

УДК 699.841

БОЛОТБЕК Т., КГУСТА им. Н.Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика,
e-mail: temir.b.amir@gmail.com

BOLOTBEK T., KSUCTA n.a. N.Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic.

НАСЫРЫНБЕКОВА К.У., КГУСТА им. Н.Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика,
e-mail: nkaukhar@mail.ru

NASYRYNBEKOVA K.U., KSUCTA n.a. N.Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic .

ТОКТОГУЛ УУЛУ Ж., КГУСТА им. Н.Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика
e-mail: jyldyzbek2018@mail.ru

TOKTOGUL UULU J., KSUCTA n.a. N.Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic .

БОЛОТБЕКОВ А.Б., КГУСТА им. Н.Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика
e-mail: nkaukhar@mail.ru

BOLOTBEKOV A.B., KSUCTA n.a. N.Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic.

ИНЕРЦИОННОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИЛ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ СО СКОЛЬЗЯЩИМ ПОЯСОМ

INERTIAL DAMPING OF SEISMIC FORCES OF BUILDINGS AND STRUCTURES WITH A SLIDING BELT

Бул макала имараттардын пайдубалындагы сейсмикалык жылуучу алкактын негизинде жер титирөөгө туруктуу курулуштарга жана сейсмикалык күчтөргө карама-каршы таасир этүүчү активдүү принциптер каралган.

Өзөк сөздөр: сейсмикалык коргоо, жылуучу алкак, сейсмикалык термелүү, басаңдатуу, сейсмикалык жүктүн азайышы, сейсмикалык талдоо.

В статье рассматриваются вопросы сейсмостойкого строительства и принципы активного противодействия сейсмическим силам на основе скользящего пояса основания здания.

Ключевые слова: сейсмозащита, скользящий пояс, сейсмические колебания, демпфирования, сейсмоизолирующий, сейсмический анализ.

The article deals with the issues of seismic resistant construction and the principles of active counteraction to seismic forces based on the sliding belt of the building foundation.

Key words: seismic protection, sliding belt, seismic vibrations, damping, seismic isolating, seismic analysis.

Сейсмический анализ, или анализ сейсмостойкости, является интеллектуальным инструментом в сейсмостойком строительстве, который разбивает эту сложную тему на ряд подразделов для лучшего понимания работы зданий и сооружений под сейсмической нагрузкой. Анализ сейсмостойкости основывается на принципах динамики сооружений и антисейсмического проектирования. В течение десятилетий самым распространенным методом анализа сейсмостойкости являлся метод спектров реакции, который получил свое развитие в настоящее время. Однако спектры реакции хороши лишь для систем с одной степенью свободы. Использование пошагового интегрирования с трехмерными диаграммами сейсмостойкости оказывается более эффективным методом для систем со многими степенями свободы и со значительной нелинейностью в условиях переходного

процесса кинематической раскочки. На рис. 1 показана 3-D диаграмма сейсмостойкости модели здания /1/.

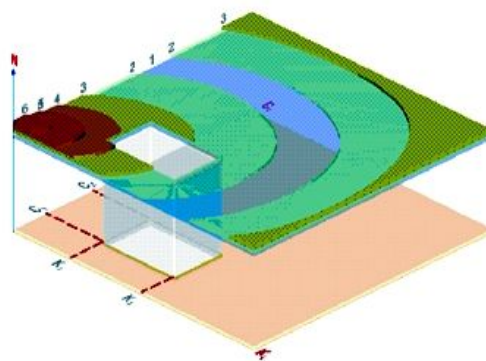


Рис. 1. Трехмерная диаграмма сейсмостойкости модели здания

Экспериментальная проверка сейсмостойкости, или исследование сейсмостойкости, необходимо для понимания действительной работы зданий и сооружений под сейсмической нагрузкой. Она бывает, в основном, двух видов: полевая (натурная) и на сеймоплатформе. Удобнее всего испытывать модель здания на сеймоплатформе, воссоздающей сейсмические колебания — если, конечно, нет возможности дожидаться настоящего землетрясения. Такие лабораторные испытания проводятся на больших или меньших моделях зданий и сооружений уже в течение многих лет, однако стоимость их довольно высока. Чтобы снизить эту стоимость, рекомендуется применять Performance Factor Procedure /2/, впервые предложенную для экспериментальной проверки эффективности сейсмической изоляции.

В связи с ежегодным ростом объема строительства в сейсмически опасных районах возрастают и расходы на антисейсмические мероприятия. Поэтому одной из важнейших задач теории и практики сейсмостойкого строительства является снижение затрат на антисейсмические мероприятия при обеспечении сохранности зданий и сооружений.

Активная сейсмозащита зданий связана со снижением уровня инерционных сил, развивающихся в сооружениях при землетрясениях. Пассивная сейсмозащита обеспечивается повешением несущей способности конструкций за счет увеличения размеров сечений, использования более тяжелых материалов, устройства железобетонных жестких конструкций. Эти меры усиления конструкций приводят к снижению устойчивости зданий и сооружений в связи с увеличением массы и жесткости сооружений. Горизонтальные сейсмические нагрузки на надземные конструкции зданий можно снизить, если обеспечить возможность проскальзывания здания относительно фундамента или основания. Большая часть энергии, сообщаемая сооружению, затрачивается при этом не на преодоление сопротивления связей в конструкциях, а на преодоление сил трения скольжения. В момент скольжения изменяется динамические характеристики системы: здание – основание.

Механизм работы зданий со скользящим поясом состоит в том, что пока сила сейсмического воздействия не преодолет сухого трения скользящих прокладок, на здание передаются ускорения колеблющегося основания. При увеличении горизонтального воздействия силы трения преодолеваются, и здание начинает проскальзывать относительно фундамента.

Для исследования сейсмической реакции зданий со скользящим поясом выбрана двухмассовая расчетная схема, показанная на рис. 2. Эта схема позволяет учесть деформационные свойства надземных конструкций здания. Масса m_2 равна приведенной массе рассматриваемого здания, помещенной в уровне покрытия третьего этажа. Остальная масса наземных конструкций m_1 размещена в уровне ростверка.

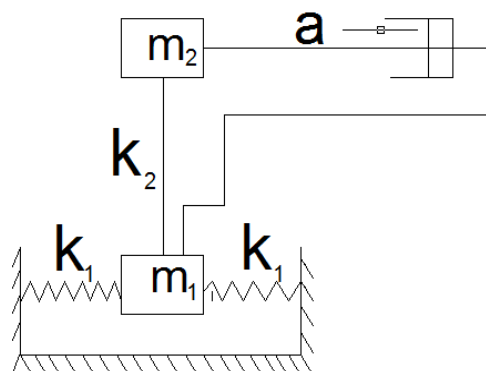


Рис. 2. Двухмассовая расчетная схема здания со скользящим поясом
 K_1 – горизонтальная жесткость надземных конструкций (сдвиговая жесткость здания); K_2 , коэффициент вязкого трения α , учитывающий затухание колебаний в надземных конструкциях

При сейсмическом воздействии масса m_2 (рис. 2) может находиться в двух состояниях в состоянии «залипания» и состоянии скольжения. В случае отсутствия скольжения система становится одномассовой с приведенной массой m_2 , собственная частота колебаний системы в этот момент времени равна:

$$P = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}}, \quad (1)$$

Коэффициент формы колебаний равен единице.

В зданиях без инерционного демпфирования масса m_1 всегда находится в состоянии (I), которая равна $P=34,9$. Период колебаний находится по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{P} \quad (2)$$

Для рассматриваемой модели здания $T = 0,18$ с.

Известно, что затухание колебаний зданий практически не влияет на величины периодов собственных колебаний [3]. Сухое трение скольжения также не оказывает влияния на частоты и периоды собственных колебаний двухмассовой системы (рис. 2), затухание в системе не учитывается. Уравнения колебаний в момент скольжения имеют вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + K_{11} y_1 + K_{21} y_2 &= 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 + K_{12} y_1 + K_{22} y_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где $\ddot{y}_1, \ddot{y}_2; y_1, y_2$ – ускорения и смещения масс m_1 и m_2 относительно оси, закрепленной на подвижном основания; $K_{11}, K_{21}, K_{12}, K_{22}$ – коэффициенты жесткости, характеризующие упругие восстанавливающие силы, приложенные в уровнях сосредоточенных масс m, k, m_2 .

Для двухмассовой системы:

$$K_{11} = K_1 + K_2; \quad K_{21} = K_{12} = -K_2; \quad K_{22} = K_2; \quad (4)$$

Уравнения (3) удовлетворяют следующие решения:

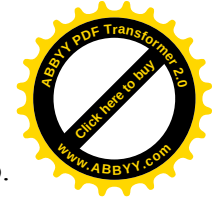
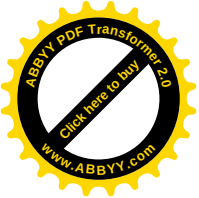
$$y_1 = A_1 \sin(P_{12}t + \alpha); \quad y_2 = A_2 \sin(P_{12}t + g); \quad (5)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды относительных колебаний масс m_1 и m_2 ; P_{12} – круговые частоты колебаний; g – начальная фаза колебаний. Величины относительных ускорений $\ddot{y}_1$ и $\ddot{y}_2$ масс m_1 и m_2 следующие:

$$\ddot{y}_1 = -P_{12}^2 A_1 \sin(P_{12}t + g); \quad \ddot{y}_2 = -P_{12}^2 A_2 \sin(P_{12}t + g); \quad (6)$$

Подставив выражения (5) и (6) в уравнения (3), получим известные уравнения:

$$\begin{aligned} (K_{11} - m_1 P_{12}^2) A_1 + K_{21} A_2 &= 0 \\ K_{21} A_1 + (K_{22} - m_2 P_{12}^2) A_2 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$



Ненулевые решения системы (7) возможны, если ее детерминант равен нулю.

$$\begin{vmatrix} K_{11} - m_1 P_{1,2}^2 & K_{21} \\ K_{12} & K_{22} - m_2 P_{1,2}^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

Решив определитель (В) с использованием выражений (4), получим формулы для определения двух частот собственных колебаний P_1 и P_2 двухмассовой системы в момент скольжения:

$$P_{1,2}^2 = \frac{m_1 k_2 + m_2 (K_1 + K_2) \pm \sqrt{m_1 k_2 + m_2 (K_1 + K_2)^2 - 4 m_1 m_2 k_1 k_2}}{2 m_1 m_2}; \quad (9)$$

$$q_1 = \frac{m_2 (K_1 + K_2)}{m_1 + K_2} \text{ и } q_2 = \frac{m_2}{m_1} \quad (10)$$

Если обозначить через D_i выражение

$$D_{1,2} = \frac{1 + q_1 \pm \sqrt{1 + q_1^2 - 4(q_1 - q_2)}}{2}; \quad (11)$$

где знак (-) соответствует D_1 , а знак (+) $-D_2$, то выражение для $P_{1,2}^2$ в сокращенном виде запишется:

$$P_{1,2}^2 = \frac{D_{1,2} K_2}{m_2} = D_{1,2} P_{1,2}^2; \quad (12)$$

где

$$P_n = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}}; \quad (13)$$

Таким образом, выражение для $D_{1,2}$ можно рассматривать как переходные коэффициенты от частоты собственных колебаний здания без сейсмоизолирующего скользящего пояса к двум частотам собственных колебаний зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом в момент скольжения.

Приняв величины амплитуд A_{11} и A_{21} массы m_1 по первой и второй формам, равными 1, получим выражение для амплитуд A_{12} и $A_{22}(A_{i2})$, массы m_2 по первой и второй формам:

$$A_{i2} = \frac{K_2}{K_2 - m_1 P_{1,2}^2} = \frac{1}{1 - D_{1,2}} \quad (14)$$

Соответственно коэффициенты форм η_{i1} и η_{i2} колебаний масс m_1 и m_2 по l_2 ой (первой и второй) формам колебаний будут равны:

$$\begin{aligned} \eta_{i1} &= \frac{(1 - D_{1,2} + q_2)(1 - D_{1,2})}{(1 - D_{1,2})^2 + q_2}, \\ \eta_{i2} &= \frac{1 - D_{1,2} + q_2}{(1 - D_{1,2})^2 + q_2}; \end{aligned} \quad (15)$$

Использував полученные формулы (11) и (12), найдем две частоты собственных колебаний

для исследуемого здания. Соответственно, периоды собственных колебаний равны:

$$T_1 = 3,41 \text{ с}; \quad T_2 = 0,13 \text{ с};$$

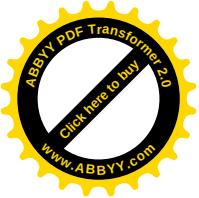
Первую частоту собственных колебаний зданий сейсмоизолирующим поясом в момент скольжения можно найти, если пренебречь упругими свойствами здания по упрощенной формуле:

$$P = \sqrt{\frac{K_1}{m_1 + m_2}} \quad (16)$$

Для исследуемого здания: $P_1 = 1,72 \text{ 1/с}$ и $T_1 = 3,65 \text{ с}$.

Практически мы получили, что $P_1 \approx P_1 (1,84 \approx 1,72)$ и $T_1 \approx T_1 (3,41 \approx 3,65)$. Значит выражение (16) может быть использовано для определения первой частоты собственных колебаний зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом.

Определим коэффициенты формы колебаний по формулам (15): для первой массы $\eta_{11} = 0,9979$ и $\eta_{21} = 0,00027$, для второй массы $\eta_{12} = 1,0024$ и $\eta_{22} = 0,00032$. Так как величины коэффициентов второй формы колебаний η_{12} для первой массы и η_{22} для второй массы получены очень малые, то можно сделать вывод, что при скольжении в зданиях с сейсмоизолирующим скользящим поясом реализуются колебания в основном по первой



форме, при этом период собственных колебаний значительно увеличивается $T_1=3,41$ с, сравнению с периодом $T=0,18$ с в зданиях без сейсмоизолирующего пояса, а коэффициент формы колебаний $\eta=1$.

Анализируя результаты расчета, можно сделать вывод, что в зданиях с сейсмоизолирующим скользящим поясом расчетная сейсмическая нагрузка $S=1124$ кН при 9-и балльном землетрясении, что в 3,75 раза меньше расчетной сейсмической нагрузки $S=4200$ кН в обычном здании и всего на 6,5% превышает расчетную сейсмическую нагрузку $S=1050$ Кн в зданиях без сейсмоизолирующего пояса при 7-ми балльном землетрясении /5/.

В этой связи устройство сейсмоизолирующего скользящего пояса позволяет снизить расчетную сейсмичность примерно на 2 балла за счет изменения динамических характеристик здания при скольжении.

Список литературы

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B9%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE
2. www.ecs.csun.edu
3. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий [Текст]/ С.В.Поляков. – М.: Высшая школа, 1993. - 304 с.
4. СНиП -22-03-2009. Строительство в сейсмических районах. –М.: Стройиздат, 2009 – 49с.
5. Солдатова Л.Л. Снижение сейсмических нагрузок в зданиях со скользящим поясом за счет изменения динамических характеристик [Текст] / Л.Л.Солдатова. - Сейсмостойкое строительство в Кыргызстане. Сборник научных трудов. - Бишкек: ФПИ, 1988. - С.6-13.