

логией.

Имеются и другие методы разнотипности: *метод рекомбинаторных преобразований*, применяемый, например, в сборно-разборных ИСС, *метод базовых систем* – в типовых каркасах с различными "навесными" строительными элементами; общеметодологические методы: *метод универсализации – специализации, метод ответственности – обновления* и т.д.

1. Романенко И.И. Терминология экспликационно-методологических основ проектирования индустриально-строительных систем // 36. науч. прац.: Науковий вісник будівництва. Вип. 4. – Харків: ХДГУБА, 1998. – С.175-191.

Получено 13.04.2001

УДК 624.012.45

А.В. ГРИШИН, В.С. ДОРОФЕЕВ, д-р техн. наук
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С УЧЕТОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИХ МАТЕРИАЛА ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ

Исследуется напряженно-деформированное состояние железобетонных балок при действии на них импульсных нагрузок. Для бетона и арматуры учитываются как упругие, так и пластические их свойства. Разработан алгоритм решения, в котором дискретизация задачи выполнена методом конечных элементов, а узловые перемещения определяются из итерационного процесса, построенного по неявной схеме интегрирования. Приведены численные результаты и дан их анализ.

Динамика балок исследовалась во многих работах, например, в [1,2,3]. Нами эта задача рассматривается в иной постановке: во-первых, бетон и арматура принимается не как усредненная среда, а как трехслойная, причем заданный процент армирования не изменяется; во-вторых, используется теория пластичности с упрочнением, базирующаяся на принципе максимума Мизеса [4]. В качестве функции нагружения для бетона применяется условие Гениева [5], а для металла – условие Писаренко-Лебедева [6]. Такая постановка позволяет учесть реальные свойства материалов балки. В-третьих, классические статическая и геометрическая гипотезы балок не учитываются, а рассматривается плоское напряженное состояние. Это вызвано тем, что при произвольной нагрузке в балках возникают сложные волновые процессы, для которых в связи с нелинейностью задач принцип суперпозиции применять нельзя. Например, сумма отдельных напряженно-деформированных состояний от продольных и поперечных волн не будет равна результату при их одновременном воздействии. Такой подход позволяет не только рассматривать колебания балки, но и изу-

чать происходящие в ней волновые процессы.

Для численной реализации поставленной задачи была разработана методика ее решения. Она включает два основных момента: во-первых, определение исходных уравнений задачи и, во-вторых, построение алгоритма их решения.

Статические уравнения равновесия элемента внутри и на контуре балки получены на основании принципа виртуальной работы, который не зависит от связи между компонентами тензоров напряжений и деформаций. Вид этих уравнений приведен ниже.

Из геометрических уравнений использовали линейные соотношения Коши, связывающие приращения компонентов тензора деформаций с компонентами вектора приращения перемещений:

$$d\epsilon_{ks} = 1/2(du_{k,s} + du_{s,k}). \quad (1)$$

Для определения физических соотношений применяли постулат суммирования приращений упругой и пластической деформаций [4], который позволяет разделить общие деформации на упругие и пластические:

$$d\epsilon_{ks} = d\epsilon_{ks}^{(e)} + d\epsilon_{ks}^{(p)}. \quad (2)$$

Компоненты тензора приращения упругой деформации связаны с компонентами тензора приращения напряжений законом Гука:

$$d\epsilon_{ks}^{(e)} = C_{ksmn}^{(e)} d\sigma_{mn}. \quad (3)$$

Связь между приращениями пластических деформаций и приращениями напряжений имеет вид дифференциальных неинтегрируемых соотношений, которые являются следствием принципа максимума Мизеса [4]:

$$d\epsilon_{ks}^{(p)} = d\lambda f' \sigma_{ks}, \quad d\lambda = \text{const} > 0, \quad (4)$$

где $f' \sigma_{ks}$ – производные от функции нагружения по σ_{ks} .

Подставляя (3), (4) в (2) и делая преобразования, окончательно получаем

$$\begin{aligned} d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(e)} d\epsilon_{mn}, \text{ если } f = 0, d'f > 0; \\ d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(p)} d\epsilon_{mn}, \text{ если } f = 0, d'f \leq 0 \text{ или } f < 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $D_{ksmn}^{(e)}$ – компоненты тензора упругих постоянных закона Гука;

$D_{ksmn}^{(p)}$ – компоненты, сложным образом зависящие от параметров

упрочнения, производных от функции нагружения и механических констант материала. В зависимости от вида функций нагружения и законов упрочнения эти соотношения исследовались в [7].

Алгоритм решения включает два основных этапа: дискретизацию исходных уравнений как по времени, так и по области, занимаемой балкой, и построение пошагового итерационного процесса, определяющего напряженно-деформированное состояние балки на заданном отрезке времени от 0 до T. Для первой дискретизации отрезок времени 0-T разбиваем на N временных интервалов Δt и в каждый момент времени t_n производим построение решения. Для второй дискретизации область балки разбиваем на конечные изопараметрические элементы и затем определяем матрицу жесткости. После выполнения всех преобразований, связанных с дискретизациями, уравнение равновесия в матричной форме для момента времени t имеет следующий вид:

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + K(d) = Q. \quad (6)$$

Здесь M – матрица масс; C – матрица демпфирования; K(d) – нелинейная матрица жесткости; d, \dot{d} , \ddot{d} – соответственно векторы перемещений, скоростей и ускорений узловых точек балки.

Уравнение (6) выполняется только в дискретных точках t_n ($n=1, 2, \dots, T$), но изменение d, \dot{d} , \ddot{d} на временных интервалах Δt между этими точками соответственно влияет на точность и устойчивость решения в моменты времени $t_{n+1} = t_n + \Delta t$. В начальных условиях при $t=0$ должны быть заданы d_0 и \dot{d}_0 . Ускорение \ddot{d}_0 определяем из уравнения (6) при $t=0$.

Затем строим пошаговый процесс для определения решений в моменты времени t_1, t_2, \dots, T . Пусть известны d, \dot{d} , \ddot{d} при t, равном t_n . Для определения этих величин в момент времени t_{n+1} приходится использовать уравнение (6) при t_n или t_{n+1} . В первом случае получаем явную схему прямого метода интегрирования, а во втором – неявную схему этого метода. Основным недостатком явных схем является их условная устойчивость, что приводит к увеличению числа временных шагов на заданном отрезке времени. Неявные методы являются безусловно устойчивыми, что позволяет увеличивать длину временного интервала Δt и этим существенно сократить затраченное на решение время и получить более надежные результаты.

В связи с нелинейностью матрицы жесткости $K(d)$ приходится решать задачу для определения узловых перемещений в приращениях нагрузки. Для нахождения приращений узловых перемещений Δd строим дополнительный итерационный процесс, который вкладывается в пошаговую процедуру классических неявных методов [8]. Если на i -м приращении нагрузки в момент времени t_{n+1} известно d_{n+1}^i и из итерационного процесса определено Δd^i , то полные узловые перемещения для $i+1$ приращения находим как

$$d_{n+1}^{i+1} = d_{n+1}^i + \Delta d^i. \quad (7)$$

Условием сходимости итерационного процесса является

$$\sqrt{\frac{\Pi \Delta d \Pi}{\Pi d + \Delta d \Pi}} \leq \varepsilon_0, \quad (8)$$

где ε_0 – заданная погрешность вычислений.

Для численной реализации предлагаемой методики был разработан в системе Delphi программный комплекс, в котором реализованы явная, неявная и комбинированная схемы прямого метода интегрирования. В качестве динамических нагрузок можно использовать сосредоточенные и распределенные импульсы, гармонические и температурные воздействия и в виде заданного во времени ускорения. Выходную информацию можно представить в виде таблиц или различных эпор, которые выводятся на экран дисплея или на печатающее устройство.

Рассмотрим применение указанной методики на конкретном примере. Пусть заданы: $l_1 = l_2 = 6$ м, $h = 0,4$ м, $v = 0,2$ м, $E_b = 32000$ МПа, $E_s = 200000$ МПа, $\mu_b = 0,2$, $\mu_s = 0,3$, $\sigma_{bt} = 1,3$ МПа, $\sigma_b = 18$ МПа, $\sigma_s = \sigma_{sc} = 274$ МПа. Процент армирования – 2,5%. Он реализуется в виде верхнего и нижнего слоев металла толщиной по 1 см. Закрепления балки показаны на рис.1. Импульсная распределенная вертикальная нагрузка интенсивностью 13,7 МПа и протяженностью $l_3 = 0,8$ м приложена на расстоянии 8 м от начала координат. Время ее действия составляет 0,001 с. Временной шаг $\Delta t = 0,003$ с, количество шагов равно 1020, т.е. временной отрезок равен $T = 3,06$ с.

На рис.2, 3 приведены соответственно эпюры колебаний u_y и напряжений σ_x точки А, показанной на рис.1. Как видим, наибольшая амплитуда вертикальных колебаний $u_{\max} = 0,7735$ см и напряжений

$\sigma_{x \max} = 161,1$ МПа возникали при $t = 0,612$ с и затем постепенно затухали. Колебания происходили не около временной оси, а около смещенной на $u = 0,5$ см горизонтальной прямой. На экране дисплея выводились пластические зоны, которые перемещались как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях аналогично волновому процессу, происходящему в балке. Вначале пластические зоны возникли в бетоне над средней опорой и в нижней центральной части правого пролета балки, а затем они перемещались в правую и левую ее части, то исчезая, то возникая вновь. В балке происходили процессы активного нагружения и разгрузки, вызванные распространением в ней волн. На экран дисплея также выводились в увеличенном масштабе колебания всей балки. Было видно, как в некоторых ее зонах происходило сжатие, а в других, наоборот, расширение волокон.

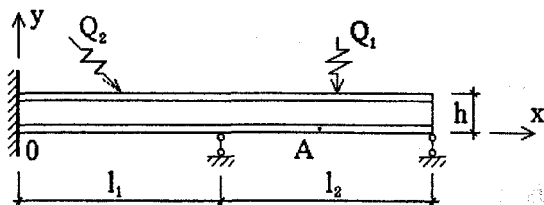


Рис.1

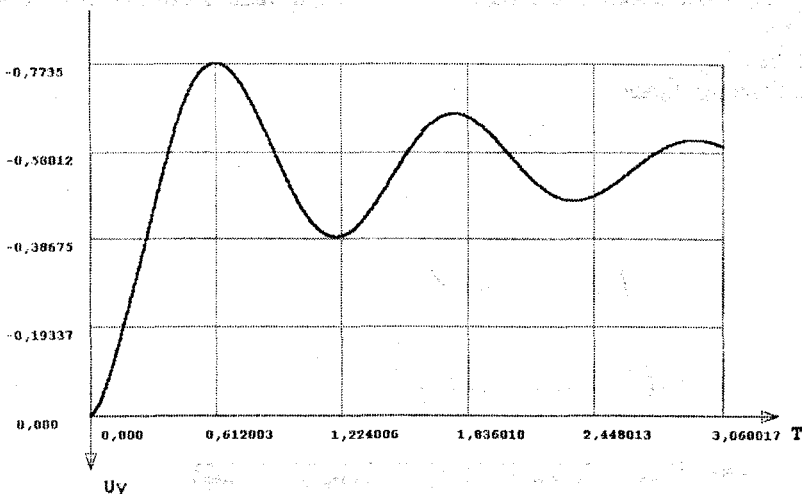


Рис.2

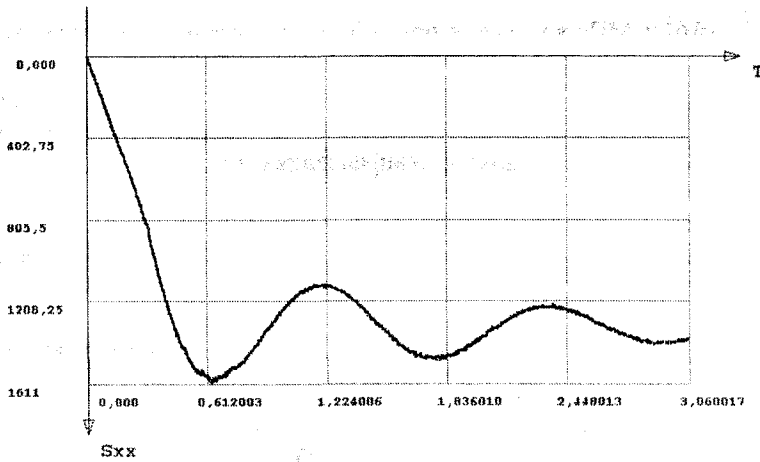


Рис.3

С увеличением интенсивности нагрузки картина колебательного процесса резко изменялась, особенно при приближении к моменту разрушения балки. На рис.4, 5 показаны те же эпюры, но при $q=13,9$ МПа. Из них видно, что вначале перемещения u_y со временем уменьшались, а затем с $t=2$ с начинали возрастать. То же происходило и с напряжениями. На экране дисплея было видно, что как только в средней части правого пролета в нижнем слое металла возникла пластическая зона, которая затем почти мгновенно распространялась на всю высоту правого пролета, – произошло разрушение балки.

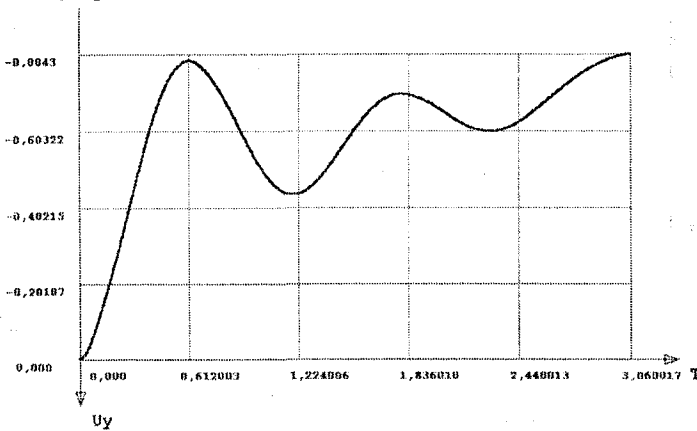


Рис.4

Был произведен расчет при действии распределенного наклонного под 45° к балке импульса, который также действовал 0,001 с. Нагрузка была приложена к левому пролету балки на расстоянии 3,2 м от начала координат и имела протяженность 0,8 м. В данном случае разрушающая нагрузка увеличивается, а картина образования пластических зон изменяется. Сначала они возникают в бетоне в заделке и нижней части левого пролета, а затем распространяются, то возникая, то исчезая в правую часть балки. Нормали к срединной поверхности балки искажаются, превращаясь в кривые, чему способствовала горизонтальная составляющая импульсной нагрузки. Например, нормаль до деформации балки в сечении $x=6$ м получила после действия импульсной нагрузки $q=20$ МПа в момент времени $t=1,44$ с следующие горизонтальные перемещения: при $y=40$ см оно равнялось $u_x=0,0383$ см, при $y=20$ см — $u_x=0,0857$ см, при $y=0$ — $u_x=0,134$ см. Касательная, проведенная к этой кривой в точке $y=20$ см, становится не перпендикулярной к срединной поверхности балки. Несмотря на сравнительно с длиной малую высоту балки гипотеза прямых нормалей нарушается.

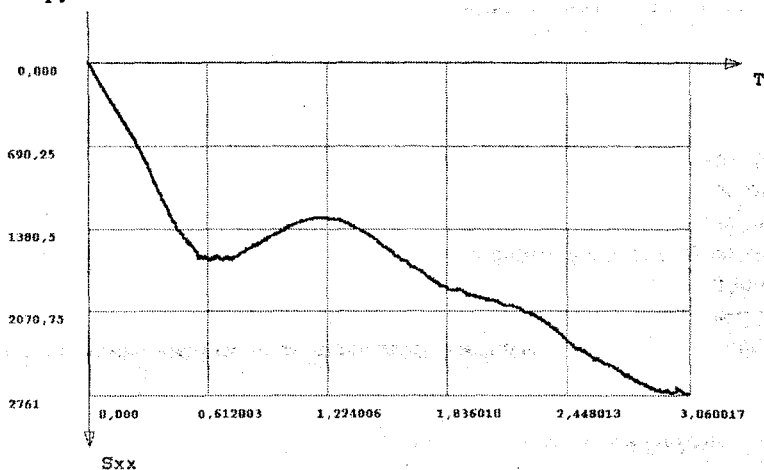


Рис.5

1. Дикович И.П. Динамика упруго-пластических балок. — Л.: Судпромгиз, 1962. — 292 с.
2. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. — М.: Стройиздат, 1984. — 415 с.
3. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. — М.: Стройиздат, 1979. — 320 с.
4. Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И. Теория упрочняющегося пластического тела. — М.:

Наука, 1971. – 231 с.

5.Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.

6.Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наукова думка, 1976. – 415 с.

7.Гришин В.А., Бугаев В.Т. Упругопластические контактные задачи. – Одесса, 1996. – 91с.

8.Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.

Получено 13.04.2001

УДК 625.858

В.К.ЖДАНЮК, д-р техн. наук, В.П.ШЕВЧЕНКО, Ю.А.МАСЮК

Харьковский государственный автомобильно-дорожный технический университет

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СМАЧИВАНИЕ ИХ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКИМИ БИТУМАМИ

Приведены результаты исследования влияния природы минеральных материалов на краевые углы смачивания их поверхности жидкими нефтяными битумами различного состава. Установлено влияние добавок катионного поверхностно-активного вещества и полимера на характеристики смачивания битумов.

Влияние механических нагрузок и климатических факторов на асфальтобетон в покрытии автомобильных дорог прежде всего проявляется на уровне вяжущего материала и на границе раздела битум – минеральный материал. В присутствии воды происходит отслаивание битумной пленки от поверхности минерального материала, при этом отслаивание битума является не единственной причиной разрушения асфальтобетонного покрытия. Агрессивное влияние воды становится особенно опасным, когда сопровождается интенсивной кинетикой процесса отслаивания. Идеальные условия обеспечения прочного сцепления битума с минеральной поверхностью на практике реализуются редко. Прочность сцепления битумных пленок с поверхностью минерального материала зависит от многих факторов и от метода ее оценки.

Учитывая неоднозначность точек зрения [1], что условием прочного сцепления является хорошее смачивание жидкостью твердой поверхности, отметим, что с позиции поверхностных явлений согласно [2] именно прочное сцепление определяет хорошее смачивание. Однако последнего недостаточно для обеспечения прочного сцепления. Так, маловязкие битумы по сравнению с вязкими лучше смачивают большинство минеральных материалов, но асфальтобетоны на их основе характеризуются меньшими значениями коэффициента длительной водоустойчивости. Сам эффект смачивания служит признаком про-