

А. Г. НАЗАРОВ

НОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В работе приводятся некоторые результаты исследования, применительно к моделированию конструкций на сейсмические воздействия [1].

1. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРИИ РАСШИРЕННОГО ПОДОБИЯ ТВЕРДЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

Приводим перечень наиболее часто упоминающихся величин и их множителей подобия. Обозначения, относящиеся к моделям, приняты теми же, что и для оригиналов, но со знаком штрих [1а]: длина $l' = \alpha l$; напряжение $\sigma' = \beta \sigma$; относительная деформация $\varepsilon' = \gamma \varepsilon$; время, применительно к безинерционным процессам $t' = \eta t$; время, применительно к динамическим (инерционным) процессам $t' = \xi t$, плотность тела (масса, отнесенная к единице объема) $\rho' = \delta \rho$.

Из рассматриваемых множителей подобия $\alpha, \beta, \gamma, \eta, \xi, \delta$ особое место занимает γ , поскольку этот множитель для деформации, т. е. отвлеченной величины. При $\gamma \neq 1$ нарушается геометрическое подобие между оригиналом и моделью в процессе роста деформации. В подавляющем большинстве случаев, к которым относятся все упругие и упруго-пластические задачи, при относительно малых перемещениях, в пределах точности аналитических методов расчета, возможно принять $\gamma = 1$. На это обстоятельство, по-видимому, впервые указал Роша [2], но, как нам представляется, оно недооценивается по настоящее время. Дело в том, что при множителе подобия γ , отличном от единицы, возникает значительно большая свобода в экспериментировании.

В тех же случаях, когда имеем дело с контактной задачей по малым площадкам, с вопросами устойчивости, в том числе и динамической, следует принимать $\gamma = 1$, так как для этих случаев обязательно строгое соблюдение геометрического подобия между оригиналом и моделью, чтобы имело место подобие между их механическими состояниями. Конечно, множитель γ следует принимать равным 1 также для случаев, когда твердое тело претерпевает очень большие перемещения, например, наблюдаемые при длительных геологических процессах.

В предложенном перечне основных множителей подобия приведены два различных множителя подобия η и ξ для шкалы времен. Это вызвано следующим обстоятельством. При длительных статических процессах загружения для величины деформации могут иметь большое значение изменения деформационных характеристик во времени (явления ползучести, релаксации, усадки и прочее). Ясно, что для возможности точного моделирования все эти явления должны протекать при одном и том же масштабе времени, которое обозначаем через η . Это значит, например, что если ползучесть материала для модели изменяется $\frac{1}{\eta}$ раз бы-

стрее, если скажем, $\eta < 1$, то $\frac{1}{\eta}$ раз быстрее должны протекать явления релаксации, усадки и пр. Ясно, что при этом и внешние силы, приложенные к модели, также должны меняться $\frac{1}{\eta}$ раз быстрее, чем для оригинала. Иначе невозможно будет осуществить подобие состояний между оригиналом и моделью. Положим теперь, что дополнительно на существующее силовое поле накладывается динамическая нагрузка. В этом случае к внешним силам добавляются силы инерции. Строго говоря, необходимо, чтобы и силы инерции также изменялись в $\frac{1}{\eta}$ раз быстрее для модели, для обеспечения согласованности изменения механических величин в оригинале и модели. Однако во многих случаях имеет место тот факт, что длительность динамической нагрузки настолько мала, что изменение механического состояния тела, вызванное длительно действующими факторами, перечисленными выше, ничтожно и этими изменениями можно пренебречь совершенно. В частности, это имеет место при сейсмической нагрузке, которая нас более всего интересует. За время действия сейсмических нагрузок, измеряющееся отрезком времени в 30—40 сек., практически не меняются деформационные свойства (явления ползучести, релаксации или усадки), по крайней мере, для обычных строительных материалов. Поэтому имеется полная возможность введения другого множителя подобия для времен в процессе кратковременно протекающего землетрясения. Это важное обстоятельство также следует учитывать при проведении экспериментальных работ. Более того, появляется возможность рассмотрения для одной и той же модели одновременно двух шкал времен — для длительных процессов при множителе подобия η и для кратковременных динамических процессов при множителе подобия ξ . Действительно, за время кратковременного события в оригинале и модели медленно изменяющиеся процессы практически остаются неизменными. Поэтому начало и конец кратковременных событий в модели и оригинале на фоне длительных стягиваются практически в одну точку на временной оси. Изменения, вызванные кратковременными событиями, как бы происходят скачкообразно на фоне длительно изменяющихся процессов. Поэтому, если скачкообразные события вызвали подобные изменения в модели и оригинале, то их подобие и подобие последствий их изменений на длительной шкале времени сохраняется. Это соображение позволяет удержать, в случае нужды, одновременно оба множителя подобия η и ξ или пользоваться одним из них, в зависимости от поставленной задачи, что также позволяет расширить возможности экспериментирования. В дальнейшем важную роль у нас играет критерий подобия материалов оригинала и модели. Если для материала оригинала связь между напряжениями и деформациями выражается зависимостью:

$$\sigma = F(\varepsilon, t),$$

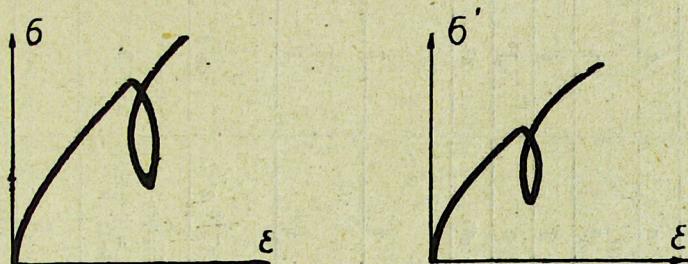
то критерий подобия запишется в следующем виде:

$$\frac{\sigma'}{\beta} = F\left(\frac{\varepsilon'}{\eta}, \frac{t'}{\eta}\right)$$

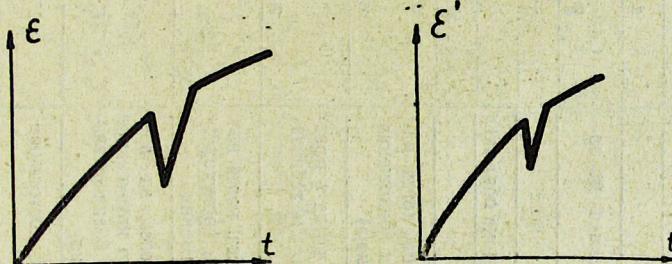
Следует подчеркнуть, что под σ подразумеваются все шесть компонентов напряжений, а под Σ все шесть компонентов деформаций. Сама функция F может представлять собой систему функций. На фиг. 1 и 2 дан в плоскостях (σ, ε) и (ε, t) случай одноосного напряженного состояния для подобных материалов.

Дадим теперь определение подобия тел A и A' , представляющих собою оригинал и модель. Два тела A и A' подобны между собою, если между ними имеет место геометрическое подобие и если они в сходственных точках изготовлены из подобных материалов.

Основная теорема о подобии: подобные тела A и A' , находятся в подобном состоянии в сходственные моменты времени t и $t' = \gamma t$, причем в сходственных точках напряжения равны соответственно σ и $\sigma' = \beta \sigma$, деформации равны ϵ и $\epsilon' = \gamma \epsilon$, смещения равны u и $u' = \alpha \gamma u$, при условии, что в моменты времени t и $t' = \gamma t$ напряженность поверхностных сил в сходственных точках равна σ и $\sigma' = \beta \sigma$ и интенсивности объемных сил в сходственных точках равны K и $K' = \beta/\alpha K$.



Фиг. 1. Зависимости между напряжениями и деформациями для оригинала и модели.



Фиг. 2. Зависимости деформаций от времени для оригинала и модели.

Из этой теоремы вытекает ряд важных следствий, на которых мы не имеем возможности останавливаться. В частности, из нее вытекают условия подобия, приведенные в далеко неполной сводной табл. 1. В ней приведены и условия динамического подобия двух сравниваемых систем.

Основной вывод, который вытекает из теории подобия, заключается в том, что при точном соблюдении условий подобия в принципе возможно обеспечить моделирование строительных конструкций по прочности, по деформации и по трещинообразованию. Основная трудность заключается в том, что на практике невозможно подобрать в точности подоб-

Таблица 1

Множители подобия

Механическая величина	Общий случай		Простое подобие	Ускорения, равные для А и А'	
	малые перемещения	большие перемещения		малые перемещения	большие перемещения
Характерный размер l	α	α	α	α	α
Напряжение; нагрузка, распределенная по поверхности σ	β	β	1	$\beta = \alpha \delta$	$\beta = \alpha \delta$
Относительная деформация ϵ	γ	1	1	γ	1
Плотность (масса, отнесенная к единице объема) ρ	δ	δ	1	δ	δ
Масса m	$\alpha^3 \delta$	α^3	α^3	$\alpha^3 \delta$	$\alpha^3 \delta$
Время t для статических процессов, когда напряжение не зависит от скорости приложения нагрузки (η —прокраинвальная величина)	1	η	η	—	—
Время t для статических процессов, когда t предопределено условиями старения материала (η —фиксированная величина)	1	η	1	—	—
Время t для динамического процесса, когда нет старения материала или старение происходит медленно и нет язкого сопротивления	$\xi = \alpha \beta^{-\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{1}{2}}$	$\xi = \alpha \beta^{-\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{1}{2}}$	$\xi = \alpha$	$\xi = \alpha \gamma^{\frac{1}{2}}$	$\xi = \alpha \gamma^{\frac{1}{2}}$
Время t для динамического процесса, за время которого происходит довольно интенсивное старение тела или имеет место большаяязкость (η —фиксированная величина)	$\xi = \eta = \alpha \beta^{-\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{1}{2}}$	$\xi = \eta = \alpha \beta^{-\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{1}{2}}$	$\xi = \eta = \alpha$	$\xi = \eta = \alpha$	$\xi = \eta = \alpha$
Модуль Юнга E, модуль сдвига G, постоянные Ламэ λ, μ	$\beta \gamma^{-1}$	β	1	$\alpha \delta \gamma^{-1}$	$\alpha \delta$
Коэффициент Пуассона ν	1	1	1	1	1
Полонная нагрузка q	$\alpha \beta$	$\alpha^2 \beta$	α	$\alpha^2 \delta$	$\alpha^2 \delta$
Сосредоточенная нагрузка P	$\alpha^3 \beta$	$\alpha^2 \beta$	α^2	$\alpha^3 \delta$	$\alpha^3 \delta$

Продолжение таблицы 1

Механическая величина	Общий случай		Простое подобие	Ускорения, равные для А и А'
	малые перемещения	большие перемещения		
Объемная сила К	$\alpha^{-1} \beta$	$\alpha^{-1} \beta$	α^{-1}	δ
Момент силы М	$\alpha^3 \beta$	$\alpha^3 \beta$	α^3	$\alpha^4 \delta$
Перемещение u	$\alpha \gamma$	α	α	α
Скорость v	$\beta^{1/2} \delta^{-1/2}$	$\beta^{1/2} \delta^{-1/2}$	1	$\frac{1}{2} \alpha^{-1/2} \delta$
Ускорение w	$\alpha^{-1} \beta \delta^{-1}$	$\alpha^{-1} \beta \delta^{-1}$	α^{-1}	1
Раскрытие трещины Δ l	$\alpha \gamma$	α	α	α
Работа, кинетическая энергия, потенциальная энергия U	$\alpha^3 \beta \gamma$	$\alpha^3 \beta$	α^3	$\alpha^4 \gamma \delta$
Мощность W	$\alpha^3 \beta^{3/2} \gamma^{1/2} \delta^{-1/2}$	$\alpha^3 \beta^{3/2} \delta^{-1/2}$	α^2	$\frac{7}{2} \alpha^{-1/2} \delta$
Скорость распространения деформаций а	$\beta^{1/2} \gamma^{-1/2} \delta^{-1/2}$	$\beta^{1/2} \delta^{-1/2}$	1	$\frac{1}{2} \alpha^{-1/2} \delta$
Импульс S	$\alpha^3 \beta^{1/2} \gamma^{1/2} \delta^{1/2}$	$\alpha^3 \beta^{1/2} \delta^{1/2}$	α^3	$\frac{7}{2} \alpha^{-1/2} \delta$
Угол φ	γ	1	1	1
Угловая скорость ω	$\alpha^{-1} \beta^{1/2} \gamma^{1/2} \delta^{-1/2}$	$\alpha^{-1} \beta^{1/2} \delta^{-1/2}$	α^{-1}	$\frac{1}{2} \alpha^{-1/2} \delta$
Угловое ускорение ω̇	$\alpha^{-3} \beta \delta^{-1}$	$\alpha^{-3} \beta \delta^{-1}$	α^{-2}	α^{-1}

ные материалы, и потому речь может идти лишь о приближенном моделировании [1, ж]. Кроме того, материалы обычно неоднородны и о их механических свойствах можно говорить лишь со статистической точки зрения. Об этом достаточно подробно изложено ранее [1 д, е].

2. К ИЗУЧЕНИЮ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ, ПОДВЕРГАЕМЫХ СЕЙСМОВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Если рассматривать спектры приведенных сейсмических ускорений, то можно убедиться, что на довольно широком диапазоне изменения периодов свободных колебаний они носят гиперболический характер. Это значит, что если период свободных колебаний уменьшить в a раз, то приведенное сейсмическое ускорение возрастет a раз. Как раз такое соотношение в точности имеет место в случае простого подобия, когда модель по размерам a раз отличается от размеров сооружения. Это обстоятельство и наводит на мысль об использовании сейсмовзрывного эффекта для исследования моделей конструкций с целью изучения различных вопросов сейсмостойкости сооружений [3]. Т. Г. Сагдиев, реализовал эту идею применительно к изучению сооружений башенного типа на сейсмостойкость [4]. Несмотря на ряд трудностей, связанных с невозможностью осуществления специальных взрывов, что привело к необходимости использования промышленных взрывов на каменном карьере, результаты были получены настолько обнадеживающие, что сейчас ставится вопрос об экспериментировании с моделью плотины Нурекской ГЭС высотою 6 м, т. е. 1/50 натуральной величины, с помощью сейсмовзрывных воздействий.

Каковы преимущества исследования моделей сооружений путем использования сейсмовзрывного эффекта?

Во-первых, появляется возможность испытания очень крупных моделей, что недоступно для сейсмических платформ.

Во-вторых, заделка модели в основание осуществляется в естественных условиях, на грунте, что также недоступно для сейсмической платформы.

Недостатком этого метода является трудность точного моделирования сейсмической нагрузки с помощью сейсмовзрывных колебаний. Во всяком случае, это связано с выбором местности, с подходящими инженерно-геологическими условиями, регулированием величин зарядов, расстоянием очага взрыва до модели и прочее. Только лишь в случае, когда расчетная схема сооружения приближается к системе с одной степенью свободы, удается достаточно просто моделировать сейсмическую нагрузку путем сейсмовзрывного эффекта. Действительно, в этом случае достаточно привести в соответствие, требуемое, условиями подобия, лишь одну ординату спектра приведенных сейсмических ускорений для модели, отвечающую периоду ее основных свободных колебаний, к одной лишь ординате спектра приведенных сейсмических ускорений оригинала, отвечающей его периоду основных свободных колебаний. Этого в принципе всегда можно добиться путем изменения лишь одного из параметров взрывного эффекта, например, либо только регулированием величины заряда, либо только дальностью очага взрыва от модели. Если же расчетная схема сооружения приводит к системе с двумя степенями свободы, то приходится приводить в соответствие уже две ординаты спектра приведенных ускорений модели к двум ординатам спектра приведенных ускорений оригинала, отвечающих сходственным периодам свободных колебаний, для обеспечения подобия сейсмических нагрузок

в этом случае. Тогда придется подбирать в принципе по меньшей мере два параметра взрыва для обеспечения условия подобия между сейсмическими нагрузками.

Мы убеждены, что, несмотря на этот недостаток, другие огромные преимущества рассматриваемого метода позволят ему занять достойное место среди инженерно-сейсмологических методов и он будет далее развиваться и совершенствоваться.

3. ЭЛАСТИЧЕСКИЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ

Идея о таких платформах нами была высказана давно. Однако, по ряду причин, претворение ее в жизнь начато только теперь.

Существующие типы сейсмических платформ совершают возвратно-поступательные перемещения как жесткие системы. Все точки такого рода платформы имеют одинаковые перемещения или, иначе говоря, совершают колебания в одной фазе.

Известно, что решение некоторых задач инженерной сейсмологии, а также сейсмостойкости сооружений, в особенности протяженных в плане, требует учета различия фаз в колебаниях грунта в основании сооружения. Поэтому представляет интерес создание сейсмических платформ таких конструкций, которые могли бы имитировать колебания почвы при землетрясении более подробно. Для этой цели сейсмическая платформа должна осуществлять не только поступательные перемещения как жесткое целое, но, кроме того, деформироваться по определенному закону во времени. В результате различные точки такой платформы будут колебаться с различными фазами. Такого рода платформы и условимся в дальнейшем называть эластическими.

Моделирование для таких платформ становится реальным делом, если исходить из условия расширенного подобия при $\gamma \neq 1$ и применять для платформы и моделей низкомодульные материалы. Чрезвычайно удобно вести экспериментирование, если принять ускорения для оригинала и модели одинаковыми. В этом случае ускорения силы тяжести для модели и оригинала должны быть одинаковыми и опыты можно вести в естественном гравитационном поле без всяких пригрузок.

Конструкции эластических платформ могут быть самыми разнообразными. Простейшая схема — это воспроизведение на специальном фундаменте модели участка местности, на которой возводится сооружение в достаточно большом объеме, чтобы освободиться от возмущающего влияния самого фундамента. При изготовлении модели местности следует воспроизвести напластование различных горных пород и рельеф местности, принимая достаточно точные значения модулей упругости и объемных весов. Такие индивидуальные эластические платформы особенно удобны для испытания моделей гидротехнических сооружений, в частности плотин. Колебания в них можно осуществлять посредством удара, толчка, взрыва или пульсирующих устройств.

Нами предлагается также другая конструкция эластической платформы. К системе земля, представляющей собой станину, подвешиваются через равные интервалы поперечины из какого-либо материала. На поперечины укладывается достаточно длинный низкомодульный брус. Если концу этого бруса сообщить какое-либо мгновенное механическое возмущение, то в результате в брусе возникнут стоячие волны, которые будут постепенно затухать из-за рассеяния энергии. На свободной верхней поверхности этого бруса может быть построена испытуемая модель

сооружений. Можно пойти дальше и воспроизводить на такой сейсмической платформе не стоячие волны, а бегущие, как это бывает при землетрясении.

Такого рода платформа небольшого размера, для опытных целей, сконструирована и изготовлена работниками Института геофизики и инженерной сейсмологии АН Армянской ССР С. С. Мурадяном, А. А. Мкртчяном, В. Л. Мнацаканяном. Предварительные эксперименты привели к обнадеживающим результатам [5].

С помощью эластических сейсмических платформ можно решать ряд задач, связанных с инженерной сейсмологией. Например, можно установить с их помощью влияние рельефа местности, характера напластований и прочее на интенсивность землетрясения. Они могут также оказать помощь в изучении закономерности взаимодействия между основанием сооружения и грунтом и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Назаров. О механическом подобии твердых тел и его применении к исследованию строительных конструкций и сейсмостойкости сооружений. Известия АН Армянской ССР, серия технических наук: а) т. X, № 5, 1957; б) т. 8, № 6, 1957; в) т. XI, № 4, 1958; г) т. XI, № 6, 1958; д) т. XIV, № 1, 1961; е) т. XV, № 6, 1962; ж) т. XV, № 1, 1963.
2. M. Rocha. Dimensionnement experimental des constructions Laboratorio de engenharia civil, publication, № 27, Lisbonne, 1952.
3. А. Г. Назаров. ДАН Армянской ССР, т. XXIV, № 1, 1957.
4. Т. Г. Сагдиев, А. А. Дилянян. Результаты модельных исследований фабрично-заводской трубы. Сб. статей по сейсмостойкому строительству. Тр. Ин-та сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Тадж. ССР, т. IX, Душанбе, 1961.
5. А. Г. Назаров. ДАН Армянской ССР, т. XXXIV, № 5, 1962.

Институт геофизики и
инженерной сейсмологии
АН Армянской ССР.