

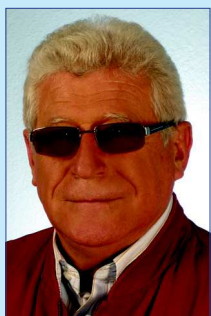
- po każdym procesie starzenia mieszanka MCR uzyskała lepsze wyniki odporności na pękanie niskotemperaturowe w badaniu *TSRST*; na uwagę zasługuje fakt, że największa przewaga występuje po starzeniu długoterminowym MCR L (3,5°C różnicy w odniesieniu do M L);
- w zakresie odporności na zmęczenie mieszanki w stanie oryginalnym charakteryzowały się zbliżoną wartością ϵ_6 , przy czym po starzeniu technologicznym i eksploatacyjnym istotnie wyższe wyniki uzyskiwała mieszanka MCR. W każdym przypadku spełnione zostały wymagania postawione w WT-2, tj. $\epsilon_6 \geq 130 \mu\text{m/m}$;
- porównanie wyników badania modułu zespolonego zależy od starzenia: w stanie oryginalnym mieszanka MCR charakteryzuje się większą wartością modułu sztywności i mniejszą lub porównywalną wartością kąta przesunięcia fazowego. W pozostałych stanach mieszanka z asfaltem 25/55-60 CR ma mniejszą sztywność, przy nieco większym udziale fazy sprężystej (mniejszy kąt przesunięcia fazowego).
- zastosowanie w mma asfaltu modyfikowanego 25/55-60 asfaltem modyfikowanym z dodatkiem gumy (25/55-60 CR) nie wpływa na zagęszczalność próbek z mma. W trakcie przygotowywania i zagęszczania próbek laboratoryjnych z mma nie odnotowano żadnych trudności, a w próbkach uzyskano zbliżoną zawartość wolnych przestrzeni;
- w badaniach odnotowano mniejszy wpływ starzenia krótkoterminowego *STOA* i długoterminowego *LTOA* na mieszankę z asfaltem 25/55-60 CR niż z asfaltem 25/55-60. Mieszanka MCR po starzeniu wykazuje korzystne właściwości (dobrą trwałość zmęczeniową, dobre właściwości niskotemperaturowe *TSRST*, korzystnie wyższy wskaźnik *ITSR* w stanie oryginalnym i po starzeniu *STOA*, a porównywalny po *LTOA*).

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań porównawczych asfaltów i mma można potwierdzić możliwości za-

stosowania asfaltu modyfikowanego z gumą 25/55-60 CR do betonu asfaltowego o wysokim module sztywności AC WMS z przeznaczeniem zarówno do warstwy wiążącej, jak i podbudowy. Mieszanka ta wykazała w badaniach dobrą odporność na odkształcenia trwałe, wysoką odporność na działanie wody, wysokie moduły sztywności przy korzystnie lepszych wynikach badań i analiz zmęczeniowych, dobre cechy niskotemperaturowe potwierdzone w badaniach *TSRST*. Badania starzeniowe potwierdziły również fakt zachowania dobrych cech mieszanki mineralno-asfaltowej z zastosowaniem asfaltu 25/55-60 CR po starzeniu krótkoterminowym *STOA* i długoterminowym *LTOA*.

Bibliografia

- [1] W. Bańkowski, M. Gajewski, D. Sybilski, *Analysis of fatigue damage on test sections submitted to HVS loading*, Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering, 8/2013
- [2] W. Bańkowski, D. Sybilski, *Prace badawcze laboratoryjne i w pełnej skali nad zastosowaniem betonu asfaltowego o wysokim module sztywności w nawierzchni drogowej*, Drogi i Mosty, nr 1-2/2011
- [3] WT-2 *Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania techniczne – 2010*, GDDKiA
- [4] PN-EN 12697-46 *Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 46: Pękanie niskotemperaturowe i właściwości w badaniach osiowego rozciągania*
- [5] W. Bańkowski, *Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metodą energii rozproszonej*, Studia i Materiały, Zeszyt 60, IBDiM 2008
- [6] D. Sybilski i in., *Opracowanie zaleceń stosowania asfaltów drogowych z uwzględnieniem warunków klimatycznych i obciążenia ruchem* Sprawozdanie TN183, listopad 1999, praca na zlecenie GDDP
- [7] D. Sybilski, K. Mirski, *Dobór asfaltu do nawierzchni w polskich warunkach klimatycznych z uwzględnieniem procedur SHRP/Superpave VI* Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce 9-10 maja 2000



KRZYSZTOF
GRADKOWSKI

Politechnika Warszawska
k.gradkowski@il.pw.edu.pl

Planarne zbrojenia podłoża nawierzchni drogowych

Ogólne zastosowanie geosyntetyków w budowie dróg lądowych, od ponad trzydziestu lat polega głównie na wykorzystaniu ich własności jako przegród separacyjnych i filtracyjnych. Właściwości geosyntetyków jako zbrojenia gruntu są wykorzystywane najczęściej w zakresie umac-

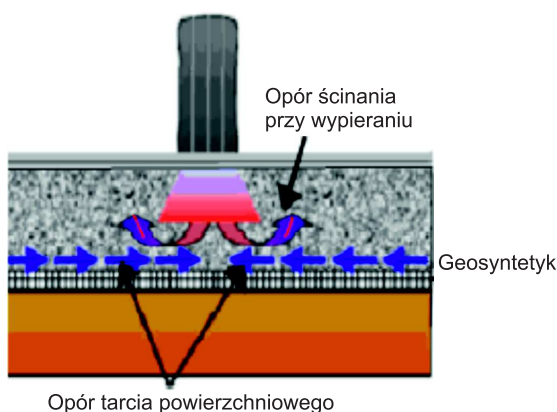
niania skarp budowli ziemnych. Jeżeli przez bezpieczne konstrukcje budowlane należy rozumieć tworzenie odpowiednio wytrzymałych struktur materiałowych zachowujących stany graniczne nośności i stateczności, to tym samym wymaganiom podlegają wielowarstwowe struktury podłoża i nawierzchni dróg lądowych. Pewne rezerwy konstrukcyjne tkwią w sposobie wzmacniania warstw gruntowych, składających się na układ nośny danej budowli ziemnej, poprzez

zbrojenie geosyntetykami tych warstw. Celem niniejszego opracowania jest ekspozycja sposobów uzyskiwania wyższej jakości nośności i wzmocnienia warstw gruntowych zbrojonych geosyntetykami. Artykuł został opracowany na podstawie selektywnego przeglądu badań i doświadczeń prowadzonych w różnych ośrodkach badawczych wymienionych w bibliografii [3] i dotyczących wyłącznie tej funkcji użytkowej samych geosyntetyków. Problem nośności podłoża nawierzchni dotyczy w równym stopniu dróg samochodowych, jak i dróg szynowych. W znaczeniu technologicznym, dotyczy bezpośredniej stateczności warstwy gruntu o przybliżonej grubości około 0,5 m, umiejscowionej bezpośrednio pod warstwami podbudowy nawierzchni drogi samochodowej. Zredukowana do minimum odkształcalność i podatność na odkształcenia podłoża gruntowego nawierzchni stanowi podstawowe wymaganie jakości tego podłoża.

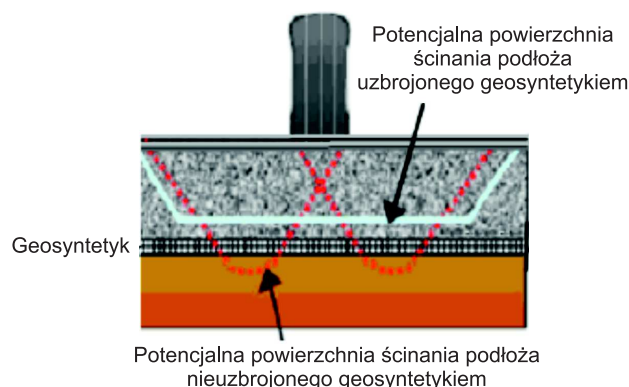
Efekty wzmocnienia przez planarny układ zbrojenia warstw gruntowych

Planarne formy zbrojenia gruntów polegają na rozmieszczeniu w warstwie gruntu płaszczyzny zbrojenia geosyntetycznego prostopadle do ciągłego i rozłożonego obciążenia użytkowego. Badania i doświadczenia pomiarów laboratoryjnych prowadzone w ostatnim dziesięcioleciu wykazują, że w istocie efekt zbrojenia, czyli wzmocnienia danej warstwy w popularnej formie geowłóknin i geosiatek o gramaturze 200 do 350 m² obejmuje warstwy gruntów piaszczystych o grubości od 6 do 9 cm [3]. Ograniczona grubość warstwy wpływu zbrojenia wynika z zanikającej podatności na odkształcenia pod wpływem obciążeń wraz ze wzrostem grubości. Podstawową funkcją zbrojenia w formie planarnego układu geosyntetyków w warstwach gruntu jest wzmocnienie gruntu z całkowitym pominięciem funkcji separacji warstw różnych gruntów i kruszyw oraz funkcji filtracji i spływu wód zawilgocenia podłoża. Skutek wzmocnienia warstwy gruntu, jako elementu zbrojonego systemu wielowarstwowego nawierzchni drogi, jest następstwem kilku zjawisk i mechanizmów występujących jednocześnie. Następuje pewna interferencja poszczególnych efektów zbrojenia co w rezultacie składa się na ewidentne wzmocnienie i mniejszą odkształcalność, zarówno warstwy zbrojonej gruntu, jak i całego, nośnego układu wielowarstwowego. Mechanizmy występowania poszczególnych efektów wzmocnienia były analizowane dotychczas w wielu publikacjach. Najnowsze specyfikacje w tym zakresie zawarte są w [2], [1]. W pierwszej kolejności wymienia się tam opór wypierania warstw oraz siły tarcia powstające na styku powierzchni geosyntetyku z gruntem, które zależą od składowych poziomych reakcji odporu gruntu. W ten sposób następuje pewien rodzaj mobilizacji sił spójności i tarcia, schematycznie przedstawiony na rys. 1.

Opór tarcia w mniejszym stopniu zależy od siły rozciągającej lub „wyciągającej” geosyntetyk w zakresie minimalnych przesunięć, a w większym stopniu od stanu zawilgocenia powierzchni geosyntetyku i uziarnienia zbrojonej warstwy gruntu podłoża. Można przyjąć, że dla tej samej grubości warstw gruntowych i wyłącznie pionowych obciążeń zakres oporu tarcia jest znacznie mniejszy w podłożach nawierzchni niż w geosyntetycznych zbrojeniach skarp budowli ziemnych. Innym mechanizmem efektu wzmocnienia poprzez zbrojenie geosyntetykiem jest wzrost nośności gruntu wynikający ze



Rys. 1. Schemat wywołania efektu oporu wypierania



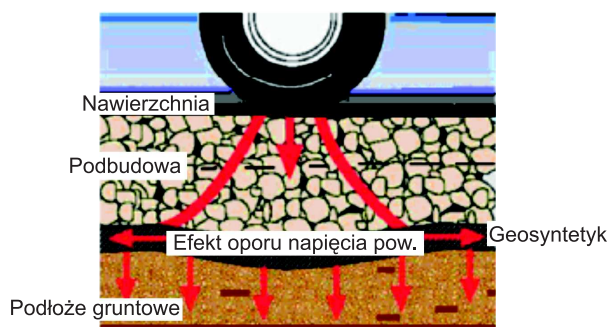
Rys. 2. Schemat powstawania efektu oporu ścinania ośrodka gruntowego

zwiększenia obciążeń granicznych wobec „zawartości” materiału *paraizotropowego* w strefie granicznego wyporu gruntu. Mechanizm tego efektu przedstawia rys. 2.

Pełny zakres oddziaływania mechanicznego geosyntetyku zbrojącego warstwę gruntu zawiera się również w jakości i sprężystości struktury samego produktu geosyntetycznego. Największymi zaletami odznaczają się geotekstyliia. Pewien niewielki zakres sił wewnętrznych wzmocnienia warstwy podłoża podlega redystrybucji w postaci napięcia powierzchniowego. W kilkunastu pracach, w tym w [1] określany jest jako „efekt membranowy” schematycznie przedstawiony na rys. 3.

Składowa poziomych sił reakcji płaszczyzny samego zbrojenia geosyntetycznego powoduje zwiększenie siły oporu tarcia. Efekt mechanizmu wzmocnienia gruntu jest bardziej widoczny w podłożach nawierzchni dróg nieutwardzonych. Funkcja zbrojenia geosyntetycznego i zakres wzmocnienia poprzez „efekt membranowy” przy większych deformacjach warstwy nawierzchniowej z kruszywa stają się wówczas wyraźniejsze.

W miarę rozwoju laboratoryjnych prac doświadczalnych i pomiarowych nad wzmacniającą funkcją geosyntetyków w warstwach gruntowych podjęto szereg obliczeń numerycznych różnych struktur modelowych. Od wielu lat wyniki obliczeń cyfrowych modeli analitycznych przedstawione są w publikacjach wymienianych w bibliografii [3]. Niezależnie od trudności w formalnym opisie rozdrobnionego ośrodka gruntowego, za skuteczne próby tworzenia adekwatnych modeli analitycznych odpowiadających układowi warstwy gruntu z planarną warstwą geosyntetyku, uważane są mody-



Rys. 3. Schemat występowania efektu membrany

fikacje złożenia modeli Kerra i Reissnera. Przy wszystkich uproszczeniach obliczeń odkształcenia powierzchni, oznaczonych jako w według schematu rys. 4 przedstawionych w [4], relatywnie miarodajne wyniki zostały uzyskane dla założeń przedstawionych niżej.



Rys. 4. Schemat zmodyfikowanego modelu Kerra Reissnera według [4]

$$k_u = \frac{4E}{H} \quad (1)$$

$$k_l = \frac{4E}{3H} \quad (2)$$

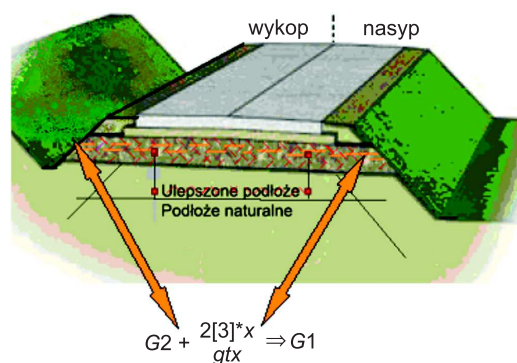
w którym:

- k_u – współczynnik sprężystości warstwy gruntu, kN/m^3 ,
- k_l – współczynnik sprężystości dolnej warstwy gruntu, kN/m^3 ,
- E – moduł Younga dla gruntu, (90500 kN/m^2 przy $\nu = 0,3$),
- H – grubość warstwy gruntu, m,
- T – stałe napięcie membrany geotekstylnej, kN/m .

Założenia takie wskazują na oczywisty wzrost sztywności gruntowej warstwy dolnej, położonej pod zastosowaną warstwą geosyntetyku. Za dyskusyjny jednak należy uznać wynik, w którym wzrost sztywności dolnej warstwy gruntu może być aż trzykrotny, wynikający z porównań wzorów (1) i (2). Weryfikacja pomiarowa tego założenia może być trudna, lecz jest możliwa za pomocą przybliżeń statystycznych w kontekście wielu pomiarów laboratoryjnych. W pracy [2] wzrost sztywności dolnej części gruntu warstwy zbrojonej szacowany jest jako około dwukrotny. Stan ten i taka kategoria założeń wynikających z fizycznego modelu „przewarstwienia” geosyntetykiem relatywnie cienkiej warstwy gruntu, bo około 20–30 cm, jest ważnym argumentem dla występującego wzmocnienia gruntów poprzez planarne ułożenie warstwy geosyntetyku (geotekstyliów), niezależnie od precyzyjnie ustalonego zakresu ilościowego wzrostu sztywności warstwy zbrojonej.

Rekomendacje sposobu zbrojenia warstw podłoża nawierzchni dróg samochodowych

Techniczne sposoby zastosowania zbrojenia podłoża nawierzchni geosyntetykami, zwłaszcza geotekstyliami, powinny uwzględniać regulacje zawarte w [5]. Konkretnie rozwiązania techniczne, za które odpowiada każdorazowo projektant drogi, powinny być pewne i bezpieczne. Warunki techniczne [5] wskazują na cztery grupy podłoża nawierzchni drogowej, a po wykonaniu różnych zabiegów technologicznych pożądaną grupą podłoża jest G1. Cel taki można osiągnąć używając odpowiednich ilości cementu do ulepszenia podłoża gruntowego. Podane w rozdziałach poprzednich mechanizmy wywołujące efekty wzmocnienia warstw podłoża gruntowych geotekstyliami przemawiają za słusznością zastosowania rozwiązań według schematu rys. 5.



Rys. 5. Ideogram technicznego zastosowania planarnego zbrojenia podłoża nawierzchni drogi (*) w zależności od właściwości gruntu; gtx – warstwa geotekstyliów)

Zastosowanie geotekstyliów do zbrojenia podłoża gruntowych nawierzchni może zatem być substytutem zastosowania cementu do ulepszenia i wzmocnienia warstw gruntu oraz warstw kruszyw. W przypadku kruszyw, skuteczniejszym elementem zbrojącym są oczywiście geosiatki.

Wnioski

Postulowana konstrukcja podłoża nawierzchni zbrojona geosyntetykami jest uzasadniona zarówno wynikami pomiarów laboratoryjnych, jak i obliczeniami wielu modyfikowanych modeli analitycznych. Stosowanie geosyntetyków jako elementu zbrojącego warstwy gruntu lub kruszywa (sortowanego lub niesortowanego), nie eliminuje ich filtrujących i separacyjnych właściwości. Układ podłoża gruntowego złożony z wielu warstw zbrojenia bądź złożony z kilku warstw zbrojonych geosyntetykiem będzie z całą pewnością stateczniejszy, a w skrajnych przypadkach „przesztywniony”. Cały, wielowarstwowy układ nawierzchni drogi samochodowej, poprzez zastosowanie geosyntetyków jako zbrojenia staje się mocniejszy i stabilniejszy. Przydatność takiej technologii budowy gruntowych podłoża nawierzchni dróg zbrojonych planarnie może prowadzić również do redukcji kosztów realizacji górnych warstw budowli ziemnej. Porównawczy poziom redukcji kosztów będzie zależny od skali ilościowej użytych materiałów geotekstylnych i gruntowych, przewidywanej ilości cementu, który mógłby być zużyty.

Bibliografia

- [1] B. R. Christofer: *Geogrids in roadway and pavement systems*. Geosynthetics Engineering, August 2008
- [2] A. Dewangana, D.P. Gupta, R. K. Bakshia and R. K. Manchiryala: *The significance of geotextile in unpaved roads with special reference to stress analysis*. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.3, No.1, March 2013, s.168-178
- [3] K. Gradkowski: *Badania gruntowych podłoża nawierzchni zbrojonych geosyntetykami*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, z.156, Warszawa 2013
- [4] J. S. Horvath, R. J. Colasanti: *New hybrid subgrade model for soil-structure interaction analysis: foundation and geosynthetics applications*. ASCE Geo-Institute/IFAI/GMA/NAGS Geo-Frontiers 2011 Dallas, Texas, U.S.A., March 2011
- [5] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 43, poz. 430).