

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-2-188-196

Оригинальная статья /Original Paper

Системы с оптимальными геометрическими формами

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,

367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматриваются здания различного очертания, которые обладают высокой сейсмостойкостью, которую обеспечивают рациональная форма и очертания здания. Влияние кручения здания в плане сводится к минимуму, тем самым, исключаются большие напряжения на торцах проектируемого здания. При этом сохраняется поступательное перемещение здания в плане. **Метод.** Путём оптимизации формы и очертания зданий различного назначения обеспечивается высокая эффективность работы сооружения при сейсмических воздействиях. Методом сравнения формы и очертаний различных зданий выбирается наилучший вариант их компоновки. **Результат.** Разработаны конструктивные схемы зданий и сооружений различного в плане очертания: круглые, квадратные, прямоугольные; составлены конструктивные схемы объемных сейсмостойких сооружений, пирамидальных, конических различного очертания. Проведен сравнительный анализ и составлены рекомендации по проектированию сейсмостойких зданий и сооружений с оптимальными геометрическими формами. **Вывод.** Предлагаемые в статье конструктивные схемы могут найти применение при проектировании сейсмостойких зданий и сооружений различного назначения.

Ключевые слова: сейсмостойкость и сейсмозащита, оптимальные формы зданий, объёмные сооружения, конструктивные схемы, сейсмические волны

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Системы с оптимальными геометрическими формами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50 (2):188-196. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-188-196

Systems with optimal geometric shapes

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. In this paper, buildings of various shapes that have high seismic resistance are considered. Such seismic resistance is provided by the rational shape and outlines of the building itself. Here, the influence of the torsion of the building in the plan is minimized, thereby eliminating large stresses at the ends of the designed building. At the same time, the translational movement of the building in the plan is preserved. **Method.** By optimizing the shape and shape of buildings for various purposes, high efficiency of the structure is ensured under seismic effects. By comparing the shape and outlines of various buildings, the best variant of their layout is selected. **Result.** Structural schemes of buildings and structures with high resistance to seismic effects are given. A comparative analysis and recommendation for the design of earthquake-resistant buildings are given. Structural schemes for buildings and structures of various outlines have been developed: round, square, rectangular; constructive schemes of volumetric seismic-resistant structures, pyramidal, conical of various shapes, have been drawn up. Recommendations for the design of earthquake-resistant buildings and structures with optimal geometric shapes are made. **Conclusion.** The design schemes proposed in the article can be used in the design of earthquake-resistant buildings and structures for various purposes.

Keywords: seismic resistance and seismic protection, optimal forms of buildings, three-di-

mensional structures, structural schemes, seismic waves

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Systems with optimal geometric shapes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(2): 188-196. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-188-196.

Введение. Обычные мероприятия по сейсмозащите зданий и сооружений сводятся в основном к повышению несущей способности элементов и конструкций. Такая сейсмозащита осуществляется в соответствии со строительными нормами «Строительство в сейсмических районах» [4,5,7,10,11]. При этом выполняемые мероприятия не снижают сейсмических нагрузок на здания и сооружения, а только их учитывают. Балльность землетрясений зависит от грунтовых условий участка строительства [1,3,6].

В последнее время в России, США, Японии, Франции и других зарубежных странах всё более широкое применение находят активные методы сейсмозащиты. Эти методы предусматривают изменение массы или жёсткости, или демпфирования системы в зависимости от её перемещений и скоростей. В настоящее время известно более 100 запатентованных конструкций сейсмозащиты. Преимуществом активных методов перед традиционными методами является то, что они существенно снижают сейсмические нагрузки на здания и сооружения.

Актуальность исследований по повышению сейсмостойких зданий и сооружений становится очевидной после землетрясений, которые произошли в Турции с 6 по 12 февраля 2023 года. Эти землетрясения унесли более 45 000 тысяч человеческих жизней и нанесли колоссальный материальный ущерб [9]. Многие здания и сооружения рухнули под воздействием сейсмических толчков. Это - невиданная трагедия для человечества, которая наталкивает нас к серьёзным размышлениям. Ранее происходили аналогичные землетрясения в Турции 1999 году [2].

Постановка задачи. Далее приводятся конструктивные схемы зданий и сооружений. Они все обладают одним преимуществом – сейсмостойкостью. Причём каждая приведенная ниже конструктивная схема имеет свои недостатки. В комментариях к конструктивным схемам мы приводим эти недостатки, не указывая на приведенное выше преимущество, общее для всех схем. Рассматриваются различные конструктивные схемы, обладающие высокой сейсмостойкостью, с указанием присущих им недостатков, которые должны учитываться при проектировании зданий и сооружений.

Методы исследования. Приведём конструктивные схемы зданий и сооружений с высокой сейсмостойкостью, давая к ним соответствующие комментарии. На рис. 1 показаны круглые в плане здания.

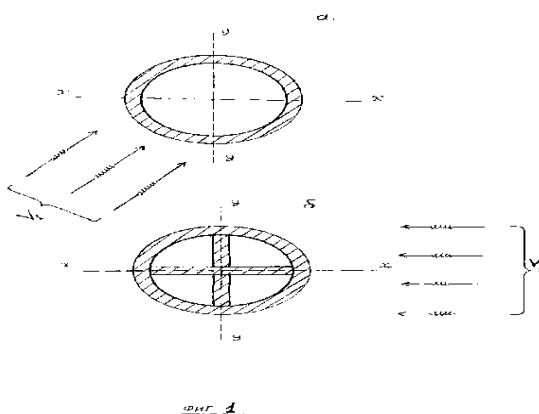


Рис.1. Взаимодействия круглых в плане зданий с сейсмической волной V_1 :
 а) - при диагональном воздействии; б) - при горизонтальном воздействии.

Fig. 1. Interaction of round buildings with seismic wave V_1 :
 а) - with a diagonal impact; б) - with a horizontal impact.

Если здание имеет в плане круговое очертание и центр его массы совпадает с центром его жёсткости, то при взаимодействии с сейсмической волной V_1 (рис. 1) такое сооруже-

ние получает только поступательные перемещения: исключается кручение. Таким образом, уменьшаются напряжения в конструкции от сейсмических нагрузок. Недостатки: здания кругового очертания имеют ограниченную область применения.

На рис. 2 показаны конструктивные схемы зданий квадратного в плане очертания. Если центр масс совпадает с центром жёсткости, то здание квадратное в плане при взаимодействии с сейсмической волной V (рис. 2) получает поступательные перемещения. При этом кручение здания – минимальное: напряжения от сейсмических нагрузок за счёт этого уменьшаются.

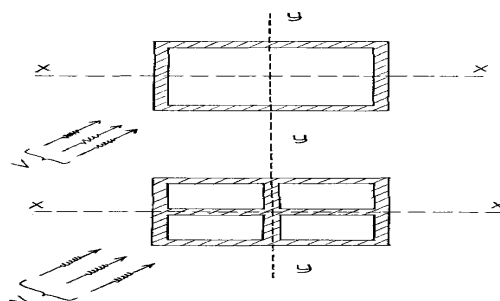


рис. 2

Рис. 2. Взаимодействию квадратного в плане зданий с сейсмической волной V

Fig. 2. Interaction of a square building with a seismic wave V

Недостатки: при значительных габаритах (в плане) затрудняется освещение и аэрация, ухудшается планировка и архитектурная выразительность здания.

На рис. 3.а показано прямоугольное в плане здание, причём здание – довольно вытянутое в одном направлении. Здесь одного совпадения центра масс с центром жёсткости не даёт нужного результата, поскольку здание вытянутое; сейсмическая волна (рис. 3.а), доходя до одного края здания, успевает его раскрутить: кручение здания – неминуемо.

На рис. 3.б показано то же самое здание, расчлененное на отдельные блоки. Это достигается за счёт устройства антисейсмических швов. Каждый квадратный в плане (или близкий к квадрату) блок должен удовлетворять условию совпадения центра масс блока с центром его жёсткости. При этом каждый отдельный блок работает автономно по схеме, изложенной в предыдущем пункте. Достигается нужный эффект.

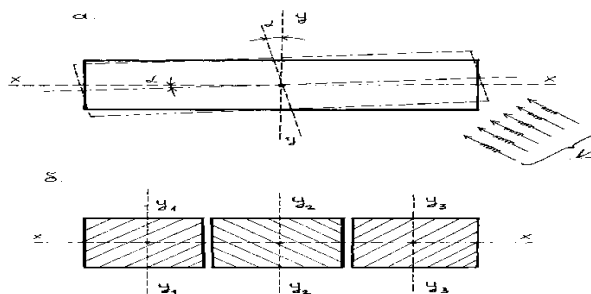


рис. 3

Рис.3. Взаимодействию прямоугольного в плане зданий с сейсмической волной V : а)прямоугольное вытянутое в одном направлении здание; б) расчленённое на отдельные блоки

Fig.3. Interaction of a rectangular building with a seismic wave V :

а) a rectangular building elongated in one direction;b) divided into separate blocks.

Недостатки: устройство антисейсмических швов требует дополнительных затрат.

Древнейшие сейсмостойкие конструкции строились в виде пирамид или конусов (усеченных или не усеченных). К ним относится «Бабушка» Вавилонской башни, сама Вавилонская башня, Египетские пирамиды.

На рис. 4 показана схема многоярусного ступенчатого (многоэтажного) конуса: каждый ярус представляет собой отдельный этаж со своими «лабиринтами», залами, проемами

и т.д. Такая форма технологична, возводится с помощью применения малых механизмов; центр тяжести здания располагается ближе к земле: на $1/3$ H от земли, - повышается сопротивляемость здания к воздействию сейсмических сил. Меняя высоту H и диаметр D , можно получить различные схемы, можно оптимизировать сооружение.

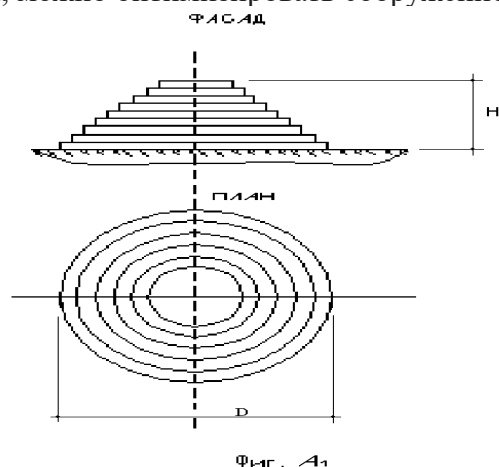


Рис. 4. Схема многоярусного ступенчатого (многоэтажного) конуса
Fig. 4. Scheme of a multi-tiered stepped (multi-story) cone

Недостатки: освещение и аэрация внутренних лабиринтов такого здания затруднены; требуется устройство воздухопроводов и обеспечение искусственного освещения; необходимы наклонные лифты; слишком много наклонных и вертикальных коммуникаций различного назначения.

На рис. 5 показана схема ступенчатой пирамиды, сечение которой имеет вид квадрата или четырехугольника, близкого к квадрату; это здание устойчиво; технологично при возведении и обладает высокой сейсмостойкостью. Недостатки были изложены в предыдущей схеме.

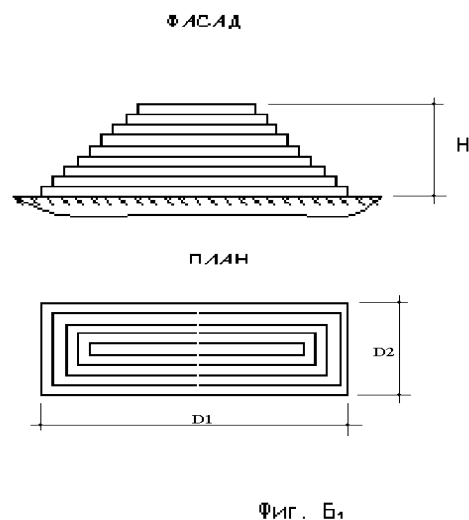


Рис. 5. Схема ступенчатой пирамиды, сечение которой имеет вид квадрата или четырехугольника

Fig. 5. Scheme of a step pyramid, the section of which has the form of a square or quadrangle

На рис. 6 показана схема ступенчатой пирамиды, в сечении которой правильный шестиугольник (можно проектировать в сечении пяти, шести, семи, восьми – угольники). Оптимизируя соотношение между высотой H и размером D (рис. 6), можно обеспечить необходимые свойства системы. Численность населения Земли растет квадратично, к 2030 году ожидается 9 млрд. человек. В связи с этим строительство многоэтажных зданий становится актуальным. Будущее за многоэтажными сейсмостойкими зданиями. Японцы уже разработали проект здания в виде ступенчатой пирамиды высотой $H = 1000$ м, (300 этажей!).

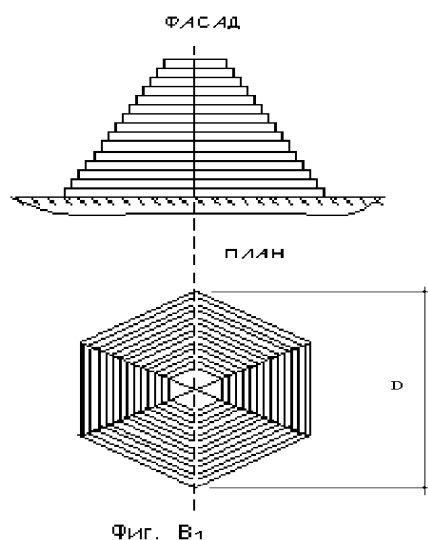


Рис. 6. Схема ступенчатой пирамиды, в сечении которой правильный шестиугольник
Fig. 6. Scheme of a stepped pyramid, in the section of which a regular hexagon

Недостатки изложены выше. Приведенные конструктивные схемы (рис.4-6), являются обобщением древнейшей конструктивной схемы *вавилонской башни*.

На рис. 7 показано здание с первым гибким этажом: колонны первого этажа – гибкие; верхние этажи – жёсткие. При землетрясениях здание получает достаточно большие горизонтальные перемещения. За счёт этого воздействие сейсмических сил на здание снижается [4,8]. В уровне фундаментов верхняя жёсткая часть здания (1) (рис. 8 и 9) опирается на катки 2, которые катятся или качаются за счёт наличия сферических поверхностей. Здание получает значительные горизонтальные перемещения при землетрясениях: снижаются сейсмические нагрузки.

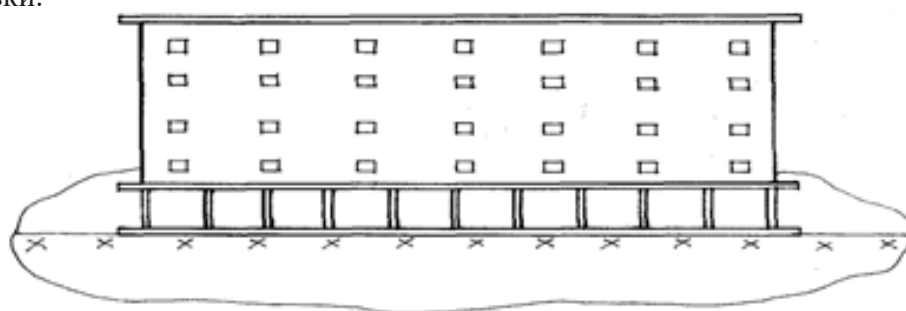


Рис. 7. Здание с первым гибким этажом
Fig. 7. Building with a first flexible floor

Недостатки: относительная сложность изготовления гибких конструкций; повышенная чувствительность к воздействиям с низким или широкополосным спектром частот.

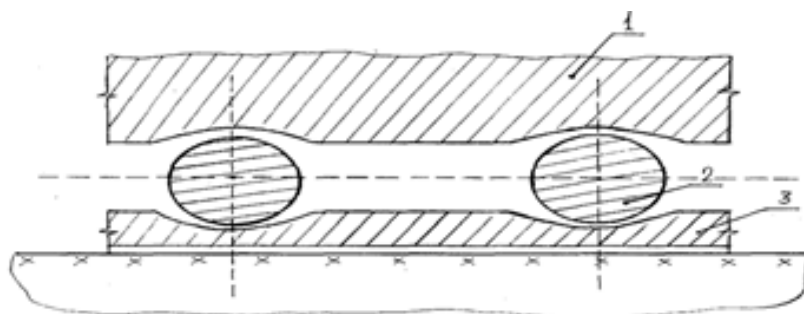


Рис. 8. Опираение здания на катки
Fig. 8. Supporting the building on the rollers

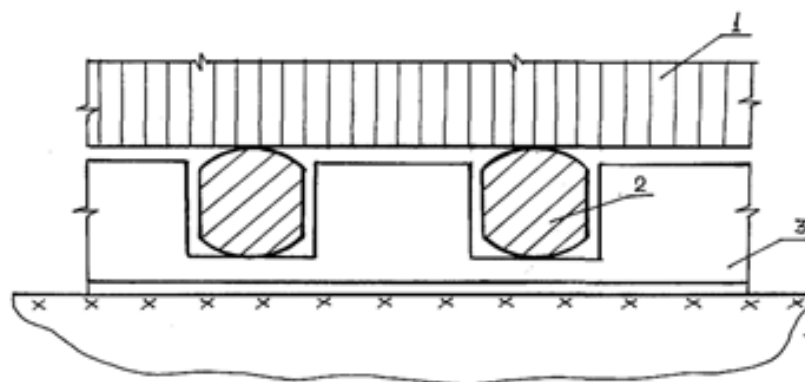


Рис. 9. Опираение здания на качающиеся катки
Fig. 9. Supporting the building on rocking rollers

Недостатки: точечные контакты быстро выходят из строя; изготовление стоек и катков со сферическими торцами малого радиуса и высокопрочными контактными поверхностями присуще скорее машиностроительному производству, чем строительной технологии; приходится применять для изготовления катков дорогие высокопрочные материалы (металлы), которые быстро корродируют; высокая концентрация напряжений охрупчивает материал.

На рис. 10. показаны схемы зданий на скальных основаниях (грунты I-ой категории по сейсмическим свойствам). Здания могут быть в виде гибкого каркаса с навесными панелями или сооружения с первым гибким этажом (колонны). Основание обладает избирательной способностью: жёсткое скальное основание усиливает перемещение основания с высокими частотами (из всего спектра частот). Напротив, здания с гибкой схемой обладает низкими собственными частотами. слабо реагируют на высокочастотные возмущения землетрясения.

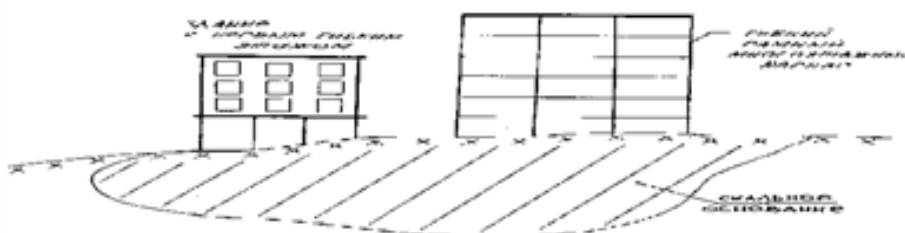


Рис. 10. Опираение здания на скальное основание
Fig. 10. Supporting the building on a rock foundation

Недостатки: при увеличении этажности приходится делать колонны достаточно мощными, что снижает эффективность системы «сооружение – основание», т.к. при этом жёсткость здания существенно возрастает.

На рис.11 показана схема жёсткого здания. Подстилающий грунт мягкий, а здание жёсткое (к мягким грунтам здесь относятся грунты III-ей категории по сейсмическим свойствам). Мягкий грунт из всего спектра частот колебаний поверхности Земли реагирует в основном на низкие частоты. Здание, будучи жестким, обладает высокими собственными частотами. Таким образом, система «сооружение - основание» далека от резонанса или состояния, близкого к нему.

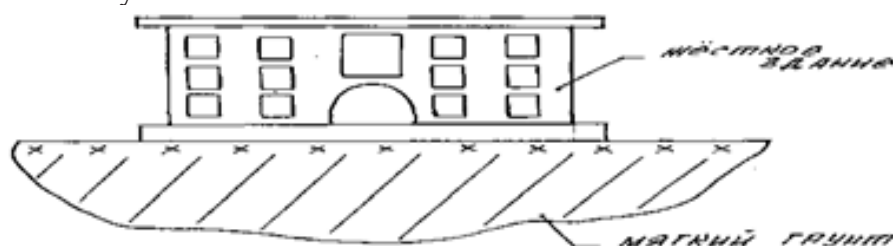


Рис. 11. Жёсткое здание на мягком основании
Fig. 11. Rigid building on a soft base

Недостатки: здание может потерять общую устойчивость, опрокинуться при землетрясении, получить большие перемещения. Требуются дополнительные мероприятия.

На рис. 12 показана схема здания на железобетонной плите. Между плитой и фундаментом устроен, так называемый компенсирующий подстилающий слой 1, из сильно деформируемого материала с низким значением модуля сдвига (резина, неопрен) [4, 8]. За счёт этого при землетрясении сейсмические силы снижаются. Система близка (с точки зрения фильтрации волны) к системе с кинематическими связями.

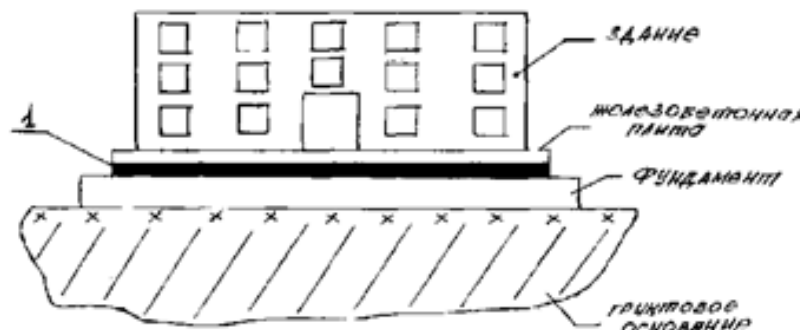


Рис. 12. Здание на мягком подстилающем слое
Fig. 12. Building on a soft underlying layer

Недостатки: конструкция сложна; компенсирующий слой недолговечен. Система рациональна только в сооружениях специального назначения.

На рис. 13 показана конструктивная схема кинематической опоры в виде колонны с двумя оголовками.

Оголовки представляют собой корытообразные обоймы из металла или железобетона, заполненные упругим материалом, играющим роль буфера, например, резина. В процессе землетрясения колонны имеют возможность получать достаточно большие горизонтальные перемещения (с обратным возвратом за счёт буфера). В результате этого сейсмические силы снижаются. В частном случае, столбчатые катки могут быть изготовлены с одним буферным оголовком.

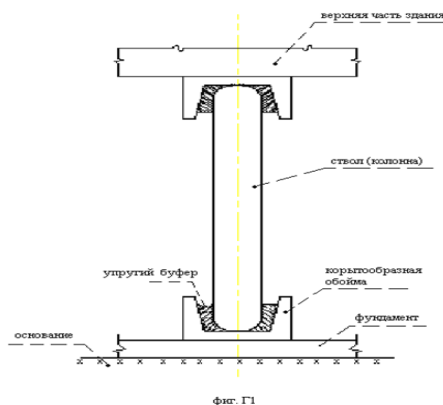
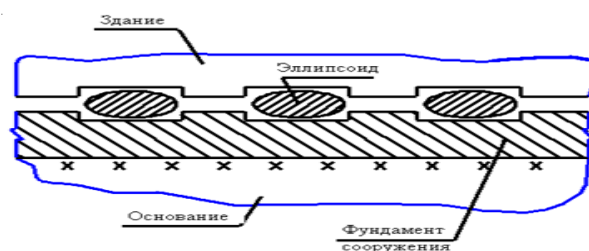


Рис. 13. Колонна на упруго-податливых опорах
Fig. 13. Column on resiliently compliant supports

Недостатки: резина и металл подвержены коррозии; устойчивость колонны на опрокидывание невысока; за счёт концентрации напряжений торцы колонны охрупчиваются.

На рис.14 показана схема кинематических опор в виде трехосных эллипсоидов. Два радиуса у этих эллипсоидов друг другу равны, а третий радиус отличен от них. В процессе землетрясения эллипсоиды позволяют зданию достаточно свободно перемещаться в горизонтальных направлениях. При этом сейсмические силы уменьшаются. Такие катки можно устроить не только в цокольном и первом этажах здания, но и на уровне каждого этажа или через этаж, в сечениях колонн, где изгибающие моменты равны нулю (в фокусных точках).



Фиг. Е2

Рис.14. Здание на кинематических эллипсоидах

Fig. 14. Building on kinematic ellipsoids

Недостатки: в точках контакта возникает высокая концентрация напряжений, что вызывает охрупчивание материала; материал катков должен быть высокопрочным; если катки из металла, то они подвержены коррозии. Рациональны в сооружениях специального назначения.

На рис. 15 показано подвешенное на гибких подвесках 3 здание или бокс 1. Всё это держится на жёсткой раме 2. При землетрясениях бокс 1 качается с малыми частотами и воздействие сейсмических сил на бокс мало.

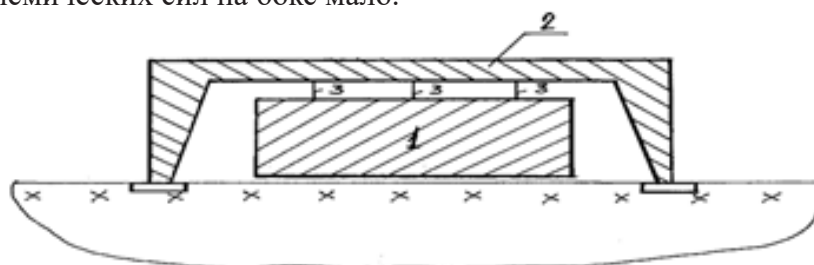


Рис.15. Здание на гибких подвесках

Fig.15. Building on flexible suspension

Недостатки: основная несущая рама должна быть достаточно жёсткой; раму догружают сейсмические силы. Применяется только в сооружениях специального назначения.

На рис.16 показан скользящий пояс. Верхняя часть 1 представляет собой здание или сооружение с достаточно большой жёсткостью. Поверхности скольжения должны иметь слой с небольшим коэффициентом трения (например, фторопласт). За счёт наличия (рис.16) свободного зазора 3 верхняя часть скользит относительно нижней. Таким образом, здание получает горизонтальные перемещения при землетрясении: снижается воздействие сейсмических сил.

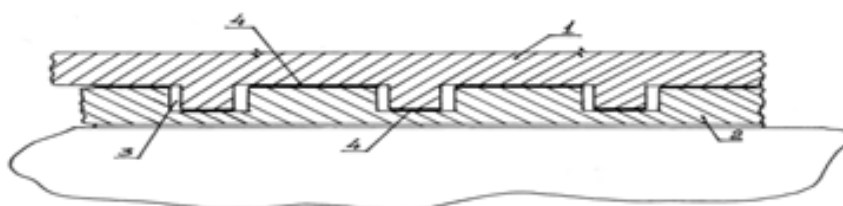


Рис. 16. Схема скользящего пояса

Fig. 16. Scheme of the sliding belt

Недостатки: поверхности скольжения приходится покрывать дорогими материалами, долговечность которых невысока; при слабых колебаниях скольжение затруднительно и ускорения основания передаются на здание, как при жёсткой связи с фундаментом 2 (рис. 16). Происходит залипание поверхностей скольжения.

Вывод. Разработаны конструктивные схемы зданий и сооружений различного в плане очертания: круглые, квадратные, прямоугольные; составлены конструктивные схемы объемных сейсмостойких сооружений, пирамидальных, конических различного очертания. Составлены рекомендации по проектированию сейсмостойких зданий и сооружений с оптимальными геометрическими формами. Предлагаемые в статье конструктивные схемы могут найти применение при проектировании сейсмостойких зданий и сооружений различного назначения.

Библиографический список:

1. Абакаров А.Д., Крамынин П.И. Выбор рациональных площадок для строительства сейсмостойких зданий в г. Махачкале (Инженерно геологические особенности Дагестанской АССР), 1984.
2. Айзенберг Я.М. Два разрушительных землетрясения в Турции за три месяца 1999г. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». 2000. - №1.- С. 54-57.
3. Айзенберг Я.М., Миносян А.В. Взаимодействие сооружения с упруго-пластическим грунтом при сейсмических воздействиях //Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001, №2.
4. Айзенберг Я.М. Сейсмоизоляция зданий в России и СНГ// Сейсмостойкое строительство», 1998, № 1. С. 23-26.
5. Кириков Б. А. Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции. Изд-во “Наука”, М. 1990.
6. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий (Основы теории сейсмостойкости). Изд-во Высшая школа, М.1983.
7. Поляков С.В., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. Стройиздат, М. 1989.
8. Уздин А.М. Задание сейсмического воздействия. Взгляд инженера-строителя//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. №1.С. 27-31.
9. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений. — М.: Стройиздат, 1978.—311с.
10. СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах.
11. Айзенберг Я.М, В. И. Смирнов, А. В. Минасян. Качающиеся опоры с гидроциркуляционной системой для сейсмоизоляции сооружений// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений — Вып. 2. 2000. С. 34-36.

References:

1. Abakarov A.D., Kramynin P.I. Selection of rational sites for the construction of earthquake-resistant buildings in the city of Makhachkala (Engineering and geological features of the Dagestan ASSR), 1984. (In Russ)
2. Aizenberg Ya.M. Two devastating earthquakes in Turkey in three months in 1999. Earthquake-resistant construction. Building safety”. 2000; 1: 54-57. (In Russ)
3. Aizenberg Ya.M., Minosyan A.V. Interaction of a structure with an elastic-plastic soil under seismic influences. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2001; 2. (In Russ)
4. Aizenberg Ya.M. Seismic isolation of buildings in Russia and the CIS. *Earthquake-resistant construction*, 1998; 1: 23-26. (In Russ)
5. B.A. Kirikov, Ancient and Newest Seismic-Resistant Structures. Publishing house “Science”, M. 1990. (In Russ)
6. Polyakov S.V. Seismic-resistant structures of buildings (Fundamentals of the theory of seismic resistance). Publishing House Higher School, M.1983. (In Russ)
7. Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. Modern methods of seismic protection of buildings. Sroizdat, M. 1989. (In Russ)
8. Uzdin A.M. Setting the seismic impact. View of a civil engineer. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2005; 1:27-31. (In Russ)
9. Polyakov S.V. Consequences of strong earthquakes. M.: Sroizdat, 1978; 311. (In Russ)
10. SP 14.13330.2018 “SNiP II-7-81* Construction in seismic areas. (In Russ)
11. Aizenberg Ya.M., V.I. Smirnov, A.V.Minasyan. Swinging supports with a hydrocirculation system for seismic isolation of structures. *Earthquake-resistant construction. Building Safety*.2000;2: 34-36. (In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абуспян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 04.05.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 01.06.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 01.06.2023.