



1883—1963

ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ¹

Профессор КАРЛ ТЕРЦАГИ

ОТ РЕДАКТОРА

В 1973 г. исполняется 90 лет со дня рождения и 10 лет со дня смерти выдающегося ученого и инженера, основоположника механики грунтов проф. Карла Терцаги. Его классический труд «Строительная механика грунта на основе его физических свойств» (*«Erdbautechnik auf bodenphysikalischer Grundlage»*) был опубликован почти 50 лет назад, в 1925 г. и вышел в русском переводе в 1934 г. под редакцией проф. Н. М. Герсеванова. В предлагаемом вниманию читателя переводе доклада проф. К. Терцаги на годовичном собрании Американского общества гражданских инженеров в Бостоне в 1961 г. дается обобщающий очерк истории и перспектив дальнейшего развития механики грунтов. Помещая перевод этой статьи, редакция сборника надеется, что статья окажется интересной для тех читателей, которые хотели бы окинуть взглядом существенные успехи в механике грунтов, свидетелями которых стало наше поколение; статья, безусловно, важна для всех специалистов в области механики грунтов и инженерной геологии, показывая, что развитие и успехи этих наук заключаются прежде всего в их взаимном проникновении.

Предлагаемая статья представляет значительный интерес и в том отношении, что в ней проф. К. Терцаги впервые дает формулировку наблюдационного метода в прикладной механике грунтов и иллюстрирует возможности этого метода на ряде хорошо проанализированных примеров из практики.

Наблюдационный метод не нашел еще всеобщего признания, и во всяком случае, применение его еще поразительно невелико. Учитывая большие потенциальные возможности наблюдационного метода при решении сложных задач прикладной механики грунтов, можно надеяться, что публикация данной статьи послужит важным стимулом в этом направлении.

Г. И. Тер-Степанян

¹ Перевод статьи „Past and future of applied soil mechanics“ by Karl Terzaghi опубликованной в Journal of the Boston Society of Civil Engineers, April 1961, pp. 110—139. Перевод с английского З. И. Марутян под ред. проф. Г. И. Тер-Степаняна

ПРЕДИСЛОВИЕ Д-РА РУТ Д. ТЕРЦАГИ К ПЕРЕВОДУ

Статья, озаглавленная «Прошлое и будущее механики грунтов» представляет собой удачный выбор по случаю девяностолетнего юбилея Карла Терцаги. Как в отношении представленного в ней фактического материала, так и выдвинутых в ней принципов она так же современна, как при ее первом изложении в 1960 г. Тот принцип, о котором сказано, что «обычай этот похвальнее нарушить, чем блюсти»^{*} может быть выражен парафразой афоризма Сократа «бессмысленная деятельность не стоит того, чтобы ее осуществлять».

Д-Р РУТ Д. ТЕРЦАГИ

СТАРЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ

Когда я начал свое восхождение, в начале этого столетия, я был снабжен набором аксиом, в которые тогда верили по крайней мере те, кто обучал этой евангельской истине кучку увлекающихся студентов. Вот эти правила:

- а) осадка уширенного фундамента при данной нагрузке на единицу площади не зависит от площади этого фундамента;
- б) осадка свайного фундамента равна осадке единичной сваи под той же нагрузкой на сваю;
- в) константы уравнивания Кулона для сопротивления сдвигу связных грунтов не зависят от времени;
- г) давление земли на боковые опоры не зависит от величины бокового перемещения опоры;
- д) влияние наличия воды на сопротивление сдвигу грунтов вызывается смазывающим действием воды.

Проектирование в области земляных работ² на основе этих правил практически не требовало никаких умственных усилий, но результаты часто были неутешительными... Я обнаружил это на самом раннем этапе своей профессиональной карьеры, после чего начались мои волнения. Ниже следуют некоторые из случаев, которые привлекли мое внимание.

В 1907 г. я запроектировал свое первое основание из отдельных опор, применив правила и методы, которым меня обучили; стены сооружения сильно растрескались и вопрос был передан в суд. К счастью, неудача с основанием была классифицирована, также в соответствии с распространенными в то время взглядами, как «божье деяние».

В те же годы мой хозяин запроектировал и построил низкую бетонную деривационную плотину с бетонным флютбетом в узкой скалистой долине в Восточных Альпах. Плотина была основана на мощном слое песка и гравия, содержащего рассеянные валуны. Учебники информировали своих читателей, что такого вида сооружения должны быть защищены от разрушения вследствие суффозии путем забивки ряда шпунтовых свай вдоль верхового и низового краев основания сооружения, но в них ничего не говорилось о требуемой глубине забивки. Поэтому сваи были попросту забиты до отказа, который был встречен на сравнительно небольшой глубине. Когда водохранилище было впервые заполнено, сооружение разрушилось вследствие суффозии и его

^{*} В. Шекспир, «Гамлет», акт I, сц. 4. Перевод М. Лозинского.

² Широко примененный в статье термин «earthwork engineering» охватывает не только земляные работы или земляные сооружения, но и фундаментостроение; по смыслу к нему ближе всего термин «геотехника», но такой перевод был бы слишком вольным. Прим. ред.

остатки были погребены в песке и гравии. К счастью, и этот случай третейский суд приписал «божьему деянию».

В 1913 г. началось исследование грунтов для проектирования нового здания Массачузетского технологического института в Кембридже, Масс. Согласно весьма компетентному геологическому отчету, подготовленному проф. У. И. Кросби, коренные породы были встречены на глубине от 36 до 40 м. Над коренными породами последовательно залегающие материалы: валунная глина толщиной от немногих до 7,5—9 м, голубая глина с нормальной толщиной от 24 до 30 м, ледниковые песок и гравий—от 0 до 10 м и рыхлые наносы толщиной около 6 м. Было решено установить основание, где это возможно, на свай-стойки, забитые до отказа в ледниковый гравий, залегающий на глине. На тех участках, где нельзя было получить нужного отказа, сваи должны были быть забиты через гравий до максимальной глубины—15 м в глину.

Для того, чтобы обосновать проектирование свайных фундаментов, было забито 80 пробных свай и на 38 из них были произведены полные испытания на пробную нагрузку (Maine and Sawtelle, 1918). Основываясь на результатах испытаний, было предложено 13 довольно разработанных правил для выбора длины свай в различных грунтовых условиях, а проектная нагрузка на сваю была выбрана таким образом, чтобы ожидаемая осадка нигде не превышала 1,5 мм.

В то время, когда производились эти испытания, я занимался проектированием и строительством свайных фундаментов в Портленде, шт. Орегон. У меня уже тогда были смутные опасения относительно правильности общепринятого метода проектирования таких фундаментов, но я все же не был в состоянии выдвинуть какие-либо веские возражения против тех методов, которые применялись на строительстве Массачузетского технологического института. В 1925 г., когда я прочел в этом институте свою первую лекцию на американском континенте, осадка купола библиотеки института уже превысила 18 см и увеличивалась со скоростью около 1 см в год, но все, что я мог сделать на этом этапе—разумно объяснить то, что произошло.

В начале двадцатого столетия такие же неудовлетворительные условия были и в области проектирования и строительства земляных плотин. Земляные плотины высотой до 20 м строились в Индии еще до начала нашей эры. В течение второй половины XIX в. рекордная высота земляных плотин достигала 38 м, но навряд ли найдется хотя бы один номер журнала «Инжиниринг Ньюс» или «Инжиниринг Рикорд», опубликованный в те дни, который не содержал бы отчета о разрушении одного из этих сооружений. Поэтому еще в 1901 г. Бюро консультантов нью-йоркского водоснабжения пришлось к заключению, что сооружение земляной плотины высотой свыше 20 м не может быть рекомендовано. Это заключение было полностью оправданным, так как в то время, когда оно делалось, не существовало каких-либо общепринятых правил проектирования и строительства земляных плотин. Некоторые инженеры полагали, что верховой откос однородной земляной плотины должен быть положе, а другие с равным основанием делали его круче. Некоторые инженеры настаивали на уплотнении строительных материалов плотин, тогда как другие утверждали, что материал должен быть уложен путем сбрасывания его в неглубокие прудки для поддержания его рабочей поверхности.

Причина отсутствия согласия между инженерами относительно проектирования и строительства земляных плотин совершенно очевид-

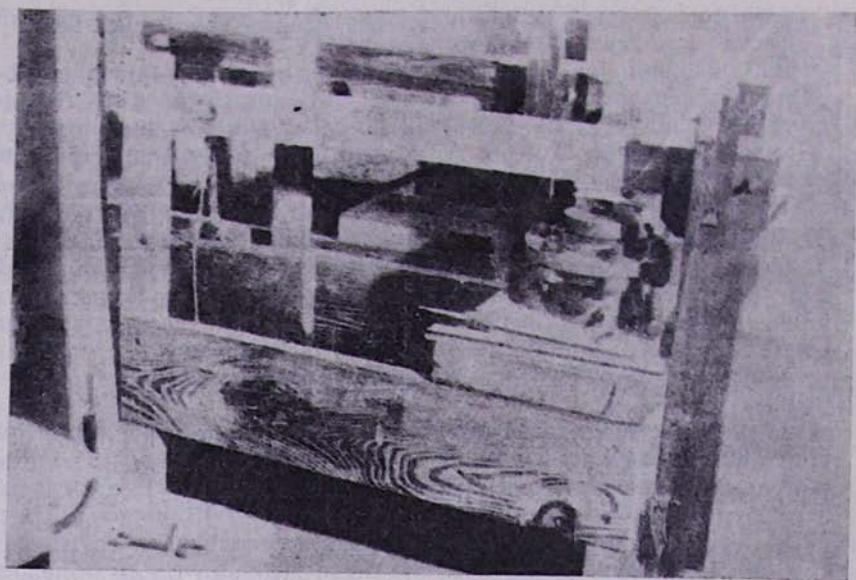


Рис. 1. Компрессионный прибор автора в Роберт-колледже (1920).

на. Соотношения между влажностью, степенью уплотнения и сопротивлением сдвигу все еще оставались неизвестными. Поэтому было невозможно оценить коэффициент безопасности склонов земляных плотин по отношению к оползанию. Вследствие этого, когда плотина разрушалась, нельзя было также установить причину аварии и разрушение рассматривалось как «божье деяние».

Одно из наиболее впечатляющих доказательств зачаточного состояния наших знаний в этой области еще в сравнительно недавнем прошлом—опубликованный отчет о строительстве трех однородных земляных плотин в Индонезии (Van Es, 1933). Две из этих плотин разрушились во время строительства, когда насыпь была доведена до высоты около 10 м, тогда как третья была успешно закончена до полной высоты 30 м и с тех пор остается устойчивой. Различное поведение этих плотин было приписано различию между индексационными свойствами грунтов, а вопросу о влажности грунта при укладке не было уделено никакого внимания.

МЕХАНИКА ГРУНТОВ СТАНОВИТСЯ УПРАВЛЯЕМОЙ

По мере того, как я делался старше, число и размеры наших строек увеличивались с возрастающей скоростью, вследствие чего недостатки традиционной процедуры в области проектирования земляных работ делались все более и более заметными. Поэтому в различных частях света, и почти одновременно, были сделаны попытки вскрыть и устранить слабые места в «старых нормах» инженера по земляным работам. В январе 1913 г. Американское общество гражданских инженеров назначило «Специальный комитет для кодификации современной практики по определению несущей способности грунтов», а в декабре того же года «Геотехническая комиссия Шведских государственных железных дорог» начала разрабатывать методы определения коэффициента

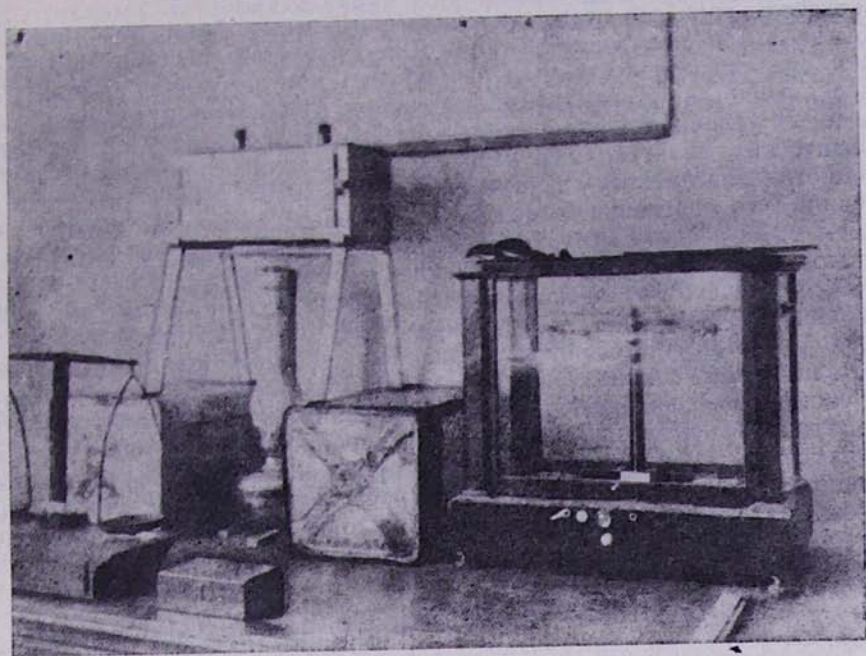


Рис. 2. Сушильный шкаф автора в его лаборатории в Роберт-колледже (1918 — 1925).

безопасности в отношении оползания многочисленных откосов, расположенных вдоль железных дорог в Южной Швеции. Помню, что из-за последствий первой мировой войны я ничего не знал об этих работах в течение целого десятилетия, с 1914 по 1924 гг. Тем временем в 1918 г. я начал свои исследования в Американском Роберт-Колледже близ Стамбула в Турции, где находился к концу войны. Я начал с того, в чем, как мне казалось, заключался корень бедствия—с недостатка надежной информации, относящейся к физическим свойствам грунтов.

Я не имел в своем распоряжении ни исследовательских фондов, ни лаборатории, ни частной практики,—ничего, кроме весьма скромного жалованья. Поэтому мне приходилось импровизировать во всем с минимумом затрат. Мой первый прибор на давление земли был сделан из пустой коробки из-под сигар, и моя нагрузочная установка состояла из пустой жестянки из-под масла, наполненной песком, присоединенной к концам деревянных балок, имеющих изготовленные кустарным способом опорные призмы (рис. 1). Сушильные шкафы (рис. 2) подогревались керосиновыми лампами, и если какая-либо лампа начинала ночью коптить, все образцы оказывались испорченными. Многие составные части моего оборудования были добыты на свалке колледжа. Поэтому надежды на успех были не очень блестящими. Однако на первом этапе любого начинания отдельные лица имеют значительно большие надежды на успех, чем комитет, так как на этом этапе продвижение требует многих лет сосредоточенного и неразделенного внимания. Поэтому не удивительно, что толчок к радикальному пересмотру основных принципов техники земляных работ был дан публикацией полученных мной и добытых без посторонней помощи сведений, а не отчетами комитетов.

Наиболее важным непосредственным эффектом публикации результатов моих опытов было образование вакуума, созданного доказа-

тельством того, что старые правила земляных работ и проектирования фундаментов были ошибочными. Для того, чтобы заполнить этот пробел, сделалось необходимым разработать новую технику взятия образцов и испытаний, измерения давления в земле и в поровой воде в полевых условиях. Одновременно быстро увеличивались наши знания о физических свойствах грунтов. Впечатляющим примером является сопротивление сдвигу связных грунтов. В 1910 г. все, в том числе и я, верили, что соотношение между нормальным давлением и сопротивлением сдвигу связных грунтов по плоскому сечению может быть достаточно точно выражено уравнением Кулона, которое было получено в восемнадцатом столетии. В течение последних лет то же самое соотношение составляло единственную тему трех важных конференций, одна из которых состоялась в Англии и две — в Соединенных Штатах. Тем не менее, наши знания об этом соотношении все еще находятся в состоянии развития. Практическая ценность результатов некоторых из этих исследований, относящихся к сопротивлению сдвигу, еще не очевидна, но когда практические проблемы потребуют привлечения относящейся к делу информации, может оказаться, что уже поздно ее добывать. Поэтому несомненно, что плоды этих терпеливых поисков смогут когда-нибудь послужить важным целям.

ПРЕДСКАЗАНИЕ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Практическое применение механики грунтов началось с попыток вычислить на основании результатов произведенных в лаборатории испытаний грунтов величину, распределение и скорость осадки сооружений, расположенных над однородным глинистым пластом, и результаты были весьма обнадеживающими. Такими же удовлетворительными были предсказания характеристик однородных насыпей и земли, подготовленной и уплотненной в соответствии со строгими техническими условиями. К этой категории относятся земляные плотины с совершенными диафрагмами, опирающимися на песчаное или гравелистое основание.

По мере того, как проходили годы, число публикаций, описывающих удовлетворительное предсказание характеристик, постоянно увеличивалось, и больше не оставалось сомнений в правильности основных принципов механики грунтов. По этой причине в настоящее время во всех проектах земляных работ и фундаментов, требующих крупных капитальных вложений, обязательны обширные исследования грунтов, дополненные их испытанием; предполагается, что каждый отчет, относящийся к проектированию земляной плотины, содержит расчет коэффициента безопасности склона в отношении оползания. Отклонения от этой практики ничтожны. Тем не менее, некоторые инженеры, которые воспользовались преимуществом обучения механике грунтов и современным методам взятия образцов и испытания, пришли случайно к весьма ошибочным выводам относительно будущего поведения тех сооружений, которые они проектировали. К чему привел этот факт во Франции, описано одним французским инженером в статье «Кризис доверия к механике грунтов» (Lossier, 1958).

Изучение случаев из практики, вскрывающих вопиющие ошибочные суждения, несмотря на надлежащие исследования грунтов, обычно приводит к следующим заключениям: или проектировщик не заметил важных пробелов в информации, полученной при исследовании грунтов, или же взятие образцов грунта и испытания проводились неопытными

работниками. В обоих случаях сооружение было запроектировано на основе ошибочных допущений. Такая процедура может быть классифицирована лишь как ошибочное применение механики грунтов и неизбежно ведет к разочаровывающим результатам. Технологические и технические обстоятельства, ведущие к такому ошибочному применению, рассмотрены в следующем разделе.

ОШИБОЧНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ

В начале XIX в., когда прикладная математика успешно вторглась в область строительной механики, представителей инженерной профессии учили, и они даже стали верить, что все может быть вычислено, если только наше знание сопротивления материалов достаточно развито. На основе этих знаний они могли решать большинство своих задач без каких-либо предположений, сидя за своими письменными столами, не беспокоясь относительно допущений. Поэтому когда была создана механика грунтов, ожидалось, что она будет служить тем же целям в связи с техникой земляных работ, что и прикладная механика в отношении проектирования мостов.

Эти ожидания в дальнейшем поощрялись тем фактом, что заслуживающим публикации признавалось лишь успешное предсказание характеристик в области техники земляных работ, и во многих статьях не проводилось четкого различия между истинным прогнозом и случайным предсказанием. Описания случаев из практики этой категории отвлекали внимание от того важного факта, что имеется много состояний, при которых геологические условия устраняют возможность точного предсказания характеристик. Кроме того, многие инженеры не представляют себе важности ошибок, которые могут произойти из применения не отвечающих требованиям методов испытания. Они полагают, что выполнили свой долг, если отправили образцы в наиболее удобно расположенную испытательную лабораторию, и принимают результаты за чистую монету. Наконец, многие инженеры до сих пор не понимают, что каждый результат бурения оставляет широкое поле для интерпретации, если только геологические условия не являются исключительно простыми.

Результаты бурения и отчет о результатах испытания грунтов передаются проектировщику, который составляет на основании этих данных грунтовый профиль, заменяет его упрощенным профилем, что может быть связано с весьма радикальными изменениями, и начинает расчеты. Во многих случаях проектировщик даже не видел участка и не подозревает, что построенный им грунтовый профиль очень мало напоминает действительный. Он может также счесть излишним позвонить в испытательную лабораторию и получить из первых рук информацию об оборудовании, применявшемся при испытании грунтов, и о квалификации техников, производивших испытание. Поэтому не удивительно, что применение механики грунтов на практике часто ведет к весьма разочаровывающим результатам.

Когда я опубликовал книгу «Строительная механика грунтов» («Erdbaumechanik»), я еще не отдавал себе полного отчета в неопределенностях, связанных с интерпретацией результатов бурения, а мои методы испытания все еще были очень примитивными. Поэтому я сам прошел через период, в течение которого моя деятельность может быть названа «ошибочным применением механики грунтов». Я все еще содрогаюсь, когда вспоминаю смелые заключения, которые я делал в те дни по результатам испытаний, выполненных на примитивных приборах

на недостаточном количестве нарушенных образцов. Однако этот период был кратким. Он закончился вскоре после 1926 г., когда я переехал в США. Здесь я впервые имел возможность изучать обнажения осадочных пород весьма различного происхождения и получать образцы, взятые с очень малыми промежутками из отдельных буровых скважин. По результатам исследований моих учеников, и среди них на первом месте А. Казагранде, я выяснил также важность влияния метода взятия образцов и испытания на результаты опытов. Таким образом, с течением времени по мере того, как моя деятельность как консультанта распространялась на все более обширные области, я понял, что осадочные отложения с неправильной системой напластования являются значительно более распространенными, чем я это ранее подозревал, и что эта система не дает возможности точного предсказания.

Вначале это открытие было для меня сильным ударом, и я временно почувствовал себя глубоко обескураженным. Однако не прошло много времени, как я обнаружил, что возможность делать достаточно точные предсказания поведения сооружений, основанных на практически однородных пластах с большими горизонтальными размерами, отнюдь не является наиболее важным результатом моих ранних исследований. Гораздо более важными, хотя и значительно менее эффективными были практические следствия впервые приобретенной возможности проникновения в механику процесса осадки и влияния давления поровой воды на сопротивление сдвигу. Вооруженный этим, я был теперь в состоянии определить до строительства тип и местоположение потенциальных источников аварии в подстилающих грунтах и поступать в соответствии с этими заключениями.

Для того, чтобы воспользоваться этой возможностью, достаточно, во-первых, пробурить по крайней мере одну разведочную скважину на участке каждого нового сооружения до той максимальной глубины, до которой проектируемое сооружение может оказать существенное влияние на условия напряжений в подстилающих грунтах, и, во-вторых, определить существенные свойства слабых пластов, встречаемых при бурении путем испытания представительных образцов грунта, или в несвязных пластах, путем пенетрационных испытаний в буровых скважинах. Если исследование подстилающих грунтов покажет неправильный характер напластований внушающего опасение грунта, то осуществление достаточно точного предсказания практически невозможно, а для многих проектов—и излишне, так как проектирование сооружений не может быть приспособлено к сложным деталям напластований подстилающих грунтов. Значение имеют изменения средних свойств внушающих беспокойство пластов в горизонтальном направлении. Следующие примеры из практики иллюстрируют этот подход.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНОВАНИЙ

Случай 1. Высокое и тяжелое административное здание должно было быть построено на мощном пласте песка и гравия, покрытого слоем рыхлой, искусственной насыпи мощностью 3,6 м. Вдоль трех линий, пересекающих участок строительства, здание располагалось над очень толстыми опирающимися на гравий стенами—остатками старой крепости. Архитекторы намеревались опереть сооружение непосредственно на старые стены, а в промежутках между ними опереть его на бетонные сваи-стойки, забитые в гравий. Осадка пробных свай под рабочей нагрузкой была ими оценена в 1,5 мм. Так как архитекторы

были воспитаны на «старых нормах», они полагали, что их фундаменты запроектированы удовлетворительно.

Когда меня попросили рассмотреть проект, я обратил внимание на тот факт, что осадка части здания, опирающейся на сваи при равной нагрузке на сваю, будет во много раз больше, чем осадка пробных свай, тогда как осадка стен, основанных на старых основаниях, будет ничтожной. Поэтому я рекомендовал заменить верхние части старых стен сжимаемой подушкой и перекрыть их. После завершения строительства сооружения было найдено, что оно дало осадку до 5 см. Отсюда следует, что если бы часть сооружения опиралась на старые стены, то оно было бы покрыто трещинами. Производство количественного предсказания не было ни осуществимым и ни существенным.

Случай 2. На некоторых строительствах проектировщики бываю введены в заблуждение результатами разведочного бурения, которое было недостаточно глубоким. Эта возможность иллюстрируется следующим случаем. Во время второй мировой войны меня пригласили рассмотреть проект промышленного предприятия на западном берегу Северной Америки. Участок был расположен на берегу затопленной долины, на несколько метров ниже уровня полной воды³. Он был изучен бурением до наибольшей глубины 24 м. Бурение показало, что пласты состоят из песка, тонкого пылеватого песка и глины, подстилаемых на глубине около 21 м плотным песком и гравием. Поэтому было решено покрыть участок намывной насыпью на высоту нескольких метров выше уровня полной воды и затем основать завод на сваях-стойках, забитых до отказа в гравелистый пласт (Terzaghi, 1953).

Глинистые пласты, содержащиеся в отложениях затопленной долины, были обычными, нормально консолидированными отложениями, и некоторые из них были очень сжимаемыми. Вследствие больших горизонтальных размеров территории, которая должна была быть покрыта гидравлической насыпью, только один вес насыпи мог вызвать весьма значительную осадку из-за консолидации глинистых пластов этого типа, расположенных на глубине большей, чем 24 м. Поэтому я потребовал бурения дополнительных скважин до большой глубины. На глубине около 30 м эти новые скважины встретили мощный слой высокосжимаемой глины с влажностью, близкой к пределу текучести, и с неправильным характером напластования. Грубая оценка, основанная на результатах нескольких компрессионных испытаний представительных образцов, показала, что комбинированный вес насыпи и приложенных нагрузок вызовет неравномерную осадку опирающегося на сваи сооружения, превышающую 30 см, и что стоимость перенесения основания на глубину большую, чем подошва недавно обнаруженного глинистого пласта, будет недопустимой. Вследствие этих причин участок должен был быть оставлен, и завод был построен на другом участке, расположенном на внешней границе затопленной долины, хотя новый участок и был значительно менее желателен с точки зрения предпринимателя. В последнее время неподалеку от первоначального участка был построен нефтяной резервуар, основанный на сваях-стойках, который дал осадку более, чем 30 см.

До того, как была создана механика грунтов, пробная нагрузка на первоначальном участке убедила бы проектировщика, что предлагаемое основание удовлетворительно, и тогда последующая осадка сооружения явилась бы сюрпризом, как это было на участке Массачусетского технологического института.

³ Наивысшее положение уровня воды при приливе. *Прим. ред.*

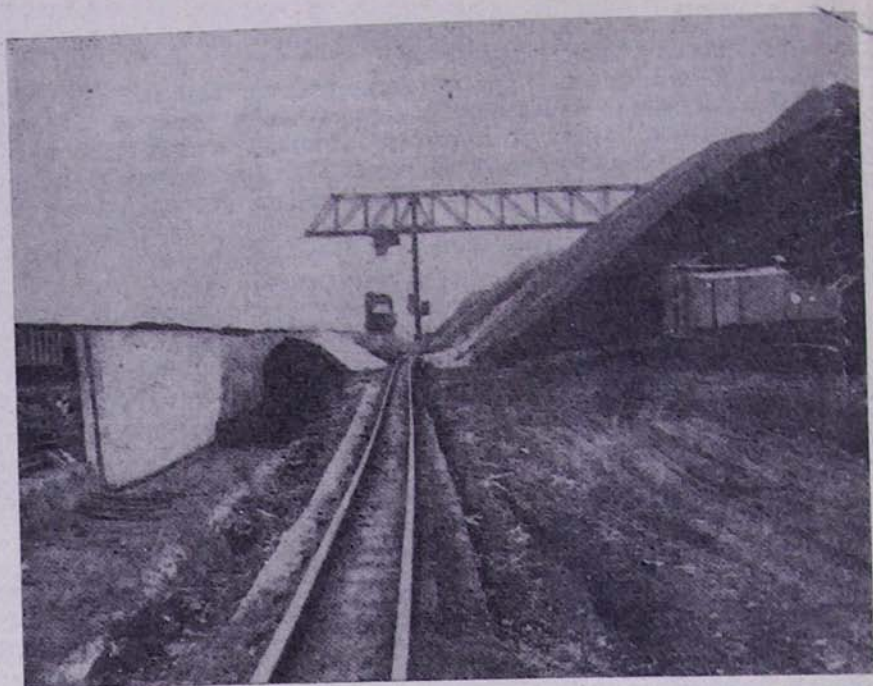


Рис. 3. Смещение рельсового пути рудного крана-перегрузателя вследствие пучения и бокового движения.

Случай 3. Другой поучительный пример службы, которую сослужила механика грунтов без производства точного предсказания,—стабилизации рельсового пути длиной около 360 м, поддерживающего один конец рудного крана-перегрузателя на сталелитейном заводе в Восточном Огайо (Терцаги и Пек, 1957). За период с 1933 по 1952 гг. накопившееся смещение опор рельсового пути внаружу местами составляло 135 см, а поднятие доходило до 90 см (рис. 3). Временами смещение было таким большим и резким, что оно угрожало непрерывности работы завода. Бурение показало, что рельсовый путь подстилался следующими пластами, считая сверху: 1) трехметровый слой очень жесткой глины; 2) трехметровый слой водонасыщенного, слегка пластичного неорганического ила (горная мука) и 3) морена. Даже в промежутках между загрузочными сезонами поровая вода в пластах ила местами находилась под умеренным артезианским давлением, а в время загрузочных сезонов давление поровой воды увеличивалось. Смещение опор рельсового пути было вызвано неадекватным сопротивлением сдвигу подстилающего пласта, по поверхности скольжения расположенной в иле.

Вначале предполагалось стабилизировать рельсовый путь комбинацией вертикальных и наклонных свай. Простой расчет показал, что этот способ непрактичен, так как местами оба ряда свай поднимались бы из своих гнезд. Однако знание выявленного механикой грунтов факта о том, что сопротивление сдвигу ила, как и любого другого грунта, зависит от эффективных, а не полных напряжений на поверхности скольжения, сделало возможным стабилизировать рельсовый путь без его укрепления сваями. Желаемый результат был достигнут

установкой 210-метрового ряда иглофильтров с расстоянием между центрами 1,5 м, пройденных в пласте ила. Коллектор был присоединен к вакуумному насосу, который работал ежегодно в течение загрузочного сезона. Количество воды, откачиваемой из водонасыщенного пласта ила, не превышало 7,5 литров в минуту. Несмотря на это, движение было приостановлено.

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТКИ ТЕЧЕНИЯ

Если мы стоим перед проблемой оценки степени устойчивости откосов земляных плотин, основанных на водопроницаемых отложениях и не снабженных глубокими диафрагмами, или склонов в естественном грунте, расположенных ниже по течению относительно водохранилищных плотин, то необходимо определить фильтрационное давление, которое действует на подстилающие грунты в направлении течения просачивающейся воды. Эта задача требует построения сетки течения. Для построения сетки течения зона фильтрации должна быть разделена на несколько слоев, каждый из которых принимается за совершенно однородный и, кроме того, необходимо принять, что характер фильтрации во всех вертикальных плоскостях в направлении течения идентичен.

Этот метод применяется повсюду, но весьма часто построенная сетка течения имеет мало общего с действительным характером фильтрации, устанавливаемым по отсчетам, производимым в наблюдательных колодцах после заполнения водохранилища. Такие противоречия постоянно встречаются на створах плотин в отношении пластов, которые повсюду обладают достаточно однородной сжимаемостью. Тем не менее, я нашел, что построение сеток течения может иметь неоценимое значение даже на тех створах, где нельзя ожидать, что эти сетки дадут какую-либо информацию о реальном характере фильтрации. Это утверждение иллюстрируется случаем 4.

Случай 4. Рис. 4 представляет собой вертикальное сечение через ледниковое отложение с неправильным напластованием, через которое из резервуара просачивается вода, переливаясь через гребень погребенного скального выступа, по направлению к крутому склону, расположенному вниз по течению от левого примыкания бетонной гравитационной плотины. Вследствие того, что между некоторыми пластами имеются постепенные переходы, а в других случаях наблюдаются резкие крутопадающие границы между пластами, а также учитывая трудности, связанные с установлением различия между мореной со слабой связностью и пылеватым песком и гравием, точная интерпретация результатов бурения и взятие образцов были неосуществимы; нельзя было ожидать, что построенный грунтовый профиль (рис. 4) обнаружит что-либо кроме самых грубых особенностей напластования. Детали оставались неизвестными.

За несколько лет до начала строительства на склоне, на середине его высоты между дном долины и уровнем воды в водохранилище была проведена водоводная магистраль большого диаметра, часть которой, расположенная по отношению к плотине вниз по течению, образовала новую систему водоснабжения. Вследствие того, что утечки из водохранилища могли подвергать риску устойчивость склонов, было решено преградить фильтрацию с помощью противофильтрационной завесы, установленной на гребне скального выступа, или около него, протянув ее от левого примыкания бетонной плотины на расстояние около 165 м от примыкания (рис. 4). Цементационные скважины глубиной до 60 м

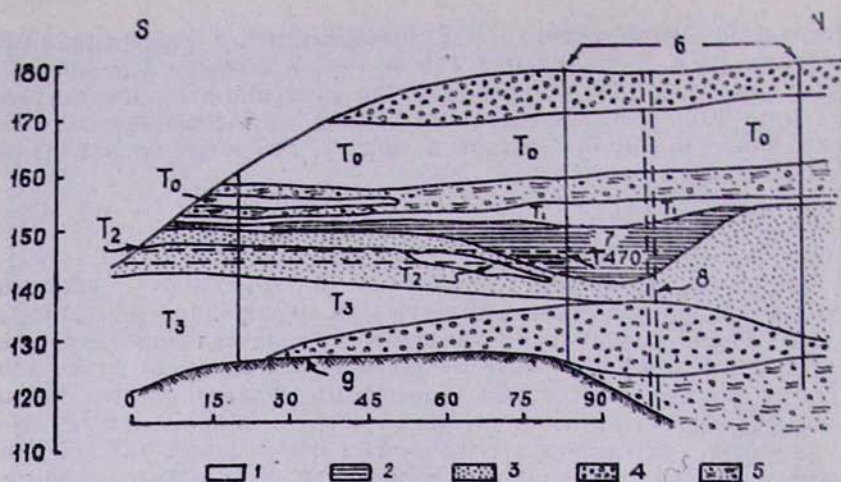


Рис. 4. Геологическое сечение через ледниковые и флювиогляциальные отложения. Отложения занимают пространство между цементационной диафрагмой и крутым склоном вниз по течению от левого примыкания бетонной гравитационной плотины. 1—морена T_0 до T_3 ; 2—ил; 3—преимущественно песок, от чистого до пылеватого; 4—преимущественно песчаный гравий от чистого до пылеватого; 5—преимущественно песок и песчаный гравий с пылеватыми линзами от чистого до пылеватого; 6—испытательные скважины; 7—дренажный туннель Т470 (отм. 141 м); 8—цементационная завеса; 9—коренная порода. Горизонтальная линейка—расстояние от портала туннеля в метрах; вертикальная линейка—отметки в метрах.

ниже уровня воды в водохранилище были пробурены вдоль единственной линии на расстоянии 3 м друг от друга. Через эти скважины в отложения было введено около 1100 т цемента.

Когда водохранилище было заполнено в первый раз, на склоне появились новые источники и наблюдалась местная просадка дороги, расположенной вдоль магистрали. Поэтому было решено снабдить цементационную завесу дренирующими устройствами на тех участках склона, которые вызывали беспокойство. Однако для того, чтобы за-проектировать дренажную систему, было необходимо знать, по крайней мере в общих чертах, колебания водопроницаемости подстилающих пластов между затопленной территорией и склоном, где вода выступает из грунта. На рассматриваемом участке эти колебания не могли быть даже грубо оценены, и не было известно, служит ли своему назначению противофильтрационная завеса.

Для того, чтобы заполнить большой пробел в наших знаниях, было установлено 25 наблюдательных колодцев на расстоянии 300 м от левого примыкания. Некоторые из них были расположены выше по течению от цементационной завесы, а большая часть—между цементационной завесой и склоном, на котором выходили источники. Некоторые из них содержали множественные пьезометры с перфорированными участками на различных отметках. Наблюдения на этих колодцах показали, что пьезометрические уровни вдоль вертикальных линий колеблются в широких пределах. Для того, чтобы применить данные наблюдений как источник информации относительно колебаний водопроницаемости отложений, на которые воздействует фильтрационное давление, измеренные пьезометрические уровни были сравнены с теми значениями, кото-

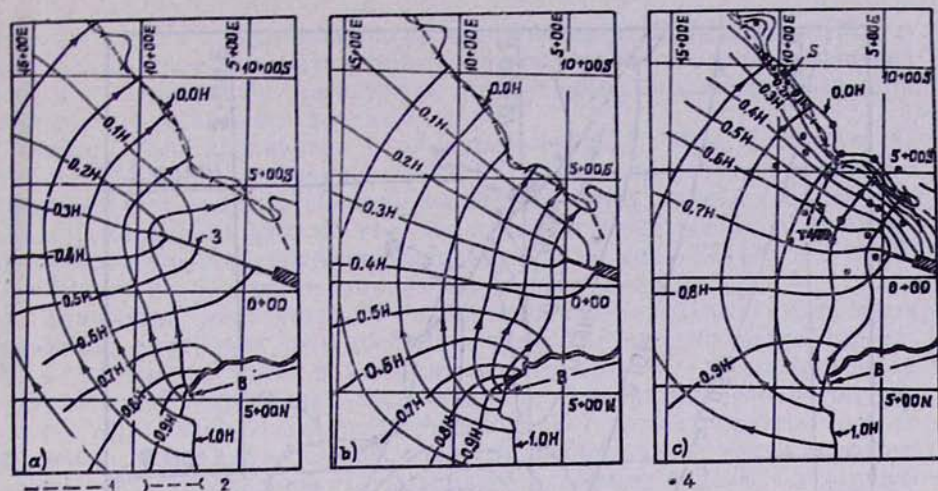


Рис. 5. Сетки течения, представляющие характер фильтрации из водохранилища к склону, показанному на рис. 4. а) теоретическая сетка течения, построенная на допущении о полной эффективности цементационной завесы; б) то же, но принимая, что противифльтрационная завеса полностью неэффективна; в) сетка течения, построенная на основании результатов отсчетов по наблюдательным скважинам до сооружения дренажей Т470 и S. Обозначения к а): 1—водоводная магистраль диаметром 1600 мм над поверхностью земли; 2—то же в туннеле; 3—цементационная завеса; В—покров; Н—полный напор по отношению к отм. 141 м; к в): 4—наблюдательный колодец; Н—полный напор по отношению к отм. 137 м; Т470—дренажный туннель на отм. 141 м; S—шахта

рые могли быть получены, если водопроницаемость подстилающих пластов не изменялась бы в направлении течения. Эти значения могут быть определены построением идеализированной сетки течения на адекватных, но радикально упрощающих допущениях.

Допущения, необходимые для построения идеальной сетки течения на участке, показанном на рис. 4, основываются на следующих фактах. Результаты бурения показали, что водопроницаемость подстилающих пластов ниже отм. 141 м весьма низкая по сравнению с средней водопроницаемостью пластов, расположенных выше. Поэтому было принято, что основание идеализированной замены действительного проницаемого слоя находится на отм. 141 м. Вода в водохранилище не поднимается на высоту более 24 м над этим основанием. На расстоянии около 210 м вверх по течению от левого примыкания затопленные выходы проницаемых отложений покрыты практически непроницаемым покровом. Поэтому линии течения начинаются вверх по течению от этого покрова и средняя длина фильтрационных путей по направлению к участку, где вода выходит из грунта, около 450 м. Так как это расстояние очень велико по сравнению с вертикальным расстоянием—24 м между основанием проницаемого слоя и уровнем воды в водохранилище, далее было сделано допущение о том, что все линии течения расположены в горизонтальной плоскости. На основании этих допущений была получена сетка течения, показанная на рис. 5,а. Однако сомнительно, служила ли показанная на чертеже противифльтрационная завеса своему назначению. Поэтому вторая сетка течения (рис. 5,б) была построена при допущении, что противифльтрационной завесы не существует. Рис. 5,в приближенно показывает действительный характер фильтрации, полу-

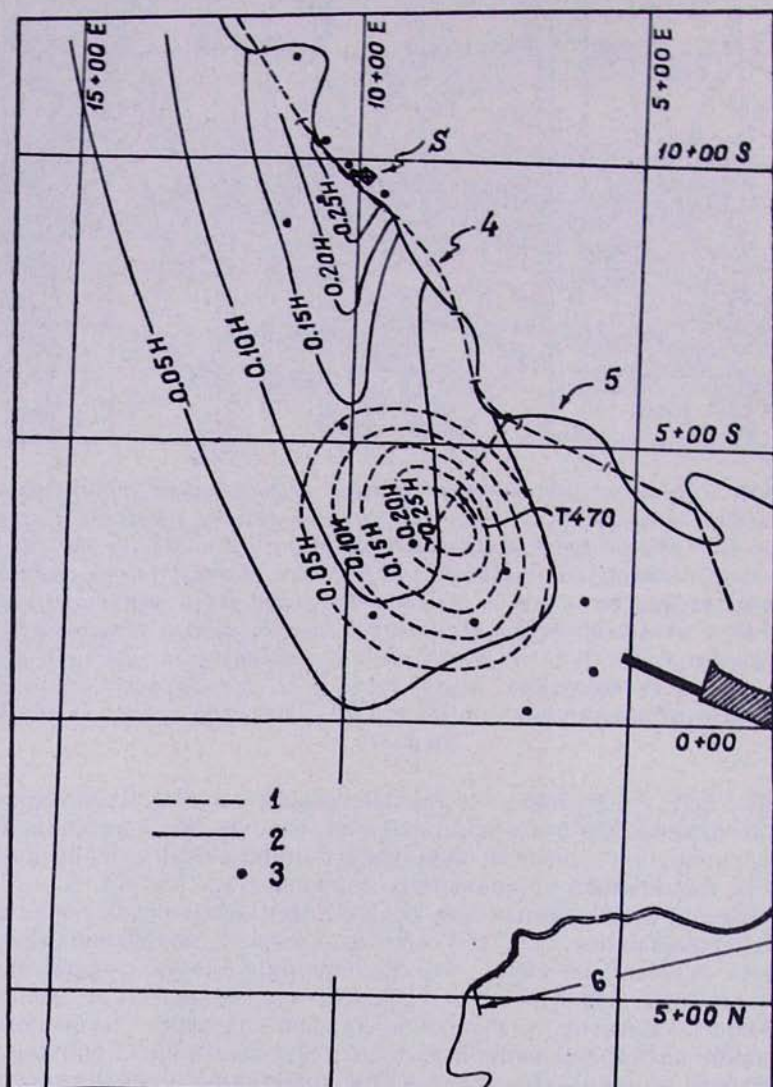


Рис. 6. Наблюдаемое понижение пьезометрических уровней, вызванных дренажем. Цифры, как напр., $0,2H$, вписанные в контурные линии, показывают уменьшение полного напора H , вызванное дренажными туннелями $T470$ и S ; 1—понижение пьезометрического уровня, вызванное туннелем $T470$; 2—то же—шахтой S ; 3—наблюдательный колодец; 4—водоводная магистраль диаметром 1600 мм над поверхностью земли; 5—горизонталь 137 м; 6—покров; H —полный напор по отношению к отметке 137 м. Сетка на чертеже дана через каждые 150 м (500 футов)

ченный путем приспособления идеализированной сетки течения к результатам отсчетов по наблюдательным колодцам.

При сравнении реальной сетки фильтрации с идеальными сетками можно видеть, что реальные линии течения пересекают участок, занятый цементационной завесой, так, как будто завесы не существует. Таким образом, сетки течения приводят к важному выводу о том, что

цементационная завеса полностью неэффективна. Вследствие этих условий стало очевидным, что устойчивость склона, на котором проложена неустойчивая водоводная магистраль, может быть гарантирована при устройстве адекватного дренажа.

Склон был дренирован с помощью туннеля Т470, пробитого на отметке 141 м на расстоянии около 180 м вниз по течению от левого примыкания, и шахты S с устьем на отметке 141 м, заложенной на расстоянии около 360 м вниз по течению от левого примыкания и снабженной горизонтальными трубчатыми дренами. Положение Т470 и S показано на рис. 5 и 6, и кроме того, Т470 виден на рис. 4.

Вследствие неправильного характера напластования ледниковых отложений, установка дрен требовала непрерывного экспериментирования в поле; имели место различные неожиданности, которые требовали видоизменений первоначального проекта. Однако окончательный результат был очень удовлетворительным. Он иллюстрируется рис. 6. Сплошные линии — это линии равного понижения отметки полного гидростатического напора H , вызванного дренажем в шахту S, а пунктирные кривые представляют собой эффект дренажа к туннелю Т470 по отношению к отметкам, которые существовали до установки дрен. Вследствие успешного дренажа, комбинированного с местным выравниванием, коэффициент безопасности склона в настоящее время выше, чем он был до строительства плотины и заполнения водохранилища.

ОБСЕРВАЦИОННЫЙ МЕТОД

Случаи из практики, которые были представлены под заголовком «Проектирование оснований», показывают, что многие проблемы в технике земляных работ могут быть решены без детального и точного предсказания поведения. Удовлетворительное решение таких проблем может быть достигнуто на основе наших знаний фундаментальных принципов механики грунтов, дополненных умеренным количеством бурений и испытаний. Однако имеются другие проблемы, в которых геологические условия препятствуют возможности получения достоверной информации, необходимой для точного проектирования. Если такие условия имеются, то здравое инженерное искусство требует проектирования на основе наиболее неблагоприятных допущений, совместимых с результатами исследования грунтов. Этот достаточно неэкономный способ может быть устранен только при условии, что сооружение позволяет вносить видоизменения в проект во время или после строительства в соответствии с результатами имеющих значение наблюдательных данных, которые были получены после начала строительства. Это может быть названо «обсервационным методом»⁴.

Случай 5. Обсервационный метод в технике земляных работ был впервые применен в крупных масштабах между 1912 и 1922 гг. администрацией Шведских государственных железных дорог в связи с исследованием устойчивости склонов в ледниковых отложениях, главным образом, ледниковых глинах, в железнодорожных выемках южной Швеции с целью устранения катастрофических оползней, происходящих с тревожной частотой (Statens etc., 1922; Деформации земляных масс, 1934).

⁴ Идеи Терцаги в отношении обсервационного метода были развиты проф. Р. Пеком в его девятой Ренкиновской лекции «Преимущества и ограничения обсервационного метода в прикладной механике грунтов». Перевод этой лекции был опубликован в сборнике «Проблемы геомеханики» № 5 (1971). *Прим. ред.*

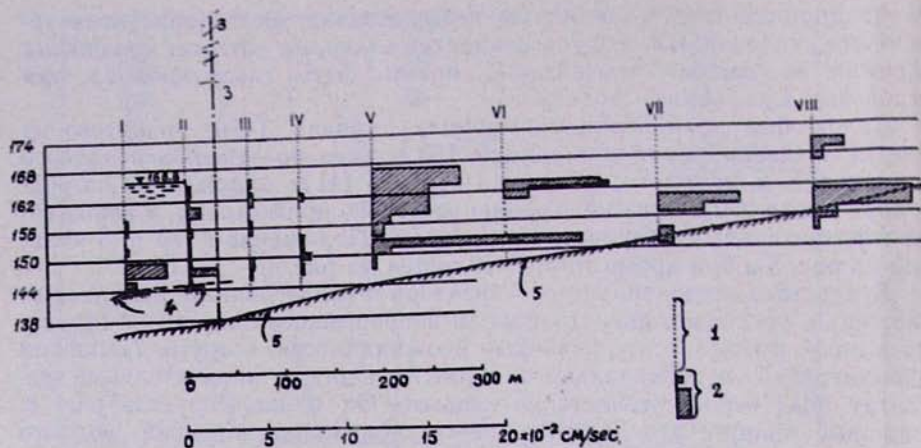


Рис. 7. Разрез подводного склона водохранилища. Чертеж показывает колебания водопроницаемости флювиогляциальных отложений, обнажающихся на склоне. 1—часть профиля, не представленного образцами; 2—толщина линии или ширина блока показывает водопроницаемость; 3—осевая линия гребня плотины; 4—коренная порода; 5—подшва склона. Вертикальный и горизонтальный масштабы в метрах, внизу—масштаб для коэффициента фильтрации в см/сек .

На ранней стадии исследований Петтерсон изобрел графический способ, известный как *шведский круговой метод*, с помощью которого может быть вычислен коэффициент безопасности склонов в отношении скольжения, если известно сопротивление сдвигу материала S , образующего склон (Pettersson, 1916). Шведские исследователи оценивали значение S на основе результатов полевых пенетрационных испытаний в буровых скважинах, в сочетании с лабораторными испытаниями на проникание конуса в перемятые образцы.

Применяя этот метод и усовершенствуя технику определения величины S , исследованные склоны были подразделены на безопасные, возможно опасные и очевидно опасные. Опасные склоны были устранены путем переноса линии или радикального уположения склонов. Склоны с сомнительной устойчивостью были довольно многочисленны и оценочные расчеты показали, что стоимость адекватного увеличения их устойчивости не позволит произвести эти работы. Поэтому железнодорожная администрация установила на этих выемках автоматические приборы, которые останавливали приближающийся поезд на некотором расстоянии от входа в выемку, как только дорожное полотно начинало двигаться по отношению к твердой основе слабых пластов.

Случай 6. По мере того, как возрастали наши знания о существенных свойствах природных грунтовых отложений вместе с развивающимся исследованием подстилающих пород, расширялось поле применения обсервационного метода. Я впервые имел возможность применить этот способ в 1926 г. в связи с водохранилищем, образуемым плотинной Гренвил около Уестфилда в шт. Массачусетс для целей водоснабжения (Terzaghi, 1929). Клиновидная часть подводного склона у правого примыкания этой однородной земляной плотины расположена на выходах флювиогляциальных отложений. Эти отложения занимают все пространство между водохранилищем и соседней долиной на расстоянии около 900 м от водохранилища. Поверхность отложения усеяна мульдами.

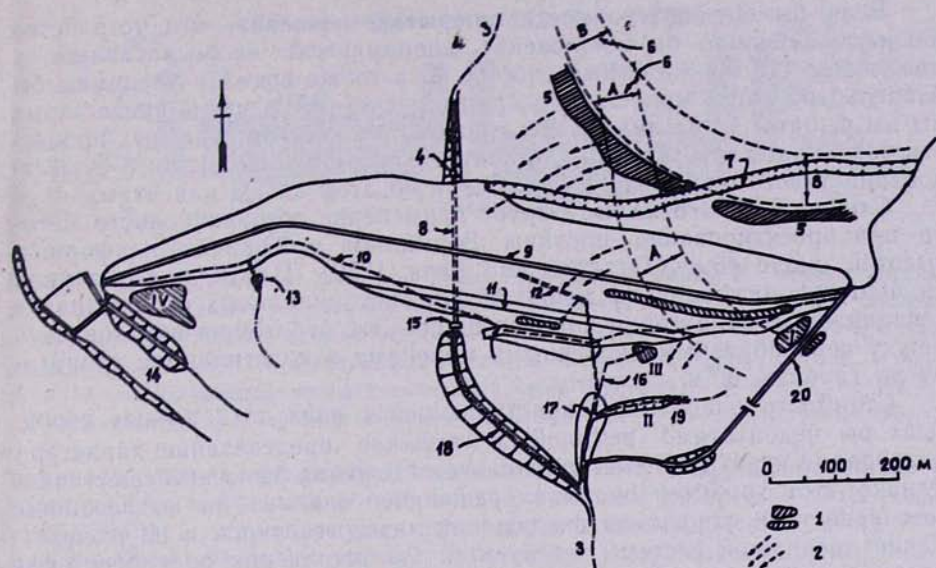


Рис. 8. План плотины Вермилион. На участках I—IV при первом заполнении водохранилища из грунта выступила вода. 1—участки увлажнения вследствие фильтрации; 2—вероятные фильтрационные пути; 3—ручей Моно; 4—водоприемное сооружение; 5—морена; 6—погребенные русла талой воды; 7—диафрагма; 8—выпускной водовод; 9—гребень плотины; 10—низовая дрена; 11—берма; 12—внутренняя дрена; 13—промежуточная низовая дрена; 14—аварийный водослив; 15—вентильное помещение; 16—вспомогательный выпуск низовой дрены; 17—выпуск низовой дрены; 18—отводящий канал; 19—крупный источник; 20—рабочий водослив. Масштаб в метрах.

Для того, чтобы получить адекватную информацию относительно водопроницаемости пластов, обнажающихся в подводной части склона, я испытал большое количество образцов, которые были получены из испытательных шурфов на профилях I—VIII (рис. 7). Результаты фильтрационных испытаний представлены на рисунке горизонтальными размерами заштрихованных блоков. Можно видеть, что коэффициент фильтрации k материала, обнажающегося на склоне, колеблется в пределах от величин близких к нулю до 0,13 см/сек. Соответствующие колебания k в направлении линии течения между подводным склоном и местом их выхода неизвестны.

Если принять, что k имеет одно и то же значение на всем протяжении линии течения, как и на подводном склоне, то расчет фильтрации показывает, что потеря воды из водохранилища будет чрезмерной. Она может быть устранена закрытием обнажений проницаемых пород на склоне водохранилища, показанного на рис. 7, водонепроницаемым покрытием. Однако геологическое происхождение отложений, выступающих на склоне, наводит на мысль о том, что отложение имеет линзообразный характер напластований. Вследствие прерывности многих проницаемых частей, действительная средняя водопроницаемость таких отложений может быть весьма низкой. Поэтому было решено отложить решение относительно конструкции покрытия до первого наполнения водохранилища, когда могли быть измерены потери воды. Наблюдения после того, как водохранилище было заполнено, показали, что покрытие было бы излишним.

Если бы оценка стоимости покрытия показала, что устройство покрытия сделало бы сооружение экономически необоснованным, я предложил бы тот же самый способ, но в то же время я уведомил бы владельцев, что сооружение содержит расчетный риск, и предоставил бы им решить, хотят ли они его принять. Множество судебных процессов возникли вследствие того, что проектировщики не знали о существовании такого риска или не сообщали об этом своим клиентам.

Случай 7. Рис. 8 иллюстрирует применение обсервационного метода при проектировании плотины Вермилион в Южной Калифорнии, высотой около 45 м (Terzaghi and Leps, 1959). Плотина, показанная на чертеже, основана на мощных флювиогляциальных отложениях с неправильным характером напластования. Эти отложения образовались между серпообразными конечными моренами и подстилаются гранитами до глубины 60 м.

Стоимость диафрагмы, простирающейся вниз до коренных пород, была бы недопустимо высокой, а надежное предсказание характера фильтрации через флювиогляциальные отложения было неосуществимо. Однако этот характер оказывал решающее влияние на коэффициент безопасности в отношении скольжения низового откоса и на расположение дренажной системы, требуемой для устранения опасности суффозии. С другой стороны, в течение строительства и первого заполнения водохранилища можно было заметить существенную разницу между проектными допущениями и действительностью еще до того, как это было бы слишком поздно для предотвращения вредных последствий. Вследствие этого обстоятельства, первоначальный проект мог быть основан на допущениях, которые казались наиболее вероятными, а не на наиболее неблагоприятных, сопоставимых с результатами исследований грунтов. Обсервационная аппаратура, требуемая для контроля первоначальных проектных допущений, устанавливалась по мере хода строительства.

Первоначальный проект включал несовершенную диафрагму до максимальной глубины 6 м от дна водохранилища, как показано на рис. 8, непроницаемое покрытие, устроенное на территории между диафрагмой и основанием непроницаемого ядра плотины (не показанного на рисунке), и установку ряда разгрузочных колодцев (не показанных на рисунке) до максимальной глубины 30 м, расположенных на осевой линии дна низовой арены. Пока строилась плотина, были установлены все наблюдательные скважины, которые были необходимы для получения более ясной картины действительного характера фильтрации, как в случае 4, иллюстрированном на рис. 4—6. Кроме того, на дне долины ниже по течению от плотины был сделан запас фильтрующего материала. Когда водохранилище было заполнено, было найдено, что пьезометрические уровни оказались почти везде ниже тех отметок, на которые была рассчитана устойчивость низового откоса. На одном участке, где они были несколько выше, на склон было добавлено некоторое дополнительное количество насыпного материала. Далее было найдено, что разгрузочные колодцы, расположенные вблизи одного примыкания, не служили какой-либо цели. Однако вода выступила из естественного склона на участках, показанных штриховкой и обозначенных I—IV на рис. 8, на расстоянии до 20 м от низовой пяти плотины. Опасность суффозии при подземной эрозии, начинающейся из этих участков, была устранена при весьма умеренных затратах путем покрытия этих участков обратным фильтром из сортированного материала.

Случай 8. Замечательные возможности для применения обсерва-

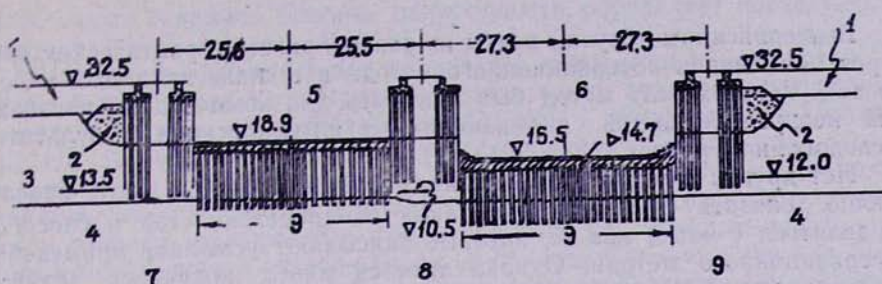


Рис. 9. Поперечное сечение через два дока. Гравийные карманы по обеим сторонам доков были уложены в открытых землечерпанием выемках после того, как боковые стенки были построены и за ними устроена обратная засыпка для устранения бокового давления на стенки. 1—гидравлическая насыпь из мергеля; 2—чистый гравий; 3—мергель; 4—тонкозернистый зеленый пылеватый песок (плотный); 5—док А; 6—док В; 7—южная стенка; 8—средняя стенка; 9—северная стенка; Э—10,5-метровые сваи.

ционного метода были представлены в связи с проектированием и строительством судовых доков на атлантическом побережье (Fitz-Hugh et al., 1945). Эти судовые доки отличаются от доков обычного типа тем, что боковые стены их состоят из ячеистых перемишек, окружающих тонкий, поддерживаемый сваями бетонный пол (рис. 9). На боковые стены действует боковое давление, оказываемое гидравлической засыпкой, состоящей из обломков мергеля, а сваи, поддерживающие пол, забиты через пласт мергеля, мощностью 6 м в подстилающие водоносные породы, состоящие из пылеватого песка. Боковые стенки должны были удовлетворять тому условию, чтобы оставаться практически вертикальными на любой стадии работы судового дока и чтобы сумма весов пола дока и подстилающего пласта мергеля была по крайней мере в 1,5 раза больше, чем величина гидростатического поднятия, действующего на подошву пласта мергеля при пустых доках. Однако надежное предсказание бокового отклонения стенок было неосуществимо, а гидростатические условия, которые преобладали бы во время работы доков, были неизвестны. Поэтому принят следующий способ.

При производстве работ по обратной засыпке было измерено увеличение бокового отклонения боковых стенок. Как только путем экстраполяции данных наблюдений было установлено, что боковое отклонение стенок будет чрезмерным, клинообразная часть гидравлически уложенной мергелистой насыпи на участке, примыкающем к внешней поверхности ячеистых боковых стенок дока, была удалена при помощи землечерпания. Этот материал был замещен гравием, сообщавшимся с доками через трубы, пропущенные через боковые стенки. Таким образом, боковое давление на стенки было уменьшено до номинальной величины.

Для получения информации относительно условий гидростатического давления в водоносном пласте, подстилающем полы дока, были установлены пьезометрические трубы с открытым отверстием, расположенным в водоносном пласте. Во время первой откачки воды из доков были замерены пьезометрические уровни. Когда было найдено, что коэффициент безопасности доков в отдельных местах был ниже 1,5, взвешивающее давление было уменьшено в пределах этих участков устройством разгрузочных колодцев. Стоимость изменений проекта во время строительства, составившая 250 тыс. долларов, была очень небольшой, по сравнению с экономией, достигнутой благодаря коренному отходу от обычного проектирования доков.

Вышеописанные случаи взяты из разнообразных практических примеров применения обсервационного метода в технике земляных работ. Во всех случаях этот метод был применен для компенсации неизбежных неопределенностей, вытекающих из интерпретации результатов исследования грунтов.

Нет других случаев из практики, которые могли бы более впечатляюще доказать существование таких неопределенностей и способов справляться с ними, как те, которые описывают успешное применение обсервационного метода. Однако имеется много инженеров, занятых проектированием земляных работ, которые все еще не отдают себе полного отчета в существовании и значении этих неопределенностей. Поэтому публикация таких случаев из практики служит насущным образовательным целям, уравнивая психологический эффект отчетов о производстве достаточно точных предсказаний, которые можно было ожидать при исключительно благоприятных условиях.

РОЛЬ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СООБРАЖЕНИЙ В ТЕХНИКЕ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ

Природа и значение неопределенностей, вытекающих из интерпретации результатов исследований грунтов, существенно определяются геологической историей участка. Поэтому я усвоил привычку начинать исследование нового участка со сбора сведений относительно геологических характеристик участка от местных геологов и из литературных источников, дополняя их тщательным изучением участка. Интерпретация полученных данных была основана на моем ранее приобретенном эмпирическом знании инженерных свойств продуктов различных геологических процессов, как, например, оледенение или действие рек. Это знание было получено при содействии механики грунтов путем корреляции процессов с информацией, полученной опытным определением инженерных свойств этих продуктов, и с характером напластований, возникших отложений.

Результаты геологического изучения в сочетании с генеральным планом сооружения определяют максимальную глубину, на которой может располагаться очаг потенциальных помех. В зависимости от природы сооружения, этот очаг может состоять из одного или более пластов с высокой сжимаемостью, или из водоносного пласта, содержащего воду под высоким артезианским давлением, путем утечки воды из водохранилища и т. д. Метод установления наибольшей глубины для первой разведочной буровой скважины был проиллюстрирован случаем 2 в разделе «Проектирование оснований».

Следующий шаг—определение с помощью разведочных скважин горизонтальных и вертикальных границ очага потенциальных помех и характера напластования связанных с ним отложений. В некоторых случаях этот характер может быть предсказан на основании результатов геологической разведки. Отложения ленточных глин в ненарушенном состоянии всегда практически однородны в горизонтальном направлении, так как они откладывались в спокойной воде. С другой стороны, индексационные свойства глин, расположенных в подошве отложений затопленной долины, вероятно, изменяются на коротких расстояниях в вертикальном и горизонтальном направлениях, так как течения, вызывавшие их перенос до седиментации, изменяются в течение всего года. В сомнительных случаях информация, относящаяся к степени однородности очага потенциальных помех, может быть получена с помощью умеренного количества испытаний образцов, полученных из

разведочных скважин. Степень однородности определяет последующие действия.

Если очаг потенциальных трудностей относительно однороден, то может быть оправдано детальное исследование грунтов, включающее в себя испытание многочисленных образцов с ненарушенной структурой. На основе результатов этих исследований может быть сделан расчет осадки или устойчивости⁵. Необходимые условия успеха таких действий удовлетворяются повсюду на большей части береговых равнин или в озерных отложениях, как, например, те, которые подстилают некоторые равнины к северо-западу от области Великих Озер или Мексиканскую долину. С другой стороны, если встречаются значительно более распространенные условия неоднородности, то собирание данных испытаний очень мало дополнит те, которые выявили отсутствие однородности. В этом случае третий шаг—оценка неизбежных неопределенностей, связанных с интерпретацией результатов исследования грунтов. Тогда проектирование должно быть основано на наиболее неблагоприятных возможностях, совместимых с известными особенностями грунтовых условий. Однако если проект позволяет вносить изменения во время строительства, можно избежать этого неэкономичного метода, применяя обсервационную процедуру, описанную в предыдущем разделе настоящей статьи (случаи 5—8).

Если следовать этой общей процедуре, то события, заметно отличающиеся от ожидаемых, могут быть вызваны только наличием существенных геологических деталей, расположенных между буровыми скважинами или между пунктами взятия образцов. Возможность подобных событий привлекла мое внимание вскоре после того, как я в 1925 г. опубликовал книгу «Erdbaumechanik» («Строительная механика грунтов»), когда меня просили рассмотреть проект подземной конструкции паровой электростанции. Участок для станции занимал территорию около 60×30 м и был изучен по скважинам, пробуренным до глубины 18 м через каждые 15 м в обоих направлениях. Скважины показали, что участок расположен на пласте водоносного песка и гравия толщиной 4,5 м, опирающемся на исключительно однородное отложение жесткой глины. Станция должна была иметь подвальный этаж на сильноармированной железобетонной плите, основанной на жесткой глине на глубине около 6 м.

До начала рытья котлована участок для подвального этажа был окружен рядом стальных шпунтовых свай, забитых в жесткую глину на глубину около 60 см. После завершения рытья вода в котлован не проникала, за исключением той, которая просачивалась из песка сквозь замки шпунтовых свай.

Я посетил участок вечером того дня, когда закончилось рытье и рабочие уже ушли; ночной сторож сообщил нам, что несколько минут тому назад в котловане произошел «удар». Когда мы прибыли к котловану, мы увидели вблизи от центра котлована струю воды, бьющую из глины. Точка выхода струи была погребена под коническим, быстро растущим скоплением чистого песка.

Для остановки течения песка мы заменили коническое отложение песка пустой цементной бочкой и заполнили ее наполнителем бетона, который должен был служить в качестве фильтра. Как только эта опе-

⁵ Совершенно недавно я встретил отложение ледниковой озерной глины, которое оказалось гораздо более сжимаемым, чем на это указывали компрессионные испытания образцов с ненарушенной структурой, но это отложение было единственным в моей практике.

рация закончилась, произошел второй удар на некотором расстоянии от первого; с ним поступили таким же образом. В течение следующих нескольких часов целая цепочка бочек была установлена над родниками, бьющими по извилистой линии, не приближавшейся ни к одной из точек, в которых было проведено бурение. Последующие исследования показали, что родники возникали из узкого пояса чистого водоносного песка, расположенного на глубине нескольких футов под дном котлована. До укладки арматуры для железобетонной глины подвала все пустоты, образованные вследствие утечки песка из пояса, были забиты цементацией.

Здания на уширенных фундаментах могут быть сильно повреждены—и повреждаются вследствие того, что несколько фундаментов, опирающихся на исключительно сжимаемый материал, содержащийся в карманах, расположены целиком между точками, в которых было произведено бурение. Откосы земляных дамб и плотин на жестких глинах могут обрушиться вследствие того, что глина может содержать немного тонких слоев исключительно слабого материала, как, например, бентонит, расположенных между теми глубинами, с которых были взяты образцы из буровых скважин. К счастью, такие случаи редки, хотя они и неизбежны.

В нормальных условиях описанный в настоящей статье общий метод предохраняет инженеров, руководящих земляными работами, от серьезной опасности недооценки неопределенностей, связанных с результатами исследований грунтов. Однако не могут быть установлены твердые правила относительно деталей применения этого метода, так как, вероятно, почти на каждом новом участке проектировщики встречают некоторые условия, в отношении которых они не имели прецедента в своей практике или в опубликованных случаях из практики. Этот факт отмечает существенное различие между строительной техникой и прикладной механикой грунтов.

Многие проблемы строительной техники могут быть решены только на основании сведений, содержащихся в учебниках, и проектировщик может приступать к работе, используя эту информацию, как только он сформулировал свою проблему. Наоборот, в прикладной механике грунтов должна быть произведена большая и оригинальная умственная работа до того, как описанные в учебниках методы смогут быть с уверенностью применены. Если инженер, руководящий проектированием земляных работ, не имеет требуемых геологических навыков, воображения и здравого смысла, его знания по механике грунтов принесут ему больше вреда, чем пользы. Вместо того, чтобы использовать механику грунтов, он будет злоупотреблять ею.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВОЗЗРЕНИЕ

В 1936 г., когда в Гарварде собрался Первый международный конгресс по механике грунтов и фундаментостроению, я не имел никаких иллюзий относительно того, что природа поставила пределы той степени точности, с которой могут делаться предсказания характеристик в области техники земляных работ. Поэтому в то время я стал поощрять сравнение предсказанных и наблюдаемых характеристик и корреляцию случаев из практики с геологическими особенностями участка. Я ожидал, что как только инженеры-практики научатся оценивать неизбежные неопределенности, связанные с предсказанием характеристик данного участка, неправильное применение механики грунтов автоматически прекратится. Это, однако, оказалось мечтой.

Многие препятствия к строгому рассмотрению проблемы земляных работ вытекают из геологической истории грунтовых отложений, подстилающих наши участки. Поэтому я имел обыкновение называть курс инженерной геологии, который я читал в Гарварде, противоядием к «Теоретической механике грунтов», и я излагал его в этом духе. Однако до сих пор очень немногие курсы инженерной геологии выполняют свою жизненную миссию, потому что в большинстве из них предмет все еще представляется как собрание фактов, предоставляя студентам самим выяснять, что эти факты являются существенными составными частями для инженерного рассуждения и основой для обсервационного метода. Такое выяснение происходит редко. Поэтому неправильное приращение механики грунтов будет продолжаться, если только центри тяжести курсов инженерной геологии не сместится от геологических фактов к их инженерным последствиям. Одними из наиболее важных являются поставленные природой пределы степени надежности информации, которая может быть получена доступными в настоящее время способами исследования грунтов (Terzaghi, 1961).

ԳՐՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱՅԻ ԱՆՅՅԱԼԸ ԵՎ ԱՊԱԳԱՆ՝

Պրոֆեսոր ԿԱՐԼ ՏԵՐԶԱԳԻ

Խ մ ր ա գ ր ի ն ա խ ա ր ա ն ր

1973 թ. լրանում է հանրահռչակ գիտնականի և ինժեների, գրումների մեխանիկայի հիմնադիր պրոֆ. Կարլ Տերզագիի ծննդյան 90-ամյակը և մահվան 10-ամյակը: Նրա կյանքի աշխատությունը «Գրունտների շինարարական մեխանիկան նրա ֆիզիկական հատկությունների հիման վրա» (Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage) հրատարակվել է մոտավորապես 50 տարի առաջ՝ 1925 թ., իսկ ռուսերեն թարգմանությունը պրոֆ. Ն. Մ. Գերսելվանովի խմբագրությամբ՝ 1934 թ.: Ընթերցողին առաջնորդվող պրոֆ. Կարլ Տերզագիի զեկուցման թարգմանության մեջ, կարդացված 1961 թ. Բոստոնում, Քաղաքացիական ինժեներների ամերիկյան ընկերության առջև, տրվում է գրումների մեխանիկայի պատմության և նրա հետագա զարգացման ընդհանրացնող ակնարկը: Տալով այս հոդվածի թարգմանությունը, ժողովածուի խմբագրությունը հույս ունի, որ այն կհետաքրքրի այն ընթերցողներին, որոնք կուզենային մի հայացքով ընդգրկել գրումների մեխանիկայում ձեռք բերված այն էական հաջողությունները, որի ականատեսն է մեր այժմյան սերունդը. հոդվածը անշուշտ կարևոր է գրումների մեխանիկայի և ինժեներական երկրաբանության բնագավառում աշխատող մասնագետների համար մատենաշրջանում, որ այս գիտությունների զարգացումը և հաջողությունները կայանում են նախ և առաջ նրանց փոխադարձ ներափանցման մեջ:

Առաջարկվող հոդվածը զգալի հետաքրքրություն է ներկայացնում այն տեսակետից ևս որ պրոֆ. Կ. Տերզագին դրանում առաջին անգամ տալիս է կիրառական գրումների մեխանիկայում դիտական մեթոդի բանաձևումը, և լուսարբանում է այդ մեթոդի հնարավորությունները պրակտիկայից վերցրած մի շարք լավ վերլուծված օրինակների վրա:

Դիտական մեթոդը դեռ չի գտել համընդհանուր ճանաչողություն, և համեմայն դեպք, դրա կիրառումը դեռևս զարմանալի աննշան է: Հաշվի առնելով կիրառական գրումների մեխանիկայի բարդ խնդիրների լուծման համար դիտական մեթոդի մեծ պոտենցիալ հնարավորությունները կարելի է հուսալ, որ

1 Պրոֆ. Կարլ Տերզագիի հոդվածի շարադրությունը (Past and future of applied soil mechanics. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, April 1961, pp. 110—139). Անգլերենից շարադրեց պրոֆ. Գեորգ Տեր-Ստեփանյանը:

սույն հոդվածի հրատարակումը այդ ուղղությամբ կարևոր ստիմուլի դեր կծանայի:

Գեորգ Տեր-Ստեփանյան

ԴՐ. ՌՈՒԹ Դ. ՏԵՐՅԱԳԻԻ ԹԱՐԳՄԱՆՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱԲԱՆԸ

Կարլ Տերցագիի ծննդյան իննսունամյա հոբելյանի կապակցությամբ «Գրունտների մեխանիկայի անցյալը և ապագան» հոդվածի թարգմանությունը հաջող ընտրություն է: Ինչպես նրանում ներկայացված փաստացի նյութերը, այնպես էլ վեր հանված սկզբունքը, այժմ էլ նույնքան ժամանակակից են նրա առաջին հաղորդմանը՝ 1960 թվականին: Այն սկզբունքը, որի մասին ասված է. «Դա մի այնպիսի սովորություն է, որի խախտումն է ավելի պատիվ, ոչ՝ հետևումը»՝ կարող է լավ արտահայտվել աֆորիզմի հարասությամբ «անիմաստ գործունեությունը չարժե, որ իրագործվի»:

ԴՐ. ՌՈՒԹ Դ. ՏԵՐՅԱԳԻ

PAST AND FUTURE OF APPLIED SOIL MECHANICS¹

Prof. KARL TERZAGHI

Editor's note

In 1973 the 90th birth anniversary of Prof. Karl Terzaghi, an eminent scientist and engineer and founder of soil mechanics, will be completed. It marks at the same time the 10th anniversary of the death of the Professor.

His classic work on soil mechanics «Erdbaumechnik auf bodenphysikalischer Grundlage» was published nearly 50 years ago. Its Russian translation, edited by Prof. N. M. Gersevanov, appeared in 1934. The present publication is a translation of the late Prof. Karl Terzaghi's lecture at the annual meeting of the American Society of Civil Engineers in Boston. It sets forth a general outline of the history and an outlook for the subsequent development of soil mechanics. Publishing the translation of this paper the Editorial Board hopes that it will be of interest for those who want to gain some notion of the essential progress made in soil mechanics, a witness to which was our generation; undoubtedly, the paper will engage the attention of all specialists in the field of soil mechanics and engineering geology. The writing shows that the subsequent development and success of these sciences is accountable in terms of their inter-penetration.

The paper is significant inasmuch as Prof. K. Terzaghi formulates for the first time the observational method in applied soil mechanics and illustrates the potentialities of this method for a number of well analysed examples from practice.

The observational method is not generally recognized and its application is strikingly poor. Taking into account the great opportunities offered by the observational method in the solution of the intricate problems of applied soil mechanics it is to be expected that the publication of this paper will come as a major impetus in this sense.

George Ter-Stepanian

* Վ. Շեֆալի, Համլետ, ար. I, տես. 4, թարգմանություն 2. Մասեհյանի:

¹ Lecture presented at the Annual convention of the American Society of Civil Engineers, held in Boston; the lecture was published in the Journal of the Boston Society of Civil Engineer, April 1961, v. 48, pp. 110—139.

Dr. RUTH D. TERZAGHI'S PREFACE TO THE TRANSLATION

The article entitled „Past and Future of Soil Mechanics“ is a happy choice for the occasion of Karl Terzaghi's ninetieth anniversary. Both with respect to the factual material presented as well as to the principle emphasized, it is as relevant today as when it was first delivered in 1960. That principle, still „more honored in the breach than in the observance“ might well be expressed by a paraphrase of Socrates' aphorism „an unexamined profession is not worth practicing“.*

Dr. RUTH D. TERZAGHI

ГРУНТЫ И ПОДЪЕМЫ — ЛИТЕРАТУРА — REFERENCES

- Деформации земляных масс, их причины и меры предупреждения, 1934. Труды Шведской геотехнической комиссии. ОНТИ, М.—Л.—Новосибирск.
- Терцаги К., 1933. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. Перевод под ред. проф. Н. М. Герсеванова. М.—Л., Гостройиздат.
- Bjerrum L., Casagrande A., Peck R. B. and Skempton A. W., 1960. From theory to practice in soil mechanics. Selections from the writings of Karl Terzaghi with bibliography and contributions on his life and achievements. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- FitzHugh M. M., Miller J. S. and Terzaghi K., 1945. Shipways with cellular walls on a marl foundation. Trans. A.S.C.E. 112: 298—324.
- Lossier H., 1958. La crise de confiance de la mécanique des sols. Le Génie Civil. July 1958. Paris
- Main Ch. T. and Sawtell H. E., 1918. Foundations of the new buildings of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. Journal, Boston Society of Civil Engineers, 5: 1—34.
- Discussion by L. M. Hastings, 35—38.
- Petterson K. E., Kajrasell Göteborg den 5te Mars 1916: Teknisk Tidsskrift 1916, V.U. 30: 281—287 and 31: 289—291.
- Statens Järnvägars Geotekniska Kommision, 1922. Slutbetänkande avgivet den Maj 31, 1922. Stockholm.
- Terzaghi K., 1925. Erdbaumechnik. Wien.
- Terzaghi K., 1929. Soil studies for the Granville Dam at Westfield, Mass. Journal, New England Water Works Association, 43: 191—213.
- Terzaghi K., 1936. Relation between soil mechanics and foundation engineering. Presidential Address, Proc., First Intern. Confer. on Soil Mech. and Found. Engg., Cambridge, Mass., 1: 54—56.
- Terzaghi K., 1953. Fifty years of subsoil exploration. Proc., Thrid Intern. Confer. on Soil Mech. and Found. Engg., Zürich, 3: 227—237.
- Terzaghi K. and Peck R. B., 1957. Stabilization of an ore pile by drainage. Proc., A.S.C.E., 83(SM 1): pap. 1144.
- Terzaghi K. and Leps T. N., 1958. Design and performance of Vermilion Dam, California. Proc., A.S.C.E., Paper
- Terzaghi K., 1961. Engineering geology on the job and in the classroom. Journal, Boston Society of Civil Engineers, 48: 97—109.
- Van Es L. J. C., 1933. Das Untersuchungsverfahren über die Eignung von Bodenarten für den Bau von Staudämmen mit Hilfe der Konsistenzwerte von Atterberg. 1. Erster Intern. Talsperren-Kongress, Stockholm, 1933. Question 2 and Rep. No. 21.

* Shakespeare's „Hamlet“, Act 1, Scene 4