

KORELACIJA UGLA UNUTRAŠNJEG TRENJA I
POKAZATELJA ZBIJENOSTI NEKOHERENTNOG
MATERIJALA

Mirosljub Samardaković

Posle analize uticaja zbijenosti na veličinu ugla unutrašnjeg trenja nekoherentnog tla, u radu se izlažu oficijelne preporuke za njihovu orijentacionu korelaciju u zemlji i svetu. Njihovom analizom pokazuje se da od srednje do najveće zbijenosti peskova i šljunkova njihova čvrstoća na smicanje raste za preko 20%, što opravdava utvrđivanje preciznije korelacije. Na kraju se predlaže racionalan postupak na bazi smicanja minimalnog broja prola (12-15) iz poremećenog uzorka, za korelaciju prikazanu dijagramom (ϕ, I_D).

1. UTICAJ ZBIJENOSTI NA VELIČINU PARAMETARA ČVRSTOĆE
NEKOHERENTNOG TLA

Kako je poznato, totalni radni naponi u građevinskom tlu daleko su manji od napona pod kojima bi se bitno deformisala ili lomila pojedina zrna skeleta. Zbog toga se deformacije pod radnim naponima tla kao trofaznog sistema ostvaruju istiskivanjem tečne i gasovite faze (kada za dreniranje ima uslova i vremena) i usled međusobnih pomeranja susednih zrna, pri čemu se u zonama (najvećih) pomeranja mobilišu odgovarajući (najveći) delovi otpornosti na smicanje duž kontakata zrna. Sa porastom opterećenja rastu deformacije skeleta tla i dolazi do mobilizacije ukupne tada ostvarene otpornosti na smicanje, tako da je za rešavanje problema stabilnosti tla merodavna njegova čvrstoća na smicanje.

Prema Coulomb-ovom zakonu, čvrstoća na smicanje (τ_f) u ravni u kojoj su poznati totalan normalan napon (σ) i prorni pritisak vode (u), računa se kao

$$\tau_f = C' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi' = C' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (1)$$

gde je $\sigma' = \sigma - u$ efektivan normalni napon (koji se prenosi kroz skelet tla).

Veličine C' i ϕ' , kao tzv. parametri čvrstoće (na smicanje) tla, određuju se ogledima smicanja preko efektivnih napona. Za jednake uslove konsolidacije i dreniranja, a zatim i jednake naponsko-deformacijske uslove, oni se mogu smatrati konstantnim za dato tlo.

U nekoherentnom tlu, za uobičajene manje radne naponne eventualna kohezija (C'), kao posledica krutih i vodno-koloidnih veza između zrna, jeste zanemarljivo mala^{*)} ili ne postoji. Zbog značajne vodopropusnosti nekoherentnog tla priraštaj prornog pritiska pod spoljašnjim opterećenjem praktično se ne javlja pa je za takvo tlo, u datim naponsko-deformacijskim uslovima (npr. ravne ili triaksijalne deformacije), ugao unutrašnjeg trenja priraznim ogledima

$\phi = \phi' = \phi_{cu} = \phi_u = \phi_D$ praktično konstantan, pošto su uslovi konsolidacije i dreniranja određeni samom prirodom materijala.

Tako je za nekoherentno tlo

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \phi$$

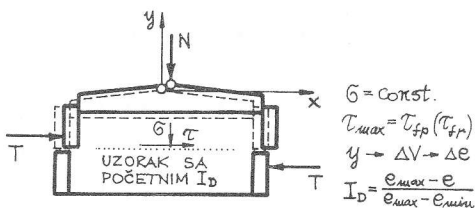
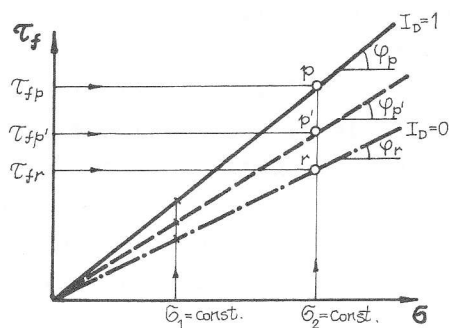
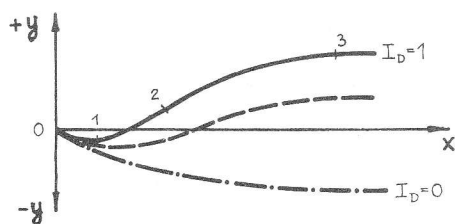
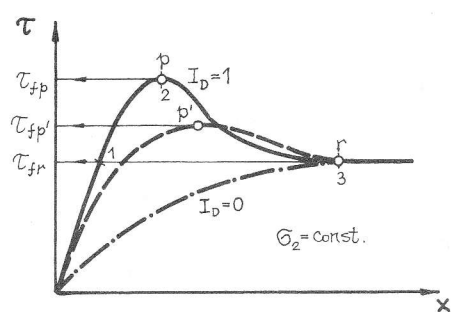
gde je σ' zbir efektivnog geološkog i totalnog dodatnog napona (od spoljašnjeg opterećenja).

Veličine parametara čvrstoće tla (C, ϕ), a preko njih i normalnog napona (σ') u datoj ravni takodje i čvrstoća na smicanje (τ_f) u toj ravni, zavise od sastava i stanja tla. Pod sastavom se pre svega, podrazumevaju granulometrijski sastav, gradacija i oblik zrna, a pod stanjem: za koherentno tlo—stanje konsistencije (vlažnost), a za nekoherentno—zbi-

^{*)} Kada anvelopa Mohr-ovih krugova loma nije prava, obično za područje većih radnih napona, pa je zbog pojednostavljenja proračuna aproksimiran-a pravom tipa I-ne (1) u tom području, tada račun-ska vrednost C' kao odsečka na τ osi dijagrama (τ, σ), može da ima značajnu vrednost.

jenost, koja ostaje jednaka i posle potapanja peska ili šljunka.

Ugao unutrašnjeg trenja lomljenog kamena, šljunkova i peskova se laboratorijski, po pravilu i najizvesnije, određuje opitom direktnog smicanja, na više proba, prema sl.1. Probe su napregnute različitim $\sigma = \text{const}$, dok napon smicanja ili smičuća deformacija (x) rastu do loma.



Sl.1.

Kako se vidi, i kako je iz literature poznato, pri porastu smičućeg napona menja se i zapremina uzorka tako što se, pri smičućem deformisanju i premeštanju zrna u zoni smicanja, zapremina zbijenog materijala uvećava (tlo "dilatira") a rastresitog smanjuje. Pri tome zbijena proba jednog uzorka prvo dostiže svoju tzv. vršnju čvrstoću (τ_{fp}) a zatim popušta, dok nezbijena proba stalno ojačava. Tako pri velikoj deformaciji obe probe (pri $\sigma = \text{const}$) postaju jednako zbijene i teorijski imaju jednaku krajnju, prema terminu za koheren-

tna tla tzv. rezidualnu čvrstoću (τ_{fr}). Tlo koje ima takvu kritičnu gustinu i tzv. kritični koeficijent poroznosti^{*)}, u toku smicanja zadržava konstantnu zapreminu, a njegova vršna i krajnja čvrstoća su jednake.

Za zbijen materijal, na dijagramu (τ_f, σ) dobiće se dve Coulomb-ove prave, za vršnu i krajnju čvrstoću, i dva odgovarajuća parametra čvrstoće (ϕ_p i ϕ_r), od kojih će drugi odgovarati i za početno rastresit materijal (koji ima samo krajnju čvrstoću).

Za proizvoljnu početnu zbijenost materijala, ugao unutrašnjeg trenja koji odgovara vršnoj čvrstoći (τ_{fp}) imaće vrednost između ϕ_p i ϕ_r , a za velike deformacije vrednost ϕ_r .

Pošto se uslovi stabilnosti pri projektovanju analiziraju na bazi manjih deformacija i vršne čvrstoće tla, u praksi se postavljaju pitanja:

- a) Koji je red veličine promene ugla unutrašnjeg trenja (ϕ) nekoherentnog tla zbog promene njegove zbijenosti tj. pokazatelja zbijenosti (npr. indeksa gustine I_D)?
- b) Ako je to značajna veličina, kako praktično, sa što manje uzoraka (vremena i sredstava), za dato tlo utvrditi korelaciju ϕ i I_D , tako da se pri projektovanju ili pri proveru stabilnosti izvedenog objekta operiše sa što realnijom veličinom ϕ , koja odgovara projektovanoj ili ostvarenoj zbijenosti?

Pokušaj odgovora na ova pitanja daje se u sledeća dva poglavlja.

^{*)} Počev od ovoga, grupa Univerziteta u Kembridžu razvila je u svetu afirmisanu metodologiju utvrđivanja konstitutivnih modela i analize ponašanja tla, poznatu kao *Critical state soil mechanics*.

2. RED VELIČINE PROMENE UGLA UNUTRAŠNJEG TRENJA ZBOG PROMENE ZBIJENOSTI NEKOHERENTNOG TLA

Na osnovu brojnih ispitivanja, orijentacione računске veličine ugla unutrašnjeg trenja šljukova i peskova daju se, u zavisnosti od sastava i zbijenosti, u raznim standardima, pravilnicima i uputstvima u literaturi. Neka od oficijelnih, iz različitih regiona, ovde se daju u sažetom obliku.

a) Prema jugoslovenskom pravilniku o temeljenju (1974), u članku 78. Pravilnika predlaže se:

Zbijenost		Ugao unutrašnjeg trenja ϕ^0	
Opis	I_D	Sitan i srednji pesak	Krupan pesak i šlj.
Rastresit	0-0,35	< 31,5	31,5-34,5
Srednje zbijen	0,35-0,65	31,5 - 34,5	34,5-38
Zbijen	0,65-0,85	34,5-38	38-42,5
Vrlo zbijen	0,85-1	38-42,5	>42,5

b) Prema sovjetskom Priručniku za projektovanje, u redakciji Soročan, Trofimenkov (1985) predlaže se ϕ^0 :

Pesak (kvarcni)	Koeficijent poroznosti e			
	0,45	0,55	0,65	0,75
Šljunkovit i krupan	43	40	38	-
Srednje krupnoće	40	38	35	-
Sitan	38	36	32	28
Prašinovit	36	34	30	26

Slične vrednosti date su i preglednim, razradjenim čehoslovačkim standardima (ČSN 73 1001), koje navodi Bažant (1979).

c) Prema Nemačkom institutu za standardizaciju, u DIN 1055(1976) predlažu se računске vrednosti ϕ za nekoherentna tla, svrstana u dve grupe:

Vrsta tla	Zbijenost	Ugao unutr.trenja ϕ^0
Šljunak,obluci,drobina,sa malo peska slabo graduirani	rastresit srednje zbijen zbijen	32,5 35 37,5
Ostali šljunkovi i peskovi	rastresit srednje zbijen zbijen	30 32,5 35

d) Autori sa anglo-saksonskog područja
Das (1983) daje tipične vrednosti ugla za vršnu (ϕ_p) i krajnju (ϕ_r) čvrstoću:

Vrsta tla	Zbijenost	ϕ_p^0	ϕ_r^0
Pesak Zaobljenih zrna	rastresit srednji zbijen	28-30 30-35 35-38	26-30
Pesak Uglastih zrna	rastresit srednji zbijen	30-35 35-40 40-45	30-35
Peskovit šljunak		34-48	33-36

Slične podatke za vršnu čvrstoću navode Bowles(1979), Bell (1983) i drugi afirmisani autori sa ovog područja,koje ovde ne navodimo.

e) Francuski autori

Costet,Sanglerat (1981) navode niz podataka raznih autora i formule za indirektno odredjivanje ugla unutrašnjeg trenja preko koeficijenta poroznosti,odnosno zbijenosti i drugih faktora.Prema njima, nekoherentno tlo od rastresitog za zbijenog stanja uveća vršni ugao ϕ za 12^0 pa i 25^0 .

Ako važi izloženo, vidi se da isti pesak, šljunak ili mešovito tlo, pri različitim uobičajenim zbijenostima, može da ima bitno različite veličine ugla unutrašnjeg trenja

(ϕ) odnosno čvrstoće na smicanje ($\tau_f = \sigma' \tan \phi$).

O redu veličine njihove promene može se zaključivati na osnovu naredne tabele, sačinjene sumiranjem navedenih preporuka.

Materijal	Zbijenost	$\sim I_D$	ϕ^0	$\tan \phi$	$\tan \phi / \tan \phi_{0,5}$
Pesak Srednje krupan	rastresit	0	29,5	0,566	0,89
	srednji	0,5	32,5	0,637	1
	zbijen	1	38	0,781	1,23
Šljunak	rastresit	0	32,5	0,637	0,84
	srednji	0,5	37	0,754	1
	zbijen	1	42,5	0,916	1,21

Kako se vidi, ugao unutrašnjeg trenja u pesku i šljunku od rastresitog do zbijenog stanja (normativno) se uvećava za $8,5-10^0$, a čvrstoća na smicanje za stanje srednje zbijenosti, koje se „in situ“ obično lako ostvaruje, pri daljem zbijanju može da se uveća za preko 20%.

Ovakva značajna povećanja trebalo bi ispitivanjima potvrditi i u analizama stabilnosti materijala (kao temeljnog tla, ispune iza potpornih zidova, u nasipima, branama i sl.) primenjivati, uvodjenjem realnijih veličina parametara čvrstoće za datu zbijenost materijala.

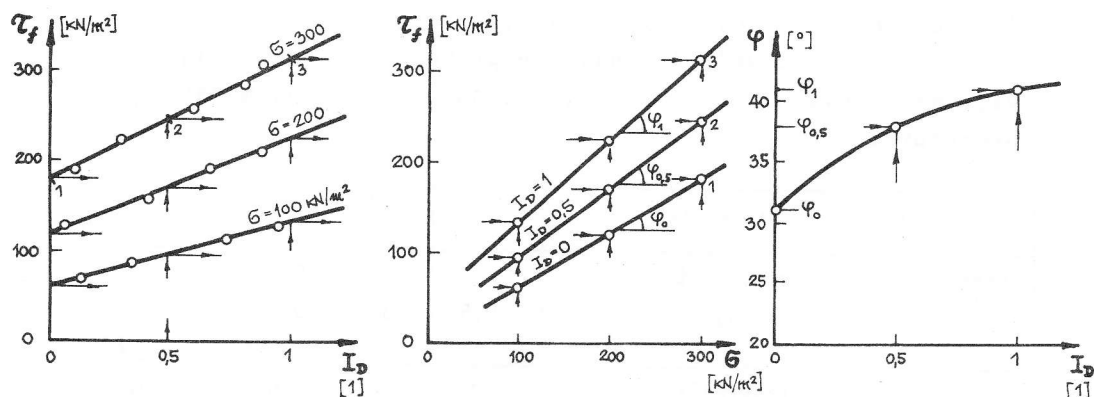
To je moguće uz prethodno laboratorijsko utvrdjivanje korelacije parametara čvrstoće i pokazatelja zbijenosti.

3. POSTUPAK ZA KORELACIJU UGLA UNUTRAŠNJEG TRENTA I POKAZATELJA ZBIJENOSTI NEKOHERENTNOG TLA

Postupak se predlaže za korelaciju na bazi laboratorijskog ispitivanja u aparatu za direktno smicanje, na 12-15 proba iz uzorka za koji je prethodno urađen opit najmanje i najveće zbijenosti^{*)}.

Postupak i korelacija prikazani su na Sl.2.

^{*)} Iako se široko primenjuje, ovaj opit kod nas nije standardizovan pa se može izvoditi prema ASTM STP 523 (1973) ili DIN 18126 (1981).



SL. 2

Probe se u kutije za smicanje ugrade sa različitom zbijenošću, koja se za izmerenu početnu visinu uzorka iskaže preko γ_d ili e , odnosno I_D^* . Po 4-5 različito zbijenih proba opteretiti se konstantnim $\sigma = 100, 200$ i 300 kN/m², za svaku se odredi čvrstoća na smicanje (τ_f) i nacrtati prvi dijagram. Odatdese za $I_D = 0, 0.5$ i 1 očitaju veličine τ_f za tri različita opterećenja (σ) i za svako I_D konstruiše po jedna Kulonova prava na drugom dijagramu. Ugao nagiba svake prave jeste ugaon unutrašnjeg trenja (za uslove kakvi su zadati pri opitu smicanja) koji odgovara indeksu gustine za tu pravu. Tako se konstruiše treći dijagram na kome je ostvarena tražena korelacija (ϕ, I_D).

Sa ovog dijagrama, za proizvoljnu projektovanu ili ostvarenu (početnu) zbijenost, iskazanu preko γ_d, e ili I_D , može se dobiti odgovarajuća veličina ugla unutrašnjeg trenja, koju treba očekivati za vršnu čvrstoću na smicanje ispitanog nekoherentnog materijala.

*) $I_D = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) = \gamma_{dmax} (\gamma_d - \gamma_{dmin}) / (\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}) \gamma_d$

4. Z A K L J U Č A K

Prema uvidu autora, u našoj savremenoj građevinskoj i geotehničkoj praksi uslovi smicanja u peskovima, šljunkovima (i drobljenom kamenu) po pravilu se ne odredjuju na bazi vrlo korisnih ali retkih terenskih opita penetracije ili laboratorijski proverenih parametara čvrstoće, već se ugao unutrašnjeg trenja za navedene materijale pretpostavlja indirektno, na bazi klasifikacije materijala, prema preporukama kao u tački 2. I u slučajevima kada se ovaj ugao određuje laboratorijski, rezultati opita smicanja najčešće se ne vezuju za zbijenost uzoraka, u kojima se gustina materijala uvek manje ili više razlikuje od one „in situ“. Izuzetak su prethodna ispitivanja materijala za nevezane slojeve kolovoznih konstrukcija saobraćajnica, kojima se, poslednjih godina, proverava veza zbijenosti (γ_d) i čvrstoće-nosivosti (CBR).

Kako se vidi iz tačke 2., od srednje do najveće zbijenosti peskova i šljunkova, njihov ugao unutrašnjeg trenja normativno bi trebalo uvećati za oko $5,5^0$, a koeficijent trenja i čvrstoću na smicanje za preko 20%.

Ovaj značajan uticaj zbijenosti na čvrstoću može se za dati nekoheretni pa i kameni materijal odrediti kvantitativno, predloženim postupkom za utvrđivanje korelacije (ϕ, I_D) tj. (ϕ, e) ili (ϕ, γ_d) . Broj uzoraka materijala ostaje kao i do sada, s tim što oni ne mora da budu neporemećeni (zbog čega se obično i odustaje od ispitivanja čvrstoće navedenog tla), a broj proba za svako opterećenje (σ) uvećava se na 4-5. S obzirom da se za ovakve materijale radi brzi (u) opit smicanja, kriva korelacije dobija se relativno brzo i jednostavno.

B I B L I O G R A F I J A

- BAŽANT, Z. (1979): *Methods of foundation engineering*. Elsevier, Amsterdam, str. 62.
- BELL, F. G. (1983): *Engineering properties of soils and rocks*. Butterworths, London, str. 16-17.
- BOWLES, J. E. (1979): *Physical and geotechnical properties of soils*. McGraw-Hill, New York, str. 154, 382.
- COSTET, J., SANGLERAT, G. (1981): *Cours pratique de mécanique des sols 1*. Dunod, Paris, str. 213-214.
- DAS, B. M. (1985): *Advanced soil mechanics*. McGraw-Hill, New York, str. 406.
- ***
DIN 1055, Teil 2 (1976), u DIN Taschenbuch 36. Beuth Verlag, Berlin, 1983, str. 44.
- ***
Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i izvođenje radova kod temeljenja građevinskih objekata (1974). Službeni list SFRJ, br. 34-642, 1974, čl. 78.
- SOROČAN, E. A. TROFIMENKOV, J. G. (redaktori) (1985): *Tlo, temelji i podzemni objekti*, Priručnik za projektovanje (na ruskom). Stroiizdat, Moskva, str. 16.

RELATION OF THE ANGLE OF INTERNAL FRICTION
TO THE RELATIVE DENSITY OF NON-COHESIVE MATERIALS

Miroljub Samardaković

S u m m a r y

After the analysis of the influence of density on the angle of interior friction of non-cohesive materials, some official recommendations for their orientational correlation in the country and abroad are presented. The analysis shows that, from medium to maximum density, the shearing strength of non-cohesive materials increases for more than 20%, thus justifying the determination of more precise correlations. Finally, the rational procedure based on shearing of the minimal number of tests (12-15) from the disturbed sample is presented for the correlation shown on the diagram (σ, I_D).