СССР
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ И УСАДКИ БЕТОНА

Москва 1987

gost.e-ecolog.ru

СССР
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора института
Г. Д. ХАСХАЧИХ
6 апреля 1987 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ И УСАДКИ БЕТОНА

Согласованы Главтранспроектом

Москва 1987

УДК 691.327:666.981.2:539.376 (083.75)

© Всесоюзный ордена Октябрьской Революции
научно-исследовательский институт
транспортного строительства, 1987

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящих Методических рекомендациях рассматриваются инженерные способы расчета железобетонных конструкций транспортных сооружений на длительные воздействия на базе теории ползучести.

Основные положения Методических рекомендаций и предлагаемый алгоритм расчета могут быть использованы для построения самых общих (в том числе численных) способов расчета на длительные воздействия при проектировании как транспортных, так и других сооружений из железобетона.

Методические рекомендации уточняют и развивают прикладные методы расчета в соответствии с указаниями действующих СНиП 2.05.03-84 "Мосты и трубы" (п.3.15) и СНиП 2.03.01-84 "Бетонные и железобетонные конструкции (пп. 2.14 и 1.26).

Методика расчета основывается на применении аналитических решений, представленных в форме простых алгебраических выражений. Приведенный способ оценки числовых значений всех параметров, необходимых для расчета, получен в результате выполненного в ЦНИИСе статистического анализа опытных данных, включающих более 50 тысяч измерений кратковременных и длительных деформаций различных бетонов.

Методические рекомендации разработаны в отделении строительных материалов, прочности и долговечности железобетонных конструкций канд.техн.наук Е.Н.Щербаковым и инж. В.Л.Хасиным. В подготовке материалов разд. 2 принимала участие канд.техн.наук Н.Г.Хубова.

Зав. отделением
строительных материалов,
прочности и долговечности
железобетонных конструкций Е.Н.Щербаков

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие Методические рекомендации позволяют существенно уточнить методику расчета железобетонных конструкций, впервые регламентированную для транспортных сооружений в документах [1, 2].

Они распространяются на расчет стержневых железобетонных элементов железнодорожных, автодорожных и городских мостов, работающих без поперечных (нормальных к продольной оси элемента) трещин в бетоне под действием постоянной внешней нагрузки и (или) усилий предварительного напряжения (конструкций отвечающих категориям требований по трещиностойкости 2а и 2б согласно СНиП 2.05.03-84).

1.2. Методика расчета, изложенная в настоящих Методических рекомендациях, основана на предпосылках наследственной теории старения (теории упругоползучего тела) Г.Н.Маслова - Н.Х.Арутюняна. При этом использован предложенный в ЦНИИСе вариант аналитического выражения для семейства кривых удельной ползучести, позволяющий в сравнительно простой форме отразить главные из известных особенностей длительного деформирования бетона как в линейной, так и в нелинейной области [3-9].

1.3. Все расчеты в данной методике осуществляются на базе общепринятых рабочих гипотез феноменологических теорий ползучести [3, 8, 9]. Суммарная деформация бетона под нагрузкой рассматривается как состоящая из трех компонентов:

упругомгновенной деформации, линейно зависящей от вызвавших ее напряжений и полностью обратимой при разгрузке;

деформации ползучести, также линейно зависящей от напряжений, подчиняющейся принципу наложения воздействий с учетом старения бетона и частично обратимой при разгрузке;

деформации ползучести, нелинейно зависящей от напряжений, не подчиняющейся принципу наложения воздействий и полностью необратимой при разгрузке.

Интегральное уравнение связи между деформациями бетона и напряжениями записывается соответственно: для линейной составляющей деформаций - в форме теории упругоползучего тела; для нелинейной составляющей - в форме теории старения [3].

Нарастание во времени модуля упругости бетона после приложения нагрузки не учитывается.

1.4. В целях унификации расчетов транспортных и других видов сооружений на длительные воздействия аналитическое выражение меры ползучести в Методических рекомендациях принято в форме, аналогичной "Рекомендациям по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций"*.

Отличительной особенностью функциональной зависимости для меры линейной ползучести, принятой в настоящей работе, является использование специальным образом подобранной (приведенной) шкалы времени. Это дает возможность простого аналитического описания семейства кривых ползучести стареющего бетона при учете фактического отсутствия их аффинного подобия (согласно С.В.Александровскому [3]). Одновременно обеспечивается лучшее соответствие расчетных кривых среднестатистическим опытным данным и строгое соблюдение физических условий для деформаций последействия при разгрузке [3, 8].

1.5. Влияние быстронатекающей (вслед за приложением нагрузки) части длительных деформаций бетона учтено в Методических рекомендациях в форме вертикальных отрезков кривых ползучести [3]. Одновременно с этим работа содержит данные, позволяющие при необходимости более точно отразить характер нарастания длительных деформаций на указанном начальном участке (в течение нескольких суток после приложения нагрузки).

1.6. Предполагается, что физическая нелинейность деформаций ползучести проявляется при всех уровнях напря-

---

* Бондаренко В. М. О рекомендациях по учету усадки и ползучести бетона при расчете железобетонных конструкций. -Бетон и железобетон, 1985, № 6.

жений, однако наиболее существенно, когда напряжения в бетоне превышают нижний параметрический уровень трещинообразования R_T^o (по О.Я.Бергу [10]).

В целях упрощения процедуры вычислений допускается использование в расчетах линейной теории ползучести, если максимальные суммарные напряжения в бетоне, вызванные приложением постоянной нагрузки и усилий предварительного напряжения, превосходят указанный параметрический уровень не более чем на 20 % (условно-линейная ползучесть).

1.7. Учет нелинейности деформаций ползучести бетона основан в Методических рекомендациях на использовании функции напряжений, отражающей отсутствие аффинного подобия кривых простой ползучести бетона при действии напряжений разного уровня [11]. Соответствующая функция нелинейности предложена также для учета специфики быстронатекающих деформаций.

1.8. Числовые параметры, входящие в аналитические выражения для описания семейств кривых ползучести, а также все другие необходимые для расчетов параметры прочностных и деформационных характеристик бетона приведены в разд.2. Значения этих параметров, обоснованные результатами статистического анализа [11], обеспечивают высокую достоверность расчетной оценки деформационных свойств цементных бетонов.

1.9. В основу принятой в Методических рекомендациях практической методики расчета с учетом ползучести и усадки бетона положен разработанный в ЦНИИСе [12, 13] общий способ решения системы интегральных уравнений совместности деформаций упругих (арматура) и упругопластических (бетон) элементов сечения, осуществляемый путем замены исходных геометрических характеристик железобетонного поперечного сечения специально выбранными обобщенными параметрами P_j (разд.3). Это позволяет математически строго применить хорошо апробированные точные решения, предназначенные для расчета железобетонных сечений с одиночной арматурой, к любым (в том числе сколь угодно сложным) случаям армирования.

Предлагаемый способ расчета, в том числе в самом общем случае(рекомендуемое приложение 1), является математически строгим и точным (в рамках точности предпосылок избранной линейной теории ползучести). Он не накладывает никаких ограничений, касающихся геометрической формы поперечного сечения элемента, расположения в сечении гибких (арматура) или жестких упругих элементов, ориентации плоскости действия равнодействующих внутренних усилий по отношению к главным осям инерции поперечного сечения.

Данный способ инвариантен также по отношению к математической форме записи меры ползучести в реологических уравнениях совместности деформаций бетона и упругих элементов.

1.10. Все расчетные формулы, приведенные в разделах [4-7], относятся к наиболее распространенному в инженерной практике случаю - расчету железобетонных элементов с двойной (многорядной) арматурой, поперечное сечение которых симметрично относительно вертикальной оси, а равнодействующие внешней нагрузки приложены в плоскости симметрии.

Для железобетонных элементов с одиночным армированием предлагаемые расчетные формулы строго соответствуют точному решению для этого частного случая.

1.11. Методика расчета железобетонных элементов, отвечающих условиям п.1.10, с учетом ползучести в линейной постановке (или в предположении условно-линейной ползучести бетона согласно п.1.6) изложена в разд. 4. Расчетные формулы, приведенные в этом разделе, представляют частный случай общего алгоритма решения задачи (см.рекомендуемое приложение 1) и полностью сохраняют математическую строгость и точность.

1.12. Способ учета нелинейной зависимости между деформациями ползучести бетона и напряжениями, содержащийся в разд.5, основан на комбинации двух математически строгих решений. При некоторых упрощающих допущениях это позволяет с достаточным для практики приближением оценить сложный характер перераспределения

усилий в поперечном сечении железобетонного элемента с двойной арматурой в условиях нелинейной ползучести бетона, в том числе при учете скоропреходящего влияния нелинейности деформаций (согласно п.1.7). Погрешность способа по сравнению с точным численным решением (при полном соответствии исходных условий) в большинстве практически встречающихся случаев не превосходит ± 5 %*.

Если влияние нелинейной составляющей деформации исключается из рассмотрения согласно п.1.6, расчетные формулы разд.5 становятся тождественными соответствующим точным формулам разд.4.

1.13. Способ учета влияния усадки бетона на напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов, изложенный в разд.7, содержит допущение об аффинном подобии кривых деформаций усадки и линейной ползучести бетона. Хотя фактически указанное допущение строго не выполняется, оно незначительно сказывается на результатах расчета, но существенно упрощает вычисления.

При этом допущении расчетные формулы, приведенные в разд.7, также являются математически строгими и точными.

1.14. Все расчетные формулы, содержащиеся в разделах 4–7, представлены в виде однотипных по структуре алгебраических выражений, включающих наследственные функции $\overline{\Phi}$ или $\widetilde{\Phi}$ (соответственно для решения задач в линейной или нелинейной постановке).

Числовые значения функций $\overline{\Phi}$ для упрощения процедуры вычислений табулированы в зависимости от двух обобщенных параметров по принципу, предложенному И.Е.Прокоповичем [15], что позволяет существенно упростить вычислительные операции (табл.1 и 2 рекомендуемого приложения 2).

*

В обосновании этой части Методических рекомендаций принял участие канд. техн.наук А.И.Филиппов; использованы результаты теоретических исследований, полученные им в Ленинградском инженерно-строительном институте [14], включая соответствующие алгоритмы и программы расчета на ЭВМ.

Аналогичным образом табулированы числовые значения функции F, входящей в расчетные формулы для определения промежуточных величин приращений напряжений в арматуре и бетоне (табл.5 рекомендуемого приложения 2).

Числовые значения функции $\tilde{\Phi}$ определяются по формулам, исходя из базовых значений функции Φ и табулированных значений дополнительной функции χ учитывающей влияние скоропреходящего характера нелинейной составляющей деформаций ползучести (табл.3 и 4 рекомендуемого приложения 2).

Общая схема расчета железобетонных конструкций транспортного назначения изложена в разд.8 и иллюстрируется двумя примерами (справочное приложение 3).

1.15. Содержащаяся в Методических рекомендациях методика может быть использована для расчета железобетонных элементов не только из обычного тяжелого, но и мелкозернистого бетона (согласно СНиП 2.03.01-84*) с учетом характерных для меры значений параметров в математическом выражении ядра ползучести (см.разд.2).

Предлагаемая методика может быть равным образом использована в расчетах железобетонных конструкций различного назначения с применением других видов бетона при условии, что для этих бетонов обоснованы необходимые числовые параметры деформаций, а также определены предпосылки теории ползучести [16], включая аналитическое выражение соответствующих наследственных функций. В этих случаях корректировке подлежат только табулированные значения функций, приведенные в рекомендуемом приложении 2.

1.16. Приводимая в данной работе методика расчета может быть эффективно использована для расчетной оценки перераспределения усилий (напряжений), вызванного ползучестью и усадкой бетона, а также температурными перепадами в сталежелезобетонных конструкциях пролетных строений мостов (разд.5 СНиП 2.05.03-84), железо-

* СНиП 2.05.03-84 "Мосты и трубы" применение таких бетонов в конструкциях транспортных сооружений в настоящее время не предусматривает.

бетонная часть которых отвечает указанным в п.1.1 требованиям по трещиностойкости.

При соблюдении условий, оговоренных в пп.1.10 и 1.13, все приведенные формулы применимы для расчета поперечных сечений сталежелезобетонных элементов и нуждаются лишь в незначительной корректировке, связанной с принятым в СНиП 2.05.03-84 способом приведения упругих характеристик стали и бетона для этого вида конструкций. При этом целиком сохраняется строгость решений (п.1.9).

2. ЧИСЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА

2.1. Прочностные и деформационные характеристики бетона, применяемые в расчетах железобетонных конструкций (разд.4-7), определяют, как правило, исходя из предусмотренного проектом класса бетона по прочности на сжатие B.

2.2. Класс бетона по прочности на сжатие устанавливается в возрасте 28 суток и контролируется испытанием кубов с размером ребра 150 мм (согласно СТ СЭВ 1406-78)

При наличии необходимых данных рекомендуется учитывать, кроме того, особенности структурных характеристик бетона данного класса, обусловленные влиянием дозировки и качества составляющих бетонной смеси или иными факторами.

При нормировании величин длительных деформаций ползучести и усадки учитывают дополнительно гарантированную прочность (возраст) бетона к моменту приложения длительной нагрузки (началу высыхания), размеры поперечного сечения элементов и влажность среды.

2.3. Нормируемые числовые параметры деформаций приведены в настоящем разделе с обеспеченностью 50 %. При необходимости нормировать значения деформаций с обеспеченностью, отличной от 50 %, последние должны

быть скорректированы с учетом следующих данных коэффициентов вариации:

для начального модуля упругости 0,12;
для предельного значения меры ползучести . 0,22;
для предельного значения деформаций . . . . 0,15.

Прочность и деформации при кратковременном нагружении

2.4. Гарантированное с обеспеченностью 0,95 значение кубиковой прочности бетона при сжатии R_{β}^{G}, МПа, соответствующее возрасту бетона t (при твердении в нормальных температурно-влажностных условиях), определяют из выражения

$$R_{\beta}^{G}(t)=\left[1+\frac{a}{c+B}\left(\frac{t-28}{t+d}\right)\right]B, \qquad (1)$$

где B – класс бетона по прочности на сжатие по п.2.1;

a, c, d – коэффициенты, числовые значения которых назначаются в зависимости от вида используемого цемента (табл.1).

Таблица 1

Вид портландцемента	Числовые значения коэффициентов		
	a, МПа	c, МПа	d, сут.
Обычный	23	55	11
Быстротвердеющий	9	31	6
Шлаковый	39	62	15
Пуццолановый	35	93	8

Соответствующие значения нормативного сопротивления бетона осевому сжатию вычисляют по формуле

$$R_{\beta n}(t)=\left[0,77-0,001R_{\beta}^{G}(t)\right]R_{\beta}^{G}(t). \qquad (2)$$

2.5. Значения начального модуля упругости бетона E_{β}, МПа, при загружении в возрасте t определяют по формуле

$$E_\beta(t) = \frac{400 s R_\beta^c(t)}{s\rho_z + R_\beta^c(t)}, \qquad (3)$$

где ρ_z – удельное (по массе) содержание цементного теста в бетонной смеси;

s – коэффициент, учитывающий влияние вида заполнителя; для тяжелого бетона (N) на гранитном щебне и кварцевом песке s = 135 МПа; для мелкозернистого бетона (M) на кварцевом песке s = 155 МПа (соответствует мелкозернистому бетону группы А по СНиП 2.03.01-84).

При наличии данных о максимальной крупности заполнителя, используемого для приготовления бетона, значения $E_\beta(t)$ по формуле (3) рекомендуется дополнительно умножать на коэффициенты, приведенные в табл.2.

Таблица 2

Максимальная крупность заполнителя, мм	5	20	30	40
Значения коэффициентов	0,94	1,00	1,05	1,10

2.6. Если необходимые данные для расчетов по формуле (3) отсутствуют, значения начального модуля упругости бетона $E_\beta(t)$, МПа, допускается принимать в зависимости от гарантированной прочности бетона на сжатие и подвижности (удобоукладываемости) бетонной смеси по ГОСТ 10181.1-81 согласно табл. 3.

Длительные деформации ползучести и усадки

2.7. Нормативные предельные (при $t \to \infty$) значения меры линейной ползучести бетона, загруженного в возрасте 28 суток, и относительных деформаций усадки по истечении 7 суток твердения во влажных условиях определяют по формулам:

$$C_n(28) = K_c \frac{W + V}{4 + B}; \qquad (4)$$

$$\varepsilon_{sn}(7) = K_s (W + V)^{3/2}, \qquad (5)$$

где W – удельное (по объему) количество воды затворения в бетонной смеси, л/м^3;

V – удельное (по объему) количество вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси, л/м^3;

K_c – безразмерный коэффициент, принимаемый равным $15,5 \cdot 10^{-6}$ для тяжелых и мелкозернистых бетонов;

K_s – безразмерный коэффициент, принимаемый равным: для тяжелых бетонов (N) $0,14 \cdot 10^{-6}$, для мелкозернистых бетонов (M) $0,16 \cdot 10^{-6}$.

2.8. В формулах (4) и (5) количество вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси принимают: для бетонов с воздухововлекающими химическими добавками – по фактическим данным, а при отсутствии таких данных V = 30 л/м^3; для бетонов с пластифицирующими добавками (включая добавки суперпластификаторов) V = 10 л/м^3.

2.9. При отсутствии данных о составе бетонной смеси нормативные значения $C_n(28)$ и $\varepsilon_{sn}(7)$ назначают по табл. 4.

2.10. Предельные (при $t \to \infty$) значения меры линейной ползучести $C(t_o)$ и относительных деформаций усадки $\varepsilon_s(t_w)$, соответствующие фактическим условиям изготовления и эксплуатации конструкций, определяют по формулам:

$$C(t_o) = C_n(28)\xi_{1c}\,\xi_{2c}\,\xi_{3c}; \qquad (6)$$

$$\varepsilon_s(t_w) = \varepsilon_{sn}(7)\xi_{1s}\,\xi_{2s}\,\xi_{3s}, \qquad (7)$$

где $C_n(28)$ и $\varepsilon_{sn}(7)$ – нормативные значения по формулам (4) и (5) или табл.4;

ξ_1, ξ_2, ξ_3 – коэффициенты, учитывающие влияние на ползучесть и усадку соответственно зрелости бетона, размеров поперечного сечения элемента и относительной влажности среды согласно данным табл. 5.

Таблица 3

Вид бетона	Подвижность (удобоукладываемость) бетонной смеси		Значения $E_{\beta}(t)$, ГПа, при гарантированной прочности бетона на сжатие R_{β}^{c}, МПа, в возрасте t, сут.								
	ОК, см	Ж, с	20	25	30	35	40	45	50	55	60
N	-	80-60	-	-	36,5	38	39,5	41	42	43	44
	-	35-30	30	33	35	36,5	38	39,5	40,5	41,5	42,5
	1-2	15-10	29	31,5	33,5	35,5	36,5	37,5	39	39,5	40
	3-4	-	28	30,5	32,5	34,5	36	36,5	37,5	38	38,5
	5-6	-	27	30	31,5	33	34,5	35,5	36	-	-
	9-10	-	26,5	29	30,5	32	33	34	-	-	-
M	-	80-60	-	29	31	32,5	34	-	-	-	-
	-	35-30	24,5	26,5	28,5	30	31	-	-	-	-
	1-2	15-10	23,5	25,5	27,5	28,5	29,5	-	-	-	-
	3-4	-	22,5	24,5	26	27,5	28,5	-	-	-	-
	5-6	-	22	24	25	-	-	-	-	-	-

Примечания: 1. Данные табл.3 соответствуют тяжелым бетонам (N), изготовленным на гранитном щебне с максимальной крупностью 40 мм и кварцевом песке с модулем крупности 2,5 и мелкозернистым бетоном (M) на том же песке. Значения, заключенные в рамку, совпадают с данными СНиП 2.03.01-84.

2. Для бетонов, подвергнутых тепловлажностной обработке, значения $E_{\beta}(t)$ по формуле (3) или табл.3 следует умножить на коэффициент 0,9.

Таблица 4

Вид бетона	Подвижность (удобоукладываемость) бетонной смеси		Значения C_n (28)·10^6, МПа$^{-1}$ для класса бетона									Значения $\varepsilon_{sn}(7)\cdot 10^6$ (независимо от класса бетона)
	ОК,см	Ж,с	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
N	–	80–60	–	–	62	54	48	43	39	36	33	230
	–	35–30	97	80	68	60	53	48	43	41	39	300
	I–2	–	I07	88	75	66	58	55	50	45	43	330
	3–4	–	II3	94	80	70	63	57	50	50	47	365
	5–6	–	II5	I00	84	75	67	62	58	–	–	400
	9–I0	–	I26	I05	9I	8I	73	67	–	–	–	430
M	–	80–60	–	88	75	66	58	–	–	–	–	355
	–	35–30	I23	I02	88	78	7I	–	–	–	–	475
	I–2	–	I29	I09	95	84	76	–	–	–	–	5I0
	3–4	–	I38	II6	I0I	90	82	–	–	–	–	550
	5–6	–	I47	I25	I08	–	–	–	–	–	–	590

Примечания: I. Данные табл. 4 соответствуют бетонам с теми же характеристиками, что и в табл. 3. Значения, заключенные в рамку, совпадают с данными СНиП 2.05.03-84.

2. Для бетонов, подвергнутых тепловлажностной обработке, значения C_n (28) и $\varepsilon_{sn}(7)$, найденные по формулам (4) и (5) или по табл.4, следует умножить на коэффициент 0,9.

3. Значения C_n (28) по формуле (4) или табл. 4 следует, кроме того, умножить на коэффициент, принимаемый равным:

для бетонов, изготовленных на пуццолановом портландцементе I,35;

для бетонов, изготовленных на шлаковом портландцементе при загружении:

в условиях атмосферной влажности I,I5;

во влагонасыщенной среде 0,85;

для бетонов, изготовленных на крупном заполнителе из известняка ..... 0,85.

Таблица 5

1	Относительная прочность бетона в момент загружения $R_b^0(t)/B$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0 и более
	ξ_{1c} ($t_o \leq$ 28 сут.)	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
2	Возраст бетона в момент загружения t, сут.	28 и менее	45	60	90	180	360	720 и более
	ξ_{1c} ($t_o \leq$ 28 сут.)	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
3	Возраст бетона к моменту окончания влажного хранения (тепловлажностной обработки) t_w, сут.	3 и менее	7	28	60	90	180	360 и более
	ξ_{1s}	1,10	1,0	0,95	0,93	0,92	0,91	0,90
4	Модуль открытой поверхности элемента M, $м^{-1}$	0	5	10	20	40	60	80 и более
	ξ_{2c}	0,51	0,65	0,76	0,93	1,11	1,23	1,30
	ξ_{2s}	0,22	0,54	0,66	0,92	1,10	1,18	1,22
5	Относительная влажность среды θ, %	40 и менее	50	60	70	80	90	100
	ξ_{3c}	1,27	1,13	1,00	0,87	0,73	0,60	0,47
	ξ_{3s}	1,14	1,08	1,00	0,91	0,79	0,63	0

Примечания: 1. При назначении коэффициента ξ_{1c} отличным от единицы принимают во всех случаях только одно из двух рядов значений, приведенных в строках 1 и 2 (при $R_б^б / B = 1$ и $t_o = 28$ сут. принимают $\xi_{1c} = 1$);

2. Модуль открытой поверхности элемента M вычисляют как отношение $M = A/V$ (A – площадь поверхности элемента, открытой для испарения влаги, м^2; V – объем элемента, м^3). Для стержневых элементов модуль открытой поверхности допускается вычислять по формуле $M = P/A$ (P – периметр поперечного сечения, соответствующий указанной открытой поверхности, м; A – площадь поперечного сечения элемента, м^2).

3. Относительную влажность среды θ принимают в соответствии с заданием на проектирование; для конструкций, эксплуатируемых на открытом воздухе, значение устанавливают в зависимости от климатического района расположения сооружения согласно СНиП 2.01.01-82, как среднюю относительную влажность наружного воздуха наиболее жаркого месяца.

4. Для районов, относящихся согласно СНиП 2.01.01-82 к 1У климатической зоне, относительную влажность воздуха рекомендуется устанавливать как среднемесячную влажность, соответствующую фактическому времени загружения (начала высыхания) бетона в элементах конструкции.

5. Для типовых конструкций, климатический район которых заранее неизвестен, допускается принимать коэффициенты ξ_{3c} и ξ_{3s} равными 1.

6. Для массивных элементов с открытой удельной поверхностью менее 4 м$^{-1}$ вне зависимости от влажности воздуха принимают $\xi_{3c} = \xi_{3s} = 1$.

7. Для элементов, постоянно находящихся в воде или насыщенном водой грунте, независимо от их массивности принимают $\xi_{2c} = \xi_{2s} = 1$.

2.11. Аналитическое выражение меры линейной ползучести (при постоянных напряжениях $\sigma_b \to 0$) для бетона, загруженного в разных возрастах t_o, принимают в виде:

$$C(t,t_o) = C(28)\cdot\Omega(\bar{t}_o)\cdot f(\bar{t}-\bar{t}_o) = \quad (8)$$
$$= C(28)(c + de^{-\gamma\bar{t}_o})[1-\kappa e^{-\gamma(\bar{t}-\bar{t}_o)}],$$

где $\bar{t}_o = t_o(1+\frac{\omega}{\delta+t_o})$ и $\bar{t} = t(1+\frac{\omega}{\delta+t})$ - приведенное время, сут.;

t_o и t - фактический возраст бетона, сут., (со времени окончания бетонирования) соответственно к моменту приложения нагрузки и в момент наблюдения;

e = 2,718 - основание натурального логарифма.

Если фактический возраст t_o к моменту достижения бетоном передаточной прочности неизвестен (в том числе, всегда после тепловлажностной обработки), приведенный возраст t_o при отпуске предварительного напряжения вычисляют по формуле

$$\bar{t}_o = \frac{1}{\delta}\ln\frac{d}{\xi_{1c}-c}, \quad (9)$$

где коэффициент ξ_{1c} принимают по строкам 1 или 2 табл.5.

Значения $C(28)$ в уравнении (8) определяют по формуле (6), полагая при этом $\xi_{1c} = 1$. Числовые значения параметров принимают равными $c = 0,3$, $\omega = 870$ сут., $\delta = 50$ сут. Значения остальных параметров в (8) и (9) находят по табл.6.

2.12. Аналитическое выражение для удельных деформаций ползучести бетона, вызванных приложением в возрасте t_o постоянных напряжений различного относительного уровня $\eta = 0,78\cdot\sigma_b/R_{bn}(t_o)$ (0,78 - коэффициент, учитывающий заданную обеспеченность нормативных значений

Таблица 6

Вид бетона	Параметры	Числовые значения параметров							
		Для бетонов естественного твердения при модуле открытой поверхности элемента M, $м^{-1}$							Для пропаренных бетонов (независимо от M)
		0	5	10	20	40	60	80	
N	d	0,95	1,05	1,09	1,17	1,29	1,34	1,38	1,09
	κ	0,95	0,92	0,91	0,89	0,87	0,86	0,85	0,91
	$\gamma \cdot 10^3$	0,9	1,2	1,3	1,5	1,8	1,9	2,0	1,3
M	d	0,95	1,02	1,05	1,13	1,25	1,29	1,34	1,05
	κ	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87	0,86	0,92
	$\gamma \cdot 10^3$	0,9	1,1	1,2	1,4	1,7	1,8	1,9	1,2

сопротивления бетона осевому сжатию $R_{бп}$ в возрасте t_o) представляется в виде:

$$C(\eta, t, t_o) = C(t, t_o) + V_t \eta^m C(t, t_o), \qquad (10)$$

где $C(t, t_o)$ – мера линейной ползучести по уравнению (8);

$V_t = V_0 e^{-f}$ – функция, учитывающая смягчение нелинейности деформаций ползучести во времени;

$f = f(\bar{t} - \bar{t}_o) = 1 - \kappa e^{-\delta(\bar{t} - \bar{t}_o)}$ согласно уравнению (8);

V_0 и m – постоянные коэффициенты, принимаемые равными соответственно 3,5 и 4.

2.13. Предельные (при $t \to \infty$) значения характеристики линейной ползучести бетона, загруженного в возрасте t_o, в общем случае определяют по формуле

$$\varphi(t_o) = C(t_o) E_б(t_o), \qquad (11)$$

где $C(t_o)$ находят по формуле (6), а $E_б(t_o)$ – согласно указаниям пп. 2.3 и 2.4 при $t = t_o$.

Аналогичным образом находят промежуточные значения характеристики ползучести $\varphi_t(t_o)$ к любому моменту времени наблюдения $t > t_o$, используя взамен $C(t_o)$ расчетные значения $C(t, t_o)$ по уравнению (8).

Особенности учета быстронатекающих деформаций ползучести

2.14. Под быстронатекающей деформацией ползучести бетона условно понимают ту часть деформаций ползучести, которая реализуется в течение нескольких первых суток после приложения нагрузки в возрасте t.

При необходимости более точного учета развития деформаций ползучести на указанном начальном отрезке времени наблюдения $\bar{t} \leq \bar{t}_j$ для определения меры линейной ползучести используют выражение

$$C(t, t_o) = C(t_j, t_o) \left(\frac{\bar{t} - \bar{t}_o}{\bar{t}_j - \bar{t}_o} \right)^q, \qquad (12)$$

в котором $C(t_j, t_o)$ определяют из уравнения (8) при $t = t_j$.

Числовые значения параметра q в (12) вычисляют по формуле

$$q = 0{,}2 + 0{,}00125\,M \quad (M, \text{ м}^{-1}), \qquad (13)$$

а значения $(\bar{t}_j - \bar{t}_o)$ принимают по табл. 7.

Таблица 7

Числовые значения параметров

Для бетонов естественного твердения в зависимости от модуля открытой поверхности элемента M, м$^{-1}$							Для пропаренных бетонов (независимо от M)
0	5	10	20	40	60	80	
14,8	19,3	21,2	25,0	29,4	35,2	41,8	21,2

При $t > t_j$ нарастание во времени линейной ползучести бетона определяют по уравнению (8).

2.15. При учете нелинейного характера связи между напряжениями и деформациями быстронатекающей ползучести бетона используют выражение (10), в котором принимают $m = 4$, а функцию V_t в виде

$$V_t = V_o \frac{\varkappa}{\varkappa + f}. \qquad (14)$$

Числовые значения параметров V_o и $\varkappa$ назначают в зависимости от проектного класса бетона по табл. 8.

Таблица 8

Класс бетона	B20	B25	B30	B35	B40
V_o	8,4	7,8	7,1	6,5	5,9
$\varkappa$	0,180	0,200	0,220	0,245	0,280

Класс бетона	B45	B50	B55	B60
V_o	5,2	4,6	3,9	3,3
$\varkappa$	0,325	0,390	0,485	0,645

В этом случае функцию (14) с числовыми параметрами из табл. 8 используют как на начальных $t \leq t_j$, так и на последующих $t \geq t_j$ отрезках времени наблюдения, совмещая ее соответственно с выражениями (12) или (8).

2.16. Переход от приведенной $\bar{t}$ к фактической шкале времени t осуществляют с учетом соотношений, представленных в табл. 9.

Таблица 9

Приведенное время $\bar{t}$, сут.	18	52	115	205	340	535	650	860	1125	1535
Фактическое время t, сут.	1	3	7	14	28	60	90	180	360	720

После линейной интерполяции по данным табл.9 фактическое время (возраст) округляют до целых суток.

Для определения более точных соотношений фактического и приведенного времени используют выражения, приведенные в п.2.9.

3. ОБОБЩЕННЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА

3.1. Исходные геометрические характеристики поперечного сечения железобетонного элемента с двойной арматурой (см.рисунок справочного приложения 3) определяют по формулам:

$$\rho_1 = 1 + \frac{y_b^2}{r_b^2}; \quad \rho_2 = 1 + \frac{(y_b')^2}{r_b^2}; \quad \rho_3 = 1 + \frac{y_b \cdot y_b'}{r_b^2}; \qquad (15)$$

$$\mu = A_{ps}/A_b; \quad \mu' = A_{ps}'/A_b,$$

где A_{ps} и A_{ps}' – суммарная площадь нижней ($A_p + A_s$) и верхней ($A_p' + A_s'$) напрягаемой и ненапрягаемой арматуры; $r_b = \sqrt{J_{bx}/A_b}$ – радиус инерции бетонной части сечения относительно оси x; J_{bx} – момент инерции бетонной части сечения относительно той же оси; y_b и y_b' – координаты центров тяжести нижней и верхней арматуры относительно центра тяжести бетонной части сечения; при отсутствии верхней арматуры y_b' – расстояние до крайней верхней фибры сечения.

3.2. Обобщенные геометрические характеристики ρ_1 и ρ_2 поперечного сечения железобетонного элемента вычисляют по формуле

$$\rho_{1,2}=\frac{1}{2}\left[(\rho_1\mu+\rho_2\mu')\pm\sqrt{(\rho_1\mu-\rho_2\mu')^2+4\rho_3^2\mu\mu'}\right], \quad (16)$$

где все исходные геометрические характеристики сечения приняты по п.3.1.

3.3. При многорядном расположении в сечении нижней и (или) верхней напрягаемой и ненапрягаемой арматуры задачу сводят к рассмотрению сечения с двойной заменяющей арматурой. При этом расстояние от центра тяжести одной из заменяющих арматур до центра тяжести бетонного сечения y_b принимают соответствующим ряду арматуры, ближайшей к наиболее напряженной грани сечения, а аналогичную координату центра тяжести второй заменяющей арматуры находят по формуле

$$y_b'=-\frac{r_s^2}{(y_b-y_0)}+y_0, \quad (17)$$

где r_s – радиус инерции всей арматуры, расположенной в сечении, относительно ее центра тяжести;

y_0 – расстояние между центрами тяжести всей арматуры и бетонной части сечения.

Эквивалентные площади заменяющих арматур $\bar{A}_{ps}$ и $\bar{A}'_{ps}$ определяют по формулам:

$$\bar{A}_{ps}=\frac{r_s^2(A_{ps}+A'_{ps})}{r_s^2+(y_b-y_0)^2};\quad \bar{A}'_{ps}=\frac{r_s^2(A_{ps}+A'_{ps})}{r_s^2+(y_b'-y_0)^2}, \quad (18)$$

где $A_{ps}+A'_{ps}$ – приведенная суммарная площадь всей напрягаемой и ненапрягаемой арматуры, расположенной в поперечном сечении (с учетом п.3.4).

3.4. При расчетах по формулам (15) – (18) площади A_s и A'_s ненапрягаемой арматуры, расположенной в сечении, следует, как правило, вводить с учетом фактических соотношений модулей упругости E_s/E_p ненапрягаемой и напрягаемой арматуры (приведенная площадь арматуры).

Влияние ненапрягаемой арматуры допускается не учитывать, если ее площадь составляет менее 20 % суммарного содержания нижней A_{ps} или верхней A'_{ps} арматуры.

4. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

4.1. Предельное (при $t \to \infty$) приращение напряжений в нижней $\Delta\sigma_p$ и в верхней $\Delta\sigma'_p$ напрягаемых арматурах после приложения в возрасте t_o усилия предварительного напряжения и (или) постоянной внешней нагрузки определяют по формулам:

$$\Delta\sigma_p = \frac{1}{\rho_1 - \rho_2}\left[\sigma_{bp}(\bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_2) + \mu'\left(\sigma_{bp}\rho_3 - \sigma_{bp}\rho_2\right)\left(\frac{\bar{\Phi}_1}{\rho_1} - \frac{\bar{\Phi}_2}{\rho_2}\right)\right]; \quad (19)$$

$$\Delta\sigma'_p = \frac{1}{\rho_1 - \rho_2}\left[\sigma'_{bp}(\bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_2) + \mu\left(\sigma_{bp}\rho_3 - \sigma'_{bp}\rho_1\right)\left(\frac{\bar{\Phi}_1}{\rho_1} - \frac{\bar{\Phi}_2}{\rho_2}\right)\right]. \quad (20)$$

Соответствующие приращения напряжений в бетоне на уровнях центров тяжести нижней $\Delta\sigma_b$ и верхней $\Delta\sigma'_b$ арматуры вычисляют по формулам:

$$\Delta\sigma_b = \frac{-1}{\rho_1 - \rho_2}\left[\sigma_{bp}(\rho_1\bar{\Phi}_1 - \rho_2\bar{\Phi}_2) + \mu'\left(\sigma_{bp}\rho_3 - \sigma_{bp}\rho_2\right)(\bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_2)\right]; \quad (21)$$

$$\Delta\sigma'_{bp} = -\frac{1}{\rho_1 - \rho_2}\left[\sigma'_{bp}(\rho_1\bar{\Phi}_1 - \rho_2\bar{\Phi}_2) + \mu(\sigma_{bp}\rho_3 - \sigma'_{bp}\rho_1)(\bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}_2)\right]. \quad (22)$$

В формулах (19) - (22):

σ_{bp} и σ'_{bp} - начальные (при $t = t_o$) напряжения в бетоне на уровнях центров тяжести соответствующих арматур в момент отпуска предварительного напряжения и (или) приложения постоянной нагрузки, определяемые по формулам сопротивления упругих материалов;

$\mu, \mu', \rho_1, \rho_2, \rho_3$ - геометрические характеристики железобетонного сечения, вычисляемые по формулам (15) разд.3;

ρ_1 и ρ_2 - обобщенные геометрические характеристики того же сечения по формуле (16) разд.3;

$\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ - наследственные функции, определяемые согласно п.4.2.

4.2. Значения функций $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ определяют в зависимости от коэффициента ξ_{1c} (из табл.5) и каждого из двух соответствующих параметров:

$$\varphi_{s1} = \lambda_1 \cdot \varphi(28) \quad \text{при} \quad \lambda_1 = \frac{\alpha\rho_1}{1 + \alpha\rho_1}; \quad (23)$$

$$\varphi_{s2} = \lambda_2 \cdot \varphi(28) \quad \text{при} \quad \lambda_2 = \frac{\alpha\rho_2}{1 + \alpha\rho_2}, \quad (24)$$

где $\varphi(28)$ - предельное значение характеристики ползучести бетона при загружении в возрасте t_o = 28 сут., определяемое согласно п.2.13;

$\alpha = E_p / E_b$ – отношение модуля упругости напрягаемой арматуры E_p к модулю упругости бетона E_b, соответствующему его проектному классу.

Числовые значения функций $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ при натяжении арматуры на упоры находят по табл.1, а при натяжении на бетон – по табл.2 рекомендуемого приложения 2, используя в обоих случаях линейную интерполяцию при промежуточных значениях входных параметров φ_S и ξ_{1b}.

4.3. Значения начальных напряжений в бетоне σ_{bp} и σ_{bp} в формулах (19) – (22) вычисляют в зависимости от стадии работы предварительно напряженного элемента, руководствуясь указаниями п.3.14 и обязательного приложения 11 СНиП 2.05.03-84, а также п. 1.28 СНиП 2.03.01-84.

При этом приращения напряжений (первые потери) в напрягаемой арматуре от быстронатекающей ползучести бетона при натяжении на упоры (поз.6 обязательного приложения 11 СНиП 2.05.03-84) определяют по формулам (19), (20), полагая значения наследственных функций $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ равными:

$$\bar{\Phi}_1 = 1 - \nu_{s1}(t_o) \quad \text{и} \quad \bar{\Phi}_2 = 1 - \nu_{s2}(t_o) \qquad (25)$$

и вычисляя $\nu_{s1}(t_o)$ и $\nu_{s2}(t_o)$ по формуле

$$\nu_s(t_o) = [1 + \lambda\,\varphi(28)\cdot \xi_{1c}\,(1-\kappa)]^{-1} \qquad (26)$$

при каждом из двух соответствующих параметров λ_1 и λ_2 по формулам (23), (24) и значениях параметров ξ_{1c} и κ по табл.6 и 7.

При натяжении арматуры на бетон приращения (первые потери) напряжений в ней от быстронатекающей ползучести согласно СНиП 2.05.03-84 не учитывают.

4.4. Приращения напряжений $\Delta\sigma_S$ и $\Delta\sigma_S$ в верхней и нижней ненапрягаемой арматурах на указанных стадиях работы железобетонного элемента также определяют по формулам (19) и (21) или (25), умножая полученный ре-

зультат на отношение модулей упругости ненапрягаемой и напрягаемой арматуры E_s/E_p. При этом приращения напряжений в ненапрягаемой арматуре учитывают согласно п.1.28.СНиП 2.03.01-84 независимо от способа натяжения напрягаемой арматуры.

4.5. Для поперечных сечений с многорядным расположением арматуры все вычисления производят с учетом эквивалентных площадей сечения заменяющих арматур $\bar{A}$ и $\bar{A}'$ и напряжений в бетоне на уровнях центра тяжести этих арматур согласно п.3.3. Во всем остальном процедура вычислений остается без изменений. Приращения напряжений в арматуре и бетоне на уровнях фактического расположения любого ряда напрягаемой или ненапрягаемой арматуры в сечении определяют по линейной интерполяции (экстраполяции). Применительно к ненапрягаемой арматуре учитывают, кроме того, указания п.4.4.

4.6. Для сечений с одиночной напрягаемой и (или) ненапрягаемой арматурой (при $\mu' = 0$) вычисление предельных приращений напряжений в напрягаемой арматуре и бетоне осуществляют по формулам (19) – (22) которые для данного частного случая приводятся к виду:

$$\Delta\sigma_p = \sigma_{bp} \cdot \frac{\bar{\Phi}_1}{\rho_1 \mu}\ ; \qquad (27)$$

$$\Delta\sigma_b = -\sigma_{bp}\bar{\Phi}_1\ . \qquad (28)$$

Приращение напряжений в крайней верхней фибре поперечного сечения с одиночной арматурой вычисляют по формуле

$$\Delta\sigma'_b = -\sigma_{bp} \cdot \frac{\rho_3}{\rho_1}\ \bar{\Phi}_1\ . \qquad (29)$$

Приращения напряжений в ненапрягаемой арматуре определяют с учетом указаний пп.4.4 и 4.5.

5. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

5.1. Предельные (при $t \to \infty$) приращения напряжений в нижней $\Delta\sigma_p$ и верхней $\Delta\sigma'_p$ напрягаемых арматурах после приложения (в возрасте t_0) усилия предварительного напряжения и (или) постоянной внешней нагрузки определяют по формулам:

$$\Delta\sigma_p = \frac{1}{\rho_1-\rho_2}\left\{\sigma_{bp}(\tilde{\Phi}_1-\tilde{\Phi}_2)+\mu'\left[\sigma'_{bp}\rho_3\left(\frac{\tilde{\Phi}'_1}{\rho_1}-\frac{\tilde{\Phi}'_2}{\rho_2}\right)-\right.\right. \quad (30)$$
$$\left.\left.-\sigma_{bp}\rho_2\left(\frac{\tilde{\Phi}_1}{\rho_1}-\frac{\tilde{\Phi}_2}{\rho_2}\right)\right]\right\};$$

$$\Delta\sigma'_p = \frac{1}{\rho_1-\rho_2}\left\{\sigma'_{bp}(\tilde{\Phi}'_1-\tilde{\Phi}'_2)+\mu\left[\sigma_{bp}\rho_3\left(\frac{\tilde{\Phi}_1}{\rho_1}-\frac{\tilde{\Phi}_2}{\rho_2}\right)-\right.\right. \quad (31)$$
$$\left.\left.-\sigma'_{bp}\rho_1\left(\frac{\tilde{\Phi}'_1}{\rho_1}-\frac{\tilde{\Phi}'_2}{\rho_2}\right)\right]\right\}.$$

Соответствующие приращения напряжений в бетоне на уровнях центров тяжести нижней $\Delta\sigma_b$ и верхней $\Delta\sigma'_b$ арматуры вычисляют по формулам:

$$\Delta\sigma_b = -\frac{1}{\rho_1-\rho_2}\left\{\sigma_{bp}(\rho_1\tilde{\Phi}_1-\rho_2\tilde{\Phi}_2)+\mu'\left[\sigma'_{bp}\rho_3(\tilde{\Phi}'_1-\tilde{\Phi}'_2)-\right.\right.$$
$$\left.\left.-\sigma_{bp}\rho_2(\tilde{\Phi}_1-\tilde{\Phi}_2)\right]\right\}; \quad (32)$$

$$\Delta\sigma'_b = -\frac{1}{\rho_1-\rho_2}\left\{\sigma'_{bp}(\rho_1\tilde{\Phi}'_1-\rho_2\tilde{\Phi}'_2)+\mu\left[\sigma_{bp}\rho_3(\tilde{\Phi}_1-\tilde{\Phi}_2)-\right.\right.$$
$$\left.\left.-\sigma'_{bp}\rho_1(\tilde{\Phi}'_1-\tilde{\Phi}'_2)\right]\right\}. \quad (33)$$

5.2. Числовые значения наследственных функций $\tilde{\Phi}_1$, $\tilde{\Phi}'_1$ и $\tilde{\Phi}_2$, $\tilde{\Phi}'_2$, входящие в формулы (30) – (33), определяют в соответствии с выражениями:

$$\tilde{\Phi}_1 = 1-(1-\bar{\Phi}_1)\chi_1\,; \qquad \tilde{\Phi}'_1 = 1-(1-\bar{\Phi}_1)\chi'_1\,;$$
$$\tilde{\Phi}_2 = 1-(1-\bar{\Phi}_2)\chi_2\,; \qquad \tilde{\Phi}'_2 = 1-(1-\bar{\Phi}_2)\chi'_2\,, \qquad (34)$$

где $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ – табулированные значения наследственных функций по табл.1 (при натяжении на упоры) или табл.2 (при натяжении на бетон);

χ – функция, учитывающая влияние начального уровня приложенных напряжений в бетоне, а также отсутствия аффинного подобия соответствующих кривых простой ползучести согласно п.5.3.

5.3. Значения функций χ определяют в зависимости от относительного значения начальных напряжений в бетоне на уровне центра тяжести соответствующей арматуры $\eta = \sigma_{bp}/R_{bn}$ или $\eta' = \sigma'_{bp}/R_{bn}$ и параметров:

$$\varphi_{s1}\varepsilon_{1c} = \lambda_1\varphi(28)\varepsilon_{1c} \qquad \text{при} \quad \lambda_1 = \frac{\alpha\rho_1}{1+\alpha\rho_1}\,; \quad (35)$$

$$\varphi_{s2}\varepsilon_{1c} = \lambda_2\varphi(28)\varepsilon_{1c} \qquad \text{при} \quad \lambda_2 = \frac{\alpha\rho_2}{1+\alpha\rho_2}\,, \quad (36)$$

где λ_1 и λ_2 вычисляют по формулам (23) и (24) при $\varphi(28)$ согласно п.2.13.

Числовые значения функций χ_1 (χ'_1) и χ_2 (χ'_2) при натяжении арматуры на упоры принимают по табл.3, а при натяжении на бетон – по табл.4 рекомендуемого приложения 2.

5.4. Приращения напряжений (первые потери) в напрягаемой арматуре от быстронатекающей ползучести бетона при натяжении на упоры определяют по формулам (30), (31) по методике, аналогичной изложенной в п.4.3. Значения функций $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ вычисляют по формулам (25) и (26), а функций $\tilde{\Phi}_1$, $\tilde{\Phi}'_1$, $\tilde{\Phi}_2$ и $\tilde{\Phi}'_2$ – по формулам (34). Особенность расчета в этом случае заключается только в том, что функции χ в формулах (34) отыскивают в виде частного двух соответствующих значений этих функций по табл.3 и 4 рекомендуемого приложения 2. Аналогичным образом поступают при определении приращений напряже-

ний от быстронатекающей ползучести бетона в ненапрягаемой арматуре независимо от способа натяжения напрягаемой арматуры (см.п.4.4).

5.5. Для случаев многорядного или одиночного армирования предельные значения приращений напряжений в арматуре и бетоне также определяют по формулам (30) - (33), в которых значения нелинейных наследственных функций $\tilde{\Phi}$ находят по формулам (34), исходя из табулированных значений базовых функций $\bar{\Phi}$ по табл.1 или 2 и функций χ по табл.3 или 4 рекомендуемого приложения 2 (в зависимости от способа натяжения напрягаемой арматуры). Во всем остальном алгоритм расчета полностью аналогичен изложенному в предыдущем разд. 4 (пп.4.4 - 4.6). В частности, для поперечных сечений с одиночной напрягаемой и (или) ненапрягаемой арматурой:

$$\Delta\sigma_p = \sigma_{bp} \cdot \frac{\tilde{\Phi}_1}{\rho_1 \mu} \quad ; \tag{37}$$

$$\Delta\sigma_b = -\sigma_{bp} \cdot \tilde{\Phi}_1 \; ; \tag{38}$$

$$\Delta\sigma_b' = -\sigma_{bp} \frac{\rho_3}{\rho_1} \tilde{\Phi}_1 . \tag{39}$$

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕКУЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИРАЩЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ БЕТОНА

6.1. В условиях линейной ползучести приращения напряжений в напрягаемой арматуре $\Delta\sigma_p(t)$ и в бетоне $\Delta\sigma_b(t)$ к любому промежуточному моменту времени наблюдения $t > t_o$ определяют по формулам (19) - (22), но входящие в них наследственные функции $\bar{\Phi}$ заменяют текущими значениями $\bar{\Phi}_t$, которые вычисляют по формулам:

при натяжении арматуры на упоры

$$\bar{\Phi}_t=\bar{\Phi}-[\nu_s(t_o)-(1-\bar{\Phi})]\frac{F(t)}{F(t_o)}\exp[-r(\bar{t}-\bar{t}_o)]; \qquad (40)$$

при натяжении арматуры на бетон

$$\bar{\Phi}_t=\bar{\Phi}-\bar{\Phi}\frac{F(t)}{F(t_o)}\exp[-r(\bar{t}-\bar{t}_o)], \qquad (41)$$

где $r=\gamma\left[\frac{1+c\lambda\varphi(28)}{1+c\lambda\varphi(28)(1-\kappa)}\right]$ при соответствующих значениях λ_1 и λ_2;

$\nu_s(t_o)$ - по формуле (26) при тех же значениях λ_1 и λ_2, остальные параметры по пп.2.9 и 2.11.

Числовые значения наследственных функций $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ для каждого из значений λ_1 и λ_2 в формулах (40) и (41) принимают по табл.1 (при натяжении арматуры на упоры) или по табл. 2 рекомендуемого приложения 2 (при натяжении арматуры на бетон) в полном соответствии с указаниями п.4.2.

Числовые значения функций $F(t)$ и $F(t_o)$ в тех же формулах находят аналогичным образом по табл.5 рекомендуемого приложения 2 независимо от способа натяжения арматуры. При этом значения коэффициента ξ_{1c} определяют по табл.6 соответственно для моментов времени наблюдения t и загружения t_o при каждом из заданных значений λ_1 и λ_2.

6.2. В условиях нелинейной ползучести приращения напряжений в напрягаемой арматуре $\Delta\sigma_p(t)$ и в бетоне $\Delta\sigma_b(t)$ к моменту времени наблюдения $t>t_o$ определяют по формулам (30) - (33) с заменой наследственных функций $\bar{\Phi}$ текущими значениями $\bar{\Phi}_t$. Последние вычисляют по формулам, аналогичным формулам (34), т.е.

$$\tilde{\Phi}_{1t}=1-(1-\bar{\Phi}_{1t})\chi_{1t}; \quad \tilde{\Phi}'_{1t}=1-(1-\bar{\Phi}_{1t})\chi'_{1t};$$
$$\tilde{\Phi}_{2t}=1-(1-\bar{\Phi}_{2t})\chi_{2t}; \quad \tilde{\Phi}'_{2t}=1-(1-\bar{\Phi}_{1t})\chi'_{2t}, \qquad (42)$$

где $\bar{\Phi}_{1t}$ и $\bar{\Phi}_{2t}$ – расчетные значения функций по формулам (40), (41) при соответствующих значениях λ_1 и λ_2.

Значения функции χ_t в (42) определяют по формуле

$$\chi_t = \left\{1 + V_0 \eta^m \beta \left[\beta + (f - \beta) exp\left(\frac{f}{\beta - 1}\right)\right]\right\}^{-\frac{1}{m}}, \qquad (43)$$

где $f = f(\bar{t} - \bar{t}_o) = 1 - \kappa e^{-\gamma(\bar{t} - \bar{t}_o)}$ согласно п.2.9;

$$\beta = \frac{m\lambda\varphi(28)\bar{\varepsilon}_{1c}}{1 + m\lambda\varphi(28)\bar{\varepsilon}_{1c}} .$$

Все числовые параметры, входящие в выражение (43) находят по пп.2.11 – 2.13 и табл.5.

6.3. Допускается использовать более простую аппроксимацию для непосредственного вычисления значений наследственных функций $\bar{\Phi}_t$ во всех расчетных формулах в соответствии с выражением, аналогичным приведенному в обязательном приложении 13 СНиП 2.05.03-84.

$$\tilde{\Phi}_t = \lambda\varphi_t(t_o)\left\{\frac{1,5}{1,6 + \lambda\varphi_t(t_o)} - \frac{\eta^3}{2\left[1 + \lambda\varphi_t(t_o) + 160\varphi_t(t_o)\frac{R_{Bn}}{E_B}\right]^3}\right\}, \qquad (44)$$

где $\varphi_t(t_o)$ – характеристика ползучести бетона к моменту времени наблюдения t согласно п.2.13. При натяжении арматуры на бетон расчетное значение $\varphi_t(t_o)$ уменьшают на величину $\Delta\varphi = (1 - \kappa)\varphi(t_o)$, принимая значение параметра κ по табл.6.

В таких случаях вычисление всех четырех значений наследственной функции $\bar{\Phi}_t$, необходимых для расчетов по формулам (30) – (33), осуществляют только по выражению (44) при соответствующих значениях параметров λ_1 и λ_2 и относительных начальных напряжений в бетоне η и η' на уровнях центров тяжести нижней и верхней арматуры. Надобность в расчетах по п.6.2 и формулам (42), (43) при этом отпадает.

Аналогичным образом допускается приближенно определять также значения наследственных функций Φ_t при решении задач в линейной постановке. Для этого в выражении (44) полагают $\eta = 0$, после чего вычисляют два требуемых значения функции $\bar{\Phi}_t$ и подставляют их в формулы (19) - (22). Формулы (40), (41) из п.6.1 тогда не используют.

Для определения приращений напряжений, обусловленных только быстронатекающей ползучестью бетона значение $\varphi_t(t_o)$ в выражении (44) следует принимать равным $(1-\kappa)\varphi(t_o)$. При этом расчеты по пп.4.3 и 5.4 не производят.

6.4. Выражение (44) применимо равным образом для приближенной расчетной оценки не только текущих $\bar{\Phi}_t$ и $\tilde{\Phi}_t$, но и предельных $\bar{\Phi}$ и $\tilde{\Phi}$ значений наследственных функций, входящих в расчетные формулы разд.4 и 5. При этом в формуле (44) достаточно заменить текущие значения характеристики ползучести $\varphi_t(t_o)$ ее предельными значениями $\varphi(t_o) = \varphi(28)\cdot\xi_{1c}$ (при натяжении арматуры на упоры) или $\kappa\varphi(t_o) = \kappa\varphi(28)\cdot\xi_{1c}$ (при натяжении на бетон).

Полученные таким путем расчетные значения $\bar{\Phi}$ или $\tilde{\Phi}$ подставляют непосредственно в формулы (19)- (22) или (30) - (33), не прибегая к использованию табл.1 - 4 рекомендуемого приложения 2 и опуская промежуточные вычисления по формулам (34).

6.5. Определение приращений напряжений $\Delta\sigma_p(t)$ и $\Delta\sigma_b(t)$ для случаев одиночного и многорядного армирования производится аналогичными способами с учетом указаний пп.4.5, 4.6 и 5.5.

7. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ УСАДКИ БЕТОНА

7.1. Предельные (при $t \to \infty$) приращения напряжений в нижней $\Delta\sigma_{pS}$ и верхней $\Delta\sigma'_{pS}$ напрягаемой арматуре, вызванные воздействием деформаций усадки бетона после окончания (в возрасте t_w) влажного хранения или тепловлажностной обработки, определяют по формулам:

$$\Delta\sigma_{ps}=\frac{q}{\rho_1-\rho_2}\left[\bar{\Phi}_1-\bar{\Phi}_2+\mu'(\rho_3-\rho_2)\left(\frac{\bar{\Phi}_1}{\rho_1}-\frac{\bar{\Phi}_2}{\rho_2}\right)\right]; \qquad (45)$$

$$\Delta\sigma'_{ps}=\frac{q}{\rho_1-\rho_2}\left[\bar{\Phi}_1-\bar{\Phi}_2+\mu(\rho_3-\rho_1)\left(\frac{\bar{\Phi}_1}{\rho_1}-\frac{\bar{\Phi}_2}{\rho_2}\right)\right]. \qquad (46)$$

Соответствующие приращения напряжений в бетоне на уровнях центров тяжести нижней $\Delta\sigma_{bs}$ и верхней $\Delta\sigma'_{bs}$ арматуры вычисляют по формулам:

$$\Delta\sigma_{bs}=-\frac{q}{\rho_1-\rho_2}\left[\rho_1\bar{\Phi}_1-\rho_2\bar{\Phi}_2+\mu'(\rho_3-\rho_2)(\bar{\Phi}_1-\bar{\Phi}_2)\right]; \qquad (47)$$

$$\Delta\sigma'_{bs}=-\frac{q}{\rho_1-\rho_2}\left[\rho_1\bar{\Phi}_1-\rho_2\bar{\Phi}_2+\mu(\rho_3-\rho_1)(\bar{\Phi}_1-\bar{\Phi}_2)\right]. \qquad (48)$$

В формулах (45) – (48) коэффициент пропорциональности $q=\frac{\varepsilon_s(t_w)}{C(t_0)}$, МПа, представляет отношение предельных значений относительной деформации усадки и меры линейной ползучести бетона, определяемых по формулам (6) и (7) разд.2. Значения функций $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ принимают при натяжении арматуры на упоры по табл.1, при натяжении на бетон по табл.2 рекомендуемого приложения 2.

Допускается вычисление функции $\bar{\Phi}_1$ и $\bar{\Phi}_2$ по формуле (44) с учетом указаний пп.6.3 и 6.4.

7.2. При многорядном расположении нижней и (или) верхней арматуры в сечении используют способ определения координат расположения центров тяжести и площадей заменяющих арматур, изложенный в разд.3, с последующим расчетом по формулам (45) – (48).

7.3. При наличии в поперечном сечении только одиночной арматуры ($\mu' = 0$) формулы (45) – (48) приводятся к виду:

$$\Delta\sigma_{ps} = q\,\frac{\bar{\Phi}_1}{\rho_1\mu}\ ; \qquad (49)$$

$$\Delta\sigma_{bs} = -q\,\bar{\Phi}_1\ . \qquad (50)$$

Приращение напряжений в верхней крайней фибре поперечного сечения с одиночной арматурой определяют по формуле

$$\Delta\sigma'_{bs} = -q\,\frac{\rho_3}{\rho_1}\,\bar{\Phi}_1\ . \qquad (51)$$

7.4. Предельные значения приращений напряжений в ненапрягаемой арматуре $\Delta\sigma_{ss}$ и $\Delta\sigma'_{ss}$, вызванных усадкой бетона, определяют аналогичным способом с учетом указаний пп.4.4 и 4.5.

7.5. Приращение напряжений в напрягаемой арматуре $\Delta\sigma_{ps}(t)$ и в бетоне $\Delta\sigma_{bs}(t)$ к любому промежуточному моменту времени $t > t_w$ определяют, используя соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{ps}(t) &= q\,\Delta\sigma_p(t); & \Delta\sigma'_{ps}(t) &= q\,\Delta\sigma'_p(t);\\ \Delta\sigma_{bs}(t) &= q\,\Delta\sigma_b(t); & \Delta\sigma'_{bs}(t) &= q\,\Delta\sigma'_b(t), \end{aligned} \qquad (52)$$

где $\Delta\sigma_p(t)$ и $\Delta\sigma_b(t)$ вычисляют по формулам (19)–(22), полагая в них $\sigma_{bp} = \sigma'_{bp} = 1$ и руководствуясь указаниями разд.6.

8. СХЕМА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

8.1 . Принимая во внимание обычную последовательность изготовления и монтажа сборных железобетонных конструкций транспортных сооружений (в первую очередь, предварительно напряженных), расчет напряженного состояния железобетонных элементов в стадии эксплуатации рекомендуется производить по формулам приведенным в разд.4-7, исходя из двухстадийной схемы приложения постоянной нагрузки.

I стадия: вычисление приращений напряжений,вызванных усилием предварительного обжатия и собственной массой железобетонного элемента с момента времени t_{o1}. В зависимости от относительного уровня начальных напряжений в бетоне σ_{bp} и σ'_{bp}, вычисляемого с учетом передаточной прочности R_{bn} в указанной стадии, используют формулы (19) - (22) или (30) - (33).

II стадия: вычисление приращений напряжений, вызванных приложением постоянной эксплуатационной нагрузки в возрасте бетона. Для расчета изменения напряжений в этой стадии используют только формулы (19) - (22).

8.2. Входящие в указанные формулы значения функции определяют по таблицам рекомендуемого приложения 2 и формулам (34). Необходимые для этого значения коэффициента ξ_{1c} принимают по табл.5 разд.2 в зависимости от передаточной прочности или фактического возраста бетона с учетом стадии приложения нагрузки.

Значения характеристики ползучести бетона независимо от рассматриваемой стадии вычисляют по формуле (11), полагая $t_o = 28$ сут.

8.3. Суммарное значение приращений напряжений от ползучести бетона находят как алгебраическую сумму указанных величин, вычисленных для обеих стадий согласно п.8.1.

8.4. Приращения напряжений в арматуре и бетоне, вызванные воздействием усадки бетона и вычисленные со-

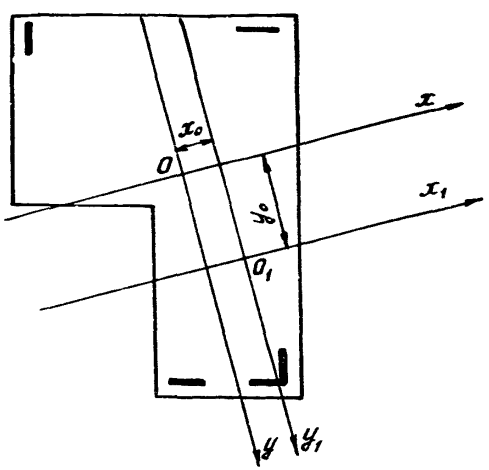
гласно разд.7, алгебраически суммируют с указанными в п.8.3 приращениями напряжений от ползучести бетона. В целях упрощения расчетов допускается принимать, что начало высыхания (начало воздействия усадки) t_w совпадает со временем t_{o1} начала 1 стадии по п.8.1. При отсутствии данных о фактическом возрасте t_w допускается принимать его равным 7 суткам.

8.5. Текущие значения напряжений в напрягаемой (ненапрягаемой) арматуре и в бетоне к любому заданному моменту времени наблюдения t определяют как алгебраическую сумму начальных и соответствующих приращений напряжений во времени с учетом указаний п.1.28 СНиП 2.03.01-84.

Приложение 1
Рекомендуемое

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В УСЛОВИЯХ ЛИНЕЙНОЙ (УСЛОВНО-ЛИНЕЙНОЙ) ПОЛЗУЧЕСТИ

1. Для расчета железобетонного сечения произвольной формы используют систему координат yOx, совпадающую с главными осями инерции бетонной части сечения и, кроме того, систему координат $y_1O_1x_1$, получающуюся параллельным переносом системы координат yOx до совмещения начала координат с центром тяжести упругой части сечения O_1 (рисунок).



Общий случай расчета железобетонного элемента

2. Текущие напряжения в бетоне и приращения напряжений в упругих элементах сечения определяют по формулам

$$\sigma_{\beta}(t,y,x)=(1,y,x)B\begin{bmatrix}N_{\beta}(t)\\M_{\beta x}(t)\\M_{\beta y}(t)\end{bmatrix}; \qquad (1)$$

$$\Delta\sigma_{s}(t,y,x)=(1,y,x)L\begin{bmatrix}N_{\beta}(t_o)-N_{\beta}(t)\\M_{\beta x}(t_o)-M_{\beta x}(t)\\M_{\beta y}(t_o)-M_{\beta y}(t)\end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где $N_{\beta}(t)$, $M_{\beta x}(t)$, $M_{\beta y}(t)$ – нормальная сила и изгибающие моменты относительно соответствующих осей в бетоне в момент времени t;

$N_{\beta}(t_o), M_{\beta x}(t_o), M_{\beta y}(t_o)$ – то же, в момент времени t_o;

L, B – матрицы податливости соответственно для упругой и бетонной частей сечения.

Матрицы податливости имеют вид:

$$L=\frac{1}{D}\begin{bmatrix}a_1 & a_2 & a_3\\ a_2 & J_{sy} & -J_{syx}\\ a_3 & -J_{syx} & J_{sx}\end{bmatrix}; B=\begin{bmatrix}1/A_{\beta} & 0 & \\ & 1/J_{\beta x} & \\ 0 & & 1/J_{\beta y}\end{bmatrix}, (3)$$

где $$a_1 = \frac{D}{A_s} - a_2 y_o - a_3 x_o ;$$

$$a_2 = -y_o J_{sy} + x_o J_{sxy} ; \qquad (4)$$

$$a_3 = -x_o J_{sx} + y_o J_{sxy} ;$$

$$D = J_{sx} J_{sy} - J^2_{sxy} ; \qquad (5)$$

A_s, A_b – площади соответственно упругой и бетонной частей сечения;

J_{bx}, J_{by} – главные моменты инерции бетона сечения относительно осей Ox и Oy соответственно;

J_{sx}, J_{sy}, J_{syx} – моменты инерции упругой части сечения относительно осей $O_1 x_1$ и $O_1 y_1$ и центробежный момент инерции в системе координат $y_1 O_1 x_1$;

x_o, y_o – координаты центра тяжести упругой части сечения 0_1 в системе координат yOx.

3. Усилия, воспринимаемые бетонной частью сечения, определяют по формуле

$$\begin{bmatrix} N_b(t) \\ M_{bx}(t) \\ M_{by}(t) \end{bmatrix} = \left[\sum_{i=1}^{m} T_i H_i\right] \cdot \begin{bmatrix} N_b(t_o) \\ M_{bx}(t_o) \\ M_{by}(t_o) \end{bmatrix}, \qquad (6)$$

где $$T_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m} \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_j}\right)^{-1} \cdot \left(B^{-1} L - \frac{1}{\rho_j}[1]\right) \qquad (7)$$

при $j = 1, \ldots, m$; для каждого фиксированного $i = 1, \ldots, m$, кроме $j = i$;

m – число отличных друг от друга значений параметров ρ_1, ρ_2 и ρ_3;

$H_i = 1 - \bar{\varphi}_{ti}$ – коэффициент затухания напряжений в бетоне при $\lambda_i = \frac{n_1 \rho_i}{1 + n_1 \rho_i}$ определяется в соответствии с п.6.1 Методических рекомендаций;

n_1 – отношение модуля упругости упругих элементов к модулю упругости бетона;

B^{-1} – матрица, обратная матрице B ;

$[1]$ – единичная матрица.

Параметры ρ_1, ρ_2 и ρ_3 определяют как корни кубического уравнения

$$\rho_3 - b_1 \rho^2 + b_2 \rho - b_3 = 0. \qquad (8)$$

Значения параметров вычисляют по формулам:

$$\rho_1 = \frac{b_1}{3} + \frac{2}{3}\sqrt{b_1^2 - 3b_2}\cos\frac{\omega}{3}\ ; \qquad (9)$$

$$\rho_{2,3} = \frac{b_1}{3} - \frac{2}{3}\sqrt{b_1^2 - 3b_2}\cos\left(\frac{\omega}{3} \pm \frac{\pi}{3}\right), \qquad (10)$$

где

$$\omega = \arccos\left[\frac{2\left(\frac{b_1}{3}\right)^3 - \frac{b_1 b_2}{3} + b_3}{2\sqrt{\left(\frac{b_1^2}{3} - b_2\right)^3}}\right]\ ; \qquad (11)$$

$$b_1 = \frac{A_s}{A_B} + \frac{J_{sy}}{J_{By}} + \frac{J_{sx}}{J_{Bx}} + \frac{A_s x_o^2}{J_{By}} + \frac{A_s y_o^2}{J_{Bx}}; \qquad (12)$$

$$b_2 = \frac{D}{J_{bx} J_{by}} + \frac{A_s (y_0^2 J_{sy} + x_0^2 J_{sx} - 2 x_0 y_0 J_{syx})}{J_{bx} J_{by}} + \\ + \frac{A_s}{A_b} \left(\frac{J_{sx}}{J_{by}} + \frac{J_{sx}}{J_{bx}} \right); \qquad (13)$$

$$b_3 = \frac{A_s D}{A_b J_{bx} J_{by}} . \qquad (14)$$

4. С учетом пп.2 и 3 текущие напряжения в бетоне и приращения напряжений в упругих элементах определяют по формулам:

$$\sigma_b(t, y, x) = (1, y, x) B \left[\sum_{i=1}^{m} T_i H_i \right] \begin{bmatrix} N_b(t_0) \\ M_{bx}(t_0) \\ M_{by}(t_0) \end{bmatrix}; \qquad (15)$$

$$\Delta\sigma_s(t, y, x) = (1, y, x) B \left[\sum_{i=1}^{m} T_i \bar{\Phi}_{ti} \frac{1}{\rho_i} \right] \begin{bmatrix} N_b(t_0) \\ M_{bx}(t_0) \\ M_{by}(t_0) \end{bmatrix}, \qquad (16)$$

где y, x – координаты рассматриваемой точки сечения в системе координат yOx совпадающей с главными осями инерции бетонной части сечения.

5. При $m = 3$, в частности для поперечного сечения произвольной формы с произвольным расположением упругих элементов ($\rho_1 \neq \rho_2 \neq \rho_3$), формула (16) приводится к виду

$$\Delta\sigma_s(t, y, x) = (1, y, x) B \left[\frac{\bar{\Phi}_1 \frac{1}{\rho_1}}{\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right)\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_3}\right)} \left(B^{-1} L - \frac{1}{\rho_2}[1]\right)\left(B^{-1} L - \frac{1}{\rho_3}[1]\right) + \right.$$

$$+\frac{\bar{\Phi}_2\frac{1}{\rho_2}}{\left(\frac{1}{\rho_2}-\frac{1}{\rho_1}\right)\left(\frac{1}{\rho_2}-\frac{1}{\rho_3}\right)}\left(B^{-1}L-\frac{1}{\rho_1}[1]\right)\left(B^{-1}L-\frac{1}{\rho_3}[1]\right)+$$

$$+\frac{\frac{1}{\rho_3}\bar{\Phi}_3}{\left(\frac{1}{\rho_3}-\frac{1}{\rho_1}\right)\left(\frac{1}{\rho_3}-\frac{1}{\rho_2}\right)}\left(B^{-1}L-\frac{1}{\rho_2}[1]\right)\left(B^{-1}L-\frac{1}{\rho_1}[1]\right)\Bigg]\begin{bmatrix}N_g(t_o)\\ M_{gx}(t_o)\\ M_{gy}(t_o)\end{bmatrix}. \quad (17)$$

При $m = 2$, в частности, для железобетонного поперечного сечения, имеющего две оси симметрии ($\rho_2 = \rho_3 \neq \rho_1$)

$$\Delta\sigma_S(t,y,x)=(1,y,x)B\Bigg[\frac{\bar{\Phi}_1\frac{1}{\rho_1}}{\left(\frac{1}{\rho_1}-\frac{1}{\rho_2}\right)}\left(B^{-1}L-\frac{1}{\rho_2}[1]\right)+$$

$$+\frac{\bar{\Phi}_2\frac{1}{\rho_2}}{\frac{1}{\rho_2}-\frac{1}{\rho_1}}\left(B^{-1}L-\frac{1}{\rho_1}[1]\right)\Bigg]\begin{bmatrix}N_g(t_o)\\ M_{gx}(t_o)\\ M_{gy}(t_o)\end{bmatrix}. \quad (18)$$

При $m = 1$, в частности, для поперечного сечения произвольной формы с равномерно распределенной по площади арматурой ($\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = A_S / A_g$)

$$\Delta\sigma_S(1,y,x)=(1,y,x)B\,\frac{\bar{\Phi}_1}{\rho_1}\begin{bmatrix}N_g(t_o)\\ M_{gx}(t_o)\\ M_{gy}(t_o)\end{bmatrix}. \quad (19)$$

6. Для наиболее распространенного в инженерных расчетах случая (железобетонное сечение симметрично относительно вертикальной оси) матрица L в формуле (17) принимает вид:

$$L = \begin{bmatrix}\frac{1}{A_S}+\frac{y_o^2}{J_{Sx}} & -\frac{y_o}{J_{Sx}} & 0\\ -\frac{y_o}{J_{Sx}} & \frac{1}{J_{Sx}} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{J_{Sy}}\end{bmatrix}. \quad (20)$$

Текущие напряжения в бетонной части сечения и приращения напряжений от ползучести в упругих элементах при этом определяют по формулам:

$$\sigma_B(t)=\frac{1}{\rho_1-\rho_2}\left[\sigma_B(t_0)(\rho_1 H_1-\rho_2 H_2)-\sigma_S(\infty)\rho_1\rho_2(H_1-H_2)\right]+ \\ +\frac{M_{By}(t_0)}{J_{By}}H_3\ ; \qquad (21)$$

$$\Delta\sigma_S(t)=\frac{1}{\rho_1-\rho_2}\left[\sigma_B(t_0)(\bar{\varphi}_{t1}-\bar{\varphi}_{t2})-\right. \\ \left.-\sigma_S(\infty)(\bar{\varphi}_{t1}\rho_2-\bar{\varphi}_{t2}\rho_1)\right]+\frac{M_{By}(t_0)}{J_{By}\rho_3}\bar{\varphi}_{t3}, \qquad (22)$$

где $\sigma_B(t_0)=\frac{N_B(t_0)}{A_B}+\frac{M_{Bx}(t_0)}{J_{Bx}}y$;

$$\sigma_S(\infty)=\frac{N_B(t_0)}{A_S}+\frac{M_{Bx}(t_0)-N_B(t_0)y_0}{J_{Sx}}(y-y_0). \qquad (23)$$

Параметры ρ_1, ρ_2 и ρ_3 определяют по формулам:

$$\rho_{1,2}=\frac{1}{2}\left[\frac{A_S}{A_B}+\frac{J_S+A_S y_0^2}{J_{Bx}}\pm\sqrt{\left(\frac{A_S}{A_B}+\frac{J_{Sx}+A_S y_0^2}{J_{Bx}}\right)^2-4\frac{A_S J_{Sx}}{A_B J_{Bx}}}\right], \qquad (24)$$

$$\rho_3=\frac{J_{Sy}}{J_{By}}\ . \qquad (25)$$

7. Учет усадки бетона осуществляют по выше приведенным формулам, заменяя в них: при определении текущих напряжений в бетонной части сечения – усилие $N_B(t_0)$ на величину $-q A_B$ и функции H_i на соответствующие функции $\bar{\varphi}_i$; при определении приращений напряжений в упругих элементах – усилие $N_B(t_0)$ на величину $q A_B$.

В обоих случаях $M_{By}(t_0)$ и $M_{Bx}(t_0)$ принимают равным нулю, а коэффициент q – согласно п.7.1 .

Приложение 2
Рекомендуемое

ЧИСЛОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ФУНКЦИИ $\bar{\Phi}$ И ФУНКЦИЙ χ И F

Таблица 1

Числовые значения наследственной функции $\bar{\Phi}$ (натяжение арматуры на упоры)

φ_s	Значения коэффициента ξ_{1c} (по табл.5 основного текста)					
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
0	0	0	0	0	0	0
0,02	0,0079	0,0119	0,0158	0,0197	0,0236	0,0275
0,04	0,0158	0,0236	0,0313	0,0389	0,0465	0,0541
0,06	0,0235	0,0350	0,0464	0,0576	0,0687	0,0797
0,08	0,0311	0,0463	0,0612	0,0758	0,0902	0,1044
0,10	0,0386	0,0573	0,0756	0,0936	0,1111	0,1283
0,12	0,0460	0,0682	0,0898	0,1108	0,1314	0,1514
0,14	0,0533	0,0789	0,1036	0,1277	0,1510	0,1737
0,16	0,0606	0,0893	0,1171	0,1440	0,1700	0,1952
0,18	0,0677	0,0996	0,1304	0,1600	0,1885	0,2160
0,20	0,0747	0,1097	0,1433	0,1756	0,2065	0,2361
0,25	0,0918	0,1343	0,1745	0,2128	0,2491	0,2835
0,30	0,1084	0,1577	0,2041	0,2477	0,2886	0,3272
0,35	0,1245	0,1802	0,2321	0,2804	0,3254	0,3674
0,40	0,1400	0,2018	0,2588	0,3113	0,3597	0,4044
0,45	0,1551	0,2225	0,2840	0,3403	0,3916	0,4386
0,50	0,1696	0,2423	0,3081	0,3676	0,4214	0,4703
0,55	0,1838	0,2614	0,3309	0,3933	0,4493	0,4995
0,60	0,1975	0,2797	0,3527	0,4175	0,4753	0,5267
0,65	0,2108	0,2973	0,3734	0,4404	0,4996	0,5518
0,70	0,2237	0,3143	0,3932	0,4621	0,5223	0,5751
0,75	0,2363	0,3305	0,4120	0,4825	0,5437	0,5968
0,80	0,2485	0,3462	0,4299	0,5018	0,5637	0,6170

Таблица 2

Числовые значения наследственной функции $\bar{\Phi}$
(натяжение арматуры на бетон)

φ_s	Значения коэффициента ξ_{1c} (по табл.5 основного текста)					
	0,4	0,6	0,8	1,0	1.2	1,4
0	0	0	0	0	0	0
0,02	0,0073	0,0109	0,0145	0,0181	0,0217	0,0253
0,04	0,0145	0,0217	0,0288	0,0358	0,0428	0,0499
0,06	0,0216	0,0322	0,0427	0,0531	0,0633	0,0735
0,08	0,0286	0,0426	0,0564	0,0699	0,0832	0,0964
0,10	0,0355	0,0528	0,0697	0,0863	0,1026	0,1185
0,12	0,0423	0,0628	0,0828	0,1023	0,1214	0,1400
0,14	0,0491	0,0727	0,0956	0,1179	0,1396	0,1607
0,16	0,0558	0,0823	0,1081	0,1330	0,1573	0,1808
0,18	0,0623	0,0918	0,1204	0,1479	0,1745	0,2002
0,20	0,0688	0,1012	0,1323	0,1624	0,1913	0,2190
0,25	0,0845	0,1239	0,1613	0,1971	0,2311	0,2634
0,30	0,0998	0,1456	0,1888	0,2296	0,2681	0,3046
0,35	0,1147	0,1664	0,2149	0,2603	0,3027	0,3426
0,40	0,1290	0,1865	0,2398	0,2849	0,3351	0,3777
0,45	0,1429	0,2057	0,2634	0,3166	0,3653	0,4103
0,50	0,1563	0,2241	0,2860	0,3423	0,3936	0,4406
0,55	0,1694	0,2419	0,3073	0,3666	0,4202	0,4687
0,60	0,1821	0,2590	0,3278	0,3895	0,4451	0,4949
0,65	0,1944	0,2754	0,3473	0,4113	0,4684	0,5192
0,70	0,2063	0,2913	0,3660	0,4320	0,4902	0,5418
0,75	0,2180	0,3064	0,3838	0,4514	0,5108	0,5629
0,80	0,2293	0,3211	0,4065	0,4699	0,5302	0,5827

Таблица 3

Числовые значения функции χ (натяжение арматуры на упоры)

φ_s ξ_{1c}	Относительный уровень напряжений в бетоне η							
	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,05	0,9975	0,9962	0,9945	0,9923	0,9894	0,9859	0,9816	0,9765
0,10	0,9953	0,9929	0,9897	0,9856	0,9804	0,9741	0,9665	0,9576
0,15	0,9934	0,9899	0,9855	0,9798	0,9726	0,9640	0,9538	0,9421
0,20	0,9916	0,9874	0,9818	0,9747	0,9659	0,9554	0,9431	0,9291
0,25	0,9901	0,9851	0,9785	0,9702	0,9600	0,9479	0,9340	0,9182
0,30	0,9887	0,9830	0,9755	0,9662	0,9548	0,9414	0,9260	0,9088
0,35	0,9874	0,9811	0,9729	0,9627	0,9503	0,9357	0,9191	0,9007
0,40	0,9863	0,9794	0,9706	0,9595	0,9462	0,9307	0,9131	0,8936
0,45	0,9852	0,9779	0,9684	0,9567	0,9426	0,9262	0,9077	0,8874
0,50	0,9843	0,9765	0,9665	0,9541	0,9393	0,9222	0,9030	0,8819
0,55	0,9834	0,9753	0,9648	0,9518	0,9364	0,9186	0,8987	0,8770
0,60	0,9826	0,9741	0,9632	0,9497	0,9337	0,9153	0,8949	0,8727
0,65	0,9819	0,9731	0,9617	0,9478	0,9313	0,9124	0,8914	0,8687
0,70	0,9813	0,9721	0,9604	0,9461	0,9291	0,9097	0,8883	0,8652
0,75	0,9807	0,9712	0,9592	0,9445	0,9271	0,9073	0,8855	0,8620
0,80	0,9801	0,9704	0,9581	0,9430	0,9253	0,9051	0,8829	0,8591

Таблица 4

Числовые значения функции χ (натяжение арматуры на бетон)

$\varphi_s \xi_{1c}$	Относительный уровень напряжений в бетоне η							
	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,05	0,9980	0,9970	0,9957	0,9939	0,9917	0,9889	0,9856	0,9816
0,10	0,9964	0,9945	0,9920	0,9888	0,9848	0,9799	0,9742	0,9674
0,15	0,9949	0,9923	0,9889	0,9845	0,9791	0,9726	0,9651	0,9564
0,20	0,9936	0,9904	0,9863	0,9809	0,9744	0,9667	0,9577	0,9477
0,25	0,9926	0,9889	0,9840	0,9779	0,9705	0,9618	0,9518	0,9407
0,30	0,9917	0,9875	0,9821	0,9754	0,9672	0,9577	0,9470	0,9352
0,35	0,9909	0,9863	0,9805	0,9732	0,9645	0,9544	0,9431	0,9308
0,40	0,9902	0,9853	0,9791	0,9714	0,9622	0,9517	0,9399	0,9273
0,45	0,9896	0,9845	0,9779	0,9699	0,9603	0,9494	0,9374	0,9245
0,50	0,9891	0,9838	0,9769	0,9686	0,9588	0,9477	0,9353	0,9223
0,55	0,9886	0,9831	0,9761	0,9676	0,9575	0,9461	0,9337	0,9206
0,60	0,9883	0,9826	0,9754	0,9669	0,9564	0,9450	0,9325	0,9194
0,65	0,9880	0,9822	0,9749	0,9660	0,9556	0,9440	0,9315	0,9184
0,70	0,9878	0,9819	0,9744	0,9654	0,9550	0,9434	0,9308	0,9178
0,75	0,9875	0,9816	0,9740	0,9650	0,9545	0,9428	0,9304	0,9175
0,80	0,9874	0,9814	0,9737	0,9646	0,9541	0,9425	0,9301	0,9173

Таблица 5

Числовые значения функции F (независимо от способа натяжения арматуры)

φ_s	Значения коэффициента ξ_{1c} (по табл.5 основного текста)					
	0,4	0,6	0,8	1,0	1.2	1,4
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,02	1,0059	1,0074	1,0093	1,0110	1.0127	0,0144
0,04	1,0118	1,0152	1,0187	1,0221	1,0256	1,0291
0,06	1,0178	1,0229	1,0282	1,0334	1,0387	1,0440
0,08	1,0238	1.0307	1,0377	1,0448	1,0519	1,0591
0,10	1,0298	1,0386	1,0474	1,0564	1,0654	1,0746
0,12	1,0358	1,0464	1,0572	1,0681	1,0791	1,0902
0,14	1,0419	1,0544	1,0671	1,0799	1,0930	1,1062
0,16	1,0480	1,0624	1,0771	1,0919	1,1071	1,1224
0,18	1.0451	1,0705	1,0871	1,1041	1,1214	1,1389
0,20	1,0603	1,0784	1,0973	1,1164	1.1359	1,1557
0,25	1.0759	1,0993	1,1232	1,1478	1,1731	1,1990
0,30	1,0916	1,1203	1,1498	1,1803	1,2117	1,2440
0,35	1,1076	1,1417	1,1771	1,2137	1.2517	1,2910
0,40	1,1237	1,1635	1.2050	1,2482	1,2932	1,3400
0,45	1,1400	1,1858	1,2336	1,2837	1,3361	1,3910
0,50	1,1566	1,2084	1,2630	1,3203	1,3807	1,4441
0,55	1,1733	1,2315	1,2930	1,3581	1,4268	1,4994
0,60	1,1902	1,2550	1,3238	1,3969	1,4746	1,5570
0,65	1,2074	1,2789	1,3554	1,4370	1,5240	1,6170
0,70	1,2247	1,3033	1,3877	1,4782	1,5752	1,6793
0,75	1,2422	1,3281	1,4208	1,5206	1,6282	1,7442
0,80	1,2600	1,3534	1,4546	1,5643	1,6831	1,8117

Формулы расчета функций $\bar{\Phi}$, χ и F по таблицам Таблица 1

$$\bar{\Phi} = \frac{\kappa \varphi_s \xi_{1c} \nu_s^2(t_0)}{(1+\varphi_s c)\nu_s(\infty)} \psi(t_0) + 1 - \nu_s(t_0). \qquad (1)$$

Таблица 2

$$\bar{\Phi} = \frac{\kappa \varphi_s \xi_{1c} \nu_s(t_0)}{(1+\varphi_s c)\nu_s(\infty)} \psi(t_0). \qquad (2)$$

Таблица 3

$$\chi = \left\{1 + V_0 \eta^m \beta \left[(1-\beta) e^{-\frac{1}{1-\beta}} + \beta\right]\right\}^{-\frac{1}{m}}. \qquad (3)$$

Таблица 4

$$\chi = \left\{\frac{1 + V_0 \eta^m \beta \left[(1-\kappa-\beta) e^{-\frac{1-\kappa}{1-\beta}} + \beta\right]}{1 + V_0 \eta^m \beta \left[(1-\beta) e^{-\frac{1}{1-\beta}} + \beta\right]}\right\}^{\frac{1}{m}}. \qquad (4)$$

Таблица 5

$$F = [\nu_s(t_0)]^{\left(1 - \frac{\kappa \nu_s(\infty)}{1-\kappa}\right)} \psi(t_0), \qquad (5)$$

где

$$\psi(t_0) = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} [\nu_s(t_0) \varphi_s(\xi_{1c} - c)]^i \prod_{j=1}^{i} \frac{j(1-\kappa) - \kappa \nu_s(\infty)}{1 + j + \kappa c \varphi_s \nu_s(\infty)};$$

$$\nu_s(t_0) = [1 + \varphi_s \xi_{1c} (1-\kappa)]^{-1};$$

$$\nu(\infty) = [1 + \varphi_s c(1-\kappa)]^{-1};$$

$$\xi_{1c} = c + d e^{-\gamma t_0};$$

$$\beta = \frac{m \varphi_s \xi_{1c}}{1 + m \varphi_s \xi_{1c}};$$

$m = 4$; $V_0 = 3{,}5$; $c = 0{,}3$; $\kappa = 0{,}92$.

Приложение 3
Справочное

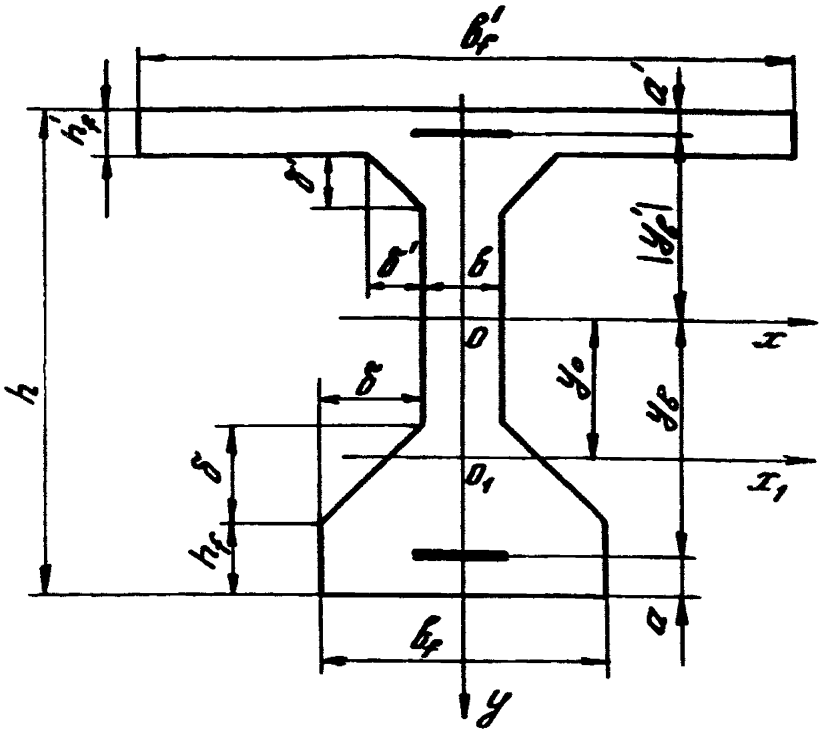
ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Исходные данные: пролетное строение моста под железную дорогу с расчетным пролетом l = = 26,9 м; поперечное сечение (в середине пролета) представлено на рисунке, геометрические размеры – в первой строке табл. 1. Бетон тяжелый класса В30, осадка конуса 3–4 см, подвергнут тепловлажностной обработке. Напрягаемая арматура класса В-П, площадь сечения нижней напрягаемой арматуры A_p = 98,7 см^2, верхней – A'_p = 9,4 см^2, модуль упругости E_p = $1,8 \cdot 10^5$ МПа; натяжения арматуры на упоры. Передаточная прочность бетона в момент обжатия R_{bp} = = 23,4 МПа. Постоянная эксплуатационная нагрузка прикладывается в возрасте 90 суток. Момент и нормальная сила в расчетном сечении от действия усилия предварительного напряжения (с учетом первых потерь за исключением поз.6 согласно обязательному приложению 11 СНиП 2.05.03-84) равны: M_p = $91,9 \cdot 10^2$ кН·м; N_p = = $101,3 \cdot 10^2$ кН. Момент от собственного веса балки M_g = $-33,0 \cdot 10^2$ кН·м; от веса балласта с частями пути M_q = $-17,8 \cdot 10^2$ кН·м. Расчетная относительная влажность воздуха θ = 70 %.

Требуется определить предельные значения потерь предварительного напряжения в нижней и верхней напрягаемой арматурах от ползучести и усадки бетона.

Расчет. Геометрические характеристики бетонной части сечения A_b = 1,2856 м^2; J_b = 0,8537 м^4; y_b = = 1,1073 м; y'_b = –0,8687 м; периметр 7,7694 м. Модуль открытой поверхности M = 7,7694/1,2856 = 6,04 м$^{-1}$.

Согласно табл.3 основного текста модуль упругости бетона с учетом тепловлажностной обработки E_b (28) = = $32,5 \cdot 0,9 = 29,25 \cdot 10^3$ МПа, отношение модулей упругости стали и бетона α = 6,15.



Поперечное сечение железобетонного элемента, имеющего одну плоскость симметрии

Геометрические размеры поперечного сечения в примерах расчета, см, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер примера	h	h_f	h_f'	δ_f	b_f'	δ	δ'	b	a	a'
1	225	35	22,5	80	208	27	20	26	19,4	8
2	115	23	15	40	130	0	15	16	20	–

Характеристики приведенного поперечного сечения при $\alpha = 6,15$; $A_{red} = 1,352$ м^2; $J_{red} = 0,9296$ м^4; $y_{red} = 1,061$; $y'_{red} = -0,915$ м.

Напряжение в бетоне на уровне центров тяжести напрягаемой арматуры от сил предварительного напряжения и собственного веса:

$$\sigma_{bp} = \frac{N_p}{A_{red}} + \frac{M_p - M_g}{J_{red}} y_{red} = 14,2 \text{ МПа};$$

$$\sigma'_{bp} = \frac{N_p}{A_{red}} + \frac{M_p - M_g}{J_{red}} y_{red} = 1,7 \text{ МПа}.$$

По формуле (2)* нормативное сопротивление бетона осевому сжатию в момент отпуска предварительного напряжения $R_{bn}(t_o) = [0,77 - 0,001 \cdot 23,4]\ 23,4 = 17,47$ МПа. Соответствующие относительные уровни напряжений в бетоне: $\eta = 0,78 \cdot \sigma_{bp}/R_{bn}(t_o) = 0,78 \cdot 14,22/17,47 = 0,635$; $\eta' = 0,78 \cdot 1,7/17,47 = 0,076$.

Исходные геометрические характеристики поперечного сечения по формулам (15):

$\rho_1 = 2,85$; $\rho_2 = 2,14$; $\rho_3 = -0,45$;
$\mu = 7,68 \cdot 10^{-3}$; $\mu' = 0,73 \cdot 10^{-3}$.

Обобщенные геометрические характеристики сечения по формуле (16):

$$\rho_1 = 21,91 \cdot 10^{-3}; \quad \rho_2 = 1,51 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем числовые параметры длительных деформаций. По табл.4 с учетом тепловлажностной обработки нормативное значение меры ползучести $C_n(28) = 80 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 = 72 \cdot 10^{-6}$ МПа$^{-1}$.

С учетом условий изготовления и эксплуатации поправочные коэффициенты по табл.5 (для $t_o = 28$ сут.) $\xi_{2c} = 0,673$ (по интерполяции для $M_o = 6,04$ м$^{-1}$); $\xi_{3c} = 0,87$. По формуле (6) определяем предельное значение меры линейной ползучести $C(28) = 72 \cdot 10^{-6} \cdot 0,673 \cdot 0,87 = 42,15 \cdot 10^{-6}$ МПа$^{-1}$.

---

* В данном приложении используются формулы основного текста.

Соответствующее значение характеристики ползучести бетона по формуле (11) с учетом указаний п.8.1 при $E_b(t_o) = E_b$ (28):

$$\varphi(28) = (42,15\cdot10^{-6})\cdot(29,25\cdot10^{3}) = 1,23.$$

По формулам(23) и (24) находим:

$$\lambda_1 = 0,1187;\quad \lambda_2 = 0,0103.$$

Соответствующие значения $\varphi_s = \lambda\times\varphi(28)$:

$$\varphi_{s1} = 0,1463;\quad \varphi_{s2} = 0,0127.$$

С учетом относительной передаточной прочности $R_{bp}/B = 0,78$ по табл.5 находим $\varepsilon_{s1c} = 1,22$.

По табл.1 рекомендуемого приложения 2, применяя линейную интерполяцию, находим числовые значения наследственных функций $\bar{\Phi}$:

$$\bar{\Phi}_1 = 0,1594;\quad \bar{\Phi}_2 = 0,0152.$$

По табл.3 рекомендуемого приложения 2 для $\eta = 0,635$ находим аналогично числовые значения функций χ:

при $\varphi_{s1}\,\varepsilon_{s1c} = 0,178$ $\chi_1 = 0,971$;

при $\varphi_{s2}\,\varepsilon_{s1c} = 0,0185$ $\chi_2 = 0,997$.

По формулам (34) вычисляем значения функций $\tilde{\Phi}$:

$\tilde{\Phi}_1 = 1-(1-0,1594)\,0,97 = 0,1838$; $\tilde{\Phi}_2 = 1-(1-0,0152)\,0,997 = 0,0182$.

Потери напряжения в арматуре, вызванные ползучестью бетона от усилия предварительного обжатия и собственного веса, определяем по формулам (30) и (31):

$$\Delta\sigma_p = \frac{1}{21,91\cdot10^{-3}-1,51\cdot10^{-3}}\left\{14,2\,(0,1838-0,0182)+\right.$$

$$+\,0,73\cdot10^{-3}\left[1,7\,(-0,45)\left(\frac{0,1594}{21,91\cdot10^{-3}}-\frac{0,0152}{1,51\cdot10^{-3}}\right)-\right.$$

$$\left.\left.-\,14,2\cdot2,14\left(\frac{0,1838}{21,91\cdot10^{-3}}-\frac{0,0182}{1,51\cdot10^{-3}}\right)\right]\right\} = 119,4\ \text{МПа};$$

$$\Delta\sigma_p' = \frac{1}{21,91\cdot10^{-3}-1,51\cdot10^{-3}}\left\{1,7\,(0,1594-0,0152)+\right.$$

$$+7,68\cdot10^{-3}\left[14,2\,(-0,45)\left(\frac{0,1838}{21,91\cdot10^{-3}}-\frac{0,0182}{1,51\cdot10^{-3}}\right)-\right.$$

$$\left.\left.-1,7\cdot2,8464\left(\frac{0,1594}{21,91\cdot10^{-3}}-\frac{0,0152}{1,51\cdot10^{-3}}\right)\right]\right\} = 25,9\ \text{МПа}.$$

Вычисляем напряжения в бетоне (на уровнях соответствующих арматур) от постоянной эксплуатационной нагрузки:

$$\sigma_{bq} = \frac{M}{J_{red}} y_{red} = -2,03 \text{ МПа};$$

$$\sigma'_{bq} = \frac{M}{J_{red}} y'_{red} = 1,60 \text{ МПа}.$$

С учетом возраста приложения указанной части нагрузки по табл.6 находим новое значение $\varepsilon_{1c}' = 0,7$, а по табл.1 рекомендуемого приложения 2 – соответствующие значения наследственных функций $\bar{\Phi}$ (при тех же $\varphi_{s1} = 0,1463$ и $\varphi_{s2} = 0,0127$):

$$\bar{\Phi}_1 = 0,0950; \quad \bar{\Phi}_2 = 0,0088.$$

По формулам (19) и (20) с учетом найденных значений $\bar{\Phi}$ определяем приращения напряжений в арматуре, вызванные ползучестью бетона под действием постоянной эксплуатационной нагрузки:

$$\Delta\sigma_p = -8,78 \text{ МПа}; \quad \Delta\sigma'_p = 8,83 \text{ МПа}.$$

Для вычисления потерь от усадки бетона, действующей с момента предварительного обжатия, по табл.4 находим нормативное значение $\varepsilon_{sn}(7) = 365 \cdot 10^{-6}$, а по табл.5 (полагая $t_w = 7$ сут.) $\hat{\varepsilon}_{1s} = 1$; $\hat{\varepsilon}_{2s} = 0,565$; $\hat{\varepsilon}_{3s} = 0,91$. Предельное значение деформаций усадки по формуле (7) с учетом тепловлажностной обработки $\varepsilon_s(7) = 365 \cdot 10^{-6} \cdot 0,565 \cdot 0,91 \cdot 0,9 = 169 \cdot 10^{-6}$.

Поскольку мера линейной ползучести бетона, соответствующая началу воздействия усадки (моменту предварительного обжатия) составляет $C(t_o) = \hat{\varepsilon}_{1c} C(28) = 1,22 \cdot 42,15 \cdot 10^{-6} = 51,42 \cdot 10^{-6}$ МПа$^{-1}$, значение коэффициента пропорциональности

$$q = \varepsilon_s(7)/C(t_o) = 3,29 \text{ МПа}.$$

Потери предварительного напряжения в арматуре, вызванные усадкой бетона, определяем по формулам (45) и (46), принимая ранее найденные значения наследственных функций $\bar{\Phi}$ для момента предварительного обжатия:

$\Delta\sigma_{ps} = 24,1$ МПа; $\Delta\sigma'_{ps} = 32,6$ МПа.

В табл.2 приведено сравнение потерь предварительного напряжения в арматуре, вычисленных по изложенной методике и методике действующих строительных норм и правил.

Таблица 2

Методика расчета	Расчетная величина потерь, МПа, в напрягаемой арматуре					
	от ползучести бетона		от усадки бетона		суммарные	
	нижней	верхней	нижней	верхней	нижней	верхней
По СНиП 2.05.03-84	95,7	12,1	35,0	35,0	130,7	47,1
По СНиП 2.03.01-84	120,4	15,2	46,6	46,6	167,0	61,8
По настоящим Методическим рекомендациям	110,6	34,7	24,1	32,6	134,7	67,3

Пример 2. Исходные данные: пролетное строение моста под автомобильную дорогу с расчетным пролетом L = = 20,4 м. Поперечное сечение (в середине пролета) представлено на рисунке, геометрические размеры - во второй строке табл. 1. Бетон тяжелый класса В30, естественного твердения из бетонной смеси с расходом воды $W = 180$ л/м^3. Удельное (по массе) содержание цементного теста в смеси ρ_z = = 0,25. Одиночная нижняя напрягаемая арматура класса В-II; $E_p = 1,8 \cdot 10^5$ МПа. Площадь арматуры A_p = = 28,26 см^2. Предварительное обжатие осуществляется в возрасте 28 суток с натяжением арматуры на бетон. Постоянная эксплуатационная нагрузка прикладывается в возрасте 90 суток. Момент и нормальная сила в расчетном сечении от действия усилий предварительного напряжения (с учетом первых потерь) относительно центра тяжести бетонной части сечения равны: $M_p = 14,58 \cdot 10^2$ кН·м; N_p = = $27,34 \cdot 10^2$ кН. Момент от собственного веса балки равен $M_q = -6,24 \cdot 10^2$ кН·м; от эксплуатационной нагрузки -

$M_q = -4,48 \cdot 10^2$ кН·м. Расчетная относительная влажность воздуха $\theta = 70$ %.

Требуется определить предельные значения потерь предварительного напряжения от ползучести и усадки бетона.

Расчет. Геометрические характеристики бетонной части сечения: $A_в = 0,4327$ м^2; $J_в = 0,06761$ м^2; $y_в = 0,5334$ м. Модуль открытой поверхности $M_o = 5,204/0,4327 = 12$ м$^{-1}$.

Модуль упругости бетона (при $t_o = 28$ суток) определяем по формуле (3):

$E_в(28) = 25,4 \cdot 10^3$ МПа; $\alpha = E_p/E_в = 7,08$.

Характеристики приведенного сечения: $A_{red} = 0,4527$ м^2; $J_{red} = 0,0768$ м^4; $y_{red} = 0,51$ м.

Напряжение в бетоне на уровне центра тяжести нижней арматуры по окончании предварительного напряжения

$$\sigma_{вр} = \frac{N_p}{A} + \frac{M_p - M_q}{J_в} y_в = 12,9 \text{ МПа}.$$

Нормативное сопротивление бетона осевому сжатию к моменту предварительного напряжения по формуле(2)

$$R_{вп}(t) = 22,2 \text{ МПа}.$$

Относительный уровень обжатия $\eta = 0,78 \cdot 12,9/22,2 = 0,453$.

В соответствии с п.1.6 расчет можно производить с учетом условно-линейной ползучести.

Исходные геометрические характеристики поперечного сечения по формулам (15):

$$\rho_1 = 2,82; \quad \mu = 0,00653.$$

Обобщенная геометрическая характеристика по формуле (16)

$$\rho_1 = \rho_1 \mu = 0,0184.$$

Нормативное значение меры линейной ползучести бетона по формуле (4)

$$C_п(28) = 95,7 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}.$$

Для условий изготовления и эксплуатации конструкции при $t_o = 28$ сут. с учетом коэффициентов из табл.5:

$\varepsilon_{2c} = 0,794$ и $\varepsilon_{3c} = 0,87$;

по формуле (6)

$C(28) = 95,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,794 \cdot 0,87 = 66,1 \cdot 10^{-6}$ МПа$^{-1}$.

По формуле (23) определяем $\lambda = 0,1153$ и по формуле (11) находим $\varphi_s = 0,1153 \cdot 66,1 \cdot 10^{-6} \cdot 26,42 \cdot 10^3 = 0,1936$.

По табл.2 рекомендуемого приложения 2 при найденном φ_s и $\varepsilon_{1c} = 1$ $\bar{\Phi} = 0,1578$.

Потери напряжений в арматуре от усилий предварительного обжатия и собственного веса по формуле (27)

$$\Delta\sigma_p = 110,9 \text{ МПа}.$$

Напряжения в бетоне от эксплуатационной нагрузки

$$\sigma_{bq} = -2,97 \text{ МПа}.$$

По табл.5 $\varepsilon_{1c} = 0,7$ ($t_o = 90$ сут.) и по табл.2 рекомендуемого приложения 2 (при $\varphi_s = 0,1936$) $\bar{\Phi} = 0,1127$.

Потери напряжений от постоянной эксплуатационной нагрузки по формуле (27)

$$\Delta\sigma_p = -18,2 \text{ МПа}.$$

Для учета влияния усадки находим по формуле (5) $\varepsilon_{sn}(7) = 426 \cdot 10^{-6}$. Из табл.5 – $\varepsilon_{1s} = 0,95$ ($t_w = 28$ сут.); $\varepsilon_{2s} = 0,712$; $\varepsilon_{3s} = 0,91$. По формуле (7) $\varepsilon_s(28) = 426 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95 \cdot 0,712 \cdot 0,91 = 262 \cdot 10^{-6}$.

В соответствии с п.7.1 $q = \varepsilon_s(28)/C(28) = 3,97$ МПа.

Потери напряжений в арматуре от усадки бетона по формуле (49)

$$\Delta\sigma_{ps} = 34,1 \text{ МПа}.$$

Суммарная величина потерь напряжений в арматуре, вызванных ползучестью и усадкой бетона,

$\Delta\sigma_p = 110,9 + 34,1 - 18,2 = 126,8$ МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указания по проектированию железобетонных и бетонных конструкций железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. (СН 365-67), М., Стройиздат, 1967.

2. Методические указания по расчету потерь предварительного напряжения, вызванных ползучестью и усадкой бетона в железобетонных конструкциях транспортных сооружений. М., ЦНИИС, 1972.

3. Арутюнян Н.Х., Александровский С.В. Современное состояние развития теории ползучести бетона. В сб.научн.трудов "Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций". М., Стройиздат, 1976.

4. Александровский С.В., Васильев П.И. Экспериментальные исследования ползучести бетона. В сб.научн. трудов "Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций". М., Стройиздат, 1976.

5. Александровский С.В., Бондаренко В.М., Прокопович И.Е. Приложение теории ползучести к практическим расчетам железобетонных конструкций. В сб. научн.трудов "Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций". М., Стройиздат, 1976.

6. Васильев П.И., Лившиц Я.Д. Приложение теории ползучести бетона к расчетам массивных конструкций и мостов. В сб.научн. трудов "Ползучесть и усадка бетонов и железобетонных конструкций". М., Стройиздат, 1976.

7. Гвоздев А.А. и др. Прочность, структурные изменения и деформации бетона. М., Стройиздат, 1978.

8. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А., Прикладная теория ползучести. М., Стройиздат, 1980.

9. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М., Стройиздат, 1982.

10. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М., Стройиздат, 1971.

11. Исследования деформаций, прочности и долговечности бетона транспортных сооружений. Сб. научн.трудов ЦНИИС(под ред. Е.Н.Щербакова).М., ЦНИИС, 1983.

12. Щербаков Е.Н., Хасин В.Л. Обобщенный способ расчета напряженного состояния железобетонных элементов в условиях ползучести. – Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1984, № 8.

13. Щербаков Е.Н., Хасин В.Л. Расчет упруго-ползучих систем с использованием коэффициентов затухания для лишних неизвестных. – Строительная механика и расчет сооружений, 1985, № 3.

14. Филиппов А.И., Медведев Г.С., Попов В.М. Расчет стержневых предварительно напряженных конструкций при различных уровнях и режимах нагружения. – Доклад на X Международном Конгрессе ФИП (Нью-Дели, 16-20 февраля 1986). М.-Л., 1986.

15. Прокопович И.Е., Барановский В.И., Неволин П.Л. Об учете влияния размеров элемента, влажности среды и нелинейной составляющей ползучести бетона при расчете релаксации и потерь преднапряжения. В сб. "Строительные конструкции", вып. 39, Киев, Будівельник, 1986.

16. Хасин В.Л. К расчету железобетонных элементов с учетом нелинейной ползучести бетона. В сб.научн.трудов "Пути повышения производительности труда, сокращения сроков проектирования и строительства транспортных сооружений". М., ЦНИИС, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ 4

2. ЧИСЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА 10

Прочность и деформации при кратковременном нагружении 11

Длительные деформации ползучести и усадки 12

Особенности учета быстронатекающих деформаций ползучести 20

3. ОБОБЩЕННЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА 22

4. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ 25

5. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ 28

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕКУЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИРАЩЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ПОЛЗУЧЕСТЬЮ БЕТОНА . . 30

7. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ УСАДКИ БЕТОНА 33

8. СХЕМА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ 36

ПРИЛОЖЕНИЯ:

1. Общий алгоритм расчета железобетонного элемента с поперечным сечением произвольной формы в условиях линейной (условно-линейной) ползучести 38

2. Числовые значения наследственной функции $\bar{\Phi}$ и функций χ и F 45

3. Примеры расчета 51

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 59

Редактор В.А.Шлыкова
Корректор О.Д.Сухова

Подп. к печ. 17.04.87. Л 77339 Заказ 315
Объем 4,0 п.л. Тираж 490экз Цена 60 коп.
Ротапринт ЦНИИСа

gost.e-ecolog.ru