

# GEOTECHNICKÁ INTERPRETACE VÝSLEDKŮ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY VELKOPRŮMĚROVÉ VRTANÉ PILOTY INSTRUMENTOVANÉ DISTRIBUOVANÝMI OPTOVLÁKNOVÝMI SNÍMAČI

**Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky

**Ing. Václav Račanský, Ph.D., Ing. Jaroslav Majer**

Keller-speciální zakládání, spol. s r.o.

**Ing. Madeleine Winkler**

ACI Monitoring GmbH

## **Geotechnical interpretation of pile loading test fitted with distributed fibre optic sensing**

The subject of the paper is the evaluation and analysis of continuous strain measurements made by distributed fibre optic sensing systems during the bored pile loading test. The spatial resolution of these system can be several orders of magnitude higher compared to more traditional vibrating wire or electric resistance gauges. The measurements made allowed the detection of two thin layers of non-cohesive soils, proper determination of the shaft frictions along the entire pile and their correlation with a nearby CPT.

**Klíčová slova:** vrtaná pilota, mezní plášťové tření, distribuovaný optovláknový systém

## **1. ÚVOD**

Obsahem předkládaného příspěvku je podrobný rozbor zatěžovací zkoušky vrtané piloty realizované v rámci stavby dálnice D1 nedaleko města Přerov. Důvody pro prezentaci této konkrétní zkoušky odborné veřejnosti jsou tři:

- a) Zkouška byla provedena do vysokých hodnot posunutí, při kterých již mohlo dojít k plné mobilizaci plášťového tření.
- b) Zkouška byla, kromě standardního monitoringu posunu a síly v hlavě piloty, instrumentovaná strunovými tenzometrickými snímači a distribuovaným optovláknovým měřicím systémem.
- c) V těsné blízkosti zkoušené piloty byla dodatečně realizována CPT zkouška.

Ve srovnání se standardními odporovými a strunovými tenzometry osazovanými ve vzdálenostech v řádu jednotek metrů, dosahuje prostorové rozlišení systémů optovláknových systémů (dále jen DFOS) centimetrů až milimetrů. To umožňuje podrobnou analýzu a pochopení geotechnických konstrukcí. Zároveň to ale klade výrazně vyšší nároky na vyhodnocení zkoušek.

V druhé kapitole jsou prezentovány základní údaje o zatěžovací zkoušce a o její instrumentaci. Třetí kapitola stručně shrnuje inženýrsko-geologické poměry, je zde také provedeno zhodnocení CPT zkoušky. V první části čtvrté kapitoly je sestavena měřená mezní zatěžovací křivka. Druhá část této kapitoly je věnována vyhodnocení tenzometrických měření strunovými tenzometry a systémem DFOS.

## **2. ZÁKLADNÍ ÚDAJE O ZKUŠEBNÍ PILOTĚ, ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠCE A INSTRUMENTACI**

Celková délka zkušební piloty byla 18,8 m, z toho prvních 2,8 m bylo před zkouškou odkopáno, statická délka piloty je tedy 16 m s průměrem piloty 880 mm. Pilota byla zhotovena rotačně

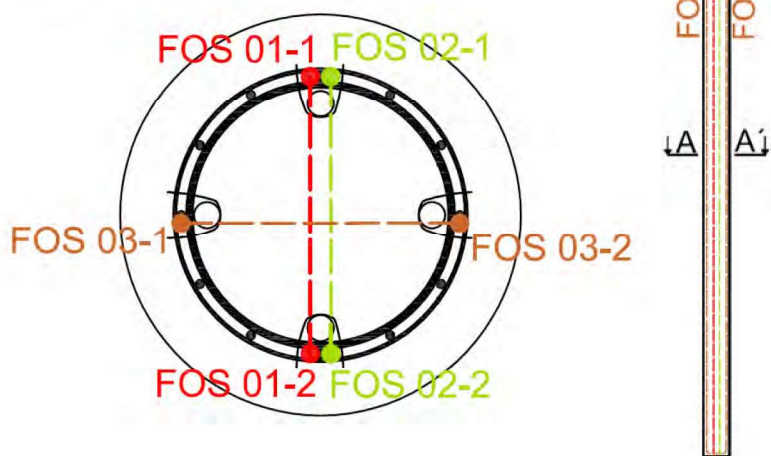


náběrovou technologii vrtnou soupravou BG33H s pažením vrtu v celé délce piloty. Zatěžovací zkouška (VUIS, 2023) byla provedena v zatěžovacích krocích 500, 1000, 1500, 0, 2000, 2500, 0, 3000, 3500, 0, 4000, 4500, 0 kN. Kritérium pro ukončení zatěžovacího stupně bylo ustalování posunů (za posledních 20 minut posun menší než 0,1 mm).

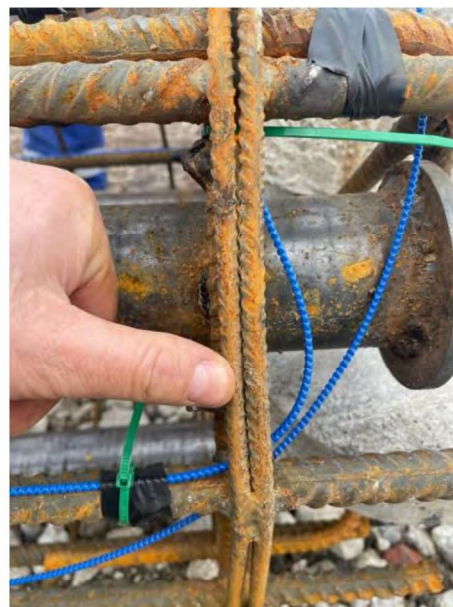
Instrumentace zkoušky sestávala z následujících prvků:

1. Měření síly v hlavě piloty dynamometrem, kontrolně pak pomocí tlaku v hydraulickém systému a měření posunu v hlavě piloty.
2. Dvojice strunových tenzometrických snímačů v hloubkách 2,9; 9,0; 12,5; 15,8 a 18,5 m pod úrovní hlavy piloty
3. Systém DFOS. Instrumentace optickými vlákny se skládala ze tří smyček optických vláken *FOS 01* až *FOS 03*. Pro každou smyčku je rozlišována její první a druhá polovina (např. *FOS 01-1* a *FOS 01-2*). Měření ve smyčkách *FOS 01* a *03* je založeno na měření Rayleighova zpětného rozptylu, v případě smyčky *FOS 02* bylo využito Brillouinův rozptyl. Výhodou první zmiňované technologie je vyšší prostorové rozlišení, přesnost měření a kratší měřicí čas. Maximální délka monitorovaného úseku činí cca 80 m. Naopak, výhodou druhého systému je větší měřicí délka. První systém lze tedy použít také pro měření na laboratorní úrovni, případně pro měření dynamických dějů. Druhý systém nachází uplatnění při velkých (např. liniových) stavbách. Uspořádání optických vláken spolu s ukázkou instrumentace je znázorněno na obr. 1.

### ŘEZ A-A'



a) Uspořádání optických vláken



b) Foto z instrumentace

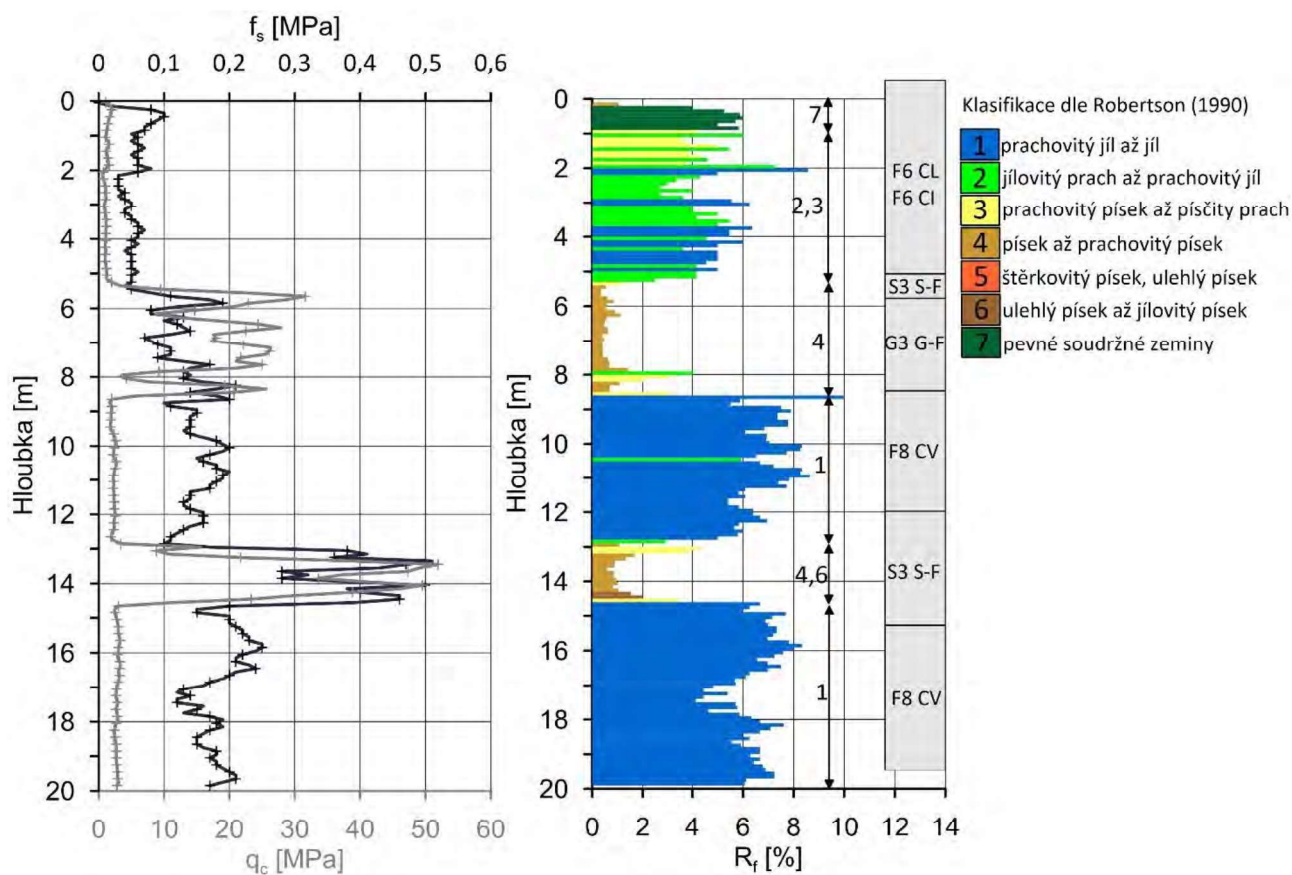
Obr. 1: Instrumentace piloty optickými vlákny

### 3. INŽENÝRSKO-GEOLOGICKÉ POMĚRY PŘEDMĚTNÉ LOKALITY

Popis geotechnických typů zastižených v blízkém vrtu je shrnut v tab. 1. Hloubka je vztažena k výškové úrovni vrtné plošiny (205,3 m n. m.). V blízkosti zkušební piloty byla také realizována CPT zkouška (*iGEO*, 2023) do hloubky 19,8 m. Vyhodnocení zkoušky bylo provedeno v programu vytvořeném na VUT FAST. V grafu na obr. 2a je znázorněn profil odporů na hrotu  $q_c$  (spodní vodorovná osa) a pláště (horní vodorovná osa). Graf na obr. 2b znázorňuje klasifikaci zemin dle *Roberston (1990)*, který dává do vztahu třecí poměr  $R_f$  a normovaný odpor na hrotu  $Q_t$  a stanovuje tzv. Soil Behaviour Type (SBT). Interpretace CPT je dále vztažena k jádrovému vrtu popsáném v předcházejícím textu. Oba zdroje údajů poměrně konzistentně potvrzují, že soudržné zeminy neogenního stáří se střídají s polohami nesoudržných ulehých zemin s nezanedbatelnou mocností.

Tab.1: Inženýrsko-geologické poměry

Hloubka		Popis	Klasifikace	Stáří
Od	Do			
0	5,6	Jíl s nízkou až střední plasticitou, převážně tuhá místy pevná konzistence	F6 CL F6 CI	Q*
5,6	6,3	Písek s příměsí jemnozrné zeminy, ulehlý	S3 S-F	Q
6,3	9,0	Štěrk s příměsí jemnozrné zeminy, ulehlý	G3 G-F	Q
9	12,5	Jíl s velmi vysokou plasticitou, pevná konzistence	F8 CV	N <sup>#</sup>
12,5	15,8	Písek s příměsí jemnozrné zeminy, ulehlý	S3 S-F	N
15,8	24,0	Jíl s velmi vysokou plasticitou, pevná konzistence	F8 CV	N

 \*Q – kvartér; <sup>#</sup> – neogén


a) Odpor na hrotu a pláště

b) Klasifikace dle Robertson (1990)

Obr. 2: Interpretace CPT a návaznost na blízký jádrový vrt

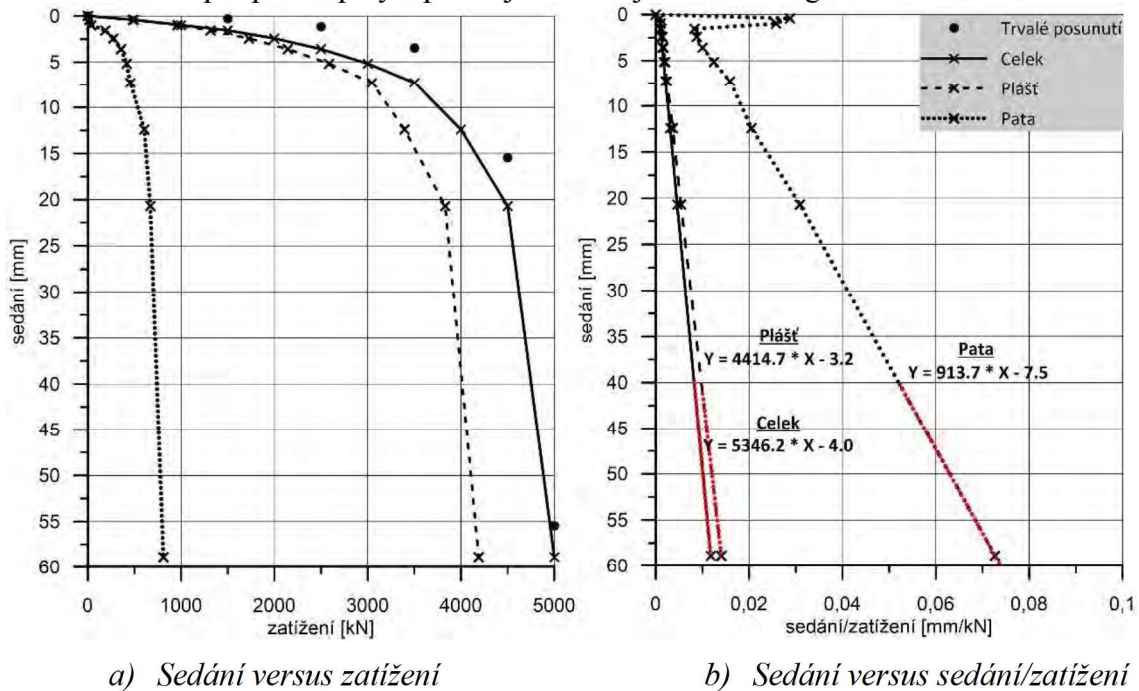
## 4. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ, GEOTECHNICKÁ INTERPRETACE

### 4.1 Základní monitoring v hlavě piloty

V grafu na obr. 3a je znázorněna měřená mezní zatěžovací křivka piloty včetně průběhu trvalých deformací. Zatěžovací křivka paty byla získána z měření nejhlubší dvojice strunových tenzometrických snímačů. Zatěžovací křivka pláště je pak stanovena odečtem celkové křivky a zatěžovací křivky paty. V grafu na obr. 3b je dále využit postup dle *Chin (1972)*. Pokud má mezní



zatěžovací křivka (síla v hlavě piloty  $F$  [kN] – posun v hlavě piloty  $u$  [mm]) hyperbolický tvar, pak transformací v zobrazení  $u/F$  [mm/kN] –  $u$  [mm] vzniká přímka a její směrnice odpovídá mezní síle (únosnosti) piloty. Poměr  $u/F$  lze inženýrsky interpretovat jako parametr tuhosti – přírůstek posunu potřebný pro mobilizaci 1 kN únosnosti pláště/paty/celku. Dle tohoto postupu jsou měřené únosnosti následující:  $F_{ult,celek} = 5346$  kN,  $F_{ult,plášť} = 4414$  kN,  $F_{ult,pata} = 914$  kN. Malá nepřesnost v součtu příspěvků paty a pláště je dána nejistotami v regresních funkcích.



Obr. 3: Měřená mezní zatěžovací křivka

#### 4.2 Tenzometrické měření podél piloty pomocí optovláknových snímačů (DFOS)

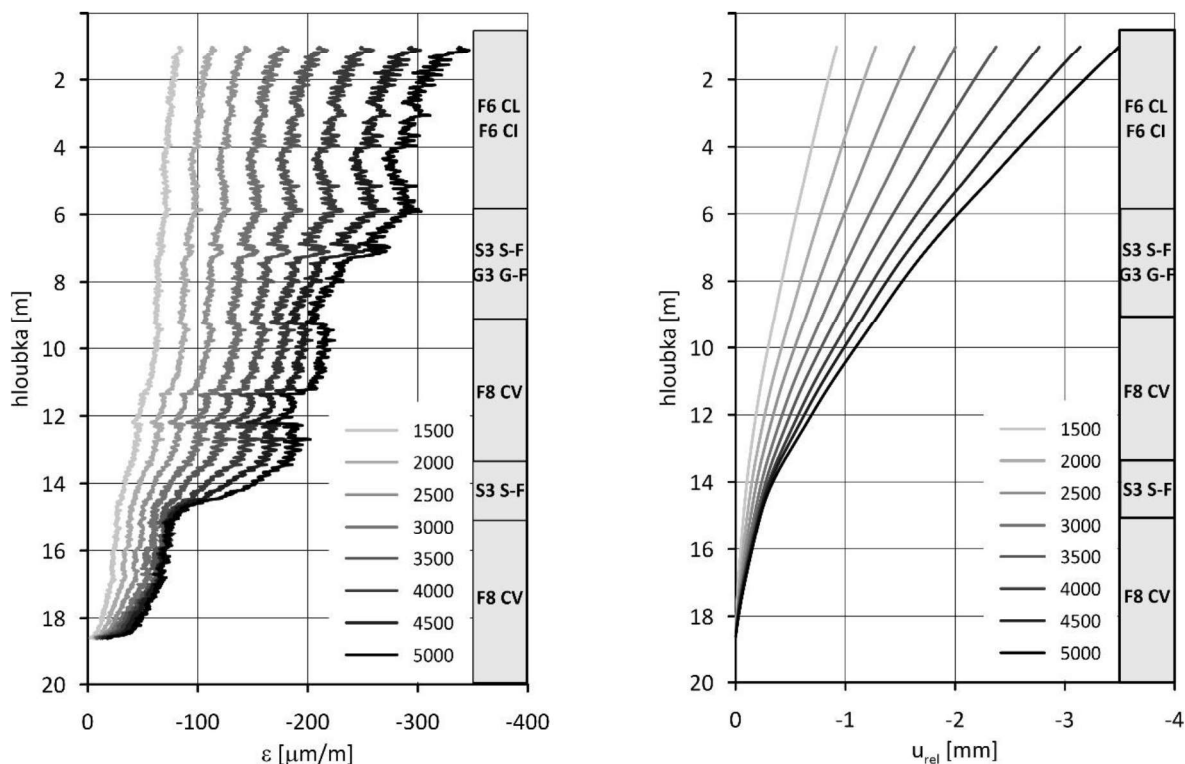
Vzhledem k omezení rozsahu příspěvku je prezentováno pouze zpracování měření ze smyčky *FOS 01*, které je doplněno o srovnání se strunovými tenzometry. Primárním výsledkem jsou hodnoty přetvoření  $\varepsilon$  pro jednotlivé zatěžovací stupně po celé délce piloty s rozlišením 1 cm (obr. 4a). Přetvoření  $\varepsilon$  reprezentuje průměr přetvoření naměřeného na vzestupné a sestupné části smyčky v dané hloubce.

V první části zpracování dat je integrací poměrných přetvoření získán přírůstek posunů  $\Delta u$  po hloubce. Součtem hodnot  $\Delta u$  směrem od paty piloty jsou stanoveny hodnoty relativních posunů  $u_{rel}$  (obr. 4b). Nejedná se ale o skutečné (absolutní) posuny podél piloty, protože předpoklad nulového posunu v patě piloty není správný. Pro získání absolutních posunů  $u$  je nutná kombinace se standardním měřením v hlavě piloty

Cílem druhé části zpracování dat je získat průběhy mobilizovaného a mezního plášťového tření ( $q_s$ ,  $q_{s,ult}$ ) podél piloty. Zde velkou komplikaci představují oscilace v průbězích poměrného přetvoření. Tvar profilů poměrných přetvoření je zároveň tvarem profilů osových sil za předpokladu konstantní osově tuhosti ( $F = EA\varepsilon$ ). I poměrně malá oscilace osově síly mezi dvěma blízkými měřenými body (zde 0,01 m) způsobí velkou výchylku ve vypočteném plášťovém tření. Měřené profily přetvoření je proto nutné vhodně upravit např. pomocí váženého klouzavého průměru. Takto upravené průběhy přetvoření jsou převedeny na průběhy sil  $\bar{F}$ . V tomto kroku předpokládáme konstantní osovou tuhost piloty. Plášťové tření působící na segmentu piloty s délkou  $l_{seg}$  je vyčísleno dle vztahu 1, kde  $\bar{F}^a$  a  $\bar{F}^b$  jsou síly na začátku a konci daného segmentu.

$$q_s = \frac{\bar{F}^a - \bar{F}^b}{\pi d_p l_{seg}} \quad (1)$$



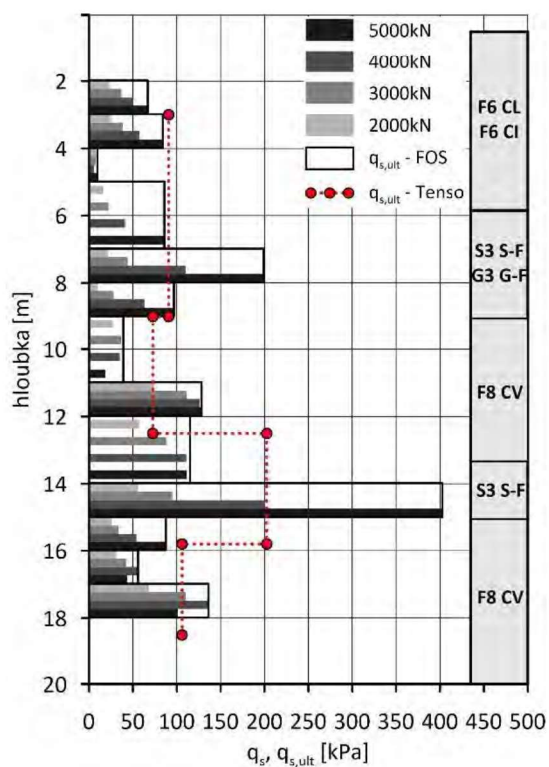


a) Průběhy poměrných přetvoření

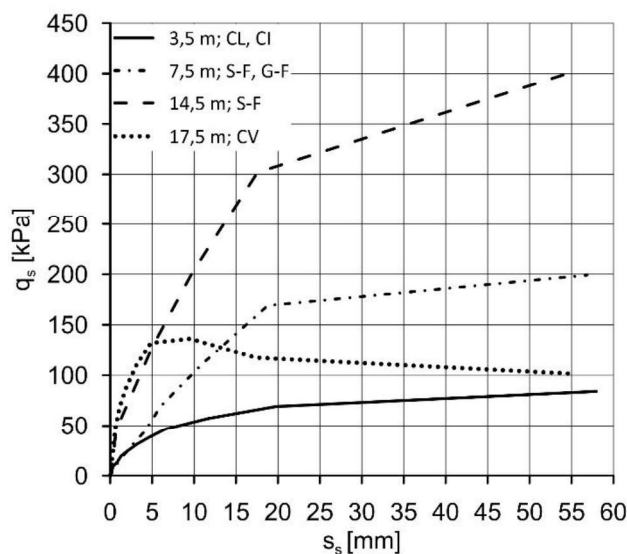
b) Průběhy relativních posunů

 Obr. 4: Naměřené hodnoty poměrných přetvoření ( $\varepsilon^l$ ) a vypočtené relativní posuny ( $u_{rel}^l$ )

Profily plášťových tření pro  $l_{seg} = 1,0 \text{ m}$  jsou znázorněny v grafu na obr. 5a. V grafu na obr. 5b. jsou pak sestaveny přenosové funkce pro čtyři reprezentativní segmenty: *segment A* v hloubce 3,5 m v prostředí kvarterních soudržných zemin; *segment B* v hloubce 7,5 m v první vrstvě nesoudržných zemin charakteru písků až štěrků s příměsí jemnozrnné zeminy, *segment C* ve druhé vrstvě nesoudržných zemin charakteru převážně písků s příměsí jemnozrnné zeminy v hloubce 14,5 m a *segment D* v hloubce 17,5 m nacházející se v prostředí neogenních jílu v blízkosti paty piloty. V přípoверхových kvarterních soudržných zeminách (*segment A*) je mobilizována relativně vysoká hodnota plášťového tření. To může být způsobeno vyšším podílem písčité frakce v kvarterních vrstvách. Výrazně se liší tuhost dvou segmentů v soudržných zeminách – v hlouběji situovaných překonsolidovaných zeminách (*segment D*) je mezní plášťové tření dosaženo při posunu cca 5 mm, v segmentu A je při stejné hodnotě posunu mobilizované plášťové tření menší než 40 kPa. Zřetelný je povrcholový pokles plášťového tření v *segmentu D*, což je typické chování pro překonsolidované zeminy. Dokumentované přímé měření povrcholového změkčování podél pláště piloty je výjimečné a v našem případě se ho podařilo jednoznačně zachytit. *Segmenty B a C* v nesoudržných ulehlých zeminách vykazují jiné chování. Jsou dosaženy velmi vysoké hodnoty plášťového tření. Jejich mobilizace je ale pomalejší, ani na konci zkoušky (posun v hlavě větší než 55 mm) nelze konstatovat, že bylo dosaženo mezní plášťové tření. Takové chování může být způsobeno jevem v zahraničí označovaným jako „constrained dilatancy“ (zamezená dilatance). Ulehlé zeminy podél pláště piloty mají při smýkání tendenci dilatovat (zvětšovat svůj objem). Tomu ale brání okolní zemina dále od piloty (v radiálním směru), v důsledku, čeho narůstá normálové napětí působící na plášť piloty, a tudíž mezní plášťové tření. Dle teorie mechaniky zemin by se celý tento proces měl ustálit až v kritickém stavu zeminy.



a) Mobilizované plášťové tření



b) Přenosové funkce

Obr. 5: Průběhy mobilizovaných plášťových tření (a) a přenosové funkce pro 4 vybrané body (b)

## 5. ZÁVĚR

V příspěvku je sumarizována úvodní etapa vyhodnocení dat z monitoringu zatěžovací zkoušky piloty pomocí distribuovaného optovláknového systému (DFOS) s prostorovým rozlišením 0,01 m. Vysoké prostorové rozlišení umožnilo detekovat dvě polohy nesoudržných zemin s malou mocností a korektně vyčíslit hodnoty plášťového tření. Systémy DFOS tedy umožňují mnohem detailnější náhled do chování geotechnických konstrukcí, na druhé straně ale kladou vyšší nároky na vyhodnocení, její algoritmizaci a následnou interpretaci dat.

## 6. PODĚKOVÁNÍ

Projekt TJ02000140 Implementace metody přenosových funkcí pro optimalizaci návrhu hlubinného zakládání staveb, v rámci kterého část tohoto příspěvku vznikla, byl spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu ZETA 2.

## 7. LITERATURA

Robertson, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27 (1), 151-8.

Chin, F. K. 1972. The inverse slope as a prediction of ultimate bearing capacity of piles. Proceedings of the third southeast asian conference on soil engineering.

VUIS – Zakladanie stavieb s.r.o. 2023. Zaťažovacia skúška piloty, Dálnice D1, stavba 0136 Říkovice – Přerov.

iGEO s.r.o. 2023. Geotechnický průzkum při založení mostního objektu SO 201 v km 76,210.

Titul, jméno, příjmení autora: Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

Pracoviště: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky

E-mail adresa: chalmovsky.j@fce.vutbr.cz