

Wykorzystanie popiołów poenergetycznych dla celów budowlanych

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, dr hab. inż. Ryszard Coufal, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, dr inż. Tomasz Szczygielski, mgr inż. Zbigniew Becker, Ekotech-Centrum Sp. z o.o., Warszawa

1. Charakterystyka popiołów poenergetycznych

Energetyka w Polsce w ponad 90% bazuje na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego, wytwarzając rocznie ponad 16 milionów ton popiołów, różniących się właściwościami w zależności od rodzaju i jakości węgla, procesu spalania (kotły pyłowe czy fluidalne) oraz technologii transportu odpadów i ich przechowywania.

Do celów budowlanych stosowane są głównie mieszanki popiołowo-żużlowe, które hydraulicznie odprowadzane są na składowiska. Mieszanki te o zawartości około 80% popiołu lotnego i 20% żużla, mają rozkład ziarnowy bliski optymalnemu z punktu widzenia jego zagęszczania. Istniejące składowiska popiołów traktowane powinny być jako źródło surowca antropogenicznego, a przed rozpoczęciem ich eksploatacji wykonać należy niezbędne analizy geotechniczne, określając parametry kruszywa według odpowiednich norm krajowych czy unijnych.

Prowadzone od ponad 20 lat w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej (obecnie ZUT w Szczecinie) badania i analizy pozwalają określić uśrednione z wieloletnich badań parametry mieszanek popiołowo-żużlowych składowanych na składowiskach odpadów. Zestawienie wyników badań dla próbki średniej (przeprowadzonych w Okręgowym Laboratorium Dyrekcji Okręgowej Dróg Publicznych w Szczecinie, w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej oraz w Centrum Stosowanej Chemii Nieorganicznej PAN) podano poniżej:

- zawartość frakcji żwirowej $f_z = 5,70\%$
piaskowej $f_p = 62,05\%$
pyłowej $f_m = 30,0\%$
iłowej $f_i = 2,55\%$
- gęstość objętościowa $\rho = 1,16-1,54 \text{ g/cm}^3$
- gęstość właściwa $\rho_s = 2,16 \text{ g/cm}^3$
- wilgotność naturalna $w = 15,4 - 49,9\%$
- wilgotność optymalna wg. Próby Proctora $w_{opt} = 28,0\%$
- maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 1,21 \text{ g/cm}^3$
- wskaźnik nośności CBR po zagęszczeniu wg Próby Proctora
– bezpośrednio po zagęszczeniu 30,0 %

- po dwudniowym moczeniu 18,0%
- po sześciodniowym moczeniu 15,0%
- kapilarność bierna 1,18 m
- odczyn pH 9,6
- współczynnik filtracji
– próbki w stanie luźnym $k = 1,20 \text{ m/dobę}$ (1,4 10–5 m/s)
– próbki po zagęszczeniu $k = 0,24 \text{ m/dobę}$ (2,8 10–6 m/s)
- parametry wytrzymałościowe
– dla $w = w_{opt}$
kąt tarcia wewnętrzznego $\phi_s = 30,7$
spójność $c = 14,3 \text{ kPa}$
stopień i wskaźnik zagęszczenia 0,75 i 1,01
- moduły ścisłości popiołu:

	zakres	moduł pierwotny	moduł wtórny
próbka średnia	0–50 kPa	3 700 kPa	8 330 kPa
	50–100 kPa	8 230 kPa	12 420 kPa
	100–150 kPa	10 900 kPa	18 000 kPa

2. Wybrane zastosowanie w budownictwie

Początki stosowania popiołów w budownictwie sięgają ponad 2300 lat, kiedy to Rzymianie stosując mieszanki popiołów wulkanicznych, jako naturalnych pucolan z wapnem wykonywali drogi, akwedukty i inne budowle, z których Koloseum, Panteon, czy Bazylika Konstantyna przetrwały do dziś.

Główne zastosowanie popiołów poenergetycznych w budownictwie obejmuje;

- w materiałach budowlanych jako dodatki do cementów, stanowiąc w niektórych 60% udział,
- w drogownictwie jako materiał na podbudowy, nasypy, elementy konstrukcji nawierzchni drogowych,
- w budownictwie ziemnym jako materiał nasypów, zapór ziemnych, wałów przeciwpowodziowych,
- w makroniwelacjach terenów – zwłaszcza obszarów zdegradowanych – jako wypełnienie kubaturowe o znacznej objętości (jak wykazuje praktyka, znacznie polepszające parametry środowiskowe terenu),
- jako podbudowa w obiektach typu place składowe, parkingi, pola golfowe, lotniska,

- jako iniekt we wzmacnianiu wgłębnym słabonośnego podłoża gruntowego, stabilizujący warunki gruntowe,
- jako materiał przeciążeniowy w konsolidacji nasypem obszarów pod zabudowę,
- jako materiał do zasypek w pracach instalacyjnych,
- jako materiał do konstrukcji warstw wyrównawczych pod fundamenty,
- jako nowe materiały budowlane (poinstalacyjne) uzyskiwane z połączenia popiołów z innymi materiałami lub odpadami (np. koncepcja utylizacji fosfogipsów w efekcie ich zeskalenia z popiołami i refulatem).

3. Wały przeciwpowodziowe z mieszanki popiołowych

Próby znalezienia materiału, który mógłby być wykorzystany do budowy korpusów wałów podejmowane były od dawna. Materiał taki stanowią mogą mieszanki na bazie popiołów wzbogaconych dodatkiem cementu lub wapna lub obu tych składników równocześnie. Poszukując optymalnej mieszanki popiołowo-cementowej do budowy wałów przeciwpowodziowych, kierowano się następującymi przesłankami:

- mieszanka tania, wobec tego zawartość cementu również musi być mała (mniejsza od 5%),
- korpus wału powinien być konstrukcją elastyczną, która „układa się” w podłożu i jest niewrażliwa na nierównomierne osiadanie – mieszanka powinna posiadać duży kąt tarcia wewnętrznego po to, aby wał posiadał dobre właściwościami mechaniczne (przy sprawdzaniu stateczności),
- mała przesiąkliwość przez wał,
- minimalizacja wyłukiwania pierwiastków ciężkich do wód gruntowych.

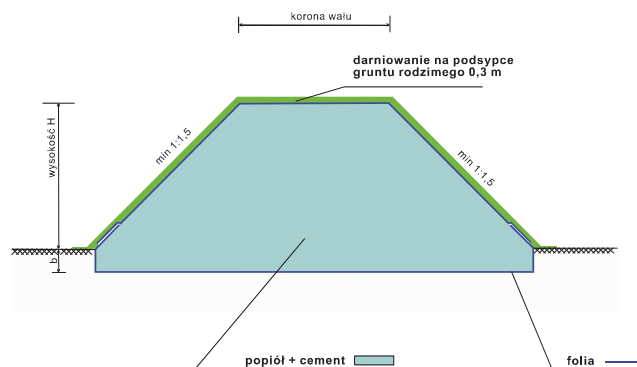
Efekt taki osiągnięto poprzez zamknięcie korpusu z mieszanki popiołowo-cementowej w otulinie z geomembrany. W odniesieniu do geomembrany postawiono następujące warunki:

- geomembrana tania, ale trwała,
- łatwa w łączeniu, tak aby można było wały wykonywać w sposób ciągły,
- powierzchnia zewnętrzna powinna być szorstka (perforowana – karbowana) tak, aby uzyskać duże tarcie na granicy grunt – geomembrana (w podstawie i na skarpach),
- możliwość przeprowadzenia ruchu kołowego na koronie wału.

Szczegóły techniczne rozwiązania przedstawiono w zgłoszeniu patentowym (P 322558 z dnia 9.10.1997: *Wał przeciwpowodziowy z zastosowaniem mieszanki popiołowo-cementowej*).

Popioły nie stanowią zagrożenia dla środowiska wód i gruntów i mogą być zabudowywane bezpośrednio, co oznacza, że wały przeciwpowodziowe można by formować bezpośrednio w terenie z pominięciem zabezpieczenia w postaci np. geomembrany. Jest to dopuszczalne, gdyż analizując warunki filtracji stwierdza się,

że przesiąkanie przez wał jest znikome. Z uwagi na zachowanie kształtu skarp, jak również z uwagi na potrzebę zadarniowania wału, należy przewidzieć w takim przypadku położenie geowłókniny w miejsce wcześniej proponowanej geomembrany.



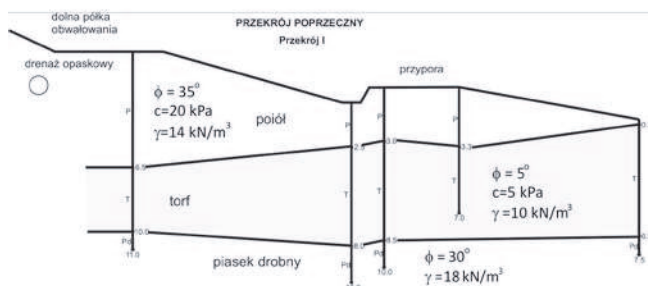
Rys. 1. Schemat wału przeciwpowodziowego z mieszanki popiołowo-cementowej

Obliczenia stateczności wału, osiadania korpusu i podłoża wykonuje się zgodnie z obowiązującymi rozporządzeniami: Min. OŚZNiL dot. *Warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane gospodarki wodnej i ich usytuowanie* (Dz.U. Nr 21 poz. 111). oraz WTWO Min. OŚZNiL dot. *Robót ziemnych. Warunki techniczne wykonania i odbioru*. Projekt posadowienia wału poprzedzony musi być rozpoznaniem podłoża gruntowego.

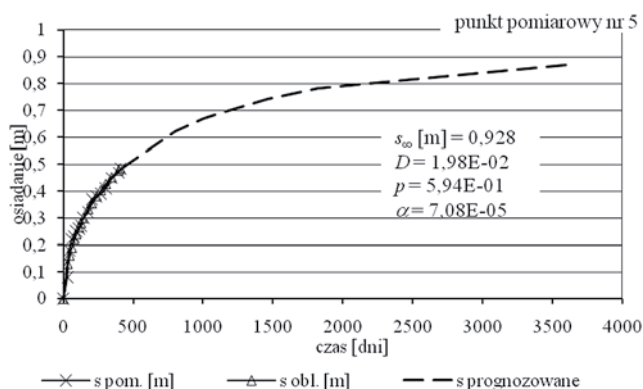
Przedstawiona zaraz po powodzi 1997 roku koncepcja budowy wałów przeciwpowodziowych z popiołocementów, nie spotkała się z większym zainteresowaniem, mimo wielokrotnego prezentowania jej na różnych forach (administracyjnych, naukowych, w mediach itp.).

Jedyną realizację w skali naturalnej stanowi dwukilometrowy odcinek wału przeciwpowodziowego pełniący przede wszystkim funkcję przypory przyskarpowej zmodernizowanego składowiska odpadów Elektrowni Pomorzany w Szczecinie. Składowisko to znajduje się na terenie zalewowej Odry, w obrębie ujścia do Odry potoku Bukowa i kanału doprowadzającego wodę technologiczną do elektrowni. Występujące w tym rejonie spiętrzenia cofkowe powodują wzrost poziomu zwierciadła wody w Odrze nawet o 1,5 metra, powodując zalewanie obszaru terasy, destrukcyjnie oddziaływały na lokalną i globalną stateczność składowanych odpadów. Podłoże terasy zlewowej budują nieskonsolidowane grunty organiczne o miąższości 6–8 metrów, stąd w projekcie posadowienia przypory należało uwzględnić znaczne osiadanie podłoża i wymusić jedynie pionową konsolidację gruntów niedopuszczając do przemieszczenia poziomego (płynięcia) podłoża.

Do odwzorowania pracy gruntu zastosowano reologiczny model gruntu słabego Meyera [1] pozwalający określić przede wszystkim wartość osiadania docelowego



Rys. 2. Schemat przypory przyskarpowej pełniącej funkcję wału przeciwpowodziowego



Rys. 3. Pomierzone i obliczone wyniki osiadań wału – przypory przyskarpowej

w funkcji parametrów podłoża i przyłożonego obciążenia. Dla uzyskanej wartości $s_{\infty} = 1,86$ m zaproponowano technologię nadbudowywania osiadającego obiektu, aż do uzyskania projektowanej rzędnej korony wału. Przeprowadzone pomiary weryfikacyjne przemieszczeń w pełni potwierdziły uzyskane z modelu wyniki numerycznych symulacji.

Schemat rozwiązania technicznego przedstawiono na rysunku 2, zaś wyniki pomiarów i obliczeń teoretycznych na rysunku 3.



Rys. 4. Formowanie przypory-wału przeciwpowodziowego na materacu faszynowym w otulinie geowłókniny

4. Popioły w budownictwie drogowym

W rozdziale tym autorzy pragną przedstawić stosunkowo nowy materiał, jakim jest kruszywo krzemianowe TEFRA oraz szereg mieszanek na jego bazie betonów popiołowo-żużlowych, certyfikowanych jakościowo i posiadających świadectwa dopuszczające do stosowania w budownictwie. Kruszywo krzemianowe TEFRA jest produktem powstającym z mieszania w instalacji (mobilnej) popioło-żużli poenergetycznych z kruszywem naturalnym, materiałem zawierającym krzemionkę, tlenki żelaza i glinu oraz inne składniki. Przebadana promieniotwórczość jest mniejsza od naturalnej (wg ITB 234/2003), pozwalając na trwały kontakt ludzi i zwierząt z badanym materiałem. Uzyskany Atest Higieniczny wskazuje na zakres stosowania materiału TEFRA: „do budowy nasypów drogowych, do stosowania jako zasyпки obiektów inżynierskich (wykopów na instalacje, przyczółków i konstrukcji oporowych) oraz podsypki pod drobnowymiarowe elementy, betonowego odziarniania i klinowania mieszanek kruszyw”.

Materiał TEFRA stosowany może być w konstrukcjach nasypów, podbudowach i wykonaniu nawierzchni drogowych (PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania, PN-S-06102:1997 Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie, PN-S-06103:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego, PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem, PN-S-96035:1997 Drogi samochodowe. Popioły lotne).

Oferowane przez EKOTECH – CENTRUM Sp. z o.o. mieszanki betonowe popiołowo-żużłowe TEFRA, dzięki technologii opartej na licznych badaniach laboratoryjnych prowadzonych przez jednostki naukowo-badawcze są produktami godnymi polecenia dla celów drogowych. Produkowane podbudowy z mieszanki betonowej popiołowo-żużłowej można wykorzystywać przy budowie dróg, ulic, placów postojowych, parkingów oraz przy poszerzaniu i wzmacnianiu istniejących konstrukcji nawierzchni, bądź przy ulepszeniu podłoża drogowego. Podbudowy z mieszanki betonowej popiołowo-żużłowej TEFRA BP wykonuje się, zgodnie z dokumentacją projektową, jako podbudowę zasadniczą lub pomocniczą.

Mieszanka betonowa popiołowo-żużłowa TEFRA BP, to warstwa zagęszczonej mieszanki (jedna lub więcej), która po stwardnieniu stanowi nośną część nawierzchni (podbudowy) zgodnie z PN-S-06103 o wytrzymałości w granicach 1,5 do 8,0 MPa.

Handlowo w ofercie wyróżnia się:

- mieszankę betonową TEFRA BP 2,5 o wytrzymałości R_m 42 od 1,5 do 2,5 MPa (do wykonywania warstw wzmacniających i ulepszonego podłoża drogowego dla dróg obciążonych ruchem od KR1 do KR6 lub



Rys. 5. Formowanie nasypu z popioło-żużli, obwodnica Sochaczewa



Rys. 6. Wiadukt na obwodnicy Sochaczewa, przyczółki wykończone warstwą 0,5 m gruntu rodzimego

do wykonywania dolnych warstw podbudowy dla dróg kategorii od KR1 do KR2),

- mieszankę betonową TEFRA BP 5,0 o wytrzymałości R_m 42 od 2,5 do 5,0 MPa (do wykonywania podbudów zasadniczych dróg obciążonych ruchem od KR1 do KR2 lub podbudów pomocniczych dróg obciążonych ruchem od KR3 do KR6),
- mieszankę betonową TEFRA BP 8,0 o wytrzymałości R_m 42 od 5,0 do 8,0 MPa (do wykonywania podbudów zasadniczych dróg obciążonych ruchem od KR1 do KR3 lub podbudów pomocniczych dróg obciążonych ruchem od KR4 do KR6).

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykład zastosowania mieszanki TEFRA przy budowie obwodnicy miasta Sochaczewa.

Zaletami zastosowania mieszanek TEFRA w budownictwie inżynierskim są:

- oszczędność (1 m² drogi wykonanej z udziałem TEFRA jest niższy w stosunku do technologii tradycyjnej nawet o 50%),
- trwały i niezawodny materiał,
- łatwy dostęp do materiału,
- materiał o niskim ciężarze objętościowym, a co za tym idzie – zmniejszenie kosztów transportu,
- wysoka wytrzymałość i mrozoodporność,
- podbudowa z udziałem TEFRA posiada właściwości elastyczne,
- na podbudowie z udziałem TEFRA można układać każdy rodzaj nawierzchni ścieralnej.

Firma oferuje również hydrauliczne spoiwa drogowe TEFRA STAB do osuszania i ulepszania gruntów, spoiwa TEFRA 15 oraz TEFRA 25 dla uzyskania nośności, mrozoodporności i jednorodności gruntu (wg PN-S-02205:1998 oraz wg Rozporządzenia Rady Ministrów z 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich użytkowanie). W zależności od rodzaju gruntu, jego wilgotności oraz dodatku spoiwa, uzyskiwane nośności na ulepszonym podłożu stabilizowanym spoiwem TEFRA 15 wynoszą od 60 do 150 MPa.

5. Podsumowanie

W referacie przedstawiono w olbrzymim skrócie możliwości wykorzystania odpadów poenergetycznych w szeroko pojętym budownictwie, w sposób szczególny zwracając uwagę na dwa aspekty:

- zastosowania do ochrony przeciwpowodziowej, bezpieczne środowiskowo, eliminujące jakiegokolwiek odcieki, nie do sforsowania przez gryzienie, nisko nakładowe finansowo, pozwalające sukcesywnie zmniejszać powierzchnię składowisk odpadów i rekultywować tereny byłych składowisk,
- możliwości zastosowania w budownictwie drogowym całego spektrum mieszanek betonowych popiołowo-żużlowych o nazwie handlowej TEFRA, zmniejszających zużycie gruntów naturalnych, bezpiecznych, o odpowiedniej nośności, wytrzymałości, mrozoodporności, tanich.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Meyer Z., Consolidation model for organic soils, Ground Improvement, Nr 1, pp. 239–248, (1997)
- [2] Meyer Z., Coufal R., Bednarek R., Prognoza osiadania przypory chroniącej stabilność składowiska popiołów elektrowni Pomorzany, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryjne Budowlane, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Szczecin–Międzyzdroje, 26-29 maja, s. 285–290, 2009
- [3] Pachowski J., Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym, WKiŁ, Warszawa 1976