بخش نهم

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

(Stability and deformation of embankments during earthquakes)

دکتر سید محمد رضا امام

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله
- کلیات

موارد متعددی از گسیختگی خاکریزها و سدهای خاکی در اثر بار زلزله مشاهده شده است. این گسیختگی ها را میتوان به چند گروه تقسیم کرد:

- گسیختگی خاکریزهای تشکیل شده از ماسه های شل و اشباع. این گسیختگی ها عموما در اثر روانگرائی ماسه و کاهش شدید مقاومت آن اتفاق افتاده و باعث گسیختگی جریانی بشود.
- گسیختگی خاکریزهای شامل لایه های نازک از ماسه های شل و اشباع که در اثر کاهش شدید مقاومت لایه ماسه ای شل و اشباع و تشکیل سطح گسیختگی در آن اتفاق بیفتد.
- گسیختگی خاکریزهای تشکیل شده از ماسه خشک متراکم و یا رس سفت که در اثر کرنش کاهش مقاومت چندانی از خود نشان نمیدهند. این گسختگی ها ناشی از افزایش نیروهای ناپایدار کننده در اثر زلزله است.

در اینجا نوع اخیر گسیختگی و تغییر شکلهای مرتبط با آن بررسی میشود.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله
- کلیات

گسیختگی خاکریزها و سدهای خاکی تشکیل شده از خاکهای خشک میتواند شکلهای متفاوتی داشته باشد ازجمله:

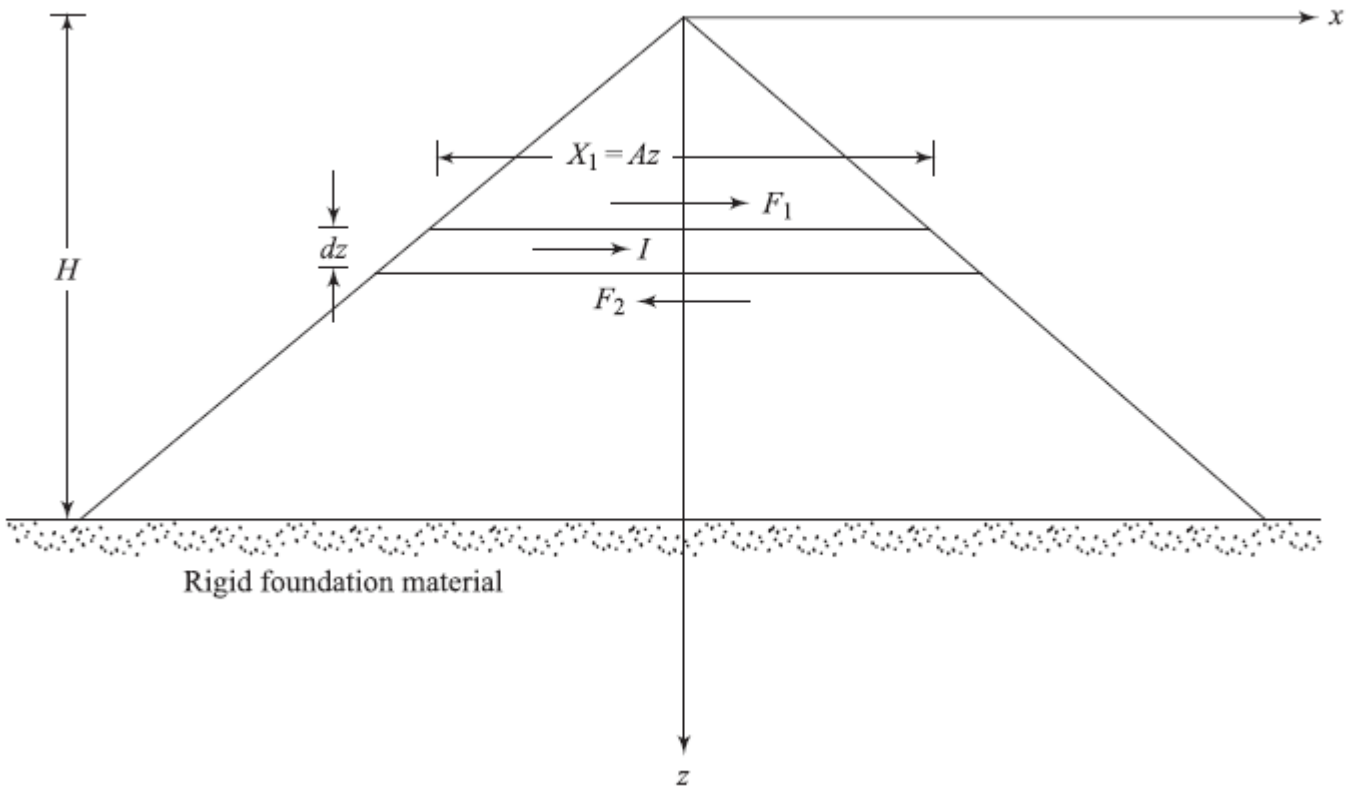
- گسیختگی همراه با تشکیل یک سطح لغزش دایره ای که بیشتر در خاکهای رسی اتفاق می افتد.
- گسیختگی همراه با تشکیل سطح لغزش صفحه ای که ممکن است کم عمق هم باشد. این گسیختگی ها بیشتر در خاکهای دانه ای دیده میشوند.
- گسیختگی و یا تغییر شکلهای زیاد در خاکریزهای تشکیل شده از خاکهای غیر متراکم که ممکن است همراه با تشکیل سطح گسیختگی نبوده و تنها تغییر شکلهای زیادی اتفاق بیفتد.

گسیختگی ها و تغییر شکلهای فوق ممکن است در اثر افزایش نیروهای ناپایدار کننده در شرایط زلزله اتفاق بیفتد. در اینجا قبل از بررسی گسیختگی خاکریزها و شیب ها ، ابتدا ارتعاشات و تغییر شکلهای ناشی از آنها در اثر بار دینامیکی بررسی میشود.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- ارتعاشات خاکریزها و سدهای خاکی

یک خاکریز بشکل ایده آل شده زیر در نظر میگیریم.



پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله
- ارتعاشات خاکریزها و سدهای خاکی

برای این خاکریز در صورتیکه فرض کنیم:

- طول خاکریز بی نهایت است. در عمل درصورتیکه نسبت طول به عرض خاکریز از چهار بیشتر باشد اثر طول خاکریز بر فرکانس ارتعاش طبیعی آن ناچیز خواهد بود.
- پی خاکریز صلب است
- نسبت عرض به ارتفاع خاکریز زیاد است. یعنی تغییر شکلها تنها برشی هستند.
- تنش برشی بر روی هر سطح افقی یکنواخت است.

در آنصورت با بررسی تعادل دینامیکی یک لایه به ضخامت dz از خاکریز میتوان نشان داد که این رابطه بشکل زیر بر حسب تغییر شکلهای افقی خاکریز u مدول برشی G و جرم حجمی آن r در می آید:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{z}\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- ارتعاشات خاکریزها و سدهای خاکی

در بدست آوردن این رابطه از میرائی ویسکوز صرفنظر شده است. با حل این رابطه تغییر شکلهای خاکریز از رابطه زیر بدست می آید:

$$u(z,t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t \right] J_0 \left(\beta_n \frac{z}{H} \right)$$

که در آن:

$$\omega_n = \frac{\beta_n}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

و داریم:

$$\beta_1 = 2.404, \beta_2 = 5.22, \beta_3 = 8.65, \ldots$$

و بقیه کمیت ها ضرایب مختلف هستند.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- ارتعاشات خاکریزها و سدهای خاکی

بنابراین فرکانس طبیعی در مودهای ارتعاشی مختلف خاکریز چنین خواهد بود:

$$\omega_1 = \frac{\beta_1}{H}\sqrt{\frac{G}{\rho}} = \frac{2.404}{H}\sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\omega_2 = \frac{5.52}{H}\sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\omega_3 = \frac{8.65}{H}\sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

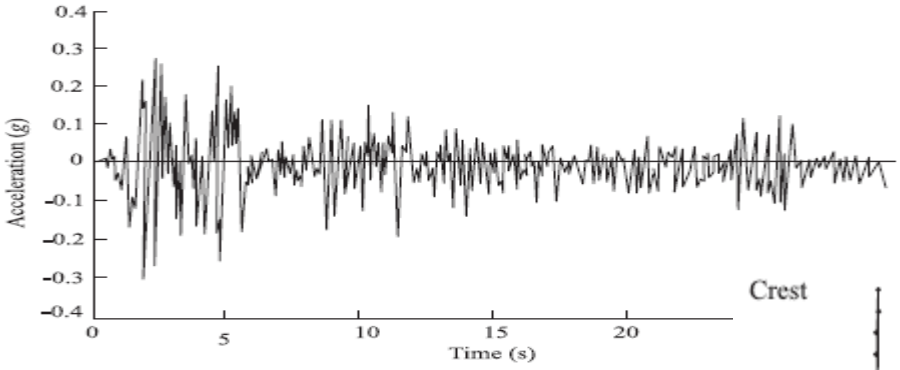
بشکل مشابهی میتوان برای ارتعاش جبری خاکریز جابجائی ها و فرکانس های طبیعی ارتعاش را تعیین کرد. برای زمانیکه خاکریز تحت جابجائی افقی با تغییرات $u_g(t)$ قرار گیرد رابطه تعادل دینامیکی بصورت زیر در می آید:

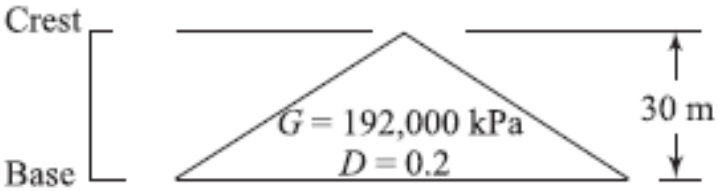
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{1}{z}\frac{\partial u}{\partial t}\right] = -\frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2}$$

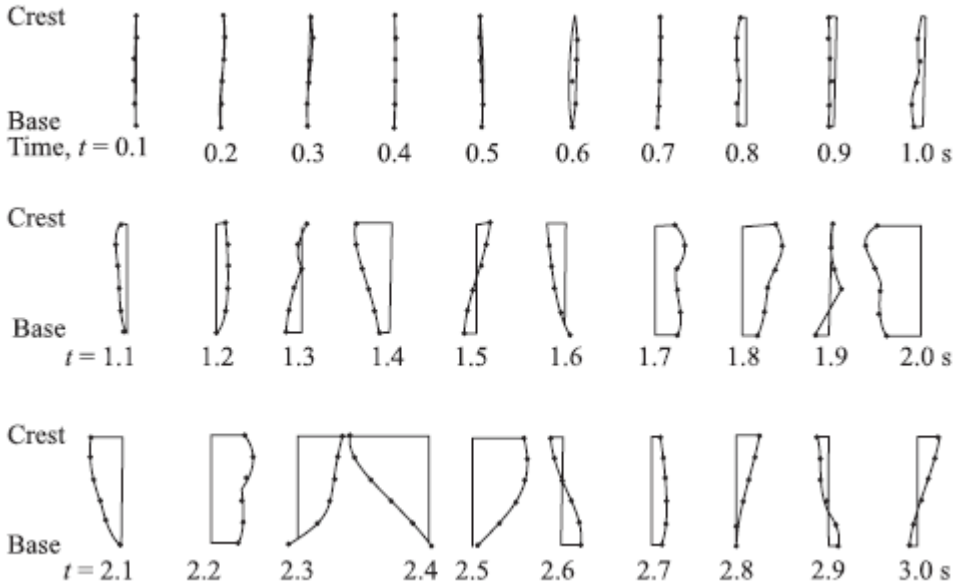
پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- ارتعاشات خاکریزها و سدهای خاکی

برای یک خاکریز با مشخصات که تحت اثر بار زلزله با شتاب نگاشت ال سنترو قرار میگیرد تغییر شکل ها در زمانهای مختلف بشکل زیر خواهد بود:



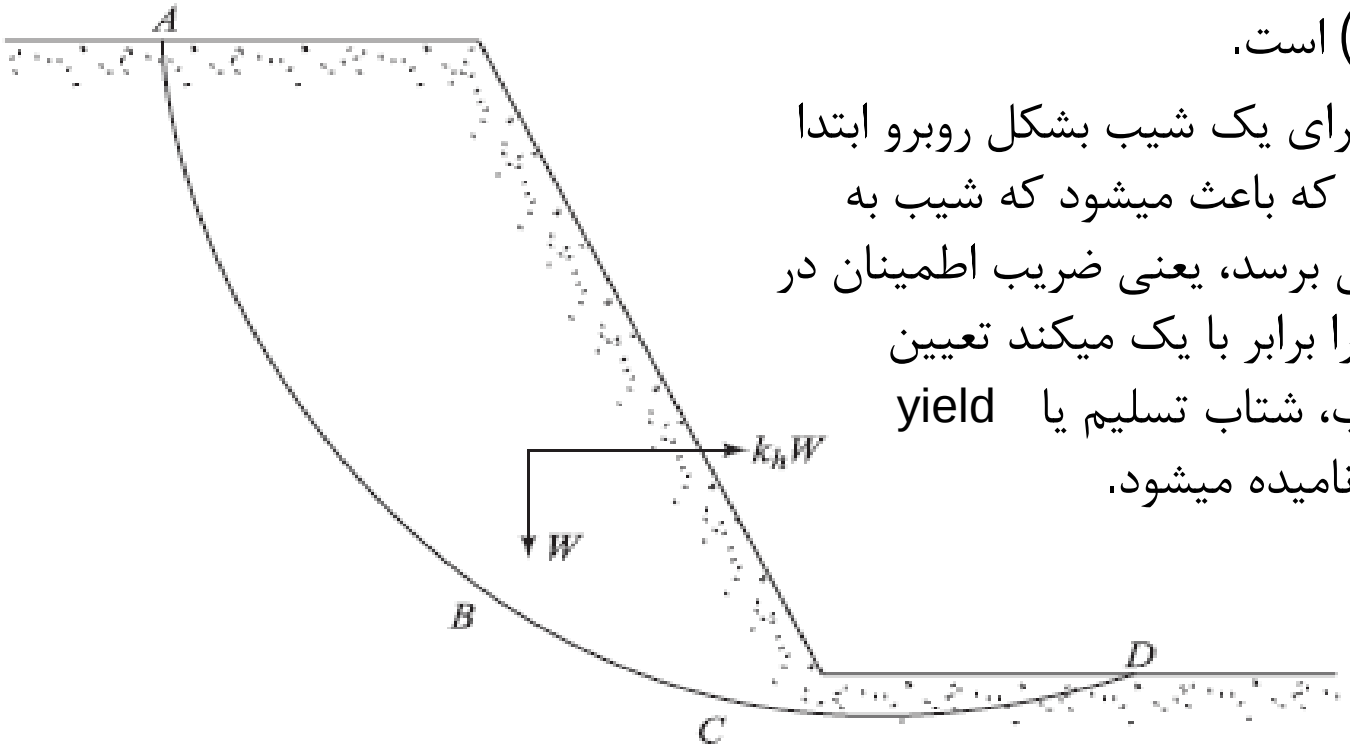




پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

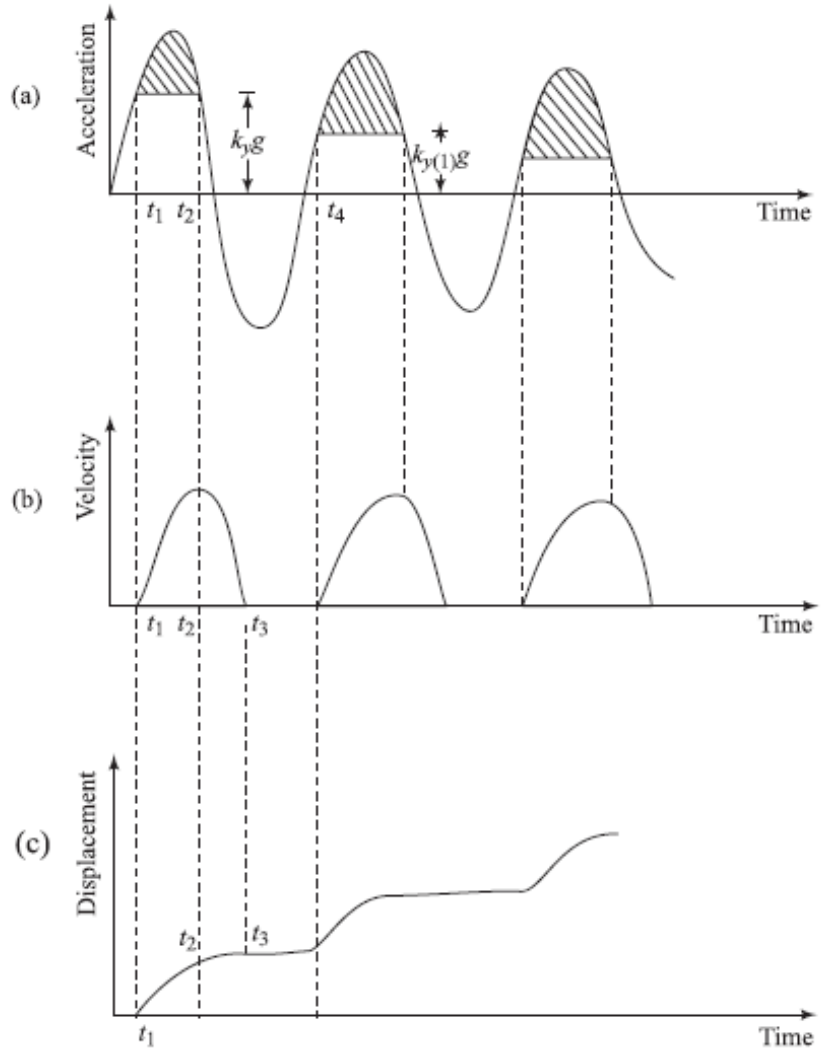
- تعیین جابجائی شیب ها در اثر زلزله

- یکی از معمول ترین روشهای تعیین تغییر شکل شیب های خاکی در شرایط زلزله استفاده از روش نیومارک (1965) است.
- در این روش برای یک شیب بشکل روبرو ابتدا شتاب افقی زلزله که باعث میشود که شیب به آستانه گسیختگی برسد، یعنی ضریب اطمینان در برابر گسیختگی را برابر با یک میکند تعیین میشود. این شتاب، شتاب تسلیم یا yield acceleration نامیده میشود.



پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- - تعیین جابجائی شیب ها در اثر زلزله



- سپس جابجائی های ناشی از بارگذاری بروش نشان داده شده در شکل روبرو تعیین میشود.
- در اینجا با هر سیکل بارگذاری، جابجائی تنها زمانیکه شتاب، باعث اعمال نیرو و حرکت بطرف پایین خاک روی سطح گسیختگی میشود اتفاق می افتد
- زمانیکه جهت شتاب و نیروی اعمال شده عکس میشود سرعت حرکت بسمت پایین کم شده و سپس به صفر میرسد تا آنکه مجددا جهت شتاب باعث اعمال نیرو بطرف پایین شیب بشود

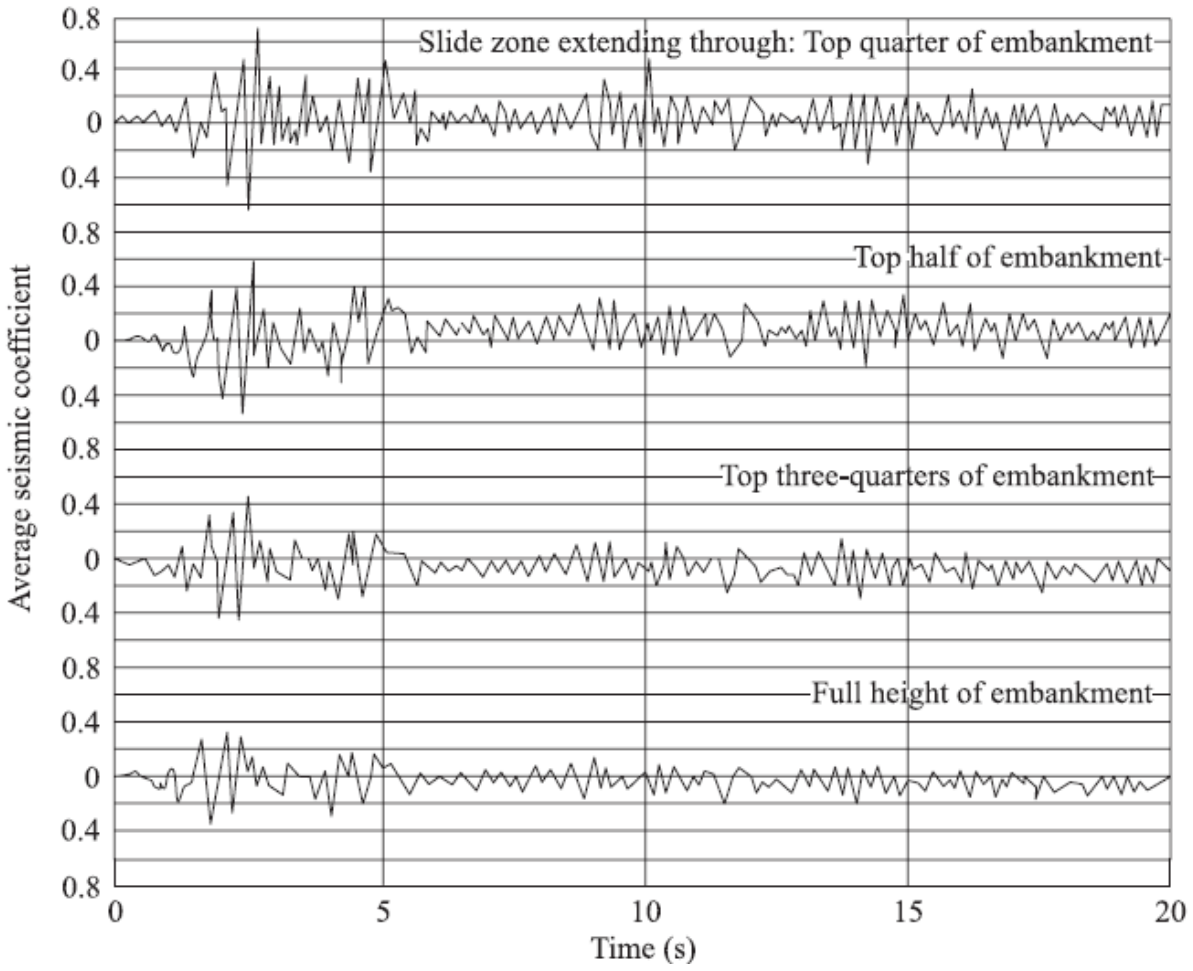
پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین جابجائی شیب ها در اثر زلزله

- در این روش با انتگرال گیری از نمودار شتاب-زمان (محاسبه سطح زیر نمودار)، منحنی تغییرات سرعت بدست می آید. وبا محاسبه سطح زیر منحنی سرعت-زمان نمودار تغییرات جابجائی با زمان تعیین میشود.
- با توجه به شکل دیده میشود که شتاب تسلیم بعد از هر سیکل بارگذاری ممکن است کمتر شود. این در صورتی است که جابجائی در سیکل اول باعث کاهش مقاومت خاک پس از رسیدن آن به حداکثر مقدار خود بشود.
- در انتها جابجائی تجمعی شیب بشکل نشان داده شده در قبل تعیین میشود.
- در کاربردهای عملی معمولا دیده شده است که درصورتیکه شتاب تاج خاکریز از g /75 بیشتر نشود و ضریب اطمینان پایداری شیب با استفاده از روشهای شبه استاتیکی حداقل برابر با 1/15 باشد، تغییر شکلهای شیب به اندازه کافی کوچک بوده و قابل قبول خواهند بود.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین جابجائی شیب ها در اثر زلزله

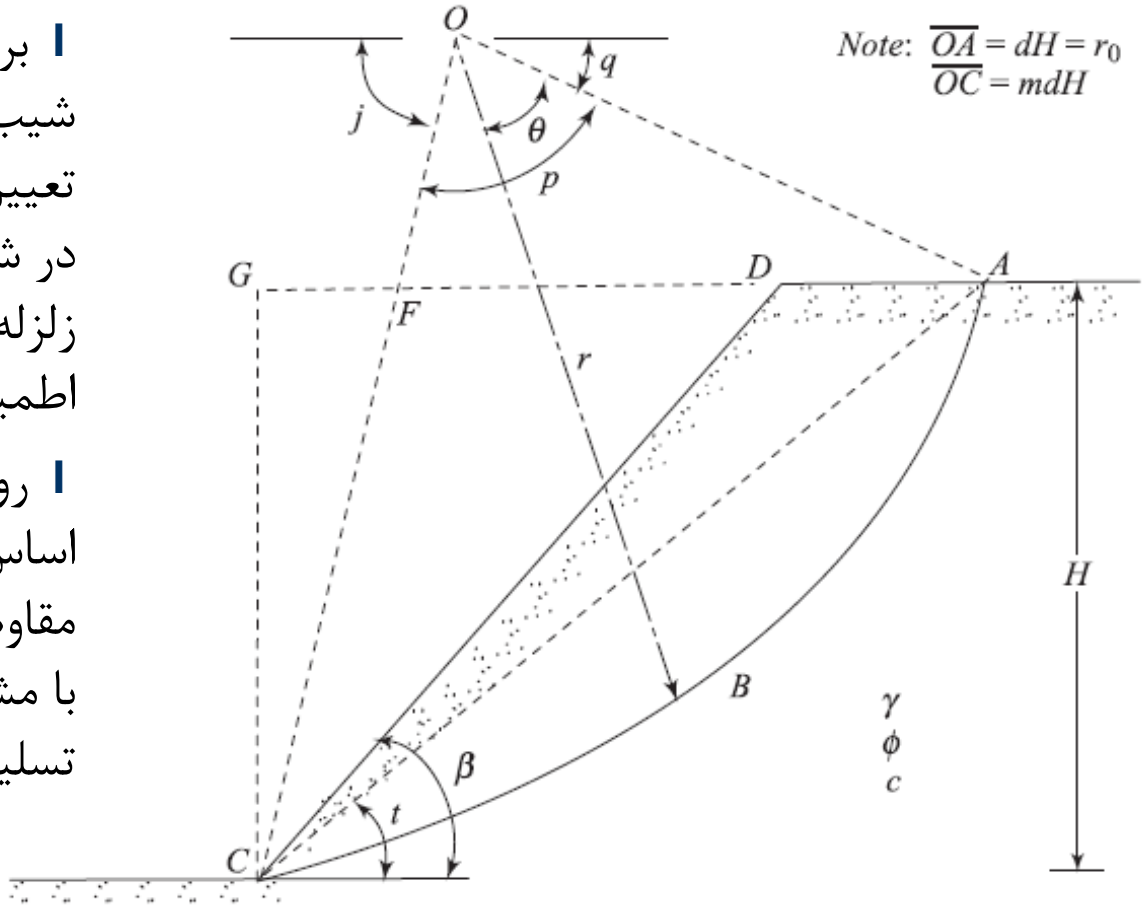


- بدلیل تغییرات نیروی برشی و جرم ناحیه در معرض گسیختگی خاکریز در ارتفاعهای مختلف، شتاب افقی متوسط اعمال شده در اثر زلزله بر خاک بالای سطح گسیختگی بستگی به ارتفاع سطح گسیختگی دارد.
- درشکل روبرو تغییرات شتاب متوسط اعمال شده بر خاک بالای سطوح با ارتفاع مختلف با زمان نشان داده شده است.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- - تعیین شتاب تسلیم

- برای تعیین شتاب تسلیم یک شیب میتوان از هریک از روشهای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب در شرایط زلزله استفاده کرد و شتاب زلزله را طوری انتخاب کرد تاضریب اطمینان برابر واحد شود.
- روشی توسط Prater (1979) بر اساس محاسبه لنگرهای محرک و مقاوم ارائه شده است که برای شیبی با مشخصات نشان داده شده، شتاب تسلیم را در جدولی ارائه می نماید.



پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

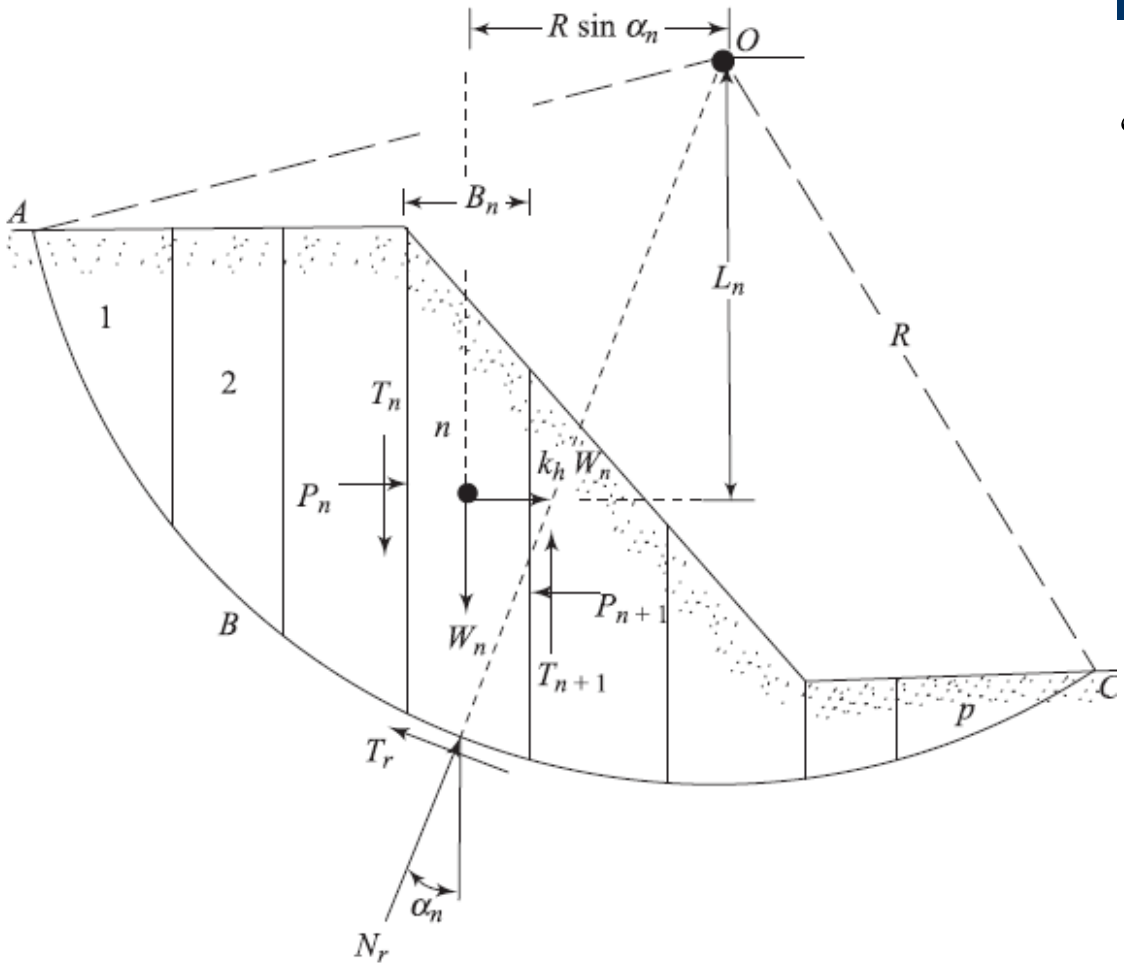
- تعیین شتاب تسلیم

β (deg)	tan ϕ	$c/\gamma H$			
		0.05	0.10	0.15	0.20
15	0.1	0.00	0.08	0.15	0.20
	0.2	0.10	0.20	0.27	0.33
	0.3	0.20	0.31	0.39	0.44
	0.4	0.30	0.41	0.50	0.55
	0.5	0.40	0.51	0.60	0.66
	0.6	0.49	0.61	0.70	0.76
	0.7	0.58	0.70	0.80	0.87
	0.8	0.66	0.79	0.89	0.97
	0.9	0.74	0.87	0.98	1.07
30	0.1	—	0.00	0.13	0.20
	0.2	0.00	0.11	0.25	0.35
	0.3	0.05	0.22	0.37	0.46
	0.4	0.14	0.32	0.46	0.56
	0.5	0.24	0.41	0.55	0.66
	0.6	0.32	0.50	0.63	0.75
	0.7	0.40	0.57	0.72	0.83
	0.8	0.47	0.65	0.79	0.91
	0.9	0.53	0.71	0.86	0.98

- جدول روبرو برای مقادیر مختلف زاویه شیب خاکریز از 15 درجه تا 75 درجه شتاب تسلیم را برای خاکهای دارای اصطکاک و چسبندگی ارائه میکند. جدول کامل در کتاب Das آمده است.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها در برابر زلزله

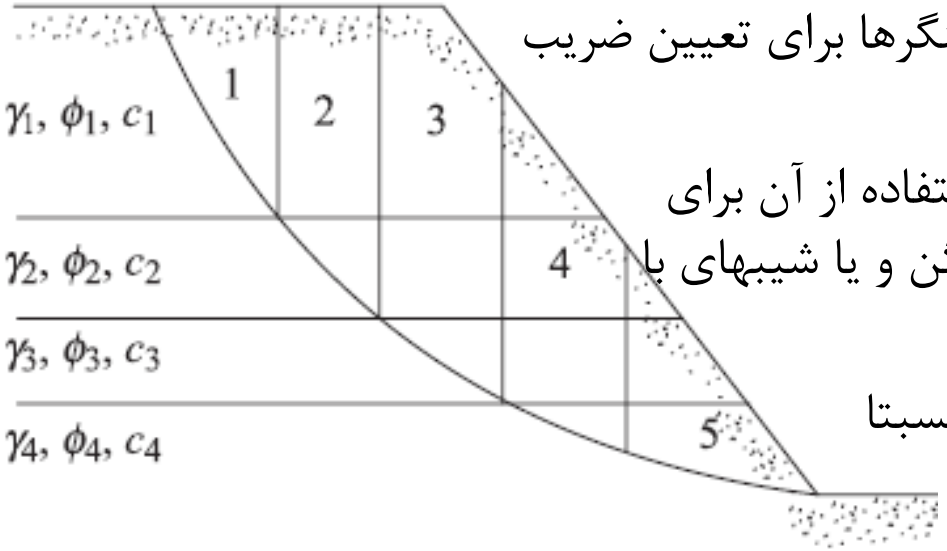


- یکی از روشهای تعیین ضریب اطمینان پایداری، استفاده از روش معمول قطعات است ولی همراه با افزودن شتاب ناشی از زلزله.
- در این روش نیروهای وزن و نیروی زلزله وارد شده بر هر یک از قطعات تعیین شده و با نیروهای ناشی از مقاومت برشی خاک مقایسه میشوند.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها در برابر زلزله

- در روش قطعات، ضریب اطمینان پایداری شیب از مقایسه نیروهای ایجاد کننده و مقابله کننده با لغزش و یا مقایسه لنگرهای مربوط به این نیروها برای تمامی قطعات بدست می آید.
- روشهای مختلفی بر اساس تقسیم شیب به قطعات پیشنهاد شده است که تفاوت آنها بیشتر بعلت فرضهای مختلفی است که در مورد نیروهای بین قطعه ای می کنند و یا استفاده از نیروها یا لنگرها برای تعیین ضریب اطمینان است.

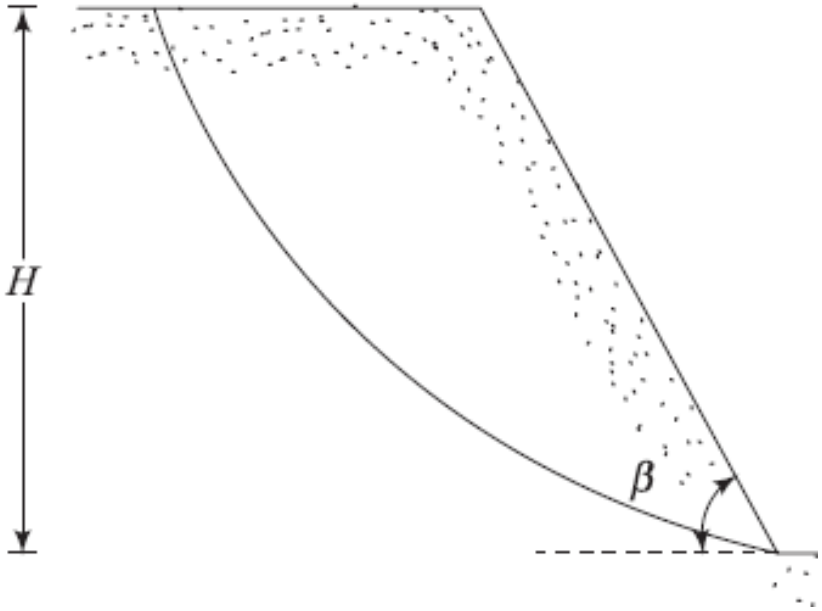


- مزیت عمده روش قطعات قابلیت استفاده از آن برای شیبهای تشکیل شده از خاک غیر همگن و یا شیبهای با هندسه یا بارگذاری های ویژه است.
- در این روشها حجم محاسبات لازم نسبتا زیاد است و غالبا بهتر است از نرم افزارهای تهیه شده بدین منظور استفاده کرد.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها در برابر زلزله

- برای خاکهای همگن تحت اثر بار زلزله روشهای مختلفی ارائه شده است. در اینجا یکی از این روشها که نسبتا ساده بوده و براساس روش تیلور (1937) توسط Majumdar (1971) ارائه شد تشریح میشود.



- برای یک شیب دارای اصطکاک و چسبندگی، مقاومت برشی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan\phi$$

- درصورتیکه زاویه اصطکاک داخلی خاک بیش از سه درجه باشد، دایره بحرانی لغزش همیشه از پای شیب میگذرد.

پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها در برابر زلزله

- ضریب اطمینان پایداری برای هر نقطه بر روی سطح لغزش را میتوان به سه روش تعریف کرد. یک روش براساس اصطکاک، دیگری بر اساس چسبندگی و سوم براساس هردو.

$$F_\phi = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_d} \qquad F_c = \frac{c}{c_d} \qquad F_s = \frac{c + \sigma' \tan\phi}{c_d + \sigma' \tan\phi_d}$$

- در روابط فوق پارامترهای دارای اندکس d نشان دهنده مقدار بسیج شده یا developed بوده و مقدارشان کمتر از پارامترهای بدون اندکس است.
- بدیهی است که اگر داشته باشیم: $\frac{c}{c_d} = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_d}$ در آنصورت ضریب اطمینان های سه گانه باهم برابر خواهند شد یعنی:

$$F_c = F_\phi = F_s$$

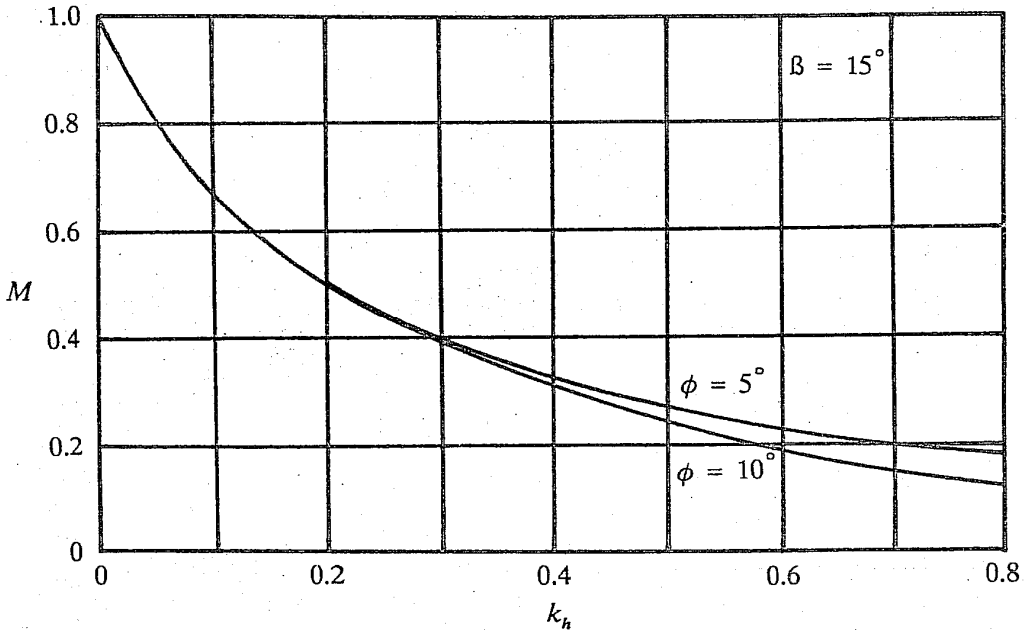
پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها در برابر زلزله

Majumdar نشان داد که در صورتیکه زاویه اصطکاک در روش تیلور به زاویه اصطکاک اصلاح شده که بر اساس رابطه زیر تعریف میشود تبدیل شود میتوان روش تیلور را برای شرایط زلزله نیز بکار برد:

$$\phi_m = \tan^{-1}(M \tan\phi)$$

در رابطه فوق M بستگی به زاویه شیب خاکریز و ضریب شتاب افقی زلزله دارد و با استفاده از نمودارهائی مانند نمودار روبرو میتوان مقدار آنرا تعیین کرد.



پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها در برابر زلزله

- در این روش برای بدست آوردن ضریب اطمینان بشکل زیر عمل میشود:

1- با داشتن مشخصات خاک و شیب و ضریب زلزله مقدار M را با استفاده از نمودار تعیین می کنیم

2- مقادیر مختلفی برای زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده انتخاب کرده (که همه باید کمتر از زاویه اصطکاک داخلی خاک باشند) و برای هریک از آنها ضریب اطمینان بر حسب زاویه اصطکاک را تعیین می کنیم. مثلا:

$$F_{\phi(1)} = \frac{\tan \phi_m}{\tan \phi_{d(1)}}$$

$$F_{\phi(2)} = \frac{\tan \phi_m}{\tan \phi_{d(2)}}$$

$$F_{\phi(3)} = \frac{\tan \phi_m}{\tan \phi_{d(3)}}$$

3- برای هریک از مقادیر زاویه اصطکاک بسیج شده و با داشتن شیب خاکریز، عدد بایداری را با استفاده از نمودارهای مربوطه تعیین می کنیم.

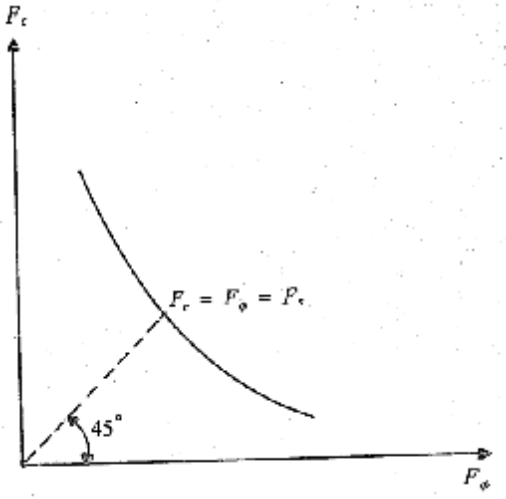
پایداری و تغییر شکل خاکریزها در شرایط زلزله

- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها در برابر زلزله

4- اکنون چسبندگی بسیج شده برای هر حالت را تعیین و ضریب اطمینان را بر حسب چسبندگی بدست می آوریم.

$$c_{d(1)} = m_1 \gamma H; \qquad F_{c(1)} = \frac{c}{c_{d(1)}}$$

$$c_{d(2)} = m_2 \gamma H; \qquad F_{c(2)} = \frac{c}{c_{d(2)}}$$



5- با رسم نموداری برای تغییران ضرایب اطمینان نسبت بهم، ضریب اطمینان برابر برای هردو را تعیین می کنیم.

بطوریکه:

$$F_s = F_c = F_\phi$$