

FACULTY OF MINING AND GEOLOGY
UNIVERSITY OF BELGRADE
Department of Geotechnics
Belgrade, Yugoslavia



RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET
UNIVERZITETA U BEOGRADU
Katedra za geotehniku
Beograd, Jugoslavija

MEDJUNARODNI NAUČNI SKUP

PRAVCI RAZVOJA GEOTEHNIKE

THE INTERNATIONAL CONFERENCE

TRENDS IN THE DEVELOPMENT
OF GEOTECHNICS

1880 - 1921 - 1996

115 GODINA GEOLOGIJE I 75 GODINA INŽENJERSKE GEOLOGIJE - GEOTEHNIKE
NA UNIVERZITETU U BEOGRADU

ON THE OCCASION OF THE 115 ANNIVERSARY OF THE INTRODUCTION OF GEOLOGICAL
STUDIES, THE 75 ANNIVERSARY OF ENGINEERING GEOLOGY ON BELGRADE UNIVERSITY

BEOGRAD
NOVEMBAR, 1996.

GEOMEHANIČKI PROGRAMSKI SISTEMI *GeoData1* I *GeoData2*

GEOMECHANICAL KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS *GeoData1* AND *GeoData2*

Miroljub Samardaković *

ABSTRACT

In conformance with up-to date technical information possibilities and the need for creative engineering approach based on wide theoretical and technical knowledge, last years in geotechnique there have been developed more or less complex *expert (knowledge-based) systems* (Moula, Toll, Vaptismas, 1995), intended for the users the knowledge and experience of whom is on the higher level than average. These systems are composed of computer programmes containing separated specific *knowledge bases* (theoretical and empirical facts and/or procedures for attaining some specific knowledge), *context* with current starting data and *inference (reasoning) mechanism* using knowledge-base to modify and expand the context in order to solve a specific problem. Unlike *conventional* programmes, acting through a numerical process and knowledge and control being integrated (procedural programming), the *expert* systems are symbolic process oriented and knowledge-basis is separated from inference procedure (declarative programming) and basis amendment being possible without influencing the programme.

The work presents the development and implementation of original, compatible systems *GeoData1* and *GeoData2*, developed and applied by the author in the course of the last five years, the knowledge-bases being in accordance with the current scientific results, Yugoslav and foreign technical norms and practice. Only the official data and the values measured directly in tests or starting calculation data are being entered into system context, followed by results in the form of tables and charts with automatically determined values of all the indicators which are possible to get, with the statistical processing and results, if needed.

The integrated system *GeoData1*, for processing and presentation of geomechanical *soil properties* determined by tests, is intended for geomechanical experts, in the first place for choosing the constitutive relations and calculation models of soil. The system comprises all conventional *laboratory tests* (for classification, physical and mechanical properties, the conditions of compaction) and most frequently *field tests* (penetration sounding, compaction control). The results have been presented particularly and in groups (as per terrain layers, with AC-classification, with statistical expectations within a layer (as a population) according to the desired criteria.

The system *GeoData2*, for geomechanical *calculations of the soil behaviour*, includes *bearing capacity* and *settlement* (with the effect of adjacent foundations) with shallow footing design, *consolidation*, determining the modulus of *subgrade reaction* for finite rigidity foundations, *slope stability* with determining the critical slip surface in the layered soil, and *earth pressures* on retaining walls, all in *seismical conditions*. Together with the compatible system *GeoData1*, this system enables current solving of the most of problems in applied Soil Mechanics, on the level higher than conventional. Due to the installed possibilities of *what-if (back)* analysis, it is suitable for exploring corresponding influences to the solutions.

GeoData1&2 are developed on PC, in *Windows* operative system, by using calculation and graphical capabilities of *Excel* (Microsoft) packet with the help of *Visual Basic* language, enabling thus the application on the average hardware and acting of users having average knowledge of software. The versions of these systems have been applied successfully in geotechnical elaborates, expertises and studies for a few dozens of objects and they are being improved according to new knowledge. The possible role and direction of these systems further development have been analysed, through better programmes interconnection in the first place.

Key words: Expert systems, soil mechanics, laboratory tests, foundations, landslides, earth pressure.

* Građevinski fakultet Univerziteta u Nišu, Beogradska 14, 18000 Niš, Jugoslavija

UVOD

Zadaci u građevinarstvu ne rešavaju se samo proračunima već i na osnovu ideja, koncepata, zaključivanja i akumuliranja iskustva, što se ne može iskazati numerički. Stručnjaci ističu da je građevinska geotehnika područje građevinarstva u kome su najizraženiji zahtevi za ovakvim kreativnim inženjerskim pristupom, zasnovanim na širokom teorijskom i stručnom znanju. U uslovima neophodnog (a) korišćenja široke i obimne *teorijske i tehničke osnove* (baze znanja), (b) određivanja, prikaza i ocene velikog broja parametara od značaja za zaključivanje i izbora *konstitutivnih modela tla*, kao i (c) višestrukih *proračuna ponašanja tla* kao dela građevinskog objekta, nastalo je mnoštvo kompjuterskih programa za rešavanje pojedinih delova zadataka u geotehnici. Složenost geotehničkih zadataka i međusobna povezanost njihovih delova upućuju na povezivanje ovakvih konvencionalnih programa u *programske sisteme*, u čemu se nije moglo značajno odmaći zbog velike raznorodnosti zadataka i potrebe kreativnih inženjerskih intervencija u fazama rešavanja zadataka.

U skladu sa savremenim tehničko-informacionim mogućnostima, poslednjih godina u svetu je u toku razvoj određenog broja geotehničkih *ekspertnih sistema*, koje čine programi čija je struktura drugačija od konvencionalne, namenjeni korisnicima sa znanjima većim od prosečnih.

Ekspertni sistem čine kompjuterski programi koji sadrže specifična saznanja (teorijske i empirijske činjenice i/ili postupke za dolaženje do nekih saznanja) i koriste izdvojene postupke zaključivanja za manipulisanje tim saznanjima i ulaznim podacima u cilju rešavanja realnog zadatka. U opštem slučaju, ekspertni sistem čine tri osnovne komponente:

- a) *baza znanja*, koja sadrži informacije iz domena rada sistema (definicije, činjenice, pravila sa datim rešenjima ili za traženje rešenja),
- b) *kontekst* (smešten u *radnu memoriju*), koji sadrži sve informacije o zadatku koji treba da bude rešen, informacije koje definišu parametre zadatka, kao i tekuće informacije na svakom stupnju procesa rešavanja zadatka,
- c) *mehanizam zaključivanja*, koji kontroliše proces zaključivanja koristeći *bazu znanja* za izmenu i proširenje *konteksta* u cilju rešenja zadatka.

Za razliku od konvencionalnih programa, koji deluju kroz numeričke procese a saznanja i kontrole su integrisani (proceduralno programiranje), ekspertni sistemi su orijentisani ka simboličkim procesima a baza saznanja je odvojena od programiranja (deklarativno programiranje), čime su omogućene izmene i dopune baze bez bitnog uticaja na program. S obzirom na njihovu strukturu i sadržaj, opravdano je da se uopšten i ambiciozan termin *ekspertni sistem* u ovom slučaju zameni sa *knowledge-based sistem*, čiji bi domaći ekvivalent (kraći od prevoda) trebalo potražiti.

Da li je potrebno i moguće, npr. za potrebe izgradnje ili eksploatacije zgrade u zaseku na padini, sačiniti i primenjivati *knowledge-based sistem* u koji bi *uneli* karakteristične kote terena i objekata, opterećenja, geometrijske podatke o slojevima terena, NPV i mestima uzorkovanja dobijene istražnim bušenjem, kao i veličine neposredno izmerene terenskim i laboratorijskim opitima i iz kompjutera+printera *neposredno dobili* blok-dijagram i geomehničke preseke terena sa klasifikovanim materijalima u slojevima i statistički obrađenim pokazateljima njihovih fizičkih i mehaničkih svojstava, dijagrame potrebnih dimenzija i sleganja temelja za uneto opterećenje, merodavan faktor sigurnosti zasečene padine, pritiske na odabrani potporni zid u odabranim seizmičkim uslovima i bez njih, itd.?

Pregled i ocene većeg broja geotehničkih ekspertnih sistema, razvijenih u poslednjoj deceniji, u okviru kojih je urađeno više disertacija, daju npr. Moula, Toll, Vaptismas (1995). Oni ističu da ekspertni sistemi prevazilaze ograničenja konvencionalnog programiranja ali da u geotehničkom inženjerstvu još uvek nisu razvijeni do nivoa pogodnog za distribuciju radi praktične upotrebe za složenije zadatke. Ovim programima može se značajno sistematizovati i unaprediti rešavanje pojedinih zadataka geotehnike. Uz dodatne komponente (interfejsi, help) korišćenje baze znanja i celog sistema može biti znatno olakšano ali i sa najboljim sistemom, prepunim ugrađenih kriterijuma za ocenjivanje i odlučivanje - racionalne odluke mora da donosi inženjer, korisnik programa.

U radu su sažeto prikazani originalni, međusobno kompatibilni sistemi *GeoData1* (za određivanje geomehničkih *pokazatelja svojstava tla*) i *GeoData2* (za geomehničke *proračune ponašanja tla*), razvijani i

primenjivani od strane autora u poslednjih pet godina u građevinskoj geotehnici, sa *bazama znanja* u skladu sa afirmisanim naučnim rezultatima, jugoslovenskom i inostranom tehničkom regulativom i savremenom stručnom praksom. U *kontekste* sistema unose se samo oficijelni podaci i *veličine neposredno izmerene opitima* ili *polazni podaci proračuna*, iz čega slede rezultati u vidu tabela i dijagrama sa automatski određenim vrednostima svih uobičajenih pokazatelja i drugih, koje je moguće dobiti, po potrebi sa statističkom obradom i ocenom rezultata (Samardaković, 1996^a, 1996^b).

GeoData1 i *2* razvijaju se na PC-računaru, u Windows operativnom sistemu, koristeći računske i grafičke mogućnosti paketa *Excel* (Microsoft) i jezika *Visual Basic*, što omogućava primenu na prosečnom hardveru i intervencije korisnika sa prosečnim poznavanjem softvera. Verzije ovih sistema uspešno su primenjene u geotehničkim elaboratima, ekspertizama i studijama za nekoliko desetina objekata i usavršavaju se u skladu sa novim saznanjima, pre svega proširivanjem baza znanja, boljim povezivanjem programa i racionalizovanjem postupaka. U radu se prikazuju neka od rešenja, uz najbitnije napomene, u okviru raspoloživog prostora.

SISTEM *GeoData1*: GEOMEHANIČKI POKAZATELJI SVOJSTAVA TLA

Integralni sistem *GeoData1*, za obradu i prikazivanje geomehaničkih *pokazatelja svojstava tla* određenih opitima, namenjen je geotehničkim specijalistima pre svega radi izbora konstitutivnih relacija i računskog modela tla. Sistem obuhvata sva konvencionalna *laboratorijska ispitivanja* (klasifikaciona, fizičkih i mehaničkih svojstava, uslova zbijanja) i najčešća *terenska ispitivanja* (penetraciono sondiranje, ispitivanja zbijenosti). Rezultati se prikazuju numerički i grafički, pojedinačno i grupno (po slojevima, sa AC-klasifikacijom, i za teren u celini), sa statističkim očekivanjem u sloju (kao populaciji) prema željenim kriterijumima. Nedavni prikaz sličnog sistema grupe zapaženih stranih autora (Toll, 1995) pokazuje da on ima nešto širi ali vrlo sličan koncept i prikaz rezultata kao sistem *GeoData1*.

Bazu znanja sistema *GeoData1* čine tri komponente: (a) baza *opštih znanja* sa informacijama o tipičnim opsezima geotehničkih parametara za klasifikacije u pogledu sastava, stanja i podobnosti tla za određene namene, (b) baza *znanja o opitima*, terenskim i laboratorijskim, i njihovoj pogodnosti za određene vrste i namene tla, i (c) baza *parametara korelacije* ili teorijskih veza između pokazatelja dobijenih opitima.

Određivanje i ocena geomehaničkih pokazatelja svojstava tla u slojevima terena vrše se automatskom obradom veličina neposredno zadatih i izmerenih geomehaničkim opitima, i to:

Laboratorijska ispitivanja

pokazatelji fizičkih svojstava

- vlažnost
- gustine u prirodnom i suvom stanju
- gustina zrna i specifična težina
- koeficijent poroznosti

klasifikacioni pokazatelji i klasifikacija tla

- granulometrijski sastav
- granice i stanje konsistencije
- jedinstvena (AC) klasifikacija

pokazatelji mehaničkih svojstava

- deformabilnost
- stišljivost i konsolidacija u edometru
- pri triaksijalnoj kompresiji (CTC)

- čvrstoća i parametri čvrstoće

- pri direktnom smicanju
- pri triaksijalnoj kompresiji (CTC)

pokazatelji uslova zbijanja ili zbijenosti

- pri min i max poroznosti nekoherentnog tla
- po Proctor-u
- CBR
- CBR sa ocenom podobnosti agregata za ugrađivanje u noseći sloj kol. konstrukcije.

Terenska ispitivanja

za procenu mehaničkih svojstava

- opit standardne penetracije (SPT)

za kontrolu zbijenosti

- opit kružnom pločom.

U *kontekst* sistema *GeoData1* unose se zadate i veličine neposredno izmerene jednim opitom ili grupom opita, kao i oficijelni podaci o memom mestu ili ispitanoj uzorku. Kod pojedinih opita i pokazatelja, zbog mnoštva ulaznih, tekućih i izlaznih podataka (mogućih i potrebnih) trebalo je izvršiti *racionalan izbor podataka i formu prikaza* u skladu sa potrebama sistema *GeoData2* i/ili drugih korisnika. To je nametnulo potrebu kritičkog uporednog proučavanja domaće i inostrane geotehničke regulative (grupe standarda JUS, DIN, BS, ASTM i drugih) i literature o ispitivanjima, konvencionalnim (Bowles, 1978, Vickers, 1978, Liu, Evett, 1984, Head, 1984, 1988) i savremenim (Yong, Townsend, 1986, Donaghe, Chaney, Silver, 1988, Cassan, 1988).

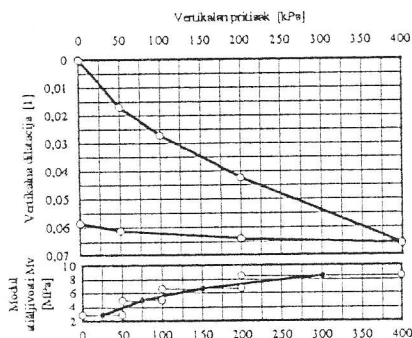
OPIT KONSOLIDACIJE U EDOMETRU

UZORAK: B1 / 2,40-2,70 m

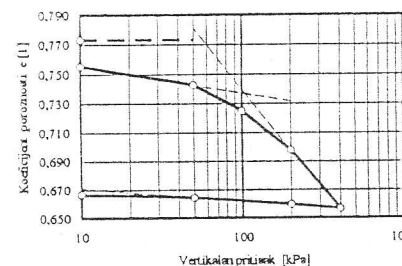
Osnovna elastičnost: $E_s = 10,00$
 Prečnik osnovne probe (cm) = 3,975
 Početna vlažnost: $w = 27,1$
 Specifična težina: $G_s = 2,608$

Finisna svojstva probe	Početak	Završetak
Osnovna p [kPa]	1,869	1,961
Vlažnost w [%]	27,1	25,5
Koef. poroznosti e	0,773	0,669
Stepen zbijenja S_r [%]	91,4	99,4

DIJAGRAMI STIŠLJIVOSTI



Por. pomena	Modul elastičnosti	Koef. deform. elastičnosti
$\Delta \sigma$ [kPa]	MV	Δv
0-50	2914	0,00061
50-100	4933	0,00046
100-200	6614	0,00027
200-400	8521	0,00021



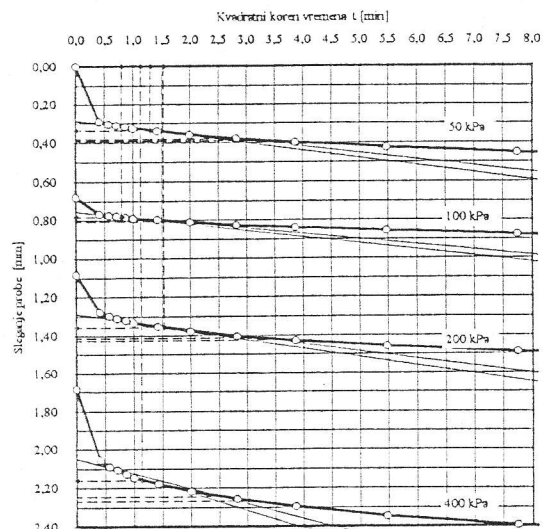
Indeks kompresije: $C_c = 0,1383$
 Indeks dekompresije: $C_s = 0,0090$
 Pritisak prekonsolidacije (orijentaciono): $\sigma'_p = 105$ kPa.

Slika 1. Pokazatelji stišljivosti u edometru

OPIT KONSOLIDACIJE U EDOMETRU

UZORAK: B1 / 2,40-2,70 m

DIJAGRAM KONSOLIDACIJE



Vertikalni pritisak σ [kPa]	Vreme za 50% konsol. t_{50} [min]	Koeficijent konsolidacije C_v [m ² /s]	Koeficijent vodopropusljiv. k [m/s]
50	1,69	7,33E-07	2,53E-09
100	0,64	1,94E-06	3,86E-09
200	2,34	5,17E-07	7,66E-10
400	1,27	9,13E-07	1,05E-09
Ar. srednja	1,49	1,03E-06	2,03E-09

Slika 2. Pokazatelji konsolidacije u edometru

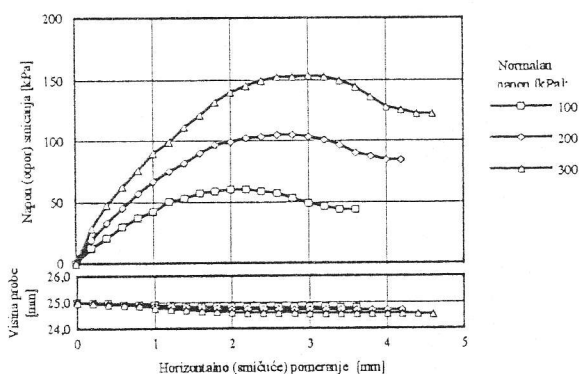
OPIT DIREKTOG SMICANJA

UZORAK: B3 / 3,00-3,30 m

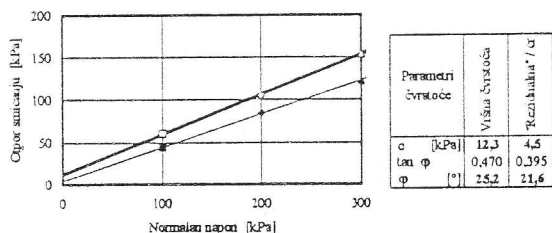
Dreniranje: Kontaktne ploče perforirane
 Konsolidacija: 1 sat, pri prirodnoj vlažnosti
 Brzina smičućeg pomeranja: δ/t [mm/min] = 0,100
 Relativna $100\delta/L$ [%/mm] = 0,167

Normalan napon [kPa]	100	200	300
Izvis (L) osnovne [cm]	6,00	6,00	6,00
Vlažnost [cm]	2,50	2,50	2,50
Osnovna [cm]	2,063	2,049	2,116
Vlažnost [%]	20,1	20,5	19,5

DIJAGRAM SMICANJA



DIJAGRAM ČVRSTOĆE NA SMICANJE



Parametri čvrstoće	Višina čvrstoće	Rezultati / σ
c [kPa]	12,3	4,5
$\tan \phi$	0,470	0,395
ϕ [°]	25,2	21,6

Slika 3. Pokazatelji čvrstoće pri direktnom smicanju

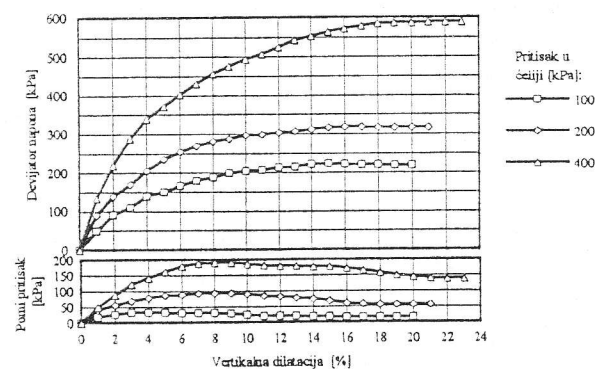
OPIT LOMA TRIAKSIJALNOM KOMPRESIJOM

UZORAK: B2 / 4,20-4,50 m

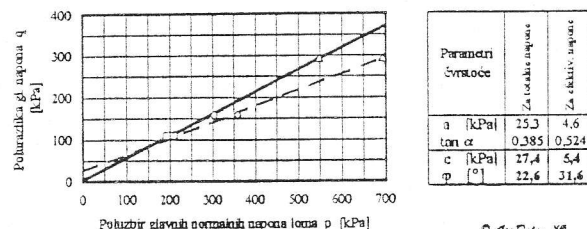
Vrsta testa: CU sa merenjem pomoćnog pritiska
 Konsolidacija: 24 sata, do poništenja priručnika pomoćnog pritiska
 Dreniranje: Sprečeno u fazi smicanja
 Brzina vertikalnog deformisanja: $\Delta H/t$ [mm/min] = 0,80
 Relativna $100\Delta H/H$ [%/mm] = 1,00

Početni pokazatelji probe pojedinačno	Pritisak u ćeliji [kPa]
Prečnik osnovne [cm]	100 200 400
Vlažnost w [%]	3,57 3,57 3,57
Gustina [t/m ³]	8,00 8,00 8,00
Vlažnost [%]	1,916 1,936 1,897
Vlažnost [%]	23,41 23,21 23,60

DIJAGRAM SMICANJA

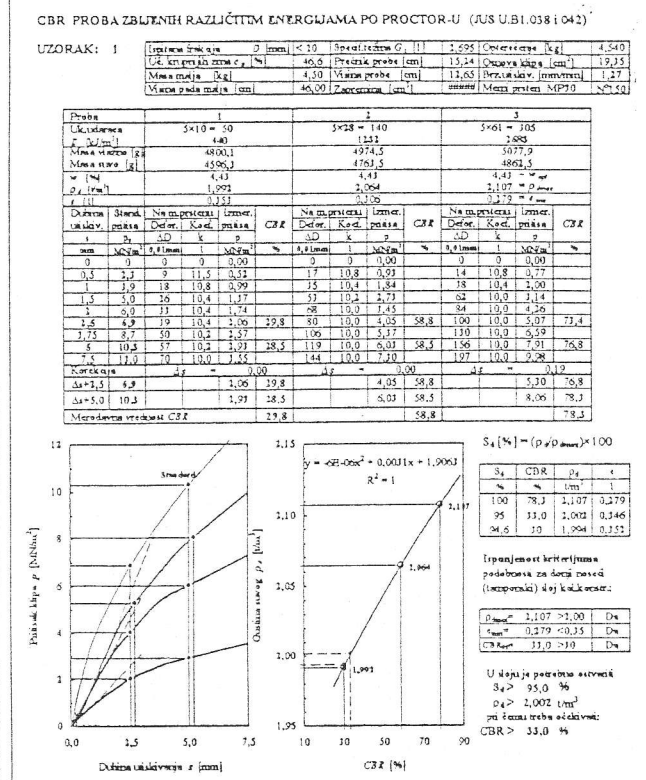
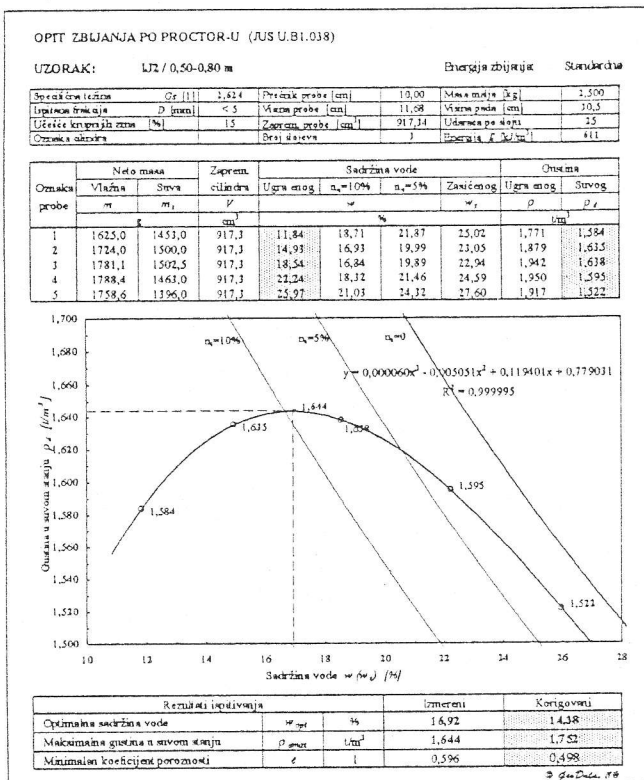


DIJAGRAM ČVRSTOĆE PREMA LAMBE-U



Parametri čvrstoće	Za lokalni napon σ_1	Za efektivni napon σ_1'
a [kPa]	25,3	4,6
$\tan \alpha$	0,385	0,524
c [kPa]	27,4	5,4
ϕ [°]	22,6	31,6

Slika 4. Pokazatelji čvrstoće pri triaksijalnoj kompresiji

SISTEM *GeoData2*: GEOMEHANIČKI PRORAČUNI PONAŠANJA TLA

Sistem *GeoData2*, za geomehaničke proračune ponašanja tla (a) ispod plitkih temelja konačne krutosti, (b) u padinama (kosinama), slojevitim i delimično potopljenim, sa spoljašnjim opterećenjem, u seizmičkim uslovima, i (c) uz potporne konstrukcije u seizmičkim uslovima. Sa kompatibilnim sistemom *GeoData1* ovaj sistem omogućava savremeno rešavanje većine zadataka primenjene Mehanike tla na nivou višem od konvencionalnog i, zbog ugrađenih mogućnosti “šta-ako” (back) analize, pogodan je za istraživanje pojedinih uticaja na rešenja.

Bazu znanja sistema *GeoData2* čini naučna i stručna osnova, ugrađena u vidu jednačina (implicitnih i eksplicitnih) teorijskih rešenja, numeričkim metodama (regresijom ili interpolacijom) utvrđenih relacija izvorno datih tabelarno ili dijagramima i pojedinačno datih veličina, kriterijuma i definicija koji se primenjuju u sledećim proračunima za:

Tlo ispod plitkih temelja

- granično i dozvoljeno opterećenje u pogledu loma tla
- naponi u tlu i *sleganja proizvoljne tačke metodom integracije napona*, usled dejstva više temelja
- *sleganja metodom integracije pomeranja*
- vremenski tok sleganja (*konsolidacija*)
- statički *moduli reakcije za temelje konačne krutosti*

Tlo padina (kosina)

Faktor sigurnosti slojevitog, delimično potopljenog tla sa spoljašnjim opterećenjem u seizmičkim uslovima, *metodama lamela*, za klizne površine oblika:

- *kružnociлиндриčnog*, sa određivanjem *minimalne vrednosti faktora* i kritične klizne površine
- *proizvoljnog* (poligonalcilindričnog), sa horizontalnim *komponentama međulamelnih sila*

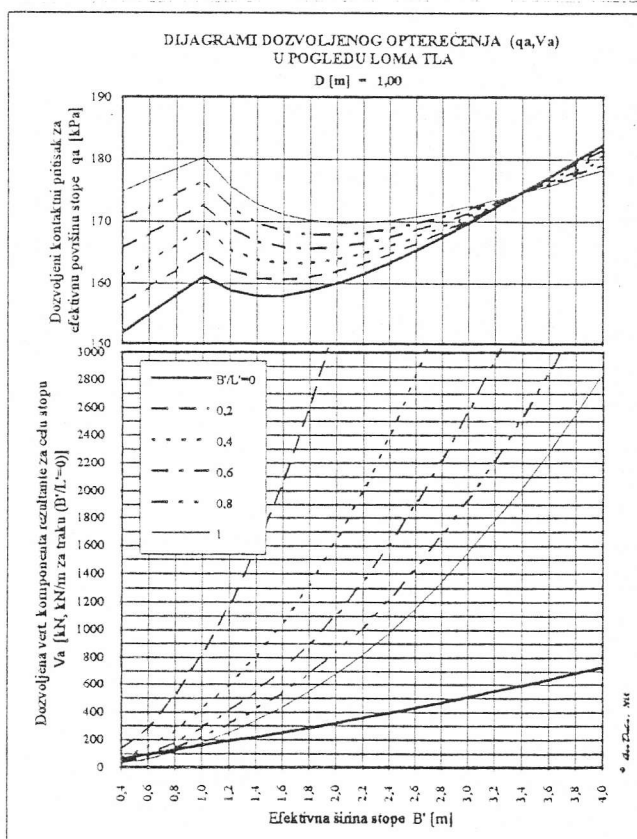
Tlo uz potporne konstrukcije

Granični *pritisak* (aktivan) i *otpor* (pasivan) *tla* za opšti slučaj, u seizmičkim uslovima.

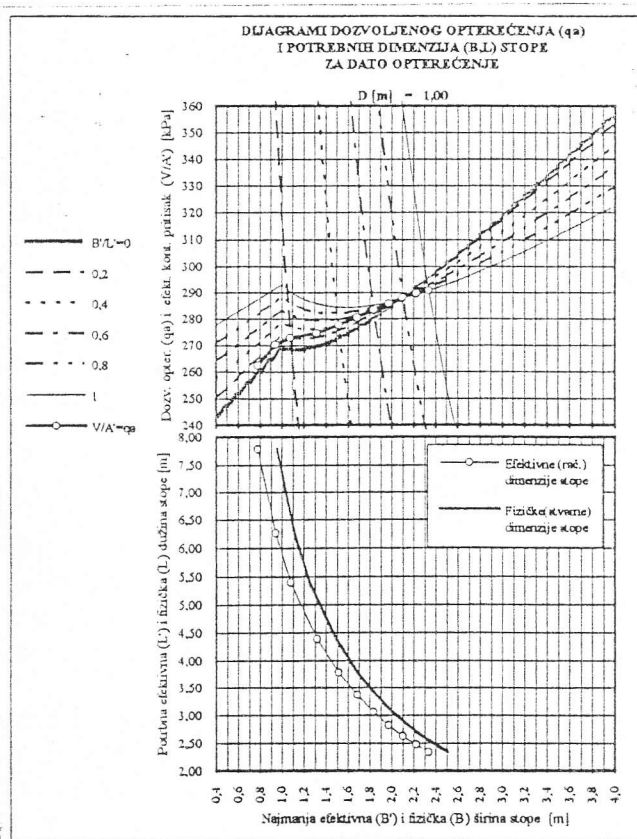
Tlo ispod plitkih temelja. Uvođenjem više inovacija, za iste polazne podatke kao u konvencionalnim proračunima sa pojedinačnim rezultatima, sistemom *GeoData2* konstrukter građevinskog objekta dobija, gde je to teorijski ili kompetentnom racionalizacijom bilo moguće, dijagrame za očitavanje potrebnih dimenzija stope temelja, u pogledu loma tla, za različito odabrano ekscentrično opterećenje (slika 7) ili dimenzija za zadato opterećenje (slika 8), sleganja za takve dimenzije i opterećenje, uz dejstvo susednih temelja (slike 9 i 10), vremena konsolidacije za naknadno odabrano vreme građenja (slika 10), sleganja na istom tlu temelja proizvoljnih dimenzija i opterećenja (slika 11) - čime geomehantički elaborat dobija pogodniju formu i sadržaj.

Za proširenu varijantu rešenja Brinch Hansen-a prema Pravilniku (1990) i odabrane parcijalne faktore sigurnosti, **dozvoljeni pritisak** (q_a) na efektivnom delu kontaktne površine i vertikalna komponenta rezultante (V_a) dobijaju se tabelarno ili grafički (slika 7) za odabrane oblike (B'/L') efektivne površine i područje vrednosti efektivne širine stope (B'). Sa jednakim faktorima sigurnosti za svaki temelj, za komponentu $V=V_a$ i ekscentricitete (e_B , e_L) rezultante i odabrani oblik (B'/L') direktno se odredi potrebno B' (i q_a ako nas interesuje) i potrebne fizičke dimenzije stope $B = B' + 2e_B$, $L = B'/(B'/L') + 2e_L$, pri čemu je srednji kontaktni pritisak $p = V/(BL) < q_a = V/(B'L')$, dok ivični naponi nisu merodavni (još od 1974.). Za poznate komponente (V, H) i ekscentricitete rezultante sistem sadrži opciju sa rešenjem u vidu dijagrama sa koga se za odabranu jednu fizičku dimenziju stope (B ili L) očitava potrebna veličina druge dimenzije (slika 8).

Proračun **sleganja tla** vrši se (a) metodom *integracije napona* u dubini ispod proizvoljne tačke (prema Steinbrenner-u tj. Holl-u, 1940, npr. Poulos, Davis, 1974), koji se računaju usled dejstva 1-5 različitih susednih temelja, sa automatskim određivanjem dubine efektivnog dejstva i mogućnošću ručnog unosa modula stišljivosti (M_v) zavisno od prikazanih napona u lamelama (slike 9 i 10), i (b) metodom *integracije pomeranja* odabrane karakteristične tačke kontaktne površine, za ekvivalentan elastičan poluprostor čije elastične konstante (E_u, ν_u ili E', ν') su zadate ili su za dati profil određene na osnovu proračuna metodom integracije napona (slika 11), čime se dobija sleganje temelja proizvoljnih dimenzija osnove i opterećenja. Za visinu dreniranja (H_{dr}), koja se unosi na osnovu dobijene dubine efektivnog dejstva (z_{ef}), automatski se, preko numeričkog rešenja Terzaghi-jeve teorije jednodimenzionalne konsolidacije (npr. Olson, 1986), dobija **dijagram konsolidacije** i veza sleganja i vremena za proizvoljno očekivano vreme građenja objekta (slika 10).



Slika 7. Dozvoljeno opterećenje u pogledu loma tla

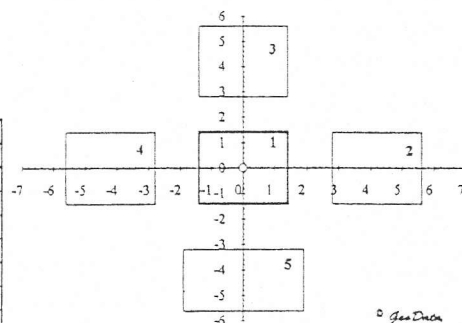


Slika 8. Potrebne dimenzije stope za dato opterećenje

(Program SMSLEPRT, metodom integracije napona u dubini)

MERODAVAN NANEPOVOLJNIJI PROFIL U PODRUČJU BUŠOTNE S-42
 RAČUNSKO KONSOLIDACIONO SLEGANJE TLA ISPOD TEŽIŠTA TEMELJA 1 SAMCA
 (Ispod centra koordinatnog sistema na skici sa osnovom temelja)

POLOŽAJ TEMELJA U ODNOSU NA TAČKU
SLEGANJA [m]



Dubina NPV [m] = 1,00			Stopa temelja				
			1	2	3	4	5
Rač. dubina temeljenja	D	m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,40
Širina stope	B	m	2,80	2,80	2,80	2,80	3,80
Dužina stope	L	m	2,80	2,80	2,80	2,80	2,40
Vert. komp. rezultante	V	kV	1810	1810	1810	1810	1810
Kontaktni pritisak	$p=V/(BL)$	kPa	231	231	231	231	198
Odstojanje najudaljen. uzla od date tačke	Bmax	m	1,40	5,60	1,40	-5,60	1,90
	Lmax	m	1,40	1,40	5,60	1,40	-5,60

Naziv (simbol)	Broj armelo	Dubina dla lam	Debljina		Gus- tina	Totalan geo.napon	Pijezom. pritisak	Efektivan geo.napon	Dodatni efektivan napon od temelja					Ukupan lod.nap.	Ef.napona u sredini lamele			Sr.mod. sustijev.	Smanjenje debljine lam.	Sleganje na dubini Z	
			1	2					3	4	5	Početni	Dodatni		Ukupni						
i	z	ΔZ	$\frac{m}{p}$	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	σZ	
l	m	m	t/m ³	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	cm	cm	
-	0	0	0	0	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0	5,73
Temelji	1	1,00	1,00	1,90	18,64	0,00	18,64	212,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	212,22	9,32	0,00	9,32	21000	0,00	5,73	
Tampon	2	1,30	0,30	2,10	24,82	2,94	21,88	210,74	0,03	0,03	0,03	0,00	210,81	20,26	211,51	231,77	40	0,16	5,57		
Ilovača	3	2,20	0,90	2,00	42,48	11,77	30,71	163,74	1,24	1,24	1,24	0,26	167,72	26,29	189,27	215,56	7	2,43	3,14		
Pesak	4	3,00	0,80	2,00	58,17	19,62	38,55	108,42	3,78	3,78	3,78	1,60	121,34	34,63	144,53	179,16	15	0,77	2,37		
Sijunak	5	4,20	1,20	2,00	81,72	31,39	50,33	58,71	7,20	7,20	7,20	4,62	84,94	44,44	103,14	147,58	35	0,35	2,02		
"	6	5,40	1,20	2,00	105,26	43,16	62,10	35,09	8,55	8,55	8,55	6,65	67,40	56,21	76,17	132,38	35	0,26	1,75		
Glina	7	7,00	1,60	2,00	136,65	58,86	77,79	20,23	8,20	8,20	8,20	7,21	52,02	69,95	59,71	129,66	12	0,80	0,96		
"	8	8,00	1,00	2,00	156,27	68,67	87,60	15,20	7,48	7,48	7,48	6,85	44,48	82,70	48,25	130,95	17	0,28	0,67		
"	9	10,00	2,00	2,00	195,51	88,29	107,22	9,43	5,92	5,92	5,92	5,65	32,83	97,41	38,66	136,07	20	0,39	0,29		
"	10	12,00	2,00	2,00	234,75	107,91	126,84	6,39	4,61	4,61	4,61	4,49	24,72	117,03	28,77	145,81	20	0,29	0,00		
"	11	14,00	2,00	2,00	273,99	127,53	146,46	4,61	3,62	3,62	3,62	3,56	19,05								
"	12	16,00	2,00	2,00	313,23	147,15	166,08	3,48	2,89	2,89	2,89	2,85	15,02								

DLJAGRAMI NAPONA I SLEGANJA TLA ISPOD TEŽIŠTA TEMELJA 1

----- Pijezometriski prikljesak

----- Efekt. geološki napon

- - - - - Efekt. geol. + dodetni napon od Temelja I

----- Efekt. geol. + ukupni dodetni napon

- - o - - NPV

----- □ ----- D

----- △ ----- Zef

NAPONI ISPOD DATE TAČKE

Vertikalni naponi [kPa]

Dubina z [m]

RAČUNSKO SLEGANJE TLA

Sleganje Sz [cm]

Dubina z [m]

$S = 5.73 \text{ cm}$
 $S_{tem} = 0.79 * S = 4.53 \text{ cm}$
 $M_{vst} = \frac{A(\Delta\sigma) S}{k} = 14711 \text{ kPa}$
 $k = 1.00E-09 \text{ m/s}$
 $C_v = 1.50E-06 \text{ m}^2/\text{s} = 3.941 \text{ m}^2/\text{mes}$
 $H_{dr} = 7.45 \text{ m}$

RAČUNSKO SLEGANJE TLA

Sleganje krutog temelja

Srednji modul stišljivosti

Srednji koef. vodoravnosti

Srednji koef. konsolidacije

Visina dreniranja

Vreme gradnje

----- tgr = 0

----- tgr = 3 mes.

- - - - - tgr = 6 mes.

----- tgr = 9 mes.

- - - - - tgr = 12 mes.

----- tgr = 18 mes.

----- tgr = 24 mes.

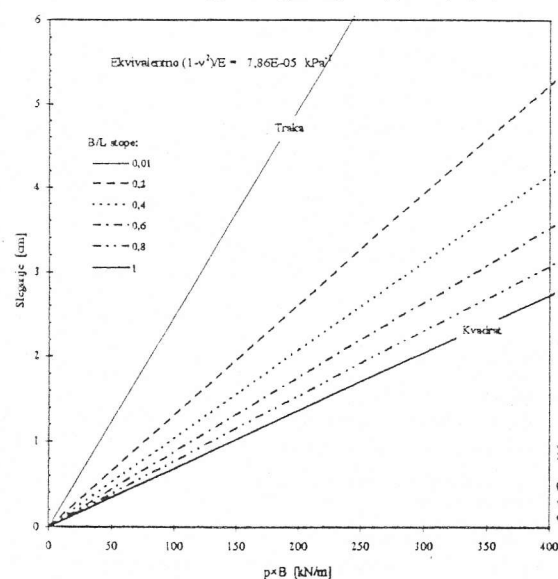
VREMENSKI TOK SLEGANJA (KONSOLIDACIJE TLA) ZA RAZLIČTA VREMENA GRADENJA (NANOŠENJA OPTEREĆENJA)

Vreme od početka gradnje t [mesen]

Sleganje konsolidacije tLA = SzS [cm]

SLEGANJA TEMELJA PROIZVOLJNOG PRAVOUGAONOG OBLIKA
NA NAJNEPOVOLJNIJEM PODRUČJU (kao u zoni bušotine B2)
(na osnovu Priloga P/6)

DIJAGRAM OČEKIVANOG SLEGANJA TEMELJA
u zavisnosti od srednjeg kontaktnog pritiska (p), žirine (B) i oblika (B/L) stope

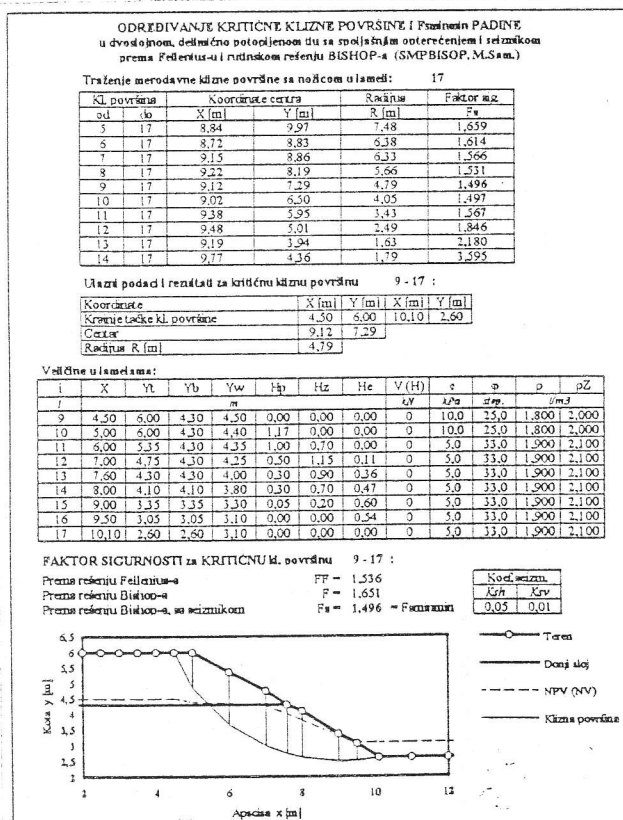
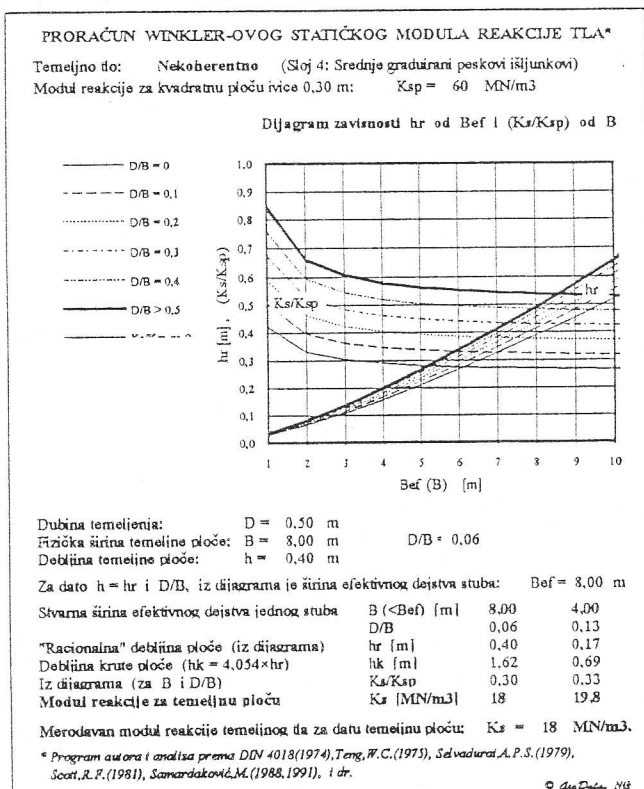


Slika 11. Sleganja krutih temelja integracijom pomeranja

U analizi interakcije temelja i tla, primena Winkler-ovog *modula reakcije* (koeficijenta posteljice) za temelj konačne krutosti i dalje je široka i opravdana, jer se i kod usvajanja složenijih modela tla vrše grube aproksimacije. Pošto su deformabilnost tla i relativna krutost temelja međusobno uslovljeni, određivanje modula reakcije (k_s) tla za temelje konačne krutosti (ploče i grede) trebalo bi vršiti sukcesivnom aproksimacijom, tražeći tzv. karakterističnu dužinu i *širinu efektivnog dejstva* jednog stuba (B_{ef}) na ploči, unoseći uticaje relativne dubine (D/B) za nekoherentno tlo i oblika kontaktne površine (B/L) za koherentno tlo, pošavši od modula reakcije (k_p) izmerenog opitom krutom kvadratnom pločom (ivice B_p) ili, za dati sastav i stanje tla, procenjenog iz literature. Na osnovu analize radova kompetentnih istraživača, autor (1991) je predložio postupak sa programom za određivanje "racionalne" debljine ploče, debljine za koju se ploča može smatrati krutom, kao i modula reakcije za odabranu debljinu ploče i geometrijske uslove, na osnovu modula izmerenog probnom pločom. Program sa prikazanim rešenjem (slika 12) ugrađen je u sistem.

Tlo padina (kosina). U ovoj fazi razvoja sistema, baza znanja omogućava proračune *faktora sigurnosti* slojevitog, delimično poroplijenog tla sa spoljašnjim opterećenjem, u seizmičkim uslovima, metodama lamela za klizne površine, od površine terena ili od dna zatežuće pukotine:

- Kružnociлиндриčnog** oblika, sa određivanjem *minimalne vrednosti faktora sigurnosti*, rutinskim rešenjem Bishop-a (1955) u okviru koga se dobija, i kao polazno za iteraciju koristi, rešenje prema Fellenius-u (npr. Bromhead, 1986). Kritična klizna površina traži se za željeno područje lamela, originalnim "tetivnim" postupkom: menjajući radijus nad tetivom koja spaja krajeve kliznog tela, nalazi se radijus sa najmanjim faktorom sigurnosti, zatim se klizno telo uvećava za jednu lamelu i postupak ponavlja, itd. (slika 13).
- Poligonalcilindričnog** oblika, kojim se aproksimira zadata površina proizvoljnog oblika, rešenjem Janbu-a (1954) sa korekcijama prema Janbu i dr. (1956). Automatizovanom iteracijom određuju se *horizontalne komponente međulamelnih sila* (npr. Chowdhury, 1978) za sračunate faktore sigurnosti i za graničnu ravnotežu (slike 14 i 15) ili za drugu željenu vrednost, radi procene uticaja na umetnutu potpornu konstrukciju. Ugrađivanje u sistem savremenijih rešenja od navedenog je u toku.



Slika 12. Određivanje modula reakcije za temeljnu ploču Slika 13. Najmanji faktor sigurnosti prema rešenju Bishop-a

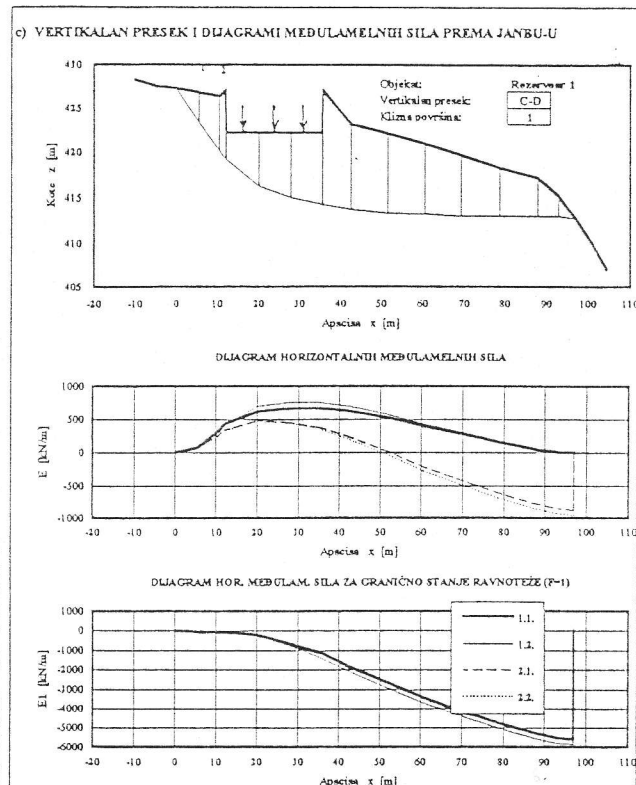
b) SPOLJ. OPTEREĆENJE I REZULTATI PRORAČUNA PREMA REŠENJU JANBU-A

Objekt: Rezervuar 1
 Vertikalni presek: C-D
 Klima površina: 1
 Kosa spolj.vode (m): 400,00

Faktori sigurnosti u pogledu klizanja:
 F - prema inženjerskom rešenju
 $F_y = F_x F_z$ - korigovan zbog međulamelnih sila (proporcijom nalivno za 1.1.)

1. Bez seizmike												2. Sa seizmikom																
1.1. Bez spolj. optereć.						1.2. Sa spolj. optereć.						2.1. Bez spolj. optereć.						2.2. Sa spolj. optereć.										
F = 5,23						4,74						3,13						2,88										
F _y = 5,43						4,94						3,32						3,20										
Opisna lamela	Tlačna lamela		Hor. usklad. sila		F _y	Vertikalna spolj. sila		Horizontalna spolj. sila		F _y	Hor. usklad. sila		F _y	Seizm. težinska lamela		Hor. usklad. sila		F _y	Vertikalna spolj. sila		Horizontalna spolj. sila		F _y	Hor. usklad. sila				
	W	E	EI	H		V	H	E	EI		W _s	E	EI	V _s	H _s	E	EI		V _s	H _s	E	EI	W _s	E	EI			
1	184	85	-56	0	0	81	-56	185	61	-56	0	0	58	-56	0	0	58	-56	0	0	58	-56	0	0	58	-56		
2	495	111	-69	0	0	110	-69	500	154	-68	0	0	148	-68	0	0	148	-68	0	0	148	-68	0	0	148	-68		
3	115	433	-57	0	0	419	-57	217	350	-56	0	0	142	-56	0	0	142	-56	0	0	142	-56	0	0	142	-56		
4	12	431	-70	0	0	416	-70	12	346	-69	0	0	138	-69	0	0	138	-69	0	0	138	-69	0	0	138	-69		
5	723	916	-122	191	0	702	-143	710	476	-231	4	27	463	-212	13	1150	160	-7710	0	0	177	-4985	1161	-608	-4766	0	-679	-4768
6	1061	665	-524	191	0	764	-751	1071	454	-626	4	27	435	-627	14	910	56	-5275	0	0	63	-5530	919	-780	-5315	0	-857	-5317
7	1206	665	-1128	191	0	756	-1184	1218	376	-1134	4	27	349	-1137	15	116	17	-5591	0	0	15	-5756	140	-851	-5542	0	-931	-5545
8	43	661	-1151	0	0	751	-1406	43	369	-1157	0	0	342	-1159	16	92	0	-5595	0	0	0	-5850	94	-877	-5636	0	-958	-5639
9	562	524	-1812	0	0	690	-2067	578	124	-1824	0	0	198	-1826														

Slika 14. Faktori sigurnosti prema rešenju Janbu-a



Slika 15. Presek terena i međulamelne sile prema Janbu-u

Tlo uz potporne konstrukcije. Ovaj segment sistema sadrži dve grupe rešenja za određivanje *pritisaka tla pri graničnoj ravnoteži* (aktivnog pritiska i pasivnog otpora) u opštem slučaju, za površinu zida proizvoljnog nagiba i kontaktnog trenja i površinu terena sa padnim uglom $|\pm\beta| \leq \varphi$, u seizmičkim uslovima, sa određivanjem kritične ravne površine smicanja, i to:

- rešenja izvedena *prema Coulomb-u*, uz zanemarivanje kohezije tla, prošireno za seizmičke uticaje sa korigovanim smerovima inercijalnih sila po teoriji *Mononobe i Okabe* (Fang, Chen, 1995),
- rešenja *Stanciu* (1990), izvedena *prema Coulomb-u*, proširena za uticaje kohezije, adhezije na kontaktu zid-tlo, spoljašnjeg jednakopodeljenog opterećenja i seizmike.

Pritisaci i sile prema navedenim rešenjima, njihove komponente i koeficijenti pritisaka u horizontalnom i vertikalnom pravcu, kao i pravci površina loma, prikazuju se tabelarno. Rezultati mogu biti prošireni za složenije tipične geometrije problema i prikazani grafički, što predstavlja pravac daljeg razvoja, s tim da se za pasivan otpor uvedu realnija rešenja.

ZAKLJUČAK

Opravdanost koncepta i razvoja programskih *knowledge-based* sistema *GeoData1*, za određivanje i prikaz geomehničkih *pokazatelja svojstava* tla, i sistema *GeoData2*, za geomehničke *proračune ponašanja* tla ispod plitkih temelja, u padinama (kosinama) i uz potporne konstrukcije, potvrđena je njihovim prihvatanjem i uspešnom primenom u svim oblastima građevinske geotehnike, kao i upoređenjem sa sličnim sistemima čiji je razvoj u toku u inostranim centrima (Moula, Toll, Vaptismas, 1995). Baze znanja i kompatibilnost sistema omogućavaju izradu podloga i projekata sa znatno boljim izborom, obradom i prikazom podataka i ponašanja nego što je u rutinskoj (ponegde banalizovanoj) praksi uobičajeno. Sistemima su programirani postupci,

sadrži i forme istraživanja i prikazivanja rezultata, što bi moglo da bude analizirano pri standardizovanju ovih ispitivanja i proračuna, koje je u toku. Mogućnostima 'šta-ako' i povratne (back) analize uočavaju se područja uticaja i značaj pojedinih ulaznih ili usputnih parametara, što sisteme preporučuje za praktična istraživačke svrhe. Dalji razvoj sistema odvija se, pre svega, kroz proširivanje njihovih baza znanja, bolje povezivanje programa i rezultata i ugrađivanje interfejsa kojima će rad biti sigurniji i prijatniji.

LITERATURA

- Bishop, A.W. (1955): The use of slip circle for stability analysis, *Geotechnique*, 5, No.1, London, 7-17.
- Bowles, J.E. (1978): *Engineering properties of soils and their measurement*, McGraw-Hill, New York.
- Bromhead, E.N. (1986): *The stability of slopes*, Surrey University press, Glasgow.
- Cassan, M. (1988): *Les essais in situ en mécanique des sols*, 1, Eyrolles, Paris.
- Chowdhury, R.N. (1978): *Slope analysis*, Elsevier, Amsterdam, 143-146.
- Donaghe, R.T., Chaney, R.C., Silver, M.L. (editors) (1988): *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM, STP 977, Philadelphia.
- Fang, Y.-S., Chen, T.-J. (1995): Modification of Mononobe-Okabe theory, *Geotechnique*, 45, No 1, ICE, London, 165-167.
- Head, K.H. (1984): *Manual of soil laboratory testing*, 1, Pentech Press, London.
- Head, K.H. (1988): *Manual of soil laboratory testing*, 2, Pentech Press, London.
- Janbu, N. (1954): Application of the composite slip surfaces for stability analysis, *Proc. of the European Conference on Stability of Earth Slopes*, Stockholm, Vol.3, 43-49.
- Janbu, N., Bjerrum, L., Kjaernsli, B. (1956): *Soil mechanics applied to some engineering problems*, Norwegian Geotech. Institute, Publication No.16.
- Liu, C., Evett, J.B. (1984): *Soil properties - testing, measurement and evaluation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Moula, M., Toll, D.G., Vaptsimas, N. (1995): Knowledge-based systems in geotechnical engineering, *Geotechnique*, 45, No.2, ICE, London, 209-221.
- Olson, R.E. (1986): State of the art: Consolidation testing, in Yong, Townsend (editors), *Consolidation of soils - testing and evaluation*, ASTM, STP 892, Philadelphia, 11.
- Poulos, H.G., Davis, E.H. (1974): *Elastic solutions for soil and rock mechanics*, John Wiley, New York, 12, 54.
- *** (1990): Pravilnik o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata, Sl. list SFRJ, br.15.
- Samardaković, M. (1991): Racionalna debljina temeljne ploče i statički modul reakcije tla - međusobna zavisnost i dijagrami za njihovo određivanje, *Zbornik radova*, br.12, Građevinski fakultet, Niš, 257-270.
- Samardaković, M. (1996^a): Razvoj ekspertnog sistema *GeoData1* - geomehanički pokazatelji svojstava tla. *Nauka+praksa*, 3, Građevinski fakultet, Niš, u štampi.
- Samardaković, M. (1996^b): Razvoj ekspertnog sistema *GeoData2* - geomehanički proračuni ponašanja tla. *Nauka+praksa*, 3, Građevinski fakultet, Niš, u štampi.
- Stanciu, A. (1990): Une généralisation de la théorie de Coulomb pour le calcul de la poussée et de la butée des terres, *Revue Française de Géotechnique*, No 50, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 39-59.
- Toll, D.G. (1995): The role of a knowledge-based system in interpreting geotechnical information, *Geotechnique*, 45, No.3, ICE, London, 525-531.
- Vickers, B. (1978): *Laboratory work in civil engineering, Soil mechanics*, Granada Publishing, London.
- Yong, R.N., Townsend, F.C. (editors) (1986): *Consolidation of soils - testing and evaluation*, ASTM, STP 892, Philadelphia.