

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНСТРУКЦИИ И ГРУНТА ОСНОВАНИЯ НАКЛОННОГО МОСТА

А. ШАМСАБАДИ – д-р техн. наук, старший инженер-мостостроитель отдела инженерной сейсмологии предприятия Caltrans (Сакраменто, Калифорния, США).

Л. ЯН – д-р техн. наук, старший инженер-геотехник компании Arroyo Geotechnical (Анахейм, Калифорния, США).

Приведены результаты численного анализа, проведенного с целью моделирования взаимодействия грунта основания и конструкций наклонного моста под воздействием сейсмической нагрузки. Исследуемая конструкция представляет собой балочный коробчатый двухпролетный мост из предварительно-напряженного бетона с монолитными устоями и углом наклона 39° . Анализ проводился с помощью трехмерной нелинейной динамической конечно-элементной модели с использованием компьютерной программы SAP 2000. Взаимодействие настила моста и насыпей устоев моделировалось пружинной моделью, состоявшей из нелинейной пружины и упругой пружины с амортизатором для представления эффектов ближнего и дальнего поля, соответственно. В качестве исходных данных для представления колебательных перемещений грунта в конечно-элементной модели при моделировании применялись два профиля сейсмических ускорений с различными амплитудами импульсов скоростей.

ВВЕДЕНИЕ

Многие наклонные мосты получали серьезные повреждения при землетрясениях. Как неоднократно отмечалось исследователями (см., например [1]), особенностью реакции наклонных мостов на сейсмические нагрузки при сильных землетрясениях является их вращение. Значительный ущерб, причиняемый землетрясениями наклонным мостам, в основном вызван вращательными перемещениями настила моста при сейсмических воздействиях [2, 3]. Следовательно, для улучшения проектирования новых и модификации существующих мостов исследователю необходимо понимать механизмы реакции наклонных мостовых конструкций на динамические воздействия.

При традиционном проектировании для изучения реакции конструкций наклонных мостов на динамические воздействия используют реберно-стержневые модели. Однако при наличии в конструкции наклонных устоев

реакция моста по продольной оси связана с поперечными нагрузками в силу эффекта взаимодействия нагрузок в двух горизонтальных направлениях. Следовательно, в данном случае необходимо рассматривать динамическую нагрузку, состоящую минимум из двух компонентов. Для иллюстрации сказанного при моделировании взаимодействия грунта основания и сооружения представим трехмерную нелинейную конечно-элементную (FE) модель на примере исследования реакции на динамические воздействия конструкций эстакады на Пэйнтер Стрит, подвергшейся воздействию двух землетрясений со значительными импульсами скоростей.

Эстакада на Пэйнтер Стрит располагается в г. Рио Делл (штат Калифорния), который характеризуется высокой сейсмической активностью. Конструкция эстакады представляет собой балочный коробчатый двухпролетный мост из предварительно-напряженного бетона с двухколонными центральными наклонными устоями (с углом наклона 39°).

Длина моста составляет приблизительно 80,5 м, ширина – 15,8 м, длина пролетов – 44,5 и 36,3 м. Толщина настила моста – 1,73 м, высота колонн – приблизительно 7,3 м и средняя высота монолитных устоев – примерно 3,7 м. Западный (левый) устой имеет несущую перемычку из неопрена, а восточный (правый) устой имеет внизу штифтовую заделку, при этом оба устоя опираются на один ряд железобетонных свай.

В данной работе объектом исследования избрано моделирование нелинейного динамического взаимодействия грунта основания и сооружения в условиях вибрационного воздействия сильного землетрясения с высокими импульсами скоростей.

1. КОНСТРУКТИВНАЯ МОДЕЛЬ МОСТА

Авторами разработана трехмерная нелинейная конечно-элементная модель для анализа эстакады на Пэйнтер Стрит с использованием компьютерной программы SAP 2000. Настил моста моделировался с помощью оболочечных элементов с соответствующими конструктивными показателями, колонны моделировались как комплексные стержневые элементы с учетом трещин в поперечном сечении, а взаимодействие устоев и насыпи описывалось пружинными моделями. В основании колонн задавались штифтовые связи, а в верхней части – пластические шарниры. Модель моста (рис. 1) со штифтовыми сочленениями колонн была выбрана потому, что целью исследования являлось моделирование взаимодействия грунта основания и сооружения и влияния этого взаимодействия на работу конструкций моста в условиях сейсмической активности без учета сложностей, накладываемых свайным фундаментом.

2. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУНТА ОСНОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ УСТОЕВ МОСТА

Надземные конструкции и грунт основания наклонного моста представляют систему, работающую как единое целое. При этом динамическое поведение моста обусловлено взаимодействием его надземных конструкций и грунта в основании насыпей устоев [8, 9].

Поэтому в конечно-элементную модель был введен фрагмент, реалистично представляющий устой.

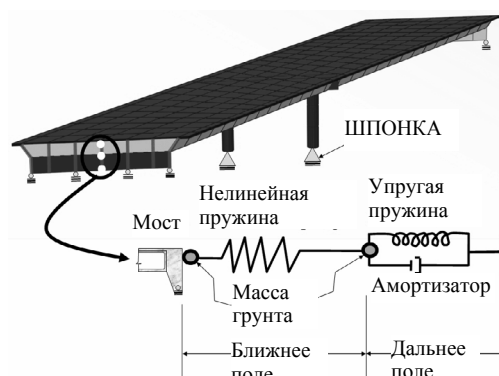
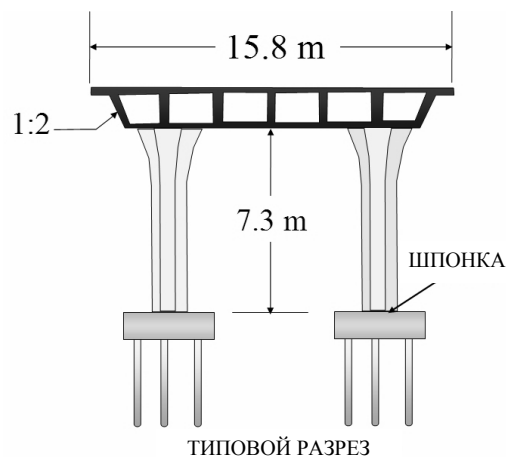


Рис. 1. Модель моста с монолитными устоями

В настоящем исследовании были приняты пружинные модели. В направлении наклона (т. е. в направлении, параллельном концам наклонного моста) была принята нелинейная пружинная модель, а перпендикулярно этому направлению – модель, показанная на рис. 2. Данная система состоит из промежуточного элемента 1 между настилом моста и засыпкой устоев, нелинейной пружины 2 для описания взаимодействия насыпи устоя и массива грунта в зоне пассивного отпора грунта (ближнее поле) и упругой пружины 3, соединенной с амортизатором для представления напряженно-деформированного состояния массива грунта и механизма рассеяния энергии по принципу упругого полупространства (дальнее поле). Первоначальное раскрытие промежуточного элемента задавалось равным

нулю для моделирования состояния монолитных устоев. Упругая пружина в зоне дальнего поля (в направлении, параллельном гасящему колебания амортизатору) была включена в расчетную схему при моделировании с использованием нелинейной пружины в зоне ближнего поля. Такая постановка задачи обозначалась как последовательное демпфирование для различения работ в зонах дальнего и ближнего полей. Работа упругой пружины в зоне дальнего поля базировалась на теории динамики упругих сред с предположением линейно-упругой работы из-за малых деформаций в зоне дальнего поля, что достаточно объективно представляет упругое полупространство.

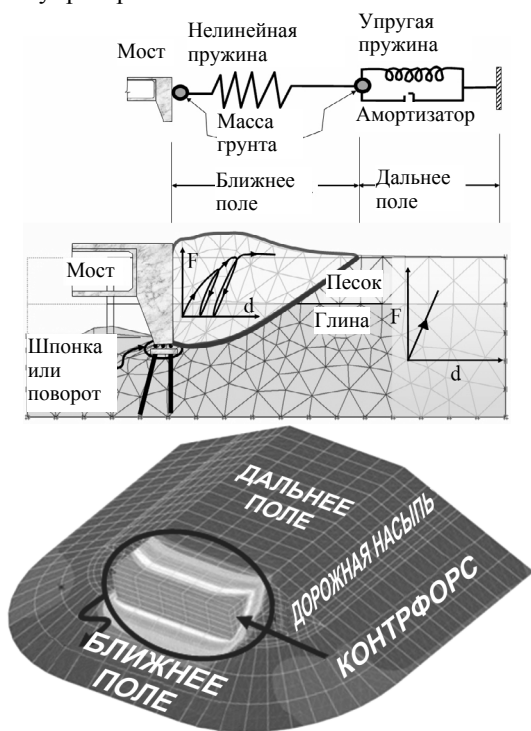


Рис. 2. Двух- и трехмерные модели устоев

Для описания работы нелинейных пружин устоев и определения границ зоны обрушения в ближнем поле применялась традиционная теория предельного равновесия, использующая мобилизованную логарифмическую спиральную поверхность обрушения и описание напряженно-деформированного состояния грунта [4]. Кроме того, для представления нелинейных пружин, моделирующих ком-

плекс насыпь–устой, использовались двух- и трехмерные нелинейные конечно-элементные модели. Результаты, полученные при использовании трехмерных нелинейных конечно-элементных моделей, были максимум на 20% выше, чем при использовании двухмерных моделей и моделей, основанных на методе предельного равновесия. Тем не менее, как показал анализ, благодаря значительному углу наклона и вращению настила общая реакция моста незначительно отличалась от результатов с использованием нелинейных пружин, полученных с помощью как двухмерных, так и трехмерных нелинейных конечно-элементных моделей.

Предыдущие исследования показали эффективность разработанных моделей устоев для исследования реакции мостов на сейсмическую нагрузку [5–7].

3. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ ГРУНТОВОГО МАССИВА

Основная цель исследования заключалась в моделировании взаимодействия грунта основания и сооружения, а также его влияния на общую динамическую реакцию конструкций наклонного моста, подверженного воздействию колебательных перемещений грунта во время землетрясения со значительными импульсами скоростей. Импульсы скоростей, зарегистрированные в журнале динамики колебаний грунтового массива, обычно связаны с эффектами направленности при землетрясении в зоне ближнего поля, которые являются более разрушительными (по сравнению с безимпульсным землетрясением). Двухкомпонентные серии данных по ускорению использовались в качестве исходных данных по перемещениям одновременно в продольном и поперечном направлениях. Исходные данные принимались на основе измерений колебательных перемещений по результатам двух землетрясений. Пиковые значения ускорений колебаний массива грунта, скоростей и перемещений, согласно двухкомпонентным сериям данных, приведены в таблице. Компоненты с максимальными импульсами скоростей прикладывались в продольном направлении.

Входные данные по параметрам перемещений

Место регистрации	Максимальные		
	ускорение g	скорость, см/с	перемещение, см
<i>Продольный компонент</i>			
Токарацу	0,69	86,35	16,75
Ренальди	0,80	156,70	26,00
<i>Поперечный компонент</i>			
Токарацу	0,69	68,35	26,70
Ренальди	0,46	65,84	17,25

На рис. 3 и 4 представлены значения ускорений колебаний массива грунта, скоростей и перемещений, характеризующие продольный компонент землетрясения 1995 г. в Кобэ, измеренные на сейсмостанции Токарацу, а также данные землетрясения 1994 г. в Нофридже, полученные на сейсмостанции Ренальди. Как видно из представленных данных, землетрясение в Ренальди имело более сильные импульсы скоростей, чем землетрясение в Токарацу.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Используя в качестве исходных данных две серии колебательных перемещений грунта, авторы проанализировали реакцию конечно-элементной модели наклонного моста. На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений в Токарацу и Ренальди.

Анализ результатов исследования (см. рис. 5, 6) показывает, что настил моста испытывает значительные поперечные перемещения. Правый остроугольный край перемещается в направлении, противоположном перемещению левого остроугольного края, что указывает на вращение настила моста вокруг вертикальной оси по часовой стрелке в момент удара настила о насыпь устоев.

Установлено, что землетрясение в Ренальди вызывает более сильное вращение, чем землетрясение в Токарацу, в силу более высоких импульсов скоростей.

На тупоугольных краях сила удара настила моста о насыпь устоев больше. Сила удара регистрируется примерно в течение первых 7 секунд перемещений. Из-за вращения настила моста грунты насыпи резко теряют контакт с устоями, при этом работа устоев ослабляется. Следовательно, пружины менее важны для

общей реакции конструкции наклонного моста на сейсмическое воздействие.

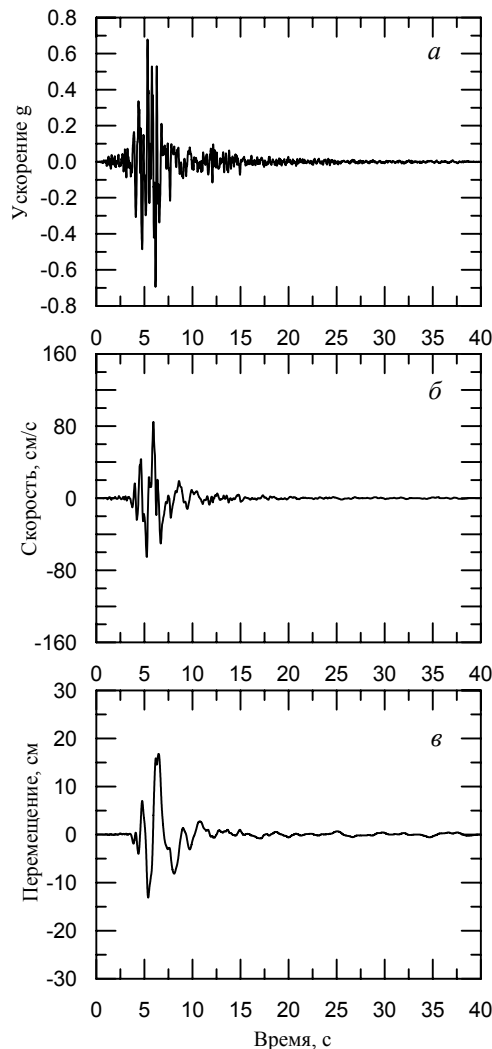


Рис. 3. Развитие во времени импульсов продольной компоненты по данным землетрясения в Токарацу: а – ускорение; б – скорость; в – перемещение

По результатам измерений в Токарацу сила воздействия больше, чем в Ренальди, из-за более сильного взаимодействия между грунтами насыпи и настилом моста, обусловленного меньшим вращением.

Устой моста на тупоугольных краях имеют большие перемещения, характеризующиеся петлей гистерезиса, по данным измерений в Токарацу по сравнению с данными измерений в Ренальди, видимо, в силу более длительного периода возбуждения и сравнительно малых величин вращения.

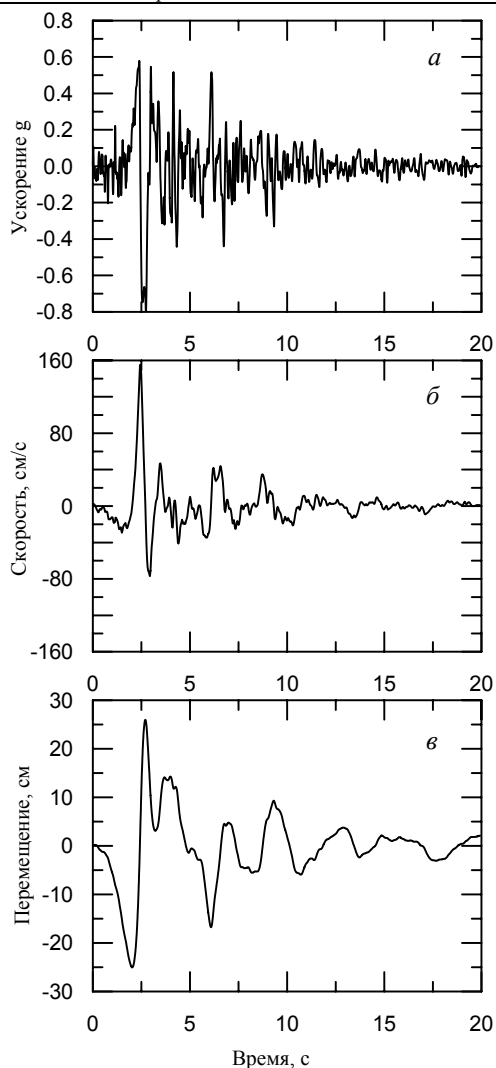


Рис. 4. Развитие во времени импульсов продольной компоненты по данным землетрясения в Ренальди: *a* – ускорение; *б* – скорость; *в* – перемещение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования реакции двухпролетного наклонного моста на сейсмические воздействия был выполнен нелинейный анализ динамического взаимодействия грунта основания и сооружения. Исследования проводились с помощью трехмерной конечно-элементной модели, состоящей из модели надземной конструкции моста и моделей устоев моста. Последние включали одну нелинейную пружину, а также распределен-

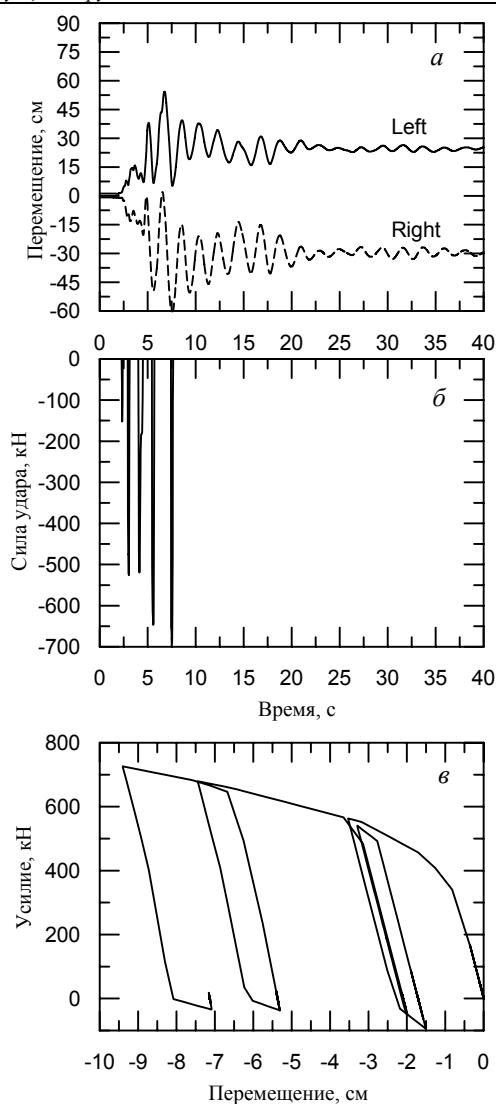


Рис. 5. Результаты, полученные с использованием параметров землетрясения в Токарацу в качестве исходных данных модели: *a* – перемещение в поперечном направлении по двум остроугольным краям; *б* – сила воздействия на левом тупоугольном краю; *в* – реакция пружины в системе координат усилие–перемещение на левом тупоугольном краю

ную сложную систему пружин. В процессе анализа использовались два вида входных данных по колебательным перемещениям грунта с различными динамическими характеристиками, в частности, пиковыми амплитудами скорости, являющимися результатом

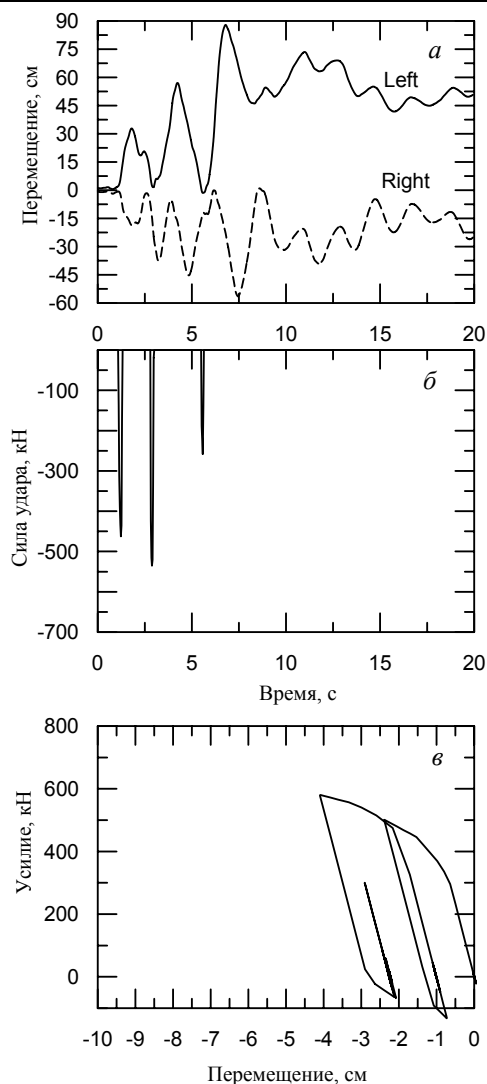


Рис. 6. Результаты, полученные с использованием измерений параметров землетрясения в Ренальди в качестве исходных данных модели:
 а – перемещение в поперечном направлении по двум остроугольным краям;
 б – сила воздействия на левом тупоугольном краю;
 в – реакция пружины в системе координат усилие–перемещение на левом тупоугольном краю

колебательных перемещений грунта в зоне ближнего поля с высокими импульсами скоростей. Результаты исследований показывают, что конструкция наклонного моста будет вращаться во время сильного сейсмического возбуждения. Высокие импульсы скоростей колебательных перемещений массива грунта в модели могут генерировать

значительные вращательные перемещения настила моста, что повлечет серьезные разрушения устоев. Представленные модели конструкции и устоев моста являются хорошим аналитическим инструментом для трехмерного конечно-элементного моделирования взаимодействия грунта основания и конструкций наклонного моста в условиях сейсмического воздействия.

Для разработки практических процедур проектирования необходимы дополнительные исследования для анализа реакции наклонных мостов с разным уровнем наклона на сейсмические воздействия. При этом должны использоваться различные параметры колебательного перемещения массива грунта с высокими импульсами скоростей и без них.

Список литературы

1. Liu, W. D., Rieles, J. M., Imbsen, R. A., Priestley, M. J. N., Seible, F., Nobari, F. S., & Yang, R. 1990. Response of a major highway bridge during the Whittier earthquake. Proc. of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
2. McCallen, D. B., & Romstad, K. M. 1994. Analysis of a skewed short-span, box-girder overpass. Earthquake Spectra, Vol. 10, No. 4, pp. 729–55.
3. Maragakis, E. 1985. A Model for the Rigid Body Motions of Skew Bridges, Report No. EERL 85-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, Caltech, Pasadena.
4. Shamsabadi, A., Ashour, M., & Norris, G. 2005. Bridge abutment nonlinear force-displacement-capacity prediction for seismic design. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 2, pp. 1–9.
5. Shamsabadi, A., Yan, L., & Martin, G. 2004. Three dimensional nonlinear seismic soil-foundation-structure interaction analysis of a skewed bridge considering near fault effects. Proc. of US-Turkey Soil-Structural Interaction Workshop, October.
6. Shamsabadi, A., Yan, L., & Law, H. 2002a. Nonlinear abutment-embankment-structure interaction behavior for seismic design of bridges. Proc. of the 3rd International Workshop on Performance-Based Seismic Design

and Retrofit of Transportation Facilities, Tokyo, Japan, July 9–11.

7. *Shamsabadi, A., Yan, L., Martin, G. R., Lam, I. P., Tsai, C.-F., & Law, H. K.* 2002b. Effects of abutment modeling on seismic response of ordinary standard bridges. Proc. of the 2002 Transportation Research Board Road Builders' Clinic, March.

8. *Siddharthan, R., El-Gamal, M., & Margakis, E. A.* 1993. Investigation of performance of bridge abutments in seismic regions. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 4, pp. 1327–46.

9. *Yan, L.* 1998. Nonlinear Load-Deformation Characteristics of Bridge Abutments and Footings under Cyclic Loading, Ph.D. Dissertation, University of Southern California, Los Angeles.