

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

УДК 624.139: 624.131.5

К ВОЗМОЖНОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КОНСОЛИДАЦИИ
ПЛАСТИЧНО-МЕРЗЛОЙ СУПЕСИ

А.Н. Власов, Л.Д. Лисин, В.П. Мерзляков, А.В. Талонов*

Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, Россия

* *Московский государственный инженерно-физический институт, 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, Россия*

В результате роста областей плавления льда, обусловленного локальными давлениями между соседними частицами грунта, может возникнуть перемычка (межзеренный канал). Фильтрация жидкости из данных областей на поверхность образца будет возможна, если множество межзеренных каналов будут образовывать открытую систему. Показано, что при определенной нагрузке размеры зон плавления становятся достаточными, чтобы по образовавшемуся множеству межзеренных каналов, вода просачивалась на поверхность породы.

Фильтрация, консолидация, температура, плавление, давление

FILTRATIONAL CONSOLIDATION POSSIBILITY OF PLASTIC-FROZEN SANDY LOAMS

A.N. Vlasov, L.D. Lisin, V.P. Merzlyakov, A.V. Talonov*

Moscow State Civil Engineering University, Moscow, 129337, Yaroslavskoe sh., 26, Russia

* *Moscow State Physical Engineering Institute, Moscow, 115409, Kashirskoe sh., 31, Russia*

The growth of regions of ice melting due to local pressures between the neighboring ground grains may result in a larger interstitial space and eventual formation of an intergranular channel. Filtration of liquid from such spaces to the sample surface is possible, if numerous intergranular channels form an open structure. It has been shown that under a definite load, the size of the melting zones becomes sufficient to allow formation of numerous intergranular channels, through which water will be driven to the rock surface.

Filtration, consolidation, temperature, melting, pressure

Успех применения тех или иных уравнений состояния грунтов и, в частности, мерзлых грунтов зависит в значительной степени от того, насколько удачно проведено сравнение модели со свойствами реальных тел. „Сопоставленные таким образом уравнения имеют бесконечное число вариаций и обобщений. Поэтому любые рекомендации по способам описания свойств не могут быть признаны окончательными, ибо в основе своей не содержат какой-либо единой физической теории“ [Зарецкий, 1989]. Процедура сравнения модели с реальным телом осуществляется, как известно, в первую очередь, на образцах реальных материалов. Шансы на „удачу“, по-видимому, можно повысить, учитывая в большей или меньшей степени структуру материала образца и реальные физические процессы.

Например, при рассмотрении композитов с периодической структурой возникает несоот-

ветствие эффективных свойств, определенных с учетом и без учета структуры материала, так как получаемые на образцах характеристики обеспечивают близость перемещений у образца и природы, но не близость их напряжений. Известен пример другого рода, когда очевидная казалась бы схема описания процесса „в среднем“ приводит к результатам, сильно отличающимся от эксперимента. Так, описывая „падение“ стального шарика в ледяном массиве формулой Стокса, мы получим скорости на несколько порядков меньше наблюдаемых. Теорию можно „подправить“, уменьшая на порядки эффективную вязкость льда, но лучше рассмотреть процесс плавления льда под нижней поверхностью шарика с последующим замерзанием [Вейнберг, 1940]. Такое рассмотрение дает лучшее согласие с экспериментом, так как учитывает реальный физический процесс.

Факт увеличения незамерзшей воды в грунте под нагрузкой, характер кривых ползучести и перераспределение льдистости с вытеснением незамерзшей воды на поверхность образца в процессе испытания, наводят на предположение, что в высокотемпературных мерзлых грунтах имеет место просачивание образовавшейся влаги и уплотнение образца (типа фильтрационной консолидации). Это предположение Н.А. Цытович формулирует следующим образом: „Ползучесть мерзлых грунтов в большой степени связана с наличием незамерзшей воды в мерзлых грунтах и ее перемещениями под влиянием градиента напряжений“ [Цытович, 1973].

При феноменологическом описании ползучести скорость тотальной объемной деформации грунта определяется следующим образом [Запецкий, 1989]:

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^{sk} + \frac{1}{1 + e_0} \cdot \dot{\epsilon}_v^s \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}_v^{sk}$ — скорость объемной деформации „скелета“ за счет изменения пористости единицы объема грунта; $\dot{\epsilon}_v^s$ — скорость объемной деформации минеральных частиц „скелета“; e_0 — коэффициент пористости, вычисленный по начальному состоянию.

Анализ микроструктуры мерзлых песка и супеси [Зигерт, 1973; Ухов и др., 1997; Микростроение..., 1988] показывает, что поровое пространство в них заполнено преимущественно льдом и незамерзшей водой. Под действием внешней нагрузки в грунте, на контактах между минеральными частицами и льдом возникает повышенное давление. Неоднородность напряженного состояния в окрестности частицы приводит к изменению температуры фазового перехода T_p , вследствие чего на поверхности контакта частицы со льдом возникают условия для плавления. Образующаяся вода пополняет пленочную (связанную) воду, но в отличие от нее может фильтровать [Ухов и др., 1997].

Пренебрегая сжимаемостью частиц и льда получим:

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^{sk}. \quad (2)$$

Основной вклад в изменение объема „скелета“ мерзлого грунта вносит процесс плавления льда с последующим просачиванием (явление перколяции) образовавшейся воды по сформированному при определенных условиях поровому пространству. Задача перколяции сводится к задаче гидравлики. Отметим также, что в случае, если перетекание воды в образце не наблюдается, то объемная деформация образца за счет фазового перехода лед—вода под действием только внешнего давления будет иметь порядок упругих деформаций ($\sim 10^{-3}$).

В работе [Ухов и др., 1997] введено понятие „порога фазовых переходов“. Если давление превосходит порог фазовых переходов, то в окрестности критической точки (точки наибольшего контактного давления) возникает область возможных фазовых переходов. Отсутствие экспериментальных подтверждений существования перегретого льда (перегретого по отношению к температуре плавления, даваемой уравнением Клапейрона-Клаузиуса) дает основание предположить, что область действительных фазовых переходов совпадает с областью возможных фазовых переходов. Это позволяет вычислить количество незамерзшей воды в окрестности минеральной частицы, не прибегая к решению локальной задачи Стефана.

Несмотря на то, что тем самым вносится неопределенность во временную оценку процесса неустановившейся ползучести (как уже отмечалось эти деформации сравнимы по порядку с упругими), мы получаем простой способ вычисления количества незамерзшей воды, которая может фильтровать, и возможность описать фильтрационную консолидацию.

Для определения области фазовых переходов лед—вода использовалась модель, представленная на рис. 1.

При увеличении нагрузки растет область плавления льда (рис. 2). В результате роста областей плавления льда, обусловленного локальными давлениями, между соседними частицами грунта возникает перемычка (межзеренный канал). Фильтрация воды на поверхность образца будет возможна, если множество межзеренных каналов образует „открытое“ поровое пространство (по терминологии работы [Ухов и др., 1996] конечный кластер с выходом на границу образца).

Давление, при котором поровое пространство „открывается“ будем называть „порогом фильтрации“. Вычисляя объем воды, протекающей по всему поровому пространству в единицу времени (объемный расход воды Q) при заданном градиенте давления, получим для скорости объемной деформации следующую оценку:

$$\dot{\epsilon}_v^{sk} = Q/V \quad (3)$$

где V — объем образца.

Для расчета объемного расхода Q воспользуемся законом Пуазейля в форме эмпирического закона фильтрации Дарси [1]:

$$v_\phi = k_\phi^w \cdot i, \quad (4)$$

где v_ϕ — скорость фильтрации, i — градиент давления, $k_\phi^w = \rho^w g \frac{K^w}{\eta^w}$, $K^w = \frac{d^2}{32} m_w$, ρ^w — плотность воды, η^w — коэффициент вязкости, m_w — объемная концентрация жидкости, заполняющая

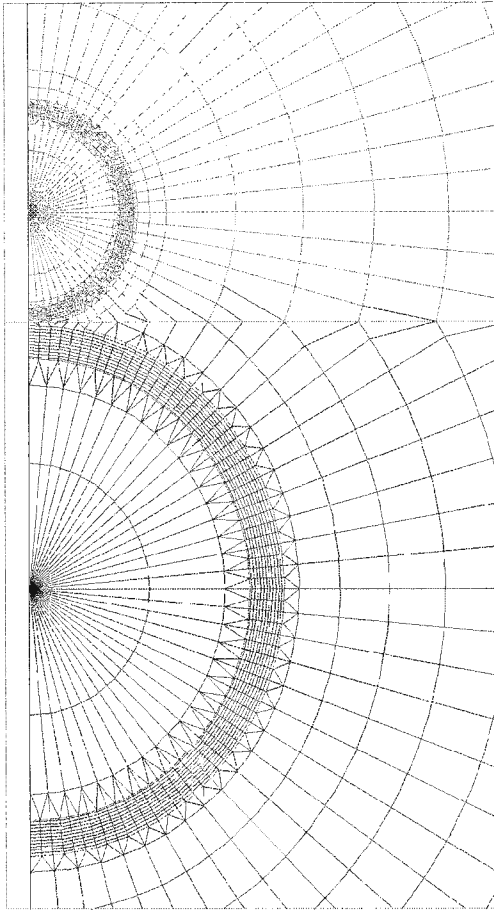


Рис. 1. Фрагмент сеточной области взаимодействия двух частиц.

сообщающиеся поры, d — эквивалентный диаметр канала, g — ускорение свободного падения.

Расчеты проводились на модели, представленной на рис.1, для пластично-мерзлого грунта одного из газовых месторождений Крайнего Севера [Ухов и др., 1995], имеющего гранулометрический состав, приведенный на рис. 3. Выбор размеров твердых частиц определялся в соответствии с гранулометрическим составом таким образом, что относительные объемы частиц и льда в модели и исследуемом образце были равны. В расчетах были приняты следующие значения: плотность частиц $\rho_s = 2,7 \text{ г/см}^3$; плотность супеси $\rho = 1,75 \text{ г/см}^3$; общая влажность $W = 0,35$; температура $T = -0,15 \text{ }^\circ\text{C}$; модуль Юнга и модуль объемного сжатия для минеральных частиц $E_s = 5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ и $K_s = 2,8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ соответственно; для льда модуль Юнга $E_i = 6 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ и, соответственно, модуль объемного сжатия $K_i = 5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$. Механические свойства эффективной среды взаимодействующей с частицами определялись в соответствии с

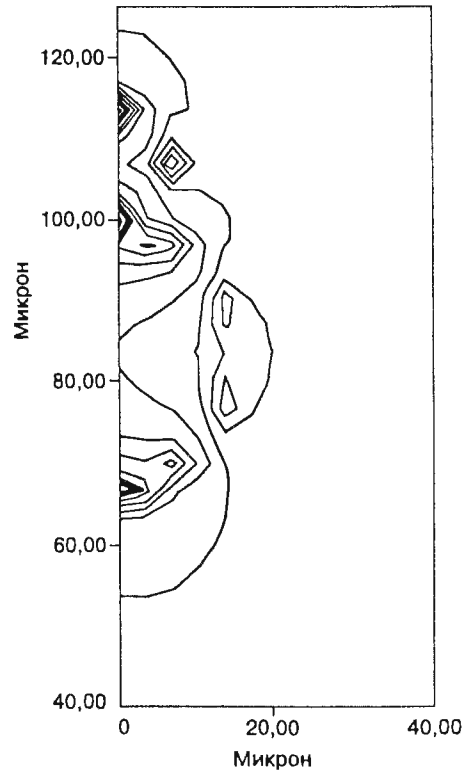


Рис. 2. Область зоны плавления.

принципом эквивалентной гомогенности по зависимостям, полученным в работе [Брушков и др., 1995]. Температура фазовых переходов определялась из условия Клапейрона-Клаузиуса.

Для порога просачивания $P_2 = 4,2 \text{ МПа}$ формула (4) дает значение скорости $v_\phi = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ см/сек}$. Используя соотношения $Q = v_\phi \cdot S_{\text{бок}}$, где $S_{\text{бок}} = 2\pi R_{\text{обр}} H_{\text{обр}}$ — площадь боковой поверхности образца, для расхода можно получить значение $Q = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{сек}$. Воспользовавшись формулой (3), получим $\dot{\epsilon} = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$. Как указывалось выше, здесь предполагается, что вытеснение жидкости осуществляется минеральными частицами за счет разности исходной пористости и пористости плотной упаковки.

Предлагаемый в данной работе подход к изучению ползучести мерзлых грунтов позволяет рассмотреть известный метод испытания мерзлых грунтов шаровым штампом [Цытович, 1973] с иных позиций. Теоретической основой метода является решение А.Ю. Ишлинского. С учетом условия пластичности Мизеса (которые можно интерпретировать как закон Кулона для материала с внутренним трением, равным нулю), было установлено, что отношение предела текучести материала к числу твердости по Бринеллю есть величина постоянная, равная



Рис. 3. Гранулометрический состав мерзлой супеси выработки ГКМ.

≈0,36. Применение этого метода к мерзлым грунтам позволяет связать условное сцепление с перемещением штампа и построить кривую зависимости сопротивления от времени. Однако при определенной нагрузке размеры зон плавления становятся достаточными, чтобы образовывать множество межзеренных каналов, по которым вода будет выдавливаться на поверхность породы с последующим замерзанием. Причины внедрения штампа в мерзлый грунт отличаются от течения идеально пластичного тела, и сравнение свойств такого тела со свойствами реальной среды оказывается слишком формальным. Учитывая это, Н.А. Цытович [Цытович, 1973] предложил два неравенства, накладываемые на стабилизированную осадку $S_{дл}$ и диаметр шарового штампа D , обеспечивающие инвариантность опытов:

$$0,01 < S_{дл} / D < 0,1.$$

Правое неравенство следует из геометрических соображений, используемых при выводе основной формулы для шарового штампа ($S < D$).

Левое неравенство исключает „крепкие“ и консолидированные мерзлые грунты с пористостью, близкой к пористости плотной упаковки. Деформации таких грунтов имеют порядок упругих деформаций.

В дальнейшем с помощью предлагаемого подхода авторы надеются расширить область применения шарового штампа.

Для дальнейшего развития работ по фильтрационной консолидации „высокотемпературных“ мерзлых грунтов необходимо:

уточнение механизма вытеснения образовавшейся воды из пор;

изучение пространственных упаковок песков и супесей;

влияние переупаковки минеральных частиц на величину деформаций;

проведение экспериментов по уточнению внутреннего энергетического баланса при локальном плавлении.

Эти эксперименты играют центральную роль в обсуждаемой проблеме [Гречищев и др., 1980; Чистотинов, 1975].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код № 96-05-65295).

Литература

- Брушков А.В., Власов А.Н., Мерзляков В.П., Талонов А.В. Влияние локальных фазовых переходов на деформируемость пластично-мерзлых грунтов // *Геоэкология*, 1995, № 5, с. 71—77.
- Вейнберг Б.П. Лед. М.-Л., ГТТИ, 1940, 524 с.
- Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз, М., Недра, 1980, 383 с.
- Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. Ростов, Изд-во Ростовского ун-та, 1989, 607 с.
- Зигерт Х. Применение оптических методов для исследования строения мерзлых пород // *Мат-лы II международной конференции по мерзлотоведению*, вып. 4, Якутск, Якутское кн. изд-во, 1973, с. 188—192.
- Микростроение мерзлых пород / Под ред. Э.Д.Ершова. М. Изд-во МГУ, 1988, 182 с.
- Ухов С.Б., Власов А.Н., Лисин Л.Д. и др. Плавление льда в несвязных мерзлых грунтах, обусловленное локальными давлениями // *Криосфера Земли*, 1997, т. I, № 3, с. 35—38.
- Ухов С.Б., Власов А.Н., Лисин Л.Д. и др. Плавление льда в несвязных мерзлых грунтах, обусловленное локальными давлениями // *Проблемы криологии Земли. Тез. докл. междунар. конф. Пушино*, Изд-во Пушинского науч. центра РАН, 1997, с. 260.
- Ухов С.Б., Власов А.Н., Лисин Л.Д. и др. Некоторые основные процессы, определяющие реологическое поведение пластично-мерзлых грунтов под нагрузкой // *Мат-лы I конф. геокриологов России*, кн. 2, М. Изд-во МГУ, 1996, с. 193—204.
- Ухов С.Б., Власов А.Н., Мерзляков В.П. и др. Влияние локальных фазовых переходов и фильтрации влаги на ползучесть пластично-мерзлого грунта // *Механика грунтов и фундаментостроение. Тр. Российской конф.*, С.-Пб., Изд-во СПбГАСУ, 1995, с. 639—644.
- Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М., Высшая школа, 1973, 446 с.
- Чистотинов Л.В. Некоторые вопросы термодинамики незамерзающей воды в грунтах // *Геокриологические исследования*. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1975, с. 24—39.

Поступила в редакцию
20 июня 1997 г.