

Projektowanie wzmocnień podtorza według jego właściwości

Michał Pawłowski, Łucjan Siewczyński

W referacie przedstawione są dwa główne sposoby obliczania wzmocnień górnej strefy podtorza stosowane w PKP. Omówiono sposoby określania parametrów geotechnicznych gruntów podtorza do projektów wzmocnień. Podano przykłady opracowania wykresów zależności grubości warstwy ochronnej od właściwości gruntów w podtorzu. Na podstawie analizy dopuszczalnych obciążeń gruntów i obciążeń od nawierzchni omówiono przydatność podtorza do budowy warstw ochronnych.



dr inż.
Michał Pawłowski,
Zakład Budowy Mostów i
Dróg Kolejowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań
michal.pawlowski@put.
poznan.pl



dr hab. inż. prof. nadzw. P.P.
Łucjan Siewczyński
Zakład Budowy Mostów
i Dróg Kolejowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 5
60-965 Poznań
lucjan.siewczyński@put.
poznan.pl

Wstęp

Naprawy górnej strefy podtorza gruntowego przeprowadzane są w ramach rekonstrukcji lub modernizacji, punktowo lub na całej długości w celu usunięcia miejscowych jego uszkodzeń spowodowanych eksploatacją drogi kolejowej i działaniem czynników przyrodniczych. Proces ulepszania stanu magistralnych i pierwszorzędnych dróg PKP do wymagań kolei europejskich obejmuje dostosowywanie ich do dużych prędkości pociągów i zwiększonych przewozów nie tylko w zakresie nawierzchni, ale także podtorza, a szczególnie jego górnej części pod torowiskiem i odbywa się z uwzględnieniem podstawowych kryteriów jego stateczności i trwałości; pozwalają one osiągnąć odpowiednią współpracę podtorza z nawierzchnią kolejową (odkształcenia podtorza mniejsze niż dopuszczalne) [1, 4].

Podstawą napraw miejscowych lub ciągłych podtorza powinny być wyniki badań geotechnicznych, przeprowadzanych dla wyjaśnienia warunków gruntowo-wodnych, z określeniem rodzajów gruntów oraz podstawowych właściwości fizycznych

i mechanicznych, metodami polowymi i laboratoryjnymi [1, 5], z uwzględnieniem próbnych obciążeń torowiska płytą sztywną [4], a ostatnio także z uwzględnieniem badań metodami pośrednimi (radarowymi); ponieważ wytrzymałość i przydatność nawierzchni do eksploatacji zależy także od odkształcalności gruntów podtorza i ich wytrzymałości na obciążenia; najwytrzymalsza nawierzchnia szybko będzie nieprzydatna do ruchu pociągów, jeżeli zostanie zbudowana na mało wytrzymałym lub źle zbudowanym podtorzu.

W naprawach modernizacyjnych oraz w miejscowych przebudowach podtorza, jeśli nie wykazuje ono ogólnej niestateczności i nie następuje zmiana trasy w profilu lub w planie, głównie wzmacniana jest górna strefa podtorza pod torowiskiem, przez wbudowanie warstwy ochronnej. Dotychczasowa górna strefa podtorza zostaje zastąpiona nową konstrukcją, którą tworzą subwarstwy z materiałów ziarnistych naturalnych (grunty niespoiste) lub z kamienia łamanego (niesorty, grysy, kłińce), w razie potrzeby zawierające geokompozyty (geowłókniny, geotkaniny, geosiatki, geokraty przestrzenne). Warstwy ochronne budowane są na stosownie przygotowanych gruntach podtorza lub podłoża. W licznych przypadkach przygotowanie to polega na zastosowaniu stabilizacji gruntów spoiwami budowlanymi (wapnem lub cementem albo mieszaniną tych spoiw).

Stabilizacja spoiwami gruntów pod torowiskiem może być zabiegiem przewidywanym w projekcie modernizacji górnej strefy podtorza, lub też może być zabiegiem dodatkowym do zastosowania na budowie przeprowadzanej w gorszych warunkach geotechnicznych, niż przewidywane na podstawie badań podtorza i projektu [8]. W obu przypadkach stabilizacja stosowana jest głównie jeżeli:

- parametry geotechniczne gruntów pod warstwą przyjmują małe wartości,
- występuje brak możliwości uzyskania właściwego zagęszczenia gruntów spoistych pod warstwą,

- istnieje potrzeba zmniejszenia grubości warstwy ochronnej, np. z powodu systemu odwodnienia podtorza,
- do budowy warstwy będą zastosowane gorsze materiały bez możliwości wzmocnienia geokompozytami.

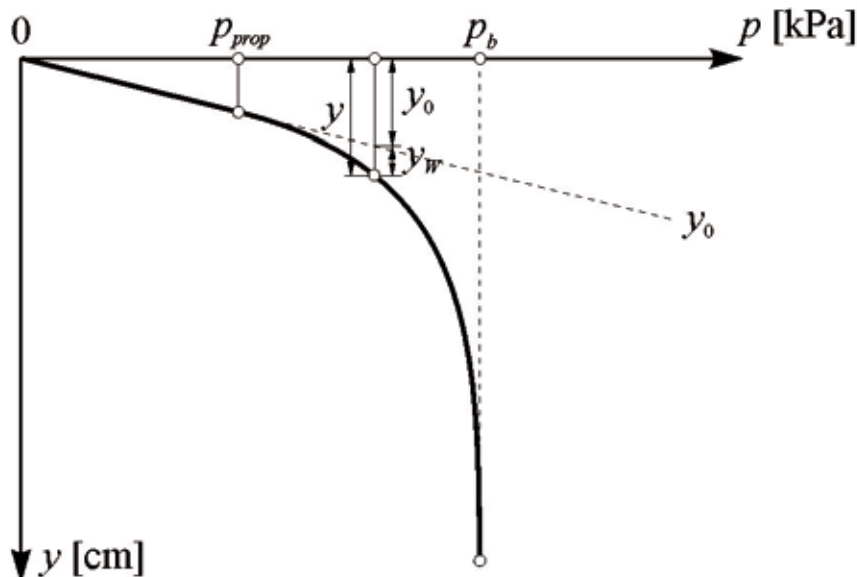
Stabilizacja gruntów pod warstwą ochronną jest chętnie stosowana przez wykonawców robót podtorzowych i zalecana jest przez nadzór techniczny, gdy podczas trwania budowy okazuje się, że warstwa ochronna według projektu jest konstrukcją niewystarczającą dla warunków gruntowych stwierdzonych po wykonaniu robót ziemnych dla przygotowania powierzchni posadowienia warstwy. Przypadki takie występują, gdy nastąpi zawilgocenie gruntów wskutek warunków klimatycznych (deszcz, płytkie przemarznięcie podtorza), lub gdy badania do projektu przeprowadzono w okresie nie miarodajnym dla stanu podtorza (podczas lata, w czasie suszy).

Konkurencyjnymi sposobami przeprowadzenia robót wbudowania warstwy ochronnej w przypadku trudnych warunków geotechnicznych w podtorzu, gorszych od przewidywanych w projekcie, mogą być:

- skuteczne odwodnienie podtorza,
- zwiększenie grubości warstwy ochronnej,
- stosowanie lepszego materiału do budowy warstwy,
- stosowanie wzmocnienia warstwy geokompozytami,
- stabilizacja spoiwami gruntów pod warstwą.

Projektowanie grubości warstwy ochronnej

Jednym z warunków odpowiedniego stanu nawierzchni kolejowej jest taka jej konstrukcja, aby naciski przekazywane przez nią na torowisko były dostosowane do nośności podtorza, która zależy od mechanicznych parametrów gruntów budujących podtorze. Uwzględniając znaną wielkość obciążeń taborem oraz konstrukcję ramy toru, przystosowanie nacisków nawierzchni do nośności podtorza obecnie realizuje się przez projektowanie grubości warstw pośredniczących



1. Wykres nieliniowej zależności osiadań od nacisków [12]

w przekazywaniu obciążeń od podkładów na podtorze, stosownie do tej nośności.

Według polskich przepisów kolejowych [1] projektowanie grubości warstw może być przeprowadzane na dwa sposoby, albo z uwzględnieniem nacisków dopuszczalnych na grunty podtorza, albo z uwzględnieniem minimalnych wartości modułu odkształcenia podtorza mierzonego na torowisku.

W sposobie projektowania według nacisków dopuszczalnych na torowisko polepszenie współpracy podtorza i nawierzchni otrzymuje się nie dopuszczając do nacisków

podsyпки większych od nacisków proporcjonalnych (rys. 1):

$$p_{dop} \leq p_{prop} \quad (1)$$

W ten sposób unika się nadmiernych trwałych odkształceń podtorza wskutek uplastycznienia i wypierania gruntu spod nawierzchni. W praktyce do wyznaczania obciążeń dopuszczalnych na grunty stosowane są wzory znane z mechaniki gruntów. Obciążenie dopuszczalne przyjmowane jest jako obciążenie krytyczne ($p_{dop} \leq p_{kr}$) czyli jako największe możliwe obciążenie nie wywołujące uplastycznienia gruntu w żadnym punkcie podtorza, lub jako obciążenie gra-

niczne z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa $n=1,5 \div 3,0$ ($p_{dop} = p_{gr} / n$).

Do wyznaczenia obciążeń dopuszczalnych torowiska potrzebna jest znajomość dwóch parametrów mechanicznych gruntu - kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Projektowanie nawierzchni musi więc być poprzedzone badaniami polowymi i laboratoryjnymi. W badaniach należy uwzględnić, że obydwa parametry zależne są od właściwości fizycznych gruntów, co ma wpływ na wybór odpowiedniej pory roku do badań [7].

Sposób ten wymaga pobrania i transportu do laboratorium próbek gruntów o nienaruszonej strukturze, a badania wykonywane są zwykłymi metodami bez uwzględnienia warunków w jakich pracuje podtorze; wpływają one na zmniejszenie parametrów gruntów.

W praktyce do projektowania grubości warstw sporządzone są nomogramy [1].

W sposobie projektowania na podstawie wartości minimalnego modułu odkształcenia, układ subwarstw warstwy ochronnej posiada moduły odkształcenia stopniowo malejące od dużego modułu wierzchniej warstwy, do najmniejszego modułu gruntu w podtorzu (rys. 2).

W obliczeniach wykorzystuje się metodę warstwy zastępczej (ekwiwalentnej). Projektowanie warstwy ochronnej polega na zastąpieniu poszczególnych subwarstw warstwy ochronnej na podtorzu, ekwiwalentną warstwą gruntu o takiej grubości, ażeby naprężenia pod warstwą ochronną były takie same. Moduły odkształcenia subwarstw układu zastępuje się ekwiwalentnym modułem jednorodnego ośrodka, który wykazuje takie same osiadanie jak układ subwarstw. Moduł ekwiwalentny powinien spełniać warunek:

$$E_e \geq E_{min} = E_{proj} \quad (2)$$

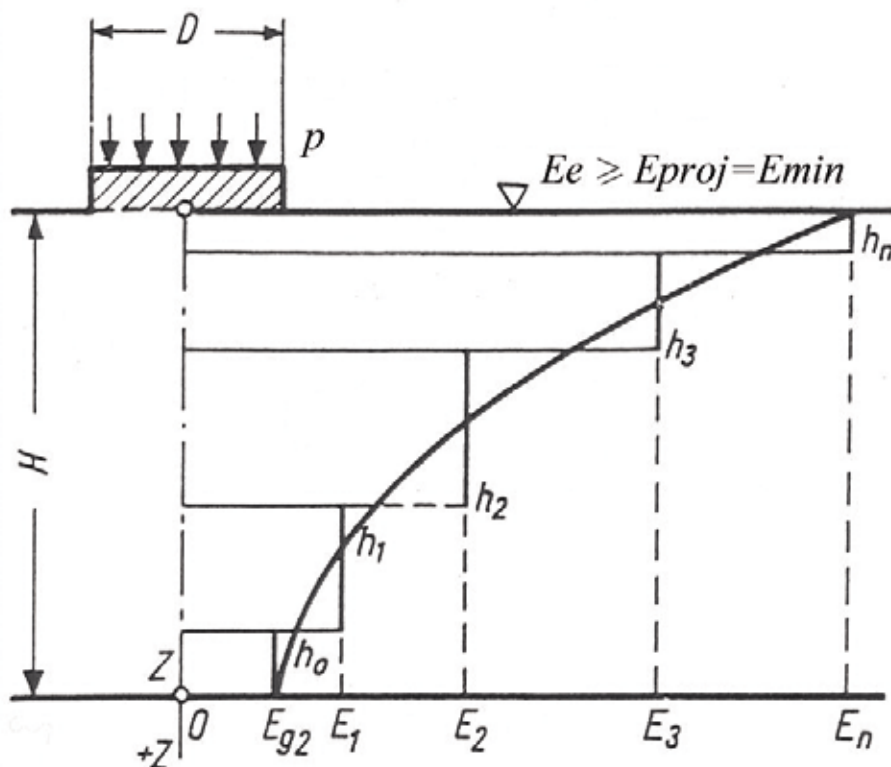
Dla określenia ekwiwalentnego modułu odkształcenia pojedynczej warstwy ochronnej, ułożonej na jednorodnym gruncie, stosuje się równanie [12]:

$$E_e = \frac{E_{g2}}{1 - \frac{2}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{E_1}{E_{g2}} \right)^{1.4}} \right) \cdot \arctg \left(\frac{h}{D} \cdot \left(\frac{E_1}{E_{g2}} \right)^{0.4} \right)} \quad (3)$$

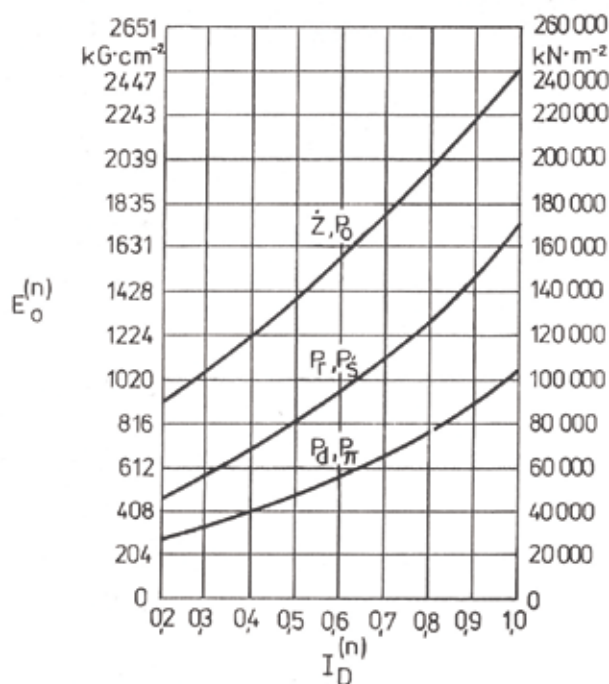
Dla praktycznych zastosowań sporządzony jest nomogram, stosowany do projektowania nawierzchni dróg samochodowych i warstw ochronnych podtorza [3]:

$$\frac{E_e}{E_1} = f \left(\frac{E_{g2}}{E_1}, \frac{h}{D} \right) \quad (4)$$

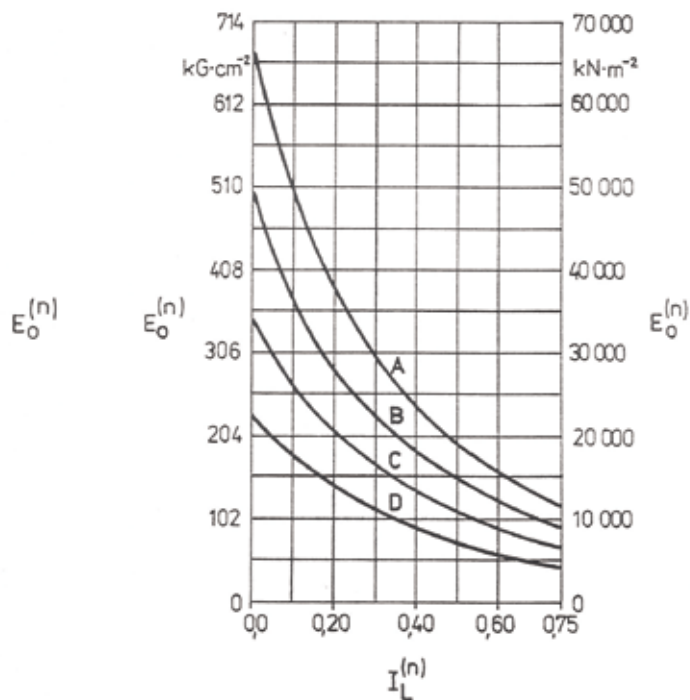
gdzie: E_1 - moduł odkształcenia warstwy leżącej na podtorzu gruntowym, E_{g2} - moduł odkształcenia gruntu w podtorzu, h - gru-



2. Schemat układu warstw do metody warstwy ekwiwalentnej [12]



3. Wykres zależności wartości modułów odkształcenia ogólnego od stopnia zagęszczenia gruntów niespoistych [3]



4. Wykres zależności wartości modułów odkształcenia ogólnego od stopnia plastyczności gruntów spoistych (A – grunty spoiste, morenowe, skonsolidowane, B – inne grunty spoiste skonsolidowane i grunty spoiste morenowe nieskonsolidowane, C – inne grunty spoiste nieskonsolidowane, D – iły niezależnie od ich genezy) [3]

bość warstwy, D – średnica płyty pomiarowej [m]

Sposób oparty na określaniu naprężenia dopuszczalnego przydatny jest tylko do wyznaczania potrzebnej grubości warstw z materiałów ziarnistych. Metoda modułu ekwiwalentnego może mieć zastosowanie do prawie wszystkich systemów wzmacniania podtorza dróg kolejowych.

Badanie parametrów geotechnicznych podtorza

Polowe badania geotechniczne podtorza są głównym i najważniejszym źródłem wartości parametrów gruntów potrzebnych w procesie modernizacji. Wartości te pochodzą bezpośrednio z prac terenowych lub też są osiągane na podstawie badań laboratoryjnych różnego rodzaju próbek gruntów pobranych z podtorza podczas tych prac.

W badaniach laboratoryjnych określone są podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów umożliwiające ich identyfikację, i podjęcie decyzji technicznych oraz, uogólniając osiągnięcia mechaniki gruntów, opracowanie zależności między właściwościami jako uzupełnienie lub weryfikacja zależności teoretycznych. Zależności te umożliwiają rozpoznawanie (określanie) wartości parametrów za pomocą rozpoznanych wartości innych parametrów. Taka pośrednia metoda może być stosowana w celu określenia wartości modułów wtórnego

odkształcenia podtorza gruntowego. W tym przypadku znajdują zastosowanie zależności między stopniem plastyczności (I_L) gruntów spoistych i wartościami modułu E_0 oraz zależności między stopniem zagęszczenia (I_D) gruntów niespoistych i wartościami modułu E_0 . Wartości modułu wtórnego odkształcenia oblicza się na podstawie wartości modułu pierwotnego odkształcenia podanych w normie [3], z wykorzystaniem związków między tymi modułami:

$$E_{g2}^{(n)} = \frac{1}{\beta} \cdot E_0^{(n)} \quad (5)$$

gdzie: $E_{g2}^{(n)}$ - wartości modułu odkształcenia wtórnego, $E_0^{(n)}$ - normowe wartości modułu odkształcenia pierwotnego (ogólnego), β - wskaźnik skonsolidowania

Wartości wskaźnika skonsolidowania dla poszczególnych gruntów niespoistych wynoszą od 1,0 (żwir) do 0,80 (piasek pylasty) i podobnie dla gruntów spoistych zależnie od ich genezy oraz stopnia skonsolidowania wynoszą od 0,90 do 0,60.

Na rysunku 3 przedstawione są wykresy zależności $E_0^{(n)} = f(I_D)$ dla głównych rodzajów gruntów niespoistych. Podobnie na rysunku 4 zaprezentowane wykresy zależności $E_0^{(n)} = f(I_L)$ odpowiadają czterem grupom A, B, C i D gruntów spoistych wydzielonych na podstawie ich genezy oraz stopnia skonsolidowania.

W celu wyznaczenia wartości modułu należy przeprowadzić miejscowe geotechnicz-

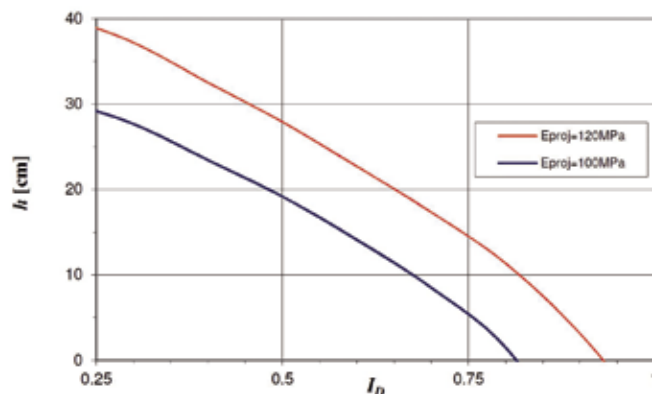
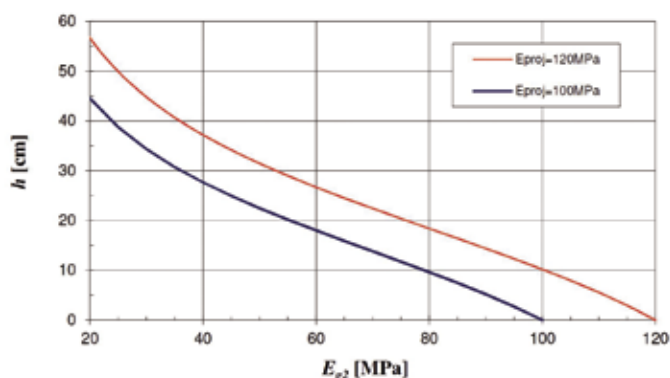
ne badanie i określić rodzaje gruntów, ich układ oraz stan (I_L ; I_D). Taki sposób określenia wartości modułu może być zastosowany dla uzupełnienia zbioru wyników z badań polowych płytą VSS i uwzględnienia wartości z miejsc o rozpoznanej budowie geotechnicznej, w których nie przeprowadzono próbnych obciążeń płytą, a nawet może być jedynym źródłem wartości modułów gruntów podtorza geotechnicznie rozpoznanego, dla którego nie przeprowadzono badań odkształcalności, np. na całej długości szlaku. Przy zastosowaniu wartości modułu z wykresu można także kontrolować ogólną poprawność wyników z polowych badań płytą.

Projektowanie z zastosowaniem wykresów

Projektowanie grubości warstw ochronnych odcinków linii kolejowych, z wykorzystaniem nomogramów dla układu dwuwarstwowego jest czasochłonne i wymaga dużej dokładności odczytu wartości z wykresów.

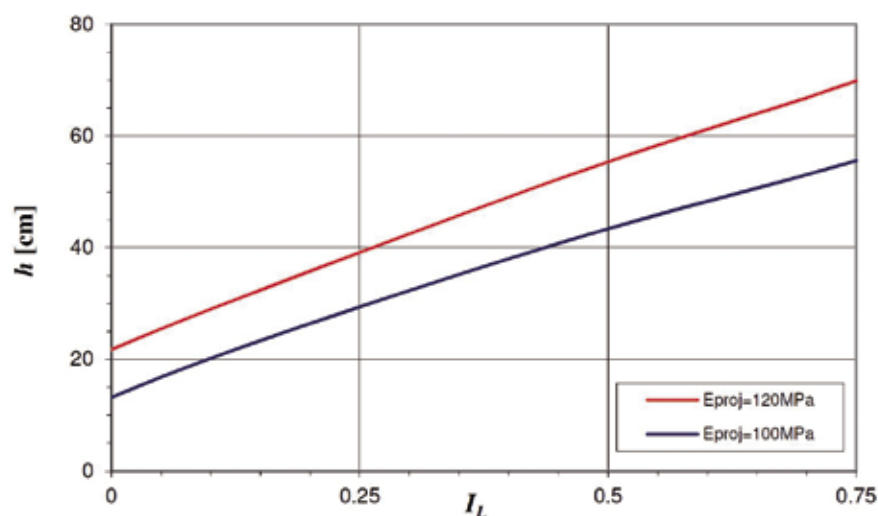
W celu usprawnienia procesu wyznaczania grubości warstw zależność (3), na podstawie której został sporządzony nomogram, można przekształcić i zapisać w postaci:

$$h = -g \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{E_1}{E_{g2}} \right)^{1,4} \cdot \frac{E_{g2} - E_c}{E_c \cdot \left(\left(\frac{E_1}{E_{g2}} \right)^{1,4} - 1 \right)} \right] \cdot \frac{D}{\left(\frac{E_1}{E_{g2}} \right)^{0,4}} \quad (6)$$



5. Wykres zależności grubości pojedynczej warstwy ochronnej z materiału o module sprężystości 200MPa od modułu odkształcenia podłoża

6. Wykres zależności grubości pojedynczej warstwy ochronnej, z materiału o module sprężystości 200MPa, od stopnia zagęszczenia (piasek drobny lub pylasty)



7. Wykres zależności grubości pojedynczej warstwy ochronnej, z materiału o module sprężystości 200MPa, od stopnia plastyczności spoistego, morenowego, skonsolidowanego gruntu podłoża (A)

Podstawiając do powyższego wzoru znane wartości modułu sprężystości projektowanej warstwy ochronnej E_v , projektowaną wartość modułu odkształcenia podtorza E_e (np. 100 i 120MPa) oraz średnicę płyty pomiarowej D , można sporządzić wykres zależności $h = f(E_g)$ (rys. 5).

W czasie opracowywania wzmocnień podtorza często zdarza się, że projektant nie dysponuje wartościami modułów wtórnego odkształcenia podtorza. Wówczas wartości modułów odkształcenia określa się na podstawie stopnia zagęszczenia I_D lub stopnia plastyczności I_L z zależności normowych, po wykonaniu badań geotechnicznych.

Stosując równanie (6) oraz znane zależności $E_0^{(n)} = f(I_D)$ (rys. 3) oraz $E_0^{(n)} = f(I_L)$ (rys. 4) można opracować wykresy zależności $h = f(I_D)$ (rys. 6) oraz $h = f(I_L)$ (rys. 7).

Przedstawiony na przykładach sposób opracowania zależności grubości warstwy ochronnej w funkcji modułu wtórnego odkształcenia podtorza (rys. 5), na którym jest projektowana, a także zależność grubości

warstwy ochronnej od stopnia zagęszczenia piasków (rys. 6.) i od stopnia plastyczności gliny morenowej (rys. 7.), może być zastosowany do sporządzenia pełnego zestawu wykresów zależności grubości warstw ochronnych pojedynczych i podwójnych z najczęściej stosowanych materiałów, na podtorzu z gruntów niespoistych i spoistych o stanach zróżnicowanych dla różnych wartości E_{proj} . Wykresy znacznie uprościłyby proces badań płytą VSS, która powinna być ustawiana na głębokości stosownej do spodziewanej grubości warstwy ochronnej i uprościłyby proces projektowania warstw ochronnych.

Ogólna analiza warunków w podtorzu do stabilizacji

Ogólną przybliżoną analizę warunków geotechnicznych w podtorzu przeznaczonym do wzmocnienia przez zastosowanie stabilizacji spoiwami budowlanymi przeprowadzono przy zastosowaniu parametrów wytrzymałości i odkształcalności gruntów.

Na rysunku 8 przedstawione są wykresy

zależności obciążeń dopuszczalnych torowiska (gruntów podtorza) od stopnia plastyczności (I_L) według wzoru Prandtl'a:

(7)

gdzie: n – współczynnik pewności, φ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu, c – spójność gruntu

Uwzględniono współczynnik pewności $n = 3$ ze względu na dynamiczny charakter obciążeń pojazdami.

Z rozkładu obciążeń w podłożu podkładu wynika, że w przypadku nawierzchni typu ciężkiego pod warstwą podsypki tłuczniowej grubości 30–35 cm nacisk na torowisko będzie od około 9 N/cm² do 13 N/cm² [6,9]. Pozwala to na wykreślenie linii poziomej „a” na rysunku 8, której nie przekroczą naciski na torowisko. Odcina ona grunty o nośności na tyle dużej, że warstwa ochronna nie jest potrzebna ze względu na wytrzymałość gruntów podtorza (rys. 8, przedział „1”). W podobny sposób przyjmując z nomogramów, że poniżej głębokości około 1,0 m od podstawy podkładu, a nawet od głębokości 0,8 m, dalsze zmniejszanie się nacisku podsypki jest bardzo małe, a koszt wbudowania warstwy ochronnej jest znaczny, otrzymuje się nacisk na kontakcie podsypka – podtorze około 5 N/cm². Na rysunku 8 można zatem zaznaczyć drugą linię poziomą „b”, poniżej której efekt wbudowania warstwy ochronnej jest nieopłacalny. Odcina ona grunty, które nie powinny być w podtorzu (rys. 8, przedział „3”). W ten sposób otrzymuje się dość wąski przedział celowości stosowania warstw ochronnych podtorza (rys. 8, przedział „2”). Linie „a” i „b” na rysunku 8 wyznaczają zatem graniczne parametry geotechniczne gruntów spoistych w trzech przedziałach ich przydatności do budowy podtorza, w strefie torowiska: grunty w podtorzu nie wymagające warstw ochronnych ze względu na swą nośność (rys. 8, przedział „1”), grunty wymagające zastosowania warstw ochronnych (rys. 8, przedział „2”), a także grunty, które wymagają zastosowa-

Tabela 1. Stosowanie warstwy ochronnej ze względu na właściwości gruntów podtorza

Podział gruntów	Podtorze		
	bez warstwy ochronnej	z warstwą ochronną	stabilizowane z warstwą ochronną
A	< 0,42	0,42 – 0,84	-
B	< 0,23	0,65 – 0,23	> 0,65
C	-	0,25 – 0,00	> 0,25
D	< 0,23	0,23 – 0,75	-

nia warstwy ochronnej oraz dodatkowego wzmocnienia, np. stabilizacji (rys. 8, przedział „3”). Analiza dotyczy warstw ochronnych bez wzmocnienia geokompozytami, z pominięciem konieczności osiągnięcia wymaganego wskaźnika zagęszczenia gruntu pod warstwą. Przedziały parametrów geotechnicznych kwalifikujących grunty spoiste według ich przydatności do budowy podtorza zestawiono w tabelicy 1.

Podobnie można także rozpatrywać grunty spoiste w podtorzu jako podłoże warstwy ochronnej, w ich stanach określonych wartościami modułów wtórnych odkształcenia podtorza. Uwzględniając zależność między wartościami modułów wtórnego i pierwotnego odkształcenia według zależności (5) można określić relację modułów wtórnego odkształcenia od stanów gruntów określonych stopniem plastyczności i stanów gruntów podzielonych na cztery grupy z uwzględnieniem ich genezy (rys. 9) [2].

W praktyce projektowania i wykonawstwa warstw ochronnych przyjmuje się, że

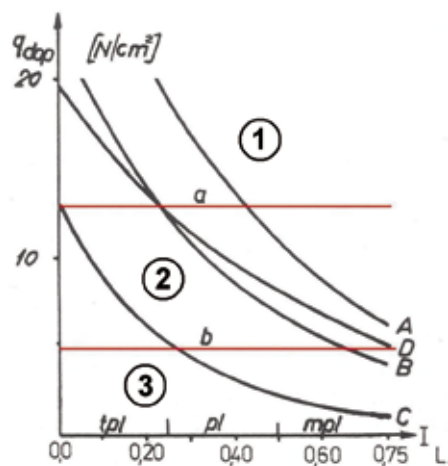
podtorze charakteryzujące się modułem odkształcenia wtórnego o wartości 10 MPa, a według niektórych realizacji nawet 20 MPa, nie stanowi wystarczająco dobrego podłoża dla prawidłowej pracy konstrukcji. Wspomniane wartości wtórnych modułów odkształcenia podtorza (10 i 20 MPa) oznaczono na rysunku 9, sporządzonym na podstawie normowych zależności modułów odkształcenia, poziomymi liniami (odpowiednio „a” oraz „b”). Grunty charakteryzujące się wartościami modułów mniejszymi od tak oznaczonych (przyjętych), powinny być poddane stabilizacji przed zbudowaniem warstwy ochronnej.

Wnioski

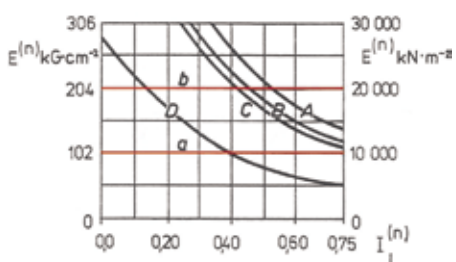
1. Stosowanie modułów minimalnych i metody warstwy podwójnej w projektowaniu wzmocnień pozwala uwzględniać realne warunki geotechniczne w podtorzu.
2. W projektowaniu wzmocnień podtorza należy stosować przede wszystkim parametry geotechniczne z badań polowych, uzupełniając ich zbiór wynikami badań laboratoryjnych i normowych.
3. Dla praktycznych zastosowań można opracować wykresy upraszczające proces projektowania wzmocnień (warstw ochronnych).
4. Stabilizacja gruntów podtorza pod warstwą ochronną była dotychczas stosowana głównie w celu pokonania skutków rozbieżności między warunkami geotechnicznymi przyjmowanymi w projektach podtorza i warunkami rzeczywistymi stwierdzonymi podczas wykonywania warstwy.
5. Stabilizowane spoiwami grunty podtorza mogłyby być projektowym elementem warstwy ochronnej, szczególnie gdy stan gruntów pod warstwą nie pozwala na osiągnięcie wymaganego wskaźnika zagęszczenia.
6. Doraźnych (poza projektem) stabilizacji gruntów podtorza pod warstwą ochronną można uniknąć przez stosowanie dobrze zaplanowanych badań geotechnicznych podtorza. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Id-3. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2009r.
- [2] Kostrzewski W.: Parametry geotechniczne gruntów budowlanych oraz metody ich oznaczania. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998r.
- [3] PN-81/B-03020 Grunty budowlane – Posadzenie bezpośrednie budowli – Obliczenia statyczne i projektowanie. PKN, Warszawa 1981r.
- [4] Siewczyński Ł.: Analiza współpracy płyty VSS z podtorzem gruntowym. Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy modernizacji i naprawy podtorza kolejowego” Wrocław-Żmigród 2000r., str. 111-115.
- [5] Siewczyński Ł.: Określenie modułów odkształcalności podtorza w procesie modernizacji. Materiały XI Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej “Drogi Kolejowe ‘01” Wrocław 21-23 listopada 2001.
- [6] Siewczyński Ł.: Uprozczone określanie nośności torowiska. IV Konferencja Naukowa WBL PP. Prace III. PP., Poznań 1985r., str. 177-185.
- [7] Siewczyński Ł.: Wpływ wody w podtorzu gruntowym na jego nośność. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Powódź ‘97 - Koleje-drogi-mosty”, Śląska DOKP, Politechnika Śląska, SITK Katowice-Wiśła 1998 r., str. 315-323.
- [8] Siewczyński Ł.: Znaczenie szczególności badań i projektu podtorza dla procesu inwestycyjnego. Materiały VI Sympozjum Z.D.K. IIDIK Politechnika Krakowska. Kraków 1998r., str. 111-119.
- [9] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Naprężenia w podtorzu od układu powierzchni obciążających. Technika Transportu Szynowego 4/2013 s. 55 – 59.
- [10] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Stabilizacja podtorza dla budowy warstwy ochronnej. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne metody stabilizacji podłoża pod nawierzchnie drogowe i kolejowe”, Żmigród-Węglewo 22-23.10.2009 r., s. 111-117
- [11] Siewczyński Ł., Pawłowski M.: Strengthening the subgrade in its properties function. 6th International Conference ENVIRONMENTAL ENGINEERING, Wilno 26-27 may 2005., on CD.
- [12] Sysak J. red: Drogi kolejowe. PWN, Warszawa 1986 r.
- [13] Wiłun Z. Zarys geotechniki WKiL Warszawa 1987r.



8. Wykresy zależności obciążeń dopuszczalnych na grunty od stopnia plastyczności [6]



9. Zależność modułu odkształcenia wtórnego $E^{(n)}$ od stopnia plastyczności [2, 10]