STANOVENIE EXPERIMENÁLNEJ ÚNOSNOSTI PILÓT

DETERMINATION OF EXPERIMENTAL BEARING CAPACITY PILES

Ján Mihálik^{*1}, Filip Gago¹, Martina Buková¹

^{*}jan.mihalik@uniza.sk

Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra geotechniky, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Abstrakt

Článok je zameraný na vyhodnotenie statickej zaťažovacej skúšky pilót podľa rôznych metód. Cieľom vyhodnotenia je získať návrhové hodnoty experimentálnej únosnosti pilót. Analýza obsahuje vyhodnotených 10 statických zaťažovacích skúšok realizovaných na veľkopriemerových pilótach rôznych dĺžok, ktoré sa nachádzajú v rovnakom inžinierskogeologickom rajóne a sú zhotovené rovnakou technológiou tzn. vŕtané pilóty s výpažnicou. Pri vyhodnocovaní sme sa zameriavali na najčastejšie využívané metódy a každú skúšku sme vyhodnotili podľa STN 73 1002, podľa metódy Brinch Hansen - 80% kritérium a podľa Davissonovej metódy medznej únosnosti.

Klíčová slova

Statická zaťažovacia skúška, experimentálna únosnosť, vŕtané pilóty, vyhodnotenie únosnosti

Abstract

The article is focused on the evaluation of the static load test of piles by various methods. The aim of the evaluation is to obtain design values of the experimental bearing capacity of the piles. The analysis contains evaluated 10 static load tests performed on large-diameter piles of various lengths, which are located in the same engineering geological district and are made as drilled piles with a casing. Each test is evaluated according to STN 73 1002, according to the Brinch Hansen method 80% criterion and according to the Davisson method of ultimate strength.

Key words

Static load test, experimental bearing capacity, drilled piles, estimation of bearing capacity

1 ÚVOD

Posúdenie a návrh pilotových základov nie je jednoduchý proces, za najvhodnejšie sa javí navrhovanie pilót na základe medzného stavu používateľnosti, t. j. sadnutia a ich únosnosť overiť dodatočne. Podstatne odlišný trend však môžeme vyrozumiť z platného Eurokódu 7-1, ktorý sa venuje predovšetkým podmienkam MSÚ a sadnutie pilót spomína len okrajovo. Únosnosť pilóty a jej presná formulácia je pomerne komplikovaná záležitosť. Únosnosť má zodpovedať takému stavu, kedy nie je prekročená pevnosť materiálu pilóty alebo pevnosť okolitej zeminy, prípadne ich medza pretvorenia [1]. Za najspôhlivejší spôsob stanovenia únosnosti osamelej pilóty sa všeobecne považuje statická zaťažovacia skúška. Pri testovaní pilóty sa zohľadňujú aj ďalšie vplyvy, ktoré výpočtové predpoklady nemusia vždy správne vystihovať. Do úvahy sa berú najmä vplyvy akými sú vlastnosti základovej pôdy v konkrétnej oblasti a technologické aspekty realizácie pilóty. Výsledok merania statickej zaťažovacej skúšky sa graficky znázorňuje zaťažovacou krivkou, ktorá zobrazuje závislosť zvislého zaťaženia a ustáleného sadania hlavy pilóty. Rovnako ako analytické metódy má aj statická zaťažovacia skúška rôzne metódy vykonávania a vyhodnocovania experimentálneho merania poskytujúce odlišné hodnoty únosnosti ako uvádzajú autori v [2],[3],[4].

Článok analyzuje porovnanie troch metód vyhodnotenia a vzájomného porovnania výsledkov získaných zo zaťažovacej krivky na veľkopriemerových vŕtaných pilótach s použitím výpažnice. Konkrétne ide o metódy vyhodnotenia krivky podľa STN 73 1002, metódy Brinch Hansen - 80% kritérium a podľa Davissonovej metódy medznej únosnosti.

2 STATICKÁ ZAŤAŽOVACIA SKÚŠKA PILÓTY

Rovnako ako analytické metódy má aj statická zaťažovacia skúška (SZS) rôzne metódy postupu a vyhodnocovania výsledkov. Pri každej metóde je nutné dodržať určitý postup zaťažovania pre získanie relevantnej zaťažovacej krivky, ktorá sa následne analyzuje a určí sa výsledná únosnosť pilóty, pre ktorú sa stanoví bezpečné zaťaženie, ktorým je možné pilótu zaťažiť bez toho, aby došlo k poškodeniu nosných konštrukcií v hornej stavbe. Najbežnejšie používanou metódou je pomalá skúška udržiavaného zaťaženia (slow ML test), označovaná ako štandardný postup zaťažovania v ASTM navrhovaní D-1143 [5]. Na obr. 1 možno vidieť schematickú zostavu SZS s využitím zaťažovacieho mostu, čo je na území Slovenskej republiky najpoužívanejší spôsob. Zaťaženie na pilótu je aplikované hydraulickými lismi rozopieranými o zaťažovací most, ktorému slúžia ako protizáťaž kotviace pilóty. Najzákladnejšie meranie počas priebehu skúšky je zaznamenávanie posunu (zatlačenie) hlavy pilóty. Skúšky môžu byť doplnené aj prídavné snímače. Napr. ide o tenzometrické snímače, poskytujúce rozsiahlejší obraz o vzájomnej interakcii pilóty a základovej pôdy. Taktiež je možné merať priehybové (poklesové) kotliny, pomocou ktorých sa zisťuje vplyv prenášania zaťaženia do okolitého geologického prostredia.

Po vykonaní metódy zaťažovania je potrebné krivku analyzovať a stanoviť z nej návrhové hodnoty. Najčastejšie používané metódy analýzy zaťažovacej krivky sú uvedené v [6]. Problematike analýze krivky sa venovali v [2] a konštatovali, že interpretácia tej istej krivky zobrazujúcej priebeh zaťaženia a sadania môže poskytnúť veľký rozptyl finálnych výsledkov v závislosti od použitej metódy, a od toho ako blízko k porušeniu bola pilóta zaťažená. Rozptyl pri niektorých metódach ovplyvňuje aj subjektívnosť inžiniera vykonávajúceho interpretáciu, pretože nie každá metóda je založená na matematických pravidlách [4].

Obr. 1 Usporiadanie zaťažovacej zostavy s kotvením do štyroch roznášacích pilót.

Vyhodnotenie podľa STN

Na Slovensku sa najviac používa metóda, ktorú uvádza STN 73 1002 a určuje experimentálnu únosnosť $U_{ve,i}$ zo štyroch medzných hodnôt (U_{con} , U_{def} , U_{pr} a U_y). Následne sa z nich určí návrhová únosnosť U_{vd} ako minimálna hodnota podľa vzťahu:

$$U_{vd,i} = \min \left[\frac{U_{ve,i}}{\gamma_{re,i}} \right], \quad (1)$$

kde U_{ve} je experimentálna únosnosť určená z priebehu krivky [kN], U_{vd} je návrhová únosnosť [kN], $\gamma_{re,i}$ je parciálny súčiniteľ zohľadňujúci bezpečnosť návrhu.

Za výslednú návrhovú únosnosť sa považuje minimálna hodnota U_{vd} . Zaťaženie, pri ktorom sa dosiahne sadnutie 25 mm je považované za smernú únosnosť a označuje sa U_{con} . Hodnota zaťaženia, pri ktorej sa dosiahne sadanie 0,1D je považovaná za únosnosť na medzi pretvorenia U_{def} . Zaťaženie, pri ktorom nastane väčšia zmena zakrivenia zaťažovacej krivky, sa považuje za únosnosť na medzi úmernosti U_{pr} . U_y predstavuje únosnosť na medzi pretvorenia, ide o hodnotu pri ktorej sa dosiahne zreteľný zlom na zaťažovacej krivke. Ak sa nedosiahne

ani jedna z uvedených hodnôt za charakteristickú únosnosť sa považuje najväčšia hodnota zaťaženia počas SZS [7].

Vyhodnotenie podľa Brinch Hansen 80% kritérium

J. Brinch Hansen v roku 1963 definoval únosnosť pilóty $Q_u(U_{ve})$ ako záťaž, ktorá vyvoláva štvornásobok sadania hlavy pilóty získaného pri 80 % tejto záťaži. Toto 80% kritérium možno odhadnúť priamo z krivky sadania a zaťaženia, ale presnejšie je určené v grafe závislosti odmocniny každej hodnoty sadania podelennej príslušnou hodnotou zaťaženia a samotného sadania ($\sqrt{S/V}$ a S). V tomto grafe sa následne určia parametre C_1 a C_2 z koncovej priamkovej časti grafu.

$$Q_u = \frac{2}{2 * \sqrt{C_1 * C_2}} \quad (2)$$

$$S_u = \frac{C_2}{C_1}, \quad (3)$$

kde Q_u je charakteristická únosnosť určená z priebehu krivky [kN], S_u je sadnutie pilóty pri Q_u [kN], C_1 je číselné vyjadrenie sklonu priamky, C_2 je ypsilónová súradnica začiatku priamky.

Pri použití metódy Brinch Hansen 80% kritérium je dôležité skontrolovať či bod $0,80Q_u/0,25S_u$ leží v blízkosti krivky alebo na nameranej krivke sadania a zaťaženia. Relevantnosť hodnotenia sa môže prehodnotiť tak, že nameraná krivka sadania a zaťaženia sa prekryje vypočítanou krivkou podľa rovnice (4). Tieto dve krivky by mali byť v tesnej blízkosti zaťaženia rovnajúceho sa približne 80% z Q_u a samotného konečného zaťaženia (únosnosti) Q_u [8].

$$V_v = \frac{\sqrt{S}}{C_1 * S + C_2}, \quad (4)$$

kde V_v je vypočítané zaťaženie [kN], S je sadanie [mm].

Vyhodnotenie podľa Davissonovej metódy medznej únosnosti

Davisson definoval únosnosť pilóty $Q_u(U_{ve})$ ako záťaž zodpovedajúcu sadaniu, ktoré presahuje elastické stlačenie (skrútenie) pilóty Δ o hodnotu 4 mm plus faktor rovný priemeru pilóty D (v milimetroch) delený 120. Medzná únosnosť pilóty sa určí priamo z grafu závislosti sadania S a zaťaženia V . Za únosnosť pilóty sa podľa Davissonovej metódy považuje bod, kde pretne odsadená čiara elastického skrútenia o hodnotu X_d krivku závislosti sadania a zaťaženia získanú zo statickej zaťažovacej skúšky. Elastické skrútenie pilóty Δ a jeho odsadenie X_d sa vypočítajú podľa vzťahov (5) a (6). Δ a X_d sa počíta pre každý stupeň zaťaženia [3], [9]

$$\Delta = V * \frac{L}{E * A}, \quad (5)$$

kde Δ je elastické stlačenie pilóty [mm], V je aplikované zaťaženie [kN], L je dĺžka pilóty [m], A je plocha priečného rezu pilóty [m²], E je modul pružnosti materiálu pilóty [kPa]

$$X_d = 4mm + \frac{D}{120}, \quad (6)$$

kde X_d je odsadenie elastického skrútenia pilóty [mm], D je priemer pilóty [mm].

Stanovenie návrhovej únosnosti

Návrhová únosnosť U_{vd} sa stanovuje podelením experimentálnej únosnosti pilóty U_{ve} koeficientom bezpečnosti γ . Tu však treba dať pozor, koeficient bezpečnosti γ nie je jednotná hodnota uplatniteľná za každých okolností. Jeho hodnota závisí od dovolenej úrovne zlyhania, ako aj od úrovne kontroly aspektov ovplyvňujúcich zmenu únosnosti pilóty na danom mieste. Ovpľyňuje ho aj metóda, ktorá sa používa na vyhodnotenie výsledkov skúšky. Veľa noriem určuje jednotný koeficient bez ohľadu na podmienky, zvyčajne je to hodnota 2,0 často aj vyššia [3]. Voľnosť inžinierov pri navrhovaní pilót viedla k použitiu veľkého množstva koeficientov bezpečnosti. Pri zaťažovacej skúške vykonanej na začiatku projektových práce, kedy nie je isté, že pilóta bude rovnakého druhu sa používajú hodnoty 2,5. V prípade testovania počas konečnej konštrukčnej fázy, keď sa zaťažovacia skúška uskutoční za priaznivých podmienok reprezentatívnych pre projekt sa používajú hodnoty 1,8–2,2.

Metóda STN uvádza rozmedzie koeficientu bezpečnosti γ v rozsahu od 1,0–1,5 a to v závislosti od dosiahnutej medznej hodnoty (v našom prípade je to pri pilótach č. 1 až 7 a 10 hodnota 1,5; pri pilótach č. 8 a 9 je to hodnota 1,3). Koeficient bezpečnosti γ pre Davissonovú metódu sa zvyčajne volí v rozsahu 1,8 až 2,0. Vo výpočtoch je uvažované s hodnotou 2,0. Pri metóde Brinch Hansen - 80% kritérium je pre určenie návrhového zaťaženia koeficient bezpečnosti γ zvyčajne v rozsahu 2,0–2,5 [6]. V našich analýzach sme uvažovali s hodnotou 2,0.

3 VYHODNOTENIE ZAŤAŽOVACÍCH KRIVIEK

Ako podklad pre hodnotenie slúžia výsledky zo skúšok realizovaných na pilótach, ktoré sú súčasťou základov stavebných mostných objektov SO 201 a SO 202 situované na ceste I/51, Trnava, severný obchvat. Realizácia a postup zvyšovania zaťaženia na pilótu počas SZS bol realizovaný podľa [7]. Maximálne skúšobné zaťaženie na pilótu bolo stanovené ako 1,5 násobok návrhového zaťaženia poskytnutého statikom hornej stavby. V článku je vyhodnotených 10 statických zaťažovacích skúšok podľa [7], [8], [9]. Všetky pilóty boli zhotovené z betónu triedy C30/37 ako vŕtané pilóty s výpažnicou a CFA technológiou (pilóty s priemerom 1,0 m – CFA, pilóty s priemerom 1,2 m – vŕtané). Dĺžky, priemery, triedy betónu, inžiniersko-geologické profily, v ktorých sa pilóty nachádzajú a priebehy statických zaťažovacích skúšok sú prevzaté z [10]. Na obr. 2 možno vidieť priebeh sadania jednotlivých pilót v závislosti od zaťaženia.

Obr. 2 Zaťažovacie krivky závislosti zaťaženia a sadania pre pilóty č. 1 až 10.

Unikátnosť výsledkov statických zaťažovacích skúšok tkvie v tom, že sú všetky realizované na jednej lokalite, na pomerne malej ploche. Podľa geomorfologického členenia patrí skúmané územie do celku Podunajská pahorkatina, podcelku Trnavská pahorkatina, časti Trnavská tabuľa a ide o rovinaté územie. Povrch terénu sa pohybuje od 153,85 do 154,29 m n. m. Skúmané územie je budované na povrchu prevažne preplavenými sprašovými ílmi a v nižších polohách s výskytom fluvialnych pieskov. Hladina podzemnej vody kolíše okolo 10,5 m pod povrchom terénu vo vrstvách fluvialnych pieskov.

Geológia územia je tvorená:

- ornica a humusom hrúbkou vrstvy 0,3–0,5 m,
- podorničnou vrstvou s hrúbkou 0,3–0,8 m siltovitého charakteru,
- vrstvami spraší so strednou a nízkou plasticitou triedy F6 tuhej miestami pevnej až tvrdej konzistencie, slabo presadavé až presadavé, hrúbka vrstvy 9,0–9,4 m,
- fluvialnymi sedimentami, ktoré majú charakter piesku ílovitého tr. S5 a piesku s prímiesou jemnozrnnéj zeminy S3 s hrúbkou vrstvy 1,0–2,6 m,
- spodné vrstvy sú tvorené neogénymi sedimentami charakteru ílu s vysokou plasticitou tr. F8/CH.

V Tab. 1 sú uvedené identifikačné údaje pilôt a výsledky z vyhodnocovania statických zaťažovacích skúšok (návrhové únosnosti). Grafické vyhodnotenie možno vidieť na obr. 3. Päť pilot sú ukončené v únosnejších vrstvách pieskov triedy S3 a S5 s výnimkou pilóty č. 6, ktorej päta končí v sprasovitých zeminách.

Tab.1 Špecifikácií pilôt a výsledných únosností.

Číslo pilóty	Objekt	Umiestnenie	Priemer D [m]	Dĺžka L [m]	STN 73 1002 U_{vd} [kN]	Brinch Hans. 80% U_{vd} [kN]	Davisson U_{vd} [kN]	Návrh. zaťaž.
1	SO-201	opr.1	1,2	14,0	2120,0	1768,0	1575,0	2120
2	SO-201	pod. 2	1,0	8,6	1350,0	Neurčené	Neurčené	1350
3	SO-201	pod. 3	1,0	8,6	1750,0	1318,0	905,0	1750
4	SO-201	pod. 4	1,0	8,6	1800,0	1318,0	1088,0	1800
5	SO-201	pod. 5	1,0	8,6	1450,0	1185,0	1086,0	1450
6	SO-201	opr.6	1,2	17,5	2370,0	Neurčené	Neurčené	2370
7	SO-202	opr.1	1,2	16,3	2950,0	Neurčené	Neurčené	2950
8	SO-202	pod. 2	1,0	8,8	1606,0	1250,0	1161,0	1750
9	SO-202	pod. 3	1,0	8,8	1077,0	1141,0	822,0	2300
10	SO-202	opr. 4	1,2	15,7	2950,0	2795,0	2042,0	2950

Obr. 3 Graf vyhodnotenia únosnosti pilóty.

Podľa metódy STN 73 1002 bolo možné zistiť únosnosti pre všetky pilóty. V deviatich prípadoch bola zistená návrhová únosnosť rovnaká ako návrhová hodnota zaťaženia, pretože rozhodujúca experimentálna únosnosť $U_{v,e}$ bola rovná maximálnemu skúšobnému zaťaženiu. Pre pilótu č. 9 bola únosnosť nevyhovujúca.

Podľa metódy Brinch Hansen 80% kritérium bolo možné zistiť únosnosti pre 7 pilôt. Vo všetkých 6 prípadoch boli únosnosti menšie ako návrhové hodnoty zaťaženia. Únosnosť pilóty č. 2 a 7 nebola určená, pretože koncové body grafu závislosti S a $\sqrt{S/V}$ netvorili priamku ($R^2 < 0,7$). Únosnosť pilóty č. 6 nebola určená, pretože bod $0,8Q_u/0,25S_u$ ležal mimo rozsahu nameranej krivky.

Podľa Davissonovej metódy medznej únosnosti bolo možné zistiť únosnosti pre tých istých 7 pilôt ako podľa metódy Brinch Hansen 80% kritéria. V šiestich prípadoch boli únosnosti menšie ako návrhové hodnoty zaťaženia. Únosnosť pilót č. 2, č. 6 a č. 7 nebolo možné určiť, pretože elastické skrátenie pilót Δ odsadené o hodnotu X_d bolo väčšie ako sadanie pilót.

Pri porovnaní metódy STN 73 1002 s metódou Brinch Hansen 80% kritérium sú únosnosti pilôt v šiestich prípadoch menšie. Rozdiel únosnosti v percentuálnom porovnaní sa pohybuje v rozsahu 6–37 %, v priemere je to hodnota 24 %. Iba v jednom prípade bola únosnosť pilóty väčšia, a to pri pilóte č. 9, kedy predstavovala výslednú únosnosť väčšiu o 6 %.

Pri porovnaní metódy STN 73 1002 s Davissonovou metódou medznej únosnosti sú únosnosti pilôt vo všetkých prípadoch menšie. Rozdiel únosnosti v percentuálnom porovnaní sa pohybuje v rozsahu 31–93 %, v priemere je to hodnota 52 %.

4 ZÁVER

Výsledok statickej zaťažovacej skúšky neposkytuje jednoznačné odpovede stanovenia únosnosti pilóty. Existujú značné odchýlky v metódach interpretácie zlyhania či prekročenia únosnosti. Z tohoto dôvodu je nutné prihliadnuť aj na limitné hodnoty sadnutia pilóty pri danej únosnosti, ktoré by mohli ohroziť stabilitu konštrukcie. Statická zaťažovacia skúška, ktorá meria iba aplikované zaťaženie a pohyb hlavy pilóty nám vyjadruje únosnosť pilóty ako celku bez možnosti stanovenia samostatnej únosnosti päty a plášta pilóty, avšak pri malých projektoch je takáto úroveň náročnosti postačujúca, ak je neistota pokrytá dostatočným faktorom bezpečnosti.

Vyhodnotením výsledkov experimentálnych meraní môžeme konštatovať, že metóda STN je univerzálna, keďže je možné určiť únosnosť pre každý typ zaťažovacej krivky, tiež poskytuje najväčšie hodnoty únosnosti z troch uvedených metód, iba v jednom prípade hodnota bola menšia ako Brinch Hansen-80% kritérium. Nevýhodou je však, že metóda nie je plne založená na matematickom pravidle, ktoré by generovalo stále rovnakú hodnotu nezávisle na mierke zobrazenia, čo neplatí však napr. pri stanovení U_{pr} a U_y . Tiež by poskytovala odlišné výsledky, ak by zaťažovanie pilóty pokračovalo na väčšie hodnoty.

Metódy Brinch Hansen 80% kritérium a Davissonovú metódou medznej únosnosti nemôžeme považovať za univerzálne metódy, keďže nebolo možné stanoviť únosnosť pre všetky typy zaťažovacích kriviek. Nie je možné ich použiť pre krivky, pre ktoré je typické malé sadanie s narastaním zaťaženia a malé konečné sadnutie pri maximálnom skúšobnom zaťažení.

Použité zdroje

- [1] STACHO, J. Analýza navrhovania pilót so zohľadnením technológie zhotovovania, dizertačná práca, STU Bratislava STU 2015
- [2] DE COCK, F. - LEGRAND, C. – HUYBRECHTS, N. 2003. : Overview of design methods of axially loaded piles in Europe – Report of ERTC3-Piles, ISSMGE Subcommittee. In XIIIth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering: proceedings. Vol 3. Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds. Prague: The Czech Geotechnical Society CICE, 2003. ISBN 80-86769-02-X.
- [3] FELLENIUS, B. H. 2001. We have determined the capacity, then what? [online]. New Jersey: Deep Foundation Institute, Fulcrum, 2001. 4 p. Dostupné na internete: <https://www.fellenius.net/papers/230%20&%20240%20Analysis%20of%20Pile%20Capacity-DFI.pdf>
- [4] FELLENIUS, B. H. 2001. What capacity value to choose from the results a static loading test [online]. New Jersey: Deep Foundation Institute, Fulcrum, 2001. 4 p. Dostupné na internete: <https://www.fellenius.net/papers/230%20&%20240%20Analysis%20of%20Pile%20Capacity-DFI.pdf>
- [5] Astm D1143-81 Piles Under Static Compressive Axial Load
- [6] DIŇA, N. Hodnotenie statickej zaťažovacej skúšky pilót podľa rôznych postupov [bakalárska práca] /; Škol. Giang Nguyen, . - Katedra geotechniky Fakulty stavebnej Žilinskej univerzity v Žiline. - Žilina; 2018. - 89 s
- [7] STN 73 1002: 1987: Pilotové základy
- [8] Hansen, J.B., 1963. Discussion on hyperbolic stress-strain response. Cohesive soils. American Society of Civil Engineers, ASCE, Journal for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 89, SM4, pp. 241 - 242.
- [9] Davisson, M. T., 1972. High capacity piles. Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, American Society of Civil Engineers, ASCE, Illinois Section, Chicago, March 22, pp. 81 - 112.
- [10] DRUSA, M. – KORENKO, M. 2010 - 2011. Dokumenty „PROJEKT ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY PILÓTY“ a „VYHODNOTENIE ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY PILÓTY“ pre pilóty SO 201 – SO 202.