

С.Ю. Берестянська¹, Є.І. Галагура^{1,2}¹Український державний університет залізничного транспорту, Україна²Сумський національний аграрний університет, Україна

ВПЛИВ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ НА МІЦНІСТЬ СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ З ФІБРОБЕТОННИМ ЯДРОМ

У статті запропоновано методику розрахунку сталобетонних колон на термосиловий вплив, в яких в якості ядра використовується базальтова та сталева фібра. Виходячи з умов однакової несучої здатності проведено розрахунки на термосиловий вплив колон з різною товщиною сталевий оболонки. Виконано дослідження колони з поперечним перерізом 100x100x3 з різними видами ядра від температури.

Ключові слова: фібробетон, базальтова фібра, сталева фібра, колона, несуча здатність, висока температура.

Постановка проблеми

Сталобетонні конструкції використовують у різноманітних будівлях і спорудах, зокрема як опорні конструкції (колони). Одним з перспективних напрямків будівельних конструкцій є дисперсно-армовані бетони, використання яких дозволяє значно поліпшити несучу здатність та знизити ресурсопотребу при будівництві нових об'єктів та при реконструкції [1, 2]. Для цього необхідно виконувати не тільки розрахунки на міцність, а і проводити розрахунки на термосиловий вплив, з метою забезпечення вогнестійкості конструкції. При розрахунках на сумісний вплив силового навантаження та високої температури, необхідно знати механічні та деформативні характеристики фібробетонів, які зазнали вплив високих температур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Експериментальним та теоретичним дослідженням використання бетонів як ядра сталобетонних конструкцій присвятили свої роботи: Кришан А. Л., Мельничук А. С., Шахворостов А. І. та інші вчені. Але не всі питання достатньо вивчені. Існуючі методи розрахунків не враховують особливості роботи фібробетонних конструкцій. Зокрема недостатньо вивченою є робота сталобетонних колон, які зазнали високий температурний вплив, квадратного поперечного перерізу з ядром із фібробетону [3-11].

Мета статті

Метою дослідження є отримання теоретичної методики розрахунку, яка в подальшому буде верифікована з експериментальними дослідженнями,

для визначення несучої здатності сталобетонної колони з ядром із фібробетону, яка зазнала термосилові навантаження. Для досягнення сформульованої мети потрібно визначити призмові напруження фібробетону з урахуванням високого температурного впливу, зі сталевий та базальтосий фібрами.

Виклад основного матеріалу

Визначення несучої здатності сталобетонних колон, які зазнали високий температурний вплив, виконуємо, використовуючи уніфікований метод [12] на прикладі шарнірно-обіпертої колони довжиною $l = 500$ мм із розмірами поперечного перерізу $100 \times 100 \times 3$ мм завантаженою осьовим навантаженням (рис. 1).

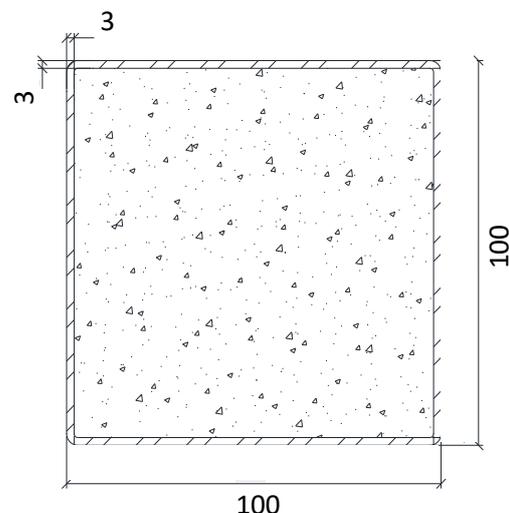


Рис. 1. Поперечний переріз колони

Несучу здатність сталобетонних колон, які зазнали високий температурний вплив, полігонального поперечного перерізу визначаємо за формулою:

$$N = f_{sk}^t \cdot A_{sk} = \left(1 + 0,5 \cdot k_e \cdot \frac{\xi^t}{1 + \xi^t}\right) \cdot (f_y^t \cdot A_s + f_{ck}^t \cdot A_c), \quad (1)$$

де f_{sk}^t – узагальнена міцність сталобетонних колон з урахуванням температурного впливу;

A_{sk} – площа перерізу сталобетонної колони;

k_e – приведений коефіцієнт ефективності,

$$k_e = k_h \cdot k_n;$$

k_h – коефіцієнт ефективності пустот (у нашому випадку пустот немає, тому $k_h = 1$);

k_n – коефіцієнт полігональності, який визначається згідно з [12], $k_n = 0.33$;

f_y^t – межа текучості сталі, яка залежить від температури;

A_s – площа перерізу сталеві оболонки, $A_s = 11.64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

f_{ck}^t – призмове міцність бетону, яка залежить від температури;

A_c – площа перерізу бетонного ядра, $A_c = 88.36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

$$\xi^t \text{ – коефіцієнт зведення, } \xi^t = \frac{A_s \cdot f_y^t}{A_c \cdot f_{ck}^t}.$$

Виконавши розрахунки за формулою (1), отримуємо значення несучої здатності сталобетонної колони при нормальній температурі $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $f_y^{20} = 220 \text{ МПа}$, $f_{ck}^{20} = 20 \text{ МПа}$, $\xi^{20} = 1.24$: $N = 505 \text{ кН}$.

Для визначення несучої здатності сталобетонної колони з ядром із фібробетону, яка зазнала термосилові навантаження необхідно розрахувати залежність межі текучості сталі від температури f_y^t за формулою:

$$f_y^t = \gamma_y f_y^{20}, \quad (2)$$

де, $f_y^{20} = 220 \text{ МПа}$ – межа текучості сталі при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$,

t – температура, $^\circ\text{C}$,

γ_y – коефіцієнт, який вибирається згідно табл. 1 [13].

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта γ_y від температури

| Коефі- цієнт | Значення коефіцієнту при температурі, $^\circ\text{C}$ | | | | | | | |
|-----------------|--|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| | 20 | 100 | 200 | 400 | 500 | 600 | 700 | 750 |
| γ_y | 1 | 0.95 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.25 | 0 |

Механічні властивості композитних матеріалів, армованих різними волокнами, залежать від ряду факторів: виду самої фібри, кількості фібри на одиницю маси чи об'єму, розміру фібри (довжина та поперечний розмір), тощо. У [1, 2, 14] розглянуто різні види фібр і зроблено висновок о доцільності

використання сталеві та базальтової фібри для несучих конструкцій, запропоновано оптимальний вміст та розмір сталеві та базальтової фібр.

Для визначення призмовеї міцності фібробетону від високої температури f_{ck}^t використовуємо дослідження [15] у якому подано залежності розрахункового опору фібробетонів для сталеві та базальтової фібр від температури (табл. 2), де ПОБ – бетон без фібри, ПББ – бетон з додаванням базальтової фібри, ПСБ – бетон з додаванням сталеві фібри.

Таблиця 2

Залежність призмовеї міцності бетону та фібробетону від температури

| Температура, $^\circ\text{C}$ | Призмове міцність, f_{ck}^t | | |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|
| | ПОБ, МПа | ПББ, МПа | ПСБ, МПа |
| 20 | 23.4 | 30.1 | 26.2 |
| 60 | 15.2 | 23.7 | 24.2 |
| 90 | 18.4 | 28.7 | 23.8 |
| 120 | 21 | 29.7 | 22.7 |
| 200 | 23 | 29.8 | 24.2 |
| 400 | 20 | 26.19 | 23 |
| 600 | 11 | 12.7 | 13.9 |
| 800 | 2.15 | 3.2 | 5.9 |

В якості дослідних зразків розглянуто фібробетонні колони зі сталеві та базальтовою фіброю при несучій здатності близької до 505 кН і довжиною $l = 0.5 \text{ м}$ [16], та без врахування коефіцієнту армування на етапі теоретичних досліджень. Результати розрахунків, виконаних за даною методикою, наведено в таблиці 3 для колон з ядром з базальтовою фіброю та в таблиці 4 для колон з ядром зі сталеві фіброю.

Таблиця 3

Залежність несучої здатності колони з ядром із базальтового фібробетону від температури

| Температура, $^\circ\text{C}$ | Несуча здатність колони N, кН в залежності від розміру сталеві оболонки | | | | |
|----------------------------------|---|-----------|---------|---------|---------|
| | 115x115x1 | 103x103x2 | 93x93x3 | 84x84x4 | 75x75x5 |
| 20 | 501,22 | 502,10 | 504,63 | 501,92 | 504,19 |
| 100 | 477,50 | 478,02 | 480,19 | 477,43 | 479,45 |
| 200 | 485,70 | 478,45 | 474,68 | 467,38 | 465,94 |
| 400 | 427,92 | 422,36 | 419,68 | 413,72 | 412,82 |
| 500 | 330,04 | 335,49 | 340,90 | 341,93 | 345,62 |
| 600 | 220,60 | 228,02 | 234,53 | 237,39 | 241,55 |
| 700 | 130,73 | 129,69 | 129,37 | 127,94 | 127,96 |

За даними таблиць 3 та 4 можна побудувати графіки залежності несучої здатності фібробетонної колони з ядром з базальтобетону рис. 2. та сталобетону рис. 3., від високої температури.

За побудованими графіками бачимо, що характерне зменшення несучої здатності колони при $t = 100^\circ\text{C}$, яке відбувається за рахунок випарювання вільної води з бетону, відсутнє, якщо ядро колони виконано з бетону з додаванням фібри. Це відноситься як до базальтової фібри, так і до сталеві. При температурі $t = 100^\circ\text{C}$, несуча здатність колон з однаковою товщиною оболонки з додаванням базальтової фібри більше на 7.8%, а з додаванням сталеві фібри на 5.8%, відповідно до колони з ядром без додавання фібри. Після досягнення $t = 400^\circ\text{C}$, відбувається різке зменшення несучої здатності колони як з базальтовою, так і зі сталеві фіброю. Це відбувається за рахунок випарювання хімічно зв'язаної води.

Таблиця 4

Залежність несучої здатності колони з ядром із сталеві фібробетону від температури

| Температура, $^\circ\text{C}$ | Несуча здатність колони N, кН в залежності від розміру сталеві оболонки | | | | |
|-------------------------------|---|-----------|---------|---------|---------|
| | 122x122x1 | 108x108x2 | 97x97x3 | 87x87x4 | 79x79x5 |
| 20 | 501,33 | 500,72 | 506,07 | 503,88 | 504,06 |
| 100 | 460,57 | 463,90 | 471,74 | 471,88 | 473,67 |
| 200 | 460,12 | 457,36 | 460,60 | 457,36 | 456,61 |
| 400 | 430,44 | 422,64 | 421,75 | 415,84 | 412,961 |
| 500 | 352,51 | 351,69 | 355,16 | 353,40 | 353,37 |
| 600 | 262,18 | 259,01 | 259,66 | 256,93 | 255,84 |
| 700 | 173,57 | 161,41 | 154,26 | 146,88 | 141,96 |

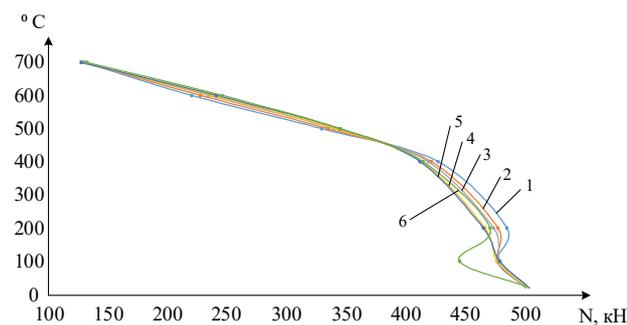


Рис. 2. Залежність несучої здатності колони з ядром із базальтобетону від температури в залежності від розміру оболонки: 1 – 115x115x1 мм, 2 – 103x103x2 мм, 3 – 93x93x3 мм, 4 – 84x84x4 мм, 5 – 77x77x5 мм, 6 – 100x100x3 мм з ядром зі звичайного бетону

При порівнянні несучої здатності колон з поперечним перерізом 100x100x3 з різними видами ядра від високої температури (рис. 4) найбільш доцільним є використання базальтової фібри.

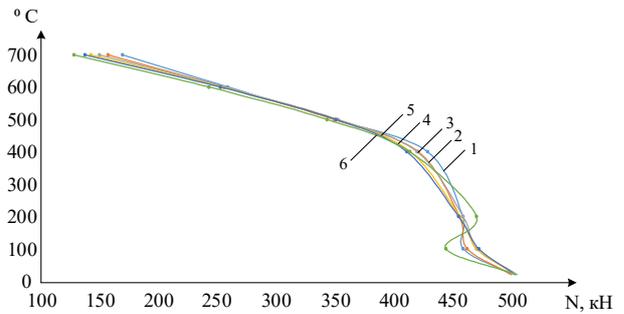


Рис. 3. Залежність несучої здатності колони з ядром із сталеві фібробетону від температури в залежності від розміру оболонки: 1 – 122x122x1 мм, 2 – 108x108x2 мм, 3 – 97x97x3 мм, 4 – 87x87x4 мм, 5 – 79x79x5 мм, 6 – 100x100x3 мм з ядром зі звичайного бетону

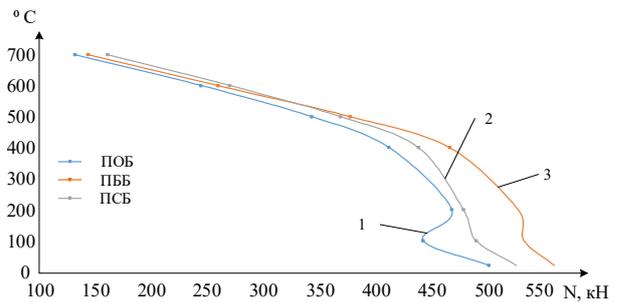


Рис. 4. Залежність несучої здатності колон з поперечним перерізом 100x100x3 мм від температури з різними видами ядра: 1 – ядро зі звичайного бетону, 2 – ядро з бетону з сталеві фіброю, 3 – ядро з бетону з базальтовою фіброю

Результати розрахунків наведено в таблиці 5. При температурі $t = 400^\circ\text{C}$, колона з ядром із базальтобетону має несучу здатність на 6.5% вище ніж з сталеві фіброю, та на 13% вище, чим ядро без додавання фібри. Колона з додаванням сталеві фібри в ядро, має несучу здатність на 6.2% вище, ніж колона без додавання фібри. При подальшому підвищенні температури несуча здатність колон з різними видами фібр починають збігатись. Це пояснюється значним нагріванням сталеві оболонки, і як слідство, зниження межі текучості металу.

Таблиця 5

Залежність несучої здатності колон з поперечним перерізом 100x100x3 від температури з різними видами ядра

| Температура, $^\circ\text{C}$ | Несуча здатність колони N, кН | | |
|-------------------------------|-------------------------------|--------|--------|
| | ПОБ | ПББ | ПСБ |
| 20 | 505,10 | 564,30 | 529,84 |
| 100 | 446,00 | 537,01 | 493,71 |
| 200 | 471,73 | 531,81 | 482,33 |
| 400 | 415,39 | 470,08 | 441,89 |
| 500 | 345,79 | 380,61 | 371,86 |
| 600 | 246,36 | 261,38 | 271,99 |
| 700 | 132,64 | 144,83 | 162,06 |

Висновки

У статті запропоновано теоретичну методику, яка в подальшому буде верифікована з експериментальними дослідженнями, розрахунку сталебетонних колон, на термосиловий вплив, в яких в якості ядра використовується фібробетон. Проведено дослідження колон з ядром із базальтовою та сталевією фібрами на дію високих температур. За основу прийнято рівномісності колони з різною товщиною сталевієї оболонки. Розрахунки показали, що при температурі $t = 100^\circ\text{C}$, несуча здатність колон з однаковою товщиною оболонки та з додаванням базальтової фібри більше на 7.8%, а з додаванням сталевієї фібри на 5.8%, відповідно до колони з ядром без додавання фібри. Розглянуто втрату несучої здатності колон поперечним перерізом $100 \times 100 \times 3$ з різними видами ядра від високої температури. Найбільш доцільним є використання базальтової фібри, міцність якої на 6.5% вище ніж колона з додаванням сталевієї фібри, та на 13% вище, ніж колона без фібри.

Література

1. Опанасенко Е.В., Берестянская А.А. Виды фибрового армирования. // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне, 2015. №30. С.57–64.
2. Vatulia G., Berestianskaya S., Opanasenko E., Berestianskaya A. Substantiation of concrete core rational parameters for bending composite structures. // DYN-WIND'2017 – MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 107. 00044 2017.
3. Избаш М.Ю., Казимагомедов Ф.И., Савйовский В.В. Аспекты применения базальтовой фибры для армирования изгибаемых конструкций // Науковий вісник будівництва: науково-технічний збірник. Харків, 2011. Вип. 66. С.282-285.
4. Избаш М.Ю., Казимагомедов Ф.И. Прочность и деформативность фибробетона // Науковий вісник будівництва: науково-технічний збірник. Харків, 2012. Вип. 68. С.212-216.
5. Избаш М.Ю., Казимагомедов Ф.И. Подбор рационального состава фибробетонной смеси // Науковий вісник будівництва: науково-технічний збірник. Харків, 2013. Вип. 72. С.220-224.
6. Веревичева М.А., Берестянская А.А., Дериземля С.В. Выбор рациональных параметров фибрового армирования. // Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение». Днепропетровск, 2015. Вип. 82. С.60-69.
7. Чихладзе Э.Д., Жакин А.И., Веревичева М.А. Теория теплообмена в пористых средах // Изв. ВУЗов. Будівництво. 1998. №1. С. 111-116.
8. Чихладзе Э.Д., Жакин А.И., Веревичева М.А. Огнестойкость бетонных и сталебетонных конструкций // Сб. трудов ХарГАЖТ. Харьков, 2000. Вип. 40. С. 97.
9. Васильовская, Н. Г., Енджиевской И.Г., Калугин И.Г. Цементные композиции дисперсно-армированные базальтовой фиброй // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. Томск, 2011. Вип. 3. С. 153-158.
10. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. 559 с.

11. Берестянская, А.А., Гаврилко Н.Н., Быченко И.В. Особенности расчета и проектирования сталефибробетонных конструкций // Сталезализобетонні конструкції: збірник наукових статей. Полтава, 2014. Вип. 11. С.34-40.

12. Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye. A unified formulation for circle and polygon concrete filled steel tube columns under axial compression. // Engineering Structures. 2013. № 49. P. 1–10.

13. Бартелими Б., Крюпа Ж. Огнестойкость стальных конструкций. Стройиздат, 1985. 216 с.

14. Веревичева М.А., Берестянская А.А., Дериземля С.В. Выбор рациональных параметров фибрового армирования. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Днепропетровск, 2015. Вип. 82. С. 60-69.

15. Svitlana Berestianskaya, Evgeniy Galagurya, Olena Opanasenko, Anastasiia Berestianskaya, Ihor Bychenok. Experimental Studies of Fiber-Reinforced Concrete Prisms Exposed to High Temperatures. // Key Engineering Materials. 2020 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. Vol. 864, P 3-8.

16. С.Ю. Берестянська, Є.І. Галагура, М.О. Ковальов, Л.Б. Кравиць, О.В. Опанасенко. Ефективність використання фібробетону як ядра для сталебетонних колон квадратного поперечного перерізу // Науковий вісник будівництва. науково-технічний збірник. Харків, 2024, №110, С. 37 – 41.

References

1. Opanasenko E., Berestyanskaya A. (2015). Types of fiber reinforcement. *Resource-saving materials, designs, etc.* 30. 57–64.
2. Vatulia G., Berestianskaya S., Opanasenko E., Berestianskaya A. (2017). Substantiation of concrete core rational parameters for bending composite structures. *DYN-WIND'2017 – MATEC Web of Conferences*. 107. 00044 2017.
3. Izbash M.Y., Kazimagomedov F.I., Savjovsky V.V. (2011). Aspects of basalt fibre application for reinforcement of bending structures. *Scientific and Technical Journal of Building Construction*. 66. 282-285.
4. Izbash M.Y., Kazimagomedov F.I. (2012). Strength and deformability of fibre concrete. *Scientific Bulletin of Construction*. 68. 212-216.
5. Izbash M.Y., Kazimagomedov F.I. (2013). Selection of rational composition of fibre-concrete mixture. *Scientific Bulletin of Construction*. 72. 220-224.
6. Verevicheva M., Berestyanskaya A., Derizemlya S. (2015). Selection of rational parameters for fiber reinforcement. *Construction, materials science, mechanical engineering*. 82. 60-69.
7. Chikhkladze E.D., Zhakin A.I., Verevicheva M.A. (1998). Theory of heat and mass transfer in porous media. *University News Construction*. 1. 111-116.
8. Chikhkladze E.D., Zhakin A.I., Verevicheva M.A. (2000). Fire resistance of concrete and steel-concrete structures *Collected Works of KharGAZhT*. 40. 97.
9. Vasilovskaya, N.G., Enjievskoy I.G., Kalugin I.G. (2011). Cement compositions dispersed-reinforced with basalt fibre. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 3. 153-158.
10. Rabinovich F. N. (2004). *Composites on the basis of disperse-reinforced concrete*. Publishing House of the Association of Construction Universities.
11. Berestyanska, A.A., Gavrillko N.N., Bychenok I.V. (2014). Peculiarities of calculation and design of steel fibre-reinforced concrete structures. *Steel and reinforced concrete structures: a collection of scientific articles*. 11. 34-40.

12. Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye. (2013). A unified formulation for circle and polygon concrete filled steel tube columns under axial compression. *Engineering Structures*. 49. 1–10.
13. Bartlemy B., Krupa J. (1985). *Fire resistance of building structures*. Stroyizdat.
14. Verevicheva M., Berestyanskaya A., Derizemlya S. (2015). Selection of rational parameters for fiber reinforcement. *Construction, materials science, mechanical engineering*. 82. 60-69.
15. Svitlana Berestianskaya, Evgeniy Galagurya, Olena Opanasenko, Anastasiia Berestianskaya, Ihor Bychenok. (2020). Experimental Studies of Fiber-Reinforced Concrete Prisms Exposed to High Temperatures. *Key Engineering Materials*. 864. 3-8.
16. Berestyanska S.Y., Galagurya E.I., Kovalev M.O., Kravtsiv L.B., Opanasenko O.V. (2024). Efficiency of using fibre concrete as a core for steel concrete columns of square cross-section. *Scientific Bulletin of Construction*. 110. 37 – 41.

Автор: БЕРЕСТЯНСЬКА Світлана Юріївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту,

Svitlana BERESTIANSKAYA
PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics and Hydraulics,
Ukrainian State University of Railway Transport
E-mail – s.berestyanskaya@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4111-3138>

Автор: ГАЛАГУРЯ Євгеній Іванович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри будівельних конструкцій, Сумський національний аграрний університет, Evgeniy GALAGURYA,
PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics and Hydraulics,
Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor of the Department of Building Structures,
Sumy National Agrarian University
E-mail – evgeniygalagurya@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3075-8651>

EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE STRENGTH OF STEEL CONCRETE COLUMNS OF SQUARE CROSS-SECTION WITH FIBRE-REINFORCED CONCRETE CORE

S. Berestianskaya¹, E. Galagurya^{1,2}

¹Ukrainian State University of Railway Transport

²Sumy National Agrarian University

The article proposes a methodology for calculating steel concrete columns for thermal force effects, in which basalt and steel fibre are used as a core. For this purpose, it is necessary to determine the prismatic stresses of fibre-reinforced concrete with steel and basalt fibres, considering the temperature effect. A column with a transverse dimension of 100x100x3 mm with a core of ordinary concrete 500 mm long and a bearing capacity of 505 kN was selected as a control sample. Based on the conditions of the same bearing capacity, calculations were made for the thermal force effect of columns with different thicknesses of steel shells with cores of concrete with steel and basalt fibres. Graphs of the bearing capacity of a fibre-reinforced concrete column with a core of basalt concrete and steel concrete were constructed as a function of temperature. The graphs show that the characteristic decrease in the bearing capacity of the column at $t=100^{\circ}\text{C}$, which occurs due to the evaporation of free water from concrete, is absent if the column core is made of concrete with the addition of fibre. This applies to both basalt fibre and steel fibre. At a temperature of $t = 100^{\circ}\text{C}$, the bearing capacity of columns with the same shell thickness with the addition of basalt fibre is 7.8% higher, and with the addition of steel fibre by 5.8%, respectively, compared to a column with a core without fibre. A column with a cross-section of 100x100x3 with different types of cores was studied as a function of temperature. At a temperature of $t=400^{\circ}\text{C}$, the column with a basalt concrete core has a bearing capacity 6.5% higher than that with steel fibre, and 13% higher than that without fibre addition. A column with steel fibre in the core has a bearing capacity 6.2% higher than a column without fibre. With a further increase in temperature, the bearing capacity of the columns with different types of fibres begins to converge. This is due to the significant heating of the steel shell and, as a result, a decrease in the strength of the metal.

Keywords: fibre concrete, basalt fibre, steel fibre, column, bearing capacity