

**МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА КЛИЗАЊА У УСЛОВИМА  
ПОРЕМЕЋЕНЕ СТАБИЛНОСТИ ТЛА**

НЕДЕЉКО СТОЈНИЋ<sup>1</sup> \*

*<sup>1</sup>Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд, Србија*

**Сажетак:** Главни циљ овог истраживања је да се у временској историји представи механизма, обликовања терена дате падине за време процеса клизања, до његове нове завршне форме. Ово значи да је осим померања материјала од кога је изграђена падина у времену дешавања процеса наглашено и стварање нове форме терена као резултат самог процеса. Овакав начин истраживања дефинитивно отвара нови простор у предикцији рељефних форми терена зависно од карактеристика терена и очекиваних временских дешавања. Овде је анализиран процес осипања и клизања тла на једној неогеној падини код места Убилци (део урбаног простора града Смедерева), који је био изазван људском делатношћу (засацањем падине) и временским утицајем, кишни период. Да би се представио континуирани ток процеса померања тла падине коришћен је продужени метод раздвојених елемената. Линија профила површине терена која је добијени нумеричком анализом се веома добро слаже са завршном профилном линијом падине на којој је дошло до реалног осипања и клизања тла.

**Кључне речи:** нумеричка анализа, померање материјала, изглед завршног профила

**Увод**

У овом случају динамичка анализа у смислу математичко моделирања одређеног терена, значи анализу његовог понашања у временској историји под већ дефинисаним условима као што су геометрија, механичке карактеристике, спољашњи утицај и други фактори који се могу математички одредити.

Клизишта припадају у једном од главних падинских процеса који перманентно обликују терен у смислу њихове бројне распрострањености и веће или мање активности. Због тога је посебан задатак који се намеће код испитивања процеса клизања тла, динамичка анализа самог дешавања клизања у временској историји.

Главни циљ овог истраживања је да се представи обликовање одређене падине за време процеса клизања терена до његовог завршног изгледа. Клизиште које је коришћено за ово испитивање догодило се услед засацања неогене глиновите падине у месту Убилци (урбани део града Смедерева). Подаци који се односе на ово клизиште добијени су од "Геосонде" (1990), геолошке фирме која се бавила овим случајем. Неогени седименти како у самом Смедереву и његовој широј околини, тако

---

\* e-mail: stojnic.nedeljko@gmail.com

и у целој Србији имају велико распрострањење (Анђелковић, М., Анђелковић, Ј., 1989, 1994; Марковић, Ј. Ђ., 1967; Милошевић, М. Б., Миливојевић, М. 2008; Милошевић, М. Б., Миливојевић, М., Чалић, Ј., 2009; Крстић, Н. 2003; Јовановић, Г. 2010). Поред тога у овим седиментима се дешава велики број клизишта обзиром да су неогене творевине често изграђене од глиновитих и песковито глиновитих седимената (Milošević, M. B. i Milivojević, M., Čalić, J. 2009; Божиновић, Д, Шутић, Ј., Локин, П. (1984); Јевремовић, Д. (1990); Abolmasov, B. & Stojkov, K. (1994); Orlić, B., Sunarić, D. 1994.) Динамичка анализа процеса клизања је урађена помоћу продуженог метода раздвојених елемената, која омогућава понашање медијума за време процеса колапса као и померања материјала на велика растојања. Симулација је урађена у две димензије.

### Методологија испитивања

Конвенционални метод раздвојених елемената, ДЕМ је коришћен у анализи механичких проблема који се односе на стенске масе. У симулацији претурања стенских стубова који су били скоро вертикални постигнути су задовољавајући резултати. Мегуро и Хакуно (Meguro, K. and Nakuno, M. 1989) су користили ДЕМ у симулацији авеланжа стенског материјала. Касније је Iwashita (Iwashita, K. and Nakuno, M. 1990) продужио овај метод увођењем порних опруга између елемената да би инкорпорирао ефекат порног материјала и континуитет медијума, и назвао га модификовани метод раздвојених елемената. Појам продужени метод раздвојених елемената користи се као синоним. Када порне опруге нису нарушене материјал се понаша као континуум, али када оне почињу да пуцају медијум постепено губи континуитет и на крају се понаша као потпуно дисконтинуиран материјал. У развоју метода Meguro и Nakuno (Meguro, K. and Nakuno, M. 1989) су даље развили критеријуме за пуцање порних опруга. Yamamoto је искористио овај метод у проучавању вулканске ерупције и дистрибуције руптура за време тока магме (Yamamoto, K. and Nakuno, M. 1991). У симулацији понашању медијума за време јаке трешње изазване земљотресом такође је коришћен продужени метод раздвојених елемената (Stojnic, N. and Higashihara, H. 1995).

Медијум у проудженом методу раздвојених елемената је предсатвљен кружним елементима и порним опругама између њих. У симулацији се користи Voight тип медијума. То значи да еластична и дампинг сила делују симултано на контакту елемената. Постављене су независне једначине померања за сваки елемент, и свака се решава прогресивно корак по корак у складу са временском историјом што омогућава праћење кретања свих елемената.

### Формулација

Једначина кретања за произвољан елеменат је

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + F = 0 \quad (1)$$

$$I\ddot{\phi} + D\dot{\phi} + M = 0 \quad (2)$$

где су:

$m$  маса елемента;  $I$  момент инерције елемента;  $F$ ,  $M$  резултантне силе и моменти који делују на елеменат;  $C, D$  дампинг коефицијенти;  $x, \phi$  вектори померања и угаоно померање.

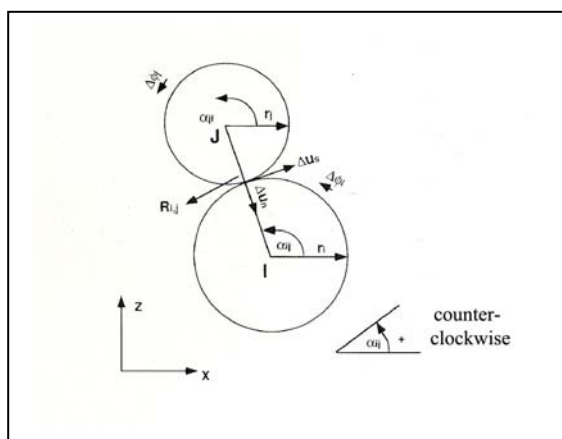
Три услова за процену да ли су елементи ,  $i$  и  $j$  , у контакту

$$r_i + r_j \geq R_{i,j} \quad (3)$$

где је:

$$R_{i,j} = \sqrt{((x_j - x_i)^2 + (z_j - z_i)^2)} \quad (4)$$

Линија која спаја центре елемената  $i$  и  $j$  се сматра да је нормални правца контакта. Са елементом  $i$  као базом, угао који ова линија заклапа са осом  $x$  је обележен са  $\alpha_{ij}$  (позитиван у супротном смеру од казаљке на сату) (слика 1.).



Слика 1. Елемент  $i$  и  $j$  у контакту

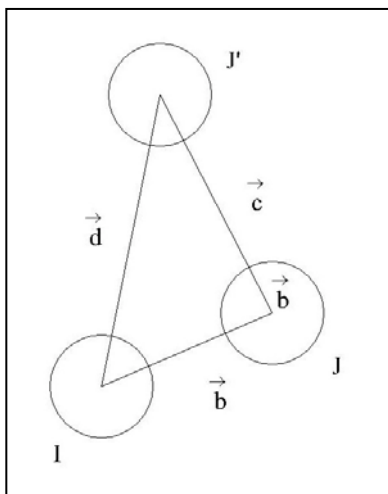
Синус и косинус угла  $\alpha_{ij}$  су дати у формулама

$$\cos \alpha_{ij} = \frac{x_j - x_i}{R_{ij}} \quad (5)$$

$$\sin \alpha_{ij} = \frac{z_j - z_i}{R_{ij}} \quad (6)$$

Када се претпостави да су координате центра елемената  $i$  и  $j$  ( $x_i, z_i$ ) и ( $x_j, z_j$ ), и да су њихови радијуси  $r_i$  и  $r_j$ , критеријум за постављање порних опруга је дат изразом

$$(r_i + r_j) \cdot DCR1 > R_{ij} \quad (7)$$



Слика 2. Релативно померање вектора порних опруга

Релативна позиција вектора елемената  $i$  и  $j$  када су постављене порне опруге (време  $0$  у  $t$ ) су означене помоћу  $\vec{d}$  и  $\vec{b}$  (Слика 2.).

Када издужење порне опруге у времену  $t$  превазиђе специфични однос свог природног издужења, долази до пуцања порне опруге. Тада се користи релација:

$$|b| \geq |d| \cdot DCR2 \quad (8)$$

Пуцање у порном материјалу се дешава због тензионих сила у нормалном правцу када је испуњен услов за кидање. Тада се узима да су попуцале порне опруге и у нормалном и тангенцијалном правцу.

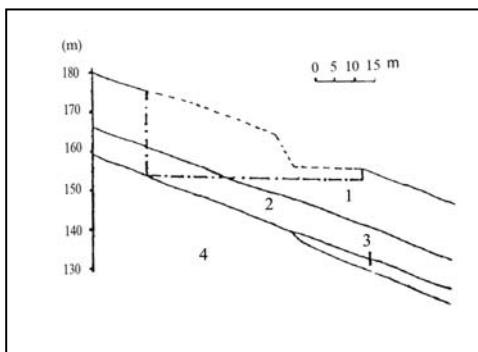
Критеријум за пуцање порних опруга у тангенцијалном правцу је Coulomb's критеријум за смичуће фрактуре.

$$\tau_c = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (9)$$

Где је  $\tau_c$  отпорност на смицање,  $\sigma$  је нормална сила на површини смицања,  $c$  је кохезија  $\phi$  угао унутрашњег трења.

### Модел за симулацију

Модел за нумеричку симулацију је урађен на основу профила реално догођеног случаја пре него што је дошло до клизања тла. (слика 3).



Слика 3. Реални профил падине у Убилцима пре него што је почело клизање, са обележеним делом падине који је искоришћен за стварање нумеричког модела.

Легенда: 1. Глина, 2. Песковита глина, 3. песков. глина и шљунак, 4. лапоровита глина  
 - - - - - Део профила нумеричког модела пре дешавања клизања тла  
 - - - - - Облик нумеричког модела

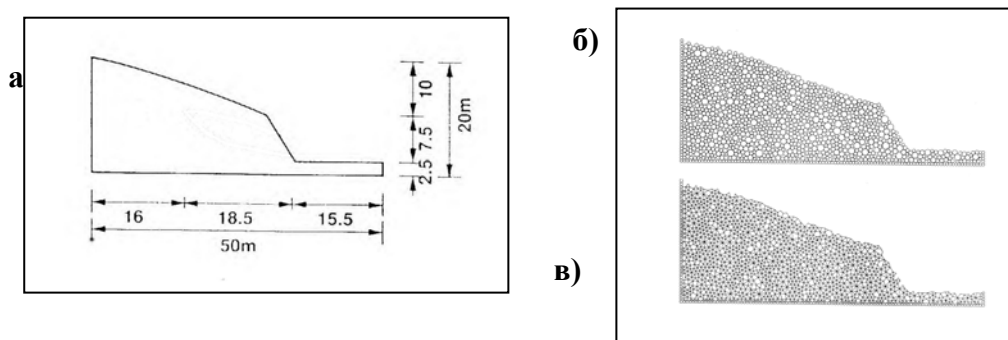
Табела 1. Вредности меахничких парамеатра који су коришћени за симулацију клизишта

Глина <i>Clay</i>		Вредност параметара <i>Parameter values</i>
Густина елемената <i>Element density</i>		$1.8 \times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )
Коефицијент еластичност елемента <i>Element springs</i>	нормални правац <i>normal direction</i>	$2.7 \times 10^9$ (N/m)
	тангенцијални правац <i>shear direction</i>	$1.4 \times 10^8$ (N/m)
Константа пригушења <i>Damping constant</i>	нормални правац <i>normal direction</i>	$7.5 \times 10^5$ (N/m)
	тангенцијални правац <i>shear direction</i>	$1.8 \times 10^5$ (N/m)
Коефицијент трења између елемената <i>Coefficient of friction between elements</i>		<b>0.25</b>
Крутоћ порних опруга <i>Stiffness of pore springs</i>	нормални правац <i>normal direction</i>	$1.4 \times 10^8$ (N/m)
	тангенцијални правац <i>shear direction</i>	$6.7 \times 10^5$ (N/m)
Константа пригушења порног материјала <i>Pore damping constant</i>	нормални правац <i>normal direction</i>	0.0 (N <sub>s</sub> /m)
	тангенцијални правац <i>shear direction</i>	0.0 (N <sub>s</sub> /m)
Критеријум за успостављање порних опруга ( $\alpha$ ) <i>Criterion for setting up pore springs</i> Критеријум за успостављање порне опруге ( $\alpha$ )		<b>1.3</b>
Критеријум за кидане порне опруге ( $\beta$ )		<b>1.004</b>
Итерациони временски интервал симулације		$8.0 \times 10^{-8}$ (s)

Димензије и облик нумеричког модела који је узет за нумеричку анализу, одговарају реалном делу падине (обележено испрекиданом линијом са тачкицама). Параметри материјала који су коришћени у нумеричкој симулацији добијени су на основу реалних карактеристика тла и класичних формула (табела 1). За време процеса симулације вредности параметара се нису мењале.

Пошто је један од циљева у овом истраживању био да се покаже утицај променљивости времена (сув и влажан период) (Живковић, Н., Анђелковић, Г. 2004; Ракићевић, Л. Т. 1987) на активирање падинског процеса, коришћена је глина са различитим вредностима кохезије тла. У случају суве глине (30% влаге) коришћена је кохезија од  $25 \text{ kPa}$ , док је у случају влажне глине (80% влаге) коришћена кохезија од  $15 \text{ kPa}$ .

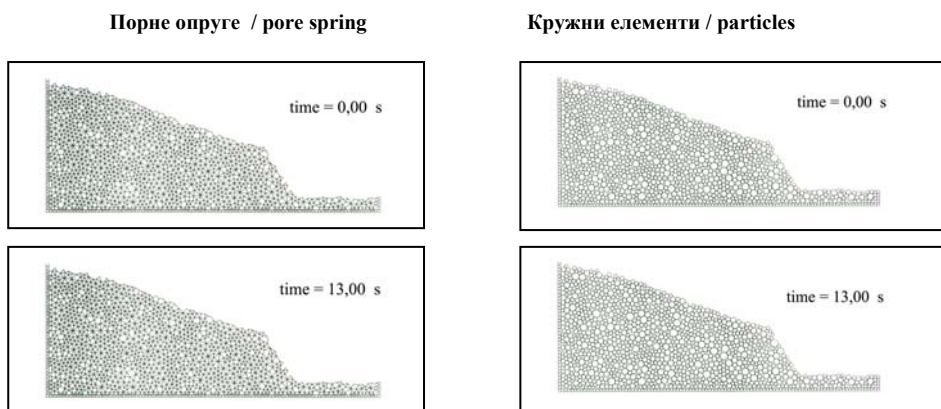
Део падине са својим димензијама и нумерички модел са порним опругама и кружним елементима су приказани на (слици 4).



Слика 4. Део реалне падине (а), нумерички модел са кружним елементима (б) и порним опругама (в).

### Резултати нумеричке анализе

Прво је симулирано понашање падине у условима сувог времена, односно се већом вредношћу кохезије,  $25 \text{ kPa}$ . Као што је видљиво из резултата, након 13,00 секунди симулације није било никакве промене на падини.



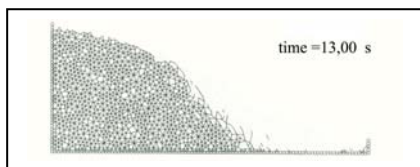
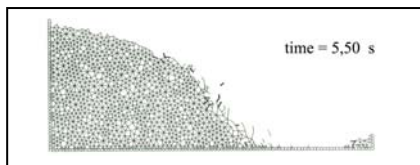
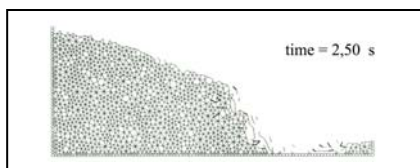
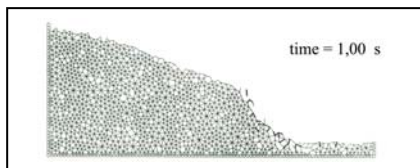
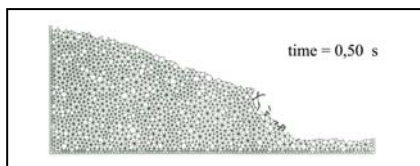
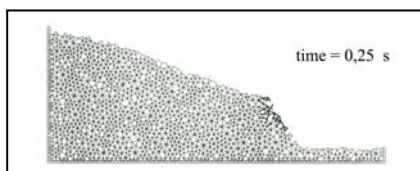
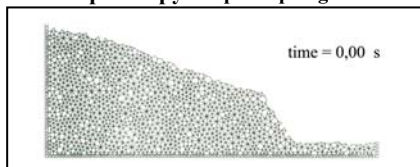
Слика 5. Резултати EDEM нумеричке симулације за суву глину, кружни елементи и порне опруге.

У току кишног периода глина је променила своје механичке карактеристике што је предствљено смањењем вредности њене кохезије,  $15 \text{ kPa}$ . На (слици 6.) види се почетак активирање падинског процеса на испитиваном терену. Прво је почео процес пуцања на најстрмијој површини профила и одатле наставио према падини. Пошто је глиновити материјал још увек био чврст, није било никакве веће пукотине у телу

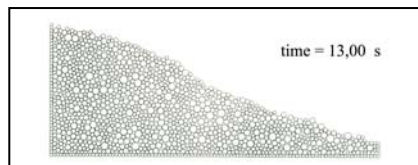
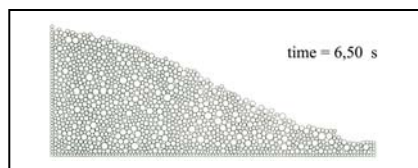
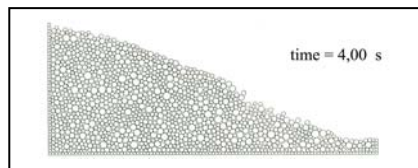
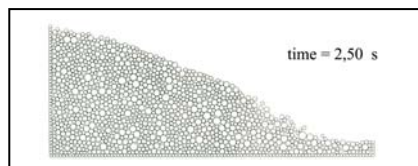
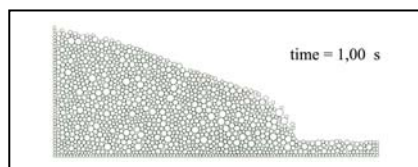
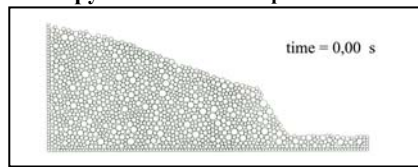
падине даље од самог места засецања која би се развила и била окидач за велико померање масе.

На основу простирања пукотина у телу падине може се видети да процес откидања материјала иде по кружној линији која је типична за сам процес.

**порне опруге / pore springs**



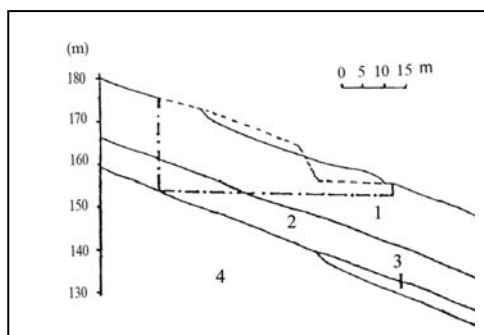
**кружни елементи / particles**



Слика 6. Резултати EDEM нумеричке симулације за влажну глину, кружни елементи и порне опруге

У овом случају је након 13,00 секунди симулације дошло до значајних промена на падини. Површина засека је нестала док је материјал који се померао под дејством силе гравитације испунио скоро читав претходно направљен засек. Завршна линија рељефа се одликује заталасаном површином која је типична за овакав вид померања материјала. Заталасана површина тла је индикатор за области које су захваћене процесом клизања.

Упоређујући крајњи изглед симулационог модела са реалним случајем (слика 7) који се десио на падини Убилци, могуће је да се нађе пуно сличности како крајњег изгледа површине падине тако и распрострањења материјала.



Слика 7. Завршни облик падине Убилци, након завршеног процеса клизања тла.

Легенда: 1. Глина, 2. Песковита глина, 3. Песковита глина и шљунак, 4. Лапоровита глина  
 - - - - - Део профила нумеричког модела пре дешавања клизања тла  
 ————— Облик нумеричког модела

### Закључак

У складу са добијеним резултатима симулације клизања засечане падине, продужени метод раздвојених елемената је показао своју ефикасност у анализирању оваквих феномена.

Било је могуће да се прати процес клизања и његов механизам у временској историји. На овај начин је могуће зоне које могу да буду угрожене од стране процеса клизања, што је веома важно са становишта урбанизма и процене ризика.

Анализирањем падинског процеса на овај начин омогућава испитивање како вредности параметара тла и њихова промена утичу на дешавање падинског процеса.

Резултати симулације показују да у случају падине са високом вредношћу кохезије глине,  $25 \text{ kPa}$ , падина остаје непо ремећена. Међутим, у случају мање кохезијом глине,  $15 \text{ kPa}$ , долази до настанка падинског процеса. За време симулације било је могуће да се прати целокупан процес клизања од почетка колапса падине па до краја и смиривања модела. Процес колапса је почео са стварањем пукотина при врху засечане падине и померању одвојеног материјала низ засечену падину и притом покривајући хоризонтални део засека. Крајњи профил настао са завршавањем процеса клизања је изглед падине који је добијен нумеричком симулацијом продуженим методом раздвојених елемената. У поређењу са реално догођеним случајем који се десио у Убилцима (слика 7.) види се доста добро поклапање између реалног и симулираног случаја. На овај начин је могуће да се предвиди облик предела помоћу нумеричке симулације.

## Литература

- Abolmasov, B. & Stojkov, K. (1994). Lide on urban planning in Belgrade city, Proc. Of the VII IAEG Cobgress, Vol. III, Lisabon, pp. 2161-2168.
- Анђелковић, М, Анђелковић Ј. (1989). Стратиграфски положај црвених серија у терцијару Србије и њихов значај за палеогеографију и тектонику. - *Геол. анал. балк. пол.*, 53, 1-19, Београд.
- Анђелковић, М, Анђелковић, Ј. (1994). Горњи еоцен између Топлице и Западне Мораве. - *Геол. анал. балк. пол.*, 58, св. 1, 1-11, Београд.
- Божиновић, Д, Шутић, Ј., Локин, П. (1984). Зона површинског распадања глиновитих неогених наслага – специфичности и значај за грађевинску делатност, Зборник реферата VIII JSHGIG, Будва
- Geosonda" - Beograd, geology survey company (1995), Geophysical and geomechanical data related for Ubilci slope.
- Група аутора (1976). Основна геолошка карта и тумач за лист „Крушевац“. Београд: Савезни геолошки завод.
- Живковић, Н., Анђелковић, Г. (2004). Висински градијент падавина у Србији, *Гласник Српског географског друштва*, 84(2), str. 31-36
- Iwashita, K. and Nakuno, M. (1990). Midified distinct element methodsimulation of dynamic cliff colaps, *Structural Eng./Eartqu. Eng. JSCE*, No. 416/1-13, Vol.7, No.1,pp.133-142,1990.
- Јевремовић, Д. (1990). Утицај површинског распадања глине и лапора на геотехничка својства терена (Докторска дисертација), Београд: Рударско-Геолошки факултет
- Јевремовић, Д. (1990). Утицај површинског распадања глине и лапора на геотехничка својства терена (Докторска дисертација), Београд: Рударско-Геолошки факултет
- Јовановић, Г., Крстић, Н. (2010). Мекушци и остракоде средњеоцењског Српског Језера, Сборник радова, 15 Конгрес геолога са међународним учешћем, Београд
- Крстић, Н., Савић, Љ., Јовановић, Г., Бодор, Е.(2003). Утицај површинског распадања глине и лапора на геотехничка својства терена (Докторска дисертација), Београд: Рударско-Геолошки факултет
- Marković, J. Đ. (1967). Gornjo-velikomoravska kotlina, geomorfološka posmatranja, Zbornik radova Geografskog Lover Miocene laces of the Balkan Land. Acta Geologi, 43, 3,pp. 291-299.
- Meguro, K. and Nakuno, M. (1989), Fracture analyses of concrete structures by the modified distinct element method, *Structural Eng./Eartqu. Eng. JSCE*, 6(2), Proc. of JSCE No. 410/12, pp.175-180, 1990.
- Милошевић, М. В. и Миливојевић, М., Ћалић, Ј. (2009). Активна клизишта на подручју општине Љиг, *Гласник Српског географског друштва*, 84(1), стр. 25-34.
- Милошевић, М. В. и Милановић, А. (2008). Сеизмизам као генетски фактор клизишта у сливу Белице, *Гласник Српског географског друштва*, 89(1), стр. 51-58
- Orlić, B., Sunarić, D. (1994). Assessment of engineering geological stability for urban planning by fuzzy logic. Proceedings 7-th International congress IAEG. Volume 3, pp.2329-2336.
- Ракићевич, Ј. Т.(1978). Регионални распоред суше у Србији, *Гласник српског географског друштва*, 67(1), str. 9-18
- Stojnic, N. and Higashihara, H. (1995). Sand Cone Behavior During Earthquake Displacement (N-S Component), *Proceedings of the 50<sup>th</sup> Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, Saporo.
- Yamamoto, K. and Nakuno, M. (1991), Simulation analyzes of volcanic eruption by the modified distinct element method, *J. Phys. Earth.*, 39. pp. 441-460

## MODELING OF THE SLIDING PROCESS IN CONDITION OF DISTURBED SOIL STABILITY

NEDELJKO STOJNIC<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Jaroslav Cerni Institute for the Development of Water Resources, Belgrade, Serbia*

**Abstract:** Main goal of this investigation is to present a mechanism, terrain shaping of a certain slope during the sliding process, in time history, up to its final form. It means that except slope material movement what is the slope composed, in time of slope occurrence is emphasized becoming of a new terrain form as a result of the process itself, too. This way of investigation definitively opens a new approach in a terrain relief form prediction depends on terrain characteristics and expecting weather occurrence. Here is analyzed a process of land crumbing and sliding on a Neogene slope at Ubilci place (part of urban area of Smederevo city), which was triggered by humane activities (undercutting of slope) and weather influence (rainy period). To present continuity flow of the slope material movement, it is used extended distinct element method. Profile line of the terrain surface which is obtained by numerical analyzes is in very good agreement with the finale profile line of the slope where a real case of crumbing and soil sliding has occurred.

**Key words:** numerical analysis, material movement, finale profile shape

### Introduction

In this case, dynamic analysis in sense of mathematical modeling of the certain terrain mean its behavior in time history under already defined conditions as geometry, mechanical characteristics, outside influence and other factors which can be defined mathematically.

Landslides belong to one of the main slope processes which permanently shaping terrain in sense of their distribution and more or less activation. Because of that, one of the special scopes impose in sliding processes investigation, is a dynamical analyzes of landslide occurrence itself in time history.

Main goal of this investigation is to present a terrain shaping flow of the certain slope during the process of landslide up to finale form. Case of landslide, used in this investigation, has occurred due to slope undercutting composed of Neogene clay sediments at Ubilci place (urban area of Smederevo). Data related to this landslide are obtained from "Geosonda"(1990) company, which investigated it. Neogene sediments are very common and wide spread in Smederevo city and its adjacency, but in all Serbia have wide expanding (Anđelković, M., Anđelković, J., 1989, 1994; Marković, J. Ђ., 1967; Milošević, M. B., Milivojević, M. 2008; Milošević, M. B., Milivojević, M., Čalić, J., 2009; Krstić, N. 2003; Jovanović, G. 2010). Additionally, in these sediments occurred a lot of landslides because the Neogene sediments are commonly composed of clay and sandy clay material (Milošević, M. B. i Milivojević, M., Čalić, J. 2009; Божиновић, Д, Шугић, Ј., Локин, П. (1984); Јевремовић, Д. (1990); Abolmasov, В. & Stojkov, К. (1994); Orlić, В., Sunarić, D. 1994.) Dynamic analyzes of the sliding process has made by extended distinct element method, which provide medium behavior simulation process of collapse has occurred. The simulation has been done in two-dimension.

---

\* e-mail: stojnic.nedeljko@gmail.com

## Methodology of investigation

The conventional Distinct Element Method (DEM), is used to analyze discrete rock mechanical problems. In simulation of rock blocs toppling which were nearly vertical a good results had been obtained. Мегуро ианд Хакуно (Meguro, K. and Hakuno, M. 1989) used DEM to simulate rock avalanche. Later, Iwashita (Iwashita, K. and Hakuno, M. 1990) is extended this method by introducing pore-spring between elements to incorporate effect of pore material and continuity of media, and named the new method Modified Distinct Element Method. The term Extended Distinct Element Method also used synonymously. When the pore springs are intact, the model behaves as continuous medium, but when they are destroying it gradually loses continuity and finally behaves like a perfect discrete medium. In the method developing, Meguro and Hakuno (Meguro, K. and Hakuno, M. 1989) introduced a criterion on breaking pore springs. Later Yamamoto (Yamamoto, K. and Hakuno, M. 1991) used this method to study volcanic eruption and distribution of failures due to magma flow. In simulation of medium behavior during strong ground motion caused by earthquake occurrence, it was also used EDEM (Stojnic, N. and Higashihara, H. 1995). Medium in EDEM is presented by circular elements and pore springs between them. In simulation is used Voight type of medium. It means that elastic and damping force acts simultaneously at the contact of the elements. An independent equations of motion for each element are established and each is solved progressively step-by-step according to the time history, thus allowing the motion of the elements to be followed.

### Formulation

The equation of motion for an arbitrary element is

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + F = 0 \quad (1)$$

$$I\ddot{\phi} + D\dot{\phi} + M = 0 \quad (2)$$

where:

$m$  is element mass;  $I$  is moment of element inertia;  $F$ ,  $M$  are resultant force and moment acting on the element;  $C$ ,  $D$  are damping coefficients;  $x$ ,  $\phi$  are displacement vector and angular displacement, respectively.

Thee condition for judging whether elements,  $i$  and  $j$ , are in contact is expressed by

$$r_i + r_j \geq R_{i,j} \quad (3)$$

where:

$$R_{i,j} = \sqrt{((x_j - x_i)^2 + (z_j - z_i)^2)} \quad (4)$$

The line connecting the centers of elements  $i$  and  $j$  is considered to be the normal direction of contact. With element  $i$  as the bases, the angle that this line makes with the  $x$ -axes is denoted by  $\alpha_{ij}$  (positive counterclockwise) (figure. 1.).

**Figure 1. Element  $i$  and  $j$  in contact**

The sine and cosine of  $\alpha_{ij}$  are given by

$$\cos \alpha_{ij} = \frac{x_j - x_i}{R_{ij}} \quad (5)$$

$$\sin \alpha_{ij} = \frac{z_j - z_i}{R_{ij}} \quad (6)$$

When it is assumed that the coordinates of the centers of elements  $i$  and  $j$  are  $(x_i, z_i)$  and  $(x_j, z_j)$  respectively, and their radii  $r_i$  and  $r_j$ , the criterion for setting up pore springs is expressed by

$$(r_i + r_j) \cdot DCR1 > R_{ij} \quad (7)$$

**Figure 2. Relative displacement vector of the pore springs**

The relative position vectors of element  $i$  and  $j$  when the pore springs are set up (times 0 at  $t$ ) are denoted by  $\vec{d}$  and  $\vec{b}$  (Figure 2.)

When elongation of a pore spring at time  $t$  exceeds a specific ratio to its natural length, the pore spring breaks down. The ratio at that time, DCR is used:

$$|b| \geq |d| \cdot DCR2 \quad (8)$$

Cracking takes place in the pore material because of the tensile strain in the normal direction but when the criterion is realized, the pore springs in both the normal and shear direction are considered broken.

As the criterion for breakdown of a pore springs in the shear direction, we used Coulomb's criterion for shearing fracture.

$$\tau_c = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (9)$$

Where  $\tau_c$  is shearing strength,  $\sigma$  is normal stress on a slip surface,  $c$  is adhesion and  $\phi$  is the angle of friction

### Simulation model

The model for numerical simulation is composed based on the real slope profile taken before the slope process started. (figure 3).

**Figure 3. Real slope profile of Ubilci place before landslide occurrence, with specified shape of the numerical model form.**

Legend : 1. Clay, 2. Sandy slay, 3. Sandy clay and gravel, 4. Marl clay  
 ----- Part of the numerical model profile line before landslide occurrence  
 ..... Numerical model shape

Dimensions and shape of the numerical model which are taken into the numerical analysis are the same as a real part of the slope (denoted by interrupt dot line). Material

parameters used for numerical model are obtained based on classical formulas (table 1.). During the process of simulation, all parameters keep the same values. As one of goals in this investigation is to show influence of changeable (dry and wet) weather period (Živković, N., Anđelković, G. 2004; Rakićević, L. . 1987) on the slope process activity, it is used different clay cohesion values. In case of dry clay (30% of moisture) it is used clay cohesion of  $25\text{ kPa}$  and in case of wet clay (80% of moisture) it is used clay cohesion of  $15\text{ kPa}$ .

**Table 1. Values of mechanical parameters which are used for landslide process simulation**

A part of the slope with its dimensions and numerical model with circular elements and pore springs are shown below (Figure 4.).

**Figure 4. A part of the real slope (a), numerical model with circular elements (b) and pore springs (c).**

### Results of numerical simulation

First, it was simulated slope behavior during dry weather, what means higher value of the clay cohesion ( $c = 25\text{ kPa}$ ). As it is visible from the result of simulation after 13,00 seconds of simulation there was no any change on the slope.

**Figure 5. Results of EDEM numerical simulation for dry clay, particles and pore springs**

In rainy period, clay material changes its mechanical characteristics what is presented with decreasing of cohesion parameter values,  $c = 15\text{ kPa}$ . From (figure 6.) it is visible how the slope process activation at the investigated terrain has started. First starts cracking process at the profile most steep surface and from that, it continues up toward the slope. As the clay material still was stiff, there was no any bigger failure farther from the slope cut surface which one could develop and trigger a big mass movement. Based on the crack propagation in the slope body we can see that the destruction process keep the typical circular way of failures.

**Figure 6. Results of EDEM numerical simulation far the wet clay, particles and pore springs**

In this case after 13,00 seconds of simulation the slope changed significantly. The slope cut surface has vanished while moving material under gravity force filed up almost all previously made excavation. Finally, relief surface has got a wave form, what is typical for this kind of material movement. Waved land surface is an indicator for the areas taken by sliding processes. Comparing finale shape of the simulation model with real case (figure 7.) that occurred at Ubilci slope, it is possible to fined a lot of similarity as final surface shape and material distribution as well.

**Figure 7. Finale shape of the Ubilci slope, after sliding process has finished.**

Legend: 1. Clay, 2. Sandy slay, 3. Sandy clay and gravel, 4. Marl clay  
 - - - - - Part of the numerical model profile line before landslide occurrence  
 \_\_\_\_\_ Finale shape of moved material

## Conclusion

According to the obtained simulation results of undercut clayey slope sliding, the extended distinct element method has shown its efficiency in such kind problems analyzing.

It was possible to follow sliding process and its mechanism in time history. In this way, it is possible to predict a zone, which could be endangered by sliding process what is vary important from the aspect of urbanization and the risk assessment. This way of the slope process analysis, makes investigation how soil parameters values and their change have influence on the slope process occurrence possible. In this simulation, only clay cohesion among the other parameters, is considered changeable because of possibility to see its influence on the slope instability.

The simulation results show that in case of the slope with high value of clay cohesion,  $25\text{ kPa}$ , the slope remained stabile, without developing of any sort of the slope processes. However, in case with low clay cohesion,  $15\text{ kPa}$ , the sliding process has occurred. During simulation, it was possible to follow all sliding process from the start of slope collapse to its finish and the model rest. The slope collapse started with cracking at the top of the undercut surface and moving of split material down the undercut surface, covering the horizontal undercut slope area. Cracking process from the top of undercut surface continue toward the slope body. A finale profile became with the slope process finishing is a slope shape which is obtained by numerical simulation using extended distinct element method. Comparing with real case, which occurred at place Ubilci (figure 7.) it is visible that there is a good agreement between real and simulated case.

In this way, it is possible to predict landscape shape by using numerical simulation.

## References

See References on page 43