

## ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТОННЕЛЕЙ ИЗ ОПУСКНЫХ СЕКЦИЙ

*Е. Н. Курбацкий, Нгуен Ван Хунг*

*Московский государственный университет путей сообщения (Россия)*

Рассматриваются виды природных сейсмических воздействий на тоннели из опускных секций: разжижение грунтов, сейсмические разломы, колебания грунтов и их деформации. Рассмотрены виды аналитических моделей при проектировании опускных тоннелей на сейсмические воздействия и их особенности.

**Ключевые слова:** *оценка сейсмических воздействий, разжижение грунтов, сейсмические разломы, колебания грунтов и их деформации, тоннели из опускных секций.*

Are discussed the types of natural seismic impacts on tunnels from the Sch-NBR of sections: razzirjanje soils, seismic faults, vibrations of soils and their deformation. Are discussed the types of analytical models in the design of tunnels and lowering the seismic load and their features.

**Keywords:** *evaluation of seismic effects, soil liquefaction, seismic-dynamic faults, vibrations of soils and their deformation, tunnels of movable sections.*

Сейсмические воздействия на подземные сооружения можно разделить на две категории [1]: колебание грунта и разрушение массива грунта, окружающего тоннели (разжижение и разлом).

В статье рассмотрены некоторые виды природных воздействий на тоннели из опускных секций.

### **Разжижение грунтов**

Разжижение грунта во время землетрясения – процесс, который приводит к потере прочности или жесткости почвы. При расположении тоннелей, в грунтах ниже уровня грунтовых вод, существует опасность разжижения грунтов. Эффекты разжижения проявляются следующим образом:

- увеличивается давление на тоннельную обделку, что может привести к разрушению тоннеля;
- тоннели могут всплывать или, наоборот, погружаться в грунт (в зависимости от соотношения веса тоннеля и веса замещенного тоннелем грунта);
- тоннели могут перемещаться в поперечных направлениях – при расположении ниже наклонных слоев;
- тоннели также могут смещаться в поперечных направлениях, если они расположены в разжижаемых грунтах, которые могут перемещаться в пространстве.

На рис. 2 представлен процесс происхождения разжижения грунтов [2–5]. Некоторые повреждения подземных сооружений в Японии в результате разжижения грунтов показаны на рис. 1.



Рис. 1. Повреждения подземных сооружений из-за разжижения [12]

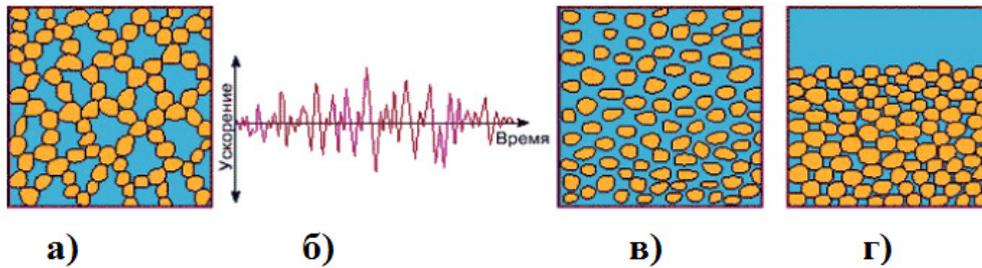


Рис. 2: а) рыхлый водонасыщенный песок до землетрясения; б) сейсмический толчок; в) момент разжижения; г) уплотненный песок после обжатия воды и оседания частиц

В разжижаемом грунте подводный тоннель может всплывать, потому что собственный вес грунта намного больше, чем у тоннеля. Кроме этого разжижение обычно вызывает большую осадку и перемещения основания [7, 13]. Для оценки возможности разжижения грунтов существует несколько методов, которые включают процедуры на основе стандартных тестов проницаемости и размер составляющих зерен; и процедуры на основе динамических трехмерных испытаний на сжатие или на сдвиг.

### Разлом

Если активный разлом пересекает тоннель, есть опасность, деформаций сдвига тоннельной обделки при воздействии от умеренного землетрясения до сильного землетрясения. Смещения при таких деформациях могут варьироваться от нескольких сантиметров до размеров, превышающих два и более метра. Во многих случаях эти перемещения сосредоточены в узкой зоне вдоль разлома. Активные разломы могут вызвать серьезные повреждения тоннелей. Если невозможно избегать пересечения разломов, то приняв приспособление к перемещениям: расширенные выработки, превышающие размеры тоннельной обделки, заполненные сжимаемым и способным к разрушению материалом, возможно использовать обделки из пластичного материала. В случаях когда величина смещения в зоне разлома ограничена или ширина зоны сдвигов в разломе такова, что смещение постепенно рассеивается на расстоянии, выбор и проектирование прочной обделки, противостоящей смещению, может быть технически осуществим и оправдан. Конструкции, однако, могут быть подвержены большими осевыми и сдвигающими силами и изгибающим моментам.

Для расчета тоннелей на перемещения, возникающих в зонах разлома, можно использовать методики, разработанные для заглубленных трубопроводов. Три основных метода были разработаны для расчета протяженных заглубленных конструкций: метод New mark-Hall; метод Kennedy; метод финитных функций Фурье; метод конечных элементов [4, 5, 10–12]. Следует отметить, что метод конечных элементов является наиболее предпочтительным. Метод конечных элементов позволяет более точно описывать модель конструкции тоннеля и окружающего массива грунта. Тоннель моделируется конечными элементами, которые могут учитывать нелинейное поведение.



Рис. 3. Разлом. Колебание грунта и деформация

Колебание грунта относится к деформации земли, произведенной сейсмическими волнами, размножающимися через земную кору. Основные факторы, влияющие на повреждение, включают: форму, размеры и глубину сооружений; свойства окружающей почвы или скалы; свойства структуры; серьезность землетрясения [12, 13].

Деформация может быть довольно сложной из-за взаимодействия сейсмических волн с поверхностными мягкими отложениями и генерации поверхностных волн. В целях инженерного проектирования эти сложные режимы деформации упрощаются.

Деформации подземных сооружений при колебании грунтов можно разделить на два случая [14, 15]:

- осевые и боковые деформации (рис. 3);
- овализация (для тоннеля круглой обделки) и сдвиговая деформация (для тоннеля прямоугольной обделки) (рис. 4).

Осевые и боковые деформации развиваются в тоннеле, когда сейсмические волны распространяются либо параллельно, либо наклонно к оси тоннеля. Вертикальные деформации также присутствуют во время землетрясения.

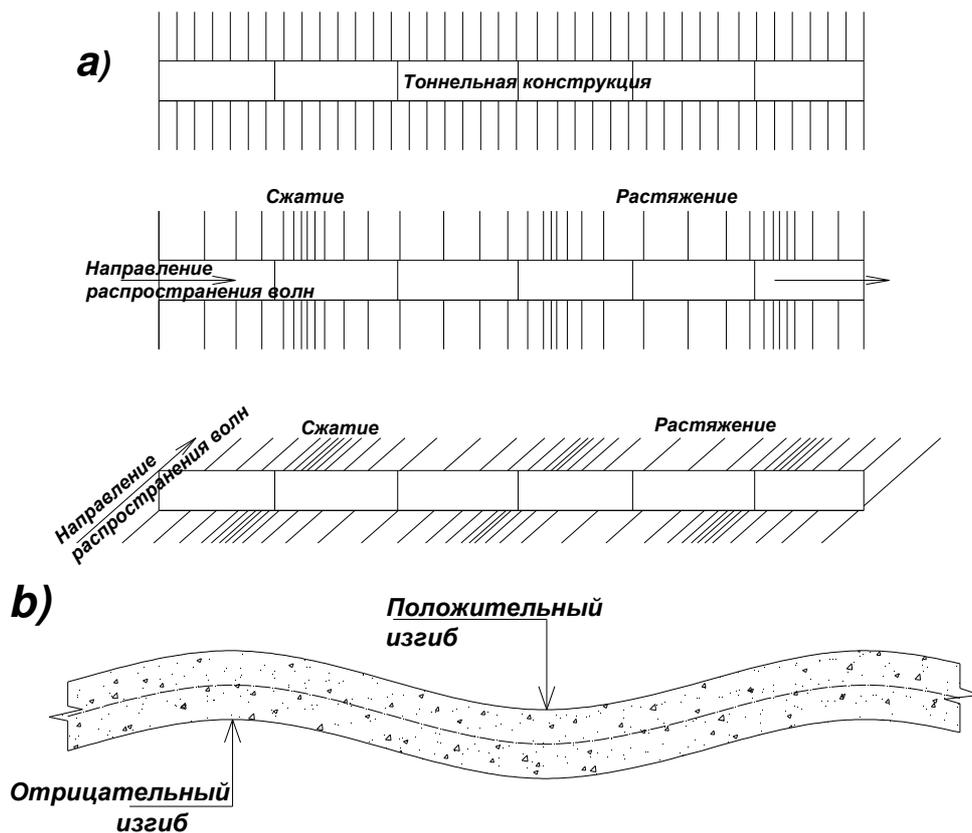


Рис. 3: а) сжатие-растяжение; б) продольный изгиб

Овализация и сдвиговая деформация развиваются в тоннеле, когда сейсмические волны распространяются либо перпендикулярно, либо почти перпендикулярно к тоннельной оси. При падении волн, так как размеры поперечного сечения тоннеля малы по сравнению с длинами сейсмических волн, колебания грунта производят сдвиговые деформации.

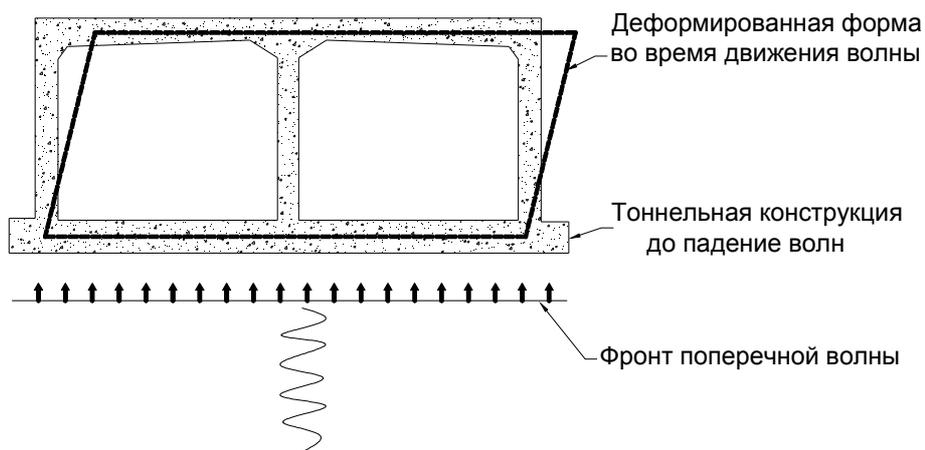


Рис. 4. Сдвиговая деформация. Анализ сейсмической опасности

Чтобы определить проектируемые значения землетрясения для конструкции в определенной области, анализ сейсмической опасности может быть выполнен детерминированным анализом (DSHA) и вероятностным анализом сейсмической опасности (PSHA) [6].

С DSHA соседние потенциальные источники землетрясения исследованы и с зонированием отношения, размер землетрясения на стройплощадке определен.

Для PSHA включены все источники землетрясения в области их вероятностных распределениях. Это приведет к построению сейсмической кривой опасности с распределением пикового значения ускорения (PGA) скальной основы, как функции повторения всех источников землетрясения. С этой кривой может быть определено проектирование землетрясения с определенным периодом возвращения. Это выполнено для территорий целого мира Организацией Объединенных Наций, карты размещены в свободном доступе в Интернете, и вход обеспечен местными органами власти.

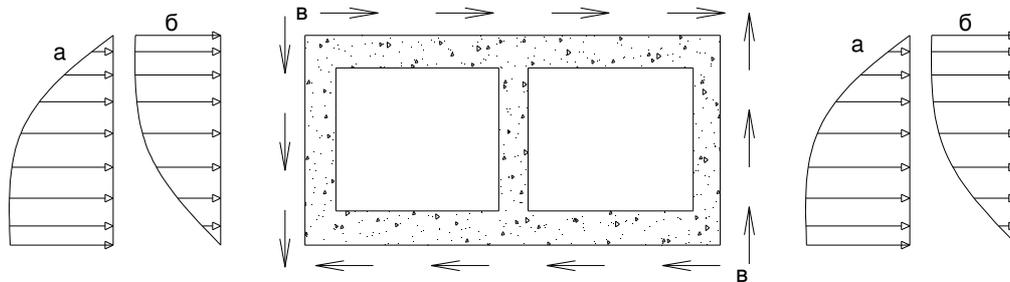
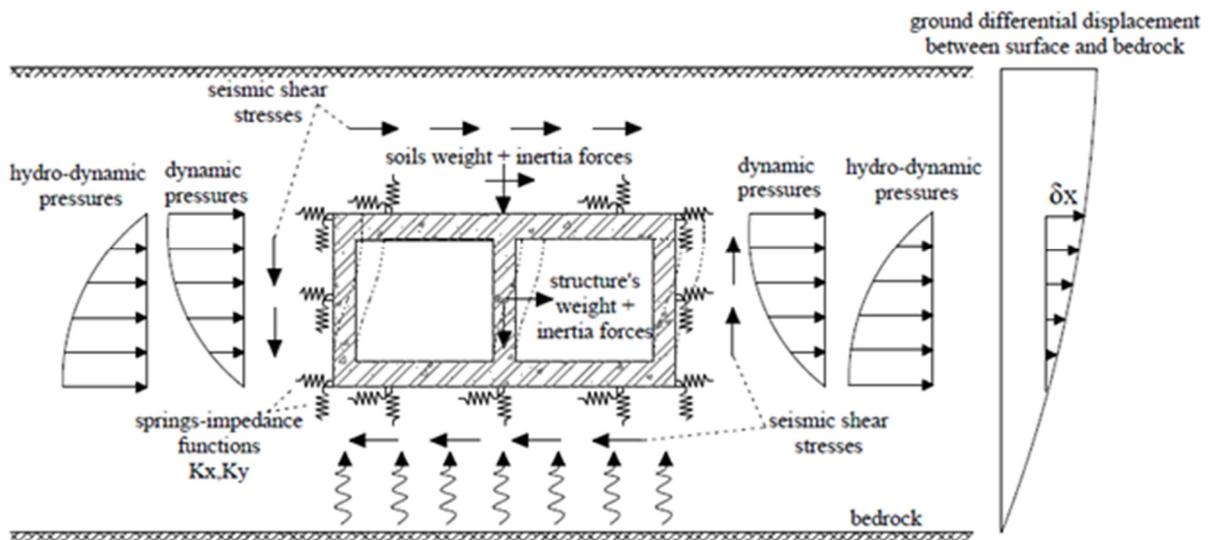


Рис. 5. Схема воздействия динамических нагрузок от среды: а) динамическая давление от воды; б) динамическое давление; в) касательное напряжение



Методы расчеты тоннелей на сейсмические воздействия

Проектирование сейсмостойкости подземных сооружений отличается от проектирования наземных сооружений. Наземные конструкции не только подвергаются возбуждениям грунтового массива, но и могут наблюдаться увеличения колебания в зависимости от собственных вибраций.

С внешней стороны тоннели ограничены окружающей средой. Следовательно, они не могут прогрессировать до значительной суммы деформаций, независимо от среды, и при этом они не могут быть подвергнуты увеличению вибрации [16, 17].

Чтобы предсказать поведение тоннельной структуры в метро в связи с землетрясением могут быть использованы различные модели [1].

*Аналитическая модель* описывает структуру тоннеля в виде бесконечной длинной упругой балки при поддержке со стороны упругого основания в виде упругих пружин (рис. 5, 6). Жесткость этих пружин зависит от модуля реакции грунтового массива. Сейсмические волны деформируют пружины грунтового массива, и тоннельная структура будет реагировать на это на основе собственной гибкости.

Если жесткость массива грунта, окружающего тоннельную обделку, мало отличается от жесткости тоннельной обделки, в качестве расчетной схемы можно использовать модель среды с полостью, ограниченной тоннельной обделкой. В этом случае деформации тоннельной обделки и контактирующего с ней массива грунта одинаковые. Этот метод применим, когда тоннели находятся в скальных породах. Этот же метод можно использовать и в тех случаях, когда жесткость материала отличается от жесткости окружающего массива, тогда в расчетной схеме необходимо учитывать эту разницу жесткостей.

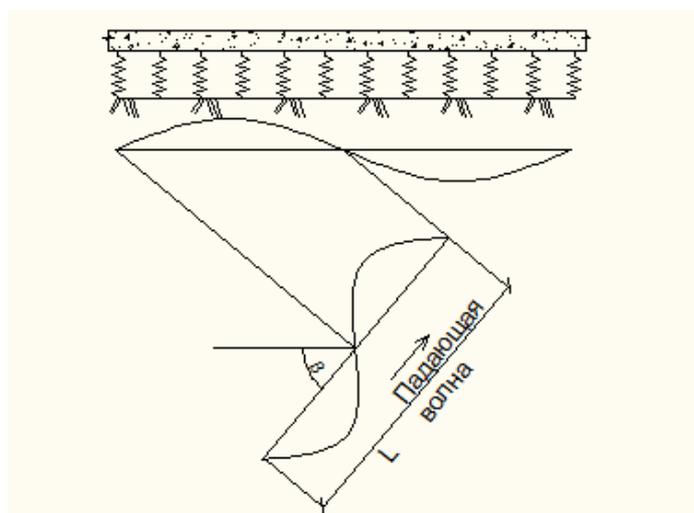


Рис. 6. Аналитическая модель

Ограничение этой модели в том, что балка (тоннельная обделка) моделируется непрерывно, что нереально для тоннеля из погруженных секций.

Вторая модель тоннельного поведения на землетрясения загрузки – «мульти-масса» модель. Для этой модели поверхность разделена на плоскости, перпендикулярным оси тоннеля (рис. 7). Каждая часть имеет массу и соединена с базовой грунтовой породой с помощью пружины и демпфера. Слой почвы над этой базовой породой вибрирует в режиме первого сдвига. Все части соединены друг с другом вдоль оси тоннеля с пружинами.

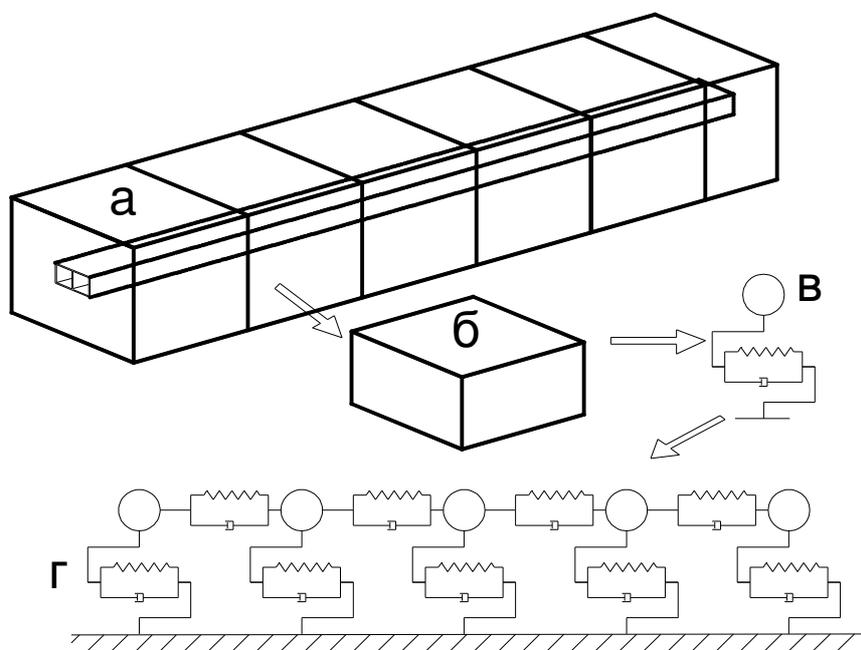


Рис. 7. Модель мульти-масс пружин: а) тоннельная конструкция и слоя массива грунта; б) одна часть массива грунта; в) схема массы и пружины; г) расчетный модель мульти-масс пружин

Конечно-элементной моделью является численная модель 3D – для прогнозирования поведения тоннеля в связи с сейсмической нагрузкой. В этой модели реакция тоннеля из погруженных секций в поверхностном слое вычисляются одновременно, в том числе и их взаимодействия. Единственным недостатком этого метода является сложность расчета; она нуждается в большом объеме памяти компьютера. Рассмотренные модели имеют свои особенности взаимодействия системы «грунт-конструкция» для работы полного тоннеля в сейсмической среде.

#### Список литературы

1. Kiyomiys O. Earthquake-resistant design features of immersed tunnels in Japan // Tunnelling and Underground Space Technology. 1995. Vol. 10, № 4. P. 463–475.
2. An Owners Guide to Immersed Tunnels, ITA Working group 11 for Immersed and Floating Tunnels // ITA Report № 007-Shotcrete for Rock support-a summary report on state of the art.
3. Trelleborg-Ginagasket. URL: <http://pdf.directindustry.com/pdf/trelleborg-ridderkerk/gina-gasket/23385-325709.html>
4. Trelleborg-Omega seals. URL: <http://pdf.directindustry.com/pdf/trelleborg-ridderkerk/gina-gasket/23385-325709.html>

5. Hideo Kimura, Hiroo Moritaka, Ichio Kojima. Development of Sandwich-Structure Submerged Tunnel Tube Production Method // Nippon steel technical report No. 86 July 2002.
6. Kiyomiya O. Flexible joints between elements for large deformation // (Re)Claiming the Underground Space, Vol. 1, pp. 329-334, Year 2003. By A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands, www.balkema.nl and www.szp.swets.nl
7. St John C. M., Zahrah T. F. Aseismic design of underground structures // Tunneling Underground Space Technol. 1987. № 2 (2). P. 165–197.
8. Kramer L.S. Geotechnical earthquake engineering. 1996.
9. Putten E. V. Seismic design of immersed tunnel. 2002.
10. Купчикова Н. В. Определение коэффициента постели по деформации свободного конца свай с использованием методики дискретного преобразования Фурье // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. Т. 4. № 1 (73). С. 206–209.
11. Курбацкий Е. Н., Купчикова Н. В., Сан Лин Тун. Соотношение между интегралом Фурье и спектрами ответов при оценке сейсмического воздействия на свайные фундаменты // Энергоресурсосберегающие технологии: Наука. Образование. Бизнес. Производство : сб.тр.V Междунар. науч.-практ. конф. (Астрахань, 24–28 окт. 2011 г.). С. 173–178.
12. Купчикова Н. В. Методика расчета свайных фундаментов с уширениями на сейсмические воздействия, основанная на свойствах изображения Фурье финитных функций // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 24–31.
13. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Т. 1 : пер. с англ. М. : Мир, 1987. 448 с., ил.
14. Dowding C. H., Rozen A. Damage to rock tunnels from earthquake shaking // J. Geotech. Eng. Div. 1978. ASCE 104 (GT2). P. 175–191.
15. St John C. M., Zahrah T. F. Aseismic design of underground structures // Tunneling Underground Space Technol. 1987. № 2 (2). P. 165–197.
16. Owen G. N. & Scholl R. E. Earthquake engineering of large underground structures // Report prepared for the Federal Highway Administration, FHWAIRD-801195, 1981.
17. Сейсмостойкое строительство зданий : учеб. пособие для вузов / И. Л. Корчинский, Л. А. Бородин, А. Б. Гроссман и др. М. : Высш. школа, 1971. 320 с.

УДК 627; 624.15; 624.157

## ТЕОРИЯ РАСЧЕТА ПРОГИБА ТОННЕЛЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ВДОЛЬ ОСИ ТОННЕЛЯ В ОДНОРОДНЫХ ГРУНТАХ

*Е. Н. Курбацкий, Нгуен Ван Хунг*

*Московский государственный университет путей сообщения (Россия)*

Разработана теория расчета на основе свойств финитной функции и преобразования Фурье по определению напряженного деформационного состояния тоннельной обделки на сейсмические волны, распространяющиеся вдоль оси тоннеля. Для определения реакции тоннеля при землетрясении упрощена модель расчета как статический поход с небольшой скоростью.

*Ключевые слова:* теория расчета, свойства финитной функции и преобразования Фурье, напряженно-деформационное состояние тоннельной обделки, сейсмические волны.