

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 5

УДК 622.28, 622.831

**ПОВЕРХНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ И ТРАЕКТОРИЯ
РАЗРУШЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТА СО СЛАБЫМ ПРОСЛОЕМ**

Шаоцян Лю¹, Хонбао Чжао^{1,2}, Шицзе Цзин¹, Тао Ван³

¹*Китайский горно-технологический университет,*

E-mail: hongbaozhaocumtb@163.com, 100083, г. Пекин, Китай

²*Уханьский технологический институт, 430205, г. Ухань, пров. Хубэй, Китай*

³*Тайюаньский технологический университет, 030024, г. Тайюань, Китай*

Для угольного разреза Неки, находящегося в провинции Шаньси Китая, с помощью мониторинга найдено расположение слабого прослоя в массиве борта. С целью изучения механизма скольжения борта со слабым прослойем построена трехмерная численная модель, рассмотрены поверхность потенциального скольжения и критические силовые элементы. Поверхность потенциального скольжения установлена на основе изучения изолиний смещений и максимального приращения деформаций сдвига. Предложен принцип выявления критических элементов массива борта со слабым прослойем. Определен главный критический элемент поверхности потенциального скольжения и траектория динамического разрушения критических элементов.

Угольный разрез, массив борта, слабый прослой, поверхность потенциального скольжения, критический силовой элемент, траектория разрушения элементов

DOI: 10.15372/FTPRPI20240508

EDN: IVMCLI

Освоение месторождений на больших глубинах ввиду исчерпания неглубоко залегающих запасов полезных ископаемых — главная тенденция развития горнодобывающей отрасли [1, 2]. Для угольных формаций характерна слоистая структура, в которой физико-механические свойства слоев из-за особенностей залегания и геологических сдвигов отличаются друг от друга. Наличие бортов со слабыми прослойками — распространенный фактор освоения глубоких месторождений [3]. Вследствие большой мощности и низких физико-механических свойств слабых прослоев массивы бортов предрасположены к оползневым явлениям, которые могут нарушить устойчивость склонов и привести к катастрофическим последствиям [4–6]. Изучение параметров деформации и механизма обрушения бортов со слабыми прослойками имеет практическую значимость в обеспечении безопасности отработки глубоких месторождений открытым способом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Открытого проекта инженерно-исследовательского центра по освоению фосфорных запасов при Министерстве образования (№ LKF20201), Национального фонда естественных наук для молодых ученых (№ 52204105), Фонда фундаментальных исследований при Китайском университете горного дела (№ BBJ2023004).

Устойчивость бортов со слабыми прослойями и механизм скольжения пород рассмотрены во многих работах путем теоретического анализа, численного моделирования, полевых испытаний и т. д. В [7] теорема верхнего предела использовалась для анализа влияния прочности и формы слабых прослоев на устойчивость борта. В [8] на основе механизма конусного разрушения построена трехмерная комбинированная модель и выполнен трехмерный анализ устойчивости бортов со слабым прослойем. В [9] посредством численного моделирования и способа снижения прочности исследованы деформация и потеря устойчивости массива, вызванные взаимодействием породы со слабым прослойем. В [10] приводится метод динамической оценки устойчивости борта на основе способа снижения прочности. В [11–13] проанализировано деформирование борта карьера со слабым прослойем. В [14–17] изучен динамический механизм потери устойчивости борта со слабым прослойем и предложен энергетический метод описания характера динамического разрушения борта. Для описания устойчивости бортов со слабыми прослойями в сложных геологических условиях часто применяется численное моделирование, с помощью которого можно описать весь процесс разрушения [18–22].

Слабый прослой имеет определяющее значение для устойчивости борта. Существует достаточно много работ, посвященных данной теме, однако менее изучена поверхность потенциального скольжения в таких бортах и траектория динамического разрушения критических силовых элементов. В настоящей работе на примере угольного разреза Неу и на основе данных моделирования напряженного состояния борта методом численного моделирования определена поверхность потенциального скольжения (ППС), установлены критические элементы вдоль слабого прослоя и проанализирована траектория динамического разрушения критических элементов.

УСЛОВИЯ ЗАЛЕГАНИЯ И РАЗРАБОТКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Угольный разрез Неу расположен недалеко от г. Синьчжоу (провинция Шаньси). Область добычи охватывает несколько отрабатываемых угольных пластов, основные из которых — 10 и 13. Согласно геологическим данным, над угольным пластом 13 залегает слабый прослой из мадстоуна мощностью ~0.5 м. Для установления ППС выполнены полевые измерения деформаций массива борта в западной оконечности горнорудного района. На горизонтальной плоскости борта образовались макротрецины параллельно уклону, ширина трещин составляет 3–40 см, глубина — 2–50 см. На измерительной площадке пробурено четыре скважины (рис. 1). В табл. 1 приведены координаты скважин и глубина измерения.

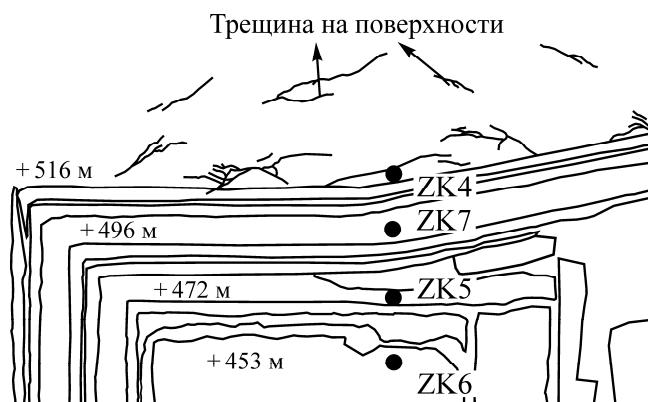


Рис. 1. Трещины и их расположение на поверхности: ZK4–ZK7 — скважины

ТАБЛИЦА 1. Глубина установки инклинометра и координаты расположения скважин

Скважина	Глубина установки инклинометра, м	X	Y	Z
ZK4	58.91	521 304.16	4 642 954.40	516.03
ZK7	74.25	521 303.39	4 642 911.18	496.69
ZK5	77.72	521 304.00	4 642 857.50	472.57
ZK6	51.98	521 304.23	4 642 807.08	453.79

После бурения скважины до требуемой глубины в нее устанавливался инклинометр, который использовался для мониторинга деформации борта. Спустя трое суток в каждой скважине трижды выполнялось измерение, среднее значение принималось за исходное смещение. Далее на скважинах с интервалом двое суток проводился мониторинг деформации массива. Его общий период 4 мес. При каждом измерении было получено два набора смещений, принималось их среднее значение. Для оценки и анализа сдвига породного массива борта бралось относительное смещение.

Скважина ZK4 расположена на уступе + 516 м и имеет глубину 58.91 м. В ходе мониторинга резкие изменения смещений не зафиксированы, относительное смещение характеризуется восходящим трендом от дна до начала скважины. Расстояние между кривыми невелико, смещение изменяется крайне слабо, максимальное относительное смещение ~20 мм. Так как скважина расположена в пределах призмы обрушения и ее глубина не достигает критического слоя скольжения, изменение смещения на каждой отметке глубины обусловлено поведением призмы обрушения.

Скважина ZK7 находится на уступе + 496 м, глубина составляет 74.25 м. В ходе измерений зафиксировано значительное смещение на глубине ~42 м. Очевидно, данный породный слой критический в контексте скольжения борта. По сравнению с ZK4 относительное смещение пород скважины ZK7 больше. Деформация в середине призмы обрушения больше, чем в области скважины ZK4.

Относительные смещения скважины ZK5 значительно превысили смещения скважин ZK4 и ZK7 за период измерений. Существенное изменение смещений зафиксировано на глубине ~21 м. Вероятно, на данной глубине расположен критический слой.

Скважина ZK6 расположена на уступе + 453 м и имеет глубину 51.98 м. В процессе измерений зафиксировано резкое смещение на глубине ~3 м, поэтому можно предположить, что на этой глубине расположен критический слой. По сравнению с ZK5 максимальное относительное смещение скважины ZK6 меньше, т. е. она находится в зоне выхода сдвига в разрез.

В программном обеспечении Rhino3D для иллюстрации изменения смещений на разной глубине скважин построены соответствующие кривые для каждой точки измерения (рис. 2). Для скважин ZK5, ZK6 и ZK7 характерно отчетливое изменение смещения на верхней границе угольного пласта 13. Относительное скольжение между слоями способно снижать прочность, в результате чего может произойти оползень. В этом месте высокая вероятность образования поверхности скольжения. В ходе кернового бурения выявлено, что между конгломератом песчаника и пластом 13 наблюдаются серо-черные фрагменты. Предположительно, между пластом 13 и конгломератом песчаника находится слой карбонатного мадстоуна. Наблюдаются

значительная трещиноватость конгломерата песчаника, что делает его проницаемым слоем. Можно предположить, что окрестность верхней границы угольного пласта 13 — слабый прослой, определяющий устойчивость борта, а нижняя часть ППС проходит вдоль слабого прослоя.

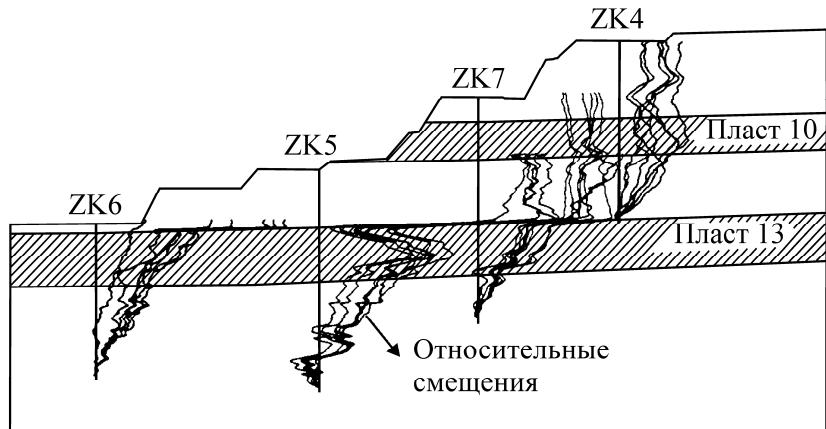


Рис. 2. Результаты полевых измерений смещений

Анализ устойчивости выполнен на примере борта в западной части разреза с помощью программного обеспечения для численного моделирования FLAC-3D. Модель строилась с учетом упомянутых геологических условий с некоторыми упрощениями. Согласно [7], выбраны следующие размеры модели: $X=330$ м; $Y=20$ м; $Z=120$ м; высота борта $H=55.6$ м; угол наклона борта 34° (рис. 3). Деформирование угольной породы подчиняется соотношениям модели Мора–Кулона. Предполагаются выполненные условия плоской деформации. Нижняя граница модели зафиксирована, границы $X=0$ и $X=330$ закреплены в горизонтальном направлении, верхняя свободна. Исходное поле напряжений определяется собственным весом пород. Для расчета коэффициента запаса прочности использовался метод снижения прочности. Расчет заканчивался, когда отношение неуравновешенности сил достигало значения 10^{-5} . Каждому породному слою задавались свои физико-механические свойства. Коэффициент запаса прочности принят 1.25. В табл. 2 приведены геотехнические параметры породных слоев.

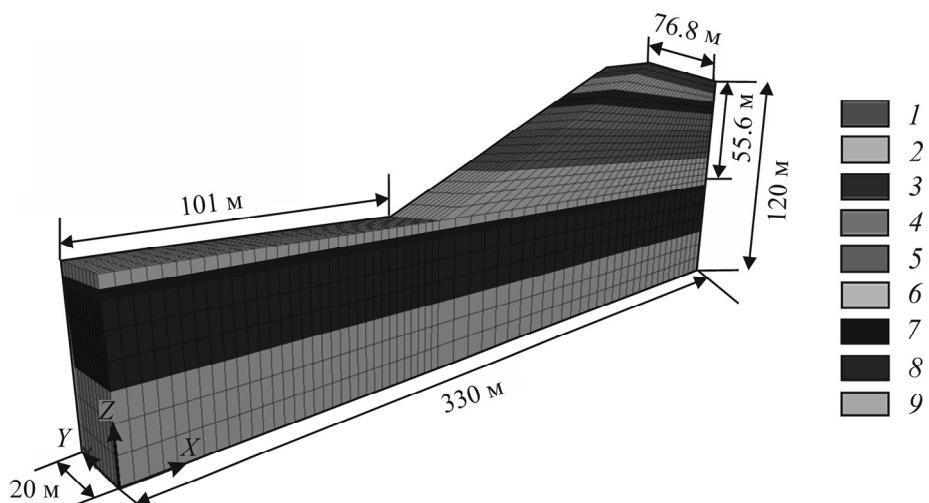


Рис. 3. Породный состав борта угольного разреза Неку: 1 — породы четвертичного периода; 2 — глинистый песчаник; 3 — песчаник; 4 — мадстоун; 5 — пласт 10; 6 — обломочная порода; 7 — прослой мадстоуна; 8 — пласт 13; 9 — коренная порода

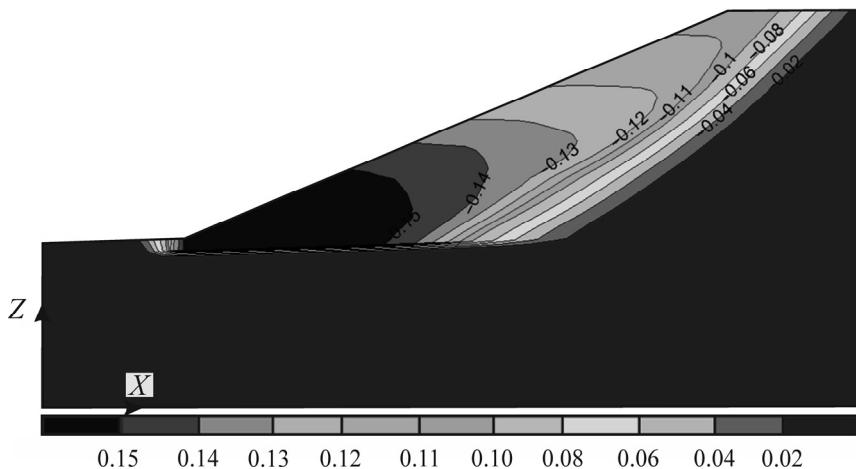
ТАБЛИЦА 2. Геотехнические параметры породных слоев

Порода	Объемный вес, кг/м ³	Объемный модуль упругости, ГПа	Модуль упругости при сдвиге, ГПа	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град	Прочность на растяжение, кПа
Четвертичные породы	1800	1.51	0.37	10	18	2.3
Глинистый песчаник	2000	1.81	0.47	25	20	16
Песчаник	2100	1.93	1.16	63	22	30
мадстоун	2280	2.23	1.16	50	23	37
Угольный пласт	1960	3.22	1.07	35	20	22
Прослой мадстоуна	1780	1.08	0.25	5	15	2.5
Обломочная порода	2300	1.93	1.18	43	25	30
Коренная порода	2280	15.32	7.48	86	32	40

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

На основе построенной модели борта со слабым прослоем методом снижения прочности рассчитано распределение напряжений и деформаций под действием собственного веса.

Критерий смещения. Получена карта изолиний смещений смоделированного борта в направлении *X* (рис. 4).

Рис. 4. Изолинии смещений в направлении оси *X*

Рассмотрим поверхность скольжения как линию, разделяющую массив борта на призму обрушения (часть массива над поверхностью скольжения) и устойчивый массив (часть массива под поверхностью скольжения). Когда борт теряет устойчивость, наблюдаются смещения призмы обрушения относительно устойчивого массива. В этом случае изолинии смещений рассматриваются в качестве основы для выявления ППС. Согласно рис. 4, массив борта можно разделить по изолинии со значением 0.02 м и считать ее разделяющей. Распределение изолиний смещений вблизи границы раздела относительно плотное, сформирована область концентрации деформаций, в которой каждый контур сосредоточен вблизи слабого прослоя. Часть ППС проходит по линии слабого прослоя. Из-за низких физико-механических свойств прослоя

способность данной части массива борта сопротивляться скольжению весьма снижена. В результате возникают напряжения растяжения, приводящие к образованию макротрещин и зон скольжения. Граница между призмой обрушения и устойчивым массивом может служить критерием определения ППС.

Критерий максимального приращения деформации сдвига. Согласно теории Мора–Кулона, при повреждении геосреды напряжение сдвига должно достигнуть значения предела прочности и на поверхности сдвига возникнет значительная деформация. Максимальное приращение сдвига может использоваться в качестве критерия определения ППС. Исходя из параметров построенной модели, получена карта максимального приращения деформации сдвига и горизонтального смещения борта (рис. 5). На рис. 5а видна зона деформации сдвига, разделяющая массив борта на две области (призму обрушения и устойчивый массив). Зона наибольшей концентрации деформаций сдвига, сформированная внутри борта, приходится на слабый прослой. Концентрация деформаций сдвига в этой области связана с низкими физико-механическими свойствами слабого прослоя. Максимальное приращение деформации сдвига может рассматриваться в качестве одного из критериев установления поверхности потенциального скольжения.

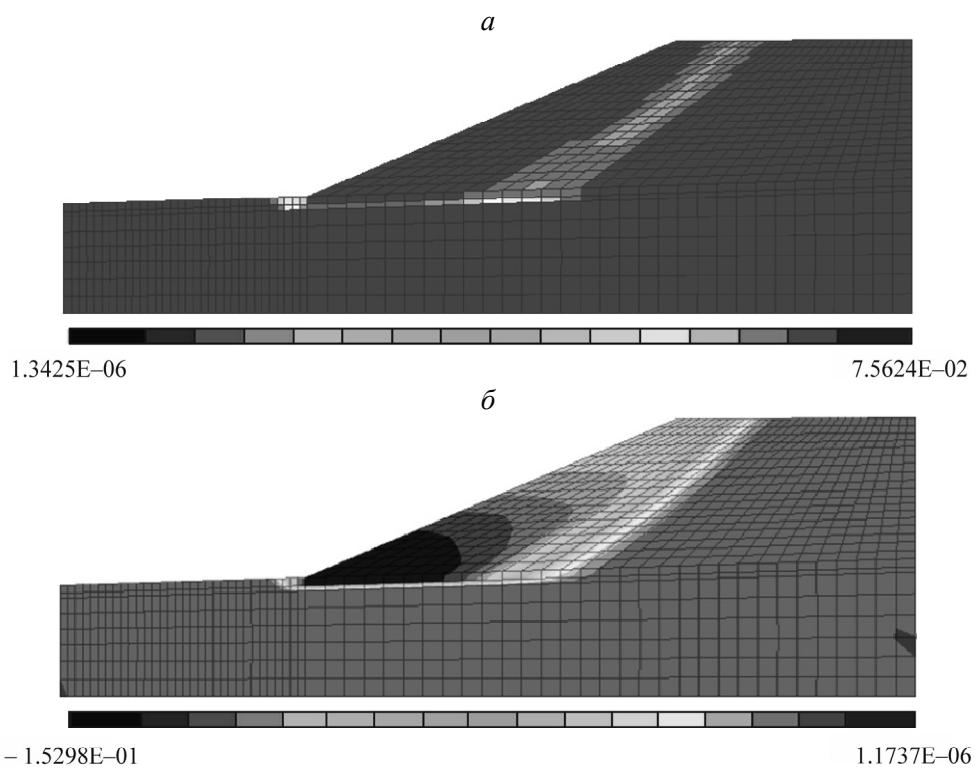


Рис. 5. Максимальные приращения деформации сдвига (а) и горизонтальные смещения (б)

Определение ППС борта со слабым прослойем. Для количественного определения местоположения поверхности потенциального скольжения борта со слабым прослойем с помощью языковой оболочки программирования FISH получены координаты ППС (X, Z). Для снижения влияния исходных данных модели на расположение элементов ППС эти координаты скорректированы. Элементы, расположенные в основании борта, выбраны в качестве исходных для новой системы координат (X_1, Z_1) (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Координаты силовых элементов на поверхности потенциального скольжения, м

Элемент	<i>X</i>	<i>Z</i>	<i>X</i> ₁	<i>Z</i> ₁	Элемент	<i>X</i>	<i>Z</i>	<i>X</i> ₁	<i>Z</i> ₁
1	270.40	105.30	175.61	60.20	20	195.75	45.18	100.96	0.08
2	267.60	102.40	172.81	57.30	21	193.44	44.70	98.65	-0.40
3	264.70	99.40	169.91	54.30	22	185.85	43.63	91.06	-1.47
4	261.20	96.00	166.41	50.90	23	178.24	43.09	83.45	-2.01
5	257.59	92.62	162.80	47.52	24	170.67	42.76	75.88	-2.34
6	254.47	89.35	159.68	44.25	25	163.10	42.41	68.31	-2.69
7	251.02	86.06	156.23	40.96	26	155.51	42.15	60.72	-2.95
8	247.37	82.79	152.58	37.69	27	147.90	41.93	53.11	-3.17
9	243.75	79.50	148.96	34.40	28	140.32	41.69	45.53	-3.41
10	240.13	76.23	145.34	31.13	29	132.73	41.47	37.94	-3.63
11	236.69	73.39	141.90	28.29	30	125.14	41.24	30.35	-3.86
12	233.13	70.57	138.34	25.47	31	117.56	41.02	22.77	-4.08
13	229.39	67.71	134.60	22.61	32	109.98	40.79	15.19	-4.31
14	225.52	64.85	130.73	19.75	33	102.38	40.57	7.59	-4.53
15	221.46	62.01	126.67	16.91	34	94.78	40.34	-0.01	-4.76
16	216.83	58.61	122.04	13.51	35	91.84	40.30	-2.95	-4.80
17	211.86	55.20	117.07	10.10	36	88.87	40.44	-5.92	-4.66
18	206.42	51.78	111.63	6.68	37	85.86	41.39	-8.93	-3.71
19	200.68	48.37	105.89	3.27	38	82.96	44.59	-11.83	-0.51

Согласно рис. 5, ППС борта можно разделить на три участка: верхний геотехнический; слабого прослоя; выхода ППС в разрез. На основе исходных координат ППС (*X*, *Z*) и скорректированных (*X*₁, *Z*₁) расположение элементов относительно участков будет следующим:

- *X*₁ > 91.06, элемент расположен на верхнем геотехническом участке;
- 0.01 ≤ *X*₁ ≤ 91.06, элемент расположен на участке слабого прослоя;
- *X*₁ < 0.01, элемент расположен на участке выхода ППС в разрез.

Исходя из указанных условий, получим аппроксимирующие уравнения ППС:

$$\begin{cases} Z_1 = aX_1^2 + bX_1 + c, & X_1 > 91.06; \\ Z_1 = a + bX_1, & 0.01 \leq X_1 \leq 91.06; \\ Z_1 = ae^{\frac{-X_1}{b}} + c, & X_1 < 0.01. \end{cases}$$

Параметры аппроксимации *a*, *b* и *c* и коэффициенты корреляции представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Параметры уравнений аппроксимации поверхности потенциального скольжения

Участок	Условие	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	Коэффициент корреляции
Верхний геотехнический участок	<i>X</i> ₁ > 91.06	0.004	-0.318	-7.602	0.999
Участок слабого прослоя	0.01 ≤ <i>X</i> ₁ ≤ 91.06	-4.862	0.034	0	0.995
Участок выхода ППС	<i>X</i> ₁ < 0.01	0.016	2.105	-4.842	0.998

Кривая аппроксимации поверхности потенциального скольжения показана на рис. 6.

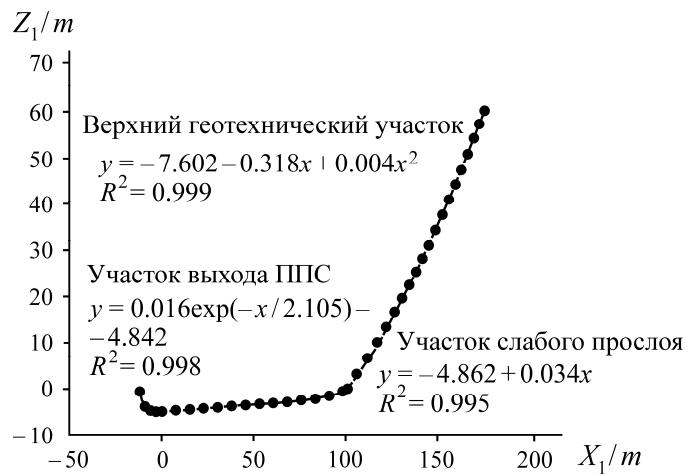


Рис. 6. Кривая аппроксимации ППС: • — координаты ППС

АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТА СО СЛАБЫМ ПРОСЛОЕМ

Поверхность потенциального скольжения разделяет борт карьера на призму обрушения (верхняя часть) и устойчивый массив (нижняя). До момента потери устойчивости, т. е. скольжения, верхняя и нижняя части связаны группами силовых несущих элементов, которые соединяются в силовую цепь по линии ППС (рис. 7).

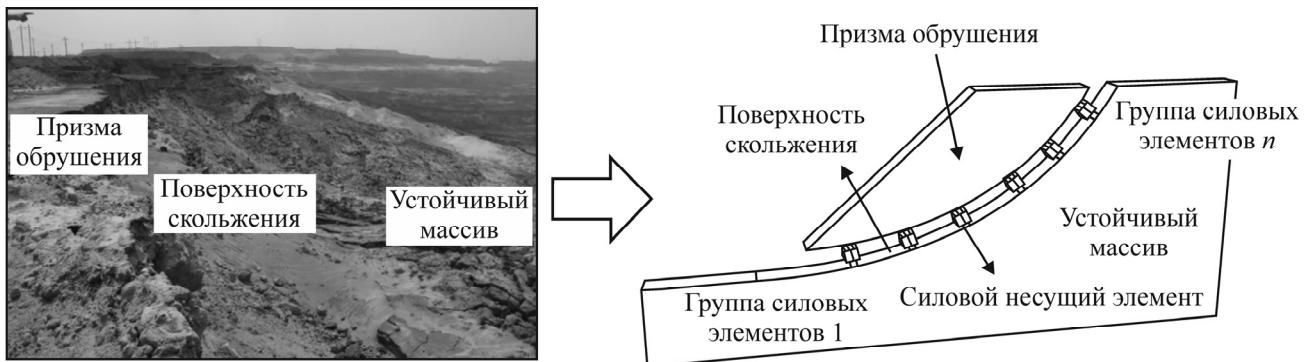


Рис. 7. Расположение силовых элементов на поверхности потенциального скольжения

Элементы в массиве борта из-за разного местоположения подвергаются воздействию разных сил со стороны призмы обрушения, что приводит к различной сопротивляемости деформации и несущей способности каждого элемента. В результате характеристики их макроскопического разрушения отличаются друг от друга. Если один элемент в цепи разрушается, происходит перераспределение напряжений на соседние элементы, что влияет на устойчивость силовой цепи в целом. Когда количество разрушенных элементов достигает определенного значения, борт перестает быть устойчивым и обрушается. Первый разрушенный силовой элемент в цепи называется главным критическим элементом, каждый последующий разрушенный элемент — критическим элементом n -го уровня ($n = 1, 2 \dots n$). Исследования расположения критических элементов в массиве борта и процесса их динамического разрушения — ключевой этап изучения механизма деформации борта и характера его обрушения. Эти исследования позволяют принять необходимые меры по укреплению борта.

Принцип выявления критических элементов. Размер элемента определяет его деформационную и несущую способности. Продольный размер m характеризует коэффициент предельной деформации, поперечный размер n — коэффициент предельной прочности:

$$m = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon}{\varepsilon_m}, \quad n = \frac{\sigma_n - \sigma}{\sigma_n},$$

где ε_m , ε — пиковая и текущая деформации элемента; σ_n , σ — пиковое и текущее напряжения.

При малом m элемент испытывает большую текущую деформацию и большую степень разрушения; при малом n элемент подвергается большему напряжению и обладает меньшей несущей способностью. На рис. 8 показана морфологическая прочность относительно размера и степени разрушения. Исходя из отношения коэффициента деформации m к коэффициенту прочности n , можно выделить три вида морфологической структуры элемента:

- $m < n$. Элемент испытывает малое текущее напряжение, но образуется значительная деформация. Он находится в стадии пластической деформации, наблюдается высвобождение ранее накопленной энергии, несущая способность элемента снижается;

- $m = n$. Текущее напряжение и текущая деформация элемента равны между собой. Элемент находится в стадии упругой деформации;

- $m > n$. Текущее напряжение элемента превышает текущую деформацию, что показывает значительную несущую способность элемента и накопление большего количества энергии. Когда напряжение превысит предел несущей способности, элемент разрушится, и накопленная энергия быстро высвободится. Это повлияет на устойчивость соседних элементов и борта в целом.

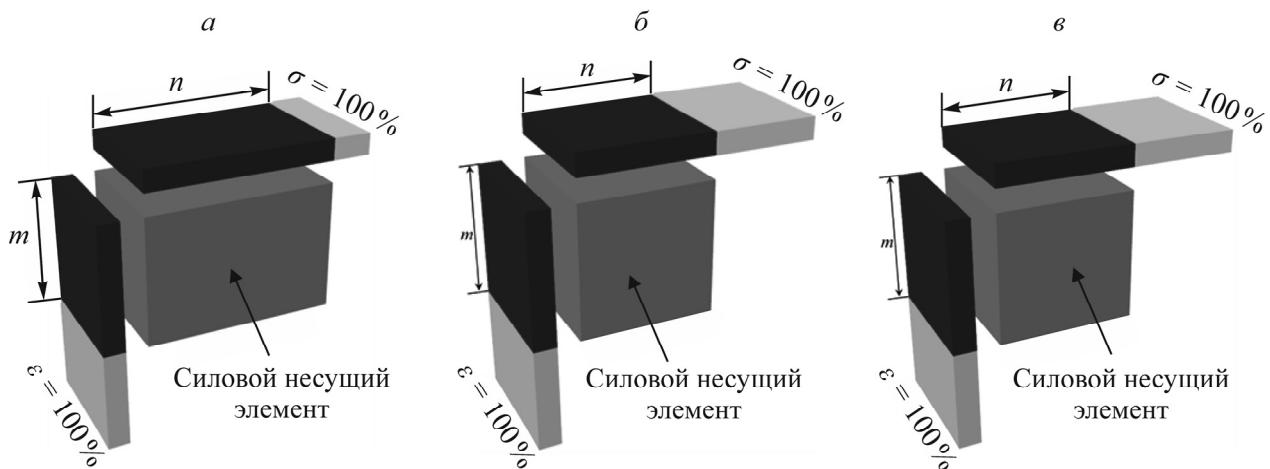


Рис. 8. Морфологическая структура элемента: $a — m < n$; $\delta — m = n$; $\varepsilon — m > n$; ε — относительная деформация; σ — напряжение

Выявление главного критического элемента. Силовой элемент на ППС является главным критическим элементом, который разрушается в первую очередь при обрушении борта. Его расположение влияет на разрушение последующих критических элементов. Для выявления его местоположения в массиве борта в результате расчета для каждого элемента на ППС определялись напряжение сдвига и горизонтальное смещение, строились соответствующие кривые (рис. 9). Смещения и напряжения сдвига элементов на ППС от вершины борта до основания сначала возрастают, затем убывают. Согласно соотношению m к n (рис. 8в), элемент № 21 подвергался наибольшему напряжению при малом смещении. В нем накапливалось наибольшее количество энергии относительно других элементов, поэтому он был принят главным критическим элементом.



Рис. 9. Напряжения сдвига (1) и смещения силовых элементов (2) на ППС

Для дальнейшего определения, является ли силовой элемент № 21 главным критическим элементом, выполнен обратный анализ путем удаления элемента из цепи. Поочередное удаление элементов из цепи позволяет оценить их влияние на устойчивость борта. После каждого расчета были получены смещения и максимальные приращения деформации сдвига. Для подтверждения правильности выбора главного критического элемента выполнялось сравнение деформации борта после удаления каждого элемента с изначальной деформацией. На рис. 10 показаны смещения и приращения деформации сдвига новой модели по сравнению с изначальной. После удаления силовых элементов по ППС рассчитанные смещения и приращения деформации сдвига превышают их значения в изначальной модели (рис. 10). В результате поочередного удаления элементов по ППС от вершины борта смещения и приращения деформаций сдвига сначала возрастают, затем убывают. Точка перегиба расположена на элементе № 21. При удалении элемента № 21 смещения и приращения деформаций сдвига снова достигают максимальных значений. Следовательно, силовой элемент № 21 — главный критический элемент.

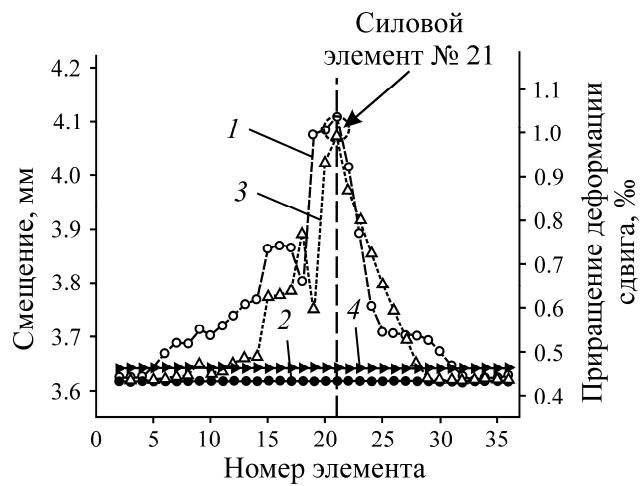


Рис. 10. Смещения и приращения деформаций сдвига в новой (1, 2) и первоначальной моделях (3, 4)

Анализ траектории динамического разрушения критических элементов. На поверхности потенциального скольжения присутствует большое количество силовых элементов. При разрушении главного критического элемента происходит перераспределение поля напряжений на сосед-

ние элементы в цепи. Разрушение критического элемента первого уровня приводит к образованию критического элемента второго уровня и т. д. Разрушение критических элементов на ППС динамически развивающийся процесс, поэтому важно проанализировать траекторию разрушения критических элементов для обеспечения устойчивости борта. На основе алгоритма, представленного на рис. 11, и с учетом того, что элемент № 21 — главный критический элемент, для определения критических элементов следующих уровней проведено моделирование ослабления по всей траектории их динамического разрушения на ППС.



Рис. 11. Алгоритм определения критических элементов

На ППС присутствует 38 критических элемента (табл. 3), пронумерованные от вершины борта к основанию. Ввиду большого количества критических элементов обратный анализ имеет много стадий расчета, поэтому в данной работе представлены кривые изменения смещения и приращения деформации сдвига по завершении удаления элементов некоторых уровней (рис. 12). После ослабления критических элементов общее смещение борта постепенно возрастает. При ослаблении критического элемента 18-го уровня степень его влияние на устойчивость борта заметно ниже, чем у элементов первых 17-ти уровней, при ослаблении которых кривые смещений и приращений деформаций сдвига имели выраженную точку перегиба. При этом ослабление элемента 18-го уровня и элементов последующих уровней кривые смещения и приращения деформации такой точки не имели. Борт теряет устойчивость при ослаблении критических элементов первых 17-ти уровней, после чего ослабление последующих элементов мало влияет на общую устойчивость борта. С помощью обратного анализа удаления элементов получена траектория разрушения критических элементов на ППС борта со слабым прослоем:

21 → 20 → 22 → 23 → 24 → 25 → 26 → 27 → 28 → 29 → 30 → 31 → 32 → 33 →
 → 34 → 35 → 36 → 10 → 15 → 14 → 17 → 13 → 3 → 7 → 5 → 8 → 12 → 6 → 11 →
 → 9 → 4 → 2 → 18 → 19 → 16.

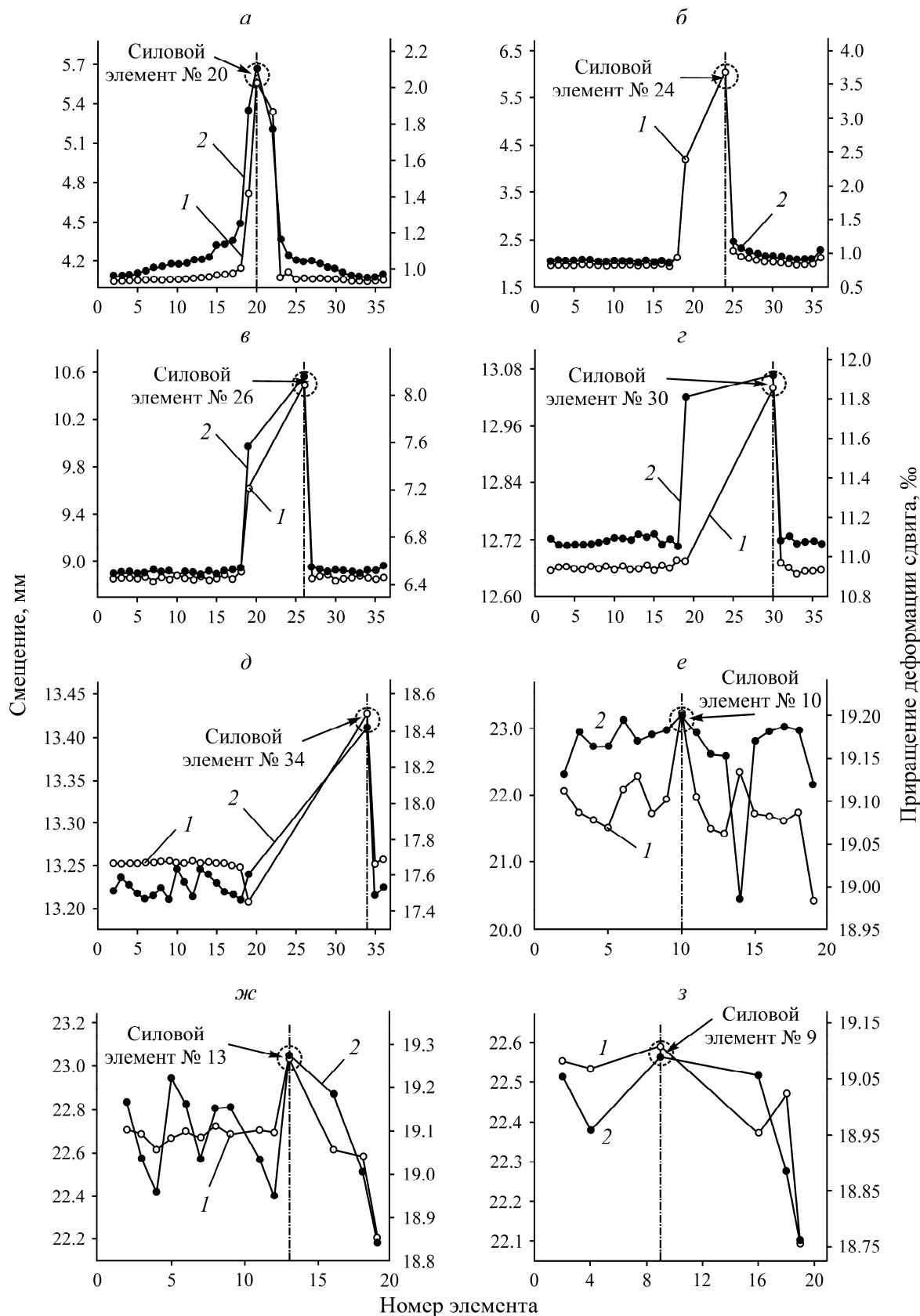


Рис. 12. Смещения (1) и приращения деформаций сдвига (2) в критических элементах уровня 2 (*a*), 5 (*б*), 7 (*в*), 11 (*г*), 15 (*д*), 18 (*е*), 22 (*жс*) и 30 (*з*) при их удалении из цепи

На рис. 13 представлена траектория разрушения критических элементов по ППС. Главный критический элемент № 21 находится в месте залегания слабого прослоя. При потере его устойчивости последовательность разрушения направлена из внутренней части борта к его основанию. После разрушения всех элементов в слабом прослое процесс продолжается от середины поверхности скольжения к ее нижней части. Установлено, что главный критический элемент и критические элементы первых уровней расположены в слабом прослое. Заметим, что наличие слабого прослоя — ключевой фактор нарушения устойчивости подобных бортов. Обеспечение устойчивости таких бортов необходимо выполнять за счет повышения сил, препятствующих скольжению слабого прослоя.

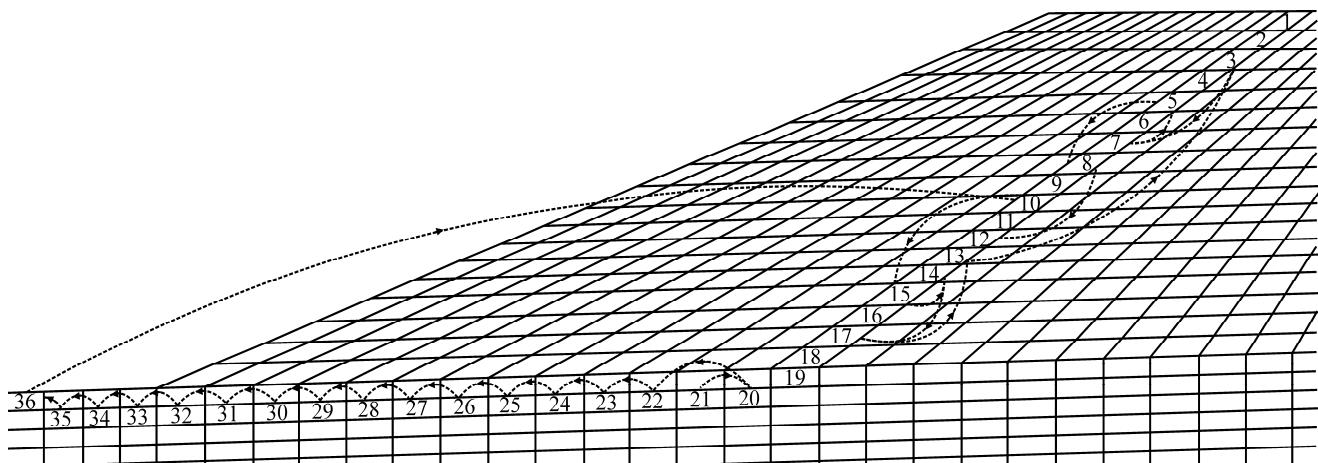


Рис. 13. Траектория динамического разрушения критических элементов

ВЫВОДЫ

С помощью полевого мониторинга и анализа геологических условий угольного разреза Hequ установлено местоположение слабого прослоя в массиве борта. На основе данных о местоположении слабого прослоя построена численная модель борта для определения поверхности потенциального скольжения путем анализа изолиний смещений и максимальных приращений деформаций сдвига. С помощью языковой оболочки программирования FISH получена информация о силовых элементах, расположенных на поверхности потенциального скольжения. Поверхность потенциального скольжения разделена на характерные участки, для которых получены соответствующие уравнения.

Предложен метод выявления критических элементов на поверхности потенциального скольжения для бортов со слабым прослойем и получена траектория динамического разрушения критических элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Xie H., Gao F., and Ju Y.** Research and development of rock mechanics in deep ground engineering, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2015, Vol. 34, No. 11. — P. 2161–2178.
2. **Xie H., Ren S., and Xie C.** Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality, J. China Coal Soc., 2021, Vol. 46, No. 7. — P. 2197–2211.

3. **Zhang L., Chen Z., and Tang Y.** Study on regional sliding failure modes and evolution regularity of slopes with weak layers, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2021, Vol. 40, No. 6. — P. 1145–1154.
4. **Liu W., Sui Y., Zhou F., and Li H.** Catastrophe analysis of rock mass slope with weak intercalated layers, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2006, Vol. S1. — P. 2663–2669.
5. **Li Y. and Yan Z.** Influence of weak interlayer parameters for anchored interface shear action of rock slope under earthquake, J. Vibration Shock, 2019, Vol. 38, No. 8. — P. 48–53.
6. **Hu B., Li J., Sheng J., and Ye Z.** Crack cause in the high slope of Chinese ancient copper mine Relics: A three-dimensional non-linear finite difference analysis, J. IEEE Access, 2020, Vol. 8. — P. 13987–13997.
7. **Xu P., Shang N., and Bao J.** Stability analysis of slopes with weak layers using limit analysis method, J. Southwest Jiaotong University, 2022, Vol. 57, No. 4. — P. 919–925.
8. **Wang H., Huang M., and Liu Z.** Three-dimensional stability analysis of slope with weak interlayer, J. Rock Soil Mech., 2013, Vol. 34, Vol. S2. — P. 156–160.
9. **Xu B., Qian Q., Yan C., and Xu H.** Stability and strengthening analyses of slope rock mass containing multi-weak interlayers, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2009, Vol. 28, No. S2. — P. 3959–3964.
10. **Chen G., Huang R., Shi Y., and Xu Q.** Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2014, Vol. 33, No. 2. — P. 243–256.
11. **Fan S., Song Z., Zhang Y., and Liu N.** Case study of the effect of rainfall infiltration on a tunnel underlying the roadbed slope with weak inter-layer, KSCE J. Civil Eng., 2020, Vol. 24, No. 5. — P. 1607–1619.
12. **Rodríguez-Ochoa R., Nadim F., and Hicks M. A.** Influence of weak layers on seismic stability of submarine slopes, J. Marine Petroleum Geol., 2015, Vol. 65. — P. 247–268.
13. **Sun P., Chen X., and Wang Y.** A global optimization algorithm of upper bound method with inclined interface blocks for slope stability, Shuili Xuebao, J. Hydraulic Eng., 2018, Vol. 49, No. 6. — P. 741–748.
14. **Fan G., Zhang J., and Fu X.** Research on transfer function of bedding rock slope with soft interlayers and its application, J. Rock Soil Mech., 2017, Vol. 38, No. 4. — P. 1052–1059.
15. **Fan G., Zhang J.-J., Fu X., and Wang Z.-J.** Energy identification method for dynamic failure mode of bedding rock slope with soft strata, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2016, Vol. 38, No. 5. — P. 959–966.
16. **Fan G., Zhang J.-J., Fu X., and Wang Z.-J.** Application of transfer function to on-site shaking table test, J. Rock Soil Mech., 2016, Vol. 37, No. 10. — P. 2869–2876.
17. **Fan G. and Zhang J.-J.** Determination of the seismic displacement relaxation zone in the reinforced slope by composite retaining structures, J. Rock Soil Mech., 2017, Vol. 38, No. 3. — P. 775–783.
18. **Zhang W.-G., Meng F.-S., Chen F., and Liu H.-L.** Effects of spatial variability of weak layer and seismic randomness on rock slope stability and reliability analysis, J. Soil Dynamics Earthquake Eng., 2021, Vol. 146. — 106735.
19. **Ho I.** Numerical study of slope-stabilizing piles in undrained clayey slopes with a weak thin layer, Int. J. Geomechanics, 2015, Vol. 15, No. 5. — 6014025.

20. **Abe K., Nakamura S., Nakamura H., and Shiomi K.** Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, *J. Soils Foundations*, 2017, Vol. 57, No. 2. — P. 155–175.
21. **Zhao H., Li H., and Wang Z.** Experimental study on characteristics of micro-crack evolution at key place of potential slip surface of slopes, *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 2015, Vol. 34, No. 5. — P. 935–944.
22. **Kang K., Fomenko I. K., Nicolskaya O. V., and Wang J.** Probabilistic assessment of rock slope stability in open pit mine charat using the generalized Hoek–Brown criterion, *J. Min. Sci.*, 2020, Vol. 56, No. 5. — P. 732–740.

Поступила в редакцию 13/XII 2023

После доработки 25/V 2024

Принята к публикации 24/IX 2024