УДК 624.15: 624.131:551 + 471

Р.Э.ДАШКО, А.В.ШИДЛОВСКАЯ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РАЗВИТИЯ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Анализируются основные ведущие факторы (изменение напряженного состояния пород в основании сооружений, физико-химические и биохимические условия), определяющие длительную устойчивость наземных сооружений. Отмечается, что фильтрационная консолидация не имеет практического значения при рассмотрении сжимаемости пород. Влияние физико-химических факторов на песчано-глинистые породы проявляется при загрязнении стоками с широким спектром минерализации и состава. Особо подчеркивается воздействие активизации микробной деятельности, в процессе которой образуются биохимические газы и нарастание содержания бактериальной массы, на снижение прочности и деформационной способности глинистых пород. Установлено, что для преобразованных глинистых пород обычно характерно наличие квазипластичного состояния.

The principal factors of constructions' long-term stability such as the stress-strain state, physical, chemical and biochemical conditions and its changes are analyzed. It is noted that the filtration consolidation isn't of practical significance when the compressibility of water-saturated clay soils is considered. The influence of physical and chemical factors on sand and clay soils takes place as a consequence of industrial leakages and sewages with wide variation of mineralization and composition. The impact of microbiota intensification that leads to the decrease of shear strength and deformation module of clay soils due to biochemical gas formation and bacterial mass accumulation is emphasized. It has been discovered that quasi-plastic state is typical for the transformed clay soils.

Как известно, в настоящее время проектирование зданий и сооружений проводится по двум предельным состояниям: по несущей способности и деформациям. Для проведения расчетов по предельным состояниям принципиальное значение имеют показатели сопротивления сдвигу – сцепление c и угол внутреннего трения φ, а для расчетов осадок сооружений – модуль общей деформации E_0. В большинстве случаев обеспечение параметров механических свойств проводится на основе влияния только изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) толщи горных пород. Однако при рассмотрении взаимодействия системы сооружение – горные породы наибольшие сложности возникают при оценке пород основания как самого важного конструктивного элемента системы. Известно, что развитие больших и неравномерных деформаций пород основания вызывает переход сооружения в аварийное состояние. Наиболее часто разрушение зданий наблюдаются в тех случаях, когда зона основания сложена слабыми водонасыщенными песчано-глинистыми грунтами, которые имеют высокий уровень чувствительности и уязвимости к изменению не только напряженного состояния, но и температурных условий, физико-химической и биохимической обстановки.

Прогноз длительной устойчивости сооружений при строительстве и реконструкции зданий должен обязательно сопровождаться изучением комплексного воздействия основных ведущих факторов: давления, физико-химических и биохимических условий, а также температурного режима в двух ас-

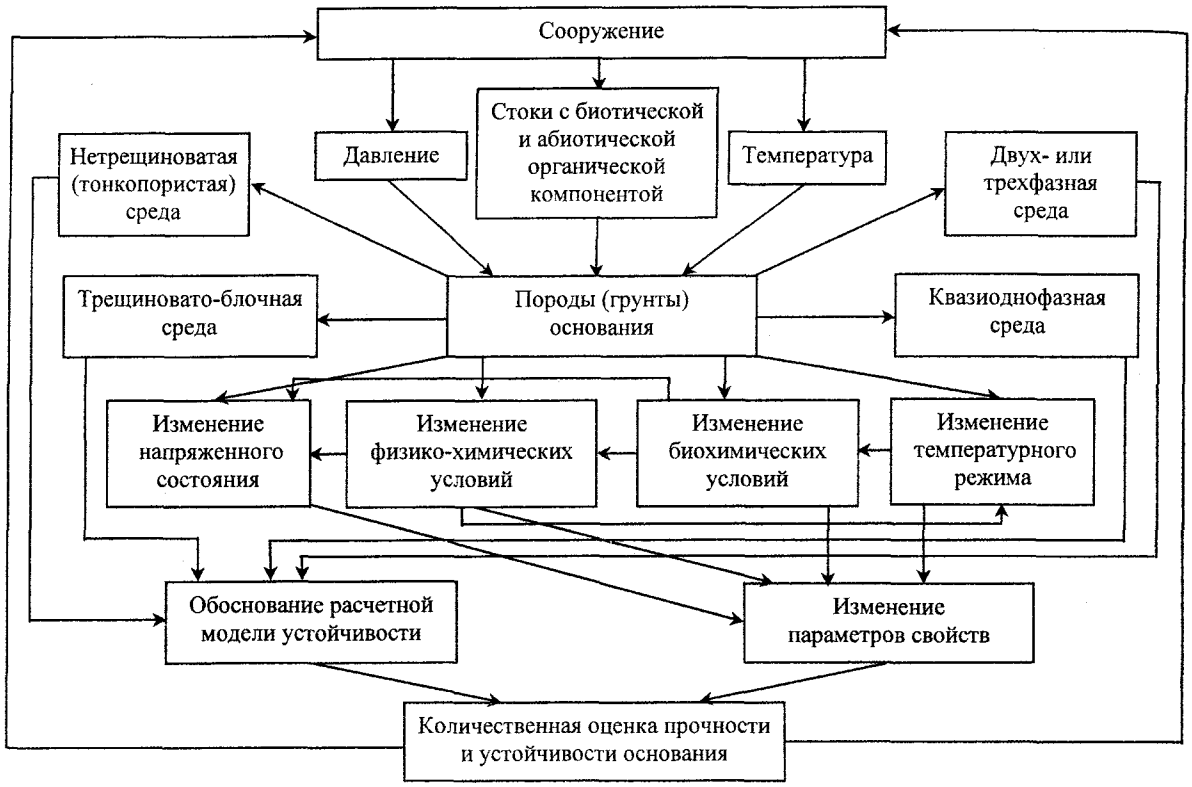


Рис.1. Блок-диаграмма комплексного анализа устойчивости системы сооружение – горные породы

пектах: изменения состояния и свойств грунтов во времени в зависимости от реальных условий их работы в основании; изменения напряженного состояния грунтов под действием веса сооружения, а также протекания физико-химических, химических и биохимических процессов. Общая схема систематизации и воздействия факторов, влияющих на устойчивость основания сооружений, приведена на рис.1.

Главным звеном является обоснование расчетной модели основания при действии определяющего фактора – давления от веса сооружения. Его роль будет меняться в зависимости от типа породы и активности протекающих процессов при разнообразных техногенных воздействиях.

При построении расчетных моделей оснований учитываются экспериментальные исследования и теоретические представления инженерной геологии, геотехники, геомеханики и механики грунтов. Анализ поведения глинистых грунтов необходимо проводить как на макро-, так и на микроуровнях их строения. С учетом макростроения выделяются две группы расчетных моделей оснований: трещиновато-блочная среда (среда с двойной пористостью) и дисперсная среда, обладающая только тонкой пористостью (наличие микротрещиноватости при этом не исключается). Анализ работы основания в таком случае необходимо проводить на микроуровне. В рамках модели дисперсной среды рассматриваются слабые глинистые грунты малой и отчасти средней степени литификации, имеющие текучую, тугопластичную и мягкопластичную консистенции и полное водонасыщение. Подчиненное значение в этих отложениях имеют цементационные связи.

Учитывая относительно слабые структурные связи таких водонасыщенных глинистых грунтов, наиболее достоверным будет вариант, когда сжимающие напряжения σ_z разрушают структурные связи в глинистом грунте, т.е. превосходят его структурную прочность на сжатие $\sigma_{стр}$. В этом случае необходимо проанализировать характер перераспределения сжимающих напряжений между поровой водой и скелетом грунта,

который зависит от содержания глинистой фракции, ее минерального состава, плотности и влажности отложений, темпов роста давления, особенностей работы грунта в основании сооружений (с возможностью либо отсутствием бокового расширения). В таблице приведен общий характер изменения максимального порового давления U_{max} для малолитифицированных глинистых грунтов четвертичного возраста Санкт-Петербургского региона различного гранулометрического состава и физического состояния (показателя консистенции) по результатам экспериментальных работ для одномерной задачи (при отсутствии бокового расширения). Тонкодисперсная часть этих грунтов представлена глинистыми минералами средней активности – гидрослюдами. При анализе работы грунта в основании с возможностью бокового расширения необходимо предусмотреть снижение значений порового давления в 1,5-2 раза (меньшее значение относится к суглинкам, бóльшее – к глинам).

Изменение максимального порового давления от содержания глинистой фракции и показателя консистенции

Глинистая фракция M_c, %	Показатель консистенции I_L	Поровое давление U_{max}/σ_z
3-10	0,5-0,75	0,32-0,40
	0,75-1,0	0,40-0,57
	1,0-2,0	0,58-0,70
10-30	0,5-0,75	0,28-0,32
	0,75-1,0	0,33-0,50
	1,0-2,0	0,50-0,62
30-60	0,5-0,75	0,03-0,28
	0,75-1,0	0,28-0,33
	1,0-2,0	0,32-0,38

Максимальная величина порового давления позволяет определить действующий градиент напора $J_д$, который сопоставляется с градиентом начала фильтрационной консолидации $J_{НФК}$ [1], предложенный Р.Э.Дашко для оценки роли фильтрационной консолидации*. Величина $J_{НФК}$ рассчитывается по эмпирической формуле $J_{НФК} = 100\sqrt{M_c}$, где M_c – содержание глинистой фракции в относительных единицах. Количество глинистых частиц определяет степень структурированности поровой воды, соответственно ее подвижность и, как следствие, возможность восприятия внешнего давления.

В случае, когда $J_д > J_{НФК}$, формируется две зоны по глубине: в верхней из них протекают деформации уплотнения за счет фильтрационной консолидации и ползучести скелета породы, а в нижней, где $J_{НФК} \geq J_д$, фильтрация воды из глинистой породы не происходит, и деформации могут развиваться только за счет ползучести скелета породы. При условии, когда $J_д < J_{НФК}$, в основании сооружения прослеживается только одна зона, где деформации протекают за счет ползучести скелета и глинистая порода должна рассматриваться как квазиоднородная среда. Мощность этой зоны $h_ф$ будет определяться исходя из действующих напряжений в основании сооружений, характера их распределения по глубине и градиента начала фильтрационной консолидации, который может быть определен экспериментальным либо расчетным путем.

Резкое возрастание мощности зоны $h_ф$ происходит только в супесчаных породах, в то же время для суглинков и глин $h_ф \ll 0,5$ м, а для пылеватых глинистых отложений практически отсутствует. При рассмотрении пород текучепластичной и текучей консистенций мощность зоны, где протекает фильтрационная консолидация, возрастает приблизительно до 1,5-2 м.

Таким образом, в рассматриваемой модели основания фильтрационная консолидация будет наблюдаться только в супесчаных и суглинистых породах текучей и текучепластичной консистенций при напряжениях, превышающих 0,1 МПа. При исследовании отложений в мягкопластичном состоянии зона фильтрационной консолидации настолько мала, что не имеет практического значения; в этом случае глинистые породы деформируются только за счет ползучести скелета с боковым распором. Следовательно, основной схемой проведения опытов для

* *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологический анализ процесса консолидации водонасыщенных глинистых пород // Инженерная геология. 1981. № 1.

определения показателей прочности и деформационной способности будет являться закрытая система испытания при консервации порового давления и возможности бокового расширения. Предпочтительней использовать схему неконсолидированно-недренированных испытаний в стабилометрах.

Экспериментально было показано, что при действии всесторонних давлений $\sigma_{вс}$ в условиях трехосного сжатия при разрушении структурных связей наблюдается постепенное снижение E_0 по экспоненциальному закону:

$$E_0 = E_0^{max} \exp\left[-\alpha\left(\sigma_{вс} - \sigma_{стр2}\right)\right],$$

где E_0^{max} – максимальная величина E_0 при минимально разрушенных структурных связях; $\sigma_{стр2}$ – вторая структурная прочность, определяющая разрушение наиболее прочных структурных связей; α – эмпирический коэффициент, зависящий от пластических свойств породы: для озерно-ледниковых отложений Санкт-Петербурга (в зависимости от их плотности и консистенции) $\alpha = 6 \div 8$; для моренных суглинков $\alpha = 3{,}0$; для разуплотненных нижнекембрийских глин $\alpha = 2{,}0$.

Компрессионные приборы используются только в том случае, когда в реальных условиях основания сооружений будет фиксироваться сжимаемость пород за счет оттока воды (фильтрационная консолидация) при невозможности развития боковых деформаций. Основным условием работы водонасыщенной глинистой породы в основании сооружений является отсутствие либо ограничение (локализация) зоны фильтрационной консолидации при возможности развития боковых деформаций.

Прогноз прочности и устойчивости оснований сооружений зависит не только от правильно выбранной расчетной модели и параметров свойств пород при действии давления, а также определяется влиянием физико-химической обстановки, которая формируется в процессе эксплуатации сооружений при наличии утечек из систем водоотведения и поступления промышленных стоков. В слабых водонасыщенных песчано-глинистых грунтах, в которых естественная влажность W_e больше влажности набухания $W_{наб}$ и при наличии разности концентраций между фильтрующимся $C_ф$ и поровым $C_п$ растворами при $C_ф > C_п$, возможно набухание глинистых грунтов за счет диффузии гидратированных ионов из внешнего раствора в поровое пространство глинистых грунтов. Интенсивность диффузионного набухания определяется составом и концентрацией фильтрующегося раствора, прежде всего, типом ионов, присутствующих в растворе, а также влажностью глинистой породы и давлением диффузионного набухания. Диффузионное набухание пород возрастает по мере перехода от растворов, содержащих одновалентные ионы к двухвалентным, которые являются в наибольшей степени гидратированными. При $C_ф < C_п$ набухание глинистой породы зависит от осмотического притока воды. Одновременно отмечается диффузия гидратированных ионов из грунта, ведущая к уменьшению концентрации порового раствора, что приводит к увеличению степени дисперсности грунта и повышению его адсорбционной способности.

Характер изменения прочности и деформационной способности глинистого грунта в процессе набухания, имеющего различную природу, позволяет оценить направленность процессов, которые приводят к увеличению степени деформируемости пород и снижению их прочности, а также к развитию деформаций подъема грунтов и сооружений.

При оценке длительной устойчивости сооружений принципиальное значение имеет активизация деятельности микроорганизмов в подземном пространстве. Микробиологические процессы, сопровождающиеся значительным наращиванием бактериальной массы, в большинстве случаев приводят к преобразованию структурных связей, снижению прочности и показателей деформационных свойств пород и повышению их чувствительности к различного рода воздействиям (изменению напряженного состояния и др.). Кроме того, прочность песчано-глинистых пород в процессе роста бактериальной массы (БМ) во времени может снижаться на 50-70 % в течение 2-3 лет (рис.2).

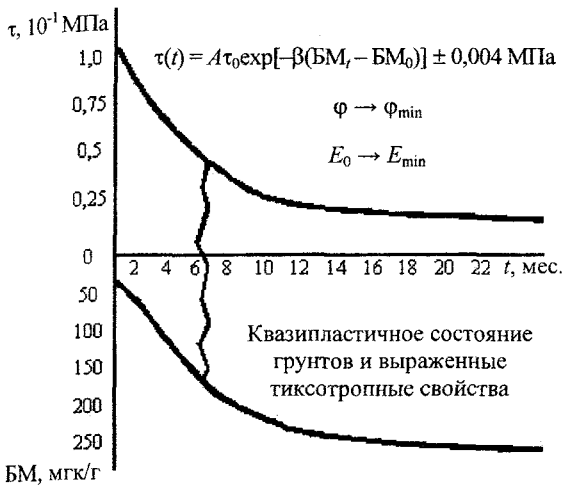


Рис.2. Изменение прочности τ глинистых грунтов в процессе роста бактериальной массы БМ во времени *t*

При оценке условий строительства и реконструкции зданий на территории исторического центра Санкт-Петербурга важную роль играют моренные отложения, которые традиционно рассматриваются как надежное основание для свайных фундаментов. При условии формирования морены в восстановительной обстановке под болотными отложениями наблюдается резкое снижение параметров физико-механических свойств. В зонах длительного техногенного загрязнения канализационными стоками и нефтепродуктами, а также под болотными отложениями даже плотные моренные суглинки и супеси характеризуются углами внутреннего трения менее 10° и сцеплением ниже 0,05 МПа, сохраняя при этом достаточно высокую плотность и устойчивую форму консистенции.

Большое значение в изменении состояния и свойств песчано-глинистых пород имеет их газонасыщение за счет активизации биохимических процессов в подземном пространстве города. Даже незначительное накопление малорастворимых газов (CH_4, N_2, H_2) в песчано-глинистых породах и соответственно повышение их газонасыщения вызывает изменение их НДС и способствуют значительному разуплотнению глинистых пород. В таких условиях существенно возрастает тиксотропность песчано-глинистых пород. Газонасыщение песчаных отложений приводит к снижению угла внутреннего трения вплоть до их перехода в состояние тяжелой жидкости.

При отсутствии фильтрационной консолидации в условиях микробной пораженности глинистые породы должны рассматриваться как квазипластичные разности. При этом их несущая способность при проектировании сооружений по второму предельному состоянию должна рассчитываться по формуле Прандтля $p_1 = \pi c + \gamma h_\phi$. В этом случае важное значение приобретает заглубление фундамента h_ϕ. Величина сцепления должна определяться с учетом настабилизированного состояния грунтов. Значение модуля общей деформации варьирует в зависимости от уровня всестороннего давления и степени разрушения структурных связей в слабой глинистой породе.