

Т.А. МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник (takhir50@rambler.ru),
С.А. МАЙОРОВ, ведущий инженер (maiorov.st@gmail.com)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6, корп. 5)

Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов по деформационной модели

Изложена методика расчета прочности сжатых элементов по деформационной модели с учетом работы сжатой композитной полимерной арматуры. Предложены критерии прочности нормального сечения сжатого элемента при расчете по деформационной модели с использованием кусочно-линейных и криволинейных диаграмм осевого сжатия бетона. Приведено сопоставление результатов расчета прочности опытных образцов по деформационной модели с опытными данными и с результатами расчетов по методу предельных усилий. Показано, что предложенная методика расчета внецентренно сжатых элементов с учетом работы композитной арматуры при сжатии приводит к удовлетворительной сходимости с опытными данными при использовании как кусочно-линейной, так и криволинейной диаграмм осевого сжатия бетона. Сопоставлением результатов расчета прочности рассмотренной выборки опытных внецентренно сжатых образцов, выполненных по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы и методом предельных усилий, установлено их удовлетворительное совпадение.

Ключевые слова: строительные конструкции, сжатые элементы, композитная полимерная арматура, прочность, методы расчета.

Для цитирования: Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов по деформационной модели // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-66-71>

T.A. MUKHAMEDIEV, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, (takhir50@rambler.ru),
S.A. MAIOROV, Lead Engineer, (maiorov.st@gmail.com)

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction
(6, bld. 5, 2nd Institutskaya Street., Moscow, 109428, Russian Federation)

Taking into Account the Operation of Compressed Composite Polymer Reinforcement when Calculating the Strength of Compressed Elements According to the Deformation Model

The method of calculating the strength of compressed elements according to the deformation model, taking into account the operation of compressed composite polymer reinforcement, is described. The criteria for the strength of the normal section of the compressed element are proposed when calculating according to the deformation model using piecewise-linear and curved diagrams of axial compression of concrete. The comparison of the results of calculating the strength of prototypes according to the deformation model with experimental data and with the results of calculations using the method of limiting forces is given. It is shown that the proposed method for calculating eccentrically compressed elements, taking into account the work of composite reinforcement in compression, leads to satisfactory convergence with experimental data when using both piecewise linear and a curvilinear diagrams of the axial compression of concrete. By comparing the strength calculation results of the considered sample of experimental non-centrally compressed samples made according to the deformation model using a curved diagram and the method of limiting forces, their satisfactory coincidence was established.

Keywords: building structures, compressed elements, composite polymer reinforcement, strength, calculation methods.

For citation: Mukhamediev T.A., Maiorov S.A. Taking into account the operation of compressed composite polymer reinforcement when calculating the strength of compressed elements according to the deformation model. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 66–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-66-71>

В [1] предложена методика расчета сжатых бетонных элементов с учетом работы композитной полимерной арматуры (АКП) на сжатие методом предельных усилий. Согласно СП 295.1325800.2017 [2] основным методом расчета прочности нормальных сечений является расчет по деформационной модели. Однако

физические соотношения, установленные в [2] для расчета бетонных элементов с АКП, не учитывают работу арматуры, расположенной в сжатой зоне сечения. В статье излагается способ учета работы сжатой арматуры при расчете прочности нормальных сечений таких элементов на основе деформационной модели.

Для расчета элементов с учетом работы сжатой арматуры необходимо принять ее расчетную диаграмму деформирования при осевом сжатии. Параметры такой диаграммы предлагается принять следующими.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований связь между относительными деформациями и напряжениями в композитной арматуре при осевом сжатии принимается линейной. Расчетное сопротивление сжатой арматуры принимается равным сопротивлению арматуры осевому сжатию $R_{fc,ult}$, установленному испытаниями контрольных образцов арматуры. В процессе расчета максимальное напряжение в сжатом стержне арматуры в момент достижения элементом предельного состояния по прочности ограничивается значениями, отвечающими предельным относительным деформациям укорочения бетона. Такое ограничение напряжений в арматуре выполняется в расчете автоматически в силу принятой для расчета по деформационной модели гипотезы плоских сечений. Гипотетически при определенной степени армирования, а также прочностных и деформационных характеристиках сжатого стержня арматуры его деформации могут достигнуть своих предельных значений до достижения предельной для элемента нагрузки. В таком случае данный стержень при выполнении расчета исключается из работы.

Система уравнений равновесия внешних и внутренних сил в нормальном сечении при расчете прочности внецентренно сжатых элементов в плоскости симметрии принимается в известном виде:

$$M = D_{11} \cdot \frac{1}{r} + D_{13} \cdot \varepsilon_0; \quad (1)$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r} + D_{33} \cdot \varepsilon_0, \quad (2)$$

где жесткостные характеристики D_{ij} ($i, j = 1; 3$) предлагается определять по формулам:

$$D_{11} = \sum A_{bi} \cdot z_{bi}^2 \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{fj} \cdot z_{fj}^2 \cdot E_{fj} + \sum A_{fk} \cdot z_{fk}^2 \cdot E_{fck} \cdot \nu_{fck}; \quad (3)$$

$$D_{13} = \sum A_{bi} \cdot z_{bi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{fj} \cdot z_{fj} \cdot E_{fj} + \sum A_{fk} \cdot z_{fk} \cdot E_{fck} \cdot \nu_{fck}; \quad (4)$$

$$D_{33} = \sum A_{bi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{fj} \cdot E_{fj} + \sum A_{fk} \cdot E_{fck} \cdot \nu_{fck}, \quad (5)$$

где M и N – изгибающий момент и продольная сила от внешней нагрузки; A_{bi} , z_{bi} , E_b – площадь, координата центра тяжести и начальный модуль упругости i -го участка бетона; A_{fj} , z_{fj} , E_{fj} – площадь, координата

центра тяжести и начальный модуль упругости j -го растянутого стержня АКП; A_{fk} , z_{fk} , E_{fk} – площадь, координата центра тяжести и начальный модуль упругости k -го сжатого стержня АКП; ε_0 – относительная деформация продольной оси; $\frac{1}{r}$ – кривизна продольной оси; ν_{fck} – условный коэффициент упругости j -го сжатого стержня арматуры, введенный для контроля его прочности при сжатии и принимаемый равным 1 при $|\varepsilon_{fk}| < \varepsilon_{fc,ult} = R_{fc}/E_{fc}$ и равным 0 при $|\varepsilon_{fk}| \geq \varepsilon_{fc,ult}$; ν_{bi} – коэффициент упругости i -го участка бетона, определяемый по указаниям СП 63.13330.2018 [3], принимая в расчетных зависимостях вместо значений относительных деформаций ε_{b0} и ε_{b2} в базовых точках диаграммы осевого сжатия бетона их значения $k \cdot \varepsilon_{b0}$ и $k \cdot \varepsilon_{b2}$, принятые с поправочным коэффициентом k , учитывающим влияние армирования элемента поперечными хомутами на деформации бетона при сжатии, и принимаемый согласно [1] равным:

$$k = 1 + \mu_{fw} \cdot \frac{R_{fw}}{R_b} \cdot \frac{S_0}{S}; \quad (6)$$

$$S_0 = 500 \text{ мм}, \quad (7)$$

где μ_{fw} – коэффициент поперечного армирования:

$$\mu_{fw} = \frac{2 \cdot A_{fw} \cdot (l_x + l_y)}{l_x \cdot l_y \cdot S}, \quad (8)$$

где R_{fw} – расчетное сопротивление растяжению поперечной арматуры; R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию; A_{fw} , l_x , l_y – площадь поперечного сечения и длина хомутов в одном и другом направлении сечения; S – шаг хомутов.

При расчете прочности сжатых элементов с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения с использованием принятых в [3] кусочно-линейных диаграмм деформирования бетона при осевом сжатии условия прочности принимаются в виде:

$$|\varepsilon_{b,max}| \leq \varepsilon_{b,ult}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{f,max} \leq \varepsilon_{f,ult}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{b,max}$ – относительная деформация наиболее сжатого волокна бетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки; $\varepsilon_{f,max}$ – относительная деформация наиболее растянутого стержня композитной полимерной арматуры в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки; $\varepsilon_{f,ult}$ – предельное значение относительной деформации удлинения композитной полимерной арматуры, принимаемое согласно указаниям [2]; $\varepsilon_{b,ult}$ – предельное значение относительной деформации бетона при сжатии, принимаемое равным:

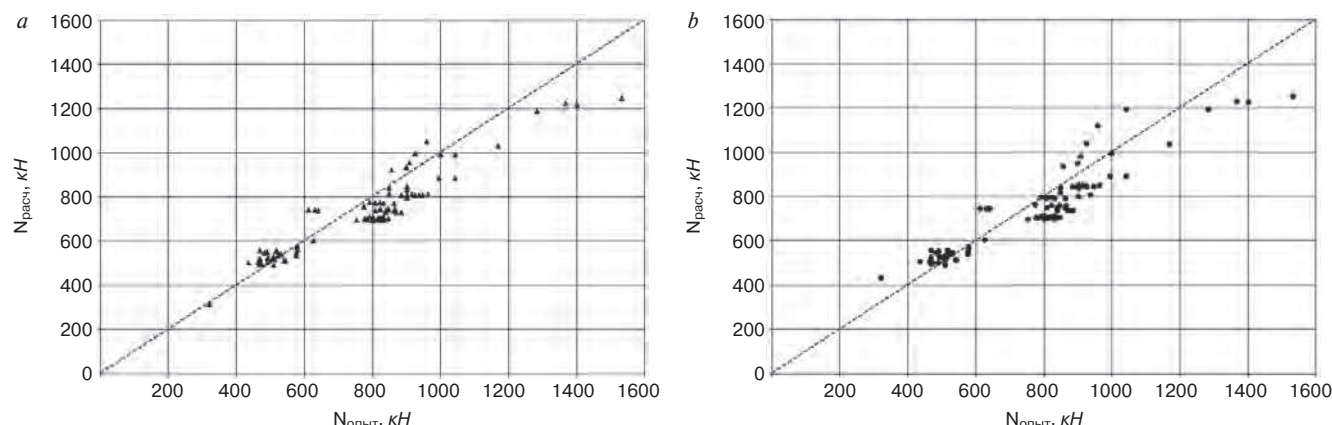


Рис. 1. Сравнение опытной несущей способности центрально-сжатых образцов и расчетной, вычисленной по деформационной модели с использованием трехлинейной (а) и криволинейной (б) диаграмм осевого сжатия

Fig. 1. Comparison of the experimental bearing capacity of centrally compressed specimens and the calculated by the deformation model using trilinear (a) and curvilinear (b) axial compression diagrams

– при двузначной эпюре деформаций в нормальном сечении элемента:

$$\varepsilon_{b,ult} = k \cdot \varepsilon_{b2}; \quad (11)$$

– при полностью сжатом сечении элемента:

$$\varepsilon_{b,ult} = k \cdot [\varepsilon_{b2} - (\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b0})] \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad (12)$$

где ε_{b0} и ε_{b2} – значения относительных деформаций в базовых точках диаграммы осевого сжатия бетона при его одноосном напряженном состоянии, принимаемые по указаниям [3]; ε_1 и ε_2 – относительные деформации на противоположных гранях сечения ($|\varepsilon_1| \leq |\varepsilon_2|$); k – коэффициент интенсивности армирования элемента поперечными хомутами, определяемый по формуле (6).

За предельную нагрузку принимается максимальное значение усилий, при котором соблюдаются условия равновесия (8) и (9).

При расчете центрально-сжатых элементов с использованием кусочно-линейных диаграмм осевого сжатия бетона предельные относительные деформации бетона согласно формуле (12) составят $k \cdot \varepsilon_{b0}$, т. е. напряжения в сжатой арматуре будут совпадать с принятыми в [1] для расчета прочности методом предельных усилий. С изменением распределения относительных деформаций по сечению элемента относительные деформации сжатой арматуры будут возрастать и приближаться к значению предельных относительных деформаций бетона, определяемых по формуле (11). В этом случае напряжение в сжатой арматуре в момент достижения предельного по прочности состояния элемента будет существенно выше принятого в [1] для расчета прочности методом предельных усилий.

Для более точной оценки значений напряжений в сжатой арматуре в предельном по прочности со-

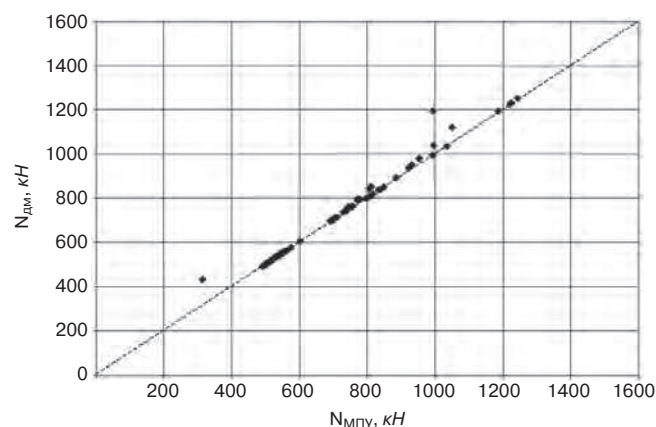


Рис. 2. Сравнение расчетной несущей способности центрально-сжатых образцов, вычисленной методом предельных усилий и по деформационной модели

Fig. 2. Comparison of calculated bearing capacity of centrally compressed specimens calculated by the limit force method and by deformation model

стоянии были выполнены расчеты прочности сжатых опытных образцов с использованием криволинейной диаграммы осевого сжатия бетона с ниспадающей ветвью. Аналитическую зависимость для описания криволинейной диаграммы осевого сжатия бетона принимали по [3], принимая значение относительных деформаций в вершине диаграммы равным $k \cdot \varepsilon_b$. За условие прочности при заданном значении внешней нагрузки принимали удовлетворение условий равновесия (1) и (2). За предельную нагрузку принималось максимальное значение внешней нагрузки, при котором система уравнений (1) и (2) имеет решение.

Расчеты прочности центрально-сжатых образцов по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы осевого сжатия бетона показали, что с увеличением армирования образцов деформации бетона в предельном по прочности состоянии отвечают ниспадающей ветви диаграммы. При этом уровень напряжений в бетоне с увеличе-

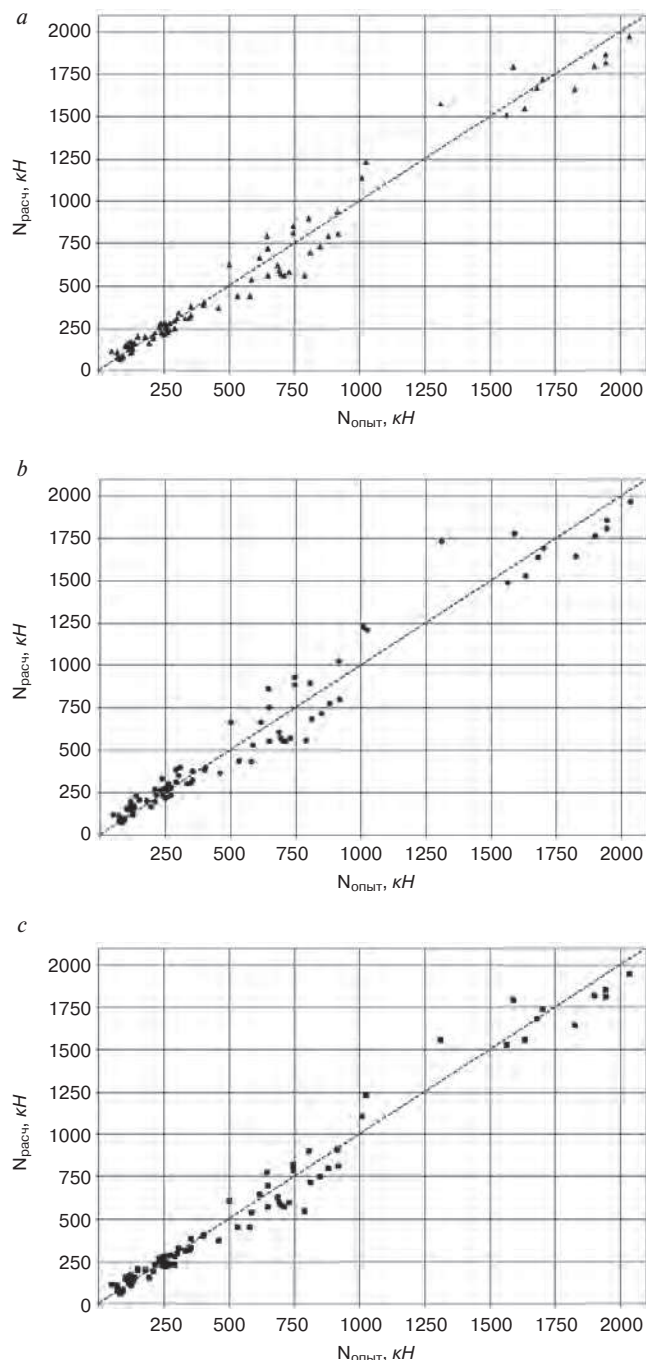


Рис. 3. Сравнение опытной несущей способности внецентренно сжатых образцов и расчетной, вычисленной с использованием трехлинейной (а) и криволинейной (б) диаграмм осевого сжатия бетона и методом предельных усилий (с)

Fig. 3. Comparison of the experimental bearing capacity of eccentrically compressed specimens and the calculated one, calculated using three-linear (a) and curvilinear (b) diagrams of axial compression of concrete, and the limit force method (c)

нием армирования сечения продольной арматурой изменяется от 1 до 0,95; значение предельного напряжения в сжатой арматуре повышается до 44%, а расчетное значение предельной нагрузки несколько увеличивается – менее чем на 7% в сравнении с ее значением, установленным расчетом с использова-

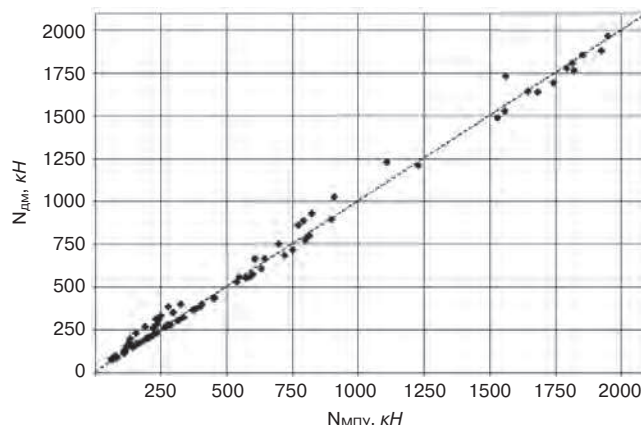


Рис. 4. Сравнение расчетной несущей способности внецентренно сжатых образцов, вычисленной методом предельных усилий и по деформационной модели

Fig. 4. Comparison of the calculated bearing capacity of eccentrically compressed specimens, calculated by the method of limit forces and by deformation model

нием кусочно-линейной диаграммы осевого сжатия бетона или методом предельных усилий.

На рис. 1 приведено сравнение результатов испытаний 103 центрально-сжатых образцов с результатами расчетов их прочности, выполненными с использованием трехлинейной (полностью совпадают с результатами расчетов методом предельных усилий) и криволинейной диаграмм осевого сжатия бетона.

Образцы отличались между собой видом продольной композитной арматуры, коэффициентами продольного и поперечного армирования, шагом поперечной арматуры и прочностными характеристиками материалов [4–20]. Описание опытных образцов и их результаты испытаний представлены в [4–6; 8–12; 16–18, 20].

Как видно из рис. 1, использование при расчете прочности центрально-сжатых образцов вместо криволинейной диаграммы деформирования бетона упрощенной трехлинейной с соответствующим критерием прочности, при котором напряжения в сжатой арматуре ограничиваются значением ее предельных относительных деформаций, равных $k \cdot \varepsilon_{b0}$, практически не влияет на точность расчета.

Сопоставление результатов расчета прочности рассмотренной выборки опытных центрально-сжатых образцов, выполненных по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы и рекомендованного в [1] упрощенного метода расчета, показывает их приемлемое совпадение. Полученные результаты расчетов опытных образцов, испытанных на центральное сжатие (рис. 2), подтверждают приемлемость принятого в [1] способа учета влияния армирования элемента поперечными хомутами на деформации бетона при осевом сжатии.

Надежность предложенной методики расчета сжатых элементов по деформационной модели

с учетом работы арматуры в сжатой зоне сечения была проверена результатами экспериментальных исследований опытных образцов, испытанных на внецентренное сжатие отечественными и зарубежными исследователями. Выборка включала в себя 114 опытных образцов, симметрично армированных угле-, стекло- и базальтопластиковой стержневой арматурой, отличающихся между собой размерами поперечного сечения, коэффициентами содержания продольного и поперечного армирования, шагом поперечной арматуры. Описание опытных образцов и результаты их испытаний представлены в [6–9; 11; 13–16; 18–20].

Сопоставление опытных значений несущей способности образцов с расчетными, вычисленными с использованием трехлинейной (*a*) и криволинейной (*b*) диаграмм осевого сжатия бетона, а также методом предельных усилий (*c*), приведено на рис. 3.

Выводы

Результаты расчета показали, что предложенная методика расчета внецентренно сжатых элементов с учетом работы композитной арматуры при сжатии приводит к удовлетворительной сходимости с опытными данными при использовании как кусочно-линейных, так и криволинейной диаграмм осевого сжатия бетона.

Сопоставление результатов расчета прочности рассмотренной выборки опытных внецентренно сжатых образцов, выполненных по деформационной модели с использованием криволинейной диаграммы и рекомендованным в [1] методом предельных усилий, показывает их удовлетворительное совпадение (рис. 4).

Список литературы / References

1. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Расчет прочности внецентренно сжатых элементов с учетом работы сжатой композитной полимерной арматуры // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 4. С. 29–35.
1. Mukhamediev T.A., Mayorov S.A. Calculation of strength of non-centrally compressed elements taking into account the operation of compressed composite polymer reinforcement. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2022. No. 4, pp. 29–35. (In Russian).
2. СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования». М.: Стандартинформ, 2017.
2. SP 295.1325800.2017 «Concrete structures reinforced with polymer composite reinforcement. Design rules». Moscow: Standartinform, 2017. (In Russian).
3. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». М.: Стандартинформ, 2019.
3. SP 63.13330.2018 «Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions». Moscow: Standartinform, 2019. (In Russian).
4. Степанова В.Ф., Мухамедиев Т.А., Кудяков К.Л., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю. Экспериментальные исследования прочности сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. № 22 (3). С. 173–182.
4. Stepanova V.F., Mukhamediev T.A., Kudyakov K.L., Buchkin A.V., Yurin E.Yu. Experimental studies of the strength of compressed concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo»*. 2022. No. 22 (3), pp. 173–182. (In Russian).
5. Лапшинов А.Е., Тамразян А.Г. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 4. С. 20–29.
5. Lapshinov A.E., Tamrazyan A.G. On the effect of transverse reinforcement on the strength and deformability of compressed concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 4, pp. 20–29. (In Russian).
6. Фридман Л.С. Прочность и трещиностойкость внецентренно сжатых бетонных элементов, предварительно напряженных стеклопластиковой арматурой: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1983.
6. Friedman L.S. Strength and crack resistance of non-centrally compressed concrete elements prestressed with fiberglass reinforcement. Cand. Diss. (Engineering). Minsk. 1983. (In Russian).
7. Уманский А.М. Совершенствование методов расчета конструкций морских гидротехнических сооружений из композитобетона с использованием базальтопластиковой арматуры: Дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2017.
7. Umansky A.M. Improvement of methods for calculating structures of marine hydraulic structures made of composite concrete using basalt-plastic reinforcement. Cand. Diss. (Engineering).. Vladivostok. 2017. (In Russian).
8. Невский А.В. Прочность сжатых углеородофибробетонных элементов с углекомпозитным стержневым и внешним армированием при кратковременном динамическом нагружении: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2018.

8. Nevsky A.V. Strength of compressed carbon fiber concrete elements with carbon composite core and external reinforcement under short-term dynamic loading. Cand. Diss. (Engineering). Tomsk. 2018. (In Russian).
9. Alwash N.A., Jasim A.H. Behavior of short concrete columns reinforced by CFRP bars and subjected to eccentric load. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015. № 6 (10), pp. 15–24.
10. Duy N.P., Anh V.N., Minh N., Anh T., Polikutin A.E. Load-carrying capacity of short concrete columns reinforced polymer bars under concentric axial load. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2018. № 9 (2), pp. 1712–1719.
11. Elchalakani M., Ma G. Tests of glass fibre reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading. *Engineering Structures*. 2017. № 151, pp. 93–104.
12. Elhamaymy A., Hamdy M., Manalo A., Benmokrane B. Uniaxial compression behavior of short square and circular RC piles constructed with GFRP bars and spirals preconditioned in simulated marine environments. *Journal of Composites for Construction*. 2022. № 26 (3).
13. Fan X., Zhang M. Behavior of inorganic polymer concrete columns reinforced with basalt FRP bars under eccentric compression: An experimental study. *Composites Part B: Engineering*. 2016. No. 104, pp. 44–56.
14. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Nanni A., Shield C.K. Eccentric behavior of full-scale reinforced concrete columns with glass fiber-reinforced polymer bars and ties. *ACI Structural Journal*. 2018. No. 115 (2), pp. 489–499.
15. Guerin M., Mohamed H.M., Benmokrane B., Shield C.K., Nanni A. Effect of glass fiber-reinforced polymer reinforcement ratio on axial-flexural strength of reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*. 2018. No. 115 (4), pp. 1049–1061.
16. Hadi M.N., Youssef J. Experimental investigation of GFRP-reinforced and GFRP-encased square concrete specimens under axial and eccentric load, and four-point bending test. *Journal of Composites for Construction*. 2016. No. 20 (5).
17. Khorramian K., Sadeghian P. Experimental and analytical behavior of short concrete columns reinforced with GFRP bars under eccentric loading. *Engineering Structures*. 2017. No. 151, pp. 761–773.
18. Othman Z.S., Mohammad A.H. Behavior of eccentric concrete columns reinforced with carbon fibre-reinforced polymer bars. *Advances in Civil Engineering*. 2019. No. 2, pp. 1–13.
19. Salah-Eldin A., Mohamed H.M., Benmokrane B. Axial-Flexural performance of high-strength-concrete bridge compression members reinforced with basalt-FRP bars and ties: experimental and theoretical investigation. *Journal of Bridge Engineering*. 2019. No. 24 (7).
20. Xue W., Peng F., Fang Z. Behavior and design of slender rectangular concrete columns longitudinally reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*. 2018. No. 115 (2), pp. 311–322.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Учебное и практическое пособие

Авторы: Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полунин В.М.

Опыт применения конечно-элементной программы «ПЛАКСИС» (учебное и практическое пособие) / Под редакцией чл.-корр. РААСН, д-ра техн. наук, профессора Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2022. 316 с.

В учебном и практическом пособии рассмотрены основные положения, программы и модели грунтов, используемые в конечно-элементном программном комплексе «ПЛАКСИС» (PLAXIS) как в плоской — двухмерной, так и трехмерной постановке. Представлен обширный набор численных примеров, относящихся к расчетам различного типа оснований и фундаментов и даны рекомендации по использованию программ «ПЛАКСИС» (PLAXIS) для решения задач по оценке устойчивости грунтовых оснований, откосов и ограждений котлованов, фильтрационных и консолидационных задач механики грунтов, а также при моделировании задач динамики в грунтовых основаниях.

Предназначено для студентов и аспирантов строительных вузов и факультетов, слушателей курсов и институтов повышения квалификации инженеров-строителей и практикующих инженерно-технических работников проектных и строительных организаций.

