

ками вязальной проволоки. Если трещина прошла по вертикальному шву между камнями, проволокой обматываются два смежных камня. После обжатия расшитые швы заделываются цементно-песчаным раствором.

Предложенный способ позволяет сохранять несущую способность конструкции при возможных дальнейших неравномерных осадках стен здания.

Получено 18.05.2002

УДК 624.073.11 : 539.371

Э.Д.ЧИХЛАДЗЕ, д-р техн. наук, М.А.ВЕРЕВИЧЕВА, канд. техн. наук,
С.Ю.БЕРЕСТЯНСКАЯ

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЕБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ СИЛОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Проведено исследование влияния различных схем огневого воздействия на несущую способность нагруженной сталебетонной плиты.

Настоящая статья, являясь развитием исследований [1-4], содержит основные положения теории сталебетонных плит, учитывающей, помимо силовых, и температурные воздействия. Используем условия равновесия элемента сталебетонной плиты, полученные в [3]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(M_T - M_x) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(M_T - M_y) - \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) M_T = q(x, y). \quad (1)$$

Температурные изгибающие моменты в бетоне и стальном листе (рис. 1) определяются следующим образом:

$$M_T = M_T^b + M_T^s; \quad (2)$$

$$M_T^b = - \int_{x_i}^{x_i} \frac{\alpha_b E_b (T - T_0)}{3(1 - \nu_b)} x dx; \quad M_T^s = - \int_{h_b}^{h_b + \delta} \frac{\alpha_s E_b (T - T_0)}{3(1 - \nu_b)} x dx,$$

где T_0 – начальная температура; α_b , α_s – коэффициенты объемного расширения бетона и стали.

Моменты M_x , M_y , M_{xy} связаны с жесткостными коэффициентами и кривизнами зависимостями [1]

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ 2K_{xy} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$D_{11} = D_1 \sin^2 \alpha + D_2 \cos^2 \alpha; \quad D_{12} = D_{21} = D_\mu;$$

$$D_{13} = D_{31} = D_{23} = D_{32} = (D_1 - D_2) \cos \alpha \cdot \sin \alpha / 2;$$

$$D_{22} = D_1 \cos^2 \alpha + D_2 \sin^2 \alpha; \quad D_{33} = (D_1 + D_2 - 2D_\mu) / 4;$$

$$D_i = \bar{x}_i^3 E_b / (3(1 - \nu_b^2)) + \bar{x}_{ti}^3 E_{bt} / (3(1 - \nu_{bt}^2)) + E_s A_s (h_0 - x_i)^2 \lambda_i / (1 - \nu_s^2);$$

$$D_\mu = 0,5(D_{\mu 1} + D_{\mu 2});$$

$$D_{\mu i} = \nu_b \bar{x}_i^2 \bar{x}_j E_b / (3(1 - \nu_b^2)) + \nu_{bt} \bar{x}_{ti}^2 \bar{x}_{tj} E_{bt} / (3(1 - \nu_{bt}^2)) +$$

$$+ \nu_s E_s A_s (h_0 - x_i)(h_0 - x_j) \lambda_j / (1 - \nu_s^2); \quad i=1,2; \quad j=2,1;$$

$$K_x = -\partial^2 w / \partial x^2; \quad K_y = \partial^2 w / \partial y^2; \quad K_{xy} = \partial^2 w / \partial x \partial y,$$

где A_s — площадь стального листа на единице длины; $E_b, E_{bt}, \nu_b, \nu_{bt}$ — параметры деформирования сжатого и растянутого бетона; E_s, ν_s — параметры деформирования стального листа; λ_i — коэффициент податливости контакта листовой арматуры с бетоном; x_i, x_{ti} — высоты сжатой и растянутой зон.

Для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии сталебетонной плиты необходимо знать распределение температурно-влажностного поля в ее сечении. Будем предполагать, что плита прогревается равномерно: а) со стороны стального листа; б) со стороны бетона; в) со стороны стального листа и бетона одновременно. В случае равномерного прогрева задача о распределении температуры и влаги сводится к одномерной (рис.2). Необходимость рассмотрения и влажностного поля связана с наличием влаги в порах бетона, при испарении которой возникает подвижная граница парообразования [4].

В работах [3, 4] на основе анализа уравнения баланса масс в фазах, уравнений движения и уравнений баланса энергии показано, что для микропористых сред с размерами пор $r \leq 10^{-7}$ м типа плотных тяжелых бетонов с пористостью порядка 20-30% теплообмен описывается следующей системой уравнений:

$$c\rho \partial T/\partial t = \partial/\partial x(\lambda \partial T/\partial x),$$

$$\partial \rho_3/\partial t = (8r/3)\sqrt{R/2\pi M} \partial(\rho_3\sqrt{T})/\partial x,$$

где T – температура твердого каркаса вместе с паром, К; c – удельная теплоемкость бетона; ρ – плотность сухого твердого каркаса; λ – коэффициент теплопроводности сухого каркаса; ρ_3 – плотность пара; M – молярная масса пара; R – газовая постоянная; t – время.

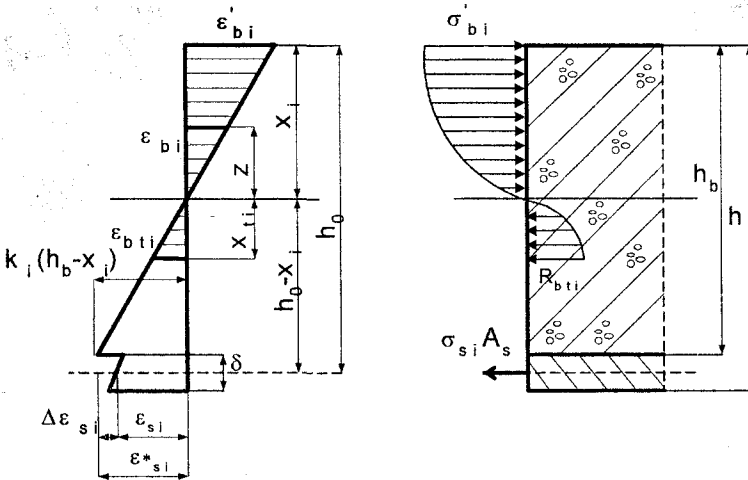


Рис.1– Деформации в сечении сталебетонного элемента

Начальные и граничные условия для случая одностороннего нагрева со стороны стали (рис.2, а) сформулированы в [3]. Они имеют следующий вид:

$$t = 0: \quad \rho_3 = \rho_{30}, \quad T = T_0;$$

$$x = h_b: \quad \lambda \partial T/\partial x = \alpha_c (T_0 - T), \quad \rho_3 = \rho_{30}; \quad x = 0: \quad \rho_3 = \rho_f;$$

$$Q = Q_c + Q_r,$$

где Q – полный тепловой поток к единице нагреваемой поверхности конструкции; Q_c – конвективный тепловой поток; Q_r – лучистый тепловой поток; α_c – коэффициент конвективного теплообмена между

бетоном и холодной средой; ρ_f - плотность горячего пара.

На границе парообразования

$$x = \sigma_1: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_1 \rho_{20} \frac{d\sigma_1}{dt}; \left(k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_1-0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_1+0} \right) = \rho_{20} \frac{d\sigma_1}{dt},$$

где r_1 - удельная теплота парообразования; p - давление пара испаряющейся жидкости в порах; $p = \rho_3 TR / (M\varphi_3)$; k_3 - коэффициент фильтрации пара по порам; φ_3 - объемная доля пара; ρ_{20} - плотность влаги в бетоне.

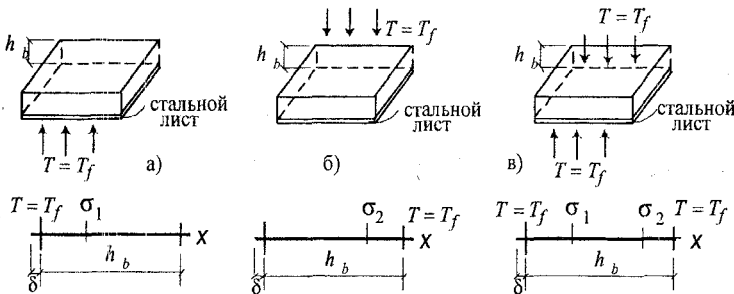


Рис. 2 - Расчетная схема сталебетонной плиты: температурное воздействие: а) со стороны стального листа; б) со стороны бетона; в) с обеих сторон

В случае нагрева со стороны бетона граница парообразования движется со стороны $x = h_b$, и граничные условия имеют вид

$$x = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_c (T_0 - T), \quad \rho_3 = \rho_{30}; \quad x = h_b: \rho_3 = \rho_f;$$

$$Q = Q_c + Q_r,$$

$$x = \sigma_2: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_1 \rho_{20} \frac{d\sigma_2}{dt};$$

$$\left(k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_2-0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma_2+0} \right) = \rho_{20} \frac{d\sigma_2}{dt},$$

где α_c – коэффициент теплообмена между сталью и холодной средой.

В отличие от этих случаев, при температурном воздействии на плиту с обеих сторон (рис.2, в) влага испаряется также с обеих сторон, и поэтому образуются две границы парообразования σ_1, σ_2 . Это явление отражается в граничных условиях, которые имеют следующий вид:

$$t = 0: \quad \rho_3 = \rho_{30}, \quad T = T_0;$$

$$x = 0: \quad \rho_3 = \rho_f; \quad Q = Q_c + Q_r, \quad x = h_b: \quad \rho_3 = \rho_f; \quad Q = Q_c + Q_r,$$

$$x = \sigma_1(t), \sigma_2(t): \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = r_t \rho_{20} \frac{d\sigma}{dt};$$

$$\left(k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma=0} - k_3 \rho_3 \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{\sigma=h} \right) = \rho_{20} \frac{d\sigma}{dt}.$$

Задача тепломассообмена для каждой схемы теплового воздействия решается путем разностной аппроксимации.

Зная распределение температурного поля по толщине плиты, по зависимостям (2) определяем температурные моменты, а решением уравнения равновесия (1) с учетом зависимостей (3) методом конечных разностей при шаговом нагружении определяем напряженно-деформированное состояние сталебетонной плиты.

Огнестойкость определяется временем t , за которое плита теряет несущую способность. В свою очередь, несущая способность характеризуется следующими факторами, имеющими место в какой либо точке конечно-разностной сетки: прочностью бетона, прочностью стального листа, прочностью контакта [1].

Для численных расчетов была использована сталебетонная плита 1000x1000 мм толщиной $h_b=50$ мм из бетона прочностью $R_b=40$ МПа. Плита армировалась плоским листом толщиной $\delta=1$ мм из стали с физическим пределом текучести $\sigma_f=255$ МПа. Начальные значения модуля упругости бетона и стали $E_b=4,08 \times 10^4$ и $E_s=2,06 \times 10^5$ МПа. Нагрузка на плиту была принята равномерно распределенная. Опирание по контуру шарнирное. Объединение стального листа с бетоном выполнялось наклонными петлевыми анкерами и имело жесткость $\xi=80$ кН/м³ [1, 2].

Результаты расчетов приведены на рис.3, 4. Из рис.3 видно, что при температурном воздействии сверху обеспечивается требуемый предел огнестойкости согласно СНиП 2.01.02-85* до нагрузки 60% от разрушающей. При огневом воздействии со стороны стального листа и с обеих сторон несущая способность не обеспечивается даже при минимальной нагрузке. В этом случае необходимо предусматривать защиту конструкции от температуры. Как видно из рис. 4, тип защитного слоя значительно увеличивает огнестойкость сталебетонных плит при действии пожара со стороны стального листа. Так, например, огнестойкость плит при нагрузке 10 кН/м^2 с защитным слоем из асбестоцементных плит $h=50 \text{ мм}$ составляет 58 мин., а с защитным слоем из минераловатных плит $h=40 \text{ мм}$ – 50 мин. Эти способы защиты могут быть рекомендованы для зданий, соответствующих II степени огнестойкости.

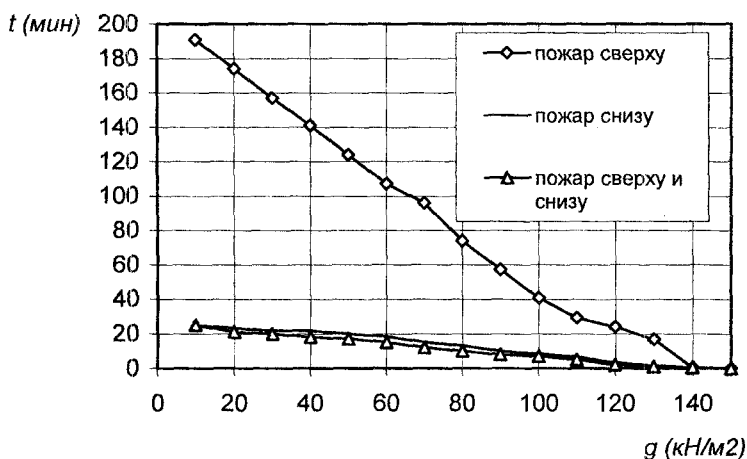


Рис. 3 – Зависимость несущей способности сталебетонной плиты от схемы температурного воздействия

Огнестойкость сталебетонных плит при нагрузке 10 кН/м^2 с защитным слоем из цементно-стружечных плит $h=200 \text{ мм}$ составляет 75 мин., с защитным слоем из минераловатной плиты $h=100 \text{ мм}$ – 104 мин., с защитным слоем из легкого бетона $h=30 \text{ мм}$ – 75 мин. Эти способы защиты могут быть рекомендованы для зданий соответствующих I степени огнестойкости.

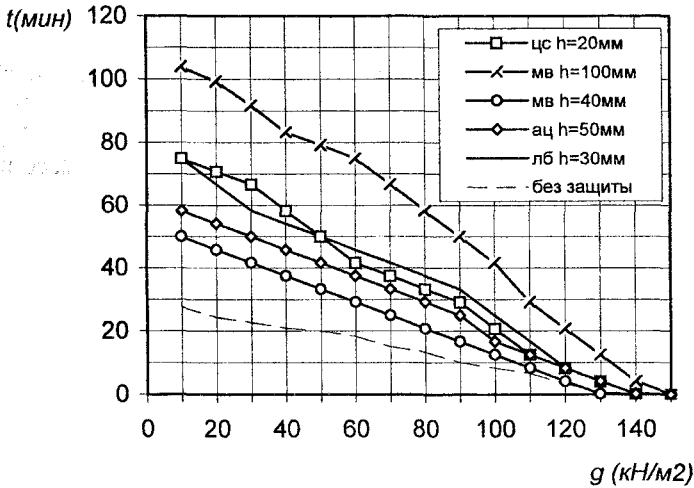


Рис. 4 – Зависимость несущей способности от вида температурной защиты

Таким образом, разработан математический аппарат, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние и несущую способность сталебетонных плит при силовых и температурных воздействиях, в том числе и при различных условиях пожара. Полученные результаты могут быть использованы для расчета сталебетонных перекрытий строительных сооружений.

1. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Напряженно-деформированное состояние сталебетонных плит // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №2. – С. 22-26.

2. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Несущая способность сталебетонных плит // Бетон и железобетон. – 1990. – №10. – С. 30-31.

3. Огнестойкость бетонных и сталебетонных конструкций: Сб. трудов ХарГАЖТ. Вып.40. – Харьков, 2000. – 97с.

4. Жакин А.И., Чихладзе Э.Д., Веревичева М.А. Теория тепломассообмена в пористых средах // Изв. ВУЗов. Строительство. – 1998. - №1. – С. 111-116.

Получено 17.05.2002