

Устройство глубоких выемок под фундаменты рядом с метрополитеном. Моделирование и мониторинг. Часть 1



Бо Лю

Школа транспорта, Юго-Восточный университет Китая, Главная лаборатория Цзянсу по техническому проектированию городских подземных пространств и экологической безопасности

Дин-Вэнь Чжан

Школа транспорта, Юго-Восточный университет Китая, Главная лаборатория Цзянсу по техническому проектированию городских подземных пространств и экологической безопасности

Чанг Янг

Школа транспорта, Юго-Восточный университет Китая, Главная лаборатория Цзянсу по техническому проектированию городских подземных пространств и экологической безопасности

Цянь-Бин Чжан

Кафедра гражданского строительства, Университет Монаша, Австралия

В статье рассматривается устройство глубоких выемок под фундаменты по соседству с двумя функционирующими тоннелями метрополитена, проложенными в алевролитистой глине в городе Нанкин. Чтобы исследовать влияние земляных работ на существующие тоннели, было выполнено численное моделирование, что позволило спрогнозировать возможную деформацию тоннелей до начала строительства. Затем, опираясь на полученные численные результаты, была предложена целевая программа мониторинга, и в течение четырех лет проводился комплексный полевой контроль для мониторинга глубоких выемок грунта и отклика тоннелей.

При мониторинге фиксировались следующие параметры: боковой прогиб стены в грунте, осадка свода тоннеля, горизонтальное смещение линии пят, сходимость диаметра и ширина раскрытия секционного соединения. По результатам мониторинга была проанализирована эволюция деформации тоннелей, а также была оценена безопасность тоннельных конструкций. Затем была предложена и принята методика цементации микронарушений деформированного тоннеля, а также оценена эффективность таких корректирующих действий.

Результаты показывают, что в развитии осадки свода тоннеля, горизонтального перемещения линии пят и сходимости диаметра можно выделить фазы медленного, быстрого и стабильного поступательного увеличения, которые соответствуют этапам предварительных, основных и завершающих земляных работ глубокой выемки.

Исходя из принципа простой балки, диапазон осадки тоннеля может быть принят в два раза большим, чем расстояние между наблюдаемым сечением с максимальной осадкой и сечением с нулевой осадкой. В процессе цементации микронарушений деформированный тоннель проходит этап коррекции и этап упругого подъема, а дополнительная деформация, вызванная соседними земляными работами, поддается корректировке путем цементации микронарушений.

Моделирование и расчет были выполнены в 3D-постановке в программном комплексе midas GTS NX.

Перевод, адаптация и редактирование выполнены руководителем технического отдела MIDAS IT Россия и СНГ Константином Скоробогатько.

Введение

Быстрое развитие метро в последние годы стало важным шагом к снижению транспортных заторов в густонаселенных городах [20,22]. В то же время, чтобы облегчить перемещение и повысить эффективность использования подземных пространств, строится все больше и больше высотных зданий, а их фундаменты располагаются в непосредственной близости от существующих линий метрополитена. Земляные работы для устройства таких фундаментов неизбежно изменяют первоначальные поля напряжений и смещение грунта основания и таким образом влияют на существующие конструкции тоннелей метрополитена [3]. Если

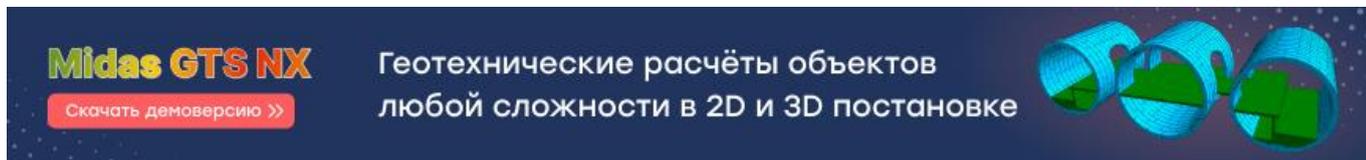
деформация или смещения, вызванные земляными работами, превышают допустимые пределы конструкции тоннеля, то тоннель может быть серьезно поврежден [38].

Чтобы лучше понять влияние земляных работ на существующие тоннели, исследователями были проведены некоторые теоретические расчеты (см. Источники [19,20, 38 45, 46, 47], численное моделирование [7; 14; 17; 33, 35, 36, 37; 34, 53] и испытания моделей [15, 22, 27, 28, 34]. Тем не менее, вышеперечисленные исследователи в основном сосредотачивались на тех случаях, когда выемка проводилась непосредственно над существующим тоннелем, т.е. изучалось влияние вертикальной разгрузки на тоннели. Более того, взаимодействие между выемкой и тоннелем в основном рассматривалось как задача плоского деформированного состояния, что в значительной степени отличается от реальных условий и не может верно отразить механизм взаимодействия между ними. Пространственное воздействие от выемки не удалось полноценно рассмотреть из-за небольшого объема изученных выемок. Напротив, не многие исследователи сосредотачивались на тех случаях, когда выемка выполнялась параллельно существующему тоннелю, т.е. изучали влияние боковой разгрузки на тоннели. Чэн и соавторы [1] описывали реакцию тоннелей Тайбэйского метрополитена (TRTS) на близлежащие пятиуровневые выемки под фундаменты.

В своде тоннеля наблюдались трещины, а бетонная плита на обратном своде оказалась отделенной от задних сегментов. В результате поврежденным тоннелям потребовался ремонт путем монтажа стальных сегментов и цементации обратного заполнения [2]. Ши и соавторы [32] исследовали взаимодействие между выемкой под треугольный фундамент и соседним тоннелем с проходкой открытым способом при помощи полевого мониторинга, но при этом акцент был сделан на производительность земляных работ, а для расчета оказались доступны только ограниченные данные относительно реакции тоннеля. Чэн и соавторы [4] также изучили влияние крупных земляных работ на существующие тоннели метрополитена, и их исследование было сосредоточено на нескольких методах численного моделирования, направленных на снижение воздействия от выемки грунта. Кроме того, используемыми данными о деформации тоннеля стали только результаты заключительного этапа, и эти данные не могли отразить весь процесс производства земляных работ на тоннель.

В этой статье рассмотрены глубокие выемки грунта под фундаменты, прилегающие к двум существующим тоннелям метрополитена, проложенным в алевритистой глине. Чтобы понять механизм влияния земляных работ на конструкцию тоннеля, перед строительством было проведено численное моделирование, что позволило прогнозировать возможную деформацию тоннелей, а затем применительно к полученным численным результатам была предложена целевая схема мониторинга и проведен комплексный полевой контроль в течение четырех лет. При мониторинге фиксировались следующие параметры: боковой прогиб стены в грунте, осадка свода тоннеля, боковое смещение линии пят, сходимости диаметра и ширина раскрытия секционного соединения. На основании полученных результатов было проанализировано развитие деформации тоннеля, а также была проведена оценка безопасности его конструкции. Затем была принята методика цементации микронарушений деформированного тоннеля.

Надеемся, что информация, представленная в настоящем исследовании, окажется полезной для аналогичных проектов.



НАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ

Глубокие выемки под фундамент

На рисунке 1 представлена схема устройства глубокой выемки в городе Нанкин (Китай). Она расположена на востоке среднего шоссе Цзяндун, к западу от шоссе Юньцзинь, к югу от улицы Сяоцзе и к северу от улицы Иньтянь. Так как здесь будет строиться коммерческий комплекс с тремя сверхвысотными зданиями, масштаб котлована очень большой. Площадь выемки в плане – 53 000 м², периметр – 940 м, ее максимальная глубина достигает 34 м. Это крупнейший и самый глубокий котлован, работа над которым ведется в Нанкине в настоящее время.

На рисунке 2 представлено поперечное сечение котлована под фундамент и прилегающих тоннелей. Глубокая выемка имеет среднюю глубину в 22,3 м и удерживается стеной в грунте в сочетании с железобетонными распорками. Общая толщина стены в грунте составляет 1 м, а со стороны существующих тоннелей она увеличена до 1,2 м. Чтобы минимизировать воздействие процесса осушения на тоннели метрополитена, дно стены в грунте на глубине 65 м располагается ниже водоносного горизонта, ограниченного водоупором, для изоляции подземных вод. Четыре уровня железобетонных распорок расположены на отметках –1,8 м, –8,1 м, –13,5 м и –18,2 м ниже поверхности грунта и поддерживаются стальными решетчатыми колоннами в вертикальном направлении. Длина и ширина поперечного сечения распорок варьируются в разных положениях в пределах от 0,6 м до 1,6 м.

Устройство выемки под фундамент проводится траншейным способом, а грунт извлекается постепенно продвижением сверху вниз. Бетонные распорки устраиваются сразу после проведения выемки каждого слоя грунта. В таблице 1 подробно перечислены этапы производства работ. С момента возведения стены в грунте в октябре 2011 года до момента завершения устройства перекрытий в январе 2016 года прошло более четырех лет. Весь этап возведения был разделен на подэтапы предварительных, основных и завершающих земляных работ.

Существующие тоннели 2-й линии метро города Нанкин

2-я линия метро города Нанкин, открытая в 2010 году, является основной линией, соединяющей северо-восточные городские районы с юго-западными. Она состоит из 37,95 км рельсовых путей и 26 станций. Большинство участков представляют собой подземный щитовой тоннель, а большинство станций являются подземными. Как показано на рисунке 1, 2-я линия метро города Нанкин расположена со стороны западной части котлована под

фундамент, а рассматриваемые тоннели находятся между станцией метро Jiqingmen Street и станцией метро Xinglong Street. Протяженность тоннелей, граничащих с боковой линией стены в грунте глубокого котлована, К7-893 ~ К8-246, в сумме составляет 353 м. Как показано на рисунке 2, тоннели (т.е. восходящий тоннель и нисходящий тоннель) залегают в илистой алевритистой глине, и средняя глубина заглубления свода тоннеля составляет 15 м. Минимальное расстояние от правой линии пят восходящего тоннеля до стены в грунте составляет 33 м, что находится в пределах зоны защиты (50 м), предусмотренной Техническим стандартом для ограждающих конструкций городского железнодорожного транспорта (СJJ/T 202-2013) и Правилами управления железнодорожным транспортом города Нанкин.

На рисунке 3 представлено поперечное сечение тоннеля, сооруженного щитовым способом. Тоннель имеет внутренний диаметр 5,5 м и облицовывается железобетонными секциями толщиной 350 мм и шириной 1,2 м. Секции соединяются с помощью загнутых болтов как в продольном, так и в кольцевом направлении.

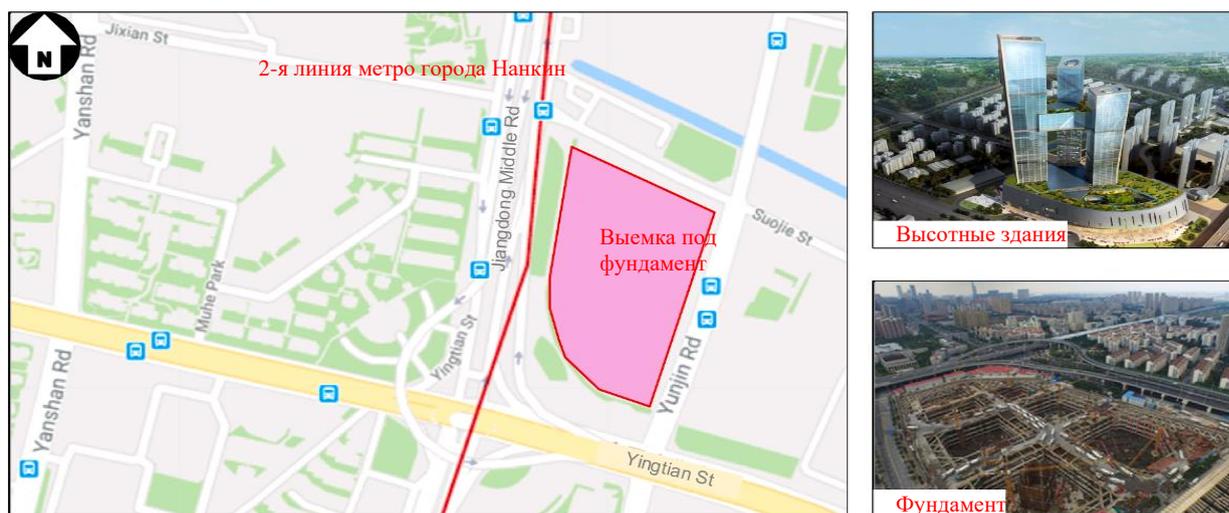


Рис. 1. План расположения выемки грунта под фундамент (по данным Google).

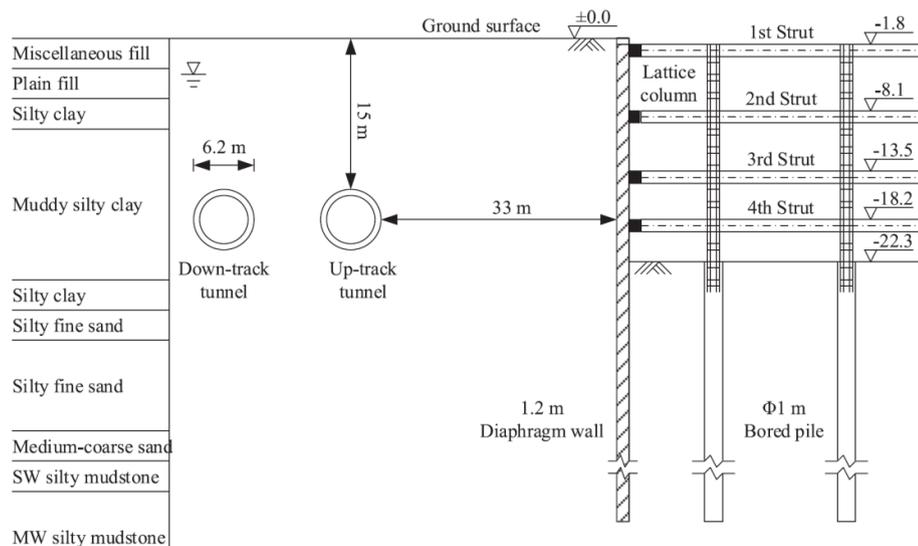


Рис. 2. Поперечное сечение тоннелей и выемки под фундамент.

Таблица 1. Разбивка этапов производства работ

<u>Этап</u>	<u>Дата</u>	<u>Вид строительных работ</u>
<u>Предварительные земляные работы</u>	21.10.2011-	<u>Возведение стены в грунте</u>
	30.06.2013	
	01.07.2013-	
	07.12.2013	
	07.12.2013-	
<u>Основные земляные работы</u>	15.04.2014	<u>Устройство буронабивных свай</u> Выемка грунта до уровня 1 (-2,3 м), устройство горизонтальной распорки 1 (-1,8 м)
	16.04.2014-	
	14.07.2014	
	15.07.2014-	
	24.09.2014	
	24.09.2014-	
	01.12.2014	
	18.12.2014-	
	10.02.2015	
	21.03.2015-	
<u>Завершающие земляные работы</u>	01.08.2015	<u>Осушение, выемка грунта до уровня 2 (-8,6 м), устройство горизонтальной распорки 1 (-8,1 м)</u> Остановка строительства в связи с юношескими Олимпийскими играми в Нанкине Осушение, выемка грунта до уровня 3 (-14 м), устройство горизонтальной распорки 3 (-13,5 м) Осушение, выемка грунта до уровня 4 (-18,7 м), устройство горизонтальной распорки 4 (-18,2 м) Осушение, выемка грунта до дна (-22,5 м), устройство фундаментной плиты Удаление горизонтальной распорки 4, устройство перекрытия подземной части 4-го уровня Удаление горизонтальной распорки 3, устройство перекрытия подземной части 3-го уровня Удаление горизонтальной распорки 2, устройство перекрытия подземной части 2-го уровня Удаление горизонтальной распорки 1, устройство перекрытия подземной части 1-го уровня
	01.10.2015	
	01.10.2015-	
	05.11.2015	
	16.11.2015-	
	25.12.2015	
	07.12.2015-	
30.01.2016		

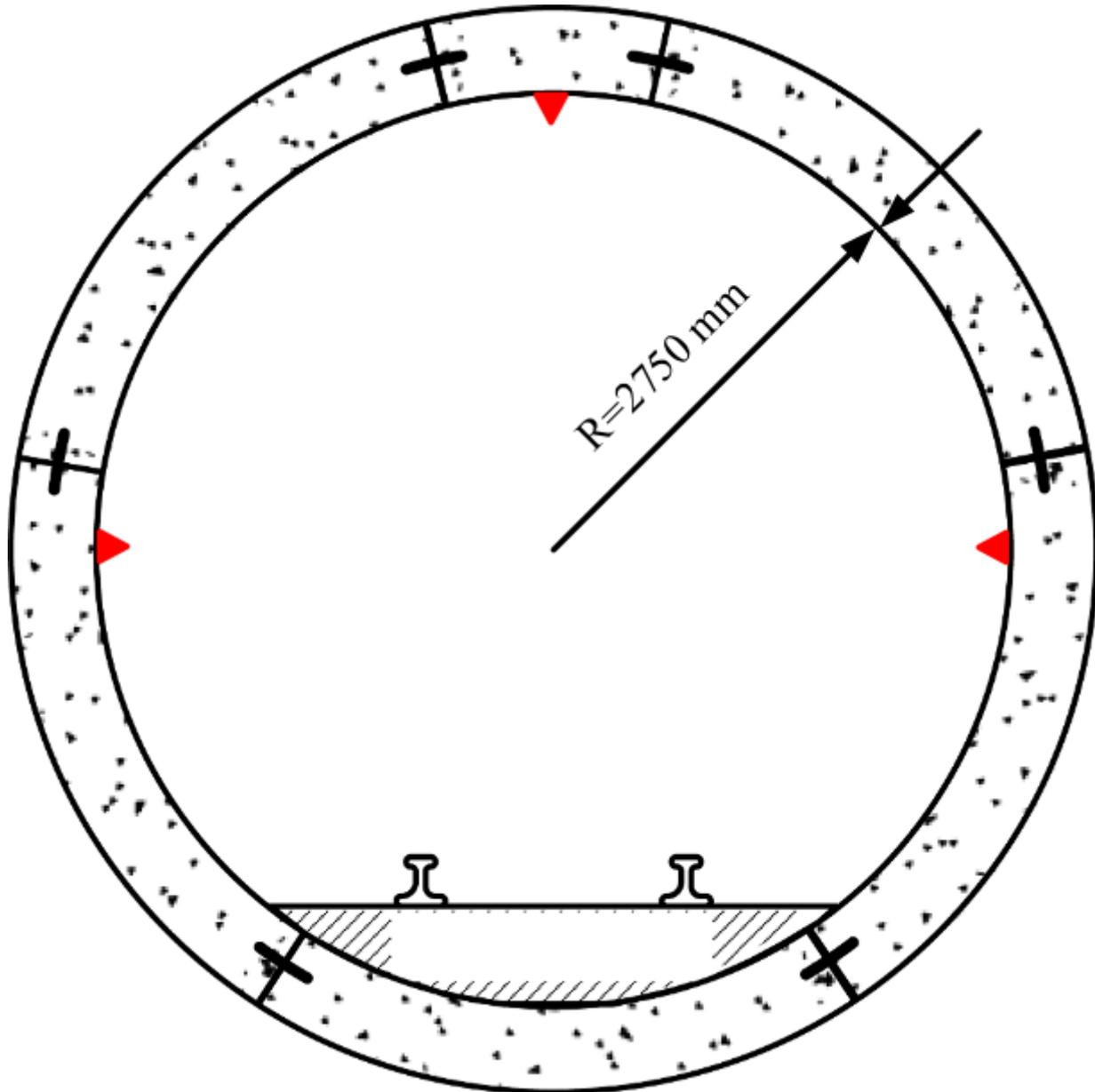


Рис. 3. Поперечное сечение тоннеля, сооружаемого щитовым способом

*Линия пят - точка, где изогнутая часть свода тоннеля соединяется с верхней частью стены.

Геологические и гидрологические условия

Участок строительства расположен в пойме реки Янцзы. Мягкий грунт недавнего образования в этой области чрезвычайно слаб и неравномерно распределен, что отрицательно влияет на инженерно-технические работы [13]. Для получения профиля и параметров грунта до начала земляных работ была проведена серия геотехнических изысканий. Программы исследований состояли из отбора проб из скважины и связанных с ними полевых и лабораторных испытаний. Полевые испытания включают в себя

стандартное испытание грунта на пенетрацию, динамическое зондирование грунта, статическое зондирование грунта, испытание плоским пенетрометром, пробную откачку и т.д. Лабораторные испытания включают в себя испытание основных физических свойств, компрессионные испытания, испытания на прямой сдвиг, испытания на трехосный срез и т.д. На рисунке 4 представлено сечение грунта и некоторые типовые физико-механические параметры. Из сечения видно, что грунт до глубины 80 м сверху вниз состоит из различных осадочных отложений (слой ①-1), однородных осадочных отложений (слой ①-2), алевритистой глины (②-1), илистой алевритистой глины (②-2), илистой глины (②-3), алевритистого мелкозернистого песка (②-4), алевритистого мелкозернистого песка (②-5), песка средней крупности (④), сильновыветрелой заиленной алеврито-глинистой породы (⑤-1) и средневыветрелой заиленной алеврито-глинистой породы (⑤-2). Илистая алевритистая глина, в которой залегают тоннели, имеет содержание воды 38,4%, коэффициент пористости 1,07, индекс текучести 1,13 и компрессионный модуль 3,23 МПа, что указывает на то, что данный слой грунта находится в текучепластичном состоянии и имеет низкую прочность и высокую сжимаемость. Более того, показатель чувствительности 2,88 указывает на то, что данный слой грунта обладает ярко выраженной прочностной характеристикой, и прочность грунта может значительно снизиться после того, как он будет нарушен строительными работами по соседству.

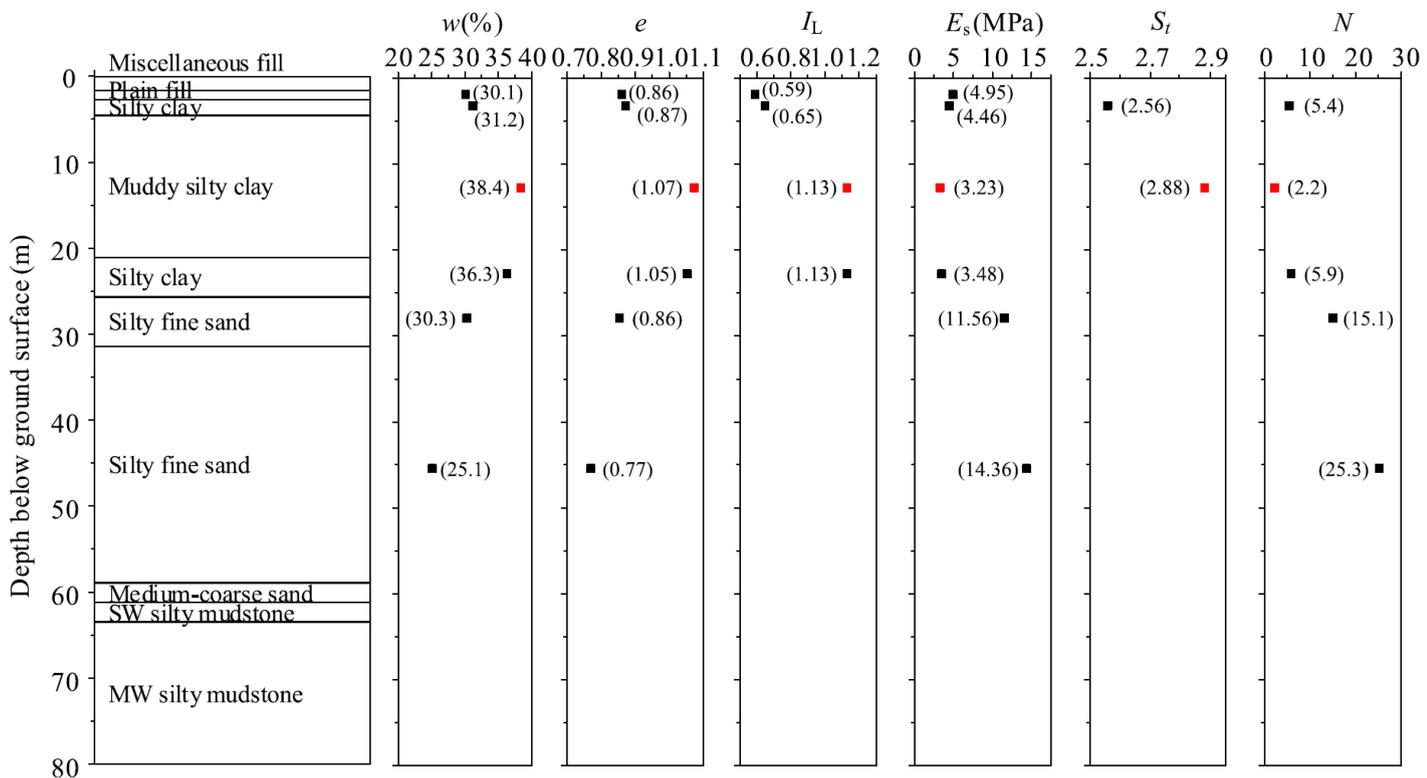
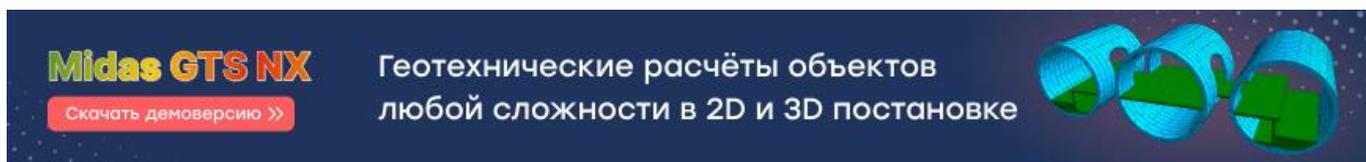


Рис. 4. Типовые физико-механические параметры грунта

Примечание: w = водосодержание, e - коэффициент пористости, I_L = индекс текучести, E_s = компрессионный модуль, s_t = чувствительность, N = количество ударов по стандартному испытанию грунта на пенетрацию (SPT).

Согласно разрезу грунта, полученному в результате инженерно-геологических изысканий, грунтовые воды на глубине проведения исследований содержат фреатические воды и артезианские напорные воды. Фреатические воды находятся главным образом в поверхностных осадочных отложениях (слой ①-2) и глине недавнего образования (слой ②-1, ②-2, ②-3) под ними, а уровень фреатических вод располагается на глубине –1,5 м ниже поверхности грунта. Артезианская напорная вода находится главным образом в алевритовом мелкозернистом песке (слой ②-4, ②-5) и песке средней крупности (слой ④), которые характеризуются высокой проницаемостью.



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОЛЕВОЙ КОНТРОЛЬ

Численное моделирование

Чтобы спрогнозировать возможную деформацию тоннелей, вызванную устройством смежных выемок грунта под фундаменты, а затем предложить целевую схему мониторинга тоннелей в соответствии с деформационными характеристиками, было проведено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) при помощи программного комплекса MIDAS GTS NX. На рисунке 5 представлена трехмерная конечно-элементная модель, созданная для этого случая. Модель размером 490 м × 380 м × 80 м имеет 56 139 узлов и 166 610 элементов, в которых каждый слой грунта принят однородным и равным по толщине, вне зависимости от перепада отметок. Блоки грунта и тоннеля были смоделированы при помощи твердотельных элементов, стена в грунте была смоделирована при помощи элементов оболочек, а внутренние горизонтальные распорки и решетчатые колонны были смоделированы при помощи балочных элементов. С целью создания сетки конечных элементов и повышения сходимости расчета вместо тетраэдральных элементов были использованы элементы гексаэдров, а для повышения точности расчета был уменьшен размер элементов вблизи тоннелей и стены в грунте. Для граничных условий модели четыре окружающие поверхности были ограничены горизонтальным закреплением в нормальном направлении, нижняя поверхность была ограничена горизонтальным и вертикальным закреплением, а верхняя поверхность была оставлена свободной. Касательно условий нагружения, динамическая циклическая нагрузка, создаваемая поездами метро, существует в тоннелях и обычно рассматривается, как одна из причин, вызывающих длительную деформацию тоннелей и подстилающего грунта. Янг и Лю [13] изучили длительную осадку тоннеля, сооруженного щитовым способом, при циклическом нагружении от поездов в слое

илистой глины в городе Нинбо. Установлено, что с увеличением времени работы тоннеля суммарная осадка грунтового основания увеличивается экспоненциально и, как правило, достигает стабильного состояния после 10 лет эксплуатации тоннеля.

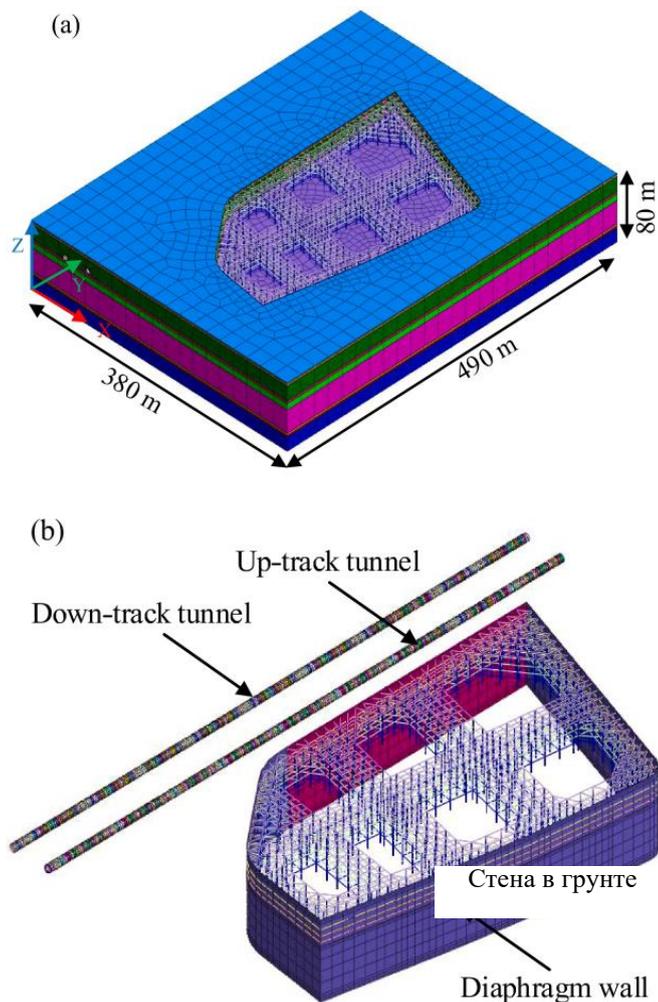


Рис. 5. Трехмерная конечно-элементная модель для рассматриваемого случая (а) Элементы для слоев грунта (б) Элементы для тоннелей и ограждающих конструкций

В том числе осадка для них через 1 год составляет около 50% от общей осадки, в то время как осадка через 5 лет – около 80% от общих показателей осадки. Гэ и соавторы [11] проанализировали продолжительную осадку обратного свода тоннеля, сооруженного щитовым способом, относительно поверхности грунта в слое мягкой глины в городе Шанхай. Выяснилось, что относительная осадка, как правило, достигает стабилизации после 8 лет эксплуатации тоннеля, а осадка, вызванная вибрацией поездов, после 1, 2, 3 и 4 лет работы составляет около 45%, 69%, 82% и 90% от окончательных показателей общей осадки соответственно. Ди и соавторы [6] анализировали наблюдаемую длительную осадку тоннеля с проходкой открытым способом на 10-й линии Метрополитена Нанкина в течение 5,75 лет

после установки железнодорожных путей. В течение первых двух лет осадка тоннеля происходила быстро, затем интенсивность осадки постепенно снизилась. Осадка спустя 2 года составляла примерно 75% от окончательных показателей суммарной осадки. Тоннель 2-й линии Метрополитена Нанкина, сооруженный щитовым способом и исследуемый в статье, был проложен в слое илистой алевритистой глины и открыт для эксплуатации в мае 2010 года. Согласно приведенным выше исследованиям, можно заключить, что осадка практически достигла своих окончательных показателей до начала основных земляных работ под фундамент (апрель 2014 г.). Более того, внимание исследования было акцентировано на отклик существующего тоннеля на близрасположенные земляные работы под фундамент. Таким образом, в этом численном моделировании не учитывается влияние циклической нагрузки, вызванной поездом.

В [bookmark12](#) таблицах 1 и 3 представлены исходные параметры материалов грунтов и подпорных сооружений выемок под фундамент соответственно. Для слоев грунта использовалась модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil) [30], а линейно-упругая модель использовалась для материала подпорных сооружений. Некоторые исследования [8, 41] показали, что модель упрочняющегося грунта может учитывать характеристики упрочнения, указывать на разницу между нагружением и разгрузкой, а определенная жесткость грунта зависит от изменения напряжений во времени и пути нагружения. Используя эти данные, результатами моделирования можно одновременно представить обоснованные параметры деформации стены в грунте и деформации грунта за стеной, что подходит для численного моделирования глубоких выемок в неустойчивой среде. Параметры модели упрочняющегося грунта в основном были получены из данных полевых и лабораторных испытаний, а параметры подпорных сооружений выемок грунта под фундамент были получены в основном из проектных чертежей. Следует отметить, что принятые здесь параметры являются лишь предварительными, а действительные исходные параметры необходимо определить после корректировки в соответствии с результатами натурного мониторинга.

Моделирование процесса возведения таких этапов как установка стены в грунте, осушение, выемка грунта и устройство горизонтальных распорок, перечисленных в Таблице 1, было реализовано путем активации и деактивации сетки элементов и применения граничных условий и условий нагружения. Основной процесс моделирования включал в себя следующее: во-первых, приложение силы тяжести для получения поля начальных напряжений на участке. Во-вторых, были установлены стена в грунте и решетчатые колонны. Затем, после осушения до 0,5 м ниже каждой выемки забоя, грунт удалялся, и возводились внутренние горизонтальные распорки. Этот цикл продолжался до тех пор, пока грунт не достигал проектной отметки дна котлована. После первого и второго этапа полученные перемещения и деформации были обнулены, чтобы устранить влияние силы тяжести и возведения подпорных сооружений, а учитывалось только влияние последующего осушения и земляных работ.

Таблица 3. Параметры линейно-упругой модели состояния для конструкций

Тип конструкции	γ (кН/м ³)	E (МПа)	ν
Железобетонная секция	25	$3,45 \times 10^4$	0,15
Стена в грунте, 1-я горизонтальная распорка	25	$3,15 \times 10^4$	0,18
2-я горизонтальная распорка			
3-я горизонтальная распорка	25	$3,25 \times 10^4$	0,18
4-я горизонтальная распорка			
Решетчатая колонна	78	$2,06 \times 10^5$	0,28

Примечание: γ – удельный вес, E – модуль упругости, ν - коэффициент Пуассона.

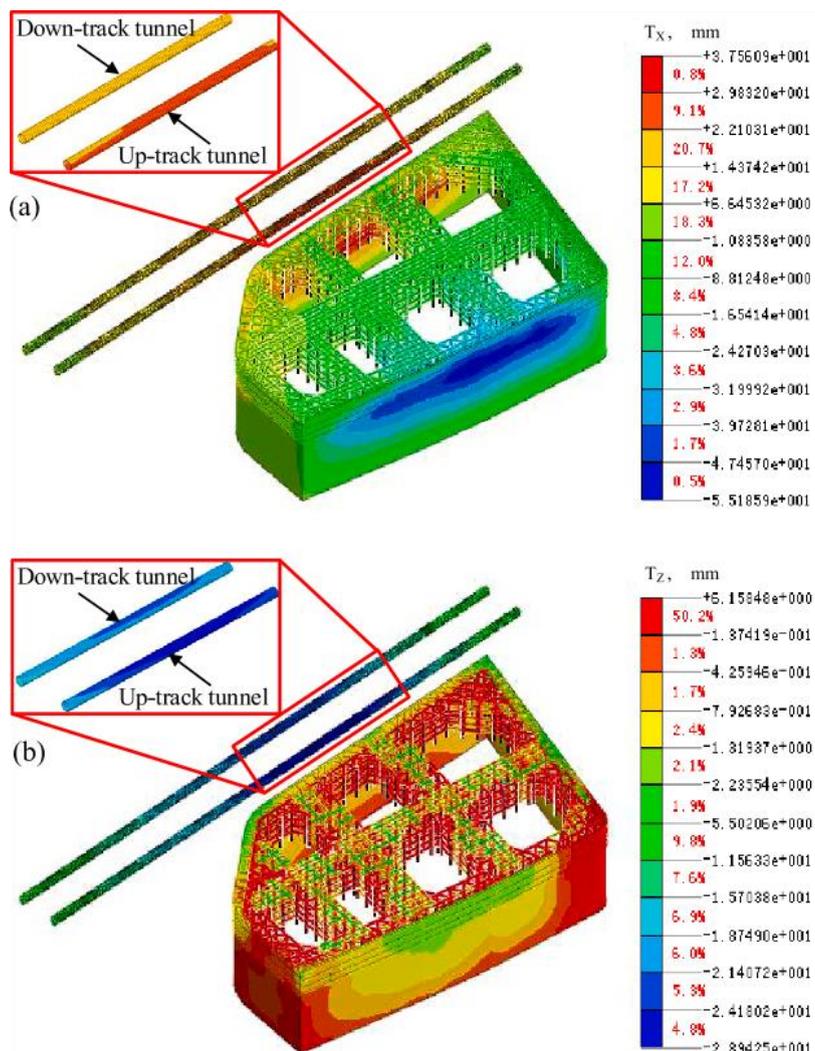


Рис. 6. Горизонтальные и вертикальные перемещения тоннелей и подпорных конструкций
 (а) Изополя горизонтальных перемещений (б) Изополя вертикальных перемещений.

Таблица 2. Параметры модели упрочняющегося грунта

Слой грунта	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	ψ (°)	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	m	ν_{ur}	p^{ref} (kPa)	R_f	K_0
⊖-1	18.5	6	15	0	7.2	6	42	0.8	0.35	100	0.9	0.54
⊖-2	19.1	15	12	0	7.8	6.5	45.5	0.8	0.35	100	0.9	0.52
⊕-1	19.1	15	16	0	7.6	6.2	43.2	0.8	0.37	100	0.7	0.5
⊕-2	18.1	12	15	0	6.8	5.5	38.5	0.8	0.39	100	0.6	0.6
⊕-3	18.2	11	18	0	8.6	7.2	51.4	0.8	0.37	100	0.7	0.54
⊕-4	19	8.2	31	1	19.8	15.4	62	0.8	0.35	100	0.9	0.4
⊕-5	19	8.3	32	2	25	22.5	88.6	0.8	0.35	100	0.9	0.34
⊕	19	8.3	32	2	30	30	120	0.8	0.35	100	0.9	0.33
⊕-1	21	30	33	3	80	80	320	0.6	0.3	100	0.9	0.36
⊕-2	21.5	100	35	5	120	120	480	0.5	0.3	100	0.9	0.34

Примечание: γ - удельный вес, c – удельное сцепление, φ - угол внутреннего трения, ψ – угол дилатансии, E_{50}^{ref} – секущая жесткость в стандартном дренированном трехосном испытании, E_{oed}^{ref} – касательная жесткость для первичной нагрузки на одометр, E_{ur}^{ref} – трехосная жесткость разгрузки/повторного нагружения, m – коэффициент для зависимости

уровня напряжений от жесткости, V_{ur} – коэффициент Пуассона для разгрузки – повторного нагружения, P_{ref} – эталонное напряжение для жесткости, R_f – коэффициент разрушения, K_0 – отношение напряжений горизонтального эффективного напряжения к вертикальному эффективному напряжению в нормально уплотненном состоянии.

Поскольку основное внимание в этой статье уделяется долгосрочному полевому мониторингу тоннелей, подробные результаты каждого этапа моделирования здесь не описываются. Здесь приведены только результаты, когда выемка под фундамент производится до отметки уровня дна.

На рисунке 6 представлены изополя горизонтальных и вертикальных перемещений тоннелей и подпорных сооружений. Здесь направление перемещения следует системе координат на рисунке 5. Положительное значение для горизонтального перемещения T_x указывает, что тоннель перемещается по направлению к выемке грунта, а положительное значение для вертикального перемещения T_z указывает на вспучивание. Отрицательные значения указывают на противоположное. Это можно увидеть на рисунке 6(а): после выемки грунта до отметки дна стена в грунте перемещается на внутреннюю часть выемки из-за боковой разгрузки, что, в свою очередь, вызывает движение тоннелей. Поперечные перемещения восходящего тоннеля больше, чем у нисходящего тоннеля с максимальным перемещением 27,1 мм. Это можно увидеть на рис. 6(б): после осушения и выемки грунта тоннели имеют ярко выраженную осадку, но подпорные сооружения фундамента менее подвержены воздействию. Осадка восходящего тоннеля больше, чем у нисходящего тоннеля с максимальной осадкой 28,9 мм.

Из приведенных выше результатов численного моделирования можно заметить, что на верхний тоннель больше влияет строительство прилегающей выемки фундамента, чем на нижний тоннель, будь то горизонтальное или вертикальное смещение, чему инженерам следует уделить больше внимания. При рассмотрении деформации подпорных сооружений фундамента следует уделить больше внимания горизонтальному перемещению стены в грунте. Данные результаты можно использовать в качестве справочной информации для последующего составления программ полевого контроля.

Полевой мониторинг нарушений в конструкции тоннелей

Для того чтобы интерпретировать начальные показатели тоннеля до начала основных земляных работ под фундамент, в мае 2014 года была проведена фиксация нарушений в конструкции тоннеля. Отмечено, что в конструкции тоннеля появились такие неисправности как трещины, просачивания и повреждения секции, что показано на рисунке 7. Согласно статистике, трещины чаще всего появляются на линии пят и нижней части тоннеля. Повреждения секции чаще всего возникают на ее краю. Просачивание, как правило, обнаруживается в продольных и кольцевых соединениях, отверстиях для цементации и болтовых отверстиях. В восходящем тоннеле количество нарушений структуры выше, чем в нисходящем.

Также до начала основных земляных работ были измерены осадка и сходимост диаметра тоннеля. По результатам измерения между двумя подземными станциями был сформирован продольный отсадочный бак длиной 600 м. Минимальный радиус кривизны кривой деформации тоннеля составил около 41 000 м, что соответствует требованиям контрольного значения 15 000

м, указанным в своде правил по охране тоннеля (GJJ/T 202-2013). Результаты измерения сходимости диаметра показали, что большая часть деформированной обделки тоннеля была горизонтально растянута и вертикально сжата, однако параметры не превысили предельных безопасных значений.

1.1. Полевой мониторинг грунтовых выемок

Как упоминалось ранее, крупномасштабные выемки под фундамент выполняются вблизи с существующими тоннелями, сооруженными щитовым способом. С целью выявления механизма воздействия выемки фундамента на тоннели был проведен комплексный полевой контроль земляных работ. Элементами мониторинга стали боковой прогиб стены в грунте, вспучивание основания, осевое усилие распорок и др. Согласно результатам приведенного выше численного моделирования, боковой прогиб стены в грунте напрямую зависит от деформации смежного тоннеля, поэтому в дальнейшем для расчета выбирается данный параметр. На рис. 8 показан план расположения наблюдаемых участков. Всего для контроля бокового прогиба в стене в грунте было использовано 37 инклинометров, в том числе 13 (QX19 ~ QX31), применяемых вдоль восходящего тоннеля. Инклинометр состоит из специально изготовленной вертикальной трубки с пересеченными скользящими канавками, которые направляют подвижный зонд.

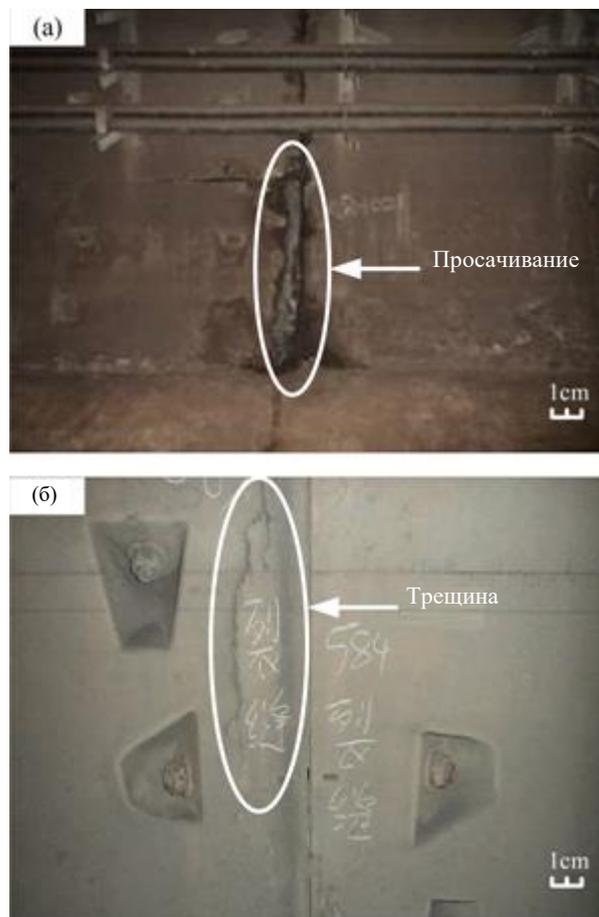


Рис. 7. Нарушения в конструкции тоннеля перед началом возведения фундамента (а) тоннельное просачивание (б) тоннельная трещина

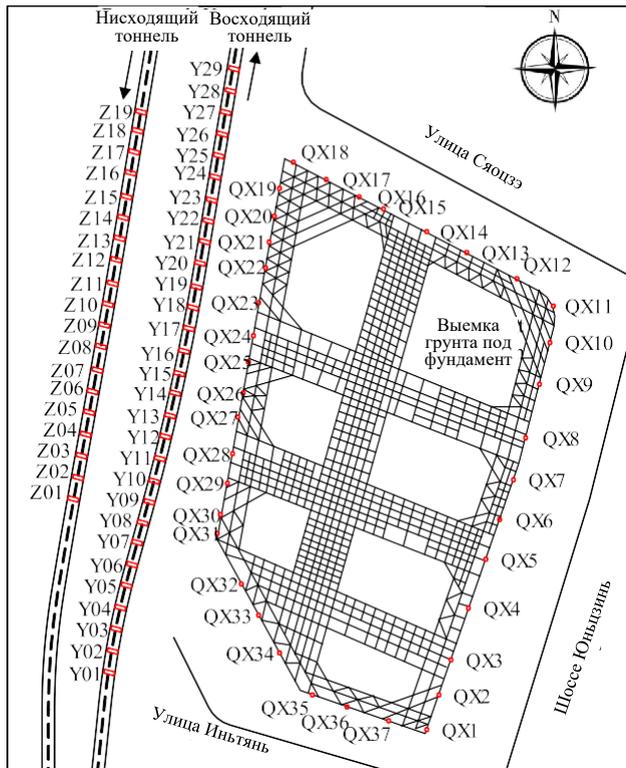


Рис. 8. План расположения наблюдаемых участков в выемке грунта под фундамент и тоннелях.

Показатели фиксируются через каждые 500 мм, так как зонд поднимается от нижней к верхней части трубки.

Полевой мониторинг тоннелей метрополитена

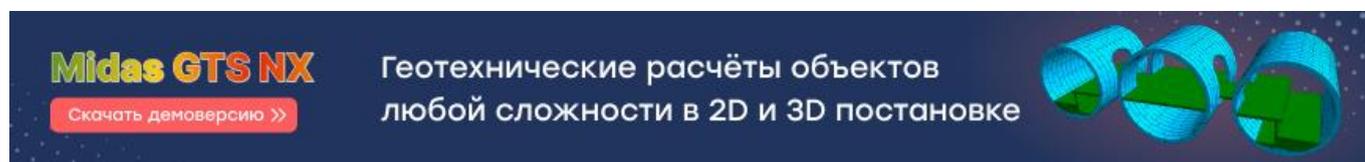
Для получения информации о функционировании конструкций тоннелей в режиме реального времени и улучшения понимания деформаций тоннелей, вызванных выемкой под фундамент, был проведен долгосрочный полевой мониторинг. Мониторинг продлился более четырех лет (с октября 2011 года по январь 2016 г.) [31, 29]. Поскольку восходящий тоннель располагался ближе нисходящего к выемке и подвергся большему воздействию, были исследованы 29 наблюдаемых участков Y1 ~ Y29 и 19 участков Z1 ~ Z19 вдоль продольного направления в восходящем и нисходящем тоннелях соответственно, как показано на рисунке 8. К элементам мониторинга каждого участка относится осадка свода, боковое перемещение линии пят, сходимость диаметра и ширина раскрытия секционного соединения. В работе Ге [12] представлена схема расположения приборов тоннеля 2-й линии метро Шанхая, сооруженного щитовым способом. Линия подверглась воздействию, вызванному близрасположенной выемкой грунта, в которой маркеры мониторинга осадки были закреплены на нижних опорных блоках, маркеры мониторинга поперечных перемещений были установлены близко к обратным сводам, а четыре маркера мониторинга сходимости были закреплены на опорном кольце по кольцевому направлению. В данном исследовании учтены результаты предыдущего численного моделирования, согласно которым максимальная осадка и поперечные перемещения сечения

тоннеля возникают на своде и линии пят соответственно. Таким образом, в данном исследовании учитываются особенности, отличающиеся от примеров из работы Ге [12]. Маркеры осадки были закреплены на своде, маркеры поперечных перемещений были закреплены на левой и правой линиях пят, а в процессе измерения сходимости диаметра были использованы маркеры мониторинга поперечных перемещений без дополнительных маркеров, как показано на рисунке 3. Расчет осадки свода осуществлялся с использованием электронного уровня Trimble с точностью 0,3 мм/км. Поперечные перемещения и сходимость диаметра вычислены с помощью высокоточного тахеометра Leica с угловой точностью 0,5 дюйма и линейной точностью 0,6 мм + 1 ppm (суб-миллиметр). Ширина раскрытия секционных соединений была отслежена штангенциркулем с точностью $\pm 0,002$ мм. Как правило, погрешность измерений тоннеля, мониторинг которого рассматривается в этой статье, оказывалась в пределах 1 мм, из чего следует, что результаты мониторинга могут точно отражать деформацию тоннеля, вызванную близрасположенными выемками.

Во второй части статьи вы узнаете о том, как был осуществлён комплексный полевой контроль для мониторинга глубоких выемок грунта и применена технология цементации микронарушений.

Благодарности

Данное исследование было поддержано Программой инноваций в области исследований и практики для аспирантов провинции Цзянсу (№ KYCX17_0151), Научно-исследовательским фондом Высшей школы Юго-Восточного университета (№ YBJ1791) и Китайским стипендиальным советом (№ 201706090315). Выражаем особую благодарность за финансовую поддержку, предоставленную данными источниками.



Midas GTS NX Геотехнические расчёты объектов
любой сложности в 2D и 3D постановке

Скачать демоверсию >>

Дополнительные данные к этой статье размещены на сайте <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103147>.

Используемая литература

1. Chang, C.T., Sun, C.W., Duann, S.W., Hwang, R.N., 2001a. Response of a Taipei Rapid Transit System (TRTS) tunnel to adjacent excavation. Tunn. Undergr. Space Technol. 16 (3), 151–158.
2. Chang, C.T., Wang, M.J., Chang, C.T., Sun, C.W., 2001b. Repair of displaced shield tunnel of the Taipei rapid transit system. Tunn. Undergr. Space Technol. 16 (3), 167–173.
3. Chen, R.P., Li, J., Kong, L.G., Tang, L.J., 2013. Experimental study on face instability of shield tunnel in sand. Tunn. Undergr. Space Technol. 33, 12–21.
4. Chen, R.P., Meng, F.Y., Li, Z.C., Ye, Y.H., Ye, J.N., 2016. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils. Tunn. Undergr. Space Technol. 58, 224–235.
5. Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangdong Province, 2017. DBJ/T

- 15-120-2017: Technical Code for Protection of Existing Structures of Urban rail Transit. China City Press, Beijing, China (in Chinese).
6. Di, H.G., Zhou, S.H., Xiao, J.H., Gong, Q.M., Luo, Z., 2016. Investigation of the long-term settlement of a cut-and-cover metro tunnel in a soft deposit. *Eng. Geol.* 204, 33–40.
 7. Doležalová, M., 2001. Tunnel complex unloaded by a deep excavation. *Comput. Geotech.* 28 (6–7), 469–493.
 8. Finno, R.J., Calvello, M., 2005. Supported excavations: observational method and inverse modeling. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131 (7), 826–836.
 9. Gao, G.Y., Gao, M., Yang, C.B., Yu, Z.S., 2010. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures. *Chin. J. Geot. Eng.* 32 (3), 453–459 (in Chinese).
 10. Gao, Y., 2015. Application of micro disturbance correction technique for double liquid grouting in shield tunnel disease treatment of Nanjing Metro. *Urban Mass Transit.* 18 (6), 109–112 (in Chinese).
 11. Ge, S.P., Yao, X.J., Ye, B., Pu, S.T., Liu, X.Z., 2016. Analysis of long-term settlement of soft clay under train vibration. *Chin. J. Rock Mech. Eng.* 35 (11), 2359–2368 (in Chinese).
 12. Ge, X.W., 2002. Response of a Shield-driven Tunnel to Deep Excavations in Soft Clay. Ph.D thesis. Department of Civil Engineering, The University of HongKong Science and Technology.
 13. Hou, X.L., Zhao, X.B., Li, X.Z., Li, J.Q., 2011. Research on engineering properties of floodplain soft soil in Hexi area. *China. Geol. Rev.* 57 (4), 600–608 (in Chinese).
 14. Huang, X., Schweiger, H.F., Huang, H.W., 2013. Influence of deep excavations on nearby existing tunnels. *Int. J. Geomech.* 13 (2), 170–180.
 15. Huang, X., Huang, H.W., Zhang, D.M., 2015. Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels. *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.* 167 (1), 3–18.
 16. Li, H.J., Liu, S.Y., Tong, L.Y., 2019. Evaluation of lateral response of single piles to adjacent excavation using data from cone penetration tests. *Can. Geotech. J.* 56, 236–248.
 17. Li, J.J., Wang, W.D., 2011. Design and construction of deep excavation engineering adjacent to the subway tunnel. *J. Railway Eng. Soc.* 28 (11), 104–111 (in Chinese).
 18. Li, M.G., Chen, J.J., Wang, J.H., Zhu, Y.F., 2018. Comparative study of construction methods for deep excavations above shield tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 71, 329–339.
 19. Liang, R.Z., Xia, T.D., Hong, Y., Yu, F., 2016. Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 58, 159–176.
 20. Liang, R.Z., Xia, T.D., Huang, M.S., Lin, C.G., 2017. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect. *Comput. Geotech.* 81, 167–187.
 21. Liao, S.M., Liu, J.H., Wang, R.L., Li, Z.M., 2009. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 24 (4), 454–465.
 22. Li, P., Du, S.J., Ma, X.F., Yin, Z.Y., Shen, S.L., 2014. Centrifuge investigation into the effect of new shield tunnelling on an existing underlying large-diameter tunnel. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 42 (5), 59–66.
 23. Liu, G.B., Jiang, R.J., Ng, C.W.W., Hong, Y., 2011. Deformation characteristics of a 38 m deep excavation in soft clay. *Can. Geotech. J.* 48 (12), 1817–1828.
 24. Liu, J.H., Wang, R.L., Wang, X.B., 2013. Shanghai rail transit tunnel maintenance system and countermeasures to technical difficulties of settlement treatment. *Undergr. Eng. Tunn.* 1, 1–6 (in

Chinese).

25. MOHURD (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China), 2013. GB 50911–2013: Code for Monitoring Measurement of Urban Rail Transit Engineering. China Architecture & Building Press, Beijing, China (in Chinese).
26. MOHURD (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China), 2014. CJJ/T 202–2013: Technical Code for Protection Structures of Urban Rail Transit. China Architecture & Building Press, Beijing, China (in Chinese).
27. Ng, C.W.W., Shi, J.W., Hong, Yi, 2013a. Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects. *Can. Geotech. J.* 50 (8), 874–888.
28. Ng, C.W.W., Boonyarak, T., Mašin, D., 2013b. Three-dimensional centrifuge and numerical modeling of the interaction between perpendicularly crossing tunnels. *Can. Geotech. J.* 50 (9), 935–946.
29. Ren, Y., Xu, X., Huang, Q., Zhao, D.Y., Yang, J., 2019. Long-term condition evaluation for stay cable systems using dead load-induced cable forces. *Adv. Struct. Eng.* 22 (7), 1644–1656.
30. Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., 1999. The hardening soil model: formulation and verification. In: Ronald B.J. Brinkgreve. (Eds.), *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema, Rotterdam, pp. 281–296.
31. Shen, S.L., Wu, H.N., Cui, Y.J., Yin, Z.Y., 2014. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of shanghai. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 40, 309–323. Shi, C.H., Cao, C.Y., Lei, M.F., Peng, L.M., Ai, H.J., 2016a. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 51, 175–188.
32. Shi, J.W., Liu, G.B., Huang, P., Ng, C.W.W., 2015a. Interaction between a large-scale triangular excavation and adjacent structures in Shanghai soft clay. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 50, 282–295.
33. Shi, J.W., Ng, C.W.W., Chen, Y.H., 2015b. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel. *Comput. Geotech.* 63, 146–158.
34. Shi, J.W., Wang, Y., Ng, C.W.W., 2016b. Three-dimensional centrifuge modeling of ground and pipeline response to tunnel excavation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 142 (11), 04016054.
35. Shi, J.W., Ng, C.W.W., Chen, Y.H., 2017. A simplified method to estimate three-dimensional tunnel responses to basement excavation. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 62, 53–63.
36. Shi, J.W., Zhang, X., Chen, Y.H., Chen, L., 2018. Numerical parametric study of countermeasures to alleviate basement excavation effects on an existing tunnel. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 72, 145–153.
37. Shi, J.W., Fu, Z.Z., Guo, W.L., 2019. Investigation of geometric effects on three-dimensional tunnel deformation mechanisms due to basement excavation. *Comput. Geotech.* 106, 108–116.
38. Sun, H.S., Chen, Y.D., Zhang, J.H., Kuang, T.S., 2019. Analytical investigation of tunnel deformation caused by circular foundation pit excavation. *Comput. Geotech.* 106, 193–198.
39. Tan, Y., Li, X., Kang, Z.J., Liu, J.X., Zhu, Y.B., 2015. Zoned excavation of an oversized pit close to an existing metro line in stiff clay: case study. *J. Perform. Constr. Facil.* 29 (6), 04014158.
40. Wang, X.B., Wang, R.L., Liu, J.H., 2012. Disposal method of unequal settlement of metro tunnel in operation in shanghai soft ground. *J. Shanghai Jiaotong Univ.* 46 (1), 26–31 (in Chinese).
41. Xu, Z.H., Wang, W.D., 2010. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of

- deep excavations in close proximity to sensitive properties. *Rock Soil Mech.* 31 (1), 258–264 (in Chinese).
42. Yang, B.M., Liu, B.G., 2016. Analysis of long-term settlement of shield tunnel in soft soil area under cyclic loading of subway train. *China Railway Sci.* 37 (3), 61–67 (in Chinese).
43. Yao, C.H., 2008. Nanjing Metro Line 2 for Structural Safety Monitoring Technology Research Program. *Modern Survey. Mapping* 32 (1), 10–12 (in Chinese).
44. Yuan, J., Liu, X.W., Chen, W.L., 2012. Effect of construction of deep excavation in Hangzhou silty sand on adjacent metro tunnels and stations. *Chin. J. Geot. Eng.* 34 (S1), 398–403 (in Chinese).
45. Zhang, J.F., Chen, J.J., Wang, J.H., Zhu, Y.F., 2013a. Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 36 (2), 24–33.
46. Zhang, D.M., Huang, Z.K., Wang, R.L., Yan, J.Y., Zhang, J., 2018. Grouting-based treatment of tunnel settlement: Practice in Shanghai. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 80, 181–196.
47. Zhang, X.M., Ou, X.F., Yang, J.S., Fu, J.Y., 2017. Deformation response of an existing tunnel to upper excavation of foundation pit and associated dewatering. *Int. J. Geomech.* 17 (4) 04016112-1-14.
48. Zhang, Z.G., Huang, M.S., Wang, W.D., 2013b. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 38 (3), 244–253.
49. Zhang, Z.G., Zhang, M.X., 2013. Mechanical effects of tunneling on adjacent pipelines based on galerkin solution and layered transfer matrix solution. *Soils Found.* 53 (4), 557–568.
50. Zhang, Z.G., Huang, M.S., 2014. Geotechnical influence on existing subway tunnels induced by multiline tunneling in shanghai soft soil. *Comput. Geotech.* 56 (3), 121–132.
51. Zhang, Z.G., Zhang, M.X., Zhao, Q.H., 2015. A simplified analysis for deformation behavior of buried pipelines considering disturbance effects of underground excavation in soft clays. *Arabian J. Geosci.* 8 (10), 7771–7785.
52. Zheng, G., Du, Y.M., Diao, Y., Deng, X., Zhu, G.P., Zhang, L.M., 2016. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations. *Chin. J. Geot. Eng.* 38 (4), 599–612 (in Chinese).
53. Zheng, G., Wei, S.W., 2008. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels. *J. Cent. South Univ.* 15 (2), 69–75.