

OCENA WZMOCNIENIA PODŁOŻA METODĄ WYMIANY DYNAMICZNEJ NA PODSTAWIE PRÓBNYCH OBCIĄŻEŃ KOLUMN

Grzegorz HORODECKI*

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wykonanego wzmocnienia słabego podłoża gruntowego pod nasyp drogowy w technologii kolumn DR. Omówiono warunki geotechniczne podłoża i zastosowane rozwiązania. Wykonano analizę wstępną na podstawie wyników próbnych obciążeń kolumn oraz pomiarów osiadań wzmocnionego podłoża całego obszaru. Porównano uzyskane wyniki i wyciągnięto wnioski.

Słowa kluczowe: wymiana dynamiczna, kolumny DR, próbne obciążenia, osiadania, analiza.

1. Wprowadzenie

Lokalizacja nasypów drogowych bardzo często obejmuje tereny nie nadające się do posadowienia bezpośredniego bez wcześniejszego wzmocnienia podłoża. Wynika to z dostępności terenów oraz niższej ich wartości. Wzmocnienie podłoża można zrealizować z zastosowaniem różnych – możliwych w danych warunkach gruntowych – technologii, a wybór powinien być podyktowany zakresem stosowności poszczególnych technologii oraz względami ekonomicznymi i czasowymi. Poprawna ocena skuteczności wykonanego wzmocnienia i osiągnięcia założeń projektowych na podstawie danych wykonawczych oraz badań odbiorczych i pomiarów na etapie odbioru robót, umożliwi miarodajną prognozę będącą z reguły podstawą decyzji o rozpoczęciu ostatniego etapu prac obejmujących wykonanie konstrukcji nawierzchni oraz dopuszczenie do ruchu. Rzeczywistą weryfikację takiej prognozy, jak i zastosowanego rozwiązania stanowi dopiero etap eksploatacji.

W artykule przedstawiono inżynierską ocenę skuteczności wzmocnienia podłoża gruntowego wykonanego (w 2009 roku) metodą wymiany dynamicznej DR pod nasyp drogowy obwodnicy miasta Brodnicy na odcinkach km 0+875 ÷ 1+224 i km 1+560 ÷ 1+706 (łącznie około 500 m) na podstawie próbnych obciążeń kolumn, zweryfikowanych pomiarami rzeczywistych osiadań podłoża w trakcie budowy.

2. Warunki geotechniczne podłoża

W podłożu, poniżej warstwy nasypów o niewielkiej miąższości zalegają słabe grunty organiczne w postaci namulów i torfów podścielonych gruntami piaszczystymi (Vössing H. GmbH, Fojud sp. z o.o., 2008; POL-DRÓG sp. z o.o., 2009b). Wydzielono następujące warstwy:

- grunty nasypowe – bardzo niejednorodne, zarówno pod względem składu, jak i stanu, zbudowane głównie z przemieszanych piasków próchnicznych (PdH) z piaskami (P); miąższość nasypów zmienna, nie przekraczająca kilkudziesięciu centymetrów;
- warstwa I – rodzime grunty organiczne – torfy (T), namuły (Nm) i piaski próchniczne (PdH), generalnie występujące poniżej poziomu wody gruntowej; miąższość tych gruntów wynosi od kilkudziesięciu centymetrów do około 3 m, lokalnie więcej;
- warstwa II – holoceny, rodzime grunty mineralne, niespoiste – luźne piaski drobne (Pd), o $I_D = 0,25$, zalegające poniżej wody gruntowej; warstwa ta o miąższości do 2,0 m występuje bezpośrednio poniżej namulów i torfów (warstwa I);
- warstwa III – rodzime grunty mineralne, niespoiste o zróżnicowanym uziarnieniu, od piasków drobnych (Pd) do pospółek (Po), a lokalnie także żwirów (Ż); stan gruntów średnio zagęszczony, o $I_D = 0,40$.

Parametry gruntów przedstawiono w tabeli 1.

W badaniach uzupełniających (Fundament sp. z o.o., 2009) stwierdzono lokalnie występujące pomiędzy gruntami organicznymi a piaskami drobnymi soczewki pyłów piaszczystych w stanie plastycznym

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: ghor@pg.gda.pl

Tab. 1. Parametry geotechniczne (Vössing H. GmbH, Fojud sp. z o.o., 2008; POL-DRÓG sp. z o.o., 2009b)

Nr warstwy	Rodzaj gruntu	I_D / I_L	$\rho^{(n)}$ [t/m ³]	γ' [kN/m ³]	$\Phi^{(n)}$ [°]	$c^{(n)}$ [kPa]	$M_0^{(n)}$ [MPa]
I	T, Nm, PdH		1,10		10,0	10	0,2
II	Pd	0,25	1,70	9	29,2		39,5
III	Pd, Po (+Ż)	0,4	1,75	9	30,0		53,0

i miękkoplastycznym o miąższości 0,3-0,9 m. W większości otworów na głębokości 0,9-1,2 m poniżej poziomu terenu nawiercono wodę gruntową, która stabilizowała się na głębokości 0,2-0,3 m poniżej poziomu terenu.

3. Wykonane wzmocnienie

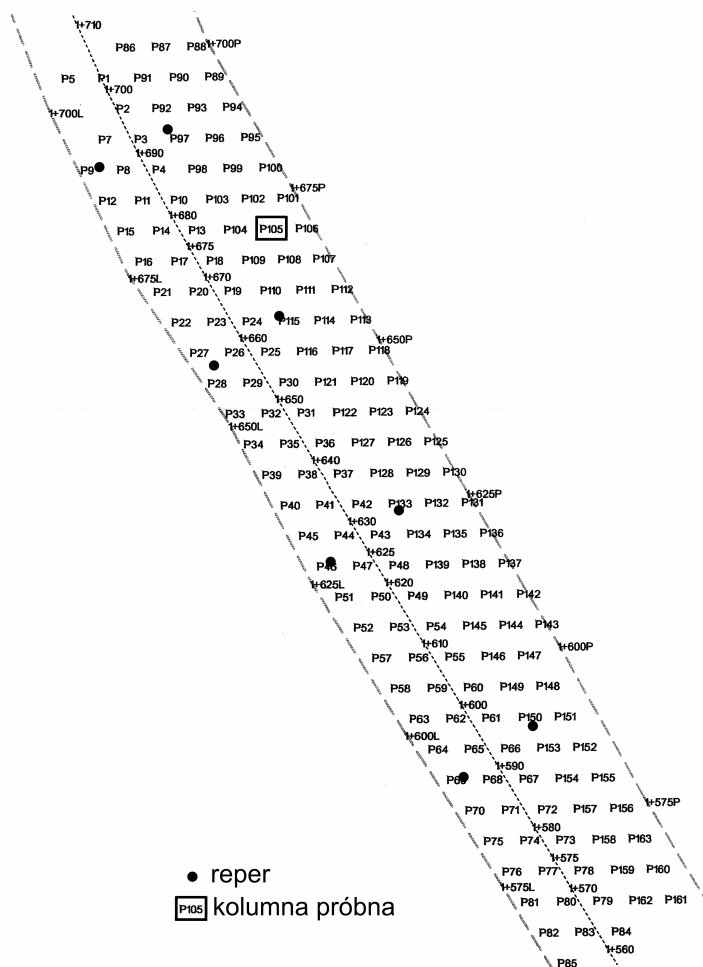
Na odcinkach km 0+875 ÷ 1+224 i km 1+560 ÷ 1+706 podłoże gruntowe wzmocniono metodą wymiany dynamicznej DR (Soletanche Polska sp. z o.o., 2009a i b), z zastosowaniem:

- rozstawu kolumn w siatce trójkąta równobocznego 5 × 5 × 5 m,

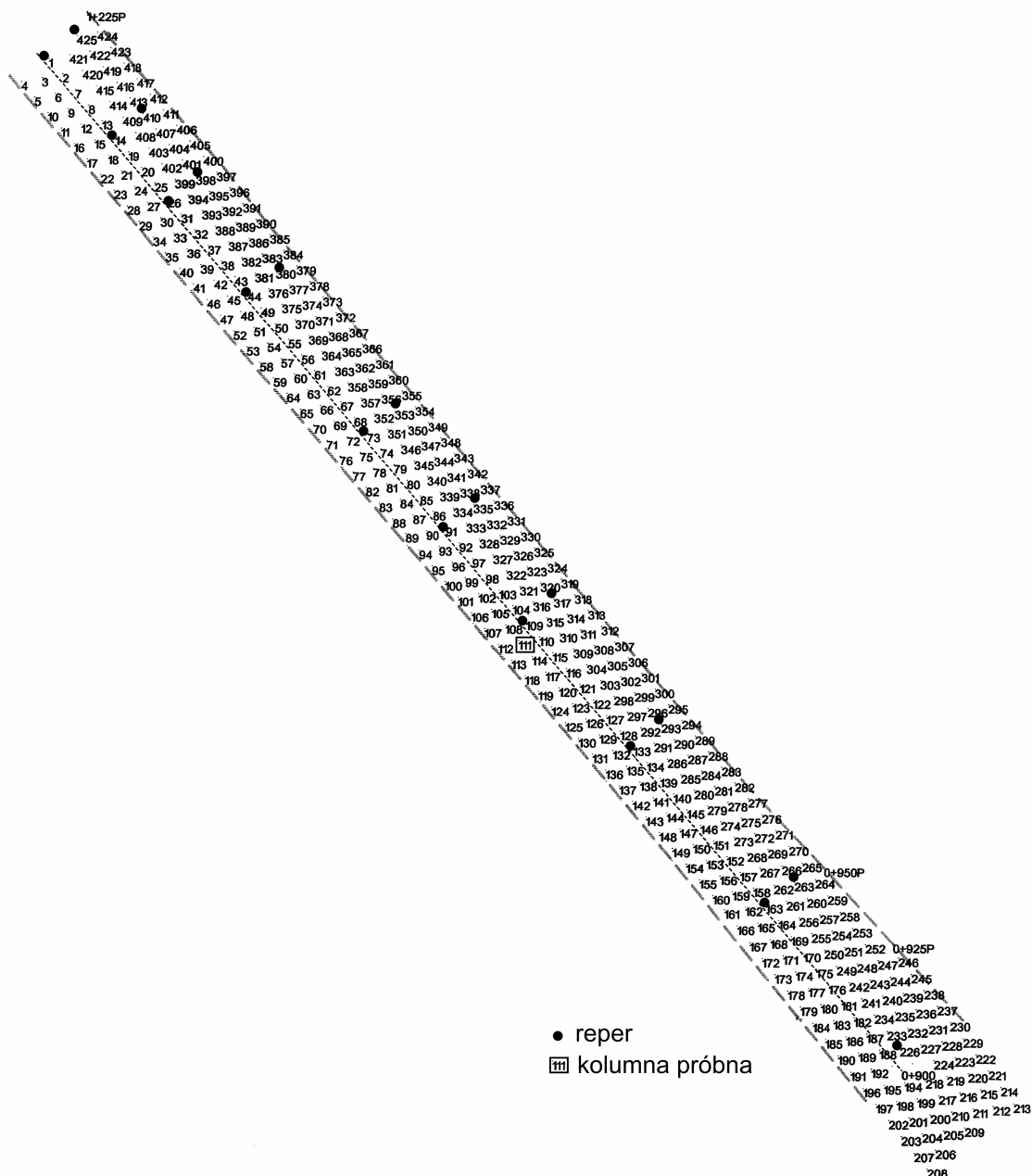
- założonej średnicy kolumn – około 2,5 m,
- do wykonania kolumn użyto pospółki o zawartości frakcji żwirowej około 20%.

Kolumny na odcinku km 1+560 ÷ 1+706 wykonano w okresie od 14-23.07.2009, na odcinku km 0+875 ÷ 1+224 w okresie 28.07-27.08.2009. Miąższość warstw gruntów organicznych na tych odcinkach wynosiła odpowiednio od 1 do 2 m, średnio 1,75 m oraz od 1 do 4 m, średnio 2,5 m.

Przeprowadzono dwa próbnego obciążenia wykonanych kolumn DR (Piletest sp. z o.o., 2009a i b): w km 1+560 ÷ 1+706 – kolumna numer 105 (rys. 1) oraz w km 0+875 ÷ 1+224 – kolumna numer 111 (rys. 2).



Rys. 1. Schemat lokalizacji kolumn, reperów pomiarowych i kolumny próbnej na km 1+560 ÷ 1+706 (POL-DRÓG sp. z o.o., 2009a)



Rys. 2. Schemat lokalizacji kolumn, reperów pomiarowych i kolumny próbnej na km 0+875 ÷ 1+220 (POL-DRÓG sp. z o.o., 2009a)

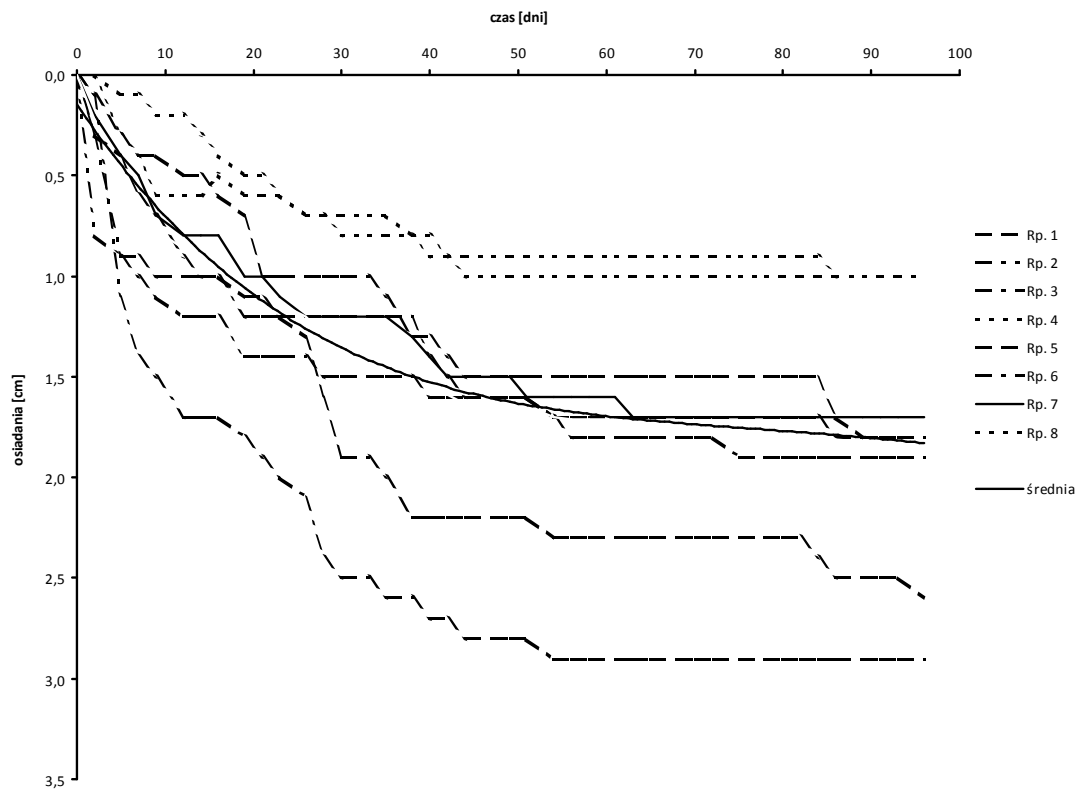
Podłoże po wzmocnieniu obciążono nasypem docelowym, zbrojonym jedną, dwoma lub trzema warstwami geotkaniny w zależności od wysokości nasypu, z przyjęciem większej liczby warstw geotkaniny przy wyższym nasypie. Wysokość nasypu na odcinku km 1+560 ÷ 1+706 wynosiła 1,8 ÷ 2,1 m, na odcinku km 0+875 ÷ 1+224 odpowiednio 1,4 ÷ 3,4 m.

4. Pomiary osiadań

Po wykonaniu wzmocnienia na podłożu zainstalowano repery wgłębne do pomiarów osiadań (POL-DRÓG

sp. z o.o., 2009c). Na odcinku km 1+560 ÷ 1+706 zainstalowano 8 reperów (po dwa w przekroju), na km 0+875 ÷ 1+220 odpowiednio 19 reperów.

Na odcinku km 1+560 ÷ 1+706 pomiary osiadań reperów prowadzono od 26.08.2009 do 30.11.2009 średnio co 2-3 dni. Stwierdzone osiadania wynosiły od 0,5 cm do 3,5 cm – średnio 1,9 cm (rys. 3). Wyraźną stabilizację osiadania stwierdzono na reperach numer 3, 6, 7 i 8. Pozostałe repery (numer 1, 2, 4, i 5) wykazały względną stabilizację osiadań, przy pewnej czułości (załamania na wykresie) na prowadzone wykończeniowe prace budowlane.

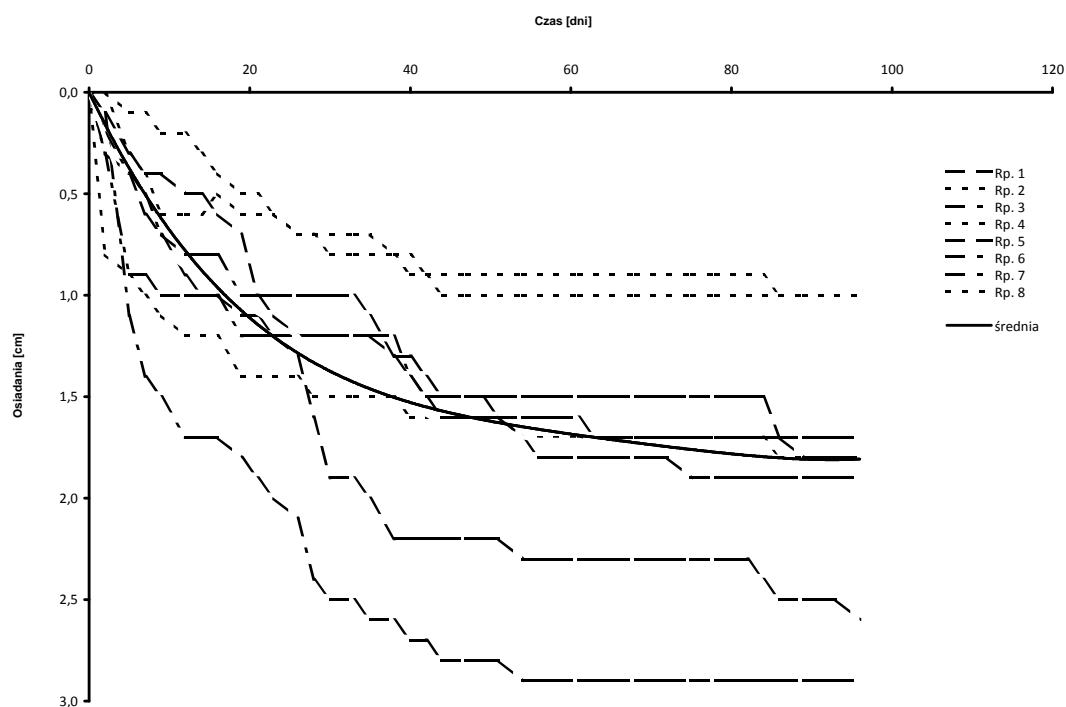


Rys. 3. Wyniki pomiarów osiadań. Odcinek km 1+560 ÷ 1+706

Na odcinku km 0+875 ÷ 1+220 pomiary osiadań prowadzono od 16.09.2009 do 30.11.2009 średnio co 2-3 dni. Pomierzone osiadania osiągnęły wartości w zakresie od 0,8 cm do 4,8 cm – średnio 2,3 cm (rys. 4). Jedynie na reperze numer wystąpiło większe osiadanie: 8,3 cm, jednak z bardzo szybką i wyraźną stabilizacją. Wyraźną stabilizację osiadań wykazały repery numer 3, 4,

5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 18, 19. Na pozostałych reperach (numer 2, 9, 10, 11, 12 i 13) wystąpiły niewielkie przyrosty osiadań w końcowym okresie pomiarów.

Charakter krzywych osiadań wszystkich reperów świadczy o dużej wrażliwości podłoża na każdorazową zmianę obciążenia.



Rys. 4. Wyniki pomiarów osiadań. Odcinek km 0+875 ÷ 1+220

5. Analiza wsteczna na podstawie wyników próbnych obciążeń oraz pomiarów osiadań

Na obszarze wykonanego wzmocnienia wykonano dwa obciążenia próbne: kolumny numer 105 (Piletest sp. z o.o., 2009b) i kolumny numer 111 (Piletest sp. z o.o., 2009a). W obydwu przypadkach zaprojektowano i wykonano obciążenie maksymalną siłą $Q_{\max} = 500$ kN co odpowiada $q_{\max} = 197$ kPa. Projektowane obciążenie obliczeniowe wynosiło dla kolumny numer 105 $q_r = 98,4$ kPa, a dla kolumny numer 111 $q_r = 137,8$ kPa. Wyniki próbnego obciążenia kolumn numer 105 i 111 zestawiono w tabeli 2. Obliczone na podstawie próbnych obciążeń moduły odkształcenia przedstawiono w tabeli 3.

Ponieważ pomierzone osiadania nasypu odnoszą się do obciążenia jedynie ciężarem własnym, do porównania przyjęto moduły określone dla niższego zakresu naprężeń (tab. 3).

Moduł wzmocnionego podłoża odpowiada wartości uśrednionej pomiędzy wartością modułu podłoża i modułu kolumny. Uśredniony moduł edometryczny podłoża określono z wzoru:

$$M_{0\text{sr}} \approx \frac{M_{0k} \cdot A_k + M_{0g} \cdot (A_{kj} - A_k)}{A_{kj}} \quad (1)$$

gdzie: M_{0k} jest modułem kolumny, M_{0g} jest modułem gruntu organicznego, A_k jest polem powierzchni przekroju kolumny, a A_{kj} jest polem powierzchni komórki jednostkowej.

Uzyskano następujące wyniki:

- dla odcinka km 1+560 ÷ 1+706: $M_{0\text{sr}} < 4,6$ MPa,
- dla odcinka km 0+875 ÷ 1+224: $M_{0\text{sr}} = 4,05$ MPa.

Tab. 2. Wyniki próbnego obciążenia (Piletest sp. z o.o., 2009a i b)

Kolumna	Odcinek km	Długość kolumny [m]	q [kPa]	Osiedzenia [mm]	
				$s_{\text{całk.}}$	$s_{\text{trw.}}$
105	1+560 ÷ 1+706	2	$q_{\max} = 196,8$	16,08	11,97
			$q_r = 98,4$	8,51	
111	0+875 ÷ 1+220	3	$q_{\max} = 196,8$	22,09	17,97
			$q_r = 137,8$	13,80	

Tab. 3. Wartości modułów kolumn obliczone na podstawie próbnych obciążeń (Gwizdała i Słabek, 2009a i b)

Kolumna	Odcinek km	Zakres naprężeń [kPa]	Moduł M_0 [MPa]
105	1+560	0 – 49	19,6 *)
	÷	0 – 98	17,5
	1+706	49 – 98	15,7
111	0+875	0 – 78,7	17,2
	÷	0 – 137,8	15,2
	1+220	78,7 – 137,8	13,1

*) wartość zawyżona ze względu na wstępne przeciążenie (25 kPa) w trakcie próbnego obciążenia kolumny

Odpowiednio dla pełnego zakresu naprężeń (tab. 2) uzyskano wyniki $M_{0\text{sr}} = 4,1$ MPa oraz $M_{0\text{sr}} = 3,6$ MPa. Rzeczywisty średni moduł edometryczny podłoża ma wartość większą, gdyż w technologii wymiany dynamicznej moduł podłoża rodzimego pomiędzy kolumnami zwiększa się w wyniku wpływu rozporu bocznego kolumny.

Na podstawie wyników pomiarów osiadań pod obciążeniem nasypem, dla obszarów odpowiadających poszczególnym reperom oraz odpowiadającym lokalizacji miąższościom gruntów organicznych określono metodą analizy wstecznej średnie moduły ściśliwości wzmocnionego podłoża. Uzyskano następujące wyniki:

- na odcinku 1+560 ÷ 1+706: $M_0 = 2,5 \div 7,6$ MPa, przy wartości średniej $M_{0\text{sr aw}} = 4,6$ MPa,
- na odcinku km 0+875 ÷ 1+224: $M_0 = 2 (0,8) \div 8,7$ MPa, przy wartości średniej $M_{0\text{sr aw}} = 4,23$ MPa.

W analizie pominięto wyniki pomiarów osiadań reperu (numer 8), którego zachowanie odbiegało od pozostałych. Uwzględniając fakt, zawyżonej wartości modułu uśrednionego z próbnego obciążenia na odcinku km 1+560 ÷ 1+706, można stwierdzić, że wartości średnie modułów z analizy wstecznej są niewiele większe od wartości obliczonych na podstawie próbnych obciążeń kolumn (tab. 4). Różnica wartości może być między innymi efektem wpływu rozporu bocznego kolumny.

Uzyskane z powyższej analizy wyniki umożliwiły oszacowanie dalszych (oprócz wartości, które już wystąpiły) osiadań po wykonaniu konstrukcji jezdni i obciążeniu ruchem na podstawie uśrednionych modułów dla zakresu docelowego naprężeń (zakresy pośrednie z tab. 3), w zakresie 1,0 ÷ 1,9 cm, przy wartości średniej 1,8 cm dla odcinka km 1+560 ÷ 1+706 i odpowiednio

Tab. 4. Porównanie wartości modułów określonych z próbnych obciążeń z wartościami z analizy wstecznej

Odcinek	1+560	0+875
	÷	÷
	1+ 706	1+220
Wartość modułu edometrycznego określonego z próbnego obciążenia w MPa	< 4,6	4,6
Wartość średnia modułu edometrycznego określonego z analizy wstecznej na podstawie osiadań w MPa	4,05	4,23

1,35 ÷ 5,4 cm, przy wartości średniej 3,3 cm dla odcinka km 0+875 ÷ 1+224. Część z tych osiadań wystąpiła w trakcie wykonania warstw konstrukcyjnych przed oddaniem drogi do eksploatacji.

Ze względu na duże zróżnicowanie miąższości warstw gruntów wzmocnianych w poszczególnych odcinkach oraz zjawisko pełzania, powyższe oszacowania stanowią pewne przybliżenie, dopuszczalne dla celów inżynierskiej prognozy, zachowania się podłoża pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Z tego względu należy zachować pewną ostrożność w ocenach odbiorowych pamiętając, że przewidywane wartości rzeczywiste osiadań na etapie realizacji konstrukcji oraz eksploatacji mogą się nieco różnić od szacowanych przedstawioną metodą.

6. Podsumowanie

Wyniki próbnych obciążeń kolumn pozwalają na weryfikację założeń projektowych oraz przybliżoną ocenę skuteczności wykonania wzmocnienia metodą wymiany dynamicznej słabego podłoża gruntowego. Umożliwiają również prognozę dalszego zachowania się wzmocnionego podłoża po wykonaniu warstw konstrukcyjnych oraz obciążeniu ruchem. Wiarygodność takiej oceny zależy od jakości, liczby oraz reprezentatywności wyników próbnych obciążeń. Celowe jest łączne wykonywanie próbnych obciążeń wzmocnianego podłoża pomiędzy kolumnami (Godlewski, 2007) opowiadające poszczególnym lokalizacjom badanych kolumn. Istotne jest również uwzględnienie zróżnicowanej budowy geotechnicznej podłoża zarówno pod względem złożoności, jak i miąższości warstw gruntów wzmocnianych. W analizowanym przypadku układ warstw był względnie jednorodny, przy znacznym zróżnicowaniu głębokości zalegania gruntów organicznych, jednak stosunkowo niewielkiej miąższości (nieprzekraczającej 3 m), a kolumny opierały się na warstwie nośnej.

W przypadku bardziej zróżnicowanego układu warstw gruntów słabych, jak również ich większych miąższościach i kolumnach zawieszonych, podstawą oceny skuteczności wzmocnienia metodą kolumn DR mogą być również wyniki próbnych obciążeń, jednak wskazana jest oddzielna analiza wydzielonych obszarów o relatywnie jednorodnej budowie podłoża, do których dostosowana będzie liczba i lokalizacja próbnych obciążeń.

Należy zwrócić uwagę również na problem nierównomierności osiadań przy zastosowaniu wzmocnienia metodą kolumn DR. W przedstawionej analizie możliwe jest jedynie określenie średnich osiadań obszaru. W celu wyrównania osiadań konieczne jest zastosowanie konstrukcji z geosyntetyków dostosowanych do rozstawu kolumn oraz warunków geotechnicznych i wysokości nasypu.

Należy podkreślić, że dokładniejsza ocena jakości wykonanych robót wzmocniających metodami dynamicznymi nie może być oparta tylko na ocenie

jakości tylko jednego elementu takiego wzmocnienia, na przykład jakości kolumny lecz musi uwzględniać uzyskane globalne parametry ośrodka gruntowego. Z tego względu bardziej miarodajna ocena jakości wzmocnienia metodą kolumn DR, jak i prognoza osiadań będąca podstawą decyzji o rozpoczęciu realizacji warstw konstrukcyjnych, powinna oprócz wyników próbnych obciążeń opierać się na wynikach kompleksowego monitoringu obejmującego pomiary osiadań w trakcie realizacji, badania geotechniczne (miedzy innymi podłoża przed i po realizacji, wykonanych kolumn, podłoża pomiędzy kolumnami, pomiaru ciśnienia wody w porach gruntu, pozwalające określić bezpośrednio moduły wzmocnionego podłoża, nadwyżkę ciśnienia porowego, wytrzymałość na ścinanie bez drenażu) oraz badania dodatkowe, na przykład pomiary naprężeń i osiadań nad kolumnami i pomiędzy kolumnami, pomiary sił w geosyntetykach.

Literatura

- Fundament sp. z o.o. (2009). Sprawozdanie z geotechnicznych badań podłoża gruntowego po wykonaniu wzmocnienia na budowie trasy przemysłowej aktywizującej tereny inwestycyjne miasta Brodnicy. Województwo kujawsko-pomorskie. *Fundament sp. z o.o.*, Gdańsk.
- Godlewski T. (2007). Metody badań odbiorczych podłoża gruntowego wzmocnionego kolumnami wymiany dynamicznej. W: *Materiały III Symposium WPGIwP, Puszczkowo 2007*.
- Gwizdała K., Słabek A. (2009a). Opinia geotechniczna dotycząca wyników próbnego obciążenia płytą sztywną kolumny kamiennej nr 105 wykonanej metodą wymiany dynamicznej. Gdańsk.
- Gwizdała K., Słabek A. (2009b). Opinia geotechniczna dotycząca wyników próbnego obciążenia płytą sztywną kolumny kamiennej nr 111 wykonanej metodą wymiany dynamicznej. Gdańsk.
- Piletest sp. z o.o. (2009a). Wyniki próbnego obciążenia kolumny kamiennej płytą sztywną. Kolumna nr 111. Bielsko-Biała.
- Piletest sp. z o.o. (2009b). Wyniki próbnego obciążenia kolumny kamiennej płytą sztywną. Kolumna nr 105. Bielsko-Biała.
- POL-DRÓG sp. z o.o. (2009a). Budowa trasy Przemysłowej aktywizującej tereny inwestycyjne Miasta Brodnicy. Dokumentacja powykonawcza. Wymiana dynamiczna gruntów. Piła.
- POL-DRÓG sp. z o.o. (2009b). Geotechniczne rozpoznanie podłoża gruntowego rodzimego trasy przemysłowej miasta Brodnicy. Piła.
- POL-DRÓG sp. z o.o. (2009c). Pomiary osiadań reperów kontrolnych. Piła.
- Soletanche Polska sp. z o.o. (2009a). Budowa trasy przemysłowej aktywizującej tereny inwestycyjne miasta Brodnicy. Projekt technologiczny dynamicznej wymiany gruntu – etap 1 km km 1+156 ÷ 1+706. Warszawa.
- Soletanche Polska sp. z o.o. (2009b). Budowa trasy przemysłowej aktywizującej tereny inwestycyjne miasta Brodnicy. Projekt technologiczny dynamicznej wymiany gruntu – etap 2 km km 0+875 ÷ 1+224. Warszawa.
- Vössing H. GmbH, Fojud sp. z o.o. (2008). Budowa trasy Przemysłowej aktywizującej tereny inwestycyjne Miasta Brodnicy. Projekt wykonawczy. Część geotechniczna.

Wymiana dynamiczna gruntu. Konsorcjum firm
Ingenieurbüro Dipl. Ing. H. Vössing GmbH Berlin oraz
Fojud sp. z o.o. Poznań.

**EVALUATION OF GROUND IMPROVEMENT
WITH DYNAMIC REPLACEMENT METHOD BASED
ON TRIAL LOAD TESTS OF COLUMNS**

Abstract: The paper presents the analysis of realised ground improvement of soft subsoil by means of dynamic replacement method under road embankment. The description of the geotechnical properties and implemented solutions were presented. The backup analysis, based on the results of the trial load tests of columns and settlement results of the whole improvement area was done. The analysis results with the measured results were compared and conclusions were drawn.