

ЭФФЕКТ КРАЕВОЙ СВАИ И ЕГО УЧЕТ ПРИ РАСЧЕТЕ ПЛИТНОГО РОСТВЕРКА

В. П. ПЕТРУХИН – д-р техн. наук, профессор, директор НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, засл. деятель науки РФ, лауреат Государственной премии СССР. Автор более 160 опубликованных работ и нормативных документов. Основные направления научной деятельности – подземные сооружения, исследование и решение геотехнических проблем освоения подземного пространства городов, строительство в особых грунтовых условиях, обследование сооружений и геомониторинг, г. Москва.

С. Г. БЕЗВОЛЕВ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, член РОМГТиФ. Автор 47 опубликованных работ. Основные направления научной деятельности – методы расчетов плитно-свайных фундаментов, подземных ограждающих конструкций, прочности, деформируемости и консолидации грунтовых и армированных массивов. Разработанные методики использованы при проектировании более 70 строительных объектов, г. Москва.

О. А. ШУЛЯТЬЕВ – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. Автор более 50 опубликованных работ и 15 изобретений. Основные направления научной деятельности – решение геотехнических проблем при освоении подземного пространства городов, проектирование фундаментов в сложных грунтовых условиях, г. Москва.

А. И. ХАРИЧКИН – аспирант, инженер НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. Автор одной опубликованной работы и одного изобретения. Основные направления научной деятельности – расчет и проектирование свайных и плитно-свайных фундаментов, г. Москва.

Рассмотрен эффект краевой сваи для плитно-свайного фундамента на примере жилого 7-этажного здания. Предложена объемная расчетная модель, моделирующая работу угла ростверка с примыкающей к нему с внешней стороны незагруженной частью основания. Результаты расчета показывают, что краевая свая является наиболее нагруженной, что должно учитываться при проектировании плитно-свайных фундаментов.

Актуальность темы. При расчете плитного ростверка, объединяющего группу или поле свай, важное значение имеет «паспорт сваи» – зависимость сопротивления сваи от ее перемещения. Исследованиями, выполненными в России [1] и за рубежом [2], выявлено, что паспорт одиночной сваи отличается от паспорта сваи в составе группы, который должен учитывать положение сваи (краевое – угловое или торцевое и внутреннее). При этом

предполагается, что в свайной группе краевая свая воспринимает большую нагрузку, чем внутренняя. Однако в некоторых случаях, когда несущая способность краевой сваи по грунту исчерпана, а прочность материала ствола сваи обеспечена, может возникнуть обратная картина – нагрузка, воспринимаемая внутренней свайей, становится больше, чем у краевой. При этом поверхность ростверка, особенно в зоне, близкой к краю, из вогнутой может превратиться в выгнутую, а сжатые волокна – в растянутые. В нижней зоне рост-

© В. П. Петрухин, С. Г. Безволев, О. А. Шулятьев,
А. И. Харичкин, 2007

Internet: www.georec.spb.ru

верка превращение будет обратным. В большей степени «эффект краевой сваи» может проявляться у плитно-свайных фундаментов, в которых допускается достижение предельного сопротивления сваи по грунту.

Описанный эффект был выявлен при расчете свайного фундамента под жилое монолитное железобетонное 7-этажное здание шириной 17 м и длиной свыше 250 м. Результаты расчета применялись при назначении арматуры ростверка и нагрузки на сваи.

Характеристика площадки строительства. Рассматриваемое здание проектируется в комплексно застраиваемом пригороде Москвы, расположенном в долине р. Москвы, в районе поймы р. Баньки. Геологическое строение исследуемого участка на разведанную глубину до 30 м (рис. 1) представлено современными техногенными и аллювиальными четвертичными отложениями, а также породами верхнего карбона.

Аллювиальные отложения, залегающие под техногенными насыпными грунтами (ИГЭ-1), представлены комплексом песчано-глинистых грунтов: супесями с прослоями песков, насыщенных водой (ИГЭ-2); суглинками с прослоями супеси, мягко- и текучепластичной консистенции (ИГЭ-3); песками – от мелких до гравелистых, от рыхлых до плотных, преимущественно средней крупности и плотности, насыщенными водой (ИГЭ-4).

Подстилающие породы верхнего карбона сложены известняками средней прочности (ИГЭ-5) с частыми прослоями пестроцветных глин. Территория строительства является потенциально опасной в отношении карстово-суффозионных процессов.

В месте устройства фундамента предполагается подсыпка территории суглинистым грунтом на 0,7...2,4 м. Абсолютная отметка подошвы ростверка – 130,8 м. Физико-механические характеристики грунтов представлены в табл. 1.

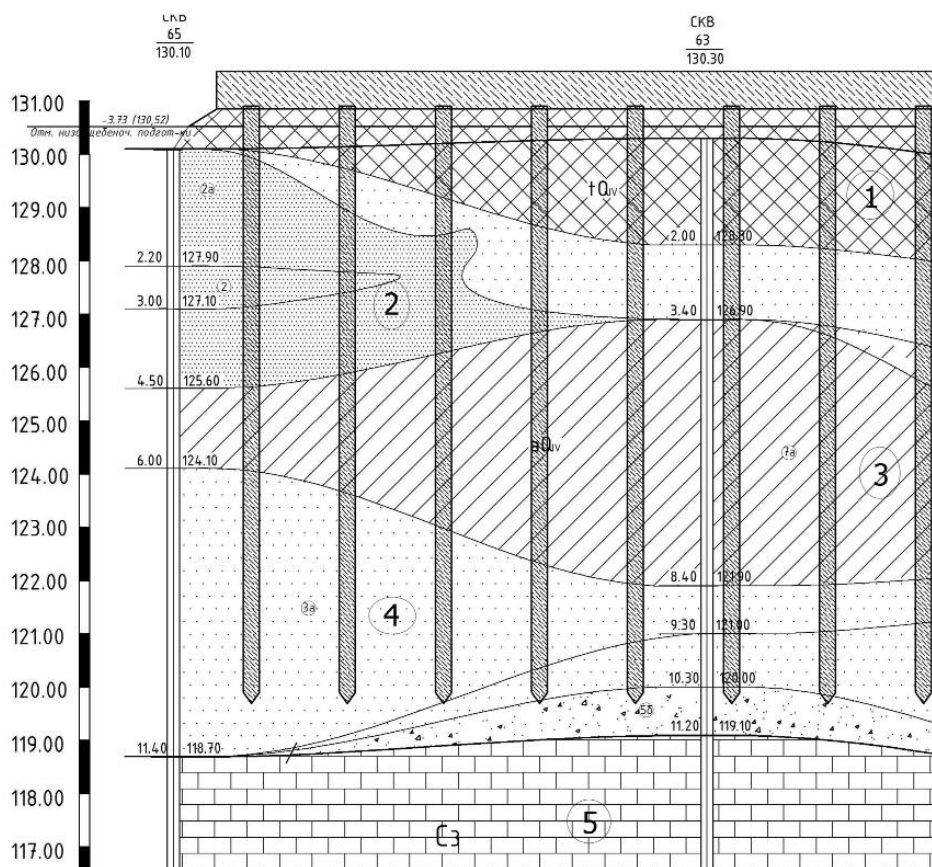


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез (1–5 – номера ИГЭ)

Конструирование свайного фундамента.

В связи с наличием в основании фундамента неоднородных и неслежавшихся насыпных грунтов, а также неравномерного в плане слоя слабого грунта (ИГЭ-3) было принято решение применить свайный фундамент. Основными практическими задачами при проектировании свайного фундамента являются определение конструкции, длины и шага свай, а также толщины и армирования ростверка. В связи с отсутствием рядом существующих зданий были приняты забивные железобетонные сваи квадратного сечения 30x30 см, длиной $L = 11$ м (С110.30.10–Св.У). Основанием пяты свай служат аллювиальные пески, располагающиеся непосредственно над известняками. Сваи, проходя слою насыпных грунтов, суглинков и прослоев рыхлых песков, не добиваются до отметки известняка на 1,0...1,5 м. В связи с закарстованностью основания свая не закрепляется в ростверке (устраивается «выпадающей»). После расчета нормативной расчетной нагрузки на сваю $N = 540$ кН было принято прямоугольное свайное поле с шагом свай $1,5 \times 1,8$ м.



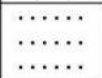

Необходимая толщина сечения плитного ростверка предварительно оценивалась исходя из требуемой по расчету прочности на продавливание бетона примыкающими несущими конструкциями (стенами, колоннами и сваями) и составила 0,6 м.

Расчет плитного ростверка. Несущие конструкции фундаментов рассматривались как часть пространственного несущего каркаса здания. Расчет производился методом конечных элементов (МКЭ) на проектно-вычислительном комплексе SCAD. Статический расчет плитного ростверка выполнен для модели с податливым основанием с переменными коэффициентами жесткости свайного основания, с варьированием положения расчетного карстового провала. Значения переменных коэффициентов жесткости определены на основании паспортов свай, рассчитанных при помощи геотехнического программного комплекса *Plaxis 3D Foundation*.

Методика расчета. В процессе проектирования фундаментов здания ставилась задача учесть на основе численного расчета усилия и перемещения, возникающие в сваях, располо-

Таблица 1

Нормативные значения характеристик грунтов

Геологический индекс	№ ИГЭ	Геолого-литологическая колонка	Грунты, слагающие ИГЭ	Нормативные значения															
				Плотность грунта	Плотность частиц грунта	Природная влажность грунта	Показатель текучести	Коэффициент пористости	Угол внутр. трения, град	Удельное сцепление	Модуль деформации.								
												ρ_n	ρ_s	W	I_L	e	Φ_n	C_n	E
												т/м ³ кН/м ³	т/м ³ кН/м ³	д.е.	д.е.	д.е.	град	кгс/см ² кПа	кгс/см ² МПа
tQIV	1		Насыпной грунт: песок со строительным мусором; неуплотненный, влажный	1,60 16,0	Расчетное сопротивление $R_c = 0.1$ МПа				12°*	0,05 5	50 5								
aQIV	2		Супесь с прослоями песков, насыщенных водой; текучая	1,80 18,0	2,68 26,8	-	>1	-	12°	0,02 2	80 8								
	3		Суглинок иловатый, с прослоями супеси; мягкопластичный с прослоями текучепластичного	1,90 19,0	2,71 27,1	0,31	0,69	0,87	23°	0,07 7	55 5,5								
	4		Песок средней крупности, с гравием и галькой до 10-15%; средней плотности, насыщенный водой	1,98 19,8	2,66 26,6		-	0,68	31°	0,01 1	230 230								
C3	5		Известняк трещиноватый (слабоветрелый), местами кавернозный, с частыми прослоями пестроцветных глин, средней прочности, обводненный.	2,20 22,0	Сопротивление одноосному сжатию в водонасыщ. состоянии $R_c = 16$ МПа														

женных в различных зонах плитного ростверка (центральной, торцевой и угловой).

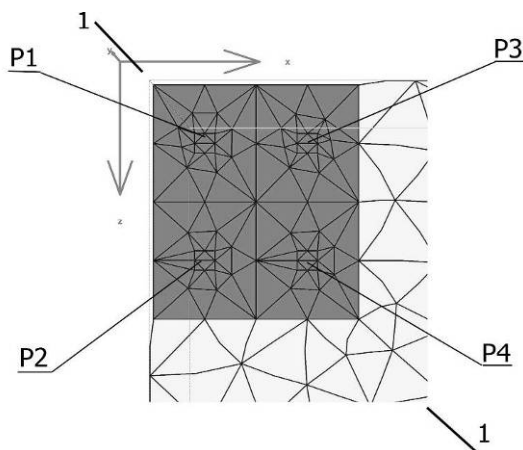


Рис. 2. Вид расчетной схемы в плане

Для этого была разработана объемная расчетная модель, моделирующая работу угла ростверка с примыкающей к нему с внешней стороны незагруженной частью грунтового основания. В представленном на рис. 2 расчетном фрагменте одна свая – угловая ($P4$), две сваи расположены в краевой зоне ($P2$, $P3$) и одна ($P1$) характеризует работу свай, расположенных во внутренних зонах ростверка.

Для проведения расчетов была выбрана упругопластическая модель Мора–Кулона, реализованная в семействе программ *PLAXIS*, прочностные и деформационные параметры грунтов (угол внутреннего трения, удельное сцепление и модуль общих деформаций сжатия) в которой совпадают с принятыми в отечественной практике изысканий. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами по программе *ARMD* [3], разработанной в НИИОСП для расчета свайных полей и армированных оснований, методика которой соответствует основополагающим концепциям, рекомендуемым строительными нормами для уточненных (нелинейных) расчетов оснований зданий и сооружений.

Физико-механические характеристики грунтов соответствуют фактическим данным инженерно-геологических изысканий (см. табл. 1, рис. 1). Расчет производился при трех степенях нагружения, соответствующих 0,5–; 1– и 2–кратной расчетной нагрузке N на сваю. Основными характеристиками работы были

сжимающие усилия N_x , возникающие в голове каждой сваи после приложения нагрузки.

Результаты расчетов. Получены значения усилий, возникающих в сваях при различной нагрузке и осадке фрагмента ростверка (табл. 2), а также графики распределения перемещений по сечению 1–1 (см. рис.2), представленные на рис. 3–5.

Таблица 2

Степень нагружения	Общая нагрузка на фрагмент Q , кН	Общая осадка фрагмента S , мм	Сжимающие усилия, возникающие в голове свай N_x , кН			
			$P1$	$P2$	$P3$	$P4$
1	1240	14,2	252	316	315	333
2	2200	63,4	539	514	511	491
3	4400	220	1007	900	899	825

Анализ результатов расчетов показал, что по мере увеличения нагрузки на фрагмент ростверка сваи прорезают («прокалывают») толщу грунта и нижняя граница зоны грунта, имеющей одинаковую осадку со сваями, перемещается снизу вверх. Данная зона составляет $0,7L$ при $0,5N$ (L – длина свай); $0,5L$ при N ; $0,2L$ при $2N$. Подобные результаты получены в [1,3], а наличие указанной зоны отмечалось в результатах расчетов с использованием упруго-пластической упрочняющейся модели грунта Cam-Clay [4].

В рассмотренном в настоящей работе примере на грунт под подошвой ростверка при $0,5N$ приходится 2% нагрузки, приложенной к ростверку; при N – 7%; при $2N$ – 17%. Таким образом, при небольших нагрузках их большая часть воспринимается сваями, и фундамент работает как классический свайный. При дальнейшем росте нагрузок доля, приходящаяся на грунт, подстилающий ростверк, становится более значительной, и фундамент начинает работать как свайно-плитный. Аналогичные результаты отмечены в [5] при расчетах по программе *ARMD*. Анализ изменения напряжений в ростверке показал, что первоначально при нагрузке на фрагмент ростверка, равной $0,5N$, наблюдается его общий прогиб, при N зарождаются, а при $2N$ развиваются зоны локального выгиба.

Эффект краевой сваи. Согласно общепринятой концепции [1], при нагружении свая работает по боковой поверхности и острию. Работа сваи по боковой поверхности определяется силами контактного трения, которые возникают при перемещении сваи относительно окружающего массива грунта. В начальный момент нагружения, когда упругий массив грунта, окружающего внутреннюю сваю, перемещается практически параллельно со сваями, силы трения по боковой поверхности внутренней сваи практически не реализуются. Для краевой сваи, с одной стороны

которой имеется неподвижный массив грунта, наоборот, наблюдается существенная мобилизация сил трения.

При работе сваи по острию, сопротивление внутренней сваи также обычно меньше, чем краевой, так как при практически одинаковых значениях осадки за счет взаимного влияния свай, сопротивление по острию у краевой сваи выше. Таким образом, в начале нагружения краевая свая воспринимает большую нагрузку, чем внутренняя. Такой характер работы свайных фундаментов соответствует упругим решениям [6].

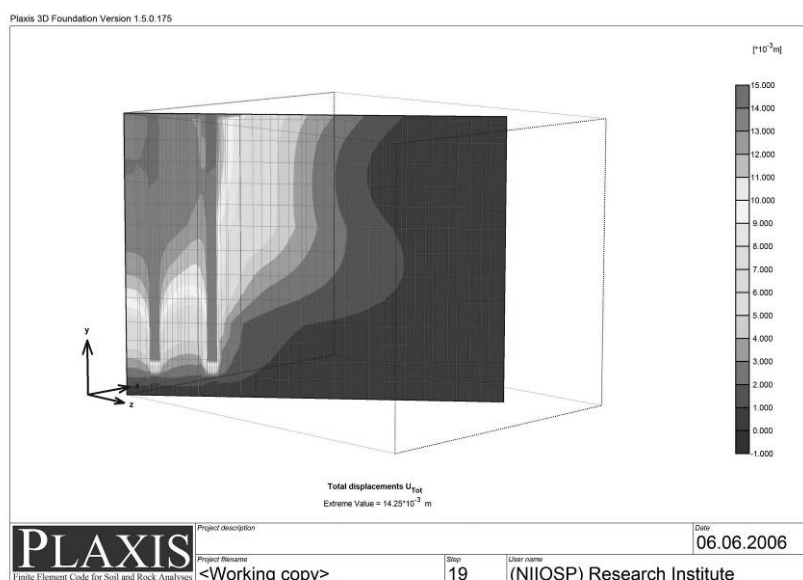


Рис. 3. Распределение перемещений при нагрузке 0,5N

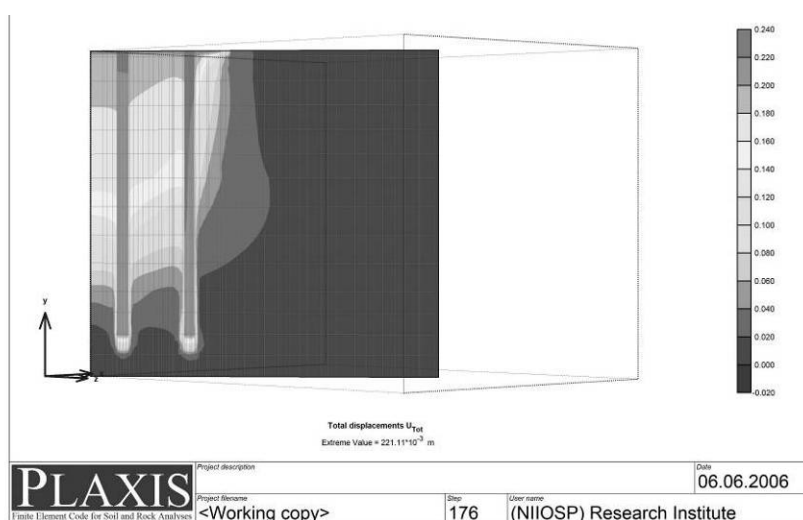
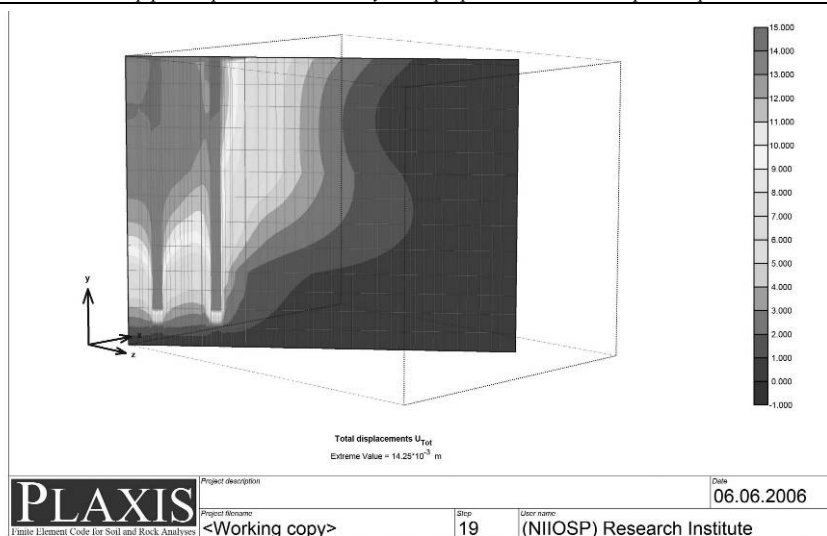


Рис. 4. Распределение перемещений при нагрузке, равной N

Рис. 5. Распределение перемещений при нагрузке, равной $2N$

Далее, в процессе нагружения и развития в грунте пластических деформаций, сопровождающихся существенным нарастанием осадки, наступает момент, когда зона перемещения грунта относительно свай возникает около внутренних свай, что приводит к увеличению сил трения по грунту. Рядом расположенные сваи создают пригрузку соседних зон. Это затрудняет выпор грунта из-под острия сваи в стороны и тем самым увеличивает ее сопротивление по острию. В конечном итоге большую часть нагрузки начинают воспринимать внутренние сваи. Такой механизм характерен для упругопластической стадии работы свайного основания.

Данные рассуждения иллюстрируются результатами выполненного расчета (рис. 6). При осадке 14,2 мм, соответствующей $0,5N$, наибольшую нагрузку воспринимает угловая свая ($N_x = 333$ кН против $N_x = 252$ кН у центральной), а при осадке 220 мм, соответствующей $2N$, – центральная (1007 кН против 825 кН).

Можно предположить, что эффект краевой сваи характерен для всех свайных фундаментов и в наибольшей степени для плитно-свайных, когда нагрузка на сваи достигает их несущей способности по грунту. На проявление этого эффекта в той или иной степени будут оказывать влияние грунтовые условия, конструкция свай и способ их изготовления (забивные, буронабивные и т. д.), расстояние

между сваями, их длина, уровень нагрузки, передаваемой на сваи.

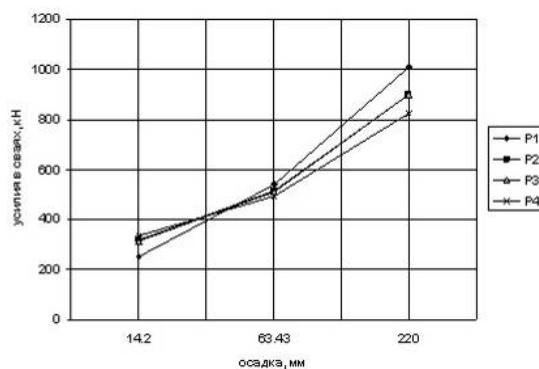


Рис. 6. Зависимость усилий, возникающих в сваях, от их осадки

Практическое применение. Сложная работа свай и ростверка была учтена при их проектировании. Так, расчет требуемого армирования плитного ростверка выполнялся для двух альтернативных вариантов соотношения податливостей краевых и внутренних свай (рис. 7). Проектное армирование началось по максимальным площадям арматуры, выявленным в каждой зоне и направлении (по X и Y) верхнего и нижнего поясов ростверка по результатам обоих вариантов. Требуемое верхнее продольное армирование больше для варианта на рис. 7,а, а нижнее – для варианта на рис. 7,б. Максимальное отличие по требуемым площадям для наиболее напряженной

арматуры (нижний пояс, направление X) достигало 15% (ср. изополя рис. 7, а и б).

ВЫВОДЫ

1. При расчете свайных и плитно-свайных фундаментов следует учитывать эффект краевой сваи.

2. В процессе нагружения плитного ростверка первоначально (в упругой стадии работы грунтового массива) большую нагрузку воспринимают краевые сваи. По мере увеличения нагрузки и нарастания упругопластиче-

ских деформаций в грунте усилия перераспределяются и наиболее загруженными становятся внутренние сваи.

3. Нижняя граница зоны грунта, имеющей одинаковую осадку со сваями, перемещается с ростом нагрузки снизу вверх. В рассмотренном примере при $0,5N$ данная зона составляет $0,7L$ (L – длина свай); при $N - 0,5L$; при $2N - 0,2L$.

4. Большая часть передаваемой на свайный ростверк нагрузки воспринимается сваями, хотя с ростом нагрузки эта часть несколько уменьшается. На рассмотренный плитный

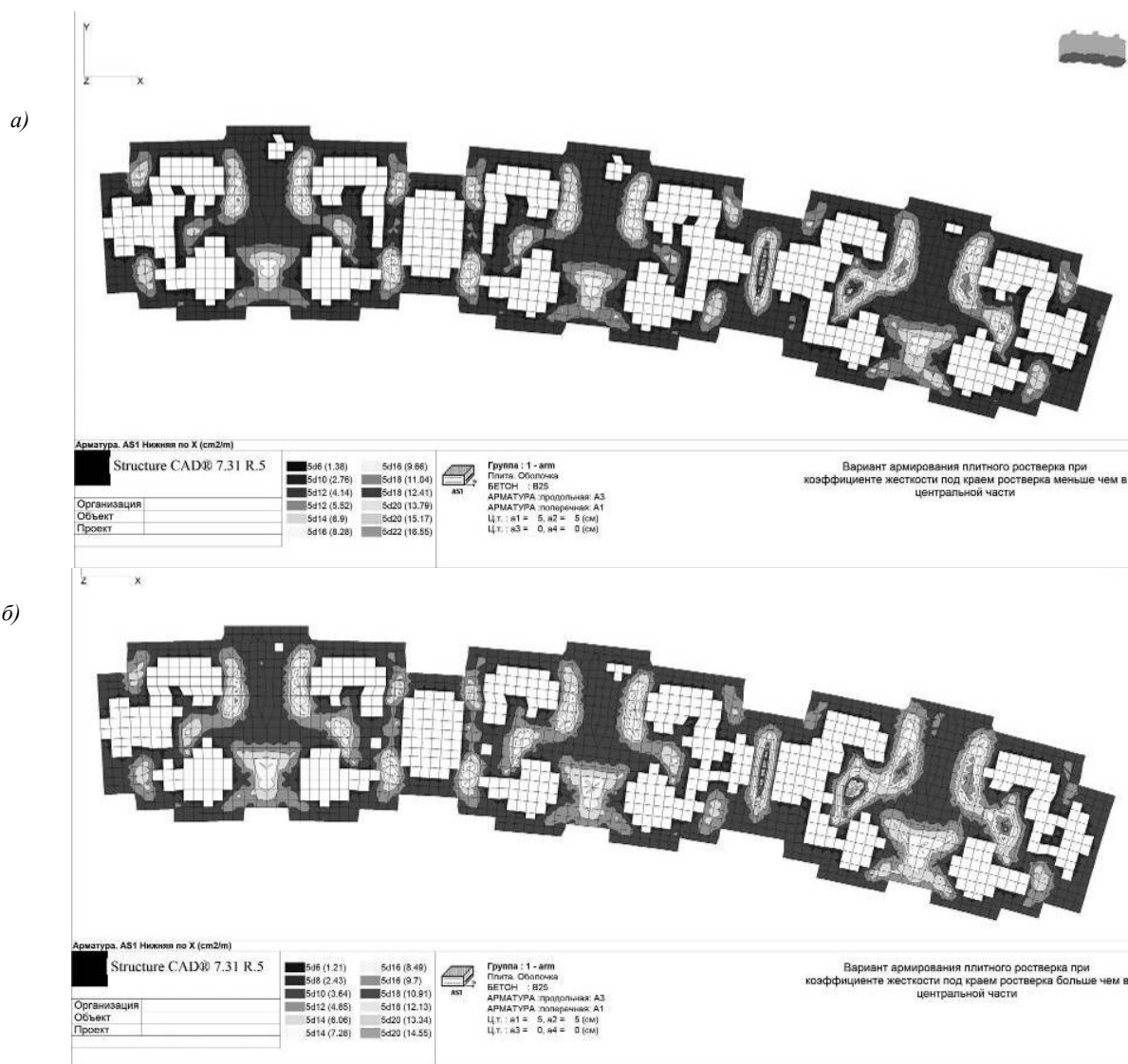


Рис. 7. Нижнее продольное армирование ростверка в направлении X при коэффициенте жесткости краевых свай большем, чем у центральных (а), при коэффициенте жесткости больше у центральных свай (б)

ростверк при $0,5N$ приходится 2%; при N – 7%; при $2N$ – 17%.

5. При армировании ростверка следует учитывать трансформацию его напряженно-деформированного состояния, обусловленную качественным изменением податливости свай, расположенных во внутренних и краевых рядах свайной группы. При расчете требуемого армирования плитного ростверка рекомендуется учитывать получаемые упруго-пластическим расчетом паспорта внутренних и краевых свай, определяя неоднородность их податливости в диапазоне $0,5...2$ от нормативной расчетной нагрузки на одиночную сваю N .

Список литературы

1. Бартоломей А. А., Омельчак И. М., Юшков Б. С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994.
2. Broms B. B. Stability of flexible structures (piles and pile groups)// Proc. 6th ECSMFE. Vol.2.1. General report. – Viena, 1976.
3. Безволев С. Г. Податливость свай и грунта в плитно-свайном фундаменте// тр. междунар. конф. по геотехнике. – СПб., 2005. Т.2. С. 57–62.
4. Noda T., Nashiro M., Asaoka A. Piled raft foundation behaviour on a soft soil system// Foundations superficielles/ Eds J.P.Magnan. Paris: ENPC/ LCPC, 2003. P. 381–385.
5. Безволев С. Г. Расчетный анализ сопротивления свай и грунта вдавлению плитного ростверка // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: тр. междунар. науч.-техн. конф. – Уфа, 2006. Т.1.– С. 35–42.
6. Banerjee P.K., Butterfield R. Boundary element methods in geomechanics // Finite elements in geomechanics/ Eds G.Gudehus. Ch.16.– London: Wiley, 1977.

ОТ РЕДАКЦИИ

В статье затронут чрезвычайно актуальный вопрос распределения усилий в сваях жесткого свайного ростверка. Этот вопрос имеет значение как для оценки работы сваи по грунту, так и по материалу, а также для оценки работы ростверка и других надземных конструкций здания. Известен факт неравномерного распределения усилий в группе свай под жестким ростверком в начальной стадии нагружения. Причины такого поведения (вовлечение грунта в межсвайном пространстве в работу) также хорошо известны. В статье проанализированы дальнейшие стадии нагружения, связанные с нелинейной работой грунта. По мере достижения предельной нагрузки на сваю происходит перераспределение нагрузок, что и показано в статье на основе численного эксперимента.

Следует, однако, отметить, что эффект перераспределения нагрузок на сваю будет принципиальным образом зависеть от особенностей нелинейной работы сваи в грунте с учетом влияния соседних свай. Поэтому весьма интересно было бы также проанализировать работу отдельной сваи в рамках принятой расчетной модели и сравнить ее с результатами статических испытаний. Это тем более важно, что примененная модель Кулона-Мора может давать завышенные значения сопротивления по боковой поверхности (по этой модели оно линейно возрастает с глубиной, что не вполне соответствует экспериментальным данным и практике расчетов несущей способности свай). В результате данная модель может не вполне корректно описывать работу сваи при нагрузках, превышающих расчетную нагрузку. При этом следует учитывать длительность нагружения свайной группы. Применение длительных модулей деформации грунта применимо при медленном загрузении свай. При относительно быстром нагружении (при статических испытаниях или даже в процессе строительства здания) распределение усилий может сильно отличаться от расчетов с применением длительных модулей деформации.

Большой интерес в дальнейшем представляет объединение расчетных и экспериментальных исследований этого вопроса для оценки не только качественного, но и количественного эффекта перераспределения усилий в сваях.