

РАЗРАБОТКА НАДЕЖНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИХ ОПОР ИЗ УПРУГИХ, ПЛАСТИЧНЫХ И АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.Ч.Апсеметов, А.Ж.Андашев

E.mail. ksucta@elcat.kg

Бул иште серпилгич, антифрикциондук жана эке материалдардан жасалган сейсмоизоляциялык таянычтардын композиттик конструкцияларынын иштелмелери жана ал таянычтардын оптималдуу параметрлеринин эсебинин инженердик методдору жазылган.

В настоящей работе описаны некоторые разработки композитных конструкций сейсмоизолирующих опор из упругих, антифрикционных и пластичных материалов и инженерные методы их расчета, устанавливающие оптимальные параметры этих опор.

In this work is describe some developments of composition constructions seism isolations support from elastics, antifriction and plastics materials and flier engineering methods of calculation, determinant optimal parameters these supports.

Из анализа современных методов активной сейсмозащиты зданий /1/ можно сделать вывод: перспективным методом активной сейсмозащиты является сейсмоизоляция зданий, выполненная на основе упругих, антифрикционных и пластичных материалов.

1. При этом наиболее распространенным сейсмоизолирующим устройством из упругого материала является резинометаллическая опора /2/, имеющая слоистую конструкцию амортизатора, состоящую из попеременно чередующихся стальных листов и слоев резины (рис.1), размещаемую между фундаментом здания и первым этажом. Такая опора имеет значительно меньшую горизонтальную жесткость, чем вертикальную. Существенным недостатком указанной опоры является технологическая сложность ее изготовления.

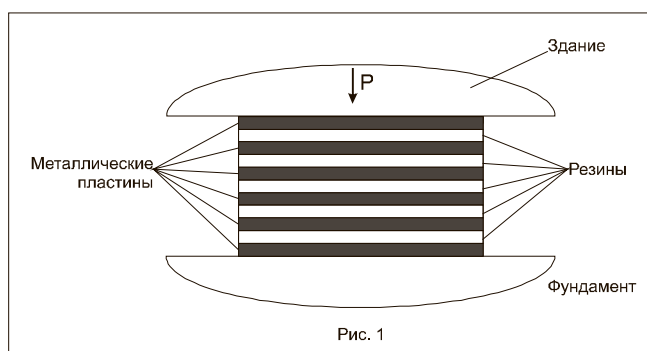


Рис. 1. Резино-металлическая опора

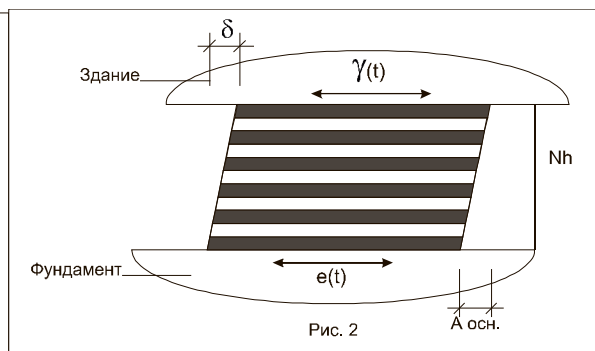


Рис. 2. Работа опоры при сейсмическом воздействии

В работе /3/ приведена методика расчета этих опор, согласно которой, задавая

$$e(t) = e_0 \sin(\omega t),$$

(1)

где $e(t)$ – амплитуда сейсмических колебаний, e_0 – некоторая амплитуда колебаний фундамента при землетрясении, а ω – их частота, получим

$$\gamma(t) = \gamma_o \sin(\omega t + \varphi),$$

где $\gamma(t)$ – колебание здания при землетрясении, γ_o – амплитуда устоявшихся колебаний здания, φ – угол запаздывания, N – число слоев резины в опоре, h – толщина одного резинового слоя (рис. 2).

Деформация опоры определяется выражением

$$\varepsilon_o = \frac{\gamma_o - \ell_o}{Nh}, \quad (2)$$

т.е. амплитуда колебаний здания γ_o больше амплитуды колебаний основания ℓ_o ,

$$\text{т.е. } \gamma_o > \ell_o, \quad \frac{\gamma_o}{\ell_o} > 1. \quad (3)$$

Получается, что резинометаллическая опора увеличивает сейсмическую нагрузку, передаваемую на здание. Из этого следует, что отношение (2) неверно, что противоречит закону инерции Ньютона. В действительности должно быть

$$\gamma_o < \ell_o, \quad \frac{\gamma_o}{\ell_o} < 1. \quad (4)$$

В работе /4/ предложена конструкция сейсмоизолирующей опоры из стальных стержней (рис. 3). Достоинством указанной опоры являются простота конструкции и технологичность изготовления.

В работе /6/ разработан метод расчета этой опоры с составлением уравнение равновесия сейсмоизолирующих опор по принципу Даламбера (рис. 5):

$$S_{ог} = R_{он}, \quad (5)$$

где $S_{он} = m\alpha_{он}$ – ограниченная сейсмическая нагрузка, передаваемая на здание, m – масса здания, $\alpha_{ор}$ – ограниченное ускорение. $R_{он} = \frac{12EJ\delta}{h^3}$ – реакция упругого стержня, h – высота стержня, EJ – жесткость стержня, δ – деформация стержня, соответствующая 9-балльному землетрясению.

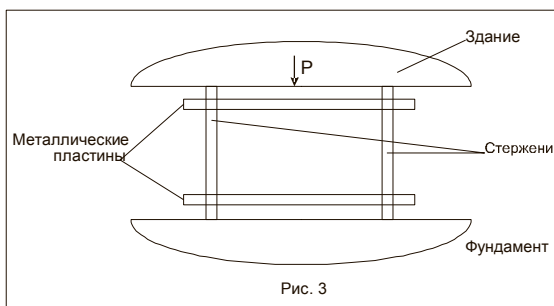


Рис. 3. Стальная стержневая сейсмоизолирующая опора

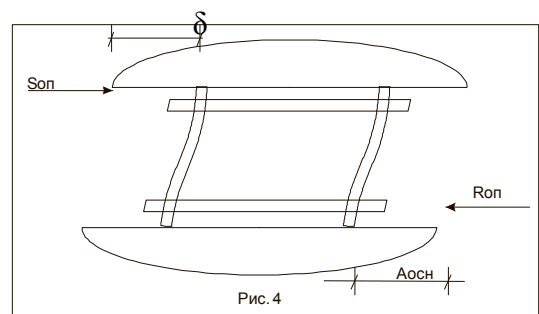


Рис. 4. Работа стальной стержневой сейсмоизолирующей опоры при сейсмическом воздействии

Из уравнения (5) определяем необходимую рабочую высоту стержня в виде

$$h = \sqrt[3]{\frac{12EJ\delta}{m\alpha_{ор}}},$$

(6) позволяющую ограничить сейсмическую нагрузку в заданных пределах, так как деформация стержня δ меньше амплитуды $A_{осн}$:

$$A_{осн} < \delta, \quad \delta / A_{осн} < 1.$$

(7)

Метод расчета этой опоры усовершенствован следующим образом. Техническое решение поясняется нижеследующим рисунком. На нем (рис. 5) изображен общий вид сейсмоизолирующей опоры, а на следующем рис. 6 – ее вид при воздействии сейсмической нагрузки.

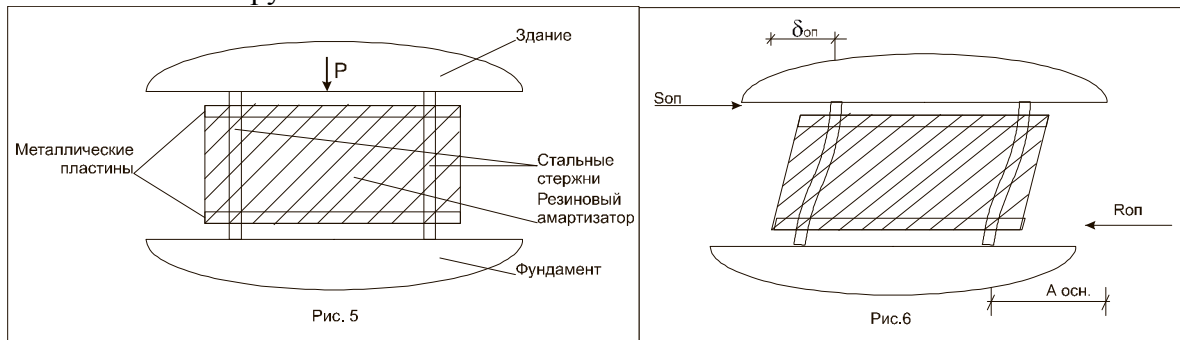


Рис. 5. Сейсмоизолирующая опора со стержневой стойкой и резиной

Рис. 6. Работа сейсмоизолирующей опоры со стержневой стойкой и резиной при сейсмическом воздействии

Усовершенствованная сейсмоизолирующая опора содержит верхнюю и нижнюю металлические пластины, между которыми закреплен амортизатор, выполненный в виде резиновой подушки, которая размещена между металлическими пластинами и закреплена к ним посредством вертикальных стержней. Эта опора устанавливается между фундаментом и первым этажом здания. Сейсмоизолирующая опора работает следующим образом. В исходном состоянии до воздействия сейсмической нагрузки расположение ее элементов соответствует рис. 5. Под действием сейсмической силы $S_{ор}$ (рис. 6) вертикальные стержни и амортизатор деформируются в пределах колебания основания, гася энергию вертикальной и горизонтальной составляющих сейсмической силы. Расчет на сейсмическую нагрузку произведем следующим образом. Составляем уравнение равновесия сейсмоизолирующих опор по принципу Даламбера:

$$S_{ор} = R_{ст} + R_r, \quad (8)$$

где $S_{ор} = m\alpha_{ор}$ – ограниченная сейсмическая нагрузка, передаваемая на здание, $\alpha_{ор}$ – ограниченное (задаваемое) ускорение, $R_{ст}$ – реакция стального стержня. При этом

$R_{ст} = \frac{12E_{ст}J_{ст}\delta_{он}}{h^3_{ст}}$, где h – высота стального стержня, $E_{ст}J_{ст}$ – жесткость стержня, $\delta_{он}$ –

перемещение опоры при 9-балльном землетрясении, $R_p = \frac{12E_pJ_p\delta_{он}}{h^3_p}$ – реакция резинового

амортизатора, E_pJ_p – его жесткость, h_p – высота амортизатора, $\delta_{он}$ – перемещение опоры при 9-балльном землетрясении. Окончательно уравнение имеет вид:

$$m\alpha_o = \frac{12E_{ст}J_{ст}\delta_{он}}{h^3_{ст}} + \frac{12E_pJ_p\delta_{он}}{h^3_p}. \quad (9)$$

Так как $h_{ст} = h_p$, то отсюда определяем оптимальную рабочую высоту опоры:

$$h_{on} \sqrt[3]{\frac{12\delta_{on}(EctJct + EpJp)}{m\delta_{or}}}$$

(10)

Выведенная формула (10) позволяет передаваемую на надземную часть здания сейсмическую нагрузку ограничить в заданных пределах. В результате разработанное техническое решение, включающее резиновую подушку, обладает преимуществами: во-первых, стальные стержни защищены от коррозии, во-вторых, благодаря совместной работе стального стержня и резинового амортизатора повышаются надежность и долговечность сейсмоизолирующей опоры.

2. В настоящее время прошли стадию опытной проверки сейсмоизолирующие опоры из антифрикционного материала фторопласта-4, имеющего низкий коэффициент трения скольжения (0,05-0,1) по пластине из нержавеющей стали, выпускаемой по ГОСТ 10007-80E /6/. Принципиальная схема сейсмоизолирующего скользящего пояса показана на рис. 8.

При превышении сейсмической нагрузки на верхней части здания, т.е. при ускорении основания $0,05g$ начинает проскальзывать относительно фундамента в пределах амплитуды основания $\delta < A_{осн}$ (рис. 9). Существенным недостатком сейсмоизолирующего скользящего пояса являются требование большой точности при монтаже и необходимость проведения профилактического ремонта, предотвращающего «залипание».

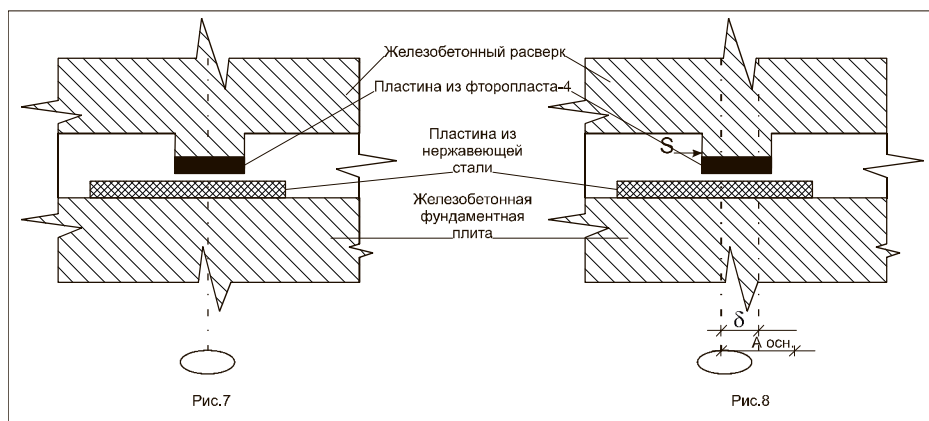


Рис. 7. Скользящая опора

Рис. 8. Работа скользящей опоры

При натурных испытаниях пятиэтажного крупнопанельного дома № 78 в микрорайоне Аламедин г.Фрунзе в связи с обнаружением отклонений от проектного решения (касание элементов железобетонного ростверка и обвязки) подвижка не достигнута. Методика определения сейсмической нагрузки на здание со скользящим поясом, ставшая классической и вышедшая в монографии, производится по силе сухого трения, т.е. по закону Кулона /7/:

$$S = Qf_{TP}, \tag{11}$$

где S – сейсмическая нагрузка, передаваемая на здание через сейсмоизолирующий пояс, Q – вес надземной конструкций, f_{TP} – коэффициент трения фторопласта-4 по стали, установленный при статистических испытаниях здания. Известна сейсмоизолирующая подушка, выполненная из эластичного материала, например, из фторополимера /7/. Согласно техническому решению, эта подушка выполнена в виде толстостенной полый сферы, внутренняя поверхность которой заполнена антифрикционным материалом, например, порошкообразным графитом, полибденитом, динолитом, тефлоном. Сейсмоизолирующая подушка работает следующим образом. Под действием тяжести здания Q сейсмоизолирующая подушка, размещенная между надземной и подземной частями здания, деформируется, принимая сплюснутую форму /10/.

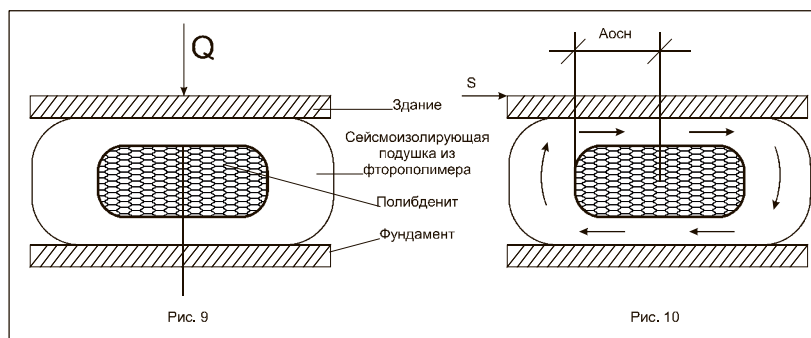


Рис. 9. Скользящая опора

Рис. 10. Работа скользящей опоры при сейсмическом воздействии

В процессе воздействия сейсмической силы S наружная поверхность сейсмоизолирующей подушки благодаря эластичности и трению перемещается, как гусеницы трактора, по поверхности надземной и подземной частей здания в пределах амплитуды колебания основания $A_{осн}$, а верхняя часть внутренней поверхности подушки благодаря свойству антифрикционного материала скользит по нижней части (рис. 10). Согласно разработанному изобретению, свойства упругости, пластичности и малого коэффициента трения скольжения материала одновременно работают на вертикальную и горизонтальную составляющие сейсмической нагрузки. Недостатком рассмотренного технического решения является нетехнологичность изготовления. В то же время методика расчетов состоит в составлении уравнения равновесия сейсмоизолирующей подушки по принципу Даламбера: $S_{ор} = R_n$, где $S_{ор} = m\alpha_{ор}$ – ограниченная сейсмическая нагрузка, передаваемая на здание, m – масса здания, $\alpha_{ор}$ – ограниченное ускорение, $R_n = fQ = fmg$ – реакция сейсмоизолирующей подушки, f – коэффициент трения порошкообразного антифрикционного материала, g – ускорение силы тяжести.

$$m\alpha_{ор} = fmg. \quad (12)$$

Отсюда определяем необходимый коэффициент трения порошкообразного антифрикционного материала:

$$f_t = \frac{\alpha_{ор}}{g}. \quad (13)$$

Таким образом, необходимо усовершенствовать эти технические решения и разработать соответствующую методику расчета. Предлагаемое техническое решение поясняется чертежами.

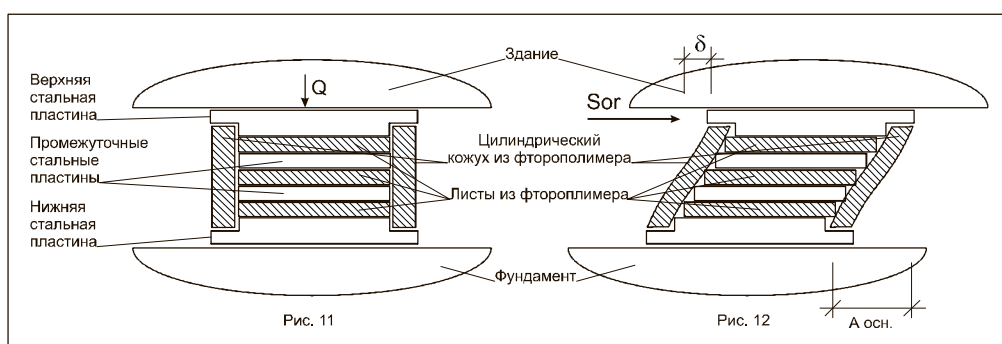


Рис. 11. Предлагаемая конструкция скользящей опоры

Рис. 12. Работа предлагаемой конструкции при сейсмическом воздействии

На рис. 12 представлен вид скользящей сейсмоизолирующей опоры при статическом действии нагрузки (вес здания) Q . На рис. 13 показан вид этой опоры при воздействии сейсмической нагрузки. Скользящая сейсмоизолирующая опора состоит из

размещенных между фундаментом и зданием верхней, нижней и промежуточных стальных пластин; между ними размещены листы из фторополимера. Сейсмоизолирующая опора работает следующим образом. В исходном состоянии до воздействия сейсмической нагрузки расположение ее элементов соответствует рис. 12. Действие сейсмической силы S воспринимается непосредственно нижней опорной частью фундамента за счет ее контакта с основанием и передается через нижнюю пластину промежуточным пластинам из стали и фторополимера, которые скользят относительно друг друга и совместно с кожухом упруго деформируются в пределах колебаний основания, ограничивая сейсмическую нагрузку (рис. 13). Составляем уравнение равновесие скользящей сейсмоизолирующей опоры:

$$S_{or} = R_{ск} + R_{уп}, \quad (14)$$

где $S_{or} = m\alpha_{or}$ — ограниченная сейсмическая нагрузка, передаваемая на здание, α_{or} — ограниченное ускорение, $R_{ск} = fQ/2n = \frac{fmg}{2n}$ — реакция скользящего листа из фторополимера, f — коэффициент трения фторополимера, Q — вес здания, g — ускорение силы тяжести, n — количество листа из фторополимера, $R_y = \frac{12E_k J_k \delta_{on}}{h_k^3}$ — реакция цилиндрического кожуха из фторополимера, $E_k J_k$ — жесткость цилиндрического кожуха, h_k — высота кожуха, δ_{on} — перемещение скользящей опоры при 9-балльном землетрясении. Теперь уравнение (14) имеет вид:

$$m\alpha_{or} = \frac{fmg}{2n} + \frac{12E_k J_k \delta_{on}}{h_k^3}. \quad (15)$$

Из этого уравнения определяем необходимую жесткость цилиндрического кожуха, точнее установим толщину стенки кожуха, в котором размещаются скользящие пластины. Иначе говоря, разработанное техническое решение надежнее, технологичнее по сравнению с известными техническими решениями.

Ранние попытки сейсмозащиты зданий от разрушительных действий землетрясений относятся к III–VII вв. Так, в основании стен некоторых сохранившихся памятников архитектуры, а также по археологическим раскопкам в зданиях древних городов и других населенных пунктов Средней Азии обнаружены мягкие прокладки на уровне верха фундаментов, сыгравшие роль сейсмоизолирующих элементов. В качестве прокладки в большинстве случаев использованы камышитовые подушки, пластичные глины.

Недостатком упомянутых попыток являются эти материалы, которые летом пересыхают, а зимой замерзают, и в процессе землетрясения амортизатор из камышита рассыпается, а пластичная глина расползается, что приводит к утрате способности к сейсмоизоляции. Все эти мероприятия осуществлялись интуитивно, исходя из инженерных соображений, т.е. не было метода расчета, устанавливающего необходимые параметры сейсмоизоляции. Известно сейсмостойкое здание /9/, включающее пространственные жесткие этажи, образованные колоннами, ригелями, стенами, перекрытиями, покрытиями, фундаментом, в котором в качестве сейсмоизолирующего устройства под фундаментом размещен торф (см. рис. 13).

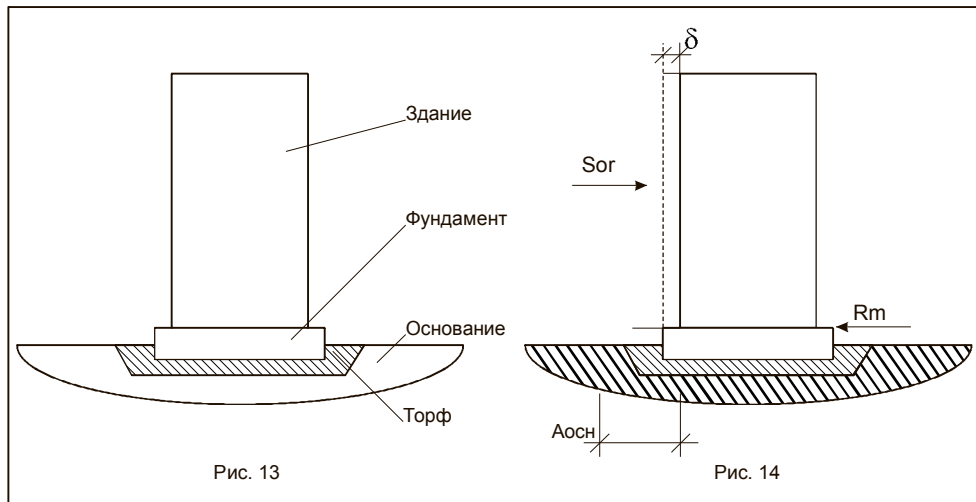


Рис. 13. Сейсмоизолирующая прокладка из торфа

Рис. 14. Работа сейсмоизолирующей прокладки из торфа при сейсмическом воздействии

При землетрясении сейсмоизолирующая прокладка из торфа работает следующим образом. Под действием сейсмической силы S (рис. 14) здание перемещается в пределах колебания основания, гася энергию вертикальной и горизонтальной составляющих сейсмической силы. Составляем уравнение равновесия сейсмоизолирующей прокладки по принципу Даламбера.

$$S_{or} = Rm^x,$$

(16) где $S_{or} = m\alpha_{or}$ – ограниченная сейсмическая нагрузка, $R_m = f\sigma^n$ – реакция прокладки из торфа, F – площадь опирания торфа на основание, σ^n – предел пластического сопротивления торфа. При этом уравнение равновесие имеет вид:

$$m\alpha_{or}F\sigma^n = 2. \quad (17)$$

Отсюда определим необходимую площадь фундамента, опирающуюся на торфяную подушку:

$$F = \frac{m\alpha_{or}}{\sigma^n}. \quad (18)$$

Упомянутое техническое решение усовершенствовано следующим образом. Предлагаемое техническое решение поясняется чертежами.

На рис. 5 изображен вид опоры при статистическом действии и нагрузке, а на рис. 6 – ее вид при воздействии сейсмической нагрузки. При этом сейсмоизолирующая опора состоит из соединенных с надземной и подземной опорными частями здания горизонтально расположенных жестких пластин, между которыми размещен выполненный из пластичного металла стержень, прикрепленный к пластинам вертикальными металлическими стержнями, пропущенными сквозь его тело. Сейсмоизолирующая опора работает следующим образом. В исходном состоянии до воздействия сейсмической нагрузки расположение ее элементов соответствует рис. 15. Под действием сейсмической силы S_{or} вертикальные металлические стержни и амортизатор из пластичного металла деформируются в пределах колебаний основания $A_{осн}$, гася горизонтальную и вертикальную составляющие сейсмические силы (рис.17). Основываясь на изложенном, составляем уравнение равновесия сейсмоизолирующей опоры

$$S_{or} = R_{п} + R_{ст}, \quad (19)$$

где $S_{or} = m\alpha_{or}$ – ограниченная сейсмическая нагрузка, m – масса зданий, α_{or} – ограниченное ускорение. При этом $R_n = F\sigma^{np}$ – реакция пластичного металла, F – поперечное сечение пластичного металла, σ^{np} – предел пластичности, $R_{CT} = \frac{12EJ\delta}{h^3_{CT}}$ – реакция стального стержня, h_{CT} – высота стержня, EJ – жесткость стержня, δ – деформация опоры, соответствующая 9-балльному землетрясению. Теперь основополагающее уравнение имеет вид:

$$m\alpha_{or} = F\sigma^{np} + \frac{12EJ\delta}{h^3_{CT}},$$

(20) отсюда определяем площадь опирания фундамента либо h_{CT} – рабочую высоту стержня, т.е. если известна площадь, то определяем высоту стержня, если же известна рабочая высота стержня, то определяем площадь сечения пластичного металла. При этом разработанное техническое решение, во-первых, долговечно, т.е. пластины не окисляются, во-вторых, стальные стержни защищены от коррозии, и по сравнению с известными техническими решениями имеет очевидное преимущество, т.е. надежны, долговечны и технологичны.

Выводы

Применяя эти сейсмоизолирующие опоры в инженерной практике, можно обеспечить надежность сейсмоизоляции зданий и сооружений.

Список литературы

1. Андашев А.Ж. Кинематические методы сейсмоизоляции зданий // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры. – Бишкек, 2006. – С. 73-77.
2. Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. – М.: Стройиздат, 1988. – С. 123-124.
3. Ормонбеков Т.О., Бегалиев У.Т., Дерев А.В. Применение тонкослойных резинометаллических опор для сейсмозащиты зданий в условиях территории Кыргызской Республики. – Бишкек, 2005. – С. 124-128.
4. Заявка №9708411 Сейсмоизолирующая прокладка / Тентиев Ж.Т., Токтонасаров Ж.М., Кожахметов К.Х.
5. Токтонасаров Ж.М., Бекбоев Б.С., Батыр С. К вопросу о сейсмоизоляции зданий //Материалы 3-й научно-технической конференции КАСИ. – Бишкек, 1999. – С. 16-22.
6. Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Солдатова Л.Л. Исследование зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом // Строительная механика и расчет сооружений. – 1982. – № 4.
7. KG 71 E02 D27/34; E04 H9/02 Фундамент сейсмостойкого здания. Токтонасаров Ж.М. – С.47-51.
8. Мартемьянов А.И. Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1985. – С. 178-183.
KG 403 E04 H9/02 Сейсмическое здание. Токтонасаров Ж.М.