**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 7, № 2, 2016
PNRPU BULLETIN
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.11

УДК 624.154

ИННОВАЦИИ В ГЕОТЕХНИКЕ, СВЯЗАННЫЕ С НОВЫМИ ПОДХОДАМИ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА БУРОВЫХ СВАЙ

Б.И. Кулачкин, А.А. Митькин

ООО «Институт по проектированию транспортных сооружений – «Транспроект», Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 18 февраля 2016
Принята: 10 марта 2016
Опубликована: 30 июня 2016

Ключевые слова:

геотехника мостов, буронабивная свая, несущая способность, качество свай, акустика, ультразвук, сейсмоакустика, статические и динамические испытания свай, сплошность, аномалия, трещина, дефект

АННОТАЦИЯ

Отмечено, что фундаментальными понятиями геотехники являются несущая способность грунта и качество бетона. Предложена аналого-дискретная модель грунта и бетона, основанная на хрупком теле KR (Кулачкин–Радкевич). Качество бетона исследовано с применением акустики, включая теневой и эхо-способы. Представлен критический анализ методов испытаний свай. Динамические методы Dynamic Load Test, Statnamic и метод Герсеванова показали свою эффективность. Метод Osterberg'a (статический метод) имеет существенные ограничения. Штамповые испытания после бурения скважин до устройства свай эффективны для оценки несущей способности свай с учетом бокового трения при применении обсадных труб. Комбинация Ultrasonic (ультразвук) и Low Strain Test (сейсмоакустика) повышает информативность акустических исследований и может быть использована для свай, стен в грунте, ограждающих конструкций и др. Зависимость скорости акустической волны (УЗД) от прочности бетона, имеющая линейный характер, использована для Low Strain Test в рамках одномерной волновой теории. Визуальное обследование геотехнических работ и анализ инженерных изысканий в рамках Observation Method (метод наблюдений) имеет важное практическое значение, особенно для линейных сооружений (мосты, путепроводы, эстакады, тоннели), позволяя вносить необходимые изменения в проект в процессе строительства, что в целом повышает качество геотехнических работ.

© ПНИПУ

© **Кулачкин Борис Иванович** – академик РАЕН, доктор геолого-минералогических наук, кандидат технических наук, чл.-корр. РИА, стипендиат «Выдающиеся ученые России», заместитель директора ООО ИПТС-«Транспроект», e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

Митькин Александр Александрович – заведующий лабораторией геомассивов, оснований и фундаментов, e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

Boris I. Kulachkin – Academician of RANS, Doctor of Mineralogy, Ph.D. in Technical Sciences, Correspondent Member of RIA, Grant-Holder “Outstanding Russian Scientists”, Deputy Director, LLC “IPTs-“Transproekt”, e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

Aleksandr A. Mit'kin – Chief of Laboratory “Geosolids, base and basements”, e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

INNOVATION IN GEOTECHNICS, ASSOCIATED WITH NEW APPROACHES TO ASSESSING THE QUALITY OF BORING PILES

B.I. Kulachkin, A.A. Mit'kin

LLC "IPTS-Transproekt", Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 18 February 2016
Accepted: 10 March 2016
Published: 30 June 2016

Keywords:

bridges' geotechnics, augured pile, pile capacity, pile quality, acoustics, ultrasonics, seismoacoustics, bootstrap and dynamic pile test, integrity, anomaly, crack, defect

ABSTRACT

It is noted that the fundamentals of Geotechnics are load-bearing capacity of soil and the quality of the concrete. Offered analogue-discrete model of soil and concrete based on a fragile body KR (Kulachkin–Radkevich). Quality concrete are investigated using acoustic methods. The critical analysis of methods of testing piles is done. Dynamic methods, Dynamic Load Test, Statnamic and Gersevanov method – are effective. Osterberg method (static method) has significant limitations. Plate test after drilling wells to piles are effective for assessing the bearing capacity of piles with consideration of lateral friction when applying the casing. Combination of Ultrasonic and Load Strain Test (Seismoacoustics) increases the information content of acoustic research and can be used for piles, diaphragm walls, walling, and others. The dependence of the acoustic wave velocity (SPL) on the strength of concrete has linear character, used for Low Strain Test as part of a one-dimensional wave theory. Visual inspection and analysis of geotechnical engineering research within the Observation Method (observation method) is of practical importance, particularly for linear structures, allowing make necessary changes to the project during construction.

© PNRPU

Введение

Фундаментальными понятиями геотехники являются несущая способность грунта и качество бетона. Предложены аналого-дискретная модель грунта [1] и бетона [2] и оценки качества бетона (сплошность, целостность, прочность и геометрия).

Выполнен критический анализ методов испытаний свай. Динамические методы DLT (Dynamic Load Test), STN (Statnamic) и метод Герсеванова показали свою эффективность. Метод Osterberg [3] имеет существенные ограничения при испытаниях свай большой несущей способности. Штапковые испытания в процессе бурения скважин до устройства свай эффективны для оценки несущей способности с учетом бокового трения при применении обсадных труб.

Комбинация Ultrasonic (УЗД) и Low Strain Test (сейсмоакустика) повышает информативность акустических исследований и может быть использована для свай, стен в грунте, ограждающих конструкций и др. Зависимость скорости акустической волны от прочности бетона имеет линейный характер и применяется для Ultrasonic и Low Strain Test в рамках одномерной волновой теории.

Визуальное обследование геотехнических работ и анализ инженерных изысканий в рамках Observation Method (метод наблюдения) имеет важное практическое значение для линейных сооружений (мосты, путепроводы, эстакады, тоннели), позволяет вносить необходимые изменения в проект в процессе строительства, что повышает качество геотехнических работ.

Аналитические и экспериментальные исследования проводились с участием более 10 проектных, изыскательных и строительных организаций в различных регионах РФ.

1. Основная часть

Главным объектом геотехники являются земля (грунт) и бетон (железобетон).

Фундаментальной основой геотехники является модель грунта (несущая способность) [4] и оценка качества бетона на основе акустики [5].

Разработана аналого-дискретная модель грунта, в которой заложено новое свойство – дискретность. Суть его состоит в том, что идеальное тело состоит из неопределенного количества стержней, объединенных в одно целое, различной длины и поперечных сечений (дискретность), с бесконечным модулем упругости (модуль Юнга), и названо телом KR (Кулачкин–Радкевич) – рис. 1.

В качестве примера можно привести модель Бингама (рис. 2), где к известным идеальным телам H (упругость), N (вязкость) и StV (сухое трение) добавлено KR (дискретность). Таким образом, получим полный набор свойств аналого-дискретной модели, не имеющей аналогов.

Рис. 1. Идеальное тело хрупкое (KR)-х
Fig. 1. Ideal discrete body (KR)-x

Рис. 2. Упруго-вязко-пластично-хрупкая модель
Fig. 2. Elastic-viscous-plastic-fragile model

Принципиальным отличием аналого-дискретной модели является то, что в общепринятой последовательности фаз («упругость – пластичность – разрушение») напряженно-деформированное состояние может не соблюдаться.

В комбинации с упругопластичными моделями предлагаемая модель позволяет существенно расширить область применения реологических моделей в теории сред.

Использование предложенной модели в реологической механике грунта может открыть новые направления развития теории, как для скального, так и для обычного грунта. Для скального грунта блочной структуры предложенная модель имеет физическое обоснование.

Особенно важным может быть применение предлагаемой модели в динамике, когда происходит разуплотнение и изменение структуры грунта, приводящее к быстрым осадкам.

Применение предложенной модели в теории железобетона представляется целесообразным, и не случайно доклад Б.И. Кулачкина на международной конференции по бетонам Concrete-2014 вызвал интерес и получил поддержку [2].

Наиболее ярко дискретность грунта проявляется при статическом зондировании [6, 7]. Примером наглядности дискретности грунта может быть диаграмма статического зондирования (рис. 3).

Рис. 3. Диаграмма статического зондирования. Фирма Fugro, о. Сахалин
Fig. 3. The diagram of static sounding. Fugro company, Sakhalin Island

Акустика в геотехнике широко применяется в двух видах – Ultrasonic (Chum, Pulsar, Бетон) и Low Strain Test (PET, SIT и др.), High Strain Test (DLT). Основным параметром для исследования бетона в конструкциях является скорость C акустической волны. Фундаментальной основой всех акустических исследований является зависимость скорости:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; ρ – плотность. Показано, что по данным SIT (“Profound”), модуль Юнга напрямую влияет на скорость C (таблица)¹.

¹ Profound SIT-series UserManual, Version 7.96. 2012. 57 p.

Пример соотношения длины свай, скорости волны и качества бетона

Example relation pile length, wave velocity and concrete quality

Наименование	Сваи монолитные	Сваи сборные
Класс бетона	B35	B60
Плотность ρ	2400 кг/м ³	2400 кг/м ³
Модуль упругости E	35 ГПа	42 ГПа
Длина свай L	20 м	20 м
Скорость волны c	3820 м/с	4185 м/с
Время прохождения Δt	10,48 мс	9,56 мс

Что касается плотности (ρ), то, по нашим оценкам, вышеприведенная формула практически не может быть использована для определения скорости в бетоне в широком диапазоне. Специалисты утверждают, что на данном этапе технологии в сфере использования бетона существенно ушли вперед, и это же касается состава бетона (физические и химические компоненты) – тем более что изменение ρ при этом находится в очень узком диапазоне.

Более эффективным и целесообразным для практических целей считаем использование зависимости $C = \varphi(B)$, где B – класс бетона по прочности. В ГОСТ РФ 17624–2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» имеет место линейная зависимость для бетонов B35–B60:

$$B = (0,02C - 37,6), \quad (2)$$

где B – класс бетона по прочности, МПа; C – скорость волны, м/с.

Нами была распространена эта зависимость на echo-test (PET, SIT) с учетом того, что частота акустического сигнала не влияет на скорость бетона. (Это наше предположение, поскольку такие исследования нам не известны.)

Необходимо отметить зависимость (Pile Test)²:

$$C = Kf_c^{1/6}, \quad (3)$$

где C – скорость волны; f_c – прочность бетона на сжатие; K – размерный коэффициент с учетом фактора трубок при использовании прибора Chum (Ultrasonic), полученного фирмой Piletest.

Выполнен анализ статических и динамических испытаний свай (SLT, DLT, SNT) [8–12].

Среди статических испытаний необходимо отметить метод Osterberg [3]. При всех достоинствах следует указать ограничения его использования:

1. Измерение сопротивления по пяте свай ограничивается практически трением по боковой поверхности.
2. Свай-стойки не могут быть испытаны в полной мере.
3. Недостаточная статистика.

В транспортном строительстве РФ широко распространены штамповые испытания в буровых скважинах под свай с оценкой несущей способности грунта под пятой свай. Сущность этого метода заключается в том, что в отличие от традиционных испытаний штампом нагрузки на штамп достигают предельного значения сопротивления грунта, тем

² Chum (Piletest) UserManual, 2014. 77 p.

самым моделируя статические испытания свай. Этот метод особенно эффективен при бурении скважин с использованием обсадных труб. Получен патент РФ № 2898936, в котором указан способ, позволяющий достигать трения по боковой поверхности свай. На рис. 4 представлено фото штампового испытания на установке Junttan, на рис. 5 – схема испытаний.

Рис. 4. Штамповые испытания на установке Junttan в Сочи

Fig. 4. The plate tests with Junttan in Sochi

Рис. 5. Схема штамповых испытаний: 1 – две двутавровые балки № 55; 2 – гидравлический домкрат грузоподъемностью 200 тс; 3 – оболочка; 4 – труба штампа; 5 – фиксирующий фонарь; 6 – нож оболочки; 7 – засыпка оболочки
Fig. 5. Plate tests sheme: 1 – two I-beams No. 55; 2 – hydraulic jack with capacity 200 cu; 3 – sheath; 4 – pipe stamp; 5 – fixing the lantern; 6 – knife sheath; 7 – filling sheath

Что касается динамических методов DLT, SNT, то каждый из них (Profound, PDI, ELDI) разработан на высоком научно-техническом уровне и имеет свою область применения.

В РФ самое широкое применение для оценки несущей способности забивных свай получил метод, основанный на формуле Герсеванова. Эта формула более 60 лет широко применяется при забивке свай, и результаты вполне удовлетворяют производителей.

Нами этот метод был распространен на буронабивные сваи практически по той же формуле:

$$F_u = \frac{AM}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4E_d}{\eta A s_a} \cdot \frac{m_1 + \varepsilon^2 \cdot m_2}{m_1 + m_2}} - 1 \right], \quad (4)$$

где η – коэффициент, зависящий от материала свай; A – площадь поперечного сечения свай м^2 ; E – расчетная энергия удара молота, кДж; s_a – фактический остаточный отказ, м; M – коэффициент зависимости от вида грунта под нижним концом; m_1 – масса молота, т; m_2 – масса свай, т; ε – коэффициент восстановления удара.

При всех недостатках этой формулы – отсутствие волновой теории удара, импульса и др., она для практического применения в определенной области является эффективной, поскольку феноменологический подход (без разделения лобового сопротивления и бокового трения) является как с производственной, так и с фундаментальной точки зрения предпочтительным. На строительстве путепровода через Варшавское шоссе (г. Москва) были проведены сравнительные испытания двух буронабивных свай диаметром 800 мм, длиной 14 м тремя методами DLT (метод ELDI), аналог Proudfoot, DLT (Герсеванова) и SLT (традиционные статические испытания). Одна из свай испытывалась DLT, а регистрация и расчеты проводились по разным методам. Результаты дали близкие оценки в процентах 10 % от несущей способности 425 т.с. ($416 \cdot 10^2$ кН) по данным SLT.

Акустика широко используется в геотехнике строительства, начиная с грунта (несущая способность) и заканчивая качеством фундамента. Проведены аналитические и экспериментальные исследования, которые позволяют комплексировать Ultrasonic и Low Strain Test³ [13], получая при этом более полную информацию о сплошности, целостности, прочности и геометрии фундамента в рамках одномерной волновой теории.

Сравнение результатов Ultrasonic и Low Strain Test (рис. 6, 7) дает идентичные результаты относительно основного параметра C .

Испытаниям подвергнута свая диаметром 1200 мм, длиной $l = 32,2$ м на одном из объектов г. Москвы. В результате анализа большого количества экспериментального материала на сваях диаметром 600–1500 мм и $l = 4 \dots 40$ м, стен в грунте, ограждающих конструкций стало возможным характеризовать фундаменты по следующим параметрам: сплошность, прочность, целостность и геометрия. Фирма Piletest рекомендует: аномалия (anomaly), трещина (flaw), дефект (defect). При анализе и обработке использовались параметры t50 %; 3D; FFT (Fast Fourier Transform) и Z (Impedance).

ИПТС-«Транспроект» осуществляет научно-техническое сопровождение транспортных проектов в различных регионах РФ. Специфика этих проектов (мосты, развязки, путепроводы, тоннели) заключается в их большой длине, что связано с различными инженерно-геологическими условиями. Как правило, такие сооружения проектируются на висячих сваях, погруженных в различные виды грунта, при этом возможны существенные

³ Proudfoot SIT-series UserManual, Version 7.96. 2012. 57 p.; Chum (Piletest) UserManual, 2014. 77 p.; PET (Piletest) User Manual, 2014. 48 p.

(Сечение 2–4) График «скорость распространения ультразвука» в бетоне сваи № 1 фундамента опоры № 15. Объект: «Южный участок Северо-Западной хорды». 7-й этап: от улицы Мосфильмовская до Аминьевского шоссе. Эстакада № 1

(Section 2–4) a Graph of the speed of distribution of ultrasound in concrete piles no. 1 Foundation support No. 15. Object: "the southern section of the North-West Expressway". Step 7: from the street Mosfilmovskaya to Aminyevskoye Highway. Overhead road № 1

Рис. 6. Ultrasonic (УЗД), прибор «Бетон»
Fig. 6. Ultrasonic diagram, "Concrete" device

Рефлектограммы, полученные в результате исследования сплошности, целостности, прочности и геометрии буронабивной сваи № 1 фундамента опоры № 15. Объект: «Южный участок Северо-Западной хорды». 7-й этап: от улицы Мосфильмовская до Аминьевского шоссе. Эстакада № 1

Reflectogram, the sploshnost received as a result of research, integrity, durability and geometry of the bored piles No. 1 of the Foundation support No. 15. Object: "the southern section of the North-West Expressway". Step 7: from the street Mosfilmovskaya to Aminyevskoye Highway. № 1

Рис. 7. Low Strain Test (Сейсмоакустика), PET
Fig. 7. Low Strain Test (Seismoacoustics), PET

нарушения природного состояния геомассивов. В качестве примера приведем строительство путепровода в г. Подольске (Московская область). Фундамент запроектирован на буронабивных сваях длиной 23 м в суглинки. В результате устройства свай и ростверка одной из опор было нарушено природное состояние геомассива, что резко изменило гидрогеологию и режим напорных вод. Возникла аварийная ситуация, потребовалось визуальное и инструментальное сопровождение геотехнических работ и внесение изменений в проект [14]. Таким образом, проведение геотехнических работ и анализ инженерно-геологических условий в рамках Observation method имеет важное практическое значение [15].

На основе экспериментально-аналитических исследований, выполненных в широком научном и производственном диапазоне в различных регионах РФ, можно сделать следующие выводы:

1. Аналого-дискретная модель грунта и бетона – фундаментальная основа геотехники.
2. DLT, STN и метод Герсеванова показали свою эффективность, метод Osterberg имеет существенные ограничения.
3. Метод штамповых испытаний в процессе бурения скважин до устройства сваи эффективен для оценки несущей способности сваи.
4. Комбинация Ultrasonic и Low Strain Test повышает информативность акустических исследований в рамках одномерной волновой теории.
5. Установлена зависимость скорости акустической волны от прочности бетона и оценок качества.
6. Анализ визуального обследования геотехнических работ совместно с результатами инженерных изысканий имеет важное значение, особенно для линейных сооружений, что позволяет вносить изменения в проект в рамках Observation Method.

Библиографический список

1. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И. Международная научно-техническая конференция. – Минск-2013. – С. 23–35.
2. Кулачкин Б.И., Митькин А.А., Шмидт Д.Д. Аналого-дискретная модель бетона // Concrete and Reinforced-Concrete at Future, III All Russian (III International) Conference and Reinforced Concrete. – Moscow, 2014. – Т. IV. – Р. 183–185.
3. Osterberg J.O. A New Simplified Method for Load Drilled Shafts // Foundation drilling. – 1994. – Vol. 23, № 6. – 421 p.
4. Косте Ж., Санглера Г. Практический курс механики грунтов / под ред. Б.И. Кулачкина. – Париж, 1975. – 454 с.
5. Schellingerhout A.J.G. Quantifying pile defects by integrity testing // Proceedings of the 4th International Conference on The Application of Stress-Wave Theory to Piles. – 1992. – Р. 702–704.
6. Санглера Г. Исследование грунтов методом зондирования. – Париж, 1965. – 231 с.
7. Survey on Site of port Salif in Yemen / B.I. Kulachkin, A.I. Radkevich, M.A. Trotsky, P.A. Schepetinov, I.P. Shlykov, J.G. Shakhgelyan // Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing. – Linköping, Sweden, 1995. – 98 p.
8. Rausche F., Goble G.G., Likins G.E. Dynamic Determination of Pile Capacity // Journal ASCE. – 1985. – Р. 367–383.
9. Foeken R.J. van, Daniels B., Middendorp P. An improved method for the real time calculation of soil resistance during drilling, Application of Stress-Wave Theory to Piles / Ed. F.B.J. Barends. – Balkema, Rotterdam. – 1996. – 124 p.
10. Middendorp P., Brederode P.J. van. Skin friction models for sand from static and dynamic laboratory load tests // Second International Conference on the application Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, 1984. – 167–174 p.
11. van Foeken R.J., Middendorp P. When to Apply Dynamic Load Testing and Static Testing // 2nd Static Seminar. – Tokyo, 1998. – 9 p.
12. Holeyman A.E. Technology of Pile Dynamic Testing // Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles. – Balkema Publishers, 1992. – Р. 195–215.
13. Schellingerhout A.J.G., Muller T.K. Detection Limits of Integrity Testing // Proceedings of the 5th International Conference on The Application of Stress-Wave Theory to Piles. – 1996. – Р. 246–253.

14. Peck R.B. Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics // *Geotechnique*. – 1969. – Vol. 19. – P. 171–187.

15. Powderham A.J., Nicholson D.P. The Way Forward; The Observational Method in Geotechnical Engineering // ICE, Thomas Telford. – London, 1996. – 10 p.

References

1. Kulachkin B.I., Radkevich A.I. Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya, Minsk, 2013, 23-35 p.

2. Kulachkin B.I., Mitkin A.A., Schmidt D.D. Analogo-discretnaia model' betona [Analog-to-discrete model concrete], *Concrete and Reinforced-Clance at Future, III Al Russian (II International) Conference and Reinforced Concrete*. Moscow, 2014 vol. IV, p. 183-185.

3. Osterberg J.O. A New Simplified Method for Load Drilled Shafts. *Foundation drilling*, 1994, vol. 23, no. 6, p. 421.

4. Koste Gh., Sanglera G. Prakticheskii kurs mekhaniki gruntov [Practical course in soil mechanics]. Ed. B.I. Kulachkin. Parizh, 1975. 454 p.

5. Schellingerhout A.J.G. Quantifying pile defects by integrity testing. *Proceedings of the 4th International Conference on The Application of Stress-Wave Theory to Piles*. 1992, pp. 702-704.

6. Sanglera G. Issledovanie gruntov metodom zondirovaniia [Research of soil by a sounding method]. Parizh, 1965. 231 p.

7. Kulachkin B.I., Radkevich A.I., Trotsky M.A., Schepetinov P.A., Shlykov I.P., Shakhgeldyan J.G. Survey on Site of port Salif in Yemen. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, Linkoping*. Sweden, 1995. 98 p.

8. Rausche F., Goble G.G., Likins G.E. Dynamic Determination of Pile Capacity. *Journal ASCE*, 1985, pp. 367-383.

9. Foeken R.J. van, Daniels B., Middendorp P. An improved method for the real time calculation of soil resistance during drilling, *Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Ed. F.B.J. Barends. Balkema, Rotterdam, 1996. 124 p.

10. Middendorp P., Brederode P.J. van. Skin friction models for sand from static and dynamic laboratory load tests. *Second International Conference on the application Stress-Wave Theory on Piles*. Stockholm, 1984, pp. 167-174.

11. Foeken R.J. van, Middendorp P. When to Apply Dynamic Load Testing and Statnamic Testing. *2nd Statnamic Seminar*. Tokyo, 1998, 9 p.

12. Holeyman A.E. Technology of Pile Dynamic Testing. *Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles*. Balkema Publishers, 1992, pp. 195-215.

13. Schellingerhout A.J.G., Muller T.K. Detection Limits of Integrity Testing. *Proceedings of the 5th International Conference on The Application of Stress-Wave Theory to Piles*, 1996, pp. 246-253.

14. Peck R.B. Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. *Geotechnique*, 1969, vol. 19, pp. 171-187.

15. Powderham A.J., Nicholson D.P. The Way Forward; The Observational Method in Geotechnical Engineering. *ICE, Thomas Telford*. London, 1996. 10 p.