

*Janusz Kaczmarek\**

## WYNIK DŁUGOTRWAŁEGO BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA PARCIA BOCZNEGO W OŚRODKU ROZDROBNIONYM METODĄ POMIARU OPORÓW TARCIA

---

### 1. Wstęp

Specyfika problemu projektowania konstrukcji podziemnych wymaga innego sposobu podejścia i rozwiązywania problemów niż w wypadku obliczania konstrukcji wolnostojących, typowych dla budownictwa powierzchniowego. Konstrukcje wolnostojące projektuje się z materiałów konstrukcyjnych o wyraźnie określonych granicach własności mechanicznych. Na ogół dobrze określone są obciążenia konstrukcji, ponieważ bardzo często wartości te są znormalizowane. Proces obliczania i projektowania sprowadza się tutaj do optymalizacji kształtu konstrukcji, doboru jej podstawowych wymiarów zewnętrznych oraz określenia wielkości przekrojów koniecznych do przeniesienia sił wewnętrznych, wyznaczonych w ramach jednej z obowiązujących teorii pracy takiej konstrukcji.

W konstrukcji podziemnej na wielkość jej obciążenia mają wpływ własności fizyczne górotworu oraz jego, najczęściej nie do końca rozpoznane, własności mechaniczne. Zarówno od własności fizycznych górotworu jak i jego własności mechanicznych zależy pierwotny stan naprężenia w górotworze. Z kolei od wielkości naprężeń pierwotnych zależą obciążenia działające na obudowę wyrobisk podziemnych. Odpowiednie wyznaczenie obciążeń działających na obudowę konstrukcji podziemnych wpływa w oczywisty sposób na bezpieczną pracę obliczanej konstrukcji oraz jej odpowiednie z punktu widzenia ekonomii zaprojektowanie.

Obudowy konstrukcji podziemnych projektuje się z reguły na określony, odpowiednio długi czas. Najczęściej jest to okres od kilkunastu do kilkudziesięciu lat. W ośrodku rozdrobnionym poza obudową następują w tym czasie różnego rodzaju procesy, opisane wcześniej

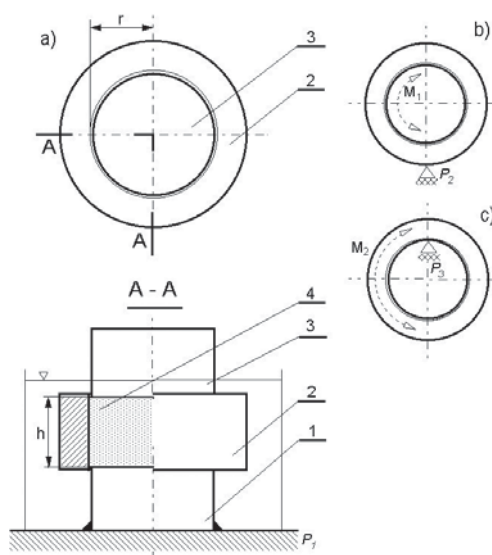
---

\* Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

w [1], które mogą powodować istotną zmianę warunków obciążenia konstrukcji podziemnej. Aby ustalić, w jaki sposób procesy te wpływają na wielkość obciążeń, czas badania ośrodka występującego na zewnątrz konstrukcji powinien być odpowiednio długi, tak by w czasie tego badania, w badanej próbce mogły wystąpić procesy zachodzące w ośrodku rzeczywistym.

## 2. Koncepcja badania współczynnika parcia bocznego metodą pomiaru oporów tarcia

Koncepcję laboratoryjnego sposobu badania współczynnika parcia bocznego w ośrodkach rozdrobnionych, opartą na pomiarze momentów granicznych równoważących siły tarcia pomiędzy badaną próbką a elementami obrotowymi aparatu badawczego przedstawiono wcześniej w pracach [1–4]. W pracach tych opisano aparat do laboratoryjnego badania współczynnika parcia bocznego w gruntach, którego schemat zamieszczono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Schemat aparatu do wyznaczania współczynnika parcia bocznego w ośrodkach rozdrobnionych przez pomiar sił tarcia pomiędzy badaną próbką a obrotowymi elementami aparatu

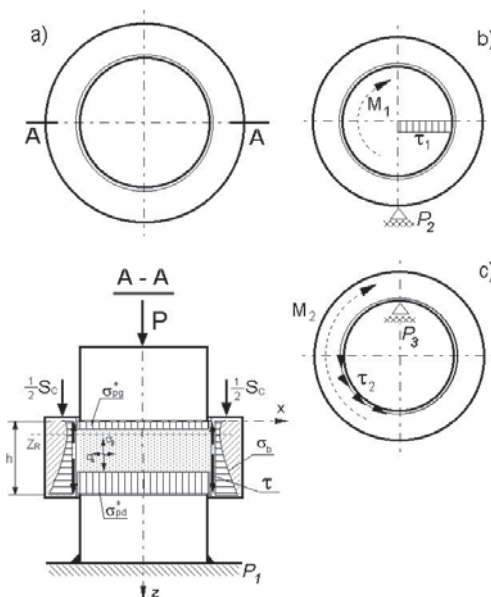
Urządzenie składa się z tłoka oporowego (1) zamocowanego u jego podstawy w sposób ograniczający przemieszczenie poziome, przemieszczenie pionowe oraz blokujący możliwość obrotu względem pionowej osi symetrii. Krępy, stalowy cylinder (2), ma zapewnić wymagane w badaniu zerowe odkształcenie poziome w badanej próbce gruntu. Obciążenie próbki odbywa się przez tłok napierający (3). Przewidziano możliwość czasowego blokowania obrotu cylindra (2) wokół jego pionowej osi. Możliwość blokowania cylindra symbolizuje podpora  $P_2$  (rysunek 1b). Istnieje również możliwość czasowego blokowania obrotu tłoka napierającego (3). Możliwość blokowania tłoka symbolizuje na rysunku 1c podpora  $P_3$ .

Rysunek 2 przedstawia aparat do wyznaczania współczynnika parcia bocznego w ośrodku rozdrobnionym przygotowany do wykonania badania.



Rys. 2. Aparat do wyznaczania współczynnika parcia bocznego w ośrodku rozdrobnionym przygotowany do badania

Na rysunku 3 przedstawiono schemat obciążeń aparatu z umieszczoną wewnątrz próbką gruntu obciążoną siłą  $P$ , przyłożoną do tłoka napierającego, oraz dodatkową siłą  $S_c$ , wywołaną ciężarem cylindra aparatu. Rozkład naprężeń w badanej próbce zmienia się na jej wysokości [4].



Rys. 3. Rozkład naprężeń normalnych w badanej próbce oraz naprężeń od sił tarcia o ścianki aparatu w aparacie obciążonym siłą  $P$  i ciężarem własnym cylindra

Po zablokowaniu możliwości obrotu cylindra (2) podporą  $P_2$  próba obrotu tłoka napierającego (3) wywoła na kontakcie jego podstawy i próbki naprężenia styczne skierowane przeciwnie do kierunku wymuszanego obrotu. Przy pewnej wartości momentu  $M_1$  na kontakcie tłoka (3) i próbki (4) wystąpi stan graniczny.

Po zablokowaniu możliwości obrotu tłoka napierającego (3) podporą  $P_3$  próba obrotu cylindra (2) wywoła na kontakcie wewnętrznej powierzchni cylindra i próbki gruntu naprężenia styczne skierowane przeciwnie do kierunku wymuszanego obrotu. Przy pewnej wartości momentu  $M_2$  na kontakcie cylindra i próbki również wystąpi stan graniczny.

### 3. Wynik badania współczynnika parcia bocznego drobnoziarnistych odpadów przemysłowych

Badaniu poddano odpady przemysłowe wyglądem i własnościami przypominające drobnoziarnisty grunt bez spójności. Ponieważ badane odpady występują w środowisku wodnym warunki badania zaprogramowano tak, by odpowiadały one warunkom rzeczywistym występowania badanego materiału.

Przed rozpoczęciem właściwego badania, ustalono w aparacie bezpośredniego ścinania, kąt tarcia wewnętrznego w warunkach maksymalnie zbliżonych do warunków rzeczywistych. Badania przeprowadzono dla jednej wartości naprężenia normalnego  $\sigma$  równego 540 kPa. W badaniu ustalono, że kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi$  jest równy  $26,6499^\circ$ . Spoczynkowy współczynnik parcia bocznego  $K_o$  standardowo wyznacza się wtedy z równania:

$$K_o = 1 - \sin \varphi \quad (1)$$

Dla ustalonego kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi = 26,6499$  spoczynkowy współczynnik parcia bocznego  $K_o = 0,5515$ .

Badanie współczynnika parcia bocznego metodą pomiaru sił tarcia wykonano dla próbki zanurzonej w wodzie przez cały okres badania. Wysokość próbki  $h$  wynosiła 0,025 m. Obciążenie pionowe próbki, uwzględniające obciążenie pochodzące od ciężaru dźwigni urządzenia obciążającego [3], od ciężaru obciążników, ciężaru tłoka oraz ciężaru cylindra wynosiło 2701,5 N, co przy promieniu próbki  $r = 0,04$  m daje naprężenie  $\sigma_p^* = 537$  kPa. W badanych osadach naprężenie pionowe o tej wielkości wystąpi na głębokości około 25 m.

Dokonano dwóch pomiarów sił tarcia  $M_1$  i  $M_2$  w różnym okresie. Pierwszy pomiar przeprowadzono bezpośrednio po obciążeniu badanej próbki naprężeniem  $\sigma_p^* = 537$  kPa, drugi zaś, po szesnastu miesiącach od pierwszego pomiaru, przy nie zmieniającym się w czasie obciążeniu.

Współczynnik tarcia próbki na kontakcie ze ściankami aparatu badawczego  $\mu$  oraz współczynnik parcia bocznego  $K_o$  określić można z następującego układu równań [4]:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{2}{3} \pi r^3 \mu \sigma_p^* \\ M_2 = 2 \pi r^3 \sigma_p^* \left(1 - e^{-\frac{\mu K_o h}{r}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

W pierwszym pomiarze uzyskano następujące wielkości momentów pochodzących od sił tarcia:

$$M_1 = 25,493 \text{ Nm},$$

$$M_2 = 31,005 \text{ Nm}.$$

Daje to współczynnik tarcia na kontakcie próbki ze ściankami aparatu  $\mu = 0,354$ . Kąt tarcia próbki o ścianki aparatu  $\varphi$  wynosi więc  $19,49^\circ$ . Współczynnik parcia bocznego  $K_{o(1)}$  obliczony z układu równań (2) wynosi:

$$K_{o(1)} = 0,7002.$$

W drugim pomiarze, po szesnastu miesiącach obciążania próbki, uzyskano  $M_2 = 32,997$  Nm przy praktycznie nieziennej wartości  $M_1$ . Obliczony z układu równań (2) współczynnik  $K_{o(2)}$  jest teraz równy:

$$K_{o(2)} = 0,7319.$$

#### 4. Wnioski końcowe

Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych wynika, że współczynnik parcia bocznego  $K_o$  w badanych odpadach przemysłowych przyjmuje różne wartości w zależności od metody jego wyznaczania. Wyznaczony w sposób standardowy z równania (1) współczynnik  $K_o$  jest równy 0,5515.

Współczynnik parcia bocznego  $K_o$  ustalony metodą pomiaru sił tarcia, obliczony z układu równań (2), przyjmuje inne wartości niż wyznaczony w sposób standardowy z równania (1). Naprężenie pionowe w badanej próbce w obu metodach pomiaru było prawie identyczne.

Zmierzona wartość współczynnika parcia bocznego zależy od historii badania, choć wielkość naprężenia pionowego w badanej próbce nie zmieniła się w czasie.

W pomiarze wykonanym bezpośrednio po obciążeniu próbki stwierdzono współczynnik parcia bocznego  $K_{o(1)} = 0,7002$ , a więc jest większy od wyznaczonego w sposób tradycyjny o 27%.

W pomiarze wykonanym szesnaście miesięcy od chwili obciążenia próbki ustalono, że współczynnik parcia bocznego  $K_{o(2)}$  jest jeszcze większy niż  $K_{o(1)}$  i wynosi 0,7319. Jest więc większy od wyznaczonego w sposób tradycyjny o 32,7%.

Niewiele większy współczynnik parcia bocznego wpływa w znaczący sposób korzystnie na pracę konstrukcji podziemnej poprzez redukcję poziomych naprężeń rozciągających. Ma to szczególne znaczenie gdy konstrukcja podziemna wykonana jest z materiału kruchego.

Wyznaczony w aparacie bezpośredniego ścinania kąt tarcia wewnętrznego badanego odpadu  $\varphi = 26,6499$  jest większy niż wyznaczony z oporów tarcia kąt tarcia badanej próbki o stalowe ścianki aparatu badawczego. Wtedy kąt  $\varphi = 19,49^\circ$ . Można więc wnioskować, że przy normalnym naprężeniu pionowym  $\sigma_p^* = 537$  kPa, pomimo upływu stosunkowo długiego czasu badania, poślizg w aparacie badawczym odbywał się na kontakcie próbki z metalowymi elementami aparatu.

## LITERATURA

- [1] *Kaczmarek J.*: Koncepcja sposobu laboratoryjnego pomiaru współczynnika parcia bocznego w gruntach. XXIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii. Geotechnika i Budownictwo Specjalne, KGBiG AGH, Kraków, 2006
- [2] *Kaczmarek J.*: Interpretacja wyników badania współczynnika parcia bocznego w gruntach metodą opartą na pomiarze momentów od sił tarcia. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 32, Zeszyt 2, Kraków, 2008
- [3] *Kaczmarek J.*: Wstępne badania współczynnika parcia bocznego w osadach zbiornika odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 32, Zeszyt 2, Kraków, 2008
- [4] *Kaczmarek J.*: Kompleksowe badanie współczynnika parcia bocznego w gruntach laboratoryjną metodą pomiaru oporów tarcia. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 32, Zeszyt 2, Kraków, 2009
- [5] *Kisiel I. i inni*: *Mechanika skał i gruntów*. PWN Warszawa, 1982
- [6] *Wilun Z.*: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1976