

УДК 53.072.23:534.5

**ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ КАХРАМАНМАРАС 06.02.2023:
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ОЦЕНКИ И МЕТОДЫ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ**

© 2024 г. А. И. Каракозова^{а, *}, С. В. Кузнецов^{а, b, c}, В. Л. Мондрус^а

^аМосковский государственный строительный университет, Москва

^bИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва

^cМосковский государственный технический университет им. Баумана, Москва

*e-mail: karioca@mail.ru

Поступила в редакцию 01.02.2023 г.

После доработки 23.02.2023 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

Недавнее землетрясение в районе Кахраманмарас (Kahramanmaraş) 06.02.2023 на территории Турции и Сирии имело магнитуду $M_w 7.8$, его интенсивность в некоторых районах Турции достигала XI баллов по модифицированной шкале Меркалли. Землетрясение вызвало катастрофические последствия, приведшие к гибели более 52 800 человек, а также многочисленные разрушения объектов инфраструктуры. В статье анализируются последствия появления в сейсмограмме землетрясения необычайно сильного дельта-импульса, ассоциируемого с приходом горизонтально поляризованной S-волны. Обсуждаются вопросы создания систем сейсмической защиты от дельтаобразных импульсов высокой интенсивности.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмограмма, дельта-импульс, спектр, разрушение

DOI: 10.31857/S1026351924020034, EDN: uwqrql

1. Введение. Недавнее землетрясение (06.02.2023) магнитудой $M_w 7.8$ и следующие сильные афтершоки магнитудой $M_w 7.5$, произошедшие в районе Кахраманмарас (Kahramanmaraş) в Турции и близких к ней регионах Сирии, имели относительно неглубокий гипоцентр, расположенный в осадочных слоях земной коры, примерно на 10 000 м ниже уровня океана [1, 2]. Оценка интенсивности землетрясения в городах Газиантеп и Килис составила XI баллов по модифицированной шкале Меркалли [3, 4]. В настоящее время афтершоки продолжаются и, вероятно, будут продолжаться еще около года после главного толчка [3].

Анализ сейсмограмм, записанных на разных станциях, показывает наличие значительного горизонтально-поляризованного дельтаобразного импульса, имевшего место во временном интервале 01:20–01:22 (рис. 1, а). Это связано с приходом пика горизонтально поляризованной S-волны большой интенсивности и малой длительности. По оценкам авторов, длительность

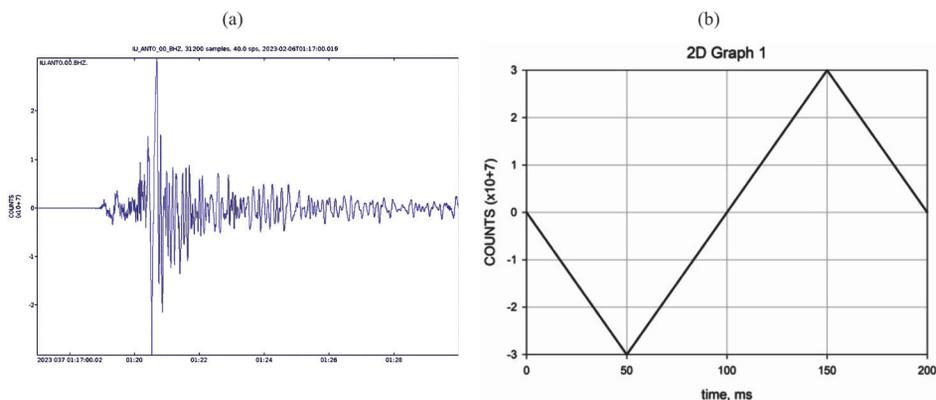


Рис. 1. а) горизонтальная компонента сейсмограммы главного толчка в 01:17 по Гринвичу, измерения на станции IU ANTO, Анкара, Турция, расположенной в 235 км от эпицентра; б) дельтаподобный импульс, соответствующий первым двум самым большим пикам, каждый длительностью примерно 100 мс.

пиковых импульсов составляет ~ 100 мс. Рассмотрение этой сейсмограммы в лучшем разрешении показывает, что два пика на самом деле состоят из двух дельтаобразных импульсов почти одинаковой амплитуды и длительности, как показано на рис. 1, б. Отметим, что разрешение сейсмограммы ограничено временем дискретизации порядка 50 мс [5, 6].

Аналогичные чрезвычайно большие импульсы малой продолжительности также были зарегистрированы при некоторых сильных землетрясениях, вызвавших большие человеческие жертвы и серьезные разрушения, например землетрясение в Кобе магнитудой 6.9 произошло 17 января 1995 г. [7]; рис. 2.

Иногда большие пики имеют место при появлении волн Рэлея, Рэлея–Лэмба или горизонтально поляризованных волн Лява большой интенсивности [8, 9]; см. сейсмограмму землетрясения в Гаити магнитудой Mw 7.0 от 12.01.2010 г.; рис. 3.

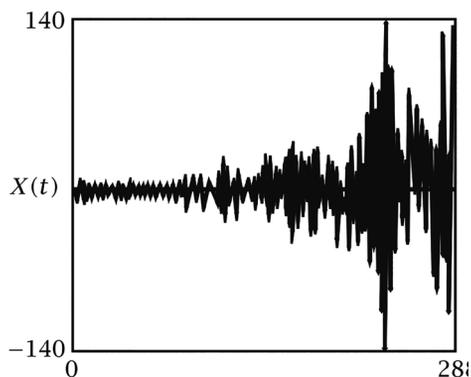


Рис. 2. Сейсмограмма землетрясения в Кобе, произошедшего 17 января 1995 г. [7].

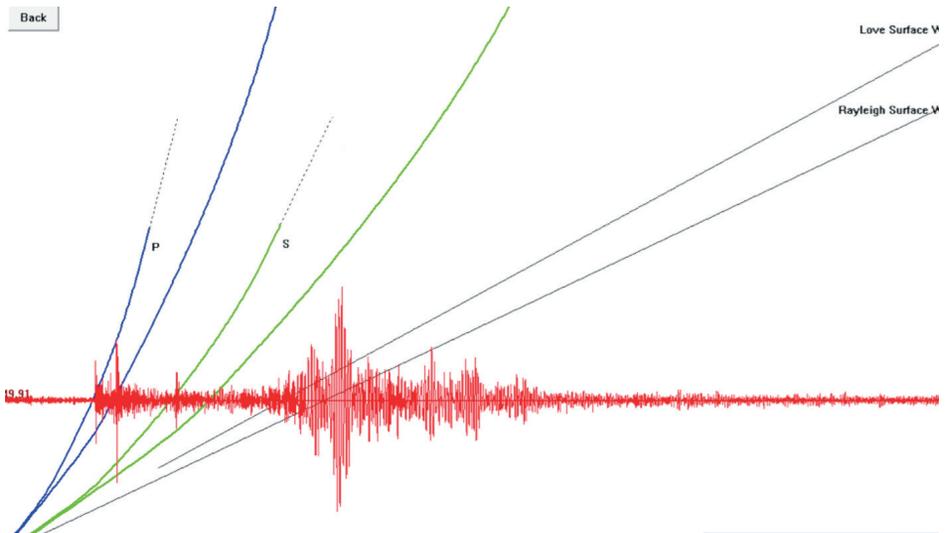


Рис. 3. Большая интенсивность и малая длительность пиков связаны с приходом поверхностных волн Рэля магнитудой M_w 7.0; землетрясение в Гаити 12.01.2010 [10].



Рис. 4. Типичная сейсмограмма; землетрясение вблизи острова Северная земля, произошедшее 19 апреля 1997 [11]; красной линией отмечено начало прихода S-волн.

Следует отметить, что более распространенной является ситуация, когда записанные сейсмограммы не содержат импульсов столь большой величины и малой длительности; образец такой сейсмограммы приведен на рис. 4.

2. Спектр треугольного импульса. Рассмотрим интегральное преобразование Фурье одиночного треугольного импульса, показанного на рис. 1, b.

$$\tilde{f}(\omega) = \int_{-T}^T f(t) \exp(-i\omega t) dt, \quad (2.1)$$

где ω – круговая частота колебаний; $f(t)$ – это функция, интегрируемая во временной области: $\text{supp} f = [-T; T]$

$$f(t) = \frac{p}{T} \times \begin{cases} t+T, & -T < t < 0 \\ T-t, & 0 < t < T \end{cases}. \quad (2.2)$$

В уравнении (2.2) p – амплитудный множитель. Здесь импульс сдвинут на T по оси времени, чтобы избежать асимметрии, что обеспечивает отсутствие мнимой части в спектре Фурье. Применение преобразования к функции дает соответствующую спектральную функцию Фурье [12]:

$$\tilde{f}(\omega) = pT \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{\omega T}{2}\right), \quad (2.3)$$

где

$$\text{sinc}(t) = \frac{\sin t}{t}. \quad (2.4)$$

Ввиду уравнения графики для соответствующих спектров Фурье будут выглядеть следующим образом – см. рис. 5.

Графики на рис. 5 четко указывают на существенные максимумы на нулевой частоте.

3. АЧХ для типового сейсмоизолирующего устройства. Предположим, что здание оборудовано сейсмоизолирующим устройством, соответствующим модели Кельвина–Фойгта или более сложной модели Ценера, известной также как стандартная вязкоупругая модель [13, 14]; см. рис. 6, а, в. Основные уравнения для моделей Кельвина–Фойгта и Ценера могут быть представлены в форме Коши [15]:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{Y}(t) = \mathbf{G} \cdot \mathbf{Y}(t) + \mathbf{U}(t), \quad (3.1)$$

где для модели Кельвина–Фойгта

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ v(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -\eta/m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U}(t) = \mathbf{U}_0 \exp(i\omega t). \quad (3.2)$$

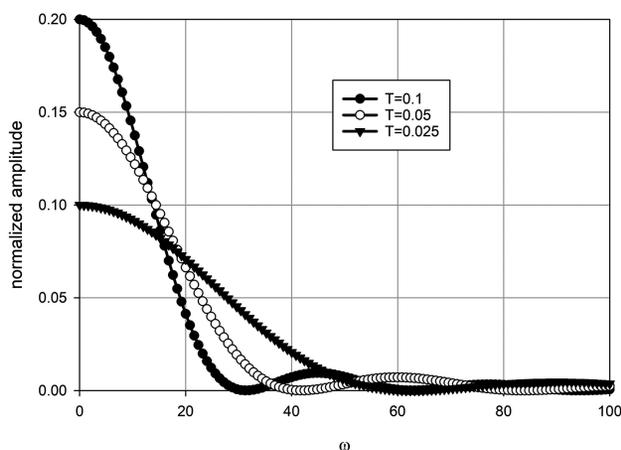


Рис. 5. Спектры Фурье дельта-подобных импульсов при разных T .

Здесь $x(t)$ – перемещение массы; $v(t) = \dot{x}(t)$; η – вязкость демпфера; k – жесткость пружины; m – масса; U_0 – амплитуда внешней нагрузки. Отметим, что \mathbf{G} – полустабильная матрица [15]. Для модели Ценера со вспомогательной пружиной соответствующие параметры будут выглядеть следующим образом

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ v_1(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ k' / \eta & -k' / \eta & 0 \\ -(k + k') / m & k' / m & 0 \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

где $x_1(t)$, $v_1(t)$ – отклонение и скорость массы; $x_2(t)$ – отклонение вспомогательной пружины; k' – жесткость вспомогательной пружины. Решение уравнения при разных частотах возбуждения дает амплитудно-частотную характеристику (АЧХ); типичная АЧХ для модели Ценера показана на рис. 6, с.

График на рис. 6, с наглядно свидетельствует о том, что типичный сейсмоизолятор идеально подходит для демпфирования относительно высоких частот ($\omega > 1$), но генерирует значительное усиление сигнала в меньшем диапазоне частот ($\omega < 1$), точнее, там, где дельта-подобный импульс достигает максимума; см. рис. 4. Таким образом, рассматриваемые сейсмоизолирующие устройства становятся не только бесполезными на низких частотах, но и усиливают сейсмические сигналы в низкочастотном диапазоне.

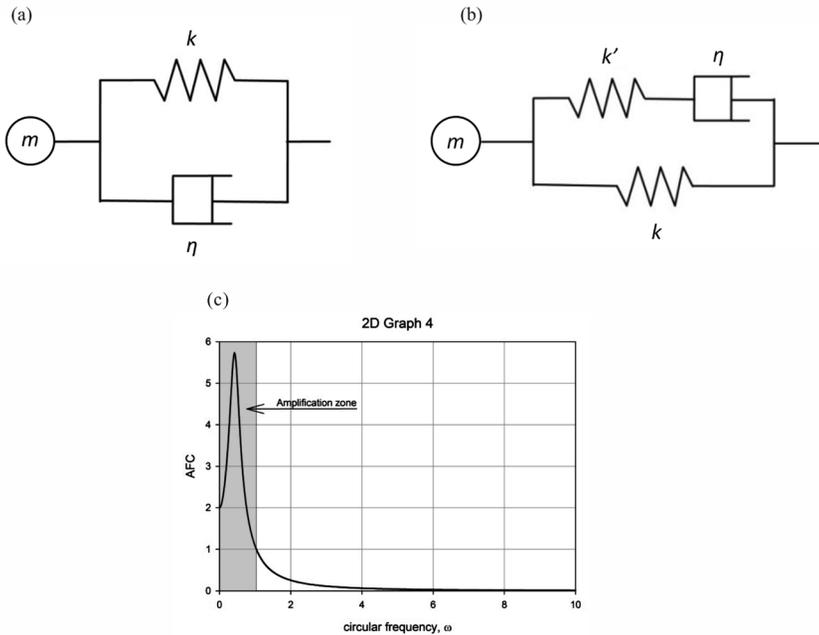


Рис. 6. а) модель Кельвина–Фойгта; б) модель Ценера; с) типичная АЧХ сейсмоизолятора, созданного по модели Ценера; серым цветом показана зона усиления сигнала.

4. Обрушение каркасного здания без сейсмоизоляции. Рассмотрим далее воздействие высокоинтенсивной сейсмической дельтаобразной S-волны на каркас здания, не имеющего сейсмоизоляции.

Анализ методом конечных элементов (МКЭ) воздействия дельтаобразного импульса S-волны большой амплитуды и малой длительности, соответствующего ускорению 1 g ($\sim 9.8\text{ м/с}^2$), показывает (I) появление полей напряжений высокой интенсивности как в колоннах, так и в плитах, особенно в нижней части здания; (II) множественные зоны повреждения, появляющиеся в основном на задних фронтах отраженных волн; и (III) разрушение элементов каркаса до начала колебаний, т.е. до начала образования стоячих; см. рис. 7. Последний вывод наглядно иллюстрирует бесполезность применения виброгасителей для смягчения высокоинтенсивных и кратковременных дельтаобразных импульсных нагрузок.

Рис. 7 иллюстрирует разрушение элементов каркаса здания, начиная с нижних этажей, при этом S-волна высокой интенсивности распространяется вверх. Таким образом, проведенный МКЭ-анализ, наряду с многочисленными наблюдениями [1–11], указывает на необходимость создания систем сейсмозащиты от рассматриваемых видов кратковременных сейсмических импульсов большой интенсивности.

5. Как обеспечить сейсмическую защиту при появлении ударных волн высокой интенсивности?

5.1. Сейсмические подушки, обзор. Возникает закономерный вопрос, как обеспечить сейсмозащиту от мощных, но при этом кратковременных сейсмических

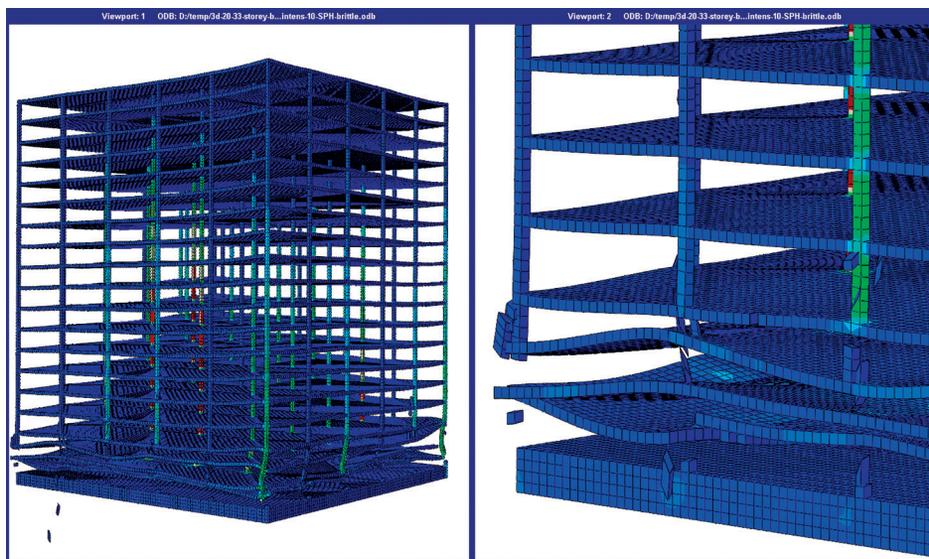


Рис. 7. Обрушение каркаса здания, вызванное появлением ударных волн высокой интенсивности; КЭ-моделирование.

импульсов. Это особенно важно ввиду принципиальной неспособности широко используемых сейсмоизолирующих устройств гасить столь короткие импульсы.

По-видимому, первой известной системой естественной сейсмической защиты, способной защитить от сильных колебаний грунта, вызванных сейсмическими волнами высокой интенсивности, является гостиница “Империал” в Токио, спроектированная в 1923 г. Фрэнком Ллойдом Райтом. Здание располагалось над реликтовым болотом, которое выполняло роль сейсмической подушки, защищавшей здание от S-волн во время Великого землетрясения Канто с Mw 7.9–8.2, произошедшего 01.09.1923 г., в том же году, когда строительство здания было завершено [16]. Также известно [17], что большая часть окружающих зданий была разрушена землетрясением. Принципиальная схема сейсмической площадки представна на рис. 8.

В настоящее время существует несколько подходов к смягчению воздействия рассматриваемых сильных ударных импульсов поперечных S-волн. Некоторые из этих подходов уже разработаны, в то время как другие еще находятся в стадии разработки. Отметим следующие подходы:

- (I) При проектировании фундаментов для мостов в сейсмоопасных районах было разработано и реализовано решение, основанное на создании сейсмической подушки из калиброванных природных камней, размещенных между оголовками свай и нижней поверхностью ростверка. Таким образом, по-видимому, впервые для столь крупных сооружений ростверк был отделен от свай. Это решение было использовано при строительстве моста Рион-Антирион и некоторых других большепролетных мостов [18, 19], проект выполнен компанией Geodynamique® (Франция). Хотя такая подушка не может отражать энергию сейсмических волн из-за небольшой разницы в акустическом импедансе между сейсмической подушкой и железобетоном, она все же может рассеивать часть волновой энергии внутри подушки благодаря относительному движению камней [20].
- (II) Система сейсмозащиты зданий, разработанная компанией Marathon Alliance® (Австралия), заключается в установке сейсмической подушки либо под фундаментную плиту (рис. 9, а), либо внутри ростверка в случае

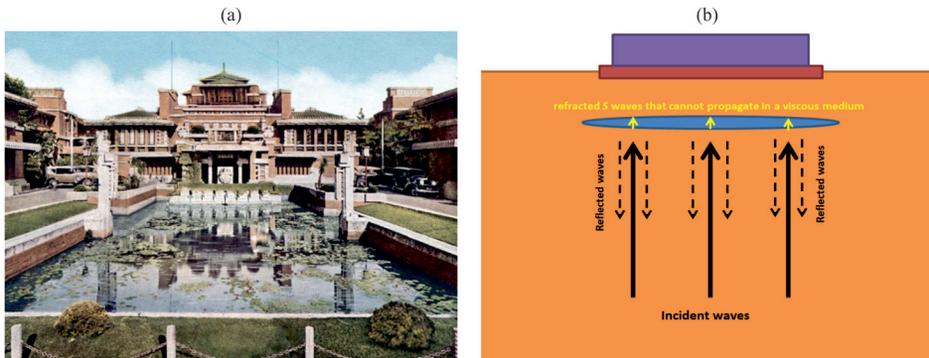


Рис. 8. а) отель “Империал” Токио, 1923 г. [16]; б) принципиальная схема сейсмической подушки на основе реликтового болота.

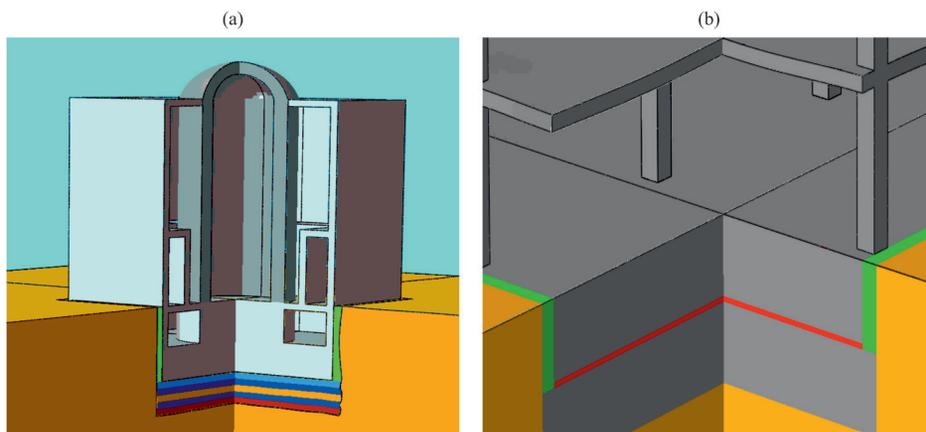


Рис. 9. Сейсмические подушки для защиты а) здание реактора АЭС защищено как от Р-волн, так и от S-ударных волн, композитная подушка из акустически контрастных слоев (слои выделены разными цветами) размещена под конструкцией фундамента [21]; б) разделение фундаментной плиты сейсмостойкой подушкой (красная линия).

- свайного фундамента (рис. 9,б); см. [21]. Разрабатываемые сейсмические подушки выполнены из гранулированных метаматериалов, обеспечивающих (1) отражение приходящих сейсмических волн в широком диапазоне соответствующих спектральных частот и (2) поглощение механической энергии сейсмических волн внутри гранулированного метаматериала за счет образования в микроструктуре материала множественных ударных волновых фронтов. Таким образом, более чем в четыре раза ослабляется энергия сейсмических волн. Срок службы этих гранулированных метаматериалов сравним со сроком службы защищаемого сооружения из-за неорганической природы гранул, изготавливаемых из плавленного базальта [21].
- (III) Сейсмические подушки, специально сконструированные для сейсмоизоляции высокоточного оборудования, например использование эластомерных листов в сочетании с механическими ползунками [22].
- (IV) Сейсмические прокладки из листов фторопласта, имеющие очень малый коэффициент трения и служащие для получения поверхностей, практически свободных от трения скольжения [23, 24]. Этот подход также можно отнести к системам сейсмозащиты на основе метаповерхностей, так как он основан на концепции поверхностей скольжения.

5.2. Сейсмические подушки, основные принципы. Рассмотренные сейсмические подушки способны обеспечить сейсмическую защиту от S-волн большой интенсивности в широком диапазоне частот, причем, как уже упоминалось ранее, некоторые виды подушек способны защищать как от продольных, так и от поперечных волн. В этой вязи можно сформулировать три основных принципа, обеспечивающих применимость и эффективность рассматриваемых сейсмических подушек:

- (A) Различие акустических импедансов окружающего массива грунта, бетона и гранулированного метаматериала, используемого для сейсмической

подушки (не относится к сейсмической подушке из фторопластовых листов). Этот принцип обеспечивает отражение энергии сейсмических волн на границах между сейсмической подушкой и грунтом или бетоном, тем самым уменьшая энергию волн, распространяющихся в вышележащие конструкции защищаемого сооружения. Отметим также, что коэффициенты отражения-преломления не зависят от частоты волны в соответствии с теорией Knott–Zoerpritz [25], независимость от частоты обеспечивает главное преимущество сейсмической подушки перед более распространенными сейсмоизолирующими устройствами; см. раздел 2.

- (B) Формирование и распространение ударных волновых фронтов в микроструктуре гранулированного метаматериала, что приводит к существенной диссипации волновой энергии внутри сейсмической подушки [26]. Этот необычный эффект доминирует в рассеянии волновой энергии внутри гранулированного метаматериала [27].
- (C) Возможность относительного перемещения различных гранул внутри подушки, что обеспечивает дополнительное ослабление энергии сейсмических волн. Учет сухого трения на контактирующих поверхностях между гранулами дает еще один источник рассеяния механической энергии метаматериалом [28].

6. Заключительные замечания. Анализ сейсмограмм недавнего разрушительного землетрясения магнитудой M_w 7.8, произошедшего 6 февраля 2023 г. в районе Кахраманмарас (Kahramanmaraş), выявил появление на сейсмограмме землетрясения необычно сильного дельтаобразного импульса S-волны. Как было указано, наблюдаемый дельтаобразный импульс соответствует большому пику, имеющему максимум на нулевой частоте, что делает большинство широко используемых сейсмоизолирующих устройств практически непригодными, или даже опасными при появлении дельтаобразных импульсов, поскольку рассматриваемые сейсмоизоляторы усиливают сигналы вблизи нулевой частоты.

Анализ существующих и разрабатываемых способов сейсмозащиты на основе различных сейсмических подушек, содержащих гранулированные метаматериалы, выявил основные преимущества этих способов сейсмозащиты по сравнению с другими видами сейсмоизоляции, особенно в связи с появлением дельтаобразных импульсов на сейсмограммах землетрясений.

Благодарность. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2023-0004 “Система территориальной сейсмической защиты критически важных объектов инфраструктуры на основе гранулированных метаматериалов, обладающих свойствами широкодиапазонных фононных кристаллов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. USGS, 6 February 2023. “USGS earthquake catalogue”. Archived from the original on 7 February 2023.
2. National Earthquake Information Center (6 February 2023). “M 7.8 – 26 km ENE of Nurdağı, Turkey”. United States Geological Survey (2023);
URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive>

3. *Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S. et al.* Active fault database of Turkey // Bull. Earthquake Eng. 2018. № 16 (8). P. 3229–3275;
<https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
4. *Kawoosa V.M., Scarr S., Gerry D.* (eds.). 10,000 tremors. Reuters. 2 March (2023). <https://www.reuters.com/graphics/TURKEY-QUAKE/AFTERSHOCKS/dwpxkzklvnm/>
5. *Kinoshita S.* Low-frequency and trend compensation of broadband seismograms // Earth Planet Space. 2012. № 64. e5–e8;
<https://doi.org/10.5047/eps.2012.02.002>
6. *Larsonnier F. et al.* Comparison on seismometer sensitivity following ISO 16063-11 standard // 19th International Congress of Metrology. 2019. Paper 27003;
<https://doi.org/10.1051/metrology/201927003>
7. *Singh N., Tampubolon D., Yadavalli V.S.S.* Time series modelling of the Kobe-Osaka earthquake recordings // Int. J. Math. Math. Sci. 2002. № 29 (8). P. 467–479;
<https://doi.org/10.1155/S0161171202007548>
8. *Eberhard M.O. et al.* The M W 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010; USGS/EERI Advance Reconnaissance Team report. U.S. Geological Survey Report 2010–1048. 2010;
URL: <http://pubsdata.usgs.gov/pubs/of/2010/1048/index.html>
9. *DesRochers R. et al.* Overview of the 2010 Haiti earthquake // Earthquake Spectra. 2011. № 27 (1, suppl. 1). P. 1–21;
<https://doi.org/10.1193/1.3630129>
10. Magnitude 7.0 HAITI Tuesday, January 12, 2010 at 21:53:09 UTC. IRIS (2010);
URL: https://www.iris.edu/hq/files/programs/education_and_outreach/retm/tm_100112_haiti/100112haiti.pdf
11. *Bormann P., Wielandt E.* Seismic signals and noise. In: *Bormann, P.* (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2). Potsdam: GFZ. 2013. P. 1–62 ;
https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch4
12. *Ye W., Entezari A.* A geometric construction of multivariate sinc functions // IEEE Trans. Image Processing. 2012. № 21 (6). P. 2969–2979;
<https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2162421>
13. *Jóźwiak B., Orczykowska M., Dziubiński M.* Fractional generalizations of Maxwell and Kelvin-Voigt models for biopolymer characterization // PLoS ONE. 2015. № 10 (11). Paper e0143090;
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143090>
14. *Goldstein R.V., Kuznetsov S.V., Khudyakov M.A.* Study of forced vibrations of the Kelvin-Voigt model with an asymmetric spring // Mech. Solids. 2015. № 50 (3). P. 294–304;
<https://doi.org/10.3103/S0025654415030061>
15. *Kuznetsov S.V.* Fundamental and singular solutions of Lamé equations for media with arbitrary elastic anisotropy // Quart. Appl. Math. 2005. № 63 (3). P. 455–467.
16. *Smith K.* Frank Lloyd Wright and the Imperial Hotel: A postscript // The Art Bulletin. 1985. № 67 (2). P. 296–310;
<https://doi.org/10.1080/00043079.1985.10788262>
17. *Hammer J.* The Great Japan earthquake of 1923 // Smithsonian Magazine. 2011. Paper 1764539.
18. *Dobry R. et al.* Damping/global energy balance in FE model of bridge foundation lateral response // Soil Dynam. Earthquake Eng. 2003. № 23 (6). P. 483–495;
[https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(03\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(03)00050-2)
19. *Teysandier J.P., Combault J., Pecker A.* Rion Antirion: le pont qui defie les seismes // La Recherche. 2000. № 334. P. 42–46.
20. *Cremer C., Pecker A. & Davenne L.* Cyclic macro-element of soilstructure interaction: material and geometrical nonlinearities // Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2001. № 25 (13). P. 1257–1284.
21. Granular metamaterials. Booklet. Adelaide, Australia: Marathon Allaince. 2022;

- URL: <https://www.marathonalliance.com.au/metamaterials>
22. *Begambre-Carrillo O.J.* et al. Passive seismic protection systems with mechanical metamaterials: A current review // *Struct. Eng. & Mech.* 2022. № 82 (4). Article 417; <https://doi.org/10.12989/sem.2022.82.4.417>
 23. *Mirzaev I., Turdiev M.* Vibrations of buildings with sliding foundations under real seismic effects // *Constr. Unique Build. Struct.* 2021. № 94. Article № 9407; <https://doi.org/10.4123/CUBS.94.7>
 24. *Mirzaev I., Yuvmitov A., Turdiev M., Shomurodov J.* Influence of the vertical earthquake component on the shear vibration of buildings on sliding // *E3S Web Conf.* 2021. № 264. Article № 02022; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402022>
 25. *Avesth P., Mukerji T., Mavko G.* Quantitative Seismic Interpretation. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2005. 408 p.; <https://doi.org/10.1017/CBO9780511600074>
 26. *Lucchesi M., Pagni A.* Longitudinal oscillations of bimodular rods // *Int. J. Struct. Stability Dynam.* 2005. № 5 (1). P. 37–54; <https://doi.org/10.1142/S0219455405001490>
 27. *Pelat A., Gautier F., Conlon S.C., Semperlotti F.* The acoustic black hole: A review of theory and applications // *J. Sound Vib.* 2020. № 476. Paper 115316; <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115316>
 28. *Goldstein R.V., Dudchenko A.V., Kuznetsov S.V.* The modified Cam-Clay (MCC) model: cyclic kinematic deviatoric loading // *Arch. Appl. Mech.* 2016. № 86 (12). P. 2021–2031; <https://doi.org/10.1007/s00419-016-1169-x>

UDC 53.072.23:534.5

KAHRAMANMARAS EARTHQUAKE ON FEBRUARY 6, 2023: MATHEMATICAL MODELS, ESTIMATES AND METHODS OF SEISMIC PROTECTION

© 2024 г. A. I. Karakozova^{a, *}, S. V. Kuznetsov^{a, b, c}, V. L. Mondrus^a

^a*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

^b*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

^c*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

*e-mail: karioca@mail.ru

Abstract — The recent earthquake in Turkey and Syria occurred on February 6, 2023. In the Kahramanmaras region the earthquake had an estimated magnitude of Mw7.8, and reached intensity XI by the modified Mercalli scale. The earthquake had catastrophic consequences, leading to the deaths of more than 52,800 people, as well as the multiple damages of the structures and buildings. The paper relates to the analyses of the seismograms and the detection of an unusually strong delta impulse, which can be associated with the arrival of a horizontally polarized S-wave.

Keywords: earthquake, seismogram, delta pulse, spectrum; destruction

REFERENCES

1. USGS, 6 February 2023. "USGS earthquake catalogue". Archived from the original on 7 February 2023.
2. National Earthquake Information Center (6 February 2023). "M 7.8 – 26 km ENE of Nurdağı, Turkey". United States Geological Survey (2023);
URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive>
3. *Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S. et al.* Active fault database of Turkey // *Bull. Earthquake Eng.* 2018. № 16 (8). P. 3229–3275;
<https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
4. *Kawoosa V.M., Scarr S., Gerry D.* (eds.). 10,000 tremors. Reuters. 2 March (2023);
URL: <https://www.reuters.com/graphics/TURKEY-QUAKE/AFTERSHOCKS/dwpkdklevm/>
5. *Kinoshita S.* Low-frequency and trend compensation of broadband seismograms // *Earth Planet Space.* 2012. № 64. e5–e8;
<https://doi.org/10.5047/eps.2012.02.002>
6. *Larsonnier F. et al.* Comparison on seismometer sensitivity following ISO 16063-11 standard // 19th International Congress of Metrology. 2019. Paper 27003;
<https://doi.org/10.1051/metrology/201927003>
7. *Singh N., Tampubolon D., Yadavalli V.S.S.* Time series modelling of the Kobe-Osaka earthquake recordings // *Int. J. Math. Math. Sci.* 2002. № 29 (8). P. 467–479;
<https://doi.org/10.1155/S0161171202007548>
8. *Eberhard M.O. et al.* The M W 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010; USGS/EERI Advance Reconnaissance Team report. U.S. Geological Survey Report 2010–1048. 2010;
URL: <http://pubsdata.usgs.gov/pubs/of/2010/1048/index.html>
9. *DesRochers R. et al.* Overview of the 2010 Haiti earthquake // *Earthquake Spectra.* 2011. № 27 (1, suppl. 1). P. 1–21;
<https://doi.org/10.1193/1.3630129>
10. Magnitude 7.0 HAITI Tuesday, January 12, 2010 at 21:53:09 UTC. IRIS (2010);
URL: https://www.iris.edu/hq/files/programs/education_and_outreach/retm/tm_100112_haiti/100112haiti.pdf
11. *Bormann P., Wielandt E.* Seismic signals and noise. In: *Bormann P.* (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)*. Potsdam: GFZ. 2013. P. 1–62;
https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch4
12. *Ye W., Entezari A.* A geometric construction of multivariate sinc functions // *IEEE Trans. Image Processing.* 2012. № 21 (6). P. 2969–2979;
<https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2162421>
13. *Jóźwiak B., Orczykowska M. & Dziubiński M.* Fractional generalizations of Maxwell and Kelvin-Voigt models for biopolymer characterization // *PLoS ONE.* 2015. № 10 (11). Paper e0143090;
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143090>
14. *Goldstein R.V., Kuznetsov S.V., Khudyakov M.A.* Study of forced vibrations of the Kelvin-Voigt model with an asymmetric spring // *Mech. Solids.* 2015. № 50 (3). P. 294–304;
<https://doi.org/10.3103/S0025654415030061>
15. *Kuznetsov S.V.* Fundamental and singular solutions of Lamé equations for media with arbitrary elastic anisotropy // *Quart. Appl. Math.* 2005. № 63 (3). P. 455–467.
16. *Smith K.* Frank Lloyd Wright and the Imperial Hotel: A postscript // *The Art Bulletin.* 1985. № 67 (2). P. 296–310;
<https://doi.org/10.1080/00043079.1985.10788262>

17. *Hammer J.* The Great Japan earthquake of 1923 // *Smithsonian Magazine*. 2011. Paper 1764539.
18. *Dobry R.* et al. Damping/global energy balance in FE model of bridge foundation lateral response // *Soil Dynam. Earthquake Eng.* 2003. № 23 (6). P. 483–495;
[https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(03\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(03)00050-2)
19. *Teyssandier J.P., Combault J., Pecker A.* Rion Antirion: le pont qui defie les seismes // *La Recherche*. 2000. № 334. P. 42–46.
20. *Cremer C., Pecker A., Davenne L.* Cyclic macro-element of soilstructure interaction: material and geometrical nonlinearities // *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2001. № 25 (13). P. 1257–1284.
21. Granular metamaterials. Booklet. Adelaide, Australia: Marathon Alliance. 2022;
URL: <https://www.marathonalliance.com.au/metamaterials>
22. *Begambre-Carrillo O.J.* et al. Passive seismic protection systems with mechanical metamaterials: A current review // *Struct. Eng. & Mech.* 2022. № 82 (4). Article 417;
<https://doi.org/10.12989/sem.2022.82.4.417>
23. *Mirzaev I., Turdiev M.* Vibrations of buildings with sliding foundations under real seismic effects // *Constr. Unique Build. Struct.* 2021. № 94. Article № 9407;
<https://doi.org/10.4123/CUBS.94.7>
24. *Mirzaev I., Yuvmitov A., Turdiev M., Shomurodov J.* Influence of the vertical earthquake component on the shear vibration of buildings on sliding // *E3S Web Conf.* 2021. № 264. Article № 02022;
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402022>
25. *Avesth P., Mukerji T., Mavko G.* Quantitative Seismic Interpretation. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2005. 408 p.;
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511600074>
26. *Lucchesi M., Pagni A.* Longitudinal oscillations of bimodular rods // *Int. J. Struct. Stability Dynam.* 2005. № 5 (1). P. 37–54;
<https://doi.org/10.1142/S0219455405001490>
27. *Pelat A., Gautier F., Conlon S.C., Semperlotti F.* The acoustic black hole: A review of theory and applications // *J. Sound Vibr.* 2020. № 476. Paper 115316;
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115316>
28. *Goldstein R.V., Dudchenko A.V., Kuznetsov S.V.* The modified Cam-Clay (MCC) model: cyclic kinematic deviatoric loading // *Arch. Appl. Mech.* 2016. № 86 (12). P. 2021–2031;
<https://doi.org/10.1007/s00419-016-1169-x>