

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-39-53

Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л.И.Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина***E-mail: sa_shipulin@mail.ru*

ОЦЕНКА МЕТОДИК РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ПРОЧНОСТИ ПРИ ДВУХОСЕВОМ ДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Аннотация. В действующих в РФ нормах проектирования железобетонных конструкций отсутствуют методики расчета изгибаемых элементов при двухосевом действии поперечных сил. Однако методики расчета таких конструкций существуют и приведены в работах отечественных и зарубежных исследователей, а также в нормах проектирования прошлых лет. В данной статье отобраны данные о результатах 33 испытаний балок на двухосевое действие поперечных сил. Выполнено сравнение результатов отобранных испытаний с результатами теоретических вычислений несущей способности элементов на двухосевое действие поперечных сил по различным аналитическим методикам. Приведен краткий обзор существующих аналитических методик. Сравнение результатов испытаний и теоретических вычислений приведено в табличном и графическом виде. Целью работы является выявление существующих методик расчета железобетонных изгибаемых элементов при двухосевом действии поперечных сил, позволяющих получать результаты расчета несущей способности, максимально приближенные к результатам испытаний. Показано, что методика, использующая эллиптическую диаграмму взаимодействия силовых факторов, а также методика Р. Марк, использующая систему интерполирующих коэффициентов, примененные к расчетным зависимостям из отечественных норм проектирования, могут быть рекомендованы для оценки несущей способности в инженерной практике проектирования.

Ключевые слова: наклонное сечение, косой изгиб, поперечная сила, железобетонные конструкции, расчет железобетонных изгибаемых элементов.

Введение. Работа железобетонных изгибаемых конструкций при действии поперечных сил в условиях плоского изгиба исследована в большом количестве работ, а в основные отечественные и зарубежные нормы проектирования включены рекомендации и методики для расчета таких элементов. В практике проектирования и строительства часто встречаются конструкции, подверженные двухосевому действию поперечных сил. При этом отмечается нехватка методик расчета таких элементов, включенных в нормы проектирования. В действующих в РФ нормах проектирования железобетонных конструкций [1] методики расчета изгибаемых элементов при двухосевом действии поперечных сил отсутствуют. Нормативные методики расчета отсутствуют и в действующих европейских нормах проектирования [2], а в японские [3] и американские [4] нормы проектирования включены методики расчета, основанные на применении диаграмм взаимодействия силовых факторов в виде уравнений, описывающих снижение несущей способности элемента на действие поперечной силы в направлении одной из главных осей его поперечного сечения при действии поперечной силы в другом направлении. Нехватка нормативных методик расчета указанных видов конструкций делает вопрос исследований по данной теме актуальным.

В данной статье приведен краткий обзор существующих аналитических методик расчета железобетонных элементов на двухосевое действие поперечных сил, включенных в нормы проектирования, а также отсутствующих в них. На основании анализа ранее выполненных опытных работ по теме исследования отобраны данные о результатах испытаний 33 балок на двухосевое действие поперечных сил. Выполнено сравнение результатов испытаний с результатами теоретических вычислений несущей способности элементов по проанализированным аналитическим методикам.

Целью работы является выявление существующих методик расчета железобетонных изгибаемых элементов при двухосевом действии поперечных сил, показывающих наиболее близкие к результатам испытаний результаты расчета несущей способности.

Обзор результатов рассматриваемых испытаний. В данной работе были отобраны результаты испытаний 33 железобетонных изгибаемых элементов на действие поперечных сил, выполненных различными исследователями. В частности, проанализированы работы Е. В. Клименко [5], А. Tinini [6], R. Thamrin [7], С. Hansapinyo [8]. Из работы [5] обработаны данные по результатам испытаний 8 балок прямоугольного поперечного сечения преимущественно без поперечной арматуры. Углы наклона силовой

плоскости составляют 0, 6 и 18 градусов. Из работы [6] обработаны данные по результатам испытаний 6 балок квадратного поперечного сечения с поперечной арматурой. Углы наклона силовой плоскости составляют 0, 22,5 и 45 градусов. Из работы [7] обработаны данные по результатам испытаний 6 балок квадратного поперечного сечения без поперечной арматуры. Углы наклона силовой плоскости составляют 22,5 и 45 градусов. Из работы [8] обработаны данные по результатам испытаний 13 балок прямоугольного поперечного сечения с поперечной арматурой. Углы наклона силовой плоскости составляют 0, 22, 45 и 90 градусов.

Все исходные данные приведены в таблицах 1–5.

В зарубежные нормы проектирования [3, 4, 2] включены методики расчета элементов на действие поперечных сил, в расчетные зависимости которых входит цилиндрическая прочность бетона. В отечественные же нормы проектирова-

ния [1] включена методика расчета, оперирующая величинами прочности бетона на растяжение. В связи с этим при анализе результатов выполненных испытаний и исходных данных к ним потребовались дополнительные вычисления, связанные с переходом от цилиндрической прочности бетона к кубиковой прочности и прочности бетона на растяжение. Значения прочностей, полученные на основе вычислений, а не напрямую из данных исследований [5–8] помечены в таблицах 1–4 знаком «*». Вычисления производились по зависимостям:

$$R_m = 0,83 f_c, \quad (1)$$

$$R_{bt} = 0,18 \sqrt[3]{R_m^2}, \quad (2)$$

где f_c – цилиндрическая прочность бетона образца, R_m – кубиковая прочность бетона образца, R_{bt} – прочность бетона образца на растяжение.

Таблица 1

Исходные данные из работы Е. В. Клименко [5]

Образец	Б-III-9	Б-III-10	Б-V-1	Б-V-4	Б-V-5	Б-V-6	Б-V-7	Б-V-8
Общее количество продольной арматуры / A , см ²	1d20 / 3,14							
Угол наклона силовой плоскости, град	0	0	6,13	18,43	6,13	6,13	18,43	18,43
h/h_0 , мм	260/233	260/232	260/229	260/232	260/229	260/232	260/229	260/231
b/b_0 , мм	74/59	75/60	211/105,5	212/106	110/55	113/56,5	109/54,4	115/57,7
Кубиковая прочность бетона, МПа	30,4	30,4	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5
Призменная прочность бетона R_b , МПа	23,6	23,6	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
Цилиндрическая прочность бетона f_c , МПа	25,23*	25,23*	28,63*	28,63*	28,63*	28,63*	28,63*	28,63*
Прочность бетона на растяжение R_{bt} , МПа	1,51	1,51	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
Расчетное сопротивление продольной арматуры R_s , МПа	433,5	433,5	425,5	425,5	425,5	425,5	425,5	425,5
Расчетное сопротивление поперечной арматуры R_{sw} , МПа	238	238	–	–	–	–	–	–
Диаметр и шаг поперечной арматуры, мм	1d6,5/160	1d6,5/160	–	–	–	–	–	–
Пролет среза, мм	582,5	580	572,5	580	572,5	580	572,5	577,5
Результаты испытаний Q_{ult} , кН	38,87	42,62	79,26	57,76	32,76	37,76	32,26	39,01

Таблица 2

Исходные данные из работы А. Tinini [6]

Образец	S0-0	S0-22.5	S0-45	S6-0	S6-22.5	S6-45
Общее количество продольной арматуры / A , см ²	8d20/ 25,12	8d20/ 25,12	8d20/ 25,12	8d20/ 25,12	8d20/ 25,12	8d20/ 25,12
Угол наклона силовой плоскости, град	0	22,5	45	0	22,5	45
h/h_0 , мм	300/260	300/260	300/260	300/260	300/260	300/260
b/b_0 , мм	300/260	300/260	300/260	300/260	300/260	300/260
Кубиковая прочность бетона, МПа	54,04	54,04	54,04	54,04	54,04	54,04
Призменная прочность бетона R_b , МПа	39,5*	39,5*	39,5*	39,5*	39,5*	39,5*
Цилиндрическая прочность бетона f_c , МПа	44,85	44,85	44,85	44,85	44,85	44,85
Прочность бетона на растяжение R_{bt} , МПа	2,57*	2,57*	2,57*	2,57*	2,57*	2,57*
Расчетное сопротивление продольной арматуры R_s , МПа	552	552	552	552	552	552
Расчетное сопротивление поперечной арматуры R_{sw} , МПа	–	–	–	552	552	552
Диаметр / шаг поперечной арматуры, мм	–	–	–	2d6 / 250	2d6 / 250	2d6 / 250
Пролет среза, мм	650	850	920	650	850	920
Результаты испытаний Q_{ult} , кН	131,7	130,2	134,7	169,2	188,7	168,6

Таблица 3

Исходные данные из работы R. Thamrin [7]

Образец	G2-01-22,5	G2-02-22,5	G2-03-22,5	G2-01-45	G2-02-45	G2-03-45
Общее количество продольной арматуры / A , см ²	8d13/ 10,61	8d16/ 16,07	8d19/ 22,67	8d13/ 10,61	8d16/ 16,07	8d19/ 22,67
Угол наклона силовой плоскости, град	22,5	22,5	22,5	45	45	45
h/h_0 , мм	222/185	222/184	222/183	222/185	222/184	222/183
b/b_0 , мм	222/185	222/184	222/183	222/185	222/184	222/183
Кубиковая прочность бетона, МПа	30,24*	30,24*	30,24*	30,24*	30,24*	30,24*
Призменная прочность бетона R_b , МПа	22*	22*	22*	22*	22*	22*
Цилиндрическая прочность бетона f_c , МПа	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1
Прочность бетона на растяжение R_{bt} , МПа	1,75*	1,75*	1,75*	1,75*	1,75*	1,75*
Расчетное сопротивление продольной арматуры R_s , МПа	410	390	370	410	390	370
Расчетное сопротивление поперечной арматуры R_{sw} , МПа	–	–	–	–	–	–
Диаметр / шаг поперечной арматуры, мм	–	–	–	–	–	–
Пролет среза, мм	800	800	800	800	800	800
Результаты испытаний Q_{ult} , кН	46,3	43,4	53,4	50,7	50,4	50,4

Таблица 4

Исходные данные из работы С. Hamsarıno (образцы 1–6) [8]

Образец	B0_1	B45_1	B45W_1	B0_2	B20_2	B20W_2
Общее количество продольной арматуры / A , см ²	8d25/ 39,2	8d25/ 39,2	8d25/ 39,2	12d25/ 58,8	12d25/ 58,8	12d25/ 58,8
Угол наклона силовой плоскости, град	0	45	45	0	20	20
h/h_0 , мм	300/ 260	300/ 260	300/ 260	350/ 310	350/ 310	350/ 310
b/b_0 , мм	300/ 260	300/ 260	300/ 260	150/ 110	150/ 110	150/ 110
Кубиковая прочность бетона, МПа	37,3*	37,3*	37,3*	33,7*	33,7*	33,7*
Призменная прочность бетона R_b , МПа	27*	27*	27*	24*	24*	24*
Цилиндрическая прочность бетона f_c , МПа	31,0	31,0	31,0	28,0	28,0	28,0
Прочность бетона на растяжение R_{bt} , МПа	2,0*	2,0*	2,0*	1,9*	1,9*	1,9*
Расчетное сопротивление продольной арматуры R_s , МПа	440	440	440	440	440	440
Расчетное сопротивление поперечной арматуры R_{sw} , МПа	370	370	370	370	370	370
Диаметр / шаг поперечной арматуры, мм	2d6/ 100	2d6/ 100	2d6/ 100	2d6/ 100	2d6/ 100	2d6/ 100
Пролет среза, мм	675	675	675	800	800	800
Результаты испытаний Q_{ult} , кН	215,9	233,5	147,2	164,7	156,5	108,0

Таблица 5

Исходные данные из работы С. Hamsarıno (образцы 7–13) [8]

Образец	B45_2	B45W_2	B90_2	B0_3	B25_3	B45_3	B90_3
Общее количество продольной арматуры / A , см ²	12d25/ 58,8	12d25/ 58,8	12d25/ 58,8	14d25/ 68,6	14d25/ 68,6	14d25/ 68,6	14d25/ 68,6
Угол наклона силовой плоскости, град	45	45	0/90	0	25	45	0/90
h/h_0 , мм	350/ 310	350/ 310	150/ 110	450/ 410	450/ 410	450/ 410	200/ 160
b/b_0 , мм	150/ 110	150/ 110	350/ 310	200/ 160	200/ 160	200/ 160	450/ 410
Кубиковая прочность бетона, МПа	33,7*	33,7*	33,1*	38,6*	38,6*	38,6*	38,6*
Призменная прочность бетона R_b , МПа	24*	24*	24*	27,5*	27,5*	27,5*	27,5*
Цилиндрическая прочность бетона f_c , МПа	28,0	28,0	27,5	32,0	32,0	32,0	32,0
Прочность бетона на растяжение R_{bt} , МПа	1,9*	1,9*	1,9*	2,1*	2,1*	2,1*	2,1*
Расчетное сопротивление продольной арматуры R_s , МПа	440	440	440	440	440	440	440
Расчетное сопротивление поперечной арматуры R_{sw} , МПа	370	370	370	370	370	370	370
Диаметр / шаг поперечной арматуры, мм	2d6/ 100						
Пролет среза, мм	800	800	800	1100	1100	1100	1100
Результаты испытаний Q_{ult} , кН	113,4	81,3	77,6	250,2	215,7	199,7	156,8

Краткий обзор рассматриваемых методик расчета.

В данной работе аналитические вычисления несущей способности испытанных конструкций при действии поперечных сил выполнялись по 7 методикам:

- методике Е. В. Клименко [5],
- методике эллиптической диаграммы взаимодействия в приложении к СП 63.13330.2018 [9, 10, 1],
- методике Р. Mark [11, 12, 13] в приложении к СП 63.13330.2018 [1], ACI 318M [4] и EN [2],
- методике А. Tinini [6] в приложении к СП 63.13330.2018 и ACI 318M.

Методика Е. В. Клименко. Методика, предложенная Е. В. Клименко, изложена в работе [5]. Обзор расчетных зависимостей приведен в работе [14]. Алгоритм является развитием основной методики расчета элементов на действие поперечных сил, приведенной в СНиП II-21-75 [15], распространенной на случай двухосевого действия поперечных сил при помощи эмпирических коэффициентов, учитывающих угол наклона силовой плоскости, количество продольной арматуры, пролет среза, соотношение сторон поперечного сечения и другие факторы, влияющие на прочность элемента.

Методика эллиптической диаграммы взаимодействия. В пособия и руководства к отечественным нормам 1975 и 1984 годов [9, 10], а также в японские нормы проектирования [3] и в работы исследователей Н. Umehara и J. O. Jirsa [16] включена рекомендация по расчету железобетонных элементов на двухосевое действие поперечной силы в виде эллиптической диаграммы взаимодействия силовых факторов. Условие прочности записано в виде формулы:

$$\left[\frac{Q_x}{Q_{bw(x)}} \right]^2 + \left[\frac{Q_y}{Q_{bw(y)}} \right]^2 \leq 1, \quad (3)$$

где Q_x и Q_y – составляющие поперечной силы, действующие соответственно вдоль оси симметрии X и вдоль нормальной к ней оси Y в наиболее удаленном от опоры конце наклонного сечения; $Q_{bw(x)}$ и $Q_{bw(y)}$ – предельные поперечные силы, воспринимаемые элементом по бетону и по поперечной арматуре при их действии соответственно вдоль осей X и Y , и определяемые в соответствии с применяемыми нормами проектирования.

В данной статье при обработке данных испытаний эллиптическая диаграмма взаимодействия силовых факторов строилась на основе вычисления прочностей элементов при одноосевом

действии поперечных сил в соответствии с методикой СП63.13330.2018 [1].

Методика Р. Mark. Методика расчета балок прямоугольного сечения, предложенная Р. Mark изложена в работах [11–13]. В основе методики лежит модель пространственной ферменной аналогии. Р. Mark предлагает модифицировать базовые расчетные зависимости для определения компонент несущей способности элементов на действие поперечных сил, связанных с бетоном и с поперечной арматурой для случая плоского изгиба при помощи системы интерполирующих коэффициентов α_v , α_t , α_c , зависящих от угла наклона силовой плоскости и соотношения сторон сечения. Приведенный к габаритам сечения тангенс угла наклона силовой плоскости:

$$\alpha_v = \frac{V_{Sd,y}}{V_{Sd,z}} \cdot \frac{h}{b}, \quad (4)$$

где $V_{Sd} = \sqrt{V_{Sd,y}^2 + V_{Sd,z}^2}$ – действующая поперечная сила и ее компоненты, приведенные к главным осям прямоугольного сечения Z (вертикальная ось) и Y (горизонтальная ось). Принимается, что $h \geq b$. Пределы определения α_v составляют $0 \leq \alpha_v \leq 1$. Значение $\alpha_v = 0$ соответствует случаю одноосевого (плоского) изгиба, а $\alpha_v = 1$ соответствует ориентации поперечной силы по диагонали сечения.

Рассматривая граничные случаи при $\alpha_v = 0$ (одноосевой сдвиг) и $\alpha_v = 1$ (диагональный сдвиг) Р. Mark вводит дополнительные интерполирующие коэффициенты α_t (учет прочности хомутов) и α_c (учет прочности сжатого бетонного подкоса «фермы»), учитывающие изменения в напряжениях в бетоне и поперечной арматуре для случая двухосевого действия поперечной силы:

$$\alpha_t = 1 + \left(\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}} - 1 \right) a_v^k \quad (5)$$

$$\alpha_c = 1 + \left(\frac{b}{b_{\text{eff}}} - 1 \right) a_v^k, \quad (6)$$

где $k \geq 0$ – показатель степени, позволяющий калибровать модель. Рекомендуемое значение $k = 0,5$. Рекомендуемое значение эффективной ширины сечения для случая двухосевого сдвига

$b_{eff} = 0,6b$. Граничные значения для коэффициентов: $1 \leq \alpha_t \leq 2$; $1 \leq \alpha_c \leq b/b_{eff}$.

Универсальность подхода, предложенного Р. Mark, заключается в том, что предложенные им интерполирующие коэффициенты могут быть применены к расчетным зависимостям для определения компонентов несущей способности, связанных с бетоном и поперечной арматурой, определенным по различным нормам проектирования. Таким образом, данный подход можно применить как при расчете с применением отечественных норм проектирования [1], так и с применением зарубежных норм проектирования [4, 2]. В данной работе аналитические вычисления с привлечением методики Р. Mark выполнены по трем нормам – РФ, европейским и американским.

Общий вид расчетных зависимостей с привлечением интерполирующих коэффициентов записывается в виде

$$Q_{ult,b,sw} = Q_{b,x} + Q_{sw} \cdot \frac{1}{\alpha_t}, \quad (7)$$

$$Q_{b,max} = Q_{b,max,x} \cdot \frac{1}{\alpha_c} \quad (8)$$

где $Q_{ult,b,sw}$ – величина несущей способности элемента при двухосевом действии поперечной силы; $Q_{b,x}$ – величина несущей способности элемента при одноосевом действии поперечной

силы, определенная по бетону в соответствии с расчетными зависимостями применяемых норм проектирования; Q_{sw} – величина несущей способности элемента при одноосевом действии поперечной силы, определяемая по поперечной арматуре в соответствии с расчетными зависимостями применяемых норм проектирования; $Q_{b,max}$ – несущая способность элемента при двухосевом действии поперечной силы, связанная с прочностью наклонной сжатой полосы (прочностью наклонного сжатого «подкоса» в ферменной аналогии); $Q_{b,max,x}$ – несущая способность элемента при одноосевом действии поперечной силы, связанная с прочностью наклонной сжатой полосы.

Методика А. Tinini. Методика, предложенная А. Tinini в работе [6], является модификацией методики интерполирующих коэффициентов, предложенной Р. Mark. Модификация заключается в том, что при вычислении несущей способности элемента при двухосевом действии поперечных сил по компоненте, связанной с бетоном, используются величины $h_{0,eff}$, $b_{0,eff}$ – приведенные к углу наклона силовой плоскости величины рабочей высоты сечения и ширины сечения. Эти величины определяются по форме сжатой зоны бетона по правилам, приведенным на рис. 1.

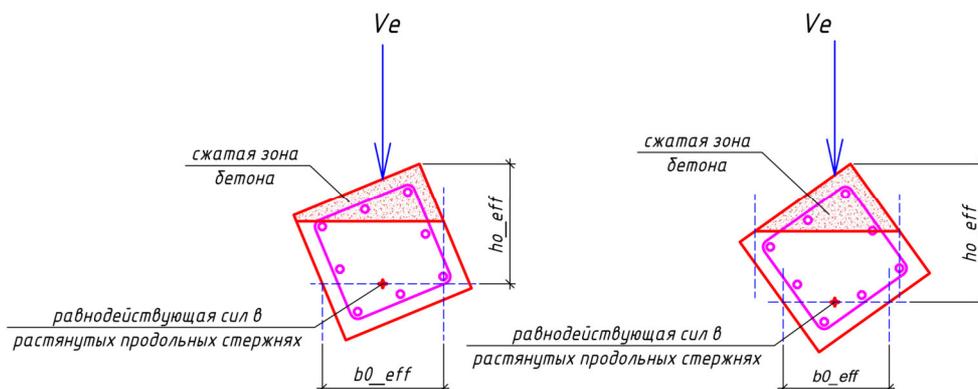


Рис. 1. Принципы определения значений $h_{0,eff}$, $b_{0,eff}$ при различных углах наклона силовой плоскости и формах сжатой зоны бетона согласно [6]

Таким образом, для вычислений по методике А. Tinini требуется точно определить форму сжатой зоны бетона (треугольник, трапеция), ее ширину и высоту, а также положение равнодействующей усилий в растянутых продольных стержнях в нормальном сечении, связанном с концом рассматриваемого наклонного сечения. Такие вычисления возможны с привлечением нелинейной деформационной модели (НДМ). Расчетная зависимость записывается в виде:

$$Q_{ult,b,sw} = Q_{b(h_{0,eff}, b_{0,eff})} + Q_{sw} \cdot \frac{1}{\alpha_t}, \quad (9)$$

где $Q_{ult,b,sw}$ – величина несущей способности элемента при двухосевом действии поперечной силы; $Q_{b(h_{0,eff}, b_{0,eff})}$ – величина несущей способности элемента при одноосевом действии поперечной силы, определенная по бетону в соответ-

ствии с расчетными зависимостями применяемых норм проектирования, с применением эффективных величин рабочей высоты сечения и ширины сечения $h_{0,eff}$, $b_{0,eff}$, определенных по правилам, приведенным на рис. 1; Q_{sw} – величина несущей способности элемента при одноосевом действии поперечной силы, определяемая по поперечной арматуре в соответствии с расчетными зависимостями применяемых норм проектирования; α_i – интерполирующий коэффициент, определенный по методике Р. Марк.

В данной работе аналитические вычисления с привлечением методики А. Тинини выполнены по двум нормам – РФ [1] и американским [4]. Ввиду необходимости большого объема вычислений с привлечением НДМ аналитические вычисления произведены только при обработке серии экспериментов, выполненных А. Тинини [6].

Результаты расчетов. Для железобетонных изгибаемых элементов, испытанных на двухосевое действие поперечных сил различными исследователями [5, 6, 7, 8], выполнены аналитические вычисления теоретической несущей способности по 7 методикам, описанным выше. Во всех рас-

четах использовались фактические величины характеристик материалов (прочности бетона и арматуры), приведенные в исследованиях. Результаты вычислений приведены в таблицах 6–9.

По результатам вычислений построены графики. На графиках для наглядности величины несущих способностей элементов по поперечной силе разложены по направлениям главных осей сечения с привлечением следующих зависимостей:

$$Q_{ult} = \sqrt{Q_{x\,ult}^2 + Q_{y\,ult}^2} \quad (10)$$

$$Q_{x\,ult} = Q_{ult} \cdot \cos\beta \quad (11)$$

$$Q_{y\,ult} = Q_{ult} \cdot \sin\beta \quad (12)$$

Такой подход позволил сравнить полученные результаты с вычислениями по эллиптической диаграмме взаимодействия (формула (3)) в графическом виде. Точка на графике соответствует величине несущей способности ($Q_{x\,ult}$; $Q_{y\,ult}$), а наклон виртуальной линии, соединяющей точку с началом координат, соответствует углу наклона силовой плоскости β .

Графики приведены на рисунках 2–8.

Таблица 6

Результаты аналитических вычислений для образцов из работы Е. В. Клименко [5]

Образец	Угол наклона силовой плоскости, град	Результаты испытаний		Расчет методом Е. В. Клименко		Расчет методом Р. Марк по нормам EN		Расчет методом Р. Марк по нормам АСІ		Расчет методом Р. Марк по нормам СП63	
		Q_b , кН	Q_{sw} , кН	Q_b , кН	Q_{sw} , кН	Q_b , кН	Q_{sw} , кН	Q_b , кН	Q_{sw} , кН	Q_b , кН	Q_{sw} , кН
Б-III-9	0	–	–	22,84	–	21,41	–	15,04	–	15,62	–
		–	–	22,89	–	11,47	–	12,75	–	22,94	–
		38,87	–	45,73	–	32,89	–	27,7	–	38,57	–
Б-III-10	0	–	–	22,94	–	21,57	–	15,13	–	15,76	–
		–	–	22,89	–	11,42	–	12,69	–	22,85	–
		42,62	–	45,84	–	32,99	–	27,82	–	38,61	–
Б-V-1	6,13	–	–	62,05	–	44,58	–	31,84	–	47,26	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		79,26	–	62,05	–	44,58	–	31,84	–	47,26	–
Б-V-4	18,43	–	–	66,82	–	44,97	–	32,22	–	48,10	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		57,76	–	66,82	–	44,97	–	32,22	–	48,10	–
Б-V-5	6,13	–	–	32,37	–	28,88	–	20,63	–	24,64	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		32,76	–	32,37	–	28,88	–	20,63	–	24,64	–
Б-V-6	6,13	–	–	33,72	–	29,57	–	21,18	–	25,64	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		32,76	–	33,72	–	29,57	–	21,18	–	25,64	–
Б-V-7	18,43	–	–	35,34	–	28,70	–	20,50	–	24,41	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		32,26	–	35,34	–	28,70	–	20,50	–	24,41	–
Б-V-8	18,43	–	–	37,94	–	29,86	–	21,37	–	25,98	–
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		39,01	–	37,94	–	29,86	–	21,37	–	25,98	–

Таблица 7

Результаты аналитических вычислений для образцов из работы A. Tinini [6]

Образец	Угол наклона силовой плоскости, град	Результаты испытаний Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН	Расчет методом Е. В. Клименко Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН	Расчет методом Р. Mark По нормам EN	Расчет методом Р. Mark по нормам АСІ	Расчет методом Р. Mark по нормам СП63	Расчет методом А. Tinini по нормам АСІ	Расчет методом А. Tinini по нормам СП63
				Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН				
S0-0	0	–	143,35	109,75	87,06	120,41	86,03	97,53
		–	–	–	–	–	–	–
S0-22.5	22,5	131,7	143,35	109,75	87,06	120,41	86,03	97,53
		–	227,25	109,75	87,06	100,34	87,53	93,20
S0-45	45	–	227,25	109,75	87,06	100,34	87,53	93,20
		–	–	–	–	–	–	–
S6-0	0	134,7	227,21	109,75	87,06	100,34	91,39	97,86
		–	–	–	–	–	–	–
S6-22.5	22,5	–	143,35	109,75	87,06	120,41	86,03	97,53
		–	61,24	27,61	30,67	61,35	27,61	55,21
S6-45	45	169,2	204,59	137,36	117,74	181,76	113,64	152,74
		–	227,25	109,75	87,06	100,34	87,53	93,20
S6-22.5	22,5	–	75,94	21,80	24,22	48,43	26,36	52,72
		–	188,7	303,20	131,55	111,28	148,78	113,89
S6-45	45	–	227,21	109,75	87,06	100,34	91,39	97,86
		–	135,22	19,52	21,69	43,38	24,69	49,38
		168,6	313,81	129,27	108,75	143,72	116,09	147,25

Таблица 8

Результаты аналитических вычислений для образцов из работы R. Thamrin [7]

Образец	Угол наклона силовой плоскости, град	Результаты испытаний Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН	Расчет методом Е. В. Клименко	Расчет методом Р. Mark по нормам EN	Расчет методом Р. Mark по нормам АСІ	Расчет методом Р. Mark по нормам СП63
			Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН			
G2-01-22,5	22,5	46,3	72,74	51,66	31,84	35,88
		–	–	–	–	–
G2-02-22,5	22,5	46,3	72,74	51,66	31,84	35,88
		–	89,13	59,07	36,41	35,68
G2-03-22,5	22,5	43,4	89,13	59,07	36,41	35,68
		–	89,13	59,07	36,41	35,68
G2-01-45	45	53,4	105,78	59,16	36,46	35,49
		–	–	–	–	–
G2-02-45	45	50,7	72,76	51,66	31,84	35,88
		–	–	–	–	–
G2-03-45	45	50,7	72,76	51,66	31,84	35,88
		–	89,11	59,07	36,41	35,68
G2-01-22,5	22,5	50,4	89,11	59,07	36,41	35,68
		–	89,11	59,07	36,41	35,68
G2-02-22,5	22,5	50,4	105,75	59,16	36,46	35,49
		–	–	–	–	–
G2-03-22,5	22,5	50,4	105,75	59,16	36,46	35,49
		–	–	–	–	–

Таблица 9

Результаты аналитических вычислений для образцов из работы С. Hansapinyo [8]

Образец	Угол наклона силовой плоскости, град	Результаты испытаний Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН	Расчет	Расчет	Расчет	Расчет
			методом Е. В. Клименко Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН	методом Р. Mark по нормам EN Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН	методом Р. Mark по нормам АСІ Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН	методом Р. Mark по нормам СП63 Q_b , кН Q_{sw} , кН Q_{ult} , кН
B0_1	0	118,4	139,98	112,60	77,80	90,64
		97,5	108,51	48,83	54,26	108,51
		215,9	248,5	161,43	132,06	199,15
B45_1	45	137,3	241,72	112,60	77,80	90,64
		96,1	153,46	34,53	38,37	76,73
		233,5	395,18	147,13	116,17	167,37
B45W_1	45	147,2	241,72	112,60	77,80	90,64
		–	–	–	–	–
		147,2	241,72	112,60	77,80	90,64
B0_2	0	80,2	116,62	62,79	44,08	50,79
		84,5	122,83	58,22	64,69	129,38
		164,7	239,45	121,01	108,77	180,18
B20_2	20	108,2	135,63	62,79	44,08	50,79
		48,4	130,81	32,85	36,50	72,99
		156,5	266,43	95,64	80,58	123,79
B20W_2	20	108,0	135,63	62,79	44,08	50,79
		–	–	–	–	–
		108,0	135,63	62,79	44,08	50,79
B45_2	45	90,7	141,92	62,79	44,08	50,79
		27,4	90,76	29,11	32,35	64,69
		113,4	232,68	91,90	76,43	115,48
B45W_2	45	81,3	141,92	62,79	44,08	50,79
		–	–	–	–	–
		81,3	141,92	62,79	44,08	50,79
B90_2	0/90	55,8	129,96	57,39	36,17	35,74
		21,8	45,91	20,66	22,95	45,91
		77,6	175,87	78,05	59,12	81,65
B0_3	0	127,5	207,32	108,02	83,10	94,18
		122,6	171,12	77,00	85,56	171,12
		250,2	378,44	185,02	168,66	265,30
B25_3	25	142,2	251,02	108,02	83,10	94,18
		73,5	183,31	41,67	46,30	92,61
		215,7	434,33	149,69	129,41	186,79
B45_3	45	137,3	257,94	108,02	83,10	94,18
		62,4	139,29	38,50	42,78	85,56
		199,7	397,23	146,52	125,88	179,74
B90_3	0/90	110,2	209,84	111,69	72,97	73,95
		46,6	66,78	30,05	33,39	66,78
		156,8	276,61	141,74	106,36	140,73

Краткие комментарии к рисункам 2 и 3:

- вычисления по методике Е. В. Клименко продемонстрировали как заниженные, так и завышенные результаты по сравнению с результатами испытаний;
- остальные методики показали более осторожные (заниженные) результаты по сравнению с результатами испытаний;
- наиболее низкая оценка несущей способности получена по методике Р. Mark по нормам АСІ.

Краткие комментарии к рисунку 4:

- методика Е. В. Клименко показала значительно завышенные результаты по сравнению с результатами испытаний;
- наиболее близкие к результатам испытаний, но несколько завышенные результаты получены по методике Р. Mark по нормам EN;
- близкие к результатам испытаний, но более осторожные (заниженные) результаты пока-

зали методики эллиптической диаграммы взаимодействия и Р. Mark по нормам СП 63.13330.2018;

– наиболее низкая оценка несущей способности получена по методике Р. Mark по нормам АСІ.

Клименко. Е.В. Б-V-1, Б-V-4

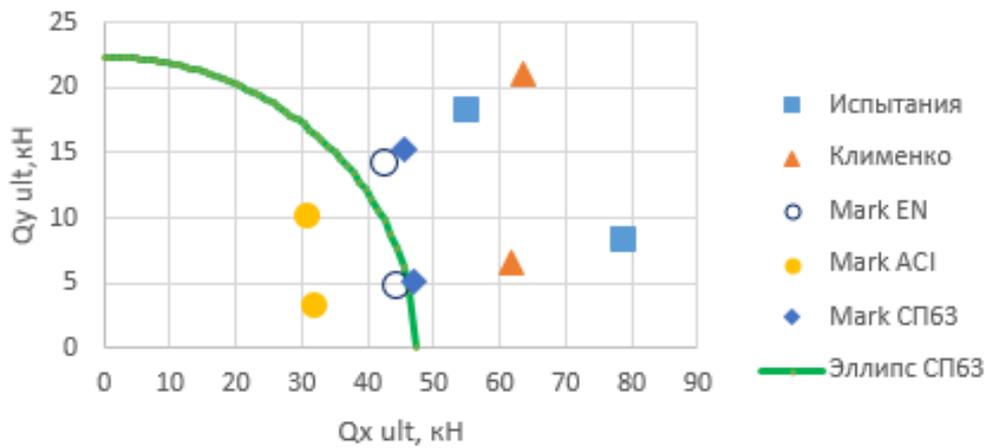


Рис. 2. Результаты обработки вычислений и испытаний для образцов из работы Е. В. Клименко. Образцы Б-V-1, Б-V-4

Клименко Е.В. Б-V-5...Б-V-8

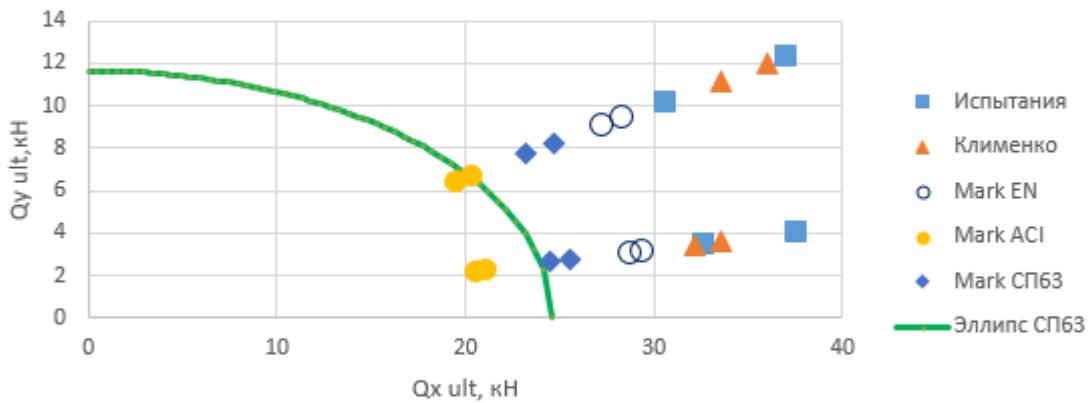


Рис. 3. Результаты обработки вычислений и испытаний для образцов из работы Е. В. Клименко. Образцы Б-V-5, Б-V-8

R. Thamrin. G2-01-22,5...G2-03-45

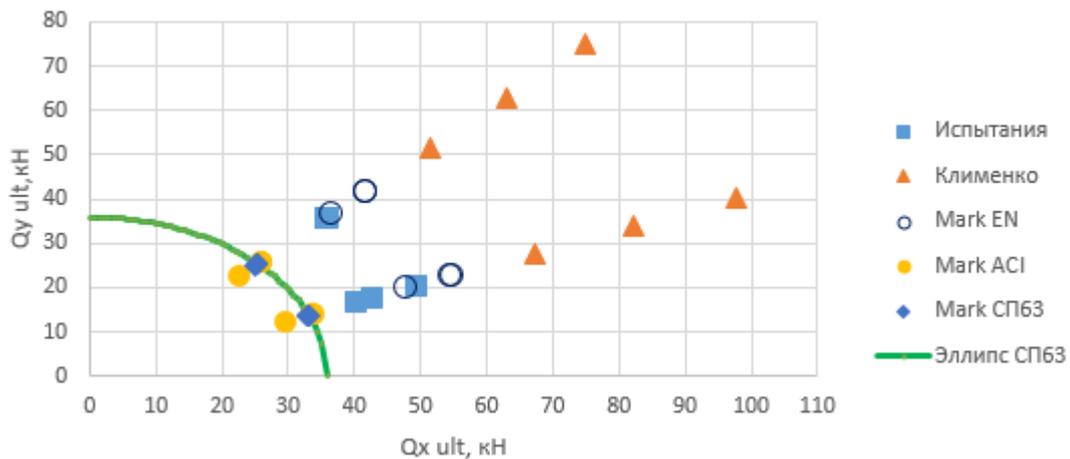


Рис. 4. Результаты обработки вычислений и испытаний для образцов из работы R. Thamrin. Образцы G2-01-22,5...G2-03-45

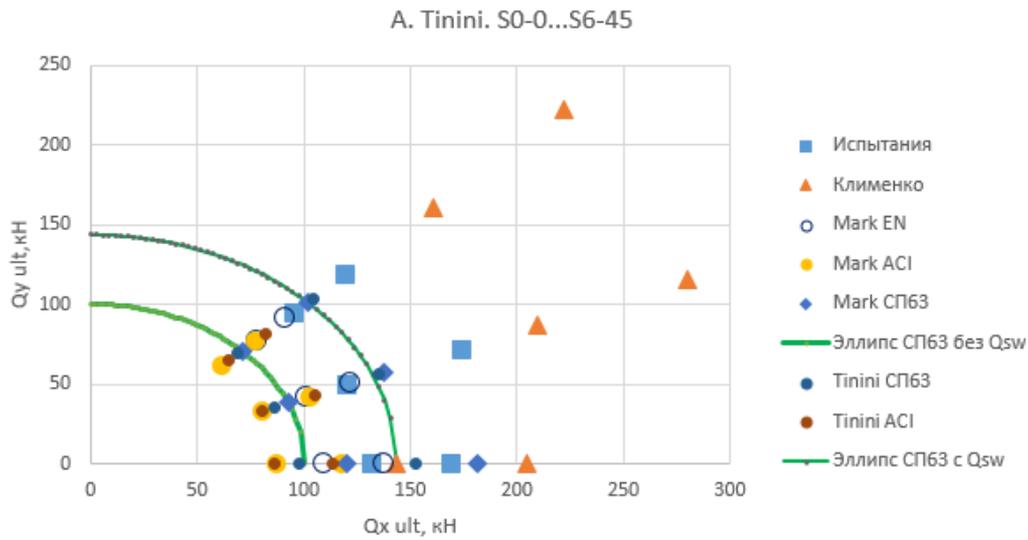


Рис. 5. Результаты обработки вычислений и испытаний для образцов из работы А. Tinini. Образцы S0-0...S6-45

Краткие комментарии к рисунку 5:

- методика Е. В. Клименко показала значительно завышенные результаты по сравнению с результатами испытаний;
- наиболее близкие к испытаниям результаты получены по методикам Р. Mark по нормам СП 63.13330.2018, А. Tinini по нормам СП

63.13330.2018, методика эллиптической диаграммы взаимодействия в приложении к СП 63.13330.2018;

- наиболее низкая оценка несущей способности получена по методикам Р. Mark по нормам ACI и А. Tinini по нормам ACI.

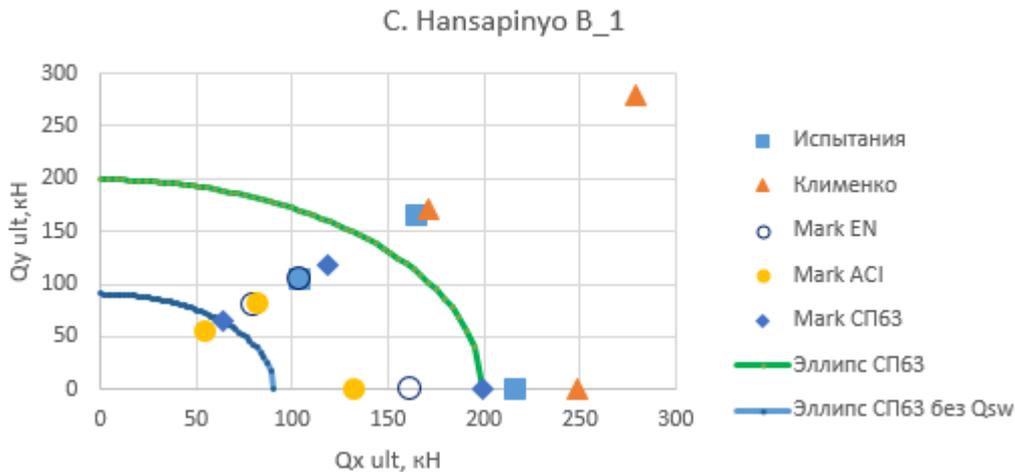


Рис. 6. Результаты обработки вычислений и испытаний для образцов из работы С. Hansapinyo. Образцы серии В_1

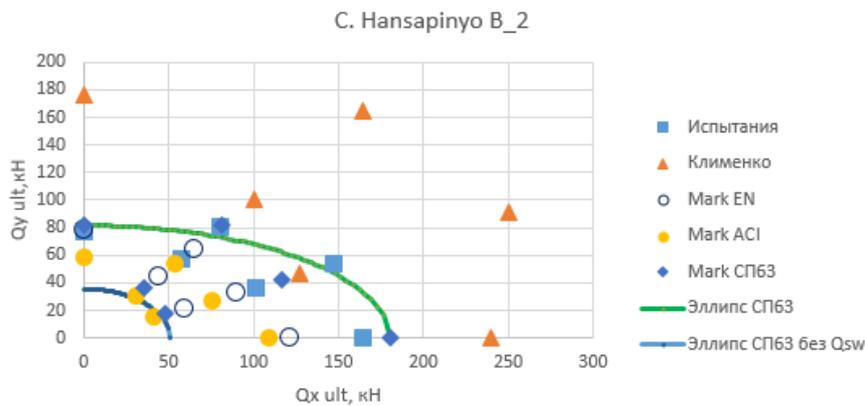


Рис. 7. Результаты обработки вычислений и испытаний для образцов из работы С. Hansapinyo. Образцы серии В_2

Краткие комментарии к рисункам 6, 7, 8:

– методика Е. В. Клименко показала значительно завышенные результаты по сравнению с результатами испытаний;

– наиболее близкие к испытаниям результаты получены по методикам эллиптической диаграммы взаимодействия и Р. Mark по нормам СП 63.13330.2018;

– наиболее низкая оценка несущей способности получена по методике Р. Mark по нормам АСІ.

Заключение. По итогам описанной в статье работы можно сформулировать следующие выводы.

Обработаны результаты 33 испытаний изгибаемых элементов на двухосевое действие поперечной силы. Рассмотрены элементы как с поперечной арматурой, так и без нее.

Выполнены поверочные расчеты несущей способности элементов по 7 аналитическим методикам – методике Е.В. Клименко, методике Р. Mark в приложении к нормам EN, методике Р. Mark в приложении к нормам АСІ, методике Р. Mark в приложении к СП 63.13330.2018, методике А. Tinini в приложении к нормам АСІ, методике А. Tinini в приложении к СП 63.13330.2018, методике эллиптической диаграммы взаимодействия в приложении к СП63.13330.2018. Результаты вычислений приведены в графическом и табличном виде.

Методика А. Tinini ввиду необходимости большого объема вычислений из-за необходимости определения параметров сжатой зоны бетона и поиска центра тяжести стержней растянутой арматуры с привлечением нелинейной деформационной модели была использована для обработки только шести испытаний из 33.

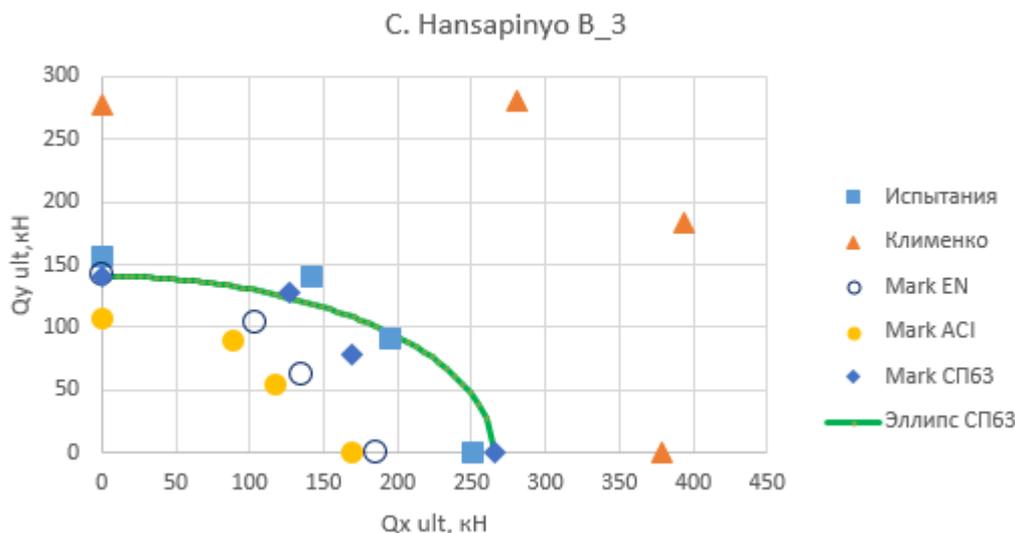


Рис. 8. Результаты обработки вычислений и испытаний для образцов из работы С. Hansapinyo. Образцы серии В_3

Наиболее низкая оценка несущей способности элементов получена по методике Р. Mark в приложении к нормам АСІ. Величины несущих способностей во всех случаях получены ниже опытных величин.

Расчеты по методике Е. В. Клименко дали близкий к опытному результат только для 8 испытаний из рассмотренных 33. В остальных случаях расчет по методике Е. В. Клименко показал завышенный по сравнению с опытными данными прогноз несущей способности. Завышение несущей способности доходит до 2 раз. Завышенный прогноз несущей способности наблюдался для элементов квадратного поперечного сечения и для элементов со значительным содержанием продольной арматуры.

Близкие к результатам испытаний, но в то же время осторожные (заниженные) результаты получены по методике эллиптической диаграммы

взаимодействия в приложении к СП 63.13330.2018 и методике Р. Mark в приложении к СП 63.13330.2018. Данные методики могут быть рекомендованы для применения с целью оценки несущей способности элементов на двухосевое действие поперечной силы в инженерной практике проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (с Изменениями № 1, 2). М.: ФАУ ФЦСС. 2021. 154 с.
- EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. 2004. 225 с.

3. JSCE: Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures – 2007 / Japan Society of Civil Engineers. 2010. 469 с.
4. ACI 318M-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary / American Concrete Institute, 2019. DOI: 10.14359/51716937
5. Клименко Е.В. Прочность наклонного сечения косоизгибаемых железобетонных тавровых элементов : дисс. ... канд. техн. наук. Полтава, 1984. 227 с.
6. Tinini A. Biaxial shear in RC square beams: Experimental, numerical and analytical program // Engineering Structures. 2016. Vol. 126. Pp. 469–480. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.07.056.
7. Thamrin R., Haris S., Dedi E., Dalmantias E. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Square Cross Section Subjected to Biaxial Bending // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 713. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/713/1/012029.
8. Hansapinyo C., Maekawa K., Chaisomphob T. Behavior of reinforced concrete beams subjected to biaxial shear // Doboku Gakkai Ronbunshu. 2003. Vol. 725. Pp. 321–331. DOI: 10.2208/jscej.2003.725_321.
9. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84). М. : Центр. ин-т типового проектирования, 1989. 192 с.
10. Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения). М.: Стройиздат, 1978. 320 с.
11. Mark P. Shear-resistant design of biaxially loaded RC beams // Magazine of Concrete Research. 2007. Vol. 59(1), Pp. 21–28. DOI:10.1680/macr.2007.59.1.21
12. Mark P. (2005). Truss Models for the Design of Reinforced Concrete Beams Subject to Biaxial Shear // Structures Congress 2005. DOI:10.1061/40753(171)168
13. Mark P. Design of reinforced concrete beams with rectangular cross sections against biaxial shear forces // Beton-Stahlbetonbau. 2005. 100(5), Pp. 370–375. DOI:10.1002/best.200590092
14. Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л. И. Расчет железобетонных элементов по прочности наклонных сечений при двухосевом действии поперечных сил // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 8. С. 16–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-16-30
15. СНиП II-21-75. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1976. 89 с.
16. Umehara H., Jirsa J.O. Short Rectangular RC Columns Under Bidirectional Loadings // Journal of Structural Engineering. 1984. Vol. 110(3). Pp. 605–618. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:3(605)

Информация об авторах

Шипулин Станислав Андреевич, аспирант кафедры строительных конструкций и механики грунтов. E-mail: sa_shipulin@mail.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Беляева Зоя Владимировна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных конструкций и механики грунтов. E-mail: z.v.beliaeва@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Миронова Людмила Ивановна, кандидат технических наук, доктор педагогических наук, профессор кафедры гидравлики. E-mail: mirmila@mail.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Поступила 05.05.2024 г.

© Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л.И., 2024

***Shipulin S.A., Beliaeva Z.V., Mironova L.I.**

Ural Federal University

**E-mail: sa_shipulin@mail.ru*

EVALUATION OF CALCULATION METHODS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS SUBJECTED TO BIAXIAL ACTION OF SHEAR FORCES

Abstract. *The current design standards for reinforced concrete structures in the Russian Federation do not contain methods for calculating bending elements subjected to biaxial action of shear forces. However, methods for calculating such structures exist and are given in the works of domestic and foreign researchers, as well as in the design standards of past years. This article selects data on the results of 33 tests of beams*

subjected to action of biaxial shear forces. The results of selected tests were compared with the results of theoretical calculations of the bearing capacity of elements under the biaxial action of shear forces using various analytical methods. A brief overview of existing analytical techniques is provided. A comparison of test results and theoretical calculations is presented in tabular and graphical form. The purpose of the work is to identify existing methods for calculating reinforced concrete bended elements under biaxial action of transverse forces, allowing to obtain load-bearing capacity calculation results that are as close as possible to the test results. It is shown that a technique using an elliptical diagram of the interaction of force factors, as well as the P. Mark technique, using a system of interpolating coefficients, applied to design dependencies from domestic design standards, can be recommended for assessing load-bearing capacity in engineering design practice.

Keywords: inclined section, biaxial bending, shear force, reinforced concrete structures, reinforced concrete structures design in bending.

REFERENCES

1. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions (with Amendments No. 1, 2). Moscow, FAA FCSS. 2021. 154 p. (rus)
2. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. 2004. 225 p.
3. JSCE: Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures – 2007 [Japan Society of Civil Engineers]. 2010. 469 p.
4. ACI 318M-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [American Concrete Institute]. 2019. DOI: 10.14359/51716937
5. Klimenko E.V. Strength of the inclined section of oblique reinforced concrete tee elements [Prochnost' naklonnogo secheniya kosoizgibayemykh zhelezobetonnykh tavrovykh elementov]: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Poltava, 1984. 227 p. (rus)
6. Tinini A. Biaxial shear in RC square beams: Experimental, numerical and analytical program. Engineering Structures. 2016. Vol. 126. Pp. 469–480. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.07.056.
7. Thamrin R., Haris S., Dedi E., Dalmantias E. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Square Cross Section Subjected to Biaxial Bending. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 713. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/713/1/012029.
8. Hansapinyo C., Maekawa K., Chaisomphob T. Behavior of reinforced concrete beams subjected to biaxial shear. Doboku Gakkai Ronbunshu. 2003. Vol. 725. Pp. 321–331. DOI: 10.2208/jscej.2003.725_321.
9. Manual for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy lightweight concrete without prestressing reinforcement (to SNiP 2.03.01-84). Moscow: Central Institute for Standard Design, 1989. 192 p. (rus)
10. Guidelines for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete (without prestressing). M. : Stroyizdat, 1978. 320 p. (rus)
11. Mark P. Shear-resistant design of biaxially loaded RC beams. Magazine of Concrete Research. 2007. Vol. 59(1). Pp. 21–28. DOI:10.1680/mac.2007.59.1.21
12. Mark P. Truss Models for the Design of Reinforced Concrete Beams Subject to Biaxial Shear. Structures Congress 2005. DOI:10.1061/40753(171)168
13. Mark P. Design of reinforced concrete beams with rectangular cross sections against biaxial shear forces. Beton-Stahlbetonbau. 2005. 100(5). 370–375. DOI:10.1002/best.200590092
14. Shipulin S.A., Beliaeva Z.V., Mironova L.I. Design of reinforced concrete elements inclined sections subjected to biaxial action of shear forces. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 8. Pp. 99–105. DOI:10.34031/2071-7318-2023-8-8-16-30.
15. SNiP II-21-75 Concrete and reinforced concrete structures. Design standards. Moscow: Stroyizdat, 1976. (rus)
16. Umehara H., Jirsa J.O. Short Rectangular RC Columns Under Bidirectional Loadings. Journal of Structural Engineering. 1984. Vol. 110. No. 3. Pp. 605–618. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:3(605)

Information about the authors

Shipulin, Stanislav A. Postgraduate student. E-mail: sa_shipulin@mail.ru. Ural Federal University, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Beliaeva, Zoia V. PhD. E-mail: z.v.beliaeva@urfu.ru. Ural Federal University, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Mironova, Ludmila I. PhD. E-mail: mirmila@mail.ru. Ural Federal University, Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Received 05.05.2024

Для цитирования:

Шипулин С.А., Беляева З.В., Миронова Л.И. Оценка методик расчета железобетонных элементов по прочности при двухосевом действии поперечных сил // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №8. С. 39–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-39-53

For citation:

Shipulin S.A., Beliaeva Z.V., Mironova L.I. Evaluation of calculation methods of reinforced concrete elements subjected to biaxial action of shear forces. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 8. Pp. 39–53. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-39-53