

УДК 624.15

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПО НАЦИОНАЛЬНЫМ И ЕВРОПЕЙСКИМ НОРМАМ

*канд. техн. наук, доц. А.П. КРЕМНЁВ;
канд. техн. наук, доц. Н.Г. ЛОБАЧЁВА; Т.С. ВЕЛЮГА
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты сравнительного определения расчетной несущей способности забивных и буровых железобетонных свай по данным испытаний статической нагрузкой и определения границ условного фундамента по национальным и европейским нормам проектирования. Рассмотрены принципы построения эквивалентного плитного фундамента. Выявлены и обобщены сходства и различия методик расчета несущей способности забивных и буровых свай по европейским и национальным нормам. Определена разница полученных значений расчетной несущей способности свай в процентном отношении. Выявлены и обобщены сходства и различия при определении условного фундамента (национальные нормы) и эквивалентного плитного фундамента (европейские нормы). Приведены три метода проектирования свайных фундаментов по европейским нормам, представлены области их использования и ограничения применения этих методов.

Ключевые слова: свайные фундаменты, методы расчета, эквивалентный плитный фундамент.

В Республике Беларусь сегодня происходит процесс массового внедрения европейских материалов, технологий, оборудования. Для того чтобы иметь возможность пользоваться этими достижениями, необходима гармонизация Национальных нормативных документов с Еврокодами. Еврокоды – это нормативные документы в области строительства, согласованные на уровне Евросоюза и рекомендованные к применению странами-членами союза с учетом национальных особенностей. Национальные приложения к Еврокодам предусматривают дополнительные требования к отдельным параметрам строительства, которые могут быть выше, но не ниже общеевропейских. Эти требования каждая страна определяет самостоятельно.

Национальные нормы Республики Беларусь и Еврокод 7 имеют ряд похожих положений в проектировании по предельным состояниям. Однако несмотря на существующие принципы и расчеты, результаты проектирования остаются различными. Прямое использование европейских норм без учета национальных особенностей проектирования и расчета фундаментов в Республике Беларусь проблематично.

Еврокод 7 [3] содержит обширный список конструктивных соображений для расчета свайных фундаментов, некоторые из которых являются обязательными («должны быть приняты во внимание») и необязательными («следует уделить внимание»). Для свайных фундаментов Еврокод 7 предусматривает три метода к проектированию [3]:

- 1) эмпирические или аналитические расчеты;
- 2) испытание свай статической нагрузкой;
- 3) испытание свай динамической нагрузкой.

Таблица 1. – Методы проектирования по Еврокод 7

Методы	Использование	Ограничения
Испытания	Результаты статических испытаний под нагрузкой	Применение должно быть обосновано расчетом или другими способами
	Результаты динамических испытаний под нагрузкой	Применение должно быть обосновано с помощью статических испытаний под нагрузкой в аналогичных ситуациях
Расчетный	Эмпирические и аналитические расчетные методы	
Наблюдения	При проектировании аналогичного свайного фундамента в таких же грунтовых условиях	Должны быть подтверждены по результатам геологических изысканий и наземных испытаний

Как видно из таблицы 1, Еврокод 7 [3] уделяет серьезное внимание использованию испытаний статической нагрузкой либо в качестве основного метода проектирования, либо в обеспечении достоверности расчетов на основе динамических испытаний под нагрузкой или аналитических расчетов.

Каждый из этих методов содержит три варианта подходов для расчета предельных состояний. Каждому подходу соответствуют три группы определенных значений частных коэффициентов надежности (приводятся в EN 1990): группа частных коэффициентов A1 или A2 применяется для нагрузок; группа

частных коэффициентов R_1, R_2, R_3, R_4 – для сопротивления сваи сжатию (выдергиванию); группа частных коэффициентов M_1 или M_2 применяется для параметров грунта. Подходы различаются тем, что запасы вводятся преимущественно либо в нагрузки, либо в показатели сопротивления.

Еврокод 7 различает статические испытания свай под нагрузкой, которые составляют часть постоянных работ («рабочих свай»), и свай, установленных для целей тестирования («пробные сваи»). Пробные сваи должны быть установлены таким же образом, что и основные, в том же слое грунта, в качестве рабочих свай. Однако в этом нормативном документе нет конкретных указаний на количество свай, которые необходимо испытать для целей проектирования, и какой тип испытания следует использовать. Еврокод 7 указывает [3], что если производится только одно испытание сваи статической нагрузкой, свая должна быть расположена там, где находятся самые неблагоприятные грунтовые условия. В противном случае характеристическое сопротивление сжатию должно быть соответствующим образом скорректировано при помощи частных коэффициентов корреляции.

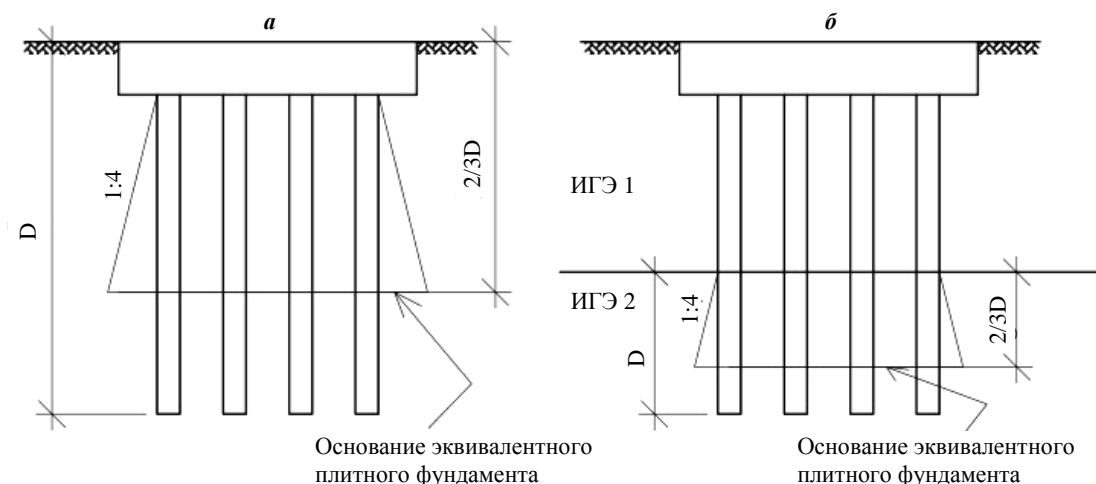
Традиционный расчет свайных фундаментов основан на статических испытаниях свай. Проверки состояний ULS и SLS должны также быть подтверждены испытанием свай статической вдавливающей нагрузкой. Еврокод 7 подчеркивает преимущества расчета свайных фундаментов по полевым испытаниям, но практически нет информации для проектирования свайных фундаментов расчетным путем. Каждая часть [3; 4] должна рассматриваться в сочетании с соответствующим национальным приложением, которое предусматривает величины частных коэффициентов и номер проектного подхода для удовлетворения условий той или иной страны.

В национальных нормах [1; 2] четко оговорены методики расчета по полевым испытаниям свай. Также большое внимание уделено проектированию свайных фундаментов при помощи расчетных формул. При проектировании свайных фундаментов по национальным нормам метод наблюдения отсутствует.

После определения несущей способности сваи по одному из методов, рассмотренных выше, встает вопрос о проектировании свайного фундамента. Расчет фундамента из заземленных в грунте свай и его основания по деформациям следует производить, как правило, в виде условного плитного фундамента в соответствии с требованиями [13]. Определение границ условного фундамента приводится в [1] и хорошо известно национальным геотехникам.

Согласно [3; 12], базовые методы расчета свайных фундаментов основываются на предположении о том, что группа свай ведет себя как фундаментный блок с определенной степенью гибкости, зависящей от жесткости соединения ростверка со сваями. Учитывая это обстоятельство, можно применить для определения несущей способности и осадки свайного фундамента общеизвестные принципы механики грунтов. В данном случае используется эквивалентный плитный фундамент. Расстановка свай в ростверке по европейским и национальным нормам практически идентична. Расстояние между центрами забивных свай должно быть не меньше трех диаметров свай.

Размеры эквивалентного свайного фундамента можно получить графическим способом (рис. 1).



а – сваи по всей длине обладают трением по боковой поверхности;
б – боковое трение сваи в ИГЭ-1 отсутствует

Рисунок 1. – Эквивалентный плитный фундамент

В данной работе рассмотрены нормы Республики Беларусь по проектированию ТКП 45-5.01-256-2012 «Сваи забивные», ТКП 45-5.01-254-2012 «Основания и фундаменты» и Еврокод 7 «Геотехническое про-

ектирование», приведен сравнительный анализ различных методов проектирования и расчета свайных фундаментов.

Анализ последних достижений и публикаций показал, что в [5–7] приводятся примеры проектирования свайных фундаментов, на которые воздействует осевая нагрузка: на основе испытания грунта и испытаний свай на нагружение. Авторы [8–12] объясняют и комментируют статьи Еврокода 7, содержащие новые подходы к проектированию, приводят примеры расчета свайных фундаментов по европейским нормам.

Несмотря на повышенный интерес известных ученых к избранной проблематике, «гармонизация» расчета свайных фундаментов по данным испытаний статической нагрузкой, а также определения границ условного фундамента по национальным и европейским нормам не теряет актуальности. Эти вопросы остаются не в полной мере изученными и требуют дальнейшего развития.

В национальных нормах Республики Беларусь и Еврокоде 7 существует ряд различий при определении границ условного фундамента и при определении несущей способности свай по результатам испытаний статической нагрузкой. На наш взгляд, прямое использование европейских норм без учета национальных особенностей проектирования и расчета фундаментов в Республики Беларусь невозможно. Исходя из этого, проведение сравнения результатов определения расчетной несущей способности забивных и буровых железобетонных свай по данным испытания статической нагрузкой и определения границ условного фундамента по национальным и европейским нормам проектирования стало целью представляемой работы.

Основная часть. Сравнительный анализ выполнен по результатам испытания свай в полевых условиях статической нагрузкой (этап 1); определение границ условного фундамента (2 этап) для грунтов реализовано по данным статического зондирования на реальных объектах Витебской области.

Этап 1.1. Расчет несущей способности забивных свай по данным статических испытаний

Национальные нормы

Фундамент свайный, забивные сваи $D = 0,3$ м, длиной 5 м. График зависимости осадки сваи от нагрузки, построенный по результатам её статического испытания, получившей наибольшие осадки от нагрузки по сравнению с пятью другими испытанными сваями, приведен на рисунке 2. Сваи нагружали до достижения предельной нагрузки 480 кН с учетом коэффициента запаса.

Для данного типа зданий предельное значение средней осадки фундамента $S_{u,mi}$ принимается согласно приложению в [2] равным 10 см. Осадка $S = \zeta S_{u,mi} = 0,2 \cdot 10 = 2,0$ см меньше осадки опытной сваи, поэтому за силу предельного сопротивления грунта основания F_u принимаем нагрузку на графике при осадке 2,0 см, т. е. $F_{u,n} = 290$ кН.

При расчете по национальным нормам [1; 2], если число свай, испытанных в одинаковых грунтовых условиях, составляет менее шести $F_{u,n} = F_{u,min}$. Следовательно, $F_d = 290$ кН.

Европейские нормы

Согласно пункту 7.6.1.3 [3] в качестве критерия разрушения принимается осадка сваи, составляющая 10% диаметра ее основания: $S = 0,1 \cdot 300$ мм = 30 мм = 3 см.

По принципу 8 [3] должна быть выполнена проверка следующего уравнения:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{323}{1,0}; \frac{323}{1,0} \right\} = 323 \text{ кН},$$

где 1,0, 1,0 – частные коэффициенты корреляции, представленные в таблице А.9 [3].

В данном случае $R_{m,mean} = R_{m,min} = 323$ кН. Средняя величина является главенствующей.

Определим проектное сопротивление свай [3]. При расчете DA1 выполняется проверка надежности с применением двух различных комбинаций частных коэффициентов. При DA1. С 1 для свайных фундаментов частные коэффициенты корреляции применяются к «нагрузкам», маленькие коэффициенты корреляции – к сопротивлению. Применяем группы А1, М1, R1. В комбинации DA1. С 2 частные коэффициенты корреляции применяются к сопротивлению и переменной нагрузке, в то время как постоянные нагрузки остаются без изменения. Применяем группы А2, М1, R4.

DA1. С 1:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{323}{1,0} = 323 \text{ кН}.$$

DA1. С 2:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{323}{1,3} = 248,46 \text{ кН}.$$

Суть расчета DA2 заключается в проверке надежности путем применения частных коэффициентов корреляции к нагрузкам или эффектам нагрузок и сопротивлению. Применяем группы A1, M1, R2.

DA2:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{323}{1,1} = 293,64 \text{ кН.}$$

Подход DA3 в данном случае не применяется.

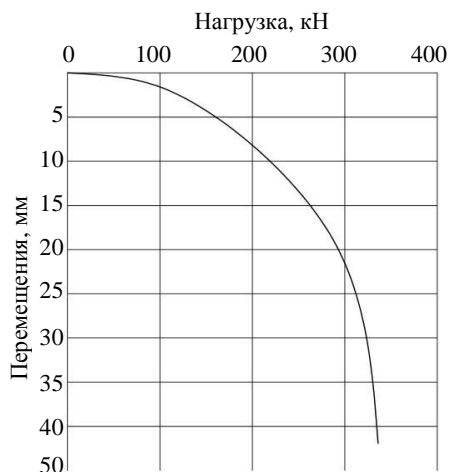


Рисунок 2. – Испытание забивной сваи статической нагрузкой

Этап 1.2. Расчет несущей способности буровых свай по данным статических испытаний

Фундамент свайный, буровые сваи $D = 0,4$ м, длиной 7 м. График зависимости осадки сваи от нагрузки, построенный по результатам статического испытания сваи, приведен на рисунке 3. Сваи нагружали до достижения предельной нагрузки 255 кН с учетом коэффициента запаса.

Для данного типа зданий предельное значение средней осадки фундамента $S_{u, \text{мт}}$, принимаемое согласно приложению [2], равно 10 см. Свая не выдержала испытания. Как видно из графика (рис. 3), за силу предельного сопротивления грунта основания F_u принимаем нагрузку 120 кН, т. е. $F_{u, n} = 120$ кН.

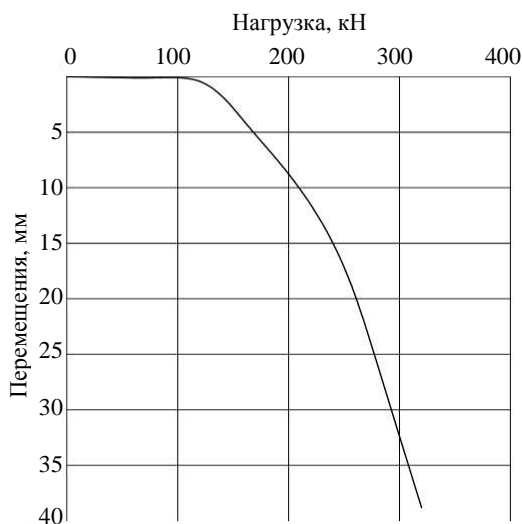


Рисунок 3. – Испытание буровой сваи статической нагрузкой

При расчете по национальным нормам [1; 2], если число свай, испытанных в одинаковых грунтовых условиях, составляет менее шести, $F_{u, n} = F_{u, \text{мин}}$.

Следовательно, $F_d = 120$ кН.

Европейские нормы

Согласно пункту 7.6.1.3 [3] в качестве критерия разрушения принимается осадка сваи, равная 10% диаметра ее основания. $S = 0,1 \cdot 400 \text{ мм} = 40 \text{ мм} = 4 \text{ см}$. Но в данном случае свая не выдержала испытаний.

По принципу 8 [3] должна быть выполнена проверка следующего уравнения:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{120}{1,4}; \frac{120}{1,4} \right\} = 85,7 \text{ кН.}$$

В данном случае $R_{m,mean} = R_{m,min} = 85,7 \text{ кН}$. Средняя величина является главенствующей.

Определим проектное сопротивление сваи [3].

DA1. C 1:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{85,7}{1,15} = 74,52 \text{ кН.}$$

DA1. C 2:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{85,7}{1,5} = 57,13 \text{ кН.}$$

DA2:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{85,7}{1,1} = 77,91 \text{ кН.}$$

Подход DA3 в данном случае не применяется.

Этап 2. Определение границ условного фундамента

Рассмотрим свайный фундамент из 4-х забивных свай С8-40.

Сопряжение сваи с ростверком жесткое. Глубина заделки сваи в ростверк 0,5 м. Глубина заложения ростверка 1,5 м. Грунт – песок средней средней прочности: $\gamma_{II} = 19,0 \text{ кН/м}^3$, $c_{II} = 3 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 35^\circ$. Грунт однородный на всю глубину свай.

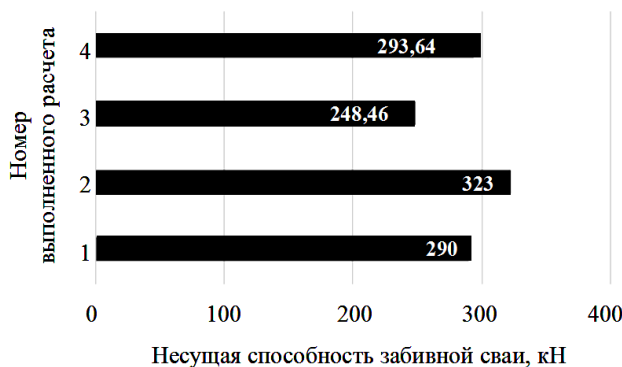
Национальные нормы

Согласно [1] $\varphi_{II,mi} = 35^\circ$. Размеры условного фундамента $B = L = 3,91 \text{ м}$. Высота условного фундамента $D_{усл} = 9,0 \text{ м}$.

Европейские нормы

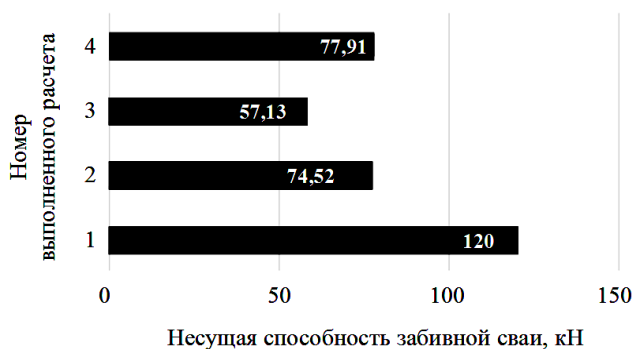
Согласно рисунку 1 (случай а) и [10; 12] высота эквивалентного плитного фундамента $D_{усл} = 6,0 \text{ м}$. Размеры эквивалентного плитного фундамента $B = L = 3,85 \text{ м}$.

Результаты выполненных исследований проиллюстрированы рисунками 4, 5.



1 – ТКП; 2 – Еврокод 7 (DA1. C 1);
3 – Еврокод 7 (DA1. C 2); 4 – Еврокод 7 (DA2)

Рисунок 4. – Расчетная несущая способность забивной сваи по данным статического испытания, полученная при расчете



1 – ТКП; 2 – Еврокод 7 (DA1. С 1);
3 – Еврокод 7 (DA1. С 2); 3 – Еврокод 7 (DA2)

Рисунок 5. – Расчетная несущая способность буровой сваи по данным статического испытания, полученная при расчете

Таким образом, в заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1. Значение несущей способности забивной сваи по данным испытаний статической нагрузкой, полученное путем вычисления по национальным нормам Республики Беларусь, на 11,4% меньше максимальной несущей способности сваи, полученной по европейским нормам (DA1. С 1), практически равняется несущей способности сваи при расчете DA2 и превышает на 14,3% несущую способность сваи, определенную с использованием подхода DA1. С 2.

2. Значение несущей способности буровой сваи по данным испытаний статической нагрузкой, полученное путем вычисления по национальным нормам Республики Беларусь, является максимальным и превышает на 52,4% минимальное значение несущей способности, полученное при расчете по европейским нормам DA1. С 2. Такую разницу можно объяснить тем, что частные коэффициенты корреляции зависят от количества испытанных свай. В данном случае испытана одна свая. При увеличении количества испытываемых свай частный коэффициент корреляции уменьшится, соответственно, увеличится несущая способность сваи.

3. Предельно допустимая осадка сваи при испытании статической нагрузкой по национальным нормам зависит от вида здания и сооружения и от вида грунта под нижним концом сваи, а по европейским нормам данная величина зависит только от диаметра сваи.

4. Длина и ширина условного фундамента по национальным нормам зависят от вида грунтов (угла внутреннего трения), расположенных по длине сваи. В европейских нормах наклон боковых плоскостей для определения эквивалентного плитного фундамента всегда одинаков и равен 1:4 (14°).

5. Положения Еврокода 7 [3] в своем большинстве содержатся в национальных нормах Республики Беларусь [1; 2] на различные геотехнические объекты и наоборот: большинство положений [1; 2] почти буквально содержится в [3]. Однако некоторые принципиальные положения в национальных нормах и Еврокоде 7 трактуются по-разному. Одно из них – применение частных коэффициентов надежности по грунту, материалу и по нагрузкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Сваи забивные. Правила проектирования и устройства : ТКП 45-5.01-256-2012(02250). – Введ. 01.07.2012. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2013. – 137 с.
2. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.01-254-2012(02250). – Введ. 01.07.2012. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2012. – 102 с.
3. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Ч. 1. Общие правила : ТКП EN 1997-1-2009 (02250). – Введ. 10.12.2009. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 121 с.
4. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Ч. 2. Исследования и испытания грунта : ТКП EN 1997-2-2009 (02250). – Введ. 10.12.2009. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 153 с.
5. Scarpelli, G. Shallow foundations – design of spread foundations / G. Scarpelli // Geotechnical Design with worked examples : Dublin, 13–14 June, 2013. – 36 p.

6. Frank, R. Geotechnical aspects of building design (EN 1997) / R. Frank. – Brussels, 20–21 October, 2011. – 55 p.
7. Trevor, L.L. Orr. Eurocode 7 Workshop. – Brussels, 18–20 February, 2008 – 26 p.
8. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 7. Геотехническое проектирование / Р. Франк [и др.] ; под науч. ред. А.З. Тер-Мартиняна. – М. : МГСУ, 2013. – 360 с.
9. Eurocode 7: Geotechnical Design. Worked examples. Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes / J. Bond Andrew [et al.]. – Dublin, 13–14 June, 2013. – 172 p.
10. Bond, A. Decoding Eurocode 7 / A. Bond, A. Harris. – London and New York. Taylor&Francis Group, 2008. – 621 p.
11. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : ВШ, 1983. – 280 с.
12. Tomlinson, M. Pile Design and Construction Practice / M. Tomlinson, J. Woodward. – Sixth Edition. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 598 p.
13. Фундаменты плитные. Правила проектирования : ТКП 45-5.01-67-2007 (02250). – Введ. 02.04.2007. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 137 с.

Поступила 02.12.2016

COMPARISON DESIGN METHODS FOR PILE FOUNDATIONS ON NATIONAL AND EUROPEAN STANDARDS

A. KREMNIOV, N. LOBACHEVA, T. VELUYGA

We consider the results of the comparison for determining the estimated carrying capacity of driven and bored concrete piles using the results of static load and determination nominal foundation borders on national and European design standard. The principles of construction of the equivalent raft foundation are considered. The similarities and differences in methods of design of the bearing capacity driven and bored piles for European and national standards are identified and summarized. The difference values obtained estimated carrying capacity of piles as a percentage of. The similarities and differences in the determination of the nominal foundation (national standards) and equivalent raft foundation (European standards) are identified and summarized. Three methods for the design of pile foundations at European standards, represents the areas of their use and limitations of these methods are presented.

Keywords: *pile foundation, design methods, equivalently raft foundation.*