

ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ДВИЖЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РОСТВЕРКОМ НА КОЛЕБАНИЯ ЗДАНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Проф. Мирзаев Ибрахим, докторант Турдиев Маликжон Сайфиддин ўгли
Ташкентский государственный транспортный университет, (Узбекистан)
E-mail: ibrakhim.mir@mail.ru, malikjon_ts@mail.ru

Аннотация: Объектом исследования являются здания на скользящих фундаментах с сухим трением, имеющих ограничения на перемещение ростверка в горизонтальном направлении, при действии реальных землетрясений выше 9 баллов по MSK-64. До настоящего времени динамические задачи с сухим трением с ограничением горизонтального движения ростверка не рассматривались. Методом решения исследуемой задачи выбран метод Ньюмарка с логическим алгоритмом определения состояний начала скольжения, слипания, достижения ограничителя и отхода от него. На примере четырехэтажного здания при наборе двух записей землетрясений показано влияние ограничителей на значения сдвигового усилия при использовании скользящего фундамента.

Ключевые слова: Сейсмические волны; сейсмоизоляция; фторопласт; сухое трение; сейсмограмма; зазор

Введение. Важность защиты зданий и сооружений от воздействия сильных землетрясений не вызывает сомнений, так как это связано с жизнью и здоровьем людей. Для уменьшения силы воздействия землетрясений на здания и сооружения используются различные способы сейсмоизоляции, демпфирования и другие конструктивные решения [1, 2].

В [3] приведен алгоритм численного расчета конструкции с распределенными и сосредоточенными параметрами с учетом податливости основания.

В работе [4] исследованы колебания четырехэтажного здания со скользящим фундаментом при воздействии только горизонтальной компоненты движения основания, а в [5] также учтена и вертикальная компонента перемещения по записям реальных землетрясений.

В настоящей работе, как продолжение работ [4, 5], исследовано влияние ограничителя горизонтального перемещения ростверка, скользящего на фундаменте здания, на значения сдвигового усилия в конструкции.

Постановка задачи и метод решения. Пусть задано горизонтальное движение основания здания в виде сейсмограммы реального землетрясения. Будем считать, что нижняя часть фундамента здания приобретает такое же перемещение, а верхняя часть фундамента или ростверк разделен от нижней части фундамента двухслойным фторопластом и с двух сторон имеет одинаковые боковые зазоры между выступами нижнего фундамента. В качестве модели взаимодействия двух слоев фторопласта примем модель сухого трения Кулона.

Здание представим одномерной сдвиговой моделью с сосредоточенными массами и безынерционными упругими связями [4, 5]

$$[M] \cdot \left\{ \begin{matrix} \ddot{U} \\ \dot{U} \end{matrix} \right\} + [C] \cdot \left\{ \begin{matrix} \dot{U} \\ U \end{matrix} \right\} + [K] \cdot \{U\} = \{Q(t)\}, \quad (1)$$

$$\{U\} = 0, \quad \left\{ \begin{matrix} \dot{U} \\ \ddot{U} \end{matrix} \right\} = 0, \quad \text{при } t = 0,$$

где $[M]$ – диагональная матрица масс, массы расположены в уровнях этажей, $[K]$ – матрица жесткостей, $[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [k]$ – матрица вязкости, $\{U\}$ – вектор перемещений. Условие взаимодействия массы скользящего ростверка $[M_0]$ с фундаментом имеет вид [4, 5]:

$$\text{при совместном движении } u_0 = u_g - u_r, \text{ если } |F_0| < |F_{fr}|, \text{ т.е.;} \quad (2)$$

$$\text{при скольжении и при отходе от ограничителей } F_0 = F_{fr}, |u_s| < \delta; \quad (3)$$

при достижении ограничения и совместного движения с ним

$$|u_s| = \delta, u_0 = u_g - u_s, \quad (4)$$

где u_0 – перемещение ростверка; u_g – перемещение фундамента, т.е. аппроксимированная функция оцифрованной сейсмограммы горизонтальной составляющей землетрясения; u_r – величина сдвига в момент времени в начале текущего совместного движения фундамента и ростверка, т.е. разность между значениями перемещений фундамента и ростверка (в начальный момент времени $u_r = 0$); u_s – перемещение скольжения; δ – величина зазора между ростверком и фундаментом; F_0 – неизвестное значение силы сцепления между фундаментом и ростверком; $F_{fr} = \text{sign}(\dot{u}_g - \dot{u}_0) \cdot f \cdot P$ – предельное значение силы сухого трения; f – коэффициент сухого трения; P – вес здания.

При совместном движении перемещение u_0 определяется по равенству (2) и уравнение движения массы $[M_1]$ имеет вид [4, 5]:

$$M_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 + c_1 \dot{u}_1 - k_2 (u_2 - u_1) - c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0 \quad (5)$$

В этом случае $Q_1 = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0$, остальные элементы вектора $\{Q\}$ равны нулю. Перемещение и скорость массы M_1 в момент начала совместного движения определяется по вычисленным их значениям на этот момент.

Скольжение с сухим трением наступает только тогда, когда выполняется условие (3). Рассматриваемая задача (1) - (4) является нелинейной задачей, при этом отсутствуют условия вычисления неизвестной функции F_0 , далее покажем отсутствие необходимости вычисления значения этой функции. Скольжение может произойти только тогда, когда ростверк набрал необходимую силу инерции, а ускорение фундамента в этот момент снижается. Поэтому при слабых землетрясениях скользящий фундамент не срабатывает или эффект будет небольшим. Во время динамического процесса изменяются размерности матриц $[M]$ и $[K]$. При скольжении имеет место уравнение для массы M_0 [4, 5]

$$M_0 \ddot{u}_0 + k_1 (u_1 - u_0) - c_1 (\dot{u}_1 - \dot{u}_0) = F_{fr} \text{ при этом } Q_0 = F_{fr} Q_0 = F_{fr}. \quad (6)$$

Перемещение и скорость массы M_0 в момент начала скольжения определяются по вычисленным их значениям на этот момент. При этом уравнения (5) и (6) решаются совместно.

Для решения задачи в целом воспользуемся следующим алгоритмом. На каждом шаге по времени решаем задачи в трех постановках [4, 5].

Матрицы $[M]$ и $[K]$ в первой постановке имеют размер $m \times m$ (здесь m – количество этажей здания), а во второй и третьей постановках $(m + 1) \times (m + 1)$. Выбор истинного решения из этих трех решений осуществляется следующим образом. Если относительные скорости $\dot{u}_g - \dot{u}_0$ во втором и третьем постановках задач имеют разные знаки, тогда истинным решением является решение задачи в первой постановке, потому что приложенная сила сухого трения заставляет двигаться ростверк в разные стороны и значит неизвестная сила меньше предельного значения силы сухого трения, т.е. отсутствует скольжение. Если относительные скорости во второй и третьей постановках задач имеют одинаковый знак, тогда истинным решением является решение задачи в той постановке, в которой относительная скорость по абсолютному значению наименьший, потому что сила сухого трения направлена против относительного движения и

всегда приводит затуханию относительного движения. Дополнительно проверяется отход ростверка от ограничителей через выполнение условия $|u_s| < \delta$. Если это условие выполняется, тогда происходит отход ростверка от ограничителя, иначе происходит совместное движение ростверка и фундамента. Все задачи решаются методом Ньюмарка [1]; оцифрованная сейсмограмма землетрясения аппроксимируется сплайн функцией Эрмита. При этом шаг по времени в методе Ньюмарка должно быть меньше шага записи землетрясения.

Результаты и обсуждение. Обсудим результаты расчетов на следующих примерах. Пусть заданы характеристики 4 этажного здания, а также сейсмограммы следующих очень сильных землетрясений [6]:

1. Tabas – 000187 (16.09.1978 г, выше 10 баллов по MSK-64, максимальное ускорение – 10.17 м/с², максимальное перемещение – 0.3446 м, шаг оцифрования – 0.005 с, продолжительность – 78.395 с).

2. Gazli - 000074 (17.05.1976 г, выше 10 баллов по MSK-64, максимальное ускорение - 7.23 м/с², максимальное перемещение - 0.1827 м, шаг оцифрования - 0.005 с, продолжительность - 28 с).

Четырехэтажное здание серии 76-017СА/53 имеет следующие характеристики: кирпичное здание размером в плане 389.88 м²; сосредоточенные массы в уровнях верхней части фундамента и этажей $M_0 = 497575 \text{ кг}$, $M_1 = 495000 \text{ кг}$, $M_2 = 495000 \text{ кг}$, $M_3 = 495000 \text{ кг}$, $M_4 = 698000 \text{ кг}$, при этом общий вес здания, давящий на фундамент, равен $P = 26269635 \text{ Н}$; сдвиговые жесткости по этажам одинаковы $k_i = 16.08 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$; вязкость материала здания по этажам одинаковы $\mu_i = 26.9 \cdot 10^5 \text{ Нс/м}$.

При численном решении задач с сухим трением, не зависимо от выбора явной или неявной конечно-разностной схемы, шаг по времени необходимо подбирать для обеспечения достаточной точности. В наших примерах расчетов шаг по времени был выбран равным 0.0001 с.

В таблицах 1-2 приведены максимальные значения сдвигового усилия по этажам здания при воздействии Табасского землетрясения для различных значений зазоров и коэффициента сухого трения. Анализ данных этих таблиц показывает, что происходит увеличение сдвигового усилия при наличии ограничителя перемещения. При этом, чем больше величина зазора, тем меньше значение сдвигового усилия, при достаточно большом значении зазора и малом коэффициенте сухого трения ($\delta \geq 0.6 \text{ м}$; $f = 0.05$) перемещение не доходит до ограничителя, и в этом случае сдвиговые усилия минимальные. По мере увеличения зазора снижение значений сдвиговых усилий может нарушиться, это связано с возможностью набора относительной скорости до момента времени достижения ограничителя. Чем больше значение коэффициента сухого трения, значение зазора можно уменьшить, так как увеличение силы сухого трения позволяет уменьшить значение относительной скорости во время скольжения.

Таблица 1. Максимальные значения сдвиговых усилий по этажам для четырехэтажного здания при действии землетрясения № 1

Этаж	Без скольжения	$\delta = 0.2 \text{ м}$			$\delta = 0.3 \text{ м}$			$\delta = 0.4 \text{ м}$		
		$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$
1	37600	30400	14500	25000	26600	14500	15200	29900	14500	15200
2	34500	27700	11600	23600	23200	11600	15400	25200	11600	15400
3	27300	25000	10800	21600	22000	10800	13800	21300	10800	13800
4	17300	25300	10500	16300	19700	10500	11600	15500	10500	11600

Таблица 2. Максимальные значения сдвиговых усилий по этажам для четырехэтажного здания при действии землетрясения № 1

Эта	Без скольжения	$\delta = 0.5 \text{ м}$	$\delta = 0.6 \text{ м}$	$\delta = 0.8 \text{ м}$

	q_{max}	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$
1	37600	13900	14500	15200	8900	14500	15200	8900	14500	15200
2	34500	13600	11600	15400	7950	11600	15400	7950	11600	15400
3	27300	10900	10800	13800	7880	10800	13800	7880	10800	13800
4	17300	8930	10500	11600	8580	10500	11600	8580	10500	11600

В таблицах 3 и 4 приведены максимальные значения сдвигового усилия по этажам здания при воздействии Газлийского землетрясения для различных значений зазоров и коэффициента сухого трения. Анализ данных этих таблиц показывает, что происходит увеличение сдвигового усилия при наличии ограничителя перемещения. При этом, чем больше величина зазора, тем меньше значение сдвигового усилия, при достаточно большом значении зазора ($\delta \geq 0.2 \text{ м}$;) перемещение не доходит до ограничения, и в этом случае сдвиговые усилия минимальные. Максимальное горизонтальное перемещение Газлийского землетрясения почти в два раза меньше Табасского землетрясения, поэтому зазор здесь можно установить поменьше.

Таблица 3. Максимальные значения сдвиговых усилий по этажам для четырехэтажного здания при действии землетрясения № 2

Этаж	Без скольжения	$\delta = 0.02 \text{ м}$			$\delta = 0.05 \text{ м}$			$\delta = 0.1 \text{ м}$		
	q_{max}	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$
1	38500	31700	28300	29600	24100	25800	29100	32600	10600	13000
2	33400	27700	24900	25000	21800	19700	23700	28300	9490	11800
3	25400	24300	21600	19900	18400	14500	18300	27100	9470	13900
4	15400	22500	19700	17800	15600	11900	19600	25000	7900	12300

Таблица 4. Максимальные значения сдвиговых усилий по этажам для четырехэтажного здания при действии землетрясения № 2

Этажи	Без скольжения	$\delta = 0.2 \text{ м}$			$\delta = 0.3 \text{ м}$			$\delta = 0.4 \text{ м}$		
	q_{max}	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$	$f = 0.05$	$f = 0.1$	$f = 0.2$
1	38500	7950	10600	13000	7950	10600	13000	7950	10600	13000
2	33400	6050	9490	11800	6050	9490	11800	6050	9490	11800
3	25400	5950	9470	13900	5950	9470	13900	5950	9470	13900
4	15400	5820	7900	12300	5820	7900	12300	5820	7900	12300

Заключение. На основе проведенных расчетов приходим к выводу, что наличие ограничений горизонтального движения скользящего ростверка на фундаменте здания приводит к увеличению максимального значения сдвигового усилия в этажах здания. Допустимое значение зазора необходимо выбрать на основе расчетов на возможные землетрясения на площадке строительства, а также по значению коэффициента сухого трения. По мере увеличения зазора снижение значений сдвиговых усилий может нарушиться, это связано с возможностью набора относительной скорости до момента времени достижения ограничения. Чем больше значение коэффициента сухого трения, значение зазора можно уменьшить, так как увеличение силы сухого трения позволяет уменьшить значение относительной скорости во время скольжения. При малых значениях коэффициента сухого трения необходимо подбирать величину зазора с осторожностью, так как ростверк может удариться об ограничитель с набранной скоростью.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Chopra A K 2012 *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering 4th Edition* (Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey) p 994
 [2] Dimova S L 2012 Numerical algorithm for the dynamic analysis of base-isolated structures with dry friction. *Natural Hazards* 6(1) pp 71-86

[3]Mirzaev I M 1976 Reactions of composite structures, with concentrated and distributed parameters, to seismic action (vertical vibrations) *Sov Min Sci* 12(3) pp 296–300

[4]Mirzaev I, Turdiyev M S 2021 Vibrations of Buildings with Sliding Foundations under Real Seismic Effects *Construction of Unique Buildings and Structures* Volume 94 Article No 9407.

[5]Ibrakhim Mirzaev, Anvar Yuvmitov, Malikjon Turdiev and Jakhongir Shomurodov 2021 Influence of the Vertical Earthquake Component on the Shear Vibration of Buildings on Sliding Foundations *E3S Web of Conferences* 264, 02022.

[6] Ambraseys N N, Smit P, Douglas J, Margaris B, Sigbjörnsson R, Ólafsson S, Suhadolc P, Costa G 2004 *Internet site for European strong-motion data. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata.* 45(3)