

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ШЛАКОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бондарев Борис Александрович

д.т.н.,

профессор кафедры

«строительного материаловедения и дорожных технологий» ЛГТУ,

г.Липецк

Черноусов Николай Николаевич

к.т.н.,

доцент кафедры

«общей механики», ЛГТУ,

г.Липецк

Черноусов Роман Николаевич

к.т.н.,

доцент кафедры

«общей механики», ЛГТУ,

г.Липецк

Стурова Виктория Андреевна

магистр кафедры

«строительного производства», ЛГТУ,

г.Липецк

Проведены равновесные механические испытания на изгиб силой P приложенной к середине пролета (1) шлакобетонных образцов с длиной начальных надрезов $a_0=5$ мм и $a_{0t}=10$ мм – призм квадратного поперечного сечения ($b = h = 40$ мм). На основе опытных данных, полученных при равновесных испытаниях на изгиб шлакобетонных образцов (ГОСТ 29167-91), разработана и реализована на ЭВМ математическая модель разрушения шлакобетонных изгибаемых элементов. Модель представляет собой динамическую систему, где в качестве входного воздействия на этапе нагружения используется изменение прогиба образца ($V[t]$) под действием нагрузки ($P[t]$), а на выходе получаем значения этой нагрузки.

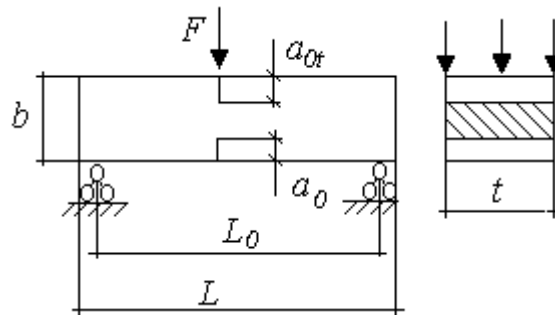


Рис. 1. Испытание образцов на изгиб

При построении модели используется принцип разбиения образца на слои равной толщины. Толщина одного слоя h_s была принята равной $\frac{(h-a_0-a_{0t})}{[h-a_0-a_{0t}]} \approx 1$ мм. Относительные деформации каждого слоя ε_i вычисляются по формуле:

$$\varepsilon_i[t] = \frac{8 \cdot V[t]}{l^2} \cdot y_i[t-1] + \varepsilon_0[t], \quad (1)$$

$$\text{где } y_i[t] = y_i[t-1] - h_s \cdot \left(\underset{i}{\operatorname{argmin}}(|\varepsilon_i[t]|) - \underset{j}{\operatorname{argmin}}(|\varepsilon_j[t-1]|) \right).$$

Внутреннее состояние системы определяется значениями деформаций ε и напряжений σ в каждом слое:

$$\sigma_i[t] = -K_1 \cdot R_i[t] \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon_i[t] \cdot \nu \cdot E_b}{R_i} - 1 \right)^2 - 1 \right], \quad (2)$$

$$\text{где } R_i[t] = \begin{cases} R_{расч}, & y_i[t-1] > 0 \\ R_{сжс}, & y_i[t-1] < 0 \end{cases}$$

Формула была выведена из предположения, что напряжения и деформации связаны параболически. Такое предположение можно сделать, так как оно не противоречит виду расчетной криволинейной диаграммы состояния, сжатого (или растянутого бетона) с ниспадающей ветвью (см. рис.2) [2].

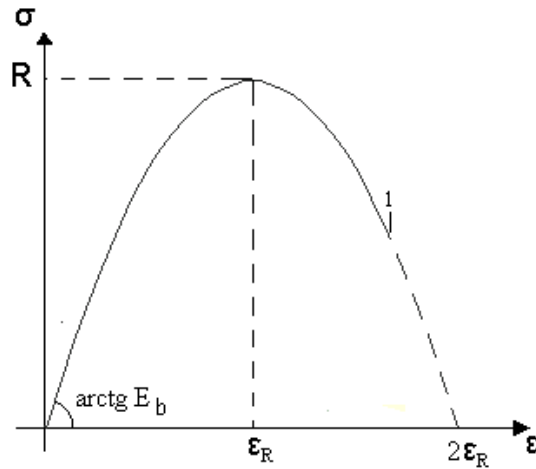


Рис.2 Криволинейная диаграмма состояния бетона с ниспадающей ветвью

Далее просто дополнив расчетную диаграмму разрушения образца от точки 1 пунктирной линией до параболы. Это предположение верно для слоев малой высоты $h_s \leq 1$ мм, которые разрушаются почти сразу после достижения точки 1 (см. рис.2).

Максимальное значение напряжения достигается в точке (R, ϵ_R) . R равно для сжатого бетона $R_{сж}$, для растянутого $R_{раст}$. Далее напряжения падают и становятся равными 0 при равенстве деформаций величине $2 \cdot \epsilon_R$. Если $\sigma_i = 0$, значит i -ый слой разрушен. Тогда зависимость напряжений от деформаций можно записать в виде:

$$\sigma = a \cdot \epsilon^2 + b \cdot \epsilon + c. \quad (3)$$

Из того условия, что начало координат принадлежит зависимости, следует, что $c = 0$. Коэффициенты a и b находятся из решения следующей системы уравнений, полученной путем подстановки в уравнение (3) точек с координатами $(R; \epsilon_R)$ и $(0; 2 \cdot \epsilon_R)$, через которые должна проходить парабола.

$$\begin{cases} R^2 = a \cdot \epsilon_R^2 + b \cdot \epsilon_R; \\ 0 = a \cdot (2 \cdot \epsilon_R)^2 + b \cdot 2 \cdot \epsilon_R; \end{cases} \quad (4)$$

Решая эту систему, получим: $a = -\frac{R}{\epsilon_R^2}$, $b = 2 \cdot \frac{R}{\epsilon_R}$, т.е. зависимость напряжений от деформаций для каждого слоя σ - ϵ выглядит следующим образом $\sigma = R \cdot \left(-\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_R}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_R}\right)$ или $\sigma = -R \cdot \left(\frac{\epsilon - \epsilon_R}{\epsilon_R}\right)^2 + R$; Но т.к. слои работают не независимо друг от друга был введен коэффициент K_1 , учитывающий влияние слоев друг на друга. Опытным путем было получено его значение $K_1 = 0.6 \pm 0.1$ для шлакобетонных образцов с $h_s \approx 1$. ϵ_R находится по формуле $\epsilon_R = \frac{R}{\nu \cdot E_b}$, где ν - коэффициент изменения модуля упругости (E_b), уменьшающийся с появлением пластических деформаций в образце ($\nu \leq 1$). Нагрузка вычисляется по формуле:

$$P[t] = \sum_i b \cdot \sigma_i[t] \cdot y_i[t] \cdot h_s \quad (5)$$

Принцип работы модели заключается в том, что на каждом этапе нагружения (t), в образце происходит накопление повреждений, выраженное формулой: $\epsilon_0 = \Delta N / (E_b \cdot b \cdot h) + \epsilon_0$ (ϵ_0 - деформация геометрического центра тяжести образца). Накопление происходит до тех пор, пока не будет выполнено условие равновесия:

$$\Delta N = \sum_i b \cdot \sigma_i[t] \cdot h_s = 0. \quad (6)$$

В дальнейшем планируется разработать модель разрушения сталефиброшлакобетонных (СФШБ) образцов, основанную на модели разрушения шлакобетонных образцов и генерации внутренней структуры СФШБ [3]. Пример моделирования равновесного испытания для образца в сравнении с опытными данными, полученными при реальных испытаниях, приведен на рисунке.

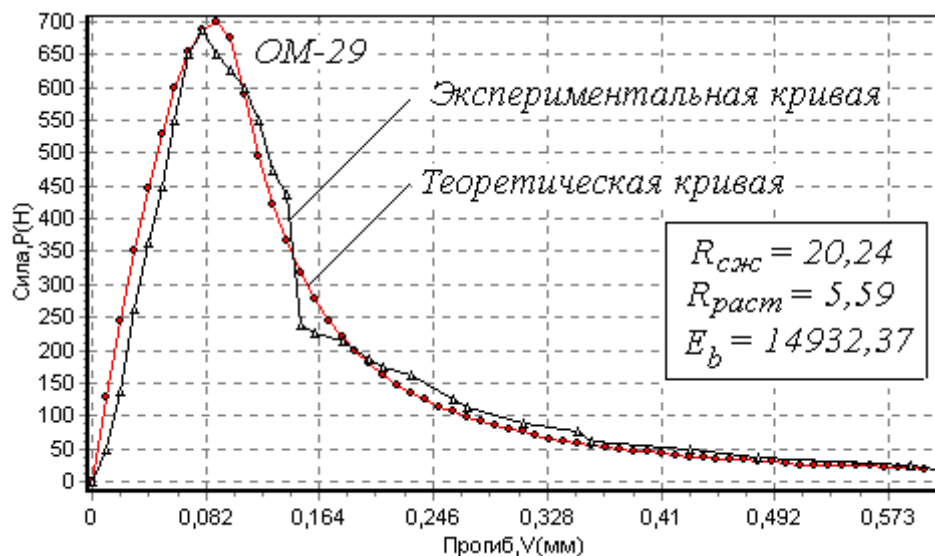


Рис.3 Теоретические и опытные значения зависимости нагрузки от прогиба

Список литературы

- ондарев, Б.А. Моделирование прочностных и деформативных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом возраста бетона/ Б.А. Бондарев, Н.Н. Черноусов, В.А. Стурова// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2018. № 2 (50). С. 56–67.
- вездов А.И. Расчет прочности железобетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил по новым нормативным документам / А.И. Звездов, А.С. Залесов, Т.А. Мухамедиев, Е.А. Чистяков // Бетоны и железобетоны. 2002. № 2. С. 21 – 25.
- ерноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В., Стурова В.А. Влияние возраста мелкозернистого шлакобетона на его прочностные характеристики/ Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Москва, 2014. Актуальные вопросы науки.
- ерноусов, Н.Н. Изгибаемые сталефиброшлакобетонные элементы/ Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов // Бетон и железобетон. – 2010. – №4. – С. 7–11.
- ерноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В., Стурова В.А. Моделирование физико-механических свойств мелкозернистого цемента-песчаного бетона при осевом растяжении и сжатии// Сборник статей по материалам XXII Международной заочной научно-практической конференции. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ – ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ. Новосибирск, 2013г.