

Wymiarowanie fundamentów na podstawie analizy parametrów geotechnicznych oznaczonych według PN-B-03020:1981 i PN-EN 1997-1:2008

Design of foundations based on the analysis of geotechnical parameters determined according to PN-B-03020:1981 and PN-EN 1997-1:2008

inż. Joanna Mieloch, dr inż. Szymon Węgliński (ORCID: 0000-0002-0830-8152),
Instytut Inżynierii Lądowej, Politechnika Poznańska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4892

Streszczenie: Ocena i analiza parametrów geotechnicznych należy do najważniejszego etapu projektowania fundamentów, także ze względu na możliwość ograniczenia robót ziemnych niekorzystnie wpływających na środowisko naturalne. Na przykładzie posadowienia hali przemysłowej, po przeprowadzonym rozpoznaniu podłoża gruntowego oceniono parametry gruntów i dokonano obliczeń nośności podłoża oraz zaprojektowano fundamenty zgodnie z normą PN-B-03020: 1981 oraz PN-EN 1997-1:2008. Przedstawiono wnioski i wyniki dotyczące wykorzystania nośności podłoża oraz oceny parametrów geotechnicznych w zależności od przyjętego wariantu obliczeniowego.

Słowa kluczowe: projektowanie fundamentów, nośność podłoża, parametry gruntów, optymalizacja fundamentów.

Abstract: Assessment and analysis of geotechnical parameters is the most important stage of foundation design, also due to the possibility of limiting earthworks that adversely affect the natural environment. Using the example of the foundation of an industrial hall, the soil parameters were assessed and the bearing capacity of the subgrade was calculated, and the foundations were designed in accordance with the PN-B-03020:1981 and PN-EN 1997-1:2008 standards. Conclusions and results regarding the use of the bearing capacity of the subsoil and the assessment of geotechnical parameters depending on the carried calculation variant are presented.

Keywords: foundation design, subsoil load-bearing capacity, soil parameters, foundation optimization.

1. Wprowadzenie

Niedostosowanie geometrii fundamentów do warunków gruntowo-wodnych powoduje wzrost ryzyka braku spełnienia wymaganej nośności oraz przekroczenia dopuszczalnych wartości osiadań. Skutkiem niewłaściwego posadowienia może być konieczność remontu lub przebudowy obiektu, która wiąże się z generowanym kosztem pieniężnym, jak również koniecznością produkcji i transportu nowych materiałów (zamiennych) oraz utylizacją starych. Działania te mają znaczący wpływ na środowisko. Niepożądanym zjawiskiem może być awaria konstrukcji, która oprócz kosztów naprawy może generować skutki społeczne. Aby zapobiegać opisanym niekorzystnym sytuacjom, warto świadomie i rozważnie podejść do etapu projektowania i wymiarowania fundamentów.

2. Rola właściwego rozpoznania podłoża gruntowego oraz ustalenia parametrów geotechnicznych

Runkiewicz [2] na podstawie wieloletnich badań ITB jako najczęstsze przyczyny awarii związane z zagadnieniami geotechnicznymi oraz fundamentowymi wymienia m.in.:

- niedostateczny zakres badań, błędne rozpoznania podłoża gruntowego oraz aktualnych warunków wodno-gruntowych,
- błędne ustalenia obciążeń dopuszczalnych na grunt i dopuszczalnych osiadań,
- nieodpowiednie przyjęte rodzaje fundamentów oraz niewłaściwe ich projektowanie,
- nieprzestrzeżenie lub błędne interpretacje wymagań technicznych, norm, aprobat technicznych.

Węgliński [3] uważa, że głównym powodem błędnego rozpoznania podłoża może być chęć redukcji kosztów na etapie projektowania i realizacji, a także brak świadomości roli badań geotechnicznych lub ich błędna interpretacja.

Badania polowe gruntu mają na celu prawidłowe rozpoznanie parametrów geotechnicznych, które są niezbędne do zaprojektowania posadowienia budowli. Poprawna ocena cech fizycznych i wytrzymałościowych powinna być pierwszym etapem projektowania przed rozpoczęciem obliczeń

warunków nośności i użyteczności. Właściwie zaprojektowane fundamenty mają zapewnić stateczność konstrukcji oraz bezpieczne użytkowanie budowli.

W Polsce do 2008 r. obowiązywała krajowa norma PN-B-03020:1981 „Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie” (zwana dalej: PN-B) [4]. Została ona zastąpiona wdrożoną normą europejską – Eurokodem 7: PN-EN 1997-1:2008 „Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne” (dalej: EC7) [5] i PN-EN 1997-2:2009 „Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego” [6]. Zgodnie z sugestiami Polskiego Komitetu Normalizacyjnego stosowanie norm jest dobrowolne, jednak organizacja mająca pieczę nad przepisami sugeruje postępowanie według nowych norm z uwagi na ich dostosowanie do bieżącego stanu wiedzy. Eurokod 7 i PN-B funkcjonowały w okresie przejściowym równoległe do 1 kwietnia 2010 roku. Ostateczny termin uzyskania pozwolenia na budowę, zatwierdzenia lub zmianę projektu budowlanego oraz zatwierdzenia zamiennego projektu według „starych” przepisów minął 1 stycznia 2021 r. [3].

Przedstawione dokumenty techniczne znacznie się różnią, m.in. w zakresie ustalania wartości parametrów geotechnicznych jak i metod pomiarowych tychże parametrów. Metoda opisana w PN-B-03020:1981 [4] pozwala na korelacyjne określenie parametrów fizycznych lub wytrzymałościowych, wykorzystując zależności (odczytane z nomogramów w niej zawartych) między wartościami parametrów, które zostały określone w sposób bezpośredni. Metody opisane w PN-EN 1997-2:2009 [6] przedstawiają oznaczenie parametrów gruntu poprzez wykorzystanie badań in-situ. W trakcie pomiarów rejestrowane są wartości mierzone w określonej częstotliwości próbkowania, które następnie należy przeanalizować, wykorzystując korelacje między własnościami, wzory empiryczne i nomogramy. Do najpopularniejszej metody oceny podłoża in-situ zalicza się sondowanie statyczne. Badanie polega na jednostajnym, pionowym wciskaniu żerdzi zakończonych stożkiem z cylindryczną pobocznicą. Mierzonymi parametrami są: prędkość i kąt wciskania żerdzi, głębokość, opór pod stożkiem, tarcie na pobocznicy stożka oraz ciśnienie wody w porach gruntu (tylko dla CPTU). Po przeprowadzonej analizie określa się parametr wiodący (stopień zagęszczenia I_D lub plastyczności I_p), kąt tarcia wewnętrznego φ , kohezję c (dla gruntów spoistych) oraz edometryczny moduł ścisłości M_0 na głębokości pomiaru z.

Projektowanie posadowienia budowli odbywa się na podstawie tablic parametrów geotechnicznych, przekrojów geotechnicznych i wyników badań wód w podłożu – jeśli występują. Po wstępnym przyjęciu geometrii i warstw konstrukcyjnych fundamentu (proces iteracyjny) oraz jego obciążenia można przystąpić do obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Niezależnie od wybranej metody badań polowych w trakcie obliczeń nie mogą zostać przekroczone warunki nośności i użyteczności zawarte w normach PN-B czy EC7. W obliczeniach cechy gruntu powinny być opisane wartościami obliczeniowymi, czyli być przemnożone przez współczynniki

bezpieczeństwa (różne dla obu norm). W celu sprawdzenia warunków stanu nośności i użyteczności należy wyznaczyć obciążenie skupione pionowe działające na fundament, sprawdzić czy powstaje mimośród, a następnie wyznaczyć nośność gruntu pod fundamentem. Obliczenia statyczne dla I stanu granicznego różnią się między sobą dla norm PN-B i EC7, natomiast dla II stanu granicznego norma EC7 nie wskazuje żadnej konkretnej metody do obliczania osiadań. Do wykonania analizy fundamentu dla II stanu granicznego zaleca stosowanie ogólnie uznanej metodyki. Oznacza to, że dobrze znana (i powszechnie stosowana w Polsce) metoda naprężeń może być wykorzystywana, co ma zastosowanie np. w dostępnych na rynku programach numerycznych [1]. Kalkulacje dla II stanu nośności między normami PN-B i EC7 różnią się tylko warunkiem głębokości strefy aktywnej z_{max} do której należy sumować osiadania dla danych warstw gruntu. Dla PN-B: $\sigma_{zd} \leq 0,3 \cdot \sigma_{zy}$; dla EC7 $\sigma_{zd} \leq 0,2 \cdot \sigma_{zy}$.

Z doświadczeń praktycznych autorów wynika, iż „przywiązanie” projektantów do stosowania PN-B oraz możliwość szybkiego odczytania wartości parametrów geotechnicznych z tablic i nomogramów dla parametrów wiodących I_D lub I_p , a także możliwość ograniczenia kosztów poniesionych na badania in-situ prowadzą do sytuacji, w której projektanci odczytują wartości parametrów mechanicznych gruntów z normy PN-B, a następnie postępują wg algorytmu obliczeniowego określonego w normie EC7 (mieszają algorytmy z obu norm). W celu wykazania różnicy w wynikach przeprowadzono obliczenia na przykładzie wybranego fundamentu hali przemysłowej.

3. Wymiarowanie fundamentu dla rozpoznanych warunków gruntowo-wodnych według norm PN-B-03020:1981 i PN-EN 1997-1:2008

3.1. Metodyka badawcza

W celu wymiarowania fundamentów z uwzględnieniem różnic metod określonych w normach PN-B i EC7 zaproponowano własny, autorski poniższy algorytm postępowania.

- Krok 1: Ustalenie ilości oraz rozstawu otworów badawczych z geotechnikiem i inwestorem realizowanej hali przemysłowej.
- Krok 2: Wykonanie wierceń badań polowych – ocena makroskopowa, wiercenie otworów badawczych, sondowanie statyczne CPTU.
- Krok 3: Analiza wyników – opracowanie kart otworów geotechnicznych zgodnie z PN-B i EC7 oraz kart sondowania statycznego.
- Krok 4: Przygotowanie dwóch tablic parametrów geotechnicznych dla własności określonych metodą bezpośrednią i korelacyjną.
- Krok 5: Podział gruntów w podłożu na warstwy geotechniczne, wykreślenie profili i przekrojów gruntu.
- Krok 6: Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe dla fundamentu pod halę przemysłową (posadowienie bezpośrednie) dla 3 wariantów:

Rys. 1. Układ warstw geotechnicznych występujących w podłożu gruntowym projektowanej hali

- wariant 1 – otrzymanie parametrów geotechnicznych zgodnie z PN-B i algorytm obliczeń według PN-B;
- wariant 2 – otrzymanie parametrów geotechnicznych zgodnie z PN-B i algorytm obliczeń według EC7;
- wariant 3 – otrzymanie parametrów geotechnicznych zgodnie z EC7 i algorytm obliczeń według EC7.

• Krok 7: Przeprowadzenie analizy i wnioski.

3.2. Analiza przypadku

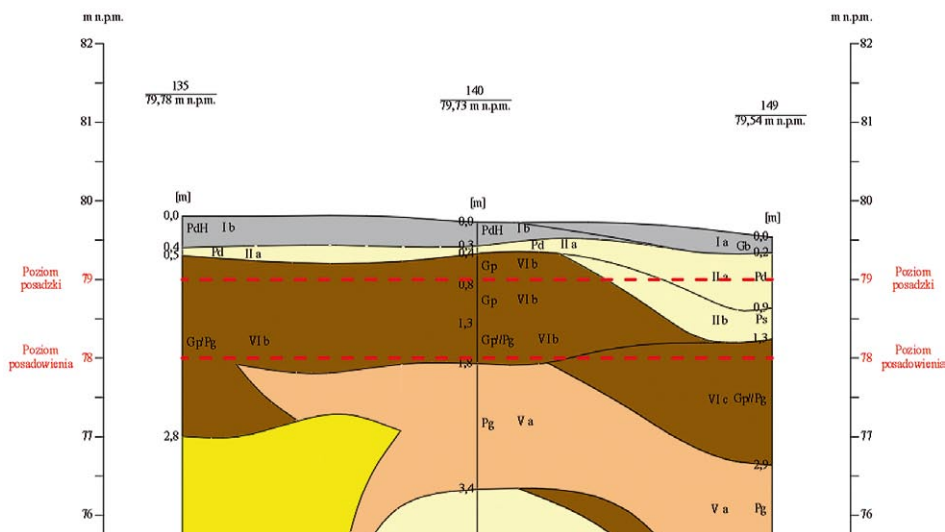
Dla rozpoznanych warunków gruntowo-wodnych w listopadzie 2017 r., na podstawie 14 otworów badawczych i 7 sondowań statycznych, do głębokości od 4,0 do 12,0 m wykonanych w siatce, przy rozmieszczeniu stanowisk badawczych co 50 mb w osi podłużnej hali i co 37,5 mb w osi poprzecznej, opracowano karty otworów i sondowań z określeniem parametrów oznaczonych zgodnie z PN-B i badań bezpośrednich opisanych w EC7.

W obliczeniach przyjęto najbardziej niekorzystny układ warstw gruntu występujących w miejscu inwestycji (w otw. nr 149 – rysunek 1, gdzie dla warstw stwierdzono najniższe wartości wytrzymałościowe i obecność gruntów spoistych o znacznej miąższości). Warstwy konstrukcyjne zilustrowano na rysunku 2, zgodnie dla wszystkich wariantów. Zadane obciążenia projektowe, wyznaczone dla analizowanego fundamentu podano w tabeli 1, zaś przyjętą geometrię stopy fundamentowej – w tabeli 2.

3.3. Wyniki i dyskusja

Dla trzech wariantów obliczeń statycznych zestawiono wyniki w tabeli 3. Pogrubioną czcionką zaznaczono wartości znacząco różne od pozostałych.

Po przeanalizowaniu wyników można zauważyć, że wartości parametrów uzyskanych metodą opisaną w normie PN-B są



wyższe co do wartości, co mogłoby wskazywać na proporcjonalnie wyższe wartości nośności podłoża gruntowego. Przykładowo dla warstwy VIc (grunty spoiste), która występuje w poziomie posadowienia, edometryczny moduł ścisłościwości pierwotnej M_o ma wartość 37,7 MPa (wg PN-B) oraz 16,5 MPa (wg EC7). Wartości fizyczne i wytrzymałościowe są niższe dla wariantu 3 (bezpośredni pomiar parametrów in-situ oraz współczynniki częściowe A1+M1+R2). Różnice w wartościach parametrów mają bezpośredni wpływ na brak zgodności otrzymanych wartości nośności dla poszczególnych wariantów (rys. 3). Dla wariantu 1 i 2 udowodniono, że dobrana geometria fundamentu nie spełnia warunku I stanu granicznego nośności, natomiast dla II stanu nośności dopuszczalna wartość osiadań jest zróżnicowana i dla wariantu 3 jest ponad dwukrotnie wyższa niż dla wariantów 1 i 2. Postępowanie zgodnie z normą PN-B powoduje uzyskanie zaniżonych wartości osiadań w porównaniu do wyników z badań in-situ (EC7).

Po przeprowadzeniu analizy można stwierdzić, że wybór metody określenia cech fizycznych i wytrzymałościowych gruntu oraz algorytm obliczeń statycznych ma wpływ na wielkości

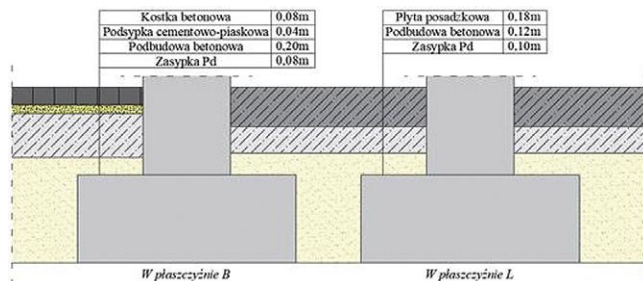
Tabela 1. Wartości charakterystyczne obciążenia

| Obciążenie | Stałe | Stałe i zmienne |
|------------|--------|-----------------|
| Vk [kN] | 350,00 | 600,00 |
| Hk [kN] | 20,00 | 40,00 |
| Mk [kNm] | 50,00 | 100,00 |
| e [m] | – | 0,05 |

Tabela 2. Geometria stopy fundamentowej

| | |
|--------|-----|
| B [m] | 1,2 |
| L [m] | 2,0 |
| bs [m] | 0,4 |
| ls [m] | 0,6 |
| hf [m] | 0,5 |
| hz [m] | 1,0 |

parametrów geotechnicznych. Przedstawione zależności nie pokrywają się dla wszystkich przypadków, dobranie warstw gruntu, geometrii fundamentu oraz wielkości obciążenia można przeprowadzić tak, aby warunki stanów granicznych nośności i użyteczności były spełnione dla wszystkich



Rys. 2. Układ warstw konstrukcyjnych w rejonie fundamentów hali przemysłowej

Tabela 3. Zestawienie uzyskanych wyników

| Wartości obliczeniowe | | | | Wariant | | | | |
|------------------------------|---|----------------|--------------|------------|------------|-------------|------------|----------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | | |
| Oznaczenie parametrów według | | | | PN-B | PN-B | EC 7 | | |
| Algorytm obliczeń według | | | | PN-B | EC 7 | EC 7 | | |
| Cechy mechaniczne | Kąt tarcia | | | 20,10 ° | 20,10 ° | 19,22 ° | | |
| | Kohezja | | | 35,90 kPa | 35,90 kPa | 19,21 kPa | | |
| | Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej | | | 37,70 MPa | 37,70 MPa | 16,54 MPa | | |
| Obciążenie | Pionowe | stałe | niekorzystne | 710,00 kN | 472,50 kN | 472,50 kN | | |
| | | | korzystne | | 350,00 kN | 350,00 kN | | |
| | | zmiennie | niekorzystne | | 375,00 kN | 375,00 kN | | |
| | | | korzystne | | 0,00 kN | 0,00 kN | | |
| | Poziome | stałe | niekorzystne | | 48,00 kN | 27,00 kN | 27,00 kN | |
| | | | korzystne | | | 20,00 kN | 20,00 kN | |
| | | zmiennie | niekorzystne | | | 30,00 kN | 30,00 kN | |
| | | | korzystne | | | 0,00 kN | 0,00 kN | |
| | Moment | stałe | niekorzystne | 120,00 kNm | | 67,50 kNm | 67,50 kNm | |
| | | | korzystne | | | 50,00 kNm | 50,00 kNm | |
| | | zmiennie | niekorzystne | | | 75,00 kNm | 75,00 kNm | |
| | | | korzystne | | | 0,00 kNm | 0,00 kNm | |
| Siły obciążające fundament | Pionowe | w płaszczyźnie | L | | 774,71 kN | 923,27 kN | 923,27 kN | |
| | | | B | | | 928,86 kN | 928,86 kN | |
| | Poziome | | L | | | 0,00 kN | 57,00 kN | 57,00 kN |
| | | | B | | | | 0,00 kN | 0,00 kN |
| | Moment | | L | 168,00 kNm | 202,24 kNm | | 202,24 kNm | |
| | | | B | | 42,38 kNm | | 42,38 kNm | |
| Nośność fundamentu | w płaszczyźnie | L | 723,70 kN | | 1021,00 kN | 604,16 kN | | |
| | | B | 701,98 kN | | 1098,41 kN | 649,94 kN | | |
| Osiedzenia całkowite | | | | 4,68402 mm | 4,62186 mm | 10,34117 mm | | |

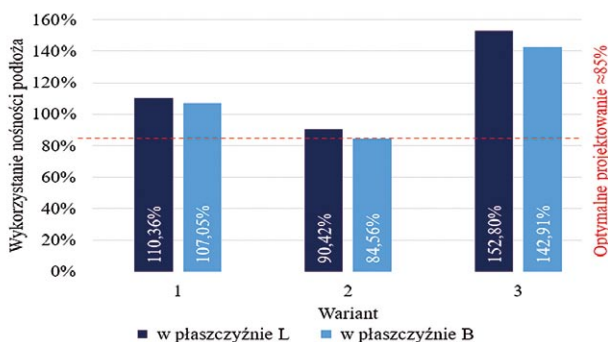
wariantów. Celem artykułu jest pokazanie, jakie są konsekwencje nieodpowiednio dobranej geometrii fundamentu.

4. Podsumowanie

Rozpoznanie parametrów podłoża gruntowego jest nieodłącznym elementem każdego projektu posadowienia budowli. Oznaczenie cech geotechnicznych z wykorzystaniem normy PN-B-03020:1981 [4] polega na metodach korelacji własności gruntu. W przypadku wystąpienia innych wielkości parametrów obliczonych z zależności, a tych występujących w rzeczywistości, istnieje ryzyko niedoszacowania lub przeszacowania nośności podłoża gruntowego z uwagi na brak prowadzenia pomiarów w terenie. Inżynierowie często jako dane wejściowe do wymiarowania fundamentów przyjmują tablice parametrów otrzymane

zgodnie z PN-B, a następnie stosują algorytm obliczeń statycznych według EC7. Takie działanie na ma celu zmniejszenie kosztów badań oraz ograniczenie poświęconego czasu do minimum. Wykonanie obliczeń w trzech wariantach miało na celu wykazanie, że cechy podłoża gruntowego oznaczone metodą bezpośrednią i korelacyjną mogą się znacznie różnić. Nieodpowiednio dobrana geometria fundamentu, która nie spełnia warunków stanów granicznych nośności i użyteczności, skutkuje możliwością utraty stateczności konstrukcji, a nawet bezpośrednim zagrożeniem zdrowia lub życia człowieka. Poniesione koszty oraz poświęcony czas na prawidłowe rozpoznanie podłoża gruntowego pozwolą nie tylko na bezpieczne, ale i ekonomiczne oraz bezpieczne dla środowiska (z uwagi na ograniczenie negatywnych skutków) – zaprojektowanie fundamentów.

Pani inż. Joanna Mieloch wygrała Konkurs Młodych im. prof. Leonarda Runkiewicza.



Rys. 3. Procentowe wykorzystanie fundamentu dla trzech wariantów

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pieczyrak J., Obliczanie osiadań według zaleceń Eurokodu 7, Inżynieria morska i geotechnika, 3/2015, str. 542–546
- [2] Runkiewicz L., Przyczyny powstawania zagrożeń, awarii i katastrof obiektów budowlanych, Przegląd Budowlany 5/2020, str. 15–19
- [3] Węgliński S., Koszty występujące w cyklu funkcjonowania obiektu budowlanego wynikające z niewłaściwego rozpoznania podłoża gruntowego, Przegląd Geologiczny 12/2021, str. 963–970
- [4] PN-B-03020:1981: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [5] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- [6] PN-EN 1997-2:2009 Eurokod: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego