

УДК 555.388

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КОНСОЛИДАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Р.Э.ДАШКО

Оценка несущей способности глинистых пород как основания зависит от условий их консолидации в ходе строительства и эксплуатации сооружений. Выяснение возможности и характера уплотнения пород позволяет прогнозировать деформации основания, изменение его прочности, правильно назначать показатели сопротивления сдвигу, выбирать схемы расчета осадок и оценивать устойчивость сооружений.

Глинистые отложения согласно инженерно-геологической классификации Саваренского - Ломтадзе относятся к IV группе мягких связных пород. По существу эта группа охватывает громадный диапазон различных глинистых образований, отличающихся по возрасту, происхождению, степени литификации, вещественному составу, физико-химической активности и, следовательно, по своим строительным свойствам.

В настоящее время инженерная геология при оценке консолидации глинистых пород исходит из известного положения, что процесс уплотнения начинается с момента преодоления внешней нагрузкой прочности структурных связей и возникновения в поровой воде градиента, превышающего начальный. Следует отметить, что большое значение имеет также характер развития напряженного состояния пород во времени, который зависит от темпов роста внешнего давления при возведении сооружения.

Первые два фактора: прочность структурных связей и величина начального градиента - определяются в основном природой глинистых образований и прежде всего степенью их литификации. Роль технологического фактора в оценке уплотнения глинистых пород также связана с их инженерно-геологическими особенностями. Консолидация глинистых пород высокой степени литификации, обладающих значительной прочностью структурных связей, малой влажностью и большой плотностью, зависит в основном от соотношения нагрузки от веса сооружения и величины структурной прочности породы при сжатии (последняя называется нагрузкой начала сжатия или эффективным давлением). Высокое значение структурной прочности этих пород при сжатии (0,5-0,7 МПа) обуславливает их уплотнение под весом сооружения за счет

упругого сжатия скелета, а также наличия трещиноватости и микродефектов в толще глинистых пород.

Такой характер уплотнения имеет место, если нагрузка от веса сооружения меньше или близка к величине структурной прочности породы. При значительном превышении веса сооружения над структурной прочностью возникает опасная с точки зрения оценки устойчивости пород ситуация, поскольку их уплотнение не может идти за счет оттока воды. Последняя может быть удалена из глинистых пород высокой степени литификации при давлениях выше 5-10 МПа, что значительно превышает напряжения в основании гражданских и промышленных сооружений. Интенсивное разрушение структурных связей в таких породах означает потерю прочности и устойчивости породы в целом.

Наиболее сложен процесс консолидации в глинистых породах средней и малой степени литификации. В этих породах величина структурной прочности меньше тех давлений, которые передает сооружение. Следовательно, в оценке процесса уплотнения главную роль начинает играть перераспределение давлений между скелетом породы и поровой водой, которое приводит к созданию напоров, обуславливающих возможность фильтрации воды из породы.

Обычно считают, что в ходе уплотнения глинистой породы под действием нагрузки от веса сооружения существенное значение имеет фильтрационная консолидация, которая сменяется затем уплотнением за счет ползучести (вторичная консолидация), причем последняя протекает при постоянной влажности породы.

Для количественной характеристики процесса фильтрационной консолидации в инженерной геологии обычно используют представление о начальном градиенте, бытующее в практике фильтрационных расчетов. Как известно, величина начального градиента входит в формулы для определения осадки сооружения во времени. Природа начального градиента довольно сложна, и большинством исследователей объясняется аномальными свойствами воды, заключенной в порах глинистой породы. Искажение структуры воды в поле действия глинистых частиц и поглощенных катионов приводит к резкому изменению ее вязкости и проявлению реологических свойств. Поведение воды в глинистых породах должно рассматриваться с позиций деформирования (течения) вязкопластических систем, для которых справедливы реологические уравнения, в частности, уравнения Бингама - Шведова. Существующие методы оценки начального градиента (опытные и расчетные) исходят из одной и той же предпосылки - постоянства плотности породы, т.е. неподвижности (жесткости) ее скелета.

Однако ряд экспериментальных данных показывает, что пренебрежение ролью ползучести скелета может привести к переоценке возможности уплотнения породы за счет фильтрационной консолидации и, следовательно, к завышению прогнозируемого изменения прочности глинистого основания. Разрушение структурных связей в породе приводит к тому, что создаются условия для развития деформаций ползучести скелета, которые в глинистых отложениях, обладающих высокой пористостью и влажностью, протекают довольно интенсивно, как в условиях открытой, так и закрытой систем уплотнения^х.

^х Р.Э. Дашко. Оценка консолидации и несущей способности пород основания некоторых защитных сооружений. - В кн.: Проблемы инженерной геологии в связи с рациональным использованием геологической среды. Матер. Всесоюз. конф. Л., изд. ЛГИ, 1978.

Известно, что процесс консолидации водонасыщенных глинистых пород протекает довольно медленно, поэтому возникает необходимость сопоставления сроков эксплуатации сооружения с продолжительностью уплотнения пород оснований.

Анализируя характер развития деформаций глинистых пород в ходе их консолидации, основное внимание следует обращать на соотношение интенсивности протекания деформаций ползучести скелета породы и скорости оттока поровой воды из нее, определяемое содержанием тонкодисперсной фракции, которая влияет на структуру связанной воды и степень ее подвижности.

При невысоком содержании глинистых частиц в породах наблюдаются высокие скорости развития деформаций ползучести скелета и интенсивное нарастание давлений в поровой воде, которые постепенно уменьшаются по мере оттока ее из породы. В таком случае уплотнение будет идти в основном за счет фильтрации воды, что сопровождается уменьшением влажности и повышением плотности породы.

В породах высокой степени глинистости, в которых структура физически связанной воды в наибольшей степени искажена, а сама вода отличается повышенной вязкостью, развитие деформаций ползучести скелета происходит медленно, а вода в силу ярко выраженных ее пластических свойств отжимается из породы только при действии относительно высоких давлений. При меньших значениях этих давлений интенсивность уплотнения зависит от ползучести скелета породы.

Для определения величины давления, при котором возможно фильтрационное уплотнение пород, можно рекомендовать испытание в компрессионном приборе двух образцов-близнецов, один из которых исследуется по открытой системе, а второй – по закрытой. Отметим, что процесс уплотнения глинистых пород целесообразно моделировать с малыми ступенями нагрузки (не больше 0,020–0,025 МПа) для всех типов глинистых пород, поскольку именно такое повышение уровня напряженного состояния соответствует реальной работе породы в основании любого сооружения.

Эксперименты показывают, что при такой методике испытания характер сжимаемости породы при открытой и закрытой системах испытаний до определенных значений давлений одинаков: уплотнение идет с равной интенсивностью. Величина давления, при которой отмечается разница в сжимаемости породы в равных условиях при открытой и закрытой системах, зависит от содержания глинистой фракции, поскольку именно оно определяет количество и степень вязкости связанной воды и, следовательно, ее подвижность. При дальнейшем повышении давления в условиях открытой системы сжимаемость становится более интенсивной, чем в закрытой, что может быть объяснено только тем, что в условиях открытой системы уплотнение породы происходит за счет оттока воды. Давление, при котором впервые фиксируется разница в уплотнении двух образцов, может быть названа нагрузкой начала фильтрационной консолидации.

Если образцы пород, исследуемые по закрытой и открытой системам испытаний, снабдить датчиками порового давления, то можно отметить, что при росте давления, не превышающем нагрузки начала фильтрационной консо-

лидации, поровое давление развивается одинаково. Полученные для начала процесса фильтрации значения поровых давлений позволяют определить градиенты, при которых начинается уплотнение за счет оттока воды из образца.

В качестве примера можно привести результаты исследований, выполненных на озерно-ледниковых отложениях. При испытании супесей нагрузка начала фильтрационной консолидации составляла 0,025–0,04 МПа, для глин – более 0,15 МПа. Соответственно, градиенты, отвечающие началу фильтрационной консолидации, для супесей были равны 25, а для глин – 80.

Для тех же озерно-ледниковых отложений была получена зависимость между величиной градиента, соответствующего началу фильтрационной консолидации $J_{н.ф.к}$ и содержанием глинистой фракции в породе M_c (в относительных единицах): $J_{н.ф.к} = 100\sqrt{M_c}$. Полученное уравнение отвечает физической сущности процесса фильтрации. Действительно, в породах, не содержащих глинистой фракции, фильтрационная консолидация должна начинаться сразу же после преодоления прочности структурных связей. В то же время содержание глинистой фракции (при прочих равных условиях) определяет количество адсорбированной воды в породе, степень ее вязкости и, следовательно, подвижности.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что величина градиента, при котором имеет место фильтрационная консолидация, может быть на порядок выше, чем значение начального градиента фильтрации, при определении которого роль ползучести скелета глинистой породы пренебрегли^х.

Сравнение реально действующих градиентов в основании сооружений с экспериментальными показывает, что мощность зоны фильтрационного уплотнения пород часто не имеет существенного значения. Сжатие породы за счет оттока воды из нее имеет место, когда коэффициент фильтрации составляет более 10^{-2} м/сутки, однако и в этом случае фильтрационное уплотнение протекает в зоне ограниченной мощности.

Следует также отметить, что если в основании залегают слабые глинистые отложения, то роль касательных напряжений, возникающих под углами фундаментов, для оценки деформаций сооружений увеличивается. Поскольку прочность таких пород мала, то действие даже небольших касательных напряжений приводит к появлению сдвиговых деформаций, которые развиваются гораздо более интенсивно, чем деформации уплотнения. Осадка сооружения в этом случае происходит только за счет выдавливания пород из-под фундамента.

Следовательно, в глинистых породах средней и малой степени литификации уплотнение протекает в три этапа. На первом этапе, когда структурные связи еще не разрушены, сжатие породы происходит за счет упругих деформаций скелета. На втором этапе, когда отмечается разрушение связей, деформирование породы идет за счет ползучести ее скелета без оттока воды. Интервал давлений, при которых наблюдаются подобные деформации, определяется содержанием глинистой фракции и плотностью породы, которые обус-

^х Р.Э. Дашко. Оценка консолидации и несущей способности пород основания некоторых защитных сооружений. – В кн.: Проблемы инженерной геологии в связи с рациональным использованием геологической среды. Матер. Всесоюз. конф. Л., изд. ЛГИ, 1976.

давливают степень вязкости адсорбированной воды, подвижность скелета породы и возможность перестройки его сложения. Наиболее отчетливо этот процесс наблюдается в породах малой степени литификации, обладающих невысокой плотностью, значительной влажностью и повышенным содержанием глинистой фракции.

Если напряжения в основании сооружения создаст напоры, при которых возникают градиенты, большие по значению, чем величина градиента фильтрационной консолидации, то начинается фильтрационная консолидация породы (третий этап). Значение этого этапа особенно велико в процессе уплотнения пород с низким содержанием глинистой фракции.

Приведенный выше анализ процесса консолидации подтверждается данными наблюдений за изменением глинистых пород в основании различных сооружений. Например, в южной части Ленинграда в 1959 г. было начато строительство промышленного объекта, основанием которого служат моренные суглинки, классифицируемые как породы средней степени литификации. Фундамент сооружения - железобетонная плита 20 x 60 м. К 1964 г. давление от веса сооружения достигло 0,43 МПа.

Интенсивное развитие осадки сооружения с момента его строительства до настоящего времени потребовало дополнительных исследований по оценке несущей способности основания. Непосредственно под сооружением с помощью скважин было произведено послойное определение физических свойств и состояния основания. Моренные суглинки характеризуются как довольно однообразные по гранулометрическому составу породы с содержанием глинистой фракции в пределах 18-23 %. До возведения сооружения величина влажности по глубине варьировала от 19 до 22 %. Действующее в течение 14 лет давление в 0,43 МПа не изменило величины влажности пород и характера ее изменения с глубиной. Неизменной осталась и мягкопластичная консистенция породы. Постоянство физических констант породы предполагает развитие осадки сооружения в течение длительного времени за счет интенсивной ползучести.

Другим примером могут служить исследования, проводившиеся на хвостохранилищах одного из промышленных объектов Ленинградской области, для оценки консолидации пород основания, в разрезе которого прослеживаются породы малой степени литификации - ленточные отложения. Последние характеризуются как глины, реже как тяжелые пылеватые суглинки с влажностью, меняющейся от 34 до 60 %. К верхней и нижней частям разреза приурочены разности с меньшей влажностью, к средней - самой высокой. Давление от намытых хвостов 0,22-0,27 МПа. Поскольку тело хвостохранилища сложено довольно хорошо фильтрующими мелкозернистыми песками, следовало бы ожидать ощутимого уплотнения пород основания под действием этих нагрузок. Необходимо отметить, что большая площадь намыва и сравнительно небольшая мощность сжимаемых глинистых пород основания (8-10 м) позволяет рассматривать задачу уплотнения как одномерную, отождествляемую с условиями компрессионного сжатия, при котором обычно наблюдается наибольшая степень консолидации пород.

Обширный материал инженерно-геологических исследований, проведенных до намыва хвостохранилища, позволил сравнить изменение свойств пород основания под действием давления хвостов. Оказалось, что никакого изменения влажности по глубине в толще ленточных глин не наблюдалось: характер распределения влажности с пиковым ее значением в середине разреза не менялся. Неизменности влажности и плотности предполагает и сохранение постоянства прочности пород основания, что подтверждается сравнением сопротивления сдвигу пород до и после намыва хвостов.

Большой опыт возведения высоких дорожных насыпей на слабых глинистых породах, по данным зарубежных исследований, показывает, что никакого существенного уплотнения пород не происходит. Более того, при возведении насыпи на 50 % ее высоты основание работает как упругое тело, затем наблюдаются сдвиговые деформации, которые не уплотняют основания¹.

Таким образом, исследования работы глинистых пород в основании позволяют сделать вывод о том, что широкое использование теории фильтрационной консолидации для прогноза устойчивости различных сооружений, возводимых на глинистых породах, может привести к резко завышенным значениям несущей способности пород. Величина градиентов фильтрации в основании сооружения должна быть сопоставлена с теми градиентами, при которых возможно развитие фильтрационной консолидации глинистых пород. На основе такого сравнения должны определяться условия, для которых следует назначать методику получения расчетных показателей деформационных свойств и характеристик прочности (неконсолидированное состояние, частичная или полная консолидация пород основания). Анализ физической сущности процессов уплотнения пород основания является также основой выбора схемы расчета конечных осадков и осадок, изменяющихся во времени, как с использованием теории фильтрационной консолидации, так и с применением теории ползучести.

¹ Tavenas et al. Canadian Geotechnical Journal, 1974, v. 11, N 1.