DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-54-60

*Кузнецов С.В., доктор физико-математических наук, профессор,
Институт проблем механики Российской академии наук, Россия,
Аль Шемали А.А. *, аспирант,
Московский государственный строительный университет, Россия*
*Ответственный автор E-mail: alshemali3@gmail.com

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ КЭМ-КЛЕЙ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГРАНУЛИРОВАННЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ

Аннотация: Проблема защиты зданий и сооружений от вибраций естественной и искусственной природы является важной для современного строительства. Один из таких современных методов защиты – сейсмические подушки. Целью данной работы было изучение влияния добавления слоя гранулированного метаматериала под плитным фундаментом на колебания здания при воздействии сейсмических поперечных волн (S-волн). Для достижения этой цели был использован метод конечных элементов (МКЭ) в сочетании с моделями Кэм-Клей. Модель КЭ состоит из десятиэтажной верхней части сооружения, опирающейся на плитный фундамент, под которым находится слой гранулированных метаматериалов. 16 моделей были созданы с учетом изменения значений этих параметров (Толщина подушки; плотность; когезия; параметр прочности критического состояния (М); модуль Юнга –коэффициент Пуассона). Динамический анализ, проведенный с использованием программного комплекса Abaqus/CAE, показал эффективность гранулированных метаматериалов в их способности рассеивать сейсмическую энергию и значительно снижать уровень колебаний, передаваемых от грунта к зданию.

Ключевые слова: поперечные сейсмические волны, критерий Кэм-Клей, метаматериалы, сейсмические подушки, конечно-элементный анализ

Введение

Сейсмические подушки представляют собой слой метаматериалов, расположенных под фундаментом сооружения. Эти подушки отличаются от других систем сейсмоизоляции, используемых в настоящее время, следующими факторами: (1) Защита подземных частей сооружений от колебаний, вызываемых диффрактированными сейсмическими волнами, передаваемыми непосредственно из грунта; (2) достаточная долговечность по сравнению с резинометаллическими сейсмическими изоляторами, у которых срок службы не превышает 25 лет; (3) Технология реализации системы изоляции с помощью сейсмических подушек очень проста по сравнению с другими системами сейсмоизоляции [1, 2]. Такого рода подушки использовались для защиты опор самого длинного вантового моста Рион-Антирион (Греция), для защиты высотной башни Брукфилд-плейс в Западной Австралии и для защиты центральной больницы в Веллингтоне и женской больницы в Крайстчерче (Новая Зеландия).

Гранулированные метаматериалы являются искусственными материалами со свойствами рассеивания энергии волн в широких частотных диапазонах [2]. Они характеризуются небольшими значениями когезии и угла внутреннего трения. По этим материалам имеются обширные экспериментальные данные, полученные в ходе исследований в разных лабораториях, институтах и компаниях и по всему миру [3]. Для того, чтобы описать поведение метаматериалов при циклических динамических воздействиях применяются критерии разрушения на основе таких моделей, как модели Мора – Кулона, Друкера – Прагера, Кэм-Клей и т. Д. В настоящей работе применялись модели Кэм-Клей.

Модели Кэм-Клей и модифицированные Кэм-Клей модели представляют собой упругопластические модели, основанные на теории критического состояния и базовом предположении о наличии логарифмической зависимости между средним напряжением и коэффициентом пористости. Оригинальный вариант модели Кэм-Клей был предложен в работах [4, 5]. Позже, оригинальная логарифмическая поверхность текущей была заменена эллипсоидной, как показано на рис.1. Уравнение критической поверхности имеет следующий вид [6-7]:

$$f(p, q_s, p_c) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{p}{a} - 1 \right)^2 + \left(\frac{q_s}{Ma} \right)^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

где β – безразмерный параметр, определяющий форму эллипсоида: в докритической зоне $\beta = 1$ (левая сторона), в сверхкритической зоне $\beta \leq 1$ (правая сторона); безразмерный параметр M , известный как касательная критического конуса, определяет размер эллипсоида вдоль оси q ; a – центральная точка эллипсоида, этот параметр определяет размер эллипсоида вдоль оси p :

$$a = \frac{p_c}{1 + \beta}$$

где p_c – текущее значение давления текучести, обратите внимание, что при $\beta = 1$ параметр a принимает значение $p_c/2$. Фактически, параметр p_c определяет эволюцию эллипсоидной поверхности (1).

Рис. 1. Поверхности текучести модифицированной модели Кэм-Клей в p - q -плоскости
Fig. 1. Yield surfaces of the Modified Cam Clay model in p - q plane

Методы и материалы

Выбор геометрических параметров здания

Объектом исследования является десятиэтажное здание, где высота каждого составляет 3,3 м. На рис. 2 показаны длина и ширина здания, а также расстояния между осями колонн.

Рис. 2. План этажа здания с осями и колоннами
Fig. 2. Floor plan of the building with axes and columns

Определение свойств элементов

Для моделирования использовались колонны квадратного сечения (0.5x0.5m) и плоская плита в дополнение к плитному фундаменту с толщами 0,3 м и 1,5 м соответственно. Что касается свойств строительного материала (бетона), они показаны в табл. 1.

Таблица 1

Свойства строительного материала (бетона)

Table 1

Construction material properties (concrete)

Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	Плотность
$30 \times 10^9 \text{ Н/м}^2$	0.25	2200 Кг/м^3

Построение КЭ модели

Программный комплекс Abaqus / CAE 6.14 использовалось для построения конечно-элементной модели и анализа взаимодействия S-волн со зданием. Применялись 8-ми узловые линейные шестигранные элементы с редуцированным интегрированием (C3D8R) для генерации сетки. На рис. 3 показана 3D-модель с подушкой, сгенерированная в инженерном программном комплексе Abaqus.

Рассматривая общие проблемы и подходы, используемые при КЭ моделировании, необходимо отметить учет диссипации энергии в конструкциях [8]; проблемы, связанные с наложением неотражающих граничных условий при КЭ моделировании, обсуждаются в [9]; с КЭ моделированием сейсмических источников [9] и применение моделирования КЭ к сейсмической защите рассмотрены в работах [3, 11].

Рис. 3. 3D модель здания со слоем гранулированных метаматериалов

Fig. 3. 3D model of a building with a layer of granular metamaterials

Определение граничных условий

Для того, чтобы смоделировать распространение сейсмических поперечных волн, под подушкой прикладывались ускорения, действующие в двух направлениях (x, z), и изменяющиеся со временем по синусоидальному закону [12], предполагалось, что первый частотный максимум сейсмического воздействия равен 2 Гц и максимальная амплитуда равна 5 м/с^2 , учитывая, что сооружение расположено в зоне сейсмической интенсивности (балльности) 9 по модифицированной шкале Меркалли [13].

Для получения желаемых результатов, были созданы 16 моделей с учетом изменения значений следующих параметров: Толщина подушки (d); Значения плотности (ρ); Значения когезии (C); параметр критического состояния в кэм-клей модели (M); Значения модуля Юнга (E); Значения коэффициента Пуассона (ν).

В Abaqus имеется возможность изменять значения этих параметров для калибровки с экспериментальными данными.

Результаты и обсуждения

Для проверки эффективности добавления подушки из гранулированных метаматериалов под фундаментом здания на основе явных разностных схем был проведен динамический анализ вышеупомянутых 16 моделей в течение 5 секунд, а затем были рассмотрены значения ускорений (A), скоростей (V) и перемещений (U) в направлении (x) в точке, показанной на рис. 4.

Рис. 4. Расположение точки наблюдения на верхней поверхности плитного фундамента
Fig. 4. Location of monitoring point on the upper surface of slab foundation

В следующих табл. (2-7) показаны значения, полученные для пяти исследованных случаев:

Случай 1:

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

Таблица 2

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении параметра (M)

Table 2

Values of accelerations, velocities, and displacements when changing the parameter (M)

	M=1		M=1.5		M=2	
	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm
A1 (m/s ²)	0.0471	0.0371	0.0789	0.0662	0.1142	0.0954
V1 (m/s)	0.0988	0.0896	0.1422	0.1360	0.1782	0.1669
U1 (m)	0.2706	0.2416	0.3906	0.3658	0.4984	0.4656

Путем сравнения значений, приведенных в таблице выше, с их аналогами при анализе с использованием критерия Мора-Кулона и критерия Друкера-Прагера при изменении значений угла трения [14] было принято решение принять параметр $M=2$, так чтобы результаты динамического теста согласовывались с соответствующими результатами МК и ДП.

Случай 2:

$E = 30 \text{ МПа}$, $\nu = 0.25$, $\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$, $M=2$.

Таблица 3

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении когезии

Table 3

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

	C = 1 kPa		C = 5 kPa		C = 10 kPa	
	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm	d=10cm	d=50cm
A1 (m/s ²)	0.1142	0.0954	0.6021	0.5094	1.1792	1.0148
V1 (m/s)	0.1782	0.1669	0.3879	0.3586	0.4445	0.4259
U1 (m)	0.4984	0.4656	1.2833	1.1860	1.5329	1.4827

Случай 3:

$E = 30 \text{ МПа}$, $\nu = 0.25$, $M=2$, $C = 1 \text{ кПа}$.

Таблица 4

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении плотности гранулированного метаматериала

Table 4

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)	0.1135	0.0997	0.1140	0.0972	0.1142	0.0954
V1 (m/s)	0.1764	0.1669	0.1776	0.1669	0.1782	0.1669
U1 (m)	0.4975	0.4679	0.4982	0.4671	0.4984	0.4656

Случай 4:

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

Таблица 5

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении модуля Юнга

Table 5

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

	A1 (m/s ²)	V1 (m/s)	U1 (m)
E = 30 MPa	0.1142	0.1782	0.4984
E = 50 MPa	0.1161	0.1792	0.5076

Случай 5:

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

Таблица 6

Значения ускорений, скоростей и перемещений при изменении коэффициента Пуассона

Table 6

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

	A1 (m/s ²)	V1 (m/s)	U1 (m)
$\nu = 0.25$	0.1142	0.1782	0.4984
$\nu = 0.35$	0.1152	0.1790	0.5029

Табл. 7 показывает значения (A1, V1, U1) в точке наблюдения при отсутствии сейсмической подушки под фундаментом здания.

Таблица 7

Значения ускорений, скоростей и перемещений без сейсмической подушки

Table 7

Values of accelerations, velocities, and displacements without seismic pad

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

Путем сравнения значений в приведенных выше таблицах, было обращено внимание на следующие результаты:

1. Наличие слоя из гранулированных метаматериалов под плитным фундаментом здания способствовало значительному снижению амплитуд его колебаний, причем, значительное снижение значений амплитуд ускорений около 95% и снижение амплитуд скоростей и перемещений около 75%, достигалось при наименьшем значении когезии.
2. Увеличение когезии материалов значительно снизило эффективность сейсмической подушки, в то время как изменение остальных переменных не оказывало существенного влияния.
3. Увеличение толщины сейсмической подушки способствовало снижению колебаний здания, но весьма незначительно. Так, было замечено, что увеличение толщины с 10 см до 50 см (эквивалентно 400%) только снизило значения ускорения, скорости и перемещения в диапазоне 5-15%.

Выводы

Согласно результатам динамического анализа с использованием критерия разрушения Кэм-Клей, добавление подушки из гранулированных метаматериалов под фундаментом многоэтажного здания доказало свою эффективность в рассеивании энергии сейсмической поперечной волны, что, в свою очередь, значительно снижает амплитуды колебаний всего здания. Более того, для получения более объективных результатов рекомендуется проводить анализ диссипирующих свойств метаматериалов при более широком спектре сейсмических воздействий, включая ангармонические воздействия, вызванные реальными сейсмограммами. Также рекомендуется изучить эффективность других типов метаматериалов в рассеивании энергии сейсмических волн и, в дополнение, требуется изучить влияние этажности здания на требуемую толщину сейсмических подушек.

Литература

1. 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.
2. Дудченко А.В. Анализ и оптимизация параметров вертикальных сейсмических барьеров при учёте диссипации энергии: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019.
3. Kuznetsov S, Maigre H. Granular metamaterials for seismic protection. Hyperelastic and hypoelastic models // Journal of Physics: Conference Series 2019. Vol. 1425. № 1. P. 012184.
4. Roscoe K.H., Schofield A., Wroth A.P. On the yielding of soils // Geotechnique. 1958. Vol. 8. № 1. P. 22 – 53.
5. Roscoe K.H. Mechanical behaviour of an idealized 'wet' clay // InProc. 3rd Eur. Conf. Soil Mech. Wiesbaden, 1963. Vol. 1. P. 47 – 54.
6. Roscoe K., Burland J.B. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay // Proceedings of Engineering Plasticity. 1968. P. 535 – 609.
7. Kuznetsov S.V. Cam-clay models in mechanics of granular materials // Mechanics and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 21. № 4. P. 813 – 821.
8. Jones R.M. Deformation theory of plasticity. Bull Ridge Corporation. 2009.
9. Li S., Brun M. et al. Numerical modelling of wave barrier in 2D unbounded medium using Explicit/Implicit multi-time step co-simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 042062.
10. Kravtsov A.V., Kuznetsov S.V., Sekerzh-Zen'kovich S.Y. Finite element models in Lamb's problem // Mech. Solids. 2011. Vol. 46. № 6. P. 952 – 959.
11. Kuznetsov S.V. Seismic waves and seismic barriers. Acoustical Physics. 2011. Vol. 57. № 3. P. 420 – 426.
12. Al Shemali A. Diffraction of harmonic S-waves into frame buildings // Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction 2021. P. 85 – 92.
13. Jain A.K. Performance Based Seismic Design Of Tall Buildings: Risks And Responsibilities. <https://cecr.in/CurrentIssue/pages/20147>
14. Аль Шемали А. Модели Друкера-Прагера для динамического анализа гранулированных метаматериалов в инженерной сейсмологии // Строительные материалы и изделия. 2021. Т. 4. №2. С. 5 – 11. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-2-5-11

References

1. 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.
2. Dudchenko A.V. Analysis and optimization of parameters of vertical seismic barriers taking into account energy dissipation: dis. ... Cand. tech. sciences. Moscow, 2019. (rus.)
3. Kuznetsov S, Maigre H. Granular metamaterials for seismic protection. Hyperelastic and hypoelastic models. Journal of Physics: Conference Series 2019. 1425 (1). P. 012184.
4. Roscoe K.H, Schofield A., Wroth A.P. On the yielding of soils. Geotechnique. 1958. 8 (1). P. 22 – 53.
5. Roscoe K.H. Mechanical behaviour of an idealized 'wet' clay. InProc. 3rd Eur. Conf. Soil Mech. Wiesbaden, 1963. 1. P. 47 – 54.
6. Roscoe K., Burland J.B. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. Proceedings of Engineering Plasticity. 1968. P. 535 – 609.
7. Kuznetsov S.V. Cam-clay models in mechanics of granular materials. Mechanics and Mechanical Engineering. 2017. 21 (4). P. 813 – 821.

8. Jones R.M. Deformation theory of plasticity. Bull Ridge Corporation. 2009.
9. Li S., Brun M. et al. Numerical modelling of wave barrier in 2D unbounded medium using Explic-it/Implicit multi-time step co-simulation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 365. P. 042062.
10. Kravtsov A.V., Kuznetsov S.V., Sekerzh-Zen'kovich S.Y. Finite element models in Lamb's problem. Mech. Solids. 2011. 46 (6). P. 952 – 959.
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. Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction 2021. P. 85 – 92.
13. Jain A.K. Performance Based Seismic Design Of Tall Buildings: Risks And Responsibilities. <https://cecr.in/CurrentIssue/pages/20147>
14. 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 (rus.)

**Kuznetsov S.V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences (Advanced Doctor), Professor,
Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Russia,
Al Shemali A.A. *, Postgraduate,
Moscow State University of Civil Engineering, Russia
* Corresponding author e-mail: alshemali3@gmail.com**

MODIFIED CAM-CLAY MODELS FOR DYNAMIC ANALYSIS OF GRANULAR METAMATERIALS IN EARTHQUAKE ENGINEERING

Abstract: the problem of protecting buildings and structures from vibrations of natural and artificial nature is important for modern construction. One of such modern methods of protection is seismic pads. The purpose of this work was to study the effect of adding a layer of granular metamaterial under a slab foundation on the vibration of a building under the influence of seismic shear waves (S-waves). To achieve this objective, the finite element method (FEM) was used in combination with Cam-Clay models. The FE model consists of a ten-story superstructure rested on the slab foundation, under which there is a layer of granular metamaterials. 16 models were created taking into account changes in the values of these parameters (pad thickness; density; cohesion; critical state strength parameter (M); Young's modulus-Poisson's ratio). The dynamic analysis performed using the software package Abaqus/CAE showed the effectiveness of granular metamaterials in their ability to dissipate seismic energy and significantly reduce vibration transmitted from the ground to the building.

Keywords: seismic shear waves, Cam-Clay criterion, metamaterials, seismic pads, finite element analysis

Для цитирования: Кузнецов С.В., Аль Шемали А.А. Модифицированные модели кэм-клей для динамического анализа гранулированных метаматериалов в инженерной сейсмологии // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 3. С. 54 – 60. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-54-60

For citation: Kuznetsov S.V., Al Shemali A.A. Modified Cam-Clay models for dynamic analysis of granular metamaterials in earthquake engineering. Construction Materials and Products. 2021. 4 (2). P. 54 – 60. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-54-60

Поступила в редакцию 2 апреля 2021 г.
Принята в доработанном виде 14 мая 2021 г.
Одобрена для публикации 18 июня 2021 г.

Received: April 2, 2021.
Revised: May 14, 2021.
Accepted: June 18, 2021.