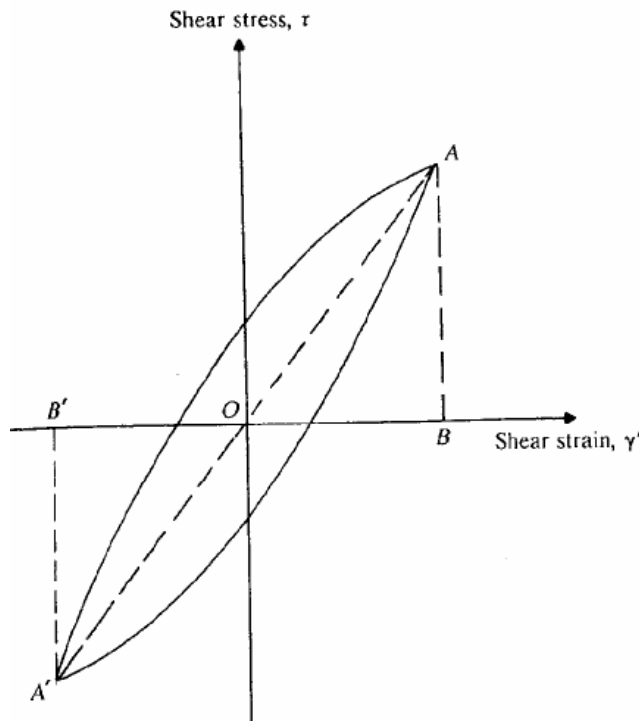
# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- آزمایش برش ساده سیکلی (Cyclic simple shear test)

$$G = \frac{t}{g'}$$

در این آزمایش مدول برشی با استفاده از نسبت دامنه برش سیکلی  $t$  به دامنه کرنش سیکلی  $g'$  بصورت روبرو بدست می آید:

نسبت میرائی نیز برای یک دامنه کرنش برشی سیکلی مشخص، با استفاده از شکل روبرو از رابطه زیر بدست می آید:

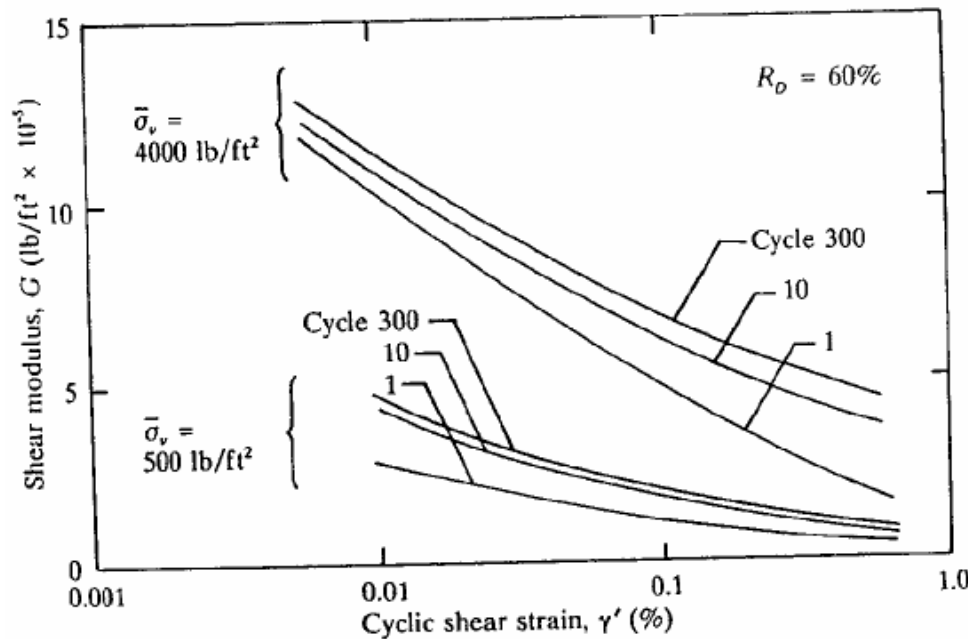


$$X = \frac{1}{2p} \frac{\text{مساحت حلقه تنش-کرنش}}{\text{مساحت نواحی } OAB \text{ و } OA'B'}$$

## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش برش ساده سیکلی
- تغییرات مدول برشی با تعداد و دامنه کرنش سیکلی و تنش عمودی

با توجه به شکل زیر که از آزمایش برش ساده سیکلی روی ماسه با تراکم متوسط انجام شده میتوان دید که مدول برشی:



۱ برای مقادیر مشخص  $g'$  و  $s'_u$  با افزایش تعداد سیکلها زیاد میشود. این افزایش در ده سیکل اول زیاد و پس از آن کم است.

۱ برای مقادیر مشخص  $s'_u$  و تعداد سیکلها، با افزایش دامنه  $g'$  کم میشود.

۱ برای مقادیر مشخص  $g'$  و تعداد سیکلها، با افزایش  $s'_u$  زیاد میشود

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش برش ساده سیکلی
- رفتار تنش- کرنش ماسه متراکم در سیکلهای مختلف

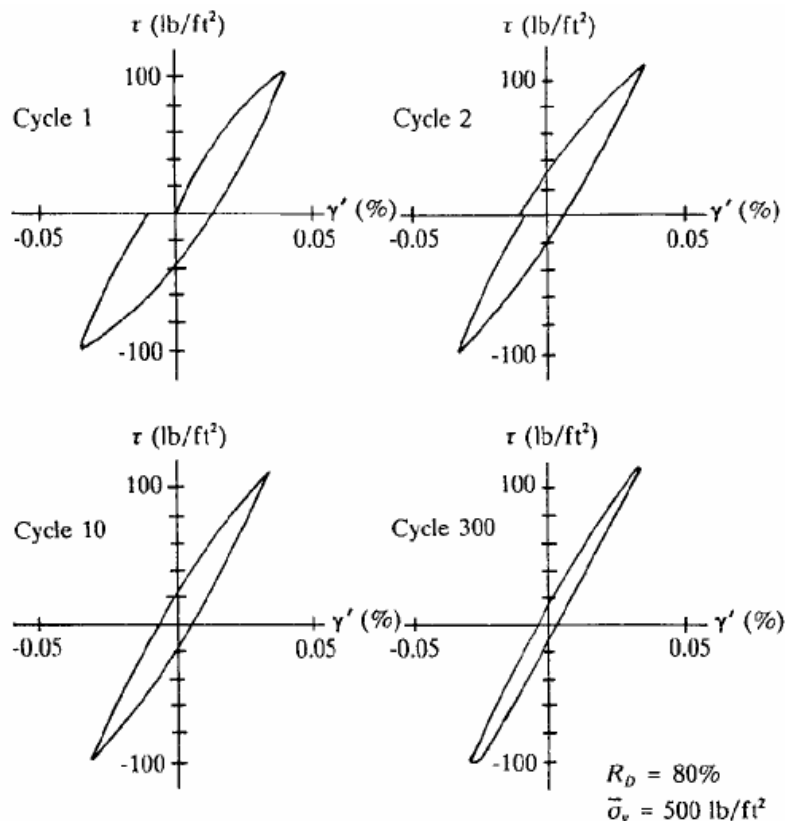


Figure 4.25 Stress-strain behavior of dense sand under cyclic shear (after Silver and Seed, 1971)

| رفتار تنش-کرنش ماسه متراکم در سیکلهای مختلف بارگذاری برشی در شکل روبرو دیده میشود.

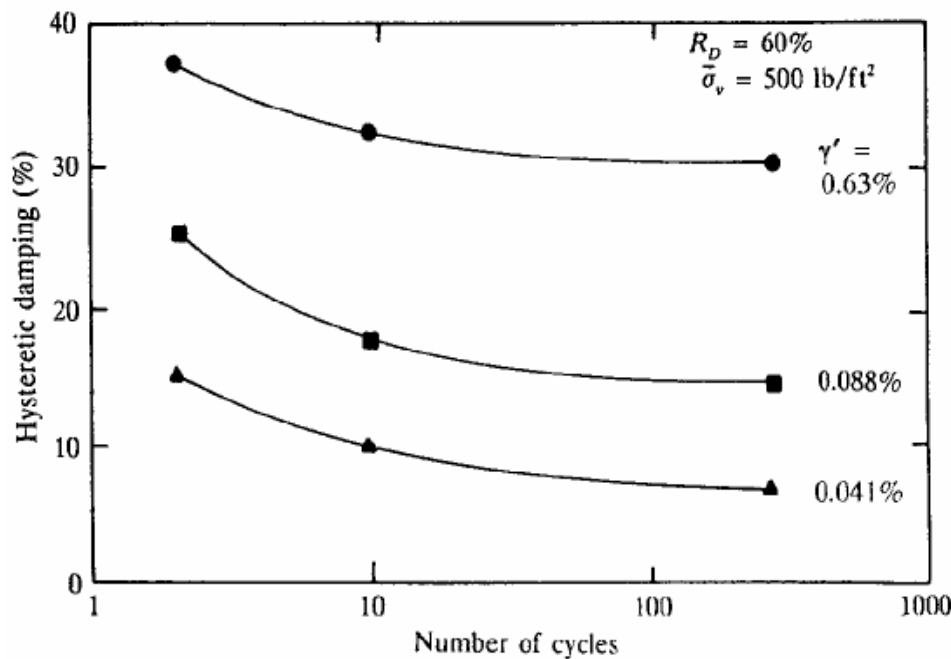
| حلقه های تنش-کرنش حاصل از چنین نتایجی را می توان برای تعیین تغییرات نسبت میرائی خاک در سیکلهای مختلف، با استفاده از رابطه ای که قبلا برای آن ارائه شد بکار برد.

| در شکل بعد نتایج چنین آزمایشهائی برای ماسه با تراکم متوسط داده شده است

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش برش ساده سیکلی
- تغییرات نسبت میرائی ماسه متوسط

با استفاده از شکل زیر دیده میشود که نسبت میرائی:

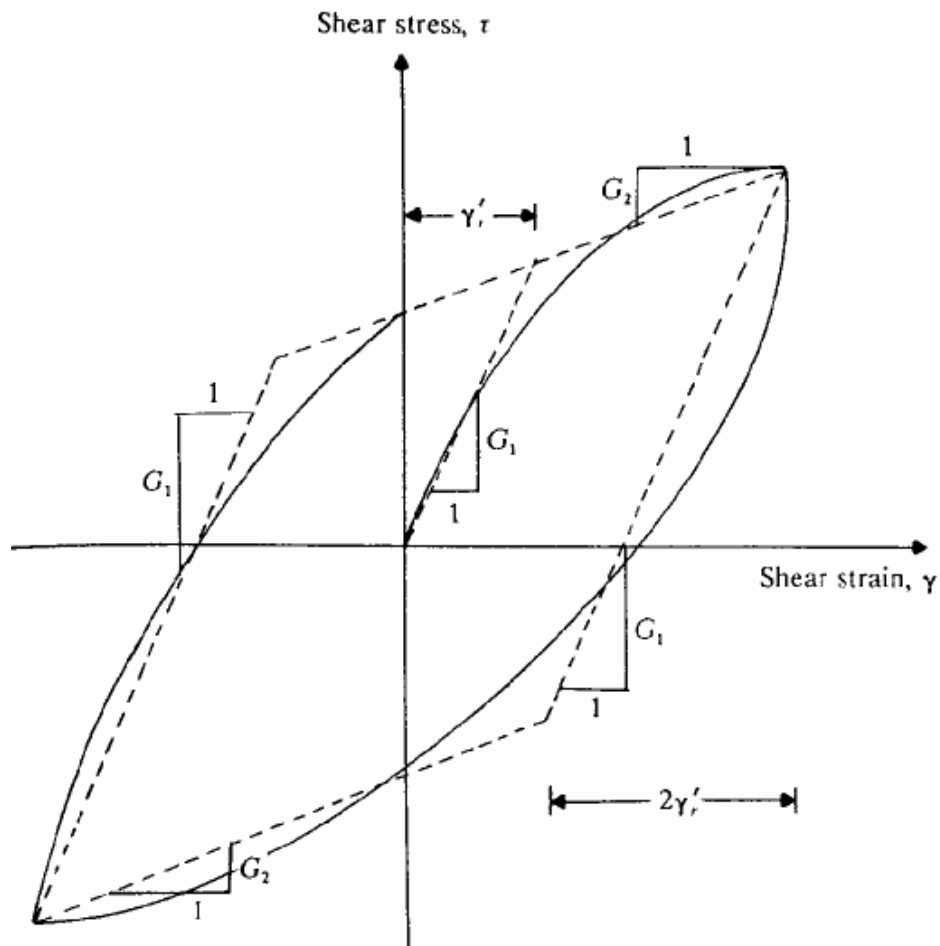


**۱** با افزایش تعداد سیکلها کم میشود. چون در اکثر کاربردهای عملی سیکلهای معادل معمولا از 20 سیکل کمتر است، مقدار بدست آمده در 5 سیکل می تواند برای اکثر کاربردهای عملی قابل قبول باشد.

**۱** با کاهش  $g'$  کم میشود.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- نمونه هائی از نتایج آزمایش برش ساده سیکلی  
- ساده سازی رفتار تنش- کرنش سیکلی



در اکثر موارد ساده تر آنست که رفتار غیر خطی تنش-کرنش برشی را با دو خط راست با شیب های متفاوت تقریب زد (مانند شکل روبرو).

در این تقریب، مدول برشی خاک تا کرنش برشی  $g'_r$  برابر  $G_1$  و در کرنش های برشی بیش از آن برابر با  $G_2$  در نظر گرفته میشوند.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

## - مزایای آزمایش برش ساده سیکلی

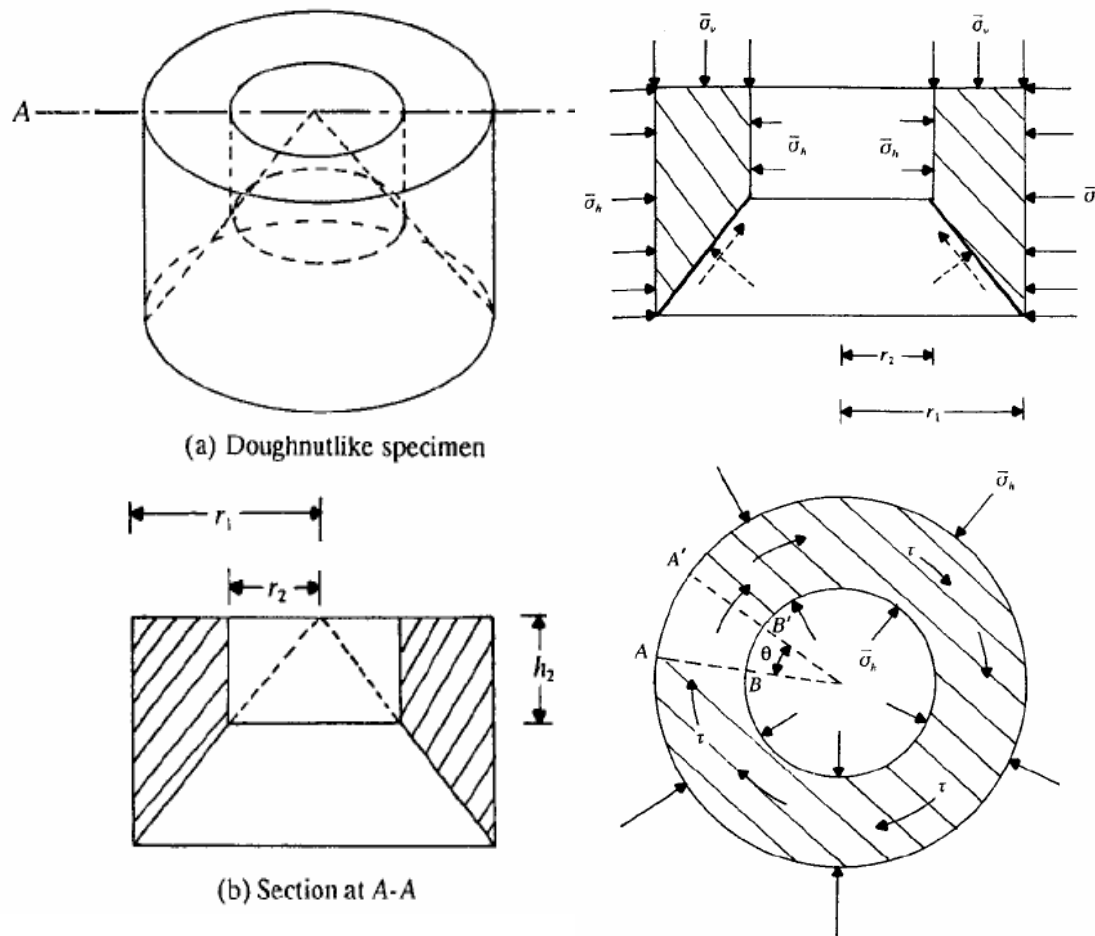
آزمایش برش ساده سیکلی دارای مزایای زیر است:

■ در این آزمایش تنش ها و کرنش های وارد شده به نمونه خاک به آنچه در محل به خاک وارد میشود نزدیکتر است. مثلا تحکیم نمونه تحت نسبت تنش جانبی  $k_0$  انجام میشود که به شرایط محل نزدیکتر است.

■ در آزمایش ستون تشدید روی نمونه توپر کرنش های قابل اعمال به خاک حداکثر  $10^{-3}\%$  و در توخالی بین  $10^{-3}\%$  و  $1\%$  است در حالیکه در آزمایش برش ساده سیکلی برش می تواند در محدوده وسیعتر  $10^{-2}\%$  تا حدود  $5\%$  اعمال شود. این محدوده به محدوده کرنش های ناشی از حرکات زمین در اثر زلزله نزدیکتر است.

■ در آزمایش ستون تشدید معمولا فشار آب ایجاد شده در ضمن ارتعاش اندازه گیری نمیشود در حالیکه در آزمایش برش ساده سیکلی فشار آب در مرزهای نمونه قابل اندازه گیری است.

## آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها - آزمایش برش ساده پیچشی سیکلی (Cyclic torsional simple shear test)



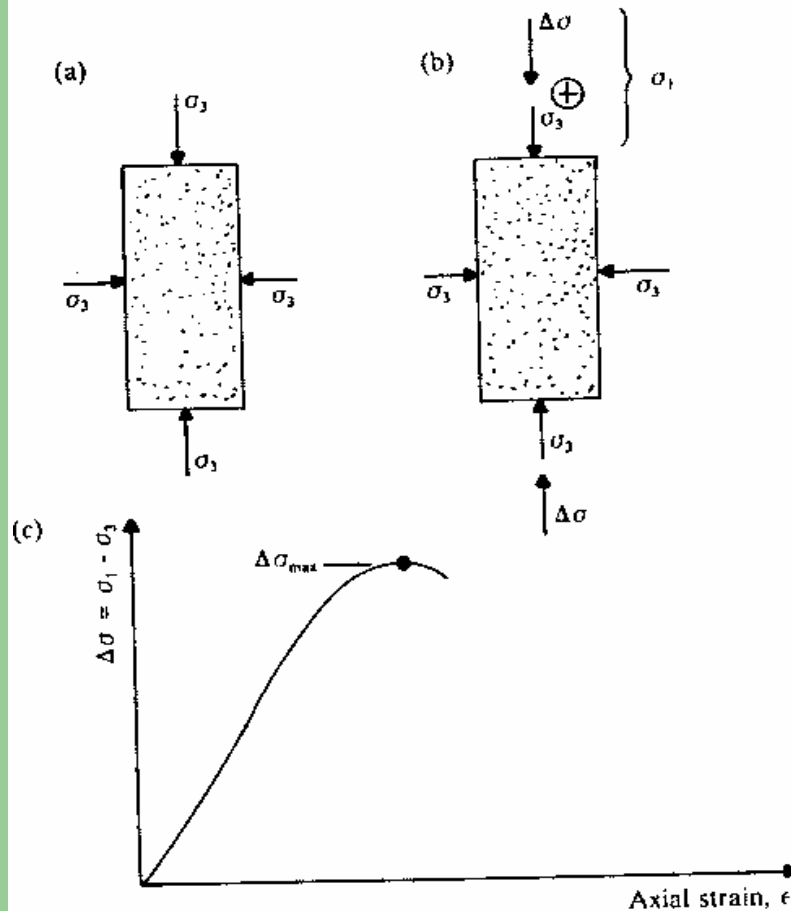
در این آزمایش نمونه بشکل استوانه توخالی است و بگونه ایست که کرنش برشی ایجاد شده در نمونه تقریباً یکنواخت باقی می ماند.

این دستگاه میتواند کرنش برشی تا حدود 1% به نمونه خاک وارد کند. همچنین اصطکاک دیواره که در آزمایش برش ساده وجود دارد حذف شده و فشار آب نیز قابل اندازه گیری است، و بنابراین امکان آزمایشات روانگونگی با استفاده از آن وجود دارد. مانند آزمایش برش ساده سیکلی، با استفاده از این آزمایش می توان مدول برشی و نسبت میرائی را تعیین کرد.



# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

## - آزمایش سه محوری سیکلی (Cyclic triaxial test)



این آزمایش یکی از آزمایشات معمول است زیرا دستگاه سه محوری در بسیاری از آزمایشگاهها وجود دارد.

از این آزمایش نیز می توان برای تعیین مدول الاستیسیته و نسبت میرائی استفاده کرد.

در این آزمایش نمونه سه محوری تحت فشار همه جانبه ثابت قرار گرفته و سپس به آن تنش انحرافی بصورت سیکلی اعمال میشود.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

## - آزمایش سه محوری سیکلی (Cyclic triaxial test)

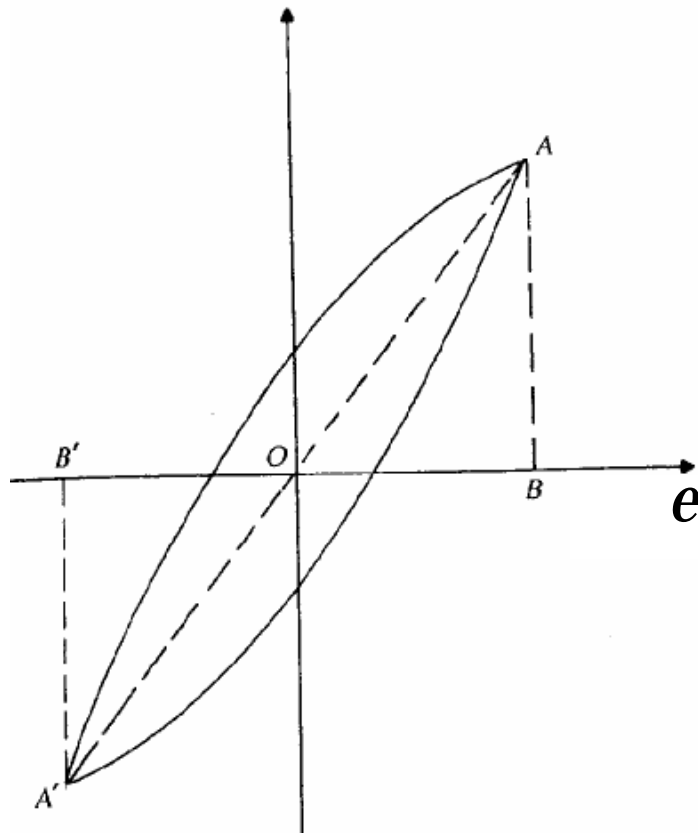
۱ شکل روبرو نمونه ای از نتایج این آزمایش را که برای تعیین مدول الاستیسیته و نسبت میرائی استفاده میشود نشان میدهد.

۱ با استفاده از این شکل می توان مدول الاستیسیته را از رابطه زیر تعیین کرد:

$$E = \frac{\Delta S_d}{e}$$

۱ با داشتن مدول الاستیسیته و استفاده از یک مقدار مناسب نسبت پواسون، می توان مدول برشی خاک را نیز بدست آورد:

$$G = \frac{E}{2(1+n)}$$



# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

## - آزمایش سه محوری سیکلی (Cyclic triaxial test)

نسبت میرائی نیز با استفاده از روش مذکور در قبل و استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$X = \frac{1}{2p} \frac{\text{مساحت حلقه تنش- کرنش}}{\text{مساحت نواحی } OAB \text{ و } OA'B'}$$

در صورتیکه بخواهیم آزمایش را در شرایط کنترل کرنش (strain-controlled) انجام دهیم باید سیستم بارگذاری بتواند بار وارده را بگونه ای تنظیم کند که تغییر شکل ایجاد شده در هر سیکل بارگذاری ثابت باشد. آزمایشهای تعیین مدول الاستیسیته و نسبت میرائی در شرایط کنترل کرنش و آزمایشهای روانگونی ماسه اشباع در شرایط کنترل تنش انجام می شوند.

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

## - آزمایش سه محوری سیکلی

چند نمونه بار سیکلی در  
آزمایش سه محوری سیکلی

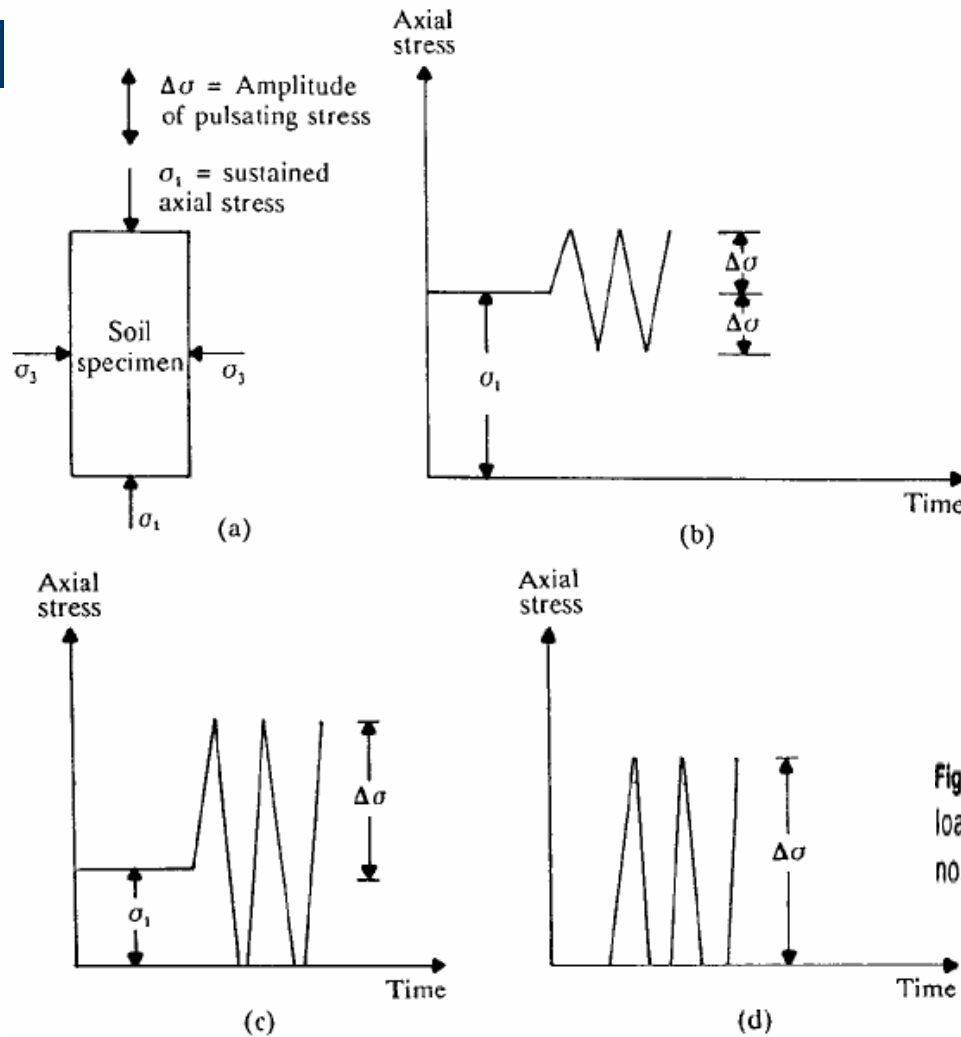


Figure 4.32 Stress conditions on a soil specimen [Note: (b) One-directional loading with symmetrical stress pulses; (c) and (d) one-directional loading with nonsymmetrical stress pulses]

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- آزمایش سه محوری سیکلی (Cyclic triaxial test)

- نمونه هائی از نتایج آزمایش

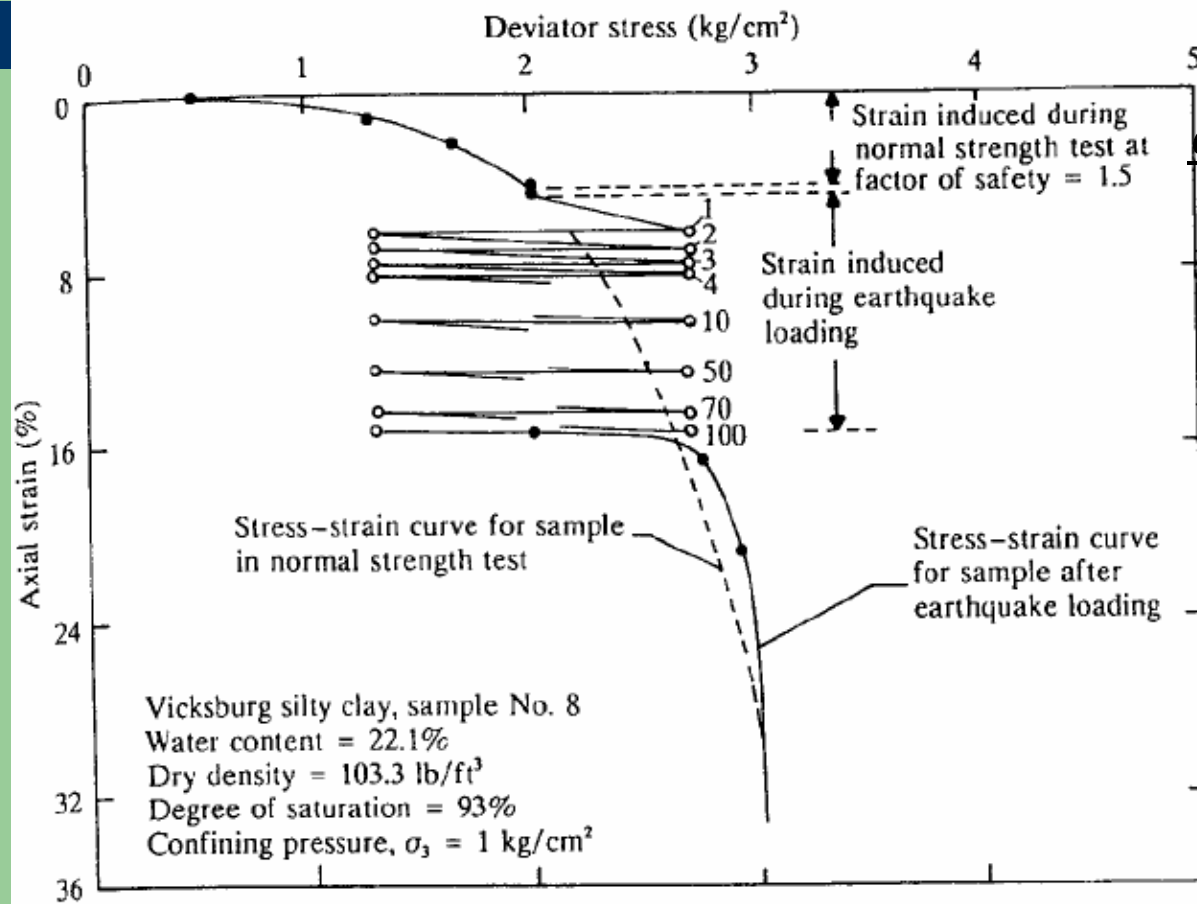


Figure 4.33 Stress-versus-strain relationship for Vicksburg silty clay under sustained and axial pulsating stress (after Seed and Chan, 1966)

رفتار رس تحت بار سیکلی

آزمایشات (Seed, Chan

1966)

ابتدا بار استاتیکی تا دو سوم مقاومت اعمال شد

سپس 100 سیکل بار دینامیکی اعمال شد بدون آنکه از مقاومت نمونه بیشتر شود

بار دینامیکی حدود 11% کرنش اضافی ایجاد

کرد

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

- آزمایش سه محوری سیکلی (Cyclic triaxial test)

- نمونه هائی از نتایج آزمایش

رفتار رس تحت بار سیکلی

آزمایشات (Seed, Chan 1966)

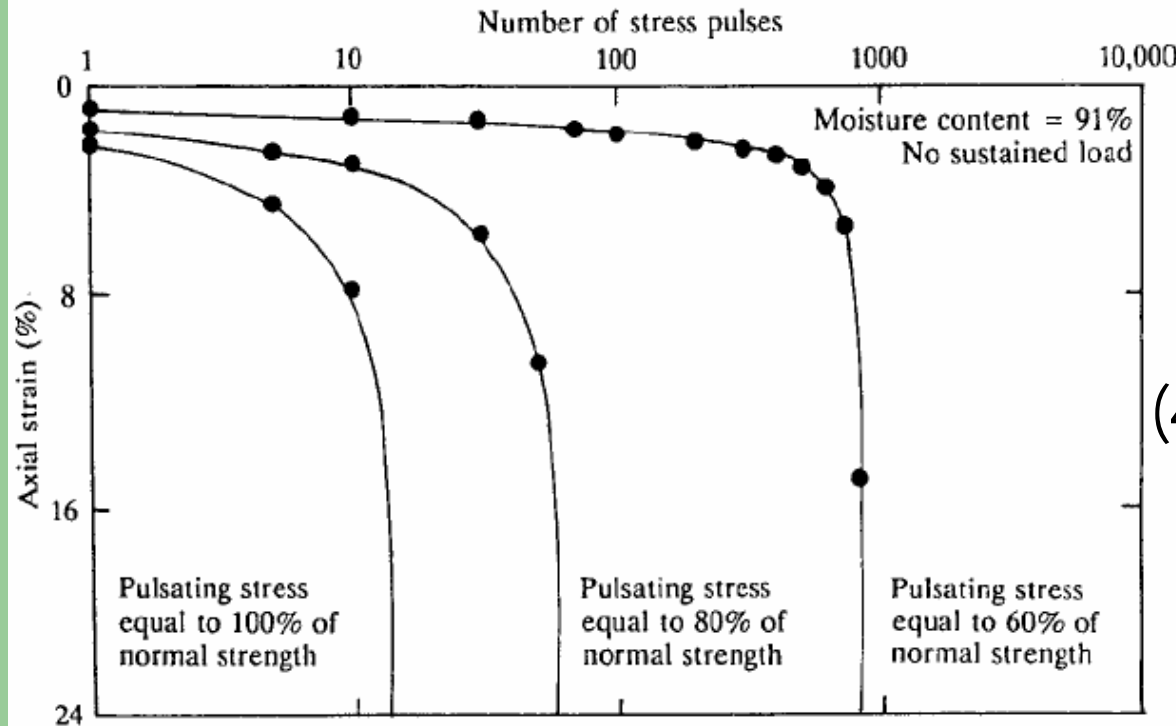


Figure 4.34 Deformation of San Francisco Bay mud specimens subjected to pulsating stress (after Seed and Chan, 1966)

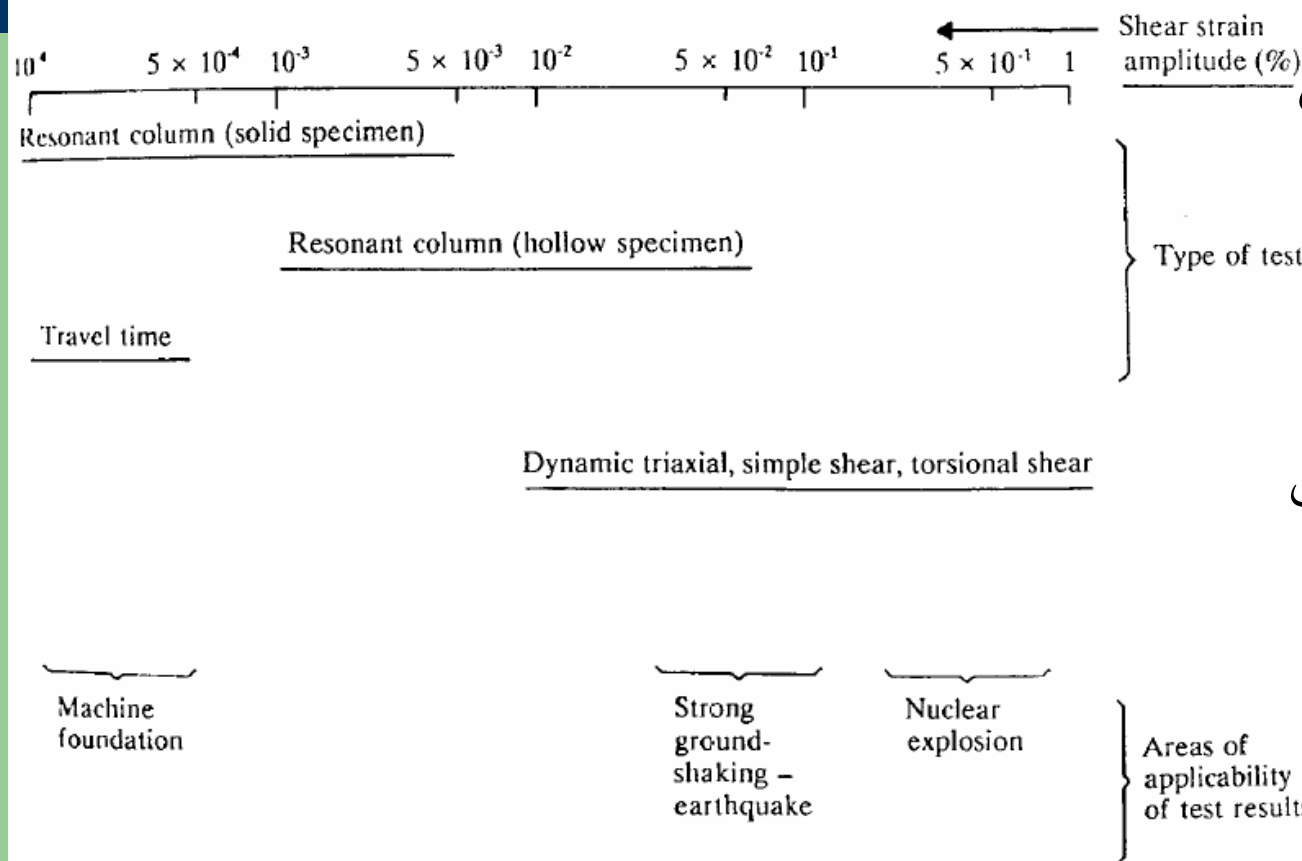
بدون اعمال بار استاتیکی،  
درصدی از مقاومت استاتیکی  
بصورت بار دینامیکی بر خاک  
اعمال شد (مانند شکل 4.32d)

در هر سه حالت کرنش ها  
بمقدار زیاد افزایش یافت.

برای دامنه بار سیکلی  
بیشتر، سیکلهای کمتری برای  
ایجاد کرنش زیاد لازم است

# آزمایشات آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار خاکها

## - دامنه کاربرد آزمایشات آزمایشگاهی



خصوصیات دینامیکی

اندازه گیری شده در  
آزمایشات مختلف  
مربوط به دامنه های  
متفاوت کرنش هستند

در انتخاب پارامترهای  
دینامیکی برای طراحی،  
باید توجه کرد که آن  
پارامتر از چه آزمایشی  
بدست آمده و برای چه  
دامنه کرنشی مناسب

است

Figure 4.36 Range and applicability of dynamic laboratory tests

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - مزایا و معایب آزمایشهای صحرائی (ژئوفیزیکی)

### مزایا:

- آزمایشها عموماً غیر مخرب (Non destructive) و غیر مزاحم (Non invasive) هستند
- آزمایشها معمولاً سریع و اقتصادی هستند
- تفسیر تئوریک برای نتایج آنها وجود دارد
- قابل استفاده برای خاک و سنگ هستند

### معایب:

- معمولاً با نمونه گیری و یا نفوذ واقعی در زمین همراه نیستند
- برای تفسیر آنها لازم است از یک مدل استفاده شود
- لایه ها و یا بخش های سیمانته شده بر نتایج آنها تاثیر میگذارند
- نتایج تحت تاثیر وجود آب، خاک رس، و همچنین عمق قرار می گیرند



# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - انواع آزمایشهای صحرائی (آزمایشهای ژئوفیزیکی)

معمولترین آزمایشهای صحرائی عبارتند از:

▪ آزمایش ارتعاشات مستمر (Steady state vibrations)

▪ آزمایشهای همراه با گمانه زنی:

- انتشار امواج رو به بالا (Uphole wave propagation)

- انتشار امواج رو به پایین (Downhole wave propagation)

- انتشار جانبی امواج (Cross-hole wave propagation)

▪ استفاده از انعکاس و انکسار امواج (Reflection and refraction of waves)

▪ آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکلی (Cyclic plate load test)

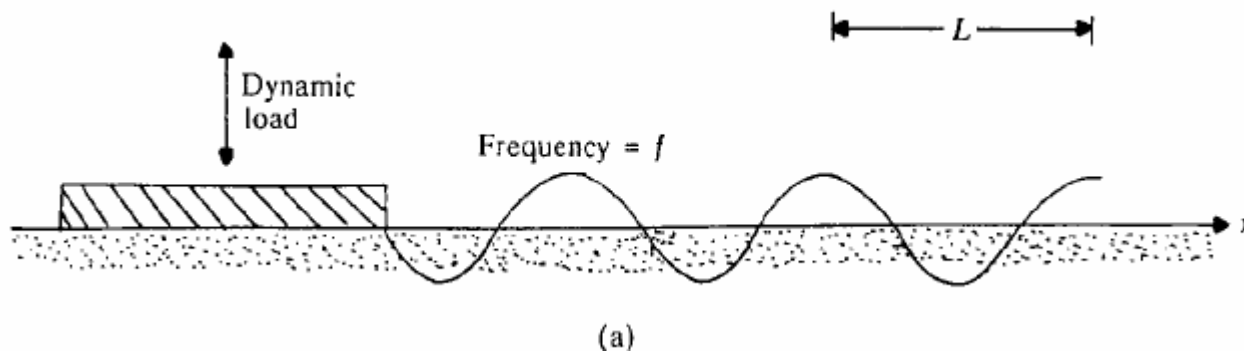
# آزمایش‌های صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش ارتعاشات مستمر (Steady state vibrations)

### نحوه انجام آزمایش

در این آزمایش با استفاده از صفحه ای که روی زمین قرار دارد امواج سینوسی بر خاک اعمال کرده و با استفاده از دریافت کننده هائی در اطراف آن، طول موج رالی منتشر شده در سطح خاک را اندازه گیری کرده و با داشتن فرکانس بارگذاری صفحه، سرعت این امواج را تعیین می کنند

$$u_r = fL$$



# آزمایشهای صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش ارتعاشات مستمر (Steady state vibrations)

- ▮ قبلا دیدیم که ناحیه ای از سطح زمین که موج رالی در آن حرکت میکند تقریبا به اندازه یک طول موج است. بنابراین با تغییر فرکانس بارگذاری، و در نتیجه طول موج، می توان عمق خاکی که سرعت متوسط موج در آن اندازه گیری میشود را تعیین کرد.
- ▮ سرعت اندازه گیری شده در فرکانس های بیشتر نشان دهنده سرعت متوسط حرکت موج برشی در اعماق کمتر، و فرکانس های کمتر مربوط به اعماق بیشتر هستند
- ▮ گاهی این آزمایش تحت عنوان آزمایش آنالیز حرکت امواج سطحی (Spectral analysis of surface waves, SASW) شناخته میشود. در این حال دو دریافت کننده در امتداد هم و در امتداد منبع ایجاد موج قرار داده شده و با تغییر فاصله آنها، محدوده و عمق خاک مورد آزمایش را تغییر میدهند
- ▮ حسن این روش آنست که نیاز به گمانه زنی ندارد

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش ارتعاشات مستمر (Steady state vibrations)

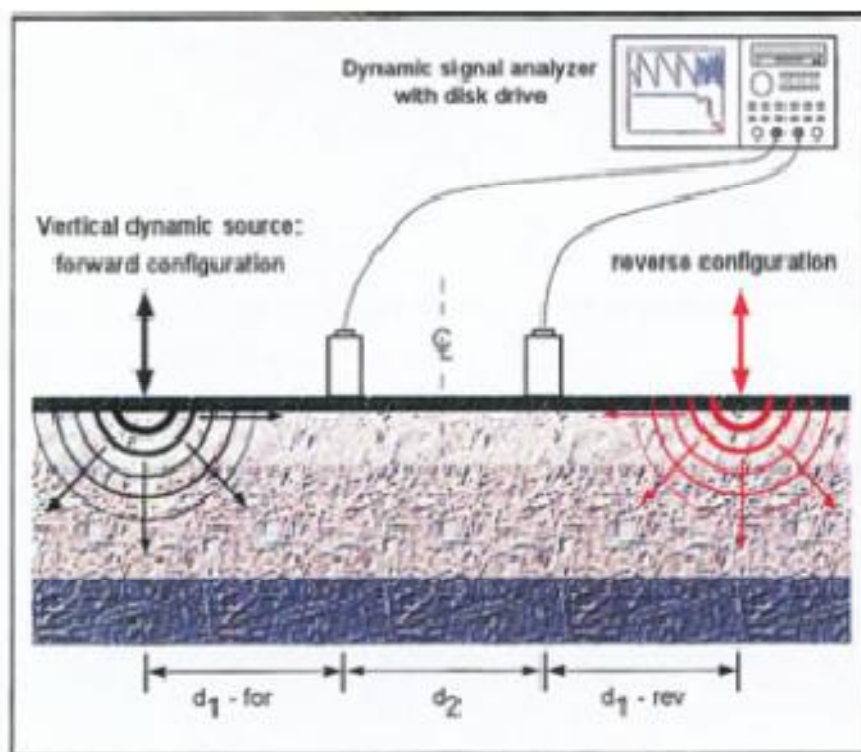


Figure 5-29. Spectrum Analyzer and Data Logging Equipment for SASW.

# آزمایش‌های صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش‌های همراه با گمانه زنی

ا در این آزمایش‌ها ابتدا یک یا دو گمانه در زمین تا عمق مورد نظر حفر میشود (یا از گمانه‌هایی که برای کارهای شناسائی حفر شده استفاده میشود) سپس با استفاده از یک منبع ارتعاش در سطح زمین یا در عمق‌های مختلف درون گمانه موجی ایجاد کرده و سپس موج گذشته از خاک در نقطه دیگر دریافت میشود.

ا حسن این روش‌ها این است که در آنها سرعت حرکت موج برشی در لایه‌های مختلف خاک مستقیماً اندازه‌گیری میشود. در حالیکه مثلاً در روش انعکاس یا انکسار، معمولاً امواج فشاری منتقل میشوند که در زیر سطح آب زیرزمینی موج دریافتی اولیه منعکس‌کننده سرعت حرکت موج فشاری در آب است در حالیکه در روش‌های همراه با گمانه زنی میتوان موج برشی با کیفیت خوبی را ایجاد کرده و سرعت آنرا اندازه‌گیری کرد

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش انتشار امواج رو به پایین (Downhole wave propagation)

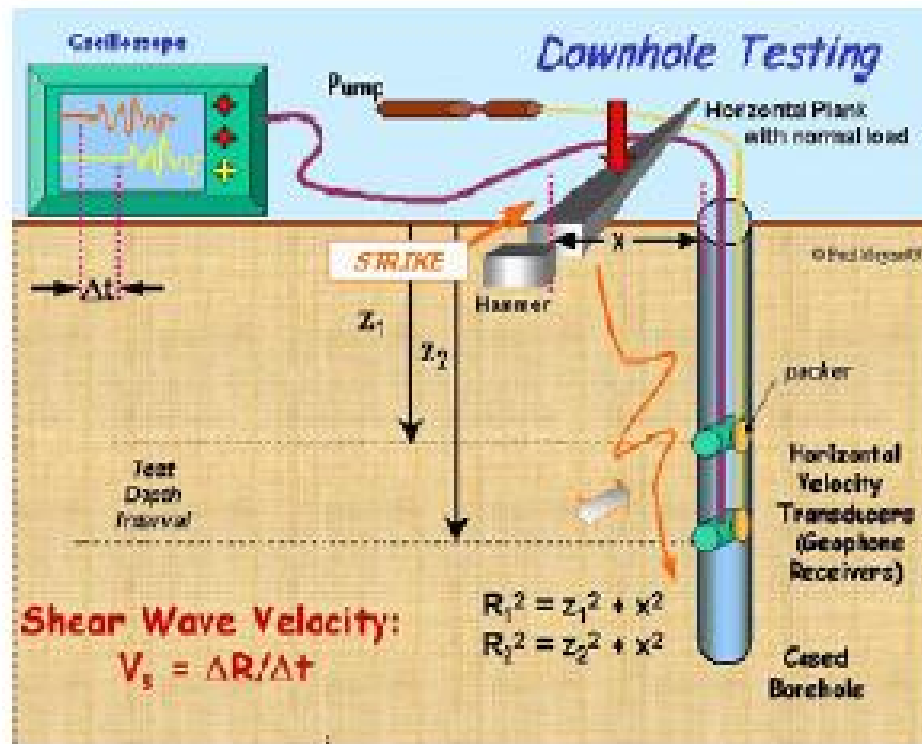


Figure 5-25. Setup and Data Reduction Procedures for Conducting a Downhole Seismic Survey

در این آزمایش با استفاده از یک منبع ارتعاش در سطح زمین موجی ایجاد کرده و در اعماق مختلف گمانه، با استفاده از ژئوفون، موج گذشته از خاک دریافت میشود.

موج میتواند با زدن ضربه در امتداد طولی تیری آهنی که با اعمال فشار مناسبی (مثلا با استفاده از چرخ ماشین) بر سطح زمین فشرده شده است موج را ایجاد می کنند. برای نتیجه بهتر ممکن است ضربه به هردو طرف تیر وارد شود.

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش انتشار امواج رو به پایین (Downhole wave propagation)

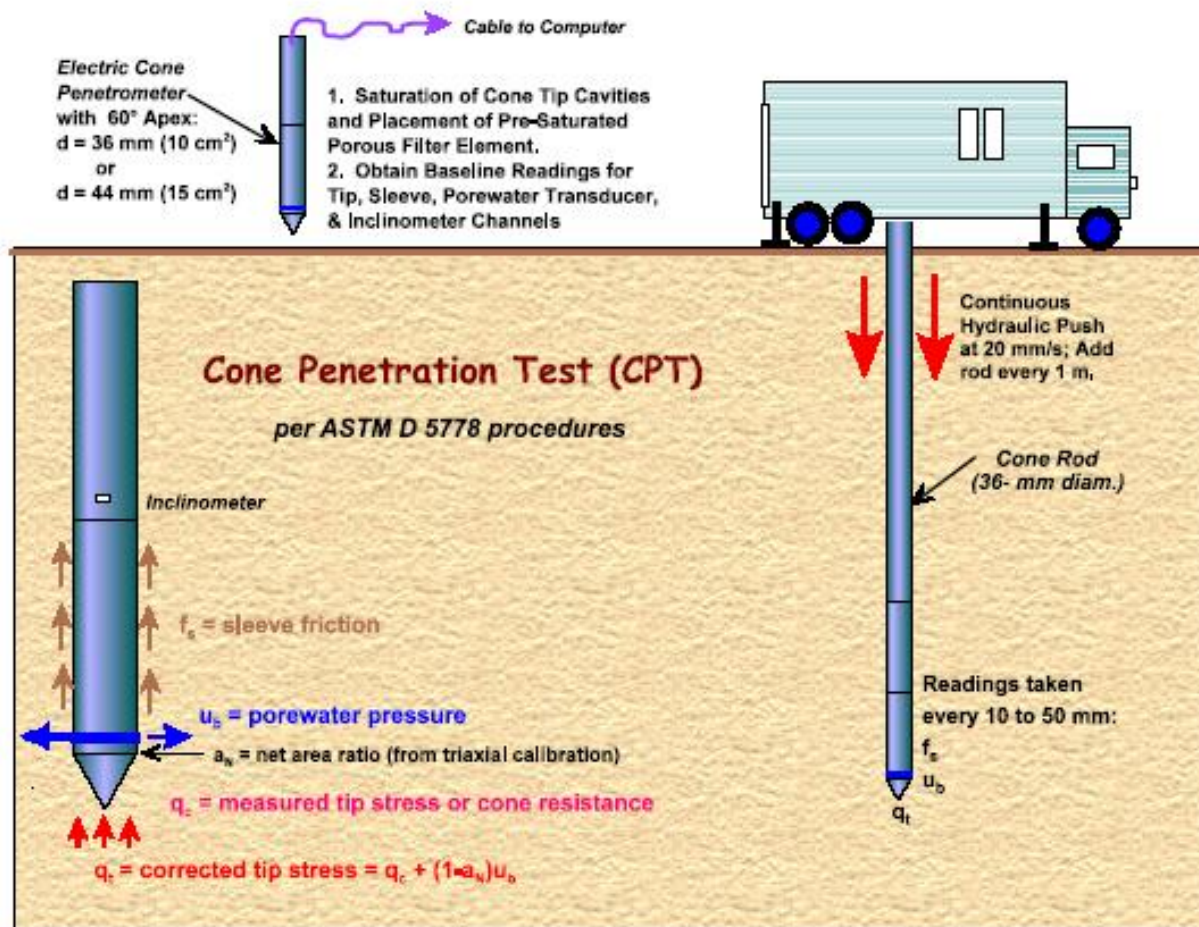


Figure 5-7: Procedures and Components of the Cone Penetration Test.

گونه ای از این آزمایش میتواند همراه با آزمایش CPT نیز انجام شود و دریافت کننده در نوک مخروط تعبیه شود. این آزمایش مختصراً با SCPT شناخته میشود

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش انتشار امواج رو به پایین (Downhole wave propagation)

! در آزمایش همراه با گمانه زنی، با داشتن فاصله دریافت کننده ها از هم  $(\Delta R)$  و همچنین تفاوت زمان های رسیدن موج به دریافت کننده ها  $(\Delta t)$  سرعت موج برشی را میتوان تعیین کرد:

$$u_s = \Delta R / \Delta t$$

! بررسی های Taylor و Larkin (1979) نشان داد که برای محدوده مشابه کرنش ها، سرعت موج برشی اندازه گیری شده در آزمایشگاه از آنچه از آزمایشهای محلی بدست می آید بمقدار قابل توجهی کمتر است. آنها رابطه زیر را برای خاک مورد آزمایش خود بدست آوردند:

$$u_{s(lab)} \approx 0.25u_{s(field)} + 83$$

در رابطه فوق سرعت ها بر حسب متر در ثانیه می باشند. تفاوت فوق می تواند نشانگر دست خوردگی ناشی از نمونه گیری در نمونه های آزمایشگاهی باشد.



# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش انتشار امواج رو به پایین (Downhole wave propagation)

آنها متغیری بنام  $S_D$  را که نمایانگر دست خوردگی خاک است بصورت زیر تعریف کردند:

$$S_D = \left[ \frac{u_{s(field)}}{u_{s(lab)}} \right]^2 = \frac{G_{field}}{G_{lab}}$$

در آزمایشهای آنها، متغیر فوق از یک برای  $u_{s(field)} = 140m/s$  تا چهار برای سرعت  $u_{s(field)} = 400m/s$  تغییر میکرد.

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش انتشار امواج رو به بالا (Uphole wave propagation)

این آزمایش مشابه آزمایش رو به پایین است با این تفاوت که دریافت کننده در سطح زمین قرار داشته و منبع موج، که معمولا خرج های انفجاری است، در عمق های مورد نظر درون گمانه قرار داده میشود.

در این روش میتوان سرعت حرکت امواج برشی و فشاری را بدست آورد زیرا با توجه به نحوه ایجاد امواج، هر دو نوع موج ممکن است در خاک ایجاد شود

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش انتشار جانبی امواج (Crosshole wave propagation)

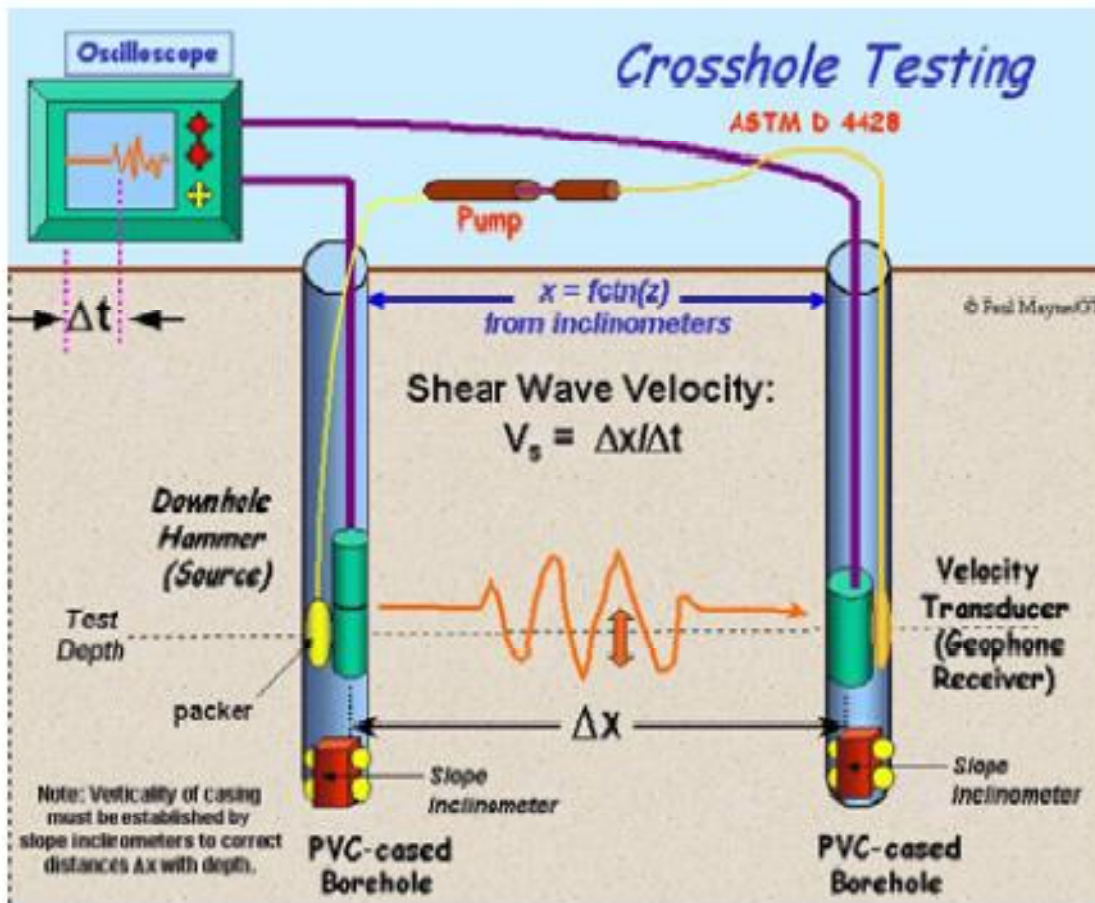


Figure 5-24. Setup and Data Reduction Procedures for Crosshole Seismic Test.

! در این آزمایش دو گمانه مورد نیاز است.

! منبع موج میتواند ضربه ناشی از سقوط یک وزنه به کف گمانه باشد که موج برشی ایجاد خواهد کرد

! دریافت کننده نیز میتواند ژئوفون حساس به ارتعاشات قائم باشد که در کف گمانه دیگر قرار داده میشود

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش انتشار جانبی امواج (Crosshole wave propagation)

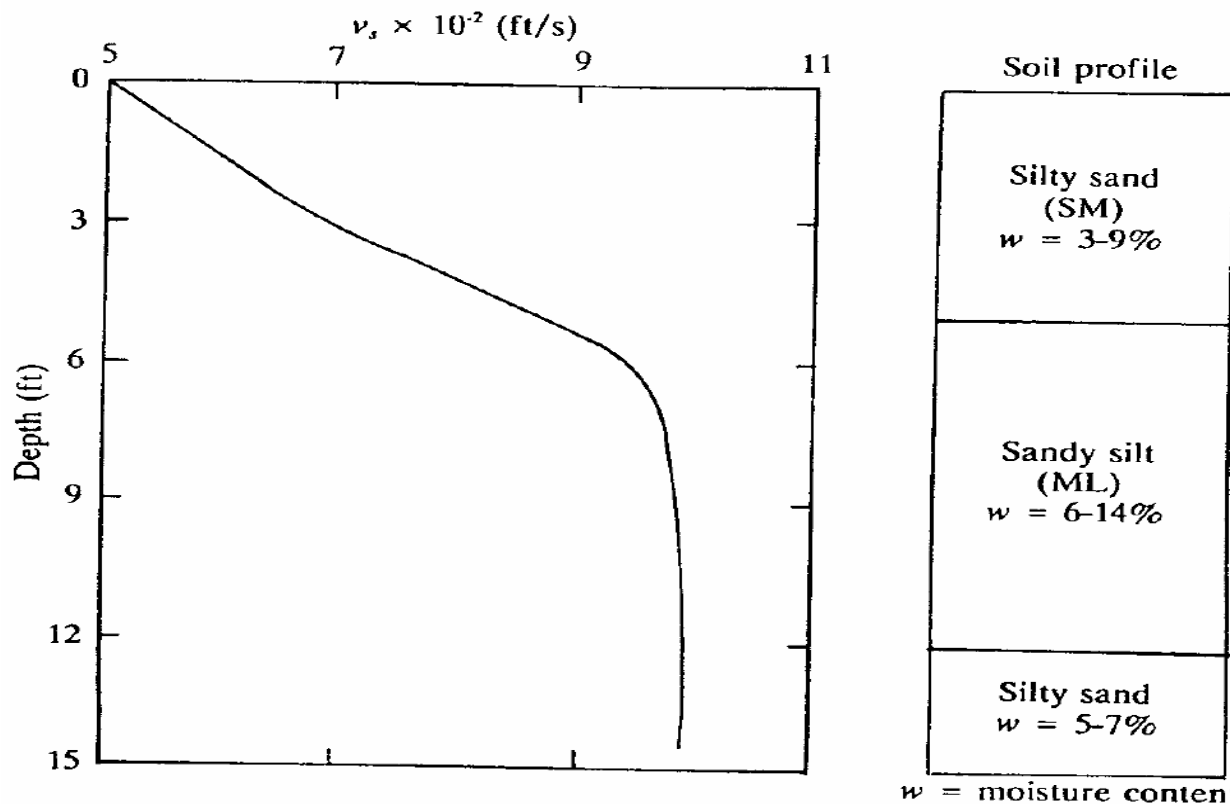
■ در صورتیکه عمق گمانه ها نسبتا زیاد باشد (مثلا بیشتر از حدود 15 متر) ممکن است لازم باشد از انحراف سنج ( inclinometer ) برای اطمینان از عمودی بودن گمانه ها استفاده شود تا فاصله بین گمانه ها درست در نظر گرفته شود. گیرنده ها نیز باید بخوبی به دیواره گمانه تماس داشته باشند

■ برای ایجاد موج میتوان از چکشهای ویژه ای که میتوانند روبرو یا رو به پایین ضربه وارد کنند استفاده کرد. اعمال دو نوع ضربه برای کنترل بهتر کیفیت و مقایسه موج های دریافتی می باشد. این روش را میتوان برای گمانه های تا عمق 300 متر نیز بکار برد ولی برای اعماق زیاد، هزینه ها بسرعت افزایش می یابد

■ سرعت حرکت موج برشی از تقسیم فاصله دو گمانه به زمان لازم برای حرکت موج بین دو گمانه بدست می آید.

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش انتشار جانبی امواج (Crosshole wave propagation)



نمونه ای از نتایج  
آزمایش انتشار  
جانبی موج برای  
شناسائی لایه  
بندی خاک در  
شکل روبرو آمده  
است.

Figure 4.53 Shear wave velocity versus depth from cross-hole seismic survey (redrawn after Stokoe and Woods, 1972)

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

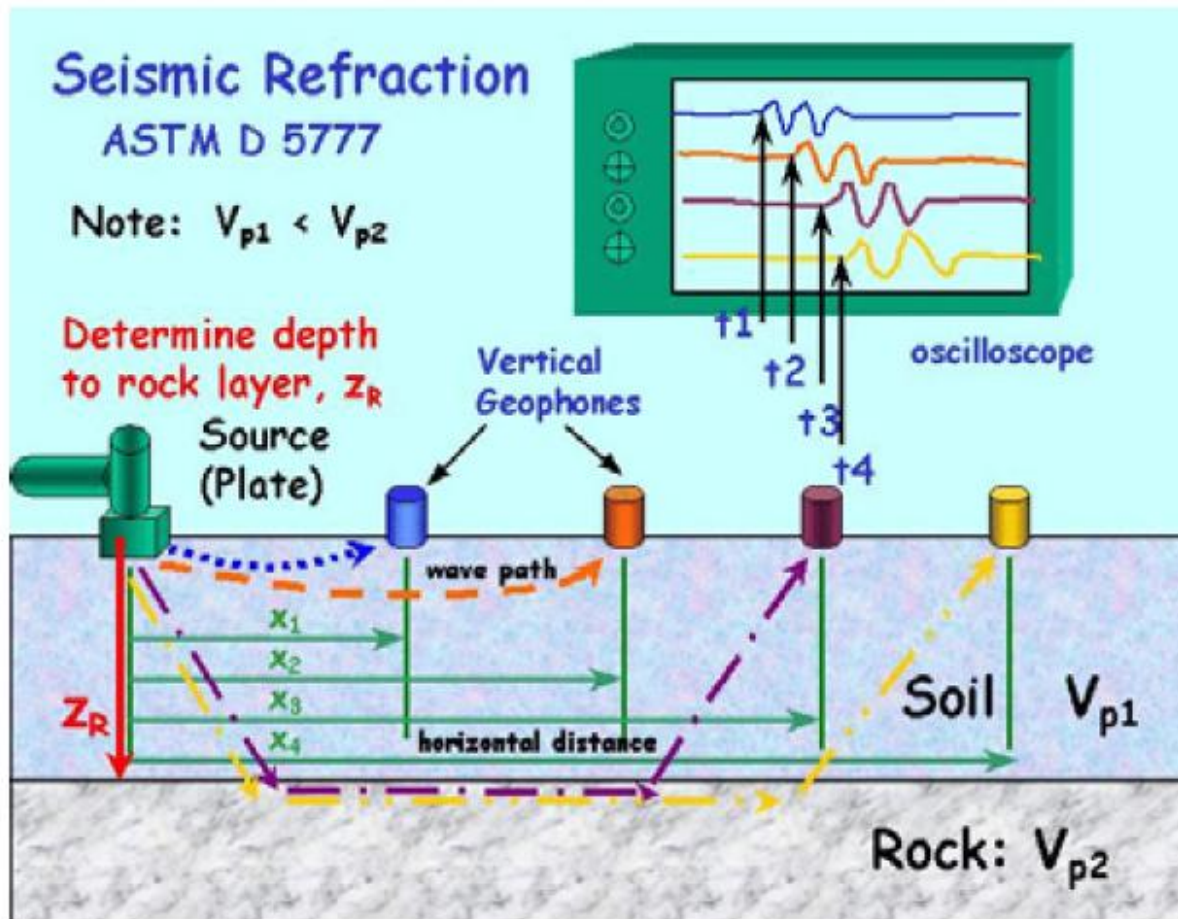
## - آزمایش انکسار امواج در خاک با لایه های افقی (Refraction of waves in horizontal soil layers)

- این آزمایش را می توان برای تعیین سرعت حرکت امواج در لایه های مختلف خاک و همچنین تعیین عمق و ضخامت لایه ها و یا عمق سنگ بستر بکار برد.
- در این آزمایش باید سرعت حرکت موج در لایه های فوقانی کمتر از لایه های زیرین باشد تا امکان انکسار و برگشت موج ارسالی به سطح زمین وجود داشته باشد.
- این آزمایش طبق استاندارد ASTM D5777 انجام میشود.
- از نتایج این آزمایش می توان برای تعیین مقاومت سنگها و قابلیت برداشتن آنها با استفاده از وسائل خاکبرداری هم استفاده کرد.
- در این آزمایش معمولا با زدن ضربه بر یک صفحه فلزی موجی که عمدتا از نوع P است ایجاد کرده و سپس موج منتشر شده را در فواصل مختلف با استفاده از یک یا چند دریافت کننده که در امتداد هم قرار داده میشوند ثبت می کنند.

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش انکسار امواج در خاک با لایه های افقی

(Refraction of waves in horizontal soil layers)



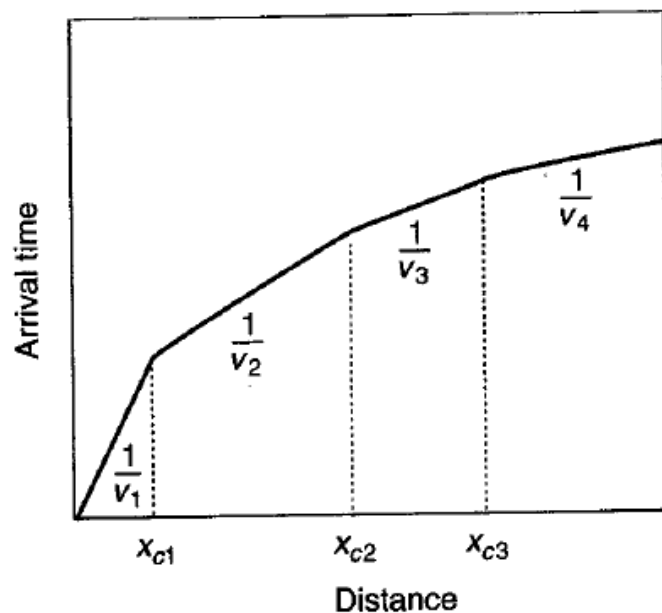
| در شکل روبرو امواج دریافت شده از دو ژئوفون اول بطور مستقیم، و از ژئوفون های دورتر بطور غیر مستقیم (پس از انکسار) دریافت شده اند  
 | برای امواج دریافت شده از فواصل نزدیک (امواج مستقیم) می توان نوشت:

$$u_p = \frac{x}{t}$$

# آزمایشهای صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش انکسار امواج در خاک با لایه های افقی

(Refraction of waves in horizontal soil layers)



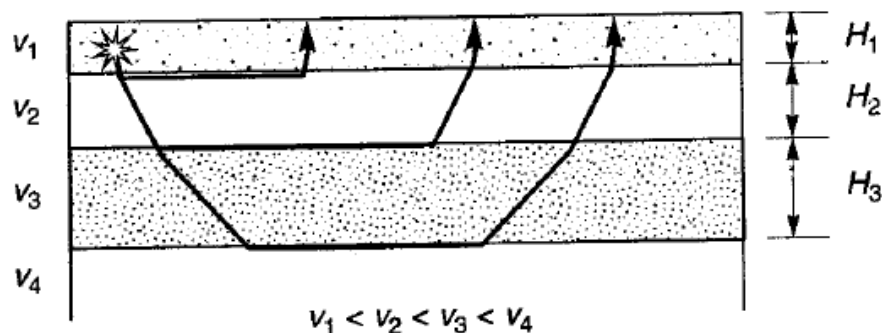
### تعیین سرعت ها با استفاده از نمودار زمان-فاصله

و برای امواج منکسر شده با استفاده از روابط انکسار و انعکاس امواج میتوان رابطه بین سرعت موج در محیط های مجاور، فواصل نقاط اندازه گیری، زمان دریافت امواج، و ضخامت لایه ها را بدست آورد.

میتوان نشان داد که در یک سیستم چند لایه ای، شیب های نمودار فاصله-

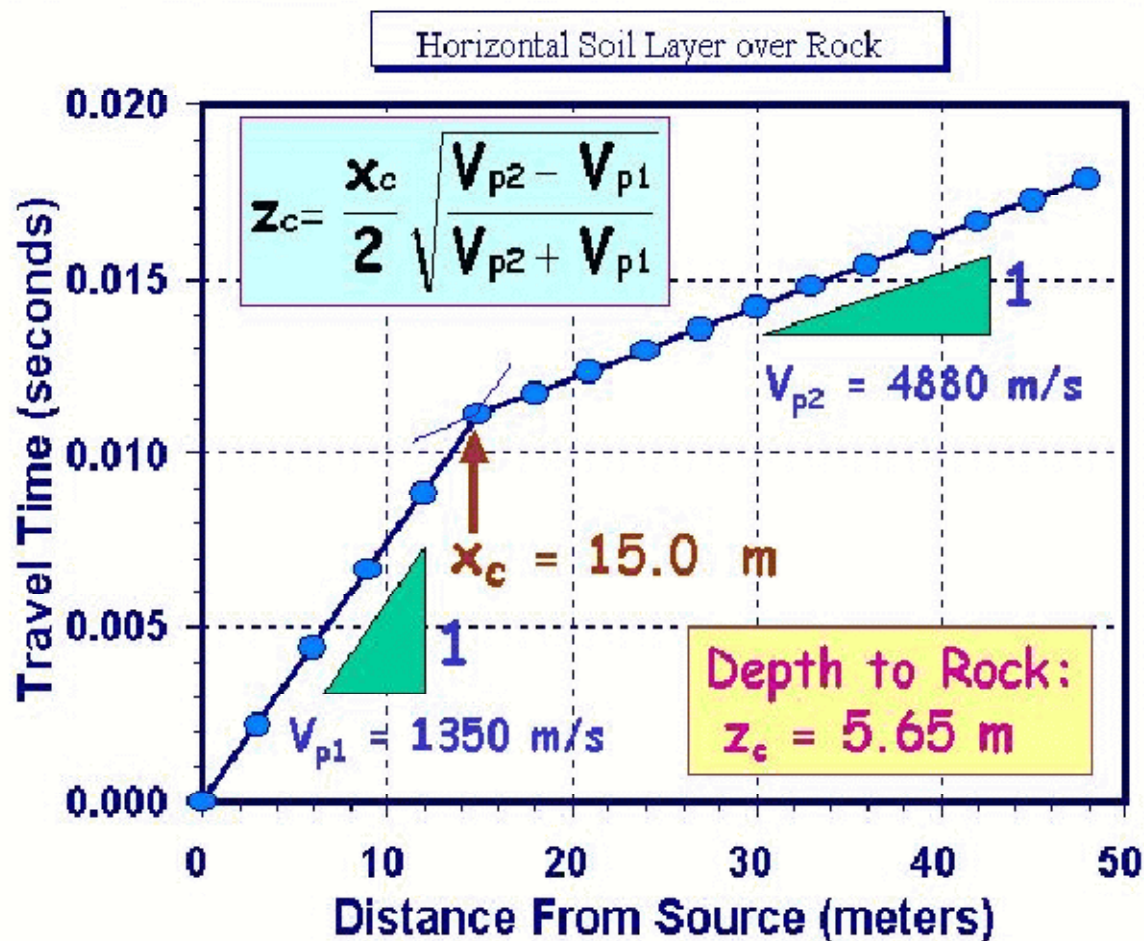
زمان با عکس سرعت های انتشار موج در محیط ها متناسب است و این سرعتها با استفاده از نموداری مانند شکل روبرو

بدست می آیند





# آزمایشهای صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها - آزمایش انکسار امواج در خاک با لایه های افقی (Refraction of waves in horizontal soil layers)



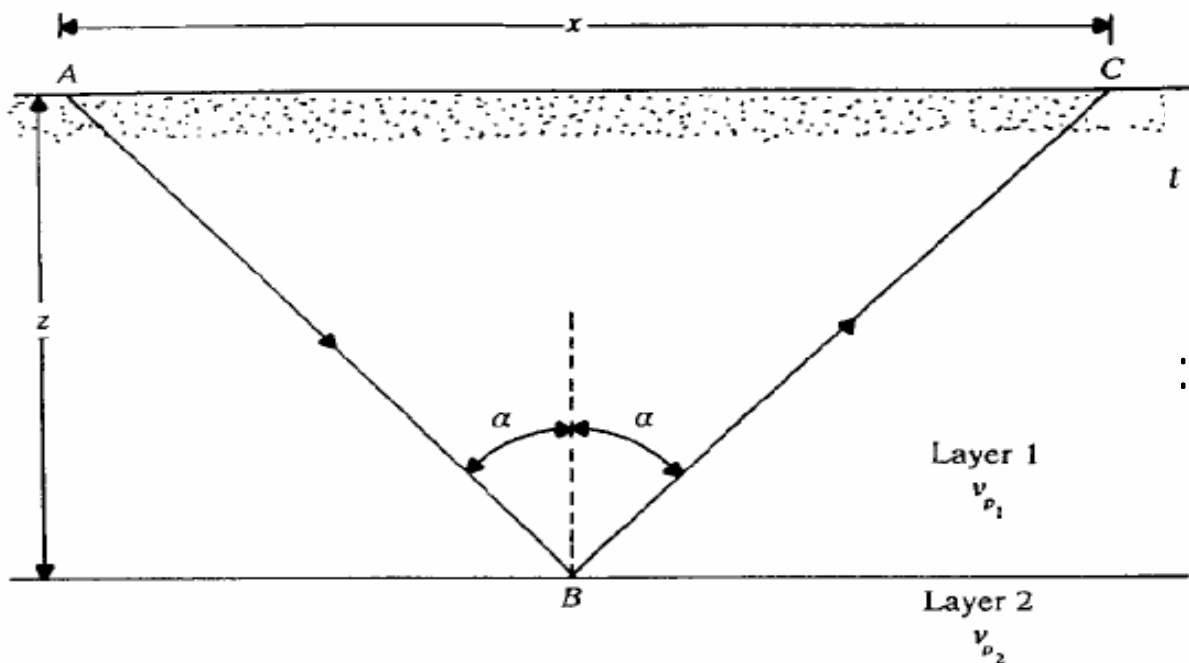
این نمونه ای از نحوه تعیین سرعت ها و ضخامت لایه در یک سیستم دو لایه ای با استفاده از نمودار زمان-فاصله

# آزمایشهای صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش انعکاس امواج در خاک با لایه های افقی

(Reflection of waves in horizontal soil layers)

از انعکاس امواج نیز میتوان برای بدست آوردن اطلاعاتی در مورد لایه های خاک استفاده کرد. در شکل زیر در صورتیکه منبع ایجاد موج در نقطه A و محل دریافت موج در C باشد زمان لازم برای رسیدن موج منعکس شده به محل دریافت t عبارت خواهد بود از:



$$t = \frac{AB + BC}{v_{p1}} = \frac{2}{v_{p1}} \sqrt{z^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}$$

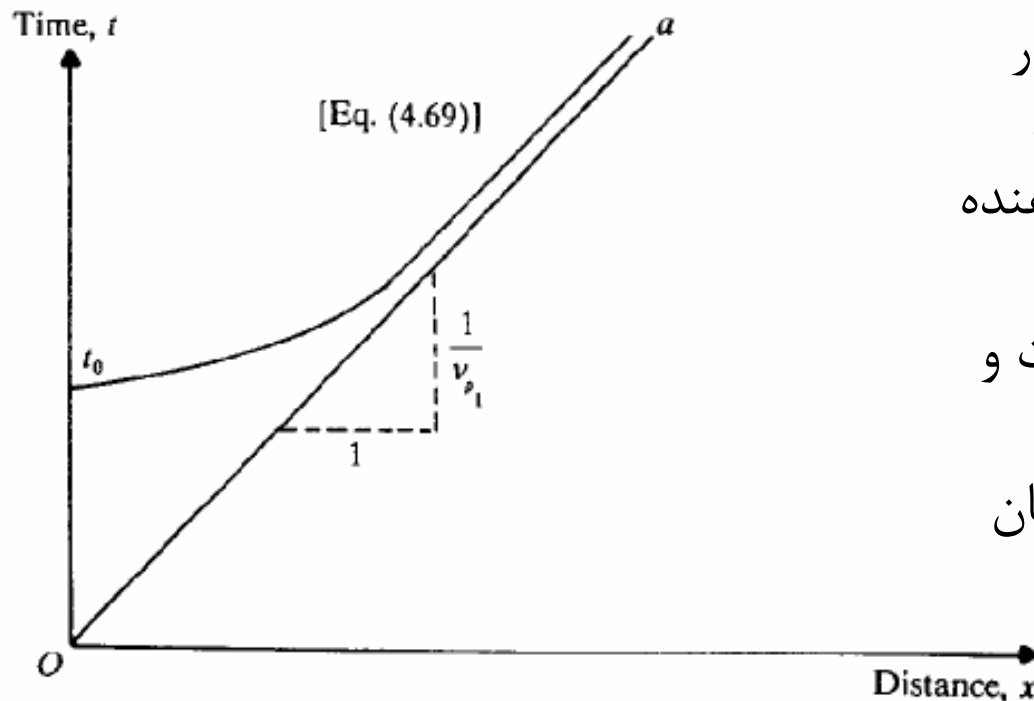
از رابطه فوق می توان عمق لایه را بشکل زیر تعیین کرد:

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{(v_{p1} t)^2 - x^2}$$

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش انعکاس امواج در خاک با لایه های افقی (Reflection of waves in horizontal soil layers)

در این روش زمان حرکت ( $t$ ) برای فواصل مختلف ( $x$ ) تعیین شده و در نموداری مانند شکل زیر رسم میشود



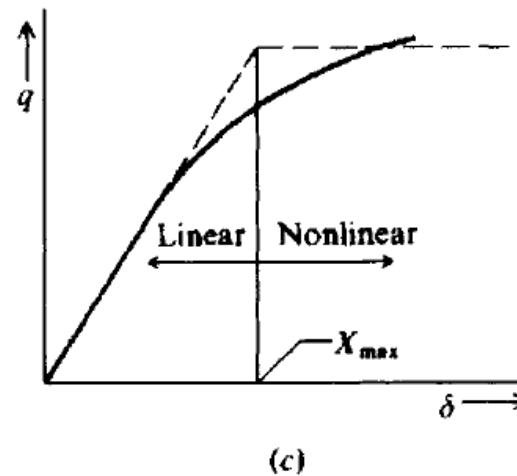
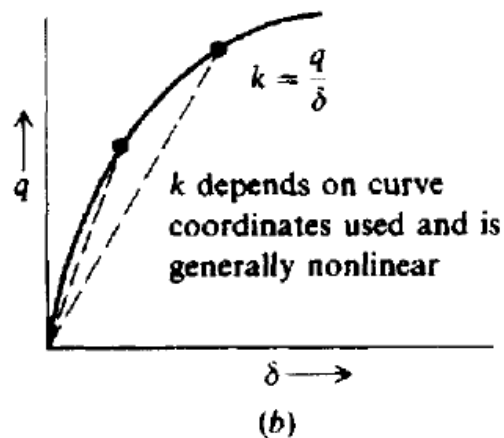
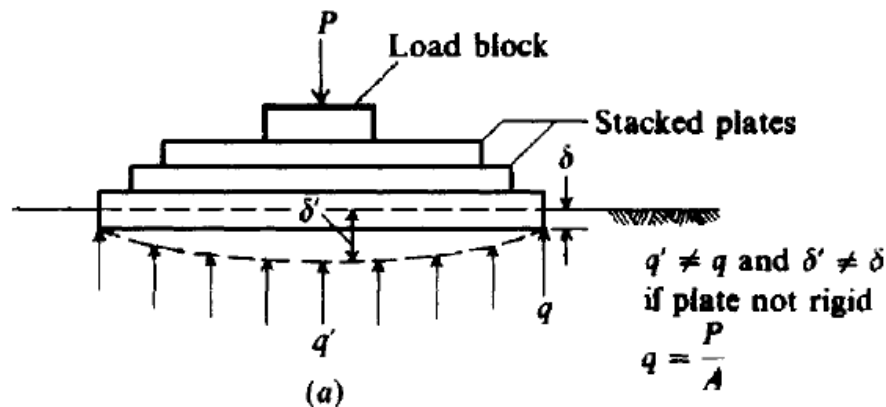
رابطه قبل نشان میدهد که نمودار زمان-فاصله بشکل هذلولی است. خط  $Oa$  در شکل روبرو نشان دهنده تغییرات زمان-فاصله برای موج مستقیم در لایه بالایی خاک است و شیب این خط معکوس سرعت حرکت موج در لایه فوقانی را نشان میدهد.

# آزمایش‌های صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکنی (Cyclic plate load test)

### نحوه انجام آزمایش

این آزمایش معمولاً برای تعیین ظرفیت باربری خاکها برای طراحی پی‌های سطحی بکار میرود. دامنه کرنش‌ها در این آزمایش بزرگتر از آزمایش‌های ژئوفیزیکی است و متناسب با تغییر شکلهای پی‌های سطحی است.



# آزمایش‌های صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکلی (Cyclic plate load test)

### نحوه انجام آزمایش

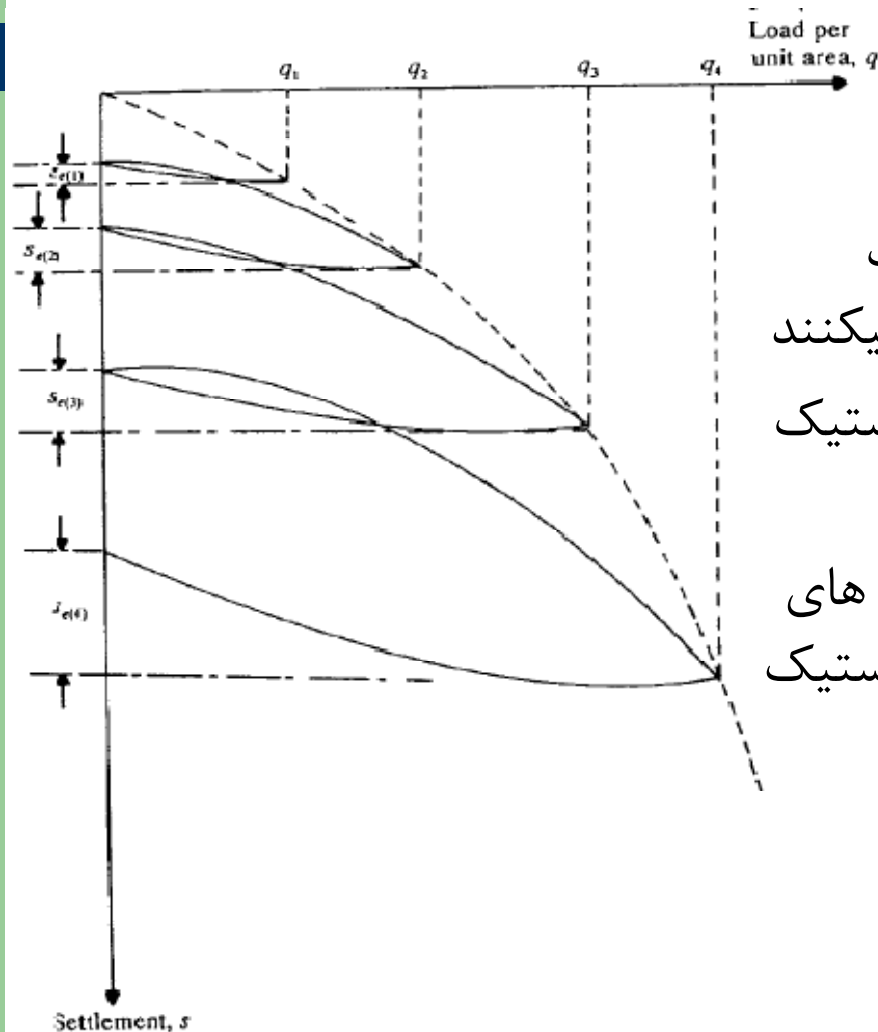
| برای انجام آزمایش معمولا از صفحه ای فلزی به ضخامت یک اینچ و قطر شش تا دوازده اینچ استفاده می کنند.

| ابتدا در محل آزمایش گودبرداری تا عمق مورد نظر انجام داده و صفحه را در مرکز گود قرار میدهند. سپس بار را در چند مرحله اعمال می کنند. در هر مرحله معمولا یک چهارم تا یک پنجم بار نهائی برآورد شده را اعمال می کنند.

| پس از اعمال هر مرحله بار، صبر می کنند تا نشست تقریبا متوقف شود و مقدار نشست را ثبت می کنند

| با استفاده از نتایج این آزمایش می توان مدول عکس العمل خاک و مدول برشی آنرا برآورد میکنند

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها - آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکلی (Cyclic plate load test)



## تعیین مدول عکس العمل خاک

- با توجه به شکل ابتدا بخش های الاستیک نشست برای هر سیکل بارگذاری را تعیین میکنند
- سپس نمودار تغییرات تنش با نشست الاستیک را رسم می کنند
- مدول عکس العمل خاک برای تغییر شکل های الاستیک را با استفاده از تغییرات نشست الاستیک با بار وارده تعیین می کنند

# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکلی (Cyclic plate load test)

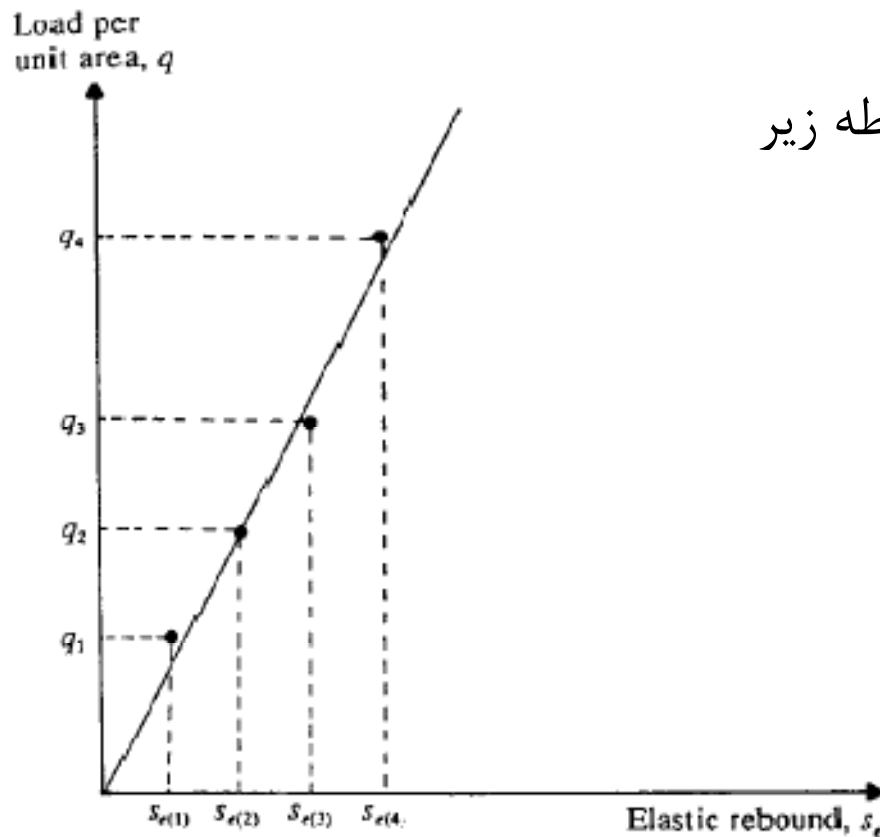
### تعیین سختی معادل صفحه

سختی معادل صفحه را با استفاده از رابطه زیر بدست می آورند

$$k_{\text{plate}} = \frac{qA}{s_e}$$

در رابطه فوق  $A$  مساحت صفحه است

مدول عکس العمل خاک نسبت فشار به جابجائی است بنابراین سختی معادل فوق باید به مساحت صفحه تقسیم شود



# آزمایشهای صحرایی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

## - آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکلی (Cyclic plate load test)

### تصحیح مدول عکس العمل خاک برای عرض پی

ا ترزاقی (1955) روابط زیر را برای تصحیح  $k_1$  بدست آمده از آزمایش جهت کاربرد در طراحی پی ها پیشنهاد کرد:

$$k_s = k_1 \frac{B_1}{B}$$

برای رس ها:

$$k_s = k_1 \left( \frac{B + B_1}{2B} \right)^2$$

برای ماسه ها:

در روابط فوق  $k_1$  و  $k_s$  بترتیب مدول عکس العمل بدست آمده از آزمایش، و مورد استفاده برای طراحی پی است.  $B$  و  $B_1$  نیز بترتیب عرض صفحه در آزمایش بارگذاری صفحه ای و عرض پی واقعی است که باید بر حسب واحد یکسانی در روابط فوق بکار روند. باید توجه کرد که در واقع روابط فوق برای زمانی که  $B/B_1 > 3$  است چندان دقیق نیستند



# آزمایشهای صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکلی (Cyclic plate load test)

## تعیین مدول برشی خاک

! Barkan (1962) نشان داد که از نظر تئوریک رابطه زیر را می توان بین مدول عکس العمل خاک ( $C_z$ ) که با توجه به عرض پی آنرا معمولا با  $k_s$  یا  $k_1$  نشان میدهند و مدول الاستیسیته آن ( $E$ ) نوشت:

$$C_z = \frac{q}{s_e} = 1.13 \frac{E}{1 - \mu^2} \frac{1}{\sqrt{A}}$$

$C_z$  = subgrade modulus

$E$  = modulus of elasticity

$\mu$  = Poisson's ratio

$A$  = area of the plate

که در آن:

# آزمایش‌های صحرائی برای مطالعه رفتار دینامیکی خاکها

- آزمایش بارگذاری صفحه ای سیکلی (Cyclic plate load test)

## تعیین مدول برشی خاک

۱ و چون میدانیم:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

بنابراین:

$$C_r = \frac{2.26G(1 + \mu)}{1 - \mu^2} \frac{1}{\sqrt{A}}$$

و در نتیجه:

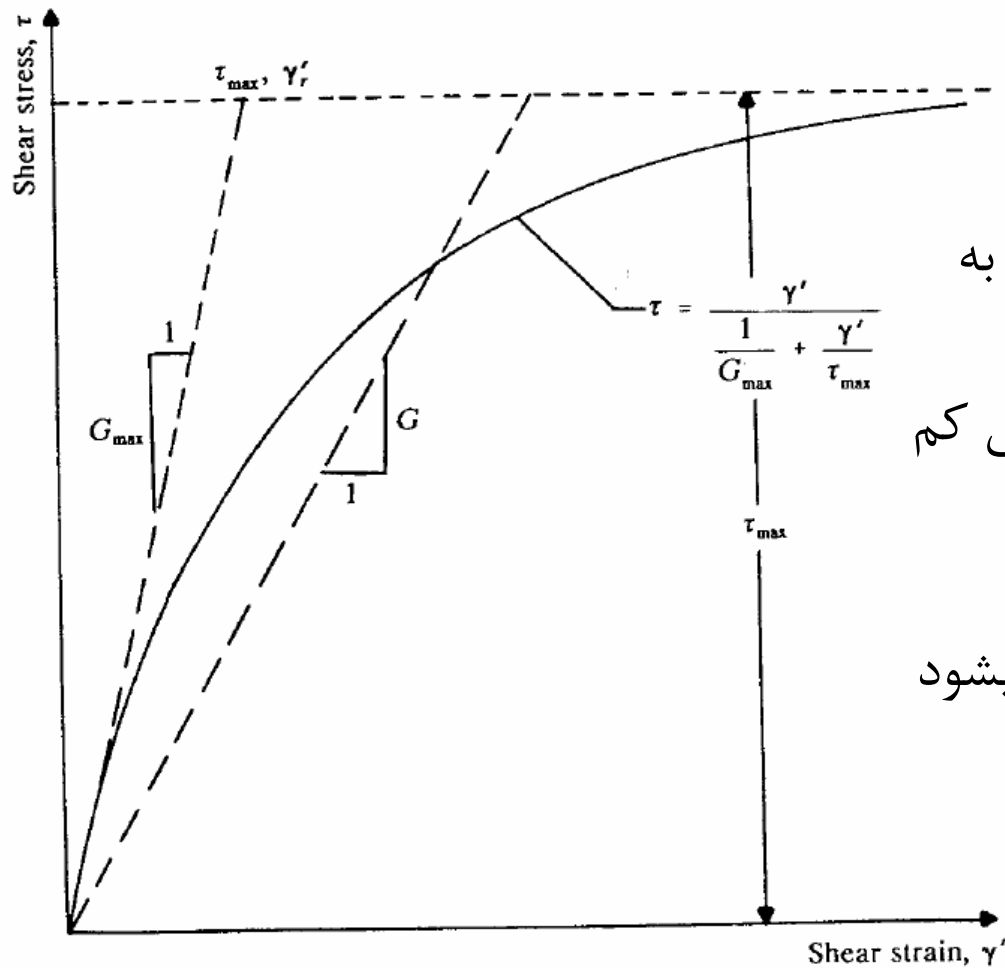
$$G = \frac{(1 - m)C_s \sqrt{A}}{2.26}$$

و یا:

$$G = \frac{(1 - m)k_1 \sqrt{A}}{2.26}$$

# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرایی خاکها

## - تغییرات مدول برشی خاک با کرنش برشی



تغییرات تنش برشی - کرنش برشی  
معمولا نظیر شکل روبروست. با توجه به  
شکل دیده میشود که:

! مدول برشی با افزایش کرنش برشی کم  
میشود

! مدول برشی در کرنش خیلی کم  
حداکثر است و با  $G_{max}$  نشان داده میشود

## روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرایی خاکها - تغییرات مدول برشی خاک با کرنش برشی

تغییرات تنش-کرنش برشی را میتوان با رابطه ای هذلولی بشکل زیر تقریب زد:  
(Hardin and Drnevich, 1972)

$$\tau = \frac{\gamma'}{1/G_{\max} + \gamma'/\tau_{\max}}$$

$$G = \frac{t}{g'} = \frac{1}{1/G_{\max} + g'/t_{\max}}$$

و یا:

بنابراین با استفاده از رابطه فوق، با داشتن دو پارامتر  $G_{\max}$  و  $t_{\max}$  برای خاک میتوان تغییرات مدول برشی آن با کرنش برشی را بدست آورد.

# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

- مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

ا در گذشته دیدیم که سرعت حرکت موج برشی در ماسه عمدتاً به نسبت تخلخل و تنش عمودی بستگی داشته و تابع عواملی مانند اندازه دانه ها، توزیع دانه بندی، دانسیته نسبی و نظایر آنها نیست.

ا Hardin and Richart (1963) برای ماسه خشک اتاوا در دامنه کرنش  $10^{-3}$  روابط زیر را بدست آوردند (در سیستم SI):

$$v_s = (19.7 - 9.06e)\bar{\sigma}_0^{1/4} \quad \text{for } \bar{\sigma}_0 \geq 95.8 \text{ kN/m}^2$$

در رابطه فوق سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه و تنش موثر بر حسب  $\text{kN/m}^2$  است. همچنین داریم:

$$v_s = (11.36 - 5.35e)\bar{\sigma}_0^{0.3} \quad \text{for } \bar{\sigma}_0 < 95.8 \text{ kN/m}^2$$

ا آنها برای ماسه کوارتزی خیلی تیزگوشه نیز رابطه زیر را بدست آوردند:

$$v_s = (18.43 - 6.2e)\bar{\sigma}_0^{1/4}$$

$\uparrow$  (m/s)                       $\uparrow$  (N/m<sup>2</sup>)

# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

- مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

با استفاده از روابط مذکور در قبل، روابط زیر را میتوان برای مدول برشی ماسه های گردگوشه و تیز گوشه بدست آورد:

$$G_{\max} = \frac{6908(2.17 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_0^{1/2} \quad (\text{round-grained})$$

$$G_{\max} = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_0^{1/2} \quad (\text{angular-grained})$$

در روابط فوق مدول برشی و تنش موثر بر حسب  $\text{kN/m}^2$  است. در صورتیکه تنش عمودی با افقی متفاوت باشند، می توان از متوسط تنش سه جهت در روابط فوق استفاده کرد. روابط فوق در موارد زیادی کاربرد پیدا کرده اند.

# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

- مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

$$G = 1000K_2(\bar{\sigma}_0)^{0.5}$$

رابطه روبرو برای مدول برشی ماسه در یک سطح کرنش مشخص نیز بوسیله Seed and Idriss (1970) پیشنهاد شده و کاربرد زیادی پیدا کرده است.

$$G_{\max} = 1000K_{2(\max)}(\bar{\sigma}_0)^{0.5}$$

برای کرنش های کوچک ( $10^{-4}\%$  یا کمتر) رابطه فوق بصورت روبرو نوشته میشود:

Relative density, $R_D$ (%)	$K_{2(\max)}$
30	34
40	40
45	43
60	52
75	61
90	70

در روابط فوق مدول برشی و تنش موثر بر حسب  $\text{kN/m}^2$  می باشند. مقدار  $K_{2(\max)}$  بین 30 برای ماسه غیر متراکم و 75 برای ماسه متراکم تغییر میکند.

Seed and Idriss (1970) مقادیر جدول روبرو را برای  $K_{2(\max)}$  پیشنهاد کردند.

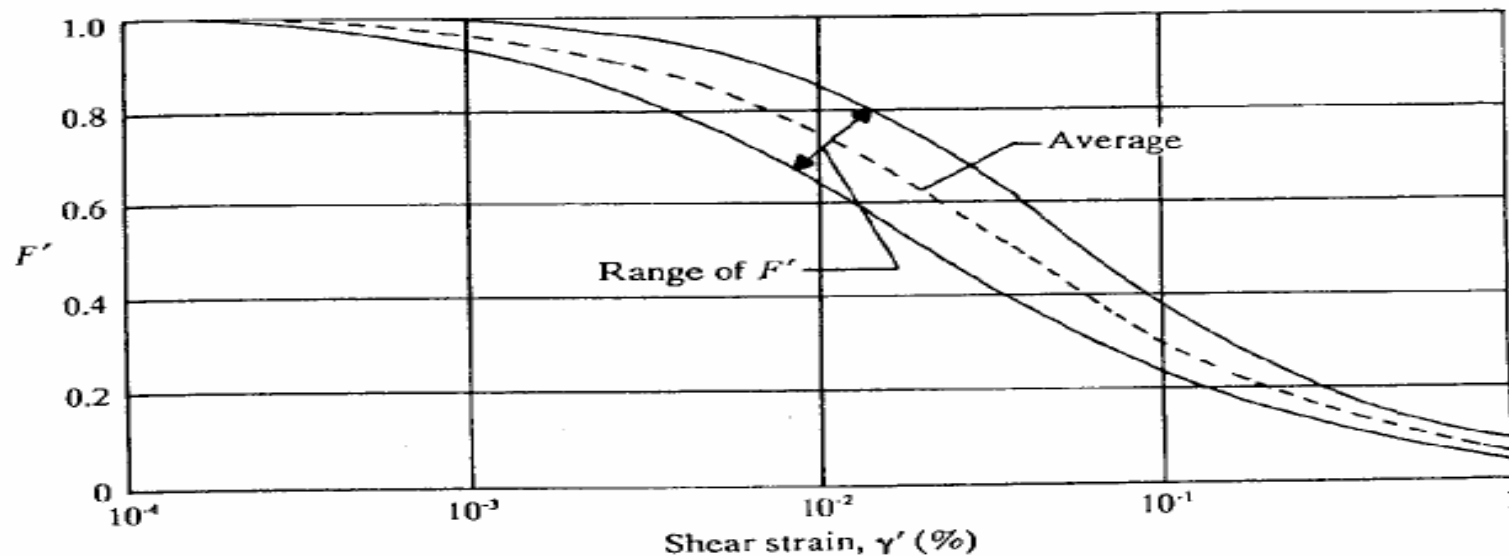
# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

- مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{K_2}{K_{2(\max)}} = F'$$

از روابط قبل می توان نتیجه گرفت:

تغییرات  $F'$  با کرنش برشی با استفاده از آزمایشات مختلف بررسی شده و نمودار زیر نشان دهنده این مطالعات است. دیده میشود این تغییرات در محدوده نسبتا کوچکی قرار داشته و استفاده از منحنی وسط برای کاربردهای عملی کاملا قابل قبول است.

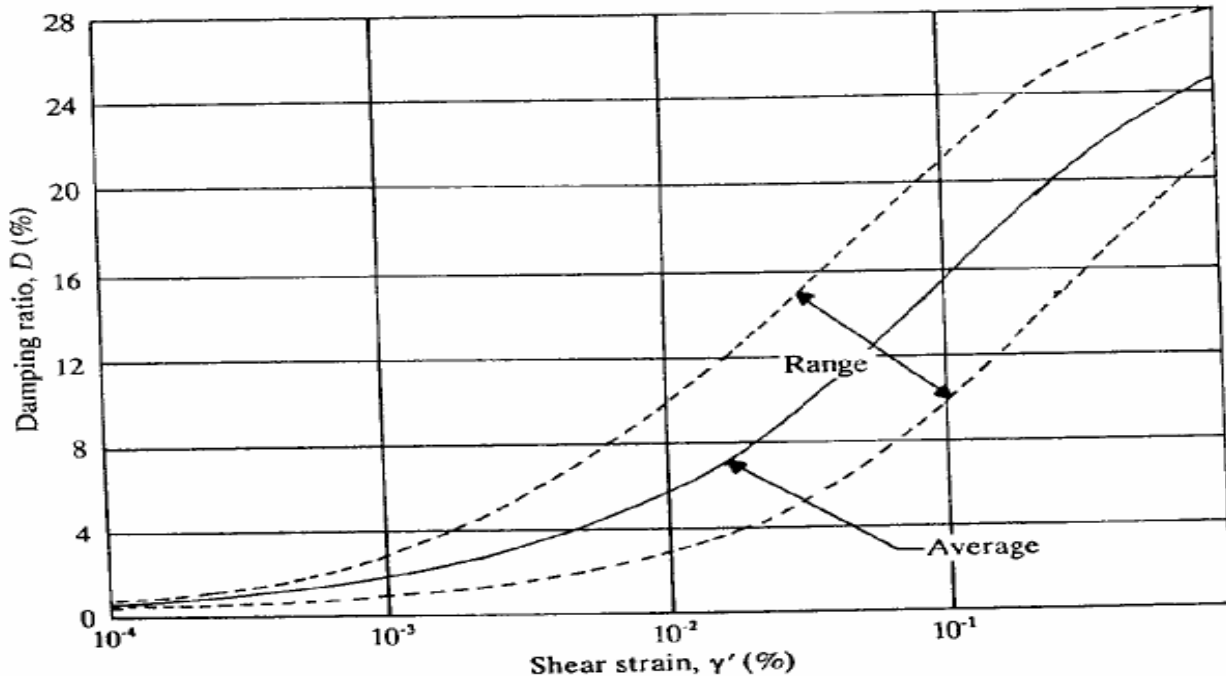




# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

- مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

مطالعات نشان داده است که نسبت میرائی ماسه ها تابع عواملی چون: اندازه و توزیع دانه ها، درجه اشباع، نسبت تخلخل، فشار جانبی خاک در حالت سکون، زاویه اصطکاک داخلی، تعداد سیکلهای بارگذاری، میزان کرنش، و تنش موثر محدود کننده میباشد.



دو عامل اخیر بیشترین تاثیر را بر نسبت میرائی دارند.

شکل روبرو با استفاده از نتایج آزمایشات مختلف بدست آمده است و برای کاربردهای عملی منحنی متوسط دقت کافی دارد.

# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

- مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

ا رابطه ای نیز برای مدول برشی حد اکثر بر حسب نتایج آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد توسط Seed و دیگران در سال 1986 پیشنهاد شده است:

$$G_{\max} \approx 35 \times 1000 N_{60}^{0.34} (\bar{\sigma}_0)^{0.4}$$

$(\text{lb}/\text{ft}^2)$                        $(\text{lb}/\text{ft}^2)$

در رابطه فوق عدد نفوذ استاندارد برای 60% انرژی تئوریک بدست آمده است.

ا مطالعات فوق همچنین نشان داد که برای خاکهای شنی مدول برشی را میتوان از رابطه زیر بدست آورد.

$$G = G_{\max} F' = 1000 F' K_{2(\max)} (\bar{\sigma}_0)^{0.5}$$

$(\text{lb}/\text{ft}^2)$                        $(\text{lb}/\text{ft}^2)$

تفاوت این رابطه با رابطه مربوط به ماسه ها در این است که بر خلاف ماسه ها، برای خاکهای شنی  $K_{2(\max)}$  بین 80 و 180 تغییر می کند

# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

## - مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

برای خاکهای شنی تغییرات مدول برشی با کرنش را میتوان با استفاده از شکل زیر بدست آورد.

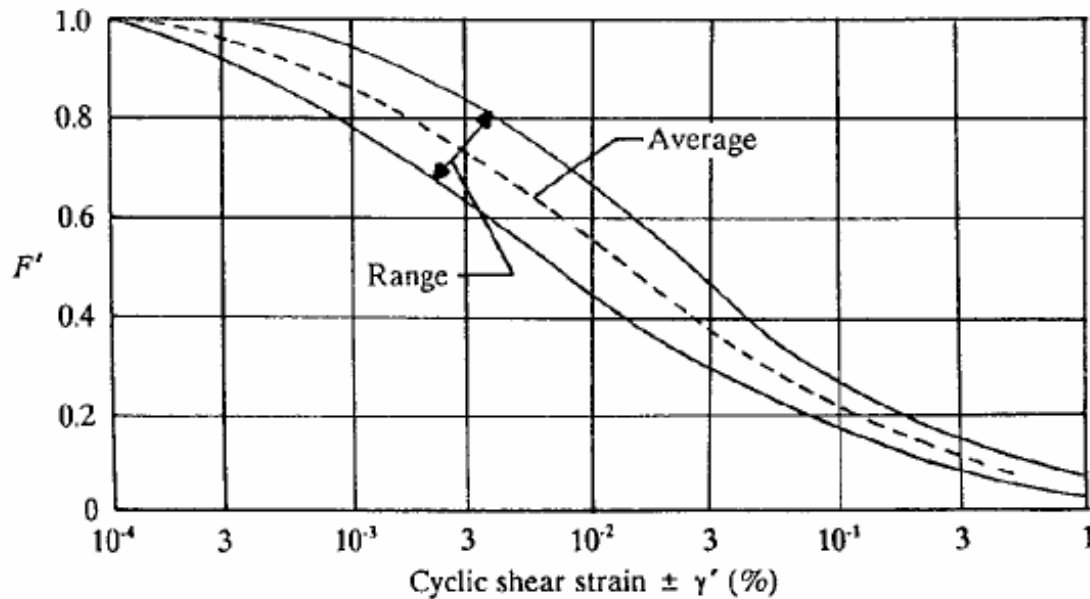
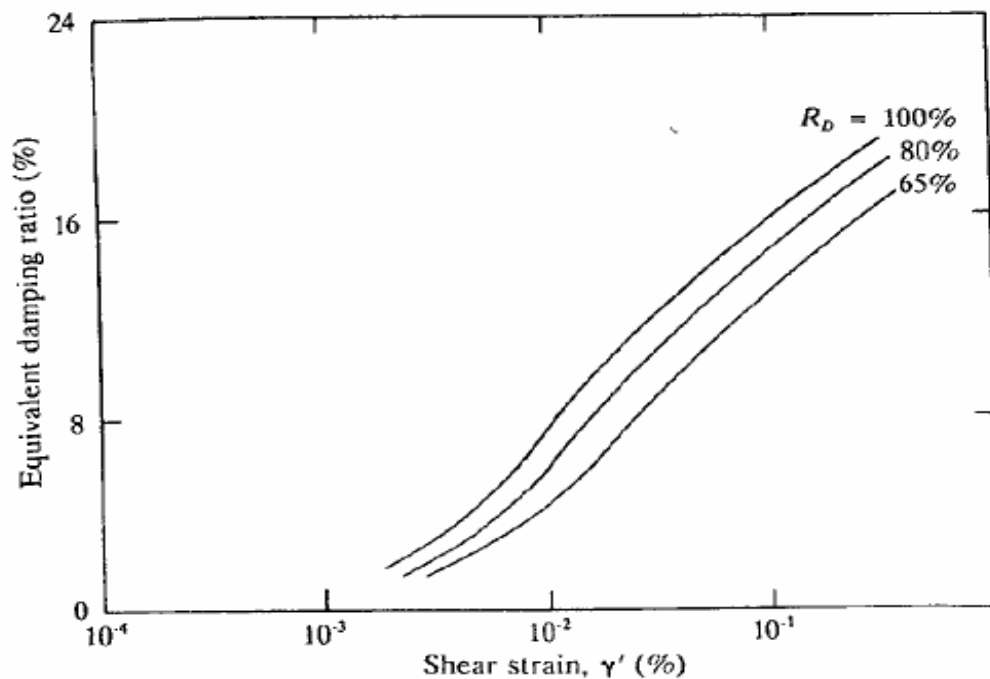


Figure 4.62 Variation of  $F'$  with shear strain for gravelly soils (after Seed et al., 1986)

# روابط تجربی برای برآورد مدول برشی و میرائی خاکها

- مدول برشی و نسبت میرائی ماسه ها

تغییرات نسبت میرائی با کرنش نیز برای خاکهای شنی در شکل نشان داده شده است. این شکل نشان میدهد که نسبت میرائی این خاکها با افزایش دانسیته نسبی افزایش می یابد.



همچنین Seed و دیگران نشان دادند که برای خاکهای شنی:

■ دانه بندی اثر چندانی بر نسبت میرائی ندارد

■ تعداد سیکلهای بارگذاری با دامنه کم اثر چندانی بر نسبت

میرائی ندارد. ولی پس از اعمال 60 سیکل کرنش با دامنه 0.2% مقدار

آن به سه چهارم مقدار اولیه میرسد

