

РАСЧЕТЫ СУФФОЗИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВ

Рассмотрены структура и фазовый состав многокомпонентных засоленных грунтов. Описаны процессы диффузии и массообмена, а также их природа. Приведены методики расчета диффузионных деформаций грунтов, учитывающие фильтрационные процессы рассоления различных по составу грунтов. Показано, что существующие методики справедливы лишь для однородных структур грунтов и не позволяют прогнозировать их напряженно-деформированное состояние во времени.

Ключевые слова: засоленный грунт, фильтрация, диффузия, массообмен, суффозия, напряженно-деформированное состояние, деформация.

Засоленные грунты представляют собой сложную природную многокомпонентную систему, содержащую нерастворимые минеральные частицы, воду в связанной и гравитационной формах, растворимые соли в твердой и жидкой фазах, газообразные включения. Со структурной точки зрения нерастворимые минеральные частицы, связанная влага и основная часть солей в твердом состоянии объединены связями жесткого типа в единый скелет, ведущий себя по отношению к внешней нагрузке как твердое тело. Заполняющая поровое пространство свободная вода с растворенными в ней солями и пузырьками воздуха по свойствам вполне аналогична слабосвязной мало-сжимаемой жидкости и практически не сопротивляется сдвигающим усилиям.

Фильтрация свободной поровой влаги возникает под действием силы тяжести и градиента порового давления, которое может изменяться в процессе деформирования массива грунта в основаниях сооружений за счет восприятия и перераспределения поровой водой части приложенной внешней нагрузки. Скорость и режим фильтрации определяются взаимодействием воды со скелетом грунта. В засоленных грунтах движение поровой воды обуславливает дополнительно изменение концентрации солевой компоненты в каждой фиксированной точке массива, что в свою очередь влияет на интенсивность процессов массообмена.

Относительное содержание компонент в единице объема засоленного грунта меняется также в результате процессов диффузии, которая при наличии фильтрационного движения поровой воды обусловлена как обычным механизмом молекулярного переноса за счет градиента концентрации, так и дополнительным, конвективным – за счет хаотичности структуры порового пространства и несовпадения скоростей отдельных жидких частиц со средней скоростью потока по величине и направлению.

Процессы массообмена между компонентами засоленного грунта могут быть разделены по своей природе [1] на физико-химические (растворение и кристаллизация солей и других соединений, адсорбция и десорбция) и физико-механические (коагуляция и пептизация коллоидов, кольмата-

ция и эрозия). Интенсивность процессов первого типа определяется прежде всего концентрацией солей в поровом растворе, отнесенной к концентрации предельного насыщения, тогда как для процессов второго типа основными являются такие параметры, как скорость фильтрации, силы внутренней адгезии, размер грунтовых частиц.

Влияние процессов массообмена на поведение засоленных грунтов в основаниях зданий и сооружений сказывается в следующих основных формах: изменение пористости, переукладка частиц скелета и связанная с этим дополнительная суффозионная деформация при растворении и десорбции твердых солей; изменение параметров уравнения состояния скелета, его прочностных и деформационных характеристик в зависимости от относительного содержания твердых солей в грунте; изменение фильтрационно-диффузионных параметров в связи с изменением пористости, а также плотности и вязкости поровой воды.

Вопросы массопереноса и массообмена в засоленных грунтах в связи с задачами прогноза гидрхимического режима грунтов и грунтовых вод в естественных условиях, при орошении и осушении подробно изучались в работах С.Ф. Аверьянова, Н.Х. Арутюняна, Н.Н. Веригина, Л. Гелхара, Н.К. Гирина, М. Колзина, А. Нерста, А. Огаты, П.Я. Полубариновой-Кочинной, А.Н. Патрашева, С. Сузуки, Ж. Тейлора, А. Шейдеггера и др. Выведены общие уравнения фильтрационно-конвективной диффузии с учетом массообмена и построен ряд аналитических решений при различных упрощающих предположениях.

В природе характер засоления грунтов является весьма разнообразным. Н.Н. Веригин выделяет два типа засоления грунтов. Часть растворимого вещества может располагаться на поверхности пор нерастворимого материала в виде пленок, причем, распределение этих пленок может быть сплошным или дискретным. Такой тип засоления называется поверхностным пленочным. Другая часть растворимого вещества может быть дисперсно рассеяна в массе нерастворимого материала в виде отдельных частиц. Причем, это рассеяние также может быть непрерывным или дискретным. Этот тип засоления грунтов назван объ-

* - автор, с которым следует вести переписку.

емным (дисперсным). В большинстве случаев, представляющих практический интерес, в грунтах преобладает либо первый, либо второй тип засоления.

По мнению Н.Н. Веригина [1, 2], процесс растворения и выноса солей состоит из двух стадий. В начальный момент фильтрации при входе воды в грунт не происходит полного растворения и выноса солей. В последующей стадии в той части грунта, где началась фильтрация, все водорастворимые соли оказываются растворенными и вынесенными. Таким образом, первая стадия характеризуется отсутствием зоны полного рассоления, а вторая – наличием этой зоны.

С течением времени зона полного рассоления постепенно перемещается вдоль направления движения потока. Ниже от границ полного рассоления происходит постепенное насыщение фильтрата и, следовательно, возрастает засоленность грунта до естественного значения.

Такая особенность кинетики растворения и выноса солей подтверждена в лабораторных экспериментах А.Е. Орадовской [3].

М.Н. Терлецкая [4] предложила зависимость для определения длительности выщелачивания гипсов из грунтов. В основу вывода были положены следующие допущения:

- в процессе рассоления в грунте образуются два слоя, первый у входа потока, полностью обессоленный, второй совсем не обессоленный;
- вода, фильтрующаяся через засоленный грунт, насыщается солями до предельной концентрации;
- фильтрующий поток в процессе суффозии не претерпевает разрыва сплошности.

На основе этой схемы для определения длительности рассоления загипсованного грунта в случае фильтрации воды через грунт со свободным оттоком М.Н. Терлецкая получила формулу

$$t_0 = \frac{Q}{\omega \cdot H} \left[\frac{l}{k^0} + \frac{c \cdot Q}{2 \cdot P_0 \cdot \omega} \left(\frac{1}{k^1} - \frac{1}{k^0} \right) \right], \quad (1)$$

в случае фильтрации воды при неоднородном сложении толщи – формулу

$$t_0 = \frac{Q}{\omega \cdot H} \left[\frac{l}{k^0} + \frac{l_1}{k_1} + \frac{c \cdot Q}{2 \cdot P_0 \cdot \omega} \left(\frac{1}{k^1} - \frac{1}{k^0} \right) \right], \quad (2)$$

а для случая фильтрации в бесконечность, когда расход практически постоянен, – формулу

$$t_0 = \frac{\rho_d^{\alpha} l}{100 \cdot c \cdot k^0 \cdot J} = \frac{\rho_d^{\alpha \beta}}{100} \cdot \frac{1}{0,25 \cdot a \cdot k^0 \cdot c \cdot J} \cdot l, \quad (3)$$

где Q – количество воды, прошедшее за время t через сечение ω , л; H – действующий напор, дм; l – мощность толщи загипсованного грунта, м; l_1 – то же, не загипсованного грунта; k^0 – коэффициент фильтрации загипсованного грунта, дм/с; k^1 – то же, не загипсованного грунта; k^l – то же, по-

сле полного рассоления грунта; c – растворимость гипса, кг/м; P – вес гипса, содержащегося в единице объема грунта, кг/дм; J – градиент напора; a – коэффициент, характеризующий увеличение коэффициента фильтрации грунта при рассолении.

Формула (3) позволяет определить длительность процесса выщелачивания до момента начала механической суффозии. Поэтому она скорректирована параметром степени рассоления β и множителем a , учитывающим возможное изменение начального коэффициента фильтрации K . Однако необходимо отметить, что формула применима для однослойного равномерно загипсованного грунта.

Н.Н. Веригин и А.Е. Орадовская установили, что при фильтрации воды, способной растворять гипс (т. е., при концентрации CaSO в воде на участке ее входа в загипсованный грунт C_0 меньше концентрации насыщения фильтрующей воды гипсом C_m), в этих грунтах образуются сначала две (рис. 1а), а затем три зоны (рис. 1б):

зона А, расположенная со стороны входного сечения и охватывающая участок уже выщелоченного грунта; здесь $\xi = 0$ и $C = C_0$;

зона В – активная зона, в пределах которой происходят растворение и вынос гипса из грунта и постепенное насыщение фильтрующейся воды гипсом; здесь увеличивается от 0 на границе с зоной А до в конце зоны В ($0 \leq \xi < \xi_0$), а C увеличивается в этих же границах от C_0 до C_m ($C_0 < C < C_m$); зона С охватывает участок невыщелоченной породы, в которой происходит фильтрационный поток, практически лишенный растворяющей способности, т. е. $C \approx C_m$ и $\xi = \xi_0$.

Н.Н. Веригин [1] теоретически рассмотрел закономерности развития этих зон и получил формулы, описывающие процесс выщелачивания солей из грунта. В частности, количественные закономерности распределения солей в зоне В на любой момент времени описываются формулой

$$\xi = \xi_0 \cdot t \cdot h^2 \cdot \left[r \cdot x + A \cdot r \cdot t \cdot h \cdot (1 - P \cdot t) \right], \quad (4)$$

здесь

$$r = \frac{\gamma \cdot \sqrt{\xi_0}}{2 \cdot V}, \quad (5)$$

$$P = \frac{\gamma}{2 \cdot P_q \cdot \sqrt{\xi}} \cdot (C_m - C_0), \quad (6)$$

где v – скорость фильтрации, см/сут, γ – обобщенный коэффициент выщелачивания, c^{-1} .

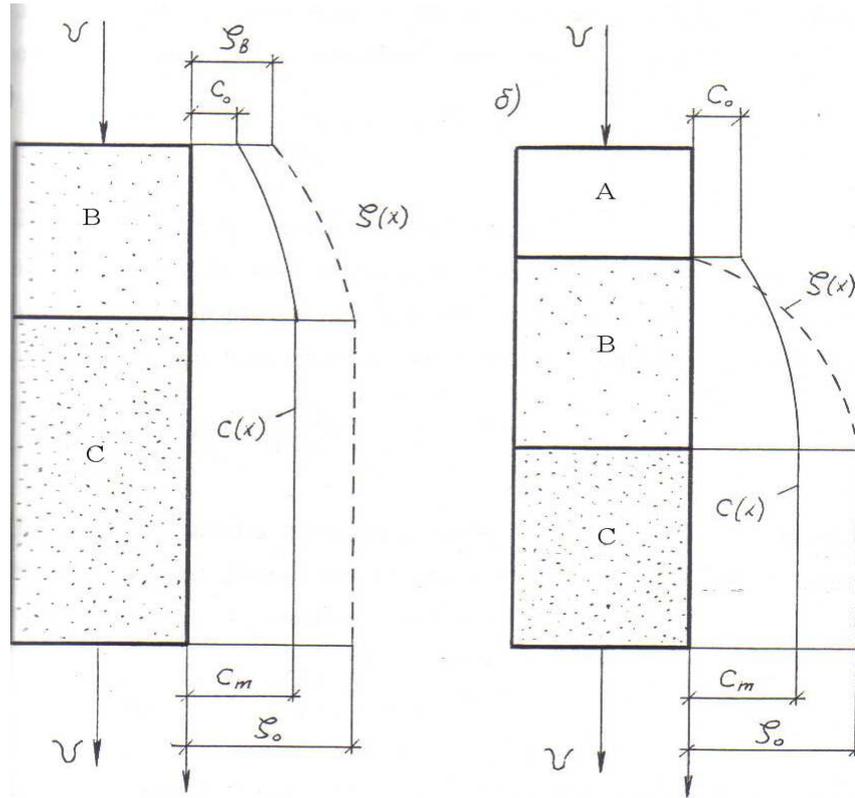


Рис. 1. Формирование зон при фильтрационном расселении загипсованного грунта

Для второй стадии Н.Н. Веригин получил формулу, описывающую скорость передвижения границы полного выщелачивания:

$$a = \frac{(C_m - C_o) \cdot V}{\rho_{sq} \cdot \xi_o}, \quad (7)$$

где ρ_{sq} – плотность частиц гипса, г/см.

А.Е. Орадовская на основании опытов с искусственно засоленными песками уточнила формулу для расчета длительности полного растворения и вымывания гипса при фильтрации воды в основании сооружений:

$$t_B = 0,79 \cdot \frac{\rho_{sq} \cdot \xi_o \cdot B^2}{(C_m - C_o) \cdot k \cdot H} \cdot M_B + T_B, \quad (8)$$

где B – полная длина фильтрационного потока; M_B – коэффициент, зависящий от схемы фильтрационного потока; T_B – период выщелачивания гипса во входном сечении

$$T_B = 1,78 \cdot \frac{\rho_{sq} \cdot \sqrt{\xi_o}}{\gamma \cdot (C_m - C_o)}. \quad (9)$$

Длину активной зоны x_B А.Е. Орадовская определяет по формуле

$$x_B = 5,18 \cdot \frac{V}{\gamma \cdot \sqrt{\xi_o}}. \quad (10)$$

Таким образом, теоретические формулы были откорректированы путем введения в них эмпирических коэффициентов. Эксперименты выполнены А.Е. Орадовской и М.Н. Терлецкой в лабораторных условиях на небольших образцах нарушенной структуры или на больших монолитах естественного сложения. Кроме того, формула (8) позволяет рассчитать время полного расселения грунтового основания с одинаковыми значениями ξ_o и коэффициента фильтрации K по всему массиву грунта, что редко встречается на практике. Рекомендации А.Е. Орадовской об определении t раздельно для каждого слоя практически неосуществимы из-за неопределенностей в граничных условиях при переходе от одного слоя к другому.

В.П. Петрухин и С.В. Альперович [5] на основании проведенных полевых опытов сделали вывод о том, что в отличие от компрессионно-фильтрационных испытаний, где расселение происходит одновременно по всей высоте образца, в реальных условиях наблюдается зональное выщелачивание грунта с образованием зоны полного выщелачивания А и зоны выщелачивания В, в соответствии с положениями работ Н.Н. Веригина, А.Е. Орадовской, М.Н. Терлецкой.

Некоторое отличие, установленное в исследовании [5], состоит в том, что в пределах зоны А не достигается полного расселения грунта, как это получено в лабораторных экспериментах А.Е. Орадовской. Неполное расселение грунта было

установлено ими и по результатам компрессионно-фильтрационных испытаний, что необходимо учитывать при экспериментальном определении суффозионной сжимаемости грунтов и расчете деформаций основания.

Согласно теоретической формуле (1.5), изменение загипсованности в зоне В от $\xi' / \xi_o = 0$ на его верхней границе до $\xi' / \xi_o = 1$ на нижней должно происходить по криволинейному закону (9), тогда как в проведенных опытах это изменение получено прямолинейным. По всей вероятности, это связано с неравномерным распределением гипса и неоднородностью сложения загипсованного грунта.

Из результатов лабораторных исследований следует, что заметное ($\epsilon_{sf} > 0,001$) суффозионное сжатие большинства изученных суглинков происходит не сразу после начала выщелачивания, а при $\beta = 0,05$. Тогда сжимаемая зона, а следовательно и выщелачиваемая, могут быть ограничены условием $\xi = 0,95 \cdot \xi_o$. При этом полного выщелачивания гипса из грунта практически не происходит, а конечное значение β составляет примерно 0,85.

В результате этой коррекции В.П. Петрухин и С.В. Альперович рекомендуют расчеты проводить по следующим формулам:

длина зоны выщелачивания В на стадии формирования

$$x'_e = \frac{2 \cdot V}{\gamma \cdot \sqrt{\xi_o}} \cdot \left[2,15 - A \cdot r \cdot t \cdot h \cdot \left(1 - \frac{t}{t_o} \right) \right]; \quad (11)$$

длина полностью сформировавшейся зоны В

$$x_e = 4,3 \cdot \frac{V}{\gamma \cdot \sqrt{\xi_o}}; \quad (12)$$

период формирования зоны В

$$T'_e = 1,78 \cdot \frac{\rho_{sq} \cdot \sqrt{\xi_o}}{\gamma \cdot (C_m - C_o)}; \quad (13)$$

скорость перемещения границы выщелачивания

$$a = 1,45 \cdot \frac{(C_m - C_o) \cdot V}{\rho_{sq} \cdot \xi_o}; \quad (14)$$

длина зоны полного выщелачивания А

$$x_A = a \cdot (t - t_o). \quad (15)$$

Формулы (11) – (15) позволяют рассчитать степень расслоения грунтового массива при условии одномерного увлажнения. Формулы применимы для расчета массивов, имеющих достаточно равномерную загипсованность.

Методы расчета суффозионных деформаций загипсованных грунтов на основе закономерностей фильтрационного выщелачивания солей предложили Н.Н. Веригин, А.Е. Орадовская и М.Н. Терлецкая [1, 3, 4, 6].

В основе этих методов лежит принцип равенства относительного количества выщелоченных солей и относительной суффозионной осадки. Но, поскольку в большинстве случаев это равенство не соблюдается, можно согласиться с мнением Л.Н. Ломизе и Н.А. Клапатовской о том, что такая расчетная схема мало отвечает действительности. Признавая этот недостаток, А.Е. Орадовская рекомендует с целью учета влияния структуры и нагрузки корректировать расчетную схему данными лабораторных экспериментов.

А.Е. Орадовская высказала также предположение, что изменения физико-механических свойств засоленных грунтов, связанные с растворением и выносом солей, могут происходить только в пределах выщелоченной и активной зон А и В. Следовательно, суффозионная осадка засоленных грунтов должна происходить в пределах этих зон. Было предложено вначале вычислять по формуле (10) мощность L загипсованного грунта, выщелоченного за время t , а затем возможную величину суффозионных деформаций по формуле

$$S_{sf} = L \cdot \xi_o. \quad (16)$$

При наличии в грунтовой толще слоев с различными значениями и k^o расчет t_β рекомендуется проводить отдельно для каждого слоя. Однако в этом случае возникают те же трудности, что и при расчете по формуле (3).

Для определения абсолютной суффозионной осадки слоя лессовидного грунта, имеющего одинаковое содержание гипса в пределах всей толщины l , М.Н. Терлецкая предложила формулу

$$S_{sf} = \frac{P_o \cdot \rho_d^{Bl}}{100 \cdot P_q} = 0,0066 \cdot P_o \cdot \beta \cdot l. \quad (17)$$

Формула (17) также основана на принципе равенства относительной суффозионной осадки и относительного объема выщелоченного гипса. Кроме того, в ней не учитывается влияние давления на величину S_{sf} . Это ограничивает возможную область применения формулы.

А.А. Мустафаев [7] предложил определять суффозионную осадку исходя из нелинейной деформируемости засоленных грунтов во времени.

Расчет основан на связи процесса фильтрационного выщелачивания солей с развитием суффозионных деформаций грунта. Для вычисления конечной величины суффозионной осадки предложена формула

$$S_{sf} = \frac{a_o}{(1 + V_o)} \cdot A \left[(B + A \cdot h_s)^{l+V_o} - B^{l+V_o} \right], \quad (18)$$

где

$$A = \gamma_o - (\sigma_o - \gamma_o \cdot h \cdot f) \cdot (1 - a \cdot h_o) / h_o;$$

$B = \sigma_o - \bar{\sigma}_o$; a и V_o – параметры нелинейной деформируемости; h_s – глубина 1-й зоны (по А.А. Мустафаеву); h_f – глубина заложения фундамента; h_o – суммарная глубина 1-й и 2-й

зон (по А.А. Мустафаеву); γ_o – удельный вес грунта, кН/м³; σ_o – среднее давление по подошве фундамента, МПа; $\bar{\sigma}_o$ – уплотняющее давление, начиная с которого возникает суффозионная осадка, МПа.

Предложенные А.А. Мустафаевым параметры нелинейной деформируемости засоленных грунтов рекомендуется вычислять по результатам компрессионно-фильтрационных испытаний.

В заключение необходимо отметить следующее. Принятый подход к расчету осадки зданий и сооружений на засоленных грунтах основан, прежде всего, на экспериментальных данных. Согласно этому подходу, суммарная величина вертикальных деформаций основания, сложенного засоленными грунтами, складывается из осадки, вызванной уплотнением грунта от нагрузки, передаваемой фундаментами, и суффозионной осадки от нагрузки фундаментов и собственного веса грунта. При этом осадка уплотнения определяется, как для обычных незасоленных грунтов с использованием деформационных характеристик грунтов естественной влажности. Для определения суффозионной осадки толща грунта разбивается на слои, напряжения в которых рассчитываются исходя из обычной схемы линейно-деформируемого полупространства или слоя конечной толщины. Осадка каждого слоя определяется по результатам лабораторных компрессионных испытаний засоленного грунта с фильтрационным замачиванием под нагрузкой, соответствующей расчетному давлению в слоях массива, либо по результатам полевых испытаний статической нагрузкой (штампами) в условиях длительного замачивания.

Условность описанного подхода при определении конечной (стабилизированной) осадки сооружений связана с игнорированием в расчете реального гидрогеологического режима грунтов основания (кроме очевидных условностей при выборе схемы линейно-деформируемого полупространства), что приводит, по сути дела, к произвольному назначению степени выщелачивания грунта в каждой точке массива. При таком подходе просто невозможно рассчитать во времени из-

менение напряженно-деформируемого состояния грунтов массива.

К настоящему моменту в механике грунтов отсутствует строгая математическая постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии массива водонасыщенного засоленного грунта и изменении этого состояния во времени с учетом процессов массопереноса и массообмена между грунтовыми компонентами. Это сдерживает дальнейшее развитие методов расчета оснований, сложенных засоленными грунтами.

Литература

1. Веригин, Н. Н. О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах / Н. Н. Веригин // Растворение и выщелачивание горных пород. – М. : Госстройиздат, 1957. – С. 84-89.
2. Веригин, Н. Н. Методы лабораторного определения параметров диффузии и сорбции при фильтрации в пористых средах / Н. Н. Веригин, П. К. Голованова // Тр. ин-та / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ВОДГЕО. – 1971. – Вып. 29. – С. 28-34.
3. Орадовская, А. Е. Фильтрационное выщелачивание дисперснораспределенного гипса из песчано-глинистых пород / А. Е. Орадовская // Растворение и выщелачивание горных пород. – М.: Госстройиздат, 1957. – С. 46-70.
4. Терлецкая, М. Н. О прогнозе осадки гидротехнических сооружений на загипсованных грунтах / М. Н. Терлецкая // Гидротехническое строительство. – 1970. – № 12. – С. 29-30.
5. Петрухин, В. П. Строительство сооружений на засоленных грунтах / В. П. Петрухин. – М.: Стройиздат, 1989. – 262 с.
6. Веригин, Н. Н. Консолидация водонасыщенного грунта при действии внешней нагрузки, нормальной к границе полупространства / Н. Н. Веригин // VI Международный конгресс по механике грунтов и фундаментостроению : тез. докл. М., 1965. – С. 47-53.
7. Мустафаев, А. А. Деформации засоленных грунтов в основаниях сооружений / А. А. Мустафаев. – М.: Стройиздат, 1985. – 280 с.