

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

И. И. ТЕМНОВ

РАСЧЕТ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ
 «ИЗДЕЛИЕ—АРМАТУРА—УПОРЫ» С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА
 ФОРМИРОВАНИЯ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ БЕТОНОМ И АРМАТУРОЙ

Источником формирования напряженного состояния предварительно напряженных железобетонных элементов, изготовляемых на стендах и в силовых формах, является усилие $Z^*(t)$, возникающее в оголенной арматуре системы (рис. 1в). Естественно, что появление такого усилия возможно после обеспечения связей между бетоном и арматурой. До настоящего времени считалось, что связи возникают одновременно по длине [1, 2]. Такое предположение не позволяет рассматривать непрерывный процесс формирования усилий в элементах системы и приводит к несоответствию рассчитанных величин экспериментальным.

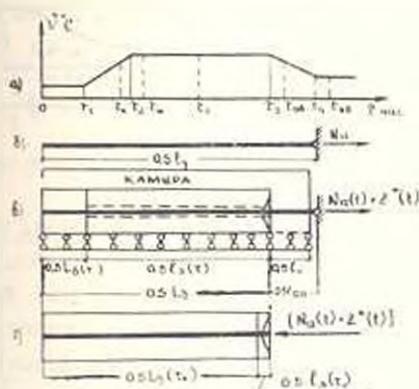


Рис. 1. Схема формирования модели системы «изделие—арматура—упоры».

Анализ независимых температурных перемещений натянутой на упоры арматуры и начинающего твердеть бетона показывает, что в зоне, расположенной у среднего поперечного сечения изделия, взаимные смещения весьма малы. В этой зоне образование связей между арматурой и бетоном начинается одновременно с началом схватывания цемента. Величина взаимных смещений увеличивается к торцам и соответствующим образом задерживается формирование сцепления. Иными словами образование связей, а следовательно и формирование железобетонной системы, происходит в течение некоторого времени.

бетонного изделия в период наращивания температур в камере происходит постепенно по длине [3]. Очевидно, что для участка по длине, на котором изделие сформировалось, можно считать справедливой гипотезу плоских сечений. По длине сформировавшегося участка изделия (рис. 2в) усилия $N_0^*(t)$ и $N_1^*(t)$, передающиеся на бетон и арматуру, постоянны. На участках, расположенных ближе к торцам, на которых образование связей задержано взаимными смещениями, усилия $N_0(z, t)$ и $N_1(z, t)$ переменны по длине. Поскольку в этой зоне происходит передача части усилий, возникающих в оголенной арматуре, на бетон, то ее можно назвать зоной заанкеривания. На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая описанную модель формирования системы. В момент времени $t = 0$ (рис. 1б) осуществляется натяжение арматуры. С момента $\tau_1 \leq t \leq \tau_2$ (рис. 1в) происходит процесс наращивания связей по длине. Система состоит из участка изделия $L_0(\tau)$, зоны заанкеривания $l_3(\tau)$, оголенной арматуры l_{ac} и упоров. В момент $t = \tau_2$ завершается формирование связей по длине. Усилия N_i изменяются от релаксации и усилия $Z^*(t)$, обжимающего бетона. При $\tau_1 \leq t < \tau_{об}$ бетон подвергается растягивающим усилиям $Z^*(t)$. Считается, что в интервале $\tau_k < t < \tau_{об}$ зона заанкеривания не изменяется.

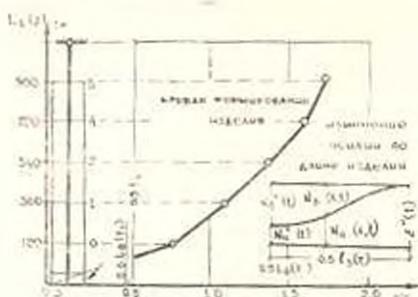


Рис. 2. К формированию во времени длин участков призматической сваи.

Для подтверждения изложенного проведены специальные экспериментальные исследования на отдельных образцах, подвергаемых тепловой обработке по режиму, приведенному на рис. 4а, при взаимных смещениях со скоростями, соответствующими скоростям смещений в различных сечениях призматической сваи. На рис. 2а показаны участки (1—5) на половине длины сваи, для которых определялись взаимные смещения [3], а на рис. 2б приведена кривая формирования во времени длин участков сваи $L_0(\tau)$, полученная по опытным значениям взаимных смещений.

Расчет напряженного состояния системы выполняется с учетом переменных во времени длин и различия в деформативностях двух участков: участка, где выполняется гипотеза плоских сечений $L_0(\tau)$ и участка, соответствующего зоне заанкеривания $l_3(\tau)$.

Определение усилий $Z^*(t)$ и $N_i^*(t)$, возникающих в оголенной и обетонированной арматуре, покажем на примере призматического из-

деля, имеющего поперечное сечение с одной осью симметрии и одиночную арматуру (рис. 3). Усилия $Z^*(t)$ находятся с помощью уравнения метода сил:

$$u_x^*(t) + u_{xc}^*(t) - u_y^*(t) = 0, \quad (1)$$

где $u_x^*(t)$, $u_{xc}^*(t)$ и $u_y^*(t)$ — перемещения изделия, свободной арматуры и уворов от суммарного действия силы $Z^*(t)$ и вынужденных деформаций $\varepsilon(t)$ (изменение во времени и по поперечному сечению изделия и стэнда, температуры и влажности).

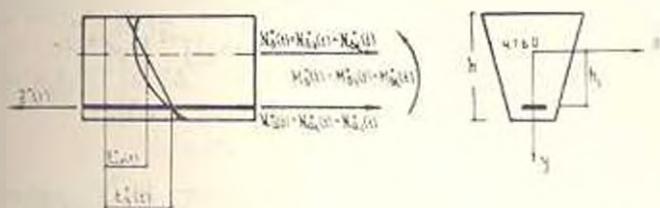


Рис. 3. Расчетная схема.

Для определения перемещения $u_x^*(t)$ необходимо решить задачу о деформировании: состоянии железобетонного стержня, находящегося под действием переменной во времени силы $Z^*(t)$ и вынужденных деформаций $\varepsilon(t)$. Перемещения бетонной и арматурной стержней, соответствующие сформировавшейся части изделия, под действием сил $N_0^*(t)$ и $N_a^*(t)$ (рис. 3), могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} u_0^*(y, t) &= \rho_{11} \left[\delta^L(t, \tau_1) N_0^*(\tau_1) + \int_{\tau_1}^t \delta^L(t, \tau) \frac{d}{d\tau} N_0^*(\tau) d\tau \right] + \\ &+ L_0(\tau_1) \varepsilon_{cp}(\tau_1) + \int_{\tau_1}^t L_0(\tau) \frac{d}{d\tau} \varepsilon_{cp}(\tau) d\tau; \\ u_a^*(t) &= \frac{1}{E_a F_a} \left[L_a(\tau_1) N_a^*(\tau_1) + \int_{\tau_1}^t L_a(\tau) \frac{d}{d\tau} N_a^*(\tau) d\tau \right] + \\ &+ L_a(\tau_1) \varepsilon_a(\tau_1) + \int_{\tau_1}^t L_a(\tau) \frac{d}{d\tau} \varepsilon_a(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\delta^L(t, \tau) = \delta(t, \tau) L_0(\tau)$, $\rho_{11} = 1/F_0 + h_1 y / J_0$.

Зависимости (2) отличаются от обычно применяющихся в линейной теории ползучести [4] наличием под интегралом множителя $L_0(t)$: это связано с переменностью во времени длины рассматриваемого участка.

Уравнения равновесия части изделия

$$\begin{aligned} N_0^*(t) + N_s^*(t) - Z^*(t) &= 0, \\ M_0^*(t) + M_s^*(t) - M^*(t) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

и условия совместности деформаций на уровне арматуры

$$u_0^*(t) = u_s^*(t) \quad (4)$$

позволяют связать усилия $N_s^*(t)$ с усилием $Z^*(t)$. В операторной форме соответствующая зависимость имеет вид:

$$\begin{aligned} N_s^* &= [\rho_1 + n_1(\delta^L + K_2)^{-1} [(l_0 + K_1)]^{-1} [\rho_1 Z^* + \\ &+ F_0(\delta^L + K_2)^{-1} (l_0 + K_1)(\epsilon_{cp} - \epsilon_s)], \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} (\delta^L + K_2) F &= \delta^L(t, \tau_1) F(\tau_1) + \int_0^t \delta^L(t, \tau) \frac{d}{d\tau} F(\tau) d\tau; \\ (l_0 + K_1) F &= L_0(\tau_1) F(\tau_1) + \int_0^t L_0(\tau) \frac{d}{d\tau} F(\tau) d\tau; \end{aligned} \quad (6)$$

F — произвольная функция.

С учетом (4), (6) и (2) получим:

$$\bar{u}_s^* = \frac{1}{E_s F_s} (l_0 + K_1) N_s^* (l_0 + K_1) \epsilon_s. \quad (7)$$

В формулах (2)–(7) $L_0(\tau_1)$ — длина участка изделия, сформировавшегося к моменту τ_1 (рис. 1а), принимаемая для различных изделий, изменяющейся в пределах $0 < L_0(\tau_1) \leq 0,025 L_0$; $\rho_1 = 1 + F_0 h_1^2 / J_0$; $\sigma_1 = F_0 / E_s F_s$.

Перемещение $u_s^*(t)$ определяется по приближенной формуле

$$u_s^* = \frac{1}{E_s F_s} (l_0 + K_1) [(1 - 0,6\rho_1) Z^* - 0,6\rho_1 N_s^*] + (l_0 + K_1) \epsilon_s, \quad (8)$$

построенной в предположении, что усилия в бетоне по длине заанкеривания меняются по закону (рис. 2в):

$$N_0(z, t) = N_0(l, t) \frac{z^2}{l^2} \left(6 - 8 \frac{z}{l} + 3 \frac{z^2}{l^2} \right). \quad (9)$$

В формуле (8)

$$(l_0 + K_1) F = l_0(\tau_1) F(\tau_1) + \int_0^t l_0(\tau) \frac{d}{d\tau} F(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Перемещения свободной арматуры и упоров определяются по формулам:

$$u_{xc}^* = \frac{1}{E_s F_s} l_{xc} Z^* + l_{nc} \varepsilon_x + (l_{xc} - l_{nc}) \varepsilon_y; \quad (11)$$

$$u_y^* = \frac{1}{E_{cs} F_{cs}} l_y Z^* + l_y \varepsilon_y.$$

С учетом (7), (8) и (11) решение уравнения (1) в матричной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{Z}^* = & -E_s F_s [\rho_1 (\Delta^6 + 0,6\rho_1 \Delta^3) (\rho_1 + n_1 \Delta K)^{-1} - (1 - 0,6\rho_1) \Delta^2 + \\ & + l_{xc} - n_y l_y]^{-1} [n_y (\Delta^6 + 0,6\rho_1 \Delta^3) (\rho_1 + n_1 \Delta K)^{-1} \Delta K (\bar{\Delta \varepsilon}_{cp} - \bar{\Delta \varepsilon}_1) + \\ & + L_6 \bar{\Delta \varepsilon}_a + l_{nc} \bar{\Delta \varepsilon}_x + (l_{xc} - l_{nc}) \bar{\Delta \varepsilon}_y]. \end{aligned} \quad (12)$$

Вектор усилия $\bar{N}_s^*(t)$ строится так:

$$\bar{N}_s^* = (\rho_1 + n_1 \Delta K)^{-1} [\rho_1 \bar{Z}^* + F_6 \Delta K (\bar{\Delta \varepsilon}_{cp} - \bar{\Delta \varepsilon})]. \quad (13)$$

По формуле (13) можно получить также усилия $N_{sa}^*(t)$ от действия силы $Z^*(t)$ и $N_{ss}^*(t)$ от действия $\varepsilon(t)$.

В формулах (12), (13) $\bar{\Delta \varepsilon}_a$, $\bar{\Delta \varepsilon}_{cp}$, $\bar{\Delta \varepsilon}_x$ — векторы вынужденных деформаций арматуры, средних по поперечному сечению изделия и в камере;

$$\Delta K = (\Delta \delta^L)^{-1} \Delta^6 = (\delta^L + K_2)^{-1} (l_6 + K_1); \quad \Delta^3 = (L_1 + K_1). \quad (14)$$

Элементы матриц Δ^6 , Δ^3 и $\Delta \delta^L$ связаны с интегралами, вычисленными для отдельных промежутков времени. Некоторые элементы этих матриц имеют вид:

$$\Delta_{ia}^6 = L_6(\xi)_{i,k-1}^{i,k}; \quad \Delta_{ia}^3 = L_3(\xi)_{i,k-1}^{i,k}; \quad \Delta_{ia}^L = \delta(t_i, \xi)_{i,k-1}^{i,k} L_6(\xi)_{i,k-1}^{i,k}, \quad (15)$$

где индекс i показывает возраст бетона в момент отсчета, а k — возраст бетона в момент приращения напряжений [5].

Векторы напряжений в оголенной, обетонированной арматуре и бетоне строятся по формулам:

$$\bar{\sigma}_{sc}^* = \frac{1}{F_s} \bar{Z}^*; \quad \bar{\sigma}_s^* = \frac{1}{F_s} \bar{N}_s^*; \quad \bar{\sigma}_6^* = \frac{1}{F_6} \rho_{11} \bar{N}_6^*. \quad (16)$$

Напряженное состояние в изделии с момента окончания обжатия [6] определяется с учетом применения принципа наложения по формулам:

$$\bar{\sigma}_{s1}^* = \bar{\sigma}_s^* + \bar{\sigma}_{s,ob}^*; \quad \bar{\sigma}_{61}^* = \bar{\sigma}_6^* + \bar{\sigma}_{6,ob}^*, \quad (17)$$

где $\bar{\sigma}_{s,ob}^*$ и $\bar{\sigma}_{6,ob}^*$ — напряжения в арматуре и бетоне вследствие обжатия. Учет напряжений, связанных с переменными температурно-влажностными градиентами, рассматривается отдельно.

Описанный метод расчета применен к определению напряжений в арматуре и бетоне преднапряженной призматической сваи, изготавливаемой на стенде. Режим тепловой обработки показан на рис. 4а. Основные характеристики системы: $l_0 = 1800$ см; $l_{ac} = 475$ см; $F_0 = 45 \times 45$ см; $F_2 = 30,4$ см²; $E_s = 2 \cdot 10^6$ кгс/см². Фланко-механические характеристики бетона соответствовали применяемым в [2].

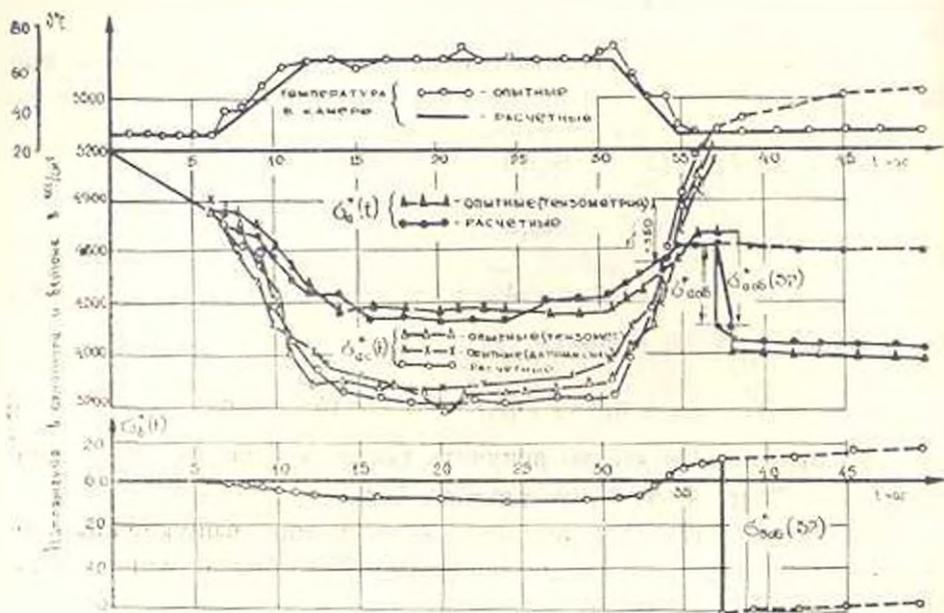


Рис. 4. Изменение рассчитанных и опытных величин напряжений в арматуре и бетоне системы и период изготовления сваи.

На рис. 4 представлено изменение напряжений в арматуре и бетоне системы, вычисленных по формулам (16), (17). К напряжениям в арматуре дополнена величина $\sigma_{ac}(6) = \sigma_c(6) = 300$ кгс/см², обусловленная релаксацией и обжатием анкеров. Алгоритм расчета реализован на ЭВМ «ЕС-1022». Результаты сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными при помощи замера деформаций в свободной и обетонированной арматуре сваи тензотрическим методом. Кроме того, в оголенной арматуре усилия замерялись с помощью датчиков силы. На рис. 4б приведены соответствующие кривые. Из рисунка видно хорошее соответствие рассчитанных величин напряжений в арматуре опытным, формирующихся как в процессе тепловой обработки сваи, так и последующего выдерживания. При $\sigma_s(34) = 0$ (рис. 4в) потери напряжений в арматуре от температурного перепада (рис. 4б) [6] составляют $\sigma_{s0} = 350$ кгс/см². Обжатие осуществлено при $t = 37$ м.

Описанное решение дает возможность проследить изменение напряженного состояния изделия на всех периодах изготовления, обжатия и дальнейшего хранения и открывает возможности для дифференцирован-

Ի. Ի. ՏԵՄԵՂՈՎ

«ՊԱՏՐԱՍՏՎԱՆՔ-ԱՄՐԱԿ-ՀԵՆԱՐԱՆՆԵՐ» ՀԱՄԱԿԱՐԴԻ ՁԵՐՄԱՅԻՆ
ԱՐՎԱՆՍՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ՝ ԲԵՏՈՆԻ ՈՒ ԱՄՐԱՆԻ ՄԻՋԵՎ
ԿԱՊԻ ՉԵՎԱԳՈՐԾԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Շարահրված են էլեմենտի ջերմային շարժային վիճակի հաշվարկի հիմնական դրույթները, որոնք հիմնված են անհամասեռ համակարգի քննարկման վրա և որոնք ներառնում են արագ «ծերացող» բետոնի և ամրանի միջև փոփոխական երկարության կապեր և ժամանակից փոփոխվող հաշվարկային սխեմա: Հաշվարկային մեթոդիկան հիմնված է սողքի տեսության ինտեգրալ հավասարումների մատրիցային տեսքով կալմման ու լուծման վրա: Ստեղծված ալգորիթմը բույլ է տալիս հետևել էլեմենտի շարժային վիճակի պրոցեսի ձևավորմանը նրա պատրաստման, սեղմման և հետագա պահման ընթացքում: Հաշվարկի ճշտությունը հաստատված է փորձնական տրվյալներով, որոնք ստացված են դործարանային պայմաններում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бердичевский Г. И., Маркаров Н. А. Технологические факторы трещиностойкости и прочности предварительно-напряженных железобетонных конструкций. М., Стройиздат, 1969, т. 151.
2. Темнов И. И. О применении теории ползучести к решению задачи о напряженном состоянии железобетонного элемента и процессе термообработки. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVII, № 5, 1974, с. 81—90.
3. Неупов С. Ф. О формировании сцепления между арматурой и бетоном в процессе термообработки изделий. «Известия вузов. Строительство и архитектура», 1980, № 3, с. 16—21.
4. Арутюнян Н. Х. Некоторые задачи теории ползучести для неоднородно стареющих тел. «Механика твердого тела», 1976, № 3, с. 153—164.
5. Прокопович И. Е. О применении теории ползучести к расчету бетонных и железобетонных конструкций. «Известия вузов. Строительство и архитектура», 1974, № 12, с. 4—16.
6. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции. М., Стройиздат, 1978, с. 767.