

И.М. ДЬЯКОВ¹, М.И. ДЬЯКОВ¹

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ ФУНДАМЕНТОВ С ОСНОВАНИЕМ ПРИ БЫСТРОМ ДОГРУЖЕНИИ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований силового взаимодействия моделей отдельно стоящих фундаментов с песчаным основанием при быстрых догрузках. Исследования выполнены на железобетонных моделях фундаментов и металлическом штампе в песчаном лотке. Анализ затронул такие факторы работы системы «фундамент-грунт» при наличии быстрого догружения как изменение несущей способности фундамента на изгиб, осадка основания, трансформация эпюры нормальных контактных напряжений. Выявлены причины снижения несущей способности фундаментов на изгиб при быстром догружении, основной из которых является изменение формы эпюры нормальных контактных напряжений. Определены факторы, влияющие на концентрацию нормальных контактных напряжений у краевых зон подошвы фундамента, среди которых: разная скорость протекания составляющих процесса перераспределения напряжений в основании, развитие дилатансии и др.

Ключевые слова: силовое взаимодействие фундаментов с основанием, осадка фундаментов, нормальные контактные напряжения, деформации, отдельно стоящий фундамент, прогрессирующее обрушение.

I.M. DIAKOV¹, M.I. DIAKOV¹

¹Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia

INTERACTION OF PILLAR FOUNDATIONS WITH THE BASEMENT UNDER DYNAMIC LOADING

Abstract. The results of experimental studies of the force interaction of models of free-standing foundations with a sandy base under rapid additional loading are presented. The studies were carried out on reinforced concrete foundation models and a metal stamp in a sand tray. The analysis touched upon such factors of the operation of the “foundation-soil” system in the presence of rapid additional loading as a change in the bearing capacity of the foundation for bending, foundation settlement, transformation of the diagram of normal contact stresses. The reasons for the decrease in the bearing capacity of foundations for bending during rapid additional loading have been identified, the main one of which is a change in the shape of the diagram of normal contact stresses. Factors influencing the concentration of normal contact stresses near the edge zones of the foundation base have been identified, including: different rates of components of the stress redistribution process in the foundation, the development of dilation, etc.

Keywords: Force interaction of foundations with soil, settlement of foundations, normal contact stresses, deformations, free-standing foundation, progressive collapse.

Введение

В последние годы значительное внимание уделяется изучению работы конструкций и основания при особых нагрузках и сложных силовых воздействиях.

© Дьяков И.М., Дьяков М.И., 2024

Широко известны исследования поведения системы «фундамент-грунт» при циклических, динамических, вибрационных и других нагрузках [1-5]. При этом не уделено внимание изучению влияния на работу системы «фундамент-грунт» быстрого догружения. Под быстрым догружением в проведенных исследованиях понимается увеличение нагрузки на фундамент, скорость возрастания которой выше, чем скорость полного перераспределения напряжений в грунтовом массиве от увеличившейся внешней нагрузки [6,7].

Наиболее характерными причинами возникновения быстрого догружения являются: реконструкция зданий с заменой фундаментов, аварийные либо запредельные нагрузки, в том числе: концентрация грузов у колонны, падение груза на перекрытие, воздействие на здание природных факторов и экзогенных процессов (обрушение откоса грунта, сход оползня) и др. Из анализа результатов имеющихся лабораторных и натурных исследований изменения физико-механических и прочностных характеристик грунта при возрастании скорости нагружения [8-10] можно предположить, что быстрое догружение может приводить к преждевременному разрушению фундаментов, неравномерной сверхнормативной осадке, а, соответственно, к повреждениям здания, что обуславливает актуальность исследований в данной сфере. Особый интерес представляет изучение работы системы «фундамент-основание» при быстрых догружениях в контексте прогрессирующего обрушения. Исследованию сопротивления зданий прогрессирующему обрушению, разработке методик расчета посвящено значительное количество публикаций [11-13]. Вместе с тем, работа системы «фундамент-грунт» в этих исследованиях рассматривается с использованием нормативного подхода без учета влияния скорости увеличения нагрузки.

Целью исследования является выявление на основе экспериментальных данных особенностей силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым основанием при быстром догружении, создающих условия для формирования методики расчета фундаментов на изгиб с учетом реальной формы эпюры нормальных контактных напряжений.

Задачи исследований:

- на основании анализа результатов экспериментальных исследований выявить особенности осадки фундаментов и трансформации эпюры нормальных контактных напряжений при быстрых догружениях, установить факторы, влияющие на их формирование;
- определить причины изменения несущей способности фундаментов на изгиб при быстрых догружениях.

Модели и методы

Для выявления особенностей силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым основанием при быстрых догружениях были выполнены экспериментальные исследования в грунтовой лотке размерами 2,2х2,2х2,2 м, заполненной песком средней крупности (см. рисунок 1). Испытано 12 моделей железобетонных фундаментов размерами в плане 0,5х0,5 м с толщиной плиты 0,07-0,082 м, 5 моделей размерами в плане 0,5х0,4 м с толщиной плиты 0,07-0,082 м (см. рисунок 2). Прочность бетона образцов 2 серии на сжатие 33 МПа, площадь сечения арматуры 0,71 см², сопротивление арматуры растяжению 717,6 МПа. Прочность бетона образцов 3 серии на сжатие 30 МПа (Ф-3.1, Ф-3.4, Ф-3.5) и 40 МПа (Ф-3.2, Ф-3.3, Ф-3.6), площадь сечения арматуры 0,34 см², сопротивление арматуры растяжению 750 МПа. Также проведено 12 экспериментов с металлической моделью размерами в плане 0,425х0,425 м.

В процессе экспериментов измеряли уровень внешней нагрузки, нормальные контактные напряжения под подошвой, осадку и деформацию плиты железобетонных фундаментов. Испытания железобетонных моделей проводили до разрушения с традиционным (медленным) нагружением, а также быстрым догружением после

предварительного медленного преднагружения уровнем 25, 50 и 75% от расчетной разрушающей нагрузки. Испытания металлических моделей выполняли по аналогичной схеме до заданной нагрузки с учетом несущей способности основания.

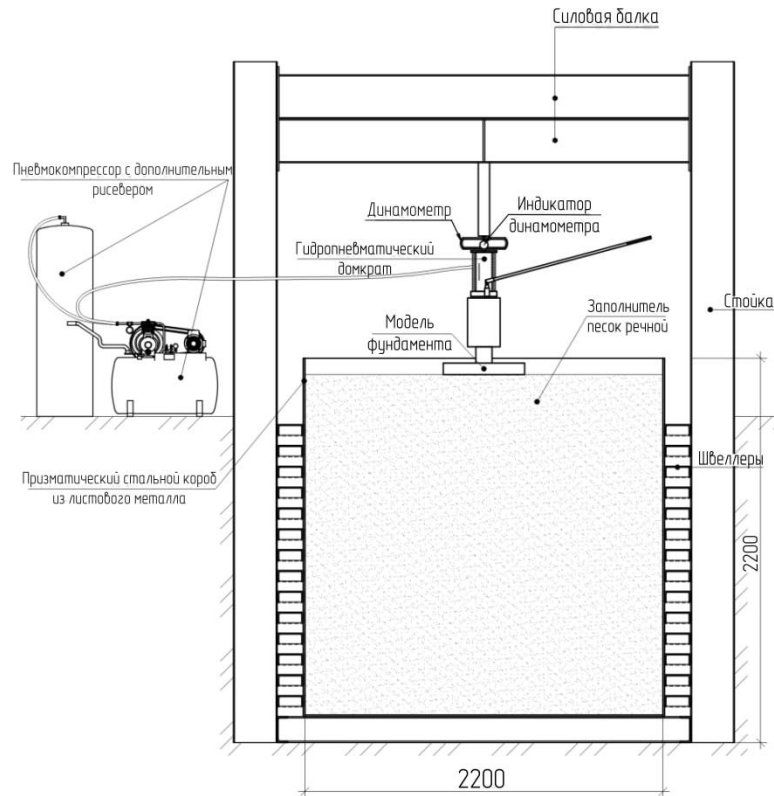


Рисунок 1 – Схема грунтового лотка и оборудования для испытания моделей фундамента

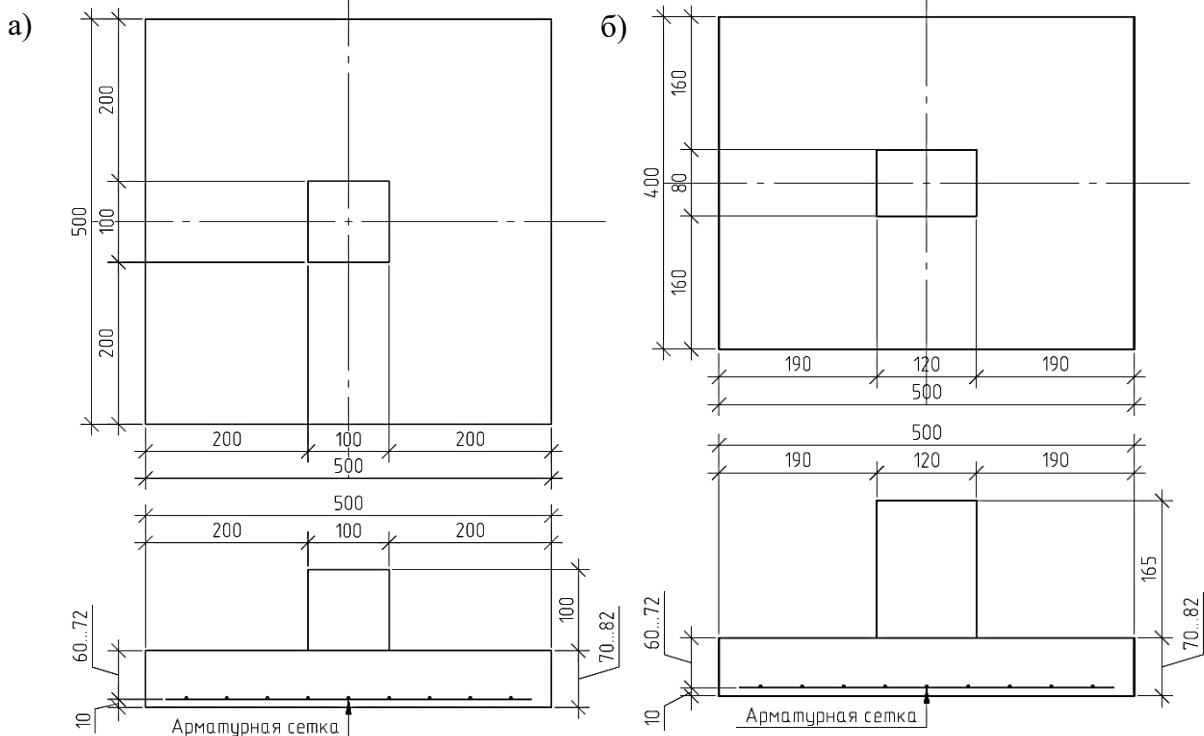


Рисунок 2 – Конструкция опытных образцов: а – 1 и 3 серии, б – 2 серия

Скорость нагружения в экспериментах (по среднему значению нормальных контактных напряжений) составляла 0,5...1,0 МПа/мин. В основу выбора скорости нагружения положены работы, обосновывающие скорость нагружения песчаного основания 0,05...3,0 МПа/мин., как оказывающую наибольшее влияние на деформации грунтов [14, 15]. Влияние быстрого нагружения на осадку фундаментов, несущую способность конструкции изучали на железобетонных моделях фундамента. Особенности трансформации эпюры нормальных контактных напряжений в процессе быстрого догружения и после стабилизации нагрузки исследовали на металлических моделях.

Результаты исследования и их анализ

Все опытные модели железобетонных фундаментов разрушились от изгиба по нормальным сечениям. При этом наблюдалось снижение несущей способности конструкций при наличии быстрого догружения на 14,7 – 24,8% относительно моделей с равными параметрами, испытанных при традиционном медленном нагружении (результаты 1 серии представлены в [6], 2 и 3 серий – в таблице 1). Разница несущей способности конструкций увеличивалась при более высоком уровне нагруженности основания (модели серии 2 и 3). Изучение характера разрушения фундаментов (см. рисунок 3) не выявило каких-либо специфических особенностей при наличии быстрого догружения.

Таблица 1 – Расчетная и опытная несущая способность моделей фундаментов 2 и 3 серии

№ образ-ца	Размеры в плане, высота плитной части, см	Расчетная несущая способность фундаментов, на изгиб $P_{из}$, кН	Уровень предварительного медленного нагружения (кН)	Наличие быстрого догружения	Опытная несущая способность, P_i (кН)	$P_i/P_{из}$	Снижение несущей способности относительно условного базового фундамента (%)
2-я серия экспериментов							
Ф-2.1	40x50x7	47,6	36	да	48,0	1,01	21,7
Ф-2.2	40x50x8	55,8	48	да	54,1	0,97	24,8
Ф-2.3	40x50x8,2	57,4	4	да	63,6	1,1	14,7
Ф-2.4	40x50x8	55,8	-	нет	75,0	1,34	-
Ф-2.5	40x50x8	55,8	-	нет	72,0	1,29	-
3-я серия экспериментов							
Ф-3.1	50x50x7	23,85	-	нет	61,0	2,56	-
Ф-3.2	50x50x8	27,96	18,3	да	55,0	1,96	20,5
Ф-3.3	50x50x8,2	28,77	7,32	да	59,0	2,05	16,8
Ф-3.4	50x50x8	27,88	-	нет	66,0	2,37	-
Ф-3.5	50x50x8	27,88	28,9	да	56,0	2,01	18,4
Ф-3.6	50x50x7,6	26,35	26,7	да	51,0	1,93	21,7

Существенное влияние быстрое догружение оказывало на осадку фундаментов. С момента начала быстрого догружения развитие осадки с увеличением нагрузки замедлялось, что прослеживается как на графиках абсолютной осадки (см. рисунок 4 а, б), так и графиках относительного приращения осадки (см. рисунок 4 г, д). На момент разрушения железобетонных моделей, осадка у большинства образцов была меньше, чем осадка аналогичных образцов, испытанных при традиционном медленном нагружении. Наибольшее

снижение осадки наблюдалась в образцах Ф-2.3 и Ф-3.3, быстрое догружение которых осуществлялась при наименьшем преднагружении статической нагрузкой (см. рисунок 4). Сниженная величина осадки при быстром догружении объясняется отсутствием силового равновесия между внешней нагрузкой и опорной реакцией грунта на момент разрушения фундамента, а также запаздыванием процессов пластических деформаций в грунте относительно роста внешней нагрузки.

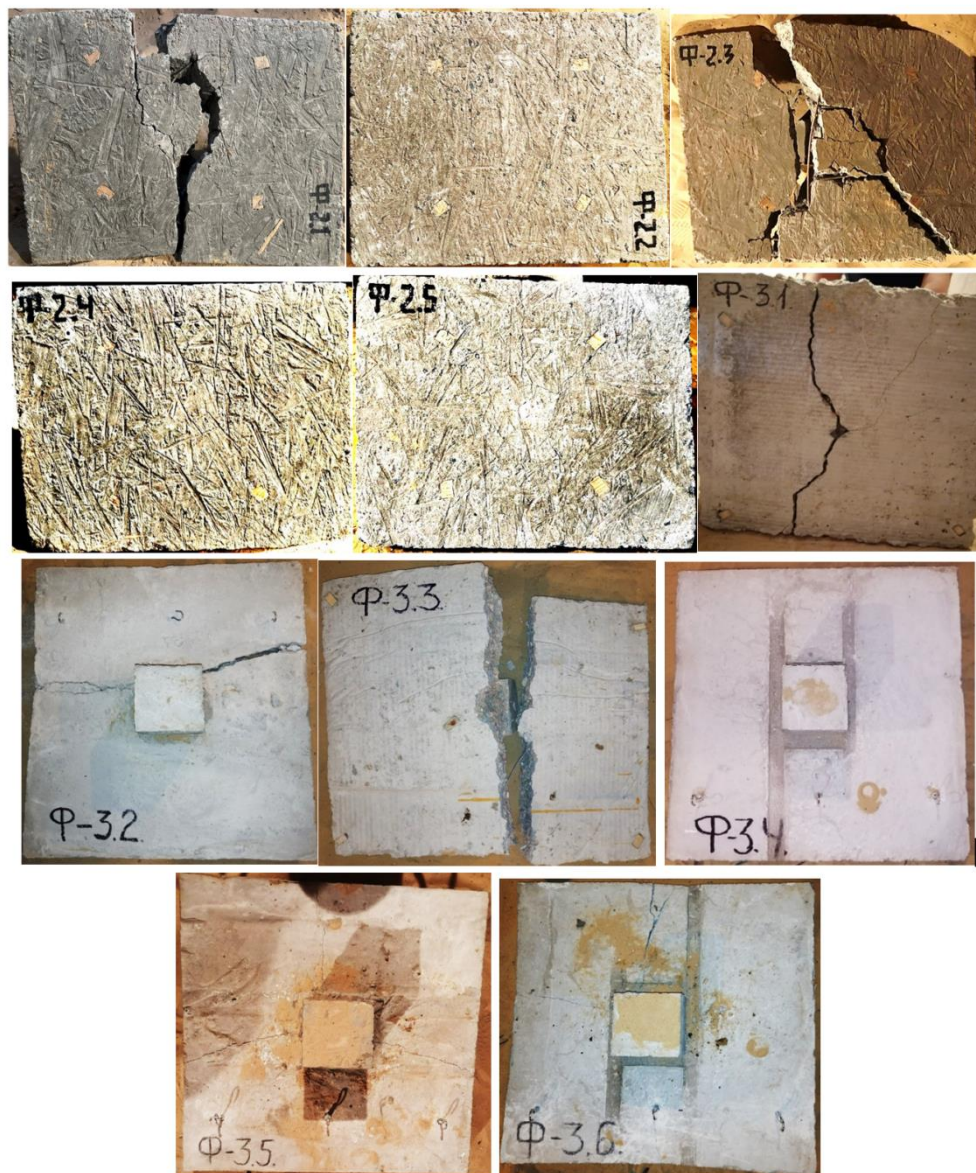


Рисунок 3 – Разрушение железобетонных моделей фундаментов

Приращения осадки образцов во время быстрого догружения носили волновой характер изменения (рисунок 4 г, д) в отличие от более равномерного приращения осадки у образцов с медленным нагружением (рисунок 4 в). Это можно объяснить развитием фрикционных автоколебаний системы «фундамент-грунт» и циклическим характером процесса дилатансии грунта у краевых зон подошвы фундаментов в виде циклов «уплотнение-разуплотнение». После стабилизации нагрузки быстрого догружения осадка металлических моделей полностью затухала в течении 10-15 минут. При этом наиболее интенсивные изменения происходили в период 10-30 секунд после стабилизации нагрузки.

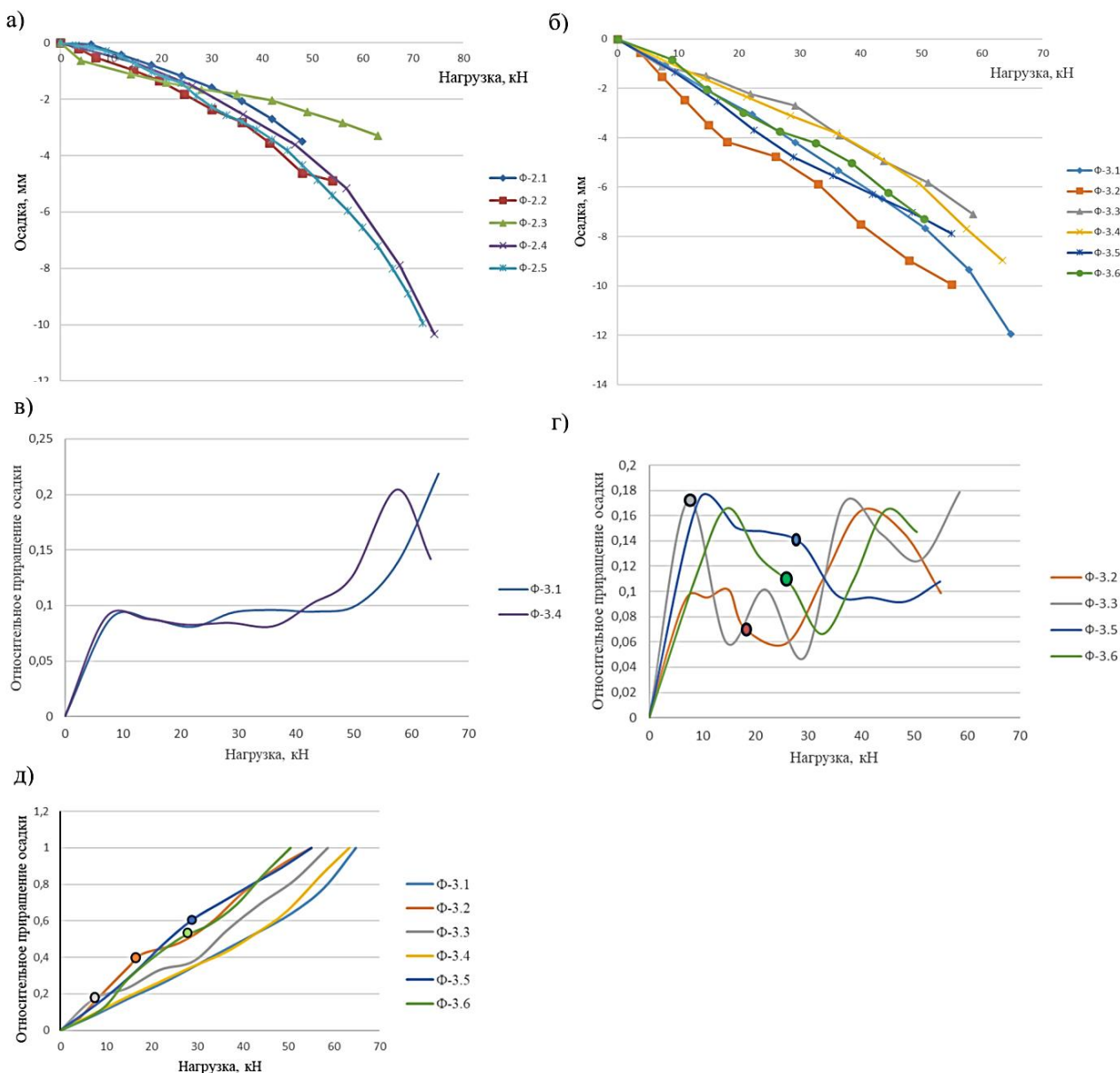


Рисунок 4 – Графики осадки фундаментов: абсолютная осадка фундаментов 2 и 3 серий экспериментов (а,б); пошаговое относительное приращение осадки фундаментов Ф-3.1 и Ф-3.4, испытанных при медленном нагружении (в); пошаговое относительное приращение осадки фундаментов Ф-3.2, Ф-3.3, Ф-3.5 и Ф-3.6, испытанных с быстрым догружением (г); относительное приращение осадки фундаментов 3-й серии (точками показано начало быстрого догружения) (д)

Форма эпюры нормальных контактных напряжений в центральных сечениях перед началом быстрого нагружения была близка к параболической как у железобетонных, так и металлических моделей. После быстрого догружения нормальные контактные напряжения у краевых зон подошвы металлических моделей имели более высокие значения относительно образцов, испытанных при традиционном медленном нагружении (см. рисунок 5 а). После стабилизации внешней нагрузки быстрого догружения под краевой зоной подошвы наблюдался непродолжительный во времени рост напряжений, после чего они стабилизировались либо снижались (см. рисунок 5 б, в).

Нормальные контактные напряжения под центральной частью подошвы фундамента, а также в промежуточной зоне после фиксации нагрузки быстрого нагружения в большинстве

экспериментов возрастали в течении более длительного времени (см. рисунок 5 в). С увеличением степени нагруженности основания величина прироста нормальных контактных напряжений под центральной частью подошвы была больше. В экспериментах с медленным нагружением прирост напряжений и осадки моделей после стабилизации нагрузки каждой ступени проявлялся лишь при высокой степени нагруженности основания и имел существенно меньшие значения, чем при наличии быстрого догружения.

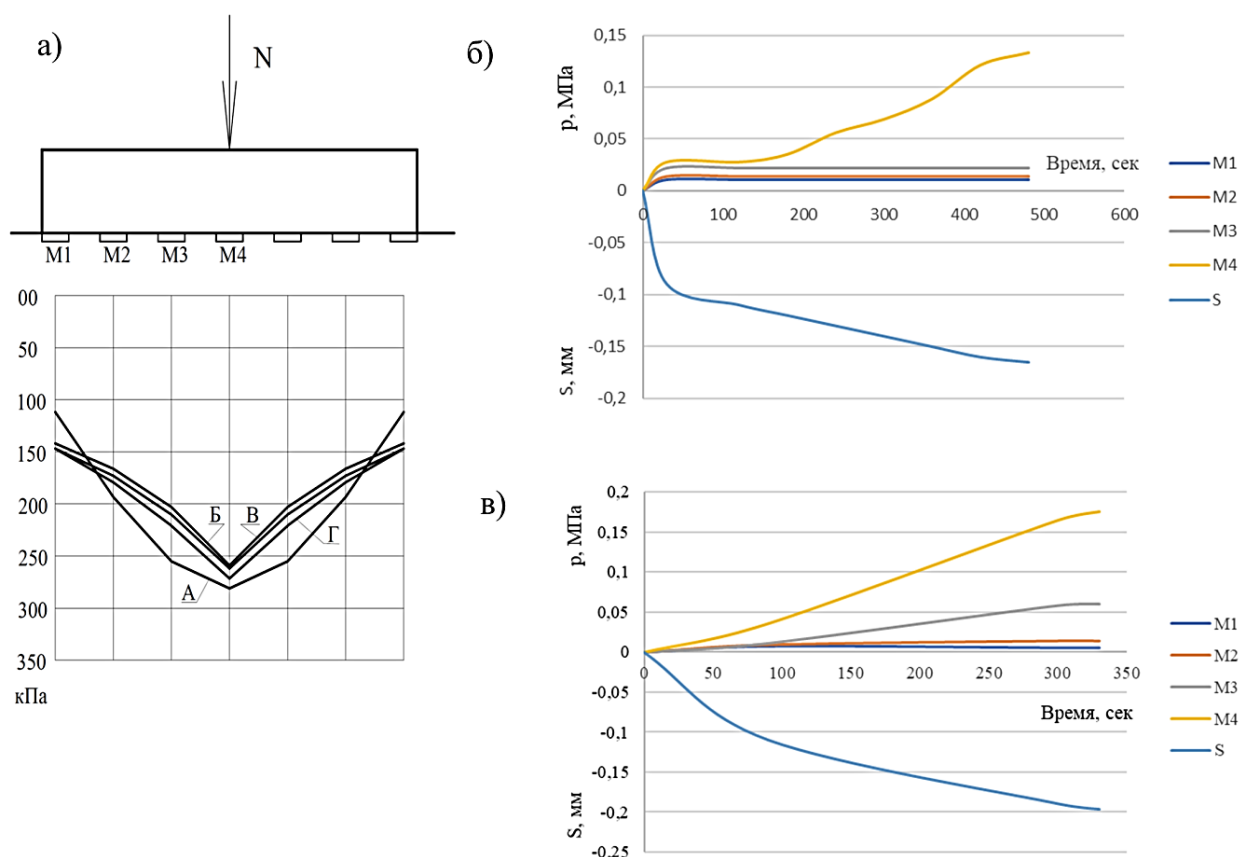


Рисунок 5 – Эпюры и ординаты нормальных контактных напряжений под подошвой железобетонных и металлических моделей: эпюры напряжений под подошвой металлической модели при нагрузке 30 кН (А- при медленном нагружении; Б, В и Г - при быстром догружении сразу после стабилизации нагрузки, через 10 и 30 секунд соответственно (а); прирост нормальных контактных напряжений после фиксации нагрузки быстрого догружения, увеличившей внешнее усилие с 15 до 60 кН (б); тоже с 60 до 67,3 кН(в)

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить, что основными причинами более высокого уровня нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы фундамента на момент фиксации внешней нагрузки быстрого догружения относительно уровня напряжений при медленном нагружении при одинаковой внешней нагрузке являются развитие процесса дилатансии, более низкая скорость сдвиговых и пластических деформаций относительно скорости догружения, а также развитие неупругих деформаций под центральными зонами подошвы фундамента. Косвенно возможность влияния дилатансии на краевые контактные напряжения подтверждается в работах [16-20].

Увеличение нормальных напряжений в уплотненном грунте при дилатансии происходит в случае ограничения возможности перемещений. Учитывая, что перемещения в грунте имеют определенную скорость, при быстром нагружении создается кратковременный эффект ограничения перемещений. Кроме того, при предварительном нагружении фундамента статической нагрузкой грунт основания уплотняется, что необходимо для развития дилатансии. Наибольшее влияние дилатансии на эпюру нормальных контактных

напряжений проявляется у краевых зон подошвы и на некотором удалении от края, так как зоны сдвига и максимальные касательные напряжения концентрируются на данных участках.

С высокой долей вероятности в качестве фактора, влияющего на кратковременное повышение краевых нормальных контактных напряжений в процессе быстрого догружения, можно рассматривать фрикционные автоколебания. Возможность возникновения колебательных процессов в системе «гибкий фундамент-грунт» связана с взаимозависимостью ординат эпюры нормальных контактных напряжений с прогибом конструкции, а также циклическим характером дилатансии, описанном в [20].

Более высокий уровень нормальных контактных напряжений у краевой зоны подошвы фундамента, формирующий более высокие значения изгибающего момента в центральных сечениях подошвы, является основной причиной снижения несущей способности фундамента на изгиб при быстром догружении.

Выводы

1. Быстрое догружение фундаментов способствует изменению параметров силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с основанием относительно медленного нагружения, что проявляется в изменении осадки фундамента и формы эпюры нормальных контактных напряжений, снижении несущей способности фундаментов на изгиб.

2. Основной причиной снижению несущей способности фундаментов на изгиб при быстром догружении фундаментов является относительное увеличение нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы фундамента и снижение под центральными зонами подошвы, что приводит к увеличению изгибающего момента в центральных нормальных сечениях конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тер-Мартirosян, А. З. Осадки оснований сооружений при статическом, циклическом и вибрационном воздействиях / А. З. Тер-Мартirosян // Международный журнал «Геотехника». – М. – 2010. – С.77-81.
2. Алексеев В.М., Евдокимцев О.В., Леденев В.В. Экспериментальные исследования работы фундаментов при действии центральной и внецентренной многократно повторной нагрузки. ВНИИТПИ, № 11691. М., 1998. - 25 с.
3. Леденёв В. В., Основания и фундаменты при сложных силовых воздействиях (опыты): монография для научных работников, аспирантов и магистрантов строительного профиля: в 2 т. /– Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. Т. 2. – 2015. – 288 с.
4. Jia J. Dynamic and cyclic properties of soils // Soil dynamics and foundation modeling// Springer international publishing Ag. 2018.P. 75-108.
5. Леденёв В. В., Несущая способность и деформативность оснований и фундаментов при сложных силовых воздействиях: монография / – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 324 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-8265-1444-3.
6. Diakov I N, Tsarenko N V, Diakov M I., Experimental studies of the “foundation-soil” system operation with sudden loading// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 913 (2020) 022064 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/913/2/022064.
7. Дьяков И.М. Планирование экспериментальных исследований работы системы «фундамент-основание» при внезапных догружениях [Электронный ресурс]/ И.М. Дьяков, М.И. Дьяков, Б.Ю. Барыкин // Строительство и техногенная безопасность. — 2020. — № 19(71). — с.5-12. — DOI: 10.37279/2413-1873-2020-19-5-12.
8. Vesic, A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations /A. S. Vesic // Journal of the soil mechanics and foundation division. – 1973. – V. 99, N SM1. – P. 45 – 73
9. Motra H.B., Stutz H., Wuttke F. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations // Soils and Foundations. 2016. Volume 56. Issue 2. Pp. 265-276.
10. Сиразиев Л.Ф. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния трехслойного грунтово-цементного основания при кратковременных штамповых испытаниях и наличии водонасыщенного слоя. Известия КГАСУ, 2017, № 4 (42). – Казань, С.228-236.

11. Колчунов В.И., Московцева В.С., Бушова О.Б., Жуков Д.И. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения. *Строительство и реконструкция*. 2021;(4):35-44. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44>
12. Колчунов В.И., Московцева В.С. Живучесть железобетонных каркасов многоэтажных зданий со сложнапряженными элементами // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 3. С. 195–203. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-195-203>.
13. Травуш, В. И. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований / В. И. Травуш, В. И. Колчунов, Е. В. Леонтьев. - (Строительные конструкции, здания и сооружения). - Текст: непосредственный // *Промышленное и гражданское строительство*. - 2019. - № 2. - С. 46-54. - Библиогр.: с. 53-54 (19 назв.). - ISSN 0869-7019.
14. Тархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев. - Москва : Транспорт, 1975. - 285 с.
15. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Исследование влияния скорости приложения постоянно возрастающей нагрузки на консолидацию грунтов после нагружения *Научные труды КубГТУ* №15.– 2016. – С. 1–15.
16. Т.М. Уласик. Влияние «стесненной» дилатансии на несущую способность свайных фундаментов/ *Вестник полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки* 2015, №16. – С30-33.
17. Abouzar Sadrekarimi. Static liquefaction-triggering analysis considering soil dilatancy. *Soils and Foundations* 2014;54(5). С.955-966
18. Merita Tafili 1,2,*, Carlos Grandas Tavera 3, Theodoros Triantafyllidis 1 and Torsten Wichtmann. On the Dilatancy of Fine-Grained Soils / *Geotechnics/ Geotechnics* 2021, 1, 192–215. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010010/> <https://www.mdpi.com/journal/geotechnics>
19. John McDougall, Darren Kelly, Daniel Barreto/ Particle loss: An initial investigation into size effects and stress-dilatancy/ April 2019/ *SOILS AND FOUNDATIONS* 59(3) DOI:10.1016/j.sandf.2019.03.002 License CC BY-NC-ND 4.0
20. Muhammad Shehzad Khalid a, Mamoru Kikumoto b, Ying Cui b, Kiyoshi Kishida. The role of dilatancy in shallow overburden tunneling/ *ScienceDirect Underground Space* 4 (2019) 181–200

REFERENCES

1. Ter-Martirosyan, A. Z. Settlement of the foundations of structures under static, cyclic and vibration influences. A. Z. Ter-Martirosyan. *International Journal of Geotechnics*. – М. – 2010. – P.77-81.
2. Alekseev V.M., Evdokimtsev O.V., Ledenev V.V. Experimental studies of the operation of foundations under the action of central and eccentric repeated loads. *VNIITPI*, No. 11691. М., 1998. - 25 p.
3. Ledenev V. V. Foundations and foundations under complex force influences (experiments): monograph for scientists, graduate students and undergraduates in construction: in 2 volumes. Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "TSTU", 2015. Т. 2. - 2015. - 288 p.
4. Jia J. Dynamic and cyclic properties of soils. *Soil dynamics and foundation modeling*. Springer international publishing Ag. 2018.P. 75-108.
5. Ledenev V. V. Bearing capacity and deformability of bases and foundations under complex force influences: monograph. Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "TSTU", 2015. – 324 p. – 400 copies. – ISBN 978-5-8265-1444-3.
6. Diakov I N, Tsarenko N V, Diakov M I. Experimental studies of the “foundation-soil” system operation with sudden loading. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 913 (2020) 022064 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/913/2/022064.
7. Dyakov I.M. Planning of experimental studies of the operation of the “foundation-foundation” system under sudden additional loading [Electronic resource]. *Construction and technogenic safety*. - 2020. - No. 19(71). — p.5-12. — DOI: 10.37279/2413-1873-2020-19-5-12.
8. Vesic, A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations .A. S. Vesic. *Journal of the soil mechanics and foundation division*. – 1973. – V. 99, N SM1. – P. 45 – 73.
9. Motra H.B., Stutz H., Wuttke F. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations. *Soils and Foundations*. 2016. Volume 56. Issue 2. Pp. 265-276.
10. Siraziev L.F. Experimental studies of the stress-strain state of a three-layer soil base during short-term stamping tests and the presence of a water-saturated layer. *News of KGASU*, 2017, No. 4 (42). – Kazan, pp. 228-236.
11. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S., Bushova O.B., Zhukov D.I. Calculation analysis of methods for protecting monolithic frames of multi-story buildings with flat floors from progressive collapse. *Construction and reconstruction*. 2021;(4):35-44. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44>.
12. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. Vitality of reinforced concrete frames of multi-storey buildings with complexly stressed elements. *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2022. Т. 18. No. 3. pp. 195–203. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-195-203>.

13. Travush, V. I. Protection of buildings and structures from progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements (Building structures, buildings and structures). *Industrial and civil construction*. - 2019. - No. 2. - P. 46-54. - Bibliography: p. 53-54 (19 titles). - ISSN 0869-7019.
14. Tarhuta N.Ya., Vasiliev Yu.M. Strength, stability and soil compaction of highway subgrades. Moscow: Transport, 1975. - 285 p.
15. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Study of the influence of the speed of application of a constantly increasing load on the consolidation of soils after loading *Scientific works of KubSTU*. No. 15. – 2016. – P. 1–15.
16. T.M. Ulasik. The influence of “constrained” dilatancy on the bearing capacity of pile foundations. *Bulletin of Polotsk State University. Construction. Applied Sciences* 2015, No. 16. – P. 30-33.
17. Abouzar Sadrekarimi. Static liquefaction-triggering analysis considering soil dilatancy. *Soils and Foundations* 2014;54(5). C.955-966.
18. Merita Tafili 1,2,*, Carlos Grandas Tavera 3, Theodoros Triantafyllidis 1 and Torsten Wichtmann. On the Dilatancy of Fine-Grained Soils. *Geotechnics* 2021, 1, 192–215. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010010/> <https://www.mdpi.com/journal/geotechnics>.
19. John McDougall, Darren Kelly, Daniel Barreto. Particle loss: An initial investigation into size effects and stress-dilatancy. April 2019. *SOILS AND FOUNDATIONS* 59(3) DOI:10.1016/j.sandf.2019.03.002 License CC BY-NC-ND 4.0.
20. Muhammad Shehzad Khalid a, Mamoru Kikumoto b, Ying Cui b, Kiyoshi Kishida. The role of dilatancy in shallow overburden tunneling. *ScienceDirect Underground Space* 4 (2019) 181–200.

Информация об авторах

Дьяков Игорь Михайлович

ФГАОУ ВО Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия,
канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой Геотехники и конструктивных элементов зданий,
E-mail: karta3@mail.ru

Дьяков Михаил Игоревич

ФГАОУ ВО Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия,
аспирант кафедры строительных конструкций,
E-mail: dyakov.info.aca@yandex.ru

Information about authors

Diakov Igor M.

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia,
candidate in tech. sc., docent, head of the department of geotechnics and structural elements of buildings
E-mail: karta3@mail.ru

Diakov Michael I.

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia,
postgraduate student of the Department of Building Structures
E-mail: dyakov.info.aca@yandex.ru