УДК 624.15

Я.А. Пронозин, М.А. Степанов

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет,
Тюмень, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫМ ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

В статье представлены экспериментальные исследования взаимодействия крупномасштабной модели ленточных свайных фундаментов, объединенных плитой переменной жесткости, с предварительно напряженным глинистым грунтовым основанием в полевых условиях. Рассмотрены результаты влияния предварительного напряжения грунта за счет опрессовки пролетного пространства фундамента цементным раствором, а также влияния роста внешней нагрузки на изменение напряженно-деформированного состояния грунтового основания.

Ключевые слова: ленточный фундамент, свая, крупномасштабная модель, предварительное напряжение, грунтовое основание, осадка, деформация, экспериментальные исследования.

Ya.A. Pronozin, M.A. Stepanov

Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering,
Tyumen, Russian Federation

EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF APPLICATION STRIP PILE FOUNDATION WITH PRESTRESSED GROUND BASEMENT

The article discusses the experimental research of interaction between strip pile foundations combined by variable rigidity plate with pre-stressed ground basement in field condition. The article presents the results of soil pre-stress influence, which create by mortar injection under the plate, and the results of interaction between external load and ground basement strain-stress state.

Keywords: strip foundation, pile, large-scale model, pre-stress, basement, settlement, strain, experimental research.

В условиях слабых водонасыщенных грунтов юга Западной Сибири (рис.1 [1]) при строительстве зданий 16–25 этажей возникает вопрос выбора адекватного типа фундаментов.

При геологических разрезах, соответствующих схемам на рис. 1, а, б, в, д, использование плитных фундаментов невозможно по причине сверхнормативных расчетных осадок, свайные фундаменты в виде забив-

ных свай длиной до 12 м неприменимы по причине малой несущей способности, а использование буровых технологий связано с большими затратами. В данных условиях авторами предлагается применение ленточных свайных фундаментов с предварительным напряжением грунтового основания под всей площадью застройки объекта (рис. 2) [2].

Рис. 1. Схемы типичных геологических разрезов Тюменской области: а, б, в, г, д, е – схемы геологических разрезов; 1 – растительный слой; 2 – слабый грунт; 3 – плотный грунт; 4 – заторфованный грунт или торф

Рис. 2. Фрагмент ленточного свайного фундамента с предварительным напряжением грунтового основания: 1 – пологая армированная оболочка; 2 – криволинейное искусственное основание; 3 – ленточный ростверк; 4 – свая; 5 – несущие стены; 6 – пленка; 7 – армирующая сетка оболочки; 8 – иньектор; 9 – естественное основание

Данный вид фундаментов существенно отличается от известных комбинированных фундаментов, которые в настоящее время широко применяются во всем мире и исследованию которых посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых [3, 4, 5]. Основные отличия предлагаемых фундаментов от комбинированных свайно-плитных фундаментов (КСПФ) состоят в том, что, во-первых, сваи расположены не под всей площадью здания с определенным шагом в двух направлениях, а четко под силовыми линиями нагружения (несущими

стенами, колоннами). Во-вторых, принципиальное отличие от КСПФ заключается в предварительном напряжении грунтового основания в пролетной части между ленточными свайными фундаментами путем опрессовки раствором щебеночной криволинейной подготовки (2, рис. 2), находящейся между грунтовым основанием (9, рис. 2) и полой оболочкой (1, рис. 2) на определенном этапе возведения здания. При этом достигается двойной эффект: уплотняется грунтовое основание, уменьшается его сжимаемость в активном слое, и обжимается боковым давлением верхняя часть свай, что приводит к увеличению их несущей способности.

Рис. 3. Конструкция ЛСФ на экспериментальной площадке, ИГУ

Для изучения взаимодействия ленточных свайных фундаментов (ЛСФ) с глинистым грунтовым основанием были проведены комплексные научные исследования на крупномасштабной модели в полевых условиях. Фундамент представлял собой однорядные ленточные свайные фундаменты, сваи были выполнены с уширением для обеспечения анкерки при прокачивании. Между продольными ростверками по искусственному основанию устраивалась цилиндрическая бетонная оболочка с однослойным армированием (рис. 3).

Устройству модели ЛСФ предшествовало оснащение грунтового основания тарированными односторонними мессдозами мембранного типа для регистрации вертикальных напряжений и винтовыми марками для измерения деформаций в массиве грунта активной зоны фундамента. Регистрация вертикальных перемещений фундамента и грунтовых марок осуществлялась прогибомерами 6ПАО. Заполнение искусственного основания цементным раствором под давлением проводилось через перфорированные инъекторы.

В геологическом строении изучаемого разреза площадки принимали участие отложения верхнечетвертичного и современного возраста. Под слоем насыпных грунтов мощностью 0,75 м на глубину 10 м залегают опесчаненные суглинки от текучепластичной до полутвердой консистенции различного генезиса и УГВ на глубине 2,6 м от поверхности земли (см. рис. 3). Нагнетание цементного раствора производилось в два этапа под ненагруженный фундамент с возрастающим до 50 кПа давлением в течение 8 часов. При прокачивании под давлением оболочка натягивалась, ребра поднимались, сваи воспринимали, как анкер, выдергивающие усилия.

Статическое нагружение опытной модели ЛСФ велось фундаментными блоками ФБС 24.6.6. Блоки укладывались на продольные ростверки. Ступени нагружения равнялись 80,8 кН на первой ступени и 141,4 кН на последующих ступенях, среднее давление составило $p_{cp} = 0,015$ МПа и $p_{cp} = 0,026$ МПа соответственно. Каждая ступень нагрузки выдерживалась до условной стабилизации, при которой скорость вертикального перемещения элементов фундамента и массива грунта основания не превышала 0,1 мм за последние два часа наблюдений¹.

В непосредственной близости от ЛСФ были испытаны плоская жесткая плита, с аналогичными размерами в плане и четыре сваи, аналогичные сваям исследуемого фундамента. При прокачивании подоболичного пространства цементным раствором (рис. 4, а) происходит уплотнение и предварительное напряжение грунтового основания в пролетной части фундамента, а также боковым давлением обжимается верхняя часть свай. Максимальные вертикальные перемещения грунта (на уровне подошвы пролетной части фундамента) составили 2,4 мм, полное затухание вертикальных перемещений соответствует глубине 0,7 B , где B – ширина фун-

¹ ГОСТ 20276-99. Грунты. Методы полевого определения характеристик деформируемости. – М.: Минстрой, 1996.

дамента. При опрессовке происходит подъем оболочки, ее изгиб и натяжение. Сваи работают на выдергивание, за счет чего в области уширения свайной пяты также происходит обжатие грунта основания.

Рис. 4. Изолинии вертикальных перемещений грунтов основания:

а – после опрессовки основания ($p_{ср}=50$ кПа); *б* – $p_{ср}=41,15$ кПа;

в – $p_{ср}=172,07$ кПа; *г* – $p_{ср}=276,81$ кПа

После твердения нагнетаемого раствора оболочка преобразуется в плиту переменной жесткости, которая имеет выгодное очертание для восприятия изгибающего момента, так как однослойное армирование расположено по линии главных растягивающих напряжений, что позволяет ей воспринимать как изгибающие моменты, так и поперечные силы от реактивного отпора грунта после приложения на ЛСФ внешних нагрузок.

При приложении внешней нагрузки на фундамент, близкой по значению давлению раствора при опрессовке (рис. 4, б), вертикальные перемещения грунта весьма незначительны, не более 0,5 мм. Осадка фундамента на данной ступени происходит за счет проявления упругих свойств грунта и частично за счет уплотнения, не реализованного по причине короткого периода опрессовки. Таким образом, практическое отсутствие осадок ЛСФ при внешнем давлении, не превышающем давление опрессовки, позволяет говорить о возможности управления осадкой ЛСФ в заданных значениях при приложении полной нагрузки от здания или сооружения.

Максимальные вертикальные перемещения грунта на последней ступени нагружения, равной 1494,8 кН, что соответствовало $p_{\text{ср}} = 276,81$ кПа, составили порядка 70 мм (рис. 4, з). Важно отметить примерное равенство вертикальных перемещений грунта от подошвы фундамента до уширения свай (с постепенным их затуханием), что обусловлено предварительным напряжением грунтового основания и, как следствие, снижением сжимаемости грунта в пролетной части и активным вовлечением его в работу (см. рис. 4, в, з). Грунт под пролетной частью работает, как единый массив повышенной жесткости (рис. 5, б), что позволяет увеличить несущую способность фундамента и уменьшить его осадки. Вертикальные перемещения грунта ЛСФ под подошвой фундамента при $p_{\text{ср}} = 224,4$ кПа, составили 34 мм, что в 3,5 раза меньше перемещений грунта под плоской фундаментной плитой (рис. 5, б). Полное затухание деформаций для ЛСФ зафиксировано на глубине 1,7 В.

Рис. 5. Эпюры вертикальных перемещений грунта ЛСФ с предварительным напряжением грунтового основания и фундаментной плиты:

а – $p_{cp} = 172,07$ кПа; б – $p_{cp} = 224,4$ кПа

Рис. 6. Эпюры относительных деформаций грунта под центром ЛСФ с предварительным напряжением грунтового основания и фундаментной плиты:

а – $p_{cp} = 172,07$ кПа; б – $p_{cp} = 224,4$ кПа

В результате проведения экспериментов выявлено, что осадка исследуемого ЛСФ на всех стадиях нагружения в несколько раз меньше осадки плоской плиты. При осадке 60 мм нагрузка, воспринимаемая основанием ЛСФ, на 45 % выше нагрузки, воспринимаемой основанием плиты (рис. 7). Экспериментальная несущая способность одиночных свай составила 50–60 кН. Принимая экспериментальную нагрузку, соответствующую срыву сваи за ее несущую способность, следует считать, что несущая способность шести свай составляет 330 кН. Таким образом, сумма нагрузки, передаваемой на грунтовое основание плиты, и несущей способности шести свай на осадке 60 мм составляет 1330 кН, что на 8–10 % ниже нагрузки, воспринимаемой основанием ЛСФ с предварительным напряжением грунтового основания.

Рис. 7. График нагрузка–осадка ЛСФ с предварительным напряжением грунтового основания и фундаментной плиты

Таким образом, в процессе заполнения искусственного основания цементным раствором под давлением происходит вовлечение в работу оболочек и естественного грунтового основания под пролетной частью фундамента. При этом оболочка натягивается, грунтовое основание уплотняется и напрягается, также обжимается боковым давлением верхняя часть свай, что приводит к увеличению их несущей способности. Подъем оболочки при создании давления в области искусственного основания ограничен закреплением ее в ростверке, который, в свою очередь, закреплен от перемещений в вертикальной плоскости анке-

рующим действием свай. Распор воспринимается боковой изгибной жесткостью ростверка, после снятия давления происходит уменьшение подъема ростверка и оболочки с остаточными значениями. До приложения нагрузки от здания или сооружения оболочка, трансформирующаяся после твердения в плиту переменной жесткости, и грунтовое основание включаются в совместную работу, что приводит к улучшению строительных свойств грунтов. После приложения нагрузки от надземной части здания или сооружения происходят равномерные осадки элементов ленточного свайного фундамента, которые весьма незначительны до величины среднего давления, соответствующего предварительному обжатию грунтового основания.

Библиографический список

1. Тетиор, А.Н. Прогрессивные конструкции фундаментов для условий Урала и Тюменской области. – Свердловск: Средне-Уральское изд-во, 1971. – 91с.
2. Тер-Мартirosян З.Г., Пронозин Я.А., Степанов М.А. Обоснование использования свайно-оболочечных фундаментов с предварительно напряженным грунтовым основанием // Основания, фундаменты, механика грунтов. Механика грунтов. – 2012. – № 4. – С. 2–6.
3. Готман Н.З. Расчет свайно-плитных фундаментов из забивных свай с учетом образования карстового провала: дис. ... докт. техн. наук. – М., 2004. – 348 с.
4. Hanisch J., Katzenbach R., Konig G. Kombinierte Pfahl-Plattengründung // In Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis «Pfähle» der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT). – Ernst & Sohn, 2002.
5. Poulos H.G. Piled-raft foundations – design and applications // Geotechnique. – 2001. – Vol. 50. – No 2. – P. 95–113.

References

1. Tetior A.N. Progressivnye konstruktsii fundamentov dlya uslovij Urala i Tyumenskoj oblasti [Progressive construction of foundations for the conditions of the Urals and the Tyumen region]. Sverdlovsk: Sredne-Uralskoe izdatelstvo, 1971. 91s.
2. Ter-Martirosyan Z.G., Pronozin Ya.A., Stepanov M.A. Obosnovanie ispolzovaniya svajno-obolocheknykh fundamentov s predvaritelno napryazhennym gruntovym osnovaniem [Rationale for the use of pile-shell

foundations with prestressed ground base]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 2012, no. 4. pp. 2-6.

3. Gotman N.Z. Raschet svayno-plitnyih fundamentov iz zabivnyih svay s uchetom obrazovaniya karstovogo provala [Calculation of pile-slab foundation of driven piles considering karst formation failure]. *Thesis of doctor degree dissertation*, Moscow, 2004. 348 s.

4. Hanisch J., Katzenbach R., König G. Kombinierte Pfahl-Plattengründung. In *Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis «Pfähle» der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)*. Ernst & Sohn, 2002.

5. Poulos H.G. Piled-raft foundations – design and applications. *Geotechnique*, 2001. vol. 50, no. 2. pp. 95-113.

Об авторах

Пронозин Яков Александрович (Тюмень, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительное производство, основания и фундаменты» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: pronozin@tgasu.ru

Степанов Максим Андреевич (Тюмень, Россия) – ассистент кафедры «Строительное производство, основания и фундаменты» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: maxim_stepanov@inbox.ru

About the authors

Pronozin Yakov Aleksandrovich (Tyumen, Russian Federation) – Ph. D in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Construction technology, groundwork and foundations, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering (e-mail: pronozin@tgasu.ru).

Stepanov Maxim Andreevich (Tyumen, Russian Federation) – Assistant Lecturer, Department of Construction technology, groundwork and foundations, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: maxim_stepanov@inbox.ru

Получено 01.04.2014