

6. Сеизмичка дејства и стабилност косина и клизишта

6.1. Увод

Основни узроци губитка стабилности косине усљед сеизмичког дејства:

- Усљед инерцијалних сила тј. повећања смичућег напона на потенцијалној клизној површини
- Смањења смичуће чврстоће

Смањење смичуће чврстоће настаје због:

- деградације при цикличном оптерећењу
- повећања порних притисака у току земљотреса усљед чега долази до смањења ефективних напона
- утицаја вибрација на осјетљиве глине

У вези са горе наведеним сеизмички ефекти који утичу на стабилност косина се могу обухватити коришћењем два приступа:

- Инерцијална анализа стабилности косина
- Анализа губитка чврстоће у току земљотреса (*weakening slope stability analysis*)

Инерцијална анализа се препоручује за материјале који не губе чврстоћу у току земљотреса као што су тла која не омекшавају са повећањем деформације у току земљотреса, глине са ниском осјетљивошћу, тла изнад нивоа подземне воде. Други тип анализе се препоручује за услојене или трошне стијене, осјетљиве глине, мека и органска тла као и за растресита тла испод нивоа подземне воде.

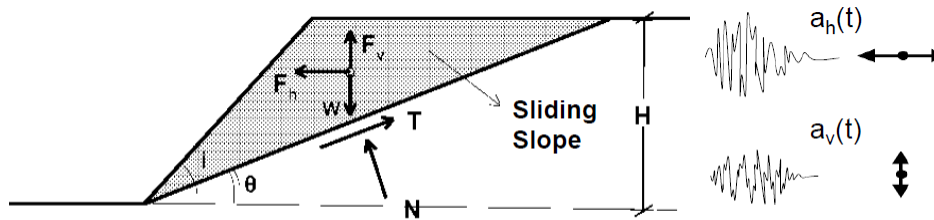
6.2. Методе анализе сеизмичке стабилности косина

Методе анализе сеизмичке стабилности косина се могу подијелити у три групе:

- Псеудостатичке методе – инерцијалне силе од земљотреса се симулирају додавањем статичких хоризонталних и вертикалних сила у услове равнотеже метода ламела.
- Њумаркова метода помјерања и методе базиране на њој – процјена неповратних помјерања која настају када када стварно убрзање прекорачи вриједност тзв. критичног убрзања. Корисна је кад псеудостатичке методе не дају задовољавајуће факторе сигурности.
- Динамичка анализа примјеном методе коначних елемената на основу одговарајућег конститутивног модела и сеизмичког улаза као резултат даје напоне и деформације при дејству земљотреса.

6.2.1. Псеудостатичка анализа

У псеудостатичкој анализи, циклично земљотресно кретање се замјењује константним хоризонталним убрзањем израженим у дјеловима гравитационог убрзања $k_h g$ гдје је k_h сеизмички коефицијент у хоризонталном правцу. Сеизмичка сила једнака производу овог убрзања и масе клизног тијела се задаје у тежишту истог. Утицај вертикалне псеудостатичке силе се углавном занемарује јер не утиче превише на стабилност косине.



$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

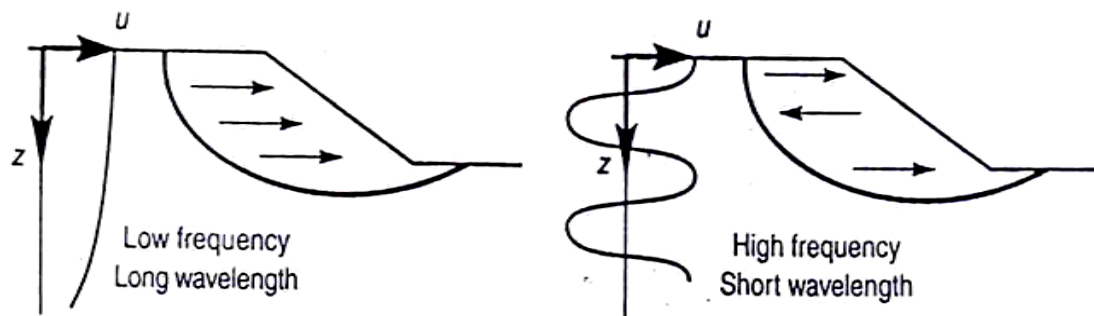
$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

Seismic Coefficient: $k_h = \frac{a_h}{g}$

$$k_v = \frac{a_v}{g}$$

Слика 6.1: Основни принцип псеудостатичке анализе. Блок на косој равни.

Основни недостатак псеудостатичке анализе је што се сложено осциловање при земљотресу замјењује константном статичком силом која дјелује у једном правцу који повећава нестабилност клизног тијела. Међутим, у условима динамичког оптерећења сила стално мијења смјер и интензитет у току времена. На тај начин је сеизмичко оптерећење у ствари серија пулсева помјерања.



Слика 6.2: Осцилације елемената клизног тијела у зависности од фреквенце сеизмичких таласа. Таласи ниске фреквенце (веће таласне дужине) изазивају помјерања тачака клизног тијела у истом смјеру по читавој висини, док таласи веће фреквенце изазивају помјерања у различитим смјеровима.

У многим случајевима ова анализа је превише конзервативна. Међутим постоје околности у којима ова анализа не даје резултате на страни сигурности као у случају значајног повећања динамичких порних притисака у току земљотреса или смањења смичуће отпорности у току земљотрес за више од 15% у односу на вршну чврстоћу.

Нема посебног правила за усвајање пројектних сеизмичких коефицијената иако су одређене препоруке дате на доњој слици. Ипак, сеизмички коефицијент би требало базирати на процијењеном убрзању масе тла клизног тијела и требало би да одговара дијелу процијењеног максималног убрзања (Kramer).

Horizontal Seismic Coefficient, k_h	Description	
0.05 - 0.15	In the United States	
0.12 - 0.25	In Japan	
0.1	“severe” earthquakes	Terzaghi [4]
0.2	“violent, destructive” earthquakes	
0.5	“catastrophic” earthquakes	
0.1 - 0.2	Seed [2], FOS ≥ 1.15	
0.10	Major Earthquake, FOS > 1.0	Corps of Engineers [5]
0.15	Great Earthquake, FOS > 1.0	
$\frac{1}{2}$ to $\frac{1}{3}$ of PHA	Marcuson [6], FOS > 1.0	
$\frac{1}{2}$ of PHA	Hynes-Griffin [7], FOS > 1.0	
FOS = Factor of Safety. PHA = Peak Horizontal Acceleration, in g's.		

Слика 6.3: Препоруке за усвајање пројектних сеизмичких коефицијената (FOS - фактор сигурности, PHA – максимално хоризонтално убрзање у дјеловима гравитационог убрзања)

6.2.2. Методе засноване на Newmark-ова методи помјерања (*permanent-displacement methods*)

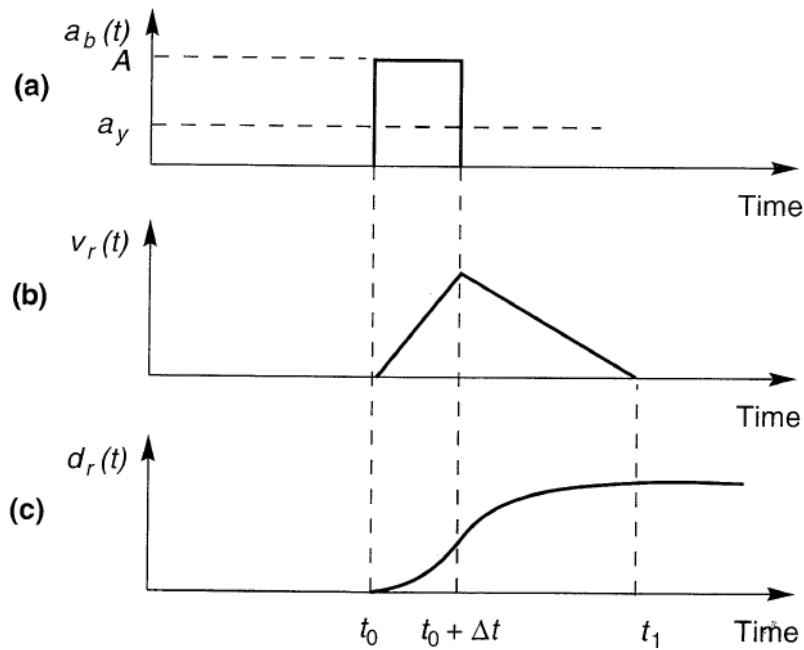
Њумарковом методом се се моделира клизно тијело крутим блоком на косој равни за који је познато критично убрзање (a_c , a_y) тј. убрзање које изазива помјерање блока низ раван. Ово убрзање се добија из услова да је фактор сигурности једнак 1. Након одабира земљотресног записа-акцелерограма врши се интеграција у временским интервалима где је убрзање веће од критичног у циљу добијања дијаграма брзина у току времена. Интеграцијом историје брзине добија се кумулативно неповратно помјерање крутог блока. Ако је блок изложен пулсу убрзања амплитуде A и трајања Δt при чему је A веће од критичног убрзања a_c , убрзање блока у односу на клизну раван у временском интервалу t_0 , $t_0 + \Delta t$ је:

$$a_{rel}(t) = a_b(t) - a_y = A - a_y \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$$

Релативно помјерање блока d_{rel} у току овог интервала се добија двоструком интеграцијом релативног убрзања:

$$v_{rel}(t) = \int_{t_0}^t a_{rel}(t) dt = [A - a_y](t - t_0) \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$$

$$d_{rel}(t) = \int_{t_0}^t v_{rel}(t) dt = \frac{1}{2}[A - a_y](t - t_0)^2 \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$$



Слика 6.4: Варијација релативне брзине и релативног помјерања између блока и клизне равни услед правоугаоног пулса убрзања у интервалу од t_0 до $t_0 + \Delta t$ (Kramer)

Кључна претпоставка је да се клизно тијело третира као круто-пластично тијело које се не деформише и не доживљава трајне (перманентне) деформације при убрзањима која су мања од критичног. Када убрзање прекорачи критичну вриједност клизно тијело се деформише пластично при константном напону дуж клизне равни.

Остале претпоставке:

- Статичка и динамичка чврстоћа тла су једнаке
- Критично убрзање остаје константно у току анализе тј. не зависи од нивоа деформација
- Помјерање уз косину није дозвољено тј. отпорност на клизање уз косину је бесконачно велика.
- Ефекти повећања порног притиска у току земљотреса су занемарени што је оправдано за збијене и преконсолидоване глине и врло збијене или суве пјескове. Ову анализу треба са опрезом примјењивати у ситуацијама гдје се очекује развој значајних динамичких порних притисака.

Погодност за примјену ове методе се може оцијенити на основу односа периода осциловања тла T_s (*fundamental site period*) и средњег периода земљотресног кретања T_m (*mean period of earthquake motion*) при чему се период осциловања тла може процијенити као:

$$T_s = \frac{4H}{v_s}$$

гдје су H – максимално вертикално растојање од површине терена и клизне равни
 v_s – брзина смичућих таласа кроз материјал клизног тијела

Средњи период T_m се добија анализом земљотресног записа – акцелерограма.

Генерално метода је погодна за однос $T_s/T_m < 0.10$ што одговара плитким, крутим клизиштима (плитка клизишта и одрони). Између 0.1 и 1 анализа даје резултате који нису на страни сигурности док између 1 и 2 даје конзервативне резултате.

6.2.3. Динамичка анализа методом коначних елемената (*Dynamic finite element analysis*).

Напонско-деформацијска анализа на 2Д и 3Д моделима коришћењем методе коначних елемената и методе коначних разлика даје најпотпунији увид у стање косине у току земљотресног дејства. Међутим овако комплексно моделирање захтијева велику количину квалитетних улазних података: обиман програм истражних радова и лабораторијских испитивања статичких и динамичких својстава тла, одабир одговарајућих сеизмичких улаза, одабир адекватног нелинеарног, деформацијских зависног цикличног модела тла. Додатно ова метода захтјева доста процесорског времена па се примјењује за сложене пројекте као што су земљане бране и косине које могу угрозити критичне елементе инфраструктуре.