



ПУТЕВОЙ

НАВИГАТОР

№ 56 (82) сентябрь 2023

ТЕМА НОМЕРА

**Транспортное
планирование, или
Кто же не любит
быстрой езды?**

Официальное издание
АНП «Объединение «ДОРМОСТ»



ДОРМОСТ

Адрес редакции:
190121, Санкт-Петербург,
наб. кан. Грибоедова, д. 130
Тел./факс (812) 400-14-58, 400-14-84
Email: info@dormost.spb.ru
www.dormost.spb.ru

Издание зарегистрировано
Управлением Федеральной
службы по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
по Санкт-Петербургу
и Ленинградской области.
Регистрационный номер
ПИ №ТУ78-02018 от 08.06.2017
ISSN: 2541-9986
Подписной индекс: ПН335

**Включен в Перечень ВАК РФ
Индексируется в РИНЦ (elibrary.ru)**

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:
АНП «ОБЪЕДИНЕНИЕ «ДОРМОСТ»

РЕДАКЦИЯ:
Главный редактор: Евгения Кайданова
Над номером работали:
Дизайн: Григорий Семенов
Верстка: Александр Закиров
Фото на обложке: Никита Крючков

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
190121, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, д. 130/13
АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ:
190121, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, д. 130/13
АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ:
190121, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, д. 130/13

Перепечатка любых материалов
допускается с письменного разрешения
редакции.

Мнение редакции может не совпадать
с мнением авторов/спикеров.

Отпечатано в типографии
ООО «Лесник-Принт»,
Санкт-Петербург, ул. Сабиловская, д. 37.
Установочный тираж 5000 экз.

Подписано в печать 15 сентября 2023 года



Уважаемые читатели, коллеги и друзья!

Приветствую всех вас, кто связал свою жизнь с дорожно-мосто-тоннелестроительной отраслью и транспортом, — производителей и ученых!

Мне приятно знать, что все мы рассуждаем и трудимся в одном ключе, когда речь идет об инициации новых научных разработок и объектов транспортной инфраструктуры, которые делают города красивее, современнее, а жизнь людей — комфортнее.

Нас, практиков высшей школы, особенно вдохновляет возможность передавать свой опыт молодым, тем, кому еще предстоит стать специалистами и чей профессиональный путь только начался. Отрадно видеть, что растет достойная смена.

Безусловно, без трудностей не бывает в любом деле, и наше с вами общее дело не исключение. Всем известна проблема несовершенства нормативной базы в области строительства, недостатки в системе образования — особенно после того, как наша страна частично перешла на западные стандарты, — но все мы стараемся компенсировать их нашими общими усилиями, говоря с властью от лица отраслевых объединений, союзов и от каждого из нас лично.

Во все времена, особенно неоднозначные, не стоит забывать и об оперативном обмене информацией: формировать исследовательские коллективы, создавать прочную теоретическую базу для профессиональной деятельности, обмениваться опытом решения актуальных проблем в науке и практике. Инструментом для этого становятся, прежде всего, научные конференции, публикации, которые позволяют преподавателям, аспирантам и магистрантам позиционировать результаты научных исследований.

Ведь именно общение делает возможным находить единомышленников, в которых нуждается каждый, кто творит, создает.

В этом году впервые будет отмечаться профессиональный праздник — День метростроителя, который, согласно Указу Президента РФ, придется на 2 октября. Надеюсь, и этот праздник станет доброй традицией, как и День строителя, и День дорожника, поэтому хочу поздравить всех причастных с наступлением первой даты этого дня и пожелать успехов, здоровья и новых интересных проектов. И не только метростроителям, но и всем нам!

Удачи, дорогие коллеги!

А. П. Ледяев,
д. т. н., заведующий кафедрой «Тоннели и метрополитены»
Петербургского государственного университета путей сообщения



содержание

ТЕМА НОМЕРА

Транспортное планирование, или
Кто же не любит быстрой езды?..... 4



НОВОСТИ, СОБЫТИЯ

Петербург отметил День строителя.....18

Строительство
Московско-Дунайской развязки..... 20

В Петербурге состоялась юбилейная
конференция «Опоры и фундаменты
для ВЛ: технологии проектирования
и строительства» 24



НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ

Противокарстовые конструкции
на железных дорогах и современные
тенденции 26

Метод конечных элементов
в сейсродинамике пространственных
конструкций неразрезных
железобетонных мостов и путепроводов 34



Расчет обделки на заданные нагрузки
методом конечных элементов и методом
Метрогипротранса..... 42

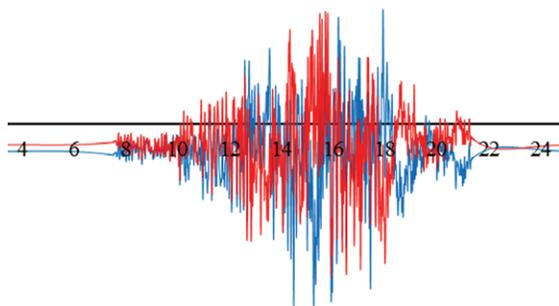
Совершенствование методов
испытаний асфальтобетонных смесей
и асфальтобетона в дорожной отрасли РФ ... 52

Влияние податливости основания
на сейсмостойкость железнодорожных
мостов..... 60

Особенности системы мониторинга
вантового моста через Петровский
канал в створе автомобильной дороги
«Западный скоростной диаметр»
в Санкт-Петербурге..... 68

ПУТЕШЕСТВИЕ

Скромное очарование Псковщины..... 78



УДК 624.21.037:624.012.4

Влияние податливости основания на сейсмостойкость железнодорожных мостов

Авторы:

Мирзаев И., Ташкентский государственный транспортный университет, профессор кафедры «Прикладная механика»;

Шермухамедов У. З., Ташкентский государственный транспортный университет, профессор кафедры «Мосты и тоннели»;

Аскарова Д. С., Ташкентский государственный транспортный университет, базовый докторант кафедры «Прикладная механика».

Аннотация

В данной работе рассматриваются особенности расчета сейсмостойкости железобетонных железнодорожных мостов по реальным записям землетрясений. Методами конечных элементов и конечных разностей производится дискретизация задачи с учетом взаимодействия опор моста с основанием. В статье на примере расчета трехпролетного железобетонного железнодорожного моста на реальные сейсмические воздействия землетрясений показано влияние податливости основания на сдвиговые усилия в опорах. Результаты показали, что значения коэффициентов жесткости и вязкости взаимодействия опоры или фундамента с грунтом существенно влияют на величину поперечного усилия в опорах моста.

Ключевые слова: железнодорожный мост, грунт, опора, вязкость, сдвиговое усилие, податливость.

Abstract

This paper deals with the peculiarities of calculation of seismic resistance of reinforced concrete railway bridges based on real earthquake records. The problem is discretised using finite element and finite difference methods, taking into account the interaction of the bridge supports with the ground. In the article on the example of calculation of a three-span reinforced concrete railway bridge on real seismic effects of earthquakes the influence of the base pliability on shear forces in supports is shown. The results showed that the values of the stiffness and viscosity coefficients of the support or foundation-soil interaction significantly affect the magnitude of the shear force in the bridge supports.

Keywords: railway bridge, soil, support, viscosity, shear force, ductility.

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения – это естественно возникающие широкополосные колебательные движения грунта, вызванные рядом причин, включая тектонические движения грунта, вулканизм, горные удары и техногенные взрывы. Наиболее важные из них вызваны разрушением и скольжением тектонических плит вдоль разломов [1].

Сейсмичность территории Узбекистана оценивается в 7, 8 и 9 баллов. Поэтому возможные зем-

летрясения оказывают влияние на работу всех систем жизнеобеспечения, транспортной инфраструктуры, в том числе железнодорожных мостов. Железобетонные мосты со сборными предварительно напряженными железобетонными пролетными строениями являются широко используемыми конструкциями мостов на железнодорожных мостах Узбекистана. Возможности применения этих мостов еще более расширяются благодаря простоте их проектирова-

ния и строительства, а также легкости в обслуживании.

Проектирование сейсмостойкой конструктивной системы требует анализа для прогнозирования ее деформаций и внутренних сил, возникающих при возможных землетрясениях. Существует широкий спектр методов сейсмоструктурного анализа (от простых до сложных). Однако для всех методов важны соответствующая модель конструкции и реалистичное пред-

ставление движения грунта при землетрясении. Модель должна с достаточной точностью представлять пространственное распределение прочности, деформационной способности и массы конструкции. История реакции конструкции на землетрясение может быть рассчитана с помощью динамического анализа. В статье [2] представлен расширенный нелинейный анализ временной истории системы «мост – фундамент – грунт», подверженной сейсмическому воздействию. Используемый метод моделирования и анализа может быть легко применен к другим типам сооружений.

Во время землетрясений, произошедших в последние годы, мосты с фундаментом мелкого заложения получили повреждения различной степени из-за пластической деформации грунта и перемещения фундамента. Предыдущие исследования показали, что взаимодействие между фундаментом и окружающим грунтом может оказывать значительное влияние на сейсмическую реакцию сооружений. Таким образом, понимание влияния параметров грунта и конструкции на взаимодействие «грунт – конструкция» важно для уменьшения ущерба от землетрясений и для улучшения будущего сейсмического проектирования [3].

В работе [4] рассмотрены аналитическая реализация изоляции основания с взаимодействием «грунт – конструкция» на образце конструкции и разработка очень простого решения для добавления этих комбинированных эффектов в матрицы массы, демпфирования и жесткости конструкции.

Отметим, что в настоящее время основным способом сейсмозащиты мостов считается сейсмо-

изоляция опор за счет устройства податливых сейсмоизолирующих опорных частей, причем в мировой практике применяются резиновые или шаровые сегментные металлические опорные части. Эти устройства детально описаны в литературе [5; 6] и широко используются в практике строительства, но они в основном применялись в автомобильных мостах. В железно-дорожных мостах [7] предлагается использовать комбинированную опорную часть, которая обеспечивает упругое тангенциальное смещение с переходом в состояние сухого трения и гашение вертикальных колебаний. Также был предложен метод научно-технического обоснования эффективности сейсмоизоляции фрикционно-демпфирующих опорных частей [8].

Правильный сейсмический анализ и проектирование мостов имеют решающее значение, особенно в местах, подверженных высокой сейсмической активности. Сейсмостойкость мостов широко исследована в литературе, но влияние асинхронных движений грунта для малых и средних балочных мостов – это явление, которое не было адекватно учтено в мостовых нормах, и поэтому оно требует дальнейшего исследования. В работе [9] изучается влияние асинхронного движения грунта на сейсмическую реакцию балочных мостов малой и средней общей длины с железобетонными колоннами с учетом землетрясений. Основным источником пространственной изменчивости колебаний грунта являлись различия в местных грунтовых условиях в основании трехпролетных (коротких) и семипролетных (средних) балочных мостов. Результаты также показали, что критические требования сконцентрированы в местах

изменения состояния грунта, что указывает на повышенную чувствительность к сейсмическим воздействиям в определенных местах, которые не были бы учтены типичной процедурой, предписанной нормой, при наличии асинхронного движения грунта.

Последствия землетрясений показали, что одними из уязвимых элементов мостов являются их опоры. Для предотвращения разрушения опор вследствие воздействия землетрясения используются изоляторы в качестве опорной части моста. В недавнем прошлом численные и экспериментальные исследования полномасштабных изоляторов привели к значительному усовершенствованию методов сейсмоизоляции мостовых сооружений. В работах [10; 11] предлагается упрощенная процедура для оптимизации систем изоляции для мостовых конструкций. Сейсмический отклик спроектированной для примера конструкции исследуется с помощью нелинейного анализа временной истории, учитывается эффективный вклад нелинейного гистеретического поведения изоляторов и упругой реакции опор.

При сильных землетрясениях между главными пролетными строениями и опорами могут возникать проскальзывания. Это приводит к чрезмерному продольному смещению пролетных строений и разрушению мостов. Большие мосты в горных районах с высокой интенсивностью легко выходят из строя. В [12; 13] исследовано влияние удерживающих опор, расстояний между деформационными швами пролетного строения на сейсмические характеристики длинных мостов. Программное обеспечение ABAQUS было использовано для моделирования динамического анализа моста с учетом

упругопластического эффекта в опорах и пролетных строениях. Для анализа динамической реакции больших мостов были выбраны сейсмические волны El-Centro, Northridge и Taft. Влияние количества удерживающих опор на динамическую характеристику показало, что внутреннее усилие в нижней части опоры увеличивалось для каждой дополнительной удерживающей опоры. Кроме того, полученные результаты показали, что продольная против надвигной жесткость моста увеличивается с увеличением количества удерживающих опор, что позволяет снизить максимальное относительное смещение пролетных строений моста в продольном направлении.

В работе [14] предложена упрощенная модель основания для расчета опор больших мостов на скальных основаниях. Для построения модели использованы передаточные функции упругого полупространства. Особенностью модели является одновременный учет сдвиговых и поворотных колебаний фундамента, при этом сдвиговые колебания моделируются демпфером вязкого типа, а поворотные – гистерезисным. Предложена методика расчета опоры с учетом двух типов демпфирования в основании.

Расчет мостов и путепроводов на воздействие землетрясений с существующими их записями позволяет анализировать их напряженно-деформированное состояние [15-17]. Проведенные расчеты показывают, что пролетное строение и опоры моста имеют завышенный запас прочности для 8-балльного землетрясения по МСК-64.

В настоящей статье на примере расчета трехпролетного железобетонного железнодорожного

моста на реальные сейсмические воздействия произошедших землетрясений показано влияние податливости и вязкости основания на сдвиговые усилия в опорах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сейсмические волны состоят из вертикального и двух горизонтальных смещений, мосты также имеют три измерения. Пролетные строения железобетонных железнодорожных мостов часто состоят из балок поперечного сечения различной формы. Остальные их конструктивные элементы имеют разные деформационные свойства и связаны друг с другом эксцентриситетом. Поскольку задача является математически сложной, для ее решения используются численные методы. Мосты сложной конструкции разбивают на элементы и узлы с помощью метода конечных элементов [18-20].

Конструктивные элементы моста испытывают одновременно сжатие-растяжение, изгиб, кручение или сжатие-растяжение, сдвиг, кручение или безмассовое (массу которого можно не учитывать) сжатие-растяжение, сдвиг, повороты. В определенных точках могут располагаться сосредоточенные массы. В работе каждый тип конструктивных элементов заменен соответствующей конечно-элементной моделью. Дискретизируя элементы моста методом конечных элементов, получаем следующую систему простых дифференциальных уравнений [21]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\}. \quad (1)$$

Начальные условия получаются из решения статической задачи:

$$\{u(t)\}_{t=0} = \{u(0)\}, \{\dot{u}(t)\}_{t=0} = \{0\}, \quad (2)$$

где $\{u(t)\}$ – вектор абсолютных перемещений узловых точек конечно-элементной модели конструкции. Для нелинейных задач матрицы $[M]$, $[C]$, $[K]$ зависят от вектора абсолютного перемещения, в $\{P(t)\}$ входят заданное движение грунта и действующие силы. Движение грунта задается в виде записей акселерограмм [21; 22]. Матрица демпфирования строится по способу Рэлея в следующем виде [21]:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]. \quad (3)$$

Здесь коэффициенты α и β определяются на основе экспериментальных данных по соотношениям:

$$\beta = \frac{\gamma}{\omega_1 + \omega_2};$$

$$\alpha = \gamma\omega_1 \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2}\right); \quad \gamma = \frac{\delta}{\pi}, \quad (4)$$

где δ – логарифмический декремент затухания колебаний конструкции; ω_1 , ω_2 – частоты двух характерных форм колебаний [21].

Граничные условия ставятся на тех местах, которые непосредственно связаны с грунтом, этими местами являются береговые опоры и фундаменты промежуточных опор:

– полное (три перемещения и три поворота) закрепление к грунту;

– частичное закрепление к грунту, в этом случае отдельные компоненты перемещений и поворотов закрепляются к грунту, то есть движутся по заданному закону движения грунта, а по остальным направлениям соответствующие силы и моменты сил равны нулю;

– учет податливости грунта входит в систему как безынерционный конечный элемент.

Для решения приведенной выше системы уравнений (1) при условиях (2) применяется неявный метод конечных разностей Ньюмарка [23]. В методе Ньюмарка используются значения скоростей и ускорений, в том числе их значения в заданной сейсмической волне. Прямое задание оцифрованных сейсмограмм при вычислении скоростей и ускорений приводит к грубым ошибкам. Поэтому сейсмическая волна задается в ускорениях, затем скорости и смещения вычисляются формулами Ньюмарка. Для обеспечения проведения вычислений с меньшим шагом по времени по сравнению с шагом оцифрования используется сплайн Эрмита.

Взаимодействие опор моста с грунтом принимается по модели Винклера, и его жесткость рассчитывается по поверхности свай, контактирующей с грунтом. В расчетах учитывается податливость грунтового основания путем приведенной жесткости и демпфирования. Коэффициенты жесткости и демпфирования вычисляются с учетом размера поверхности контакта для каждой сваи и каждого фундамента по отдельности. Для фундаментов в начале и конце моста коэффициенты жесткости по трем направлениям взяты равными $14,76 \cdot 10^7$ Н/м. Для фундамента под промежуточными опорами эти коэффициенты равны: вертикальная жесткость грунта — $14,4124 \cdot 10^7$ Н/м; горизонтальная жесткость грунта — $24,17 \cdot 10^7$ Н/м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера с целью учета сейсмостойкости железнодорожного моста, длина которого составляет 64,6 метра, расположенного на перегоне ст. Куюмазор — ст. Бухара (ПК 39506+45) на участке высокоскоростной электрифицированной железной

дороги Навои – Бухара, был проведен расчет программой ШАРК [21] на основе реальных записей землетрясений.

Железнодорожный мост состоит из трех пролетов ($16,5 \times 23,6 \times 16,5$ м). В железобетонном железнодорожном мосту использованы четыре типовые балки, каждая по 16,5 метра, и две типовые балки, каждая по 23,6 метра с поперечным сечением в форме тавра. Конструкция моста состоит из множества элементов, таких как опоры, опорные части, ригели, пролетные строения и т.д. Опора и опорная часть являются самыми уязвимыми элементами мостового сооружения, поэтому для опорной части используют сейсмоизолирующие устройства. Опорные части сделаны из стали. Использовались тангенциальные и секторные опорные части. Опорная часть моделируется в виде конечного элемента, работающего на растяжение-сжатие, сдвиг по двум направлениям и кручение. Общее количество промежуточных опор на сваях — 8 шт. Размеры: высота — 3 м, поперечное сечение — диаметр 1,22 м. По способу взаимодействия с грунтом: свая, длиной 17 м, несущие проектную нагрузку за счет сил бокового трения.

Для дискретизации железнодорожного моста был разбит на 101 конечный элемент с учетом работы каждого типа конечного элемента, количество узловых точек 91. Вычисления проводились по неявной схеме с шагом по времени 0,001 с, потеря энергии учитывается в форме Рэлея. Типы характеристик конечных элементов — 13 различных типов — были даны через соответствующие порядковые номера. Количество соединений с эксцентритетом — 38.

Результаты расчета железнодорожного моста получены на основании реальной записи Газлийского (Узбекистан) землетрясения от 17.05.1976, интенсивность более 9 баллов по шкале MSK-64 [22], максимальные горизонтальное и вертикальное: ускорения — $7,22$ м/с² и $6,7$ м/с², $13,163$ м/с²; скорости — $0,62$ м/с и $0,53$ м/с, $0,57$ м/с; перемещения — $0,18$ м и $0,17805$ м, $0,216664$ м; шаг оцифрования — $0,005$ с; продолжительность — 28 с.

Было исследовано поведение рассматриваемого моста во время землетрясения. Рассматривались два разных случая: в первом не учитывалась податливость грунта, во втором учитывалась податливость грунта.

Ниже приведены результаты расчетов при учете вязкости грунта, равной $\beta = 0,012$ с⁻¹.

Расчеты показали, что абсолютное вертикальное перемещение нижней части опоры с учетом податливости грунта составило: максимальное значение $0,215956$ м при $t = 15,685$ с; минимальное значение $-0,11962$ м при $t = 18,446$ с.

Абсолютное горизонтальное перемещение по главной оси моста нижней части опоры с учетом податливости грунта составило: максимальное значение $0,157544$ м при $t = 16,148$ с; минимальное значение $-0,17849$ м при $t = 18,345$ с.

Абсолютное горизонтальное перемещение в поперечном направлении нижней части опоры с учетом податливости грунта составило: максимальное значение $0,142272$ м при $t = 16,493$ с; минимальное значение $-0,18276$ м при $t = 17,529$ с (рис. 1).

Из этих результатов видно, что влияние деформации грунта на максимальные значения пере-

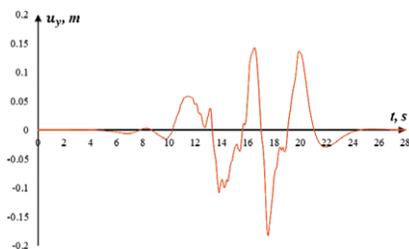


Рисунок 1. Боковое перемещение опор и грунта (по оси Oy) во времени с учетом податливости грунта

мещений нижней части опоры незначительно, однако они существенно влияют на возникающие усилия и моменты сил в конструкции.

В табл. 1 представлены результаты расчетов изменения поперечных усилий в нижних элементах опор при землетрясении Газли для случаев без учета и с учетом податливости грунта.

В расчетах было принято, что торцы опорных частей жестко закреплены к ригелям и соответствующим пролетным строениям с учетом эксцентритетов, поэтому в статическом состоянии вертикальное усилие больше в опорах, стоящих под пролетными строениями длиной 16,5 м, чем в опорах, стоящих под пролетными строениями длиной 23,6 м. Учет податливости осно-

вания изменяет это состояние (см. табл. 1).

Из анализа табл. 1 приходим к следующему выводу: учет податливости грунта позволяет уменьшить поперечное усилие в опорах моста в 1,5–2 раза.

Из рис. 2 можно увидеть влияние податливости грунта на динамический процесс вертикальных усилий в нижних элементах опор железнодорожного моста. Учет податливости основания моста приводит к уменьшению максимального значения вертикальных усилий в среднем в 1,5 раза и сглаживанию высокочастотных составляющих.

Таблица 1. Поперечные усилия в нижней части опорных элементов

Наименование элемента		Вертикальное усилие (Н)		Горизонтальное усилие (по оси Oy) (Н)		Горизонтальное усилие (по оси Oz) (Н)	
		Статика	Динамика	Статика	Динамика	Статика	Динамика
Не учитывалась податливость грунта							
Элемент 26	Опора под пролетное строение 16,5 м	-799760	-5302800	-7565,5	-1179100	-202030	-2317600
Элемент 27	Опора под пролетное строение 23,6 м	-602460	-4348900	-9876,6	-1205300	-201900	-2312200
Учитывалась податливость грунта							
Жесткость грунта		$14,4124 \cdot 10^7$ Н/м		$24,17 \cdot 10^7$ Н/м		$24,17 \cdot 10^7$ Н/м	
Элемент 26	Опора под пролетное строение 16,5 м	-686780	-3126300	-6300,2	-262130	-93765	-588230
Элемент 27	Опора под пролетное строение 23,6 м	-715350	-3176600	-6966,1	-512630	-93718	-579240

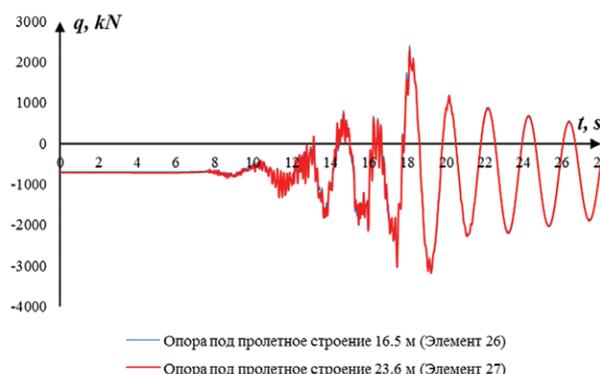
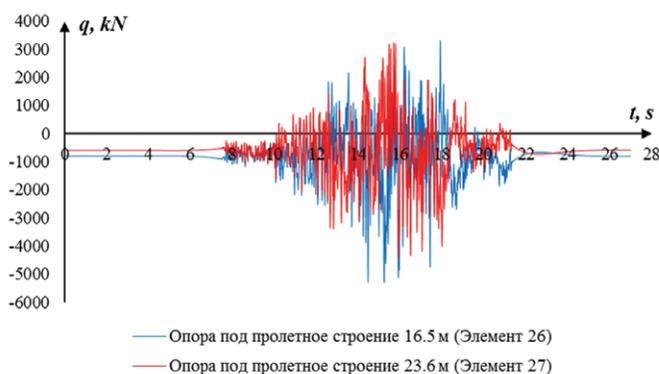


Рисунок 2. Изменение по времени вертикального усилия в опорных элементах без учета (слева) и с учетом податливости грунта (справа)

Для исследования влияния характеристик грунта под фундаментами в начале и конце моста, а также под промежуточными опорами были изменены коэффициенты жесткости грунта: уве-

личены в 2 раза ($29,52 \cdot 10^7$ Н/м и $28,8248 \cdot 10^7$ Н/м) по сравнению со значениями $14,76 \cdot 10^7$ Н/м и $14,4124 \cdot 10^7$ Н/м.

В табл. 2 представлены результаты расчетов железнодорож-

ного моста по записям реальных сейсмограмм опасного землетрясения.

Из табл. 2 видно, что жесткость грунта под промежуточными опорами моста влияет на мак-

Таблица 2. Зависимость поперечного усилия в опорном элементе железнодорожного моста от податливости грунта при землетрясении Газли

Наименование элемента		Вертикальное усилие (Н)		Горизонтальное усилие (по оси Oy) (Н)		Горизонтальное усилие (по оси Oz) (Н)	
		Статика	Динамика	Статика	Динамика	Статика	Динамика
Учитывалась податливость грунта							
<i>Жесткость грунта</i>		$28,8248 \cdot 10^7$ Н/м		$48,34 \cdot 10^7$ Н/м		$48,34 \cdot 10^7$ Н/м	
Элемент 26	Опора под пролетное строение 16,5 м	-691140	-5431500	-7257,9	-212800	-111590	-693430
Элемент 27	Опора под пролетное строение 23,6 м	-707520	-5466500	-8068,9	-583000	-111540	-673410

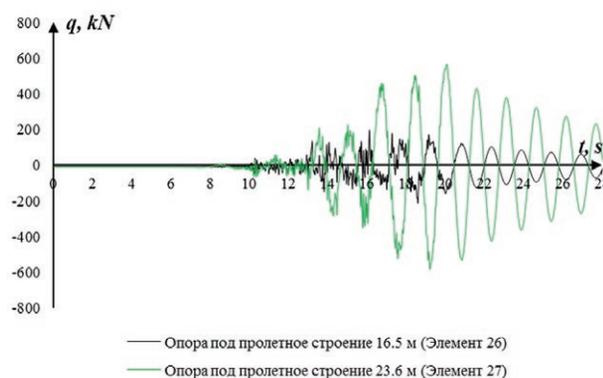
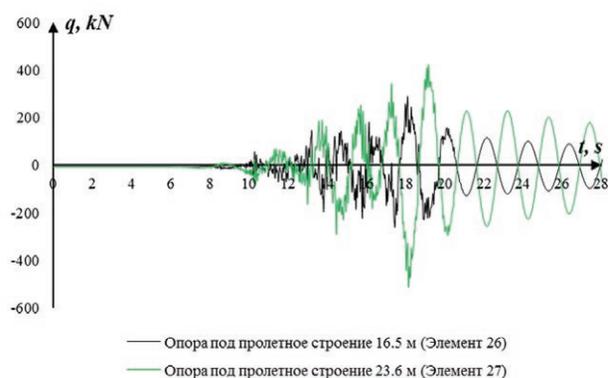


Рисунок 3. Изменение сдвиговых усилий (по оси Oy) по времени в опорных элементах для случаев вычисленной жесткости грунта (слева) и увеличенной жесткости грунта в 2 раза (справа)

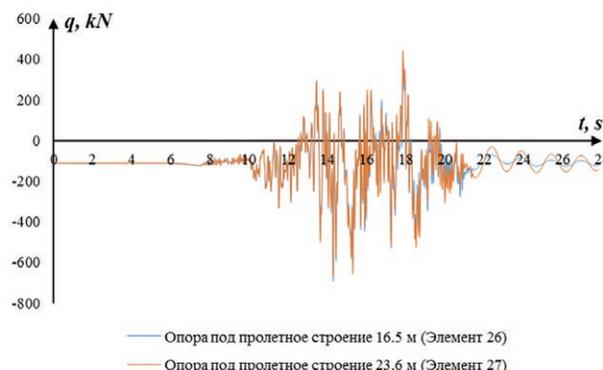
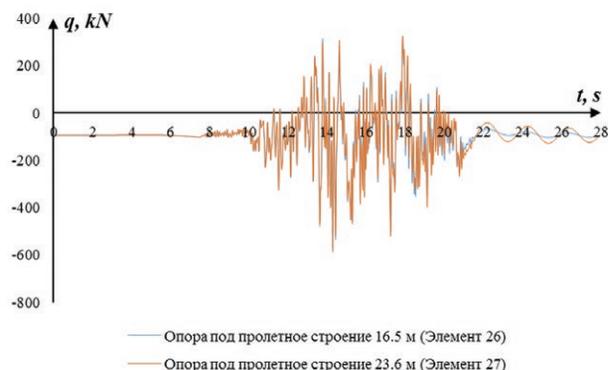


Рисунок 4. Изменение сдвиговых усилий (по оси Oz) по времени в опорных элементах для случаев вычисленной жесткости грунта (слева) и увеличенной жесткости грунта в 2 раза (справа)

Таблица 3. Изменение поперечного усилия в опорных элементах при разных значениях коэффициента вязкости грунта

Наименование элемента		Вертикальное усилие (Н)		Горизонтальное усилие (по оси Oy) (Н)		Горизонтальное усилие (по оси Oz) (Н)	
		Статика	Динамика	Статика	Динамика	Статика	Динамика
Вязкость грунта $\beta = 0,05 \text{ с}^{-1}$							
Элемент 26	Опора под пролетное строение 16,5 м	-686780	-2681400	-6300,2	-229440	-93766	-646930
Элемент 27	Опора под пролетное строение 23,6 м	-715350	-2701500	-6966,1	-437070	-93719	-638710
Вязкость грунта $\beta = 0,1 \text{ с}^{-1}$							
Элемент 26	Опора под пролетное строение 16,5 м	-686780	-2234700	-6300,7	-207750	-93766	-761120
Элемент 27	Опора под пролетное строение 23,6 м	-715350	-2368100	-6966,5	-349940	-93719	-767040
Вязкость грунта $\beta = 0,2 \text{ с}^{-1}$							
Элемент 26	Опора под пролетное строение 16,5 м	-686780	-2212600	-6300,8	-176620	-93766	-1008100
Элемент 27	Опора под пролетное строение 23,6 м	-715350	-2339700	-6966,7	-241100	-93719	-1012800

симальные по модулю значения вертикального усилия в опорах железнодорожного моста. Это объясняется тем, что изменение жесткости грунта приводит к изменению частот собственных колебаний конструкции в целом, а также сейсмические волны землетрясений имеют свои преобладающие частоты.

На рис. 3 и 4 показаны результаты расчетов изменений сдвиговых усилий в элементах опоры во времени при землетрясении Газли для случая увеличения в 2 раза коэффициентов жесткости грунта.

Как видно из рис. 3 и 4, податливость грунта существенно влияет на максимальные значения сдвиговых усилий на опорных элементах моста.

Было исследовано сдвиговое усилие моста для случаев изменения коэффициента вязкости грунта. В расчетах использованы значения коэффициента вязкости: $\beta = 0,05 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 0,1 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 0,2 \text{ с}^{-1}$.

Из анализа табл. 3 приходим к выводу, что вязкость грунта также влияет на усилия в опорах моста. С увеличением значения коэффициента вязкости максимальные значения вертикальных и горизонтальных в поперечном направлении к главной оси моста усилий уменьшаются, а усилия в направлении главной оси увеличиваются. Это связано с направлением распространения сейсмической волны, которое совпадает с главной осью моста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчетов, полученных на основании реальных записей Газлийского землетрясения, сейсмостойкости железнодорожного моста общей длиной 64,6 м, расположенного на участке железной дороги Навои — Бухара, приходим к выводу:

1. Учет коэффициента вязкости грунта позволяет существенно уменьшить поперечное усилие в опорах моста.

2. Также учет податливости грунта позволяет существенно уменьшить поперечное усилие в опорах моста. Учет податливости грунта приводит к уменьшению в 1,5–2 раза максимальных значений поперечных усилий в опорах моста во время землетрясения.

3. Жесткость грунта под промежуточными опорами моста может увеличить или уменьшить максимальные по модулю значения усилий в опорах железнодорожного моста. Это объясняется тем, что изменение жесткости грунта приводит к изменению частот собственных колебаний конструкции в целом, также сейсмические волны от землетрясений имеют свои преобладающие частоты. ■

Список литературы

1. Scawthorn Ch., Kramer S. L. Geotechnical Earthquake Considerations // Bridge Engineering Handbook. Second edition, 2014, p. 1–52.
2. Yuyi Zhang, Joel P. Conte, Zhaohui Yang, Ahmed Elgamal, Jacobo Bielak, Gabriel Acero. Two-Dimensional Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Bridge-Foundation-Ground System // Earthquake Spectra, 2008, Volume 24, No. 2, p. 343–386.
3. Zhang T., Chou N., Moghaddasi M. A parametric study of nonlinear soil-structure interaction effects on structural response in far-field earthquakes // Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Pacific 6–8 November 2015, Sydney, Australia.
4. Arcan Yanik, Yalcincan Ulus. Soil-Structure Interaction Consideration for Base Isolated Structures under Earthquake Excitation // Buildings, 2023.
5. Белаш Т. А., Уздин А. М. Железнодорожные здания для районов с особыми природно-климатическими условиями и техногенными воздействиями // Учебник для вузов ж. д. транспорта. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 372 с.
6. Хучбаров З. Г. Сейсмоизоляция автодорожных мостов // Фрунзе, КиргизНИИ. – 1986. – 58 с.
7. Кузнецова И. О., Уздин А. М., Долгая А. А., Фрезе М. В., Шульман С. А. Обеспечение сейсмостойкости железнодорожных мостов // Наука и транспорт. Транспортное строительство. – 2012. – № 4. – С. 43–47.
8. Уздин А. М., Мажиев Х. Н., Андреев Б. А., Андреева Е. И. Обеспечение сейсмостойкости железнодорожных мостов на основе демпфирующей сейсмоизоляции с применением фрикционно-подвижных болтовых соединений для обеспечения сейсмостойкости и их программная реализация в SCAD office // Земля России. – 2018. – № 77. – 175 с.
9. Jhordy Rodríguez, Saqib Khan, Miah Mohammed Riyadh, Dan Bruton, M. Shahria Alam. Assessment of the seismic behavior of short-to-medium overall length girder bridges under asynchronous ground motions // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, Volume 162.
10. Furinghetti M., Pavese A. Definition of a Simplified Design Procedure of Seismic Isolation Systems for Bridges // Structural Engineering International, 2020, p. 381–386.
11. Furinghetti M., Pavese A. Assessment of the Seismic Response of Isolated Bridges under extra-stroke displacement demands // IABSE Symposium 2019 Guimarães: Towards a Resilient Built Environment – Risk and Asset Management, 2019, March 27–29, p. 251–257.
12. Yuhu Luo, Yongguang Li, Xu Wang, Guangping Lu. Influence of Restraint Piers on the Seismic Performance of Long Bridges with Equal-Height Piers // Mathematical Problems in Engineering, 2021.
13. Sha B., Tao T., Xing C. Pounding analysis of isolated girder bridge under nonpulse and pulse-like earthquakes // Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, Volume 34, No. 4.
14. Кузнецова И. О., Уздин А. М., Шермухамедов У. З., Ван Х. Использование упругого полупространства для моделирования оснований при оценке сейсмостойкости больших мостов // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – № 3. – С. 91–95.
15. Shermukhamedov U., Mirzaev I, Karimova A., Askarova D. Calculation of the stress-strain state of monolithic bridges on the action of real seismic impacts // 1st International Scientific Conference «Modern Materials Science: Topical Issues, Achievements and Innovations», 2022, Mart 4–5, p. 314–321.
16. Шермухамедов У. З., Абдухатова М. А. Современное состояние и перспективы проектирования и строительства городских транспортных сооружений Республики Узбекистан // Путевой Навигатор. – 2018. – № 36–37. – С. 24–28.
17. Шермухамедов У. З., Каримова А. Б., Зокиров Ф. З., Абдуллаев А. Р., Обруев Х. М. Обоснование эффективности неразрезных железобетонных мостов и путепроводов при эксплуатации // Путевой Навигатор. – 2023. – № 52 (78). – С. 4–10.
18. Mirzaev I., Askarova D. S. Zilzila ta'sirida sirpanuvchan po'ydevor ustidagi ko'priknig siljish tebranishlarini sonli modellashtirish // «Matematik modellashtirish va axborot texnologiyalarining dolzarb masalalari» xalqaro ilmiy – amaliy anjumani tezislari to'plami, To'plam No. 2, Nukus, 2–3 may 2023 y., 97–98 b.
19. Askarova D. S., Mirzaev I. Temir yo'l ko'priknig zilzila ta'sirida fazoviy tebranishi // The scientific journal of vehicles and roads, 2022, Issue 2, p. 46–57.
20. Mirzaev I., Askarova D. Spatial oscillations of a railway bridge under the impact of a real earthquake // V Central Asian conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 2022, p. 91–95.
21. Рашидов Т. Р., Кузнецов С. В., Мардонов Б. М., Мирзаев И. Прикладные задачи сейсмодинамики сооружений. Книга 2. – Ташкент: Навруз, 2021. – 172 с.
22. Ambraseys N. N., Smit P., Douglas J., Margaris B., Sigbjörnsson R., Ólafsson S., Suhadolc P., Costa G. Internet site for European strong-motion data. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2004, No. 45 (3).
23. Chopra A. K. Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering. Fourth edition // University of California at Berkley, 2012, 944 p.