

roads of the Far East. Experience of design and operation]. Moscow, Transport, 1994. 141 p.

11. Morina O.M. K voprosu dorozhno-klimaticheskogo rajonirovanija Habarovskogo kraja i EAO po dinamike temperatur vozduha i pochvy [To a question of road and climatic zoning of the Khabarovsk territory and Jewish Autonomous Oblast on dynamics of air and soil temperatures]. *Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2006, no 21. pp. 1-23.

12. Schiffer H.-W. Europe's road to a sustainable energy-supply system / H.-W. Schiffer // *Energy and Environment*. 2015. - 26 (1-2), pp. 111-126.

13. Sanchez, A.X. Use of contract models to improve environmental outcomes in transport infrastructure construction / A.X. Sanchez, L.M. Lehtiranta, K.D. Hampson // *Journal of Environmental Planning and Management*. 2014.

Федюк Роман Сергеевич (Россия г. Владивосток) – старший преподаватель учебного военного центра ФГАОУ ВПО «ДВФУ» (690000, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 20, e-mail: roman44@iyandex.ru).

Козлов Павел Геннадьевич (Россия г. Владивосток) – преподаватель учебного военного центра ФГАОУ ВПО «ДВФУ» (690000, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 20, e-mail: roman44@iyandex.ru).

Мочалов Александр Викторович (Россия г. Владивосток) – начальник учебной части – заместитель начальника учебного военного

центра ФГАОУ ВПО «ДВФУ» (690000, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 20, e-mail: roman44@iyandex.ru).

Тимохин Андрей Михайлович (Россия г. Владивосток) – начальник отдела подготовки инженерных войск учебного военного центра ФГАОУ ВПО «ДВФУ» (690000, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 20, e-mail: roman44@iyandex.ru).

Fedyuk Roman Sergeevich (Russian Federation, Vladivostok) – senior lecturer of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (690000, Russkiy Island, 20 Ayax, Vladdivostok, e-mail: roman44@iyandex.ru).

Kozlov Pavel Gennadiyevich (Russian Federation, Vladivostok) – lecturer of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (690000, Russkiy Island, 20 Ayax, Vladdivostok, Russian Federation, e-mail: roman44@iyandex.ru).

Mochalov Aleksandr Viktorovich (Russian Federation, Vladivostok) – head of the training unit of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (690000, Russkiy Island, 20 Ayax, Vladdivostok, e-mail: roman44@iyandex.ru).

Andrey M. Timokhin (Russian Federation, Vladivostok) – head of the department of training engineering troops of Military Training Center, Far Eastern Federal University (690000, island Russkiy, Vladivostok, Ayax village, 20, e-mail: roman44@iyandex.ru).

УДК 624.13

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЛУБОКИХ ФУНДАМЕНТОВ И ТРЕЩИНОВАТЫХ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ

И.Н. Хохлов

ФГБОУ ВПО «МГСУ», Россия, г. Москва.

Аннотация. Данная статья рассматривает основные факторы, влияющие на несущую способность и перемещения свай в скальных грунтах при горизонтальных нагрузках. Перечислены основные методы расчета свай на горизонтальную нагрузку: аналитические, эмпирические, численные методы. На сегодняшний день численные методы расчета, позволяющие учесть множество факторов, влияющих на работу свай, являются наиболее эффективными при расчете свай в скальном грунте на горизонтальную нагрузку. Предложенная методика расчета, основанная на применении численных методов и метода планирования эксперимента, позволяет вычислить несущую способность и деформации свай с учетом основных факторов, влияющих на работу свай в скальном массиве. При использовании предложенной методики, решения могут быть получены как аналитическим способом (при решении параметрических уравнений), так и графическим (используя номограммы), что существенно облегчает выбор конструктивных параметров свай на предварительной стадии проектирования.

Ключевые слова: свай в скальных грунтах, методы расчета, численное моделирование, метод планирования экспериментов, несущая способность.

Введение

Расчет глубоких фундаментов (свай), устраиваемых в скальных грунтах на вертикальные и горизонтальные нагрузки изучен недостаточно, а в нашей стране практически не изучался. Стоит сказать, что в действующем СП имеется лишь один параграф, касающийся расчета свай на вертикальную нагрузку. При этом предложенная формула для расчета несущей способности на вертикальную нагрузку с учетом показателя RQD дает заниженные результаты [1]. При анализе нормативной и специальной литературы отечественных авторов можно сделать вывод о том, что основным методом расчета свай на горизонтальные нагрузки является винклеровская модель балки на упругом или упруго-пластическом основании [2],[3]. При этом практически не рассмотрены вопросы учета различных факторов, влияющих на напряженно-деформируемое состояние свай в скальном грунте.

Основные факторы, влияющие на работу свай в скальных грунтах при горизонтальных нагрузках

Характер взаимодействия свай с массивом скального грунта определяется влиянием множества факторов, изучением которых занимались как в лабораторных условиях, так и при испытаниях натуральных свай [4],[5],[6]. В лабораторных исследованиях изучались модели свай для определения факторов, влияющих на сопротивление сдвигу вдоль контакта поверхности свай и скального массива. В полевых исследованиях проводились измерения несущей способности свай, напряжения в глубине скального массива, деформации свай. Исследования проводились на сваях, между которыми устанавливался домкрат. Для измерения напряжений в грунте проводили тесты по методу Остерберга. Инклинометрами и деформометрами различного типа измерялись перемещения свай. Методом конечных элементов изучалось влияние на несущую способность и перемещения свай соотношения между длиной её заглублённой части и диаметром, а также отношения модулей упругости бетона и скального массива, как вокруг свай, так и под её концом. В 1999 году Вакаи [7] представил пространственную конечноэлементную модель свай и окружающего грунтового массива. Массив грунта задавался упруго-пластической моделью, свая задавалась упругой линейной моделью. В 2002 году

Уоллес [8] представил пространственную модель свай, имитирующую полевые испытания, где грунт был задан по модели Кулона-Мора.

Результаты выполненных исследований позволили установить факторы, существенно влияющие, как на несущую способность заглублённых в скальный грунт свай, так и на их перемещения. К этим факторам относятся: отношение заглублённой части свай к её диаметру (L/d); соотношение модулей упругости бетона и скального массива; прочность скального массива вокруг и под нижним концом свай; шероховатость стенок скважины; наличие на дне скважины под концом свай образовавшейся при бурении скважины горной массы и другого мусора; слоистость скального массива, если слои имеют различную прочность и модули упругости; ползучесть скальных пород в зоне контакта бетона со скальным массивом, приводящая к увеличивающимся во времени осадкам свай.

При этом факторами, оказывающими наибольшее влияние на несущую способность свай являются: соотношение модуля упругости бетона и скальной отдельности ($\frac{E_b}{E_r}$), трещиноватость скального массива и соотношение длины и диаметра свай.

Постановка задачи определения несущей способности и деформаций свай в скальном грунте при горизонтальных нагрузках

Как известно, для определения несущей способности свай возможно проводить полевые испытания натуральных свай или пользоваться одной из известных методик расчета. Полевые испытания натуральных свай в скальных грунтах довольно дорогостоящи и не всегда позволяют определить оптимальные конструктивные параметры свайного фундамента. Что касается существующих расчетных методик, то среди них выделяют следующие: аналитические (не учитывают многообразие факторов, влияющих на работу свай под нагрузкой); эмпирические (основанные на обработке множества натуральных испытаний, поэтому ограничены в применении для конкретных геологических условий); численные методы (позволяющие учесть множество факторов, влияющих на работу свай и не требующих обработки большого числа опытных данных).

При этом стоит отметить, что несмотря на явные преимущества по сравнению с

аналитическими и эмпирическими методами, численные методы обладают существенным недостатком – они позволяют получить единственное решение, из которого невозможно вывести закономерности взаимодействия системы «свая-скальный массив». Используя метод планирования эксперимента (МПЭ), и обрабатывая с его помощью данные численного моделирования, возможно получить уравнение несущей способности и деформаций свай в скальном грунте. Суть МПЭ заключается в организации, проведении и обработке опытных данных, позволяющих очертить область варьируемых факторов, в которых будет исследоваться зависимость – матрицу планирования эксперимента. В матрице планирования эксперимента четко

указаны количество опытов и значений факторов, на основании чего можно получить «отклики» – значения функции, соответствующее конкретному сочетанию факторов. После обработки «откликов» возможно получить параметрическое уравнение, которое может быть использовано для отыскания значений функции в любой точке факторного пространства при произвольном задании их значений.

Для решения задачи совместного деформирования сваи и массива скального грунта, а также определения предельной допустимой нагрузки на сваю (несущей способности), была составлена серия численных моделей в соответствии с планом эксперимента (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат				Характеристики скального массива			
	$\frac{E_b}{E_r}$	RQD, %	$\frac{L_p}{D_p}$	X_0	X_1	X_2	X_3	E_r , МПа	E_m , МПа	c_m , МПА	φ_m , град.
1	0,5	25	2,5	+1	-1	-1	-1	50000	2000	2,8	30
2	5	25	2,5	+1	+1	-1	-1	5000	200	0,44	26
3	0,5	75	2,5	+1	-1	+1	-1	50000	15000	4,5	36
4	5	75	2,5	+1	+1	+1	-1	5000	1500	0,71	30
5	0,5	25	10	+1	-1	-1	+1	50000	2000	2,8	30
6	5	25	10	+1	+1	-1	+1	5000	200	0,44	26
7	0,5	75	10	+1	-1	+1	+1	50000	15000	4,5	36
8	5	75	10	+1	+1	+1	+1	5000	1500	0,71	30
9	2,75	50	6,25	0	0	0	0	27500	1870	2,1	30

Сваи моделировались восьмиузловыми конечными элементами. В качестве модели материала использовалась упругая модель. Скальный массив также задавался восьмиузловыми конечными элементами по модели Мора-Кулона. Граничные условия задавались стандартным способом – боковые и нижняя грани расчетной модели закреплялись от перемещений. Выбор расстояния от центра сваи до боковых граней расчетной модели были выполнены на

основании данных моделирования, выполненного Уоллесом [8]. Оптимальное расстояние до края расчетной области составляет 11 диаметров сваи, под сваей рекомендуется задавать 0,7 длины сваи. Расчетная модель сваи представлена на рисунке 1. Для решения поставленной задачи использовался программно-вычислительный комплекс Z-Soil, основанный на методе конечных элементов.

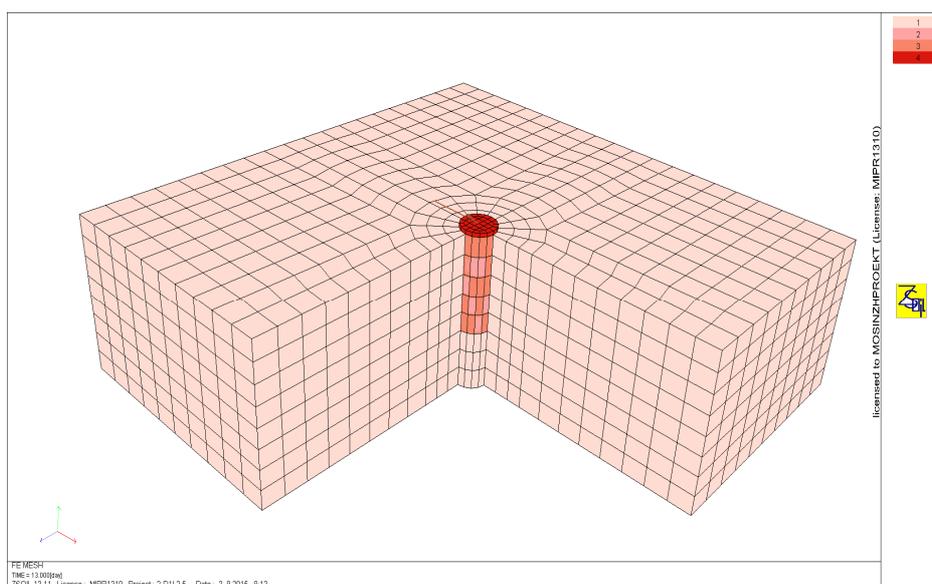


Рис. 1. Пространственная модель сваи (четверть не показана)

«Жесткая» и «гибкая» схемы деформаций свай в скальном массиве и их связь с несущей способностью свай при горизонтальных нагрузках

На вопрос о том, что считать несущей способностью свай в скальном грунте при действии горизонтальной нагрузки, нельзя ответить однозначно, так как существует два случая, при которых наступает предельное состояние в системе «свая-грунт». В первом случае, при недостаточно глубокой заделке сваи, происходит разрушение скального грунта впереди сваи и в нижней части (со стороны приложения нагрузки). В этом случае

свая имеет возможность перемещаться в грунте, не имея заделки, и такие сваи называют «жесткими». Во втором случае - «гибкие» сваи, имея достаточное заглубление в грунт, не имеют возможности свободного поворота в грунте и воспринимают большую часть нагрузки стволом сваи. При этом на грунт оказывается меньшее давление. Таким образом, предельное состояние такой системы определяется предельными внутренними усилиями в стволе сваи, которые наступают значительно раньше, чем горизонтальное напряжение в грунте превысит предел прочности.

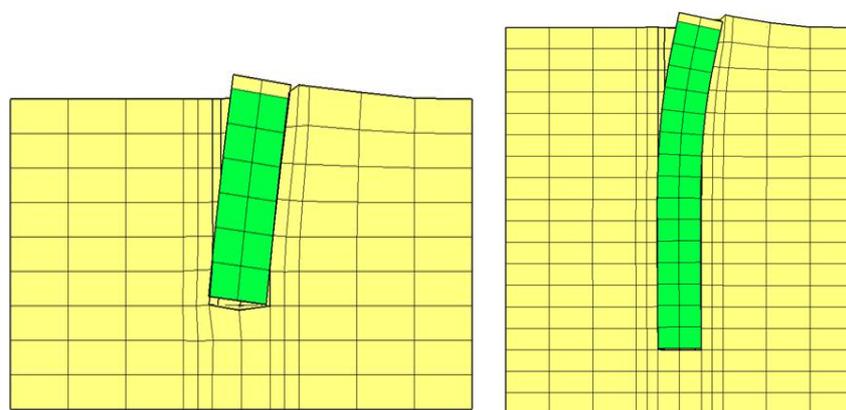


Рис. 2. «Жесткая» (слева) и «гибкая» (справа) схемы работы свай

В рассмотренных моделях свай различных длин и диаметров при приложении горизонтальной нагрузки на сваю наблюдалось увеличение горизонтальных напряжений по фронту сваи с ростом нагрузки. При определенном значении

нагрузок значение горизонтального напряжения превышало предел прочности грунта на сжатие. Очертания зоны предельного напряжения в массиве скального грунта перед сваем показано на рисунке 3. Нагрузка, при которой в грунте образуется

зона предельных напряжений, принималось в качестве максимально возможной нагрузки на сваю. Соответствующие данному нагружению внутренние усилия в свае фиксировались и ставились в соответствие приложенной нагрузке. При этом изгибающие моменты в стволе сваи и напряжения в окружающем

массиве скального грунта определялись на стадии упругих и пластических деформаций, что позволило вывести закономерность увеличения внутренних усилий и определить момент разрушения как материала сваи, так и окружающего сваю грунта.

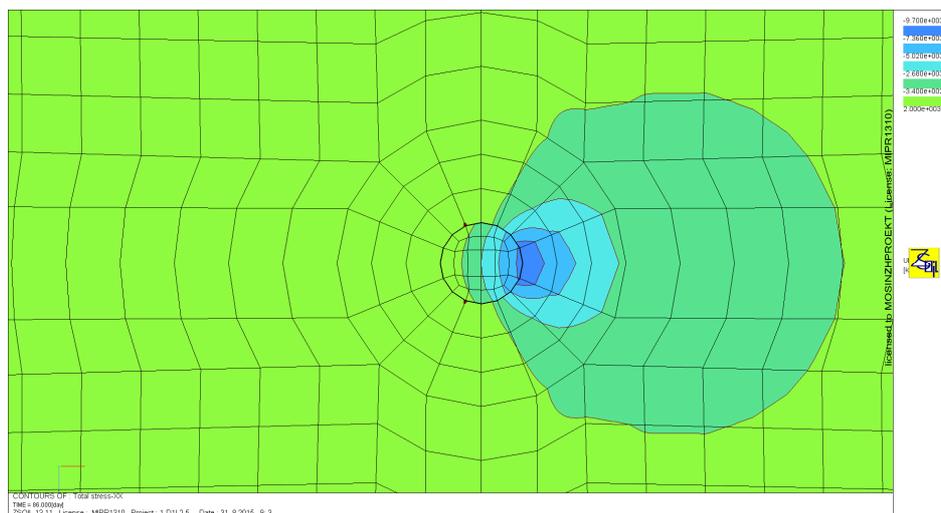


Рис. 3. Образование зоны предельного горизонтального напряжения в грунтовом массиве

Рассматривая кривые деформирования сваи под нагрузкой, возможно выделить два участка: прямой – линейные деформации и

участок нелинейных деформаций, где имеют развитие в грунте пластические зоны (рис.4).

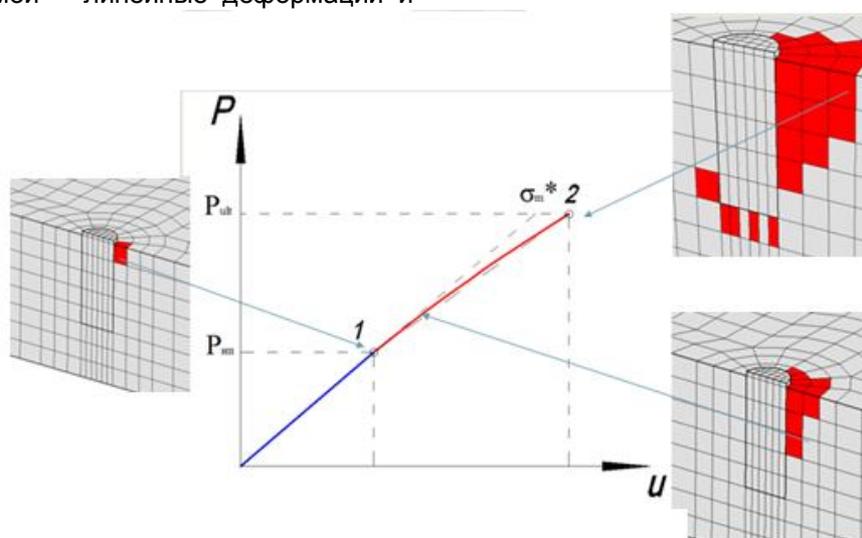


Рис. 4. Кривая деформирования сваи

Учет наличия трещин в скальном массиве при численном моделировании

Важной особенностью расчета взаимодействия сваи и массива скального грунта, является учет наличия систем трещин и масштабного фактора. В настоящее время в нашей стране отсутствуют качественно-количественные классификационные

системы, которые позволили бы учесть данные особенности в расчетах. Для характеристики трещиноватости использовался показатель RQD, который позволяет, основываясь на исследованиях Чанга [9], определить модуль деформации массива (рис. 5).

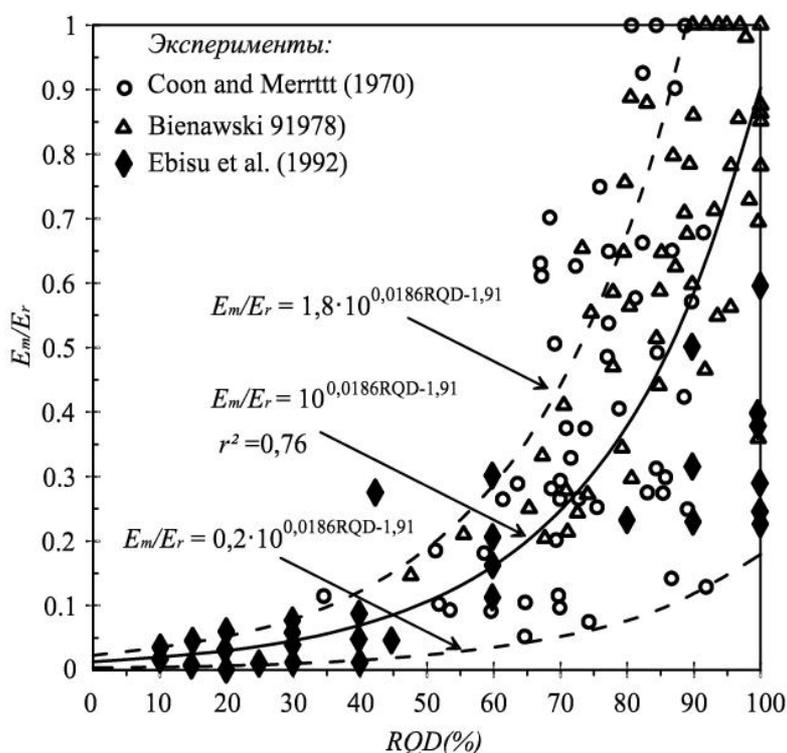


Рис. 5. График зависимости E_m/E_r как функция от RQD (Zhang, 2000)

Обработка результатов моделирования и получение уравнений несущей способности и горизонтальных перемещений сваи

Проведя серию расчетов пространственных конечноэлементных моделей, и обработав их по правилам метода

планирования эксперимента, были получены уравнения регрессии, которые позволяют при любой комбинации факторов рассчитывать несущую способность сваи.

Нагрузка на сваю (несущая способность по грунту):

$$\begin{aligned}
 P_{ult} = & 6543,75 - 4406,25 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r - 2,25} \right) + 931,25 \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) + 493,75 \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p - 3,75} \right) - 618,75 \\
 & \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r - 2,25} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) - 56,25 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r - 2,25} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p - 3,75} \right) - 243,75 \\
 & \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p - 3,75} \right) + 106,25 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r - 2,25} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p - 3,75} \right)
 \end{aligned}$$

Отклонение головы сваи в уровне поверхности грунта, соответствующее предельному напряжению:

$$\begin{aligned}
 U_{ult} = & 10,84 + 0,97 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) - 6,01 \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) + 1,46 \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right) - 0,805 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \\
 & \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) + 0,22 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right) - 0,815 \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right) \\
 & - 0,08 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right)
 \end{aligned}$$

Изгибающий момент в стволе сваи, соответствующий предельному напряжению:

$$\begin{aligned}
 M_{ult} = & 2095,625 - 989,375 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) - 265,625 \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) + 530,375 \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right) + 158,375 \\
 & \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) + 32,375 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right) - 327,375 \\
 & \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right) + 93,625 \cdot \left(\frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left(\frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left(\frac{L_p - 6,25}{D_p} \right)
 \end{aligned}$$

Однако, следует отметить, что полученные уравнения регрессии громоздкие и таким образом их эффективное использование возможно лишь при наличии специальных программ типа Excel. Для

упрощения использования данных уравнений были построены номограммы, использование которых позволяет оценить несущую способность и предельные деформации сваи на стадии предварительного расчета (рис.6).

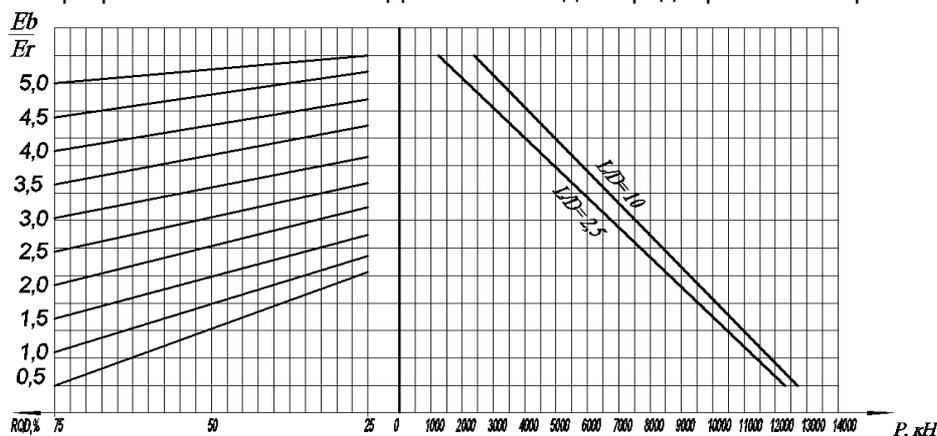


Рис. 6. Номограмма несущей способности сваи по грунту

Заключение

Необходимо отметить, что представленная методика, учитывающая влияние нескольких факторов, позволяет при минимальном

количестве исходных данных (только прочность скальной отдельности и трещиноватость массива, выраженная показателем RQD) производить предварительные расчеты

несущей способности и деформаций свай в скальном грунте при горизонтальных нагрузках. Дальнейшее развитие данной методики в увязке с аналогичными исследованиями при вертикальных нагрузках, позволит производить всесторонний комплексный анализ работы свай в скальном грунте и их рациональное конструирование (подбор длины, диаметра, технологии устройства, армирования и пр.). Учитывая широкое применение свайных фундаментов в транспортных сооружениях в связи с их относительно высокой несущей способностью и скоростью устройства, разработанная методика может существенно облегчить задачу проектирования и расчета подобных конструкций.

Библиографический список

1. СП 24.13330.2011: Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – М.: Минрегион России, 2010. – С. 16, 71-74.
2. Зерцалов, М.Г. О расчете свай в скальных грунтах / М.Г. Зерцалов, Д.С. Конюхов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – №1. – С. 14-16.
3. Федоровский, В.Г. Сваи в гидротехническом строительстве / В.Г. Федоровский, С.Н. Левачев, С.В. Курилло, Ю.М. Колесников. – М.: Издательство «АСВ», 2003. – 238 с.
4. US department of transportation. Drilled shafts: construction procedures and design methods // Publication No FHWA-IF-99-025, August 1999. 789 p.
5. The government of the Hong-Kong special administrative region. Foundation design and construction // GEO Publication No 1/2006. 376 p.
6. Transportation research board executive committee. Rock-socketed shafts for highway structure foundations // NCHRP Synthesis 360, Washington, D.C., 2006. 145 p.
7. Wakai A., Gose, S., Ugai, K. 3-D elasto-plastic finite element analyses of pile foundations subjected to lateral loading. Soils and Foundations, Vol.39, No.1, pp. 97-111.
8. Wallace J.W. et al. Cyclic large deflection testing of shaft bridges part II: analytical studies. Report from California Dept. of Transportation, 2002. 230 p.
9. Zhang L. Drilled shafts in rock. Analysis and design // A.A. Balkema publishers, 2004. 383 p.

ANALYSIS OF INTERACTION OF THE DEEP BASES AND JOINTED ROCKY MASSIFS AT HORIZONTAL LOADINGS

I.N. Khokhlov

Abstract. This article considers the main factors affecting the bearing capacity and displacement of piles in rock under horizontal loads. The main methods for calculation of piles for horizontal loading are: analytical, empirical, numerical methods. Today, numerical methods of calculation that take into account many factors affecting on piles, are the most

effective in the calculation of piles in rock under horizontal loads. The method of calculation, based on the application of numerical methods and the method of experiment planning, allows us to calculate the bearing capacity and deformation of piles taking into account the main factors influencing on piles in rock. When using the proposed method, solutions can be obtained by analytical method (when solving parametric equations) and graphical (using nomograms), which greatly facilitates the choice of the design parameters of the piles at the preliminary design stage.

Keywords: piles in rock, calculation methods, numerical model, experimental design method, bearing capacity.

References

1. SP 24.13330.2011: *Svajnye fundamenty. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.02.03-85* [SP 24.13330.2011: Pile bases. The staticized edition Construction Norms and Regulations 2.02.03-85]. Moscow, Minregion Rossii, 2010. p. 16, 71-74.
2. Zercalov M.G., Konjuhov D.S. O raschete svaj v skal'nyh gruntah [About calculation of piles in rocky soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 2007, no 1. pp. 14-16.
3. Fedorovskij V.G., Levachev S.N., Kurillo S.V., Kolesnikov Ju.M. Svai v gidrotehnicheskom stroitel'stve [Piles in hydrotechnical construction]. Moscow, Izdatel'stvo «ASV», 2003. 238 p.
10. US department of transportation. Drilled shafts: construction procedures and design methods // Publication No FHWA-IF-99-025, August 1999. 789 p.
11. The government of the Hong-Kong special administrative region. Foundation design and construction // GEO Publication No 1/2006. 376 p.
12. Transportation research board executive committee. Rock-socketed shafts for highway structure foundations // NCHRP Synthesis 360, Washington, D.C., 2006. 145 p.
13. Wakai A., Gose, S., Ugai, K. 3-D elasto-plastic finite element analyses of pile foundations subjected to lateral loading. *Soils and Foundations*, Vol.39, No.1, pp. 97-111.
14. Wallace J.W. et al. Cyclic large deflection testing of shaft bridges part II: analytical studies. Report from California Dept. of Transportation, 2002. 230 p.
15. Zhang L. Drilled shafts in rock. Analysis and design // A.A. Balkema publishers, 2004. 383 p.

Хохлов Иван Николаевич (Россия, г. Москва) – аспирант кафедры «Механики грунтов и геотехники», Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ») (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, i.khokhloff2015@yandex.ru).

Khokhlov Ivan Nickolaevich (Russian Federation, Moscow) – postgraduate student, department of «Soil Mechanics and Geotechnics», Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) (129337, Moscow, Yaroslavl'skoe shosse26, e-mail: i.khokhloff2015@yandex.ru).