

DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-28-33

*Калачук Т.Г. *, кандидат технических наук, доцент,
Колмыкова И.В., старший преподаватель,
Шин Е.Р., старший преподаватель,*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия

*Ответственный автор E-mail: gkadastr@mail.ru

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧНОСТИ СИЛ ИНЕРЦИИ ПО ФАКТИЧЕСКИМ ПОВРЕЖДЕНИЯМ МОСТОВ

Аннотация: постоянная угроза землетрясений в сейсмических опасных районах, вызывает необходимость исследования вопросов сейсмостойкости сооружений и разработки методов их проектирования с учетом сейсмического фактора. Значительную долю в общем объеме инженерных сооружений постоянных и строящихся на каналах, и на автодорогах занимают искусственные сооружения, типа акведуков, малых и средних мостов (путепроводов). В связи с этим, обеспечение сейсмостойкости указанных сооружений представляет практический интерес. Здания и сооружения, расположенные в сейсмических районах испытывают в процессе землетрясений воздействие факторов, вызывающих возникновение сейсмических усилий и изменение условий работы конструкций. В статье представлены результаты сопоставления расчетов при динамической теории (по методу спектральных кривых) и статической по определению коэффициента сейсмичности с фактическими данными о повреждениях сооружений при сильных землетрясениях. Предложена формула расчета коэффициента сейсмичности.

Ключевые слова: сейсмичность, повреждение мостов, основания и фундаменты

Введение

Постоянная угроза землетрясений в сейсмических опасных районах, вызывает необходимость исследования вопросов сейсмостойкости сооружений и разработки методов их проектирования с учетом сейсмического фактора.

Значительную долю в общем объеме инженерных сооружений постоянных и строящихся на каналах, и на автодорогах занимают искусственные сооружения, типа акведуков, малых и средних мостов (путепроводов). В связи с этим, обеспечение сейсмостойкости указанных сооружений представляет практический интерес.

Здания и сооружения, расположенные в сейсмических районах испытывают в процессе землетрясений воздействие факторов, вызывающих возникновение сейсмических усилий и изменение условий работы конструкций.

Опыт прошлых лет землетрясений показывает, что сейсмическое воздействие обладает огромной разрушительной мощностью. В мировой истории отмечен целый ряд разрушительных землетрясений, стерших с лица земли большие города и огромные населенные районы.

Только за последние 30-40 лет человечество испытало целый ряд разрушительных землетрясений приведших к огромному материальному ущербу, разрушения большой части зданий и сооружений, гибели многих людей (Чили, Иран, 1962 г.; Скопье, Югославия 1963 г.; Инагата, Япония, 1964 г., Аляска, 1964 г.; Калифорния, 1971 г. Ташкент, 1966 г. Тува и Хакасия, 2010 г., Фукусима, Япония, 2011 и др.

Существенно при землетрясениях страдает дорожная сеть. Здесь отметим, что разрушение дорожной сети вызывает очень большой материальный урон и ее восстановление требует значительных средств. Существенны также убытки от перерыва движения по дорогам. В ряде случаев при сильных землетрясениях отмечалось опрокидывание железнодорожных составов, сход поездов с рельс, аварии с автомобилями. Такие явления могут стать непосредственными причинами человеческих жертв.

В тех случаях, когда район разрушений охватывает крупные населенные пункты, повреждение дорожной сети приводит к дополнительным тяжелым последствиям. Сразу или после разрушительного землетрясения в пострадавшем районе возникает ряд острых проблем, связанных с ликвидацией пожаров, спасением поврежденных домов, обеспечением населения временным жильем продовольствием, медицинской помощью. В таких случаях необходимо выполнить транспортные операции большого объема. Выход из строя путей сообщения затрудняет перевозку в пострадавший район противопожарных и аварийных спасательных команд, доставку восстановительных средств, медикаментов, продовольствия. Это усугубляет бедствия пострадавшего района в восстановлении сообщения и становится одной из первоочередных задач. Очень часто наиболее катастрофическим оказывается повреждение мостов и железнодорожных насыпей в связи с невозможностью доставки остродефицитных материалов для восстановительных работ.

Из сказанного следует, что обеспеченные бесперебойной интенсивной работой дорожные сети непосредственно после разрушительного землетрясения делаются одним из важных условий смягчения и скорейшей ликвидации последствий катастрофы. Поэтому в общем комплексе защитных строительных мероприятий, осуществляемых в сейсмических районах, обеспечение сейсмостойкости дорожной сети - играет очень важную роль.

Особого внимания требует дорожные искусственные сооружения, ликвидация сейсмических повреждений земляного полотна, верхнего строения пути или покрытия производиться сравнительно простыми техническими средствами в восстановлении (хотя бы временное) этих элементов дорог обычно не требует большого времени. Повреждение таких искусственных сооружений, как мосты и тоннели, приводит к наиболее тяжелым последствиям в смысле длительности перерыва движения, а их восстановление связано с проведением сложных и трудоемких работ. Поэтому в нормах сейсмостойкого строительства большинства стран для мостов и других инженерных сооружений предусмотрены повышенные гарантии сейсмостойкости.

Наиболее типичными повреждениями балочных мостов и акведуков при землетрясениях 7, 8 и 9 баллов и выше является следующее: сдвиг пролетных строений с опорных частей или опорных площадок, падение с опор (одним или двумя концами, вдоль или поперек моста), повреждения оголовков и опорных частей, сдвиг (скольжение) устоя в сторону пролета и их наклон, разрушение промежуточных опор типа, опрокидывание или сдвиг по шву.

Повреждение железобетонных опор рамного или рамных надстроек по своему характеру не отличается от сейсмических повреждений рамных железобетонных каркасов промышленных и гражданских зданий. Преимущественно наблюдается разрушение стоек и ригелей вблизи узлов и морозных зон, с образованием косых трещин, раздроблением бетона и изгибом арматурных стержней.

Сейсмостойкость сооружений достигается надлежащим их проектированием и строительством с учетом сейсмического воздействия. Условия сейсмостойкости следует учитывать на всех этапах проектирования от выбора места сооружений и назначений из общей схемы до разработки конструктивных деталей.

Исследования по сейсмостойкости дорожных сооружений как по теории сейсмостойкости в целом имеет недавнюю историю. Этапы развития исследований тесно связаны с разрушительными землетрясениями, которые доставили новые данные о сейсмическом эффекте, и оживляет интерес к вопросам сейсмостойкости.

Первые исследования по сейсмостойкости дорожных сооружений относятся к началу XX века. В результате анализа последствий разрушительного землетрясения 1891 г. Японскими учеными Кикуги и Омори были разработаны некоторые рекомендации по проектированию мостов.

Важная роль в более поздних исследованиях по сейсмостойкости дорожных сооружений принадлежит также Японии. Вследствие высокой сейсмичности территории и густоты дорожной сети эти проблемы в Японии чрезвычайно актуальны. Японскими специалистами Мононоба и Нава были тщательно обследованы повреждения дорожных сооружений при разрушительном землетрясении 1932г.

Материалы этих обследований долгое время служили основой для практических рекомендаций. Много новых данных доставило также обследование пострадавших дорожных сооружений при последующих разрушительных землетрясениях на территории Японии.

Натурные обследования сейсмических повреждений дорожных сооружений проводили также в США, Новой Зеландии, Индии, Канаде. В США проведены натурные динамические испытания мостовых сооружений. Начиная с 30-х годов, в связи со строительством больших мостов, исследования по сейсмостойкости опор и пролетных строений выполнены в США, Мексике, Новой Зеландии.

В Советском Союзе интенсивная теоретическая и практическая разработка вопросов сейсмостойкого строительства началось в 20-х годах. В связи с большим объемом дорожного строительства обеспечению сейсмостойкости дорожных сооружений в СССР уделялось должное внимание. Показательно в этом смысле строительство Туркестано-Сибирской железнодорожной магистрали (1927-1930 г.г.), где впервые в истории железнодорожного строительства были осуществлены систематизированные сейсмические мероприятия в отношении дорожных сооружений.

В послевоенный период исследования по сейсмостойкости дорожных сооружений в основном велись в Тбилиском институте инженеров железнодорожного транспорта (ТИИЖТ), с 1958 они проводились в Грузинском политехническом институте имени В.И. Ленина (ГрузПИ). В 1956 г. В ТИИЖТЕ был составлен раздел «Дорожные сооружения», утвержденный в 1957 г. в качестве нормативного документа по сейсмостойкому строительству. В его развитии был (составлен) разработан проект инструкции по расчету искусственных сооружений в сейсмических районах.

Исследования по сейсмостойкости дорожных сооружений велись и в других организациях. В

центрального научно-исследовательского институте транспортного строительства (ЦНИИСа) исследовались вопросы сейсмостойкости тоннелей и земляного полотна, разрабатывались нормативные документы. Ряд работ в этой области выполнялся в институте строительной механики и сейсмостойкости АН Груз. ССР, Фрунзенском политехническом институте, Красноярском ПромНИИпроекте, институте механики и сейсмостойкого строительства АН УЗССР, научно-исследовательском институте сейсмостойкого строительства Госстроя ТурССР, Туркменском политехническом институте.

Обеспеченные бесперебойной интенсивной работой дорожные сети непосредственно после разрушительного землетрясения делаются одним из важных условий смягчения и скорейшей ликвидации последствий катастрофы. Поэтому в общем комплексе защитных строительных мероприятий, осуществляемых в сейсмических районах, обеспечение сейсмостойкости дорожной сети – играет очень важную роль.

Методы и материалы

Для обоснования выбора расчетной методики существенное значение имеет сопоставление результатов расчетов по тому или иному методу с фактическими данными о повреждениях сооружений при сильных землетрясениях; в отношении гражданских и промышленных зданий и сооружений произведенное в работах Корчинского А.И., Павлыка В.Г. и других, в целом, подтвердило результаты расчетов по спектральным кривым. В данной статье аналогические сопоставления проведены для мостов. Однако следует иметь в виду, что определение сейсмических усилий и нагрузок, порождающих наблюдаемые повреждения являются весьма сложной задачей, поскольку результаты в существенной мере зависят от таких неопределенных или трудно устанавливаемых величин, как фактические прочностные показатели материалов и т.д. Поэтому достоверные данные можно получить только в простейших случаях. Ниже приводятся сопоставление для типичного вида повреждений балочных мостов – сдвиги пролетных строений по опорам.

Рассмотрим случай моста малого или среднего пролета и наибольшей высоты с массивными опорами. Как показывают данные натуральных динамических испытаний, для таких мостов периоды собственных колебаний основного тона, как вдоль моста, так и поперек моста $T=0,4с$, [1]. Для таких сооружений сейсмическая горизонтальная (нагрузка) сила от веса пролетного строения на основе статической теории определяется по формуле:

$$S_c = K_c \cdot Q, \quad (1)$$

где α – отношение ускорений;

K_c – сейсмический коэффициент, определяемый в зависимости от балльности воздействия землетрясений.

Одновременно на пролетное строение моста будет действовать сейсмическая сила вертикального напряжения. Его величина может быть принята равной

$$S_{c,в} = \alpha K_c Q, \quad (2)$$

где α – отношение ускорений почвы горизонтальных или вертикальных напряжений.

По данным фактических акселлограмм α изменяется в пределах $0,4 \div 0,7$ [2].

Во многих малых и средних пролетах мостов пролетные строения не закрепляются на опорах или закрепляются весьма слабо, так что при его сдвиге на опоре должна быть только сила трения. Такое положение характерно для многих разрушенных мостов при Японском землетрясении 1948 года [3-6] и при последующих. Тогда в момент сдвига пролетного строения должно быть соблюдено условие предельного равновесия с силами трения:

$$S = f(Q \pm S_{c,в}), \quad (3)$$

где f – коэффициент трения пролетного строения на опоре.

Наиболее неблагоприятный случай будем иметь при вертикальной сейсмической силе, направленной вверх. Принимая в предыдущей формуле знаки, подставляя значения $S_c, S_{c,в}$, получим:

$$K_c = f(1 - \alpha K_c) \quad (4)$$

Отсюда коэффициент сейсмичности:

$$K_c = \frac{f}{1+\alpha f} \quad (5)$$

При расчете по динамической теории (по методу спектральных кривых) формулы для определения сейсмических сил горизонтального направления имеют вид [4]:

$$S = K_c \beta \eta Q \quad (6)$$

$$S_B = \alpha K_c \beta_B \eta_B Q, \quad (7)$$

где β, η (соответственно β_B, η_B) – коэффициент динамичности и коэффициент колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Ввиду того, что $T < 0,4c$, по спектральной кривой можно принять $\beta = 3$. Для рассматриваемых пролетных строений малых и средних пролетов будем иметь $\beta_B = 3$, что же касается коэффициентов формы колебаний, то их можно определить расчетом или принять в пределах $\eta = \eta_B = (1,10 \div 1,15)$. В соответствии с этим из условия предельного равновесия получим:

$$S = f(Q - S_B) \quad (8)$$

Или

$$K_c = \frac{f}{3(\eta + \alpha \eta_B f)} \quad (9)$$

Результаты и обсуждения

Произведем расчеты по приведенным формулам для нескольких случаев повреждения мостов.

1. Повреждение моста Итагаки, Япония 1923 г. Железобетонное пролетное строение упало с опоры. Сила землетрясения 9-10 баллов, пролетное строение ввиду его большой боковой жесткости можно рассматривать как абсолютно жесткую массу. Его вес обозначим через Q . По аналогичным проектам вес железобетонного ребристого пролетного строения $Q = 139 \text{ тс}$. Принимая в предыдущих формулах $\alpha = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,7$ и $f = 0,5$, подсчитываем коэффициент K_c по статической и динамической теориям.

При $\alpha = 0,2 - \beta = 0,5$.

Подставляя эти данные в формулу, получим:

$$K_c = \frac{f}{1+\alpha f} = \frac{0,5}{1+0,2 \cdot 0,5} = 0,455.$$

При тех же данных по динамической теории:

$$K_{c,d} = \frac{f}{3(\eta + \alpha \eta_B f)} = \frac{0,5}{3(1,15 + 0,2 \cdot 0,5)} = 0,133,$$

где $\eta = 1,15, \eta_B = 1$ – пролеты на основании расчета аналогичных мостов.

При $\alpha = 0,4; f = 0,5$,

$$K_{c,c} = \frac{0,5}{1 + 0,4 \cdot 0,5} = 0,416;$$

$$K_{c,d} = \frac{0,5}{3(1,15 + 0,4 \cdot 1 \cdot 0,5)} = 0,123.$$

При $\alpha = 0,6; f = 0,5$,

$$K_{c,c} = \frac{0,5}{1 + 0,6 \cdot 0,5} = 0,384;$$

$$K_{c,d} = \frac{0,5}{3(1,15 + 0,6 \cdot 1 \cdot 0,5)} = 0,115.$$

Тогда сила инерции (горизонтальная) от веса пролетного строения, вызванная на сдвиг его на опоре:

$$S = K_c \beta \eta Q = 0,115 \cdot 3 \cdot 1,15 \cdot 139 = 55 \text{ тс}.$$

2. Повреждение опоры моста (Япония 1923 г.). Повреждение опоры характеризовалась сдвигом опор по горизонтальному шву. Плоскость сдвига оказалась расположена в средней части высоты опоры. Сила

землетрясения 9-10 баллов. Вес пролетного строения, включая вес опоры выше плоскости сдвига по аналогичным проектам, принимаем равным $Q = 30 \text{ тс}$.

Принимаем распространенную для кладки равную 25 и определяем расчетное сопротивление его на срез, которое равно

$$R_{ср} = \frac{1,1 \text{ ктс}}{\text{см}^2}.$$

По формуле: $Q \leq (K_{ср} + 0,8f\sigma_0)F$, определяем силу, которая могла вызвать сдвиг.

Принимая $f = 0,7$ – коэффициент трения;

σ_0 – среднее расчетное напряжение сжатия;

F – площадь среза, $\approx 9 \cdot 10^6 \text{ см}^2$.

Тогда: $\sigma_0 = 3,3 \text{ кгс/см}^2$.

Подставляем значения в формулу:

$$Q_{ср} = (1,1 + 0,8 \cdot 0,7 - 3,4) \cdot 9 \cdot 10^4 = 26,5 \text{ тс}.$$

Подставляя это значение в формулу для определения сейсмической нагрузки по динамической теории и принимая равным $Q_{ср} = S$ можно определить коэффициент сейсмичности и фактическую балльность

$$S = K_c \cdot G \cdot \beta \cdot \eta.$$

Для рассматриваемого случая можем принять, что $\beta = 3\eta = 1,15$.

Тогда:

$$K_c = \frac{Q_{ср}}{G \cdot \beta \cdot \eta} = \frac{26,5}{30 \cdot 3 \cdot 1,15} = 0,25.$$

По статической теории: $S = K_c \cdot G$.

Тогда

$$K_c = \frac{Q_{ср}}{G} = \frac{26,5}{30} = 0,88.$$

Выводы

Экспериментальные исследования являются существенным источником информации для теории сейсмостойкости сооружений. В одних случаях они служат для проверки достоверности выдвигаемой теоретической гипотезы, расчетного метода, в других играют самостоятельную роль, позволяя определить динамические характеристики сооружений. Такие характеристики, как периоды и формы собственных колебаний, непосредственно входят в расчетную формулу определения сейсмической нагрузки.

Как показывают произведенные вычисления, при различных значениях K_c и α , статическая теория приводит к нереально высоким балльностям землетрясений и не согласовывается с балльностью, установленной по макросейсмическим признакам. Таким образом, статическая теория не объясняет наблюдаемых повреждений: в то же время в рамках метода расчета по спектральным кривым она находит правильное истинное подтверждение. Поэтому применение динамических методов расчета на сейсмические воздействия возможно лишь при наличии обоснованных значений динамических характеристик.

Литература

1. Моджеков Х., Куликов Г.В. Натурные исследования колебаний малых мостов // Сборник "Сейсмостойкое строительство и строительные материалы". Изд-во "Блльм", 1972.
2. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1960.
3. Карцивадзе Г.Н. Повреждение дорожных искусственных сооружений при сильных землетрясениях. М.: Изд-во "Транспорт", 1969.
4. Gol'denblat I.I., Karcivadze G.N., Napetvaridze SH.T., Nikolaenko N.A. Proektirovanie sejsmostojkikh gidrotekhnicheskikh, transportnyh i special'nyh sooruzhenij. М.: Gosstrojizdat, 1971.
5. Карцивадзе Г.Н., Моджеков Х. Исследование динамических параметров балочных мостов с опорами переменной высоты // Известия АН ТурССР, серия ФХ ФТХРН. Ашхабад, 1970. №4.

6. Моджеков Х., Куликов Г.В. Вопросы проектирования балочных мостов с гибкими опорами в сейсмических районах // Сб. стрит.и стр. мат. ТурССР. Ашхабад, 1976.

References

1. Modzhekov H., Kulikov G.V. Naturnye issledovaniya kolebanij malyh mostov. Sbornik "Sejsmostojkoe stroitel'stvo i stroitel'nye materialy". Izd-vo "Ylym", 1972. (rus.)
2. Medvedev S.V. Inzhenernaya sejsmologiya. M.: Gosstrojizdat, 1960. (rus.)
3. Karcivadze G.N. Povrezhdenie dorozhnyh iskusstvennyh sooruzhenij pri sil'nyh zemletryasenyah. M.: Izd-vo "Transport", 1969. (rus.)
4. Gol'denblat I.I., Karcivadze G.N., Napetvaridze SH.T., Nikolaenko N.A. Proektirovanie sejsmostojkikh gidrotekhnicheskikh, transportnyh i special'nyh sooruzhenij. M.: Gosstrojizdat, 1971. (rus.)
5. Karcivadze G.N., Modzhekov H. Issledovanie dinamicheskikh parametrov balochnyh mostov s oporami peremenoj vysoty. Izvestiya AN TurSSR, seriya FH FTNRN. Ashkhabad, 1970. 4. (rus.)
6. Modzhekov H., Kulikov G.V. Voprosy proektirovaniya balochnyh mostov s gibkimi oporami v sejsmicheskikh rajonah. Sb. stroit.i str. mat. TurSSR. Ashkhabad, 1976. (rus.)

*Kalachuk T.G. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Kolmykova I.V., Senior Lecturer,
Shin E.R., Senior Lecturer,
Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Russia*
*Corresponding author E-mail: gkadastr@mail.ru

EVALUATION OF THE SEISMIC INERTIA FORCES ON THE ACTUAL DAMAGE OF BRIDGES

Abstract: because of the constant threat of earthquakes in seismic hazardous areas, it is necessary to study the issues of seismic resistance of structures and development of methods of their design, taking into account the seismic factor. A significant share in the total volume of engineering structures permanent and built on canals and roads is occupied by artificial structures, such as aqueducts, small and medium bridges (overpasses). In this regard, the provision of seismic resistance of these structures is of practical interest. Buildings and structures located in seismic areas are affected by factors that cause the occurrence of seismic forces and changes in the working conditions of structures during earthquakes. The article presents the results of comparison of calculations in the dynamic theory (by the method of spectral curves) and static seismic coefficient determination with the actual data on damage to structures in strong earthquakes. A formula for calculating the coefficient of seismicity is proposed.

Keywords: seismicity, damage of bridges, bases and foundations

Для цитирования: Калачук Т.Г., Колмыкова И.В., Шин Е.Р. Оценка сейсмичности сил инерции по фактическим повреждениям мостов // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №3. С. 28 – 33. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-28-33

For citation: Kalachuk T.G., Kolmykova I.V., Shin E.R. Evaluation of the seismic inertia forces on the actual damage of bridges. Construction Materials and Products. 2019. 2 (3). P. 28 – 33. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-28-33

Поступила в редакцию 10 января 2019 г.
Принята в доработанном виде 15 апреля 2019 г.
Одобрена для публикации 4 мая 2019 г.

Received: January 10, 2019.
Revised: April 15, 2019.
Accepted: May 4, 2019.