

Použití popílku v cementobetonovém krytu pozemní komunikace

(ze sborníku 2. kongresu cementobetonových vozovek CCC)

Autoři příspěvku: Sanja Dimter, Tatjana Rukavina a Krunoslav Minazek

Příspěvek popisuje možné aplikace popílku v tuhých (betonových) vozovkách. Také se zabývá základními vlastnostmi tohoto „moderního pucolánu“, kterých se využívá při návrhu cementobetonové směsi nebo návrhu směsí pro stabilizace používaných do horních a spodních podkladních vrstev vozovky. Zvláštní pozornost je věnována popisu zkušeností současného výzkumu v Chorvatsku s ohledem na posouzení vlastností směsí drobného kameniva s cementem a popílkem. Vlastnosti jsou popisovány s ohledem na jejich shodu se stávajícími normami a podmínkami pro stavbu podkladních vrstev vozovky v Chorvatsku.

1 Úvod

Výzkum možného využití popílku do konstrukcí staveb je stále aktuálním tématem a jeho aktuálnost podtrhuje existence mnoha studií a výzkumných projektů. Tento projekt byl zahájen nejen z důvodu vhodných vlastností popílků, ale zejména z důvodu nárůstu jeho produkce a s tím souvisejícím problémem jeho skladování. Popílek má oproti jiným odpadům určitou výhodu, neboť jej lze na rozdíl od jiných odpadů použít v původní formě bez jakéhokoli zpracování nebo úprav složení.

Popílek lze využít nepřímo jako pojiva. Jeho přidáním se tak vyvolají určité chemické reakce ve směsích. Nebo jej lze použít přímo jako filer v případech, kdy je nutné zlepšit fyzikální vlastnosti směsi zvýšením podílu jemných částic.

Již několik let jsou pozitivní vlivy tohoto „moderního pucolánu“ využívány, při stavbě vozovek, u návrhu cementobetonového krytu nebo směsí pro stabilizace do podkladních vrstev vozovky. Jedna z nejběžnějších aplikací popílku je přísada do pojiva cementobetonových směsí, kde popílek nahrazuje určitý podíl cementu. Navíc se popílek přidává již při výrobě cementu, lze jej použít jako pojiva nebo jako přísadu do pojiva (přidáním popílku do cementu nebo vápna) u směsí pro stabilizace do podkladních vrstev vozovky a lze jej také použít jako základní materiál do směsí pro stabilizace podkladních vrstev vozovky, který stabilizuje cement, vápno nebo jiné popílky. Kromě uvedených použití se popílek také používá jako základní materiál pro stavby násypů, dále jako dodatečný materiál pro stavbu násypů, kde je nezbytné zlepšit granulometrické složení základního materiálu a také do podkladních vrstev polních cest apod. Možnosti využití tohoto odpadního materiálu jsou různorodé a četné. Tento příspěvek se zaměří pouze na použití popílku v cementobetonových vozovkách a ve směsích pro stabilizace do podkladních vrstev.

2 Popílek

2.1 Úvod

Termín popílek byl poprvé použit v americké publikaci výsledků výzkumného úkolu s využitím popílku Amerického betonářského institutu (ACI) v roce 1937.

Podle údajů ACI byl popílek poprvé použit ve Spojených Státech v roce 1929 při stavbě Hooverovy přehrady, jako přísada do pojiva. Širšího užití se popílku poprvé dostalo ve 120 000 tunové konstrukci ve státě Montana v roce 1949 při stavbě přehrady Hladový kůň, kde byl využit jako přísada do cementu.

Poté byl popílek používán v dalších konstrukcích přehrad ve Spojených Státech: Canon Ferry, Palisades, Yellowtail dams atd.

Po mnoho let je popílek horkým tématem výzkumných úkolů po celém světě. Zaměřovaly se především na prokázání výhod materiálu z ekonomického hlediska, tak i vyřešení ekologických problémů při jeho skladování.

2.2 Vlastnosti a podíl popílků

Popílek je odpadním materiálem vznikajícím spalováním těžného uhlí pro účely výroby energie v elektrárnách. Popílek má více či méně výrazné pucolánové vlastnosti, které jej činí vhodným materiálem pro stavební účely.

Vlastnosti popílku především závisí na druhu spalovaného uhlí, zrnitosti a podmínkách spalování a stejně tak i na chemickém a mineralogickém složení paliva.

Fyzikálně je popílek velmi jemným prachem o zrnitosti 1 až 400 mikronů, sklovité struktury a ve většině případů oblé tvarů zrn, jež vychází z náhlého ochlazení při procesu spalování, světle hnědé až tmavě šedé barvy.

Z hlediska chemického složení je popílek kromě zbytků hořlavých materiálů především složen z oxidu křemíku, hliníku, vápníku, železa, hořčíku a síry a alkalických oxidů.

Specifikace popílku kladou důraz na dvě vlastnosti, které určují použitelnost popílku: zrnitost a obsah pucolánově aktivních SiO_2 a CaO . Bylo zjištěno, že menší velikost zrna, např. 20 mikronů pozitivně ovlivňuje pucolánové vlastnosti popílku, proto tyto jemné frakce popílku jsou cennější než hrubší frakce.

Pucolánová aktivita popílku je ukazatelem jeho schopnosti vytvořit zatvrdlý beton za přítomnosti CaO . Přímý vliv na pucolánovou aktivitu mají zrnitost, obsah křemíku a hliníku, ztráta žíháním a obsah alkálií (vypočtená jako Na_2O).

Základní rozdělení popílků vychází z jeho chemického složení nebo obsahu CaO . Takto se popílký dělí na:

- Popílký, které obsahují vysoký podíl oxidu vápenatého CaO (15 až 40 % hmotnosti), oxidu železitého Fe_2O_3 , oxidu hlinitého Al_2O_3 , oxidu křemičitého SiO_2 , a které vznikají ze spalování uhlí nižší kvality (podle americké klasifikace ASTM C 618 patří takový popílek do třídy C).
- Popílký, jejichž obsah oxidu vápenatého je zanedbatelný (méně než 5 %) a typicky je přítomen vysoký podíl oxidu křemičitého SiO_2 , a který vzniká spalováním antracitu nebo lignitu (podle americké klasifikace ASTM C 618 patří takový popílek do třídy F).

3 Použití popílku do cementobetonových vozovek

3.1 Použití popílku do cementobetonových vozovek

Víceleté studie prokázaly, že přidáním popílku, jako fileru nebo ve větším měřítku jako náhrady určitého množství cementu, do betonové směsi může zlepšit vlastnosti těchto směsí.

Některé z těchto zlepšení vycházejí z fyzikálních vlivů, založených na nárůstu podílu jemných částic, zatímco jiná zlepšení jsou vysvětlována chemickým vlivem popílku jako následek jim vyvolaných pucolánových reakcí.

Podíl popílku v pojivu betonové směsi závisí na typu popílku. Popílký s nižším obsahem CaO se většinou používají v množství 15 až 25 % hmotnosti pojiva do cementobetonové vozovky (cement a popílek), zatímco popílký s vysokým obsahem CaO se používají v podílu 20 až 35 % popílku v hmotnosti pojiva.

Přidáním popílku do betonové směsi se **snižuje množství vody pro přípravu směsi** v porovnání s „klasickými“ cementobetonovými směsmi, čímž se zlepšují inženýrské vlastnosti směsi. To je vysvětlováno tím, že granulometrie kameniva a cementu

ovlivňuje mezerovitost a tím i požadavky na množství vody. Přidání popílku může způsobit snížení objemu mezer ve směsi a tím i snížit potřeby vody pro dosažení požadované konzistence směsi.

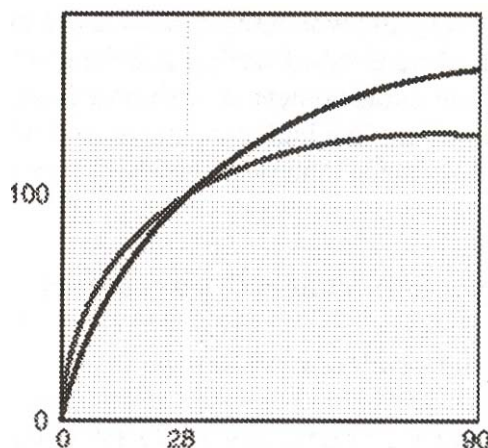
Přidáním popílku do směsí hubeného betonu **se zlepší reologické vlastnosti** takových směsí postrádající dostatečný podíl jemných částic.

Dalším pozitivním dopadem vycházejícím ze zvýšení podílu jemných částic v betonové směsi přidáním popílku je **snížení odlučování vody** z čerstvé betonové směsi, tzv. „pocení“ betonu

Navíc přidáním popílku do směsi **se zvyšuje její zpracovatelnost**, která závisí na soudržnosti a obsahu cementové malty v betonové směsi. Výhodou náhražek cementu v cementobetonových směsích se stejnou hmotností popílku, ale s nižší objemovou hmotností než má beton, je nárůst objemu cementové malty, čímž se zvýší zpracovatelnost směsi.

Přidání popílku do směsi **prodlužuje dobu tuhnutí**, zejména u popílků s nižším obsahem CaO a vysokým obsahem uhlíku. Okamžitá pevnost betonových směsí je obvykle nižší, ale v pozdějších fázích tuhnutí může být pevnost betonových směsí s popílkem ještě vyšší než je pevnost referenční betonové směsi.

To je výsledkem pomalé pucolánové reakce popílku a vápna, která vzniká při hydrataci cementu.



Legenda (vzhledem ke špatné kvalitě předlohy)

Křivka s pozvolnějším nárůstem znázorňuje nárůst pevnosti betonové směsi s popílkem, zatímco druhá křivka (jež při 90 dnech zrání dosahuje nižší pevnosti) reprezentuje betonovou směs z běžného portlandského cementu

Obrázek 1 – Nárůst pevnosti betonu v čase

Obdobné výsledky pevnosti betonu byly také pozorovány v případě nepropustnosti betonu. Důvodem ke snížení propustnosti směsí obsahující popílek je transformace velkých mezer na menší a zvýšení jejich diskontinuity.

Kromě snížení propustnosti již ztuhnutých směsí se pro zlepšení životnosti takové směsi přidáním popílku zvýší **odolnost proti působení síry** ve směsi. Konkrétně nahrazením jistého podílu cementu popílkem sníží podíl volného Ca(OH)_2 a minerálního C_3A ve směsi. Obě sloučeniny jsou důležité pro negativní působení síranů.

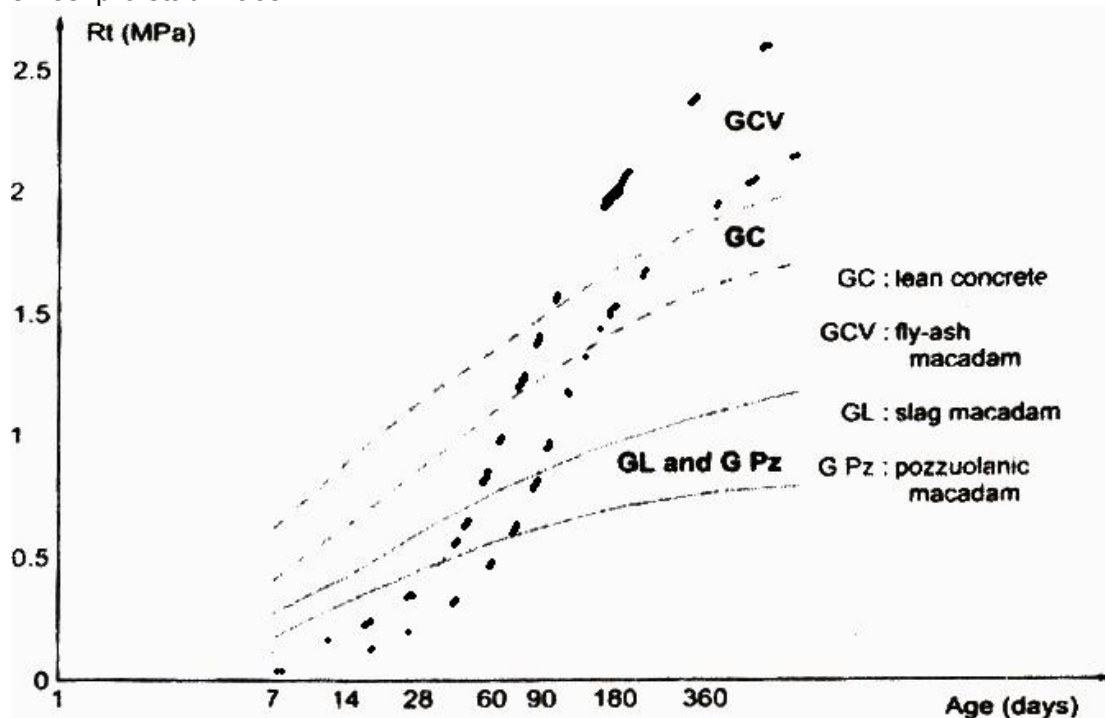
Jedním z nejdůležitějších dopadů popílku na betonovou směs je určitě **snížení teploty hydratace**. Celková teplota směsi i její vývoj jsou sníženy probíhajícími reakcemi popílku pro směsi se střední dobou hydratace. Náhradou určitého podílu portlandského cementu, který nejvíce uvolňuje teplo, popílkem sníží celkový potenciál pro nárůst tepla, neboť je známo, že popílek nevydává teplo při prvních dnech hydratace. Pro stavbu betonových vozovek a tunelů v geotermálních

oblastech jsou cementové směsi s popílkem obzvláště vhodné z důvodu omezeného výskytu trhlin způsobených teplem.

Odolnost proti zmrazování betonových směsí s přidavkem popílku je zapříčiněna přítomností ochranných vzduchových mezer a propustností směsi. Za předpokladu, že se zvýší diskontinuita mezer a i samotná mezerovitost, s vhodně zvolenou mezerovitostí lze dosáhnout požadované odolnosti směsí proti zmrazování.

3.2 Použití popílku do podkladních vrstev vozovky

Zatímco se betonové směsi s popílkem používají do prolévaných vrstev vozovky již po mnoho let, používání směsí pro stabilizace s pojivem z popílku a cementu nemá takovou tradici. Když v sedmdesátých letech minulého století vzrostla cena betonu, byl popílek používán v široké míře jako náhrada za určitý podíl cementu ve směsích pro stabilizace. K výběru popílku jako částečné náhrady cementu vedlo mnoho faktorů, i když ten ekonomický byl nejdůležitějším, neboť cena popílku oproti cementu je zanedbatelná. Z dalších faktorů je především pozitivní dopad přidavku popílku do betonových směsí na vlastnosti směsi, jak vyplývá z mnohaletého zkoušení. Očekávalo se, že obdobný dopad bude mít popílek i na kvalitativně nižší, směsi pro stabilizace.



Legenda

- GC hubený beton
- GCV popílkový makadam
- GL struskový makadam
- GPz pucolánový makadam

Obrázek 2 – Nárůst pevnosti v tahu jako funkce času

Brzy bylo prokázáno, že směsi pro stabilizace budou mít zelenou zejména pro jejich kontinuální nárůst pevnosti v tahu i po dobu několika let po pokládce vrstvy dosahující vysokých hodnot pevnosti v tahu.

3.3 Chorvatské zkušenosti s použitím popílku do vozovek

První studie o směsích pro stabilizace vyráběných z místních zdrojů (jemnozrnné těžené kamenivo z řeky Drávy) s hydraulickým pojivem z cementu a popílku byla v Chorvatsku provedena fakultou stavební v Osijeku v roce 1996. Jediným domácím producentem popílku byla elektrárna Plomin, jejíž popílek nedosahoval příslušné kvality, proto byl pro zkoušení použit popílek z maďarské elektrárny v Pešti (Peczs). Svým složením ($\text{CaO} = 2,5 \%$) spadal tento popílek do kategorie bez schopnosti samostatné vazby (třída F) a mohl být použit pouze v kombinaci s jiným hydraulickým pojivem.

Množství pojiva (specifický podíl cementu s popínkem) ve zkoušených směsích byl 6 %, 9 %, 12 % a 15 % celkové hmotnosti směsi. V každém z těchto podílů byl podíl popílku zvýšen z 0 %, na 15 %, 20 %, 25 % a 30 % vzhledem k podílu cementu.

Mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku a příčném tahu) byly měřeny na každém vzorku směsi pro stabilizace. Tato studie byla zaměřena na stanovení chování popílku a jeho vztahu k cementu ve směsi pro stabilizace.

Bylo zjištěno, že může být částečně nahrazena jistá část cementu, a pevnosti v tlaku a příčném tlaku se budou stále nacházet v uspokojivých limitech pro použití směsi do podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací.

Výsledky naznačily, že podíl popílku v pojivu by měl být 15 až 25 % ve směsi pro stabilizace za předpokladu příslušného podílu pojiva v celkové hmotnosti směsi.

Popisovaná studie směsí pro stabilizace těžného kameniva, cementu a popílku byla rozšířena a pokračovalo se v ní v roce 2004. Komplexní laboratorní studie byla prováděna na 600 vzorcích směsí pro stabilizace včetně zkoušení mechanických a elastických vlastností: pevnosti v tlaku a příčném tahu, dynamický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo.

Množství pojiva (jistý podíl cementu a popílku) ve zkoušených směsích byl 10 a 14 % z celkové hmotnosti směsi a u každého z nich byl podíl popílku zvýšen z 0 %, 25 %, 50 % a 75 % k podílu cementu.

Výsledek potvrdil, že použitý popílek může nahradit podíl cementu (maximálně 25 %) hmotnosti pojiva a že pevnost v tlaku směsi pro stabilizace zůstává v rámci předepsaných hodnot požadovaných pro její použití do podkladních vrstev vozovky stabilizovaných hydraulickým pojivem. Minimální množství pojiva ve směsi pro stabilizace bylo omezeno na 12 % celkové hmotnosti směsi.

Výsledky směsí s nižším podílem cementu pro stabilizace, s podílem popílku v pojivu 50 a 75 %, nespĺnily požadavky na použití do stabilizovaných vrstev vozovky a hodnota minimální pevnosti v tahu byla podstatně nižší než požadovaná.

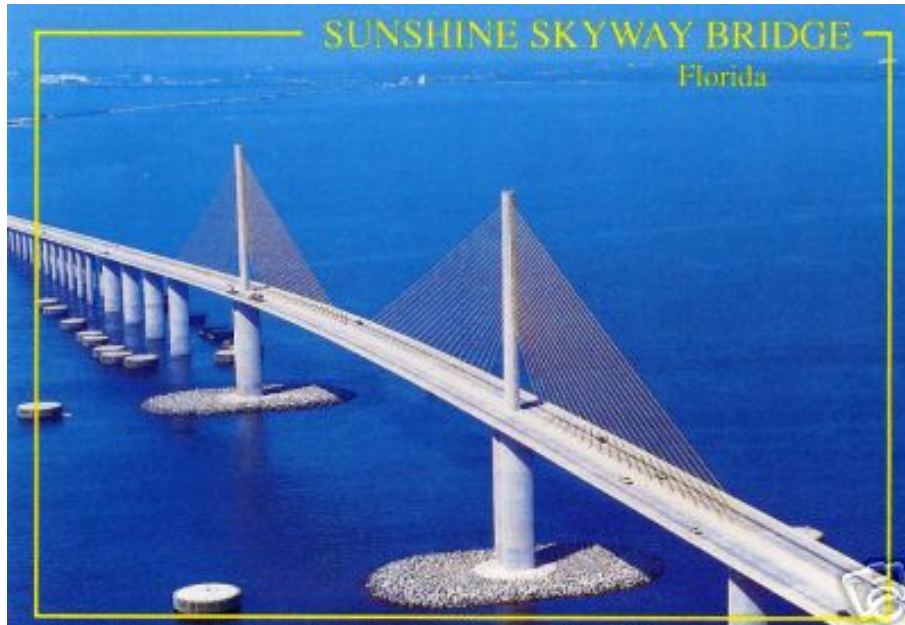
Obě výše popisované studie využily pro své účely popílek z maďarské elektrárny v Pešti. Důvody pro výběr tohoto popílku byly blízkost zdroje popílku, dobré zkušenosti maďarské strany s používáním tohoto popílku a nedostatečná kvalita popílku domácího producenta. Při řešení studie však tento producent, elektrárna v Plominu, začal spalovat nové uhlí, a proto fakulta stavební v Osijeku plánuje opakovat své studie i s chorvatským popínkem. Dalším důvodem pro pokračování studie je plánovaná výstavba dvou dalších tepelných elektráren v blízké budoucnosti poblíž měst Sisak a Osijek a nakládáním s odpadem se tak stane reálným problémem.

4 Závěr

Doposud provedené početné studie o betonových směsích a směsích pro stabilizace prokázaly vhodné vlastnosti směsí s použitím popílku. To bylo potvrzeno aplikací těchto směsí do vozovek, tudíž je navrženo širší použití tohoto odpadního materiálu. Vzhledem k mnohaleté zkušenosti s těmito směsmi v silničním stavitelství, zvýšeným zájmem o životní prostředí a světovými trendy využívání alternativních materiálů při

stavbách lze očekávat, že použití směsí s popílkou se bude v silničním stavitelství stále zvyšovat.

Využití popílku, který sám je odpadním materiálem, lze kromě pozitivních dopadů na kvalitu betonových směsí a směsí pro stabilizaci dosáhnout i ekologických přínosů – snížení počtu skládek popílků a snížení emisí vznikajících během výroby cementu, které výrazně přispívají ke vzniku skleníkového efektu a globálního oteplování.



Obrázek 3 – Betonová směs s popílkem použitá pro aplikace vystavené extrémnímu vlivu prostředí jako jsou mostovky a pilíře mostu Sunshine Skyway Bridge ve městě Tampa Bay ve státě Florida, USA