

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СООТВЕТСТВИИ С ЕВРОКОДОМ 7

**Р. ФРАНК** – д-р техн. наук, профессор, Исследовательский центр механики грунтов (CERMES, ENPC-LCPC), Париж, Франция, вице-президент Международного общества геотехники ISSMGE по Европе, председатель комитета CEN/TC 250/SC 7, ответственный за разработку Еврокода 7 (1998–2004).

*Лекция, прочитанная на XIII Дунайско-Европейской конференции по геотехнике в г. Любляне, Словения (29-31 мая 2006 г.).*

Описываются две части Еврокода 7 «Геотехническое проектирование»: ч. 1 «Общие нормы» (EN 1997-1) и ч. 2 «Исследования и испытания грунтов» (EN 1997-2). Рассматриваются и комментируются основные положения и требования Еврокода 7 к проектированию свайных фундаментов (разд. 7 EN 1997-1). Приводятся примеры проектирования свайных фундаментов, на которые воздействует осевая нагрузка: на основе испытаний грунта и испытаний свай на нагружение.

### ВВЕДЕНИЕ ПРОГРАММА ЕВРОКОДОВ

Строительные Еврокоды – нормы по проектированию зданий, мостов и других сооружений гражданского строительства. В их основе лежат теория проектирования по предельным состояниям (LSD) и метод частных коэффициентов. Еврокоды состоят из 10 групп стандартов: «Еврокод: Основы строительного проектирования» (EN 1990) и Еврокоды 1–9 (EN 1991 - EN 1999; EN – европейские нормы).

Еврокоды 2–9 посвящены строительным материалам – в каждом из них описывается работа с определенным материалом (железобетоном, сталью и т. д.). В EN 1990 (Основы строительного проектирования), Еврокодах 1 (Нагрузки и воздействия), 7 (Геотехническое проектирование) и 8 (Проектирование сооружений в сейсмически активных районах) даются рекомендации по всем видам строительства вне зависимости от материала.

Еврокод 7 должен применяться для решения всех проблем в области взаимодействия оснований (грунтов и скальных пород) и сооружений, фундаментостроения и подпор-

ных конструкций. Он позволяет рассчитывать геотехническое воздействие на здания и сооружения, а также сопротивление грунта. В Еврокоде 7 даются предписания и правила проведения качественных геотехнических изысканий при проектировании сооружения или, в более общем случае – при осуществлении чисто геотехнического проекта.

Разработка Еврокода 7 связана с разработкой EN 1990 (Основы строительного проектирования) CEN, 2002, поэтому процедура выверки задач взаимодействия грунтов и сооружений для этих документов одинакова.

После описания основного содержания Еврокода 7 обобщим требования к проектированию свай (при этом не будем упоминать принципы определения LSD и частных коэффициентов) и приведем два примера проектирования свайных фундаментов, подвергавшихся сжимающей вертикальной нагрузке. Примеры взяты из материалов недавнего семинара ERCT 10 по оценке Еврокода 7 (Ott, 2005; Frank, 2005).

### 1. СОДЕРЖАНИЕ ЕВРОКОДА 7

Еврокод 7 состоит из двух частей: EN 1997-1. Геотехническое проектирование. Ч. 1: Общие нормы (CEN, 2004); EN 1997-2. Гео-

техническое проектирование. Ч. 2: Исследование и испытание грунта (CEN, 2005,а).

### 1.1. Часть 1. Общие нормы

Еврокод 7. Ч. 1. Общие нормы – это документ, где принципы геотехнического проектирования и строительства рассматриваются в рамках LSD. Эти принципы относятся к расчету геотехнических операций применительно к конструктивным элементам, взаимодействующим с грунтом (фундаментам, сваям, стенам подвалов и т. д.), а также деформаций и прочности грунтов, взаимодействующих с сооружениями. В информативных приложениях приводятся некоторые подробные правила проектирования и модели для расчетов, включающие точные формулы и графики.

Часть 1 Еврокода 7 состоит из 12 разделов (CEN, 2004): 1. Общие положения. 2. Основы геотехнического проектирования. 3. Геотехнические данные. 4. Наблюдение за проведением строительных работ, мониторинг и техническая поддержка. 5. Устройство насыпей, процесс осушения, улучшение и армирование грунта. 6. Фундаменты на естественном основании. 7. Свайные фундаменты. 8. Анкера. 9. Подпорные сооружения. 10. Гидравлическое разрушение. 11. Общая устойчивость сооружений. 12. Насыпи.

В Еврокод 7 входят различные приложения. Все они (кроме приложения А, имеющего нормативный характер) являются информативными:

Приложение А (нормативное). Частные и корреляционные коэффициенты запаса для предельных состояний и их рекомендуемые величины.

В. Основная информация по частным коэффициентам для подходов к проектированию 1, 2, 3.

С. Примеры методов определения предельных величин давления на вертикальные стены.

Д. Пример аналитического метода расчета несущей способности.

Е. Пример полуэмпирического метода расчета несущей способности.

Ф. Пример метода расчета осадок.

Г. Пример метода прогноза несущей способности фундаментов на скальных породах.

Н. Предельные значения перемещений фундаментов и деформаций конструкций.

И. Перечень методов наблюдений за строительными работами и мониторинг сооружений.

Приложение А очень важно, так как здесь приводятся частные коэффициенты надежности для определения предельных состояний при проектировании на кратковременные и длительные нагрузки (основные сочетания), а также коэффициенты корреляции для характеристических величин несущей способности свай (см. ниже). Отметим, что численные значения частных коэффициентов или коэффициентов корреляции в прил. А носят сугубо рекомендательный характер и могут изменяться в Национальных приложениях к EN 1990-1, которые публикуются в каждой отдельной стране. Все другие приложения, как уже говорилось, имеют информативный характер, хотя некоторые из них содержат ценную информацию и могут быть приняты большинством стран в ближайшем будущем.

### 1.2. Часть 2. Исследование и испытание грунтов

Часть 2 Еврокода 7 – это связующее звено между требованиями к проектированию, приведенными в ч. 1, в частности в разд. 3 «Геотехнические данные», и результатами ряда лабораторных и полевых испытаний.

Она не включает стандарты геотехнических испытаний, которые недавно изданы Техническим комитетом 341 CEN (TC 341), занимающимся вопросами геотехнических изысканий и испытаний.

В ч. 2 входят следующие разделы (CEN, 2004, b): 1. Общие положения. 2. Планирование изыскания грунтов. 3. Выборка образцов грунта и скальных пород, измерение уровня грунтовых вод. 4. Полевые испытания грунтов и скальных пород. 5. Лабораторные испытания грунтов и скальных пород. 6. Отчет по результатам исследования грунтов.

В разд. 4 рассматриваются пенетрационные испытания конусом и пьезоконусом СРТ(У), испытания прессиометром РМТ, испытания грунтов и скальных пород гибким

дилатометром FDT, стандартные пенетрационные испытания SPT, динамические испытания на зондирование DP, испытания с использованием тяжелого зондирования WST, полевые испытания крыльчаткой FVT, испытания с использованием плоских дилатометров DMT и штамповые испытания PLT.

В разд. 5 описываются: подготовка образцов грунта и скальных пород для испытаний; испытания с целью классификации, идентификации и описания грунтов; химические испытания грунтов и грунтовых вод; испытание грунтов на прочность, сжимаемость и деформационные свойства грунтов; испытания грунтов на уплотнение; фильтрационные испытания грунтов; классификационные испытания скальных пород; испытания скальных пород на набухание и прочность.

В ч. 2 также представлен ряд информативных приложений с примерами корреляций и вывода величин геотехнических параметров на основе результатов полевых испытаний. В информационных приложениях D.6 и D.7 (для испытаний СРТ) и E.3 (для испытаний РМТ) приводятся примеры определения прочности на сжатие для отдельной сваи.

Как и в ч. 1, большинство расчетных моделей носят информативный характер, однако существует перспектива их повсеместного применения в Европе.

## 2. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ РАЗДЕЛА 7 «СВАЙНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ»

Основное внимание в разделе 7 ЕН 1997-1 уделяется работе свайных фундаментов при воздействии осевых (вертикальных) нагрузок. Совершенно очевидна важность испытаний на статическое нагружение, что они являются основой для проектирования свайных фундаментов. В этом же разделе представлена инновационная концепция, соотносимая с традиционными концепциями строительства свайных фундаментов: использование коэффициентов корреляции  $\xi$  для получения характеристических значений прочностей на сжатие и растяжение свай, что может происходить как на основе статических испытаний на нагружение свай, так и полевых испытаний. В обоих случаях коэффициент корреляции  $\xi$  в

основном зависит от количества проводимых испытаний.

В ЕН 1997-1 даются общие рекомендации по определению предельных состояний: в § 2.4.7.3.4.2(2)Р – для Подхода к проектированию 1; в § 2.4.7.3.4.3(1)Р для Подхода 2 и в § 2.4.7.3.4.4(1)Р – для Подхода 3. Рекомендуемые величины частных факторов  $\gamma$  приводятся в таблицах (в табл. А.3 – для воздействий или влияния воздействий ( $\gamma_F$  или  $\gamma_E$ ), табл. А.4 – для параметров грунта ( $\gamma_M$ ), табл. А.6–А.8 – для сопротивления свай ( $\gamma_R$ ) и А.9–А.11 – для коэффициентов корреляции свай  $\xi$ ), см. табл. 1–5.

В § 7.6.2.2 разд. 7 описывается «Предельная прочность на сжатие на основе статических испытаний на нагружение», в § 7.6.2.3 – «Предельная прочность на сжатие на основе полевых испытаний», в частности, в уравнении (7.8) § 7.6.2.3(5)Р в представлен метод моделирования свай, в § 7.6.2.3(8) – альтернативный подход, в § 7.6.4 рассматриваются вертикальные смещения свайных фундаментов (эксплуатационная пригодность сооружений), а в § 7.7 – «Поперечно нагруженные сваи». Информация по всем этим параграфам приводится ниже. Более детальные комментарии представлены в «Руководстве по проектированию» (Frank et al., 2004).

### 2.1. Предельные состояния и особые воздействия

Необходимо рассмотреть целый ряд предельных состояний: 1. Предельные состояния (ULS): общая устойчивость; несущая способность грунта при разрушении, выдергивании или прочность на растяжение при разрушении и разрушение грунта в поперечном направлении; разрушение свай при сжатии, растяжении, изгибе или сдвиге; предельная величина осадок, выпора и бокового смещения.

2. Предельные состояния по эксплуатационной пригодности (SLS): предельная величина осадок, пучения и бокового смещения; вибрации.

3. Воздействия, вызванные перемещением грунта, присущие свайным фундаментам: отрицательное трение, выпор, поперечное нагружение.

Еврокод 7 требует использовать такие методы расчета, где смещения грунта рассматриваются воздействия и проводится анализ взаимодействия, или где верхняя граница усилия на сваю вводится как проектное воздействие.

Почти во всех методах расчета «должны рассматриваться верхние границы проектных величин прочности и жесткости перемещающегося грунта».

## 2.2. Роль испытаний свай на нагружение

Почти все методы проектирования свай, принятые в Еврокоде 7, прямо или косвенно основываются на результатах испытаний свай на статическое нагружение. В документе написано, что: «Проектирование должно основываться [...]»:

*на результатах испытаний свай на статическое нагружение [...];*

*методах численного или эмпирического расчета, результаты которого проверяются с помощью испытаний свай на статическую нагрузку [...];*

*результатах испытаний свай на динамическое нагружение, выверяемых с помощью испытаний на статическую нагрузку [...];*

*наблюдениях за работой сравнимых свайных фундаментов, причем этот подход должен основываться на результатах изысканий на площадке строительства и испытаний грунта».*

Испытания свай на нагружение проводятся, когда применяются новый вид свай или новая технология их устройства;

невозможно найти сопоставимые грунтовые условия и условия нагружения;

теоретические знания и опыт не гарантируют абсолютной успешности проектирования;

в процессе установки свай их поведение отклоняется от ожидаемого и требуются дополнительные грунтовые изыскания для определения причин такой работы.

Процедура статического нагружения свай «должна проводиться таким образом, чтобы на основе ее результатов можно было сделать заключения о деформированном состоя-

*нии, ползучести повторной разгрузке [...]], предельной нагрузке на опытные сваи.*

В случае применения свай растяжения испытания должны проводиться до их разрушения.

В примечании о методиках нагружения (EN 1997-1) упоминается метод, предложенный ISSMGE в 1985 г. Недавно CEN/TC 250 разработал стандарты для проведения испытаний на статическую сжимающую нагрузку, сейчас этот документ находится на стадии обсуждения (CEN 2005 b).

*«Испытания на динамическую нагрузку могут применяться для вычисления прочности на сжатие при условии, что были проведены необходимые изыскания на площадке строительства и метод соответствует по калибровке испытаниям на статическую нагрузку, т. е. испытываются сваи того же вида той же длины и поперечного сечения в сопоставимых грунтовых условиях».*

## 2.3. Общая проверка свай под воздействием осевой нагрузки

Необходимо рассматривать:

*«предельное состояние по прочности на сжатие или растяжение отдельной сваи при разрушении;*

*предельное состояние по прочности на сжатие или растяжение при разрушении свайного фундамента как целостной конструкции;*

*предельное состояние при разрушении или серьезном повреждении подпорной конструкции вследствие чрезмерного смещения или неравномерных смещений свайного фундамента;*

*предельное состояние по эксплуатационной пригодности для подпорной конструкции при смещении свай».*

При рассмотрении свайной группы следует учитывать:

1. Разрушение несущей способности отдельных свай при сжатии или отказе.

2. Разрушение несущей способности свай при сжатии или отказе, а также грунта, находящегося между сваями и действующего с ними как единое целое.

2.4. Предельное состояние, соответствующее исчерпанию прочности на сжатие или растяжение

Ниже обобщаются основные уравнения и условия, предписываемые Еврокодом 7 (ч. 1) для проверки предельной прочности на сжатие или растяжение. Характеристическое значение прочности на сжатие или растяжение  $R_k$  выводится из величин  $R$  (измеренных  $R_m$  или рассчитанных  $R_{cal}$ ):

$$R_k = R / \xi, \quad (1)$$

где  $\xi$  – коэффициент корреляции.

Рекомендуемые величины  $\xi$  для проектирования на основе испытаний свай на статическую нагрузку приводятся в табл. 1; на основе полевых испытаний – в табл. 2; на основе испытаний свай на динамическую нагрузку (только прочность на сжатие) – в табл. 3.

Проектные величины  $R_d$  вычисляются по формуле:

$$R_d = R_k / \gamma_t \quad \text{или} \quad R_d = R_{bk} / \gamma_b + R_{sk} / \gamma_s, \quad (2)$$

где  $\gamma_t$ ,  $\gamma_b$ ,  $\gamma_s$  – частные коэффициенты сопротивления  $\gamma_R$  для общего сопротивления  $R_k$  или для сопротивления основания и ствола сваи ( $R_{bk}$  и  $R_{sk}$ ). Рекомендуемые величины этих параметров приводятся в табл. 4 (для напряженных свай предписывается  $R_{bk} = 0$ ,  $\gamma_{st} > \gamma_s$ ).

Проектная величина прилагаемой нагрузки от напряжения/растяжения  $F_d$  равна

$$F_d = \gamma_F F_k, \quad (3)$$

где  $F_k$  – характеристическое значение прилагаемой нагрузки (ок);  $\gamma_F$  – частный коэффициент воздействий (или влияния воздействий), значения которого для постоянных и кратковременных проектных ситуаций приводятся в табл. 5 ( $\gamma_F F_k$  в уравнении (3) по возможности представляет несколько воздействий). Для случайных проектных случаев все  $\gamma_F = 1,0$ .

Основным условием предельного состояния является

$$F_d \leq R_d. \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (4) можно вывести

$$F_k \leq R / \gamma_F \cdot \gamma_t \cdot \xi = R / FS, \quad (5)$$

где  $FS = \gamma_F \cdot \gamma_t \cdot \xi$  аналогично традиционному общему коэффициенту запаса (предполагается, что  $\gamma_F$  может иметь несколько значений, а  $\gamma_t$  можно заменить  $\gamma_b$  или  $\gamma_s$ ).

2.5. Величины коэффициентов корреляции  $\xi$  и частных коэффициентов  $\gamma$

Как говорилось, все величины, приводимые в нормативном прил. А EN-1997-1, являются рекомендуемыми. Они могут быть изменены и адаптированы в Национальном приложении.

При проектировании свай на основе испытаний на статическое нагружение следует использовать уравнение

$$R_k = \min \{R_{m,\text{mean}} / \xi_1 ; R_{m,\text{mean}} / \xi_2\}, \quad (6)$$

где  $R_m$  – измеренная величина сопротивления;  $\xi = \xi_1$  при среднем значении;  $\xi = \xi_2$  при минимальном значении;  $n$  – функция количества испытаний свай (все эти величины приводятся в табл. 1).

Таблица 1

Рекомендуемые значения коэффициентов корреляции  $\xi$  для  $R_k$  по результатам  $n$  испытаний свай на статическое нагружение (табл. А.9 прил. А EN 1997-1)

Коэффициент	Количество испытаний				
	1	2	3	4	$\geq 5$
$\xi_1$	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
$\xi_2$	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

При использовании правил расчета и результатов полевых испытаний применяются уравнения

$$R_k = R_{bk} + R_{sk} = (R_{b,\text{cal}} + R_{s,\text{cal}}) / \xi = R_{\text{cal}} / \xi = \min \{R_{\text{cal,mean}} / \xi_3 ; R_{\text{cal,mean}} / \xi_4\}, \quad (7)$$

где  $\xi = \xi_3$  при среднем значении и  $\xi = \xi_4$  при минимальном значении;  $n$  – функция количества полевых испытаний грунта (все эти величины приводятся в табл. 2);  $R_{\text{cal}}$  – сопротивление грунта, вычисленное на основе полевых испытаний грунта.

Таблица 2

Рекомендуемые значения коэффициентов корреляции  $\xi$  для  $R_k$  по результатам  $n$  полевых испытаний грунта (табл. А.10 прил. А EN 1997-1)

Коэффициент	Количество испытаний						
	1	2	3	4	5	7	10
$\xi_3$	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
$\xi_4$	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

Для свай при сжатии; если возможен переход от «слабых» к «сильным» сваям, эти величины можно разделить на 1,1 при условии, что  $\xi_1 \geq 1,0$ .

Данную процедуру часто называют моделированием свай (Frank et al., 2004), поскольку согласно основному требованию, величина сопротивления должна вычисляться для каждого профиля грунта независимо от расположения свай в проекте.

При проектировании на основе результатов полевых испытаний грунта допускается применение альтернативной процедуры, которая во многих европейских странах является традиционной в практике строительства. Процедура направлена на определение характеристических значений сопротивления по основанию сваи и трения по боковой поверхности  $q_{bk}$  и  $q_{sik}$  исходя из параметров грунта с помощью уравнений и графиков соответствующего вычислительного метода. Тогда

$$R_{bk} = q_{bk} A_b \text{ и } R_{sk} = \sum q_{sik} A_{si}, \quad (8)$$

где  $A_b$  и  $A_{si}$  – область основания сваи и поверхность ствола сваи в слое  $i$ .

В нормах не уточняется, какие величины должны использоваться при альтернативном подходе: характеристические значения параметров грунта или более «традиционные» величины. Однако в примечании указывается: если «используются значения частных коэффициентов  $\gamma_b$  и  $\gamma_s$ , рекомендуемые в прил. А, может потребоваться их корректировка с помощью коэффициента моделирования больше 1,0. Величина коэффициента моделирования может определяться по Национальному приложению». Это объясняется тем, что в данной процедуре не применяется коэффициент корректировки  $\xi$ .

Можно определить прочность на сжатие, основываясь на результатах испытаний на динамическую нагрузку:

Испытания на динамическую ударную нагрузку;

Применения формул забивания свай;  
Анализа волновых уравнений.

Отметим, что Еврокод предписывает перепроверку результатов.

Тогда уравнение для  $R_k$  принимает вид

$$R_k = \min \{R_{m,\text{mean}} / \xi_5 ; R_{m,\text{mean}} / \xi_6\}, \quad (9)$$

где  $R_m$  – измеренные величины сопротивления;  $\xi = \xi_5$  при среднем значении и  $\xi = \xi_6$  при минимальном значении;  $n$  – функция количества испытаний свай, все эти величины приводятся в табл. 3.

Таблица 3

**Рекомендуемые значения коэффициентов корреляции  $\xi$  для  $R_k$  по результатам динамических испытаний на ударную нагрузку (табл. А.11, прил. А ЕН 1997-1)**

Коэффициент	Количество испытаний				
	$\geq 2$	$\geq 5$	$\geq 10$	$\geq 15$	$\geq 20$
$\xi_5$	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
$\xi_6$	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

Значения  $\xi$  в таблице действительны для динамических испытаний свай на ударную нагрузку. При проведении последних с сигнальной сверкой можно умножить значения  $\xi$  на коэффициент моделирования 0,85. При использовании формул забивания свай и измерении квазиупругого смещения оголовника сваи во время динамического удара значения  $\xi$  следует умножить на коэффициент моделирования 1,10; при использовании тех же формул без измерения квазиупругого смещения оголовника сваи  $\xi$  умножают на коэффициент моделирования 1,20. Если в фундаментах устраиваются разные сваи, при выборе  $n$  для испытаний группы одинаковых свай должны рассматриваться по отдельности.

#### Частные коэффициенты $\gamma$ для оценки сопротивления и воздействий

Для оценки предельных состояний при проектировании на кратковременные и длительные нагрузки в ч. 1 Еврокода 7 (СЕН, 2004) предлагаются три подхода: DA1 (проверяются две различных комбинации воздействий), DA2 и DA3.

Соответствующие величины частных коэффициентов  $\gamma_t$  или  $\gamma_b$  и  $\gamma_s$  для сопротивлений и  $\gamma_F$  для воздействий приводятся в табл. 4, 5.

Для определения предельных состояний в случайных проектных ситуациях  $\gamma_F$  всегда принимают равным 1,0, а значения частных коэффициентов по сопротивлению  $\gamma_t$ ,  $\gamma_b$  или  $\gamma_s$  зависят от конкретной случайной ситуации и

Таблица 4

**Предельные состояния при проектировании на кратковременные и длительные нагрузки.  
Рекомендуемые величины  $\gamma_t$ ,  $\gamma_b$  и  $\gamma_s$  (табл. А6, А7 и А8 прил. А ЕН 1997-1)**

Вид свай	Подход 1						Подход 2	Подход 3*
	Комбинация 1			Комбинация 2				
	$\gamma_b$	$\gamma_s$	$\gamma_t$	$\gamma_b$	$\gamma_s$	$\gamma_t$	$\gamma_b = \gamma_s = \gamma_t$	$\gamma_b = \gamma_s = \gamma_t$
	Сжатие							
Забиваемые Буронабивные СФА	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,1	1,0
	1,25	1,0	1,15	1,6	1,3	1,5	1,1	1,0
	1,2	1,0	1,1	1,45	1,3	1,4	1,1	1,0
	Растяжение							
$\gamma_{sr}$		1,25			1,6		1,15	1,1

Частные коэффициенты применяются к параметрам грунта. Нельзя использовать DA 3, если величины сопротивления определяются на основе испытаний свай на нагружение.

Таблица 5

**Предельные состояния при проектировании на кратковременные и длительные нагрузки.  
Рекомендуемые величины  $\gamma_F$  для воздействий или влияния воздействий (табл. А3 прил. А ЕН 1997-1)**

Воздействия		Подход 1-1 (В)	Подход 1-2 (С)*	Подход 2	Подход 3**
Постоянные	Неблагоприятные $\gamma_G$	1,35	1,0	1,35	1,35
	Благоприятные	1,0	1,0	1,0	1,0
Переменные	Неблагоприятные $\gamma_Q$	1,5	1,3	1,5	1,5
	Благоприятные	0	0	0	0

\* Частные коэффициенты применяются к прочностным параметрам грунта.

\*\* Величины только для воздействий на конструкцию; для геотехнических воздействий частные коэффициенты применяются к прочностным параметрам грунта.

могут определяться по Национальным приложениям.

**2.6. Вертикальные смещения свайных фундаментов: эксплуатационная пригодность опертых сооружений**

Необходимо оценивать и проверять величины смещений в условиях предельного состояния по эксплуатационной пригодности, сравнивая их с предельными значениями.

При рассмотрении свай при сжатии необходимо учитывать возможное отрицательное трение и осадки свайной группы; при растяжении необходимо также проверять выпор.

**2.7. Проектирование поперечно нагруженных свай**

Параграфы ЕН 1997-1, посвященные проектированию поперечно нагруженных свай, соответствуют положениям, принятым в

общей практике. Их можно обобщить следующим образом. Для всех предельных состояний проектные величины поперечного сопротивления  $R_{tr,d}$  должны отвечать условию

$$F_{tr,d} \leq R_{tr,d}, \quad (10)$$

где  $F_{tr,d}$  – проектная величина прилагаемых поперечных нагрузок.

В ч. 1 Еврокода 7 сказано: «Необходимо учитывать один из нижеперечисленных механизмов разрушения: для коротких свай – вращение или преобразование твердого тела; для длинных тонких свай – разрушение свай при изгибе, сопровождаемое локальной текучестью или смещением грунта у конца сваи».

Поперечное сопротивление нагружению  $R_{tr}$  определяется на основе: испытаний свай на нагружение; результатов испытаний грунта и прочностных параметров свай. При этом можно использовать теорию балок и коэффициент постели.

При оценке поперечного смещения необходимо учитывать: нелинейную жесткость грунта; жесткость свай при изгибе; условия устойчивости соединения с конструкцией; эффект свайной группы; влияние перемены знака нагрузки или циклического нагружения.

в) общую прочность на сжатие  $R_{cal} = R_{b,cal} + R_{s,cal} = 387 + 132L$  (в кН и м).

Таблица 6

Данные, иллюстрирующие пример проектирования свайных фундаментов по результатам испытания грунта

Свайный фундамент, спроектированный на основе параметров грунта	
• <b>Проектная ситуация</b>	Бурионабивные сваи для здания диаметром 600 мм Уровень грунтовых вод – на 2 м ниже поверхности
• <b>Грунтовые условия</b>	Песок: $c'_k = 0$ , $\phi'_k = 35^\circ$ , $\gamma = 21 \text{ кН/м}^3$ , SPT $N = 25$
• <b>Воздействия</b>	Характеристическое значение постоянной нагрузки $G_k = 1200 \text{ кН}$ Характеристическое значение переменной нагрузки $Q_k = 200 \text{ кН}$ Удельный вес бетона – $24 \text{ кН/м}^3$
• <b>Требование</b>	Длина свай $L$

### 3. ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Примеры проектирования свайных фундаментов, подвергавшихся сжимающему вертикальному нагружению, взяты из материалов недавнего семинара ERCT 10 по оценке Еврокода 7.

#### 3.1. Проектирование свайных фундаментов на основе результатов испытаний грунта

Пример проектирования приведен на рис. 1 и в табл. 6 (Ort, 2005).

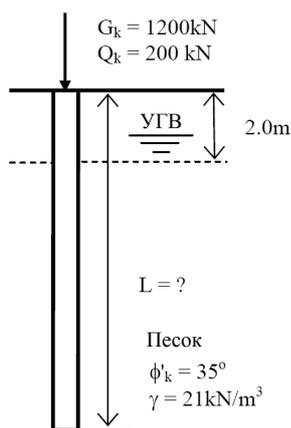


Рис. 1. Пример проектирования свайных фундаментов по результатам испытания грунта (пример 3 семинара ERCT 10 – WP 2)

По результатам испытаний, SPT  $N = 25$ , исходя из корреляций с результатами испытаний РМТ и использующихся во Франции норм полуэмпирического проектирования (Frank, 2005) вычисляют:

а) удельное сопротивление по пяте  $q_b = 1,37 \text{ МПа}$ ; общее сопротивление по пяте  $R_{b,cal} = \pi(D^2/4)q_p = 3,14 \times (0.36/4) \times 1,37 = 387 \text{ кН}$ ;

б) удельное трение по боковой поверхности свай на всех глубинах  $z$  равно  $q_s = 70 \text{ кПа}$ ; общее трение по боковой поверхности свай диаметром 0,6 м равно  $R_{s,cal} = \pi(D) \int q_s dz = 1,885 \times 70L = 132L$  (в кН и м);

Часть 1 Еврокода 7 предписывает проверять первое и второе предельные состояния по эксплуатационной пригодности. В рассматриваемом примере ограничений относительно осадки свай и любых случайных воздействий нет, предельные состояния касаются проектирования на длительные и кратковременные нагрузки.

В данном случае при оценке предельных состояний для проектирования на длительные и кратковременные нагрузки можно использовать подходы DA 1 и 2. Подход DA 3 к полуэмпирическим моделям, одна из которых описывается в данном примере, не применяется, поскольку в нем предполагается использование коэффициентов «по материалу»  $\gamma_M > 1,0$  (это определение коэффициентов исходных параметров прочности на сдвиг, а не сопротивления по острию и трения по стволу свай, следовательно,  $\gamma_b = 1,0$ ,  $\gamma_s = 1,0$ ); в этих моделях, напротив,  $\gamma_M = 1,0$ , а  $\gamma_b \geq 1,0$  и  $\gamma_s \geq 1,0$ .

Для подходов DA 1 и 2 должны применяться «альтернативные» процедуры, описанные в разд. 2.4 и уравнении (8), так как известны лишь параметры грунта и не дается указаний относительно количества профилей грунта («моделирование свай» неприменимо).

Можно сделать два предположения:

А. Вычисленные значения  $q_s$  и  $q_b$  в свете уравнения (7) могут рассматриваться как

характеристические, поскольку они получены с постоянным учетом  $N$  (отметим определенный консерватизм норм для расчета). Поэтому мы считаем, что величины, рекомендуемые в прил. А EN 1997-1, применимы и без привлечения коэффициента сопротивления модели, если он больше 1,0.

Б. Вычисленные значения  $q_s$  и  $q_b$  в свете уравнения (7) не могут рассматриваться как характеристические, так как они основываются на величинах  $N$ , которые неточны, а нормы для расчета недостаточно консервативны. Поэтому мы считаем, что величины, рекомендуемые в прил. А EN 1997-1, применимы с привлечением коэффициента модели сопротивления, если он больше 1,0 – для выбора величины  $\gamma_{Rd} = 1,25$  для данного примера.

Следовательно, можно провести вычисления в двух группах (величины измерения – кН или м):

предположение А  $R_k = R_{cal} = R_{b,k} + R_{s,k} = 387 + 132L$ ;

предположение В  $R_k = R_{cal}/\gamma_{Rd} = R_{b,k} + R_{s,k} = (387 + 132L)/1,25 = 309,6 + 105,6L$

В дальнейших вычислениях используются табл. 4 и 5.

Предположение А:  $R_k = R_{cal}$

#### Проектный подход DA 1

Сочетание 1:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \times 1200 + 1,5 \times 200 = 1920$  кН

проектное сопротивление сваи  $R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 387/1,25 + 132L/1,0 = 309,6 + 132L$

Условие  $F_d \leq R_d$  приводит к  $L \geq 12,2$  м.

Сочетание 2:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,0 \times 1200 + 1,3 \times 200 = 1460$  кН

проектное сопротивление сваи  $R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 387/1,6 + 132L/1,3 = 241,9 + 101,5L$

Условие  $F_d \leq R_d$  приводит к  $L \geq 12,0$  м.

Заключение для подхода **DA 1**:  $L \geq 12,2$  м (большая из двух длин, указанная в комбинации 1).

#### Подход DA 2

Возможно только одно сочетание:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \times 1200 + 1,5 \times 200 = 1920$  кН

проектное сопротивление сваи  $R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 387/1,1 + 132L/1,1 = 351,8 + 120L$

Условие  $F_d \leq R_d$  приводит к  $L \geq 13,1$  м.

**Подход DA 3** нельзя применить к SPT или другой полуэмпирической модели.

Предположение Б:  $R_k = R_{cal}/\gamma_{Rd}$ .

#### Подход DA 1

Сочетание 1:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \times 1200 + 1,5 \times 200 = 1920$  кН

проектное сопротивление сваи  $R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 309,6/1,25 + 105,6L/1,0 = 247,7 + 105,6L$

Условие  $F_d \leq R_d$  приводит к  $L \geq 15,8$  м.

Сочетание 2:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,0 \times 1200 + 1,3 \times 200 = 1460$  кН

проектное сопротивление сваи  $R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 309,6/1,6 + 105,6L/1,3 = 193,5 + 81,2L$

Условие  $F_d \leq R_d$  приводит к  $L \geq 15,6$  м.

Заключение для подхода **DA 1**:  $L \geq 15,8$  м (большая из двух длин, указанная в сочетании 1).

#### Подход DA 2

Возможно только одно сочетание:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \times 1200 + 1,5 \times 200 = 1920$  кН

проектное сопротивление сваи  $R_d = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s = 309,6/1,1 + 105,6L/1,1 = 281,5 + 96,0L$

Условие  $F_d \leq R_d$  приводит к  $L \geq 17,1$  м.

**Подход DA 3** нельзя применить к полуэмпирическим моделям.

Вывод по предположениям А и Б: если следовать предписаниям Еврокода 7-1 (EN 1997-1) по предельным состояниям для проектирования на кратковременную или длительную нагрузку, для данного примера (где преобладает трение по боковой поверхности ствола сваи) подход 2 является наиболее консервативным, поскольку при его использовании мы получаем  $L \geq 13,1$  м (предположение А) и  $L \geq 17,1$  м (предположение Б). Что касается подхода 1, то здесь сочетание 1 более консервативно, чем сочетание 2.

### 3.2. Проектирование свайного фундамента на основе результатов испытаний сваи на нагружение

Пример проектирования приведен на рис. 2 и в табл. 7 (Огг, 2005).

Характеристические значения прочности на сжатие

Измеренные значения удельной прочности на сдвиг (при фиксировании информации при осадке  $s = 0,1$   $D = 40$  мм) равны  $R_{m1} = 5.0$  МН и  $R_{m2} = 5.6$  МН.

При использовании уравнения (7)  $R_{m,mean} = 5.3$  МН и  $R_{m,min} = 5.0$  МН.

Согласно табл. 1, для  $n = 2$  испытаний на нагружение сваи  $\xi_1 = 1,30$  и  $\xi_2 = 1,20$ , следовательно,  $R_k = \min\{5.3/1.30; 5.0/1.20\} = \min\{4.08; 4.17\} = 4.08$

которая показывает, что средняя величина является «главенствующей».

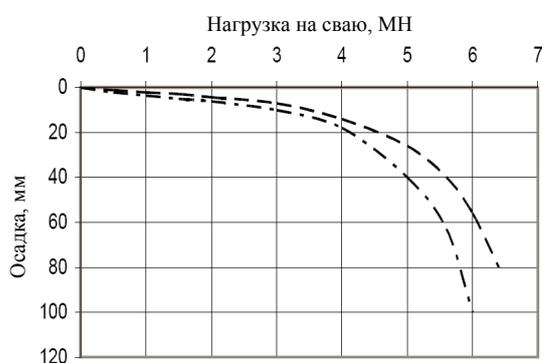


Рис. 2. Пример проектирования свайных фундаментов на основе результатов испытания свай на статическое нагружение (пример 4 семинара ERCT 10)

Таблица 7

**Данные, иллюстрирующие пример проектирования свайных фундаментов на основе результатов испытания свай на статическое нагружение (пример 4 семинара ERCT 10)**

Свайный фундамент, спроектированный на основе параметров грунта	
• <b>Проектная ситуация</b>	Фундамент свайный, забивные сваи диаметром $D = 0,4$ м, длиной 15 м. Здание не обладает способностью передавать нагрузку со «слабых» на «сильные» сваи. Допустимая осадка свай – 10 мм.
• <b>Сопротивление свай</b>	Проводились два статических испытания на нагружение на забивных сваях с такими же длиной и диаметром, как проектные сваи. Для достижения предельной нагрузки сваи нагружали до осадки 0,1 $D = 40$ мм.
• <b>Характеристические значения воздействий</b>	Постоянная вертикальная нагрузка $G_k = 20000$ кН Переменная вертикальная нагрузка $Q_k = 5000$ кН
• <b>Требуется определить количество свай, необходимое для соответствия предельным состояниям по несущей способности и эксплуатационной пригодности</b>	

Предельное состояние для проектирования на кратковременную и длительную нагрузку

Используются табл. 4 и 5.

**Подход DA 1**

Для геотехнического проектирования обычно применяется сочетание 2:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1.0 \times 20 + 1.3 \times 5 = 26.5$  МН;

проектное сопротивление одной сваи  $R_d = R_k / \gamma_t = 4.08 / 1.3 = 3.14$  МН.

Следовательно, согласно подходу DA 1 (сочетание 2), необходимо установить  $26,5/3,14 = 9$  свай (эффект свайной группы не учитывается).

**Сочетание 1:**

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1.35 \times 20 + 1.5 \times 5 = 34.5$  МН;

проектное сопротивление одной сваи  $R_d = R_k / \gamma_t = 4.08 / 1.0 = 4.08$  МН.

Следовательно, согласно подходу DA 1 (сочетание 2), необходимо установить  $34,5/4,08 = 9$  свай (эффект свайной группы не учитывается).

**Подход DA 2**

Применяется только одно сочетание:

проектная нагрузка  $F_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k = 1.35 \times 20 + 1.5 \times 5 = 34.5$  МН;

проектное сопротивление одной сваи  $R_d = R_k / \gamma_t = 4.08 / 1.1 = 3.71$  МН.

Количество свай:  $34,5/3,71 = 10$  свай, которые необходимо установить (эффект свайной группы не учитывается).

Проверка предельного состояния по эксплуатационной пригодности.

Характеристическое значение нагрузки  $G_k + Q_k = 25$  МН важно для характеристической комбинации, которая является самым строгим предписанием, используемым для описания неизменяемых предельных состояний (см. ЕН 1990).

Когда мы изучаем две полученных кривых «нагрузка – осадка», величина осадки 10 мм для измеренных нагрузок  $F_m = 3,0$  МН и 3,5 МН, соответственно. Характеристическое значение для 10 мм может определяться так же, как и характеристическое значение несущей способности, т. е.  $F_{m,k} \sim 2,5$  МН. Следовательно, чтобы осадки были меньше или равны 10 мм, необходимо установить 10 свай.

Таким образом, проверка предельного состояния по несущей способности и эксплуатационной пригодности показала, что независимо от используемого подхода требуется устройство 10 свай.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Еврокоде 7 рассматриваются проблемы геотехники, относящиеся к области взаимодействия оснований и сооружений. Предписания и рекомендации по проектированию свайных фундаментов в основном соответствуют традиционной практике строительства, однако существует и ряд инновационных черт:

введение коэффициентов корреляции для определения сопротивления свай, в которых учитывается количество испытаний на нагружение или испытаний грунта;

прогнозы относительно смещений фундаментов, в частности для проверки эксплуатационной пригодности конструкций.

Еврокод 7 – это не только инструмент, помогающий всем европейским инженерам-геотехникам говорить на одном языке, но и необходимое средство для диалога между инженерами-геотехниками и проектировщиками наземных конструкций.

Мы надеемся, что Еврокод 7 будет способствовать развитию исследовательской деятельности, особенно в области взаимодействия оснований и сооружений. Ведь одна из главных задач современного геотехнического фундаментостроения – разработка точных, рациональных методов прогнозирования деформаций фундаментов для проектирования надежных и более экономичных конструкций.

## Список литературы

CEN (2002). *Eurocode: Basis of structural design*. European standard, EN 1990 : 2002. European Committee for Standardization: Brussels.

CEN (2004) *Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*, EN 1997-1:2004 (E), (F) and (G), November 2004, European Committee for Standardization: Brussels.

CEN (2005a) *Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing*. Final draft, 3rd editing stage 49, doc. Nr CEN/TC 250/SC 7/N 400, European Committee for Standardization: Brussels.

CEN (2005b). *Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures-Part1: Pile load test by static axially loaded compression*, Draft prEN ISO 22477-1, European Committee for Standardization: Brussels.

Frank R., Bauduin C., Driscoll R., Kavvadas M., Krebs Ovesen N., Orr T., Schuppener B. (2004). *Designers' guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design - General rules*, Thomas Telford, London, 216 pages.

Frank R. (2005) Evaluation of Eurocode 7 – Two pile foundation design examples. *Proc. International Workshop on Evaluation of Eurocode 7*, ISSMGE/ERTC 10 & TC 23 and GeoTechNet/WP 2, Ed. T. Orr, Dept Civil, Structural and Environmental Engng, Trinity College Dublin, 117–125.

ISSMFE (1985) Axial Pile Loading Test, Suggested Method. Subcommittee on Field and Laboratory Testing, *ASTM Journal*, June.

Orr T. (2005) Design Examples for the Eurocode 7 Workshop. *Proc. International Workshop on Evaluation of Eurocode 7*, ISSMGE/ERTC 10& TC 23 and GeoTechNet/WP 2, Ed. T. Orr, Dept Civil, Structural and Environmental Engng, Trinity College Dublin, 67–74.

ОТ РЕДАКЦИИ

Статья написана известным французским геотехником, многие годы возглавлявшим комиссию Евросоюза, созданную для написания Еврокода-7. При первом знакомстве с практикой применения европейских норм российскому читателю может показаться, что подходы, лежащие в их основе, иногда более просты, чем в отечественных нормах. Скажем, слишком прост метод расчета осадок, дискуссионным вылядит предложение о расчете осадок свайного фундамента по кривой испытания одиночной сваи.

Предупреждая поспешность суждения такого плана, хотелось бы обратить внимание на главное отличие новых европейских норм от национальных систем нормативных документов Германии или России. Оно заключается, прежде всего, в раскрепощении специалиста от мелочной опеки норм старого образца, предоставлении ему свободы действий в соответствии с его высоким профессиональным уровнем. Но было бы непростительной ошибкой слепо копировать такой подход для условий нашей страны, если не сделать прежде другого шага – установить строгую систему ответственности специалиста за принятые им решения и допущенные ошибки.