

## WYMIANA DYNAMICZNA – SKUTECZNA METODA WZMACNIANIA GRUNTÓW SPOISTYCH ORGANICZNYCH I NASYPOWYCH

### 1. Wstęp

Metoda dynamicznej wymiany jest konsekwentnym rozwinięciem techniki dynamicznej konsolidacji wynalazonej przez Louisa Menarda. Przy użyciu identycznego sprzętu i podobnej technologii, możliwe jest wzmocnienie gruntów, w przypadku których dynamiczna konsolidacja okazuje się w pełni nieefektywna. Celem metody jest umożliwienie posadowienia bezpośredniego stosunkowo mało wrażliwych obiektów budowlanych na gruntach bardzo ściśliwych, głównie gruntach spoistych w stanie płynnym i miękkoplastycznym. Z powodzeniem technologię dynamicznej wymiany stosuje się w gruntach organicznych i wybranych gruntach nasypowych, często określanych w dokumentacjach geotechnicznych jako „grunty nienośne”.

W przypadku gruntów o bardzo małej spójności, budowa obiektów nawet o niewielkich naciskach na podłoże np. nasypów powyżej wysokości dwóch metrów może doprowadzić do niekontrolowanego wyporu gruntu przez wybudowaną konstrukcję, lub zachwianie stateczności globalnej. Dodatkowo osiadania długotrwałe spowodowane konsolidacją słabego podłoża mogą całkowicie nie spełnić warunków drugiego stanu granicznego. W tej sytuacji dynamiczna wymiana często okazuje się pewnym, szybkim i ekonomicznym sposobem wzmocnienia słabego podłoża (Rys.1.).



Rys.1. Wzmocnienie podłoża pod płytę zbiorników na gaz płynny.

---

<sup>1</sup> Mgr inż., Freyssinet Polska Sp. z o. o. / Menard Soltraitement

## 2. Technologia dynamicznej wymiany.

Technologia wymiany dynamicznej polega na wykonaniu w spoistym gruncie wielkośrednicowych słupów z materiału okruszowego. Powstałe kolumny formowane są, aż do stropu warstwy niżej leżącego gruntu nośnego, lub w przypadkach uzasadnionych względami projektowymi, nieco płycej. Nie jest konieczne oparcie stopy kolumny na stropie warstwy nośnej. W metodzie wymiany dynamicznej słupy, formowane są poprzez wbijanie kruszywa dużym ciężarem upuszczanym z wysokości od 10 do 30m, w warstwę gruntu o małej nośności.

Standartowo stosuje się ubijaki o ciężarze od 12 do 30 ton o kształcie spłaszczonym i okrągłej podstawie. Do podnoszenia i opuszczania ubijaka stosuje się sprzęt analogiczny do używanego w technologii dynamicznej konsolidacji, nazwanej często „metodą Menarda”. W większości przypadków wykorzystywane są specjalnie przystosowane dźwigi kratowe o bardzo dużej nośności – od 100t do 400t (Rys.2.).

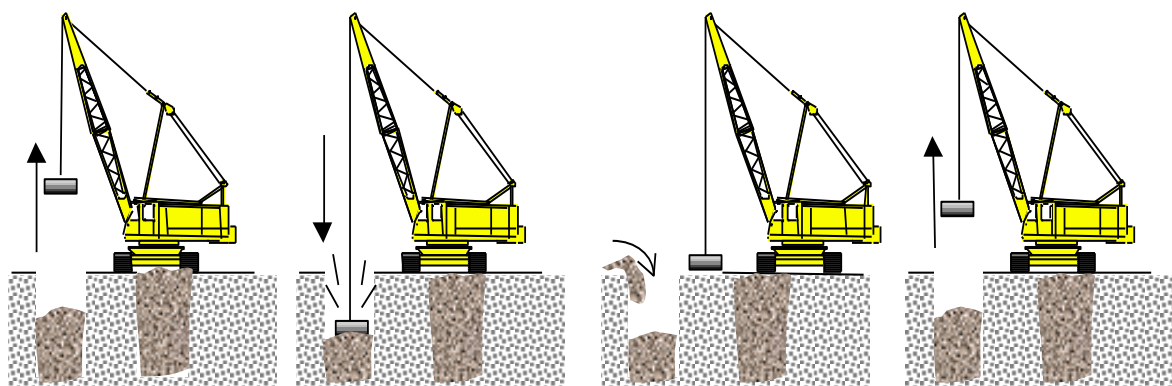


Rys.2. Żuraw kołowy o dużej nośności w trakcie dynamicznej wymiany

W przypadkach indywidualnych stosowane są specjalne konstrukcje pozwalające na zrzucanie z dużych wysokości ciężarów przekraczających kilkukrotnie wartość 40t. Światowy rekord ciężaru użytego do wykonania konsolidacji dynamicznej to 200t. W celu wykonania w słabym gruncie kolumn metodą wbijania, często używana jest specjalnie przygotowana konstrukcja - wieża o podstawie trójkątnej na ramie samonośnej „Menard Tripod” transportowana przy pomocy ciągników zewnętrznych. Ilość uderzeń wykonywanych w ciągu jednej zmiany (8h) przez jednostkę roboczą wynosi od 400 do 800 pojedynczych uderzeń. Stosowane urządzenia narażone są stale na powtarzające się cyklicznie, ogromne przeciążenia. W celu uniknięcia częstych awarii, niezbędne jest przystosowanie sprzętu do specyficznych obciążeń dynamicznych. Praktyka pokazuje, że nominalna nośność sprzętu używanego do metody dynamicznego zagęszczania powinna od 6 do 8 razy przewyższać ciężar używanego ubijaka. W przeciwnym razie liczne przestoje i naprawy sprzętu mogą niemal całkowicie sparaliżować przebieg prac.

Rozpoczęcie procesu ubijania następuje na powierzchni terenu lub uformowanej platformy roboczej. W przypadku, gdy stan gruntu znajdującego się na poziomie terenu nie pozwala na ruch ciężkiego sprzętu, wykonuje się na jego powierzchni nie zagęszczoną warstwę z gruntu niespoistego. Rodzaj wykonanej platformy roboczej zależy od rodzaju

podłoża, na którym przemieszcza się dźwig lub konstrukcja używana do dynamicznej wymiany. Do wykonania platformy roboczej używane jest kruszywo łatwo dostępne na rynku lokalnym, najczęściej piasek lub pospółkę. Miąższość platformy roboczej wynosi przeważnie od 0,8m do 1,5m. W przypadku, gdy zagęszczanie wykonywane jest na terenie o wysokim poziomie wody gruntowej, lub wręcz okresowo zalewanym, wykonanie platformy roboczej ma doprowadzić do optymalnego podwyższenia poziomu terenu. W większości przypadków wskazane jest, by poziom wody gruntowej znajdował się co najmniej 1,5m poniżej poziomu, z którego wykonywana jest seria uderzeń. W sytuacji gdy zagęszczany grunt pozwala na bezpośrednie poruszanie się po jego powierzchni ciężkiego sprzętu, możliwe jest wykonanie dynamicznej wymiany bezpośrednio na powierzchni terenu istniejącego. Należy zauważyć, że grubość platformy roboczej zwiększa w rzeczywistości głębokość dynamicznego zagęszczania, a zatem sumaryczną ilość energii wymaganej do uformowania kolumny. Zbytne zwiększenie grubości platformy roboczej może nie tylko niepotrzebnie zwiększyć koszt wzmocnienia, ale także uniemożliwić uformowanie kolumny na wymaganą względami technicznymi głębokość. W niektórych przypadkach przypowierzchniowa warstwa gruntu okazywała się na tyle zwarta (lub zamrznięta), iż uniemożliwiała skuteczne wykonanie pierwszego uderzenia i wprowadzenie początkowej porcji gruntu na wstępną głębokość. W takiej sytuacji przy pomocy koparki hydraulicznej wykonywany był płytki wykop wypełnianym kruszywem mineralnym, następnie wykonywane pierwsze uderzenie. Następujące po sobie opuszczenia ubijaka wprowadzają porcje materiału gruntu niespoistego na żądaną głębokość. Kolejne fazy: dosypywanie kruszywa do wykopu i dalsze uderzenia powtarzane są do momentu uformowania słupa wymiany dynamicznej do żądanej rzędnej (Rys.3.).



Rys. 3. Schemat wymiany dynamicznej.

W wielu przypadkach koniec procesu ubijania sygnalizuje głuchy odgłos połączony z nagłym zmniejszeniem wartości wępu ubijaka co upewnia iż słup uformowany został do aż spągu warstwy nienośnej. Dzięki opisanej wyżej procedurze, w warstwie miękkiego gruntu nieprzepuszczalnego powstaje kolumna o doskonałych wartościach nośnych i drenujących. Typowy rozstaw powstałych słupów wynosi od 4.5m do 7.0 m, w zależności od wartości obciążenia, warunków gruntowych w danym miejscu, a także od sposobu rozkładu obciążenia. Najczęściej kolumny rozmieszczane są na siatce trójkątnej lub kwadratowej. Typowa średnica powstałych słupów wynosi od 2.0 do 2.5 m, aczkolwiek formowano już kolumny o średnicach do 4,5m. Przy użyciu konwencjonalnego sprzętu kolumny metodą wymiany dynamicznej wykonuje się gdy głębokość zalegania gruntów nienośnych nie przekracza 7 m. Najefektywniej jednak proces wymiany dynamicznej przebiega gdy wykonywany jest do głębokości 5m. Jako materiał słupów używane jest kruszywo naturalne tj. żwir, pospółka lub kruszywo łamane. Istnieje także możliwość wykorzystania materiałów dostępnych lokalnie takich jak; żużel, spieki, odpady kopalniane, materiały z rozbiórki itp.. Grunt używany do

wykonania omawianych inkluzji nie musi spełniać rygorystycznych parametrów, a jego skład granulometryczny może być bardzo różny. W większości przypadków dąży się do tego, by wykorzystany został materiał łatwo dostępny na lokalnym rynku, a metodę wykonania i sposób projektowania dostosowuje się do jego charakterystyki. Zasadniczym ograniczeniem materiałowym jest zawartość cząstek o średnicy poniżej 0,075mm. Materiał, z którego wykonywane są kolumny powinien zawierać mniej niż 5% cząstek ilastych.

Ubijanie standartowo wykonywane jest w dwóch fazach. W przypadku siatki trójkątnej pierwsza jest przesunięta w stosunku do drugiej o połowę wymiaru oczka. Zagęszczenie platformy roboczej i wierzchniej warstwy gruntu, o orientacyjnej miąższości ok. dwóch metrów, następuje w wyniku ubijania powierzchniowego tzw. „ironingu”. Proces ten następuje przy użyciu ubijaka o płaskim kształcie i podstawie kwadratowej. Pojedyncze uderzenia wykonywane są obok siebie w odległości równej wymiarowi zewnętrznemu podstawy ubijaka, w ten sposób by objęły swoim zasięgiem całą wzmocnianą powierzchnię. Po tej procedurze, powierzchniowa warstwa podłoża lub platformy roboczej jest w dalszym ciągu nie dogęszczona. Koniecznym jest wykonanie klasycznego zagęszczenia za pomocą ciężkich walców wibracyjnych.

Kolejność prac przy wykonaniu metody dynamicznej wymiany przebiega w sposób następujący (Rys.4.):

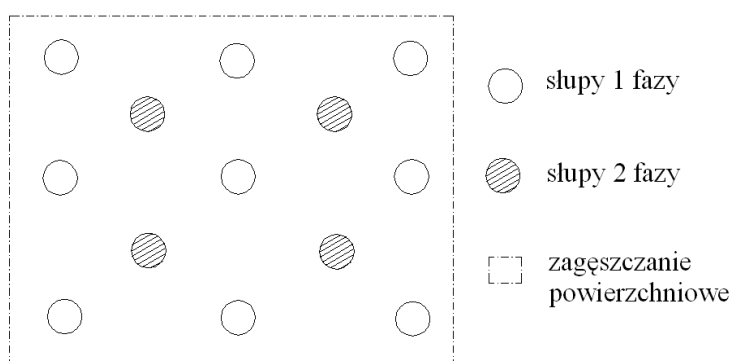
- czynności przygotowawcze
- wyrównanie terenu
- przygotowanie platformy roboczej

Właściwe prace geotechniczne:

- pierwsza faza ubijania
- druga faza ubijania
- wyrównanie terenu platformy roboczej
- zagęszczanie powierzchniowe (ironing)

Czynności dodatkowe:

- zagęszczenie walcami wibracyjnymi wierzchniej warstwy platformy roboczej.



Rys. 4. Kolejność robót wymiany dynamicznej

### 3. Zastosowanie – rodzaje podłoża gruntowego.

Metoda wymiany dynamicznej okazuje się skutecznym rozwiązaniem w gruntach o dużej zawartości drobnych cząstek, glinach i iłach, a także w gruntach organicznych. Dynamiczna wymiana pozwala zwiększyć wytrzymałość zarówno bardzo wilgotnych gruntów spoistych jak i słabych gruntów organicznych zalegających do głębokości 7m. Stosowana może być także w gruntach organicznych o stosunkowo dużej wilgotności, w takich wypadkach konieczny jest jednak staranny dobór kruszywa użytego do uformowania kolumn. Metodę

dynamicznej wymiany wielokrotnie stosowano na obszarze sfałdowanych gruntów nasypowych pochodzenia antropogenicznego, nawet na zabudowywanych wysypiskach śmieci. W Polsce w ten sposób zostały odzyskane tereny pod budowę obiektów handlowych „Castoramy” w Gdańsku Ossowa i „Auchan” w Mikołowie (Katowice).

Teoretycznie istnieje możliwość wykonywania dynamicznej wymiany na głębokość znacznie przekraczającą 7m. Wymaga to jednak zastosowania bardzo ciężkiego, specjalnie przygotowanego sprzętu. W praktyce tego rodzaju prace nie były wykonywane. W przypadkach gdy miąższość warstw słabych przekracza 7 m bardziej ekonomicznie i technicznie uzasadnione wydają się inne metody wzmocnienia podłoża (np: kolumny CMC, kolumny żwirowe).

#### **4. Zastosowanie – typy posadawianych obiektów budowlanych.**

Dynamiczna wymiana ma na celu umożliwienie posadawianie obiektów komunikacyjnych: dróg kołowych i szynowych, wszelakiego rodzaju nasypów, zbiorników, obiektów przemysłowych oraz obiektów użytku publicznego, przy możliwie najniższym koszcie całkowitym. Sposób przekazywania obciążeń na grunt może być bardzo różnorodny. Metoda dynamicznej wymiany może być stosowana przy posadawianiu obiektów kubaturowych na stopach, ławach, rusztach i płytach fundamentowych. Bardzo często wykorzystywana jest także do wzmocnienia podłoża pod obiekty stosunkowo mało wrażliwe na odkształcenia, głównie nasypy drogowe i kolejowe. Dynamiczną wymianę zaleca się stosować w przypadku obiektów zajmujących względnie dużą powierzchnię. W takich wypadkach metoda ta ma możliwie największe uzasadnienie ekonomiczne. Ograniczenie związane jest z występowaniem dużych sił skupionych, przekazywanych na podłoże gruntowe. Zakłada się, iż w większości przypadków pod stopą fundamentową istnieje możliwość wykonania jednej kolumny wymiany dynamicznej. Z tego względu dopuszczalne obciążenie fundamentu ograniczone jest właśnie przez nośność pojedynczego słupa. W związku z tym zaleca się stosować dynamiczną wymianę w przypadkach, gdy maksymalny nacisk na podłoże gruntowe nie przekracza 200kPa.

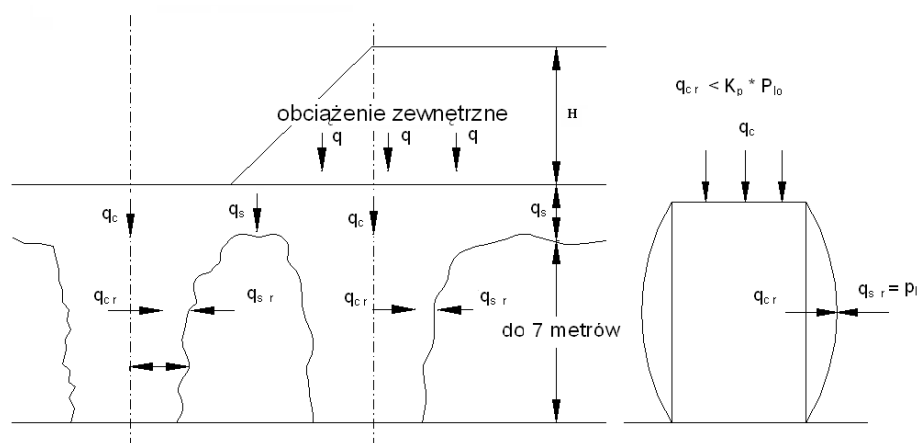
#### **5. Efekty dynamicznej wymiany.**

Metoda wymiany dynamicznej zakłada poprawienie zarówno właściwości drenażowych podłoża jak i jego parametrów nośnych co sytuuje tą metodę na pograniczu metod dynamicznej konsolidacji, drenażu pionowego i kolumn żwirowych. Przeprowadzone badania na modelach w skali naturalnej wykazały wysoką efektywność dynamicznej wymiany jako szybkiej metody wzmocnienia podłoża gruntowego. W czasie prowadzonych na eksperymentalnych budowach obserwacji stwierdzono, iż uformowane w słabym gruncie kolumny cechuje bardzo duży stopień zagęszczenia, wysoka wytrzymałość na ścinanie i moduł sztywności i zaskakująco wysoka nośność osiowa. Wraz z wbijaniem materiału kolumn, następuje gwałtowny wzrost ciśnienia porowego, które następnie dyssypowane jest przez pełniące funkcje drenów pionowych kolumny. Dzięki temu zjawisku część konsolidacji podłoża następuje niemal natychmiastowo po wykonaniu wzmocnienia. Co skutkuje poprawieniem wartości parametrów mechanicznych gruntu pomiędzy uformowanymi kolumnami. Kolejny etap konsolidacji podłoża następuje po wprowadzeniu obciążenia na powierzchnię słabego gruntu. Dzięki poprawionym warunkom drenażowym podłoża pozostała część osiadań przebiega wielokrotnie szybciej niż miałyby to miejsce w gruncie naturalnym.

Całkowity czas konsolidacji podłoża gruntowego jest bardzo silnie zredukowany, co pozwala na szybkie zwiększanie wartości obciążenia przekazywanego na grunt, nawet w przypadku gdy grunt w stanie naturalnym jest niemal zupełnie nieprzepuszczalny.

## 6. Projektowanie i kontrola

Każdorazowe zastosowanie wymiany przekazywanego na grunt, jako posadowienia bezpośredniego powinno poprzedzić precyzyjne określenie parametrów formowanych kolumn oraz otaczającego ich gruntu naturalnego. Na podstawie doświadczeń z projektów zrealizowanych na całym świecie, zostały określone procedury obliczeniowe pozwalające na pewne i bezpieczne określenie wymaganych parametrów wzmocnienia oraz szczegółów technologicznych. Każdy projekt wzmocnienia wykonanego za pomocą metody dynamicznej wymiany wiąże się z koniecznością wykonania precyzyjnych obliczeń. Podstawą projektowania powinny być precyzyjne badania podłoża gruntowego przeprowadzone w dwóch etapach: przed rozpoczęciem robót wymiany dynamicznej, oraz po wykonaniu niezbędnych prac na obszarze poletek próbnych. Każdy projekt dynamicznej wymiany rozpatrywany jest pod kątem osiągnięcia wymagań dotyczących: współczynnika bezpieczeństwa nośności granicznej podłoża jak i całkowitej wartości osiadań resztkowych oraz czasu ich trwania. Wykonane wzmocnienie powinno rozwiązać następujące problemy. Zapewnienie stateczności globalnej, zmniejszenie czasu konsolidacji warstw gruntów ściśliwych, spełnienie wymagań nośności granicznej, zminimalizowanie całkowitych osiadań po oddaniu obiektu do użytkowania, zapewnienie możliwie najmniejszej nierównomierności osiadań. Rysunek umieszczony poniżej pokazuje uproszczony schemat pracy podłoża wzmocnionego kolumnami wymiany dynamicznej obciążonego nasypem.



Rys.2. Rozkład obciążeń we wzmocnionym podłożu.

Obciążenie przekazywane na grunt rozkładane jest za pośrednictwem warstwy transmisyjnej na utworzone kolumny i słaby grunt znajdujący się pomiędzy nimi. Obciążenia przekazane na grunt nie mogą przekroczyć jego nośności granicznej w momencie obciążenia (czyli po wykonaniu dynamicznej wymiany). Nośność graniczna kolumny zapewniana jest poprzez opór otaczającego ją gruntu. Dokładna analiza wzmocnienia za pomocą słupów wymiany dynamicznej wymaga prześledzenia licznych zjawisk w tym wpływu zwiększonego ciśnienia porowego, efektu przyspieszonej konsolidacji, zmian w module sztywności słabego podłoża, efektu przesklepienia w warstwie transmisyjnej, (lub w dolnej części nasypu), efektu tarcia ujemnego na styku gruntu i słupów. Przeprowadzenie analitycznych obliczeń uwzględniających powyższe czynniki jest bardzo pracochłonne. W praktyce inżynierskiej

standartowo stosuje się pewne uproszczenia sprawdzane za pomocą Metody Elementów Skończonych.

## 7. Ograniczenia

Podstawowe ograniczenie związane z aplikacją metody wymiany dynamicznej związane jest ze wstrząsami wywołanymi w momencie uderzenia spadającego ubijaka o podłoże gruntowe. Akceptowalny poziom wibracji jest w zależności od lokalizacji placu budowy bardzo różny. Wpływają na to lokalne przepisy, bliskość i rodzaj istniejących obiektów, a także mieszkańcy danego regionu. Powstałe wibracje mogą być zdefiniowane przez jeden z parametrów: prędkość cząstek gruntu, amplituda drgań, maksymalna wartość przyspieszenia cząstek gruntu. Najczęściej spotykane jest przyjmowanie kryteriów opartych na prędkości przemieszczeń cząstek gruntu wywołanych falą Rayleigh'a - przemieszczającą się po powierzchni terenu. Na podstawie wieloletnich obserwacji można stwierdzić iż dynamiczna wymiana może być stosowana w bardzo niewielkiej odległości od budynków i konstrukcji sztywnych w dobrym stanie technicznym ( bliżej niż 20 m). Dla normalnych budynków w niezniszczonym stanie wymagany bezpieczny dystans to odległość 30 m. Dla budynków o bardziej wrażliwej konstrukcji wymagane jest zachowanie odległości 50 metrów. W przypadku gdy powyższy dystans nie może być zachowany wibracje mogą być znacznie zredukowane przez wycięcie w podłożu rowu, o głębokości od 1,5 do 2,5m.



Rys.3. Wzmacnianie podłoża w pobliżu istniejącego budynku handlowego.

Należy zauważyć, iż wstrząsy wywoływane przez dynamiczną wymianę mają, w przeciwieństwie do efektów wywołanych przez takie prace jak wibroflotacja czy wbijanie grodzić metodą wibracyjną, charakter bardzo krótkotrwały. Z tego względu w większości przypadków nie stanowią poważnego zagrożenia dla istniejących obiektów budowlanych. Wymagany dystans od istniejących budynków zdeterminowany jest najczęściej względami społecznymi.