

НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОСНОВАНИЙ ПОРТОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Посуховский А.К., Мосичева И.И.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

АННОТАЦІЯ: Розглянуто одномірне завдання консолідації двошарової основи, де верхній шар практично нестискуваний, з обмеженою водопроникністю. Наведено отримані авторами рішення даного завдання для випадків односторонньої і двосторонньої фільтрації парової води.

АННОТАЦИЯ: Рассмотрена одномерная задача консолидации двухслойного основания, где верхний слой практически несжимаемый с ограниченной водопроницаемостью. Приведены полученные авторами решения данной задачи для случаев односторонней и двусторонней фильтрации поровой воды.

ABSTRACT: The one-dimensional problem of consolidation of a two-layer base, where the top layer is practically incompressible with limited permeability, is considered. The author's solutions to this problem for the cases of one-way and two-way steam water filtration are presented.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: консолидация, фильтрация, дренирование.

В практике морского портового гидротехнического строительства достаточно часто грунтовые условия характеризуются мощным слоем морских илов, перекрываемым или подстилаемым слоем достаточно прочного глинистого грунта с ограниченной водопроницаемостью.

В расчетном отношении приведенные случаи уплотнения слоя слабого грунта приводятся к частным условиям деформирования, которые можно рассматривать в рамках одномерной задачи консолидации двухслойного основания. При этом слой слабого грунта мощностью H_1 (см. рис. 1) консолидируется, а слой прочного грунта мощностью H_2 принимается практически несжимаемым при заданной на поверхности нагрузке p . Из [1-3] следует, что данная задача ранее не рассматривалась.

Решения указанных частных случаев одномерной задачи консолидации получены в результате совместного рассмотрения системы двух дифференциальных уравнений [4], описывающих закономерности изменения избыточного порового давления u_1 и u_2 в слоях мощностями H_1 и H_2 , соответственно:

$$C_{v_1} \frac{\partial^2 u_1}{\partial z_1^2} = \frac{\partial u_1}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial z_2^2} = 0 \quad (2)$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$\text{при } t = 0 \text{ и } 0 \leq z_1 \leq H_1 \quad u_1 = p \quad (3)$$

$$\text{при } z_2 = 0 \text{ и } 0 \leq t \leq \infty \quad u_2 = 0 \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } z_2 = 0 \\ \text{и } 0 \leq t \leq \infty \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{\partial u_1}{\partial z_1} = 0 \\ u_1 = 0 \end{array} \quad \begin{array}{l} (5, \text{ а}) \\ (5, \text{ б}) \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } z_2 = H_2 \\ \text{при } z_1 = H_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} u_2 = u_1 \\ k_{\delta_1} \frac{\partial u_1}{\partial z_1} = -k_{\delta_2} \frac{\partial u_2}{\partial z_2} \end{array} \quad \begin{array}{l} (6) \\ (7) \end{array}$$

В выражениях (1) и (7) C_{v_1} , k_{δ_1} и k_{δ_2} – коэффициенты консолидации и фильтрации слоев H_1 и H_2 , соответственно.

Условия (5, а) и (5, б) относятся к случаям одно- и двусторонней вертикальной фильтрации поровой воды. Далее индексами «а» и «б» обозначены описанные выше случаи. Остальные обозначения приняты в соответствии с рис. 1, а и 1, б.

Решения системы уравнений (1) – (2) представляются в следующем виде [5]:

$$u(z_1) = 2p \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \cdot \cos\left(\gamma_n \frac{z_1}{H_1}\right) \exp(-\gamma_n^2 \cdot T_{v_1}) \quad (8, \text{ а})$$

$$u(z_1) = 2p \sum_{n=1}^{\infty} \beta'_n \cdot \sin\left(\gamma_n \frac{z_1}{H_1}\right) \exp(-\gamma_n^2 \cdot T_{v_1}) \quad (8, б)$$

$$u(z_2) = \alpha z_2 \quad (9, а)$$

$$u(z_2) = \alpha' z_2 \quad (9, б)$$

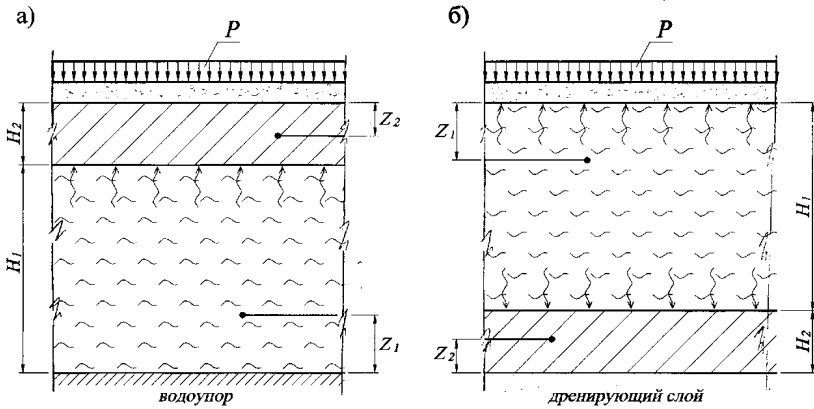


Рис. 1. Расчетные схемы.

После подстановки значений β_n , β'_n , α и α' , определенных из начальных (3) и граничных (6) условий, в (8) и (9) получим следующие выражения для определения величин порового давления в сжимаемом слое $u(z_1)$ и несжимаемом слое $u(z_2)$:

$$u(z_1) = 2p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_n \cdot \cos\left(\gamma_n \frac{z_1}{H_1}\right)}{\gamma_n + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_n} \exp(-\gamma_n^2 \cdot T_{v_1}) \quad (10, а)$$

$$u(z_1) = 2p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos \gamma'_n) \cdot \sin \left(\gamma'_n \frac{z_1}{H_1} \right)}{\gamma'_n - \frac{1}{2} \sin 2\gamma'_n} \exp(-(\gamma'_n)^2 \cdot T_{v_1}) \quad (10, \text{б})$$

$$u(z_2) = 2p \frac{z_2}{H_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_n \cdot \cos \gamma_n}{\gamma_n + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_n} \exp(-\gamma_n^2 \cdot T_{v_1}) \quad (11, \text{а})$$

$$u(z_2) = 2p \frac{z_2}{H_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos \gamma'_n) \cdot \sin \gamma'_n}{\gamma'_n - \frac{1}{2} \sin 2\gamma'_n} \exp(-(\gamma'_n)^2 \cdot T_{v_1}) \quad (11, \text{б})$$

В приведенных выше выражениях значения γ_n и γ'_n определяются как корни следующих уравнений:

$$\gamma_n \cdot \operatorname{tg} \gamma_n = R \quad (12, \text{а})$$

$$\gamma'_n \cdot \operatorname{ctg} \gamma'_n = R', \quad (12, \text{б})$$

где

$$R = \frac{H_1 / H_2}{k_{\delta_1} / k_{\delta_2}} \quad (13, \text{а})$$

$$R' = -R \quad (13, \text{б})$$

Как следует из выражений (13, а) и (13, б), влияние несжимаемого слоя H_2 характеризуется величиной параметров R и R' . При отсутствии несжимаемого слоя (т.е. при $H_2 = 0$, следовательно, $R(R') = \pm \infty$) выражения (10, а) и (10, б) обращаются в известные [6] решения одномерной задачи фильтрационной теории консолидации однородного слоя грунта H_1 при одно- и двусторонней фильтрации поровой воды.

Для практических целей при расчетах консолидации слабых оснований удобнее пользоваться величиной средней степени консолидации \bar{Q}_{t_1} всего слоя слабого грунта мощностью H_1 , представляющей собой отношение среднего эффективного напряжения $\bar{\sigma}_{y\delta_1}$ в этом слое к полному внешнему давлению p в любой момент времени t т.е.:

$$\bar{Q}_{t_1} = \frac{\bar{\sigma}_{y\delta_1}}{p} = 1 - \frac{\bar{u}_{t_1}}{p}, \quad (14)$$

где \bar{u}_{t_1} - среднее значение порового давления в слое слабого грунта в момент времени t , равное

$$\bar{u}_{t_1} = \frac{1}{pH_1} \int_0^{H_1} u(z_1) dz_1 \quad (15)$$

Выражения для определения величины средней степени консолидации сжимаемого слоя грунта H_1 для случаев (а) и (б), с учетом (10, а) и (10, б), имеют следующий вид:

$$\bar{Q}_{t_1} = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \gamma_n}{\gamma_n \left(\gamma_n + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_n \right)} \exp(-\gamma_n^2 \cdot T_{v_1}) \quad (16, а)$$

$$\bar{Q}_{t_1} = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos \gamma'_n)^2}{\gamma'_n \left(\gamma'_n - \frac{1}{2} \sin 2\gamma'_n \right)} \exp(-(\gamma'_n)^2 \cdot T_{v_1}) \quad (16, б)$$

При значениях параметров $0,1 < R < 2,0$ и $-2,0 < R' < -0,5$ в выражениях (16, а) и (16, б) можно ограничиться удержанием лишь первого члена ряда, т.е:

$$\bar{Q}_{t_1} = 1 - 2 \frac{\sin^2 \gamma_1}{\gamma_1 \left(\gamma_1 + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_1 \right)} \exp(-\gamma_1^2 \cdot T_{v_1}) \quad (17, а)$$

$$\bar{Q}_i = 1 - 2 \frac{(1 - \cos \gamma'_1)^2}{\gamma'_1 \left(\gamma'_1 - \frac{1}{2} \sin 2\gamma'_1 \right)} \exp(-(\gamma'_1)^2 \cdot T_{v_i}) \quad (17, б)$$

где γ_1 и γ'_1 – первые корни уравнений (12, а) и (12, б), соответственно.

Указанные пределы изменения значений параметров R и R' соответствуют следующим часто встречающимся на практике условиям:

а) $H_1 / H_2 = (1,0 \div 5,0)$;

б) $k_{\delta_1} / k_{\delta_2} = (10 \div 100)$.

Расчеты уплотнения слабых глинистых водонасыщенных оснований портовых территорий с использованием выражений (17, а) и (17, б) удобнее производить в обратной последовательности, т.е. задаваться величинами $\bar{Q}_i = 0,1; 0,2; 0,3; \dots 0,95$ и определять соответствующие им значения фактора времени T_{v_i} по следующим формулам:

$$T_{v_i} = -\frac{1}{\gamma_1^2} \ln \left[(1 - \bar{Q}_i) \frac{\gamma_1 \left(\gamma_1 + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_1 \right)}{2 \sin^2 \gamma_1} \right] \quad (18, а)$$

$$T_{v_i} = -\frac{1}{(\gamma'_1)^2} \ln \left[(1 - \bar{Q}_i) \frac{\gamma'_1 \left(\gamma'_1 - \frac{1}{2} \sin 2\gamma'_1 \right)}{(1 - \cos \gamma'_1)^2} \right] \quad (18, б)$$

Далее по вычисленным значениям T_{v_i} определяется соответствующее им время t_1 достижения задаваемых величин средней степени консолидации слоя слабого грунта H_I по формуле:

$$t_1 = \frac{H_1^2}{C_{v_i}} \cdot T_{v_i} \quad (19)$$

Ниже, с целью иллюстрации изложенной методики, приведен пример расчёта уплотнения слоя ила суглинистого мощностью $H_1 = 5,0$ м, перекрытого слоем глины толщиной $H_2 = 1,0$ м, при следующих исходных данных:

$$k_{\delta_1} = 5,0 \times 10^{-5} \text{ см/с}; \quad k_{\delta_2} = 5,0 \times 10^{-7} \text{ см/с}; \quad \tilde{N}_{v_1} = 7,36 \times 10^4 \text{ см}^2/\text{год};$$

$$\gamma_1 \left(\gamma_1 + \frac{1}{2} \sin 2\gamma_1 \right)$$

$$p = 0,5 \text{ кгс/см}^2; \quad R = 0,05; \quad \gamma_1 = 0,218 \text{ рад (12,5}^{\circ}); \quad A = \frac{2 \sin^2 \gamma_1}{\gamma_1} = 1,01.$$

Вычисления по формулам (17, а), (18, а) и (19) производим в табличной форме:

\bar{Q}_t	$\ln[(1 - \bar{Q}_t) \cdot A]$	$T_{v_1} = -\frac{1}{\gamma_1^2} \ln[(1 - \bar{Q}_t) \cdot A]$	$t_1 = \frac{H_1^2}{C_{v_1}} \cdot T_{v_1}$, лет
0,1	- 0,105	2,22	7,50
0,2	- 0,223	4,70	16,0
0,3	- 0,357	7,51	25,5
0,4	- 0,511	10,75	36,5
0,5	- 0,693	14,59	49,6
0,6	- 0,916	19,29	65,6
0,7	- 1,204	25,34	86,1
0,8	- 1,609	33,88	115,2
0,9	- 2,303	48,47	164,8
0,95	- 2,996	63,06	214,4

Результаты выполненного примера расчета приведены на рис. 2 в виде графика зависимости средней степени консолидации слоя ила суглинистого мощностью $H_1 = 5,0$ м от времени t (кривая 1). На этом же рисунке для сравнения приведен такой же график (кривая 2) при отсутствии слоя глины (т.е. при $H_2 = 0$).

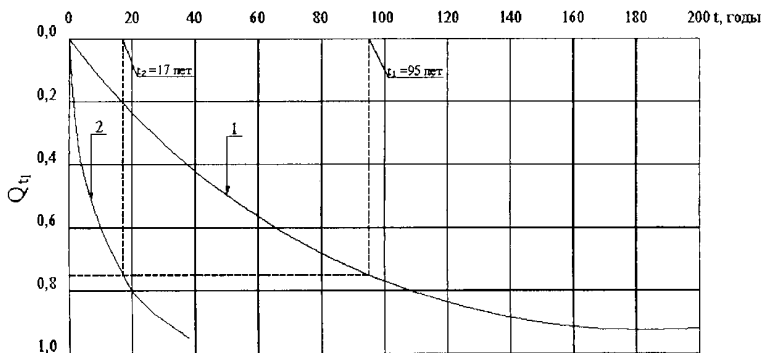


Рис. 2. Графики консолидации слоя ила суглинистого $H_1 = 5,0$ м.

Как видно из указанного рисунка, достижение одного и того же значения средней степени консолидации (например, равного 0,75) слоя слабого грунта в условиях свободного его дренирования в одном направлении (снизу вверх) происходит примерно в 6 раз быстрее, чем при наличии над ним препятствия в виде слоя глины толщиной $H_2 = 1,0$ м с коэффициентом фильтрации k_{σ_2} в 100 раз меньше коэффициента фильтрации k_{σ_1} консолидируемого грунта.

В заключение следует отметить, что, как показали выполненные по специально составленной программе расчеты примеров на ПК при различных значениях параметров R и R' , наличие несжимаемого слоя грунта H_2 над сжимаемым слоем H_1 следует учитывать при $[R] \geq 100$, а при $[R] \leq 0,05$ – фильтрацией поровой воды сквозь слой H_2 можно пренебречь, т.е. расчет консолидации слоя H_1 можно не производить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абелев М.Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания как основания сооружений / Абелев М.Ю. – М.: Стройиздат, 1973. - 288 с.
2. Марченко А.С. Морские портовые сооружения на слабых грунтах / Марченко А.С. – М.: «Транспорт», 1976. - 192 с.
3. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / Абелев М.Ю. – М.: Стройиздат, 1983. - 248 с.
4. Флорин В.А. Основы механики грунтов / Флорин В.А. – Т. 2., М.-Л.: Госстройиздат, 1961. - 543 с.
5. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики / Араманович И.Г., Левин В.И. – М.: Наука, 1964. - 286 с.
6. Терцаги К. Теория механики грунтов / Терцаги К. – М.: Госстройиздат, 1961. - 507 с.