

VÝPOČET ÚNOSNOSTI HLUBINNÝCH ZÁKLADOVÝCH KONSTRUKCÍ NA ZÁKLADĚ INTERPRETACE VÝSLEDKŮ STATICKÝCH PENETRACÍ (CPT) A POROVNÁNÍ S VÝSLEDKY METOD OBVYKLÝCH

RNDr. Mgr. Ivan Poul, Ph. D.^{1,2}, Ing. Jiří Laurin¹

¹FINE s.r.o. a ²Projekce iGEO s.r.o.,

Design of deep foundation capacity based on CPT interpretations - typical methods comparison

Deep foundation bearing capacity is typically designed via J. Masopust method in Czechia; based on an ultimate limit settlement curve. The method uses foundation soil index of consistency and density index only for design. The aim of methods after CPT results is use of foundation soil tip resistance and following numerical design. The methods based on CPT results are commonly used in „English-speaking countries“, France and Holland, however, the methods are comparable with Masopust and CPT methods show a new way of modern geotechnical worldwide design.

Klíčová slova: CPT, interpretace, Masopust, Brustemante, Schmertmann, pilota, kapacita

1. ÚVOD

Asi nejpoužívanější metodou výpočtu únosnosti pilot v ČR je výpočet podle J. Masopusta. Tato metoda je založená na interpretaci provedených zatěžovacích zkoušek pilot v ČR a únosnost je spjata s nelineární zatěžovací křivkou těchto pilot. Na základě požadavku na minimální sedání piloty stanovíme v grafu vypočtené zatěžovací křivky její únosnost. Maximální akceptovatelnou hodnotou sedání v ČR bývá 25 mm, kdy na zatěžovací křivce odečítáme maximální únosnost. Tato metoda se používá více než třicet let a funguje velmi dobře. V platném Eurokódu EN 1997-2 je ale metoda výpočtu pilot založená na zkouškách statické penetrační sondy (anglicky CPT, nebo česky SP), které se u nás v IG průzkumech v posledních letech stále více používají. Na základě zkoušek CPT se počítají piloty v Holandsku, Polsku, na západě USA - tedy především v zemích u moře, kde se vyskytují velké mocnosti měkkých jíílů a nesoudržných sedimentů charakterů písků. Naším cílem bylo zjistit, zda jsou tyto metody vhodné a použitelné i pro naše podmínky a jak zkoušky CPT využívat. Jako podklad jsme vzali 11 lokalit v ČR, kde jsme měli provedené jádrové vrty, mechanické analýzy a zkoušky CPT. Pomocí programů GEO5 Pilota a Pilota CPT jsme porovnali únosnosti navržených pilot na základě vyhodnocení výsledů CPT a porovnali s metodikou J. Masopusta. Výsledky jsou velmi zajímavé.

2. METODIKA MĚŘENÍ CPT

Metodika realizace a vyhodnocení statických (případně i dynamických) penetrací má svoje kořeny v Holandsku ve 30. letech minulého století. Základní myšlenka vlastně vychází z napodobování zarážení nebo zatlačování dřevěných kúlů do země při stavbě mostů, rybářských domků, opěrných zdí říčních kanálů v holandských městech a také fortifikací. Zjednodušeně se tak vlastně jedná o *in situ stand* modely hlubinných základových konstrukcí, kdy sonda může být porovnávána s projektovanou základovou pilotou a na základě empirických vztahů lze potom únosnost snadno vypočítat.

Mechanická statická penetrační sonda představuje soutyčí složené z duté ocelové trubky, skrz kterou je veden tvrdý ocelový prut a je zakončen kuželovou hlavicí. Zkouška probíhá tak, že se do testované zeminy nejprve zatlačuje vnitřní prut, který testuje odpor na hrotu proti vniknutí. Po 20 cm zatlačení prutu se připojí zatlačování vnější trubky soutyčí o 20 cm a snímáme tření na povrchu

(na plášti). Je to vlastně „housenkový pohyb“, kdy se soutyčí postupně po úsecích 20 cm zatlačuje do požadované hloubky. Na zemském povrchu jeden snímač zaznamenává odpor na hrotu (Q_t v kN) a druhý zaznamenává odpor na plášti (f_s v kPa). Příklady měření jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Příklady některých zemin a použití typických výsledků měření a interpretací statických penetrací z ČR a Nového Zélandu (některé zeminy se v ČR běžně nevyskytují, z uvedeného důvodu byla využita data z ciziny), zkoušky realizoval I. Poul v letech 2010-2016

Lokalita	Hloubka H (m)	qc (MPa)	fs (MPa)	Rf (%)	u2 (MPa)	klasifikace
Hodonín (u řeky) SP1	10,6	28,60	0,700	2,62	-	Štěrk říční
	20,0	7,40	0,320	4,34	-	NG jíł OCR > 1,5
Napajedla (u řeky) SP1	2,0	0,82	0,040	5,04	-	jíl povodňový
	5,6	45,20	0,670	1,75	-	Štěrk říční
Brno - Medlánky (na kopci) SP1	5,0	1,42	0,088	6,20	-	spraš
	15,0	3,24	0,133	3,88	-	NG jíł OCR > 1,5
Uherské Hradiště (u řeky) SP1	2,0	1,06	0,120	10,77	-	jíl povodňový
	9,0	24,56	0,270	1,62	-	štěrk
	12,0	3,06	0,199	5,54	-	NG jíł OCR > 1,5
Tauranga (NZ), Coach Rd. CPT1	3,0	0,54	0,028	4,9	0,027	prach jíłovitý (vulk.)
	18,5	2,77	0,012	0,46	-0,070	prachovec (sedim.)
Tauranga (NZ), Mt. Manganui CPT8	2,0	7,16	0,020	0,29	0,006	plážový písek
	19,0	11,81	0,025	0,22	0,158	plážový písek
Tauranga (NZ), 2nd Av. CPT1	6,6	0,17	0,040	23,5	-1,80	organická zemina (zkonsolidovaná rašelina)

Po nástupu využívání digitální techniky se metodika velmi rozvinula a stavba moderních penetračních sond je poněkud odlišná, nicméně princip je vlastně stejný. Soutyčí je duté a vedou v něm kabely od citlivých snímačů. Zatlačování probíhá kontinuálně, hlavice má stejný průměr jako soutyčí, jen je rozdělena do více segmentů. Hlavici je snímán odpor na hrotu, v dalším segmentu plášťové tření a mezi hrotem a pláštěm pomocí membrány dynamický pórový tlak způsobený průnikem sondy do zeminy.

Všichni praktiční inženýři a inženýřtí geologové ve světě zabývající se interpretacemi statických a případně i dynamických penetrací, byly zaměřeni obvykle na svůj rajon. Zde prováděli testy a na základě srovnání výsledků penetrací, vrtů a laboratorních analýz sestavili pro studované území vhodné algoritmy. Pro vyhodnocování mechanických vlastností zemin na základě křivek CTP na jiném území, než pro které byl model sestaven, je složité. Přítomné zeminy jsou vázány na vznik za odlišných přírodních podmínek a z různých hornin (teplota, tlak, množství srážek a zejména matečná hornina, ze které vznikly zvětráváním posuzované zeminy). Jako vhodný příklad odlišnosti lze použít příklad písků (písek na základě křivky zrnitosti) různých složení a genezí:

křemen, úlomky korálů, rozdrčená pemza aj. Odlišné metodiky naladěné na typické přírodní prostředí potom přináší odlišné výsledky.

2.1 Měření, pozorování a metodika vyhodnocení statických penetrací

Na základě pozorování bylo rychle celosvětově ověřeno, že nesoudržné středně ulehlé hrubozrné polymiktní zeminy charakteru písku až šterku, vykazují na hrotu velký odpor (lokalizace Napajedla, ČSN EN 14688-1 clcGr, $q_c = 45,2$ MPa, $f_s = 670$ kPa, $R_f = 1,75$ %, $H = 5,6$ m), kdežto zeminy kypré mají odpor velmi malý (např. plážové písky - Tauranga, Nový Zéland, ČSN EN 14688-1 mSa, $q_c = 11,81$ MPa, $f_s = 25$ kPa, $R_f = 0,22$ %, $H = 19$ m) a jemnozrné zeminy s konzistencí $I_c \leq 1,0$ jsou spíše lepkavé a jsou rozpoznatelné podle většího plášťového tření (lokalizace Uherské Hradiště, ČSN EN 14688-2 siCl, $I_c = 1,0$, $q_c = 1,06$ MPa, $f_s = 120$ kPa, $R_f = 10,77$ %, $H = 1,3$ m). Asi nejdůležitějším ukazatelem pro interpretaci stratigrafie je poměr R_f (%) mezi plášťovým třením f_s (MPa) a odporem na hrotu q_c (MPa). Složitější je potom rozpoznání pevných jílu až jílovců, pískovců, zemin smíšených (tj. jílovitý šterk, jílovitý písek), zvětralé horniny sedimentární i magmatické a metamorfované (příklady jsou uvedeny v tabulce 1). Samotné použití pouze statické penetrace bez využití vrtného průzkumu může být stále poněkud zavádějící. Ač je obvyklý geologický průzkum složen z vrtného průzkumu a zrnitostního rozboru zemin, vždy se najde mnoho dat, o které je možné interpretaci opřít.

„Lepivost“ soudržných zemin se odvíjí od kvantitativního mineralogického složení jílových minerálů a jejich vlastností. Krystality jednotlivých skupin jílových minerálů jsou extrémně malé a jsou typické různými tvary a i v malém objemu vykazují v součtu obrovské plochy. Třecí a chemické vazby na vzájemných kontaktech mezi krystality vytváří podklad pro mechanické vlastnosti. Nejběžnější je destičkový habitus (vč. slíd), kdy na základě přiblížení k sobě a přítomnosti silných kationů v mezivrstvi vzniká soudržnost. V Mohr-Coulombově modelu zeminy složené ze smektitu, kaolinitu, chloritu apod. vykazují malý vrcholový efektivní úhel vnitřního tření a naopak velkou vrcholovou efektivní i reziduální kohezi (lokalizace Brno – Medlánky - na kopci, ČSN EN ISO 14688-2 Cl, $I_c = 0,9$, $\varphi_{ef} = 21^\circ$, $c_{ef} = 32$ kPa, $H = 3,8$ m). V případě velkého obsahu minerálů jako je hallozyt (habitus trubičky), alofán (koule), drobných úlomků křemene, mají jednotlivé strukturní prvky pouze omezené množství kontaktů a mechanické chování je principiálně jako zeminy nesoudržné (!). Vedle významného efektivního úhlu vnitřního tření mají nízkou kohezi (málo chemických vazeb). Tyto zeminy bývají převážně vulkanického původu (příklad město Auckland, Nový Zéland, ČSN EN ISO 14688-2 Cl, $I_c = 0,8$, $\varphi_{ef} = 31^\circ$, $c_{ef} = 11$ kPa, $H = 0,5$ m), jsou velmi sensitivní ($S=4-6$), a bývají někdy označovány jako tzv. „quick clays“.

Základním výsledkem interpretace statické penetrace je zatřídění zeminy do některé z typických klasifikací a sestavení profilu z jednotlivých vrstev zemin. Jak již bylo uvedeno dříve, odlišení ulehlého písku od tuhého jílu je relativně snadné, nicméně problémy nastávají, pokud se zeminy smísí nebo se jedná o zeminy překonsolidované a zvětralé horniny. Klasifikace vychází zejména z poměru mezi plášťovým třením a odporem na hrotu. U modernějších sond výrazným pomocníkem při vyhodnocení bývá také membránový snímač měření pórového tlaku. V zeminách s velkým koeficientem filtrace nárůsty v pórových tlacích po penetrování vyznívají rychle a snižují se na velikost původní (velikost tlaku hydrostatického), kdežto v zeminách nepropustných (jíly) rozptýlení přírůstek tlaku probíhá výrazně pomalu. Nepropustné zeminy budují hydraulické bariéry a tlak v zeminách propustných pod bariérou narůstá. Měření pórového tlaku jsou nezbytná pro exaktní stanovení stability svahu. Stabilitní výpočty za pomoci měření hladiny podzemní vody jsou v porovnání s dříve jmenovanou metodikou spíše orientační. Pro výpočty únosnosti pilot se z měření CPT využívá odpor na hrotu, který simuluje v patě opřenu pilotu.

2.2 Úskalí vyhodnocení mechanických vlastností z CPT a jejich korelace

Doporučený postup interpretace statických penetrací je na základě zkušeností s danou lokalitou vycházejících ze znalosti geologické stavby, zrnitosti a zejména mechanických vlastností zemin. Vyhodnocení statických penetrací je založeno na základě modelů pro konkrétní (třeba i široké) území s místními geomechanickými vlastnostmi. Vhodnou metodikou pro ČR, kde vlastní modely zatím nemáme (nebo nejsou veřejné), je kombinovat statické penetrace s vrty, ze kterých jsou odebírány neporušené a porušené vzorky pro laboratorní testování. Výsledky dat ze statické penetrace je potom vhodné naladit podle výsledků jmenovaných analýz. Tímto způsobem získáváme komplexní informace pro ekonomické vyprojektování stavby, kdy se vyhýbáme předimenzování ze špatné znalosti základové půdy nebo typickému využití směrných normových charakteristik ze zrušené normy ČSN 73 1001 (pro plošné zakládání).

Neporušené vzorky lze snadno odebírat z jemnozrnných zemin a případně je to možné i ze zemin smíšených, kdy zemina může obsahovat drobná zrníčka písku. Odebírání neporušených vzorků nesoudržných a často zvodnělých zemin (šterkopísky) je při použití vrtné soupravy téměř nemožné. Ulehlost nesoudržných zemin často stanovuje geolog jen odhadem na základě hloubky, což je nesprávně. Stanovení efektivního úhlu vnitřního tření v případě hrubozrnných zemin je i tak laboratorně nemožné. Interpretace penetračních dat u hrubozrnných nesoudržných zemin je mírně složitá i z toho důvodu, že Robertsonovy modely (nejvíce světově užívané) neobsahují šterk.

3. VYBRANÉ LOKALITY, POUŽITÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI ZEMIN A METODIKA VÝPOČTU

Pro účely tohoto článku byla použita data získaná I. Poulem při realizaci inženýrskogeologických průzkumů pro stavební účely na území Moravy. Lokality byly vybrány tak, aby bylo možné porovnat výsledky únosnosti pro podobné zeminy ze vzdálených lokalit. Zaměřili jsme se převážně na kvartérní nivní sedimenty charakteru jílu, písků a šterků, kvartérních spraší (ČSN EN ISO 14688 Si, cSi a saSi) a dále lehce překonsolidovaných neogenních jílu (ČSN EN ISO 14688 siCl a Cl). Jako výjimečné zeminy byly použity smykově porušené flyšové zeminy ze svahů nad Kopřivnicí, jílovitá navážka s kameny.

Na těchto vybraných lokalitách proběhl také geologický průzkum, který ověřil skladbu jednotlivých vrstev, bylo realizováno stanovení konzistence a neodvodněné smykové pevnosti zemin pomocí vrtulkové zkoušky přímo v jádru a případně byla na neporušených vzorcích stanovena laboratorně konzistence, odvodněná smyková pevnost a stlačitelnost. Interpretací výsledků statické penetrace za pomoci průkazných laboratorních analýz bylo provedeno doporučení mechanických vlastností (model Mohr-Coulomb) pro vybrané vrstvy v každém geologickém profilu pro výpočty.

Výpočty únosnosti byly provedeny pomocí čtyř metodik, které respektují pokyny a doporučení normy ČSN EN 1997: I) metodika interpretace mechanických vlastností CPT pomocí Robertsona a výpočet únosnosti vrtaných pilot pomocí EC 7-2, II) výpočet únosnosti vrtané piloty pomocí mezní zatěžovací křivky – metodika J. Masopusta pro II. mezní stav a použití koeficientů a modelů EC-7, III) metodika LCPC (Bustamante), IV) Schmertmann za použití softwaru GEO5 CPT Pilota. Výsledky byly testovány pro piloty délek 8,0 m a pro průměry 0,9 m. Metodika realizace pilot byla zvolena těžba z vrtu pod ochranou ocelové výpažnice.

4. VÝSLEDKY

Pro účely srovnání účinnosti jednotlivých metodik výpočtu bylo provedeno porovnání MS únosnosti pilot modelovaných na základě výsledků CPT s metodikou podle J. Masopusta založené na klasickém geologickém průzkumu vč. průkazných laboratorních analýz pro maximální sedání 25 mm (tabulka 2). Výsledky únosnosti metod založených na CPT jsou sice uváděny při sedání až 180

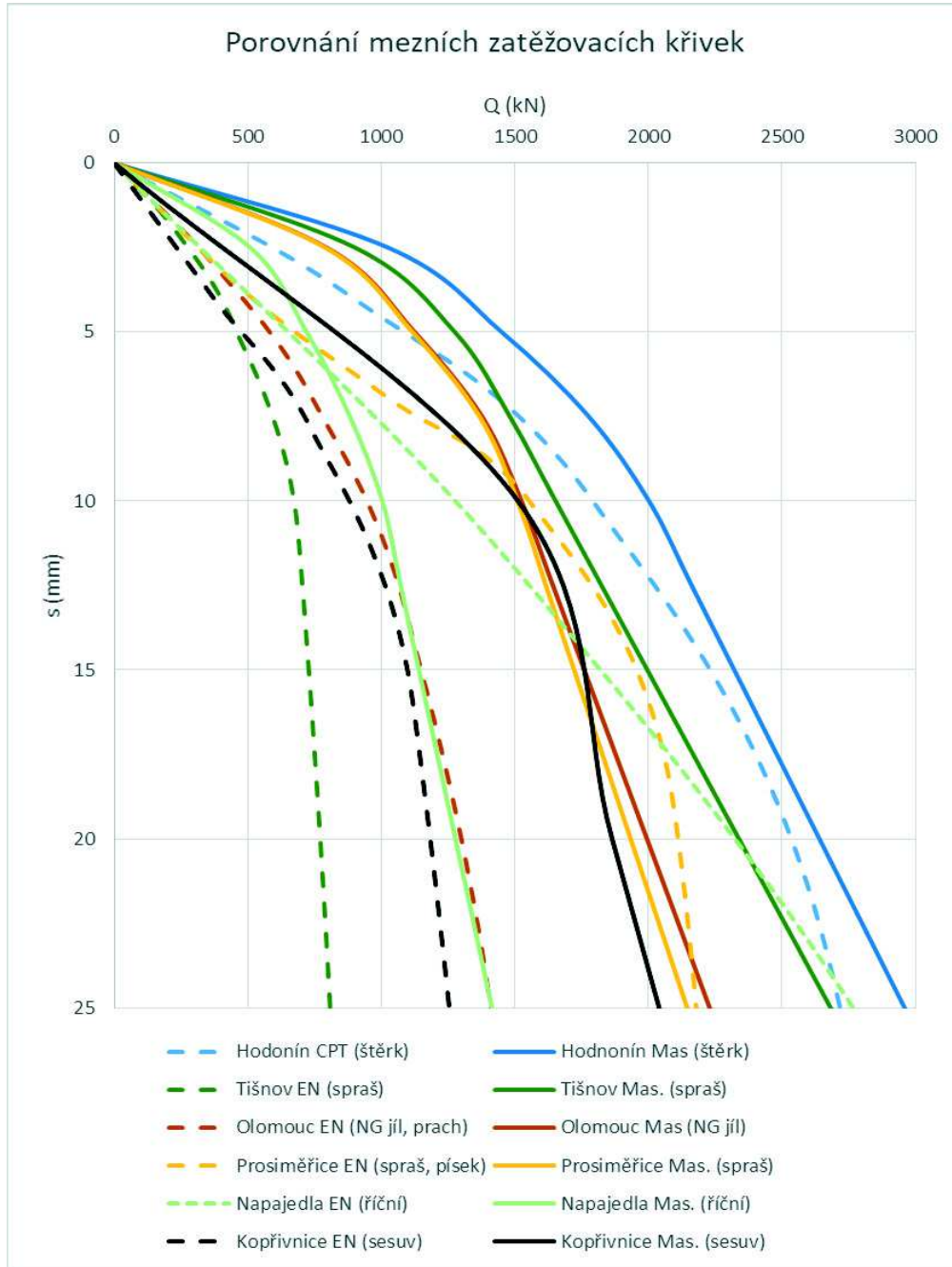
mm, ale přiznejme si, že pro takové sedání nikdo neprojektuje a nejednalo by se o souměřitelné výsledky. Z uvedeného důvodu byly únosnosti těchto metod zpětně odvozeny z mezní zatěžovací křivky. Zde byly porovnávány únosnosti v závislosti na sedání podle metodiky výpočtu únosnosti podle CPT a podle nelinerární zatěžovací křivky podle J. Masopusta.

Zatěžovací křivka vypočtená zpětně z výpočtu únosnosti pomocí CPT je podobná hyperbole, kdy ramena hyperboly často kopírují průběh asymptot (osy zatížení a sedání, obr. 1). Sedání je z počátku velmi malé a narůstá zhruba lineárně, po překonání vrcholové smykové pevnosti základové půdy v patě piloty se křivka rychle lomí a následuje rychlý nárůst deformace při minimálním nárůstu únosnosti. Toto by pozorovatel zabývající se únosností vertikálních hlubinných základových konstrukcí očekával po delší vertikální deformaci, kdy by se mobilizovaly smykové plochy.

Tab. 2: Výsledky výpočtu únosnosti vrtaných betonových pilot s těžením z vrtu za pomoci různých metodik výpočtu (GEO 5 Pilota CPT a Pilota)

	L=8 m	EC7-2	Masopust	Brustemante (LCPC)	Schmertmann
Lokalita	dia	Q)	Q	Q	Q
geologie	m	kN	kN	kN	kN
Brno Medlánky					
spraš/neogenní jíł	0.9	580	2340	500	880
Hodonín					
řiční terasa	0.9	2680	2910	1850	1600
Prosiměřice					
spraš/NG jem. písek	0.9	2250	2145	920	1100
Tišnov					
spraš	0.9	800	2680	560	800
Kopřivnice					
flyš, paleogén (sesuv)	0.9	1430	2030	850	950
Klentnice					
navážka spraš	0.9	1100	2000	590	880
Brno FN u sv. Anny					
řiční terasa/NG jíł	0.9	980	2360	1200	950
Napajedla					
řiční terasa jíł/šterk	0.9	2500	1410	2650	1960
Olomouc					
prach/jíł NG	0.9	1450	2230	720	820

Pokud se zaměříme na výsledky v tabulce 2, je patrné, že metodika zpracovávající výsledky CTP, kde podloží tvoří jemnozrnné a překonsolidované sedimenty (neogenní jíł), vykazuje menší únosnost než Masopustova metodika. Toto je také patrné v obr. 1, kde jsou zobrazeny zatěžovací křivky podle obou popsanych metodik. Odlišné výsledky je možné získat při modelování pilot opřených o vrstvu šterků, kdy Masopustova metoda zejména z důvodu nesprávných podkladů (odhadů) od geologů přináší menší kapacitu pilot při maximálním vyhovujícím sedání.



Obr. 1: Porovnání mezních zatěžovacích křivek pro různá prostředí, vyhodnoceno metodikou CPT (EN 1997-2) a Masopust pro vrtané piloty průměru 0,9 m a délky 8 m, pro max. sedání 25 mm.

Výsledky interpretace CPT v soudrzných zeminách jsou v porovnání s ostatními metodikami zpravidla nejvyšší podle Masopusta. V případě nesoudrzných zemin jako jsou písčité štěrky, jsou vyšší kapacity pro interpretace CPT podle ČSN EN 1997-2. Výsledky podle Schmertmanna i Brustamanteho (LCPC) jsou spíše odlišné. Výsledky interpretace CPT podle LCPC jsou až na výjimky nejvíce konzervativní pro jemnozrné zemin. Nejlépe je s Masopustovou mezní zatěžovací křivkou porovnatelná metodika výpočtu únosnosti a zpětného výpočtu zatěžovací křivky pomocí EC7-2.

5. DISKUSE

V předešlých odstavcích byla představena na západě již zavedená a zakořeněná metodika realizace a vyhodnocení statických penetračních analýz. Tato metodika je výrazně levnější a rychlejší pro realizaci geologických průzkumů i získávání mechanických vlastností zemin než drahý vrt, drahý popis od geologa a případné průkazné laboratorní analýzy. V rámci tohoto článku byly porovnávány kapacitní výpočty únosnosti podle mezních zatěžovacích křivek (J. Masopust a další 3 metodiky založené na CPT) a limitního povoleného sedání 25 mm. Byly porovnávány 4 metodiky (bylo vypracováno v softwaru GEO5 Pilota CPT a Pilota).

Z výsledků korelace jednotlivých metod pro stejné sedání 25 mm a dané prostředí je patrné, že únosnosti pilot navrhované na základě interpretace výsledků statické penetrační soupravy jsou si v některých ohledech podobné, nicméně výsledky získané na základě výpočtů podle ČSN EN 1997-2 občasně vybočují. Výsledky výpočtu únosnosti pilot na základě metodiky J. Masopusta pro sedání 25 mm jsou z pravidla pro jemnozrnné zeminy nejvyšší; na druhou stranu metodika J. Masopusta pro výpočet únosnosti na nesoudržných hrubozrnných zeminách (i píscích) posouvají únosnost Masopustových pilot trochu níže než výsledky interpretace CPT (např. lokalita Napajedla).

Odlišné výsledky poukazují na závislost na prostředí, kde byly prováděny analýzy a pro které prostředí je počítána únosnost. Pro jemnozrnné zeminy jsou únosnější piloty dimenzované na základě J. Masopusta. V případě výsledků nesoudržných ulehých až velmi ulehých (ČSN EN ISO 14688) hrubozrnných zemin (štěrky) jsou únosnější piloty založeny na výpočtech na základě CPT podle EC7-2 a metodice výpočtu pomocí odporu na hrotu. Do diskuse ještě vstupuje vliv stanovení konzistence. Pokud se jedná o výsledek z laboratoře, není zde započten vliv geostatického tlaku. Tento vliv je velmi dobře patrný z výsledků interpretace CPT, kdy interpretované konzistence jsou zpravidla pro prvních 5-8 m nižší (s vyšší mírou bezpečnosti) než laboratorní. Nebo lze stanovit konzistenci přímo ve vrtu za pomoci vrtulkové zkoušky (např. BS 1377, NZS 4402 apod.).

Domníváme se, že se na rozdílných výsledcích uplatňuje vliv doporučených mechanických vlastností zemin a zejména správný geologický model. Masopustova metodika tak pracuje s přesnějšími výsledky, které jsou založeny na lokální zatěžovací pokusy pilot a lokální znalosti. V případě nesoudržných zemin jsou doporučení mechanických vlastností složitá, neboť odběr neporušeného vzorku je téměř nemožný, stanovení ulehlosti odhadem a interpret mechanických vlastností vyvrtaných zemin se nemá o co opírat. Pokud bychom počítali únosnost piloty (I. mezní stav) podle EC-7 na základě klasického pojetí. Potom mechanické vlastnosti často vychází z mediánu intervalu konzervativních směrných normových charakteristik z ČSN 73 1001. V takovém případě potom měření odporu na hrotu CPT přináší jednoznačně lepší výsledky.

6. ZÁVĚR

V předloženém článku byl proveden pokus o porovnání výpočtu únosnosti a sedání velkopřůměrových vrtaných pilot za pomoci 4 rozdílných metod založených de facto na obdobné metodice „zatlačování sondy“ do základové půdy. Metody vycházejí z výpočtů na základě měření statické penetrace (CPT) a průkazných laboratorních analýz mechaniky zemin a stanovení konzistence a ulehlosti (pro Masopusta). Výpočty probíhaly pro vrtané piloty průměru 900 mm, délky 8,0 m, kdy piloty byly metodicky realizovány pod ochranou ocelové výpažnice. Samotné metody jsou hůře porovnatelné, neboť Masopustova metoda je založena na mezní zatěžovací křivce (II. mezní stav) a ostatní metody pomocí CPT na I. mezním stavu.