

МОДЕЛИРОВАНИЕ В MIDAS GTS NX ОСАДОК СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ ОТ МЕТРО

Переводная статья

Поступила в редакцию 15.03.2023. Принята к публикации 28.03.2023

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

ЦАО ЦЮАН

Факультет железнодорожного транспорта Шанхайского технологического института, г. Шанхай, Китай

ХАН ЮЙ

Факультет железнодорожного транспорта Шанхайского технологического института, г. Шанхай, Китай
sakuragihy@163.com

АННОТАЦИЯ

Продолжаем знакомить наших читателей с использованием программной продукции южнокорейской компании MIDAS IT, основанной в 2000 году в г. Сеуле. Программы, разработанные в этой компании, используются в 136 странах мира для моделирования, комплексного проектирования и анализа в области транспортного, геотехнического, промышленного и гражданского строительства и обеспечивают безопасность, эффективность и конкурентоспособность инженерных проектов. В том числе с помощью продуктов MIDAS IT был спроектирован знаменитый небоскреб Бурдж Халифа в Дубае ОАЭ и прекрасный трехкилометровый вантовый мост Русский в российском Владивостоке. В 2013 году было открыто российское представительство этой компании – ООО «МИДАС» (midasoft.ru/; geoinfo.ru/brand/midas-it/). На территории РФ сейчас представлено три конечноэлементных расчетных комплекса MIDAS IT, адаптированных для соответствия требованиям российских нормативных документов, – midas GTS NX, midas Civil и midas FEA NX. Программа midas GTS NX (midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm_source=site&utm_medium=geoinfo&utm_content=article-03-2023) предназначена для комплексных геотехнических расчетов, моделирования и анализа поведения грунтов и их взаимодействий с инженерными конструкциями. Сегодня представляем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод с английского языка доклада «Моделирование в midas GTS NX осадок слабых глинистых грунтов при динамических нагрузках от метро» [1], сделанного на 3-м Международном симпозиуме по новейшим архитектурным исследованиям и экологической среде (ARFEE

2020), который проходил в декабре 2020 года в городе Чжанцзяцзе (Китай). Авторами данной работы являются китайские исследователи Цюан Цао и Юй Хан из Шанхайского технологического института. В начале следующего года этот доклад появился на сайтах E3S Web of Conferences и Researchgate в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, которая позволяет его копировать, распространять, адаптировать, преобразовывать и использовать (в том числе в коммерческих целях) при указании типов изменений и ссылки на первоисточник (в нашем случае это ссылка [1] в «Списке литературы», а остальная часть списка – это источники, использованные авторами переведенного доклада).

В настоящее время метро стало главным способом передвижения в мегаполисах. На территории г. Шанхая (Китай), сложенной в основном слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами, проживает и работает большое количество людей и наиболее широко распространено строительство метро. Но такие грунты, вмещающие тоннели метро, будут оседать под действием динамических нагрузок от движения поездов, что повлияет на срок службы и безопасность сооружений.

В конечноэлементной программе midas GTS NX была создана трехмерная динамическая модель, с помощью которой анализировалось и сравнивалось поведение слабых глинистых и пылеватых грунтов при обычной скорости поездов метро (80 км/ч) и при их высокой скорости (120 км/ч). Результаты исследований показали, что чем выше скорость движения поездов, тем меньше осадки грунта под тоннелем и тем более мелкой в глубину, но более широкой в плане является мульда оседания дневной поверхности над тоннелем. В любом случае скорость увеличения осадок над и под тоннелем постепенно уменьшается во времени (в течение длительного периода эксплуатации).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

слабые водонасыщенные глинистые грунты; тоннель метро; скорость поезда; динамическое нагружение; длительные циклические нагрузки; осадки; численное моделирование; программный комплекс midas GTS NX.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Цао Ц., Хан Ю. Моделирование в midas GTS NX осадок слабых глинистых грунтов при динамических нагрузках от метро (пер. с англ.) // Геоинфо. 2023. № 2. С. 18–25. doi:10.58339/2949-0677-2023-5-2-18-25.

SETTLEMENT SIMULATION OF SOFT CLAYS UNDER DYNAMIC LOADS FROM SUBWAY IN MIDAS GTS NX

Translated paper

Received 15.03.2023. Accepted 28.03.2023

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2023

QUAN CAO

School of Railway Transportation,
Shanghai Institute of Technology,
Shanghai, China

YU HANG

School of Railway Transportation,
Shanghai Institute of Technology,
Shanghai, China
sakuragihy@163.com

ABSTRACT

We are continuing to familiarize the readers with the use of software products of the South Korean company "MIDAS IT" founded in 2000 in Seoul. The programs developed in this company are used in 136 countries of the world for modeling, integrated design and analysis in the field of transport, geotechnical, industrial and civil construction. They ensure the safety, efficiency and competitiveness of engineering projects. Among other things, the famous Burj Khalifa skyscraper in Dubai (UAE) and the beautiful three-kilometer cable-stayed Russian Bridge in Russian Vladivostok were designed with the help of MIDAS IT products. In 2013, the Russian representative office of this company was opened (LLC "MIDAS"). Three MIDAS IT finite element software products adapted to meet the requirements of the Russian regulatory documents are currently presented in the territory of the Russian Federation. They are midas GTS NX, midas Civil, and midas FEA NX. The midas GTS NX program (midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm_source=site&utm_medium=geoinfo&utm_content=article-02-2023) is designed for geotechnical calculations, modeling and analysis of the behavior of soils and their interactions with engineering structures.

Today, we offer to the attention of the readers a slightly abridged and adapted translation (from English into Russian) of the report [1] made at the 3rd International Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment (ARFEE 2020) that was held in December 2020 in the city of Zhangjiajie (China). The authors of this work are Quan Cao and Yu Han from the Shanghai Institute of Technology (China). In the beginning of the next

year, this report appeared on the "E3S Web of Conferences" website and "Researchgate" website. It is an open access article distributed under the terms of the CC BY 4.0 license that allows it to be copied, distributed, adapted, transformed and used (including for commercial purposes) with the indication of the types of changes and reference to the original source (in our case, this is the reference [1], and the rest references were used by the authors of the translated report).

Currently, the subway has become the main mode of transportation in metropolitan areas. Lots of people live and work in the Shanghai territory composed mainly of soft water-saturated clay soils, and subway construction is the most widespread there. But such sort of soils containing metro tunnels will settle under the impact of dynamic loads from train traffic. And that will affect the service life and safety of the structures.

In the midas GTS NX finite element program, a 3D dynamic model was created, with the use of which the behavior of soft saturated clay and silt soils was analyzed for the normal speed of metro trains (80 km/h) and for their high speed (120 km/h). According to the research results, the higher the speed of the trains, the lower the settlements of the soil under the tunnel and the shallower in depth but wider in plan is the surface settlement trough above the tunnel. In any case, the rate of increase of the settlements above and below the tunnel gradually decreases with time (during long period of operation).

KEYWORDS:

soft saturated clay soils; subway tunnel; train speed; dynamic loading; long-term cyclic loads; settlements; numerical simulation; midas GTS NX software package.

FOR CITATION:

Cao Q., Hang Y. Modelirovaniye v midas GTS NX osadok slabyyh glinistykh gruntov pri dinamicheskikh nagruzkah ot metro (per. s angl.) [Settlement simulation of soft clays under dynamic loads from subway in midas GTS NX]. *Geoinfo*. 2023. 2: 18–25. doi:10.58339/2949-0677-2023-5-2-18-25 (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ ►

Строительство метро оказывает значительное влияние на улучшение коэффициента использования городских земель и снижение интенсивности городского движения. В данной статье в качестве примера рассмотрим Шанхай (КНР). Этот город имеет большую численность населения, и метро в нем является основным средством передвижения людей. При этом он построен на водонасыщенных слабых глинистых грунтах, из-за чего возникает ряд инженерных проблем.

Когда такие вмещающие грунты подвергаются постоянным динамическим нагрузкам во время эксплуатации тоннелей метро, они даже после длительного процесса уплотнения будут давать различные степени осадок. То есть под действием длительных циклических нагрузок эти грунты будут давать осадки после окончания строительства тоннеля на протяжении длительного времени. При больших осадках конструкции тоннеля начнут страдать от возникновения трещин, проникновения воды и грязи и даже разрушений, что серьезно повлияет на безопасность нормальной эксплуатации, эффективность работы метро и срок службы его сооружений. Линия метро Шанхая № 1 была введена в эксплуатацию в 1995 году. Проблема оседания для нее стала более серьезной, когда через 8 месяцев после начала движения поездов осадки достигли 6 см, а на нескольких участках они все еще

проявляют тенденцию к дальнейшему развитию, причем максимальная осадка за год достигает 40 мм [2].

В настоящее время для исследований оседания грунта под действием динамических нагрузок от работы метро широко используются методы теоретических расчетов, эмпирические методы в сочетании с полевыми измерениями, методы испытаний грунтов и физических моделей в лабораториях и методы численного моделирования. Ширлоу [3] изучил данные по долговременному оседанию для множества тоннелей и обнаружил, что долговременная осадка тоннеля во вмещающем слабом грунте обычно может составлять более 30% от общей осадки. Янь Чуньлин и Тан Ицюнь [4] рассмотрели динамические характеристики пылеватого грунта под влиянием нагрузок от метро и долговременное оседание тоннелей метро. Они указали, что после окончания строительства и запуска в эксплуатацию тоннели метро подвергаются прерывистым циклическим нагрузкам. Фудзивара и др. [5, 6] всесторонне обсудили влияние общей нагрузки, цикла нагрузки, степени приращения нагрузки, метода нагружения, степени цементации и длительности циклов на деформации глины и обнаружили, что уплотнение при циклическом нагружении было больше, чем при статическом нагружении. Дин Чжи и др. [7], Лю Мин и др. [8], Йилдирим и др. [9], Йилмаз и др. [10] и Хэ Шаохэн и др. [11] также провели соответствующи-

е исследования по осадкам слабых грунтов под действием динамических нагрузок от метро.

Конечноэлементная программа midas GTS NX (midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm_source=site&utm_medium=geoinfo&utm_content=article-03-2023) была разработана для целей геотехники. Она имеет мощные режимы предобработки и постобработки данных, которые могут удовлетворить большинство инженерных нужд. В этой работе программа midas GTS NX использовалась для создания трехмерной конечноэлементной модели для анализа взаимодействий между обделкой тоннеля, его балластным слоем, земляным полотном и окружающим грунтом для имитации вибраций метро и анализа закономерностей изменений осадок вмещающего тоннель слабого грунта при обычной (80 км/ч) и высокой (120 км/ч) скорости поездов метро. На основе модельного исследования влияния вибраций метро на оседание слоев грунта вдоль линии метро в статье прогнозируются осадки дневной поверхности во время эксплуатации путем комбинирования теоретической и эмпирической формул, которые служат ориентиром для проектирования и оценки долгосрочной безопасности эксплуатации сооружений метро в зоне слабых грунтов.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ►

Для создания модели были выбраны грунтовые условия на участке территории

Шанхая между станциями метро Фанхуа-Роуд и Луньян-Роуд линии № 7, где типичный геологический разрез в диапазоне глубины инженерно-геологической скважины 30 м состоит из 7 слоев – в основном слабых глин (рис. 1). Глубина заложения тоннеля составляет 15 м.

Были выполнены лабораторные испытания образцов грунта, результаты которых были подвергнуты статистическому анализу. Физико-механические характеристики каждого слоя грунта приведены в таблице.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ►

Наружный диаметр рассматриваемого тоннеля метро, пройденного в свое время щитовым способом, составляет 6,2 м, внутренний диаметр – 5,5 м, толщина сегмента обделки – 350 мм, толщина балластного слоя для рельсового пути – 0,450 м, ширина железнодорожной колеи – 1,435 м, класс прочности сборной железобетонной обделки – С55.

Для создания конечноэлементной модели грунта использовалась программа midas GTS NX (midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm_source=site&utm_medium=geoinfo&utm_content=article-03-2023). С учетом принципов метода конечных элементов, фактического распределения усилий и граничного эффекта станции метро эта модель была надлежащим образом упрощена. Слой насыпного грунта (верхний) был объединен с находящимися ниже слоями пылеватой и иловато-пылеватой глины, средний слой илистой глины был объединен с залегающим ниже слоем глины (в этой части проходит тоннель метро), а нижняя часть модели имитировала пылеватые грунты. При установлении параметров грунта слой с более слабым модулем упругости был принят как наиболее неблагоприятный по условиям, поэтому принятая модель была более безопасной и надежной.

Были использованы следующие размеры модели (относительно продольной оси тоннеля):

- в поперечном горизонтальном направлении – 62 м (10 внешних диаметров тоннеля);
- в вертикальном направлении – 50 м;
- в продольном горизонтальном направлении – 120 м (рис. 2).

Модель тоннеля с обделкой и балластным слоем представлена на рисунке 3.

При моделировании были взяты параметры грунтов типичного для рассматриваемого участка геологического разреза, определенные при лабораторных испытаниях (см. таблицу). Были рас-

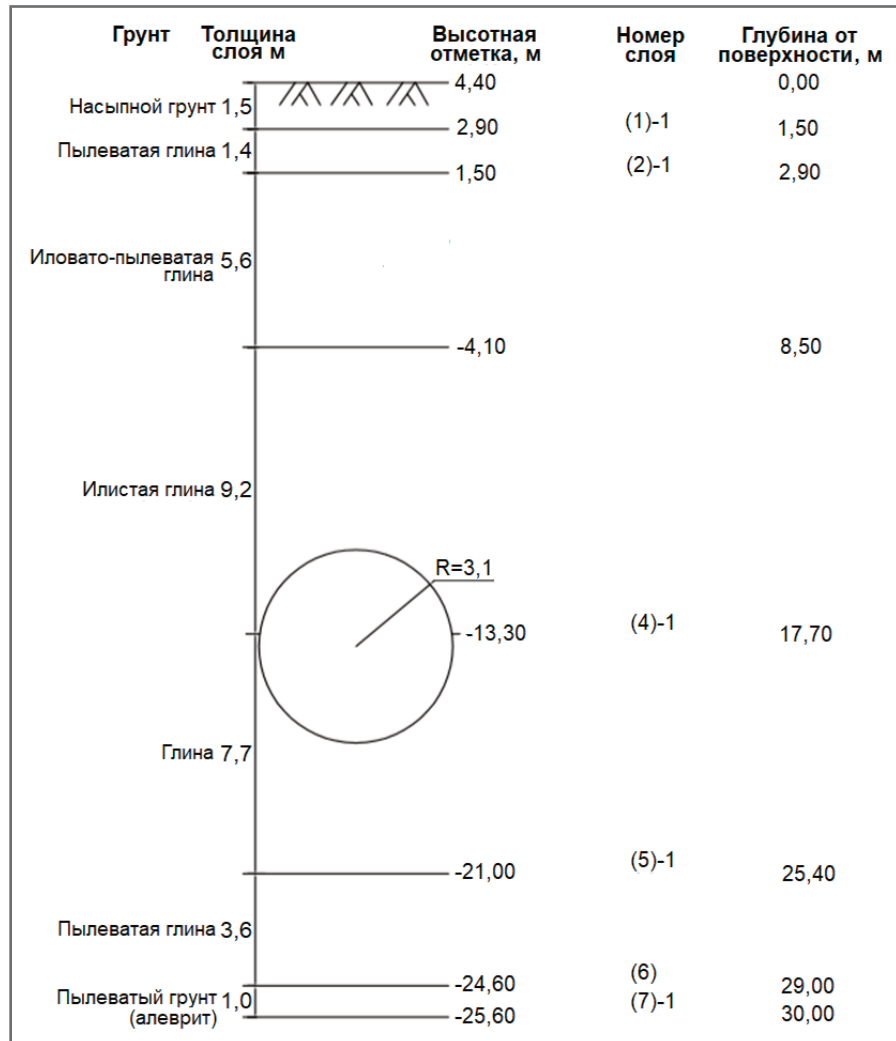


Рис. 1. Типичный для исследуемого участка геологический разрез

Таблица. Физико-механические параметры слоев грунта

Грунт	Удельный вес γ , кН/м ³	Коэф. Пуассона ν	Секущий модуль деформации $E_{s0,1-0,2}$, МПа	Показатели недреназированной прочности на сдвиг	
				Удельное сцепление C_{cu} , кПа	Угол внутр. трения φ_{cu} , град.
Пылеватая глина	18,8	0,35	5,64	21,0	23,0
Иловато-пылеватая глина	17,4	0,25	3,22	12,5	17,3
Илистая глина	16,7	0,25	2,32	14,0	11,8
Глина	17,4	0,35	3,02	16,0	13,8
Пылеватая глина	19,2	0,35	6,55	48,0	17,0
Пылеватый грунт (алевроит)	18,6	0,25	12,49	2,0	32,5
Пылеватый грунт (алевроит)	18,6	0,25	13,03	0,5	33,5

считаны пять нагрузок при динамических воздействиях от движения поездов метро, и воздействие каждой из них было проанализировано.

Для анализа динамических характеристик конструкций тоннеля применялся

анализ собственных (свободных) колебаний. Для расчета матрицы демпфирования использовались периоды первого и второго основных типов собственных колебаний при анализе изменений во времени. Были выбраны все сетки, чтобы

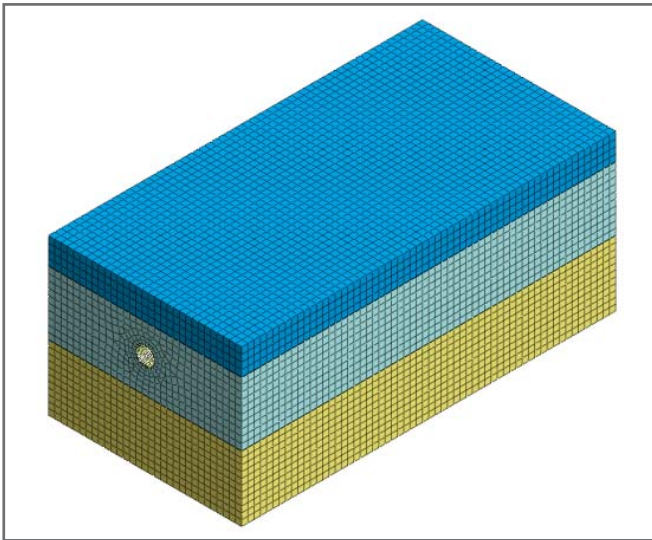


Рис. 2. Модель вмещающего тоннель грунтового массива

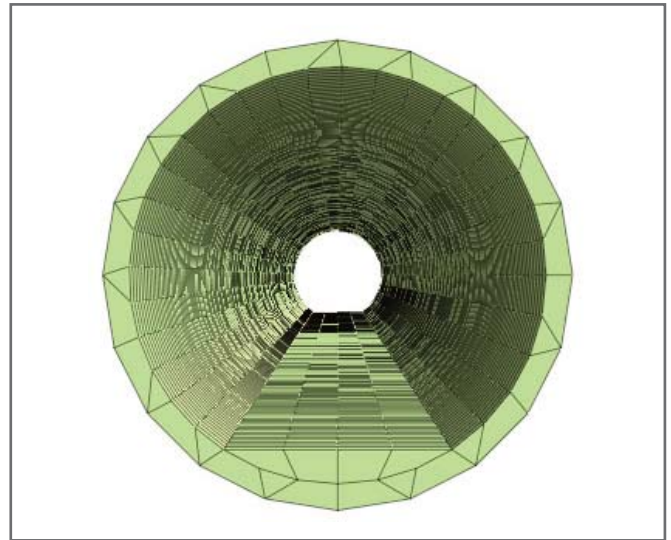


Рис. 3. Модель конструкций тоннеля

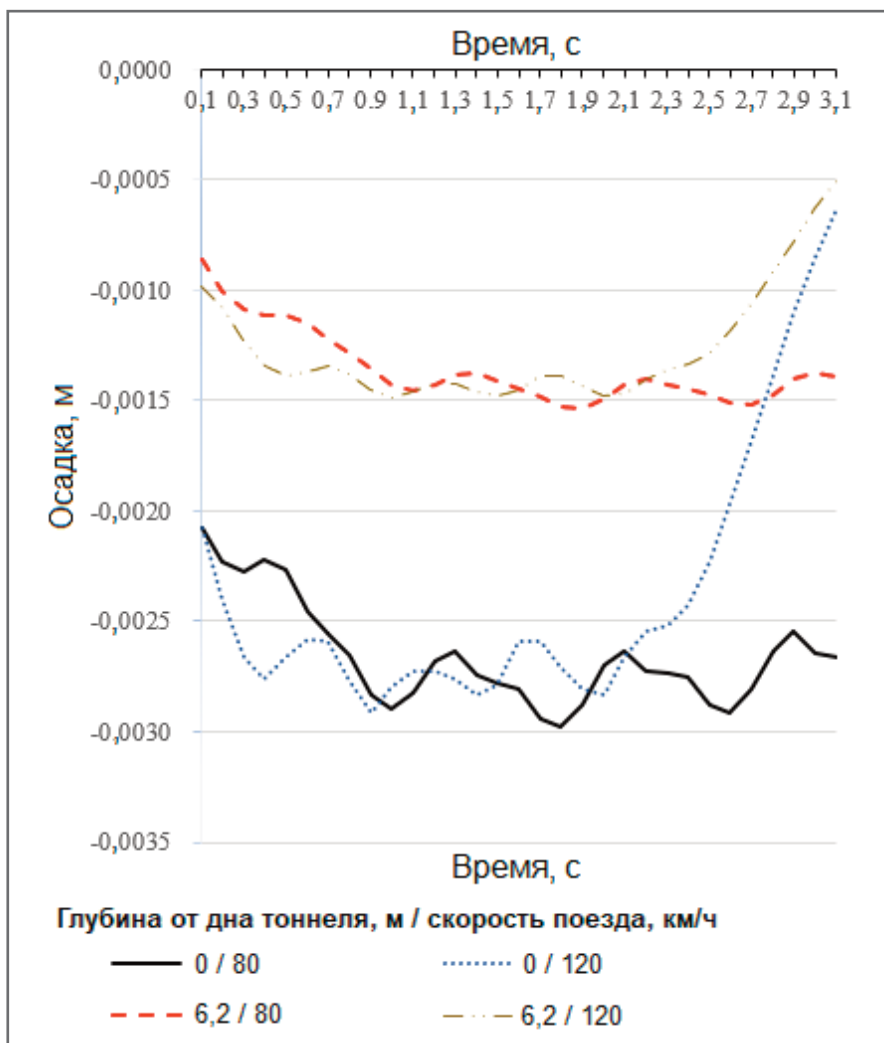


Рис. 4. Осадки грунта под тоннелем при разных скоростях движения поезда (в результате первого приложения нагрузки)

смоделировать упругую границу с помощью пружин, имитирующих реакции грунта. В качестве типа решения была выбрана опция Eigenvalue («Расчет собственных форм»), активировались все сетки и упругие граничные условия и про-

верялась таблица результатов анализа собственных значений. Особое внимание уделялось периодам первого и второго основных типов собственных колебаний.

При статическом анализе надо убедиться, что граница находится достаточно

далеко от основной области для моделей без границ в таких материалах, как скальные или дисперсные грунты. Но при динамическом анализе волна будет отражаться от границ. И если настройка границы будет такой же, как и при статическом анализе, то, скорее всего, она будет неверна. Поэтому во избежание ошибок используются приближенные методы, такие как установление искусственной границы, транзитивной границы (когда изменение физических свойств происходит через промежуточный слой малой толщины) или использование гиперконечного, бесконечного и граничного элементов. В данном исследовании была принята вязкая граница.

К модели прикладывалась динамическая нагрузка от движения поезда метро. Выбиралась: узел, к которому прикладывалась нагрузка (точка прохождения колеса), а также начальный и конечный узлы в соответствии с направлением движения. Вводилась предполагаемая скорость поезда. Для решения выбиралась опция Linear time history (direct integration method), то есть «Линейный нестационарный расчет». Вводились результаты предыдущего анализа собственных значений, и для начала расчетов переносились в группу активации все сетки, вязкие условия и динамические нагрузки.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Осадки грунта под дном тоннеля

При моделировании осадок под дном тоннеля были выполнены расчеты для случая, когда динамическая нагрузка от движения поезда была циклически

приложена пять раз при двух разных скоростях движения – 80 и 120 км/ч. Полученные осадки показаны на рисунках 4–6. При сравнении этих рисунков видно, что с увеличением глубины от дна тоннеля вертикальное кумулятивное смещение грунта под ним постепенно уменьшается. Среднее значение осадки на одной и той же глубине больше при обычной скорости поезда, чем при высокой. Чем ниже частота приложения нагрузок от движущегося поезда, тем медленнее изменение нагрузки и тем дольше время ее действия, что в большей степени способствует уплотнению грунта. Чем большая энергия воздействует на грунт и чем ниже частота приложения нагрузок, тем больше будет генерируемое накопленное напряжение в грунте, что приведет к большей его деформации уплотнения.

Осадки дневной поверхности ►

На рисунке 7 показаны кривые осадок дневной поверхности в пределах мулды оседания над тоннелем при различных скоростях поезда. Из этого рисунка видно, что мулда оседания поверхности при обычной скорости поезда (80 км/ч) выражена сильнее и ее глубина в середине больше, чем при более высокой скорости (120 км/ч), при этом осадки уменьшаются с увеличением поперечного горизонтального расстояния от оси тоннеля. При постепенном увеличении скорости поезда форма мулды оседания в поперечном тоннелю направлении будет постепенно меняться от «глубокой и узкой» до «мелкой и широкой».

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСАДОК ►

На основе результатов численного моделирования и эмпирических прогнозных формул авторы предлагают эмпирическую модель для прогноза осадок сооружения в процессе его эксплуатации:

$$s = \gamma \sum_{i=1}^n \varepsilon h_i; \quad (1)$$

$$\varepsilon = 0,96N^{0,085}, \quad (2)$$

где ε – кумулятивная пластическая деформация расчетного слоя грунта; N – количество вибраций, S – прогнозируемая осадка, мм; γ – поправочный коэффициент с учетом опыта, который главным образом может быть равен 0,85; h_i – толщина расчетного слоя грунта, которая обычно может составлять от 3 до 4 диаметров тоннеля или максимум 20 м.

Согласно предложенной эмпирической модели можно прогнозировать

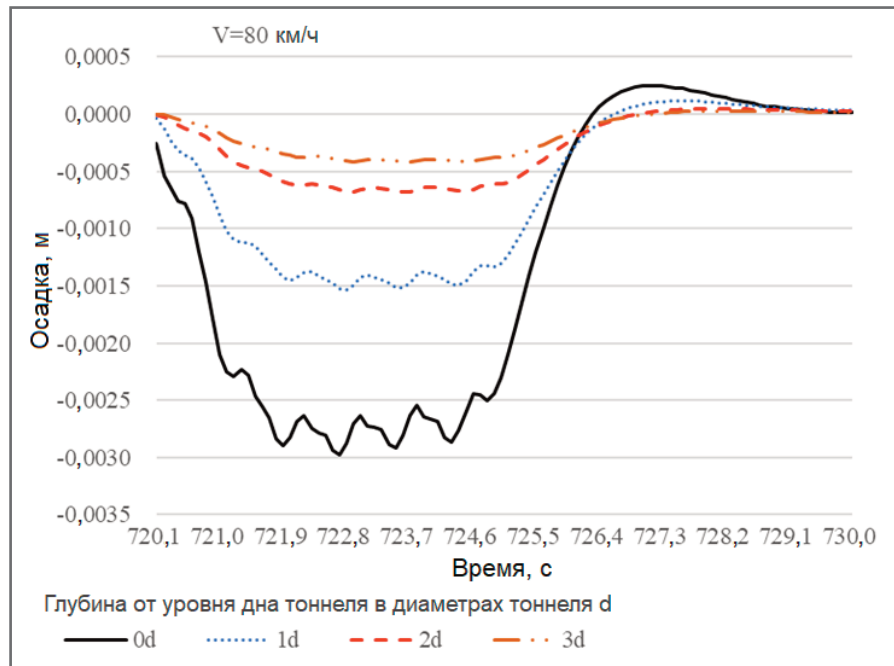


Рис. 5. Осадки грунта под тоннелем в результате пятого приложения нагрузки при скорости поезда 80 км/ч

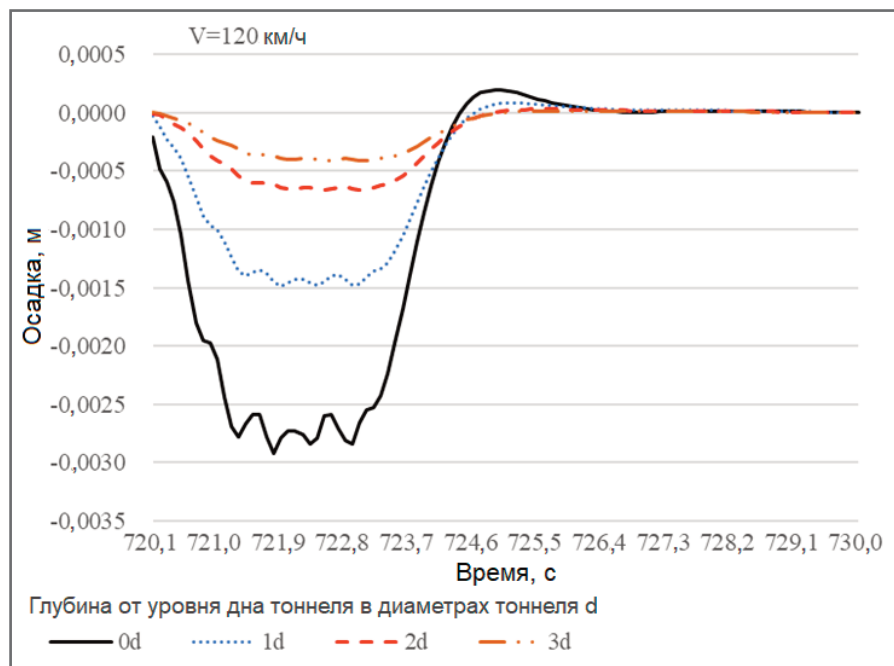


Рис. 6. Осадки грунта под тоннелем в результате пятого приложения нагрузки при скорости поезда 120 км/ч

осадки тоннеля в период эксплуатации. Количество вибраций в год исчисляется как 400 тысяч раз. На рисунке 8 показана кривая развития осадок рассматриваемой линии метро в течение 20 лет с момента начала эксплуатации. Из этого рисунка видно, что прогнозная осадка через 1 год составляет 45 мм, а через 20 лет – 58 мм. Скорость роста расчетных прогнозных осадок постепенно снижается и в конце концов начинает стремиться к нулю. В более поздний период эксплуатации приращение осадки очень

невелико даже при большом приращении времени.

ВЫВОДЫ ►

В данной работе были рассмотрены осадки слабых водонасыщенных глинистых грунтов при динамических нагрузках от движения поездов метро с различной скоростью в изучаемом тоннеле (построенном щитовым способом), проанализированы кумулятивные пластические деформации типичных для рассматриваемой территории грунтов при

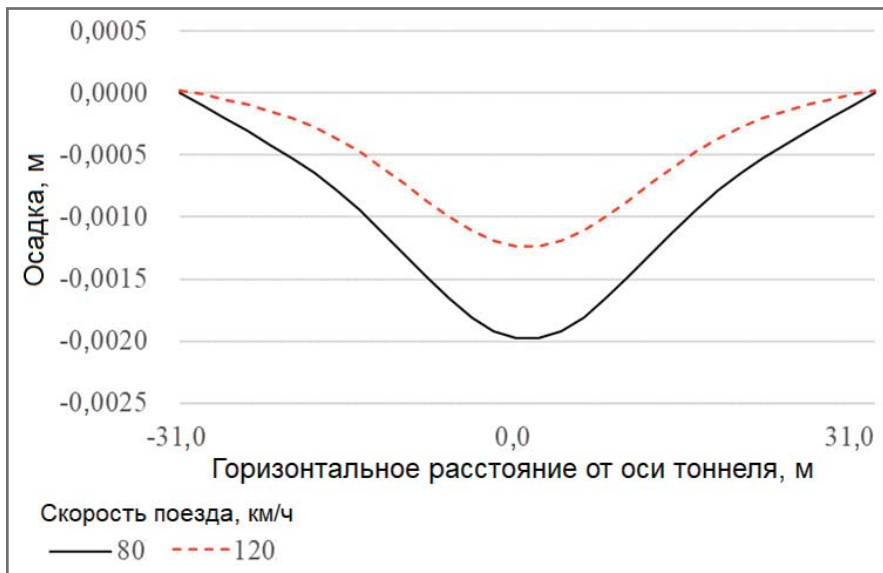


Рис. 7. Осадки дневной поверхности в зависимости от поперечного расстояния от оси тоннеля при разных скоростях движения поезда

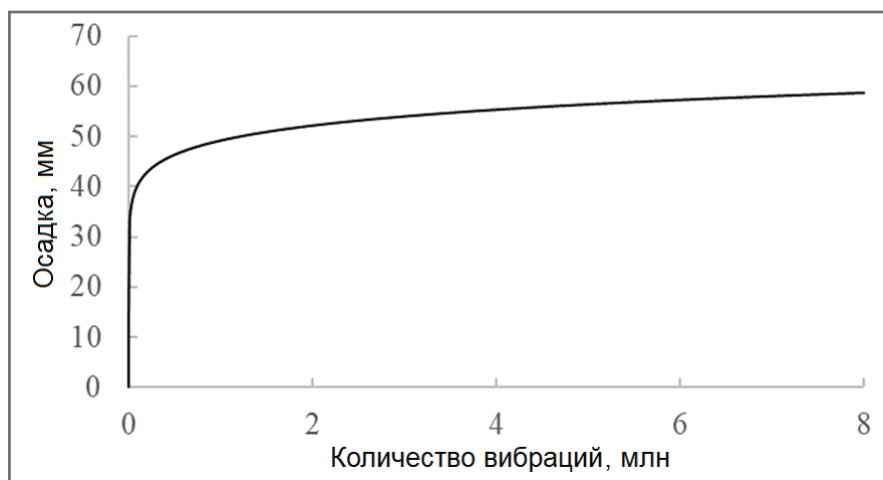


Рис. 8. Прогнозное развитие осадок рассматриваемого тоннеля в течение 20 лет с момента начала эксплуатации

динамическом нагружении, осадки слабых грунтов под тоннелем, осадки дневной поверхности над тоннелем, создана модель для прогноза осадок тоннеля с

момента начала его эксплуатации. На основании полученных результатов можно сделать следующие основные выводы.

1. Оседание грунта под тоннелем на одной и той же глубине при обычной скорости движения поезда больше, чем при более высокой скорости. При обычной скорости деформирование грунта под тоннелем в ответ на нагружение является более выраженным, кривая изменений осадок после приложения нагрузки является более «крутой и высокой» по сравнению с кривой в случае более высокой скорости.

2. Когда скорость поезда увеличивается от нормальной до более высокой, форма мульды оседания дневной поверхности в горизонтальном поперечном отношении оси тоннеля направлении меняется от «глубокой и узкой» до «неглубокой и широкой», ширина мульды оседания может стать даже больше, но максимальная осадка при этом все равно будет меньше.

3. Под действием динамического нагружения от движения поездов метро долговременные осадки тоннеля подчиняются экспоненциальному закону роста. По мере увеличения времени эксплуатации тоннеля поведение слабого грунта вокруг него под влиянием этих нагрузок постепенно становится все более и более стабильным. Через год после начала эксплуатации прогнозная осадка тоннеля составляет около 45 мм, а через 20 лет – 58 мм, что может послужить ориентиром для принятия инженерных решений в аналогичных случаях. **И**

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку факультету железнодорожного транспорта Шанхайского технологического института.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Cao Q., Hang Y. Settlement simulation of soft clay in the subway under dynamic load based on midas GTS NX // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 237. Proceedings of the 3rd International Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment (ARFEE 2020). Article № 03011. 4 p. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202123703011; researchgate.net/publication/349150939_Settlement_simulation_of_soft_clay_in_the_subway_under_dynamic_load_based_on_Midas_GTS_NX.
2. Ye Y.D., Zhu H.H., Wang R.L. The present situation and cause analysis of the diseases of the railway operating tunnel in soft soil // Journal of Underground Space and Engineering. 2007. Vol. 3. № 1. P. 157–160.
3. Shirlaw J.N. Observed and calculated pore pressures and deformations induced by an earth balance shield: discussion // Canadian Geotechnical Journal. 1995. Vol. 32. P. 181–189.
4. Yan C.L., Tang Y.Q. Research progress of dynamic characteristics of silt soil under the subway load // Journal of Earthquake Engineering. 2011. Vol. 33. № 2. P. 200–205.
5. Fujiwara H., Yamanouchi T., Yasuhara K. Consolidation of alluvial clay under repeated loading // Soils and Foundations. 1985. Vol. 25. № 3. P. 19–30.
6. Fujiwara H., Shunji U., Kazuya Y. Secondary compression of clay under repeated loading // Soils and Foundations. 1987. Vol. 27. № 2. P. 21–30.

7. Ding Z., Fan J.L., Zhang M.Y. Model test study on undisturbed soil pore pressure and strain under the subway trainload // Journal of the China Railway Society. 2017. Vol. 39. № 3. P. 96–103.
8. Liu M., Huang M.S., Liu Y.H. Analysis of long-term settlement of cross-river tunnel in soft soil caused by vehicle vibration // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2009. Vol. 31. № 11. P. 1703–1709.
9. Yildirim A., Ersan H. Settlements under consecutive series of cyclic loading // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2007. Vol. 27. № 6. P. 577–585.
10. Yilmaz M.T., Pekcan O., Bakir B.S. Undrained cyclic shear and deformation behavior of silt clay mixtures of Adapazari in Turkey // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2004. Vol. 24. № 7. P. 497–507.
11. He S.H., Zheng Q.Q., Xia T.D. Experimental study on long-term dynamic characteristics of marine soft soil under subway train load considering time intermittent effect // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2019. Vol. 38. № 2. P. 353.

REFERENCES

1. Cao Q., Hang Y. Settlement simulation of soft clay in the subway under dynamic load based on Midas GTS NX. E3S Web of Conferences. 2021. Volume 237. Proceedings of the 3rd International Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment (ARFEE 2020). Article № 03011. 4 p. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202123703011.
2. Ye Y.D., Zhu H.H., Wang R.L. The present situation and cause analysis of the diseases of the railway operating tunnel in soft soil. Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (1): 157–160.
3. Shirlaw J.N. Observed and calculated pore pressures and deformations induced by an earth balance shield: discussion. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 181–189.
4. Yan C.L., Tang Y.Q. Research progress of dynamic characteristics of silt soil under the subway load. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 33 (2): 200–205.
5. Fujiwara H., Yamanouchi T., Yasuhara K. Consolidation of alluvial clay under repeated loading. Soils and Foundations, 1985, 25 (3): 19–30.
6. Fujiwara H., Shunji U., Kazuya Y. Secondary compression of clay under repeated loading. Soils and Foundations, 1987, 27 (2): 21–30.
7. Ding Z., Fan J.L., Zhang M.Y. Model test study on undisturbed soil pore pressure and strain under the subway trainload. Journal of the China Railway Society, 2017, 39 (3): 96–103.
8. Liu M., Huang M.S., Liu Y.H. Analysis of long-term settlement of cross-river tunnel in soft soil caused by vehicle vibration. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (11): 1703–1709.
9. Yildirim A., Ersan H. Settlements under consecutive series of cyclic loading. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27 (6): 577–585.
10. Yilmaz M.T., Pekcan O., Bakir B.S. Undrained cyclic shear and deformation behavior of silt clay mixtures of Adapazari in Turkey. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24 (7): 497–507.
11. He S.H., Zheng Q.Q., Xia T.D. Experimental study on long-term dynamic characteristics of marine soft soil under subway train load considering time intermittent effect. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (2): 353.

Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>