

KOLUMNY ŻWIOWE W NOWOCZESNEJ INFRASTRUKTURZE

TECHNOLOGIA ŁĄCZĄCA EFEKTYWNOŚĆ,
ZRÓWNOWAŻENIE I NIEZAWODNOŚĆ

■ **MARCIN STERNALSKI**
Kierownik Pionu Produktowego Keller Polska



Z TEKSTU DOWIESZ SIĘ:

- ✓ kiedy kolumny żwirowe (KSS) stanowią optymalne rozwiązanie wzmocnienia podłoża gruntowego,
- ✓ jakie korzyści techniczne, ekonomiczne i środowiskowe wynikają z zastosowania tej technologii,
- ✓ dlaczego kolumny żwirowe coraz częściej zastępują pełną wymianę gruntu i tradycyjne fundamentowanie palowe.

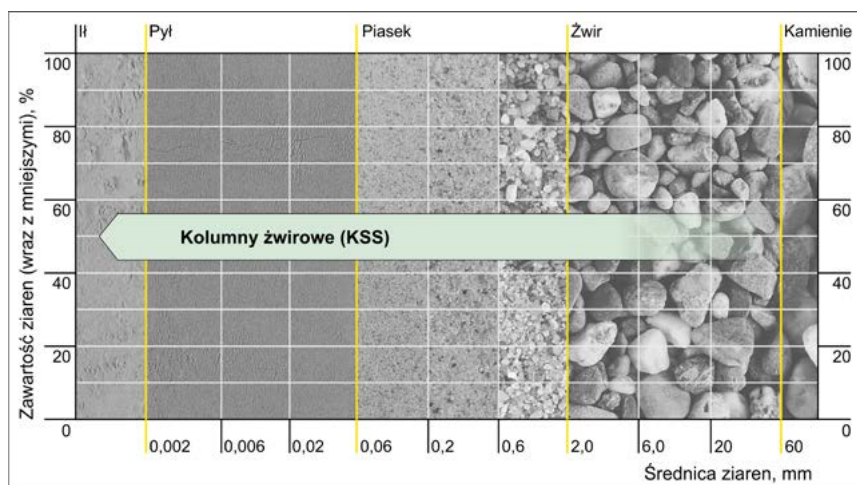
Realizacja nowoczesnych obiektów infrastrukturalnych coraz częściej odbywa się w warunkach rosnącej presji inwestycyjnej, zaostrzających się wymagań środowiskowych oraz dużej zmienności warunków gruntowo-wodnych. W takich realiach dobór technologii fundamentowania przestaje być wyłącznie decyzją projektową, a staje się jednym z kluczowych elementów wpływających na tempo realizacji, bezpieczeństwo wykonania oraz ekonomikę inwestycji. Istotnym czynnikiem jest także dostępność sprzętu oraz zasobów wykonawczych, które w warunkach dużych programów infrastrukturalnych mogą decydować o realnej wykonalności przyjętych rozwiązań. W efekcie już na etapie koncepcji konieczne jest uwzględ-

nienie nie tylko parametrów gruntu, ale również uwarunkowań logistycznych i organizacyjnych budowy.

Choć wachlarz dostępnych metod jest szeroki – od wymiany gruntów po rozwiązania palowe – kolumny żwirowe (KSS) stanowią technologię łączącą prostotę wykonania z wysoką efektywnością techniczną oraz korzystnym bilansem środowiskowym, charakteryzującą się dużą elastycznością projektową, co umożliwia dostosowanie rozstawu, średnicy i głębokości kolumn do lokalnych warunków geotechnicznych. W praktyce pozwala to optymalizować rozwiązanie w sposób iteracyjny, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie wymaganych parametrów przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów.

TECHNOLOGIA DOSTOSOWANA DO SKALI INWESTYCJI

Jednym z podstawowych wyzwań współczesnych inwestycji jest konieczność prowadzenia prac na dużą skalę w sposób ciągły i przewidywalny. Kolumny żwirowe dobrze wpisują się w ten model, ponieważ ich wykonanie może być realizowane w sposób powtarzalny na rozległych frontach robót. Technologia ta pozwala na łatwe zwiększanie wydajności poprzez równoległą pracę wielu zestawów wykonawczych, bez istotnego wzrostu złożoności procesu. Jednocześnie parametry wykonywanych elementów pozostają porównywalne, co ułatwia kontrolę jakości i nadzór.



RYS. 1. | Granice stosowania kolumn żwirowych (KSS)



FOT. 1a i b. | Równoległa praca wielu zestawów wykonawczych

Ma to szczególne znaczenie w projektach liniowych, takich jak drogi ekspresowe, linie kolejowe czy inwestycje kubaturowe (hale, centra handlowe, magazyny), gdzie kluczowa jest zarówno wydajność, jak i ograniczenie ryzyk organizacyjnych oraz technologicznych. Możliwość etapowania robót i dostosowywania frontu pracy do harmonogramu innych branż zwiększa efektywność całego procesu budowlanego. W praktyce pozwala to ograniczyć przestoje oraz minimalizować kolizje pomiędzy kolejnymi etapami realizacji.

SPRAWDZONE PODSTAWY PROJEKTOWE

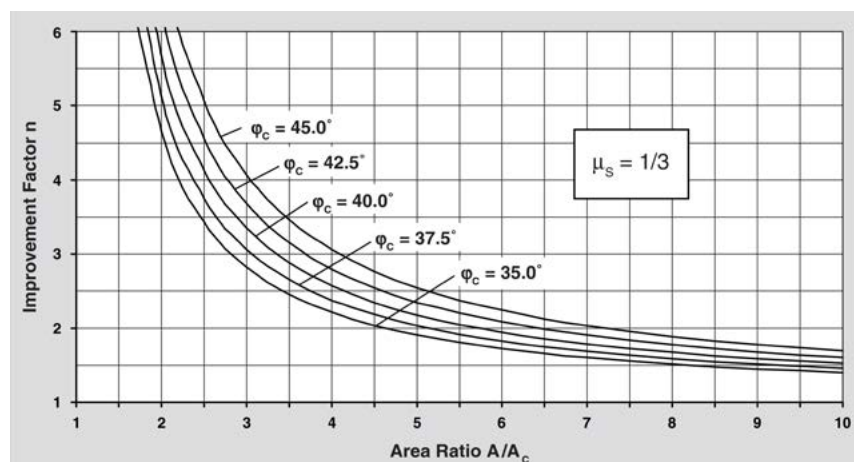
Technologia kolumn żwirowych opiera się na ugruntowanych zasadach projektowych i wykonawczych, ujętych m.in. w normie PN EN 14731:2005 „Wykonaw-

stwo specjalnych robót geotechnicznych – Wzmacnianie gruntu metodą wibrowania wgłębnego”. Dzięki temu może być stosowana w sposób bezpieczny i przewidywalny, zgodnie z obowiązującymi wymagania-

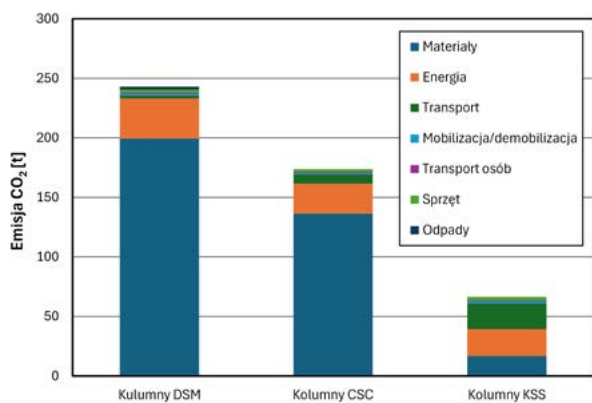
mi. Dodatkowo szerokie doświadczenie wykonawcze oraz dostępność wyników badań terenowych pozwalają na kalibrację parametrów projektowych w oparciu o dane z obserwacji i badań testowych. Pozwala to ograniczyć niepewność obliczeniową i zwiększyć wiarygodność przyjmowanych założeń.

Uzupełnieniem zasad projektowych są dedykowane dla kolumn żwirowych specyfikacje WWiORB, które porządkują wymagania dotyczące wykonania, kontroli jakości oraz odbioru robót. Wprowadzają one spójne i jednoznaczne kryteria oceny efektów wzmocnienia, oparte na wynikach badań i pomiarów terenowych. Dzięki temu możliwe jest zachowanie ciągłości pomiędzy założeniami projektu a ich weryfikacją w trakcie realizacji. W praktyce przekłada się to na wysoką powtarzalność efektów oraz przejrzystość procesu realizacji inwestycji.

Proces projektowania bazuje na analizie stopnia wzmocnienia podłoża wynikającego z udziału kolumn w planie fundamentu. Uwzględnia się przy tym zarówno parametry gruntu w stanie pierwotnym, jak i jego zachowanie po zagęszczeniu oraz oddziaływaniach dynamicznych. Jest on relatywnie prosty, ponieważ dla inżynierskiego oszacowania stopnia wzmocnienia podłoża wystarczy posłużyć się nomogramem. Pozwala to na szybkie przejście od etapu koncepcji do realizacji, co ma istotne znaczenie w inwestycjach o napiętym harmonogramie.



RYS. 2. | Nomogram przedstawiający zależność współczynnika poprawy w stosunku do powierzchni wzmocnienia



RYS. 3. | Porównanie kalkulacji emisji CO₂ dla kolumn CSC, DSM i żwirowych dla wzmocnienia o wartości ok. 500 tys. PLN obliczone przy użyciu kalkulatora EFCF

KORZYŚCI ŚRODOWISKOWE

Współczesne inwestycje coraz częściej wymagają ograniczenia śladu węglowego. Na tym tle kolumny żwirowe wyróżniają się szczególnie korzystnie, ponieważ nie wymagają stosowania betonu ani cementu. Ograniczenie produkcji materiałów wiążących, które są jednymi z głównych źródeł emisji CO₂ w budownictwie, przekłada się bezpośrednio na redukcję wpływu inwestycji na środowisko. Dodatkowo mniejsze zużycie energii w trakcie wykonania przekłada się na niższe całkowite zużycie zasobów.

Wykorzystanie naturalnych materiałów, takich jak żwir i piasek, pozwala na znaczące ograniczenie emisji CO₂ – nawet o około 80% w porównaniu z rozwiązaniami palowymi opartymi na betonie i stali. Istotne jest również ograniczenie transportu materiałów oraz brak konieczności utylizacji znacznych ilości urobku, co dodatkowo poprawia bilans środowiskowy inwestycji.

WYKORZYSTANIE MATERIAŁÓW Z RECYKLINGU

Kierunek ten może być dodatkowo wzmocniony poprzez wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu. Coraz większe znaczenie zyskuje zastosowanie przekruszu betonowego jako alternatywy dla naturalnego kruszywa w technologii kolumn żwirowych. Rozwiązanie to wpisuje się w zasady gospodarki o obiegu zamkniętym, umożliwiając ponowne wykorzystanie materiałów z rozbiórki istniejących obiektów. Badania wskazują, że odpowiednio przygotowany i zagęszczony materiał

z odzysku charakteryzuje się parametrami mechanicznymi, takimi jak sztywność czy kąt tarcia wewnętrznego, porównywalnymi, a niekiedy nawet korzystniejszymi niż w przypadku tradycyjnych kruszyw łamanych. W praktyce oznacza to możliwość wykorzystania materiału pochodzącego z rozdrobnionych elementów betonowych lub urobku z istniejących konstrukcji, co ogranicza transport i dodatkowo redukuje ślad środowiskowy inwestycji.

ODPOWIEDŹ NA ZMIENNOŚĆ WARUNKÓW GRUNTOWYCH

Zmiany klimatu wprowadzają dodatkowy poziom niepewności w projektowaniu geotechnicznym. Wahania poziomu wód gruntowych, okresowe przesuszenia gruntów czy intensywne opady wpływają na parametry podłoża i jego zachowanie w czasie. Kolumny żwirowe stanowią rozwiązanie, które jednocześnie zwiększa sztywność gruntu i poprawia jego drenaż.

Mechanizm ten wynika z wysokiej przepuszczalności kruszywa oraz zdolności kolumn do odprowadzania wody w kierunku pionowym. W rezultacie możliwe jest przyspieszenie konsolidacji oraz ograniczenie osiadania, szczególnie w gruntach słabonośnych i nawodnionych. Skrócenie drogi filtracji powoduje, że proces stabilizacji podłoża zachodzi szybciej niż w gruntach niewzmocnionych, co bezpośrednio przekłada się na większą przewidywalność harmonogramu realizacji.

Funkcja drenażowa sprawia, że technologia ta znajduje zastosowanie również w inwestycjach hydrotechnicznych, gdzie kolumny pełnią rolę pionowych drenaży ograniczających wzrost ciśnienia wody w gruncie i poprawia



FOT. 2a i b. | Recykling betonu bezpośrednio na placu budowy do zastosowania jako materiał do kolumn żwirowych



FOT. 3. | Wykonywanie kolumn z przekruszu betonowego



FOT. 4. | Wykonywanie kolumn żwirowych (KSS) w warunkach gruntów nawodnionych – technologia pełni jednocześnie funkcję wzmocnienia i efektywnego drenażu podłoża

wiających stateczność konstrukcji ziemnych.

W kontekście obiektów o najwyższych wymaganiach bezpieczeństwa, takich jak elektrownie jądrowe, zastosowanie kolumn żwirowych pozwala ograniczyć ryzyko upłynięcia podłoża oraz związanej z nim utraty nośności w warunkach obciążeń dynamicznych. Dzięki zdolności do szybkiej redukcji nadciśnień porowych oraz poprawy współpracy gruntu ze wzmocnieniem, technologia ta zwiększa niezawodność posadowienia.

KOLUMNY ŻWIROWE A PEŁNA WYMIANA GRUNTU

W przypadkach podłoża wymagającego poprawy parametrów naturalnym rozwiązaniem jest pełna wymiana gruntów. W praktyce jednak uzasadnione jest zastosowanie kolumn żwirowych jako alternatywy, szczególnie przy dużej miąższości warstw słabonośnych, wysokim poziomie wód gruntowych lub ograniczeniach przestrzennych.

Wymiana gruntów pozostaje skuteczna przy płytkim zaleganiu warstw słabych, jednak wymaga prowadzenia głębokich wykopów oraz – w warunkach nawodnionych – intensywnego odwodnienia i zabezpieczeń, co znacząco zwiększa złożoność robót.

W takich warunkach kolumny żwirowe pozwalają na wzmocnienie podłoża bez jego

usuwania, przy mniejszym ryzyku wykonawczym i niższej wrażliwości na zmiany warunków gruntowych. Tworzą one układ współpracujący z gruntem rodzimym i zapewniający ciągły rozkład obciążeń.

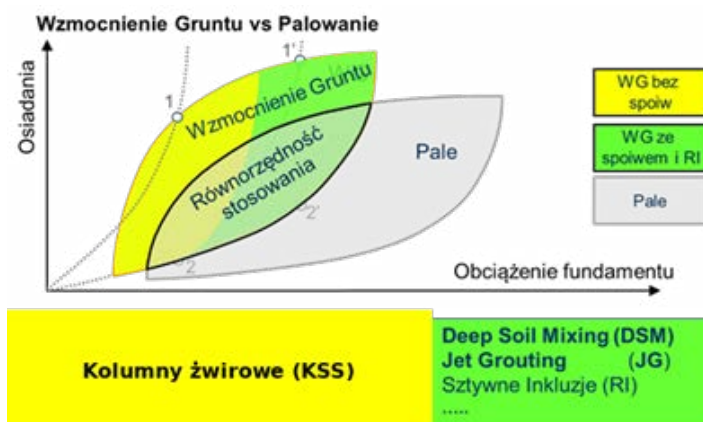
Z punktu widzenia odkształceń technologia ta umożliwia ograniczenie i wyrównanie osiadania oraz przyspieszenie konsolidacji dzięki funkcji drenażowej. Wymiana gruntów pozwala redukować osiadania wtórne, jednak efekt ten jest w pełni osiągalny jedynie przy całkowitej wymianie podłoża.

Różnice widoczne są również w organizacji robót – kolumny żwirowe umożliwiają szybkie i powtarzalne prowadzenie prac przy ograniczonym froncie robót, podczas gdy wymiana gruntów jest rozwiązaniem bardziej czasochłonnym i logistycznie wymagającym.

Istotne są także aspekty środowiskowe. Kolumny żwirowe znacząco ograniczają emisję CO₂ oraz ilość odpadów, natomiast wymiana gruntów wiąże się z koniecznością zagospodarowania dużych ilości urobku (wraz z kosztami BDO).

ALTERNATYWA DLA FUNDAMENTOWANIA PALOWEGO

Współczesne podejście projektowe coraz częściej traktuje kolumny żwirowe jako realną alternatywę dla klasycznego fundamentowania palowego, a nie jedynie rozwiązanie uzupełniające. Odpowiednio zaprojektowane układy kolumn pozwalają spełnić wymagania zarówno w zakresie nośności, jak i osiadania, przy uwzględnieniu współpracy gruntu ze wzmocnieniem oraz rozkładu naprężenia w podłożu.



RYG. 4. | Zakres równoważnego zastosowania kolumn żwirowych (KSS) i palowania (na podstawie: Sondemann, Ground Improvement as Alternative to Piling – Effective Design Solutions for Heavily Loaded Structures)



FOT. 5. | Maszyna specjalistyczna do wykonywania kolumn żwirowych

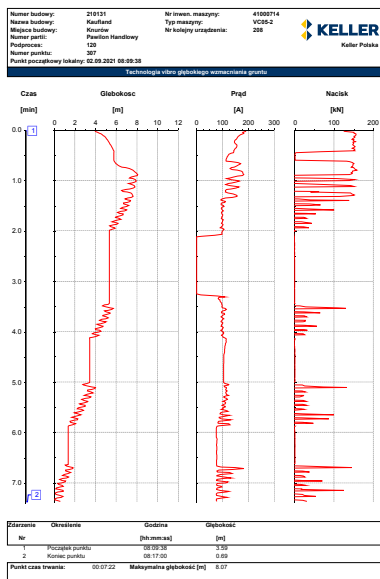
W wielu przypadkach możliwe jest osiągnięcie wymaganych parametrów użytkowych bez konieczności stosowania pełnego palowania lub przy jego istotnym ograniczeniu. Takie podejście pozwala na optymalizację kosztów oraz lepsze dopasowanie rozwiązania do lokalnych warunków gruntowych, w tym poprzez zastosowanie układów hybrydowych, szczególnie efektywnych w obszarach o złożonej budowie geologicznej.

ZNACZENIE DOBORU SPRZĘTU

Kluczowym elementem skuteczności technologii jest właściwy dobór sprzętu wykonawczego. Nowoczesne zestawy umożliwiają pełną kontrolę procesu poprzez rejestrację parametrów technologicznych w czasie rzeczywistym, co stanowi podstawę bieżącej oceny jakości robót oraz ewentualnej korekty ich przebiegu.

Odpowiednia siła dociskowa oraz możliwość osiągania wymaganych głębokości determinują skuteczność penetracji wibratora i zapewniają osiągnięcie projektowanej długości kolumn. Kluczowe znaczenie ma również kontrolowane zagęszczanie materiału w trakcie formowania trzonu, które bezpośrednio wpływa na parametry nośności i sztywności wzmocnionego podłoża.

Sercem systemu jest wibrator służący z wewnętrznym podawaniem kruszywa, który umożliwia jednocześnie pogrążanie narzędzia oraz wibracyjne zagęszczanie materiału. Głębokość wykonania kolumny wynika nie tylko



RYS. 5. | Metryka wykonanej kolumny

z założeń projektowych, ale również z rzeczywistych warunków gruntowych i jest identyfikowana w trakcie penetracji na podstawie wzrostu oporu pogrążania, obserwowanego m.in. poprzez zwiększone natężenie prądu pobieranego przez wibrator. Generowanie energii drgań w dolnej części urządzenia pozwala efektywnie oddziaływać na grunt i zapewniać właściwe warunki formowania kolumny oraz jej współpracę z podłożem. Jednocześnie średnica kolumny kształtowana jest w sposób adaptacyjny poprzez wibracyjne rozpychanie kruszywa, a jej wartość wynika z równowagi pomiędzy energią zagęszczania a boczną podatnością ośrodka gruntowego.

Integralnym elementem procesu jest również monitoring parametrów produkcyjnych w czasie rzeczywistym (QA/QC – Quality Assurance / Quality Control), obejmujący w szczególności

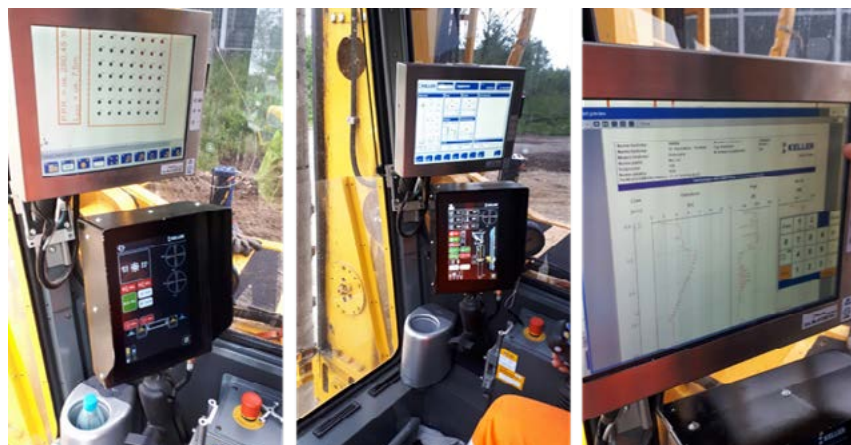
główności rejestrację głębokości penetracji, oporu pogrążania poprzez natężenie prądu pobieranego przez wibrator oraz ilości i objętości wbudowanego kruszywa. Dane te umożliwiają bieżącą kontrolę przebiegu robót oraz weryfikację zgodności wykonania z założeniami projektowymi.

Analiza zarejestrowanych parametrów pozwala dodatkowo identyfikować lokalne zmiany warunków gruntowych, takie jak strefy słabszych gruntów czy warstwy o podwyższonej sztywności, co umożliwia bieżące dostosowanie parametrów technologicznych do rzeczywistych warunków podłoża.

PODSUMOWANIE

W obliczu wyzwań stojących przed branżą budowlaną – od transformacji klimatycznej, przez rosnące wymagania regulacyjne, po realizację dużych programów infrastrukturalnych – kolumny żwirowe zyskują na znaczeniu jako technologia przyszłości. Ich zastosowanie wpisuje się w kierunek rozwoju zrównoważonego budownictwa oraz optymalizacji procesów realizacyjnych. Dodatkowo rosnąca presja na skracanie czasu inwestycji sprzyja rozwiązaniom o wysokiej wydajności, umożliwiającym mobilizację dużych zasobów sprzętowych i wykonawczych.

Łączą one efektywność techniczną, prostotę wykonania oraz wyraźne korzyści środowiskowe. Uwzględnienie tej technologii już na etapie koncepcji projektowej pozwala tworzyć rozwiązania bardziej niezawodne, ekonomiczne i dopasowane do rzeczywistych warunków gruntowych. |



FOT. 6a, b i c. | Monitoring procesu wykonania kolumn żwirowych (KSS) – kontrola parametrów technologicznych w czasie rzeczywistym w kabinie operatora