

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Геологический факультет

Кафедра геокриологии

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Под редакцией Э.Д.Ершова

Издательство Московского университета
1989

ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ ПОРОД ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ СОЛЕЙ

При эксплуатации мерзлых оснований важное значение имеют расчеты устойчивости фундаментов инженерных сооружений в области распространения многолетнемерзлых пород. Обычно производится учет многолетних или сезонных процессов пучения и осадки, которые связаны с существующими температурными полями в массиве. Однако возможны иные причины, вызывающие деформирование мерзлых пород. Например, пучение и осадка могут быть вызваны засолением мерзлой породы; возникающие при этом деформации будут иметь хемогенную природу. Вопросам хемогенного деформирования и посвящается настоящая работа. Кроме практического значения проблема хемогенного деформирования имеет и научные аспекты, которые, в первую очередь, связаны с разработкой физико-химических и механических представлений в криолитогенезе.

В настоящее время процессы деформирования мерзлых пород при возникновении в них градиента концентрации (засоленности) изучены недостаточно. Это связано, во-первых, со сложностью выявления указанного процесса в природе в чистом виде, а, во-вторых, - с небольшой интенсивностью освоения районов распространения многолетнемерзлых пород в недалеком прошлом.

Имеющиеся в литературе данные затрагивают лишь отдельные вопросы миграции ионов в многолетнемерзлых породах /1, 2/ или рассматривают вопросы компрессии мерзлых пород с различной засоленностью /4, 5/. Настоящие исследования направлены на выяснение механизма хемогенного деформирования мерзлых пород, а также на выявление различных закономерностей развития хемогенного пучения и осадки в зависимости от состава и свойств грунта и внешних термодинамических условий.

Ввиду сложности изучения хемогенного деформирования в природных условиях были проведены целенаправленные лабораторные исследования. Опыты проводились в компрессионных приборах, где образец мерзлого грунта взаимодействовал с раствором неорганической соли различных концентраций. При необходимости на образец задавалось внешнее давление с помощью рычажного пресса. Испытания образцов проводились при различных постоянных отрицательных температурах в холодильной камере НКР-1.

Образцы, имеющие цилиндрическую форму высотой 2 см и площадь торца 60 см², готовились путем уплотнения пасты рассоленного дисперсного грунта до 0,2 МПа и их быстрого замораживания для получения массивной криогенной текстуры. Перед началом эксперимента образцы и приборы выставлялись при температуре опыта, а затем производилась сборка прибора. В ходе опыта осуществлялся контроль за температурой и вертикальным деформированием образца по мессуре с ценой деления 0,01 мм. Возможность бокового

расширения отсутствовала.

По окончании каждого испытания производилось изучение строения образца и послойное определение влажности и его химического состава. По результатам замера деформаций строились графики динамики деформирования и зависимости последнего от состава и свойств исследуемого грунта, а также от температуры, внешнего давления и концентрации раствора, взаимодействовавшего с грунтом.

При экспериментальных исследованиях использовались грунты различной дисперсности и химико-минерального состава, которые были представлены ранее /3/. Согласно использованной схеме опыта контактным методом в соприкосновение приводились мерзлая порода и раствор неорганической соли или соленый лед. До начала опыта порода и раствор выставлялись при данных термодинамических условиях. Таким образом, между фазами и компонентами в породе и растворе существует равновесие, которое нарушается при их взаимодействии. Это происходит в связи с тем, что в каждой из указанных систем (порода и раствор) аналогичные фазы обладают различными значениями общих термодинамических потенциалов. Нарушение равновесия при взаимодействии этих систем приводит к возникновению градиентов потенциала в различных компонентах и развитию их миграции в каждой системе. Процесс массопереноса здесь происходит аналогично миграции влаги в температурном поле, т.е. перемещение молекул воды в область с меньшим общим термодинамическим потенциалом, однако, при взаимодействии мерзлого грунта с раствором соли возникновение градиента потенциала обусловлено химическими причинами. Возникающая при этом миграция влаги в мерзлый грунт приводит к развитию деформаций пучения. При соприкосновении грунтовой системы и раствора происходит уменьшение абсолютного значения общего термодинамического потенциала влаги в приконтактной зоне мерзлого грунта, понижение там давления в водных пленках и изменение энтропии незамерзшей воды в связи с миграцией ионов соли. В общем случае при термодинамическом подходе к описанию массопереноса используют градиент общего термодинамического потенциала влаги ($g \text{ grad } \mu_w$), который, в свою очередь, может быть представлен в виде суммы частных потенциалов:

$$g \text{ grad } \mu_w = g \text{ grad } \psi_w + g \text{ grad } \psi_0 + g \text{ grad } \psi_3 + g \text{ grad } \psi_p + \dots,$$

где $g \text{ grad } \psi_w$; $g \text{ grad } \psi_0$; $g \text{ grad } \psi_3$; $g \text{ grad } \psi_p$ соответственно градиенты каркасно-сорбционного, осмотического, электрокинетического и гидростатического потенциалов. Отсюда следует, что формирование в мерзлом грунте градиента общего термодинамического потенциала, отличного от нуля, является необходимым условием миграции влаги. Кроме того, возможность влагопереноса и влагонакопления в мерзлых грунтах определяется механическим условием, т.е. давление в пленках незамерзшей воды, возникающее благодаря градиенту потенциала, должно превышать сумму прочности структурных связей в грунте, бытового и внешнего давления, а также других нагрузок:

$$\Delta P > P_{сц} + P_{г} + P_{вн} + \dots,$$

где ΔP , P_{oc} , P_0 , $P_{ан}$ соответственно величины давления в водных пленках, сцепления, бытового и внешнего давления.

Рассмотрим более подробно формирование давления в водных пленках. На его величину влияют процессы различной природы. Таким образом. Таким образом, можно выделить осмотическую и электрокинетическую составляющие давления в пленках незамерзшей воды, связанные с количественным содержанием в них ионов: расклинивающее давление, обусловленное изменением толщины пленок незамерзшей воды в направлении градиента концентрации ионов. При увеличении концентрации ионов в пленочной влаге происходят фазовые превращения в системе вода - лед, что также сказывается на понижении давления пленочной влаги.

$$\Delta P = -P_0 + P_3 + P_p - P_\Phi, \quad \text{или}$$

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P_0}{\partial c}\right)_{vt} dc + \left(\frac{\partial P_p}{\partial h}\right)_{vt} dh + \left(\frac{\partial P_\Phi}{\partial \lambda}\right) d\lambda,$$

где ΔP , P_0 , P_3 , P_p - соответственно суммарное, осмотическое, электрокинетическое, расклинивающее и фазовое давления в пленках незамерзшей воды; c , h и λ - соответственно концентрация ионов в пленке, свободная поверхностная энергия, толщина пленки незамерзшей воды и энергия, затраченная на фазовые переходы; V - объем, t - температура.

При описании процесса миграции ионов имеет смысл применить термодинамический подход. Таким образом, следует рассматривать химический потенциал ионов как сумму нескольких частных составляющих. Наиболее важными из них являются концентрационный, ионноэлектростатический и адсорбционный потенциалы.

$$\mu_i = \varphi_c + \varphi_3 + \varphi_{aq} + \dots,$$

где μ_i , φ_c , φ_3 , φ_{aq} - соответственно химический, осмотический, ионноэлектростатический и адсорбционный потенциалы. В этом случае движущей силой ионнопереноса будет являться градиент химического потенциала ионов ($q \text{ grad } \mu_i$):

$$q \text{ grad } \mu_i = \left(\frac{\partial \varphi_c}{\partial c}\right)_{TP} dc + \left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial q}\right)_{TP} dq + \left(\frac{\partial \varphi_{aq}}{\partial E}\right)_{TP} dE,$$

где q - заряд иона, P - давление.

Таким образом, при выполнении миграционного и механического условий имеет место массоперенос влаги и ионов, неразрывно связанный во влагонасыщенных породах с развитием объемных деформаций образца мерзлой породы. Учитывая основные процессы, имеющие место при взаимодействии мерзлого грунта с раствором соли, можно составить уравнение деформирования

$$h_{\text{деф}} = h_y + h_i + h_{\text{расп}} - h_{yc} - S_t - S_\Phi - S_{ct},$$

где $h_{\text{деф}}$ - суммарная деформация образца мерзлого грунта; h_y - деформации, связанные с влагонакоплением в мерзлой породе; h_i - деформации, вызванные внедрением ионов; $h_{\text{расп}}$ - увеличение объема образца за счет вымерзания влаги; S_t и h_{yc} - осадка и усад-

ка мерзлого грунта; S_{ϕ} - фильтрационная осадка; $S_{\sigma T}$ - осадка, вызванная структурными преобразованиями.

При взаимодействии образца мерзлой породы с раствором неорганической соли можно выделить три принципиально отличных типа кривых динамики деформирования, а в пределах каждого типа несколько стадий.

Первый тип кривых имеет вид монотонно возрастающей функции, стремящейся в пределе к константе (рис. 1). Ее предельное значение

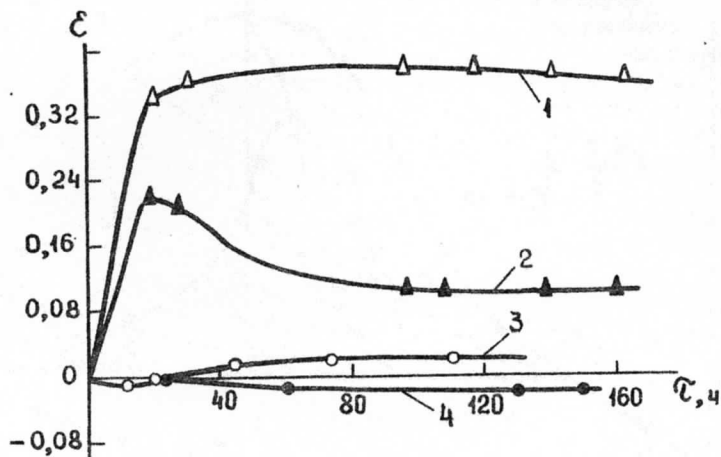


Рис. 1. Кинетика развития относительных деформаций в мерзлых дисперсных породах при взаимодействии их с водным раствором соли NaCl : 1 и 2 образцы глины каолинитовой, взаимодействующие с 1,0 и 2,0 Н раствором при $t = -2,0^\circ\text{C}$; 3 и 4 глина монтмориллонитовая и песок, взаимодействующие с 0,8 и 2,4 Н раствором при $t = -4^\circ\text{C}$

назовем максимальной стабилизированной деформацией. Следовательно, в данном классе кривых существуют стадии хомогенного пучения и стабилизации. Механизм развития кривых этого типа состоит в следующем. По мере увеличения засоленности грунта и выравнивания в образце содержания соли происходит уменьшение движущих сил массопереноса, что вызывает стабилизирование хомогенного пучения. При этом бытовая (P_b) и внешняя ($P_{\text{вн}}$) нагрузки воспринимаются образовавшимися шпиромы и грунтовыми прослоями, в которых часть льда по сравнению с исходной породой вытягивалась, но их структурная прочность еще достаточна для содержания указанных нагрузок. Таким образом,

$$P_{\text{стр}} \geq P_b + P_{\text{вн}} \quad (P_{\text{водн.}} \rightarrow 0),$$

где $P_{\text{стр}}$ - структурная прочность грунта, $P_{\text{водн.}}$ - давление в водных пленках. Следует отметить, что в данном классе кривых стабилизирован-

ная деформация совпадает с максимальной.

Второй тип кривых динамики деформирования представлен монотонно убывающими кривыми. Это связано с осадкой мерзлой породы при внедрении в нее ионов и последующей компрессией. В данном классе кривых выделяются стадии хомогенной осадки и стабилизации (рис. 2).

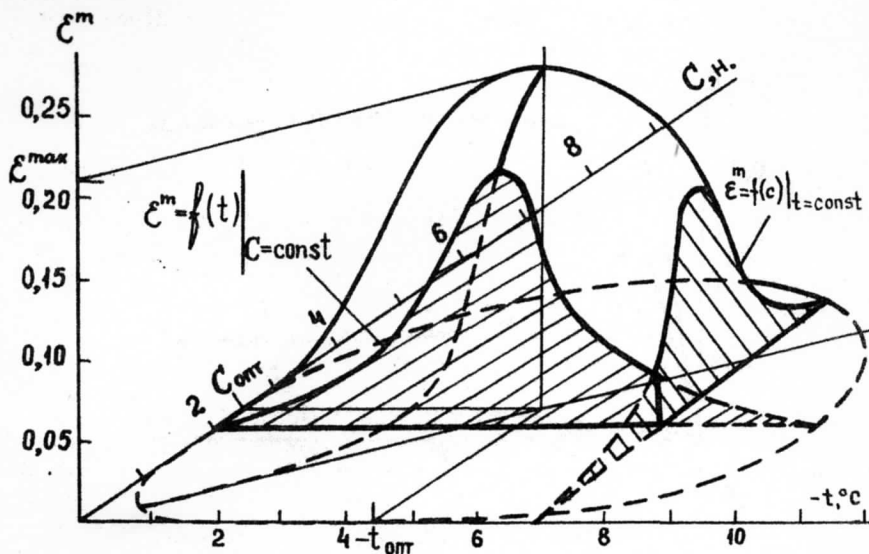


Рис. 2. Характер изменения относительных деформаций пучения в зависимости от отрицательной температуры и концентрации водного раствора NaCl , взаимодействующего с образцами мерзлой каолинистой глин при внешнем компрессионном давлении на них $0,2 \text{ МПа}$ (блок диаграмма)

К третьему типу кривых динамики деформирования относятся кривые, переходные между первым и вторым типами. Здесь наблюдаются уже три стадии — хомогенного пучения, хомогенной осадки и стабилизации. До стадии осадки процесс развивается аналогично первому типу. Изменение преобладающего процесса с пучения на осадку вызвано, во-первых, чрезмерным подплавлением пленочного и порового льда грунтовых прослоев и их компрессионным уплотнением под действием внешних нагрузок, а во-вторых, уменьшением величины движущих сил миграции влаги. Таким образом, на стадии осадки имеет место неравенство

$$P_{\text{б}} + P_{\text{вн}} > P_{\text{стр}} > P_{\text{водн.}}$$

Стадия осадки продолжается до тех пор, пока в грунте продолжают фазовые переходы льда в воду. Затем наступает стадия длительной стабилизации, во время которой наступает равновесие между

фазами и компонентами в мерзлой породе и прекращается деформации осадки. Важным отличием от первого типа кривых деформирования является отсутствие льда в породе после стабилизации процесса, протекающего по второму или третьему типу, т.е. первый тип кривых возникает только в таких условиях, когда возможно установление термодинамического равновесия между льдом и поровым раствором грунта.

Интенсивность и характер процесса деформирования определяется, с одной стороны, свойствами мерзлого грунта, а с другой, — внешними термодинамическими условиями. В частности, наиболее сложна зависимость хода процесса от температуры опыта и концентрации взаимодействующего с грунтом раствора. Рассмотрим, например, изменение максимальной деформации от концентрации при постоянной температуре. При росте небольших значений концентраций внешнего раствора движущие силы миграции влаги увеличиваются и, как следствие, увеличивается максимальная деформация. Однако синбатно с увеличением интенсивности пучения увеличивается абсолютное значение потенциала влаги во внешнем растворе, что сказывается отрицательно на ее подвижности. Поэтому интенсивность миграции влаги возрастает до некоторой величины, а затем уменьшается при дальнейшем увеличении концентрации. В случае равенства химического потенциала воды в растворе и общего термодинамического потенциала влаги в грунте миграции влаги в образец не произойдет. Аналогично выглядит зависимость максимальной деформации от температуры. При ее понижении общий термодинамический потенциал незамерзшей воды увеличивается по абсолютному значению, что требует увеличения концентрации для его уравнивания.

Изучать влияние температуры и концентрации удобно совместно, сделав построение изолиний максимальной деформации в координатах температуры и концентрации внешнего раствора. Изолинии имеют форму соосных овалов и показывают, что зависимость максимальной деформации от концентрации и температуры имеет экстремальный характер (рис. 3).

Отдельно следует остановиться на описании линий оптимальных условий. Линия оптимальных концентраций ($C(t)$) показывает, при какой концентрации достигается максимальное пучение при указанном значении температуры. И, наоборот, линия оптимальных температур позволяет определить температуру, при которой будет наблюдаться максимальное пучение при данной концентрации. Например, при температурах t_1 и t_2 максимальное пучение будет наблюдаться при концентрациях C_1 и C_2 . Но при полученных концентрациях можно получить общую величину деформирования, но для этого надо взять температуру t_3 и t_4 . Таким образом, максимальное пучение для данного грунта при данном внешнем давлении при взаимодействии с определенным раствором будет получено в точке пересечения линий оптимальных условий.

Форма изолиний максимальной деформации в координатах (t, C) определяется суммарным влиянием нескольких различных факторов.

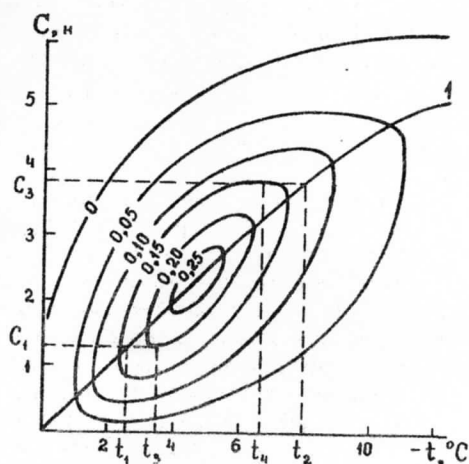


Рис. 3. Изолинии максимальных относительных деформаций пучения мерзлой каолинистой глины, взаимодействующей с водным раствором NaCl в координатах C и t при компрессионном давлении $0,2 \text{ МПа}$: 1 – линия оптимальных температур для развития деформаций пучения

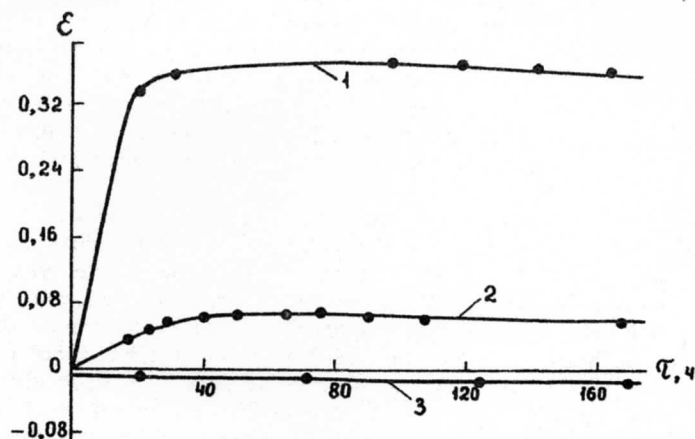


Рис. 4. Кинетика развития относительных деформаций в каолинистой глине, взаимодействующей с водным раствором NaCl при действии на нее внешнего компрессионного давления: 1, 2 и 3 – внешнее давление $0,0$; $0,5$ и 1 МПа

Рассмотрим каждый из них в отдельности.

Определяющей силой миграции влаги является градиент ее общего термодинамического потенциала. В рассматриваемых координатах градиент потенциала определяется в основном концентрацией раствора соли, от температуры он зависит сравнительно слабо. Его значение увеличивается с увеличением концентрации внешнего раствора хлорида натрия. Однако с увеличением концентрации внешнего раствора понижается значение химического потенциала влаги в растворе, поэтому с увеличением концентрации внешнего раствора зависимость градиента потенциала влаги от концентрации будет иметь экстремальный вид при сравнительно малой зависимости от температуры.

Влияние температуры на форму изолиний максимальной деформации сказывается в основном на возрастании структурной прочности с уменьшением температуры, что при температурах $-10 + -12^{\circ}\text{C}$ практически полностью определяет затухание деформаций хемогенного пучения. При значении температуры в интервале фазовых переходов имеет смысл рассматривать объем мерзлых пор. При переходе большего числа пор в мерзлое состояние интенсивность хемогенного пучения возрастает.

Важную роль в хемогенном деформировании мерзлого грунта играет внешнее давление. С его увеличением заметно уменьшается скорость деформирования на стадии хемогенного пучения, увеличивается продолжительность этой стадии, а также уменьшается величина достигимой деформации пучения, что особенно сильно заметно в области малых величин внешнего давления (рис. 4).

При величинах внешнего давления порядка $0,5-0,7$ МПа миграция влаги в мерзлый грунт практически прекращается, и при повышении давления будет происходить только осадка и компрессия, т.е. развивается второй тип кривых динамики деформирования.

Особое внимание следует уделить закономерностям деформирования грунтов различного химико-минерального состава и дисперсности. С увеличением дисперсности возрастают движущие силы миграции влаги, с чем связано увеличение значений максимальной деформации, а также за счет возрастания активной влагонепроницающей пористости увеличивается интенсивность деформирования. Кривые деформирования слабодисперсных грунтов относятся ко второму типу. С повышением дисперсности начинает развиваться хемогенное пучение и они переходят в третий тип кривых деформирования. А в грунтах с очень высокой дисперсностью может происходить понижение величины максимальной деформации за счет уменьшения проводящих свойств мерзлой породы.

Не менее сильно на хемогенное деформирование мерзлых грунтов влияет их химико-минеральный состав. Наиболее сильно его влияние проявляется через микростроение грунта, которое определяет величину активной влагонепроницающей пористости. С этим связано уменьшение величин максимальной деформации при переходе от каолинистовой глины к бентонитовой. Увеличение льдистости мерзлых пород и переход их от массивной к шпировой криогенной текстуре, а также от порового к базальному типу льда-цемента приводит к уменьшению интенсификации

ности хомогенного деформирования и величин максимальной деформации.

Таким образом, в результате проведенных исследований обработана методика изучения хомогенного деформирования мерзлых пород с учетом внешнего давления, вскрыт механизм хомогенного пучения и осадки, выделено три типа динамики деформирования мерзлой породы при взаимодействии ее с растворами электролитов. Кроме вышеперечисленного было показано, что с увеличением концентрации или уменьшением температуры происходит увеличение, а затем уменьшение величин максимальной деформации. Впервые были построены и обоснованы изолинии максимальной деформации в координатах (t, c), а также было получено, что увеличение максимальной деформации происходит при уменьшении внешнего давления, увеличении дисперсности, переходе от бентонитовой глины к каолинитовой и при переходе от базального к поровому типу льда-цемента.

Литература

1. А н и с и м о в а Н.П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск, 1981. 152 с.
2. Б о ж е н о в а А.П. Значение осмотических сил в процессе миграции влаги в грунтах/Мат-лы по лабораторному исследованию мерзлых грунтов, сб. 3. М., 1957. С.129-141.
3. Е р ш о в Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. М., 1986. 333 с.
4. П е к а р с к а я Н.К., Ч а п а е в А.А. Влияние засоленности мерзлых грунтов на их деформационные свойства // Инженерное мерзлотоведение. М., 1979. С.5-19.
5. Ц ы т о в и ч Н.А. Механика мерзлых грунтов. М., 1973. 448 с.