

Warstwy ochronne z kruszywa stabilizowanego mechanicznie

Henryk Koba

Warstwy z kruszywa są bardzo popularnym rozwiązaniem w budownictwie drogowym i kolejowym. Stosowane są jako warstwy wzmacniające słabe podłoże gruntowe oraz jako warstwy ochronne. Nośność podbudów z kruszywa ocenia się najczęściej w badaniu obciążeń płytą. Dla celów praktycznych jako kryterium nośności przyjmuje się zazwyczaj moduł odkształcenia w drugim cyklu obciążenia. Moduł odkształcenia na powierzchni warstwy podbudowy w pierwszym i drugim cyklu obciążeń pozwala również ocenić stopień zagęszczenia warstwy. Dotychczasowe badania wskazują, że nośność tych warstw zależy od stopnia zawilgocenia ale również od zawartości frakcji drobnych w mieszance kruszywa. W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu uziarnienia kruszywa i wilgoci na nośność warstw z kruszywa stabilizowanego mechanicznie.



dr inż.
Henryk Koba
Katedra Dróg i Lotnisk
Politechnika Wroclawska
henryk.koba@pwr.edu.pl

Wprowadzenie

Podbudowy z kruszywa naturalnego lub łamanego są najstarszym i najpopularniejszym typem warstw nośnych nawierzchni drogowych i kolejowych. Stosowane są jako warstwy wzmacniające słabe podłoże gruntowe oraz jako warstwy odcinające.

Stabilizacja mechaniczna to proces technologiczny polegający na zagęszczeniu kruszywa o właściwie dobranym uziarnieniu przy optymalnej wilgotności. Uważa się, że efekt stabilizacji mechanicznej zależy głównie od czterech czynników:

- porowatości mieszanki kruszywa (powinna być jak najmniejsza),
- cech zmieszanych gruntów i kruszywa (głównie uziarnienia),
- sposobu i efektu wymieszania składników,
- dostatecznego zagęszczenia mieszanki kruszywa (przy wilgotności optymalnej)

Najmniejszą porowatość mają mieszanki posiadające odpowiednie (ciągłe) uziarnienie.

Właściwie wszystkie typy nawierzchni drogowych i torowisk kolejowych zawierają swym składzie warstwy z kruszywa stabilizowanych mechanicznie. Ta wieloletnia praktyka inżynierska wymusiła również opracowanie odpowiednich wymagań dotyczących rodzaju i właściwości materiałów, oceny nośności i kontroli jakości wykonania robót. Wykorzystywano w tym celu, stosowaną od dziesięcioleci, początkowo dla podłoża gruntowego, metodę obciążeń płytą –VSS [3] (norma branżowa BN-64/8931-02 *Drogi samochodowe. Oznaczanie modułu od-*

kształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenia płytą).

Obecnie, w budownictwie drogowym jak i kolejowym, ocena nośności podłoża i warstw ochronnych w oparciu o pomiar modułu odkształcenia płytą stała się codzienną praktyką i niewątpliwie wpłynęła korzystnie na poprawę jakości wykonywanych robót.

Wprowadzone w ostatnich latach nowelizacje norm dotyczące podłoża (PN-S-02205;1998 *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.*) oraz podbudów (PN-S-06102;1997 *Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie*, oraz wprowadzane nowe *Normy Europejskie*) ujednoliciły wymagania odnośnie cechy właściwości gruntów i kruszyw stosowanych do tych warstw nawierzchni drogowych. Przeniesienie tych wymagań na warstwy podtorza kolejowego stwarza czasami kłopoty wynikające z faktu, że nawierzchnia kolejowa, w odróżnieniu od nawierzchni drogowych, jest konstrukcją przepuszczalną. W konstrukcjach nawierzchni drogowych odpowiednio zagęszczona warstwa podbudowy z kruszywa, przykryta szczelnymi warstwami bitumicznymi, nie jest narażona na okresowe zmiany zawilgocenia. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że nawet bardzo starannie wbudowane warstwy z kruszywa spełniającego wymagania jakościowe narażone są na okresowe obniżenie nośności spowodowane zawilgoceniem materiału.

Dotyczy to szczególnie warstw ochronnych podtorza linii kolejowych już eksploatowanych jak i przebudowywanych.

Duża wrażliwość na zmiany wilgotności materiału warstwy może być spowodowana:

- niedostatecznym zagęszczeniem warstwy,
- złym odwodnieniem korpusu torowiska,
- nieodpowiednim uziarnieniem mieszanki kruszywa (brak ciągłości uziarnienia i duża zawartość części drobnych - pylastych i ilastych).

Wymagania dla kruszyw na warstwy ochronne

Warstwy ochronne stabilizowane mechanicznie mogą być budowane z kruszyw łamanymi (mieszanki o ciągłym uziarnieniu, kłińce), naturalnymi (piaski, żwir i pospółki), żużla wielkopieczowego i pomiedziowego oraz z ich mieszanin.

Wymaga się aby oprócz odpowiedniego uziarnienia kruszywo wykorzystywane do warstw ochronnych było jednorodne bez zanieczyszczeń obcych i bez domieszek gliny oraz spełniało wymagania określone w tablicy 1.

Uziarnienie kruszywa

Wymagania dotyczące uziarnienia kruszywa na warstwy stabilizowane mechanicznie są podobne w różnych krajach i charakteryzują się ciągłością ziarnienia. Ciągłość uziarnienia powoduje, że mieszanka kruszywa charakteryzuje się małą porowatością, a zawartość części kruszyw drobnych ułatwia zagęszczanie mieszanki i stanowi swego rodzaju naturalne spoiwo wiążące grubsze ziarna kruszywa. Dobrze zagęszczona warstwa kruszywa stabilizowanego mechanicznie po przesuszeniu charakteryzuje się bardzo dużą sztywnością i nośnością. Dla podbudów drogowych wymaga się aby krzywa uziarnienia kruszywa, określona według PN-S-06102, leżała między krzywymi granicznymi pół dobrego uziarnienia podanymi na rysunku 1.

Podobne wymagania, jeżeli chodzi o uziarnienie mieszanki kruszywa, stosują Francuzi (rys. 2) i Niemcy (rys. 3). Porównując krzywe uziarnienia według wymagań polskich, francuskich i niemieckich można stwierdzić, że podejście do kryteriów uziarnienia jest podobne jednakże mieszanki mineralne w Niemczech i Francji są nieco grubiej uziarnione. Widoczne jest to przy porównaniu przesiewu mieszanki na sicie o wymiarze 4 mm (Polska

Tablica 1. Właściwości kruszyw do stabilizacji mechanicznej według [1].

| Lp. | Wyszczególnienie właściwości | Wymagania | | | | | | Badania według |
|-----|---|--------------------|-------------|-----------------|-------------|------------|------------|--|
| | | Kruszywa naturalne | | Kruszywa łamane | | Żużel | | |
| | | Podbudowa | | | | | | |
| | | zasadnicza | pomocnicza | zasadnicza | pomocnicza | zasadnicza | pomocnicza | |
| 1 | Zawartość ziaren mniejszych niż 0,075 mm, % (m/m) | od 2 do 10 | od 2 do 12 | od 2 do 10 | od 2 do 12 | od 2 do 10 | od 2 do 12 | PN-B-06714 -15; 1991 |
| 2 | Zawartość nadziarna, % (m/m), nie więcej niż | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | PN-B-06714 -15; 1991 |
| 3 | Zawartość ziaren nieforemnych % (m/m), nie więcej niż | 35 | 45 | 35 | 40 | - | - | PN-B-06714 -16; 1978 |
| 4 | Zawartość zanieczyszczeń organicznych, % (m/m), nie więcej niż | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | PN-B-04481; 1988 |
| 5 | Wskaźnik piaskowy po pięciokrotnym zagęszczeniu metodą I lub II wg PN-B-04481, % | od 30 do 70 | od 30 do 70 | od 30 do 70 | od 30 do 70 | - | - | BN-64/8931 -01 |
| 6 | Ścieralność w bębnie Los Angeles a) ścieralność całkowita po pełnej liczbie obrotów, nie więcej niż b) ścieralność częściowa po 1/5 pełnej liczby obrotów, nie więcej niż | 35 | 45 | 35 | 50 | 40 | 50 | PN-B-06714 -42; 1976 |
| 7 | Nasiąkliwość, % (m/m), nie więcej niż | 2,5 | 4 | 3 | 5 | 6 | 8 | PN-B-06714 -18; 1977 |
| 8 | Mrozoodporność, ubytek masy po 25 cyklach zamrażania, % (m/m), nie więcej niż | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | PN-B-06714 -19 1978 |
| 9 | Rozpad krzemianowy i żelazawy łącznie, % (m/m), nie więcej niż | - | - | - | - | 1 | 3 | PN-B-06714 -37; 1980 PN-B-06714 -39; 1978 |
| 10 | Zawartość związków siarki w przeliczeniu na SO ₂ , % (m/m), nie więcej niż | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | PN-B-06714 -28; 1978 |
| 11 | Wskaźnik nośności w mieszanke kruszywa, %, nie mniejszy niż: a) przy zagęszczeniu IS ³ 1,00 b) przy zagęszczeniu IS ³ 1,03 | 80 | 60 | 80 | 60 | 80 | 60 | PN-S-06102; 1997 |
| | | 120 | - | 120 | - | 120 | - | |

35 – 59 %; Francja 19 – 41 % i Niemcy 28 – 50%). Również Niemcy zwrócili uwagę na problem zbyt dużej szczelności mie-

szanek stabilizowanych mechanicznie i dla warstw narażonych na zawilgocenie proponują mieszanki drenujące (z mniej-

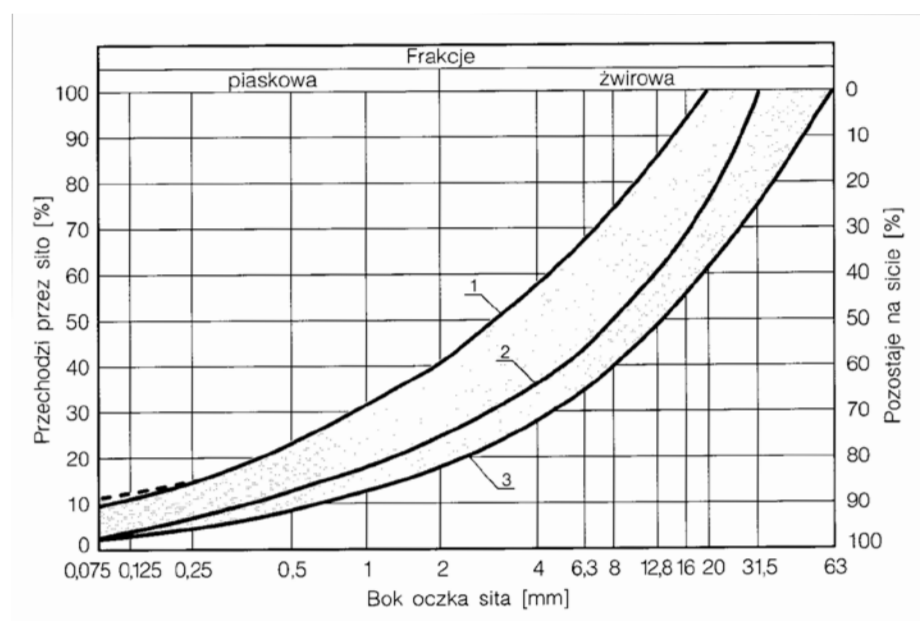
szą zawartością części < 0,063mm i zawężonym przedziałem uziarnienia na sicie 2 mm (rys. 3).

Należy jednak podkreślić, że przedstawione wymagania odnośnie uziarnienia kruszyw do warstw podbudów drogowych są dostosowane dla nawierzchni, których górne warstwy są zbudowane najczęściej z warstw nieprzepuszczalnych (bitumicznych). W budownictwie drogowym wymaga się również aby warstwa podbudowy stabilizowanej mechanicznie była zabudowana na warstwie gruntu przepuszczalnego lub na dodatkowej warstwie odcinającej lub filtracyjnej. W ten sposób warstwa podbudowy odcięta jest od dopływu wody zarówno od góry jak i od dołu.

Po wielu latach doświadczeń i analiz opracowano również wymagania dotyczące warstw ochronnych dla budowy kolei. Aktualnie obowiązujące wymagania dla górnej części podtorza (w tym warstw ochronnych) zebrane w instrukcji Id 3 dotyczą:

1. wymaganej trwałości podtorza (20 – 50 lat),

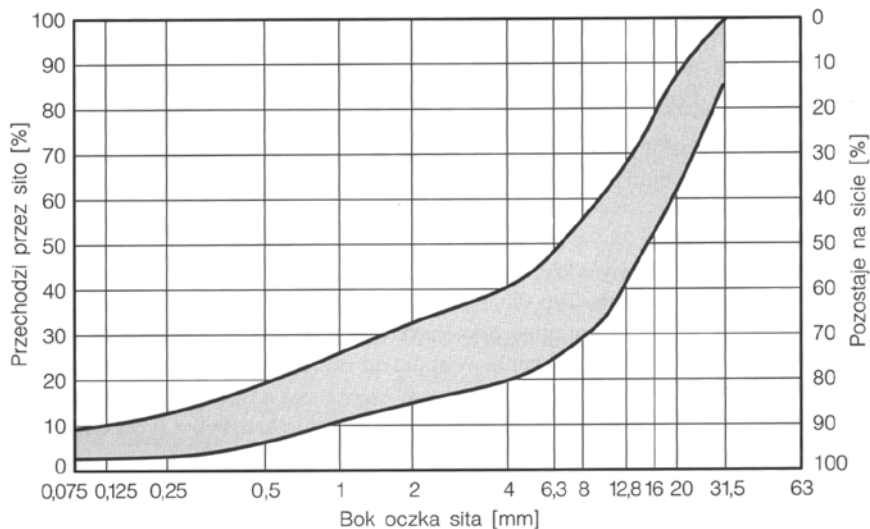
2. wytrzymałości doraźnej (nośność i sztyw-



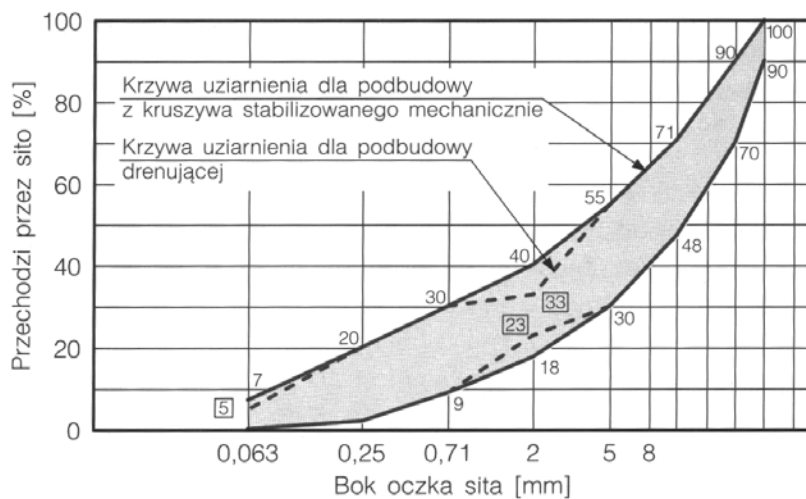
1. Pola dobrego uziarnienia kruszyw przeznaczonych na podbudowy wykonywane metodą stabilizacji mechanicznej

1-2 kruszywo na podbudowę zasadniczą (górną warstwę) lub podbudowę jednowarstwową

1-3 kruszywo na podbudowę pomocniczą (dolną warstwę)



2. Krzywe graniczne uziarnienia mieszanki na warstwy stabilizowane mechanicznie według norm francuskich

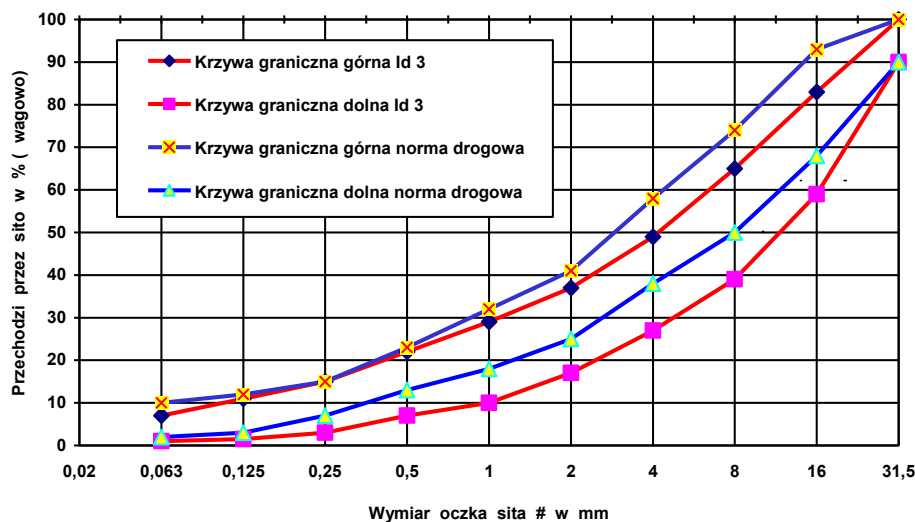


3. Krzywe graniczne uziarnienia mieszanki na warstwy stabilizowane mechanicznie według norm niemieckich

ność określona według badań płytą VSSE" w granicach 80 – 120MPa),

3. Wymaganą trwałość podtorza zapewnią się poprzez wbudowanie odpowiednio

dobrych materiałów odpornych na zmienne warunki klimatyczne, zapewniające stabilność mechaniczną na styku poszczególnych warstw oraz odpowiednią



4. Porównanie krzywych granicznych uziarnienia mieszanki na warstwy ochronne według Id-3 i według normy drogowej PN-S-06102:1997

wodoprzepuszczalność przy warstwach filtracyjnych i szczelność wymaganą dla warstw ochronnych których zadaniem jest niedopuszczenie wody do słabego podłoża gruntowego wrażliwego na zawilgocenie.

4. Wymagania jakie są stawiane dla górnej części podtorza odnośnie uziarnienia wyrażone są wskaźnikiem uziarnienia $U = d_{60}/d_{10}$ (powinien być większy od 10) i wskaźnikiem krzywizny uziarnienia $c = d_{30} \times d_{30}/d_{60} \times d_{10}$ (w granicach 1 - 3). Wskaźnik uziarnienia (U) i wskaźnik krzywizny (c) mają zapewnić odpowiednią różnorodność i ciągłość uziarnienia mieszanki co z kolei ułatwia jej zagęszczenie.

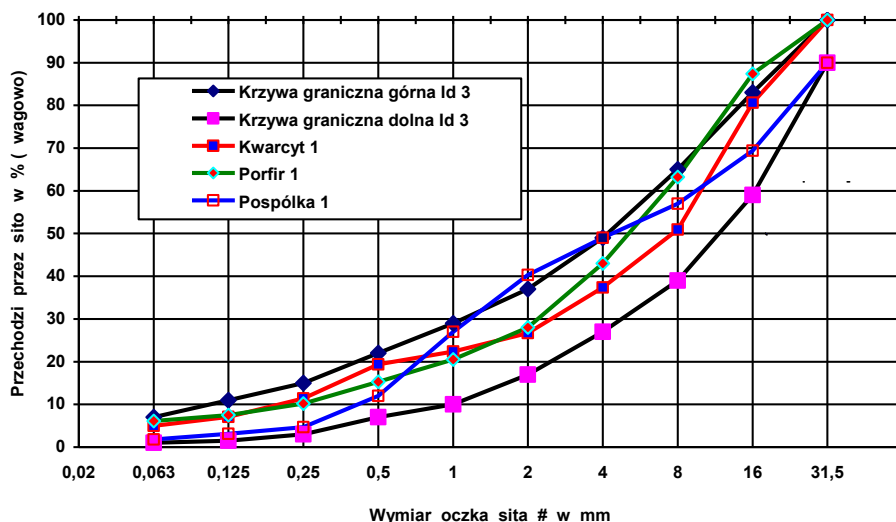
5. Dodatkowo dla linii nowo budowanych i modernizowanych oraz przy zabudowie warstw ochronnych z użyciem zestawu AHM wymaga się aby krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej leżała w polu dobrego uziarnienia (rys 23-3 Id -3), oraz zawartość części pylastych (<0,02mm) nie przekraczała 3 %.

Porównanie krzywych uziarnienia mieszank mineralnych według wymagań drogowychi kolejowych przedstawiono na rys. 4.

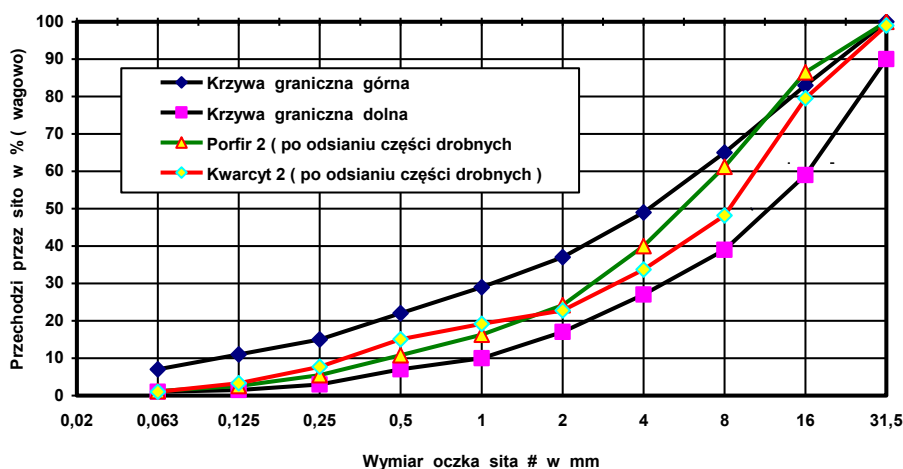
Przedstawione na rys. 4 krzywe graniczne wskazują, że wymagania dotyczące uziarnienia są podobne. Zalecane krzywe uziarnienia charakteryzują się ciągłością i stosunkowo dużą zawartością frakcji drobnych (< 0,063 mm). Mieszanki takie są łatwe w zagęszczaniu (dzięki częściom drobnym które stanowią swego rodzaju smar ułatwiający ułożenie ziaren grubszych). Jednakże ciągłość uziarnienia i związana z tym minimalna zawartość wolnej przestrzeni powoduje, że zagęszczone warstwy ochronne są słabo przepuszczalne i bardzo wrażliwe na zawilgocenie. Jest to szczególnie ważne w torowiskach kolejowych, gdzie warstwa ochronna narażona jest na stały dopływ wody poprzez bardzo przepuszczalną warstwę tłuczni. Bardzo często, w czasie pomiarów terenowych, obserwuje się drastyczny spadek nośności warstw stabilizowanych mechanicznie po opadach deszczu. Stan ten utrzymuje się przez długi okres czasu. Wzrost nośności warstwy może nastąpić dopiero po przesuszeniu materiału co nie jest łatwe szczególnie w okresie wiosny i jesieni przy zwiększonej liczbie opadów i dużej wilgotności powietrza.

W pracy [4] przedstawiono wyniki badań wpływu zawilgocenia warstw ochronnych na spadek ich nośności. Spadek modułów odkształcenia może dochodzić nawet do 50 – 60 %.

Jako główną przyczynę tego stanu można uznać uplastycznienie drobnych cząstek gruntu nadmierną ilością wody.



5. Krzywe uziarnienia mieszanek stabilizowanych mechanicznie



6. Krzywe uziarnienia mieszanek mineralnych po redukcji frakcji drobnych.

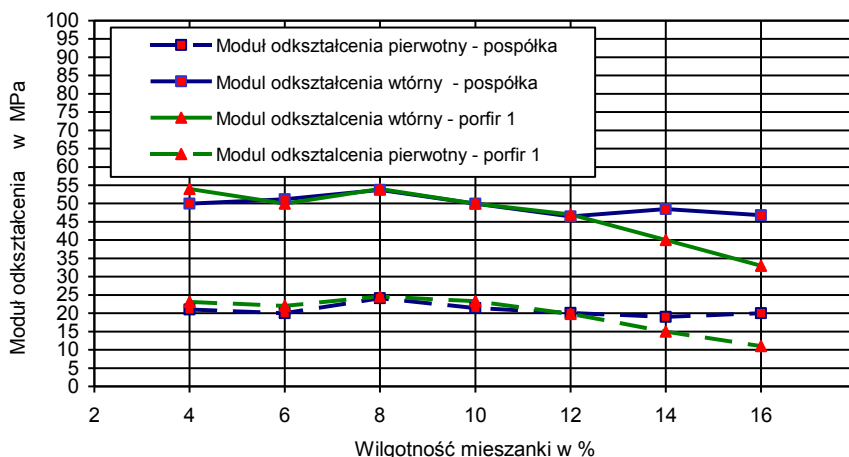
Wpływ wilgotności kruszywa na nośność warstw ochronnych

Badaniom wpływu wilgotności kruszywa na nośność warstw ochronnych stabilizowanych mechanicznie poddano trzy rodzaje kruszywa z których wszystkie spełniały podstawowe wymagania dla mieszanek

do warstw ochronnych (0/31,mm) podane w tabeli 1 i uziarnienia według wymagań drogowych i kolejowych. Badane kruszywa pochodziły z różnych rodzajów skał:

- kruszywo łamane kwarcytowe,
- kruszywo łamane porfirowe,
- kruszywo naturalne (pospółka)

Krzywe uziarnienia poszczególnych mieszanek kruszyw podano na rys. 5.



7. Wpływ wilgotności na moduły odkształcenia pospółki i mieszanki z kruszywa porfirowego

Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na próbkach zagęszczonych do gęstości według Proctora w cylindrze stalowym o pojemności 2,2dcm³.

Moduły odkształcenia (pierwotny i wtórny) oznaczono na próbkach o różnej wilgotności, na prasie dźwigniowej zadając obciążenia według schematu:

Obciążenie w I i II cyklu: 0,00; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 i 0,25 MPa

Odciążenie: 0,25; 0,15; 0,05 i 0,00 MPa

Moduły odkształcenia (E_o) obliczono z zakresu obciążenia 0,05 – 0,15 MPa z równania:

$$E_o = \frac{3 \Delta p}{4 \Delta s} \times D$$

gdzie:

D - średnica płyty obciążającej ($D = 5,0\text{cm}$),

Δp - zakres przyrostu obciążeń,

Δs - osiadanie płyty dla przyjętego zakresu obciążeń

Badania modułów odkształcenia poszczególnych mieszanek kruszyw przeprowadzono w zakresie wilgotności 4, 6, 8, 10, 12 i 14%. Oznaczano moduł przy pierwszym i drugim cyklu obciążenia.

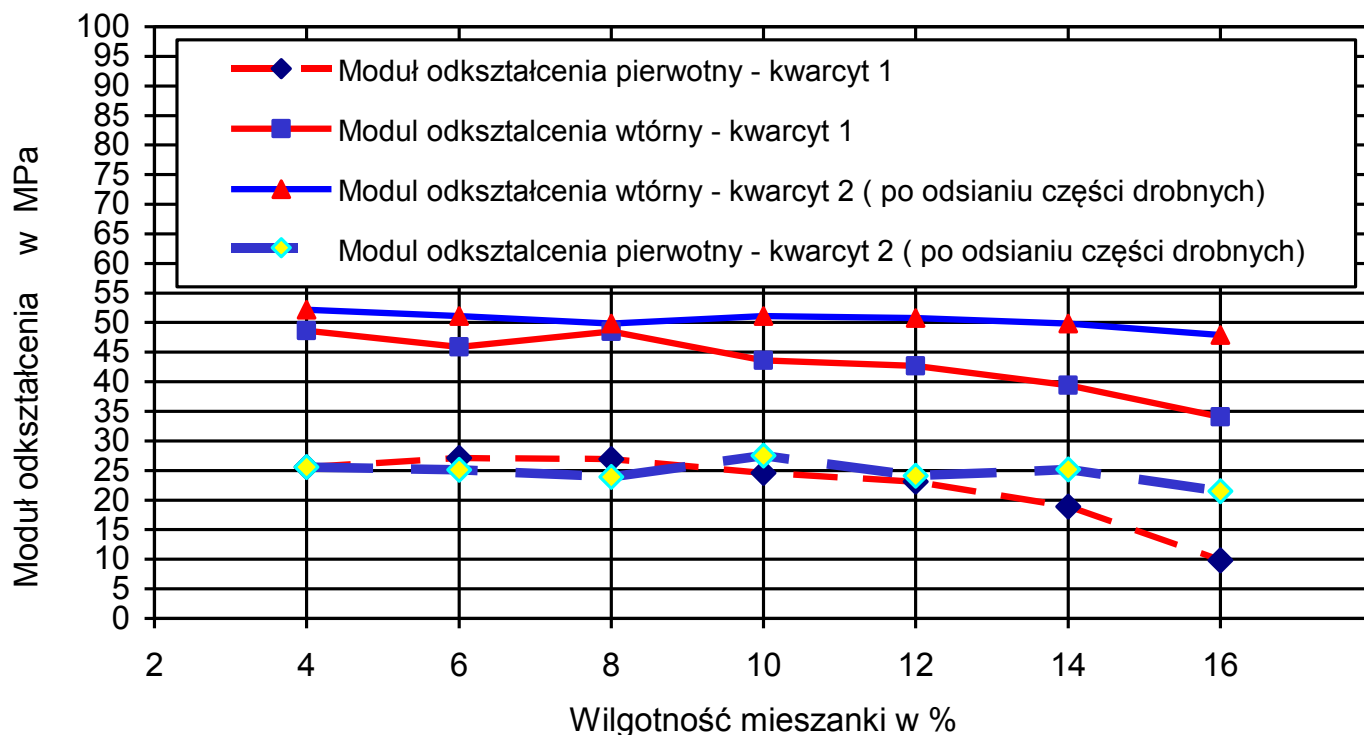
Następnie z tych samych próbek kruszywa (kwarcyt i porfir) użytych do badań przygotowano próbki laboratoryjne po odsianiu około 5% części drobnych (< 0,063mm) i powtórzono cykl badań modułów według poprzedniego schematu. Krzywe uziarnienia mieszanek po redukcji części frakcji drobnych przedstawiono na rys. 6.

Wyniki badań modułów odkształcenia dla poszczególnych rodzajów kruszyw przedstawiono na rys. 7, 8 i 9.

Podsumowanie

Przedstawione w referacie wyniki badań (rys. 7, 8 i 9) wskazują, że właściwie wszystkie badane kruszywa, z wyjątkiem kruszywa naturalnego (pospółka), są wrażliwe na nadmierne zawilgocenie. Objawia się to znacznym obniżeniem modułów odkształcenia (pierwotnego i wtórnego) po przekroczeniu pewnej granicy wilgotności (około 12%).

Spadek modułów odkształcenia dochodzić nawet do 50 – 60%. Jako główną przyczynę tego stanu można uznać uplastycznienie drobnych cząstek gruntu nadmierną ilością wody. Potwierdzają to wyniki badań modułów przeprowadzone na próbkach po odsianiu części frakcji drobnych kruszywa (rys 8 i 9). Całkowite pozabawienie części drobnych nie jest wskazane z uwagi na fakt, że te same części drobne zwiększają nośność warstwy w stanie suchymi zabezpieczając materiał przed roz-



8. Wpływ wilgotności na moduły odkształcenia mieszanki z kruszywa kwarcytowego

segregowaniem w wyniku dynamicznego oddziaływania kół taboru kolejowego na podtorze.

Wydaje się, że zawężenie zawartości frakcji drobnych (< 0,63mm) w kruszywie na warstwy ochronne dla budownictwa kolejowego do zakresu 1,0 do 3,0 % spowodowałoby częściowy przepływ wody w kruszywie (drenowanie) i znacznie zabezpieczyłoby warstwy ochronne przed utratą nośności w wyniku nadmiernego zawilgocenia.

Za takim rozwiązaniem przemawia również fakt, że szczelne (z dużą zawartością frakcji drobnych) warstwy ochronne są praktycznie nieprzepuszczalne (odcinają dopływ wody do niżej leżącego słabego podłoża) ale równocześnie części drobne

powodują kapilarne podciąganie wody z warstw niżej leżących.

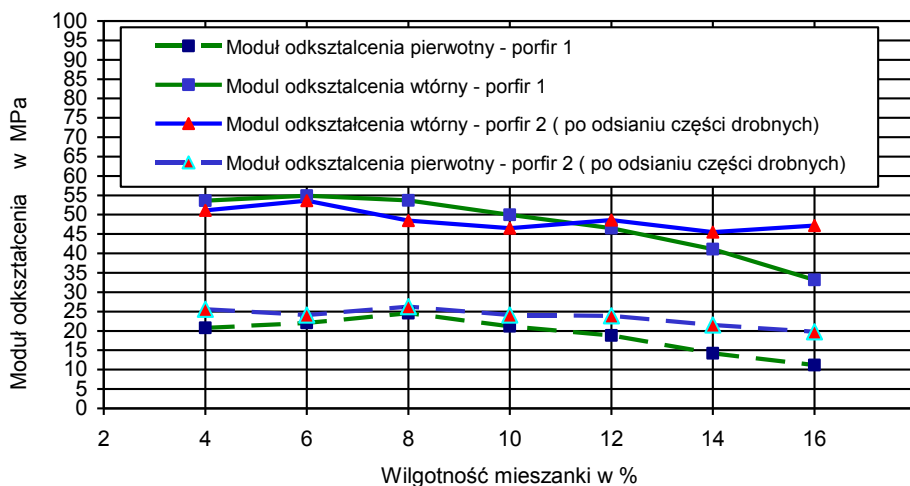
Jednym ze sposobów zabezpieczenia warstw ochronnych przed kapilarnym podciąganiem wody od podłoża jest stosowanie warstw odcinających z pospółek i piasków gruboziarnistych.

Z praktycznego punktu widzenia proponowane rozwiązania są proste jeśli chodzi o technologię wykonania i nie wymagają zmian w procesie projektowania i budowy.

Należałoby jednak wymusić na dostawcach kruszyw wydzielenia asortymentu kruszywa przeznaczonego dla warstw ochronnych na kolei o nieco innych parametrach w stosunku do tych jakie stosowane są w budownictwie drogowym. ◀

Literatura

- [1] PN-S-06102 ; 1997 Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie.
- [2] PN-S-02205; 1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne.
- [3] BN-64/8931-02 Drogi samochodowe. Oznaczanie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą
- [4] H. Koba, Nośność warstw z kruszywa stabilizowanego mechanicznie, III Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna Problemy Modernizacji i Naprawy podtorza kolejowego Wrocław – Żmigród 26-27 Października 2006, s. 49 – 57.
- [5] Richtlinien für die Standarisierung des Oberbaues von Verkkhrsfaalachen, RstO, 1986,
- [6] E. Skrzyński, R. Sikora; Kolejowe budowlę ziemne, Tom 1, Utrzymanie i naprawy WKiŁ, 1990
- [7] Z. Wiłun - Zarys geotechniki, WKiŁ, Warszawa



9. Wpływ wilgotności na moduły odkształcenia mieszanki kruszywa porfirowego.