

بخش پنجم
روانگرائی خاکها
Liquefaction of soils

دکتر محمد رضا امام

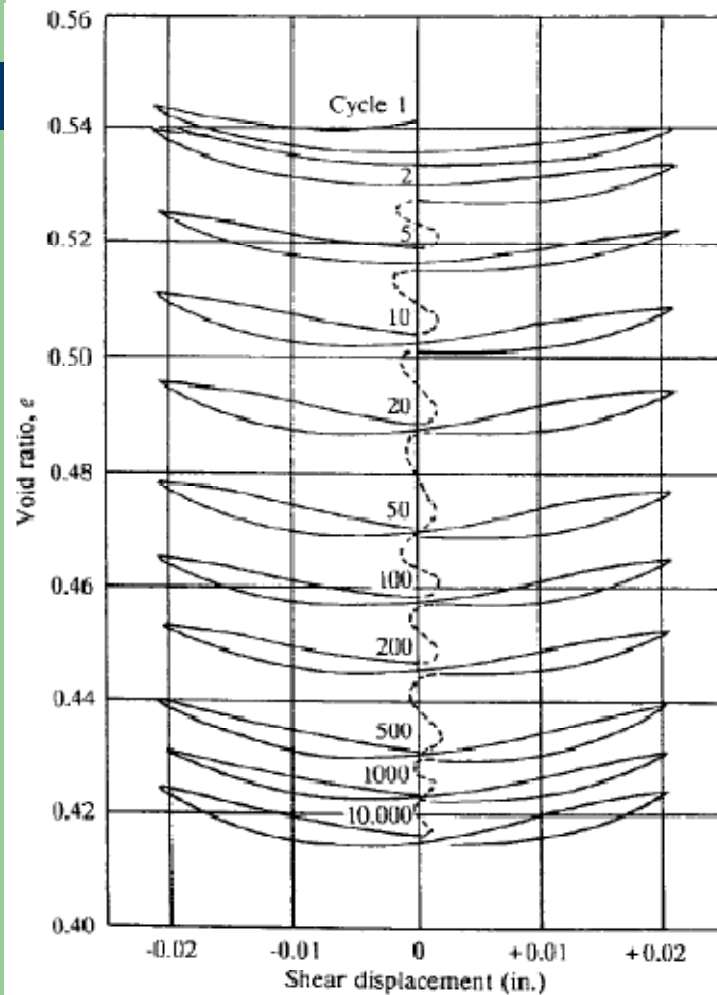


Figure 10.1 Void ratio versus cyclic shear displacement for densification of a sand with successive cycles of shear (after Youd, 1972)

روانگرایی خاکها (Soil Liquefaction) - آشنائی با پدیده روانگرایی

تحت بارهای سیکلی، ماسه غیرمتراکم تمایل به تراکم دارد. در صورتیکه این ماسه بدلیل اشباع بودن نتواند تغییر حجم دهد، فشار آب بالا رفته و تنش بین ذره ای کاهش می یابد. در شرایط خاصی ممکن است این تنش به صفر نیز برسد.

این امر ممکن است منجر به نشست خاک و از دست دادن باربری آن بشود

روانگرایی خاکها (Soil Liquefaction) - آشنائی با پدیده روانگرایی

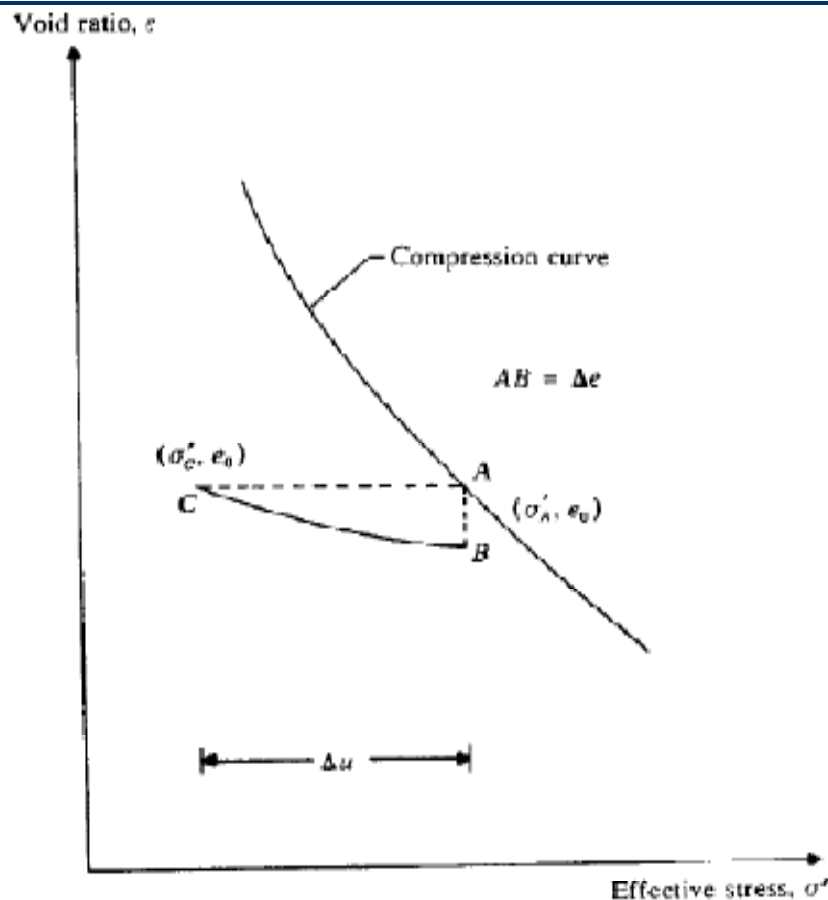


Figure 10.2 Mechanism of pore water pressure generation due to cyclic loading in undrained conditions

۱ میزان افزایش فشار آب در بارگذاری زهکشی نشده بستگی به پتانسیل تغییر حجم خاک در بارگذاری زهکشی شده دارد.

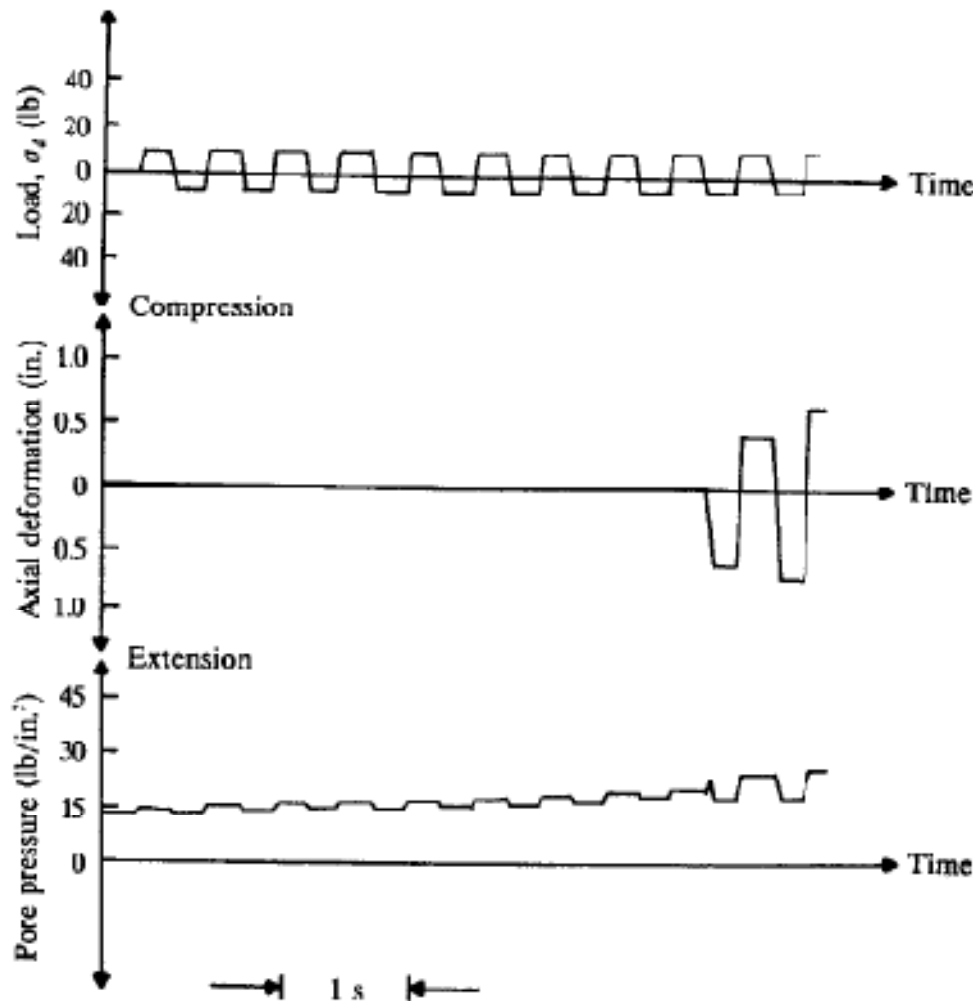
۱ در صورتیکه تحت بارگذاری زهکشی شده خاک از A به B برود، برای آنکه در شرایط زهکشی نشده حجم خاک در نقطه A ثابت بماند، خاک باید روی منحنی باربرداری (منحنی BC) حرکت کند تا زمانیکه به نقطه مربوط به تخلخل اولیه (نقطه C) برسد.

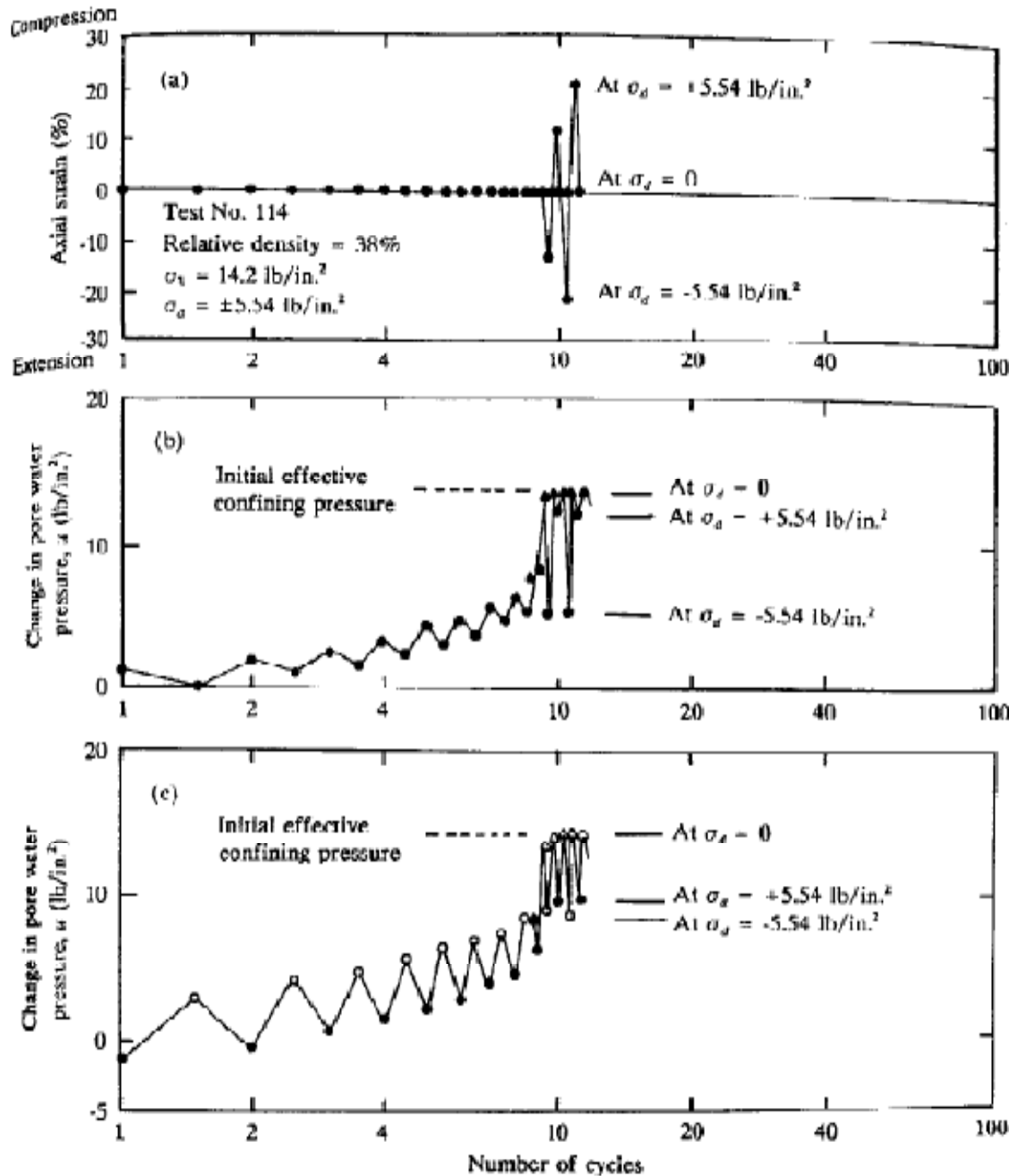
۱ در اینصورت فشار آب بمقدار Δu افزایش، و تنش موثر به همان اندازه کاهش می یابد.

روانگرایی خاکها (Soil Liquefaction) - آشنائی با پدیده روانگرایی

رفتار ماسه غیر متراکم

- نتایج یک آزمایش سه محوری سیکلی بر روی ماسه غیر متراکم در شکل نشان داده شده است
- تنش انحرافی با فرکانس دو سیکل در ثانیه بر نمونه اعمال شد
- در چند سیکل اول کرنش محوری چندان افزایش نیافت ولی با افزایش تعداد سیکلها، در یک مرحله، کرنش های برشی و فشار آب شروع به افزایش کردند.





روانگرایی خاکها آشنائی با پدیده روانگرایی

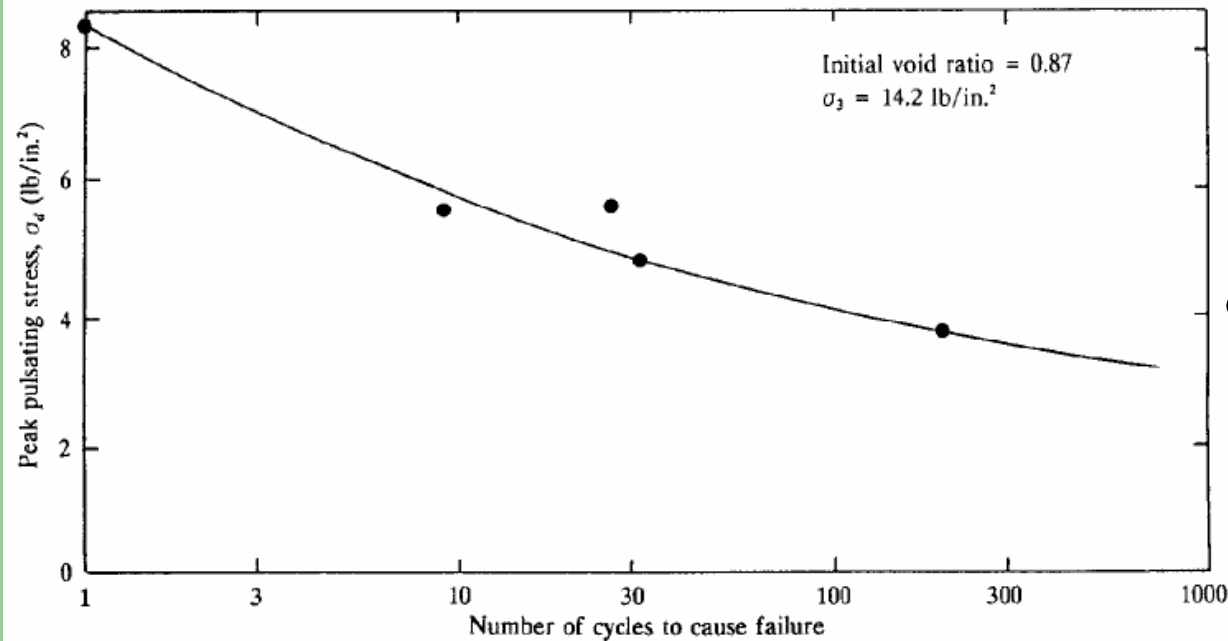
رفتار ماسه غیر متراکم

- در سیکل دهم، کرنش محوری به 20% رسیده و خاک روانگرا شد.
- فشار آب اندازه گیری شده و تصحیح شده در شکل نشان داده شده است

روانگرایی خاکها - آشنائی با پدیده روانگرایی

رفتار ماسه غیر متراکم

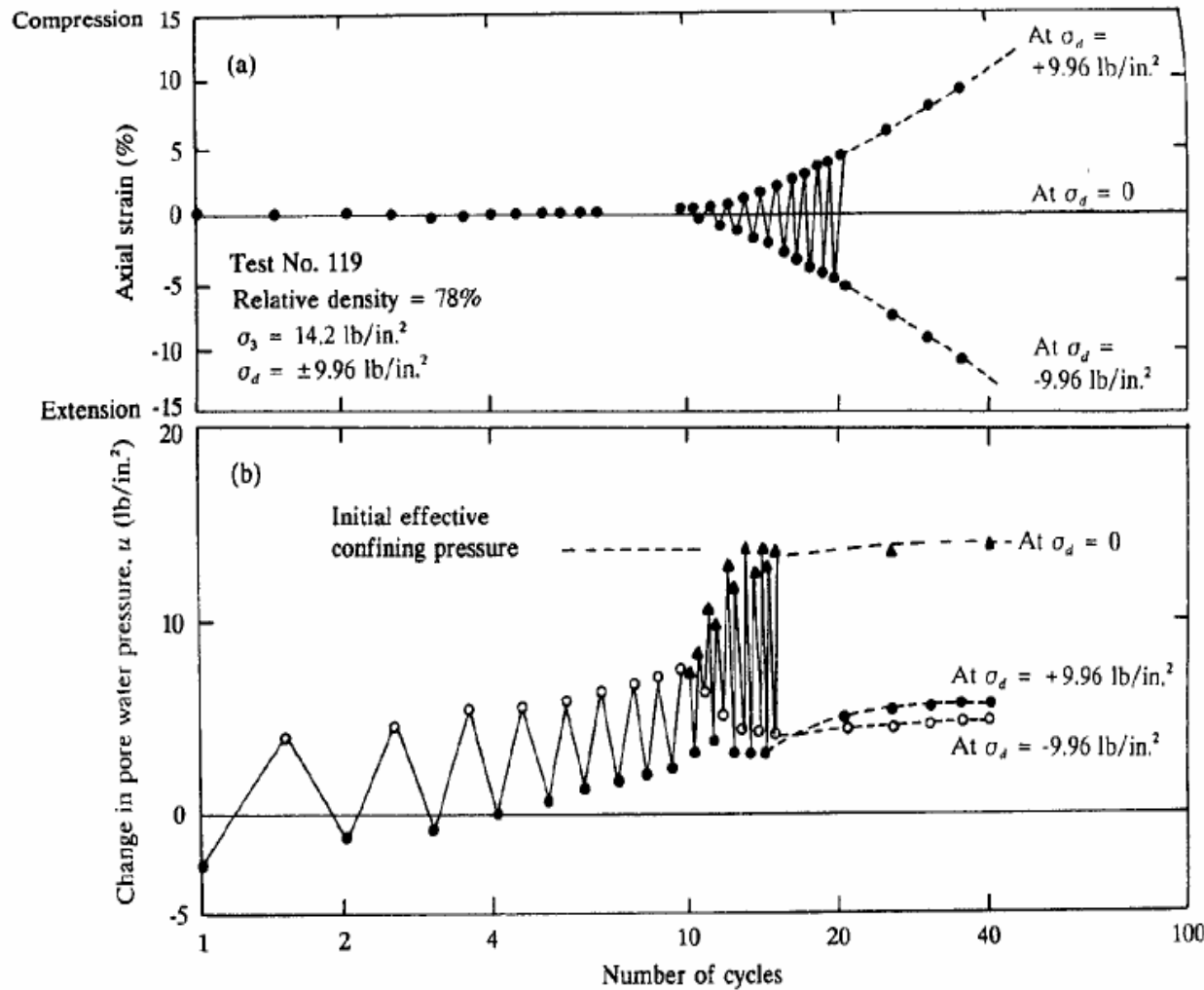
در صورتیکه دامنه تنش انحرافی را کاهش دهیم، به تعداد سیکلهای بیشتری برای شروع روانگرایی نیاز خواهیم داشت.



در شکل روبرو تعداد سیکلهای لازم برای ایجاد روانگرایی را برای مقادیر مختلف دامنه تنش انحرافی نشان داده شده است.

هرچه دامنه تنش بیشتر باشد، خاک در سیکلهای کمتری روانگرا میشود.

روانگرایی خاکها - آشنائی با پدیده روانگرایی



رفتار ماسه متراکم

در شکل روبرو دیده

میشود که پس از سیزده سیکل، فشار آب با تنش محصور کننده برابر شده ولی دامنه کرنش محوری از 10% تجاوز نمیکند.

این امر نشان دهنده مقاومت خاک در برابر تغییر شکل، حتی در تنش موثر صفر است.

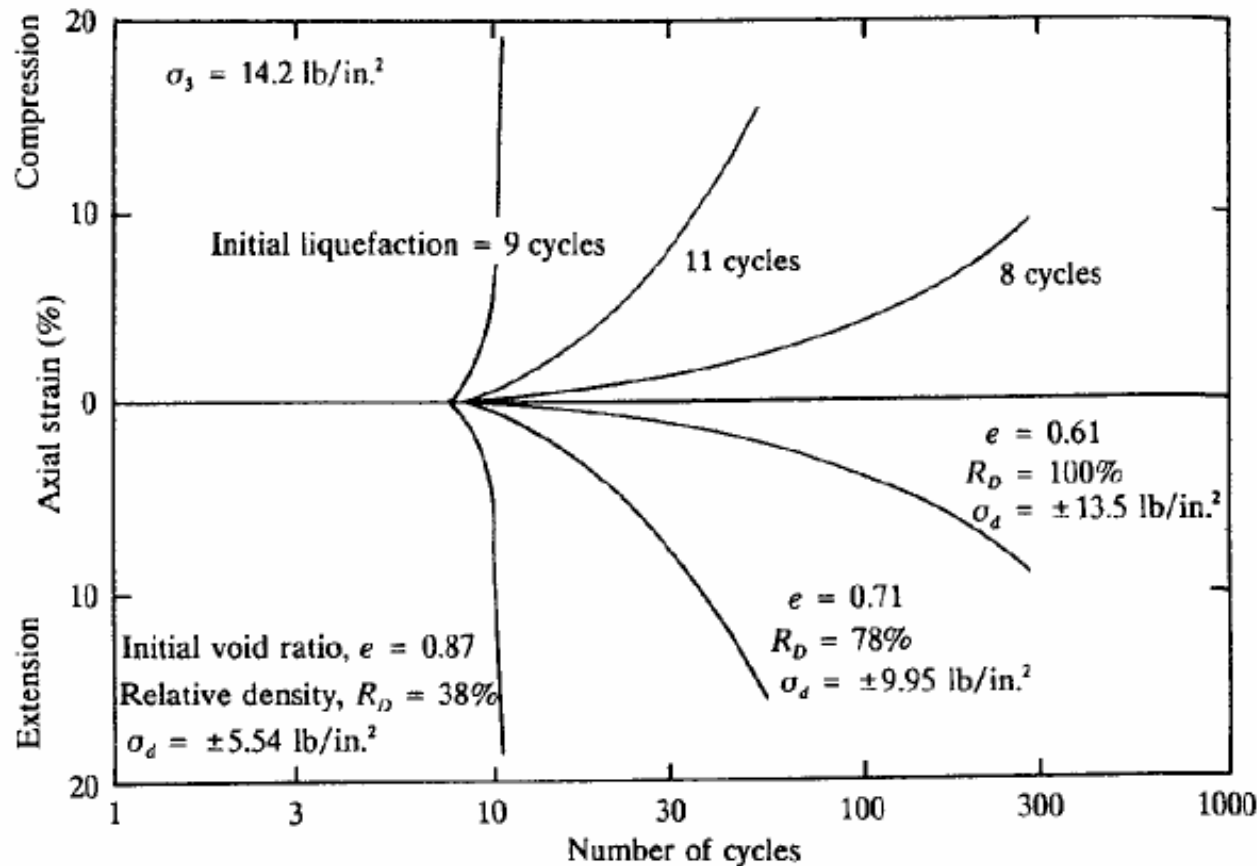
روانگرایی خاکها - آشنائی با پدیده روانگرایی

رفتار ماسه متراکم

این امر میتواند باعث تمایل خاک متراکم به اتساع (dilation) و در نتیجه کاهش فشار آب در اثر افزایش کرنش محوری باشد که باعث پایدارشدن خاک تحت بار سیکلی میشود.

اینگونه رفتار ماسه را (cyclic mobility) می گویند که در ماسه های متراکم بجای روانگرایی اتفاق می افتد.

روانگرایی خاکها - عوامل موثر بر روانگرایی



ا شکل روبرو تغییرات کرنش محوری، تعداد سیکلهای بارگذاری برای رسیدن به روانگرایی، و دانسیته نسبی برای ماسه ساکرامنتو را نشان میدهد. این مقادیر برای تنش محدود کننده مشخصی است و برای مقادیر دیگر این تنش نمودارهای دیگری بدست خواهد آمد.

روانگرایی خاکها - عوامل موثر بر روانگرایی

- با توجه به مطالب گفته شده می توان دید که روانگرایی به پنج عامل مهم زیر بستگی دارد:
- | دانسیته نسبی (Relative density)
 - | فشار محدود کننده (confining pressure)
 - | دامنه تنش انحرافی سیکلی (peak pulsating stress)
 - | تعداد سیکلهای بارگذاری (number of cycles of pulsating stress)
 - | نسبت پیش تحکیمی (overconsolidation ratio)
- در اینجا بطور مختصر اثر هر یک از عوامل فوق را بر پتانسیل روانگرایی با استفاده از نتایج آزمایشات بررسی می کنیم.

روانگرایی خاکها - عوامل موثر بر روانگرایی

اثر دانسیته نسبی

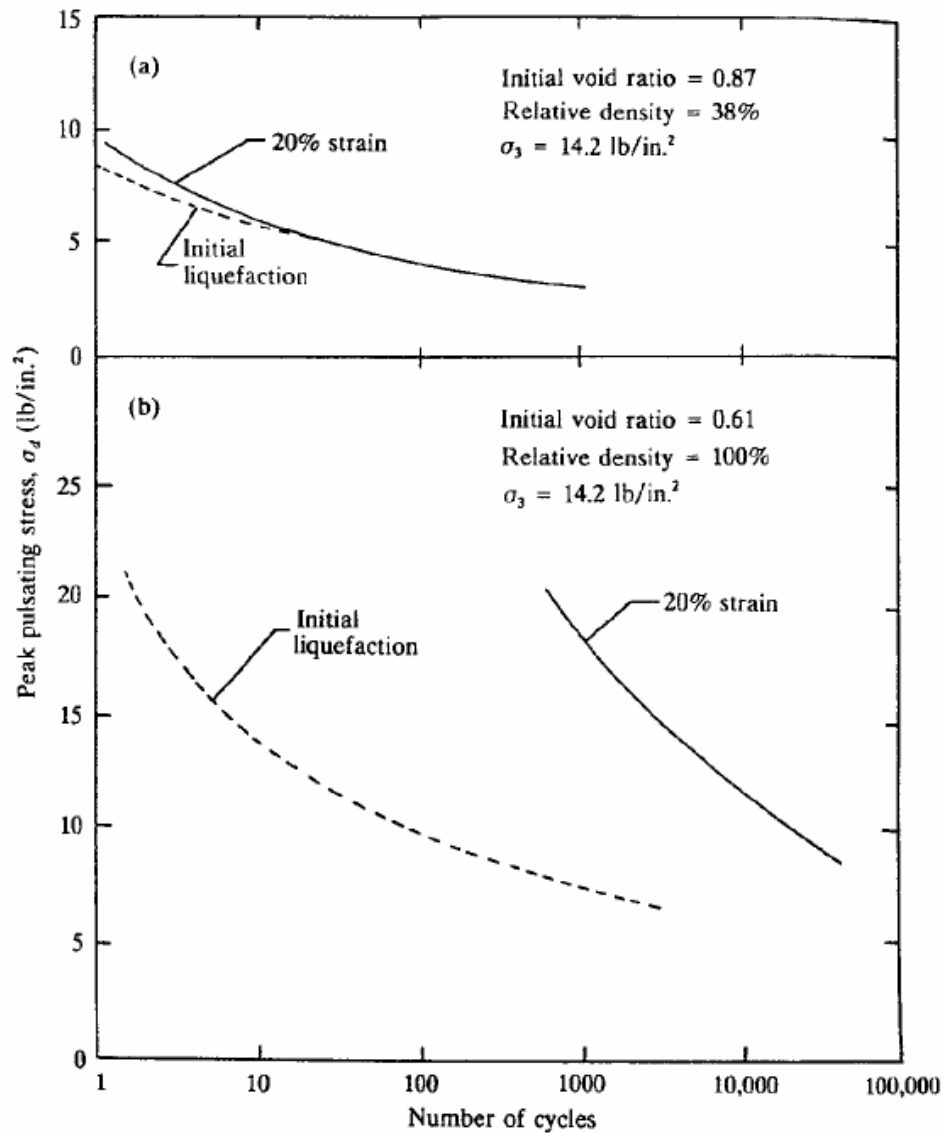


Figure 10.12 Influence of Initial relative density on liquefaction for Sacramento River sand (redrawn after Lee and Seed, 1967)

در شکل روبرو اثر دانسیته نسبی بر روانگرایی و گسیختگی (failure) ماسه ها نشان داده شده است.

در اکثر موارد گسیختگی، رسیدن به کرنشی با دامنه مضاعف (double amplitude) برابر 20% تعریف میشود.

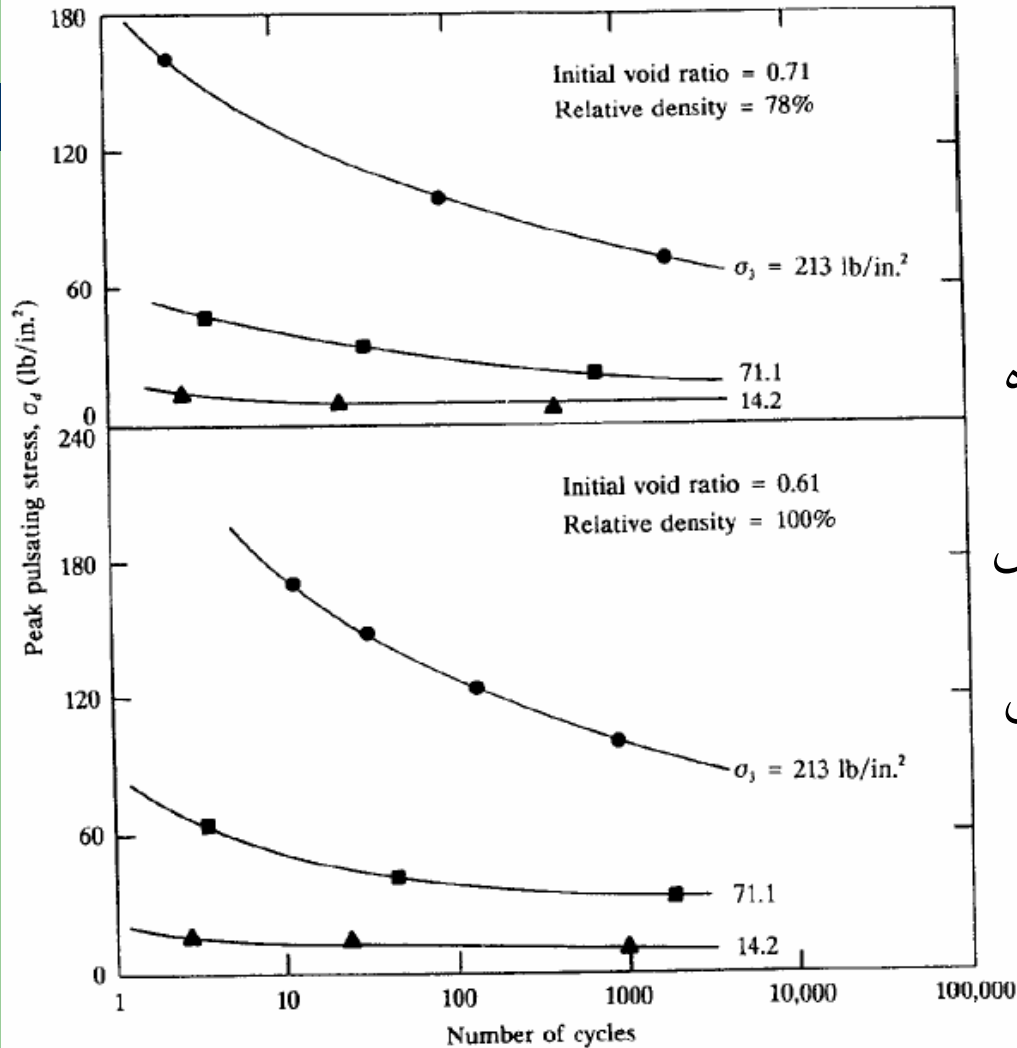
دیده میشود که در ماسه غیرمتراکم، گسیختگی و روانگرایی همزمان اتفاق می افتد ولی در ماسه متراکم، ایندو در تعداد سیکلهای بارگذاری متفاوتی اتفاق می افتند

روانگرایی خاکها - عوامل موثر بر روانگرایی

اثر فشار محدود کننده

اثر فشار محدود کننده بر روانگرایی ماسه ها در شکل روبرو نشان داده شده است.

دیده میشود که برای مقادیر مشخص دانسیته نسبی و دامنه تنش انحرافی سیکلی، تعداد سیکلهای بارگذاری برای رسیدن به روانگرایی با افزایش فشار محدود کننده زیاد میشود.

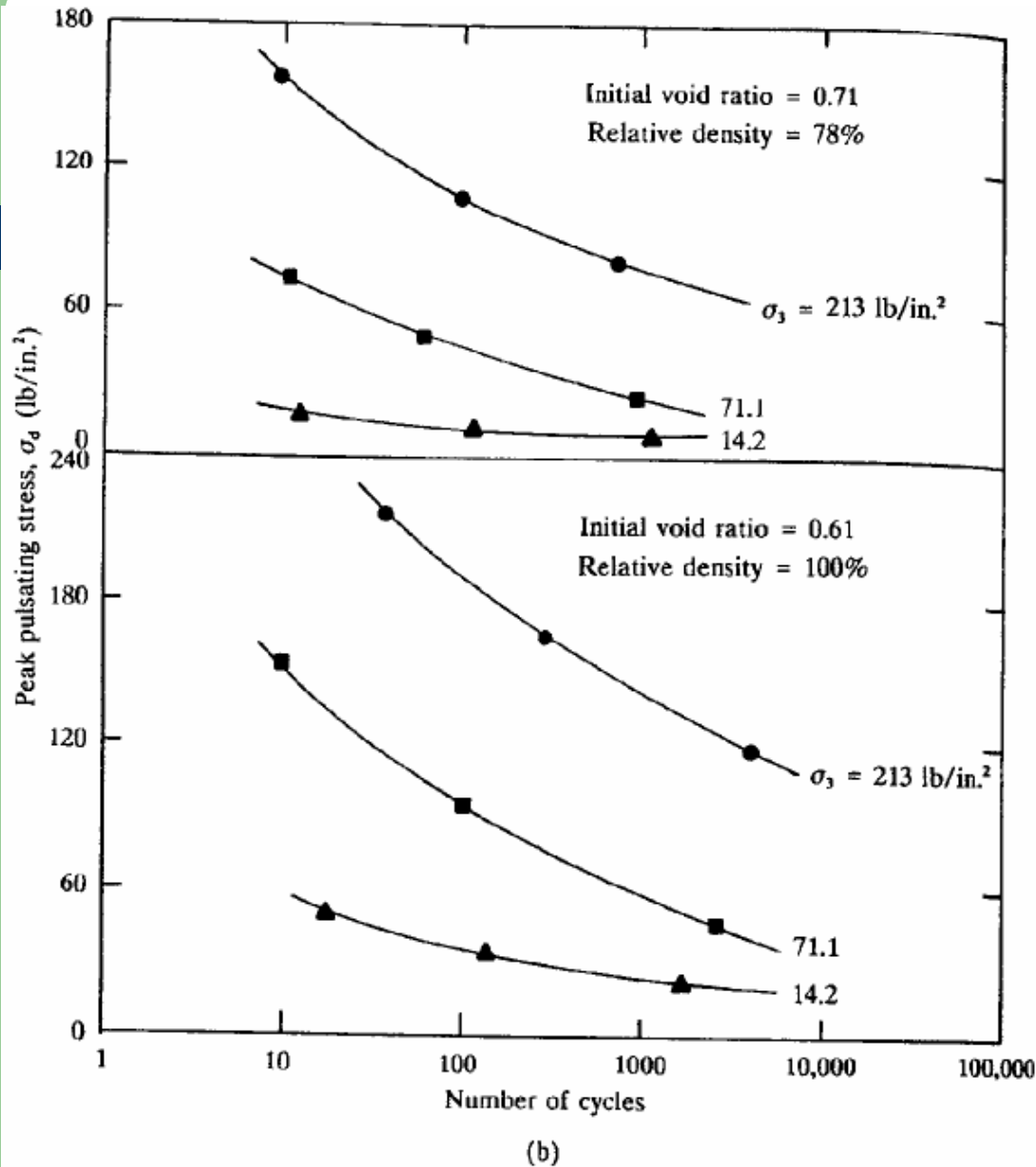


روانگرایی خاکها - عوامل موثر بر روانگرایی

اثر فشار محدود کننده

ا در شکل روبرو اثر فشار محدود کننده بر گسیختگی (رسیدن به کرنش 20%) در ماسه ها نشان داده شده است.

ا دیده میشود که برای مقادیر مشخص دانسیته نسبی و دامنه تنش انحرافی سیکلی، تعداد سیکلهای بارگذاری برای رسیدن به گسیختگی نیز با افزایش فشار محدود کننده زیاد میشود.

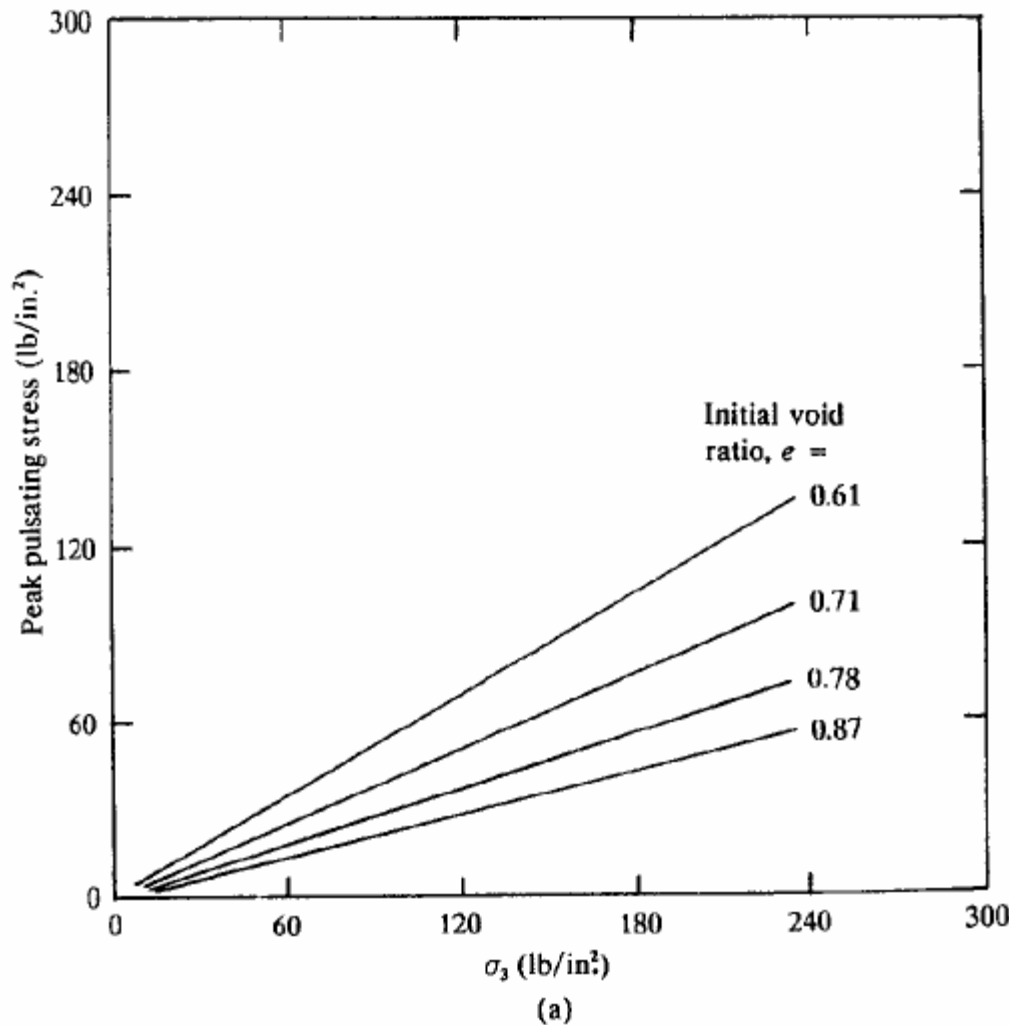


روانگرائی خاکها - عوامل موثر بر روانگرائی

اثر دامنه تنش سيکلی

ا شکل روبرو تغییرات دامنه تنش سيکلی با فشار محدود کننده برای رسیدن به روانگرائی در ماسه پس از 100 سيکل بارگذاري نشان داده شده است.

ا دیده میشود که برای مقادير مشخص دانسيته نسبي و تعداد سيکلهای بارگذاري، دامنه تنش انحرافی سيکلی برای رسیدن به روانگرائی بصورت خطی با فشار محدود کننده افزایش می یابد.

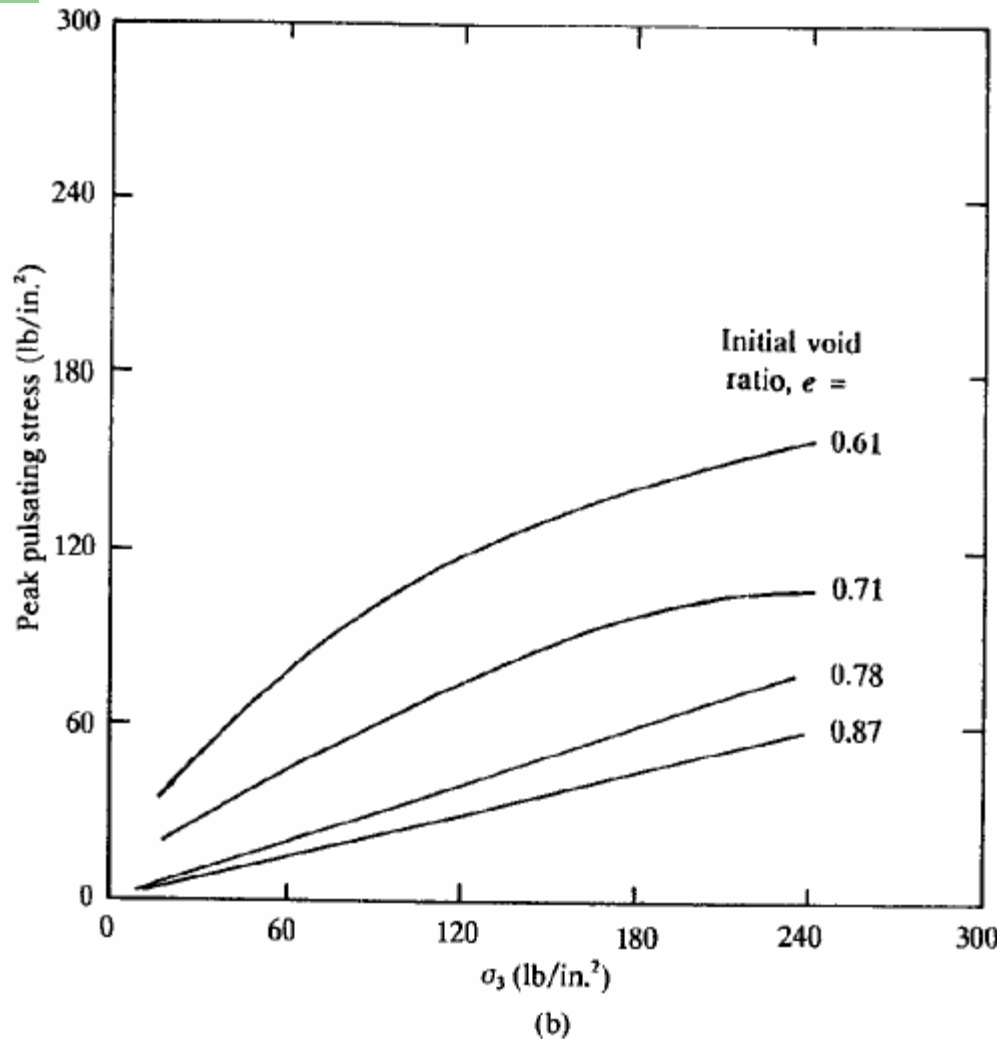


روانگرایی خاکها - عوامل موثر بر روانگرایی

اثر دامنه تنش سیکلی

ا تغییرات دامنه تنش سیکلی با فشار محدود کننده برای رسیدن به گسیختگی پس از 100 سیکل بارگذاری در شکل روبرو نشان داده شده است.

ا دیده میشود که برای مقادیر مشخص دانسیته نسبی و تعداد سیکلهای بارگذاری، دامنه تنش انحرافی سیکلی برای رسیدن به روانگرایی با فشار محدود کننده افزایش می یابد و این رابطه برای ماسه غیر متراکم خطی است.

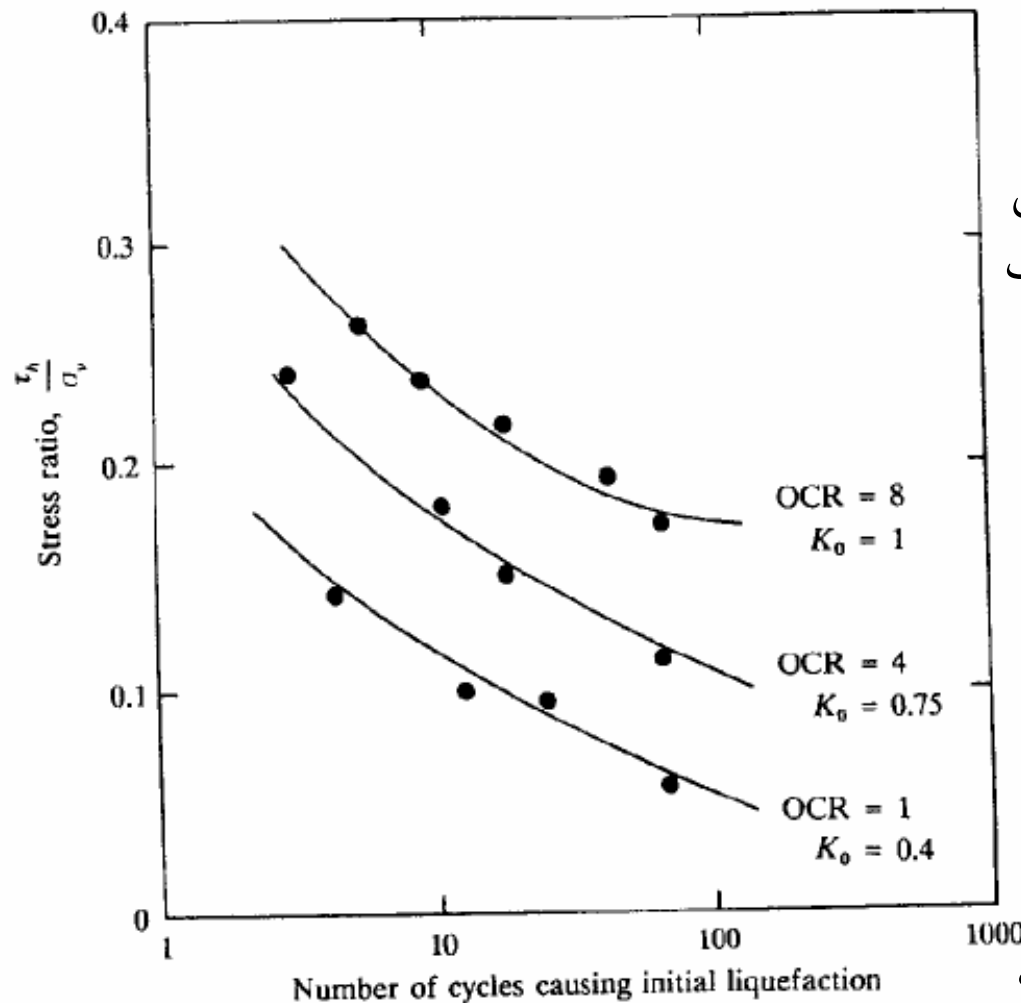


روانگرایی خاکها - عوامل موثر بر روانگرایی

اثر نسبت پیش تحکیمی

ا در آزمایش برش ساده سیکلی، تنش برشی افقی به ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون (K_0) بستگی دارد و این نسبت، خود به نسبت پیش تحکیمی بستگی دارد.

ا در شکل روبرو تغییرات نسبت تنش برشی به عمودی با تعداد سیکلهای لازم برای روانگرایی نشان داده شده است. دیده میشود که با افزایش نسبت پیش تحکیمی، نسبت تنش برشی به عمودی برای روانگرایی افزایش می یابد



عوارض ناشی از روانگرایی

- عوارض معمول روانگرایی

روانگرایی میتواند باعث عوارض و نتایج زیادی بشود. از جمله مهمترین آنها عبارتند از:

- ا گسیختگی پی ها در اثر از بین رفتن ظرفیت باربری پی ها (bearing capacity failures)
- ا نشست پی ها و دیگر سازه های متکی بر خاک و یا ساخته شده از خاک (seismic settlements)
- ا گسترش جانبی (lateral spreading)
- ا روانگرایی جریان شیب ها (flow failure of slopes)
- ا شناور شدن سازه های مدفون (uplift of buried structures)
- ا جوشش ماسه (sand boil)

عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هائی از عوارض روانگرایی



نشست و کج شدگی ساختمانها در زلزله نیگاتا در ژاپن

عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هائی از عوارض روانگرایی



Fig. 15 45-cm subsidence of ground surface in front of a shopping center (Urayasu City)



Distortion of road embankment

نشست ساختمانها و تغییر شکل ساختمانها و سازه های خاکی

عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هایی از عوارض روانگرایی



showing variation of settlements along one street in Urayasu

Figure 5: Sidewalk settles relative to a building on piles (top left), whereas a three-story building settles more than the adjacent sidewalk surface (top right, and bottom) in Urayasu (N35.6485, E139.9178).

عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هایی از عوارض روانگرایی



Figure 13a. Depression behind quay wall that displaced towards water at Kashima port (N35.88461, E140.68476).

جابجائی دیوارهای ساحلی بطرف دریا

عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هائی از عوارض روانگرایی

(N36.341, E140.596).



Figure 13b. Displacement of quay wall at Hitachinaka port (N36.341, E140.596).

جابجائی دیوارهای ساحلی بطرف دریا

عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هائی از عوارض روانگرایی



نمونه هائی از گسترش جانبی ناشی از زلزله

عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هائی از عوارض روانگرایی



Fig. 18 Uplifting of manhole of 2 meters
In Urayasu of Chiba



Fig. 19 Uplifting of manhole and surface
subsidence in Sukagawa of Fukushima

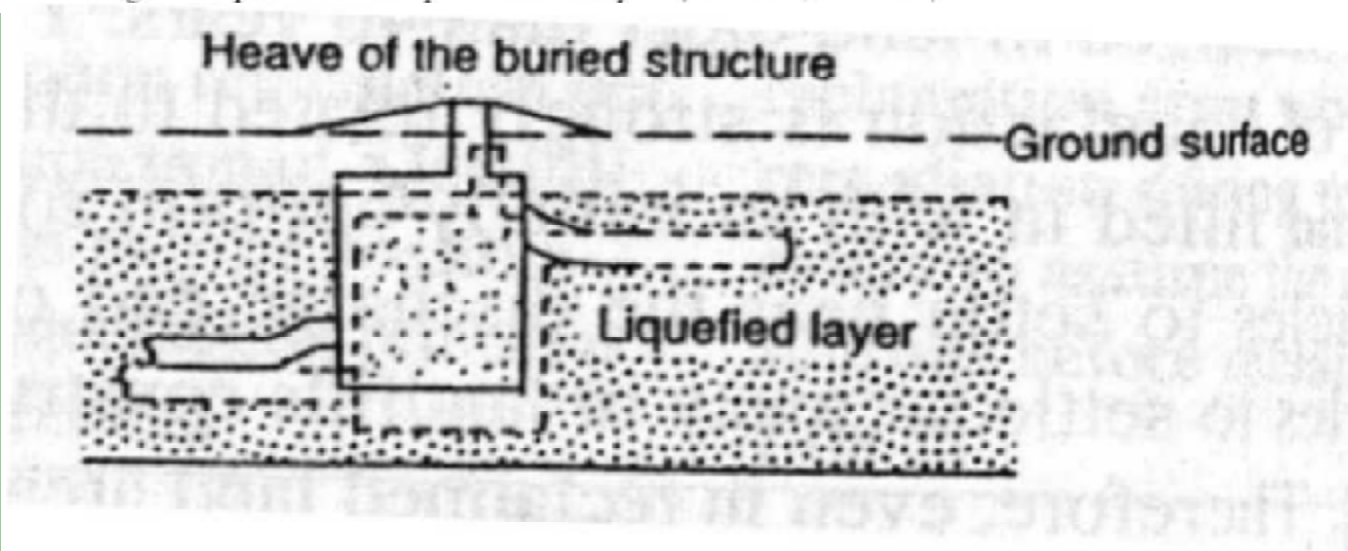
عوارض ناشی از روانگرایی

- نمونه هائی از عوارض روانگرایی



Figure 7. Uplifted tank in a park field in Urayasu (N35.6398, E139.8235).

نمونه هائی از بالا آمدن سازه های مدفون



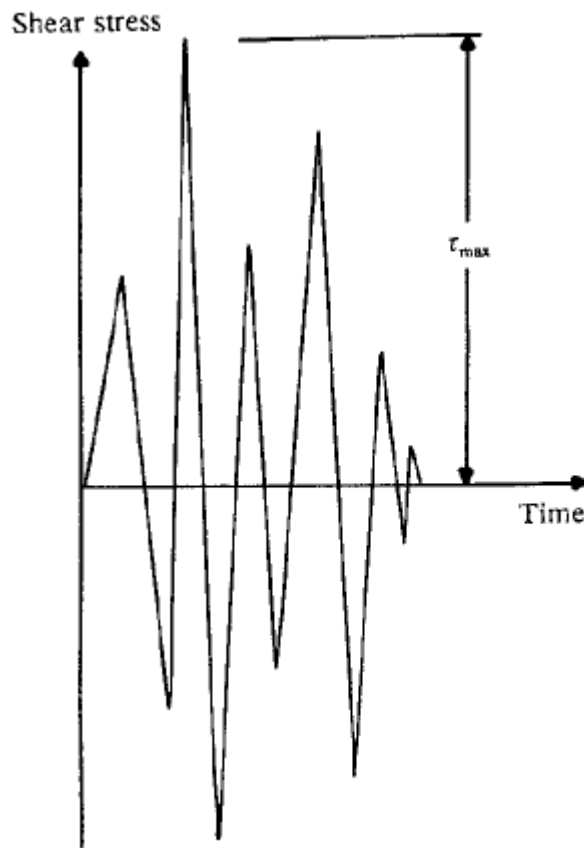
پیش بینی روانگرایی در محل - مقدمات

- تعداد سیکلهای یکنواخت معادل (Equivalent uniform cycles)

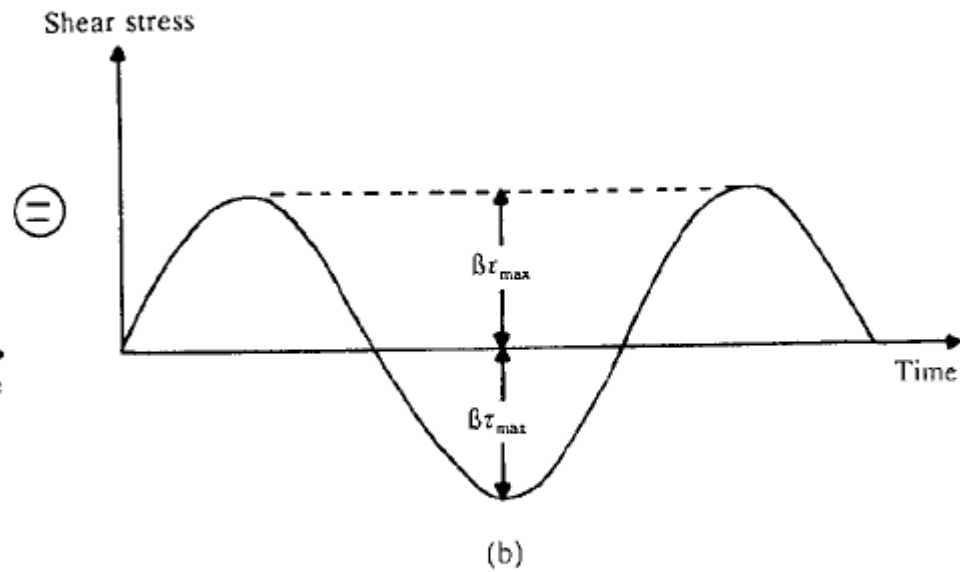
- بارگذاری ناشی از زلزله (مثلا تنش برشی یا شتاب) معمولا دارای تغییرات نامنظم بوده و براحتی قابل اعمال در محاسبات نیست لذا برای بررسی روانگرایی خاکها معمولا بارگذاری زلزله را به تعدادی سیکل یکنواخت با دامنه یکسان تبدیل می کنند.
- در این روش تعداد سیکلهای بارگذاری و دامنه آنها را طوری تعیین می کنند که اثر آنها بر خاک مشابه اثر بار واقعی زلزله باشد. امکان تعیین سیکلهای یکنواخت معادل برای بررسی روانگرایی توسط محققین مختلف نشان داده شده است.
- شکل بعد بار نامنظم با دامنه حداکثر t_{max} را که بر خاک اعمال شده نشان میدهد که با تعداد N سیکل بار یکنواخت با دامنه bt_{max} جایگزین شده است.

پیش بینی روانگرایی در محل
- مقدمات

- تعداد سیکلهای یکنواخت معادل (Equivalent uniform cycles)



(a)



(b)

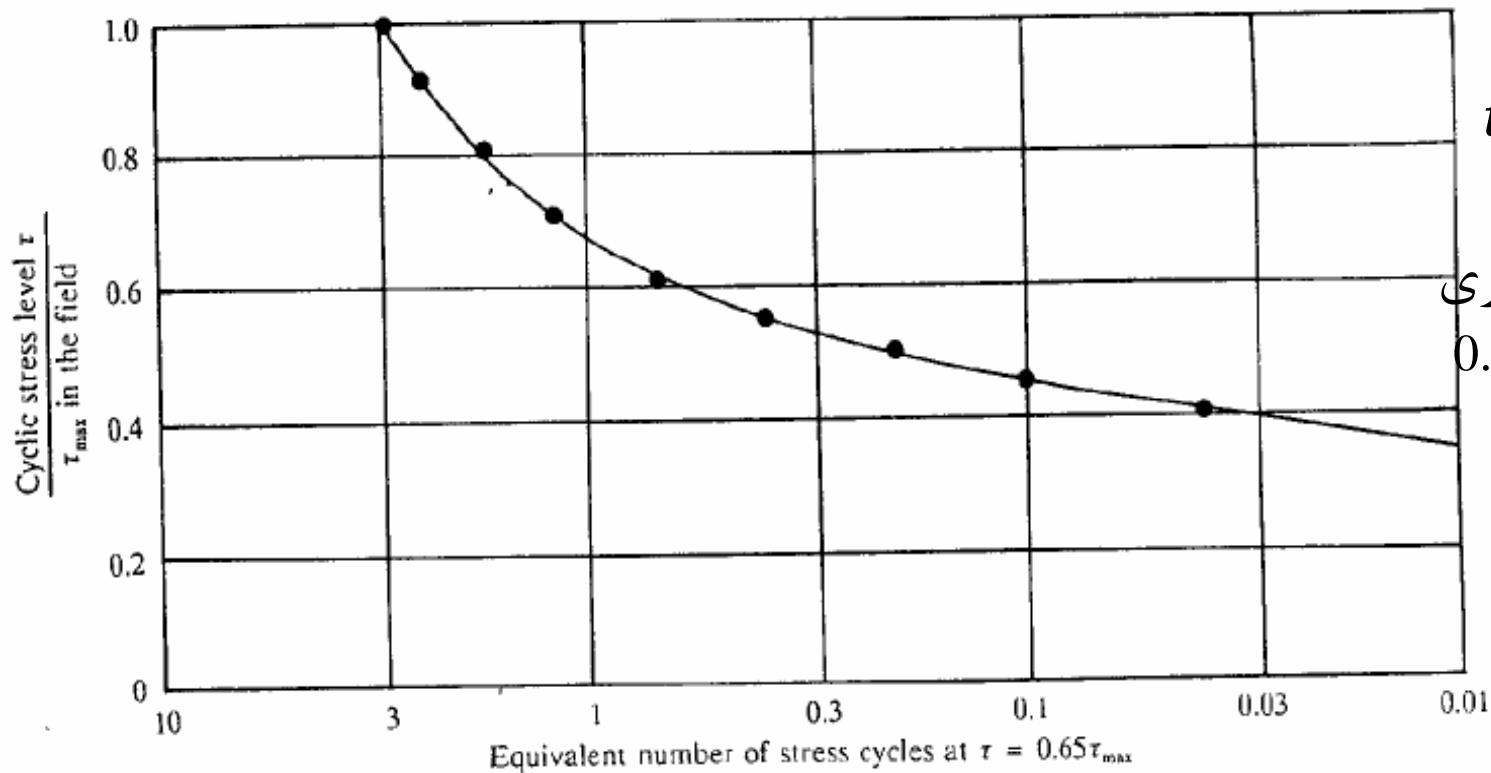
بار معادل با سیکلهای یکنواخت

تغییرات نامنظم تنش با زمان

پیش بینی روانگرایی در محل - مقدمات

- تعیین تعداد سیکلهای یکنواخت معادل (Equivalent uniform cycles)

شکل زیر تغییرات تعداد سیکلهای معادل با دامنه $0.65t_{max}$ را برای سیکلهای بارگذاری با دامنه های مختلف نشان میدهد. بر اساس این شکل، بطور مثال اثر یک سیکل



بارگذاری

با دامنه t_{max}

معادل سه

سیکل بارگذاری

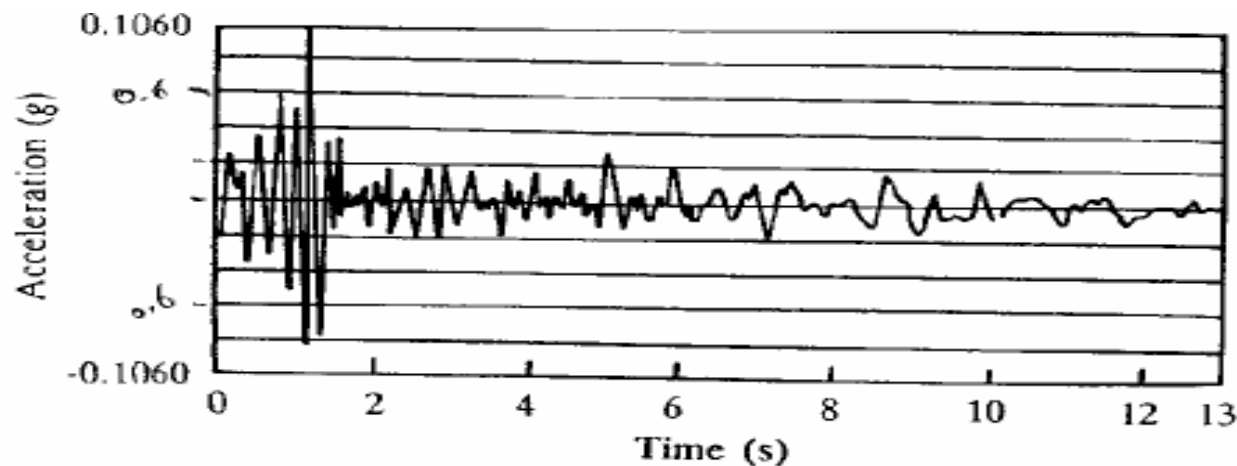
با دامنه $0.65t_{max}$

می باشد.

پیش بینی روانگرایی در محل - مقدمات

- تعیین تعداد سیکل‌های یکنواخت معادل (Equivalent uniform cycles)

- ۱ باید دانست که در محدوده 20 فوت (6-7 متر) فوقانی سطح زمین، تغییرات تنش برشی با تغییرات شتاب در سطح زمین مشابه است. بنابراین غالباً کافی است که سیکل‌های بارگذاری یکنواخت معادل را با استفاده از نمودار تغییرات شتاب با زمان تعیین کرد.
- ۱ شکل زیر نمونه ای از شتاب نگاشت ثبت شده از زلزله San Jose (1955) را نشان میدهد. دیده میشود که شتاب حداکثر ثبت شده $0.1060g$ می باشد. بنابراین تنش برشی حداکثر متناسب با این شتاب است.



پیش بینی روانگرایی در محل - مقدمات

- تعیین تعداد سیکل‌های یکنواخت معادل (Equivalent uniform cycles)

- ۱- در عمل می توان تعداد سیکل‌های معادل برای شتاب نگاشتی مانند آنچه که در شکل قبل نشان داده شده است را طی مراحل زیر تعیین کرد:
- 1- تعیین تعداد سیکل‌های تنش مربوط به دامنه های مختلف تنش ثبت شده در شتاب نگاشت برای سیکل‌های با دامنه مثبت و منفی
 - 2- تعیین فاکتورهای تبدیل مربوط به هر دامنه با استفاده از نمودار مربوطه
 - 3- تعیین تعداد سیکل‌های معادل با دامنه $0.65t_{max}$ برای هر یک از دامنه های فوق با استفاده از حاصلضرب تعداد سیکل در فاکتور تبدیل
 - 4- تعیین مجموع سیکل‌های معادل با دامنه $0.65t_{max}$ برای کلیه دامنه های مثبت و منفی
 - 5- تعداد سیکل‌های معادل کل N برابر است با نصف مجموع تعداد سیکل‌های معادل مثبت و منفی که در مرحله قبل بدست آمده است.

پیش بینی روانگرایی در محل
- مقدمات

- تعیین تعداد سیکلهای یکنواخت معادل (Equivalent uniform cycles)

Table 7.4 Example of Determination of Equivalent Uniform Cyclic Stress Series from Figure 7.14^a

Stress level ($\times \tau_{max}$) (1)	Above horizontal axis			Below horizontal axis		
	no. of stress cycles (2)	Conversion factor (3)	Equivalent no. of cycles at $0.65\tau_{max}$ (4)	No. of stress cycles (5)	Conversion factor (6)	Equivalent no. of cycles at $0.65\tau_{max}$ (7)
1.00	1	3.00	3.00			
0.95						
0.90	—	—	—			
0.85	—	—	—	1	2.05	2.05
0.80	—	—	—	1	1.70	1.70
0.75	—	—	—			
0.70	—	—	—			
0.65	—	—	—			
0.60	1	0.70	0.70			
0.55	1	0.40	0.40	1	0.40	0.40
0.50						
0.45						
0.40	1	0.04	0.04	1	0.04	0.04
0.35	2	0.02	0.02	1	0.02	0.02
		Total	4.2		Total	4.2

Average number of cycles of $0.65\tau_{max} \approx 4.2$

^a Seed et al. (1975).

جدول روبرو
مراحل تعیین
تعداد سیکلهای
معادل را برای
شتاب نگاشت
مربوط به زلزله
(San Jose
1955 نشان
میدهد:

پیش بینی روانگرایی در محل - مقدمات

- تعیین تعداد سیکلهای یکنواخت معادل (Equivalent uniform cycles)

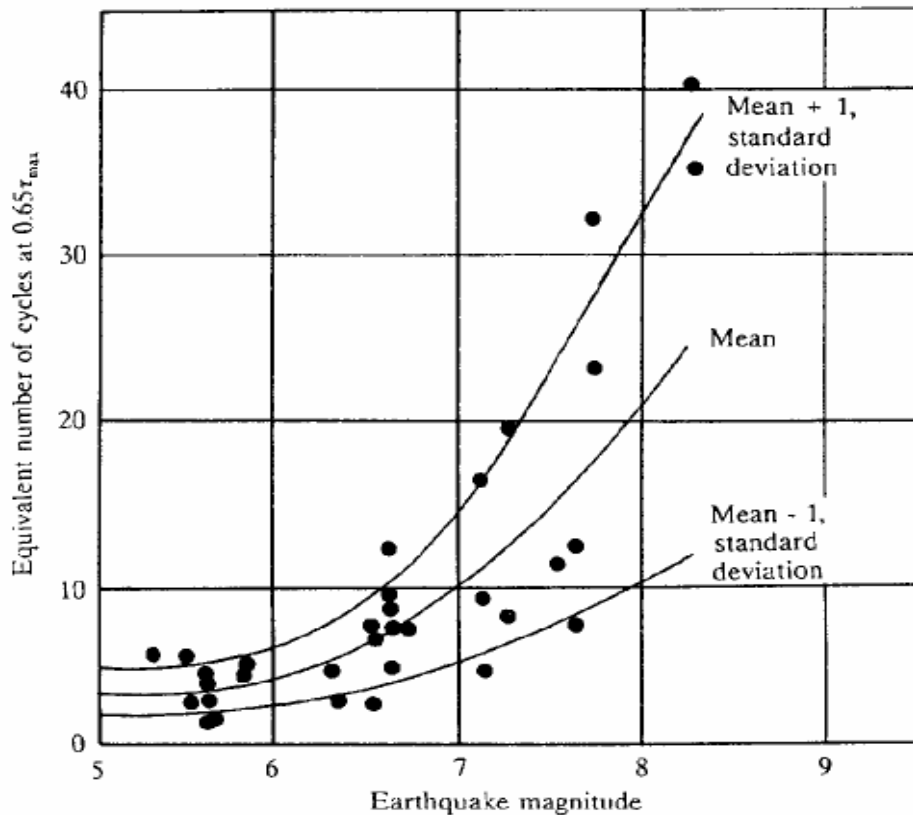
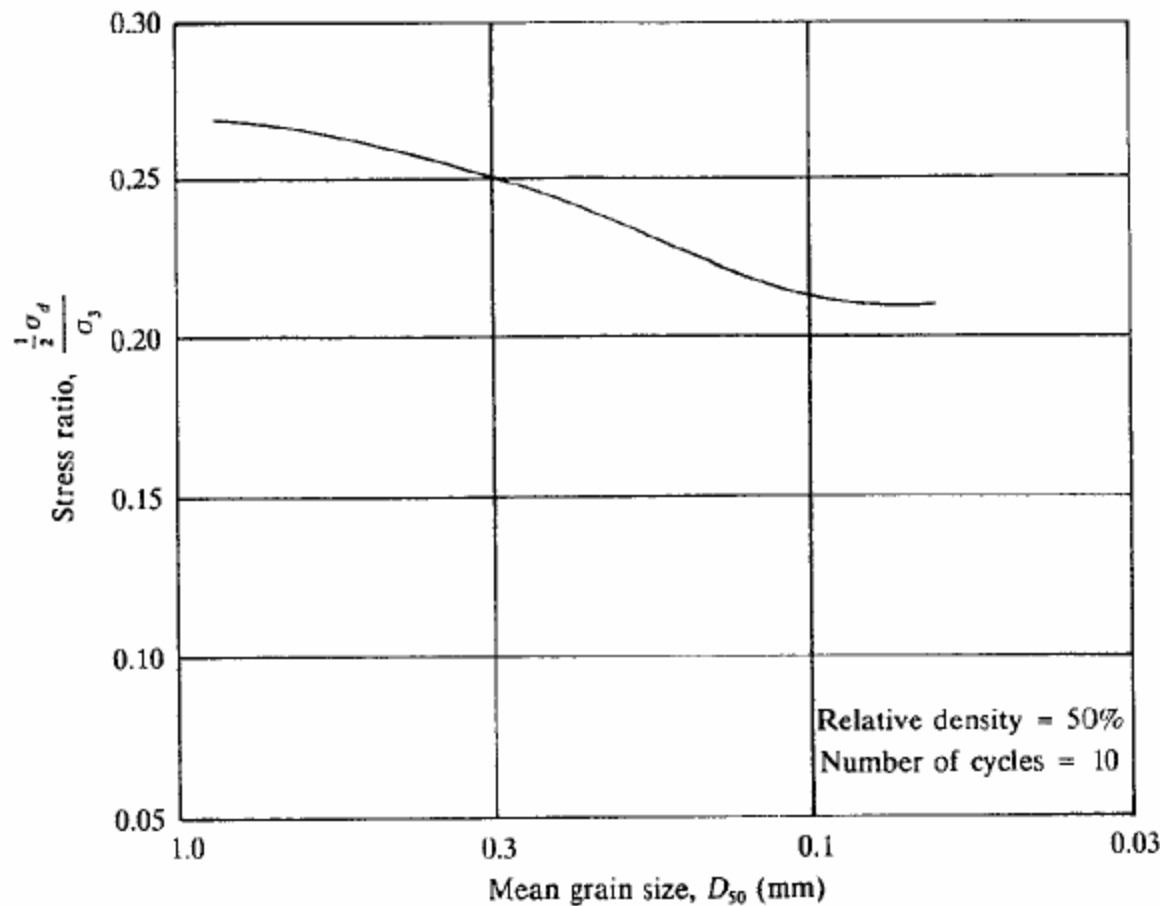


Figure 7.15 Equivalent numbers of uniform stress cycles based on strong component of ground motion (after Seed et al. 1975)

۱ شکل روبرو تعداد سیکلهای معادل را برای چند زلزله با بزرگی های مختلف نشان میدهد. در این شکل مقدار متوسط و مقادیر بدست آمده برای یک انحراف معیار کمتر و بیشتر از آن را نشان میدهد.

۱ چنین نمودارهایی میتواند در طراحی ها برای تعیین سیکلهای معادل مربوط به زلزله با بزرگی مشخص مورد استفاده قرار گیرد.

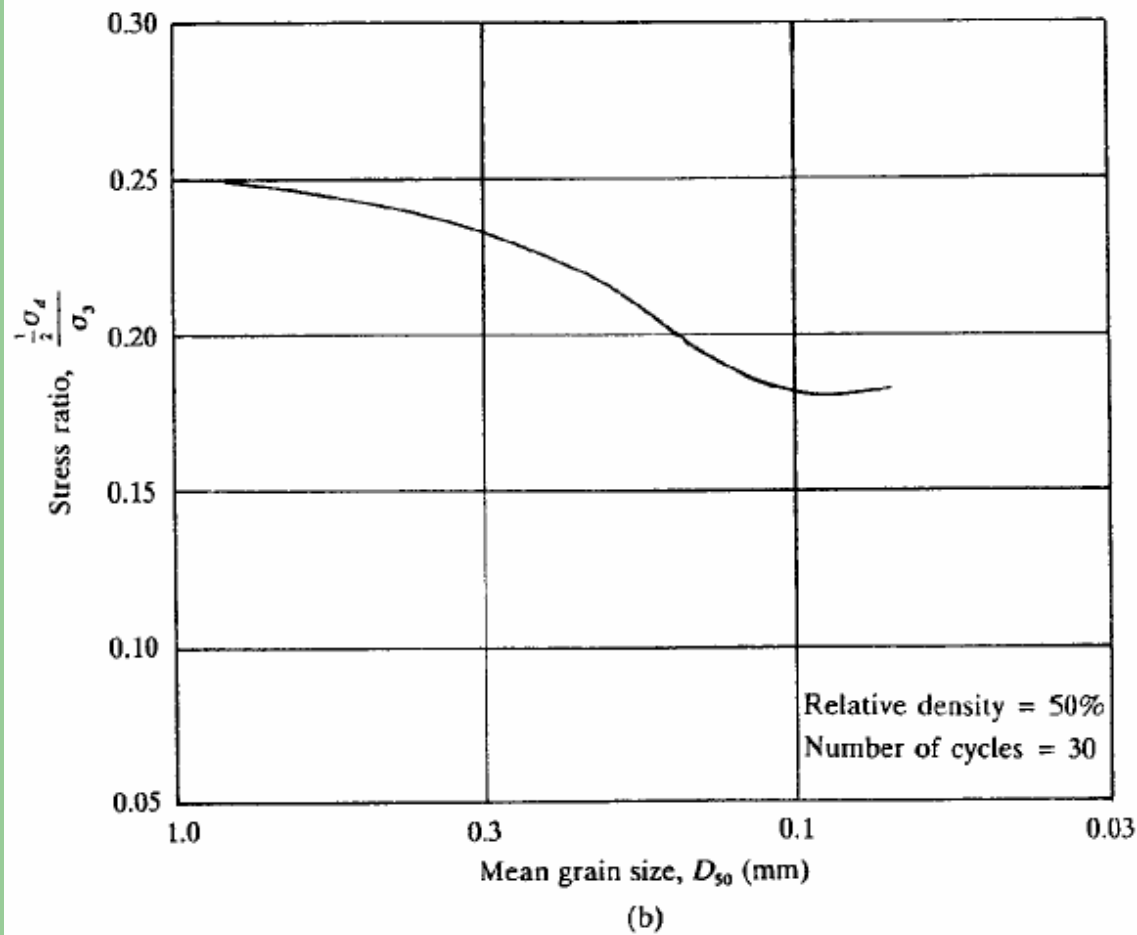
پیش بینی روانگرایی در محل - تهیه منحنی های استاندارد روانگرایی



با استفاده از نتایج آزمایشات سه محوری بر روی ماسه های مختلف می توان منحنی های متوسطی برای آغاز روانگرایی تحت تعداد مشخصی سیکل بارگذاری تهیه کرد.

این منحنی ها را می توان برای پیش بینی روانگرایی در محل بکار برد. نمونه ای از این منحنی ها در شکل نشان داده شده است.

پیش بینی روانگرایی در محل - تهیه منحنی های استاندارد روانگرایی



■ شکل روبرو نظیر شکل قبل است با این تفاوت که تعداد سیکلهای بارگذاری در این شکل 30 و در شکل قبل 10 می باشد.

■ از چنین منحنی هائی می توان برای پیش بینی روانگرایی در محل استفاده کرد.

پیش بینی روانگرایی در محل - رابطه بین نتایج آزمایشات سه محوری روانگرایی و شرایط صحرایی

می توان نشان داد که در شرایط مساوی، رابطه بین نسبت تنش برشی به عمودی لازم برای روانگرایی در آزمایش برش ساده و نسبت تنش انحرافی به همه جانبه در آزمایش سه محوری را می توان با رابطه زیر نشان داد:

$$\left(\frac{\tau_h}{\sigma_v}\right)_{\text{simple shear}} = a' \left(\frac{\frac{1}{2}\sigma_d}{\sigma_3}\right)_{\text{triax}}$$

که در آن بطور متوسط $a' = 0.47$

همچنین دیده شده است که بدلیل ناهمگنی تنش در نمونه آزمایشی برش ساده، نمونه مورد آزمایش زودتر روانگرا میشود و نسبت تنش لازم برای ایجاد روانگرایی در محل بین 15% تا 50% بیشتر از نسبت تنش بدست آمده از آزمایش برش ساده است. لذا داریم:

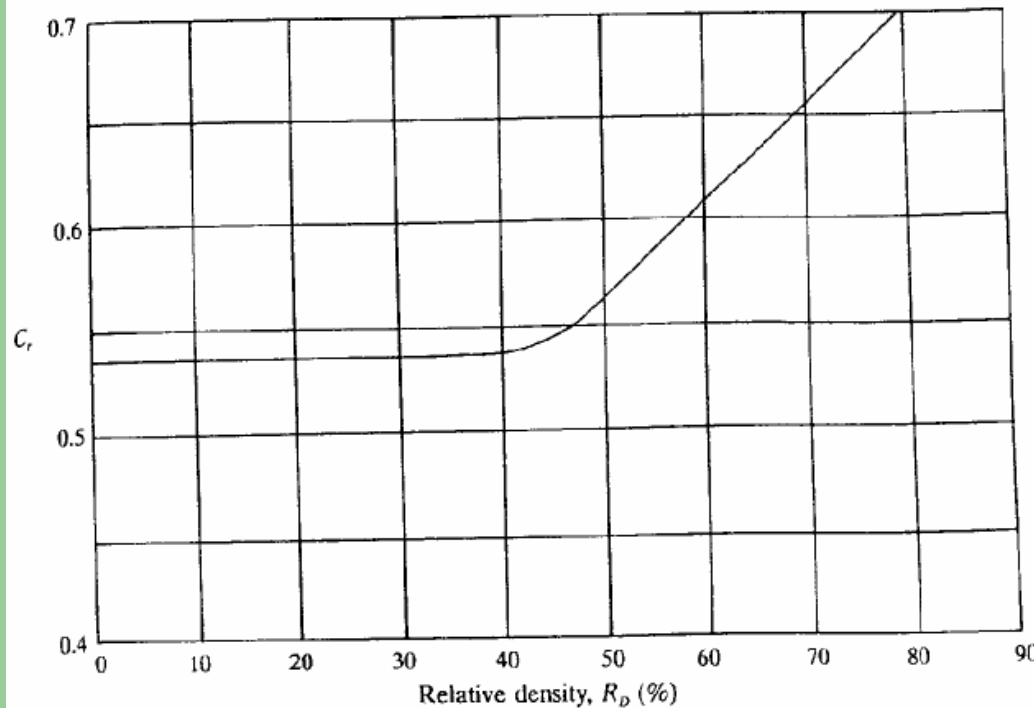
$$\left(\frac{\tau_h}{\sigma_v}\right)_{\text{field}} = \beta \left(\frac{\tau_h}{\sigma_v}\right)_{\text{simple shear}}$$

پیش بینی روانگرایی در محل - رابطه بین نتایج آزمایشات سه محوری روانگرایی و شرایط صحرایی

$$\left(\frac{\tau_h}{\sigma_v}\right)_{\text{field}} = \beta \left(\frac{\tau_h}{\sigma_v}\right)_{\text{simple shear}} = \alpha' \beta \left(\frac{\frac{1}{2}\sigma_d}{\sigma_3}\right)_{\text{triax}} = C_r \left(\frac{\frac{1}{2}\sigma_d}{\sigma_3}\right)_{\text{triax}}$$

بنابراین می توان نوشت:

که در آن $C_r = \alpha' \beta$: میباشد که طبق شکل روبرو با R_D تغییر میکند | از طرفی روابط بالا برای دانسیته نسبی یکسان صادقند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، برای روانگرایی تحت سیکلهای بارگذاری مشخص، تنش برشی لازم بطور خطی با دانسیته (کمتر از 80%) تغییر میکند. یعنی:



$$\tau_h[R_{D(2)}] = \tau_h[R_{D(1)}] \left[\frac{R_{D(2)}}{R_{D(1)}} \right]$$

پیش بینی روانگرایی در محل - رابطه بین نتایج آزمایشات سه محوری روانگرایی و شرایط صحرائی

با ترکیب روابط قبل می توان نوشت:

$$\left(\frac{\tau_h}{\sigma_v}\right)_{\text{field}[R_{D(2)}} = C_r \left(\frac{\frac{1}{2}\sigma_d}{\sigma_3}\right)_{\text{triax}[R_{D(1)}} \cdot \frac{R_{D(2)}}{R_{D(1)}}$$

با استفاده از رابطه فوق، نمودارهای C_r ، و منحنی های استاندارد روانگرایی که قبلا دیدیم، می توان نسبت تنش لازم برای آغاز روانگرایی در محل را بدست آورد.

ا برای اینکار لازم است در عمق های مختلف زیر سطح خاک، تنش برشی لازم برای آغاز روانگرایی را با توجه به تنش عمودی و دانسیته نسبی در آن عمق، و تعداد سیکلهای معادل مربوط به زلزله طرح بدست آورد.

پیش بینی روانگرایی در محل - مراحل تعیین نواحی در معرض روانگرایی در محل

با توجه به مطالب گفته شده، برای تعیین عمق های در معرض روانگرایی در محل می توان مراحل پنج گانه زیر را طی کرد:

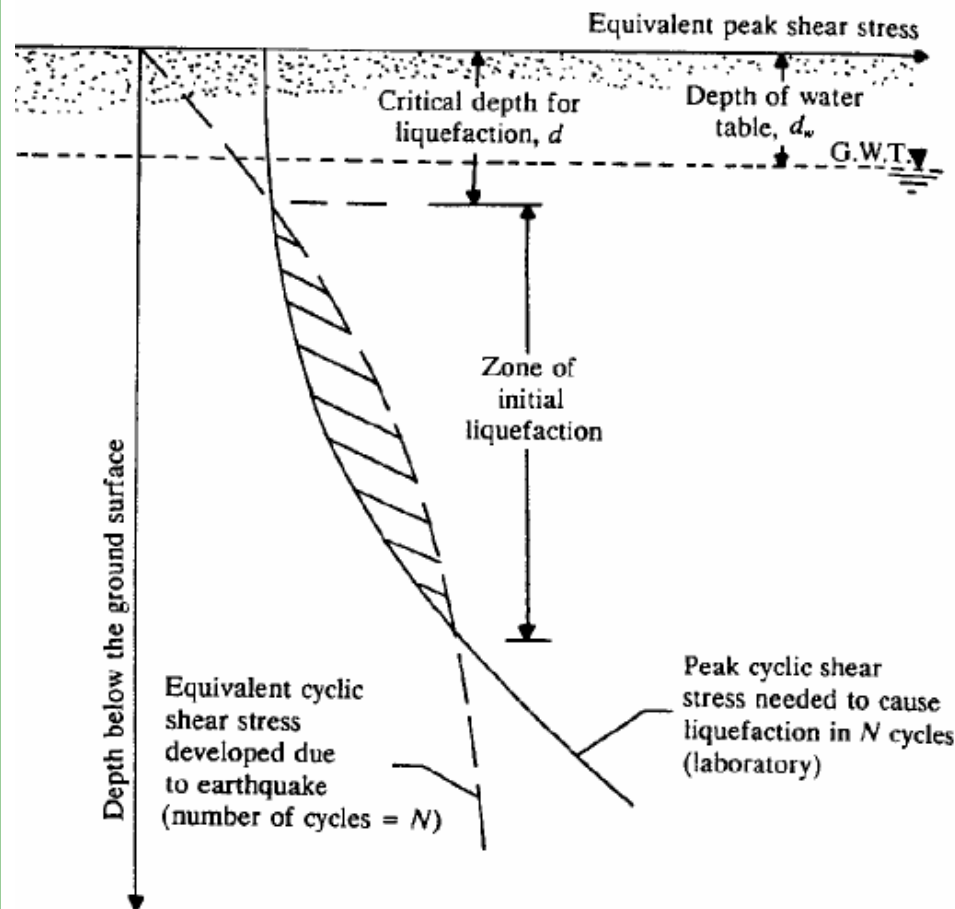
1- تعیین زلزله طرح

2- تعیین تغییرات تنش برشی ناشی از زلزله طرح در عمق های مختلف در لایه ماسه ای موردنظر

3- تبدیل کردن تغییرات تنش برشی در هر عمق به N عدد سیکل تنش معادل. تغییرات این تنش برشی با عمق را می توان بصورت نموداری رسم کرد.

4- با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، تعیین تغییرات تنش برشی سیکلی لازم برای ایجاد روانگرایی در محل در N سیکل با عمق. لازم بذکر است که حتی اگر شرایط دیگر مانند دانسیته نسبی و غیره با عمق ثابت بماند، بدلیل تغییر تنش عمودی با عمق، تنش برشی سیکلی لازم برای آغاز روانگرایی با عمق تغییر خواهد کرد.

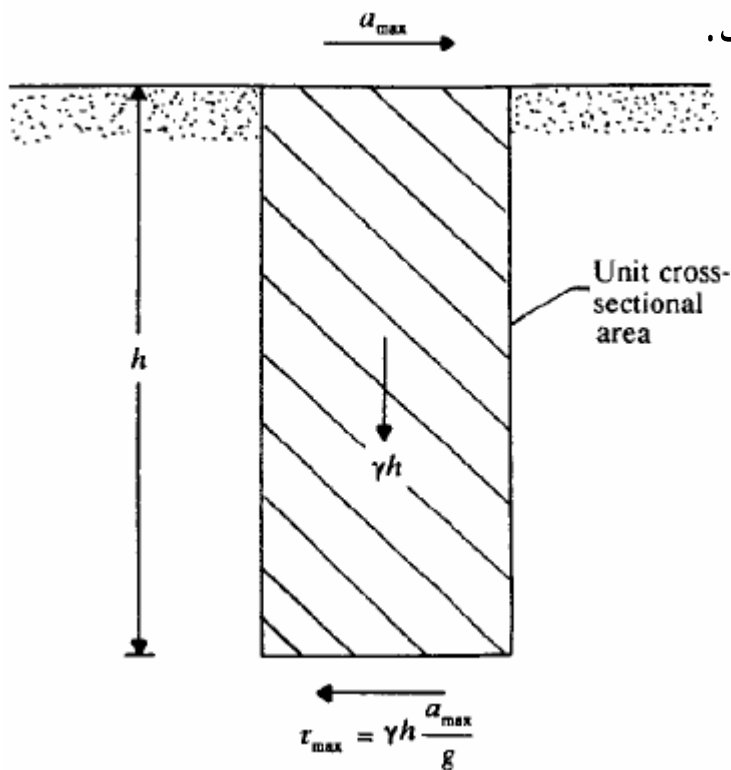
پیش بینی روانگرایی در محل - مراحل تعیین نواحی در معرض روانگرایی در محل



5- تعیین عمق هائی که در آنها روانگرایی می تواند اتفاق افتد. اینها عمق هائی هستند که در آنها تنش ایجاد شده در اثر زلزله با تنش لازم برای آغاز روانگرایی برابر یا از آن بیشتر است. این عمق ها در شکل روبرو هاشور زده شده اند.

پیش بینی روانگرایی در محل - تعیین رابطه بین حداکثر شتاب در سطح زمین و دانسیته نسبی خاک (روش ساده شده Seed and Idriss, 1971)

در این روش متداول تحلیل روانگرایی، با استفاده از فرض های ساده کننده، امکان روانگرایی را بسادگی در محل پیش بینی می کنند.



۱ در شکل روبرو در صورتیکه ستون خاک با سطح مقطع واحد و ارتفاع h بصورت صلب رفتار کند رابطه بین شتاب حداکثر در سطح زمین و تنش برشی در قاعده ستون عبارت خواهد بود از:

$$\tau_{max} = \left(\frac{\gamma h}{g} \right) a_{max}$$

پیش بینی روانگرایی در محل
- تعیین رابطه بین حداکثر شتاب در سطح زمین و دانسیته نسبی خاک
(روش ساده شده Seed and Idriss, 1971)

ولی در واقع این ستون خاک تغییر شکل پذیر است، بنابراین حداکثر تنش برشی اصلاح شده با اعمال ضریب کاهش C_D بشکل زیر تعیین می شود:

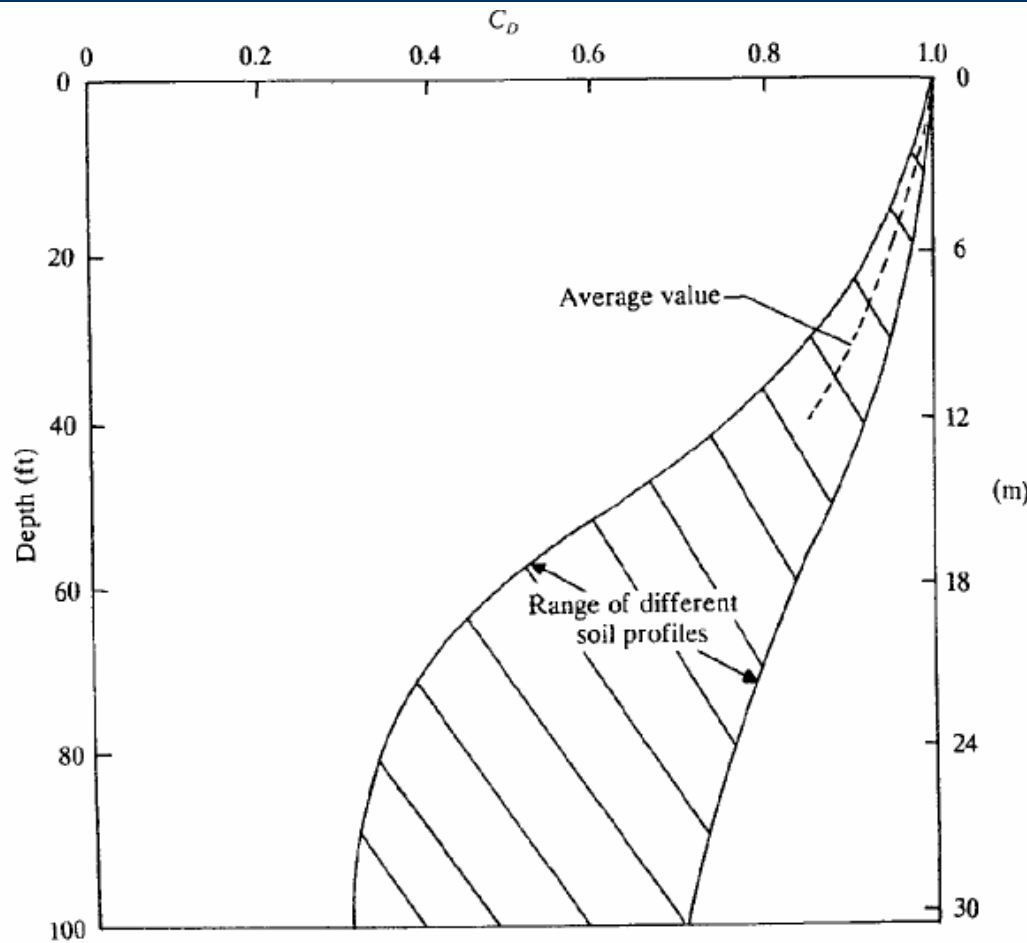
$$\tau_{\max(\text{modif})} = C_D \left[\left(\frac{\gamma h}{g} \right) a_{\max} \right]$$

تغییرات این ضریب برای خاکهای مختلف در شکل بعد نشان داده شده است. برای کاربردهای عملی، معمولاً استفاده از مقدار متوسط این تغییرات تا عمق حدود 12 متر دقت کافی دارد.

همانگونه که دیده شد تغییرات تنش برشی با زمان را می توان به تعدادی سیکل یکنواخت معادل تبدیل کرد. Seed و Idriss دامنه متوسط این تنش برشی سیکلی معادل را بصورت زیر تعریف کردند:

$$\tau_{\text{av}} = 0.65 \tau_{\max(\text{modif})} = 0.65 C_D \left[\left(\frac{\gamma h}{g} \right) a_{\max} \right]$$

پیش بینی روانگرایی در محل
 - تعیین رابطه بین حداکثر شتاب در سطح زمین و دانسیته نسبی خاک
 (روش ساده شده Seed and Idriss, 1971)



تعداد سیکلهای معادل برای تنش
 برشی متوسط مذکور برای زلزله
 های با بزرگی مختلف در جدول
 زیر داده شده است:

Table 10.2 Significant Number of Stress Cycles N Corresponding to τ_{av}

Earthquake magnitude	N
7	10
7.5	20
8	30

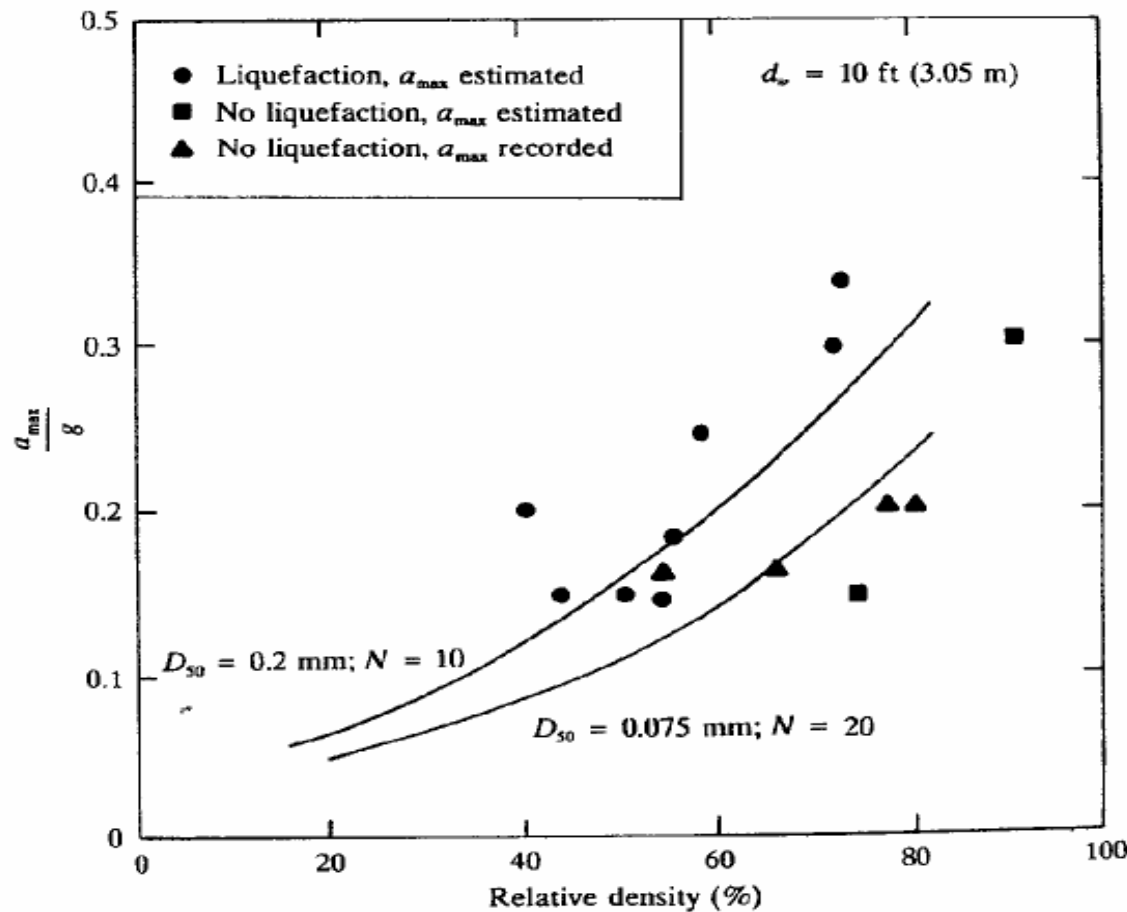
پیش بینی روانگرایی در محل
- تعیین رابطه بین حداکثر شتاب در سطح زمین و دانسیته نسبی خاک
(روش ساده شده Seed and Idriss, 1971)

اکنون می توان با استفاد از رابطه بین تنش برشی سیکلی لازم برای آغاز روانگرایی در محل و در آزمایش سه محوری که قبلا بدست آمد، تغییرات این تنش برشی را با عمق بدست آورد.

همچنین با استفاده از رابطه اخیر برای تعیین تنش برشی ناشی از زلزله طرح برای تعداد مشخص سیکل معادل ، می توان تغییرات تنش برشی ناشی از زلزله طرح را با عمق بدست آورد. مقایسه این دو مقدار در عمق های مختلف می تواند به تعیین عمق هائی که در آنها روانگرایی محتمل است بینجامد.

پیش بینی روانگرایی در محل

- تعیین رابطه بین حداکثر شتاب در سطح زمین و دانسیته نسبی خاک
(روش ساده شده Seed and Idriss, 1971)



می توان نمودارهایی مانند شکل روبرو را رسم کرد. این نمودارها برای محدوده دانسیته و سیکل معادل که در آنها روانگرایی محتمل تر است رسم شده اند و برای کاربردهای عملی می توانند مورد استفاده قرار گیرند.

Figure 10.32 Evaluation of liquefaction potential for sand below the ground surface (redrawn after Seed and Idriss, 1971)

پیش بینی روانگرایی در محل - استفاده از آزمایش های در محل برای پیش بینی روانگرایی

- این روشها امروزه بیشترین کاربرد را در تعیین روانگرایی ماسه ها دارند زیرا قابل اعتمادتر بوده و بر اساس مشاهدات و اندازه گیریهای محلی بدست آمده اند.
- آزمایشهای محلی که برای اینکار بیشتر بکار رفته اند عبارتند از: آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد، آزمایش نفوذ مخروط، و آزمایش های تعیین سرعت حرکت موج برشی در خاک.
- این روشها، بویژه روش استفاده از آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد در طول زمان مکررا با نتایج مشاهدات مقایسه شده و اصلاحات لازم بر روی آنها اعمال شده است.
- آخرین دستور العمل ها و توصیه ها در این زمینه در مقاله ASCE در سال 2001 توسط تعدادی از معروفترین صاحب نظران ارائه شده است.

پیش بینی روانگرایی در محل - استفاده از آزمایش های در محل برای پیش بینی روانگرایی

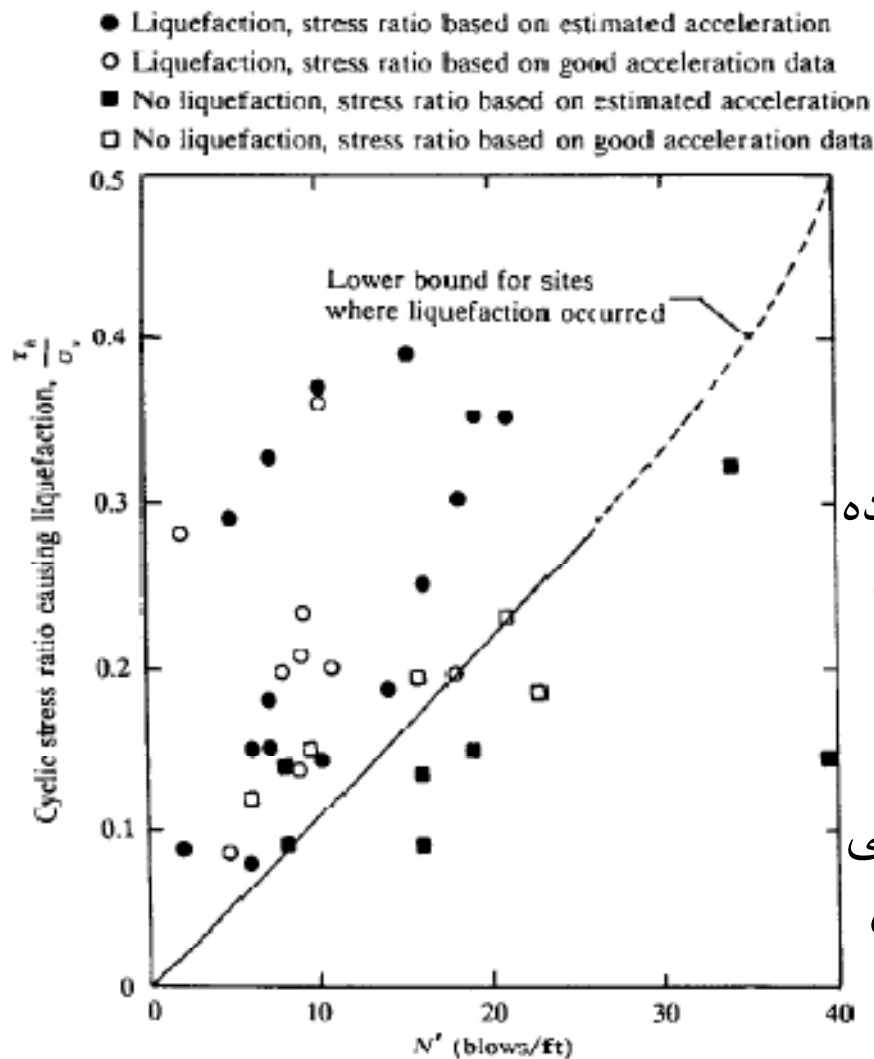


Figure 10.33 Correlation between τ_h/σ_v and N' (after Seed, 1979)

در روشهای مبتنی بر استفاده از نتایج آزمایشات صحرایی، نقاطی را که در آنها روانگرایی اتفاق افتاده و آنها که اتفاق نیفتاده را روی نمودار رسم کرده و خط جداکننده آنها را بعنوان معیار روانگرایی تعیین می کنند.

میتوان با استفاده از روشهای آزمایشگاهی گفته شده در قبل نیز تغییرات نسبت تنش برشی سیکلی که باعث روانگرایی در محل میشود بدست آورد.

پیش بینی روانگرایی در محل - استفاده از آزمایش های در محل برای پیش بینی روانگرایی

جدول زیر مقادیر نسبت تنش برشی سیکلی لازم برای روانگرایی در محل را با استفاده از نتایج آزمایشات برش ساده سیکلی برای زلزله های با بزرگی مختلف نشان میدهد. در صورتیکه این مقادیر با منحنی حداقل نسبت تنش برشی بدست آمده از بررسی های محلی مقایسه شود،

دیده میشود که نتایج بسیار نزدیک بوده و نشان میدهد که آنچه منحنی در محل نشان میدهد مربوط به زلزله ای با بزرگی 7.5 می باشد

Table 10.4 Data from Large-scale Simple Shear Tests on Freshly Deposited Sand*

Relative density, P_D	N' (blows/ft)	$M = 5-6$ 5 cycles		$M = 7-7.5$ 15 cycles		$M = 8-8.25$ 25 cycles	
		$\left(\frac{\tau_b}{\sigma_v}\right)_{test}$	$\left(\frac{\tau_b}{\sigma_v}\right)_{field}$	$\left(\frac{\tau_b}{\sigma_v}\right)_{test}$	$\left(\frac{\tau_b}{\sigma_v}\right)_{field}$	$\left(\frac{\tau_b}{\sigma_v}\right)_{test}$	$\left(\frac{\tau_b}{\sigma_v}\right)_{field}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
54	13.5	0.22	0.25	0.17	0.19	0.155	0.175
68	23	0.30	0.335	0.24	0.27	0.21	0.235
82	33	0.44	0.49	0.32	0.37	0.28	0.315
90	39	0.59	0.66	0.41	0.46	0.36	0.405

Note: N' = standard penetration resistance corrected to an effective overburden pressure of 1 ton/ft²; M = magnitude of earthquake.

* After Seed (1979).

پیش بینی روانگرایی در محل - استفاده از آزمایش های در محل برای پیش بینی روانگرایی

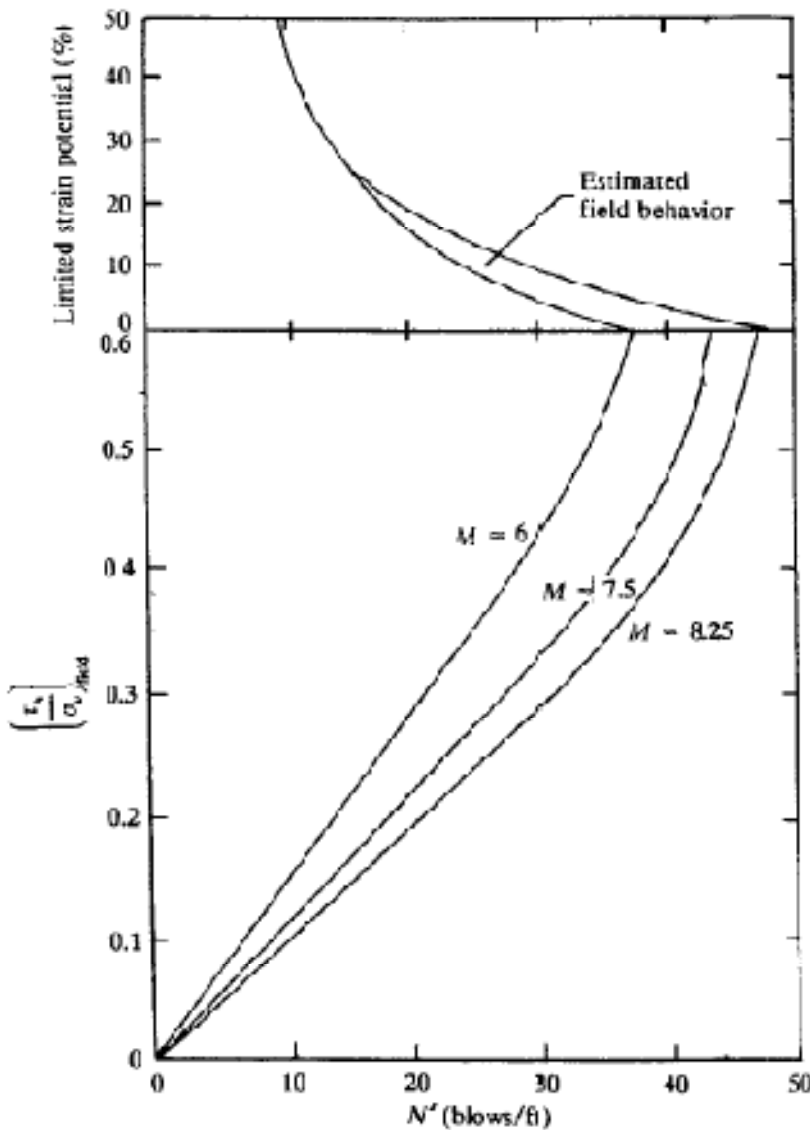


Figure 10.34 Variation of $(\tau_v/\sigma_v)_{field}$ with N' and M (after Seed, 1979)

می توان بهمین شکل منحنی های مشابهی برای آغاز روانگرایی برای زلزله های با بزرگی های دیگر بدست آورد. چنین منحنی هایی در شکل روبرو دیده میشود.

در این شکل همچنین منحنی های مربوط به پیدایش کرنش محدود نشان داده شده است که امروزه چندان در طراحی ها بکار نمیروند

پیش بینی روانگرایی در محل - استفاده از آزمایش های در محل برای پیش بینی روانگرایی

■ لازم بذکر است که بدلیل حساسیت زیاد آنالیز روانگرایی به عدد نفوذ استاندارد، در حال حاضر برای برآورد بهتر دانسیته خاک با استفاده از آزمایش SPT، عدد N بدست آزمایش را برای عوامل موثر بر نتایج این آزمایش مانند سربار، انرژی، قطر گمانه، طول میله متصل به نمونه گیر، و وجود یا عدم وجود پوشش داخلی در نمونه گیر تصحیح می کنند. نحوه منظور کردن اثر عوامل فوق در مقاله سال 2001 ژورنال ASCE آمده است.

■ در جدول 10.4 کتاب این تصحیح تنها برای سربار انجام شده ولی امروزه معمولاً تصحیحات دیگر نیز، بویژه تصحیحات مربوط به سربار و انرژی را برای افزایش دقت انجام میدهند.

پیش بینی روانگرایی در محل - استفاده از آزمایش های در محل برای پیش بینی روانگرایی

Percent of fines, F	N	Lower bound of $(\tau_u/\sigma_v)_{flow}$ for which liquefaction is likely ($M = 7.5$)
≤ 5	5	0.055
	10	0.115
	15	0.17
	20	0.22
	25	0.295
	30	0.5
10	5	0.098
	10	0.16
	15	0.225
	20	0.295
	25	0.5
35	5	0.13
	10	0.185
	15	0.26
	20	0.4

از جمله عوامل موثر بر روانگرایی اثر وجود ریزدانه در خاک ماسه ای است. Seed و دیگران در سال 1984 منحنی های متفاوتی برای نسبت تنش برشی سیکلی لازم برای روانگرایی بر حسب عدد N را برای ماسه با سه درصد متفاوت ریزدانه ارائه کردند. این درصدها در جدول روبرو نشان داده شده اند.

از دیده میشود که برای یک عدد N مشخص، هرچه درصد ریزدانه بیشتر باشد، نسبت تنش برشی سیکلی لازم برای ایجاد روانگرایی بیشتر میشود.