DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-2-5-11

*Аль Шемали А.А., аспирант,
Московский государственный строительный
университет, Москва, Россия*

*Ответственный автор E-mail: alshemali3@gmail.com

МОДЕЛИ ДРУКЕРА-ПРАГЕРА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГРАНУЛИРОВАННЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ

Аннотация: на сегодняшний день проблема разработки методов защиты зданий и сооружений от вибраций, передаваемых им от грунта под действием сейсмических воздействий, является чрезвычайно актуальной. Один из таких современных методов – сейсмические подушки. Цель данной работы заключалась в изучении эффективности добавления подушки из гранулированных метаматериалов под фундамент здания для уменьшения влияния сейсмических поперечных волн. Метод конечных элементов (КЭ) в сочетании с моделями Друкера-Прагера был использован для исследования диссипации волновой энергии. Модель КЭ состоит из десятиэтажной верхней части сооружения, опирающейся на плитный фундамент, под которым находится слой гранулированных метаматериалов. Проанализированы значения пяти переменных, влияющих на механические свойства этих метаматериалов (плотность – когезия – угол внутреннего трения – модуль Юнга – коэффициент Пуассона) для двух разных толщин подушки. Динамический анализ, проведенный с использованием программного комплекса Abaqus/CAE, показал эффективность гранулированных метаматериалов в их способности значительно снижать величины ускорений, скоростей и перемещений в исследуемом сооружении. Проведенный анализ также показал, что среди исследуемых переменных когезия является параметром, наиболее сильно влияющим на эффективность метаматериалов в их способности рассеивать энергию сейсмических волн, в то время как для других параметров существенного влияния не наблюдалось.

Ключевые слова: сейсмические волны, критерий Друкера-Прагера, метаматериалы, сейсмические площадки, Конечно-элементный анализ

Введение

Сейсмическая изоляция является одним из наиболее популярных средств защиты сооружения от сейсмических воздействий [1]. Изоляция может быть получена с помощью различных методов, таких как резиновые и резино-металлические сейсмоизоляторы, маятниковые сейсмоизоляторы сухого трения, динамические гасители колебаний и другие системы. Однако эти системы сейсмоизоляции имеют ряд недостатков, наиболее важным из которых является то обстоятельство, что (1) подземные части сооружений остаются незащищенными от колебаний, вызываемых дифрагированными сейсмическими волнами, передаваемыми непосредственно из грунта; (2) недостаточная долговечность, например; срок службы резинометаллического сейсмического изолятора обычно ограничивается 20-25 годами; (3) повышенная сложность конструкций сооружений, защищаемых с помощью традиционно применяемых сейсмоизолирующих систем, в дополнение к необходимости в периодическом обслуживании [2, 3]. Все это, естественно, приводит к повышению стоимости проектирования и строительства. Эти очевидные недостатки, применяемых в настоящее время сейсмоизолирующих систем, требуют разработки более надежных и долговечных систем сейсмической защиты, включая сейсмические барьеры и сейсмические подушки. Сейсмические барьеры могут быть использованы для защиты существующих зданий и сооружений от поверхностных сейсмических волн Рэлея, Рэлея-Лэмба, Лява, а так же некоторых других типов сейсмических волн, возникающих в основном в окрестности эпицентров землетрясений, а подушки используются для защиты строящихся зданий от наиболее опасного вида сейсмических волн – поперечных S-волн. Данная работа предназначена для исследования эффективности добавления сейсмической подушки под плитным фундаментом многоэтажного здания, подверженного воздействию сейсмических поперечных волн.

Гранулированные метаматериалы, используемые для заполнения сейсмических барьеров и сейсмических подушек, являются предметом обширных исследований различными научными коллективами [4]. Эти материалы предназначены для противостояния значительным колебаниям, возникающим при землетрясениях. Они характеризуются следующими механическими свойствами: плотность $\rho = 1200 - 1700 \text{ kg/m}^3$, угол внутреннего трения $\phi \leq 1^\circ$ и когезия $C = 1 - 100 \text{ kPa}$. В настоящей работе для описания поведения метаматериалов при циклических динамических воздействиях применялись модели Друкера-Прагера.

Критерий текучести Друкера – Прагера описывает начало текучести в метаматериале и дальнейшие процессы пластического деформирования и разгрузки при циклических динамических воздействиях, характерных для сейсмических волн. Этот критерий может применяться и для описания разрушения скальных грунтов, бетона, полимеров, пены и других, зависящих от давления, материалов. Назван по именам Даниэля Друкера и Прагера, разработавшим эту модель в 1952 году. Критерий описывается следующей формулой:

$$\sqrt{J_2} = A + BI_1 \quad (1)$$

где I_1 – первый инвариант тензора напряжений, J_2 – второй инвариант девиатора тензора напряжений. Константы A , B определяются экспериментально.

Метод конечных элементов (МКЭ) является эффективным способом решения задач дифракции волн в различных средах. Применения КЭ моделирования к учету диссипации энергии в конструкциях, к наложению неотражающих граничных условий, к моделированию сейсмических источников и к сейсмической защите рассмотрены в работах [3] и [5-12].

Методы и материалы

Для изучения влияния гранулированных метаматериалов на дисперсию сейсмических поперечных волн был проведен динамический анализ на основе конечно-элементной модели, состоящей из десятиэтажного здания и подушки под плитным фундаментом. Основные параметры, характеризующие геометрию зданий, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные здания, подлежащего моделированию параметры

Table 1

The main parameters of the building to be modeled

Длина здания, m	Ширина здания, m	Этажность	Высота этажа, m
33	20	10	3.3

Для моделирования использовались колонны квадратного сечения и плоская плита в дополнение к плитному фундаменту. В табл. 2 показаны свойства элементов зданий. Модуль упругости бетона был принят равным 30×10^9 Н/м², коэффициент Пуассона-0,25, а плотность бетона-2200 кг/м³.

Таблица 2

Поперечное сечение элементов здания

Table 2

Cross-section of the building members

Сечение колонны, mxm	Толщина плит, m	Толщина плитного фундамента, m
0.5x0.5	0.3	1.5

Применялись 8-ми узловые линейные шестигранные элементы с редуцированным интегрированием (C3D8R) для генерации сетки и для построения модели FE. Элемент C3D8R имеет шесть степеней свободы в каждом узле. На рис. 1 и 2 показаны соответственно план этажа здания и 3D-модель с подушкой, сгенерированная в инженерном программном комплексе Abaqus/CAE 6.14.

Рис. 1. Поэтажный план здания
Fig. 1. Floor plan of the building

Рис. 2. 3D Конечно-элементная модель здания с подушкой
Fig. 2. 3D Finite Element Model of the building with pad

Для моделирования воздействия сейсмических поперечных волн на все сооружение, непосредственно под подушкой прикладывались ускорения, действующие в двух направлениях (x , z), и изменяющиеся со временем по следующему периодическому закону [12]:

$$f(x) = \sin(\omega t) \quad (2)$$

где ω – круговая частота сейсмических волн.

Предполагая, что максимальная амплитуда этого синусоидального движения равна 5 м/с^2 , учитывая, что сооружение расположено в зоне сейсмической интенсивности 9 по модифицированной шкале Меркалли [13].

Для получения желаемых результатов было изучено влияние набора параметров на значения ускорений, скоростей и перемещений для двух разных толщин подушки ($d = 10 \text{ см}$, 50 см) в соответствии со следующими случаями, когда изменялся только один параметр, а другие оставались неизменными:

1. Изменение значений плотности (ρ);
2. Изменение когезии (C);
3. Изменение угла трения (ϕ);
4. Изменение модуля Юнга (E) при толщине подушки 10 см ;
5. Изменение коэффициента Пуассона (ν) при толщине подушки 10 см .

Abaqus позволяет изменять значения этих параметров путем определения поведения материала (плотность – эластичность – Друкер-Прагер).

Результаты и обсуждения

Явный динамический анализ проводился для сейсмической частоты $f=2$ Гц в течение 5 секунд для всех вышеперечисленных случаев. После анализа значения ускорений (A), скоростей (V) и перемещений (U) в направлении x рассматривались в точке, расположенной на верхней поверхности плитного фундамента, как показано на рис. 3.

Рис 3. Расположение точки наблюдения на верхней поверхности плитного фундамента
Fig.3. Location of monitoring point on the upper surface of slab foundation

Полученные значения были организованы в следующие таблицы (3-8) для каждого случая исследования:

Случай 1:

$E = 30 \text{ МПа}$, $\nu = 0.25$, $\phi = 0.1^\circ$, $C = 1 \text{ кПа}$.

Таблица 3

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении плотности гранулированного метаматериала

Table 3

Values of accelerations, velocities, and displacements when changing the density of metamaterial

	$\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$	
	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm
A1 (m/s^2)	-0.1379	-0.1204	-0.1374	-0.1176	-0.1369	-0.1158
V1 (m/s)	0.1916	0.1842	0.1916	0.1792	0.1916	0.1792
U1 (m)	0.5303	0.5068	0.5271	0.4950	0.5252	0.4917

Случай 2:

$E = 30 \text{ МПа}$, $\nu = 0.25$, $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$, $\phi = 0.1^\circ$.

Таблица 4

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении когезии

Table 4

Values of accelerations, velocities, and displacements when changing the cohesion

	$C = 1 \text{ кПа}$		$C = 5 \text{ кПа}$		$C = 10 \text{ кПа}$	
	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm
A1 (m/s^2)	-0.1369	-0.1158	-0.7071	-0.6248	-1.4100	-1.2290
V1 (m/s)	0.1916	0.1792	0.4180	0.4029	0.4944	0.4719
U1 (m)	0.5252	0.4917	1.3649	1.2858	1.6584	1.5874

Случай 3:

$E = 30 \text{ МПа}$, $\nu = 0.25$, $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$, $C = 1 \text{ кПа}$.

Таблица 5

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении угла трения

Table 5

Values of accelerations, velocities, and displacements when changing the angle of friction

	$\phi = 0.1^\circ$		$\phi = 0.5^\circ$		$\phi = 1^\circ$	
	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm
A1 (m/s ²)	-0.1369	-0.1158	-0.1369	-0.1158	-0.1369	-0.1158
V1 (m/s)	0.1916	0.1792	0.1916	0.1792	0.1916	0.1792
U1 (m)	0.5252	0.4917	0.5254	0.4918	0.5251	0.4918

Случай 4:

$\nu = 0.25$, $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$, $\phi = 0.1^\circ$, $C = 1 \text{ kPa}$, $d = 10 \text{ cm}$.

Таблица 6

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении модуля Юнга

Table 6

Values of accelerations, velocities, and displacements when changing Young's modulus

	A1 (m/s ²)	V1 (m/s)	U1 (m)
E = 30 MPa	-0.1369	0.1916	0.5252
E = 50 MPa	-0.1369	0.1916	0.5255

Случай 5:

$E = 30 \text{ MPa}$, $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$, $\phi = 0.1^\circ$, $C = 1 \text{ kPa}$, $d = 10 \text{ cm}$

Таблица 7

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении коэффициента Пуассона

Table 7

Values of accelerations, velocities, and displacements when changing Poisson's ratio

	A1 (m/s ²)	V1 (m/s)	U1 (m)
$\nu = 0.25$	-0.1369	0.1916	0.5252
$\nu = 0.25$	-0.1369	0.1917	0.5246

Все значения в приведенных выше таблицах сравнивались между собой и со значениями ускорений, скоростей и перемещений при отсутствии сейсмической подушки под фундаментом здания, которые показаны в табл. 8.

Таблица 8

Значения ускорений, скоростей и перемещений без сейсмической подушки

Table 8

Values of accelerations, velocities, and displacements without seismic pad

A1 (m/s ²)	V1 (m/s)	U1 (m)
4.5873	0.8061	2.0095

Данные, представленные в таблицах, показывают:

- Размещение подушки из гранулированных метаматериалов под плитным фундаментом здания уменьшило значения перемещения и скорости более чем на 70% и уменьшило значения ускорения более чем на 95% (в случае наименьшего значения когезии).
- Среди всех механических свойств метаматериалов наибольшее влияние на снижение уровня колебаний оказывает когезия; кроме того, было обнаружено, что эффективность подушки значительно снижается при небольшом увеличении когезии.
- Влияние плотности, угла трения, модуля Юнга и коэффициента Пуассона гранулированных метаматериалов на уменьшение значений ускорений, скоростей и перемещений практически незаметно.
- Увеличение толщины сейсмической подушки не оказывает заметного влияния на снижение значений ускорений, скоростей и перемещений.

Выводы

На основании проведенных расчетов доказана эффективность применения подушек из гранулированных метаматериалов для снижения уровня колебаний во всех конструктивных элементах многоэтажного здания при воздействии сейсмических поперечных волн. Результаты динамического анализа получены с использованием критерия текучести Друкера-Прагера, примененного для моделирования поведения гранулированного метаматериала.

В дальнейшем, рекомендуется проведение анализа диссипирующих свойств метаматериалов при более широком спектре сейсмических воздействий, включая ангармонические воздействия, вызванные реальными сейсмограммами. Также рекомендуется изучить влияние этажности здания, на требуемые толщины сейсмических подушек.

Литература

1. Datta T.K. Seismic analysis of structures. John Wiley & Sons. 2010. P. 369.
2. Vershinin V., Javkhlan S., Saidmukaram S. Seismic pads to protect buildings and structures from bulk seismic waves. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 04047. EDP Sciences.
3. Дудченко А.В. Анализ и оптимизация параметров вертикальных сейсмических барьеров при учёте диссипации энергии: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019.
4. Goldstein R.V. et al. The modified Cam-Clay (MCC) model: cyclic kinematic deviatoric loading. Arch Appl Mech. 2016. Vol. 86. P. 2021 – 2031.
5. Мусаев В.К. Решение задачи дифракции и распространения упругих волн методом конечных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 1990. № 4. С. 74 – 78.
6. Jones R.M. Deformation theory of plasticity. Bull Ridge Corporation. 2009.
7. Li S. et al. Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains. Computers and Geotechnics. 2019. Vol. 109. P. 69 – 81.
8. Kuznetsov S.V., Terentjeva E.O. Planar internal Lamb problem. Waves in the epicentral zone of a vertical power source // Acoust. Phys. 2015. Vol. 61. P. 356 – 367.
9. Орехов В.В., Негахдар Х. Некоторые аспекты изучения применения траншейных барьеров для уменьшения энергии поверхностных волн в грунте // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 98 – 104.
10. Кузнецов С.В., Нафасов А.Э. Горизонтальные сейсмические барьеры для защиты от сейсмических волн // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 131 – 134.
11. Kuznetsov S.V. Seismic waves and seismic barriers // Acoustical Physics. 2011. № 57 (3). P. 420 – 426.
12. Al Shemali A. Diffraction of harmonic S-waves into frame buildings. In: Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction 2021. P. 85 – 92. Springer International Publishing.
13. Jain A.K. Performance Based Seismic Design Of Tall Buildings: Risks And Responsibilities. <https://cecr.in/CurrentIssue/pages/20147>

References

1. Datta T.K. Seismic analysis of structures. John Wiley & Sons. 2010. P. 369.
2. Vershinin V., Javkhlan S., Saidmukaram S. Seismic pads to protect buildings and structures from bulk seismic waves. E3S Web of Conferences. 2019. 97. P. 04047. EDP Sciences.
3. Dudchenko A.V. Analysis and optimization of the parameters of vertical seismic barriers when taking into account energy dissipation: dis. ... Candidate of Engineering Sciences. Moscow, 2019. (rus.)
4. Goldstein R.V. et al. The modified Cam-Clay (MCC) model: cyclic kinematic deviatoric loading. Arch Appl Mech. 2016. 86. P. 2021 – 2031.
5. Musaev V.K. Solution of the problem of diffraction and propagation of elastic waves by the finite element method. 1990. 4. P. 74 – 78. (rus.)
6. Jones R.M. Deformation theory of plasticity. Bull Ridge Corporation. 2009.
7. Li S. et al. Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains. Computers and Geotechnics. 2019. 109. P. 69 – 81.
8. Kuznetsov S.V., Terentjeva E.O. Planar internal Lamb problem. Waves in the epicentral zone of a vertical power source. Acoust. Phys. 2015. 61. P. 356 – 367.
9. Orekhov V.V., Negakhdar Kh. Some aspects of studying the use of trench barriers to reduce the energy of surface waves in the ground. Bulletin of MSCU. 2013. 3. P. 98 – 104. (rus.)
10. Kuznetsov S.V., Nafasov A.E. Horizontal seismic barriers for protection from seismic waves. 2010. 4. P. 131 – 134. (rus.)

11. Kuznetsov S.V. Seismic waves and seismic barriers. *Acoustical Physics*. 2011. 57 (3).P. 420 – 426.
12. Al Shemali A. Diffraction of harmonic S-waves into frame buildings. In: *Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction 2021*. P. 85 – 92. Springer International Publishing.
13. Jain A.K. Performance Based Seismic Design Of Tall Buildings: Risks And Responsibilities. <https://cecr.in/CurrentIssue/pages/20147>

*Al Shemali A.A., Postgraduate,
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*
*Corresponding author e-mail: alshemali3@gmail.com

DRUCKER-PRAGER MODELS FOR DYNAMIC ANALYSIS OF GRANULAR METAMATERIALS IN EARTHQUAKE ENGINEERING

Abstract: problem of developing methods for protecting buildings and structures from the vibrations transmitted to them from the soil under the action of seismic effects is extremely important to date. One of these modern methods is seismic pads. The purpose of this work was to study the effectiveness of adding a pad of granular metamaterials under the foundation of the building to decrease influence of seismic shear waves. The Finite Element Analysis of Mohr-Coulomb models was used to achieve this goal. The FE model consists of a ten-story superstructure rested on the slab foundation, under which there is a layer of granular metamaterials. The values of five variables that affect the mechanical properties of these metamaterials were analyzed (density – cohesion – internal friction angle – Young's modulus – Poisson's ratio) for two different pad thicknesses. The dynamic analysis performed using the software package Abaqus/CAE showed the effectiveness of the granular metamaterials in their ability to significantly reduce magnitudes of displacements, velocities and accelerations in the building compared to the same values in the absence of these metamaterials. The analysis also revealed that among the studied variables, the cohesion is the parameter most influencing the effectiveness of metamaterials in their ability to dissipate seismic waves, while no significant effect was observed for the other parameters.

Keywords: Seismic Waves, Drucker-Prager criterion, Metamaterials, Seismic pads, Finite element analysis

Для цитирования: Аль Шемали А.А. Модели друкера-прагера для динамического анализа гранулированных метаматериалов в инженерной сейсмологии // *Строительные материалы и изделия*. 2021. Том 4. № 2. С. 5 – 11. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-2-5-11

For citation: Al Shemali A.A. Drucker-prager models for dynamic analysis of granular metamaterials in earthquake engineering. *Construction Materials and Products*. 2021. 4 (2). P. 5 – 11. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-2-5-11

*Поступила в редакцию 9 февраля 2021 г.
Принята в доработанном виде 1 марта 2021 г.
Одобрена для публикации 27 марта 2021 г.*

*Received: February 9, 2021.
Revised: March 1, 2021.
Accepted: March 27, 2021.*