

О. А. САВИНОВ, В. В. САХАРОВА, А. М. УЗДИН

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА УПРУГИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

Предложения по устройству сейсмоизолированных фундаментов в настоящее время широко освещаются в отечественной и зарубежной литературе. Однако их практическое использование вызывает пока определенные трудности. Являющиеся аналогом сооружений с сейсмоизолированным фундаментом здания с гибким нижним этажом, построенные в Югославии и Румынии, получили серьезные повреждения при сильных землетрясениях [3, 4], что вызывает известное недоверие к самой возможности применения сейсмоизоляции.

Низкая сейсмостойкость первых решений сейсмоизолированных фундаментов обусловлена прежде всего тем, что при значительном снижении уровня ускорений сейсмоизолированного сооружения имеет место рост его смещений относительно фундамента [5]. Эти смещения вызывают разрушение упругих элементов, связывающих фундамент с сооружением. С целью ограничения взаимных смещений между сооружением и фундаментом последний снабжается ограничителями перемещения демпферами, из которых наиболее удобны в эксплуатации демпферы сухого трения. Принципиальная схема такого фундамента показана на рис. 1. Для уменьшения опасного влияния взаимных сме-

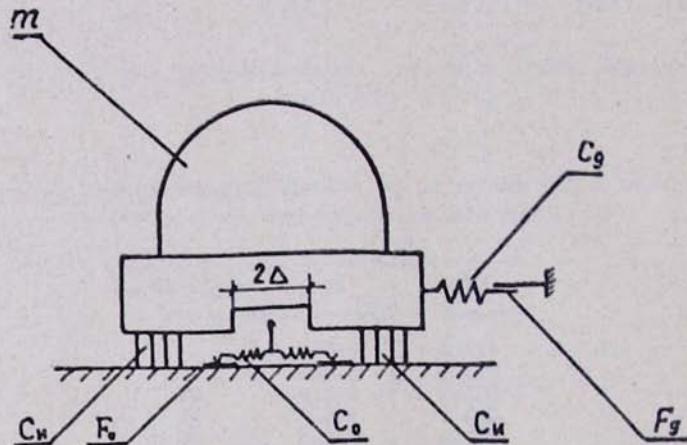


Рис. 1. Принципиальная схема сооружения с сейсмоизолированным фундаментом.

m — масса сооружения; C_g, F_g — жесткость и сила трения демпфера сухого трения; C_i — жесткость сейсмоизоляции; C_o, F_o — жесткость и сила трения упругопластического ограничителя

щений фундамента и сооружения связь между ними устраивают кинематической [2, 6]. При этом ограничения по смещениям сооружения определяются требованиями к целостности коммуникаций. В настоящее время фундаменты упомянутой конструктивной схемы построены как в нашей стране [2], так и за рубежом [6], однако они не перенесли пока сильных землетрясений. Необходимо отметить, что при большом объеме исследований в этой области некоторые принципиальные вопросы сейсмостойкости сейсмоизолированных фундаментов до сих пор не освещены в литературе. Целью настоящей статьи является иллюстрация возможностей сейсмоизолированных, в первую очередь, кинематических фундаментов для сейсмозащиты сооружений. Прежде всего следует отметить, что рассматриваемые конструкции сейсмозоляции характеризуются существенной нелинейностью, и единственным методом их анализа является в настоящее время математическое моделирование колебаний системы, т. е. расчет сооружения по акселерограммам землетрясений. Исходным для проведения расчетов является задание расчетных акселерограмм. Уже на этом этапе возникают проблемы, не рассмотренные в литературе. До последнего времени специалисты в области сейсмостойкого строительства обращали особое внимание сейсмологов на запись акселерограмм, поскольку именно ускорения основания входят в правую часть уравнений колебаний и определяют нагрузку на систему. При этом не уделялось внимания вопросу соответствия акселерограмм и сейсмограмм, а большинство акселерограмм содержало длиннопериодные помехи, не влияющие практически на запись ускорений, но существенно искажающие сейсмограмму основания. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена акселерограмма

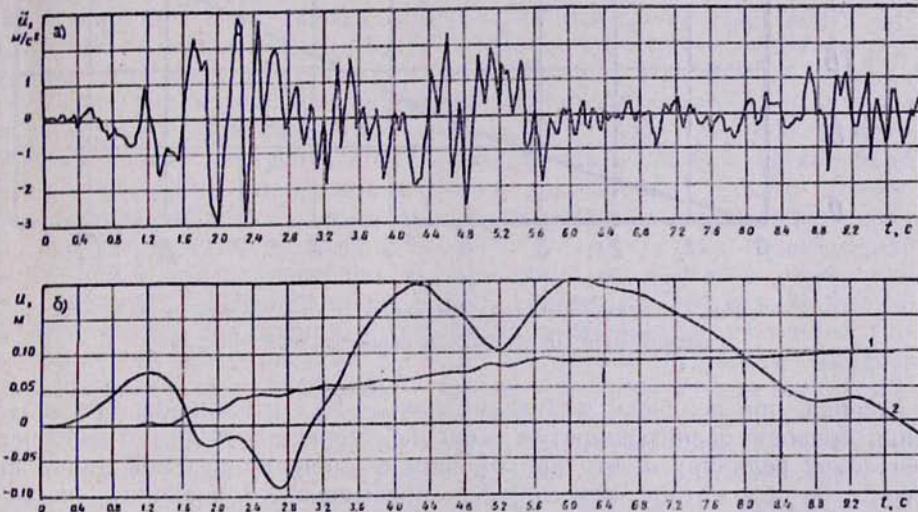


Рис. 2. Акселерограмма и сейсмограмма землетрясения Эль-Центро 1940 г.

а) акселерограмма, б) сейсмограмма.

1—сейсмограмма, полученная численным интегрированием имеющейся цифровки; 2—натуральная сейсмограмма

ма землетрясения Эль-Центро, используемая для расчетов во многих работах и две сейсмограммы: фактическая (1) и полученная путем численного интегрирования (2). Указанные искажения существенно влияют на точность оценки смещений кинематических фундаментов. В качестве простого примера оценим влияние смещения нулевой линии на акселерограмме на остаточные смещения фундамента массой m , соединенного с основанием лишь вязким демпфером с коэффициентом демпфирования a . В силу линейности такой системы уравнение для определения помехи Δ_y смещения y фундамента имеет вид:

$$m\ddot{\Delta}_y + b\dot{\Delta}_y = a\gamma_0(t)y. \quad (1)$$

где γ_0 — функция Хевисайда,

a — величина смещения нулевой линии.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$\Delta_y = \frac{am}{b} \left[t + \frac{m}{b} \left(e^{-\frac{b}{m}t} - 1 \right) \right]. \quad (2)$$

Зависимость максимальных относительных смещений $\frac{\Delta_y}{a}$ от продолжительности землетрясения t_3 показана на рис. 3. Как видно из

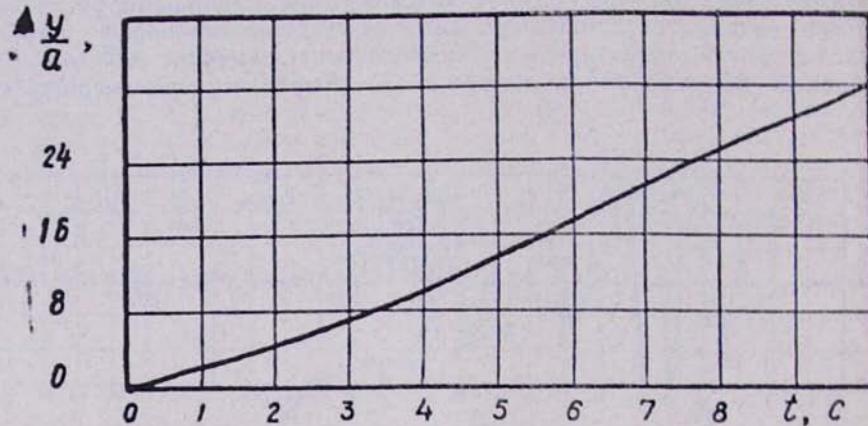


Рис. 3. Зависимость максимальных относительных смещений Δ_y/a от продолжительности землетрясения

рисунка, при реальных значениях $t_3 = 5 \div 15$ с отклонение нулевой линии приводит к погрешностям в оценке смещений, в 20—30 раз превышающих величину a , что при 5%-ном отклонении нулевой линии приводит к абсолютной погрешности, превышающей величину искомых смещений. Массовые расчеты и анализ акселерограмм, выполненные авторами, показали, что определение смещений фундаментов достигает приемлемой точности (погрешность не превосходит 10—15%), если выполняется условие:

$$\alpha = \frac{y_{\text{err}}}{y_{\max} t_3^2} < 0,05, \quad (3)$$

здесь $u_{\text{ост}}$ — остаточное смещение, полученное путем численного интегрирования акселерограммы, $u_{\text{макс}}$ — максимальное ускорение основания. Если условие (3) не выполняется, акселерограмма непригодна для оценки смещений кинематических фундаментов и требует корректировки. С этой целью может быть использована методика ИФЗ [1], успешно зарекомендовавшая себя при проведении соответствующих расчетов. Для исследования эффективности работы сейсмоизолированных фундаментов авторами были приняты 6 акселерограмм сильных землетрясений, характеристики которых приведены в табл. Принятый набор воздействий охватывает весь возможный диапазон частотного состава сейсмических колебаний, амплитудные характеристики акселерограмм нормировались по максимальному ускорению на 7, 8 и 9 баллов согласно нормам (0,1, 0,2 и 0,4g, где g — ускорение силы тяжести).

Характеристика расчетных акселерограмм

Таблица

% № пп	Наименование акселерограммы	Шаг циф- ровки, с	Продолжи- тельность, с	α	Характерные периоды, с
1	Эль-Центро, 1940 г.	0,01	10,11	0,00029	0,25; 0,5; 1,3
2	Хелена 31.10.1935 г.	0,03	6,45	0,0011	0,25; 1; 3
3	Вернон	0,02	7,98	0,00079	0,1; 0,5; 1,5
4	Газли 17.5.76	0,00657	13,06773	0,00014	0,1; 0,2; 0,55; 0,8
5	Ташкент 4.07.66	0,0091	2,5935	0,00413	
6	Карпатское 4.03.77	0,0153	17,0748	0,000231	0,13; 0,4; 1,5

По указанным акселерограммам выполнены массовые расчеты сейсмоизолированных фундаментов с варьированием жесткости сейсмоизоляции, жесткости и силы трения демпфера сухого трения, жесткости, силы трения и зазора упруго-пластического ограничителя перемещений. Выполненные расчеты показали, что фундамент на упругих опорах может быть реализован при настройке жесткости последних на период основного тона колебаний $T_1 = 1,5 \div 2$ с. При этом для обеспечения снижения уровня ускорений сооружения до $0,2 \div 0,25$ g и смещений до 3,5 см необходимо снабжение системы демпферами сухого трения. Оптимизация смещений и ускорений по параметрам ограничителя привела к нулевой величине зазора $\Delta_{\text{ср}} = 0$, т. е. от системы с демпфером сухого трения и ограничителем мы пришли к аналогичной системе с двухкаскадным демпфированием. Для каждого воздействия оптимальное соотношение сил трения в демпферах оказывается различным, однако при силе землетрясения до 8 баллов можно подобрать универсальную систему сейсмоизоляции с суммарной силой трения около 16% от веса сооружения, поровну распределенной между каскадами демпфирования; первый из каскадов демпфирования выполняется жестким, второй каскад обеспечивает период основного тона колебаний (при одновременно работающих с ним упругих элементах изоляции) в пределах 0,5—0,7 с. Отмеченное положение иллюстрировано на рис. 4, где показаны зависимости максимальных ускорений и смещений системы от силы землетрясения для различных акселерограмм и настройки, оптимальной для акселерограммы Хелена. При силе землетрясения более 8 баллов устройство сейсмоизолированных фундаментов возможно лишь при высокочастотных сейсмических воздействиях. При настройке основного тона сейсмических колебаний 1 с (Карпатское землетрясение) и пиковом ускорении основания 0,3g максимальные ускорения сооружения достигают величины 0,4g, а смещение — 22 см.

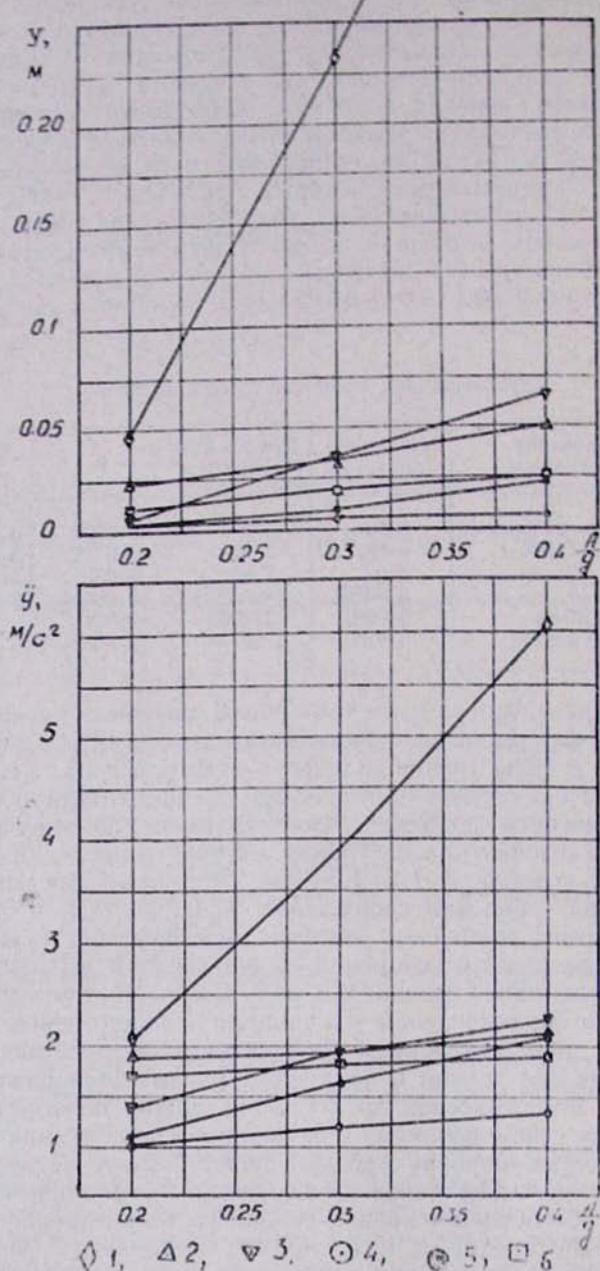
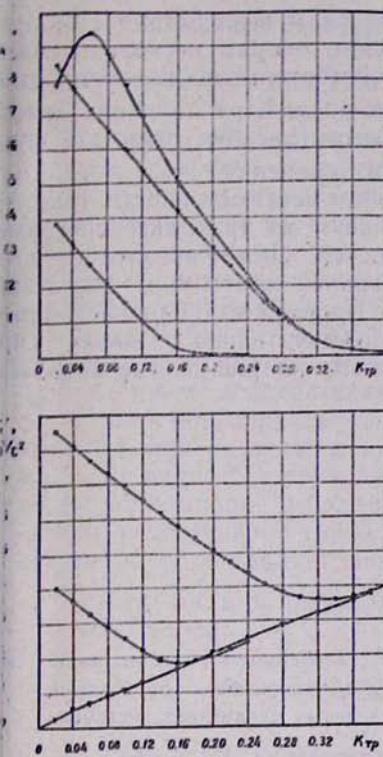


Рис. 4. Зависимости максимальных смещений y и ускорений \ddot{y} от максимальных относительных ускорений основания A/g для различных типов землетрясений: 1—Карпатское; 2—Эль-Центро; 3—Вернон; 4—Ташкент; 5—Газли; 6—Хелена

Для выяснения дополнительных возможностей фундаментов на кинематических опорах была выполнена сопоставительная серия расчетов таких фундаментов и фундаментов на упругих опорах. На рис. 5



5. Зависимость максимальных смещений u и ускорений \ddot{y} от величины K_{tr} различных типов сейсмозоляции фундамента при воздействии землетрясения на Карпатского

— сейсмоизолированный фундамент на упругих опорах при силе землетрясения 9 баллов;

— то же при силе землетрясения 8 баллов;

— кинематический фундамент при силе землетрясения 9 баллов.

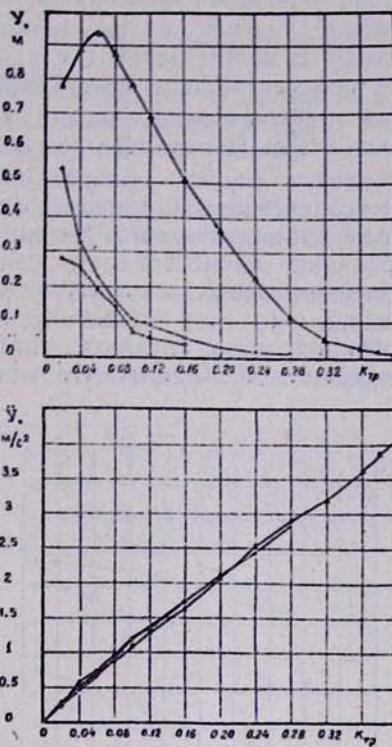


Рис. 6. Зависимость максимальных смещений u и ускорений \ddot{y} от величины K_{tr} для различных сейсмических воздействий, нормированных по ускорению на 9 баллов.

△—Карпатское землетрясение;

+—землетрясение Вернон;

○—землетрясение Эль-Центро.

казаны зависимости максимальных смещений u_{max} и ускорений \ddot{y}_{max} верхней плиты фундамента от коэффициента трения $K_{tr} = F_{tr}/Q$ (Q — с сооружения) при однокаскадном демпфировании и наиболее неблагоприятном воздействии, заданном акселерограммой Карпатского землетрясения. Как и следовало ожидать, устройство кинематических опор привело к снижению u_{max} и увеличению \ddot{y}_{max} . Однако при уровнях смещений $u_{max} < 10$ см u_{max} для кинематического фундамента не значительно меньше аналогичной величины для фундамента на упругих опорах. Из рис. 5 видно также, что при трении в демпферах сухого трения, близком к оптимальному ($K_{tr} \geq K_{opt}$), показатели жесткости опор становятся несущественными, и зависимости u_{max} (K_{tr}) и \ddot{y}_{max} (K_{tr}) для обоих типов фундаментов практически совпадают.

Этот факт указывает на то, что точность настройки жесткости сейсмозащищенных фундаментов не играет существенной роли при их устройстве. Кроме того, при $K_{sp} > K_{opt}$ (а для кинематических фундаментов во всем диапазоне изменения K_{sp}) ускорения верхней плиты фундамента $\ddot{y}_{max} \approx K_{sp}g$, вне зависимости от силы воздействия (8 или 9 баллов). В целом переход к кинематическим опорам несколько повышает сейсмостойкость фундамента. Это обстоятельство наглядно видно на графиках зависимости $y_{max}(K_{sp})$ и $\ddot{y}_{max}(K_{sp})$ для трех землетрясений Эль-Центро, Вернон и Карпатского (рис. 6). Если для фундамента на упругих опорах смещения и ускорения y_{max} и \ddot{y}_{max} при этих воздействиях не удовлетворяли условиям сейсмостойкости (рис. 3), то для кинематического фундамента по двум из трех акселерограмм требования сейсмостойкости удовлетворяются. Для Карпатского землетрясения и в этом случае ускорения верхней плиты \ddot{y}_{max} достигают величины $0.3g$ при смещениях до 20 см. Переход от однокаскадного демпфирования к двухкаскадному лишь незначительно позволяет снизить смещения системы, что иллюстрировано на рис. 7, где показаны

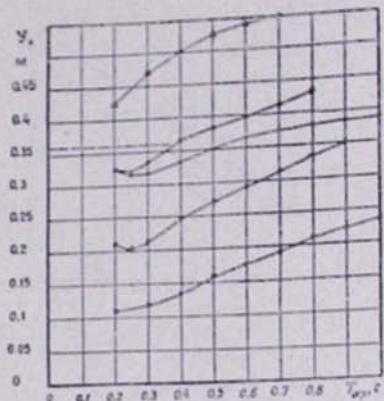
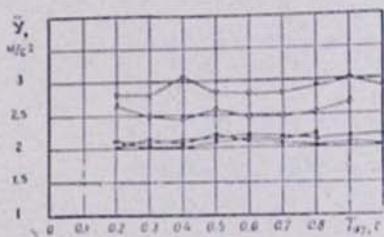


Рис. 7. Зависимость максимальных смещений y и ускорений \ddot{y} от величины T_{org} при различных параметрах системы:



- $\triangle - T_g = 1.4 \text{ с. } F_g = F_0 = 100000 \text{ кН}$
- $\odot - T_g = 0.2 \text{ с. } F_g = F_0 = 100000 \text{ кН}$
- $\bullet - T_g = 0.2 \text{ с. } F_g = 140000 \text{ кН},$
 $F_g = 140000 \text{ кН},$
 $\diamond - T_g = 0.2 \text{ с. } F_g = 100000 \text{ кН},$
 $F_0 = 60000 \text{ кН}; F_0 = 140000 \text{ кН};$
 $\triangle - T_g = 0.2 \text{ с. } F_0 = 140000 \text{ кН}$
- — — значение смещений при однокаскадном демпфировании
и $F_g = 200000 \text{ кН}$

зависимости максимальных смещений и ускорений системы от жесткости второго каскада демпфирования, определяемой величиной T_{org} — периода колебаний сооружения при открытом демпфере первого каскада и закрытом демпфере второго каскада. На рисунке принято обозначение T_g — период колебаний системы при закрытых демпферах только первого каскада. Из приведенного рисунка следует также, что варьирование жесткости и сил трения при многокаскадном демпфировании (при сохранении суммарной силы трения) приводит к изменению смещений системы и практически не влияет на ускорение верхней плиты фундамента.

Резюмируя приведенные исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Для оценки смещений сейсмоизолированных фундаментов недопустимо применять акселерограммы, удовлетворяющие условию $\frac{y_{\text{ист}}}{y_{\text{так}}} = \frac{t_3^2}{t_2^2} > 0,05$, поскольку они содержат длиннопериодные помехи, искажающие картину смещений сейсмоизолированных фундаментов.

2. Существуют оптимальные системы демпфирования, минимизирующие ускорения сооружения: снижение перемещений в этом случае можно добиться введением многокаскадного демпфирования; устройство ограничителей перемещений для сейсмоизолированных систем оказывается неэффективным.

3. Сейсмоизоляция фундаментов позволяет обеспечить снижение ускорений сооружения до $0,2 g$ и смещений до 3 см при воздействии силой до 8 баллов, причем существует универсальная настройка параметров фундамента, обеспечивающая сейсмостойкость сооружения при различных воздействиях.

4. Сейсмоизолированные фундаменты на кинематических опорах имеют несколько лучшие показатели, чем на упругих, однако это улучшение не является определяющим. При длиннопериодном сейсмическом воздействии силой 9 баллов (типа Карпатского) кинематический фундамент обеспечивает снижение ускорений сооружения до $0,3g$, смещение при этом составляет около 20 см.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева,
НИИ мостов

ЛИТЕРАТУРА

1. Грайзер В. М. Определение истинного смещения почвы по записям сильных движений. Физика земли, № 12, 1979.
2. Катин-Ярцев А. С., Назин В. В., Зеленский Г. А., Шуляк Ю. И. Динамические испытания зданий с гравитационными системами сейсмоизоляции в Севастополе. Научно-технический реферативный сборник «Сейсмостойкое строительство», вып. 7, 1977.
3. Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений. М., Стройиздат, 1978.
4. Поляков С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий. М., Высш. школа, 1983.
5. Савинов О. А., Сандович Т. А. О некоторых особенностях применения систем сейсмоизоляции зданий и сооружений. Изв. ВНИИГ, том 161, 1982.
6. Renault J., Richle M., Pavot B. Première application des appuis antiseismiques à friction: la centrale nucléaire de Koeberg. Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, № 371, ch. 74, 1979.

Этот факт указывает на то, что точность настройки жесткости сейсмостойких изолированных фундаментов не играет существенной роли при их устройстве. Кроме того, при $K_p > K_{opt}$ (а для кинематических фундаментов во всем диапазоне изменения K_{tr}) ускорения верхней плиты фундамента $\ddot{u}_{max} \approx K_{tr}g$, вне зависимости от силы воздействия (8 или 9 баллов). В целом переход к кинематическим опорам несколько повышает сейсмостойкость фундамента. Это обстоятельство наглядно видно на графиках зависимости $u_{max}(K_{tr})$ и $\ddot{u}_{max}(K_{tr})$ для трех землетрясений Эль-Центро, Бернон и Карпатского (рис. 6). Если для фундамента на упругих опорах смещения и ускорения u_{max} и \ddot{u}_{max} при этих воздействиях не удовлетворяли условиям сейсмостойкости (рис. 3), то для кинематического фундамента по двум из трех акселерограмм требования сейсмостойкости удовлетворяются. Для Карпатского землетрясения и в этом случае ускорения верхней плиты \ddot{u}_{max} достигают величины $0.3g$ при смещениях до 20 см. Переход от однокаскадного демпфирования к двухкаскадному лишь незначительно позволяет снизить смещения системы, что иллюстрировано на рис. 7, где показаны

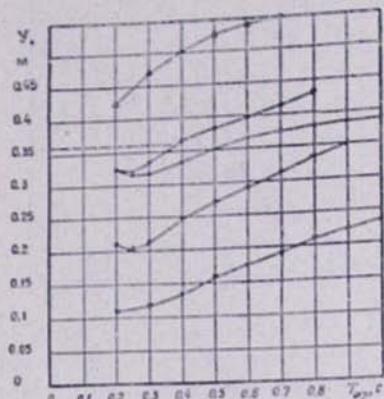


Рис. 7. Зависимость максимальных смещений u и ускорений \ddot{u} от величины T_{opt} при различных параметрах системы:

$$\triangle - T_g = 1.4 \text{ с.}, \quad F_g = F_0 = 100000 \text{ кН}$$

$$\odot - T_g = 0.2 \text{ с.}, \quad F_g = F_0 = 100000 \text{ кН}$$

$$\bullet - T_g = 0.2 \text{ с.}, \quad F_g = 140000 \text{ кН}, \\ F_g = 140000 \text{ кН},$$

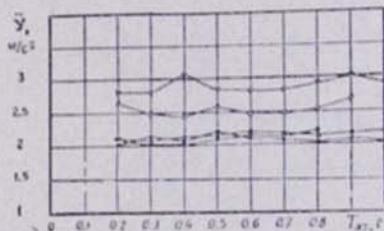
$$\diamond - T_g = 0.2 \text{ с.}, \quad F_g = 100000 \text{ кН},$$

$$F_0 = 60000 \text{ кН}; \quad F_0 = 140000 \text{ кН};$$

$$\square - T_g = 0.2 \text{ с.}, \quad F_0 = 140000 \text{ кН}$$

— — — значение смещений при однокаскадном демпфировании

$$\text{и } F = 2000000 \text{ кН}$$



зависимости максимальных смещений и ускорений системы от жесткости второго каскада демпфирования, определяемой величиной T_{opt} периода колебаний сооружения при открытом демпфере первого каскада и закрытом демпфере второго каскада. На рисунке принято обозначение T_k — период колебаний системы при закрытых демпферах только первого каскада. Из приведенного рисунка следует также, что варьирование жесткости и сил трения при многокаскадном демпфировании (при сохранении суммарной силы трения) приводит к изменению смещений системы и практически не влияет на ускорение верхней плиты фундамента.

Резюмируя приведенные исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Для оценки смещений сейсмоизолированных фундаментов недопустимо применять акселерограммы, удовлетворяющие условию $\frac{y_{\text{ист}}}{y_{\text{макс}}} \cdot t_3^2 > 0,05$, поскольку они содержат длиннопериодные помехи, искажающие картину смещений сейсмоизолированных фундаментов.

2. Существуют оптимальные системы демпфирования, минимизирующие ускорения сооружения: снижения перемещений в этом случае можно добиться введением многокаскадного демпфирования; устройство ограничителей перемещений для сейсмоизолированных систем оказывается неэффективным.

3. Сейсмоизоляция фундаментов позволяет обеспечить снижение ускорений сооружения до $0,2 g$ и смещений до 3 см при воздействии силой до 8 баллов, причем существует универсальная настройка параметров фундамента, обеспечивающая сейсмостойкость сооружения при различных воздействиях.

4. Сейсмоизолированные фундаменты на кинематических опорах имеют несколько лучшие показатели, чем на упругих, однако это улучшение не является определяющим. При длиннопериодном сейсмическом воздействии силой 9 баллов (типа Карпатского) кинематический фундамент обеспечивает снижение ускорений сооружения до $0,3g$, смещение при этом составляет около 20 см.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева,
НИИ мостов

ЛИТЕРАТУРА

1. Грайзер В. М. Определение истинного смещения почвы по записям сильных движений. Физика земли, № 12, 1979.
2. Катин-Ярцев А. С., Назин В. В., Зеленский Г. А., Шуляк Ю. И. Динамические испытания зданий с гравитационными системами сейсмоизоляции в Севастополе. Научно-технический реферативный сборник «Сейсмостойкое строительство», вып. 7, 1977.
3. Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений. М., Стройиздат, 1978.
4. Поляков С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий. М., Высш. школа, 1983.
5. Савинов О. А., Сандович Т. А. О некоторых особенностях применения систем сейсмоизоляции зданий и сооружений. Изв. ВНИИГ, том 161, 1982.
6. Renault J., Richle M., Pavot B. Première application des appuis antisismiques à friction: la centrale nucléaire de Koeberg. Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, № 371, ch. 74, 1979.