

Wyzwania geotechniczne w diagnostyce podłoża i nasypów kolejowych

Największe problemy i wyzwania w projektowaniu geotechnicznym posadowienia nowych oraz modernizowanych linii kolejowych mają związek z wymaganiami wobec niezawodności konstrukcji, warunkami obciążeń, specyfiką geometrii nasypów kolejowych, a także zakresem niezbędnego rozpoznania geotechnicznego. Zwłaszcza jakość badań podłoża jest kluczowa dla trafności i racjonalności podejmowanych decyzji projektowych.



dr hab. inż. Tomasz Godlewski, prof. instytutu

Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu

Duże wyzwanie stanowi modernizacja linii kolejowych, których nasypy wykonano z materiału lokalnego, bez rzetelnej kontroli, w miejscach o złożonych warunkach gruntowo-wodnych. W fazie użytkowania, gdy dochodziło do nadmiernych osiadań, przejezdność tych linii zapewniano poprzez podbicie torów i uzupełnienie kruszywa w celu kompensacji występujących przemieszczeń. Lata użytkowania nasypów pod obciążeniem dynamicznym oraz w zmiennych warunkach atmosferycznych sprawiły, że często nie nadają się one do dalszego wykorzystywania bez znaczących napraw lub wzmocnienia. Doprowadziło to do nagromadzenia problemów, z jakimi obecnie musi się zmierzyć branża kolejowa [1, 2].

W przypadku wykorzystywania podłoża „słabego” (ściśliwego) lub zbudowanego z materiałów odpadowych i posadowiania na nim obiektów projektant musi stosować

specjalne zabiegi, takie jak zaprojektowanie wzmocnienia. Postęp techniczny w dziedzinie fundamentowania i wzmocniania podłoża przyniósł bogatą ofertę metod, zabiegów i wyrobów specjalistycznych.

Wzmocnianie podłoża stanowi alternatywę dla klasycznego podejścia, w którym stosowano fundamenty głębokie (np. pale). Takie podejście można określić jako omijanie problemu słabego podłoża, często niesłusznie uznawanego za nienosić. Było ono konsekwencją rutynowego dokumentowania warunków gruntowych w obrębie nasypów, w którym pomijano parametry mechaniczne gruntów organicznych uważanych za warstwę nadającą się tylko do wymiany lub palowania. W wielu przypadkach nie miało to uzasadnienia ekonomicznego, ponieważ zastosowanie wzmocnienia byłoby tańsze niż wykonanie fundamentu głębokiego. Rozwiązanie to wymagałoby jednak od wykonawcy

dokumentacji przeprowadzenia dodatkowych, kompleksowych badań podłoża oraz doświadczenia w doborze metod i interpretacji parametrów geotechnicznych [3].

Wymagania wobec poziomu bezpieczeństwa i warunków użyteczności linii kolejowych są regulowane prawem [4] i normami [5] na poziomie krajowym oraz specyfikacjami wewnętrznymi PKP [6–8]. Budowa nowej lub modernizacja istniejącej linii kolejowej na potrzeby kolei dużych prędkości wymaga oceny ryzyka oraz rozważenia potencjalnych zagrożeń już na etapie projektowania.

Z perspektywy opisanych potencjalnych problemów z podłożem czy nasypem bardziej złożona wydaje się modernizacja. Wymaga ona bowiem zwaloryzowania wielu elementów, takich jak:

- opis metodyki doboru i projektowania wzmocnień podłoża z podaniem wymagań wobec zakresu rozpoznania podłoża;
- wskazanie czynników warunkujących możliwość stosowania danej metody w kontekście jej niezawodności;
- wskazanie zagrożeń (ryzyk) wynikających z nieprawidłowego doboru oraz możliwych wad wykonawczych;

- spełnienie wymagań odnoszących się do materiałów, trwałości i oceny jakości wykonanych wzmocnień oraz ich monitorowania.

W obszarze zagadnień geotechnicznych należy uwzględnić wymagania dotyczące stateczności nasypów oraz przewidywanych osiadań podtorza. W przypadku projektowania opartego na stanach granicznych są to najważniejsze stany do rozważenia dla nośności oraz użyteczności. W prawidłowym projekcie powinny się znaleźć warunki odpływu w zależności od typu materiału, jaki występuje w podłożu oraz z jakiego będzie zbudowany nasyp [2]. Najważniejszymi czynnikami mogącymi warunkować wystąpienie tych stanów granicznych są: obciążenie ruchem kolejowym, geometria nasypu i warunki geotechniczne (rys. 1).

Optymalizacja posadowienia będzie więc obejmować dostosowanie zakresu badań geotechnicznych do lokalnych warunków podłoża, z uwzględnieniem specyficznych potrzeb związanych z przewidywaną metodą posadowienia czy wzmocnienia gruntu. W projekcie należy zawrzeć szczegółową analizę dla każdego rodzaju warunków geotechnicznych z uwzględnieniem klasy złożoności geotechnicznej w zakresie: litologii i genezy gruntów oraz skał, warunków wodnych, a także występowania gruntów słabonośnych, zagrożeń geologicznych i geotechnicznych oraz terenów deformacji górniczych, krasowych i osuwiskowych. W tym celu niezbędne jest właściwe podejście do jakości rozpoznania podłoża – zarówno pod względem liczby wykonanych badań, jak i doboru metod

oraz zastosowania lokalnego, popartego doświadczeniem „klucza interpretacyjnego” do określenia oczekiwanych parametrów geotechnicznych [1].

UWARUNKOWANIA DOTYCZĄCE ROZPOZNANIA PODŁOŻA

Zakres niezbędnego rozpoznania podłoża z uwzględnieniem zmienności i właściwości gruntu oraz możliwe techniki pomiarów zostały ustalone w wytycznych opracowanych na potrzeby PKP i CPK (Igo-1 [8]; [9]). Nawiązują one do zapisów Eurokodu 7 [5], branżowych wytycznych kolejowych oraz wymagań odnoszących się do obiektów inżynierskich (warunki techniczne Id-2) i linii kolejowych (warunki techniczne Id-1 [6] i Id-3 [7]).

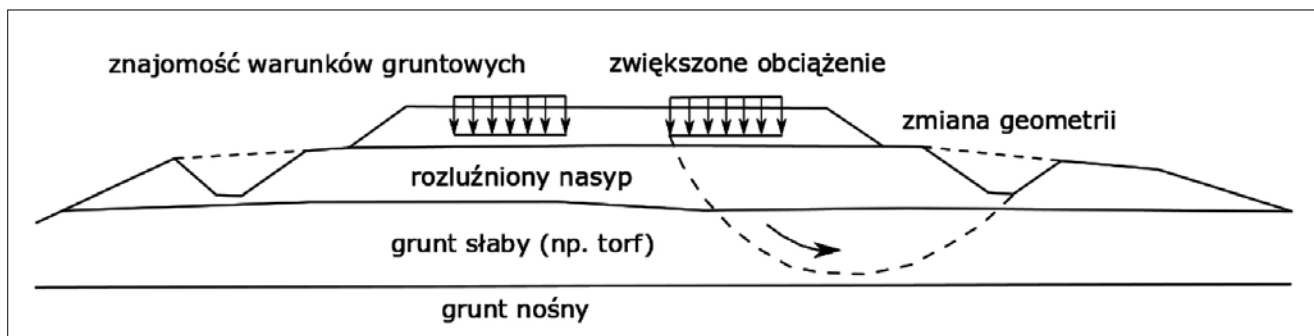
Obecnie badania podłoża wykonuje się zgodnie z wytycznymi wdrożonymi w PKP [8, 9], które pozwalają na podjęcie decyzji, czy możliwe jest bezpieczne posadowienie obiektu oraz czy potrzebne jest wzmocnienie podłoża. W zakresie wskazanych i stosowanych metod badań brakuje jednak przełożenia osiągniętych wyników na realne potrzeby pozyskiwania danych (parametrów) pozwalających na optymalny dobór i zaprojektowanie metody wzmocnienia podłoża dostosowanej do warunków nośności.

Zakres rozpoznania geotechnicznego powinien umożliwić redukcję niepewności co do przyjmowanego modelu geotechnicznego podłoża do poziomu akceptowalnego na danym etapie inwestycji. Punkty dokumentacyjne należy projektować odpowiednio do: rodzaju inwestycji (modernizacja, budowa nowej linii, roz-

budowa, naprawa), jej etapu (studium lub koncepcja, etap projektu budowlanego, realizacji, eksploatacji, wzmocnienia konstrukcji lub fundamentów) i kategorii geotechnicznej uwzględniającej stopień skomplikowania warunków gruntowych [1, 5].

Rozpoznanie podłoża na każdym etapie należy opierać na badaniach polowych lub ich kombinacji z innymi metodami, aby uzyskać wiarygodne parametry geotechniczne [3]. Odpowiednia kombinacja i dobór badań do różnych warunków pozwalają na stworzenie pełnej charakterystyki podłoża gruntowego. Różnorodność metod jest obecnie coraz większa i nadal rośnie [3, 10]. Do poprawnego ustalenia parametrów konieczne jest posługiwanie się wykalibrowanymi do warunków lokalnych metodami oraz sprawdzoną interpretacją, a sprzęt i procedury badań powinny odpowiadać wymaganiom zawartym w normie [5] i przywoływanych w niej specyfikacjach technicznych. Norma [5] wymaga również, aby w ocenie wyników badań uwzględniać nie tylko opis próbek gruntów i skał z wierceń oraz wykopów, lecz także wpływ sprzętu i obsługi (niepewności pomiarowej) oraz zmienności ośrodka gruntowego (niepewności aleatorycznej) na pomiary.

Szybki rozwój metod geotechnicznych badań podłoża oraz oceny warunków sprawił, że coraz większe znaczenie w jego rozpoznaniu mają badania polowe, pozwalające na ocenę parametrów gruntów w warunkach in situ. W tab. 1, na podstawie załącznika A normy [5], zestawiono wybrane, najpopularniejsze w krajowej



Rys. 1. Główne czynniki warunkujące wystąpienie stanów granicznych nasypów kolejowych [1]

Tab. 1. Zestawienie metod polowych badań podłoża, uzyskiwanych pomiarów oraz wyprowadzonych na ich podstawie parametrów gruntów według PN-EN 1997-2 (według [5], zmodyfikowany)

Metoda	Wykonywane pomiary	Wartości wyprowadzone*	Zastosowanie	Ograniczenia
Sondowanie dynamiczne DP	- Liczba uderzeń N_{10} dla następujących badań: DPL, DPM, DPH - Liczba uderzeń N_{10} lub N_{20} dla badania DPSH	I_D ϕ' M	- Zasięg głębokościowy gruntów „starych”, nasypowych - Lokalizacja pustek - Lokalizacja stref osłabień - Stan gruntów gruboziarnistych (niespoistych)	- Ograniczona głębokość: DPL – 8 m, DPM – 20 m, DPH – 25 m - Znaczący wzrost tarcia wraz z głębokością w gruntach spoistych i organicznych
Badanie dynamiczne sondą cylindryczną SPT	- Liczba uderzeń N - Współczynnik energii E_r - Opis gruntu	I_L I_D q_c ϕ' E	- Pobór próbek - Lokalizacja stref osłabień	- Występowanie kamieni, gruzu, dużych otoczków - Wymaga podwiertu
Badanie statyczne sondą stożkową z możliwością pomiaru ciśnienia porowego CPTU	- Skorygowany opór stożka q_t - Miejscowy, jednostkowy opór tarcia na pobocznicy f_s - Pomierzone ciśnienie porowe u	I_L I_D c_u ϕ' c' M E γ - OCR K_0 I_c $c_{v(h)}$ $k_{h(v)}$ G_0 - CRR	- Identyfikacja gruntów - Ustalenie profilu wytrzymałościowego i odkształceniowego podłoża - Zasięg głębokościowy gruntów „starych”, nasypowych - Lokalizacja stref osłabień - Oszacowanie historii naprężeń w gruncie - Ocena podatności piasków na upłynnienie - Ocena bocznych naprężeń in situ - Ocena nośności podłoża – metody obliczeniowe dla posadowień bezpośrednich i pali - Oszacowanie przepuszczalności gruntów	Bardzo zagęszczone piaski, żwiry i pospółki
Badanie dylatometrem płaskim DMT	- Skorygowane ciśnienie p_0 - Skorygowane ciśnienie p_1 przy wychyleniu membrany 1,1 mm - Moduł dylatometryczny E_{DMT} - Wskaźnik materiałowy I_{DMT} - Wskaźnik naprężeń poziomych K_{DMT}	c_u ϕ' M K_0 - OCR k_h	- Określenie rodzaju gruntu - Ustalenie profilu wytrzymałościowego i odkształceniowego podłoża - Określenie stanu naprężeń w gruncie - Ocena nośności i osiadania fundamentów bezpośrednich i palowych – metody analityczne	Możliwość uszkodzenia membrany w przypadku występowania kamieni, gruzów itp.
Badanie presjometryczne Menarda MPM	- Moduł presjometryczny E_M - Ciśnienie pełzania p_f - Ciśnienie graniczne p_{LM} - Krzywa ekspansji (rozszerzalności)	I_D I_L c_u M q_c	- Ustalenie profilu wytrzymałościowego i odkształceniowego podłoża - Nośność i osiadania fundamentów bezpośrednich - Nośność pali	- Bardzo zagęszczone piaski, żwiry i pospółki nawodnione - Wymaga podwiertu
Badanie połową sondą krzyżakową FVT	- Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu (bez poprawki) c_{fv} - Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu gruntu przerobionego c_{rv} - Krzywa momentu obrotowego	I_L c_u c_r S_t	- Ustalenie profilu wytrzymałościowego i odkształceniowego podłoża - Nośność i osiadania fundamentów bezpośrednich	Dla gruntów o $\tau_f < 150$ kPa

* Wybrano najbardziej popularne metody stosowane w Polsce oraz znaczące parametry geotechniczne, symbole i opisy według PN-EN 1997-2 [5].

Możliwość takich ustaleń pokazano na przykładzie współczynnika kalibracyjnego (N_{kt}) dla oznaczania parametru: c_u (s_u) = $q_t - \sigma_{vo} / N_{kt}$ na podstawie znormalizowanej wartości oporu pod stożkiem z badań CPTU – tab. 2. Są to istotne ustalenia, ponieważ dotyczą „problemowych” i wrażliwych gruntów

organicznych, w przypadku których niedoszacowanie tego parametru może prowadzić do błędnych założeń projektowych.

Drugi ważny dla nasypów i podłoża linii kolejowych stan graniczny dotyczy analizy osiadań. Obecnie w projektowaniu geotechnicznym wykorzystuje się programy

oparte na metodzie elementów skończonych. Chociaż wymaga ona większej liczby parametrów, jej główną zaletą jest szerszy zakres analizowanych zagadnień. Przykładowo: w ocenie stateczności nasypów kolejowych nie trzeba przyjmować założeń odnośnie do powierzchni poślizgu, która

Tab. 3. Zalecane metody badań polowych i laboratoryjnych z uwagi na wymagane informacje projektowe w zakresie zagadnień geotechnicznych mających zastosowanie przy budowie i modernizacji infrastruktury kolejowej [8]

Typ konstrukcji	Zagadnienia geotechniczne do oceny	Informacje niezbędne do analiz projektowych	Zalecane badania podstawowe	
			badania polowe	badania laboratoryjne
Podłoże pod nasypy i nasypy	- Osiadania (wielkość i prognoza – przebieg konsolidacji) - Nośność podłoża - Stateczność skarp/zboczy - Parcie gruntu - Nośność elementów konstrukcyjnych - Ocena przydatności gruntów do wbudowania - Konieczność wzmocnienia podłoża lub zbrojenia nasypu	- Profile podłoża (opis gruntów, poziomów wody, skał) - Parametry wytrzymałościowe (efektywne i całkowite) - Parametry odkształceniowe (parametry konsolidacji, moduły odkształcenia) - Ciężary objętościowe - Parametry konsolidacji - Współczynnik parcia spoczynkowego - Parametry tarcia kontaktowego (grunt–element konstrukcyjny) - Opór na wyciąganie w gruntach zbrojonych - Dane geologiczne zawierające charakterystykę i położenie dyslokacji podłoża skalnego - Zasięg zwietrzelin - Ocena przydatności gruntów i skał do wbudowania (nasypy kolejowe i górne części podtorza)	- Wiercenia - Badania płytą statyczną (np. VSS) - Badania zagęszczenia – sondy dynamiczne (DP) - Badania sondą statyczną (MCPT, CPT, CPTU) - Badania sondą krzyżakową (FVT) - Badania dylatometrem (DMT) - Badania sondą wkręcaną (WST) do oceny zasięgu zwietrzelin - Pomiary wody w piezometrach (GWO, GWC) - Opis rdzenia skalnego (RQD) - Badania geofizyczne	- Badania edometryczne - Badania w skrzynkowym aparacie bezpośredniego ścinania (SB) - Badania w aparacie trójosiowego ściskania (TX) - Rozkład uziarnienia - Granice konsystencji (Atterberga) - pH i oporność gruntu - Wilgotność - Gęstość objętościowa - Zawartość części organicznych - Oznaczenie wilgotności optymalnej – aparat Proctora - Przewodność hydrauliczna - Badania współpracy geosyntetyków z gruntem (np. wielkoskalowy aparat skrzynkowy, odporność na przebicie) - Potencjał pęcznienia - Odporność na ścieranie
- Konstrukcje oporowe nasypów - Grunty zbrojone - Skarpy	- Stateczność ogólna - Nośność elementów konstrukcyjnych - Osiadania - Przemieszczenia poziome - Parcie gruntu - Nośność podłoża - Ocena agresywności gruntów i wody w stosunku do betonu - Cisnienie porowe za ścianą - Ocena przydatności gruntów do wbudowania	- Profile podłoża (opis gruntów, poziomów wody, skał) - Współczynnik parcia spoczynkowego - Wytrzymałość podłoża pod konstrukcją ściany - Parametry odkształceniowe (w tym konsolidacyjne, wskaźniki ekspansywności, moduły odkształcenia) - Skład chemiczny gruntu – klasa ekspozycji - Przewodność hydrauliczna gruntów za ścianą - Parametry konsolidacyjne w czasie - Dane geologiczne zawierające charakterystykę i położenie dyslokacji podłoża skalnego	- Wiercenia - Badania płytą statyczną (np. VSS) - Badania zagęszczenia – sondy dynamiczne (DP) - Badania sondą statyczną (CPT, CPTU) - Badania sondą krzyżakową (FVT) - Badania dylatometrem (DMT) - Pomiary wody w piezometrach (GWO, GWC) - Opis rdzenia skalnego (RQD) - Badania geofizyczne	- Badania edometryczne - Badania w skrzynkowym aparacie bezpośredniego ścinania (SB) - Badania w aparacie trójosiowego ściskania (TX) - Rozkład uziarnienia - Granice konsystencji (Atterberga) - pH i oporność gruntu - Wilgotność - Gęstość objętościowa - Zawartość części organicznych - Oznaczenie wilgotności optymalnej – aparat Proctora - Przewodność hydrauliczna - Kapilarność bierna - Wskaźnik piaskowy - Oznaczenie kalifornijskiego wskaźnika nośności - Odporność na rozdrabnianie metodą Los Angeles - Mrozoodporność

w tym wypadku stanowi rezultat przeprowadzonej analizy [2]. Zachowanie zgodności przemieszczeń ośrodka gruntowego i elementów konstrukcyjnych pozwala na ich uwzględnienie w analizie oraz zwierytowanie. Zastosowanie wiarygodnych parametrów odkształceniowych umożliwia obliczenie przewidywanych osiadań dla danego przekroju charakterystycznego nasypu, a w uzasadnionych przypadkach można przeprowadzić analizę problemów przestrzennych (3D) [2].

Szczegółowa analiza współpracy konstrukcji z podłożem w przypadku linii kolejowych należy do zagadnień złożonych, które ze względów praktycznych podlegają znacznym uproszczeniom na potrzeby projektowania. Dotychczas przeprowadzono w tym zakresie niewiele badań, gdyż problematyka ta jest interdyscyplinarna i wymaga zdefiniowania obciążeń charakterystycznych, oceny wpływów dynamicznych oraz stopnia ich przekazywania na podłoże gruntowe, a ostatecznie również oceny warunków gruntowych i właściwego odwzorowania współpracy konstrukcji nawierzchni kolejowej z podłożem. W praktyce często rozdziela się analizy konstrukcji układu torowego i podtorza, zakładając sprężystą odpowiedź podłoża, dla którego kryterium odbiorowym jest wartość modułu E_2 – jak w przypadku konstrukcji drogowych. Autor wielokrotnie spotkał się z sytuacją, gdy w projektach konstrukcji torowych, mimo szczegółowo opisanej i przeliczonej charakterystyki układu torowiska oraz podtorza, w odniesieniu do istniejącego nasypu oraz podłoża pojawia się ogólnikowy zapis: „opis lub wzmocnienie podłoża według branży geotechnicznej”.

Przyjmowanie uproszczenia w ocenie zachowania ośrodka gruntowego (charakter sprężysty i współpraca w warunkach braku odpływu) w tego typu analizach ma pewne podstawy. Pomiaru wskazują, że już na głębokości ok. 2 m poniżej podkładów kolejowych wpływ tymczasowego obciążenia ruchem kolejowym jest ograniczony do pomijalnie małych wartości przemieszczeń [2]. Należy jednak pamiętać, że proces ten

jest długotrwały i cykliczny oraz że istnieje krytyczna wartość prędkości, przy której następuje degradacja podtorza i mogą występować istotne przemieszczenia torów. Dodatkowo, przy posadowieniu na podłożu charakteryzującym się znaczną odkształcalnością (gruntach organicznych, niekontrolowanych nasypach) postępowanie osiadań może być związane również ze zjawiskiem długotrwałej konsolidacji oraz pęcznienia. Często czynnikiem inicjującym nadmierne osiadania jest też zmiana warunków wodnych w otoczeniu nasypu (złe działające odwodnienie lub jego brak albo obniżenie zwierciadła wód gruntowych w podłożu).

Jak widać, analizy przemieszczeń w ujęciu geotechnicznym, z wykorzystaniem modeli konstytutywnych opisujących nieliniowe, sprężysto-plastyczne zachowanie gruntu, są nieodzowne w projektowaniu nasypów czy modernizacji podłoża. Przydatne będą odpowiednie parametry opisujące taki model, a wśród nich kluczowe będzie ustalenie parametrów odkształceniowych.

W warunkach in situ niedocenianym urządzeniem jest dylatometr płaski typu Marchettiego [10], przeznaczony do wyznaczania parametrów odkształceniowych gruntów. Przemawia za tym specyfika przeprowadzania samego pomiaru [5]. Pompowanie stalowej membrany w gruncie jest bowiem testem z kontrolowanym przemieszczeniem (pomiar ciśnienia przy żądanym/oczekiwanym przemieszczeniu). To pozwala na oszacowanie modułu odkształcenia bezpośrednio w gruncie (in situ), co jest podstawą do wyznaczania przemieszczeń projektowanej konstrukcji [10].

Ponieważ do powszechnego stosowania weszło sondowanie statyczne, również w tym przypadku można wykorzystać ustalone zależności lokalne, które pozwalają na wskazanie wykalibrowanego parametru (modułu dylatometrycznego) dla danego typu gruntu na podstawie znajomości wartości mierzonych z CPTU – rys. 2.

Przywołany nomogram został wielokrotnie potwierdzony w zakresie wiarygodności szacowanych parametrów odkształceniowych zarówno w trakcie badań laboratoryjnych, jak i obserwacji prowadzonych na zrealizowanych obiektach [10], a uzyskane moduły odnoszą się do zakresu naprężeń in situ dla badań walidujących (przedział głębokości ~10–30 m).

Filozofia projektowania geotechnicznego w nadchodzących Eurokodach drugiej generacji wskazuje na potrzebę specyfikowania niezbędnych parametrów podłoża dla konkretnego zadania i stanu granicznego. Dobór metody badawczej powinien być świadomy, uwzględniający zarówno ograniczenia techniczne pomiaru, jak i wiarygodność stosowanych interpretacji. Obecnie popularne jest ilościowe rozpoznanie podłoża za pomocą sondowań statycznych, co stanowi zjawisko pożądane. Problemy pojawiają się jednak na etapie interpretacji uzyskiwanych wyników, które są stosunkowo łatwe do pozyskania i występują w dużej liczbie.

Powszechną praktyką budzącą wątpliwości jest bezpośrednie „przechodzenie” od rejestrowanych parametrów (np. q_c) do ocen stanów gruntu (I_L/I_D). To podejście może prowadzić do nieuprawnionego stosowania nomogramów zaczerpniętych z dotychczasowej (wycofanej) normy PN-81/B-03020. Pierwsza wątpliwość dotyczy liczby dostępnych wzorów takich przeliczeń, często automatycznie zaimplementowanych w programach interpretacyjnych, których wyniki są obarczone niepewnością ze względu na lokalny charakter opracowań oraz ograniczoną stosowalność – zwykle nieuwzględnianą w analizach. Druga wątpliwość dotyczy samych parametrów uzyskiwanych w ten sposób – są one bowiem „nieefektywne” i nieodniesione do konkretnego stanu naprężenia, w którym miałyby być stosowane.

Zdaniem autora należy korzystać z doświadczeń krajowych (np. zebranych w [10]) w zakresie bezpośredniego wyznaczania niezbędnych parametrów geotechnicznych na podstawie lokalnie zwalidowanych zależności, opartych na rejestrowanych wartościach z sondowań.

DOBÓR METOD BADAŃ DO PROBLEMU

W zakresie projektowania geotechnicznego nasypów kolejowych nadal istnieją wyzwania dotyczące optymalnego doboru rozwiązań zapewniających niezawodność linii kolejowych. Obciążenie wywołane ruchem kolejowym (w tym zwiększenie obciążenia po modernizacji na potrzeby wdrożenia kolei dużych prędkości) ma bezpośredni wpływ na prawdopodobieństwo utraty stateczności nasypu kolejowego oraz możliwość wystąpienia nadmiernych osiadań w trakcie użytkowania linii.

Stosowane w Polsce rozwiązania w zakresie projektowania infrastruktury kolejowej są dość konserwatywne w odniesieniu do wymaganych poziomów niezawodności oraz przyjmowanych obciążeń. Należy zwracać uwagę na jakość rozpoznania geotechnicznego realizowanego na potrzeby budowy i modernizacji linii kolejowych, ponieważ ma ono istotny wpływ na stosowane rozwiązania projektowe oraz warunki niezawodności linii kolejowych. Niskiej jakości rozpoznanie i związana z tym niepewność w odniesieniu do parametrów mogą skutkować przyjmowaniem zbyt konserwatywnych założeń przez projektantów, którzy zgodnie z polskim prawem ponoszą odpowiedzialność za swoje rozwiązania projektowe. Dobór metod powinien przede wszystkim odpowiadać potrzebom rozpatrywanego zadania geotechnicznego – tu pomocne może być zestawienie podane w tab. 3 za [8].

Dodatkowo, z uwagi na dynamiczny charakter oddziaływań, uzasadnione może być zastosowanie metod geofizycznych umożliwiających uzyskanie ciągłego profilu budowy podłoża. Przydatne są zwłaszcza metody pozwalające zarówno na jakościową, jak i ilościową ocenę warunków w podłożu, w tym na określenie dynamicznej sztywności gruntów. Zaliczają się do nich: Cross-Hole, SDMT, SCPTU oraz CSWS/SASW/MASW, a w badaniach laboratoryjnych można także stosować Bender Element Test (BET) [10].

Jednak nowoczesne metody badawcze nie gwarantują uzyskania wiarygodnych

danych do projektowania. Rozpoznanie geotechniczne powinno być prowadzone przez akredytowanych oraz certyfikowanych wykonawców, z użyciem regularnie kontrolowanego i kalibrowanego sprzętu. Należy również zwracać uwagę na kwalifikacje oraz doświadczenie personelu odpowiedzialnego za prowadzenie badań polowych i laboratoryjnych. ■

Literatura

1. L. Wysokiński, W. Kotlicki, T. Godlewski, *Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Poradnik*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2011.
2. W. Bogusz, T. Godlewski, *Geotechnical design of railway embankments – requirements and challenges*, „MATEC Web of Conferences”, vol. 262/2019, <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201926211002>, 2019.
3. T. Godlewski, *Diagnostyka podłoża budowlanego – dobre praktyki vs. złe nawyki*, „Inżynier Budownictwa” nr 11/2024, s. 54–58.
4. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie (Dz.U. z 1998 r. nr 151 poz. 987 ze zm.).
5. PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
6. *Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1*, PKP PLK S.A., Warszawa 2005.
7. *Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3*, PKP PLK S.A., Warszawa 2009.
8. *Wytyczne badań podłoża gruntowego dla potrzeb budowy i modernizacji infrastruktury kolejowej (lgo-1)*, praca zbiorowa: PIG-PIB, ITB, IBDiM, na zamówienie PKP PLK, Warszawa 2016.
9. *Wytyczne rozpoznania i badań podłoża budowlanego dla inwestycji kolejowych dużych prędkości*, CPK, PIG-PIB, Warszawa 2023.
10. M. Tarnawski, Z. Frankowski, T. Godlewski i in., *Badania podłoża budowlanego. Metody polowe*, PWN, Warszawa 2020.
11. T. Godlewski, *Niepewności i ryzyka w procesie rozpoznania podłoża budowlanego*, „Inżynier Budownictwa” nr 1/2025, s. 50–54.
12. Z. Młynarek, J. Wierzbicki, M. Bogucki, *Geotechnical characterization of peat and gyttja by means of different in-situ tests*, „Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development”, Edinburgh, September 2015, 3097–31.
13. T. Lunne, P.K. Robertson, J.J.M. Powell, *Cone penetration testing in geotechnical practice*, Blackie Academic & Professional, London 1997.
14. K. Stefaniak, *Assessment of shear strength in silty soils*, „Studia Geotechnica et Mechanica”, vol. 37, nr 2/2015, s. 51–55.