

# Wgłębne mieszanie gruntu w akwenach morskich

Rozbudowa terminali portowych oraz znajdujących się w ich bezpośrednim sąsiedztwie obszarów przemysłowych lub terenów mieszkalnych wymaga załadowania akwenu morskiego. Wymaga to prac wstępnych, np. przeprowadzenia robót wzmacniających grunt morski. Jedną z wykorzystywanych wtedy technologii jest metoda wgłębego mieszania gruntu DSM.

Osady budujące dno morskie bardzo często są gruntami nieskonsolidowanymi, nierzadko pochodzenia organicznego, o niskich parametrach wytrzymałościowo-odkształceniowych. Przeważnie przed przystąpieniem do właściwego załadowania, w ramach robót pogłębiarskich, grunty te wybierane są z dna i zastępowane materiałem piaszczystym, zapewniającym podłożu odpowiednią nośność oraz stateczność. Jednakże w przypadku ograniczonej dostępności materiału zasypowego lub w celu zminimalizowania objętości przemieszczanego na odkład materiału osadowego możliwe jest zastosowanie technologii wzmacniających podłoże bez konieczności pogłębiania. Jedną z nich jest metoda wgłębego mieszania gruntu DSM (ang. deep soil mixing).

Wgłębne mieszanie gruntu od dziesięcioleci ma zastosowanie do wzmacnia-

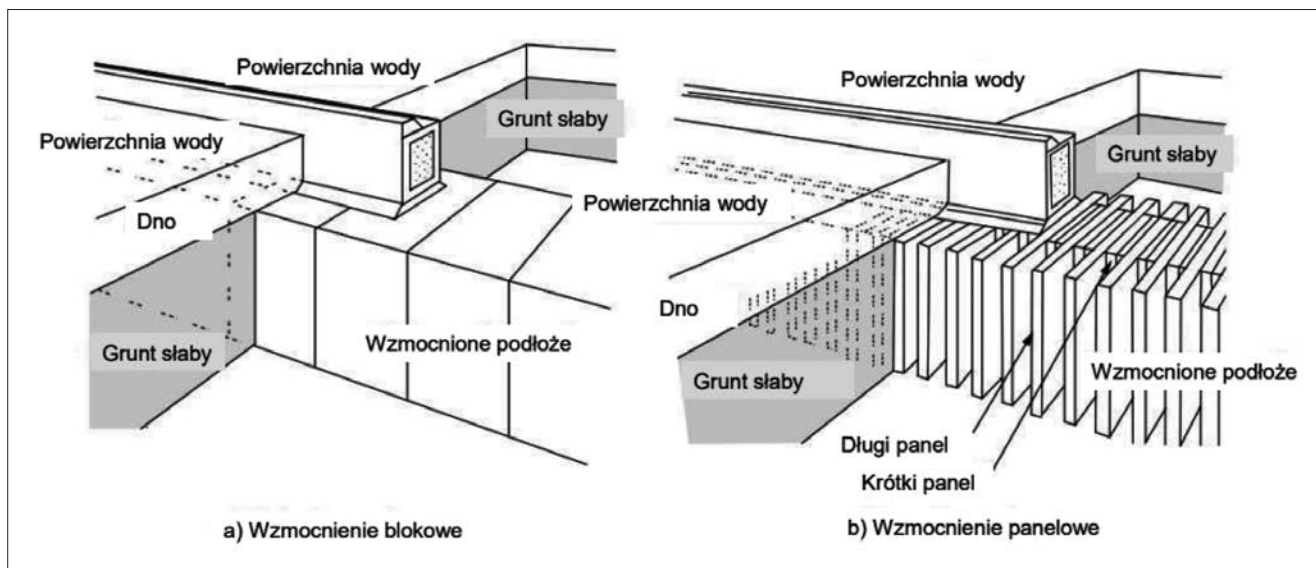
**dr inż. Rafał Buca**

Keller Polska

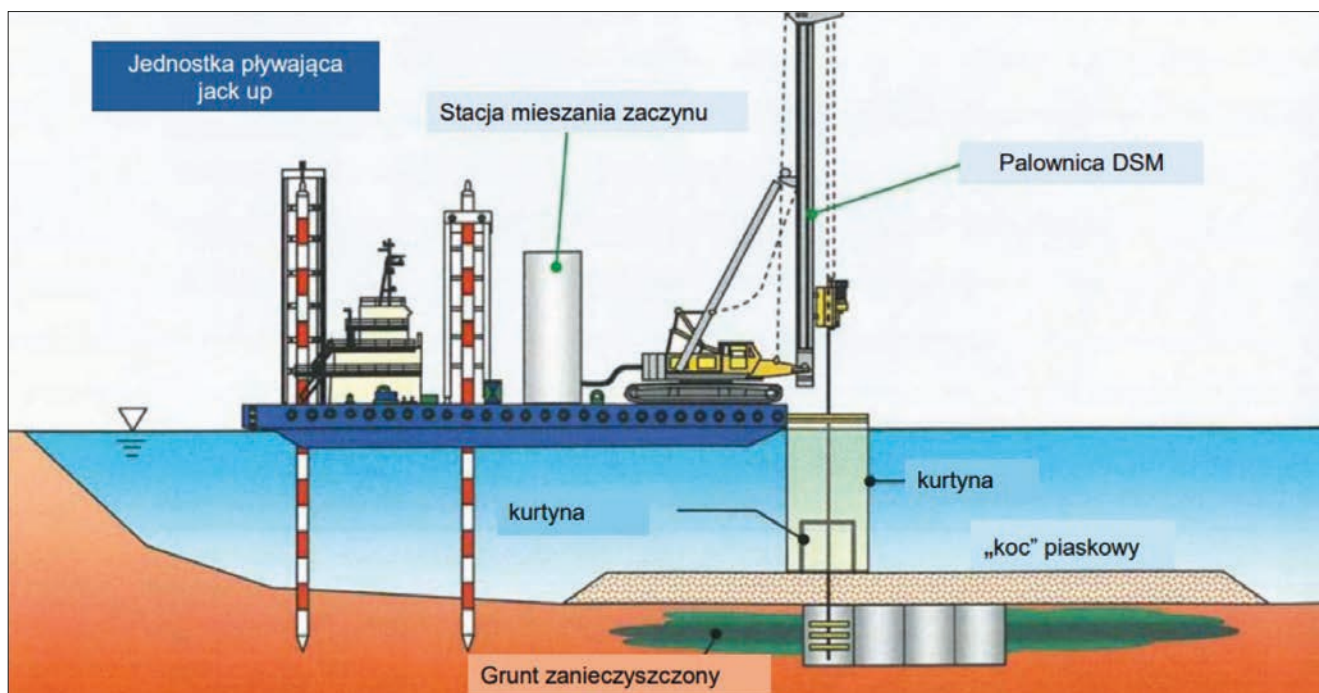
nia gruntu in situ poprzez wykonywanie w nim kolumn cementowo-gruntowych bez wytwarzania dużych ilości urobku. Technologia ta z powodzeniem znalazła zastosowanie również w hydrotechnice morskiej, w szczególności na Dalekim Wschodzie. W Japonii metodę DSM stosuje się do wzmacniania podłoża pod budowanymi falochronami, opaskami brzegowymi, a także nabrzeżami [1]. W rozwiązaniach tych zadaniem kolumn DSM jest zwiększenie sztywności podłoża w celu ograniczenia jego deformacji, zmniejszenie parcia na ścianę frontową nabrzeża i/lub zwiększenie odporu przed nią oraz – co jest nie bez znaczenia w tamtym regionie świata – zmniejszenie potencjału upłynnienia gruntu w wyniku trzęsienia ziemi. W zależno-

ści od warunków gruntowych oraz wymagań stawianych konstrukcji morskiej kolumny wykonuje się jedna obok drugiej, tworząc tym samym masywny blok cementogruntu (ang. solidification), lub w układzie paneli (rys. 1).

Ciekawym rozwiązaniem jest system wzmocnienia podłoża polegający na wykonaniu w dnie kolumn DSM w siatce, np. kwadratowej, w której całkowita powierzchnia kolumn stanowi ok. 10–15% całkowitej powierzchni obszaru wzmacnianego, co jest relatywnie niską wartością współczynnika wzmocnienia. Bezpośrednio na głowicach kolumn DSM układana jest warstwa urobku z robót pogłębiarskich, zmieszana uprzednio w pływającej stacji z zaczynem cementowym CPM (ang. cement pipe mixing), a następnie transportowana rurociągiem na dno [2]. W rezultacie otrzymuje się układ kolumn zwieńczonych relatywnie



Rys. 1. Schematy wzmocnienia podłoża pod konstrukcją morską [1]



Rys. 2. Wgłębne mieszanie zanieczyszczonych osadów dennych [2]

sztywną warstwą transmisyjną, odporną na efekty przebiccia, umożliwiającą transfer większości obciążenia bezpośrednio na głowice kolumn będących w stosunkowo dużym rozstawie.

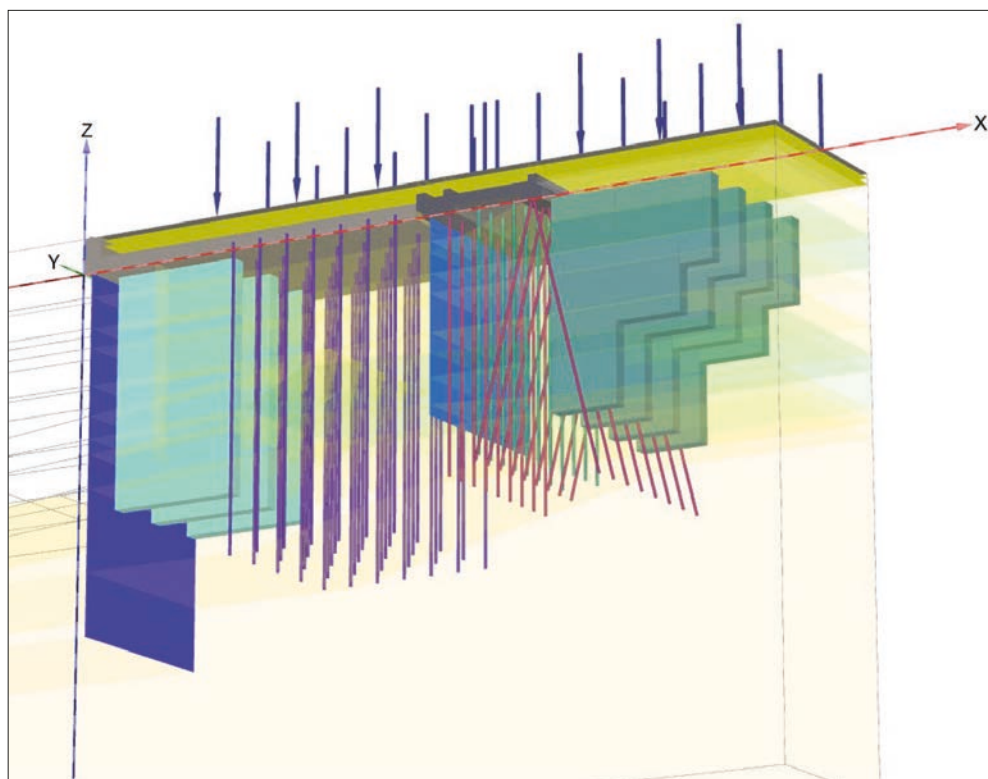
Wyzwaniem podczas wgłębego mieszania w warunkach morskich jest zapewnienie wymagań ochrony środowiska dotyczących zarówno jakości wody, jak i bezpieczeństwa gatunków zwierząt w niej żyjących. W trakcie realizacji robót należy maksymalnie ograniczyć rozprzestrzenianie się materiału cementowego w wodzie morskiej. Szczególną ostrożność należy zachować podczas mieszania osadów dennych, które z natury są gruntami luźnymi, organicznymi i bardzo często również zanieczyszczonymi. W celu ograniczenia unoszenia się osadów dennych podczas ich mieszania z zaczynem cementowym warstwę tę uprzednio przykrywa się „kocem” z piasku ułożonego na geowłókninie separacyjnej (rys. 2). W przypadku braku przykrycia kocem prędkość obrotowa oraz prędkość podciągania urządzenia mieszającego muszą być ograniczone,

tak aby zbyt nie podrywać osadów z dna morskiego. Dodatkowym zabiegiem ograniczającym rozprzestrzenianie materiału cementowego jest stosowanie kurtyn pionowych, spuszcanych na dno morskie bezpośrednio z jednostki pływającej wykonującej mieszanie wgłębne (rys. 2). W trakcie realizacji robót poza kurtyną zabezpieczającą monitorowane są wartości zasolenia, pH, zawartość tlenu w wodzie oraz jej zmętnienie. Przed przystąpieniem do prac na wodzie wyznaczane są strefy bezpieczeństwa dla ssaków morskich, mierzone odległością od jednostki pływającej wykonującej mieszanie wgłębne. W przypadku zaobserwowania ssaka w tej strefie roboty są wstrzymywane.

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości i oceny wpływu wgłębego mieszania na ukształtowanie dna morskiego przed przystąpieniem do robót wykonuje się trójwymiarową mapę batymetryczną. Wprowadza się ją następnie do modelu BIM, który jest na bieżąco aktualizowany w trakcie wykonywania kolumn podwodnych. Do modelu w czasie rzeczywistym

przypisywane są informacje dotyczące parametrów produkcyjnych poszczególnych kolumn oraz pomiary wypiętrzania się dna w trakcie mieszania wgłębego. Wszystkie te dane wizualizowane są w 3D. Kontrola jakości wykonywanych kolumn musi być dostosowana do warunków pracy na morzu. Pobieranie świeżych próbek z kolumn jest problematyczne ze względu na ryzyko ich rozmycia podczas wynoszenia na powierzchnię, dlatego preferuje się pobieranie próbek rdzeniowych ze związanych już kolumn DSM. Ilość próbek rdzeniowych przeznaczonych do badania wytrzymałości na ściskanie określona jest w specyfikacji projektowej i w zależności od zakresu robót wynosi od 1 do 5% całkowitej liczby wykonanych kolumn [2].

W projektach hydrotechnicznych wymagających załadowania obszarów morskich problemem jest nie tylko ewentualne wzmocnienie podłoża pod refulatem, ale także zagęszczenie samego materiału pochodzącego z robót czerpalnych. Najpopularniejszą metodą zagęszczenia piaszczystego refulatu jest metoda



Rys. 3. Schemat wzmocnienia podłoża panelami DSM [3]

wibroflotacji, jednakże o jej skuteczności decyduje uziarnienie materiału, a w szczególności zawartość frakcji pylistych. W przypadku zawartości tej frakcji większej niż 8% materiał można uznać za trudno zagęszczalny metodą wibroflotacji. Do oceny jednorodności oraz podatności materiału zasypowego na zagęszczanie można wykorzystać sondowanie statyczne CPT i na podstawie rejestrowanych oporów wyznaczyć na całym przelocie sondowania zmienność parametru ISBT (ang. Soil Behaviour Type), obliczanego według Robertsona na podstawie wyników sondowania statycznego i opisującego zdolność gruntu do zagęszczania się. W przypadku zarejestrowania na wysokości sondowania prze-warstwień gruntu o wartości ISBT > 2,6 możemy stwierdzić obecność w refulacji wkładek gruntu niezageszczalnego. Określenie jednorodności materiału zasypowego przy wykorzystaniu parametru ISBT ma kluczowe znaczenie przy okre-

ślaniu wymagań odbiorowych wgłębnego zagęszczania metodą wibroflotacji. Niezależnie od jakości użytego materiału zasypowego zawsze pojawia się problem jego wzmocnienia w strefie bezpośrednio za pionową ścianą odwodną, będącą granicą między akwenem a obszarem załadownym.

Zastosowanie wibroflotacji w bezpośrednim sąsiedztwie ściany nabrzeża zawsze skutkuje dodatkowym jej przemieszczeniem oraz powstaniem w ścianie trudnych do oszacowania sił wewnętrznych od generowanych przez wibroflot oddziaływań dynamicznych. W praktyce wyznacza się za ścianą pas bezpieczeństwa o szerokości zależnej od głębokości akwenu oraz mocy przewidzianego do użycia wibroflotu. Przeważnie szerokość ta wynosi od 5 do 8 m i musi być każdorazowo potwierdzona na poletku badawczym.

Rozwiązaniem problemu wzmocnienia zasypu i podłoża gruntowego bez-

pośrednio za ścianą może być zastosowanie w tej strefie kolumn DSM. Sytuacja taka miała miejsce podczas budowy jednego z terminali dla obsługi polskich projektów offshore. Kolumny DSM  $\phi$  1200 mm wykonano w układzie paneli prostokątnych do stalowej ściany nabrzeża. Zastosowany układ kolumn zapewnia bezpieczne przeniesienie zakładanego obciążenia naziomu, które nad głowicami kolumn wynosi od 50 do 250 kPa. Ponadto panele wykonane z kolumn DSM tworzą układ tarcz redukujących wartość parcia na ścianę nabrzeża poprzez mobilizację dodatkowego tarcia w strefie klina odłamu (rys. 3).

Podsumowując, wgłębne mieszanie gruntu znalazło

na świecie wiele ciekawych zastosowań przy realizacji projektów związanych z załadowaniem obszarów morskich. Metoda jest alternatywą dla wymiany gruntu zalegającego na dnie akwenu. Przy zastosowaniu wspomnianych w artykule zabiegów wgłębne mieszanie gruntu w warunkach morskich jest bezpieczne dla środowiska naturalnego. W Polsce z sukcesem wykorzystano tę technologię w załadowanej części terminalu offshore. Autor widzi potencjał do zastosowania metody DSM przy realizacji rodzimych projektów hydrotechnicznych. ■

#### Literatura

1. *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, MLIT, 2020.
2. *Deep Mixing 2024*, Yokohama, Japan, December 2024.
3. *CDM design manual. Design of Cement Deep Mixing Method in Japan*, September 2024.
4. *Materiały Keller Polska. Sekcja Hydrotechniczna*, Gdańsk 2024.