

УДК 69.04

РАБОТА МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕБРИСТОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПРИОПОРНЫХ УСАДОЧНЫХ ТРЕЩИН В РЕБРАХ

А.А. Цветкова¹, С.А. Агафонов², А.О. Горячева³, Т.В. Маслак⁴

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

³ ООО «ЛОТ», г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

⁴ ООО «5 этажей», г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. В данной статье дано описание и результаты экспериментального исследования характера работы железобетонной конструкции монолитного ребристого перекрытия общественного здания с усадочными трещинами, под нагрузкой. Загружение в 624 кгс/м², соответствующее уровню эксплуатационной нагрузки, прикладывалось ступенчато, на каждом этапе фиксировались прогибы и дефекты конструкции и анализировалась степень влияния усадочных трещин на работу конструкции. В задачи испытаний входила оценка соответствия напряженно-деформированного состояния (НДС) перекрытий проектному НДС, а также анализ поведения усадочных трещин.

Ключевые слова: усадочные трещины, монолитное железобетонное ребристое перекрытие, жесткость, экспериментальное исследование, ползучесть.

Ссылка для цитирования: Цветкова А.А., Агафонов С.А., Горячева А.О., Маслак Т.В. Работа монолитного железобетонного ребристого перекрытия при наличии приопорных усадочных трещин в ребрах // Инженерные исследования. 2023. №1 (11). С. 11-19. EDN: OCVMVQ

THE PERFORMANCE OF A MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE RIBBED FLOOR WITH SHRINKAGE CRACKS IN THE RIBS

A.A.Tsvetkova¹, S.A. Agafonov², A.O. Goryacheva³, T.V. Maslak⁴

^{1,2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg (Russian Federation)

³ LLC "LOT", Saint-Petersburg (Russian Federation)

⁴ LLC "5 Floors", Saint-Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article describes and presents the results of an experimental study of the nature of the work of a reinforced concrete structure of a monolithic ribbed ceiling with shrinkage cracks, under load. Loading of 624 kgf/m², corresponding to the level of service load, was carried out in several stages, at each stage deflections and structural defects were recorded and the degree of influence of shrinkage cracks on the work of the structure was analyzed. The tasks of the study included an assessment of the compliance of the stress-strain state of the floors with the design stress and strain state, as well as an analysis of the behavior of shrinkage cracks.

Keywords: shrinkage cracks, monolithic reinforced concrete ribbed floor, rigidity, experimental study, creep

For citation: Tsvetkova A.A., Agafonov S.A., Goryacheva A.O., Maslak T.V. The performance of a monolithic reinforced concrete ribbed floor with shrinkage cracks in the ribs // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.1 (11). Pp. 11-19. EDN: OCVMVQ

ВВЕДЕНИЕ

Монолитные ребристые перекрытия нашли широкое применение в практике строительства промышленных и общественных зданий благодаря меньшему по сравнению со сплошными плитами весу при сохранении несущей способности, благодаря чему становится возможна реализация самых разнообразных архитектурных решений.

Процессы, протекающие в процессе твердения бетона таковы, что неизбежно, вследствие испарения воды и других факторов происходит усадка цементного камня и образуются усадочные трещины. Несмотря на то, что коэффициент усадки нормируется, и в настоящее время активно ведется работа по поиску добавок, снижающих усадку бетона [1-3] и оптимизации качества бетонной смеси как обычных [4-6], так и высокопрочных бетонов [7], полностью исключить явление усадки бетона и, как следствие, появление усадочных трещин не представляется возможным.

Большое внимание изучению явлений усадки и ползучести бетона было уделено в 60-80е годы прошлого века. Среди советских ученых, внесших значительный вклад в развитие теории усадки и ползучести бетона в это время, выделяются З.Л. Циолосани [8], В.Н. Шведов [9], д-ра техн. наук Р.Л. Серых [10], В.М. Бондаренко [11], И.Е. Прокопович, П.И. Васильев, А.Б. Гольшев, канд. техн. наук А.В. Яшин, Е.Н. Щербаков, Н.Г. Хубова, В.Г. Назаренко, И.М. Сперанский, М.В. Штейнберг, А.Н. Орлов, В.Я. Бачинский, В.А. Критов.

В это время были изучены механизм усадки цементного камня, взаимосвязь между усадкой и ползучестью, влияние различных факторов на усадочную трещиностойкость бетона, прогнозирование трещиностойкости бетона с помощью математико-статистических методов.

Основные положения по учету ползучести и усадки бетона в железобетонных конструкциях закреплены в соответствующих рекомендациях, разработанных НИИЖБ и изданных в 1988 году.

В это же время проводились отдельные эксперименты по влиянию усадки бетона на деформацию железобетонных элементов, в частности влияния изоляции на деформации от усадки бетона, влияние армирования на деформации от усадки бетона [12].

В 90е-2010е годы большое внимание уделено развитию математического аппарата механики ползучести железобетона как нелинейного материала [13] и рассмотрению усадки совместно с явлением ползучести как явления, возникающего в бетонных конструкциях при приложении статической нагрузки в течение длительного времени.

Некоторое количество современных работ посвящены изучению механизма усадочных деформаций в бетоне [14] и влияние усадочных трещин на напряженно-деформированное состояние (НДС) и жесткость железобетонных конструкций [15, 16] и взаимное влияние усадочных и силовых трещин [17]. Так, автор [17] делает представляющий интерес вывод о том, что усадочные трещины тормозят развитие силовых трещин в бетоне, то есть оказывают не отрицательное, а положительное влияние на работу конструкции. Однако таких работ явно недостаточно, и в связи с недостаточной изученностью проблемы влияния усадочных трещин на прочность и жесткость конструкции, учета усадочных деформаций в расчетных моделях становятся актуальными новые исследования влияния усадочных трещин на работу конструкций под нагрузкой.

Одним из таких исследований является натурное испытание железобетонного монолитного ребристого перекрытия здания общественного назначения, расположенного в Санкт-Петербурге. Испытания проводились научно-исследовательской лабораторией «Политех СКИМ тест» в июне 2022 года. В ребрах перекрытия наблюдаются усадочные трещинами как в оппорной, так и в пролетной зонах. Трещины проходят строго вдоль арматуры, что косвенно свидетельствует об их происхождении усадочного характера.

Целью экспериментального исследования являлось определить характер работы и перемещения монолитного ребристого перекрытия при действии равномерно распределенной эксплуатационной нагрузки с усадочными трещинами в опорных зонах ребер перекрытия.

В рамках данной цели были решены следующие задачи:

- проведено обследование ребер монолитного перекрытия,
- ступенчато приложена нагрузка 624 кгс/м^2 ;
- после каждого этапа загрузки зафиксированы прогибы конструкции, в том числе после 1-го этапа – непосредственно после приложения нагрузки и через 1 сутки;
- произведен расчет перекрытия в SCAD Office;
- произведен расчет фактического коэффициента ползучести для данной конструкции;
- сделаны выводы о характере работы перекрытия и степени влияния усадочных трещин на работу конструкции.

Исследовались перемещения балок (ребер) конструкции 1 и конструкции 2. **Конструкция 1.** Монолитная железобетонная балка типа Б.1.1., расположенная в уровне перекрытия 1-го этажа в/о (М-П)/14. **Конструкция 2.** Монолитная железобетонная балка типа Б.1.1., расположенная в уровне перекрытия 1-го этажа в/о (М-П)/16. Расположение балок в плане здания, сечение балки Б-1.1, фотографические изображения конструкций 1 и 2 представлены на рисунках ниже (рис. 1 – рис.3).

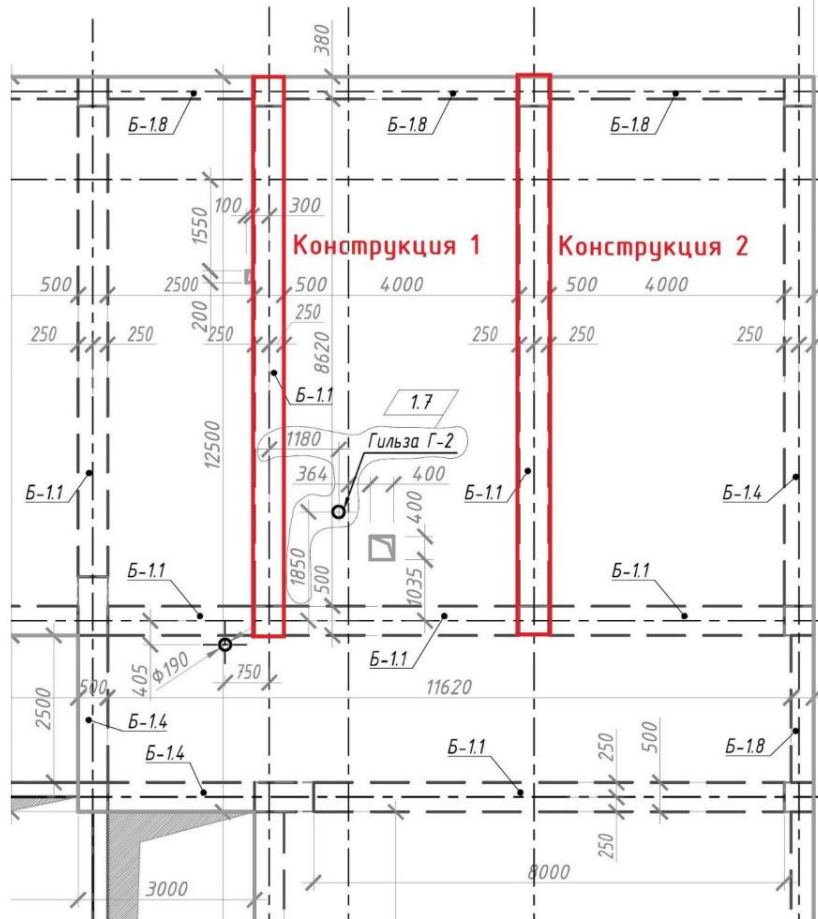


Рис. 1. Укрупненный фрагмент схемы расположения конструкций 1 и 2
Fig. 1. An enlarged fragment of the layout of structures 1 and 2

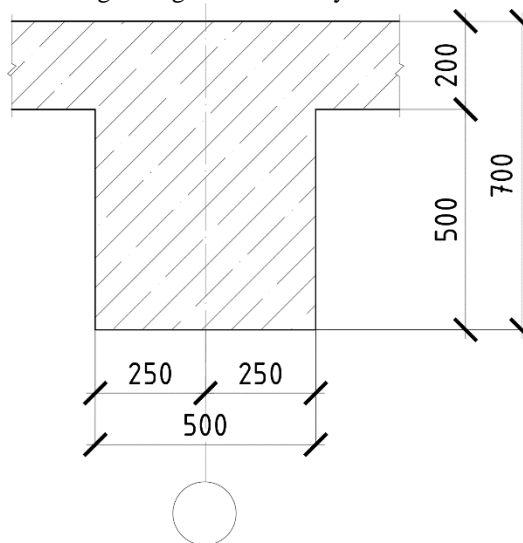


Рис. 2. Сечение балки Б-1.1
Fig. 2. Section of beam Б-1.1



Рис. 3. Фото обследуемых конструкций а – Конструкция 1 ; б – Конструкция 2
Fig. 3. Photo of examined structures: a – Structure 1 ; b – Structure 2

В задачи испытаний также входила оценка соответствия напряженно-деформированного состояния перекрытий проектному НДС, а также анализ поведения усадочных трещин под эксплуатационной нагрузкой порядка 600 кгс/м^2 .

Испытательные приборы и оборудование. Четыре прогибомера 6-ПАО с точностью показаний $0,01 \text{ мм}$, имеющих действительные сертификаты о поверке.

ХОД ИСПЫТАНИЙ

Перед нагружением конструкций на нижних гранях балок в двух местах – в середине пролета и у места опирания (в $10-15 \text{ см}$ от колонны), были установлены прогибомеры №№1 и 2 на конструкции 1 и №№3 и 4 на конструкции 2, замерены ширина раскрытия трещин и зафиксированы все дефекты и повреждения конструкций. Нагружение плиты проводилось в 3 этапа.

1 этап

На поверхность перекрытия на площади 78 м^2 были уложены 15 дорожных плит 2П 30-18-30 по ГОСТ 21924.2-84 размерами $3000 \times 1750 \times 170 \text{ (мм)}$ номинальным весом по 2200 кг каждая (рис. 4, рис.5). Вес всех плит был проконтролирован и составил 32680 кг , уровень нагружения составил 419 кгс/м^2 .

Нагрузка прикладывалась плавно, без ускорения, с коэффициентом динамичности, не превышающим $1,25$.

После окончания приложения нагрузки были сняты показания прогибомеров и зафиксированы имеющиеся дефекты и повреждения конструкции. Под данной нагрузкой конструкции были оставлены на 1 сутки. После выдержки показания прогибомеров были сняты еще раз.

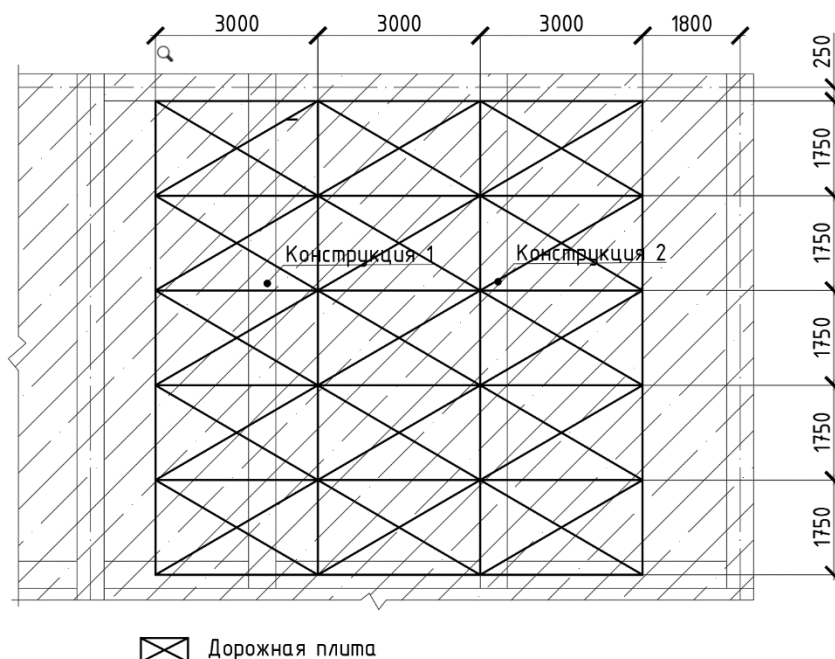


Рис. 4. Схема загрузки дорожными плитами (этап 1)
Fig. 4. The scheme of loading with road slabs (stage 1)

2 этап

На имеющиеся плиты 2П 30-18-30 уложены дополнительно 90 плит П15.5 номинальным весом по 90 кг каждая (рис. 6). Нагрузка прикладывалась ступенчато, за 3 ступеней по 30 плит каждая. Вес плит был проконтролирован и составил 8,19т., общий вес 40,87т. Уровень нагружения составил 524 кгс/м². Зафиксированы показания прогибомеров и имеющиеся дефекты и повреждения конструкций.

3 этап.

На нагружаемую площадь добавлены еще 30 плит перекрытия ПТ 75.120.12-9 номинальным весом по 260 кг каждая (рис. 7), в 2 этапа. Вес этих плит составил 7,8т., общий вес 48,7т. Суммарное нагружение 624 кгс/м². Зафиксированы показания прогибомеров.



Рис. 5. Первый этап нагружения дорожными плитами
Fig. 5. The first stage of loading with road slabs



Рис. 6. Второй этап нагружения дорожными плитами
Fig. 6. The second stage of loading with road slabs



Рис. 7. Третий этап нагружения дорожными плитами
Fig. 7. The third stage of loading with road slabs

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты измерений прогибов контрольных точек на каждом этапе нагружения представлены ниже (табл. 1, рис. 8).

Таблица 1. Результаты определения прогибов конструкций
Table 1. The results of determining the deflections of structures

Этап	Нагрузка, кгс/м ²	Конструкция 1				Конструкция 2			
		Прогибомеры, мм		Прогибы в контрольных точках, мм		Прогибомеры, мм		Прогибы в контрольных точках, мм	
		1	2	середина	у опоры	4	3	середина	у опоры
0	0	74,20	97,30	0	0	33,07	95,29	0	0
1.1	419	73,27	97,26	0,93	-0,04	31,69	95,38	1,38	-0,09
1.2	419+1сут	73,11	97,42	1,09	0,12	31,63	95,16	1,44	0,13
2.1	454	72,90	97,42	1,3	0,12	31,38	95,19	1,69	0,1
2.2	489	72,77	97,41	1,43	0,11	31,21	95,21	1,86	0,08
2.3	524	72,55	97,39	1,65	0,09	30,96	95,27	2,11	0,02
3.1	574	72,46	97,39	1,74	0,09	30,89	95,27	2,18	0,02
3.2	624	72,36	97,39	1,84	0,09	30,73	95,27	2,34	0,02

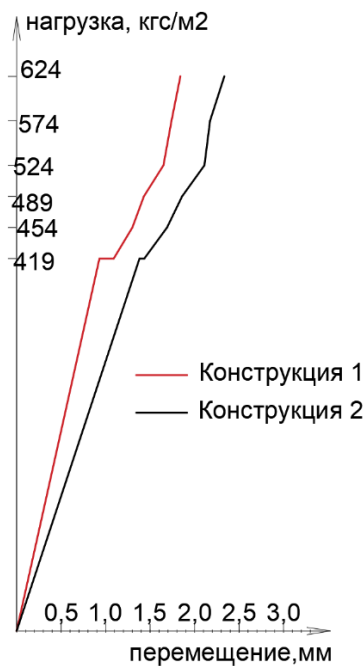


Рис. 8. Зависимость перемещений в середине пролета от величины нагрузений
Fig. 8. Dependence of deflections in the middle of the span on the amount of loading

Схема нагружения и результаты расчета перемещений плиты перекрытия в SCAD Office представлены ниже (рис. 9-11).

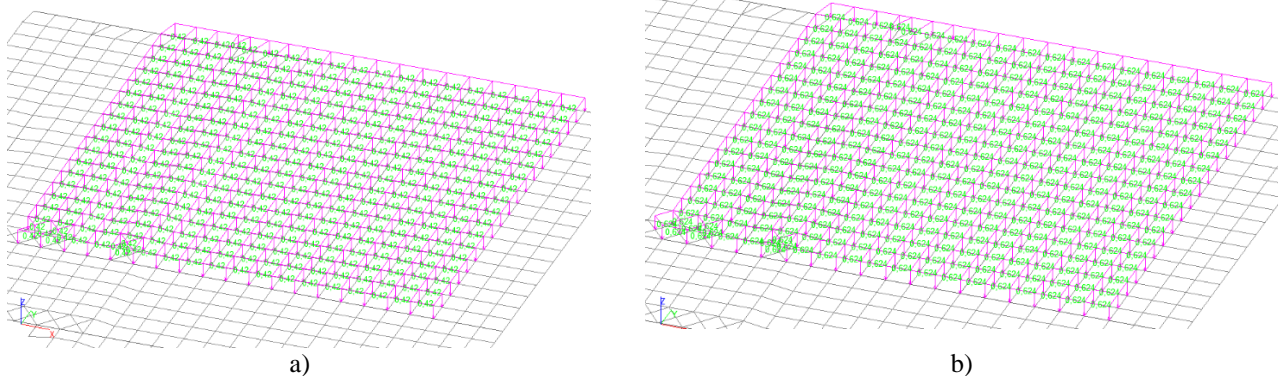


Рис. 9. Схема приложения нагрузки. а – 419 кгс/м² 1; б – 624 кгс/м².
Fig. 9. Load application scheme: а – 419 kgf/m² 1; б – 624 kgf/m²

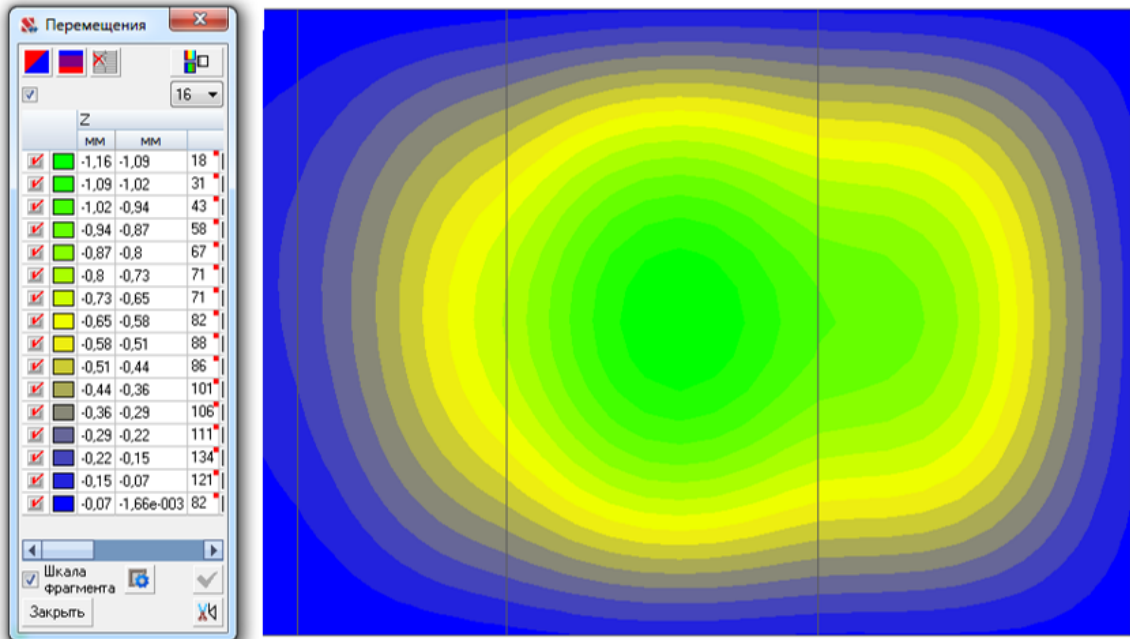


Рис. 10. Вертикальные перемещения от нагрузки 419 кгс/м²
 Fig. 10. Vertical deflection from a load of 419 kgf/m²

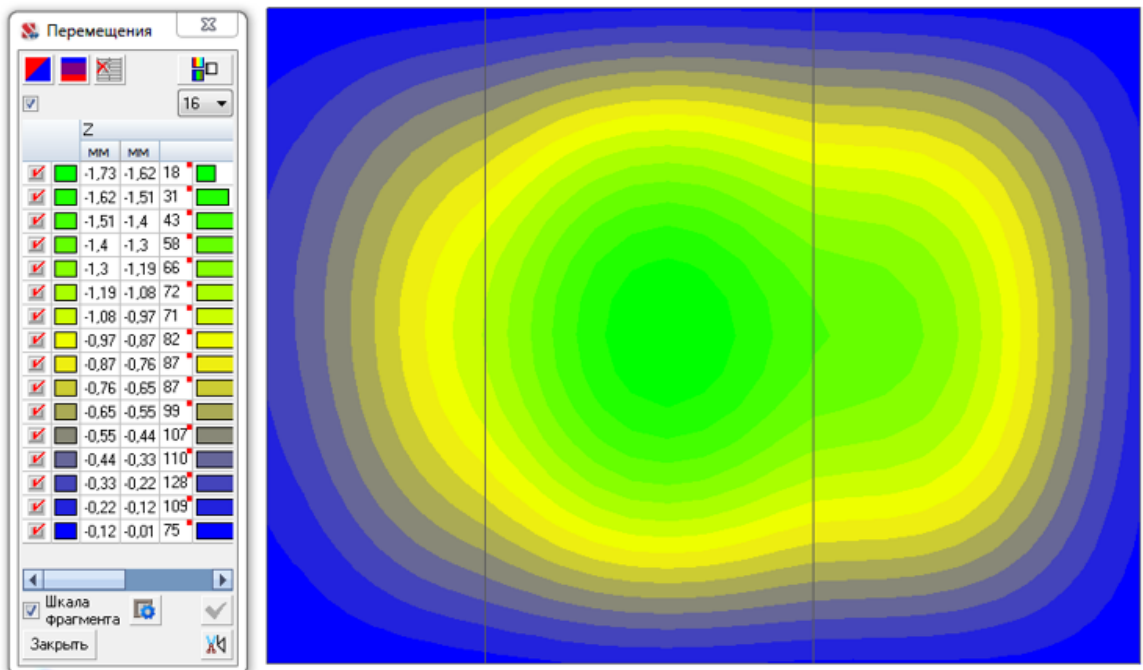


Рис. 11. Вертикальные перемещения от нагрузки 624 кгс/м²
 Fig. 11. Vertical deflection from a load of 624 kgf/m²

На основании полученных результатов было вычислено фактическое значение коэффициента ползучести бетона по зависимости (1):

$$y_{упр} = \frac{y_{факт}}{\varphi_{b,cr} + 1} \rightarrow \varphi_{b,cr} + 1 = \frac{y_{факт}}{y_{упр}} \rightarrow \varphi_{b,cr} = \frac{y_{факт}}{y_{упр}} - 1 \quad (1)$$

где $y_{упр}$ - прогиб в предположении работы конструкции в упругой стадии; $y_{факт}$ - фактический прогиб с учетом ползучести; $\varphi_{b,cr}$ - коэффициент ползучести;

Результаты вычисления фактических значений ползучести и сравнения данных значений со значениями СП 63.13330 представлены ниже (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительный анализ фактических и нормативных значений коэффициента ползучести
Table 2. Comparative analysis of actual and normative values of the creep coefficient

Уровень загрузки	Фактическое значение $\varphi_{b,cr}^{\phi}$	Фактический модуль деформации $E_{b,\tau}^{\phi}$, МПа $\cdot 10^{-3}$	Значение $\varphi_{b,cr}^H$ по СП 63.13330 (Бетон В25, относительная влажность >75%)	Нормативный модуль деформации $E_{b,\tau}^H$ (Бетон В25), МПа $\cdot 10^{-3}$	$\frac{E_b^{\phi} - E_b^H}{E_b^H} \cdot 100\%$
419 кгс/м ²	0,24	24,19	1,8	10,7	+126
624 кгс/м ²	0,35	22,22	1,8	10,7	+107

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения эксперимента установлено, что:

1. Максимальные перемещения плиты составляют 2.34 мм и не превышают нормативные, составляющие, в соответствии с табл. Д.1. СП 20.13330 при пролете 4 м 24 мм (по интерполяции), следовательно, характер работы перекрытия и его напряженно-деформированное состояние без изменений относительно проектного.

2. Фактический коэффициент ползучести составляет 0.35 и не превышает коэффициента ползучести 1.8 по табл. 6.12 СП 63.13330, следовательно, усадочные трещины не влияют на деформативность конструкции перекрытия.

3. Коэффициенты ползучести, указанные в табл. 6.12. СП 63.13330 существенно завышены и, применительно к данному исследованию, привели к погрешностям вычисления модуля деформации, составляющим 126% и 107%.

4. Характер работы конструкций –линейный (физическая линейность), что наглядно иллюстрирует график на рис. 8.

5. Взаимное смещение частей монолитной железобетонной конструкции относительно вертикальных трещин не обнаружено; наблюдается постепенное закрытие трещин под действием нагрузки. Кроме того, усадочные трещины не влияют на жесткость;

6. Смещение точек исследованных балок на расстоянии 10-15 см от опор составляет 0,6...0,13мм и носит характер смещение узла стыка колонн и балок как жесткого целого вследствие деформаций сжатия колонн и осадки фундамента под нагрузкой.

Все вышесказанное может говорить о том, что негативный эффект усадочных трещин в современной литературе несколько преувеличен и нивелируется деформациями ползучести. Дальнейшее изучение усталостных трещин может быть продолжено, в том числе, с применением математического аппарата теории ползучести.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность научно-испытательной лаборатории «Политех-СКИМ-Тест» в лице заведующего Акимова Станислава Васильевича и к.т.н., доцента ФГАОУ ВО СПбПУ Рыбакову Владимиру Александровичу за проведение и предоставление результатов эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несветаев Г.В., Тимонов С.А., Чмель Г.В. К оценке эффективности суперпластификаторов// Железобетон, строительные материалы и технологии в третьем тысячелетии. Межкафедральный сборник научных трудов. Второй выпуск, Ростов-на-Дону, 2001. С 429-432.

2. Демьянова В.С. Миненко Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. №4(544). С. 31-34.

3. Шмитько Е.И., Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Милохин И.В. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2020. №1(42). С. 128-135.

4. Придатко Ю.М. Способ регулирования усадки бетона. Патент на изобретение, Россия, 2007.

5. Барабанщиков Ю.Г., Архарова А.А., Терновский М.В. Бетон с пониженной усадкой и ползучестью // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7(22). С. 152-165.

6. Макушина Ю.В., Шмицько Е.И., Белькова Н.А. Пути оптимизации качества бетонов по показателю качественной усадки // Химия, физика и механика материалов. 2020. №4 (27). С. 50-65.
7. Дайронас М.В., Ломако А.Л., Капленко О.А. Аутогенная усадка высокопрочных бетонов и пути ее уменьшения // Университетская наука. 2022. №1 (13). С. 31-34.
8. Циловани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, 1979.
9. Шведов В.Н. Усадка и трещиностойкость бетонов. Кишинев. 1985.
10. Серых Р.Л. Исследование усадки конструктивного железобетона // Труды МАДИ. Мосты и строительная техника: сб. науч. тр. М.: МАДИ. 1972. Вып. 46.
11. Бондаренко В.М., Суровкин Д.Г. Железобетонные и каменные конструкции. М. Высшая школа, 1987.
12. Людковский И.Г., Мизернюк Б. Н., Терехова Г.Б., Ковалев Е.В. Деформации железобетонных элементов от усадки // Прочность и деформативность бетона и специальных железобетонных конструкций. Москва, 1972. С. 33-54.
13. Тамразян А. Г., Есаян С. Г. Механика ползучести бетона: монография. Москва: Изд-во МИСИ - МГСУ, 2012. ISBN 978-5-7264-0664-0. EDN QNQFSB.
14. Каримов И.Ш. Механизм усадочных деформаций бетона и факторы, влияющие на них (обзор) // Технологии бетонов. 2010. №7-8(48-49). С. 20-23.
15. Ерышев В.А., Латышева Е.В., Латышев Д.И. Учет усадочных деформаций на напряженное состояние арматуры и бетона при трещинообразовании // Вестник ВРО РААСН, Нижний Новгород, 2011. №14. С. 191-198.
16. Карпенко Н.И., Ерышев Н.И., Латышева Е.В., Бондаренко А.С. Деформации железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций // Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. 2013. №31(50) Ч.2. Строительные науки. С. 344 – 357.
17. Ахмедзянов Ф.Х. К эффекту торможения силовой трещины в цементном камне (бетоне) усадочным трещинообразованием // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. №3(29). С. 14-18.

ОБ АВТОРАХ

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

Сергей Александрович Агафонов – ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. E-mail: agaf50@gmail.com

Анна Олеговна Горячева – главный специалист ООО «ЛОТ», 194156, Россия, г. Санкт-Петербург, Сердобольская ул., д.1. E-mail: vse_zdes@mail.ru

Татьяна Викторовна Маслак – генеральный директор ООО «5 этажей», 196247, Россия, г. Санкт-Петербург, Новоизмайловский пр., д. 63, оф. 72. E-mail: tmaslak@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Anna A. Tsvetkova – the Master degree student of Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: annatsvetkova2014@mail.ru

Sergey A. Agafonov – assistant of the higher school of industrial, civil and road construction of Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: agaf50@gmail.com

Anna O. Goryacheva – shief specialist of LLC «LOT», 194156, Russia, Saint-Petersburg, Serdobolskaya st., 1. E-mail: vse_zdes@mail.ru

Tatiana V. Maslak – general director of LLC «5 Floors», 196247, Russia, Saint-Petersburg, Novoizmajlovskij av., 63, office 72. E-mail: tmaslak@mail.ru