

## Поглавље 4 – Замјена тла.Шљунчани шипови

### 4.1. Шљунчани шипови ( *stone columns* )

#### 4.1.1. Увод

Побољшање тла се може извршити изградњом у тлу шипова од шљунка и ломљеног камена. Различите технике изградње шљунчаних шипова се обухватају једним називом – вибро-замјена (*vibro – replacement*).

Шљунчани шипови су идеални су за побољшање меких глина и прашина као и за растресите прашинасте пјескове.

Типично је 15-35% слабог тла се замјењује шљунком/каменом.

Пројектно оптерећење варира од 200 до 500 кN. Пречник се креће од 0.9 до 1.20м

Присуство шљунчаних шипова креира композитни материјал мање стишљивости и веће чврстоће него што је природно тло.Након наношења вертикалног напона на површини терена шипови и тло се помјерају надоље па пошто је шип крући од тла у њему се јавља концентracија напона.

Показали су се успјешним за:

- побољшање стабилности косина како насипа тако и природних падина
- повећање носивости тла
- смањење тоталних и диференцијалних слегања
- смањење ризика од ликвефакције пјешчаног тла
- повећање брзине слегања

Ограничења:

- 1) кохезија  $c_u > 15$  кРа
- 2) органска тла неповољна, слој тресета дебљи од 60цм неадекватан.
- 3) осјетљиве глине. нормалне глине имају осјетљивост 1-4 а брзе глине и до 150, услед вибрација постају нестабилне
- 4) индекс пластичности не би требао да је већи од 40%

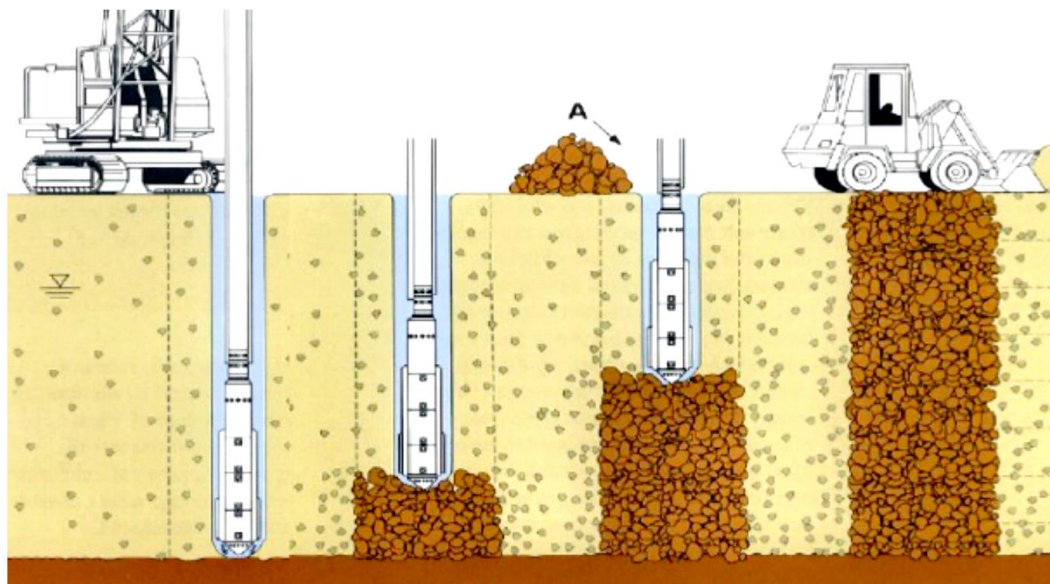
#### 4.1.2. Технологија

Постоје двије групе метода извођења доносно уградње шљунчаних шипова:

- Мокри поступак
- Суви поступак

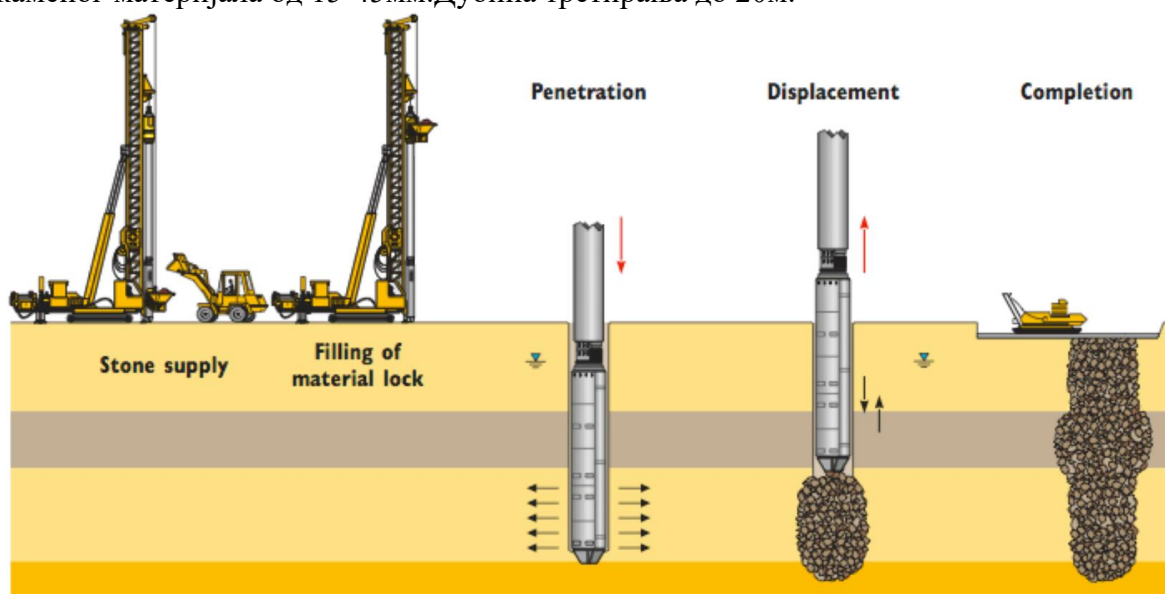
**Мокри поступак (*wet installation method, vibro-replacement top feed*)** се користи код терена грађених од врло меког тла гдје је потребно подграђивање јаме или бушотине и гдје постоји висок ниво подземне воде. Користе се водене млазнице на дну и са стране у циљу олакшавања продирања вибро-уређаја и испирања растреситог тла из јаме. Вода је такође битна за подупирање јаме приликом инсталације шипа као и за хлађење опреме. Такође, овим поступком се добијају већи пречници шљунчаних шипова а тиме и веће носивости у односу на суви поступак. Основни недостатак влажног поступка су велике количине воде коју је потребно

употријевити и коју је касније потребно уклонити у складу са условима заштите животне средине. Мокри поступак је приказан на доњој слици. Вода се упумпава кроз отвор на глави вибро уређаја док се шип пуним каменим материјалом одозго надоље. Камени материјал је величине од 40-75мм. Овом методом се може третирати тло до дубине од 30м.



Слика 4.1: Мокри поступак – пуњење каменим материјала одозго надоље

Суви поступак (*dry installation method, vibro-replacement bottom-feed*) се користи код дјелимично засићеног тла које може да стоји без подграде, посебно код оних врста тла која се могу збити под дејством вибрација. Често се користи за уградњу шљунчаних шипова кроз насипе од слабог тла у урбаним зонама због проблема са прибављањем, задржавањем и одлагањем воде употребљене у мокром поступку. На доњој слици је приказан суви поступак гдје се шљунак прво пуни у бункер на машини а затим помјера надоље према глави вибро уређаја кроз посебну цијев ( енгл. *tremie*). Поступак пуњења одоздо захтијева мањи пречник зрна каменог материјала од 15-45мм. Дубина третирања до 20м.



Слика 4.2: Суви поступак – пуњење каменим материјала одоздо нагоре

Уколико је предвиђено да шљунчани шипови буду подршка систему фундација онда би требало да буду изведени до чврстог слоја, дакле треба их извести као стојеће а не лебдеће шипове.

Након формирања јама до одговарајуће дубине коришћењем мокрог поступка, јама се испира неколико пута ради уклањања прашине. Обично су потребна 2-3 испирања осим ако се не ради о тлу које има прослојака органског тла или тресета гдје је потребно поступак поновити више пута прије наставка изградње шипа. Вибро-уређај обично остаје у јами до краја изградње. Уградња материјала шипа се обично врши у слојевима од 0.60 до 1.20 метара. Да би се извео солидан шљунчани шип, потребно је утрошити додатно вријеме да би се прво формирала чврста и добро збијена база на којој ће бити изведен остатак шипа. Након тога се изводе следећи слојеви додавањем материјала шипа и његовом компакцијом. Компакција се обавља наизмјеничном пенетрацијом и повлачењем вибро-уређаја.

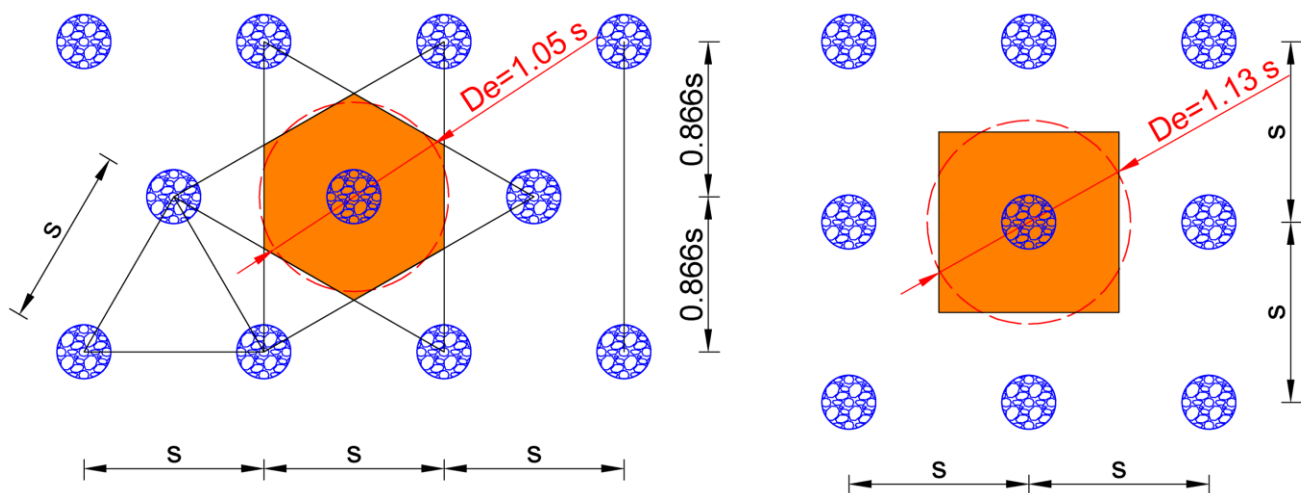
Потребна енергија вибро-уређаја се повећава са повећањем збијености материјала, па се често потрошња енергије користи као помоћ при процјени да ли је постигнута довољна збијеност. Поред тога треба потребно је на сваком слоју контролисати да ли је обављена одговарајућа пенетрација вибро-уређаја. Отпор пенетрацији вибро-уређаја се може регистровати током извођења као повратна информација оператору машине који онда може да прилагоди количину каменог материјала бочном отпору тла.

Након завршетка једног шипа, вибро-уређај се извуче и кран се премјешта на другу позицију. Уобичајено растојање шипова је од 1.8 до 2.7м. Из конструктивних разлога минимално растојање је 1.50. У току извођења могу настати проблеми услед присуства препрека у тлу као што су остаци дрвећа, камење, сочива чврстог тла и различити материјал који се може јавити у старим насипима.

**Крути шљунчани шипови** се формирају додавањем цемента збијеном шљунчаном шипу чиме се добија нека врста бетонског шипа. Ова врста шипова мање зависи од бочног отпора тла, имају већу носивост од нецементованих шипова, могу бити коришћени у јако меком тлу. Извод се сувим поступком. Погодни су за локално ојачање шљунчаног шипа у зонама тла које има мали бочни отпор. Такође погодни су побољшање стабилности косина.

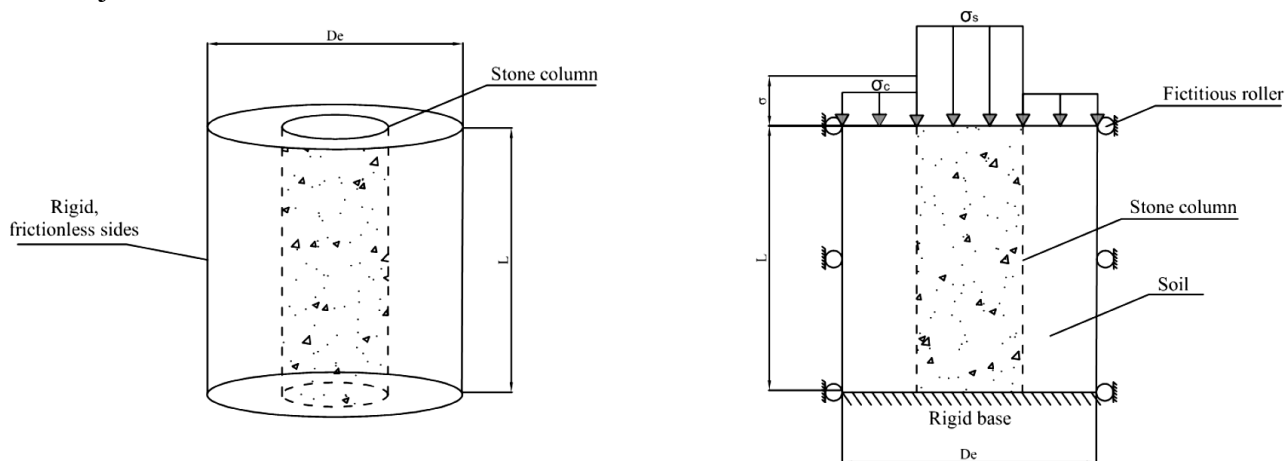
#### **4.1.3. Анализа стабилности – гранично оптерећење шљунчаног шипа**

За потребе анализе стабилности и слегања погодно је пригодно је сваком шљунчаном шипу придружити одговарајућу припадајућу површину околног тла на начин као што је то приказано на доњој слици за шипове у троугаоном и квадратном распореду (мрежи). Припадајућа површина која је облика правилног шестоугла из практичних разлога апроксимира се еквивалентним кругом дијаметра  $D_e$  који се одређује тако да шестоугаоник и круг имају исте површине.



Слика 4.3: Припадајуће површине за троугаони и квадратни распоред шипова ћелија

Цилиндар пречника  $D_e$  који окружује шип и припадајуће тло се назива јединична ћелија (*unit cell*). Ако се размотри бесконачно велика група шипова оптерећена равномерно расподијељеним оптерећењем онда се сваки шип може сматрати јединичном ћелијом као што је приказано на слици. Због симетрије геометрије и оптерећења, бочне деформације се не могу појавити преко граница јединичне ћелије и смичући напони на спољњим границама ћелије морају бити једнаки нули. На основу реченог јединичина ћелија може бити моделирана као цилиндрично тијело са крутим спољњим зидом по којем се не јавља трење као што је приказано на доњој слици.



Слика 4.4: Јединична ћелија

Коефицијент замјене (Area replacement ratio) се дефинише као:

$$a_s = \frac{A_s}{A}$$

гдје су  $A_s$  – површина шљунчаног шипа након компакције  
 $A$  – припадајућа површина тла за један шип тј. површина јединичне ћелије

Коефицијент замјене може бити приказан у функцији од пречника и растојања шљунчаних шипова као:

$$a_s = C_1 \left( \frac{D}{s} \right)^2$$

гдје су  $D$  – пречник збијеног шљунчаног шипа  
 $s$  – међуосовинско растојање шипова  
 $C_1$  – константа која зависи од коришћеног распореда шипова,  
 за квадратни распоред  $C_1 = \pi/4$ , за троугаону шему  $C_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0.907$

### Концентрација притисака

Након изградње насипа или темеља преко тла ојачаног шљунчаним шиповима јавља се битна концентрација напона у шљунчаним шиповима. Ово је праћено са одговарајућом редукцијом напона у околном мање крутом тлу. Претпостављајући слично слегање шипа и околног тла, концентрација напона у шипу се јавља због тога што је шип крући него околно кохезивно или растресито некохерентно тло. Фактор концентрације напона се може изразити као:

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}$$

гдје су  $\sigma_s$  – напон у шипу  
 $\sigma_c$  – напон у околном тлу

Прорачунске вриједности фактора концентрације се крећу од 2 до 5 као што је приказано у доњој табели.

Прорачунски параметри коришћени за анализу стабилности шљунчаних шипова

Фирма	Фактор концентрације напона	Ø материјала шипа	Фактор сигурности
Vibroflotation Foundation Company	2.0	42	1.25-1.50
GKN Keller	2.0	45 40	1.3-1.4
PBQD	1.0-2.0	42	1.3
Japan( pješčani šipovi)	3-5	30-35	1.2-1.3

Просјечни напон  $\sigma$  у јединичној ћелији на одређеној дубини се може из услова равнотеже у вертикалном правцу изразити као:

$$\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s)$$

Решавањем горње једначине добијају се напони у околном тлу и шипу:

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{(1 + (n - 1)a_s)} = \mu_c \sigma$$

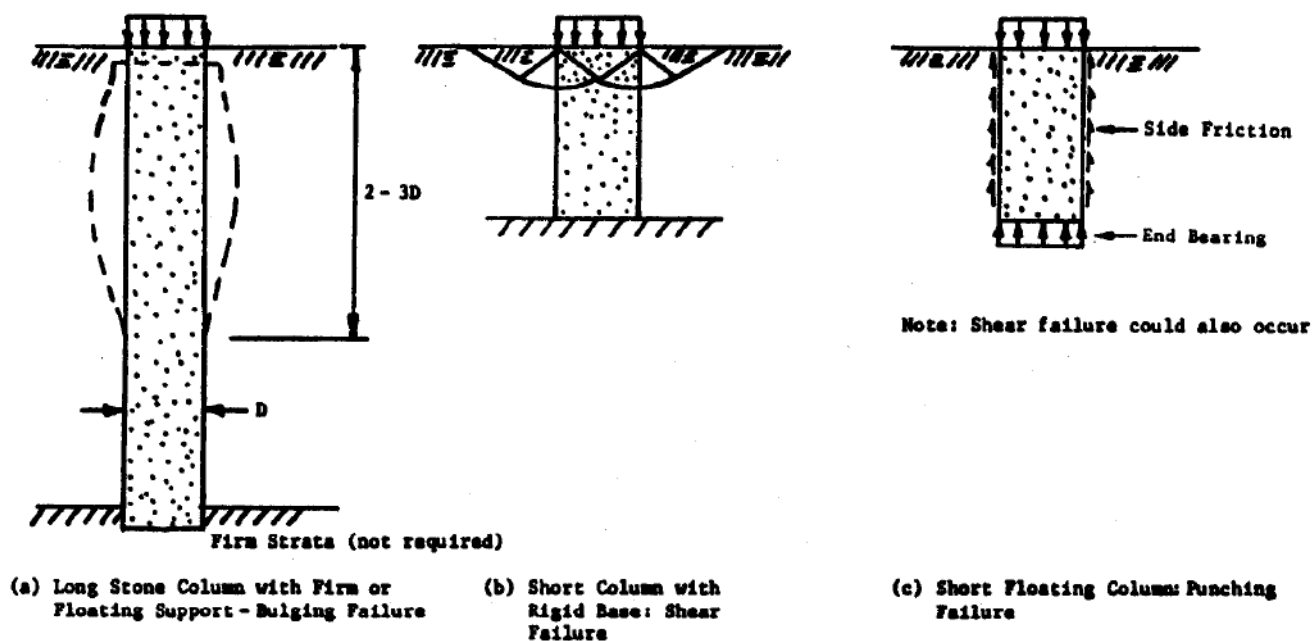
$$\sigma_s = \frac{n\sigma}{(1+(n-1)a_s)} = \mu_s \sigma$$

гдје су  $\mu_c$  и  $\mu_s$  односи напона у тлу (глини) и шипу, респективно, према укупном просјечном напону  $\sigma$ . Напони  $\sigma$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_s$  потичу од спољашњег оптерећења.

### Гранична носивост појединачног шљунчаног шипа

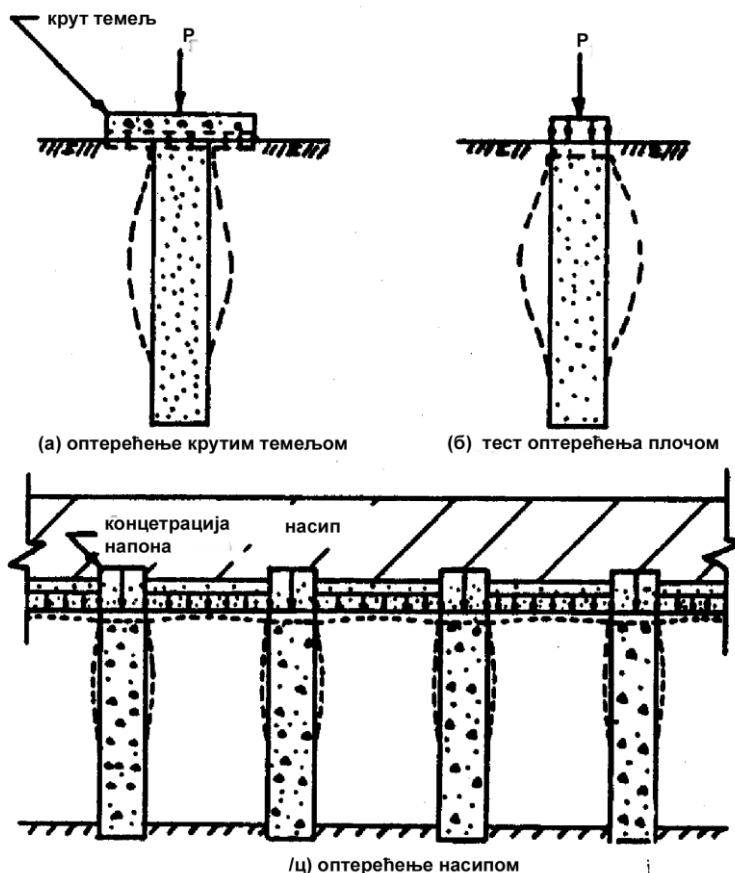
Шљунчани шипови могу бити конструисати као стојећи или лебдећи, мада чешће као стојећи. И стојећи лебдећи шипови за однос дужине према пречнику већи од 3 достижу граничну носивост услед избочавања материјала шипа у горњем дијелу истог (слика 4.5а).

С друге стране врло кратак шип ослоњен на слоју крутог тла показује или општи или локални механизам лома типичан за плитке темеље (слика 4.5б). Коначно лебдећи шљунчани шип дужине мање од 2 до 3 пречника може изгубити носивост у бази прије појаве избочавања (слика 4.5ц).



Слика 4.5: Механизми лома појединачног шљунчаног шипа у хомогеном слоју меког тла

Носивост шљунчаних шипова зависи значајно и од начина наношења оптерећења. На примјер наношење оптерећења преко крутог темеља ширине веће од пречника шипа доводи до повећања вертикалних и хоризонталних напона у околном меком тлу. Ово за резултат има већу носивост и мање избочавање шипа ( слика 4.6а). Уколико се ради о флексибилном оптерећењу као што је оптерећење од насипа приказано на слици 4.6б, може се јавити бочно ширење тла испод насипа (*lateral spreading*) што смањује носивост шипова због смањења бочног отпора.



Слика 4.6: Различити видови оптерећивања шљунчаних шипова

Пошто већина шљунчаних шипова има однос пречника према дужини већи или једнак од 4 до 6, обично се развија лом усљед избочавања шипа у горњем дијелу истог као што је приказано на слици 4.5а. Мали дио аплицираног оптерећења долази до базе шипа, остатак се преноси на сусједно меко тло у које се материјал шипа избочавањем утискује.

Гранични притисак у вертикалном правцу  $\sigma_1$  се може коришћењем класичне теорије пластичности срачунати као:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \sigma_3 = k_p \sigma_3$$

гдје су  $\phi_s$  – угао смичуће отпорности материјала шипа  
 $k_p$  – коефицијент пасивног отпора материјала шипа  
 $\sigma_3$  – бочни притисак околног тла

Гранични бочни притисак (отпор)  $\sigma_3$  се може срачунати коришћењем решења за ширење бесконачно дугог цилиндра у тлу до успостављања граничне вриједности бочног отпора (*cavity expansion theory*). За кохезивни материјал ( $\phi=0$ ) Hughes и Withers су коришћењем еласто-пластичне теорије Gibson-а и Anderson-а добили процјену недренираног бочног отпора тла као:

$$\sigma_3 = \sigma_{r0} + c \left[ 1 + \ln \frac{E_c}{2c(1+\nu)} \right]$$

гдје су  $\sigma_3$  – гранични недренирани бочни отпор  
 $\sigma_{r0}$  – тотални in-situ бочни напон ( $\sigma_h$ )  
 $E_c$  – модуо еластичности тла за недрениране услове  
 $c$  – недренирана смичућа чврстоћа  
 $\nu$  – Poisson-ов коефицијент

Гранични (ултимативни) притисак на шљунчани шип за недрениране услове је онда:

$$q_u = \left( \sigma_{r0} + c \left[ 1 + \ln \frac{E_c}{2c(1+\nu)} \right] \right) \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right)$$

Весић је развио општу теорију ширења бесконачно дуге цилиндричне шупљине у еластичном и пластичном тлу. На основу ове теорије гранични бочни притисак:

$$\sigma_3 = cF_c' + qF_q'$$

гдје су  $\sigma_3$  – гранични бочни отпор  
 $q$  – средњи нормални напон,  $q = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  на еквивалентној дубини лома тла  
 $c$  – кохезија  
 $F_c', F_q'$  – фактори експанзије шупљине

Зависности фактори експанзије шупљине од угла смичуће отпорности околног тла и индекса крутости  $I_R$  (*Rigidity index*) су приказане на слици 4.7. Индекс крутости без редукције усљед ефеката промјене запремине у пластичној зони се може изразити као:

$$I_R = \frac{E}{2(1+\nu)(c + q \tan \phi_c)}$$

гдје су  $q$  – средњи нормални напон у зони тла  
 $E$  – модуо еластичности околног тла у коме се дешава експанзија цилиндра  
 $c$  – кохезија околног тла  
 $\nu$  – Poisson-ов коефицијент околног тла

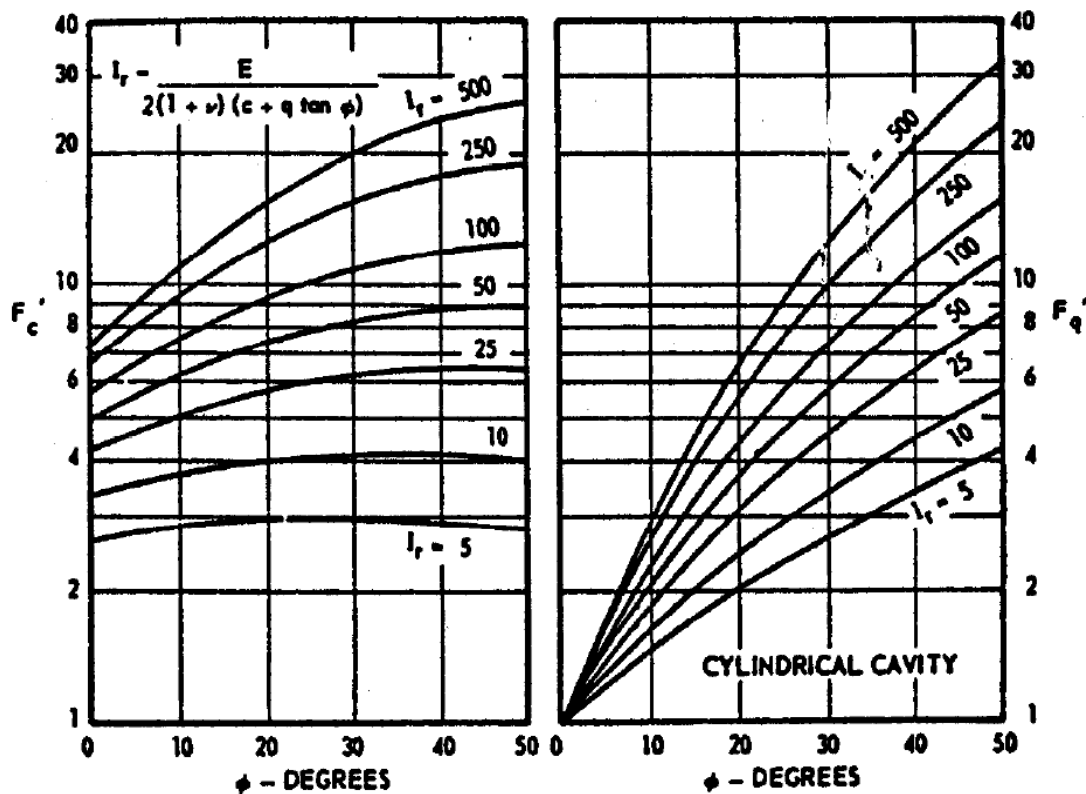
На основу горе наведеног гранични притисак се може изразити као:

$$q_u = (cF_c' + qF_q') \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right)$$

Опште решење које је развио Весић, за некохезивно тло, даје исти гранични притисак као решење засновано на теорији Gibson-а и Anderson-а. Средњи нормални напон коришћен у горњој анализи требало би срачунати на просјечној дубини избочавања шљунчаног шипа. Овај напон је сума иницијалног геостатичког напона у тлу и напонске промјене од спољашњег оптерећења.



Note:  $F'_c = \ln I_r + 1$  for case of  $\phi_c = 0$



Слика 4.7: Фактори експанзије за Весићеву теорију

#### 4.1.4. Прорачун слегања

##### Метода равнотеже

За прорачун слегања су усвојене следеће претпоставке:

- важи раније описана идеализација јединичне ћелије
- укупно вертикално оптерећење аплицирано на јединичну ћелију једнако је збиру оптерећења које носи шип и оптерећења које носи тло тј. постоји равнотежа у оквиру једне ћелије
- вертикална помјерања шипа и тла су једнака
- напон од спољњег оптерећења је исти по цијелој дужини шипа или се стишљиви слој дијели на инкременте и слегање се срачунава за сваки инкремент на основу средњег напона у њему

Слегања тла испод зоне ојачане шиповима се разматрају посебно. Обично су ова слегања занемарљива.

Консолидационо слегање слоја тла ојачаног шљунчаним шиповима на дужини  $H$  се може добити на основу конвенционалне теорије консолидације као:

$$s_t = \left( \frac{C_c}{1 + e_0} \right) \log \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \sigma_c}{\bar{\sigma}_0} \right) H$$

гдје су  $s_t$  – консолидационо слегање слоја дебљине  $H$   
 $H$  – дебљина слоја тла третираног шљунчаним шиповима  
 $\bar{\sigma}_0$  – средњи геостатички ефективни напон у слоју глине  
 $\sigma_c$  – промјена напона у слоју глине усљед спољашњег оптерећења  
 $C_c$  – индекс компресије  
 $e_0$  – почетни коефицијент порозности

Степен побољшања тла се може изразити преко односа слегања тла ојачаног шљунчаним шиповима и нетретираног тла  $s_t/s$  као:

$$s_t / s = \frac{\log \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \mu_c \sigma_c}{\bar{\sigma}_0} \right)}{\log \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \sigma}{\bar{\sigma}_0} \right)}$$

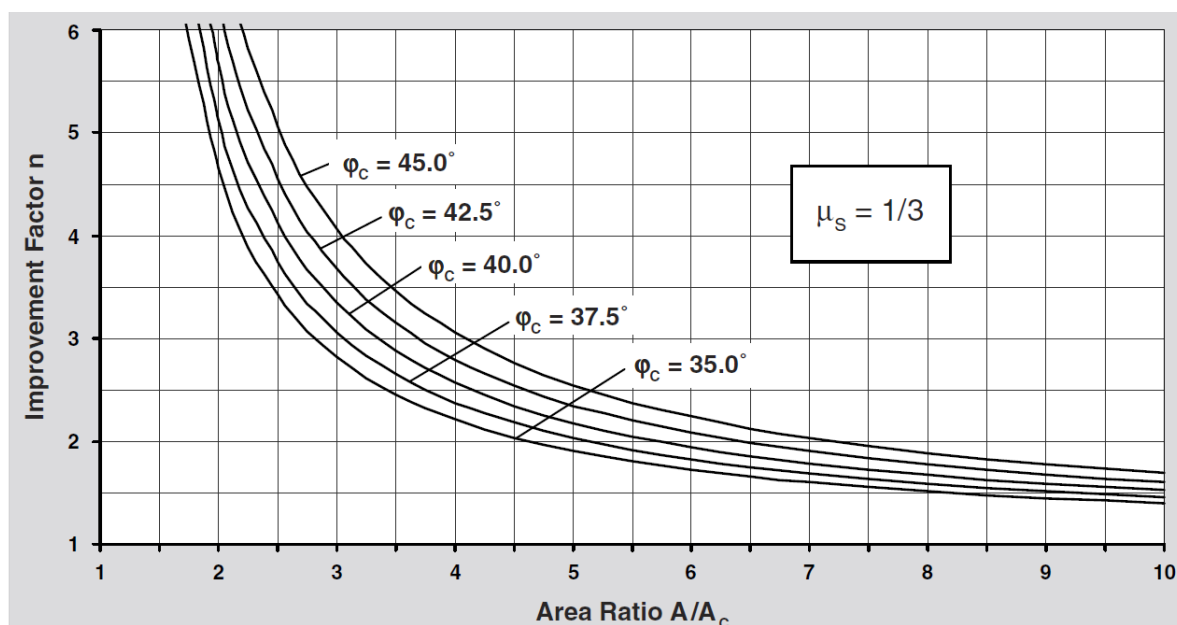
Горњи израз показује да степен побољшања тла зависи од:  $\mu_c$  тј. од фактора концентracије напона  $n$ , геостатичког напона у глини  $\bar{\sigma}_0$ , величине аплицираног напона  $\sigma$ . За врло дуге шипове гдје је  $\bar{\sigma}_0$  велико и мале вриједности аплицираног оптерећења  $\sigma$  однос слегања се врло брзо приближава вриједности:

$$s_t / s = \frac{1}{(1 + (n - 1)a_s)} = \mu_c$$

#### 4.1.5. Прорачун слегања према методи Priebe

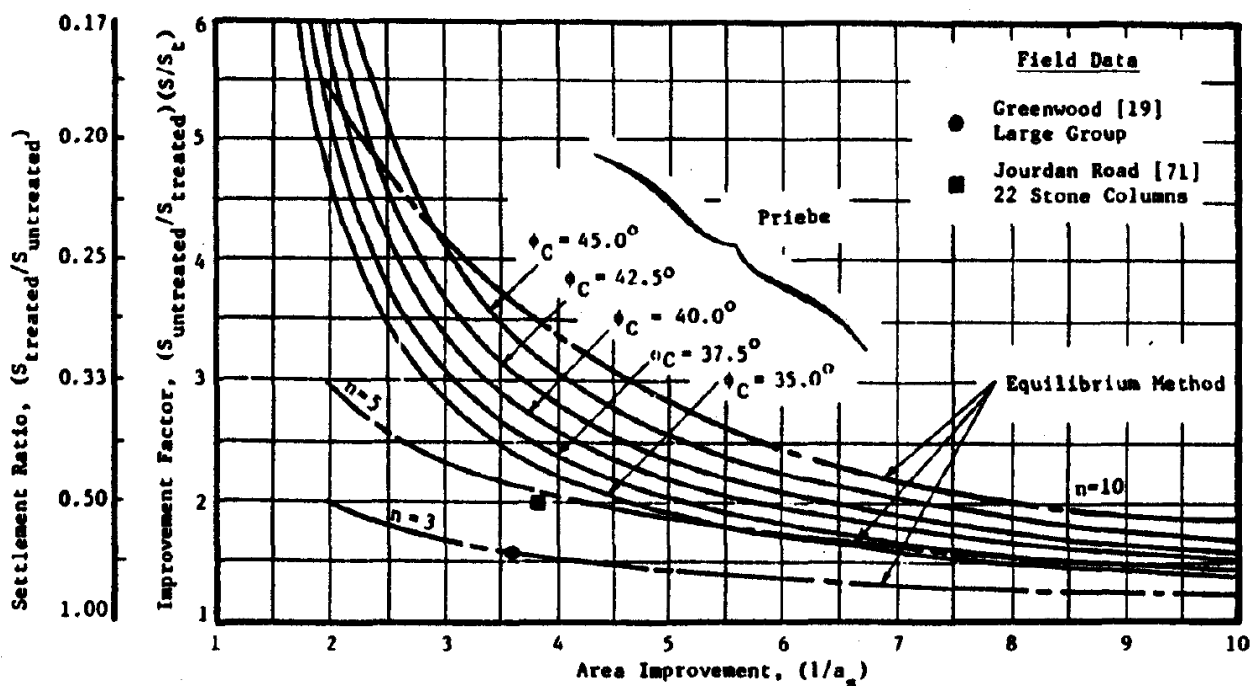
У овој методи се такође користи концепт јединичне ћелије. Претпоставља се да се шљунчани шип налази у стању пластичне равнотеже у условима триаксијалног напонског стања. Тло унутар ћелије је идеализовано еластичним материјалом. Радијална деформација еластичног тла је одређена коришћењем решења за експанзију бесконачно дугог, шупљег цилиндра. Еластични цилиндар тла чија се крута спољна граница поклапа са границом јединичне ћелије, изложен је равномјерном унутрашњем притиску. Остале претпоставке: једнака помјерања тла и шипа, равномјерно напрезање оба материјала, стојећи шипови.

Фактор побољшања  $n$  се дефинише као однос деформације нетретираног и третираног тла,  $n=s/s_t$ . Користи се реципрочна вриједност коефицијента замјене  $a_s=A/A_c$ , гдје је  $A$  припадајућа површина,  $A_c$  површина шипа. Овај однос се зове коефицијент површине (*area ratio, area improvement*). На слици 4.8 су дате прорачунске зависности фактора побољшања  $n$  од реципрочног односа површина  $A/A_c$ , за различите вриједности угла смичуће отпорности материјала шипа и вриједност коефицијент Poisson-а од 1/3.



Слика 4.8: Зависности фактора побољшања од односа  $A/A_c$

На слици 4.9 је дат упоредни приказ смањења слегања по наведеним методама прорачуна слијегања. Криве максиманог побољшања по методама равнотеже су дате за факторе концентracије 3,5 и 10. Priebe-ове криве углавном падају у област кривих добијених методом равнотеже за фактор концентracије од 5 до 10. Фактори побољшања по методи Priebe су значајно већи од оних добијених за концентracије напона од 3 до 5. На основу ограниченог броја теренских података, такође датих на слици, изгледа да Priebe-ова метода прецењује утицај шипова на смањење слегања.



Слика 4.9: Смањење слегања због примјене шљунчаних шипова – метода Priebe и методе равнотеже (equilibrium method)