

ANALYSIS OF STRESS IN THE EARTH COMPACTING BY THE VIBRATING ROLLER TREAD WITH VARIABLE ANGLE OF VIBRATION VECTOR

Analýza napjatosti v zeminách hutněných vibračním běhounem s proměnným úhlem vektoru vibrace

Jaroslav Kašpárek¹, Přemysl Pokorný², Radek Šebek³

This paper describes numerical simulation and subsequent compacting experiment. Simulative process is solved by FEM as non-linear two-dimensional problem. A vector of directional vibration causes during continuous travel of tread of vibrating roller in several directions. Results of numerical calculation are comparing with experiment. During experimental verification bulk densities and compaction of layers were measured by radiometric search unit and by static loading plate.

Keywords

compaction, stress, deformation, varying angle of vibration vector

Úvod

Hutnění zemin patří mezi stavební technologie přípravy podloží, jehož výsledkem jsou požadované mechanické vlastnosti hutněného materiálu podloží staveb. V průběhu hutnění usměrněnou vibrací dochází k elasticko-plastickým procesům, které mohou způsobit pozdější deformaci (ssedání) komunikace či základů stavby. Ke zjištění vlivu parametrů vibrace při hutnění na stav napjatosti zeminy lze využít i numerickou simulaci. Simulace s experimentálním ověřením může být použita pro optimalizaci hutnících účinků vibračního běhounu s proměnným úhlem vektoru vibrace.

V příspěvku je popsán hutnící experiment a jeho vyhodnocovací metody, řešení metodou konečných prvků s cílem zjištění rozložení napjatosti pro daný úhel naklopení vibračního budiče běhounu. Při experimentálním měření jsou zároveň posuzovány metody vyhodnocení vlivu hutnícího účinku vibračního válce. Numerické výpočty jsou provedeny v MKP systému MARC.

¹ Ing. Jaroslav Kašpárek: Vysoké učení technické v Brně, Ústav dopravní techniky, Technická 2, 61669 Brno, Česká republika, tel.: +420 541142432, e-mail: kasparek@fme.vutbr.cz

² Ing. Přemysl Pokorný: Vysoké učení technické v Brně, Ústav dopravní techniky, Technická 2, 61669 Brno, Česká republika, tel.: +420 541142422, e-mail: pokorny.p@fme.vutbr.cz

³ Ing. Radek Šebek: Vysoké učení technické v Brně, Ústav dopravní techniky, Technická 2, 61669 Brno, Česká republika, tel.: +420 541142425, e-mail: ysebek00@stud.fme.vutbr.cz

Teoretická podstata hutnění zemin

Hutnění zemin je fyzikální proces, který je ovlivněn výraznou heterogenitou sledovaného prostředí. Pokud je tento proces zjednodušen okrajovými podmínkami a funkčním rozsahem, lze jej matematicky definovat jako elasticko-plastické izotropní prostředí [1].

V matematickém modelovacím prostředí kónického poloprostoru [1] jsou vyjádřeny silové a deformační vztahy pro zatěžovací vztahy statického i dynamického charakteru (obr.-01).

Kontrola intenzity zhutnění a dalších vlastností a napěťových stavů hutněné zeminy může být prováděna buď přímo v časovém průběhu procesu hutnění (online), nebo po procesu hutnění (offline).

První způsob kontroly zhutnění - online je na principu snímání chování hutněné vrstvy během procesu hutnění. Při této kontrole zhutnění má obsluha vibračního válce možnost



Obr.-01: Kónický poloprostor

sledovat průběh hutnění přímo během práce stroje a může podle potřeby měnit hutnící parametry vibračního válce.

Principem kontroly je snímání průběhu zrychlení běhounu válce při vibraci. Signál, který je zaznamenáván v řídící jednotce a je zobrazován na display, je dále programově zpracován pomocí rychlé Fourierovy transformace, která nám vyjádří velikosti zrychlení v závislosti na velikosti frekvence vibračního pohybu. Podílem velikostí zrychlení dvojnásobku budící frekvence ku budící frekvenci získáme hodnotu CMV, která má vyjadřovat velikost intenzity zhutnění [1].

$$CMV = \frac{a(2f)}{a(f)} \cdot 300$$

Kontrola intenzity zhutnění - offline je na principu zjišťování míry a kvality zhutnění až po procesu hutnění, resp. po přejezdu vibračním běhounem válce. Pomocí přístrojů, založených buď na principu radiometrického snímání zhutněné vrstvy nebo na jiných principech nedestruktivního snímání jako je statická zatěžovací deska (obr.-02), se zjišťují vlastnosti jako objemová hmotnost, vlhkost či modul přetvárnosti [2].

Modul přetvárnosti je dán vztahem:

Obr.-02: Princip měření statickou zatěžovací deskou

$$\mathbf{E}_{vd} = \mathbf{1}, \mathbf{5r} \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s} = \mathbf{1}, \mathbf{5r} \cdot \frac{\overline{\mathbf{F}}_{s}}{\pi r^{2} \overline{s}}$$

kde po dosazení

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \lambda \cdot \dot{\varepsilon}$$

platí vztah:

$$\frac{\mathrm{F_{s}}}{\mathrm{\pi r}^{2}} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{1.5r}} \cdot (\mathrm{s} + \lambda \mathrm{\dot{s}})$$

Z těchto hodnot je možno získat představu o napěťových stavech v hutněné vrstvě. Výsledky se však vztahují k celé tloušťce hutněné vrstvy, zvláště pak k povrchu, který ovlivňuje celkový výsledek měření.

Mezi kontroly intenzity hutnění offline patří také odběry vzorků zhutněné vrstvy vývrty. Tyto vzorky jsou dále posuzovány laboratorně.

Experiment

Zkušební pole, dané rozměry zkušebního kanálu délky 16 m a šířky 5m, je rozděleno na čtyři zóny. Materiálem je tříděný štěrkopísek "Rusek", vlhkost je upravena a homogenizována v celém objemu.Materiál je uložen do zkušebního kanálu ve vrstvách v tomto pořadí:

- 1. podkladní vrstva 50 cm max. zhutněna,
- 2. podkladní vrstva 50 cm max. zhutněna,
- 3. zkušební pole sypaná vrstva 80 cm.

Po založení zkušební vrstvy a při přerušení pokusu byla zkušební pole zakryta plachtami pro zajištění stejné vlhkosti během celého experimentu.





Obr.-03 a obr.-04: Fotografie z průběhu měření

Provedení zhutňovacích pokusů

Vlastní realizace je rozdělena na dva samostatné hutnící pokusy [3]. Nejdříve je proveden pokus se svislým a vodorovným vektorem vibrace (obr.-05 a obr.-06) a poté s vektorem 45° vpřed za jízdy vpřed (tj. vždy souhlasný směr působení vektoru vibrace a pohybu stroje vpřed – vzad) (obr.-07) a s vektorem 45° vzad za jízdy vpřed (tj. vždy nesouhlasný směr působení

vektoru vibrace a pohybu stroje vpřed - vzad) (obr.-08). Před započetím pokusů jsou ověřeny parametry vibrace a rychlost jízdy stroje.



Obr.-05: Svislý vektor vibrace





Obr.-06: Vodorovný vektor vibrace



Obr.-07: Vektor vibr. 45° vpřed - jízda vpřed Obr.-08: Vektor vibr. 45° vzad – jízdy vpřed

Na měřeném poli jsou postupně provedeny dva statické a dvanáct vibračních přejezdů. Během přejezdů je měřena zbytková amplituda na rámu běhounu. Vždy po přejezdu tam a zpět jsou měřeny objemové hmotnosti a stlačení vrstev radiometrickou sondou, po dvanáctém vibračním přejezdu také objemové hmotnosti denzitometrem a přetvoření statickou zatěžovací deskou LDD 100.

Stlačení je měřeno po 0,5 m v ose stopy technickou nivelací. Objemová hmotnost je zjišťována v pěti místech na každé měřené zóně radiometrickou sondou TROXLER 3411-B v ose stopy po deseti centimetrech do hloubky třiceti centimetrů. Doba načítání impulsů 0,25 minuty. Objemová hmotnost denzitometrem je měřena ve dvou místech na zónu ve vrstvách po patnácti centimetrech. Moduly přetvárnosti jsou zjišťovány statickou zatěžovací zkouškou pomocí zařízení LDD 100 ve dvou místech na zónu.

Vlhkost je dále měřena laboratorně. Vzorky jsou odebrány po dvanáctém vibračním přejezdu z hloubky 10-20 cm v pěti místech na vrstvu. Všechna měření jsou prováděna podle platných českých norem.

Výsledky experimentálního měření

Provedená měření dávají první informaci o chování stroje s proměnným vektorem vibrace. Metodika byla zvolena za účelem srovnání zhutňovacích účinků jednotlivých směrů vektoru vibrace za stejných vnějších podmínek.

Na základě výsledků měření jsou konstatovány v [3] tyto dílčí závěry:

Dosažené stlačení je nejvyšší u svislého směru vektoru, následuje šikmý vpřed, šikmý vzad a vodorovný. Dosažené relativní stlačení je zřetelně nejvyšší u svislého, s odstupem následují šikmý vpřed, šikmý vzad a vodorovný.

Dosažená objemová hmotnost vrstvy 0 - 30 cm (pomocí radiometrické sondy TROXLER 3411-B) je nejvyšší u svislého, v desátém a dvanáctém vibračním přejezdu se k ní blíží šikmý vpřed, následuje vodorovný a svislý vzad dosahující téměř shodných hodnot. Dosažená objemová hmotnost vrstvy měřená nakonec hutnění denzitometrem je téměř shodná u všech směrů v rozsahu hloubky 0 - 15 cm, v hloubce 15 - 30 cm pak jasně vymezuje rozdíly v míře zhutnění – nejvyšší je u svislého, následuje šikmý vpřed, vzad a vodorovný je zřetelně nejnižší.

Dosažené moduly deformace měřené statickou zatěžovací zkouškou jsou zřetelně nejvyšší u vodorovného vektoru a šikmého vzad, následuje svislý a šikmý vpřed (obr.-09 až 12). Toto je způsobeno patrně "utažením" horní vrstvy u vodorovného vektoru a šikmého vzad a "rozvibrováním" téže vrstvy u obou dalších směrů vektoru vibrace.



Obr.-09: Graf modulu přetvárnosti E_{vd} (MPa)



Obr.-11: Graf modulu přetvárnosti Evd (MPa)







Obr.-12: Graf modulu přetvárnosti Evd

Počítačová simulace

Experiment je modelován v MKP programem MARC od firmy MSC. Geometrie, zatěžovací a okrajové podmínky jsou odpovídající použitému stroji a podmínkám experimentu [4].

Proces hutnění je řešen jako nelineární kontaktní úloha s cílem stanovit rozložení napjatosti ve vrstvě zeminy při různých podmínkách hutnění, tj. při různých směrech vektoru síly usměrněné vibrace budiče ocelového běhounu. Běhoun válce je pro svoji lineární zatěžovací schopnost po celé šířce běhounu (kromě okrajů běhounu) zjednodušen na rovinné těleso (obr.-13). Vibrační běhoun je materiálově definován jako vysocetuhostní, tedy deformace běhounu je nulová.



(obr.-13), je pevně spojen se základem pomocí nadefinovaných okrajových podmínek. Základ pod modelem podloží je definován jako materiál vysocetuhostní. Zhutňované podloží - zemina - je směsí kameniva a vzduchových a vodních pórů. Chová se jako pružně-plastické prostředí. Plasticita materiálů je dána především vlastnostmi směsí zeminy jako pórovitost, ostrost, sypný úhel, teplota nebo vlhkost, což jsou vlastnosti fyzikálně zjistitelné. Pružnost materiálů těchto směsí je naopak dána schopností dominantního materiálu

Model podloží je rovněž rovinný útvar o rozměrech stejných jako při experimentu

(kameniva, písku, jílu atd.) krátkodobě změnit tvar nebo stabilitu uložení zrn ve směsi. Rozptyl energie je při zhutňování přičítán vnitřnímu útlumu v zemině. Nejvýrazněji se projevuje třením a částečně i viskózními účinky, závislými na rychlosti šíření deformace.

Výsledky numerického modelování

Model je zatížen tíhovou i budící silou. Hutnící síla běhounu válce působí na podloží frekvencí 25 Hz a úhel sklonu vektoru budící síly je pro první zatěžovací cyklus 90° (svislý vektor vibrace), dále pak 45° , 0° (vodorovný vektor vibrace).

Z výpočtového numerického modelu je možno zjistit stav napjatosti do celé hloubky hutněné vrstvy, deformační vlastnost v závislosti na počtu cyklů a konečnou míru zhutnění, která je shodná právě s deformačním spektrem v průběhu hutnění.

Stav napjatosti, tedy rozložení a velikost plastické pevnosti zeminy v rozsahu celé vrstvy, je rozlišný pro dané sklony vektoru budící síly vibračního běhounu. Odpovídá svými rozdíly našim předpokladům, které jsou potvrzeny experimentálním ověřením. S klesajícím úhlem sklonu hutnící síly se mění energie hutnící na energii tření běhounu o zeminu. Tím dochází k nevratným přeměnám energie a tedy ztrátám. Při hutnění svislým vektorem vibrace (obr.-14) je zřetelné působení hutnícího procesu do hloubky na rozdíl od hutnění vodorovným vektorem vibrace (obr.-16).



Obr.-14: Stav napjatosti při hutnění svislým vektorem vibrace



Obr.-15: Stav napjatosti při hutnění vektorem vibrace 45°



Obr.-16: Stav napjatosti při hutnění vodorovným vektorem vibrace

Závěr

Je vytvořen numerický model procesu hutnění zeminy běhounem vibračního válce s proměnným úhlem sklonu vektoru síly budiče. Následně je experimentálně ověřeno a jsou potvrzeny předpoklady zjištěné počítačovou simulací. Tyto předpoklady jsou dány dílčími závěry, které nám dávají komplexní rozbor chování zeminy a analyzují stav napětí v zemině při hutnění.

Jde o zjištění, že svislý vektor je nejúčinnější při hutnění do hloubky, s odstupem následuje šikmý vpřed. Šikmý vzad a vodorovný vektor nejsou účinné do hloubky. Zhutnění jejich nejspodnější vrstvy dosahuje hodnot pro statické přejezdy. Pro hutnění svrchní vrstvy jsou účinnější šikmé a vodorovné směry vektoru než směr svislý. Vyšší únosnosti (hodnot modulu přetvárnosti) bylo dosaženo u vodorovného a šikmého vzad.

Použitím vodorovného vektoru po svislém lze docílit zvýšení pevnosti o cca 10%. Použitím vodorovného vektoru lze dosáhnout nejkompaktnějšího, hladkého povrchu téměř bez příčných trhlin.

Literatura

- [1] BRANDL, H. DIETMAR, A.: Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2000, 275 str., ISSN 0379-1491
- [2] ANDEREGG, R.: *Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern*. VDI Verlag. Düsseldorf 1998, 200 str., ISBN 3-18-314604-5
- [3] VV 1500D vektor, Protokol z měření zhutňovacích účinků, ZKS/383/03, Stavostroj a.s., Nové Město Nad Metují, 48 str., 2003
- [4] MSC Software& Co. : MSC Marc 2000 Introductory Course, L.A., 200 str., 1999