

УДК 630.383

МЕТОДИКА ОБРАЗОВАНИЯ МОРОЗОБОЙНЫХ ТРЕЩИН НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ЭТИМ ЯВЛЕНИЕМ

¹Бургонутдинов А.М., ¹Юшков Б.С., ²Бурмистрова О.Н.

¹ФГБОУ ВПО «Пермский научно-исследовательский политехнический университет», Пермь;

²ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»,

Ухта, e-mail: Oburmistrova@ugtu.net

Проведен анализ распределения полей влажности, который позволяет установить, что интенсивное изменение влажности грунта при промерзании происходит только непосредственно у фронта нулевых отметок. Выявлено, что существование свободной вертикальной поверхности предопределяет направление образующихся трещин, и в однородных массивах при этом условии формируется система параллельных трещин на расстояниях x друг от друга. Определено, что при сопряжении трещин в виде основания и перпендикуляра основание образуется ранее, более длинной трещиной, более низкого порядка генерации, а перпендикуляр – позже, более короткой трещиной, более высокого порядка генерации. Разрывающие напряжения (τ_v) пропорциональны произведению линейного размера отдельности (x) на градиент температуры ($\Delta t/\Delta z$), поэтому при малых градиентах линейное сооружение распадается на крупные прямоугольные отдельности, а затем при увеличении градиентов эти отдельности последовательно делятся пополам трещинами последующих порядков генерации на все более мелкие отдельности.

Ключевые слова: морозобойные трещины, автомобильные дороги, влажность грунта, напряжение в слоях дорожной конструкции

METHOD OF EDUCATION FROST CRACKS ROAD AND HOW TO DEAL WITH THIS PHENOMENON

¹Burgonutdinov A.M., ¹Yushkov B.S., ²Burmistrova O.N.

¹FGBOU VPO «Perm Research Polytechnic University», Perm;

²FGBOU VPO «Ukhta State Technical University», Ukhta, e-mail: Oburmistrova@ugtu.net

The distribution of moisture fields, which allows to establish that the intensity change of soil moisture during the freezing occurs only directly in front of the zero marks. Revealed that the existence of a free surface determines the direction of the vertical cracks and homogeneous arrays under this condition, a system of parallel fractures at a distance x from each other. Determined that the cracks when paired as a base and the base is formed perpendicular earlier longer crack, the lower order generation and perpendicular – later, shorter crack higher order generation. Tearing voltage (τ_v) proportional to the product of the linear size alone (x) on the temperature gradient ($\Delta t/\Delta z$), so when small gradients linear structure splits into large rectangular separately, but for those with increasing gradients of these individual sequences bisect cracks generate subsequent orders into smaller separately.

Keywords: frost cracks, roads, soil moisture, tension in the layers of the road structure

Напряжения в слоях дорожной конструкции, вызывающие их деформации, в частности растрескивание, можно подразделить на две существенные различные группы:

1) напряжения, вызванные внешними условиями, приложенными к поверхностям слоёв дорожной конструкции;

2) напряжения, возникающие внутри дорожного полотна под влиянием неравномерного изменения элементов его объема вследствие каких-либо физических или химических процессов, например усыхания, охлаждения, диагенеза, рекристаллизации, с изменением объема, солнечной радиации, рельефа местности и условий проложения рабочих отметок.

Тогда как теория напряжений и деформаций первой группы достигла значительного развития и решены многие относящиеся к ним механические задачи, этого нельзя сказать о напряжениях и деформации второй группы. Относительно этих на-

пряжений и деформаций поставлена только частная, так называемая температурная задача теории упругости, причем её решения, представляющие особенный интерес для проектировщиков и строителей, почти совершенно отсутствуют.

Неравномерные изменения связанных между собой элементов объема массива происходят вследствие изменения в массиве некоторой физической величины, например температуры, в некотором направлении или, другими словами, вследствие наличия градиента этой величины. Поэтому внутренние напряжения и деформации второй группы можно назвать вообще «объемно-градиентными» напряжениями и деформациями.

Для выяснения характера объемно-градиентных напряжений рассмотрим в качестве примера напряжения и деформацию элементарного твердого кубика *ABCDFWHK*, охлаждаемого сверху (рис. 1).

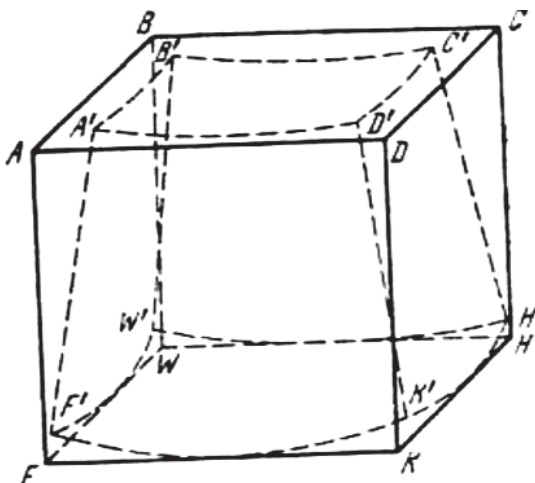


Рис. 1. Характер температурной деформации куба при охлаждении сверху

При равенстве температур во всех точках кубика температурных напряжений нет, и он сохраняет кубическую форму.

При охлаждении сверху верхний горизонтальный слой площадью $ABCD$ стремится сократиться до размеров площади $A_1B_1C_1D_1$, но этому мешает связанный с ним лежащий ниже слой, температура которого выше, а площадь больше.

Вследствие взаимодействия этих слоев в них возникают напряжения: верхний слой

растягивается нижним, а нижний сжимается верхним. То же можно сказать о любых двух соседних участках дороги – выемка и насыпь, за исключением поверхностного слоя, который растягивается особенно сильно.

Если отделить рассматриваемый кубик от массива, в нем произойдет деформация сдвига и изгиба. Каждый горизонтальный слой будет сдвигаться к своей центральной точке относительно лежащих ниже слоев. Поверхность $ABCD$ станет вогнутой и займет положение $A_1B_1C_1D_1$, а поверхность $FWHK$ – выпуклой и займет положение $F_1W_1H_1K_1$.

Таким образом, при охлаждении сверху каждый элемент охлаждающегося массива испытывает растягивающие, сжимающие, сдвигающие (касательные) и изгибающие напряжения. Но до наступления разрывов в однородном бесконечно протяженном массиве температурные напряжения проявляются как растяжения или сжатия, а деформации – как сокращения или расширения по вертикали [1].

При промерзании в начале зимы дисперсные грунты могут сначала несколько увеличивать свой объем вследствие увеличения объема при переходе воды в лед, но затем при дальнейшем охлаждении они уменьшают свой объем по причине обычного температурного сокращения твердых тел при охлаждении (рис. 2).

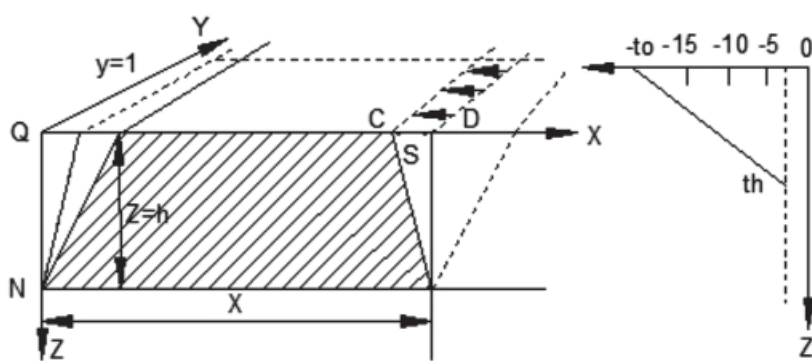


Рис. 2. Схема постановки задачи при приближенном расчете температурных напряжений в массиве, ограниченном горизонтальной и вертикальной поверхностями

Попытаемся приближенно определить напряжения, возникающие в верхнем слое дорожной конструкции при её дальнейшем охлаждении. С этой целью схематизируем задачу следующим образом.

Расположим систему прямоугольных координат (x, y, z) , как показано на рис. 2, и будем рассматривать поперечник дороги как нижнюю четверть пространства, ограниченную плоскостями xu и yz , которые в данном случае являются свободными поверхностями.

Пусть при этом температуры в массиве дорожной призмы представлены кривой в правой части рис. 2. Тогда справа от плоскости yz в слое мощностью $\Delta z = h$ все верхние элементы объема будут стремиться сократиться относительно нижних и ребро O_y отойдет вправо на расстояние OB ; в то же время в массиве возникнут растягивающие напряжения, уравниваемые в пределах упругости силами сцепления.

Определим эти напряжения τ в сечении, параллельном плоскости yz , на расстоянии

х от последней; при этом мы будем считать их касательными напряжениями, приложенными к поверхности массива. Такая замена объемных напряжений касательными физически оправдывается характером реальных температурных кривых (рис. 1), показывающим, что изменения температур и, следовательно, температурные напряжения сосредоточены преимущественно в поверхностном слое породы [2].

Задача эта статически неопределима, так как даны только равенство и противоположная направленность сил в любой точке выбранного сечения. Воспользуемся поэтому принципом совместности деформаций.

Рассечем массив плоскостью, параллельной плоскости yz , на расстоянии x от последней, тогда силы сцепления уже не будут уравнивать силы растяжения; в отсеченной части напряженного слоя произойдет деформация сдвига, и отрезок BD , представляющий ширину отсеченной полосы, переместится влево на расстояние $S = \frac{1}{2}OB$, в положение AC (рис. 2). Длину OB можно приближенно считать сокращением длины x при охлаждении на $\Delta t = t_h - t_0$ градусов, то есть написать равенство

$$OB = 2s = \alpha x \Delta t, \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного сокращения данного массива.

Если мы теперь восстановим действие сил сцепления, то последние произведут деформацию сдвига в обратном направлении, причем абсолютный сдвиг опять будет равен S .

Известно, что абсолютный сдвиг S связан со сдвигающей касательной силой Q_x следующим соотношением:

$$s = \frac{\Delta z Q_x}{FG}, \quad (2)$$

где Δz – расстояние закрепленной плоскости тела от параллельной ей плоскости, по которой действует сила Q_x ; F – площадь, по которой действует сила Q_x (в данном случае

$F = xy$); $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль упругости

при сдвиге, где, в свою очередь, E – модуль Юнга и μ – коэффициент Пуассона.

Приравняв S из равенств (1) и (2), получим уравнение для определения силы Q_x , действующей в направлении x :

$$\frac{1}{2} \alpha \Delta t x = \frac{\Delta z Q_x}{FG}, \quad (3)$$

откуда $Q_x = \frac{1}{2} \alpha GF \frac{\Delta t}{\Delta z}$. (4)

Вводя вместо силы Q_x тангенциальное напряжение $\tau_x = (Q_x/F)$ и имея в виду, что $(\Delta t/\Delta z) = \text{grad}_z t$, получим окончательно:

$$\tau_x = \frac{1}{2} \alpha G x \text{grad}_z t. \quad (5)$$

При расчете градиента $\Delta t/\Delta z$ за нормальную температуру ненапряженного грунта естественно, принимать среднюю температуру на глубине нулевых годовых амплитуд. Тогда слои при более высоких температурах будут относительно расширены и сжаты, а при более низких – относительно сокращены и растянуты.

Таким образом, тангенциальное напряжение τ_x в охлаждающейся дорожной конструкции, например в замёршем слое при наличии в нем свободной вертикальной поверхности yz , пропорционально градиенту температур по вертикали $\Delta t/\Delta z$, расстоянию x от свободной вертикальной поверхности, модулю упругости при сдвиге G и коэффициенту линейного расширения (сокращения) грунта α .

Приравняв τ_x временному сопротивлению при сдвиге или разрывающему напряжению τ_b , из формулы (4) можно подсчитать расстояние x от свободной вертикальной поверхности, на котором касательные напряжения достигнут предельных значений, и произойдет разрыв (появится трещина).

Это расстояние равно

$$x = \frac{2\tau_b}{\alpha G \frac{\Delta t}{\Delta z}}. \quad (6)$$

Расчеты показывают, что расстояния между параллельными трещинами, получаемые по формуле (6), хорошо согласуются с наблюдаемыми в природе.

Из формулы (4) можно приближенно подсчитать и глубину зияющей трещины Δz в зависимости от ширины трещины s на поверхности и механических характеристик породы.

Действительно, принимая во внимание, что в формуле (1) $OB \approx x \alpha \Delta t$ представляет собой ширину трещины на поверхности и что напряжения τ_x на линии растрескивания равны разрывающим напряжениям τ_b , по формуле (4) получаем:

$$\Delta z = \frac{G}{\tau_b} \cdot \frac{c}{2} = \frac{E_c}{4(1+\mu)\tau_b}. \quad (7)$$

Подход к приближенному расчету напряжений, возникающих в грунте вследствие его неравномерного высыхания, или, другими словами, вследствие образования градиента влажности, может быть совершенно аналогичным с постановкой вопроса

в случае температурных напряжений. Характер напряжений в обоих случаях будет совершенно одинаковым, а различие заключается лишь в количественных характеристиках. Вместо коэффициента линейного сокращения (α) мы будем иметь коэффициент линейной усадки при усыхании (k), а вместо градиента температуры – соответственно градиент влажности ($\Delta\omega/\Delta z$), и формула для разрывающих напряжений τ_b при усыхании влажного глинистого грунта будет иметь вид:

$$\tau_b = \frac{1}{2} k G x \frac{\Delta\omega}{\Delta z}. \quad (8)$$

Появление морозобойных трещин на поверхности автомобильной дороги с асфальтобетонным покрытием является следствием промерзания влажного грунта земляного полотна и представляет собой сложный термодинамический процесс, протекающий в неоднородной капиллярно-пористой среде. Задача о протекании этого процесса является одной из наиболее сложных задач математической физики. Основной трудностью решения указанной задачи является необходимость учета изменения агрегатного состояния и теплофизических характеристик среды, в результате чего задача становится нелинейной. Кроме того, при промерзании и оттаивании одновременно с изменением температурного поля имеет место массоперенос, вызванный перемещением влаги.

Расчет такого единого процесса динамики температурного и влажностного полей при промерзании (оттаивании) крайне сложен. В значительном числе случаев, когда при промерзании отсутствует интенсивное морозное пучение, связанное с массопереносом, для практических целей можно ограничить расчет процесса промерзания влажного грунта расчетом его теплового режима с учетом фазовых переходов воды. Таким образом, в первом приближении расчет промерзания (оттаивания) грунта может быть значительно упрощен.

Для подобных задач существует значительное число методов расчета типового режима промерзающих (протаивающих) влажных грунтов без учета миграции в них влаги, но учитывающих фазовые превращения последней. В силу того, что в зависимости от физических свойств грунта фазовые переходы могут происходить практически полностью при температуре замерзания (грубодисперсные грунты), так и в спектре температур (тонкодисперсные), возможны две постановки задачи о промерзании без учета миграции.

Если влага замерзает при одной температуре, задача состоит в исследовании динамики температурных полей в мерзлой и немерзлой зонах при наличии подвижной границы раздела фаз между ними (задача Стефана). Скорость продвижения границы раздела фаз также подлежит определению. Если же замерзание (протаивание) влаги происходит в некотором диапазоне температур, т.е. с образованием зоны промерзания, задача еще более усложняется.

На основании вышесказанного и полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. Существование свободной вертикальной поверхности предопределяет направление образующихся трещин, и в однородных массивах при этом условии должна формироваться система параллельных трещин на расстояниях x друг от друга (закон параллельности).

2. Так как вектор градиента температуры перпендикулярен изотермическим поверхностям, а последние параллельны свободным горизонтальной и вертикальной поверхностям массива, то система полос, выделяемая системой параллельных трещин, должна разбиваться поперечными трещинами как система прямоугольников. Углы при сопряжении продольных и поперечных трещин должны быть прямыми (закон перпендикулярности).

3. Разрывающие напряжения (τ_b) пропорциональны произведению линейного размера отдельности (x) на градиент температуры ($\Delta t/\Delta z$), поэтому при малых градиентах линейное сооружение распадается на крупные прямоугольные отдельности, а затем при увеличении градиентов эти отдельности последовательно делятся пополам трещинами последующих порядков генерации на все более мелкие отдельности.

4. При сопряжении трещин в виде основания и перпендикуляра основание образуется ранее, более длинной трещиной, более низкого порядка генерации, а перпендикуляр – позже, более короткой трещиной, более высокого порядка генерации.

5. В неоднородных породах с переменными в некоторых пределах морозобойные трещины могут быть извилистыми и не вполне параллельными друг другу, но перпендикулярность в точке сопряжений остается в силе.

6. Кроме двух систем взаимно перпендикулярных вертикальных трещин, выделяющих прямоугольные призмы, последние должны разбиваться горизонтальными трещинами на параллелепипедальные отдельности.

7. Анализ распределения полей влажности позволяет установить, что интенсивное изменение влажности грунта при промерзании происходит только непосредственно у фронта нулевых отметок.

Список литературы

1. Агейкин В.Н. Несущая способность водонасыщенных глинистых грунтов в основании дорожной конструкции / В.Н. Агейкин, В.Ф. Бай, Н.Н. Подгорнова. – Тюмень: Тюмен. гос. архит.-строит. уни-т., 2007. – 10 с.
2. Бартоломей А.А. Механика грунтов. – М.: АСВ, 2004. – 304 с.
3. Бондарева Э.Д. Изыскания и проектирования автомобильных дорог на многолетнемёрзлых грунтах: учебное пособие / Э.Д. Бондарева, В.А. Давыдов. – Омск: Изд-во ОмПИ, 1989. – 120 с.
4. Бургонутдинов А.М. Образование морозобойных трещин на автомобильных дорогах / А.М. Бургонутдинов, В.И. Клевеко // Сб. междунар. науч. трудов научно-практической интернет конференции. – Киев, 2011. – 10 с.
5. Гольштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1973. – 374 с.

References

1. Agejkin V.N. Nesushhaja sposobnost' vodonasyshennyh glinistyh gruntov v osnovanii dorozhnoj konstrukcii /

V.N. Agejkin, V.F. Baj, N.N. Podgornova. Tjumen': Tjumen. gos. arhit.-stroit. uni-t., 2007. 10 p.

2. Bartolomej A. A. Mehanika gruntov. M.: ASV, 2004. 304 p.

3. Bondareva Je.D. Izyskanija i proektirovanija avtomobil'nyh dorog na mnogoletnemjorzlyh gruntah / Je.D. Bondareva, V.A. Davydov // Uchebnoe posobie. Omsk: Izd-vo OmPI, 1989. 120 p.

4. Burgonutdinov A.M. Obrazovanie morozobojnyh treshhin na avtomobil'nyh dorogah / A.M. Burgonutdinov, V.I. Klev-eko // Sb. mezhdunar. nauch. trudov nauchno-prakticheskoj internet konferencii. Kiev, 2011. 10 p.

5. Gol'shtejn M. N. Mehanicheskie svojstva gruntov. M.: Strojizdat, 1973. 374 p.

Рецензенты:

Сушков С.И., д.т.н., профессор кафедры технологии и машин лесозаготовок, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

Павлов А.И., д.т.н., профессор кафедры лесных, деревообрабатывающих машин и материаловедения, ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

Работа поступила в редакцию 21.05.2014.