

Samardaković, M. (1996): Softver za analizu stabilnosti padina metodama lamela, Zbornik radova savetovanja *Primena računara u putnom inženjerstvu*, Niš, 20-21. juni 1996., Društvo za puteve Srbije i dr., Beograd, str. 215-221.

Мирољуб Самардаковић*

СОФТВЕР ЗА АНАЛИЗУ СТАБИЛНОСТИ ПАДИНА МЕТОДАМА ЛАМЕЛА

Описан је оригиналан програмски (експертни) систем за геомеханичке прорачуне: носивост, слегање, консолидација и показатељи интеракције тла испод плитких темеља, стабилност косина и притисци тла у сеизмичким условима. Са компатибилним системом GeoData1 за одређивање показатеља својстава тла, систем омогућава савремено решавање већине задатака примењене Механике тла и истраживање појединих утицаја на решења. Приказан је део система за рачунску анализу стабилности падина методама ламела, погодан за примену у путној геотехници. Софтвер користи рачунске и графичке могућности Windows пакета Excel и Visual Basic и успешно се примењује у пракси.

Кључне речи: Експертни системи, Механика тла, темељи, клизишта, притисци тла.

SOFTWARE FOR SLOPE STABILITY ANALYSIS BY METHODS OF SLICES

Mirosljub Samardaković, Civ. Eng.*

A original knowledge-based (expert) system for geomechanical calculations is described: bearing capacity, settlement, consolidation and interaction coefficients beneath shallow foundations, slope stability and soil pressures in seismic conditions. With the compatible system GeoData1, for soil parameter determination, the system enables to solve the most of currently soil mechanics problems and separate parameter influence examination. The part for slope stability analysis by methods of slices, convenient in roads geotechnics, is presented. role and potential of the system are discussed. The software is in Microsoft-Excel with Visual Basic developed and in practice well used.

Keywords: Knowledge-based systems, Soil mechanics, foundations, slopes, soil pressures.

УВОД

У оквиру делатности Одељења и Лабораторије за геотехнику Института Грађевинског факултета у Нишу, од 1990. године развијају се два компатибилна програмска (експертна) система: GeoData1, за одређивање, приказ и избор геомеханичких показатеља својстава тла у слојевима терена, и GeoData2, за геомеханичке прорачуне понашања тла као дела грађевинског објекта [1,2]. Системи се развијају на РС-рачунару, у Windows оперативном систему, користећи рачунске и графичке могућности пакета Excel

* Mirosljub Samardaković, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet, Niš, Tel./Fax 381 18 42 758

(Microsoft), уз помоћ језика Visual Basic. У наведеном периоду, верзије ових система су успешно примењене у геотехничким елаборатима, експертизама и студијама за неколико десетина објеката и усавршавају се у складу са новим сазнањима.

Уз опис општих карактеристика експертних система и оправданости њихове примене у грађевинској геотехници [3], у претходном реферату овог Зборника [4] описане су могућности система *GeoData1* и његове примене у обради величина измерених теренским и лабораторијским опитима и аутоматском приказу и оцени резултата претходних геомеханичких испитивања за путеве.

Оригиналан програмски систем *GeoData2* развијен је за геомеханичке прорачуне понашања тла испод плитких темеља (носивост, слегање, консолидација, показатељи интеракције тла и темеља коначне крутости) и за рачунске анализе стабилности тла (падине-косине и уз потпорну конструкцију) у сеизмичким условима. Уз компатибилан систем *GeoData1*, тиме је омогућено савремено решавање већине задатака примењене Механике тла на нивоу вишем од конвенционалног, као и ефикасно истраживање појединих утицаја на решења.

Циљ реферата је начелан приказ потенцијала система *GeoData2* и карактеристичних резултата у делу који је често актуелан у путној геотехници: рачунској анализи стабилности косина и падина. Такође актуелан део за прорачуне притисака и отпора тла овде неће бити приказан.

ПРОГРАМСКИ СИСТЕМ GEODATA2

Базу знања система *GeoData2* чини савремено сагледана научна и стручна основа, уграђена у виду теоријских једначина (експлицитних и имплицитних), нумеричким методама (регресијом или интерполацијом) утврђених релација које су изворно дате табеларно или дијаграмима, као и појединачно датих величина, критеријума и дефиниција, усклађених са постојећом (у овој области код нас оскудном) техничком регулативом.

У садашњој фази развоја, систем се примењује у следећим прорачунима за:

тло испод плитких темеља

- гранично и дозвољено оптерећење у погледу лома тла
- напони у тлу и слегања методом интеграције напона, услед дејства више темеља
- слегања методом интеграције померања
- временски ток слегања (консолидација)
- статички модули реакције за темеље коначне крутости

тло падина (косина)

фактор сигурности слојевитог, делимично потопљеног тла са спољашњим оптерећењем у сеизмичким условима, методама ламела, за клизне површине облика:

- кружноцилиндричног, са одређивањем минималне вредности фактора сигурности и критичне клизне површине
- полигоналноцилиндричног, са хоризонталним компонентама међуламелних сила

тло уз потпорне конструкције

гранични притисак (активан) и отпор (пасиван) тла за општи случај, са кохезијом и спољашњим оптерећењем, у сеизмичким условима.

Уз важније напомене, у наставку реферата приказана су нека од решења из дела система погодног за примену у путној геотехници.

ПРИМЕНА СИСТЕМА GEODATA2 У АНАЛИЗАМА СТАБИЛНОСТИ ПАДИНА МЕТОДАМА ЛАМЕЛА

У овој фази, одговарајући део базе знања система омогућава прорачуне фактора сигурности слојевитог, делимично поропљеног тла, методама ламела за клизне површине:

- а) *кружноцилиндричног* облика, са одређивањем *минималне вредности фактора сигурности* и критичне клизне површине, рутинским решењем *Bishop-a* (1955) у оквиру кога се добија, и за итерацију користи као полазно, решење према *Fellenius-у* (нпр. према [5]),
- б) *полигоналноцилиндричног* облика, којим се апроксимира задата површина произвољног облика, решењем *Janbu-a* (1954) са корекцијама према *Janbu и др.* (1956), са итерацијом одређеним *хоризонталним компонентама међуламелних сила* [6].

Оба решења проширена су увођењем *спољашњег оптерећења и сеизмичких утицаја* (квазистатичких), слично препорукама једног од наших ретких стандарда за геомеханичке прорачуне [7] или недавно објављеном компетентном упутству [8]. За оба решења клизне површине пружају се кроз ивице ламела, почев од површине терена или од дна затежуће пукотине, ако се тако одабере за кохерентно тло, због чега је пожељна мања ширина (већи број) ламела.

Кружноцилиндрична клизна површина

Решењем *Bishop-a* критична клизна површина тражи се за жељено подручје ламела, оригиналним "тетивним" поступком: прво се за највећу тетиву (која спаја почетак и крај клизне површине од полазне до најудаљеније ламеле подручја) аутоматски мења радијус и нађу критичан центар, радијус и најмања вредност фактора сигурности за ту тетиву а затим се све понавља за следеће тетиве, скраћене избацивањем по једне крајње ламеле, при чему рачунар одабира и приказује податке за меродавну (*minmin*) вредност фактора сигурности. На Сл.1 приказан је пример решења *Bishop-a*, са горњим табелама којима се дефинишу критична тетива, површина и меродаван фактор сигурности за одабрано подручје ламела и са доњом табелом у којој су сви подаци за меродавну површ смицања.

ODREĐIVANJE KRITIČNE KLIZNE POVRŠINE I FAKTORA SIGURNOSTI U DVOSTOJNOJ, DELIMIČNOJ I RUTINSKOJ REŠENJU BISHOP-A (SMPBISOP, M.Sam.)

Traženje merodavne klizne površine sa nožicom u lameli: 17

Kl. površina	Koordinate centra		Radijus		Faktor sig.
od	do	X [m]	Y [m]	R [m]	Fs
5	17	8,84	9,97	7,48	1,659
6	17	8,72	8,83	6,38	1,614
7	17	9,15	8,86	6,33	1,566
8	17	9,22	8,19	5,66	1,531
9	17	9,12	7,29	4,79	1,496
10	17	9,02	6,50	4,05	1,497
11	17	9,38	5,95	3,43	1,567
12	17	9,48	5,01	2,49	1,846
13	17	9,19	3,94	1,63	2,180
14	17	9,77	4,36	1,79	3,593

Ulazni podaci i rezultati za kritičnu kliznu površinu 9 - 17 :

Koordinate	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]
Krajnje tačke kl. površine	4,50	6,00	10,10	2,60
Centar	9,12	7,29		
Radijus R [m]		4,79		

Veličine u lamelama:

i	X	Yt	Yb	Yw	H _p	H _z	H _e	V (H)	c	φ	ρ	ρZ
9	4,50	6,00	4,30	4,50	0,00	0,00	0,00	0	10,0	25,0	1,800	2,000
10	5,00	6,00	4,30	4,40	1,17	0,00	0,00	0	10,0	25,0	1,800	2,000
11	6,00	5,35	4,30	4,35	1,00	0,70	0,00	0	5,0	33,0	1,900	2,100
12	7,00	4,75	4,30	4,25	0,50	1,15	0,11	0	5,0	33,0	1,900	2,100
13	7,60	4,30	4,30	4,00	0,30	0,90	0,36	0	5,0	33,0	1,900	2,100
14	8,00	4,10	4,10	3,80	0,30	0,70	0,47	0	5,0	33,0	1,900	2,100
15	9,00	3,35	3,35	3,30	0,05	0,20	0,60	0	5,0	33,0	1,900	2,100
16	9,50	3,05	3,05	3,10	0,00	0,00	0,54	0	5,0	33,0	1,900	2,100
17	10,10	2,60	2,60	3,10	0,00	0,00	0,00	0	5,0	33,0	1,900	2,100

FAKTOR SIGURNOSTI ZA KRITIČNU kl. površinu 9 - 17 :

Prema rešenju Fellenius-a

FF = 1,336

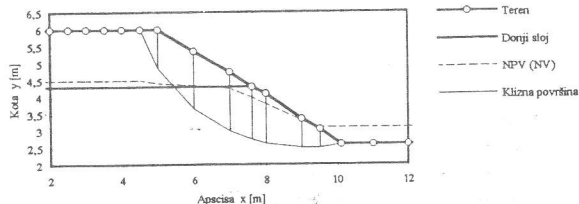
Prema rešenju Bishop-a

F = 1,651

Prema rešenju Bishop-a, sa seizmikom

Fs = 1,496 = F_{seism}

Koef.seizm.
Ksh
Kev
0,05
0,01



Сл.1. Одређивање меродавног фактора сигурности рутинским решењем Bishop-a

них сила за срачунате факторе сигурности и за граничну равнотежу ($F_s = 1$). Међуламелне силе добијају се аутоматизованом итерацијом и могу се одредити и за било коју жељену вредност F_s , чиме се може проценили оптерећење потпорне конструкције уграђене на место одређене ламеле.

Пошто за примену старог (и популарног) решења Janbu-a (1954, 56) постоје значајна ограничења, предстоји проширивање базе знања система бољим, општијим решењем за клизну површину произвољног облика.

ЗАКЉУЧНЕ НАПОМЕНЕ

У садашњој фази развоја, систем GeoData2 омогућава израду геомеханичких прорачуна понашања (деформација и услова стабилности) тла у скоро свим типичним задацима грађевинске геотехнике.

Клизна површина произвољног (полигонално-цилиндричног) облика

Решењем Janbu-a, за улазне геометријске податке (апсолутне координате карактеристичних тачака или релативне, мерене на пресеку терена) и параметре тла (јединствене за слојеве или унете по ламелама), добија се табела са срачунатим полазним подацима за ламеле (Сл.2) и табела са силама у ламелама и срачунатим и коригованим величинама фактора сигурности за четири комбинације оптерећења (без спољашњег оптерећења или са њим, без сеизмике или са њом)(Сл.3).

На посебном листу (Сл.4) приказују се пресек терена са задатом клизном површином и дијаграми хоризонталних компоненти међуламел-

F_s PADINE SA SPOLJAŠNJIM OPTEREĆENJEM I SEIZMIKOM
PREMA RUTINSKOM REŠENJU JANBU-A (Program SMJANBU, M.Sam., 1994.)

a) ULAZNI PODACI

Objekat:	Pr. padina	Gustina prir. vlažnog tla [t/m ³]:	1,850
Vertikalni presek:	A-A'	Gustina zasićenog tla [t/m ³]:	2,050
Klizna površina:	1	Koef.seizm.horizontalan Ksh [1]:	0,05
Kota spojl.vode [m]:	120,00	Koef.seizm.vertikalni Ksv [1]:	0,01

Oznaka lamele	Koordinate			Debljina sloja			Padni ugao kl.površ	Širina lamele	Deb.sloja u sred. lam.			U zoni smic.	
	Apscisa	Kota terena	Kota klizne površi	Prirudno vlažnog	Zasićenog	Potopljenog			Prirudno vlažnog	Zasićenog	Potopljenog	Kohhezija	Ugao un.trenja
	x	zT	zKP	hd	hzd	h'd	α	b	h	hz	h'	c	φ
i	m			m			step	m		m		kPa	step
0	0,00	150,00	150,00	0,00	0,00	0,00							
1	1,00	149,80	145,00	4,80	0,00	0,00	78,7	1,00	2,40	0,00	0,00	10,0	23,0
2	5,00	148,50	137,00	11,50	0,00	0,00	63,4	4,00	8,15	0,00	0,00	10,0	23,0
3	10,00	147,50	131,00	16,50	0,00	0,00	50,2	5,00	14,00	0,00	0,00	10,0	23,0
4	12,00	147,00	130,00	17,00	0,00	0,00	26,6	2,00	16,75	0,00	0,00	10,0	23,0
5	20,00	145,00	124,00	15,50	5,50	0,00	36,9	8,00	16,25	2,75	0,00	10,0	23,0
6	30,00	143,00	120,00	14,00	9,00	0,00	21,8	10,00	14,75	7,25	0,00	10,0	23,0
7	40,00	141,00	116,00	13,00	8,00	4,00	21,8	10,00	13,50	8,50	2,00	10,0	23,0
8	50,00	138,00	114,50	11,50	6,50	5,50	8,5	10,00	12,25	7,25	4,75	10,0	23,0
9	60,00	134,00	113,00	9,00	5,00	7,00	8,5	10,00	10,25	5,75	6,25	10,0	23,0
10	70,00	129,00	112,00	6,00	3,00	8,00	5,7	10,00	7,50	4,00	7,50	10,0	23,0
11	80,00	122,00	111,50	1,50	0,50	8,50	2,9	10,00	3,75	1,75	8,25	10,0	23,0
12	85,00	120,00	111,00	0,00	0,00	9,00	5,7	5,00	0,75	0,25	8,75	10,0	23,0
13	90,00	116,00	110,50	0,00	0,00	5,50	5,7	5,00	0,00	0,00	7,25	10,0	23,0
14	100,00	110,00	110,00	0,00	0,00	0,00	2,9	10,00	0,00	0,00	2,75	10,0	23,0

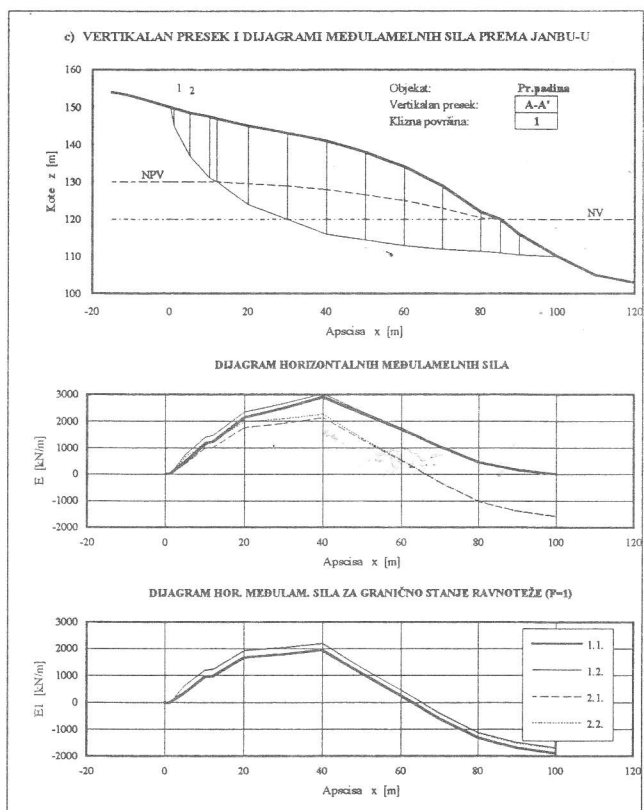
Sl.2.
 Polazni
 podaci za
 rešenje
 Janbu-a

b) SPOLJ. OPTEREĆENJE I REZULTATI PRORAČUNA PREMA REŠENJU JANBU-A

Objekat:	Pr. padina	Faktori sigurnosti u pogledu klizanja:
Vertikalni presek:	A-A'	F - prema 'rutinskom' rešenju
Klizna površina:	1	F_s = F×fo - korigovan zbog međulameinih
Kota spojl.vode [m]:	120,00	sila (preporučen uslovno za 1.1.)

Oznaka lamele	1. Bez seizmike								2. Sa seizmikom							
	1.1. Bez spojl.optereć.				1.2. Sa spojl.optereć.				2.1. Bez spojl.optereć.				2.2. Sa spojl.optereć.			
	F = 1,22				F = 1,18				F = 1,03				F = 1,01			
i	Fs = 1,29				Fs = 1,25				Fs = 1,10				Fs = 1,07			
	Težina lamele	Hor.medulam.sila	Hor.med.sila za F=1	Vertikalna spojl.sila	Horizontalna sp.sila	Hor.medulam.sila	Hor.med.sila za F=1	Seizm. težina lamele	Hor.medulam.sila	Hor.med.sila za F=1	Vertikalna spojl.sila	Horizontalna sp.sila	Hor.medulam.sila	Hor.med.sila za F=1		
i	W	E	E1	V	H	E	E1	Ws	E	E1	Vs	Hs	E	E1		
l	kN/m	kN/m		kN/m	kN/m	kN/m		kN/m	kN/m		kN/m	kN/m	kN/m	kN/m		
0		0	0			0	0		0	0			0	0		
1	44	-4	-19	0	0	-6	-19	44	-16	-19	0	0	-18	-19		
2	592	475	377	300	0	746	632	598	399	382	300	0	646	638		
3	1270	1167	948	0	0	1420	1204	1283	999	961	0	0	1232	1216		
4	608	1228	966	0	0	1475	1221	614	1025	978	0	0	1253	1234		
5	2802	2131	1671	0	0	2349	1927	2830	1773	1691	0	0	1978	1946		
6	4135	2486	1785	0	0	2669	2041	4176	1931	1804	0	0	2106	2059		
7	4365	2894	1945	200	0	3049	2197	4411	2136	1963	200	0	2279	2215		
8	4170	2268	1063	150	10	2356	1276	4217	1290	1069	150	10	1364	1282		
9	3660	1688	253	0	0	1743	466	3703	512	248	0	0	557	460		
10	2938	1035	-597	0	0	1062	-384	2975	-313	-614	0	0	-291	-401		
11	1882	461	-1314	0	0	467	-1101	1909	-1013	-1341	0	0	-1008	-1128		
12	544	294	-1527	0	0	294	-1314	554	-1220	-1556	0	0	-1221	-1344		
13	373	164	-1691	0	0	160	-1479	381	-1380	-1723	0	0	-1386	-1511		
14	283	0	-1893	0	0	-10	-1681	289	-1577	-1927	0	0	-1587	-1715		

Sl.3.
 Rezultati
 prema
 rešenju
 Janbu-a



Сл.4. Пресек терена и хоризонталне компоненте међуламелних сила према решењу Janbu-a

Тако конципиран, у комбинацији са компатибилним *GeoData1*, систем је успешно примењен за пројекте грађења или санирања значајних објеката, дајући пројектантима подлоге са знатно бољим избором, обрадом и приказом потребних података него што је у рутинској (често банализованој) пракси уобичајено.

При томе је често коришћена анализа "шта-ако" (нпр. решавањем формула уназад функцијом *goal seek*), омогућена базичним програмом *Excel*, чиме се, уз графичке могућности система, једноставно и јасно уочавају

подручја утицаја и значај појединих улазних или успутних параметара - што систем препоручује као погодан за истраживачке сврхе.

У приказаним рачунским анализама стабилности падина методама ламела, напред наведено својство система омогућава повратну (back) анализу по више параметара, корисну за сагледавање стварних својстава тла у клизној зони клизишта. Познате теоријске основе и интересантни детаљи прорачуна према наведеним решењима Fellenius-a, Bishop-a и Janbu-a овде нису (могли бити) приказани јер је циљ реферата приказ концепта и могућности система *GeoData2* и његове примене у путној геотехници.

Бољим повезивањем компонената система, проширивањем његове базе знања и израдом одговарајућих интерфејса (корисничких табела за унос и заштиту података, читање и повезивање резултата) интервенцијама преко уграђеног језика *Visual Basic*, даљи развој омогућиће још већу и рационалнију истраживачку и практичну примену система у наведеној и другим областима грађевинске геотехнике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самардаковић, М. (1996): Развој експертног система *GeoData1* - геомеханички показатељи својстава тла, *Наука+пракса*, бр.3, Грађевински факултет - Институт за грађевинарство и архитектуру, Ниш, у штампи.
2. Самардаковић, М. (1996): Развој експертног система *GeoData2* - геомеханички прорачуни понашања тла, *Наука+пракса*, бр.3, Грађевински факултет - Институт за грађевинарство и архитектуру, Ниш, у штампи.
3. Moulia, M., Toll, D. G., Vaptismas, N. (1995): Knowledge-based systems in geotechnical engineering, *Geotechnique*, 45, No. 2, ICE, London, 209-221.
4. Самардаковић, М. (1996): Софтвер за обраду и приказивање резултата претходних геомеханичких испитивања, Зборник радова, Саветовање *Примена рачунара у путном инжењерству*, Ниш, 20-21. јуни 1996., Друштво за путеве Србије и др., Београд.
5. Bromhead, E. N. (1986): *The stability of slopes*, Surrey University press, Glasgow.
6. Chowdhury, R. N. (1978): *Slope analysis*, Elsevier, Amsterdam, 143-146.
7. *** (1990): *Осигурање доњег строја саобраћајница и укупне стабилности тла и тупа пута*, JUS U.C4.200, СЗС, Београд.
8. Максимовић, М. М. (1995): *Механика тла*, Гроскњига, Београд, 484.