

ИНИЦИЈАЛНИ ПОКАЗАТЕЉИ НАСТАНКА УНУТРАШЊИХ ЕРОЗИОНИХ ПРОЦЕСА

ГРОЗДАНА ГАЈИЋ

Извод: Тло лесног порекла представља еродибилну средину. Осетљивост лесног тла на унутрашњу ерозију расте са повећањем порозности, посебно макро порозности. Интеракција физичких карактеристика тла и хидро-гео-механичких параметара представљају основ за даља истраживања земљишта у погледу појаве и развоја процеса унутрашње ерозије. У раду је помоћу формираних математичких модела, на основу експериментално добијених резултата физичких особина тла и хидро-гео-механичких параметара, приказана успостављена функционална зависност између појединих параметара лесног тла. На бази приказаних резултата испитивања, математичких модела и успостављене функционе везе између водног режима и отпорних карактеристика земљишта дефинисани су показатељи настанка иницијалне унутрашње ерозије и сагледани су ефекти практичне примене добијених резултата.

Кључне речи: физика тла, хидро-гео-механички параметри, математичко моделирање, гео-статистика, показатељи настанка унутрашњих ерозијоних процеса.

INITIAL PARAMETERS OF THE GENESIS OF INTERNAL EROSION PROCESSES

Abstract: The soil of loess origin is an erodible environment. The susceptibility of loess soil to internal erosion grows with the increase of porosity, especially macro-porosity. The interaction of soil physical characteristics and hydro-geo-mechanical parameters is the base of further soil research from the aspect of the occurrence and development of internal erosion processes. This paper uses the mathematical models, based on experimental results on physical properties of soil and hydro-geo-mechanical parameters. It presents the functional dependence between individual parameters of loess soil. Based on the study results, mathematical models and functional relation between water regime and soil resistance characteristics, we defined the parameters of the genesis of initial internal erosion and analysed the effects of the practical implementation of the study results.

Key words: soil physics, hydro-geo-mechanical parameters, mathematical modelling, geo-statistics, parameters of genesis of internal erosion processes.

1. УВОД И ЦИЉ РАДА

Унутрашња ерозија у суштини представља ерозију унутар филтрационо неотпорне геомехничке средине. Последица развоја унутрашњих ерозијоних процеса су настанак: ерозијоних клизишта, тецишта, одрона, јаруга, и развоја карстних појава. Степен и интензитет развоја унутрашње ерозије зависи у првом реду од генезе ерозијоно геотехничког модела, односно од физичко-механичких карактеристика, које дефинишу отпорност земљишта на ерозију и динамичности филтрационог тока. Дефинисање појаве настанка, као и праћење механизма и динамике унутрашње ерозије је сложен истраживачки задатак и захтева примену више методологија и метода укључујући и реалност поставки у домену стохастичности модела.

Хипотеза од које се полази базира на чињеници о постојању узајамне повезаности отпорности земљишта и степена активизације дубинске ерозије. Како интензитет унутрашње ерозије у општем смислу зависи од хидродинамичких сила воде (као агенса), и укупне отпорности земљишта на ерозију (ако предмета ерозије), произилази закључак да је утицај отпорности земљишта на степен активизације унутрашње ерозије један од предоминантних фактора.

Основни циљ истраживања обухвата проучавање укупне отпорности земљишта на степен активизације унутрашње ерозије, а на бази испитивања физичко-механичких, посебно филтрационих особина тла, узимајући у обзир и промену отпорних својстава при различитој влажности и водозасићењу. Основ за разматрање проблема унутрашње ерозије је проучавање физичких карактеристика и хидро-гео-механичких параметара земљишта. Механизам настанка дубинске ерозије условљен је различитим чиниоцима који делују на промену напонског стања, физичко-механичких карактеристика и водног режима, ерозијом ангажованог земљишта, [4]. У зависности од промена ових параметара, зависи степен активизације и облик унутрашње ерозије код макропорозног, колапсибилног лесног тла.

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДА РАДА

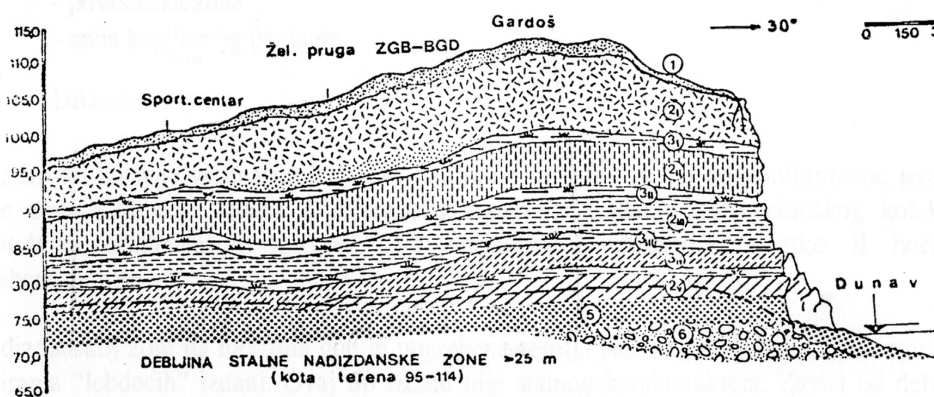
2.1. Порекло материјала

Лесно земљиште које је испитивано и анализирано у овом раду је са подручја познатог под називом “земунски лесни плато”- горњи Земун. Земунски лесни плато просторно обухвата горњи Земун, Батајницу, Сурчин, Добановце, Угриновце и укупне је површине око 20 000 хектара. Земунски лесни плато има благо заталасану површину чије се апсолутне коте крећу од 75÷114 м. Ободни делови платоа према Дунаву и Сави завршавају одсецима висине 20÷30 м, Слика -1. Геотехничким истражним радоваима дефинисана је грађа терена у којој се издвајају два комплекса стенских маса формираних у различитим условима седиментације:

- комплекс копнених седимената, квартарне старости који чине хоризонти леса са међуслојевима “погребене земље” и лесоидна иловача, и
- комплекс језерских седимената, плеистоценске старости, у коме се смењују песковите глине и глиновити пескови.

Лесну серију чине пет хоризоната леса, који су међусобно раздвојени са четири хоризонта погребене земље. Дебљина лесних наслага је најчешће 15 ÷ 20 m а у ободним деловима платоа и до 35 метара.

На исраживаном подручју подземна вода се јавља у своја два основна вида: као слободна и као физички везана вода. У комплексу лесних наслага формирана је сложена издан етажног типа. Сложеност се огледа у условима формирања, дубини појављивања и начину прихрањивања изданске зоне. Лесне насlage, испитиваног терена одликују се сложеним типом порозности: цеваста, међузрнска и пукотинска. Овако сложена структура порозности лесног комплекса омогућава формирање издани. Надизданска зона је веома променљиве дебљине и директно зависи од конфигурације терена и висине зоне колебања издани. Надизданска зона има функцију



Сл. 1 Геотехнички пресек терена експерименталне локације лесног одсека у приобаљу Дунава

Figure 1. Geotechnical section of the sample plot of loess segment of the Danube bank

хидрогеолошког колектора спроводника и обухвата I, II и ређе III хоризонт леса, односно I и ретко II хоризонт погребене земље. У надизданској зони на местима где је погребена земља јаче заглињена, постоји могућност формирања “лебдећих” издани. Овај тип издани није сталног карактера. Зависи од дебљине погребене земље - хидрогеолошког изолатора, количине и распореда понирјуће воде, као и сложених физичко-хемијских процеса. Осим “лебдећих” издани у надизданској зони, после падавина постоји и “лутајућа” слободна вода, која се веома брзо процеђује у издан. На контакту са издани постоји изражен појас капиларног пењања. Остали део воде у надизданској зони је физички везан за чврсте честице - везана вода.

2.2. Метод рада

Појаву и развој процеса унутрашње ерозије, као и њен мањи или већи интензитет условљавају, с једне стране, физичке и отпорне карактеристике тла, и динамичност филтрационог струјног тока, односно, с друге стране хидро-гео-динамичких параметара [1]. Из тих разлога је и испитивање ишло у два правца. Један правац је био испитивање осетљивости промена физичких и отпорних карактеристика лесног тла са променом влажности, односно садржајем воде у тлу. Други правац се односио на дефинисање хидро-гео-механичких параметара и њихова промена у односу на промену сувих запреминских тежина лесног тла. Практични значај резултата ових испитивања је омогућила примена геостатистичких метода у коначној анализи.

Експериментална испитивања физичко-механичких особина тла су извршена на реперезентативним узорцима макропорозног лесног тла са подручја “земунског лесног платоа”-горњи Земун. Сва теренска и лабораторијска испитивања су вршена у циљу дефинисања ерозионе стабилности на унутрашњу ерозију. У том смислу посебан акценат је дат на испитивања отпорних карактеристика тла са различитим садржајем влажности w (%).

Ова испитивања су обављена у геомеханичарској лабораторији Шумарског факултета по стандардном поступку. Такође, од посебног значаја су и експериментална испитивања настанка - почетне - иницијалне унутрашње ерозије и течења тла при прекорачењу граничних хидродинамичких услова, односно критичном хидрауличком градијенту (J_k и J_l). При чему је J_k критични градијент настанка унутрашње ерозије (померања и пре-груписавања честица тла) и J_l критични градијент течења тла. Испитивања су извршена на узорцима лесног тла, у апарату Б.Н. Славјанов-а [5]. За потребе испитивања на нашем подручју модификацију апарата је извешо проф. др Влаховић М. [6]. Упоредо са овим мереним вредностима иницијалне унутрашње ерозије, извршена су и лабораторијска испитивања на истим узорцима ради одређивања гранулометријског састава и других физичко-механичких карактеристика.

2.3. Тип испитивања и меродавни распони испитиваних параметара земљишта

Гранулометријски састав

Учешће појединих фракција се знатно мења како у хоризонталном, тако и у вертикалном профилу, што је последица примарних услова таложења, (јачине и правца дувања ветра), и дејства секундарних процеса дубинске ерозије (суфозије, преструктурирања честица и рушења структуре). Испитивање је извршено, комбинованом методом, према стандарду ЈУС - У.Б1. 018 Меродавни распони процентуалног учешћа појединих фракција макропорозног леса су: глина $2 \div 19\%$ (8), прашина $73 \div 91\%$ (82.6), Песак: ситан $1 \div 15\%$ (7.35), средњи $0 \div 5\%$ (1.3), крупан $0 \div 2\%$ (0.35), из групације шљунка регистрован је само ситан шљунак у границама $0 \div 1\%$, са средњом вредности од (0.2)%, док фракције средњег и крупног шљунка нису регистроване. Степен неравномерности се креће у распону од $4.9 \div 22.8$, (10,0).

Анализирајући резултате истраживања, може да се закључи да је цео макропорозни комплекс лесних наслага променљивих структурних својстава из чега произилази променљивост физичко-механичких карактеристика. Сам гранулометријски састав макропорозног леса, није примаран податак за одређивање водопропустљивости, као и степена активизације унутрашње ерозије. Због тога се морају сагледати и сви други параметри и показатељи и то: суве запреминске тежине, ефективна порозност, отпорност на смицање и његова укупна деформабилна својства, односно колапсбилност у условима дејства струјно филтрационог тока подземне воде.

Пластичносћ

Одређивање Атербергових граница конистенције извршене су према стандарду ЈУС - У.Б1.020. Резултати ових испитивања указују да су макропрозне лесне насlage ниске (CL) до средње (CI) пластичности са границом пластичности која се креће у распону од $15.2 \div 24.3\%$, (20.7). Овако широк распон у погледу границе пластичности условио је, између осталих, наглашено хетероген састав са смењивањем песковитих, прашинастих до

прашинасто песковитих зона. Садржај глиених фракција је, такође, један од битних показатеља пластичности. Садржај глиених фракција код макропорозног леса износи мах. до 20%, с тим да у песковитим зонама скоро изостају или их има у незнатним количинама. Меродавни распони осталих показатеља пластичности су: граница течења $31 \div 49\%$ (38.1), индекс пластичности $9.40 \div 25.90$ (15.99), индекс конзистенције $0.43 \div 1.54$ (0.913).

Приказане вредности Атебергових граница пластичности, имају за циљ да се сагледају и могуће промене отпорности на смицање (угао унутрашњег трења и кохезија), затим бубрење и запреминске промене, као и сама сензитивност ове средине, што је од значаја за решавање проблема течења тла у одређеним хидродинамичким условима, а нарочито при динамичким оптерећењима.

Порозност

Порозност је веома значајна у наслагама леса и једна је од битних структурних својстава за оцену физичко-механичких карактеристика. За лесне наслаге типична је примарна цеста порозност чија се густина појављивања веома мења у хоризонталном, а нарочито у вертикалном правцу профила, (са дубином се смањује). Цеста порозност је веома изражена у I хоризонту, нешто је мања у II хоризонту, да би дубље, у изданској зони сасвим нестала. Значајну улогу има и секундарна порозност која се у лесним наслагама манифестује присуством макро пора и прлина. Присуство макро пора утврђено је у површинским деловима (надизданској зони), и у већини случајева су делимично запуњене глиновитим или песковитим материјалом, са видљивим траговима деловања филтрације подземне воде. Макро поре имају неправилан правац прижања са пречницима који могу достићи и 1цм. Укупна порозност макропорозне зоне леса се креће у границама од $34\% \div 53\%$ (46.96), док је коефицијент порозности $0.56 \div 1.35$, са средњом вредности од 0.875.

Запреминске масе

Код физичких својстава од битног значаја су суве запреминске масе које директно резултирају из величине порозности лесних наслага. Као такве биле су путоказ у ком правцу усмерити одређене опите и под којим условима их извести.

Утврђено је да суве запреминске масе варирају у широком дијапазону. Мада, генерално посматрано, расту са дубином профила, односно са променом примарних структурних својстава (порозности). Применом стандарда ЈУС - У.Б1.016 добијене су вредности природно влажних и сувих запреминских маса. Испитиване вредности запреминских маса су у распону од $\gamma = 15.5 \div 20.4 \text{ kN/m}^3$ (17.85), односно $\gamma_d = 12.5 \div 15.6 \text{ kN/m}^3$ (14.60). Веза сувих запреминских маса и порозности јасно се уочава пратећи промену распона ових вредности у вертикалном профилу. Такође, се може уочити да са повећањем дубине, односно смањењем порозности расте засићеност тла.

Водопроницаљивост

Водопроницаљивост лесних наслага у директној је зависности од сопствених физичких карактеристика, са једне стране и од вискозитета течности и других хидрофизичких показатеља, са друге стране. Физичке карактеристике које условљавају, како количину, тако и тип и карактер водопроницаљивости у макропорозним лесним наслагама су: порозност, збијеност и гранулометријски састав са степеном неравномерности. Макропорозне лесне насlage имају карактеристичну примарну вертикалну цевасту порозност и секундарну порозност са израженим макро порама и прслинама. Овакав вид порозности, у песковитим зонама леса замењује итергрануларна порозност. С обзиром на изражену порозност у вертикалном правцу, примарна водопроницаљивост макропорозних зона леса је у вертикалном правцу, док је у хоризонталном правцу минимална и незнатна у укупном билансу водопроницаљивости леса. Величина водопроницаљивости у директној је вези са пречником пора и величином прслина. За одређивање величине водопроницаљивости урађени су лабораторијски опити, применом стандарда ЈУС - У.Б1.034, и добијене вредности коефицијента филтрације који се креће у дијапазону од $10^{-5} \div 10^{-3}$ cm/sec., с тим да је средња вредност коефицијента филтрације 10^{-3} cm/sec, што макропорозну зону лесних наслага сврстава у врло пропустљива тла.

Опшорне карактеристике

Један од најважнијих механичких параметара тла је чврстоћа на смицање. Елементи унутрашњег отпора земљишта, односно параметри отпорности на смицање су угао унутрашњег трења и кохезија. Резултати испитиваног, неконсолидованог макропорозног, лесног тла су показали веома широк распон вредности параметара отпорности на смицање ($\varphi = 8^{\circ} \div 26^{\circ}$ (18), и $c = 9 \div 25.6$ kN/m² (17.4)). Разлог овако широком распону вредности угла унутрашњег трења и кохезије јесу физичка својства лесног тла и садржај влажности у тлу. Од утицаја на параметре отпорности на смицање, код макропорозног лесног тла су хетерогеност састава, велики садржај прашине, велика порозност, мала збијеност и ниске вредности сувих запреминских маса. С обзиром да се у условима провлажавања могу очекивати промене у наведеним физичким особинама и да долази до дејства порних притисака, долази и до смањења параметара отпорности на смицање у условима провлажавања макропорозног лесног тла. То значи да се у условима провлажавања мора рачунати са смањеним вредностима угла унутрашњег трења и кохезије.

Деформабилна својства

Показатељи механичких својстава утврђена су и преко опита деформабилности на репрезентативним узорцима са спреченим бочним ширењем, применом стандарда ЈУС - У.Б1.028, из свих евидентираних средина макропорозног лесног комплекса. Резултати показују директну зависност деформабилних карактеристика од структурних и физичких својстава. Површински нивои лесног комплекса карактеристични су по изузетној стишљивости. Меродавни распони показатеља деформабилности макро-

порозног и колапсибилног лесног тла су: за оптерећења $\sigma=50\div 100 \text{ kN/m}^2$ $M_s=3\ 900\div 5\ 400 \text{ kN/m}^2$ ($3\ 100^*$), $\sigma = 100\div 200 \text{ kN/m}^2$ $M_s = 2\ 300\div 3\ 800 \text{ kN/m}^2$ ($2300^* \div 1800^0$), $\sigma = 200\div 400 \text{ kN/m}^2$ $M_s = 3\ 000\div 3\ 500 \text{ kN/m}^2$ ($4\ 000^{*0} \div 3\ 200^x$), провлажавање током опита је извршено на * $\sigma = 0,00 \text{ kN/m}^2$ $^0 \sigma = 100,00 \text{ kN/m}^2$ $^x \sigma = 200,00 \text{ kN/m}^2$ Колапсибилност лесног тла условљена је између осталог структурним разарањем услед деловања унутрашње ерозије и хидродинамичке консолидације тла. Показатељ колапсибилности, индекс тоњења се креће у распону од $0.0066 \div 0.028$.

3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ЊИХОВА АНАЛИЗА

Наменска експериментална испитивања физичко-механичких показатеља макропорозног лесног тла извршена су на 47 узорака. Поред физичких карактеристика, сувих запреминских маса, порозности и влажности, испитивани су и параметри отпорности на смицање, угао унутрашњег трења и кохезија и то у условима различитог садржаја влажности. Ова испитивања имала су за циљ сагледавање опште отпорности макропорозног лесног тла на унутрашњу ерозију поготно у условима повећане влажности и водозасићења. Резултати ових испитивања су приказани у табели 1. Приказани резултати имају за циљ како оцену меродавних вредности тако и успостављање корелационе везе $c=f(\psi)$ и $\varphi=f(\psi)$.

Табела 1: Експериментално добијене вредности општорних карактеристика макропорозног лесног тла

Table 1: Experimental values of resistance characteristics of macroporous loess soil

N ^o	γ_d	W	n	$\angle \varphi$	c	N ^o	γ_d	W	n	$\angle \varphi$	c	N ^o	γ_d	W	n	$\angle \varphi$	c
	(kN/m^3)	(%)	(%)	($^\circ$)	(kN/m^2)		(kN/m^3)	(%)	(%)	($^\circ$)	(kN/m^2)		(kN/m^3)	(%)	(%)	($^\circ$)	(kN/m^2)
1	13.7	7.5	47.3	16	19.6	17	16.3	11.0	37.3	23	20.8	33	14.2	18.5	45.4	18	16.6
2	15.7	20.1	39.6	17	15.0	18	15.2	15.0	41.5	20	20.0	34	15.3	6.0	41.1	21	20.5
3	12.2	30.0	53.1	11	10.0	19	15.0	10.0	42.3	19	17.5	35	14.8	6.5	43.1	20	18.4
4	12.6	25.1	51.5	12	9.0	20	15.5	5.0	40.4	20	18.9	36	16.5	8.9	36.5	24	22.5
5	16.7	7.6	35.8	26	15.0	21	13.8	18.8	46.9	16	17.5	37	16.3	12.5	37.3	25	25.6
6	15.4	12.5	40.8	21	19.0	22	12.8	24.0	50.8	14	14.2	38	16.0	5.0	38.4	23	21.5
7	13.5	27.5	48.1	14	15.0	23	12.5	28.4	51.9	12	12.3	39	14.9	3.0	42.7	19	18.3
8	14.5	15.2	44.2	18	22.5	24	13.0	33.2	50.0	10	11.3	40	15.6	17.5	40.0	21	15.0
9	15.9	15.0	38.8	15	14.1	25	14.2	22.5	45.4	15	14.3	41	13.9	12.0	46.5	17	23.8
10	15.7	8.1	39.6	21	25.2	26	15.5	10.8	40.4	21	19.9	42	13.4	19.0	48.5	14	22.0
11	16.1	16.3	38.1	23	18.0	27	14.9	20.2	42.6	16	17.2	43	13.1	31.0	49.6	13	12.5
12	15.0	22.5	42.3	18	17.5	28	12.1	31.0	53.5	10	14.0	44	13.6	28.0	47.7	15	9.5
13	14.1	21.2	45.8	14	11.2	29	15.5	23.5	40.4	16	13.5	45	13.0	4.0	50.0	17	16.2
14	12.4	34.1	52.3	8	10.5	30	13.9	14.3	46.5	19	18.0	46	14.6	8.0	43.8	18	14.5
15	12.9	35.3	50.4	10	12.5	31	13.5	26.5	48.1	13	13.0	47	16.2	14.0	37.7	23	16.0
16	12.7	25.7	51.5	9	12.0	32	14.4	17.0	44.6	18	18.7						

ЛЕГЕНДА

γ_d сува запреминска маса n укупна порозност c кохезија
W природна влажност φ угао унутрашњег трења

На 47 узорака макропорозног лесног тла извршена су мерења почетне - иницијалне унутрашње ерозије и преласка у стање течења у моменту слома услед прекорачења граничних услова отпорности тла при деловању филтрационо струјног тока. Параметри који су на овај начин добијени јесу критични градијент J_e у моменту почетка померања честица - унутрашње ерозије, и критични градијент J_t при пластичном течењу макропорозног лесног тла. У табели 2 дате су вредности резултата добијених експерименталним испитивањем лесног тла.

Табела 2: Експериментално добијене вредности показатеља унутрашње ерозије код макропорозног лесног тла

Table 2: Experimental values of internal erosion parameters in macroporous loess soil

N ^o	γ_d	n	Kf	Im	Iue	It	N ^o	γ_d	n	Kf	Im	Iue	It	N ^o	γ_d	n	Kf	Im	Iue	It
	(kN/m ³)	(%)	(cm/s)	(/)	(/)	(/)		(kN/m ³)	(%)	(cm/s)	(/)	(/)	(/)		(kN/m ³)	(%)	(cm/s)	(/)	(/)	(/)
1	13.7	47.3	2.4x10 ⁻³	0.018	3.0	3.7	17	16.3	37.3	1 x 10 ⁻⁵	0.007	5.8	7.3	33	14.2	45.4	2 x 10 ⁻³	0.016	2.8	4.5
2	15.7	39.6	8 x 10 ⁻⁴	0.011	5.2	6.4	18	15.2	41.5	4 x 10 ⁻⁴	0.012	4.3	5.1	34	15.3	41.1	4 x 10 ⁻⁴	0.013	4.8	5.5
3	12.2	53.1	7 x 10 ⁻²	0.025	1.6	2.9	19	15.0	42.3	7.5 x 10 ⁻⁴	0.013	4.5	5.2	35	14.8	43.1	8 x 10 ⁻⁴	0.014	3.8	4.7
4	12.6	51.5	9 x 10 ⁻²	0.024	2.15	3.6	20	15.5	40.4	4 x 10 ⁻⁴	0.011	5.3	5.5	36	16.5	36.5	3 x 10 ⁻⁵	0.007	6.3	7.3
5	16.7	35.8	7.2x10 ⁻⁶	0.005	6.6	7.3	21	13.8	46.9	7.5 x 10 ⁻³	0.018	2.5	4.0	37	16.3	37.3	8 x 10 ⁻⁵	0.008	6.2	7.1
6	15.4	40.8	2.3x10 ⁻⁴	0.011	4.2	5.9	22	12.8	50.8	1.5 x 10 ⁻³	0.023	2.1	3.4	38	16.0	38.4	1 x 10 ⁻⁵	0.009	5.5	6.9
7	13.5	48.1	3 x 10 ⁻⁴	0.02	3.2	3.5	23	12.5	51.9	9.1 x 10 ⁻²	0.024	1.8	3.2	39	14.9	42.7	8 x 10 ⁻⁴	0.014	3.8	5.7
8	14.5	44.2	1 x 10 ⁻⁴	0.015	3.3	4.6	24	13.0	50.0	9.5x10 ⁻⁵	0.022	2.3	4.0	40	15.6	40.0	3 x 10 ⁻⁴	0.01	4.7	5.9
9	15.9	38.8	1.1x10 ⁻⁵	0.009	5.5	6.6	25	14.2	45.4	8.2x10 ⁻³	0.016	3.4	4.7	41	13.9	46.5	3.5 x 10 ⁻³	0.017	2.9	4.8
10	15.7	39.6	2.3x10 ⁻⁴	0.01	4.5	6.2	26	15.5	40.4	4 x 10 ⁻⁴	0.011	4.0	5.7	42	13.4	48.5	7.5 x 10 ⁻³	0.02	2.8	4.5
11	16.1	38.1	9.3x10 ⁻⁶	0.008	5.2	6.5	27	14.9	42.6	2 x 10 ⁻⁴	0.013	4.0	5.3	43	13.1	49.6	9.1 x 10 ⁻³	0.022	2.4	3.7
12	15.0	42.3	3.5x10 ⁻⁴	0.013	3.8	5.6	28	12.1	53.5	6 x 10 ⁻²	0.026	1.8	2.9	44	13.6	47.7	5.3 x 10 ⁻³	0.019	2.3	4.7
13	14.1	45.8	8 x 10 ⁻³	0.016	3.1	4.2	29	15.5	40.4	6 x 10 ⁻⁴	0.012	4.8	6.2	45	13.0	50.0	2 x 10 ⁻³	0.022	1.8	3.2
14	12.4	52.3	2 x 10 ⁻²	0.025	1.9	3.5	30	13.9	46.5	8 x 10 ⁻³	0.017	3.3	4.6	46	14.6	43.8	8.5 x 10 ⁻⁴	0.015	3.2	5.2
15	12.9	50.4	1 x 10 ⁻³	0.022	2.4	3.8	31	13.5	48.1	5 x 10 ⁻³	0.02	2.6	4.0	47	16.2	37.7	1 x 10 ⁻⁵	0.007	6.0	6.7
16	12.7	51.5	9 x 10 ⁻²	0.023	2.3	2.9	32	14.4	44.6	1 x 10 ⁻⁴	0.015	3.7	4.8							

ЛЕГЕНДА

γ_d - сува запреминска маса Kf - коефицијент филтрације Iue - градијент при настанку унутрашње ерозије n - укупна порозност Im - индекс тоњења It - градијент при настанку течења тла

3.1. Промена параметара отпорности у функцији промене влажности

Како су угао унутрашњег трења и кохезија један од основних показатеља отпорности тла извршена су експериментална испитивања промене ових параметара у функцији промене влажности. Испитано је укупно 47 узорака а резултати су приказани у табели 1 [2].

На основу експериментално добијених резултата формиран су математички модели и извршено је тестирање веза кроз комплексну регресиону анализу и добијени су следећи резултати: Утврђена је функциона веза $\phi = f(\psi)$ Реални развој регресионе криве као и оптималне вредности минимума и максимума даје полином V-степенa. Математички модел са

се постиже при влажности од $w=19\%$, минимална вредност кохезије од $c=1.17 \text{ kN/m}^2$, је при влажности од $w=19\%$. Интересантно је истаћи податак, евидентан праћењем тока развоја регресионе криве, а то је да се и при мањим вредностима влажности од $w=19\%$ примећује опадање вредности угла унутрашњег трења. Веома идентична ситуација је и код регресионе криве везане за кохезију, с тим што вредност кохезије почиње да опада при смањењу садржаја влажности од $w=19\%$.

3.2. Промена хидро-гео-механичких параметара унутрашње ерозије у функцији промене сувих запреминских маса

Хидро-гео-механички параметри иницијалне унутрашње ерозије анализирани у овом раду су вредности градијента при настанку процеса унутрашње ерозије (J_{ue}) и вредности градијента при настанку течења тла (J_t) у функцији промене показатеља физичких особина лесног тла (γ_d). Експериментално испитивање је извршено на 47 узорака макропорозног лесног тла и добијене су вредности које су приказане у табели 2 [2].

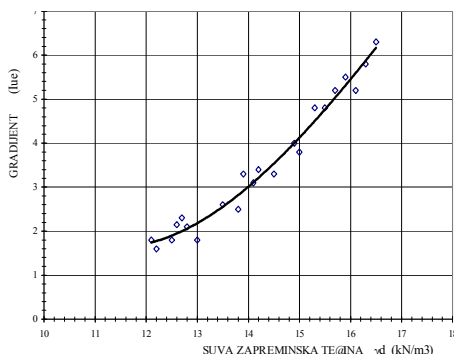
По формирању математичких модела на основу експериментално добијених вредности J_{ue} и J_t тестирана је веза ових показатеља унутрашње ерозије и физичких особина тла, односно сувих запреминских маса лесног тла, и добијени су следећи резултати: Утврђена је функциона веза $J_{ue} = f(\gamma_d)$ Полином III-степенa који даје функциону везу $J_{ue} = f(\gamma_d)$ има једначину:

$$J_{ue} = 0.0001 \gamma_d^3 - 0.0022 \gamma_d^2 + 0.0177 \gamma_d - 0.0001$$

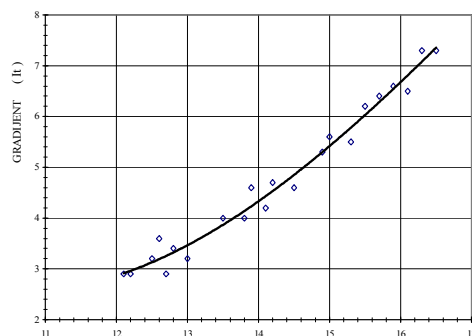
Са показатељима:

Коефицијент корелације 0.988
Коефицијент детерминације 0.976

Ф-тест 247.770
Стандардна грешка процене 0.012



Слика 4.
Figure 4.



Слика 5.
Figure 5.

На слици 4 приказан је математички модел са кривом која даје функциону зависност.

Промене градијента течења тла (J_t) у функцији промене сувих запреминских маса (γ_d) су такође испитиване геостатистичким методама и добијени су следећи резултати: Утврђена је функциона веза $J_t = f(\gamma_d)$. Функциону везу као и оптималне вредности минимума и максимума даје полином III-степенa. Математички модел са регресионом кривом приказан је на слици 5. Полином III-степенa који даје функциону везу $J_t = f(\gamma_d)$ има једначину:



Са показатељима:

Коефицијент корелације 0.978

Ф-тест 256.750

Коефицијент детерминације 0.967

Стандардна грешка процене 0.013

На основу успостављених корелационих веза $J_t = f(\gamma_d)$ и $J_t = f(\gamma_d)$ може се закључити да лес при сувој запреминској тежини од $\gamma_d = 1.2$ је много осетљивији на настанак унутрашње ерозије и течења, односно потребни су градијенти реда величине 2÷4, у односу на градијенте када су суве запреминске масе $\gamma_d = 1.4$, под условом да не дође до порног притиска у лесном тлу. У условима успостављања и трајања порног притиска влада друго напонско стање на чврсте честице тла, па филтрациона сила нема толики утицај на померање чврсте честице, односно градијент нема значајнијег утицаја. По слабљењу порног притиска поново се успоставља напонско стање као и пре настанка порног притиска.

4. ЗАКЉУЧАК

На основу приказаних експерименталних испитивања физичко-механичких карактеристика, а посебно отпорних карактеристика - иницијалне унутрашње ерозије и течења макропорозног лесног тла, и њиховом обрадом математичким методама геостатистике може да се закључи:

Показатељи настанка унутрашњих процеса су отпорне карактеристике земљишта и градијенти под којима се одвија филтрација подземних вода. Критеријуме ових показатеља за настанак ерозионих процеса, код лесног тла треба тражити у функционој зависности природне влажности и параметара отпорности на смицање и функционој зависности сувих запреминских маса и градијената филтрације подземне воде. Међусобном интерацијом критеријума добијених из функционе зависности добиће се критеријум настанка унутрашњих ерозионих процеса за лесно земљиште.

Отпорне карактеристике (угао унутрашњег трења и кохезија), имају снижене вредности, у условима повишене влажности и водозасићења, односно пад од вршне на резидуалну чврстоћу за око два пута.

Резултати есперименталних испитивања почетне - иницијалне унутрашње ерозије и течења тла доведени су у функциону везу са сувим запреминским масама уз висок степен корелационе зависности. Са повећањем сувих запреминских маса потребни су већи градијенти и веће брзине да би се остварила филтрација која иницира слом структуре - унутрашњу ерозију.

Успостављене корелационе зависности: отпорних карактеристика и влажности, као и зависности хидрауличких градијената ($J_{\mu\epsilon}$) и (J_t) и сувих запреминских маса омогућавају рационалност у истраживању и испитивању унутрашње ерозије у оквиру макропорозних лесних наслага.

5. ЛИТЕРАТУРА

- Гајић Г. (1994): "Утицај физичко-механичких карактеристика земљишта на појаву и развој процеса дубинске ерозије" магистарски рад одбрањен 1994 године на Шумарском факултету у Београду.
- Гајић Г. (2000): "Утицај отпорности земљишта на степен активизације дубинске ерозије" докторска дисертација одбрањена 2000 године на Шумарском факултету у Београду
- Тодоровић Т.; Гајић Г. (1996): "Application of the method of erosion-control soil engineering in the study of the mechanism of landslides and sanation of terrain", First European Conference and Trade Exposition on Erosion Control, Barcelona, may 29-31.
- Тодоровић, Т.; Гајић Г. (1997): "Applications geotechnical approach to structures on macroporous loess soil", APCOM '97 - Symposium on computers applications and operations research in the mineral industries, 2nd Regional, Moscow state Mining University, Moscow, Russia, August 24-28.
- Славјанов В.Н., Фандеева В.И., - "Инженерно геологическије процеси и јављенија их значење дља строитеелства", Госстеојиздат, Москва, 1963.
- Влаховић М., - "Прилог проучавању процеса филтрације и консолидацује нормално консолидованих тла", Докторска дисертација, одбрањена на Рударско геолошком факултету 1977 год.

INITIAL PARAMETERS OF THE GENESIS OF INTERNAL EROSION PROCESSES

Grozdana Gajić

Summary

Internal erosion is actually erosion within the filtrationally unresistant geomechanical environment. The consequences of internal erosion development are: erosion landslides, soil flow, rockfall, gulleys, and the development of karst phenomena. The degree and intensity of internal erosion development depends primarily on the genesis of erosion geotechnical model, i.e. on physical-mechanical characteristics, which define the soil resistance to erosion and the filtration dynamics.

The parameters of the genesis of internal process are soil resistance characteristics and the gradients of groundwater filtration. The criteria of the parameters for the genesis of loess soil erosion process are in the functional dependence of natural moisture and the parameters of shear strength and functional dependence of dry bulk density and gradients of groundwater filtration. By the interaction of criteria obtained from the functional dependence we shall get the criterion of genesis of loess-soil internal erosion.

Resistance characteristics (angle of internal friction, and cohesion) have lower values in the conditions of higher moisture and water saturation, i.e. the drop from the top to residual strength by about two times.

The results of experimental research of initial internal erosion and soil flow are in functional relationship with dry bulk densities, with a high correlation. The higher dry bulk densities require higher gradients and greater velocities, so as to achieve the filtration which initiates the failure of the structure.

The correlations of resistance characteristics and moisture, as well as the dependence of hydraulic gradients (J_{ue}) and (J_I) and dry bulk densities enable the rationality in the study and investigation of internal deep erosion in macroporous loess layers.

