

НАРУШЕНИЯ МЕХАНИЗМА ПРОЧНОСТИ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

Д.А.Каюмов

Ташкентский государственный транспортный университет, ст. преп., (PhD)

Н.Аскарров

Ташкентский государственный транспортный университет, студент гр. YMAL-4

М.Эргашов

Ташкентский государственный транспортный университет, студент гр. YMAL-4

Б.Толибов

Ташкентский государственный транспортный университет, студент гр. YMAL-4

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7437897>

Аннотация. Проанализировано определения влияния многократных и кратковременных нагрузок на физико-механические свойства, в том числе прочностных и деформационных характеристик уплотненных слабозасоленных супесчаных грунтов хлоридно-сульфатного засоления. На физико-механические свойства уплотненных засоленных грунтов также зависят от состояния подвижной нагрузки, т.е. от многократных и кратковременных транспортных нагрузок. Проведены лабораторные исследования с слабозасоленными супесчаными грунтами хлоридно-сульфатного засоления. Лабораторные эксперименты показали, что с увеличением количества воздействия циклических и кратковременных нагрузок на грунт увеличиваются остаточные деформации, плотность и модуль осадки, а пористость, коэффициент пористости, прочностные и деформационные характеристики грунта уменьшаются.

Ключевые слова: Слабозасоленный грунт, циклическая нагрузка, остаточная деформация, жёсткий и вязкий связ, процесс деформирования, структурные элементы, упруго-вязкий характер деформирования.

BREAKING THE MECHANISM OF STRENGTH OF BONDS BETWEEN THE STRUCTURAL ELEMENTS OF SALTED SOILS UNDER THE INFLUENCE OF A MOVING LOAD

Abstract. The determinations of the influence of repeated and short-term loads on the physical and mechanical properties, including the strength and deformation characteristics of compacted slightly saline sandy loamy soils of chloride-sulphate salinization, are analyzed. The physical and mechanical properties of compacted saline soils also depend on the state of the moving load, i.e. from repeated and short-term transport loads. Laboratory studies were carried out with slightly saline sandy loamy soils of chloride-sulfate salinity. Laboratory experiments have shown that with an increase in the amount of exposure to cyclic and short-term loads on the soil, residual deformations, density and modulus of settlement increase, and porosity, porosity coefficient, strength and deformation characteristics of the soil decrease.

Keywords: Slightly saline soil, cyclic loading, residual deformation, rigid and viscous bond, deformation process, structural elements, elastic-viscous nature of deformation.

При проектировании дорожных одежд используются физико-механические свойства, прежде всего следующие характеристики засоленных грунтов [1]: плотность,

влажность, пористость, модуль осадки и так называемые расчетные характеристики: модуль упругости грунта E , удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ .

Анализ литературных и нормативных документов по строительству дорог, показывает, что физико-механические свойства уплотненных засоленных грунтов также зависят от состояния подвижной нагрузки, т.е. от многократных и кратковременных транспортных нагрузок. Для определения влияния многократных и кратковременных нагрузок на физико-механические свойства, в том числе прочностных и деформационных характеристик уплотненных слабозасоленных супесчаных грунтов хлоридно-сульфатного засоления проводили соответствующие лабораторные исследования.

Лабораторные исследования проводились с слабозасоленными супесчаными грунтами хлоридно-сульфатного засоления. Испытываемый грунт имел следующие характеристики: число пластичности $PI=5,35$, влажность при текучести $W_{тек}=29,1\%$; влажность при раскатывании $W_p=23,8\%$; максимальная плотность при стандартном уплотнении $\gamma_{max}=1780 \text{ кг/м}^3$ и оптимальная влажность $W_{оп}=17,5\%$. Для определения выше отмеченных свойств грунтов образцы подготовлены следующим образом. Слабозасоленный грунт естественного сложения с ненарушенной структурой предварительно увлажняли до $(0,6-1,0)W_{тек}$. Для равномерного распределения влаги увлажненный участок грунта покрывали полиэтиленовой пленкой. После разработки грунта они распадались на систему агрегатов ненарушенной структуры различного размера. Уплотнение грунтов до коэффициента уплотнения $K_y=0,94 \div 1,02$ на кольце сдвигового прибора ГПП-30 (конструкция Маслова-Лурье), размерами высотой $h=3,5$ см и диаметром $d=7,1$ см осуществляли на гидравлическом прессе кратковременно повторяющимся действием, при удельном давлении – $0,7$ МПа. Общее время выдерживания образца под нагрузкой составляло 2 мин. Прежде чем определить свойства уплотненных агрегированных грунтов, на образец прикладывали кратковременные и циклические нагрузки.

Учитывая, что давление на дорожную одежду от колеса автомобиля $P=0,6$ МПа уменьшается, на грунт земляного полотна оно доходит до $P=0,1$ МПа, эту нагрузку передавали к образцу циклически [2]. Порядок приложения циклической нагрузки осуществляли следующим образом. На рычаг прибора ГПП-30, передающий вертикальное давление на грунт, установлено специальное устройство, позволяющее превращать постоянную статическую нагрузку на кратковременную циклическую. При проведении эксперимента время действия вертикальной нагрузки на образец составило $0,1-0,3$ с., а интервал между погружениями нагрузки $0,3-0,5$ с. Число приложений кратковременной нагрузки фиксировали с помощью электросчетчика, установленного на приборе. Результаты экспериментов показаны в табл. 1.

Таблица-1.

Влияние кратковременной и циклической нагрузки на свойства засоленных супесей хлоридно-сульфатного засоления при $W=0,8W_{тек}$, $K_y=0,96$

Свойства грунтов	Количество приложение кратковременные и циклические нагрузки при ΣN_p							
	0	1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
Остаточная деформация, l , мм	0	0,010	0,182	0,328	0,437	0,546	0,656	0,765

Плотность грунтов, γ , кг/м ³	1709	1710	1718	1725	1730	1736	1741	1746
Пористость, n , %	0,360	0,359	0,357	0,354	0,352	0,350	0,348	0,346
Коэффициент пористости, ξ	0,562	0,561	0,555	0,548	0,543	0,538	0,534	0,529
Модуль осадки, a , мм/м	0	0,40	5,20	9,37	12,48	15,60	18,74	21,86
Влажность грунтов, в долях от W_T	0,981	0,976	0,967	0,958	0,949	0,939	0,930	0,925

Проведенные лабораторные эксперименты (табл. 1) показывают, что с увеличением количества воздействия циклических и кратковременных нагрузок на образец и влажности грунта увеличиваются остаточные деформации, плотность и модуль осадки, а пористость, коэффициент пористости, прочностные и деформационные характеристики грунта уменьшаются.

Результаты лабораторных экспериментов можно объяснить следующим образом.

Условия возникновения и накопления остаточных деформаций под воздействием кратковременной многократной прикладываемой нагрузки можно проследить с помощью модели, аналогичной, предложенной В.Д.Казарновским [3, 4] и представленной на рис.1.

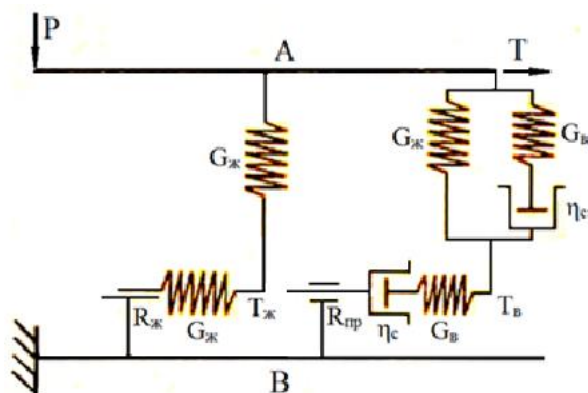


Рис.1. Схема к анализу взаимодействия жестких и вязких связей, действующих между отдельными структурными элементами: А и В – структурные элементы; Р – нормальное усилие; Т – сдвигающие усилия; G_b , G_j – жесткость пружин вязкой и жесткой связей; T_b , T_j – сдвигающие усилия распределяющие между жесткой и вязкой связями; R_j , $R_{пр}$ – прочностные жесткой связи и предельная прочность; η_c – условная вязкости связи

Рассмотрим совместную работу под нагрузкой различных связей, возникающих между двумя структурными элементами А и В. В модели между двумя структурными элементами действуют включенные параллельно жесткая и вязкая связи. В засоленном грунте роль жестких связей выполняют грунтовый скелет, состоящий из минеральных зерен и кристалл солей, а также сильно модифицированные пленки связанной воды, адсорбированные на поверхности грунтовой частицы, роль вязких связей – поровая вода и пленки связанной воды. Свойства жестких связей не зависят от временных факторов, свойства вязких связей зависят.

Жесткая связь характеризуется упругим характером деформирования: приложенная нагрузка вызывает практически мгновенную деформацию; с увеличением нагрузки деформация нарастает, чаще всего примерно линейно. Жесткая связь обладает хрупким

характером разрушения. При этом прочность ее практически не зависит от характера и скорости приложения нагрузки. Свойства такой связи моделируются с помощью механического элемента, содержащего пружину (реологического тела Гука) и включенный с ней последовательно элемент, работающий на трение и моделирующий хрупкое разрушение (элемент срабатывает при превышении растягивающим его усилием некоторого значения $R_{ж}$).

Вязкая связь характеризуется тем, что деформируются под нагрузкой не мгновенно, а по времени (упруго-вязкий характер деформирования). Вязкая связь моделируется с помощью реологического тела Максвелла, тела Гука и дополнительного элемента трения, срабатывающего при чрезмерном усилии. Поведение связи зависит от скорости и ее деформирования.

Прочность связей зависит от напряженного состояния, возникающего под действием внешних нагрузок. Изменение напряженного состояния прежде всего отражается на сопротивлении жестких связей, так как их прочность прямым образом связывается с элементом трения. Возникновение в этом элементе некоторого нормального усилия вызывает повышение прочности рассматриваемого элемента. Возникновение под влиянием напряженного состояния дополнительного сопротивления разрушению жесткой связи моделируется введением дополнительной жесткой связи, содержащей элемент трения, сопротивление которого и будет зависеть от напряженного состояния. При некотором напряженном состоянии такая связь не работает. По мере изменения напряженного состояния между структурными элементами может включиться большее или меньшее количество связей, в соответствии с чем суммарная их прочность будет меняться. При этом в работу могут вступить дополнительно жесткие и вязкие связи. Суммарное сопротивление последних не будет непосредственно связано с напряженным состоянием, однако будет зависеть от числа этих связей, которое, в свою очередь, соответствует данному напряженному состоянию.

Количество связей, которые могут возникнуть при изменении напряженного состояния, ограничено, так как контакт структурных элементов всегда ограничен по площади. С ростом напряженного состояния (с ростом нормальной нагрузки) количество дополнительно вступающих в работу вязких связей не может превысить некоторого значения, при этом суммарное их сопротивление будет до некоторого напряженного состояния возрастать, а потом оставаться постоянным.

Количество дополнительных связей с ростом напряженного состояния также не может превысить некоторого значения. Однако суммарное их сопротивление возрастает и после того, как количество дополнительных связей будет постоянным, так как это сопротивление связано не с количеством таких связей, а со значением суммарного нормального усилия.

Роль вязких связей не ограничивается только вязким сопротивлением сдвигающей нагрузке T . Наличие упруго-вязких связей в структуре должно отражаться на сжимающих усилиях в жестких связях, поскольку определенную часть внешнего усилия P упруго-вязкие связи примут на себя. Для отражения этого обстоятельства к упруго-вязкому элементу, работающему на сдвиг, подключен упруго-вязкий элемент, работающий на сжатие от нагрузки P . При этом, поскольку рассматривается процесс разрушения от сдвига, а от нагрузки P разрушения произойти не может, этот дополнительный элемент

выполнен в виде тела Кельвина бесконечной прочности. Благодаря его введению отражается влияние связи на напряжения в системе от сжимающей нагрузки P .

При кратковременном приложении нагрузки нормальное усилие P и сдвигающее усилие T мгновенно распределяются между жесткой и вязкой связями пропорционально их жесткости.

$$T_v = \Delta G_v, \quad (1)$$

$$T_j = \Delta G_j, \quad (2)$$

где G_v и G_j – жесткость пружин вязкой и жесткой связей; Δ – величина, на которую произошло растяжение пружин.

Жесткость жесткой связи мало изменяется во времени, жесткость вязкой связи снижается благодаря движению поршня в цилиндре. При этом происходит перераспределение усилий в связях, усилие в жесткой связи будет нарастать в соответствии с зависимостью

$$T_j = T / [1 + (G_v)_t / G_j], \quad (3)$$

где $(G_v)_t$ – жесткость вязкого элемента, падающая во времени до некоторого конечного значения, зависящего от длины цилиндра.

Сопротивление в элементе трения жесткой связи T_0 будет нарастать во времени, по мере роста в ней нормального усилия до его предельной величины P

$$T_0 = P\psi, \quad (4)$$

где ψ – коэффициент трения.

Достигнув своего предела, сопротивление жесткой связи в процессе деформирования не теряется, а сохраняется на том же уровне. Это учтено введением в модель бесконечного длинного (с точки зрения пределов деформирования) элемента трения.

Если действующая нагрузка не превысит сопротивления жесткой связи $T < T_0$, то деформация в модели наблюдаться не будет. Если к модели будет приложена такая нагрузка $T > T_0$, при которой в некоторый момент времени усилие, возникающее в жесткой связи, превысит сопротивление в элементе трения жесткой связи, то произойдет его смещение. В результате сопротивление системы может снизиться и это вызовет необратимую деформацию в вязкой связи. Деформация будет продолжаться до тех пор, пока не возрастает сопротивление жесткой связи вследствие увеличения в ней нормального усилия. И тогда сопротивление системы снова окажется больше сдвигающего напряжения. Длительность этого процесса будет зависеть от напряжения, первоначально возникающего в вязкой связи, разности первоначально напряжения в жесткой связи и ее прочностью, а также от вязкости вязкой связи, то есть в конечном итоге от приложенной нагрузки, прочности жесткой связи и соотношения начальных жесткостей вязкой и жесткой связи.

При однократном приложении нагрузки необратимая деформация вязкой связи будет незначительной. Многократное же приложение нагрузки вызовет накопление этой деформации сдвига. Этот процесс будет иметь монотонный характер по мере движения поршня в бесконечно длинном цилиндре.

Таким образом, предложенная модель наглядно показывает, что до некоторого напряженного состояния остаточные деформации в засоленном грунте не возникнут. Если же напряжения, возникающие в жесткой связи, превысят их сопротивление, то при

каждом приложении нагрузки будет образовываться остаточная деформация сдвига (за счет необратимой деформации в вязкой связи), которая будет накапливаться с увеличением количества приложений кратковременной нагрузки.

Результаты лабораторных экспериментов показывают, что в условиях многократного нагружения грунтов значения прочностных характеристик ниже, чем при статическим воздействием нагрузок. При этом происходит уменьшение как сцепления, так и угла внутреннего трения. Это можно объяснить следующим образом. В соответствии с предложенной моделью общая сопротивляемость сдвигу складывается из сопротивляемости жестких и вязких связей. В процессе деформирования происходит снижение сопротивляемости системы за счет смещения в элементе трения жесткой связи. В результате должно снизиться сцепление. Так как сопротивляемость жестких связей, согласно модели, достигнув некоторого предела не теряется совсем, а общая сопротивляемость системы сдвигу падает, то это свидетельствует и о снижении второй прочностной характеристики – угла внутреннего трения.

Можно отметить, что снижение значений прочностных характеристик тем больше, чем больше влажность грунта. Например, для суглинка при 10000 нагружениях происходит уменьшение по сравнению со статическим: при влажности $0,6W_{\text{тек}}$ – сцепления на 6% и угла внутреннего трения на 4%, а при влажности $0,8W_{\text{тек}}$ – сцепление на 25% и угла внутреннего трения на 27%

Увеличение количества приложений кратковременной нагрузки так же вызывает снижение прочностных характеристик грунта. Так для суглинка с влажностью $0,7W_{\text{тек}}$ уменьшается по сравнению со статическим значениями при $N=1000$ - сцепление на 10%, угол внутреннего трения на 12%, а при $N=1000000$ – сцепление на 15% и угол внутреннего трения на 17%.

Анализ результатов экспериментальных работ также показали, что сцепления и модуль упругости грунтов уменьшается с уменьшением плотности и влажности грунтов, а угол внутреннего трения оказалась практически постоянной при изменении плотности (при заданной влажности).

Вывод о независимости угла внутреннего трения от плотности, но при статическом испытании глинистых грунтов был получен В.Д.Казарновским [3] и может быть объяснен следующим образом.

Предположим, что сдвиг происходит по некоторой плоскости. Контакт частиц, непосредственно примыкающих к плоскости сдвига с одной стороны, с частицами, непосредственно примыкающими к плоскости сдвига с противоположной стороны, может осуществляться как через точки непосредственного контакта частиц, так и через водные пленки. Общая площадь сдвига F :

$$F = F_{\text{пл}} + F_{\text{гр}} + F_{\text{воз}}, \quad (5)$$

где $F_{\text{пл}}$ – общая (суммарная) площадь контакта через пленки; $F_{\text{гр}}$ – общая (суммарная) площадь непосредственного контакта частиц; $F_{\text{воз}}$ – часть общей площади сдвига, приходящаяся на долю воздуха.

Нормальное давление P , приложенное к плоскости сдвига, может передаваться как через пленки, так и через точки непосредственного контакта. Предположим, что распределение напряжений между пленками и непосредственными контактами

происходит пропорционально модулям упругости соответственно пленок и частиц грунта, т.е. предположим, что

$$P_{пл} = mP_{гр} = (E_{пл}/E_{гр})P_{гр} \quad (6)$$

где: $P_{пл}$ – усилие, действующее на единицу площади пленочного контакта; $P_{гр}$ – усилие, действующее на единицу площади непосредственного контакта; $E_{пл}$ – модуль упругости пленок; $E_{гр}$ – модуль упругости твердой фазы.

Предположим, что для преодоления сил трения ко всей площади сдвига потребовалось приложить усилие T . Тогда коэффициент трения определится:

$$f = T/PF, \quad (7)$$

Поскольку нормальное давление передается через пленки и точки непосредственного контакта, можно записать

$$PF = P_{гр}F_{гр} + P_{пл}F_{пл}, \quad (8)$$

где P – нормальное давление на единицу площади сдвига.

Подставляя (7) в (8), получим:

$$f = T/(P_{гр}F_{гр} + P_{пл}F_{пл}). \quad (9)$$

Далее необходимо учесть, что трение в пленках весьма мало и может быть принято равным нулю. В таком случае, сдвигающее усилие преодолевает только сопротивление трению, возникающее в точках непосредственного контакта. Если обозначить коэффициент трения в точках непосредственного контакта, т.е. коэффициент трения сухой частицы по частице, через $f_{гр}$, то можно записать:

$$T = f_{гр}P_{гр}F_{гр}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), получим:

$$f = f_{гр}P_{гр}F_{гр}/(P_{гр}F_{гр} + P_{пл}F_{пл}) = f_{гр}/(1 + P_{пл}F_{пл}/P_{гр}F_{гр}). \quad (11)$$

или, учитывая (6):

$$f = f_{гр}/(1 + m(F_{пл}/F_{гр})), \quad (12)$$

где $m = E_{пл}/E_{гр} = P_{пл}/P_{гр}$.

Анализ формулы (12) показывает, что коэффициент трения для данного грунта зависит от отношения площадей непосредственного контакта и контакта через пленки, а также от отношения модулей упругости пленок и твердой фазы. При неизменной величине m увеличение $F_{пл}/F_{гр}$ (что соответствует повышению влажности грунта) понижает величину коэффициента трения f . Если $F_{гр}=0$, то $f=0$. Это положение соответствует переходу грунта в текучее состояние при повышении влажности границы текучести или отвечает грунтам, в которых контакт осуществляется только через пленки. Из формулы (12) также видно, что при $F_{пл}=0$, то $f=f_{гр}$. Вместе с тем $f_{гр}$ для данного грунта величина постоянная. Отсюда следует: если влажность грунта понижается настолько, что контакты через пленки практически исчезают, коэффициент трения при дальнейшем понижении влажности должен оставаться постоянным. Далее из формулы (12) следует, что величина части общей площади сдвига, приходящейся на долю воздуха $F_{воз}$, не оказывает влияния на коэффициент трения.

Таким образом, формула (12) позволяет наглядно объяснить факт независимости угла внутреннего трения от плотности при заданной влажности. Экспериментально установленные закономерности деформирования грунта подтвердили правильность высказанных теоретических представлений о механизме деформирования. А именно: при многократном воздействии кратковременной нагрузки и при влажности больше чем $0,8W_T$

в уплотненном засоленном грунте происходит накопление остаточной деформации в виде сдвига. Ниже этого влажности грунт ведет себя как твердообразное тело и деформация происходит с изменением формы.

Выше было отмечено, что прочностные и деформационные свойства засоленных грунтов, подстилающих дорожную одежду прежде всего зависят от интенсивности и режима действия нагрузок, напряженного состояния, состояния грунтов по влажности и плотности, вида и степени засоления грунтов, структурных особенностей. Эти зависимости можно выразить в следующем виде:

$$E, C, \varphi = f(N_p, W_p, K_y, A), \quad (13)$$

где N_p – количество приложений нагрузки; W_p – расчетная влажность, в долях от текучести; K_y – коэффициент уплотнения, A – вид и степени засоления грунтов.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные в лабораторных условиях с образцами, приготовленными при различной плотности и влажности (табл. 2), а также полевые исследования позволили определить значения модуля упругости, угла внутреннего трения и сцепления грунтов, в частности слабозасоленных супесей хлоридно-сульфатного засоления по выражениям:

$$E = E_0(\lg N_p + 187,4) - \Delta E_w(W_p - 0,55) + \Delta E_{K_y}(K_y - 0,1), \quad (14)$$

$$C = C_0(1,032 - 0,032 \lg N_p) - \Delta C_w(2,35 W_p - 1,29) + \Delta C_{K_y}(15,59 K_y - 14,51), \quad (15)$$

$$\varphi = \varphi_0(1 - 0,032 \lg N_p) - \Delta \varphi_w(1,72 W_p - 0,95), \quad (16)$$

где E_0 , φ_0 , C_0 – коэффициент учитывающий приращение модуля упругости, угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от числа приложения нагрузки N_p , $E_0 = 0,372$ МПа, $\varphi_0 = 31^\circ$, $C_0 = 0,031$ МПа; ΔE_w , $\Delta \varphi_w$, ΔC_w – коэффициент учитывающий приращения модуля упругости, угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от W_p , $\Delta E_w = 130$ МПа, $\Delta \varphi_w = 31^\circ$, $\Delta C_w = 0,031$ МПа; ΔE_{K_y} , ΔC_{K_y} – коэффициент учитывающий приращения модуля упругости, угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от K_y , $\Delta E_{K_y} = 295$ МПа, $\Delta C_{K_y} = 0,031$ МПа.

Таким образом, при проектировании конструкции дорожных одежд целесообразно пользоваться прочностными и деформационными характеристиками засоленных грунтов с учётом воздействия на них кратковременных и многократных нагрузок.

REFERENCES

1. МКН 46-2008. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. “Узавтойул” ГАК. Ташкент. 2008. – 246 с.
2. Каюмов А.Д., Махмудова Д.А. Влияние циклических кратковременных нагрузок на физико-механические свойства лёссовых грунтов. Наука и техника в дорожной отрасли. Москва. №4-2019. 40-42 с.
3. Казарновский В.Д. Оценка сдвигоустойчивости связных грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1985. -168 с.
4. Пилепенко А.С. Сдвигоустойчивость глинистых грунтов в основании дорожных одежд под действием кратковременных многократных нагрузок. Автореф. дисс. на соис. уч. степ. к.т.н. - М.: 1990. -20 с.