

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОПОРЫ СЕЙСМОСТОЙКИХ ЗДАНИЙ

Л.А. Бородин

Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

Рассмотрены кинематические опоры сейсмостойких зданий, обладающих геометрически малоизменяемой структурой надпорных конструкций; опоры обладают сложной формой торцевой поверхности и способствуют ограничению сейсмической нагрузки на здания.

Ключевые слова: сейсмостойкие здания, кинематические опоры.

При возведении строительных объектов в районах, подверженных сильным землетрясениям, сейсмостойкость обеспечивается главным образом за счет высокой прочности строительных конструкций. Вместе с тем сейсмозащищенность сооружений может осуществляться при использовании принципа сейсмоизоляции, основанном на применении конструкций, благодаря которым можно ограничивать действующую на здания горизонтальную сейсмическую нагрузку.

Примером являются колонны гибкого первого этажа в зданиях, обладающих в целом по условиям эксплуатации жесткой, геометрически малоизменяемой структурой. Такие колонны, выполняя роль амортизаторов, воспринимают основную долю энергии, сообщаемой сооружению в процессе сейсмоколебаний. Однако это нередко может приводить к серьезным авариям, связанным с разрушением колонн. В этом отношении более надежными представляются объекты на кинематических (качающихся) опорах [1; 2; 3]. Принцип работы конструкций такого типа известен давно. Леонардо да Винчи, исследуя «падающую» Пизанскую башню, выяснил, что тело, опирающееся на горизонтальную плоскость, остается в равновесии, если вертикаль, проведенная через центр ее тяжести, не выходит за границы площади опоры.

На рисунке 1а схематически представлена конструкция в виде свободно опертой, геометрически неизменяемой стойки. Высота стойки H . Размер поперечного сечения $2a_0$. Опора воспринимает приложенную к точке O по нейтральной оси продольную сжимающую нагрузку N . Торцевая поверхность опоры, контактирующая с основанием, имеет форму плоскости. В таком случае, когда происходит отклонение конструкции от положения равновесия, между контактной поверхностью опоры и основанием появляется соответствующее угловое смещение φ и возникает в результате гравитационная восстанавливающая сила (ГВС) в виде удерживающего момента $M_G = N(a_0 - H\varphi)$ и пропорциональной ему горизонтальной реакции $S_G = M_G H^{-1} = N(H^{-1}a_0 - \varphi)$. Разность, заключенная в скобках, представляет, как видно из рис. 1б, по отношению к линии приложения нагрузки N плечо вертикальной восстанавливающей реакции, приложенной к крайней точке контактной поверхности опоры K . И это плечо уменьшается по мере отклонения опоры, соответственно уменьшается ГВС; достижение нулевого уровня произой-

дет при угловом смещении равном $\varphi_{\text{ПР}} = H^{-1}a_0$. Тем самым будет понижаться и общий уровень горизонтальной реакции сооружения на сейсмическую нагрузку. Графически реакция кинематической опоры с плоской контактной поверхностью приводится на диаграмме (рис. 1в). Площадь диаграммы в диапазоне $0 - \varphi_{\text{ПР}}$ представляет обратимую потенциальную энергию, за счет которой смещенная система будет в состоянии самостоятельно возвращаться к исходному положению.

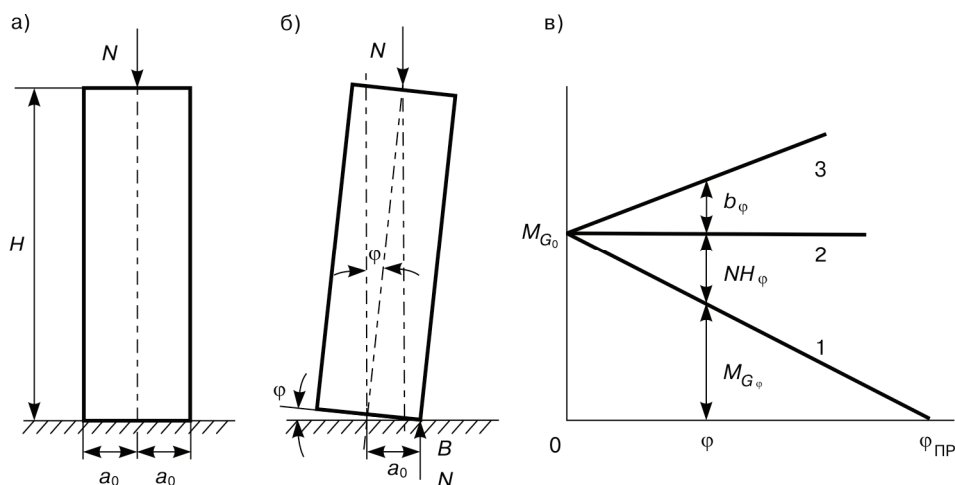


Рис. 1. Восстанавливающая реакция (ГВС) кинематических опор:

а, б — опоры с плоской формой торцевой поверхности; в — диаграмма ГВС:
 1 — падающая реакция; 2 — постоянная реакция; 3 — возрастающая реакция

Несущая способность кинематических опор такого рода может быть существенно повышена за счет создания более рациональной геометрической формы торцевой поверхности опоры в виде плоскости в сочетании с поверхностью криволинейного очертания (рис. 2).

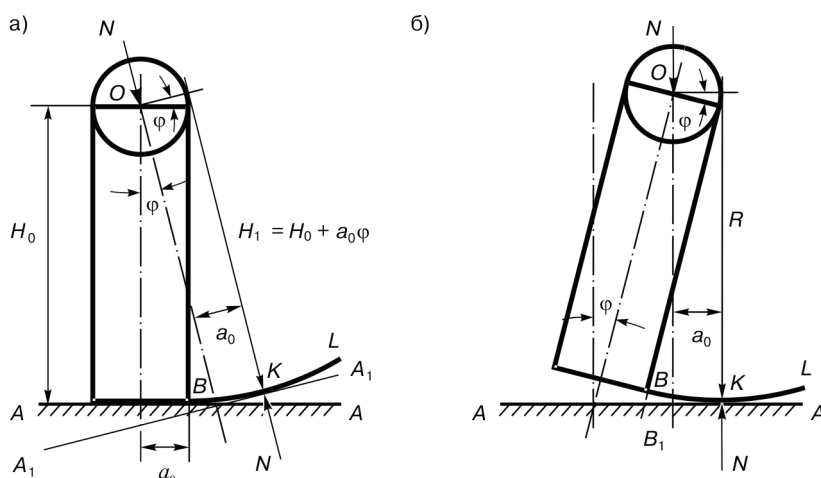


Рис. 2. Смещения кинематических опор со сложной формой торцевой поверхности:

а — смещение основания относительно опоры; б — смещения опоры относительно основания

Рассмотрим условие, при котором ГВС опорной конструкции остается по мере ее отклонения от положения равновесия постоянной. Формообразование торцевой поверхности удобно объяснить, полагая, что конструкция неподвижна, в то время как основание смещается вдоль поверхности торца по касательной (см. рис. 2а). Построим окружность радиусом a_0 с центром приложения продольной силы N в точке O . Первоначально, когда взаимное угловое смещение торцевой поверхности опоры и основания еще равно нулю, радиус кривизны R , касаясь построенной окружности, равен высоте H_0 и располагается по вертикали параллельной осевой линии, вдоль которой приложена сила N . При этом восстанавливающий момент ГВС $M_G = Na_0$, его значение в процессе дальнейшего смещения по условию должно оставаться неизменным. Теперь представим, что в данном структурном образовании возникло некоторое угловое смещение φ . В результате основание системы, занимавшее положение прямой $A-A$, переместилось в новое положение A_1-A_1 , касательной к линии BL в точке K . Линия радиуса кривизны R и линия силы N , повернувшись на угол φ , сохраняют взаимно параллельное расположение. Отметим, что в такой позиции точка касания K является точкой контакта кинематической опоры с основанием и радиус кривизны линии BL в точке K пересекается с основанием по линии A_1-A_1 под прямым углом. При этом, поскольку $M_G = \text{const}$, плечо силы N относительно контактной точки K должно быть равным a_0 . Следовательно, радиус кривизны R должен проходить по касательной к окружности в центре с точкой O . Отсюда видно, что при таком условии кривая торцевой поверхности опорной конструкции BL является фрагментом развертки (эвольвентой) окружности, радиус которой $r = a_0$.

Перейдем к рассмотрению схемы, на которой учитывается смещение кинематической опоры относительно неподвижного основания (см. рис. 2б). В тот момент, когда угловое смещение опоры было еще равным нулю, радиус кривизны по развертке совпадает с высотой H_0 и равен $H_0 = a_0\alpha_0$, где α_0 — угол отсчета развертки от начального положения, отсюда $\alpha_0 = H_0a_0^{-1}$. При смещении кинематической опоры от нейтрального положения на угол φ радиус кривизны нелинейной поверхности BL в точке касания K с основанием по развертке равен $H_1 = H_0 + a_0\varphi$. Длина дуги развертки BK представляет разность $l = 0,5a_0[(\alpha_0 + \varphi)^2 - \alpha_0^2]$. Выполняя преобразование и учитывая, что $\alpha_0 = H_0a_0^{-1}$, получим

$$l_\varphi = H_0\varphi + 0,5a_0\varphi^2. \quad (1)$$

При этом горизонтальное отклонение опорной конструкции равно, очевидно, отрезку B_1K , который представляет дугу BK , развернутую по линии основания $A-A$ (см. рис. 2б).

Перемещение конструкции по вертикали представляет, как видно из рис. 2б, разность

$$z = H_1 - H_0 = a_0\varphi. \quad (2)$$

Следует отметить, что второй член правой части формулы (1) может быть слишком малым для того, чтобы его надо было учитывать при выполнении реальных задач. Рассмотрим, например, заведомо предвзятый случай, при котором отношение поперечного размера плоской поверхности кинематической опоры $2a_0$ к ее высоте H_0 равно 0,4, а расчетная величина горизонтального отклонения $y = 0,1H_0$, при этом $\varphi \approx 0,1$. Выполнив расчет, получаем два результата: $0,101H_0$ и $0,1H_0$. Разница между ними составляет всего лишь 1%. Это дает основание на практике форму кривизны нелинейной поверхности принимать по дуге окружности и расчет отклонений выполнять по формуле

$$y = H_0\varphi. \quad (3)$$

Радиус кривизны при упрощенном подходе равен высоте опоры H . Величина ГВС будет в таком случае сохраняться при отклонении на неизменном уровне. Наряду с этим при необходимости можно избрать такое решение кинематической опоры, при котором горизонтальная реакция по мере отклонения опоры будет меняться. На рисунке 3а приводится схема опоры, у которой центр окружности развертки расположен на нейтральной оси конструкции, но выше по отношению к точке приложения продольной силы N на величину b . При таком условии восстанавливающий момент и соответствующая горизонтальная реакция ГВС составят: $M_G = N(a_0 + b\varphi)$; $S_G = M_G H^{-1} = NH^{-1}(a_0 + b\varphi)$. При этом горизонтальная реакция будет возрастать по линейному закону. На диаграмме (см. рис. 1в) данная реакция представлена в виде восходящей прямой.

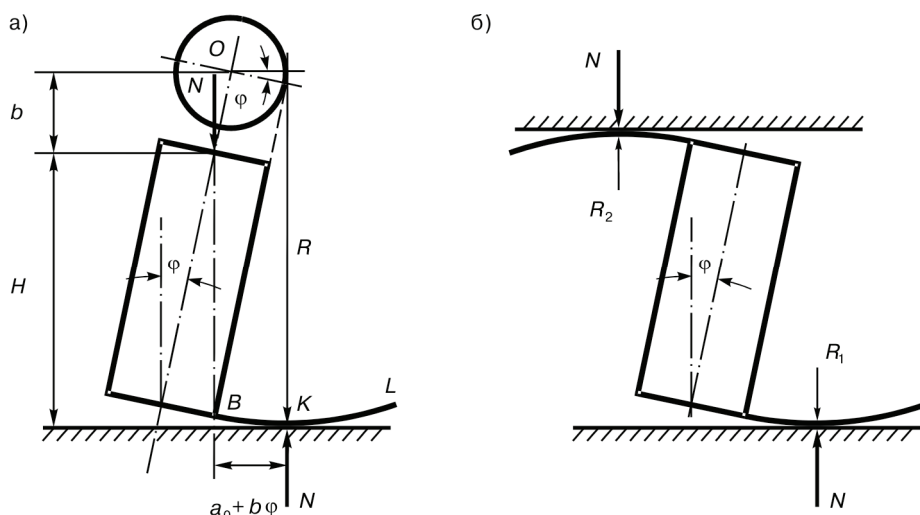


Рис. 3. Кинематические опоры с изменением уровня ГВС:
 а — опора с возрастающей ГВС; б — опора со сложной формой
 поверхности верхнего и нижнего торцов

Конструкции кинематических опор будут более компактными, если оба торца верхний и нижний будут иметь геометрически подобные формы, обеспечивающие синхронность работы (см. рис. 3б) В таких случаях следует соблюдать ра-

венство отношений $h_1/h_2 = a_1/a_2 = b_1/b_2$, где h_1 и h_2 — высоты верхней и нижней частей опоры, при этом $h_1 + h_2 = H$; $h_1 + b_1$; $h_2 + b_2$ — радиусы кривизны контактных поверхностей верхнего и нижнего торцов; a_1 и a_2 — половины ширины плоской части поверхности торцов. Суммарный восстанавливающий момент и горизонтальная реакция будут при этом иметь значения

$$M_G = N[a_1 + a_2 + (b_1 + b_2)\varphi], \quad (4)$$

$$S_G = M_G H^{-1} = N H^{-1}[a_1 + a_2 + (b_1 + b_2)\varphi]. \quad (5)$$

Использование в зданиях кинематических опор с линейно возрастающей реакцией возможно, например, при комбинированных решениях, когда определенная часть опор создает линейно убывающую реакцию, и в результате совокупная горизонтальная реакция будет иметь постоянное значение.

Размеры плоских участков торцевой контактной поверхности кинематических опор задаются исходя из такого расчета, чтобы при сейсмоздействиях умеренной интенсивности сооружения находились в несмещенном состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Бородин Л.А.* Исследование несущей способности при сейсмической нагрузке неупругих систем с учетом гравитационной восстанавливающей силы // *Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство.* — М.: Изд. ВНИИИС Госстроя СССР, 1986. Серия 14. Вып. 8. — С. 19—23.
- [2] *Курзанов А.М., Семенов С.Ю.* Натурные динамические испытания строящегося многоэтажного сейсмоизолированного монолитного дома в Сочи // *Промышленное и гражданское строительство.* — М.: Изд. ПГС, 2005. — № 3. — С. 42—43.
- [3] *Бородин Л.А.* Сейсмостойкость геометрически малоизменяемых объектов на кинематических опорах шарового типа // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* — М.: Изд. РУДН, 2006. — № 1. — С. 90—95.

KINEMATIC SUPPORT OF A SEISMIC BUILDINGS

L.A. Borodin

Peoples' Friendship University of Russia
Ordshonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Kinematic support possess a difficult front surface and provide seismoisolation for over supports constructions of buildings.

Key words: a seismic buildings, kinematic support.