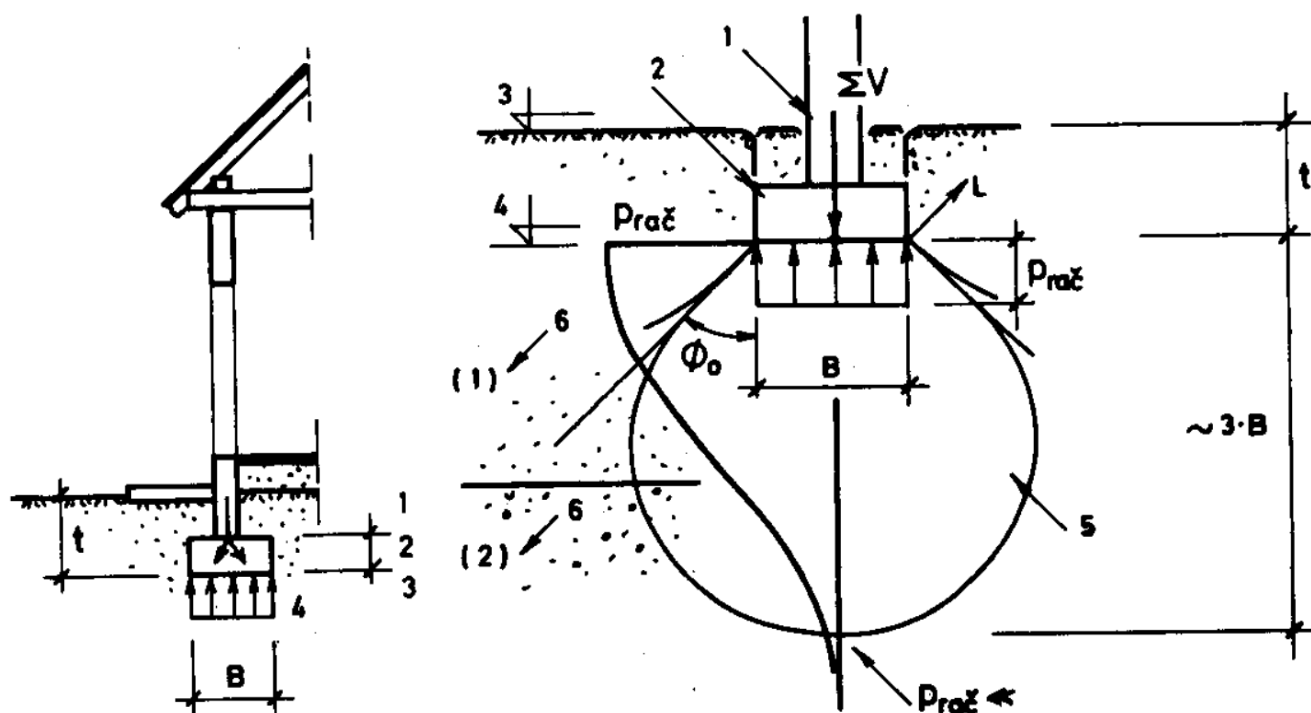


Poglavlje 4

Stišljivost tla i sleganje temelja. Zbijanje tla

4.1 UVOD

Temelj predstavlja vezu konstrukcije i tla. Opterećenje iz konstrukcije se preko temelja prenosi na tlo i povećava postojeće pritiske u tlu. Najveći pritisak je na kontaktu temeljne spojnice i tla na *dubini fundiranja t*. Ovaj pritisak se naziva *računski pritisak* p_{rac} i treba da je manji od dozvoljenog pritiska za tlo p_{doz} . Dodatni pritisci u tlu se javljaju do dubine od približno $3B$ gdje je B širina trakastog temelja. U ovoj zoni se tlo deformiše i rezultat tih deformacija je pomjeranje temelja na dolje – *sleganje temelja s*. Sleganje treba da je manje od *dozvoljenog sleganja* s_{doz} za tu vrstu objekta.



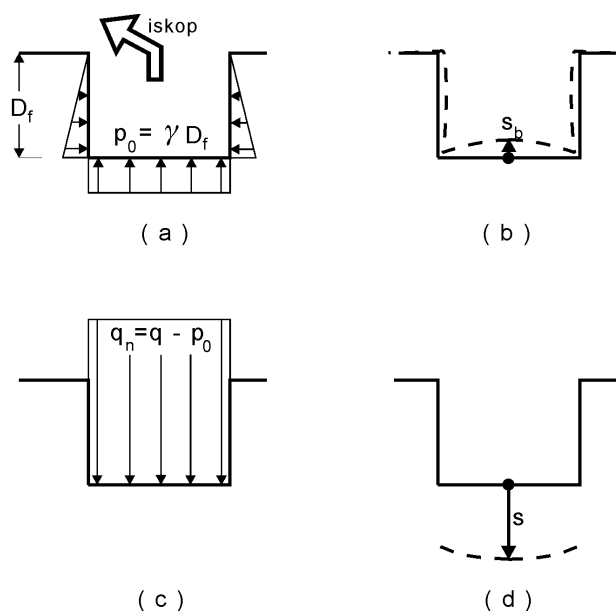
1-Konstrukcija; 2-temelj;
3-tlo; 4-reaktivno opterećenje tla.

1-Objekat; 2-temelj; 3-teren; 4-kota naležude površine temelja; 5-podloga; 6-osnaka sloja tla.

Slika 4.1 – Temelj kao veza konstrukcije i tla. Prenos opterećenja kroz tlo (naponi u tlu).

4.2 PRORAČUN SLEGANJA

S obzirom da se opterećenje građevinskim objektom izuzetno retko izvodi na samoj površini terena, uobičajeno izvođenje temelja počinje izvođenjem iskopa. Tlo iz područja temeljne jame se uklanja i dolazi do rasterećenja tla ispod budućeg temelja sa promenom konturnih opterećenja prikazanih na Slici 4.2-a. Usled smanjenja normalnih napona u centralnom području ispod budućeg temelja dolazi do deformacija bubrenja u elastičnoj oblasti rasterećenja, tako da tlo može bubriti u veličini s_b (Slika 4.2-b).



Slika 4.2. Rasterećenje tla pri iskopu. Neto kontakti napon

Nakon završenog uklanjanja tla, dno iskopa se počinje opterećivati temeljnom konstrukcijom, proces bubrenja se zaustavlja, počinju pomeranja na niže, tako da kada opterećenje dostigne raniji **geostatički nivo napona** $p'_v = p'_0$, svi efekti bubrenja se anuliraju i nakon povećavanja napona iznad geostatičkog, počinju stvarna sleganja, Slika 4.2-d. Zbog toga se u proračunu sleganja priraštaj vertikalnih napona određuje nanošenjem neto kontaktnog napona q_n , koji predstavlja razliku bruto **kontaktnog napona** q i geostatičkog vertikalnog efektivnog napona na nivou temeljne spojnice p'_0 , (Slika 4.2-c).

Obrazac za sleganje temelja za procjenu slijeganja temelja u praksi:

$$s = \frac{(1-\nu^2) \cdot \bar{P}}{E_0 \cdot \sqrt{F}} \cdot \bar{k} \quad (\text{m})$$

Oznake u obrascu imaju sledeća značenja

s - ukupno sleganje (m)

$\bar{P} = (p_{\text{rač}} - \gamma \cdot t) \cdot F$ (kN) ; dodatni pritisak u tlu (samo od naknadno nanetog opterećenja u iskop).

ν - Poasonov koeficijent (1)

F - Naležuća površina temelja (m^2)

E_0 - Deforamcijski modul tla (kN/m^2)

$$E_0 = \left(1 - \frac{2 \cdot \nu^2}{1 - \nu}\right) \cdot M_s$$

- gde je M_s (kN/m^2) modul stišljivosti tla.

Koeficijent k , i informativne vrednosti Poasonovog koeficijenta ν su sledeće vrednosti

L/B	\bar{K}	Tlo	v
1	0,88	šljunak	0,25
2	0,86	pesak	0,30
3	0,83		
4	0,80	prašina	0,35
5	0,77	glina	0,40

L je duža a B kraća strana temelja.

4.3 STIŠLJIVOST TLA

Stišljivost je osobina tla da smanjuje zapreminu pri povećavanju efektivnih napona. Ova osobina je od posebnog značaja kada se analizira sleganje objekata koji se oslanjaju na tlo.

KOMPONENTE SLEGANJA NA REALNOM TLU

Ukupna veličina sleganja opterećene površine se može opisati zbirom:

$$s = s_i + s_c$$

gde je:

s_i trenutno sleganje. Deformacije se pojavljuju istovremeno sa nanošenjem priraštaja napona.

s_c konsolidaciono sleganje. Deformacije promene zapremine doprinose ukupnoj veličini sleganja, pri čemu u vodom zasićenim materijalima dolazi do istiskivanja vode iz pora. Ova komponenta je značajna kod glina jer može trajati relativno dugo. U peskovima i drugim vodopropusnim materijalima ova komponenta sleganja se odigrava praktično istovremeno sa trenutnim sleganjem u toku nanošenja opterećenja, bez vremenskog zaostajanja.

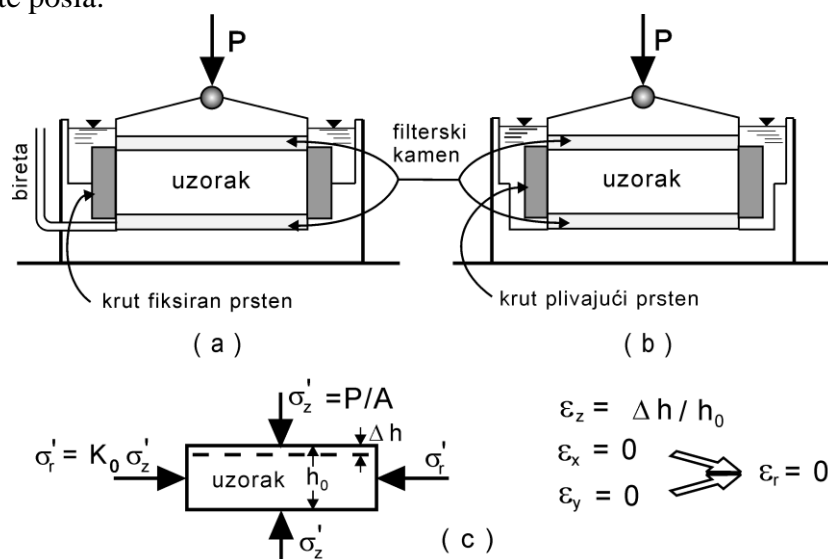
Veličina konsolidacionog sleganja vodom zasićenih glina može se izračunati korišćenjem rezultata opita stišljivosti u edometarskom aparatu

EDOMETARSKI OPIT - OPIT STIŠLJIVOSTI ili KONSOLIDACIJE

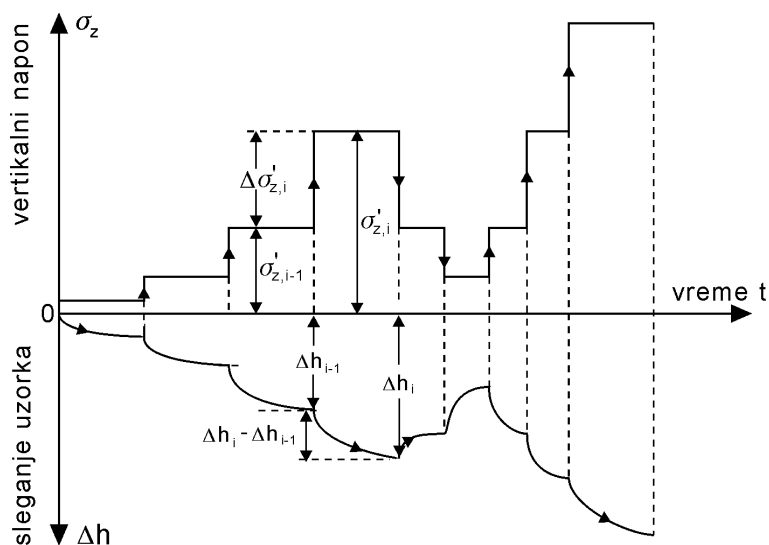
Opit stišljivosti izvodi se u kutijastom aparatu koji se naziva *edometar*. Uzorak u obliku relativno niskog cilindra, sa površinom baze između 20 cm² i 100 cm² i odnosom prečnika prema visini u granicama od 2.5 do 5, izlaže se kontrolisanim priraštajima vertikalnih napona, ali je krutim prstenom bočna deformacija sprečena. Meri se sleganje uzorka, tj. smanjenje njegove visine sa povećanjem napona. Presek kroz kutiju edometra sa fiksnim i plivajućim prstenom prikazani su na Slici 4.3.

Porozne pločice na bazama uzorka omogućavaju evakuaciju vode u procesu konsolidacije, dok se promena zapremine registruje merenjem promene visine uzorka. Opterećenje se nanosi stepenasto, kao što je to ilustrovano na Slici 4.4. U početnom stanju uzorak se opterećuje malim naponom od oko 5 do 10 kPa koji obezbeđuje kontakt između ploče za opterećivanje, poroznih pločica i uzorka. Ovo malo "nulto" opterećenje (koje nije prikazano na Slici 4.4) se uzima kao početno, nulto, a nakon toga se opterećivanje vrši stepenasto, pri čemu je uobičajeno da je odnos veličina vertikalnih napona između dve susedne stepenice opterećenja oko 2, na primer: 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa, itd. Uobičajeno je

da svaka stepenica opterećenja traje 24 časa, izuzetno i do 48 časova. Praktično neizbežan nedostatak je da opiti relativno dugo traju, što se mora imati u vidu pri planiranju potrebnog vremena za obavljanje ove vrste posla.



Slika 4.3. Šema edometra. (a) sa fiksiranim prstenom, (b) sa plivajućim prstenom, (c) naponi i deformacije



Slika 4.4. Nanošenje napona i deformacije u edometarskom opitu

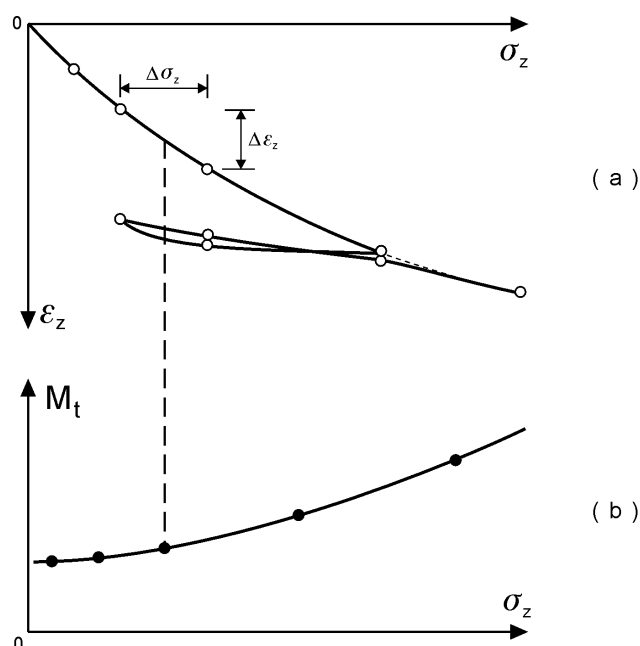
POKAZATELJI STIŠLJIVOSTI IZ EDOMETARSKIH ISPITIVANJA. Tipični rezultati dobijeni edometarskim ispitivanjem uzorka prikazani su dijagramima na Slici 4.5. S obzirom da se tlo samo aproksimativno može tretirati kao elastičan materijal, za interval napona $\Delta \sigma'_z = \sigma'_{z,i} - \sigma'_{z,i-1}$ može se definisati tangenti, odnosno *sekantni modul stišljivosti* M_v ili M_s kao

$$M_v = \frac{\Delta \sigma'_z}{\Delta \epsilon_z}$$

Ako je neopterećen uzorak tla u edometru imao početnu visinu h_0 i pri stepenici opterećenja "i" smanjio visinu za Δh_i , specifična deformacija je:

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{\Delta h_i - \Delta h_{i-1}}{h_0 - \Delta h_i}$$

Tlo koje ima manji modul stišljivosti ima veću stišljivost.



Slika 4.5. Rezultati opita stišljivosti u edometarskom opitu.

(a) Specifične deformacije, (b) Tangentni modul stišljivosti.

SLEGANJE TEMELJA NA PESKU

Iz granularnih materijala, kao što su pesak i šljunak, nije moguće konvencionalnim sredstvima i na ekonomičan način uzeti iz terena neporemećen uzorak i ispitati ga u laboratoriji, na primer u edometru, kao što se to radi sa uzorcima gline ili prašine, već se do pokazatelja deformabilnosti dolazi indirektnim putem, empirijski, korišćenjem rezultata standardnih penetracionih ispitivanja (*SPT*) ili ispitivanja statičkim penetrometrom (*CPT*). Penetraciona ispitivanja treba smatrati obaveznim u svim terenskim ispitivanjima tla za potrebe temeljenja, a mogu se izostaviti samo uz jasno i logično obrazloženje, a nezamenljiva su u slučaju da u preseku tla postoje slojevi peska.

Ovde možda nije suvišno napomenuti da su rastresiti peskovi stišljiviji od zbijenih, ali i da su gline znatno stišljivije od peska ili šljunka.

4.4. DOZVOLJENA SLEGANJA

Dopušteno sleganje temelja objekta je veličina koju konstrukcija može da toleriše i zavisi od više faktora kao što su **vrsta konstrukcije, njena visina, krutost, namena, lokacija, brzina i raspodele sleganja**. Ne postoji jedinstvena dopuštena vrednost koja bi se mogla uvek i unapred propisati. Osnovni oblici deformacije objekta, sa komponentama sleganja (Lambe i Whitman, 1969), prikazani su na Slici 4.6, gde je na šematizovan i uprošćen način ukupna deformacija objekta usled sleganja temelja razdvojena na tri komponente.

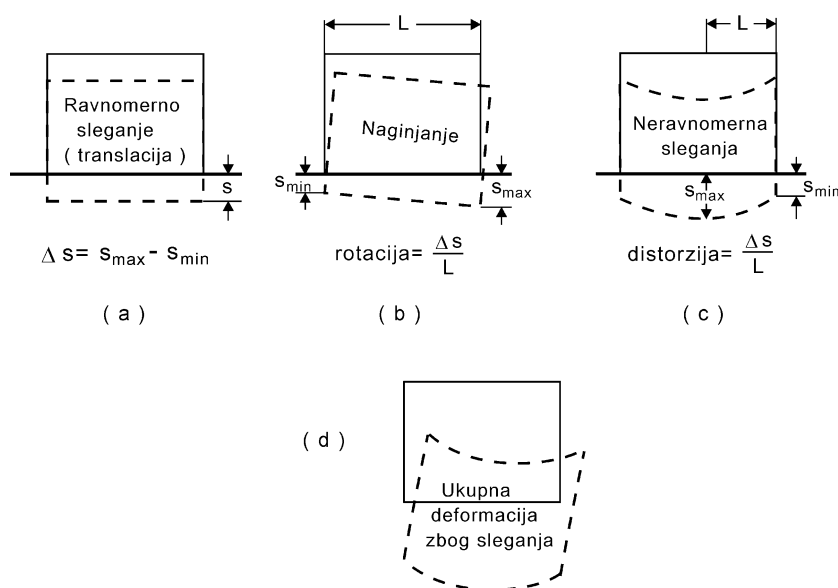
- a) *Ravnomerno sleganje* (Slika 4.6-a) je moguće u slučaju krutog simetričnog objekta na homogenom tlu. Čak i kada je relativno veliko, ravnomerno sleganje obično nema štetne posledice po sam objekat, ali može oštetiti veze instalacija (vodovod, kanalizacija, struja, gas, drenažni sistem i sl.) po konturi objekta. Zbog toga takve veze treba realizovati što kasnije tokom građenja, ukoliko je to moguće, ili ih konstruktivno rešiti na takav način da mogu da prime lokalizovane deformacije bez oštećenja ili narušavanja funkcionalnosti i da budu pristupačne radi eventualnih intervencija. Postoje zabeleženi slučajevi sleganja od 1.5-2 metra i objekat zadovoljavajuće funkcioniše, ali sa druge strane, sleganje od desetak centimetara može objekat učiniti neupotrebljivim.

Skempton i MacDonald (1955) predlažu sledeće maksimalne projektne vrednosti:

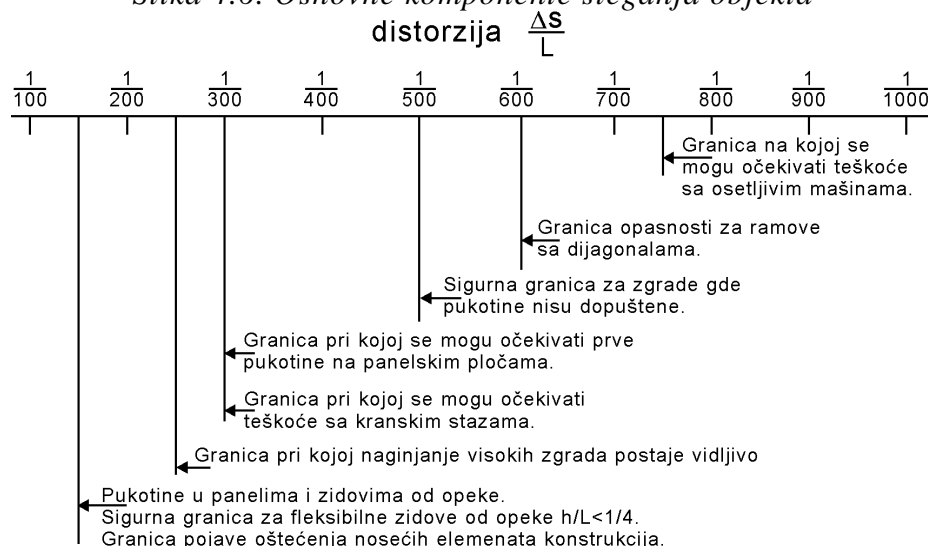
- Pojedinačni temelji na glini	65 mm
- Pojedinačni temelji na pesku	40 mm
- Ploča ispod celog objekta na glini	65-100 mm
- Ploča ispod celog objekta na pesku	40-65 mm

- b) *Naginjanje, čista rotacija* relativno krutog objekta (Slika 4.6-b) može imati štetne posledice po konstrukciju i instalacije u njoj, uticati na rad mašina, kranova i druge opreme. Uski i visoki objekti, tornjevi, pojedinačni dimnjaci, soliteri, usled početnog naginjanja mogu preopteretiti jednu zonu temeljnog tla usled ekscentričnosti rezultante opterećenja zbog inicijalnog naginjanja, izazvati lokalnu plastifikaciju tla tako da, usled distorzijskog puzanja, naginjanje dobija progresivan karakter.
- c) *Diferencijalna ili neravnomerna* sleganja karakterističnih tačaka u osnovi objekta (Slika 4.6-c) ograničena su fleksibilnošću konstrukcije i izazivaju zakrivljenost uz distorzijske deformacije koje mogu izazvati različita lokalna preopterećenja i oštećenja objekta. Ovaj oblik sleganja je najčešći i mora se ograničiti na dopuštene veličine. Takav oblik sleganja zavisi od rasporeda opterećenja i od nehomogenosti prirodnog tla. Diferencijalna sleganja su obično manja od maksimalnih, ali su utoliko nepovoljnija ukoliko se pojavljuju na manjem odstojanju, tako da je mera ovog oblika deformisanja definisana distorzijom tj. odnosom razlike sleganja i odstojanja. S obzirom da su to relativno mali brojevi, obično se izražavaju razlomkom $1/n$, na način prikazan na Slici 4.7 (Bjerrum, 1963). Slika ilustruje granične velične distorzijskih deformacija na osnovu teorijskih istraživanja, merenja na modelima i osmatranja objekata i može se koristiti za ocenu izračunatih veličina kod objekata uobičajenih dimenzija i namene. Međutim, stvarne tolerancije distorzijskih deformacija i rotacija mogu biti i znatno strožije u slučaju objekata i konstrukcija specijalne namene.

4. Stišljivost tla i sleganje temelja. Zbijanje tla



Slika 4.6. Osnovne komponente sleganja objekta



Slika 4.7. Granične ugaone distorzije

Radi relativne ocene veličina u našim propisima za temeljenje iz 1990 godine, ako se dopuštena apsolutna i relativna računski sleganja ne dokazuju posebno detaljnom analizom sleganja konstrukcije temelja i građevinskog objekta, dozvoljavaju se računski sleganja na krupnozrnom tlu najviše 2.5 cm, a na sitnozrnom tlu najviše 5 cm. Ukoliko je izračunato ili procenjeno sleganje veće od 10 mm, uputno je od početka građenja početi sa pažljivim merenjem sleganja kako bi se proverila tačnost prognoze. Merenje treba vršiti tokom građenja, dovoljno često u zavisnosti od brzine napredovanja, ali ih nastaviti i nakon završetka prvih godina tokom eksploatacije.

Ukoliko se plitkim temeljima ne mogu zadovoljiti uslovi o veličinama dopuštenih sleganja i/ili nosivosti tla, tada se traži neko drugo rešenje, koje podrazumeva ili **poboljšanje karakteristika tla ispod objekta** ili prenošenje opterećenja na dublje, manje deformabilne zone tla primenom **dubokog temeljenja**, najčešće šipova.

4.5. DEFORMACIJE BEZ ZNATNE PROMJENE NAPONA – UTICAJ MRAZA NA TLO

Usled zamrzavanja površinskog sloja tla može doći do izdizanja njegove površine, pri čemu nakon povišenja temperature u proleće, takva mesta ostaju veoma meka i raskvašena. Ova pojava može izazvati velika oštećenja na kolovoznim konstrukcijama, oblogama kanala i plitkim temeljima.

Zamrzavanje vode je praćeno povećavanjem zapremine od oko 9% pri prelasku u led. Zbog toga povećavanje zapremine zasićenog tla pri sniženju temperature ispod tačke mržnjenja nastaje usled povećanja zapremine pora za isti iznos. Ukupna promena zapremine tla, zavisno od poroznosti, može biti približno između 2.5% i 5 %, što bi u našim klimatskim uslovima izazvalo izdizanje površine tla od 2 do 4 cm, a u krupnozrnom tlu, šljunku ili pesku može biti i manje jer se pri zamrzavanju izvesna količina vode može istisnuti iz pora.

Da bi došlo do ove pojave treba da budu zadovoljeni sledeći uslovi:

1. Tlo mora biti zasićeno ili blisko zasićenom stanju.
2. Tlo mora da bude sitnozrno. U pogledu uticaja mraza najopasnija su ona tla koja imaju **relativno visok sadržaj prašinstih frakcija**. Takva tla sadrže sistem malih pora, ali istovremeno i vodopropusnost nije sasvim mala.

U našem podneblju se ilustrovani nepovoljni uticaji eliminišu temeljenjem ispod donje granice aktivnog sloja, a zaleđe potpornih konstrukcija se zapunjava krupnozrnim tлом koje nije osetljivo na dejstvo mraza. Zaštitne mere podrazumevaju temeljenje objekata na dubinama većim od dubine dejstva mraza koja se u našem podneblju kreće do oko **1,0 m**. U nekim okolnostima primenjuje se i prekidanje kapilarnog penjanja ugrađivanjem tamponskog sloja od krupnozrnog vodopropusnog materijala.

4.6 ZBIJANJE TLA

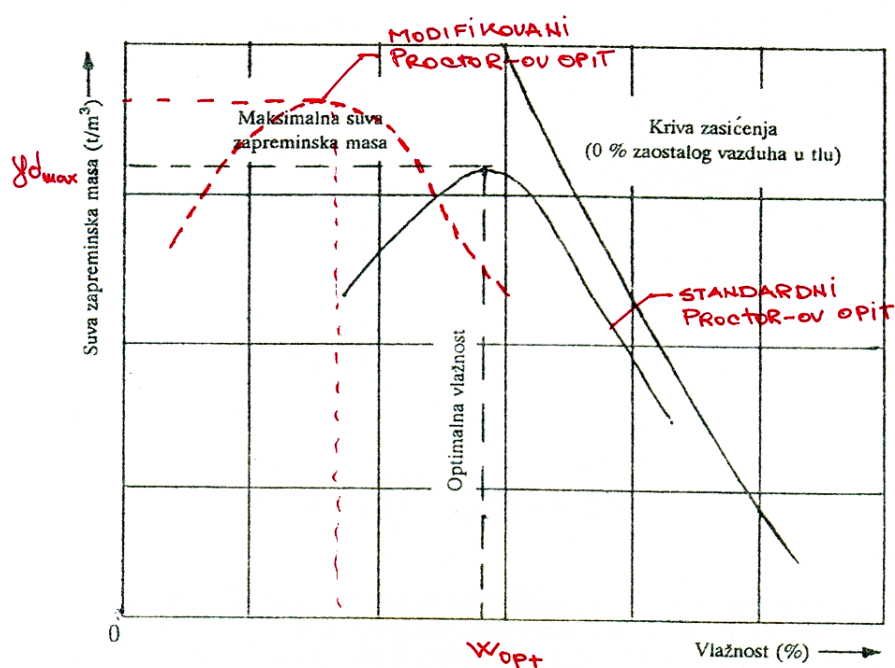
Kada se tlo koristi kao građevinski materijal za izradu nasipa (putevi, aerodromske piste, nasute brane) potrebno je da se materijal: iskopa, transportuje i ugradi nasipanjem. Pri građenju nasipa rastresito tlo se razastire u slojevima debljine 10-50cm a zatim **zbija** valjanjem, vibracijama ili udarcima malja. Zbijanjem se istiskuje vazduh i voda iz pora tla, povećava gustina tj. zapreminska težina tla čime se povećava čvrstoća na smicanje i nosivost tla a smanjuje se njegova stišljivost (deformabilnost) i vodopropusnost. Faktori koji utiču na zbijanje su: vrsta materijala koji se zbija, njegova vlažnost i primijenjene mašine za zbijanje.

Krupnozrna tla (nevezana) tla se najbolje zbijaju dejstvom vibracija pod čijim dejstvom manja zrna materijala upadaju u prostore između većih zrna. Vlažnost malo utiče na zbijanje ove vrste tla za razliku od granulometrijskog sastava koji je od najvećeg uticaja. U tom smislu se za istu primijenjenu energiju zbijanja bolje zbija dobro građuirano od slabo ili uniformno građuiranog krupnozrnog tla.

Kod sitnozrnog (vezanog, koherentnog) tla od najvećeg uticaja na zbijanje je vlažnost materijala koji se ugrađuje u nasip. Zato je prije izrade nasipa potrebno u laboratorijskim uslovima ispitati mogućnost

4. Stišljivost tla i sleganje temelja. Zbijanje tla

zbijanja materijala za različite vlažnosti istog. U takozvanom **Proktorovom opitu** se uzorak tla zbija u cilindričnom kalupu udarcima malja težine 2.5kg koji pada sa visine od 30.5cm. Tlo se zbija u tri sloja sa po 25 udaraca po sloju. Ovo je tzv. **standardni opit** a postoji i **modifikovani opit** sa većom energijom zbijanja (5 slojeva, malj 4.5kg, visina pada 46cm). Oba opita se ponavljaju za pet uzoraka različite vlažnosti i svaki put se mjeri zapreminska težina u suvom stanju γ_d koja predstavlja mjeru zbijenosti. Zatim se crta kriva zavisnosti između postignute zapreminske težine u suvom stanju i vlažnosti – Proktorova kriva. Za datu energiju zbijanja postoji vlažnost pri kojoj se postiže maksimalna zapreminska težina u suvom stanju tj. maksimalna zbijenost. Ova vlažnost koja odgovara maksimumu Proktorove krive naziva se **optimalna vlažnost** w_{opt} (slika 4.8) što znači da vlažnost materijala koji se ugrađuje u nasip treba da bude blizu optimalne.



Slika 4.8. Proktorova kriva za standardni i modifikovani Proktorov opit

Pokazatelj zbijenosti je tzv. stepen zbijenosti:

$$RC = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \cdot 100\%$$

Na terenu je obično dovoljno postići $RC=95\%$ tj. $\gamma_d=0.95 \gamma_{dmax}$.

Kontrola zbijanja se tradicionalno sprovodi nakon zbijanja određenog sloja materijala u određenom broju slučajno odabranih tačaka. Međutim, danas se sve veća važnost pridaje **kontinuiranoj kontroli zbijanja** gdje je kontrolni uređaj sastavni dio opreme za zbijanje.

Mašine za zbijanje tla

Mašine za zbijanje tla se mogu podijeliti na:

- mašine sa stajčkim dejstvom
- mašine sa dinamičkim dejstvom

U mašine za zbijanje sa statičkim dejstvom spadaju:

- glatki valjci
- valjci na pneumaticima – kompaktori
- valjci sa ovčijim nogama – ježevi

Glatki valjci djeluju sopstvenom težinom, međutim, i pored velikog specifičnog opterećenja po izvodnici valjka, imaju ograničenu dubinu djelovanja. Koriste se uglavnom za obradu površina (glačanje) kao dopuna drugim sredstvima za zbijanje.



Slika 4.9. Glatki valjak

Valjci na pneumaticima – kompaktori

Valjak na točkovima sastoji se od čeličnog sanduka, koji leži na većem broju naduvanih guma. Sanduk se opterećuje vodom, peskom ili tegovima. Da bi se obezbedilo podjednako prenošenje opterećenja na tlo treba da postoji uređaj za jednaku raspodelu tereta na sve točkove, bez obzira po kakvom se terenu kreće. Prema konstrukciji, kompaktori se dele na:

- vučene jednoredne valjke, težine od 60 do 100t
- vučene dvoredne valjke težine do 15t
- samohodne valjke, težine od 15 do 40t

Kompaktori se primenjuju pri izgradnji puteva, nasutih brana, aerodromskih pista i sl. Kompaktore najčešće vuku traktori na pneumaticima dok teže kompaktore vuku traktori na gusenicama. Uobičajen broj prelazaka preko jedne trake je od 6 do 10. Debljinu nasipanja treba odrediti nakon izvršenih opita na **probnom polju**. Faktori koji utiču na debljinu sloja su opterećenje po jednom točku kao i pritisak vazduha u gumama. Kod iste težine valjka, sabijanje će biti veće ukoliko je pritisak u gumama veći. Jedna od glavnih prednosti kompaktora je finoća rada i brzina sabijanja bez udara.



Slika 4.10. Valjak na pneumaticima

Valjci sa ovčijim nogama – ježevi

Jež se sastoji od glatkog valjka po čijem su obodu raspoređene su bodlje konusnog oblika ili oblika „ovčije noge“ sa svrhom da pri valjanju prodiru u nasuti sloj te da ga počnu nabijati u donjem dijelu. Visina bodlje iznosi 18 do 23 cm, a na kvadratni metar dolazi 10 do 12 bodlja. Služe isključivo za zbijanje koherentnog tla. Debljina nasutog sloja smije biti najviše 1,2 visine bodlje ježa kojim se nabija sloj. Broj prelaza 10-12. Efikasnost ježa potiče otuda da se pri kotrljanju cjelokupna njegova težina koncentriše na razmjerno malu površinu gaženja nogama duž jedne izvodnice. Pošto valjak tone u svježe nasuti sloj za visinu svoje noge, prvo se zbijaju najniže čestice sloja, pa postupno one gornje. Sloj je nabijen kada se valjak kotrlja po njemu bez upadanja nogu. Prilikom valjanja ježeve najčešće grupišemo po dva, tri ili čak četiri komada zajedno. Tako grupisani imaju mogućnost prilagođavanja neravninama na nasipu. Ako nisu samohodni, ježeve vuku traktori gusjeničari.



Slika 4.11. Jež

U mašine za zbijanje sa dinamičkim dejstvom spadaju:

- vibro valjci
- vibro ježevi
- vibro nabijači
- vibro ploče

Vibro valjci se primjenjuju prvenstveno za zbijanje nevezanih materijala, iako daju dobre učinke i kod valjanja slabo koherentnih materijala. Zbog dinamičkog djelovanja težina ovih valjka može biti znatno manja od težine valjka koji djeluju samo statički. Vibracijama se, u odnosu na masu, djelovanje

višestruko povećava (5 do 7 puta). Težina vibro valjaka kreće se od 0,34 t za lake valjke do 5 t za teže valjke. Vibro valjci vibriraju bez odskoka, odnosno neprekidno ostajući u prisnom dodiru sa zbijajućom masom.



Slika 4.12. Vibro valjak

Vibro nabijači se primjenjuju u vrlo skućenom prostoru. Konstrukcija, način djelovanja i gabariti nabijača to omogućuju. S obzirom na odskok (10 do 20 cm) i težinu, udarna sila koja se dobije je 40 do 130 kN. Dubina djelovanja 40 do 100 cm.

Vibro ploče se koriste za zbijanje podloge od rastresitih, nekoherentnih materijala - pijeska, šljunka, zemlje i sl. Koriste se za zbijanje slojeva od 40 do 80 cm, a najbolje djelovanje postižu u donjem djelu sloja. Radna širina ovih ploča kreće se od 60 do 90 cm, zavisno od modela, a radna brzina se kreće od 15 do 20 m/min. Mogu savladati uspone čak do 25 %, te se mogu kombinovati dvije i više ploča u radu, a da njima upravlja jedan rukovalac.



Slika 4.13. a) vibro nabijač, b) vibro ploča