

Вавринюк Т.С., Федоренко Е.В. Миаком Санкт-Петербург

СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ГЕОТЕХНИКЕ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАСЧЕТАМ АЭРОДРОМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Современная геотехника, как наука, представляющая собой синтез знаний в области инженерной геологии, механики грунтов и проектирования дорожных конструкций и геотехнологий, претерпела значительные изменения по сравнению с той областью знаний, которая зародилась более 50 лет назад, сформировавшись под влиянием двух академических направлений: почвоведения и горного дела. Последние представления о грунтах позволяют определять для каждого слоя численные величины, адекватно характеризующие параметры жесткости, прочности, предварительного напряжения, водопроницаемости, реологические параметры и анизотропию. Набор параметров для геотехнических расчетов может составлять более 30 величин!

Прежде всего важным является определение начального состояния, которое может быть описано такими параметрами как начальный коэффициент пористости e_0 , начальное эффективное напряжение σ_{v0} , начальное гидростатическое давление поровой воды U_0 и начальное состояние бокового давления K_0 .

По-прежнему процесс извлечения, консервации и транспортирования образцов имеет первостепенное значение. Извлечение образцов должно производиться с максимальной осторожностью, тогда можно говорить об условно ненарушенной структуре и сходстве результатов с натурными условиями, однако всегда существует вероятность определенного нарушения структуры при отборе и транспортировке. В случаях слабых глин и илов нарушение структуры зависит от метода бурения, типа грунтоноса, метода его извлечения, уровня снятия напряжений, способа консервации, особенностей транспортировки, времени хранения, условий влажности, метода установки образца и лабораторного обслуживания.

В последнее время значительно развитие получили методы полевых испытаний, позволяющих путем погружения зондов и приборов получать необходимые геотехнические параметры на месте. Кроме того, в мировой практике принято для грунтов, характеризующихся сложным поведением, устраивать экспериментальные площадки. Наблюдения, измерения и моделирование грунтов на таких площадках ведется на протяжении более пятидесяти лет, а результаты представляют большую практическую и научную ценность. Стоит сказать, что в геотехнике сегодня не существует универсального подхода к интерпретации лабораторных и полевых данных для оценки несущей способности сооружений на слабых грунтах. Однако несомненная польза от наблюдений на экспериментальных площадках заключается в стимулировании развития аналитических методов и корректировки численных моделей.

Развитие приборов для испытаний грунтов независимо друг от друга способствовало тому, что результаты интерпретируются различными методами: аналитическими, численными, эмпирическими зависимостями (например, испытание сдвигометром-крыльчаткой базируется на теории предельного равновесия, а штамповые испытания на теории пластичности), что приводит к получению отличающихся результатов. Так сравнение результатов недренированной прочности с помощью девяти методов испытаний показывает, что минимальное значение 0,14 кПа получено при испытаниях на одноосное сжатие, а максимальное 0,34 кПа при испытаниях на сжатие в условиях плоской деформации. Получен большой разброс важной величины, позволяющей определять устойчивость сооружений на водонасыщенных грунтах. Если же полученные данные лабораторных испытаний сравнить с полевыми, расхождение результатов будет еще больше (до 6 раз). Все это свидетельствует о насущной необходимости дальнейшего развития и совершенствования методов определения характеристик грунтов. И если в новейшей мировой геотехнической практике, вооруженной современнейшими приборами, компьютерными программами и развиваемой

ведущими мировыми специалистами существуют такие недостатки, то что можно сказать о состоянии этого вопроса в нашей стране? Для нас стало нормой принимать табличные значения; в лучшем случае проводятся компрессионные испытания, реже испытания в приборе однополкостного среза. Но даже в тех случаях, когда имеются трехосные и консолидационные испытания, при расчетах становится ясным то, что изыскатели и сотрудники лабораторий, при проведении испытаний, не имели представления, для чего эти испытания проводятся. Основная проблема заключается в отсутствии прямой связи между геологами и геотехниками.

Все принятые в нашей стране методы обработки лабораторных испытаний и построенные на их основе методы расчетов используют теорию полных напряжений, что связано со сложностями определения порового давления и соответственно эффективных напряжений. Развитие компьютерных технологий позволило объединить подходы и на основе совместного учета полных и эффективных напряжений: были разработаны широко известные и продвинутые модели, реализованные в программах численного моделирования. Теория совместного расчета была впервые предложена в 1968 году и получила название Механика грунтов критических состояний (Critical State Soil Mechanics, CSSM).

ОБ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МЕТОДАХ РАСЧЕТА

В инженерной практике приняты методы расчетов, регламентированные нормативными и рекомендательными документами, однако, несмотря на актуализацию документов, существенного изменения они не претерпели. Все методы расчетов разработаны в середине прошлого века и не отвечают современным возможностям вычислительной техники и состоянию развития геотехники за рубежом.

Применение этих методик вполне оправдано используемыми в качестве исходных данных результатами лабораторных испытаний. Следует отметить, что современное представление о лабораторных испытаниях грунтов за рубежом значительно отличается от принятого в отечественной практике.

Методы определения механических характеристик, чаще всего используемые при проектировании объектов транспортной отрасли (авто и жд дороги), достаточно упрощенные и не во всех случаях соответствующие реальному поведению сооружений.

Важным параметром, определяющим исходную точку для выполнения расчетов, и, соответственно, конечный результат, является определение начального напряженного состояния, обусловленного давлением вышележащих слоев грунта. Обычно принимается равновесное состояние с шаровым тензором напряжений, однако эта ситуация скорее редкость, поскольку неоднородность геологического строения, линзы, выклинивание слоев и прочее как правило не учитываются.

В итоге любой расчет не представляет собой точный прогноз, а позволяет лишь оценить НДС системы «основание-сооружение» с определенной степенью вероятности. Существенным недостатком инженерных методов расчета является их не универсальность, т.е. необходимость для каждой расчетной схемы, для каждой проверки использовать различные методы расчетов со своими допущениями и упрощениями.

В случае несоответствия результатов инженерных методов расчета натурным данным принято использовать поправочные коэффициенты, корректирующие условность расчетной схемы. Учитывая давность разработки методов расчета можно предположить, что одним из основных способов наблюдения являлось измерение перемещений дневной поверхности, что не всегда имеет однозначное толкование в связи с малой изученностью процессов, происходящих непосредственно в массиве грунта.

Построение разрешающих уравнений в замкнутой форме при сложной геометрии напластования грунтов, произвольном нагружении как в пространстве, так и во времени, изменении граничных условий задачи, использовании нелинейных зависимостей между напряжениями и деформациями возможно в настоящее время только численными методами, в

частности одним из наиболее развитых и апробированных – методом конечных элементов (МКЭ).

Тенденции роста взлетной массы воздушных судов, а также необходимость проектирования аэродромов в сложных инженерно-геологических условиях требует повышения научно-технического уровня проектирования покрытий и совершенствования методов расчетов и конструирования. Накопленный мировой опыт в механике грунтов позволяет пересмотреть принятые подходы к расчетам аэродромных одежд.

Методика расчета аэродромных одежд имеет большое количество допущений и упрощений, наиболее существенными из них являются следующие:

- применение коэффициентов постели, являющихся коэффициентом пропорциональности между нагрузкой и деформацией, не зависящих от расчетных нагрузок;

- использование эквивалентного модуля упругости как обобщенной величины;

- использование обобщенной характеристики упругого прогиба.

Характеристика грунтового основания в виде коэффициента постели или модуля упругости является очень примерной, линейная зависимость между напряжениями и деформациями в грунтах должна устанавливаться на основании определения структурной прочности грунтов, начального напряженного состояния, а в случае водонасыщения с учетом градиента начальной фильтрации. В конструкции аэродромного покрытия слабым местом является грунтовое основание, упругая работа которого гарантируется только в случае должного уплотнения, и никаким расчетом не проверяется. По-прежнему не является до конца решенным вопрос о назначении сжимаемой толщи грунта. В актуализированном СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» после многих десятилетий использования критерия $0,2\sigma_{zg}$ введен новый критерий $0,5\sigma_{zg}$.

Можно выделить три пути развития методов расчета аэродромных покрытий (дорожных одежд):

- теория зернистых сред (Кандауров И.И., 1966), которая была разработана в 60-е годы и незаслуженно забыта в нашей стране. Согласно ее положениям зернистые среды рассматриваются не как сплошная среда, а как распорные и безраспорные системы частиц. Этот подход успешно применяется за рубежом, однако в нашей стране специалистов в этой области знаний очень немного. Современное развитие вычислительной техники позволяет реализовать эту теорию расчета в виде соответствующих программ (например, белгородская программа «Универсальный механизм»).

- численное моделирование, основанное на применении программ, считающих по методу конечных элементов (МКЭ). Использование продвинутой модели грунта, при наличии соответствующих испытаний, позволяет реалистично моделировать работу дорожных покрытий, учитывать динамические воздействия транспорта, а также оценивать накопление пластических деформаций. Эта концепция принята к внедрению Federal Aviation Administration (FAA) в США, разработаны специализированные программные конечноэлементные комплексы для авиационной отрасли.

- развитие теории упругости в виде решения для многослойных систем (Кульчитский В.А. и др. 2002).

Численное моделирование наиболее перспективный путь развития теории расчетов (<http://www.airporttech.tc.faa.gov/pavement/3dfem.asp>). В условиях повышения транспортных нагрузок, появления новых типов воздушных судов с различными схемами расположения колес, возможности трехмерного МКЭ-анализа имеют неоспоримые преимущества перед традиционными методами, особенно для конструкций жестких покрытий, когда можно оценить работу плит различной конфигурации и мест их соединений на основе моделирования. Основное преимущество МКЭ заключается в том, что расчеты могут быть выполнены как в линейной, так и в нелинейной постановке. При выполнении расчетов традиционным способом

предполагается линейная зависимость между давлением и деформацией, однако проверка нахождения в линейной зоне не выполняется. Выход за границу линейного диапазона приводит к ухудшению работы аэродромных одежд и появлению пластических (остаточных) деформаций. Более подробно с принципом расчета по МКЭ можно ознакомиться в статье (Вавринюк Т.С., 2014).

ПРИМЕНЕНИЕ МКЭ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ЛЕТНЫХ ПОЛЕЙ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ (международный опыт)

Аэропорт Инчхон (Корея) был построен в 2001 году в 52 км западнее Сеула. Территория образована из четырех крупных и нескольких мелких островов, пространство между которыми засыпано грунтом. Поскольку под территорией аэропорта проходят подземные железобетонные коммуникационные тоннели (шириной и высотой около 3 м), то необходимо было предусмотреть конструктивные решения, обеспечивающие равную жесткость основания в области, прилегающей к железобетонным конструкциям, а также обеспечить необходимую степень уплотнения грунта обратной засыпки.

В качестве решения было использовано армирование нижних слоев аэродромных одежд одним и двумя слоями георешетки. Благодаря двум принципам работы геосинтетической армирующей прослойки: мембранный эффект и эффект блокировки (заклинивание) (Резяпкин И.П., 2014; Федоренко Е.В., 2012) проблема неравномерности осадки была решена. Для выполнения расчетов был использован программный комплекс Plaxis, по результатам расчетов получено, что благодаря наличию геосинтетического материала удалось обеспечить снижение осадки на контакте с бетонной конструкцией. (Cancelli, P., 2002).

Другой пример использования численного моделирования для расчетов аэропортовых конструкций в сложных инженерно-геологических условиях – аэропорт Супадио (Индонезия). В качестве решения по обеспечению

требуемой несущей способности на слабых грунтах было предложено устройство свайного основания из висячих деревянных свай. В ходе эксплуатации было выявлено локальное место, сложенное слабыми грунтами, на котором проявились деформации покрытия (около 2 см) после эксплуатации самолета Боинг 737-400. Было принято решение выполнить реконструкцию средней части ВВП в виде устройства деревянных свай с шагом 40 см, диаметром 12 см, длиной 4 м над которыми был устроен 65 см слой щебня, укрепленного цементным вяжущим. Работы были выполнены в сжатые сроки для обеспечения бесперебойной работы аэропорта.

Моделирование конструкции усиления выполнялось с помощью программы Plaxis, в которой имеется модель слабого грунта, учитывающая ползучесть. Расчеты выполнялись как на статические, так и на динамические нагрузки с учетом процессов консолидации, т.е. с изменением времени.

Наличие свайного основания позволило снизить осадку и обеспечить нормальную эксплуатацию ВВП, в то время как расчеты показали, что обычная реконструкция (без свайного основания), с течением времени, не позволяет говорить о снижении осадки (Slamet Widodo, 2013).

Учет ползучести грунтов является немаловажной проблемой, которую следует учитывать при проектировании аэродромов, особенно на слабых и обводненных грунтах. По данным ведущих специалистов-геотехников из Санкт-Петербурга скорость осадки (наблюдения велись с 1775 г) такого известного сооружения как Исаакиевский собор составляет 0,7 мм/год. В этом отношении показательным является пример аэропорта Кансай (Япония), территория которого (размером 4 км на 1,2 км) представляет собой намывное сооружение. Всего понадобилось около 180 млн. кубических метров грунта, из него можно было бы построить 70 египетских пирамид. Учитывая то, что будущий остров будет проседать, первоначально его насыпали на 30 метров над уровнем моря.

Первые 5 лет искусственный остров просел на 8 метров, что намного превысило расчетные величины инженеров планировавших это

суперсооружение. Расчет был выполнен только на фильтрационную осадку, а ползучесть грунта учтена не была. В настоящее время осадка продолжается с меньшей интенсивностью (менее 7 см в год).

Один из первых примеров – аэропорт Чанги (Сингапур), построенный в конце 70-х годов прошлого столетия. Сложность для проектировщиков заключалась в том, что на протяжении ВВП в основании залегают как прочные грунты (песчаники и сланцы), так и слабые глинистые, что предопределяло развитие неравномерных осадок. Для ускорения консолидации водонасыщенных глин были применены геосинтетические дрены, которые погружались в основание на глубину до 40 м. Это позволило обеспечить быстрое осушение и упрочнение основания (Soil Improvement. Chapter 8 <http://www.encyclopedia.com/>).

Заключение

Современное состояние развития геотехники, включая методы получения информации о свойствах и поведении грунтов, требует высокой квалификации от инженера геотехника. Инженер-проектировщик не всегда имеет достаточно времени для глубокого изучения вопросов механики грунтов, совершенствования расчетных методик и прочего. Таким образом, для решения сложных инженерных задач требуется привлекать либо специализированные геотехнические организации, либо иметь в штате геотехнический отдел. Одним из примеров сотрудничества можно привести совместную работу над проектом аэропорта Мирный специалистов-геотехников ГК «МИАКОМ» и проектировщиков Ленаэропроект. Объект является весьма сложным и требует выполнения теплофизических прогнозных расчетов, в том числе с выбором мероприятий по термостабилизации, и последующих расчетов напряженно-деформированного состояния с обоснованием применения геосинтетических материалов, позволяющих обеспечить требуемую надежность объектов летного поля.

Список использованной литературы:

Advanced Pavement Design: Finite Element Modeling For Rigid Pavement Joints. Report II - Model Development, DOT/FAA/AR-97/7

Inchon international airport: subgrade reinforcement with geogrids Cancelli, P. ; Recalcatti, P. ; Shin, E. C. ; Italian Geotechnical Society. PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE; 1; 379-384

Резяпкин Применение геосинтетических материалов для усиления конструкции аэродромных одежд (Airports International №3 2014)

Федоренко Е.В. Влияние плоских георешеток на сдвигоустойчивость дорожных одежд. Красная линия №58 февраль 2012 с. 78-81.

Вторушин В.Н., Федоренко Е.В. Геосинтетические материалы в аэродромном строительстве. Журнал Airports International №6 (53) 2013

Slamet Widodo Dynamic loading behaviour of pavement on soft soil. Dissertation to attain the academic degree of DR.-ING. Freiberg, 2013.

Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. М.:Стройиздат, 1966 320 с.

Кульчицкий В.А., Макагонов В.А., Васильев Н.Б., Чеков А.Н., Романков Н.И. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. – М.: Физико-математическая литература, 2002

Вавринюк Т.С., Вторушин В.Н., Федоренко Е.В. Прогнозирование оттаивания грунтовых оснований вследствие изменений климата в районах со сложными природно-климатическими условиями и предупреждение связанных с этим процессом деформаций. Airports International №3 2014

Soil Improvement: Prefabricated Vertical Drain Techniques. Chapter 8 Case Studies. <http://www.encyclopedia.com/>