2022

№ 4

УДК 624.136

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАМБ ХВОСТОХРАНИЛИЩ В КИТАЕ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Ма Хайтао, Чжан Ихай

Университет науки и технологий Китая, E-mail: 1604659717@qq.com, 100012, г. Пекин, Китай

Для оценки научных основ и достоверности физического моделирования дамб хвостохранилищ исследуются такие вопросы, как их прорыв, развитие области потока ниже по течению, устойчивость плотин и испытание способов их защиты. Проанализированы экспериментальные материалы, методы измерения и используемые инструменты. Определены проблемы и недостатки лабораторного моделирования с точки зрения разницы между физической моделью и прототипом, природой эксперимента, методами измерения и т. д. Изучены методы оценки безопасности дамб хвостохранилищ, сочетающие передовые технологии — искусственный интеллект и 3D-печать. Рассмотрено влияние гидротехнического сооружения на окружающую среду при чрезвычайных происшествиях.

Дамба хвостохранилища, физическая модель, прорыв дамбы, состояние проблемы

DOI: 10.15372/FTPRPI20220404

Хвостохранилище представляет собой место хранения отходов обогащения полезных ископаемых. Дамба хвостохранилища — периферийное ограждающее сооружение, используемое для удержания в нем хвостов и регулирования воды. В мире насчитывается около 18 400 хвостохранилищ, в Китае — 8869 хвостохранилищ и 1425 хранилищ концентрата. Доля прорыва дамб хвостохранилищ за последние 100 лет составила 1.2%, что в 120 раз превышает количество нарушений традиционных водоудерживающих сооружений [1]. По данным на 2015 г., аварии на дамбах составили 56% от общего числа нарушений эксплуатации хвостохранилищ, обрушение хранилищ концентрата — более 55% от общего количества случаев прорыва дамб. Основные причины прорыва дамбы — просачивание воды и переполнение хранилища (для Китая 52.3 и 32.9% соответственно, для других стран — 44.6 и 19.6%). Они возникают при высоком уровне грунтовых вод, повреждении насыпи, чрезмерном наполнении хвостохранилища, разжижении хвостов, вызванном сейсмической активностью и т. д.

Работа выполнена при поддержке Национальной программы научных исследований и опытно-конструкторских разработок Китая (№ 2017YFC0804603).

Обычно хвостохранилища расположены в неблагоприятной окружающей среде, а прорыв дамбы развивается крайне быстро, поэтому многие исследователи используют данные компьютерного моделирования, а не фактические. Из-за этого наблюдается недостаточное количество сведений локального мониторинга дамб хвостохранилища [2]. Физическое моделирование способно преодолеть данный недостаток и позволить определить механизм образования и развития прорыва дамбы хвостохранилища. Схема испытания дамбы хвостохранилища обычно состоит из основного корпуса модели, области потока ниже по течению, систем управления оборудованием и извлечения хвостов (рис. 1).



Рис. 1. Система испытания дамбы хвостохранилища: СФ — система фильтрации; СО — система очистки; Хр — хранилище; ПВ — подача воды

На рис. 2 представлен испытательный стенд прорыва дамбы хвостохранилища, спроектированный в Университете науки и технологий Китая. Согласно статистическим данным, количество исследований, проводимых с помощью физического моделирования, с 2006 г. увеличивается, составляя 1.74% от общего числа периодических публикаций. Это свидетельствует об интересе к данному методу специалистов угольной промышленности [3].



Рис. 2. Установка для моделирования прорыва дамбы хвостохранилища

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ. ОБЗОР РАБОТ

Исследования хвостохранилищ 1960-х годов XX в. связаны с методами возведения дамб и решением организационных проблем. С 1980-х годов после случаев прорыва дамб хвостохранилищ в Китае и других странах все большее количество экспертов обращают внимание на безопасность грунтовых насыпей хвостохранилищ при обогащении. В основе ранних исследований лежали математические и численные модели, физические эксперименты использовались позже, когда гидравлические испытания стали относить к базовым методам. В настоящее время отсутствует наиболее полное понимание масштабов подобия при физическом моделировании дамбы хвостохранилища, отражающие условия реального имитирования влажного песка (подобие веса, сопротивляемости и числа Струхаля). Классическая физическая модель проектируется исходя из критериев подобия, но, если число Рейнольдса не соответствует требованиям, используется нестандартная модель [4].

За пределами Китая исследования хвостохранилищ направлены на изучение временной статистики, влияния на окружающую среду, математическое и численное моделирование и т. д. Физические испытания позволяют изучать прорывы в основном в ограждающих дамбах, учитывая большое разнообразие материалов и методов возведения грунтовых насыпей. Однако известно мало работ, связанных с физическим моделированием хвостохранилищ. В [5] для разработки физической модели однородной дамбы из связного грунта использован критерий подобия, выполненный по гравитационной аналогии и движении обломков. Согласно гравитационному подобию и теории сходства движения осадочных пород, получен критерий подобия для несвязного грунта, формирующего однородную дамбу с помощью того же коэффициента сопротивляемости, что и у прототипа [6]. Влияние материала дамбы, вместимости хвостохранилица и уровня воды на прорывы изучено в [7].

В 1990-х годах европейскими и американскими научно-исследовательскими группами выполнялись крупные проекты по исследованию прорывов дамб, например Национальная программа безопасности дамб (NSDP) в США и проекты IMPACT и CADAM в Европе. В ходе испытаний физической модели разрушения насыпной дамбы в рамках проекта NSDP рассмотрены разные ее материалы и коэффициенты подобия, а также использованы экспериментальные стенды разного масштаба [8]. Исследование в рамках проекта CADAM включало моделирование разрушения дамбы, изучение характеристик смещения осадочных пород, сравнение физической и математической моделей, анализ точности прогнозирования и причин несоответствия результатов [9]. В результате работы над проектом IMPACT проведены испытания разных масштабов для изучения влияния типа дамбы, ее материала, механизма прорыва и т. д. [10]. В настоящее время физическое моделирование хвостохранилищ в Китае можно разделить на четыре направления: моделирование механизма прорыва дамбы, развитие потока прорыва ниже по течению, оценка устойчивости и способов защиты дамбы.

Обзор работ по механизму возникновения прорыва дамбы хвостохранилища. Испытания такого рода позволяют изучить механизм разрушения дамбы при следующих факторах: просачивание воды через систему водоотведения, переполнение хранилища и сейсмическая активность. Исследование начальной стадии разрушения дамбы хвостохранилища связано с изучением насыпных, каменно-бетонных гидротехнических сооружений и искусственных озер. В [11] прорыв дамбы разделен на три типа: эрозия при переполнении, скользящая лавина, прогрессирующее разрушение при встречном потоке. Описаны четыре различия между дамбами хвостохранилищ и водоудерживающими насыпными плотинами (метод возведения дамбы, распределение хвостов, механизм прорыва и состав высвобождающегося материала) и выделены три типа прорыва дамбы: прорыв дамбы при переполнении (эрозионный тип), превышение допустимого уровня насыщения водой (обратно прогрессирующий тип) и разрушение системы водоотведения [12]. Механизм разрушения при сейсмической активности не рассматривался. В [13] разрушение дамбы при сейсмической активности имеет четыре типа: повреждение основания, разрушение ядра дамбы, разрушение поддамбы, оползень внутреннего откоса.

Высота физической модели дамбы хвостохранилища не превышает 1.5 м, геометрический масштаб находится в диапазоне 1:50–1:300. В качестве материала выступают как крупнозернистые, так и мелкозернистые хвосты. В некоторых испытаниях используется квазикоксовая пыль или хвосты обогащения определенной фракции. Прорыв дамбы, вызванный переполнением или просачиванием воды из дренажных труб, оценивается с помощью лабораторной испытательной камеры. Для удобства наблюдения и снижения трения обе стенки испытательной камеры изготавливаются из прозрачного плексигласа и смазываются вазелином. Сначала в камеру закладывается дренажная труба, после чего устанавливается трубка измерения уровня воды. Далее возводится первичная дамба, затем — поддамба. После обеспечения устойчивости системы выполняется водоотведение, моделирование атмосферных осадков и внешней нагрузки. Механизм разрушения дамбы при сейсмоактивности моделируется с помощью центрифуги или большого вибрационного стола с применением губки для снижения граничного влияния. В ходе испытаний получены полезные результаты по изучению механизма разрушения дамб (табл. 1).

Источник	Содержание работы	Размер и масштаб модели	Материал
[14]	Механизм прорыва трубопровода и дамбы хвостохранилища	Испытательный резервуар, 1.60 × 3.30 × 1.07 м	Летучая зола
[15]	Развитие разрушения системы водоотведения в основании дамбы хвостохранилища	Модель песчаной траншеи, 1.60 × 0.33 × 1.07 м, 1:250	Мелкозернистые хвосты
[16]	Механизм переполнения дамбы выше по течению потока с последующим разрушени- ем	Лабораторная модель, 3.10 × 0.72 × 0.26 м, 1:50	Связная пульпа из хвостов
[17]	Механизм просачивания воды и разрушения хвостохранилища при затоплении и выбросе хвостов	Испытательный резервуар, 1.8 × 0.5 × 0.5 м, 1:300	Мелкозернистые хвосты
[18]	Механизм переполнения дамбы	Изначальная общая высота дамбы 140 м, 1:180	Квазикоксовая пыль
[19]	Механизм разрушения дамбы при ее переполнении	Полевая моделирующая платформа, 4.0 × 0.2 × 0.4 м, 1:100	Крупнозернистый песок
[20]	Характеристики разрушения и меры укрепления дамбы хвостохранилища при сейсмическом воздействии	Вибрационный стол, 0.95 × 0.30 × 0.60 м	Мелкозернистые хвосты
[21]	Динамическая реакция и развитие прорыва дамбы при сильной сейсмоактивности и затоплении	Центрифуга, 0.50 × 0.20 × 0.35 м	Крупнозернистый песок

TO A DUTITITA 1	TT	~				~
	Научные п	аботы по	исспелованию	механизма	ппопыва	ламоы
11100111411	ind million		песледованню	mentannismu	прорыва	дилов

Обнаружено, что расслоение хвостов приводит к анизотропии коэффициента проницаемости, тогда как равномерный размер частиц, низкая их плотность и быстрое повышение уровня воды с большой вероятностью — к разрушению системы водоотведения [14]. В [15] предложено соотношение между средним гидравлическим градиентом основания дамбы и разрушением системы водоотведения, а также описаны четыре стадии ее повреждения в основании плотины: неочевидное просачивание воды из труб, деформация труб, развитие деформации труб и полное разрушение. Изучено изменение ширины и глубины дефектов в дамбе при ее переполнении и прорыве в результате атмосферных осадков [16]. В условиях затопления происходит сдвижение линии инфильтрации, в этом случае максимальные горизонтальные напряжения находятся в середине откоса дамбы. Рассмотрен механизм прогрессирующего разрушения при встречном потоке. В процессе разрушения дамбы хвостохранилища она подвергается изначальной вертикальным смещениям с последующей доминирующей горизонтальной деформацией [17]. Установлено, что развитие разрушения эрозионного типа при переполнении подчиняется водонасыщению грунта в теле дамбы: чем больше насыщение, тем больше смещение насыпи [18]. Описан механизм переполнения дамбы водой [19]. Основные характеристики прорыва дамбы на ранней и средней стадии — водяная эрозия, продольный эрозионный выступ и поперечное разрушение. Испытания на вибрационном столе показали, что явления усиления ускорения не зависят от высоты дамбы. Предложены следующие меры по увеличению прочности дамбы: повышение градиента давления в 2 раза; сооружение водоотвода в горизонтальных и вертикальных соединениях; возведение противоскользящих отвалов у подошвы дамбы [20]. В [21] изучено развитие линии насыщения и порового давления, а также реакция ускорения и смещения дамбы в момент наполнения и последующего хранения хвостов в хранилище.

Обзор работ по характеристике области потока ниже по течению. Данные испытания направлены на изучение глубины грязевого слоя, силы воздействия и скорости высвобождающегося песка на степень затопления во время прорыва. Область потока ниже по течению обычно формируется для трехмерного моделирования местности или криволинейных дорог. Трехмерный рельеф размечается и в данной области возводится система траншей в соответствии с основным коэффициентом подобия, затем она корректируется исходя из ширины и высоты секции. В испытаниях иногда учитывается размер пробоины и инженерные условия. Для моделирования полного разрушения управление прорывом дамбы осуществляется подвижной перегородкой или автоматическим разъединением подъемного затвора, управляемого электромагнитом. Используются такие материалы, как квазикоксовая пыль или гипсовая пульпа.

Исследования показали, что глубина грязевого слоя, сила воздействия и скорость резко увеличиваются, затем медленно уменьшаются (табл. 2). Обнаружено, что время достижения пиковых значений данными параметрами не совпадает с влиянием рельефа и других факторов [22]. Изучены естественные условия и инженерные измерения затопленной области, включая разную глубину грязевого слоя и объем эрозионных полостей [23]. Глубина грязевого слоя и сила воздействия линейно увеличиваются с ростом затвора устья и высоты тела дамбы, а также времени достижения потоком участка ниже по течению [24, 25]. Развитие разрушения делится на три стадии: быстрый рост, относительная устойчивость и снижение. Глубина грязевого слоя при его высвобождении колеблется исходя из неопределенного влияния разрушения и рельефа [22, 26].

Источник	Содержание работы	Размер и масштаб модели	Материал
[24]	Исследование глубины грязевого слоя, скорости потока и силы воздействия при трех различных пробоинах	Аналоговый испытательный стенд, 1:400	Гипсовая паста
[22]	Исследование глубины грязевого слоя, скорости потока и силы воздействия во время полного прорыва дамбы	Полевое испытание, высота 0.36 м, 1:400	Мелкозернистые хвосты
[23]	Изучение параметров секции и осадочных размывов при выбросе хвостов из дамбы ниже по течению, основной дамбы выше по течению или поддамбы во время прорыва	Модель реки, по горизонтали 1:200, по вертикали 1:150	Квазикоксовая пыль
[25]	Анализ характеристик состояния потока и силы воздействия на дамбу хвостохра- нилища различной высоты	Система моделирования на принципе подобия, высота 0.25-0.30 м	Гипсовая паста
[26]	Изучение процесса потока переполнения дамбы и построение математической модели прогнозирования затопления	Большая физическая модель, 35 × 8 × 5 м, 1:180	Квазикоксовая пыль

ТАБЛИЦА 2. Научные работы по исследованию развития дамбы ниже по течению

Обзор работ по оценке устойчивости дамб хвостохранилища. В рамках научноисследовательского проекта оценивается устойчивость не только возведенных дамб хвостохранилищ, но проектируемых. Физическое и численное моделирование — эффективные методы анализа устойчивости ввиду недостатка данных о линии инфильтрации и распределения напластований хвостов.

Высота испытательной модели составляет ~ 1.5 м. В качестве материала выступает одна из трех фракций песка, трехмерный рельеф произведен в соответствии с коэффициентом подобия. Алгоритм оценки устойчивости дамбы хвостохранилища следующий:

— испытание физической модели на основе критериев подобия;

— сбор экспериментальных данных по распределению хвостов и линии инфильтрации;

— численный расчет и анализ на основе собранных данных (применяется метод конечных элементов и метод предельного равновесия);

— оценка устойчивости и разработка соответствующих рекомендаций.

В табл. 3 рассмотрены работы, связанные с анализом устойчивости. В [27] обнаружена значимость явления слоистости мелкозернистых хвостов в грязи. По причине низкой проницаемости и легкой блокировки геотекстиля линия инфильтрации наблюдалась выше, чем при крупнозернистых хвостах, что приводило к инфильтрационному повреждению. Явление слоистости меньше в дамбах хвостохранилища с высокой концентрацией. Метод "выше по течению" способен повысить проницаемость и устойчивость дамбы на 19–32 % [28]. В [29, 30] определена структура залегания и распределения хвостов, а также глубина линии инфильтрации. На примере хвостохранилища Yang Tian Qing установлены условия, при которых вероятны затопления и разработаны мероприятия по водоотведению. В [31] применялся тот же метод и определено максимальное напряжение сдвига и смещение верхней части дамбы. На примере хранилища хвостов железной руды Simon выявлено, что основная часть дамбы — центральная имеет критическую высоту, ведущую к потере устойчивости и последующему полному разруше-

нию [32]. При помощи численного анализа данные по хранилищу хвостов медной руды в провинции Юньнань использованы для оценки влияния высоты дамбы на безопасность. Установлено, что результаты расчетов противоречат классической теории консолидации. С увеличением скорости возведения дамбы хвостохранилища время консолидации не уменьшается, фактор безопасности повышается [33].

Источник	Содержание работы	Размер и масштаб модели	Материал	Программное обеспечение
[27]	Изучение механизма просачивания воды в хранилище крупнозернистых и мелкозернистых хвостов в процессе его наполнения	Испытательный резервуар, 7.0 × 3.0 × 1.5 м, 1:200	Мелкозернистые хвосты	ANSYS
[28]	Сравнение устойчивости между традиционным и усовершенствованным методом "вверх по течению"	Лабораторная модель, 11.0 × 7.0 × 1.5 м, 1:150	Мелкие и измельченные хвосты	SLOPE/W
[29]	Оценка устойчивости хвостохранилищ в условиях затопления	Лабораторная модель, 1:200	Мелкие и измельченные хвосты	SLIDE
[30]	Анализ устойчивости при нормальном состоянии и в условиях затопления	Испытательный резервуар, 7.0 × 2.5 × 1.5 м, 1:200	Пустая порода, шлак	ANSYS
[31]	Изучение изменения распределения хвостов и линии инфильтрации в процессе наполнения дамбы	Испытательный резервуар, 7.0 × 2.5 × 1.5 м, 1:200	Глина	ABAQUS
[32]	Анализ устойчивости дамбы хвостохра- нилища при различных нагрузках	Испытательный резервуар, 3.5 × 1.5 × 1.4 м, 1:100	Измельченные хвосты	None
[33]	Изучение влияния скорости возведения на устойчивость дамбы хвостохранилища	Испытательный резервуар, 8.0 × 5.0 × 1.5 м, 1:200	Измельченные хвосты	SIGMA/W

ТАБЛИЦА 3. Научные работы по оценке усто	йчивости дамбы хвостохранилища
------------------------------------------	--------------------------------

Обзор работ по защите хвостохранилищ. Данные работы рассматривают укрепление и меры по защите удерживающих дамб. Геосетка обладает функциями укрепления, уплотнения и придания жесткости. Предлагается использовать геосетки со скрученными краями, что позволит обеспечить лучшее водоотведение [34]. В настоящее время изучаются способы укрепления дамб хвостохранилища, а также влияние плотности повышающих устойчивость конструкций на прорыв дамбы.

Стенд для испытания способов укрепления строится аналогично модели для изучения механизма прорыва дамбы. В укрепленных дамбах вместо геосетки используется стальная оконная сетка с мелкими ячейками. В табл. 4 приведены работы, связанные с испытаниями способов укрепления дамбы хвостохранилища.

Источник	Содержание работы	Размер и масштаб модели	Материал
[35]	Сравнение прорыва между укрепленной и неукрепленной дамбой из крупных хвостов	Испытательный резервуар, 1.4 × 0.2 × 0.3 м	Крупные хвосты
[36]	Сравнение процесса разрушения между укрепленной и неукрепленной дамбой при вертикальной нагрузке	Испытательный резервуар, 1.75 × 0.50 × 0.25 м, 1:200	Мелкие хвосты
[37]	Изучение влияния плотности обвязки на прорыв дамбы	Испытательный резервуар, 1.4 × 0.6 × 0.4 м	Мелкие хвосты
[38]	Сравнение прорыва между укрепленной и неукрепленной дамбой из мелких хвостов	Испытательный резервуар, 1.40 × 0.50 × 0.25 м, 1:200	Мелкие хвосты
[39]	Изучение влияния проницаемости и укрепления дамбы на ее устойчивость	Испытательный резервуар, 1.90 × 0.20 × 0.42 м, 1:80	Выбранные мелкие и измельченные хвосты
[40]	Исследование блокирования дамбы илом при ее разрушении	Испытательный резервуар, 1:400	Гипсовый порошок и мелкий песок

ТАБЛИЦА 4. Научные работы по исследованию способов защиты дамбы хвостохранилища

В [35] процесс переполнения укрепленной дамбы хвостохранилища разделен на пять стадий. Выявлено, что укрепляющая обвязка снижает интенсивность проникновения воды и повышает противооползневую сопротивляемость дамбы. Однако в этом случае увеличивается глубина линии инфильтрации. Разрушение укрепляющей конструкции имеет клиновидную форму. Укрепление повышает прочность дамбы и снижает ее смещение. Пространственное расположение укрепляющих конструкций незначительно влияет на смещение и несущую способность дамбы [36]. Повышение плотности геотекстиля изменяет форму пробоины от *Y*до *H*-образной, ограничивая поперечное и продольное ее развитие [37]. В [38] отмечается, что поверхность разрушения укрепленного хранилища мелкозернистых хвостов отличается от неукрепленного. Укрепленная дамба обеспечивает низкое развитие трещин, их малую длину и глубину [39]. Скользящее тело имеет нестандартную форму и в материале происходит уплотнение. Увеличенная высота ограждающей дамбы способна снизить силу воздействия и уровень затопления в случае прорыва плотины. С этими параметрами высота ограждающей дамбы имеет линейную зависимость [40].

Обзор материала при моделировании дамбы хвостохранилища. В качестве материала для физического моделирования использовался песок или материал, соответствующий требованиям критериев подобия. Выполнены физические испытания с помощью метода постепенной аппроксимации. Материалы при моделировании должны отвечать следующим требованиям:

- схожесть коэффициента проницаемости и прочностных характеристик модели и натуры;
- схожесть физических и механических свойств модели и натуры;
- отсутствие значительной деформации после построения модели;
- схожесть прочности и плотности модели и натуры;
- схожесть потока хвостов и локального разрушения модели и натуры.

Выбор материала для моделирования не всегда соответствует критериям подобия из-за межфазового соединения между жидкими и твердыми веществами. В табл. 5 приведены преимущества и недостатки разных материалов, используемых при моделировании хвостохранилищ.

Материал	Затраты	Состояние	Объемная плотность	Примечание
Измельченный фенол	Высокие	Устойчивое	Средняя	Легко нарушается типичный поток
Шлак	Средние	Сложный состав	Высокая	Сложно использовать повторно; загрязняет окружающую среду
Квазиобоженный песок	Доста- точно высокие	Устойчивое	Средняя	Сложно выбрать гидрофобный песок для использования зимой
Природная осадочная порода	Низкие	Устойчивое	Высокая	Высокая начальная скорость, большая когезионная сила при меньшем размере частиц
Угольный пепел из ТЭЦ	Низкие	Устойчивое	Высокая	Легко консолидируется и содержит более активные вещества
Угольный пепел из ТЭЦ	Низкие	Устойчивое	Высокая	Ограниченный выбор для крупнозернистых хвостов

ТАБЛИЦА 5. Преимущества и недостатки разных материалов при моделировании хвостохранилиц [41]

Анализ средств измерения. Мониторинг уровня воды и интенсивности потока проводится постоянно. При катастрофах особое внимание уделяется скорости потока, деформации дамбы и т. д. Характеристики распространения волн прорыва дамбы сначала изучаются визуально, а затем с помощью приборов измерения уровня воды. Разработано оборудование для автоматического считывания информации. Распространение волн прорыва дамбы отслеживалось камерой. Для исследования развития прорыва дамбы используются такие технологии, как радиолокационное отслеживание, съемка цифровых и стереоскопических изображений, а также технология отслеживания частиц. Например, поверхностное смещение дамбы можно измерить с помощью сетки фиксированных точек, вертикальное и горизонтальное смещение данных — тахеометром (рис. 3).



Рис. 3. Карта фиксированных точек на поверхности дамбы (*a*) и метод наблюдения за смещениями с помощью тахеометра (б)

В табл. 6 представлено измерительное оборудования и требования к нему.

Измеряемый объект	Инструмент	Требование
Модель	Измеритель уровня, теодолит, тахеометр, стальная линейка	Контроль локальных и общих ошибок модели и сокращение эффекта масштабирования
Глубина грязевого слоя	Стальная линейка, высокоскоростная камера, ультразвуковой измеритель уровня	Вертикальная установка линейки и измерителя уровня
Уровень воды, линия инфильтрации	Трубка для измерения уровня воды, ультразвуковой измерительный инструмент, ультразвуковой измеритель уровня	Измерение с учетом повышения показаний манометра
Напряжение, деформация	Датчик давления воды, датчик давления грунта	Выбор подходящего диапазона и определение местоположения измерительного датчика
Смещение	Радиоинтерферометр, лазерный датчик смещения	Соблюдение требований к точности
Сила воздействия	Датчик давления	Выбор подходящего диапазона
Скорость потока	Многофункциональный расходомер, измеритель скорости частиц хвостов, инструмент отслеживания поплавка	Тахометр должен устанавливаться на устойчивом основании
Гранулярный анализ	Лазерный анализатор размера частиц	Установка на устойчивом основании и выбор подходящего диапазона измерения размера частиц
Ширина прорыва	Рулетка, топографический инструмент для трехмерного измерения	_

ТАБЛИЦА 6. Средства измерений и требования к ним

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ

Анализ различия между моделью и прототипом. Возникновение и развитие разрушения дамбы хвостохранилища является пространственно-временным процессом сложного взаимодействия полей просачивания, напряжения и смещения. Традиционные методы физического моделирования не способны сымитировать физические характеристики хвостов в условиях высоких напряжений. Характеристики хвостов близки к песку и илистому грунту, однако циклическая нагрузка разрушает их, и они обладают свойством обратного сдвигового сжатия. При использовании для возведения дамбы метода "вверх по течению" хвосты на нижних уровнях имеют более мелкую фракцию, чем на верхних. При этом хвосты в передней части хранилища мельче, чем в последующих частях. Структура залегания и явление многослойного кека отличаются друг от друга в испытаниях одной, двух или трех размерных фракций материала. Крупнозернистые хвосты обычно используются для закладки пустых выработок, а хвосты, складируемые в хранилища, имеют крайне мелкую фракцию. Испытания с похожими размерами частиц материала приводят к нежелательным результатам: высокой когезии, нарушению типичного (классического) потока и характеристик разрушения. Масштаб и граничные условия также негативно влияют на результаты.

Анализ содержания испытаний. Для понимания механизма прорыва дамбы, возникающего в результате затопления, сейсмоактивности или других факторов, необходимо выполнить анализ прорыва в микро- и макромасштабе. В рамках количественного анализа характеристик глубины осадочных пород и скорости развития отложений ниже по течению физическое моделирование сравнивается с результатами математического. Эти результаты не совпадают с данными фактического мониторинга при чрезвычайном происшествии, ввиду того что на устойчивость хвостохранилища влияют многие факторы. Выводы проекта САДЕМ показали, что точность моделирования ограничена; достоверность прогнозирования пикового затопления не превысила 50%, а времени прорыва дамбы — еще ниже. В Китае проводились исследования, связанные с анализом статистических ошибок при физическом моделировании разрушения дамб хвостохранилища, более сложном по сравнению с водоудерживающими плотинами. Большая часть дамб хвостохранилища располагалась вблизи жилой зоны и объектов инфраструктуры. Из-за гористого рельефа присутствовала опасность схода на окружающую территорию хвостов с верхних частей хранилища. Прорыв воды с высоким содержанием тяжелых металлов и коррозионных веществ мог негативно повлиять на экологическую обстановку в данном районе. Экспериментальные исследования экологического воздействия хвостохранилищ требуют дополнительного изучения.

Анализ методов измерения. Качество измерения непосредственно определяет эффективность испытаний, особенно в случае крупномасштабного моделирования в полевых условиях с низкой возможностью повторяемости и высокими затратами. Для измерения глубины грязевого слоя используется стальная линейка и высокоскоростная камера. Граничные условия и грязь, прилипшая к линейке, приводят к ошибке. На определение скорости потока воды влияет контактный расходомер. Оптические методы визуализации способны измерять поле потока только на поверхности. Использование эмпирической зависимости для определения распределения вертикальной скорости трудно применимо к сложной трехмерной топографии. Электромагнитное измерение подвержено влиянию магнитного поля и не пригодно для ферромагнитных материалов. Расходомер термического типа не применим для измерения скорости потока грязи и песка. На ширину пробоины при прорыве дамбы, измеряемую топографическими инструментами, влияет поток и атмосферные осадки. Ввиду того что высвобождающийся материал начинает играть роль заграждения, измерение расширения водостоков и прорывов с какой-либо точностью — сложная задача. При полевом крупномасштабном моделировании возникают проблемы с безопасностью. Сложной задачей остается мониторинг деформаций, смещений и несущей способности высвобождающегося материала дамбы.

Физические испытания хвостохранилищ можно разделить на четыре типа: изучение механизма прорыва дамбы, изучение развития потока прорыва ниже по течению, оценка устойчивости дамб и испытания способов их защиты. Механизм прорыва дамбы включает в себя его возникновение и развитие, вызванные просачиванием воды из системы водоотведения, переполнением хранилища водой и сейсмоактивностью. Изучение области потока ниже по течению включает определение пространственно-временного распределения грязевого слоя, силы воздействия, скорости и объема высвобождающегося песка, а также зоны затопления в случае прорыва дамбы. При оценке устойчивости используются данные, связанные с расположением линии инфильтрации и распределением залегания хвостов. Разрабатывается численная модель, позволяющая проанализировать процесс возведения дамбы и ее сохранность при различных инженерных условиях. Цель испытаний способов защиты — изучение влияния укрепляющих конструкций на дамбы.

выводы

На основе проведенного комплекса исследований установлено, что для разработки физической модели разрушения ограждающей дамбы хвостохранилища, объективно отражающей реальные процессы, необходимо соблюдение следующих требований.

Мультимасштабная модель должна быть спроектирована с учетом: снижения эффекта масштабирования между крупномасштабными полевыми и мелкомасштабными лабораторными испытаниями; надежности развития параметров во времени, результатов мониторинга и численного моделирования; возможности изучения статистических ошибок и применимости результатов. Центробежная и большая гидравлическая модели должны моделировать механизм возникновения и развития разрушения дамбы хвостохранилища при воздействии таких факторов, как переполнение, заиливание системы водоотведения, просачивание воды и неустойчивость откоса дамбы.

Ввиду несопоставимости критериев подобия, а также различия факторов прорыва дамбы необходимо установить соответствующие масштабы подобия. Влияние атмосферных осадков и процесса размывания дамбы могут быть аппроксимированы по смещению и нагрузке на основание. При испытаниях развития области потока ниже по течению изучаются характеристики силы воздействия, глубины грязевого слоя и область затопления, нежели траектория и скорость движения отдельных частиц хвостов.

Такие катастрофы, как прорывы водоудерживающих дамб хвостохранилищ, а также потоки осадочных и пластических пород, имеют общие и различающиеся черты. Вода, песок и смеси грунта являются высвобождающимися веществами. Изучение влияния их состава на характеристики потока позволяет расширить результаты исследования хвостохранилищ и получить определенное соотношение, которое поможет глубже понять поведение потока. Анализ фактических данных приведет к значимым результатам в области оценки и прогнозирования катастроф.

Физическая модель должна сохранять характеристики исследуемого объекта, это напрямую влияет на результаты испытаний. Быстрое развитие технологий трехмерной печати позволяет использовать новый способ построения физических моделей, при помощи которых имитируются сложные рельефные поверхности. Данные о поверхности можно получить с помощью лазерного сканирования или аэросъемки. Разработка модели с изменяемой областью потока ниже по течению позволит повысить повторяемость проведения испытаний и снизить влияние факторов этой области на результаты моделирования.

Необходимо использовать современные методы и технологии мониторинга, которые позволят организовать автоматический сбор данных. Для изучения изменяющихся значений уровня воды, напряжений, деформаций и смещений перед прорывом дамбы следует применять систему полевого трехмерного сбора информации в режиме реального времени, а также численный метод расчета. Предлагается разработать программное обеспечение для оценки состояния хвостохранилищ, обеспечивающее прогнозирование и ранее оповещение о прорыве дамбы, оборудование для измерения параметров двухфазового потока (состоящего из воды и твердых веществ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Azam S. and Li Q. Tailings dam failure: a review last one hundred years, Waster GEO Technics, 2010, Vol. 12. — P. 50–53.
- 2. Wu Z. Z. and Mei G. D. Statistical analysis of tailings pond accidents and cause analysis of dam failure, China Safety Sci. J., 2014, Vol. 24, No. 9. P. 70–76.
- Chai J., Yuan Q., Wang Z. L., et al. Application analysis of physical model test method, J. Xi'an University Sci. Technol., 2013, Vol. 34, No. 5. — P. 505–511.
- Wang X. K. and Fang D. Study on laws of debris flow model similarity, J. Sichuan University: Eng. Sci. Edition, 2000, Vol. 32, No. 3. — P. 9–12.
- 5. Coleman S. E., Andrews D. P., and Webby M. G. Overtopping breaching of non-cohesive homogeneous embankments, J. Hydraulic Eng., 2004, Vol. 128, No. 9. P. 829–838.
- 6. Dupont E., Dewals B., Archambeau P., Erpicum S., and Pirotton M. Experimental and numerical study of the breaching of an embankment dam, J. Bacteriology, 2007, Vol. 189, No. 9. P. 3645–3649.
- 7. Hanson G. J., Temple D. M., and Robinson K. M. Overview of dam gully erosion research, Int. J. Sediment Res., 2005, Vol. 20, No. 3. P. 259–269.
- 8. Morris M. W., Hassan M., Kortenhaus A., Geisenhainer G., Visser P., and Zhu Y. Modelling breach initiation and growth, Hr Wallingford, 2008. — 581–591.
- 9. Morris M. W. CADAM: Concerted action on dam break modelling, Hr Wallingford Limited, 2000.
- Morris M. W., Hassan M. A., and Vaskinn K. A. Conclusions and recommendations from the IMPACT Project WP2: Breach formation, Munich, HR Wallingford Ltd., 2004.
- Kuang S. F. Formation mechanisms and prediction models of debris flow due to natural failures, J. Sediment Res., 1993, Vol. 8, No. 4. — P. 42–57.
- 12. Zhao T. L., Chen S. S., and Zhong Q. M. Advances in studies of tailing dam break mechanism and process, Hydro-Sci. Eng., 2015, Vol. 36, No. 1. P. 105–111.
- **13.** Pan J. P., Wang S. Y., and Zhu H. W. Study on flow slide destruction models induced by seismic liquefaction and stabilizing measures of tailings dam, Metal Mine, 2011, Vol. 46, No. 4. P. 134–136.
- **14.** Zheng X., Kang Y., et al. Experimental study on tailings dam piping, Industrial Saf. Env. Protect., 2014, Vol. 40, No. 1. P. 71–77.
- **15.** Wei Y., Zhao A. W., and Xu K. L. Failure experiment of tailings dam foundation piping, Metal Mine, 2015, Vol. 50, No. 9. P. 157–160.
- **16.** Xiao J. G., Yao M. L., Huai Y. G., et al. Expansion mechanism of collapse gates of upstream tailings dam break due to overtopping, Value Eng., 2017, Vol. 36, No. 19. P. 117–119.
- 17. Jing X. F., Yin G. Z., Wei Z. A., et al. Model experimental study of collapse mechanism and broken mode of tailings dam, Chinese J. Rock Soil Mech., 2011, Vol. 32, No. 5. P. 1377–1404.
- **18.** Zhang X. K., Sun E. J., and Li Z. X. Experimental study on evolution law of tailings dam flood overtopping, China Safety Sci. J., 2011, Vol. 21, No. 7. P. 118–124.
- **19.** Chu J. W., Song H. B., and Zhang H. W. Experimental study on tailing dam break due to overtopping, China Mine Eng., 2015, Vol. 44, No. 3. P. 73–77.
- **20.** Jin J. X., Cui H. Z., Liang B., et al. Process model test on tailings dam break in earthquake action and reinforcement scheme, China Safety Sci. J., 2017, Vol. 27, No. 2. P. 92–97.
- **21.** Sun E. J., Zhang X. K., and Cheng S. Centrifuge and shaking table experiment on the tailings dam failure, China Safety Sci. J., 2012, Vol. 22, No. 6. P. 130–135.
- **22.** Wang Y. Q. and Zhang J. C. Tailings dam-break debris flow prediction analysis based on similar tests, China Safety Sci. J., 2012, Vol. 22, No. 2. P. 70–75.

- **23.** Shao J., Gan S. S., and He X. C. Application of dam break simulation test in environmental risk assessment of tailing pond, China Mine Eng., 2016, Vol. 45, No. 2. P. 64–67.
- 24. Jing X. Z., Yin G. Z., Wei Z. A., and Wang M. L. Study of tailings dam-break surges with floating slurry in model experiment in different collapse gates, J. Rock Soil Mech., 2012, Vol. 33, No. 3. P. 745–752.
- 25. Yin G. Z., Jing X. F., Wei Z. A., et al. Experimental study of similar simulation of tailings dam-break, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2010, Vol. 29 (S2), No. 9. — P. 3830–3838.
- 26. Liu L., Zhang H. W., Zhong D. Y., et al. Research on tailings dam break due to overtopping, J. Hydraulic Eng., 2014, Vol. 32, No. 6. P. 675–681.
- 27. Yin G. Z., Jing X. F., Wei W., and Li X. S. Study of model test of seepage characteristics and field measurement of coarse and fine tailings dam, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2010, Vol. 29 (S2), No. 9. P. 3710–3718.
- Zhang D. M., Zheng B. B., Yin G. Z., Dai J., and Tang F. Model tests on upstream dam-building method using concentrated and classified tailings, J. Rock Soil Mech., 2016, Vol. 37, No. 7. — P. 1832–1838.
- 29. Yin G. Z., Li Y., Wei Z. A., Jing X. F., and Zhang Q. G. Regularity of the saturation lines change and stability analysis of tailings dam in the condition of flood, J. Chongqing University, 2010, Vol. 33, No. 3. P. 72–86.
- **30.** Jing X. F., Yin G. Z., Wei Z. A., and Huang G. Model test and numerical simulation of tailing dam safety forecasting, J. Chongqing University, 2009, Vol. 8, No. 3. P. 308–313.
- **31. Deng T., Wan L., and Wei Z. A.** Stacking model test of Wenzhuang tailings reservoir and its stability analysis, J. Rock Soil Mech., 2011, Vol. 32, No. 12. P. 3647–3652.
- 32. Zhang M. Z., Jin A. B., Wang Z. K., et al. On the physical model tests of tailings dam stability, Metals Mine, 2013, Vol. 48, No. 12. P. 115–117.
- **33.** Zhang W. Z., Kang Q. R., Cao G. S., et al. Stability analysis of different construction rates of a copper tailings dam in Yunnan province, Metal Mine, 2013, Vol. 48, No. 12. P. 10–17.
- 34. Wei Z. A., Xu J. J., Chen Y. L., and Zhang D. D. Reinforcement method of both ends scroll geosynthetics in tailings dam, J. Northeastern University: Natural Sci., 2014, Vol. 35, No. 6. — P. 880–884.
- **35.** Zhao Y. S., Jing X. F., Zhou X., Cai Z. Y., and Liu K. H. Experimental study on blocking action of bar strip on tailings dam overtopping, China Safety Sci. J., 2016, Vol. 26, No. 1. P. 94–99.
- **36.** Yin G. Z., Wei Z. A., Wan L., and Zhang D. M. Test study on stability of fine grained tailings dam in geo-grid reinforcement situation, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2005, Vol. 24, No. 6. P. 1030–1034.
- **37.** Jing X. F., Zhou X., Zhao Y. S., et al. Impact study on spacing of geogrid of tailing dam break due to overtopping, China Safety Sci. J., 2016, Vol. 26, No. 8. P. 68–74.
- **38.** Tang J. X., Yin G.Z., Wei Z.A., et al. Model test study of fine grained tailings dam of Longdu tailings pone, China Min. Magazine, 2004, Vol. 13, No. 1. P. 54–56.
- **39.** Sui S. M., Hai L., You Z. Z., et al. Study on physical simulation test of improving the stability of tailings dam, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2016, Vol. 26, No. 12. P. 86–91.
- **40.** Jing X. F., Cai Z. Y., and Liu K. H. Buffering effect of landslide dam on debris flow surging from tailings dam-break, China Safety Sci. J., 2010, Vol. 20, No. 2. P. 270–276.
- **41.** Jing X. F., Cai Z. Y., and Liu K. H. Research on comparable selection of the yellow river estuary model sand, China Rural Water Hydropower, 2014, Vol. 56, No. 9. P. 43–46.

Поступила в редакцию 21/I 2021 После доработки 25/X 2021 Принята к публикации 30/VI 2022