

*Bartłomiej Czado\**, *Elżbieta Korzeniowska-Rejmer\*\**, *Jan S. Pietras\**

## ANALIZA ZMIAN NOŚNOŚCI PODŁOŻA BUDOWLANEGO W WYNIKU JEGO ZANIECZYSZCZENIA SUBSTANCJAMI ROPOPOCHODNYMI NA PRZYKŁADZIE GRUNTÓW PIASZCZYSTYCH

---

### 1. Wprowadzenie

Antropogeniczne zmiany zachodzące w środowisku podziemnym, wywołane zanieczyszczeniami gruntów i wód, w odniesieniu do podłoża budowli i konstrukcji inżynierskich nie mają dotychczas w Polsce swojej literatury. Podjęte na szerszą skalę badania związane z zanieczyszczeniami środowiska gruntowo-wodnego dotyczą głównie oceny stanu zanieczyszczeń, migracji oraz metod ich usuwania. Nie obejmują natomiast ich wpływu na zmianę właściwości gruntu jako podłoża budowlanego i gruntu jako materiału budowlanego w budownictwie ziemnym. Zagadnienie to jest istotne dla przyjętych rozwiązań projektowych obiektów inżynierskich na terenach zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi i podjęcia odpowiednich zabezpieczeń konstrukcji obiektów już istniejących na terenach poddanych skażeniu.

Z dotychczas prowadzonych badań nad tym zagadnieniem [1–9, 11, 12] jednoznacznie wynika, iż wpływ ten zależy przede wszystkim od czynnika zanieczyszczającego, jego stężenia, rodzaju gruntu poddanego zanieczyszczeniu oraz czasu trwania penetracji. Grunty niespoiste, ze względu na cechujące je wyższe wartości współczynnika filtracji, są przy tym bardziej podatne na przenikanie zanieczyszczeń, niż grunty spoiste. Substancje ropopochodne (SR) wprowadzone do gruntu tworzą otoczki wokół jego ziaren, a także częściowo lub całkowicie wypełniają przestrzenie międzyziarnowe. Na ziarnach gruntu powstaje silnie zaadsorbowana warstwa oleju, sprawiająca, że przy kontakcie cząstek mineralnych gruntu

---

\* Zakład Współdziałania Budowli z Podłożem, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Kraków

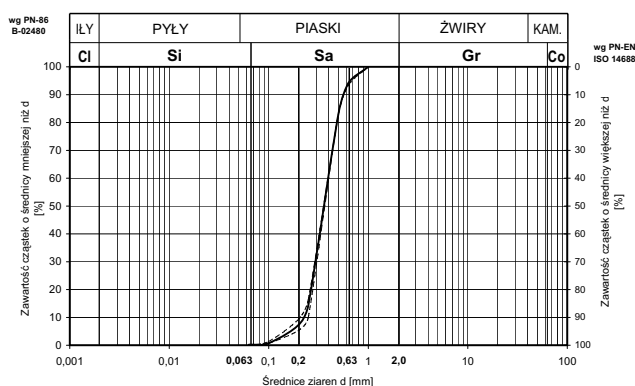
\*\* Zakład Geologii, Geoinżynierii i Ochrony Powierzchni Ziemi, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, Kraków

z wodą, ich zwilżalność znacznie się zmniejsza [10]. Utworzone z oleju otoczki wokół cząstek mineralnych tworzących szkielet gruntu, są przyczyną zmian oporu tarcia przy wzajemnych przemieszczeniach podczas ścinania.

## 2. Metodyka i materiały badań

Celem badań było określenie wpływu zanieczyszczenia gruntu ON na jeden z podstawowych parametrów wytrzymałościowych gruntu — efektywny kąt tarcia wewnętrznego ( $\varphi'$ ). Badaniom poddano utwory piaszczyste, pochodzące z występujących na obszarze Krakowa czwartorzędowych osadów rzecznych tarasu wysokiego z głębokości 3,0–4,0 m ppt. Z otworów wiertniczych pobrano grunt o naturalnym uziarnieniu i wilgotności, metodą pobierania próbek kategorii B wg PN-EN 1997-2 oraz EN ISO 22475-1. Badania laboratoryjne wykonano na próbkach naturalnych, formowanych (określenie wg PN-EN 1997-2). Próbki wykorzystane w badaniach zaklasyfikowano do klasy jakości 3 według PN-EN 1997-2.

Badania wstępne obejmowały analizy granulometryczne. Zakres zmienności uziarnienia badanych próbek przedstawiono na rysunku 1. Linia ciągła reprezentuje uśrednioną krzywą granulometryczną, reprezentatywną dla wszystkich przebadanych próbek, podczas gdy linie przerywane ilustrują przebiegi graniczne. Badane grunty zostały sklasyfikowane jako piaski średnie: MSa (*medium sand*) wg PN-EN ISO 14688; Ps wg PN-86/B-02480.



Rys. 1. Wyniki analiz granulometrycznych badanych próbek gruntu

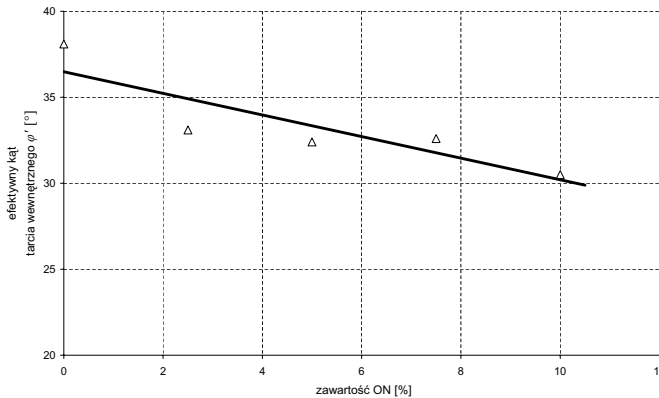
Próbki gruntu zanieczyszczono olejem napędowym w ilościach 2,5%, 5%, 7,5% oraz 10% w stosunku do suchej masy szkieletu gruntowego i zabezpieczono w pojemnikach hermetycznych przez okres 30 dni. Przyjęte ilości zanieczyszczenia wynikają z analizy metodyki innych dotychczas opublikowanych, podobnych badań, wykonywanych w ośrodkach badawczych polskich (Politechnika Szczecińska; Politechnika Warszawska) [8, 12] i zagranicznych (MNR Engineering College, Allahabad, Indie) [11], które posłużyły jako badania porównawcze w analizie wyników. Jednocześnie należy zauważyć, że największa przyjęta

ilość zanieczyszczenia (10%) jest zbliżona do maksymalnej teoretycznej wartości, odpowiadającej całkowitemu wypełnieniu porów otwartych gruntu substancją zanieczyszczającą, która dla badanych gruntów wynosi nieco ponad 12%.

Oznaczenia efektywnych wartości kąta tarcia wewnętrznego próbek wyjściowych oraz zanieczyszczonych wykonano w aparacie skrzynkowym bezpośredniego ścinania typu 27-T2160 firmy Controls, który umożliwia wykonanie badania w sposób zautomatyzowany, z cyfrową rejestracją wartości przemieszczeń poziomych i pionowych oraz siły ścinającej. Badania wykonano z uwzględnieniem wymogów norm PN-EN 1997-2 oraz PN-88/B-04481. Liczba wykonanych badań dla każdej z prób została dobrana zgodnie z zaleceniami PN-EN 1997-2 — dla zależności  $\tau$ - $\sigma$  uzyskano współczynniki korelacji  $r$ -Pearsona na poziomie 0,99.

### 3. Wyniki badań i ich dyskusja

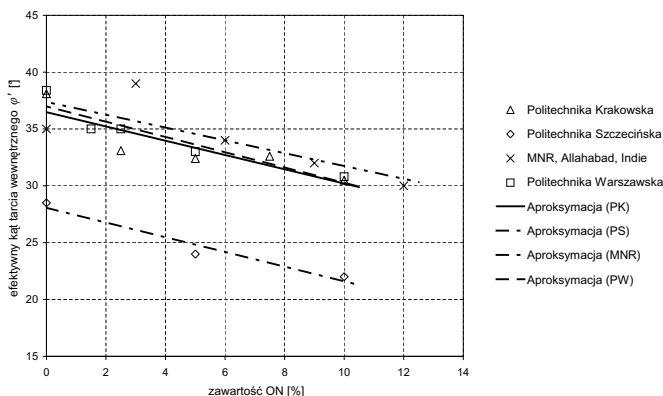
Przebadane próbki gruntu niezanieczyszczonego charakteryzowały się wartością efektywnego kąta tarcia wewnętrznego wynoszącą  $\varphi' = 38,1^\circ$ . Dla próbek piasku średniego (MSa), zanieczyszczonych ON w ilości od 2,5% do 10%, otrzymano wartości kąta tarcia wewnętrznego w granicach od  $33,1^\circ$  do  $30,5^\circ$ . Wraz ze wzrostem ilości zanieczyszczenia od 0 do 10% zaobserwowano obniżenie wartości kąta tarcia wewnętrznego o  $7,6^\circ$ , co stanowi spadek o ok. 20% jego początkowej wartości. Wykres zależności wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego badanego gruntu od procentowej zawartości zanieczyszczenia przedstawiono na rysunku 2. Zależność aproksymowano linią prostą.



Rys. 2. Zależność efektywnego kąta tarcia wewnętrznego badanych piasków średnich od zawartości ON

Otrzymane wyniki porównano z rezultatami badań wpływu obecności ON w gruntach piaszczystych wykonanych w innych ośrodkach badawczych [8, 11, 12]. Aproksymowane liniowo zależności przedstawia rysunek 3.

Wszystkie przeanalizowane dane badawcze wykazują jednoznaczną tendencję spadkową wartości kąta tarcia wewnętrznego wraz ze wzrostem zawartości ON w gruncie.



Rys. 3. Aproksymacje liniowe wartości  $\varphi'$  zanieczyszczonych gruntów piaszczystych uzyskanych w różnych ośrodkach badawczych [8, 11, 12]

Wyraźnie niższe wartości parametru uzyskane w ośrodku szczecińskim wynikają z faktu, iż badaniom poddano grunt o drobniejszym uziarnieniu (piaski drobne). Wysoka zbieżność wyników badań w ośrodkach: krakowskim, warszawskim i indyjskim skłoniła autorów do próby znalezienia wspólnej dla tych badań, funkcyjnej zależności wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego od stopnia zanieczyszczenia olejem napędowym piasków średnich.

Aproksymację liniową wykonaną dla wszystkich zgromadzonych danych przedstawiono na rysunku 4, a uzyskaną zależność funkcyjną opisuje poniższy wzór:

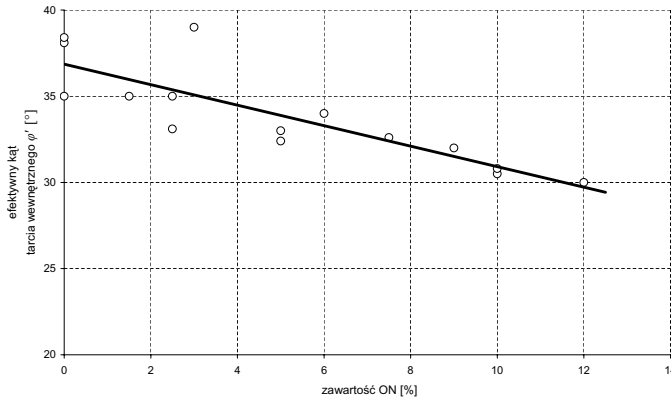
$$\varphi' = \varphi'_0 - 0,6z \quad (1)$$

gdzie:

- $\varphi'$  — efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu zanieczyszczonego, °,
- $\varphi'_0$  — efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu czystego, °,
- $z$  — zawartość oleju napędowego w gruncie, %.

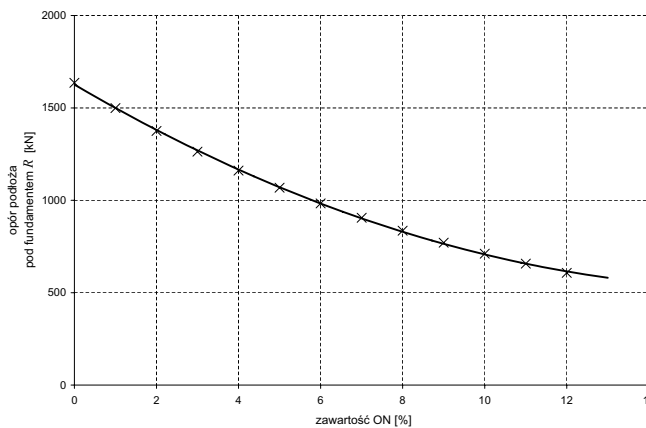
#### 4. Wpływ zanieczyszczeń olejowych na nośność podłoża budowlanego

Opisany powyżej negatywny wpływ zanieczyszczenia gruntu substancją ropopochodną na kąt tarcia wewnętrznego może mieć bardzo duże znaczenie inżynierskie, ponieważ jest on podstawowym parametrem wytrzymałościowym, na którym opiera się projektowanie fundamentów budowli. Parametr ten stanowi podstawę do określania współczynników nośności  $N$  przy wyznaczaniu obliczeniowego oporu podłoża gruntowego  $Q_f$  zgodnie z obowiązującą dotychczas Polską Normą do projektowania fundamentów bezpośrednich PN-81/B-03020. Podobne podejście zostało również zaproponowane w przygotowywanej do wprowadzenia w Polsce normie Eurokod 7 (PN-EN 1997-1). Efektywny kąt tarcia wewnętrznego jest tutaj podstawowym parametrem gruntowym, służącym do obliczania wartości oporu gruntu  $R$  dla tzw. warunków „z odpływem” (*drained*).



**Rys. 4.** Aproksymacja liniowa wartości  $\varphi'$  dla wszystkich analizowanych wyników uzyskanych dla zanieczyszczonych piasków średnich przebadanych w różnych ośrodkach badawczych [8, 11, 12]

Dla zobrazowania istotności wpływu zmian kąta tarcia wewnętrznego, wynikających z zanieczyszczenia gruntu ON na nośność fundamentu bezpośredniego, autorzy poddali analizie przypadek obliczeniowy fundamentu bezpośredniego. Zgodnie z procedurą normy Eurokod 7 obliczono wartość oporu podłoża pod fundamentem stopowym o jednostkowej powierzchni (wymiary  $B = L = 1,0$  m), obciążonego osiową siłą pionową. Fundament posadowiono na warstwie piasku średniego o wyjściowej wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego równej  $\varphi' = 37^\circ$ , a następnie badano wpływ zmian tej wartości, wynikających z występowania w gruncie substancji zanieczyszczającej (stosując opracowaną zależność funkcyjną), na nośność podłoża pod fundamentem. Wyniki obliczeń przedstawia rysunek 5.



**Rys. 5.** Opór (nośność) podłoża piaszczystego pod fundamentem w funkcji zanieczyszczenia ON

Z otrzymanych rezultatów wynika, iż już stosunkowo niewielka zawartość ON w gruncie może powodować znaczny spadek jego nośności. Dla 2% zanieczyszczenia, redukcja

oporu podłoża wynosi ponad 15%, a dla 10% zanieczyszczenia wartość oporu obniża się już ponad dwukrotnie.

## 5. Podsumowanie i wnioski

- Opór tarcia wewnętrznego wyraża się iloczynem naprężeń efektywnych w szkielecie gruntowym prostopadłych do powierzchni ścinania i współczynnika tarcia, wyrażanego tangensem kąta tarcia wewnętrznego. Parametr ten zależy przede wszystkim od wymiaru ziaren oraz ich kształtu, ale także od innych cech materiału gruntowego, np. składu mineralnego. Bezpośredni wpływ na zmniejszenie oporów tarcia przy ścinaniu ma obecność w gruncie substancji mogącej działać jak smar. Wpływ taki obserwuje się chociażby w gruntach wilgotnych i nawodnionych, gdzie substancją „smarującą” jest woda. Analogiczne działanie może mieć obecność w gruncie zanieczyszczeń ropopochodnych. Olej napędowy, ze względu na mniejszą gęstość, mniejsze siły napięcia powierzchniowego, a także wyższą lepkość, powoduje poślizg pomiędzy ziarnami, znacznie większy niż woda, a w konsekwencji obniżenie oporu tarcia gruntu przy ścinaniu.
- Badania wpływu obecności oleju napędowego w gruncie na wartości  $\varphi'$  przeprowadzone w różnych ośrodkach krajowych i zagranicznych jednoznacznie wskazują, że obecność tego typu zanieczyszczenia w gruncie wpływa niekorzystnie na wartość kąta tarcia wewnętrznego. Zgromadzone wyniki badań pozwoliły na wyprowadzenie zależności funkcyjnej pomiędzy efektywnym kątem tarcia wewnętrznego, a zawartością oleju napędowego w piaskach średnich i drobnych. Zgodnie z tą zależnością, w gruntach tych występuje spadek wartości kąta tarcia wewnętrznego o  $0,6^\circ$  przy wzroście zanieczyszczenia olejem napędowym o 1%.
- Przedstawione obliczenia wykazały, iż stosunkowo niewielka ilość substancji zanieczyszczającej w gruncie piaszczystym może powodować znaczące obniżenie oporu podłoża pod fundamentem. Dla 2% zanieczyszczenia, redukcja oporu podłoża wynosi ponad 15%, a dla 10% zanieczyszczenia wartość oporu obniża się już ponad dwukrotnie. Analiza danych obliczeniowych wyraźnie wskazuje, iż przy projektowaniu posadowień obiektów „naftowych” (m.in. stacje paliw, zbiorniki na paliwa płynne, osadniki), gdzie potencjalne ryzyko zanieczyszczenia gruntu tymi substancjami jest relatywnie wysokie, należy brać pod uwagę dodatkowe zwiększenie częściowych współczynników bezpieczeństwa.

## LITERATURA

- [1] *Herzig J., Rybicki S.*: Influence of Chemical Pollutants on Some Geotechnical Properties of Typical Soils from Poland. Proceedings of GREEN 2, The Second International Symposium on Geotechnics Related to the Environment, Krakow, Poland, 8–11 September, 1997. Wyd. Thomas Telford, London 1998, pp. 233–238
- [2] *Kaya A., Fang H.Y.*: The Effects of Organic Fluids on Physicochemical Parameters of Fine-grained Soils. Canadian Geotechnical Journal, 37, 2000, pp. 943–950

- [3] *Korzeniowska-Rejmer E.*: Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na charakterystykę geotechniczną gruntów, stanowiących podłoże budowlane, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2, 2001, s. 83–87
- [4] *Korzeniowska-Rejmer E.*: The Effects of Persistent Anthropogenic on the Geotechnical Properties of Soil. *Proceedings of GREEN 4 International Symposium on Geotechnics Related to the Environment*, R.W.Sarsby & A.J.Felton: Geotechnical and Environmental Aspects of Waste Disposal Sites, Wyd. Taylor & Francis Group, London 2007, pp. 157–162
- [5] *Korzeniowska-Rejmer E., Izdebska-Mucha D.*: Ocena wpływu zanieczyszczeń ropopochodnych na uziarnienie i plastyczność gruntów spoistych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* t. 9, nr 1. 2006, s. 89–103
- [6] *Korzeniowska-Rejmer E., Motak E.*: Wpływ zanieczyszczeń substancjami ropopochodnymi podłoża gruntowego na nośność fundamentów bezpośrednich i ścian oporowych. *Materiały Międzynarodowego Sympozjum Naukowo-Szkoleniowego*, Wyd. Arka Konsorcjum, Poznań 1995
- [7] *Korzeniowska-Rejmer E., Motak E., Rawicki Z.*: Wpływ zanieczyszczeń olejowych na stan techniczny podłoża gruntowego i budynku magazynowania paliw. *Przegląd Budowlany*. VIII, 1995
- [8] *Lupa H., Sałaciak A.*: Wpływ zanieczyszczenia olejami mineralnymi na własności fizykowo-wodne gruntu. *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej*, z. 45, 1975, s. 47–57
- [9] *Palka J., Korzeniowska E.*: Wpływ odpadów porafinacyjnych na zmianę właściwości fizyko-mechanicznych gruntów nasypowych oraz na korozję drenażu w Rafinerii Nafty w Trzebini. *Politechnika Krakowska, Archiwum Instytutu Geotechniki*, Kraków 1990
- [10] *Stegeman W.*: Die Umbenutzung des Untergrundes durch Mineralölein-wirkungen, *Wasser-Abwasser*, 6, 1976
- [11] *Srivastawa R. K., Pandey V.D.*: Geotechnical Evaluation of Oil Contaminated Soil. *Proceedings of GREEN 2, The Second International Symposium on Geotechnics Related to the Environment*. Thomas Telford, London 1998, pp. 204–209
- [12] *Thiel-Roman M.*: Wpływ agresywnych zanieczyszczeń przemysłowych na właściwości fizyczne i mechaniczne wybranych gruntów podłoża budowli. *Praca dyplomowa*, Politechnika Warszawska 1994