

Особенности проектирования железобетонных колонн из саморасширяющихся бетонов с добавкой «Эмбэлит»

Л.А.Хомич

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Усовершенствован алгоритм и программа расчета прочности, деформативности и трещиностойкости железобетонных конструкций при различных режимах многократно-повторных нагружений на основе развития научных представлений о влиянии собственного поля напряжений бетонов с РД «Эмбэлит» и СП, а так же установления малоциклового усталостной прочности таких бетонов и пределов усталостной прочности от основных факторов. Выявлены основные закономерности развития собственных деформаций и напряжений бетонов при твердении в условиях ограничения деформаций расширения и без ограничения.

Ключевые слова: особенности проектирования, саморасширяющие бетоны, эмбэлит, расчет прочности железобетонных колонн, малоциклового усталостная прочность, суперпластификаторы, добавка эмбэлит, расчет трещиностойкости железобетонных конструкций, собственные деформации, напряжение бетона.

Одним из основных направлений совершенствования железобетонных конструкций является повышение их усадочной трещиностойкости, что предопределяет применение бетонов с пониженной усадкой, получение которых на основе портландцемента требует минимизации растворной составляющей в составе бетонных смесей, что приводит к снижению их подвижности [1-7]. Учитывая современную тенденцию широкого применения монолитных конструкций, производство которых, как правило, предопределяет применение высокоподвижных, в т.ч. самоуплотняющихся бетонных смесей, структура которых характеризуется повышенной концентрацией растворной составляющей, что приводит к повышению усадочных деформаций и ползучести бетона, проблема обеспечения усадочной трещиностойкости становится актуальной. Для устранения усадки используют бетоны с компенсированной усадкой на основе напрягающих цементов (НЦ) или расширяющих добавок (РД) к портландцементу. В последнее десятилетие в РФ широко применяется РД «Эмбэлит», в т.ч. для самоуплотняющихся и высокопрочных бетонов. Развитие научных

представлений о формировании структуры цементного камня и бетона с указанной добавкой и современными суперпластификаторами (СП) на основе эфиров поликарбоксилатов, выявление и уточнение зависимостей «состав-технология-структура-свойства» таких бетонов для совершенствования нормативной базы и расширения областей их применения представляет актуальную задачу [11-18].

Для более широкого внедрения бетонов с РД «Эмбэлит» в практику строительства необходимо иметь данные о их сопротивлении не только монотонно возрастающим воздействиям, но и немногokrатно повторным усилиям различного уровня и режима. Это вызвано тем, что железобетонные конструкции при эксплуатации могут претерпевать различные сложные нагружения. Так, например, стойки зданий промышленного и гражданского назначения, колонны мостов и эстакад, вертикальные конструкции сооружений бункеров могут испытывать повторные нагружения одного знака, знакопеременные нагружения и т.д. [11-20]. Такие воздействия, как показали ранее выполненные исследования, оказывают значительное влияние на параметры диаграммы деформирования бетона и, в конечном счете, на работе железобетонной конструкции в целом. Программы и алгоритмы расчета были составлены отдельно для повторного нагружения без изменения знака эксцентриситета, с изменением знака эксцентриситета на последнем цикле и для повторных знакопеременных нагружений.

Элемент делится на i_{np} участков, определяются характеристики эпюр моментов от единичной силы. Расчет производится итерационно с монотонным возрастанием внешнего усилия N . При работе элемента без трещин система уравнений статики записывается в следующем виде:

$$B \int_0^{\bar{x}_B} \sigma_B dx - B \int_{x_B}^{\bar{x}_B + \bar{x}_{Bt}} \sigma_{Bt} dx + \sigma_s A_s - \sigma_s A_s - N = 0 \quad (1)$$

$$B \int_0^{\bar{x}_B} \sigma_B x dx - B \int_{x_B}^{\bar{x}_B + \bar{x}_{Bt}} \sigma_{Bt} x dx + \sigma_s A_s a - \sigma_s A_s h_0 \pm Ne = 0, \quad (2)$$

где \bar{x}_B и \bar{x}_{Bt} – высоты сжатой и растянутой зон сечения, $\sigma_B(x)$ и $\sigma_{Bt}(x)$ – напряжения в сжатых и растянутых волокнах

На каждом этапе нагружения определяются усилия, воспринимаемые растянутой зоной бетона:

$$N_{Bt} = B \int_{\bar{x}_B}^{\bar{x}_B + \bar{x}_{Bt}} \sigma_{Bt} dx; \quad M_{Bt} = B \int_{\bar{x}_B}^{\bar{x}_B + \bar{x}_{Bt}} \sigma_{Bt} x dx \quad (3)$$

и проверяется условие

$$M_{Bt(n)} - M_{Bt(n-1)} < 0 \quad \text{или} \quad dM_{Bt}/d\varepsilon_{Bt} = 0 \quad (4)$$

Если (9) не выполняется элемент работает без трещин, после выполнения – в элементе появились трещины. При этом фиксируются: $\varepsilon_{Bt,i}$ – предельная растяжимость бетона и \bar{x}_{Bt} – высота растянутой зоны и определяется глубина развития трещин.

После чего определяются кривизны и прогибы:

$$\kappa_{ki} = \frac{\varepsilon_{Bt,i}}{\bar{x}_{Bt}}, \quad f_{ki} = \sum_{i=1}^{i_{np}} \kappa_{ki} M_{1i} \frac{l}{i_{np}},$$

а также новые значения эксцентриситета. Далее происходит переход к следующей итерации – определяются прогибы при новых значениях моментов. Расчет на данном шаге заканчивается при выполнении условия сходимости для среднего участка элемента $f_{kin} - f_{ki(n-1)} / f_{kin} \leq \alpha$, где n – номер итерации, α – критерий сходимости ($\alpha = 0,001$).

Для повторного однозначного нагружения при выполнении сходимости по прогибам производится проверка $n_i < n_{max}$, где n_i – текущий цикл "нагружения-разгрузки", а n_{max} – принятое количество повторных нагружений. При выполнении условия производится переход к расчету при силе $N_2 = N_1 + \Delta N$. Так повторяется до достижения внешней нагрузкой верхнего значения повторного усилия N_{max}^{rep} .

Затем производится разгрузка элемента до нижнего уровня повторной нагрузки N_{min}^{rep} . На каждом этапе разгрузки решается система уравнений

(1)...(2) с диаграммами " $\sigma_{B(Bf)} - \varepsilon_{B(Bf)}$ " при разгрузке. При построении диаграмм " $\sigma_{B(Bf)} - \varepsilon_{B(Bf)}$ " при разгрузке начало координат располагается в точке исходной диаграммы с координатами $\sigma_{B,max}^{rep}$ и $\varepsilon_{B,max}^{rep}$ ($\sigma_{Bf,max}^{rep}$ и $\varepsilon_{Bf,max}^{rep}$). Диаграмма бетона при разгрузке в новых осях описывается уравнением (5) при этом предельное значение напряжений при разгрузке $\bar{\sigma}_B^{раз} = \sigma_{B,max}^{rip}$. Описанное распространяется лишь на восходящую ветвь диаграммы " $\sigma_{B(Bf)} - \varepsilon_{B(Bf)}$ " в новых координатных осях, нисходящая ветвь не описывается.

В процессе очередного нагружения и разгрузки диаграмма " $\sigma_{B(Bf)} - \varepsilon_{B(Bf)}$ " трансформируется, поскольку с каждым циклом нагружения происходит изменение параметров диаграмм. Если имеет место нагружение без изменения знака эксцентриситета на последнем цикле, то последнее нагружение до разрушения начинается с $N_{min}^{rep} + \Delta N$, в противном случае – при изменении знака эксцентриситета, последнее нагружение начинается с N_1 . Замена знака эксцентриситета учитывается в процессе трансформации диаграмм деформирования различных волокон бетона.

При возрастающем усилии N_k расчет заканчивается после выполнении условия $dN / d\varepsilon_B = 0$, т.е. при достижении экстремума функции " $N - \varepsilon_B$ ".

При повторном знакопеременном нагружении после полной разгрузки осуществляется переход к блоку-счетчику циклов и полуциклов. Полуциклы n_{11}, n_{21}, n_{31} и т.д. означают приложение нагрузки с одной стороны сечения, а n_{12}, n_{22}, n_{32} и т.д. – соответственно с другой. Трансформация диаграмм " $\sigma_B - \varepsilon_B$ " и " $\sigma_{Bf} - \varepsilon_{Bf}$ " производится после каждого полного цикла повторного нагружения, при этом для каждого волокна бетона используются уровни повторного нагружения, полученные на предыдущем цикле.

Как только достигается максимальное количество повторного знакопеременного нагружения, при невыполнении условия $n < n_{max}$, элемент доводится до разрушения возрастающей нагрузкой. Расчет повторяется до выполнения условия $dN/d\varepsilon_B = 0$. Составлены программы и алгоритмы итерационного расчета.

Разработана упрощенная методика приближенной оценки влияния различных режимов однозначного и знакопеременного многократно повторного нагружения на параметры диаграммы деформирования бетона при сжатии и растяжении, удобная для использования в инженерных расчетах.

$$\gamma_{R_B(R_{st}, E_B, E_{st}, \varepsilon_{BR}, \varepsilon_{BRt})}^{rep} = 1 + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \left[\alpha \eta_{B(Bt)}^{rep} - \beta \eta_{B(Bt)}^{rep} \right], \quad (5)$$

Так же произведена оценка адекватности предложенных формул для расчета железобетонных конструкций при малоцикловых нагружениях. Нами рассмотрены вопросы малоциклового усталостной прочности бетонов с добавкой «Эмбэлит» и СП. При малоцикловом повторном нагружении бетона происходит изменение его прочностных и деформативных характеристик. При сравнительно невысоком уровне повторных нагружений.

$\eta^{rep} = \sigma_B^{rep} / R_B \leq \eta_v = R_{сгс}^v / R_B$, (где $R_{сгс}^v$ – соответствует верхней границе микротрещинообразования) с увеличением количества циклов нагружения n до 10...25 процесс изменения механических свойств бетона практически прекращается и их показатели стабилизируются.

С увеличением относительной прочности бетона к началу повторных нагружений β и предварительного обжатия бетона η_{sp} эффект влияния количества повторных нагружений n на величину относительной малоциклового усталостной прочности R_y / R_B несколько снижается. Еще меньшее влияние на относительную малоциклового усталостную прочность оказывает относительная прочность бетона к началу повторных нагружений

β . С увеличением β значения $R_{y,n} / R_B$ и R_y / R_B повышаются. Так, при количестве циклов повторной нагрузки $n = 20$ увеличение β с 0,9 до 1,1 привело к повышению относительной малоцикловой усталостной прочности бетона $R_{y,n} / R_B$ с 0,913 до 0,928. Аналогичный характер носит влияние β на $R_{y,n} / R_B$ и при других значениях n .

Заметное влияние предварительное обжатие оказало также на относительную малоцикловую усталостную прочность бетона. Так, для призм предварительно обжатых с $\eta_{ep} = 0,4$ при $n = 20$ величина $R_{y,n} / R_B$ повысилась на 13% по сравнению с необжатыми призмами. Уменьшение количества циклов повторного нагружения снижает эффект влияния предварительного обжатия.

Для определения относительной малоцикловой усталостной прочности бетона предлагается следующая формула, полученная в результате обработки опытных данных:

$$R_{y,n} / R_B = 1 - \frac{0,06}{\beta} (1 - 0,75 \eta_{ep}) \lg n. \quad (6)$$

Предлагается следующая формула для определения относительного предела усталостной прочности $\eta_y = R_{y,50} / R_B$ в зависимости от относительной прочности бетона к началу повторных нагружений β и уровня предварительного обжатия η_{ep}

$$\eta_y = R_y / R_B = \frac{0,9 \sqrt[3]{\beta}}{1 - 0,1 \eta_{ep}^2}. \quad (7)$$

Таким образом доказано, что при малоцикловом нагружении конструкций многократно повторное растяжение на конструкционные характеристики бетона с РД «Эмбэлит» при последующем сжатии или растяжении существенно влияет. Так, наблюдается снижение призмной прочности до 24%, модуля упругости при сжатии и растяжении до 15%, предельной растяжимости до 19%. При уровне повторных нагружений до

0,55 отмечено повышение прочности бетона с РД «Эмбэлит» на растяжение, а при дальнейшем увеличении уровня до 0,8 - снижение прочности на растяжение до значений меньших аналогичной характеристики исходного бетона [20-24].

Разработана расчетная методика, позволяющая при расчете железобетонных конструкций с высокой степенью точности устанавливать значения коэффициентов, учитывающих изменение характеристик бетона с РД «Эмбэлит» от различных возможных режимов однозначного и знакопеременного повторного нагружения. Предложена также упрощенная методика определения коэффициентов условий работы бетона после повторных нагружений, удобная для выполнения инженерных расчетов конструкций.

Литература

1. Аль-Ахмади Мухаммед Ахмед Али. Свойства керамзитобетона и конструкций на его основе при предварительном напряжении и повторных нагружениях: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2003. 139 с.
2. Айрапетов Г.А., Несветаев Г.В., Егорочкина И.О. Структура и свойства бетонов с компенсированной усадкой на вторичных заполнителях // Бетон и железобетон. 1998. № 2. С. 25-27.
3. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / В.С. Демьянова, В.И. Калашников. М.: АСВ, 2006. 368с.
4. Виноградова Е.В. Высокопрочный быстротвердеющий бетон с компенсированной усадкой: Дисс... канд. техн. наук., Ростов-на-Дону: РГСУ, 2006. 215 с.
5. Блещик Н.П., Рак А.Н., Котов Д.С. Основы прогнозирования технологических и физико-механических свойств самоуплотняющегося

бетона // Проблемы современного бетона и железобетона. Ч.2. Мн: Минсктиппроект, 2009. С. 132–158.

6. Бондарев Г.И. Влияние переменных загрузжений на деформативность и устойчивость железобетонных элементов: Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: ВЗИСИ, 1983. 21с.

7. Звездов А.И. Бетон с компенсированной усадкой для возведения трещиностойких конструкций большой протяженности // Бетон и железобетон. 2001. №4 С. 17 - 20.

8. Иссерс Ф.А., Корев В.И. Влияние знакопеременных нагрузжений на трещиностойкость и деформативность стен силосов // Бетон и железобетон. 1980. №5. С. 14-15.

9. Кокарев А.М. Деформации железобетонных призм при малоцикловом повторном и знакопеременном нагружении // Развитие технологии, расчета и конструирования железобетонных конструкций. М.: Тр. НИИЖБа, 1983. С. 60-63.

10. Кургин К.В. Керамзитоволокно-железобетонные колонны со смешанным армированием: Диссертация канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2013. 142с.

11. Кургин К.В., Маилян Д.Р. Работа керамзитоволокнобетонных колонн при повторных нагрузках // Инженерный вестник Дона, 2012, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/738.

12. Маилян Д.Р., Кургин К.В. Сопротивление керамзитоволокножелезобетонных колонн многократноповторным нагружениям // Инженерный вестник Дона, 2012, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/625.

13. Москвин В. В. Циклическое нагружение элементов конструкций. М. Наука, 1981. 325 с.



14. Несветаев Г.В. Некоторые общие зависимости и их роль в развитии научных представлений о бетоне на напрягающем цементе // Известия РГСУ, 2004. №8. С. 79-85.

15. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Самоуплотняющиеся бетоны: прочность и проектирование состава // Строительные материалы. 2009. № 5. С. 54-57.

16. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Самоуплотняющиеся бетоны: модуль упругости и мера ползучести // Строительные материалы. 2009. № 6. С. 68 - 71.

17. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня // Строительные материалы. 2010. №1. С. 44.

18. О влиянии суперпластификаторов и минеральных добавок на величину начального модуля упругости цементного камня и бетона / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян, Та Ван Фан, Л. Хомич Л.А. // Новые технологии. Майкоп: ФГБОУ ВПО «МГТУ». 2012. Вып. 4. С. 118-121.

19. Погореляк А.П. Исследование работы железобетонных изгибаемых элементов на поперечную силу при многократно-повторных нагрузках: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Киев, 1981. 22 с.

20. Руденко В.В. Критерии малоциклового несущей способности бетона в железобетонных конструкциях // Совершенствование методов расчета и исследование новых типов железобетонных конструкций. Л.: ЛИСИ, 1981. С. 67-71

21. Степанюк В.К., Лобанов А.Т. Особенности работы предварительно напряженных балок при действии статических повторных нагрузок // Строительство и архитектура Белоруссии. 1982. №1. С.32-39.

22. Таршин В.А. Исследование трещиностойкости и деформативности центрально растянутых предварительно напряженных элементов, армированных проволочной арматурой при немногokrатно-повторных нагружениях: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Киев. 1977. 22 с.

23. Pooya Alaei, Bing Li. High-strength concrete exterior beam-column joints with high-yield strength steel reinforcements // Engineering Structures. 2017. Vol. 145. pp. 305-321.

24. Mohamed K. Ismail, Assem A.A. Hassan. An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. 2017. Vol. 145. pp. 97-108.

References

1. Al`-Axmadi Muxammed Axmed Ali. Svoystva keramzitobetona i konstrukcij na ego osnove pri predvaritel`nom napryazhenii i povtorny`x nagruzheniyax [Properties of expanded clay concrete and structures based on it under prestressing and repeated loading]: avtoref. dis.... kand. texn. nauk. Rostov-on-Don, 2003. 139 p.

2. Ajrapetov G.A., Nesvetaev G.V., Egorochkina I.O. Beton i zhelezobeton. 1998. № 2. pp. 25-27.

3. Bazhenov Yu.M. Modificirovanny`e vy`sokokachestvenny`e betony` [Modified high-quality concrete]. ASV, 2006. 368 p.

4. Vinogradova E.V. Vy`sokoprochny`j by`strotverdeyushhij beton s kompensirovannoj usadkoj [High-strength, fast-hardening concrete with compensated shrinkage]: dis... kand. texn. nauk. Rostov-on-Don, 2006. 215 p.

5. Bleshchik N.P., Rak A.N., Kotov D.S. Problemy` sovremennogo betona i zhelezobetona. Ch.2 [Basics of forecasting technological and physical-mechanical properties of self-compacting concrete]. Mn: Minsktipproekt. 2009. pp. 132-158.

6. Bondarev G.I. Vliyanie peremenny`x zagruzhenij na deformativnost` i ustojchivost` zhelezobetonny`x e`lementov [Influence of variable loading on

deformability and stability of reinforced concrete elements]: avtoref. dis.... kand. texn. nauk. M., VZISI, 1983. 21 p.

7. Zvezdov A.I. Beton i zhelezobeton. 2001. №4. pp. 17-20.

8. Issers F.A., Korev V.I. Beton i zhelezobeton. 1980. №5. pp. 14-15.

9. Kokarev A.M. Razvitie texnologii, rascheta i konstruirovaniya zhelezobetonny`x konstrukcij [Deformations of reinforced concrete prisms under low-cycle repeated and alternating loading. Development of technology, calculation and design of reinforced concrete structures]. M. Tr. NIIZhBa. 1983. pp. 60-63.

10. Kurgin K.V. Keramzitofibro-zhelezobetonny`e kolonny` so smeshanny`m armirovaniem [Reinforced concrete columns with mixed reinforcement]: dis.... kand. texn. nauk. Rostov-on-Don, 2013. 142 p.

11. Kurgin K.V., Mailyan D.R. Inzhenerny`j vestnik Dona (Rus), 2012, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/738.

12. Mailyan D.R., Kurgin K.V. Inzhenerny`j vestnik Dona (Rus), 2012, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/625.

13. Moskvina V. V. Ciklicheskoe nagruzhenie e`lementov konstrukcij [Cyclic loading of structural elements]. M. Nauka, 1981. 325 p.

14. Nesvetaev G.V. Izvestiya RGSU. 2004. №8. pp. 79-85.

15. Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N.. Stroitel`ny`e materialy`. 2009. № 5. pp. 54-57.

16. Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N. Stroitel`ny`e materialy`. 2009. № 6. pp. 68-71.

17. Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N.. Stroitel`ny`e materialy`. 2010. №1. P. 44.

18. G.V. Nesvetaev, G.S. Kardumyan, Ta Van Fan, L. Xomich L.A. Novy`e texnologii. Majkop. FGBOU VPO «MGTU». 2012. Vy`p. 4. pp. 118-121.

19. Pogorelyak A.P. Issledovanie raboty zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov na poperechnuyu silu pri nemnogokratno-povtornykh nagruzheniyax [Investigation of the work of reinforced concrete bending elements on the transverse force for slightly repeated loads]: avtoref. dis.... kand. texn. nauk. Kiev, 1981. 22 p.

20. Rudenko V.V. Kriterii malociklovoj nesushhej sposobnosti betona v zhelezobetonnykh konstrukciyax [Criteria of low-cycle load-bearing capacity of concrete in reinforced concrete structures]. Sovershenstvovanie metodov rascheta i issledovanie novykh tipov zhelezobetonnykh konstrukcij. L., LISI, 1981. pp. 67-71

21. Stepanyuk V.K., Lobanov A.T. Stroitel'stvo i arhitektura Belorussii. 1982. №1. pp. 32-39.

22. Tarshin V.A. Issledovanie treshhinostojkosti i deformativnosti central'no rastyanutykh predvaritel'no napryazhennykh elementov, armirovannykh provolochnoj armaturoj pri nemnogokratno-povtornykh nagruzheniyax [Investigation of crack resistance and deformation of centrally stretched prestressed elements reinforced with wire reinforcement for slightly repeated loading]: avtoref. dis.... kand. texn. nauk. Kiev. 1977. 22 p.

23. Pooya Alae, Bing Li. High-strength concrete exterior beam-column joints with high-yield strength steel reinforcements. Engineering Structures. 2017. Vol. 145. pp. 305-321.

24. Mohamed K. Ismail, Assem A.A. Hassan. An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. 2017. Vol. 145. pp. 97-108.