

К. З. Хайрнасов

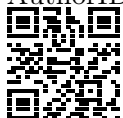
ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

*Московский государственный строительный университет (Национальный
исследовательский университет), Москва, Россия*

Аннотация. Целью статьи является определение параметров армирования для получения прочностных характеристик ячеистых бетонов на растяжение сопоставимых с прочностными характеристиками сжатия. Приводятся зависимости определения приведенных прочностных характеристик многослойных композиционных материалов: холстов при различном расположении волокон. Приведены способы усиления железобетонных конструкций композиционными холстами. Проведено моделирование стеновой строительной панели из ячеистого материала армированной композиционными волокнами. Проведено численное и аналитический расчеты, модели стеновой панели модели. Сходимость результатов конечно элементного расчета определялось путем сгущения сетки конечных элементов и если результаты предыдущего и последующего расчетов отличалось не более чем на 3%, конечноэлементная аппроксимация считалась достаточной. Исследовано напряженно деформированное состояние стеновой панели на действие изгибающих моментов и температурных нагрузок. Разработан алгоритм определения характеристик армирующего материала. Получены параметры армирования, при которых прочностные характеристики на растяжения были сопоставимы с прочностными характеристиками растяжения для данной конструкции. Проведен анализ полученных результатов и сделаны выводы.

Ключевые слова: ячеистые бетоны, композитные материалы, полотна, волокна, приведенные характеристики, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, повышение несущей способности.

Хайрнасов Камилъ Зайнутдинович, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; e-mail: kamilh@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0111-2947>; AuthorID: 600738



для цитирования: Хайрнасов К. З. Повышение прочностных характеристик ячеистых бетонов композиционными материалами // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. № 1(63). С. 109–122. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.010. EDN: WHGZUX

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

K. Z. Khayrnasov

IMPROVING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF CELLULAR CONCRETE USING COMPOSITE MATERIALS

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the article is to determine the reinforcement parameters to obtain the tensile strength characteristics of cellular concrete comparable to the compressive strength characteristics. The dependencies for determining the reduced strength characteristics of multilayer composite materials are given: canvases with different fiber arrangement. The methods for strengthening reinforced concrete structures with composite canvases are given. The modeling of a wall building panel made of cellular material reinforced with composite fibers is carried out. Numerical and analytical calculations are carried out, and the model of the wall panel model. The convergence of the finite element calculation results was determined by thickening the finite element mesh and if the results of the previous and subsequent calculations differed by no more than 3%, the finite element approximation was considered sufficient. The stress-strain state of the wall panel under the action of bending moments and temperature loads is investigated. An algorithm for determining the characteristics of the reinforcing material is developed. The reinforcement parameters are obtained at which the tensile strength characteristics are comparable to the tensile strength characteristics for this structure. The analysis of the obtained results is carried out and conclusions are drawn.

Keywords: cellular concrete, concrete, composite materials, webs, fibers, reduced characteristics, stress-strain state, finite element method, increasing bearing capacity.

Kamil Z. Khayrnasov, PhD, Assoc. Prof.; e-mail: kamilh@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-0111-2947>; AuthorID: 600738



to cite this article: Khayrnasov K. Z. Improving the strength characteristics of cellular concrete using composite materials // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2025. No 1(63). p. 109–122. DOI: 10.37972/chgpu.2025.63.1.010

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

1. Введение. В настоящее время все большее распространение в строительстве занимают легкие бетоны, получаемые из ячеистых структур: газосиликаты и пенобетоны. Ячеистые бетоны имеют несопоставимые прочностные характеристики сжатия и растяжения. Прочность на сжатие в 10 и более раз превышает прочностные характеристики растяжения. Поэтому применение таких материалов, имеющих низкую теплопроводность в 3 раза ниже теплопроводности керамического строительного кирпича, имеет большую перспективу. Однако низкие характеристики прочности на растяжении не позволяет применять ячеистые материалы в строительных конструкциях, испытывающих растягивающие напряжения. Такие напряжения возникают при действии изгибающих тепловых нагрузок поэтому вопросы усиления прочностных характеристик ячеистых бетонов на растягивающие напряжения является важной и актуальной. Одним из способов повышения прочности ячеистых бетонов на растяжение является армирование ячеистых бетонов. Применение стальной арматуры ведет к смятию ячеистых бетонов в местах соприкосновения с жестким металлом, и арматура перестает выполнять свои функции. Одним из материалов подходящих для армирования ячеистых бетонов для повышения прочностных характеристик являются композиционные холсты, сетки и волокна, имеющие высокие характеристики прочности и не разрушающие ячеистую структуру при эксплуатации строительных материалов. Вопросам усиления железобетонных конструкций композиционными материалами уделялось внимание в работах [1–3], и нашло свое отражение в отечественных и зарубежных нормативных материалах [4–8]. Экспериментальные исследования, посвященные усилению строительных конструкций из ячеистых бетонов, на действие температурных нагрузок приведены в работах [9–11]. Методика исследования конструкций из композиционных материалов описана в материалах [12–16].

2. Материалы и методы. Многослойные материалы имеют разные характеристики слоев. Для учета разнородности слоев применяется два метода – определение приведенных характеристик и учет каждого слоя в отдельности. Рассмотрим метод приведенных характеристик, позволяющий определять характеристик многослойного материала в виде однородного материала. Рассмотрим зависимость между напряжениями и деформациями в плосконапряженном состоянии

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\}, \quad (1)$$

Здесь обозначено

$$[E] = \begin{Bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{Bmatrix};$$

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_s, \sigma_\theta, \sigma_{s\theta}\}; \{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_s, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{s\theta}\};$$

$$Q_{11} = E_s / (1 - \nu_{s\theta}\nu_{\theta s}); Q_{12} = \nu_{s\theta}E_s / (1 - \nu_{s\theta}\nu_{\theta s}); Q_{21} = \nu_{\theta s}E_s / (1 - \nu_{s\theta}\nu_{\theta s});$$

$$Q_{22} = E_\theta / (1 - \nu_{s\theta}\nu_{\theta s}); Q_{66} = G_{66},$$

где E_s – модуль упругости в осевом направлении, E_θ – модуль упругости в перпендикулярном направлении, ν – коэффициент Пуассона, G – модуль, учитывающий сдвиг, $\{\sigma\}^T = \{\sigma_s, \sigma_\theta, \sigma_{s\theta}\}$ – вектор напряжений, $\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_s, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{s\theta}\}$ – вектор деформаций.

При повороте осей координат на угол θ коэффициент зависимости (1) приобретает вид

$$[\bar{E}] = \begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{Bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= A^4 Q_{11} - s^4 Q_{22} + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) s^2 c^2; \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) s^2 c^2 + (s^2 + c^2) Q_{22}; \\ \bar{Q}_{16} &= (c^2 Q_{11} - s^2 Q_{12} + (Q_{12} + 2Q_{66})(s^2 - c^2)) sc; \\ \bar{Q}_{22} &= s^4 Q_{11} - c^4 Q_{22} + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) s^2 c^2; \\ \bar{Q}_{26} &= (s^2 Q_{11} - c^2 Q_{12} - (Q_{12} + 2Q_{66})(s^2 - c^2)) sc; \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} - 2Q_{12} + Q_{22}) s^2 c^2 + (s^2 - c^2) Q_{66}; \\ s &= \sin \theta; c = \cos \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Деформация слоя, расположенного на расстоянии z от срединной поверхности можно записать в виде

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^0\} + z \{\chi^0\}.$$

Здесь введено обозначение $\{\varepsilon^0\}$ – деформации в срединной поверхности, $\{\chi^0\}$ – деформации кривизны срединной поверхности.

В результате получаем зависимость между напряжениями и деформациями для многослойного материала в виде

$$\{\sigma\} = [\bar{E}] \{\varepsilon^0\} + z [\bar{E}] \{\chi^0\}.$$

Для многослойного материала, к которому относятся и многослойный композиционный материала, получим

$$\{\sigma\} = \left[\bar{Q} \right] \{\varepsilon^0\} + z \left[\bar{Q} \right] \{\chi^0\}.$$

Здесь обозначено $\{\varepsilon^0\}$ – деформации в срединной поверхности, $\{\chi^0\}$ – деформации кривизны срединной поверхности.

Для нормальных усилий и моментов зависимости выглядят следующим образом

$$\begin{aligned} \{N\} &= \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma\} dz, \{N\}^T = (N_x, N_y, N_{xy}) \\ \{M\} &= \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma\} z dz, \{M\}^T = (M_x, M_y, M_{xy}) \end{aligned} \quad (3)$$

Проведя интегрирование уравнений (3) получим следующие соотношения

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = [E] \begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \chi^o \end{Bmatrix}, [E] = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \end{bmatrix}, \quad [D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix}.$$

$$\{A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}\} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{ij}(1, z, z^2) dz \quad (i, j = 1, 2, 6)$$

Для многослойного композиционного материала приведенные характеристики можно записать в виде

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{ij}(h_k - h_{k-1}) \quad i, j = 1, 2, 6 \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{ij}(h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad i, j = 1, 2, 6 \\ D_{ij} &= \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{ij}(h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad i, j = 1, 2, 6 \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь введено обозначение A_{ij}, B_{ij}, D_{ij} – мембранная, изгибно-мембранная и изгибная жесткость

На рисунке 1 показаны параметры, применяемые в формуле (5)

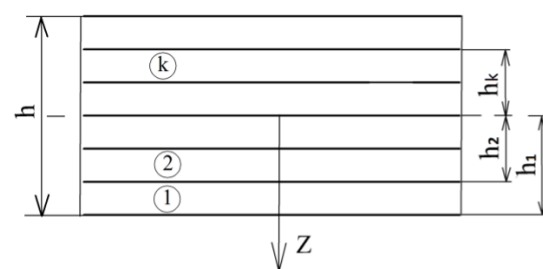


Рис. 1. Обозначения в многослойном композиционном материале

Полученные зависимости определяют приведенные характеристики многослойной структуры, имеющей различные характеристики слоев, применительно к многослойной композиционной структуре при различных углах расположения волокон

Методы усиления железобетонных конструкций путем армирования композиционными холстами приведены на рисунках 2.

Пример усиления строительных конструкций многослойными композиционными холстами приведен на рисунке 3

Одним из основных положительных характеристик композиционного материала относится коррозионная стойкость, малый удельный вес и высокая удельная прочность в 2-2,5 раза превышающая удельную прочность титана, наиболее прочного однородного металла с малым удельным весом.

В таблицах 1 и 2 приведены физико-механические характеристики материалов используемые в работе.

В таблице 1 показано, что прочностные характеристики сжатия газосиликата в 11 раз больше характеристик на растяжение.

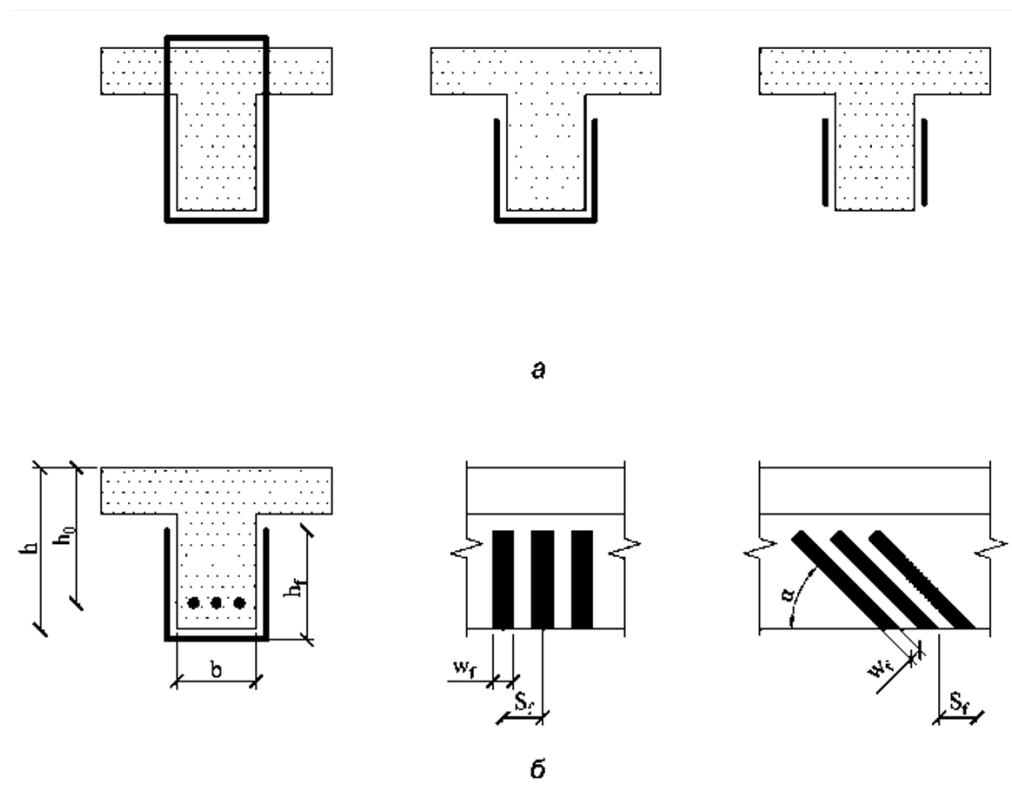


Рис. 2. Методы усиления железобетонных конструкций композиционными холстами при реконструкции

Газосиликат марки 500	Предельное состояние 1			Предельное состояние 2		
	Допустимое напряжение сжатия, R_b , МПа	Допустимое напряжение растяже- ния, σ_t , МПа	Допустимое напряжение сдвига, R_s , МПа	Допустимое напряжение сжатия, R_b , МПа	Допустимое напряжение растяже- ния, σ_t , МПа	Допустимое напряжение сдвига, МПа
	1,6	0,14	0,2	2,4	0,31	0,46

Таблица 1. Таблица свойств газосиликата марки 500

3. Результаты. Исследовалась строительная стеновая панель из ячеистого бетона: газосиликата с параметрами: ширина - 1,8 м, высота - 1 м, толщина - 0,2 м. армированная композиционными волокнами через 0,1 м. по высоте. Внешняя нагрузка - нормальная равномерно распределенная нагрузка на верхнюю грань, создающая изгибающий момент и растягивающая нагрузка величиной, приложенная нормально к торцам модели, имитирующая тепловую

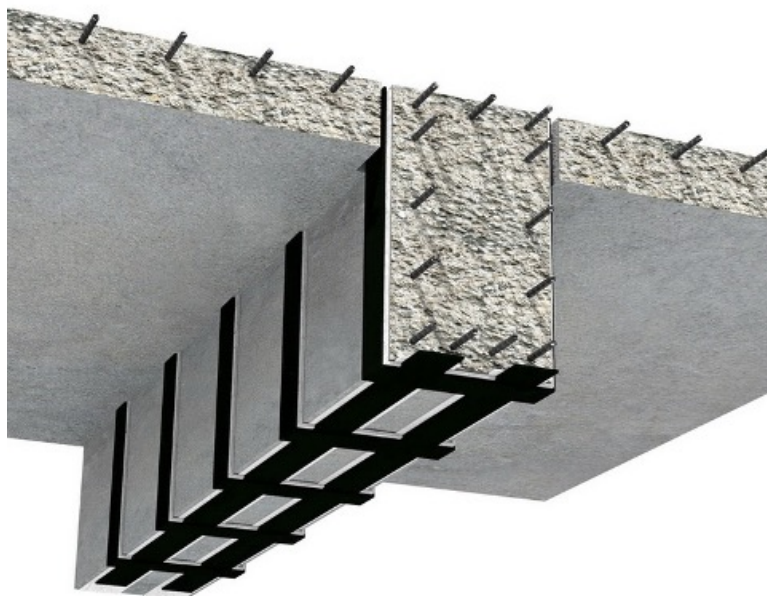


Рис. 3. Усиление строительных элементов композиционными холстами

Материал	Модуль упругости E , ГПа	Допустимое напряжение растяжения, R_s , МПа	Допустимое напряжение сжатия, σ , МПа	Удельный вес, кг/м ³
Углеродное волокно	145	1100	700	1400
Стекловолокно	22-32	645	530	2100

Таблица 2. Физико-механические характеристики углеволокна и стекловолокна[15]

нагрузку. В качестве метода исследования применялся метод конечных элементов [17–21]. Проведанное исследование напряженно-деформированного состояния при действии изгибающего момента и температурного воздействия показано на рисунках 4-6. Проведенные аналитические расчеты в предположении, что прочностные характеристики стеновой панели из ячеистого бетона будут иметь одинаковые прочностные характеристики растяжения и сжатия позволило определить параметры поперечных сечений армирующих композитных стержней. Полученные результаты позволили увеличить несущую способность стеновой строительной конструкции при изгибающих и температурных нагрузках, при действии которых возникают растягивающие напряжения в 11 раз, что соответствует равенству прочностных характеристик растяжения и сжатия газосиликата. Применение апробированных систем автоматизированного проектирования, сходимость результатов расчета, путем сгущения сетки конечных элементов предполагает достоверность полученных результатов

На рисунке 4 показана модель стеновой строительной панели из ячеистого бетона: газосиликата, армированная композиционными волокнами

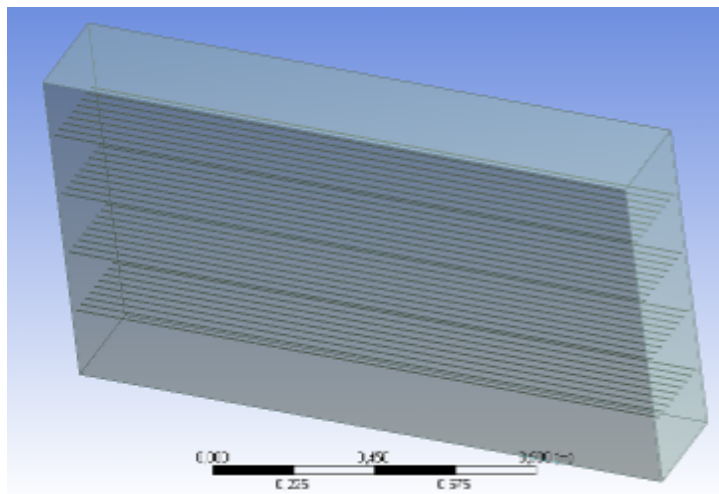


Рис. 4. Модель стеновой строительной панели из ячеистого бетона: газосиликата, армированная композиционными волокнами

На рисунке 5 приведено напряженно-деформированное состояние стеновой панели при действии изгибающего момента и температурного воздействия а) не армированной б) армированной композиционными стержнями.

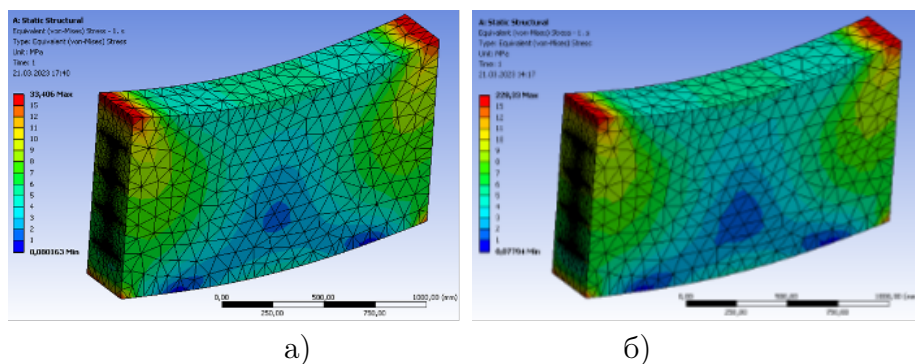


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние стеновой панели от изгибающего момента и температурного воздействия а) без армирования, б) с армированием, МПа

На рисунке 6 показана мозаика перемещений стеновой панели при действии изгибающего момента и температурной нагрузки без армирования а) и с армированием б).

Аналитическое исследование несущей способности стеновой панели высотой $h=1$ м., шириной $L=1,8$ м., толщиной $b=0,2$ м., усиленной композиционными

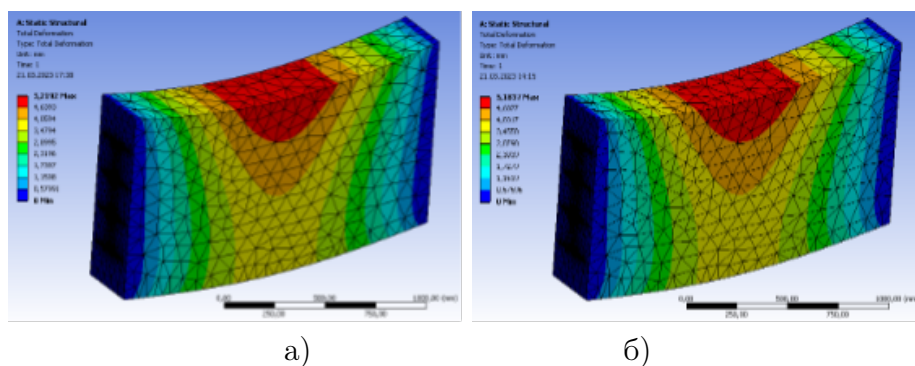


Рис. 6. Мозаика перемещений стеновой панели при действии изгибающего момента и тепловой нагрузки без армирования а) и с армированием б), мм.

стержнями. Площадь композиционной арматуры определялась в предположении, что нейтральная ось модели расположена на расстоянии 0,5 м от основания, что соответствует одинаковым прочностным характеристикам материала модели, выполненного из газосиликата (таблица 1). Действующие нагрузки – изгибающий момент величина которого определялась из аналитических расчетов в предположении, что допустимая величина трещины в области растягивающих напряжений будет не более 0,03 см. и температурная нагрузка, приложенная к внешним боковым граням. Граничные условия – жесткое защемление внешних боковых граней. стеновой панели. В арматурные стержни расположены равномерно на высоте с шагом $a=0,1$ м от основания. На рисунке 6 показаны обозначения, применяемые в аналитическом расчете рисунке 6.

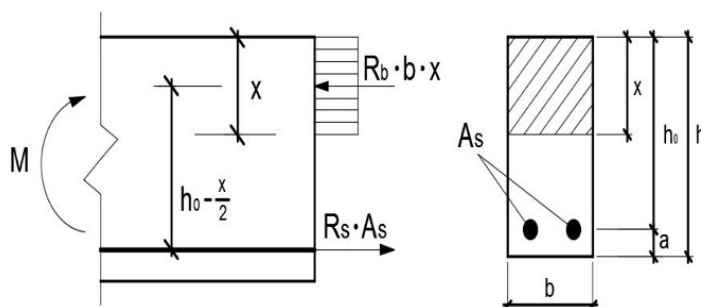


Рис. 7. Обозначения, принятые в расчете

Зададим нейтральную ось на расстоянии половины высоты стеновой панели: 0,5 м., с тем, чтобы газосиликатный материал имел одинаковые значения на растяжение и сжатие при изгибе стеновой панели. Определим необходимое поперечное сечение углеродных волокон, расположенных на расстояниях от нейтральной оси в зоне растяжения стеновой панели при изгибе: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4м.

Тогда момент инерции газосиликата от нейтральной оси определяется по формуле:

$$I_x = \frac{bh^3}{24} = 104166 \text{ см}^4$$

Момент инерции углеволокна, относительно нейтральной оси в предположении, что площадь поперечного сечения F не зависит от расположения по высоте.

$$I_{xy} = F(40^2 + 30^2 + 20^2 + 10^2)$$

Определим необходимую площадь поперечного сечения углеволокна из отношения моментов инерции газосиликата и углеволокна относительно нейтральной оси

$$F = \frac{I_x}{I_{xy}} = 34,72 \text{ см}^2$$

Определим допустимое напряжение растяжения, при котором появляется трещина шириной $l=0,03$ см в зоне растяжения на нижней грани стеновой панели.

$$\sigma_l = E l = 435 \text{ кг/см}^2.$$

В месте расположения армирования стеновой панели углеволокна - 40 см от нейтральной линии, величина трещины составит $l_1=0,024$ см и напряжение будет $\sigma_{l1} = 348 \text{ кг/см}^2$

Учтем далее различие в прочности составляющих прочности газосиликата на сжатие и допустимое напряжение в углеродной нити при допустимой ширине трещины в нижней растянутой зоне стеновой панели. Площадь арматуры углеродной нити составит

$$F_y = \frac{F R_b}{\sigma_{l1}} = 1,28 \text{ см}^2$$

Момент инерции углеродной нити относительно нейтральной оси при полученной площади углеродного волокна будет

$$I_{xy} = 3831,4 \text{ см}^4$$

Момент сопротивления относительно нейтральной оси для углепластика определяется как

$$W_{xy} = \frac{I_{xy}}{40} = 95,79 \text{ см}^3$$

Момент сопротивления сечения для газосиликатного материала

$$W_x = \frac{bh^2}{12} = 4167 \text{ см}^3$$

Определим допустимый изгибающий момент из прочности газосиликата на сжатие

$$M = R_b W_x = 66666,7 \text{ кг см}$$

Погонная нагрузка на верхнюю грань стеновой панели при этом составит $q = \frac{8 M}{bh^2} = 53,3 \text{ кг/см}$

Допустимый изгибающий момент стеновой из газосиликата без армирования составит

$$M_g = \sigma_{g1} W_x = 5833.3 \text{ кг см}$$

В результате проведенного расчета и анализа стеновой панели из газосиликата на допустимый изгибающий момент, с равными характеристиками ячеистого бетона: газосиликата на растяжение и сжатие, путем армирования зоны растяжения стеновой панели углениями при изгибе получили допустимый изгибающий момент 66666,7 кг см.

Несущая способность стеновой панели на изгиб увеличилась на следующую величину

$$n = \frac{M}{M_g} = 11$$

Анализ результатов расчета показал, что армирование ячеистого бетона: газосиликата композитными нитями значительно повышает несущую способность газосиликата на изгиб.

Выводы. В результате проведенного исследования получены результаты, позволяющие повысить прочностные характеристики ячеистых бетонов. Ячеистые бетоны имеют большое применение в современном строительстве, благодаря низким теплопроводящим характеристикам. Низкие характеристики прочности растяжения, по сравнению с характеристиками сжатия (таблица 1), не позволяет применять ячеистые бетоны в конструкциях, испытывающих растяжение. Такие напряжения возникают при изгибных и температурных нагрузках, а в случае применения ячеистых бетонов при таких нагрузках в ячеистых конструкциях возникают трещины, превышающие допустимые: 0.03 см. Поэтому вопросы решения проблемы усиления допустимых низких растягивающих напряжений, путем применения композиционных сеток и волокон в областях растягивающих напряжений является важной и актуальной темой. Проведенные расчеты и анализ показал, что композиционные волокна и сетки, расположенные в зонах растягивающих напряжений ячеистых бетонов позволяет повысить прочностные характеристики растяжения сопоставимые с допустимыми напряжениями сжатия, а именно в 10 и более раз, что позволяет применять ячеистые бетоны в конструкциях испытывающих растягивающие напряжения. Отличие усиления ячеистых конструкций композиционными сетками и волокнами по сравнению с металлической арматурой заключается в возникновении напряжений смятия ячеистых бетонов при соприкосновении с металлической арматурой и как следствие утратой арматурой своих функций. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными приведенными в работах [22, 23].

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. 100%.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. 100%.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ghernouti Y., Rabehi B. Effectiveness of Hybrid and Partially Confined Concrete Subjected to Axial Compressive Loading Using CFRP and GFRP Composite Materials // Slovak Journal of Civil Engineering. 2020. T. 28, № 4. С. 8–14.
- [2] Spyrakos C.C. [и др.]. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction & Building Technology Journal. 2014. T. 8. С. 153–160.
- [3] Lau Denvi, Pam Hoat Joen. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams // Engineering Structures. 2010. T. 32. С. 3857–3865.
- [4] Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP / C.C. Spyrakos [и др.] // The Open Construction and Building Technology Journal. 2014. T. 8. С. 153–163.
- [5] Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures / American Concrete Institute. 2008. ACI 440.2R-08.
- [6] Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures / CNR. Rome, 2004. CNR-DT 200/2004, 144 p.
- [7] Willam K.J., Warnke E.D. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. T. 19. 1975. С. 174.
- [8] A General Approach to Calculation of Displacements of Concrete Structures / ACI. 2000. ACI-435.
- [9] Strengthening of concrete beams by CFRP: Experimental study and finite element analysis / Y. Ghernouti [и др.] // J. Build. Mater. Struct. 2014. T. 1. С. 47–57.
- [10] Bonacci J.F., Maalej M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams // ACI Structural Journal. 2000. T. 97, № 5. С. 703–711.
- [11] Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review / Marwan Bllkasem Salah Alferjani [и др.] // American Journal of Civil Engineering. 2014. T. 2, № 1. С. 1–7.
- [12] Khayrnasov K.Z. Methodology for Modeling and Determining the Frequency Response Trace of Robotic Composite Structures // Przegląd Elektrotechniczny. 2020. T. 96, № 10. С. 39–42.
- [13] Khayrnasov K.Z. Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. T. 1030. 2021. С. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012070.
- [14] Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. 2014. T. 475–476. С. 1563–1566.
- [15] Jones R.M. Mechanics of composite materials. London : Taylor & Francis, 1999. 538 с.
- [16] Roos R., Kress G., Ermanni F. A Post-Processing Method for Interlaminar Normal Stresses in Doubly Curved Laminates // Composite Structures. 2007. T. 81, № 3. С. 463–470.
- [17] Moaveni S. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. UK : Pearson Education, 2015. 929 с.
- [18] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. Finite Element Method: Its Basis And Fundamental. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. 756 с.

- [19] Koutromanos I. Applied Fundamentals of Finite Element Analysis Linear Finite Element Analysis. N.Y : John Wiley & Sons, 2018. 731 c.
- [20] Bathe K.J. Finite Element Procedures. USA : Prentice Hall, Pearson Education, Inc, 2006. 1037 c.
- [21] Koutromanos I. Applied Fundamentals of Finite Element Analysis. Linear Finite Element Analysis. N.Y : John Wiley & Sons, 2018. 356 c.
- [22] Ceroni F. Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials // Construction and Building Materials. 2010. T. 24. C. 1547–1559.
- [23] Granovsky A.V. [и др.]. The use of a composite mesh on a strong lining under the action of the touch, simulating temperature effects // Industrial and civil construction. 2020. № 3. C. 25–32.

REFERENCES

- [1] Ghernouti Y., Rabehi B. Effectiveness of Hybrid and Partially Confined Concrete Subjected to Axial Compressive Loading Using CFRP and GFRP Composite Materials // Slovak Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 28, no. 4. P. 8–14.
- [2] Spyrakos C.C. [et al.]. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction & Building Technology Journal. 2014. Vol. 8. P. 153–160.
- [3] Lau Denvid, Pam Hoat Joen. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams // Engineering Structures. 2010. Vol. 32. P. 3857–3865.
- [4] Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP / C.C. Spyrakos [et al.] // The Open Construction and Building Technology Journal. 2014. Vol. 8. P. 153–163.
- [5] Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures / American Concrete Institute. 2008. ACI 440.2R-08.
- [6] Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures / CNR. Rome, 2004. CNR-DT 200/2004, 144 p.
- [7] Willam K.J., Warnke E.D. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 19. 1975. P. 174.
- [8] A General Approach to Calculation of Displacements of Concrete Structures / ACI. 2000. ACI-435.
- [9] Strengthening of concrete beams by CFRP: Experimental study and finite element analysis / Y. Ghernouti [et al.] // J. Build. Mater. Struct. 2014. Vol. 1. P. 47–57.
- [10] Bonacci J.F., Maalej M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams // ACI Structural Journal. 2000. Vol. 97, no. 5. P. 703–711.
- [11] Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review / Marwan Bllkasem Salah Alferjani [et al.] // American Journal of Civil Engineering. 2014. Vol. 2, no. 1. P. 1–7.
- [12] Khayrnasov K.Z. Methodology for Modeling and Determining the Frequency Response Trace of Robotic Composite Structures // Przegląd Elektrotechniczny. 2020. Vol. 96, no. 10. P. 39–42.
- [13] Khayrnasov K.Z. Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1030. 2021. P. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012070.
- [14] Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 475–476. P. 1563–1566.
- [15] Jones R.M. Mechanics of composite materials. London : Taylor & Francis, 1999. 538 p.

-
- [16] Roos R., Kress G., Ermanni F. A Post-Processing Method for Interlaminar Normal Stresses in Doubly Curved Laminates // Composite Structures. 2007. Vol. 81, no. 3. P. 463–470.
 - [17] Moaveni S. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. UK : Pearson Education, 2015. 929 p.
 - [18] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. Finite Element Method: Its Basis And Fundamental. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
 - [19] Koutromanos I. Applied Fundamentals of Finite Element Analysis Linear Finite Element Analysis. N.Y : John Wiley & Sons, 2018. 731 p.
 - [20] Bathe K.J. Finite Element Procedures. USA : Prentice Hall, Pearson Education, Inc, 2006. 1037 p.
 - [21] Koutromanos I. Applied Fundamentals of Finite Element Analysis. Linear Finite Element Analysis. N.Y : John Wiley & Sons, 2018. 356 p.
 - [22] Ceroni F. Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. P. 1547–1559.
 - [23] Granovsky A.V. [et al.]. The use of a composite mesh on a strong lining under the action of the touch, simulating temperature effects // Industrial and civil construction. 2020. no. 3. P. 25–32.