

УДК 691.328

ББК 38.53

X 98

Хунагов Руслан Азметович, преподаватель кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин технологического факультета Майкопского государственного технологического университета, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru;

Маилян Дмитрий Рафаэлович, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Ростовского государственного строительного университета

РАСЧЕТ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПАНЕЛЕЙ

(рецензирована)

В статье раскрывается вопрос эффективного использования коэффициентов приведения при расчете слоистых железобетонных конструкций, значений секущих модулей деформаций легкого и тяжелого бетонов. Реализованы предложения по определению жесткости сечений и кривизн элементов с учетом влияния преднапряжения, уровня нагружений и неупругих свойств бетонов.

Ключевые слова: слоистые железобетонные конструкции, призмная прочность бетона, предельные деформации, секущий модуль деформации, напряжения.

Khunagov Ruslan Azmetovich, Lecturer of the Department of Construction and General Professional Disciplines of the Technological Faculty of Maikop State Technological University;

Mailyan Dmitry Rafaelovich, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Metal-concrete Structures FSBEI HPE "Rostov State University of Civil Engineering".

CALCULATION OF TWO-LAYER PRE-STRESSED METAL-CONCRETE PANELS

(reviewed)

The article deals with the issue of effective use of coefficients in the calculating of the cast layer of metal concrete structures, the values of the secant models of deformation of the light and heavy concretes. Proposals to define the rigidity of the cross sections and curvatures of the elements with the influence of pre-stressing, the level of loading and elastic properties of concrete have been implemented.

Keywords: layered concrete structures, prism strength of concrete, the limiting deformations, cutting module of the deformation, tension.

Как показали исследования, проведенные в РГСУ [1] при расчете слоистых железобетонных конструкций наиболее эффективно использовать коэффициент приведения, представляющий собой отношение секущих модулей деформации бетона слоев. Это отношение при невысоких уровнях нагружения равно отношению модулей

упругости слоев бетона, а на конечной стадии разрушения – отношению призмных прочностей ($R_b^\Lambda / R_b^T = \varepsilon_u^\Lambda E_b^\Lambda / \varepsilon_u^T E_b^T = E_b^\Lambda / E_b^T$, т.к. в зоне контакта предельные деформации легкого и тяжелого бетонов равны $\varepsilon_u^\Lambda = \varepsilon_u^T$). Для реализации этой методики расчета необходимо располагать аналитическими зависимостями секущих модулей бетонов от уровней напряжений.

При $\sigma_b / R_b \geq 0.3$, выражение для определения секущего модуля деформаций тяжелого бетона имеет вид

$$E_b^T = E_b^T - 1.43(\sigma_b / R_b - 0.3) \left(E_b^T - \frac{R_b E_s}{R_{sc}} \right) \quad (1)$$

Последний член выражения (1) представляет собой минимальное значение секущего модуля деформаций $E_{b,\min}^T$ или $\sigma_b / R_b = 1$. В самом деле $E_{b,\min}^T = R_b / \varepsilon_{bu}$, а $\varepsilon_{bu} = R_{sc} / E_s$. Представление выражения для секущего модуля деформаций в виде (1) удобно, поскольку в правой его части значатся только нормированные характеристики материалов.

Аналогично выражение получено также для легкого бетона, при $\sigma_b / R_b \geq 0.75$ оно имеет вид

$$E_b^\Lambda = E_b^\Lambda - 4(\sigma_b / R_b - 0.75) \left(E_b^\Lambda - \frac{R_b E_s}{R_{sc}} \right) \quad (2)$$

Значение отношений секущих модулей деформаций легкого и тяжелого бетонов в зависимости от уровня напряжений в тяжелом бетоне приведенного сечения при $\sigma_b / R_b \leq 0.3$ равно отношению их модулей упругости, а при более высоком уровне напряжений могут быть определены выражения

$$\alpha'_b = E_b^\Lambda / E_b^T = E_b^\Lambda / E_b^T + 1.43(\sigma_b^T / R_b^T - 0.3) (R_b^\Lambda / R_b^T - E_b^\Lambda / E_b^T) \quad (3)$$

С помощью выражения (1) – (3) предлагается определять коэффициенты приведения с учетом стадии напряженного состояния слоистых конструкций. Опыты проведенные автором показали, что все слои бетона несмотря на значительные различия их механических свойств (отношение $R_b^T / R_b^\Lambda = 9 \dots 12$, а $E_b^T / E_b^\Lambda = 14 \dots 17$) вплоть до разрушения работают совместно. Это позволяет на всех стадиях работы слоистых элементов производить их расчет как однослойных с приведенным сечением при переменных значениях коэффициентов приведения, определяемых в зависимости от уровня напряжений по предложенным рекомендациям.

При расчете слоистых железобетонных элементов по образованию трещин по методике ядровых моментов расчетную эпюру нормальных напряжений в сжатой зоне следует принимать трапециевидной в пределах сжатого слоя из тяжелого бетона. В растянутой зоне эпюра имеет ступенчато-прямоугольную форму. Перед образованием трещин напряжения в растянутой зоне тяжелого бетона равны $\gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T$, а легкого бетона $\gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda$, где $\gamma_{R_{bt}}^T$ и $\gamma_{R_{bt}}^\Lambda$ - коэффициенты, учитывающие снижение расчетного сопротивления бетона растяжению вследствие длительного воздействия предварительного обжатия. Наибольшие напряжения на сжатой грани элемента равны $\sigma_{b,max}^T$, а наклон линии, ограничивающей эпюру напряжений в сжатом тяжелом бетоне такой, что при ее продолжении на крайнем растянутом волокне отсекается ордината, равная $A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T$. Напряжение, отсекаемое этой линией в сжатой зоне на расстоянии U_T от нейтральной линии составит

$$\sigma_{b,U_T} = A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \frac{U_T}{h-x} \quad (4)$$

где $A_T = \gamma_{E_b}^T E_b^T / \gamma_{E_b}^\Lambda E_b^\Lambda = \gamma_{E_b}^T E_b^T / \gamma_{v_t}^T \gamma_{E_b}^\Lambda E_b^\Lambda = 2 / \gamma_{v_t}^T$

при $\gamma_{v_t}^T = 0.5$.

На уровне контакта слоев из тяжелого и легкого бетонов при $U^T = x - h_1$, напряжения в тяжелом бетоне составляет

$$\sigma_b^T = A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \frac{x-h_1}{h-x} \quad (5)$$

а в легком –

$$\sigma_b^\Lambda = \alpha_b A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \frac{x-h_1}{h-x} \quad (6)$$

где $\alpha_b = \gamma_{E_b}^\Lambda E_b^\Lambda / \gamma_{E_b}^T E_b^T < 1$, поэтому $\sigma_b^\Lambda < \sigma_b^T$.

Наибольшие напряжения на сжатой грани элемента в тяжелом бетоне равны

$$\sigma_{b,max}^T = A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \frac{x}{h-x} \quad (7)$$

а в легком (условно) –

$$\sigma_{b,max}^\Lambda = \alpha_b \sigma_{b,max}^T \quad (8)$$

Составим уравнение проекций всех сил на продольную ось элемента

$$\int_{A_b^T} \frac{A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T}{h-x} u^T dA_b^T + \int_{A_b^\Lambda} \frac{A_\Lambda \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda}{h-x} u^\Lambda dA_b^\Lambda - \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T A_{bt}^T - \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda A_{bt}^\Lambda = 0$$

или

$$S_T + m_b^\Lambda \alpha_b S_\Lambda = (h-x) \cdot \left(\frac{A_{bt}^T}{A_T} + m_b^\Lambda \frac{A_{bt}^\Lambda}{A_\Lambda} \right) \quad (9)$$

$$\text{где} \quad S_T = \int_{A_b^T} u^T \alpha_b dA_b^T; \quad S_\Lambda = \int_{A_b^\Lambda} u^\Lambda \alpha_b dA_b^\Lambda; \quad m_b^\Lambda = \frac{A_\Lambda \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda}{A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T} \quad (10)$$

Выражение упруго - пластического момента сопротивления сечения слоистого железобетонного элемента получим из уравнения моментов всех сил относительно нейтральной оси. После преобразования оно получит вид:

$$W_{pl} = \frac{A_T (I_T + \alpha_b m_b^\Lambda I_\Lambda)}{h-x} + S_i^T + m_b^\Lambda \frac{A_T}{A_\Lambda} S_i^\Lambda \quad (11)$$

где $I_T = \int_{A_b^T} u^{T2} dA_b^T$; $I_\Lambda = \int_{A_b^\Lambda} u^{\Lambda2} dA_b^\Lambda$ - моменты инерции сжатой зоны приведенного сечения тяжелого и легкого бетонов относительно нейтральной оси;

$S_i^T = \int_{A_{bt}^T} u_i^T dA_{bt}^T$; $S_i^\Lambda = \int_{A_{bt}^\Lambda} u_i^\Lambda dA_{bt}^\Lambda$ - статические моменты растянутой зоны приведенного сечения тяжелого и легкого бетонов относительно той же оси.

При расчете по образованию трещин железобетонных элементов по методике ядровых моментов не учитывается влияние продольных сил, вследствие чего, при ее использовании для сжатых элементов наблюдается значительное расхождение теоретических и опытных значений усилий трещинообразования, которое с увеличением предварительного обжатия и внешнего продольного усилия возрастает [2]. Опыты авторов [3] показали, что это в полной мере относится и к слоистым сжатым элементам.

В связи с этим расчет сжатых слоистых железобетонных элементов в особенности предварительно напряженных, следует производить с учетом влияния

продольных сил, а также неупругой работы бетонов сжатой зоны по двум уравнениям равновесия на основе прилагаемых эпюр нормальных напряжений. Учет неупругой работы бетона сжатой зоны следует производить при $\sigma_{b,\max}^T > 0.3R_b$. В этом случае напряжения в крайнем сжатом волокне бетона

$$\sigma_b^T = \gamma_{\varepsilon_b^T} \varepsilon_b^T \gamma_{\varepsilon_b^T} E_b^T = \frac{A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T E_b^T}{\gamma_{E_b^T} E_b^T} \cdot \frac{x}{h-x} = A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \overline{v}_T \frac{x}{h-x} = \overline{v}_T \sigma_{b,\max}^T \quad (12)$$

Коэффициент $\overline{v}_T = \varepsilon_{eb} / \varepsilon_{b,u} = E_b^T / E_b^T$ при напряжениях $\sigma_b \leq 0.3 R_b$ принимается равным единице. При этом высота упругого ядра сечения

$$x_{el} = \frac{0.3 \cdot \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T}{A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T} (h-x) \quad (13)$$

Эпюры напряжения перед образованием трещин искривляются и их максимальные значения уменьшаются и становятся равными $\overline{v}_T \sigma_{b,\max}^T$ и $\overline{v}_T \sigma_{b,\max}^\Lambda$. Криволинейные участки эпюр заменяются прямоугольными с максимальными значениями напряжений. На уровне контактных поверхностей между слоями различных бетонов и перехода от зоны упругой работы к неупругой на эпюре напряжений образуются скачки.

Исходя из принятых расчетных эпюр уравнения равновесия для случая, когда нейтральная линия пересекает слой легкого бетона, имеет вид:

$$\begin{aligned} & N_{cr} + \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T b h_3 + \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda b (h-x-h_3) + A_s (\sigma_{sp2} + A_T \alpha_s \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T) + \\ & + A'_s \left(\sigma'_{sp2} - A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \frac{x}{h-x} \alpha_s \overline{v}_T \right) - A_\Lambda \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda \frac{x_{el}}{h-x} 0.5 x_{el} b \alpha_b - \\ & - A_\Lambda \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda \overline{v}_\Lambda \frac{x-h_1}{h-x} (x-x_{el}-h_1) \cdot b \alpha_b - A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \overline{v}_T \frac{x}{h-x} b h_1 = 0 \\ & N_{cr} (e_{cr} - h_0 + x) - \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T b h_3 (h-x-0.5h_3) - \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda b (h-x-h_3)^2 \cdot 0.5 - \\ & - A_s (\sigma_{sp2} + A_T \alpha_s \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T) \cdot (h_0 - x) + A'_s \left(\sigma'_{sp2} - A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \frac{x}{h-x} \alpha_s \overline{v}_T \right) (x - \alpha') - \\ & - A_\Lambda \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda \frac{x_{el}^2}{h-x} \cdot b \cdot \frac{x_{el}}{3} \cdot \alpha_b - A_\Lambda \gamma_{R_{bt}}^\Lambda R_{bt}^\Lambda \overline{v}_\Lambda \frac{x-h_1}{h-x} (x-x_{el}-h_1) \cdot b \alpha_b \cdot \\ & \cdot \left(x_{el} + \frac{x-x_{el}-h_1}{2} \right) - A_T \gamma_{R_{bt}}^T R_{bt}^T \overline{v}_T \frac{x}{h-x} b h_1 (x-0.5h_1) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Расчет по уравнениям (14) возможен только итерационным способом, т.к. в гибком сжатом элементе эксцентриситет $e_{crс} = e_0 + f_{crс} - f_p + 0.5(h_0 - a')$ усилия $N_{crс}$ зависит от прогиба $f_{crс}$, который в свою очередь зависит от искомого $N_{crс}$.

Для выполнения численных расчетов были составлены алгоритмы и программы для ЭВМ, в которых реализованы обе приведенные методики расчета по образованию трещин слоистых железобетонных элементов.

Расчет сжатых слоистых железобетонных элементов по деформированной схеме рекомендуется производить итерационным способом, однако с учетом предложения по определению переменных значений коэффициентов приведения, зависящих от уровня нагружений, а также с использованием рекомендуемой методики определения усилий трещинообразования, учитывающей неупругие свойства тяжелого и легкого бетонов. При этом реализованы предложения по определению жесткости сечений и кривизн элементов с учетом влияния преднапряжения, уровня нагружений и неупругих свойств бетонов.

В составленной блок-схеме и программе расчета на ЭВМ на каждой ступени расчета предусмотрено определение окончательного для данной ступени нагрузки прогиба среднего сечения и прочности элемента $N_{u,k}$ с учетом суммарного эксцентриситета ($e_0 + f_k$). Проверяется условие прочности $N_{u,k} > N_k$, при его выполнении внешнему продольному усилию присваивается новое значение и расчет повторяется. В противном случае несущая способность элемента окажется исчерпанной, производится печать результатов и остановка машины. При определении окончательного (после заданной степени сходимости итерационного процесса) прогиба на каждой ступени нагрузки проверяется условие $(f_k - f_{k-1}) < \beta$. При его неудовлетворении также наступает исчерпание несущей способности элемента, но вследствие потери устойчивости.

Расчет опытных железобетонных панелей показал близкую сходимость опытных и теоретических значений несущей способности и трещиностойкости.

Литература:

1. Осипов В.К., Маилян Д.Р. Эффективный железобетон для сельскохозяйственного строительства: монография. Ростов н/Д, 1992.

2. Маилян Д.Р., Ахмед Аббуд. Проектирование рациональных керамзитовых фибробетонных элементов со смешанным армированием: монография. 2010.

3. Хунагов Р.А., Маилян Д.Р. Двухслойные предварительно напряженные железобетонные панели // Материалы науч.-практ. конф. Ростов н/Д, 2010.

References:

1. Osipov V.K., Mailyan D.R. *The effective metal-concrete for agricultural construction: monograph. Rostov-on-Don, 1992.*

2. Mailyan D.R., Ahmed Abboud. *Designing of rational ceramsyt-fibreconcrete elements with mixed reinforcement: monograph. 2010.*

3. Khunagov R.A., Mailyan D.R. *Two-layer pre-stressed concrete panels // Proceedings of the conference. Rostov-on-Don, 2010.*