

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А. Г. НАЗАРОВ

О МЕХАНИЧЕСКОМ ПОДОБИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ЕГО
ПРИМЕНЕНИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Сообщение 5

Здесь приводится дальнейшее развитие теории моделирования твердых деформируемых тел, изложенной в сообщениях 1, 2, 3, 4 [1]*.

1. Механическое подобие твердых деформируемых тел
в статистическом смысле

Для выяснения существа дела мы вначале остановимся на случае простого подобия, когда оригинал и модель в сходственных точках имеют тождественные соотношения между тензорами напряжений и деформаций. Положим имеется серия одинаковых тел (оригиналов), связанных единством технологии изготовления. Эти тела в силу всякого рода случайностей изготовления и неоднородности материала обладают в известных пределах различными механическими свойствами. Каждый из оригиналов имеет некоторые индивидуальные отличия в механическом аспекте. При достаточно большом количестве оригиналов становится возможным описание их свойств в статистическом смысле. В частности, например, можно установить математическое ожидание какой-либо механической величины (напр., предельное значение нагрузки, максимальное смещение, угол поворота и др.), ее флуктуацию и прочее. При необходимости более подробного исследования можно найти функцию распределения вероятностей данной случайной механической величины или при надобности дать ее описание с помощью случайных функций.

Примем некоторое фиксированное значение множителя подобия α для геометрических величин; остальные множители подобия $\beta = \gamma = \delta = 1$, поскольку мы пока ограничиваемся простым подобием. Поставим оригиналу A в соответствие модель A' , являющегося его точной копией в механическом смысле, со всеми индивидуальными подробностями. Аналогичным образом оригиналам $A_2, A_3, \dots, A_n$ поставим в соответствие их точные модели $A'_2, A'_3, \dots, A'_n$. Ясно, что

* Некоторые из положений высказанных нами в этих сообщениях, как выяснилось, были опубликованы М. Роча ранее. См. [2].

статистические характеристики моделей в точности должны совпадать со статистическими характеристиками оригиналов.

Систему оригиналов A_i и систему моделей A_i условимся называть механически подобными в статистическом смысле. Очевидно, что к точно такому же результату приводит и рассмотрение моделей, построенных при условии расширенного подобия, т. е. при постоянных β , γ и δ отличных от единицы. Здесь предполагается, что множители подобия для всех пар оригиналов и моделей одинаковы, т. е. не рассматриваются ошибки моделирования.

Механическое подобие в статистическом смысле есть прямое следствие механического подобия, так как нами ничего нового не внесено в рассуждениях предыдущих сообщений кроме того, что ранее сопоставлялась лишь одна пара подобных тел A и A' , а теперь осуществлено попарное сопоставление серии (ансамблей) подобных тел A_i и A_i . Конечно, это сопоставление чисто умозрительное, практически неосуществимое. Оно было нужно лишь для того, чтобы показать, что при осуществлении механического подобия системы оригиналов и системы моделей обязательным условием является их тождественность в статистическом смысле. Это позволяет путем применения известных правил статистики установить с той или иной степенью точности имеет ли место статистическое подобие. Для этого группы A_i и A_i следует рассматривать как статистические ансамбли, тождественность которых устанавливается путем их сопоставления между собою по каким-либо признакам. Ясно также, что теперь уже они не обязательно должны состоять из одинакового числа элементов, лишь бы эти элементы выбирались случайным образом.

Наоборот-из статистического подобия моделей и оригиналов следует и их подобие в обычном смысле. Для простоты, без ущерба для общности, рассмотрим одновременно распределение вероятности каких-либо случайных механических величин X и X' оригиналов и моделей. В силу тождественности функций распределения вероятностей для обоих рассматриваемых случайных величин по условию (подобие в статистическом смысле) имеем, что вероятности появления величин в интервалах $(X, X + \Delta X)$ и $(X, X' + \Delta X')$ одинаковы и равны, скажем, Δp . Пусть имеем одинаковые, достаточно большие количества оригиналов и моделей, обозначаемых через n . Пусть далее частоты величин в рассматриваемых интервалах соответственно равны $\frac{n_1}{n}$ и $\frac{n_1}{n}$. В соответствии с законом больших чисел рассматриваемые частоты сходятся по вероятности к Δp

$$\frac{n_1}{n} \simeq \Delta p, \quad \frac{n_1}{n} \simeq \Delta p.$$

Поэтому относительное различие в количествах n_1 оригиналов и n_1 моделей в рассматриваемых интервалах не велико при достаточно боль-

шом n . Положим, для определенности, что $n_1' > n_1$. Тогда из рассматриваемого интервала $(X, X' + \Delta X')$ отбросим произвольные элементы в количестве $n_1' - n_1$ (т. е. отобранные случайным образом).

Теперь в обоих рассматриваемых интервалах имеются одинаковые количества оригиналов и моделей n_1 . Расположим в этих интервалах образцы в порядке возрастания X :

$$X + \xi_1 \Delta X, X + \xi_2 \Delta X \dots X + \xi_n \Delta X$$

$$0 \leq \xi_1 \leq \xi_2 \dots \leq \xi_n \leq 1,$$

и

$$X' + \eta_1 \Delta X', X' + \eta_2 \Delta X' \dots X' + \eta_n \Delta X'$$

$$0 \leq \eta_1 \leq \eta_2 \dots \leq \eta_n \leq 1.$$

Поставим в соответствие элементы

$$X + \xi_i \Delta X \text{ и } X' + \eta_i \Delta X',$$

они являются попарно приближенно подобными в обычном смысле.

Увеличивая число образцов оригиналов и моделей n и соответственно уменьшая интервалы ΔX и $\Delta X'$ и имея ввиду, что разность частот $\frac{n_1' - n_1}{n}$ по вероятности стремится к нулю, мы приходим к

заключению о существовании попарного подобия оригиналов и моделей, т. е. подобия в обычном смысле, что и требовалось показать. Изучаемые механические величины являются многокомпонентными. Например—нас могут интересовать смещения отдельных точек, углы поворота, деформации, предел пропорциональности, предел упругости, предел прочности и т. д. Поэтому, если мы хотим точно установить статистическое подобие между системами A_i и A_i' , необходимо установить их тождественность в статистическом смысле по всем независимым механическим величинам. На практике в большинстве случаев достаточно приближенно установить статистическую тождественность по главнейшим механическим величинам, представляющим наибольший интерес. В этом случае механическое подобие в статистическом смысле устанавливается в той или иной мере приближенно в зависимости от поставленной задачи.

Остановимся еще на одном моменте, могущем иметь значение. Оно заключается в том, что путем специального подбора модельного материала, подбора технологии изготовления моделей, а также целенаправленной выборки из них, возможно получить совокупность моделей, обладающих требуемыми статистическими признаками. Таким образом неисключена возможность получения искусственным способом статистического подобия систем A_i^* и A_i' .

По-видимому, в значительном большинстве случаев достаточно удовлетвориться статистической тождественностью систем моделей и оригиналов по двум простейшим признакам: — по средним значениям и средне-квадратическим отклонениям. Тогда системы A_i и A_i' счи-

таются подобными, если для каких-либо их характерных точек имеем, например, соотношение

$$\sigma_{\text{ср}} = \beta \sigma_{\text{ср}}, \quad \varepsilon_{\text{ср}} = \gamma \varepsilon_{\text{ср}}.$$

Эти же соотношения сохраняются и для их средних квадратических отклонений.

2. О масштабном эффекте

Экспериментами установлен факт увеличения прочности образцов, изготовленных из одного и того же материала, с уменьшением их размеров. Это явление особенно ярко проявляется на образцах из хрупких материалов. Оно и носит название масштабного эффекта. Таким образом, при уменьшении линейных размеров образцов (скажем кубиков, призм, восьмерок и пр.), но с сохранением их геометрического подобия, прочность образцов возрастает. Эффект масштабности вступает в противоречие с основной теоремой о подобии твердых тел. Поэтому мы вынуждены остановиться на этом вопросе несколько подробнее.

Наиболее распространенное толкование эффекта масштабности связано со статистической теорией прочности хрупких материалов. Существо этой теории заключается в следующем.

Материал неоднороден. Помимо зерен средней прочности, которые составляют большинство, в нем вкраплены более прочные и более слабые зерна. Эффект увеличения прочности образца в целом из-за зерен повышенной прочности весьма мал и им можно пренебречь. Скорее они даже вызывают преждевременное возникновение микротрещин в образце из-за создаваемого ими неоднородного поля напряжения, что приводит к снижению его прочности. Это в основном вызывается тем, что более прочные зерна обычно более жесткие. Неоднородное напряженное состояние вызывают также и более слабые зерна, поскольку они обычно менее жестки. Далее, слабые зерна способствуют прямому снижению прочности образца в зависимости от их площади в его поперечном сечении. С увеличением размеров образца вероятность встречи в нем зерен с большими отклонениями от средних прочности и жесткости возрастает, чем и объясняется соответствующее снижение прочности в целом.

Установление количественной зависимости прочности образца в функции от распределения его неоднородностей представляет сложнейшую задачу механики сплошных сред даже при статистической постановке задачи.

Поэтому исследователи, при построении статистической теории прочности, вынуждены прибегать к тем или иным упрощающим предположкам [3, 4, 5, 6]. Для некоторых напряженных состояний образцов получено удовлетворительное согласие с опытом.

Естественным следствием статистической теории является не только уменьшение прочности образца с ростом его размера.

Поскольку количество зерен в малом образце менее чем в большем, то в малом образце больше случайностей в распределении зерен, чем в большем. Поэтому, если мы будем испытывать параллельно партии малых и больших образцов, то для малых образцов получим большие средние прочности, но зато и большие отклонения от среднего, нежели для больших образцов. Это явление подтверждается экспериментами [7, 8].

Таким образом имеет место отклонение от условий подобия также и в статистическом смысле.

С увеличением размеров образцов, т. е. с увеличением количества зерен их составляющих, отклонения от среднего асимптотически затухают. Поэтому, если иметь дело только с достаточно большими образцами, то масштабный эффект для них должен быть мало заметным. По-видимому, по этой причине некоторые экспериментаторы отрицают его существование. Ясно также, что понятие о величине образца здесь относительно и в значительной мере зависит от соотношения между размерами зерен и размерами образца. Чем мельче зерна, тем скорее произойдет уменьшение разброса величины прочности с увеличением размера образца. С развитием пластических свойств материала эффект масштабности снижается, так как неравномерность в распределении напряжений выравнивается.

Можно оспаривать те или иные положения различных вариантов статистических теорий, но не подлежит сомнению, что масштабный эффект в той или иной мере является результатом такого сложного фактора как неоднородность материала, который подчиняется статистическим закономерностям.

Мы теперь видим также почему требование основной теоремы о подобии применительно к единичным оригиналу и модели, а также вытекающего из этой теоремы требования о статистической тождественности ансамблей оригиналов и моделей не выполняются из-за эффекта масштабности.

Основная теорема, применительно к простому подобию, справедлива при условии, что соотношения между тензорами напряжений и деформаций в сходственных точках оригинала и модели одинаковы. Поэтому при неоднородном материале различные его зерна также должны быть смоделированы при том же геометрическом множителе подобия α . Или, еще более обще это требование может быть выражено так: структуры модели и оригинала также должны быть геометрически подобны. Конечно, это требование на практике большей частью невыполнимо.

Однако масштабный эффект не исчерпывается лишь причинами статистического порядка в распределении дефектов в материале. Он может быть вызван также другими причинами.

Н. Н. Давиденковым высказана мысль о связи масштабного эффекта при хрупком разрушении с накоплением потенциальной энергии в системе образец — испытательная машина [9—10]. Чем большей

величины образец, тем больше в нем аккумулируется потенциальной энергии, которая уже при начальной стадии трещинообразования начинает разряжаться, переходя в кинетическую энергию системы и ускоряя процесс разрушения.

Рассмотрим это явление с точки зрения теории подобия. Пусть система $A + B$ представляет собою образец + испытательная машина. Рассмотрим точно такую же систему $A' + B'$, но геометрические размеры которого уменьшены в α раз ($\alpha > 1$). Системы $A + B$ и $A' + B'$ удовлетворяют условию простого подобия. Для обеспечения полного подобия состояний необходимо, чтобы система $A' + B'$ находилась в гравитационном поле с ускорением ag . Однако, учитывая незначительность напряжений, возникающих в рассматриваемых системах из-за земного тяготения, в сравнении с усилиями, развиваемыми испытательными машинами, можем считать, что условия подобия будут достаточно точно соблюдены, если обе системы окажутся под воздействием g (ускорения силы тяжести.). При правильном подборе размеров испытательной машины в зависимости от размера образца, а также при точном подборе модельного материала в упомянутом выше смысле (точное копирование неоднородностей материала), эффект масштабности не должен проявляться даже в стадии разрушения, когда потенциальная энергия переходит в энергию кинетическую. Это непосредственно вытекает из теоремы 4 и ее следствий (Iв)*.

При испытании же подобных образцов A и A' на одном и том же прессе B , подобие состояний A и A' действительно нарушается. Это нарушение будет тем более, чем больше накопится потенциальной энергии в испытательной машине в сравнении с потенциальной энергией в образце. В этом случае начальная стадия разрушения одинаковая для обоих образцов, действительно приведет к более интенсивному высвобождению потенциальной энергии и к более ускоренному разрушению большего образца.

В другом крайнем случае, при весьма большой жесткости испытательной машины и малой ее массе, когда в ней, в процессе испытания, накапливаются потенциальная и кинетическая энергии, пренебрежимые в сравнении с таковыми в образцах, задача о подобии системы в целом вырождается лишь в подобие образцов. В этом случае возмущающее влияние испытательной машины ничтожно и ею можно пренебречь. Конечно, результаты испытания на такой машине должны быть более достоверными.

Таким образом эффект масштабности обусловленный рассматриваемым явлением скорее является несовершенством методики испытания, нежели фактором, препятствующим правильному моделированию.

Эффект масштабности может быть, очевидно, порожден самой

* Возможно некоторое нарушение подобия в связи с отклонением от условий подобия диссипативных сил в гидравлической части испытательной машины.

технологией изготовления оригиналов и моделей. Здесь могут иметь место два случая:

а) принятая технология изготовления и обработки оригиналов и моделей одинаковая, но результаты применения данной технологии могут оказаться различными в зависимости от соотношения между размерами оригинала и модели;

б) технология изготовления может быть принята различной, вынужденно или намеренно, в зависимости от размеров образцов.

В этих обоих случаях „масштабный эффект“ следует понимать в более широком смысле, так как рассматриваемые причины могут привести в принципе не только к повышению, но и наоборот, к понижению прочности с уменьшением геометрических размеров образца.

К эффекту масштабности, вызванного технологическими причинами, можно отнести и различия в условиях затвердевания малых и больших литых металлических образцов, бетонных образцов и др. Дополнительную роль играют в таких случаях и различия в их термических режимах.

Влияние поверхностного натяжения, в принципе, также может вызвать масштабный эффект. Однако, при тех абсолютных размерах моделей, которые обычно применяются, влияние этого фактора ничтожно. Например, подсчеты показали, что уже для стальной проволоки диаметром порядка 1,0 мм поверхностное натяжение не влияет сколько-нибудь заметно на увеличение ее прочности [11].

Эффект масштабности может быть вызван также зависимостью прочности от градиентов компонентов напряжений.

Современная механика сплошных твердых тел строится в основном лишь на зависимости компонентов деформации от компонентов напряжений. Можно допустить к рассмотрению возможность зависимости компонентов деформации не только от компонентов напряжений, но и от их частных производных по координатам. Таким образом деформации могут зависеть и от „скорости“ изменения напряжений в заданных направлениях. В этом случае, при неравномерных распределениях напряжений, условия подобия окажутся в общем случае нарушенными [1]. Мы не встречали указаний в литературе об опытным подтверждении такой возможности.

Остановимся еще на одном объяснении масштабного эффекта, предложенного применительно к изгибу брусьев из льда [13].

Предполагается, что разрушение таких брусьев наступает при определенном, постоянном для льда, угле раскрытия трещины. Если следовать этой точке зрения, то мы должны допустить два различных механизма разрушения льда. Один относится к чистому растяжению льда, другой к чистому его изгибу. Кроме того, действия этих механизмов должны быть согласованы между собою при совместном действии растяжения и изгиба на всем диапазоне изменения соотношений их величин. Затруднения, в объяснении явления разрушения с такой точки зрения возникают даже при простом изгибе, так как

сопротивление растяжению льда при растяжении менее сопротивления растяжению льда при изгибе.

Существование специального механизма хрупкого разрушения при изгибе было бы как то оправдано при обратной картине, когда сопротивление растяжению при изгибе менее сопротивления растяжению при чистом растяжении.

Нам представляется, что и для случая ледяных брусьев статистическая теория может привести к достаточно обоснованным результатам.

Итак, масштабный эффект существует. Он особенно четко проявляется при хрупком разрушении и природа его, по-видимому, многообразна и сложна. Масштабный эффект вносит искажения, точнее является помехой в моделировании твердых деформируемых тел и потому он не может оставаться без внимания при проведении экспериментальных работ на моделях. С увеличением размеров образца и сравнении с размерами его „дефектов“ масштабный эффект асимптотически стремится к некоторому пределу. Поэтому при испытании образцов различных размеров, но достаточно больших, в отмеченном выше смысле, масштабный эффект можно не заметить. Этот эффект смягчается также уже при относительно небольших пластических деформациях.

3. Другие трудности, связанные с моделированием

Здесь мы не останавливаемся на затруднениях чисто технического порядка при проведении экспериментов над моделями, хотя подчас они очень велики и могут оказать решающее влияние на достоверность полученных результатов. Остановимся здесь лишь на трудностях, сопряженных с моделированием самого материала моделей или, короче, с подбором модельного материала.

Моделирование однородных изотропных твердых деформируемых тел в пределах закона Гука является наиболее простой задачей, в особенности, если влиянием собственного веса можно пренебречь в сравнении с внешней нагрузкой. В этом случае требуется соблюдение лишь одного условия — равенства коэффициентов Пуассона для оригинала и модели. Для многих, практически важных задач, как например, для стержневых и балочных систем, с преобладающими осевыми деформациями и это требование излишнее. В некоторых случаях сложного напряженного состояния, отвечающего двумерным и трехмерным задачам, достаточно удовлетвориться лишь приближенным совпадением коэффициентов Пуассона для модели и оригинала. Более существенные затруднения возникают при исследовании на моделях составных конструкций из различных материалов, так как отношения их модулей упругости в отдельности для модели и оригинала должны совпадать, а коэффициенты Пуассона для сходственных материалов должны быть одинаковыми. При соблюдении простого подобия

это затруднение отпадает, так как модель и оригинал могут быть изготовлены из одинаковых материалов, вследствие чего рассматриваемое условие автоматически выполняется.

Принципиальные трудности возникают при изучении на моделях напряженного и деформированного состояний за пределами упругости. Практически невозможно добиться точного соответствия между тензорами напряжений и деформаций для выполнения условий расширенного подобия

$$\sigma' = \beta \sigma, \quad \varepsilon' = \gamma \varepsilon$$

в общем случае сложного напряженного состояния. Соблюдение этих условий затруднительно даже для одноосного напряженного состояния. Поэтому в таких случаях речь может идти лишь о приближенных методах моделирования. Тогда во весь рост встает задача об оценке точности экспериментирования, если мы хотим получить сколько-нибудь достоверное представление о состоянии оригинала. Эту задачу вряд ли возможно разрешить в общем виде. Ее нужно решать для каждого конкретного случая в отдельности. Обоснование распространения выводов с модели на оригинал требует в каждом случае серьезной проработки. Вынужденное, неполное соблюдение условий подобия приводит к необходимости выбора целесообразных приближений. Этот выбор в значительной мере зависит от рода моделируемой конструкции и связанных с нею видами напряженного состояния. Например, если в рассматриваемой конструкции значительно преобладают нормальные напряжения и деформации, то условия подобия нужно, по возможности, точнее соблюдать именно для этих компонентов, примиряясь с большими погрешностями в отношении сдвиговых деформаций и, наоборот.

Итак, в общем случае моделирования речь может идти лишь о приближенных приемах. Но необходимо задачу решать таким образом, чтобы дать оценку погрешности моделирования.

Еще более строгая постановка задачи приводит к желательности исследования моделей таким образом, чтобы интересующие исследователя механические величины получались с недостатком и избытком. В результате мы получим решение задачи в постановке, приближающейся к широко применяемой „вилке“ в математическом анализе. Некоторые соображения показывают, что неисключена целесообразность исследования моделей в такой постановке.

По-видимому, плодотворно также применение сочетаний аналитических и экспериментальных методов исследования, которые могут иметь многообразные варианты. Основной задачей такого рода исследований является получение наиболее полной информации о поведении оригинала по поведению не точно построенной модели. К этому вопросу мы надеемся вернуться впоследствии.

Ниже подробнее остановимся на одном из рассмотренных нами методов приближенного моделирования.

4. Метод поэлементного моделирования

Положим требуется создать модель, подобный оригиналу. Оригинал состоит из отдельных элементов и их сопряжений. Например, если мы имеем дело со стержневой системой, то эта система может быть разложена на отдельные стержни и на узлы их сочленений (фермы, рамы). Здание состоит из каменной кладки, перекрытий, или из сборных железобетонных и бетонных элементов, каким-либо способом сопряженных между собою. Сборный бетонный массив состоит из отдельных бетонных блоков теми или иными способами связанных между собою.

Можно поставить задачу о моделировании следующим образом. Нам известно, или, во всяком случае мы имеем возможность прямым экспериментальным путем получить необходимые данные о механических свойствах элементов и узлов сопряжения оригинала под воздействием характерных для них напряженных состояний. Такая работа под силу современным исследовательским строительным организациям. Многие из них уже сейчас располагают ценными данными о результатах исследований конструкций и элементов конструкций в натуральную величину до стадии разрушения, которые могут быть использованы для нашей цели. Если теперь мы подберем экспериментальным путем модели этих элементов и модели их узлов сопряжений, удовлетворяющих условиям подобия, под воздействием сходственных нагрузок, то можно сказать, что проблема моделирования данного объекта решена. Действительно, как было показано в (16), если отдельные элементы и их сопряжения попарно удовлетворяют условиям подобия при одних и тех же масштабных множителях, то и конструкции и сопряжения из них также должны попарно удовлетворять условиям подобия. Этот метод возможно будет эффективен тем, что он позволяет экспериментатору освободиться от необходимости скрупулезного подбора модельного материала, а также от необходимости точного копирования, при моделировании. Этот метод автоматически устраняет также трудности, связанные с эффектом масштабности. Перед экспериментатором открывается большая свобода выбора модельных элементов, допускающих большие отклонения, лишь бы их главнейшие механические характеристики отвечали требованиям подобия. Условимся, в дальнейшем, этот метод называть методом поэлементного моделирования.

Оригиналы часто бывают составлены из множества однотипных элементов — скажем крупных блоков, панелей стен и перекрытий и пр. Поэтому возникает надобность обеспечения их механического подобия в статистическом смысле, как это было установлено выше. Метод поэлементного моделирования и здесь может сыграть положительную роль. Если в нашем распоряжении имеются результаты испытаний партии однотипных элементов — оригиналов, то для них можем установить, скажем, среднюю прочность R_{cp} и ее средне-квадра-

тическое отклонение. Далее следует подобрать такую технологию изготовления моделей этих элементов, чтобы для них были $R_{\sigma p}^* = \beta R_{\sigma p}$ и средне-квадратическое отклонение с тем же множителем β . Для обеспечения моделям элементов необходимых статистических характеристик, возможно, как указывалось выше, осуществлять их целенаправленный отбор, используя, например, разумное сочетание испытаний до разрушения отдельных образцов партии с неdestructивным методом испытания в массовом масштабе. После проведения такой операции мы можем быть уверенными в механическом подобии в статистическом смысле между оригиналом и моделью. Это может иметь значение для исследования крупных сооружений, скажем больших многоэтажных зданий, возводимых в массовом масштабе. Испытание даже одного такого объекта в натуре, в особенности до стадии разрушения, практически невозможно. Ставить же вопрос об испытании таких объектов в массовом масштабе бессмысленно. Метод поэлементного моделирования допускает достоверное исследование достаточно большой партии моделей, для получения суждения о поведении оригиналов и даже их характеристики со статистической точки зрения. Для большинства случаев выбор масштаба модели 1/10—1/20 натуральной величины уже позволяет практически ставить задачу о серийном изготовлении моделей и их испытании. Если учесть, что для изготовления и проведения испытаний одного экземпляра модели приходится осуществлять большую работу по изготовлению всяких форм, стендов и приспособлений, которые успешно могут быть применены для изготовления и испытания близнецов, то дополнительные расходы для испытания серии моделей относительно не должны быть уж так велики.

Для очень крупных сооружений лабораторное испытание их элементов в натуральную величину может встретить затруднение. Однако, поскольку, как уже указывалось выше, механические величины для крупных элементов с дальнейшим их увеличением изменяются несущественно, то представляется возможность испытать модели этих элементов в масштабе 1/2—1/5 изготовленные из того же материала и при той же технологии, что и для оригинала и полученные результаты приписать элементам оригинала.

Для монолитных сооружений, как например, больших бетонных массивов, за элемент следует принять достаточно большой бетонный блок, т. е. в данном случае метод поэлементного моделирования сводится (точнее вырождается) по существу к приближенному подбору модельного материала для преобладающих напряженных состояний.

Институт стройматериалов и сооружений
Госстроя Армянской ССР

Поступило 5.XI 1960

Ա. Գ. ՆԱԶԱՐՈՎ

ՊԻՆԳ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ ՄԵՆԱՆԻԿԱԿԱՆ ՆՄԱՆՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ
ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻԱՆԵՐԻ ՈՒ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾԻՆԵՐԻ ՍՅՅՄԱՍԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ
ՄԵՋ ՆՐԱ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Հաղորդագրություն 5

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոգիածած բերվում է զեֆորմացիայի ենթարկվող պինդ մարմինների մոդելացման տեսության հետագա զարգացումը:

Դեֆորմացիայի ենթարկվող պինդ մարմինների մեխանիկական նմանությունը վիճակագրական հասկացողությամբ: Այս զեպքերում տատանահարկության սֆերան է ընդգրկվում ոչ թե A և A' նման մարմինների գույքը, այլ A_i և A_i նման մարմինների սերիաների գույքային համեմատությունը: Յուրյ է արվում, որ մեխանիկական նմանությունը վիճակագրական հասկացողությամբ հանդիսանում է մեխանիկական նմանության ուղղակի հետևանքը, ընդունելով որ A_i օբիեկտների սխեմներ և A_i մոդելների սխեմներ վիճակագրական հասկացողությամբ ապահովված են մեխանիկական նմանությամբ: Այդ արդյունքին կարելի է հասնել նաև հարցին մոտենալով մոդելացման ընդլայնված նմանության պայմանից ելնելով: Եթե մեզ հարկավոր է A_i և A' սխեմներին միջև հաստատել վիճակագրական նմանություն, ապա անհրաժեշտ է հաստատել նրանց նմանությունը վիճակագրական առումով բոլոր անկախ մեխանիկական մեծություններում:

Մասշտաբային էֆեկտի մասին: Մասշտաբային էֆեկտը զույլություն ունի և նա հատկապես հանդես է գալիս փորձն քայքայման զեպքում: Մասշտաբային էֆեկտը մոդելների վրա փորձարկումների զեպքում խանգարիչ հանգամանք է և ազդվողում է ստացվող արդյունքները: Հետևաբար զեֆորմացիայի ենթարկվող պինդ մարմինների մոդելացման հարցերը զիանելիս այս հանգամանքը չի կարելի անուշադրության մատնել հաշվի առնելով, որ մասշտաբային էֆեկտը մտնում է հակասության մեջ պինդ մարմինների նմանության հիմնական թեորեմի հետ:

Հոգիածած դիտվում է մասշտաբային էֆեկտի կապը փորձն նյութերի ամրության վիճակագրական տեսության լույսի տակ: Հատկապես կանգ է առնված նյութի անհամասեռության հարցի վրա: Շոշափված է Ն. Ն. Դավիդենկովի [9, 10] կողմից առաջ քաշված միտքը մասշտաբային էֆեկտի կապակցությամբ՝ փորձն քայքայման զեպքում պոտենցիալ էներգիայի կուտակումը նմուշ-փորձարկման մեքենա սխեմում և այն կապված է նմանության թեորեմի հետ: Վերջինիս կապակցությամբ հետևություն է արված, որ մասշտաբային ֆակտորի ազդեցությունը պատճառ է փորձարկման եղանակի անկատարելությունը: Վերջ նշվածներից բացի դիտված է նաև մասշտաբային ֆակտորի ազդեցությունը օբիեկտի և մոդելի պատրաստման տեխնոլոգիայի հետ կապված: Հետաքրքիր է, որ դրանից ելնելով հնարավոր է ամրության նվազում նմուշի երկրաչափական չափերի փոքրացման զեպքում: Մասշտաբային ֆակտորի և տեխնոլոգիայի միջև եղած առնչության կա-

պակցութիւնը հիշվում է երկու մասնավոր դեպքեր՝ այն է ամրացման պայմանները ձուլածո մետաղական նմուշների և բետոնն նմուշների մոտ, ինչպես նաև արտաքին լարվածութիւնն ազդեցութիւնը:

Այլ դժվարություններ կապված մոդելացման հետ: Մոդելացման հարցը դուրսնում է, երբ մոդելի համար օգտագործվող նյութը ենթարկվում է Հուկի օրենքին: Այս պայմանում պահանջվում է պաշտպանել Պուասսոնի դործակցի հավասար արժեքները օրիգինալի և մոդելի համար: Սկզբունքալին դժվարութիւններ է առաջանում մոդելների վրա լարվածութիւն և դեֆորմացիայի առաձգականութիւնն սահմանից դուրս վիճակում կոտարվող ուսումնասիրութիւնն ժամանակ: Այս դեպքում պրակտիկորեն անհնար է լարվածութիւն տեղորոշի և դեֆորմացիայի միջև հասնելու լրիվ համապատասխանութիւն, այսինքն պաշտպանելու ընդլայնված նմանութիւնն պայմանը բարդ լարվածութիւն վիճակի համար՝

$$\sigma' = \beta \sigma, \quad \varepsilon' = \gamma \varepsilon.$$

Այս պայմանը անգամ դժվար է բավարարել միառանցք լարվածային վիճակի համար: Դա է պատճառը, որ նման դեպքում խոսքը գնում է միայն մոդելացման մոտավոր եղանակի մասին: Այս առնչությամբ արդշունավետ կլինի անալիտիկ և փորձնական ուսումնասիրութիւնների համատեղումը, որոնք կարող են հանդիս գալ բաղմապիսի տարատեսակներով:

Ըստ էլեմենտային մոդելացման եղանակի: Հետադոտական հիմնարկները լրիվ հնարավորութիւն ունեն սովորական փորձարկումների միջոցով ստանալ այս կամ այն կոնստրուկցիայի առանձին էլեմենտների և դրանց կցումների ամրութիւնը վերաբերող հարցերի պատասխանը: Այդպիսի տվյալներ ներկայումս շատ կան: Այստեղից հետևում է, որ եթե փորձնական եղանակով պատրաստվի այդ էլեմենտներին համապատասխան մոդելներ և դրանց կցումների մոդելներ, որոնք ժանրաբեռնվեն համապատասխան բեռներով, ապա կարելի է հաշվել, որ տվյալ օբյեկտի մոդելացման հարցը դառնում է հեշտ լուծելի: Եվ իսկապես, եթե առանձին էլեմենտները և նրանց կցումները նույնանման մասշտաբային գործակցի դեպքում միացվալ ձևով պատասխանում են նմանութիւնն պայմանին, ապա իրական կոնստրուկցիան և կցումը նույնպես պետք է բավարարի նմանութիւնն պայմանին:

Նման, ըստ էլեմենտային մոդելացման դեպքում բավականին հեշտանում է խոշոր կառուցվածքների ուսումնասիրութիւնն հարցը, ինչպես օրինակ՝ բազմահարկ շենքերի ուսումնասիրութիւնը: Այս դեպքում առանց կառուցվածք քայքայելու, այլ միայն փորձարկելով նրա մոդելները հնարավորութիւն է ստեղծվում բավարար խորութիւնը ուսումնասիրելու օրիգինալի հետ կատարվող երեւութները:

Մոնոլիտ կառուցվածքների դեպքում ըստ էլեմենտային մոդելացումը փաստորեն վեր է ածվում մոդելային նյութի ուսումնասիրութիւնն՝ կառուցվածքի գերակշռող լարվածային վիճակի համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Известия АН Армянской ССР (серия технических наук), а) том X, № 5, 1957; б) том X, № 6, 1957; в) том XI, № 4 1958; г) том XI, № 6 1958.

2. *Miriel Rocha*. Dimensionnement experimental des constructions. Publ. № 21, Laboratório de engenharia civil, Lisbonne, 1952.
3. *Weibull W.* A statistical theory of the strength of materials. Proc. Royal Swedich Inst. Res., № 151, 1939.
4. *Конторова Т. А. и Френкель Я. Н.* Статистическая теория хрупкой прочности реальных кристаллов. Ж. Т. Ф., т. XI, № 3, 1941.
5. *Седракян Л. Г.* К статистической теории прочности. Армянский институт строй-материалов и сооружений, Ереван, 1958.
6. *Болотин В. В.* Изменчивость пределов прочности хрупких материалов и ее связь с масштабным эффектом. Журнал "Строительная механика и расчет сооружений", 4, 1960, М.
7. *Цискрели Г. Д.* Влияние формы и размеров образца на сопротивление бетона разрыву. Известия ТНЦГЭИ, т. 4, вып. 2, 1951, Тбилиси.
8. *Шеванди Е. М. и Маневич Ш. С.* Эффект масштаба при хрупком разрушении стали. ЖТФ, т. XVI, вып. II, 1946.
9. *Мороз Л. С. и Шураков С. С.* Проблема прочности цементированной стали. Л., 1947 (предисловие Н. Н. Давиденкова).
10. *Давиденков Н. Н.* О влиянии размеров образцов на их механические свойства. Журн. "Заводская лаборатория", № 3, 1960.
11. *Норffe А. Ф.* Проблемы новейшей физики, ГТТИ, 1933.
12. *Назаров А. Г.* Основная теорема подобия в применении к моделированию строительных конструкций. Журн. "Строительная механика и расчет сооружений", № 3, 1959.
13. *Лавров В. В.* Природа масштабного эффекта у льда и прочность ледяного покрова. ДАН СССР, т. 122, № 4, 1958.