



Ryc. 1. Wykonywanie kolumn DSM-d pod nasypą drogi krajowej S7

Wzmocnienie podłoża pod nasypy drogi krajowej S7 na odcinku od węzła Elbląg do Kalska za pomocą kolumn DSM-d

■ dr inż. Agata Leśniewska, Keller Polska Sp. z o.o.

Pod nasypy drogi krajowej S7 na odcinku od węzła Elbląg do miejscowości Kalsk, którego generalnym wykonawcą była Eurovia Polska SA, zaprojektowano wzmocnienie podłoża kolumnami wykonanymi w technologii wglębnego mieszania gruntu na sucho DSM-d (*Deep Soil Mixing dry*). Metoda ta powstała w Szwecji na początku lat 90. i była najczęściej stosowaną technologią wzmocniania gruntu w krajach skandynawskich. Opracowano ją w celu wzmocnienia słabych i silnie nawodnionych gruntów, jak np. glin plastycznych i miękkoplastycznych, pyłów z dodatkiem części organicznych, namułów i torfów.

Technologia wykonania kolumn DSM-d (ryc. 1) polega na formowaniu w gruncie kolumn o średnicy np. 60 cm. Odbывается to przez mechaniczne zmieszanie in situ gruntu oraz suchego spoiwa tłoczonego pneumatycznie. Do wykonania kolumn stosuje się specjalne mieszadło mechaniczne, które wkręca się w podłoże na odpowiednią głębokość. Następnie, zmieniając kierunek obrotów i zwiększając prędkość obrotową, wyciąga się powoli mieszadło z gruntu, czemu towarzyszy kontrolowane podawanie spoiwa za pomocą sprężonego powietrza oraz formowanie trzonu kolumny. Trzon kolumny jest formowany przy wysokiej energii mieszania (minimalna liczba obrotów wynosi 100 obr./min) i małej prędkości podciągania, ok. 20 mm/obr.

Pod nasypy S7 na odcinku od węzła Elbląg do Kalska firma Keller Polska wykonała łącznie ok. 146 350 sztuk kolumn DSM-d o średnicy 60 cm i łącznej długości ok. 679 000 m.b. Na każdym etapie realizacji prowadzona była kontrola jakości wykonania robót.

Pilotażowe badania laboratoryjne

Przed rozpoczęciem robót z rejonu planowanych prac pobrano trzy charakterystyczne typy gruntów słabych: torf, namuł oraz glinę z domieszką próchnicy do pilotażowych badań laboratoryjnych. Celem badań było wstępne ustalenie odpowiedniego składu i ilości spoiwa hydraulicznie czynnego w kolumnach DSM-d.

W pierwszym etapie badań próbki słabych gruntów związane czterema rodzajami spoiwa hydraulicznie czynnego. Każdy rodzaj gruntu został wymieszany z każdym rodzajem spoiwa w proporcjach wagowych 150 i 200 kg spoiwa na 1 m³ gruntu.

W drugim etapie zawężono zakres badań do dwóch rodzajów gruntu: torfu i namułu, a jako spoiwo przyjęto dwa rodzaje spoiwa, wybrane ze względu na dobre efekty wzmocnienia uzyskane w badaniach pierwszego etapu. Obydwa rodzaje gruntu zostały wymieszane z każdym rodzajem spoiwa w proporcjach 100, 150 i 200 kg na 1 m³ gruntu.

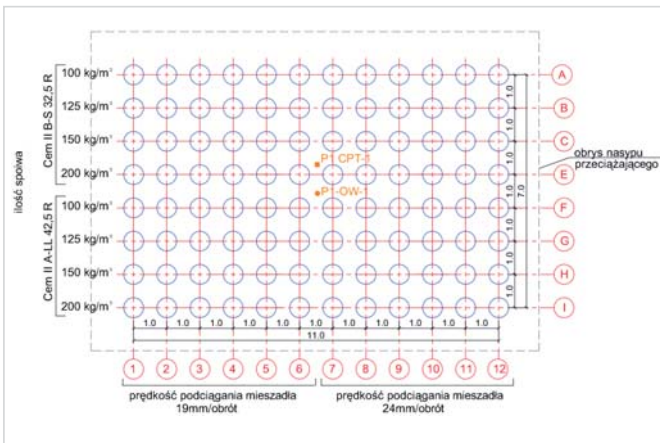
Po siedmiu i 28 dniach dojrzewania próbek oznaczono ich wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe, na podstawie której wyznaczono wytrzymałość cementogruntu na ścinanie i porównano ją z wymaganiami specyfikacji technicznej.

Pilotażowe badania laboratoryjne wykazały konieczność zastosowania wyższych zawartości spoiwa w rejonie występowania torfów oraz możliwość ograniczenia zawartości spoiwa na obszarach, gdzie występują jedynie gliny i namuły. Do zastosowania na budowie wytypowano dwa rodzaje cementu. Wyniki badań laboratoryjnych zweryfikowano w pilotażowych badaniach polowych.

Pilotażowe badania polowe – poletka próbne

W celu weryfikacji wyników badań laboratoryjnych wykonano poletka próbne umożliwiające zbadanie rzeczywistych wytrzymałości kolumn DSM-d na ścinanie w warunkach polowych.

Na podstawie dostępnej dokumentacji geologicznej wytypowano trzy lokalizacje poletek o najbardziej niekorzystnych warunkach gruntowych. Na każdym z nich wykonano po 96 kolumn DSM-d rozmieszczonych w siatce kwadratowej, obejmującej osiem rzędów po 12 kolumn. Kolumny w rzędach poziomych zróżnicowano pod względem rodzaju i zawartości spoiwa, natomiast kolumny w rzędach pionowych wykonano przy dwóch różnych prędkościach podciągania mieszadła (ryc. 2).



Ryc. 2. Plan poletka próbnego nr 1

Wytrzymałość in situ wykonanych kolumn zbadano metodą penetracyjną po siedmiu i 28 dniach wiązania pod obciążeniem metrowym nasypem przeciążającym.

Kontrola jakości w trakcie wykonywania robót

Podczas prowadzenia prac jakość wykonania kolumn DSM-d kontrolowano na bieżąco dzięki automatycznemu zapisowi parametrów produkcyjnych każdej kolumny, takich jak data wykonania kolumny, numer kolumny, zagłębienie kolumny poniżej poziomu roboczego, ilość zużytego spoiwa, prędkość obrotowa mieszadła w fazie penetracji oraz w fazie wykonywania kolumny oraz prędkość podciągania mieszadła.

Terenowe badania wytrzymałości

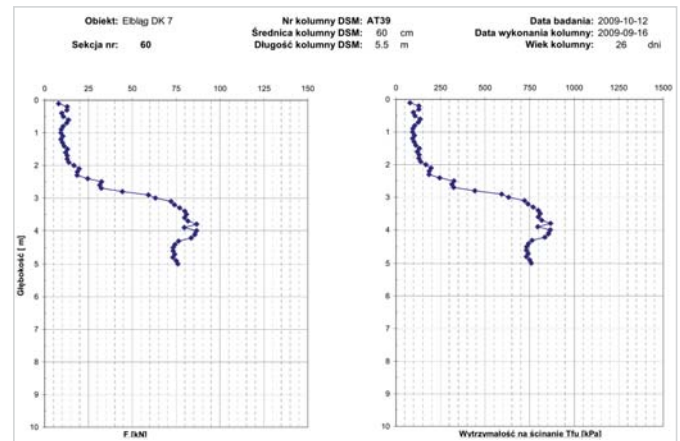
Badanie wytrzymałości kolumn na ścinanie wykonywano urządzeniem stosowanym powszechnie do wykonywania sondowań statycznych CPT. Badanie polegało na wciskaniu ze stałą prędkością, równą 20 mm/s, w związaną kolumnę końcówki skrzydełkowej o wymiarach 400–600 mm. Opór w trakcie wciskania końcówki mierzono czujnikiem siły, a jego wartość [kN] monitorowano na bieżąco i rejestrowano (ryc. 3).



Ryc. 3. Badanie wytrzymałości na ścinanie kolumn DSM-d oraz przykładowa końcówka pomiarowa o średnicy 500 mm

Wartość zmierzonej siły pomniejszono o tarcie na poboczniczy żerdzi pomiarowych wyznaczone na podstawie pomierzonych oporów końcówki skrzydełkowej w gruncie niewzmocnionym oraz na podstawie sondowania CPT wykonanego w danym rejonie.

Badania wytrzymałości przeprowadzono dla co najmniej 0,5% wykonanych kolumn DSM-d. Wynik przedstawiano w formie wykresu oporu, jaki stawia kolumna [kN], i odpowiadającej mu wytrzymałości na ścinanie [kPa] w funkcji głębokości (ryc. 4).



Ryc. 4. Wykres oporu materiału oraz wytrzymałości na ścinanie kolumny DSM-d

Laboratoryjne badania wytrzymałości

Pod jednym z projektowanych przepustów, zlokalizowanym w rejonie występowania gruntów organicznych, konieczne było ścięcie kolumn DSM-d do założonego, głębszego poziomu posadowienia. Z uzyskanych w ten sposób odcinków głowic kolumn wycięto sześciennie próbki cementogruntu i zbadano ich wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe (ryc. 5).



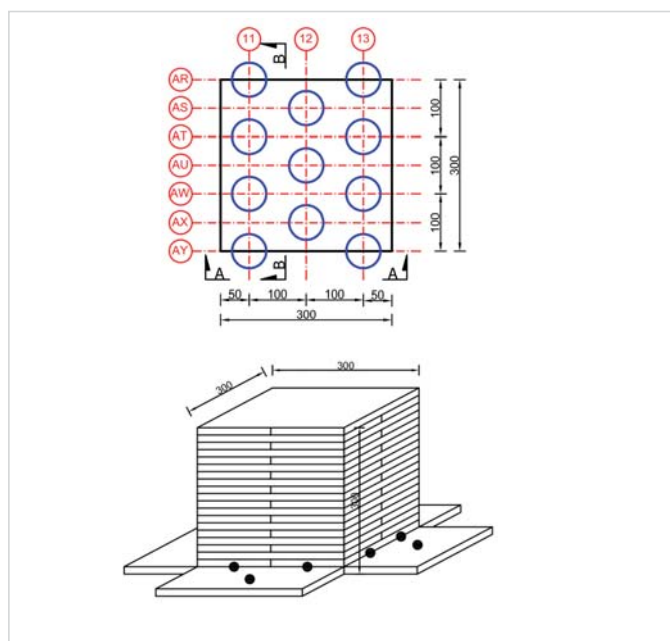
Ryc. 5. Odcinek związanej kolumny DSM-d oraz wycięte z niej próbki sześciennie

Wytrzymałość na ścinanie, określona na podstawie jednoosiowego ściskania próbek, była zbliżona do wyników badań wytrzymałości uzyskanych w polowych badaniach penetracyjnych.

Próbne obciążenia

W ramach kontroli powykonawczej kolumn DSM-d wykonano próbne obciążenie grupy kolumn za pomocą płyt drogowych oraz próbne obciążenie nasypem.

Próbne obciążenie płytami drogowymi przeprowadzono dla 11 kolumn wykonanych w rejonie niekorzystnych warunków gruntowych. Grupę kolumn obciążono płytami ułożonymi w formie sześcianu o wymiarach w podstawie 3 x 3 m i wysokości 3 m (ryc. 6). Po bokach ułożono po jednej dodatkowej płycie. Łączne obciążenie od płyt wyniosło 66 kN/m², co równoważyło ciężar nasypu oraz planowanego obciążenia eksploatacyjnego na tym odcinku drogi.

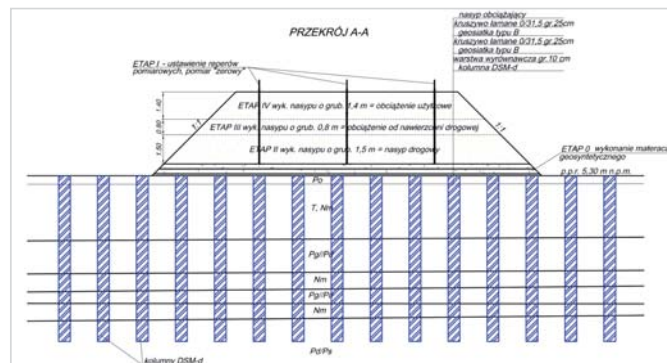


Ryc. 6. Próbne obciążenie grupy kolumn DSM-d za pomocą płyt drogowych

Na każdym z boków sześcianu zainstalowano po dwa repery do pomiaru osiadania oraz po jednym reperze na każdej z dodatkowych płyt umieszczonych po bokach. Pomiar zerowy wykonano po ułożeniu płyt i założeniu reperów. Kolejne pomiary osiadania kontynuowano co drugi dzień przez pierwsze dwa tygodnie, a następnie z częstotliwością dwóch pomiarów w tygodniu. Łączny czas trwania obserwacji wyniósł ok. 245 dni. Wyniki badania wykazały stabilizację osiadania po ok. 90 dniach. Średnie osiadanie wyniosło ok. 12,0 cm i było mniejsze niż osiadanie prognozowane. Prędkość osiadania była jednak wolniejsza niż w prognozie, która zakładała że 70% osiadania całkowitego nastąpi w ciągu pierwszych 14 dni od przyłożenia obciążenia.

Próbne obciążenie nasypem przeprowadzono również w rejonie niekorzystnych warunków gruntowych. Nasypem obciążono grupę 400 kolumn DSM-d wykonanych na powierzchni o wymiarach 20 x 20 m. Założono, że próbne obciążenie będzie odwzorowywało rzeczywiste warunki budowania nasypu oraz warunki występujące w fazie eksploatacji drogi. Całkowita wysokość nasypu równoważyła obciążenie od projektowanego nasypu oraz obciążenia użytkowego. Łącznie obciążenie kolumn DSM-d przy pełnej wysokości nasypu na powierzchni o wymiarach 11,4 x 11,4 m wyniosło 76,6 kPa (ryc. 7).

Przed przystąpieniem do badania, po wstępnym wyrównaniu i dogoszczeniu platformy roboczej przygotowano materac z geosyntetyków, na którym ustawiono repery robocze i wykonano zerowy pomiar kontrolny. Od tego momentu prowadzono pomiary osiadania z częstotliwością jednego pomiaru na tydzień. Po ułożeniu materaca wykonano pierwszą warstwę nasypu o miąższości 1,5 m, a po 90 dniach następną warstwę o miąższości 0,8 m. Po upływie kolejnych 30 dni wykonano nasyp odwzorowujący obciążenie użytkowe. Ostatni etap oczekiwania wynosił 30 dni, po czym zakończono badanie.



Ryc. 7. Próbne obciążenie podłoża z kolumnami DSM nasypem

Osiadania wzmocnionego podłoża pod nasypem budowanym etapowo, zgodnie z założeniami specyfikacji technicznej, wykazały stabilizację po ok. 60 dniach od rozpoczęcia badania i potwierdziły spełnienie założeń projektowych.

Monitoring osiadania nasypu drogowego

Zgodnie z wymogami specyfikacji technicznej prowadzono monitoring osiadania nasypów drogowych na całym odcinku wzmocnionym metodą DSM-d. Dla celów monitoringu na powierzchni materaca geosyntetycznego zainstalowano co ok. 30 m w osi drogi repery talerzowe do pomiaru osiadania. Obserwacje geodezyjne prowadzono z częstotliwością jednego pomiaru w tygodniu (ryc. 8).



Ryc. 8. Przykładowy wykres osiadania reperu na podłożu wzmocnionym kolumnami DSM-d

Monitoring osiadania nasypu drogowego wykazał stabilizację osiadania nasypu po ok. 30 dniach od rozpoczęcia pomiarów oraz wartości osiadania całkowitego nieprzekraczające wartości prognozowanych.

Podsumowanie

Przy rosnących obecnie wymaganiach w stosunku do wykonawstwa robót oraz dużej konkurencji na rynku budowlanym odpowiednie przygotowanie do budowy oraz szczegółowa kontrola w trakcie i po wykonaniu robót mają coraz większe znaczenie, pozwalając na optymalizację kosztów i uniknięcie błędów w trakcie prowadzenia prac. Szczegółowe badania kontrolne dają świadectwo wysokiej jakości wykonanych robót zarówno wykonawcy, jak i inwestorowi.