

УДК 624.012.35

КОПАНИЦА ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kopanitsa@mail.ru

КАПАНУЛИН СЕРГЕЙ ЛЬВОВИЧ, канд. техн. наук,
ст. научный сотрудник,
skaparulin@mail.ru

ДАНИЛЬСОН АРТЕМ ИВАНОВИЧ, магистрант,
Danilson_ai@mail.ru

УСТИНОВ АРТЕМ МИХАЙЛОВИЧ, аспирант,
artemustinov@bk.ru

УСЕИНОВ ЭМИЛЬ СЕЙРАНОВИЧ, мл. научный сотрудник,
useinov_em@mail.ru

ШАШКОВ ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ,
vasya_shashkov@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА*

Приводятся результаты экспериментальных исследований узла сопряжения фрагмента колонны и двух фрагментов ригелей на действие трехкратной динамической нагрузки. Свободные торцы ригелей шарнирно оперты. Нагрузка от падающего груза действует на оголовок колонны по направлению ее продольной оси. Для определения деформаций поверхности испытуемого образца во времени использована высокоскоростная камера, совмещенная с цифровой оптической системой VIC-3D. Это позволило определить характер распределения относительных деформаций в процессе ударного нагружения и зафиксировать моменты появления и развития трещин в зоне сопряжения фрагмента колонны с ригелями, приводящих к падению жесткости конструкций и соответствующему снижению частот ее собственных колебаний.

Ключевые слова: железобетон; узловое сопряжение; экспериментальные исследования; удар; напряжения; деформации; разрушение.

DMITRII G. KOPANITSA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru

SERGEI L. KAPARULIN, PhD, Senior Research Assistant,
skaparulin@mail.ru

ARTEM I. DANILSON, Undergraduate Student,
Danilson_ai@mail.ru

ARTEM M. USTINOV, Research Assistant,
artemustinov@bk.ru

EMIL S. USEINOV, Junior Research Assistant,
useinov_em@mail.ru

VASILII V. SHASHKOV,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке работ по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации.

vasya_shashkov@mail.ru

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

DYNAMIC STRENGTH AND DEFORMABILITY OF BEAM-TO-COLUMN JOINT

The paper presents the results of the experimental analysis of the longitudinal beam-to-column joint under the triple dynamic load. Longitudinal girders have hinged ends. The column head is subjected to the longitudinal load of the weight dropper. A high-speed camera combined with the VIC-3D digital optical system is used to detect surface deformations in the specimen. This allowed detecting the deformation distribution during the impact loading and record crack birth and propagation within the area of the longitudinal beam-to-column joint. Crack birth and propagation result in the reduction of the structural rigidity and eigenfrequency.

Keywords: reinforced concrete; beam-to-column connection; experimental analysis; impact; stress; deformation; fracture.

В Томском государственном архитектурно-строительном университете совместно с Томской домостроительной компанией разработана каркасная универсальная сейсмостойкая система жилого дома. При этом учитывался опыт по конструированию и обеспечению сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий, а также результаты исследований колонн на динамические нагрузки [1–4]. Для экспериментальной оценки прочности и деформативности узлового сопряжения колонны каркаса с двумя несущими ригелями проведены экспериментальные исследования.

Узел сопряжения фрагмента колонны с двумя несущими ригелями выполнен из фрагмента колонны высотой 1300 мм и двух фрагментов ригелей длиной 1500 мм. Ширина колонны и ригелей, высота ригелей 400 мм. Конструкции, выполненные из бетона класса В40, армировались арматурой класса А500 СП. Фрагмент колонны и двух фрагментов несущих ригелей полностью изготавливались в заводских условиях. Сборка узлового сопряжения выполнена с применением муфтовых обжимных соединений. Омоноличивание стыков проведено в лаборатории.

Испытания проведены на копровой установке со скоростью нагрузки 4,95...5,18 м/с.

Свободные торцы ригелей устанавливались на две опоры таким образом, чтобы вертикально стоящий фрагмент колонны мог перемещаться под действием падающего груза. Торцы колонны, воспринимающий удар, усилили стальной пластиной.

Рассмотрим результаты испытаний образца на действие двух последовательно проведенных ударов. Все образцы доведены до предельного состояния.

Измерение деформаций и процесса образования трещин в стыке колонны и ригелей проведено высокоскоростной камерой FASTCAMSA2, совмещенной с цифровой оптической системой VIC-3D. Измерение виброскорости и виброперемещения средней точки узла по направлению удара проведено лазерным дальномерным виброметром RSV-150. После каждого удара фиксировались перемещения, деформации, схема трещинообразования и ширина раскрытия трещин.

Общий вид испытаний узла сопряжения колонны и двух несущих ригелей показан на рис. 1. Свободные торцы фрагментов ригелей устанавливались на опорах таким образом, чтобы оголовок колонны мог свободно перемещаться по вертикали. Под оголовком было установлено зеркало, отражающее лазерный луч для измерения виброскоростей.

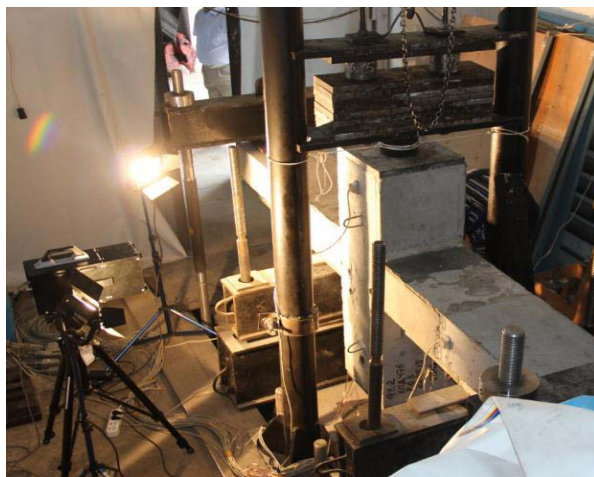


Рис. 1. Конструкция узлового сопряжения на опорах копровой установки

Результаты измерений лазерным виброизмерителем RSV-150 представлены в виде диаграмм скоростей перемещений и ускорений образца (рис. 2).

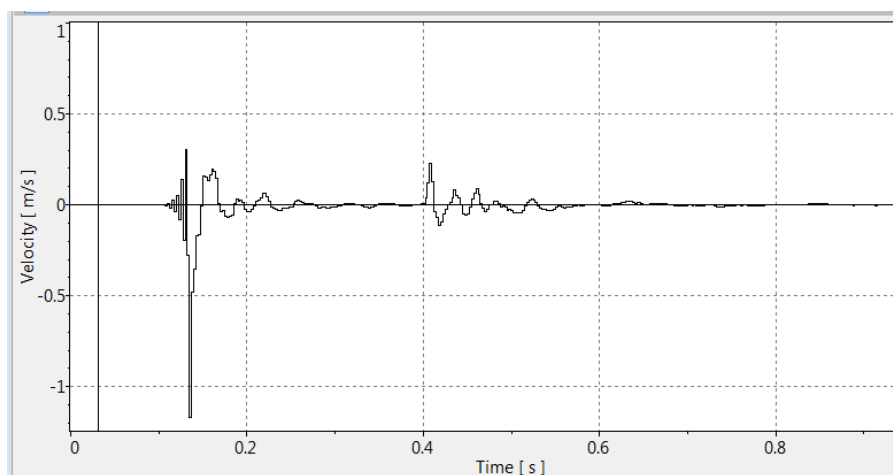


Рис. 2. Велосиграмма средней точки узла в направлении первого удара

Здесь представлена диаграмма изменения скорости средней точки узлового сопряжения по направлению первого удара от падающего груза массой 410 кг с высоты 1,37 м. Скорость груза в момент соприкосновения с оголов-

ком колонны равна 5,18 м/с. Измерения показали, что наибольшая скорость смещения средней точки конструкции узлового сопряжения равна 1,1 м/с.

Соответствующий спектр виброскорости показан на рис. 3, из которого видно, что максимальные значения скорости смещения средней точки определены на частоте 20,45, 61,36 и 88,63 Гц.

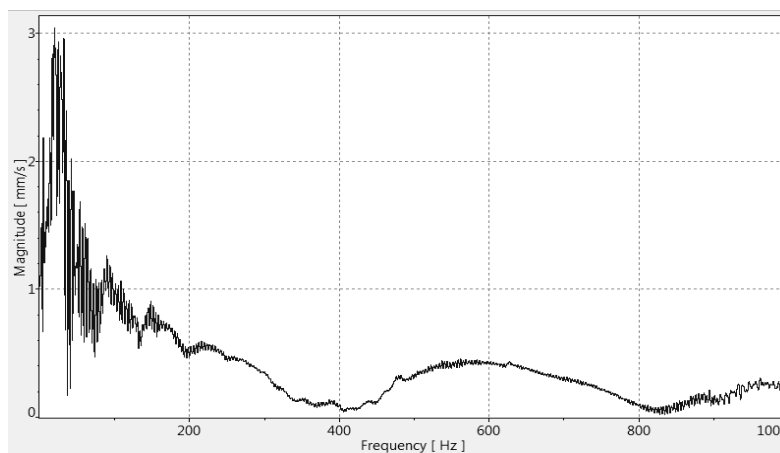


Рис. 3. Спектр виброскорости средней точки узла в направлении первого удара

Анализ диаграмм перемещений показал, что смещение оголовка колонны включает две составляющие: необратимые деформации на опорах (смыкание зазоров, обмятие бетона), равные 4,1 мм, и упругие прогибы конструкции, равные 2,8 мм. Основные смещения конструкции происходили на нижних частотах.

Как и в первом случае, при испытании на действие второго удара скорость соприкосновения падающего груза массой 410 кг с высоты 1,37 м равна 5,18 м/с. Диаграмма изменения скорости средней точки узлового сопряжения по направлению второго удара от падающего груза показана на рис. 4. От действия второго удара скорость смещения средней точки конструкции узлового сопряжения увеличилась до значения 1,2 м/с.

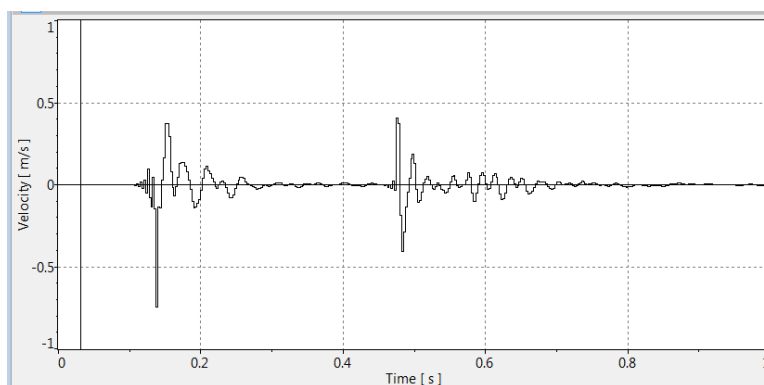


Рис. 4. Велосиграмма средней точки узла в направлении второго удара

Соответствующая диаграмма перемещений показана на рис. 5. Перемещение средней точки включает две составляющие: необратимые деформации на опорах (смыкание зазоров, обмятие бетона), равные 0,4 мм, и упругие деформации конструкции, равные 4,3 мм.

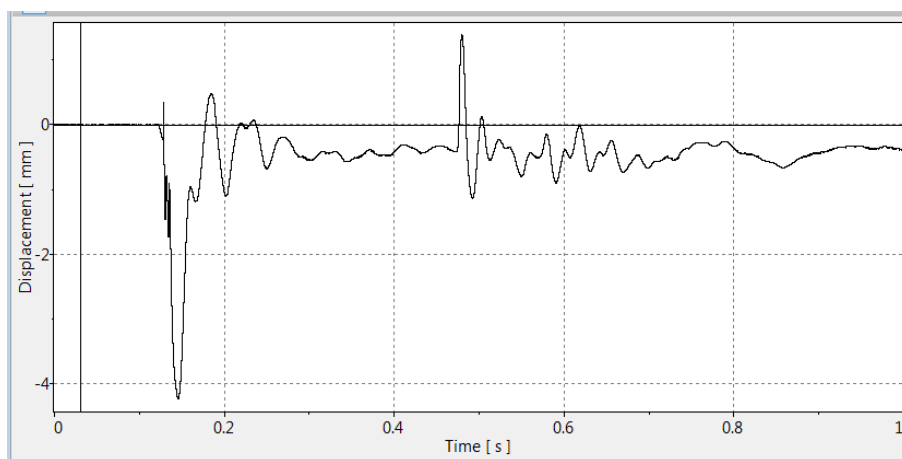


Рис. 5. Диаграмма перемещений средней точки узла в направлении второго удара

Согласно спектру виброскорости, приведенному на рис. 6, максимальные значения скорости смещения средней точки происходили на более высоких частотах 49,65 и 100 Гц.

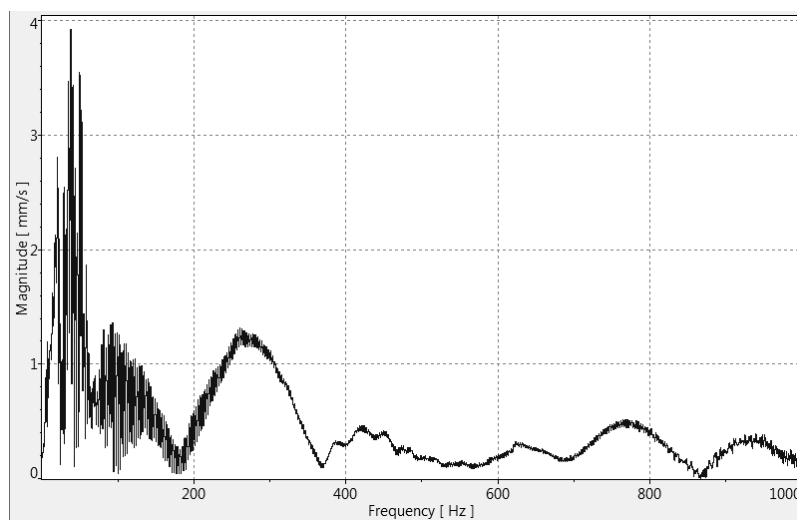


Рис. 6. Спектр виброскорости средней точки узла в направлении второго удара

Динамика деформаций поверхности испытуемого образца отражена на картинах распределения относительных деформаций на главных площадках в процессе ударного нагружения образца.

Картина главных относительных деформаций, представленная на рис. 7, отражает распределение деформаций по боковой поверхности узла колонны и ригеля в момент контакта ударника с оголовком колонны и развитие деформаций в процессе ударного нагружения.

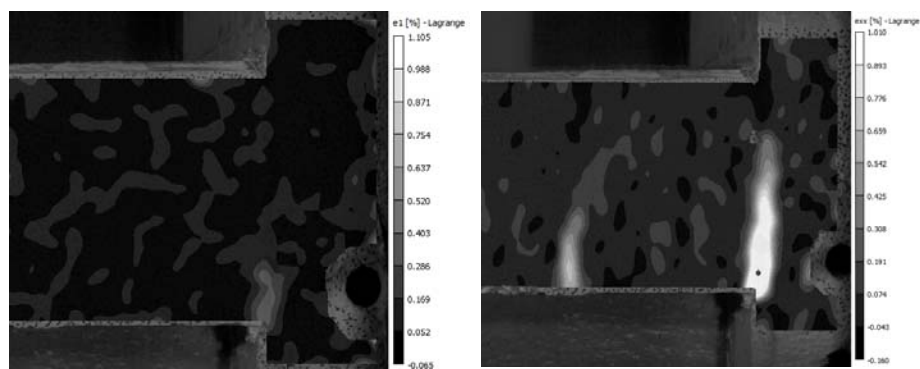


Рис. 7. Развитие деформаций и образование трещин поверхности узла

Образованная в начальный момент трещина развивается по границе бетона омоноличивания и тела колонны. Осветление внутренних областей трещины говорит об увеличении ее раскрытия. Трещины с максимальной шириной раскрытия образовались по границе бетона омоноличивания и тела колонны. С ростом деформаций в нижней зоне появилась и получила развитие трещина на границе бетона омоноличивания и тела ригеля, отстоящая от грани колонны на расстоянии, равном высоте ригеля.

Отпор конструкции и переход растянутой зоны с нижней грани ригеля на картину деформаций вверх сопровождается закрытием трещин в нижней зоне и возникновением трещин в верхней зоне ригеля с развитием на всю высоту, как показано на рис. 8.

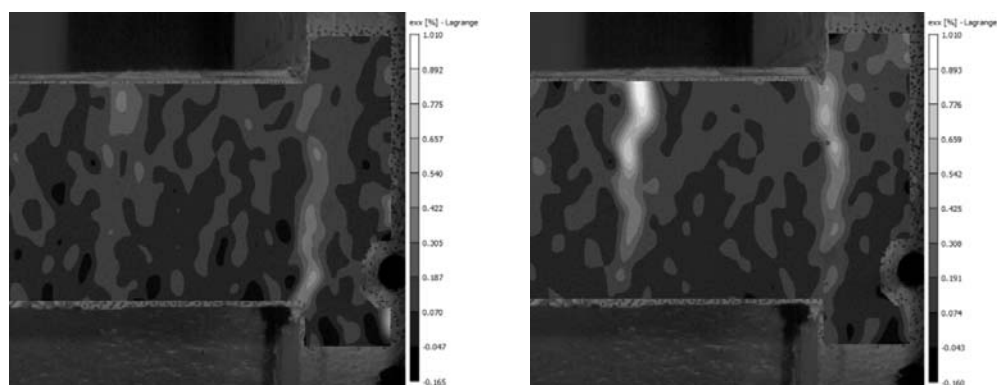


Рис. 8. Отпор конструкции вызвал развитие трещин в верхней зоне ригеля

Анализ результатов измерений показал, что действие падающего груза массой 410 кг со скоростью 5,18 м/с эквивалентно действию статической

нагрузки 90 т. Ширина раскрытия нормальной трещины в стыке колонн при статическом изгибе от действия нагрузки, равной 90 т, и от действия падающего груза массой 580 кг со скоростью 3,5 м/с составила 1,2 мм.

Относительный угол раскрытия шарнира пластичности, полученный при действии динамической нагрузки от падающего груза с массой 580 кг со скоростью 3,5 м/с, равен 0,003, что на порядок меньше предельного значения 0,04. Таким образом, стык железобетонной колоны с ригелем системы «КУПАСС» и соединением рабочей арматуры на обжимных муфтах имеет достаточный запас прочности при обеспечении требований надежности в соответствии с ГОСТ 54257–2010 в диапазоне скоростей нагружения поперечной нагрузкой до 5 м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сейсмостойкие многоэтажные здания с железобетонным каркасом* / Я.М. Айзенберг, Э.Н. Кодыш, И.К. Никитин, В.И. Смирнов, Н.Н. Трекин. – М. : Изд-во АСВ, 2012. – 264 с.
2. *Белов, Н.Н.* Экспериментальные исследования железобетонных колонн на неоднократный продольный удар / Н.Н. Белов, Д.Г. Копаница, Н.Т. Югов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. – № 1. – С. 118–126.
3. *Копаница, Д.Г.* Экспериментальные исследования моделей железобетонных колонн при ударном воздействии / Д.Г. Копаница, А.С. Пляскин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 4. – С. 91–96.
4. *Николаенко, Н.А.* Динамика и сейсмостойкость сооружений / Н.А. Николаенко, Ю.П. Назаров. – М. : Стройиздат, 1988. – 312 с.

REFERENCES

1. *Ajzenberg Ja.M., Kodysh Je.N., Nikitin I.K., Smirnov V.I., Trekin N.N.* Seismostoikie mnogoetazhnye zdaniya s zhelezobetonnyim karkasom [Antiseismic multistorey buildings with reinforced concrete frame]. Moscow : ASV Publ., 2012. 264 p. (rus)
2. *Belov N.N., Kopanitsa D.G., Yugov N.T.* Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh kolonn na neodnokratnyi prodol'nyi udar [Experimental study of concrete columns under longitudinal impact load]. *Vestnik TSUAB*. 2007. No. 1. Pp. 118–126. (rus)
3. *Kopanitsa D.G., Plyaskin A.S.* Eksperimental'nye issledovaniya modelej zhelezobetonnykh kolonn pri udarnom vozdeystvii [Experimental study of concrete columns under impact load]. *Vestnik TSUAB*. 2011. No. 4. Pp. 91–96. (rus)
4. *Nikolaenko N.A., Nazarov Yu.P.* Dinamika i sejsmostojkost' sooruzhenij [Dynamics and anti-seismic construction]. Moscow : Stroyizdat, 1988. 312 p. (rus)