دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی- گروه عمران-گرایش مکانیک خاک وپی

موضوع درس:

دینامیک خاک(Soil Dynamics)

دکتر علی عسگری (Dr. Ali Asgari)

نیمسال دوم تحصیلی ۹۴-۹۵

دینامیک خاک (Soil Dynamics) فصل چهارم

تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایشهای دینامیکی

مقدمه و کلیات
تئوری ارتعاشات
امواج در محیط های . . .
خصوصیات دینامیکی . . .
ارتعاشات شالوده و پی
ظرفیت باربری دینامیکی
پاسخ لرزه ای زمین
فشارلرزه ای جانبی خاک
تراکم دینامیکی . . .
روانگرایی
ماشین مرتعش برروی شمع
پایداری لرزه ای شیروانی

مقدمه:

خرابی ها در اثر زلزله شدیدا به خصوصیات دینامیکی خاک محل دارد.
مسائلی زیادی وجود دارد که برای حل آنها نیاز است که پارامترهای دینامیکی خاک تعیین شود. این مسائل شامل:
ظرفیت باربری دینامیکی پی، پاسخ پی تحت ارتعاش ماشین، اندرکنش خاک-سازه تحت بار زلزله و پایداری لرزه ای سدهای خاکی است.

خواص عمده‌ای که باید برای خاک ها تحت بارهای دینامیکی مورد مطالعه قرار گیرد:

۱- مقاومت برشی بر حسب سرعت تغییرشکل برشی و خصوصیات تنش-کرنش خاک
۲- پارامترهای مکانیکی- دینامیکی نظیر ν ضریب پواسون، E مدول الاستیسیته، G مدول برشی، K مدول حجمی و M مدول مهار شده
۳- میرائی و یا استهلاک نوسانات در خاک
۴- پارامترهای سیلان خاک شامل نسبت تنش برشی سیکلی، تغییرشکل سیکلی، واکنش فشار حفره‌ای.

تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایشهای دینامیکی

انواع آزمایش های تعیین مشخصات دینامیکی خاک :

۱- آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن
۲- آزمایش صحرایی و اندازه گیری ها

دستگاه‌های تست دینامیکی خاک‌ها

مشخصات کلی دستگاه‌ها و مقتضیات خاص آن‌ها و تفاوت با وسایل تست استاتیک متداول

۱- تست استاتیک

بارهای وارده با زمان بسیار کم تغییر کرده و وسایل متداول از قبیل گیج‌ها و وسایل دستی قابل استفاده‌اند.

۲- تست دینامیک

بارهای وارده با زمان تغییرات شدید داشته و لذا قرائت‌ها باید سریع‌تر و دقیق‌تر انجام گیرد لذا وسایل اتوماتیک لازم است.

نکته:

روش های مختلفی برای تعیین مشخصات دینامیکی خاک وجود دارد که برای استفاده از آنها مزایای و محدودیت هایی وجود دارد. بطور مثال برخی از این تست ها نیاز به تخصص دارد و به ابزارآلات بسیار گران نیازمند است و برخی دیگر در محدوده خاصی از کرنشها قابل استفاده هستند ...

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایشهای دینامیکی

تقسیم بندی
فصل چهارم

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری ها

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

تعیین خصوصیات دینامیکی خاک با انجام آزمایشهای دینامیکی

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

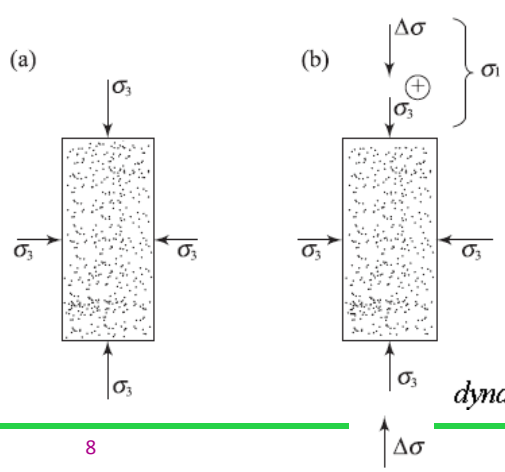
۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع:

الف) خاک رس اشباع *unconsolidated-undrained triaxial tests*

Major principal stress (total) = $\sigma_{1(f)} = \sigma_3 + \Delta\sigma_{max}$

Minor principal stress (total) = σ_3



$\phi = 0$

$$c_u = \frac{\Delta\sigma_{max}}{2} = \frac{\sigma_{1(f)} - \sigma_3}{2}$$

اگر نرخ کرنش کوچک باشد.

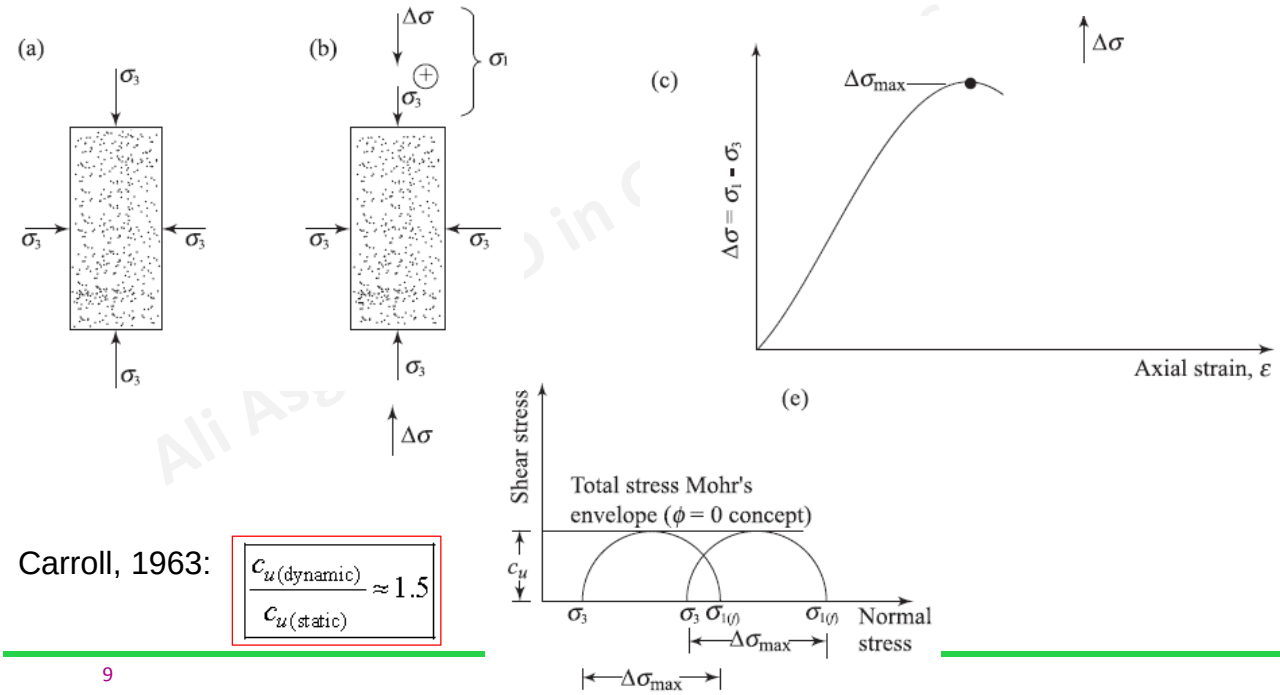
static loading condition, or $c_u = c_{u(static)}$

اگر نرخ کرنش بزرگ باشد. 50% to 42%

dynamic undrained shear strength, or $c_u = c_{u(dynamic)}$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

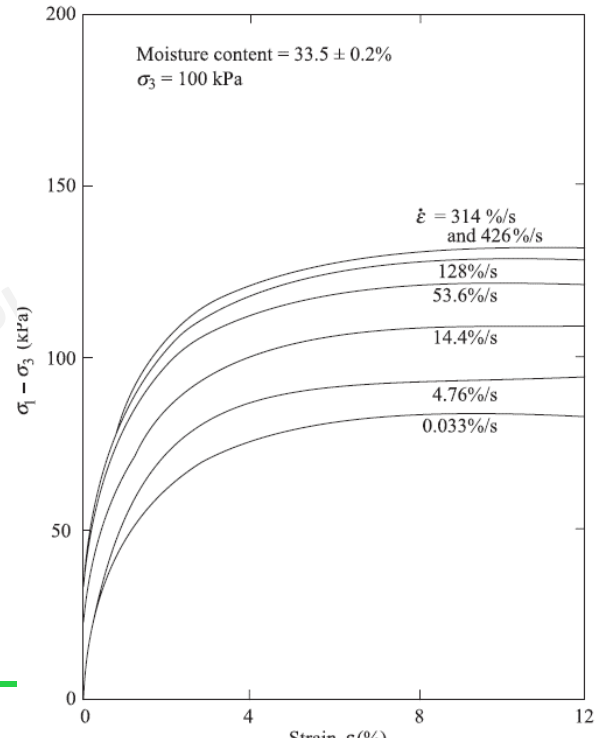
unconsolidated-undrained triaxial tests الف) خاک رس اشباع



Carroll, 1963: $\frac{c_{u(\text{dynamic})}}{c_{u(\text{static})}} \approx 1.5$

unconsolidated-undrained triaxial tests الف) خاک رس اشباع

Carroll, 1963: $\frac{c_{u(\text{dynamic})}}{c_{u(\text{static})}} \approx 1.5$

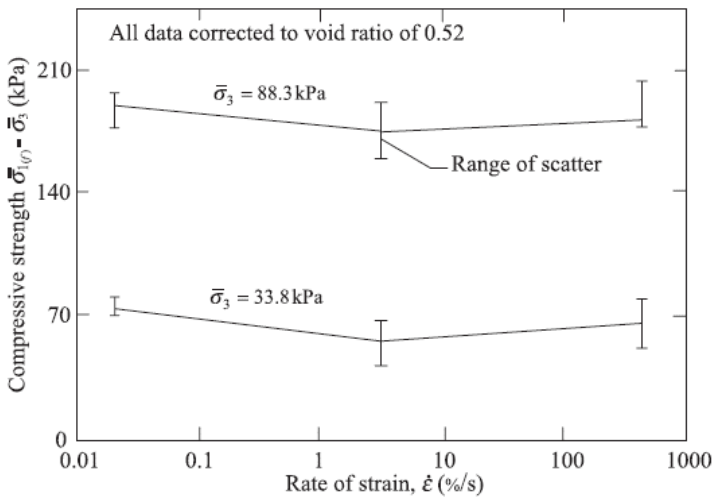


triaxle tests ب) خاک ماسه

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{\bar{\sigma}_{1(f)} - \bar{\sigma}_3}{\bar{\sigma}_{1(f)} + \bar{\sigma}_3}\right)$$

(Vesic, 1973)

$$\left(\phi_{dyn}\right)_{\min} = \phi_{static} - 2$$



تاثیر نرخ کرنش بر روی زاویه اصطکاک داخلی ماسه خشک اوتاوا
(Whitman and Healy, 1963)

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس کمبریج و ماسه منچستر تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

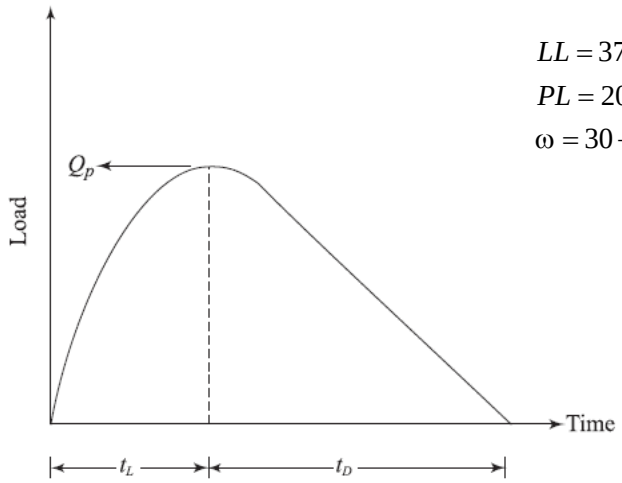
تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

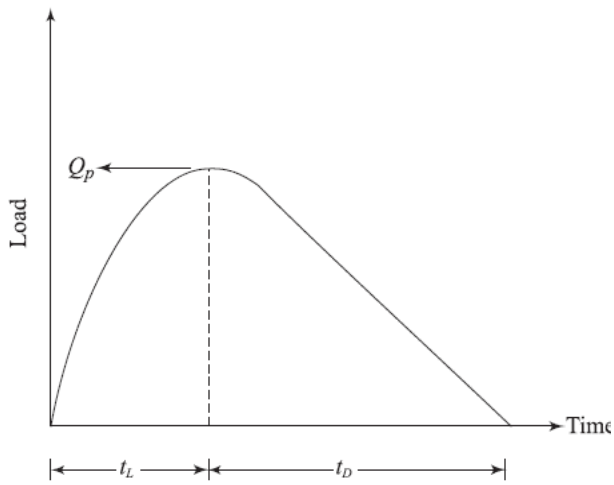
الف) مقاومت تک محوره خاک رس کمبریج تحت بارگذاری گذرا Unconfined Compression Strength

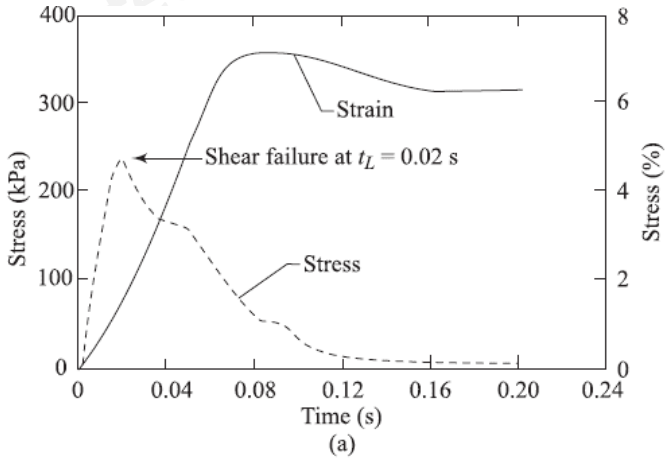
$$LL = 37 - 59\%$$
$$PL = 20 - 27\%$$
$$\omega = 30 - 50\%$$



بارگذاری گذرا

الف) مقاومت تک محوره خاک رس کمبریج تحت بارگذاری گذرا Unconfined Compression Strength





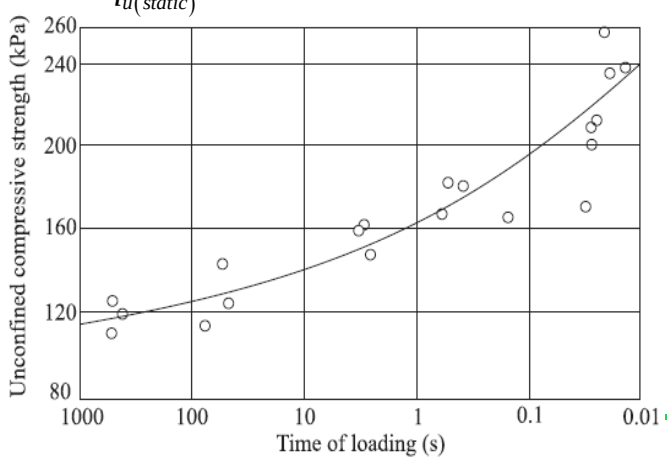
(a)

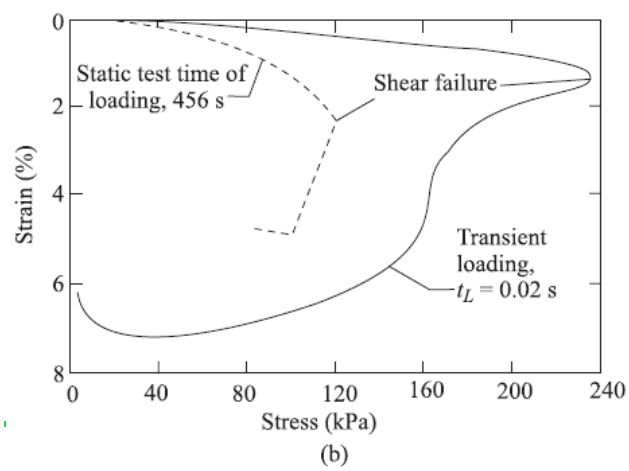
الف) مقاومت تک محوره خاک رس کمبریج تحت بارگذاری گذرا Unconfined Compression Strength

مطابق با شکل زیر می توان نتیجه گرفت:

$$\frac{q_{u(transient)}}{q_{u(static)}} \approx 1.5 \text{ to } 2$$

$$\frac{E_{transient}}{E_{static}} \approx 2$$

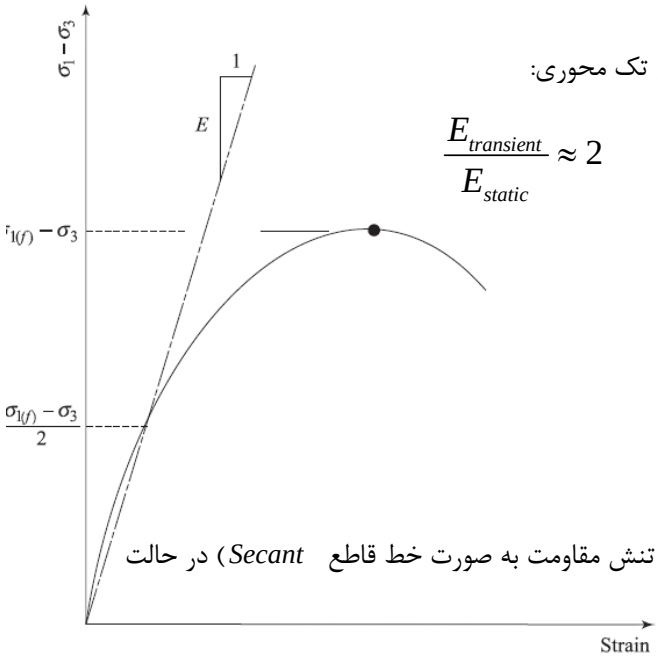




مقاومت تک محوره خاک رس کمبریج تحت بارگذاری گذرا Unconfined Compression Strength

طرز تعیین مدول الاستیسیته از آزمایش تک محوری:

$$\frac{E_{transient}}{E_{static}} \approx 2$$



- E_s (مدول الاس‌تیسیته برشی در $\frac{1}{2}$ تنش مقاومت به صورت خط قاطع *Secant*) در حالت دینامیکی حدود ۲ برابر است.

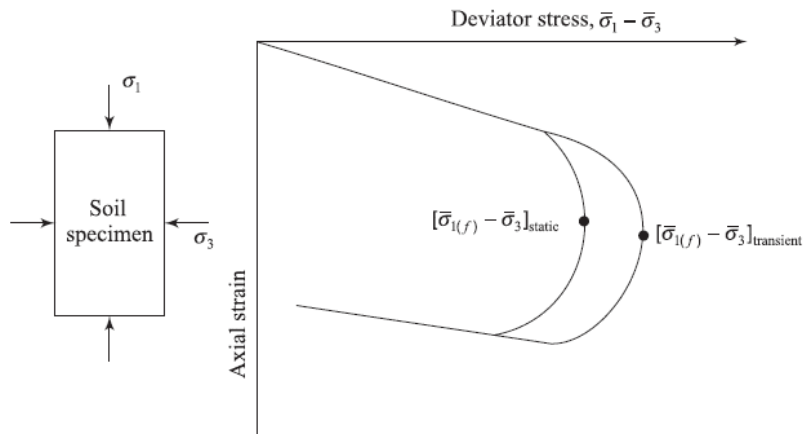
نتایج تست فشاری محصورشده Confined Compression Test بر روی خاک ماسه ای منچستر با $e_{max} = 0.88,\ e_{min} = 0.61$ تحت بارگذاری گذرا

- مقاومت ماسه برخلاف رس فقط در استاتیک و در دینامیک با میدان بار گذرا یکسان و مستقل از زمان باحدود ۱۰٪ افزایش یافته است.

$$\frac{[\bar{\sigma}_{1(f)} - \bar{\sigma}_3]_{\text{transient}}}{[\bar{\sigma}_{1(f)} - \bar{\sigma}_3]_{\text{static}}} \approx 1.1$$

- مدول تغییر شکل بر خلاف رس چه در آزمایش استاتیک و در دینامیک با میدان بار گذرا یکسان و مستقل از زمان بارگذاری است.

$$E_{transient} \approx E_{static}$$



نقاط ضعف آزمایشات گفته شده:

- در محیط طبیعی بارهای استاتیکی و دینامیکی توأم هستند در حالی که در آزمایش فوق به صورت خالص دینامیکی بارگذاری وجود دارد.
- فقط یک سیکل بارگذرا بر نمونه وارد شده است، در حالی که در یک زلزله ممکن است ۱۰۰ سیکل و بیشتر بارگذاری وجود داشته باشد.
- نمونه‌های ماسه ای همگی خشک وغیر متراکم آزمایش شده‌اند در حالی که اثر بار دینامیکی روی ماسه ی غیرمتراکم و اشباع متفاوت است.
- ماسه‌های غیرمتراکم و اشباع در اثر بارهای دینامیکی روان گردیده و مقاومت برشی آن‌ها صفر می‌شود که باعث وقوع خرابی‌های بسیار زیاد می‌گردد (روانگرایی در آزمایشا گفته شده مدل نمی شود).

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

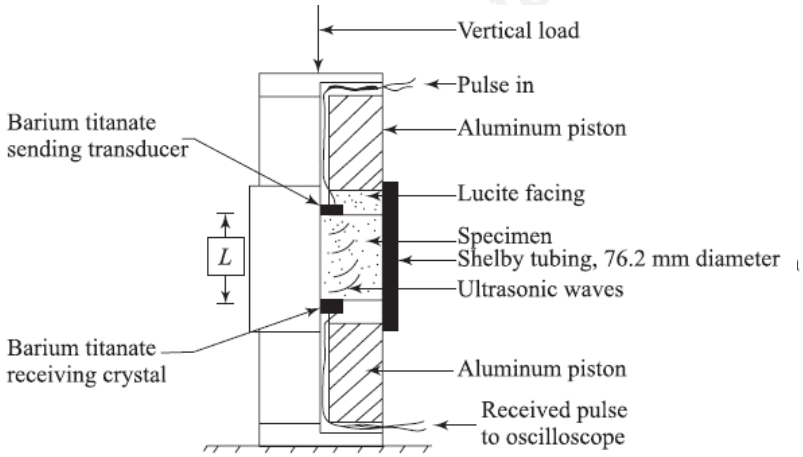
آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

با تجهیزات الکتریکی زمان طی شده موج (t_c) در نمونه ای به ارتفاع L قابل اندازه گیری است.
بنابراین می توان سرعت موج طولی را از رابطه زیر تعیین کرد:

$$v_c = \frac{L}{t_c}$$

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$E = \rho v_c^2 = \rho \frac{L^2}{t_c^2}$$

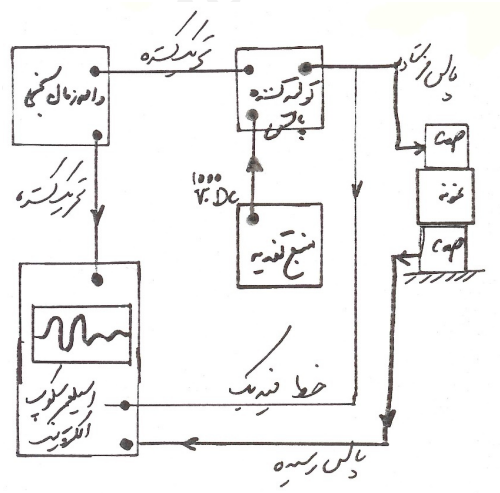


(b)

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

دیاگرام شماتیک وسایل اندازه‌گیری سرعت موج موســوم به دستگاه *Lawrence & Whitman*



مدول مقید شده و سرعت موج طـولی بـرای نمونـه محصور شده را می توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$v_c = L/t'_c \qquad M = \rho \frac{L^2}{t'^2_c}$$

مدول برشی و سرعت موج عرضی بـرای نمونـه را می توان از رابطه زیر تعیین کرد:

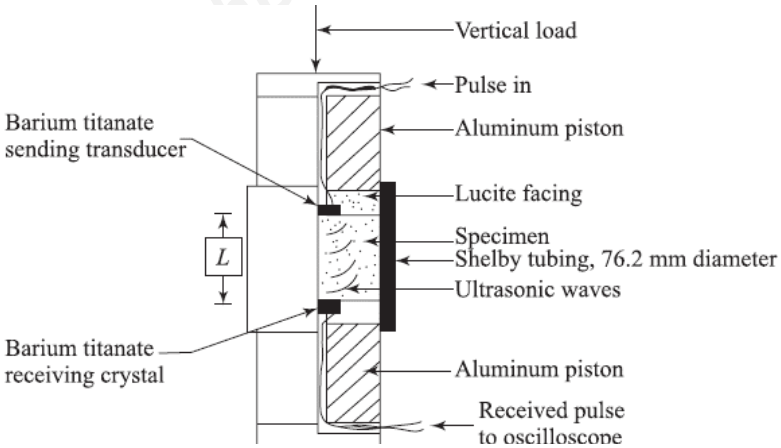
$$v_s = L/t_c,$$

$$G = \rho v_s^2 = \rho \frac{L^2}{t_c^2}$$

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

دراین روش آزمایش امکان این وجود دارد که همراه با اندازه‌گیری‌های زمان و ... نیرویی را بر نمونه وارد نمود و به عبارتی فشار محوری را بر نمونه افزایش داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌اند که سرعت با افزایش فشار محوری افزایش می‌یابد.

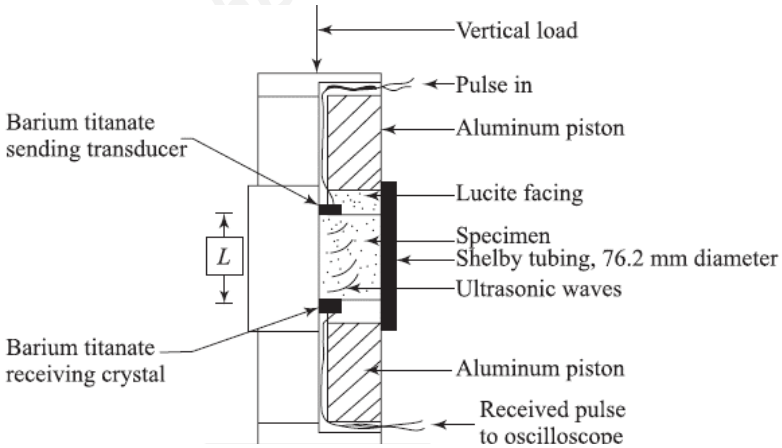
این نکته قابل ذکر است که نمونه خاک در یک لوله شلبی به قطر ۳ اینچ پر شده است و نیروی عمودی به وسیله یک پیستون آلومینیومی اعمال می‌گردد. بنابراین نمونه در لوله شلبی از جوانب خود محدود شده است و اندازه‌گیری سرعت طولی محدود شده مبنا خواهد بود.



آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test برای تعیین سرعت طولی و عرضی

دراین روش آزمایش امکان این وجود دارد که همراه با اندازه‌گیری‌های زمان و ... نیرویی را بر نمونه وارد نمود و به عبارتی فشار محوری را بر نمونه افزایش داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌اند که سرعت با افزایش فشار محوری افزایش می‌یابد.

این نکته قابل ذکر است که نمونه خاک در یک لوله شلبی به قطر ۳ اینچ پر شده است و نیروی عمودی به وسیله یک پیستون آلومینیومی اعمال می‌گردد. بنابراین نمونه در لوله شلبی از جوانب خود محدود شده است و اندازه‌گیری سرعت طولی محدود شده مبنا خواهد بود.



۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هاردین و ریچارت ۳- هال و ریچارت

دستگاه ویلسون و دیتریش

دیاگرام شماتیک دستگاه نکات زیر را دربردارد:

۱- برای ارتعاش طولی

۱- ارتعاش توسط مولد فرکانس صوتی ۲ - مولد فرکانس صوتی و تقویت امـواج توسـط Amplifier معمولی ۳- پرده متحرک نوسان‌ساز و اتصال آن به یک گیره آلومینیومی حلقوی

۴- گیره حلقوی آلومینیومی فرکانس طبیعی بسیار بزرگ‌تر از فرکانس خاک مورد آزمایش.

۵- نمونه encased در یک محفظه لاستیکی و قبلا در سلول سه‌محوری تحکیم یافته

۶- دستگاه نگاشت صدا (صدانگار) جهت دریافت ارتعاشات توسط نوک سوزن واقع در کلاهک نمونه

۷- ثبت نتایج آزمایش بر روی صفحه ی نوسان سنج و ترسیم نتایج

۲- برای ارتعاش پیچشی

۱- اتصال پرده متحرک از طریق میله آلومینیومی به گیره آلومینیومی کـه باعـث پـیچش در انتهـای نمونه می‌شود. ۲- نمونه خاک درون غشاء لاستیکی و پس از تحکیم در سلوله سه محوری

۳- کلاهک سبک بر بالای نمونه ۴- دستگاه صدانگار نتایج حاصله را ثبت می‌کند.

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هاردین و ریچارت ۳- هال و ریچارت

دستگاه ویلسون و دیتریش

دیاگرام شماتیک دستگاه نکات زیر را دربردارد:

۱- برای ارتعاش طولی

۱- ارتعاش توسط مولد فرکانس صوتی ۲ - مولد فرکانس صوتی و تقویت امـواج توسـط Amplifier معمولی ۳- پرده متحرک نوسان‌ساز و اتصال آن به یک گیره آلومینیومی حلقوی

۴- گیره حلقوی آلومینیومی فرکانس طبیعی بسیار بزرگ‌تر از فرکانس خاک مورد آزمایش.

۵- نمونه encased در یک محفظه لاستیکی و قبلا در سلول سه‌محوری تحکیم یافته

۶- دستگاه نگاشت صدا (صدانگار) جهت دریافت ارتعاشات توسط نوک سوزن واقع در کلاهک نمونه

۷- ثبت نتایج آزمایش بر روی صفحه ی نوسان سنج و ترسیم نتایج

۲- برای ارتعاش پیچشی

۱- اتصال پرده متحرک از طریق میله آلومینیومی به گیره آلومینیومی کـه باعـث پـیچش در انتهـای نمونه می‌شود. ۲- نمونه خاک درون غشاء لاستیکی و پس از تحکیم در سلوله سه محوری

۳- کلاهک سبک بر بالای نمونه ۴- دستگاه صدانگار نتایج حاصله را ثبت می‌کند.

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

تئوری ارتعاشات
امواج در محیط های . . .
خصوصیات دینامیکی . . .
ارتعاشات شالوده و پی
ظرفیت باربری دینامیکی
پاسخ لرزه ای زمین
فشارلرزه ای جانبی خاک
تراکم دینامیکی . . .
روانگرایی
ماشین مرتعش برروی شمع
پایداری لرزه ای شیروانی

۲- میله با شرایط انتهایی گیردار- آزاد

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}=\frac{E}{\rho}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \qquad v_c=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$u(x,t)=F(t)\times U(x)=\{A_1\sin\omega_n t+A_2\cos\omega_n t\}\times\left\{B_1\sin\frac{\omega_n x}{v_c}+B_2\cos\frac{\omega_n x}{v_c}\right\}$$

برای این حالت محاسبات مشابه شرایط انتهایی آزاد- آزاد انجام می شود جابجایی در انتهای گیردار صفر است و کرنش در انتهای آزاد صفر است. بنابراین داریم:

$$x=0\Rightarrow U(x)=0\Rightarrow B_2=0$$

$$x=L\Rightarrow\frac{dU(x)}{dx}=0\Rightarrow\frac{B_1\cdot\omega_n}{V_c}\cos\left(\frac{\omega_n\cdot L}{V_c}\right)=0$$

$$\text{or}\quad\frac{\omega_n\cdot L}{V_c}=(2n-1)\frac{\pi}{2},n=1,2,3,\ldots$$

$$\text{or}\quad\omega_n=\frac{1}{2}(2n-1)\frac{\pi V_c}{L}$$

$$U(x)=B_1\sin\left(\left(\frac{2n-1}{2}\right)\frac{\pi x}{L}\right)$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

دستگاه ویلسون و دیتریش

نحوه انجام آزمایش

۱- نمونه تحت خلأ قرار داده می شود.

۲- نوسان‌کننده به صورت تدریجی تنظیم می‌گردد.

۳- ارتعاشات در انتهای آزاد نمونه اندازه‌گیری شده

۴- فرکانس تشدید خاک به دست آورده می‌شود.

۵- ارتعاش نمونه معادل ارتعاش یک میله با وضعیت گیردار- آزاد (پایین گیردار- بالا آزاد) می‌باشد.

$$\omega_n=\frac{1}{2}(2n-1)\frac{\pi V_c}{L}\xrightarrow{n=1}\omega_n=\frac{\pi}{2}\frac{V_c}{L}$$

$$\omega_n=2\pi f_n \qquad V_c=4f_n.L=\sqrt{\frac{E}{\rho}},\qquad E=16\rho f_n^2L^2$$

$$\nu=\frac{E}{2G}-1$$

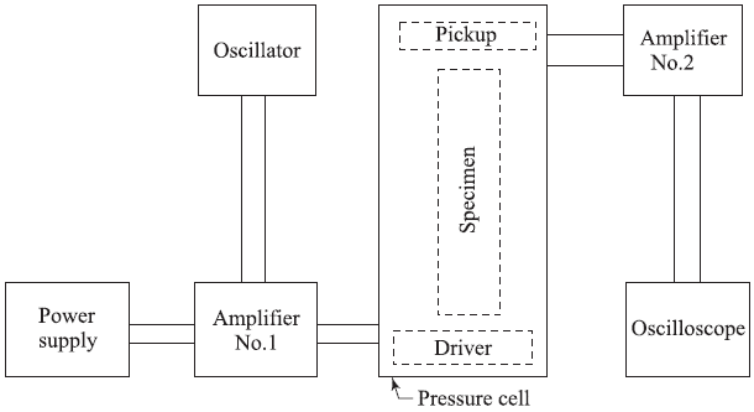
Ali Asgari, PhD in Geotechnics

انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هاردین و ریچارت ۳- هال و ریچارت

دستگاه آزمایش هاردین و ریچارت

دیاگرام شماتیک دستگاه نکات زیر را دربردارد:



دستگاه آزمایش هاردین و ریچارت

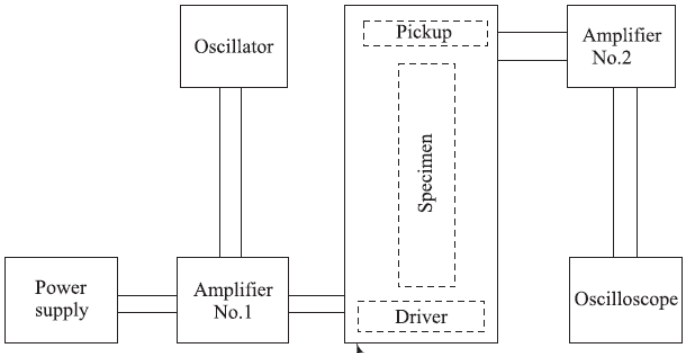
۱- مولد نیرو و Amplifier No.1 برای تقویت علائم سینوسی
۲- وارد شدن علائم تقویت شده در یک نوسان‌کننده Oscilator
۳- ایجاد ارتعاش دلخواه توسط Oscilator
۴- نمونه در داخل سلول فشار
۵- وارد نمودن ارتعاش پس از تقویت توسط Amplifier No.1 به پایین نمونه Driver
۶- گرفتن پاسخ در بالای آزاد نمونه و وارد نمودن آن‌ها به Amplifier No.2
۷- تجزیه و تحلیل امواج فرستاده و رسیده توسط Oscilloscope
۸- نمونه درداخل سلول فشار به صورت شرایط انتهایی آزاد- آزاد یک تیر مدل می‌شود:

$$V_C = \omega_n \cdot L / n\pi$$

$$V_c = \omega_n \cdot L / \pi = 2\pi\, f_n L / \pi, \qquad n = 1$$

$$V_c = 2 f_n \cdot L \Rightarrow V_C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2 f_n \cdot L$$

$$E = 4 f_n^2 \rho L^2$$



دستگاه آزمایش هاردین و ریچارت

برای ارتعاشات طولی داریم:

$$V_c = 2 f_n \cdot L \Rightarrow V_C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2 f_n \cdot L$$

$$E = 4 f_n^2 \rho L^2$$

برای ارتعاشات پیچشی داریم:

$$V_S = 2 f_n . L$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 2 f_n . L \Rightarrow G = 4 f_n^2 \rho L^2$$

Ali Asgari PhD in Geotechnics

دستگاه آزمایش ستون تشدید

Geotechnics

انواع دستگاه‌های ستون تشدید:

۱- ویلسون و دیتریش ۲- هاردین و ریچارت ۳- هال و ریچارت

دستگاه آزمایش هال و ریچارت

۱- طرح کلی شبیه دستگاه قبلی با این تفاوت که از مگنت‌های القایی با قرارگیری وضعیت‌های مختلف (Different Configuration)برای ایجاد نوسانات پیچشی و یا طولی به کار رفته است.

۲- نمونه در پایین گیردار و در بالا آزاد بوده است.

۳- گیرنده و نوسان‌کننده هر دو در بالای نمونه هستند.

۴- کوپل القایی بین گیرنده و نوسان‌کننده ایجاد می‌شود که خطایی ایجاد می‌کند ولی قابل اصلاح است.

۵- قرارگیری کوپل‌ها در وضعیت‌های مختلف می‌تواند ارتعاش پیچشی و یا طولی به وجود آورد.

۶- از آن‌جایی که وسایل متعلقه در بالای نمونه خاک دارای جرم می‌گردند معادله کلی حرکت دستخوش تغییر می‌شود و باید برای جرم اضافی بالای نمونه معادله دیفرانسیل جدید نوشته شود.

دستگاه آزمایش هال و ریچارت

در آزمایش ستون تشدید شده در حالت گیردار- آزاد وسایل تحریک و ایجاد ارتعاش باید به بالای نمونه وصل شوند و این شرایط مفروض راکه منجر به تعیین $\omega_n = (2n-1)\pi V_c/(2L)$ گردید تغییر می‌دهد در نتیجه معادلاتی که برای وضعیت گیردار- آزاد نوشته شده باید اصلاح گردد.

فرض: آنچه که به بالای نمونه متصل می شوند را با جرم m معادل سازیم

$$u(x,t) = U(x)\left(A_1 \sin\omega_n t + A_2 \cos\omega_n t\right)$$

$$U(x) = B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right) + B_2 \cos\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right)$$

$$x = 0 \Rightarrow U(x) = 0 \Rightarrow B_2 = 0 \Rightarrow U(x) = B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right)$$

$$u(x,t) = B_1 \sin\left(\frac{\omega_n \cdot x}{V_c}\right)\left(A_1 \sin\omega_n t + A_2 \cos\omega_n t\right)$$

اما در $x = L$ نیروی اینرسی F از جرم m بر روی ستون خاک اثر میکند و به صورت:

$$F = -m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad , \qquad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{F}{AE}$$

دستگاه آزمایش هال و ریچارت

$$u(x,t)=B_1\sin\left(\frac{\omega_n\cdot x}{V_c}\right)\left(A_1\sin\omega_n t+A_2\cos\omega_n t\right)$$

$$\begin{cases} F=-m\dfrac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \dfrac{\partial u}{\partial x}=\dfrac{F}{AE} \end{cases} \Rightarrow \quad \frac{\partial u}{\partial x}=-\frac{m}{AE}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

A سطح مقطع نمونه E ضریب ارتجاعی نمونه:

$$\frac{\partial u}{\partial x}=\left(\frac{B_1\cdot\omega_n}{V_C}\right)\left[\cos\left(\frac{\omega_n\cdot x}{V_c}\right)\right]\left(A_1\sin\omega_n t+A_2\cos\omega_n t\right)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=-\omega_n{}^2 B_1\sin\left(\frac{\omega_n\cdot x}{V_c}\right)\left(A_1\sin\omega_n t+A_2\cos\omega_n t\right)$$

جایگذاری

$$\frac{\partial u}{\partial x}=-\frac{m}{AE}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{A\cdot E}{V_C}\cos\left(\frac{\omega_n\cdot x}{V_c}\right)=m\cdot\omega_n\cdot\sin\left(\frac{\omega_n\cdot x}{V_c}\right) \quad\Rightarrow\quad A\cdot E=m\cdot\omega_n\cdot V_c\cdot\tan\left(\frac{\omega_n\cdot L}{V_c}\right)$$

Ali Ghari, PhD in Geotechnics

دستگاه آزمایش هال و ریچارت

$$\frac{A\cdot E}{V_C}\cos\left(\frac{\omega_n\cdot x}{V_c}\right)=m\cdot\omega_n\cdot\sin\left(\frac{\omega_n\cdot x}{V_c}\right) \quad\Rightarrow\quad A\cdot E=m\cdot\omega_n\cdot V_c\cdot\tan\left(\frac{\omega_n\cdot L}{V_c}\right)$$

$$\xrightarrow{E=\frac{V_c^2}{\rho}}$$

$$A\cdot V_c^2\cdot\rho=m\cdot\omega_n\cdot V_c\cdot\tan\left(\frac{\omega_n\cdot L}{V_c}\right)\Rightarrow\frac{A\cdot L\cdot\gamma}{W}=\frac{A\cdot L\cdot\rho}{m}=\alpha\tan\alpha$$

$$\alpha=\frac{\omega_n\cdot L}{V_c}=\frac{2\pi f_n\cdot L}{V_c}\Rightarrow V_c=\frac{2\pi f_n\cdot L}{\alpha},\ E=39.48\left(\frac{f_n^2\cdot L^2}{\alpha^2}\right)\rho$$

که در آن m جرم ملحقات بالای نمونه خاک و ρ جرم مخصوص خاک است. مقدار آلفا از جدول روبرو یا روش صحیح الخطا قابل تعیین است.

$(AL\gamma)/W$	α (radians)
0.1	0.32
0.3	0.53
0.5	0.66
0.7	0.75
1	0.86
2	1.08
4	1.27
10	1.43

Ali Ghari, PhD in Geotechnics

دستگاه آزمایش هال و ریچارت

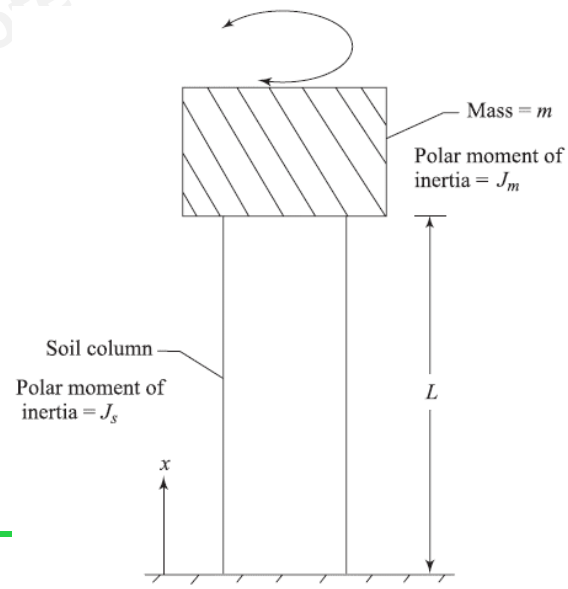
با تحلیل مشابه برای تشدید پیچشی و آزمایش ستون تشدید هرگاه نمونه‌ای با شرایط انتهایی گیردار آزاد تشدید پیچش گردد، جرم قسمت‌های نوسان‌کننده وحرکت‌زا را می‌توان در نظر گرفت ودر تحلیلی مشابه می‌توان به دست آورد:

$$\frac{J_S}{J_m} = \frac{\omega_n \cdot L}{V_s} \tan\left(\frac{\omega_n \cdot L}{V_s}\right) = \alpha \tan\alpha$$

که در آن J_s ممان اینرسی قطبی نمونه خاک و

J_m ممان اینرسی قطبی ملحقات با جرم برابر m است.

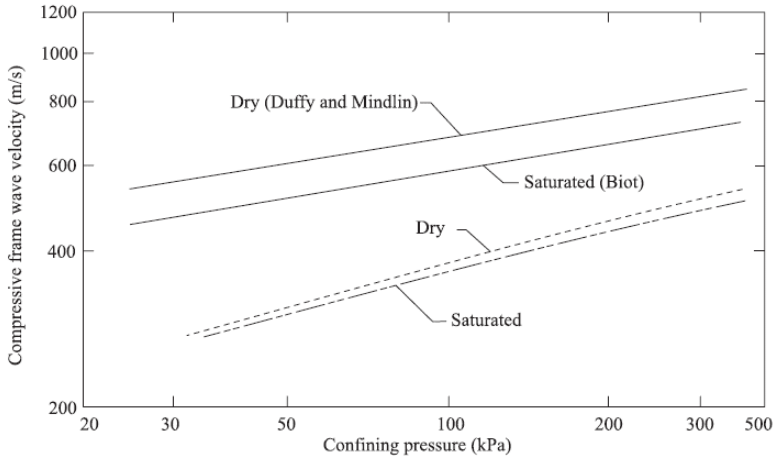
$$V_s = \frac{\omega_n L}{\alpha} = \frac{2\pi f_n L}{\alpha} \Rightarrow \quad G = \rho V_s^2 = 39.48\left(\frac{f_n^2 \cdot L^2}{\alpha^2}\right)\rho$$



بحث روی نتایج آزمایشگاهی ستون تشدید

ستون تشدید با شرایط آزاد-آزاد و گیردار- آزاد، ساخت هاردین و ریچارت و هال و ریچارت.
نتایج کلی به دست آمده از گراف شکل زیر عبارتند از:

الف- مقادیر V_s, V_c خاک با افزایش فشار مؤثر متوسط اعمال شده $\bar{\sigma}_0$ افزایش مییابد.



امواج در محیط های ارتجاعی پیوسته

یادآوری

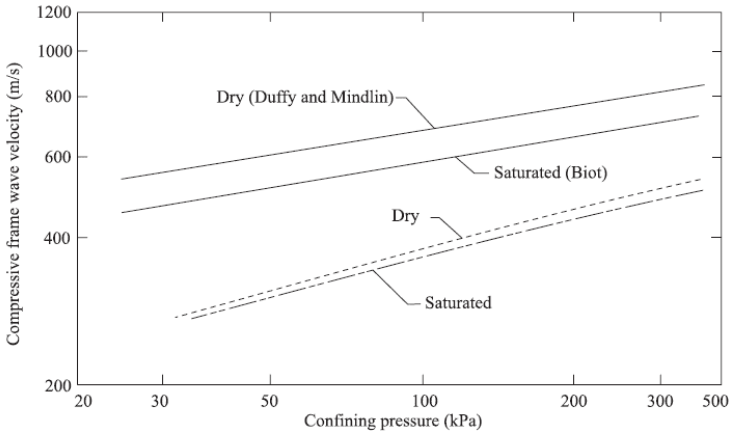
چند نکته اساسی:

۶- امواج در محیط های خاک اشباع از دو طریق دانه های خاک و آب داخل حفرات انتشار می یابد. تحقیقات کاملی توسط بایوت در سال ۱۹۵۶ در این زمینه انجام گرفت.در آن مطالعه نشان میدهد که دو موج فشاری و یک نوع موج برشی در محیط اشباع وجود دارد. برخی پژوهشگران اشاره کردند که یک موج فشاری از طریق سیال انتقال می یابد و موج دیگر از طریق بخش جامد خاک.

مسلما انتشار این دو موج بطور مجزا نیست و حرکت بصورت همبسته است. در مورد انتشار موج برشی فقط بسته به مشخصات دانه های خاک دارد و مرتبط به سیال بین حفرات نیست.

مقایسه سرعت موج فشاری در خاک ماسه ای اوتاوا به صورت خشک واشباع در دو حالت تئوری و آزمایشگاهی Hardin and Richart, 1963

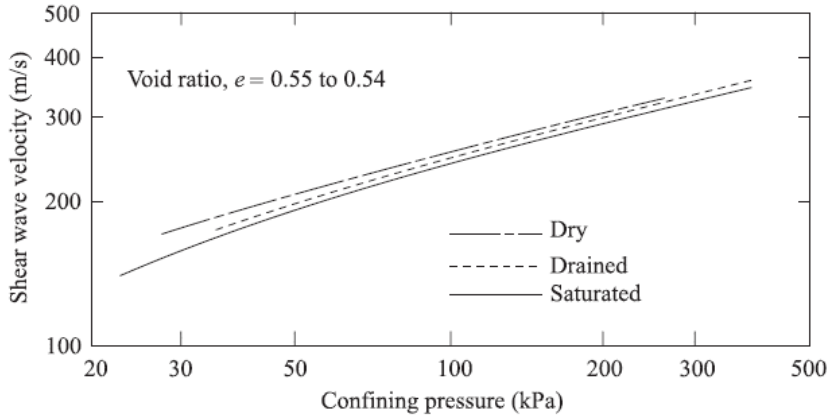
حالت تئوری: $\boxed{\upsilon_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}}$



بحث روی نتایج آزمایشگاهی ستون تشدید

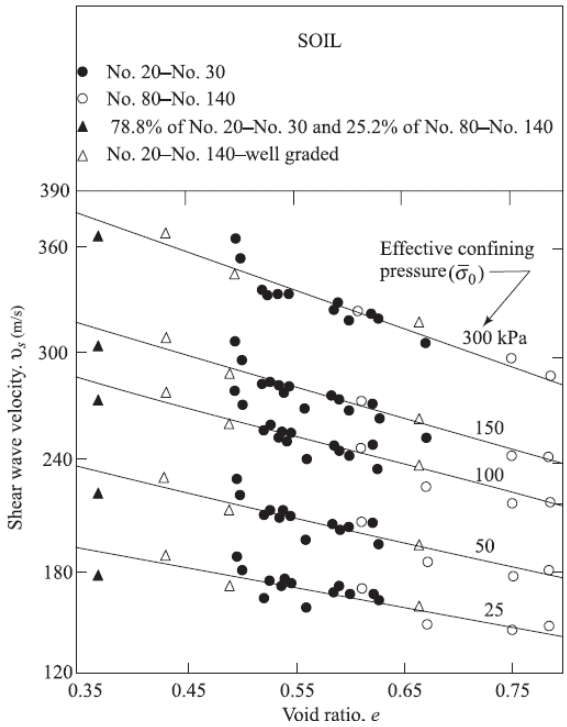
ب- مقادیر V_s, V_c خاک اشباع شده اندکی کمتر از مقادیر مشابه خاک خشک است.

دلیل آن این است که به علت پر شدن فضای خالی خاک با آب دانسیته افزایش پیدا نموده است در نتیجه سرعتها در حالت اشباع کمتر است.



بحث روی نتایج آزمایشگاهی ستون تشدید

ج) آزمایشات هاردین و ریچارت با ستون تشدید در شکل زیر خلاصه شده است.
(ماکزیمم دامنه تغییر شکل برشی 10^{-3} است.)



۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

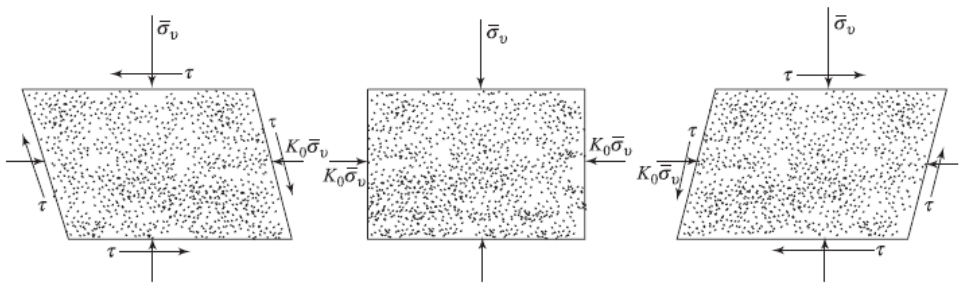
Ali Asgari, PhD in Geotechnics

آزمایش برش ساده سیکلی

علت لزوم انجام آزمایش

شرایط تنش‌ها در آزمایش سه‌محوری نمی‌تواند به خوبی وضعیت واقعی تنش‌ها در عمل را مدل‌سازی نماید سهم عمده تغییرشکل‌های حاصله در خاک ممکن است در اثر انتشار رو به بالای امواج برشی ناشی از لایه‌های زیرین است مطابق شکل زیر، یک المان خاک ممکن است تحت اثر تعداد قابل ملاحظه‌ای از تنش‌ها یا تغییرشکل‌های نوسانی قرار گیرد.

هنگام زلزله المان فوق تحت اثر یک تنش نرمال مشخص و ثابت تنش‌های برشی روی نمونه تغییرجهت داده و در نتیجه تنش‌های اصلی بر نمونه خاک نیز به طور سیکلی تغییرجهت می‌دهند و به اندازه θ به چپ و راست دوران می‌کنند.



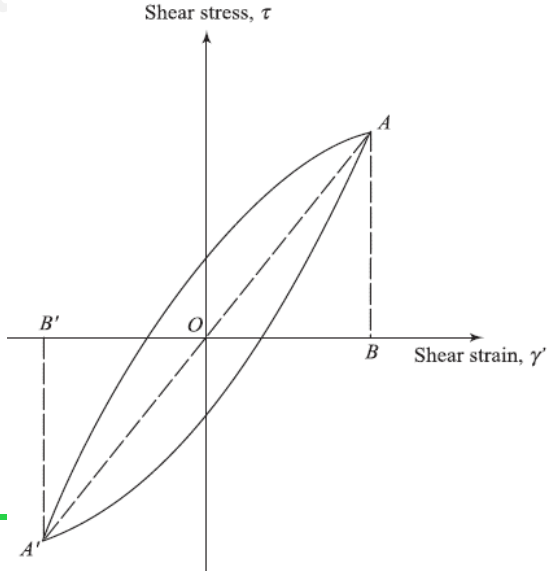
آزمایش برش ساده سیکلی

ارتفاع قالب دستگاه آزمایش برش ساده معمولا بین ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر و به اضلاع ۶۰ تـا ۸۰ میلیمتـر است. نمونه خاک ابتدا تنش قائم اعمال می شود و سپس تحت تنش برشی سیکلی قرار می گیرد. مسلما محل زوایای قالب با استفاده از لولاها بهم متصل شده اند.

محاسبه مدول برشی و ضریب میرایی:

$$G = \frac{\text{amplitude of cyclic shear stress, } \tau}{\text{amplitude of cyclic shear strain, } \gamma'}$$

$$D = \frac{1}{2\pi}\,\frac{\text{area of the hysteresis loop}}{\text{area of triangle } OAB \text{ and } OA'B'}$$

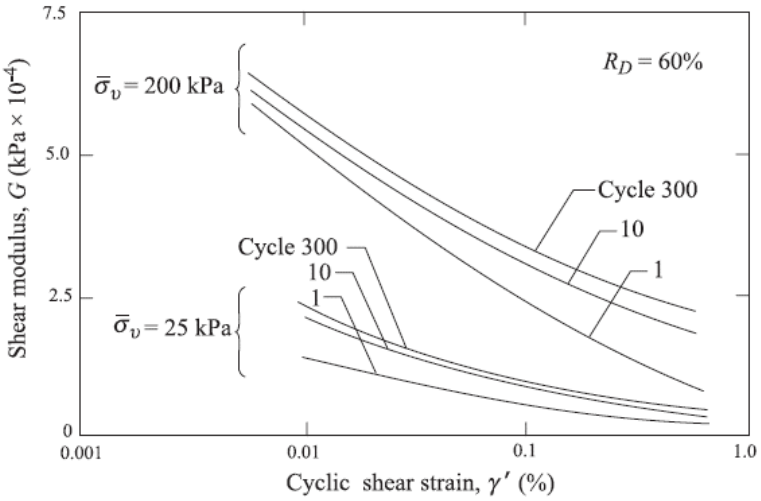


نتایج آزمایش برش ساده (Silver and Seed, 1971) بر روی ماسه نیمه متراکم

۱- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تنش موثر قائم، مدول برشی بـا افـزایش تعـداد سـیکل، افزایش می یابد. این افزایش در ۱۰ سیکل ابتدایی چشمگیرتر است.

۲- در یک مقدار مشخصی از تنش موثر قائم و تعداد سیکل یکسان، با افزایش کـرنش برشـی، مـدول برشی کاهش می یابد.

۳- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تعداد سیکل یکسان، با افزایش تنش موثر قائم، مدول برشی نیز افزایش می یابد.

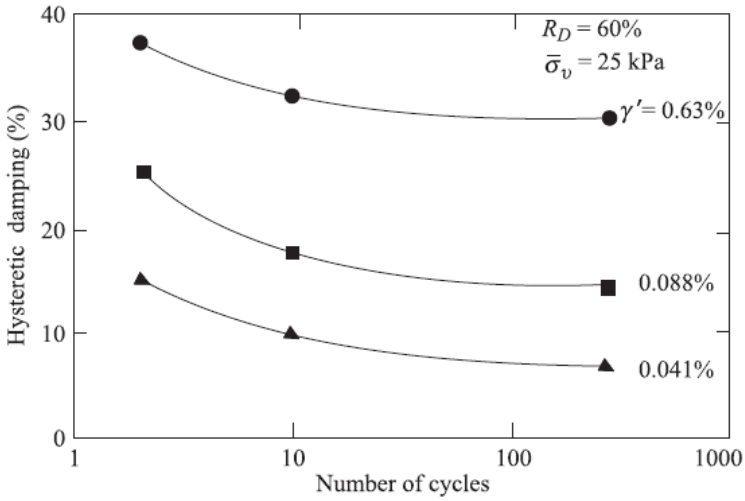


نتایج آزمایش برش ساده (Silver and Seed, 1971) بر روی ماسه نیمه متراکم

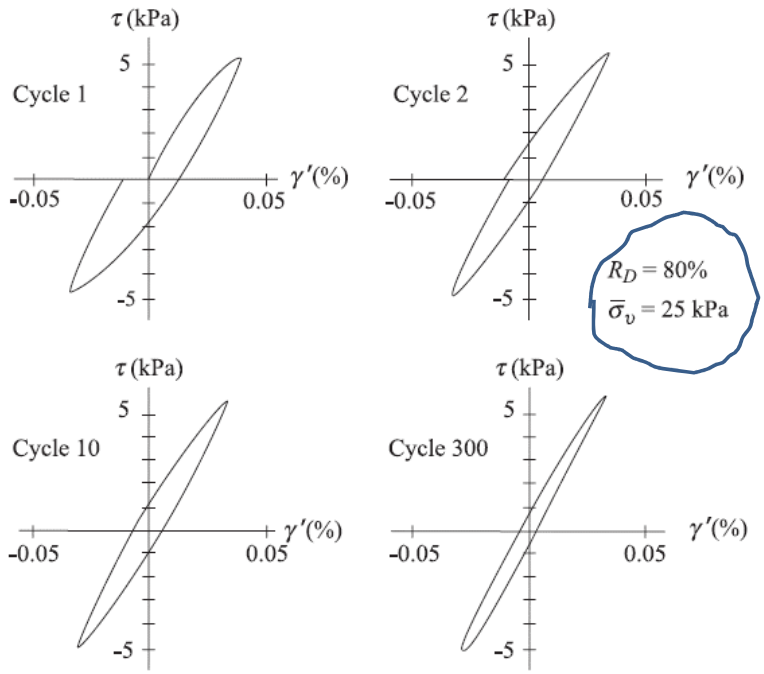
۱- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تنش موثر قائم، ضریب میرایی با افزایش تعـداد سـیکل، کاهش می یابد.

۲- در یک مقدار مشخصی از تنش موثر قائم و تعداد سیکل یکسان، با کاهش کـرنش برشـی، ضـریب میرایی کاهش می یابد.

۳- در یک مقدار مشخصی از کرنش برشی و تعداد سیکل یکسان، با افزایش تنش موثر قائم، ضریب میرایی نیز کاهش می یابد.

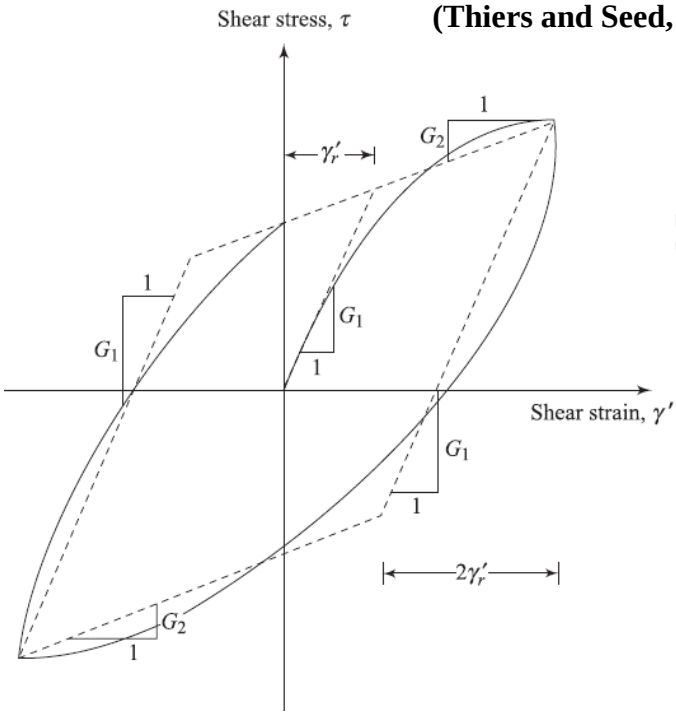


نتایج آزمایش برش ساده (Silver and Seed, 1971) بر روی ماسه نیمه متراکم



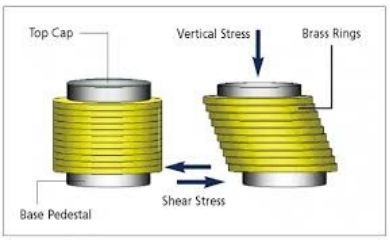
نتایج قبلی برای ماسه متراکم نیز برقرار است. همچنین میتوان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد سیکل در یک کرنش یکسان، میرایی کاهش می یابد.

مدل دوخطی ایده آل (Thiers and Seed, 1968)



مزیت آزمایش برش ساده سیکلی

- شرایط آزمایش در این سیستم به مراتب واقعی‌تر از دستگاه ستنی با قالب صلب است.
- (ماکزیمم دامنه تغییر شکل برشی در آزمایش ستون تشدید برابر بـا 10^{-3} اسـت. در صـورتی که در آزمایش برش ساده سیکلی محدوده قابل قبول کرنش در رنج 10^{-2} تا 5% است.
- در این آزمایش اضافه فشار آب حفره ای نیز قابل اندازه گیری است.
- – اعمال تنش‌های برشی سیکلی امکان‌پذیر است. پتانسیل سیلان خاک‌ها قابل بررسی است.



Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

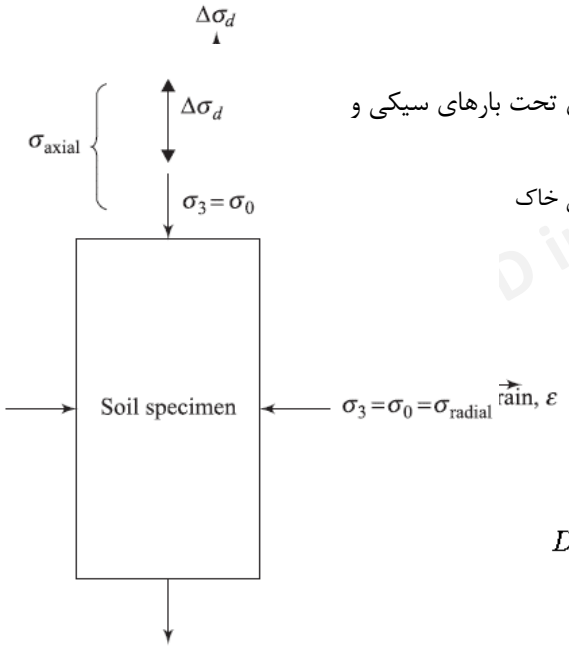
تست برش ساده سیکلیCyclic Simple Shear Test

تست پیچشی ساده سیکلیCyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

آزمایش سه‌محوری سیکلی



هدف

- مطالعه رفتار تنش- کرنش خاک‌های دانه‌ای تحت بارهای سیکی و در شرایط مختلف تنش‌های اصلی.
- تعیین مدول برشی و الاستیسیته و ضریب میرایی خاک

$$E = \frac{\Delta\sigma_d}{\varepsilon}$$

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

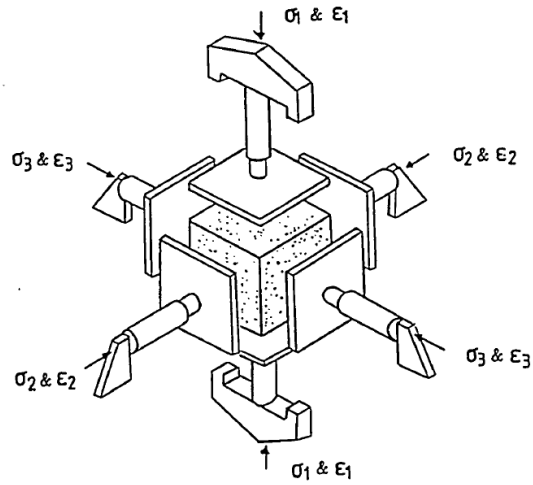
$$D = \frac{1}{2\pi}\frac{\text{area of the hysteresis loop}}{\text{area of triangle } OAB \text{ and } OA'B'}$$

نواقص دستگاه آزمایش فشاری سه‌محوری معمولی در تست‌های استاتیک و دینامیک شامل:

- امکان استفاده از دستگاه آزمایش فشاری سه‌محوری معمولی برای بارهای سیکلی وجود دارد اما چنین دستگاهی حتی در تست‌های معمول و استاتیک نیز دارای نواقص متعدد هستند.
- محور (شافت) بارگذاری دارای اصطکاک با بدنه سلول می‌باشد و مقداری از انرژی و نیروی تحمیلی بدنه را جذب می‌کند.
- صفحات صلب بالایی و پایینی که نمونه خاک را دربرمی‌گیرند اصطکاک دارند و موجب گیرداری بین نمونه و صفحات و محور بالایی شده که تنش برشی روی Upper & lower flattenها می‌نمایند.
- چرخش محورهای اصلی به میزان (چرخش محور تنش‌های اصلی) دلخواه غیرممکن بوده و برای سنگ و خاک‌های غیرایزوتوپ قابل استفاده نیست.
-دوتای از تنش‌های اصلی ناچارا مساوی بوده ($\sigma_3 = \sigma_2$) و مطالعه شرایط نامتقارن مرکزی و نیز تأثیر تنش اصلی متوسط بر رفتار نمونه غیرممکن است.
- کاربرد عملی دستگاه محدود به تعداد محدودی از موارد عملی می‌باشد.

Ali Asgari, Ph.D in Geotechnics

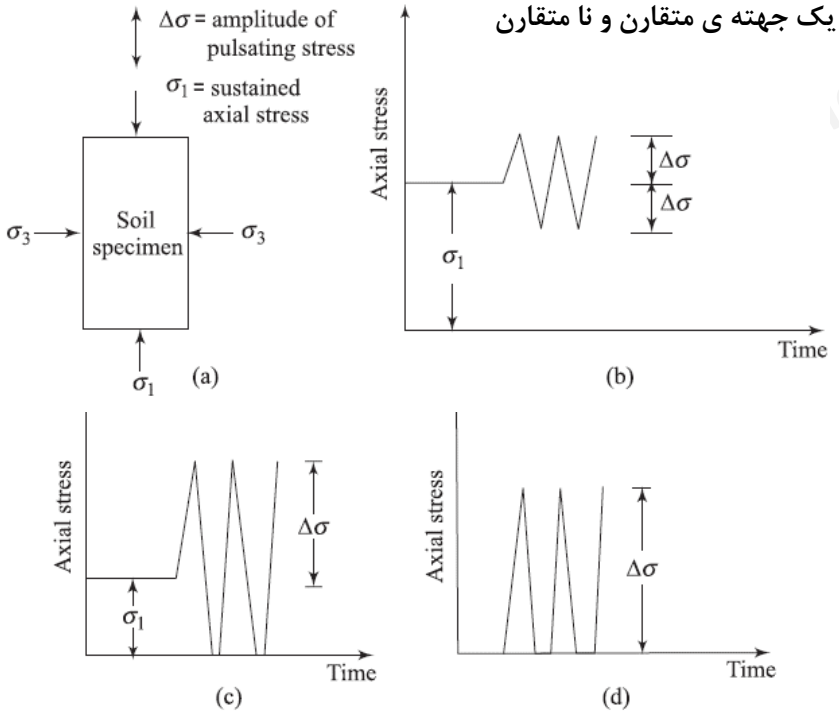
وضعیت تنش‌های سه‌محوری واقعی- آزمایش سه‌محوری واقعی



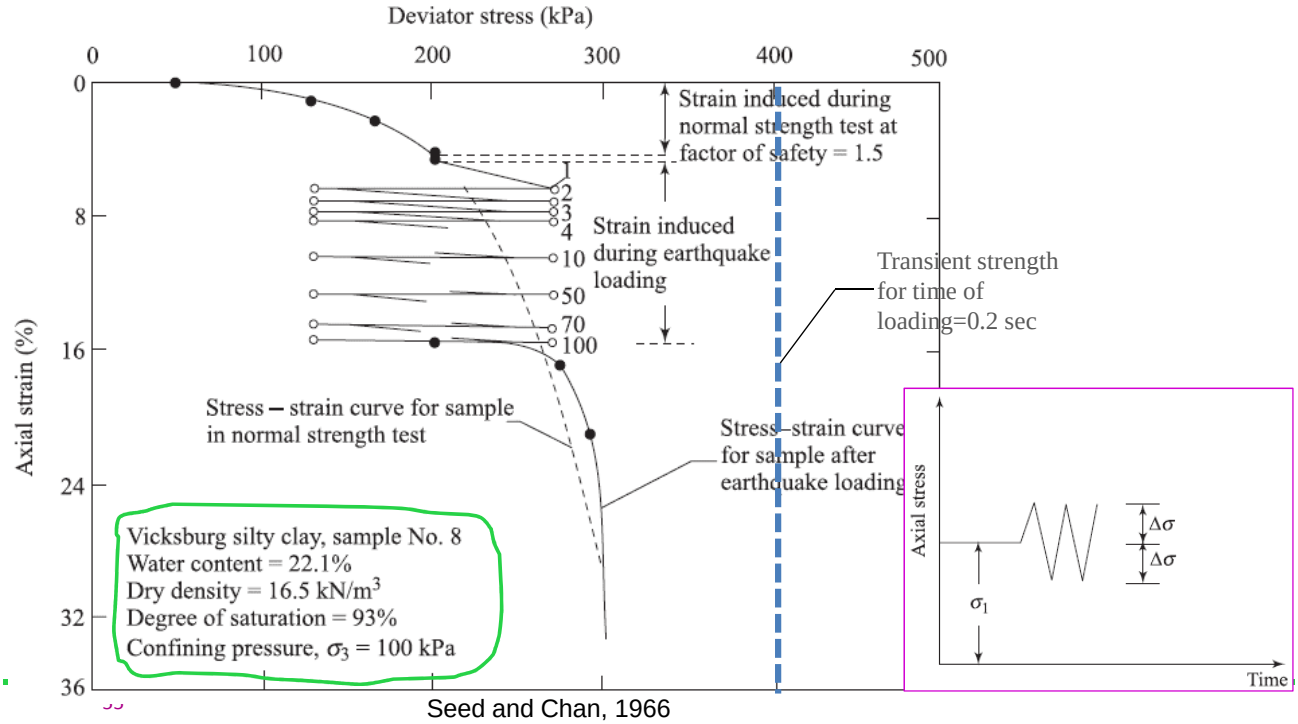
وضعیت کلی سه‌محوری $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ دستگاهی که قادر به اعمال تنش‌ها و تغییرشکل‌های اصلی مستقل و متفاوت از یکدیگر مطابق شکل بر نمونه خاک باشد دستگاه آزمایش سه‌محوری واقعی می‌باشد.

بر پایه چنین مطالبی ساخت دستگاه‌های تست فشاری بر روی نمونه‌های کاملا معکبی و متعلقات و ضمائم در دستور مطالعه محققان از سه دهه قبل بوده است. یک نمونه جدید از این دستگاه‌ها، دستگاه SCTA (SimpLe Cubic TriaxiaL Apparatus) می‌باشد که قادر به اعمال تنش‌های استاتیکی و دینامیکی در شرایط مختلف از نظر تقید جانبی نمونه بوده و رفتار تنش- کرنش خاک‌ها در حالات متفاوت مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

تنش‌اعمالی یک جهته ی متقارن و نا متقارن



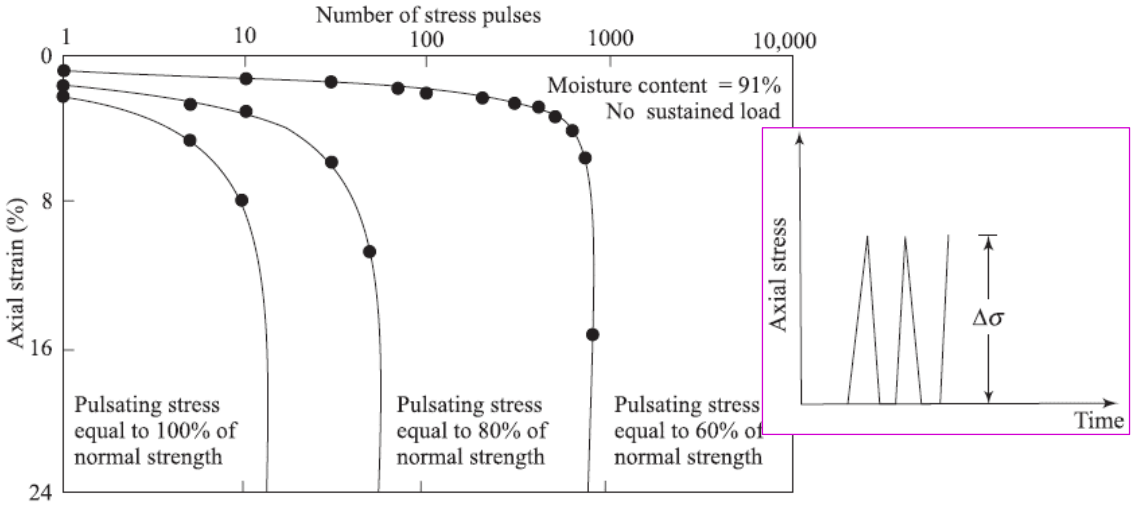
نتایج آزمایش سه‌محوری سیکلی بر روی رس سیلت دار Vicksburg silty clay



Seed and Chan, 1966

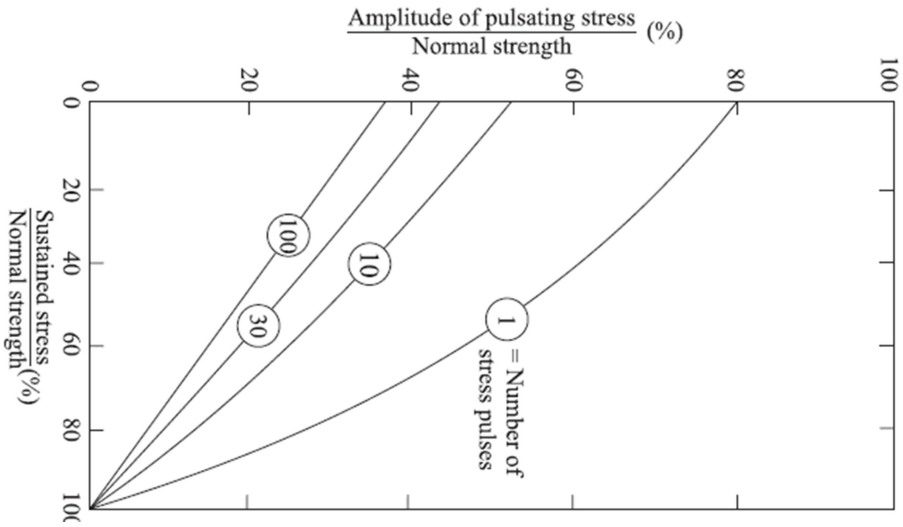
نتایج آزمایش سه‌محوری سیکلی بر روی مات San Francisco Bay mud

San Francisco Bay mud specimens



Seed and Chan, 1966

نتایج آزمایش سه‌محوری سیکلی بر روی مات San Francisco Bay mud



Seed and Chan, 1966

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

مقاومت برشی خاک رس اشباع و ماسه خشک تحت بارگذاری سریع Unconsolidated-Undrained Triaxial Test

مقاومت برشی خاک رس و ماسه تحت بارگذاری گذرا Unconfined & Confined Compression Test

آزمایش زمان طی شده مسیر موج Travel-Time Test

ستون تشدید Resonant Column Test

تست برش ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

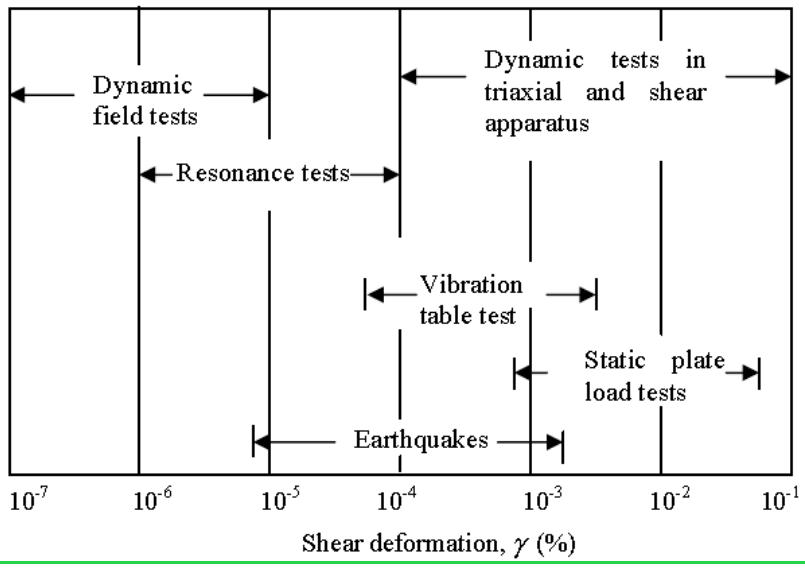
تست پیچشی ساده سیکلی Cyclic Simple Shear Test

تست سه محوره سیکلی Cyclic Triaxial Tests

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

جمع بندی و خلاصه آزمایش های سیکلی

ما باید بدانیم که کدام تست برای تعیین مشخصات دینامیکی خاک مناسب تر است و تغییرات کرنشها در چه اندازه ای قرار دارند.



جمع بندی و خلاصه آزمایش های سیکلی

کیفیت نسبی خصوصیات تعیین شده از تست های آزمایشگاهی:

	Relative Quality of Test Results				
	Shear modulus	Young's modulus	Material damping	Effect of number of cycles	Attenuation
Resonant column	Good	Good	Good	Good	-
with application	-	-	-	-	Fair
Ultrasonic pulse	Fair	Fair	-	-	Poor
Cyclic triaxial	-	Good	Good	Good	-
Cyclic simple shear	Good	-	Good	Good	-
Cyclic torsional shear	Good	-	Good	Good	-

a After Silver (1981)

جمع بندی و خلاصه آزمایش های سیکلی

خصوصیات قابل اندازه گیری در تست های آزمایشگاهی:

	Resonant column	Cyclic triaxial	Cyclic simple shear	Torsional shear
Load	Resonant frequency	Axial force	Horizontal force	Torque
Deformation				
Axial	Vertical displacement	Vertical displacement	Vertical displacement	Vertical displacement
Shear	Acceleration	Not measured	Horizontal displacement	Rotation
Lateral	Not usually measured	Not usually measured	Often controlled	Not usually measured
Volumetric	None for undrained tests			
	Volume of fluid moving into or out of the sample for drained tests			
Pore water pressure	Not usually measured	Measured at boundary	Measured at boundary	Measured at boundary

[a]After Silver (1981)

تقسیم بندی
فصل چهارم

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

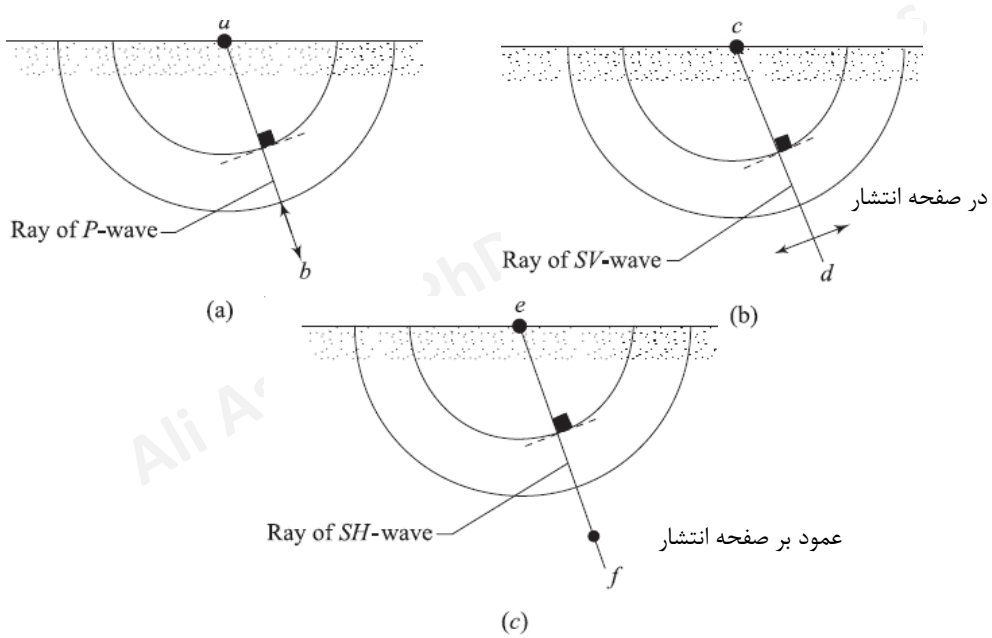
روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

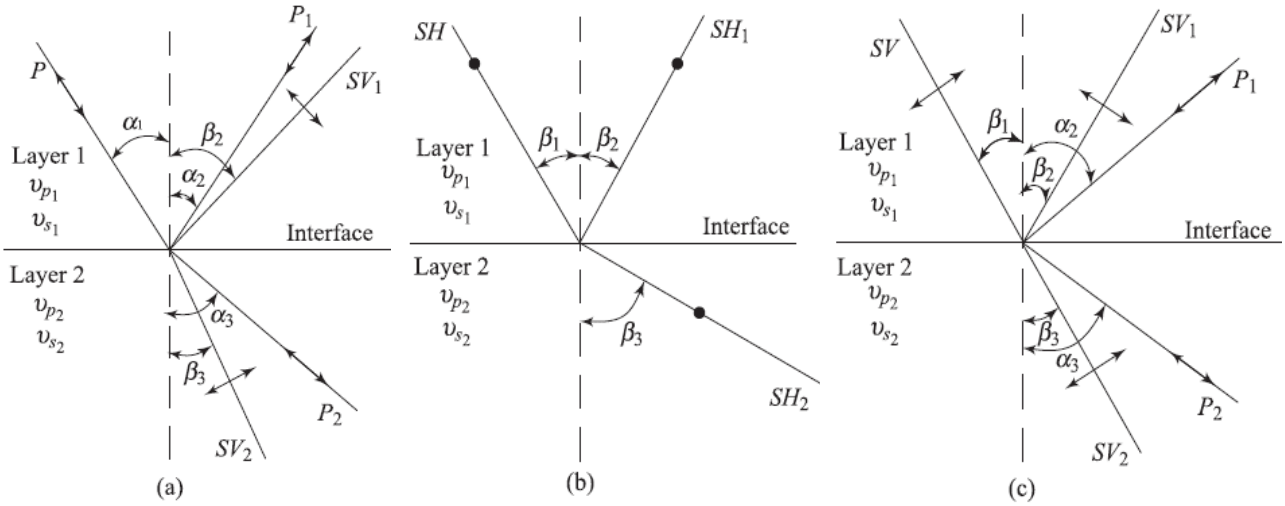
روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

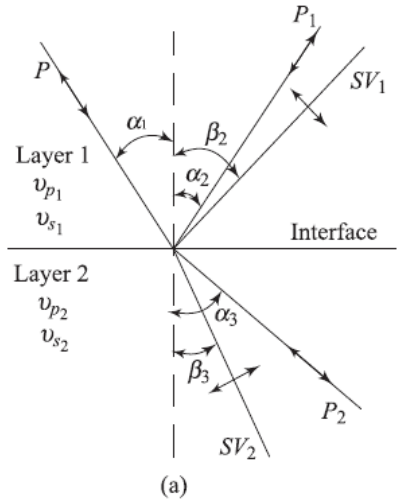
Ali Asgari, PhD in Geotechnics

انواع امواج حجمی: موج طولی p و برشی s





موج انکسار یافته			موج انعکاس یافته	موج برخوردی	
شکل مربوطه	نامگذاری موج در شکل	نوع موج	نامگذاری موج در شکل	نوع موج	Incident ω
a	SV_2, P_2	SV, P	SV_1, P_1	SV, P	P
b	SH_2	SH	SH_1	SH	SH
c	SV_2, P_2	SV, P	SV_1, P_1	SV, P	SV

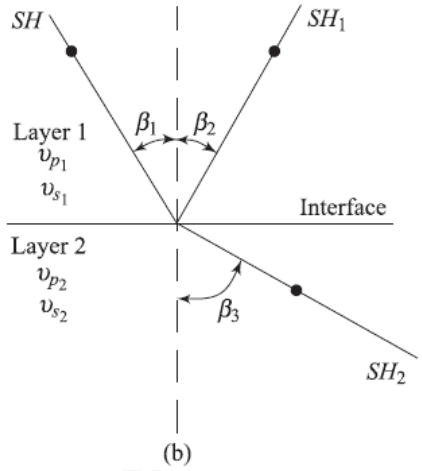


پدیده انعکاس و انکسار امواج حجمی در مصالح

امواج تنشی ارتجاعی هنگامی که به مرز بین دو لایه از مصالح مختلف برخورد نمایند، می‌شکنند و منعکس میشوند. اگر امواج تنشی برخوردی از نوع P فشاری باشند آنگاه بصورت امواج P و SV هم منعکس پیدا می کنند و هم می شکنند.

$$\alpha_1 = \alpha_2, \quad \frac{\sin\alpha_1}{V_{p1}} = \frac{\sin\alpha_2}{V_{p2}} = \frac{\sin\beta_2}{V_{s1}} = \frac{\sin\alpha_3}{V_{p2}} = \frac{\sin\beta_3}{V_{s2}}$$

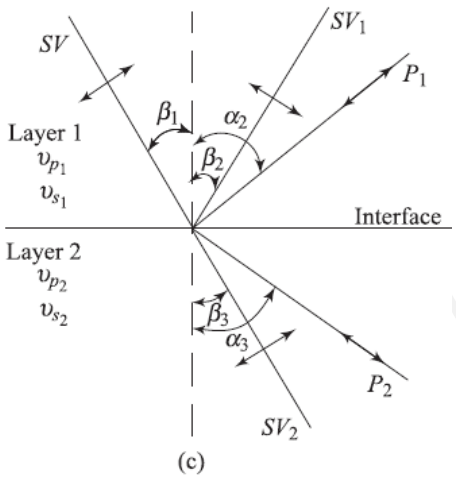
پدیده انعکاس و انکسار امواج حجمـــی در مصالح



اگر امواج تنشی برخوردی از نوع SH باشند آنگاه بصورت همان امواج SH هم منعکس پیدا می کنند و هم می شکنند.

$$\beta_1 = \beta_2, \quad \frac{\sin\beta_1}{V_{s1}} = \frac{\sin\beta_3}{V_{s2}}$$

پدیده انعکاس و انکسار امواج حجمی در مصالح



اگر امواج تنشی برخوردی از نوع SV باشند آنگاه بصورت امواج P و SV هم منعکس پیدا می کنند و هم می شکنند.

$$\beta_1 = \beta_2, \qquad \frac{\sin\beta_1}{V_{s1}} = \frac{\sin\alpha_2}{V_{p1}} = \frac{\sin\beta_2}{V_{s1}} = \frac{\sin\beta_3}{V_{s2}} = \frac{\sin\alpha_3}{V_{p2}}$$

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

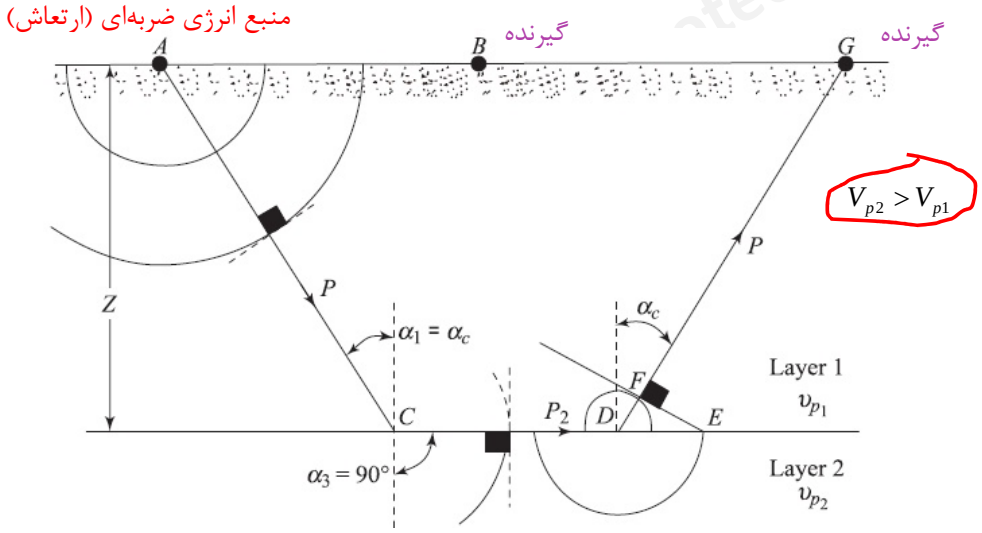
روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

این بررسی‌ها بیشتر به منظور تعیین سرعت امواج ارتجاعی و نیز مشخصات مکانیکی مصالح و همچنین برای تعیین ضخامت لایه ها به کار می‌روند.

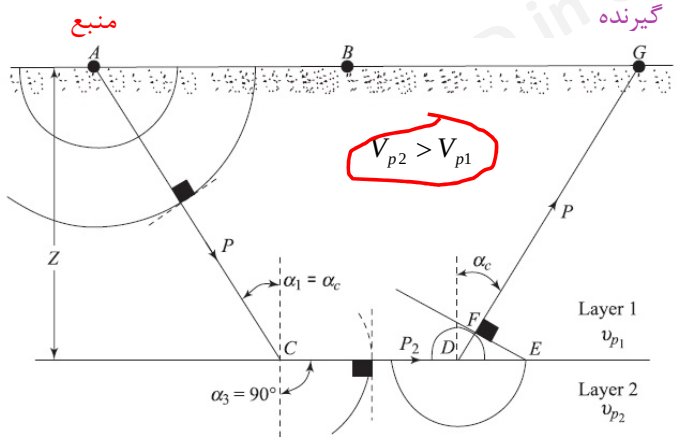


بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

فرضیات

$V_{p2} > V_{p1}$: نقطه ی A منبع انرژی ضربه ای (ارتعاش) گیرنده در نقطه B یا هر نقطه دلخواه دیگر در فاصله x.

زمان حرکت موج P از طریق غیرمستقیم و از طریق لایه بالا:



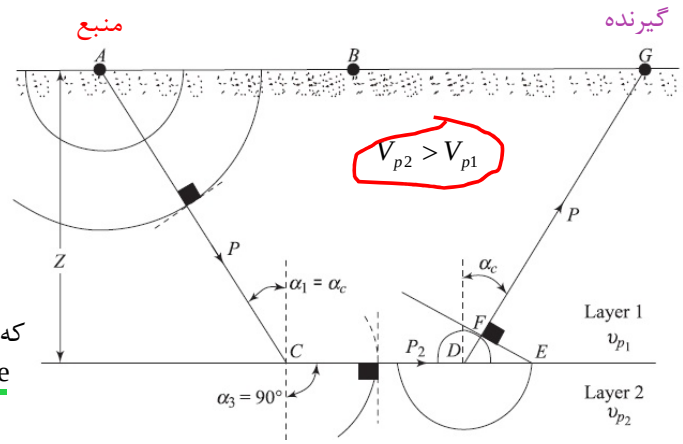
$$x = \overline{AB}, \qquad t = \frac{x}{V_{p1}}$$

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$x = \overline{AB}, \qquad t = \frac{x}{V_{p1}}$$

اما زمان حرکت موج P که از طریق غیرمستقیم به نقطه G که در فاصله‌ای دورتر از B قرار دارد چگونه به دست می‌آید؟

موج کروی P که در A تولید شده به فصل مشترک دولایه می‌خورد از میان جبهه امواج نقطه C در مرز دو لایه را می‌توان چنان یافت که موج شکسته شده در راستای فصل مشترک دو لایه قرار گیرد و در موازات آن حرکت نماید (موج P) این موج سرعت $V_{p2} > V_{p1}$ حرکت می‌کند و بنابراین سریع‌تر است از معادلات گفته شده قبل.



$$\frac{\sin\alpha_1}{V_{p1}} = \frac{\sin\alpha_3}{V_{p2}}$$

حال چون $\alpha_3 = 90°$ است، بنابراین داریم:

$$\alpha_1 = \sin^{-1}\left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right) = \alpha_c$$

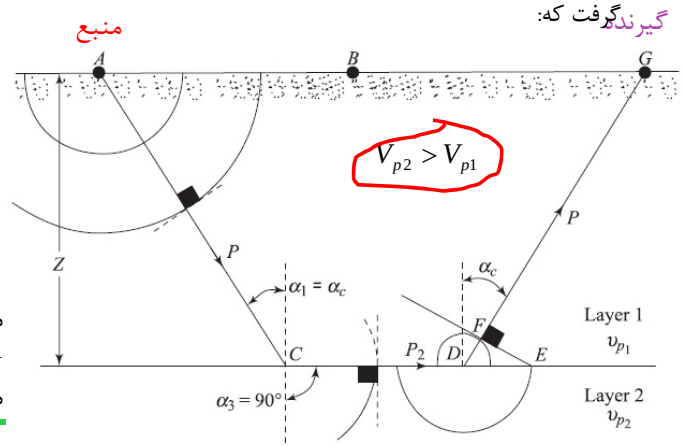
که α_c را زاویه‌ی بحرانی برخورد یا Critical Incidentiny Waveمی‌نامند.

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$x=\overline{AB}\,,\qquad t=\frac{x}{V_{p1}}\qquad \alpha_1=\sin^{-1}\left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)\alpha_c$$

حال این جبهه موج که با سرعتی معادل V_{p2} در موازات مرز دو لایه حرکت می‌کند باعث به وجود آمدن تنش‌هایی ارتجاعی در محل برخورد می‌شود که به نوبه خود جبهه‌هایی از امواج را به سمت لایه بالایی منتشر می‌نماید که این امواج نیز با سرعت V_{p1} پخش می‌شوند. حال نقطه‌ای مانند D را در مرز مشترک دو لایه در نظر می‌گیریم که جبهه امواج کروی منتشر می‌کند (در لایه ۱ و ۲) و این امواج کروی بعد از زمان dt که به سمت بالا حرکت می‌کند دارای شعاع مساوی DF می‌شوند در حالی که در همین زمان dt امواج به سمت پایین دارای شعاع DE هستند. در نتیجه برآیند جبهه امواج در لایه بالایی بر راستای خط EF قرار می‌گیرد حال از همین شکل می‌توان نتیجه گرفت که:



$$\frac{V_{p1}.\Delta t}{V_{p2}.\Delta t}=\frac{DF}{DE}=\sin i_c$$

یعنی شعاع موج DFG با امتداد قائم زاویه‌ی i_c را می‌سازد.

می‌توان نشان داد که برای $x>x_c$ امواج P که از مسیر ACDG حرکت می‌کنند اولین موجی هستند که به نقطه می‌رسند.

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

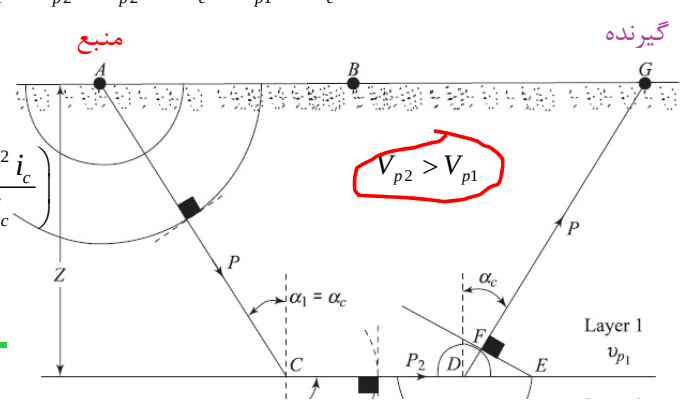
$$x=\overline{AB}\,,\qquad t=\frac{x}{v_{p1}}\qquad \alpha_1=\sin^{-1}\left(\frac{v_{p1}}{v_{p2}}\right)\alpha_c$$

$$\frac{v_{p1}.\Delta t}{v_{p2}.\Delta t}=\frac{DF}{DE}=\sin i_c$$

مدت زمان طی مسافت توسط امواج P از مسیر $ACDG$ برابر است با:

$$t=t_{AC}+t_{CD}+t_{DG}$$

$$t=\left(\frac{Z}{\cos i_c}\right)\frac{1}{v_{p1}}+\frac{x-2Z\tan i_c}{v_{p2}}+\left(\frac{Z}{\cos i_c}\right)\frac{1}{v_{p1}}=\frac{x}{v_{p2}}-\frac{2Z\sin i_c}{v_{p2}.\cos i_c}+\frac{2.Z}{v_{p1}\cos i_c}$$



در این روابط $x=\overline{AG}$ و $V_{p2}=V_{p1}/\sin i_c$ میباشد، پس:

$$t=\frac{x}{v_{p2}}-\frac{2Z\sin^2 i_c}{v_{p1}.\cos i_c}+\frac{2Z}{v_{p1}\cos i_c}=\frac{x}{v_{p2}}+\frac{2.Z}{v_{p1}}\left(\frac{1-\sin^2 i_c}{\cos i_c}\right)$$

$$t=\frac{x}{v_{p2}}+\frac{2Z}{v_{p1}}\cos i_c$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

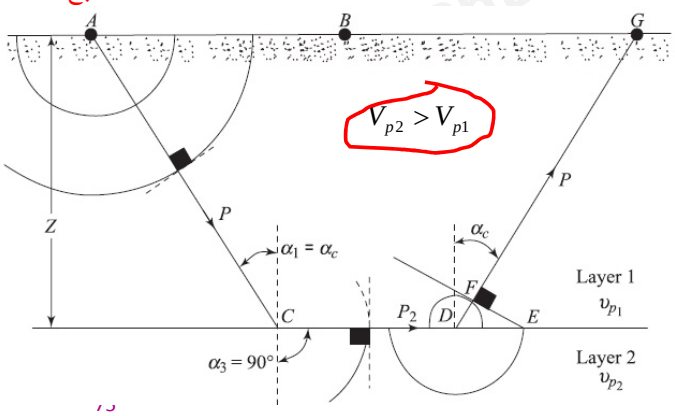
بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$x = \overline{AB}, \qquad t = \frac{x}{v_{p1}} \qquad \alpha_1 = \sin^{-1}\left(\frac{v_{p1}}{v_{p2}}\right)\alpha_c \qquad \frac{v_{p1}.\Delta t}{v_{p2}.\Delta t} = \frac{DF}{DE} = \sin i_c$$

$$t = t_{AC} + t_{CD} + t_{DG} \Rightarrow \boxed{t = \frac{x}{v_{p2}} + \frac{2Z}{v_{p1}}\cos i_c, \quad x = \overline{AG}}$$

$$\sin i_c = \frac{v_{p1}}{v_{p2}} \Rightarrow \cos i_c = \sqrt{1-\sin^2 i_c} = \sqrt{1-\left(\frac{v_{p1}}{v_{p2}}\right)^2}$$

منبع گیرنده

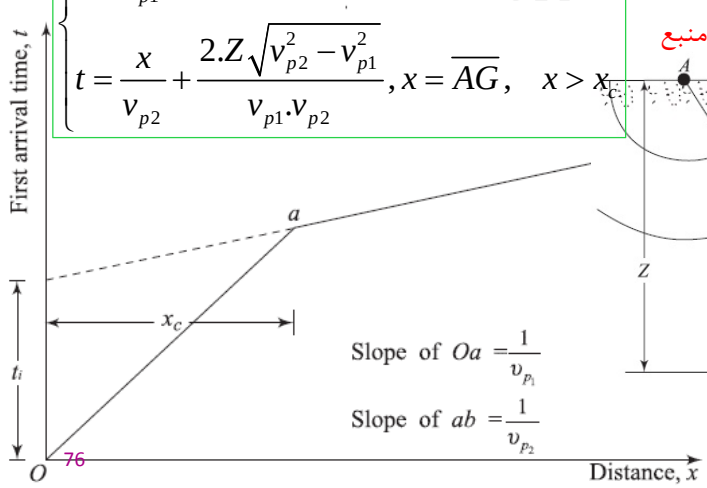


$$\boxed{t = \frac{x}{v_{p2}} + \frac{2.Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1}.v_{p2}}}$$

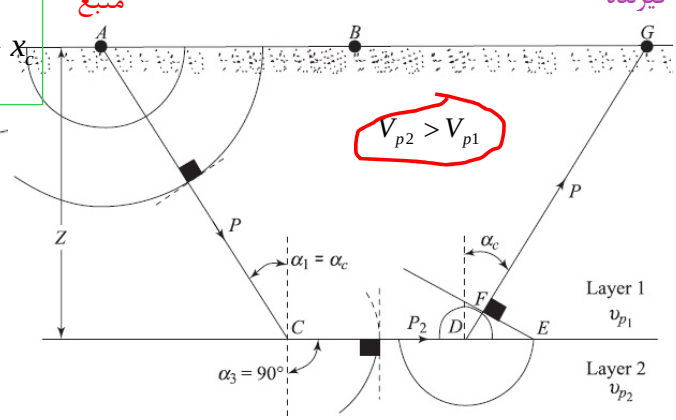
بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

حال اگر فرض گردد که نقطه G جابه‌جا گردد در آن صورت بدان معنی است که دستگاه گیرنده در فواصل مختلف از منبع A قرار بگیرد در این صورت اگر در این فواصل مختلف زمان رسیدن اولین موج را اندازه گرفته و عمل را برای مسافت‌های مختلف تکرار نماییم زوج نقاط (فاصله، زمان رسیدن اولین موج) چنین به دست می‌آید که در یک دستگاه t, x قابل رسم شبیه شکل زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} t = \dfrac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, & x < x_c \\ t = \dfrac{x}{v_{p2}} + \dfrac{2.Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1}.v_{p2}}, x = \overline{AG}, & x > x_c \end{cases}$$



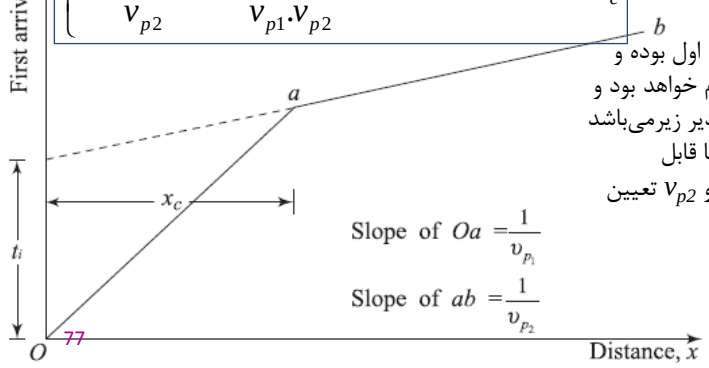
منبع گیرنده



بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

حال اگر فرض گردد که نقطه G جابه‌جا گردد در آن صورت بدان معنی است که دستگاه گیرنده در فواصل مختلف از منبع A قرار بگیرد در این صورت اگر در این فواصل مختلف زمان رسیدن اولین موج را اندازه گرفته و عمل را برای مسافت‌های مختلف تکرار نماییم زوج نقاط (فاصله، زمان رسیدن اولین موج) چنین به دست می‌آید که در یک دستگاه t, x قابل رسم شبیه شکل زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} t = \dfrac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_c \\ t = \dfrac{x}{v_{p2}} + \dfrac{2.Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1}.v_{p2}}, x = \overline{AG}, \quad x > x_c \end{cases}$$



خط Oa دراین شکل معرف معادله اول بوده و خط ab معرف اطلاعات معادله دوم خواهد بود و شیب این خط‌ها به ترتیب برابرمقادیر زیرمی‌باشد که با رسم نتایج تجربی این شیب‌ها قابل اندازه‌گیری و در نتیجه مقادیر v_{p1} و v_{p2} تعیین خواهند شد.

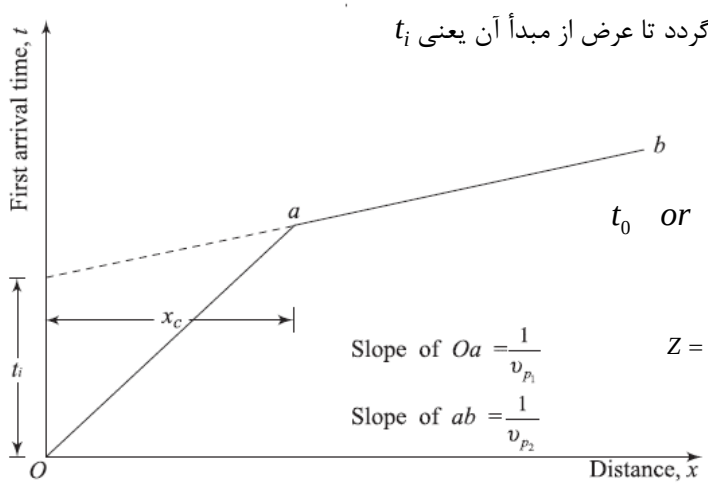
$$m_{0a} = \frac{1}{v_{p1}}, \quad m_{ab} = \frac{1}{v_{p2}}$$

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$\begin{cases} t = \dfrac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_c \\ t = \dfrac{x}{v_{p2}} + \dfrac{2.Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1}.v_{p2}}, x = \overline{AG}, \quad x > x_c \end{cases}$$

$$m_{0a} = \frac{1}{v_{p1}}, \quad m_{ab} = \frac{1}{v_{p2}}$$

اگر خط ab به عقب تصویر گردد تا عرض از مبدأ آن یعنی t_i در تعیین شود ان‌گاه:



$$t_0 \quad or \quad t_i = 2.Z.\frac{\sqrt{{v_{p2}}^2 - {v_{p1}}^2}}{(v_{p1} - v_{p2})}$$

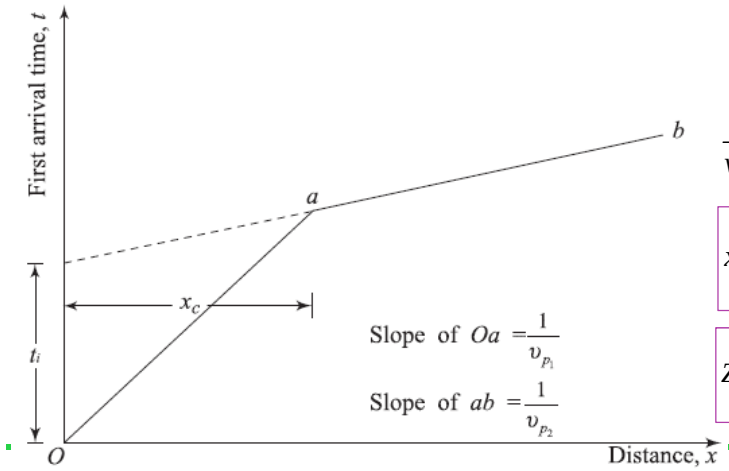
$$Z = \frac{1}{2}(t_i)\frac{v_{p1}.v_{p2}}{\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}} = \frac{1}{2}.t_i.\frac{v_{p1}}{\cos i_c}$$

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

$$\begin{cases} t = \dfrac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_c \\ t = \dfrac{x}{v_{p2}} + \dfrac{2.Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1}.v_{p2}}, x = \overline{AG}, \quad x > x_c \end{cases}$$

$$t_0 \quad or \quad t_i = 2.Z.\frac{\sqrt{v_{p2}{}^2 - v_{p1}{}^2}}{(v_{p1} - v_{p2})}$$

$$Z = \frac{1}{2}.t_i.\frac{V_{p1}}{\cos i_c}$$



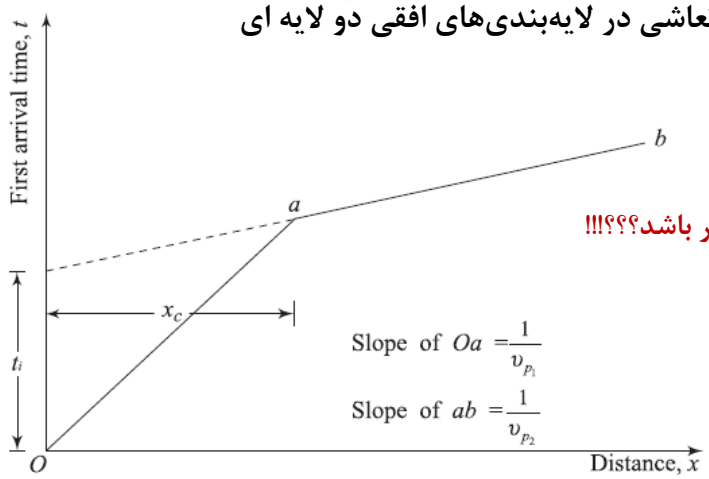
فاصله بحرانی موج انکساری

$$\frac{x_c}{v_{p1}} = \frac{x_c}{v_{p2}} + \frac{2Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1} - v_{p2}}$$

$$x_c = 2Z\sqrt{\frac{v_{p2} + v_{p1}}{v_{p2} - v_{p1}}}$$

$$Z = \frac{x_c}{2}\sqrt{\frac{v_{p2} - v_{p1}}{v_{p2} + v_{p1}}}$$

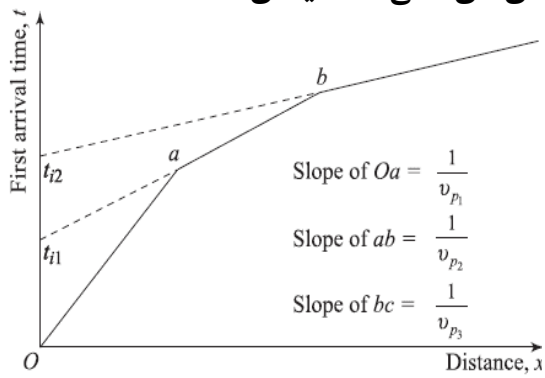
بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی دو لایه ای

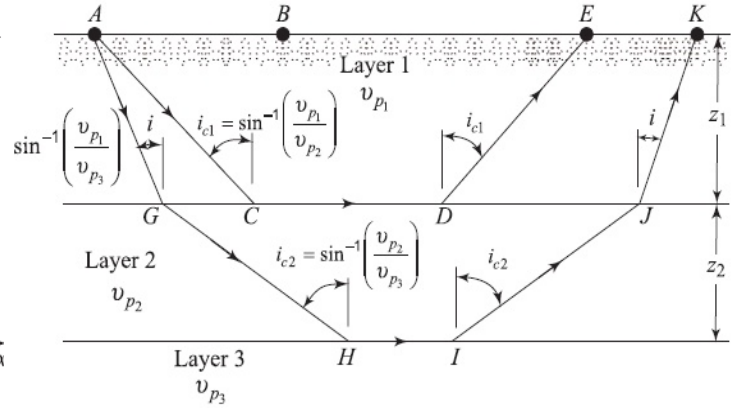


اگر سه لایه ای یا بیشتر باشد؟؟؟!!!

$$\begin{cases} t = \dfrac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_c \\ t = \dfrac{x}{v_{p2}} + \dfrac{2.Z\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1}.v_{p2}}, x = \overline{AG}, \quad x > x_c \end{cases}$$

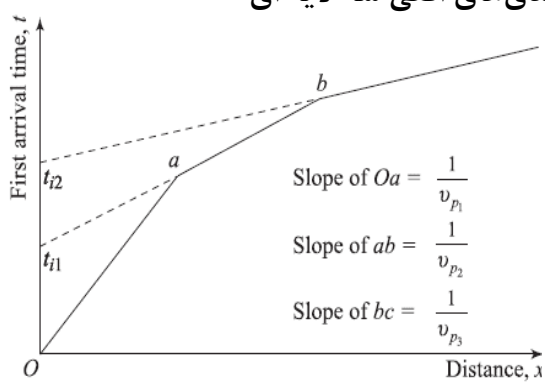
بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی سه لایه ای

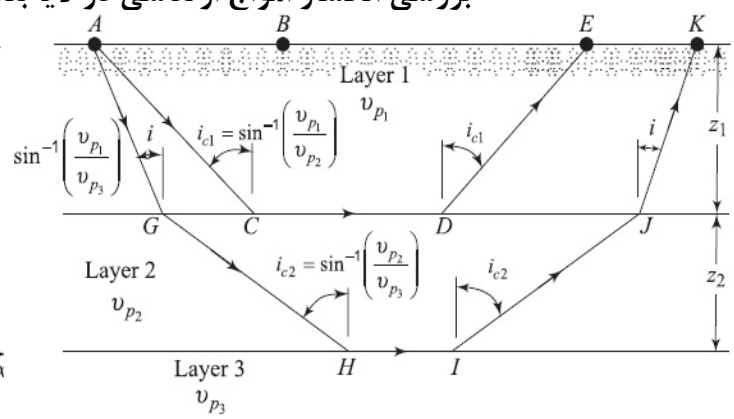




$$
\begin{cases}
t = \dfrac{x}{v_{p1}}, x = \overline{AB}, \quad x < x_{c1} \\[2ex]
t = \dfrac{x}{v_{p2}} + \dfrac{2z_1\sqrt{v_{p2}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p1}.v_{p2}}, x = \overline{AE}, \quad x_{c1} < x < x_{c2} \\[2ex]
t = \dfrac{x}{v_{p3}} + \dfrac{2z_1\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p1}^2}}{v_{p3}.v_{p1}} + \dfrac{2z_2\sqrt{v_{p3}^2 - v_{p2}^2}}{v_{p3}.v_{p2}}, x = \overline{AK}, \quad x_{c2} < x
\end{cases}
$$

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی سه لایه ای

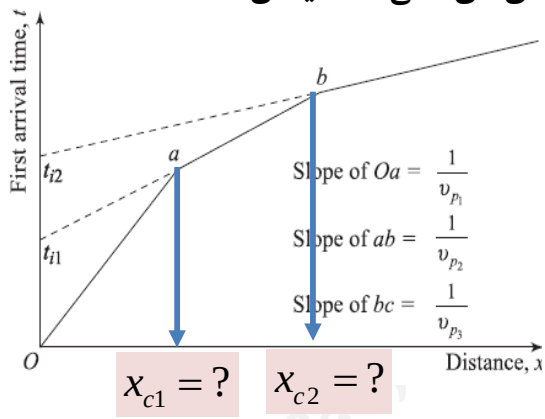


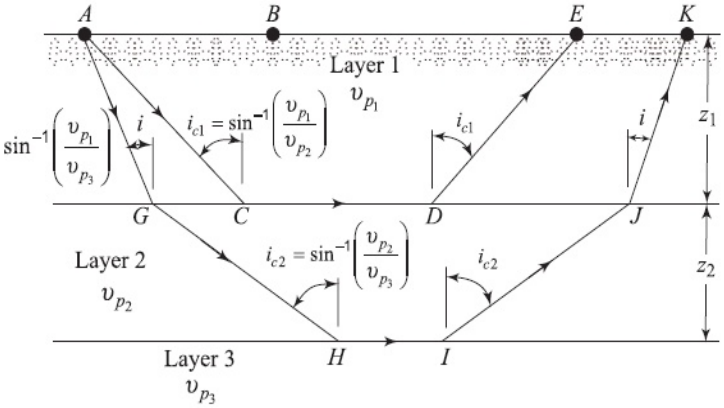


$$z_1 = \frac{(t_{i1})(v_{p_1})(v_{p_2})}{2\sqrt{v_{p_2}^2 - v_{p_1}^2}} \qquad t = t_{i2} = \frac{2z_1\sqrt{v_{p_3}^2 - v_{p_1}^2}}{(v_{p_3})(v_{p_1})} + \frac{2z_2\sqrt{v_{p_3}^2 - v_{p_2}^2}}{(v_{p_3})(v_{p_2})}$$

$$\boxed{z_2 = \frac{1}{2}\left[t_{i2} - \frac{2z_1\sqrt{v_{p_3}^2 - v_{p_1}^2}}{(v_{p_3})(v_{p_1})}\right]\frac{(v_{p_3})(v_{p_2})}{\sqrt{v_{p_3}^2 - v_{p_2}^2}}}$$

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی سه لایه ای

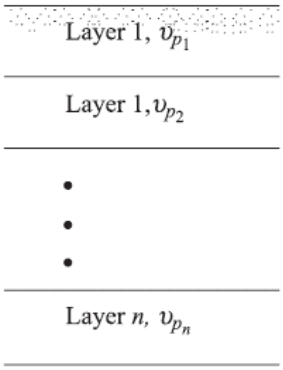


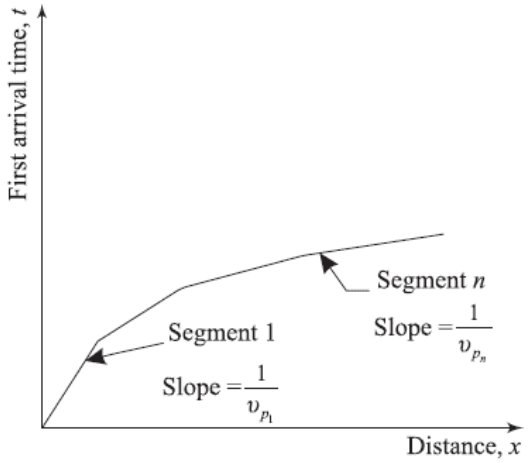


Ali Asgari

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی چند لایه ای

اطلاعات بیشتر در کتاب های ژئوفیزیک





مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های افقی

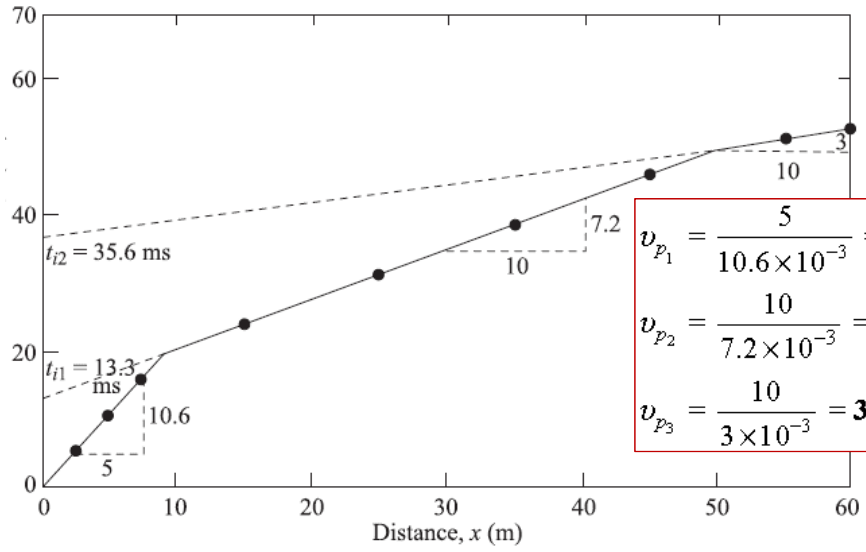
نتایج پیمایش انکسار موج P بصورت جدول زیر است. مطلوبست تعیین سرعت امواج طولی و ضخامت لایه ها؟

Distance (m)	Time of first arrival (ms)
2.5	5.5
5.0	11.1
7.5	16.1
15.0	24.0
25.0	30.8
35.0	38.2
45.0	46.1
55.0	51.3
60.0	52.8

حل:

ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می کنیم.

حل: ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می کنیم.



$$v_{p_1} = \frac{5}{10.6\times10^{-3}} = \mathbf{472\ m/s}$$

$$v_{p_2} = \frac{10}{7.2\times10^{-3}} = \mathbf{1389\ m/s}$$

$$v_{p_3} = \frac{10}{3\times10^{-3}} = \mathbf{3333\ m/s}$$

$$t_{i1} = 13.3\times10^{-3}\ \text{s};\ t_{i2} = 35.6\times10^{-3}\ \text{s}.$$

حل: ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می کنیم.

$$\upsilon_{p_1} = \frac{5}{10.6\times10^{-3}} = \mathbf{472\ m/s}$$

$$\upsilon_{p_2} = \frac{10}{7.2\times10^{-3}} = \mathbf{1389\ m/s}$$

$$\upsilon_{p_3} = \frac{10}{3\times10^{-3}} = \mathbf{3333\ m/s}$$

$$z_1 = \frac{(t_{i1})(\upsilon_{p_1})(\upsilon_{p_2})}{2\sqrt{\upsilon_{p_2}^2-\upsilon_{p_1}^2}} = \frac{(13.3\times10^{-3})(472)(1389)}{2\sqrt{(1389)^2-(472)^2}}$$

$$= 3.39\ \text{m}$$

$$z_2 = \frac{1}{2}\left[t_{i2} - \frac{2z_1\sqrt{\upsilon_{p_3}^2-\upsilon_{p_1}^2}}{(\upsilon_{p_3})(\upsilon_{p_1})}\right]\frac{(\upsilon_{p_3})(\upsilon_{p_2})}{\sqrt{\upsilon_{p_3}^2-\upsilon_{p_2}^2}}$$

$$= \frac{1}{2}\left[35.6\times10^{-3} - \frac{(2)(3.39)\sqrt{(3333)^2-(472)^2}}{(3333)(472)}\right]$$

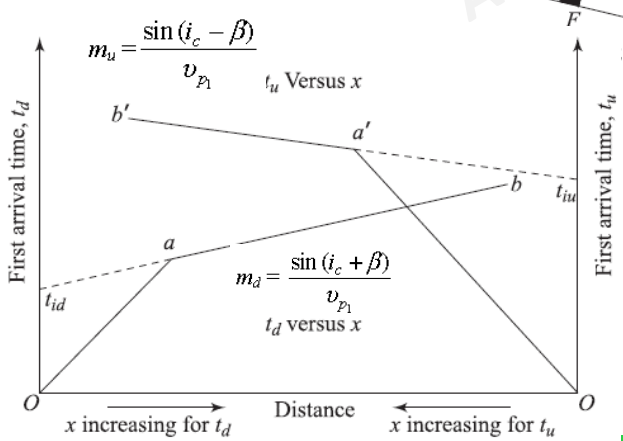
$$\times\frac{(3333)(1389)}{\sqrt{(3333)^2-(1389)^2}}$$

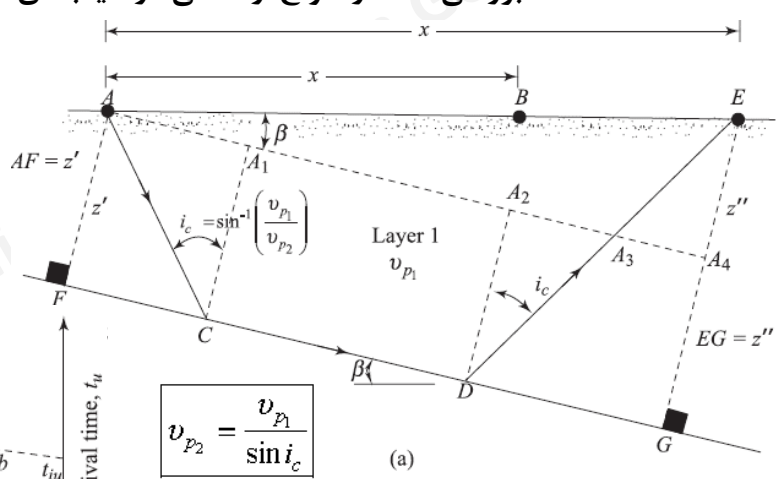
$$= \frac{1}{2}\ (0.02138)\ (1528) = \mathbf{16.33\ m}$$

بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

$$i_c = \tfrac{1}{2}[\sin^{-1}(\upsilon_{p_1}m_d) + \sin^{-1}(\upsilon_{p_1}m_u)]$$

$$\beta = \tfrac{1}{2}[\sin^{-1}(\upsilon_{p_1}m_d) - \sin^{-1}(\upsilon_{p_1}m_u)]$$





$$\upsilon_{p_2} = \frac{\upsilon_{p_1}}{\sin i_c}$$

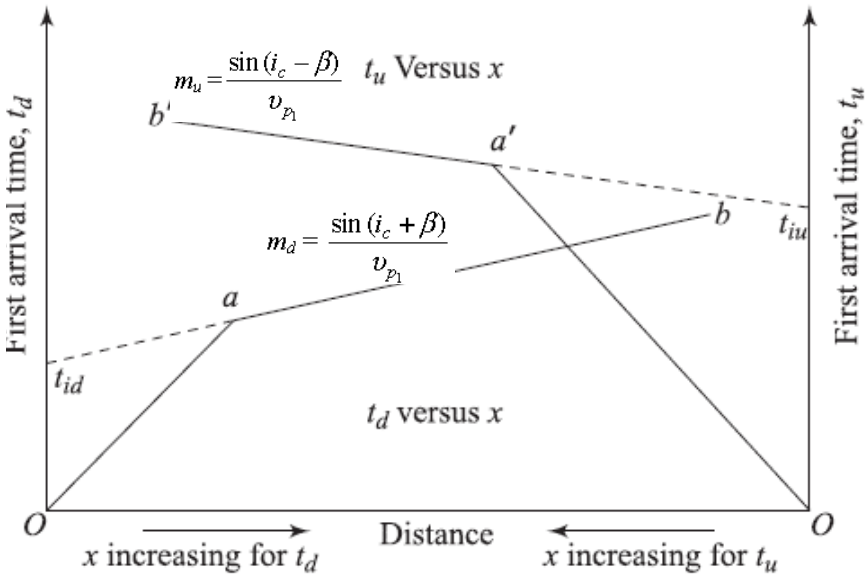
$$t_{id} = \frac{2z'\cos i_c}{\upsilon_{p_1}}$$

$$z' = \frac{(t_{id})\,\upsilon_{p_1}}{2\cos i_c}$$

$$z'' = \frac{(t_{iu})\,\upsilon_{p_1}}{2\cos i_c}$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

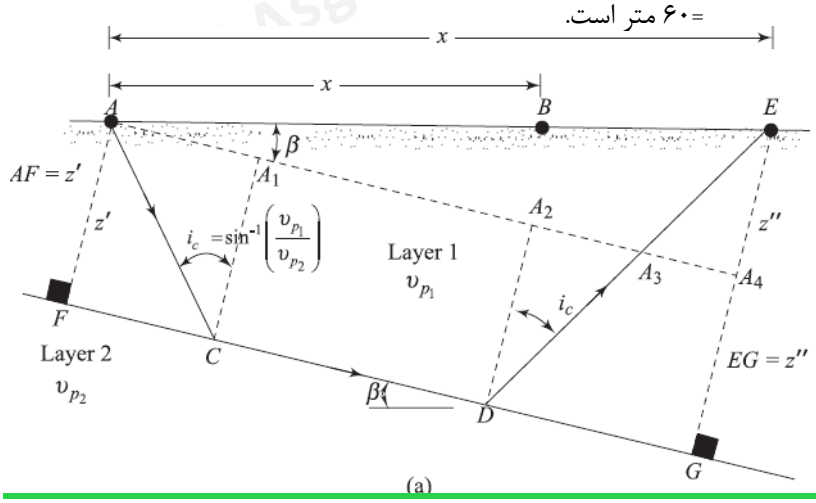
بررسی انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار



Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

نتایج پیمایش انکسار موج P بصورت جدول زیر است. مطلوبست تعیین: الف) سرعت امواج طولی در دولایه و ب) ضخامت لایه در محل A و E ج) شیب لایه زیرین؟ فاصله AE =۶۰ متر است.



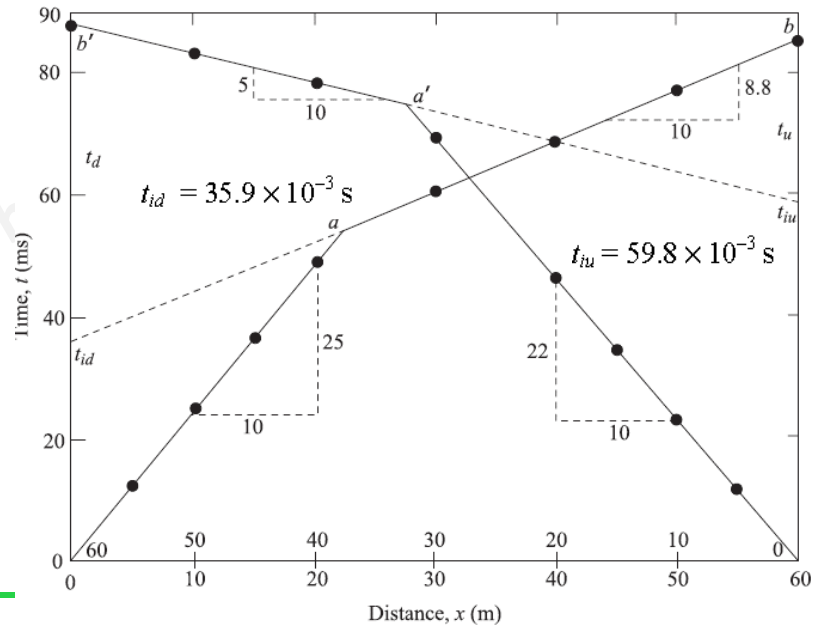
(a)

Point of disturbance A	
Distance from A (m)	Time of first arrival (ms)
5	12.1
10	25.2
15	35.3
20	48.0
30	60.2
40	68.5
50	76.8
60	85.1

Point of disturbance E	
Distance from E (m)	Time of first arrival (ms)
5	11.5
10	22.8
15	34.5
20	44.8
30	69.1
40	78.1
50	82.8
60	87.7

مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

حل الف: ابتدا نمودار فاصله-زمان را ترسیم می کنیم.



از شاخه oa

$$\upsilon_{p_1} = \frac{10}{25 \times 10^{-3}} = 400 \text{ m/s}$$

از شاخه $o'a'$

$$\upsilon_{p_1} = \frac{10}{22 \times 10^{-3}} = 454 \text{ m/s}$$

متوسط دو مقدار بالا

$$\boxed{\upsilon_{p_1} = 427 \text{ m/s}}$$

$$m_d = \frac{8.8 \times 10^{-3}}{10} = 0.88 \times 10^{-3}$$

$$m_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{10} = 0.5 \times 10^{-3}$$

مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

$$\boxed{\upsilon_{p_1} = 427 \text{ m/s}}$$

حل الف:

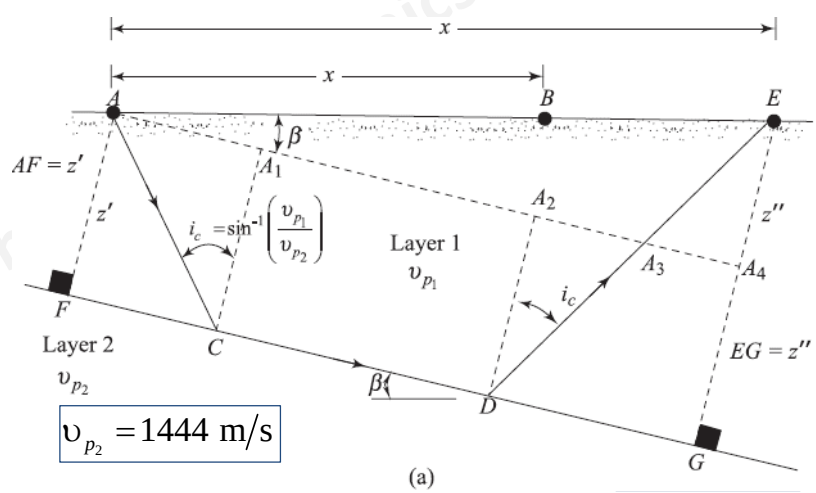
$$m_d = \frac{8.8 \times 10^{-3}}{10} = 0.88 \times 10^{-3}$$

$$m_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{10} = 0.5 \times 10^{-3}$$

$$i_c = \tfrac{1}{2}[\sin^{-1}(\upsilon_{p_1} m_d) + \sin^{-1}(\upsilon_{p_1} m_u)]$$

$$i_c = \tfrac{1}{2}(22.07° + 12.33°) = 17.2°$$

$$\upsilon_{p_2} = \frac{\upsilon_{p_1}}{\sin i_c} = \frac{427}{\sin(17.2)} = \mathbf{1444 \text{ m/s}}$$

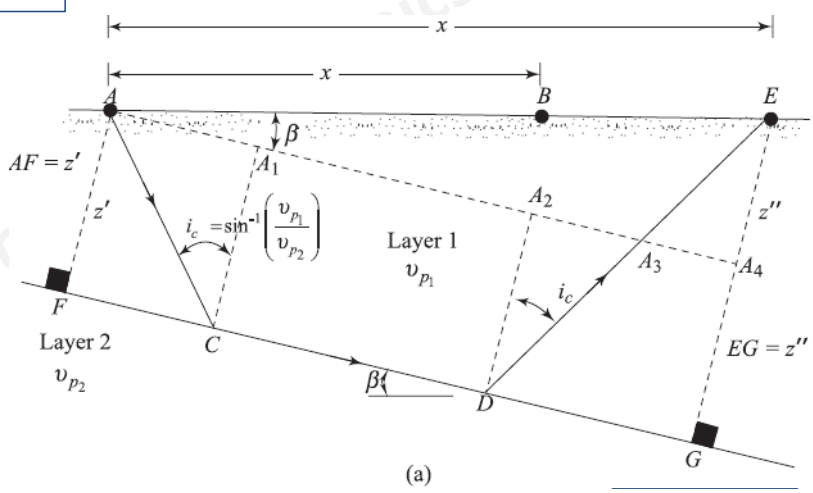


$$\boxed{\upsilon_{p_2} = 1444 \text{ m/s}}$$

مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

$\upsilon_{p_1} = 427 \text{ m/s}$ $\upsilon_{p_2} = 1444 \text{ m/s}$

حل ب و ج:



$$m_d = \frac{8.8\times10^{-3}}{10} = 0.88\times10^{-3}$$

$$m_u = \frac{5\times10^{-3}}{10} = 0.5\times10^{-3}$$

$$i_c = \tfrac{1}{2}(22.07° + 12.33°) = 17.2°$$

$$z' = \frac{(t_{id})(\upsilon_{p_1})}{2\cos i_c} \qquad t_{id} = 35.9\times10^{-3}\text{ s}$$

$$z' = \frac{(35.9\times10^{-3})(427)}{2\cos(17.2)} = \mathbf{8.03\ m}$$

$$z'' = \frac{(t_{iu})(\upsilon_{p_1})}{2\cos i_c} \qquad t_{iu} = 59.8\times10^{-3}\text{ s} \qquad z'' = \frac{(59.8\times10^{-3})(427)}{2\cos(17.2)} = \mathbf{13.37\ m}$$

$$\beta = \tfrac{1}{2}\,[\sin^{-1}(\upsilon_{p_1}\, m_d) - \sin^{-1}(\upsilon_{p_1}\, m_u)] = \tfrac{1}{2}\,(22.07° - 12.33°) = \mathbf{4.87°}$$

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

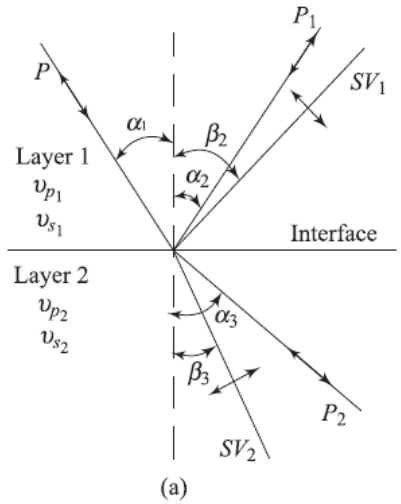
روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

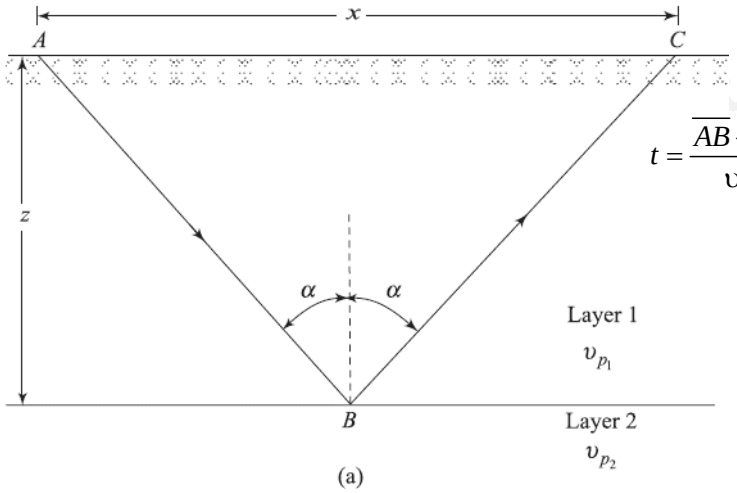
پدیده انعکاس امواج حجمی در مصالح



اگر امواج تنشی برخوردی از نوع P فشاری باشند آنگاه بصورت امواج P و SV هم منعکس پیدا می کنند و هم می شکنند.

$$\alpha_1 = \alpha_2, \quad \frac{\sin\alpha_1}{V_{p1}} = \frac{\sin\alpha_2}{V_{p2}} = \frac{\sin\beta_2}{V_{s1}} = \frac{\sin\alpha_3}{V_{p2}} = \frac{\sin\beta_3}{V_{s2}}$$

پدیده انعکاس امواج حجمی در مصالح



$$t = \frac{\overline{AB} + \overline{BC}}{\upsilon_{p_1}} = \frac{2}{\upsilon_{p_1}}\sqrt{z^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}$$

$$z = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\upsilon_{p_1} t\right)^2 - x^2}$$

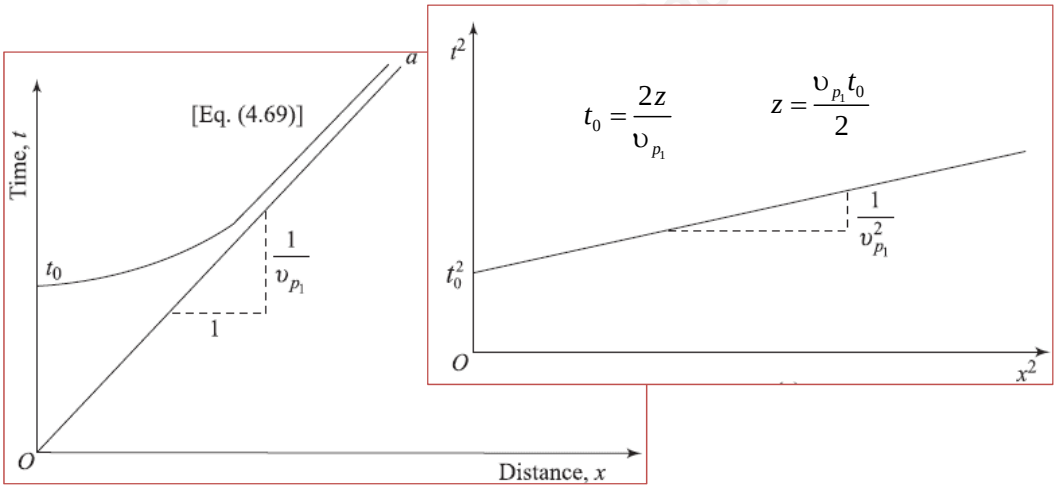
$$t_0 = \frac{2z}{\upsilon_{p_1}}$$

$$z = \frac{\upsilon_{p_1} t_0}{2}$$

پدیده انعکاس امواج حجمی در مصالح

$$z = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\upsilon_{p_1} t\right)^2 - x^2}$$

دو روش ترسیم برای تعیین سرعت موج v_{p1} وجود دارد که در شکل زیر می بینید.



مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار

نتایج پیمایش انعکاس موج P در یک شل بر روی گرانیت بصورت جدول زیر است. مطلوبست تعیین سرعت موج طولی در شل؟

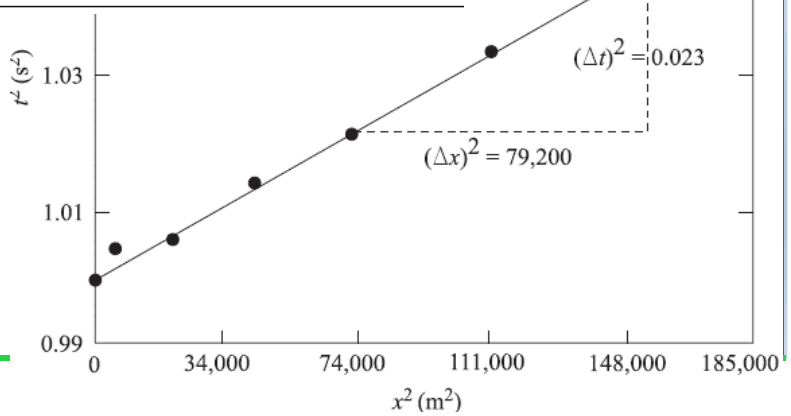
Distance from point of disturbance (m)	Time for first reflection (s)
30	1.000
90	1.002
150	1.003
210	1.007
270	1.011
330	1.017
390	1.023

حل : ابتدا نمودار مجذور فاصله-مجذور زمان را ترسیم می کنیم.

مثال انکسار امواج ارتعاشی در لایه‌بندی‌های شیبدار حل :

x (m)	x^2 (m²)	t (s)	t^2 (s²)
30	900	1.000	1.000
90	8,100	1.002	1.004
150	22,500	1.003	1.006
210	44,100	1.007	1.014
270	72,900	1.011	1.022
330	108,900	1.017	1.034
390	152,100	1.023	1.046

$$v_{p_1} = \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{(\Delta t)^2}} = \sqrt{\frac{79200}{0.024}} = \mathbf{1816.6\ m/s}$$



۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

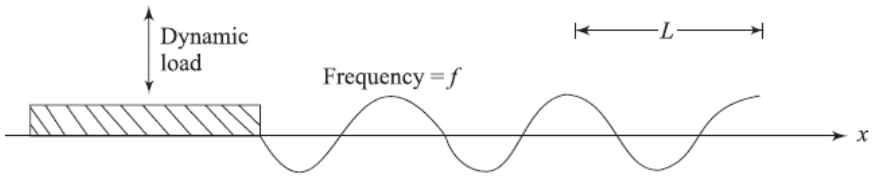
Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۲- روش انتشار امواج سطحی *Subsoil Exploration by Steady-State Vibration*

در نواحی نزدیک به سطح زمین جهت تعیین مدول برشی خاک‌ها مورد استفاده است.

اساس روش

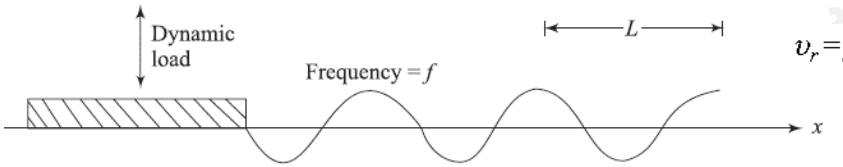
مطابق شکل زیر اندازه‌گیری فواصل بین نقاطی که با اختلاف فاز نسبت به منبع نوسان می‌کنند می‌تواند جهت محاسبه‌ی طول موج به کار رود.



$$v_r = fL$$

امواج رایلی اثراتی سطحی داشته و بنابراین تا حداکثر عمق برابر نصف طول موج فرستاده شده اطلاعات قابل قبول عمق را می‌دهد. برای تعیین اطلاعات عمیق تر فرکانس کوچکتری انتخاب می شود.

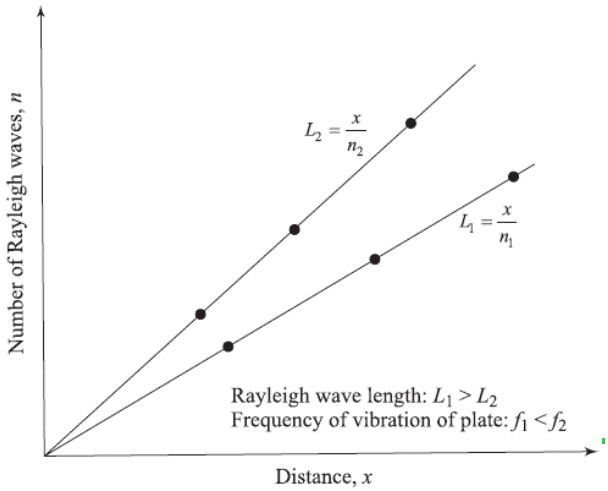
۲- روش انتشار امواج سطحی *Subsoil Exploration by Steady-State Vibration*



$$v_r = fL$$

مطابق شکل بالا، یک ارتعاش کننده مکانیکی وجود دارد اما اگر نیروی ارتعاش کننده مکانیکی آن قدر بزرگ باشد ممکن است باعث جدایی ارتعاش‌کننده از زمین گردد. لذا ارتعاش‌کننده را روی یک بلوک قرار می‌دهند و یا در غیاب آن از تعدادی وزنه بر روی ارتعاش‌کننده استفاده می‌شود ابعاد بلوک در استانداردهای کشورهای مختلف آمده است.

با تعیین سرعت موج رایلی می توان موج برشی و مدول موج برشی را تعیین کرد.



امواج در محیط های ارتجاعی پیوسته

یادآوری

تئوری ارتعاشات
امواج در محیط های . . .
خصوصیات دینامیکی . . .
ارتعاشات شالوده و پی
ظرفیت باربری دینامیکی
پاسخ لرزه ای زمین
فشارلرزه ای جانبی خاک
تراکم دینامیکی . . .
روانگرایی
ماشین مرتعش برروی شمع
پایداری لرزه ای شیروانی

موج رایلی:

$$\alpha^2 = \frac{\upsilon_s^2}{\upsilon_p^2} \qquad \upsilon_p^2 = (\lambda + 2G)/\rho \qquad \alpha^2 = \frac{\upsilon_s^2}{\upsilon_p^2} = \frac{G}{\lambda + 2G} = \frac{(1-2\mu)}{(2-2\mu)}$$

$$\frac{\upsilon_r^2}{\upsilon_s^2} = V^2, \quad \upsilon_r = V \cdot \upsilon_s, \quad \upsilon_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+v)\rho}},$$

$$\upsilon_r = V\sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{VE}{2(1+v)\rho}}$$

$$\boxed{V^6 - 8V^4 - (16\alpha^2 - 24)V^2 - 16(1-\alpha^2) = 0}$$

μ	$V = \upsilon_r/\upsilon_s$
0.25	0.919
0.29	0.926
0.33	0.933
0.4	0.943
0.5	0.955

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۲- روش گمانه با انتشار امواج به صورت صعودی و یا نزولی ***Shooting Up/Down the Hole***

در هر دو روش‌های فوق، به یک گمانه بیشتر نیاز نیست و این از مزایای روش است.

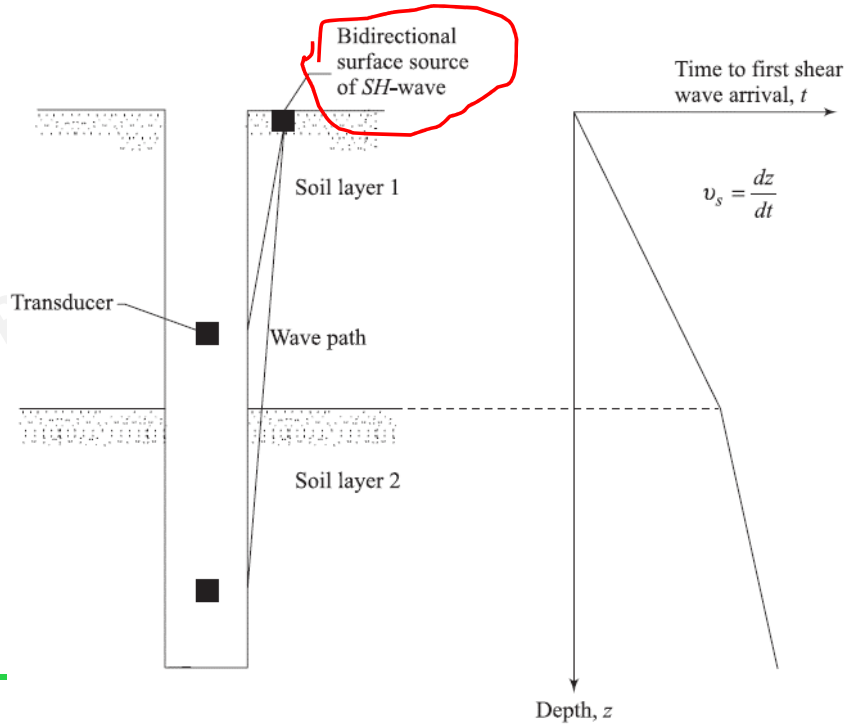
در روش امواج صعودی دو منبع ایجاد موج در نقاط مختلف (عمق مختلف) از گمانه قرار گرفته و یک منبع در سطح زمین قرار می‌گیرد.

در روش امواج نزولی دو گیرنده در اعماق مختلف گمانه قرار می‌گیرند.

در هر دو روش فوق سرعت متوسط امواج بین منبع تولید و گیرنده و بین دو گیرنده را اندازه‌گیری و محاسبه می‌کنند.

مزیت: سرعت موج برشی تعیین میشود.

در روش انکسارو انعکاس موج، سرعت موج طولی قابل تعیین است.



۲- روش گمانه با انتشار امواج به صورت صعودی و یا نزولی ***Shooting Up/Down the Hole***

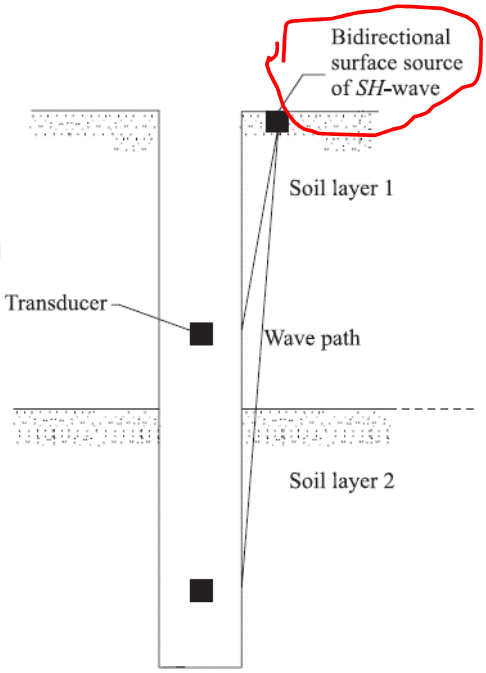
لارکن و تیلور در سال ۱۹۷۹ با استفاده از دو روش امواج نزولی و روش آزمایشگاهی، سرعت موج برشی (SH) را تعیین کردند و با مقایسه آن دو سرعت موج برشی در آزمایشگاه همواره کمتر است و رابطه زیر برای رنج خاک تعیین شد:

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

کاهش سرعت موج برشی منوط به دستخوردگی نمونه آزمایشگاهی است.

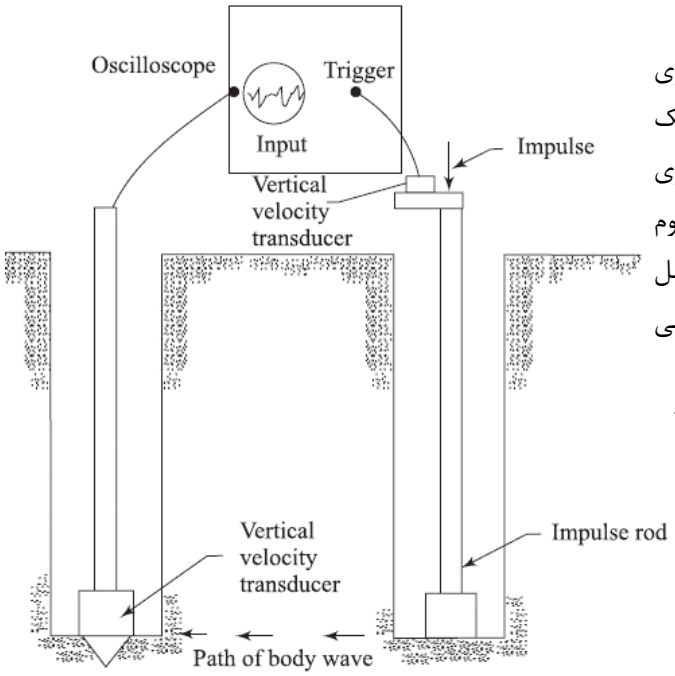
$$S_D = \left[\frac{v_{s(\text{field})}}{v_{s(\text{lab})}}\right]^2 = \frac{G_{\text{field}}}{G_{\text{lab}}}$$

لارکن و تیلور میزان S_D را برای نمونه با سرعت موجهای برشی $v_{s(\text{field})}$=140 m/s و $v_{s(\text{field})}$=400 m/s به ترتیب برابر با S_D=1 و S_D=4 تعیین کردند.



Larkin and Taylor (1979)

۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری *Cross-Hole Shooting*



در این روش سرعت موج عبوری فرستاده شده (SV) از انتهای یک گمانه تا انتهای گمانه دیگر اندازه‌گیری می‌شود و حداقل دوگمانه مورد لزوم است. این یک روش متداول و قابل اطمینان برای تعیین مدول برشی خاک است.

$$v_s = \frac{L}{t}$$

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surveys

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری *Cross-Hole Shooting*

- ارسال موج از انتهای یک گمانه و دریافت آن در انتهای یک یا چند گمانه دیگر و اندازه‌گیری سرعت موج
- پارامترهای عمده عبارت از گمانه‌ها منبع تأمین نیروی دینامیکی، گیرنده ارتعاشات، زمان‌سنج، اندازه‌گیر وثبات همه نقش مهم حساس دارند.
- نتایج دقیق‌تر با تعداد گمانه بیشتر .
- در صورتی که گمانه‌های چندتایی در امتداد یک خط مستقیم باشند سرعت انتشار موج بین گمانه اول و آخر و یا بین هر دو زوج از گمانه‌ها محاسبه می‌شود و اندازه‌گیری زمان شروع (ضربه) لزومی ندارد.
- فاصله مناسب گمانه ها بین ۲ تا ۳ متر است.
- در خاکهای ضعیف اگر نیاز به غلاف یا لوله محافظ باشد. برای کاهش تاثیرات آن از غلاف آلومینیوم یا PVC بجای فولادی استفاده شود.

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری *Cross-Hole Shooting*

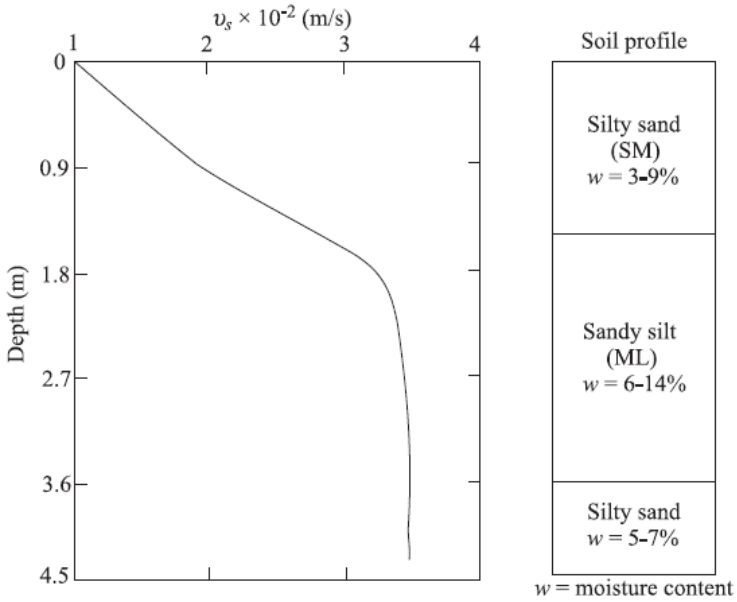
- ارسال موج از انتهای یک گمانه و دریافت آن در انتهای یک یا چند گمانه دیگر و اندازه‌گیری سرعت موج
- پارامترهای عمده عبارت از گمانه‌ها منبع تأمین نیروی دینامیکی، گیرنده ارتعاشات، زمان‌سنج، اندازه‌گیر وثبات همه نقش مهم حساس دارند.
- نتایج دقیق‌تر با تعداد گمانه بیشتر .
- در صورتی که گمانه‌های چندتایی در امتداد یک خط مستقیم باشند سرعت انتشار موج بین گمانه اول و آخر و یا بین هر دو زوج از گمانه‌ها محاسبه می‌شود و اندازه‌گیری زمان شروع (ضربه) لزومی ندارد.
- فاصله مناسب گمانه ها بین ۲ تا ۳ متر است.
- در خاکهای ضعیف اگر نیاز به غلاف یا لوله محافظ باشد. برای کاهش تاثیرات آن از غلاف آلومینیوم یا PVC بجای فولادی استفاده شود.

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری ***Cross-Hole Shooting***

- گمانه‌ها مخصوصا گمانه‌های عمیق باید قائم باشند و گرنه اندازه‌گیری فواصل گمانه بر مبنای فاصله آن‌ها در سطح زمین دقیق نیست. در این صورت از شیب سنج استفاده شود.
- به جای چکش و ایجاد ضربه می‌توان از دستگاه‌های ایجاد کننده لرزش یکنواخت استفاده نمود ولی دستگاه ضربه متداول‌تر است.
- ژئوفون‌های با فرکانس طبیعی بین 4-15 Hz جهت دریافت امواج برشی مناسب هستند و باید به صورت مطمئن به دیواره گمانه نصب گردند.
- دستگاه‌های ثبت نوسانات، باید قادر به تفکیک فواصل زمانی (دقت زمانی) ۰.۲ میلی‌ثانیه و یا ۵٪ زمان عبور موج باشند برای این منظور اسیلوسکوپ‌های حافظه‌دار مناسب هستند.

۳- روش گمانه با انتشار امواج عبوری ***Cross-Hole Shooting***



Stokoe and Woods. 1972

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

روش شکست امواج Seismic Refraction Surve

روش انعکاس امواج Seismic Reflection Surveys

روش انتشار امواج سطحی Subsoil Exploration by Steady-State Vibration

روش گمانه با انتشار امواج به صورت نزولی و یا صعودی Shooting Up/Down the Hole

روش گمانه با انتشار امواج عبوری در خاک Cross-Hole Shooting

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی Cyclic Field Plate Load Test

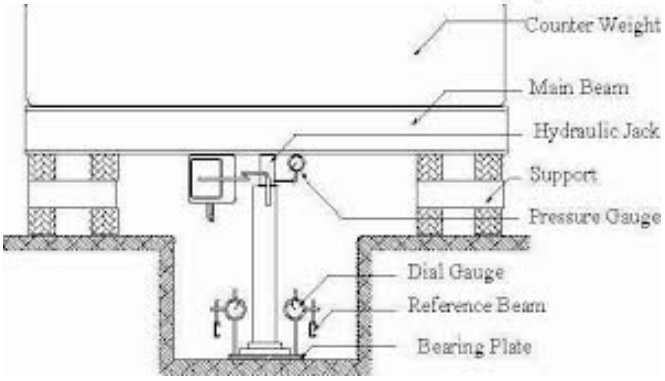
Ali Asgari, PhD in Geotechnics

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی *Cyclic Field Plate Load Test*

در اغلب کتب مرجع خاک و پی این آزمایش، تشریح گردیده است و در این‌جا اشاره‌ای به آن می‌گردد.

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای غیرسیکلی جهت تعیین ظرفیت باربری خاک‌ها به کار رفته و نشست خاک نیز با استفاده از نتایج آن قابل پیش‌بینی است.

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی جهت تعیین ثوابت خاک- فنر و نیز واکنش بستر و ثوابت سختی و میرائی در مودهای مختلف ارتعاش پی‌ها به کار می‌رود.



Ali Asgari, PhD in Geotechnics

خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی ***Cyclic Field Plate Load Test***

۱- تنظیم دستگاه و قرار دادن صفحه (ضخامت صفحه ۲۵ میلیمتر و قطر یا ضلع آن بین ۱۵ تا ۷۶.۲ سانتیمتر متغیر است)

۲- قرائت اولیه گیج‌ها یا صفر نمودن آن‌ها

۳- تحمیل اولین بار استاتیکی به صفحه که حدودا یک پنجم یا یک چهارم بار نهایی است. تحمیل بار به صورت تقریبا تدریجی است زیرا جک توانایی بار سریع را ندارد.

۴- افزایش بار به صفحه تا مقدار ماکزیمم تعیین شده و سپس ثابت نگه داشتن آن تا زمانی که سرعت نشست ناچیز گردد.

۵- قرائت نهایی بار و تغییرشکل در قسمت ۴ بالا.

۶- باربرداری از صفحه به طور کامل و اجازه دادن به خاک برای ظهور تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر و ادامه عمل تا رسیدن به وضعیت ثبات در گیج.

۷- قرائت گیج مجدا انجام می‌گیرد.

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی ***Cyclic Field Plate Load Test***

۸- بارگذاری مجدد با تحمیل بار ماکزیمم بیشتر نسبت به دفعه (سیکل) قبل.

۹- ادامه مراحل ۴ تا ۷ فوق برای سیکل جدید.

۱۰- سیکل‌های باربرداری و بارگذاری آن قدر تکرار می‌شوند تا به مقدار ماکزیمم یعنی مقاومت تخمینی خاک برسیم.

۱۱- تجربه نشان داده است مقدار افزایش بارها طوری باشد که بعداز ۵ تا ۶ سیکل به مقدار ماکزیمم نهایی بار برسیم.

۱۲- رسم نتایج تغییرشکل الاستیک متناظر با شدت بارگذاری.

۱۳- تعیین ضریب فشار یکنواخت الاستیک خاک از رابطه زیر و شکل زیر.

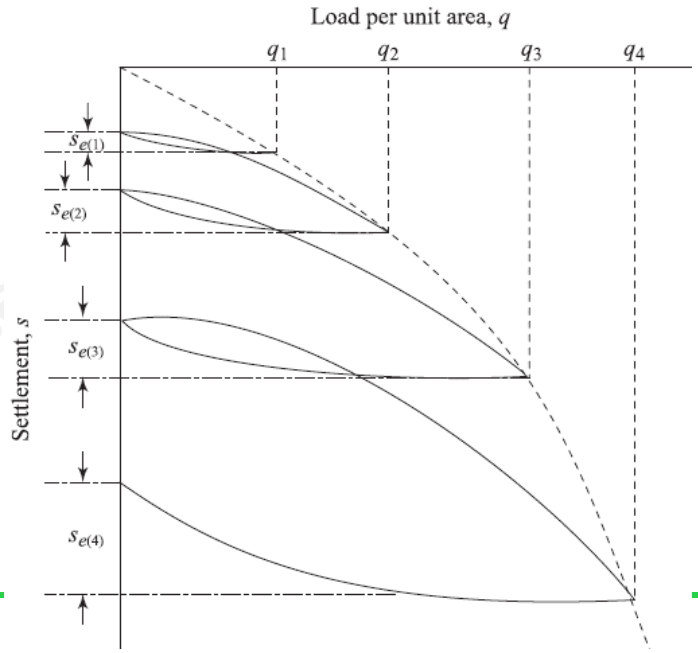
$$q = \frac{\text{load on the plate, } Q}{\text{area of the plate, } A}$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی ***Cyclic Field Plate Load Test***

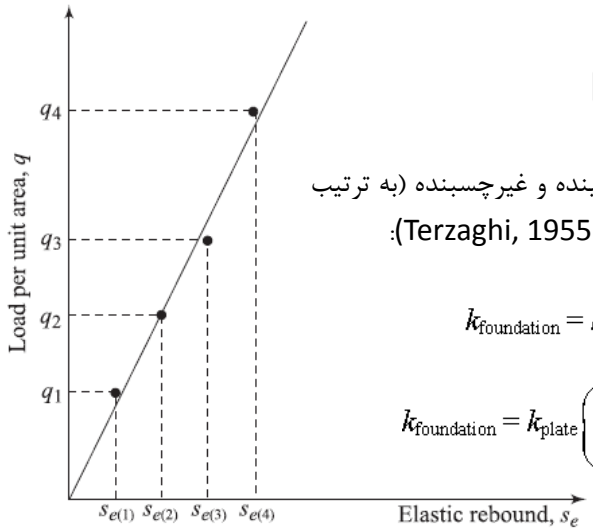
$$q = \frac{\text{load on the plate, } Q}{\text{area of the plate, } A}$$

۱۲- رسم نتایج تغییرشکل با شدت بارگذاری:



خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی ***Cyclic Field Plate Load Test***

۱۳- رسم نتایج تغییرشکل الاستیک متناظر با شدت بارگذاری و تعیین ضریب سختی خاک:



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

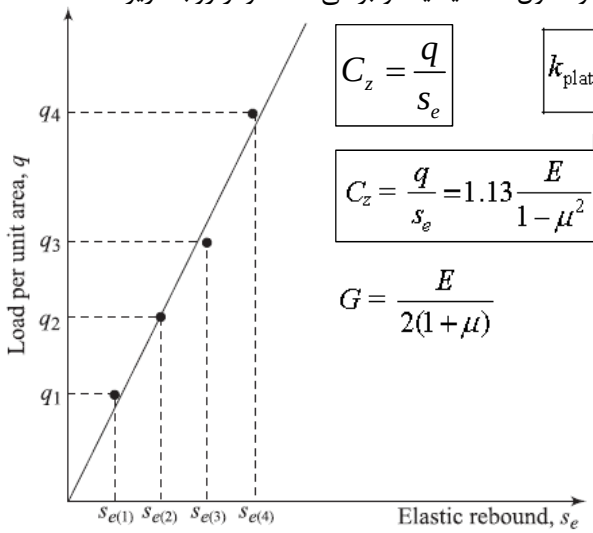
۱۴- تعیین ضریب سختی خاک چسینده و غیرچسبنده (به ترتیب از بالا به پایین) با توجه به شالوده واقعی(Terzaghi, 1955):

$$k_{\text{foundation}} = k_{\text{plate}} \left(\frac{\text{foundation width}}{\text{plate width}} \right)$$

$$k_{\text{foundation}} = k_{\text{plate}} \left(\frac{\text{foundation width} + \text{plate width}}{2 \times \text{plate width}} \right)^2$$

خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی ***Cyclic Field Plate Load Test***

۱۵- تعیین ضریب فشار یکنواخت الاستیک و مدول الاستیسیته و برشی خاک و از روابط زیر:



$$C_z = \frac{q}{s_e}$$

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

از روش تئوری Barkan, 1962 :

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

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

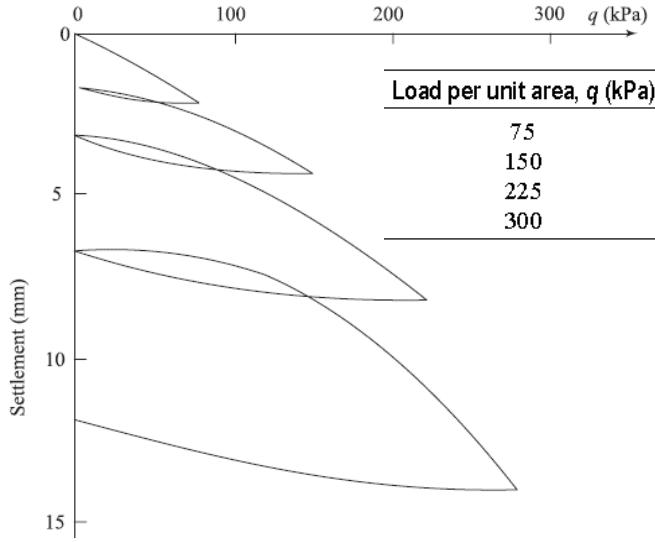
$$C_z = \frac{2.26G(1+\mu)}{1-\mu^2} \frac{1}{\sqrt{A}}$$

$$G = \frac{(1-\mu)\, C_z \sqrt{A}}{2.26}$$

A : سطح مقطع صفحه

مثالی از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی ***Cyclic Field Plate Load Test***

نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی بصورت شکل زیر است. سطح مقطع صفحه برابر با ۰.۳ متر مربع است. مطلوبست تعیین الف) k_{plate} ب) مدول برشی با فرض ضریب پواسون ۰.۳۵



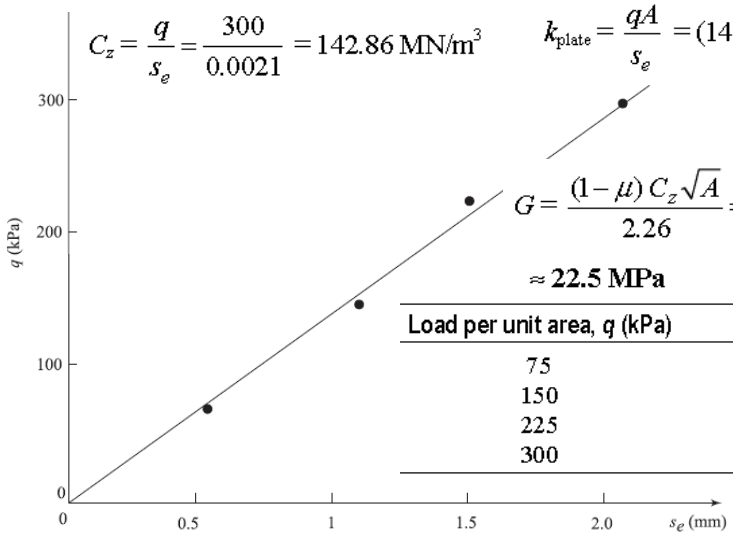
Load per unit area, q (kPa)	Elastic settlement, s_e (mm).
75	0.53
150	1.10
225	1.50
300	2.10

مثالی از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی *Cyclic Field Plate Load Test*

نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای سیکلی بصورت شکل زیر است. سطح مقطع صفحه برابر با ۰.۳ متر مربع است. مطلوبست تعیین الف) k_{plate} ب) مدول برشی با فرض ضریب پواسون ۰.۳۵؟

$$C_z = \frac{q}{s_e} = \frac{300}{0.0021} = 142.86\ \text{MN/m}^3$$

$$k_{plate} = \frac{qA}{s_e} = (142.86)(0.3) = \mathbf{42.86\ MN/m.}$$



$$G = \frac{(1-\mu)\,C_z\sqrt{A}}{2.26} = \frac{(1-0.35)(142.86)(\sqrt{0.3})}{2.26}$$

$$\approx \mathbf{22.5\ MPa}$$

Load per unit area, q (kPa)	Elastic settlement, s_e (mm).
75	0.53
150	1.10
225	1.50
300	2.10

تقسیم بندی
فصل چهارم

۱- انواع آزمایش آزمایشگاهی و نتایج آن

۲- انواع آزمایش صحرایی و اندازه گیری های محلی

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

عوامل مؤثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

۱- نوع خاک و خواص آن (وزن مخصوص خشک، درجه اشباع، دست‌خوردگی، تراکم و ...)

۲- مقدار تنش استاتیکی اولیه

۳- مقدار تنش دینامیکی وارده

۴- مقدار سیکل‌های بار دینامیکی

۵- فرکانس بار دینامیک

۶- شکل و نوع بار دینامیک

۷- یک‌طرفه و یا دوطرفه بودن بار دینامیک

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

روش های تعیین مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

General procedure	Test condition	Approximate strain range	Properties determined
Determination of hysteretic stress-strain relationships	Triaxial compression	10^{-2} to 5%	Modulus; damping
	Simple shear	10^{-2} to 5%	Modulus; damping
	Torsional shear	10^{-2} to 5%	Modulus; damping
Forced vibration	Longitudinal vibrations	10^{-4} to 10^{-2}%	Modulus; damping
	Torsional vibrations	10^{-4} to 10^{-2}%	Modulus; damping
	Shear vibrations—lab	10^{-4} to 10^{-2}%	Modulus; damping
	Shear vibration—field	10^{-4} to 10^{-2} %	Modulus
Free vibration tests	Longitudinal vibrations	10^{-3} to 1%	Modulus; damping
	Torsional vibrations	10^{-3} to 1%	Modulus; damping
	Shear vibration—lab	10^{-3} to 1%	Modulus; damping
	Shear vibration—field	10^{-3} to 1%	Modulus
Field wave velocity measurements	Comparison waves	$\approx 5 \times 10^{-4}$%	Modulus
	Shear waves	$\approx 5 \times 10^{-4}$%	Modulus
	Rayleigh waves	$\approx 5 \times 10^{-4}$%	Modulus
Field seismic response	Measurement of motions at different levels in deposit		Modulus; damping

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

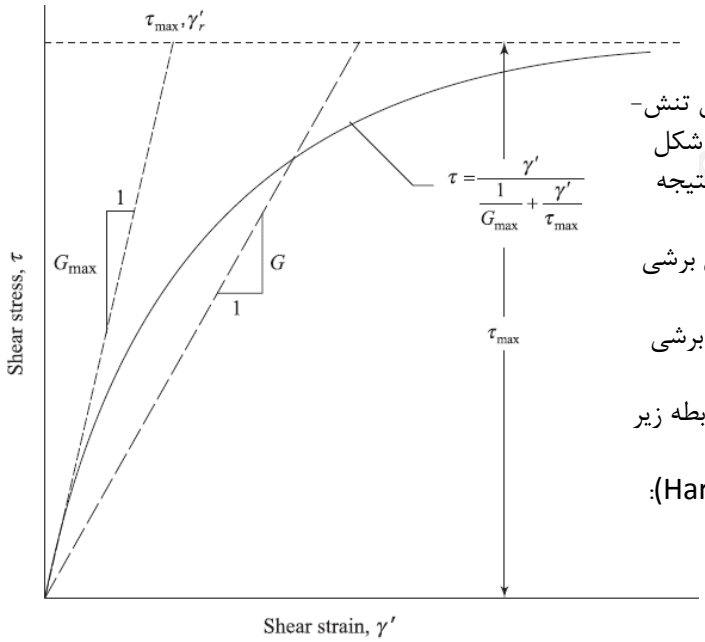
مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی



بطور معمول قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی برای خاکها بصورت شکل مقابل است. از این شکل میتوان نتیجه گرفت که:

۱- با افزایش کرنش برشی، مدول برشی کاهش می یابد.

۲- در کرنش بسیار پایین، مدول برشی ماکزیمم است($G=G_{max}$).

۳- ارتباط بین تنش- کرنش از رابطه زیر پیروی می کند (Hardin and Drnevich, 1972):

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

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

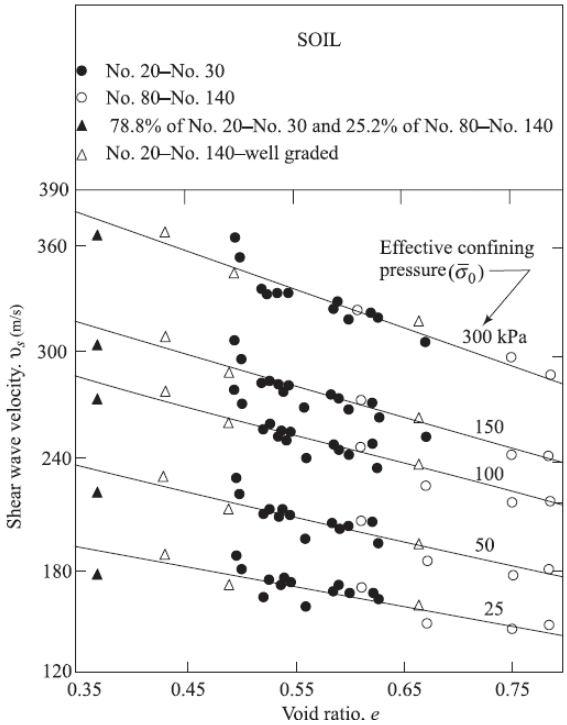
یادآوری

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

آزمایشات هاردین و ریچارت با ستون تشدید در شکل زیر خلاصه شده است. (ماکزیمم دامنه تغییر شکل برشی 10^{-3} رادیان بوده است).

ممکن است (شاید) از شکل بتوان دریافت که مقدار v_s مستقل از دانه‌بندی، نحوه توزیع دانه‌ها و نیز تراکم نسبی خاک کوبیده شده باشد یعنی اگر دیاگرام‌هایی نظیر ۲-۱۱ برای متغیرهای فوق‌الذکر ترسیم گردد، منحنی‌ها عدم‌ارتباط v_s با متغییرهای فوق‌الذکر را نشان بدهند.

اما اگر جواب‌های آزمایشی برای دو پارامتر e و $\bar{\sigma}_0$ رسم گردند بیشترین ارتباط را نشان می‌دهند چنان که در شکل زیر مشخص گردیده است.



مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه گردگوشه اوتاوا

در سیستم SI:

$$\upsilon_s\,(\mathrm{m/s}) = (19.7 - 9.06e)\bar{\sigma}_0^{1/4}\,(\mathrm{N/m^2}), \qquad \bar{\sigma}_0 \geq 95.8\ \mathrm{kN/m^2}$$

$$\upsilon_s = (11.36 - 5.35e)\bar{\sigma}_0^{0.3}, \qquad \bar{\sigma}_0 < 95.8\ \mathrm{kN/m^2}$$

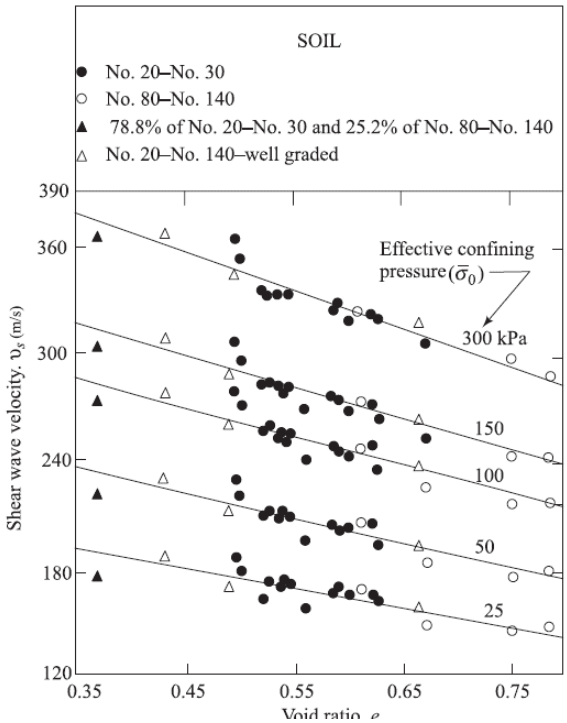
$$G_{\max}\,(\mathrm{kPa}) = \frac{6908(2.17-e)^2\,\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}\,(\mathrm{kPa})}{1+e}$$

در سیستم انگلیسی:

$$\upsilon_s\,(\mathrm{ft/s}) = \left(170 - \frac{78}{2e}\right)\bar{\sigma}_0^{1/4}\,(\mathrm{lb/ft^2}), \qquad \bar{\sigma}_0 > 2000\ \mathrm{lb/ft^2}$$

$$\upsilon_s = (119 - 56e)\bar{\sigma}_0^{0.3}, \qquad \bar{\sigma}_0 < 2000\ \mathrm{lb/ft^2}$$

$$G_{\max} = \frac{2630(2.17-e)^2\,\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$



مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه کوارتزی تیزگوشه اوتاوا

گراف نشان داده شده در روبـرو و معـادلات رگراسـیون شـده مورد بحث برای ماسه خشک گردگوشه از منطقه اتاوا بـه دسـت آمده است. اما برای ماسه تیزگوشه از روابط زیر تبعیت می کند:

در سیستم SI:

$$\upsilon_s\left(\mathrm{m/s}\right)=(18.43-6.2e)\bar{\sigma}_0^{1/4}\left(\mathrm{N/m^2}\right)$$

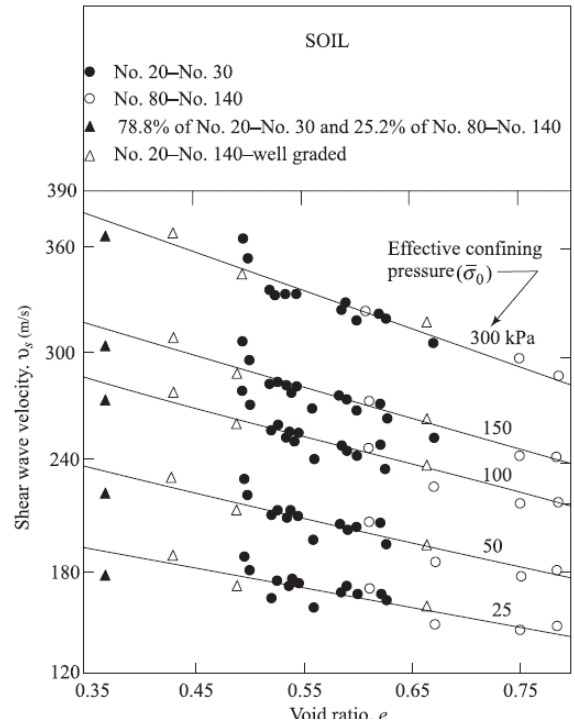
$$G_{\max}=\frac{3230\left(2.97-e\right)^2\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

در سیستم انگلیسی:

$$\upsilon_s\left(\mathrm{ft/s}\right)=(159-53.5e)\bar{\sigma}_0^{1/4}\left(\mathrm{lb/ft^2}\right)$$

$$G_{\max}=\frac{1230\left(2.97-e\right)^2\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

$\bar{\sigma}_0=?$



تعیین مقدار تنش متوسط اکتاهیدرال $\bar{\sigma}_0=?$

برای نمونه خاکی که تحت تأثیر شرایط تنش کلی مانند $\sigma_1\neq\sigma_2\neq\sigma_3$ قرار می‌گیرد، میانگین فشار مؤثر جانبی برابر است با:

$$\bar{\sigma}_0=\frac{1}{3}\left(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3\right)=\frac{1}{3}I_1=\sigma_{oct}$$

I_1 نا متغیر تنش اول، σ_{oct} ← تنش اکتاهیدرال

$\bar{\sigma}_1=$ effective vertical stress $=\bar{\sigma}_\upsilon$

$\bar{\sigma}_2=\bar{\sigma}_3=K_0\bar{\sigma}_\upsilon$

$K_0=1-\sin\left(\phi\right)$

$$\bar{\sigma}_0=\frac{1}{3}\left[\bar{\sigma}_v+2\bar{\sigma}_v\left(1-\sin\phi\right)\right]=\frac{\bar{\sigma}_v}{3}\left(3-2\sin\phi\right)$$

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

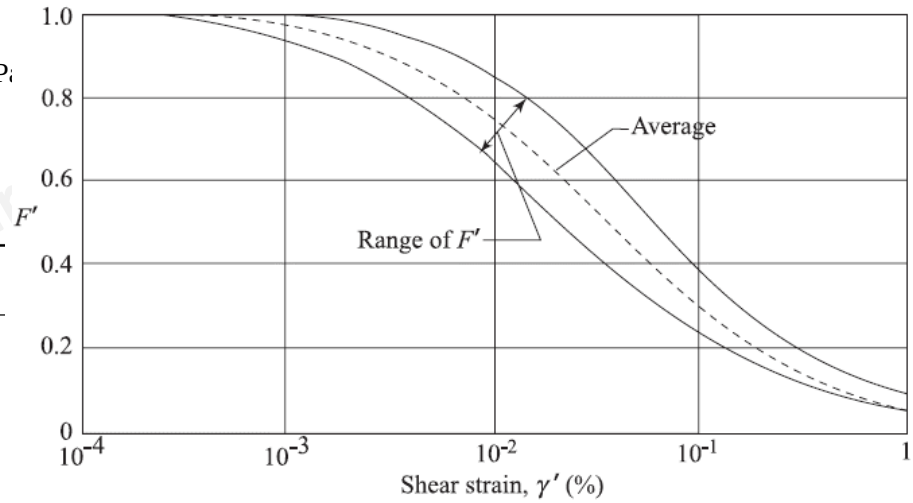
محققان برای تعیین مدول برشی و ضریب میرایی از آزمایشات مختلفی استفاده و ارائه کردند. با استفاده از نتایج آزمایشات روابط تجربی توسط سید و ادریس در سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شد:

$$G(\text{kPa}) = 218.82 K_2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kPa})$$

$$G_{\max}(\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} (\text{kP}$$

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

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



Soil	Location	Depth ft.	K_2
Loose moist sand	Minnesota	10	34
Dense dry sand	Washington	10	44
Dense saturated sand	So. California	50	58
Dense saturated sand	Georgia	200	60
Dense saturated silty sand	Georgia	60	65
Dense saturated sand	So. California	300	72
Extremely dense silty sand	So. California	125	86
Dense dry sand (slightly cemented)	Washington	65	166
Moist clayey sand	Georgia	30	119

*Shear modulus, $G = 1000\ K_2\ (\sigma_m')^{\frac{1}{2}}$ psf

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

همچنین مطالعات سید و ادریس در سال ۱۹۷۰ و هاردین و درنویچ ۱۹۷۲ نشان می دهد که میرایی به پارامترهای زیر وابسته است:

۱- نوع خاک و خواص آن (ضریب تخلخل، درجه اشباع و ...)

۲- ضریب جانبی سکون خاک

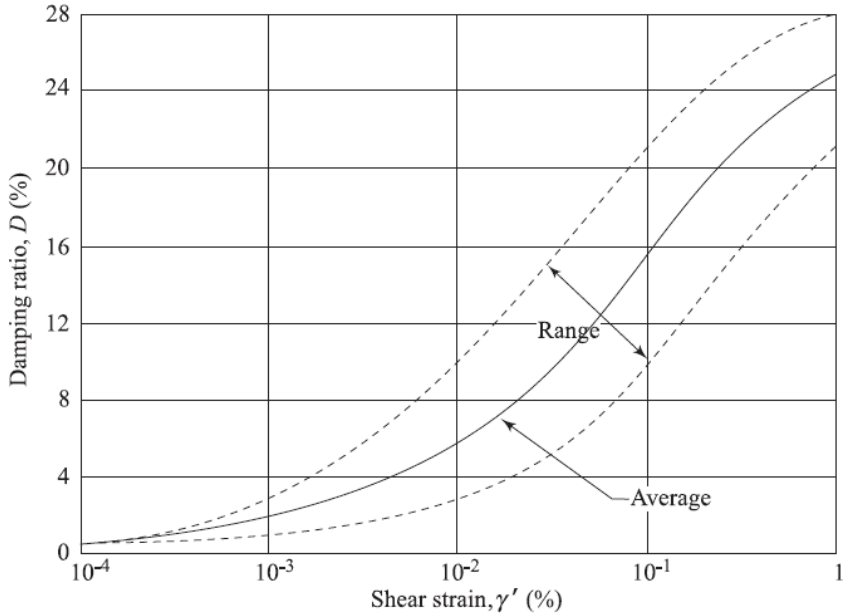
۳- زاویه اصطکاک داخلی خاک

۴- مقدار سیکل‌های بار دینامیکی

۵- فرکانس بار دینامیک

۶- سطح یا میزان کرنش برشی

۷- فشار محصورکننده



مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

بر مبنای مطالعات Sherif, Ishibashi, Gaddah (1977) بر روی تست پیچشی ساده سیکلی نشان دادند که میرایی از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$D = \frac{50 - 0.087\,\bar{\sigma}_0}{38}\,(73.3F - 53.3)(\gamma')^{0.3}\,(1.01 - 0.046\,\log N)$$

$$F = \frac{1}{\psi^2 C_g} \qquad \psi = \frac{S'}{S}$$

$$C_g = \frac{D_{30}^2}{(D_{10})(D_{60})}$$

N: تعداد سیکل

F: فاکتور کروی

D_i: قطری که i درصد دانه ها از آن کوچکترند

S: سطح جانبی دانه

S': سطح جانبی کره هم حجم دانه

C_g: ضریب خمیدگی

مثال:

سطح آب زیر زمینی ۳ متر پایین تر از سطح زمین است. وزن مخصوص خاک بالای سطح آب ۱۵.۵ و زیر آن ۱۸.۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب تخلخل خاک به ترتیب برابر با ۳۶ درجه و ۰.۶ باشد، مطلوبست تعیین مدول برشی و ضریب میرایی خاک در عمق ۷.۵ متری از سطح زمین و در سطح کرنش ۱۲٪ ؟

حل:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{\bar{\sigma}_v}{3}(3 - 2\sin\phi)$$

$$\bar{\sigma}_v = 3(15.5) + 4.5(18.5 - 9.81) = 85.61 \text{ kPa}$$

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{85.61}{3}[3 - (2)(\sin 36)] = 52.06 \text{ kPa}$$

$$\phi = 36^\circ \Rightarrow R_D \approx 45\%,\ K_{2(\max)} \approx 43$$

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

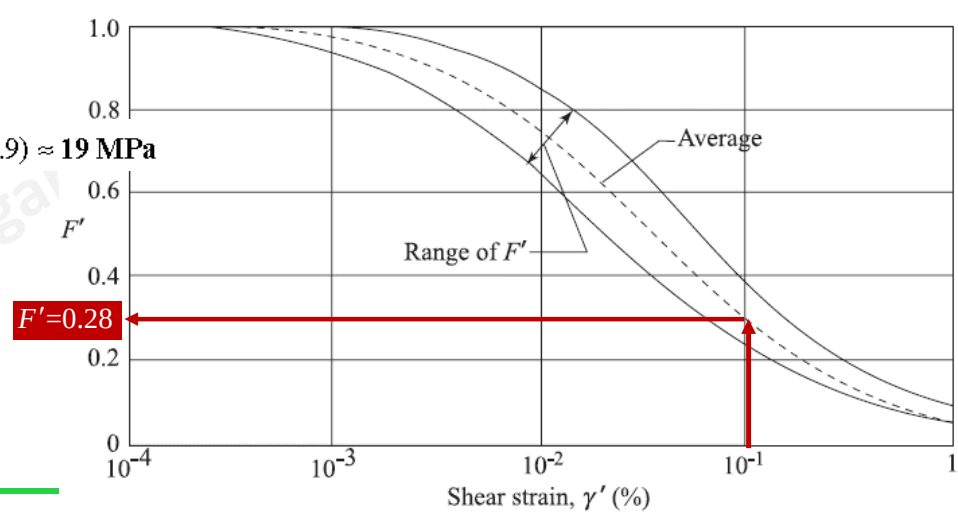
$$G_{\max} = 218.82 K_{2(\max)} \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} = 218.82(43)\sqrt{52.06} = 67890 \text{ kPa} = 67.9 \text{ MPa}$$

مثال:

سطح آب زیر زمینی ۳ متر پایین تر از سطح زمین است. وزن مخصوص خاک بالای سطح آب ۱۵.۵ و زیر آن ۱۸.۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب تخلخل خاک به ترتیب برابر با ۳۶ درجه و ۰.۶ باشد، مطلوبست تعیین مدول برشی و ضریب میرایی خاک در عمق ۷.۵ متری از سطح زمین و در سطح کرنش ۱۲٪ ؟

$$G_{\max} = 67.9 \text{ MPa}$$

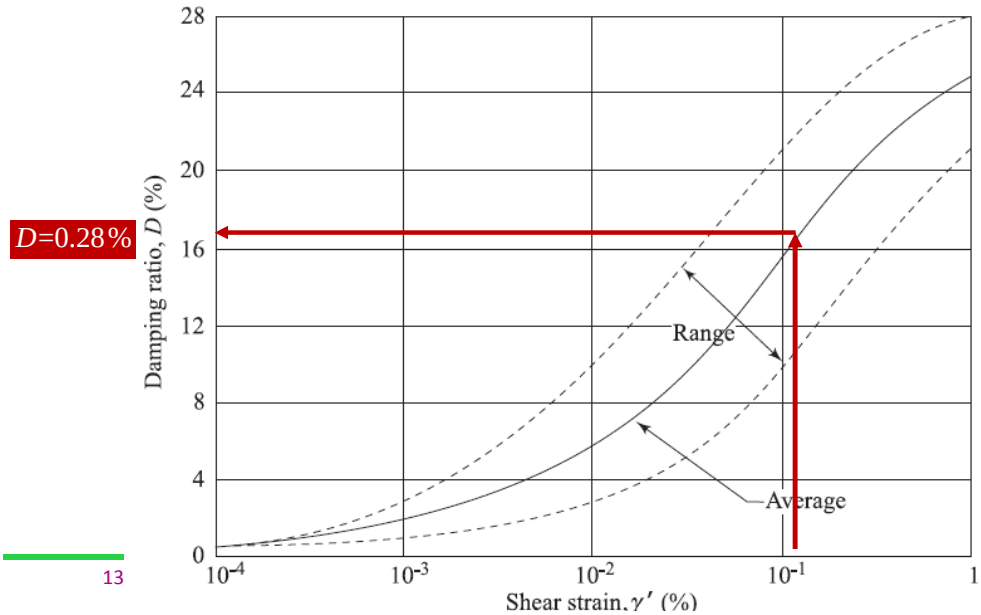
$$G = F' G_{\max} = (0.28)(67.9) \approx \mathbf{19\ MPa}$$



مثال:

سطح آب زیر زمینی ۳ متر پایین تر از سطح زمین است. وزن مخصوص خاک بالای سطح آب ۱۵.۵ و زیر آن ۱۸.۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است. اگر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب تخلخل خاک به ترتیب برابر با ۳۶ درجه و ۰.۶ باشد، مطلوبست تعیین مدول برشی و ضریب میرایی خاک در عمق ۷.۵ متری از سطح

حل:



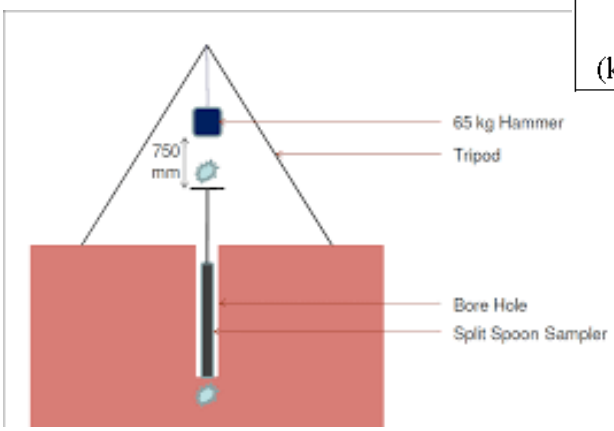
ارتباط بین ماکزیمم مدول برشی و عدد نفوذ استاندارد در ماسه

بر مبنای مطالعات Seed et al., 1986 نشان دادند که بیشینه مدول برشی از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$G_{max} \approx 35 \times 161.5 N_{60}^{0.34} (\bar{\sigma}_0)^{0.4}$$

$\uparrow$ (kPa) $\qquad$ $\uparrow$ (kPa)

N_{60}: عدد نفوذ استاندارد (SPT)



۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

نتایج مطالعات سید و همکارانش در سال ۱۹۸۶ یر روی شن خوب دانه بندی شده بصورت زیر است:

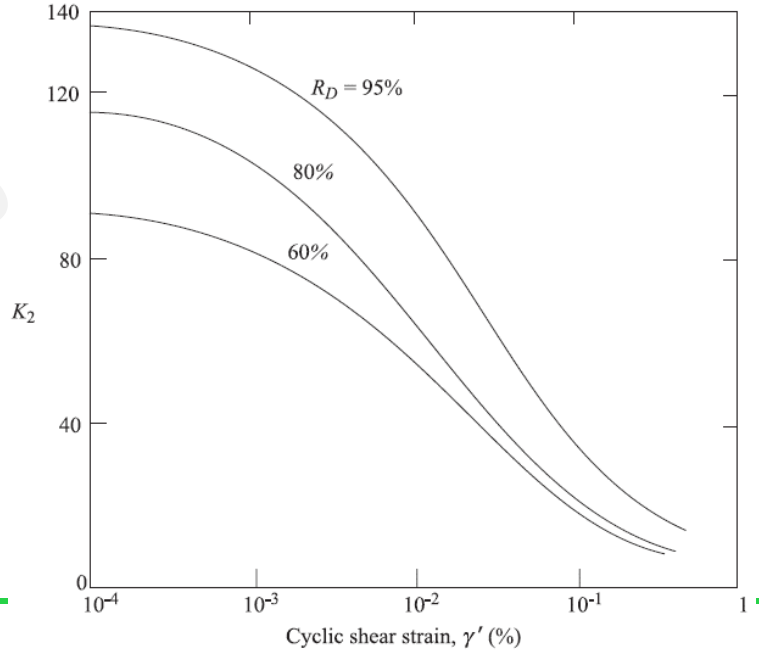
$$G_{\max}(\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}(\text{kPa})$$

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

$$G(\text{kPa}) = 218.82 K_{2(\max)} F' \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}(\text{kPa})$$

$80 \le K_{2(\max)} \le 180$ برای شن

$30 \le K_{2(\max)} \le 75$ برای ماسه



Ali Asgari, PhD

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

نتایج مطالعات سید و همکارانش در سال ۱۹۸۶ یر روی شن خوب دانه بندی شده بصورت زیر است:

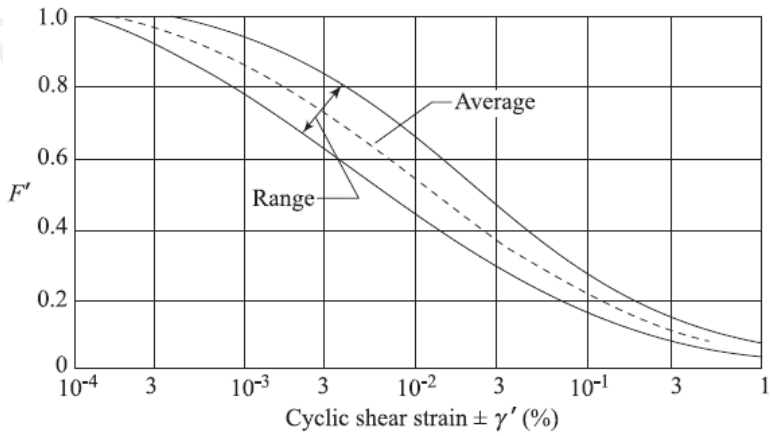
$$G_{\max}\left(\text{kPa}\right)=218.82K_{2(\max)}\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}\left(\text{kPa}\right)$$

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

$$G\left(\text{kPa}\right)=218.82K_{2(\max)}F'\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}\left(\text{kPa}\right)$$

$80\le K_{2(\max)}\le 180$ برای شن

$30\le K_{2(\max)}\le 75$ برای ماسه



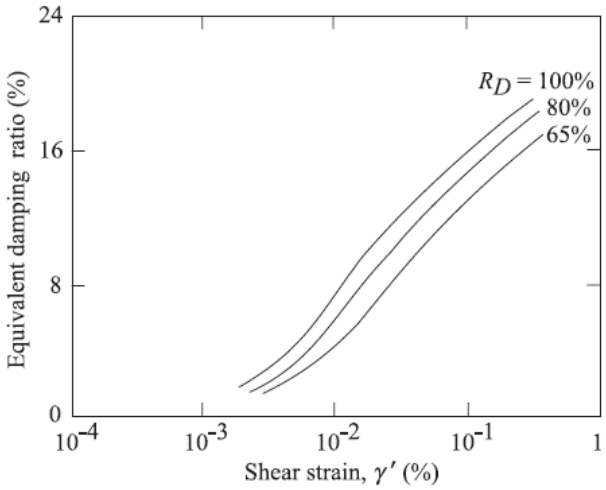
مدول برشی و ضریب میرایی در شن

نتایج مطالعات سید و همکارانش در سال ۱۹۸۶ یر روی شن خوب دانه بندی شده بصورت زیر است:
ضریب میرایی شن از حلقه هیسترزیس در ۵ سیکل تعیین شده است.

۱- در یک کرنش مشخص، با افزایش تراکم، ضریب میرایی افزایش می یابد.

۲- ضریب میرایی چندان تحت تاثیر تعداد سیکل قرار نمی گیرد. در ۶۰ سیکل به ¾ اندازه ی اولیه خود در یک سطح ثابتی از کرنش، کاهش می یابد.

۳- منحنی ضریب میرایی بر حسب کرنش شن شبیه ماسه است.



۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

بر اساس آزمایشات ستون تشدید افراد مختلفی گزارشات و داده‌های به دست آمده را ارائه کرده‌اند مثلا لارنس در آزمایشات خود با نمونه‌های ستون خاک برای به دست آوردن v_s زمان انتشار امواج را برای فرکانس‌های بالا اندازه گرفت و نشان داده شد که برای خاک‌های رسی تحکیم عادی یافته با حساسیت عادی و کم می‌توان از همان معادلات ماسه تیزگوشه استفاده کرد:

در سیستم انگلیسی:

$$G_{\max} = \frac{1230(2.97-e)^2 \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

در سیستم SI:

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

برخلاف خاکهای رسی عادی تحکیم یافته مقدار G برای خاکهای رسی فوق تحکیم تابعی از OCR می باشد.

در سیستم انگلیسی:

$$G_{\max} = \frac{1230(2.97-e)^2 (\mathrm{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

در سیستم SI:

$$G_{\max} = \frac{3230(2.97-e)^2 (\mathrm{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برخلاف خاکهای رسی عادی تحکیم یافته مقدار G برای خاکهای رسی فوق تحکیم تابعی از OCR می باشد.

در سیستم انگلیسی:

$$G_{max} = \frac{1230(2.97-e)^2 (\mathrm{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

در سیستم SI:

$$G_{max} = \frac{3230(2.97-e)^2 (\mathrm{OCR})^K \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$$

توان K در عبارات فوق بستگی به اندکس خمیری خاک دارد که در جدول رویرو آورده شده است.

Plasticity index, PI *(%)*	*K*
0	0
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
≥100	0.5

تعریف OCR:

$$\mathrm{OCR} = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}_0}$$

$\bar{\sigma}_c$ ← تنش هیدرو استاتیکی که تحت آن خاک تحکیم یافته

$\bar{\sigma}_0$ ← تنش هیدرو استاتیکی موجود

تعیین مقدار تنش متوسط اکتاهیدرال در رس $\bar{\sigma}_0 = ?$

برای نمونه خاکی که تحت تأثیر شرایط تنش کلی مانند $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ قرار می‌گیرد، میانگین فشار مؤثر جانبی برابر است با:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} I_1 = \sigma_{oct}$$

I_1 نا متغیر تنش اول، σ_{oct} ← تنش اکتاهیدرال

$$\bar{\sigma}_1 = \text{effective vertical stress} = \bar{\sigma}_v$$

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = K_0 \bar{\sigma}_v$$

$$\boxed{\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_v + 2K_0\bar{\sigma}_v)}$$

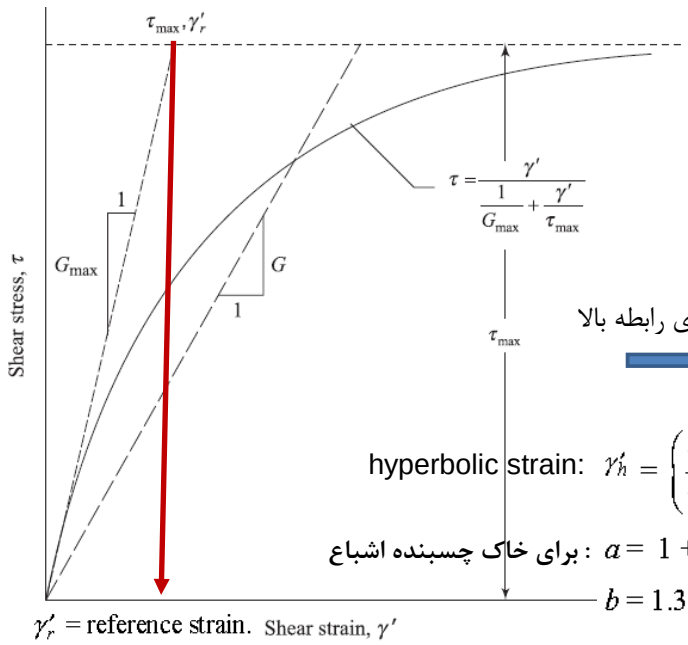
$$K_0 = 0.4 + 0.007(\mathrm{PI}), \qquad 0 \le \mathrm{PI} \le 40\%$$

$$K_0 = 0.68 + 0.001(\mathrm{PI} - 40), \qquad 40\% \le \mathrm{PI} \le 80\%$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برای یافتن مدول برشی در کرنش های بزرگ Hardin and Drnevich 1972 روش زیر را پیشنهاد کردند:



$$G = \frac{\tau}{\gamma'}$$

$$G_{max} = \frac{\tau_{max}}{\gamma'_r}$$

$$G = \frac{G_{max}}{1 + \gamma'/\gamma'_r}$$

اصلاح شده ی رابطه بالا

$$\boxed{G = \frac{G_{max}}{1 + \gamma'_h}}$$

hyperbolic strain: $\gamma'_h = \left(\dfrac{\gamma'}{\gamma'_r}\right)\left[1 + ae^{-b(\gamma'/\gamma'_r)}\right]$

برای خاک چسبنده اشباع : $a = 1 + 0.25 \log N$ ← تعداد سیکل

$b = 1.3$

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برای یافتن مدول برشی در کرنش های بزرگ Hardin and Drnevich 1972 روش زیر را پیشنهاد کردند:

$$\boxed{G = \frac{G_{max}}{1 + \gamma'_h}} \qquad G_{max} = \frac{\tau_{max}}{\gamma'_r}$$

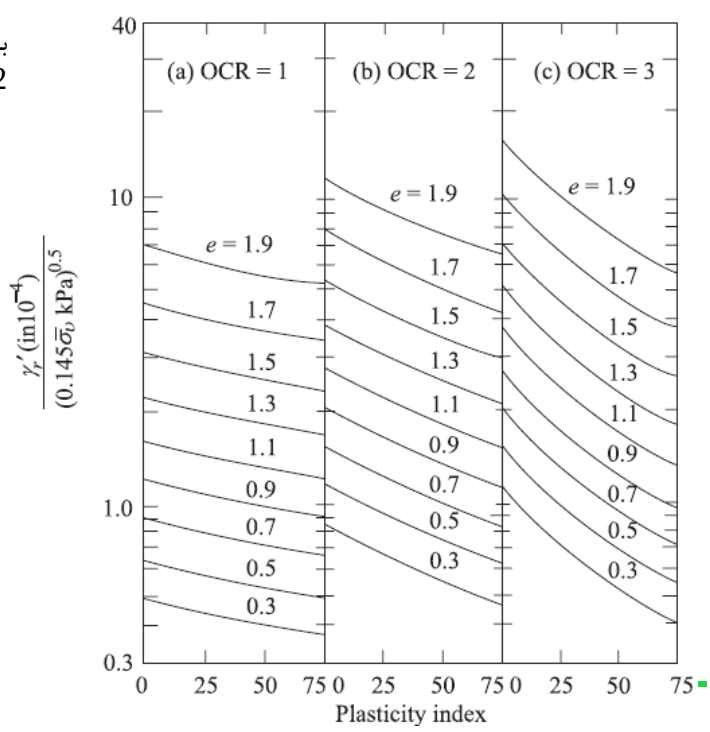
hyperbolic strain:

$$\gamma'_h = \left(\frac{\gamma'}{\gamma'_r}\right)\left[1 + ae^{-b(\gamma'/\gamma'_r)}\right]$$

برای خاک چسبنده اشباع :

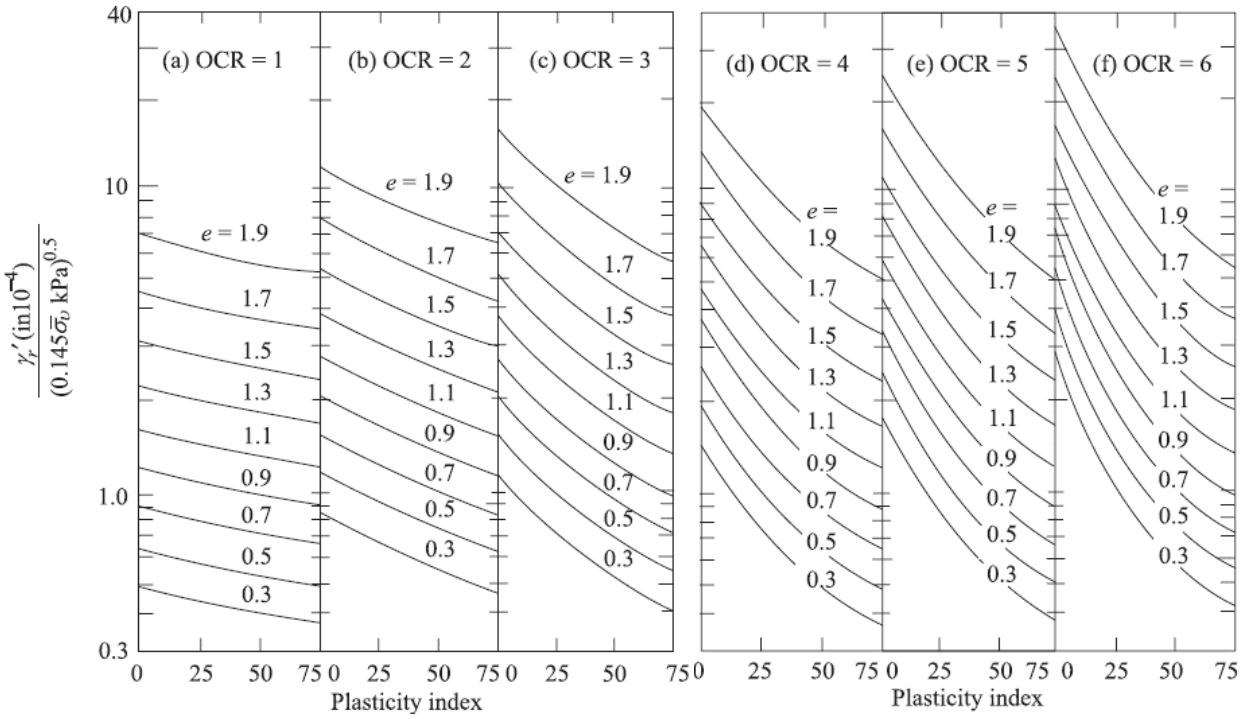
$a = 1 + 0.25 \log N$ ← تعداد سیکل

$b = 1.3$



γ'_r = reference strain.

مدول برشی و ضریب میرایی در رس



مدول برشی و ضریب میرایی در رس

برای یافتن ضریب میرایی Hardin and Drnevich 1972 روش زیر را پیشنهاد کردند:

برای خاک چسبنده اشباع :

$$D = D_{max}\left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right)$$

$$D_{max}(\%) = 31 - (0.3 + 0.003f)\bar{\sigma}_0^{1/2} + 1.5f^{1/2} - 1.5(\log N)$$

فرکانس (Hz) — تعداد سیکل

اصلاح شده ی رابطه بالا

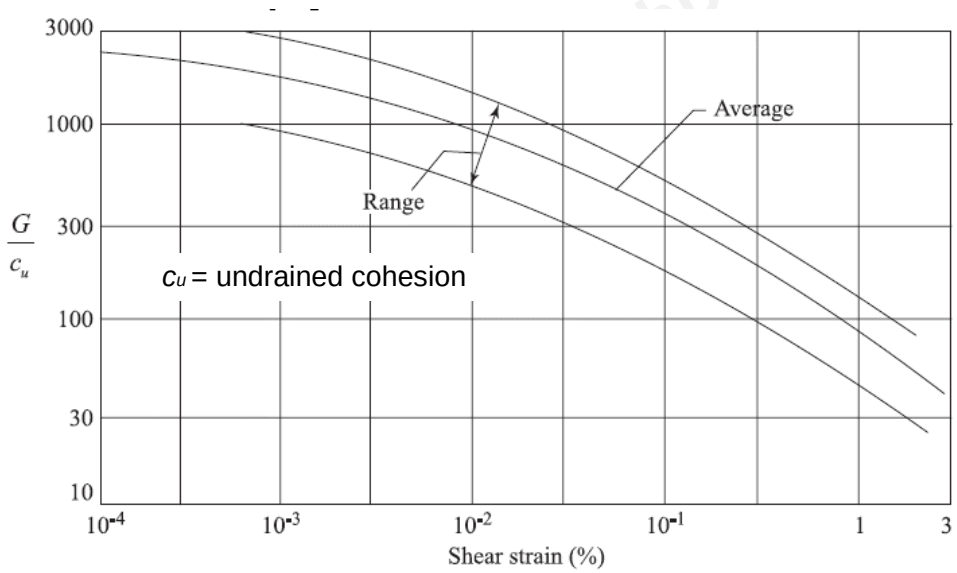
$$\frac{D}{D_{max}} = \frac{\gamma_h''}{1+\gamma_h''} \qquad \gamma_h'' = \left(\frac{\gamma'}{\gamma_r'}\right)\left[1 + a_1 e^{-b_1(\gamma'/\gamma_r')}\right] \qquad a_1 = 1 + 0.2f^{1/2}$$

$$b_1 = 0.2f(e^{-0.01\bar{\sigma}_0}) + 0.023\,\bar{\sigma}_0 + 0.3\log N$$

ضریب میرایی به پارامترهایی نظیر نشانه خمیری، تنش جانبی، ضریب پوکی، سن زمین شناسی، میزان سمنت بودن و ... وابسته است که برای جزئیات می توانید به منابع Vucetic and Dobry (1991) و Dobry and Vucetic (1987) رجوع کنید.

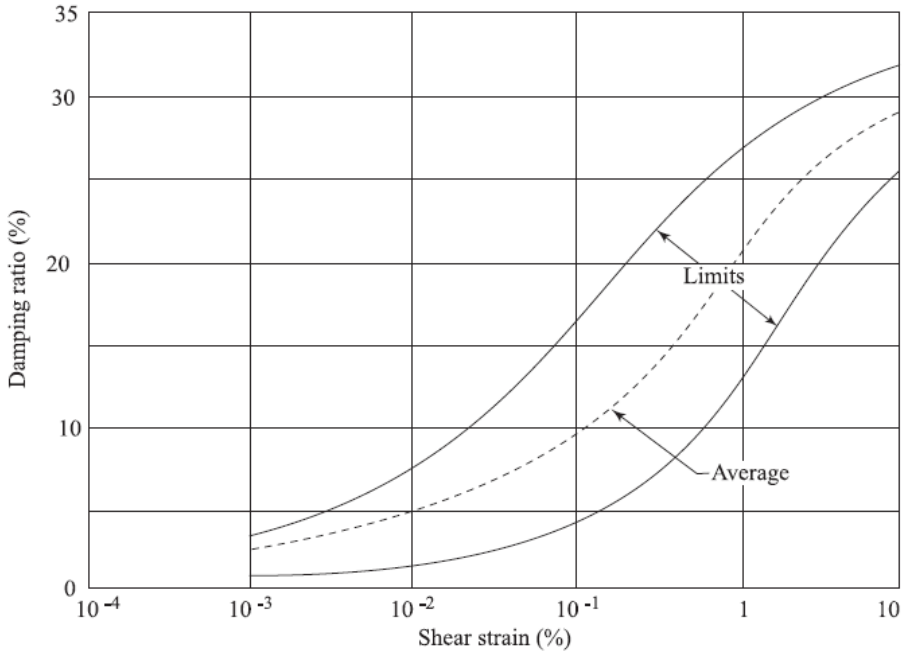
تعیین مدول برشی و ضریب میرایی در رس به روش سید و ادریس(1970)

سید و ادریس با توجه به نتایج آزمایشات مختلف در سطوح مختلف کرنش ها منحنی زیر را برای خاکهای چسبنده اشباع پیشنهاد کردند:



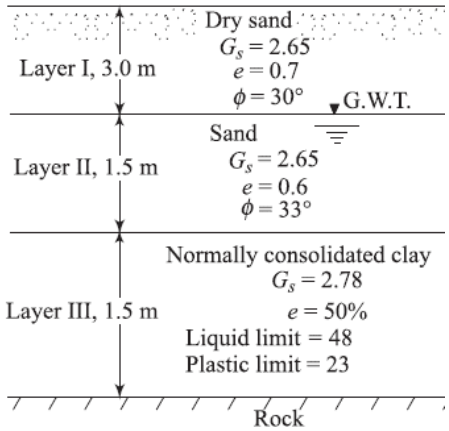
تعیین مدول برشی و ضریب میرایی در رس به روش سید و ادریس(1970)

بطور مشابه برای یافتن ضریب میرایی منحنی زیر را پیشنهاد کردند:



Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مثال: پروفیل خاکی مطابق شکل داده شده است تغییرات ضریب برشی را درعمق رسم نمایید



حل:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}\left(\bar{\sigma}_v + 2K_0\bar{\sigma}_v\right)$$

$$\text{Layer (I)} \quad K_0 = 1 - \sin\phi = 1 - \sin 30 = 0.5,$$
$$\text{Layer (II)} \quad K_0 = 1 - \sin 33 = 0.455$$

$$\text{Layer (III)} \quad \text{PI} = \text{LL} - \text{PL} = 48 - 23 = 25$$
$$K_0 = 0.4 + 0.007(\text{PI}), \quad \text{PI} \le 40\%$$
$$K_0 = 0.4 + 0.007(25) = 0.575$$

محاسبه وزن مخصوص موثر:

$$z = 0 - 3\,\text{m} \;\Rightarrow\; \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{dry}} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{(2.65)(9.81)}{1+0.7} = 15.29\,\text{kN/m}^3$$
$$z = 3 - 4.5\,\text{m} \;\Rightarrow\; \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \frac{(G_s - 1)}{1+e}\gamma_w = \frac{(2.65-1)(9.81)}{1+0.6} = 10.12\,\text{kN/m}^3$$
$$z = 4.5 - 6.0\,\text{m} \;\Rightarrow\; \gamma_{\text{eff}} = \frac{(G_s - 1)}{1+e}\gamma_w = \frac{(2.78-1)(9.81)}{1+1.22} = 7.87\,\text{kN/m}^3$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مثال:

$$\text{Layer (I)} \quad K_0 = 0.50, \quad \gamma_{\text{eff}} = 15.29\,\text{kN/m}^3$$
$$\text{Layer (II)} \quad 0.455, \quad 10.12\,\text{kN/m}^3$$
$$\text{Layer (III)} \quad 0.575, \quad 7.87\,\text{kN/m}^3$$

حل:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}\left(\bar{\sigma}_v + 2K_0\bar{\sigma}_v\right)$$

برای رس : $G_{\max} = \dfrac{3230(2.97-e)^2\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}}{1+e}$

برای ماسه : $G_{\max}(\text{kPa}) = \dfrac{6908(2.17-e)^2\bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}}(\text{kPa})}{1+e}$

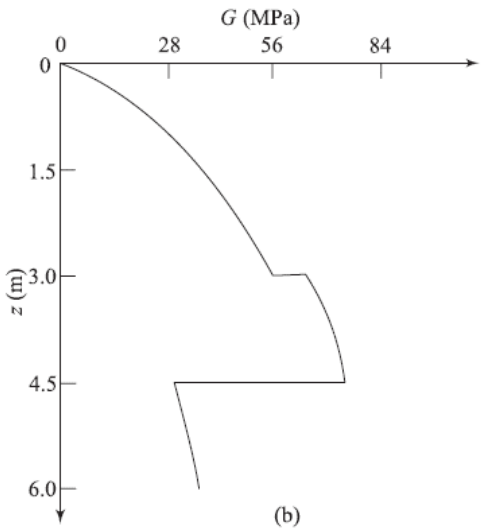
Depth z (m)	$\bar{\sigma}_1$ (kPa)	$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3 = K_0\bar{\sigma}_1$ (kPa)	$\bar{\sigma}_0$ (kPa)	e	$G = G_{max}$ (MPa)
0	0	0	0	0.7	0
1.5	15.29 x 1.5 = 22.94	11.47	15.29	0.7	34.34[a]
3.0 (in layer I)	15.29 x 3 = 45.87	22.94	30.58	0.7	48.56[a]
3.0 (in layer II)	45.87	20.87	29.20	0.6	57.51[a]
4.5 (in layer II)	45.87 + 10.12 x 1.5 = 61.05	27.78	38.87	0.6	66.35[a]
4.5 (in layer III)	61.05	35.10	43.75	1.22	29.47[b]
6.0	61.05 + 7.87 x 1.5 = 72.86	41.89	52.21	1.22	32.20[b]

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مثال:

حل:

Depth z (m)	$G = G_{max}$ (MPa)
0	0
1.5	34.34[a]
3.0 (in layer I)	48.56[a]
3.0 (in layer II)	57.51[a]
4.5 (in layer II)	66.35[a]
4.5 (in layer II)	29.47[b]
6.0	32.20[b]



Ali Asgari, PhD in Geotechnics

۳- تخمین پارامترهای دینامیکی مدول برشی و میرایی با استفاده از روابط تجربی

عوامل موثر بر مدول برشی دینامیکی و ضریب میرایی

قوانین ساختاری بین تنش-کرنش برشی

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه

مدول برشی و ضریب میرایی در شن

مدول برشی و ضریب میرایی در رس

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

کربنات کلسیم در ماسه باعث سیمانته شدن آن می شود. با ترکیب سیمان پرتلند و ماسه می توان این نوع ماسه را بوجود آورد. آزمایشات بر روی این نوع ماسه سیمانته سبک نشان می دهد که مدول برشی از رابطه تجربی زیر پیروی می کند (Saxena, Avramidis, and Reddy, 1988):

ماکزیمم مدول برشی ماسه سیمانته شده

$$G_{\max(CS)} = G_{\max(S)} + \Delta G_{\max(C)}$$

ماکزیمم مدول برشی ناشی از اثر سیمانته

ماکزیمم مدول برشی ماسه تنها

در صد سیمانته

$$\boxed{G_{\max(S)} = \frac{428.2}{0.3+0.7e^2}(P_a)^{0.426}(\bar{\sigma}_0)^{0.574}}$$

(kPa) (kPa) (kPa)

$$\frac{\Delta G_{\max(C)}}{P_a} = \frac{172}{(e-0.5168)}(CC)^{0.88}\left(\frac{\bar{\sigma}_0}{P_a}\right)^{0.515e-0.13CC+0.285}$$

(for $CC < 2\%$)

$$\frac{\Delta G_{\max(C)}}{P_a} = \frac{773}{e}(CC)^{1.2}\left(\frac{\bar{\sigma}_0}{P_a}\right)^{0.698e-0.04CC-0.2}$$

فشار اتمسفر

(for $2\% \le CC \le 8\%$)

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

کربنات کلسیم در ماسه باعث سیمانته شدن آن می شود. با ترکیب سیمان پرتلند و ماسه می توان این نوع ماسه را بوجود آورد. آزمایشات بر روی این نوع ماسه سیمانته سبک نشان می دهد که مدول برشی از رابطه تجربی زیر پیروی می کند (Saxena, Avramidis, and Reddy, 1988):

ضریب میرایی ماسه سیمانته شده

($\gamma' \le 10^{-3}\%$)

$$D_{CS} = D_S + \Delta D_C$$

ضریب میرایی ناشی از اثر سیمانته

ضریب میرایی ماسه تنها

$$\boxed{D_S = 0.94\left(\frac{\bar{\sigma}_0}{P_a}\right)^{-0.38}}$$

$$\boxed{\Delta D_C = 0.49(CC)^{1.07}\left(\frac{\bar{\sigma}_0}{P_a}\right)^{-0.36}}$$

Ali Asgari, PhD in Geotechnics

مثالی از مدول برشی و ضریب میرایی در ماسه سیمانته شده

اگرنمونه ای از خاک ماسه ای سیمانته شده سبک تحت تنش موثر محصور شده برابر با 98 kPa قرار بگیرد، مطلوبست تعیین $G_{max(CS)}$ در صورتی که $e = 0.7$ و $CC = 3\%$ است.

$$G_{max(S)} = \frac{428.2}{0.3+0.7e^2}(P_a)^{0.426}(\bar{\sigma}_0)^{0.574} = \frac{428.2}{0.3+(0.7)(0.7)^2}(100)^{0.426}(98)^{0.574}$$

$$= 65{,}805 \text{ kPa} = 0.066 \text{ GPa}$$

$$\frac{\Delta G_{max(C)}}{P_a} = \frac{773}{e}(CC)^{1.2}\left(\frac{\bar{\sigma}_0}{P_a}\right)^{0.698e-0.04CC-0.2}$$

$$\frac{\Delta G_{max(C)}}{100} = \frac{773}{0.7}(3)^{1.2}\left(\frac{98}{100}\right)^{[0.698(0.7)-0.04(3)-0.2]}$$

$$= (1104.3)(3.737)(0.994)$$

$$= 416{,}067 \text{ kPa} = 0.416 \text{ GPa}$$

تمرین

$D_{CS} = ?$

$$G_{max}(CS) = G_{max(S)} + \Delta G_{max(C)}$$

$$= 0.066 + 0.416 = 0.482 \text{ GPa} = \mathbf{482\ MPa}$$

Ali ... PhD in Geotechnics