

Posouzení únosnosti plošného základu – část 1

Návrh pomocí metody dílčích součinitelů

Ing. Jiří BOŠTÍK, Ph.D.
Ing. Lumír MIČA, Ph.D.
doc. Ing. Miroslav VOŘECHOVSKÝ, Ph.D.
VUT Brno – Fakulta stavební

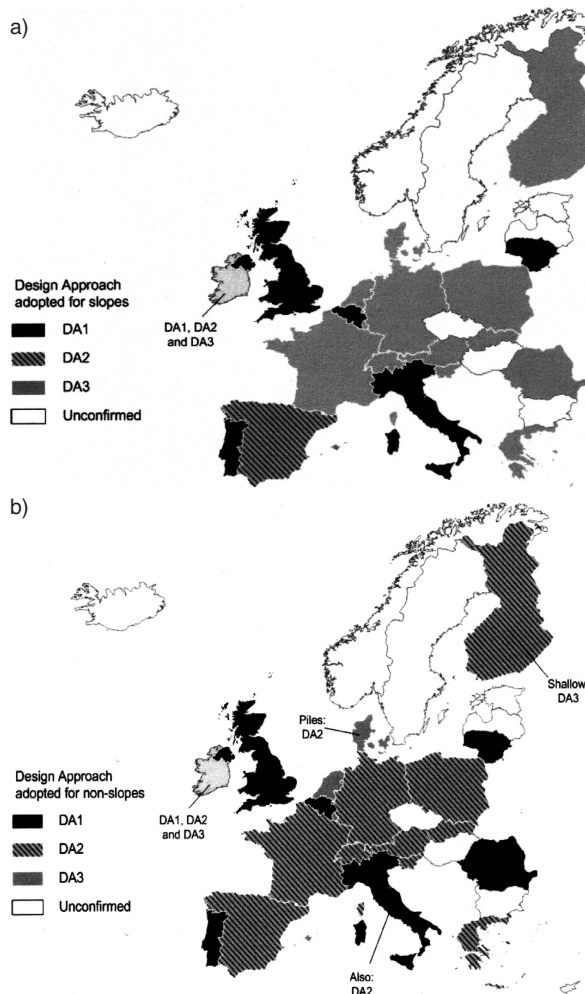
Článek je první částí dvoudílného příspěvku věnovaného porovnání úrovně spolehlivosti plošného základu navrženého pomocí EC 7 a starší národní geotechnické normy ČSN 73 1001. Na jednoduché aplikaci je proveden návrh plošného základu podle výše uvedených norem s použitím metody dílčích součinitelů (část 1). V navazující části bude pozornost zaměřena na využití plně pravděpodobnostního výpočtu (část 2). Cílem příspěvku je demonstrovat postup pro zvolený návrhový přístup, a to jak se liší úroveň spolehlivosti navrženého základu a jak lze případný rozdíl kvantifikovat pomocí plně pravděpodobnostního výpočtu. Porovnání je provedeno pouze pro jeden zvolený návrhový přístup (DA3) a je určována šířka základu pro různý poměr svislé a vodorovné síly. Hodnocení vhodnosti aplikace různých návrhových přístupů dle EC 7 pro řešení únosnosti plošných základů není věnována pozornost.

Úvod

Za významný vývoj v oblasti mezinárodních předpisů pro navrhování konstrukcí v Evropě lze považovat přechod k jednotným metodickým postupům stanoveným v harmonizovaných normativních předpisech označovaných jako eurokódy. Tyto nové evropské předpisy se opírají o koncepci *mezních stavů*, přednostně ve spojení s metodou dílčích součinitelů [4]. V České i Slovenské republice byl tento přístup používán v technické praxi již před zavedením EC 7, např. návrh plošných základů či stanovení zemních tlaků. Geotechnických konstrukcí se týká EN 1997 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí (EC 7) [9], rozdělený na část 1 (Obecná pravidla) a část 2 (Průzkum a zkoušení základové půdy). Obecnou prezentaci lze nalézt např. v [3].

V kontextu obecného přístupu v metodě mezních stavů se tedy široce uplatňuje metoda dílčích součinitelů spolehlivosti. Tuto metodu lze označit jako pravděpodobnostní, ale s poznámkou, že je nutné mít na zřeteli, že nejde o plně pravděpodobnostní metodu, neboť systém dílčích součinitelů spolehlivosti, který má zajistit přibližně požadovanou úroveň spolehlivosti konstrukce, je deterministický. Takový systém součinitelů je velkým přínosem v případě, že nejsou k dispozici přesná data o proměnlivosti vstupních parametrů. Pokud má ovšem inženýr k dispozici např. velké statistické soubory charakterizující nahodilost parametrů materiálu nebo zatížení, lze doporučit plně pravděpodobnostní výpočet, který je schopen detailní informace zužitkovat (viz část 2).

Nosným tématem, které chtějí autoři článku přiblížit odborné veřejnosti, je plně pravděpodobnostní výpočet plošného základu a jeho porovnání s metodou dílčích součinitelů. Z tohoto důvodu je problematika rozdělena do dvou částí – první se věnuje návrhu plošného základu dle metody dílčích



Obr. 1. Doporučený návrhový přístup dle EC 7 v jednotlivých státech EU [1]
a – stabilita svahů, b – ostatní aplikace

součinitelů spolu s porovnáním návrhu podle nově platného předpisu EC 7, přístup DA3 a dříve v geotechnické praxi používaného postupu dle ČSN 73 1001 [10]. Plně pravděpodobnostní výpočet je poté analyzován a porovnán s metodou dle dílčích součinitelů ve druhé části článku, publikované následně.

Návrh plošného základu metodou dílčích součinitelů

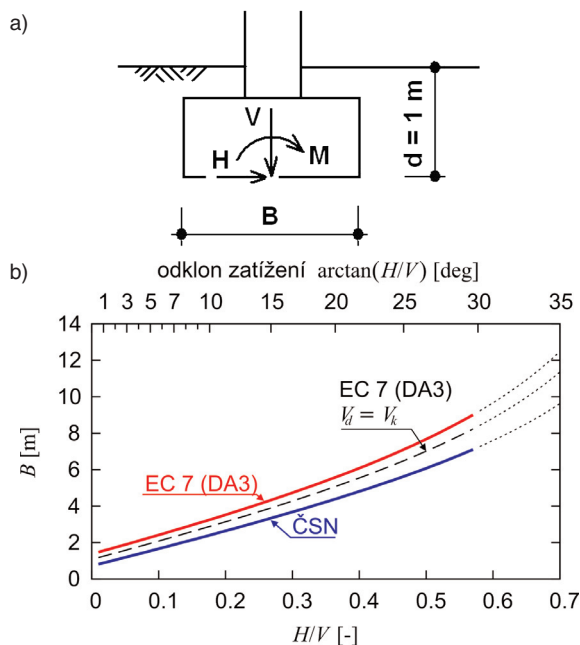
Návrh podle EC 7 na rozdíl od ČSN 73 1001 definuje tři návrhové přístupy, které se liší způsobem rozdělení dílčích součinitelů pro zatížení, vlastnosti a odpor [3].

V současné době probíhají nebo již byly ukončeny porovnávací studie v jednotlivých členských státech EU s cílem doporučit návrhový přístup pro řešení geotechnické úlohy

s udržení úrovně bezpečnosti podle původního způsobu navrhování. V roce 2007 byl prezentován přehled doporučených návrhových přístupů napříč Evropou [6]; velmi přehledně to bylo prezentováno na mapě Evropy pro stabilitu svahů (obr. 1a) a ostatní úlohy (obr. 1b). Jak je zřejmé z obr. 1b, pro plošné základy převládá přístup DA2, následuje DA1 a nejméně je doporučen přístup DA3. V případě České republiky nebyl doposud doporučen konkrétní přístup, i když některé dílčí studie již byly provedeny [5], [7]. Doporučení konkrétního návrhového přístupu podle EC 7 není předmětem tohoto článku. Pro analýzu únosnosti plošného základu byl návrhový přístup zvolen způsobem uvedeným dále.

V podkladu [5] je proveden výpočet svíslé únosnosti plošného základu podle EC7 pro jednotlivé návrhové přístupy na příkladu patky (vypočtená svíslá únosnost základu R_d : DA1, komb. 1 → 781 kPa; DA1, komb. 2 → 445 kPa; DA2 → 564 kPa a DA3 → 342 kPa). Příklad plošného základu autoři článku vypočetli podle postupu uvedeného v ČSN 73 1001 za předpokladu, že extrémní výpočtové zatížení (V_d , H_d , M_d) bylo stanoveno vynásobením zatížení uvedeného v [5] dílčím součinitelem rovným 1,2. Pro tyto podmínky byla vypočtena svíslá únosnost $R_d = 291$ kPa. Porovnáním únosnosti podle EC7 a ČSN vidíme, že nejbližší únosnosti podle ČSN je přístup DA3. Proto dále v článku je již analyzován a porovnáván návrh základu pro tento přístup.

Návrh plošného základu dle EC7 (DA3) a ČSN 73 1001 bude ukázán na modelovém příkladu, který byl převzat ze studie [8]. V řešené modelové úloze byl uvažován základový pás s úrovní základové spáry v hloubce $d = 1$ m pod úrovní upraveného terénu. Výslednice zatížení působící v základové spáře je definována třemi složkami, a to vertikální silou V , vodorovnou silou H působící ve směru šířky základového pásu B a ohybovým momentem M rovněž působícím ve směru šířky (obr. 2a).



Obr. 2. Porovnání návrhu šířky základu B dle EC 7 a ČSN 73 1001

a – schéma základového pásu, b – šířka základu navržené podle EC 7 (DA3) a podle ČSN 73 1001

Charakteristická hodnota svíslé složky síly je zadána 400 kNm^{-1} a zjednodušeně se předpokládá její konstantní velikost. Vodorovná síla je uvažována jako proměnná s tím, že její maximální poměr ke svíslé složce zatížení je omezen

na 0,577. Tato mezní hodnota odpovídá odklonu výslednice zatížení od normály k základové spáře 30° . Velikost ohybového momentu je pak zaváděna jako čtyřnásobek hodnoty vodorovné síly, tedy

$$M_k = 4 \cdot H_k \text{ a } M_d = 4 \cdot H_d, \quad (1)$$

kde M_k (M_d) je charakteristická (návrhová) hodnota ohybového momentu a H_k (H_d) je charakteristická (návrhová) hodnota vodorovné síly. Návrhová hodnota účinku zatížení E_d reprezentuje kontaktní napětí v základové spáře a počítá se jako výpočtová hodnota svíslé síly V_d rovnoměrně rozdělená na efektivní plochu základu, zde determinovanou efektivní šířkou základu b_{ef}

$$E_d = \frac{V_d}{b_{ef}} = \frac{V_d}{(B - 2e)}, \quad (2)$$

kde B je šířka základu, e je excentricita výslednice zatížení v základové spáře. Přitom návrhová hodnota svíslé síly je do výpočtu podle EC 7 zaváděna jako 1,35 násobek (nebo $\gamma_F = 1,00$) její charakteristické hodnoty, jinak řečeno dílčí součinitel spolehlivosti zatížení $\gamma_G = 1,35$ (pozn. dílčí součinitel $\gamma_F = 1,00$ by neměl být zahrnut při použití pravděpodobnostní analýzy [2]). ČSN uvažuje hodnotu dílčího součinitele spolehlivosti $\gamma_F = 1,2$.

V podloží základu se nachází písek o parametrech – úhel vnitřního tření $\phi_k = 32,5^\circ$ (charakteristická hodnota), koheze $c_k = 0$ kPa a objemová tíha $\gamma = 19 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ [8]. Návrhová hodnota úhlu vnitřního tření je spočtena jako

$$\phi_d = \arctan \left[\frac{\tan(\phi_k)}{1,25} \right]. \quad (3)$$

Proti EC 7 není v ČSN 73 1001 výpočtová hodnota úhlu vnitřního tření vypočtena z jeho tangenty, ale přímo z hodnoty úhlu. Další rozdíl spočívá v tom, že výpočtová hodnota podle ČSN 73 1001 a EC 7 je stanovena pro jinak definovanou hodnotu charakteristickou hodnotu. Dle ČSN je charakteristickou střední hodnota ($\phi_k = 36,35^\circ$) a podle EC 7 jde o 5% kvantil ($\phi_k = 32,5^\circ$). Z tohoto důvodu je výpočtová hodnota úhlu podle ČSN 73 1001 $\phi_d = 32,35^\circ$, zatímco podle EC 7 uvažujeme $\phi_d = 27^\circ$.

Návrhová hodnota odporu základové půdy je počítána ze vztahu, který je definován v ČSN 73 1001 (vztah je rovněž znám jako rovnice Brinche-Hansena)

$$R_d = c_d N_c s_c d_c i_c + \gamma_1 d N_d s_d d_d i_d + \gamma_2 b_{ef} / 2 N_b s_b d_b i_b. \quad (4)$$

Vzhledem k tomu, že vztah pro R_d uvedený v ČSN 73 1001 se poněkud liší od vztahu uváděného v příloze D normy EC 7, budou v následujícím textu uvedeny vztahy, se kterými bylo uvažováno ve výpočtu. Symbol c_d v rovnici (4) značí návrhovou hodnotu soudržnosti, γ_1 a γ_2 značí objemovou tíhu zeminy nad úrovní a pod úrovní základové spáry (v našem případě $\gamma_1 = \gamma_2 = 19 \text{ kNm}^{-3}$) a b_{ef} je efektivní šířka základu. Vzhledem k nulové soudržnosti je první sčítanec v rovnici (4) nulový. Součinitele únosnosti (N_d , N_b), součinitele tvaru základu (s_d , s_b), součinitele hloubky založení (d_d , d_b) a součinitele šikmosti zatížení (i_d , i_b) jsou v nenulových sčítancích spočteny ze vztahů

$$N_d = \tan^2(45^\circ + \phi_d/2) \cdot \exp(\pi \cdot \tan \phi_d), N_b = 1,5(N_d - 1) \cdot \tan \phi_d, \quad (5a)$$

$$s_d = s_b = 1, \quad (5b)$$

$$d_d = 1 + 0,1 \sqrt{(d/b_{\phi}) \sin(2\phi_d)}, \quad d_b = 1, \quad (5c)$$

$$i_d = i_b = (1 - H_d/V_d)^2. \quad (5d)$$

Pro výše uvedené předpoklady a vymezení podmínek byl pro širokou škálu hodnot vodorovné síly H proveden návrh základového pásu – tedy návrh jeho šířky B . Uvažován byl nejvýše hospodárný návrh, tj. takový, ve kterém je právě splněna podmínka rovnosti návrhové hodnoty účinku zatížení a odporu základové půdy

$$E_d = R_d. \quad (6)$$

Výsledky těchto návrhů jsou shrnuty na *obr. 2b*, kde prezentovaná závislost navržené šířky základu B je funkcí pouze poměru vodorovné a svislé složky síly.

Pro potřeby dalších analýz verifikace návrhu šířky B pomocí plně pravděpodobnostního přístupu byly návrhy podle EC 7 (DA3) a podle ČSN aproximovány numericky polynomm 4. řádu. Konkrétně, navržená šířka závislá pouze na poměru vodorovné a svislé složky výpočtové síly je aproximována metodou nejmenších čtverců jako

$$B \approx \sum_{i=0}^4 a_i (H_d/V_d)^i, \quad (7)$$

kde vektory regresních součinitelů \mathbf{a} pro návrhy podle EC 7 a podle ČSN byly vypočteny jako

$$\mathbf{a}_{EC} = \{1,4126; 8,8832; 12,9157; -28,8695; 34,9449\}, \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_{CSN} = \{0,7474; 8,4467; 7,8982; -17,7385; 21,4826\}.$$

Numerická přesnost uvedených lineárních regresí byla ověřena koeficientem determinace, který v obou případech přesahoval hodnotu 0,99999 (pouze pro rozpětí poměru sil $H/V \in (0; 0,7)$). Korektnost vypočtených hodnot aproximace byla rovněž ověřována porovnáním s výpočtem v programu GEO 5.

Za povšimnutí stojí, že hodnota absolutního členu v polynomu (7) je v případě návrhu podle EC 7 přibližně dvakrát větší než v návrhu podle ČSN (porovnej 1,413 s hodnotou 0,747). To znamená, že pro velmi malé sklony výslednice zatížení je základ navržený podle EC 7 přibližně dvakrát širší než základ navržený podle ČSN (*obr. 2b*).

Závěry

V první části článku byl porovnán návrh plošného základu (šířka základového pásu) podle metody dílčích součinitelů spolehlivosti na základě Eurokódu 7 a ČSN 73 1001. Porovnání je provedeno po jednoduché dílčí analýze pouze pro návrhový přístup DA3, který byl vybrán tak, jak je naznačeno v textu výše. Je nutné poznamenat, že do budoucnosti je třeba tento předpoklad podrobněji analyzovat a jednoznačně jej potvrdit, popř. doporučit úpravu dílčích součinitelů do národní přílohy.

Ze studie vyplynulo, že vypočtené pravděpodobnosti poruchy základu navrženého pomocí EC 7 (DA3) nebo ČSN, které budou prezentovány ve druhé části článku, reprezentují horní mez pravděpodobnosti poruchy, neboť navržená šířka základu B podle normy nemůže být menší. Analýzy byly prováděny s nejhospodárnějším návrhem.

Návrhové přístupy DA1 a DA2 nebyly analyzovány, protože cílem článku nebylo doporučit návrhový přístup dle EC7 pro navrhování plošných základů, ale zejména pouká-

zat na možnost přístupu při srovnávání EC7 a ČSN, a tím najít porovnatelný přístup s donedávna používaným postupem dle ČSN 73 1001, popř. upravit dílčí součinitele spolehlivosti v národní příloze pro plošné základy.

Závěrem poznamenejme, že předložená studie neuvazuje kombinaci různých druhů zatížení (stálé, užitné apod.), neboť cílem bylo zřetelně ilustrovat rozdíly mezi metodou dílčích součinitelů a plně pravděpodobnostním výpočtem pro geotechnickou aplikaci. V tomto textu je tedy proveden první krok, a to nejhospodárnější návrh šířky základu podle obou norem. V navazující části je přistoupeno k verifikaci úrovně spolehlivosti těchto návrhů pomocí plně pravděpodobnostního přístupu s uvážením dvou různých alternativ vstupních sdružených hustot náhodného vektoru.

Článek vznikl za podpory projektu specifického výzkumu FAST-S-11-39 MŠMT ČR a v rámci projektu KJB201720902 GA AV ČR.

Literatura

- [1] Bond, A. – Harris, A.: Decoding Eurocode 7. London, Taylor & Francis 2008.
- [2] Frank, R. et al.: Designer's Guide to EN 1997-1. London, Thomas Telford 2007.
- [3] Frank, R.: General Presentatoin of Eurocode 7 on 'Geotechnical design'. In: Frankovská a kol. (eds.), [Proceeding], Danube-European Conference on Geotechnical Design – from Research to Design in European Practise, Bratislava, 2010, p. 121.
- [4] Holický, M.: Pravděpodobnostní základy metody dílčích součinitelů v Eurokódech. Stavební obzor, **13**, 2004, č. 8, s. 225-230.
- [5] Lamboj, L. – Pruška, J.: Stanovení charakteristické a návrhové hodnoty geotechnických parametrů a únosnosti základové půdy pod plošným základem podle EN 1997-1. Geotechnika, 2005, č. 4, s. 11-17.
- [6] Schuppener, B.: Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules — its Implementation in the European Member States. [Proceeding], European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, 2007.
- [7] Vaníček, I. – Jettmar, J.: Plošné základy. Seminář ČGTS ČSSI, ČSN EN 1997-1, 2005.
- [8] Vogt, N. – Schuppener, B.: Ověřování návrhových postupů podle EC7-1 v Německu, Geotechnika, 2: 22-26 (translation to Czech), 2006.
- [9] ČSN EN 1997-1: Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla. ČNI, 2006.
- [10] ČSN 73 1001: Zakládání staveb: Základová půda pod plošnými základy. ÚNM, 1987.

Boštík, J. – Miča, L. – Vořechovský, M.: Assessment of the Load-Bearing Capacity of Shallow Foundations – Part I. Design Using Method of Partial Factors.

The article is focused on the comparison of the confidence level of a shallow foundation designed according to EC7 and the previously used Czech standard ČSN 73 1001 (Part I). The comparison is made for the DA3 design approach. The width of the shallow foundation for different ratios of vertical and horizontal forces is observed in the analysis. The aim is illustrated on an example where the confidence level for a designed shallow foundation varies; it is also shown how this appropriate difference quantifies with using fully probabilistic design. This is summarized in Part II.