

УДК 69.07

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-64-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-64-72)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Перспективное использование конструктивных систем зданий подвешенного типа в сейсмических районах

Белаш Татьяна Александровна¹, Свитлик Илья Владимирович²

^{1,2} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Подходы к обеспечению устойчивости высотных зданий к сейсмическим воздействиям отличаются своим многообразием. Среди них стоит выделить использование подвесных конструкций. Подобный подход позволяет снизить нагрузки в несущих конструкциях, вызванные динамическими воздействиями. Эффективность применения подвесных конструкций в сейсмостойком строительстве подтверждалась исследованиями поведения подобных объектов в условиях землетрясений. Развитие вычислительных комплексов в свою очередь позволило раскрыть потенциал использования подвесных конструкций в сейсмически опасных районах. Однако инженерное сообщество всё ещё не пришло к однозначному решению проблемы значительных смещений подвешенных перекрытий при низкочастотных сейсмических воздействиях. Вопрос по обеспечению устойчивости конструкций ядра здания также остаётся открытым. Предложения по решению данных проблем, как и сами несущие конструкции высотных зданий подвешенного типа, отличаются многообразием. В этой статье рассматриваются основные существующие и перспективные конструктивные решения, обеспечивающие сейсмостойкость высотных зданий с подвесными конструкциями. Результаты расчётных исследований данных конструктивных решений приведены в статье.

Ключевые слова: высотные здания, подвесные конструкции, сейсмическое воздействие

Для цитирования: Белаш Т.А., Свитлик И.В. Перспективное использование конструктивных систем зданий подвешенного типа в сейсмических районах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С.64-72.

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-64-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-64-72)

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Prospects for the use of structural systems of suspended buildings in seismic areas

Belash Tatiana Aleksandrovna¹, Svitlik Iliia Vladimirovich²

^{1,2} Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: There are many approaches to ensuring the stability of high-rise buildings to seismic impacts. Among them, it is worth noting the use of suspended structures. This approach makes it

@ Белаш Т.А., Дымов Е.А., 2021

possible to reduce the loads in load-bearing structures caused by dynamic influences. The effectiveness of the use of suspended structures in earthquake-resistant construction was confirmed by studies of the behavior of such objects in earthquake conditions. The development of computer systems allowed us to unlock the potential of using suspended structures in seismically dangerous areas. However, the engineering community has not yet come to an unambiguous solution to the problem of significant displacements of suspended ceilings during low-frequency seismic impacts. The question of ensuring the stability of the core structures of the building also remains open. Proposals for solving these problems, as well as the supporting structures of suspended high-rise buildings themselves, are diverse. This article discusses the main existing and promising design solutions that provide earthquake resistance of high-rise buildings with suspended structures. The results of computational studies of these design solutions are given in the article.

Keywords: high-rise buildings, suspended structures, seismic impact

For citation: Belash T. A., Svitlik I.V. Prospects for the use of structural systems of suspended buildings in seismic areas. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 64-72. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-64-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-64-72)

Введение

Подвесные конструкции дают возможность конструктивной реализации как высотных, так и многоэтажных зданий. Наибольшее распространение в строительстве получили подвесные конструкции с жёстким ядром. Ствольная конструктивная система высотных зданий была запатентована американским инженером Фазлуром Рахманом Ханом в 1961 г. [1]. Одной из разновидностей высотных и многоэтажных зданий с несущим ядром являются здания, возведённые по системе с подвешенными этажами.

Ключевое достоинство данной системы заключается в замене продольно изгибающихся колонн на меньшие по площади подвески, что обеспечивает меньшую материалоемкость. Помимо этого стоит отметить, что данная конструктивная система может применяться в плотной городской застройке, так как на уровне первых этажей ядро здания является единственной несущей конструкцией и обладает меньшим по сравнению с планом здания фундаментом [2]. Использование такого фундамента обеспечивает одинаковую осадку всех конструктивных частей зданий, что позволяет применять подобный вариант в первую очередь в сейсмических районах и на неоднородных основаниях [3]. Податливость конструкций зданий с подвешенными этажами в том числе позволяет таким зданиям считаться сейсмостойкими [4].

К основной проблеме использования подвесных систем относится возникновение неупругих деформаций подвесок. Также висячим системам присуща аэродинамическая неустойчивость, что делает более сложными методы проектирования, строительства и обеспечения общей устойчивости зданий [5]. Необходимость создания на верхнем торце ствола здания мощных конструкций консольных оголовков может свести на нет экономию материала от использования растянутых подвесок вместо сжатых колонн [2]. Также к недостаткам систем такого типа можно отнести необходимость создания массивных конструкций ствола жёсткости, так как они должны полностью воспринимать горизонтальные нагрузки, а также развитых конструкций фундаментов для опирания несущего ствола. При этом эти конструкции должны учитывать относительные перемещения между стволом и конструкциями подвешенных этажей, возникающие, например, при сейсмических воздействиях.

Было установлено, что применение зданий подвесного типа оправдано при высокой вероятности возникновения высокочастотных землетрясений на площадке строительства.

Однако их использование в зданиях, расположенных в районах низкочастотных землетрясений, способно привести к негативным эффектам в виде раскачки перекрытий и повреждения целостности несущих конструкций. Предложения по решению проблем обеспечения сейсмостойкости зданий с подвесными конструкциями отличаются многообразием. В данной работе будут приведены некоторые из подходов к этой проблеме и проведены расчётные исследования, целью которых является определение эффективности использования различных решений применительно к конкретной задаче. Для проведения расчётов были выбраны четыре конструктивные схемы зданий с подвесными конструкциями (рис. 1-4). Расчётные модели представляют собой 15-этажное здание высотой 64 метра с перекрытиями, подвешенными к металлическому оголовку на 16 подвесках по внутреннему и внешнему контуру. Перекрытия и несущий ствол здания имеют круглую форму, диаметр ствола равен 8 метрам, диаметр перекрытия – 16 метрам. Подвески первой расчётной модели свободно подвешены вдоль ствола здания без установки связей с несущими стенами (рис. 1). Вторая модель реализует принцип создания жёстких этажных блоков за счёт установки крестовых связей (рис. 2), подвешенная конструкция при этом соединяется со стволом здания через элементы упругой связи в уровнях 2-го и 15-го этажей (рис. 5). Третья модель представляет собой исходную конструкцию с добавлением упругих связей между перекрытиями и ядром жёсткости на каждом этаже здания (рис. 3, 5). Упругие связи четвертой модели расположены между оголовком и стволом здания (рис. 4, 6). Места установки упругих связей в расчётных схемах выделены цветом на рисунках 2-6.

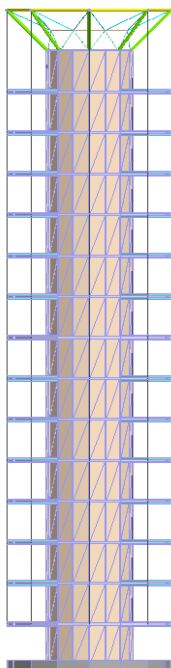


Рисунок 1 – Первая расчётная модель

Figure 1 – First calculation model

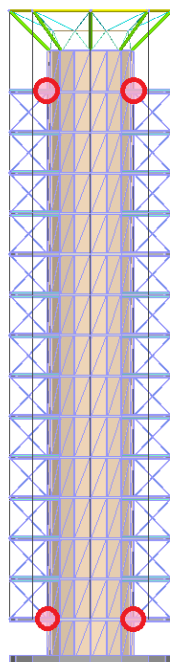


Рисунок 2 – Вторая расчётная модель

Figure 2 – Second calculation model

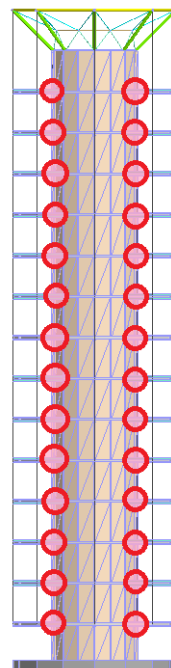


Рисунок 3 – Третья расчётная модель

Figure 3 – Third calculation model

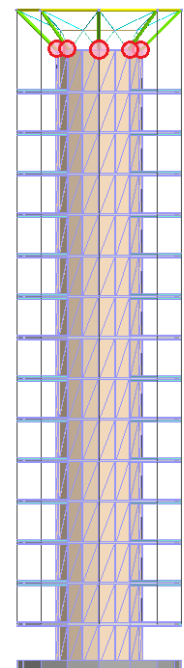


Рисунок 4 – Четвёртая расчётная модель

Figure 4 – Fourth calculation model

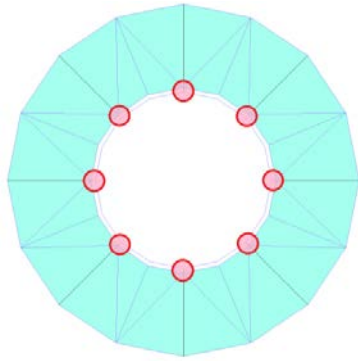


Рисунок 5 – Схема расположения на плане упругих связей во второй и третьей моделях

Figure 5 – The location of the elastic constraints on the plan in the second and third models

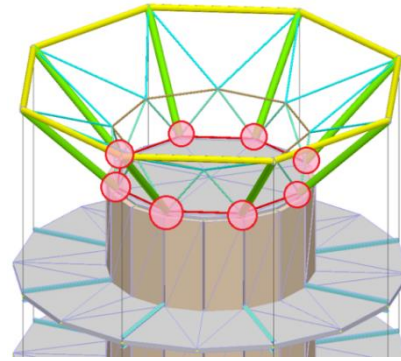


Рисунок 6 – Схема расположения упругих связей в четвёртой модели

Figure 6 – The location of the elastic constraints in the fourth model

Для всех расчётных моделей было принято, что стены ствола и перекрытия выполнены из бетона прочности В25 и имеют толщину 0,5 и 0,2 метра соответственно. Несущий оголовок выполнен из стальных труб различных диаметров марки С255. В качестве балок перекрытия использованы стальные двутавры профиля 50Б1 марки С255. Сечение элементов подвесок представлено стальным проволочным канатом.

Для расчётных исследований в веб-базе данных о движении грунта Тихоокеанского центра инженерных исследований землетрясений были подобраны акселерограммы землетрясений с различными спектрами реакции (рис. 7). Подобранные землетрясения имеют широкий диапазон частот. На основе преобладающих периодов колебаний T в спектрах реакции было принято условное разделение записей землетрясений на высокочастотные ($T < 0,3$ с), среднечастотные ($0,3 \text{ с} \leq T < 1$ с) и низкочастотные ($T \geq 1$ с). Таким образом, к высокочастотным относятся землетрясения, произошедшие в г. Алмирос и области Фриули, к среднечастотным – землетрясение в г. Грива, и к низкочастотным – землетрясения в г. Цзици и горах св. Ильи.

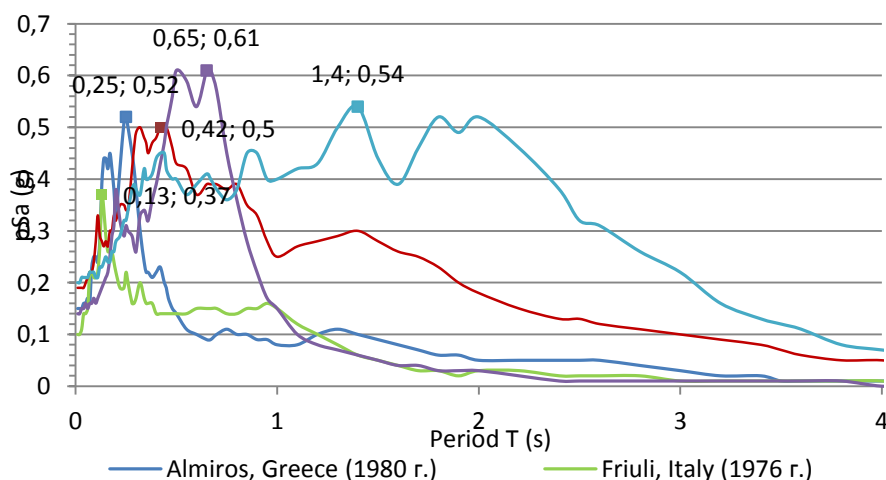


Рисунок 7 – Спектр реакции землетрясений (T ; pSa)

Figure 7 – Earthquake response spectrum (T ; pSa)

Расчёт производился в программном комплексе ЛИРА с использованием модуля Динамика плюс. Данный модуль позволяет производить моделирование отклика конструкции на динамические воздействия и выполнять расчёт во временной области с применением инструментальных сейсмограмм. При задании динамического нагружения сейсмограммы прикладывались к основаниям расчётных моделей как узловые нагрузки. В качестве допущения не учитывалась совместная работа здания и основания. Соединение фундаментной плиты и основания условно принято жёстким.

Как было сказано выше, относительные смещения между подвесными конструкциями и ядром жёсткости здания наряду с возможным возникновением эффекта раскачки подвешенных перекрытий представляют ключевую угрозу для целостности несущих конструкций подобных объектов. Поэтому в качестве определяющего фактора эффективности использования предложенных решений по обеспечению сейсмостойкости зданий подвесного типа были выбраны перемещения перекрытий расчётных схем в условиях различных землетрясений.

Несущие подвески могут быть выполнены как из стальных канатов, так и из элементов стального проката, таких как полосы, трубы, швеллеры. Так как несущая способность высокопрочных стальных канатов выше, чем у обычных строительных сталей, их применение способно обеспечить экономию материалов и снижение веса подвешенных конструкций. Ванта в таком случае обладает более низкой изгибной жёсткостью, что значительно влияет на перемещения перекрытий при сейсмических воздействиях. Применение стальных труб в качестве подвесок приводит к раскачке перекрытий. Подвески, выполненные из стальных канатов, практически не передают колебания несущего ростверка на нижележащие этажи, что на первом этапе обусловило их выбор для дальнейших расчётов. Однако перемещения верхнего подвешенного перекрытия, как и относительные смещения двух верхних этажей, принимают опасные значения (рис. 8).

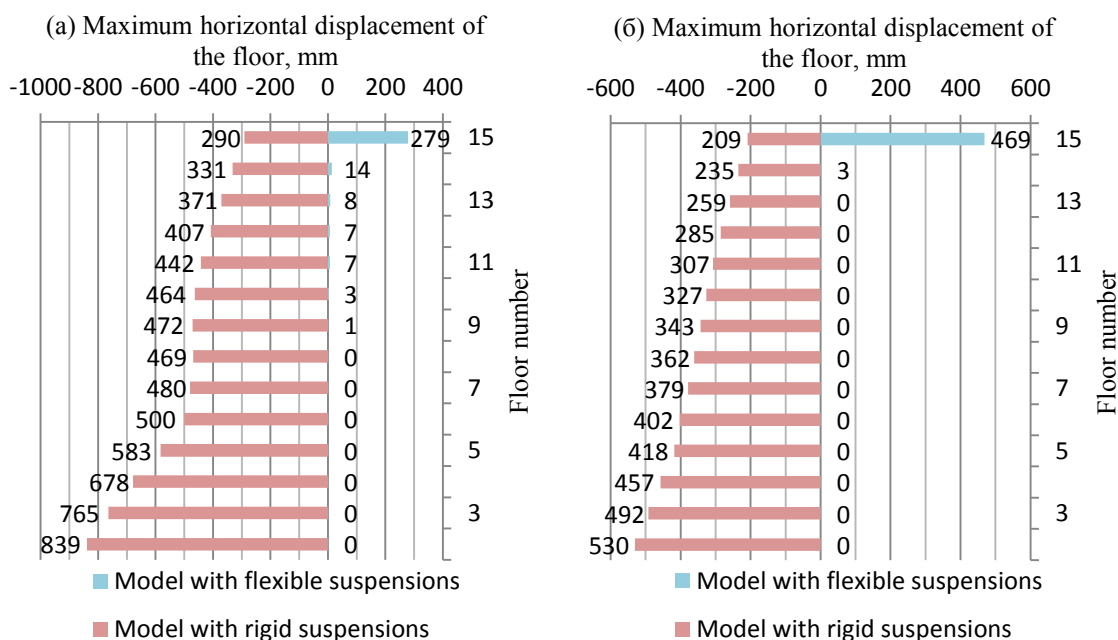


Рисунок 8 – Максимальные перемещения перекрытий первой модели с жёсткими и гибкими подвесками при сейсмическом воздействии: а) горы св. Ильи, Аляска; б) Цзицзи, Тайвань

Figure 8 – Graph of maximum floor displacements of the first model with rigid and flexible suspensions during seismic impact: a) St Elias, Alaska; b) Chi-Chi, Taiwan

С целью их уменьшения могут быть применены конструктивные решения, описанные выше. Результаты расчётов представлены на рисунке 9.

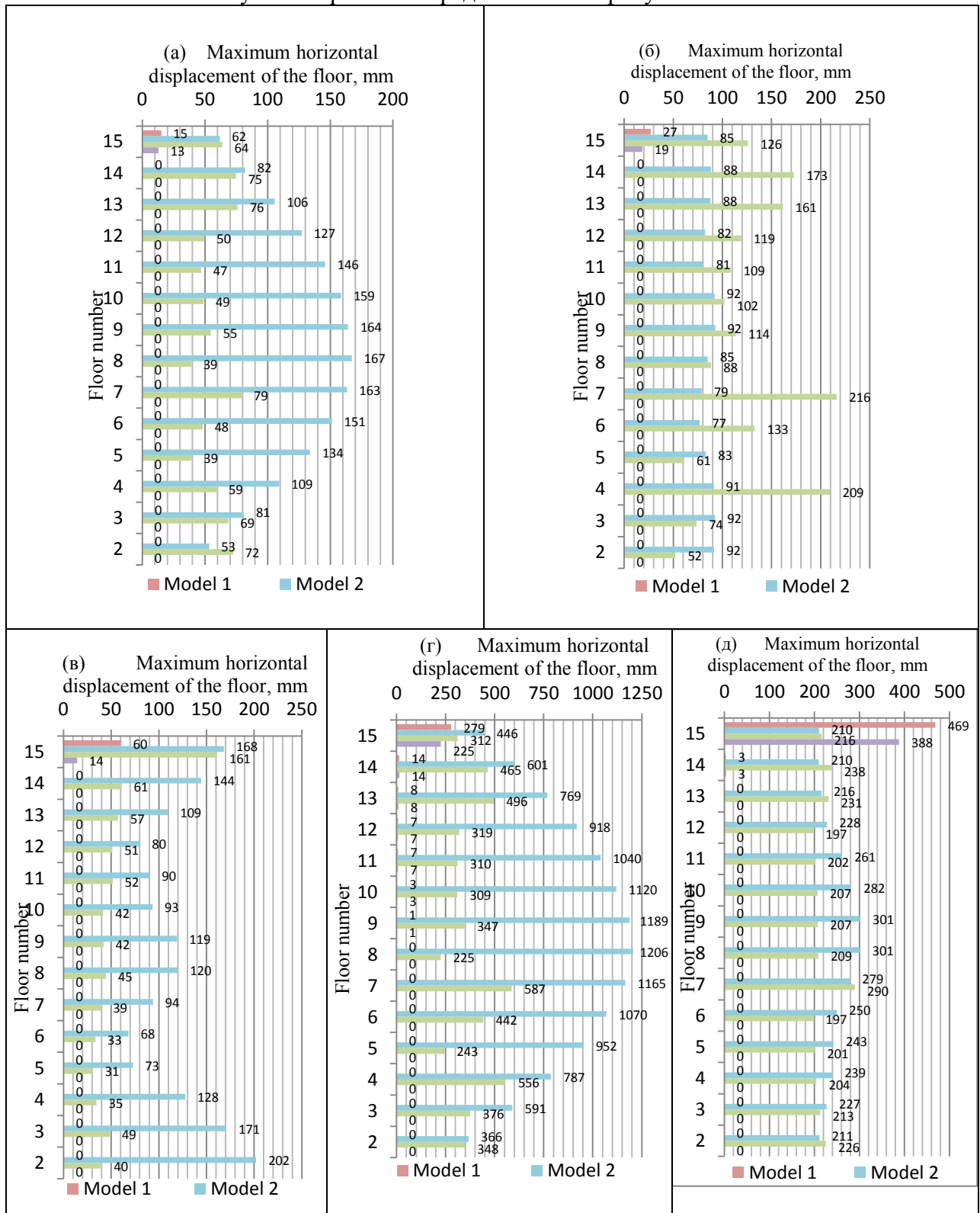


Рисунок 9 – Максимальные перемещения перекрытий моделей при сейсмическом воздействии: а) Фриули, Италия; б) Алмирос, Греция; в) Грива, Греция; г) горы св. Ильи, Аляска; д) Цицзи, Тайвань

Figure 9 – Graph of maximum floor displacements of models during seismic impact: a) Friuli, Italy; b) Almiros, Greece; c) Griva, Greece; d) St Elias, Alaska; e) Chi-Chi, Taiwan

Увеличение боковой жёсткости подвесных конструкций за счёт введения крестовых связей позволило уменьшить межэтажный дрейф при всех рассматриваемых сейсмических воздействиях (рис. 10), что в теории может сохранить целостность внутренних конструкций здания, а также элементов фасада. Однако в случае низкочастотного землетрясения в горах св. Ильи данный подход привёл к возникновению значительных перемещений средних этажей здания (рис. 9 г).

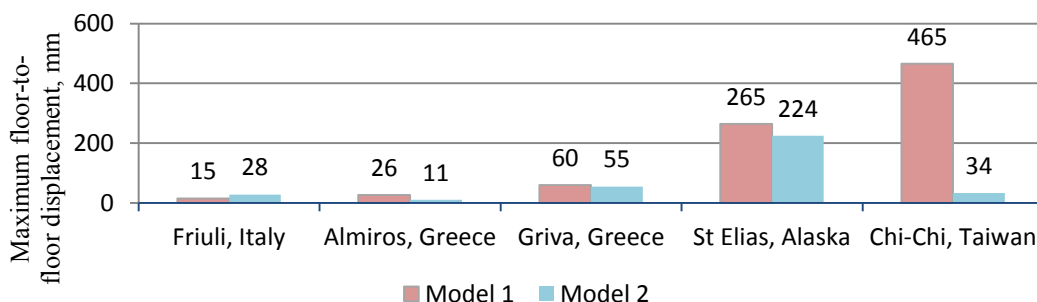


Рисунок 10 – Максимальные межэтажные смещения перекрытий первой и второй моделей

Figure 10 – Maximum floor-to-floor displacements of the first and second models

Продольная жёсткость упругих связей в составе третьей расчётной схемы подбиралась на основании усилий, возникающих в этих связях при моделировании землетрясения, произошедшего в г. Цзици (рис. 11). Несмотря на то, что применение подобного решения обеспечения сейсмостойкости подвесного здания не дало каких-либо положительных результатов в уменьшении перемещений подвесных конструкций (рис. 9), стоит отметить, что в некоторых случаях такой подход позволил уменьшить перемещения ядра жёсткости здания (рис. 12). Подвешенные перекрытия могут быть использованы в качестве демпфера настроенной массы, но при этом подбор оптимальных характеристик связей остаётся серьёзной проблемой, решением которой может являться, например, применение генетического алгоритма [6].

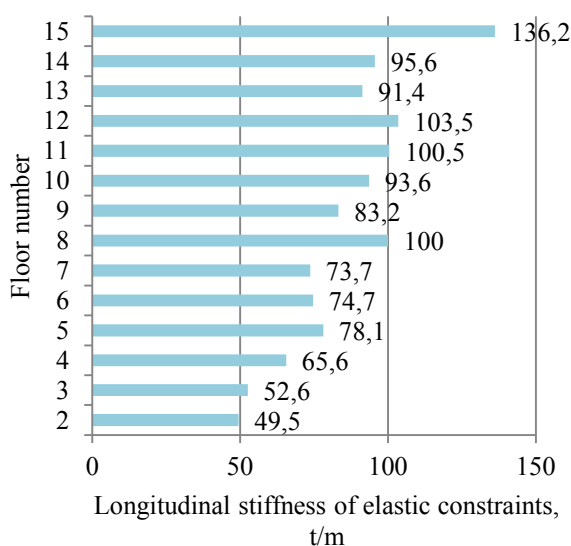


Рисунок 11 – Продольные жёсткости конечных элементов упругой связи третьей модели

Figure 11 – Longitudinal stiffness of elastic constraints of the third model

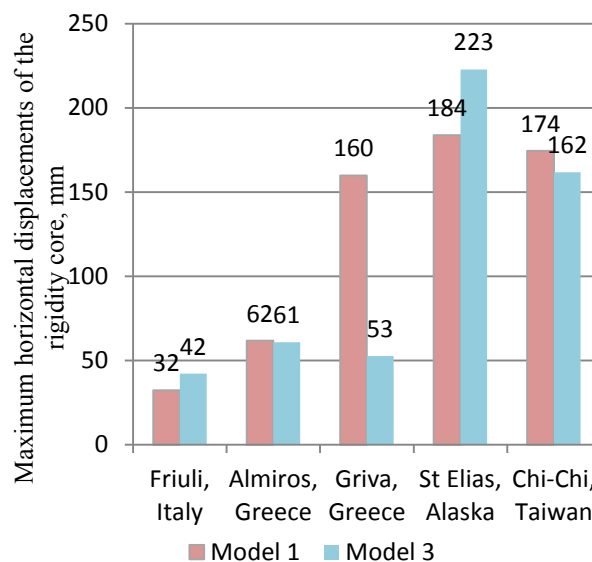


Рисунок 12 – Максимальные перемещения конструкций ядра жёсткости первой и третьей моделей

Figure 12 – Maximum horizontal displacements of the rigidity core of the first and third models

Применение конечных элементов упругой связи на всех этажах позволило уменьшить значения перемещений подвесных конструкций при сейсмическом воздействии на Тайване. Более детальный подход в определении продольных жёсткостей упругих связей потенциально способен снизить перемещения перекрытий при землетрясениях с другими интенсивностью и спектрами реакции.

Внедрение в расчётную схему упругих связей между оголовком и стволом здания привело к снижению максимальных перемещений подвешенных перекрытий при всех моделируемых землетрясениях. Применение подобного решения позволило снизить перемещения перекрытий на 13% при низкочастотном землетрясении в провинции Фриули (рис. 9 а), на 76% при среднечастотном землетрясении в г. Грива (рис. 9 в) и на 17% при низкочастотном землетрясении в горах св. Ильи (рис. 9 д).

Заключение

1. Введение крестовых связей во второй расчётной схеме позволило уменьшить межэтажный дрейф при сейсмических воздействиях различных частотных составов, что способно сохранить целостность внутренних конструкций здания, а также элементов фасада.
2. Применение поэтажных упругих связей позволило уменьшить амплитуду колебаний ствола здания для среднечастотного и низкочастотного сейсмических воздействий.
3. Наиболее эффективной является демпферная конструкция, представленная в четвёртой схеме. Применение упругих связей между оголовком, несущим подвесные конструкции, и стволом здания позволило уменьшить опасные перемещения перекрытий при всех рассмотренных сейсмических воздействиях, обладающих различным спектром частот.
4. Выбор конструктивной реализации механизма подвески перекрытий должен определяться на основе данных о характере преобладающих в районе строительства землетрясений.

Список литературы

1. Саркисян М. Designing tall buildings: Structure as architecture. Нью-Йорк: Routledge, 2012. 203 с.
2. Козак Ю. Конструкции высотных зданий / Перевод с чеш. Казиной Г.А. Под ред. Дыховичного Ю.А. М.: Стройиздат. 1986. 308 с.
3. Ендеде М., Шейнога И. Высотные здания с диафрагмами и стволами жёсткости / Перевод с чеш. Длгова Е.Б. Под ред. Казиной Г.А. М.: Стройиздат. 1980. 336 с.
4. Копытов М.М. Металлические конструкции высотных зданий. М.: АСВ, ТГАСУ, 2016. 401 с.
5. Шуллер В. Конструкции высотных зданий / Перевод с англ. Килимника Л.Ш. Под ред. Казиной Г.А. М.: Стройиздат. 1979. 248 с.
6. Ye Z., Wu G. Optimal lateral aseismic performance analysis of mega-substructure system with modularized secondary structures. Structural Design of Tall and Special Buildings. 2017, no.17, pp. 1-14.

References

1. Sarkisian M. Designing tall buildings: Structure as architecture. New York, Routledge, 2012. 203 p.
2. Kozak Yu. Konstrukcii vysotnyh zdaniy [Design of tall buildings], Perevod s chesh. Kazinoy G.A. Pod red. Dykhovichnogo Yu.A. Moscow, Strojizdat. 1986. 308 p. (In Russian)

3. Endele M., Shejnoga I. Vysotnye zdaniya s diafragmami i stvolami zhyostkosti [Tall buildings with diaphragms and cores of rigidity], Perevod s chesh. Dlgova E.B. Pod red. Kazinoj G.A. Moscow, Strojizdat, 1980. 336 p. (In Russian)
4. Kopytov M.M. Metallicheskie konstrukcii vysotnyh zdaniy [Metal structures of tall buildings]. Moscow, ASV, TSUAB, 2016. 401 p. (In Russian)
5. Shuller V. Konstrukcii vysotnyh zdaniy [High-rise building structures], Perevod s angl. Kilimnika L.Sh. Pod red. Kazinoj G.A. Moscow, Strojizdat. 1979. 248 p. (In Russian)
6. Ye Z., Wu G. Optimal lateral aseismic performance analysis of mega-substructure system with modularized secondary structures. Structural Design of Tall and Special Buildings. 2017, no. 17, pp. 1-14.

Информация об авторах / Information about authors

Белаш Татьяна Александровна, д.т.н., профессор. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Tatiana A. Belash, D.Sc. (Technology), Professor. Saint-Petersburg, Russian Federation

Свитлик Илья Владимирович*, аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Ilya V. Svitlik *, postgraduate student, Department «Building structures, buildings and structures», Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. Saint-Petersburg, Russian Federation