

О зависимости «напряжения-деформации» и «модуль деформаций-уровень нагружения» для бетонов с органо-минеральными модификаторами

Д.Р. Маилян¹, Г.В. Несветаев¹, Л.В. Постой²

¹Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

²Волгодонский инженерно-технический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета (МИФИ), Волгодонск

Аннотация: показано, что соотношение приведенного модуля деформаций и начального модуля упругости бетона зависит не только от вида функции $\varepsilon = f(\sigma)$, но и от начального модуля упругости бетона, т.е. для бетонов с различными значениями начального модуля упругости при равной прочности, например, при введении в состав бетона органо-минеральных модификаторов, зависимость соотношения E_{σ}/E_0 от уровня нагружения будет различным. Для описания зависимостей «напряжения-деформации» или «модуль деформаций-уровень нагружения» для бетонов с органо-минеральными модификаторами целесообразно использовать диаграмму Саржина (Sargin) с учетом влияния модификаторов на основные константы деформирования: начальный модуль упругости, коэффициент упругости, относительная деформация, соответствующая пределу кратковременной прочности. Характер деформирования бетонов с органо-минеральными модификаторами при уровне нагружения выше 0,9 может отличаться от известных для традиционных бетонов закономерностей, в связи, с чем этот вопрос требует специального изучения.

Ключевые слова: модуль деформаций, диаграмма напряжения-деформации, модифицированные бетоны, уровень нагружения, модуль упругости.

Известно, что расчет железобетонных элементов по методике норм, которая предусматривает прямоугольную эпюру напряжений в сжатой зоне бетона, нередко приводит к значительной недооценке (переоценке) несущей способности элемента (СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003). В новой редакции норм проектирования и технической литературе [1-3] наряду с прямоугольной для некоторых случаев предлагается использовать двух- или трехлинейные диаграммы деформирования с помощью которых возможно сблизить опытные и теоретические значения [3-5]. Вместе с тем диапазон использования этих предложений, как правило,

ограничен предельным состоянием конструкций. При том, что нередко необходимо располагать данными о напряженно-деформированном состоянии конструкций в процессе нагружения.

Для решения ряда задач по оценке напряженно-деформированного состояния бетона необходимо иметь функцию $\sigma = f(\varepsilon)$ (или $\varepsilon = f(\sigma)$), связывающую напряжения и деформации бетона при центральном осевом сжатии при различных уровнях нагружения, либо описывающую изменение приведенного модуля деформаций (тангенс угла между секущей к кривой $\varepsilon = f(\sigma)$ в точке ε_i и осью ε) в зависимости от приложенного напряжения. В этом случае при известной функции $\frac{E_\sigma}{E_0} = f(\sigma)$ зависимость между деформациями и напряжениями может быть представлена как [6]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_\sigma}, \quad (1)$$

или

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0 \cdot f(\sigma)}, \quad (2)$$

где ε – текущее значение относительной деформации бетона, E_σ – приведенный модуль деформаций, E_0 – начальный модуль упругости, $f(\sigma)$ – функция, описывающая изменение модуля деформаций от уровня нагружения.

В первом случае наиболее часто используется зависимость, известная как формула Саржина (Sargin) [1, 5, 7]

$$\frac{\sigma}{R} = \frac{k \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_R}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_R}}, \quad (2)$$

где σ – текущее значение напряжения при центральном осевом сжатии, ε – текущее значение относительной деформации бетона, ε_R – значение относительной деформации, соответствующее пределу кратковременной прочности при центральном осевом сжатии R_b , $k = 1/\lambda_R$, λ_R – значение

коэффициента упругости бетона, соответствующее пределу кратковременной прочности при центральном осевом сжатии.

Во втором случае иногда используются зависимости вида [6]

$$\frac{E_{\sigma}}{E_0} = (1 + \beta \cdot (\sigma^x - 1))^d, \quad (3)$$

β , x , d – эмпирические коэффициенты, определяемые экспериментально.

В частности, для бетонов прочностью от 10 до 60 МПа предлагаются значения $x = 2$, $d = -1$, а β предлагается определять по эмпирической формуле (размерность R – кгс/см²) [6]

$$\beta = \frac{\epsilon_{\sigma 0.3R} - R}{(R - \epsilon_0) \cdot R^2}. \quad (4)$$

Применение зависимостей вида ф.(3) требует экспериментального определения эмпирических коэффициентов [6], в связи, с чем не очень удобно для практических целей, поскольку применение суперпластификаторов [7-9] при производстве высокоподвижных бетонных смесей и органо-минеральных модификаторов при производстве самоуплотняющихся бетонов [10-12] может существенно влиять на величину начального модуля упругости бетона и вид диаграммы «напряжения-деформации», что оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций [13-14]. Зависимость E_{σ}/E_0 в принципе может быть получена из ф.(2), поскольку

$$\epsilon_{0.3R} = \frac{0.3 \cdot R}{E_0}, \quad (5)$$

$$\epsilon_{\sigma} = \frac{\sigma}{E_{\sigma}}, \quad (6)$$

то

$$\frac{E_{\sigma}}{E_0} = \frac{\sigma \cdot \epsilon_{0.3R}}{\epsilon_{\sigma} \cdot 0.3 \cdot R} = \frac{\sigma}{E_0 \cdot (\epsilon = f(\sigma))}. \quad (7)$$

Из ф.(7) следует, что соотношение приведенного модуля деформаций и начального модуля упругости бетона зависит не только от функции $\epsilon = f(\sigma)$,

но и от начального модуля упругости бетона, т.е. для бетонов с различными значениями начального модуля упругости, например, при введении в состав бетона органо-минеральных модификаторов, соотношение E_{σ}/E_0 будет различным даже при равной прочности бетонов. Значения ε_{σ} при любом уровне нагружения σ/R_b и $\varepsilon_{0,3R}$ могут быть определены из ф.(2) с учетом влияния модификаторов на основные константы деформирования ($E_{0,M}$, ε_R , λ_R) и, закономерно, характер диаграммы «напряжения-деформации» бетона [8]

$$E_{0,M} = k \cdot \frac{0,05 \cdot R_b + 57}{1 + \frac{29}{R_b + 3,9}} \cdot 10^3, \quad (8)$$

$$\varepsilon_R = a \cdot \sqrt{\frac{R_b}{E_0}}, \quad (9)$$

$$\lambda_R = b \cdot \sqrt{\frac{R_b}{E_0}}, \quad (10)$$

где k , a , b – коэффициенты, учитывающие влияние модификаторов, R_b – призмочная прочность бетона ($R_b \approx 0,8R$).

На рис. 1 представлена зависимость E_{σ}/E_0 от уровня нагружения, полученная в результате решения уравнения ф.(7) с учетом ф. (2,8-10) для традиционных (1) и модифицированных (0,85; 1,15) бетонов класса В50 ($R \approx 60$ МПа). За единичное значение принято соотношение модулей при уровне нагружения равном 0,3.

Из представленных на рис. 1 данных очевидно:

- модификаторы оказывают влияние на зависимость E_{σ}/E_0 ;
- результаты, полученные по ф.(3) по данным [6] несколько отличаются от данных, полученных в результате решения уравнения ф.(7) с учетом ф. (2,8-10) для традиционных (1) и модифицированных (0,85; 1,15) бетонов;
- при уровне нагружения более 0,9 имеет место некоторое расхождение расчетных и среднестатистических экспериментальных значений.

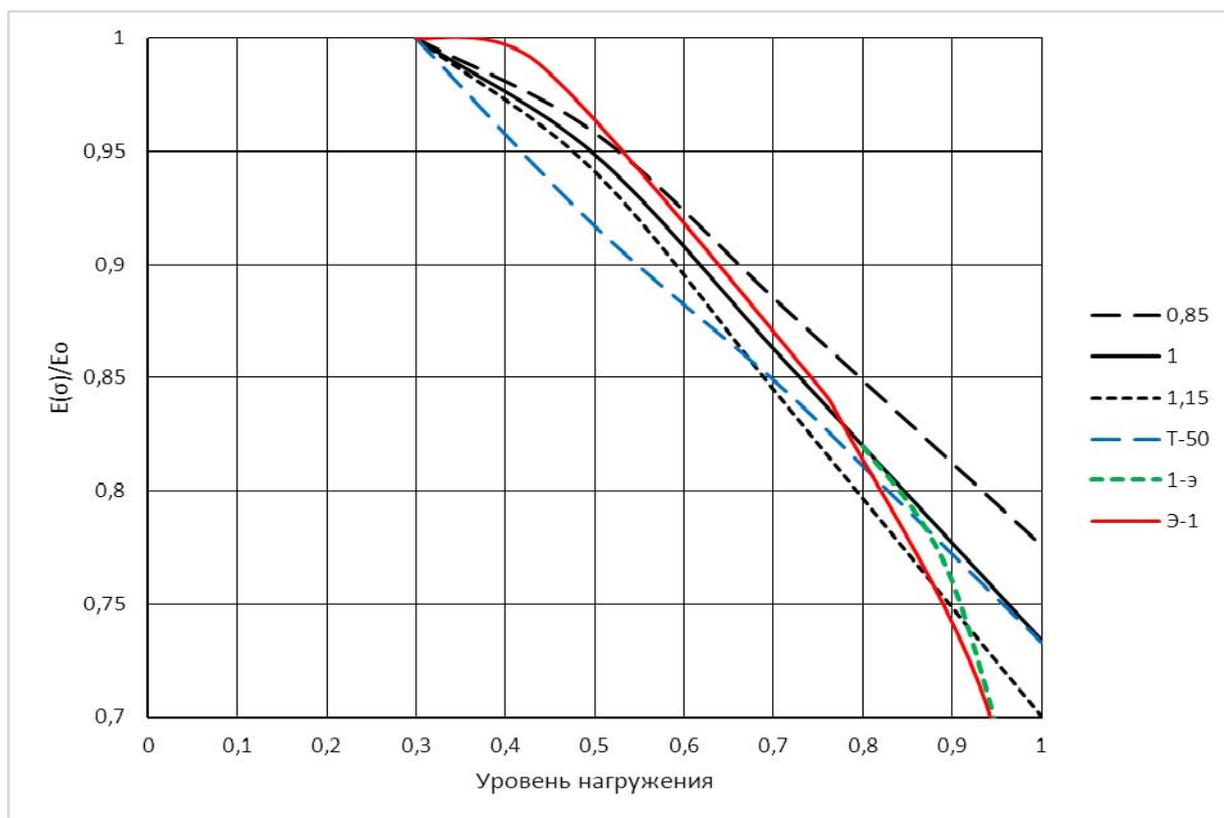


Рис. 1. – Изменение приведенного модуля деформаций бетона класса В50 в зависимости от уровня нагружения 0,85; 1; 1,15 – из решения уравнений (ф.2,7,8-10) для бетонов со значением начального модуля упругости: пониженным за счет возможного влияния суперпластификатора ($E_0 = 32860$ МПа); среднестатистическим ($E_0 = 38660$ МПа); повышенным за счет возможного влияния минерального модификатора ($E_0 = 44460$ МПа); Т-50 – по данным ф.(3) [6]; 1-э – по среднестатистическим экспериментальным данным; Э-1 – бетон с высокомодульным заполнителем, $E_0 = 46200$ МПа

На рис. 2 представлена зависимость E_{σ}/E_0 от уровня нагружения, полученная в результате решения уравнения ф.(7) с учетом ф. (2,8-10) для традиционных (1) и модифицированных (0,85; 1,15) бетонов класса В30 ($R \approx 40$ МПа). За единичное значение принято соотношение модулей при уровне нагружения равном 0,3.

Из представленных на рис. 2 данных очевидно:

– модификаторы оказывают влияние, как и в случае бетонов класса В50, на зависимость E_{σ}/E_0 ;

– результаты, полученные по ф.(3) по данным [6] значительно отличаются от данных, полученных в результате решения уравнения ф.(7) с учетом ф. (2,8-10) для традиционных (1) и модифицированных (0,85; 1,15) бетонов;

– при уровне нагружения более 0,9 имеет место расхождение, как и для бетонов класса В50, расчетных и среднестатистических экспериментальных значений.

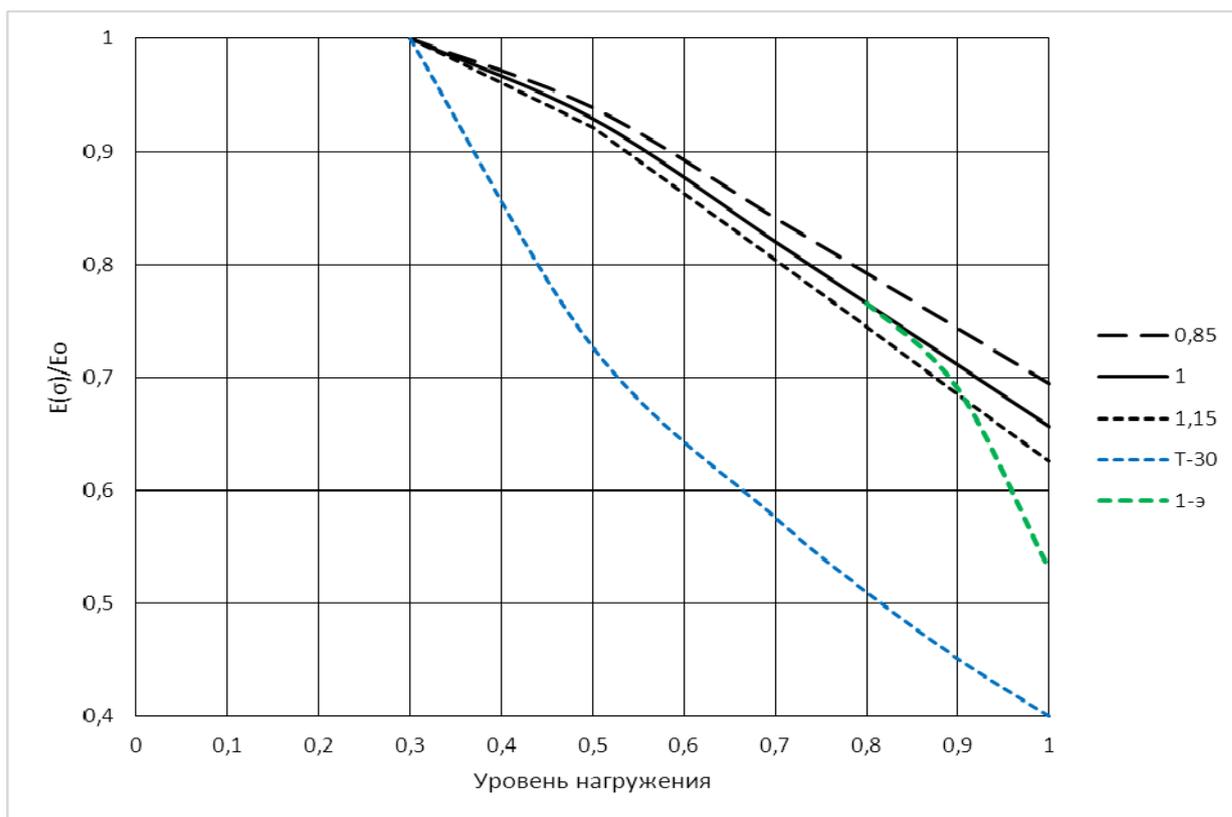


Рис. 2. – Изменение приведенного модуля деформаций бетона класса В30 в зависимости от уровня нагружения

0,85; 1; 1,15 – из решения уравнений (ф. 2,7,8-10) для бетонов со значением начального модуля упругости: пониженным за счет возможного влияния суперпластификатора ($E_0 = 26760$ МПа); среднестатистическим ($E_0 = 31480$ МПа); повышенным за счет возможного влияния минерального модификатора ($E_0 = 36200$ МПа); Т-30 – по данным ф.(3) [6]; 1-э – по среднестатистическим экспериментальным данным

На рис. 3 представлена зависимость «напряжения-деформации» при кратковременном осевом нагружении сжимающей нагрузкой для бетонов

класса В50, полученная расчетом на основе данных, представленных на рис. 1, в сравнении с экспериментальными значениями.

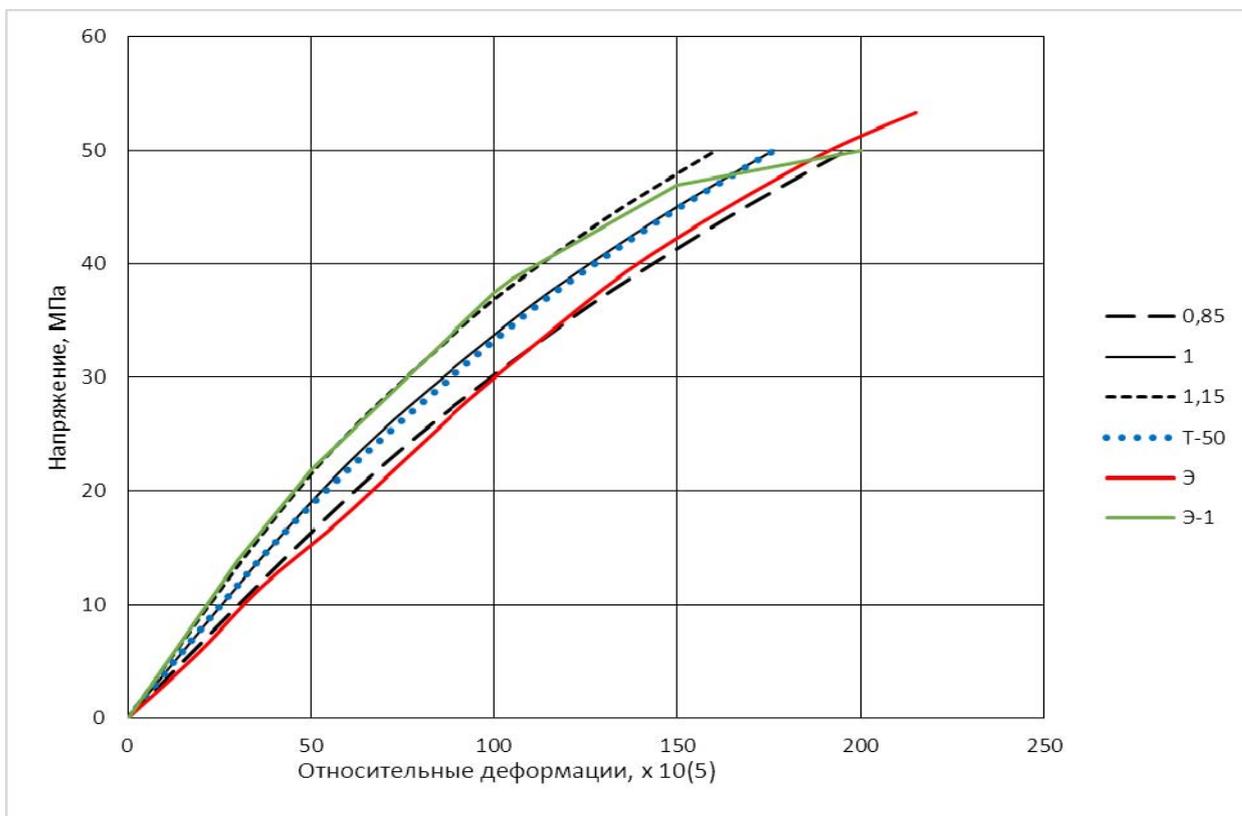


Рис. 3. – Зависимость «напряжения – деформации» бетонов класса В50

0,85; 1; 1,15 – из решения уравнений (ф. 2,7,8-10) для бетонов со значением начального модуля упругости: пониженным за счет возможного влияния суперпластификатора ($E_0 = 32860$ МПа); среднестатистическим ($E_0 = 38660$ МПа); повышенным за счет возможного влияния минерального модификатора ($E_0 = 44460$ МПа); Т-50 – по данным ф.(3) [6]; Э – бетон с низко модульным крупным заполнителем и суперпластификатором ($E_0 = 31700$ МПа); Э-1 – бетон с высоко модульным крупным заполнителем, $E_0 = 46200$ МПа

Из представленных на рис. 3 данных очевидно:

- модификаторы оказывают влияние на характер диаграммы «напряжения-деформации»;
- расчетные диаграммы, полученные по ф.(3) по данным [6] и по результатам решения уравнения ф.(7) с учетом ф. (2,8-10) для традиционных (1) бетонов

практически совпадают;

– при уровне нагружения выше 0,9 возможно некоторое расхождение расчетных и экспериментальных значений диаграммы «напряжения-деформации», что для большинства практических задач не играет значительной роли.

На рис. 4 представлена зависимость «напряжения-деформации» для бетонов класса В30, полученная расчетом на основе данных, представленных на рис. 2.

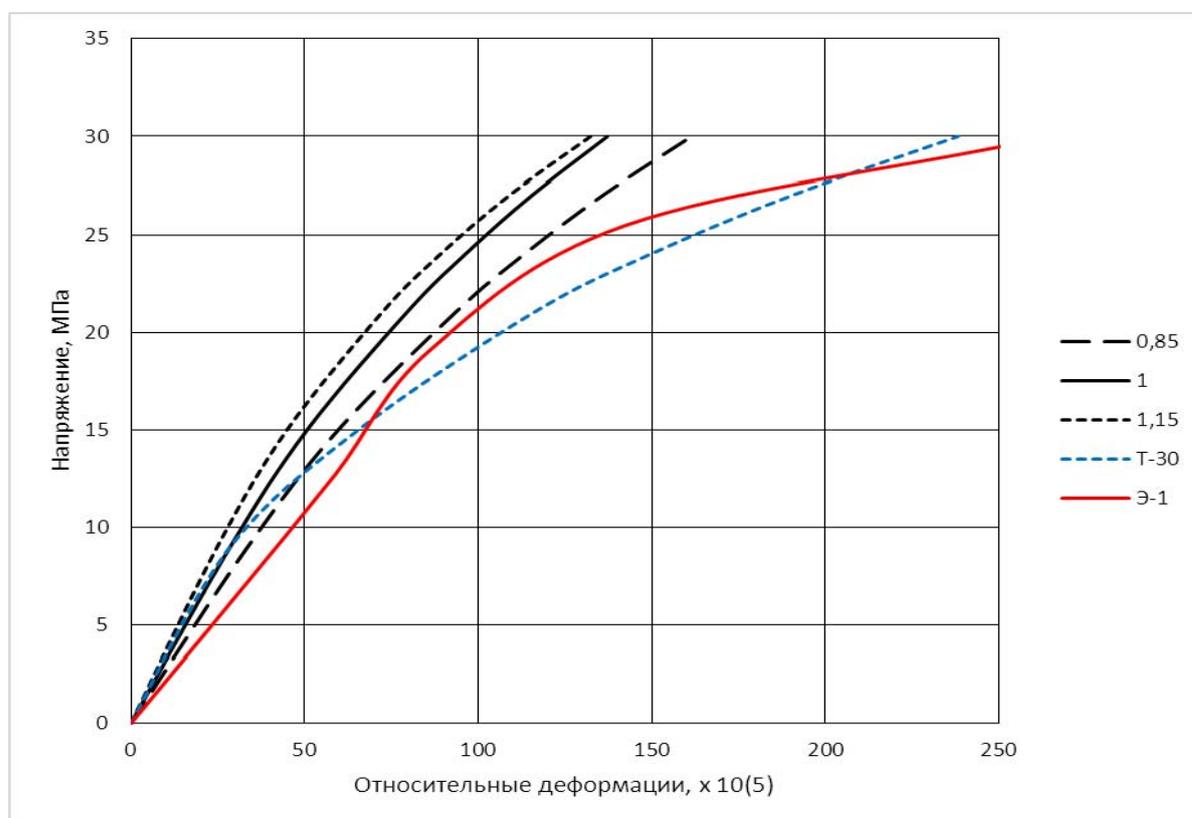


Рис. 4. – Расчетная зависимость «напряжения – деформации» бетонов класса В30

0,85; 1; 1,15 – из решения уравнений (ф. 2,7,8-10) для бетонов со значением начального модуля упругости: пониженным за счет возможного влияния суперпластификатора ($E_0 = 26760$ МПа); среднестатистическим ($E_0 = 31480$ МПа); повышенным за счет возможного влияния минерального модификатора ($E_0 = 36200$ МПа); Т-30 – по данным ф.(3) [6]; Э-1 – бетон с низко модульным заполнителем и суперпластификатором, $E_0 = 21690$ МПа

Из представленных на рис. 4 данных очевидно:

- модификаторы оказывают, как и для бетонов класса В50, влияние на характер диаграммы «напряжения-деформации»;
- расчетные диаграммы, полученные по ф.(3) по данным [6] и по результатам решения уравнения ф.(7) с учетом ф. (2,8-10) для традиционных (1) бетонов существенно различаются.

Таким образом, представление функции E_{σ}/E_0 бетона в виде зависимости от величины приложенного напряжения σ требует экспериментального определения эмпирических коэффициентов, что связано, с учетом значительного количества органо-минеральных модификаторов, оказывающих влияние на константы деформирования бетона и характер диаграммы «напряжения-деформации», со значительным количеством достаточно сложных исследований. Представление функции E_{σ}/E_0 бетона на основе результатов решения уравнения ф.(7) с учетом ф. (2,8-10), позволяет получить со значительно меньшими трудозатратами требуемую зависимость, поскольку такой подход базируется на применении хорошо зарекомендовавшей себя зависимости Саржина (Sargin) и требует только уточнения влияния модификаторов на основные константы деформирования бетона.

Выводы

1. Соотношение приведенного модуля деформаций и начального модуля упругости бетона зависит не только от вида функции $\varepsilon = f(\sigma)$, но и от начального модуля упругости бетона, т.е. для бетонов с различными основными константами деформирования даже при равной прочности, например, в результате введения в состав бетона органо-минеральных модификаторов, зависимость соотношения E_{σ}/E_0 от уровня нагружения «по умолчанию» будет различным.

2. Для описания зависимостей «напряжения-деформации» или «модуль деформаций-уровень нагружения» для бетонов с органо-минеральными

модификаторами целесообразно использовать диаграмму Саржина (Sargin) с учетом влияния модификаторов на основные константы деформирования бетонов.

3. Характер деформирования бетонов с органо-минеральными модификаторами при уровне нагружения выше 0,9 может отличаться от известных для традиционных бетонов закономерностей, в связи, с чем этот вопрос требует специального изучения.

Литература

1. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры. // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986 – с. 7-25.

2. Кургин К.В. К расчету внецентренно-сжатых колонн из керамзитобетона. // Строительство – 2013: материалы научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2013. – с. 24-28.

3. Лихов З.Р. К расчету железобетонных изгибаемых элементов с комбинированным преднапряжением с учетом полных диаграмм деформирования материалов. // Строительство – 2003: материалы научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2003. – с. 43-48.

4. Аль-Ахмади Мухаммед Ахмед Али. Свойства керамзитобетона и конструкций на его основе при предварительном напряжении и повторных нагружениях: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01. – Ростов-на-Дону, 2003. – 24с.

5. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings Management Centre: rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels – 225 p.

6. Тамразян, А.Г., Есяян С.Г. Механика ползучести бетона: монография. – М.: МГСУ, 2012. – 324 с.



7. Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси: Ползучесть. Ч.1: Справ. Под ред. Комохова П.Г. С.-Пб: НПО «Профессионал», 2007. С. 310-322.
8. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Модуль упругости цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян // Бетон и железобетон. - 2013. - №6. - С. 10-13.
9. Sabau M., Onet T., Petean A.I. Hardened properties of self-compacting concrete/ First International Conference for PhD students in Civil Engineering CE-PhD. 2012. Vol. 1. pp. 436 – 442.
10. Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S.A., Khubaev M.S.M. High-quality modified concrete based on mineral additives and superplasticizers of different nature. Innovations and investments. 2015. № 8. pp. 163-166.
11. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. – М. ООО «Типография «Парадиз», 2010. - 258 с.
12. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона. - М.: Стройиздат, 1996. - 416 с.
13. Аксёнов В.Н. К расчету колонн из высокопрочного бетона по недеформированной схеме // Бетон и железобетон.– 2009.– № 1. – С. 24- 26.
14. Маилян, Д.Р., Несветаев Г.В., Халезин С.В., Горцевской А.А. Деформационные свойства и параметрические точки бетонов каркасной структуры // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941

References

1. Karpenko N.I., Muhamediev T.A., Petrov A.N. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij. M.: Strojizdat, 1986. pp. 7-25.
 2. Kurgin K.V. Stroitel'stvo 2013: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Rostov-na-Donu: RGSU, 2013. pp. 24-28.
 3. Lihov Z.R. Stroitel'stvo 2003: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Rostov-na-Donu: RGSU, 2003. pp. 43-48.
 4. Al'-Ahmadi Muhammed Ahmed Ali. Svoystva keramzitofibrobetona i konstrukcij na ego osnove pri predvaritel'nom napryazhenii i povtornyh nagruzheniyah [Properties keramzitobetona and designs based on it pre-tension and repeated loading]: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Rostov-na-Donu, 2003. 24p.
 5. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings Management Centre: rue de Stassart, 36. B-1050 Brussels. 225 p.
 6. Tamrazyan, A.G., Esayan S.G. Mekhanika polzuchesti betona [Mechanics of concrete creep]. M.: MGSU, 2012. 324 p.
 7. Cementy, betony, stroitel'nye rastvory i sukhie smesi: Polzuchest'. [Cements, concretes, mortars and dry mixtures: Creep.] Ch.1: Sprav. pod red. Komokhova P.G. SPb.: NPO «Professional», 2007. pp. 310-322.
 8. Nesvetaev, G.V. Kardumyan G.S. Beton i zhelezobeton. 2013. №6. pp. 10-13.
 9. Sabau M., Onet T., Petean A.I. Hardened properties of self-compacting concrete. First International Conference for PhD students in Civil Engineering CE-PhD. 2012. Vol. 1. pp. 436 – 442.
 10. Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S.A., Khubaev M.S.M. Innovations and investments. 2015. № 8. pp. 163-166.
-



11. Kaprielov S.S., SHEjnfel'd A.V., Kardumyan G.S. Novye modificirovannye betony [The new modified concretes]. M. ООО «Типографиya «Paradiz», 2010. 258 p.
12. Karpenko, N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. M.: Strojizdat, 1996. 416 p.
13. Aksènov V.N. Beton i zhelezobeton. 2009. № 1. pp. 24- 26.
14. Mailyan, D.R., Nesvetaev G.V., Halezin S.V., Gorcevskoj A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941