

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА ПРЕДПОСТРОЕЧНОГО УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕСОВЕРШЕННЫХ ПЕСЧАНЫХ ДРЕН ПРИ ДВУХСТОРОННЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОРОВОЙ ВОДЫ.

А.В. Школа, И.И. Мосичева.

В работе [1] рассмотрен случай предпостроечного уплотнения основания, сложенного однородной толщиной слабого глинистого грунта, подстилаемого водоупором.

В практике морского гидротехнического строительства нередки случаи, когда относительно большая толща слабых грунтов подстилается слоем песка, щебня или гравия. На рис. 1 представлена расчётная схема ускорения процесса консолидации слабого основания при применении в этих условиях несовершенных песчаных дрен. Согласно приведенной расчётной схеме расчёт консолидации всего основания мощностью H сводится к разделённому определению нестабилизированных осадок $S_t^{H_1}$ (верхнего слоя, в пределах дрен), $S_t^{H_2}$ (нижнего слоя, под дренами) и последующему их суммированию при одних и тех же значениях времени консолидации t .

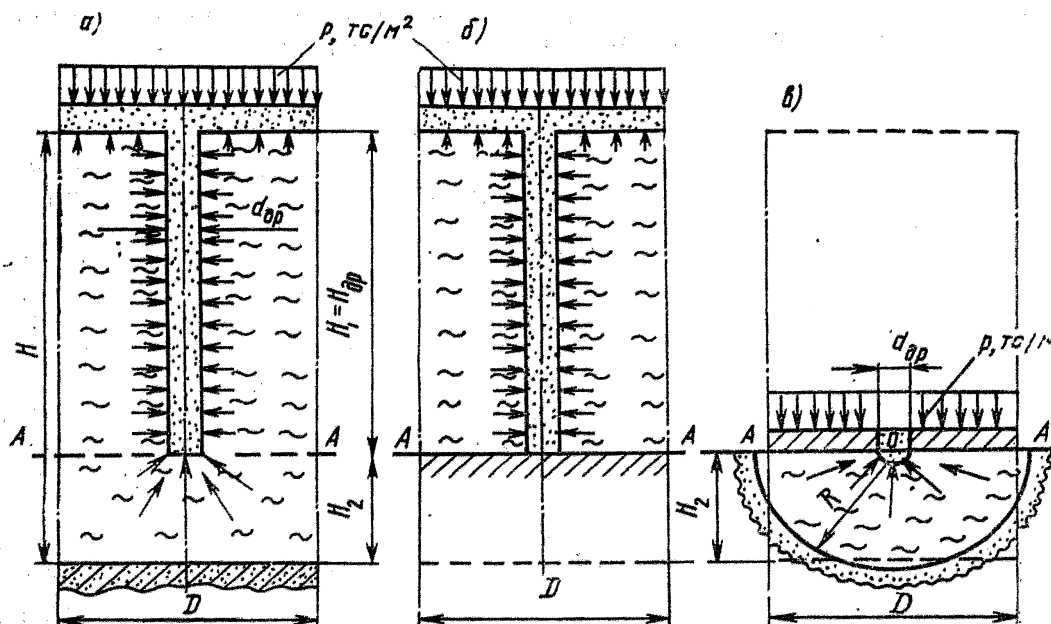


Рис. 1. Расчётные схемы уплотнения основания с несовершенными песчаными дренами: а) всего основания мощностью $H = H_1 + H_2$; б) верхнего слоя мощностью $H_1 = H_{др}$; в) нижнего слоя мощностью $H_2 = H - H_1$.

Как видно из рис. 1, задача уплотнения слабого основания по указанной расчётной схеме состоит в получении выражения для определения $S_t^{H_2}$ нестабилизированных осадок нижнего слоя.

Ниже приведено аналитическое решение указанной задачи, основанное на использовании предпосылок теории фильтрационной консолидации грунтов и дополнительного допущения о замене действительной области уплотнения эквивалентной ей грунтовой полусферой радиусом R .

Для принятой условной области уплотнения дифференциальное уравнение консолидации, начальное и граничные условия имеют вид [2]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_{vr} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$u|_{t=0} = p; \quad u|_{r=r_0} = 0; \quad u|_{r=R} = 0, \quad (2)$$

где u – поровое давление;

t – время;

C_{vr} - коэффициент консолидации;

r – переменный радиус полусферы;

p – величина равномерно распределённой уплотняющей нагрузки;

r_0 - радиус дрены;

R – радиус расчётной полусферы, определяющийся по формуле [1]:

$$R = 1,453 \sqrt{\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 H_2}. \quad (3)$$

Упростим уравнение (1) путём подстановки

$$v = ru. \quad (4)$$

Тогда формула (1) примет вид

$$\frac{\partial v}{\partial t} = C_{vr} \frac{\partial^2 v}{\partial r^2}. \quad (5)$$

Полученное уравнение по своей форме аналогично известному [3] уравнению одномерной задачи уплотнения. Следовательно, рассматриваемая пространственная задача консолидации с помощью подстановки формулы (4) приводится к более простой – квазиодномерной.

Начальное и граничные условия с учётом выражения (4) запишутся:

$$v|_{t=0} = rp; \quad v|_{r=r_0} = 0; \quad v|_{r=R} = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (5) в общем случае, когда $v|_{t=0} = \varphi(r)$, имеет вид [4]:

$$v_{r,t} = \frac{2}{R-r_0} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \sin \alpha(r-r_0) \exp(-\alpha^2 C_{vr} t) \int_{r_0}^R \varphi(r) \sin \alpha(r-r_0) dr, \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{\pi n}{R-r_0}$.

Для рассматриваемого случая, когда $v|_{t=0} = r$ (при $p=1$), с помощью подстановки $y = r - r_0$ получим следующее решение интеграла в выражении (7):

$$\int_{r_0}^R r \sin \alpha(r-r_0) dr = \frac{1}{\alpha^2} [\sin \alpha(R-r_0) - \alpha(R-r) \cos \alpha(R-r_0)] + \frac{r_0}{\alpha} [1 - \cos \alpha(R-r_0)]. \quad (8)$$

Выражение для определения избыточного давления $v_{r,t}$ в поровой воде в точке r грунтовой полусферы в любой момент времени t с учётом формулы (8) имеет вид

$$v_{r,t} = \frac{2p}{R-r_0} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \sin \alpha(r-r_0) \exp(-\alpha^2 C_{vr} t) \beta, \quad (9)$$

где

$$\beta = \frac{1}{\alpha^2} [\sin \alpha(R-r_0) - \alpha(R-r_0) \cos \alpha(R-r_0)] + \frac{r_0}{\alpha} [1 - \cos \alpha(R-r_0)]. \quad (10)$$

Для практических расчётов уплотнения удобнее пользоваться выражением для определения средней степени консолидации всего слоя слабого грунта мощностью H_2 , которое в рассматриваемом случае имеет вид

$$Q_t^{H_2} = 1 - \frac{4}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\gamma [1 - \cos \alpha(R-r_0)]}{n^3} \exp(-\alpha^2 C_{vr} t), \quad (11)$$

где $\gamma = \beta \alpha^2$.

Анализ сходимости ряда в выражении (10) показывает, что для практических расчётов можно ограничиться первым его членом. Формула для определения средней степени консолидации нижнего (поддренного) слоя слабого грунта при этом принимает более простой вид:

$$Q_t^{H_2} = 1 - A \exp(-at) = 1 - A \exp(-\pi^2 T_{vr}), \quad (12)$$

где

$$A = \frac{8}{\pi^2} \frac{R+r_0}{R-r_0}; \quad (13)$$

$$C_{vr} = \frac{C_v + C_r}{2}, \quad (14)$$

где C_v и C_r - соответственно коэффициенты консолидации при вертикальном и радиальном направлениях фильтрации поровой воды;

$$a = \frac{\pi^2}{(R - r_0)^2} C_{vr} = \pi^2 T_{vr}, \quad (15)$$

где фактор времени T_{vr} определяется по формуле:

$$T_{vr} = \frac{C_{vr}}{(R - r_0)^2} t, \quad (16)$$

Приведенное выше решение получено в предположении, что уплотняющая нагрузка приложена мгновенно.

Из формулы (12) следует, что степень консолидации $Q_t^{H_2}$ может быть представлена в виде функции трёх безразмерных параметров: m, n и T_{vr} . С использованием формулы для определения фактора времени, полученной из выражения (12), в виде

$$T_{vr} = -\frac{\ln\left(\frac{1 - Q_t^{H_2}}{A}\right)}{\pi^2} \quad (17)$$

были выполнены расчёты 25 примеров консолидации слоя H_2 при следующих значениях параметров: $m = 4, 6, 8, 10$ и 20 и $n = 4, 5, 6, 7$ и 8 . По полученным результатам расчёта консолидации построены графики зависимости $Q_t^{H_2} = f(m, n, T_{vr})$.

Расчёты консолидации слоя H_2 указанных примеров с применением формулы (17) производились в табличной форме.

Анализ результатов выполненных расчётов примеров консолидации нижнего слоя (под дренами) слабого грунта при нижней водопроницаемой границе показывает, что в данном случае уплотнение происходит в основном за счёт отжатия поровой воды вниз, т.е. в подстилаемый дренирующий слой грунта. Об этом свидетельствует тот факт, что расстояние между висячими дренами, характеризующее величиной параметра n в интервале от 4,0 до 8,0, практически не влияет на величины фактора времени T_{vr} , соответствующие одному и тому же значению степени консолидации $Q_t^{H_2}$ для данного параметра m .

Ниже, в таблице 1, в качестве примера приведены значения фактора времени T_{vr} в зависимости от задаваемых величин степени консолидации $Q_t^{H_2}$, полученных по формуле (17) при $m = 4,0$, что соответствует мощности нижнего слоя грунта.

$$H_2 = m \cdot d_{op} = 4,0 \cdot 0,5 = 2,0 \text{ м.}$$

Таблица 1.

$Q_t^{H_2}$	$T_{vr} = -\frac{\ln\left(\frac{1-Q_t^{H_2}}{A}\right)}{\pi^2}$				
	$n = 4,0$	$n = 5,0$	$n = 6,0$	$n = 7,0$	$n = 8,0$
0,1	0,025	0,020	0,016	0,014	0,012
0,2	0,037	0,031	0,029	0,026	0,024
0,3	0,049	0,045	0,042	0,039	0,037
0,4	0,066	0,061	0,057	0,054	0,053
0,5	0,085	0,079	0,076	0,073	0,072
0,6	0,106	0,100	0,098	0,095	0,093
0,7	0,136	0,130	0,128	0,125	0,121
0,8	0,179	0,173	0,168	0,165	0,163
0,9	0,243	0,241	0,238	0,235	0,233

Аналогичная картина наблюдается и во всех остальных расчётах при $m = 6,0$; $8,0$ и $20,0$, что позволяет для практического использования рекомендовать только один график зависимости $Q_t^{H_2} = f(m)$ для всех значений параметра n в интервале от $4,0$ до $8,0$ (рис. 2).

Для оценки результатов, получаемых с применением полученного решения были выполнены сравнительные расчёты консолидации одного и того же илистого основания мощностью $H = 20,0$ м с вертикальными песчаными дренами диаметром $d_{op} = 0,45$ м, длиной $H_{op} = 15,0$ м, устроенными по квадратной в плане сетке с шагом $l_{op} = 2,5$ м, при водоупорном подстилающем слое и дренирующем. Как видно из графиков на рис. 3, время достижения требуемой средней степени консолидации всего илистого основания $Q_{mp}^H = 0,75$ ($S_{mp}^H = 150$ см) при односторонней фильтрации составляет $t_{op1} = 8$ мес., а при двухсторонней - $t_{op2} = 3,7$ мес., что в $2,16$ раза меньше.

Выводы.

1. Предложен инженерный метод расчёта консолидации оснований портовых сооружений с несовершенными песчаными дренами для случая, когда уплотняемая толща слабого грунта подстилается дренирующим слоем.

2. Наличие дренирующего слоя приводит к существенному сокращению времени достижения требуемой средней степени консолидации всего слабого основания.

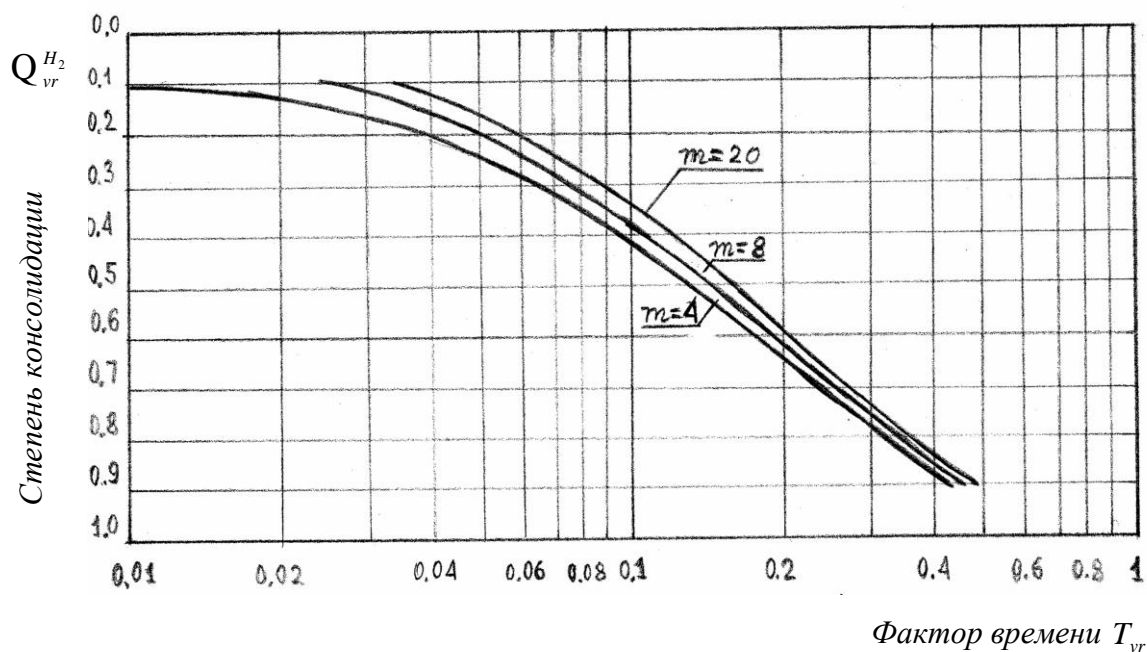


Рис. 2. Графики зависимости $Q_{vr}^{H_2} = f(m, T_{vr})$.

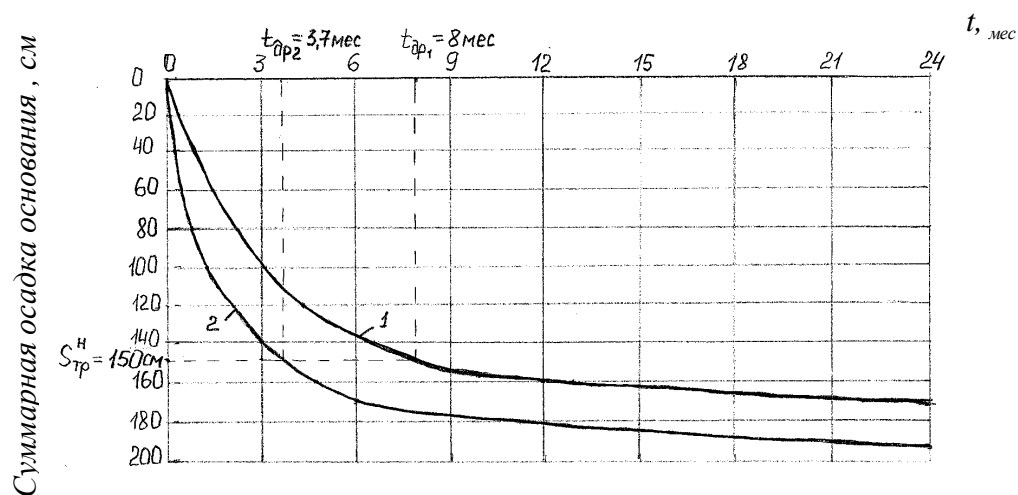


Рис. 3. Кривые консолидации однородного илистого основания: 1- при односторонней фильтрации; 2- при двухсторонней фильтрации

ЛИТЕРАТУРА.

1. Марченко А.С., Посуховский А.К., Школа А.В. Расчёт уплотнения слабых глинистых оснований при устройстве висячих песчаных дрен. В кн.: Портовое гидротехническое строительство, вып.36. М., Транспорт, 1974, с. 95-101.
2. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики. М., Наука, 1964. 286с.
3. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 2. М.-Л., Госстройиздат, 1961, 543с.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., Наука, 735с.