УДК 624.159.1:556.34

ВЗАИМОСВЯЗЬ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МАСС ПОРОД С ИНФИЛЬТРАЦИЕЙ ВОДНОГО РАСТВОРА В ПРОЦЕССЕ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ

А. М. Самедов, докт. техн. наук, Е. В. Скобленко, студ. (НТУУ «КПИ»)

Дослідження дозволили встановити взаємозв’язок інфільтраційного потоку з в’язкопластичною течією масиву, прогнозувати процеси розрідження, опливання і зміни вологості масиву, що протікають при ін’єкційних роботах.

Ключові слова: волога, гірський масив, інфільтраційний потік, ін’єкційні роботи, розрідження.

Исследования позволили установить взаимосвязь инфильтрационного потока с вязкопластическим течением массива, прогнозировать протекающие процессы разжижения, оплывания и изменения влажности массива при инъекционных работах.

Ключевые слова: влажность, горный массив, инфильтрационный поток, инъекционные работы, разжижение.

Researches allowed establishing interrelation between the infiltration stream and viscoplastic flow of rock massif and predicting processes of thinning, sloughing and changes of massif humidity at injection works.

Key words: humidity, rock massif, infiltration stream, injection works, thinning.

В природных условиях у влажных грунтов отсутствует движение воды в порах грунта из-за силы притяжения твердых частиц, то есть имеющаяся вода в порах грунта играет роль адсорбционной (связной) или пленочной воды. Под действием молекулярной силы притяжения твердых частиц слой пленочной воды прочно прикрепляется к твердым частицам (давлением до 10 атм) и имеет определенную толщину (примерно 0,25–0,5 мкм). Эта вода при сжатии грунта мало отличается от твердых частиц и ведет себя как твердые тела. С удалением от поверхности твердых частиц связная вода переходит в диффузионную воду. Катионы, расположенные в диффузионной пленке, совместно с отрицательными молекулярными силами притяжения твердых частиц создают двухслойные электрические или термодинамические потенциалы. Наибольшие термодинамические потенциалы образуются в неподвижных анионах твердых частиц грунта. Электрические потенциалы, уменьшаясь на границе диффузионного слоя, постепенно становятся равными кинетическому потенциалу. С возрастанием кинетического потенциала увеличивается толщина диффузионного водяного слоя. Связная (пленочная) вода даже при высоком градиенте давлений не может свободно двигаться в массиве грунта.

Каждая минеральная частица грунта благодаря своей собственной электромолекулярной силе притяжения может сосредотачивать вокруг себя частицы определенной максимальной толщины пленочной и диффузионной воды. Такой максимальной толщине водяного слоя, при которой не изменяются свойства твердых частиц, соответствует максимальная молекулярная влагоемкость грунта. Максимальная молекулярная влагоемкость W_m зависит от удельной поверхности твердых частиц. Например, для песчаных грунтов W_m = 2–3 %, для супесей, суглинков и лессовых грунтов W_m = 15–18 %. Динамические воздействия и инфильтрационные потоки могут оторвать часть диффузионной воды от диффузионной пленки (оболочки), заставить ее двигаться в порах и действовать как свободная, гравитационная вода, которая движется от большего напора к меньшему.

При отсутствии движения воды в порах грунта ее воздействие на скелет грунта ограничивается направленными снизу вверх силами взвешивания. Если же под действием разности напоров (например, в случае инъекции жидкого раствора в массив грунта) вода движется, то вследствие этого возникают дополнительные силы взаимодействия между движущейся водой и частицами грунта. Дополнительное воздействие потока воды на частицы грунта складывается из силы трения воды о поверхность частиц и силы фильтрационного давления, нормального к поверхности частиц. Элементарные фильтрационные силы от инфильтрационных потоков распределены по всему объему массива грунта, поэтому их можно рассматривать как объемную силу, а интенсивность этой силы – как произведение объемного веса воды на градиент напора.

Наличие направленной вертикально вверх фильтрационной силы вызывает дополнительное взвешивание частиц грунта, приводящее к уменьшению сопротивления грунта сдвигу, разжижению, оплыванию и переходу к упруго-вязкопластическому или текучему состоянию.

Рассмотрим увлажнение толщи многослойного грунтового массива с непрерывным замачиванием при нагнетании жидкого мелкодисперсного цементного раствора для изготовления буро-инъекционных свай. Жидкий цементный раствор не успевает твердеть и определенное количество воды под напором просачивается в грунтовой массив и резко изменяет его состояние.

Нагнетание жидкого раствора осуществляется под высоким давлением, что создает инфильтрационные потоки по всей глубине буро-инъекционных свай. Естественная влажность W_0 грунта в условиях инфильтрации изменяется на W. Рассмотрим этот процесс как одномерную задачу по увлажнению. Тогда уравнение движения влаги в грунтовом массиве будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \theta \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}. \qquad (1)$$

При инфильтрации влажность грунта изменяется до максимальной молекулярной влагоемкости и водонасыщенности. Поэтому для уравнения (1) применим задачу Коши о распределении влажности на полубесконечной прямой при следующих начальных и граничных условиях:

$$W(y,0)=W_0;\;\; W(0,t)=W_{sat}. \qquad (2)$$

Влияние начальных условий на распространение влажности по глубине тела массива с одного нагнетаемого участка с течением времени ослабевает, однако из соседнего участка инфильтрация захватывает ослабленный участок и влажность выравнивается по граничным условиям. Таким образом, взаимовлияющие инфильтрационные потоки влаги от нагнетаемой жидкости сводят задачу к краевым задачам без начальных условий.

Тогда решение уравнения (1), подчиняющееся условиям (2), легко строится методом Фурье и Грина:

$$W(0,t) = W_0+(W_{sat}- W_0)\left[1- f\left(\frac{y}{2\sqrt{t}}\right)\right], \qquad (3)$$

где W_{sat} – влажность грунта при водонасыщенном состоянии; y – глубина смачивания; $\theta=\frac{\beta}{\gamma_w}\overline{K}$ – коэффициент влагопроводности грунта; γ_w – 10 кН/м^3 – удельный вес воды; $\overline{K}$ – коэффициент водопроницаемости грунта в интервале изменения от естественной влажности W_0 до полной влагоемкости W_{sat}, который носит линейный характер; β – коэффициент, определяемый для каждого грунта экспериментальным путем, при этом $\beta > 0$; t – время; f – функция от $\frac{y}{2\sqrt{t}}$.

Расход просачивающейся воды в единицу времени вследствие инфильтрации инъектированного жидкого раствора при изготовлении буро-инъекционных свай или при закреплении массива определяется по формуле

$$q(t)=\frac{d}{dt}\int_0^\infty W(y,t)dy=\frac{W_{sat}-W_0}{\sqrt{\pi t}}\sqrt{\;}\,. \qquad (4)$$

Выражение $(W_{sat}- W_0)\sqrt{\theta/\pi}$ представляет собой скорость инфильтрации в конце первой единицы времени, когда t = 1.

Из формулы (3) определим фронт смачивания y из инфильтрационного потока. Для этого решение формулы (3) представим в виде интеграла вероятности следующего характера:

$$\int_0^{\frac{y}{2\sqrt{t}}} e^{-\rho^2}d\rho=\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{\left(\frac{y}{2\sqrt{\theta t}}\right)^{2n-1}}{(2n-1)(n-1)!}=-2\sum_{n=1}^{\infty}a_n y^{2n-1},$$

где $a_n = \dfrac{(-1)^n}{4^n(\ \ t^{\ n-0.5}\ \ \ n- \ \ \ n-}$.

Тогда выражение (3) будет иметь вид

$$W(y,t) = W_0 + (W_{sat} - W_0)\left(1 + \frac{4}{\sqrt{\pi}}\sum_{n=1}^{\infty} a_n y^{2n-1}\right). \tag{5}$$

На границе смачивания при инфильтрации во времени t должно соблюдаться условие

$$W(y_0,t) = W_0$$

или

$$(W_{sat} - W_0)\left(1 + \frac{4}{\sqrt{\pi}}\sum_{n=1}^{\infty} a_n y^{2n-1}\right) = 0.$$

Поскольку

$$W_{sat} - W_0 \neq 0,$$

то

$$1 + \frac{4}{\sqrt{\pi}}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n y_0^{\ 2n-1}}{4^n(\ \ t^{\ n-0,5}\ \ \ n- \ \ \ n-} = 0. \tag{6}$$

Легко можно показать, что корни уравнения имеют вид

$$y_0 = \mathrm{A}\sqrt{\theta \cdot t}\ , \tag{7}$$

где A – положительное или отрицательное число.

Подставляя (7) в формулу (6), получим:

$$\frac{\sqrt{\pi}}{4} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n A^{2n-1}}{4^n(2n-1)(n-1)!} = 0. \tag{8}$$

Из формулы (8) последний ряд, согласно теореме Лейбница, быстро сходится. Решение уравнения (8) для конечной суммы ряда может быть построено с помощью формулы Виета. При этом могут быть установлены наибольшие по значению и положительные по знаку корни.

Если ограничиться четырьмя знаками разложения и воспользоваться корнем уравнения (8) по экспериментальным значениям, полученным для супесей, суглинков и мелких песков A = 2,37, то фронт смачивания определится выражением

$$y_0 = \alpha\sqrt{t}\ , \tag{9}$$

где $\alpha = A\sqrt{\theta} = 2{,}37\sqrt{\theta}$.

Скорость продвижения фронта смачивания при инфильтрации воды определяется по формуле

$$\overline{V} = \frac{dy_0}{dt} = 0{,}5\times 2{,}37\sqrt{\frac{\theta}{t}} = 1{,}19\sqrt{\frac{\theta}{t}}\,. \qquad (10)$$

Таким образом, вначале скорость продвижения фронта смачивания от инфильтрации потока воды из инъекционных жидких растворов очень велика, а с течением времени уменьшается.

В соответствии с установленным фронтом смачивания для распределения влажности получим следующую приближенную формулу:

$$W = W_{sat} - \frac{W_{sat} - W_0}{\sqrt{\pi\theta t}}\, y + \frac{W_{sat} - W_0}{12\sqrt{\pi}(\theta t)^{3/2}}\, y^3 - \frac{W_{sat} - W_0}{160\sqrt{\pi}(\theta t)^{5/2}}\, y^5\,. \qquad (11)$$

Очевидно, значение фронта смачивания y в этом выражении должно изменяться в пределах $0 \le y \le 2{,}37\sqrt{\theta t}$.

Количество просачивающейся в грунт воды и скорость инфильтрации определяются следующими выражениями:

$$q(t) = \int_0^{2{,}37\sqrt{\theta t}} W(y,t)\,dy = (1{,}6W_0 + 0{,}78W_{sat})\sqrt{\theta t}\,; \qquad (12)$$

$$V(t) = \frac{d}{dt}\int_0^{2{,}37\sqrt{\theta t}} W(y,t)\,dy = (0{,}8W_0 + 0{,}39W_{sat})\sqrt{\theta/t}\,. \qquad (13)$$

Следует отметить, что здесь при инфильтрационном потоке воды не учитывали влияния напора воды, которая выделяется под давлением во время инъектирования жидкого раствора и существенно влияет на количественное соотношение просачивающейся воды в грунт и увеличение скоростей инфильтрации.

Отметим, что инфильтрационные силы достаточной интенсивности могут вызвать разрушение структурных связей песчаных грунтов, супесей, суглинков и привести к возникновению оползней-потоков.

Хотя явления фильтрационного взвешивания, оплывания, разжижения и движения оползней-потоков имеют различную природу, последствия их являются почти одинаковыми – потеря несущей способности массива, переход из твердого состояния в вязкопластическое. Вместе с тем необходимо строго различать эти явления, чтобы правильно построить расчетную схему и в каждом конкретном случае определить эффективные инженерные мероприятия по обеспечению устойчивости зданий и сооружений.

Фильтрационные процессы при разжижении, оплывании, фильтрационном взвешивании и течении могут быть вызваны различными причинами.

Например, при разрушении структурных связей грунта инфильтрационными потоками или динамическими воздействиями на влажный грунт разжижение вызывает передачу давления от собственного веса грунта или от внешней нагрузки на поровую воду и соответствующее изменение напора в водонасыщенной среде, вследствие чего возникает фильтрация воды, отжимаемой из пор грунта.

Фильтрация при оплывании или фильтрационном выпоре часто вызывается внешними причинами, например, разностью напоров воды в верхней и нижней части массива. Если при разжижении фильтрация возникает в результате снижения нормальных напряжений в скелете грунта, то при оплывании или фильтрационном взвешивании непосредственно сами фильтрационные силы являются причиной снижения нормальных напряжений. Отсюда вытекает, что разрушение структуры грунта под давлением воды, которая вызывает разжижение, является причиной возникновения фильтрации и увеличения плотности осаждаемых частиц, а при оплывании или фильтрационном выпоре происходит усиление взвешивания и разрыхление массива. Таким образом, обязательным условием возникновения разжижения является инфильтрационный поток воды, взвешивание грунта, затем уменьшение пористости и отжатие воды из пор; при оплывании или фильтрационном выпоре часть этих процессов отпадает. Наоборот, фильтрационное взвешивание увеличивает пористость за счет разрыхления грунта. Здесь инфильтрационный поток вызывает разрыхление, взвешивание частиц, смывание мелких частиц и т.д.

Рассмотрим поведение разжиженного массива, расположенного на водонепроницаемом основании.

При полном разжижении объемный вес разжижаемого грунта ($\gamma_{\text{рг}}$) складывается из веса твердых частиц и веса воды, заполняющей поры между твердыми частицами, то есть

$$\gamma_{\text{рг}} = \gamma_{\text{т}} m + \gamma_{\text{в}} n, \tag{14}$$

где $\gamma_{\text{т}}$ – удельный вес твердых частиц грунта; $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес воды ($\gamma_{\text{в}} = 10$ кН/м^3); n и m – объем пор и объем скелета грунта в единице объема.

Следует отметить, что при изготовлении буро-инъекционных свай, нагнетании жидких растворов под давлением, закреплении слабых грунтовых массивов, замачивании грунтов, при уплотнении с увлажнением до оптимальной влажности и других инфильтрационных потоках процессы разжижения, оплывания и фильтрационного взвешивания могут изменить свойства грунтов до состояния вязкопластического течения, что нарушает устойчивость массива и приводит к его смещению или вызывает оползневые процессы. Это требует контроля инъектируемого участка до твердения силикатного, цементного или полимерного раствора.

В таком состоянии оказался массив склона по Краснозвездному проспекту, 126г города Киева при устройстве буро-инъекционных свай диаметром 620 мм, длиной 22,5 м, предназначенных для обеспечения устойчивости склона и строительства 18-этажного жилого дома.

Инъектированные мелкодисперсные цементные растворы не успели затвердеть, резко увеличилась молекулярная влагоемкость грунтового массива склона, что явилось причиной разжижения, оплывания, фильтрационного взвешивания грунта. Массив грунта изменил свойства, перешел из твердого состояния в вязкопластическое, нарушилась устойчивость склона, и произошло смещение массива с малыми скоростями движения. Смещение массива на расстояние более 80 см увеличило сдвигающие горизонтальные силы, которые срезали буро-инъекционные сваи на разных глубинах массива (от 3 до 6 м).

Естественно, возникновению и развитию разжижения, оплывания и переходу в стадию вязкопластического течения массива способствовали динамические нагрузки, переданные от машин и механизмов при устройстве буро-инъекционных свай.

1. *Иванов П. Л.* Разжижение песчаных грунтов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 260 с.

2. *Савченко И. А.* Изменение свойств намывных грунтов под действием вибраций: Доклады о применении вибрации при устройстве оснований сооружений и бурении скважин в строительных целях. – М., 1959.

3. *Самедов А. М., Кравец В. Г., Вапничная В. В., Ган А. Л.* Влияние динамических воздействий на разжижение пылевых песков, супесей и суглинков. – Miedzynarodna konferencja VI Szkola Geomechaniki, Gliwice-Ustron 21–24 pazdriernixe 2003. – С. 107–119.

4. *Самедов А. М., Исмаилов Т.* Смещение разжиженного (Sivillasma) массива вдоль линии подпорных стен. – Miedzynarodna konferencja VI Szkola Geomechaniki, Gliwice-Ustron 21–24 pazdriernixe 2003, С. 151–158.

5. *Самедов А. М., Ган А. Л., Исмаилов Т., Озчелик М.* Разжижение пылеватых песков, супесей и суглинков при фильтрационных воздействиях. – Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2003. – Вип. 3/27. – С. 204–208.