

УДК 69.04

ЖЕСТКОСТЬ СТЫКОВ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ НА СДВИГ В ИХ ПЛОСКОСТИ ДО МОМЕНТА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

А.А. Цветкова

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В настоящем исследовании делается обзор методов расчета жесткости вертикальных стыков стеновых панелей крупнопанельных зданий, приведенных в действующих нормативных документах и наиболее часто используемом пособии к ним, выявляются противоречия в методах расчета. На основании проведенного сравнения, обзора научных публикаций, анализа работы вертикального стыка железобетонных стеновых панелей на арматурных выпусках делается вывод, что напряженно-деформируемое состояние стыка представляет собой совокупность сдвига и сжатия. На основании данной предпосылки предлагается формула для расчета податливости (величины, обратной жесткости) стыка в направлении z , в плоскости панелей. Проводится численный эксперимент в программно-вычислительном комплексе SCAD путем моделирования стыка с помощью объемных конечных элементов для проверки достоверности значений податливости стыка в направлении оси z , полученных по данной формуле. Погрешность результатов, полученных по формуле и в численном эксперименте в случае связей, наложенных сбоку от стыка и связей, наложенных посередине стыка, составляет менее 1% и 7% соответственно. Формулу можно использовать при задании жесткостей упругих связей при моделировании крупнопанельных зданий в вычислительных программных комплексах.

Ключевые слова: коэффициент жесткости, податливость, расчет стыка, численный эксперимент, напряженно-деформированное состояние стыка, специальные конечные элементы, сдвиг, сжатие.

Ссылка для цитирования: Цветкова А.А. Жесткость стыков сборных железобетонных стеновых панелей на сдвиг в их плоскости до момента трещинообразования // Инженерные исследования. 2022. №4 (9). С. 26-33. EDN: HYZLEU

THE JOINT STIFFNESS OF PRECAST REINFORCED CONCRETE WALL PANELS TO SHEAR IN THEIR PLANE BEFORE CRACKING

A.A. Tsvetkova

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This study provides an overview of the methods for calculating the stiffness of vertical joints of wall panels of large-panel buildings, given in the current regulatory documents and the most frequently used manual for them, contradictions in the calculation methods are revealed. Based on the comparison, review of scientific publications, analysis of the performance of vertical joint of reinforced concrete wall panels on reinforcement loops, it is concluded that the stress-strain state of the joint is a combination of shear and compression. Based on this premise, a formula is proposed for calculating the joint flexibility (value, the inverse of stiffness) in the z direction, in the plane of the panels. A numerical experiment is carried out in the SCAD software and computing complex by modeling the joint using volumetric finite elements to verify the reliability of the values of joint flexibility in the direction of the z axis obtained by this formula. The error of the results obtained by the formula and in the numerical experiment in the case of bonds superimposed on the side of the joint and bonds superimposed in the middle of the joint is less than 1% and 7%, respectively. The formula can be used when setting the stiffness of special finite elements when modeling large-panel buildings in computing software complexes.

Keywords: coefficient of stiffness, flexibility, numerical experiment, stress-strain state of the joint, special finite elements, shear, compression.

For citation: Tsvetkova A.A. The joint stiffness of precast reinforced concrete wall panels to shear in their plane before cracking // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.4 (9). Pp. 26-33. EDN: HYZLEU

ВВЕДЕНИЕ

Корректное построение расчетной модели сборного железобетонного здания в любом программном комплексе невозможно без моделирования стыков стеновых панелей. В случае решения по сварке стеновых панелей между собой через пластину (рис. 1а) связь моделируется абсолютно жестким телом, в случае решения стыка панелей на петлях (рис. 1б) - связевыми конечными элементами упругих связей, жесткость которых (податливость – обратная величина) нужно численно задать в т/м (кН/м) или, в случае задания жесткости на поворот, т · м/рад (кН · м/рад).

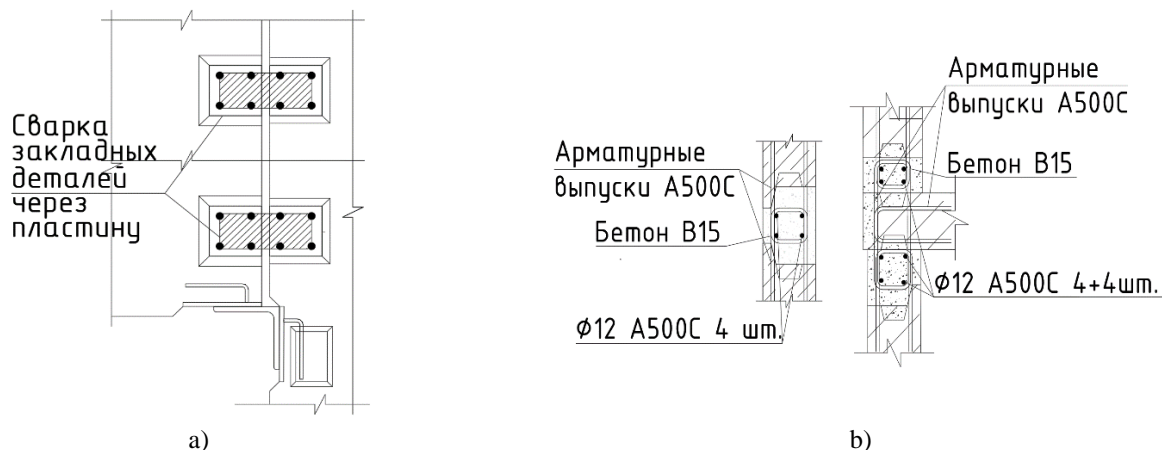


Рис. 1. Варианты вертикального соединения панелей между собой: а – жесткое на сварке через пластину; б – упругое на арматурных выпусках (стык двух стен слева и трех стен справа)

Fig. 1. Options for vertical connection of panels between each other. a – rigid on welding through a plate; b – elastic on rebar loops (joint of two walls on the left and three walls on the right)

В практике расчетов принято руководствоваться СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы», СТО 3655401-026-2012 «Рекомендации по расчету и конструированию жилых крупнопанельных домов с применением бессварных вертикальных и горизонтальных стыков...», «Пособие по проектированию жилых зданий. Вып. 3. Конструкции жилых зданий к СНиП 2.08.01-85». Однако, данные нормативные документы дают противоречивые формулы для расчета податливости стыков в плоскости панелей, так, СП 335.1325800.2017, как и «Пособие...» предлагает воспользоваться формулой (1), которая представлена ниже.

$$\lambda_{\tau,b} = \frac{l_{loc} \left(\frac{1}{E_b} + \frac{1}{E_{mon}} \right)}{A_{loc} n_k} \quad (1)$$

где l_{loc} – условная высота шпонки, равная 250мм;

E_b, E_{mon} – модули упругости бетона и шва замоноличивания соответственно, кПа;

A_{loc} – площадь шпонки; n – количество шпонок.

СТО 3655401-026-2012 предлагает рассчитывать жесткость (податливость – обратная величина) на сдвиг К по формулам (2) – (4):

$$Q_1 = R_b \cdot l_k \cdot t_k \cdot n_k \quad (2)$$

$$Q_2 = 1.5 R_{bt} \cdot l_k \cdot h_k \cdot n_k \quad (3)$$

$$K = \frac{Q}{\Delta} \quad (4)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона шпонки на сжатие;

R_{bt} – расчетное сопротивление бетона шпонки на растяжение;

l_k – ширина шпонки;

t_k – глубина шпонки;

h_k – высота шпонки;

n_k – общее количество шпонок по обеим граням панелей;

Q – сдвиговое вертикальное усилие, приходящееся на 1м.п. стыка и равное $Q_{min}(Q_1, Q_2)$;

Δ – смещение стыка, вызываемое усилием Q и равное 1мм/м.п.

Был произведен анализ отечественных и зарубежных публикаций, посвященных расчету и моделированию стыков стеновых панелей крупнопанельных зданий. Были найдены публикации, посвященные расчету стыков на закладных деталях [2], стыков с использованием гибких петель [3]. Также ряд работ посвящено оценке напряженно-деформированного состояния горизонтальных и комбинированных стыков [4,5] и автоматизации расчета стыков в программных комплексах [6-8]. В современных зарубежных исследованиях, посвященных стыкам железобетонных элементов, в основном внимание уделяется работе стыков колонн [9-10]. Наиболее схожую задачу нахождения податливости вертикальных стыков стеновых панелей рассматривает В.П. Блажко [1]. В своем исследовании он моделирует стык стеновых панелей крупнопанельных зданий (рис.2) и делает вывод о том, что формула (1) занижает жесткость соединения панелей, что при расчетах на динамические воздействия приводит к существенным искажениям результатов расчета.

На основании вышесказанного, было решено сконструировать новую формулу, описывающую податливость вертикального шпоночного стыка стеновых панелей в их плоскости до момента трещинообразования.

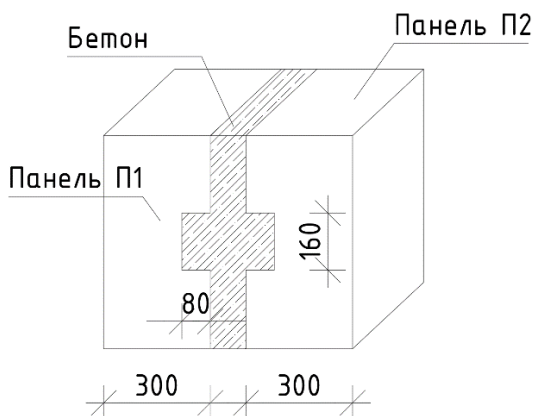


Рис. 2. Стык, замоделированный в исследовании В.П. Блажко
Fig. 2. The joint modeled in the study of V.P. Blazhko

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве предпосылки для конструирования формулы было взято предположение, что стык работает на совокупность сжатия и сдвига, а не только на сжатие, которое учтено в формуле (1). Была составлена схема стыка с учетом последовательности и параллельности его элементов, взаимосвязь податливостей которых представлена ниже (рис.3). Чертеж стыка и его схема также представлены ниже (рис. 4).



Рис. 3. Случаи расположения элементов стыка: а – последовательное; б – параллельное
Fig. 3. Cases of arrangement of joint elements: a – serial; b – parallel

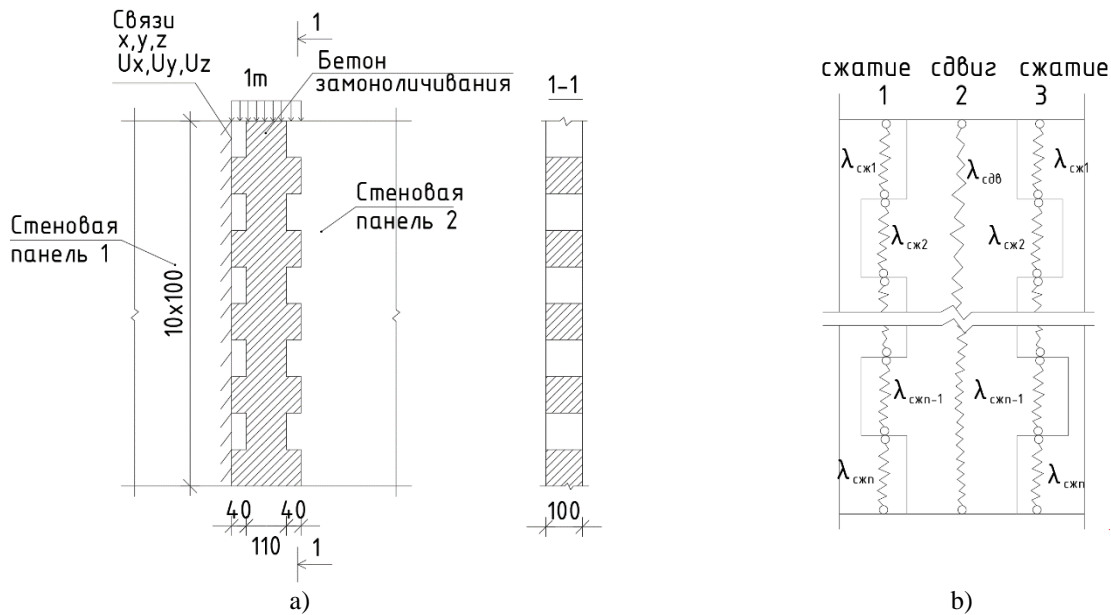


Рис. 4. Моделируемый стык: а – визуальное представление стыка; б – схема стыка
Fig. 4. The considered joint: а – visual representation of the joint; б – junction diagram

Таким образом, податливость стыка выражается формулой (5):

$$\frac{1}{\lambda_{стыка}} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} \quad (5)$$

В свою очередь, податливость λ_1 выражается как сумма податливостей каждого из блоков высотой 0,1м, вычисляемых по известному закону Гука, т.к. соединение последовательное, по формуле (6):

$$\lambda_1 = \frac{1 \cdot l_{блока1}}{E_{блока1} \cdot A_{сж}} + \frac{1 \cdot l_{блока2}}{E_{блока2} \cdot A_{сж}} + \dots + \frac{1 \cdot l_{блока10}}{E_{блока10} \cdot A_{сж}} \quad (6)$$

где $l_{блокn}$ – высота n-го блока (шпонки или не шпонки);

$E_{блокn}$ – модуль упругости n-го блока;

$A_{сжатия}$ – площадь поверхности блока, перпендикулярная сжимающей силе.

У нас пять одинаковых блоков высотой 100мм с модулем упругости панели E_b и пять одинаковых блоков высотой 100мм с модулем упругости шва замоноличивания $E_{мон}$. Подставив данные значения в (6) и выполнив преобразования получим формулу (7):

$$\lambda_1 = \frac{5l_{блока}}{E_{мон} \cdot A_{сж}} + \frac{5l_{блока}}{E_b \cdot A_{сж}} = \frac{5l_{блока}}{A_{сж}} \left(\frac{1}{E_{мон}} + \frac{1}{E_b} \right) \quad (7)$$

В связи с симметрией стыка $\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda$, запишем формулу (8):

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_3} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} = \frac{1}{\lambda/2} \quad (8)$$

Подставим (7) в (8) и получим формулу (9):

$$\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_3} = 1 / \left(\frac{5l_{блока}}{2A_{сж}} \left(\frac{1}{E_{мон}} + \frac{1}{E_b} \right) \right) \quad (9)$$

Обратимся к сдвиговой составляющей работы стыка. Схема работы стыка на сдвиг показана на рис.5.

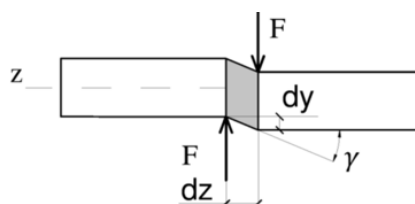


Рис. 5. Схема работы материала на сдвиг
Fig. 5. The scheme of the performance of the material for shear

Податливость при сдвиге от усилия в 1т (1кН) определяется известной формулой (10):

$$\lambda_2 = \frac{1 \cdot z}{G_{\text{мон}} \cdot A_{\text{сдвига}}} \quad (10)$$

где: $G_{\text{мон}} = \frac{E_{\text{мон}}}{2(1 + \mu)} = 0.417 E_{\text{мон}}$ – модуль сдвига бетона (μ - коэффициент Пуассона);

z – толщина стыка, или расстояние между панелями;

$A_{\text{сдвига}}$ – площадь сдвигаемых поверхностей, для рассматриваемого стыка;

$$A_{\text{сдвига}} = n_{\text{блоков}} \cdot A_{\text{блока}} = 5 \cdot 0.1 \cdot 0.1 = 0.05 \text{ м}^2.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате анализа напряженно-деформированного состояния стыка, путем подстановки (9,10) в (5) и выполнения преобразований формула (11):

$$\lambda = \frac{1}{\frac{2A_{\text{сж}} E_{\text{мон}} E_b}{n_{\text{шп}} l_{\text{шп}} (E_b + E_{\text{мон}})} + \frac{G_{\text{мон}} A_{\text{сдвига}}}{z}} \quad (11)$$

где: $E_{\text{мон}}$, E_b модуль упругости соответственно шва замоноличивания стыка и стеновой панели;

$G_{\text{мон}}$ – модуль сдвига шва замоноличивания;

$l_{\text{шп}}$ – высота шпонки, также равная межшпоночному расстоянию;

$n_{\text{шпонок}}$ – количество шпонок по одну сторону панели;

$A_{\text{сж}}$ – площадь сжатия шпонки, перпендикулярная сжимаемой нагрузке;

$A_{\text{сдвига}}$ – площадь сдвига, равная площади сдвигаемых поверхностей по одну сторону шва;

z – расстояние между стеновыми панелями (длина стыка).

Предлагаемая формула (11) дополняет (1) сдвиговой составляющей. Таким образом, значение жесткости уже не является заниженным, как было указано в [1]. Формула применима в том случае, когда высота шпонки равна межшпоночному расстоянию.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитаем податливость по предложенной формуле (11) значение податливости для стыка на рис. 4а. Принимаем материал стеновой панели бетон В25, бетон замоноличивания стыка В15.

$$E_b = 3058103 \frac{\text{м}}{\text{м}^2} \quad E_{\text{мон}} = 2446483 \frac{\text{м}}{\text{м}^2} \quad A_{\text{сж}} = 0.004 \text{ м}^2 \quad A_{\text{сдвига}} = 0.05 \text{ м}^2 \quad z = 0.11 \text{ м}$$

$$\lambda = \frac{1}{\frac{2(0.004 \cdot 2446483 \cdot 3058103)}{5 \cdot 0.1(2446483 + 3058103)} + \frac{0.417 \cdot 2446483 \cdot 0.05}{0.11}} = \frac{1}{21746.5 + 463720} = 2,059 \cdot 10^{-6} \text{ м / м}$$

Данный стык моделировался в программном комплексе SCAD с помощью восьмиузловых конечных элементов тип 36. В результате выполнения расчета от нагрузки 1т получились максимальные перемещения по z , равные $4.05 \cdot 10^{-6} \text{ м / м}$. Изополю перемещений представлены на рис.6.

$$\text{Погрешность составляет: } \Delta = \frac{4.09 - 2,059}{4.09} = 49\%.$$

Далее был рассчитан по формуле (11) и замоделирован в SCAD стык, отличающийся по параметрам от исходного: связи были наложены в середине стыка, в результате чего расстояние z уменьшилось вдвое (рис.7).

Результат расчета по формуле (11) представлен ниже:

$$E_b = 3058103 \frac{\text{м}}{\text{м}^2} \quad E_{\text{мон}} = 2446483 \frac{\text{м}}{\text{м}^2} \quad A_{\text{сж}} = 0.004 \text{ м}^2 \quad A_{\text{сдвига}} = 0.05 \text{ м}^2 \quad z = 0.055 \text{ м}$$

$$\lambda = \frac{1}{\frac{2(0.004 \cdot 2446483 \cdot 3058103)}{5 \cdot 0.1(2446483 + 3058103)} + \frac{0,417 \cdot 2446483 \cdot 0.05}{0.055}} = \frac{1}{21746.5 + 927439} = 1.053 \cdot 10^{-6} \text{ м / м}$$

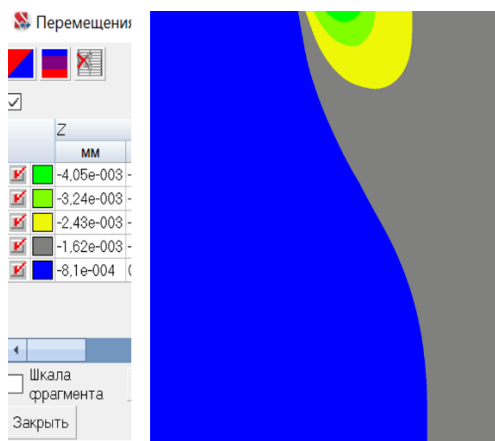


Рис. 6. Изополя перемещений по Z в SCAD исходного стыка

Fig. 6 Isofield of Z-displacements in the SCAD of the initial joint

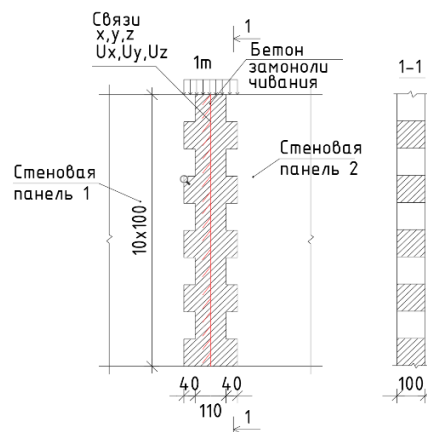


Рис. 7. Схема стыка со связями, наложенными посередине

Fig. 7. Junction diagram with links superimposed in the middle

Результат расчета модели из объемных конечных элементов со связями посередине шва представлен на рис. 8.

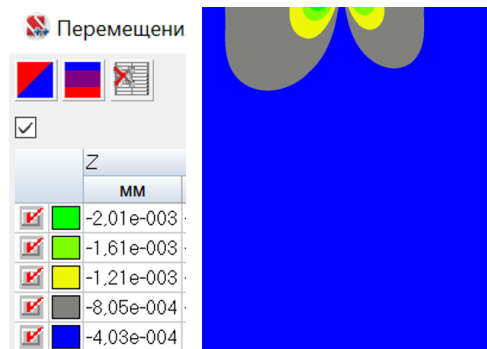


Рис. 8. Изополя перемещений по Z в SCAD стыка со связями, наложенными посередине.

Fig. 8. Isofield of Z-displacements in the SCAD of the joint with links superimposed in the middle

Погрешность нахождения податливости по формуле и в результате численного эксперимента составляет $\Delta = \frac{2.14 - 1.053}{2.14} = 50\%$, что меньше, чем по формулам из СП 335.1325800.2017.

Результаты расчета по формуле (1), формуле (11) и численного эксперимента сведены в табл.1.

Таблица 1. Результаты аналитического расчета и численного моделирования податливости вертикального стыка по направлению z

Table 1. The results of analytical calculation and numerical simulation of the ductility of the vertical joint in the z direction

№	Вид расчета	Стык с закреплением слева		Стык с закреплением посередине	
		$\lambda, \frac{M}{t} \cdot 10^6$	Погрешность, %	$\lambda, \frac{M}{t} \cdot 10^6$	Погрешность, %
1	Расчет по формуле (1)	9.58	136	9.58	376
2	Расчет по формуле (11)	2,059	49	1,053	50
3	Численное моделирование в SCAD	4.05	0	2.01	0

Как видно из п.2 и п.3 таблицы, предложенная формула, в отличие от формулы из СП 335.1325800.2017, отражает прямопропорциональную зависимость коэффициента податливости от длины стыка z.

Характер изополей перемещений также подтверждает гипотезу, что в стыках присутствует комбинация напряженного состояния сжатия и сдвига (рис. 9)

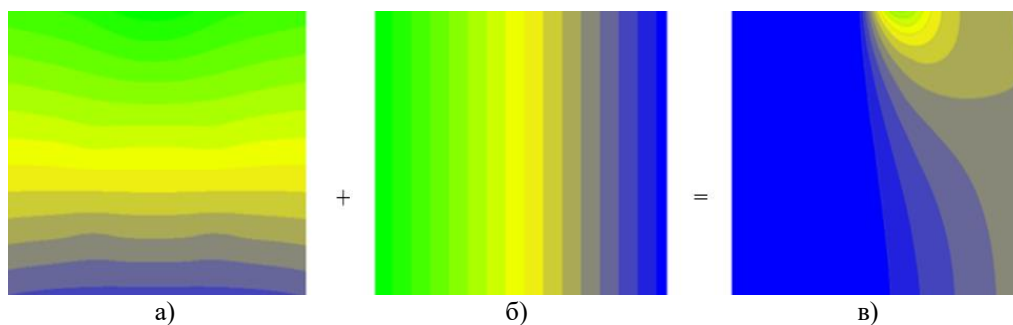


Рис. 9. Характер изополей перемещений: а - при сжатии; б - при сдвиге; в - в рассматриваемом случае
Fig. 9. The nature of the displacement isofields: a - during compression; б - during shear; в - in the case under consideration

ВЫВОДЫ

1. Обосновано, что в вертикальном стыке стеновых панелей присутствуют как деформации как сжатия, так и сдвига.

2. Предложена формула для расчета податливости по направлению оси z вертикального шпоночного соединения, применимая в случае, если высота шпонки равна межшпоночному расстоянию.

3. Показано, что погрешность расчета по предложенной формуле меньше, чем по формулам из СП 335.1325800.2017.

4. Показано, что жесткость стыка зависит от длины стыка z, то есть присутствует сдвиговая составляющая.

В результате проведенного анализа работы вертикального стыка железобетонных панелей была получена формула (11) для расчета податливости стыка в направлении оси Z. Также был проведен численный эксперимент в ПК SCAD расчета податливости для случая наложения связей слева и посередине. Сравнения численного эксперимента и расчета по формуле показало, что формула (11) дает погрешность величиной 50% в обоих случаях, что, однако, меньше, чем формула (1), которая в случае наложения связей посередине дает погрешность 376%. Требуется дальнейшая доработка формулы (11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блажко В.П. Об определении податливости связей при формировании расчетных моделей панельных зданий // Жилищное строительство. 2017. № 3. С. 17-21. EDN YNZFAN.
2. Малахова А.Н., Маринина Д.А. Определение податливости элементов вертикального стыка на закладных деталях крупнопанельных зданий // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: Сборник докладов Первой Национальной конференции, Москва, 30 сентября 2020. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. С. 123-127. EDN QWNAEY.
3. Соколов Б.С., Миронова Ю.В. Прочность и податливость вертикальных стыков стеновых панелей с использованием гибких петель // Жилищное строительство. 2014. №5. С. 60-62. EDN SFMQUN.
4. Соколов Б.С., Никитин Г.П. Совершенствование методики расчета комбинированных стыков панелей зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. №1 (14). С. 81-89. EDN JUCYZT.
5. Соколов Б.С., Седов А.Н. Изучение напряженно-деформированного состояния горизонтальных стыков панелей зданий для их усиления // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2008. Т.4. №2. С.123-124. EDN MOTWUR.
6. Соколов Б.С., Седов А.И. Автоматизированный программный комплекс для проектирования комбинированных стыков панелей крупнопанельных зданий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2(28). С. 97-101. EDN SPCMZR.
7. Водопьянов Р.Ю. Моделирование и расчет крупнопанельных зданий в ПК Лира-САПР // Жилищное строительство. 2017. №3. С. 42-48.
8. Губченко В.Е. Работа с инструментом «Стык» ПК ЛИРА-САПР // Жилищное строительство. 2018. № 3. С. 30-35. EDN YVVSXFU.
9. Zhou Xuhong, Xu Tianxiang, Liu Jiepeng, Wang Xuanding, Chen Y. Frank Seismic performance of concrete-encased column connections for concrete filled thin-walled steel tube piers // Engineering Structures. 2022. №269(2). С. 114803.
10. Allan B.F., Chen S.K., Henry R.S., Ingham J.M. Experimental Testing of Concrete Panel Connections // The New Zeland Concrete Industry Conference 2012, Claudelands, Hamilton 11-13 October.

ОБ АВТОРАХ

Анна Андреевна Цветкова – студентка. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: annatsvetkova2014@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Anna A. Tsvetkova – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: annatsvetkova2014@mail.ru