



ENGINEER

international scientific journal

SPECIAL ISSUE

E-ISSN

3030-3893

ISSN

3060-5172



SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan



A bridge between science and innovation



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



ENGINEER

A bridge between science and innovation

E-ISSN: 3030-3893

ISSN: 3060-5172

SPECIAL ISSUE

16-february, 2026



engineer.tstu.uz

**ABDURAXMON ASIMOVICH ISHANXODJAYEV TAVALLUDINING
85 YILLIGIGA BAG‘ISHLANGAN
“TRANSPORT INSHOOTLARI: ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALAR,
SEYSMIK BARQARORLIK”
MAVZUSIDAGI XALQARO ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
ILMIY ISHLARI TO‘PLAMI**

Toshkent davlat transport universiteti texnika fanlari doktori, professor, transport qurilishi sohasida taniqli olim, fan va texnika sohasidagi Abu Rayhon Beruniy nomli O‘zbekiston Davlat mukofoti laureati, “Shuxrat belgisi” ordeni, “Sharafli mehnati uchun” medali, “Oliy talim fidoiysi”, Oliy talim alochisi”, “SSSR ixtirochisi”, “Yo‘l ustalarning ustozlari”, “Seysmik xavfsizlik sohasi alochisi” ko‘krak nishonlari sohibi **Abduraxmon Asimovich Ishanxodjayev tavalludining 85 yilligiga bag‘islangan “Transport inshootlari: zamonaviy texnologiyalar, seysmik barqarorlik”** mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya ilmiy ishlari to‘plami chop etildi.

Abduraxmon Asimovich 100 dan ortiq ilmiy asarlar, shu jumladan, 2 ta monografiya, 2 ta darslik, 18 ta chet elda chop etilgan ilmiy maqola va ishlab chiqarishga tadbiiq etilgan 6 ta ixtiroga berilgan guvohnoma va patentlar muallifidir. Uning ilmiy maslahatchiligi va ilmiy rahbarligida 2 ta doktorlik, 8 ta nomzodlik va 4 ta texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajalariga dissertatsiyalar yoqlandi, ko‘p sonli ilmiy-tadqiqot mavzulari – fundamental va amaliy Ilmiy grantlar, yo‘l-ko‘prik qurilishi bo‘yicha Respublika va soha me‘yoriy hujjatlari yaratganlar.

Ishanxodjayev Abduraxmon Asimovich 1962 yilda Toshkent temir yo‘l muhandislari institutini “Sanoat va fuqaro qurilishi” mutaxassisligi bo‘yicha tugatib, bir yil O‘zbekiston suv xo‘jaligi Davlat loyiha instituti muhandisi, to‘rt yil “Toshshaxarqurilish Bosh Boshqarmasi” qurilish tashkilotlarida qurilish ustasi va ish bajaruvchi lavozimlarida ishladi. Shu davrda u hozirgi Respublika Prezidenti devoni binosi qurilishida ishtirok etdi, Toshkent viloyati Bo‘stonliq rayoni “Chimyon” dam olish zonasida tiklanayotgan “Quyoshli” pioner lager qurilishiga rahbarlik qildi. Nihoyat, u 5-yillik loyiha va ishlab chiqarish tajribasiga ega mutaxassis sifatida 1967-yil dekabrda O‘zbekiston Fanlar Akademiyasi mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutiga, ushbu institut direktori, o‘sha paytda fan nomzodi, keyinchalik akademik Tursunboy Rashidov ilmiy rahbarligida aspiranturaga kiradi va keyingi 20-yil davomida kichik va katta ilmiy hodim, laboratoriya mudiri lavozimlarida faoliyat ko‘rsatdi.

Shu davrda uning bevosita rahbarligi va ishtirokida O‘zbekiston Fanlar Akademiyasi mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida dunyoda yagona “Metropolitanlar zilzilabardoshligi” laboratoriyasi tashkil etildi. Ushbu laboratoriya Toshkent metropoliteni Chilonzor metro yo‘lini noqulay grunt sharoitlari va yuqori seysmik zonada loyihalash va qurishda, metro qurilishi tajribasida birinchi bo‘lib yirik yig‘ma temirbeton elementlardan tiklanadigan yurish va bekat tonnellarining yangi, zilzilabardosh konstruksiyalari yaratish va tadbiiq etishda faol qatnashdi. Toshkent metrosi Chilonzor yo‘lining qurilgan bo‘laklarida ulkan eksperimental tadqiqotlar o‘tkazildi, metro tajribasida birinchi bo‘lib muhandis-seysmometrik kuzatuvlar tashkil qilindi. Laboratoriya ilmiy xodimlari va izlanuvchilaridan 10 dan ortiq kishi nomzodlik va doktorlik dissertatsiyalari yoqladilar. Kafedrada bajarilgan ilmiy-tadqiqotlar natijalarining ishlab chiqarishga tadbiiqidanda hosil bo‘lgan katta miqdordagi iqtisodiy samara institut va O‘zbekiston Fanlar Akademiyasi hisobotlarida qayd etildi.



Ustozimiz 30 yildan ortiq muddatda rahbarlik qilgan Toshkent avtomobil-yo'llar instituti "Ko'priklar va transport tonnolari" kafedra O'zbekiston Respublikasi, shuningdek, Osiyo, Afrika va Lotin Amerikasi mamlakatlari uchun ko'priksizlik bo'yicha oliy malumotli kadrlar tayyorladilar. Shuni qayd etish lozimki, professor Ishanxodjaev Abduraxmon Asimovich turli yillarda Tojikiston va Qirg'iziston Respublikalari hududlarida, Armaniston Respublikasining Spitak shahrida ro'y bergan kuchli zilzilalar oqibatlarini o'rganish va tahlil qilishda, sobiq Ittifoq Fanlar Akademiyasi prezidiumi qoshidagi seysmologiya va zilzilabardosh qurilish bo'yicha idoralararo kengash azosi sifatida faol ishtirok etdi. Keyingi yillarda u Toshkent shahri va Respublikada qurilayotgan ulkan transport inshootlari konstruksiyalari, shu jumladan Toshkent metropoliteni yer usti xalqa yo'li konstruksiyalarini ekspertiza qilish jarayonlarida ham bevosita ishtirok etdi.

Ishanxodjayev Abduraxmon Asimovich 50 yildan ortiq davrda ilmiy darajalar beruvchi ixtisoslashgan va ilmiy kengashlarning raisi, ilmiy kotibi, a'zosi va ushbu kengashlar qoshidagi ilmiy seminar raisi sifatida 300 dan ortiq mutaxassislarning doktorlik, nomzodlik va falsafa doktori ilmiy darajasini olish jarayonida qatnashdi. Hozirda u Toshkent Davlat Transport Universiteti huzuridagi doktorlik dissertatsiyalari himoyasi bo'yicha ilmiy kengash a'zosi va ushbu ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, O'zbekiston mexaniklar jamiyatining kengashi a'zosi, Sharof Rashidov nomli Samarqand Davlat universiteti va O'zbekiston Fanlar Akademiyasi seysmologiya instituti qoshidagi doktorlik dissertatsiyalari himoyasi bo'yicha ilmiy kengashlar a'zosi sifatida ilmiy darajadagi mutaxassislar tayyorlashda faol ishtirok etmoqdalar.

Mazkur ilmiy-amaliy konferensiyaning maqsadi transport qurilishi sohasida olib borilayotgan zamonaviy ilmiy tadqiqotlar yo'nalishlarini muhokama qilish, jumladan ko'priklar va tunnellar qurilishi, metropolitenlar, yuqori seysmik hududlarda transport obyektlarining ishonchliligi va seysmik mustahkamligi, zamonaviy hisoblash va loyihalash usullari, hamda innovatsion muhandislik yechimlari bo'yicha ilmiy natijalar almashuvini ta'minlashdan iboratdir.

Konferensiyada O'zbekiston Respublikasi hamda xorijiy mamlakatlarning oliy o'quv yurtlari va ilmiy-tadqiqot institutlari olimlari, shuningdek, muhim ilmiy tadqiqot natijalariga ega bo'lgan ishlab chiqarish vakillari o'z ilmiy ishlari bilan ishtirok etdilar.

"Transport inshootlari: zamonaviy texnologiyalar, seysmik barqarorlik" mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyaning asosiy yo'nalishlari quyidagilardan iborat:

1. Transport inshootlari uchun zamonaviy konstruktiv yechimlar va materiallar;
2. Ko'priklar hamda yo'l o'tkazgichlarni diagnostika qilish, ta'mirlash va mustahkamlash texnologiyalari;
3. Seysmik hududlarda transport inshootlarini loyihalash va ekspluatatsiya qilishdagi dolzarb masalalar;
4. Ilg'or xorijiy tajriba, innovatsion yondashuvlar va amaliy tavsiyalar.

Ushbu ilmiy-ma'rifiy to'plam Abduraxmon Asimovich Ishanxodjayevning tabarruk 85 yoshga to'lishi munosabati bilan nashr etilib, unda transport qurilishi sohasida faoliyat yuritayotgan yetakchi olimlar, professor-o'qituvchilar va malakali mutaxassislarning ilmiy izlanishlari jamlangan. To'plamda transport qurilishining dolzarb muammolari, zamonaviy muhandislik yechimlari, ilmiy-nazariy va amaliy tadqiqot natijalari yoritilib, ushbu sohaning bugungi holati va istiqboldagi rivojlanish yo'nalishlari aks ettirilgan. Mazkur nashr Abduraxmon Asimovichning transport qurilishi faniga qo'shgan ulkan hissasiga nisbatan chuqur hurmat va e'tirof ramzi sifatida tayyorlangan.



Parameters of underground metro structure interaction with soil under seismic loads and methods for their determination

K.S. Sultanov¹  ^a

¹Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbaev, Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The seismic strength or resistance of underground structures mainly depends on the forces of their interaction with the surrounding soil. These interaction forces are governed by specific laws. The simplest law includes an interaction coefficient, which is the primary parameter. The values of this coefficient are determined experimentally. For underground metro structures, experimentally determining the interaction coefficient under dynamic (seismic) loads is a highly challenging problem. This paper suggests a straightforward method to estimate interaction parameters, including the interaction coefficient, based on the strength characteristics of the soil surrounding underground metro structures.

Keywords: subway, tunnels, soil, seismic impact, interaction, seismic resistance, friction, stress, contact surface

Параметры взаимодействия подземных конструкций метрополитена с грунтом при сейсмических воздействиях и методы их определения

К.С. Султанов¹  ^a

¹Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: Прочность при сейсмических воздействиях или сейсмостойкость подземных конструкций, главным образом, определяются силами их взаимодействия с окружающей грунтовой средой. Силы взаимодействия определяются из соответствующих законов. Простейший закон взаимодействия содержит коэффициент взаимодействия, которая является основным параметром взаимодействия. Значения коэффициента взаимодействия, определяется экспериментально. Для подземных конструкций метрополитена, экспериментального определения значения коэффициента взаимодействия при динамических (сейсмических) нагрузках, архисложная проблема. Здесь предлагается определения значений параметров взаимодействия, в том числе коэффициента взаимодействия, простым методом на основе прочностных характеристик грунта окружающей подземной конструкции метрополитена.

Ключевые слова: метрополитен, тоннели, грунт, сейсмические воздействие, взаимодействие, сейсмостойкость, трение, напряжения, контактная поверхность

1. Введение

Метрополитен, безусловна, является основным и решающим транспортным средством во всех мегаполисах. С увеличением пассажир-потоков обеспечения безопасности и надежности метрополитена становится важным вопросом. Строительства и эксплуатация метрополитена в сейсмоопасных регионах требует еще и обеспечения его сейсмической безопасности.

Фундаментальные основы сейсмической безопасности или сейсмостойкости подземных сооружений созданы в [1-5]. Сейсмостойкость подземных конструкций метрополитена исследована в [4,6]. В [7,8] рассмотрены сейсмостойкость подземных трубопроводов, аналогично [1-5]. Результаты исследований [1-5] включены республиканским нормативным документам [9].

В работах [1-7], динамическая теория сейсмостойкости подземных конструкций,

разрабатывалась на основе стационарной теории колебаний, деформируемых тел. Это означает, что фронт сейсмической волны ушел далеко в перед и колебания подземного трубопровода установилась. Кроме этого в этих работах грунтовая среда вокруг трубопровода не рассматривалась и она зманялась силами взаимодействия приложенными в виде касательных напряжений трения на внешнюю поверхность трубопровода. Такая постановка была оправдана, тем что решения задачи сейсмостойкости подземных конструкций, даже такой очень простой конструкции, как подземный трубопровод, с учетом нестационарности процесса их колебаний и с учетом волновых процессов в грунтовой среде, была очень сложная задача. Однако, была ясно, что при решении задачи сейсмостойкости подземных сооружений, в том числе подземных трубопроводов [1-10], не рассматривается очень важная часть, начало процесса,

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5526-9862>



когда сейсмическая волна начинает воздействовать на подземную конструкцию. Также было ясно, что волновые процессы в грунте игнорируются в теориях [1-10].

Волновые задачи близкие к задачам сейсмостойкости подземных трубопроводов, фундаментально рассмотрены в [11-15]. В [11,12] получены аналитические решения нестационарных волновых задач о распространении плоской ударной волны в упругом стержне с внешним сухим трением. Здесь также не учитывается внешняя среда. Постановка задачи в [11,12] и [1-5,7,8] по сути, одинаковые, однако здесь рассматривается начала процесса распространения волны в стержне. В [13] экспериментально исследована распространения ударной волны в струне окруженной песком. Получены в первые затухание ударной волны в струне, благодаря проявлению силы трения между упругой струной и сухим внешним песочным грунтом. Работы [11-13] служили основой волновых задач сейсмостойкости подземных трубопроводов в [14]. В [14] обширными натурными и лабораторными экспериментальными исследованиями показана, что волновые процессы в грунтах, играют важную решающую роль при определении оценке сейсмостойкости подземных конструкций. Экспериментально показана, даже в случае распространения плоской взрывной волны вдоль трубопровода, возникает существенное нормальное к внешней поверхности трубы, напряжение. Показана также экспериментально, двух стадийность процесса взаимодействия подземного трубопровода с окружающим его грунтом. Раздельное рассмотрение этих стадий, в прикладных задачах сейсмостойкости, как это сделано в [1-10], является не точным. На основе результатов обширных натуральных и лабораторных экспериментальных исследований взаимодействия подземных трубопроводов с грунтом и фрагментов подземных внешних поверхностей подземных конструкций с окружающей его грунтом, в [14] разработана волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений.

Волновая теория показывает, что волновые процессы в грунте, при распространении сейсмической волны, играют определяющую роль при формировании напряженного состояния в подземном трубопроводе. В дальнейшем по истечении времени процесс установится и трубопровод может совершать стационарные колебательные движения. Однако, на этом этапе тоже игнорировать динамическим напряженным состоянием окружающий трубопровод грунта, приводит не к точностям. Здесь, необходимо отметить, что игнорирования грунтовой средой, в [1-10], была вынужденная мера. Чтобы получить решения сложных задач сейсмостойкости, даже для простейшей подземной конструкции как подземный трубопровод, необходима была упростить задачу. Поэтому волновая теория [14], является логическим продолжением, динамической теории сейсмостойкости подземных сооружений [1-10].

Локальность и двух стадийность процесса взаимодействия подземных конструкций с окружающим их грунтом, следующий существенный вывод, вытекающий из волновой теории. Благодаря этому выводу, становятся возможным, разработать простейших, общедоступных методов определения значений параметров взаимодействия подземных конструкций с грунтом. Волновая теория, развивается и

усовершенствуется последующими исследованиями в [15-21]. В [15] рассмотрены задачи стационарной колебании подземных трубопроводов с учетом волновых процессов в грунтовой среде. В [16,17] обсуждаются фундаментальные вопросы деформирования грунтов и распространения и затухания сейсмических волн в грунтовых средах. Нелинейность и двух стадийность законов взаимодействия подземных сооружений с грунтом обоснована в [18]. Образование контактного слоя грунта между подземной конструкцией и грунтом, при их динамическом взаимодействии, показана в [19]. Показана, что толщина контактного слоя зависит от физико-механических характеристик грунта и скорости взаимодействия. В [20, 21] исследованы свойства законов взаимодействия подземного трубопровода с грунтом и механизмы образования продольных напряжений в трубопроводе при распространении низкочастотных сейсмических волн в грунте.

Краткий анализ работ по сейсмостойкости подземных сооружений показывают, что напряженно – деформированное состояние подземных конструкций всецело зависит от законов взаимодействия. Законы взаимодействия имеют параметры характеризующие механические свойства процесса взаимодействия. Разработка методов определения значения этих параметров является первостепенной актуальной проблемой сейсмостойкости подземных сооружений, таких как метрополитен.

2. Методика исследования

При воздействии сейсмической волны при землетрясении, на подземные конструкции метрополитена, такие как тоннели круглого или четырехугольного сечения, стационарные сооружения, происходит колебания этих конструкций и их взаимодействия с окружающим их грунтом. Процесс взаимодействия, например, тоннеля метрополитена круглого сечения с грунтом (рис.1).

Тоннель метрополитена круглого сечения с внешним диаметром D_H , внутренним диаметром D_B и толщиной стенки d , показана на рис.1. Тоннель метрополитена расположена на глубине H . При воздействии сейсмической волны на подземный тоннель с внешним диаметром $D_H = 6м$, начинается движения грунта и тоннеля в грунтовой среде. Сейсмическая нагрузка на тоннель передается через грунт. При этом, в зависимости от частоты и амплитуды сейсмической нагрузки σ_g , тоннель начинает колебательное движение. В силу различия массы железобетонного тоннеля и грунта образуется относительное их смещение и, следовательно, касательное напряжения τ на поверхности контакта тоннеля с грунтом. В состоянии покоя тоннель находится под статическим давлением σ_{NS} . Очевидно, что по контуру внешней поверхности тоннеля, в различных ее точках, эта давления будет разное. При воздействии сейсмической давления к статическому давлению (напряжению) добавляется динамическая давления σ_{ND} . Суммарная давления или ее нормальная составляющая на внешнюю поверхность, определяется по формуле

$$\sigma_N = \sigma_{NS} + \sigma_{ND} \quad (1)$$

В силу различия нормального напряжения σ_N , по круглому контуру тоннеля, касательное напряжения τ также будет различными.



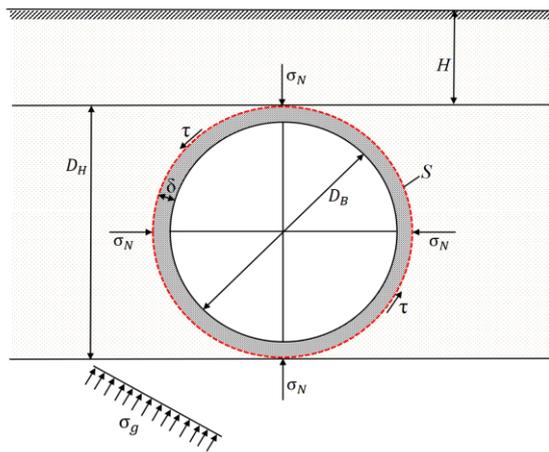


Рис.1. Схематическое представление тоннеля метрополитена круглого сечения

Как показывают результаты экспериментальных исследований [1-14], закон изменения τ , достаточно сложный. Схематически, обобщая результаты опытов по определению τ , ее изменения в зависимости от относительного смещения при постоянном нормального напряжения, можно представить как на рис.2.

Процесс взаимодействия в любой точке внешней поверхности подземного тоннеля с грунтом, при воздействии сейсмической волны может пойти по кривым 1-3 на рис.2 в зависимости от физико-механического состояния контактного слоя грунта. Процесс взаимодействия пойдет по кривой 1, в случае не нарушенного грунта вокруг тоннеля. В этом случае, проявляется пиковое значения касательного напряжения, потом ее спад и постоянства ее значения. В случае нарушенной, вернее разрушенного грунта вокруг тоннеля, процесс взаимодействия пойдет по кривой 2. Упрощая кривой 2, получаем ломанную 3, где процесс взаимодействия пойдет по прямым линиям OC и CE .

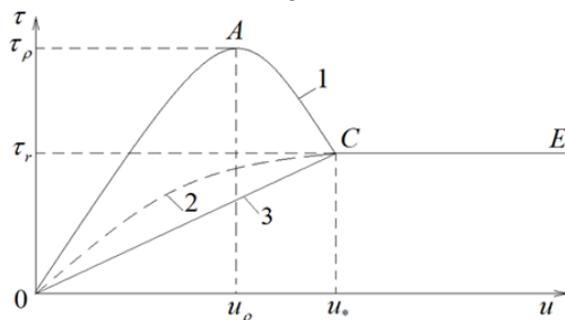


Рис.2. Схематическое представления закона изменения силы взаимодействия τ от относительного смещения u при постоянном нормального напряжении σ_N

Во всех случаях процесс взаимодействия, состоит из двух стадий. Первая стадия, когда сила взаимодействия развивается в зависимости от относительного смещения. Вторая стадия, когда сила взаимодействия не зависит от относительного смещения. Очевидно, в этой стадии взаимодействия выполняется закон Амонтона - Кулона. Следовательно, в обеих стадиях, сила взаимодействия

зависит от нормального к внешней поверхности напряжения.

В случае кривая 1, происходит разрушения контактного слоя грунта. Разрушения особенно интенсивно происходит на участке AC кривой 1. Контактный слой грунта полностью разрушится в точке C , где относительное смещение u достигает своего предельного значение u_* . Повторное взаимодействия уже пойдет по кривой 2. В этом случае в процессе взаимодействия, происходит переукладка зёрен грунта и частичное разрушение, благодаря чему процесс взаимодействия происходит нелинейно. В [21] показана, что эти стадии взаимодействия необходимо рассматривать вместе. Так как, в зависимости от значения нормального давления, относительного смещение, в отдельных точках контактной поверхности может наступит вторая стадия взаимодействия, т.е. процесс взаимодействия является локальным.

Во всех случаях процесс взаимодействия, состоит из двух стадий. Первая стадия, когда сила взаимодействия развивается в зависимости от относительного смещения. Вторая стадия, когда сила взаимодействия не зависит от относительного смещения. Очевидно, в этой стадии взаимодействия выполняется закон Амонтона- Кулона. Следовательно, в обеих стадиях, сила взаимодействия зависит от нормального к внешней поверхности напряжения.

В случае кривая 1, происходит разрушения контактного слоя грунта. Разрушения особенно интенсивно происходит на участке AC кривой 1. Контактный слой грунта полностью разрушится в точке C , где относительное смещение u достигает своего предельного значение u_* . Повторное взаимодействия уже пойдет по кривой 2. В этом случае в процессе взаимодействия, происходит переукладка зёрен грунта и частичное разрушение, благодаря чему процесс взаимодействия происходит нелинейно. В [21] показана, что эти стадии взаимодействия необходимо рассматривать вместе. Так как, в зависимости от значения нормального давления, относительного смещение, в отдельных точках контактной поверхности может наступит вторая стадия взаимодействия, т.е. процесс взаимодействия является локальным.

В простейшем идеализированном случае процесс локального взаимодействия подземного тоннеля метрополитена с грунтом, пойдет по прямым линиям OCE . В этом случае законами взаимодействия являются

$$\tau = K_x u \text{ при } u < u_* \quad (2)$$

$$\tau_r = c + f \sigma_N \text{ при } u = u_* \text{ или } u > u_* \quad (3)$$

где c – коэффициент сцепления, а f – коэффициент внутреннего трение грунта, K_x – коэффициент жесткости контактного слоя грунта.

Параметры c , f , u_* являются параметрами взаимодействия подземного тоннеля метрополитена с окружающим его грунтом. Законы (2) и (3), как уже отметили выше являются локальными законами. Они выполняются в каждой точке внешней поверхности тоннеля контактирующей с грунтом. Определения



значений параметров взаимодействия K_x , c , f , u_* необходимо для решения задачи сейсмостойкости подземного тоннеля в частности, любых подземных сооружений в целом.

3. Результаты исследования

Из параметров взаимодействия K_x , c , f , u_* , последние три c , f , u_* являются прочностными характеристиками грунта. Из-за локальности процесса взаимодействия, значения этих параметров можно определить экспериментально в лабораторных условиях. Экспериментальные методы определения c , f , u_* общеизвестны. Проблема заключается в определении значения параметра K_x . В [1,3-5] предлагается определения значения параметра K_x экспериментально. В этом случае, по предложенной методике [1,4,5], необходимо проведение натурных экспериментов с подземным тоннелем. В [14] были проведены для определения значения параметра K_x , натурные эксперименты. Сейсмическая нагрузка в виде плоской волны создавалась взрывом. Аналогичный эксперимент с подземным тоннелем метрополитена организовать является сложным и экономически нецелесообразным. Отсюда экспериментальный метод определения значения параметра K_x становится невозможным.

Однако, существует другой, достаточно простой путь определения значения параметра K_x . В точке C на рис.2, значения сил взаимодействия по формуле (2) и (3) должны быть равными. Для точного выполнения этого условия, необходимо в уравнении (2) также присутствия нормального напряжения, т.е.

$$K_x = K_N \sigma_N \quad (4)$$

где K_N – коэффициент взаимодействия подземного тоннеля с грунтом.

Далее его значения определяется из условия равенства сил взаимодействия в точке C диаграммы на рис.2 следующими уравнениями

$$\tau = \tau_r = K_N \sigma_N u_* = c + f \sigma_N \quad (5)$$

$$K_N = \frac{f}{u_*} + \frac{c}{\sigma_N u_*} \quad (6)$$

В случае разрушенной структуры грунта, когда значения коэффициента сцепления $c=0$ или незначительно, формула (6) предельно упрощается

$$K_N = \frac{f}{u_*} \quad (7)$$

Используя формулы (6) или (7) определяется значения параметра (коэффициента взаимодействия) K_N . Далее используя (4) определяется значения коэффициента жесткости контактного слоя грунта K_x .

В случае, когда взаимодействия происходит по кривым 1 или 2 на рис.2, процесс взаимодействия описывается более сложными уравнениям [14].

Закон взаимодействия тоннеля с грунтом для кривых 1, 2 уравнения (2) принимает вид

$$\tau = K_x(\sigma_N, I_S) u \quad (8)$$

где $K_x(\sigma_N, I_S)$ – нелинейный коэффициент жесткости контактного слоя грунта.

Изменение разрушения контактного слоя грунта в уравнении (8) характеризуется параметром $I_S = |u/u_*|$. Параметр I_S определяет степень разрушенности структуры грунта в процессе взаимодействия. В случае $I_S = 0$, грунт на контактом слое считается неразрушенным, а в случае $I_S = 1$ – полностью разрушенным. В остальных случаях $0 < I_S < 1$.

На основе опытных данных, в [14] коэффициент жесткости описывается уравнением

$$K_x(\sigma_N, I_S) = K_x^*(\sigma_N) \exp[\alpha_u(1 - I_S)] \quad (9)$$

где K_x^* – секущий коэффициент жесткости при $u = u_*$; α_u – коэффициент, характеризующий диапазон изменения K_x .

При $I_S = 0$ из (9) получим

$$K_x(\sigma_N) = K_x^*(\sigma_N) \exp(\alpha_u) \quad (10)$$

Согласно результатов опытов [14], зависимость $K_x^*(\sigma_N)$ является линейной функцией и определяется соотношением

$$K_x^*(\sigma_N) = K_N \sigma_N \quad (11)$$

Из (11) и (5) при $u = u_*$ получим формулу (6) или (7).

Отсюда следует, что значения u_* является постоянным для данного вида грунта и конструкции подземного тоннеля метрополитена.

Значения пикового касательного напряжения или силы взаимодействия τ_p зависят от значения α_u . С увеличением α_u значение τ_p увеличивается. При $\alpha_u = 0$, соответствующем случаю, когда разрушения контактного слоя грунта не учитываются, зависимость $\tau(u)$ в первой стадии взаимодействия является линейной (кривая 3). Уравнения (9) переходит в (4), а уравнения (8) в (2). Значения коэффициента α_u определяется экспериментально в лабораторных условиях, также как значения c , f , u_* .

Таким образом, волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений, где в отличие от динамической теории [1-5], процесс взаимодействия считается локальным, определения параметров взаимодействия становится возможным в лабораторных условиях.

4. Заключение

1. Показана основные преимущества и недостатки динамической и волновой теории сейсмостойкости подземных сооружений. Показаны применимости линейных и нелинейных локальных законов взаимодействия в задачах сейсмостойкости подземных тоннелях метрополитена.

2. Приведены и проанализированы основные соотношения линейных и нелинейных уравнений законов взаимодействия, их области применения в зависимости от значений относительного смещения. Показана двух стадийность процесса взаимодействия подземных сооружений с грунтом и следствия,



вытекающие из этого случая.

3. Предложены методы определения параметров, входящих в линейный и нелинейный законы взаимодействия подземного тоннеля метрополитена, из результатов прочностных испытаний на сдвиг в лабораторных условиях.

Использованная литература / References

[1] Рашидов Т.Р. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. Ташкент: Фан, 1973. 180 с.

[2] Ильюшин А.А., Рашидов Т.Р. О действии сейсмической волны на подземный трубопровод // Изв. АН РУз. Сер.техн. наук. 1971. -№1. - С. 3.

[3] Рашидов Т.Р., Хожметов Г.Х., Мардонов Б. Колебания сооружений, взаимодействующих с грунтом. Ташкент: Фан, 1973. - 174 с.

[4] Рашидов Т.Р., Ишанходжаев А.А., Дорман И.Я. и др. Сейсмостойкость тоннельных конструкций метрополитена. М.: Транспорт, 1975. - 120 с.

[5] Рашидов Т.Р., Хожметов Г.Х. Сейсмостойкость подземных трубопроводов. Ташкент: Фан, 1985. - 152 с.

[6] Мубараков Я.Н. Сейсמודинамика подземных сооружений типа оболочек. Ташкент: Фан, 1989. - 190 с.

[7] O'Rourke M.J., Liu X. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects. – MCEER: Univ. at Buffalo, USA. – 1999. – 249 p.

[8] O'Rourke T.D., Jung J.K., Argyrou C. Underground pipeline response to earthquake-induced ground deformation // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2016. – Vol.91. – P. 272–283.

[9] КМК 2.01.03-19 Строительство в сейсмических районах / Минстрой РУз.- Ташкент, 2019. -111 с.

[10] Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы. Проектирование и строительство. М.: Недра, 1982. - 384 с.

[11] Никитин Л.В. Статика и динамика твердых тел с внешним трением. Москва. Изд. Московский лицей. 1998. – 272 с.

[12] Никитин Л.В. Динамика упругих стержней с внешним сухим трением// Успехи механики. 1988. т.11. - № 4. - С. 53-106.

[13] Веклич П.А., Малышев Б.М. Распространение волн в упругих стержнях, находящихся в среде с сухим трением // Труды института механики МГУ. Задачи

механики твердого деформируемого тела. М.: Изд. МГУ, 1985. - С. 64-99.

[14] Султанов К.С. Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений. Ташкент, Фан: 2016. 392 с.

[15] Israilov M.S. Solution of the External Pochhammer–Chree Problem and Bending Seismic Vibrations of the Pipeline in Infinite Elastic Continuum // Mechanics of Solids. – 2023. – Vol.58. – P.26–37.

[16] Sultanov K.S. A non-linear law of the deformation of soft soils // Journal of applied mathematics and mechanics. – 1998. – Vol. 62 (3). - P. 465-472.

[17] Sultanov K.S. The attenuation of longitudinal waves in non-linear viscoelastic media // Journal of applied mathematics and mechanics. – 2002. – Vol. 66 (1). - P.115-122.

[18] Sultanov K.S. Laws governing the interaction of underground structures with soil during their relative displacement // International applied mechanics. - 1993. – Vol. 29 (3). - P.217-223.

[19] Bakhodirov A.A., Ismailova S.I., Sultanov K.S. Dynamic deformation of the contact layer when there is shear interaction between a body and the soil // Journal of applied mathematics and mechanics. – 2015. – Vol. 79 (6). - P.587-595.

[20] Sultanov, K.S., Vatin, N.I. Wave Theory of Seismic Resistance of Underground Pipelines // Applied Sciences. – 2021. – № 4. – Pp. 1797. DOI:10.3390/app11041797. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1797>.

[21] Sultanov K.S. Contact interaction of an underground pipeline with soil under dynamic impacts // Facta universitatis-series. Mechanical engineering. – 2024. – Vol. 22 (3). – P.485-501.

Сведения об авторе / Information about the author

**Султанов
Карим
Султанович /
Sultanov
Karim
Sultanovich**

Главный научный сотрудник
Института механики и
сейсмостойкости сооружений имени
М.Т. Уразбаева Академии наук
Республики Узбекистан,
д-р физ.-мат. наук, профессор.
E-mail: sultanov.karim@mail.ru
Tel.: +998909702535
<https://orcid.org/0000-0002-5526-9862>



K. Sultanov

Parameters of underground metro structure interaction with soil under seismic loads and methods for their determination8

B. Mardonov, N. Nishonov, M. Berdibaev, A. Khurramov, R. Azamov

Vibrations of a rigid beam elastically connected to deformable supports under seismic loads13

A. Belyi, Sh. Kadirova, M. Mamadaliev

Experience in Implementation and Prospects for the Development of Structural Health Monitoring Systems at Transport and Civil Infrastructure Facilities20

U. Shermukhamedov, Sh. Mirkhodjaev, A. Karimova, A. Abdullaev

On the issue of assessing a monolithic reinforced concrete overpass under seismic impacts24

I. Mirzaev, S.M. Gaynazarov

Mutual influence of parallel tunnels in an elastic medium in the epicentral zone of an earthquake31

Sh. Erboev, D. Juraeva

Modern building materials based on household waste and natural raw materials37

Kh. Akramov, R. Ametov

Physicochemical analysis of expanded clay concrete modified with mineral and chemical additives39

Z. Rakhimjonov, A. Khurramov

Application of new seismically insulated supporting parts for seismic protection of bridge intermediate buildings44

E. Shipacheva, Z. Muradov

Concrete for Additive Construction Production in Dry Hot Climate Conditions for Transport Infrastructure49

I. Mirzaev, U. Shermukhamedov, A. Karimova, A. Abdullaev

Seismic Performance of Continuous Monolithic Bridges54

A. Khasanov, Z. Khasanov, B. Kurbanov, B. Toshmukumov

Use of basalt reinforcement, mesh, and fabrics as structural materials in geotechnical and earthworks59