

ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ РАЗРУШЕНИЕ СКЛОНОВ В ПЕРЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПЛАСТИЧНЫХ ГЛИНАХ И ГЛИНИСТЫХ СЛАНЦАХ¹

Д-р Лоритс Бьеррум

От редактора

Третья Терцагнанская лекция безвременно скончавшегося крупнейшего норвежского ученого д-ра Лоритса Бьеррума (1918—1973) представляет исключительный интерес для понимания механизма оползней в переконсолидированных глинах. Выдвигаемая им концепция высвобождения накопленной в процессе консолидации восстановимой энергии деформации и роли диагенетических связей в этом процессе открывает большие перспективы при изучении механизма оползней в областях со сложной геологической историей.

Научный потенциал и творческая активность д-ра Лоритса Бьеррума были поистине необычайны. Достаточно сказать, что только в 1966—1967 годах он прочел три выдающиеся лекции на наиболее важных форумах механики грунтов: Седьмую Ренкиновскую лекцию «Инженерно-геологические свойства норвежских нормально-консолидированных морских глин» в Британском геотехническом обществе в Лондоне; Специальную лекцию «Влияние структуры на поведение при сдвиге нормально-консолидированных плавунных глин»² на Геотехнической конференции по сопротивлению сдвигу природных грунтов и скальных пород в Осло и настоящую Третью Терцагнанскую лекцию. Его лебединой песней был замечательный генеральный доклад «Проблемы механики грунтов и строительства на мягких глинах», представленный Восьмому международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению в Москве в 1973 г., который он уже, к сожалению, не успел прочесть.

Большую научную работу д-р Бьеррум сочетал с руководством крупнейшим Норвежским геотехническим институтом, директором которого он был с момента организации института в 1951 году до своей смерти, с созданием Терцагнанской библиотеки и с руководством Международным обществом по механике грунтов и фундаментостроению

¹ Третья Терцагнанская лекция, прочитанная 1 февраля 1966 г. на конференции по строительной технике Американского общества гражданских инженеров, состоявшейся в Майами, шт. Флорида, США (Bjerrum L., Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clays and clay shales. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 93, No. SM5, 1967, p. 1—49; Norwegian Geotechnical Institute, Publication Nr. 77, Oslo 1968. p. 1—29); сокращенный перевод с английского проф. Г. И. Тер-Степаняна.

² Перевод этой лекции на русский и армянский языки был опубликован в Сборнике «Проблемы геомеханики», № 4, 1970.

(вице-президент для Европы в 1961—1965 годах и президент в 1965—1969 годах).

В настоящем сокращенном переводе Третьей Терцагианской лекции выпущены примеры оползней, приводимые автором по литературным источникам, и обширный список литературы. За эти купюры, вызванные условиями места, редакция приносит свои извинения.

Г. И. Тер-Степанян

Резюме. Имеются многочисленные подтверждения того, что оползанию склонов в переконсолидированных глинах и глинистых сланцах предшествует развитие непрерывной поверхности скольжения при прогрессирующем разрушении и высказывается предположение, что оно является следствием большой восстановимой энергии деформации глины, накопленной в течение геологической истории. В глинах со слабыми диагенетическими связями энергия деформации высвобождается немедленно после устранения нагрузки. В глинистых сланцах диагенетические связи образуются в то время, когда глина подвергается наибольшему консолидационному давлению, вследствие чего восстановимая энергия деформации замыкается и высвобождается только после постепенного разрушения связей при выветривании в приповерхностной зоне.

ВВЕДЕНИЕ

В лекции излагается концепция инженерно-геологических условий образования переконсолидированных глин и глинистых сланцев, которая может дать последовательный анализ свойств различных типов глин и глинистых сланцев, встречающихся в различных частях мира. Эта концепция служит для попытки объяснения механизма прогрессирующего разрушения склонов.

Опыт извлеченный из анализа разрушения склонов в пластических глинах и глинистых сланцах

Мировой опыт изучения оползней в переконсолидированных пластичных глинах и глинистых сланцах показывает, что средние касательные напряжения, действующие по поверхности скольжения, значительно меньше, чем сопротивление сдвигу, определенное в лабораторных испытаниях. Этот вывод относится как к оползням в свежих выемках, так и к оползням на естественных склонах. На это противоречие впервые указал Терцаги в 1936 г.; в дальнейшем были опубликованы многочисленные данные, подтверждающие эти наблюдения. Некоторые из этих данных приведены в табл. 1, в последних графах которой параметры c' и φ' сопротивления сдвигу, выраженные через эффективные напряжения по результатам лабораторных исследований, сопоставлены с полевыми значениями сопротивления сдвигу, мобилизованного вдоль поверхности скольжения в момент разрушения, вычисленными как сопротивление трения при допущении, что $c' = 0$. Это сравнение ясно показывает различие между сопротивлением сдвигу, определенным в лабораторных испытаниях и в поле; оно также показывает, что это различие тем больше, чем прочнее глина. Разумеется, фактор времени в лабораторных испытаниях отличается от порядка величины фактора времени полевых наблюдений, однако имеющиеся результаты изучения влияния скорости нагружения ясно показывают, что невозможно объяснить различие между лабораторными и полевыми испытаниями на сдвиг одним только влиянием времени. Из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать важный вывод о том, что параметр φ' сопротивления сдвигу, вычисленный по измерению оползней, не зависит от сопротивления сдвигу глины, определенного в лаборатории на ненарушенных образцах; он также не зависит от влажности и показателя текучести глины, значение которых в сопротивлении глины известно.

Таблица Աղյուսակ 1
Данные об оползнях — Տվյալներ սղանքների մասին

Оползень	Սղանք	S, C*	Лабораторные данные Հարդարար տվյալներ							φ'
			σ_p	σ_L	σ	кПа	ՀԳա	σ'_p	σ'_L	σ'_σ
Кулебра, Панама	Կուլերրա, Պանամա	C	12	80	35	—	—	10	—	—
Калифорнийск. побер.	Կալիֆորնյան ծովափ	S	19	68	28	—	—	25	—	12
Плотина Вако	Վակո ամրաբարակ	—	17	80	22	40	17	6	7—8	7—8
Саскачеван	Սասկաչևան	C	32	115	23	40	20	6	7—9	7—9
Данвеган Хилл	Դանվեգան Հիլ	S	22	50	24	38	20	—	9	9
Литл Смоки	Լիթլ Սմոկի	S	24	42	18	20	22	—	12	12
Систл (автодорога)	Սիսլ (ավտոճանապարհ)	C	30	55	23	—	30	—	13	13
Балгхайм	Բալդհայմ	C	27	61	25	15	18	17	14—17	14—17
Санднес	Սանդնես	C	36	60	30	13	22	12—18	15—17	15—17
Джекфильд	Ջեկֆիլդ	S	21	44	22	11	25	19	17	17
Уолтонс Вуд	Ուոլտոնս Վուդ	S	—	53	28	16	21	13	13	13
Слоны в Лондонской глине	Հանգստի լոնդոնյան կավերում	S	33	80	29	16	20	16	16	16
Садбери Хилл	Սադբերի Հիլ	S	31	82	28	3	17	16	15	15

* S—природный склон. C—откос выемки, S—բնական լանջ, C—հանվածքի շեղք.

** Определено путем обратного расчета оползня, принимая $c'=0$. Ստացված է սղանքի հակադարձ հաշվարկից, ընդունելով $c'=0$.

Остаточное сопротивление сдвигу

Приведенные в табл. 1 результаты лабораторного определения сопротивления сдвигу относятся к наибольшему (пиковому) сопротивлению, которое проявилось при опыте на сдвиг. Хорошо известно, что если в дренированных испытаниях на сдвиг после разрушения продолжать деформировать образец, то сопротивление сдвигу уменьшается и в пределе достигает некоторого значения, которое остается постоянным при дальнейшем деформировании (рис. 1). Для переконсолидированных пластичных глин падение сопротивления сдвигу после разрушения весьма значительно, и остаточное сопротивление сдвигу составляет только часть пикового сопротивления. Остаточная прочность при сдвиге³ имеет природу трения, хотя и не обязательно, чтобы величина φ_r была независимой от нормального давления. В хрупких глинах (а переконсолидированные пластичные глины вообще бывают хрупкими) остаточное сопротивление сдвигу представляет собой прочность при сдвиге вдоль вполне развитой поверхности скольжения.

В Четвертой Ренкиновской лекции Скемpton (1967) обобщил наши сведения об остаточном сопротивлении сдвигу и сравнил его значения с сопротивлением сдвигу, полученных из обратных расчетов оползней в переконсолидированных глинах⁴. В этой статье Скемpton делает три важных вывода.

1. Параметр остаточного сопротивления сдвигу φ_r не зависит от первоначального сопротивления сдвигу глины и таких факторов, как ее влажность и показатель текучести. Представляется, что значение φ_r

³ Здесь проведено различие между сопротивлением сдвигу (shear strength), выраженным в единицах напряжения, и прочностью при сдвиге (shear resistance), являющейся отношением сопротивления сдвигу к эффективному нормальному напряжению.

⁴ В своей статье Скемpton применяет термин «жесткие трещиноватые глины». По причинам, излагаемым ниже, трещины не являются существенными для его выводов. Поэтому в настоящей статье предпочтительнее применение термина переконсолидированные пластичные глины.

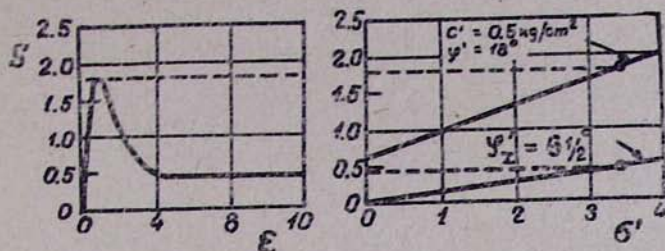


Рис. 1. Характеристика сдвига типичной пластичной глины (глина Литл-Белт). Ординаты—сопротивление сдвигу в kg/cm^2 ; абсциссы: а) перемещение в мм; б) эффективное нормальное напряжение в kg/cm^2 .

Նկ. 1. Տիպիկ պլաստիկ կավի սահմի բնութագրումը (Լիթլ-Բելտի կավ): Օրդինատներով՝ սահմի դիմադրությունը—կգ/սմ², աբսցիսսներով. ա) տեղափոխությունները մմ-ով. б) էֆֆեկտիվ նորմալ լարումը—կգ/սմ².

глины зависит только от размера, формы и минералогического состава составляющих частиц.

2. Среднее касательное напряжение вдоль поверхности обрушения, полученное из обратных расчетов ряда оползней в переконсолидированных пластичных глинах, более близко к остаточному сопротивлению сдвигу, чем к пиковому сопротивлению; анализ некоторых оползней природных склонов показал, что касательные напряжения почти равны остаточному сопротивлению сдвигу.

3. Оползням в переконсолидированных глинах предшествует прогрессирующее развитие поверхности обрушения; в природных склонах, в которых имеется достаточно времени для развития поверхности скольжения при прогрессирующем разрушении, предельная устойчивость зависит только от остаточного сопротивления сдвигу.

Опыт, полученный из анализа устойчивых склонов

В табл. 1 приведена только часть имеющихся данных, полученных при изучении опыта полевых наблюдений; аналогичная таблица могла быть составлена по результатам анализа устойчивости ряда устойчивых склонов. Такая таблица показала бы, что в районах, где происходили оползни, могут существовать склоны, устойчивость которых в течение сотен лет не вызывала никаких сомнений, несмотря на то, что наклон их несовместим с теми низкими углами, которые получают при обратном расчете склонов по имевшим место оползням. Похоже, что чем жестче глины, тем больше различие между результатами анализа устойчивых и неустойчивых склонов.

Объяснение этой кажущейся несостоятельности результатов изучения обрушившихся и устойчивых склонов может, несомненно, заключаться в том, что устойчивость склонов в рассматриваемых типах глин является функцией времени. Прежде предполагали, что замедление обрушения вызывается медленностью уменьшения сопротивления сдвигу со временем, но открытие Скемптона о том, что обрушению склонов предшествует развитие непрерывной поверхности скольжения при прогрессирующем разрушении, ведет к пересмотру этой концепции. В настоящее время является более вероятным, что скорость, с которой развивается поверхность скольжения, может изменяться от одной глины к другой и что в жестких глинах эта скорость может быть настолько мала, что замедление оползня может измеряться столетиями.

Техническая проблема

Несомненно, что работа Скемптона представляет собой большой прогресс в изучении вопроса. Непосредственное приложение ее результатов заключается в том, что имеется возможность предсказать абсолютное наименьшее сопротивление сдвигу глины и принять, что для склонов, для которых имеется достаточно времени для прогрессирующего развития поверхности скольжения, предельное значение устойчивости управляется величиной этого сопротивления. Однако основывать все расчеты устойчивости на остаточном сопротивлении сдвигу было бы ненужно консервативным и чрезвычайно дорогим решением. Это в особенности относится к временным склонам в жестких глинах и глинистых сланцах.

Поэтому необходимо ответить на вопрос, при каких условиях мы вынуждены применять в расчетах склонов остаточное сопротивление сдвигу и когда мы можем полагаться на какую-то долю пикового сопротивления.

Если исключить те случаи, когда имеется ранее возникшая поверхность, вдоль которой сопротивление сдвигу уже снизилось до остаточного значения, то ответ на этот вопрос потребует, чтобы мы могли уточнить условия, при которых можно ожидать развитие прогрессирующего разрушения и определить время, необходимое для образования непрерывной поверхности разрушения. Надо еще много продумать, чтобы можно было дать на эти вопросы количественный ответ. Дальнейший прогресс потребует, во-первых, основательного понимания механизма прогрессирующего разрушения и связанных с ним факторов и, во-вторых, основательного знания свойств различных типов материала, с которым мы имеем дело.

МЕХАНИЗМ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ СКЛОНОВ

Как указывалось, можно считать доказанным, что в некоторых условиях оползням в переконсолидированных пластичных глинах и глинистых сланцах предшествует развитие непрерывной поверхности обрушения при участии механизма прогрессирующего разрушения. Поэтому дальнейший прогресс в изучении устойчивости склонов в этих грунтах полностью зависит от знаний механизма прогрессирующего разрушения и факторов, управляющих его развитием.

Для приближенного решения задачи постулируется возможный механизм образования прогрессирующего разрушения и развития непрерывной поверхности скольжения. Этот подход общий, без рассмотрения определенных типов грунтов и без точного описания напряжений и деформаций. Его задача—составление приближенной, но последовательной картины возможного проявления прогрессирующего разрушения, достаточной для понимания проблемы и для оценки управляющих факторов, как например, свойств грунта.

Принцип прогрессирующего разрушения

На рис. 2 показан небольшой участок устойчивого склона, образующего угол α с горизонтом. Определим напряжения, действующие на площадке, параллельной поверхности грунта и расположенной на глубине z ; с этой целью рассмотрим условия равновесия блока $OAA'O'$. Вначале по площадке OA действуют только те касательные напряжения, которые вызываются весом блока, поскольку боковые силы E , действующие на торцы блока, равны по величине и взаимно противоположны. Вызванное весом блока касательное напряжение равно

$$\tau = \gamma z \sin \alpha \cos \alpha, \quad (1)$$

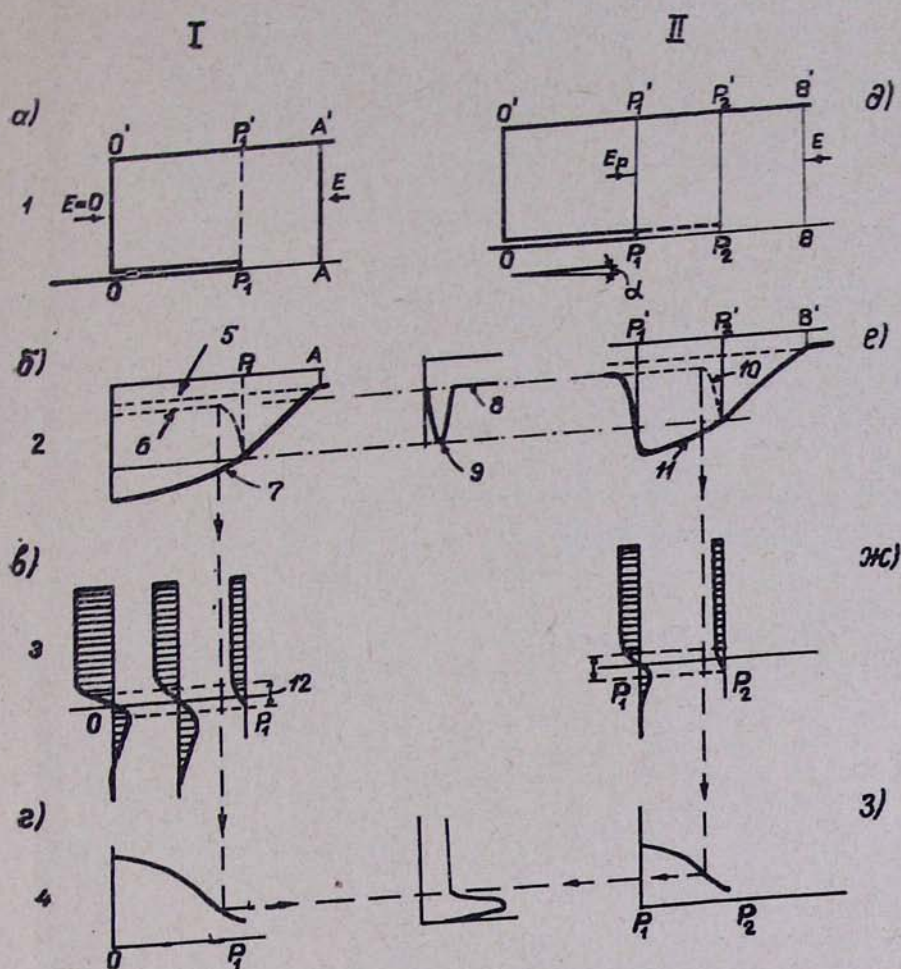


Рис. 2. Принцип развития непрерывной поверхности скольжения при прогрессирующем разрушении. Левый ряд рисунков—начальное разрушение, правый—прогрессирующее. 1—склон; 2—напряжения; 3—деформации; 4—дифференциальные деформации поперек зоны разрушения; 5—гравитационные напряжения; 6—касательные напряжения после местного разрушения; 7—то же до; 8—остаточное сопротивление сдвигу; 9—то же пиковое; 10—касательные напряжения после прогрессирующего разрушения; 11—то же после местного разрушения; 12—зона разрушения.

Նկ. 2. Սահեցման անընդհատ մակերևույթի զարգացման սկզբունքը առաջընթաց քայլաձևով դեպքում: Նկարների ձևի շարքը—սկզբնական բալթայումը, աչը՝ առաջընթաց. 1—լանջ, 2—լարումներ. 3—դեֆորմացիաներ. 4—դիֆերենցիալ դեֆորմացիաները բալթայուման գոտու լայնքով. 5—գրավիտացիոն լարումները. 6—շոշափող լարումները տեղական բալթայումից հետո. 7—նույնը մինչև. 8—սահին մնացորդային դիմադրությունը. 9—նույնը պիկայինը. 10—շոշափող լարումները առաջընթաց բալթայումից հետո. 11—նույնը տեղական բալթայումից հետո. 12—քայլաձևով շրջանը:

и поскольку склон устойчив, эта величина меньше пикового сопротивления сдвигу.

Для того, чтобы началось прогрессирующее разрушение, где-то на склоне непрерывность должна быть каким-либо способом нарушена. На рис. 2,а принято, что рядом с рассматриваемым блоком сделана

выемка с вертикальными стенками до глубины z . Устранение бокового опирания по OO' вследствие отрывки вызывает перераспределение внутренних напряжений в блоке $OAA'O'$. Если только AA' расположено настолько далеко от OO' , что боковое напряжение на AA' остается неизменным, равновесие блока $OAA'O'$ может быть сохранено только при условии, что касательная сила вдоль OA увеличивается на величину E , равную полному внутреннему боковому давлению земли по AA' :

$$E = \int_0^A \tau_E dl. \quad (2)$$

Дополнительные касательные напряжения будут распределяться неравномерно. Наибольшее дополнительное касательное напряжение будет в O ; приблизительное распределение касательных напряжений показано на рис. 2,б. Если k —фактор концентрации, показывающий отношение между наибольшим и средним напряжениями по плоскости OA , то наибольшее касательное напряжение, вызванное боковой силой E , будет

$$(\tau_E)_{\max} = k \cdot E/OA \quad (3)$$

и полное касательное напряжение в точке O будет

$$\tau_0 = \gamma z \sin z \cos z + k \cdot E/OA. \quad (4)$$

Это уравнение выведено только на основе условий равновесия, принимая, что касательные напряжения не превосходят сопротивления сдвигу.

Вопрос о том, вызовет ли отрывка прогрессирующее разрушение, зависит от превышения наибольшего касательного напряжения, выраженного вышеприведенным уравнением по отношению к пиковому сопротивлению глины; это прежде всего зависит от величины внутреннего бокового давления E . При условии, что величина E достаточно велика для того, чтобы теоретическое значение касательного напряжения превысило пиковое сопротивление сдвигу, происходит местное обрушение. Оно начинается в точке O и распространяется на область, в которой касательное напряжение превышает сопротивление сдвигу. К примеру, на рис. 2,б местное разрушение будет происходить до P_1 .

Явление обрушения при сдвиге в основании блока $OO'P_1P_1$ будет прежде всего означать уменьшение касательных напряжений по OP_1 от теоретического значения, выраженного указанной величиной, до пикового сопротивления сдвигу. Соответственно уменьшатся внутренние боковые напряжения блока глины $OO'P_1P_1$. Вследствие упругого поведения глины эта боковая разгрузка вызовет расширение глины по направлению к отрывке со скольжением по вновь образовавшейся плоскости разрушения OP_1 (рис. 2,в). В результате дифференциальная деформация (рис. 2,г) поперек зоны разрушения будет определяться восстановимой энергией деформации глины, и если она достаточно велика, то деформация сможет уменьшить сопротивление сдвигу от пикового значения до остаточного. При условии, что остаточное сопротивление сдвигу низко по сравнению с пиковым, разрушение и, следовательно, деформация вызовут большое уменьшение касательных напряжений по OP_1 и соответственно—увеличение касательных напряжений по поверхности, находящейся вправо от P_1 .

Вследствие этого начинается прогрессирующее разрушение, и плоскость скольжения распространяется до точки P_1 . Следующий шаг—изучение тем же путем условий дальнейшего распространения процесса за точкой P_1 . Рассмотрим равновесие следующего блока—

$P_1BB'P'_1$, ограниченного сечением BB' , расположенным на таком расстоянии от PP' , чтобы на боковые напряжения по BB' не влияло происходящее влево от точки P_1 (рис. 2, д). По-прежнему рассматриваются напряжения, действующие вдоль основания P_1B блока, но в данном случае дополнительные касательные напряжения, вызванные внутренними боковыми напряжениями в глине, зависят от разности между боковыми силами E и E_p , действующими на верховое и низовое сечения блока соответственно. Наибольшее касательное напряжение будет в P_1 и составит

$$\tau_{\max} = \gamma z \cos \alpha \sin \alpha + k \frac{E - E_p}{P_1 B}. \quad (5)$$

Если эта величина больше пикового сопротивления сдвигу глины, то местное разрушение делается прогрессирующим. Следовательно, чем меньше величина E_p , тем больше вероятность прогрессирующего разрушения.

До начала отрывки E_p равнялось E . Местная разгрузка, вызванная отрывкой и уменьшением сопротивления сдвигу вдоль OP_1 после того, как произошло местное разрушение, привело к уменьшению E_p . Мы не можем точно вычислить значение E_p , но исходя из равновесия блока $OP_1P'_1O'$, можно оценить то максимальное значение, которое могло бы иметь E_p . Если E_p превышает это значение, то касательные напряжения вдоль основания блока будут превышать сопротивление сдвигу и блок будет сползать, вызывая уменьшение E_p . Это максимальное значение равно

$$(E_p)_{\max} = \int_0^{P_1} s \, dl - OP_1 \gamma z \cos \alpha \sin \alpha, \quad (6)$$

Так как касательные напряжения вдоль OP_1 после разрушения приблизительно равны остаточному сопротивлению сдвига, то

$$(E_p)_{\max} = OP_1 (s_r - \gamma z \cos \alpha \sin \alpha). \quad (7)$$

Это уравнение ведет к простому заключению, что если остаточное сопротивление сдвигу настолько низко или наклон откоса настолько велик, что блок глины, покоящийся на уже сформировавшейся плоскости скольжения, сползает, то максимальное значение, которым может обладать E_p , будет очень малым. Максимальные касательные напряжения в точке P_1 будут, следовательно, примерно равны тем значениям, которые существовали в точке O , когда началось разрушение, и поверхность разрушения будет продвигаться от P_1 к P_2 . Если условия не меняются в направлении вверх по склону, то прогрессирующее разрушение будет по-прежнему развиваться кверху, вызывая постепенно развитие непрерывной поверхности скольжения, вдоль которой сопротивление сдвигу уменьшается до остаточного значения.

С другой стороны, если $s_r > \gamma z \cos \alpha \sin \alpha$, т. е. если остаточное сопротивление сдвигу настолько высоко или наклон откоса настолько мал, что подрезанный у своего основания блок не имеет тенденции сползать, то значение E_p будет постепенно увеличиваться вверх по склону и прогрессирующее разрушение прекратится на некотором расстоянии от отрывки. Это произойдет на таком расстоянии, где E_p делается настолько большим, что $\tau_{\max}$ на конце уже сформировавшейся поверхности скольжения будет как раз равно пиковому сопротивлению сдвигу глины.

В вышеизложенном само собой подразумевается, что прогрессирующее разрушение продвигается в направлении, параллельном скло-

ну. Это предположение основано не на теоретическом доказательстве того, что это направление обладает наиболее низким коэффициентом запаса, а только на наблюдениях действительных оползней, показывающих, что во многих случаях поверхность разрушения очень близка к параллельной. Ниже будет показано, что во многих случаях поверхность скольжения развивается в горизонтальном или почти горизонтальном направлениях.

Необходимые условия прогрессирующего разрушения

Опираясь на описанный механизм, возможно уточнить некоторые необходимые условия прогрессирующего разрушения.

Прежде всего, для того чтобы началось прогрессирующее разрушение, ведущее к развитию непрерывной поверхности разрушения, где-то в массе глины или на ее границе должна отсутствовать непрерывность; здесь может начаться разрушение и могут произойти деформации, требуемые для его дальнейшего развития. Это отсутствие непрерывности может представлять собой крутой эрозионный склон или выемку в подошве склона или быть слабым участком где-либо на склоне.

Требования к поведению и свойствам материала могут быть изложены в трех пунктах; для каждого из них потенциальная опасность прогрессирующего разрушения выражается следующими важными отношениями.

1. Развитие непрерывной поверхности разрушения при прогрессирующем разрушении возможно, если только существуют или могут развиваться местные касательные напряжения, превосходящие пиковое сопротивление сдвигу глины. При прочих равных условиях опасность местного разрушения при сдвиге увеличивается с отношением p_n/s_p бокового внутреннего напряжения p_n к пиковому сопротивлению сдвига s_p .

2. Продвижение поверхности разрушения должно сопровождаться местной дифференциальной деформацией в зоне разрушения при сдвиге, достаточной для деформирования глины за пределы разрушающего значения. Отношение ε_n/s_p служит мерой степени, в которой боковая деформация ε_n , вызванная накопленной энергией деформирования в глине, превышает пиковую деформацию при разрушении ε_p после которого боковые напряжения уменьшаются.

3. Глина должна показывать большое и быстрое уменьшение сопротивления сдвигу после его полной мобилизации для того, чтобы в зоне разрушения не препятствовать движению, требующемуся для получения дифференциальной деформации и следовательно перемещения зоны концентрации напряжений к соседней зоне неразрушенной глины. Отношение s_p/s_r выражает степень размягчения глины при деформировании.

Развитие непрерывной поверхности скольжения при прогрессирующем разрушении возможно, если только удовлетворены все три условия, т. е. если все эти три важных отношения превышают определенные значения.

СВОЙСТВА ПЕРЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПЛАСТИЧНЫХ ГЛИН И ГЛИНИСТЫХ СЛАНЦЕВ

Для получения рационального представления о свойствах переконалированных глин и глинистых сланцев, в особенности тех, которые определяют опасность прогрессирующего разрушения, и учета всех факторов, которые могут влиять на эти свойства, проследим за всеми фазами геологической истории типичной глины, от времени образования отложения до настоящего времени, когда она встречается

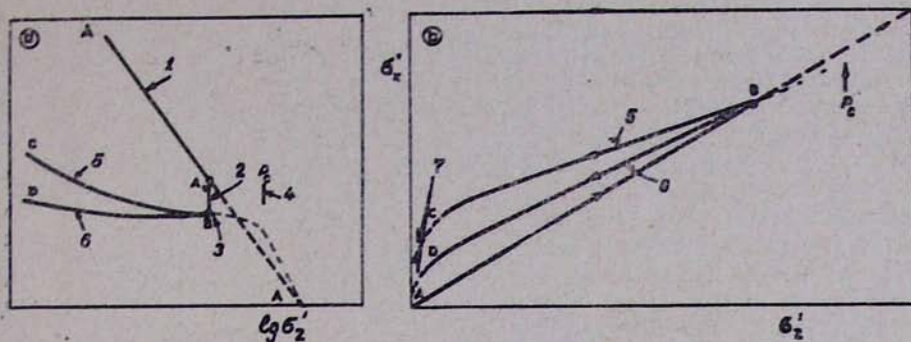


Рис. 3. Геологическая история переконсолидированной глины. а) зависимость между логарифмом эффективного вертикального напряжения и влажностью; б) зависимость между вертикальным и эффективным горизонтальным напряжениями; 1—седimentация, 2—вторичная консолидация, 3—диагенез, 4—критическое давление, наблюдаемое в ненарушенных образцах, 5—глина без диагенетических связей; 6—глина с диагенетическими связями; 7—разрушение при сдвиге.

24. 3 Գերկոնսոլիդացված կավի երկարաճիկի պատմությունը. а) էֆֆեկտիվ ուղղահայաց լարումների լոգարիթմի և խոնավության կապը. б) էֆֆեկտիվ և ուղղահայաց նորիզոնական լարումների միջև եղած կապը. 1—սедимենտացիայի, 2—երկրորդային կոնսոլիդացիայի, 3—դիա-գենեզ, 4—խախտված նմուշներում դիտված կրիտիկական լարում, 5—առանց դիագենեզի կավերի կապը, 6—դիագենեզի կավերով կապը, 7—բախվում առերի ժամանակ:

в виде невыветрелой глины в глубоких выработках и туннелях или выветрелой глины в неглубоких выемках или природных склонах.

Свойства невыветрелой глины

В данной работе рассматриваются в основном морские глины мелового или третичного периодов, отложившиеся миллионы лет назад. В результате постепенного увеличения веса покрывающих пород глины консолидировались, пока наконец не было достигнуто наибольшее консолидационное давление. Наиболее вероятно, что этим пластичным глинам, с относительно высоким содержанием активных глинистых минералов, потребовалось заметное вторичное время для того, чтобы их влажность достигла равновесия.

Хорошо известно, что часть сжатия грунта имеет восстановимый характер. Восстановимая часть увеличивается вместе с содержанием глинистых частиц и в пластичных глинах рассматриваемого типа образует заметную часть общего сжатия. На рис. 3, а показаны результаты компрессионного испытания перемятой пластичной глины; AA_1 —девственная компрессионная кривая, A_1B —уменьшение влажности при вторичной консолидации и BC —кривая восстановления при разгрузке образца после деформации. Принимается, что восстановимая часть сжатия прежде всего является результатом деформации гибких чешуйчатых частиц глины. Когда снимается нагрузка, частицы стремятся по существу восстановить свою первоначальную форму, при условии, что они не были деформированы свыше предела упругости. Когда глина консолидируется под данной нагрузкой, она содержит известное количество того, что может быть названо восстановимой энергией деформации. Количество восстановимой энергии зависит от консолидационного давления и от свойств глины; вообще чем пластичнее глина, тем больше ее восстановимая энергия деформации.

Вернемся к глинистому отложению. После консолидации глина была оставлена без изменения нагрузки на длительное время. Вследствие большого веса покрывающих пород, времени и других агентов, произошли физические и химические изменения глины; процессы, вы-

зывающие эти изменения, совместно называются диагенезом. В отношении природы диагенеза глины известно мало. Однако исходя из возникших эффектов можно постулировать, что в зонах контакта между частицами напряжения очень высоки и происходит перекристаллизация, вызывающая физическое приспособление каждой пары соприкасающихся частиц; здесь возникают молекулярные связи и может развиваться адгезия. Кроме того, связи между частицами образуются вследствие осаждения цементирующих агентов в зонах контакта. В данной работе комбинированный эффект, независимо от его природы, называется диагенетическими связями или сокращенно, просто связями.

Таким образом, при высоком давлении по истечении большого промежутка времени структура глины делается все более прочней и хрупкой без изменения объема. Прочность диагенетических связей зависит от консолидационного давления, минерального состава, поровой жидкости, температуры и времени и может изменяться от одной глины к другой. В тех случаях, когда связи очень прочные, глина делается затвердевшей и классифицируется как мягкая скальная порода.

Один из эффектов диагенетических связей—увеличение сопротивления глины дальнейшему изменению объема при увеличении нагрузки. Дополнительная нагрузка вызывает незначительное изменение объема при условии, что она не превышает некоторого значения p_c (рис. 3). Величина p_c , обычно называемая преконсолидационным давлением, определяется суммой сопротивления изменению объема глины без связей и резервным сопротивлением, вызванным связями. Поэтому возможность определения наибольшего ранее существовавшего консолидационного давления по компрессионным испытаниям ограничена глинами, которые не подвергались диагенезу.

В течение последующего геологического периода глинистое отложение было разгружено вследствие того, что покрывающие породы были удалены при эрозии. Во многих районах большая часть эрозии произошла до плейстоцена, в других некоторая эрозия произошла также и во время оледенения. Вследствие присутствия восстановимой энергии деформирования глина имеет стремление к расширению и увеличению влажности, но ее расширению препятствуют связи между частицами. При более высокой степени разгрузки связи делаются более напряженными и разрушаются во все большем количестве. Поэтому влажность увеличивается с приближением к дневной поверхности.

Вследствие того, что разрушение связей в структуре грунта зависит от времени, процесс набухания связан со вторичным эффектом времени. Возможно, что равновесная влажность некоторых глинистых сланцев еще не достигнута. Таким образом, конечная влажность зависит от восстановимой энергии деформации, сопротивления связей и их разрушения. Кривая BD восстановления после деформации (рис. 3,а) показывает равновесную влажность после разгрузки глины с сильными связями, а кривая BC —то же для глины со слабыми связями или без них.

Вернемся еще раз к рассматриваемому глинистому отложению. Увеличение вертикального эффективного напряжения при образовании отложения вызывает увеличение горизонтального эффективного напряжения, которое зависит от способности глины сопротивляться сдвигу. Для слабых глин наведенное горизонтальное напряжение будет больше, чем для прочных глин. Кривая AB на рис. 3,б показывает изменение напряжений во время нагружения и соответствует действительной компрессионной кривой на рис. 3,а. При разгрузке глина расширяется, поскольку обладает восстановимой энергией деформирования. Так как глина имеет возможность свободного расширения в верти-

кальном, но не горизонтальном направлении, изменения эффективного вертикального напряжения были больше, чем изменения эффективно-горизонтального напряжения. Это показано на рис. 3,б кривой *BC*, которая представляет собой поведение глины, не имеющей связей. Однако если в глине развились диагенетические связи, то они будут препятствовать расширению глины, и в результате структура, созданная изогнутыми частицами, не сможет создать большие горизонтальные напряжения при разгрузке. Таким образом, благодаря связям между частицами, глина ведет себя, как упругий материал с более высоким Пуассоновым отношением, и результирующие горизонтальные напряжения будут меньше, чем напряжения для глины без связей; это видно из кривой *BD* на рис. 3,б. Поэтому влияние диагенетических связей на поведение переконсолидированной глины при разгрузке заключается в большем уменьшении горизонтальных напряжений благодаря сохранению в структуре глины большого количества скрытой энергии деформирования.

В глинистом отложении на каждой глубине существует верхний предел возможных горизонтальных напряжений. При известном различии между эффективными горизонтальными и вертикальными напряжениями касательное напряжение в глине будет превышать сопротивление сдвигу и может произойти разрушение. Вследствие хрупкости переконсолидированной глины, могут развиваться плоскости сдвига и произойти малые движения. Движения, требующиеся для того, чтобы уменьшить горизонтальные напряжения до их предельных значений, зависят от структурной жесткости глины, и это опять-таки зависит от сопротивления связей. В твердых глинистых сланцах с сильными связями требуются лишь небольшие движения для уменьшения горизонтальных напряжений, тогда как для глины со слабыми связями или без связей нужны большие движения.

Влияние выветривания

Термин «выветривание» применяется здесь для описания всех изменений в верхнем слое глины, включая физические изменения, не вызванные климатическими условиями. В процессе выветривания обнаженной переконсолидированной глины с диагенетическими связями можно различать первую фазу дезинтеграции, в течение которой структура глины нарушается при разрушении связей, и вторую фазу, в течение которой происходят химические изменения и разложение минералов. В глинах с сильными связями первая фаза в геологическом масштабе времени происходит довольно быстро, и если ограничить обсуждение изменениями механических свойств, то эта фаза наиболее существенна.

Главный эффект дезинтеграции заключается в постепенном разрушении связей, стремящихся сохранить первоначальную структуру глины. По мере разрушения связей замкнутая в них восстановимая энергия деформации освобождается и вызывает расширение глины, увеличение влажности и уменьшение сопротивления сдвигу. Это расширение должно по необходимости быть направлено перпендикулярно к поверхности. Так как расширение глины параллельно поверхности невозможно, постепенное высвобождение энергии деформирования вызывает увеличение эффективных напряжений в этом направлении. Это увеличение параллельных поверхности напряжений будет происходить с той же скоростью, с которой разрушаются связи, и будет продолжаться до тех пор, пока вся восстановимая энергия деформирования не будет высвобождена.

Общая величина расширения, которое происходит во время дезинтеграции, зависит от количества скрытой энергии деформирования

глины. Если связи очень слабые, то большая часть энергии деформирования рассеивается во время разгрузки и в этом случае эффект дезинтеграции будет мал. Если связи сильные, только небольшая часть энергии деформирования будет потеряна во время разгрузки и расширение в зоне дезинтеграции будет очень велико.

Главный агент разрушения диагенетических связей—деформация. Деформацию вызывают многие физические процессы. Их эффект уменьшается с глубиной; в глинах с диагенетическими связями вообще можно различать зоны, в которых процесс дезинтеграции развился в различной степени.

Сразу под поверхностью находится зона *полной дезинтеграции*. Эта зона подвергается замерзанию, температурным изменениям и повторному высыханию и увлажнению; деформации, сопровождающие эти процессы, по-видимому, очень эффективно вызывают разрушение структуры глины. В этой зоне так же интенсивно протекают химические процессы, как-то: окисление и разложение глинистых минеральных составляющих грунта. Влажность и сопротивление сдвигу в этой зоне зависит в большей степени от климатических условий, чем от влажности и сопротивления сдвигу материнской глины.

Ниже этой зоны расположена зона *развитой дезинтеграции*. Происходящие в этой зоне деформации могут быть вызваны циклическими изменениями эффективных напряжений, вызванных изменениями порового давления в результате колебаний грунтовых вод и сезонного замерзания вышележащего грунта. В зависимости от условий рельефа в процессе дезинтеграции важную роль может играть деформация сдвига. Эта зона вообще имеет систему открытых трещин. Осмотическое давление, происходящее вследствие циркуляции пресных вод в трещинах, может привести к размоканию глины. Некоторые химические изменения происходят также и в этой зоне. Эта зона вообще значительно мягче и влажнее, чем расположенная ниже.

Наиболее низко располагается зона *средней дезинтеграции*. Здесь влияние приповерхностных условий не ощущается. Однако деформации и глубина, на которой они развиваются, значительно больше в случае расположения под склоном, чем в случае горизонтальной поверхности. Локально в этой зоне развивается очень важный тип деформации. При детальном изучении этой зоны наблюдается значительно большее изменение влажности от точки к точке, чем в расположенной ниже неизменной или нетронутой глине. Эти изменения отражают вариации минералогического состава глины, отмечаемые изменением предела текучести. Количество энергии деформирования, накопленной в глине под нагрузкой, в очень большой степени зависит от типа глинистых минералов, и действительно, чем больше содержание активных глинистых минералов, тем больше восстанавливаемая энергия деформирования. Поэтому всякие изменения минералогического состава ведут к неравномерному набуханию, и это неизбежно сопровождается местной неравномерной деформацией. Это в свою очередь ведет к нарушению объема соседней глины и дальнейшему разрушению связей. Вполне возможно, что эти местные деформации достаточно велики для того, чтобы вызвать местное разрушение при сдвиге и образование трещин. Интенсивная нерегулярная система трещин малой протяженности, характерная для дезинтегрированной зоны глинистых сланцев, может, таким образом, своим возникновением быть обязанной неравномерности разрушения связей и распределения скрытой энергии деформирования.

Примером переконсолидированной пластичной глины может служить глина эоценового возраста Литл-Белт в Ютландии, имеющая

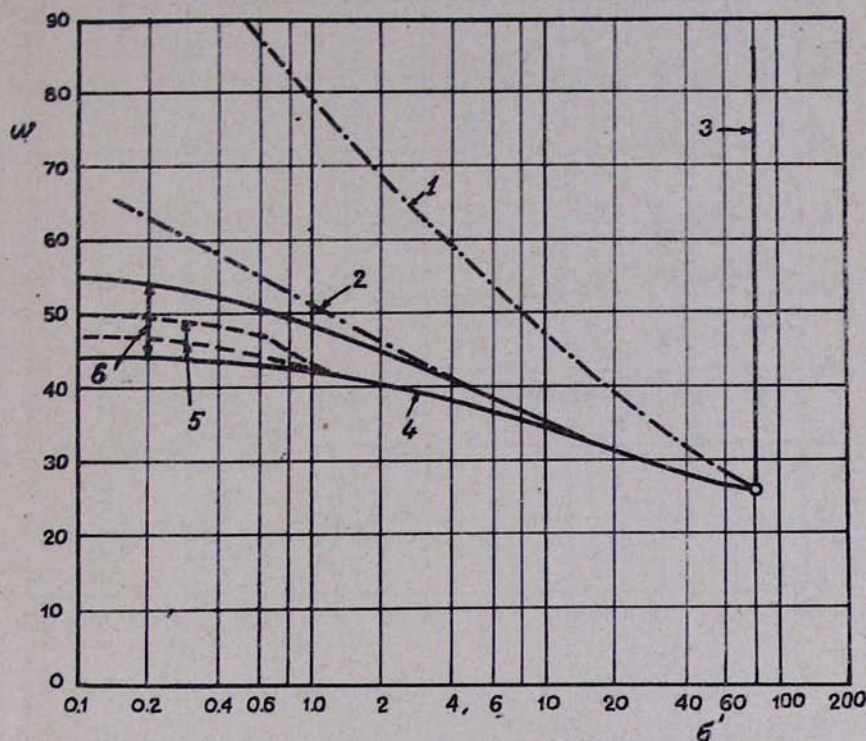


Рис. 4. Геологическая история глины Литл-Белт; зависимость между эффективным давлением от веса покрывающих пластов в kg/cm^2 и влажностью в %; 1—девственная компрессионная кривая для перемятой глины; 2—кривая разгрузки для перемятой глины; 3—оцененное максимальное консолидационное давление; 4—кривая разгрузки для невыветрелой глины; 5—влажность по результатам бурения в зависимости от местных условий; 6—набухание в результате дезинтеграции.

Նկ. 4 Լիրլ-Բելրի կավի երկաթաբանական պատմությունը: Մածկող շերտերի էֆֆեկտիվ լարումների (կգ/սմ^2) և խոնավության (%) ներքով միջև եղած կապը: 1—կուսական սեղմման կորագիծը տրորված կավի համար, 2—բեռնաթափման կորագիծը՝ տրորված կավի համար, 3—գնահատված առավելագույն կոնսոլիդացման ճնշումը, 4—բեռնաթորության կորագիծը՝ չհողմնահարված կավի համար, 5—խոնավությունը ըստ հորատման արդյունքների կախված տեղական պայմաններից, 6—ուռումը զեֆինտեղրացիայի հետևանքով:

высокое содержание монтмориллонита. Ее геологическая история показана на рис. 4. В зависимости от степени выветривания она сохраняет ту или иную часть диагенетических связей; даже такое сильное воздействие, как перемятие образца глины, не устраняет эти связи.

Примером пластичных глинистых сланцев служат хорошо изученные верхнемеловые глинистые сланцы Берпоо, исследованные в связи со строительством плотины на р. Южный Саскачеван (Канада); они имеют высокое содержание монтмориллонита. Их геологическая история показана на рис. 5; это очень переконсолидированная глина с сильными диагенетическими связями. По мере разрушения связей под действием различных агентов выветривания энергия деформирования высвобождается и происходит значительное набухание. На рис. 6 показано уменьшение ширины туннеля в сланцах в результате набухания; в зоне мягких дезинтегрированных сланцев набухание составило от 28 до 53 см за полтора года наблюдений.

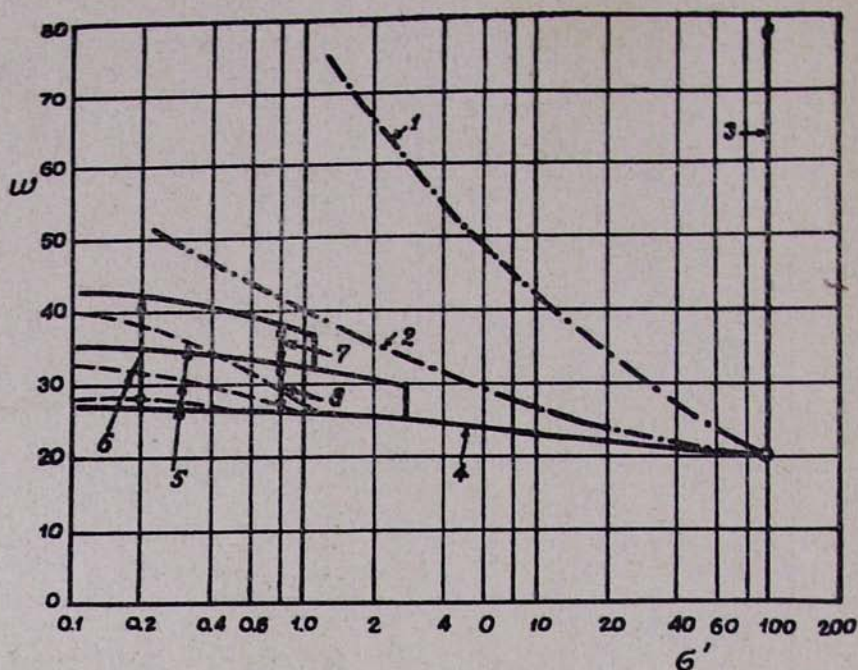


Рис. 5. Геологическая история глинистых сланцев Берпоо. Обозначения—см. рис. 4; 4—кривая разгрузка для твердых невыветрелых глинистых сланцев; 7—мягкие сланцы, полная дезинтеграция; 8—средние сланцы, частичная дезинтеграция.

Նկ. 5. Բերպոյի կավային քերտաւերի երկրաբանական պատմությունը: Նշանումները տե՛ս նկ. 4, 4—բեռնաթափման կորագիծ պինդ չհողմնահարված կավային քերտաւերի համար, 7—փափուկ քերտաւերի, լրիվ դեգրինակցացիա, 8—միջին քերտաւերի, մասնակի դեգրինակցացիա:

Сводка свойств переконсолидированных пластичных глин и глинистых сланцев

Для того, чтобы получить последовательную картину свойств и поведения переконсолидированной глины и глинистых сланцев, необходимо ввести два понятия, которыми до сих пор пренебрегали,—восстановимой энергии деформирования и диагенетических связей. К сожалению, мы пока не можем их измерить количественно, но по натурным наблюдениям можно приближенно оценить их важность. Основываясь на изучении поведения в поле различного типа переконсолидированных глин и глинистых сланцев, удобно подразделять это семейство горных пород на три группы по признаку прочности диагенетических связей:

- 1) переконсолидированные глины—переконсолидированные пластичные глины со слабыми связями или без них;
- 2) глинистые сланцы—переконсолидированные пластичные глины с хорошо развитыми диагенетическими связями;
- 3) сланцы—переконсолидированные пластичные глины с сильно развитыми диагенетическими связями.

Ниже приводится сводка существенных свойств этих трех групп. В переконсолидированных глинах большая часть восстановимой

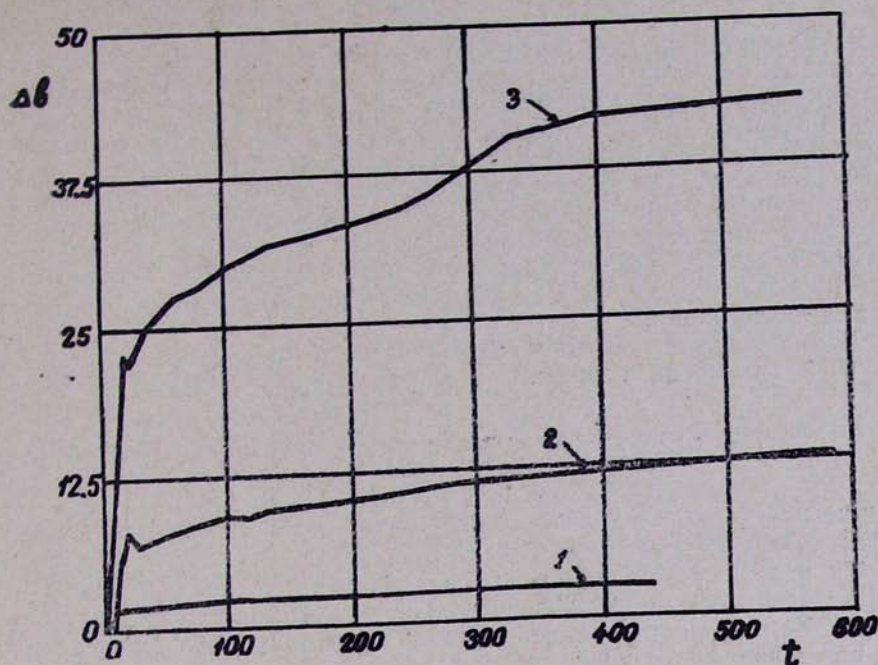


Рис. 6. Уменьшение ширины опытной штольни в глинистых сланцах Берпоо. Абсциссы — время в днях, ординаты — уменьшение ширины в см; 1 — твердые невыветрелые глинистые сланцы; 2 — средние выветрелые глинистые сланцы; 3 — мягкие выветрелые глинистые сланцы.

նկ. 6. Քնայրի կալային քերտաւերում փորձական րովեցի լայնուրան փոքացում: Արագիւնի՝ ժամանակ օրերով, օրինաւոր՝ լայնուրան փոքացում սմ-ով. 1 — ամրի հոգմահարված կալային քերտաւեր. 2 — միջին հոգմահարված կալային քերտաւեր. 3 — փափուկ հոգմահարված քերտաւեր:

энергии деформирования рассеивается во время восстановления после деформации, но вследствие ограничения боковых деформаций часть восстановимой энергии сохраняется и горизонтальные эффективные напряжения будут выше, чем в нормально консолидированной глине, находящейся под тем же давлением покрывающих пластов. Влияние выветривания сводится лишь к небольшому увеличению бокового давления, параллельного поверхности. Выветривание сопровождается уменьшением сопротивления сдвигу частично вследствие увеличения влажности и частично вследствие растрескивания.

В глинистых сланцах набухание глины было ограничено во время разгрузки и влажность разгруженной глины меньше, чем в переконсолидированной глине. Большая часть восстановимой энергии деформирования в глинистых сланцах все еще замкнута диагенетическими связями. Горизонтальные напряжения меньше, чем в глинах со слабыми связями, сопротивление сдвигу выше, и глина имеет большую структурную жесткость. Выветривание вызывает постепенное разрушение связей. Вследствие большего количества скрытой энергии деформирования, разрушение связей вызывает набухание, ведущее к большому увеличению влажности и существенному уменьшению сопротивления сдвигу. Одновременно происходит заметное увеличение напряжений параллельно поверхности, происходящее вследствие тенденции глины расширяться в этом направлении.

В сланцах диагенетические связи настолько сильны, что переконсолидированная глина приобрела характер слабой скальной породы. Во

время разгрузки набухание практически не происходит, и поэтому восстанавливаемая энергия деформирования сохраняется в сланцах. Горизонтальные напряжения в сланцах малы, а сопротивление сдвигу — очень большое. Влияние выветривания заключается в постепенном разрушении связей. Сланцы распадаются на обломки, размер которых уменьшается вместе с ходом дезинтеграции, и в пределе превращаются в переконсолидированную глину. Этот процесс сопровождается постепенным высвобождением восстанавливаемой энергии деформирования, которое ведет к энергичному расширению и увеличению боковых напряжений. Сопротивление сланцев сдвигу значительно уменьшается по мере дезинтеграции.

В дальнейшем рассматриваются только переконсолидированные глины и глинистые сланцы.

РАЗРУШЕНИЕ СКЛОНОВ В ПЕРЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ГЛИНАХ И ГЛИНИСТЫХ СЛАНЦАХ

Восприимчивость различных типов переконсолидированных глин к прогрессирующему разрушению

Из изложенного видно, что различные переконсолидированные глины имеют различную восприимчивость к прогрессирующему разрушению. Чем более переконсолидирована глина, тем больше содержание восстанавливаемой энергии деформации и опасность прогрессирующего разрушения. Чем круче склон и глубже выемка, вызвавшие обрушение, тем более благоприятны условия для прогрессирующего разрушения. Для одной и той же степени переконсолидации и той же топографии поведение склона определяют три основных критерия: прочность диагенетических связей, выветрелость глины и степень ее пластичности.

Попытка относительной классификации опасности прогрессирующего разрушения различных типов глины дана в табл. 2; для этого отдельно оценены три существенных отношения. Из этой классификации можно сделать следующие выводы.

В переконсолидированных пластичных глинах со слабыми диагенетическими связями опасность прогрессирующего разрушения велика; это относится как в невыветрелым, так и выветрелым глинам.

В переконсолидированных пластичных глинах с сильными диагенетическими связями восстанавливаемая энергия деформирования замкнута, и поэтому опасность прогрессирующего разрушения в невыветрелых глинах мала. Когда связи постепенно разрушаются под действием различных агентов выветривания, энергия деформирования высвобождается, и если это происходит при низком давлении от веса покрывающих пластов, то опасность прогрессирующего разрушения очень велика.

Опасность прогрессирующего разрушения переконсолидированных глин с низкой пластичностью очень мала. Вследствие низкого содержания активных глинистых частиц восстанавливаемая энергия деформирования очень мала и деформация, сопровождающая уменьшение боковых напряжений, также очень мала. Кроме того, глины с низкой пластичностью не хрупки и не показывают какого-либо заметного уменьшения сопротивления при деформации за пределами разрушения.

Механизм разрушения склонов в невыветрелых глинах

Очевидно, существуют различные пути, по которым может начаться прогрессирующее разрушение; его дальнейшее развитие будет также различаться в зависимости от таких факторов, как топография,

Таблица — Աղյուսակ 2

	Переконсолидированная пластичная глина со слабыми связями Թույլ կապերով գերկոն- սոլիդացած կավ	Переконсолидированная пластичная глина с сильными связями Ուժեղ կապերով գերկոն- սոլիդացած կավ	Переконсоли- дированная глина низкой пластичности ցածր պլաստի- կուժյամբ գերկոնսոլի- դացած կավ		
	невывет- релая չնոգմնա- հարված	выветрелая նոգմնա- հարված	невывет- релая չնոգմնա- հարված	выветрелая նոգմնա- հարված	
ρ_H/s_p	2	3	0—1	3	1
$\varepsilon_H/\varepsilon_p$	2	2	1	3	0—1
s_p/s_r	2	1	3	2	0—1
Относительная опасность про- грессирующего разрушения Առաջընթաց բայ- թայման հարա- բերական վտանգ	высокая բարձր	высокая բարձր	низкая ցածր	очень высокая շատ բարձր	очень низкая շատ ցածր

Примечание: Возможность прогрессирующего разрушения различных типов глин зави-
сит от того, насколько выполняются три важных отношения. Обозначения: 0—не выра-
жено; 1—слабо выражено; 2—выражено; 3—сильно выражено.
Ծանոթություն. Տարբեր տեսակի կավերի առաջընթաց բայթայման հնարավորու-
թյունը կախված է այն բանից, թե ինչքանով են բավարարվում հերթ կարևոր հարաբերու-
թյունները. նշանակումներ՝ 0—չի արտահայտված, 1—թույլ է արտահայտված, 2—արտահայտ-
ված է, 3—ուժեղ է արտահայտված:

геологическое строение и свойства глины. Ниже рассматриваются два
несколько различающихся случая, типичные для ряда оползней, про-
исходящих в невыветрелых переконсолидированных пластичных гли-
нах.

Первый случай представлен на рис. 7а, где показана выемка в
крупнозернистом покровном материале и невыветрелой переконсоли-
дированной глине со слабыми связями. Развитие непрерывной поверх-
ности обрушения при прогрессирующем разрушении происходит в со-
ответствии со схемой, описанной на рис. 2; единственное различие со-
стоит в том, что вследствие наличия склона на рис. 7а горизонтальные
напряжения в глине с расстоянием от выемки увеличиваются. Это
увеличение горизонтальных напряжений, очевидно, увеличивает опас-
ность прогрессирующего разрушения.

Как показано на рис. 7а, прогрессирующее разрушение ведет к
развитию непрерывной поверхности скольжения, которая стремится
быть горизонтальной или следовать направлению поверхностей напла-
стования. Когда поверхность скольжения развивается на некоторую
длину и сопротивление горизонтальному перемещению всего блока,
расположенного над поверхностью скольжения, уменьшается настоль-
ко, что не может противостоять активному давлению земли, находя-
щейся выше массы грунта, прогрессирующее разрушение переходит в
крупный оползень, показанный на рис. 7а. В зависимости от того, что
происходит с оползневыми массами и в какой степени они удержива-
ют склон позади, прогрессирующее разрушение может продолжать
развиваться, вызывая новые крупные оползни.

В отрывах в глубоких отложениях сильно переконсолидирован-
ной пластичной глины прогрессирующее разрушение может также на-

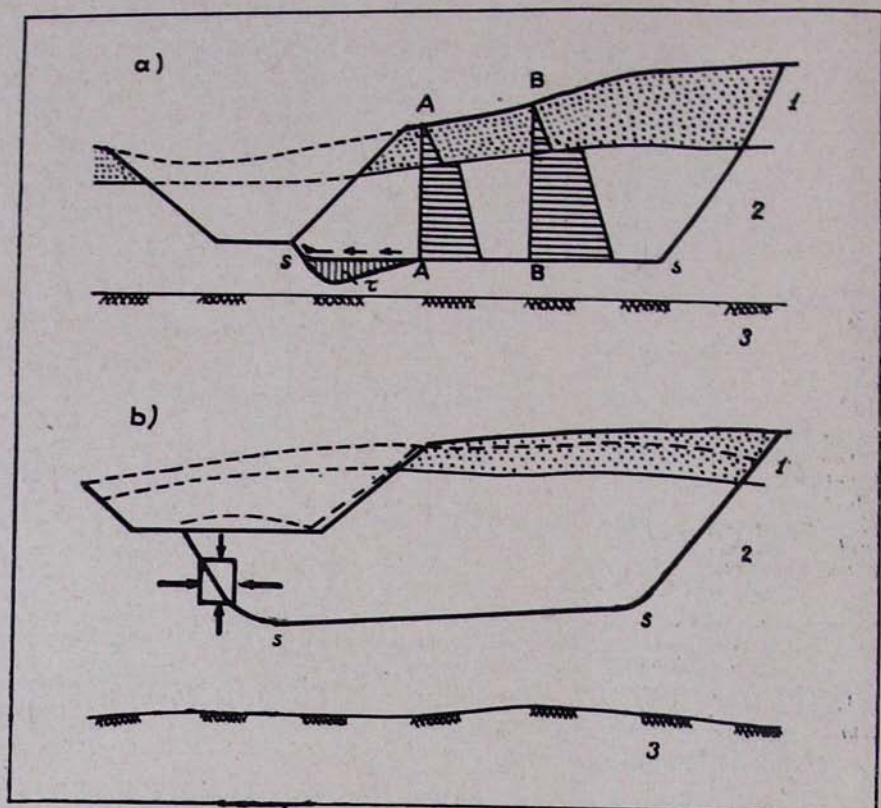


Рис. 7. Прогрессирующее разрушение склонов в невыветрелых глинах; 1—песок, 2—переконсолидированная глина; 3—скальная порода.

Նկ. 7. Չնոդվանհարված կավերում լանդի առաջընթաց քայքայում. 1—ավազ, 2—գերկոնսոլիդացած կավ, 3—ժայռային ապար:

чаться несколько отличным путем, чем показано на рис. 7а. На рис. 7б показаны условия, когда через верхний песчаный покров сделана отрывка в невыветрелой переконсолидированной глине. В результате уменьшения давления от веса покрывающих пластов отношение горизонтальных напряжений к вертикальным ниже дна отрывки в глине увеличивается. На некоторой глубине отрывки это отношение может превзойти критическое значение, при котором касательное напряжение делается равным пиковому сопротивлению сдвигу и происходит пассивное обрушение при сдвиге. Обрушение вызовет подъем дна выемки, сопровождаемый горизонтальным движением глины вблизи отрывки. Это движение вызовет уменьшение горизонтального распора глины вблизи отрывки и, как описано выше, приведет к местной концентрации касательных напряжений в глине под склоном. Если эти касательные напряжения превзойдут пиковое сопротивление сдвигу, то произойдет прогрессирующее разрушение и образуется непрерывная поверхность обрушения.

В обоих упомянутых случаях характерная особенность оползней состоит в том, что движение склона главным образом горизонтальное, или выражаясь другими словами, прогрессирующее разрушение стремится развиваться вдоль поверхности, которая преимущественно направлена горизонтально или следует поверхностям напластования.

Механизм разрушения склонов в выветрелых глинах

Изложенная выше концепция механизма набухания в верхней части обнаженной переконсолидированной глины позволяет понять многие случаи обрушения, происшедшие по поверхностям более или менее параллельным дневной. Эти оползни вообще легко распознаются по их большому протяжению по сравнению с глубиной и по расположению поверхности скольжения в нижней части зоны, в которой протекает выветривание. Анализ ряда оползней этого типа показывает, что среднее касательное напряжение по поверхности скольжения, вызванное силой тяжести, намного меньше, чем сопротивление сдвигу глины, но имеет величину того же порядка, что и остаточное сопротивление сдвигу глины. Оползни должны последовательно образовываться вдоль сформировавшейся поверхности скольжения, и так как эта поверхность разрушения ранее не существовала, то можно заключить, что она была образована при прогрессирующем разрушении, предшествовавшем происшедшему оползню. Так как касательные напряжения, вызванные силой тяжести, меньше сопротивления сдвигу, прогрессирующее разрушение можно объяснить, приняв во внимание внутренние напряжения. Именно здесь проявляется тенденция глины расширяться в направлении, параллельном поверхности; это помогает понять тот факт, что в зоне выветривания могут существовать боковые напряжения, достаточно большие для того, чтобы вызвать местное разрушение глины. Подобные явления будут происходить и в конце концов приведут к развитию непрерывной плоскости скольжения, параллельной поверхности.

Для того, чтобы проиллюстрировать прогрессирующее разрушение, рассмотрим склон в переконсолидированной пластичной глине с сильными диагенетическими связями. Пусть произошло некоторое выветривание до глубины Z (рис. 8а), в результате которого имело место высвобождение замкнутой энергии деформирования и последующее увеличение напряжений параллельно поверхности. Влажность также увеличивается, и сопротивление сдвигу ниже, чем в невыветрелой глине, находящейся как раз под ней. У подошвы склона происходит эрозия (рис. 8б), и образуется крутой склон в выветрелой зоне. В результате устранения бокового упора боковые напряжения в зоне выветривания должны теперь передаваться нижележащей невыветрелой глине касательными напряжениями по плоскости SS . Эти касательные напряжения прибавляются к касательным напряжениям, вызванным силой тяжести, создавая таким образом концентрацию касательных напряжений как раз под подошвой склона. Если касательные напряжения превышают пиковое сопротивление сдвигу глины, то происходит местное оползание и начинается прогрессирующее разрушение.

Так как в пиковом сопротивлении сдвигу составляющая сцепления имеет заметную величину, в пределах зоны выветривания сопротивление глины сдвигу с глубиной увеличивается лишь незначительно. Однако касательные напряжения, вызванные силой тяжести, так же, как и вызванные внутренними боковыми напряжениями, увеличиваются пропорционально глубине. Это объясняет, почему плоскость скольжения имеет тенденцию начинаться так глубоко, как это возможно, и действительно, в природе она часто находится в наиболее низкой части зоны выветривания.

На рис. 8с показана ситуация, когда параллельно поверхности образовалась плоскость скольжения и достигла точки P . Вдоль плоскости скольжения происходит движение плиты вниз по склону, и сопротивление сдвигу по поверхности скольжения уменьшается до остаточного значения. Дальнейшее зависит от наклона склона. Если этот на-

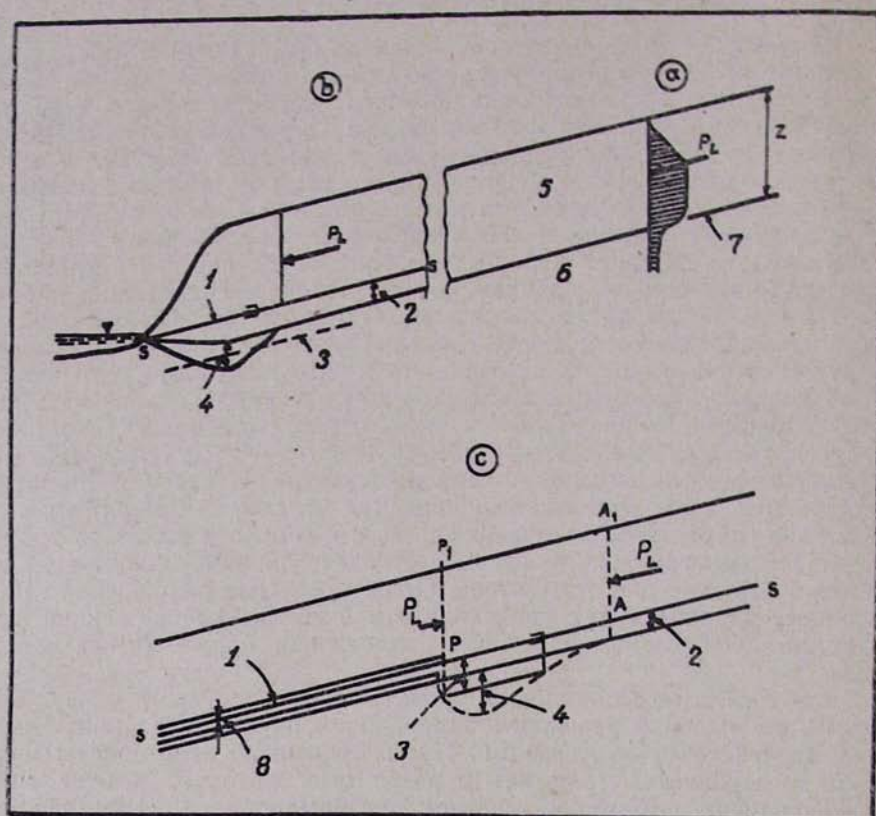


Рис. 8. Прогрессирующее разрушение склона в выветрелых глинах. 1—поверхность скольжения; 2—касательные напряжения, вызванные силой тяжести, 3—пиковое сопротивление сдвигу; 4—касательные напряжения, вызванные внутренними боковыми напряжениями; 5—зона выветривания; 6—невыветрелая глина; 7—граница между выветрелой и невыветрелой глиной; 8—остаточное сопротивление сдвигу.

Նկ. 8 Հողմնահարված կավերում լանջի առաջընթաց փայլալուծ: 1—առնկեցման մակերևույթ: 2—ծանրության ուժից առաջացած շոշափող լարումներ: 3—առնկի պիկային դիմադրություն: 4—ներքին կողմնային լարումներից առաջացած շոշափող լարումներ: 5—հողմնահարման գոտի: 6—չհողմնահարված կավ: 7—հողմնահարված և չհողմնահարված կավի միջև սահմանը: 8—առնկի մնացորդային դիմադրություն:

лон так мал, что касательное напряжение по поверхности скольжения, вызванное силой тяжести, будет меньше остаточного сопротивления сдвигу, то плита, отделенная плоскостью скольжения, не будет иметь тенденции двигаться вниз по склону и прогрессирующее разрушение не перейдет в оползень. Если склон достаточно крут для того, чтобы касательное напряжение превышало остаточное сопротивление, то плита будет стремиться двигаться вниз по склону; этот случай показан на рис. 8с. Боковые напряжения по плоскости PP' уменьшаться, возможно, сделаются нулевыми. Если в этом случае касательные напряжения в глине на переднем крае плоскости скольжения, вызванные силой тяжести и боковыми напряжениями по плоскости AA' , превысят пиковое сопротивление сдвигу, то будет продолжаться прогрессирующее развитие поверхности скольжения в направлении вверх по склону.

Скорость развития прогрессирующего разрушения

Большой интерес, очевидно, представляет знание скорости протекания прогрессирующего разрушения, так как этот фактор управляет замедлением оползания. Вообще эта скорость зависит от таких факторов, как наклон склона, величина бокового давления и пиковое сопротивление глины. Различаются следующие три комбинации условий.

1. Если боковые внутренние напряжения так высоки, что местные касательные напряжения больше, чем *недренированное* сопротивление сдвигу глины, то прогрессирующее разрушение будет развиваться очень быстро.

2. В тех случаях, когда боковые внутренние напряжения так малы, что местные касательные напряжения меньше, чем *недренированное* сопротивление сдвигу, но больше, чем *дренированное* сопротивление сдвигу, быстрого разрушения не происходит. Однако в локальной зоне высоких напряжений глина стремится дилатировать, и влажность увеличивается с такой же скоростью, с какой поступает вода. Со временем происходит увеличение влажности и уменьшение сопротивления сдвигу от *недренированного* к нижнему *дренированному* значению. Таким образом, скорость, с которой происходит прогрессирующее разрушение, управляется временем, требующимся для уменьшения сопротивления сдвигу от *недренированного* значения до значения действующего касательного напряжения.

3. Если местные касательные напряжения, вызванные силой тяжести и внутренними боковыми напряжениями, меньше, чем *дренированное* сопротивление сдвигу, разрушения не будет даже после того, как влажность в зоне прогрессирующего разрушения придет в равновесие с условиями напряжений. Прогрессирующее разрушение произойдет только в том случае, если со временем, в результате непрерывной дезинтеграции глины и высвобождения замкнутой энергии деформации увеличатся боковые напряжения. Задержка оползня в подобных случаях будет большой, порядка нескольких лет или столетий.

Рассматривая время развития оползня, необходимо также учитывать сезонные изменения уровня грунтовых вод, которые могут вызывать колебания сопротивления сдвигу грунтов не только в обрушившейся части будущей поверхности скольжения, но и в той ее части, которая уже образовалась. Окончательный результат прогрессирующего разрушения заключается в том, что расположенный под поверхностью склона объем глины будет отделен и сопротивление сдвигу вдоль нижней границы уменьшено до остаточного значения. Насколько далеко продвинется прогрессирующее разрушение до того, как склон начнет сползать, зависит от таких факторов, как наклон склона и граничные условия. Наконец, большое влияние на время оползания будут иметь колебания сопротивления сдвигу по поверхности скольжения, вызванные климатическими условиями.

ПОЛЗУЧЕСТЬ СКЛОНОВ В ПЕРЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ГЛИНАХ

Механизм ползучести

«Ползучесть склонов» представляет собой широкий термин, применяемый в инженерной геологии для описания смещений вниз по склону, протекающих с незаметной скоростью. Ограничиваясь обсуждением ползучести в глинистых склонах, необходимо различать тип движений, происходящих в зоне, до которой протекает зимнее промерзание и которую правильнее было бы назвать солифлюкцией, и составляющий предмет настоящей статьи тип ползучести, вызванной дви-

жениями на большей глубине. Даже при таком ограничении предмета возможно, что существуют разнообразные типы ползучести в глинистых склонах. Изложенная выше концепция того, что происходит в верхних слоях переконсолидированной глины, позволяет нам, однако, объяснить по крайней мере один тип движений склонов в таких глинах. Так как относительно природы ползучести известно очень мало, может быть интересным включить в данную статью краткое обсуждение вопроса о связи между этим типом ползучести и описанным выше прогрессирующим разрушением.

Изучение поведения склонов в глинах с различным геологическим происхождением и историей позволяет сделать интересный вывод о том, что ползучесть склонов делается более отчетливой при увеличении жесткости и твердости материнской глины или горной породы. Одна из наиболее склонных к ползучести областей находится в восточной части Швейцарии, где материнские породы—слабо сцементированные аргиллитовые сланцы, которые приобрели свою очень высокую сопротивляемость под испытанными ими высокими давлениями (они могли также подвергнуться некоторым метаморфическим изменениям), но набухают и разрушаются в контакте с водой и воздухом. Далее идет ползучесть, наблюдаемая в склонах, сложенных из нескольких более мягких глинистых сланцев, в Южной Европе, во многих районах распространения сланцев в Соединенных Штатах, как например, в Пенсильвании и на Калифорнийском западном побережье. С другой стороны, известно из опыта, что на склонах в Швеции, Норвегии и Канаде, где глины мягкие и нормально или почти нормально консолидированы, ползучесть происходит очень медленно или вообще отсутствует; то же относится и к лессу. Поэтому не является неправдоподобным, что природа рассматриваемой ползучести связана с геологической историей материнского материала. Выдвигается предположение, что ползучесть—явление, связанное с медленным увеличением объема и сопровождаемое дезинтеграцией сильно переконсолидированных глин и сланцев, содержащих большое количество накопленной энергии деформации. Согласно этому предположению, необходимые условия ползучести этого типа следующие:

1. Материнский грунт или скальная порода должны содержать глинистые частицы, которые проявляют отчетливо выраженные упругие свойства под нагрузкой, и химические и минералогические изменения, которые происходили, когда глина находилась под полной нагрузкой, не были достаточно сильными для того, чтобы вследствие перекристаллизации или подобных процессов были нарушены упругие свойства глинистых частиц.

2. Связи, развившиеся в глине, когда она была под наибольшим консолидационным давлением, должны иметь сопротивление, достаточное для удержания существенной части восстановимой энергии деформации во время разгрузки; эти связи разрушаются, когда глина подвергается действию различных физических и химических агентов выветривания.

3. Энергия деформации, высвобожденная при разрушении структуры глины вследствие выветривания, должна быть достаточной для увеличения боковых напряжений до такой величины, чтобы в сочетании с силой тяжести они могли бы вызвать прогрессирующее разрушение массы глины.

Явления, происходящие при дезинтеграции верхней коры глинистых сланцев, говорят о том, что наиболее важный фактор ползучести,—непрерывное увеличение бокового расширения и одновременное уменьшение сопротивления сдвигу, сопровождаемое увеличением влаж-

ности. Неизбежно, что где-либо условия склона окажутся благоприятными для начала прогрессирующего разрушения, как например, в подошве склона. Как только начинается движение, оно прогрессирует в направлении вверх по склону тем путем, который был описан в предыдущем разделе.

Дальнейшее развитие ползучести будет зависеть от наклона склона и остаточного сопротивления сдвигу глины в зоне разрушения. Если склон настолько крут, что остаточное сопротивление меньше касательных сил, ползучесть в конечном счете приведет к оползнию, как описано выше. Оползень обнажает свежую поверхность в грунте, и процесс начинается снова. Скорость, с которой склон в глинистых сланцах будет «доведен», определяется, таким образом, скоростью дезинтеграции верхних слоев глины.

Если касательные напряжения в зоне разрушения, вызванные силами тяжести, равны остаточному сопротивлению сдвига, склон подвергается медленной, установившейся ползучести и движения не ведут к оползнию. Общий механизм ползучести может быть разделен на две фазы. В первой фазе образуется непрерывная зона разрушения при описанном выше прогрессирующем разрушении. Когда от нижележащей глины таким путем отделяется пласт, начинается вторая фаза ползучести. В принципе коэффициент запаса пласта равен единице. Всякое боковое расширение глины во время дальнейшей дезинтеграции вызовет соответствующее движение, и так как сопротивление оползанию вниз по склону незначительное, происходит ползучесть вниз по склону. Движение будет, конечно, нерегулярным и неоднородным, и в результате сильного растрескивания, которое сопровождает ползучесть, поровое давление в зоне разрушения будет значительно колебаться вместе с выпадением осадков. Поэтому ползучесть имеет сезонный характер. Так как движения содействуют дезинтеграции менее нарушенной глины и обломков нетронутой глины, то это ведет к дальнейшему падению остаточного сопротивления и местному ускорению ползучести.

Склоны, достаточно пологие для того, чтобы касательные силы, вызванные силой тяжести, были меньше, чем остаточное сопротивление сдвигу, не будут подвергаться гравитационной ползучести. В локальных участках ослабления могут происходить некоторые боковые движения, вызванные внутренними напряжениями, но они не будут влиять на устойчивость склона. По мере того, как проходит время и верхний слой размягчается, внутренние боковые напряжения уменьшаются; наибольшее значение отношения главных напряжений является функцией сопротивления сдвигу глины.

Наблюдения за ползучестью склонов в Калифорнии, США

Опубликовано лишь очень немного исследований ползучести глинистых склонов; к ним относится достаточно полное описание, дающее картину ползучести нескольких склонов на западном побережье Калифорнии, включая два склона в сильно переконсолидированных морских глинах третичного возраста со сравнительно сильными связями. Склоны имели различный наклон, от крутых обрывов до пологих склонов с таким малым углом наклона, как 9° . Исследования включали наблюдения за поровым давлением и измерение инклинометрами движений на различных глубинах. Один из изученных склонов имел высоту 40 м и очень пологий наклон с углом 10° (рис. 9). Склон испытывает более или менее непрерывную ползучесть; средняя скорость движения около 30 см в год. По отсчетам инклинометров, показанных на рис. 9, можно сделать важное заключение, что ползучесть выз-

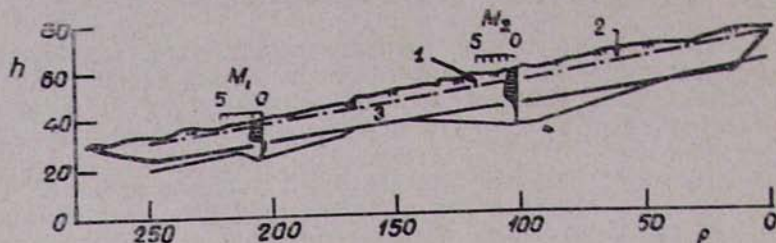


Рис. 9. Ползучесть склона на западном побережье Калифорнии: 1—выветрелая глина; 2—уровень грунтовых вод; 3—невыветрелая глина Мартинес; 4—невыветрелая песчанистая глина Мартинес; M_1 —график смещения по глубине в см за 175 дней; M_2 —то же за 38 дней. Абсциссы—длина в м, ординаты—отметка в м.

նկ. 9. Լանդի սղղվ Կալիֆորնիայի արևմտյան ծովափում: 1—չոզմահարված կավ. 2—գետնաջրերի մակարդակ. 3—չոզմահարված Մարտինեսի կավ. 4—չոզմահարված Մարտինեսի ավազային կավ. M_1 —բաց խորության տեղաշարժի գրաֆիկ 175 օրվա չամար, սմ-ով. M_2 նույնը 38 օրվա չամար: Արագիսներ՝ երկարությունը մ-ով, օրդինատներ՝ բարձրության նիշ, մ-ով:

вана сползанием верхнего слоя вдоль хорошо выраженной поверхности скольжения или узкой зоны разрушения на глубине до 14 м. Гравитационные касательные напряжения вдоль этой плоскости скольжения приблизительно равны остаточному сопротивлению глины и соответствуют $\varphi_r = 10-12^\circ$. Думается, что это типичный пример склона, в котором непрерывная ползучесть вызвана боковым расширением глины вследствие дезинтеграции; в этом частном случае маловероятно, чтобы ползучесть привела к оползанию. Исследования показали, что склоны в том же районе существуют при наклонах, изменяющихся от 9 до 28° . Если принять $c' = 0$, то для сохранения устойчивости таких склонов необходимо, чтобы φ' составляло от 12 до 45° . История района ясно показывает, что со временем все склоны с наклоном большим, чем $10-12^\circ$, обрушатся, но время до разрушения может быть очень большим. Фактор длительности, постепенно ведущий к оползанию, ясно связан с ползучестью. Таким образом, устойчивость склонов уменьшается с длительностью обнажения поверхности глины и с общей величиной ползучести в течение этого периода. Наблюдения показывают, что для этих именно глин, имеющих предел текучести $65-70\%$ и естественную влажность, значительно меньшую предела пластичности, требуется значительная деформация для разрушения структуры и приведения глины к предельному остаточному сопротивлению сдвига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчете, описывающем страшный оползень в сильно переконсолидированных глинистых сланцах в Японии, занятый этим вопросом инженер был вынужден сделать вывод, что «оползневой дьявол, кажется, смеется над человеческой некомпетентностью». К сожалению, настоящая статья ничего не дала для того, чтобы опровергнуть это хорошо подтвержденное положение. Ее целью было попросту сделать попытку окружить оползневого дьявола для того, чтобы изучить его природу. Эта попытка по крайней мере указала, что если нужно назвать одним словом тот сильный агент, который способен привести к разрушению наиболее твердые глины, то им будет, вероятно, термин «восстановимая энергия деформации». Для выяснения этого вопроса были рассмотрены инженерная геология переконсолидированных глин и возможные пути, по которым глинистый склон приходит к раз-

нению при оползании, независимо от того, что он обладает пологим склоном и большим сопротивлением сдвигу глины. В настоящем исследовании этот метод аргументации может быть суммирован в следующих пунктах.

1. Все имеющиеся факты, казалось бы, подтверждают без всякого сомнения, что разрушению склонов в переконсолидированных глинах глинистых сланцах предшествует развитие непрерывной поверхности скольжения с механизмом прогрессирующего разрушения, в котором сопротивление сдвигу прогрессирующе уменьшается от пикового к окончательному значению.

2. Можно качественно доказать, что развитие поверхности скольжения при прогрессирующем разрушении в пластичных переконсолидированных глинах возможно, если удовлетворяются три условия. Во-первых, внутренние боковые напряжения должны быть достаточно великими для того, чтобы вызвать концентрацию напряжений перед продвигающейся поверхностью скольжения, в которой касательные напряжения превышают пиковое сопротивление сдвигу. Во-вторых, глина должна содержать достаточное количество восстановимой энергии деформации для того, чтобы вызвать необходимое расширение глины в направлении оползания и деформирование глины в зоне разрушения. В-третьих, как величина боковых напряжений в большой степени управляет энергией деформации, то оказывается, что опасность прогрессирующего разрушения склона зависит главным образом от единственного фактора—восстановимой энергии деформации, который до сих пор не рассматривался в обычных оценках устойчивости. В-третьих, остаточное сопротивление сдвига должно быть относительно малым по сравнению с пиковым сопротивлением сдвигу.

3. Поэтому было необходимо пересмотреть инженерно-геологические свойства переконсолидированных глин, обратив наибольшее внимание на восстановимую энергию деформации. Выяснилось, что в некоторых глинах энергия деформации восстанавливается одновременно с изменением напряжений, тогда как в других она «замкнута» и поэтому не имеется немедленно в наличии. Накопление энергии деформации в некоторых глинах объясняется тем, что в этих глинах диагенетические связи были образованы в то время, когда глина несла максимальную консолидационную нагрузку. Они имели характер сваривания точек контакта между частицами, вследствие чего было создано препятствие выпрямлению изогнутых частиц при уменьшении нагрузки. Однако диагенетические связи постепенно разрушаются по мере того, как глина вблизи от поверхности подвергается действию различных агентов выветривания. В процессе выветривания замкнутая энергия деформации постепенно освобождается. Таким образом, присутствие диагенетических связей и их постепенное разрушение оказывается важным фактором при выяснении условий прогрессирующего разрушения вследствие запаздывания высвобождения восстановимой энергии деформации.

4. Следовательно, имеется существенное различие в поведении переконсолидированных глин со слабыми и сильными диагенетическими связями. В глинах со слабыми связями большая часть энергии деформации восстанавливается во время разгрузки. Глина набухает почти неограниченно, и отношение между горизонтальным и вертикальным эффективными напряжениями увеличивается во время восстановления после деформации; вследствие ограничения боковых деформаций глина будет иметь тенденцию расширяться в горизонтальном направлении. Влияние выветривания на верхние слои глины будет небольшим. В глинистых сланцах с сильными диагенетическими связями восстано-

вимая энергия деформации замкнута во время разгрузки. Поэтому набухание ограничено, горизонтальные эффективные напряжения относительно малы и тенденция глины к горизонтальному расширению ограничена. Однако связи постепенно разрушаются, если глина с сильными диагенетическими связями подвергается действию различных агентов выветривания, и в результате происходит весьма энергичное набухание, увеличение эффективных напряжений в направлении, параллельном поверхности, и возникает тенденция расширяться в том же направлении.

5. Таким образом, рассмотрение свойств переконсолидированных глин говорит о том, что возможность прогрессирующего разрушения не одинакова для всех переконсолидированных глин; она сильно зависит от того времени, когда была высвобождена накопленная энергия деформации. Наиболее опасными должны быть глинистые сланцы или переконсолидированные глины с сильными связями, подвергавшиеся постепенной дезинтеграции при выветривании вблизи от поверхности. Большое количество высвобождаемой накопленной энергии деформации приводит к большим боковым напряжениям и к ясно выраженной тенденции расширяться в направлении, параллельном поверхности. Далее идут переконсолидированные глины со слабыми связями. Этот тип глин почти одинаково опасен в неветрелых и ветрелых условиях. Наименее опасный тип глин—неветрелые переконсолидированные глинистые сланцы с сильными диагенетическими связями, достаточно сильными для предотвращения высвобождения накопленной энергии деформации.

6. Последним шагом в настоящем исследовании была проверка обоснованности представленной концепции на действительных оползнях в переконсолидированных глинах и глинистых сланцах. Из опубликованных описаний и отчетов были собраны данные, относящиеся примерно к шестидесяти оползням, которые были достаточно хорошо изучены для того, чтобы можно было оценить тип глины. Принимая, что эти случаи отражают действительное поведение в природе переконсолидированных глин, этот материал мог быть использован для выводов, сделанных в пункте 5. Оползни были распределены согласно типу глин, и было найдено, что очень большое количество оползней (около 55%) произошло в зоне выветривания переконсолидированных глин с сильными диагенетическими связями. Следующую большую группу (около 35%) составили оползни в переконсолидированных глинах со слабыми связями; во многих случаях было невозможно определить, произошли ли оползни в ветрелой или неветрелой глинне. Только небольшое количество оползней (около 10%) произошло в неветрелых глинах с сильными диагенетическими связями; большая часть их представляла собой природные бедствия, в которые были вовлечены очень высокие склоны. Отсюда следует, что оценка относительной склонности к оползанию различных типов глин, вытекающая из настоящей концепции, качественно правильна. Наконец, был выбран ряд оползней, для которых имелись детальные наблюдения их развития, и было доказано, что предлагаемый механизм прогрессирующего разрушения может качественно объяснить причины и развитие оползней.

7. Исследование неизбежно коснулось также и вопроса о ползучести глинистых склонов. На основании доступных наблюдений было сделано заключение о том, что ползучесть может также находиться в связи с высвобождением накопленной деформации в зоне выветривания и поэтому в переконсолидированных пластичных глинах с сильными диагенетическими связями представляет собой общее явление.

8. Наконец, имеются некоторые основания полагать, что сложная проблема устойчивости склонов в переконсолидированных глинах и глинистых сланцах тесно связана со специальными инженерно-геологическими свойствами этих глин, а именно, что они содержат восстанавливаемую энергию деформации.

Запаздывание, наблюдаемое в некоторых глинах, вызвано тем фактом, что энергия деформации замкнута в диагенетических связях, которые разрушаются только тогда, когда глина подвергается выветриванию.

ԱՆՃԱՆԱԿԻ ԱՌԱՋԻՆԹԱՅ ՔԱՅՔԱՅՈՒՄԸ ԳԵՐԿՈՆՍՈՒԴԱՅՎԱԾ ՊԼԱՍՏԻԿ ԿԱՎԵՐՈՒՄ ԵՎ ԿԱՎԱՅԻՆ ԹԵՐԹԱՔԱՐԵՐՈՒՄ¹

Դոկտոր ԼՈՐԻՏՍ ԲՅԵՌՈՒՄ

Խմբագրի կողմից

Անժամանակ վախճանված նորվեգացի խոշորագույն գիտնական Լորիտս Բյեռոմի (1918—1973) երրորդ Տերցագիական դասախոսությունը արտակարգ հետաքրքրություն է ներկայացնում գերկոնսոլիդացված կավերում սողանքների մեխանիզմի հասկացման տեսակետից: Նրա կողմից առաջ քաշված կոնսոլիդացիայի պրոցեսի ընթացքում կուտակված դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի ազատման և այդ պրոցեսի ընթացքում դիագենետիկական կապերի դերի մասին կոնցեպցիան մեծ հեռանկարներ է բացում բարդ երկրաբանական պատմություն ունեցող գոտիներում սողանքների մեխանիզմի ուսումնասիրության համար:

Դոկտոր Լորիտս Բյեռոմի գիտական պոտենցիալը և ստեղծագործական ակտիվությունը հիշաժի արտակարգ են եղել: Բավական է ասել, որ միայն 1966—1967 թթ. գրունտների մեխանիկայի առավել կարևոր ֆորումներում նա կարողացել է երեք երեկի դասախոսություն՝ «Նորվեգական նորմալ կոնսոլիդացված ծովային կավերի ինժեներա-երկրաբանական հատկությունները»՝ յոթերորդ Ռենկինյան դասախոսությունը Լոնդոնի Բրիտանական գեոտեխնիկական ընկերությունում, «Ստրուկտուրայի ազդեցությունը նորմալ կոնսոլիդացված լողուն կավերի վարքի վրա սահմանափակ ժամանակ»² հատուկ դասախոսությունը բնական գրունտների և ժայռային ապարների սահմանի գիմարությունը գեոտեխնիկական կոնֆերանսում՝ Օսլոյում և երրորդ Տերցագիական դասախոսությունը: Նրա կարապի երգը եղավ 1973 թ. Մոսկվայում կայացած գրունտների մեխանիկայի և հիմքաշինության միջազգային միջազգային կոնգրեսին ներկայացրած երեկի գլխավոր զեկուցումը, որը ցավով սրտի չհասցրեց կարգալ:

Բյեռոմն իր մեծ գիտական աշխատանքը զուգակցում էր կազմակերպչական աշխատանքի հետ: Նա ղեկավարում էր խոշորագույն Նորվեգական գեոտեխնիկական ինստիտուտը և ստեղծել էր Տերցագիական գրադարանը: 1961—1965 թթ. նա Գրունտների մեխանիկայի ու հիմքաշինության միջազգային ընկերության վիցեպրեզիդենտն էր Եվրոպայի համար, իսկ 1965—1969 թթ. այդ միջազգային ընկերության պրեզիդենտը:

Ներկա երրորդ Տերցագիական դասախոսության կրճատված թարգմանությունում բաց են թողնված սողանքների օրինակները, որոնք հեղինակի

¹ Մայամիում (Ֆլորիդա նահանգ, ԱՄՆ) 1966 թ. փետրվարի 1-ին կայացած Ամերիկայի քաղաքացիական շինարարների ընկերության շինարարական տեխնիկայի կոնֆերանսում երրորդ Տերցագիական դասախոսությունը: Ռուսերենից թարգմանեց տեխն. գիտ. թեկնածու Աշոտ Գուրբանյանը:

² Այդ դասախոսության թարգմանությունները հայերեն և ռուսերեն լեզուներով հրապարակվել են «Գեոտեխնիկայի պրոբլեմները» ժողովածուի մեջ, № 4, 1970 թ.:

վրթյունից և հոսունության ցուցանիշից, որի արժեքը կալի դիմադրություն-
ունում հայտնի է:

Մենացորդային դիմադրությունը սահմիւ

Աղ. 1-ում բերված սահքի դիմադրության որոշման լաբորատոր
լաբարդյունքները վերաբերում են առավելագույն պիկային դիմադրությանը, որը
դժերևան է եկել սահքի փորձի ժամանակ: Հայտնի է, որ եթե սահքի ցամաքեց-
ված փորձարկումներում քայքայումից հետո նմուշը շարունակել դեֆորմաց-
մանը, ապա նրա սահքի դիմադրությունը փոքրանում է և հասնում սահմանա-
վրդին մի ինչ-որ արժեքի, որը հետագա դեֆորմացիայի ընթացքում մնում է
հաստատուն (նկ. 1): Քայքայումից հետո գերկոնսոլիդացված պլաստիկ
կավերի համար սահքի դիմադրության նվազումը բավականին զգալի է և
մենացորդային սահքի դիմադրությունը կազմում է պիկային դիմադրության
լաբարժեքի մի մասը: Սահքի դեպքում մենացորդային ամրությունը շփման
մարտկոյթ ունի, չնայած պարտադիր չէ, որ ֆ. մեծությունը նորմալ ճնշումից
կախված չլինի: Փխրուն կավերում, իսկ գերկոնսոլիդացված պլաստիկ
կավերը ընդհանրապես փխրուն են լինում, սահքի մենացորդային դիմադրու-
թյունը իրենից ներկայացնում է սահքի ամրությունը լիովին զարգացած
սահեցման մակերևույթի երկայնությամբ:

Չորրորդ մեկնիչյան դասախոսությունում Սկեմպտոնը (1967), ընդհան-
րացրեց սահքի մենացորդային դիմադրության մասին մեր տեղեկությունները
և համեմատեց նրա արժեքները գերկոնսոլիդացված կավերում սողանքներից
հետադարձ ձևով հաշված սահքի դիմադրության հետ: Այս հոդվածում
Սկեմպտոնը երեք կարևոր եզրակացություն է անում:

1. Սահքի մենացորդային դիմադրության ֆ. պարամետրը կախված չէ
կալի սահքի սկզբնական դիմադրությունից և այնպիսի ֆակտորներից,
ինչպիսիք են նրա խոնավությունը և հոսունության ցուցանիշը: Թվում է, որ
կալի ֆ. արժեքը կախված է միայն նրա բաղկացուցիչ մասերի չափից,
ձևից և հանքարանական կազմից:

2. Գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավերում մի շարք սողանքներից
հետադարձ ձևով հաշվարկված փուլգման սահեցման մակերևույթի երկայ-
նությամբ միջին շոշափող լարումը ավելի մոտ է սահքի մենացորդային դի-
մադրությանը, քան պիկային դիմադրությանը. բնական լանջերի որոշ
սողանքների վերլուծումը ցույց է տվել, որ շոշափող լարումները համարյա
թե հավասար են սահքի մենացորդային դիմադրությանը:

3. Գերկոնսոլիդացված կավերում սողանքներին նախորդում է սահեցման
մակերևույթի առաջընթաց զարգացումը. բնական լանջերում, որոնցում
բավականին ժամանակ կա առաջընթաց քայքայման դեպքում սահեցման
մակերևույթի զարգացման համար, սահմանային կայունությունը կախված է
միայն սահքի մենացորդային դիմադրությունից:

Փորձ, ստացված կայուն լանջերի վերլուծումից

Աղ. 1-ում բերված ամլայինները դաշտային դիտումների եղած փորձի
միայն մի մասն է. նմանօրինակի աղյուսակի կարող էր կազմվել նաև մի
շարք կայուն լանջերի կայունության վերլուծման արդյունքների հիման վրա:
Այդպիսի աղյուսակը ցույց կտար, որ սողանքների մոտակա շրջաններում
կարող են գոյություն ունենալ լանջեր, որոնք հարյուրավոր տարիների
ընթացքում իրենց կայունության տեսակետից ոչ մի կասկած չեն առաջաց-
նում, չնայած. որ դրանց թեքության անկյունները անհամատեղելի են այն

⁴ Այսպիսի տարբերություն է դրված լարումների միավորներով արտահայտված սահքի
դիմադրությունը (shear strength) և սահքի ամրության (shear resistance) միջև. վերջինս
ներկայացնում է սահքի դիմադրության և էֆեկտիվ նորմալ լարումների հարաբերությունը:

⁵ Իր հոդվածում Սկեմպտոնը օգտագործում է եղջառ ճեղքվածքավոր կավեր՝ տերմինը
ներքևում շարադրվող պատճառներով, նրա արած եզրակացությունների համար ճեղքվածքները
էական չեն: Այդ պատճառով էլ ներկա հոդվածում նախապատվությունը տրվել է գերկոնսոլի-
դացված պլաստիկ կավեր տերմինին:

ցածր անկյունների հետ, որոնք ստացվում են տեղի ունեցած սողանքների հակադարձ ձևով հաշվարկման ղեկարգում: Կայուն և անկայուն լանջերի վերլուծման արդյունքների միջև եղած այդ տարբերությունը թվում է այնքան ավելի մեծ, որքան կոշտ է կավը:

Փլուզված և կայուն լանջերի ուսումնասիրության արդյունքների անհիմն թվացող այդպիսի բացատրությունը անկասկած կարող է կայահարման նրանում, որ լանջերի կայունությունը քննարկվող կավերի տեսակներում նախորդում է սահմանափակ է հանդիսանում: Առաջներում ենթադրում էին, որ ժամանակի ֆունկցիա է հանդիսանում: Առաջներում ենթադրում էին, որ փլուզման հապաղումը առաջանում էր ժամանակի ընթացքում սահբի դիմադրության նվազման դանդաղմամբ, բայց Սկեմպտոնի հայտնագործությունն այն մասին, որ առաջընթաց բայթայման ղեկարգում լանջերի փլուզմանը նախորդում է սահմանափակ անընդհատ մակերևույթի զարգացումը տանում է այդ կոնցեպցիայի վերանայմանը: Ներկայումս առավել հավանական է հանդիսանում այն, որ արագությունը, որով զարգանում է սահմանափակ մակերևույթը, կարող է փոփոխվել մի կավից մյուսին անցնելիս, և որ կոշտ կավերում այդ արագությունը կարող է լինել այնքան փոքր, որ սողանքի հապաղումը կարող է չափվել հարյուրավոր տարիներով:

Տեխնիկական պրոբլեմ

Անկասկած է, որ Սկեմպտոնի աշխատանքը հարցի քննարկման գործում իրենից ներկայացնում է մեծ առաջընթաց: Նրա արդյունքների անմիջապես կիրառումը կայանում է նրանում, որ հնարավորություն է լինում կանխագուշակել կավի սահբի ամենափոքր դիմադրությունը և այն լանջերի համար, որոնցում բավականին ժամանակ կա սահմանափակ մակերևույթի առաջընթաց զարգացման համար, կայունության սահմանային արժեքը կառավարվում է դիմադրության այդ մեծությամբ:

Սակայն, հիմնավորել կայունության բոլոր հաշվարկները սահբի մնացորդային դիմադրությամբ, կլինի ոչ ավելորդ պահանջական և արտակարգ թանկ որոշում: Դա հատկապես վերաբերում է կոշտ կավերում և կավային թերթաբարերում ժամանակավոր լանջերին:

Այդ պատճառով էլ անհրաժեշտ է պատասխանել այն հարցին, թե ինչպիսի պայմանների ղեկարգում ենք ստիպված լանջերի հաշվարկներում օգտագործել սահբի մնացորդային դիմադրությունը և երբ ենք կարող հիմնվել պիկային դիմադրության մի որևէ մասի վրա:

Եթե բացառենք այն ղեկարգը, երբ գոյություն ունի նախապես գոյացած մակերևույթ, որի երկայնությամբ սահբի դիմադրությունը արդեն նվազել է մինչև մնացորդային արժեքը, ապա այդ հարցի պատասխանը պահանջում է, որպեսզի մենք կարողանանք ճշտել այն պայմանները, որոնց ղեկարգում կարելի է սպասել առաջընթաց բայթայման զարգացմանը և որոշել այն ժամանակը, որն անհրաժեշտ է բայթայման անընդհատ մակերևույթի կազմավորման համար: Դեռևս շատ բան պետք է անել, այդ հարցերին դրական պատասխան տալու համար: Հետագա զարգացումը պահանջում է առաջին հերթին առաջընթաց բայթայման մեխանիզմի և դրա հետ կապված ֆակտորների հիմնավոր հասկացում և երկրորդ՝ տարբեր տեսակի նյութերի հատկությունների հիմնավոր իմացություն:

ԼԱՆԶԵՐԻ ԱՌԱՋԸՆԹԱՑ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ՄԵՆԱՆԻՉՄԸ

Ինչպես ցույց տրվեց, կարելի է ապացուցված համարել, որ որոշակի պայմաններում գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավերում և կավային թերթաբարերում սողանքներին նախորդում է փլուզման չրդհատվող մակերևույթի զարգացումը՝ առաջընթաց բայթայման մեխանիզմի մասնակցությամբ: Այդ պատճառով էլ այդպիսի կավերում լանջերի կայունության ուսումնասիրության հետագա զարգացումը ամբողջովին կախված է առաջընթաց բայթայման մեխանիզմի և այդ զարգացումը կառավարող ֆակտորների մասին գիտելիքների աճից:

Խնդրի մոտավոր լուծման համար պոստուլատ է առաջադրվում առաջընթաց քայքայման և սահեցման շրջահատվող մակերևույթի զարգացման հնարավոր մեխանիզմի գոյացումը: Այդ մոտեցումն ընդհանուր է, առանց գրունտների տեսակների ու լարումների և դեֆորմացիաների ճշգրիտ նկարագրության բննարկման: Նրա խնդիրն է կապել առաջընթաց քայքայման մոտավոր և հետևողական պատկեր, որը թույլ կտա հասկանալ պրոբլեմը և գնահատել գործոնները, օրինակ, գրունտի հատկությունները: Առաջընթաց քայքայման սկզբունքը

նկ. 2-ում ցույց է տրված հորիզոնի նկատմամբ α անկյուն կազմող կայուն լանջի մի փոքր հատված: Որոշենք այն լարումները, որոնք ազդում են գրունտի մակերևույթին զուգահեռ՝ Z խորությամբ տեղադրված հարթակի վրա: Այդ նպատակով բննարկենք $OAA'O'$ բլուրի հավասարակշռության պայմանները, Սկզբում OA հարթակի վրա ազդում են միայն շոշափող լարումներ, որոնք առաջանում են բլուրի կշռով, քանի որ կողմնային E ուժերը, որոնք ազդում են բլուրի ճակատային մասի վրա, ըստ մեծության հավասար են և փոխադարձաբար հակառակ: Բլուրի կշռով առաջացած շոշափող լարումը արտահայտվում է (1) բանաձևով և քանի որ լանջը կայուն է, այդ մեծությունը փոքր է սահքի պիկային դիմադրության արժեքից:

Որպեսզի սկսվի առաջընթաց քայքայումը, ինչ-որ մի տեղում լանջի անընդհատությունը պետք է որևէ ձևով խանգարվի: Ընդունված է (նկ. 2ա), որ դիմադրող բլուրի կողքին մինչև Z խորությունը արված է ուղղահայաց պատերով հանվածք: Հանվածքի հետևանքով OO' -ով կողքի հենարանի հեռացումը $OAA'O'$ բլուրում առաջացնում է ներքին լարումների վերադասավորում: Եթե միայն AA' -ը տեղավորված է այնքան հեռու OO' -ից, որ AA' -ի վրա կողմնային լարումը մնում է անփոփոխ, $OAA'O'$ բլուրի հավասարակշռությունը կարող է պահպանվել միայն այն պայմանի դեպքում, երբ OA -ի երկայնությամբ շոշափող ուժը մեծանում է E մեծության չափով, որը հավասար է AA' -ով հողի լրիվ ներքին կողմնային ճնշմանը (բնձ. 2): Լրացուցիչ շոշափող լարումները կբաշխվեն անհավասարաչափ: Ամենամեծ լրացուցիչ շոշափող լարումները կլինեն O կետում. շոշափող լարումների մոտավոր բաշխումը ցույց է տրված նկ. 26-ում: Եթե k -ն կոնցենտրացիայի ֆակտորն է, որը ցույց է տալիս OA մակերևույթով ամենամեծ է միջին լարումների հարաբերությունը, ապա E կողմնային ուժից առաջացած ամենամեծ կողմնային շոշափող լարումը՝ k -ն որոշվում է ըստ (3) բանաձևի և լրիվ շոշափող լարումը O կետում կորոշվի ըստ (4) բանաձևի: Այդ հավասարումը դուրս է բերված հավասարակշռության պայմանների հիման վրա, ընդունելով, որ շոշափող լարումները չեն գերազանցում սահքի դիմադրությունը:

Այն հարցը, թե կառաջացնի արդյո՞ք փորվածքը առաջընթաց քայքայում, կախված է վերևում բերված հավասարումով արտահայտված ամենամեծ շոշափող լարման մեծացումից՝ կալի պիկային դիմադրության նկատմամբ, դա կախված է ներքին կողմնային E ճնշման մեծությունից: Այն պայմանի դեպքում, երբ E -ի արժեքը բավականաչափ մեծ է, որպեսզի շոշափող լարման տեսական արժեքը գերազանցի սահքի պիկային դիմադրությունը, տեղի է ունենում տեղական փլուզում: Այն սկսվում է O կետում և տարածվում է այն մասում, որում լարումները գերազանցում են դիմադրությունը: Օրինակ, նկ. 26-ում տեղական քայքայումը տեղի կունենա մինչև P_1 -ը:

$OO'P_1P_1$ բլուրի հիմքում սահքի ժամանակ քայքայումը ամենից առաջ կնշանակի շոշափող լարումների նվազում OP_1 -ով, վերևում նշված տեսական մեծությունից մինչև պիկային մեծությունը: Համապատասխանաբար փոքրանում է կավի $OO'P_1P_1$ բլուրի ներքին կողմնային լարումը: Կավի առաձգական վարքի հետևանքով այդ կողմնային բեռնաթափումը կառաջացնի կավի ընդարձակում դեպի փորվածքի ուղղությունը, սահեցումով ըստ նոր կազմավորված OP_1 քայքայման մակերևույթի (նկ. 26):

Արդյունքում դիֆերենցիալ դեֆորմացիան (նկ. 26) քայքայման գոտու

լայնքով կորոշվի կավի ղեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայով և եթե այն բավականին մեծ է, ապա ղեֆորմացիան կարող է փոքրացնել սահքի դիմադրությունը՝ պիկային արժեքից մինչև մնացորդայինը: Այն պայմանի առկայության դեպքում, երբ սահքի մնացորդային դիմադրությունը փոքր է պիկայինի համեմատությամբ, քայքայումը և հետևաբար ղեֆորմացիան կառաջացնեն շոշափող լարումների խիստ փոքրացում OP_1 -ով և համապատասխանաբար՝ շոշափող լարումների մեծացումը P_1 -ից աջ գտնվող մակերև. վուլթով:

Դրա հետևանքով սկսվում է առաջինժամ քայքայում, և սահքի մակերև. վուլթը տարածվում է մինչև P_1 կետը: Դիտարկենք հետևյալ $P_1BB'P'$ բլոկի հավասարակշռությունը, որը սահմանափակված է BB' կտրվածքով և տեղադրված է P_1P_1' -ից այնպիսի հեռավորության վրա, որպեսզի BB' -ում կողմնային լարումների վրա չազդեն P_1 կետից ձախ տեղի ունեցածը (նկ. 2Յ): Ինչպես նախորդում, ուսումնասիրվում են P_1B բլոկի հիմքի երկայնությամբ ազդող լարումները, բայց տվյալ դեպքում լրացուցիչ շոշափող լարումները, որոնք կավում առաջացել են ներքին կողմնային լարումներով, կախված են բլոկի վերին և ստորին հատվածներում ազդող կողմնային E և E_p ուժերի տարբերությունից: Ամենամեծ շոշափող լարումը կլինի P_1 -ում և կարտահայտվի (5) բանաձևով: Եթե այդ մեծությունը մեծ է կավի սահքի պիկային դիմադրությունից, ապա տեղական քայքայումը դառնում է առաջինժամ: Հետևաբար, որքան փոքր է E_p -ի մեծությունը, այնքան մեծ է առաջինժամ քայքայման հավանականությունը:

Մինչև փորվածքի սկսումը E_p -ն հավասար էր E -ին: Տեղական բեռնաթափումը OP_1 -ի երկայնությամբ, այն բանից հետո, երբ տեղի է ունենում տեղական քայքայումը, E_p -ը փոքրանում է: Մենք չենք կարող ճիշտ հաշվել E_p -ի արժեքը, բայց ելնելով $OP_1P_1'O'$ բլոկի հավասարակշռությունից կարելի է գնահատել այն մաքսիմում արժեքը, որը կունենար E_p -ն: Եթե E_p -ն գերազանցում է այդ արժեքին, ապա շոշափող լարումները բլոկի հիմքի երկայնությամբ կգերազանցեն սահքի դիմադրությանը և բլոկը կսկսի սահել, առաջացնելով E_0 -ի փոքրացում: Այդ առավելագույն արժեքը որոշվում է ըստ (6) բանաձևի, քանի որ OP_1 -ի երկայնությամբ շոշափող լարումները քայքայումից հետո մոտավորապես հավասար են սահքի մնացորդային դիմադրությանը: Այդ հավասարումը բերում է պարզ եզրակացության, որ եթե սահք մնացորդային դիմադրությունը այնքան է փոքր կամ շեպի թեքությունը այնքան է մեծ, որ արդեն ձևավորված սահնգման մակերևույթի վրա անշարժ գտնվող կավի բլոկը սահում է, ապա առավելագույն արժեքը, որը կարող է ունենալ E_p -ն, կլինի շատ փոքր: Առավելագույն շոշափող լարումները P_1 կետում հավասար է ըստ (7) բանաձևի: Կլինեն մոտավորապես հավասար այն արժեքներին, որոնք գոյություն ունեն O կետում, երբ սկսել էր քայքայումը և քայքայման մակերևույթը կտեղաշարժվի P_1 -ից դեպի P_2 -ը: Եթե լանջի բարձրությամբ պայմանները չեն փոխվում, ապա առաջինժամ քայքայումը կշարունակի զարգանալ դեպի վերև՝ առաջացնելով սահնգման անընդհատ մակերևույթի աստիճանական զարգացում, որի երկայնությամբ սահքի դիմադրությունը նվազում է մինչև մնացորդային արժեքը:

Մյուս կողմից, եթե $s_r > \gamma z \cos \alpha \sin \alpha$, այսինքն, եթե սահքի մնացորդային դիմադրությունը այնքան մեծ է կամ շեպի թեքությունը այնքան փոքր է, որ իր հիմքի մոտ կտրված բլոկը չի ձգտում սահել, ապա E_p -ի արժեքը աստիճանաբար մեծանում է լանջի բարձրությամբ և առաջինժամ քայքայումը դադարում է փորվածքից մի որոշ հեռավորության վրա: Դա տեղի կունենա այնպիսի հեռավորության վրա, որտեղ E_p -ն կդառնա այնքան մեծ, որ $\tau_{\max}$ արդեն կազմավորված սահնգման մակերևույթի վերջում կլինի հավասար կավի սահքի պիկային դիմադրությանը:

Վերը շարադրվածից ենթադրվում է, որ առաջինժամ քայքայումը շարժվում է լանջին զուգահեռ ուղղությամբ: Այդ ենթադրությունը հիմնված չէ այն տեսական ապացույցի վրա, թե այդ ուղղությունը ունի պաշարի ամենա-

փոքր գործակիցը, այլ միայն իրական սողանքների դիտարկումների վրա, որոնք ցույց են տալիս, որ շատ դեպքերում քայքայման մակերևույթը շատ մոտ է մակերևույթին զուգահեռ լինելուն: Ներքևում ցույց կտրվի, որ շատ դեպքերում սահնգման մակերևույթը զարգանում է հորիզոնական կամ համարյա հորիզոնական ուղղությամբ:

Առաջընթաց փայլաման անհրաժեշտ պայմաններ

Հիմնվելով նկարագրված մեխանիզմի վրա, հնարավոր է ճշտել առաջընթաց քայքայման որոշ անհրաժեշտ պայմաններ:

Նախ և առաջ, որպեսզի սկսվի առաջընթաց քայքայումը, որը տանոս է դեպի քայքայման անընդհատ մակերևույթի զարգացմանը, կավի զանգվածի ինչ-որ մի տեղում կամ նրա սահմանագծում պետք է գոյություն ունենա անընդհատության բացակայություն. այստեղ կարող է սկսվել քայքայումը և կարող են տեղի ունենալ դեֆորմացիաներ, որոնք պահանջվում են նրա հետագա զարգացման համար: Անընդհատության այդ բացակայությունը իրենից կարող է ներկայացնել թեք էրոզիոն լանջ կամ փորվածք լանջի ստորոտում, կամ լինել փափուկ հողակտոր լանջի որևէ մասում:

Նյութի վարքի և հատկությունների նկատմամբ եղած պահանջները կարող են շարադրվել հետևյալ երեք կետերում. դրանցից յուրաքանչյուրում առաջընթաց քայքայման պոտենցիալ վտանգը արտահայտվում է հետևյալ կարևոր հարաբերությամբ:

1. Առաջընթաց քայքայման դեպքում անընդհատ մակերևույթի զարգացումը հնարավոր է, եթե միայն գոյություն ունեն կամ կարող են զարգանալ սահքի պիկային դիմադրությանը գերազանցող տեղական շոշափող լարումներ: Այլ հավասարազոր պայմաններում սահքի ժամանակ տեղական քայքայման վտանգը մեծանում է P_H/S_0 հարաբերության հետ միասին, որտեղ P_H — կողմնային ներքին լարումն է, S_0 — սահքի պիկային դիմադրությունն է:

2. Քայքայման մակերևույթի առաջխաղացումը պետք է ուղեկցվի սահքի դեպքում քայքայման գոտում տեղական դեֆորմացիալ դեֆորմացիայով, որը բավականաչափ կլինի քայքայման սահմաններից դուրս կավը դեֆորմացնելու համար: $\varepsilon_H/\varepsilon_p$ հարաբերությունը հանդիսանում է չափ, որում ε_H կողմնային դեֆորմացիան գերազանցում է քայքայման պիկային ε_p դեֆորմացիային, որից հետո կողմնային լարումները նվազում են:

3. Սահքի դիմադրության լրիվ մոբիլիզացումից հետո կավը պետք է ցուցաբերի դիմադրության մեծ և արագ նվազում, որ քայքայման գոտում չարգելակի դեֆորմացիալ դեֆորմացիայի համար անհրաժեշտ շարժմանը և հետևաբար լարումների կենտրոնացման գոտու տեղաշարժմանը դեպի հարևան չխախտված կավի գոտին: S_0/S_c հարաբերությունը արտահայտում է դեֆորմացման հետևանքով կավի փափկեցման աստիճանը:

Առաջընթաց քայքայման դեպքում սահնգման անընդհատ մակերևույթի զարգացումը հնարավոր է, եթե միայն բավարարվում են բոլոր երեք պայմանները, այսինքն՝ եթե այդ բոլոր երեք կարևոր հարաբերությունները գերազանցում են սահմանային արժեքներին:

ԳԵՐԿՈՆՍՈՒԴԱՅՎԱՏ ՊԼԱՍՏԻԿ ԿԱՎԵՐԻ ԵՎ ԿԱՎԱՅԻՆ ԹԵՐԹԱՔԱՐՆԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Գերկոնսոլիդացված կավերի և կավային թերթաքարերի հատկությունների մասին ռացիոնալ պատկերացում կազմելու համար, նամանավանդ այն հատկությունների, որոնք պայմանավորում են առաջընթաց քայքայման վտանգը և այն բոլոր գործոնների հաշվառումը, որոնք կարող են ազդել այդ հատկությունների վրա, հետևենք տիպական կավի երկրաբանական պատմության բոլոր փուլերին, սկսած նստվածքների կազմավորման ժամանակից մինչև ներկա ժամանակը, երբ այն հանդիպում է խորը հանքավայրերում և թունիկներում՝ չհողմնահարված կավի տեսքով կամ ոչ խորը բացվածքներում և բնական լանջերում՝ հողմնահարված կավի տեսքով:

Զեղման հարված կալի հատկությունները

Այս աշխատության մեջ քննարկվում են հիմնականում կավճային կամ երրորդական ժամանակաշրջանների ծովային կավերը, որոնք նստվածք են տվել միլիոնավոր տարիներ առաջ: Մածկող գրունտների կշռի աստիճանական մեծացման հետևանքով կավերը կոնսոլիդացվել են, մինչև որ վերջապես ձևեր է բերվել ամենամեծ կոնսոլիդացիոն ճնշումը: Հավանական է, որ ակտիվ կավային միներալների համեմատաբար բարձր պարունակությամբ այդ պլաստիկ կավերը պահանջեցին զգալի ժամանակ, որպեսզի դրանց խոնավությունը հասներ հավասարակշռության:

Հայտնի է, որ գրունտի սեղմման մի մասը ունի վերականգնվող բնույթ: Վերականգնվող մասը մեծանում է կավային մասնիկների պարունակությամբ հետ միասին, և քննարկվող տեսակի պլաստիկ կավերում առաջացնում է ընդհանուր սեղմման զգալի մասը: Նկ 3a-ում ցույց են տրված տրոլված պլաստիկ կավի կոմպրեսիոն փորձարկման արդյունքները. AA_1 — կուսական կոմպրեսիոն կորն է, A_2B — խոնավության նվազեցումն է երկրորդական կոնսոլիդացիայի դեպքում և BC — վերականգնման կորն է դեֆորմացիայից հետո նույնի բեռնաթափման. դեպքում: Ընդունվում է, որ սեղմման վերականգնվող մասը նախ և առաջ հանդիսանում է կավի ճկուն թեփուկանման մասնիկների դեֆորմացիայի արդյունքը: Երբ բեռնվածքը հանվում է, մասնիկները ըստ էության ձգտում են վերականգնել իրենց սկզբնական ձևը, եթե դրանք չէին դեֆորմացվել՝ առաձգականության առժամանից վեր: Երբ կավը կոնսոլիդացվում է տվյալ բեռնվածքի տակ, այն պարունակում է դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի որոշ քանակ: Վերականգնվող էներգիայի քանակը կախված է կոնսոլիդացիոն ճնշումից և կավի հատկություններից. ընդհանրապես, որքան պլաստիկ է կավը, այնքան մեծ է նրա դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիան:

Վերադառնալով կավային նստվածքին: Կոնսոլիդացիայից հետո կավը երկար ժամանակ թողնվել է առանց բեռնվածքի փոփոխման: Մածկող գրունտների մեծ կշռի, ժամանակի և ուրիշ ազդակների հետևանքով տեղի են ունեցել կավի ֆիզիկական և քիմիական փոփոխություններ. այդ փոփոխություններն առաջացնող պրոցեսները միասին կոչվում են դիագենեզ: Կավի դիագենեզի բնույթի վերաբերյալ քիչ բան է հայտնի: Սակայն, երևելով առաջացած էֆեկտներից կարելի է ընդունել իբրև պոստուլատ, որ մասնիկների միջև շփման գոտում լարումները շատ մեծ են և տեղի է ունենում վերաբյուրեղացում, առաջացնելով շփվող մասնիկների ամեն մի դույզմի ֆիզիկական հարմարեցվածություն. այստեղ ծագում են մոլեկուլյար կապեր և կարող է զարգանալ աղհեղիա: Բացի դրանից, մասնիկների միջև կապը կազմավորվում է շփման գոտիներում ցեմենտացնող ագենտների նստվածք առաջացնելու հետևանքով: Ներկա աշխատանքում կոմբինացված էֆեկտը՝ անկախ նրա բնույթից, կոչվում է դիագենետիկական կապեր կամ պարզապես կապեր:

Այսպիսով, բարձր ճնշման դեպքում, երկար ժամանակից հետո կավի կառուցվածքը դառնում է ավելի ու ավելի ամուր և բեկուն՝ առանց ծավալի փոփոխության: Դիագենետիկական կապերի ամրությունը կախված է կոնսոլիդացիոն ճնշումից, միներալային կազմից, ծակոտկենային հեղուկից, ջերմաստիճանից, ժամանակից և կարող է փոխվել մի կավից մյուսը: Այն դեպքում, երբ կապերը շատ ամուր են, կավը լինում է կոշտացած և դասակարգվում է որպես փափուկ ժայռապար:

Դիագենետիկական կապերի էֆեկտներից մեկն է կավի ծավալի հետագա փոփոխության հանդեպ դիմադրության մեծացումը բեռնվածքի մեծացման դեպքում: Լրացուցիչ բեռն առաջացնում է ծավալի շնչին փոփոխություն, երբ այն չի գերազանցում p_c (նկ. 3) որոշակի արժեքից: p_c -ի մեծությունը, որը սովորաբար կոչվում է նախակոնսոլիդացման ճնշում, որոշվում է առանց կապերի կավի ծավալի փոփոխության դիմադրության և կապերի կոզմից առաջացած պահանջարկին դիմադրության գումարով: Դրա համար էլ

առնենամեծ նախապես գոյություն ունեցող կոնսոլիդացման ճնշման որոշման հնարավորությունը, կոմպրեսիոն փորձարկումների միջոցով, սահմանափակված է այնպիսի կավերով, որոնք չեն ենթարկվել դիագնոզին:

Հետագա երկրաբանական ժամանակաշրջանի ընթացքում, կավային նստվածքները բեռնաթափվել են որոշ ծածկող գրունտները էրոզիայից հեռացվելու հետևանքով: Շատ շրջաններում էրոզիայի մեծ մասը տեղի է ունեցել մինչև պլեյստոցենը, այլ շրջաններում որոշ էրոզիա տեղի է ունեցել նաև սառցակալման ժամանակաշրջանում: Դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի առկայության հետևանքով կավը ձգտում է ընդարձակման և խոնավության մեծացման, բայց նրա ընդարձակմանը արգելակում են մասնիկների միջև եղած կապերը: Առավել մեծ աստիճանի բեռնաթափման դեպքում կապերը դառնում են ավելի լարված և քայքայվում են շատ ավելի մեծ քանակով: Այդ պատճառով էլ երկրի մակերևույթին մոտենալով խոնավությունը աճում է:

Քանի որ գրունտների ստրուկտուրայում կապերի քայքայումը կախված է ժամանակից, ապա ուռչման պրոցեսը կախված է ժամանակի երկրորդային էֆեկտից: Հավանական է, որ որոշ կավային թերթաքարերի հավասարակշռված խոնավությունը դեռևս ձեռք չի բերվել: Այսպիսով, վերջնական խոնավությունը կախված է դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայից, կապերի դիմադրությունից և դրանց քայքայումից: Դեֆորմացիայից հետո վերականգնման BD կորագծեր (նկ. 3ա) ցույց է տալիս ուժեղ կապերով կավի բեռնաթափումից հետո հավասարակշռված խոնավությունը, իսկ BC կորագծերը ցույց է տալիս ուռչել, թույլ կամ առանց կապերի կավերի համար:

Նստվածքագոյացման ընթացքում ուղղաձիգ էֆեկտով լարման մեծացումը առաջացնում է հորիզոնական էֆեկտով լարման մեծացում, որը կախված է սահքին դիմադրելու կավի հատկությունից: Թույլ կավերի համար բերած հորիզոնական լարումը կլինի ավելի մեծ, քան ուժեղ կավերի համար: Նկ. 3b-ում AB կորագծերը ցույց է տալիս լարման փոփոխությունը բեռնավորման ժամանակ և համապատասխանում է նկ. 3ա-ում կուսական կոմպրեսիոն կորագծին: Բեռնաթափման ժամանակ կավը ընդարձակվում է, քանի որ ունի դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիա: Քանի որ կավը հնարավորություն ունի ուղղաձիգ, բայց ոչ հորիզոնական ուղղությամբ ազատ ընդարձակվելու, ապա ուղղաձիգ էֆեկտով լարման փոփոխություններն եղել են ավելի մեծ, քան հորիզոնական էֆեկտով լարման փոփոխությունները: Այն ցույց է տրված նկ. 3b-ում BC' կորագծով, որը իրենից ներկայացնում է կապեր չունեցող կավի վարքը: Այնուամենայնիվ, եթե կավում դարձացել են դիագնոստիկական կապեր, ապա դրանք կարգելակեն կավի ընդարձակմանը և ծոված մասնիկներով ստեղծված կազմվածքը չի կարող առաջացնել մեծ հորիզոնական լարումներ բեռնաթափման ժամանակ: Այսպիսով, մասնիկների միջև եղած կապերի շնորհիվ կավը իրեն պահում է որպես առաձգական մարմին՝ պլաստիկան բարձր գոթակցով, և գումարային հորիզոնական լարումները լինում են ավելի փոքր, քան լարումներն առանց կապերի կավերի համար. դա երևում է BD կորագծից նկ. 3b-ում: Այդ պատճառով էլ բեռնաթափման դեպքում գերկոնսոլիդացված կավի վարքի վրա դիագնոստիկական կապերի աղեղնությունը կայանում է հորիզոնական լարումների զգալի փոքրացման մեջ՝ կավի կազմվածքում դեֆորմացիայի թաքնված էներգիայի մեծ քանակի պահպանման շնորհիվ:

Կավային նստվածքներում ամեն մի խորություն վրա գոյություն ունի հնարավոր հորիզոնական լարումների վերին սահման: Հորիզոնական և ուղղաձիգ էֆեկտով լարումների հայտնի տարբերության դեպքում կավում շոշափող լարումը կգերազանցի սահքի դիմադրությանը և կարող է տեղի ունենալ քայքայում: Գերկոնսոլիդացված կավերի բեկունության հետևանքով կարող են զարգանալ սահքի հարթություններ և տեղի ունենալ փոքր տեղաշարժեր: Տեղաշարժերը, որոնք պահանջվում են հորիզոնական լարումները մինչև դրանց սահմանային արժեքները փոքրացնելու համար, կախված են կավի

կազմվածքի կոշտությունից, իսկ դա, նույնպես, կախված է կապերի դիմադրությունից: Ուժեղ կապերով կոշտ կավային թերթաքարերում հորիզոնական լարումների փոքրացման համար պահանջվում են սոսկ փոքր տեղաշարժեր, այն դեպքում, երբ թույլ կամ առանց կապերի կավերի համար հարկավոր են մեծ տեղաշարժեր:

Հողմնահարման ազդեցությունը

«Հողմնահարմարություն» տերմինը այստեղ օգտագործվում է կավի վերին շերտերի բոլոր փոփոխությունների նկարագրման համար՝ ներառյալ ֆիզիկական փոփոխությունները, որոնք շեն առաջացել կլիմայական պայմանների պատճառով: Դիագնոստիկ կապերով գերկոնսոլիդացված բաց կավերի հողմնահարմարության պրոցեսում կարելի է զանազանել դեզինտեգրացիայի առաջին փուլը, որի ընթացքում կապերի քայքայման դեպքում կավի կազմվածքը խախտվում է, և երկրորդ փուլը, որի ընթացքում տեղի են ունենում քիմիական փոփոխություններ և միներալների երկրաբանական մասշտաբով կավերում առաջին փուլը, ժամանակի երկրաբանական մասշտաբով, տեղի է ունենում բավականին արագ, և եթե քննարկումը սահմանափակենք միանշանակ կապերի հատկությունների փոփոխություններով, ապա այդ փուլը ամենաէականն է:

Դեզինտեգրացիայի զլխավոր էֆեկտը կայանում է այն կապերի աստիճանաբար քայքայման մեջ, որոնք ձգտում էին պահպանել կավի սկզբնական կառուցվածքը: Ըստ կապերի քայքայման չափի, դրանց մեջ պարփակված ղեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիան ազատվում է և առաջացնում կավի ընդարձակում, խոնավություն մեծացում և սահքի դիմադրության փոքրացում: Անհրաժեշտ է, որ այդ ընդարձակումը ուղղված լինի մակերևութին ուղղահայաց: Քանի որ կավի ընդարձակումը մակերևութին զուգահեռ ուղղությամբ անհնար է, ղեֆորմացիայի էներգիայի աստիճանաբար ազատվելը կառաջացնի այդ ուղղությամբ էֆեկտիվ լարումների մեծացում: Այդ մակերևութին զուգահեռ լարումների մեծացումը տեղի կունենա նույնպիսի արագությամբ, ինչպես քայքայվում են կապերը և կշարունակվի այնքան ժամանակ, մինչև ղեֆորմացիայի վերականգնվող ամբողջ էներգիան չազատվի:

Դեզինտեգրացիայի ժամանակ տեղի ունեցող ընդարձակման ընդհանուր մեծությունը կախված է կավի ղեֆորմացիայի թաքնված էներգիայի բանալից: Եթե կապերը շատ թույլ են, ապա ղեֆորմացիայի էներգիայի մեծ մասը ցրվում է բեռնաթափման ժամանակ և այդ դեպքում ղեզինտեգրացիայի էֆեկտը փոքր է լինում: Եթե կապերն ուժեղ են, ապա ղեֆորմացիայի էներգիայի միայն մի փոքր մասն է կորչում բեռնաթափման ժամանակ, ղեզինտեգրացիայի գոտում ընդարձակումը լինում է շատ մեծ:

Դիագնոստիկ կապերի քայքայման զլխավոր աղղակը ղեֆորմացիան է: Դեֆորմացիան առաջանում է բազմաթիվ ֆիզիկական պրոցեսներից: Դրանց էֆեկտը փոքրանում է կախված խորությունից: Դիագնոստիկ կապերով կավերում ընդհանրապես կարելի է տարբերել գոտիներ, որոնցում ղեզինտեգրացիայի պրոցեսը զարգացել է տարբեր աստիճանով:

Մակերևութից անմիջապես ներքև գտնվում է լրիվ ղեզինտեգրացիայի գոտին: Այդ գոտին ենթարկվում է սառեցման, ջերմաստիճանային փոփոխությունների և կրկնվող շորացման ու խոնավացման: Այդ պրոցեսներին ուղեկցող ղեֆորմացիաները էֆեկտիվ կերպով առաջացնում են կավի կառուցվածքի քայքայում: Այդ գոտում ինտենսիվ կերպով ընթանում են նաև քիմիական պրոցեսներ՝ կավի կավային միներալների օքսիդացում ու տարրալուծում: Խոնավությունը և սահքի դիմադրությունը այդ գոտում առավել մեծ չափով կախված են կլիմայական պայմաններից, բան մայրական խոնավությունից և սահքի դիմադրությունից:

Այդ գոտուց ներքև տեղափոխված է զարգացած ղեզինտեգրացիայի գոտին: Այդտեղ տեղի ունեցող ղեֆորմացիաները կարող են առաջանալ էֆեկտիվ լարումների ցիկլային փոփոխությունից, որոնք առաջանում են

գետնաշրջերի տատանումների և վերը գտնված գրունտների սեզոնային սառցակալման պատճառով ծախսականային լարման ցիկլային փոփոխություններից: Ռելիեֆի պայմաններից կախված, ղեզինտեգրացիայի պրոցեսում կարևոր դեր կարող են խաղալ սահբի ղեֆորմացիաները: Այդ գոտին ընդհանրապես ունի բաց ճեղքերի սիստեմ: Օսմոտիկական ճնշումը, որը տեղի է ունենում ճեղքերում անուշամեջքների ցիկլոլայացիայի հետևանքով, կարող է բերել կավի թրջման: Որոշ քիմիական փոփոխություններ ընթանում են նաև այդ գոտում: Այդ գոտին ընդհանրապես զգալիորեն փափուկ և խոնավ է, քան ներքև դասավորվածներին:

Առավել ցածր է տեղավորված միջին ղեզինտեգրացիայի գոտին: Այստեղ ենթամակերևութային պայմանների ազդեցությունը չի զգացվում: Սակայն, ղեֆորմացիաները և այն խորությունը, որում դրանք զարգանում են, զգալիորեն մեծ են լանջի, քան հորիզոնական մակերևութի տակ տեղավորված լինելու դեպքում: Հենց այդ գոտում զարգանում է ղեֆորմացիայի շատ կարևոր տեսակ: Այդ գոտում մանրամասն ուսումնասիրման դեպքում նկատվում է կետից կետ խոնավության զգալի փոփոխություն, քան ավելի ներքև տեղավորված անփոփոխ կամ անարատ կավում: Այդ փոփոխություններն արտացոլում են կավի միներալոգիական կազմը և ցույց են տալիս հոսունության սահմանի փոփոխությունը: Դեֆորմացիայի էներգիայի քանակը, որը կուտակված է բեռնվածության տակ գտնվող կավում, շատ մեծ չափով կախված է կավային միներալների տեսակից, և իրոք, որքան մեծ է ակտիվ կավային միներալների պարունակությունը, այնքան մեծ է ղեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիան: Այդ պատճառով էլ, միներալոգիական կազմի ամեն մի փոփոխություն տանում է անհավասարաչափ ուռչման և կավը ենթարկվում է տեղական անհավասարաչափ ղեֆորմացիայի: Դա էլ իր հերթին բերում է հարևան կավի ծավալի խախտման և կապերի հետագա քայքայման: Շատ հնարավոր է, որ այդ տեղական ղեֆորմացիաները լինեն բավականաչափ մեծ և առաջացնեն տեղական քայքայում սահբին և ճեղքվածքների զոլացում: Փոքր տարածականություն ունեցող ճեղքվածքների ինտենսիվ և ոչ կանոնավորված սիստեմը, որը բնորոշ է կավային թերթաքարերի ղեզինտեգրացիոն գոտում համար, կարող է այդպիսով իր ծագմամբ պարտական լինել կապերի անհավասարաչափ քայքայմանը և ղեֆորմացիայի թափված էներգիայի տեղաբաշխմանը:

Գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավի օրինակ կարող է ծառայել Յուտլանդիայի Լիթլ-Բելթ էոցենյան հասակի կավը, որն ունի մոնոմորֆիտների մեծ պարունակություն: Նրա երկրաբանական պատմությունը ցույց է տրված նկ. 4-ում: Հողմնահարության աստիճանից կախված այն պահպանում է դիագենետիկական կապերի այս կամ այն մասը: Նույնիսկ այնպիսի ուժեղ ազդեցություն, ինչպիսին է կավի նմուշի տրորումը չի վերացնում այդ կապերը:

Պլաստիկ կավային թերթաքարերի օրինակ է ծառայում լավ ուսումնասիրված Հարավ-Սասկաչևանում Բերպոոյի վերին-կավճի կավային թերթաքարերը (Կանադա): Դրանք ունեն մոնոմորֆիտների մեծ պարունակություն: Դրանց երկրաբանական պատմությունը ցույց է տրված նկ. 5-ում: Այն ուժեղ դիագենետիկ կապերով խիստ գերկոնսոլիդացված կավ է: Հողմնահարության տարբեր ազդակների ազդեցության տակ կապերի քայքայման չափից կախված ղեֆորմացիայի էներգիան ազատվում է և տեղի է ունենում զգալի ուռչում: Նկ. 6-ում ցույց է տրված թերթաքարերում թունելի լայնության փոքրացումը ուռչելու հետևանքով: Փափուկ ղեզինտեգրացված թերթաքարերի գոտում ուռչումը մեկ ու կես տարվա դիտարկումներում կազմել է 28-ից մինչև 53 սմ:

Գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավերի և կավային թերթաքարերի հատկությունների ամփոփում

Գերկոնսոլիդացված կավերի և կավային թերթաքարերի հատկություն-

ների մասին հետեւողական պատկեր ստանալու համար անհրաժեշտ է երկու հասկացողութիւն՝ զեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիան և դիագնոստիկական կապերը: Բնական պայմաններում կատարված դիտարկումներից կարելի է մոտավորապես գնահատել զրանց կարեւորութիւնը: Հիմնվելով կարելի է մոտավորապես գնահատել զերկոնսոլիդացված կավերի և կավային թերթազաշտում տարրեր տեսակի զերկոնսոլիդացված կավերի և կավային թերթաբարների վարքի ուսումնասիրման վրա, նպատակահարմար է լեռնային ապարների այդ ընտանիքը ըստ դիագնոստիկական կապերի ամբողջական հատկանիշների ենթարաժանել երեք խմբի:

1. Գերկոնսոլիդացված կավեր՝ զերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավեր թույլ կամ առանց կապերի:

2. Կավային թերթաբարներ՝ զերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավեր լավ զարգացած դիագնոստիկական կապերով:

3. Թերթաբարներ՝ զերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավեր ուժեղ զարգացած դիագնոստիկական կապերով:

Ներքեւում բերվում է այդ երեք խմբերի էական հատկութիւնների ամփոփումը:

Գերկոնսոլիդացված կավերում զեֆորմացիայի վերականգնման էներգիայի մեծ մասը ցրվում է զեֆորմացիայից հետո վերականգնման ժամանակ, բայց կողմնային զեֆորմացիաների սահմանափակ լինելու հետեւանքով վերականգնվող էներգիայի մի մասը պահպանվում է և հորիզոնական լիդացված կավում, որոնք գտնվում են ծածկող շերտերի նույն ճնշման տակ: Հողմնահարման ազդեցութիւնը սահմանափակվում է սոսկ մակերևութին զուգահեռ կողմնային ճնշման մի փոքր ավելացմամբ: Հողմնահարմութիւնը ուղեկցվում է սահբի դիմադրութիւն փոքրացումով՝ մասամբ խոնավութիւն մեծացման, մասամբ էլ ձաքճքման հետեւանքներով:

Կավային քերթաբարներում կավի ուռչումը բեռնաթափման ժամանակ սահմանափակված է և բեռնաթափված կավի խոնավութիւնը փոքր է, բան զերկոնսոլիդացված կավինը: Կավային թերթաբարներում զեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի մեծ մասը ղեռ փակված է դիագնոստիկ կապերով: Հորիզոնական լարումները փոքր են թույլ կապերով կավերում, սահբի ղեռ: Հորիզոնական լարումները փոքր են թույլ կապերով կավերում, սահբի ղեռ: Հողմնահարմութիւնը առաջացնում է կապերի աստիճանական քայքայում: Դեֆորմացիայի փակ էներգիայի մեծ բանակի հետեւանքով կապերի քայքայումը առաջացնում է ուղեկցում, որը տանում է խոնավութիւն մեծ ավելացման և սահբի դիմադրութիւն էական փոքրացման: Միաժամանակ մակերևութիւնը զուգահեռ տեղի է ունենում լարումների ղգալի մեծացում՝ կավի ընդարձակվելու հետեւանքով:

Թերթաբարներում դիագնոստիկական կապերը այնքան ուժեղ են, որ զերկոնսոլիդացված կավը ձեռք է բերել թույլ ժայռապարի բնույթ: Բեռնաթափման ժամանակ ուղեկցում համարյա թե տեղի չի ունենում, և զրա հետեւանքով էլ թերթաբարներում պահպանվում է զեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիան: Թերթաբարներում հորիզոնական լարումները փոքր են իսկ սահբի դիմադրութիւնը շատ մեծ: Հողմնահարմութիւնը ազդեցութիւնը կայանում է կապերի աստիճանական քայքայման մեջ: Թերթաբարները բաժանվում են բեկորների, որոնց չափերը փոքրանում են ղեղինտիզացիայի ընթացքում և այդ թերթաբարները վերջում վերածվում են զերկոնսոլիդացված կավի: Այդ պրոցեսն ուղեկցվում է զեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի աստիճանաբար ազատումով, որը տանում է կողմնային լարումների գործուն ծավալման և մեծացման: Դեղինտիզացիայի չափից կախման սահբի դիմադրութիւնը ղգալիորեն փոքրանում է:

Հետագայում ուսումնասիրվում են միայն զերկոնսոլիդացված կավեր և կավային թերթաբարները:

ԳԵՐԿՈՆՍՈՒԴԱՅՎԱՄ ԿԱՎԵՐՈՒՄ ԵՎ ԿԱՎԱՅԻՆ ԹԵՐԹԱՔԱՐԵՐՈՒՄ
ԼԱՆՁԵՐԻ ՔԱՅՔԱՅՈՒՄԸ

Տարբեր տեսակի գերկոնսոլիդացված կավերի զգայունությունը առաջին քայլի փայլալույսի վերաբերմամբ

Շարադրվածից երևում է, որ տարբեր տեսակի գերկոնսոլիդացված կավերը առաջին քայլի զգայունությունը շատ ավելի է ցածր, քան իրականում լինում է:

Որքան ավելի է գերկոնսոլիդացված կավը, այնքան մեծ է նրա դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի պարունակությունը և առաջին քայլի վտանգը: Որքան զսպարհի է լանջը և խորն է փուլում առաջացնող հանվածքը, այնքան ավելի բարենպաստ են պայմանները առաջին քայլի համար: Գերկոնսոլիդացման միևնույն աստիճանի և միևնույն տողորմաֆիայի դեպքում լանջի վաղը որոշում են երեք հիմնական չափանիշներ՝ դիագնոստիկական կապերի ամրությունը, կավի հողմնահարումը և նրա պլաստիկության աստիճանը:

Տարբեր տեսակի կավերի առաջին քայլի վտանգի համեմատական դասակարգման փորձը տրված է աղ. 2-ում, որի համար զննատված են երեք էական հարաբերություններ:

Թույլ դիագնոստիկ կապերով գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավերում առաջին քայլի վտանգը մեծ է: Այն վերաբերվում է ինչպես շողմնահարված, այնպես էլ հողմնահարված կավերին:

Ուժեղ դիագնոստիկ կապերով գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավերում դեֆորմացիայի վերականգնող էներգիան փակված է և այդ պատճառով էլ շողմնահարված կավերում առաջին քայլի վտանգը փոքր է: Երբ կապերը հողմնահարության տարբեր գործոնների ազդեցության տակ աստիճանաբար քայքայվում են, դեֆորմացիայի էներգիան ազատվում է, և եթե այդ տեղի է ունենում ծածկող շերտերի ցածր ճնշման դեպքում, ապա առաջին քայլի վտանգը շատ մեծ է:

Գծադրված պլաստիկությամբ գերկոնսոլիդացված կավերի առաջին քայլի վտանգը շատ փոքր է: Ակտիվ կավային մասնիկների ցածր պարունակության պատճառով դեֆորմացիայի վերականգնող էներգիան և կոնսոլիդացիոն լարումների նվազումն ուղեկցող դեֆորմացիաները շատ փոքր են: Բացի դրանից, ցածր պլաստիկությամբ կավերը բեկուն չեն և դիմադրության ուժի զգալի փոքրացում՝ քայքայման սահմաններից դուրս դեֆորմացիայի ժամանակ չեն ցուցաբերում:

Չողմնահարված կավերում լանջերի փայլալույսի մեխանիզմը

Գոյություն ունեն տարբեր ուղիներ, որոնցով կարող է սկսվել առաջին քայլի քայքայումը և դրա հետագա զարգացումը կարող է տարբեր լինել կախված այնպիսի գործոններից, ինչպիսիք են տեղագրությունը, երկրաբանական կառուցվածքը և կավի հատկությունները: Ստորև ուսումնասիրվում են երկու տարբեր դեպք, որոնք տիպական են շողմնահարված գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավերում տեղի ունեցող մի շարք սողանքների համար:

Առաջին դեպքը ներկայացված է նկ. 7ա-ում, որտեղ ցույց է տրված հանվածքի լողորմաֆիայի ծածկույթային նյութում և շողմնահարված թույլ կապերով գերկոնսոլիդացված կավում: Առաջին քայլի զգայունությունը փուլում անընդհատ մակերևույթի զարգացումը տեղի է ունենում նկ. 2-ում նկարագրված սխեմայի համաձայն: Միակ տարբերությունը կայանում է նրանում, որ լանջի առկայության շնորհիվ (նկ. 7ա) հորիզոնական լարումները կավում հանվածքի հեռավորությունից կախված մեծանում են: Հորիզոնական լարումների այդ մեծացումը հավանաբար մեծացնում է առաջին քայլի վտանգը:

Ինչպես ցույց է տրված նկ. 7ա-ում առաջին քայլի տանում է սահեցման անընդհատ մակերևույթի զարգացմանը, որը ձգտում է լինել հորիզոնական կամ հետևել շերտավորության մակերևույթների ուղղությանը: Երբ սահեցման մակերևույթը զարգանում է ինչ-որ երկարությամբ և սահեց-

ման մակերևույթից վերև տեղավորված ամբողջ բլուկի դիմադրությունը հորիզոնական տեղաշարժին այնքան է նվազում, որ չի կարողանում հակադռել գրունտի դանգվածից վերև գտնվող հողի ակտիվ ճնշմանը, առաջընթաց բայքայումը վեր է ածվում խոշոր սողանքի (նկ. 7a):

Կախված այն բանից, թե ինչ է կատարվում սողանքային դանգվածների հետ և ի՞նչ շափով են դրանք պահում ետևում գտնվող լուսնը, առաջընթաց բայքայումը կարող է շարունակվել զարգանալ, առաջացնելով նոր խոշոր սողանքներ: Հույժ գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավի խոր նստվածքների փորվածքներում առաջընթաց բայքայումը կարող է սկսվել նաև այն դեպքում, երբ վերին ավազային շերտի վրայով փորվածք է արվում շողմնահարված գերկոնսոլիդացված կավում (նկ. 7b): Մածկող շերտերի ճնշման փոքրացման հետևանքով հորիզոնական և ուղղաձիգ լարումների հարաբերությունը կավում՝ փորվածքի հատակից ներքև մեծանում է: Փորվածքի մի ինչ-որ խորությունում այդ հարաբերությունը կարող է գերազանցել այն կրիտիկական մեծությունը, որի դեպքում շոշափող լարումը դառնում է սահքի դիմադրության պիկային արժեքին հավասար և տեղի է ունենում պասսիվ բայքայում սահքի դեպքում: Այդ բայքայումը առաջացնում է փորվածքի հատակի բարձրացում, որն ուղեկցվում է փորվածքի մոտերքում կավի հորիզոնական ուղղությամբ տեղաշարժումով: Այդ տեղաշարժումն առաջացնում է փորվածքի մոտերքի կավի հորիզոնական կողահանման փոքրացում, և ինչպես նկարագրված է վերը, կավում բերում է շոշափող լարումների տեղական կոնցենտրացիայի՝ լանջի տակ: Եթե այդ շոշափող լարումները գերազանցեն սահքի դիմադրության պիկային մեծությունը, ապա տեղի կունենա առաջընթաց բայքայում և կառաջանա փլուզման անընդհատ SS մակերևույթ:

Շոշափողված երկու դեպքերում էլ սողանքների բնորոշ առանձնահատկությունը կայանում է նրանում, որ լանջի շարժումը հիմնականում հորիզոնական ուղղությամբ է, կամ ուրիշ կերպ ասած, առաջընթաց բայքայումը ձգտում է զարգանալ այն մակերևույթով, որը մեծ մասամբ ուղղված է հորիզոնական ուղղությամբ կամ հետևում է շերտավորման մակերևույթին:

Լանջերի փայլայման մեխանիզմը հոդմանհարված կավերում

Գերկոնսոլիդացված կավի վերին բաց շերտի ուղման մեխանիզմի վերը շարադրված կոնցեպցիան թույլ է տալիս հասկանալու փլուզման բազմաթիվ դեպքեր, որոնք տեղի են ունենում երկրի մակերևույթին քիչ թե շատ զուգահեռ փլուզման մակերևույթներով: Այդ սողանքներն, ընդհանրապես, հեշտ են ճանաչվում խորության հետ համեմատած դրանց մեծ երկարությամբ և սահեցման մակերևույթի դիրքից՝ այն գոտու ստորին մասում, որտեղ տեղի է ունենում հողմնահարումը: Այդ տեսակի մի շարք սողանքների վերլուծումը ցույց է տալիս, որ սահեցման մակերևույթով ծանրության ուժի ազդեցության տակ առաջացած միջին շոշափող լարումը, շատ ավելի փոքր է, քան կավի սահքի դիմադրությունը, բայց ունի նույն կարգի մեծություն, ինչ կավի սահքի մնացորդային դիմադրությունը: Սողանքները պետք է հաջորդականորեն առաջանան սահեցման կազմավորված մակերևույթի ուղղությամբ և քանի որ բայքայումն այդ մակերևույթը նախկինում գոյություն չէր ունեցել, ապա կարելի է եզրակացնել, որ այն կազմավորվել է տեղի ունեցած սողանքին նախորդած առաջընթաց բայքայման ընթացքում: Քանի որ ծանրության ուժի տակ առաջացած շոշափող լարումները փոքր են սահքի դիմադրությունից, ապա առաջընթաց բայքայումը կարելի է բացատրել հաշվի առնելով ներքին լարումները: Հենց այստեղ է երևան գալիս մակերևույթին զուգահեռ կողողությունը կավի ընդարձակվելու ձգտումը: Ուստի հողմնահարման գոտում կարող են գոյություն ունենալ կողմնային լարումներ, որոնք բավականաչափ մեծ են կավի տեղական քայքայում առաջացնելու համար: Նման երևույթները հետազայում կրեբեն մակերևույթին զուգահեռ, սահեցման անընդհատ մակերեսի զարգացմանը:

Առաջընթաց քայքայումը լուսարանելու համար, դիտարկենք ուժեղ դիագնոստիկ կապերով գերկոնսոլիդացված պլաստիկ կավով մի լանջ: Դիցուք տեղի է ունեցել մի որոշ հողմնահարում մինչև Z խորությունը (նկ. 8a), որի հետևանքով տեղի է ունեցել ղեֆրոմացման պարփակ էներգիայի ազատում և մակերևույթին զուգահեռ լարումների հետագա մեծացում: Խոնավությունը այստեղ նույնպես մեծանում է, և սահքի դիմադրությունը ցածր է, քան նրա տակ գտնվող չհողմնահարված կավում:

Լանջի ստորոտում տեղի է ունենում էրոզիա (նկ. 8b) և հողմնահարված գոտում առաջանում է դադիթափ լանջ: Կողմնային հենարանի վերացման հետևանքով հողմնահարված գոտում կողմնային լարումները արդեն պետք է փոխանցվեն ներքև գտնվող հողմնահարված կավին շոշափող լարումներով SS հարթությունով: Այդ շոշափող լարումները ավելանում են ծանրության ուժից առաջացած շոշափող լարումներից, առաջացնելով շոշափող լարումների կոնցենտրացիա՝ հենց լանջի ստորոտի տակ: Եթե շոշափող լարումները գերազանցում են կավի սահքի պիկային դիմադրությանը, ապա տեղի է ունենում տեղական սողվածք և սկսվում է առաջընթաց քայքայում:

Քանի որ սահքի պիկային դիմադրության մեջ կցման բաղադրիչը ունի զգալի մեծություն, ապա հողմնահարման գոտու սահմաններում կավի սահքի դիմադրությունը խորության հետ միասին մեծանում է աննշան չափով: Բայց ինչպես ծանրության ուժով, այնպես էլ ներքին կողմնային լարումներով առաջացած շոշափող լարումները մեծանում են խորությանը համեմատական: Դա բացատրում է, թե ինչու սահնցման մակերևույթը ձգտում է սկսվելու այնքան խորը, ինչպես դա հնարավոր է, և իրոք, բնության մեջ այդ մակերևույթը հաճախ գտնվում է հողմնահարման գոտու ամենացածր մասում:

Նկ. 8c-ում ցույց է տրված այն պատկերը, երբ մակերևույթին զուգահեռ գոյացել է սահնցման մակերես և հասել P կետին: Սահնցման մակերեսի ուղղությամբ տեղի է ունենում սալի շարժում լանջիվար և սահքի դիմադրությունը սահնցման մակերևույթով նվազում է մինչև մնացորդային արժեքը: Հետագան կախված է լանջի թեքությունից: Եթե այդ թեքությունն այնքան փոքր է, որ ծանրության ուժի տակ առաջացած շոշափող լարումները սահնցման մակերևույթով փոքր կլինեն սահքի մնացորդային դիմադրությունից, ապա սահնցման մակերևույթով անջատված սալը չի շարժվելու լանջիվար և առաջընթաց քայքայումը չի վերածվի սողանքի: Եթե լանջը բավականին դադիթափ է, ապա շոշափող լարումը կգերազանցի մնացորդային դիմադրությանը, և սալը կձգտի շարժվել լանջիվար (նկ. 8c): PP' մակերեսով կողմնային լարումները կնվազեն, հնարավոր է կդառնան զրոյական: Եթե սահնցման մակերեսի առաջնային եզրում՝ շոշափող լարումները կավում, որոնք առաջանում են ծանրության ուժից և AA' մակերեսով զարգացող կողմնային լարումներից, գերազանցեն սահքի պիկային դիմադրությանը, ապա կշարունակվի սահնցման մակերևույթի լանջիվեր առաջընթաց քայքայումը:

Առաջընթաց քայքայման զարգացման առագությունը

Առաջընթաց քայքայման ընթացքի արագության իմացությունը մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում, քանի որ այդ գործոնը կառավարում է սողանքների դանդաղեցումը: Ընդհանրապես այդ արագությունը կախված է այնպիսի գործոններից, ինչպիսին են լանջի թեքությունը, կողմնային ճնշման արժեքը և կավի պիկային դիմադրությունը: Հնարավոր է տարբերել պայմանների երեք կոմբինացիա:

1. Եթե կողմնային ներքին լարումներն այնքան բարձր են, որ տեղական շոշափող լարումներն ավելի մեծ են, քան կավի սահքի չցամաքեցված դիմադրությունը, ապա առաջընթաց քայքայումը զարգանում է շատ արագ:

2. Եթե կողմնային ներքին լարումներն այնքան ցածր են, որ տեղական շոշափող լարումներն ավելի փոքր են, քան սահքի չցամաքեցված դիմադրությունը, բայց ավելի մեծ են, քան սահքի ցամաքեցված դիմադրությունը,

ապա արագ քայքայում տեղի չի ունենում: Սակայն, մեծ լարումների տեղա-
կան գոտում կավը կծգտի դիրտաքվել և խոնավությունը մեծանում է
այնպիսի արագությամբ, ինչպիսի արագությամբ որ լցվում է ջուրը: Ժամա-
նակի ընթացքում տեղի է ունենում խոնավության մեծացում և սահճի
դիմադրության փոքրացում շրամաքեցված արժեքից մինչև ներքևի ցամա-
քեցվածը: Այսպիսով, արագությունը, որով տեղի է ունենում առաջընթաց
քայքայումը, կառավարվում է ժամանակով, որը պահանջվում է սահճի
շրամաքեցված դիմադրության արժեքից մինչև գործող շոշափող լարման
արժեքը իջեցնելու համար:

3. Եթե ժանրության ուժի և ներքին կողմնային լարումների ազդեցու-
թյան տակ տեղական շոշափող լարումները փոքր են, բան սահճի ցամաքեց-
ված դիմադրությունը, ապա քայքայում տեղի չի ունենա նույնիսկ այն
ժամանակ, երբ խոնավությունը առաջընթաց քայքայման գոտում հավասա-
րակշռության մեջ մտնի լարումների պայմանների հետ: Առաջընթաց
քայքայում տեղի կունենա միայն այն դեպքում, երբ ժամանակի ընթացքում,
կավի անընդհատ դեզինտեգրացիայի և դեֆորմացիայի հետևանքով պարփակ
էներգիայի ազատումը կմեծացնի կողմնային լարումները: Սողանքի հապա-
ղումը ալյուրի դեպքերում տեղում է մի բանի տարի կամ հարյուրամյակները:

Քննության ենթարկելով սողանքների զարգացման ժամանակը, անհրա-
ժեշտ է նմանապես հաշվի առնել գետնաքերի մակարդակի սեզոնային
փոփոխությունները, որոնք կարող են առաջացնել գրունտի սահճի դիմադ-
րության տատանումներ ոչ միայն սահեցման ապագա մակերևույթի չփոփո-
ված մասում, այլ նաև սահեցման մակերևույթի այն մասում, որն արդեն
կազմավորվել էր: Առաջընթաց քայքայման վերջնական արդյունքը կայանում
է նրանում, որ կանջի մակերևույթի տակ տեղավորված կավի ծավալը
անջատվում է և սահճի դիմադրության ներքևի սահմանի երկայնությամբ
նվազում է մինչև մնացորդային արժեքը: Թե որքանով կծավալվի առաջընթաց
քայքայումը մինչև որ լանջը սկսի սողալ, կախված է այնպիսի գործոններից,
ինչպիսին են լանջի թեքությունը և եզրային պայմանները: Վերջապես,
սողանքի ժամանակի վրա մեծ ազդեցություն են ունենում սահեցման
մակերևույթը, սահճի դիմադրության տատանումները, որոնք առաջանում են
կլիմայական պայմաններից:

ԼԱՆՋՆՐԻ ՍՈՂՔԸ ԳԵՐԿՈՆՍՈՒԴԱՑՎԱԾ ԿԱՎԵՐՈՒՄ

Սողքի մեխանիզմը

«Լանջերի սողքը» մի ընդարձակ տերմին է, որն ինժեներական երկրա-
բանության մեջ օգտագործվում է աննկատելի արագությամբ լանջիվար
ընթացող տեղափոխությունը նկարագրելու համար: Սահմանափակվելով
կավային լանջերում սողքի բնարկումով, անհրաժեշտ է տարբերել՝ ձմեռա-
յին սառեցման գոտում կատարվող սուխֆլուկցիան ներկա հողվածում
բնարկված մեծ խորությունում տեղի ունեցող սողքից: Նույնիսկ առարկայի
ալյուրի սահմանափակումով հնարավոր է, որ հայտնվեն ունենա կավային
լանջերում սողքի տարբեր տեսակների բազմազանություն: Գերկոնսոլիդաց-
ված կավի վերին շերտերում շարադրված կոնցեպցիան, այնուամենայնիվ,
թույլ է տալիս բացատրելու ալյուրի կավերում լանջերի տեղաշարժման գոնե
մեկ տեսակը: Քանի որ սողքի բնույթի վերաբերյալ շատ քիչ բան է հայտնի,
հետաքրքիր կլինի սույն հողվածի մեջ մտնել ալյուրի տղքի և վերը
նկարագրված առաջընթաց քայքայման միջև եղած կապի հակիրճ բնար-
կումը:

Կավերում տարբեր երկրաբանական ծագում և պատմություն ունեցող
լանջերի վարքի ուսումնասիրությունը թույլ է տալիս եզրակացություն
անելու այն մասին, որ լանջերի սողքը ավելի որոշակի է դառնում մայրական
կավի կամ լեռնային ապառի կոշտության և կարծրության մեծացման
դեպքում: Սողքի նկատմամբ առավել հակված մարդերից մեկը դանվում է

Շվեյցարիայի արևմտյան մասում, որտեղ մայրական ապարները թույլ ցեմենտացված արգիլիտային թերթաքարեր են, ձեռք են բերել մեծ դիմադրություն բարձր ճնշման ազդեցության տակ (դրանք կարող էին նաև ենթարկվել որոշ մեթամորֆային փոփոխությունների), բայց ուշում և քայքայվում են ջրի և օդի հետ շփվելիս: Հաջորդն է սողը, որ նկատվել է քիչ ավելի փափուկ կավային թերթաքարերից կազմված լանջերում՝ Հարավային նվրոպայում, Միացյալ Նահանգներում տարածված թերթաքարերի մի շարք շրջաններում, ինչպես, օրինակ, Պենսիլվանիայում և Կալիֆորնիայի արևմտյան ծովափում: Փորձից հայտնի է, որ Շվեդիայի, Նորվեգիայի և Կանադայի լանջերում, որտեղ կավերը փափուկ են և նորմալ կամ համարյա նորմալ կոնսոլիդացված, տեղի է ունենում շատ դանդաղ սողը, կամ այն ընդհանրապես բացակայում է: Նույնը վերաբերում է նաև լյութին: Այդ պատճառով էլ անհավատարի չէ, որ դիտարկվող սողքի բնույթը կապված է մայրական նյութի երկրաբանական պատմության հետ: Ենթադրվում է, որ սողքը ծավալի դանդաղ մեծացման հետ կապված երևույթ է և դեֆորմացիայից կոտակված էներգիայի մեծ քանակություն պարունակող հույժ գերկոնսոլիդացված կավերն ու թերթաքարերը ուղեկցվում են դեզինտեգրացիայով: Համաձայն սույն ենթադրության այդ տեսակ սողքի անհրաժեշտ պայմաններն են՝

1. Մայրական գրունտը կամ ապառը պարունակում է կավային մասնիկներ, դրանց բեռնվածության տակ հանդես են բերում պարզ արտահայտված առաձգական հատկություններ: Իսկ քիմիական և միներալոգիական փոփոխությունները, որոնք տեղի են ունենում, երբ կավը գտնվում է լրիվ բեռնվածության տակ, այնքան ուժեղ չէ, որպեսզի վերաբյուրեղացման կամ նման պրոցեսների հետևանքով խախտվեն կավային մասնիկների առաձգական հատկությունները:

2. Կապեր, որոնք զարգացել էին, երբ կավը գտնվում էր ամենամեծ կոնսոլիդացիոն ճնշման տակ, ունեն բավականաչափ դիմադրություն բեռնաթափման ժամանակ դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի էական մասի պահպանման համար. այդ կապերը քայքայվում են, երբ կավը ենթարկվում է հողմնահարման տարբեր ֆիզիկական և քիմիական ազդակների ներգործության:

3. Դեֆորմացիայի էներգիան, որն ազատվում է կավի ստրուկտուրայի քայքայման ժամանակ հողմնահարման հետևանքով, բավարար է կողմնային լարումների մեծացման համար մինչև այնպիսի մեծություն, որպեսզի ծանրության ուժի հետ զուգակցված դրանք կարողանան առաջացնել կավի զանգվածի առաջընթաց քայքայում:

Վերին կեղևում կավային թերթաքարերի դեզինտեգրացիայի ժամանակ կատարվող երևույթներն ասում են, որ սողքի առավել կարևոր գործոնն է կողմնային ընդարձակման անընդհատ մեծացումը և միաժամանակ դիմադրության փոքրացումը, որն ուղեկցվում է խոնավության մեծացմամբ: Անխուսափելի է, որ ինչ-որ մի տեղ, լանջի պայմանները կլինեն նպաստավոր առաջընթաց քայքայման սկսման համար, ինչպես օրինակ լանջի ստորոտը: Հենց որ սկսվում է շարժումը, դրանք զարգանում են լանջիվեր, որը նկարագրվել է նախորդ բաժնում:

Սողքի հետագա զարգացումը կախված է լանջի թեքությունից և քայքայման գոտում կավի սահքի մնացորդային դիմադրությունից:

Եթե լանջը այնքան զառիթափ է, որ մնացորդային դիմադրությունը փոքր է շոշափող ուժերից, սողքը վերջին հաշվով բերում է սողանքի, ինչպես նկարագրված է վերևում: Սողանքը մերկացնում է գրունտում թարմ մակերևույթը և պրոցեսը նորից սկսվում է:

Այն արագությունը որով լանջը կավային թերթաքարերում «հասցվում է», դրանով իսկ որոշվում է կավի վերին շերտերի դեզինտեգրացիայի արագությունը:

Եթե ծանրության ուժի ազդեցության տակ զարգացող շոշափող լարում-

ները քայքայման գոտում հավասար են սահքի մնացորդային դիմադրությանը, լանջը ենթարկվում է դանդաղ կայունացված սողքի և շարժումը շի բերում սողանքի: Սողքի ընդհանուր մեխանիզմը կարող է բաժանվել երկու փուլի: Առաջին փուլում կազմավորվում է անընդհատ քայքայման գոտի՝ վերը նկարագրված առաջընթաց քայքայման դեպքում: Երբ ներքև պատկած կավից այդ ճանապարհով շերտ է անջատվում, սկսվում է սողքի շարժման երկրորդ փուլը: Սկզբունքորեն շերտի պաշարի գործակիցը հավասար է մեկի: Կավի ամեն մի կողմնային ընդարձակումը հետագա դեզինտեգրացիայի ժամանակ առաջացնում է համապատասխան շարժում, և քանի որ լանջով ներքև սողալու դիմադրությունը լինում է անշշան, տեղի է ունենում սողք՝ լանջիվար:

Իհարկե, շարժումը կլինի ոչ կանոնավորված և անհամասեռ: Սողքին ուղեկցվող ուժեղ ճաքճքման հետևանքով ծակոտկենային ճնշումը քայքայման գոտում զգալիորեն տատանվում է տեղումների ժամանակ:

Այդ պատճառով էլ սողքը ունի սեղոնային բնույթ: Քանի որ շարժումները նպաստում են ավելի քիչ խախտված կավի և անարատ կավի բեկորների դեզինտեգրացիային, ապա դա տանում է մնացորդային դիմադրության հետագա նվազեցման և սողքի տեղական արագացման:

Բավականաչափ փոքրաթեք լանջերում ծանրության ուժից առաջացած շոշափող ուժերը փոքր են, քան սահքի մնացորդային դիմադրությունը. այդ լանջերը չեն ենթարկվում զրավիտացիոն սողքի: Թուլացման կետերում կարող են տեղի ունենալ ներքին լարումներից առաջացող որոշ կողմնային շարժումներ, բայց դրանք չեն ազդի լանջի կայունության վրա: Ժամանակի ընթացքում վերին շերտը փափկում է և ներքին կողմնային լարումները նվազում են. գլխավոր լարումների հարաբերության ամենամեծ արժեքը ֆունկցիա է հանդիսանում կավի սահքի դիմադրությունից:

Լանջերի սողի դիտարկումները Կալիֆոռնիայում, ԱՄՆ

Կավային լանջերի սողքի վերաբերյալ շատ քիչ հետազոտություններ են հրատարակվել: Դրանց են վերաբերում Կալիֆոռնիայի արևմտյան ծովափի մի քանի լանջերի սողքի պատկերի բավականաչափ լրիվ նկարագրությունը, ներառյալ երկու լանջ՝ համեմատաբար ուժեղ կապերով երրորդական հասակի հուլժ գերկոնսոլիդացված ծովային կավերում: Լանջերն ունենին տարբեր թեքություններ, ուղղաբերձ դարափից մինչև փոքրաթեք լանջերը (9°): Հետաքննությունները ներգրավել էին նաև ծակոտկենային ճնշման և տարբեր խորություններում՝ ինկլինոմետրների միջոցով շարժումների չափումներ: Ուսումնասիրված լանջերից մեկը ուներ 40 մ բարձրություն, շատ փոքր թեքություն 10° անկյունով (նկ. 9): Լանջը ցուցաբերում է շատ թե քիչ անընդհատ սողունություն՝ շարժման միջին արագությունը տարում մոտ 30 սմ է: Ինկլինոմետրական չափումների արդյունքներից (նկ. 9) կարելի է անել կարևոր եզրակացություն, որ սողքը առաջանում է վերին շերտի սողունությունից՝ 14 մ խորությունում տեղադրված լավ արտահայտված սահեցման մակերևույթի կամ քայքայման նեղ գոտու երկանությունը: Դրավիտացիոն շոշափող լարումները սահեցման այդ մակերևույթի երկանությունից մոտավորապես հավասար են կավի սահքի մնացորդային դիմադրությանը ($\varphi_r \approx 10-12^\circ$): Թվում է, որ այդ լանջը տիպիկ օրինակ է, երբ անընդհատ սողքը առաջանում է դեզինտեգրացիայի հետևանքով կավի կողմնային ընդարձակումից. այդ մասնավոր դեպքում քիչ է հավանական, որ սողքը կբերի սողանքի: Հետազոտությունները ցույց տվին, որ նույն շրջանում լանջերը ունեն թեքություն 9 -ից մինչև 28° : Ընդունելով $c' = 0$ այդպիսի լանջերի կայունությունը պահանջում է, որ φ' կազմի 12 -ից մինչև 45° : Շրջանի պատմությունը պարզորոշ ցույց է տալիս, որ ժամանակի ընթացքում բոլոր լանջերը, որոնց թեքությունը գերազանցում է $10-12^\circ$ փվելու են, բայց քայքայման ժամանակը կարող է լինել շատ մեծ: Աստիճանաբար սողանքի տանող տեղություն ֆակտորը որոշակիորեն կապված է սողքի

հետ: Այսպիսով, լանջերի կայունությունը փոքրանում է կավի մակերևույթի մերկացման տեղողությունից և այդ ժամանակամիջոցի ընթացքում սողքի ընդհանուր մեծությունից կախված: Դիտարկումները ցույց են տալիս, որ հենց այդ կավերի համար, որոնք ունեն 65—70% հոսունության սահման և պլաստիկության սահմանից զգալիորեն փոքր բնական խոնավություն, պահանջվում է զգալի ղեֆորմացիա ստրուկտուրայի քայքայման և կավին՝ ահաբի մնացորդային դիմադրության բերելու համար:

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ճապոնիայում, հույժ գերկոնսոլիդացված կավային թերթաբարեքում ահավոր սողանքը նկարագրող հաշվետվության մեջ, այդ հարցով զբաղվող ինժեներ-գրունտաբանը ստիպված էր եղրակացություն անելու, որ «սողանքային սատանան կարծես թե ծիծաղում է մարդկային անձեռնհասության վրա»: Յավոր սրտի, այս հողվածք ունիչ լավեց այդ լավ հաստատված դրույթը փոխելու համար: Հողվածի նպատակն էր պարզապես մի փորձ կատարել այդ սողանքային սատանային շրջապատելու և նրա բնույթն ուսումնասիրելու համար: Այդ փորձը, համենայն դեպս, ցույց տվեց, որ եթե պետք է մեկ անունով անվանել առավել ամենաամուր կավերի քայքայմանը բերելու ուժեղ ազդակը, ապա այն հավանաբար կլինի «ղեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիան»: Այդ հարցի պարզաբանման համար քննարկվել են գերկոնսոլիդացված կավերի ինժեներական երկրաբանությունը և այն հնա-դարյան ուղիները, որոնցով կավային լանջը սողանքի դեպքում հասնում է քայքայման, անկախ այն բանից, որ նա ունի զառիկող թեքություն և կավի սահմանի մեծ դիմադրություն: Ներկա հետազոտության մեջ հիմնավորման այս մեթոդը կարող է հանրագումարի բերվել հետևյալ կետերում:

1. Եղած բոլոր փաստերը առանց կասկածի հաստատում են, որ գերկոնսոլիդացված կավերում և կավային թերթաբարեքում լանջերի քայքայմանը նախորդում է սահեցման անընդհատ մակերևույթի զարգացումը՝ առաջընթաց քայքայման մեխանիզմով, որում սահքի դիմադրությունը պլուրգրեսիվորեն նվազում է պիկայինից մինչև մնացորդային արժեքը:

2. Որակային կարելի է ապացուցել, որ առաջընթաց քայքայման դեպքում սահեցման մակերևույթի զարգացումը պլաստիկ գերկոնսոլիդացված կավերում հնարավոր է, եթե բավարարվում են հետևյալ երեք պայմանները: Առաջին, երբ ներքին կողմնային լարումները բավականաչափ մեծ են լարումների կոնցենտրացիա առաջացնելու համար, առաջ շարժվող սահեցման մակերևույթով, որում շոշափող լարումները գերազանցում են սահքի պիկային դիմադրությունը: Երկրորդ, կավը պետք է պարունակի բավականին լանակությամբ ղեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիա, որը սողքի ուղղությամբ անհրաժեշտ է ընդարձակման և քայքայման գոտում ղեֆորմացիայի առաջացման համար: Քանի որ կողմնային լարումների մեծությունը հիմնականում կառավարվում է ղեֆորմացիայի էներգիայով, ապա պարզվում է, որ լանջի առաջընթաց քայքայման վտանգը հիմնականում կախված է մեկ տրոժոնից՝ ղեֆորմացիայի վերականգնող էներգիայից, որը մինչև այժմ չէր քննարկվում կայունության սովորական գնահատումներում: Երրորդ, սահքի մնացորդային դիմադրությունը պետք է համեմատաբար փոքր լինի սահքի պիկային դիմադրությունից:

3. Այդ պատճառով էլ անհրաժեշտ է վերանայել գերկոնսոլիդացված կավերի ինժեներա-երկրաբանական հատկությունները՝ առավել ուշադրություն դարձնելով ղեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիայի վրա: Այդ ստանդարտության ժամանակ պարզ դարձավ, որ որոշ կավերում ղեֆորմացիայի էներգիան վերականգնվում է լարումների փոփոխության հետ միա-ամանակ, իսկ ուրիշ կավերում այն «փակված» է, և այդ պատճառով էլ միջապես առկա չէ: Այն բանի բացատրությունը, թե ինչու ղեֆորմացիայի էներգիան կուտակված է որոշակի կավերում, կայանում է նրանում, որ այդ

անակների և գտնված է, որ մեծ քանակությամբ սողանքներ (մոտ 55%)
 ճեղի են ունեցել ուժեղ դիագենետիկ կապերով գերկոնսոլիդացված կավերի
 ճեղման հարման գոտում: Սողանքների հաջորդ մեծ խումբը (մոտ 35%)
 գրեթե է կել թույլ կապերով գերկոնսոլիդացված կավերում, շատ դեպքերում
 միարակի չի եղել որոշել, թե սողանքները ինչպիսի կավերում են առաջացել՝
 ճեղման հարմած թե ճեղման հարմած: Միայն փոքր քանակությամբ սողանք-
 անք են առաջացել ուժեղ դիագենետիկ կապերով ճեղման հարմած կավերում
 (մոտ 10%), և դրանց մեծ մասը իրենցից ներկայացրել են բնական աղետ-
 անք, որոնցում ներգրավված են եղել շատ բարձր լանջեր: Այս հանգամանքը
 ցույց է տալիս, որ տարբեր տեսակի կավերում սողանքների հարաբերական
 ճեղման հարմածի գնահատականը, որը բխում է ներկա կոնցեպցիայից, որա-
 վայան ճիշտ է: Վերջապես, ընտրվել են մի շարք սողանքներ, որոնց
 պարզացման մանրագնիներն դիտարկումները ապացուցեցին որ առաջին թա-
 քայթայման մեխանիզմը կարող է որակապես բացատրել սողանքների պատ-
 ճառներն ու զարգացումը:

7. Հետազոտությունը շոշափել է նաև կավային լանջերի սողքի հարցը:
 Դիտումները ցույց տվին, որ սողքը կարող է նույնպես կապված լինել
 ճեղման հարման գոտում դեֆորմացիայի պահեստված էներգիայի ազատման
 հետ՝ և հետևաբար, ուժեղ դիագենետիկ կապերով գերկոնսոլիդացված
 կավերում իրենց ներկայացնում է ընդհանուր երևույթ:

8. Վերջապես, որոշ հիմքեր կան ենթադրելու, որ գերկոնսոլիդացված
 կավերում և կավային թերթաբարերում լանջերի կայունության բարձր պո-
 լիմը սերտորեն կապված է այդ կավերի ինժեներա-երկրաբանական առանձ-
 նահատուկ հատկությունների հետ, հատկապես, որ դրանք պարունակում են
 դեֆորմացիայի վերականգնվող էներգիան: Ժամանակի հապաղումը, որը
 դիտվում է որոշ կավերում, դրված է այն փաստով, որ դեֆորմացիայի այդ
 էներգիան փակված է դիագենետիկ կապերով, որոնք քայքայվում են միայն
 այն ժամանակ, երբ կավը ենթարկվում է ճեղման հարման:

PROGRESSIVE FAILURE OF SLOPES IN OVERCONSOLIDATED PLASTIC CLAYS AND CLAY SHALES¹

Dr. Laurits Bjerrum

Editor's note

The Third Terzaghi lecture given by the outstanding Norwegian
 scientist Dr. Laurits Bjerrum (1918—1973) who has passed away
 prematurely is of exceptional interest for the understanding of the
 landslide mechanism in the overconsolidated clays. The propounded con-
 cept on the liberation of the recoverable strain energy stored during the
 consolidation process and on the role of diagenetic bonds in this process
 opens great prospects at the study of the landslide mechanism in areas
 with a complicated geological history.

Dr. Laurits Bjerrum's scientific potential and the creative activity
 where truly unusual. It is enough to tell that in 1966—1967 only he
 delivered three outstanding lectures at the most important forums on soil

¹ The Third Terzaghi lecture given to the Structural Engineering Conference of
 the American Society of Civil Engineers in Miami, Florida on February 1, 1966 and
 published in Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, vol. 93,
 SM5, 1967, p. 1—49; see also Norwegian Geotechnical Institute, Publication Nr. 77,
 Oslo, 1968, p. 1—29.

mechanics: the Seventh Rankine lecture "Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlement of buildings" held before the British Geotechnical Society in London; the Special lecture "Effect of structure on the shear behaviour of normally consolidated quick clays"² delivered at the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks in Oslo; and the present Third Terzaghi lecture. His swan song was the remarkable General Report "Problems of soil mechanics and construction on soft clays" presented to the Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering held in Moscow in 1973 which he could not read unfortunately.

Dr. Bjerrum combined this immense scientific work with the leadership of the greatest Norwegian Geotechnical Institute the Director of which he has been from the moment of its organization until his death, with the creation of the Terzaghi's library and the guidance of the International Society on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vice-President for Europe in 1961—1965 and President in 1965—1969).

In the present abridged translation of the Third Terzaghi lecture many examples of landslides, quoted by the author from the publications and numerous references were omitted. The Editorial Board offers its apologies for these excisions forced by the place requirements.

George Ter-Stepanian

² Translation of this lecture into Armenian and Russian was published in Transactions "Problems of Geomechanics" No 4, 1970.