

Национална конференция с международно участие „ГЕОНАУКИ 2022“
National Conference with International Participation “GEOSCIENCES 2022”

Interpretation of CPTu and SPT data about sandy soils in the Plovdiv region Интерпретация на CPTu и SPT данни за пясъци в района на град Пловдив

Lyubomir Angelov¹, Tanya Vasileva²
Любомир Ангелов¹, Таня Василева²

¹ Independent Scientist; Aqua Terra Consult Ltd; E-mail: ld_angelov@abv.bg

² Geological Institute, BAS, Acad. G. Bonchev str., bl. 24, 1113 Sofia, Bulgaria; E-mail: tanyav@geology.bas.bg

Abstract. CPTu (Piezocone Penetration Test) and Penetration tests – SPT (Standard Penetration Test) are the most used *in situ* tests in order to map a soil stratigraphy and determine the geotechnical parameters of construction soils. A comparison has been made between the relative density values obtained on the basis of the two types of field trials. The soils examined are classified according to well-established classification diagrams. The sandy soils are described in the range of dense to very dense. They have good strength and deformation characteristics – with a high friction angle and high Young’s modulus but the presence of a high level of groundwater is a prerequisite for their liquefaction under dynamic impacts.

Keywords: piezocone penetration test (CPTu), standard penetration test (SPT), soil parameters, *in situ* testing.

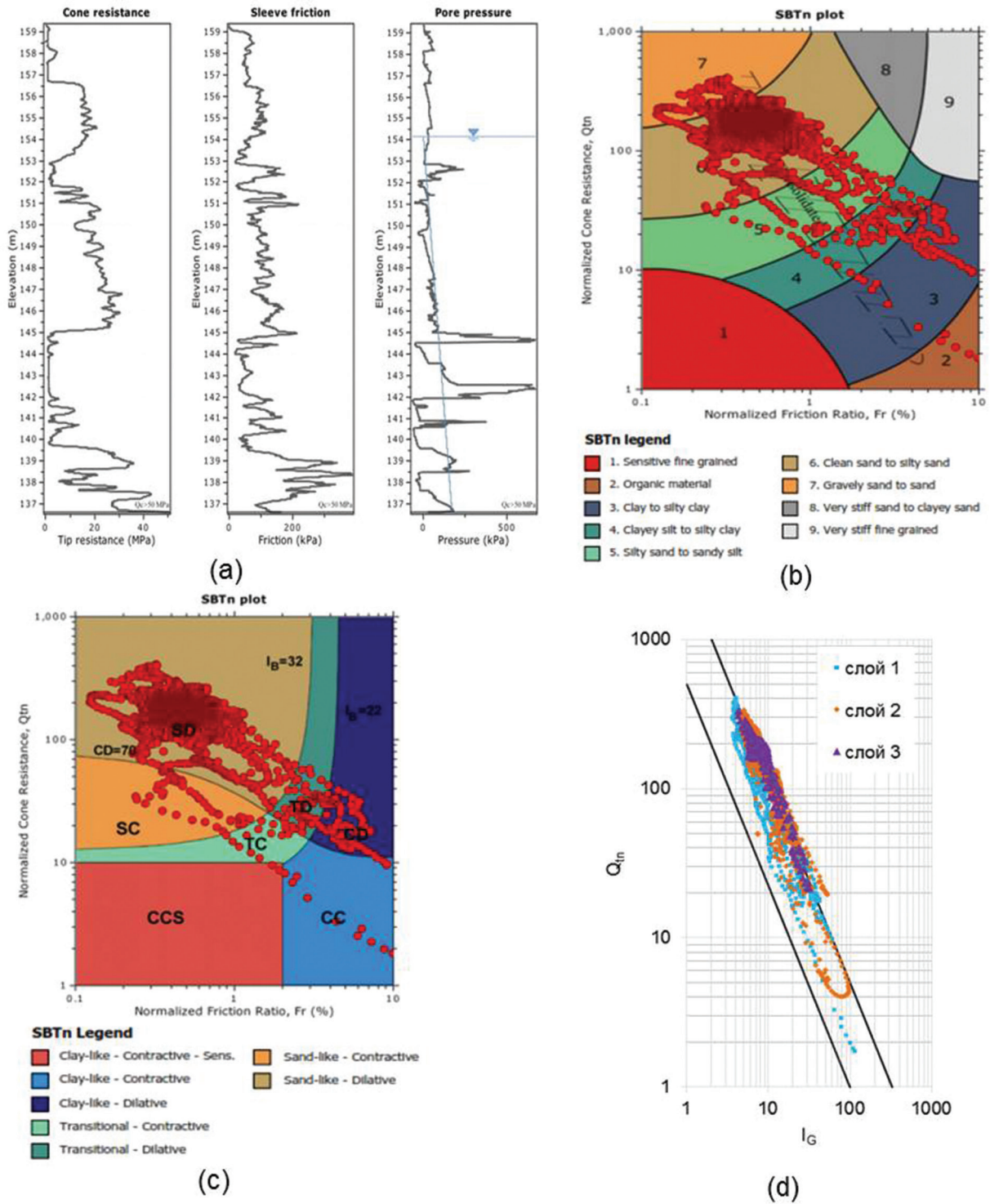
Въведение

С оглед оценка на геотехническите свойства на земна основа в западната част на гр. Пловдив, в терасата на р. Марица са проведени полеви пенетрационни тестове – CPTu и SPT. Конусният статичен пенетрометър с измерване на налягането на водата в порите на почвата (CPTu) е най-широко използваната *in situ* техника за литоложко профилиране и определяне на геотехническите показатели на строителната почва. Той позволява бързото събиране и интерпретиране на данни, за разлика от вземането на проби и провеждането на лабораторни изследвания. При CPTu директно се измерват върховото съпротивление на конуса (q_c), околното триене (f_s) и поровото налягане (u) (фиг. 1а). В резултат на измереното порово налягане е дадено коригирано съпротивление на конуса или общо върхово съпротивление на конуса (q_t). Посредством измереното върхово съпротивление се определят следните по-важни физико-механични почвени параметри: относителна плътност (D_r), обемно тегло (γ), ъгъл на вътрешно триене (ϕ), модул на

Юнг (Young’s Modulus, E_s), модул на срязване при малка деформация (G_o), коефициент на филтрация (k), скорост на разпространение на напречна сеизмична вълна (V_s). CPTu изследванията са проведени съгласно БДС EN ISO 22476-1. SPT, опитите са проведени в два броя сондажи през регулярни интервали 1,0–1,5 m в дълбочина, съгласно БДС EN ISO 22476-3. Анализирани са 43 броя SPT, отнасящи се за несвързаните почви от разреза.

Обект на изследването и методология

Геоложката основа в района до изследваната дълбочина 46,0 m е изградена от кватернерни алувиални отложения (alQ^h), преобладаващо от пясъчливи почви. Нивото на подземните води е на дълбочина от 5,20 до 7,50 m под теренната повърхност. Целта на настоящото изследване е анализ на данните, получени от полевите пенетрационни тестове. Извършени са 4 броя CPTu при стандартна скорост 2 cm/s до следните дълбочини: CPTu 1 – 22,79 m; CPTu 2 – 20,04 m; CPTu 3 – 24,86 m; CPTu 4 – 30,85 m. За CPTu е



Фиг. 1. (a) илюстрация на данните от измерванията на СРТu-1; (b) и (c) нормализирани графици на поведение на почвата (SBTn), $Q_{tn}-Fr$, (по данни за слой 1); (d) нормализиран индекс на коравина (K_g^*) графика $Q_{in}-I_G$

използван стандартен конус с площ 10 cm^2 и диаметър $3,57 \text{ cm}$, с възможност за прилагане на натиск 150 kN . Въз основа на аналитични методи, предложени от Robertson (1990, 2009), измерените параметри от СРТu опитите (q_c, f_s, u) са ко-

ригирани като са получени съответно нормализирани стойности. Те се използват за типизиране на почвата по класификационните диаграми на Robertson (1990, 2009). Допълнително изследваната почва е класифицирана по БДС EN ISO

14688-2. За по-подробно изучаване на почвения разрез и в допълнение към *CPTu* са прокарани два проучвателни сондажа до дълбочини 25,6 и 46,0 m, в които са проведени 60 броя *SPT* и са взети почвени проби. *SPT* изпитването е извършено чрез забиване на стандартен накрайник в земната основа, с използването на тежест 63,5 kg, спускана от височина 760 mm. В процеса на пенетрационните опити са отчитани броя удари за проникване на накрайника на всеки 15,0 cm до достигане на дълбочина 45,0 cm под дъното на прокарания сондажен отвор. Броят на ударите N_{SPT} е коригиран чрез регламентиран енергиен коефициент и е определен броят N_{60} .

Резултати и дискусия

Първата стъпка към геостратиграфия, отделяне на самостоятелни слоеве и типове почви се осъществява с помощта на наличните процедури за оценка поведението на почвите. Един от най-популярните методи, използващи се днес, са графики на почвения поведенчески тип (Soil Behavioral Type, SBT), базирани на коригирано върхово съпротивление на конуса (Normalized Cone Tip Resistance Q_m) и коефициент на триене (Friction Ratio, F_r), наречени SBTn-графики, като коригираните измервания се използват за класифициране на почвите в девет и седем отделни зони (фиг. 1b, c), представени на графики (Q_m-F_r). По класификационните диаграми за поведение на почвата, пясъчливите почви от изследвания район се поделят основно на пясък до прахов пясък (фиг. 1b; таблица 1). По отношение на обемните разширения и уплътняване на почвите, те се класифицират като *Sand Like Dilative* тип (фиг. 1c). За инженерно-геоложка класификация на строителните почви е направено обвързване на данните от *CPTu* теста с данните от двата сондажа и извършените лабораторни анализи на взетите почвени проби. Лабораторните изследвания показват, че повечето проби са със съдържание на чакълеста фракция от 2,43 до 26,29% (средно 15,48%), пясълива фракция от 56,85 до 91,61% (средно 74,62%). Финозърнестата фракция варира от 5,27 до 16,98% (средно 9,90%), като глинестите частици с размер по-малък от 0,002 mm са със съдържание от 1,21 до 3,82% (средно 2,14%). Съгласно БДС EN ISO 14688-2 почвите се класифицират като: *едър пясък (CSa)*, *едропясъчлив среднозърнест чакъл (csa MGr)*, *глинест пясък (clSa)* и *среднозърнест пясък (MSa)* – отделени в слой 1; *среднозърнест пясък (MSa)* и *среднозърнест чакълест, едрозърнест пясък (mgr CSa)* – отделени в слой 2 и *глинест пясък (clSa)* – слой 3. Отделянето на слоевете е извършено не само въз

основа на зърнометричен състав, но и по относителна плътност (D_r) (табл. 1).

От диаграмата на Robertson (2016) (фиг. 1d) е направена индентификация на почвените слоеве по коравина и микроструктура. На фигурата са въведени следните означения: (I_G) е индексът на коравина при малки деформации, определен по зависимостта: (1) $I_G = G_o/(q_t - \sigma_v)$, където: q_t е общо върхово съпротивление на конуса; G_o – модул на сръзване при малка деформация (MPa); σ_v е общо вертикално напрежение (MPa). K_g^* – модифициран нормализиран индекс на коравина при малка деформация, дефиниран като: (2) $K_g^* = (G_o/q_t - s_n)'(Q_m)^{0.75}$ (Kavur et al., 2019), където: Q_m е нормализирано съпротивление на конуса с отчитане на налягането в порите (MPa). Пясъчливите почви, установени в изследваната площадка, попадат в интервала $100 < K_g < 330$, т.е. това са добре дренирани, дребно до едрозърнести пясъци. В определени интервали от разреза се забелязва тенденция на нарастване на стойността на (K_g), което се дължи на заглиняване на пясъка и присъствието на структурирани глинести прослойки. Резултатите се потвърждават от извършените лабораторни анализи.

От определената чрез двата полеви теста (*CPTu* и *SPT*) относителна плътност (D_r) и съгласно класификацията по Eurocode 7, пясъците се класифицират като средносбити до сбити (табл. 1). За да се оцени променливостта в получените стойности за (D_r) за отделните пясъчни слоеве е направен еднопосочен дисперсионен анализ. Анализирани са разликите между средните стойности за относителната плътност, получени от двата теста и е установено, че те не са статистически значими. Въпреки различията, получените резултати за относителната плътност се отнасят към една група съгласно категоризацията по Eurocode 7. Като по-достовърни следва да се приемат резултатите от *CPTu*, който тест директно измерва съпротивлението на конусния накрайник, докато при *SPT* резултатите за (q_c) се определят въз основа на корелационни зависимости и само за определени интервали от геоложкия разрез (мястото на провеждане на опита).

В таблица 1 са представени осреднените стойности на *in situ* данните, основните изходни данни и получените показатели. Оценените характеристики описват основните якостно-деформационни свойства на пясъчливите слоеве. Стойността на (q_t), определя пясъчливите слоеве като плътни до много плътни. Те са с много добри якостни и деформационни свойства – с висок ъгъл на вътрешно триене и висок модул на еластичност, но наличието на високо ниво на подземните води е предпоставка за втечняването им при динамични въздействия.

Таблица 1. Класификация на несвързаните почви по относителна плътност (D_r , %) и осреднени параметри

№ слой	Дълбочина от-до (m)	Литоложко описание	Класификация по SBTn по данни от CPTu (Robertson, 2009)	Относителна плътност D_r (%)		Класификация по Eurocode 7
				данни от SPT	данни от CPTu	
1	3,0–14,0	пясък средно до едрозърнест	група 6 – пясък до прахов пясък	57,10	69,70	средносбит до сбит
2	18,0–20,0	пясък среднозърнест, с глинести прослойки, сбит	група 6 – пясък до прахов пясък и група 5 – прахов пясък до песъчлив прах	54,54	68,70	средносбит до сбит
3	21,0–23,0	пясък дребно до среднозърнест, слабо заглинен, сбит до много сбит	група 6 – пясък до прахов пясък; група 4 – глинест прах до прахова глина и група 5 – прахов пясък до песъчлив прах	65,43	71,90	сбит

№ слой	Дълбочина от-до (m)	q_c (MPa)	f_s (kPa)	Q_{in} (MPa)	F_r (%)	V_s (m/s)	G_o (MPa)	E_{s_s} MPa	k , m/d	ϕ , °	γ , kN/m ³
1	3,0–14,0	19,02	96,86	168,561	0,652	248,1	123,40	96,175	23,20	40,48	19,25
2	18,0–20,0	27,55	195,48	165,250	0,974	324,1	212,50	158,275	20,44	40,58	20,20
3	21,0–23,0	30,90	208,54	179,568	0,822	334,8	228,55	167,95	20,04	41,10	20,40

Забележка: В таблицата са дадени осреднени стойности.

Заклучение

CPTu и SPT са най-често използваните *in situ* тестове за определяне на геотехническите свойства на строителните почви. Предимствата на CPTu теста е непрекъснатото и пряко измерване в дълбочина на важни геотехнически параметри през интервал от 1 cm. Той е около 5 до 10 пъти по-бърз от традиционното прокарване на сондаж и извършване на SPT тестове. CPTu тестът не елиминира необходимостта от сондиране, но може значително да намали броя на прокарваните сондажи при проучването. Той прогнозира много статични и динамични свойства на почвата. CPTu тестът дава допълнителни класификационни характеристики на почвата в сравнение със SPT. Достоверността на резултатите от SPT е в пряка зависимост от качеството на сондиране, необходимостта от обсаждане на сондажния ствол с цел елиминиране на обрушаване от дъното на сондажа, което води до изкривяване на резултатите от полевите опити. Тези недостатъци не съществуват при провеждане на CPTu. Съпротивлението на проникване в почвите, околното триене и налягането в порите са едни от важните критерий за геотехническа им оценка. Точността на показанията при CPTu е надеждна

и резултатите за (q_c) имат голямо практическо значение при определяне на носещата способност на почвата при плоско и пилотно фундаране. Недостатък на CPTu теста е невъзможността за вземане на проби от геоложкия разрез и неприложимостта му при почви, които са с голямо съдържание на много едрозърнеста фракция (едри чакъли, камъни и валуни), както и при почви с върхово съпротивление (q_c) по-голямо от 50 MPa.

Литература References

- Kavur, B., J. Dodigovic, J. Jug, S. Strelec. 2019. The interpretation of CPTu, PMT, SPT and cross-hole tests in Stiff clay. – *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2018)*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 221, 012009; <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012009>.
- Robertson, P. K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. – *Canadian Geotech. J.*, 27, 1, 151–158; <https://doi.org/10.1139/t90-014>.
- Robertson, P. K. 2009. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. – *Canadian Geotech. J.*, 46, 11, 1337–1355; <https://doi.org/10.1139/T09-065>.
- Robertson, P. K. 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. – *Canadian Geotech. J.*, 53, 1910–1927; <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>.