

GRANULOMETRIE ČÁSTICOVÝCH PLNIV PRO VYTVRDI TELNÉ KOMPOZITY

SVOBODA L.

České vysoké učení technické v Praze, svobodal@fsv.cvut.cz

Běžné vytvrditelné kompozity (tmely, malty, formovací hmoty) obsahují jako plnivo částice, jejichž velikost se pohybuje mezi setinami až jednotkami milimetru, některé kompozity používané ve stavebnictví (cementový beton, asfaltobeton) obsahují částice, jejichž velikost se počítá v desítkách milimetrů a vyjimečně může i přesahovat až přes sto milimetrů.

Samotná částicová plniva jsou za sucha dobře sypké hmoty, ve kterých částice tvoří navzájem oddělená zrna. V rozmezí 0,01–100 mm se ještě výrazně neprojevuje agregace jemných částic a hrubé částice ještě nemají charakter kusového materiálu.

U sypkých látek je jednou ze základních vlastností zrnitost, což je poměrná skladba zrn jednotlivých velikostí, ze kterých je látka složena. Velikost zrna je definována jako velikost otvoru, kterým posuzované zrno právě projde.

Na základě této definice se ke stanovení zrnitosti plniv nejčastěji používá mechanické rozdělení na frakce s užším zrnitostním rozmezím. Toto rozdělení se provádí na sadě sít, jejichž otvory se postupně zmenšují. Typická zkušební sada sestává ze sít jejichž otvory tvoří geometrickou posloupnost s kvocientem 0,5. Výsledkem postupného prosévání je soubor dílčích zbytků zachycených na jednotlivých sítích.

K popisu zrnitosti se používá buď přímo velikost dílčích zbytků vyjádřená v procentech (y_i), nebo kumulativní charakteristika, kterou tvoří procentické podíly zrn menších než oka jednotlivých sít (celkové propady p_i).

V obou případech je zrnitost vícečíselnou charakteristikou, jejíž zachycení ve formě tabulky není příliš přehledné. Zastoupení jednotlivých dílčích zbytků se proto běžně prezentuje graficky ve formě sloupcového diagramu (histogramu) nebo ve formě spojnicového diagramu (polygonu četností). U celkových propadů se při grafickém zobrazení dává přednost spojnicovému diagramu (čáře zrnitosti).

Body odpovídající jednotlivým sítům ze zkušební sady (seřazeným podle velikosti) se umísťují na osu x se stejnou mezibodovou vzdáleností.

Jednočíselné charakteristiky

Z nalezených hodnot zrnitosti se vytvářejí odvozené veličiny sloužící k celkové charakteristice velikostní distribuce zrn plniva jediným číslem.

Nejběžnější celkovou charakteristikou počítanou na základě čáry zrnitosti je modul zrnitosti (modul jemnosti). V literatuře vycházející z německých pramenů (zejména pak v literatuře betonářské) se modul zrnitosti nazývá k-hodnota.

Modul zrnitosti k je uměle vytvořený ukazatel definovaný jako setinový podíl ze součtu celkových procentických zbytků (z_i):

$$z_i = 100 - p_i, \quad (1)$$

$$k = (\Sigma(z_i)) / 100 \quad (2).$$

Pro hodnotu modulu zrnitosti má zásadní význam sada sít, pro kterou byl stanoven, a všude, kde by mohlo dojít k omylu, je třeba spolu s hodnotou modulu zrnitosti uvádět i použitou sestavu sít.

Součet propadů D (označovaný někdy jako Rothfuchsovo číslo) je definován vztahem:

$$D = \Sigma(p_i), \quad (3)$$

kde p_i je celkový propad na i -tém sítě v procentech. Pro součet propadů a modul zrnitosti platí:

$$D = (n - k) \cdot 100, \quad (4)$$

kde n je počet sít vybraných ke stanovení p_i .

Obě veličiny jsou z hlediska hodnocení zrnitosti rovnocenné. Jejich společnou nevýhodou je nedostatečný důraz na nestejný význam různě jemných zrn.

Veličinou, která lépe zohledňuje vliv velikosti jednotlivých zrn je specifický povrch (povrch jednoho kilogramu zrnité látky). Výhodou specifického povrchu je zejména přímý vztah k spotřebě pojiva, nezbytného k dokonalému obalení zrn plniva.

Pro obtíže s přímým stanovením specifického povrchu látek s hrubšími zrny se v praxi často uchylujeme ke stanovení přibližné hodnoty specifického povrchu (S_s) z čáry zrnitosti. Pro tento účel se používá výpočet podle vzorce [1]:

$$S_s = \sum \left(\frac{S_i \times Q \times p_i}{V_i \times h \times 100} \right) \quad (5),$$

kde p_i je propad na sítě s okem d_p , symbolem h je označena hustota zrn, S_i je povrch koule o průměru 0,67. d_p a V_i je objem koule stejného průměru. Empirický koeficient Q vyjadřuje odchylku zrn od kulatého tvaru (např. $Q_{\text{těženého kameniva}} = 1,1$, $Q_{\text{drceného kameniva}} = 1,4-1,9$).

Mezi vypočteným specifickým povrchem a modulem zrnitosti existuje korelace popsateľná rovnicí typu:

$$k = A - B \times \log(S_s) \quad (6).$$

Její konkrétní číselná podoba je ovlivněna hustotou zrn, použitou síťovou sadou a velikostí koeficientu Q [2].

Hodnota modulu zrnitosti a velikost specifického povrchu jsou protikladné. Zatímco specifický povrch je zvyšován především přítomností jemných částic, vyšší hodnoty modulu zrnitosti poskytuje látka s hrubšími zrny.

Ojedinele se můžeme setkat i s jinými jednočíselnými charakteristikami (Hummelův index, Faurého modul, koeficient stejnoměrnosti). Vždy však platí, že žádná jednočíselná veličina nemůže popsat distribuci zrn stejně podrobně a jednoznačně jako čára zrnitosti.

Stejná hodnota jednočíselného kritéria může být složena z různých velkých dílčích příspěvků daných příslušných podílem zrn určité velikosti a stejnou hodnotu mohou případně vykazat i látky s výrazně odlišnou čarou zrnitosti.

Pro hodnotu kterékoliv jednočíselné charakteristiky zrnitosti má zásadní význam použitý soubor sít.

Důsledné uvádění síťového souboru použitého k výpočtu jednočíselného kritéria by mělo být pravidlem.

Granulometrická analýza

Zpracování výsledků prosévací zkoušky (prováděné typicky na sadě obsahující 5–10 sít) je sice matematicky jednoduchou záležitostí, ale k usnadnění opakovaných výpočtů a k tvorbě grafické podoby získaných výsledků je vhodné použít nějaký softwarový nástroj.

U moderních strojů pro granulometrickou analýzu je prosévací proces řízený připojeným počítačem a příslušný ovládací program obsahuje zároveň i moduly pro zpracování výsledků [3,4].

Pro uživatele starších strojů může být užitečný volně dostupný program Granplots, který má podobu excelového sešitu vybaveného potřebnými makry [5].

Dokončení na další straně

Bezplatně dostupný je také program Aggmix [6], který současně s zrnitostí počítá i specifický povrch, modul zrnitosti a umožňuje porovnat zrnitost dvou látek.

Pro vyhodnocování výsledků síťového rozboru je pořizování některého z placených programů zbytečné. Programy pro hodnocení zrnitosti zemin [7,8], nebo pro formulaci betonové směsi [9–11] jsou sice použitelné, jejich použití pro samotný síťový rozbor se však nejeví jako výhodné.

Ideální zrnitost

Zrnitost je důležitá technologická charakteristika, která rozhoduje o chování samotných sypkých látek i o chování kompozitních materiálů, ve kterých jsou tyto látky obsaženy jako plnivo.

Je zřejmé, že neexistuje jedna univerzální ideální zrnitost, ale že i pro jednotlivé výrobky či technologie existuje více zrnitostí, které představují pro daný případ uspokojivé řešení.

K určení optimální zrnitosti plniva se v konkrétních případech používají různé postupy, které mohou být založeny na teoretických představách o vhodné zrnitosti, nebo mohou mít podobu praktického optimalizačního experimentu.

Tradiční způsob vychází z představy, že hlavním úkolem plniva je co nejdokonalejší vyplnění objemu kompozitu a podle této představy je nejlepším plnivem zrnitá soustava s minimální mezerovitostí.

Novější přístup vychází z toho, že optimální zrnitost má plnivo poskytnout dobře zpracovatelnou hmotu, která vykazuje nejlepší poměr mezi celkovými náklady a konečnou užitnou hodnotou kompozitu.

Teoreticky stanovená nebo prakticky nalezená optimální zrnitost se většinou prezentuje ve formě ideální čáry zrnitosti, nebo jako pásmo doporučené zrnitosti obklopující ideální čáru zrnitosti. Při obvyklém grafickém zobrazení se doporučené pásmo vymezuje soustavou dvou hraničních čar.

Snad nejznámějším pokusem o popis ideální zrnité soustavy je Fullerova čára zrnitosti [12], zobrazující minimálně mezerovitou látku s přibližně kulovými zrny definovanou pomocí vztahu:

$$p_i = 100 \times (d_i / D_{max})^{0.5} \quad (7),$$

kde p_i je celkový propad příslušející síti o jmenovitém rozměru d_i , a D_{max} je jmenovitý rozměr největšího síta použitého při konstrukci čáry zrnitosti.

I když byl Fullerův vztah mnohokrát upravován a modifikován, dodnes patří k používaným nástrojům při navrhování optimálních plnivových směsí.

Moderní přístup k návrhu minimálně mezerovitého plniva představují programy simulující možné uspořádání různě velkých virtuálních částic v 3D prostoru [13,14].

Tyto programy mohou predikovat, při jakém poměru vznikne ze surovin (které jsou k dispozici) směs s minimální mezerovitostí.

Příprava výstižných vstupních dat (definování virtuálních částic) však není jednoduchá a pokud je možné fyzicky realizovat přípravu dostatečného počtu zkušebních směsí, je v současnosti spolehlivější stanovit složení minimálně mezerovité směsi experimentálně.

Ještě nevytvrzené kompozity obsahující plnivo s extrémně nízkou mezerovitostí bývají špatně zpracovatelné, a proto se při provádění praktických optimalizačních zkoušek často nehodnotí jen samotná mezerovitost plniva, ale sledují se vlastnosti modelové řady kompozitů z plniva připravených.

Granulometrická syntéza

Látky s zrnitostí odpovídající vypočtené ideální čáře zrnitosti nebudou přímo dostupné. Ani zrnité směsi navržené na základě optimalizačního experimentu nejsou trvale připravené podle původní receptury, protože dochází ke změnám v jakosti vstupních surovin.

Návrh konkrétní zrnité skladby z momentálně dostupných surovin je vícerozměrnou optimalizační úlohou označovanou jako granulometrická syntéza.

Optimalizačním cílem, který má být dosažen, je minimalizace

rozdílu mezi dosaženou zrnitostí a zrnitostí vzorovou.

Minimalizovanou veličinou je součet druhých mocnin rozdílů mezi jednotlivými body čáry zrnitosti vzorového plniva a odpovídajícími body čáry zrnitosti plniva navrhovaného.

Je-li k dispozici jako surovina množina M různých látek, jejichž zrnitost byla stanovena na N normových sítích, přičemž celkový propad nalezený na kterémkoliv kontrolním síti K pro látku L je $P(K,L)$ a odpovídající vzorový (ideální) celkový propad výsledné směsi na stejném kontrolním síti K je $VP(K)$, pak platí:

$$P(1,1) \times X(1) + P(1,2) \times X(2) + \dots + P(1,M) \times X(M) = VP(1) - R(1),$$

$$P(2,1) \times X(1) + P(2,2) \times X(2) + \dots + P(2,M) \times X(M) = VP(2) - R(2),$$

$$P(3,1) \times X(1) + P(3,2) \times X(2) + \dots + P(3,M) \times X(M) = VP(3) - R(3),$$

~

$$P(N,1) \times X(1) + P(N,2) \times X(2) + \dots + P(N,M) \times X(M) = VP(N) - R(N),$$

kde $X(L)$ je hmotnostní zlomek odpovídající zastoupení látky L v celkové hmotnosti směsi a $R(K)$ je rozdíl mezi vzorovým celkovým propadem na zvoleném kontrolním síti K a skutečně dosahovaným celkovým propadem celé směsi na tomtéž kontrolním síti. Nejtěsnější možné přiblížení ke vzorové čáře odpovídá minimální možné hodnotě $\Sigma[R(K)]/2$.

Čistě matematický přístup k řešení (stanovení minima na základě nulové hodnoty první derivace) je prakticky nepoužitelný, protože nalezené optimum by často obsahovalo záporné navážky surovin.

Uspokojivé řešení je možné nalézt na základě simulovaného mísení dostupných surovin a postupné optimalizace mísící receptury na základě získaných výsledků.

K tomuto cíli jsou používány různé postupy. Pro menší počet výchozích surovin lze použít nejjednodušší techniku „brute force“ a zkoušet všechny možnosti z předem vytvořené recepturní báze [15].

Nejsofistikovanější způsob postupného řešení představuje použití genetického algoritmu [16]. Výsledky srovnatelné s genetickým algoritmem poskytuje amébový algoritmus, který je implementován ve volně dostupném granulometrickém programu Aggmix [6].

Závěr

Problematika granulometrické analýzy částicových plniv pro vytvrditelné kompozity je podobná problematice ostatních sypkých látek a matematické zpracování výsledků prosévacích zkoušek je triviální.

Výrazně specifická je problematika ideální zrnitosti částicových plniv a návrh receptury plniva určité zrnitosti připravovaného z dostupných surovin (granulometrická syntéza) vyžaduje použití speciálního software.

Literatura

- [1] Pytlík, P.: *Technologie betonu*, VUT, Brno 1997.
- [2] Svoboda, L.: *O mísení frakcí kameniva*. Beton TKS 4(1), 2004, s. 24–28.
- [3] <http://www.retsch.com/cz/produkty/sitovani/vyhadnovaci-software/informace-o-produktu/>
- [4] <http://www.fritsch.de/sample-preparation/products/sieving/software-autosieb/autosieb/description-software-autosieb/>
- [5] http://www.dep.state.fl.us/geology/geologictopics/analytic_gran_tools/analytic_gran.htm
- [6] <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/aggmix/>
- [7] <http://www.pointstar.com/Geotech/SieveGraph.aspx>
- [8] http://www.gaea.ca/en-us/dept_3.html
- [9] <http://www.shilstone.com/software.htm#seemix>
- [10] <http://www.loudin.eu/unibet/index.php>
- [11] <http://www.lpc.fr/fr/produits/betonlabpro/index.php>
- [12] Fuller, W. B. – Thomson, S.E.: *The laws proportioning concrete*. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 59, 1907, s. 67–143.
- [13] Stroeven, P. – Stroeven, M.: *Assessment of packing characteristics*

by computer simulation, Cement and Concrete Research 29, 1999, s. 1201–1206.

- [14] Yang, R. Y. – Zou, R. P. – Yu, A. B.: *Computer simulation of the packing of fine particles*. Phys. Rev. E 62, 2000, s. 3900–3908.
- [15] Shakhmenko, G. – Birsh, J.: *Concrete Mix Design And Optimization*. 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering 1998 Budapest.
- [16] Cengiz Toklu, Y.: *Aggregate Blending Using Genetic Algorithms*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 20 (6), 2005, s. 450–460

Všechny URL ověřeny 2.7.2010.

Poděkování: Tento článek vznikl s podporou výzkumného záměru VZ 31 CEZ MSM 6840770031.

Abstract

GRANULOMETRY OF PARTICLE FILLERS FOR CURABLE COMPOSITES

Summary: *The article brings review of main characteristic used for description granulometry of particle filler. Traditional and modern concepts of ideal granulometry are explained. Optimization of granulometry is discussed. Examples of software for granulometry calculations are given.*

Key words: curable composites, particle filler, Fuller curve, optimization of granulometry