

Поглавље 2 Збијање, вибрирање и ињектирање

2.1. Увод

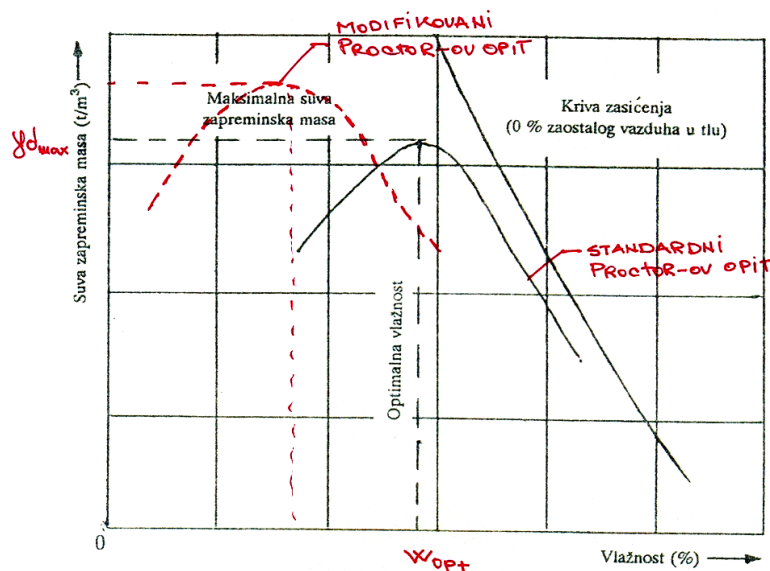
Преглед метода за побољшање тла повећањем густине истог (*Densification methods*):

- Збијање површинских слојева машинама за збијање (вибро ваљци, компактори, жељеви итд.) је најчешће примјењивана метода
- Дубинско динамичко збијање (*dynamic deep compaction*)
- Виброфлотација
 - Дубинско вибрирање тла –вибро компакција (*vibrocompaction*)
 - Вибро збијање са замјеном материјала (*vibroreplacement*)
- Брзо ударно збијање (*rapid impact penetration - RIC*)
- пенетрационо ињектирање
- компакционо ињектирање (*compaction grouting*)

2.2. Збијање површинских слојева машинама за збијање

Када се тло користи као грађевински материјал за израду насипа (путеви, аеродромске писте, насуте бране) потребно је да се материјал: ископа, транспортује и угради насипањем. При грађењу насипа тло се разастире у слојевима дебљине 10-50цм а затим збија. Збијањем с истискује ваздух и вода из пора тла, повећава се густина тј. запреминска тежина тла. Тиме се повећава чврстоћа на смицање и носивост тла а смањује његова стишљивост и водопропустљивост. Фактори који утичу на збијање су: врста материјала који се збија, његова влажност и примјењене машине за збијање.

Крупнозрна (невезана) тла се најефикасније збијају дејством вибрација при чему се мања зрна помјерају у просторе између већих зрна. На могућност збијања крупнозрног тла највише утиче гранулометријски састав а мало влажност. Код ситнозрног (везаног, кохерентног) тла од највећег утицаја на збијање је влажност материјала. Прокторовим опитом се у лабораторијским условима испитује могућност збијања кохерентног материјала тј. одређује оптимална влажност w_{opt} (слика 2.1) којој одговара максимална јединична тежина у сувом стању.



Слика 2.1: Прокторова крива за стандардни и модификовани Прокторов опит

Показатељ збијености је тзв. степен збијености (*compaction ratio*):

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

На терену је обично довољно постићи $RC=95\%$ тј. $\gamma_d=0.95 \gamma_{dmax}$.

Контрола збијања се традиционално спроводи након збијања одређеног слоја материјала у одређеном броју случајно одабраних тачака. Међутим, данас се све већа важност придаје континуираној контроли збијања гдје је контролни уређај саставни дио опреме за збијање.

Машине за збијање тла се дијеле на машине са статичким и машине са динамичким дејством.

У машине за збијање са статичким дејством спадају глатки ваљци, ваљци на пнеуматичима-компактори и ваљци са овчијим ногама - жежеви

Глатки ваљци дјелују сопственом тежином, међутим, и поред великог специфичног оптерећења по изводници ваљка, имају ограничену дубину дјеловања. Користе се углавном за обраду површина (глачање) као допуна другим средствима за збијање.

Ваљци на пнеуматичима-компактори се састоје од челичног сандука који лежи на већем броју пнеуматика. Подједнако преношење оптерећења на тло се постиже посебним уређајем. Према конструкцији и тежини компактори се дијеле на:

- вучене једноредне ваљке тежине од 60 до 100t
- вучене дворедне ваљке тежине до 15t
- самоходне ваљке тежине од 15 до 40t

Компактори се примјењују код изградње путева, насутих брана, аеродромских pista и сл. Компакторе најчешће вуку трактори на пнеуматичима док теже компакторе вуку трактори на гусеницама. Уобичајени број прелаза преко једне траке је од 6 до 10. Дебљину насипања треба одредити након извршених опита на пробном пољу. Једна од главних предности компактора је финоћа рада и брзина сабијања без удара.



Слика 2.2: Глатки ваљак (лијево) и компактор (десно)

Ваљак са овчијим ногама-јеж се састоји од глатког ваљка по чијем ободу су распоређене бодље конусног облика или облика „овчије ноге“ које при ваљању продиру у насути слој и збијају га у доњем дијелу. Служе за збијање кохерентног тла. Висина бодље износи од 18 до 23цм (10 до 12 бодљи по м²). Висина насутог слоја је максимално 1.20 висине бодље. Број прелаза 10-12. Ефикасност јежа потиче отуда што се при котрљању цјелокупна његова тежина концентрише на малу површину бодљи дуж једне изводнице. Прво се збијају доње честице слоја па горње. Слој је набијен када се ваљак котрља по њему без упадања бодљи. Приликом ваљања се јежеви најчешће групишу у по два, три или четири комада заједно. Ако нису самоходни, јежеве вуку трактори гусеничари.



Слика 2.3: Самоодни и вучени ваљци са овчијим ногама

У машине са динамичким дејством спадају вибро ваљци, вибро јежеви, вибро набијачи и вибро плоче.

Вибро ваљци се примјењују првенствено за збијање невезаних материјала иако дају добре учинке и код слабо кохерентног материјала. Вибрацијама се, у односу на масу, дјеловање вишеструко повећава (5 до 7 пута). Тежина се креће од 0,34 t за лаке до 5 t за теже ваљке.



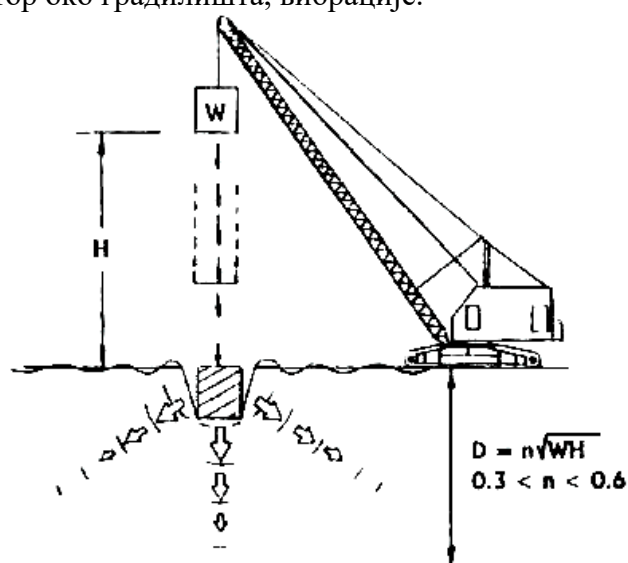
Слика 2.4: Вибро ваљак, вибро набијач, вибро плоча

Вибро набијачи се примјењују у врло скученом простору. При одскоку од 10 до 20цм се добија ударна сила од 40 до 130 kN. Дубина дјеловања 40 до 100цм.

Вибро плоче се користе за збијање подлоге од растреситих некохерентни материјала шљунка, пијеска, земље и сл. Дебљина слоја 40-80цм. Радна ширина плоче од 60 до 90цм. Ногу савладати успоне до 25 %.

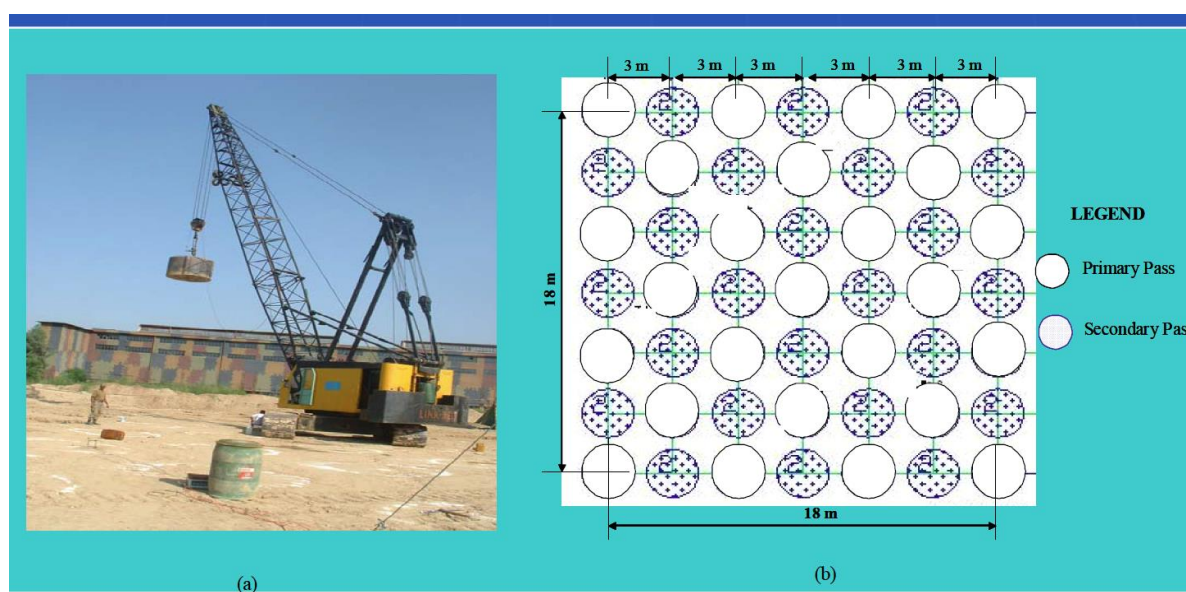
2.3. Дубинско динамичко збијање (dynamic deep compaction)

Дубинско динамичко збијање тла се спроводи ударима тега тежине од 10 до 30 тона који пада са висине од 15 до 30 метара на поједине тачке на површини терена постављене на међусобном растојању од 2 до 6м. Техника је једноставна и јефтина и примјењује се за збијање засићених пјескова и прашинастих пјескова као и дјелимично засићеног пијеска. Погодна је за многа тла са <15% ситнозрних фракција. Недостаци су: ефективна дубина збијања D ограничена на 10м, потребан слободан простор око градилишта, вибрације.



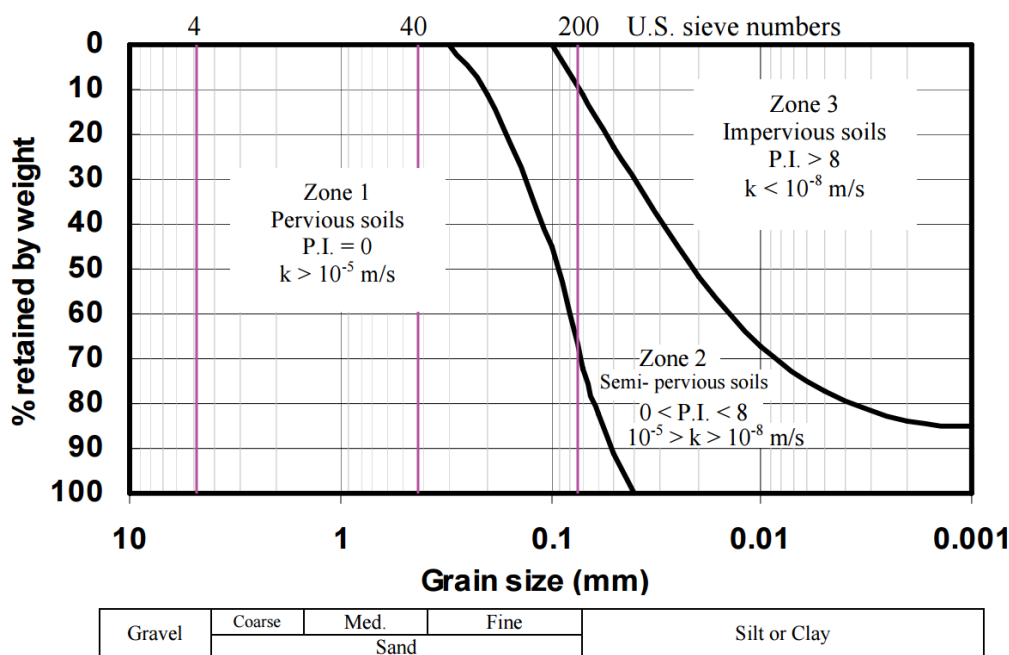
Слика 2.5: Скица дубинског динамичког збијања

Врши се систематски у квадратној или троугаоној шеми и у више прелаза.



Слика 2.6: Квадратна шема дубинског збијања у два прелаза

Динамичка компакција се користи за пропусне пјескове, шљункове и непластичне прашине – зона 1 на слици 2.7. За засићена тла ове зоне ударци тега изазивају увећање порног притиска што доводи до ликвефакције тј. губитка контакта између зрна. Након дисипације порних притисака долази до слегања и збијања тла. Збијени или чврсти слојеви близу површине могу ограничити ефекте динамичке компакције. Тла у зони 2 могу бити побољшана динамичком компакцијом али је потребно више циклуса удара и дисипације порног притиска. Употреба за непропусна, пластична финозрна тла из зоне 3 није препоручљива.



Слика 2.7: Груписање тла према погодности за динамичку компакцију

Дубина побољшања тла се може добити према:

$$D_{\max} = n\sqrt{WH}$$

гдје су

D_{\max} -максимална дубина побољшања

W - тежина у тонама

H - висина пада тега у метрима

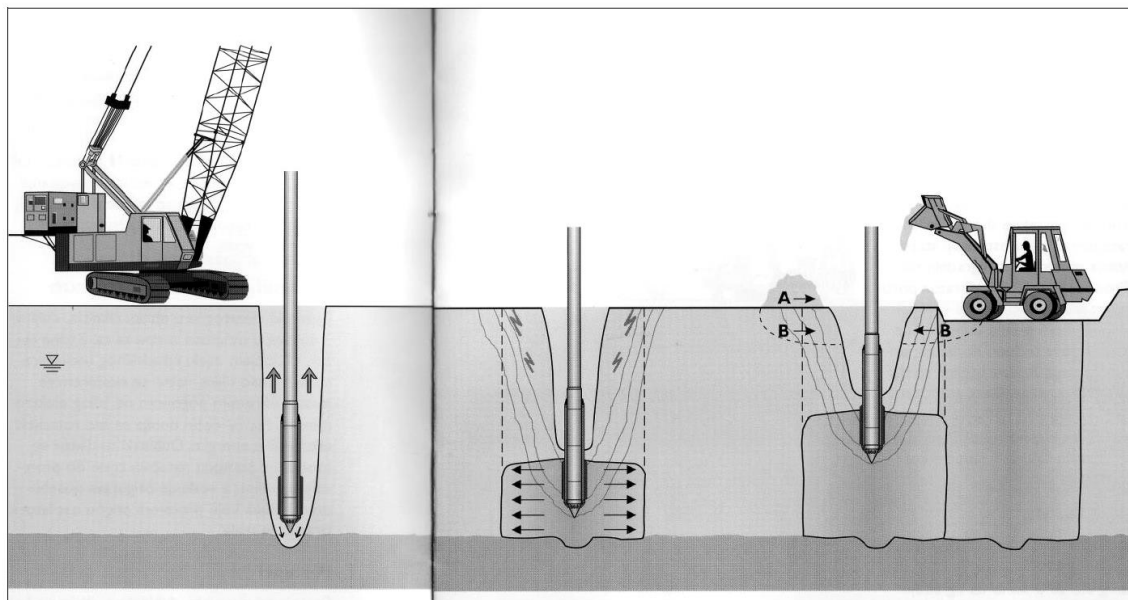
n - емпиријски коеф. у опсегу 0.3 до 0.8, за већину врста тла је 0.5, за депоније 0.4

Степен побољшања тла се обично мјери помоћу SPT или CPT тестова који се спроводе прије и послије компакције. Највеће побољшање је на дубини од $D_{\max}/3$ до $D_{\max}/2$.

2.4. Виброкомпакција (вибробзијање)

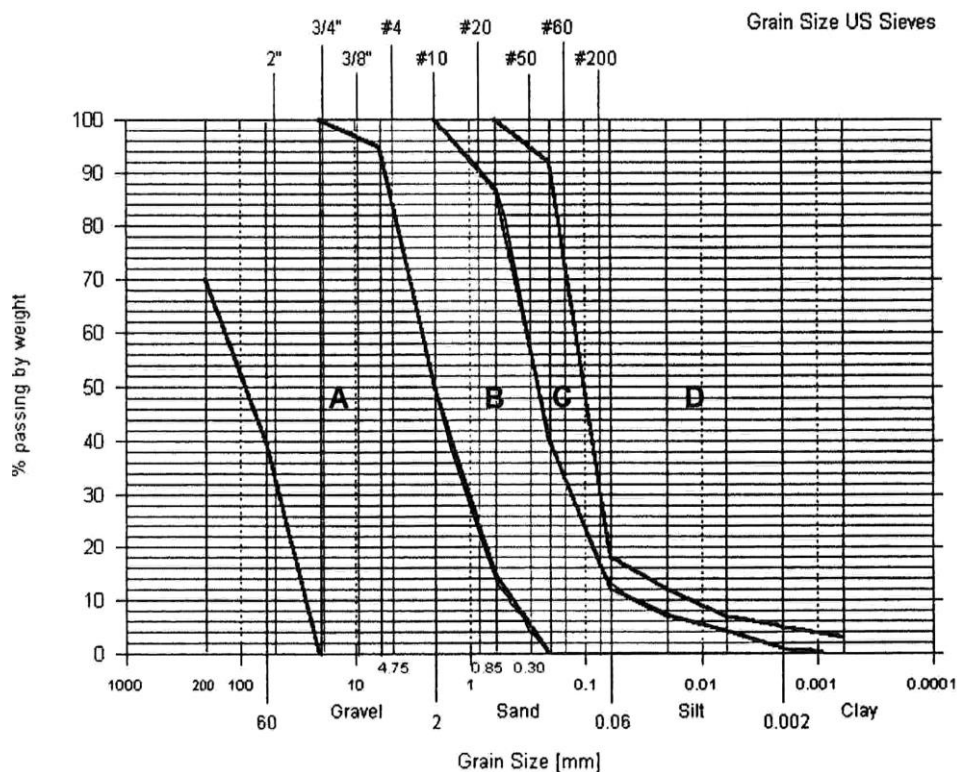
Виброкомпакција, вибробзијање се састоји у пенетрацији вибро уређаја (*vibro probe, vibro-flot*) у тло до захтјеване дубине и вибрирања током повлачења уређаја нагоре,што изазива згушњавање тла. Формирани кратер на површини терена се затим засипа а вибро уређај извлачи. Пенетрација вибратора је усљед његове сопствене тежине а може се побољшати

коришћењем водених млазница. Виброкомпакција је економична алтернатива дубоком фундарању и замјени тла. Збијањем тла испод темеља се смањује ризик од ликвифакције.



Слика 2.8: Шематски приказ виброкомпакције

Вибро збијање је најефикасније код пјескова, прашинастих и шљунковитих пјескова са мање од 20% ситних фракција. Највећи ефекат се постиже кад је садржај ситних фракција до 5%. Може се збијати тло до дубине и до преко 50м. Недостатак је што је потребна специјална опрема. Опсег врста тла које се могу побољшати виброкомпакцијом је приказан на слици 2.9.



Слика 2.9: Опсег тла које се може третирати виброкомпакцијом

Тла на крупнијој страни Зоне В могу бити лако збијена и засута пијеском или шљунком.

Тла на крупнијој страни Зоне С могу бити збијена али се препоручује засипање само са шљунком.

Тла лоцирана дјелимично или у потпуности у зони D нису погодна за вибро-компакцију. Међутим, тла у зони D су погодна за вибро-замјену (шљунчани шипови).

Табела 1 – Очекивано побољшање и типично растојање позиција вибро-компакције

Опис тла	Очекивано побољшање	Размак између позиција у којима се врши вибро-компакција *
Добро градуирани пијесак са мање од 5% прашине и без глине	Одлично	2.75-3.35 м
Једнолични финозрни до среднјезрни пијесак са мање од 5% прашине и без глине	Добро	2.30 - 2.75м
Прашинасти пијесак са 5-15% прашине, без глине	Умјерено	1.80 -2.75м
Пијесак и прашина са више од 15% прашине	Није примјењиво**	-
Глине и отпад	Није примјењиво	-

* Растојање позиција за постизање 70% релативне збијености са 165HP виброфлотом, веће густине траже гушћи распоред

**Ограничено побољшање у прашини може бити постигнуто са великим помјерањима и засипом од камена.

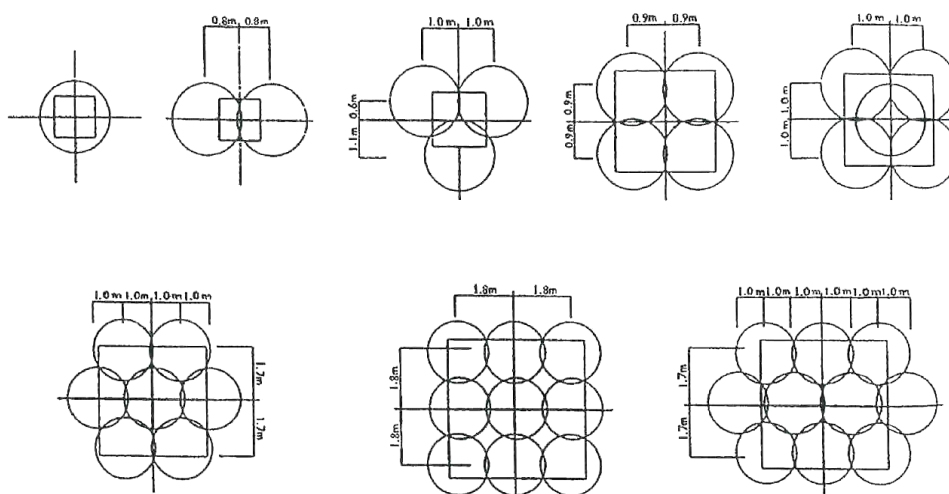
Повећање густине крупнозрног тла изазива помјерање тла надоље око вибро уређаја. Ово кретање изазива појаву депресије у облику конуса на површини терена и малу шупљину око вибро уређаја. Депресија захтијева стално пуњење додатним шљунковитим материјалом. Индекс погодности S_N се користи за одређивање одговарајуће мјешавине шљунковито-пјесковитог засипа који има мање од 10% ситних фракција. S_N се заснива на брзини слегања засипа у води и на искуству и одређује се на основу доње једначине.

$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(d_{50})^2} + \frac{3}{(d_{20})^2} + \frac{3}{(d_{10})^2}}$$

На основу овако одређеног S_N се оцјењује погодност материјала за засип на основу доње табеле:

S_N	0-10	11-20	21-30	31-40	>40
Повољност засипа	Одличан	Добар	Средње повољан	Слаб	Неповољан

На доњој слици су приказане тишичне диспозиције за збијање тла испод темеља самца.



Слика 2.10: Типичне диспозиције за збијање тла испод темеља самца

2.5. Брзо ударно збијање (*Rapid Impact Compaction - RIC*)

Брзо ударно збијање се користи за збијање пјесковитог тла са процентом финих фракција мањим од 15%. Омогућава побољшање до дубине која је већа него код површинског збијања а мања него код дубоког динамичког збијања. Ударно збијање се постиже помоћу челичног маља тежине од 9 до 16 тона који пада са висине од 1.2 до 1.5м на челично постолје (стопу, капу) пречника од 1.5 до 2.6м. Број удара је од 40 до 80 у минути. Уобичајена дубина утицаја се креће од 4-6м, максимално до 9м. Позиције удара су на међурастојању од 1.5 до 3.6м. Вибрације су ограничене на 20мм/сек на растојању од 15м, односно растојање након кога не треба мјерити вибрације је од 5 до 6м. Процес збијања се спроводи док се са повећањем броја удара постиже врло мало продирање челичне стопе. Параметри збијања и одговор тла се провјеравају на пробном пољу.



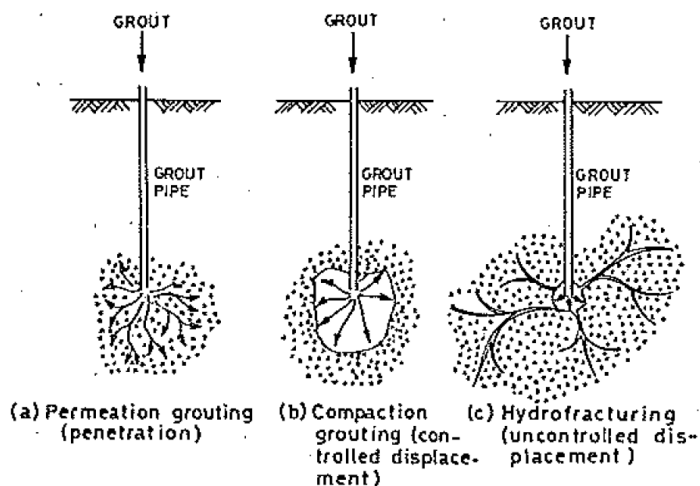
Слика 2.11: Уређај за брзо ударно збијање

2.6. Ињектирање (*grouting*)

Процес побољшања гла утискивањем ињекционе масе (*grout*) у тло или стијену.

Ињекциона маса је најчешће мјешавина цемента и воде. Недостатак овакве ињекционе масе је што не може да продире у тло мале водопропустности. Тада се користе хемијске ињекционе масе. Крупнозрна и средње водопрпусна гла захтијевају ињекционе масе велике вискозности. Три основне функције ињекционе масе:

- засићавање или пенетрација – ињекциона маса тече слободно у поре са минималним ефектом на околно тло
- компакција или контролисано помјерање – ињекциона маса остаје релативно интактна и остварује притисак на тло
- хидраулично фрактурисање - ињекциона маса брзо продире у испуцалу зону стијене или гла формирану под притиском масе



Слика 2.12: Три основна типа ињектирања у тлу

Ињекционе масе се могу подијелити на: суспензије и растворе (хемијске ињекционе масе)

Цементне ињекционе масе

ОПС (*Ordinary Portland Cement*) и вода су погодне за испуцале стијене, шњункове и крупне пјескове. $w/c=0.5:1$ до $5:1$. Брзовезујући цемент препоручљив гдје има протицаја воде. Као филер се користи пијесак

Хемијско ињектирање – раствори и смоле

Раствори (*solutions*) могу продирати у финија гла у односу на суспензије. Примјер је натријум силикат (водено стакло). **Смоле** (*resins*) се користе са повећање чврстоће и осигурање водонепропустљивости.

Тип смоле	Врста гла на које се може примијенити	Тип примјене
Акрилне смоле	Грануларна, врло фина гла	Обезбјеђивање водонепропустљивости Обезбјеђење непропустности за складишта гаса и руднике
Феноли	Фино испуцала стијена	Ојачање

Аминопластичне смоле	шкриљци и угаљ	Ојачање пријањањем за материјале органског поријекла
Полиуретани	Крупне поре	Формирање пјене као баријере за подземну воду (коришћење смола које реагују са водом) Стабилизација испуне са двокомпонентним смолама

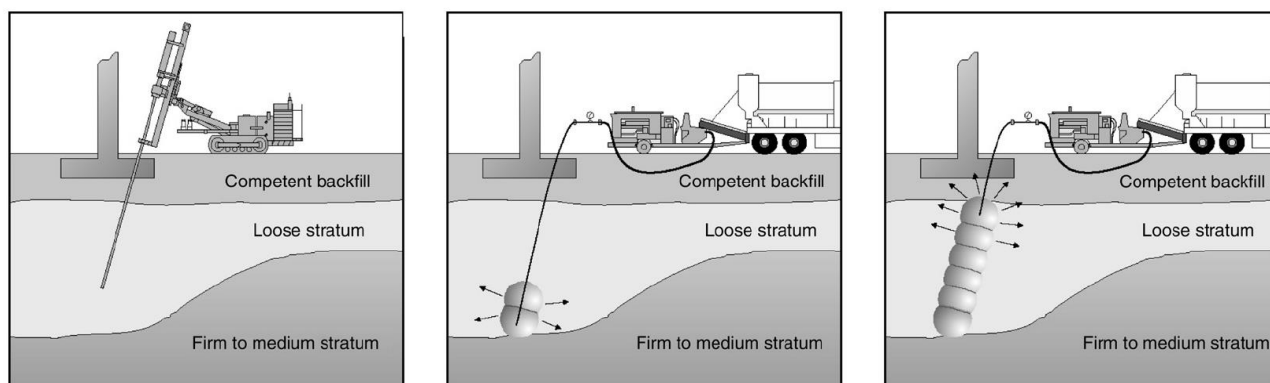
2.3.1. Компакционо ињектирање

Компакционим ињектирањем се збија тло ињектирањем слабо покретљиве ињекционе масе. Ињекционо тијело се шири при утискивању додатне ињекционе масе, сабијајући притиском ширења околно тло. Осим побољшања околног тла, маса тла је армирана стубом ињекционе масе чиме се смањује слегање и повећава смичућа чврстоћа.

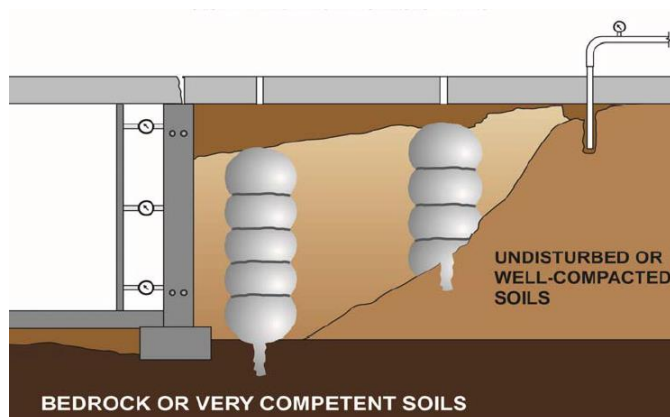
Метода се користи са смањење слегања темеља, митигацију ризика од ликвефакције. Метода омогућава изградњу на растреситом насутом тлу, смањује слегања на колапсбилном тлу, смањује ризик од колапса терена у карстним подручјима. У доњој табели је дат преглед очекиваног побољшања тла у зависности од типа тла.

Опис тла	Збијање	Ојачање тла
Шљунак и пијесак, са мање од 10% прашине и без глиновитих фракција	Одлично	Врло добро
Пијесак са мање од 10-20% прашине и мање од 2% глине	Умјерено	Врло добро
Финозрно непластично тло	Минимално	Одлично
Пластично тло	не примјењује се	Одлично

Потребна је опрема за: припрему и мијешање ињекционе масе, пумпање ињекционе масе и уградњу ињекционе цијеви. Пумпа мора имати капацитет за ињектирање ињекционе масе круће конзистенције (мало слијегање конуса овично мање од 2.5цм). Зато се ово ињектирање зове још и ињектирање са масом мале покретљивости (*Low Mobility Grouting – LMG*). Обично се захтијевају клипне пумпе капацитета до 6.9 МПа.



Слика 2.13: Шематски приказ примјене компакционог ињектирања за ојачање тла испод темеља



Слика 2.14: Шематски приказ примјене компакционог ињектирања за ојачање засипа испод прелазне плоче моста

Компакционо ињектирање почиње са дна зоне која се третира и може бити прекинуто на било којој дубини. Техника је ефикасна за изоловане зоне у дубини тла. Генерално је тешко постићи побољшање у зони до 2.50м од површине терена. Одређено побољшање на мањој дубини може бити постигнуто коришћењем спорије и скупље процедуре гдје се прво ињектира горњи дио третиране зоне. Након очвршћавања ињекционе масе, цијев се убуши испод ињектиране зоне и врши се додатно ињектирање. Процедура се понавља до ињектирања дна третиране зоне. Проток ињекционе масе је у опсегу од 0.087 до 0.175м³/мин, зависно од карактеристика третираног тла. Уколико је проток превисок, може доћи до повећања порног притиска или разарања тла што смањује ефикасност методе. Ефективни вертикални напон мора бити довољно велик да омогући ињекционој маси хоризонтално помјерање тла – у супротном може доћи до издизања површине терена.

Материјали за ињекциону масу су портланд цемент, пијесак и вода. Финозрни материјали као што су природна ситнозрна тла, летећи пепео и бентонит могу бити додати у мјешавину.

Пројектовање ојачања почиње са анализом планиране конструкције и постојећих геотехничких услова (носивост тла, слегање, ликвефакција итд.). Онда се иста анализа врши са параметрима побољшаног тла као што је SPT N вриједност да би се одредиле минималне потребне вриједности параметара. Коначно, утврђују се димензије зоне у којој је потребно побољшати тло. У случају побољшања тла у циљу смањења слегања испод темеља самца, уобичајено је да се пијесак испод планираног темеља третира до дубине од двије ширине темеља. За случај темељне траке третира се тло до дубине од четири ширине траке.

Контрола квалитета

Зависно од захтјева у вези ињекционе масе, специфицирају се слегање и чврстоћа ињекционе масе. Тестирање слегања (конзистенције) и узимање узорача за испитивање једнооксијалне чврстоће спроводи се у току припреме ињекционе масе. Потребно је надгледати и документовати и параметре припреме и производње ињекционе масе као што су проток, количине, притисци, издизање површине терена и дубина ињектирања. Након ињектирања могу се спровести тестови између локација ињектирања да би се потврдило тражено побољшање тла.

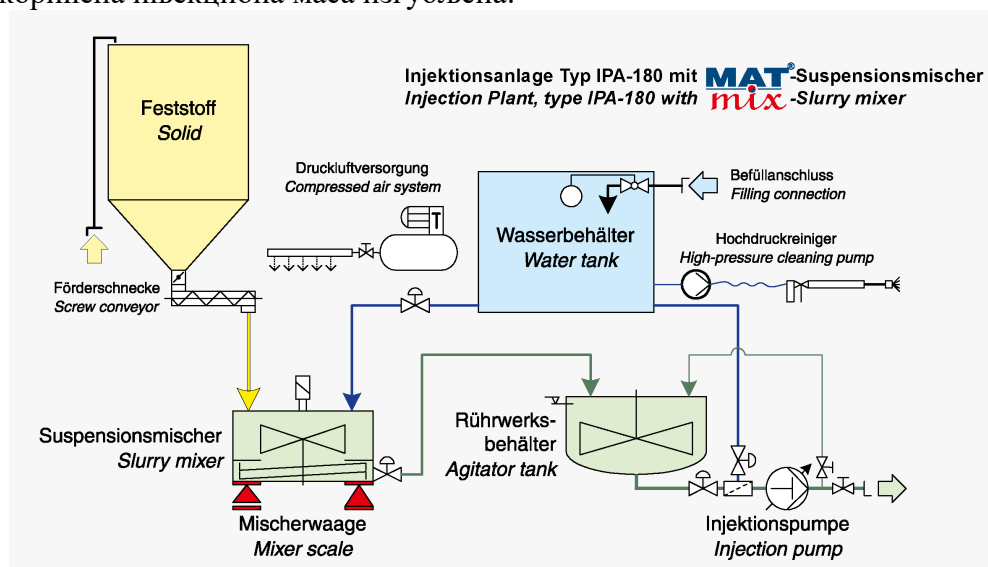
У доњој табели су дате прелиминарне смјернице за усвајање растојања између ињекционих бушотина у функцији од типа тла. Растојање зависи прилично од вискозности ињекционе масе. Укупна потребна количина ињекционе масе зависи порозности тла, присуства подземних вода и испуцалости стијене, тако да се на почетку пројекта не може планирати тачна количина

ињекционе масе. Ињекционе бушотине су генерално вертикалне. Косе бушотине се раде да би се осигурало да што већи број пукотина и слојева буде пресјечен ињекционом бушотином. Такође, косе бушотине се користе испод темеља објеката.

кофицијент водопропустљивости (мм/сек)	Растојање бушотина за ињектирање (м)	тип тла
>1	6	Испуцале стијене
1 до 10^{-1}	3	Ситни до средње крупни пјескови/шљункови
< 10^{-1}	0.50-1	Фини пјескови

Постројење за ињектирање и одговарајућа опрема

Суспензије и раствори се припремају у истим уређајима за мијешање и користе исти систем испоруке а разликују се углавном у начину складиштења и типу мијешања. Постројење за ињектирање се састоји из: миксера, агитатора, пумпе и цијеви повезаних на отворе за ињектирање. Типично постројење за ињектирање цементном ињекционом масом је приказано на доњој слици. Постоје два система за пренос ињекционе масе, један је циркулационог типа гдје се неискоришћена ињекциона маса враћа према агитатору док је друга типа једне линије гдје је неискоришћена ињекциона маса изгубљена.



Слика 2.15: Шема постројења за ињектирање

За ињекционе масе у форми раствора, поједини састојци су смјештени у стационарне или танковне на камионима. Дозирају се на бази протока и мијешају односно спајају прије пумпања у одговарајућу ињекциону цијев.

Основни дјелови опреме постројења за ињектирање су:

- танк за мјерење који служи за контролу запремине ињектиране масе
- мјешалица (миксер) за сједињавање појединих састојака
- агитатор за одржавање чврстих честица у суспензији прије пумпања. За хемијске ињекционе масе није неопходан.
- пумпа за потискивање масе из агитатора према линијама за пумпање
- уређаји за контролу брзине ињектирања и притиска



Слика 2.16: Приказ постројења за ињектирање