

УДК 624.154.1

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-78-86

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОСЛЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Я. А. Богданов, Е. С. Соболев

Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается свайный фундамент в однородном песчаном основании, подверженный интенсивному сейсмическому воздействию, как объект исследования. Целью работы является количественная оценка изменения несущей способности свай во времени, а также анализ влияния разжижения песчаного грунта на напряжённо-деформированное состояние системы «свая–грунт». Для решения поставленной задачи использовано численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе PLAXIS 3D с применением нелинейной конститутивной модели грунта UBC3D-PLM. Параметры модели определены на основе результатов лабораторных динамических трёхосных испытаний и последующей калибровки. Расчёты выполнены для однородного водонасыщенного песчаного массива при уровне грунтовых вод 2,5 м и сейсмическом воздействии интенсивностью $PGA = 0,5g$, с анализом трёх стадий: до воздействия, сразу после и в процессе консолидации.

Установлено, что в массиве формируются зоны разжижения по всей активной толщине песчаного слоя (до 15–20 м), сопровождающиеся снижением эффективных напряжений до 20 % – 40 % от исходного уровня. Это приводит к деградации бокового сопротивления свай до 40% – 60% и формированию протяжённых зон сниженного трения вдоль их боковой поверхности. Совокупное снижение несущей способности свайного фундамента непосредственно после сейсмического воздействия достигает 10 % – 15 %, при этом её восстановление происходит постепенно и через 3 суток составляет 80 % – 90 % от исходного значения. Показано, что однородность песчаного основания приводит к более выраженному и равномерному развитию разжижения по глубине по сравнению с многослойными основаниями. Дополнительно установлена чувствительность результатов к параметрам модели: их вариация в пределах $\pm 10\%$ приводит к изменению несущей способности до 6 % – 8 %. Полученные результаты подтверждают эффективность применения нелинейных моделей типа UBC3D-PLM для количественной оценки деградации и восстановления несущей способности свайных фундаментов в песчаных основаниях при сейсмических воздействиях и могут быть использованы при инженерных расчётах в сейсмоопасных районах.

Ключевые слова: свайные фундаменты, сейсмическое воздействие, несущая способность, гибридное моделирование, деградация несущей способности грунта, поровое давление, численное моделирование

HYBRID MODELING OF TIME-DEPENDENT BEARING CAPACITY EVOLUTION OF PILE FOUNDATIONS AFTER SEISMIC LOADING

Y. A. Bogdanov, E. S. Sobolev

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Annotation. The study considers a pile foundation in a homogeneous sandy soil subjected to intense seismic loading as the object of research. The objective is to quantitatively assess the time-dependent variation of pile bearing capacity, as well as to analyze the influence of sand liquefaction on the stress–strain state of the “pile–soil” system. The methodological

framework is based on finite element numerical modeling using PLAXIS 3D, incorporating the nonlinear constitutive soil model UBC3D-PLM. Model parameters were derived from laboratory dynamic triaxial tests and subsequent calibration procedures. The analysis was carried out for a homogeneous saturated sandy deposit with a groundwater level at 2.5 m and seismic excitation with an intensity of $PGA = 0.5g$, considering three stages: before loading, immediately after seismic action, and during post-seismic consolidation.

The results indicate that liquefaction zones develop throughout the active thickness of the sandy layer (up to 15–20 m), leading to a reduction of effective stresses to 20–40% of their initial values. This results in degradation of pile shaft resistance by up to 40–60% and the formation of extended zones of reduced friction along the pile length. The overall reduction in pile bearing capacity immediately after seismic loading reaches 10–15%, while recovery is gradual and attains only 80–90% of the initial value after 3 days due to pore pressure dissipation. It is shown that the homogeneity of the sandy deposit leads to a more uniform and pronounced development of liquefaction with depth compared to layered soils. Additionally, the analysis reveals a high sensitivity of the results to model parameters: their variation within $\pm 10\%$ leads to changes in bearing capacity of up to 6–8%.

The obtained results confirm the applicability of advanced nonlinear soil models such as UBC3D-PLM for quantitative assessment of degradation and recovery of pile bearing capacity in sandy soils under seismic loading and can be used in engineering practice for design in seismic regions.

Keywords: pile foundations, seismic impact, bearing capacity, hybrid modeling, soil degradation, pore pressure, numerical modeling

Введение

Свайные фундаменты являются одним из основных типов оснований для сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях, включая сейсмоопасные регионы и зоны слабых водонасыщенных грунтов. В таких условиях их поведение определяется не только статическими нагрузками, но и динамическими воздействиями, способными вызывать существенные изменения структуры грунта, включая разжижение и снижение эффективных напряжений [1, 2].

Современные методы расчёта, основанные на методе конечных элементов, позволяют моделировать поведение системы «сооружение – свайный фундамент — грунтовый массив» с учётом нелинейности грунта и его циклической деградации. Однако большинство существующих подходов ограничиваются анализом состояния «до» и «сразу после» сейсмического воздействия, не учитывая последующее изменение несущей способности во времени [3, 4].

В то же время полевые наблюдения и экспериментальные исследования показывают, что восстановление несущей способности грунтового массива после землетрясения носит инерционный характер и связано с процессами диссипации порового давления и структурного восстановления грунта. Это приводит к необходимости введения временной составляющей в расчётные модели свайных фундаментов.

В этой связи актуальной является разработка гибридных подходов, объединяющих численное моделирование и аналитические зависимости изменения параметров грунта во времени после динамического воздействия.

Постановка задачи и методика исследования

Целью работы является разработка и апробация гибридной модели оценки изменения несущей способности свайных фундаментов во времени после сейсмического воздействия.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- анализ механизмов снижения несущей способности свай при сейсмическом воздействии;
- формализация временной деградации бокового сопротивления свай;
- разработка гибридной расчётной схемы;
- оценка влияния консолидации после сейсмического воздействия на восстановление несущей способности.

Методика основана на сочетании:

- конечно-элементного моделирования НДС грунтового массива;
- модели нелинейного поведения грунта с учётом циклической деградации;
- аналитической функции восстановления эффективных напряжений во времени.

Гибридная расчётная модель

Гибридная модель включает две взаимосвязанные составляющие:

1. Численное моделирование

Система «свая–грунт» моделируется методом конечных элементов с учётом:

- 1) нелинейной деформации грунта;
- 2) накопления пластических деформаций;
- 3) изменения контактных характеристик на интерфейсе «свая–грунт».

Свайный элемент рассматривается как линейно-упругий стержень, взаимодействующий с грунтом через нелинейные интерфейсные элементы.

Для апробации предложенного подхода рассмотрен условный свайный фундамент в водонасыщенном песчаном основании, подверженном сейсмическому воздействию. Расчётная схема принята в трёхмерной постановке по аналогии с ранее рассмотренной моделью свайного основания в PLAXIS 3D, где анализировались состояния до землетрясения, сразу после сейсмического воздействия и через 3 суток после него.

В расчёте приняты следующие исходные параметры:

Таблица 1

Параметр	Значение
Тип свай	Железобетонные забивные
Диаметр свай	1,2 м
Длина свай	55 м
Расстояние между сваями	4,0 м
Основной грунт	Мелкий водонасыщенный песок
Глубина уровня грунтовых вод	2,5 м
Модель песка	UBC3D-PLM
Сейсмическое воздействие	PGA = 0,5g
Время анализа после воздействия	0 ч; 24 ч; 72 ч

Расчёт выполнялся по следующей стадийности:

Таблица 2

Стадия	Назначение
Initial phase	Формирование начального напряжённого состояния
Construction phase	Устройство свайного фундамента
Static loading	Приложение эксплуатационной нагрузки
Dynamic phase	Сейсмическое воздействие
Post-seismic phase	Состояние сразу после землетрясения
Consolidation 24 h	Частичная диссипация порового давления
Consolidation 72 h	Дальнейшее восстановление эффективных напряжений

На каждой стадии определялись:

- осадки свай;
- боковое сопротивление по длине свай (рис. 1);
- избыточное поровое давление;
- коэффициент снижения несущей способности;
- остаточная несущая способность свайного фундамента.

Имея значения трения по боковой поверхности и используя методику, описанную в [5–7], получены следующие значения несущей способности одиночной сваи:

Таблица 3

Расчётное состояние	Несущая способность Q , кН	Относительная несущая способность Q/Q_0	Снижение, %
До сейсмического воздействия	8200	1,00	0
Сразу после воздействия	5900	0,72	28
Через 24 часа	6550	0,80	20
Через 72 часа	7050	0,86	14

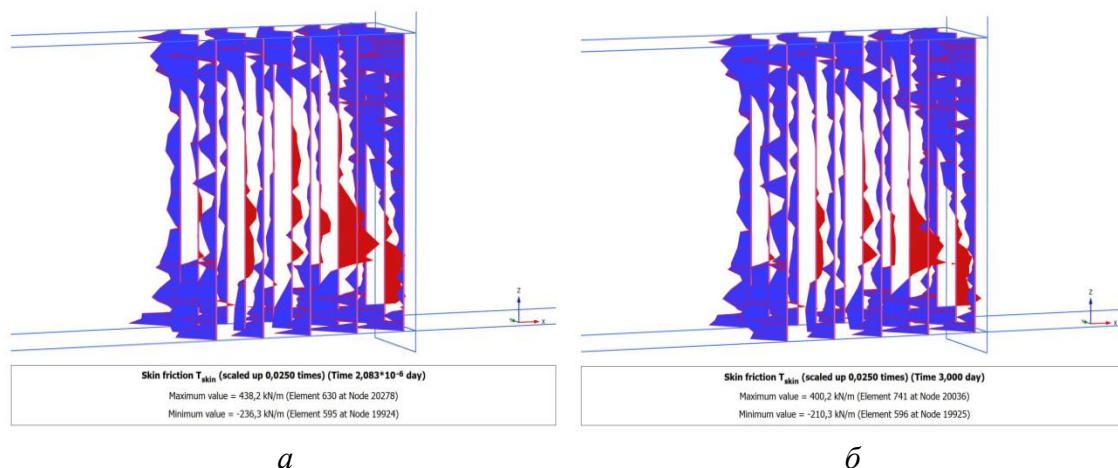


Рис. 1. Результаты численного моделирования. Значения силы трения грунта по боковой поверхности свай:

а – сразу после землетрясения – 438,2 кН/м;
б – спустя 3 дня после землетрясения – 400,2 кН/м

Таким образом, максимальное снижение несущей способности наблюдается непосредственно после завершения динамического воздействия. Через 72 часа происходит частичное восстановление несущей способности, однако исходное значение не достигается.

2. Аналитический подход

Изменение несущей способности во времени после землетрясения вводится через коэффициент восстановления:

$$R(t) = R_0 \cdot k_{rec}(t), \quad (1)$$

где R_0 — исходная несущая способность до землетрясения; $R(t)$ — несущая способность через время t после воздействия; $k_{rec}(t)$ — коэффициент восстановления; t — время после землетрясения.

Таким образом, несущая способность сваи определяется как:

$$k_{rec}(t) = k_{min} + (1 - k_{min}) \cdot (1 - e^{-\alpha t^\beta}), \quad (2)$$

где k_{min} — остаточная доля несущей способности сразу после землетрясения; α — коэффициент скорости восстановления, физически значения α зависят от коэффициента консолидации c_v и коэффициента фильтрации песка K_f ; β — коэффициент формы восстановления, $\beta < 1$ — быстрое начальное восстановление, затем замедление; $\beta = 1$ — обычное экспоненциальное восстановление; $\beta > 1$ — быстрое начальное восстановление, затем замедление; t — время после сейсмического воздействия.

Сразу после землетрясения несущая способность падает до $k_{min} \cdot R_0$, затем постепенно восстанавливается по мере диссипации порового давления и восстановления эффективных напряжений.

Для определения значений α и β необходимо знать:

1. R_0 и $R_{post} = R(t = 0)$ — значения несущей способности до и сразу после землетрясения.

Тогда

$$k_{\min} = \frac{R_{post}}{R_0}, \quad (3)$$

2. $R(t_1), R(t_2), R(t_3)$ — значения несущей способности (в данной работе рассматриваем через 1 сутки и через 3 суток)

3. Изменение порового давления во времени:

$$r_u(t) = \frac{\Delta u(t)}{\sigma'_v}. \quad (4)$$

где $\Delta u(t)$ — избыточное поровое давление; σ'_v — начальное эффективное вертикальное напряжение; r_u — коэффициент изменения порового давления.

Тогда коэффициент восстановления можно связать не напрямую со временем, а с восстановлением эффективных напряжений:

$$k_{rec}(t) = k_{\min} + (1 - k_{\min}) \cdot \left(1 - \frac{r_u(t)}{r_{u,0}}\right)^m, \quad (5)$$

где m — показатель чувствительности бокового сопротивления свай к восстановлению эффективных напряжений.

Учёт процессов в грунте после сейсмического воздействия и результаты расчёта

После прекращения сейсмического воздействия в грунтовом массиве наблюдаются следующие процессы:

- диссипация избыточного порового давления;
- перераспределение эффективных напряжений;
- частичное восстановление жёсткости песчаных грунтов;
- стабилизация структуры после циклической деградации.

Скорость восстановления существенно зависит от:

- коэффициента фильтрации грунта;
- плотности сложения;
- степени разжижения;
- глубины залегания слоя.

В рамках модели данные процессы учитываются через изменение параметров интерфейса «свая–грунт» во времени.

После проведённого численного моделирования, мы имеем расчетные значения k_{rec} для разных моментов времени. Подбор значений α и β может быть осуществлен следующим способом:

$$k_t = k_{\min} + (1 - k_{\min}) \cdot \left(1 - e^{-\alpha t^\beta}\right). \quad (6)$$

Преобразуем в

$$1 - \frac{k_t - k_{\min}}{1 - k_{\min}} = e^{-\alpha t^\beta}; \quad (7)$$

$$-\ln \left(1 - \frac{k_t - k_{\min}}{1 - k_{\min}} \right) = \alpha t^\beta. \quad (8)$$

Логарифмируем и получаем:

$$\ln Y = \ln \alpha + \beta \cdot \ln t, \quad (9)$$

где

$$Y = -\ln \left(1 - \frac{k_t - k_{\min}}{1 - k_{\min}} \right). \quad (10)$$

Тогда α и β могут быть получены линейной аппроксимацией в координатах $\ln Y - \ln t$

В результате расчёта по предложенной в данной работе аналитической методике получаем следующие рекомендуемые диапазоны значений:

$$\begin{aligned} k_{\min} &= 0,62 - 0,7; \\ \alpha &= 0,25 - 0,40 \text{ сут}^{-1}; \\ \beta &= 0,65 - 0,85. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем:

Таблица 4

Время после землетрясения	k_{rec}	Несущая способность от исходной
0 суток	0,65	65 %
1 сутки	$\approx 0,74$	74 %
3 суток	$\approx 0,83$	83 %
7 суток	$\approx 0,92$	92 %
14 суток	$\approx 0,97$	97 %

Анализ результатов

Расчётные исследования показывают, что:

- 1) сразу после сейсмического воздействия наблюдается резкое снижение бокового сопротивления свай;
- 2) наиболее критичные зоны деградации формируются в верхней части сваи в зоне разжижения грунта;
- 3) восстановление несущей способности носит нелинейный затухающий характер;
- 4) полное восстановление первоначального уровня несущей способности не достигается в рассматриваемом временном интервале.

Наибольшая чувствительность модели наблюдается к параметру β , определяющему скорость консолидации и восстановления эффективных напряжений.

Заключение

В ходе работы был создан и апробирован подход к оценке изменения несущей способности свайных фундаментов во времени после сейсмического воздействия на основе численного моделирования с использованием нелинейной модели грунта и последующего аналитического описания процессов восстановления.

По результатам расчётов установлено, что при сейсмическом воздействии интенсивностью $PGA = 0,5g$ снижение несущей способности свайного фундамента достигает 28 % относительно исходного состояния. При этом основная деградация бокового сопротивления сосредоточена в верхней и средней частях песчаного массива (в пределах 15–25 м), где формируются зоны разжижения и наблюдается максимальное снижение эффективных напряжений.

Показано, что изменение несущей способности после завершения динамического воздействия носит выраженный временной характер и определяется процессами диссипации избыточного порового давления и восстановления эффективных напряжений. В частности, через 24 ч после воздействия несущая способность восстанавливается до 80 %, а через 72 ч — до 86 % от исходного значения, что свидетельствует о неполном восстановлении эксплуатационных характеристик основания в краткосрочном периоде.

Предложенная аналитическая зависимость изменения несущей способности во времени позволяет адекватно описывать нелинейный характер восстановления после сейсмического воздействия и учитывать инерционность процессов, протекающих в грунтовом массиве. При этом установлено, что параметры деградации и восстановления чувствительны к инженерно-геологическим условиям, прежде всего к плотности сложения песчаных грунтов, уровню грунтовых вод и степени их разжижения.

Анализ результатов показал, что использование исключительно расчётных состояний «до» и «после» сейсмического воздействия без учёта временного фактора может приводить к искажению оценки несущей способности до 10 % – 15 %, что имеет принципиальное значение при проектировании ответственных сооружений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного подхода при:

- оценке остаточной несущей способности свайных фундаментов после землетрясений;
- обосновании сроков восстановления эксплуатационной пригодности сооружений;
- уточнении расчётных моделей оснований и фундаментов в условиях сейсмических воздействий.

Полученные результаты подтверждают необходимость учёта временных процессов в грунтовом массиве при анализе работы свайных фундаментов после динамических воздействий и могут быть использованы при совершенствовании методов расчёта оснований в сейсмоопасных районах.

Список источников

1. Мирный, А.Ю. Испытания трёхосного сжатия крупнообломочных грунтов / А. Ю. Мирный, И. Х. Идрисов // Геоинфо. – 2021. –1. – С. 58-62.
2. Соболев, Е. С. Зависимость динамического модуля деформации грунтов от частоты воздействия / Е. С.Соболев, Я. А. Богданов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2024. – 61. – С. 153-156.
3. Тер-Мартirosян, А. З. Опыт научно-технического сопровождения гидротехнического объекта I класса с выполнением трёхосных испытаний крупнообломочного грунта / А. З. Тер-Мартirosян, Л. Ю. Ермошина, А. С. Алмакаева // Геотехника. – 2021. – 2 (13). – С. 32-45.
4. Нуждин, Л. В. Зависимость динамических параметров основания от величины статических нагрузок на свайный фундамент / Л. В. Нуждин // Тезисы докладов 62-й научно-технической конференции, посвящённой 75-летию НГАСУ. – Новосибирск. – С. 96.
5. Сидоров, В. В. Графоаналитический метод расчета сваи в однослойном массиве с учетом проскальзывания / В. В.Сидоров, А. З. Тер-Мартirosян, А. С. Алмакаева // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 10. – С. 96-104. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.10.96-104.
6. Тер-Мартirosян, А. З. Графоаналитический метод расчета сваи в многослойном массиве с учетом отрыва и проскальзывания сваи по грунту / А. З. Тер-Мартirosян, В. В. Сидоров, А. С. Алмакаева // Жилищное строительство. – 2023. – № 11. – С. 37-43.
7. Ter-Martirosyan, A.Z., Sidorov, V.V., Almakaeva, A.S. Graph-analytical method for calculating settlement of a single pile taking into account soil slippage // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Article Number 8064. <https://doi.org/10.3390/app14178064>.
8. Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсевича (НИИОСП им. Н. М. Герсевича) — институт ОАО «НИЦ «Строительство» (2011). СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» (актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85), Министерство регионального развития Российской Федерации (Минрегион России), Москва.

© Богданов Я. А. Соболев Е. С., 2026