

Modyfikacja podłoża gruntowego pod niskimi nasypami

– kolumny MSC (Menard Supple Columns)

tekst: **NORBERT KUREK, ADAM ZAREMBA**, Menard Polska Sp. z o.o.

Konstruktorzy budynków oraz budowli w codziennej pracy spotykają się z zagadnieniem posadowienia obiektu budowlanego. Wyróżnić należy najczęściej spotykane posadowienia:

- Bezpośrednie/Płytkie, polega na posadowieniu konstrukcji na gruncie rodzimym, zalegającym w poziomie posadowienia konstrukcji. Przy odpowiednim rozpoznaniu charakterystyki podłoża nie sprawia problemów w wykonaniu optymalnego, a zarazem bezpiecznego posadowienia bezpośredniego konstrukcji.
- Pośrednie/Głębokie, najczęściej w postaci pali, ścian szczelinowych, baret lub innych elementów, które całe obciążenie z konstrukcji przez ww. elementy przenoszą na grunty o lepszych parametrach wytrzymałościowo-odkształceniowych, zalegających, na dużych głębokościach poniżej poziomu posadowienia konstrukcji.
- Posadowienie bezpośrednie na podłożu wzmocnionym, które pozwala przenosić obciążenie z budowli na różnego rodzaju inkluzje oraz włączyć do współpracy otaczający grunt. Poprzez wykonanie odpowiednich zabiegów technicznych polepsza się parametry gruntów rodzimych w celu umożliwienia posadowienia bezpośredniego konstrukcji.

Tematyka związana z zagadnieniami wzmocniania podłoża gruntowego podejmowana jest przez wiele ośrodków naukowych oraz inżynierów praktyków od końca XIX stulecia. Obecnie można spotkać całą gamę metod, które zestawiono w postaci klasyfikacji zaproponowanych przez Mitchella i innych [2], Terashiego i innych [1]. Tak duża liczba różnych

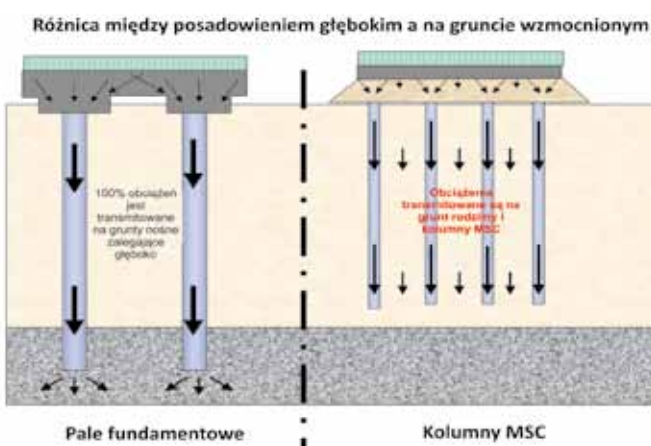
technologii spowodowana jest wieloma ich ograniczeniami oraz zmiennymi typu:

- Powód wzmocnienia gruntu oraz przewidywane wykorzystanie ww. gruntu.
- Wymagany stopień wzmocnienia oraz parametry gruntu wzmocnionego.
- Obszar, głębokość i całkowita objętość wzmocnianego gruntu; rodzaj gruntu i jego właściwości początkowe.
- Dostępność materiałów typu grunty ziarniste oraz różnego rodzaju domieszki.
- Czynniki środowiska wewnętrzne, np. agresywność chemiczna, oraz zewnętrzne, np. poziom drgań, poziom hałasu.
- Lokalizacja inwestycji oraz sąsiedztwo.
- Lokalne doświadczenia i praktyki inżynierów projektantów oraz wykonawców.
- Czas wykonania lub czas uzyskania pożądanego efektu
- Koszt wzmocnienia podłoża.

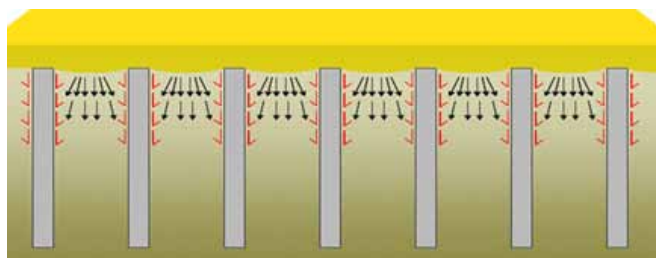
Malejąca liczba działek o bardzo dobrych warunkach lokalizacyjnych oraz gruntowych powoduje, że coraz częściej aktywowane są tereny, które do tej pory nie były atrakcyjne ze względu na lokalizację bądź występowanie podłoża gruntowego o niedużej nośności. Problem posadowienia obiektów budowlanych na gruntach nienośnych jest jednym z kluczowych elementów powodujących dodatkowe koszty inwestycji, które na etapie planowania projektu wielokrotnie nie są brane pod uwagę. Nieatrakcyjność takich działek spowodowała, że ich wartość na rynku nieruchomości jest niższa niż działek geotechnicznych z dobrymi warunkami geotechnicznymi. To z kolei spowodowało szerokie zainteresowanie Inwestorów wielkopowierzchniowych obiektów budowlanych typu centra handlowe, centra dystrybucyjne z parkingami, którzy lokują inwestycje zazwyczaj na obrzeżach miast i aglomeracji.

Powyższa sytuacja oraz rosnąca świadomość inwestorów spowodowała, że na etapie przygotowania realizacji przeprowadzane są konsultacje z firmami wyspecjalizowanymi we wzmocnianiu podłoża celem określenia dodatkowych kosztów, które mogą stanowić znaczącą część w budżecie inwestycji. Jednym z ważnych zagadnień na tego typu inwestycjach jest wielkopowierzchniowy parking oraz drogi dojazdowe, zewnętrzne place składowe i magazyny, np. w spalarniach i kompostowniach, których powierzchnia jest równa lub większa niż planowany obiekt kubaturowy/przemysłowy.

Autorzy niniejszego artykułu spotkali się z wieloma realizacjami, gdzie problemem są słabe grunty organiczne o miąższości od 2,0 do 6,0 m p.p.t. oraz wysoki poziom zwierciadła



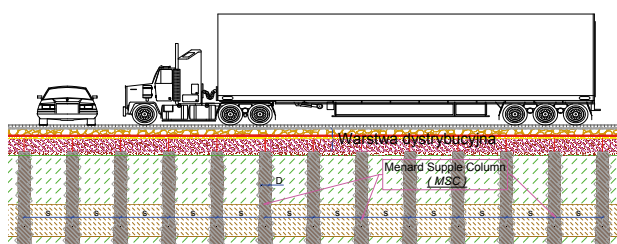
Ryc. 1. Porównanie pracy konstrukcji posadowionej na palach i wzmocnionym podłożu gruntowych



Ryc. 2. Schemat pracy konstrukcji na wzmocnionym podłożu

wody gruntowej. Wielu wykonawców w przypadku takich warunków zastanawia się nad klasyczną wymianą gruntów, która może wydawać się rozwiązaniem tańszym niż wzmocnienie podłoża gruntowego. Oczywiście poza kosztami rozwiązania należy zwrócić uwagę na aspekty techniczne odpowiedniego wykonania takich prac, aby móc spełnić warunki nośności, a w szczególności użyteczności. Dużym problemem, który utrudnia wykonanie robót wymiany gruntów słabych, jest wysoki poziom wód gruntowych i konieczność wykonywania wymiany pod wodą. Konsekwencją tego są problemy z odpowiednim zagęszczeniem wbudowanego materiału, co może powodować konieczność użycia innych metod pozwalających wzmocnić wymieniony grunt, np. wibroflotacja, zagęszczenie dynamiczne lub mikrowybuchy. To z kolei oddziałuje na całkowity koszt rozwiązania.

Innymi aspektami techniczno-logistycznymi, jakie muszą być brane pod uwagę podczas kosztorysowania wymiany gruntów są: dostępność materiałów lokalnych mogących być użytymi do wbudowania, konieczność utylizacji wykopanego gruntu słabego, logistyka związana z transportem dużych mas ziemnych itd. Jest to bardzo problematyczne zagadnienie w przypadku wykonywania budowy w aglomeracji miejskiej lub w miejscu o słabej infrastrukturze drogowej.



Ryc. 3. Schemat wzmocnienia podłoża w technologii MSC

Menard jako profesjonalny wykonawca wzmocnienia podłoża gruntowego, wychodząc naprzeciw oczekiwaniom rynku rozwinął technologię podatnych kolumn betonowych MSC (*Menard Supply Columns*), która jest alternatywną pod względem ekonomicznym oraz technicznym w stosunku do klasycznej wymiany gruntów słabych, jak i sztywnych metod wzmocnienia podłoża. Kolumny MSC należą do grupy technologii przemieszczeniowych, co oznacza, że w trakcie formowania trzonu kolumny grunt nie jest wydobywany na powierzchnię, ale przemieszczany w kierunku poziomym do osi otworu. Do ich wykonania stosuje się specjalnie dostosowaną stalową rurę, która przy użyciu niewielkiej jednostki sprzętowej poprzez wibrator generujący drgania w kierunku pionowym pogrąża narzędzie w grunt na odpowiednią głębokość. Po uzyskaniu żądanej głębokości następuje podciąganie narzędzia przy jednoczesnym pompowaniu

odpowiednio dobranego iniektu. Dzięki zastosowaniu zewnętrznego medium do wykonania trzonu kolumny technologią MSC z powodzeniem można stosować w gruntach organicznych, nie występuje zjawisko wybożenia/rozplątania kolumny w takich warunkach. W rezultacie uzyskujemy kompozyt gruntu i kolumn, współpracujących jak jednolita struktura o zwiększonej nośności. Proces wykonywania kolumny nie powoduje praktycznie żadnych uszkodzeń powierzchni terenu, a generowane w płaszczyźnie pionowej wibracje o małej częstotliwości nie wpływają na konstrukcję sąsiednich obiektów, nawet gdy prace wykonywane są w ścisłej zabudowie. Wydajności prac dochodzą do kilkuset metrów bieżących kolumn na zmianę. Podczas wykonywania kolumn MSC rejestrowane są takie parametry kolumny, jak głębokość wykonania, zużycie iniektu czy pobór energii wibratora. Czynna analiza tych odczytów daje możliwość ciągłej kontroli, jakości wykonania kolumn oraz weryfikacji warunków gruntowych w danym miejscu.



Ryc. 4. Zdjęcia z realizacji wzmocnienia w technologii MSC

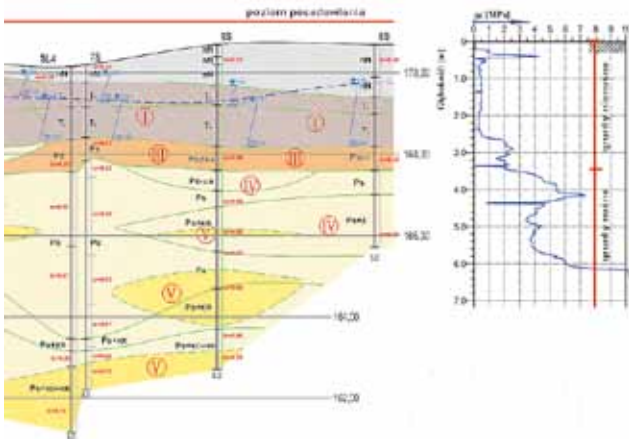
Jako medium nośne trzonu kolumny stosowany jest odpowiednio zaprojektowany iniekt: cementowy, wapienny, cementowo-wapienny z domieszkami popiołów i ulepszczy chemicznych lub mieszanka cementowo-piaskowa, cementowo-wapienno-piaskowa. Parametry iniektu dobiera się zgodnie z wymaganiami projektowymi, aby w przypadku niskich nasypów typu parkingi nie dopuścić do przebicia kolumny przez warstwę dystrybucyjną, a zainicjować podatną pracę kolumny MSC.

Kolumny MSC wpływają na poprawę warunków posadowienia obiektów budowlanych, redukując ścisłość warstw gruntów słabych w skali globalnej. W przeciwieństwie do rozwiązań sztywnych typu kolumny betonowe lub pale, które projektuje się jako elementy przenoszące praktycznie całość obciążeń konstrukcji na głębiej zalegające nośne warstwy gruntu, kolumny MSC projektuje i wykonuje się tak, aby nastąpiła dystrybucja obciążeń na grunt (od 15% do 40% obciążeń) i na kolumny. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość zminimalizowania wielkości oraz kosztów warstwy dystrybucyjnej, która jest kluczowym elementem w przypadku wzmocnienia podłoża gruntowego za pomocą sztywnych inkluzji betonowych.

W celu rozwoju technologii MSC wykonano analizę przypadku opartą na: badaniu podłoża gruntowego, przeprowadzeniu obliczeń charakteryzujących rzeczywistą pracę układu grunt-kolumna MSC-warstwa dystrybucyjna metodą elementów skończonych 2D i 3D, przeprowadzenie badań laboratoryjnych, doboru odpowiednich charakterystyk iniektu, badania nośności pojedynczej kolumny oraz poletka próbne pracy grupy kolumn w skali 1:1.

Warunki gruntowo-wodne na terenie objętym niniejszym przypadkiem zostały scharakteryzowane jako złożone, obejmujące

jące grunty słabonośne i nienośne, przy zaleganiu zwierciadła wód gruntowych w poziomie projektowanego posadowienia oraz przy braku niekorzystnych zjawisk geologicznych, w tym procesów geodynamicznych. Rycina 5 przedstawia charakterystyczny przekrój geologiczny, gdzie podstawą podziału jest kryterium litologiczno-genetyczne, a także stopień plastyczności dla gruntów spoistych, stan zagęszczenia dla gruntów niespoistych i ściśliwość dla gruntów organicznych.

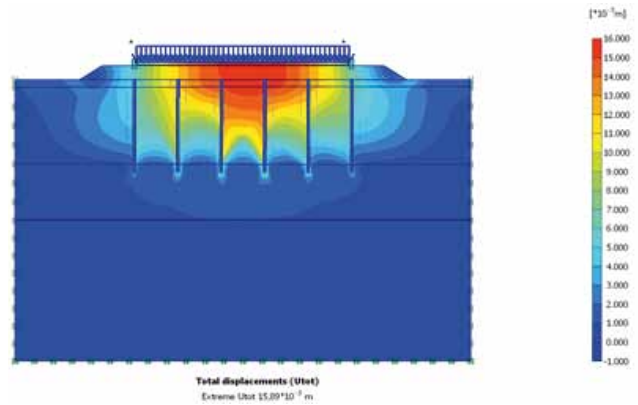


Ryc. 5. Przekrój geologiczny

Grunty nienośne poza przypowierzchniową warstwą nasypów niebudowlanych składają się z warstwy „I”, która składa się z torfów niskich i podrzędnie namułów torfiastych, pylastych i gliniastych, silnie nasyconych wodą, o średniej wilgotności naturalnej $w_n = 327,6\%$. Są to grunty o dużej ściśliwości, przeciętny moduł ściśliwości pierwotnej wynosi $M_0 = 1\,052$ kPa, wtórny $M = 1895$ kPa. Moduły ściśliwości oszacowane na podstawie sondowań sondą CPT są w przedziale 0,5–2,0 MPa.

Prace projektowe miały na celu: dobranie siatki kolumn oraz ich średnicy, wyznaczenie parametrów minimalnych materiału, który zapewniłby podatną pracę kolumn oraz optymalizację warstwy dystrybucyjnej pod względem wysokości oraz kosztów. Analizę wykonano za pomocą programu obliczeniowego skierowanego geotechnicznie, który wykorzystuje metodę elementów skończonych w 2D oraz 3D. Obliczenia w płaskim stanie odkształcenia wykazały osiadania na poziomie 16 mm, co spełnia założenia projektowe konstrukcji. Maksymalna siła obliczeniowa przypadająca na pojedynczą kolumnę została wyznaczona na poziomie 90 kN, co w zależności od średnicy kolumny generowało naprężenia ściskające od 720 kPa do 1850 kPa.

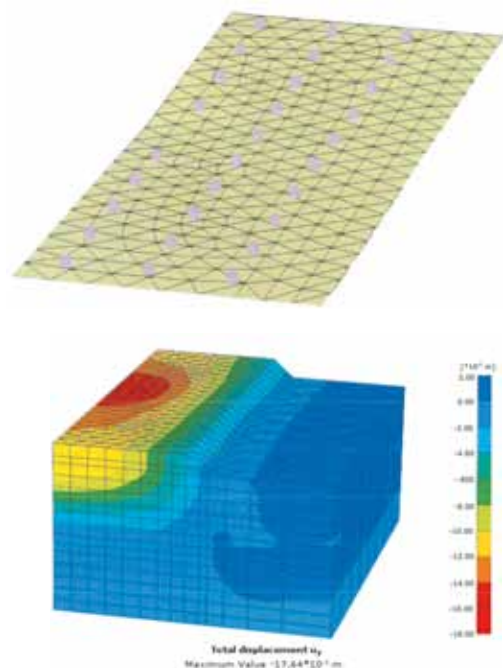
Analiza 3D pozwoliła zamodelować zachowanie bryły gruntu oraz szczegółową współpracę kolumna-grunt-warstwa dystrybucyjna. Model obliczeniowy 3D przy warunkach równoważnych do modelu 2D wykazał zbieżne wartości osiadań powierzchni parkingów, która w przypadku 3D wynosiły 13 mm. Drugi schemat obliczeniowy zakładał przypadek, gdy nastąpi przekroczenie wytrzymałości wewnętrznej pojedynczej kolumny. Sytuacja taka powoduje zwiększenie obciążeń przypadających na kolumny sąsiednie oraz ma wpływ na osiadania całego układu (ryc. 7). Model zakładał eliminację jednej kolumny w osi modelu, co przy symetrycznym modelowaniu odpowiadało utracie 2 z 6 kolumn, tj. ok. 30%



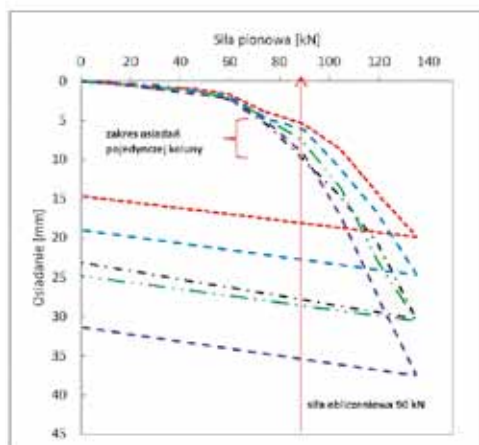
Ryc. 6. Osiedzenia niskiego nasypu posadowionego na wzmocnionym podłożu (kolumny MSC)

inkluzyj w przekroju poprzecznym. Przeprowadzona analiza numeryczna wykazała, że w przypadku zniszczenia kolumny osiadania nawierzchni parkingów stabilizują się na poziomie 17,64 mm, co potwierdza spełnienie warunku drugiego stanu granicznego.

W celach weryfikacji założeń projektowych wykonano próbnę obciążenia pojedynczej kolumny, wykorzystując metodę belki odwróconej. Na podstawie analizy wyników wykazano, że osiadania pojedynczej kolumny przy maksymalnej sile obliczeniowej przypadającej na kolumnę mieści się w zakresie od 5 do 10 mm (ryc. 8). Siła obliczeniowa nie powoduje utraty nośności wewnętrznej kolumny, w związku z tym parametry iniektu spełniają założenia projektowe. Po przekroczeniu wartości siły obliczeniowej kolumny osiadają w zakresie od 10 do 25 mm, dzięki czemu skumulowanie większych obciążeń na podłożu gruntowe nie powoduje niszczenia kolumny, a zwiększenie osiadania, co jest elementem bardzo korzystnym przy koncepcji kolumn MSC. Pozwala to uniknąć sztywnego podparcia, które przy niskich nasypach powoduje powstanie efektu przebijania



Ryc. 7. Przemieszczenia pionowe (osiadanie) po wyeliminowaniu kolumny

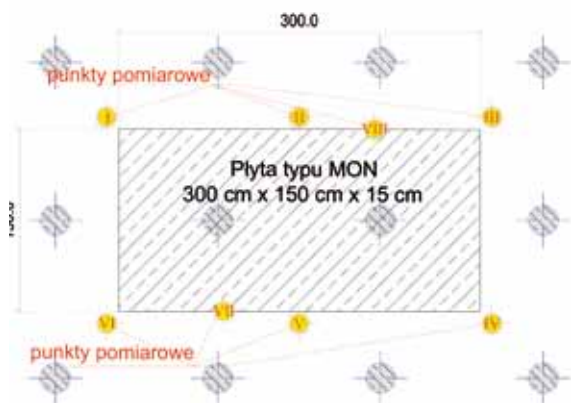


Ryc. 8. Obciążenia próbne kolumn MSC

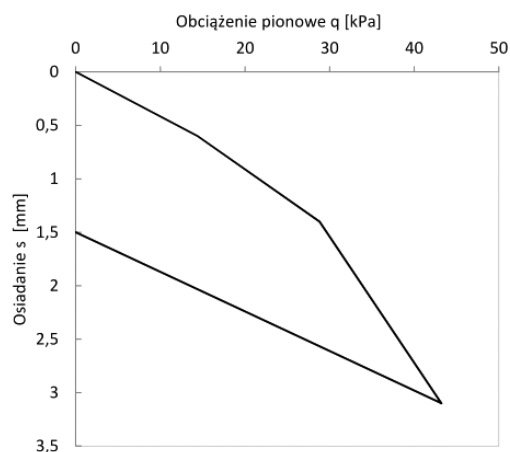
pojedynczych kolumn przez warstwę dystrybucyjną, co można zaobserwować na powierzchni parkingu w postaci wybrzuszeń i tzw. „grzybków”. Pomimo zwiększonego obciążenia, a tym samym znacznie wyższych osiadań powierzchni parkingu, nadal spełniony jest warunek użyteczności zdefiniowany jako $s_{\text{dop}} \leq 100$ mm.

Analiza pracy pojedynczej kolumny nie umożliwia przedstawienia pracy całego nasypu jako przestrzennej konstrukcji, która składa się z kolumny, gruntu ją otaczającego oraz warstwy dystrybucyjnej, której zadaniem jest rozłożenie obciążeń na kolumnę oraz grunt. W celu sprawdzenia całościowej pracy konstrukcji parkingu na poletkach doświadczalnych wykonano obciążenia w skali rzeczywistej. Schemat stanowisk przedstawiono na rycinie 9, jako elementy obciążenia wykorzystano płyty drogowe układane w stos.

Rycina 10 przedstawia wyniki uzyskane na podstawie ww. poletek dla obciążenia maksymalnego, przekraczającego wartość obciążenia użytkowego o 50%. Badania przeprowadzone na poletkach doświadczalnych wykazały osiadania układu kolumna MSC-grunt-warstwa dystrybucyjna na poziomie 3,10 mm oraz stabilizację osiadań przy każdym kroku obliczeniowym. Wartość osiadań uzyskanych z badań terenowych jest znacznie niższa niż wielkość osiadań, które zamodelowano w programie geotechnicznym z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Różnica



Ryc. 9. Schemat stanowiska do obciążeń rzeczywistych



Ryc. 10. Poletko próbne obciążenie grupy kolumn MSC

ta spowodowana jest tym, że modele numeryczne zakładały obciążenie na całości konstrukcji, natomiast na poletku próbnym zakres obciążenia ograniczony jest powierzchnią płyt drogowych.

Przeprowadzona analiza przypadku potwierdziła słuszność założeń projektowych oraz techniczne zalety technologii kolumn podatnych MSC (*Menard Supple Columns*). Pozwala to z pełną świadomością i ograniczeniem ryzyk technicznych rozwiązywać problemy niskich nasypów typu parkingi oraz drogi dojazdowe. Należy zwrócić uwagę również na fakt odpowiedniego konstruowania warstw dystrybucyjnych, które są ważnym elementem w podejściu do objętościowego wzmocnienia podłoża gruntowego. Analizując koszty inwestycji oraz techniczne możliwości wykonania posadowienia takich budowli, należy pamiętać o gruncie, który w wielu przypadkach jest elementem pomijanym w szacowaniu budżetu inwestycji, a może zaważyć o rentowności przedsięwzięcia.

Literatura

- [1] Terashi M., Juran I.: Ground Improvement – state of the art. In: *Proceedings International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000*. Vol. 1. Melbourne 2000, pp. 461–519.
- [2] Mitchell J.M., Jardine. F.M.: *A guide to ground treatment*. CIRIA, 2002.

