

Masyw skalny jako podłoże budowli

Sławomir Kwiecień¹, Jerzy Sękowski¹, Krzysztof Frogowski¹



S. Kwiecień

J. Sękowski

K. Frogowski

Foundation on rock masses. *Prz. Geol.*, 65: 511–515.

Abstract. The verification of limit states conditions of soil and foundation for an object constructed on bedrock requires a quantitative determination of the construction zone of influence. Due to time and cost factors, it is usually limited to boreholes performed in order to indicate the soil type and profile in terms of crackings. To determine the internal forces of the footing and construction for larger objects, especially statically indeterminate structures, it is crucial to know, e.g., the values of deformation and elasticity moduli. This paper presents the results of a number of tests performed to determine the stiffness of bedrock under silos in reconstruction. Trial loadings were performed and the settlement of soil under the adjacent construction was observed.

Soil behaviour under the reconstructed silos was also monitored. Some of the results of the above-mentioned investigations served as the basis for back analyses carried out using the finite element method (FEM), in which stiffness parameters of rocky soil were determined. Based on the investigations and analyses, it was found out that the initial and secondary deformation moduli do not exceed the value of 230 MPa, which is at least a few times less than the elasticity moduli (455–1244 MPa). The analysis of internal forces in silos foundations, performed by the designer in order to indicate the stiffness of bedrock, resulted in the replacement of other 10 walls of the silos, without the necessity to modify the foundations.

Keywords: silos, foundation, settlement, load plate test, limestone stiffness

Poprawnie posadowiony obiekt budowlany powinien spełniać warunki stanów granicznych oraz warunki konstrukcyjne, ekonomiczne i estetyczne. Wybór odpowiedniej metody posadowienia budowli jest nierzadko trudnym zadaniem. Zazwyczaj staje się ono łatwiejsze, gdy w podłożu budowli występuje warstwa nośna i mało odkształcalna, na przykład lita skała. Wyjątkiem jest sytuacja, gdy o poprawnym rozwiązaniu decyduje odpowiednia sztywność podłoża, która wpływa nie tylko na osiadanie obiektu, ale również na wielkość sił wewnętrznych w fundamentach, a podłoże skalne jest spękanе.

Skały są bardzo zróżnicowane pod względem genezy, składu, zwięzłości i warunków występowania. Skutkuje to zmiennością ich właściwości mechanicznych (tab. 1) oraz parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych, a wartości dopuszczalnych obciążeń skał są silnie uzależnione od stopnia ich spękania (tab. 2). W praktyce budowlanej obecność skał stwarza wielorakie problemy, m.in. w trakcie ich odpajania, wykonywania głębokich wykopów lub też dotyczące definiowania ich sztywności (Derlacz, Sternik, 2008; Sternik, 2009). Brak wiarygodnych wyników badań skał tworzących podłoże budowlane skutkuje często przy-

Tab. 1. Podstawowe właściwości mechaniczne niektórych skał (Pisarczyk, 2001)

Table 1. The mechanical properties of some rocks (Pisarczyk, 2001)

Rodzaj skały Rock type	R_c [MPa]	R_r [MPa]	ϕ [°]	c [MPa]	E [MPa]	E_0 [MPa]	ν [-]
Granit Granite	100÷250	7÷25	45÷60	17,4	$(2\div6) \cdot 10^4$	–	0,25
Dioryt Diorite	180÷300	15÷30	–	–	$(7\div10) \cdot 10^4$	–	–
Bazalt Basalt	150÷300	10÷30	50÷55	–	$(6\div10) \cdot 10^4$	–	0,31÷0,33
Piaskowiec Sandstone	20÷170	4÷25	35÷55	2,5÷20	$(0,5\div8) \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	0,19÷0,20
Łupek ilasty Shale	10÷100	2÷10	15÷30	0,06÷2,1	–	$0,4 \cdot 10^4$	0,31
Wapień Limestone	30÷250	5÷25	35÷50	5,5	$(1\div8) \cdot 10^4$	$0,21 \cdot 10^4$	0,25÷0,32
Dolomit Dolomite	80÷250	15÷25	–	–	$(4\div8,4) \cdot 10^4$	–	–
Kwarcyt Quartzite	150÷300	10÷30	50÷60	24,3	–	–	–
Marmur Marble	100÷250	7÷20	35÷50	–	–	–	0,33÷0,36

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5/223, 44-100 Gliwice; slawomir.kwiecien@polsl.pl, jerzy.sekowski@polsl.pl, krzysztof.frogowski@gmail.com.

Tab. 2. Wartości dopuszczalnych obciążeń skał (Wiłun, 2010)
Table 2. The allowable bearing load of rocks (Wiłun, 2010)

Klasy Category	Rodzaj skał Rock type		Wartości dopuszczalnych obciążeń skał Allowable bearing load of rocks k_s [kPa]		
	Grupa Group	Nazwa Name	Skały lite i mało spękane Unfractured and slightly fractured rocks k_{ms}	Skały średnio spękane Moderately fractured rocks k_{ss}	Skały bardzo spękane Very intensely fractured rocks k_{bs}
Skały lite Unfractured rocks	Twarde Hard	Krystaliczne i przeobrażone Crystalline and metamorphic rocks	4000	2000	1000
	Miękkie Soft	Osadowe: wapień i piaskowce Sedimentary rocks: limestone and sandstone	2000	1000	600
		Margle kredowe, iłolupki i słabo spójne piaskowce Chalk marl, shale and poorly bonded sandstone	1000	500	300

mowaniem do obliczeń wartości parametrów skał z dostępnej literatury (tab. 1 i 2). Taki sposób postępowania budzi jednak poważne zastrzeżenia, które wynikają zarówno z dużego zakresu zmienności parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych skał, jak i efektu skali, powodowanego przez to, że parametry te są przeważnie wyznaczane w laboratoriach na niewielkich próbkach, a rzeczywista reakcja obciążonego podłoża dotyczy nieporównywalnie większego obszaru.

Zarysowany problem ilustrujemy na przykładzie trudności w zaprojektowaniu posadowienia nowych silosów na cement na Śląsku Opolskim, których przyczyną był brak wiarygodnych danych o parametrach odkształceniowych podłoża skalnego.



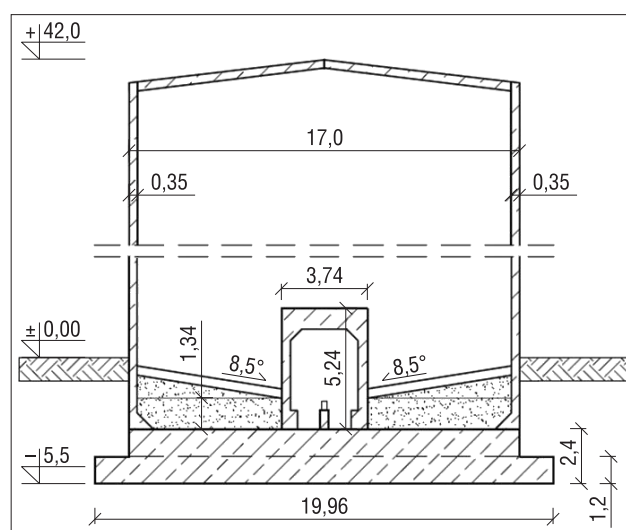
Ryc. 1. Uszkodzenia płaszczy silosów na cement. Fot. S. Kwiecień
Fig. 1. Damaged silos walls. Photo by S. Kwiecień

PARAMETRY BUDOWLI I WARUNKI GRUNTOWO-WODNE W PODŁOŻU

Zły stan techniczny płaszczy żelbetonowych silosów, które wybudowano na początku lat 70. XX w., w tym liczne pęknięcia i ubytki betonu (ryc. 1), stały się powodem podjęcia decyzji o wyburzeniu dwóch spośród dwunastu stojących obok siebie magazynów i wybudowaniu nowych obiektów o podobnych wymiarach, jednak posadowionych na starych fundamentach (Jaśniok i in., 2012).

Silosy te mają kształt walca o wysokości 42 m i średnicy zewnętrznej 17 m. Zostały posadowione w sposób bezpośredni na płycie żelbetowej, na głębokości 5,5 m poniżej poziomu terenu. Płyty fundamentowe mają w rzucie kształt prostokąta o wymiarach 19,96 × 18,46 m, a ich grubość wynosi 1,2 m poza silosami oraz 2,4 m w ich wnętrzu. Na dnie silosów umieszczono warstwę żużlobetonu o grubości 1,34 m, której nadano odpowiednie spadki (ryc. 2). Nacisk powodowany przez wypełnienie magazynu cementem wynosił ok. 370 kPa.

W profilu podłoża silosów do głębokości około 2,5 m poniżej poziomu terenu występują utwory czwartorzędowe-



Ryc. 2. Przekrój przez silos i płytę fundamentową
Fig. 2. Silo and slab foundation cross-section

we: zagęszczony piasek średnioziarnisty (0–1,8 m p.p.t.) i podścielająca go zagęszczona pospółka (1,8–2,5 m p.p.t.). Poniżej znajdują się utwory środkowego triasu: zagęszczony rumosz białobeżowego wapienia (2,5–10 m p.p.t.) i mocno spękany białobeżowy wapień, miejscami rdzawy (10–15 m p.p.t.). Nie stwierdzono występowania wody gruntowej – skały występują w stanie suchym.

OCENA SZTYWNOŚCI PODŁOŻA POD SILOSAMI

Decyzję o pozostawieniu starych fundamentów podjęto ze względu na spodziewaną stabilność podłoża, które na skutek wielokrotnego zasypywania i opróżniania silosów zostało usztywnione i w związku z tym nie powinno ulegać osiadaniu pod nowym obciążeniem.

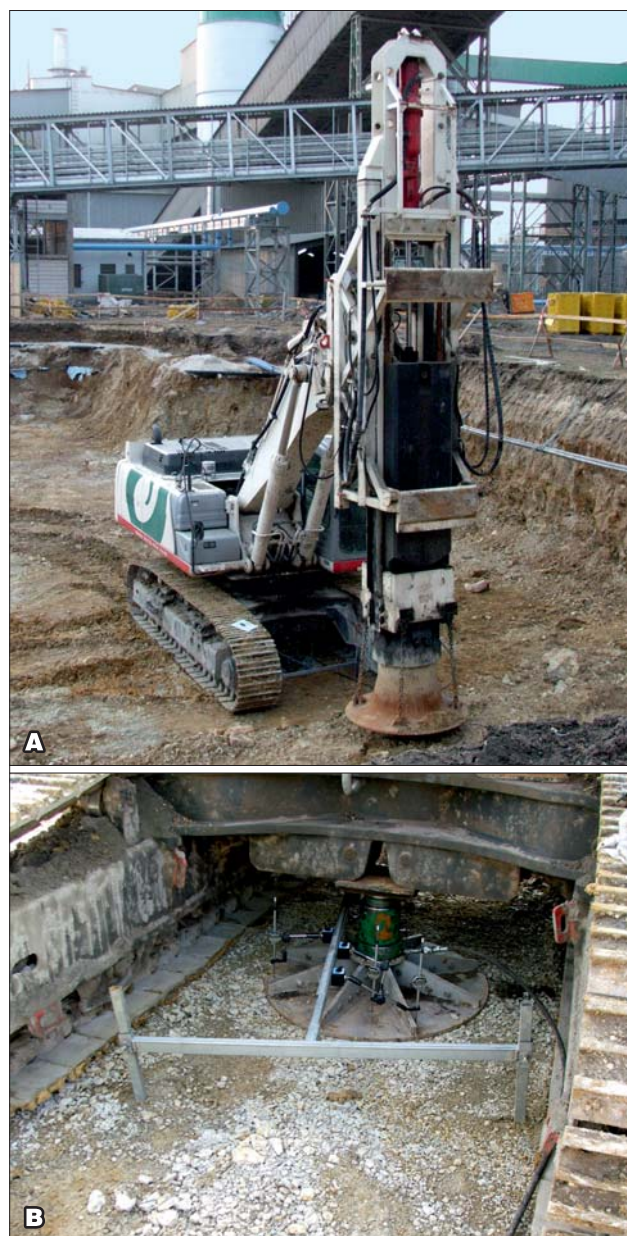
Niestety, poza wierceniem rozpoznawczym nie wykonano innych badań podłoża skalnego, przez co nie uzyskano jednoznacznych wyników, na podstawie których można by było ściśle określić jego sztywność. W związku z tym podjęto kilkuetapowe prace zmierzające do ustalenia modułu odkształcenia i sprężystości podłoża. Po pierwsze skorzystano z wyników badań przeprowadzonych na budowie sąsiadującego z silosami młyna. Były to wyniki próbnych obciążeń podłoża w wykopie pod młyn oraz pomiary osiadania fundamentów młyna po jego wybudowaniu. Kolejnym etapem było studium literaturowe, a końcowym wsteczna analiza metodą elementów skończonych (MES). Do przeprowadzenia tej analizy wykorzystano wyniki odprężenia podłoża zarejestrowane po wyburzeniu silosów oraz wyniki osiadań po wybudowaniu nowych płaszczy silosów i wypełnieniu magazynów.

PRÓBNE OBCIĄŻENIA

Dwa lata przed przebudową silosów w odległości kilkudziesięciu metrów od nich wybudowano budynek wraz z młynem. Posadowienie tych obiektów było realizowane na zbliżonej głębokości do posadowienia silosów. W celu określenia sztywności podłoża wykonano 9 próbnych obciążeń (Blejarski, 2011) – 7 pod fundamentami budynku (w zakresie obciążeń pierwotnych 0–550 kPa), a pozostałe 2 pod fundamentami młyna (w zakresie obciążeń pierwotnych 0–590 kPa i wtórnych 0–590 kPa). Badania przeprowadzono z powierzchni dna wykopu przy użyciu sztywnej, okrągłej płyty stalowej o średnicy 1,13 m i powierzchni podstawy równej 1 m² (ryc. 3). Obciążenie, w postaci siły skupionej, zastosowano z wykorzystaniem siłownika hydraulicznego o zakresie do 100 t. Osiedzenia płyty mierzono w czterech punktach, z zastosowaniem elektronicznych czujników przemieszczeń, opartych o niezależną konstrukcję, która stanowiła stały punkt odniesienia.

OSIADANIA FUNDAMENTU MŁYNA

Na podstawie analizy wyników próbnych obciążeń zdecydowano o bezpośrednim posadowieniu budynku i znajdującego się w nim młyna. W trakcie montażu młyna prowadzono pomiar osiadań jego fundamentu. Pierwotny moduł odkształcenia podłoża określono metodą odkształceń trójosiowych (Wiłun, 2010), przyjmując do obliczeń wymiary fundamentu (14,4 × 23,5 m), przekazywane naciski (ok. 30 kPa) oraz wartość osiadań (4,5 mm).

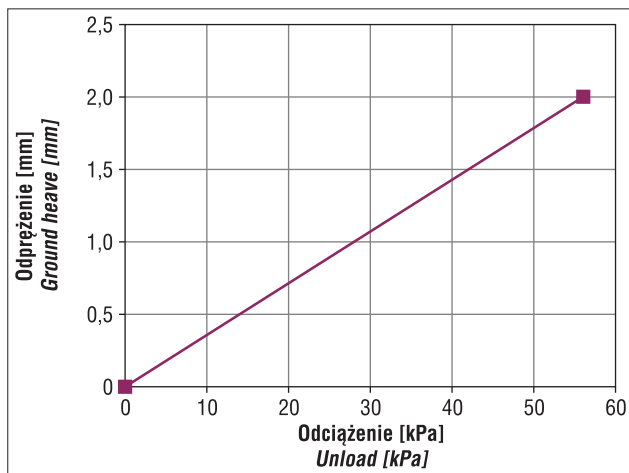


Ryc. 3. Stanowisko do próbnych obciążeń. Fot. S. Kwiecień
Fig. 3. Load plate test station. Photo by S. Kwiecień

ANALIZA NUMERYCZNA MES

Do analizy numerycznej metodą elementów skończonych (MES), prowadzonej w celu rozpoznania wartości modułu sprężystości podłoża, posłużyły wyniki pomiarów odprężenia podłoża podczas wyburzania starych silosów oraz wyniki osiadań podłoża zarejestrowane po napełnieniu cementem nowych silosów (ryc. 4 i 5). Pomiary wykonano metodą geodezyjną (niwelacji technicznej), wykorzystując repery zamontowane na starych fundamentach (do pomiaru odprężeń) oraz repery na nowo wybudowanych płaszczykach (do pomiaru osiadań po napełnieniu silosów).

Za kryterium adekwatności zastosowanego modelu przyjęto dopasowanie jego charakterystyk obciążenie–osiadanie do średniej wartości pomiarów rzeczywistych. Miarą dopasowania obu charakterystyk był zmodyfikowany współczynnik determinacji (Pieczyrak, 2001).



Ryc. 4. Średnie odprężenie podłoża zaobserwowane w trakcie rozbiórki płaszczu silosu

Fig. 4. Ground heave measured during dismantling of silo walls

W toku badań określono moduły odkształcenia podłoża (w jednoosiowym ściskaniu, przy swobodnej rozszerzalności gruntu i nieliniowej zależności między naprężeniami i odkształceniami) oraz moduły sprężystości (liniowa zależność między naprężeniami i odkształceniami podłoża wielokrotnie obciążanego).

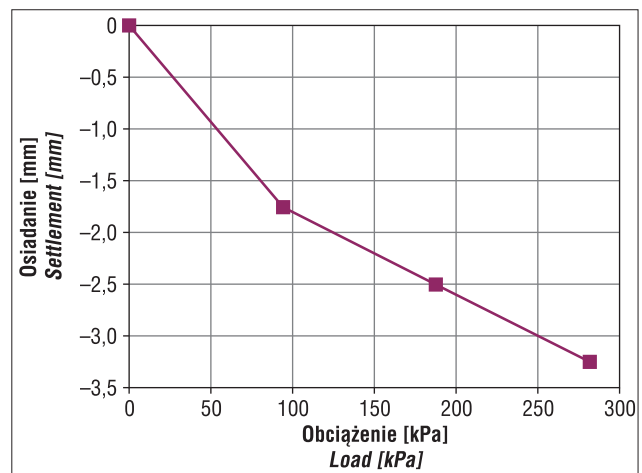
Obliczenia wykonano za pomocą programu Z_Soil Student w wersji 12.19 (Zimmermann i in., 2012) w układzie przestrzennym. Ze względu na symetrię zadania zdecydowano o modelowaniu jedynie ćwiartki układu o wymiarach 35 m dł. × 35 m szer. × 30 m wys. Model numeryczny składał się z 5933 elementów skończonych. W odniesieniu do warstw skalnych i zasyпки fundamentów przyjęto model idealnie sprężysto-plastyczny o powierzchni granicznej Coulomba-Mohra i opisany niestowarzyszonym prawem płynięcia.

Fundament i płaszcze silosów modelowano liniowo sprężysto, przy czym w celu ograniczenia czasu realizacji zadania modelowano tylko dolną część płaszczu, górną natomiast zastąpiono obciążeniem równomiernie rozłożonym. Obciążenie silosu cementem, prowadzone do 75% jego wysokości, modelowano jako równomiernie rozłożone o wartości równej rzeczywistej.

Parametry modelu liniowo sprężystego, moduł sprężystości (E) i współczynnik Poissona (ν) płaszczu i fundamentu, przyjęto na podstawie klasy betonu zgodnie z normami PN-EN 1991-1-1:2004 i PN-EN 1992-1-1:2008.

Aby można było zastosować w obliczeniach model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra, konieczna jest znajomość pięciu parametrów podłoża budowlanego: modułu sprężystości (E), współczynnika Poissona (ν), kąta tarcia wewnętrznego (ϕ), spójności (c) i kąta dylatacji (ψ). Przyjęto, że moduł sprężystości (E) warstw skalnych zostanie określony na podstawie analizy wstecznej MES, której kryterium będzie zbieżność wyników numerycznych z rzeczywistymi (pomiaru odprężenia i osiadania podłoża). Kąt tarcia wewnętrznego (ϕ) i spójność (c) podłoża określono na podstawie wzorów [1.1] i [1.2] (Pisarczyk, 2001):

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{R_c - R_r}{2\sqrt{R_c R_r}} \quad [^\circ] \quad [1.1]$$



Ryc. 5. Średnie osiadanie podłoża zaobserwowane podczas zasypywania wyremontowanego silosu

Fig. 5. Settlements measured during filling of renovated silo

$$c = \frac{\sqrt{R_c R_r}}{2} \quad [\text{kPa}] \quad [1.2]$$

gdzie:

R_c – wytrzymałość na ściskanie,

R_r – wytrzymałość na rozciąganie,

przyjmując za Kidybińskim (1982) i Titan Polska (2014), że wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie skały wapiennej wynosi 10% minimalnej wartości tych parametrów określonych dla skały litej.

Na podstawie przedstawionych zależności [1.1], [1.2] uzyskano zaniżone wartości spójności (c) i zawyżone wartości kąta tarcia wewnętrznego (ϕ) w podłożu (tab. 3). Przyjęto, że jest to efekt spękania warstw skalnych. W obliczeniach przyjęto wartość kąta dylatacji (Ψ) równą zeru. Przed przystąpieniem do kalibrowania modelu analizowano budowę silosu oraz skutki wielokrotnego zasypywania go cementem.

Tab. 3. Modele konstytutywne i parametry przyjęte do analiz numerycznych

Table 3. Constitutive models and parameters used in numerical analysis

Element <i>Element</i>	Model konstytutywny <i>Constitutive model</i>	Parametry modelu <i>Model parameters</i>
Podłoże skalne: wapień <i>Bedrock:</i> <i>limestone</i>	Coulomba-Mohra <i>Coulomb-Mohr</i>	$\phi = 46^\circ$ $\psi = 0^\circ$ $c = 612 \text{ kPa}$ $\nu = 0,27$ $\gamma = 21,0 \text{ kN/m}^3$ E – ustalone na podstawie analizy wstecznej E – derived from back analyses
Zasyпка fundamentu: rumosz <i>Back-fill material:</i> <i>rubble</i>	Coulomba-Mohra <i>Coulomb-Mohr</i>	$E = 111 \text{ MPa}$ $\phi = 40^\circ$ $\psi = 0^\circ$ $c = 0 \text{ kPa}$ $\nu = 0,27$ $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$
Płaszcz silosu <i>Silo walls</i>	liniowo sprężysty <i>linear elastic</i>	$E = 31 \text{ GPa}$ $\nu = 0,2$ $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

WYNIKI BADAŃ

Na podstawie analizy próbnych obciążeń i monitorowania osiadań fundamentu sąsiadującego z silosami młyna uzyskano pierwotne i wtórne moduły odkształcenia podłoża. Z kolei analizy wsteczne MES, których podstawą były wyniki odprężenia i osiadania podłoża zarejestrowane podczas modernizacji silosów, umożliwiły określenie modułów sprężystości podłoża skalnego. Zmodyfikowany współczynnik determinacji R^2 , określający zbieżność wyników analizy MES i pomiarów rzeczywistych, wyniósł 0,99.

Tab. 4. Moduły odkształcenia pierwotnego (E_1), wtórnego (E_2) i sprężystości (E) uzyskane w badaniach i obliczeniach

Table 4. Modulus of: primary deformation (E_1), secondary deformation (E_2) and elasticity (E) derived from test and analysis

Rodzaj badania lub analizy <i>Types of test or analysis</i>	Uzyskane moduły <i>Obtained modulus</i>
Próbne obciążenia <i>Load plate test</i>	Pod fundamentami budynku: <i>Under building foundations:</i> $E_1 = 48 \div 228$ MPa Pod fundamentami młyna: <i>Under cement mill foundations:</i> $E_1 = 77 \div 130$ MPa, $E_2 = 102 \div 174$ MPa
Pomiar osiadań fundamentów młyna <i>Settlements of cement mill</i>	$E_1 = 105$ MPa
Analiza MES (wyburzenie płaszczu) <i>FEM analysis (dismantling of silo walls)</i>	$E = 455$ MPa
Analiza MES (zasyp wyremontowanych silosów) <i>FEM analysis (filling of renovated silo)</i>	$E = 1244$ MPa
Analiza literatury (Kidybiński, 1982) <i>Literature review (Kidybiński, 1982)</i>	$E_1 = 2100$ MPa $E = 10\ 000 \div 18\ 000$ MPa

Uzyskane w toku badań wartości modułów odkształceń i sprężystości podłoża znacznie się różniły (tab. 4). Pierwotne i wtórne moduły odkształcenia gruntu pod fundamentami młyna (E_1 i E_2) nie przekroczyły 230 MPa i były co najmniej kilkakrotnie mniejsze od modułów sprężystości gruntu pod silosami (455–1244 MPa), co jest naturalne i było do przewidzenia, gdyż podłoża silosów przez kilkadziesiąt lat było wielokrotnie obciążane i odciążane. W związku z tym teraz pracuje ono w zakresie sprężystym. Moduły odkształcenia podłoża pod młynem dotyczyły pierwszego i drugiego cyklu obciążenia. Poza tym w zasięgu działania fundamentów silosów znajdują się warstwy skalne, a próbne obciążenia obejmowały warstwy zwietrzelin charakteryzujących się mniejszą sztywnością.

Uzasadniona jest również mniejsza wartość modułu sprężystości podłoża, jaką uzyskano podczas odprężenia na skutek wyburzenia betonowych płaszczu silosów (455 MPa), w stosunku do modułu sprężystości uzyskanego w trakcie zasypywania silosów po ich modernizacji (1244 MPa). Po pierwsze podłoża silosów nie pracowało wcześniej w tym zakresie odciążenia (po opróżnieniu silosów pozostawał ciężar własny konstrukcji). Po drugie największe odprężenie podłoża obserwuje się zwykle w końcowej fazie jego odciążania. Natomiast moduły odkształcenia i sprężystości określone na podstawie literatury (Pisarczyk, 2001) są dużo większe, gdyż dotyczą warstw niespękanych, które nie występują na terenie prowadzonych badań.

PODSUMOWANIE

Na skutek ograniczeń czasowych i kosztowych rozpoznanie podłoża często kończy się na wierceniach, na podstawie których można określić jedynie rodzaj skały i typ występujących w niej spękań. Dla niewielkich budowli, należących do pierwszej kategorii geotechnicznej, jest to wystarczające. W przypadku projektowania posadowienia większych obiektów budowlanych (II i III kategoria geotechniczna) konieczna jest znajomość przynajmniej wartości modułów odkształcenia lub też sprężystości warstw skalnych. Do obliczenia wartości tych modułów można wykorzystać wyniki badań laboratoryjnych i polowych. Jednak należy się wówczas liczyć ze znaczącymi rozbieżnościami uzyskanych rezultatów, wynikającymi głównie z efektu skały (Thiel, 1980; Hobler, 1977). Jak wskazują wyniki wcześniejszych doświadczeń autorów (Kwiecień i in., 2016), do wyznaczania parametrów skał może być przydatna metoda elementów skończonych. Natomiast bezkrytyczne przyjmowanie do obliczeń wartości parametrów z literatury budzi zastrzeżenia, gdyż może prowadzić do przeszacowania sztywności podłoża, a przez to do niedoszacowania sił wewnętrznych w fundamentach.

Badania finansowane z pracy pt. „Analiza posadowienia obiektów i stanu technicznego tuneli technologicznych silosów nr 1 i 7”, wykonywanej na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej. Autorzy pracy dziękują Recenzentom za wnikliwe recenzje, które pozwoliły na uniknięcie w artykule wszelkich błędów i nieścisłości.

LITERATURA

- BLEJARSKI T. 2011 – Raport końcowy z nadzoru geotechnicznego budowy młyna na terenie Cementowni Górażdże w Choruli. Arch. Cement. Górażdże.
- DERLACZ M., STERNIK K. 2008 – Zastosowanie kotew gruntowych do zabezpieczenia wykopu w rejonie osuwiska. XXXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii, Geotechnika i Budownictwo Specjalne, 9–14 marca 2008, Krynica Zdrój. Górn. i Geol., 32 (2): 89–98.
- HOBLER M. 1977 – Badania fizykomechanicznych własności skał. PWN, Warszawa.
- JAŚNIOK T., KWIECIEŃ S., PIEKARCZYK A., SĘKOWSKI J., ZYBURA A. 2012 – Analiza posadowienia obiektów i stanu technicznego tuneli technologicznych silosów nr 1 i 7. Arch. Wydz. Budownictwa, PŚL., Gliwice.
- KIDYBIŃSKI A. 1982 – Podstawy geotechniki kopalnianej. Wyd. Śląsk, Katowice.
- KWIECIEŃ S., SĘKOWSKI J., SZUSTAK J. 2016 – MES w analizie pracy pali zagłębionych w utworach skalistych. Geoinżynieria. Drogi. Mosty. Tunele, 2: 22–25.
- PIECZYRAK J. 2001 – Ustalanie parametrów wybranych modeli gruntu na podstawie próbnego obciążenia. Pr. hab. PŚL., z. 91, Gliwice.
- PISARCZYK S. 2001 – Gruntoznawstwo inżynierskie. PWN, Warszawa.
- PN-B-02480:1986 – Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-EN 1991-1-1:2004 – Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- PN-EN 1992-1-1:2008 – Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1–1: reguły ogólne i reguły dla budynków.
- PN-EN ISO 14689-1:2006 – Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie skał. Część 1: Oznaczenie i opis.
- STERNIK K. 2009 – Zastosowanie kotew gruntowych do stabilizacji niestatecznych skarp głębokich wykopów. XXIV Konf. Nauk.-Techn. Awarie Budowlane 2009, Szczecin–Międzyzdroje: 313–320.
- THIEL K. 1980 – Mechanika skał w inżynierii wodnej. PWN, Warszawa.
- TITAN POLSKA 2014 – Nowy wymiar geotechniki. Technologia, zastosowanie, wykonawstwo. Brosz. inform. System TITAN, Kraków.
- WIŁUN Z. 2010 – Zarys geotechniki. Wyd. Kom. i Łączn., Warszawa.
- ZIMMERMANN TH., TRUTY A., URBAŃSKI A., PODLEŚ K. 2012 – Z_Soil.PC 2010 3D user manual, Theory, Tutorials and Benchmarks, Data Preparation. Elmeppress International & Zace Services Ltd., Switzerland.

Praca wpłynęła do redakcji 16.06.2016 r.
Akceptowano do druku 14.07.2017 r.