

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕХАНИЗМУ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНОВ

Член-корр. АН АрмССР, проф., докт. техн. наук Г. И. ТЕР-СТЕПАНЯН¹

Реферат. Изучение деформированного состояния склонов необходимо при определении механизма оползней, установлении роли оползнеобразующих факторов, оценке эффективности противооползневых мероприятий и осуществлении обсервационного метода борьбы с оползнями. Для анализа оползневых процессов широко применяется реологическая модель Бингема и описывающее ее уравнение, однако из-за нечеткости динамической вязкости грунта целесообразно применять предлагаемое уравнение, содержащее статическую вязкость грунтов. Приводятся результаты применения теории кинетических процессов и описывается новая концепция ползучести грунтов при сдвиге, свободная от допущения о постоянстве коэффициента динамической вязкости грунта и поэтому применимая ко всем фазам ползучести. Рекомендуется построение годографов и годограмм ползучести при мониторинге движений масс на склонах.

РЕОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС МЕХАНИЗМА ОБРУШЕНИЯ СКЛОНОВ²

Реология в широком смысле термина изучает поведение материалов под действием четырех основных факторов — напряжения, деформации, времени, температуры и их производных, как-то: скорость деформации, интенсивность напряжений и т. д. Это широкое определение включает также обширные проблемы механики грунтов, как связь между напряжением и деформацией или характеристики прочности грунтов; естественно, что они выходят за пределы настоящей статьи.

В узком смысле реология грунтов изучает зависящее от времени поведение грунтов: ползучесть или изменение деформации со временем при постоянном напряжении, релаксацию или изменение напряжений со временем при постоянной деформации, длительную прочность или изменение сопротивления сдвигу при длительном действии постоянных напряжений и т. д.

Поскольку напряженное состояние склонов зависит от статических условий и для данного склона может считаться более или менее постоянным, если только не изменяются гидрогеологические факторы, и, с другой стороны, склоны обычно могут беспрепятственно деформироваться по крайней мере по направлению к дневной поверхности, очевидно, что именно ползучесть представляет собой главную проблему, которая должна рассматриваться при анализе длительного поведения склонов.

¹ Зав. Лабораторией геомеханики ИГИС АН АрмССР.

² Папельный доклад на Международном симпозиуме по механике грунтов в Оахака, Мексика, в марте 1979 г.

Формирование представлений о резлогической природе оползней

Геологический опыт показывает, что на многих склонах происходят длительные медленные деформации. Медленные деформации склонов происходят не только в приповерхностных пластах, но также и в более глубоких зонах. Их существование было замечено почти столетие тому назад Геймом (Heim, 1882); его наблюдения, по большей части сделанные в Альпах, были обобщены им пятьдесят лет спустя (Heim, 1932). Во многих случаях медленные деформации переходят в оползни. Дальнейшее геологическое изучение и инженерный опыт показали, что обрушения природных склонов, сложенных грунтами или скальными породами, или искусственных земляных сооружений почти всегда предшествует более или менее длительный подготовительный период медленных деформаций; это положение не относится к оползням, вызванным внезапным разжижением песков или землетрясениями. Эти ранние наблюдения подтверждают обширными инженерно-геологическими исследованиями, проведенными во всех частях света. Было замечено, что чем крупнее оползень, тем длительнее подготовительный период медленных деформаций.

Процессам, вызывающим эти медленные деформации, давалось различное объяснение—их связывали с пресловутым «действием подземных вод», выветриванием и разрушением связей и т. д. Шахуняц (1944) предложил теорию цикличности деформативных процессов на нестабилизированных склонах: вследствие неравномерных непрерывных изменений внешних и внутренних факторов, определяющих устойчивость склонов, изменяется также и коэффициент безопасности, вызывая циклические возобновления деформации, когда его значение падает ниже единицы.

Большой прогресс в понимании различных типов деформации склонов был сделан Терцаги (1958). Наука об оползнях получила твердый фундамент и позже сделалась ведущим направлением инженерной геологии. Рассматривая быстрые оползни и медленную непрерывную ползучесть, Терцаги указал, что разница между ними состоит в различном типе деформирования, вызываемого этими двумя процессами. Ползучесть начинается при малом значении касательных напряжений, называемом основным сопротивлением (Griggs, 1936); если касательные напряжения превосходят это значение, склон ползет, если же они делаются равными напряжениям, требуемым для того, чтобы вызвать обрушение при сдвиге, происходит оползень. Таким образом, впервые была указана геологическая природа процесса медленной деформации.

Фундаментальная работа Терцаги по механизму оползней стимулировала многочисленные исследования на эту тему. Одной из первых была исчерпывающая статья Штини (Stiny, 1952), которая сохраняет свое значение до настоящего времени. Заслуживает внимания попытка Штини проанализировать с точки зрения новых идей различные известные типы медленных движений на склонах.

Хефели (Haeufeli, 1954) различает установившуюся и неустановившуюся ползучесть; первая наблюдается в осыпях и в делювии. В качестве иллюстрации может служить ползучесть семи церквей около Пайдена в Швейцарии, которые в течение 67 лет сместились в горизонтальном направлении безо всяких повреждений на 15 м.

Реологическое поведение грунтов позволяет применять модель твердого тела и описывающее его хорошо известное уравнение Бингема

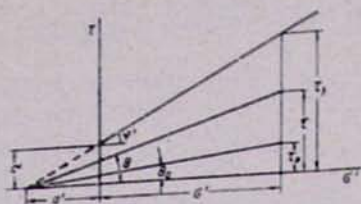


Рис. 1. Коэффициент мобилизованного сопротивления сдвигу.

Պկ. 1. Մահի մարիիզացման դիմադրության գործակից:

Fig. 1. Coefficient of the mobilized shear strength of soils.

$$\dot{\gamma} = (\tau - \tau_0) / \eta, \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}$ — скорость деформации сдвига, τ — касательное напряжение по поверхности деформирования, τ_0 — сдвигающее сопротивление и η — коэффициент вязкости, принимаемый за постоянную величину.

Тер-Степанян (1955) предложил сложного напряженного состояния в теле склона образуется зона концентрации касательных напряжений. В этой зоне протекает ползучесть со скоростью, определяемой уравнением Бингема. Для различных приращений сдвигающего напряжения выделяются три последовательные фазы в соответствии с формой кривых время—смещение: стабилизация, ползучесть и срез. Вследствие неравномерного распределения нормального σ и касательного τ напряжений целесообразно выражать напряженное состояние через коэффициент мобилизованного сопротивления сдвигу $\operatorname{tg} \theta$ (рис. 1), который является менее изменчивым, чем составляющие напряжений, взятые в отдельности:

$$\operatorname{tg} \theta = \tau / (a' + \sigma'). \quad (2)$$

Здесь σ' — эффективное нормальное напряжение; $a' = c' \operatorname{ctg} \varphi'$ — притяжение (по Янбу); c' , φ' — параметры сопротивления сдвигу; зона ползучести ограничена изолинией $\operatorname{tg} \theta_0$, соответствующей пороговому значению этого коэффициента

$$\operatorname{tg} \theta_0 = \tau_0 / (a' + \sigma'). \quad (3)$$

Ползучесть протекает в этой зоне со скоростью, определяемой уравнением Бингема.

Маслов (1955) провел различие между вязким течением водонасыщенной грунтовой массы и пластичным течением грунтов на склонах и дал выражение для их скорости; реологическими моделями для них служат Ньютоновская жидкость и Бингемово твердое тело соответственно. Таким образом, концепция применимости вязкопластичного реологического тела Бингема к анализу медленных деформаций склонов укоренилась к середине пятидесятых годов.

Классическая реология грунтов и ее критика

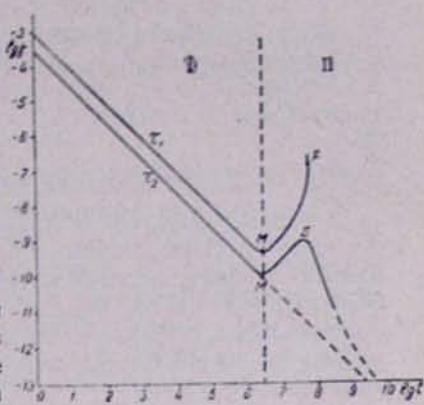
Характерное для классической реологии грунтов реологическое тело Бингема основано на допущении постоянного значения вязкости грунтов. Этот очень важный вопрос должен быть специально обсужден.

Вязкость или, точнее, динамическая вязкость является подходящей концепцией при изучении механического поведения жидкостей, так как именно для жидкостей ее значение не зависит от времени и изменяется только с температурой. Что касается грунтов, вязкость их изменяется со временем в широких пределах. Кривые ползучести (кри-

Рис. 2. Соотношение между логарифмами времени t и скоростью ползучести $\dot{\gamma}$ глины при высоком (τ_1) и промежуточном (τ_2) уровнях напряжений. I—фаза мобилизации, II—фаза разрушения, M—предел мобилизации, S—предел стабилизации.

Նկ. 2. Բարձր (τ_1) և միջին (τ_2) լարումների մակարդակի գիպում $\dot{\gamma}$ ժամանակի լոգարիթմի և սողի $\dot{\gamma}$ արագության անկախությունը: I—մոբիլիզացման փուլ, II—բախտման փուլ, M—մոբիլիզացման սահման, S—ստաբիլիզացման սահման:

Fig. 2. Relation between logarithm of time t and logarithm of creep rate $\dot{\gamma}$ of a clay at high (τ_1) and at intermediate (τ_2) stress levels. I is the mobilization phase, II is the rupture phase. M is the mobilization limit, S is the stabilization limit, F is the failure.



вые время t —деформация γ) для низких значений касательных напряжений затухают; для касательных напряжений, превосходящих некоторое предельное значение, эти кривые обычно делятся на три части: первичная ползучесть (затухающая или неустановившаяся), вторичная ползучесть (установившаяся, протекающая с постоянной скоростью) и третичная ползучесть (незатухающая или прогрессирующее течение). Отсюда следует, что грунт обладает постоянной вязкостью только во время вторичной ползучести. Это несомненно разочаровывающее ограничение. В этой концепции далее делается допущение, что третичная ползучесть должна рано или поздно закончиться разрушением и что лишь вопрос времени, когда разрушится грунт.

Ни одно из этих допущений, принятых в традиционной интерпретации процесса ползучести, не подтверждается опытами. На отсутствие вторичной ползучести с постоянной скоростью деформации указал Бишоп (Bishop, 1966). Позже Тер-Степаняном (1976) было доказано, что идея прямолинейных отрезков на кривых ползучести является результатом масштабного эффекта; в произведенных опытах прямолинейных участков никогда не наблюдали. Тот же интервал опыта на ползучесть, который казался прямолинейным, на графике с более мелким масштабом времени показывал заметную кривизну.

Наконец, из вышеуказанных утверждений вытекает, что как только скорость ползучести начинает увеличиваться, т. е. когда ускорение деформации делается продолжительным, грунт должен разрушиться (см., например, Schmid, 1962). Шукле и Видмар (Šuklie, Vidmar, 1961) показали, что скорость ползучести уменьшается приблизительно обратно пропорционально времени, в интервале до 90% от сопротивления сдвигу. Бишоп и Ловенбарн (Bishop, Lovenbary, 1969) впервые наблюдали уменьшение скорости ползучести после некоторого ее увеличения. Тер-Степанян (1976) доказал, что для промежуточных уровней касательных напряжений скорость ползучести вначале уменьшается до известного минимального значения (предел мобилизации), затем заметно увеличивается (предел стабилизации) и наконец опять продолжает постепенно уменьшаться в течение многих лет (рис. 2); только для высоких уровней напряжений, близких к предельному сопротивлению сдвигу, процесс завершается разрушением (например при $\tau = 0,50\sigma$ процесс стабилизируется в течение более 2000 дней, при $\tau = 0,55\sigma$ разрушение происходит через 111 дней) (Тер-Степанян, 1982).

Таким образом, к концу шестидесятих годов сделалось очевидным, что концепция постоянной вязкости грунтов вообще говоря некорректна. Эта концепция может быть применена с полным правом только к природным склонам, в которых напряженное состояние неизменно, все процессы могут рассматриваться как установившиеся и динамическая вязкость может быть принята постоянной.

Новые пути решения проблемы

В тех случаях, когда возраст касательных напряжений был невелик, решение проблемы требовало нового подхода. В связи с этим было положено начало исследованиям соотношения между временем и вязкостью. Эти новые тенденции были связаны с применением теории кинетических процессов Эйринга, основной на концепции преодоления энергетических барьеров в текучих элементах при деформировании.

Первое успешное исследование этой проблемы было сделано Мураяма и Шибата (Murauma, Shibata, 1958, 1961). Учитывая, что вязкое поведение глины не согласуется с теорией вязкости Эйринга, они допустили существование сдерживающего сопротивления в связях и предложили теорию структурной вязкости. Им было дано нелинейное выражение вязкости связей и логарифмическое уравнение деформации ползучести.

Исходя из теории Эйринга, Митчел (Mitchell, 1964) предложил уравнение скорости ползучести $\dot{\gamma}$, когда касательные напряжения достаточно велики для того, чтобы вызвать заметную ползучесть:

$$\dot{\gamma} = X \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{-E}{R_0 T}\right) \exp\left(\frac{f_1 \lambda}{2kT}\right), \quad (4)$$

где X — функция числа текучих элементов в направлении деформирования и средней составляющей смещения в том же направлении, вызванного единичным преодолением энергетического барьера; k — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка; T — абсолютная температура; R_0 — универсальная газовая постоянная; f_1 — среднее усилие, действующее в каждом текучем элементе; λ — расстояние между последовательными положениями равновесия; E — свободная энергия активации.

Уравнение (4) дает постоянную скорость деформации. Для того, чтобы привести эти результаты в соответствие с поведением глины, были проанализированы результаты многих экспериментов и было выведено простое трехпараметрическое уравнение, связывающее скорость деформации, напряжение и время

$$\dot{\gamma} = A \exp(\alpha D) \cdot (t_1/t)^m, \quad (5)$$

где D — девиатор напряжения; A — скорость ползучести в момент $t=t_1$ и $D=0$; α — наклон средней части прямолинейного графика; $\lg \dot{\gamma}$ — напряжение для установленного времени после приложения нагрузки; t_1 — единица времени и m — наклон графика $\lg t - \lg \dot{\gamma}$. Митчел подчеркивает, что хотя уравнение (5) может служить основой для оценки влияния напряжения и времени на скорость деформации, оно, однако, не позволяет непосредственно применять значения параметров, определенных в лаборатории, к полевым задачам (Mitchell, 1969). Метод был позже иллюстрирован для предсказания скорости увеличения боковых эффективных напряжений во времени в илах залива

Сан-Франциско при одномерной консолидации (Kavesajan, Mitchell, 1977).

Для учета влияния времени в грунтах Маслов (1955) применил уравнение вязкости органических смол, предложенное Персо (Persoz, 1953),

$$\tau_k = \tau_{ik} - (\tau_{ik} - \tau_{i0}) \exp(-\mu t), \quad (6)$$

где τ_{ik} и τ_{i0} — конечное и начальное значения вязкости грунтов и μ — параметр грунта; определение τ_{ik} связано с большими трудностями.

Согласно Тер-Степаняну (1976), ползучесть глины протекает на 4² уровнях: молекулярном, частичном и структурном. В точках контакта частиц грунта происходят деформации сдвига на молекулярном уровне, описываемые уравнением Эйринга и протекающие с постоянной скоростью; это детерминистический процесс. На частичном уровне происходит деформация грунта; это также детерминистический процесс, управляемый длительностью L оседлой жизни связей, уровнем касательных напряжений τ и деформируемостью грунта F/R ; последняя представляет собой отношение векториальной суммы F касательных сил в сечении, проведенном через точки контакта в образце грунта, к векториальной сумме R нормальных сил. Отсюда коэффициент X в уравнении (4) равняется:

$$X = K \frac{F}{R} \frac{\tau - \tau_0}{\zeta L}, \quad (7)$$

где K — коэффициент пропорциональности и ζ — статическая вязкость. Процесс ползучести состоит из фаз мобилизации, разрушения и стабилизации. В фазе мобилизации дефекты структуры уменьшаются (Вялов и др., 1972), и поэтому длительность оседлой жизни связей увеличивается прямо пропорционально времени; это ведет к уравнению

$$\dot{\gamma} = a(\tau - \tau_0) / \zeta t, \quad (8)$$

где a — структурный коэффициент. В фазе разрушения дефекты структуры увеличиваются, длительность оседлой жизни связей уменьшается прямо пропорционально времени и уравнение скорости деформации будет

$$\dot{\gamma} = a(\tau - \tau_0) t / \zeta t_m^2, \quad (9)$$

где t_m — время мобилизации, соответствующее переходу от одной фазы к другой. Деформации структуры грунта происходят на структурном уровне; это стохастический процесс, при котором происходит скачкообразная перестройка структуры грунта и предшествующая структура делается неадекватной. Как только возникает новая структура, изменяются деформируемость грунта F/R и среднее усилие f_1 , действующее в текучих элементах, и следовательно изменяется также и структурный коэффициент a . Механические свойства вновь возникшей структуры не могут быть предопределены ходом событий, а зависят от случайных причин, как-то: геометрия частиц, распределение сил между контактами и т. д.

Для весьма длительных опытов (более чем шесть лет) было найдено, что при низком и промежуточном уровне касательных напряжений скорость ползучести уменьшается обратно времени (ср. с (8)):

$$\dot{\gamma} = (\tau - \tau_0) / \zeta t. \quad (10)$$

³ В последнее время установлено наличие четвертого уровня — агрегатного.

Сравнивая это уравнение с уравнением (1), получаем закон векового изменения динамической вязкости грунтов

$$\eta = \zeta t. \quad (11)$$

Статическая вязкость ζ грунтов линейно связана с эффективным напряжением

$$\zeta = C_2(a' + \sigma'), \quad (12)$$

где C_2 — показатель вязкости — безразмерный коэффициент, постоянный для данного грунта. Объединяя уравнения (1, 2, 3, 11 и 12), получаем следующее безразмерное уравнение:

$$\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \theta_0 + C_2 t, \quad (13)$$

где t — возраст касательных напряжений.

Реологическое тело, описываемое этим уравнением, как и Бишгемово тело, полностью соответствует поведению природных склонов. Кроме того, в этом уравнении учитывается влияние времени на вязкость, оно позволяет изучать влияние изменения напряженного состояния склонов, т. е. описывает поведение природных склонов, на которых устроены насыпи и выемки, а также склонов искусственных земляных сооружений.

Что касается зависимости поведения глин от времени, следует различать *истинное влияние* времени на ползучесть при постоянном напряженном состоянии и неизменных свойствах грунтов и *кажущееся влияние*, возникающее в результате приспособления грунта к изменяющимся условиям различной природы. Приспособляемость грунта к изменяющимся активным напряжениям вследствие перехода от недеформированного сопротивления к дренарованному была отмечена Бишопом (Bishop, 1966). Приспособляемость к изменяющемуся сопротивлению сдвигу вследствие прогрессирующего характера процесса сдвига в грунтах проявляется в хрупком или размягчающемся в ходе сопротивления сдвигу поведении, когда условия пикового сопротивления постепенно распространяются вдоль потенциальной поверхности скольжения и заменяются остаточным или промежуточным сопротивлением; Скемптон (1967) показал, что параметры сопротивления сдвигу переконсолидированных глин с надлежащим учетом определенного в поле порового давления существенно отличаются от значений пикового сопротивления, полученного в лаборатории. Приспособляемость к изменениям свойств грунтов со временем может быть результатом выветривания и высвобождения замкнутой энергии деформирования показанного Бьеррумом (1976).

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ СКЛОНОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЗМА ОПОЛЗНЕП

Низкая эффективность и высокая стоимость борьбы со старыми, крупными и упорными оползнями

История борьбы со многими крупными, сложными и упорными оползнями измеряется десятилетиями; иными словами, на таких оползнях в течение многих лет производились исследования и расчеты, проектировались и осуществлялись подпорные и дренажные сооружения, которые должны были устранить деформации грунта, и все это оказалось безрезультатным. Трудно указать какую-либо другую область техники или строительства, где положение было бы таким же безот-

радным. Более того, во многих случаях оползни возникают именно в результате строительных работ (насыпи, выемки, водохранилища, открытые разработки, отвалы, ирригация и др.), производимых после инженерно-геологических исследований и расчетов, и именно в наши дни, когда наука вооружила инженеров многими сведениями о свойствах грунтов и их поведении. Кажется, будто «оползневой дьявол» часмехается над людьми и их попытками справиться с ним. Важно и другое обстоятельство. В развитых странах подавляющее большинство оползней имеет техногенное происхождение. Огромные успехи механики грунтов за последние шестьдесят лет, давшие поразительные результаты в других областях геотехники (фундаментостроение, плотностроение, земляные сооружения, сваи), не оказались столь эффективными в отношении старых оползней на природных склонах. В настоящее время проблема заключается в исследовании механизма оползней (Терцаги, 1958).

Необходимость установления механизма оползней

Объяснение низкой эффективности и высокой стоимости борьбы со старыми, крупными и упорными оползнями следует искать в том, что установление их механизма сложнее, чем в случаях первозодных оползней. Напряженное состояние грунтовых массивов в обычных задачах механики грунтов может быть вычислено или хотя бы поддается оценке. Поэтому анализ обстановки начинается с определения распределения напряжений.

Наоборот, для склонов не существует аналитического решения распределения напряжений в замкнутой форме, и поэтому для оценки напряженного состояния массивов приходится прибегать к грубым допущениям. Хотя нормальные напряжения в теле склона и соизмеримы с нормальными напряжениями в основании инженерных сооружений, касательные напряжения в них относительно больше и достигают иногда предельных (пиковых) значений; поэтому в оползневом теле в одних участках может существовать допиковое состояние, а в других—последниковое (остаточное). В повторных и возобновляющихся оползнях остаточные значения сопротивления сдвигу сохраняются в старых поверхностях скольжения. Вязкость грунтов непосредственно связана с возрастом касательных напряжений, т. е. временем с момента приложения нагрузки. Поэтому для свежееотсыпанной насыпи или отрытой выемки вязкость грунта быстро изменяется, тогда как для тела старого склона она практически постоянна. Деформации склонов, находящиеся в фазе глубинной ползучести, происходят с переменной скоростью, зависящей от интенсивности действия оползнеобразующих факторов, и могут достигать высоких значений даже при отсутствии видимых признаков подвижек.

Подобные вопросы не возникают при анализе грунтовых условий оснований зданий или плотин, но они имеют важное значение для понимания механизма оползней. Поэтому одно только изучение геологических, гидрогеологических и геоморфологических условий или получение данных о геотехнических свойствах грунтов недостаточно; они могут дать некоторое общее представление о строении рассматриваемой территории и реакции грунтов на данное изменение напряженного состояния, но не о развитии оползневых деформаций на его склонах.

Роль второстепенных геологических деталей

Проф. Карл Терцаги еще более пятидесяти лет назад указывал на важную роль «второстепенных геологических деталей, которые не могут быть выявлены ни по результатам тщательного исследования створа плотины, ни с помощью разумно выбранного количества буровых скважин. Здесь имеются в виду такие вопросы, как точное местоположение и вариация ширины трещин, проходящих через скалу ниже основания плотины, форма и местные вариации водопроницаемости небольших прослоев грубого песка и гравия, содержащегося в тонкозернистых аллювиальных отложениях, и подобные же характеристики, имеющие второстепенное значение с точки зрения геологии» (Terzaghi, 1929). Влияние второстепенных геологических деталей на геотехнические свойства лессовидных суглинков в Иране было показано автором (Тер-Степанов, 1941). Однако тонкозернистые аллювиальные отложения и лессовидные суглинки представляют в общем значительно более однородный материал по сравнению с оползневыми накоплениями. Особенно важны положение старых поверхностей скольжения, имеющих низкие значения остаточного сопротивления сдвигу (Скемптон, 1967), и расположение оползневых трещин, играющих значительную двойную роль в перераспределении напряжений и возникновении новых фильтрационных путей.

ОПОЛЗНЕВОП ПРОЦЕСС

Оползневой процесс распадается на две неравные части: длительную фазу глубинной ползучести и кратковременную фазу обрушения склона, или собственно оползень.

Фаза глубинной ползучести

В гравитационном массиве, ограниченном откосом с примыкающими к нему горизонтальными поверхностями и ниже обозначаемом термином «тело склона», возникает сложное напряженное состояние. Оно характеризуется неравномерным распределением нормальных и касательных напряжений. В некоторой зоне, приуроченной к потенциальной поверхности скольжения, происходит концентрация касательных напряжений. Напряженное состояние тела склона целесообразно выражать через коэффициент мобилизованного сопротивления сдвигу (уравнение 2).

На рис. 3 показано распределение значений коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу в теле склона, сложенного из линейно-деформируемого материала. Оно образует замкнутую зону, приуроченную к потенциальной поверхности скольжения *AB*. Дальнейшее поведение склона зависит от деформативных свойств составляющего его материала. Если материал не способен ползти, то распределение сохранится. Если он способен ползти, то должна возникнуть вращательная глубинная ползучесть вокруг центра *C* и, следовательно, линии ползучести должны быть круговыми дугами. Однако такая ползучесть кинематически невозможна, так как точки, лежащие на одной и той же линии ползучести (например, на линии ползучести *D*),

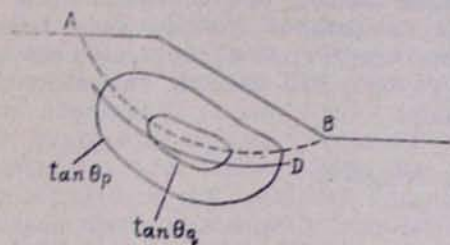


Рис. 3.

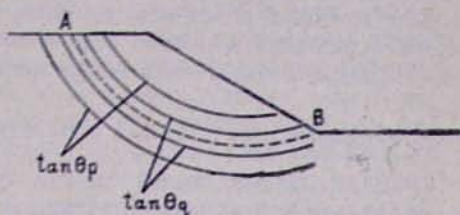


Рис. 4.

Рис. 3. Распределение коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу в линейно-деформируемом, способном к ползучести теле склона в гипотетический начальный момент; $tg\theta_p$ —изолиния предела ползучести, $tg\theta_q$ —изолиния предела разрушения.

Рис. 4. Распределение коэффициента мобилизованного сопротивления сдвигу в линейно-деформируемом, способном к ползучести теле склона после перераспределения касательных напряжений; $tg\theta_p$ —изолиния предела ползучести, $tg\theta_q$ —изолиния предела разрушения.

նկ. 3. Մանրի մարիի զագված դիմադրության զորժակի բաշխումը լանջի գծային-դեֆորմացվող, սողի բնդունակ մարմնում երկարեակի սկզբնական պահին. $tg\theta_p$ -ն սողի սահմանի հավասարագիծն է, $tg\theta_q$ -ն բաշխման սահմանի հավասարագիծը:

նկ. 4. Մանրի մարիի զագված դիմադրության զորժակի բաշխումը լանջի գծային-դեֆորմացվող, սողի բնդունակ մարմնում շոշափող լաբումների վերաբաշխումից ետո. $tg\theta_p$ -ն սողի սահմանի հավասարագիծն է, $tg\theta_q$ -ն բաշխման սահմանի հավասարագիծը:

Fig 3. Distribution of mobilized shear-strength coefficient in the linearly-deformable, liable to creep body of the slope at a hypothetical initial moment; $tg\theta_p$ is the creep limit isoline, $tg\theta_q$ is the rupture limit isoline.

Fig. 4. Distribution of mobilized shear-strength coefficient in the linearly deformable, liable to creep body of the slope after redistribution of shear stresses; $tg\theta_p$ is the creep limit isoline, $tg\theta_q$ is the rupture limit isoline.

имеют различные значения коэффициента $tg\theta$ и, следовательно, деформируются с различной скоростью. Поэтому в этом случае происходит перераспределение касательных напряжений и соответственно устанавливается новое распределение коэффициента $tg\theta$ показанное на рис. 4 (Тер-Степанян, 1978). Отсюда следует, что в теле склона, состоящего из линейно-деформируемого, способного ползти материала, распределение $tg\theta$, показанное на рис. 3, соответствует только гипотетическому начальному моменту образования склона, например, моменту, наступающему сразу же после отрывки выемки.

Реологические исследования ползучести глин показывают, что процесс деформирования отличается от общепринятого. Вся область значений касательных напряжений τ (или коэффициента $tg\theta$) может быть разбита на три части—низких, промежуточных и высоких значений. Границами между ними являются два предела: *предел ползучести* τ_p (или $tg\theta_p$), ниже которого не происходит ползучести, и *предел разрушения* τ_q (или $tg\theta_q$), выше которого ползучесть со временем переходит в разрушение. При промежуточном уровне касательных напряжений ползучесть состоит из трех фаз—фазы мобилизации, когда скорость ползучести убывает до некоторого минимального значения, фазы разрушения, когда скорость ползучести возрастает до некоторого максимального значения, и фазы стабилизации, когда скорость ползучести вновь убывает со временем. При высоком уровне касательных напряжений ползучесть состоит из двух фаз—мобилиза-

щин и разрушения. Отсюда вытекает, что периферические области шириной зоны ползучести (рис. 4), в которых коэффициент мобилизованного сопротивления сдвигу ниже предела разрушения, со временем стабилизируются, а в узкой центральной полосе, приуроченной к потенциальной поверхности скольжения, в которой коэффициент $tg\theta$ больше предела разрушения, ползучесть ускоряется, и процесс со временем переходит в общее обрушение склона. Это явление называется *концентрацией ползучести со временем*.

Фаза обрушения склона или собственно оползень

Распределение коэффициента $tg\theta$ на рис. 4 зависит от интенсивности действия оползнеобразующих факторов. При ухудшении обстановки, например, при возрастании фильтрационного давления, значение коэффициента $tg\theta$ по потенциальной поверхности скольжения может достигнуть предельного значения $tg\varphi'$, и склон обрушится. Такое же явление может иметь место и без всякого изменения коэффициента $tg\theta$, только вследствие концентрации ползучести со временем. В обоих случаях образуется поверхность скольжения, деформации сосредоточиваются в узкой полосе, и происходит собственно оползень.

Дальнейшее состояние склона существенно зависит от скорости сползания во время обрушения склона. Если эта скорость была невелика и при этом не возникли значительные силы инерции, то после медленного перемещения земляные массы займут гипсометрически более низкое положение, установятся новые статические условия равновесия и склон постепенно успокоится. Эти условия близки к предельным. Поэтому в медленно обрушившихся склонах значения коэффициента $tg\theta$ высоки, и в них после собственно оползня продолжается глубинная ползучесть. Вследствие неизбежного колебания интенсивности действия оползнеобразующих факторов эта ползучесть будет временами увеличиваться, и значения коэффициента $tg\theta$ будут приближаться к предельным значениям. Не обязательно, чтобы это явление охватило весь склон—оно может проявиться и на отдельных участках. В результате будет наблюдаться активизация какой-либо части оползневого массива. Отсюда следует, что строительство на медленно обрушившихся склонах сопряжено с большим риском.

Наоборот, если скорость перемещения при обрушении была велика и при этом развились значительные силы инерции, то земляные массы проделывают под действием этих сил большой путь и занимают новое положение, удаленное от того, которое соответствует предельным условиям. Склон также успокаивается, но значения коэффициента $tg\theta$ будут невысоки. Поэтому глубинная ползучесть прекращается или протекает с небольшой скоростью. Здесь также могут происходить колебания интенсивности оползнеобразующих факторов и соответственно изменения скорости глубинной ползучести, однако обстановка будет далека от опасной. Поэтому строительство некапитальных или временных сооружений на быстро обрушившихся склонах связано со значительно меньшим риском.

Обсервационный метод борьбы с оползнями

Борьба с оползнями наиболее эффективна на ранних стадиях развития процесса, когда оползневой баланс, т. е. соотношение сил, сопротивляющихся оползанию и вызывающих смещение, еще достаточно благоприятен и до обрушения остается довольно времени для при-

Принятия необходимых мер. Поэтому основное значение приобретает своевременное обнаружение небольших смещений и раннее установление механизма оползня.

Наблюдения за динамикой склона очень важны; их использование лежит в основе наблюдационного метода борьбы с оползнями. Нет необходимости, да и просто невозможно устранить действие всех оползнеобразующих причин. Для стабилизации оползня достаточно изменить оползневой баланс таким образом, чтобы прекратилась глубинная ползучесть склона. Поэтому вопрос о «дозировании» противооползневых мер имеет решающее значение. Во многих случаях целесообразно не осуществлять одновременно весь комплекс возможных противооползневых мер, но выполнять их последовательно, начиная с наиболее эффективных. Параллельно ведутся наблюдения за ходом и глубиной ползучести, и на основании полученных данных судят о том, насколько правильна данная мера. Если оказывается, что действие предполагаемой причины оползня удалось устранить, но скорость деформации склона не изменилась, то это означает, что причина оползня была установлена неправильно и следует пересмотреть проект противооползневых мер (Гер-Степанян, 1973).

Временной и пространственный аспекты механизма оползней

На склонах в зависимости от геологических, гидрогеологических условий, геометрических характеристик, механических и геологических свойств грунтов и вида внешних влияний могут действовать различные типы оползневого механизма. Механизм оползней может изменяться в процессе оползания, как это происходит в трансформирующихся оползнях. Одним из таких примеров является переход земляных потоков накапливающегося типа в их нижней части во вращательные оползни. Таким образом, оползневой механизм может иметь временной аспект. На склонах могут одновременно развиваться разного типа оползни или же может существовать несколько этажей оползания, расположенных друг над другом. Соответственно оползневой механизм может иметь пространственный аспект.

Единый критерий оценки роли различных оползнеобразующих факторов и противооползневых мер

Различные оползнеобразующие факторы, действующие на склоны, и противооползневые меры, осуществляемые для устранения их действия, выражаются в разных единицах; так, атмосферные осадки выражаются в миллиметрах, подрезка склона дорогой—в метрах протяженности и глубины выемки, горизонтальный дренаж—в количестве скважин и метрах длины и т. д. Однако имеется единый критерий, позволяющий в принципе свести воедино влияние всех этих факторов и мер и выявить суммарный результат; этим критерием является соотношение между напряжениями, деформациями и временем. Важность и единственность этого критерия вытекает из принципиальной возможности выразить каждый из оползнеобразующих факторов и каждую из противооползневых мер через напряжение, деформацию и время. Однако эта возможность, как правило, не реализуется вследствие чрезвычайно сложной картины напряженного состояния склонов, ее зависимости от интенсивности и распределения внешних факторов, действующих на склон, от реологических свойств грунтов и истории напряжений, от деформации и времени. Поэтому во многих слу-

чаях количественная сторона напряженного состояния склона остается невыявленной. Тем не менее, природа оползня может быть понята только в том случае, если его оценка основывается хотя бы на качественном представлении о зависимости между напряжением, деформацией и временем.

Возможность полевого измерения напряжений довольно проблематична вследствие технических трудностей с установкой такой аппаратуры, которая не изменяла бы напряженного состояния. Модельные испытания и приближенные математические решения для старых и упорных оползней весьма условны вследствие неучитываемых влияний второстепенных геологических деталей и неясной истории напряжений.

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Преимущества изучения деформированного состояния

Изучение деформированного состояния склонов, т. е. кинематики склонов, обладает преимуществами, поскольку деформации могут быть легко измерены в полевых условиях применением геодезических и инклинометрических наблюдений. Они позволяют оценивать механизм оползней, роль оползнеобразующих факторов и эффективность противооползневых мер в интегральной форме.

Необходимость измерения оползневых деформаций приобрела всеобщее признание, и результаты подобных наблюдений нередко сопровождают описание оползней. В большинстве случаев они служат только для иллюстрации оползневого процесса, хотя из этих данных может быть извлечена значительно большая информация. Использование результатов геодезических наблюдений на склонах позволило вывести важные заключения о механизме оползней. Поэтому целесообразно иметь на оползнях большое количество наблюдательных реперов. Для облегчения работ и достижения большей точности рекомендуется применение графического дифференциального метода, основанного на анализе небольших приращений измеряемых величин (Тер-Степанян, 1979).

Годографы ползучести

Как правило, векторы смещения реперов не распределяются регулярно, как должно быть в случае, если земляные массы движутся как одно целое. Если расхождение в распределении векторов смещений не может быть приписано неточности геодезических измерений, то они несомненно отражают реальную картину глубинной ползучести. Для анализа и разложения векторов скорости смещения оползневых реперов может быть с успехом применен графический метод построения годографов ползучести. На рис. 5 показан склон, подверженный вращательной глубинной ползучести вокруг центра C . Для построения годографов ползучести должны быть вычислены составляющие v_x , v_y и v_z векторов скоростей смещения оползневых реперов. Вычерчивается два графика (рис. 6). Один из них изображает горизонтальную плоскость с осями координат v_x и v_y . Начало всех векторов скорости смещения помещают в начале координат, а вектор скорости смещения изображают в виде точки. Второй график изображает совмещенные вертикальные плоскости, проходящие через направления горизонтальных проекций v_H векторов скорости, $v_H = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$,

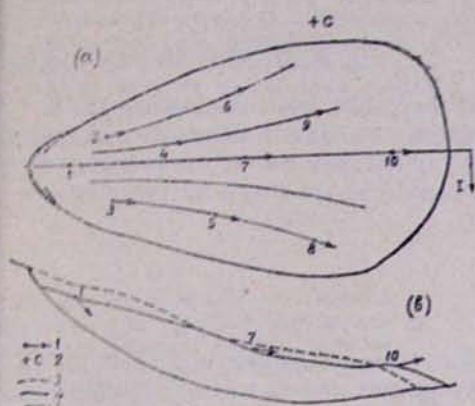


Рис. 5.

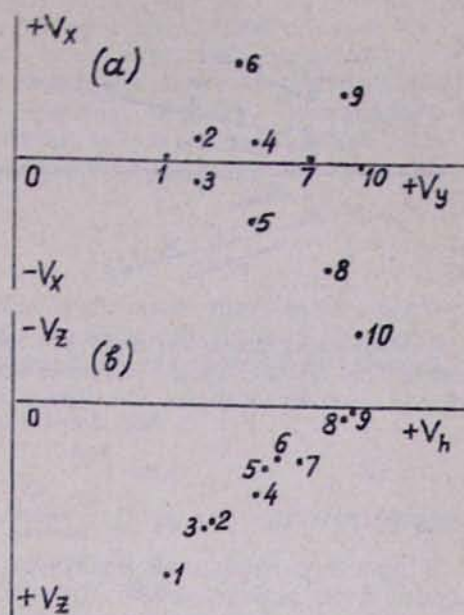


Рис. 6.

Рис. 5. План (а) и разрез по оси I—I вращательного оползня (б). 1—репер и вектор скорости смещения; 2—центр вращения оползня (в вертикальной плоскости); 3—поверхность склона до оползания; 4—поверхность склона после оползания; 5—линии ползучести.

Рис. 6. Годограф ползучести вращательного оползня. (а) горизонтальная плоскость; (б) — вертикальная плоскость.

Նկ. 5. Պլանը (ա) և կտրվածքը (բ) ըստ պտտության առանցքի I—I առանցքի: 1—տեղանիշ և տեղաշարժման արագության վեկտոր. 2—սողանքի պտտման կենտրոն (որոշված է հարթությունում). 3—թանգի մակերևույթը մինչև սողանքը. 4—թանգի մակերևույթը սողանքից հետո. 5—սողքի գծերը:

Նկ. 6. Պտտության առանցքի առկա հորիզոնական հարթություն (ա) — որոշված է հարթությունում, (բ) — ուղղահայաց հարթություն:

Fig. 5. Plan (a) and cross section (b) along the I—I axis of the rotational landslide. 1 is the benchmark and displacement rate vector; 2 is the landslide rotation centre (in the vertical plane); 3 is the slope surface before sliding; 4 is the slope surface after sliding; 5 are creep lines.

Fig. 6. Creep hodograph of a rotational landslide. (a) is the horizontal plane; (b) is the vertical plane.

с осями координат v_h и v_z . Отсюда следует, что для построения годографа ползучести необходимы по крайней мере два цикла геодезических наблюдений, принимая, что скорость движения реперов была равномерной. Годограф ползучести в сочетании с результатами картирования оползневых трещин и деформации сооружений позволяет локализовать оползневые очаги, оконтуривать зоны глубинной ползучести, выделять смещающиеся тела в многоярусных оползнях и т. д. Такие сведения имеют важное значение в борьбе с оползнями, так как позволяют правильно располагать дренажные и опорные сооружения и использовать земли надлежащим образом (Тер-Степанян, 1979).

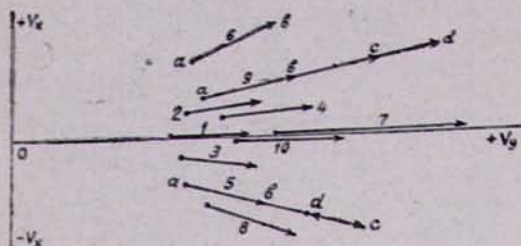


Рис. 7. Годограмма ползучести равномерно ускоряющегося вращательного оползня. *a*—результат второго цикла наблюдений, *b*—то же третьего цикла; скорость ползучести увеличилась на 50%. Результаты следующих циклов показаны только для реперов № 5 и 9.

Բն. 7. Շափառաձայն արագացող պրոտատվան սողմի նորոգամբ: *a*—դրուամների երկրորդ փուլի արդյունքը, *b*—նույնը երրորդ փուլի ճամար, սողմի արագությունն աճել է 50%-ով: Մյուս փուլերի արդյունքները ջույզ են արված միայն № 5 և № 9 սեղանիչների ճամար:

Fig. 7. Creep hodogram of the uniformly accelerating rotational landslide: *a* is the result of the second cycle of observations; *b* is the same for the third cycle; the creep rate increased by 50 per cent. Results of next cycles are shown for benchmarks Nos. 5 and 9 only.

Линии ползучести

В процессе глубинной ползучести склонов земляные массы проделывают пути, определяемые господствующими на склоне условиями. Если точка *A* переходит со временем в положение *C* и т. д., то линия *ABC* является линией ползучести точки *A*. В общем случае линии ползучести криволинейны. Линии ползучести вращательного оползня показаны на рис. 5. Кривизна линии ползучести очень мала. Смещение оползневого репера ничтожно по сравнению с радиусом кривизны линии ползучести. Поэтому можно пренебречь этой кривизной и рассматривать линии ползучести вблизи каждого репера как прямые. Только в случае больших смещений в фазе обрушения кривизна линии ползучести должна приниматься в расчет.

Годограммы ползучести

Значительно большая информация может быть получена, если производятся систематические геодезические наблюдения в течение ряда лет. Основываясь на этих данных, могут быть построены и проанализированы *годограммы ползучести*. Годограммы ползучести строятся по тем же принципам, что и годографы ползучести. По результатам последовательных циклов наблюдений для каждого репера получают точки *a*, *b*, *c*... на чертеже годографов, как описано выше (рис. 7). Векторы \vec{Oa} , \vec{Ob} , \vec{Oc} показывают скорости ползучести для соответствующих интервалов времени.

Вектор \vec{ab} , имеющий началом точку *a* и концом точку *b*, показывает разность векторов \vec{Ob} и \vec{Oa} , или приращение скорости ползучести. Из допущения о прямолинейности линий ползучести вытекает, что векторы в годограмме ползучести должны проходить через начало координат. Отсюда следует, что векторы на годограмме ползучести располагаются веерообразно по отношению к началу координат. Если эти векторы направлены наружу, то глубинная ползучесть ускоряется, как это показано на рис. 7, и наоборот, если векторы направлены к началу координат, то глубинная ползучесть замедляется. Для ясности чертежа результаты дальнейших циклов *c* и *d* показаны на рис. 7 только для реперов № 5 и 9. Видно, что после цикла наблюдений *c* репер № 5 начал замедляться, тогда как репер № 9 продолжал уско-

твояться. Если векторы на годограмме ползучести отклоняются от направления, проходящего через начало координат, это означает, что вна основное направление движения наложилось влияние местных обстоятельств, например, повреждение репера, боковая активизация оползня, возникновение трещины, отрывка грунта и т. д. Такие случаи должны быть тщательно изучены на месте с целью введения поправок.

Анализ годограмм ползучести

В качестве примера использования годограмм ползучести произведем анализ вращательного оползня, показанного на рис. 5. Годограф ползучести этого оползня, составленный на основании первых

Рис. 8. Годограммы ползучести вращательного оползня наступательного типа. Графики (а)–(с) показывают три последовательных этапа активизации вследствие утечки из водопроводной линии в верхней части склона; точки а–d показывают результаты пяти циклов наблюдений, соответственно, проведенных до начала борьбы с оползнями. График (d) показывает результат первого этапа после уборки водопроводной линии. Верхние реперы начали замедляться, нижние продолжают ускоряться. Результаты наблюдений показывают, что противооползневые меры были правильными. Во избежание загромождения чертежа не все точки обозначены.

Յկ. 8. Առաջընթաց տիպի պտտական սողանքի սողմի նորոգումներ: (ա)–(ս) գրաֆիկները ցույց են տալիս լանդշիփերին մասում ջրմուղի զծից արտահոսքի հետևանքով ակտիվացման երեք հաջորդական փուլերը: ա–d կետերը ցույց են տալիս, համապատասխանաբար, դիտումների հինգ փուլերի արդյունքները, որ անց են կացվել մինչև սողանքների դեմ պայքարն սկսելը: (d) գրաֆիկը ցույց է տալիս ջրմուղի զծի հեռացումից հետո առաջին կտապի արդյունքը: Վերին տեղանիշները սկսել են դանդաղել, ստորինները շարունակում են արագանալ: Գիտումների արդյունքները ցույց են տալիս, որ հակասողանքային միջոցառումները արդյունավետ են եղել: Քրեմադրի ծանրարևոտումից խուսափելու նպատակով ոչ բոլոր կետերն են նշանակված:

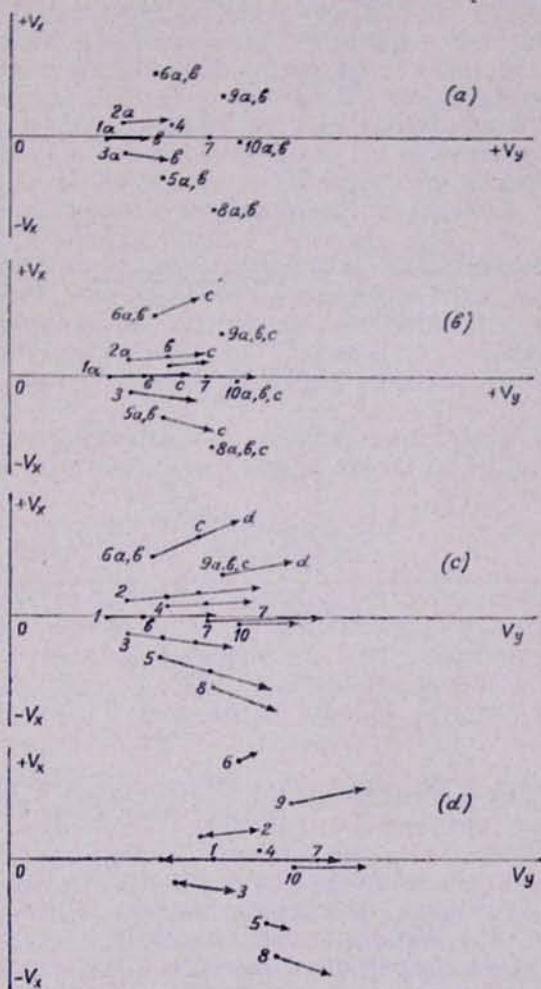


Fig. 8. Creep hodograms of an advancing type rotational landslide. Graphs (a)–(c) show three successive stages of activation due to leakage from the water pipeline in the upper part of the slope; points a–d show results of five cycles of observation, respectively, carried out before the beginning of landslide control. Graph (d) shows the result of the first stage after removal of water pipeline. Upper benchmark marks began to slow down, while lower ones continue to accelerate. For sake of clarity not all the points are designated.

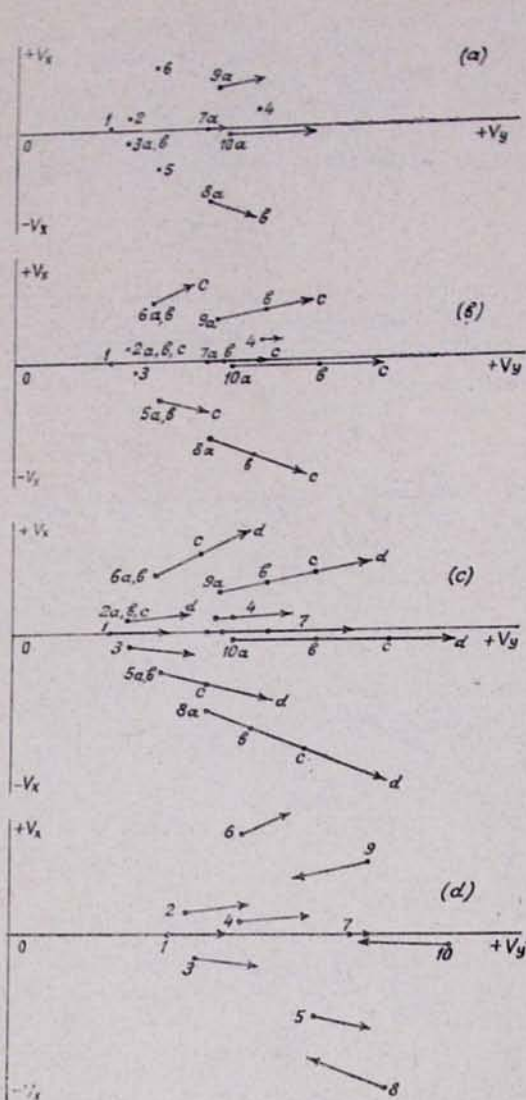


Рис. 9. Годограммы ползучести вращательного оползня отступательного типа. Графики (а)—(с)—три последовательные подрезки дорогой нижней части склона; точки а—d показывают результаты пяти циклов наблюдений, соответственно, проведенных до начала борьбы с оползем. График (д)—результат первого этапа после закрепления склона анкерами. Низовые реперы № 8—10 начали замедляться, верховые продолжают ускоряться. Результаты наблюдений показывают, что противооползневые меры были эффективными.

նկ. 9. Ետրեքաց տիպի պտտական աղանձի սողի հարգումներ: (ա)—(ս) դրաֆիկները ցույց են տալիս լանդի ստորին մասի՝ ճանապարհով ճատման նետանքով ակտիվացման երեք հաջորդական էտափները. ա—d կետերը ցույց են տալիս, համապատասխանաբար, դիտումների հինգ փուլերի արդյունքները, որ անց են կացվել մինչև սողանքի դեմ պայքարը սկսելը: (դ) դրաֆիկը խորիսներով ամրացնելուց հետո ստացված էտափի արդյունքը: № 8—10 ստորին տեղանիշները սկսել են դանդաղել, վերինները շարունակում են արագանալ: Դիտումների արդյունքները ցույց են տալիս, որ հակաոպոզանքային միջոցառումները արդյունավետ են եղել:

Fig. 9. Creep hodograms of a retreating type rotational landslide.

Graphs (a)—(c) denote three successive stages of activation due to undercutting of the lower part of the slope by a road; points a—d show results of five successive cycles of observations, respectively, carried out before the landslide control. Graph (d) is the result of the first stage after anchoring the slope.

Lower benchmarks Nos. 8—10 began to slow down, while upper ones continue to accelerate. Observation results show that the landslide measures were efficient.

двух циклов наблюдений, показан на рис. 6. Предположим, что рис. 8, а изображает годограмму ползучести после третьего цикла (обозначено «b^а»). Верховые реперы (№ 1—3) показывают ускорение (в данном случае увеличение скорости земляных масс около 35%), остальная часть склона движется с той же скоростью (точки а и b совпадают). Таким образом, началась активизация верхней части склона. Следующая стадия, обозначенная «с», показана на рис. 8, б: реперы № 1—3 продолжают ускоряться, № 4—7 в средней части склона включаются в процесс, тогда как реперы № 8—10 движутся с той же скоростью. Последняя стадия, когда активизировался весь склон, обозначенная «d», показана на рис. 8, с.

Еще в самой начальной стадии процесса можно сделать правильное заключение, что активизация склона началась вследствие причины, действующей в верховой части склона, например, из-за утечки из водопроводной линии, пересекающей оползневое тело. Наконец, на рис. 8, d приведена годограмма ползучести, показывающая затухание процесса после осуществления противооползневых мер, например, если убрана водопроводная линия. Глубинная ползучесть начала уменьшаться в верховой части склона (реперы № 1—3), средняя часть склона продолжает двигаться с постоянной или слегка увеличенной скоростью (№ 5—7), тогда как низовая часть все еще ускоряется, так как процесс затухания до нее еще не дошел (№ 8—10).

Если активизация оползня начинается в нижней части склона, например, вследствие подрезки склона дорогой, то увеличение скорости ползучести обнаруженное вначале низовыми реперами, будет постоянно распространяться в направлении вверх по склону. Может быть также легко установлена эффективность принятых противооползневых мер, например, закрепления склона анкерами (рис. 9).

Годограммы ползучести представляют собой способ обнаружения отставания во времени деформации от действия оползнеобразующих факторов, установления миграции оползневого очага и эффективности противооползневых мер, изучения эволюции оползня, вычисления ускорения смещения, заблаговременного предсказания обрушения и осуществления обсервационного метода борьбы с оползнями.

Анализ результатов инклинометрических измерений дает возможность очертить зону ползучести, обнаружить концентрацию ползучести со временем вблизи потенциальной поверхности скольжения и на месте определить два важных реологических параметра, а именно предел ползучести и динамическую вязкость (Тер-Степанян, Симонян, 1982).

Невозможно переоценить теоретическое и практическое значение информации, получаемой при анализе деформации склонов.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ПРОГНОЗЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СКЛОНЫ

Нет ничего более ошибочного при планировании искусственного, техногенного воздействия на природу, чем арифметическое правило «от перестановки слагаемых сумма не изменяется». При техногенном воздействии на геологическую среду от перестановки слагаемых сумма изменяется весьма существенно, и несомненно, что при правильной расстановке слагаемых для получения того же результата многие слагаемые могут вообще не потребоваться.

Акад. Е. М. Сергеев (1981) приводит множество примеров неблагоприятного техногенного воздействия на природную обстановку, наблюдаемого во всем мире. Это переработка берегов крупных водохранилищ в равнинных и предгорных районах и вызванные ею оползни, разбуривание песков в пустынях при их освоении и вызванные им песчаные бури и движение песков, опускание земной поверхности при добыче нефти, газа и подземных вод и вызванные им заболоченность и заозеренность и т. д. Нельзя думать, что эти отрицательные воздействия на природу были предусмотрены заранее—они выявились постфактум, а в ряде случаев вызвали необходимость осуществления дополнительных защитных мероприятий и, следовательно, повлекли за собой затраты материальных средств, труда и времени.

При решении многих крупных народно-хозяйственных задач в области строительства большое значение и технико-экономический эффект имеет правильный выбор генеральной схемы. Между тем выбор схемы в ряде случаев производится без участия квалифицированных инженер-геологов, а принципиальные решения принимаются без достаточного знания и учета закономерностей инженерно-геологических условий территории и без прогноза изменений природной обстановки в отдаленном будущем.

Инженер-геологи часто привлекаются лишь на второстепенные роли—после того как все основные вопросы решены и схема принята, им даются отдельные поручения, как например, установить потери на фильтрацию из водохранилищ или каналов, горное давление на туннельную обделку, несущую способность оснований плотин, выявить инженерно-геологические условия строительной площадки моста на лесовозной дороге и тому подобные нужные, но не очень принципиальные вопросы. Представителей дисциплин, решающих основные задачи по выбору генеральной схемы, следует обвинять не только в том, что они их неправильно решили, но и в том, что они не подозревали о своей беспомощности.

Из сказанного следует, что во всех случаях, когда ожидается изменение природной обстановки или геологической среды, инженер-геолог должен быть одним из ведущих специалистов, призванным делать долговременные прогнозы техногенного воздействия на природу. Естественно, он для этого должен уметь делать такие прогнозы. Результатом вмешательства инженер-геологов на самых ранних стадиях создания проектов явится в ряде случаев переоценка казалось бы вполне привлекательных схем, которые были бы адекватными, если бы природная обстановка изменилась в желательном направлении. Так как желаемое может отличаться от действительного, инженер-геолог должен уметь предвидеть результаты техногенного воздействия, т. е. составлять долговременные прогнозы и обосновывать их.

Несомненно, что, выступая в этой роли, инженер-геолог в ряде случаев будет затруднять решение таких технических вопросов, которые сулят большую немедленную выгоду, хотя они и чреватые неизмеримо более крупными потерями в будущем. Поэтому инженер-геолог должен быть достаточно компетентным специалистом и мужественным человеком.

В конце двадцатого века, когда во всем мире происходит необратимое и неконтролируемое изменение природных условий, когда ничем не ограниченный демографический взрыв, ускоряющаяся урбанизация, загрязнение окружающей среды промышленными и бытовыми отходами, ускоренная разработка естественных ресурсов, уничтожение лесов и нарушение экологического равновесия, угроза всеобщей термоядерной войны создают реальную опасность для сохранения природы и процветания человечества, особое значение приобретает важнейший раздел геологической науки—инженерная геология. Наша наука, стоящая на стыке геологии с инженерными областями знаний, призвана изучать, регулировать и контролировать различные стороны использования поверхностных пластов земной коры в целях строительной, транспортной, индустриальной, горно-промышленной, агрономической, градостроительной и других видов деятельности человека. Ввиду колоссальных технических возможностей и размаха строительства и индустриализации во многих странах мира является несомненным, что те из них, которые смогут наилучшим образом использовать инженерно-геологическую науку для увеличения

эффективности материальных затрат и уменьшения ущерба от неразумного строительства, будут развиваться и процветать в будущем веке, а те, в которых инженерная геология будет в загоне и не сможет служить успешному осуществлению государственных планов развития, будут деградировать и превратятся в отравленную пустыню. Поэтому внимание к инженерной геологии, к использованию всего накопленного ею опыта имеет в настоящее время огромное значение.

Сказанное выше об исключительно важном значении инженерной геологии не является оговоркой, продиктованной гипертрофированным представлением о роли своей профессии. Действительно, инженерная геология и гидрогеология являются в наши дни важнейшими областями геологических знаний, и ошибки здесь несравнимы по своим последствиям с ошибками в любой другой области геологии. Если геолог-стратиграф ошибается и вместо миоценового возраста приписывает данным отложениям олигоценный, то это досадное обстоятельство будет рано или поздно выяснено и большой беды не произойдет. Если геолог-тектонист продолжает придерживаться фиксистой точки зрения и отрицает мобилизм, то он лишает себя возможности понимать глобальные вопросы эволюции земной коры; это также особого вреда никому, кроме него самого, не принесет. Если геолог-поисковик неправильно понимает тектонические условия месторождения полезных ископаемых и не может обнаружить богатое слепое рудное тело, содержащее медь или цинк, то можно не сомневаться, что рано или поздно, через десять или пятьдесят лет, это месторождение будет открыто другими геологами и ничего трагического не произойдет. Но если инженер-геолог своими неправильными исследованиями и оценками спровоцирует оползневые процессы в спокойных до того условиях или вызовет обрушение плотины и катастрофическое наводнение в долине, сопровождаемое материальными убытками и человеческими жертвами, то эти ошибки будут иметь трагические и непоправимые последствия. Если гидрогеолог неправильными рекомендациями вызовет радиоактивное или химическое загрязнение артезианского бассейна или бактериальное заражение бассейна минеральных вод, то такая ошибка будет роковой и непоправимой.

Понимание ответственной роли инженер-геологов в нашем быстро изменяющемся мире накладывает на них особые обязательства. Инженер-геолог должен быть не только патологоанатомом, устанавливающим причины природных или искусственно вызванных бедствий, или терапевтом, пытающимся устранить аварийное состояние, но прежде всего санитарным врачом, который предусматривает события и предупреждает возникновение нежелательных изменений в природной обстановке. Он должен уметь не только ставить правильный диагноз, но и делать верные прогнозы событий.

Долговременные прогнозы техногенных воздействий производятся в общем по тем же принципам, что и прогнозы аналогичных естественно протекающих экзогенных процессов, т. е., в сущности говоря, применяется тот же актуалистический метод, но не для объяснения прошлого, а для предвидения будущего. Однако имеется одно существенное различие, на котором необходимо остановиться.

Для решения одной и той же конечной задачи, например, сооружения плотины или устройства выемки, могут быть осуществлены техногенные воздействия по различным программам, и результаты будут различными в зависимости от степени разумности программ. Так, например, насыпь из тонкозернистого материала можно возводить медленно, наблюдая за поровым давлением в глине и учиты-

бая его рассевание; в результате получится вполне устойчивое земляное сооружение. Из того же материала можно быстро отсыпать насыпь, не дав возможности рассеяться поровому давлению, и в результате произойдет ее обрушение.

Проанализируем приведенный пример с позиции темы настоящей статьи, иначе говоря, зададимся вопросом, какой долговременный прогноз следовало сделать в этом случае. Ответ ясный—оползни являются результатом неразумной человеческой деятельности, они могли быть, а могли и не быть, в зависимости от того, по какой программе осуществляется техногенное воздействие. Не вытекает ли отсюда, что мы должны анализировать не только природные условия и запроектированное сооружение, но также и выяснять, насколько разумна программа техногенного воздействия, как она учитывает геолого-гидрогеологические особенности участка и технические характеристики сооружения?

Роль субъективного фактора при техногенных воздействиях на природу велика, и это отрицать невозможно. Анализ имеющихся данных показывает, что в развитых индустриальных странах практически все оползни происходят вследствие неразумной человеческой деятельности. Отсюда вытекает, что основной путь оптимизации техногенного воздействия на природу заключается в повышении теоретических знаний инженер-геологов, овладении ими мирового опыта, развитии в них чувства ответственности и понимания того, что почти каждый оползень имеет имя, отчество и фамилию. Техногенный оползень не является ни «божьим деянием», как думали некогда, ни «непредвиденной случайностью», как теперь представляют его заинтересованные в этом лица, а это вполне закономерный процесс, предсказуемый при современном уровне знаний о механизме оползания, если, конечно, делом занимаются специалисты, а не случайные люди. Поэтому выражения «божье деяние» и «непредвиденные события» в применении к техногенным оползням практически имеют один и тот же смысл и могут быть переданы более понятно и точно словами: «результат неразумной человеческой деятельности».

ԱՆՁԵՐԻ ՓՈՒԶՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ՌԻՍՈՒՄԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

ԳԵՈՐԳ ՏԵՐ-ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, ՀՍՍՀ ԳԱ րգր.-անդ., պրոֆ., տեխ. գիտ. դոկտոր

ՌԵՖԷՐԱՏ: Լանջերի ղեկորմացված միճակի ուսումնասիրությունն անհրաժեշտ է սողանքների մեխանիզմը պարզելու, սողանք առաջացնող գործոնների զերբ որոշելու, հակասողանքային միջոցառումների արդյունավետությունը գնահատելու և սողանքների զեմ պայթարի դիտական մեթոդի իրականացման ժամանակ: Առողանքային պրոցեսի վերլուծության համար լանջորեն կիրառվում են Բինգեմի ուսուղիական մոդելն ու հավասարումը, սակայն գրունտի դինամիկ մածուցիկության փոփոխականության պատճառով նպատակահարմար է կիրառել առաջարկվող հավասարությունը, որը պարունակում է գրունտների առատիկական մածուցիկությունը: Նկարագրվում է սահրի զեպրում գրունտի սողրի մի նոր կոնցեպցիա, որը զերմ է գրունտի մածուցիկության դորմակցի հաստատունության ենթադրությունից և, հետևարար, կիրառելի է սողրի բոլոր փուլերի համար: Առաջարկվում է սողրի հողորաֆների և հողորամների կառուցվածք՝ լանջերի վրա զանգվածրների շարժման մոնիտորինգի ժամանակ:

¹ ՀՍՍՀ ԳԱ ԳԻՍԻ գեոմեխանիկայի լաբորատորիայի վարիչ:

INVESTIGATIONS ON SLOPE FAILURE MECHANISM

GEORGE TER-STEPANIAN, Prof., Dr. Sc. (Eng.), Corr. Mem. Arm. Ac. Sc.

Synopsis. Investigation of the deformed state of slopes is necessary when defining the landslide mechanism, determining the role of landslide-producing factors, estimating the efficiency of corrective measures and performing the observational method of landslide control. Bingham's rheological model and equation are widely used in the analysis of landslide processes but due to the changeability of dynamic viscosity of soils it is advantageous to use the proposed equation containing the static viscosity of soils. A new concept of soil creep during shear is described: it is free of the assumption of constancy of the dynamic viscosity coefficient and is, therefore, applicable to all phases of creep. The plotting of creep hodographs and hodograms at monitoring of mass motions on slopes is advised.

ԳՐԱԳՆԻՔՅՈՒՆ—ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

- Бьеррум Л. 1976. Прогрессирующее разрушение склонов в переконсолидированных пластичных глинах и глинистых сланцах. — Проблемы геомеханики, Ереван, № 7, с. 50—98.
- Вялов С. С., Зарецкий Ю. К., Максимьяк Р. В. и др. 1972. Проблемы структурной реологии грунтов. — В кн.: Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них. Труды Междунар. симпозиума в Москве. М., Изд. МГУ, вып. 2, с. 16—25.
- Маслов Н. И. 1955. Условия устойчивости склонов и откосов в гидротехническом строительстве. М., Госэнергоиздат.
- Сергеев Е. М. 1982. Воздействие человека на литосферу, понятие «геологическая среда». — В кн.: Инженерно-геологические аспекты рационального использования и охраны геологической среды. М., Наука, с. 11—36.
- Скемптон А. У. 1967. Длительная устойчивость глинистых склонов (пер. Г. И. Тер-Степаняна). — Проблемы геомеханики, Ереван, № 1, с. 91—146; (пер. Р. С. Зянгирова). — В кн.: Проблемы инженерной геологии. М., Мир, вып. 4, с. 146—172.
- Тер-Степанов Г. И. 1941. О роли второстепенных деталей в геотехнике. — Труды НИС Ленингр. отд. Треста глубинных работ, вып. II, Л., с. 43—48.
- Тер-Степанян Г. И. 1955. Глубинная ползучесть склонов и методы ее изучения. Автореф. докт. дис., Ленинградский инж.-строит. ин-т, Ереван; см. также: М. Н. Гольдштейн, Г. И. Тер-Степанян, Длительная прочность глин и глубинная ползучесть склонов. — Матер. к IV Междунар. конгр. по механике грунтов и фундаментостроению. Изд. АН СССР, М., с. 43—51.
- Тер-Степанян Г. И. 1973. Принципы observationalного метода борьбы с оползнями. — Проблемы геомеханики, Ереван, № 6, с. 29—48.
- Тер-Степанян Г. И. 1976. Исследование ползучести глины при сдвиге. — Проблемы геомеханики, Ереван, № 7, с. 18—49; см. также: он же, Теория ползучести глины при сдвиге и ее экспериментальное подтверждение. — Труды Второго всесоюзного симпозиума по реологии грунтов, Цахкадзор, 1976, Изд. Ереванского гос. ун-та, Ереван, с. 74—97.
- Тер-Степанян Г. И. 1979. Геодезические методы изучения динамики склонов. 2-е изд. М., Недра.
- Тер-Степанян Г. И. 1978. Новые методы изучения оползней. Изд. АН АрмССР, Ереван.
- Тер-Степанян Г. И., Симонян С. С. 1982. Применение результатов обратных реологических расчетов к определению устойчивости и деформируемости склонов. — Проблемы геомеханики, Ереван, № 8, с. 75—89.
- Тер-Степанян Г. И. 1982. Реологическое поведение глины при уровне касательных напряжений, близком к разрушающему. — Проблемы геомеханики, Ереван, № 8, с. 144—152.
- Терцаги К. 1958. Механизм оползней. — Проблемы инженерной геологии. М., ИЛ, вып. I, с. 174—219.
- Шахуняц Г. М. 1944. О методике проектирования мероприятий по стабилизации земляного полотна. — Техника железных дорог, № 12, с. 3—7; см. также: он же. О некоторых сторонах оценки устойчивости оползневых склонов. — Проблемы геомеханики, Ереван, № 6, с. 128—139.

¹ Head, Laboratory of Geomechanics, IGES, Arm. Ac. Sc.

- Bishop A. W. 1966. The strength of soils as engineering material. — Sixth Rankine Lecture. *Geotechnique*, vol. 16, N. 2, p. 91—128.
- Bishop A. W., Lovenbury H. T. 1969. Creep characteristics of two undisturbed clays. — *Proc. Seventh Intern. Conf. Soil Mech.*, Mexico, vol. 1, p. 29—37.
- Griggs D. T. 1936. Deformation of rocks under high confining pressure. — *Journ. Geol.*, vol. 44, p. 541—547.
- Haefeli R. 1954. Kriechprobleme im Boden, Schnee und Eis. *Wasser- und Energiewirtschaft*, No. 3; see also: Creep and progressive failure in snow, soil, rock and ice, by R. Haefeli. — *Proc. Sixth Intern. Conf. Soil Mech.*, Montreal, vol. 8, p. 134—147.
- Heim A. 1982. Ueber Bergstürze. *Naturforsch. Gesellsch. Zürich, Neujahrsblatt* 84.
- Heim A. 1932. Bergsturz und Menschenleben. — *Beibl. z. Vierteljahrsschr. d. Naturforsch. Gesellsch. in Zürich*, Jg. 77, H. 3/4, N. 20, *Geolog. Nachlese*, N. 30.
- Kavazanjian E., Jr., Mitchell J. K. 1977. A general stress-strain-time formulation for soils. Preprint, Spec. Sess. 9 «Constitutive Equations of Soils», Ninth Intern. Conf. Soil Mech., Tokyo, p. 113—120.
- Mitchell J. K. 1964. Shearing resistance of soils as a rate process. — *Journ. Soil Mech. Found. Div., Proc. ASCE*, vol. 90, N. SMI, p. 29—61.
- Mitchell J. K. 1969. Discussion on Stress, deformation and strength characteristics, including time effects. — *Proc. Seventh Intern. Conf. Soil Mech.*, Mexico, vol. 3, p. 159—169.
- Mitchell J. K., Campanella R. G., Singh A. 1968. Soil creep as a rate process. — *Journ. Soil Mech. Found. Div., Proc. ASCE*, vol. 94, SMI, p. 231—253.
- Murayama S., Shibata T. 1958. On the rheological characters of clays, pt. 1. — *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Bull.* N. 26.
- Murayama S., Shibata T. 1961. Rheological properties of clays. — *Proc. Fifth Intern. Conf. Soil Mech.*, Paris, vol. 1, p. 269—273.
- Persoz B. 1953. Contribution à l'étude du fluage des résines organiques; le fluage du polyisobutylène. — *La Recherche Aeronautique*, N. 34.
- Schmid E. 1962. New concepts on shearing strength for saturated clay soils, pt. 2. *Sols-Soils*, t. 1, No. 2, p. 19—28.
- Stiny J. 1952. Neuere Ansichten über «Bodenbewegungen» und ihre Beherrschung durch den Ingenieur. — *Geologie u. Bauwesen*, Bd. 19, H. 1, S. 31—54.
- Šuklje L., Vidmar S. 1961. A landslide due to long term creep. — *Proc. Fifth Intern. Conf. Soil Mech.*, Paris, vol. II, p. 727—735.
- Ter-Stepanian G. 1977. Behaviour of clays close to failure. — *Proc. Ninth Intern. Conf. Soil Mech.*, Tokyo, vol. 1, p. 327—328.
- Terzaghi Ch. 1929. Effect of minor geological details on the safety of dams. — *Amer. Inst. Mining and Metallurg. Engrs, Technical Publ.* No. 215, p. 31—44; see also: In «From Theory to Practice in Soil Mechanics» by L. Bjerrum, A. Casagrande, R. B. Peck and A. W. Skempton, Wiley, New York 1960, p. 202—245.