

ФАКТИЧНЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЕВ ПРЕДСКАЗАНИЯ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНОВ¹

Докт.-инж. МИЧИТАКА САИТО²

От редактора. Один из самых удивительных успехов в области инженерной геологии за последнее время—чрезвычайно точное предсказание в 1969 г. докт.-инж. Мичитака Саито времени начала оползня Такабаяма в Японии—время катастрофы было определено с ошибкой, составляющей всего 6 минут! Краткие сведения об этом оползне и о способе предсказания времени обрушения склона появились на английском и японском языках в нескольких последовательных изданиях. Ввиду того, что прогноз оползней имеет важное значение, во время своего пребывания в Японии в 1977 г. по приглашению Японского оползневого общества для чтения лекций я попросил докт.-инж. М. Саито подготовить более полную статью о применяемых в Японии методах предсказания оползней для ее публикации в «Проблемах геомеханики». Докт.-инж. М. Саито весьма любезно принял мое предложение и прислал в Ереван обещанную статью на английском языке, которая и была включена в сборник, намеченный к изданию в 1978 г. По не зависящим от нас обстоятельствам издание сборника задержалось до 1982 г. За это время с согласия редактора докт.-инж. М. Саито опубликовал свою статью на английском языке, с кратким содержанием на японском языке, в сборнике трудов Корпорации «OYO Technical Report» с соответствующей ссылкой (Saito, 1979). Исходя из этого, редакция нашла более целесообразным опубликовать статью докт.-инж. М. Саито на русском языке полностью, а ее сокращенное содержание—на армянском и английском языках.

Г. И. Тер-Степанян

Реферат. В статье дается описание трех способов, применяемых для предсказания обрушения склонов, а именно: 1) грубой оценки, основанной на установленной скорости деформации во вторичной области ползучести; 2) близкой оценки путем вычисления или графического анализа с использованием заменяющей логарифмической формулы и 3) окончательного точного вычисления времени, основанного на линейности полулогарифмического графика зависимости между деформацией и временем до разрушения. Рассмотрев несколько случаев из практики, автор приходит к выводу, что метод предсказания времени обрушения, основанный на характеристиках ползучести-разрушения, эффективен и достоверен.

ВВЕДЕНИЕ

Метод предсказания обрушения склонов, основанный на характеристиках ползучести-разрушения грунта, был опубликован последовательно в трудах международных конгрессов по механике грунтов и фундаментамостроению. Я бы хотел объяснить ход разработки этого

¹ Перевод с английского А. Г. Тер-Степанян.

² Директор и главный инженер Корпорации ОЮ, Токио, Япония.

метода, представить тенденции изучения характеристик ползучести-разрушения и привести фактическую оценку метода с анализом случаев обрушения склонов.

Слово «предсказание», по-видимому, имеет разные аспекты и в каждом случае по-разному воспринимается разными людьми.

В некоторых случаях это означает отбор таких склонов, на которых в ближайшем будущем могут возникнуть разрушения или сильные движения, хотя они в настоящем и кажутся устойчивыми. Наши нынешних знаний, тем не менее, недостаточно для подобных суждений, и настаивать на этом значило бы навязывать одностороннее предвзятое мнение. Верно ли это, можно будет оценить путем изучения случаев из практики.

Иногда слово «предсказание» используется как синоним для выражения «степень опасности обрушения склонов» и означает возможность возникновения многочисленных разрушений склонов в пределах некоторого ограниченного участка. В данном случае эта возможность будет определяться некоторыми условиями, как например количеством или интенсивностью осадков или таянием снега.

В большинстве случаев, однако, «предсказание» относится к образованию оползней или обрушений на конкретном склоне и означает определение места, размеров, типа и времени начала быстрых движений. Среди этих вопросов наиболее актуальным является изучение времени образования оползня или обрушения склона. Поэтому в дальнейшем можно ограничиться тем значением «предсказания», которое относится ко времени обрушения.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРЕДСКАЗАНИЯ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕДОПУСТИМО БЫСТРЫХ ДВИЖЕНИЙ НЕУСТОЙЧИВЫХ СКЛОНОВ

Разработка метода предсказания

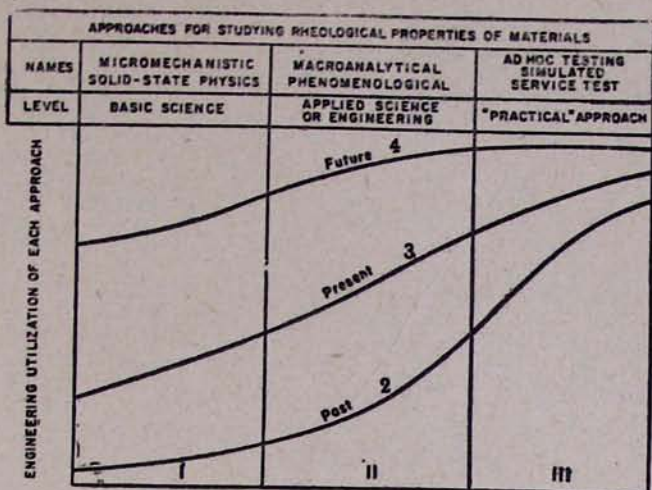
Для разработки метода предсказания необходимо найти эффективные факторы. Эффективными следует считать факторы, которые обычно появляются до обрушения. Кроме того, необходимо, чтобы их уровень измерялся количественно и чтобы время от появления этих факторов до обрушения не было очень коротким. Желательно также, чтобы измерение этих факторов было достаточно простым и чтобы можно было принимать четкие решения.

Факторы предсказания могут быть разделены на несколько групп: первая группа может быть названа прямыми факторами, как-то: горизонтальные и вертикальные смещения, накопление или деформирование поверхности склона; вторая группа—это полупрямые факторы, непосредственно связанные с механизмом движения, как-то: напряжение в грунте, давление в поровой воде, осадки, таяние снега, сопротивление сдвигу грунта и третья группа—непрямые факторы, которые сопровождают движение грунта или влияют на него, как-то: температура, геоэлектрический потенциал, акустическая эмиссия, поведение животных и т. д.

Различные методы подхода к этой задаче можно классифицировать следующим образом (Lazan, 1962):

- 1) физический (физика твердого тела) или микромеханический подход (фундаментальные науки);
- 2) макроаналитический или феноменологический подход (технические науки);
- 3) практический подход, при котором проводят испытание *ad hoc*, т. е. «на данный случай», или модельные испытания.

Рис. 1. Три подхода к изучению реологических свойств материалов (Lazan, 1962). I—микромеханический, в физике твердого тела (фундаментальные науки); II—макроаналитический или феноменологический (прикладные или технические науки); III—испытание «для данного случая» или производственное испытание («практический» подход); 1—инженерное использование каждого подхода; 2—в прошлом; 3—в настоящем; 4—в будущем.



Նկ. 1. Երեք մոտեցումը ուսումնասիրելու համակարգերի ուսումնասիրման երեք մոտեցում (Lazan, 1962). I—միկրոմեխանիկական՝ պինդ մարմնի ֆիզիկայում (ֆունդամենտալ գիտություններ). II—մակրոանալիտիկ կամ փրոնոմալական (կիրառական կամ տեխնիկական գիտություններ). III—փորձարկում «տվյալ դեպքի համար» կամ արդյունաբերական փորձարկում («գործնական» մոտեցում). 1—ամեն մի մոտեցման ինժեներական օգտագործում. 2—անցյալում. 3—ներկայում, 4—ապագայում:

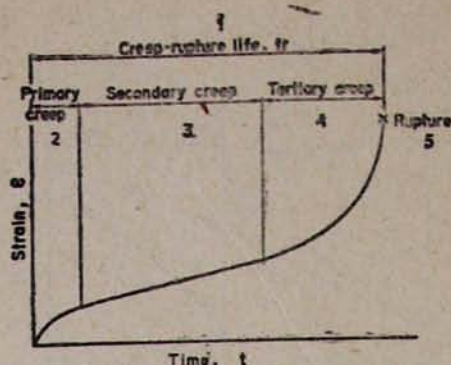
Fig. 1. Three approaches for studying rheological properties (Lazan, 1962).

Соотношение между этими тремя подходами и изменение их значения со временем показаны на рис. 1. Первый подход наиболее приемлем, но он еще не является техническим инструментом для расчета свойств инженерных материалов. Третий относится к совершенно иному типу по сравнению с первым. Его результаты полностью применимы к интересующей нас специфической проблеме, но он имеет ряд серьезных недостатков, как-то: длительность явлений и неприменимость в случае различных режимов. В противоположность этим подходам второй является наиболее практичным и успешным при анализе поведения инженерных материалов. Принятие этой классификации весьма полезно для нахождения эффективных факторов предсказания.

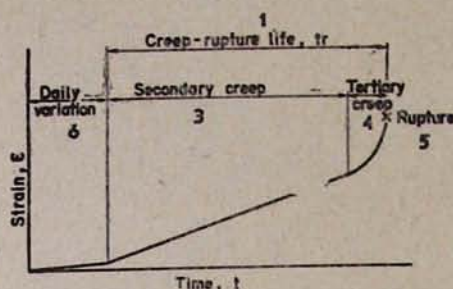
Развитие метода предсказания, основанного на явлениях ползучести—разрушения грунтов

Наиболее рациональный метод определения факторов для предсказания заключается в проведении испытаний склонов на обрушение. Это дает возможность найти наиболее чувствительные факторы, которые могут показать более ранние изменения. Но обрушения, которые могут быть экспериментально воспроизведены, представляют собой только часть обрушений, происходящих в природе, и не все полученные таким образом результаты применимы к действительным обрушениям.

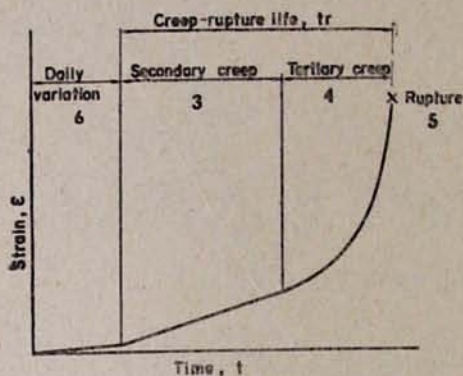
Например, в случае испытания образцов грунта на разрушение при ползучести приложение напряжений ведет прежде всего к периоду неуставившейся ползучести, в течение которого скорость ползучести вначале внезапно увеличивается, затем непрерывно уменьшается со временем, далее следует ползучесть с постоянной скоростью деформирования, и, наконец, процесс переходит в ускоряющуюся стадию, ведущую в конце концов к обрушению. Эти три стадии обычно называют первичной, вторичной и третичной ползучестью (рис. 2а).



(a) Creep rupture test on test piece



(b) Model test of slope failure



(c) Actual slope failure

Рис. 2. Типичное выражение различных кривых ползучести—разрушения; а) испытание на ползучесть—разрушение на опытном образце; б) модельные испытания обрушения склонов; в) действительное обрушение склона. Абсциссы—время t ordinаты—деформация ε ; 1—длительность t ползучести—разрушения; 2—первичная ползучесть; 3—вторичная ползучесть; 4—третичная ползучесть; 5—разрушение; 6—суточные изменения.

Նկ. 2. Տարբեր սող-խզման կորագծերի արտահայտություն. ա) սող-խզման փորձարկում ենույի վրա, б) լանդերի փլուզման մոդելային փորձարկումներ, в) լանդի իրական փլուզում: Աքսիսները— t ժամանակ, օրդինատները— ε ձևափոխություն. 1—սող-խզման t տևողություն. 2—առաջնային սողը. 3—երկրորդային սողը. 4—երրորդային սողը. 5—քայքայում. 6—օրական փոփոխություններ:

Fig. 2. Typical expression of various creep-rupture curves.

Однако в случае модельных испытаний обрушения склонов при помощи искусственного дождевания не происходит внезапного увеличения напряжений, поэтому первичная ползучесть не проявляется, но вторичная ползучесть может наблюдаться—она прямо следует за суточными изменениями ползучести. Область третичной ползучести довольно мала, как показано на рис. 2б.

Действительные обрушения склонов сходны со случаем модельных испытаний, в которых отсутствует область первичной ползучести; но область третичной ползучести очень велика, в особенности если учитывать общую деформацию и скорость деформирования, как это видно из рис. 2с. Поэтому модельные испытания

склонов не используются для анализа действительного обрушения склонов. Тем не менее, можно быть уверенным в том, что они представляют собой ценное орудие для отбора факторов предсказания. Можно считать, что именно эти их достоинства и недостатки являются неизбежным следствием вышеупомянутого испытания ad hoc.

Путем натурных испытаний обрушения склонов при искусственном дождевании на экспериментальной станции Ноу Японских государственных железных дорог (ЯГЖД) в 1949 г. было установлено, что деформация поверхности склонов является наиболее эффективным фактором предсказания (Saito & Uezawa, 1961; Saito, 1965). Их следствием явились лабораторные испытания ползучести—разрушения (феноменологический подход) (Saito & Uezawa, 1961). Эти резуль-

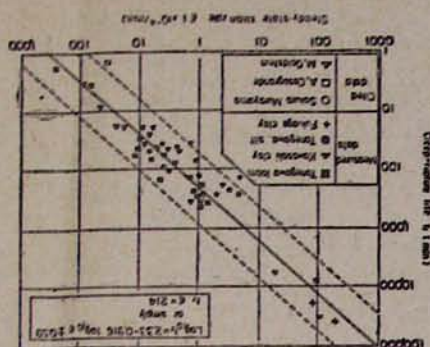


Рис. 3. График прогноза, использующий соотношение между установившейся скоростью деформации ε ($\times 10^{-4}$) в минуту и длительностью t_r ползучести—разрушения в минутах.

Նկ. 3. Կանխագուշակման գրաֆիկ, որը օգտագործում է հաստատված արագության ε ($\times 10^{-4}$) բազմում և սող-խզման t_r տևողության (բալբերով) միջև:

Fig. 3. Forecast diagram using the relation between steady-state strain rate and creep-rupture life.

таты показаны на графике предсказания, дающем обратную пропорциональность между установившейся скоростью деформирования и длительностью жизни ползучести разрушения (рис. 3).

Эта зависимость была проверена на действительных случаях обрушения склонов (Saito, 1965), и ее эффективность для предсказания жизни до обрушения была подтверждена (рис. 4). Более того, путем анализа случая оползня Асамуши было найдено, что с некоторыми видоизменениями это обратно пропорциональное соотношение может быть распространено и на область третичной ползучести. Такое построение было названо графическим анализом; оно поясняется направлением стрелок на рис. 5. Приложение этого метода к оползню Асамуши показано на рис. 6 (Saito, 1969).

Таким образом, был установлен метод предсказания оползней, основанный на характеристиках ползучести-разрушения (Saito, 1968), который состоит в следующем.

Длительность жизни до обрушения склонов в области вторичной ползучести определяется на графике предсказания (рис. 3) или вычисляется по следующей формуле:

$$\lg t_r = 2,33 - 0,916 \lg \varepsilon \pm 0,59, \quad (1)$$

или из простого выражения

$$t_r = 214 \quad (2)$$

где t_r —длительность жизни ползучести-разрушения в минутах и ε —установившаяся скорость ползучести в 10^{-4} в минуту.

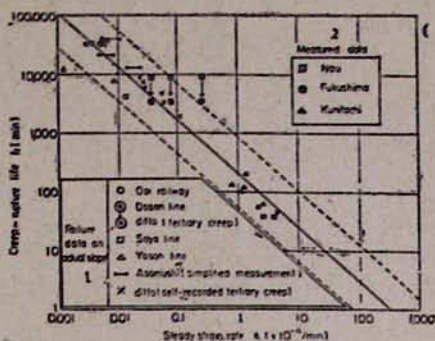


Рис. 4. Достоверность графика прогноза, использующего данные испытаний обрушения склонов и действительных обрушений склонов. Абсциссы—установившаяся скорость деформации ε ($\times 10^{-4}$ мин $^{-1}$), ординаты—длительность ползучести—разрушения t_r в минутах. 1—данные об обрушении действительных склонов, 2—измеренные величины.

Նկ. 4. Կանխագուշակման գրաֆիկի փորձարկումը և լանդշիթի իրական փլվածքի տվյալների օգտագործումը կանխագուշակման գրաֆիկի ստուգությունը: Արագության—ձևափոխման հաստատված ε արագություն ($\times 10^{-4}$ րոպե $^{-1}$), օրդինատները—սող-խզման t_r տևողությունը բալբերով: 1—իրական լանդշիթի փլվածքի տվյալներ, 2—չափված մեծություններ:

Fig. 4. Validity of forecasting diagram using data of slope failure tests and actual slope failures.

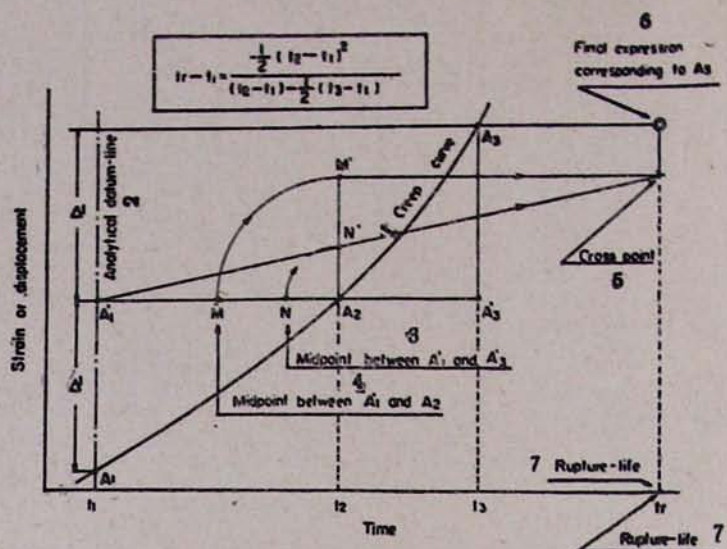


Рис. 5. Метод графического анализа длительности ползучести-разрушения в области третичной ползучести. Абсциссы—время, ординаты—деформации или перемещения. 1—кривая ползучести; 2—аналитический базис; 3—серединная точка между A_1 и A_3 ; 4—серединная точка между A_1 и A_2 ; 5—точка пересечения; 6—конечное выражение, соответствующее A_3 ; 7—продолжительность разрушения.

Նկ. 5. Մոդիկ երրորդային տիրույթում սող-խզման տեղորոշյալ գրաֆիկական վերլուծման մեթոդ: Արդյունքը—ժամանակ, օրդինատներ—ձևափոխություններ կամ տեղաշարժեր. 1—սողքի կորագիծ, 2—անալիտիկ բազիս, 3— A_1 և A_3 կետերի միջև միջնակետ, 4— A_1 և A_2 կետերի միջև միջնակետ, 5—հատման կետ, 6— A_3 -ին համապատասխանող վերջնական արտահայտություն, 7—քայքայման տեղորոշում:

Fig. 5. Procedure of graphical analysis for creep-rupture life in the tertiary creep range.

В области третичной ползучести в качестве эмпирической формулы может служить следующее логарифмическое уравнение:

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = A \lg \frac{t_r - t_0}{t_r - t} \quad (3)$$

или

$$\Delta l = l A \lg \frac{t_r - t_0}{t_r - t}, \quad (4)$$

где t_r длительность жизни ползучести-разрушения, т. е. время, оставшееся до обрушения; t_0 —исходное время; ε —деформация в произвольный момент времени; ε_0 —деформация во время t_0 ; $\Delta l = \varepsilon l$ —относительная деформация.

Длительность жизни до обрушения получается по эмпирической логарифмической формуле путем вычисления или графического анализа, а также путем изображения измеренных величин на полулогарифмическом графике.

Поэтому рекомендуется грубо определять время начала обрушения склона по установившейся скорости деформирования в области вторичной ползучести и более близко оценивать его, пользуясь заме-

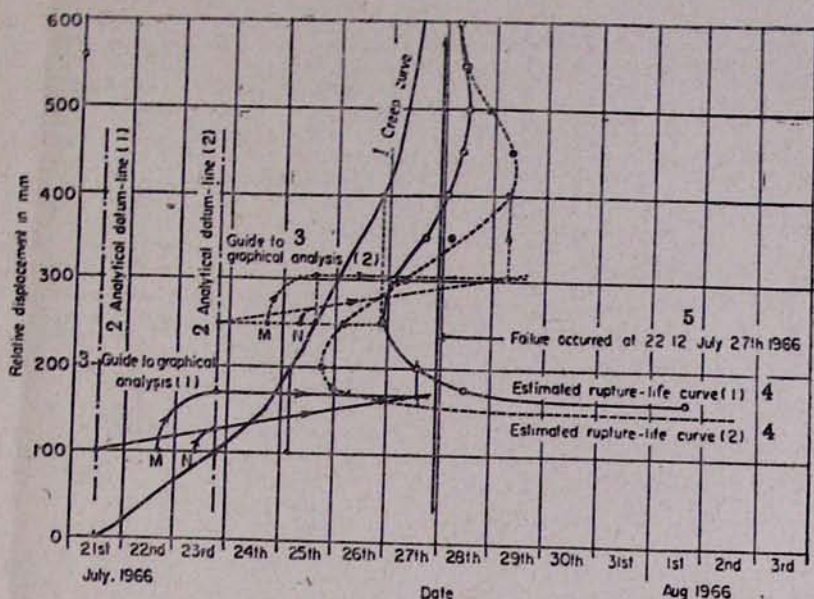


Рис. 6. Прогноз времени обрушения оползня Асамуши с помощью графического анализа. Абсциссы—даты, ординаты—относительные перемещения в мм; 1—кривая ползучести; 2—аналитический базис; 3—направляющая графического анализа; 4—вычисленная кривая длительности разрушения; 5—обрушение произошло 27 июля 1966 г., в 22 ч 12 мин.

Նկ. 6. Ասամուսի սղանքի փլվածքի ժամանակի կանխագուշակումը գրաֆիկական վերլուծման միջոցով: Արագիւններ—ամսաթիվեր, օրդինատներ—հարաբերական տեղաշարժումներ մմ-ով. 1—սղքի կորագիծ, 2—անալիտիկ բազիս, 3—գրաֆիկական վերլուծման ուղղորդ, 4—բախարժման տեղումբյան հաշվարկված կորագիծ, 5—փլվածքը տեղի ունեցավ 1966 թ. հուլիսի 27-ին, 22 ժամ 12 րոպեին:

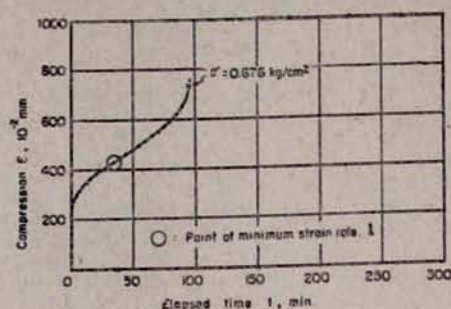
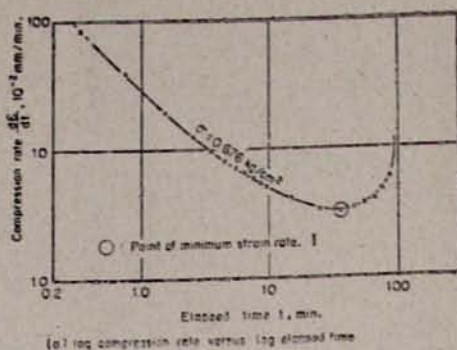
Fig. 6. Forecast failure time of Asamushi landslide by means of graphical analysis.

няющей логарифмической формулой в области третичной ползучести. Кроме этого для предсказания в области третичной ползучести в качестве грубой оценки может быть использован метод оценки в области вторичной ползучести, однако необходимо, чтобы предупреждение делалось заблаговременно, за час до обрушения.

Сопоставление экспериментальных данных испытаний ползучести—разрушения

Имеется множество статей, содержащих результаты испытаний образцов грунтов или скальных пород на ползучесть—разрушение, и было высказано много мнений относительно интерпретации и обработки результатов испытаний.

Прежде всего заслуживает внимания мнение, что область вторичной ползучести не существует, если даже скорость деформирования рассматривается как постоянная, иначе говоря, скорость деформирования вначале непрерывно уменьшается, а затем увеличивается до наступления разрушения. Это обстоятельство ясно обнаруживается, если показать на полулогарифмическом графике скорость деформирования и протекшее время (Murayama & Shibata, 1961, 1965; Finn & Sneed, 1973; Campanella & Vaid, 1974), или если тем же путем показать осевую деформацию и скорость осевой деформации (Bishop, 1966), как изображено на рис. 7—10, соответственно. Это выражение верно при условии, что применяются логарифмические шкалы. Однако



(b) Compression versus elapsed time

Рис. 7. Различные выражения кривых ползучести—разрушения по Мураяма и Шибата (Murayama & Shibata, 1956). а) Логарифм скорости сжатия $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt \times 10^1$ мм в минуту в сравнении с логарифмом протекшего времени t в минутах; 1—точка минимальной скорости деформации или скорости деформации при пределе мобилизации по Тер-Степаняну, 1976); б) Сжатие $\epsilon \times 10^{-2}$ мм по сравнению с протекшим временем в минутах.

Նկ. 7. Սղիվ-լարման կորագծերի տարբեր արտահայտություններ ըստ Մուրայամայի և Շիրատայի (Murayama & Shibata, 1956): а) սղիվման արագության $d\epsilon/dt \times 10^{-2}$ մմ. բաղնամիջակի իրարիքի համեմատում անցած t ժամանակի (բաղններով) իրարիքի հետ. 1—ձևափոխության նվազագույն արագության կետ կամ մոբիլիզացման փուլում ձևափոխության արագության ըստ Տեր-Ստեփանյանի (Тер-Степанян, 1976). б) սղիվման $\epsilon \times 10^{-2}$ մմ վերցրած անցած ժամանակի (բաղններով) համեմատությունը. Fig. 7. Different expressions of a creep-rupture curve published by Murayama & Shibata (1956).

оно некоторым образом относится к области мистики, потому что равные приращения координат не означают одинаковой длины.

Логарифмическое изображение показывает малые части чрез-

мерно крупно и большие части чрезмерно мелко. Поэтому в случае логарифмических координат для скорости деформирования и протекшего времени различие скорости ползучести в пределах одного цикла в области минимальной скорости ползучести или скорости ползучести у предела мобилизации по Тер-Степаняну (1976) довольно мало; тем не менее, один цикл протекшего времени в области минимальной скорости ползучести означает существенно длительное время, вследствие того, что от начала ползучести протекло много времени: конечная точка цикла протекшего времени соответствует в десять раз большему времени, чем начальная точка этого цикла. Точка минимальной скорости деформирования расположена в правой стороне логарифмической оси времени: поэтому скорость ползучести по оси времени незначительно изменяется в области этой точки и, таким образом, кажущаяся постоянной скорость вторичной ползучести, вычисленная по обычному графику время—деформация, в сущности одинакова с минимальной скоростью ползучести, как это принимается Кампанелла и Вайдом (Campanella & Vaid, 1974). Следовательно, область вторичной ползучести действительно существует.

Следующая проблема заключается в определении термина «разрушение». В случае глинистых образцов часто можно видеть, что вскоре после изменения наклона кривой времени наблюдаются трещины сдвига. Поэтому время до разрушения в испытаниях на ползучесть—разрушение иногда определяется как точка начала ускорения, так сказать, точка минимальной скорости ползучести, как это принимается рядом ученых (Casagrande & Wilson, 1951; Singh & Mitchell, 1969; Finn & Shead, 1973). Но это мнение кажется довольно странным и не всегда подтверждается. Причина заключается в том, что эти понятия были заим-

Рис. 8. Различные выражения кривой ползучести—разрушения по Финну и Снейду (Finn & Sneed, 1973). а) Логарифм скорости осевого сжатия в % в минуту по сравнению с логарифмом протекшего времени в минутах для нормально-консолидированного опыта С-6, $\sigma_1 - \sigma_3 = 300$ кПа. б) Осевая деформация в % по сравнению с протекшим временем в минутах, $\sigma_1 - \sigma_3 = 300$ кПа; 1—точка минимальной скорости деформации.

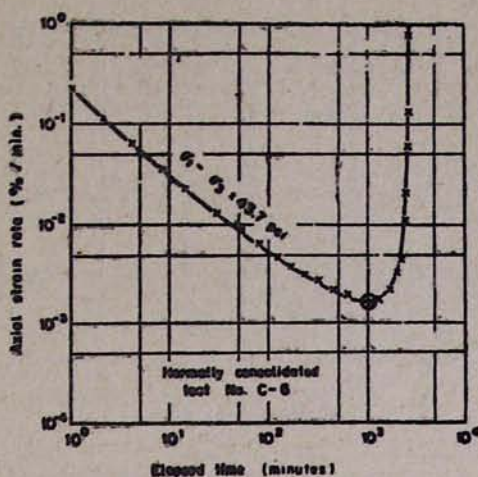
նկ. 8. Առկ-խզման կորագծի տարբեր արտահայտությունները Բիննի և Տնեդի (Finn & Sneed, 1973). а) С-6 նորմալ կոնսոլիդացված փորձի համար առանցքային սեղմման արագության (%-ներով) բաղադրված լոգարիթմը անցած ժամանակի (րոպեներով) լոգարիթմի համեմատությամբ: $\sigma_1 - \sigma_3 = 300$ կՊա: б) Առանցքային ձևափոխությունը (%-ներով) անցած ժամանակի (րոպեներով) համեմատությամբ, $\sigma_1 - \sigma_3 = 300$ կՊա, 1—ձևափոխության նվազագույն արագության կետ

Fig. 8. Different expressions of a creep-rupture curve published by Finn & Sneed (1973).

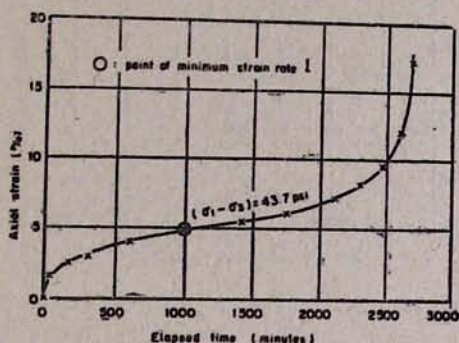
ставлены из явлений ползучести-разрушения металлов, которые при увеличении скорости деформации выходят из строя, как например в реактивных двигателях при высоких температуре и давлении. В противоположность этому в случае грунтов после достижения минимальной скорости деформирования обычно до наступления разрушения остается достаточно длительное время и происходят большие смещения, как это видно из рис. 7—10. Нет оснований к тому, чтобы эта область третичной ползучести не рассматривалась как область разрушения. Поэтому в случае грунтов разрушение должно быть определено как окончательное и макроскопическое состояние разъединения.

В современной литературе имеется много ценных статей, посвященных этому вопросу. На рис. 11 показано соотношение между неустановившейся минимальной скоростью деформации сдвига и общей длительностью жизни до разрушения (Finn & Sneed, 1973). На рис. 12 приведено соотношение между установившейся скоростью ползучести и временем до разрушения по Курихара (Kurihara, 1972). На рис. 13 показано соотношение между минимальной скоростью ползучести и временем до разрушения, опубликованное Секигучи (Sekiguchi, 1977). На рис. 17 показано соотношение между скоростью деформирования и временем до разрушения горных пород, полученное Морлье (Morlier, 1964).

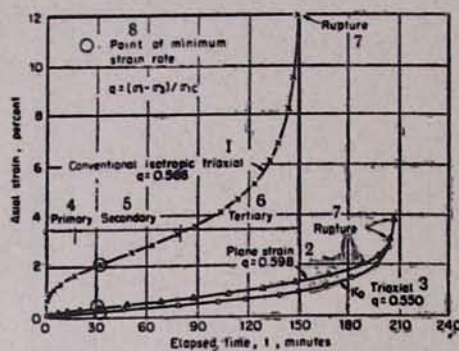
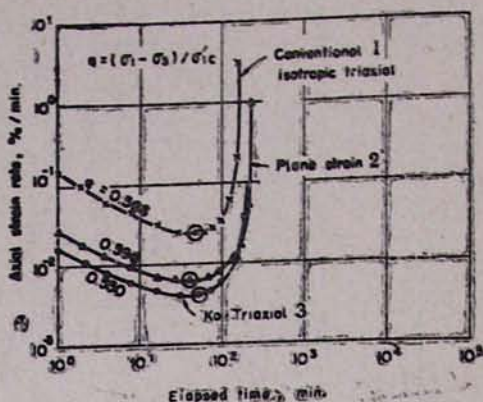
Учитывая вышеуказанные соображения, можно заключить, что минимальная скорость деформирования не должна сильно отличаться от установившейся скорости деформирования, так что можно одинаковым образом трактовать обе скорости деформирования. На рис. 15 сопоставлены результаты всех испытаний на ползучесть—разруше-



1a) log axial strain rate versus log elapsed time



1b) Axial strain versus elapsed time



(b) Axial strain versus elapsed time

Рис. 9. Различные выражения кривых ползучести-разрушения по Кампанелла и Вайду (Campanella & Vaid, 1974). а) Логарифм скорости осевой деформации в % в минуту по сравнению с логарифмом протекшего времени в минутах; 1—стандартное изотропное трехосное испытание; 2—плоскодеформированное испытание; 3—трехосное испытание при отсутствии боковых деформаций; 4—первичная; 5—вторичная; 6—третичная; 7—разрушение; 8—точка минимальной скорости деформации.

նկ. 9. Առիթ-խզման կորագծերի տարբեր արտահայտությունները ըստ Կալպանելլայի և Վայդի (Campanella & Vaid, 1974). ա) Առանցքային սեղանման ձևափոխության արագության լոգարիթմը (%-ով) առանցքային ձևափոխության անցած ժամանակի (րոպեներով) համեմատությամբ. 1—ստանդարտ իզոտրոպիկ եռաանցքային փորձարկում. 2—հարթ ձևափոխված փորձարկում. 3—փորձարկում կողմնային ձևափոխությունների բացակայության դեպքում. 4—առաջնային. 5—երկրորդային. 6—երրորդային. 7—քայքայում. 8—ձևափոխության նվազագույն արագության կետ:

Fig. 9. Different expressions of creep-rupture curves published by Campanella & Vaid (1974).

ние, приведенные в различных публикациях. Большая часть точек расположена в области 95% доверительных пределов, предложенных Сaito и Uezawa (Saito & Uezawa, 1961).

К тому же данные Морлье относятся к горным породам. Интересно, что поташ (potassium) не выходит из этих пределов, в то время как мел оказался значительно ниже этого предела. С другой стороны алюминиевые сплавы оказались существенно выше области грунтов, но параллельно этой области. Отсюда можно заключить, что длительность жизни ползучести-разрушения дольше для тягучих материалов (металлы) и короче для хрупких (горные породы).

РЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ-РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВ

В последнее время теорией кинетических процессов объясняются многие явления ползучести грунтов, и существует опасность возникновения иллюзии, что все явления ползучести, включая характеристики ползучести-разрушения, могут быть объяснены этой теорией.

Возможно, что это справедливо в области первичной и вторичной ползучести, но имеется много вопросов в области третичной ползучести, которые не могут быть объяснены теорией кинетических процессов. Точнее говоря, еще не создано теории, которая была бы в настоящее время применима к области третичной ползучести.

Прежде всего, является весьма спорным предположение, что грунт разрушается вскоре после того, как его смещение достигает определенной величины, как это утверждают Мураяма и Шибата (Murayama & Shibata, 1951, 1956) и Вялов, Маслов и Караулова (Vyalov et al., 1977). Существенно, что свойства материала делятся на две категории: нечувствительные и чувствительные по отношению к структуре

Рис. 10. Различные выражения кривых разрушения—разрушения по Бишопу (Bishop, 1966). а) Логарифм скорости осевой деформации в % в день по сравнению с осевой деформацией в %; б) осевая деформация в % по сравнению с логарифмом времени в минутах, днях; в) осевая деформация в % по сравнению с временем в минутах; 1—разрушение; 2—точка минимальной скорости деформации.

Քիմիկ. 10. Առդ-խզում կորացմերի տարբեր ար-
մատաւանայտուրութենէր (ստ Bishop, 1966), ա-
տաւ Ատաւցեայի ձևափոխութեան արագութեան (%-
աւելմենրով օրաւ) յոգարիրմ առաւելային ձևա-
ւորութեան տարեան (%-ենրով) հետ համեմատած, ի-
տաւ Ատաւցեային ձևափոխութեանը %-ենրով ժա-
նաւանդակի (ռալքենրով, օրենրով) յոգարիրմենրի
տմէ հետ համեմատած. c) Ատաւցեային ձևափոխ-
ութեանը %-ենրով համեմատած ժամանակի
ամենտ, ռալքենրով. 1—բայտաւ. 2—ձևափո-
խութեան նիւաղադրին արագութեան կետ

Fig. 10. Different expressions of a creep-rupture curve published by Bishop (1966).

упругости. Первые вызваны совместным действием составных частей материала—атомов, молекул и частиц, например, коэффициент упругости, Пуассоново отношение, удельный вес или коэффициент термического расширения. Вторые не вызваны совместным действием составных частей материала, но обусловливаются сильным влиянием таких дефектов, как дислокации, пустоты или трещины, достаточно великим по сравнению с размерами составных частей, как например, сопротивление сдвигу, пластичность или водопроницаемость.

Деформация является нечувствительным к структуре свойством, тогда как сопротивление разрушению—чувствительным. Если бы разрушение определялось в соответствии с деформацией, то предел деформации был бы в некотором отношении равномерным, но разрушение не может происходить при тех же самых деформациях, поскольку оно означает окончательное и макроскопическое состояние разделения.

Далее, имеется очень немного примеров кривых время—деформация в третичной области ползучести. Они должны выражаться формулой, связывающей деформации или перемещения со временем. Поскольку эта формула должна быть формулой ползучести или области третичной ползучести, необходимо, чтобы величина деформации или перемещения принимала бесконечное значение за ограниченное время. Если применяется такая формула ползучести, при которой деформация или смещение конечны за ограниченное время, то разрушение должно определяться деформацией, а это слишком произвольно и далеко от действительности.

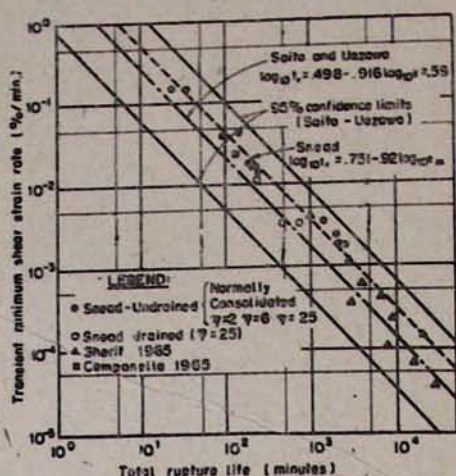


Рис. 11. Соотношение между неустановившейся минимальной скоростью деформации сдвига в % в минуту и полной длительностью разрушения в минутах по Финну и Снеду (Finn & Snead, 1973).

Կգ. 11. Մահիճի ձևախոխության հաստատված նվազագույն արագության (%-հերով րոպեում) հարաբերությունը խայթյալման լրիվ տևողությանը (րոպեներով) Բինն Զիննի և Սնեդի (Finn & Snead, 1973):

Fig. 11. Relation between transient minimum shear strain rate and total rupture life published by Finn & Snead (1973).

Экспериментальная формула Сингха и Митчела (Singh & Mitchell, 1969)

$$\dot{\epsilon} = A e^{aD} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m \quad (5)$$

а также формула Вялова, Маслова и Карауловой (Vyalov & al., 1977)

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 + \frac{\tau}{\eta_0 [1 - n(\tau)]} \left[(t+1)^{1-n(\tau)} - 1 \right] \quad (6)$$

не пригодны для предсказаний в области вблизи разрушения, так как они не дают бесконечной деформации или перемещения за ограниченное время.

В противоположность этим формулам моя экспериментальная формула (3) или

$$\dot{\epsilon} = \frac{A}{t_r - t} \quad (7)$$

дает бесконечную деформацию и скорость деформации за ограниченное время и может описать вид кривой ползучести, близкий к реальным перемещениям до момента разрушения. Поэтому эта формула может быть успешно применена для предсказания времени разрушения.

СЛУЧАИ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

Оползни, происшедшие после длительной ползучести

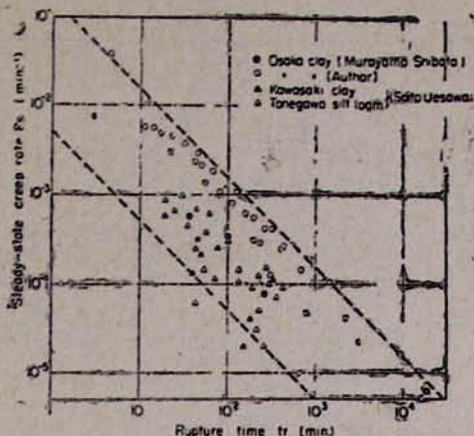
Оползень Такабаяма на линии Ийяма. Я докладывал на Московском конгрессе в 1973 г. об оползне Такабаяма, который произошел в январе 1970 г., но я хотел бы еще раз описать этот случай, так как время обрушения было объявлено до катастрофы и оказалось в хорошем соответствии с действительным временем обрушения (Saito & Yamada, 1973).

Туннель Такабаяма расположен на линии Ийяма, ЯГЖД (рис. 16). В апреле 1969 г. в туннеле были обнаружены необычайные деформации, после чего непрерывно производились тщательные наблюдения. В ноябре на склоне над центральной частью туннеля была обнаружена длинная трещина растяжения; для измерения относительных движений поперек трещины были установлены тензометры. В середине декабря сильный снегопад разрушил все измерительные приборы, установленные на поверхности грунта; затем были вновь уста-

Рис. 12. Соотношение между установившейся скоростью ползучести $\dot{\epsilon}_s$ в мин⁻¹ и длительностью разрушения t_r в минутах по Курихара (Kurihara, 1972).

Նկ. 12. Մաղի հաստատված $\dot{\epsilon}_s$ արագության (րոպե-1-ում) և փայլաժամ t_r տևողության (րոպեներով) հարաբերությունը ըստ Կուրիհարայի (Kurihara, 1972):

Fig. 12. Relation between steady-state creep rate and rupture time published by Kurihara (1972).



новлены подземные тензометры дистанционного действия, и наблюдения были возобновлены 31 декабря 1969 г.

Предсказание времени обрушения было произведено двумя способами—путем оценки по переменной скорости деформирования и путем графического анализа по заменяющей логарифмической кривой в области третичной ползучести. Эти методы показаны на рис. 17 и 18, соответственно. 21 января в 5 ч. пополудни официально было объявлено о том, что склон обрушится предстоящей ночью или до рассвета. Оценка времени обрушения исправлялась через каждый час. В полночь было сделано окончательное объявление о том, что оползень произойдет в ночь на 22-е в 1 ч 30 мин, в соответствии с анализом третичной области ползучести. Склон над туннелем Такабаяма начал разрушаться в 1 ч 24 мин и смещение прекратилось через две минуты. Разница между предполагаемым и действительным временем разрушения составила только 6 мин. Говорили, что это не что иное, как чудо.

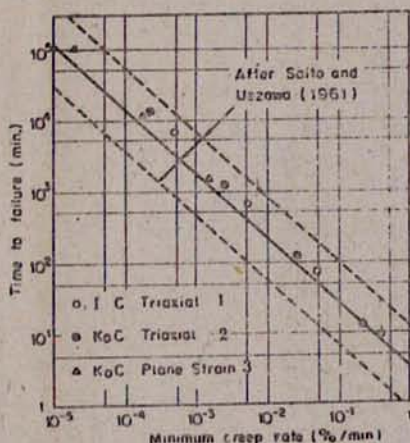


Рис. 13. Соотношение между временем до разрушения в минутах и минимальной скоростью ползучести в % в минуту, по Секигучи (Sekiguchi, 1977). 1—изотропное стандартное испытание; 2—трехосное консолидированное испытание при отсутствии боковых деформаций; 3—консолидированное плоскодеформированное испытание при отсутствии боковых деформаций.

Նկ. 13. Մինչև փայլաժամ ժամանակի (րոպեներով) և սողի նվազագույն արագության (%-ներով րոպեում) հարաբերությունը ըստ Սեկիգուչիի (Sekiguchi, 1977): 1—ստանդարտ իզոտրոպիկ փորձարկում: 2—եռօսյան կոնսոլիդացված փորձարկում՝ կողմնային ձևափոխությունների բացակայության դեպքում: 3—կոնսոլիդացված հարթձևափոխված փորձարկում՝ կողմնային ձևափոխությունների բացակայության դեպքում:

Fig. 13. Relation between time to failure and minimum creep rate published by Sekiguchi (1977).

На рис. 19 показана кривая перемещений, построенная путем соединения при приемлемых допущениях двух кривых, полученных до и после снегопада в декабре. По трем значениям скорости ползучести, вычисленным по кривой, полученной до снегопада, можно было предположить, что разрушение может произойти между 30-м и 60-м днем после 13 декабря, т. е. между 10 января и 10 февраля.

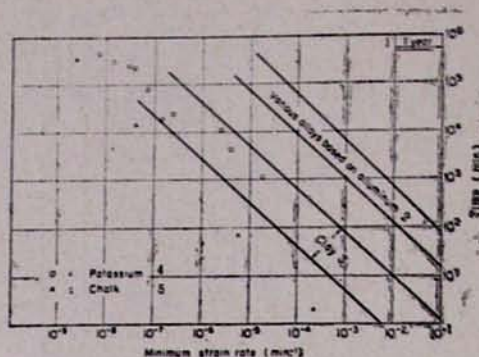


Рис. 14. Соотношение между минимальной скоростью деформации в мин⁻¹ и временем до разрушения в минутах по Мортье (Morlier, 1964). 1—один год; 2—различные сплавы, основанные на алюминии; 3—глина; 4—поташ; 5—мел.

Նկ. 14. Չափոխարյան նվազագույն արագության (բալբ-1) և միջին փայլայումը (բալբեն-բալ) ժամանակի հարաբերությունը ըստ Մորլի (Morlier 1964): 1—մեկ տարի, 2—ալյումինումի վրա հիմնված տարբեր համաձուլվածքներ, 3—կավ, 4—պոտաշ, 5—կավիճ:

Fig. 14. Relation between strain rate and rupture time published by Morlier (1964).

Оползень Агояма в городе Фукуи. Примерно в 5 км к северо-западу от г. Фукуи на месте старого оползня в декабре 1972 г. произошел оползень Агояма около 200 м шириной, 80 м высотой и протяженностью 180 м по длине склона. Это движение было вызвано извлечением земли из карьера у подножья склона. Коренные породы состоят из туфистых песчаников третичного возраста; предполагается, что поверхность скольжения приурочена к тонкозернистому слою песчаников.

4 октября 1972 г. была обнаружена длинная непрерывная трещина

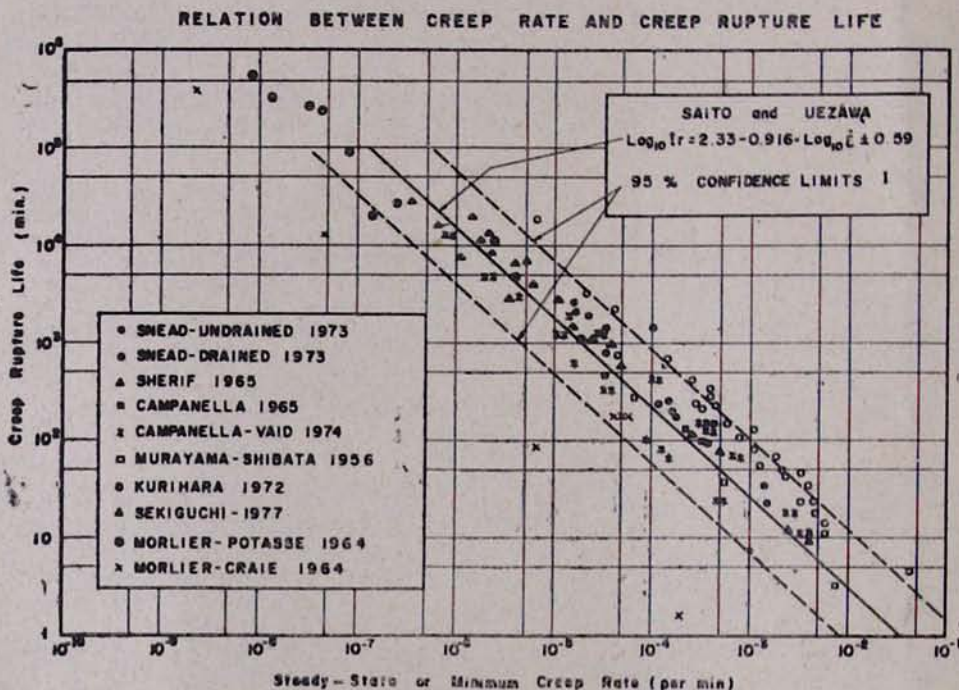


Рис. 15. Сводный график, показывающий соотношение между установившейся скоростью ползучести или минимальной скоростью ползучести в мин⁻¹ и длительностью ползучести—разрушения в мин; 1—доверительные пределы 95%.

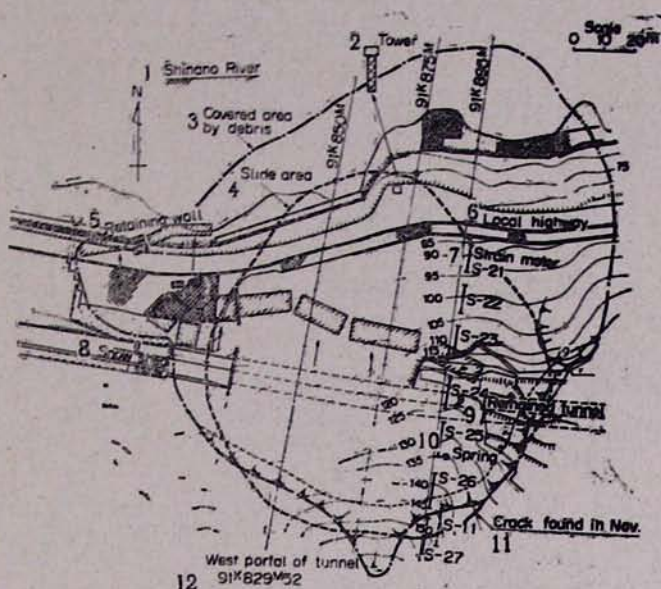
Նկ. 15. Ամփոփիչ գրաֆիկ, որը ցույց է տալիս սողի հաստատված արագության կամ սողի նվազագույն արագության (բալբ-1) և սողանք-լուծման տևողության (բալբում) հարաբերությունը 1—95%-անի վստահված սահման:

Fig. 15. Compiled relationship between creep rate and creep-rupture life.

Знак. 16. План оползня Така-
матаяма. 1—река Шинано; 2—
навашина; 3—площадь, покрытая
обиданосами; 4—оползневая тер-
ритория; 5—подпорная стен-
ка; 6—местная шоссеиная до-
рога; 7—тензометр; 8—снего-
вой навес; 9—сохранившийся
туннель; 10—родник; 11—тре-
сина, обнаруженная в нояб-
ре; 12—западный портал тун-
неля.

Տի. 16. Տակարայմա սողանի
նայլանը: 1—Շինանո դեղեր, 2—աշ-
ղատարակ, 3—երկրվածներով ծած-
կապոված մալիկն, 4—սողանքային
երկնզանք, 5—հնամպատ, 6—տե-
րակապան խելուն, 7—տեղիքմեղ, 8—
— ձյուն ծածկարան, 9—պաշ-
մալանված բունի, 10—աղբուր, 11
—նոյմերինի, 12—նունիկ արևմտ-
յան ճակատանուր:

Fig. 16. *Plan of Takabayama landslide.*



на на склоне Агояма; наблюдения были начаты 7 октября после установки измерительных инструментов. Вначале движение составляло 0,0 мм в день, но затем, постепенно ускоряясь, к концу октября достигло 20 мм в день, а после ноября—100 мм в день. Расчеты по предсказанию времени обрушения были выполнены в Токио, примерно на расстоянии 400 км от оползня, и их результаты были сообщены по телефону должностному лицу.

Полученный анализ области третичной ползучести показан на

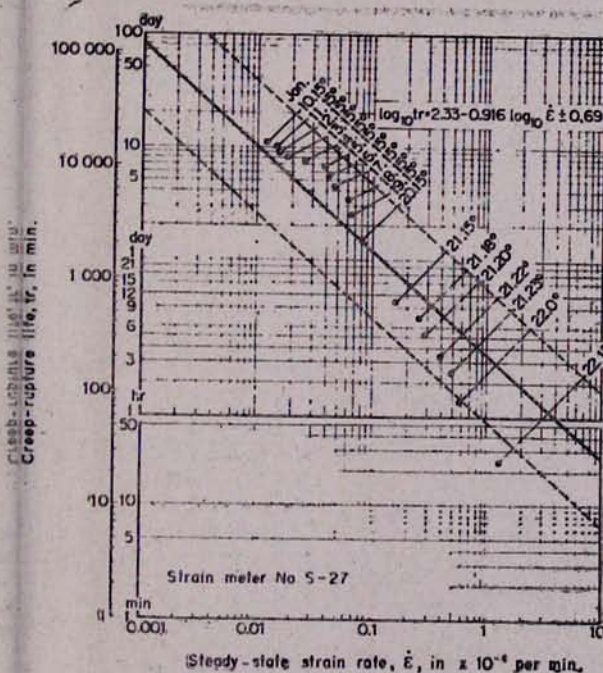


Рис. 17. Надежность прогноза времени обрушения, основанного на графике прогноза, в случае применения установившейся скорости деформации для оползня Такабаяма. Абсциссы—установившаяся скорость ползучести $\epsilon \times 10^{-4}$ мин⁻¹, ординаты—длительность t_f ползучести—разрушения в минутах; тензометр S—27.

Նկ. 17. Տակարայամա սղանքի համար Բայրայան ժամանակի կենթազգայական հուսկիայրյու- եր, հինված կենթազգայական Գառնիկի վրա ձևախոյան շը- հաստաղած աբազայան դիպ- հում: Արցղիսիսիւր-սողքի Հա- տաղած Է արպայիւրյան $\times 10^{-4}$ ռոպ⁻¹-ում. օրդիսանիւր-սող- քիւման սոկոյիւրյան ռոպեն- ռոյ. տննդոնար $S=27$:

Fig. 17. Reliability of forecasting failure time based on forecasting diagram in case of using transient strain rate, Takabayama landslide.

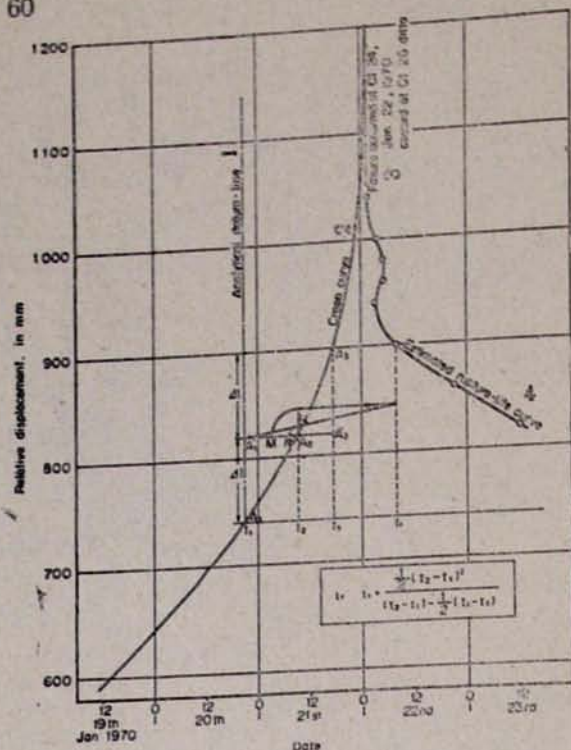


Рис. 18. Прогноз времени обрушения в области третичной ползучести с помощью графического анализа оползня Такабаяма. Абсциссы—даты, ординаты—относительные смещения в мм; 1—аналитический базис; 2—кривая ползучести; 3—обрушение произошло 22 января 1970 г. в 01 ч 24 мин, прекратилось в 01 ч 26 мин; 4—вычисленная кривая длительности обрушения.

Նկ. 18. Տակաբայամա սողանքի համար փյուն ժամանակի կանխազգուշացումը երրորդային սողի տիրույթում գրաֆիկական վերլուծման օգնությամբ: Արագիսներ—ամսաթիվ, օրդինատներ—հարաբերական տեղաշարժ մմ-ով. 1—անալիտիկ բազիս. 2—սողի կորագիծ. 3—քայքայումը կատարվեց 1970 թ. հունվարի 22-ին 01 ժամ 24 րոպեին, ավարտվեց 01 ժամ 26 րոպեին. 4—փյունի տևողության հաշվարկված կորագիծ:

Fig. 18. Forecasting failure time by means of graphical analysis in the tertiary creep range, Takabayama landslide.

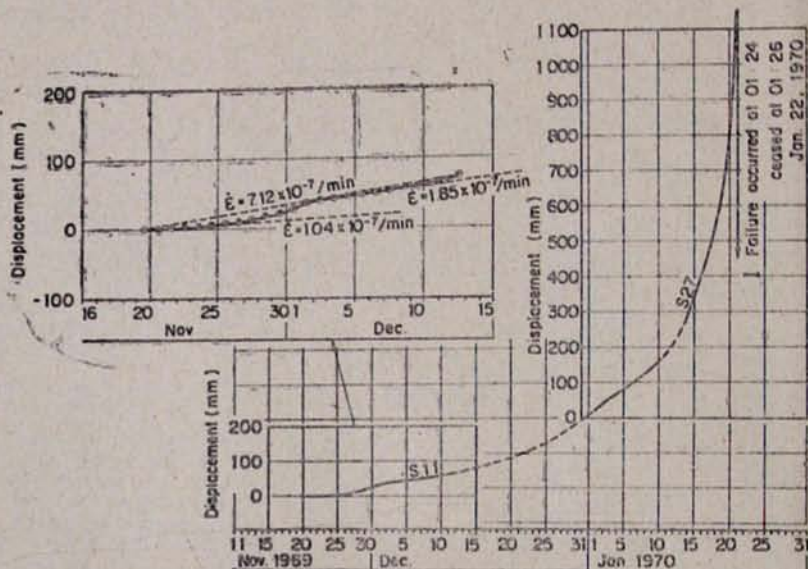


Рис. 19. Прерванная кривая относительного смещения оползня Такабаяма, соединенная при известных предположениях. Абсциссы—даты, ординаты—смещения в мм; 1—обрушение произошло 22 января 1970 г. в 01 ч 24 мин, прекратилось в 01 ч 26 мин. Նկ. 19. Տակաբայամա սողանքի համար հաշարեական տեղաշարժից ընդհատված կորագծեր, որոնք միացված են ենթադրությամբ: Արագիսներ—ամսաթիվ, օրդինատներ—տեղաշարժ մմ-ով. 1—փյունը տեղի ունեցավ 1970 թ. հունվարի 22-ի 01 ժամ 24 րոպեին և ավարտվեց 01 ժամ 26 րոպեին:

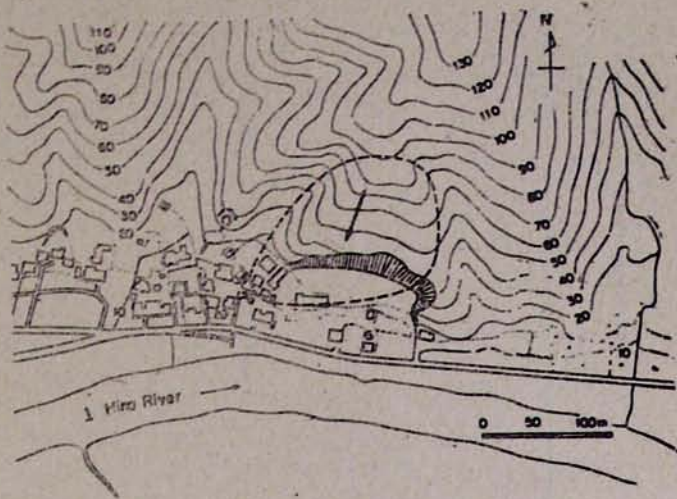
Fig. 19. Relative displacement curve interrupted but connected under acceptable supposition, Takabayama landslide.

рис. 20. План оползня
Агояма. 1—река Хино.

рис. 20. Ագոյամի օղակմի
պլանը: 1—Հինո գետը:

рис. 20. Plan of Agoya-
ma landslide.

рис. 21; было пред-
положено, что обру-
шение произойдет в
конце ноября. Но
отто предположение
было отвергнуто
вследствие нерав-
номерных движе-
ний в последней
декадии; затем для
получения линей-



ности кривой ползучести вместе с графическим анализом был принят ме-
тод построения полулогарифмического графика как показано на рис. 22.
Было нелегко добиться линейности кривой ползучести, поскольку она
показывала непрерывное искривление. Согласно последнему предска-
занию, сделанному вечером того же дня, обрушение должно было про-
изойти 1 декабря в 20 ч 30 мин; произошло же оно 2 декабря в
19 ч 30 мин. Позже было установлено, что это расхождение явилось
следствием того, что движение всей массы остановилось и обрушилась
только одна треть массы, как это видно из рис. 23 (Watarai, 1973).

Обрушение крутого склона приозерной дороги Тама. В июле
1976 г. произошло обрушение части склона объемом 9500 м³ у при-
озерной дороги Тама, примерно в 70 км к западу от Токио (рис. 24).
Жерновые породы состоят главным образом из юрских сланцев, частич-
но содержащих песчаник, рассланцованных при сдвиге и измененных
до глин. Рассматриваемый склон имеет 70 м по падению и наклон
0,06 : 1.

Признаки неустойчивости склона были обнаружены 13 июня
1976 г. В верхней части склона в пяти пунктах были установлены
измерительные точки поперек трещин растяжения. 14 числа начались
наблюдения за изменением расстояния между измерительными точ-
ками.

Графический анализ области третичной ползучести показан на
рис. 25. 18 июня в 10 ч утра было предсказано, что обрушение склона
произойдет через 12 ч. Обрушение произошло в 21 ч 30 мин того же
дня. Разница составляет ровно полтора часа и свидетельствует о хоро-
шем прогнозе (Hasegawa & Kiuchi, 1977).

В статье, опубликованной в одном из технических журналов, ука-
зывалось, что предсказание было произведено по моему методу, хотя
я и не имел отношения к работе по прогнозу.

Оползень Юнотан на линии Эсаши. В апреле 1975 г. произошел
оползень объемом 40 тыс. м³ на участке между Юнотан и Миякоши на
линии Эсаши, ЯГЖД (рис. 26). Железнодорожное полотно на про-
тяжении 117 м было завалено земляной массой высотой около 10 м и
объемом 20 тыс. м³; движение было прервано на 19 дней. Коренные
породы состоят из алевролита миоценового возраста; участок рас-
сматривается как древняя оползневая область.

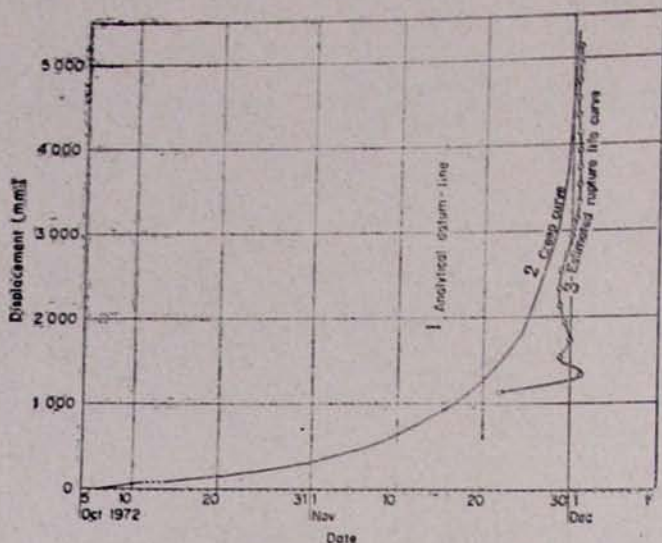


Рис. 21. Кривые ползучести и прогноз времени обрушения оползня Агояма с помощью графического анализа. Абсциссы — даты, ординаты — перемещения в мм: 1 — аналитический базис, 2 — кривая ползучести, 3 — вычисленная кривая длительности обрушения.

Նկ. 21. Ագոյամա սողանքի համար սողի կորագծերի և փլման ժամանակի կախյալ կազմակերպչական գրաֆիկական վերլուծման օգնությամբ: Արագիսներ — սողանքի փլման ժամանակի (t_r-t) տարբերությունը օրերով, օրդինատներ — տեղաշարժ մմ-ով, 1 — ընդունված է t_r — 1972 թ. դեկտեմբերի 1, 20 ժամ 30 րոպե:

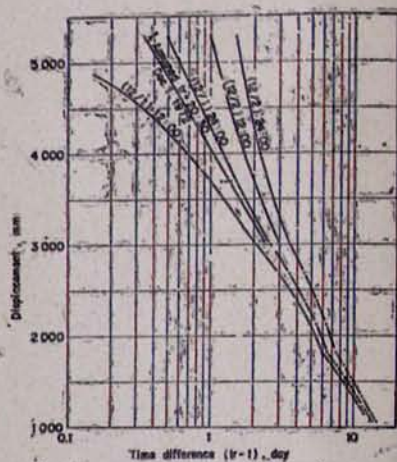
Fig. 21. Creep curve and forecasting failure time by means of graphical analysis, Agoyama landslide.

21 марта над железнодорожным полотном была обнаружена воронка обрушения; затем на поверхности дороги появились многочисленные трещины. 7 апреля склон сместился на железнодорожное полотно, и рельсы оказались смещенными в боковом направлении на 300 мм. Наконец, 9 апреля в 17 ч 40 мин склон обрушился с громким и страшным шумом. На рис. 27 показаны смещения наблюдательных точек на поверхности дороги.

Рис. 22. Прогноз времени обрушения оползня Агояма, основанный на линейности в полулוגарифмических координатах. Абсциссы — разность времени (t_r-t) в днях; ординаты — перемещения в мм; 1 — принято t_r = 1 декабря 1972 г., в 20 ч 30 мин.

Նկ. 22. Ագոյամա սողանքի համար փլման ժամանակի կանխագուշակումը հիմնված զոնայի վրա կիսալոգարիթմական կոորդինատներով: Արագիսներ — ժամանակի (t_r-t) տարբերությունը օրերով, օրդինատներ — տեղաշարժ մմ-ով: 1 — ընդունված է t_r — 1972 թ. դեկտեմբերի 1, 20 ժամ 30 րոպե:

Fig. 22. Forecasting failure time based on linearity on semilogarithmic coordinates, Agoyama landslide.

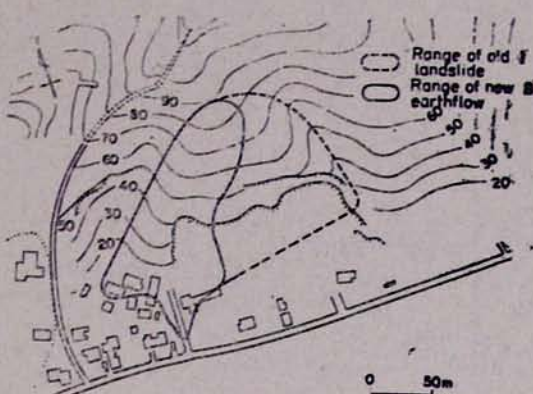


Кривые ползучести показывают, что склон находился в области вторичной ползучести до 6 апреля, а затем наступила область третичной ползучести. В полночь на 8 апреля было сделано предположение, что обрушение произойдет на одиннадцатый день, но в 10 ч 45 мин девятого дня, после последнего наблюдения, предсказали, что обру-

Рис. 23. Окончательно обрушившаяся территория оползня Агояма. 1—область старого оползня; 2—область нового земляного потока.

Նկ. 23. Ագոյամի սողանքի վերջնական փլված տիրույթ: 1—հին սողանքի տիրույթ, 2—նոր հողահեղքի տիրույթ:

Fig. 23. Finally failed area of Ago yama landslide.



шение наступит на девятый день в 18 ч 10 мин. Вопреки этому предсказанию обрушение произошло на девятый день в 17 ч 40 мин, на 30 мин

ранее предполагаемого срока (Saruta & Ishibashi, 1976).

В этом случае я также не имел отношения к работе по прогнозу.

Оползни, окончательно остановившиеся после быстрого движения

Оползень на обменном пункте Кашивара на скоростной автодороге Нишимейхан. В конце апреля 1969 г. появились признаки неустойчивости на зданиях больницы, стоящей на плоской площадке на склоне (рис. 28). Положение стало опасным с появлением многочисленных трещин на всей территории. Подобные же трещины были обнаружены на главных путях, подъемах и подпорных стенках скоростной дороги Нишимейхан. Постепенно выявилось, что размеры неустойчивой территории составляют около 250 м в ширину и 250 м по длине склона; эта площадь стала рассматриваться как возобновившиеся древние оползни.

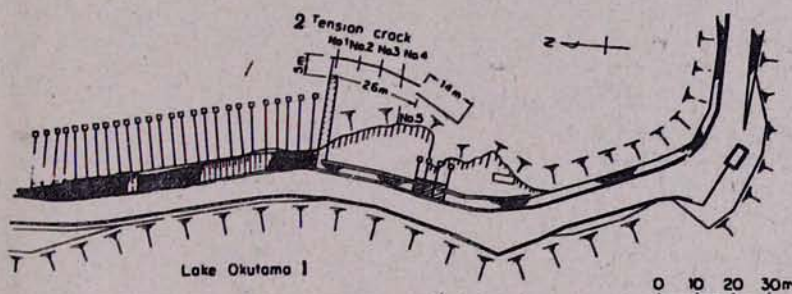


Рис. 24. План поврежденной территории вдоль приозерной дороги Тама. 1—озеро Окутама; 2—трещина растяжения.

Նկ. 24. Տամայի լճափնյա ճանապարհի երկայնական վնասված տեղանքի պլանը: 1—Օկուտամա լիճ, 2—ձգման ճեղքվածք:

Fig. 24. Plan of damaged area along Tama Lakeside road.

Исследования и наблюдения были начаты в конце мая. Охваченная оползем территория распространилась на национальную автодорогу и пригородную железнодорожную линию, расположенные ниже по склону. Оползневые движения постепенно увеличивались; так, тензосметр № 45 А показал смещение 470 мм за 40 дней с 4 июня по 16 июля, а максимальное дневное смещение—24 мм наблюдалось 13 июня.

Быстрые смещения продолжались довольно долгое время, как

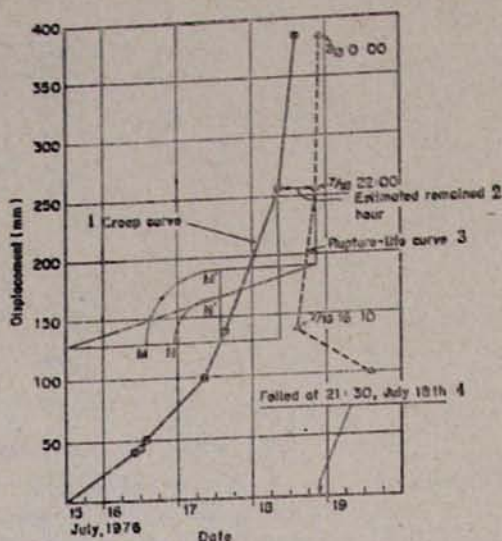


Рис. 25. Прогноз времени обрушения склона вдоль приозерной дороги Тама. Абсциссы—даты, ординаты—смещения в мм: 1—кривая ползучести; 2—вычисленный оставшийся час; 3—кривая времени обрушения; 4—обрушение произошло 18 июля в 21 ч 30 мин.

Նկ. 25. Տաճայի լճափնյա եռնապարհի երկայնքով լանդի փլման կանխագուշակումը: Աբսցիսները—ամսաթիվ, օրդինատները—աղաշաբաթ մմ-ով. 1—սողքի կորագիծ. 2—հաշվարկված մնացած ժամ. 3—փլման ժամանակի կորագիծ. 4—փլումը հուլիսի 18-ին 21 ժամ 30 րոպեին:

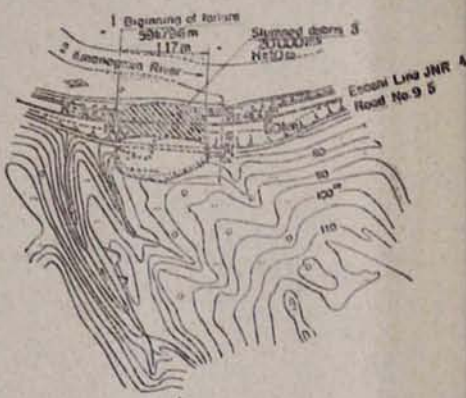
Fig. 25. Forecasting failure time by means of graphical analysis, slope failure along Tama Lakeside road.

показано на рис. 29, а затем движение постепенно стало уменьшаться. С целью дренирования склона с конца июня производилось горизонтальное бурение, и в результате удаления воды движение практически прекратилось к 10 июля (Tokuno & Tatsumi, 1971).

Рис. 26. План оползня Юнотани. 1—начало обрушения; 2—река Аманогава; 3—оползшие массы; 4—линия национальной железной дороги Есаши; 5—дорога № 9.

Նկ. 26. Յունոտայի սողանքի պլանը: 1—փլման սկիզբը. 2—Ամանոգավա գետը. 3—սողանքային զանգվածներ. 4—աղգային երկաթուղու եռաշրի գիծը. 5—ճանապարհ № 9:

Fig. 26. Plan of Yunotal landslide.



Вычислим максимальную скорость деформации. База тензометра № 45 А равна 15,54 м, поэтому движению 24 мм в день соответствует скорость деформирования $1,07 \times 10^{-6}$ в минуту. Эта величина не очень большая, но ею нельзя пренебрегать. Если бы движение с такой скоростью непрерывно продолжалось, то согласно моему методу склон обрушился бы через 9,5 дня. Исходя из того факта, что скорость деформации не превзошла этой величины, предположили, что оползень относится к такому типу оползней, которые в конце концов останавливаются без обрушения.

Оползень Ивадонояма у Отсуки на центральной скоростной автодороге. На оползневом участке Ивадонояма во время строительства дважды произошло обрушение склона. Коренные породы состоят из чередующихся туфа, шлакового туфа, туфобрекчий и туфопесчаника миоценового возраста, с дайками андезита; напластование падает в

Рис. 27. Развитие смещения дороги на оползне Юнотай. Абсциссы—даты, ординаты—перемещения в мм; 1—прекращение движения поездов в 14 час 15 мин; 2—обрушение произошло в 17 час 40 мин.

Նկ. 27. Հանապարհի տեղաշարժի անբ Յունտայի սողանքում: Աբսցիսսներ—ամսաթիվ, օր-դր՝ զիմատներ—տեղաշարժ մմ-ով. 1—գնացքների շարժման դադարեցումը 14 ժամ 15 րոպեին. 2—փլուծը 17 ժամ 40 րոպեին:

Fig. 27. Progress of displacement of road Yunotai landslide.

глубь склона. Участок представляет собой подрезанный склон с откосом 32°. 17 февраля 1972 г. на территории было обнаружено несколько линий трещин, 2 марта была околпурена оползневая территория размером 60 м в ширину и 90 м по длине склона и наблюдалось увеличение трещин (рис. 30). Наблюдения с помощью тензометров из инварной проволоки были начаты 24 февраля. После этого соответственно расширению оползневой территории были добавлены дополнительные тензометры; были установлены также дистанционно записывающие тензометры у нижней или верхней краевых трещин на случай внезапного возникновения опасной ситуации.

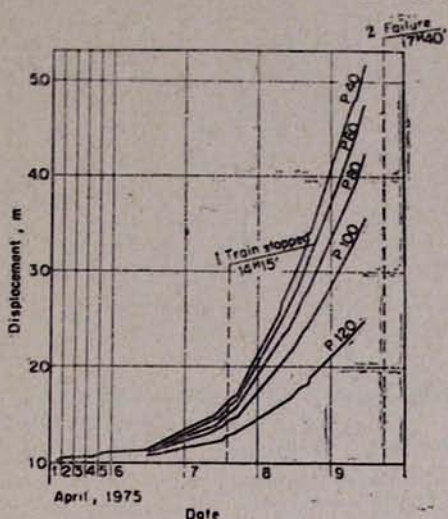


Рис. 28. План оползня у обменной станции Кашивара. 1—тензометр; 2—госпиталь; 3—скоростная дорога Нишимейхан; 4—национальная дорога № 165; 5—пригородная железнодорожная линия; 6—река Хара.

Նկ. 28. Կաշիվարայի փոխանակման կայանի մոտ սողանքի պլանը: 1—տենզոմետր. 2—հիվանդանոց. 3—նիշիմեյխանի ճեպուղի. 4—ազգային ճանապարհ № 165. 5—մերձքաղաքային երկաթուղի. 6—Հարա գետը:

Fig. 28. Plan of landslide at Kashiwara Interchange.

Как показано на рис. 31, начиная с 21 марта смещения стали быстро увеличиваться, а 26 марта неустановившаяся скорость деформирования достигла $6,14 \times 10^{-6}$ в минуту. С другой стороны, согласно графическому анализу области третичной ползучести предполагалось, что ситуация настолько серьезна, что обрушение произойдет через полтора дня. Однако вскоре выяснилось, что несмотря на наши опасения скорость деформирования не превышала этого значения, и склон стабилизировался без обрушения (Harada, 1972).

Как видно из данного случая, имеется много примеров того, что склон не обрушивается, и движение прекращается, даже если в области третичной ползучести наблюдается значительное ускорение деформирования. В таких случаях чрезвычайно трудно прогнозировать при нашем уровне знаний, обрушится склон или нет.

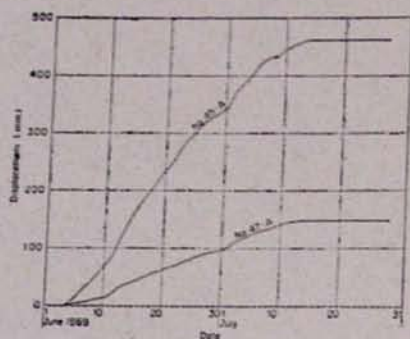


Рис. 29. Развитие смещений пригородной железнодорожной линии на оползне у обменной станции Кашивара. Абсциссы—даты, ординаты—смещения в мм.

Նկ. 29. Մերձադաշտային երկաթուղու հաշիվարայի փոխանակման կայանի մոտ սողանքի վրա տեղաշարժերի զարգացումը: Արագիսներ—ամսաթիվ, օրդինատներ—տեղաշարժ մմ-ով:

Fig. 29. Progress of displacements of suburban railway line, landslide at Kashiwara Interchange.

Обрушения типа откалывания

Обрушение вертикальной выемки в глинах в Уэлленде, Канада. Несколько лет назад Д. Кван из Управления морского пути св. Лаврентия написал мне, что при полевых испытаниях на обрушение выемки с вертикальными стенками, которые он провел для выпрямления Уэллендского канала, время обрушения, установленное по моему методу, не соответствовало действительному (Kwan, 1971). Я предполагаю, что в подобном случае мой метод предсказания времени обрушения по скорости установившейся деформации не может быть применен, так как тип обрушения представлял собой не скольжение, а откалывание и опрокидывание, ограниченное глубокими трещинами растяжения, и поверхность скольжения появилась только у самой подошвы вертикального откоса.

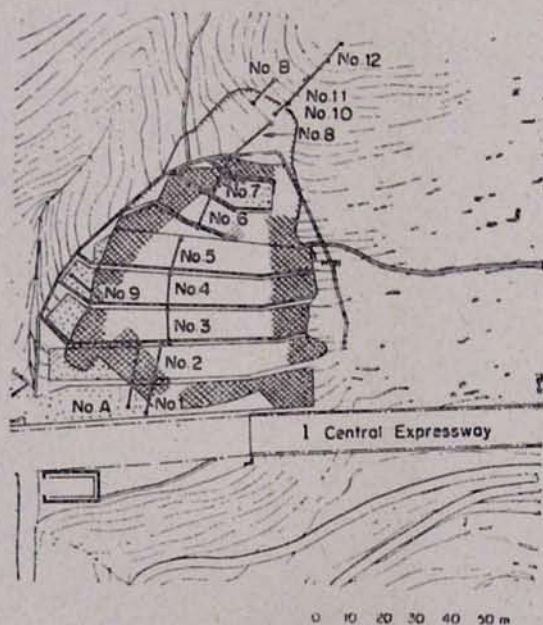


Рис. 30. План оползня Ивадонояма. 1—центральная скоростная дорога.

Նկ. 30. Իվադոնոյամայի սողանքի պլանը. 1—կենտրոնական ճեպուղի:

Fig. 30. Plan of Iwadonoyama landslide.

рис. 31. Развитие относительных смещений поперек верховых и низовых трещин на оползне Ивадзона-яма. Абсциссы—даты, ординаты—смещения в мм (вниз—сжатие, вверх—растяжение); 1—No. B—растяжение поперек верховой трещины; 2—No. A—поперек низового языка; 3—третичная кривая длительности разрушения.

рис. 31. Իվադոնոյամայի սղաւնքի վրա վերին և ներքին ճեղքվածքների լայնեով տարարեալան տեղաշարժի զարգացում: Արտիստներ—ամսաթիվ, օրդինատ—տեղաշարժ մմ-ով (ներքև՝ սեղմում, վերև՝ ձգում). 1—No. B—վերին անոտան ճեղքվածքի լայնեով, 2—No. A—ներքին լեզվի լայնեով, 3—փման ժամանակի հաշվարկված կորագիծ:

Fig. 31. Progress of relative displacement crossing over upper or lower and cracks, Iwadonoyama landslide.

В данном случае, однако, к результатам испытаний может быть применен графический анализ из области третичной ползучести. Как видно из рис. 32, он дал хорошее соответствие с конечным временем обрушения.

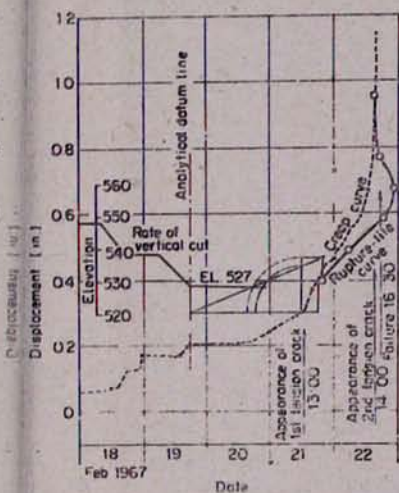


рис. 32. Графический анализ для прогноза времени обрушения оползня в Уэлленде, Канада.

Նկ. 32. Կանադայում Ուելենդի սղաւնքում փման ժամանակի կանխագրչականը գրաֆիկական վերլուծումով:

Fig. 32. Graphical analysis for forecasting failure time, Welland, Canada.

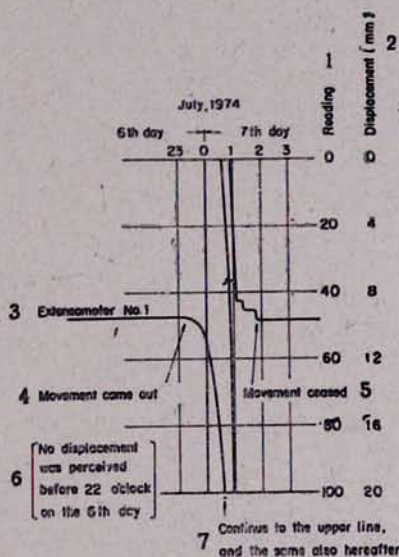
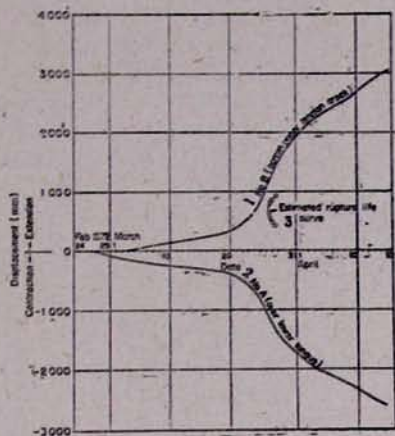


рис. 33. Развитие смещений на оползне в Хикета. 1—отсчеты; 2—перемещения в мм; 3—тензометр № 1; 4—движение началось; 5—движение прекратилось; 6—до 22 часов 6 июля не было замечено никаких смещений; 7—продолжить до верхней линии и повторить еще раз.

Նկ. 33. Հիկետայում սղաւնքի տեղաշարժի զարգացումը: 1—դուրսմուտքներ, 2—տեղաշարժ մմ-ով, 3—տենզոմետր № 1, 4—շարժումը սկսվեց, 5—շարժումը դադարեց, 6—մինչև հուլիսի 6-ի ժամը 22-ը չէր նկատվել ոչ մի տեղաշարժ, 7—շարունակել մինչև վերին գիծը և կրկնել մեկ անգամ եւս:

Fig. 33. Progress of displacement, Hiketa landslide.

тито если правильно выбрать время разрушения, то измеренные величины, отложенные на полулогарифмическом графике (деформации на ненормальной шкале и $t_r - t$ на логарифмической) должны лежать на прямой. Результаты применения этого метода показаны на рис. 34. Выбирая этим путем переменную «время до разрушения», было найдено, что обрушение произошло 7 числа примерно в 1 ч 10 мин. Если бы в данном случае была применена такая процедура, то определение времени обрушения было бы очень эффективным. Таким образом, предсказание времени обрушения склона, непосредственно вызванного дождями, применимо на основании полулогарифмического представления данных.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Исходя из нескольких случаев, описанных выше, можно заключить, что метод предсказания времени обрушения, основанный на характеристиках ползучести-разрушения, то есть на грубой оценке времени до обрушения, базирующейся на установившейся скорости деформирования, более близком определении путем расчета или графического анализа с использованием заменяющей логарифмической формулы и заключительном точном определении, базирующемся на линейности на полулогарифмическом графике, путем подбора переменной величины «жизнь до разрушения», является эффективным и достоверным. Что касается достоверности, то предсказание может быть сделано в днях, если прогноз делается за несколько дней, и в часах или даже порядка десяти минут, если делается накануне.

*
* *

Несмотря на то, что я не имел отношения к большей части полевых исследований обрушения склонов, приведенные данные непосредственно демонстрируют достоверность метода предсказания. Я высоко ценю возникшую возможность дать этому методу практическое применение.

Я хочу выразить сердечную признательность проф., д-ру техн. наук Г. И. Тер-Степаняну, который убедил меня представить эту статью. Хочу также выразить искреннюю признательность сотрудникам Корпорации, в особенности ее председателю д-ру наук Л. Фукада, президенту д-ру наук К. Суяма и заместителю начальника технического отдела С. Охия, за сотрудничество.

ԼԱՆՁԵՐԻ ՓԼՎԱԾՔԻ ԿԱՆԵԱԳՈՒՇԱԿՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՔԵՐԻ ՓԱՍՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒՄՆԵՐԸ¹

Դոկտ.— ինժ. Միշիտակա Սախոն²

Խմբագրի կողմից. Ինժեներական երկրաբանության բնագավառում վերջին ժամանակվա ամենագումանայի հաշվարկայուններից մեկն էր Հայպոնիայում Տակարայամա սղանքի շտապանց ստույգ կանխագուշակումը, որը կատարված էր 1969 թ. դոկտ.— ինժ. Միշիտակա Սախոնի կողմից. աղետի ժամանակը կանխագուշակված էր ընդամենը 6 րոպե սխալով: Այդ սղանքի և լանջի փլվածքի ժամանակի կանխագուշակման եղանակի մասին հակիրճ տեղեկությունները լույս տեսան անգլերեն և հայերեն բնագրերի և հայերեն հաշվարկայունների մի քանի հաշվարկայուն հրատարակություններում: Սղանքների կանխագուշակման կարևոր նշանակության պատճառով ես օգտվեցի Հա-

¹ Թևեհրեհից Թարգմանեց Սվետլանա Սիմոնյանը:

² ՕՅՕ Կորպորացիայի գիրենկտոր և գլխավոր ինժեներ, Տակիո, Հայպոնիա:

պահանջան սաղանգային ընկերության հրավերից՝ այցելել 1977 թ. Ճապոնիա՝ դասախոսություններ կարդալու և այնտեղ խնդրեցի ջակտ. ինժ. Մ. Սաիտային պատրաստել ավելի ընդարձակ հաղված, Ճապոնիայում կիրառվող սաղանգները կանխագուշակելու եղանակների մասին «Գեո-մեխանիկայի պրոբլեմներ»-ում հրատարակելու նպատակով: Դեպքում. — ինժ. Մ. Սաիտան շատ փութով երևան ուղարկեց խոստացած հոդվածն անգլերեն, որը և մտավ 1978 թ. հրատարակման նախատեսված ժողովածուի մեջ: Մեզանից անկախ պատճառներով այդ ժողովածուի հրատարակումը հետաձգվեց մինչև 1982 թվականը: Այդ ընթացքում, խմբագրի քայլափոխումը, ջակտ-ինժ. Մ. Սաիտան հրատարակեց ճշված հոդվածը Կարագացիայի աշխատությունների ժողովածու՝ «OYO Technical Report» մեջ անգլերեն, հապաներեն՝ հակիրճ բովանդակությամբ, համապատասխան ծանոթությունով (Saito, 1979): Հաշվի առնելով այդ հանգամանքը, գտա՞նք ավելի նպատակահարմար ջակտ. — ինժ. Սաիտայի հոդվածը հրատարակել ուսերեն լեզվով ամբողջությամբ, հայերեն և անգլերեն հակիրճ բովանդակությամբ:

Պարզ Տեր-Ստեփանյան

Ռե ֆ ե ր ա տ. Հոդվածում տրվում է լանջերի փլվածքի կանխագուշակման երեք զորոշու-թյուններ. դրանք են. 1) կոպիտ շնահատում՝ հիմնված սողքի երկրորդական շրջանում ձևափոխության հաստատված արագության վրա, 2) մոտավոր գնահատում՝ հաշվարկի կամ գրաֆիկական վերլուծման եղանակով, օգտագործելով փոխարինող լողարկիմական բանաձևը, 3) վերջնական ճշգրիտ ժամանակի հաշվարկ հիմնված ղեֆորմացիայի և մինչև քայքայումը ժամանակի հարաբերության կիսալոգարիթմական գրաֆիկի զմայնության վրա: Դիտելով ուսումնասիրությունների մի քանի դեպքեր, կարելի է ասել, որ փլվածքի ժամանակի կանխագուշակումը՝ հիմնված սողք-խզման բնութագրությունների վրա, արդյունավետ է և հուսալի:

Կանխագուշակում մեծ մասամբ նշանակում է, որ տվյալ լանջում կծաղի սողանք կամ փլվածք: Ցանկալի է նաև իմանալ ղեպքի ժամանակը: Կարելի է սահմանափակվել այս հարցով և ընդունել, որ կանխագուշակման նպատակն է փլվածքի ժամանակի որոշումը: Լանջերի փլվածքի կանխագուշակման համար անհրաժեշտ է բացահայտել շղափելի կամ իրեն վազ ի հայտ բերող զորոշումները: 1949 թ. Ճապոնական պետական երկաթգծերի կողմից բնական մասշտաբով իրագործված լանջի քայքայման փորձը, արհեստական անժրհանցման միջոցով, ցույց տվեց, որ կանխագուշակման ամենաարդյունավետ զորոշող լանջի մակերևույթի ձևափոխման շափումն է: Այս, դիմելով լարորատոր սողք-խզման փորձերին, հիմնավորեցին, որ հաստատուն արագության և սողք-խզման տեղություն միջև կա հակադարձ համեմատական կապ:

Այս հարաբերությունը ուսումնասիրված է լանջերի իրական փլվածքի տվյալների հետ համատեղ և զործնական եղով փլվածքին նախորդող տեղության գուշակման համար: Հետազա-յում դառան, որ հակադարձ համեմատական հարաբերությունը կարելի է տարածել սողքի երրորդա-յին շրջանի վրա: Սա հանգեցրեց կիսալոգարիթմական գրաֆիկների զմայնության վրա հիմնված գրաֆիկական վերլուծման մեթոդի մշակմանը: Բոլոր այս ձևերը մտնում են հեղինակի կողմից մշակված լանջի փլվածքի սկսման ժամանակի կանխագուշակման մեթոդի մեջ (Saito, 1970):

Այժմ կարելի է հանդիպել սողքի և փլվածքի փորձերին վերաբերող շատ օգտակար հոդ-վածներին: Այդ արդյունքների հանրագումարը բերված է նկ. 15-ում³, որտեղ կետերի մեծա-մասնությունը տեղավորված են Սաիտայի և Ուեսավայի կողմից առաջարկված 95%-անի վստահ-ված սահմանի տիրույթում (Saito & Uesawa, 1961):

Հետևաբար պետք է ննթաղել, որ ձևափոխության հաստատված արագության և սողք-խզման տեղություն միջև հարաբերությունը, որը մենք առաջարկեցինք 1961 թ., այժմ ևս հանդիսանում է բոլորի կողմից ընդունված և կիրառելի: Կինետիկ ընթացքների տեսությունը կարող է գործնաոր սողքի երևույթի բացատրության մեջ հաջողություն ունենալ, սակայն երրոր-դային սողքի շրջանում կան շատ պրոբլեմներ, որոնք չեն կարող բացատրվել այս տեսությամբ: Հետևաբար կարելի է ընդունել, որ այժմ դոյություն չունի սողքի տեսություն, որը կարողանար կիրառվել երրորդային սողքի շրջանի նկատմամբ: Այս շրջանի համար օգտակար է միայն հեղինակի կողմից առաջարկված փորձնական բանաձևը, բոլր նկարագրում է երևույթը մինչև քայքայման պահը:

³ Նկարները տե՛ս էջ 47—48:

Որպես ապացուցող փաստեր բերվում են ուսումնասիրման մի քանի դեպքեր, որոնք բաժանված են հետևյալ շորս խմբերի՝ 1) սողանքներ, որոնք տեղի են ունեցել սողքի երկարատև շարժումներից հետո, 2) սողանքներ, որոնք վերջնականապես կանգ են առել առանց փլվածքի, 3) փլվածք, շարժման ձևով, 4) լանջերի փլվածք, առաջացած անձրևների պատճառով:

Տակաբայամայի սողանքը (նկ. 16—19) հայտնի է որպես հիանալի դիտումների օրինակ (Salto & Yamada, 1973)։ Անսովոր տեղափոխությունները հայտնաբերվեցին 1969 թ. ապրիլին, փլվածքից մոտավորապես 9 ամիս առաջ, և դրանից հետո կատարվեցին մասնազննիչ դիտումներ: Փլվածքի ժամանակի կանխագուշակումը կատարվեց երկու եղանակով՝ ձևափոխության չհաստատված արագության դնահատումով և երրորդային սողքի տիրույթում փոխարինող լողարկի միջանկյուն կորագծի գրաֆիկական վերլուծումով: Փլվածքի նախօրյակին՝ 1970 թ. հուլիսի 21-ի երևելյան ժամը 5-ին հրապարակվեց տեղեկություն այն մասին, որ լանջը կփլվի գալիք կեսգիշերին կամ մինչև լուսաբաց: Հետագայում փլվածքի հաշվարկված ժամանակը վերանայվում էր ժամը մեկ անգամ: Կեսգիշերին, գրաֆիկական անալիզի հիման վրա, երրորդային սողանքի շրջանում արվեց վերջնական հաղորդում այն մասին, որ փլվածքը տեղի կունենա հուլիսի 22-ին առավոտյան 1 ժամ 30 րոպ., իրական սողանքը տեղի ունեցավ հուլիսի 22-ին առավոտյան 1 ժ. 24 րոպ., փլվածքի իրական և հաշվարկված ժամանակի տարբերությունը կազմում էր միայն 6 րոպե: Անված էր, որ դա ոչ այլ ինչ է, եթե ոչ հրաշք:

Ազոյամայի (նկ. 20—23) սողանքի դեպքում փլվածքի ժամանակի կանխագուշակումը ավելի դժվար էր, կապված վերջնական փուլում ոչ կանոնավոր շարժումների հետ. տարբերությունը հաշվարկված և իրական փլվածքի ժամանակների միջև կազմում էր մոտավորապես 5 ժամ (Watari, 1973): Ավելի ուշ պարզվեց, որ այս անհամաձայնությունը առաջացել էր այն պատճառով, որ վերջին փուլում ամբողջ մասսայի շարժումը կանգնել էր և փլվել էր միայն զանգվածի մեկ երրորդ մասը:

Լնայիյա Տամայի ճառագայրի զառիթավ լանջի (նկ. 24—25) և Յունոտաիի (նկ. 26—27) սողանքի փլվածքի մասին հրատարակված էին պարբերական տեխնիկական ամսագրում Hasegawa & Kluchi, 1977; Saruta & Ishibashi, 1976): **Երկու դեպքում էլ կիրառված էր կանխագուշակման իմ մեթոդը, բայց անուշույուն չեմ ունեցել դիտումների և փլվածքի ժամանակի հաշվարկումների հետ:**

Կաշիվարայի փոխանակման կայանի սողանքը (նկ. 28—29) և Իվադոնոյամայի սողանքը (նկ. 30—31) հանդիսանում են սողանքների օրինակներ, որոնք արագ շարժումից հետո վերջիվերջո կանգ առան առանց փլվածքի (Tokuno & Tatsumi, 1971; Harada, 1972), Ուշադրություն արժանի է, որ ձևափոխության ամենամեծ արագությունը երկու դեպքում էլ հասնում էր րոպեում 10—6 կարգի:

Ուելինդում (նկ. 32) ուղղադիմ հանվածքի փլվածքի դեպքում փլվածքի ժամանակի կանխագուշակումը, ըստ ձևափոխության հաստատված արագության, ստացվեց ոչ ճիշտ, սակայն գրաֆիկական անալիզի կիրառումը պետք է, որ տար լավ արդյունքներ (Kwan, 1971):

Անմիջականորեն հորդառատ անձրևներից առաջացած Հիկետայի սողանքի դեպքում, սողանքային շարժման մեխանիզմը տարբերվում է սովորական սողանքների մեխանիզմից և հետևաբար փլվածքի ժամանակի սովորական հաշվարկը կիրառելի չէ (նկ. 33—34). զճանութային հասնելու նպատակով կիսալողարկի միջանկյուն կառուցումների կիրառումը հաջողություն բերեց (Sakurai, 1974; Yano, 1976):

Պրակտիկայից այդ դեպքերի ուսումնասիրության հիման վրա կարելի է ենթադրել, որ փլվածքի սող-խզման բնութագրի վրա հիմնված մեթոդը արդյունավետ է և հուսալի:

EVIDENTIAL STUDY OF FORECASTING OCCURENCE OF SLOPE EAILURE

Dr. Eng. MICHITAKA SAITO¹

From Editor. The exceptional accuracy of forecasting the Takabayama landslide in Japan done lately by Dr. Eng. M. Saito was one of the most remarkable achievements in the field of engineering geology; the time of the slope failure

¹ Director and Chief Engineer, OYO Corporation, Tokyo, Japan.

was forecasted with an error of 6 minutes only. The short information concerning this landslide and its forecasting appeared in English and Japanese in several successive publications. Owing to the great importance of the landslide forecasting I profited the invitation by the Japan Society of Landslides to visit Japan for lecturing in 1977 and asked Dr. Eng. M. Saito to prepare a more complete paper on the methods of the landslide forecasting for its publication in the Transactions „Problems of Geomechanics“. Dr. Eng. M. Saito sent me very kindly the promised paper in English; it was included in the Transactions planned for publication in 1978. Owing to circumstances beyond our control the publication of the Transactions was retarded until 1982. In the meantime Dr. Eng. M. Saito by Editors consent published this paper in English with a Japanese summary in Transactions „OYO Technical Report“ in Tokyo, with a corresponding reference (Saito, 1979). Taking this into consideration it was found as more expedient to publish the present paper in Russian fully with Armenian and English abridgments.

GEORGE TER-STEPANIAN

Synopsis. This paper describes an outline of three types of the procedure on forecasting occurrence of slope failure, that is to say, rough estimation based on steady-state strain rate in the secondary creep range, close estimation through calculation of graphic analysis using substituted logarithmic formula and final precise estimation based on linearity on a semi-logarithmic graph assuming temporary rupture life. Considered from several case studies, it can be said that the method of forecasting failure time based on creep-rupture characteristics is effective and reliable.

In most cases, forecasting means occurrence of slide or failure for a specified slope. Among other things the time of occurrence is desired to know; therefore, we may make a point of limiting the meaning of forecasting to that of failure time.

A short cut to find forecasting factor is to carry out slope failure tests and thereby to see what factors are most sensitive or can show earlier changes. Through full-scale slope failure tests with artificial rainfall by Japanese National Railways in 1949, it was found that strain measurement of slope surface is the most effective as forecasting factor. It was turned to creep-rupture tests in laboratories, and inversely proportional relationship between steady-state strain rate and creep-rupture life was found.

This relationship was examined with actual slope failure records and verified effective to forecast the rupture life. It was found, furthermore, that the inversely proportional relationship can be extended to the tertiary creep range with some modification. This resulted to devise graphical analysis and semi-logarithmic representation to pursue linearity. All these procedures are included in the method of forecasting the time of initiation of slope failure that I have developed.

Nowadays there can be found many useful contributions related to creep-rupture tests. Compilation of those results is shown in Fig. 15¹, in which plots are situated within the range of 95% confidence limits proposed by Saito & Uezawa (1961). It can be said, therefore, that the relationship between steady-state strain rate and creep-rupture life, which we made a proposal in 1961, is current and available still now.

Recently, rate process theory has come to gain ground to explain creep phenomena of soil, but there are many problems that cannot be explained with this theory in the tertiary creep range. It should be said, therefore, that no creep theory is formed at present to be applicable to the tertiary creep range. In this range the experimental formula proposed by the author is only our strength up to the moment of rupture.

Several case studies are referred to as evidential facts, classified in four groups as follows:

- (1) Landslides failed after long creep movement,
- (2) Landslides that finally ceased without failure,

¹ Figures see pages 47—68.

(3) Split-type failures,

(4) Slope failures directly caused by rainfall.

Takabayama Landslide is known as an example of perfect observation and vigilance. Unusual dislocation was found in April 1969, about 9 months before failure, and thereafter careful observation was performed. Forecasting of failure time was made with two ways: estimation with transient strain rate and graphical analysis for substituted logarithmic curve in the tertiary creep range. Public announcement for failure was made at 5 p.m. on the 21st of Jan. 1970, the day before, that the slope would fail at the coming midnight or before dawn. Then the estimation of failure time was revised every hour. The final announcement was made at the midnight that the failure would occur at 1:30 on the 22nd, according to the graphical analysis in the tertiary creep range, and actual failure occurred at 1:24 on the 22nd. The difference between estimated and actual failure time is only 6 minutes. It was said that there was nothing else than a miracle.

In case of Agoyama Landslide, forecasting of failure time was rather difficult, because of irregular movement at the final stage, and the difference between estimated and actual failure time resulted in amount of 5 hours. Later it was made clear that this discrepancy was caused by the reason that movement of total mass was stopped at the final stage and only one third of the mass failed at all.

Collapse of a steep slope at Tama Lakeside Road and Yunotai Landslide were reported in commercial technical magazine. In both cases, my forecasting method was used, but I had no relation with the work of observation and estimation of failure time.

Landslide at Kashiwara Interchange and Iwadonoyama Landslide are examples of landslides that finally ceased without failure after rapid movement. It is worth noticing that maximum strain rate attained to the order of 10^{-6} per min. in both cases.

In case of failure of a vertical cut at Welland, forecasting of failure time with steady-state strain rate did not come true, but graphical analysis would be applied with good result.

In case of Hiketa Landslide, directly caused by heavy rainfall, mechanism of sliding movement is not the same with that of usual landslide, and so usual estimation of failure time is not applicable, but semi-logarithmic representation to pursue linearly is successfully applied.

Through these case studies, it can be said that the method of forecasting failure time based on creep-rupture characteristics is effective and reliable.

I would like to express cordial gratitude to Prof., Dr. Techn. Sc. G. I. Ter-Stepanian, who persuaded me to present this paper, and also to express my wholehearted appreciation to officers of OYO Corporation, especially to the Chairman Dr. Sci. A. Fukada, the President Dr. Sci. K. Suyama and Mr. S. Ohya, Deputy Head of the Technical Headquarters of OYO, who willingly admitted and encouraged me to complete my work.

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ — ЛИТЕРАТУРА — REFERENCES

- Тер-Степанян Г. И., 1976. Исследование ползучести глин при сдвиге. Проблемы геомеханики, Ереван, № 7, с. 18—49.
- Bishop A. W., 1966. The strength of soils as engineering materials, Sixth Rankine Lecture, *Geotechnique*, 16(2):89—130.
- Campanella R. G. & Vaid Y. P., 1974. Triaxial and plane strain creep rupture of an undisturbed clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 11(1):1—10.
- Casagrande A. & Wilson S. D., 1951. Effect of rate of loading on the strength of clays and shales at constant water content, *Geotechnique*, 2(2):251—263.
- Finn W. D. L. & Snead D., 1973. Creep and creep rupture of an undisturbed sensitive clay, *Proc. Eighth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg.*, Moscow, 1—1: 135—142.
- Harada S., 1972. Landslide at Iwadonoyama on Central Expressway and its repair work, *Construction*, 10(8): 30—37 (In Japanese).

- Hasagawa H. & Kiuchi A., 1977. On forecasting slope failure along Tama Lakeside Road, Soils and Foundations, 25(3):83-86 (in Japanese).
- Kurihara N., 1972. Experimental study on creep rupture of clays, Proc. Japan Soc. Civil Engrs, 202:59-71 (in Japanese).
- Kwan D., 1971. Observations of the failure of a vertical cut in clay at Welland, Ontario, Canadian Geotech. Jour., 8(2):283-298.
- Lazan B. J., 1962. Stress-strain-time relations for idealized materials, Symposium on Stress-Strain-Time-Temperature Relationships in Materials, ASTM, STP 325:3-18.
- Morlier P., 1964. Étude expérimentale de la déformation des roches, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 19(10):1113-1147; 19(11):1183-1217.
- Murayama, S. & Shibata T., 1956. On the rheological characters of clay. Trans. Japan Soc. Civ. Engrs., 40 (in Japanese).
- Murayama S. & Shibata T., 1961. Rheological properties of clays, Proc. Fifth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Paris, 1:269-273.
- Saito M., 1965. Forecasting the time of occurrence of a slope failure, Proc. Sixth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Montreal, 2:537-541.
- Saito M., 1968. Research on forecasting the time of occurrence of slope failure, Railway Technical Research Report, 626, JNR, (in Japanese).
- Saito M., 1969. Forecasting time of slope failure by tertiary creep, Proc. Seventh Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Mexico City, 2:677-683.
- Saito M., 1970. Estimation of the rupture life of soil based on the shape of the creep curve, Proc. Fifth Int. Cong. on Rheology, Kyoto, 2:559-567.
- Saito M., 1979. Evidential study on forecasting occurrence of slope failure. OYO Technical Report, Tokyo, No. 1, pp. 1-23 (with Japanese summary).
- Saito M. & Uezawa, H. 1961. Failure of soil due to creep, Proc. Fifth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Paris, 1:315-318.
- Saito M. & Yamada G., 1973. Forecasting and result in case of landslide at Takabayama, Proc. Eighth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Moscow, 4-3:325-327.
- Sakurai T., 1974. Landslide disaster on the Japanese National Railways, News, Landslides, 11(3):40-41 (in Japanese).
- Saruta T. & Ishibashi M., 1976. Big slope failure in 20 days after beginning of movement. Railway Civil Engineering, 12(6):47-50 (in Japanese).
- Sekiguchi H., 1977. Rheological characteristics of clay, Proc. Ninth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Tokyo, 1:289-292.
- Singh A. & Mitchell J. K., 1969. Creep potential and creep rupture of soils, Proc. Seventh Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Mexico City, 1:379-384.
- Tokuno M. & Tatsumi T., 1971. Landslide at Nishimeihan Expressway and its treatment, Civil Engineering Execution, 12(3):21-32; 12(4):17-27 (in Japanese).
- Vyalov S. S., Maslov N. N. & Karaulova Z. M., 1977. Laws of soil creep and long-term strength, Proc. Ninth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Tokyo, 1: 337-340.
- Watari M., 1973. Landslide movement at Agoyama, Fukui Pref. Executive Technique 6(7): 109-112 (in Japanese).
- Yano Y., 1976. I witnessed a big slope failure, Railway Civil Engineering, 18(6):75-76, (in Japanese).