

Моделирование конструкций железнодорожного терминала станции Адлер с учетом системы сейсмоизоляции

Главный конструктор Е.В. Румянцев*,
ООО «Проектное управление ШтриХ»;
инженер Е.А. Белугина,
ОАО «Уралпромпроект»

Ключевые слова: система сейсмоизоляции; резинометаллические опорные части; метод конечных элементов; линейно-спектральная теория; метод прямого интегрирования по времени; синтезированная акселерограмма

В настоящее время вопрос строительства сейсмоустойчивых зданий и сооружений остается довольно актуальным. Отмечается, что одним из наиболее эффективных путей его решения является использование систем сейсмической защиты для сооружений в строительстве [1, 2, 3]. Подтверждением обоснованности использования таких систем является анализ количества человеческих жертв, ставших результатом наиболее разрушительных землетрясений за последние несколько лет. Так, по данным Геологической службы США (USGS), количество жертв землетрясения в Японии 03.11.2011 магнитудой 9.0 баллов составило 28050 человек, в то время как количество жертв землетрясения на Гаити 01.12.2010 магнитудой 7.0 баллов составило 222570 человек. Несмотря на высокую балльность землетрясения, явившуюся причиной большого количества жертв, эффективность использования систем сейсмической защиты в Японии не вызывает сомнения. Одним из видов так называемых пассивных систем сейсмической защиты являются сейсмоизолирующие опоры, которые получили широкое применение в мировой практике [4, 5, 6, 7, 8].

Обеспечение сейсмобезопасности сооружения закладывается на этапе проектирования на основе компьютерного анализа процессов сейсмического нагружения конструкций и численного анализа их напряженно-деформированного состояния (НДС) [9, 10].

Целью работы является математическое моделирование конструкций здания методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программных комплексов (ПК) с учетом особенностей сейсмического воздействия, а также работы несущих конструкций и системы сейсмоизоляции.

В качестве объекта исследования выбран антисейсмический блок конкорса пригородного железнодорожного терминала станции Адлер. Результатом исследования является сравнительный анализ моделирования конструкций и НДС на статические и сейсмические нагрузки конечно-элементных моделей разработанных применительно к ПК «Лира 9.6 Pro» и ПК MIDAS/CIVIL.

Согласно специальным техническим условиям на проектирование, разработанным ООО «Институт Гипростроймост Санкт-Петербург», исследуемый блок конкорса представляет собой один из антисейсмических блоков здания вокзала. Размеры блока в плане 95,0×62,5 м, высота до верха несущих конструкций кровли 31,5 м. По данным инженерно-геологических изысканий сейсмичность площадки оценивается в 9 баллов.

Конкорс располагается на отметке +10,800 м над железнодорожными путями, перпендикулярно их направлению. Строение соединяет морскую и городскую части вокзала. Несущими конструкциями в межпутевом пространстве являются 26 железобетонных опор, поперечное сечение которых – 1,5×2,0 м, высота – 9,5 м. Перекрытие на отметке +10,800 и +15,750 запроектировано как сталежелезобетонная балочная клетка. Плиты перекрытия выполнены из монолитного железобетона. Несущие конструкции выше отметки +10,800 м (колонны, V-образные опоры кровли и ее несущие конструкции) приняты в стальном исполнении.

Жесткость каркаса обеспечивается включением в его работу стальных связей, а так же включением железобетонных ограждающих конструкций лифтовых шахт в ядро жесткости. Важно отметить, что горизонтальные элементы жесткости от отметки земли до отметки +10,800 м выполнить не представляется возможным из-за действующей сети разветвленных

железнодорожных путей. Балочная клетка первого этажа опирается на железобетонные опоры посредством 26 резинометаллических сейсмоизоляторов со свинцовым сердечником.

Авторами данной статьи выполнен ряд расчетов в ПК Лира (расчетная схема (РС)-1,-2,-3) с целью выявления зависимости результатов от особенностей создания расчетной схемы и учета сейсмического воздействия.

Описание расчетных схем

РС-1 выполнена с учетом статического и сейсмического воздействия с применением коэффициентов надежности по нагрузке к различным сочетаниям, рекомендованным СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия.

Несущие конструкции здания моделировались конечными элементами (КЭ), представленными в соответствующем каталоге программы. Всем КЭ были присвоены свойства соответствующих материалов конструкций. Колонны каркаса, элементы балочных клеток перекрытий и несущие конструкции кровли моделировались как КЭ-10 – «универсальный пространственный стержневой КЭ». Перекрытия моделировалось как КЭ-41, КЭ-42, КЭ-44. Толщина перекрытия принималась в зависимости от заданных конструктивных решений, эксцентриситеты сталебетонного перекрытия моделировались абсолютно жесткими вставками стержней. Объемная (3D) модель конкурса в ПК Лира представлена на рисунке 1.

Для генерации силовых воздействий были созданы 8 групп загрузок: постоянное, длительное, ветер слева, ветер справа, снег и сейсмическое воздействие по направлениям X, Y, Z.

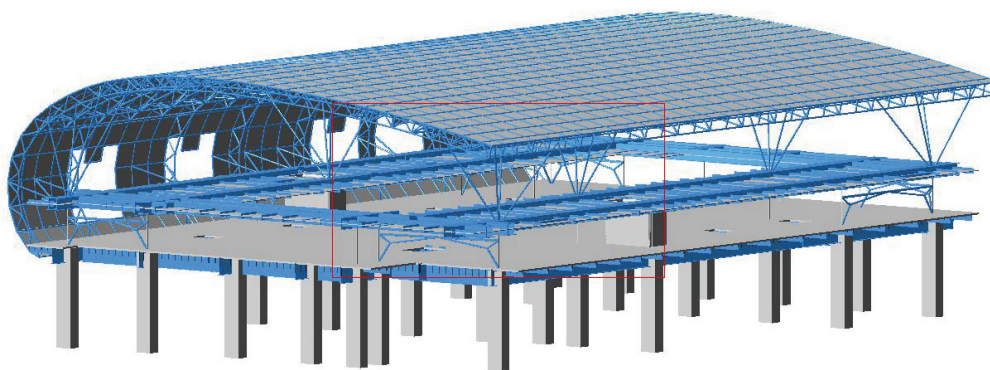


Рисунок 1. Объемная (3D) модель расчетной схемы в ПК Лира

Расчет выполнен согласно линейно-спектральной теории, сейсмическое воздействие задавалось на основе рекомендаций, предложенных в СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах», в ПК Лира использовался модуль-35. Линейно-спектральная теория расчета конструкций на сейсмические воздействия является в настоящее время основной как в нашей стране, так и за рубежом.

Она занимает промежуточное место между статическим и динамическим методами оценки сейсмостойкости сооружений [11, 12, 13].

РС-2 аналогична РС-1. Отличительной особенностью является учет сейсмического воздействия с помощью акселерограмм, синтезированных применительно к сейсмогеологическим условиям строительной площадки (рисунок 2), в ПК Лира использовался модуль-29 (шаг дискретизации – 0,01 с). Продолжительность акселерограмм – 25 с, шаг оцифровки 0,01 с, пиковые значения ускорений – 4 м/с^2 . В результате расчетов-1 и -2 получены значительные усилия в опорных сечениях железобетонных колонн.

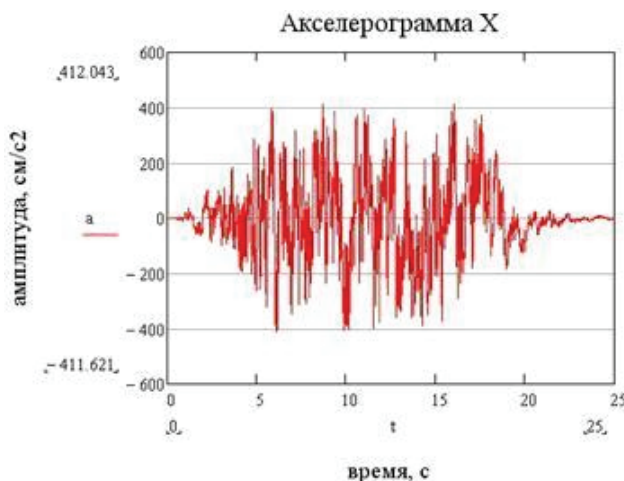


Рисунок 2. Синтезированная акселерограмма по направлению «X»

Следует отметить, что для РС-1 и РС-2 введение в расчетную схему нелинейных резинометаллических опорных частей (упругопластические элементы сейсмоизоляции) делает невозможным использование свойств ортогональности колебательных форм, поскольку последнее является следствием линейности динамической системы [9]. На практике это обстоятельство приводит к невозможности использования линейно-спектральной теории и метода разложения по формам собственных колебаний для интегрирования уравнений движения. Таким образом, схемы РС-1 и РС-2 могут быть использованы для анализа НДС конструктивной системы без использования системы сейсмоизоляции.

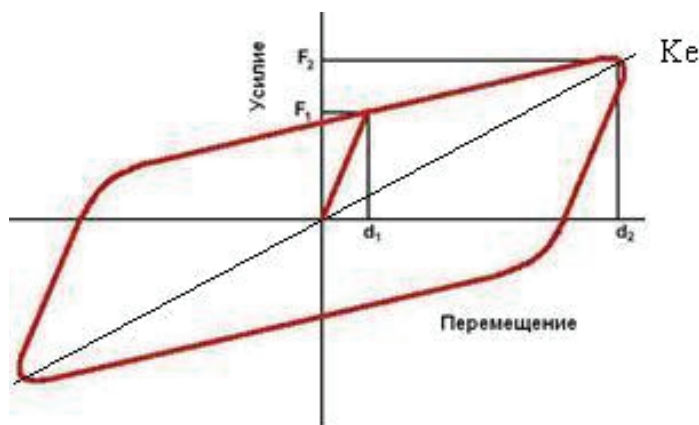


Рисунок 3. Диаграмма «горизонтальная сила-перемещение» резинометаллической опорной части со свинцовым сердечником

В РС-3.1, РС-3.2 согласно проектным данным в качестве системы сейсмоизоляции приняты резинометаллические опорные части со свинцовым сердечником, поэтому возникает необходимость их моделирования в ПК одним или несколькими КЭ. Сейсмоизоляторы со свинцовым сердечником обладают высокими демпфирующими свойствами. На сегодняшний день ПК Лира не имеет аналогов КЭ, позволяющих описать гистерезисные петли сейсмоизолятора (рисунок 3) – билинейную диаграмму «горизонтальная сила-перемещение». В качестве допущения был использован КЭ255 (двухузловой КЭ упругих связей с учетом предельных усилий).

Данный элемент работает с жесткостью K_e в обоих направлениях до предельных усилий (N_{max}), значения которых могут быть различными в зависимости от направления. Недостатком будет являться невозможность учета ниспадающей ветви гистерезисной кривой. Таким образом, авторами предложена попытка линеаризации жесткостных свойств упругопластических элементов.

В численном описании КЭ255 для каждой марки сейсмоизолятора задаются: прочностные – F_2 , демпфирующие характеристики сейсмоизоляторов – ξ_e , а так же эффективная сдвиговая жесткость – K_e и вертикальная жесткость – K_v , которые принимаются согласно каталогу фирмы производителя [14].

Кроме того, с помощью КЭ255 смоделированы гидравлические демпферы, устанавливаемые в зонах размещения резинометаллических опорных частей несущей способностью 100 тс (14 демпферов в продольном направлении и 12 – в поперечном). В численном описании задаются эффективные жесткости линеаризованных демпферов в продольном и поперечном направлении, а также предельные усилия в КЭ.

Расчетно-графическая система ДИНАМИКА-плюс в ПК Лира позволяет провести моделирование поведения нелинейно-деформированной системы от динамического воздействия во времени, то есть реализуется метод прямого интегрирования дифференциальных уравнений движения по времени.

Выполнено два расчета с приложением сейсмического воздействия в продольном РС-3.1 и поперечном направлениях РС-3.2 с учетом демпфирующих характеристик конструкций и сейсмоизоляторов. Возможность учета вертикальной составляющей сейсмической нагрузки при выполнении данных расчетов в ПК Лира отсутствует.

Для РС-4.1, РС-4.2 КЭ-модель здания была разработана генеральным проектировщиком строительных конструкций здания терминала – ЗАО «Институт Гипростроймост Санкт-Петербург» для расчетов на статические и сейсмические нагрузки применительно к ПК MIDAS/CIVIL.

Модель показана на рисунке 4, включает 2367 узлов и 5652 конечных элемента. Колонны, балочные клетки перекрытий и покрытия, V-образные стойки, связи, лифтовые шахты и лестничные клетки схематизированы балочными КЭ. Железобетонные плиты перекрытий, профилированные листы перекрытия и кровли представлены КЭ пластин.

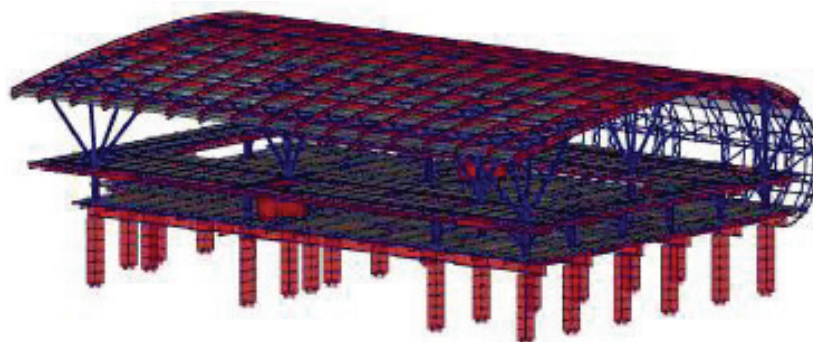


Рисунок 4. Расчётная схема здания конкорса (общий вид)

В зонах размещения резинометаллических опорных частей устанавливаются гидравлические демпферы несущей способностью 100 тс (14 демпферов в продольном направлении и 12 – в поперечном).

В нелинейных расчетах антисейсмические устройства моделируются нелинейными двухузловыми связями. Расчеты аналогично выполняются с использованием синтезированных акселерограмм. Гидравлический демпфер идеализирован в виде модели Максвелла. В этой модели упругая пружина моделирует сжимаемость жидкости в цилиндре демпфера.

Результаты расчета

Сравнение и анализ результатов расчетов выполнялись по ряду критериев, как и в работе [15]: напряженное состояние наиболее нагруженных железобетонных колонн, сумма расчетной площади продольного армирования поперечного сечения колонны, кинематические характеристики – перемещения расчетных характерных точек здания по направлениям «X», «Y», «Z».

Анализ результатов выполнялся отдельно для РС-1 и РС-2 и отдельно для РС-3.1, РС-3.2 и РС-4.

Для РС-1 и РС-2 расчеты были выполнены разложением по формам собственных колебаний с учетом сейсмического воздействия заданного по нормам и акселерограммами. Численные значения максимальных перемещений в трех направлениях для каждого расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Максимальные перемещения здания конкорса, мм

Направление	Расчет по нормам (РС-1)		Расчет по акселерограммам (РС-2)	
	Вдоль оси, мм	Против оси, мм	Вдоль оси, мм	Против оси, мм
«X»	71,4	-119,0	130,0	-58,6
«Y»	174,0	-134,0	148,0	-233,0
«Z»	32,1	-140,0	16,4	-158,0

Из таблицы видно, что полученные перемещения по результатам расчета по акселерограммам (максимальное расчетное землетрясение) существенно выше, чем при расчете по нормам (проектное землетрясение). Это связано с тем, что нормативный спектральный коэффициент динамичности норм соответствует среднему значению из нескольких акселерограмм. Значения полученных перемещений достигают значительных величин, что не соответствует требованиям норм.

Прочность опорного сечения колонны оценивалась посредством построения эллипсоида предельных усилий в ПК ЭСПРИ 1.0. Положение расчетной точки внутри поверхности эллипсоида указывает на выполнение условия прочности расчетного сечения. Напряженное состояние опорного сечения железобетонной колонны и суммарная площадь армирования ее поперечного сечения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Максимальные усилия и площадь поперечного армирования в опорном сечении колонны для РС-1, РС-2

Вид расчета	Усилия в опорном сечении					Максимальная суммарная площадь армирования поперечного сечения, см ²
	N, т	M _y , тс·м	Q _y , т	M _z , тс·м	Q _z , т	
по нормам	-1 175,1	-1 629,6	-190,2	-1 351,2	-245,4	2242,71
по акселерограммам	-1 430,9	-3 695,6	-458,2	-3 018,3	-525,1	2684,78

Полученная площадь арматуры должна быть размещена в поперечном сечении колонны. Учитывая конструктивные требования, разместить расчетное количество арматуры в колонне не представляется возможным.

Эллипсоиды предельных усилий для оценки несущей способности колонны с учетом принятого в проекте армирования изображены на рисунке 5.

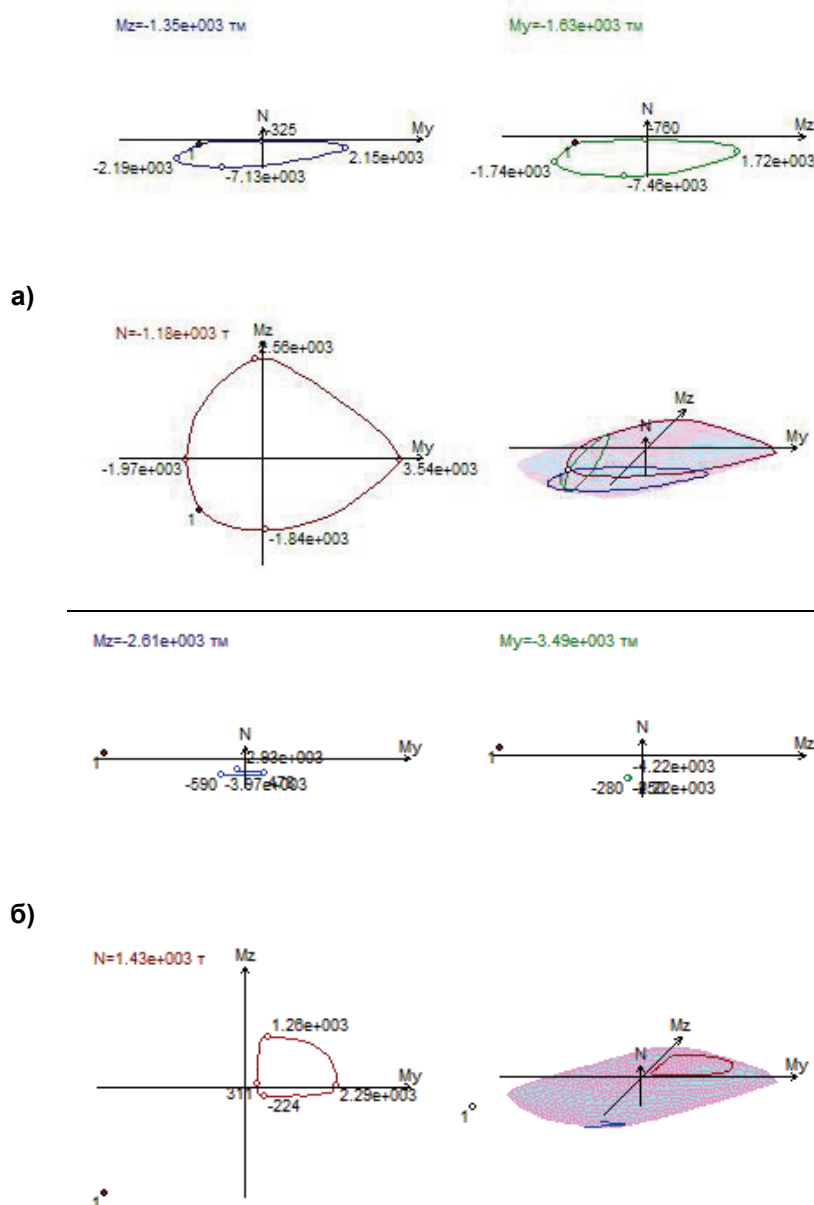


Рисунок 5. Общий вид и сечения поверхности эллипсоида предельных усилий для РС-1 и РС-2 при координатах:

**а) $N=-1\,175,00$ т,
 $M_y=-1\,629,6$ тс·м,
 $M_z=-1\,351,2$ тс·м;**

**б) $N=1\,430,00$ т,
 $M_y=-3\,487,0$ тс·м,
 $M_z=-2\,607,0$ тс·м**

Для визуализации результатов РС-2 эллипсоид предельных усилий был построен по максимально возможным усилиям для заданного армирования, которые несколько ниже полученных. Таким образом, положение расчетной точки вне поверхности эллипсоидов предельных усилий (рис. 5а, 5б) свидетельствует о недостаточной несущей способности поперечного сечения колонны и необходимости снижения значения усилий путем применения сейсмоизолирующих систем.

Румянцев Е.В., Белугина Е.А. Моделирование конструкций железнодорожного терминала станции Адлер с учетом системы сейсмоизоляции

Результаты расчета для РС-3.1, РС-3.2 и РС-4.1, РС-4.2

Расчеты выполняются в ПК Лира и MIDAS/CIVIL. Сейсмическое воздействие задается в виде трехкомпонентных акселерограмм с учетом динамики во времени. Анализ результатов проводился совместно для указанных схем. Для этого приводятся таблицы максимальных усилий, возникающих в железобетонных колоннах конкорса (таблица 3).

Таблица 3. Максимальные усилия в опорном сечении колонны для РС-3 и РС-4

Усилия	Нелинейный расчет в ПК MIDAS/CIVIL	Нелинейный расчет в ПК Лира
N, т	218,00	500,00
M_y , тс·м	1 340,00	1 300,00
M_z , тс·м	1 237,00	1 180,00

Строим эллипсоиды предельных усилий для проверки несущей способности железобетонных колонн конкорса с проектным армированием поперечного сечения (рисунок 6).

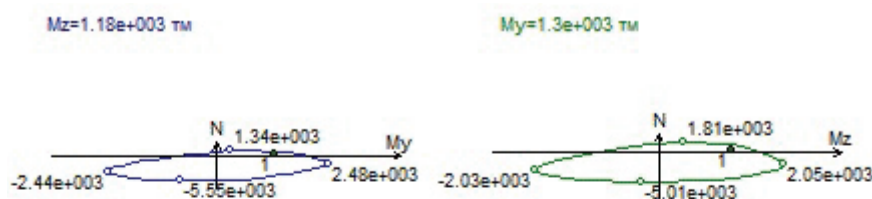
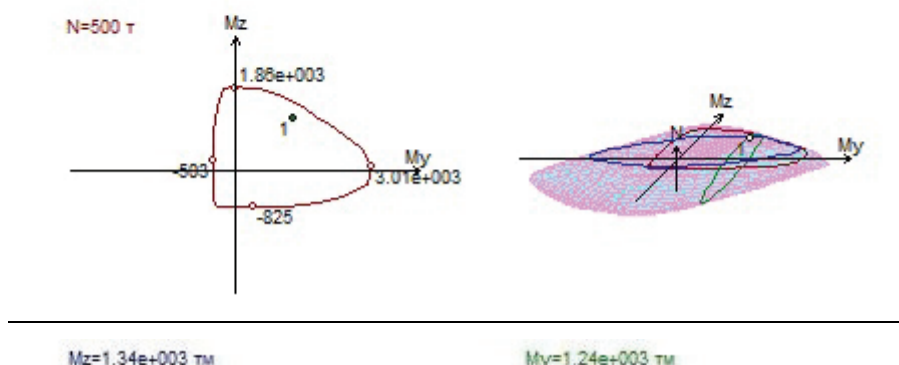


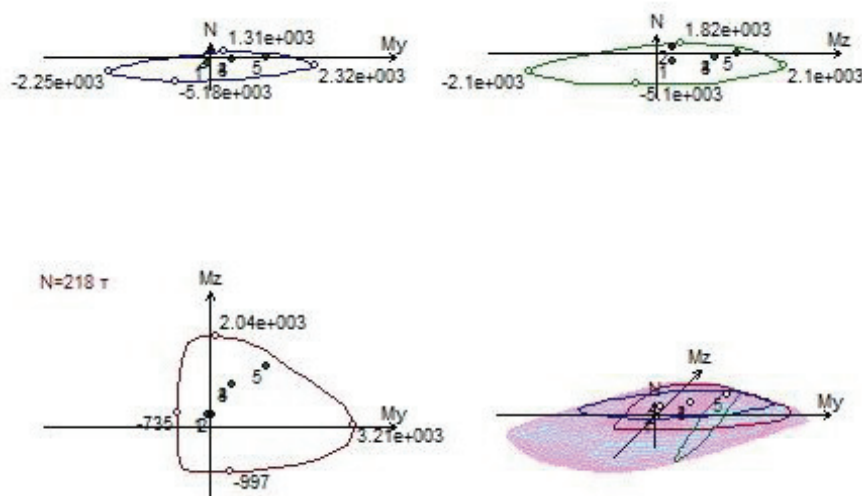
Рисунок 6. Общий вид и сечения поверхности эллипсоида предельных усилий

а)



а) расчет в ПК Лира для РС-3 при координатах:
N=500,00 т,
 $M_y=1\,300,00$ тс·м,
 $M_z=1\,180,00$ тс·м;

б)



б) расчет в ПК MIDAS/CIVIL для РС-4 при координатах:
N=218,00 т,
 $M_y=1\,237,00$ тс·м,
 $M_z=1\,340,00$ тс·м

Результаты расчетов РС-3 и РС-4 характеризуются высокой степенью совпадения, все расчетные точки лежат внутри области эллипсоида, что указывает на достаточную несущую способность поперечного сечения колонн в обоих направлениях.

Результаты, отражающие перемещения конкурса, полученные в двух ПК, приведены в таблице 4.

Таблица 4. Максимальные перемещения характерных частей здания для РС-3, РС-4 (мм)

Направление	Перекрытие на отметке +10,800		Перекрытия на отметке +15,750		Кровли	
	ПК Лира	ПК MIDAS/CIVIL	ПК Лира	ПК MIDAS/CIVIL	ПК Лира	ПК MIDAS/CIVIL
продольное	80,0	93,0	110,0	102,0	138,0	133,0
поперечное	118,0	128,0	149,0	135,0	187,0	156,0

Суммарные перемещения всего здания, полученные в ПК MIDAS/CIVIL, изображены на рисунках 7, 8 и находятся в пределах 200 мм (196,0 мм для РС-4.1, 194,0 мм для РС-4.2). Возможность визуального представления перемещений одновременно всех узлов расчетной схемы для нелинейных задач динамики в ПК Лира отсутствует.

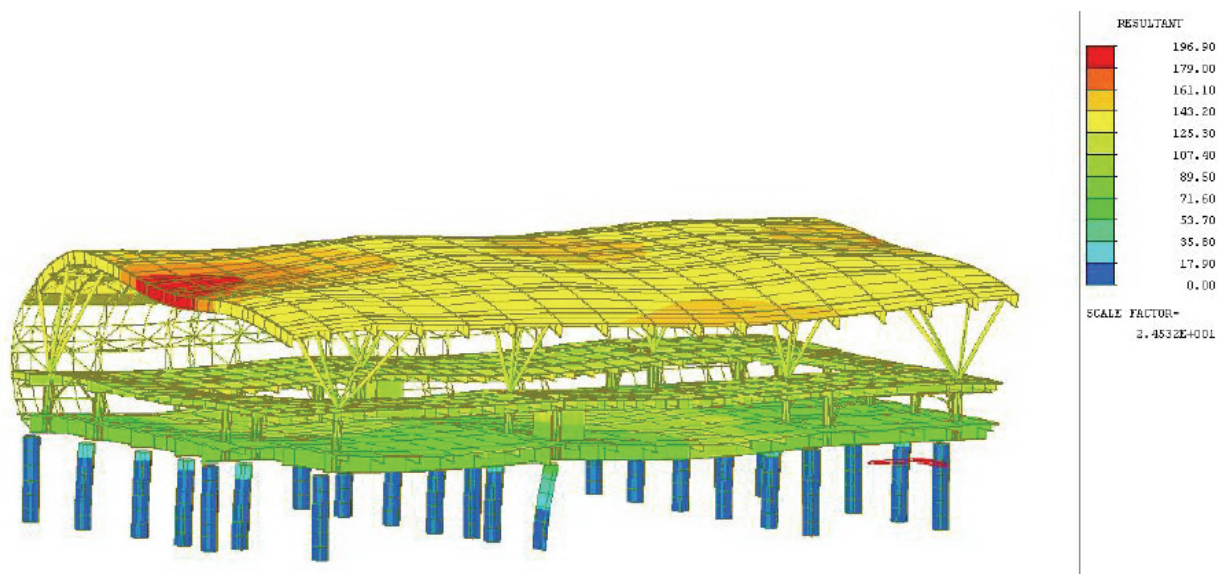


Рисунок 7. Суммарные перемещения здания для РС-4.1 (ПК MIDAS/CIVIL)

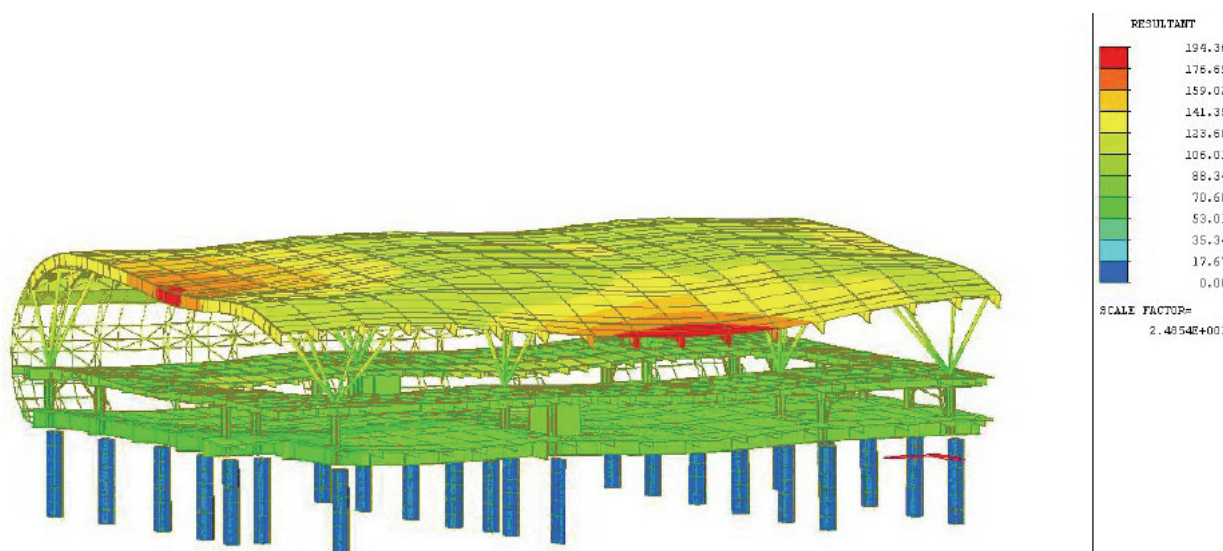


Рисунок 8. Суммарные перемещения здания для РС-4.2 (ПК MIDAS/CIVIL)

На основе анализа полученных результатов расчетов были построены гистограммы расчетных усилий, наглядно отражающие различие в значениях полученных усилий. Гистограммы строились на основе данных таблиц 2, 3 и отображены на рисунке 9.

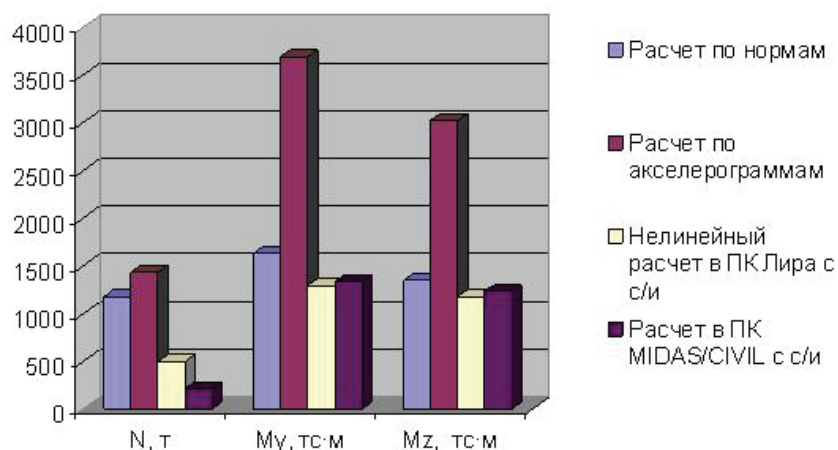


Рисунок 9. Гистограммы расчетных усилий в элементах каркаса

Полученные результаты:

- 1) в работе предложены различные варианты моделирования работы каркаса здания на сейсмические воздействия в двух ПК, в том числе с использованием системы сейсмоизоляции;
- 2) получены величины НДС несущих элементов каркаса, построены неправильные эллипсоиды предельных усилий железобетонных поперечных сечений колонн здания;
- 3) показано, что несущая способность колонн при проектном армировании обеспечивается только в случае использования системы сейсмоизоляции;
- 4) определено, что максимальные перемещения системы без использования системы сейсмоизоляции принимают значительные значения, особенно при задании сейсмического воздействия с помощью акселерограмм;
- 5) анализ результатов РС-3 (ПК Лира) и РС-4 (ПК Midas/Civil) показал:
 - хорошее совпадение максимальных изгибающих моментов M_y и M_z в железобетонных колоннах (относительная погрешность -3,0% и +4,6% соответственно);
 - незначительное превышение максимальных перемещений, полученных в ПК Лира (максимальная относительная погрешность +7,8%). Превышение перемещений в ПК Лира может быть связано с занижением степени рассеивания энергии резинометаллических опорных частей при реализации линейаризованного подхода к моделированию сейсмоизоляторов.

Выводы

1. Использование системы сейсмоизоляции здания конкурса железнодорожного терминала станции Адлер позволило значительно снизить (до 2,5 раз) усилия в несущих элементах каркаса, размеры их поперечных сечений, величины армирования.
2. Расчетные модели нелинейных резинометаллических опорных частей и демпферов могут быть реализованы в ПК Лира с приемлемой точностью. При этом результаты таких расчетов следует использовать при нахождении уровня погрешности таких вычислений, например, путем сравнения с результатами расчета в ПК с более полными возможностями аппроксимации нелинейных сейсмоизоляторов.
3. Наиболее широкие возможности в реализации моделей нелинейных систем сейсмоизоляции представлены в ПК MIDAS/CIVIL, в том числе по наглядности результатов расчетов.
4. Результаты работы могут быть использованы для более широкого применения систем сейсмоизоляции в строительстве как наиболее эффективного метода повышения сейсмоустойчивости зданий и сооружений.

Авторы выражают глубокую признательность коллективу отдела расчетов мостов ЗАО «Институт Гипростроймост Санкт-Петербург» за предоставленные материалы.

Литература

1. Арутюнян А. Р. Современные методы сейсмоизоляции зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 3(13). С. 56-60.
2. Кузнецов В. Д., Чэнь С. Скользящий пояс с фторопластом сейсмостойкого здания // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 53-58.
3. Кузнецов В. Д., Лядский В. А. Сейсмоизоляция общественных зданий на основе фторопласта // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 3(13). С. 61-64.
4. Смирнов В. И. Поведение изолированных зданий при Нортриджском землетрясении в США // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. №5. С. 36-41.
5. Смирнов В. И. Анализ надежности сейсмоизолированных зданий при разрушительных землетрясениях в Японии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. №5. С. 24-33.
6. Петерсен Х., Бойтлер Х., Браун Х., Мангеринг И. Системы сейсмической защиты надземных сооружений и мостов. Издательский дом «Вилей Компании». 929 с.
7. Chen W. F., Scawthorn Ch. Earthquake engineering handbook. Hawaii University, 2003. 1450 p.
8. Largest and Deadliest Earthquakes by Year 1990 – 2011 // U.S. Geological Survey. [Электронный ресурс]. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/byyear.php> (Дата обращения: 27.01.2012)
9. Готовский Д. С. Дискретные математические модели в процессах динамического взаимодействия сложных технических сооружений с упругопластическими сейсмоизоляторами. Автореферат на соискание ученой степени. Иркутск, 2011. 23 с.
10. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружения и возможности их анализа. Киев : Сталь, 2002. 618 с.
11. Уздин А. М. Что скрывается за линейно-спектральной теорией сейсмостойкости // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. №2. С. 18-23.
12. Егупов В. К., Командрина Т. А. Расчет зданий на сейсмические воздействия. Киев : Будівельник, 1969. 207 с.
13. Уздин А. М., Сандович Т. А., Аль-Насер М. С. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб. : Изд-во ВНИИГ, 1993. 89 с.
14. Айзенберг Я. М., Смирнов В. И., Акбиев Р. Т. Методические Рекомендации по проектированию сейсмоизоляции с применением резинометаллических опор. М. : РАСС, 2008. 46 с.
15. Pankaj Pankaj, Ermiao Lin. Material modelling in the seismic response analysis for the design of RC framed structures // Engineering structures: The journal of earthquake, wind and ocean engineering. 2005. №7. Pp. 1014-1023.

**Евгений Владимирович Румянцев, г. Златоуст, Россия*

Тел. раб. (3513) 62-10-52, эл. почта: jekarum@yandex.ru

Station Adler railway terminal structures modelling taking into account seismic base isolation

Rumyantsev Ye.V.

Proektnoe upravlenie ShtrikH, LLC, Zlatoust, Russia

Belugina Ye.A.

Uralpromproekt, OJSC, Zlatoust, Russia

+7(3513)62-10-52, e-mail: jekarum@yandex.ru

Key words

seismic base isolation; lead rubber bearings; finite element method; linear spectral theory; the method of direct time integration; synthesized acceleration

Abstract

The article discusses methods of building frame constructions modeling by finite element method, taking into account seismic isolation systems. It presents data of the calculation in the two software systems. The calculation results are compared by analyzing of the individual elements stress-strain state. Recommendations about the calculation schemes and software systems selection are given on the base of results analyzing. The achieved results allow us to evaluate the effectiveness of seismic base isolation and can be used for wide application of such systems in building area.

References

1. Arutyunyan A. R. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 3(13). Pp. 56-60. (rus)
2. Kuznetsov V. D., Chen S. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 3(21). Pp. 53-58. (rus)
3. Kuznetsov V. D., Lyadskiy V. A. *The magazine of civil engineering*. 2010. No. 3(13). Pp. 61-64. (rus)
4. Smirnov V. I. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Safety of buildings]. 2009. No. 5. Pp. 36-41. (rus)
5. Smirnov V. I. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Safety of buildings]. 2009. No. 5. Pp. 24-33 (rus)
6. Petersen Kh., Boytler Kh., Braun Kh., Mangering I. *Sistemy seysmicheskoy zashchity nadzemnykh sooruzheniy i mostov* [Systems for seismic protection of buildings and bridges]. Izdatelskiy dom «Viley Kompanii». 929 p.
7. Chen W. F., Scawthorn, Ch. *Earthquake engineering handbook*. Hawaii University, 2003. 1450 p.
8. Largest and Deadliest Earthquakes by Year 1990 – 2011. *U.S. Geological Survey*. [Electronic document]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/byyear.php> (Date of request: 27.01.2012)
9. Gotovskiy D. S. *Diskretnyye matematicheskiye modeli v protsessakh dinamicheskogo vzaimodeystviya slozhnykh tekhnicheskikh sooruzheniy s uprugoplasticheskimi seysmoizolyatorami*. Avtoreferat na soiskaniye uchenoy stepeni [Discrete mathematical models of processes in the dynamic interaction of complex engineering structures with elastoplastic seismic insulator. Abstract of a thesis]. Irkutsk: 2011. 23 p. (rus)
10. Perelmutter A. V., Slivker V. I. *Raschetnyye modeli sooruzheniya i vozmozhnosti ikh analiza* [The calculated structures model and the possibility of their analysis]. Kiyev: Stal, 2002. 618 p. (rus)
11. Uzdin A. M. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [Earthquake engineering. Safety of buildings]. 2009. No. 2. Pp. 18-23. (rus)
12. Egupov V. K., Komandrina T. A. *Raschet zdaniy na seysmicheskiye vozdeystviya* [Calculation of seismic effects on buildings]. Kiyev: Budivelnik, 1969. 207 p. (rus)
13. Uzdin A. M. *Osnovy teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitelstva zdaniy i sooruzheniy* [Fundamentals of the theory of seismic and earthquake-proof construction of buildings]. Saint-Petersburg: 1993. 89 p. (rus)
14. Ayzenberg Ya. M., Smirnov V. I., Akbiyev R. T. *Metodicheskiye Rekomendatsii po proyektirovaniyu seysmoizolyatsii s primeneniym rezinometallicheskikh opor* [Methodical Recommendations for the design of seismic isolation using rubber-mathalic supports]. Moscow: RASS, 2008. 46 p. (rus)
15. Pankaj Pankaj, Ermiao Lin. Material modelling in the seismic response analysis for the design of RC framed structures. *Engineering structures: The journal of earthquake, wind and ocean engineering*. 2005. No. 7. Pp. 1014-1023.

Full text of this article in Russian: pp. 22-30

Rumyantsev Ye.V., Belugina Ye.A. Station adler railway terminal structures modelling taking into account seismic base isolation