

возможных разломов под этими линейными сооружениями и свойства вмещающих их грунтов.

Авторами переведенной работы была изготовлена крупная физическая модель грунтового массива с проходящим внутри него тоннелем для имитации сбросов и взбросов и их воздействий на указанное сооружение при разных значениях параметров грунта, углов наклона плоскости разрывного нарушения и глубины заложения тоннеля. Было выявлено, что такие свойства грунта, как влажность, гранулометрический состав, удельное сцепление и угол внутреннего трения, значительно влияют на смещения тоннеля. Полученные результаты также показали, что увеличение угла наклона плоскости разрывного нарушения может сильно увеличить смещение тоннеля. Кроме того, чем ближе к разлому (чем глубже) расположен тоннель, тем больше его смещения и разрушения.

Также было проведено моделирование в программном комплексе PLAXIS 2D. Было показано, что в рыхлом грунте смещения тоннеля могут быть значительно больше, чем в плотном, а наличие в грунтовом массиве фундамента в плотном или рыхлом грунте может уменьшить смещения тоннеля.

Сокращенный адаптированный перевод выполнен при поддержке партнера журнала «ГеоИнфо» – компании «НИИ-Информатика».

ГАФАРИ МЕХДИ (GHAFARI MENDI)

Кафедра гражданского строительства инженерного факультета Университета «Путра Малайзия» (UPM), шт. Селангор, Малайзия

НАХАЗАНАН ХАСЛИНДА (NAHAZANAN HASLINDA)

Кафедра гражданского строительства инженерного факультета Университета «Путра Малайзия» (UPM), шт. Селангор, Малайзия

ЮСОФ ЗАЙНУДДИН МД (YUSOFF ZAINUDDIN MD)

Кафедра гражданского строительства инженерного факультета Университета «Путра Малайзия» (UPM), шт. Селангор, Малайзия

ДАУД НИК НОРСЯХАРИАТИ НИК (DAUD NIK NORSYAHARIATI NIK)

Кафедра гражданского строительства инженерного факультета Университета «Путра Малайзия» (UPM), шт. Селангор, Малайзия

Ключевые слова: свойства грунта; угол наклона плоскости разлома; глубина заложения тоннеля; сброс (нормальный сброс); взброс (обратный сброс).

1. ВВЕДЕНИЕ

Разрывные нарушения вызываются внезапным перемещением по плоскости разлома, когда напряжение достигают таких величин, что преодолевают трение. При этом высвобождается энергия и распространяется в виде сейсмических волн через грунт. В последние годы количество исследований по этой теме выросло из-за нескольких крупных сейсмических событий, произошедших из-за таких нарушений, – на Тайване в 1999 году, в Турции в 1999 году, в США в 2002 году, в Японии в 2004 году, в Китае в 2008 году, в Иране в 1990 году [1–6]. Кроме того, в 2015 году в штате Сабах в Малайзии произошло землетрясение с магнитудой 6, которое было зарегистрировано как второе по силе

сейсмическое событие в стране после землетрясения 1991 года в городе Ранау в том же штате [7]. Тектоническая карта активности разрывных нарушений показала, что разлом в Сабахе был частью 200-километровой системы нормальных разломов, пересекающих восточную сторону хребта Крокер параллельно северо-западному побережью Сабаха [8].

В предыдущих исследованиях разрывных нарушений использовались два типа физических моделей – для центробежного моделирования и для $1g$ -моделирования [9, 10]. При центробежном моделировании можно изменять ускорение центрифуги $N \times g$, где N – коэффициент масштабирования; g – ускорение свободного падения. Это означает, что удельный вес грунта при вращении в центрифуге в N раз превышает его удельный вес при $1g$ [11–16]. То есть при моделировании реальной ситуации с помощью центрифуги как бы изменяется сила тяжести. Однако имитация разрывных нарушений с помощью центрифуг в основном использовалась для исследований массивов несвязных грунтов без каких-либо строительных сооружений внутри («в свободном поле») [13, 15, 17]. В нескольких исследованиях изучалась взаимосвязь между зоной сдвига и повреждениями, и их результаты показали, что грунт в зоне сдвига возникают самые высокие напряжения и деформации, которые и приводят к нарушениям. Ли (Lee) с коллегами [18] использовали центробежное моделирование, чтобы исследовать зону сдвига, когда разлом происходит «в свободном поле», и показали, что плотность грунта может оказывать большое влияние на смещения его поверхности.

Но для моделирования влияния свойств грунта на тоннели при разломах предпочтительнее использовать $1g$ -модели. Во-первых, в отличие от центробежного моделирования, которое очень чувствительно к достижению определенной силы тяжести, в $1g$ -моделях используется естественная сила тяжести. Во-вторых, в них можно управлять процессом увеличения вертикальной составляющей, а также устанавливать больше датчиков из-за большего размера таких моделей. В-третьих, с их помощью может быть более точно исследовано влияние свойств грунта (опять же из-за большего масштаба модели грунтового массива).

При испытаниях моделей с участием грунта очень важны такие его свойства, как удельное сцепление, угол внутреннего трения, гранулометрический состав, плотность и влажность [20, 21].

Предыдущие исследования показали, что деформации влажного и сухого грунта при возникновении разлома различны. Было обнаружено, что более влажный грунт показывает значительное увеличение порового давления и удельного сцепления по сравнению с более сухим, поэтому влажность увеличивает прочность грунта [19] (в PLAXIS учет дополнительного упрочнения неполностью водонасыщенного грунта обеспечивается за счет опции Suction – *Ped.*).

Плотность грунта – еще один важный фактор. Зона сдвига в грунте с низкой плотностью обычно более сложна, чем в грунте с высокой плотностью, и при увеличении относительной плотности модели грунта количество плоскостей разрывов уменьшается благодаря росту его прочности [9, 11].

В доступных статьях других авторов также показано, что на несущую способность грунта может повлиять изменение угла внутреннего трения и удельного сцепления [22, 23]. Результаты, полученные Хезри (Khezri) с соавторами [24], показали, что очень важно измерять удельное сцепление на глубине заложения подземных сооружений, потому что оно увеличивается с глубиной и разные слои грунта имеют разное удельное сцепление (в PLAXIS у многих моделей есть возможность задавать рост сцепления с глубиной – *Ped.*).

В работах [25, 26] было указано, что при проектировании фундаментов, дорог и других объектов инфраструктуры решающее значение имеют гранулометрический состав (размер частиц) и влажность грунта. Более того, сбросы и взбросы также будут по-разному влиять на деформации грунта. Когда происходит нормальный сброс, по крайней мере в одном месте

разрыв достигает поверхности земли и повреждает фундаменты зданий и может быть больше воздействий на грунт [10, 27].

Тоннели и метро будут первыми сооружениями, которые повредятся при любых смещениях во вмещающих их грунтовых массивах, прежде чем вызванные разломами усилия достигнут поверхности земли. Следовательно, инженеры должны уделять больше внимания устойчивости тоннельных конструкций. Ежедневно миллионы людей пользуются подземным общественным транспортом, и, следовательно, разрывные нарушения могут стать серьезной угрозой для их жизни. Восстановление поврежденных сооружений – еще одна проблема, потому что оно может быть очень дорогостоящим, а иногда и невозможным.

Таким образом, чтобы уменьшить повреждения тоннелей и зданий, необходимы дополнительные исследования в этой области. Помимо характеристик разломов также очень важны и требуют особого внимания свойства грунта. Ранее было проведено несколько исследований разрывных нарушений, но ни в одном из них не рассматривались свойства грунта как одни из основных факторов, влияющих на смещения тоннелей.

Моделирование сбросов и взбросов можно выполнить, подняв нижнюю часть физической модели вверх или опустив ее вниз. Разные исследователи оценили ограничения смещений и показали, что процентное отношение h/H (где h – смещение висячего крыла; H – глубина формы) может давать диапазон от 4 до 10%. Смещение вызовет некоторые изменения на поверхности земли, которые будут различны в зависимости от свойств грунта [27–29]. В настоящем исследовании были выбраны диапазоны от 2,7 до 8%. В предыдущих работах воздействие смещений измерялось только на поверхности земли, а в настоящем исследовании измерялись также смещения тоннеля, встроенного в грунт.

Авторами представленной статьи было выполнено экспериментальное изучение влияния на смещения тоннеля со стороны свойств вмещающего его грунта (удельного сцепления, влажности, гранулометрического состава, угла внутреннего трения), характеристик разрывных нарушений (их типов, углов наклона плоскостей разломов) и глубины заложения тоннелей с использованием $1g$ -модели. Кроме того, были исследованы воздействия на тоннели со стороны различий и сходств сбросов и взбросов, углов наклона плоскостей разломов и глубины заложения тоннелей.

Полезным инструментом для анализа двух- и трехмерных моделей является программный комплекс PLAXIS, который используется в различных обстоятельствах, таких как моделирование параметров грунтового массива, тоннелей, фундаментов и многого другого. В настоящей работе программа PLAXIS использовалась для моделирования воздействия разломов на рыхлый и плотный грунт и тоннели в нем, в том числе при наличии в грунтовом массиве фундаментов.

Авторы полагают, что результаты этой работы помогут инженерам понять уровень ущерба, который может быть нанесен тоннелям в районах разломов с теми или иными характеристиками грунта и самих разрывных нарушений.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

В лаборатории геомеханики Университета «Путра Малайзия» была изготовлена физическая модель длиной 3000 мм, шириной 1000 мм и высотой 1000 мм для моделирования сбросов и взбросов («нормальных и обратных сбросов» – normal and reverse faults). Было установлено условие $B=4H$ (где H и B – соответственно толщина и длина физической модели). Эта физическая модель состояла из стабильных зон и подвижных частей, которые можно было перемещать вверх и вниз с помощью гидравлического домкрата для имитации взбросов и сбросов (рис. 1).

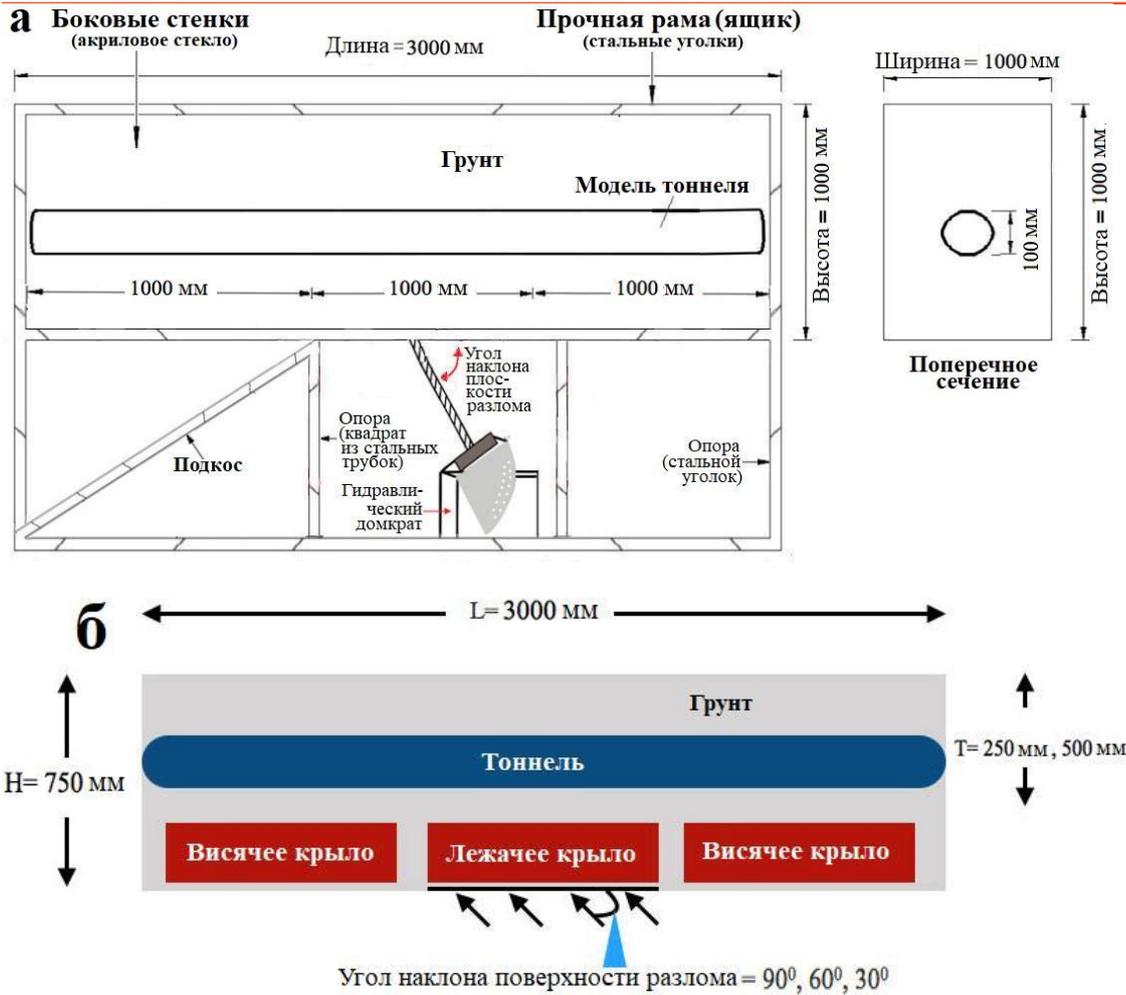


Рис. 1. Схемы устройства для испытания физической модели и самой модели

Чтобы оценить влияние *различных свойств грунта* на тоннель при возникновении разрывного нарушения исследовали по три значения влажности, размера частиц, удельного сцепления и угла внутреннего трения грунта (таблицы 1–4). Угол наклона плоскости разлома оставался постоянным и составлял 60 град. при всех этих испытаниях. Тип грунта, выбранный на основе единой системы классификации грунтов USCS (ASTM D-2487), – плохо отсортированный песок (SP). Естественная влажность этого грунта составляла 5%. Образцы с содержанием воды 2% были приготовлены путем их высушивания на воздухе в лаборатории в течение двух недель. Образцы с влажностью 9 и 12% были приготовлены с добавлением различного количества воды (таблица 5) на основе того, что, как показали тесты, 95 кг воды могут увеличить содержание воды в 3,7 т грунта примерно на 3%. По результатам испытаний в приборе стандартного уплотнения получения кривой «плотность – влажность» оптимальное содержание воды составило 13,9% (рис. 2). Причина выбора для испытаний максимальной влажности 12% заключалась в достижении при этом плотности грунта 80% и угла внутреннего трения 39 град.

Таблица 1. Используемые свойства грунта при его различной влажности

Размер частиц грунта D ₅₀ , мм	Удельное сцепление с, кПа	Угол внутр. трения φ, град.	Угол наклона плоскости разлома, град.	Глубина заложения тоннеля, мм	Тип разрывного нарушения	Влажность w, %	№ теста
0,4	10	39	60	250	взброс	2	M2R
					сброс	2	M2N
					взброс	9	M9R
					сброс	9	M9N
					взброс	12	M12R
					сброс	12	M12N

Таблица 2. Используемые свойства грунта при различных размерах его частиц

Удельное сцепление с, кПа	Угол внутр. трения φ, град.	Влажность w, %	Угол наклона плоскости разлома, град.	Глубина заложения тоннеля, мм	Тип разрывного нарушения	Размер частиц грунта D ₅₀ , мм	№ теста
10	39	12	60	250	взброс	0,2	P0.2R
					сброс	0,2	P0.2N
					взброс	0,4	P0.4R
					сброс	0,4	P0.4N
					взброс	0,6	P0.6R
					сброс	0,6	P0.6N

Таблица 3. Используемые свойства грунта при различных удельных сцеплениях

Угол внутр. трения φ, град.	Размер частиц грунта D ₅₀ , мм	Влажность w, %	Угол наклона плоскости разлома, град.	Глубина заложения тоннеля, мм	Тип разрывного нарушения	Удельное сцепление с, кПа	№ теста
39	0,4	12	30	250	взброс	0	C0R
					сброс	0	C0N
					взброс	10	C10R
					сброс	10	C10N
					взброс	20	C20R
					сброс	20	C20N

Таблица 4. Используемые свойства грунта при различных углах внутреннего трения

Удельное сцепление с, кПа	Размер частиц грунта D ₅₀ , мм	Влажность w, %	Угол наклона плоскости разлома, град.	Глубина заложения тоннеля, мм	Тип разрывного нарушения	Угол внутр. трения φ, град.	№ теста
10	0,4	12	60	250	взброс	27	F27R
					сброс	27	F27N
					взброс	33	F33R
					сброс	33	F33N
					взброс	39	F39R
					сброс	39	F39R

Таблица 5. Способы приготовления грунта с нужной влажностью

Влажность грунта w , %	Количество воды, кг (на 3,7 т грунта)
2	Частичное высушивание на воздухе
9	
12	

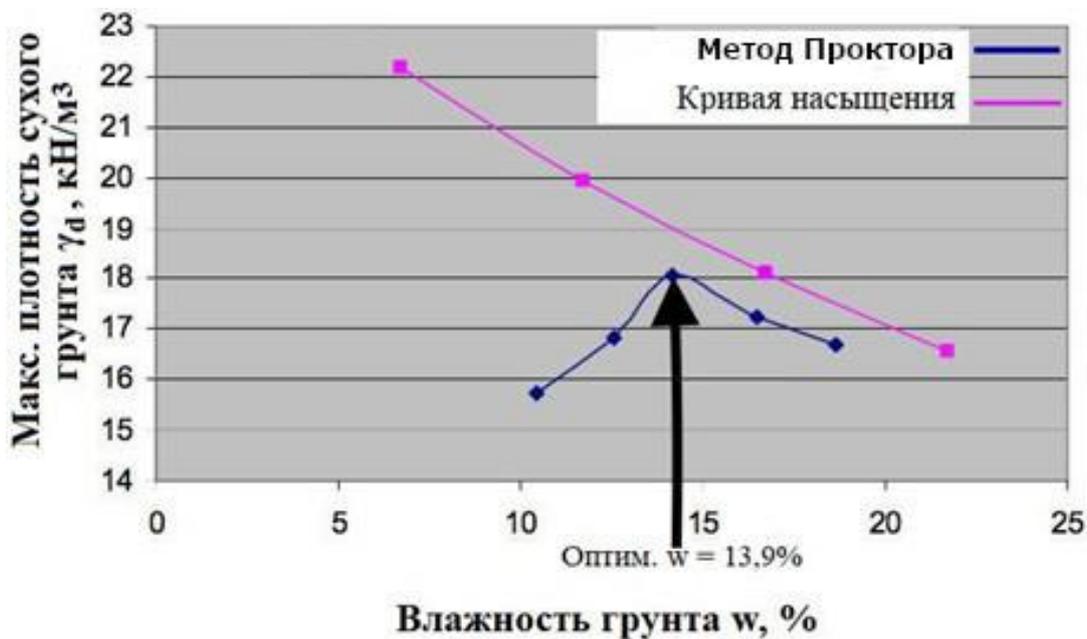


Рис. 2. Определение оптимальной влажности грунта с помощью кривой «плотность – влажность», построенной по результатам испытаний по методу Проктора

Было изучено также влияние углов падения разрывного нарушения 30, 60 и 90 град. (таблица 6, рис. 3). Кроме того, были выбраны значения глубины заложения тоннеля 250 и 500 мм от поверхности земли (таблица 7). Показатели свойств рыхлого и плотного песка (по классификации Инженерного корпуса армии США), оцененные в PLAXIS, были взяты на основе случаев из практики (таблица 8) [23, 30]. Смещения тоннеля регистрировались тремя тензодатчиками. Чтобы измерить смещения поверхности физической модели, на ней было установлено пять датчиков на основе дифференциальных трансформаторов с линейно изменяющимся выходным сигналом (LVDT – linear variable differential transformers) (рис. 4). Но большинство датчиков было установлено в середине высоты физической модели, потому что самые большие усилия локализуются ближе к разлому (следовательно, в середине модели можно было зарегистрировать максимальные смещения).

Таблица 6. Используемые свойства грунта при различных углах наклона плоскостей разломов

Удельное сцепление c , кПа	Угол внутр. трения ϕ , град.	Размер частиц грунта D_{50} , мм	Влажность w , %	Глубина заложения тоннеля	Тип разрывного нарушения	Угол наклона плоскости разлома, град.	№ теста
20	39	0,4	12	250	взброс	30	C20R30
					взброс	60	C20R60
					взброс	90	FA90R
					сброс	30	C20N30
					сброс	60	C20N60
					сброс	90	FA90N

Таблица 7. Использованные свойства грунта при различной глубине заложения тоннеля

Удельное сцепление c , кПа	Угол внутр. трения ϕ , град.	Размер частиц грунта D_{50} , мм	Влажность w , %	Угол наклона плоскости разлома, град.	Тип разрывного нарушения	Глубина заложения тоннеля, мм	№ теста
0	39	0,2	2	60	взброс	250	TD250R
					взброс	500	TD500N
					сброс	250	TD250N
					сброс	500	TD500R

Таблица 8. Свойства грунта, использованные при моделировании в PLAXIS

Грунт	Модуль упругости	Угол внутр. трения ϕ , град.	Удельное сцепление c , кПа	Тип разрывного нарушения	Влажность w , %	Угол наклона плоскости разлома, град.	Глубина заложения тоннеля, мм
Рыхлый песок	25 000	33	0,3	сброс и взброс	9	60	250
Плотный песок с гравием	200 000	22	50				



Рис. 3. Испытания с углами наклона плоскости разрывного нарушения 30, 60 и 90 град. (а, б, в соответственно)

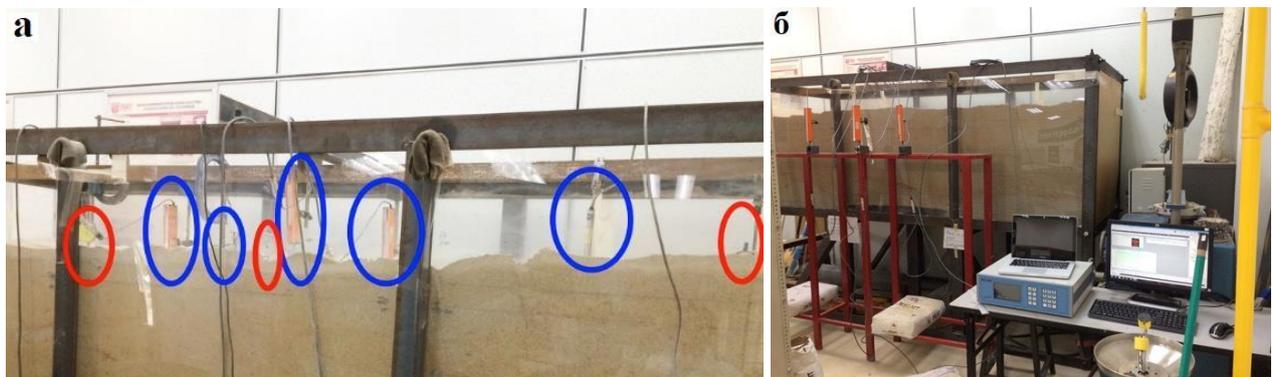


Рис. 4. Установка для испытаний и аппаратура для измерения, контроля и регистрации данных: а – тензодатчики (обведены красными овалами) и датчики LVDT (обведены синими овалами); б – компьютер и регистрирующее устройство (справа на переднем плане)

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Влияние свойств грунта на смещения тоннеля

3.1.1. Влажность грунта

На рисунке 5 представлено влияние различных значений влажности грунта (2, 9 и 12%) на смещения тоннеля при взбросах и сбросах. Смещения тоннеля больше при взбросах, чем при сбросах, и они уменьшаются с увеличением содержания воды в грунте от 2 до 12% (практически до достижения ее оптимального уровня 13,9%). Например, при взбросах разница в смещениях тоннелей для влажности 2 и 12% достигла почти 34%. Это указывалось и в предыдущих работах [31, 32]. Интересно отметить, что содержание воды 9 и 12%, которое ближе к оптимальному (13,9%), дает меньшие различия в смещениях по сравнению с 2%-ной влажностью. Причина такого уменьшения смещений была обнаружена и объяснена Кумари (Kumari) [33]. Она заключается в том, что с увеличением содержания воды в грунте повышается его условное сцепление, вызывая рост сопротивления сдвигу, что придает грунту более высокую прочность.

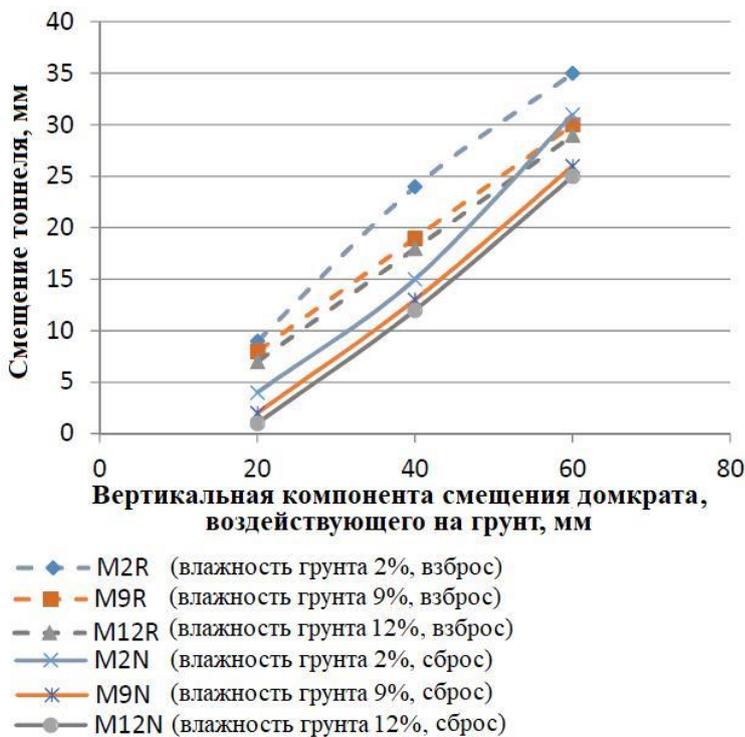


Рис. 5. Влияние влажности грунта на смещения тоннеля при взбросах и сбросах

3.1.2. Гранулометрический состав

На рисунке 6 отражено влияние различных размеров частиц грунта D_{50} (0,2; 0,4 и 0,6 мм) на смещения тоннеля, вызванные взбросами и сбросами. Смещения при взбросах больше, чем при сбросах. И в целом кривые для взбросов проходят более круто, чем для сбросов. Результаты показали, что с увеличением D_{50} от 0,2 до 0,6 мм смещения тоннеля уменьшились почти на 39%. Полученные данные согласуются с результатами других исследователей, которые показали, что мелкозернистый грунт имеет меньшую устойчивость к воздействию сил сдвига [35, 36]. Наиболее подходящее исследование в этом отношении было проведено Дипа (Deera) [34], которое показало, что крупнозернистый песок с глинистыми частицами имеет более высокую прочность и может выдерживать большее напряжение.

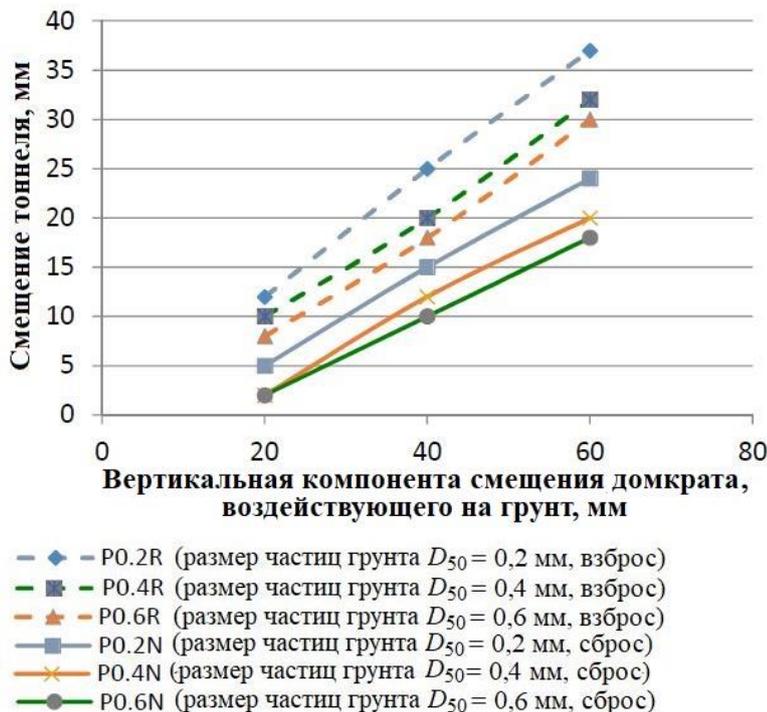


Рис. 6. Влияние размера частиц грунта D_{50} на смещения тоннеля при взбросах и сбросах

3.1.3. Удельное сцепление

Из рисунка 7 видно, что удельное сцепление грунта (0, 10 и 20 кПа) оказало большое влияние на смещения тоннеля при взбросах и сбросах. При уменьшении сцепления смещение тоннеля увеличивается (особенно сильно при снижении сцепления от 20 до 10 кПа). Таким образом, более высокое сцепление грунта может значительно уменьшить смещения тоннелей при взбросах и сбросах. Как показали предыдущие исследования [37, 38], рост сцепления увеличивает прочность грунта на сдвиг. Несвязный же грунт очень легко деформируется даже при небольших смещениях домкрата. Более того, при работе над любым проектом важно знать, что удельное сцепление одного и того же грунта увеличивается с глубиной [24].

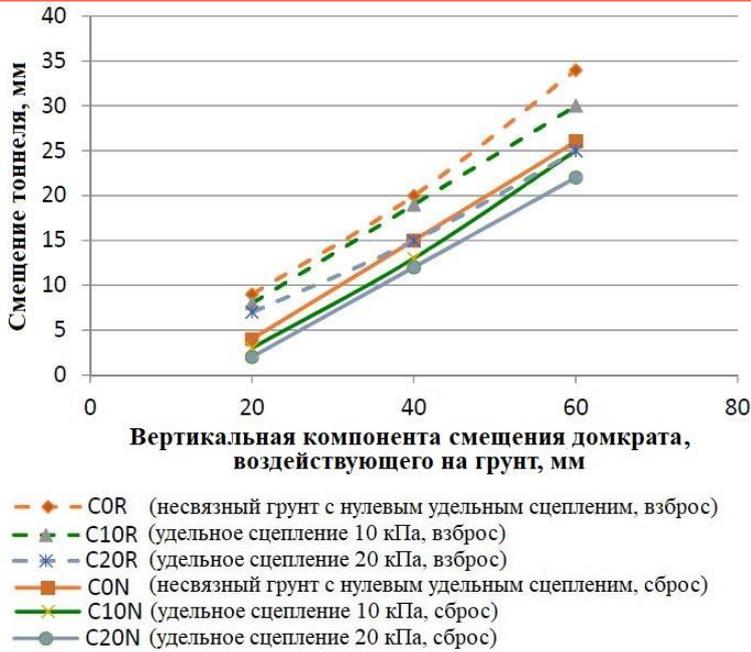


Рис. 7. Влияние удельного сцепления на смещения тоннеля при взбросах и сбросах

3.1.4. Угол внутреннего трения

Из рисунка 8 видно, что при уменьшении угла внутреннего трения смещения тоннеля при взбросах и сбросах увеличиваются. Например, при уменьшении угла с 39 до 27 град. смещения тоннеля при взбросе выросли на 39%, а на поверхности грунтового массива появилось больше трещин (рис. 9). При взбросах смещения гораздо больше, чем при сбросах. Например, при угле внутреннего трения 27 град. взброс вызвал на 48% большие смещения тоннеля, чем сброс.

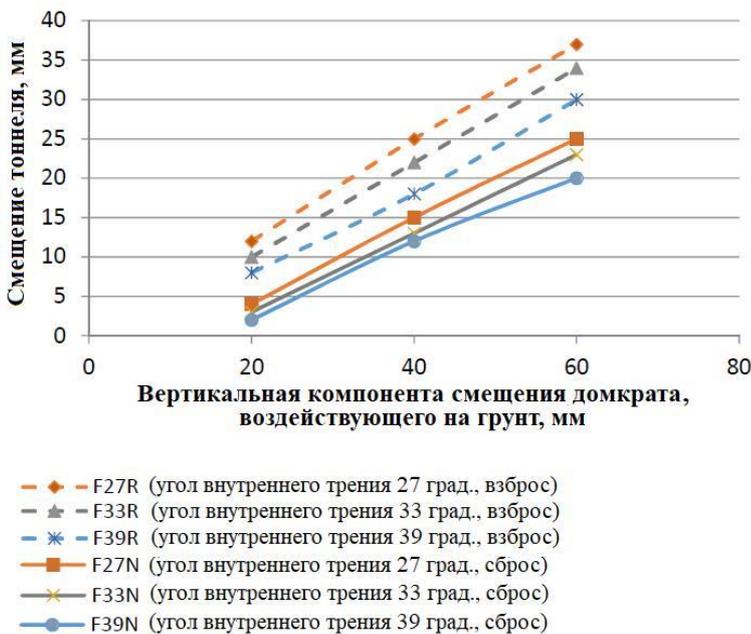


Рис. 8. Влияние угла внутреннего трения грунта на смещения тоннеля при взбросах и сбросах



Рис. 9. Трещины (выделены сиреневым цветом) на поверхности грунта после взброса при удельном сцеплении 39 град. (а) и 27 град. (б)

Результаты физического моделирования также показали, что при возникновении разрывного нарушения рыхлый грунт в случае $h/H > 4\%$ (где h – смещение; H – толщина слоя грунта) сначала уплотняется, а затем смещается. Более того, рыхлый грунт дает больше трещин на поверхности, чем плотный.

Таким образом, влияние величины угла внутреннего трения и плотности грунта на смещения тоннеля при взбросах и сбросах является существенным и очень важным. Это согласуется с выводом Мосса (Moss) с коллегами [39] о том, что плотный грунт может выдерживать большие деформации, чем рыхлый. Лабораторные испытания устойчивости грунта [40, 41] также показали, что рост угла внутреннего трения увеличивает прочность грунта на сдвиг (а также уменьшает осадки).

3.2. Влияние угла наклона плоскости взброса или сброса на смещения тоннеля

На рисунке 10 продемонстрирована важность влияния угла наклона плоскости разрывного нарушения (30, 60 и 90 град.) на смещения тоннеля при взбросах и сбросах. При росте этого угла растут смещения тоннеля, но они мало изменяются при увеличении угла от 40 до 60 град., зато увеличивается примерно в два раза при росте угла от 60 до 90 град. При взбросах смещения тоннеля больше (и трещины на поверхности грунта более выражены), чем при сбросах (при сбросах больше выражены осадки поверхности грунта, а не трещины [16]).

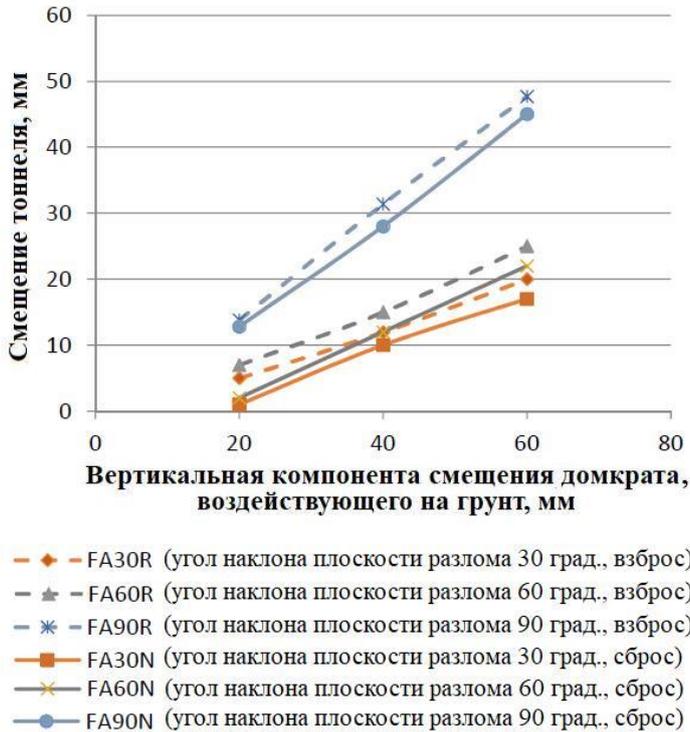


Рис. 10. Влияние угла наклона плоскости разрывного нарушения на смещения тоннеля при взбросах и сбросах

3.3. Влияние глубины заложения тоннеля на его смещения

Рисунок 11 иллюстрирует влияние глубины заложения тоннеля (250 и 500 мм) на его смещения при взбросах и сбросах для случая с углом падения разрывного нарушения 60 град. Смещения тоннеля больше, когда он располагается ближе к разлому, то есть глубже. При этом его смещения при взбросах существенно выше, чем при сбросах (примерно на 44 и 41% при глубине заложения тоннеля 250 и 500 мм соответственно).

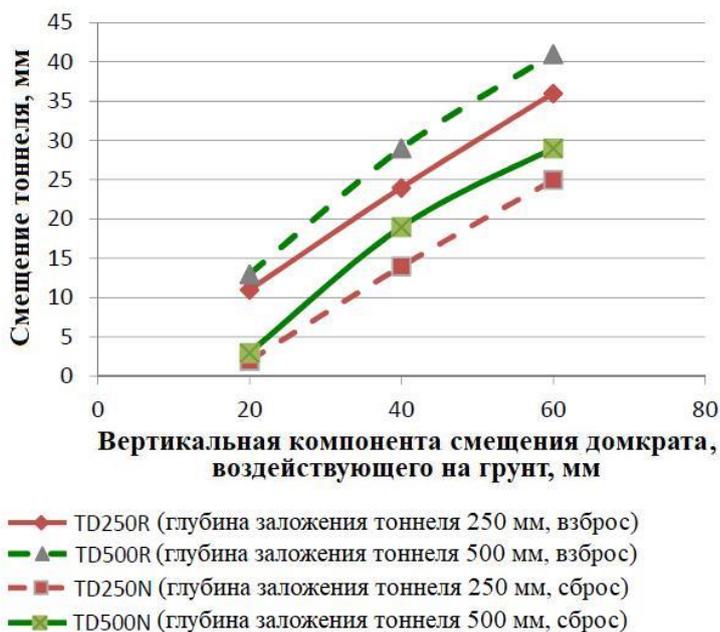


Рис. 11. Влияние глубины заложения тоннеля на его смещения при взбросах и сбросах

На рисунке 12 продемонстрировано, как сбросы могут повлиять на тоннель, поверхность земли и здания на ней.

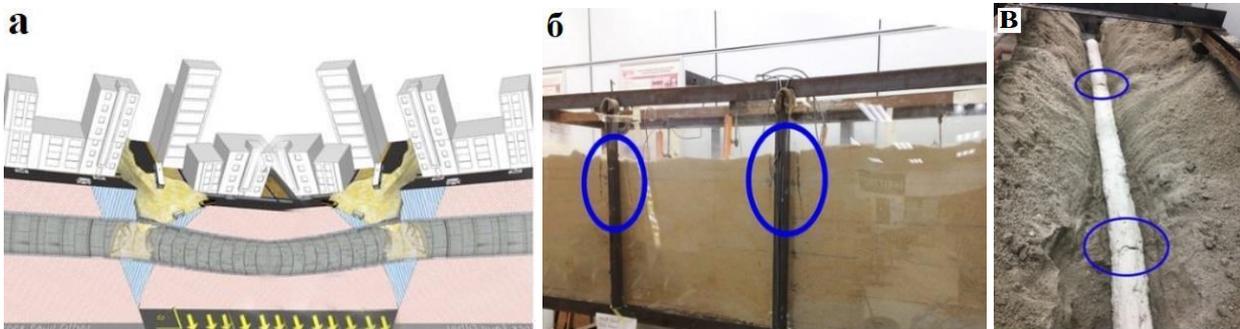
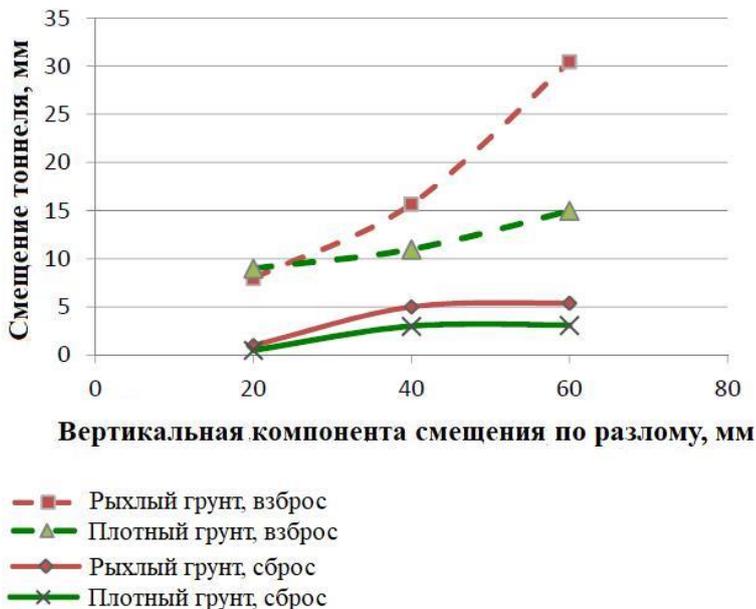


Рис. 12. Повреждения при сбросах: а – схема повреждений грунтового массива, тоннеля, поверхности земли и зданий на ней; б – смещения в грунтового массива при испытании (обведены сиреневыми овалами); в – повреждения тоннеля, откопанного после испытания (обведены сиреневыми овалами)

3.4. Анализ методом конечных элементов

Сравнение поведения плотного и рыхлого грунта при взбросах и сбросах с помощью моделирования в программном комплексе PLAXIS показало, что при рыхлом грунте смещения могут быть в два раза больше, чем при плотном. При этом смещения, вызванные взбросами, могут более чем в четыре раза превышать смещения, вызванные сбросами (рис. 13).



Кроме того, в программе PLAXIS было изучено поведение рыхлого и плотного грунта при добавлении фундамента в грунтовой массив с тоннелем. Фундамент уменьшил осадки тоннеля (а без фундамента все напряжения сосредоточились на самом тоннеле) (рис. 14).

Например, наличие фундамента в рыхлом грунте привело к уменьшению смещений поверхности земли на 23% и смещений тоннеля на 6% (рис. 15).

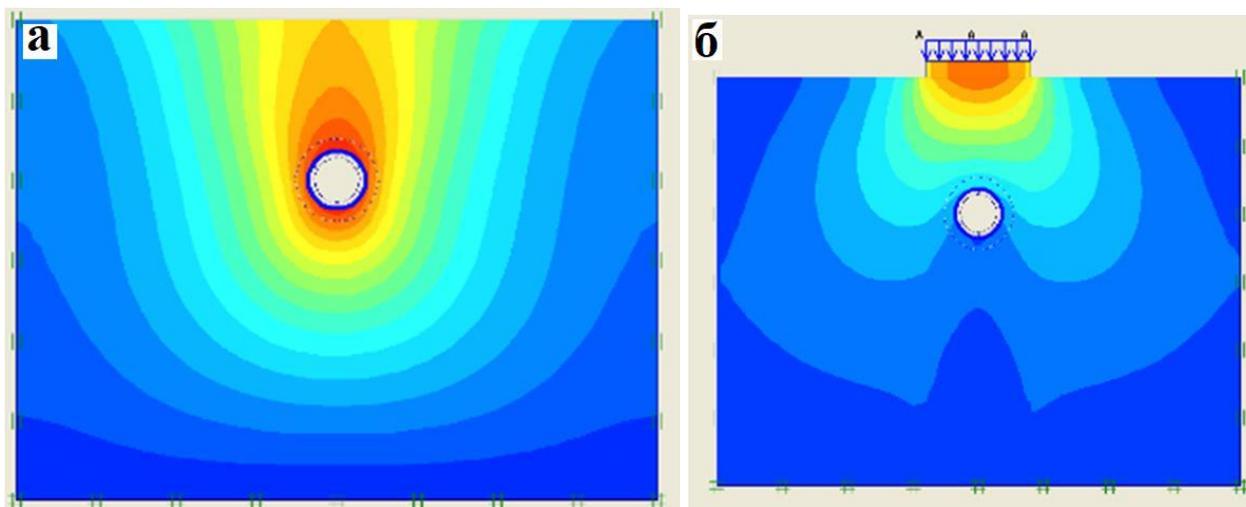


Рис. 14. Распределение общих смещений на поперечном разрезе тоннеля и вмещающего его рыхлого грунта при разломе в массиве: а – без фундамента; б – с фундаментом

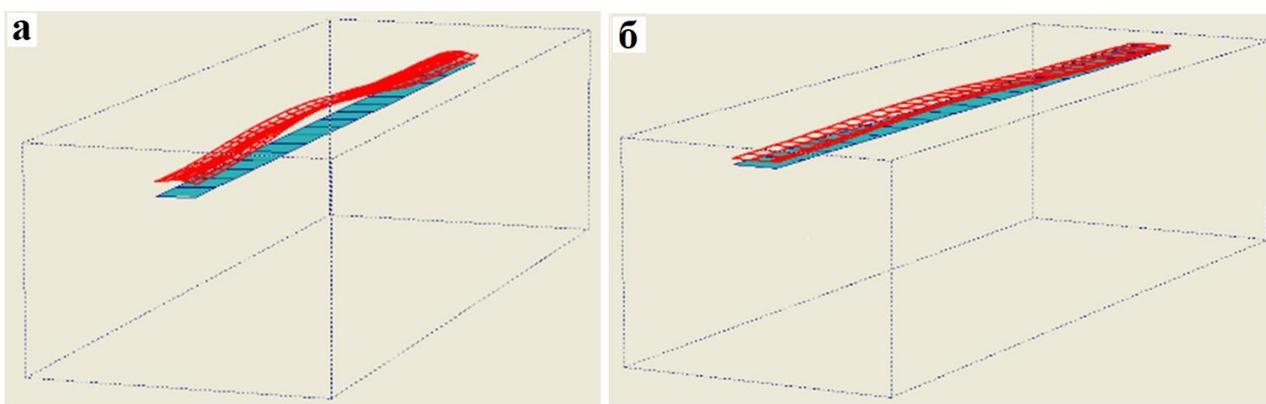


Рис. 15. Смещения поверхности рыхлого грунта при разрывных нарушениях в массиве: а – без фундамента; б – с фундаментом

В плотном грунте по сравнению с рыхлым смещения поверхности земли и тоннеля при наличии фундамента уменьшились на 14 и 4% соответственно.

При использовании в PLAXIS именно тех свойств грунта, которые были применены в физической модели, смещения поверхности земли и тоннеля при наличии фундамента уменьшились на 29 и 7% соответственно.

В свою очередь, по результатам, полученным Размхахом (Razmkhah) с коллегами [42], наличие тоннеля в массиве грунта уменьшает смещения поверхности земли и фундаментов.

4. ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показали, что на смещения тоннеля при взбросе или сбросе оказывают большое влияние свойства грунта (влажность, гранулометрический состав, удельное сцепление, угол внутреннего трения), параметры взброса или сброса (угол наклона плоскости разрывного нарушения) и глубина заложения тоннеля.

1. Испытания физических моделей показали, что на смещения тоннеля большое влияние оказывает влажность вмещающего его грунта (2, 9 и 12%). Основная разница в смещениях (почти 34%) была между 2 и 12% содержания воды. Увеличение влажности грунта вызывает уменьшение его смещений за счет увеличения его сопротивления сдвигу.

2. Изучение с помощью физической модели влияния размера частиц грунта показало, что мелкозернистый грунт менее прочен при разломах и в нем происходят большие смещения тоннеля. Например, при угле наклона плоскости разрывного нарушения 60 град. разница в смещениях тоннеля для грунта с $D_{50}=0,2$ мм и с $D_{50}=0,6$ мм достигла 39%. Результаты Хуна (Hong) с сотрудниками [43] также показали, что глинистый грунт менее устойчив к резким смещениям.

3. Исследование влияния удельного сцепления грунта с помощью физического моделирования показало следующее. При взбросе с углом падения 60 град. несвязный грунт очень легко деформировался при изменении вертикальной составляющей смещения по разлому более чем на 10 мм. Даже при увеличении плотности несвязного грунта на его поверхности появлялись трещины из-за отсутствия сцепления. Следовательно, песок очень чувствителен к смещениям, и тоннели в таком грунте очень легко деформируются. Например, при изменении удельного сцепления грунта с 20 до 0 кПа при угле наклона плоскости взброса 30 град. смещения тоннеля увеличились на 64%. Дело в том, что более высокое удельное сцепление увеличивало прочность грунта на сдвиг и его устойчивость, что и приводило к меньшим смещениям в нем.

4. Величина угла внутреннего трения грунта, как показали испытания физических моделей, также играет большую роль в смещениях тоннеля. Увеличение угла внутреннего трения уменьшило осадки и увеличило сопротивление грунта сдвигу. В плотном грунте смещения и повреждения тоннеля были меньше, чем в рыхлом.

5. Испытания физических моделей также подтвердили, что важную роль в смещениях и повреждениях тоннелей играет угол наклона плоскости разрывного нарушения. При испытаниях с углами 30, 60 и 90 град. самые большие смещения тоннеля возникли при угле 90 град., поскольку в этом случае распределение усилий при разломе фокусируется в конкретном месте тоннеля. А при меньших углах наклона плоскости разрывного нарушения более значительная часть тоннеля участвует в выдерживании воздействующих на него усилий. Например, при угле 30 град. смещения тоннеля были на 25 и 50% меньше по сравнению с углами 60 и 90 град. соответственно.

6. Результаты физического моделирования показали, что смещения и повреждения тоннеля зависели и от глубины его заложения (250 и 500 мм). Когда тоннель располагался ближе к разлому (500 мм от поверхности земли), его смещения были больше по сравнению с глубиной заложения 250 мм (где большая часть грунта участвовала в поглощении усилий). В свою очередь, тоннель увеличил несущую способность грунтового массива и уменьшил количество трещин на поверхности земли.

7. Результаты испытаний физических моделей и моделирования в программном комплексе PLAXIS вполне согласовывались друг с другом. Было проведено виртуальное моделирование для оценки различий между влиянием рыхлого и плотного грунта. Оно показало, что в первом случае смещения могут быть в два раза больше, чем во втором.

В заключение интересно отметить следующее. Результаты полевых исследований поведения грунтового массива при наличии в нем фундамента и тоннеля показали, что рыхлый (слабый) грунт может испытывать в восемь раз большие смещения, чем плотный (скальный), а наличие в массиве тоннеля может уменьшить смещения фундамента примерно на 34% при взбросе и почти на 24% при сбросе.

Данное исследование было профинансировано Университетом «Путра Малайзия» (грант Putra IPS Grant, GP IPS/2016/9505400).

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА

Ghafari M., Nahazanan H., Yusoff Z.M., Daud N.N.N. A novel experimental study on the effects of soil and faults' properties on tunnels induced by normal and reverse faults // Applied Sciences. Basel, Switzerland: MDPI, 2020. Vol. 10. № 11. P. 3969. URL: mdpi.com/2076-3417/10/11/3969/htm.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ

1. Bakir P.G., De Roeck G., Degrande G., Wong K.K.F. Site dependent response spectra and analysis of the characteristics of the strong ground motion due to the 1999 Duzce earthquake in Turkey // Eng. Struct. 2007. Vol. 29. P. 1939–1956.
2. Faccioli E., Anastasopoulos I., Gazetas G., Callerio A., Paolucci R. Fault rupture-foundation interaction: selected case histories // Bull. Earthq. Eng. 2008. Vol. 6. P. 557–583.
3. Gazetas G., Pecker A., Faccioli E., Paolucci R., Anastasopoulos I. Preliminary design recommendations for dip-slip fault-foundation interaction // Bull. Earthq. Eng. 2008. Vol. 6. P. 677–687.
4. Novakova L. Evolution of paleostress fields and brittle deformation in Hronov-Porící Fault Zone, Bohemian Massif // Studia Geophys. Et Geod. 2014. Vol. 58. P. 269–288.
5. Alexandr G. The Impact of earthquakes of tunnel linings: a case study from the Hanoi metro system // Int. J. Geomate. 2018. Vol. 14. P. 151–158.
6. Ahmadi M., Moosavi M., Jafari M.K. Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through wet granular soil // Eng. Geol. 2018. Vol. 239. P. 229–240.
7. Yusoff H.H.M., Razak K.A., Yuen F., Harun A., Talib J., Mohamad Z., Ramli Z., Razab R.A. Mapping of post-event earthquake induced landslides in Sg. Mesilou using LiDAR // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2016. Vol. 37. P. 012068.
8. Wang Y., Wei S., Wang X., Lindsey E.O., Tongkul F., Tapponnier P., Bradley K., Chan C.-H., Hill E.M., Sieh K. The 2015 Mw 6.0 Mt. Kinabalu earthquake: an infrequent fault rupture within the Crocker fault system of East Malaysia // Geosci. Lett. 2017. Vol. 4. P. 6.
9. Baziari M.H., Nabizadeh A., Jung Lee C., Yi Hung W. Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel // Soil Dyn. Earthq. Eng. 2014. Vol. 65. P. 151–164.
10. Liu X., Li X., Sang Y., Lin L. Experimental study on normal fault rupture propagation in loose strata and its impact on mountain tunnels // Tunn. Undergr. Space Technol. 2015. Vol. 49. P. 417–425.
11. Burridge P.B., Scott R.F., Hall J.F. Centrifuge study of faulting effects on tunnel // J. Geotech. Eng. 1989. Vol. 115. P. 949–967.
12. Tongkul F. The geology of Northern Sabah, Malaysia: its relationship to the opening of the South China Sea Basin // Tectonophysics. 1994. Vol. 235. P. 131–147.
13. Ahmed W., Bransby M.F. Interaction of shallow foundations with reverse faults // J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 2009. Vol. 135. P. 914.
14. Cai Q.P., Hu P., Laak P., Van Ng C.W.W., Chiu A.C.F. Investigation of boundary conditions for simulating normal fault propagation in centrifuge // 4th Int. Conf. Geotech. Eng. Soil Mech. 2010. Vol. 614. P. 1–8.
15. Chang Y.Y., Lee C.J., Huang W.C., Hung W.Y., Huang W.J., Lin M.L., Chen Y.H. Evolution of the surface deformation profile and subsurface distortion zone during reverse faulting through overburden sand // Eng. Geol. 2015. Vol. 184. P. 52–70.
16. Kiani M., Akhlaghi T., Ghalandarzadeh A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults // Tunn. Undergr. Space Technol. 2016. Vol. 51. P. 108–119.

17. Ng C.W.W., Asce F., Cai Q.P., Hu P. Centrifuge and numerical modeling of normal fault-rupture propagation in clay with and without a preexisting fracture // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2012. Vol. 138. P. 1492–1502.
18. Lee J.W., Tabuchi G., Hamada M. Experimental approach for understanding of fault rupture propagation through an alluvial soil // *J. Earthq. Eng. Exp.* 2003. Vol. 27. P. 1–4.
19. Johansson J., Konagai K. Fault induced permanent ground deformations – an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures // *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2006. Vol. 26. P. 45–53.
20. Lin M.L., Chung C.F., Jeng F.S., Yao T.C. The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels // *Eng. Geol.* 2007. Vol. 92. P. 110–132.
21. Ertugrul N. Analysis of seismic behavior of underground structures: a case study on Bolu tunnels: master's thesis. Ankara, Turkey: The Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2010.
22. Yang H. Soil slope stability investigation and analysis in Iowa. Ames, IA, USA: Iowa State University, 2005.
23. Zou J., Chen G., Qian Z. Tunnel face stability in cohesion-frictional soils considering the soil arching effect by improved failure models // *Comput. Geotech.* 2019. Vol. 106. P. 1–17.
24. Khezri N., Mohamad H., Haji Hassani M., Fatahi B. The stability of shallow circular tunnels in soil considering variations in cohesion with depth // *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2015. Vol. 49. P. 230–240.
25. Sudarsan B., Ji W., Adamchuk V., Biswas A. Characterizing soil particle sizes using wavelet analysis of microscope images // *Comput. Electron. Agric.* 2018. Vol. 148. P. 217–225.
26. Pohlitz J., Rucknagel J., Schluter S., Vogel H.J., Christen O. Computed tomography as an extension of classical methods in the analysis of soil compaction, exemplified on samples from two tillage treatments and at two moisture tensions // *Geoderma.* 2019. Vol. 346. P. 52–62.
27. Anastasopoulos I., Gazetas G., Asce M., Bransby M.F., Davies M.C.R., El Nahas A. Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2007. Vol. 133. P. 943–958.
28. Cole D.A., Lade P.V. Influence zones in alluvium over dip-slip faults // *J. Geotech. Eng.* 1984, Vol. 110. P. 599–615.
29. Taniyama H., Watanabe H. Deformation of sandy deposit by reverse faulting // *Doboku Gakkai Ronbunshu.* 2001. Vol. 591. P. 135–142.
30. Corigliano M., Scandella L., Lai C.G., Paolucci R. Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions: a case study in Southern Italy // *Bull. Earthq. Eng.* 2011. Vol. 9. P. 975–995.
31. García A.J.H., Jaime Y.N.M., Contreras A.M.Z., Bastardo L.D.S., Llovera F.A.S. Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship // *Revista Científica UDO Agrícola.* 2012. Vol. 12. P. 324–337.
32. Rahmat M.N., Ismail N. Effect of optimum compaction moisture content formulations on the strength and durability of sustainable stabilised materials // *Appl. Clay Sci.* 2018. Vol. 157. P. 257–266.
33. Kumari D. A study on the effect of moisture on strength characteristics of river sand, 2008–2009 // Bachelor's Thesis. Rourkela, India: National Institute of Technology, 2009.
34. Deepa P. Effect of grading and proportioning of sand on the compaction properties and shear strength of sand-clay mixtures: report project. Bengaluru, Karnataka, India: University of Bangalore, 2012.
35. Liang R., Bai X., Wang J. Effect of clay particle content on liquefaction of soil // 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 30 January – 4 February 2000. P. 1560–1564.
36. Vangla P., Latha G.M. Influence of particle size on the friction and interfacial shear strength of sands of similar morphology // *Int. J. Geosynth. Ground Eng.* 2015. Vol. 1. P. 6.

37. Yokoi H. Relationship between soil cohesion and shear strength // *Soil Sci. Plant Nutr.* 1968. Vol. 14. P. 89–93.
38. Kemper W.D., Rosenau R.C., Dexter A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature1 // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1987. Vol. 51. P. 860.
39. Moss R.E.S., Stanton K.V., Buelna M.I. The impact of material stiffness on the likelihood of fault rupture propagating to the ground surface // *Seismol. Res. Lett.* 2013. Vol. 84. P. 485–488.
40. Mohammed S.M. The effect of granular material on behaviour of stone columns in soft clay under embankment // *Eng. Technol. J.* 2015. Vol. 33. P. 2212–2219.
41. Alshameri B., Bakar I., Madun A., Abdeldjouad L., Dahlan S.H. Effect of coarse materials percentage in the shear strength // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2016, Vol. 136.
42. Razmkhah A., Purlak M., Ghobakhloo E. Seismic waves scattering impact through tunnel excavation on adjacent monuments subjected to far field earthquakes // *Civ. Eng. Dimens.* 2014. Vol. 17. P. 18–24.
43. Hong-kai C., Xiu-zhu Z., Xiao-ying H. Experimental study on settlement characteristics of grading particles in debris flow slurry // *IERI Procedia.* 2013. Vol. 5. P. 265–270.