# Zastosowanie wymiany dynamicznej do wzmocnienia podłoża obiektów handlowych

*Mgr inż. Joanna Fudali, Menard Polska*

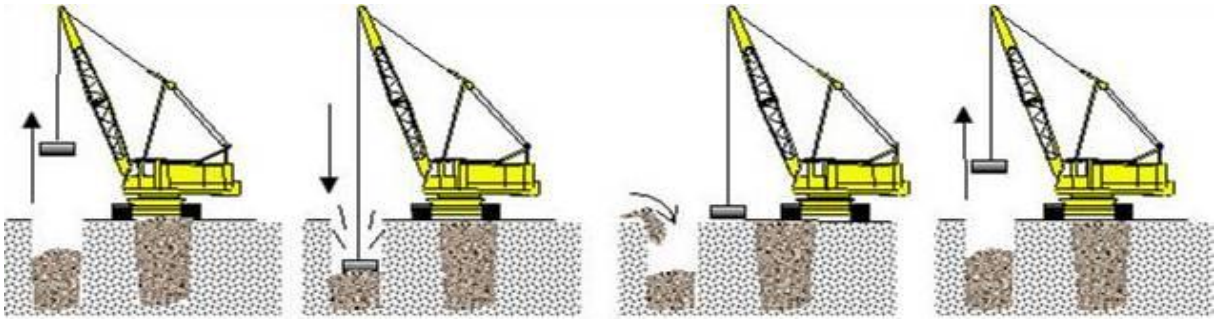
*Mgr inż. Jakub Saloni, Menard Polska*

Posadowienie wielko powierzchniowych obiektów komercyjnych w wielu przypadkach stanowi poważny problem zarówno technologiczny jak również ekonomiczny. Mimo stosunkowo niewielkich (w porównaniu z obiektami kubaturowymi, czy konstrukcjami inżynierskimi) obciążeń przekazywanych z takiej konstrukcji na grunt, rozwiązanie problemu słabego podłoża zajmującego często obszar kilku hektarów powoduje konieczność zaangażowania zaawansowanych rozwiązań projektowych w połączeniu z precyzyjną kalkulacją kosztów zaproponowanego rozwiązania. W obliczu niezwykle kosztownych tradycyjnych metod posadowienia pośredniego na palach, jak również ich licznych ograniczeń technologicznych w przypadku natrafienia na nasypy antropogeniczne, nowe możliwości otwiera intensywny rozwój metod wzmocnienia podłoża gruntowego. Szczególnie atrakcyjną zarówno technologicznie (szybkość i niezawodność realizacji, nawet w skomplikowanych warunkach), jak również kosztowo, okazuje się metoda wymiany dynamicznej (w polskiej literaturze określana mianem kolumn kamiennych). Z uwagi na niewątpliwe atuty tej metody, mimo stosunkowo małego rozpowszechnienia w Polsce, metoda wymiany dynamicznej, była już wielokrotnie stosowana w celu posadowienia obiektów handlowych w skomplikowanych warunkach antropogenicznego podłoża.

Technologia wymiany dynamicznej polega na wykonaniu w spoistym gruncie wielkośrednicowych kolumn z kruszywa. W tym celu wykorzystuje się urządzenia, które umożliwiają swobodny zrzut znacznej masy tzw. ubijaka z dużej wysokości w ściśle wytyczony punkt. Przed przystąpieniem do procesu dynamicznej wymiany na placu budowy wykonuje się platformę roboczą o grubości 0,3 - 0.8 m z gruntu niespoistego, która spełnia istotną rolę w procesie wzmacniania podłoża. Ułatwia ona odprowadzenie wody wyciskanej w czasie ubijania oraz zapobiega jej gromadzeniu na powierzchni i powstawaniu błota. Ponadto dociąża ona słaby grunt w podłożu, ograniczając jego wypieranie. Z poziomu platformy roboczej formuje się w podłożu słabonośnym kolumny z kruszywa. Zagęszczenie standardowo wykonuje się w dwóch fazach. W pierwszej fazie realizuje się co drugą kolumnę, w drugiej fazie - pozostałe. Na wykonanie pojedynczej kolumny składa się kilka serii uderzeń. Wykonanie pierwszej serii uderzeń polega na wybiciu kilkoma udarami krateru w podłożu, który uzupełnia się materiałem formującym kolumnę. Jeśli przypowierzchniowa warstwa gruntu jest na tyle zwarta, iż skutecznie utrudnia wbijanie kruszywa w głąb słabych warstw, wykonuje się, przy pomocy koparki hydraulicznej, płytki wykop wypełniany kruszywem mineralnym. Następnie wykonuje się uderzenia do momentu wyraźnej redukcji wpędu (zagłębienia) ubijaka w stosunku do poprzednich uderzeń. Kolejne fazy uderzeń oraz dosypywania kruszywa do wykopu powtarza się do momentu uformowania kolumny wymiany dynamicznej do żądanej rzędnej - stropu warstwy gruntu nośnego lub, w przypadkach uzasadnionych względami projektowymi, nieco płyciej. Często koniec formowania kolumny sygnalizuje głuchy odgłos połączony z nagłym zmniejszeniem wartości wpędu ubijaka, co świadczy o tym, że dalsze przesunięcie dna kolumny jest niemożliwe.

Zagęszczanie platformy roboczej i wierzchniej warstwy gruntu o orientacyjnej miąższości ok. 2 m następuje w wyniku ubijania powierzchniowego tzw. „ironing'u".

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 wzmacnianą powierzchnię. Jeśli po tej procedurze wierzchnia warstwa gruntu jest w dalszym ciągu niedogęszczona, koniecznym jest wykonanie klasycznego zagęszczenia za pomocą ciężkich walców wibracyjnych.



Rys.1. Etapy wykonania kolumny wymiany dynamicznej.

Na podstawie doświadczeń z przeprowadzonych realizacji sprecyzowano następujące zalety potwierdzające wysoką skuteczność metody wymiany dynamicznej:

- wysoka wytrzymałość na ścinanie i mała odkształcalność uformowanych w słabym gruncie kolumn;
- poprawienie wartości mechanicznych gruntu pomiędzy kolumnami mające miejsce zarówno w czasie kompakcji jak i po zakończeniu wbijania kolumn.

Rys.2. Proces formowania kolumny wymiany dynamicznej.

Stosowanie metody wymiany dynamicznej wymaga odpowiedniego podejścia

projektowego popartego badaniami in-situ i doświadczeniem wykonawczym. W przypadku dużych powierzchni sklepowych podstawowy problem techniczny polega na zapewnieniu możliwie najmniejszych odkształceń podłoża często znacznie obciążonych posadzek. Praktyka pokazuje, iż stosowanie do celów obliczeniowych obciążenia równomiernie rozłożonego, działającego przez nieskończenie długi okres, daje stosunkowo duże zapasy bezpieczeństwa, a rzeczywiste osiadania są najczęściej niższe od prognozowanych. Odmienne podejście wymagałoby wykonywania obliczeń w oparciu o trudną do wyobrażenia liczbę kombinacji obciążeń, z uwagi na fakt, iż rzeczywiste obciążenia mają charakter zmienny i ruchomy.

Warto w tym miejscu zauważyć, iż projektanci konstrukcji poświęcają duża uwagę fundamentom obiektu bagatelizując problem osiadania posadzek. W przypadku lekkich konstrukcji halowych obciążenia fundamentów są stosunkowo niewielkie, co wynika z lekkiej konstrukcji hali, podczas gdy na nie posiadającą funkcji konstrukcyjnej posadzkę oddziałują często skomplikowane kombinacje obciążeń .

Praktycznym przykładem zastosowania wymiany dynamicznej pod obiektem handlowym o stosunkowo dużych obciążeniach użytkowych na posadzkę jest realizacja hali Castoramy w Raciborzu. Inwestycja obejmowała budowę sklepu i magazynu z materiałami budowlanymi o powierzchni ok. 8500 $m^2$.

**Konstrukcja obiektu i warunki gruntowe.**

Zaprojektowano obiekt o konstrukcji szkieletowej, niepodpiwniczony posadowiony na stopach i ławach żelbetowych wylewanych na mokro. Dla hali głównej wydzielono dwie strefy obciążenia użytkowego o wartościach obliczeniowych odpowiednie 70kPa i 20kPa.

Na znacznym obszarze terenu planowanego pod zabudowę występowały słabonośne nasypy niebudowlane o miąższości dochodzącej do 5÷7m. Warstwa ta powstawała od końca lat 80-tych ubiegłego wieku. W ramach rekultywacji dawnego zbiornika wodnego deponowane były grunty oraz inne materiały o zróżnicowanym składzie i własnościach, składające się w przewadze z mas ziemnych pochodzących z wykopów, remontu ulic, gruzu budowlanego i ceglanego, elementów stali zbrojeniowej i drutu, odpadów paleniskowych, a także odpadów o charakterze komunalnym.

Pod nasypami zalegały osady czwartorzędowe akumulacji rzeczno-zastoiskowej wykształcone jako gliny pylaste zwięzłe, piaski gliniaste i gliny pylaste Pomiędzy warstwami glin znajdowało się przewarstwienie o miąższości 0,5m÷2m z gruntów organicznych tj. namułów organicznych ilastych i pylastych w stanie miękkoplastycznym. Grunty nośne wykształcone były w postaci pospółek i żwirów (warstwa III) występujących dopiero poniżej głębokości 7,5 – 10,4 m ppt..

W projekcie wzmocnienia podłoża największy problem obliczeniowy stanowiła warstwa gruntów organicznych w stanie miękkoplastycznym. W celu weryfikacji oraz uzupełnienie informacji o parametrach podłoża gruntowego wykonano dodatkowe badania sondowania statyczne (CPTU) oraz DMT, na podstawie których oszacowano moduł odkształcenia namułów $E_o$ = 2÷5 MPa.

**Rozwiązanie**

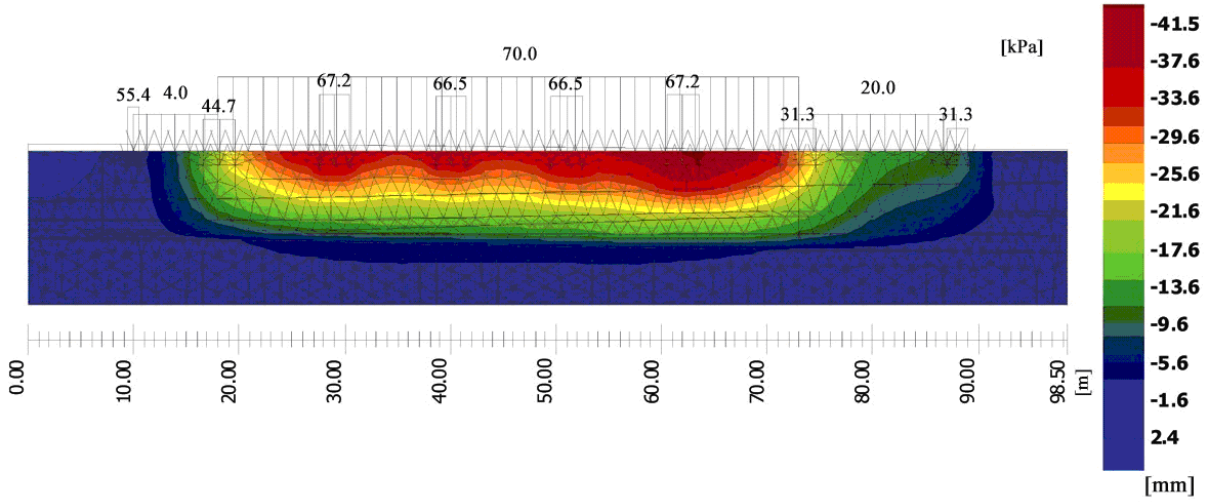
Pierwotne rozwiązanie przewidywało posadowienie fundamentów obiektu na kolumnach wykonanych w technologii iniekcji wysokociśnieniowej ( jet-grouting). Na pozostałym obszarze - pod posadzką obiektu zaproponowano zastosowanie podatnych kolumn kamiennych wykonanych w technologii wymiany dynamicznej

o bardzo małej średnicy 1m. Realny zasięg wzmocnienia małym lekkim ubijakiem do wymiany dynamicznej ( przy założeniu średnicy kolumny 0,8 – 1,0 m) nie przekracza najczęściej 3-4 m głębokości, podczas gdy głębokość zalegania warstw słabych znacznie przewyższa tą wartość. Różnica nakładów kosztowych i materiałowych pomiędzy podłożem posadzki a stóp fundamentowych skutkowała duża różnicą osiadań dla części budynku wzmocnionych w odmienny sposób. (znacznie obciążona posadzka na podatnych kolumnach i posadowione na niemal sztywnych inkluzjach stopy fundamentowe). W efekcie zaczęto rozważać zmianę rozwiązania.

W wyniku prowadzonej analizy zdecydowano o ujednoliceniu rozwiązania projektowego i zastosowaniu metody wymiany dynamicznej w wersji ciężkiej zarówno pod fundamentami jak i posadzką obiektu. Idea polegała na wykonaniu wzmocnienia podłoża w jego górnej części – czyli do głębokości 5-7m. Pominięto wzmocnienie w warstwach słabych gruntów spoistych, zalegających w przybliżeniu na głębokości 8-9m. W projekcie założono, iż obciążenie z konstrukcji przekazywane przez fundamenty oraz obciążenie użytkowe na posadzkę może spowodować dodatkowe osiadania podłoża zarówno pod fundamentami jak i posadzką budynku, jednak ze względu na jednorodny układ warstw podłoża nasypowego stwierdzono, iż osiadania te będą miały charakter równomierny.

Obliczenia współpracy obiektu z podłożem wykonano wykorzystujących metodę elementów skończonych. Pierwszy etap obliczeń miał na celu określenie parametrów wzmocnionego podłoża. Uwzględniano w nim poprawienie jego parametrów w wyniku znacznego zagęszczenia istniejących warstw jak również wykonania kolumn z gruboziarnistego kruszywa.

W kolejnym etapie oszacowano wartości osiadań obiektu posadowionego na podłożu wzmocnionym kolumnami wymiany dynamicznej. Granicę strefy wzmocnionej założono na głębokości 6 m. Obliczenia prowadzono do głębokości zalegania gruntów nośnych. Obliczenie osiadań konstrukcji wykonano w płaskim stanie odkształcenia dla kilku wybranych przekrojów budynku Różnica odkształceń pomiędzy strefami wynikała przede wszystkim z różnych wartości obciążenia użytkowego co obrazuje rysunek poniżej:




Rys.3. Wyniki analizy osiadań obiektu przeprowadzonej w PSO.

Zgodnie ze stosowaną normą, oraz wymaganiami klienta określono maksymalne dopuszczalne osiadanie budynku na 5 cm, podczas gdy maksymalne wartości otrzymane w wyniku przeprowadzonych analiz wyniosły 4,1cm. Względna

różnica osiadań fundamentów w najniekorzystniejszym położeniu wynosiła według obliczeń 0,0016 i nie przekraczała dopuszczalnej normą wartości 0,003.

Istotne zagadnienie projektowy stanowiła stosunkowo duża różnica osiadań na styku stref o różnych wartościach obciążenia użytkowego, odpowiednio 70kPa i 20kPa. Problem rozwiązano przewidując w projekcie konstrukcji odpowiednie rozwiązanie dylatacji w tej strefie. Obliczeniowo stwierdzono, iż w strefie granicznej należy spodziewać się długoterminowej różnicy osiadań ok. 2 cm. W związku z tym zastosowane rozwiązanie miało na celu złagodzenie różnicy przyszłych osiadań pomiędzy strefami. Zaprojektowano żelbetową płytę przejściową oparta przegubowa na małych fundamentach liniowych.

**Realizacja**

Harmonogram prac związanych z przeprowadzeniem wymiany dynamicznej zaplanowano tak, aby w pierwszej fazie wykonane były kolumny pod stopami fundamentowymi z uwagi na działające na nie duże siły skupione. Z uwagi na rozchodzenie się fali zagęszczającej również pomiędzy punktami zagęszczania, wymiary kolumn wykonywanych w drugim etapie ( głębokość i średnica) są z reguły nieco niższe, gdyż podłoże to zostało już częściowo zagęszczone uderzeniami wykonanym w pierwszej fazie.

Jako materiał wypełniający kolumny wymiany dynamicznej zaproponowano przepalony łupek przywęgłowy ze zwałowiska znajdującego się w pobliżu budowy.

Do wykonania kolumn wymiany zastosowano samojezdny dźwig wolnospadowy o nośności nominalnej 120t pozwalający na zrzucania ubijaka o masie 22,5 ton z wysokości 30 m. Uzyskana w ten sposób energia o wartości dochodzącej do 5 MN*m, pozwala w zależności od warunków gruntowych wykonać kolumny wymiany dynamicznej o długości do 7m.i średnicy do 3m.

Rys. 4. Ubijak stosowany przy ciężkiej wymianie dynamicznej.

Na przeznaczonym do wzmocnienia obszarze wykonano 380 kolumn. Wymiary kolumn wynosiły długość: realna od 5 m do 7m ( w zależności od parametrów gruntu nasypowego w danym miejscu), średnica: 2,5 m ÷ 3,0 m. Do wykonanie jednej kolumny wymiany dynamicznej zużywano od 20 do -35 $m^3$ kruszywa. Prace wzmocnienia podłoża przeprowadzono w czasie 4 tygodni. Pracując na jedną 8 godzinna zmianę roboczą

.

Rys.5. Widok kolumny po wykonaniu.

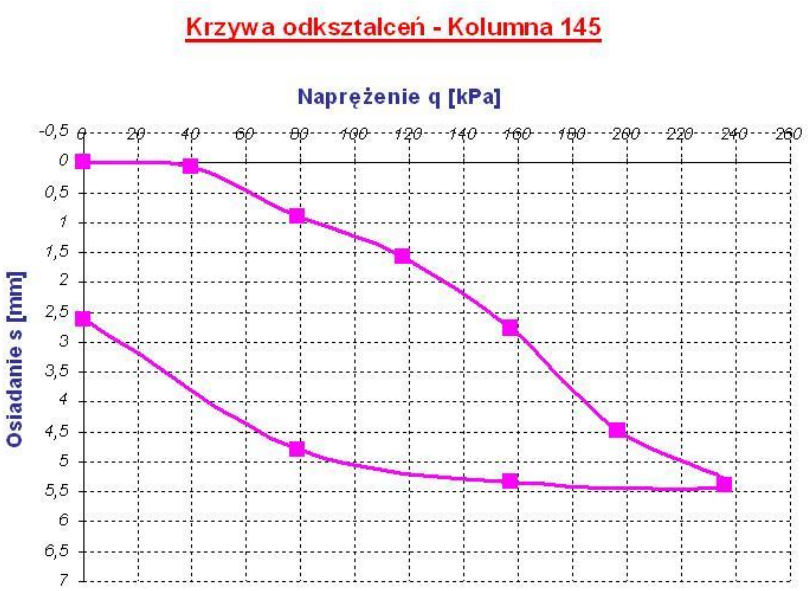
Problemem wykonawczym, o którym należy wspomnieć, typowym dla metody wymiany dynamicznej okazały się efekty generowanych przez nią drgań. Potencjalnie zagrożonym nadmiernymi drganiami obiektem wydawał się znajdujący w odległości 50 m od obszaru poddanego dynamicznemu zagęszczaniu obiekt Centrum Handlowo-Usługowego „Auchan". Wieloletnia praktyka firmy Menard pokazuje, iż metoda wymiany dynamicznej może być stosowana z powodzeniem powyżej 30 m od obiektów budowlanych. W tym wypadku odległości od istniejącego budynku były większe. W celu uniknięcia ewentualnych roszczeń zdecydowano przed rozpoczęciem właściwych prac sprawdzić prędkość drgań zagrożonego obiektu wywołanych dynamiczną wymianą. W tym celu zaplanowano ustawienie mierników drgań na konstrukcji i wykonanie testujących uderzeń w najbliższych obiektowi projektowanych punktach zagęszczenia. Ku zaskoczeniu wykonawców budynek okazał się na tyle nie czuły na drgania, iż nie tylko nie stanowiły żadnego zagrożenia dla konstrukcji, ale także nie były wyczuwalne dla znajdujących się wewnątrz osób.

Niewątpliwy problem społeczny stanowiły protesty mieszkańców zlokalizowanego w odległości ok. 150 m od miejsca zagęszczania osiedla budynków jednorodzinnych. Wbrew rzeczywistej potrzebie zadecydowano o przeprowadzeniu pomiarów drgań także w tej lokalizacji. Przeprowadzono próby zrzutu ubijaka o masie 22,5 ton z trzech wysokości 15 m, 20m, 25 m, drgania obiektów przy zrzucie ciężaru z najniższej wysokości były niemal niezauważalne. Dla dwóch kolejnych wysokości uniesienia ciężaru uzyskano drgania pionowe o wartości 18 $mm/s^2$ a poziome o wartości 13 $mm/s^2$, podczas gdy próg odczuwania drgań przez człowieka, wyrażony przez jednostkę przyspieszeń (wg stosownej normy) wynosi

w kierunku pionowym 5.0 mm, w kierunek poziomym 3.6 mm, a zatem drgania te były rzeczywiście odczuwalne przez mieszkańców. .Bazując na normie PN-88/B-02171 rozważając funkcję obiektu, charakter drgań, oraz ich powtarzalność, stwierdzono iż monitorowane drgania były akceptowalne (w całym paśmie częstotliwości) ze względu na odbiór ich przez ludzi przebywających w budynkach. Rzeczywiste poziomy drgań wygenerowane prze ubijak spadający nawet z największej wysokości nie powodowały żadnego zagrożenia dla konstrukcji budynków.

**Wnioski.**

Zaproponowane przez Menard rozwiązanie problemu słabego podłoża jak również nierównomierności osiadań okazało się niezwykle skuteczne, co potwierdziły wykonane badania odbiorowe. Rozwiązanie okazało znacznie szybsze w realizacji i znacznie tańsze od proponowanego pierwotnie.




Rys. 6. Wynik próbnego obciążenia wykonanego płytą kołową o średnicy 2m.

Opisywana realizacja wykazała, iż metoda wymiany dynamicznej jest skutecznym sposobem na wzmocnienie gruntu pod projektowane obiekty handlowe. Warto zauważyć, iż w omawianym przypadku głębokość gruntów słabych znacząco przekraczała zakres oddziaływania metody wymiany dynamicznej. Zaawansowane metody projektowania pozwalają w wielu przypadkach na osiągnięcie wymagań inwestora stosując szybkie i ekonomiczne rozwiązania do których zaliczyć należy niewątpliwie metodę wymiany dynamicznej.