УДК 624.07
doi: 10.33622/0869-7019.2024.07.41-47

Натурные и численные эксперименты узлов крупногабаритных железобетонных модулей

Сергей Александрович АМБАРЦУМЯН[1], доктор технических наук, профессор, генеральный директор, sergey.ambartsumyan@mon-arch.ru

Артур Ванушевич МАНУКЯН[1], доктор технических наук, зам. генерального директора – технический директор, a.manukyan@mon-arch.ru

Олег Вартанович МКРТЫЧЕВ[2], доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой сопротивления материалов, mkrtychev@yandex.ru

Михаил Иванович АНДРЕЕВ[2], кандидат технических наук, ведущий инженер, misha-andreev_93@mail.ru

Аркадий Вульфович ГРАНОВСКИЙ[2], кандидат технических наук, доцент кафедры, granovskiyav@mgsu.ru

[1] Концерн «МонАрх», 125284 Москва, Ленинградский просп., 31А, стр. 1

[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *Рассмотрены вопросы строительства жилых зданий с применением крупногабаритных железобетонных модулей, показаны преимущества данной технологии. Отмечена необходимость проведения испытаний и исследований элементов модулей, актуализации базы нормативных документов в этой области. Приведены результаты испытаний сухих контактных стыков железобетонных модулей, позволяющие оценить прочность и деформативность узлов при транспортных, монтажных и эксплуатационных нагрузках. Анализ полученных результатов испытаний с доведением узлов до разрушения свидетельствует о выполнении условий первой и второй группы предельных состояний в соответствии с требованиями действующих норм. Оптимальность конструкции узлов подтверждена результатами вариантных численных исследований. Разработанные с учетом результатов испытаний расчетные методики и модели позволяют учесть действительную жесткость узлов, нелинейный характер деформирования несущих элементов и реальную диаграмму работы материала. Полученные параметры и разработанные подходы могут быть использованы в расчетах многоэтажных зданий из объемных железобетонных модулей, а также при актуализации нормативных документов в области модульного строительства.*

Ключевые слова: *быстровозводимое жилье, модульное строительство, объемные блоки, крупногабаритные железобетонные модули, контактные стыки, накопление повреждений, нелинейные методы, нелинейная модель бетона, испытание конструкций*

Для цитирования: *Амбарцумян С. А., Манукян А. В., Мкртычев О. В., Андреев М. И., Грановский А. В.* Натурные и численные эксперименты узлов крупногабаритных железобетонных модулей // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 7. С. 41–47. doi: 10.33622/0869-7019.2024.07.41-47

FULL-SCALE AND NUMERICAL EXPERIMENTS OF THE NODES OF LARGE-SIZED REINFORCED CONCRETE MODULES

Sergey A. AMBARTSUMYAN[1], sergey.ambartsumyan@mon-arch.ru, **Artur V. MANUKYAN**[1], a.manukyan@mon-arch.ru

Oleg V. MKRTYCHEV[2], mkrtychev@yandex.ru, **Mikhail I. ANDREEV**[2], misha-andreev_93@mail.ru

Arkadiy V. GRANOVSKIY[2], granovskiyav@mgsu.ru

[1] Concern "Monarch", Leningradsky prospekt, 31A, str. 1, Moscow 125284, Russian Federation

[2] National Research Moscow State Civil Engineering University, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *The issues of construction of residential buildings using large-sized reinforced concrete modules and the advantages of this building construction technology are considered. The need to conduct appropriate tests and studies of module elements, and update the base of regulatory documents in this area is noted. The results of tests of dry contact joints of reinforced concrete modules are presented, which make it possible to evaluate the strength and deformability of the units under transport, installation and operational loads. Analysis of the obtained test results with bringing the units to destruction indicates that the conditions of the first and second groups of limit states are met in accordance with the requirements of current standards. The optimal design of the units is confirmed by the results of variant numerical studies. Calculation methods and models developed taking into account the test results make it possible to take into account the actual stiffness of the nodes, the nonlinear nature of the deformation of load-bearing elements and the actual diagram of the material's operation. The obtained parameters and developed approaches can be used in the calculations of multi-storey buildings made of volumetric reinforced concrete modules, as well as in updating regulatory documents in the field of modular construction.*

© АМБАРЦУМЯН С. А., МАНУКЯН А. В., МКРТЫЧЕВ О. В., АНДРЕЕВ М. И., ГРАНОВСКИЙ А. В., 2024

***Keywords**: prefabricated housing, modular construction, volumetric blocks, large-sized reinforced concrete modules, contact joints, damage accumulation, non-linear methods, non-linear model of concrete, structural testing*

For citation: Ambartsumyan S. A., Manukyan A. V., Mkrtychev O. V., Andreev M. I., Granovskiy A. V. Full-Scale and Numerical Experiments of the Nodes of Large-Sized Reinforced Concrete Modules. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2024, no. 7, pp. 41–47. (In Russ.).
doi: 10.33622/0869-7019.2024.07.41-47

Введение

Необходимость увеличения объема жилищного строительства и улучшения жилищных условий граждан, являются важными задачами для многих стран, в том числе и для России. Рост объемов строительства с использованием современных технологий позволяет обеспечить население доступным и качественным жильем, а также способствует развитию экономики, повышает качество жизни людей, комфорт и безопасность.

Применение технологий крупномодульного строительства зданий и сооружений [1–3] способствует существенному увеличению объемов жилищного строительства. На сегодняшний день в нашей стране возведение зданий из крупногабаритных модулей – одно из перспективных направлений в области строительства, обладающее следующими преимуществами [4, 5].

Скорость строительства: крупногабаритные модули изготавливаются на заводе и доставляются на строительную площадку с высокой степенью готовности (отделка, инженерные сети и т. д.), что значительно сокращает сроки возведения объекта.

Качество: крупногабаритные модули обычно производят на заводе в контролируемых условиях, где обеспечивается высокое качество и точность изготовления [6, 7].

Энергоэффективность: крупногабаритные модули изготовляют с использованием современных энергоэффективных материалов и технологий.

Экологичность: применение крупногабаритных модулей дает возможность снизить количество образуемых отходов, что благоприятно влияет на окружающую среду.

Гибкость: крупногабаритные модули могут быть изготовлены в соответствии с разными требованиями и спецификациями, это позволяет проектировать и строить здания различных размеров и конфигураций [8, 9].

Экономическая эффективность: производство крупногабаритных модулей в больших количествах на заводе и их использование для возведения зданий снижает финансовые затраты на строительство.

Крупномодульное строительство в России имеет большой потенциал [10]. Для успешного развития данного направления требуется актуализация базы нормативных документов, при этом должен быть проведен комплекс соответствующих экспериментальных и расчетных исследований. По результатам таких работ должна быть подтверждена возможность безопасного применения данных технологий и определены исходные параметры, необходимые для расчетов и проектирования [11, 12].

При разработке конструктивных решений зданий на основе крупногабаритных железобетонных модулей особое внимание следует уделить идентификации расчетных параметров и обеспечению должной работы узлов сопряжения элементов в самом модуле и модулей между собой.

Одним из вариантов узла сопряжения является «шпоночное» соединение пилонов между собой по высоте здания. Такое соединение позволяет легко и быстро установить модули друг на друга, ускорить процесс монтажа и снизить затраты на строительство.

Исследования работы контактных стыков железобетонных конструкций модульных блоков являются актуальной частью разработки и внедрения новых технологий в области модульного строительства. Это важный элемент обеспечения безопасности и долговечности здания или сооружения.

Цель работы – верификация расчетных методик на основе результатов экспериментальных исследований узлов крупногабаритных железобетонных модулей.

Материалы и методы исследования

Общий вид опытных образцов контактного стыка (узлов) несущих пилонов железобетонных модулей показан на *рис. 1*.

Прочность при сжатии бетона пилонов узла П1-В1-Н1 соответствует классам В80 (верхний пилон) и В75 (нижний пилон), узла СТ-3 – классам В75 (верхний пилон) и В80 (нижний пилон).

Между консольными выступами контактного стыка верхнего и нижнего пилонов имеется зазор 10 мм, в котором находится вспененный полиэтилен *(рис. 2)*.

Были проведены натурные и численные испытания полноразмерных моделей узлов соединений пилонов на сдвиг и сжатие с доведением до разрушения.

Армирование железобетонных элементов выполняли сварными сетками и каркасами (арматура класса А240 и А500С), объединенными в пространственный каркас с помощью сварки и вязальной проволоки. В

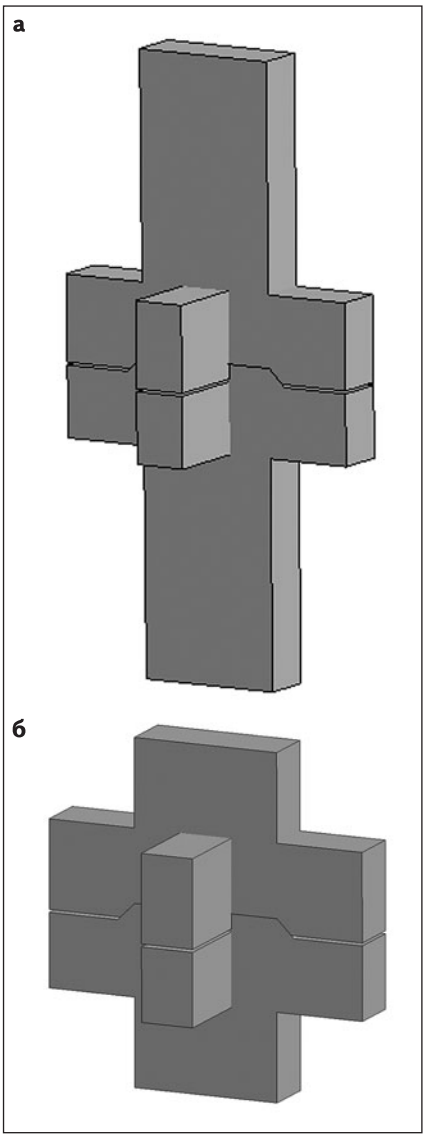
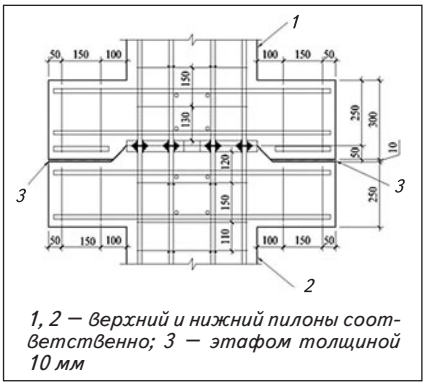


Рис. 1. ***Общий вид контактного стыка П1-ВН-Н1 (а) и СТ-3 (б)***



1, 2 – верхний и нижний пилоны соответственно; 3 – этафом толщиной 10 мм

Рис. 2. ***Конструкция стыкового соединения***

опорной зоне узла предусмотрена закладная деталь из стали марки 40ХГ.

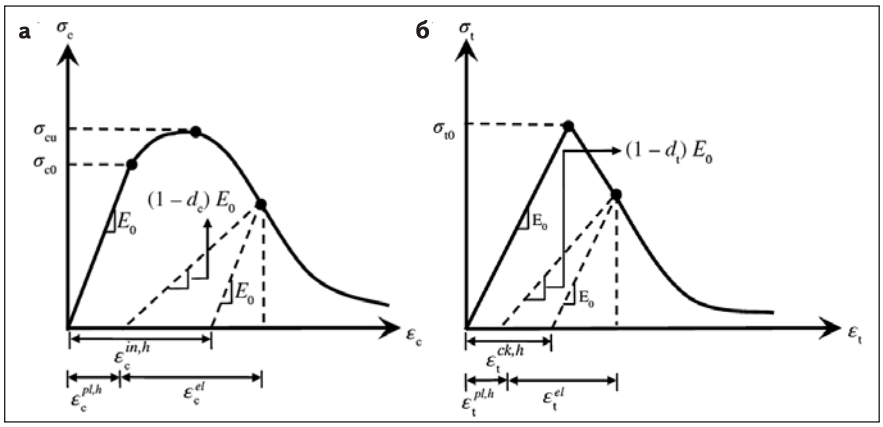


Рис. 3. ***Функция накопления повреждений в модели материала CSCM при сжатии (а) и растяжении (б)***

Работа бетона в численном сопровождении экспериментальных исследований описывается нелинейной моделью материала с замкнутой поверхностью и «колпаком» Continuous Surface Cap Model (CSCM) [13, 14], для которой использована функция накопления повреждений при растяжении и сжатии *(рис. 3).*

Численные испытания фрагментов железобетонных стыковых соединений пилонов выполнялись в многоцелевом конечно-элементном программном комплексе LS-DYNA [14]. Стержневая арматура моделировалась стержневыми конечными элементами. При моделировании бетона применялись объемные конечные элементы SOLID с шестью степенями свободы в узле. Основной размер конечных элементов конструкции контактного стыка 20 мм. Для расчетных схем исследовали сходимость на последовательно сгущаемых сетках конечных элементов. Анализ результатов показал, что характерные размеры конечных элементов при разработке расчетной модели выбраны оптимально [13].

Расчет конструкций выполнялся на соответствующую вертикальную и горизонтальную нагрузки в нелинейной динамической постановке с использованием явных схем прямого интегрирования уравнений движения, при этом учитывалась геометрическая, физическая и конструктивная нелинейности.

Размеры *узла П1-В1-Н1* со схемой расположения измерительных приборов на элементах стыка при проведении экспериментальных исследований представлены на *рис. 4.*

В численном эксперименте сжимающая нагрузка P прикладывается к верхнему пилону и возрастает во времени *(рис. 5).* Нагружение конструкции выполняли следующим образом:

- в интервале времени от 0 до 0,1 с происходит нагружение собственным весом;
- в интервале времени от 0,1 до 3,1 с происходит нагружение сжимающей нагрузкой P согласно графику *(см. рис. 5).*

Максимальное значение нагрузки P достигается в момент времени 3,1 с и составляет $P = 7150$ кН.

Схема приложения нагрузки, расчетная модель и арматурный каркас узла П1-В1-Н1 приведены на *рис. 6.* Нижний пилон стыка закреплен жесткой заделкой. Верхние граничные точки верхнего пилона объединены в абсолютно жесткое тело, что препятствует перемещениям включенных в него точек относительно друг друга *(рис. 6б).* На жесткое тело наложены ограничения по-

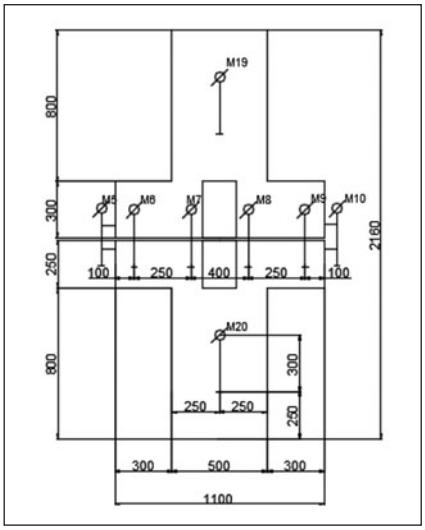


Рис. 4. ***Расположение измерительных приборов на элементах узла П1-В1-Н1***

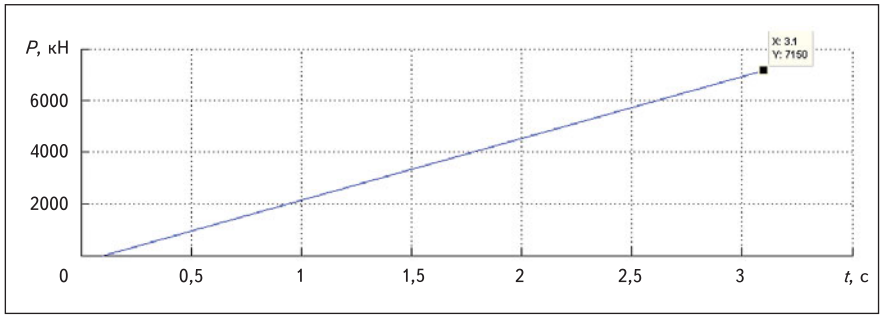


Рис. 5. ***Изменение нагрузки P во времени для узла П1-В1-Н1***

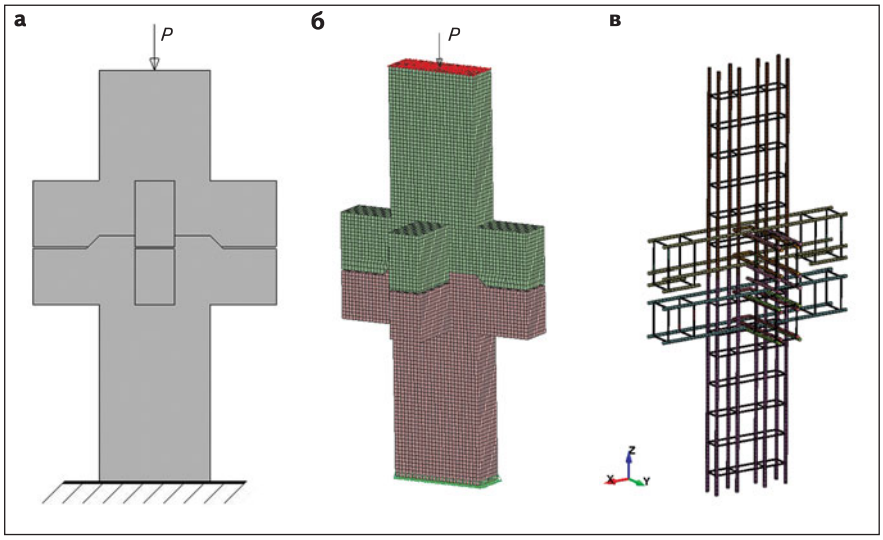


Рис. 6. ***Схема приложения нагрузки (а), расчетная модель (б) и арматурный каркас (в) в расчетной модели узла П1-В1-Н1***

воротов и горизонтальных перемещений. В центральную точку абсолютно жесткого тела приложена вертикальная нагрузка P.

При нагружении *узла СТ-3* вертикальная сжимающая нагрузка P_{ver} прикладывается к верхнему пилону, а горизонтальная нагрузка P_{hor} – к консольному выступу верхнего пилона.

В численном эксперименте принят следующий порядок нагружения конструкции:

- в интервале времени от 0 до 0,1 с происходит нагружение собственным весом и вертикальной нагрузкой P_{ver}.
- в интервале от 0,1 до 3,1 с происходит нагружение горизонтальной нагрузкой P_{hor} *(рис. 7)*.

Схема приложения нагрузки, расчетная модель и арматурный каркас узла СТ-3 показаны на *рис. 8*. Нижняя грань нижнего пилона стыка жестко закреплена. Левый консольный выступ нижнего пилона опирается на конструкцию, препятствующую горизонтальным и вертикальным перемещениям. Для левых граничных точек левого пилона действуют ограничения горизонтальных перемещений, для граничных точек 2/3 площади нижнего края левого пилона – ограничения вертикальных перемещений *(см. рис. 8а)*.

Верхние граничные точки верхнего пилона объединены в абсолютно жесткое тело, которое препятствует перемещениям принадлежащих ему точек (*см. рис. 8б*, выделено красным цветом). На жесткое тело наложены ограничения поворотов и горизонтальных перемещений. В центральную точку абсолютно жесткого тела приложена вертикальная нагрузка P_{ver}. Также в абсолютно жесткое тело объединена часть точек (2/3 границы) правого консольного выступа верхнего пилона (*см. рис. 8б*, выделено синим цветом). На данное жесткое тело наложено ограничение поворотов. В центральную точку приложена горизонтальная нагрузка P_{hor}.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты расчета и испытаний на сжатие и сдвиг с доведением до разрушения железобетонных фрагментов узлов соединений пилонов.

Изополя интенсивности напряжений и накопления повреждений в бетоне для узла П1-ВН-НЗ, полученные по результатам расчета при испытании на сжатие, приведены на *рис. 9*.

Изополя интенсивности напряжений и функции накопления повреждений в бетоне для узла СТ-3, полученные по результатам расчета при испытании на сдвиг, представлены на *рис. 10*.

В численной модели разрушающая нагрузка P = 6119 кН, в экспериментальном исследовании P = 7110 кН. В численной модели разрушение произошло в

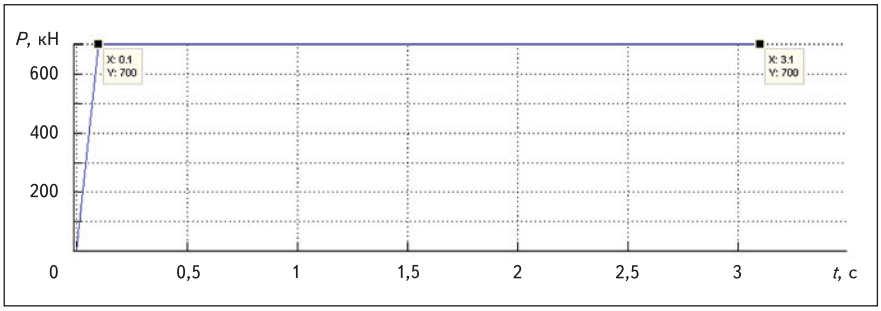


Рис. 7. *Изменение нагрузки P_{hor} во времени для узла СТ-3*

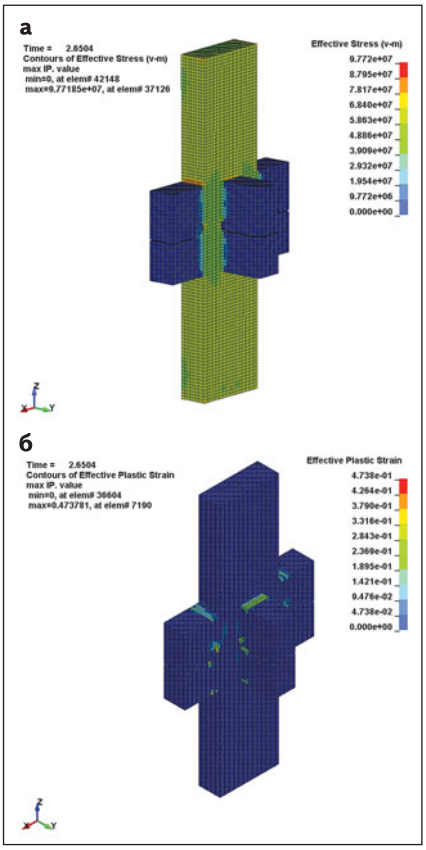


Рис. 9. *Интенсивность напряжений (а), функция накопления повреждений (б) в бетоне узла П1-ВН-Н3 в момент разрушения (t = 2,65 с, P = 6078 кН)*

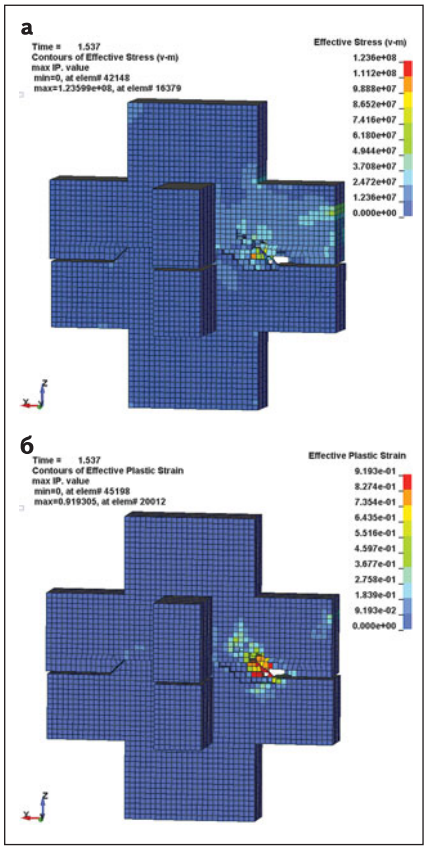
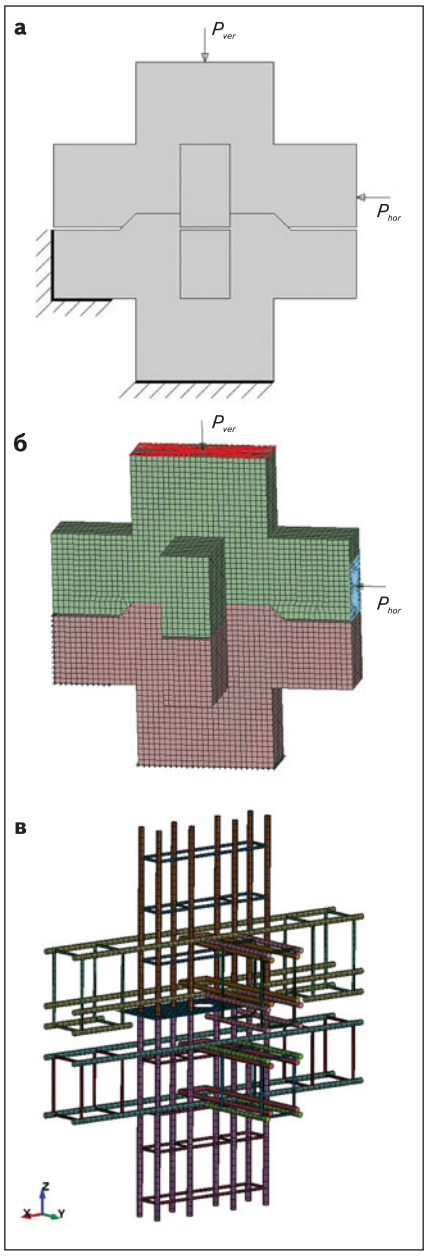


Рис. 10. *Интенсивность напряжений (а), функция накопления повреждений (б) в бетоне узла СТ-3 в момент разрушения (t = 1,537 с, P = 958 кН)*

Рис. 8. *Схема приложения нагрузки (а), расчетная модель (б) и арматурный каркас (в) в расчетной модели узла СТ-3*



нижнем пилоне (бетон В75), в экспериментальном исследовании — в верхнем (бетон В80). Также имеются локальные повреждения верхнего пилона в окрестности наклонных участков стыка. Картины разрушения пилонов (нижнего в численной модели и верхнего в экспериментальном исследовании) совпадают.

Сравнение характера повреждений в численном и экспериментальном исследованиях для узлов П1-ВН-Н3 и СТ-3 показаны на *рис. 11*.

В результате численного эксперимента получено, что при разрушении конструкций узлов П1-В1-Н1 *(см. рис. 11а)* происходит выпучивание основных вертикальных арматурных стержней пилонов, а непосредственно перед разрушением узла в части элементов (наклонные участки опорной зоны верхнего пилона) возникают пластические деформации и повреждения, которые носят локальный характер.

Для численной модели узла СТ-3 разрушающая нагрузка $P_{hor} = 958$ кН, в экспериментальном исследовании $P_{hor} = 650$ кН. Картины разрушения имеют хорошую сходимость по местам трещинообразования. При разрушении узла СТ-3 происходит

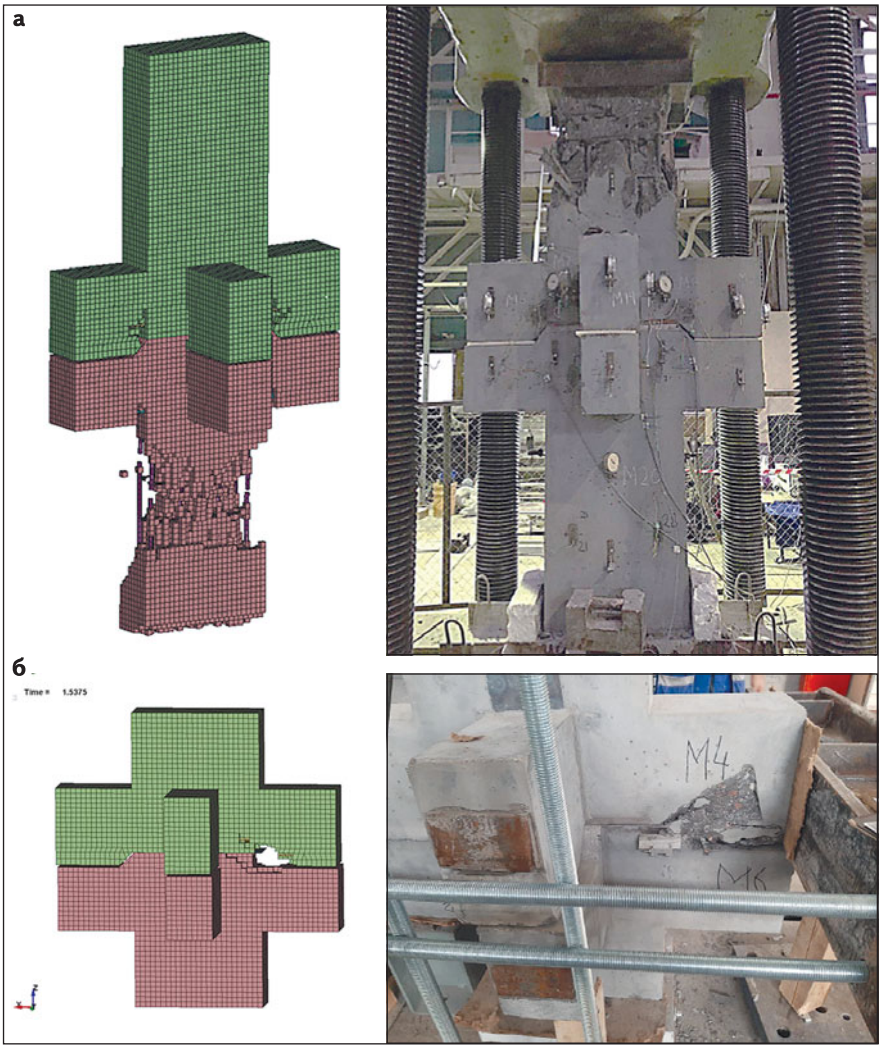


Рис. 11. *Сравнение картины повреждений при численном и натурном экспериментах для узлов П1-ВН-Н3 (а) и СТ-3 (б)*

срез опорной зоны верхней панели стыка.

Рассмотренные узлы позволяют воспринимать все действующие на здание из объемных модулей эксплуатационные нагрузки. Прочность и устойчивость узлов обеспечена. Оптимальность конструкции узлов подтверждается результатами испытаний и численных исследований.

Выводы

1. Выполнены расчетные исследования в рамках работ по сопровождению и анализу результатов испытаний на сжатие и сдвиг горизонтальных стыков несущих вертикальных пилонов железобетонных модульных блоков прямым нелинейным динамическим методом. Разработаны подробные конечно-элементные модели узлов с использованием объемных конечных и стержневых элементов для моделирования бетона и арматуры.

2. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментальных исследований, который показал достаточно хорошую сходимость контролируемых параметров. Это свидетельствует об адекватности используемых расчетных моделей.

3. Определены разрушающие нагрузки при различных режимах работы и схемах нагружения узлов.

4. Уточненные по результатам испытаний расчетные модели позволяют достоверно оценить сложное напряженно-деформированное состояние зон сопряжения несущих элементов, а также дать рекомендации по оптимизации конструктивных решений узлов.

5. Разработанные методики могут применяться исследовательскими и проектными организациями при проведении численных и натурных экспериментов для отдельных несущих конструкций и соединений (узлов) зданий и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Олейник П. П., Пахомова Л. А.* Формирование расчетных показателей возведения жилых зданий из крупногабаритных блоков // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 8. С. 92–99. doi: 10.33622/0869-7019.2023.08.92-99
2. *Давыдов Н. С., Ямов В. И.* Обзор модульного строительства в России: тенденции, задачи, перспективы // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2023. Т. 9. № 2. С. 902004.
3. *Шевцов С. В., Астафьева Н. С.* Концепция модульного строительства на примере использования легких металлических конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 3(8). С. 30–37.
4. *Тешев И. Д., Коростелева Г. К., Попова М. А.* Объемно-блочное домостроение // Жилищное строительство. 2016. № 3. С. 26–33.
5. *Крыжановский В. В.* Модульные здания в современном строительстве // Инженерные исследования. 2023. № 1(11). С. 31–37.
6. *Oleynik P., Pakhomova L.* A new stage in the development of housing construction [Новый этап в раз-

витии жилищного строительства] // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 258. P. 09060.

7. *Кузьмина Т. К., Аветисян Р. Т., Мирзаханова А. Т.* Особенности строительства зданий из крупногабаритных модулей (Часть 1) // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 95–101.
8. Пат. РФ № 2712845. Способ изготовления крупногабаритного готового объемного модуля и способ строительства здания из крупногабаритных готовых объемных модулей / Амбарцумян С. А., Мещеряков А. С. Заявл. 30.11.2018. Опубл. 31.01.2020.
9. Пат. РФ № 2715781. Способ производства объемного модуля / Амбарцумян С. А., Мещеряков А. С. Заявл. 19.08.2019. Опубл. 03.03.2020.
10. *Скворцов М. Е.* Потенциал модульного строительства // Вестник МАСИ. 2021. № 3. С. 34–46.
11. *Амбарцумян С. А., Манукян А. В., Мкртычев О. В., Андреев М. И.* Верификация расчетных методик на основе экспериментальных исследований фрагментов железобетонных блоков // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 6. С. 73–77. doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.73-77
12. *Пахомова Л. А., Мещеряков А. С.* Аспекты организации проектирования для крупномодульного домостроения // Системные технологии. 2022. № 1(42). С. 15–21.
13. *Андреев М. И.* Верификация расчетных моделей железобетонных зданий, проектируемых для сейсмических районов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 157 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01010991924?ysclid=ly60s03ybc52079088 (дата обращения: 07.04.2024).
14. *Murray Y. D.* Users Manual for LS-DYNA. Concrete Material Model 159 [Руководство пользователя LS-DYNA. 159 модель материала бетона]. FHWA-HRT-05-062, 2007. 77 с.

REFERENCES

1. Oleynik P., Pakhomova L. Formation of calculated indicators for the construction of residential buildings from large-sized blocks. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2023, no. 8, pp. 92–99. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.08.92-99
2. Davydov N. S., Yamov V. I. Review of modular construction in Russia: trends, tasks, prospects. *Russian Journal of Construction Science and Technology*, 2023, no. 9(2), p. 0902004. (In Russ.)
3. Shevtsov S. V., Astafeva N. S. The concept of modular construction on the example of the use of light metal structures. *Inzhenernyye issledovaniya*, 2022, no. 3(8), pp. 30–37. (In Russ.).
4. Teshev I. D., Korosteleva G. K., Popova M. A. Space block house prefabrication. *Zhilishhnoe stroitel'stvo*, 2016, no. 3, pp. 26–33. (In Russ.).
5. Kryzhanovsky V. V. Modular buildings in modern construction. *Inzhenernyye issledovaniya*, 2023, no. 1(11), pp. 31–37. (In Russ.).
6. Oleynik P., Pakhomova L. A new stage in the development of housing construction. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 258, p. 09060.
7. Kuzmina T. K., Avetisyan R. T., Mirzakhanova A. T. Features of the construction of buildings from large-sized modules. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2023, no. 5, pp. 95–101. (In Russ.).
8. Patent RF No. 2712845. *Sposob izgotovleniya krupnogabaritnogo gotovogo ob"emnogo modulya i sposob stroitel'stva zdaniya iz krupnogabaritnykh gotovykh ob'emnykh moduley* [Method of manufacturing large-sized finished three-dimensional module and method of building construction from large-size finished 3d modules]. Ambartsumyan S. A., Meshcheryakov A. S. Publ. 31.01.2020. (In Russ.).
9. Patent RF No. 2715781. *Sposob proizvodstva ob'emnogo modulya* [Method for production of volume module]. Ambartsumyan S. A., Meshcheryakov A. S. Publ. 03.03.2020. (In Russ.).
10. Skvortsov M. E. Modular building potential. *Vestnik MASI*, 2021, no. 3, pp. 34–46. (In Russ.).
11. Ambartsumyan S. A., Manukyan A. V., Mkrtychev O. V., Andreev M. I. Verification of calculation methods based on experimental studies of fragments of reinforced concrete blocks. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2023, no. 6, pp. 73–77. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.73-77
12. Pakhomova L. A., Meshcheryakov A. S. Aspects of design organization for large-modular housing construction. *Sistemnye tekhnologii*, 2022, no. 1(42), pp. 15–21. (In Russ.).
13. Andreev M. I. *Verifikatsiya raschetnykh modelej zhelezobetonnykh zdanij, proektiruemykh dlya sejsmicheskikh rajonov* [Verification of calculation models of reinforced concrete buildings designed for seismic areas]. Diss. Moscow, 2022. 157 p. (In Russ.). Available at: https://search.rsl.ru/ru/record/01010991924?ysclid=ly60s03ybc52079088 (accessed 07.04.2024).
14. Murray Y. D. *Users manual for LS-DYNA. Concrete material model 159.* FHWA-HRT-05-062. 2007. 77 p.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!
ПРЕЖДЕ ЧЕМ ОТПРАВИТЬ СТАТЬЮ В РЕДАКЦИЮ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ,
ВНИМАТЕЛЬНО ОЗНАКОМЬТЕСЬ С ТРЕБОВАНИЯМИ К СТАТЬЯМ,
КОТОРЫЕ ПРИВЕДЕНЫ НА САЙТЕ ЖУРНАЛА (**www.pgs1923.ru**) В РАЗДЕЛЕ «АВТОРАМ».