УДК 624.1

В.Ф. Бай, С.А. Еренчинов

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет,
Тюмень, Россия

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ ОСНОВАНИЯ РАМНО-КОЗЛОВЫХ ФУНДАМЕНТОВ

В работе рассматривается исследование в лабораторных и полевых условиях рамно-козловых фундаментов в слабых глинистых грунтах. Приведены результаты измерений напряжений по контактными поверхностям в зависимости от величины нагрузки, так же дана картина деформации основания, как маломасштабной модели, так и модели в натуральную величину в зависимости от угла наклона клиновидных свай. На основании проведенных экспериментов предлагается методика расчета осадок заимствованная из метода конечных элементов.

Ключевые слова: свайный фундамент, клиновидная свая, козловые сваи, расчет осадки, метод конечных элементов, слабые глинистые грунты, статические испытания.

V.F. Bay, S.A. Erenchinov

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

NUMERICAL ANALYSIS OF DEFORMATION OF THE FOUNDATION FRAME-GANTRY FOUNDATIONS

The paper discusses the research carried out in laboratory and field conditions for trestle-frame foundations constructed in weak clay soils. Given are the results of stress measurements on the contact surfaces depending on the load and foundation footing deformations presented as a little scale and life-size models depending on inclination of wedge-shaped piles. The paper gives finite element method-based settlement computation technique on the grounds of the experiments done.

Keywords: pile foundation, wedge-shaped pile, trestle piles, settlement computation, finite element method, weak clay soils, static tests

В сложных инженерно-геологических условиях Западно-Сибирского региона, где преимущественно слабые грунты, фундаменты мелко-го заложения обладают большими осадками. Традиционные призматические забивные сваи средней длины не обладают, как правило, достаточной несущей способностью, а увеличение размеров свай приводит к большим затратам. В таких грунтовых условиях предлагается использовать рамно-козловые фундаменты (рис. 1).

Очевидно, что прогноз взаимодействия таких фундаментов с грунтовым основанием не может быть адекватно представлен существующими методами расчета традиционных фундаментов. Для разработки метода расчета рамно-козловых фундаментов выполнены экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях, направленные на выявление закономерности взаимодействия таких фундаментов в условиях статического нагружения вертикальными нагрузками.

Рис. 1 Общий вид фундамента

В лабораторном разделе проводилось исследование работы рамно-козловых фундаментов на маломасштабных моделях. Конструкции моделей фундаментов рассматривались в трех конфигурациях (рис. 2).

Рис. 2. Конструкции моделей фундаментов: *а* – рама с вертикальными сваями; *б* – рама с наклоном свай 15 град.; *в* – рама с наклоном свай 30 град.

Расстояние между сваями в составе рамы во всех трех вариантах составляет $4d$.

При внедрении свай вертикально и под наклоном 15 град. выявлено, что уплотненные зоны вокруг свай замыкаются и образуют единый массив повышенной плотности, а при внедрении свай в грунт под углом 30 град. уплотненные зоны формируются только вокруг свай (рис. 3).

Рис. 3 Деформации основания при внедрении свай под различным углом

По результатам испытаний статической нагрузкой рассмотренных моделей фундаментов установлено, что наибольшей несущей способностью обладает рама с наклоном свай под углом 30 град. Также она обладает наибольшим упругим подъемом при разгрузке. Это показывает, что данная конструкция фундамента обладает наибольшей распределительной способностью в массиве грунта.

Рассматривая грунтовое основание рам с вертикальными и наклонными сваями под углом 15 град. можно отметить, что перемещение грунта в межсвайном пространстве происходит в большей степени вместе со сваями. Это свидетельствует о том, что осадка фундамента происходит в основном за счет деформации подстилающего слоя ниже концов свай.

При исследовании грунтового основания рамно-козлового фундамента с наклоном свай под углом 30 град. в межсвайном пространстве в процессе нагружения дополнительно происходит увеличение и смыкание зоны уплотнения. Существенное изменение плотности грунта во время осадки фундамента происходит непосредственно в верхней части между сваями рамы. Таким образом, видно, что осадка фундамента происходит в основном за счет деформаций грунта, заключенного между сваями.

По результатам полевых испытаний полномасштабных ленточных фундаментов была получена реальная «картина» деформирования грунтового основания рамно-козлового фундамента с ярко выраженной неравномерностью перемещения слоев грунта (рис. 4). Наибольшие деформации происходят вблизи свай на расстоянии 0,2–0,5 м от внутренних граней свай и 0,1–0,15 м от наружной грани свай.

Рис. 4. Изолинии вертикальных перемещений основания рамно-козлового фундамента (мм)

Анализируя фактическую работу грунтового основания, отметим, что объем грунта, заключенный между сваями, имеет вертикальные перемещения от 28,5 до 2,5 мм. При удалении от наиболее уплотненной зоны отмечается резкое снижение перемещений грунта. На расстоянии 0,5–0,6 м в глубину от концов свай перемещения имеют величину до 1,0 мм, что составляет всего 3,5 % от осадки фундамента.

Таким образом, выявлено, что основу осадки фундамента составляют деформации массива грунта, заключенного между сваями, которые составляют 96 % от всей осадки фундамента.

Для выявления характера распределения реактивного отпора грунта по поверхностям свай были измерены контактные напряжения в исследуемой зоне. Рассматривая эпюру контактных напряжений, отметим, что в процессе нагружения контактные давления распределяются равномерно, но конечная эпюра контактных напряжений по внутренней грани имеет седлообразную форму (рис. 5) с максимальными значениями у острого конца сваи (190 кПа) и в месте закрепления свай в ростверке (320 кПа). По наружной грани свай реактивный отпор грунта (330 кПа) обнаружен только в нижней половине свай.

В конечном счете по результатам эксперимента получена ярко выраженная неравномерность эпюры контактных напряжений по наружным и внутренним граням клиновидных свай, что было учтено при разработке методики расчета осадки рамно-козловых фундаментов.

Рис. 5. Эпюра контактных напряжений на поверхности клиновидных свай по этапам нагружения (кПа)

Предлагается методика расчета осадки таких фундаментов, основанная на методе конечных элементов для определения перемещений точек треугольного массива копирующего геометрическое очертание межсвайного грунтового основания, деформации которого составляют основу осадок фундамента. Основная задача при разработке расчета заключается в выборе аппроксимирующего полинома для конечного элемента (КЭ).

Рис. 6. Схемы конечного элемента: *a* – для линейного полинома; *б* – для квадратичного полинома, *в* – для кубического полинома

Предлагается рассмотреть задачу плоской деформации для треугольного элемента. В этом случае задача исследования связана с построением описания деформированного состояния массива грунта на

основе использования аппроксимирующих функций все более высокого порядка, начиная с линейной функции (рис. 6, а), далее квадратичной (рис. 6, б) и кубической функций (рис. 6, в).

В линейном приближении общий вид расчетной схемы представлен на рис. 7, а. В этом случае осадка определяется по следующей формуле:

$$v_3 = \frac{Ph^2(1-2\nu)(1+\nu)}{E(1-\nu)}.$$

В квадратичном приближении общий вид расчетной схемы представлен на рис. 7, б. В этом случае определение осадки выполняется по следующей формуле:

$$v_5 = \frac{3h(1+\nu)}{8a(-2h^2 + a^2(\nu-1))E} \{a^2(2\nu-1)(P_{4y} + P_{5y} + P_{6y}) + 2h^2(2\nu-1)(P_{4y} + P_{5y} + P_{6y}) + 4ah\nu(P_{4x} + P_{6x})\},$$

где P_x , P_y – горизонтальная и вертикальная составляющие действующих сил в соответствующих точках; h – высота рассматриваемого треугольного массива (м); E – средневзвешенный модуль деформации (МПа); ν – коэффициент Пуассона; a – половина основания треугольного массива (м).

Рис. 7. Расчетные схемы массива грунта: а – для линейного полинома; б – для квадратичного полинома; в – для кубического полинома где Q_i – эквивалентные действующие силы на основание, A_i – рассматриваемые точки

Для случая кубической аппроксимации (рис. 7, в) формулы для расчета осадки, полученные для различных способов закрепления основания треугольного массива (четыре и две точки опоры), достаточно объемны, и поэтому в данной статье не приведены.

Наиболее подходящим по параметрам нагружения является вариант кубической аппроксимации (см. рис. 7, в), в этом случае нагрузки прикладываются по четырем точкам с обеих сторон треугольного элемента, что дает возможность учесть неравномерность распределения контактных напряжения по длине свай.

Для распределения полученной величины прикладываемой нагрузки в заданных точках необходимо определить долю силы, приходящуюся в окрестности рассматриваемой точки. Вследствие того что задача является плоской, необходимую величину доли можно определить из соотношения площадей эпюры контактных напряжений в окрестностях каждой точки.

На рис. 8 приведено распределение площадей эпюры контактных напряжений по отношению к минимальной площади. Эти значения долей дают картину распределения приложенных сил в рассматриваемых точках расчетной схемы.

Рис. 8. Схема для определения сил действующих на основание

При задании величин долей от нагрузки необходимо учесть, что в верхней точке значение удваивается вследствие суммирования эпюры контактного давления от пары свай в фундаменте.

Исходными данными для расчета являлись: модуль деформации, принимаемый как средневзвешенная величина модуля деформации слоев вовлеченных в работу, $E = 14$ МПа; коэффициент Пуассона для глинистых грунтов $\nu = 0,3$; угол раствора свай составлял 60 град. Действующая нагрузка принималась для последней ступени, и ее величина составила 280 кН.

Предварительные расчеты были выполнены по трем расчетным схемам. В случае линейной аппроксимации осадка составила 148 мм, при квадратичной – 37,6 мм. По результатам расчета для варианта кубической аппроксимации с опорой на две точки A_2 и A_3 осадка составила 31,1 мм, тогда как фактическая осадка экспериментальных фундаментов составила в среднем 28,5 мм. Таким образом, расчетная модель при использовании кубического полинома показывает хорошую сходимость с экспериментом – около 91 %.

На основании вышеизложенного для детального рассмотрения предлагаются варианты моделей с квадратичной аппроксимацией и кубической аппроксимацией с опорой на две точки.

Рис. 9. График зависимости осадки от нагрузки:
 1 – результат экспериментальной модели фундамента с углом наклона свай 30° ; 2 – по расчету осадки фундамента при кубической аппроксимации; 3 – по расчету осадки фундамента при квадратичной аппроксимации; 4 – по расчету осадки фундамента с углом наклона свай 30° в Plaxis 3D

Для полной оценки и сопоставления данных по результатам работы было выполнено сравнение значений осадок рамно-козлового фундамента, полученных экспериментально по предлагаемой методике, а также в программе Plaxis с использованием модели Мора-Кулона (рис. 9). При построении кривой «нагрузка-осадка» значение осадки определялось индивидуально на каждой ступени, учитывая характер и величину распределения контактного давления по внутренней поверхности свай. Силы прикладывались согласно предложенной методике рассмотренной ранее.

Полученные результаты показали, что характер кривых 1, 2, 4 идентичен (см. рис. 9). Кривая 3 имеет меньшую кривизну и не отражает работу фундамента под нагрузкой. Этот факт объясняется взаимодействием грунтового основания и распределенной нагрузки по контактной поверхности. В случае квадратичной аппроксимации действующая нагрузка распределяется по трем точкам с каждой стороны соответственно. Учет неравномерности распределения контактного давления в этом случае является затруднительным, и эпюра контактного давления приближается к равномерно-распределенной, что не соответствует реальной картине, полученной при полевых экспериментах.

При рассмотрении кривых 1, 2 и 4 отметим, что расчет осадки по программному комплексу Plaxis 3D дает сопоставимую картину с экспериментом только в качественном отношении. В количественном же сопоставлении результатов отмечается завышенное более чем в два раза значение по отношению к экспериментальным значениям.

Кривая осадки, построенная по предложенной методике, дает достаточно близкие к эксперименту результаты, сходимость 74–91 % [1, 5].

Библиографический список

1. Бай В.Ф., Еренчинов С.А., Баев М.А. Исследование работы фундамента в виде клиновидных свайных рам // Материалы IV конф. ТюмГАСУ. – Тюмень 2004. – С. 26–28.
2. Бай В.Ф., Еренчинов С.А., Баев М.А. Определение оптимальных геометрических параметров рамно-козловых свайных фундаментов // Материалы V конф. ТюмГАСУ. – Тюмень 2005. – С. 51–54.
3. Бай В.Ф., Еренчинов С.А., Баев М.А. Экспериментальные исследования рамно-козловых свай // Материалы VI конф. ТюмГАСУ. – Тюмень 2006. – С. 42–46.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М., 1975. – 576 с.
5. Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

References

1. Bay V.F., Erenchinov S.A., Baev M.A. Issledovanie raboty fundamenta v vide klinovidnykh svajnykh ram [Research of the foundation performance in the form of wedgeshaped pile frames]. *Sbornik materialov IV konferentsii TyumGASU*, Tyumen, 2004. pp. 26-28.
2. Bay V.F., Erenchinov S.A., Baev M.A. Opređenje optimal'nykh geometricheskikh parametrov ramno-kozlovnykh svaynykh fundamentov [Determination of optimum geometrical parameters of the frame and goat pile bases]. *Sbornik materialov V konferentsii TyumGASU*, Tyumen, 2005. pp. 51-54.
3. Bay V.F., Erenchinov S.A., Baev M.A. Eksperimental'nye issledovaniya ramno-kozlovnykh svaj [Pilot studies of frame and goat piles]. *Sbornik materialov VI konferentsii TyumGASU*, Tyumen, 2006. pp. 42-46.
4. S.P. Timoshenko, Dzh. Gudier. Teoriya uprugosti [Elasticity theory]. Moscow, 1975. 576 s.
5. Galager R. Metod konechnykh elementov. Osnovy [The method of final elements. Bases]. Moscow: Mir, 1984. 428 s.

Об авторах

Бай Владимир Федорович (Тюмень, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: Bay.vlad@yandex.ru

Еренчинов Сергей Александрович (Тюмень, Россия) – ассистент кафедры «Строительные конструкции» Тюменского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: erenchinov@yandex.ru

About the authors

Bai Vladimir Fedorovich (Tyumen, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head Department of Building construction, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: Bay.vlad@yandex.ru

Erenchinov Sergey Aleksandrovich (Tyumen, Russian Federation) – Assistant Department of Building construction, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering (e-mail: erenchinov@yandex.ru)

Получено 10.04.2014