

Bezpieczny fundament dla Kolei Dużych Prędkości



Daniel Dymek

Mgr inż.

Keller Polska Sp. z o.o.

daniel.dymek@keller.com



Marcin Sternalski

Mgr inż.

Keller Polska Sp. z o.o.

marcin.sternalski@keller.com



Tadeusz Brzozowski

Dr inż.

Keller Polska Sp. z o.o.

ORCID: 0009-0006-6833-9213

tadeusz.brzozowski@keller.com



Oskar Mitrosz

Mgr inż.

Keller Polska Sp. z o.o.

oskar.mitrosz@keller.com

Streszczenie: W niniejszym artykule opisano bieżące wytyczne do geotechnicznego projektowania Kolei Dużych Prędkości. Szczególną uwagę zwrócono na aspekty stateczności dynamicznej podłoża gruntowego jako nowego zagadnienia technicznego. Wskazano technologię wibrowymiany jako rozsądne rozwiązanie wzmocnienia, pozwalające na spełnienie wymogów projektowych dla nawierzchni kolejowej. Podano szczegóły techniczne realizacji wibrowymiany. Opisano przykłady zastosowania kolumn zwirowych dla kolei konwencjonalnej w Polsce oraz dla Kolei Dużych Prędkości poza granicami naszego kraju.

Słowa kluczowe: Kolej Dużych Prędkości; Centralny Port Komunikacyjny; Geotechnika, Projektowanie; Stateczność dynamiczna; Wibrowymiana; Kolumny zwirowe

Kolej Dużych Prędkości (KDP) jest uważana za kluczowy element infrastruktury transportowej, który na świecie rozwijany jest od wielu lat, natomiast w Polsce dopiero rozpoczynamy to inżynierskie wyzwanie. Za KDP uważa się m.in. linie pozwalające na osiągnięcie prędkości co najmniej 250 km/h, a także linie o standardzie dostosowanym do dużych prędkości, pozwalające na osiągnięcie 200 km/h. Jednym z istotnych elementów zapewnienia odpowiedniego bezpieczeństwa dla ruchu pociągów jest tutaj właściwe przygotowanie podłoża gruntowego, w tym specjalistyczne roboty geotechniczne.

Obecnie KDP projektowana jest w oparciu o standardy techniczne Centralnego Portu Komunikacyjnego (CPK) [1], które zastosowanie mają do prędkości równej lub mniejszej niż 350 km/h. Standardy te należy stosować przy obliczeniach geotechnicznych budowli ziemnych, tj. przy sprawdzaniu nośności podłoża gruntowego oraz stateczności skarp i zboczy (stany graniczne nośności) wraz z analizą przemieszczeń i odkształceń (stany graniczne użyteczności). Same prace projektowe prowadzi się w oparciu o normy Eurokod: PN-EN 1990, PN-EN 1991 i PN-EN 1997, a podstawowy okres użytkowania dla kolejowych budowli ziemnych to 100 lat.

Odziaływanie taboru kolejowego w postaci obciążenia projektowego określa się tak samo jak dla kolei tradycyjnej. Obciążenie ruchem

według modelu LM71 zgodnie z PN-EN 1991 jest to obciążenie równomiernie rozłożone o szerokości 3,0 m i długości 6,4 m, na poziomie 0,7 m poniżej główki szyny o wartości 63 kPa. Jest to obciążenie charakterystyczne pionowe dla linii magistralnych i pierwszorzędnych, do którego nie stosuje się już współczynnika dynamicznego.

Sprawdzenie nośności podłoża gruntowego, stateczności skarp i zboczy oraz analizę przemieszczeń i odkształceń przeprowadza się jak dla kolei tradycyjnej, natomiast inaczej zostały zdefiniowane graniczne wartości przemieszczeń do weryfikacji stanów granicznych użyteczności. Podstawowym wymaganiem dla podtorza jest zagwarantowanie jego akceptowalnego osiadania w okresie użytkowania od momentu wykonania torowiska. W ten sposób zostały określone dopuszczalne wartości osiadań pokonstrukturalnych dla nawierzchni w KDP.

Osiadania lub ich nierównomierność, podczas eksploatacji nawierzchni, mogą powodować konieczność regulacji położenia toru potencjalnie obniżając jego stabilność. Natomiast, w przypadku nawierzchni bezpodsykowej, mogą uniemożliwić korektę położenia wysokościowego toru lub spowodować uszkodzenia jej konstrukcji.

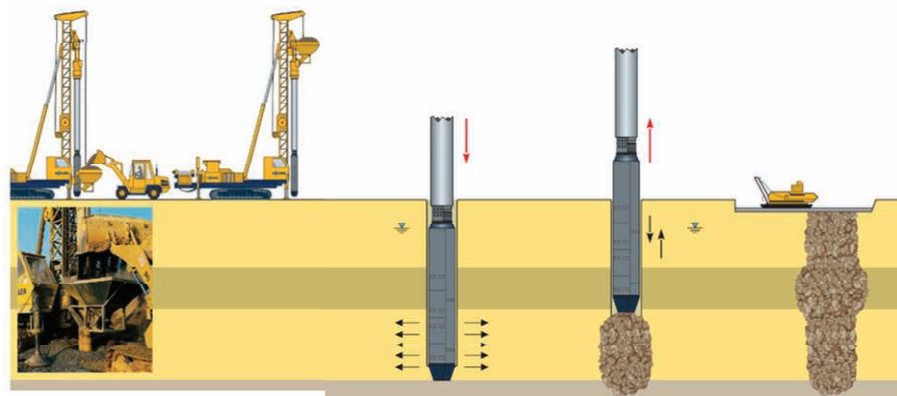
Całkowicie nowym zagadnieniem w KDP jest stateczność dynamiczna. W przypadku obciążenia cyklicznego wywołanego tabo-

rem kolejowym mamy do czynienia z efektami dynamicznymi w podłożu gruntowym. W zależności od warunków gruntowych, poziomu wody gruntowej czy przeszkód podziemnych zachodzi wielokierunkowa propagacja fal w gruncie z interferencjami i odbiciami. Następuje też wibracja samego układu torowego, powodując jego ruchy i odkształcenia. Fale rozchodzące się w podłożu gruntowym dzieli się na fale wglębne podłużne (typu P – ściskające) i poprzeczne (typu S – ścinające) oraz fale powierzchniowe Rayleigha (typu R). Wibracje gruntu wywołane ruchem pociągów o prędkości ponad 150-160 km/h mogą powodować pogorszenie jego parametrów i nadmierne osiadanie, a nawet upłynnienie. Wrażliwe na działanie wibracji są grunty, takie jak: piaski łatwo przemieszczające się o wskaźniku różnoziarnistości uziarnienia poniżej 2,0 i stopniu zagęszczenia $ID < 0,5$, grunty spoiste o stopniu plastyczności $IL > 0,4$ oraz grunty organiczne różnego rodzaju i pochodzenia. Warunki stateczności pogarsza nawodnienie gruntu, natomiast poprawia nadkład mocnego gruntu. Stateczność dynamiczna warstw wrażliwych jest zagrożona w przypadku, gdy prędkość ruchu pociągów zbliża się do prędkości rozchodzenia się w nich fal powierzchniowych typu R (tzw. prędkości krytycznej). W celu zabezpieczenia przed niekorzystnymi skutkami zalecane jest, by stosunek prędkości ruchu pociągów do prędkości rozchodzenia

się fal nie był większy od 0,65-0,70. Warunek ten można spełnić przy zastosowaniu różnych rozwiązań geotechnicznych – od poprawy podłoża przez jego wzmocnienie po rozwiązanie fundamentowania na palach.

Wśród technologii geotechnicznych poprawiających nośność podłoża gruntowego, stateczność skarp i zboczy, w tym stateczność dynamiczną, a także zmniejszających przemieszczenia i odkształcenia, jako fundamentalną i najbardziej niezawodną można wymienić wibrowymianę. Wykonanie w tej technologii kolumn piaskowych, żwirowo-piaskowych lub żwirowych pozwala odpowiednio wzmocnić podłoże gruntowe do wymaganych projektowo parametrów. Wzmocnienie to realizuje się dwójako: z jednej strony wprowadza się w podłoże gruntuwe dobry, gruboziarnisty materiał niespoisty, który w momencie instalacji jest zagęszczany wibracyjnie, a z drugiej strony przestrzenie wzmacniany jest istniejący grunt przez rozpychanie oraz wspomniane wibracje.

Technologia wibrowymiany polega na formowaniu kolumn z kruszywa, w słabonośnym podłożu, za pomocą wibratora wgłębny z wewnętrznym podawaniem materiału. W pierwszej fazie wykonywania kolumn wibrator wypełnia się kruszywem i pogrąża w podłoże przy udziale wibracji i docisku maszyny podstawowej (rys. 1). Po osiągnięciu głębokości przewidzianej w projekcie albo wymaganego oporu penetracji następuje formowanie poszerzonej stopy żwirowej w gruncie nośnym. W drugiej fazie wykonuje się trzon kolumny żwirowej w obrębie wzmacnianych gruntów. W tym celu do wibratora wsypuje się od góry, przez zamykaną śluzę, gruboziarniste kruszywo. W trakcie podciągania wibratora do góry kruszywo wypływa spod ostrza wibratora, przy udziale sprężonego powietrza i wypełnia przestrzeń zajęta wcześniej przez wibrator. Z kolei ponowne opuszczenie wibratora powoduje rozepchnięcie kruszywa na boki i zwiększenie efektywnej średnicy kolumny. Posuwisto-zwrotny ruch wibratora kontynuowany jest na całej długości kolumny żwirowej. W trakcie formowania trzonu średnica kolumny dostosowuje się do podatności bocznej gruntu i wynosi od około 0,5 m do nawet 0,8 m, tzn. w gruntach słabych jest większa, a gruntach bardziej wytrzymałych mniejsza. Kształt kolumny jest owalny z uwagi na kształt wibratora. Dodatkowym efektem, jaki towarzyszy formowaniu trzonu kolumny żwirowej, jest poprawienie parametrów



1. Schemat wykonania kolumn żwirowych [4]

mechanicznych otaczającego gruntu, przy czym podłoże rodzime doznaje dodatkowo wzmocnienia na skutek zagęszczenia (grunty sypkie) lub przyspieszonej konsolidacji (nawodnione grunty spoiste). Potrzebną sztywność podłoża, spełniającą wymagania stanu granicznego użytkowania (SGU), uzyskuje się poprzez zastosowanie odpowiednio dobranej siatki kolumn o określonej średnicy i długości. Cechą charakterystyczną wzmocnienia podłoża kolumnami wibrowymiany, które traktuje się jako elementy przestrzennego wzmocnienia gruntu, jest ich zdolność do znacznego zredukowania osiadania, generowanego przede wszystkim w gruntach słabych. Przyjęty sposób wzmocnienia podłoża gruntowego ma charakter objętościowy i prowadzi do relatywnego poprawienia parametrów wytrzymałościowych gruntu pozostającego pomiędzy kolumnami. Wykonanie żwirowej głowicy kolumny zapewnia zachowanie podatnego charakteru podparcia nasypu kolejowego i eliminuje ryzyko wystąpienia efektu przebiccia. Istotną cechą technologii jest dostosowanie długości każdej kolumny do rzeczywistych warunków gruntowych w danym punkcie ze względu na ciągły pomiar oporu penetracji wibratora w podłożu.

Sprzęt używany w technologii wibrowymiany umożliwia elastyczne podawanie różnych rodzajów materiałów tworzących kolumnę w gruncie. Może to być zarówno kruszywo, jak i mieszanka cementowo-żwirowa, czy też beton w stanie półsuchym. Stąd w związku z brakiem ograniczenia w technologii, w przypadku przewarstwień gruntów organicznych o miąższości przekraczającej średnicę kolumny, należy każdorazowo rozważyć cementację części trzonu kolumny żwirowej.

Wykonanie wzmocnienia podłoża o parametrach zakładanych w fazie projektowej nie

jest możliwe bez zastosowania odpowiedniego sprzętu, który zapewni kontrolę i monitoring procesu technologicznego na każdym jego etapie. Ma on zaawansowane rozwiązania konstrukcyjne oraz system kontroli jakości i rejestracji parametrów produkcyjnych [2]. Sprzęt musi dysponować siłą dociskową ułatwiającą przechodzenie wibratora przy bardziej zagęszczone warstwy przy udziale sprężonego powietrza, umożliwiać wykonanie kolumn o długości wynikającej z warunku osiągnięcia warstwy nośnej przy ciągłym pomiarze oporu penetracji wibratora w podłożu, wprowadzenie kruszywa na wymaganą głębokość i uformowanie poszerzonej stopy żwirowej w gruncie nośnym oraz zapewniać pełną kontrolę ilości wbudowywanego kruszywa i zagęszczenia trzonu kolumny podczas jego formowania na całej długości kolumny (rys. 2 do rys. 5) Tylko takie rozwiązania techniczne zapewniają wykorzystanie jednej z podstawowych cech kolumn żwirowych – zdolności samoregulacji, czyli dostosowywania się kolumn do podatności bocznej gruntu i działających obciążeń, jak również pozwalają zminimalizować tarcie na pobocznicy wibratora oraz rur przedłużeniowych i osiągać wysokie wydajności bez uszczerbku na jakości produktu.

System pozycjonowania GPS zamontowany na maszynach (6.) pozwala dodatkowo precyzyjnie wyznaczać położenie punktów wzmocnienia na platformie roboczej zastępując tradycyjne pomiary geodezyjne i przyspieszając proces produkcji, szczególnie na dużych projektach.

Efektywne zagęszczanie wymaga zastosowania odpowiedniego typu wibratora, jednego z kluczowych elementów całego systemu (rys. 7). Wibratory różnią się mocą, częstotliwością, amplitudą drgań, wartością siły odśrodkowej i dobór tych parametrów do warunków gruntowych ma podstawowe znaczenie. Należy podkreślić, że wibrator jako źródło drgań musi być zamontowany w dolnej części narzędzia roboczego, aby energia była wytwarzana dokładnie tam, gdzie jest potrzebna do zagęszczenia. W ten sposób eliminowane są długie ścieżki transmisji z dużymi stratami tłumienia, jak to jest w przypadku wibratorów nasadowych, montowanych na

Tab. 1. Dopuszczalne wartości osiadań pokonstrukcyjnych dla nawierzchni w KDP

Rodzaj przemieszczenia	Nawierzchnia bezpodsytkowa	Nawierzchnia podsytkowa
Maksymalne osiadane pokonstrukcyjne S_R	15 mm	50 mm
Maksymalny kąt pochylenia spowodowany różnicą osiadań pokonstrukcyjnych	1/1000	1/1000 (*)
Prognozowana różnica pokonstrukcyjnych osiadań nasypu przy obiekcie i podpory obiektu	20 mm w odległości 20 m	20 mm w odległości 20 m (*)

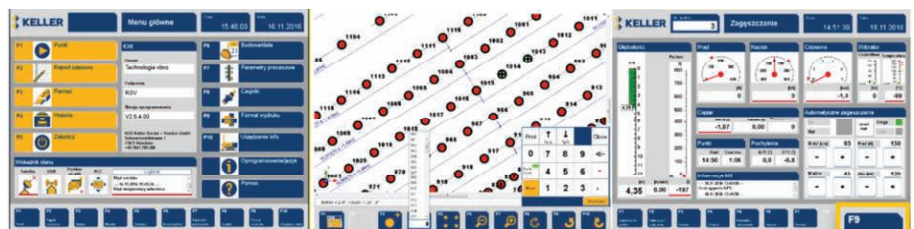
(*) podana wartość odnosi się do okresu regulacji/naprawy nawierzchni, który wynosi 5 lat

górze – takie rozwiązania wymagają zastosowania rury o średnicy odpowiadającej średnicy kolumny, co z kolei wymusza zastosowanie większej maszyny nośnej, a to generuje potrzebę bardziej stabilnej platformy roboczej, zwiększonego zużycia energii i często, przez brak siły docisku, dodatkowych urządzeń do wiercenia wstępnego, co znacznie zwiększa koszty realizacji. Wibratory nasadowe mają przede wszystkim znaczne ograniczenia głębokościowe, pozwalają na wykonanie „kolumn” o długości sięgającej kilku metrów, bez możliwości kontroli procesu wykonawstwa oraz zaangażowania otaczającego gruntu do współpracy, szczególnie w gruntach słabych. Między innymi z wymienionych powodów norma PN-EN 14731:2005 nie dopuszcza sposobu wykonywania wibrowymiany z zastosowaniem wibratorów nasadowych. Zarówno maszyny główne, jak i wibratory projektowane i produkowane są przez KGS Keller Geräte & Service GmbH, spółkę z grupy Keller, której fabryka znajduje się w Renchen w Niemczech.

Kolumny piaskowe, żwirowo-piaskowe i żwirowe w technologii wibrowymiany wykonywane są w Polsce od ponad 20 lat we wszystkich sektorach budownictwa. Mówiąc o przykładach zastosowania kolumn wibrowymiany dla kolei konwencjonalnej w naszym kraju należy wspomnieć chociażby o wzmocnieniu podłoża na linii 227/249 i stacji Gdańsk Zaspą Towarową oraz linii 722 w ramach projektu „Poprawa infrastruktury kolejowego dostępu do Portu Gdańsk”, który firma Keller zrealizowała w 2020 roku. W oparciu o analizy statyczne prowadzone przy użyciu powszechnie stosowanej metody Priebego przyjęto tutaj wykonanie kolumn żwirowych w rozstawach nominalnych 1,8m x 1,8 m (8.) oraz w obrębie stref przejściowych 2,5 m x 2,5 m. Zastosowane rozstawy poprzeczne oraz mijankowy układ kolumn wibrowymiany zapewniają równomierne wzmocnienie podłoża, niezależnie od geometrycznego położenia toru. W celu zmniejszenia różnic osiadania i zapewnienia stopniowej zmiany sztywności podłoża pomiędzy odcinkiem istniejącego podłoża (niewymagającego wzmocnienia), a odcinkiem wzmocnionego podłoża, zaprojektowano każdorazowo odcinki przejściowe. Zadaniem odcinka przejściowego jest wyrównanie osiadania na styku obszaru wzmocnionego i niewzmocnionego, pozwalając uniknąć tzw. „efektów progowych”. W projekcie przyjęto zagłębienie podstawy kolumn wibrowymiany minimum 1,0 m w gruntach nośnych, jednakże projektowane długości kolumn zawsze podlegają ostatecznej weryfikacji na budowie w oparciu o obserwowany i rejestrowany opór podłoża podczas ich wykonania. Po realizacji robót (9.), od odbioru końcowego (rozpoczynającego okres gwarancyjny), zakres osiadania torowiska nie powinien przekroczyć dopuszczalnych wartości, tj. 4 mm/rok na długości 30 m lub 10 mm/rok na długości 200 m, zgodnie z §7 instrukcji Id-3 i



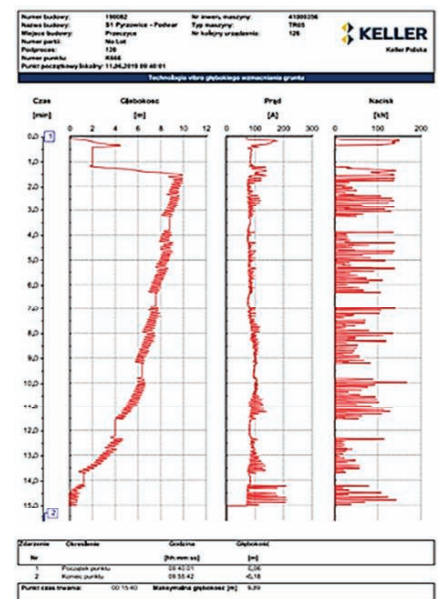
2. Widok systemu kontroli jakości i rejestracji danych wraz z panelem kontroli produkcji w kabinie operatora [4]



3. System kontroli jakości i rejestracji danych [4]



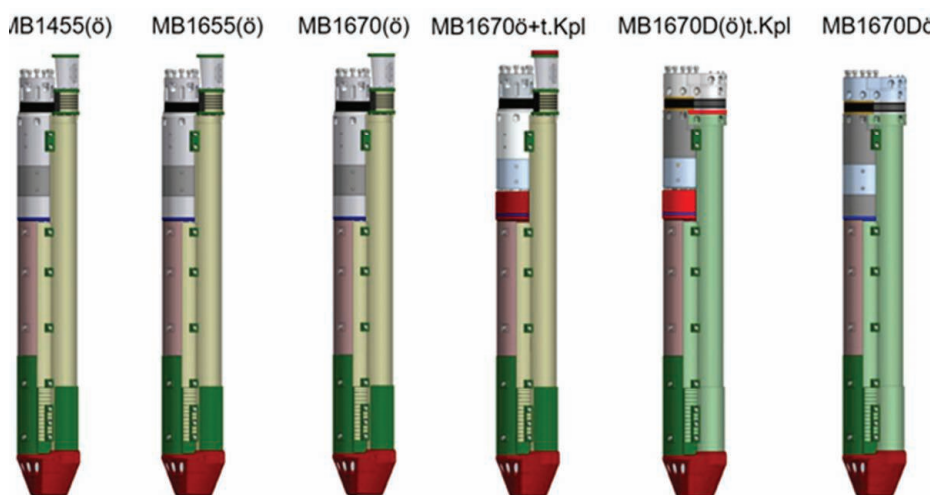
4. Maszyna do wykonywania kolumn żwirowych [4]



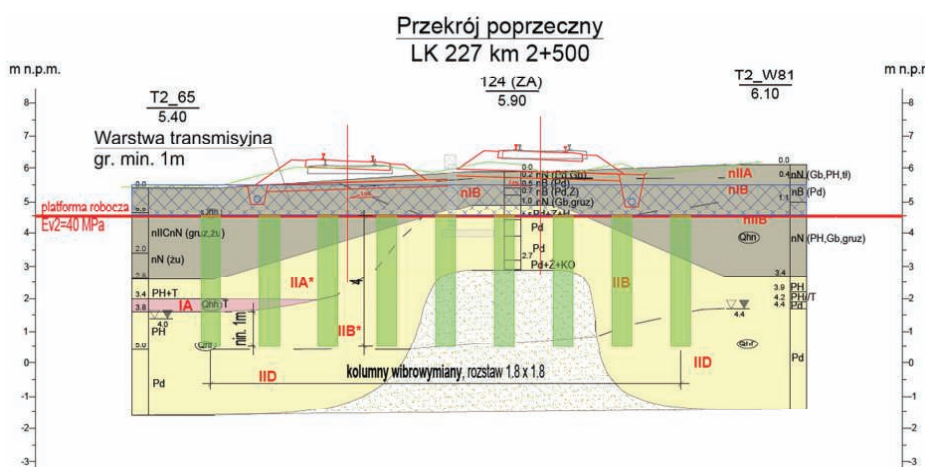
5. Metryka wykonanej kolumny [4]



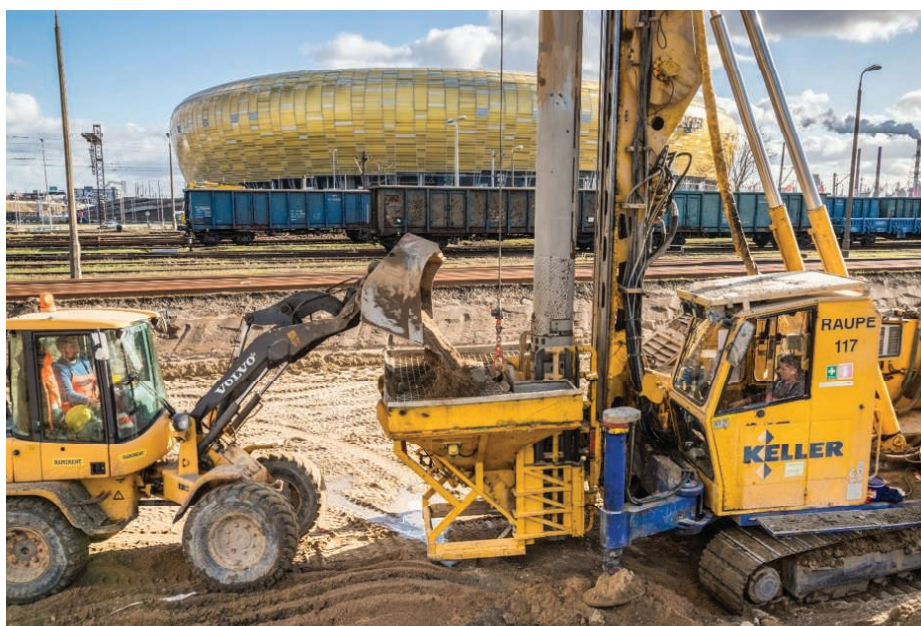
6. Maszyna wyposażona w system pozycjonowania GPS [4]



7. Rodzaje wibratorów do wykonywania wibrowymiany [4]



8. Typowy przekrój wzmocnienia podłoża metodą wibrowymiany [4]



9. Realizacja kolumn wibrowymiany [4]

wymagań całkowitych osiadań zgodnie z projektem budowlanym osiadania dopuszczalne $s_{dop} \leq 1,0$ cm.

Dla kolei dużych prędkości w Europie jako przykład można przedstawić realizację Keller Grundbau GmbH w Niemczech dla Deutsche

Bahn AG. W ramach rozbudowy KDP (ICE, tj. Inter City Express) na odcinku z Hanoweru do Berlina, w rejonie mostu nad Łabą w Shoenhausen, należało wzmocnić istniejący nasyp wzniesiony 150 lat wcześniej, przystosowując go do prędkości pociągów 250 km/h. W

pierwszej fazie budowy poszerzono istniejący nasyp tworząc platformę roboczą (PR1 zgodnie z 10.) do wykonania kolumn żwirowych o długości około 4,0 m. Następnie podniesiono nowy nasyp o około 4,0 m tworząc kolejną platformę roboczą (PR2) do właściwego wzmocnienia nasypu istniejącego. Kolumny żwirowe w siatce ortogonalnej 1,85 x 2,15 m i długości około 8 m pozwoliły spełnić warunki stanów granicznych nośności i użyteczności dla projektowanej linii kolejowej.

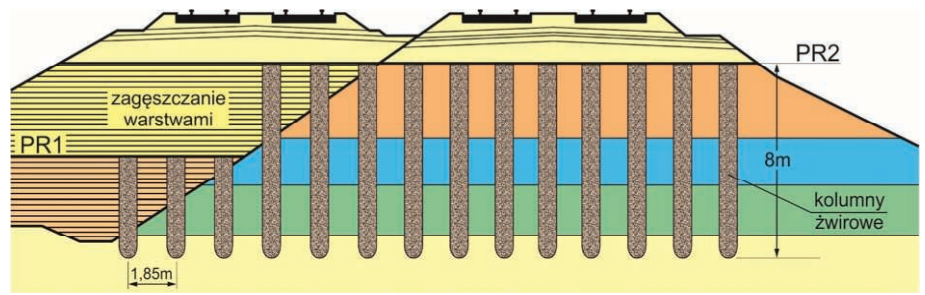
W 2022 r. firma Keller Foundazioni zrealizowała kilka odcinków wzmocnienia w technologii wibrowymiany dla KDP (Eurostar Italia) w postaci kolumn żwirowych pod nasypem nowej linii kolejowej z Mediolanu do Wenecji we Włoszech. Część trasy przebiega w rejonie jeziora Garda, gdzie zostały wzmocnione m.in. słabo-nośne grunty pochodzenia jeziornego.

Ze względu na wieloletnie światowe doświadczenia w realizacji kolumn żwirowych do wzmocniania podłoża gruntowego, w archiwach publikacji technicznych znaleźć można szereg artykułów naukowych, w których opisano pozytywny wpływ takiego wzmocnienia również na wspomnianą stateczność dynamiczną. W [5] stwierdzono m.in. wzrost prędkości krytycznej od kilkunastu do kilkudziesięciu procent w gruntach słabo-nośnych po wykonaniu wzmocnienia za pomocą kolumn żwirowych. W [6] analizowano różne warianty ruchu jednego lub dwóch pociągów z różnymi prędkościami i w różnych kierunkach również na podłożu wzmocnionym za pomocą kolumn żwirowych, a także bez takiego wzmocnienia. W analizie wariantu ze wzmocnieniem stwierdzono nawet 50% redukcję deformacji pionowych torowiska przy przejeździe jednego pociągu z prędkością 300 km/h.

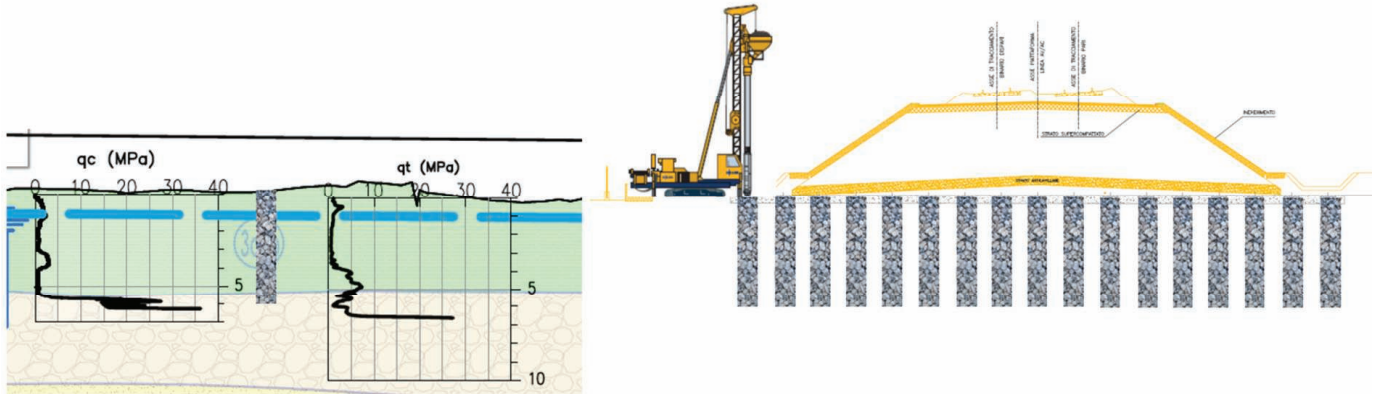
Obecnie ważnym aspektem realizacji inwestycji budowlanych są kwestie środowiskowe. Technologie wzmocnienia podłoża gruntowego, które nie wykorzystują betonu i cementu zazwyczaj wykazują zdecydowanie niższą emisję CO₂. Świadczą o tym m.in. wyniki kalkulacji śladu węglowego wykonanych z użyciem kalkulatora opracowanego przy udziale Europejskiego Stowarzyszenia Wykonawców Fundamentów Specjalnych (EFFC), gdzie porównano projekty budowlane tożsame pod względem technicznym, ale zrealizowane przy zastosowaniu różnych technologii i produktów [3]. Wyjątkowo korzystnie wypada tutaj technologia kolumn żwirowych, która poprzez wykorzystywanie naturalnych materiałów (żwir, piasek) pozwala zmniejszyć tę emisję nawet o około 80% w porównaniu do produktów z użyciem stali, betonu i cementu (pale i kolumny cementowe lub żelbetowe).

Rozwój Kolei Dużych Prędkości to słuszny kierunek rozwoju infrastruktury transportowej w naszym kraju. Musimy zmierzyć się z nowymi wyzwaniami technicznymi, ale mamy też komfort wiedzy i doświadczenia zdobytego przy tego typu realizacjach w innych krajach.

W przypadku robót geotechnicznych istnieje szereg rozwiązań (od wzmocnień palowymi do wzmocnień palowymi) zapewniających spełnienie wymaganych warunków dla nawierzchni (torowiska). Natomiast technologia wibrowymiany wydaje się być tutaj jedną z wiodących, ponieważ jest ona sprawdzona i praktycznie niezawodna ze względu na pełną kontrolę parametrów produkcyjnych. W KDP na świecie stosowana jest od wielu lat stanowiąc jej bezpieczny i przyjazny środowisku fundament. ◀



10. Typowy przekrój wzmocnienia podłoża metodą wibrowymiany [4]



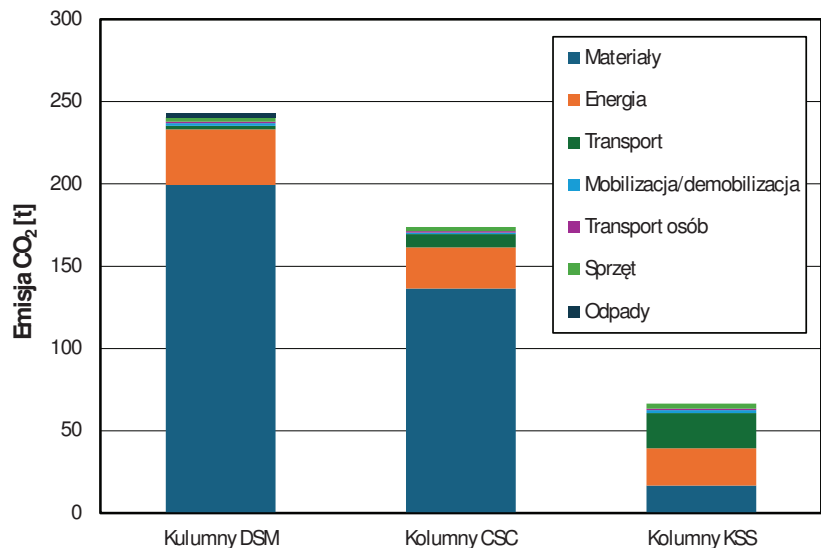
11. Przykładowy zakres wzmocnienia podłoża metodą wibrowymiany [4]

Materiały źródłowe

- [1] Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla budowy infrastruktury kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego – wytyczne projektowania. Tom I.5. Droga szynowa – badania i projektowanie geotechniczne. Wersja 3.0.0., Instytut Kolejnictwa, Centralny Port Komunikacyjny.
- [2] M. Król, M. Sternalski, 2024 Kolumny żwirowe - simply smart, Inżynieria Morska i Geotechnika nr 4 2024.
- [3] A. Gaszewski, M. Sternalski, 2023, Wybrane przykłady emisji CO2 w pracach geoinżynierskich, Przegląd Budowlany nr 7-8/2023.
- [4] Materiały wewnętrzne Keller Group.
- [5] J. Fernández-Ruiz, M. Miranda, J. Castro, L. Medina Rodríguez, A. Castanheira-Pinto, 2023, The effect of stone columns on critical speed for high-speed railway lines.
- [6] M. Shahraki, K-J. Witt, 2015, Improvement of soft subgrade soil using stone columns for high-speed railway track.



12. Realizacja kolumn wibrowymiany [4]



13. Porównanie kalkulacji emisji CO2 dla kolumn CSC, DSM i żwirowych dla wzmocnienia o wartości około 500 tys. PLN obliczone przy użyciu kalkulatora EFFC