

Поглавље 6 Скраћење времена консолидације. Предоптерећење и дренажи.

6.1. Увод

Једнодимензионална консолидација

Коефицијент консолидације у вертикалном правцу:

$$c_v = \frac{kM_v}{\gamma_w}$$

гдје је:

k - коефицијент филтрације

M_v - модуо стишљивости

γ_w - јединична тежина воде

Коефицијент консолидације је такође дат изразом

$$c_v = \frac{T_v H^2}{t}$$

гдје је:

t - вријеме консолидације

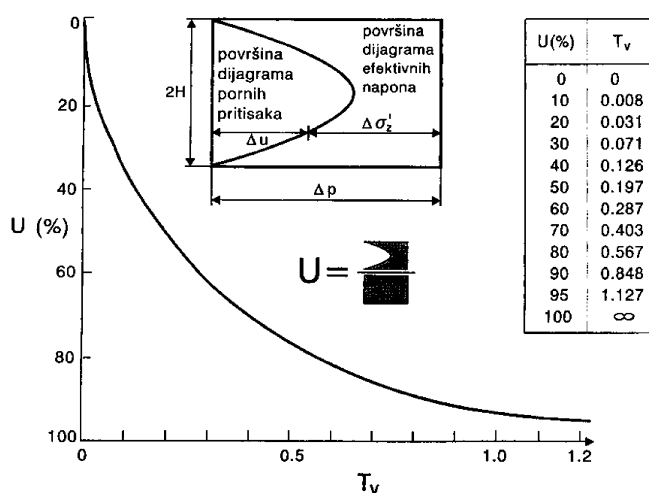
T_v - временски фактор

H_{dr} -дебљина слоја кроз који се врши филтрација

Степен консолидације представља однос између обављеног слијегања у неком времену t и укупног слијегања по обављеној консолидацији. Подаци везани за степен консолидације се изражавају кроз дијаграме или табеларно (слика 6.1) док се сам степен консолидације срачунава сложеним интегрисањем или уз помоћ приближних израза:

$$U < 60\% \quad T_v = \frac{\pi}{4} U^2$$

$$U > 60\% \quad T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$



Слика 6.1: Зависност степена консолидације од временског фактора

Коначно слијегање се добија по изразу

$$s_{\infty} = \frac{\Delta\sigma}{M_v} H = \frac{q}{M_v} H, \quad M_v = \frac{c_v \gamma_w}{k}$$

Примјер 1 - Изградња подног складишта, фундираног на плочи чији је контактни притисак на тло $p_1=70 \text{ kN/m}^2$, трајала је 8 мјесеци. Колико се може дозволити корисно оптерећење ако је величина накнадног слегања након завршене изградње и наношења корисног оптерећења не смије бити већа од 4цм. Параметри тла: $k=3 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, $M_v=3.5 \text{ МПа}$. Дебљина стишљивог слоја који лежи на водонепропусној подлози је 2.0м.

$$c_v = \frac{kM_v}{\gamma_w} = \frac{3 \times 10^{-8} \times 10^{-2} \times 3500}{9.81} = 1.071 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\frac{c_v}{H^2} \frac{t_0}{2} = T_v(t_0/2) = 0.281, U = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} = 0.5983 = 59.83\%$$

Након изградње завршено је 59,83% примарне консолидације. Остало је да се оствари још $100 - 59,83 = 40,17\%$ односно приближно 40% чему треба да одговара максимално дозвољених 4цм слегања након изградње и наношења корисног оптерећења.

Из пропорције 4цм : 40.17% = s_{∞} : 100% слиједи да је коначно слегање након 100% консолидације $s_{\infty} = 4 / 0.4017 = 9,96 \text{ cm}$. Слегање након завршетка изградње износи $s_{t_0} = 9,96 \times 0.5983 = 5,96 \text{ cm}$. Коначно слегање од 9,96цм одговара укупном притиску од:

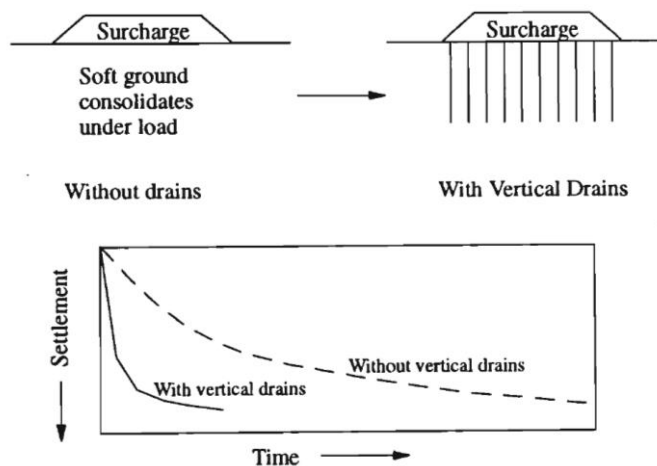
$$p = s_{\infty} M_v / H = 9.96 \times 0.35 / 200 = 0.01743 \text{ kN/cm}^2 = 0.1743 \text{ МПа} = 174,3 \text{ kN/m}^2$$

Корисно оптерећење може бити:

$$\Delta p = 174,3 - 70 = 104,3 \text{ kN/m}^2$$

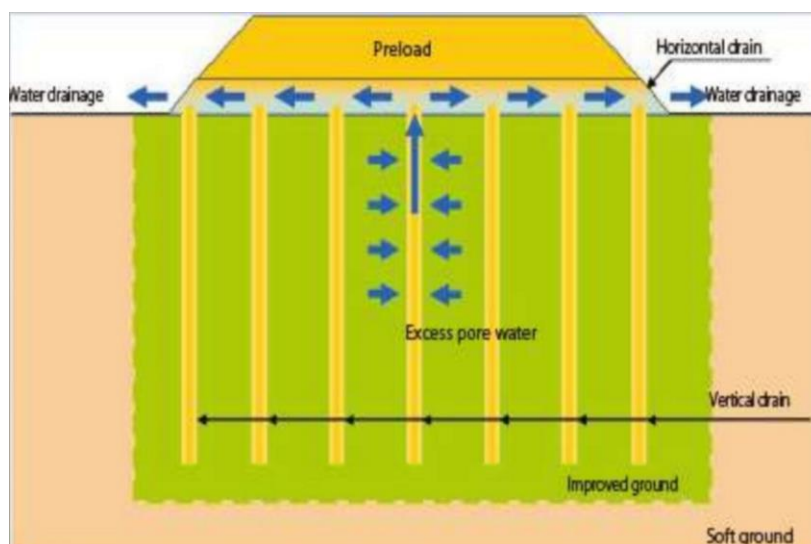
6.2. Убрзавање консолидације – предоптерећење и дренажи

Убрзана консолидација (слика 6.2) се спроводи предоптерећењем и/или вертикалним дренажима (*accelerated consolidation by surcharging and/or vertical drains*). Као вертикални дренажи се могу користити пјешчани шипови (*sand piles*) и префабриковани вертикални дренажи (*prefabricated vertical drain PVD, wick drains*). Преглед типова вертикалних дренажа са начином уградње је дат у табели 1.



Слика 6.2: Убрзање консолидације коришћењем вертикалних дренажа

Пјешчани дренажи су пречника од 200 до 450 mm и постављају се на размаку од 1 до 6 m. Префабрикованих дренажа има више дестина врста. Дебљина 2-6мм, ширине су око 100мм. У фази предоптерећења потребно је провјерити да не дође до лома меког тла испод насипа у недренираним условима. Механизам дејства вертикалних дренажа и предоптерећења је приказан на доњој слици (слика 6.3). Уградњом вертикалних дренажа скраћују се дужине дренажа. Вода се прикупља у вертикалним дренажима и кроз њих струји на горе према хоризонталном дренажу (*sand blanket*).



Слика 6.3: Механизам дејства вертикалних дренажа и предоптерећења

Табела 1 – Типови вертикалних дренажа (Holz, 1991)

Тип дрена	Начин уградње	Пречник дрена (м)	Међурастојање (м)	Максимална дужина (м)
Пјешчани	утискивање заштитног омотача (<i>mandrel</i>), статички или вибрацијама	0.15-0.60	1-5	≤30
Пјешчани	ротационо бушење (<i>hollow stem continuous flight auger</i>)	0.30-0.50	2-5	≤35
Пјешчани	коришћењем млазница (<i>jetted</i>)	0.2-0.3	2-5	≤30
Префабриковани пјешчани дренажи (<i>sandwick</i>)	утискивање заштитног омотача (<i>mandrel</i>), статички или вибрацијама, ротационо бушење	0.06-0.15	1.2-4	≤30
Префабриковани PVD дренажи (<i>PVD, wick drain</i>)	утискивање заштитног омотача (<i>mandrel</i>), статички или вибрацијама	0.05-0.1 еквивалентни пречник	1.2-3.5	≤60

Предности методе:

- пјешчани дренажи ефикасно смањују вријеме потребно за примарну консолидацију засићених глина како меких тако и тврдих
- редукација времена је поготово изражена код тврдих глина (6-7 пута)
- с повећањем пречника пјешчаних шипова смањује вријеме консолидације док коначно слијегање не зависи од пречника шипа d

Недостаци методе:

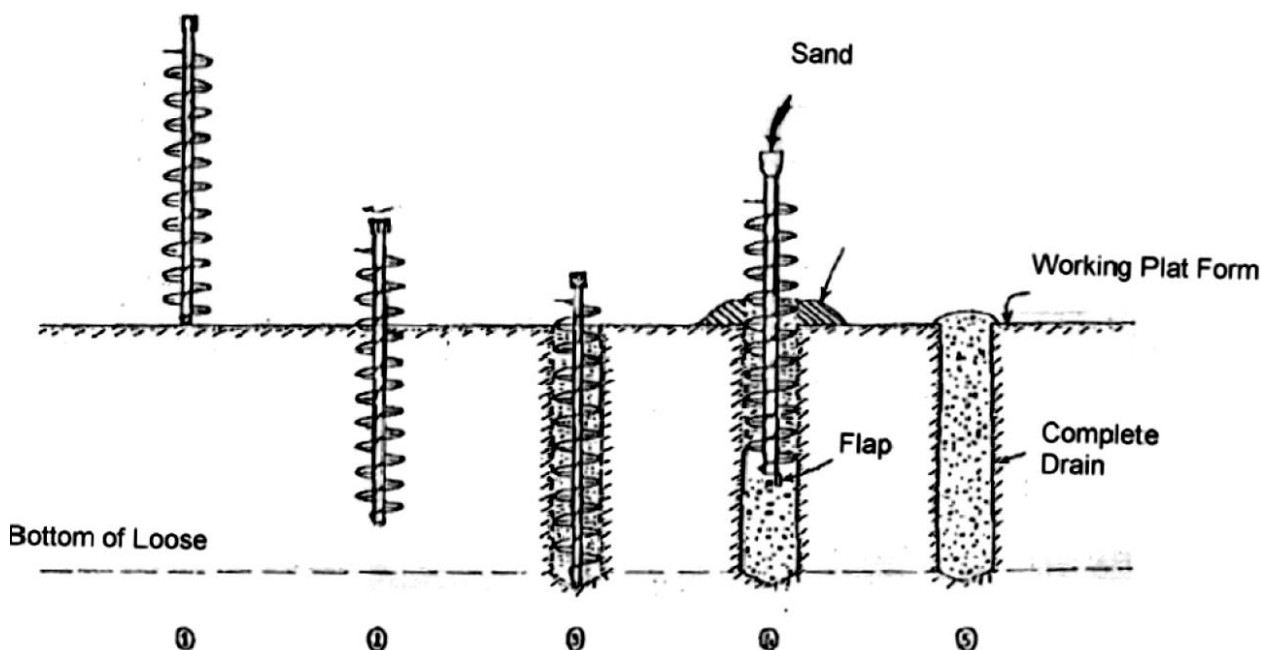
- прекид у дренажима услед несавјесног извођења и консолидације тла око дрена

- поремећај тла око дрена услед извођења може смањити пропустљивост тла око дрена – смањење ефикасности дрена
- утицај ојачања тла шиповима може смањити ефикасност предоптерећења

6.3. Пјешчани дренажи

Генерално се изводе уградњом заштитне цијеве у тло након чега се у јаму под притиском ваздуха уноси пијесак уз извлачење цијеве. Постоји више техника за уградњу пјешчаних дренажа:

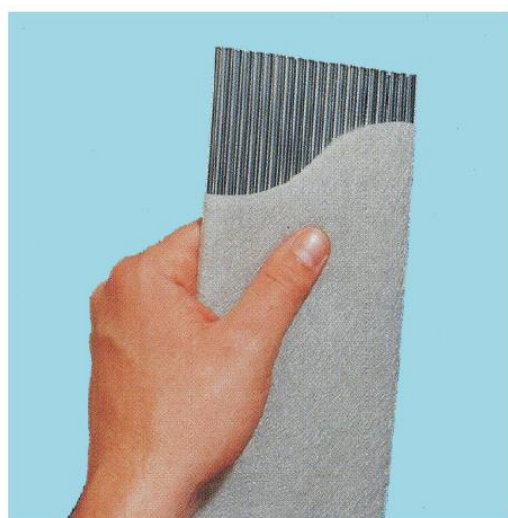
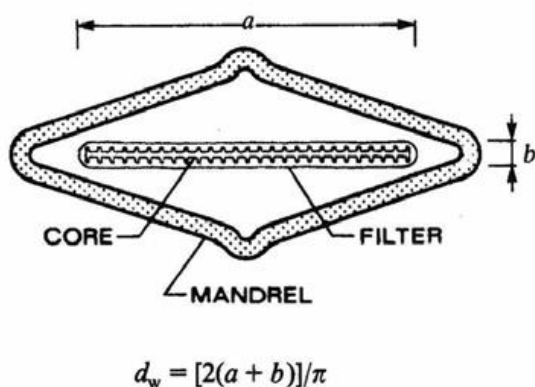
- тло унутар цијеве се уклања воденом млазницом (*jetted sand drains*). Млаз воде под високим притиском разара тло на дну ископа при чему се вода са тлом креће нагоре око млазнице. Челична цијев унесена у тло тоне услед сопствене тежине чиме се повећава простор у тлу. Ова метода захтјева велику количину воде и проблематична је због потребе за уклањањем воде помијешане са тлом у складу са условима заштите животне средине. Међутим, ова метода изазива врло мали поремећај тла.
- затворена заштитна цијев са монтажном папучом се побија у тло. Побијање се врши ударцима или вибрацијама. Цијев се пуни пијеском а затим извлачи из тла (*driven sand drains*). Метода ствара поремећај тла око цијеве услед чега се могу јавити високи порни притисци, мала пропустљивост око дрена и смањење смичуће отпорности. Ипак, метода је веома популарна због своје једноставности и економичности.
- ошупљена ротациона бушилица – сврдло врши ископ до одређене дубине након чега се пијесак уноси уз извлачење сврдла (*CFA – continuous flight auger*). Ова метода се препоручује у циљу смањења тзв. запрљане зоне тј. појаве “smear” ефекта услед поремећаја тла око бушотине што за резултат даје смањење коефицијента пропустљивости (слика 6.4).



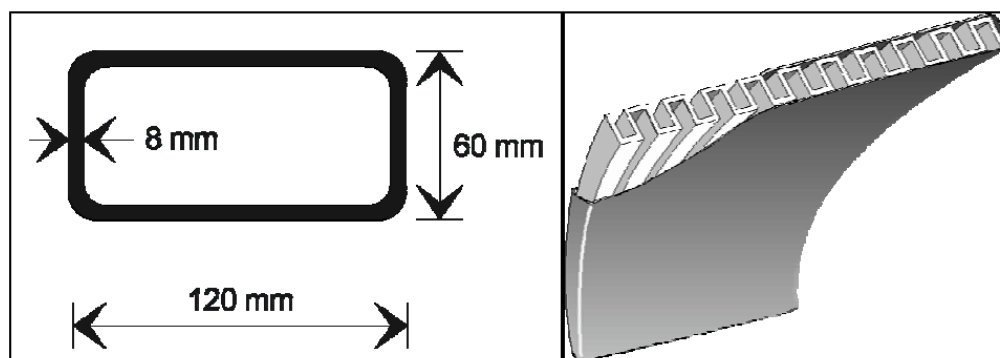
Слика 6.4: Уградња пјешчаних шипова CFA методом

6.4. Префабриковани вертикални дренажи

Префабриковани вертикални дренаж (*prefabricated vertical drain PVD, wick drains*) је било који префабриковани материјал или продукт који се састоји од пластичног језгра са синтетичким филтерским омотачем а има следеће карактеристике: а) могућност прикупљања порне воде; б) могућност спровођења прикупљене воде дуж дрена (слика 6.5, слика 6.6). Омотач може бити од неплетеног полиестера, полипропиленског геотекстила или синтетичког папира који функционишу као баријера-филтер који спречава пролаз ситних честица из глиновитог тла у језгро. Пластично језгро има две важне функције: потпора филтерском омотачу и подужно спровођење воде и при великим бочним притисцима. Постоји и заштитни омотач (*mandrel*) који штити дрена приликом инсталације. Облик заштитног омотача је правоугаони или ромбичан (слика 6.5).

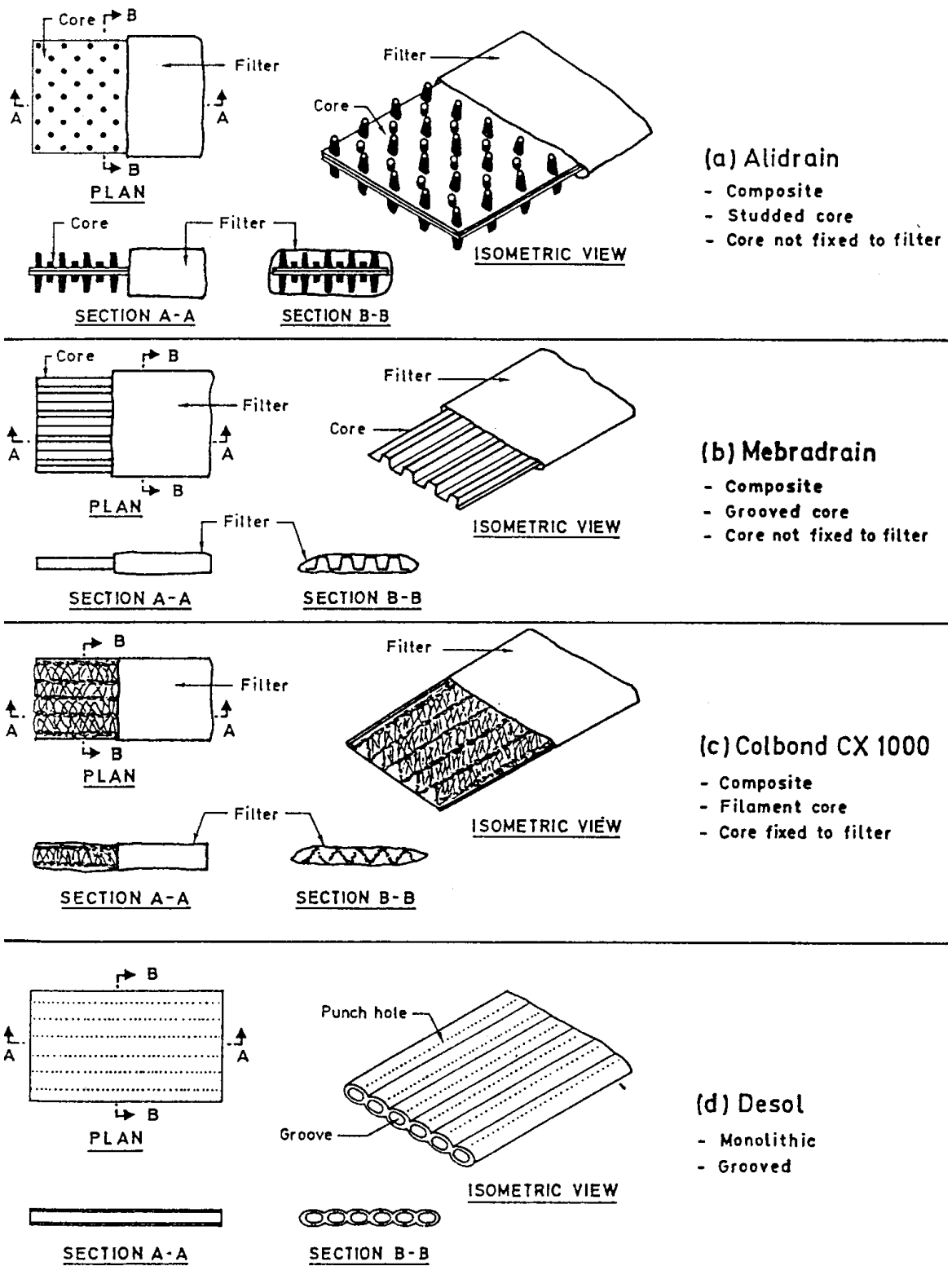


Слика 6.5: Попречни пресјек и фотографија префабрикованог вертикалног дрена (ПВД)



Слика 6.6: Димензије заштитног омотача и приказ префабрикованог дрена (Mebradrain)

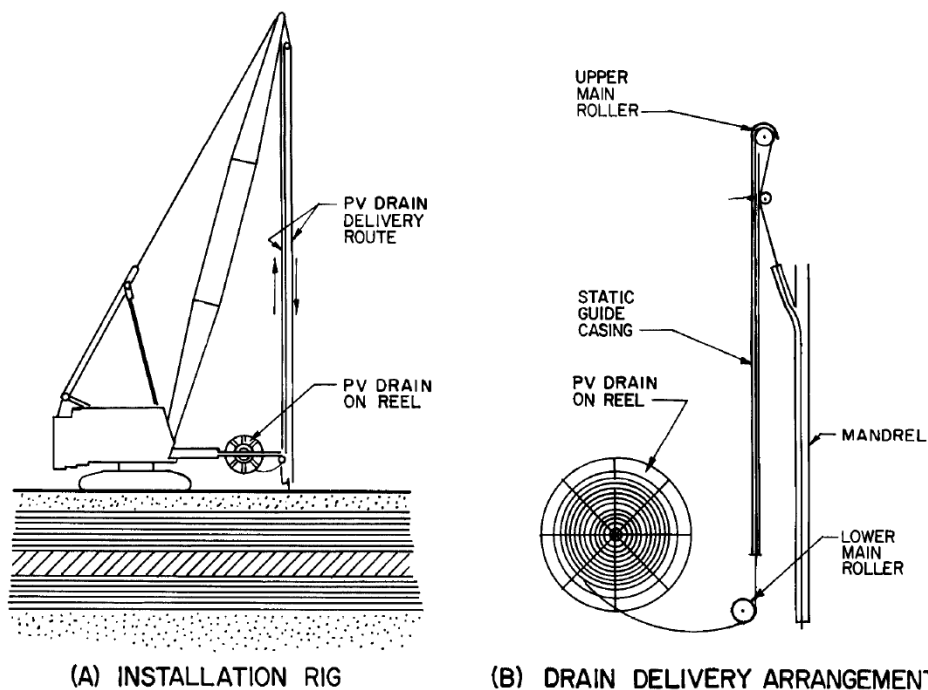
Постоје три типа језгра ПВД дрена (PVD core) : језгро са жљебовима (*Grooved core*), чепасто језгро (*studded core*), и језгро од нити (*filament core*), слика 6.7.



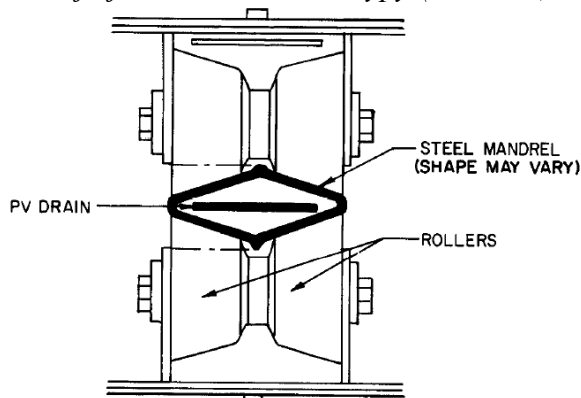
Слика 6.7: Различити типови ПВД и различита језгра

Уградња ПВД

Заштитни омотач (*mandrel*) штити дренаж при уградњи и ствара простор за дренаж истискујући тло при пенетрацији. Пенетрација заштитног омотача се врши или статичком или динамичком силом (вибрације). Статичка сила се аплицира тежином омотача у комбинацији са мртвим теретом на врху омотача или тежином машине за уградњу (*installation rig*). Вибрације се аплицирају коришћењем вибро уређаја сличних оним који се користе за уградњу шипова и талпи. Вибрације нису погодне код осјетљивог тла.



Слика 6.8: Типична опрема за уградњу префабрикованих дренажа-машина за уградњу и шема за уградњу дрена који је намотан на катуру (енг. reel)

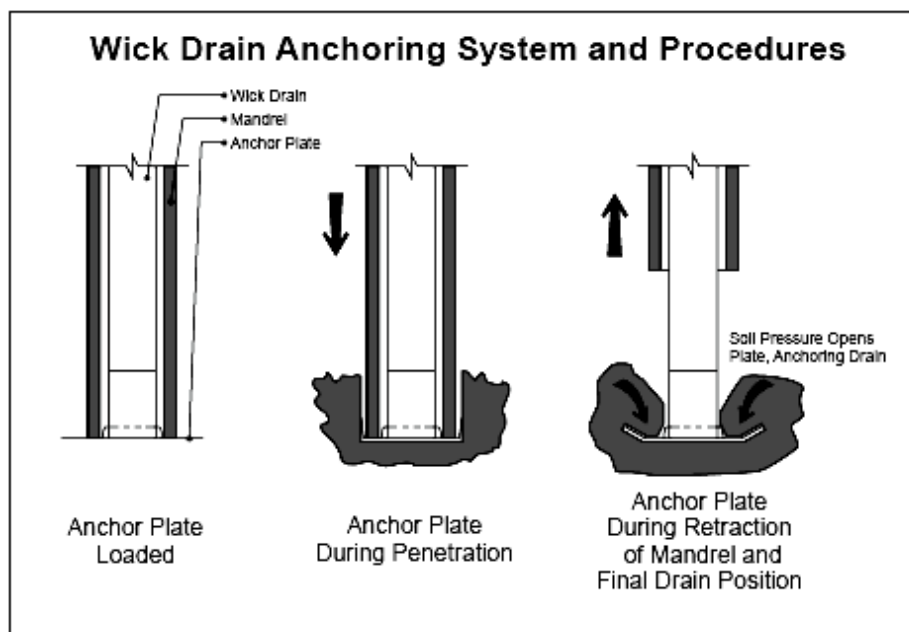


Слика 6.9: Опрема– попречни пресјек заштитног омотача и дрена

Типична процедура уградње ПВД садржи следеће кораке:

- Машина се позиционира на локацију дрена
- анкер се поставља на крај дрена
- заштитним омотачем се продире до жељене дубине
- заштитни омотач се извлачи
- дренажни материјал се сјече изнад хоризонталног дренажног слоја на површини терена

Уколико постоје препреке у тлу типа дробине, залеђеног тла, тла са камењем или врло збијеног тла, потребно је прије уградње дрена извршити претходно бушење на локацији истог коришћењем бушилаца, млазница или хидрауличког чекића.



Слика 6.10: Начин уградње префабрикованог дрена

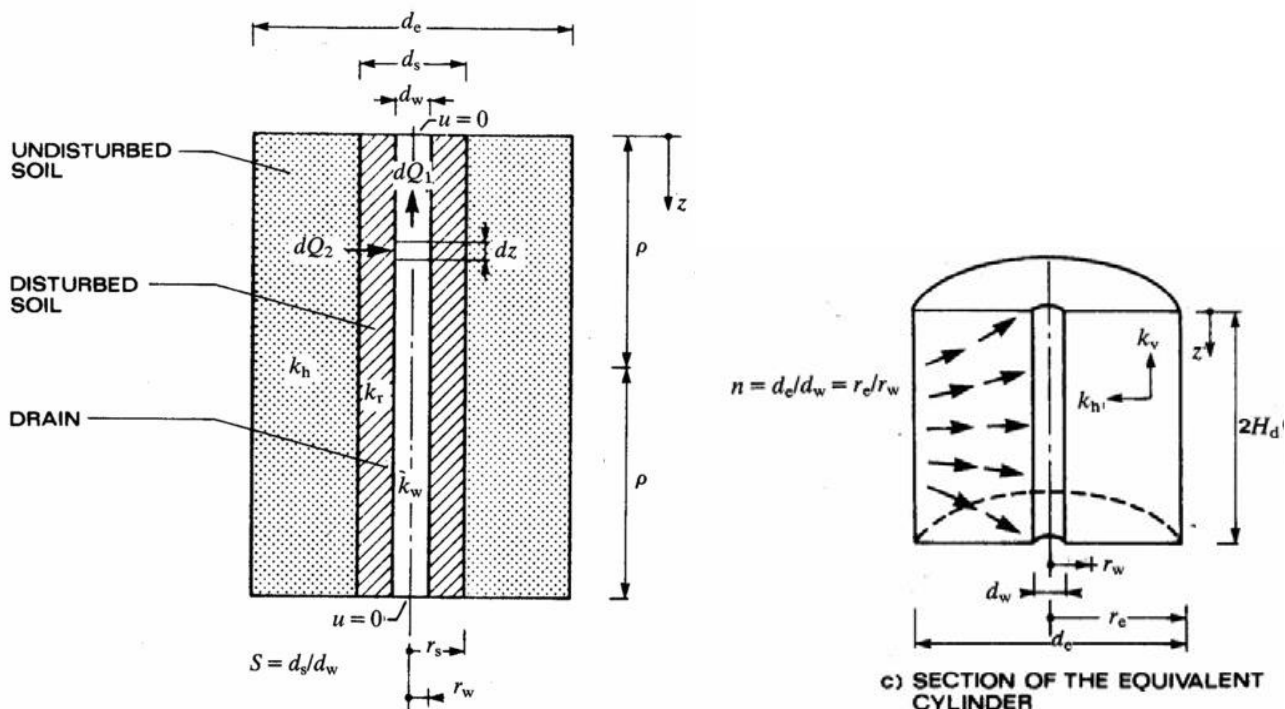
Типична брзина уградње заштитног омотача је 0,15 до 0,60 м/секунди. Потребно је одржати вертикалност дрена – вертикално одступање је највише бцм на 3м дужине. Анкер на крају дрена може бити комад арматуре или цијеви или специјална анкерна плоча. Анкер мора бити нешто већи од омотача али не превише да се би дошло до непотребног поремећаја тла око дрена.

6.5. Теорија консолидације вертикалним дреновима

Основна теорија пјешчаних дренова је развијена од стране Rendulic (1935) и Barron (1948), а касније сумирана од стране Richart (1959). При томе се разликују два основна случаја:

1. Случај различитих деформација (*Free-strain case*) се јавља при флексибилном оптерећењу аплицираном на површини терена чему одговара равномјерна дистрибуција истог. Ово резултује неравномјерним слегањем на површини терена.
2. Случај једнаких деформација (*Equal-strain*) се јавља када је оптерећење нанијето крутим темељом што резултује једнаким слегањима али неравномјерном дистрибуцијом оптерећења

Други фактор који се мора узети у обзир је такозвани “*smear*” ефекат. Усљед поремећаја глине при бушењу у пјешчаним дреновима се формира тзв. запрљана зона или “*smear zone*”. Резултат формирања ове зоне је смањење коефицијент пропустљивости у хоризонталном правцу а тиме и ефикасности дренова.



Слика 6.11: Попречни пресјек кроз тло у околини дрена и 3Д приказ еквивалентног цилиндра око дрена

6.1.1. Консолидација пјешчаним шиповима

Једначина 3Д консолидације у поларним координатама ,према Carillo-у гласи:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

гдје су u – порни притисак
 c_v – коефицијент консолидације у вертикалном правцу
 c_r – коефицијент консолидације у радијалном правцу

Коефицијент консолидације за радијални правац се може процијенити према изразу:

$$c_r = (k_h / k_v) c_v$$

гдје су k_h и k_v коефицијенти водопропустљивости у хоризонталном и вертикалном правцу, респективно. Одређивање коефицијента c_r зависи од комплексности пројекта гдје разликујемо три категорије дате у доњој табели.

Табела 2 – Типови пројекта према сложености услова тла

категорија пројекта	Опис
А	Углавном униформно тло, мале до ниске осјетљивости. Једноставно извођење без фазности градње. Мањи број ПВД, дужине до 18м
Б	Прелаз између категорија А и Ц
Ц	Хетерогено тло или високо осјетљиво тло. Фазна изградња. Велики број дрена или дужина дрена већа од 18м

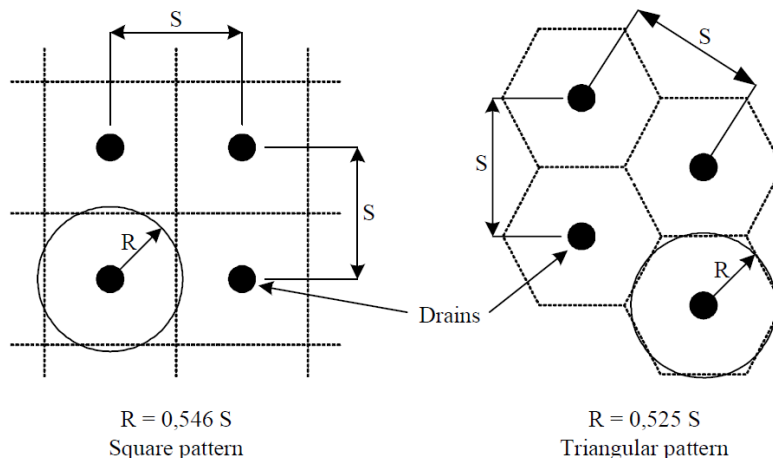
За пројекте сложености категорије А може се конзервативно усвојити $k_h/k_v=1$ тј. $c_r=c_v$, при чему се c_v одређује едометарским опитом. Однос k_h/k_v се може приближно процијенити на основу доње табеле уз упоредна теренска или лабораторијска мјерења.

Табела 3 - Опсег вриједности односа k_h/k_v за различите врсте тла.

Опис структуре и услојености меке глине ($c_u < 50$ kPa)	k_h/k_v
Хомогена, неуслојена глина (дјелимично суве глине)	1.2±0.20
Без или са слабо развијеном макро-текстуром (седиментне глине са пропустљивим сочивима и прослојцима)	1 до 1.50
Слабо развијена услојеност (седиментне глине са прашинастим сочивима)	2 до 5
Умјерено до добро развијена макроструктура (седиментне глине са пропустљивим сочивима и прослојцима)	2 до 4
Ламиниране глине и други депозити који садрже мање или више конинуалне пропусне прослојке	3 до 15

За пројекте категорије Ц и можда категорије Б, коефицијент консолидације у радијалном правцу се може тачније процијенити посебним лабораторијским методама и теренским опитима. Због сложености процјене резултата ових тестова за препоруку је примјена едометарског теста за процјену c_v у комбинацији са теренским и лабораторијским тестовима за процјену k_h/k_v , а затим коришћење формуле за c_r .

Вертикални призматични блокови тла који окружују пјешчане шипове су замијењени еквивалентним цилиндричним блоковима радијуса R који имају исту површину пресека.



Слика 6.12: Еквивалентни цилиндри за квадратни и троугаони распоред дренажа

За случај префабрикованих дренажа који су правоугаоног пресека пронађени еквивалентни пречник дрена из услова да је исти теоретски радијални капацитет дренажања. Правоугаони и кружни дрена имају исти капацитет ако им је обим исти па је еквивалентни пречник дрена:

$$d_w = 2(a+b)/\pi$$

гдје је a -ширина, b -дебљина

Решење горње једначине се може написати у два дијела:

$$U_v = f(T_v), U_r = f(T_r)$$

гдје су U_v – степен консолидације у вертикалном правцу

U_r – степен консолидације у радијалном правцу

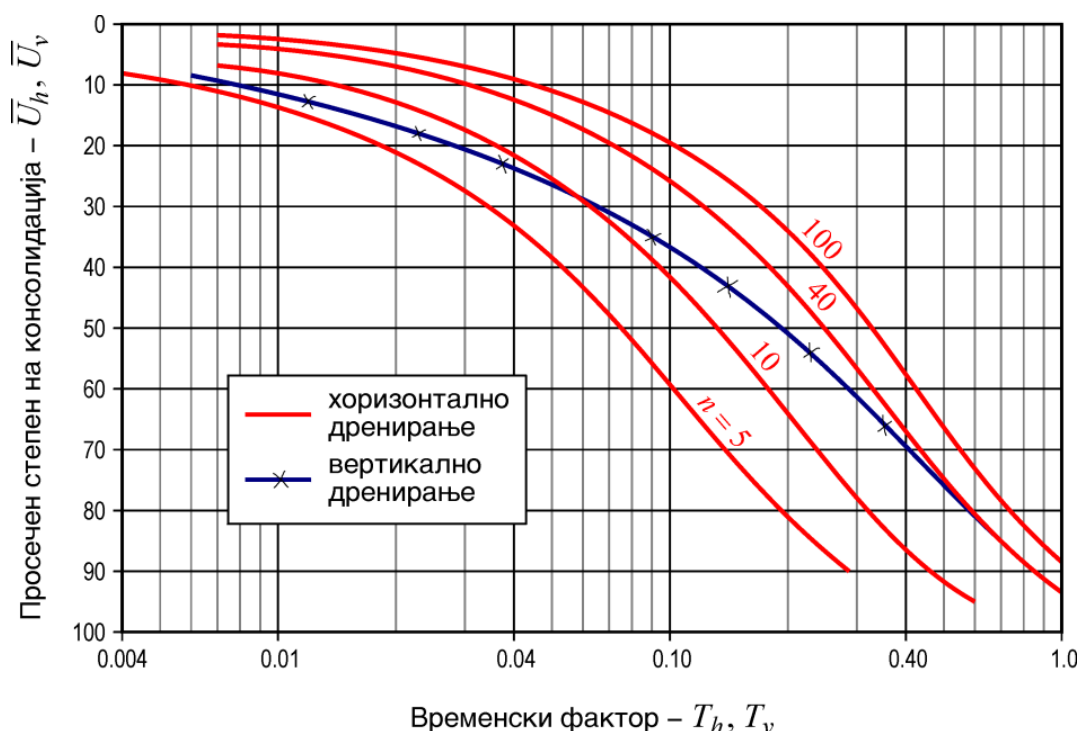
$T_v = C_v t/H^2$ –временски фактор за дренарање у вертикалном правцу

$T_r = C_r t/4R^2$ –временски фактор за дренарање у радијалном правцу

Решење за радијално дренарање дао је Ваггон (слика 6.13). Однос U_r/T_r зависи од коефицијента $n=R/r$ гдје је R радијус еквивалентног блока, а r полупречник пјешчаног шипа.

Комбиновани степен консолидације за консолидацију у вертикалном и радијалном правцу:

$$U = 1 - (1-U_v)(1-U_r)$$



Слика 6.13: Зависност временских фактора за вертикални и хоризонтални (радијални) правац од одоварајућих временских фактора.

Примјер 2 – Објекат изграђен на слоју стишљиве глине дебљине $H=7.6m$ завршен је у року од 6 мјесеци а пустиће се у експлоатацију 7 мјесеци након изградње. Захтијева се обзиром на осјетљивост конструкције у погледу слегања, да се за то вријеме изврши консолидација тако да од укупног срачунатог слегања остане максимум 2.5cm неостварено. Процес консолидације убрзати примјеном пјешчаних шипова у троугаоном или квадратном распореду.

Расположиви подаци:

Коефицијент консолидације у вертикалном правцу $C_v=C_R=0,0402 \text{ cm}^2/\text{min}$, $M_s=2180 \text{ kPa}$, геостатички напон у средишту стишљивог слоја $p_g=55 \text{ kN/m}^2=\sigma_1$, укупно напрезање у средини стишљивог слоја након доношења оптерећења $p_g+\Delta\sigma=\sigma_2=164 \text{ kN/m}^2$.

За троугаони распоред шипова, полупречник дејства дренарања је $R=0,525s$ а за правоугаону расподелу $R=0,564s$, гдје је s размак између шипова који за прву итерацију износи 3.6m. Полупречник пјешчаног шипа $r=20\text{cm}$.

$$\Delta\sigma=164-55=109 \text{ kPa}$$

$$s_{\infty} = 109/2180 \times 760 = 38 \text{ cm}$$

$U\% = (38 - 2.5)/38 = 93.42\%$ је захтијевани степен консолидације за вријеме $t = 6/2 + 7 = 10$ мјесеци (узет утицај грађења према Терцагију)

$$t = 304 \text{ dana i } c_v = c_h = 0.0402 \text{ cm}^2/\text{min} \text{ па је } \text{vremenski faktor } T_v = 0.0402 \times 304 \times 1440/760^2 = 0.0305$$

Из дијаграма за консолидацију у вертикалном правцу за срачунато T_v се добија степен консолидације $U_v = 23\%$

За радијални правац и правоугаону шему вертикалних дренажа:

$$R = 0.564 \text{ s } = 0.564 \times 360 = 203 \text{ cm}, n = R/r = 203/20 = 10.15 \sim 10$$

$$\text{За радијални правац } c_r = c_v, T_{vr} = c_r t / (2R)^2 = 0.0402 \times 304 \times 1440 / (4 \times 203^2) = 0.107$$

$$\text{Са дијаграма се читава да је за } T_{vR} = 0.107, U_R = 42\%$$

Укупни степен консолидације је дат изразом:

$$U = 100 - 1/100(1 - U_v)(1 - U_r) = 100 - 1/100(100 - 23)(100 - 42)$$

$$U = 55.34 < 93.42 \text{ не задовољава}$$

За $s = 200 \text{ cm}, R = 0.564 \times 200 = 113, n = 113/20 = 5.65 = 5, T_r = 0.345, U_r = 92, U_v = 23, U = 93.84 > 93.42,$ задовољава

За равностранни троугао:

$$s = 200, R = 0.525, e = 105, n = 105/20 = 5.25 = 5, T_r = 0.399, U_r = 95\%, U = 96.15 > 93.42$$