



DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.04
УДК 624.131

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА НАПЛАСТОВАНИЯ И УДЕЛЬНОГО ВЕСА ГРУНТОВ ВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ

В.В. Антипов, В.Г. Офрихтер

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 октября 2018
Принята: 23 декабря 2018
Опубликована: 29 марта 2019

Ключевые слова:

волновой анализ, многоканальный анализ поверхностных волн, МАПВ, удельный вес грунта, геологический разрез.

АННОТАЦИЯ

Предварительная геотехническая оценка площадки позволяет произвести технико-экономический анализ объекта реконструкции или нового строительства. Для корректного выбора вариантов конструктивного решения подземной части сооружения при геотехнической оценке необходимо знать имеющееся напластование грунтов на площадке строительства, их физико-механические характеристики и наличие аномальных включений (полости, трубопроводы, иные подземные грунтовые включения и т.п.), что позволит наиболее корректно выполнить технико-экономическое обоснование. Современные неразрушающие методы волнового анализа позволяют оперативно при минимальных трудозатратах построить разрезы напластований грунтов изучаемой площадки и оценить их физико-механические характеристики. Одним из таких оперативных методов является метод многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ).

В статье представлены результаты проведения испытаний оперативным методом многоканального анализа поверхностных волн на площадках г. Перми и Пермского края для дисперсных и полускальных типов грунтов. Проведен сравнительный анализ волновых картин с геологическими разрезами по данным инженерно-геологических изысканий для оценки эффективности применения волнового анализа при предварительной оценке геотехнической ситуации площадки. В целом МАПВ позволил с достаточной степенью точности выделить границы слоев в верхней части разреза. Также оценена погрешность применения эмпирической формулы для определения удельного веса грунта по скорости поперечной волны, приведенной в зарубежных источниках, относительно значений удельного веса, определенных в лабораторных условиях. Расхождения между различными типами грунтов составили не более 18 %. В итоге МАПВ при относительно невысоких трудозатратах позволил получить достаточно достоверную картину грунтового разреза.

© ПНИПУ

© Антипов Вадим Валерьевич – аспирант, e-mail: seekerva@mail.ru.

Офрихтер Вадим Григорьевич – доктор технических наук, доцент, e-mail: ofrikhter@mail.ru.

Vadim V. Antipov – Postgraduate Student, e-mail: seekerva@mail.ru

Vadim G. Ofrikhter – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ofrikhter@mail.ru.

EXPRESS ASSESSMENT OF SOIL STRATA AND OF SOIL UNIT WEIGHT BY WAVE ANALYSIS

V.V. Antipov, V.G. Ofrikhter

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 October 2018
Accepted: 23 December 2018
Published: 29 March 2019

Keywords:

wave analysis, Multichannel Analysis of Surface Waves, soil unit weight, geologic profile.

ABSTRACT

A preliminary geotechnical assessment of a site allows to make technical and economic analysis of the object of reconstruction or new construction. For the correct choice of the constructive solution of the structure underground part during geotechnical evaluation, it is necessary to know the existing bedding of soils at the construction site, soil physical and mechanical characteristics and the presence of anomalous inclusions (cavities, pipelines, other underground soil inclusions, etc.). This allow to perform the most correct feasibility study. Modern non-destructive techniques of wave analysis make it possible to quickly make velocity profiles of soil strata, with minimum labor costs, and evaluate soil physical and mechanical characteristics. One of these express techniques is Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW).

The article presents testing results by means of express method of multichannel analysis of surface waves at the sites of Perm and the Perm krai for dispersed and semi-rock soils. A comparative analysis of wave profiles with geological profiles obtained by engineering-geological surveys was carried out to assess the effectiveness of application of wave analysis for a site preliminary geotechnical assessment. In general, MASW allowed to determine the layers boundaries in the upper section with sufficient accuracy. Also an error of soil unit weight empirical formula given in foreign literature relative to the soil unit weight values determined under laboratory conditions is estimated. Divergence between different soil types was no more than 18 %. As a result, MASW with relatively low labor costs allowed to obtain a fairly reliable profile of the soil low velocity upper section.

© PNRPU

Введение

Предварительная геотехническая оценка площадки позволяет произвести технико-экономический анализ объекта реконструкции или нового строительства. Для корректного выбора вариантов конструктивного решения подземной части сооружения при геотехнической оценке необходимо знать имеющееся напластование грунтов на площадке строительства, их физико-механические характеристики и наличие аномальных включений (полости, трубопроводы, иные подземные грунтовые включения и т.п.), что позволит наиболее корректно выполнить технико-экономическое обоснование. Современные неразрушающие методы волнового анализа позволяют оперативно при минимальных трудозатратах построить разрезы напластований грунтов изучаемой площадки и оценить их физико-механические характеристики. Одним из таких оперативных методов является метод многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ).

Впервые метод многоканального анализа поверхностных волн (англ. Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW) был представлен в [1] и в настоящее время продолжает развиваться, позволяя получать все более точные изображения разрезов [2]. МАПВ описывался и применялся такими учеными, как Park, Xia, Miller, Foti, Louie, Ryden и др. [1–4]. За рубежом ведется активное изучение вопроса применимости метода волнового анализа для геотехнической оценки грунтового напластования [5–9]. Авторами настоящего исследования также проводился ряд натурных и численных экспериментов для определения возможности применения волнового анализа для геотехнических расчетов [10–13].

Метод МАПВ используется для получения скорости поперечных волн в слоистой грунтовой толще. Описанные в литературе зависимости позволяют определять характеристики грунта по данным волнового анализа лишь для упругой зоны [4, 14, 15]. В нормативной документации РФ методика волнового анализа не имеет четко прописанного алгоритма, а сам волновой анализ отмечается в нормативном документе СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований» в виде сейсмического или сейсмоакустического метода определения характеристик грунта, с указанием довольно большого количества эмпирических зависимостей для определения физических, прочностных и деформационных характеристик различных видов грунтов.

Цель выполненных исследований: определение погрешностей отображения грунтового напластования в разрезе и вычисление удельного веса между результатами МАПВ и данными инженерно-геологических изысканий.

1. Описание метода

МАПВ основан на регистрации поверхностных волн Рэлея от различных источников и последующем анализе полученных годографов для определения скоростей поперечных (V_s) волн для слоистой модели грунта. Полученные скорости представляются в виде профиля (1D, 2D или 3D) распределения скоростей поперечных волн в зоне малых скоростей (ЗМС) верхней части разреза (ВЧР). МАПВ может выполняться по активной, пассивной или комбинированной схеме. Во всех испытаниях настоящего исследования использовалась активная схема.

Система наблюдения применялась фланговая из 24 приемников (вертикальных, низкочастотных геофонов 10 Гц), соединенных с компьютером через интерфейс посредством косы с телеметрическими модулями (система ТЕЛСС-3), а также источника колебаний в виде кувалды 4 кг и металлической плиты основания. Параметры системы наблюдения подбирались по рекомендациям [2]. Принципиально использовались две схемы расстановки системы наблюдения в зависимости от условий стесненности площадки: коса длиной 46 м с шагом приемников 2 м и коса длиной 11,5 м с шагом приемников 0,5 м. На всех площадках либо отсутствовали, либо были минимальны пассивные источники колебаний, вызывающие шумы при записи, в связи с чем во всех случаях производилось накопление из 5 ударов.

По полученным значениям скоростей поперечных волн значения удельного веса определяли по следующей зависимости [16]:

$$\gamma = 8,32 \lg(V_s) - 1,61 \lg(z), \quad (1)$$

где V_s – скорость поперечной волны в слое, м/с; z – глубина подошвы слоя.

2. Описание площадок и грунтов

Испытания проводились на пяти площадках г. Перми и Пермского края. На каждой площадке анализ значений удельного веса выполнялся для следующих слоев грунта:

Площадка № 1. Основание фундаментной плиты: насыпь из песка мелкого однородного, плотного, маловлажного.

Площадка № 2. Автомагистраль: аргиллитоподобная глина с линзами песчаника низкой и средней прочности, выветрелая, трещиноватая, обводнена; песчаник мелкозернистый, низкой и средней прочности, выветрелый, трещиноватый, обводнен.

Площадка № 3. Свободная от застройки площадка бывшего предприятия: глина тугопластичная и полутвердая.

Площадка № 4. Основание фундаментной плиты под жилой дом: супесь серо-коричневая, песчанистая, текучая, с прослойками и линзами мощностью до 3–5 см песка мелкого, серого, водонасыщенного и суглинка коричневого, текучепластичного; суглинок темно-серый, тяжелый пылеватый, текучепластичный с включениями до 15 % хорошо разложившегося органического вещества черного цвета.

Площадка № 5. Свободная от застройки площадка испытательного полигона кафедры СПГ ПНИПУ: песок мелкозернистый, бурового цвета.

Физические характеристики исследуемых грунтов, определенные по лабораторным испытаниям, представлены в табл. 1. Геологические колонки исследуемых площадок представлены на рис. 1–5.

Таблица 1

Физические характеристики грунтов на исследуемых площадках

Table 1

Soil physical parameters of studied sites

Номер площадки	Номер точки	Тип грунта	Природная влажность W , д. ед.		Влажность на границе текучести W_L , д. ед.	Влажность на границе раскатывания W_P , д. ед.	Число пластичности I_P , д. ед.	Показатель текучести I_L , д. ед.	Плотность ρ , г/см ³	Плотность частиц ρ_s , г/см ³	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Коэффициент пористости e , д. ед.	Коэффициент водонасыщения S_r , д. ед.	Примечания
			W	w_p										
1	1	Насыпь песчаная	0,068	–	–	–	–	1,82	2,62	1,70	0,54	0,33	$K_y = 0,96$	
2	1	Аргиллитоподобная глина	0,170	0,34	0,14	0,2	0,1	2,04	2,62	1,74	0,50	0,89		
	1	Песчаник	0,170	–	–	–	–	2,05	2,66	1,75	0,52	0,87		
3	1	Глина	0,129	0,33	0,07	0,26	0,23	2,12	2,26	1,88	0,20	1,46		
4	1	Супесь	0,296	0,24	0,18	0,06	0,98	2,02	2,70	1,56	0,73	1,09		
	2	Суглинок	0,299	0,35	0,19	0,16	0,76	1,88	2,64	1,45	0,82	0,96		
5	1	Песок	0,099	–	–	–	–	1,63	2,51	1,47	0,69	0,36		

Начата: 22.02.18
Окончена: 24.02.18

Отметка устья: 301,90 м
Общая глубина: 1,40 м


Номер слоя п/л	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Абс. отметка подошвы слоя, м	Литологический разрез	Глубина отбора проб грунта	Описание грунта	Сведения о воде		
		от	до						Появление воды, м	Установ. уровень, м	Глубина установки штампа, м (отм.)
1	tQ	0,00	1,40	1,40	300,50		1	Насыпной грунт: песок мелкий, однородный, плотный, маловлажный			0,0 (301,90) A=2500 см ²

Рис. 1. Геологическая колонка площадки № 1

Fig. 1. Geologic borehole at site No. 1

Начата: 21.02.17
Окончена: 09.03.17

Отметка устья: 168,60 м
Общая глубина: 12,60 м

Бурение: Ø 400 мм 0-12,60 м
Крепление: Ø 325 мм 0-8,00 м

№ п/п	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Абс. отметка подошвы слоя, м	Литологический разрез	Глубина отбора проб грунта	Описание грунта	Сведения о воде		Глубина установки штампа, м (отм.)
		от	до						Появление воды, м	Установ. уровень, м	
1	tQ	0,00	1,00	1,00	167,60			Насыпной грунт: суглинок коричневый, мягкопластичный. Грунт слежавшийся, более 1 года			
2	aQ	1,00	3,00	2,00	165,60		2	Суглинок коричневый от тугопластичного до текучего, насыщенный водой; с включением гравия и гальки до 40%	1,50 22,02.17	1,50 22,02.17	
3	aQ	3,00	6,00	3,00	162,60		4	Суглинок коричневый от тугопластичного до текучего; с включением гравия и гальки до 10 %			
4	aQ	6,00	8,00	2,00	160,60		6	Суглинок коричневый от тугопластичного до текучего; с включением гравия, гальки и аргиллита до 5 %			
5	p	8,00	11,50	3,5	157,10		8	Аргиллит коричневый, низкой и средней прочности, выветрелый, трещиноватый, обводнен			9,19 (159,41) S=600 см²
6	p	11,50	12,60	1,10	156,00		10	Песчаник коричневый, мелкозернистый, низкой и средней прочности, выветрелый, трещиноватый, обводнен			11,70 (156,90) S=600 см²
				вск.			12				

Рис. 2. Геологическая колонка площадки № 2

Fig. 2. Geologic borehole at site No. 2

Начата: 30.06.17
Окончена: 30.06.17

Отметка устья: 98,16 м
Общая глубина: 8,50 м

Номер слоя п/п	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Абс. отметка подошвы слоя, м	Литологический разрез	Глубина отбора проб грунта	Описание грунта	Сведения о воде		Глубина установки штампа, м (отм.)
		от	до						Появление воды, м	Установ. уровень, м	
1	tQIV	0,00	0,50	0,50	97,66			Насыпной грунт: глина коричневая, от тугопластичной до мягкопластичной. Грунт слежавшийся, с давностью отсыпки более 5 лет			0,1 (98,06) A=600 см²
2	aiQIV	0,50	2,00	1,50	96,16		2	Суглинок коричневый мягкопластичный			
3	aiQIV	2,00	5,00	3,00	93,16		4	Суглинок коричневый от текучепластичного до тугопластичного. На глубине 3-4 м встречен суглинок текучий	3,0 30.06.17	3,0 30.06.17	
4	aiQIV	5,00	6,00	1,00	92,16		6	Суглинок коричневый мягкопластичный			
5	aiQIV	6,00	8,50	2,50	89,66		8	Суглинок коричневый от текучего до тугопластичного			

Рис. 3. Геологическая колонка площадки № 3

Fig. 3. Geologic borehole at site No. 3

Начата: 04.09.18
Окончена: 13.09.18

Отметка устья: 99,60 м
Общая глубина: 3,00 м

Номер слоя п/п	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Абс. отметка подошвы слоя, м	Литологический разрез	Глубина отбора проб грунта	Описание грунта	Сведения о воде		Глубина установок штампа, м (отм.)
		от	до						Появление воды, м	Установ. уровень, м	
1	tQ	0,00	1,40	1,40	98,20		2	Насыпной грунт: суглинок коричневый, от твердой до мягкопластичной консистенции, с включением строительного мусора, гравия, гальки, песка мелкого, серо-коричневого, малой и средней степени водонасыщения и линзами супеси коричневой, твердой и пластичной. Грунт слежавшийся, с давностью отсыпки около 5 лет.	1,6	1,6	1,6 (98,00) A=5000 см ²
2	aQ	1,40	1,60	0,20	98,00				04.09.18	13.09.18	
3	aQ	1,60	3,00	вск.	96,60				1,6	1,6	
									Суглинок коричневый, легкий песчаный, текучепластичный с прослоями супеси коричневой, пластичной и с прослоями песка мелкого, коричневого, влажного.		
									Супесь, серо-коричневая, песчаная, текучая, с прослоями песка мелкого, серого, водонасыщенного, и суглинка коричневого, текучепластичного		

а

Начата: 06.09.18
Окончена: 13.09.18

Отметка устья: 99,28 м
Общая глубина: 4,00 м

Номер слоя п/п	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Абс. отметка подошвы слоя, м	Литологический разрез	Глубина отбора проб грунта	Описание грунта	Сведения о воде		Глубина установок штампа, м (отм.)
		от	до						Появление воды, м	Установ. уровень, м	
1	tQ	0,00	2,10	2,10	97,18		2	Насыпной грунт: до глубины 0,9 - песок мелкий, серый, плотный, малой степени водонасыщения, с глубины 0,9 м - суглинок коричневый, полутвердый и тугопластичный, с включениями строительного мусора. Грунт слежавшийся с давностью отсыпки около 5 лет			1,9 13.09.18 2,4 (96,88) A=5000 см ²
2	aQ	2,10	2,40	0,30	96,88						
3	aQ	2,40	3,10	0,70	96,18						
4	aQ	3,10	3,70	0,60	95,58						
5	aQ	3,70	4,00	0,30	95,28						
									3,1	06.09.18	
									Суглинок темно-серый, легкий пылеватый, мягкопластичный		
									Суглинок темно-серый, тяжелый пылеватый, текучепластичный		
									Супесь, серо-коричневая, текучая, с прослоями песка мелкого, серого, водонасыщенного, и суглинка коричневого, текучепластичного		
									Гравийный грунт: гравий и галька (60–70 %) кварц-кремниевый состава, средней окатанности, размером до 3–5 см, заполнитель – песок мелкий, серовато-коричневый, средней плотности, водонасыщенный		

б

Рис. 4. Геологическая колонка в точке 1 (а) и точке 2 (б) площадки № 4
Fig. 4. Geologic borehole at point 1 (a) and point 2 (b) of site No. 4

Начата: 01.07.14
Окончена: 2.07.14

Отметка устья: 143,00 м
Общая глубина: 6,00 м

Номер слоя п/п	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Абс. отметка подошвы слоя, м	Литологический разрез	Глубина отбора проб грунта	Описание грунта	Сведения о воде		Глубина установок штампа, м (отм.)
		от	до						Появление воды, м	Установ. уровень, м	
1		0,00	0,10	0,10	142,90		2	Слой почвенно-растительный Песок бурый, мелкозернистый Песок серый, мелкозернистый Песок бурый, мелкозернистый, с включениями гравия (менее 25 %) Суглинок гравелистый			0,1 (142,90) A=600 см ²
2	aQ	0,10	1,00	0,90	142,00						
3	aQ	1,00	2,50	1,50	140,50						
4	aQ	2,50	4,20	1,70	138,80						
5	aQ	4,20	5,50	вск.	137,50						

Рис. 5. Геологическая колонка площадки № 5
Fig. 5. Geologic borehole at site No. 5

3. Результаты испытаний

Результаты испытаний МАПВ представлены в виде 1D-профилей на рис. 6 и в сводной табл. 2. Кроме профилей ВЧР на рис. 6 приведены дисперсионные кривые, по которым выполнялось построение теоретической модели грунтового разреза.

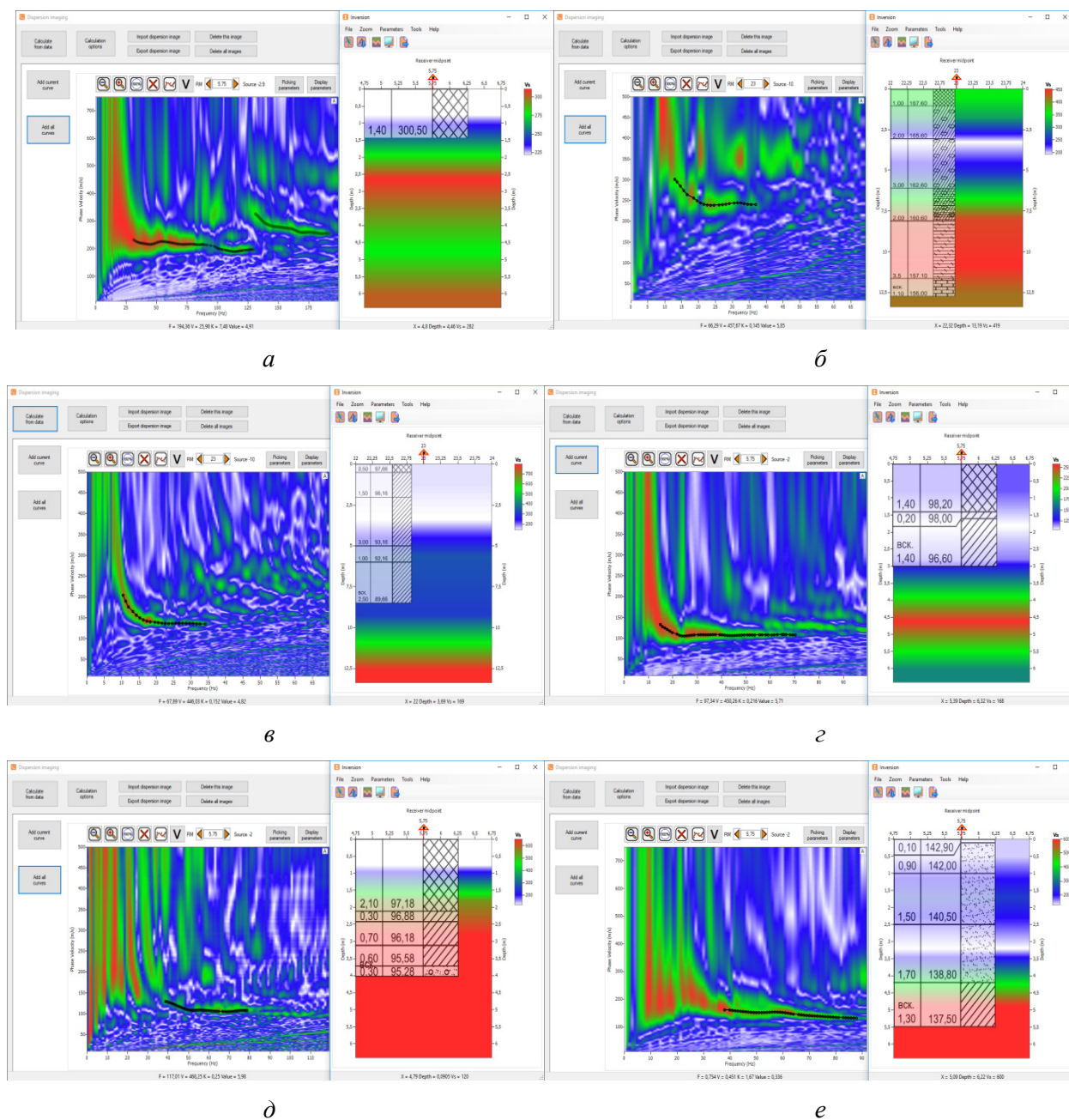


Рис. 6. Дисперсионные кривые с разрезами на площадках:
 а – № 1; б – 2; в – 3; г – 4 точка 1; д – 4 точка 2; е – 5
 Fig. 6. Dispersive curves and wave profiles at sites No.:
 а – 1; б – 2; в – 3; д – 4 point 1; е – 4 point 2; ф – 5

Таблица 2

Результаты определения удельного веса по данным волнового анализа
и по лабораторным испытаниям

Table 2

Soil unit weight calculation results by means of wave analysis and laboratory tests

Номер площадки	Номер точки	Тип грунта	Толщина слоя h , м	Глубина подошвы слоя z , м	УГВ, м	Скорость поперечной волны V_s , м	Удельный вес по формуле (1) γ , кН/м ³	Удельный вес по лабораторным испытаниям γ_{lab} , кН/м ³	Расхождение, %
1	1	Насыпь песчаная	1,5	1,5	–	245	19,59	17,9	9,47
2	1	Аргиллитоподобная глина	3,5	11,5	1,5	332	19,27	19,7	2,19
	1	Песчаник	>1,1	12,6	1,5	417	19,27	20	0,14
3	1	Глина	0,5	0,5	3	151	18,61	20,7	10,08
4	1	Супесь	>1,4	3	1,6	118	16,47	20	17,65
	2	Суглинок	0,7	3,1	1,9	547	21,99	18,8	16,96
5	1	Песок	1	1	5	142	17,91	16,3	9,86

4. Обсуждение результатов испытаний

Проведение волновых испытаний заняло на каждой площадке 2–4 ч и по 0,5–1 ч обработки для каждого набора данных. Это свидетельствует о высокой производительности и оперативном характере применяемого метода, что является очевидным преимуществом волнового анализа при его использовании для оперативной предварительной геотехнической оценки верхней части разреза.

Полученные волновым методом картины разрезов сравнивались с данными инженерно-геологических изысканий (см. рис. 6). Результаты сравнительного анализа показывают, что границы слоев, полученные методом МАПВ, расположены на профилях достаточно близко к реальным границам. Расхождения по мощностям слоев во многих случаях, когда получены записи с минимальным количеством посторонних шумов и на дисперсионном изображении четко прослеживается фундаментальная дисперсионная кривая, а также кривые высших мод, не превышают 15 % (рис. 6, а, в, г, е). Такое расхождение можно объяснить следующим образом: середина приемной линии телеметрической системы находилась не точно в месте расположения буровой колонки, а на некотором расстоянии (в некоторых случаях до 5 м).

Метод МАПВ имеет минимальный и максимальный пределы измерений по глубине разреза, связанные с минимальной и максимальной длинами поверхностных волн Рэлея, регистрируемых в ходе наблюдений. Это приводит к появлению слепой зоны в приповерхностной области, равной половине минимальной длины поверхностной волны. Минимальную длину поверхностной волны можно принять равной расстоянию между приемниками, а максимальную – длине приемной линии. В результате этого ограничения некоторые приповерхностные слои не были отображены в волновых моделях (см. рис. 6, в, е). Для уменьшения приповерхностной слепой зоны можно использовать более мелкую расстановку системы наблюдения с меньшим шагом приемников. Для увеличения глубины исследований грунтово-

го массива можно применять сейсмоприемники с более низкой собственной частотой (4,5 Гц, 2 Гц), если они имеются в наличии. В этом случае появляется возможность регистрации и последующего включения в анализ поверхностных волн большей длины.

В целом волновые картины разрезов оказались близки к истинным, что свидетельствует о достаточной степени точности получаемых волновым методом профилей ВЧР для их оперативной геотехнической оценки.

Кроме того, для слоев, в которых проводились штамповые испытания и имеются данные лабораторных испытаний по определению физических характеристик, проводился расчет удельного веса по эмпирической зависимости (1), предложенной в статье [16]. По результатам сравнительного анализа, расхождения эмпирических расчетов с лабораторными данными составили не более 18 %, причем большее расхождение наблюдалось на глубине 0,5–3,1 м. На большей глубине (до 12,6 м) расхождение снизилось до 2 %. Такое расхождение в результатах можно объяснить следующим образом: согласно первоисточнику [16] зависимость (1) определялась по результатам статического зондирования методом вертикального сейсмического профилирования, а не по данным многоканального анализа поверхностных волн.

В целом результаты сравнительного анализа показывают достаточную точность оперативного определения значений удельного веса грунтов на большой глубине/глубине, близкой к предельной в волновом методе.

Заключение

В статье представлены результаты проведения испытаний методом волнового анализа МАПВ на площадках г. Перми и Пермского края для дисперсных и полускальных типов грунтов. Произведено сравнение полученной картины разрезов с геологическим колонками и оценена достоверность полученных результатов. В целом МАПВ позволяет с достаточной степенью точности выделять границы слоев в верхней части разреза. Также проведена оценка погрешности расчета удельного веса по формуле (1) по отношению к данным лабораторных испытаний. Расхождения между различными типами грунтов составили не более 18 %. В итоге можно утверждать, что МАПВ при относительно невысоких трудозатратах позволяет получить достаточно достоверную картину грунтового разреза. Кроме этого, с помощью данного метода можно получить близкие к истинным значения физических характеристик грунта, в частности удельного веса.

Библиографический список

1. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – No. 64 (3). – P. 800–808. DOI: 10.1190/1.1444590
2. Park C.B., Carnevale M. Optimum MASW survey – revisit after a decade of use // *GeoFlorida*. – 2010. – P. 1303–1312. DOI: 10.1061/41095 (365) 130
3. Louie J.N. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2001. – No. 91 (2). – P. 347–364. DOI: 10.1785/0120000098
4. Surface wave methods for near-surface site characterization / S. Foti [et al.]. – London: CRC Press, 2015. – 487 p.

5. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for offshore geotechnical investigations / T. McGrath [et al.] // Proceedings of the fifth international conference on geotechnical and geophysical site characterisation (issmge tc-102 – isc'5), Gold Coast, Queensland, Australia, 5–9 September 2016. – Australian Geomechanics Society, 2016. – P. 911–916.
6. Pegah E., Liu H. Application of near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves for geotechnical site characterization: A case study // Engineering Geology. – 2016. – Vol. 208. – P. 100–113. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.04.021
7. Soil investigation using multichannel analysis of surface wave (MASW) and borehole / A. Madun [et al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – No. 11 (6). – P. 3759–3763.
8. Horizontal resolution of multichannel analysis of surface waves / B. Mi [et al.] // Geophysics. – 2017. – Vol. 82, No. 3. – P. EN51–EN66. DOI: 10.1190/geo2016-0202.1
9. In situ modulus reduction characteristics of stabilized pavement foundations by multichannel analysis of surface waves and falling weight deflectometer tests / C. Li [et al.] // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 188. – P. 809–819. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.163
10. Ofrikhter V.G., Ofrikhter I.V. Investigation of municipal solid waste massif by method of multichannel analysis of surface waves // Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Innovations in environmental geotechnics (TC215 Session). – Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2015. – No. 57. – P. 1956–1959.
11. Антипов В.В., Офрихтер В.Г., Шутова О.А. Исследование верхней части разреза грунтовой толщи экспресс-методами волнового анализа // Вестник МГСУ. – 2016. – № 12. – С. 44–60. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.44-60
12. Применение неразрушающих методов определения механических характеристик грунта при численном моделировании динамических воздействий на существующее здание / О.А. Шутова [и др.] // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 1. – С. 74–78.
13. Численное моделирование динамического воздействия от одиночного транспортного средства на существующее здание / В.В. Антипов [и др.] // Известия КГАСУ. – 2017. – № 3. – С. 131–138. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.01
14. Robertson P.K. CPT interpretation – a unified approach // Canadian Geotechnical Journal. – 2009. – Vol. 46, is. 11. – P. 1337–1355. DOI: 10.1139/T09-065
15. Verruijt A. Soil dynamics. – Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2008. – 417 p.
16. Mayne P.W. Stress-strain-strength-flow parameters from seismic cone tests // Proceedings of International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories. – Bali, Indonesia: Parahyangan Catholic University, 2001. – P. 27–48.

References

1. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 1999, no. 64 (3), pp. 800–808. DOI: 10.1190/1.1444590
2. Park C.B., Carnevale M. Optimum MASW survey – revisit after a decade of use. *GeoFlorida*, 2010, pp. 1303–1312. DOI: 10.1061/41095(365)130
3. Louie J.N. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, no. 91 (2), pp. 347–364. DOI: 10.1785/0120000098

4. Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C. Surface wave methods for near-surface site characterization. London, CRC Press, 2015, 487 p.
5. McGrath T., Long M., O'Connor P., Trafford A., Ward D. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for offshore geotechnical investigations. *Proceedings of the fifth international conference on geotechnical and geophysical site characterisation (issmge tc-102 – isc'5)*, Gold Coast, Queensland, Australia, 5–9 September 2016, Australian Geomechanics Society, 2016, pp. 911–916.
6. Pegah E., Liu H. Application of near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves for geotechnical site characterization: A case study. *Engineering Geology*, 2016, vol. 208, pp. 100–113. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.04.021
7. Madun A., Ahmad Supa'at M.E., Ahmad Tajudin S.A., Zainalabidin M.H., Sani S., Yusof M.F. Soil investigation using multichannel analysis of surface wave (MASW) and borehole. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, no. 11 (6), pp. 3759–3763.
8. Mi B., Xia J., Shen C., Wang L., Hu Y., Cheng F. Horizontal resolution of multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 2017, vol. 82, no. 3, pp. EN51-EN66. DOI: 10.1190/geo2016-0202.1
9. Li C., Ashlock J.C., Lin S., Vennapusa P.K.R. In situ modulus reduction characteristics of stabilized pavement foundations by multichannel analysis of surface waves and falling weight deflectometer tests. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 188, pp. 809–819. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.163
10. Ofrikhter V.G., Ofrikhter I.V. Investigation of municipal solid waste massif by method of multichannel analysis of surface waves. *Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Innovations in environmental geotechnics (TC215 Session)*, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2015, no. 57, pp. 1956–1959.
11. Antipov V.V., Ofrikhter V.G., Shutova O.A. Issledovanie verkhnnei chasti razreza gruntovoi tolshchi ekspress-metodami volnovogo analiza [Investigation of a soil stratification upper section by rapid methods of wave analysis]. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 12, pp. 44–60. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.44-60
12. Shutova O.A., Ponomarev A.B., Antipov V.V., Ofrikhter V.G. Primenenie nerazrushaiushchikh metodov opredeleniia mekhanicheskikh kharakteristik grunta pri chislennom modelirovanii dinamicheskikh vozdeistvii na sushchestvuiushchee zdanie [Application of nondestructive methods of determination of mechanical characteristics of the soils for numerical modeling of dynamic impact on existing building]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN*, 2017, no. 1, pp. 74–78.
13. Antipov V.V., Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B., Shutova O.A. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo vozdeistviia ot odinochnogo transportnogo sredstva na sushchestvuiushchee zdanie [Numerical modelling of dynamic impact from a single vehicle on the existing building]. *Izvestiia KGASU*, 2017, no. 3, pp. 131–138. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.01
14. Robertson P.K. CPT interpretation – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, Vol. 46, Is. 11, Pp. 1337–1355. DOI: 10.1139/T09-065
15. Verruijt A. Soil dynamics. Delft, Netherlands, Delft University of Technology, 2008, 417 p.
16. Mayne P.W. Stress-strain-strength-flow parameters from seismic cone tests. *Proceedings of International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*, Bali, Indonesia, Parahyangan Catholic University, 2001, pp. 27–48.