

*Jacek Ścigallo**, *Antoni Florkiewicz**

WYBRANE PROBLEMY PROJEKTOWE WYMIAROWANIA BUDOWLI PODZIEMNYCH

1. Wstęp

Projektowanie i wykonawstwo budowli podziemnych ma swoją specyfikę i najczęściej wiąże się z koniecznością rozwiązania szeregu złożonych i trudnych problemów inżynierskich [5, 9, 10]. Obliczenia statyczne i wymiarowanie silnie związane są z przyjętym modelem podłoża gruntowego oraz opisującymi grunt parametrami geotechnicznymi. Dodajmy, że najczęściej podstawą obliczeń konstrukcyjnych są normowe wartości parametrów geotechnicznych, ustalone w oparciu o tzw. cechy wiodące określające genezę, rodzaj i stan fizyczny gruntu. Normowe określenie wartości parametrów geotechnicznych, a w szczególności parametrów wytrzymałościowych, jest proste i polega na odczytaniu odpowiednich wartości z tablic, wykresów lub wzorów obliczeniowych podanych w normach geotechnicznych [7, 8]. Alternatywną metodą wobec normowej metody określania wartości parametrów geotechnicznych jest ich zbadanie w stosunkowo drogiej i skomplikowanych testach polowych lub laboratoryjnych.

Należy również zauważyć, że zachowanie się tych konstrukcji w kolejnych etapach ich realizacji, a później w okresie eksploatacji jest różne i zależy od wielu czynników, w tym od zmieniającego się schematu statycznego poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Dotyczy to zwłaszcza ścian zewnętrznych wykonanych w technologii ścian szczelinowych oraz płyt stropowych i fundamentowej płyty dennej.

Celem artykułu jest ukazanie różnic w wynikach obliczeń statycznych i wymiarowaniu głębokich konstrukcji podziemnych w zależności od przyjętych założeń projektowych, na przykładzie wielopoziomowego parkingu podziemnego położonego na terenie placu Wolności w Poznaniu, którego podłożem budowlanym są ility plioceńskie. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wykonano dla różnych wartości parametrów gruntowych.

* Politechnika Poznańska, Poznań

2. Parametry geotechniczne podłoża gruntowego

W miejscu projektowanej konstrukcji podziemnej, tj. pod placem Wolności w Poznaniu, podłoże gruntowe zbudowane jest zasadniczo z dwóch warstw: gliny zwałowej zlodowacenia środkowopolskiego i ilów trzeciorzędowych (plioceńskich). Z przeprowadzonych badań geologiczno-inżynierskich [1, 2] wynika, że obie warstwy tworzą grunty w stanie twardo-plastycznym zbliżonym do półzwarłego ($I_L \approx 0,05$). Dla warstwy ilu, w której zaprojektowano zamocowanie ścian szczelinowych parkingu, średnie wartości parametrów wytrzymałościowych określone metodą normową wynoszą: $C_u = 56$ kPa, $\varphi_u = 12^\circ$; natomiast wyznaczone w testach bezpośrednich: $C_u^* = 89$ kPa, $\varphi_u^* = 9^\circ$. Wartości podstawowych parametrów geotechnicznych zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Parametry geotechniczne podłoża gruntowego

Nazwa parametru	Parametry geotechniczne dla warstwy:	
	I – górnej (głina)	II – dolnej (ił)
Ciężar objętościowy γ , kN/m ³	21,9*	21,0*
moduł odkształcenia E , MPa	52,5	24,0/23,5*
współczynnik Poissona ν , –	0,25	0,37
Spójność C_u , kPa	45,0	56,0/89,0*
kąt tarcia wewnętrznego φ_u , °	23,0	12,0/9,0*

* Wartości uzyskane w bezpośrednich testach wytrzymałościowych w laboratorium.

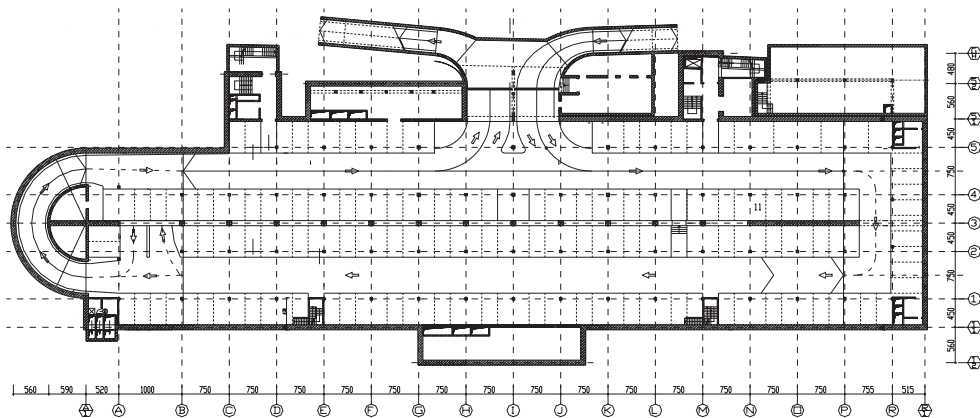
3. Główne założenia konstrukcyjne i realizacyjne parkingu podziemnego

Projektowany obiekt zlokalizowany jest w centrum Poznania na placu Wolności. Jest to plac o wymiarach około 50×200 m. Otoczenie placu stanowią budynki użyteczności publicznej i banki powstałe przed I i II wojną światową. Trójkondygnacyjny, podziemny obiekt zaprojektowano w formie szczelnego, monolitycznego zbiornika żelbetowego (rys. 1), którego głównymi nośnymi elementami konstrukcyjnymi są szczelinowe ściany zewnętrzne i wewnętrzna płyta stropowa poziomu placu, stropy międzykondygnacyjne oraz płyta denna.

Stropy pośrednie oraz strop poziomu zerowego zaprojektowano w układzie konstrukcyjnym słupowo-płytowym i oparto na wewnętrznych słupach oraz na podłużnych ścianach szczelinowych. Stropy wewnętrzne stanowią jednocześnie rampy wjazdowe parkingu. Wjazd do parkingu zaprojektowano w połowie długości obiektu w północnej ścianie podłużnej. W szczytowej części zachodniej parkingu zaprojektowano ślimakową rampę wyjazdową.

Podstawowe wymiary parkingu podziemnego są następujące:

- całkowita długość — 145,0 m,
- podstawowa szerokość — 28,5 m,
- maksymalna szerokość obiektu — 45,0 m,
- głębokość użytkowa do górnego poziomu płyty fundamentowej — 11,0 m,
- osiowy rozstaw słupów w kierunku poprzecznym — $2 \times (4,50-7,50-4,50)$ m,
- osiowy rozstaw słupów w kierunku podłużnym — 7,50 m.



Rys. 1. Rzut poziomy zerowego konstrukcji parkingu pod placem Wolności w Poznaniu

Ściany szczelinowe zaprojektowano o grubości 0,80 m. Słupy zaprojektowano jako żelbetowe, monolityczne o przekrojach prostokątnych: słupy dolnej kondygnacji $0,40 \times 0,50$ m oraz $0,50 \times 0,50$ m, pozostałe $0,40 \times 0,40$ m oraz $0,45 \times 0,45$ m. Stropy międzykondygnacyjne poziomu – 1 i – 2 zaprojektowano o grubości 0,20 m, a strop poziomu zerowego 0,35 m. W obszarach głowicowych słupów o długości 2,0 m w kierunku poprzecznym oraz 2,20 m w kierunku podłużnym parkingu podwojono grubości płyt stropowych, konstruując głowice stropowe. Posadowienie słupów obiektu zaprojektowano jako bezpośrednie na żelbetowych, monolitycznych stopach fundamentowych. Wymiary podstawowych stóp fundamentowych w rzucie poziomym wynoszą $3,00 \times 3,00$ m oraz lokalnie $2,50 \times 2,50$ m i $3,50 \times 3,50$ m. Rzędne posadowienia stóp fundamentowych są zmienne w zakresie od 11,25 do 13,65 m.

Ściany szczelinowe, stanowiące wewnętrzną i zewnętrzną przegrody pionowe parkingu, wykorzystano jako podpory płyt stropowych. Rzędna posadowienia ścian, z uwagi na rampowy układ stropów, jest zmienna na obwodzie obiektu i wynosi od – 14,25 do – 16,65 m.

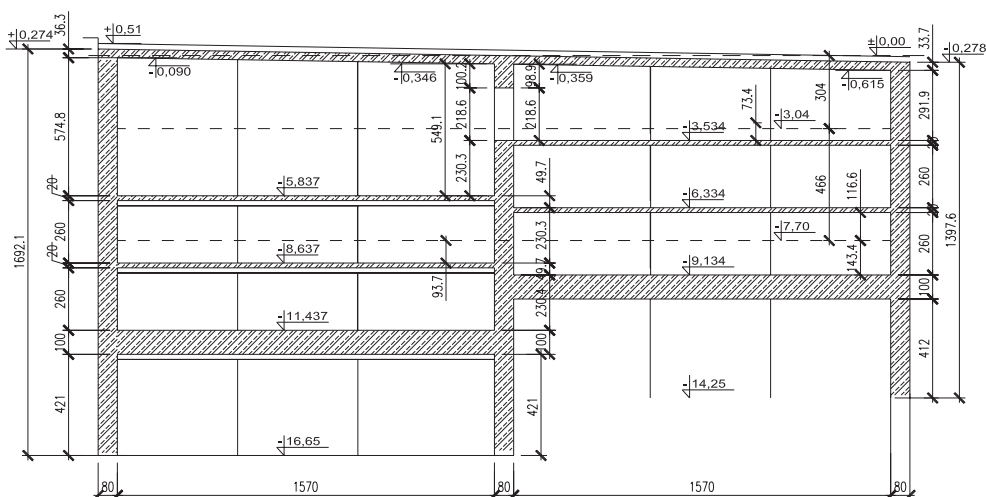
Konstrukcję parkingu zaprojektowano w monolitycznej technologii żelbetowej z betonem klasy B37 zbrojonego stalą żebrowaną klasy A-IIIN o znaku BSt500S. Ponadto ściany szczelinowe zaprojektowano z betonu hydrotechnicznego W-8.

Wykonywanie obiektu podzielono na siedem zasadniczych faz realizacji i eksploatacji, dla których przyjęto odpowiednie modele obliczeniowe.

W projekcie przyjęto, że konstrukcja rozporowa, zabezpieczająca stateczność ścian szczelinowych w fazach głębienia wykopu, będzie zrealizowana z wykorzystaniem następujących elementów konstrukcyjnych:

- fragmentów docelowych stropów poziomu zerowego i poziomów – 1 oraz – 2,
- żelbetowych stropów tymczasowych w obszarze ślimakowej pochylni wyjazdowej,
- stalowej konstrukcji rozpór i oczepów tymczasowych zastosowanych na 2 poziomach.

Ze względu na rampowy układ stropów i płyty dennej obiektu parkingu, w obszarach górnego i dolnego poziomu konstrukcji rozparcia istnieją różnice poziomów dochodzące do 1,50 m. Na rysunku 2 przedstawiono wybrany przekrój poprzeczny parkingu z zaznaczeniem lokalizacji żelbetowych stropów docelowych i tymczasowej stalowej konstrukcji rozporowej, zaznaczonej linią przerywaną.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny parkingu

4. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe konstrukcji parkingu

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe konstrukcji ściany szczelinowej wykonano dla siedmiu faz budowy, uwzględniając wytyczne projektowe zawarte w pracach [3, 6].

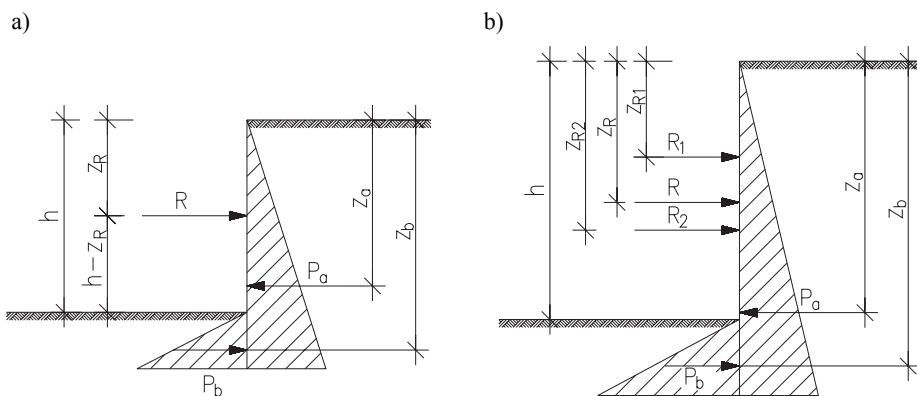
Poszczególne fazy uwzględnione w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych to:

- Faza I — ściana wykonana do pełnej głębokości, wykop do poziomu – 1.
- Faza II — ściana wykonana do pełnej głębokości, wykop do poziomu – 2, założone tymczasowe rozpory poziomu górnego.
- Faza III — ściana wykonana do pełnej głębokości, wykop do poziomu – 3, założone tymczasowe rozpory poziomów górnego i dolnego.

- Faza IV — ściana wykonana do pełnej głębokości, założone tymczasowe rozpory poziomych górnego i dolnego, wykonana płyta fundamentowa.
- Faza V — ściana wykonana do pełnej głębokości, założone tymczasowe rozpory poziomych górnego, wykonane: płyta fundamentowa oraz strop poziomu – 2.
- Faza VI — ściana wykonana do pełnej głębokości, wykonane: płyta fundamentowa, strop poziomu – 2 oraz strop poziomu – 1.
- Faza VII — ściana wykonana do pełnej głębokości, wykonane: płyta fundamentowa, strop poziomu – 2, strop poziomu – 1 oraz strop poziomu zerowego.

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe konstrukcji parkingu wykonano przy przyjęciu następujących założeń obliczeniowych:

- parametry geotechniczne podłoża wg tabeli 1, pkt 2;
- parcie gruntu zmienne: od wartości parcia granicznego, poprzez wartości pośrednie do parcia spoczynkowego w zależności od aktualnej fazy pracy konstrukcji;
- odpór graniczny podzielony przez uogólniony współczynnik o wartości 1,50;
- obciążenie naziomu i płyty poziomu zerowego — $20,0 \text{ kN/m}^2$;
- obciążenie stropów międzykondygnacyjnych — $5,0 \text{ kN/m}^2$;
- beton klasy B37 zbrojony stalą żebrowaną klasy A-IIIN o znaku BSt500S.



Rys. 3. Schemat statyczny do metody Jamesa i Jacka dla I i II etapu rozparcia ściany:
a) etap I (1 rząd rozpór); b) etap II (2 rzędy rozpór)

Przy wyznaczeniu długości ściany szczelinowej zastosowano metodę Jamesa i Jacka [4] (rys. 3). W rezultacie otrzymano głębokość ściany oraz reakcje w miejscu podparcia ściany rozporami.

Rozpatrzono dwa etapy pracy:

- etap I — gdy wykonany jest tylko pierwszy rząd rozpór,
- etap II — po wykonaniu drugiego rzędu rozparcia konstrukcji ściany.

Dla I etapu uzyskano równania:

$$\begin{aligned}P_a - R - P_b &= 0 \\P_a (z_a - z_R) - P_b (z_b - z_R) &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

gdzie:

- P_a — parcie gruntu na ramieniu z_a ,
- P_b — odpór gruntu na ramieniu z_b ,
- R — reakcja rozpory odległa o z_R od poziomu gruntu.

Dla II etapu uzyskano następujące warunki równowagi:

$$\begin{aligned}P_a - R - P_b &= 0 \\P_a (z_a - z_R) - P_b (z_b - z_R) &= 0 \\R &= R_1 + R_2 \\R_1 (z_R - z_{R1}) - R_2 (z_R - z_{R2}) &= 0\end{aligned}\tag{2}$$

gdzie: R_1, R_2, z_{R1}, z_{R2} — odpowiednio reakcje R_i na ramieniach z_{Ri} w rozporach.

Wartości parcia P_a i odporu gruntu P_b wyznaczono w funkcji głębokości wykopu h_w . Uzyskano w ten sposób dwa równania, w których niewiadomymi są h i z_R . Przy wyznaczaniu głębokości ściany kluczową sprawą są wartości przyjętych parametrów geotechnicznych, jak również liczba i położenie rozpór. Obliczenia wykonano komputerowo przy wykorzystaniu programu własnego ŚCIANA-SZCZELINOWA.

W obliczeniach ściany szczelinowej, traktowanej jako pręt osadzony w sprężystym podłożu, obciążony siłami poziomymi, oddziaływania gruntu oraz rozpór były zastąpione przez podpory sprężyste o odpowiedniej podatności. Przy takim założeniu stosunkowo dokładnie wyznaczono siły wewnętrzne w konstrukcji oraz oszacowano jej przemieszczenia. Założono, że grunt jest ośrodkiem spełniającym zależność

$$P_z = C_z \cdot y_z\tag{3}$$

gdzie:

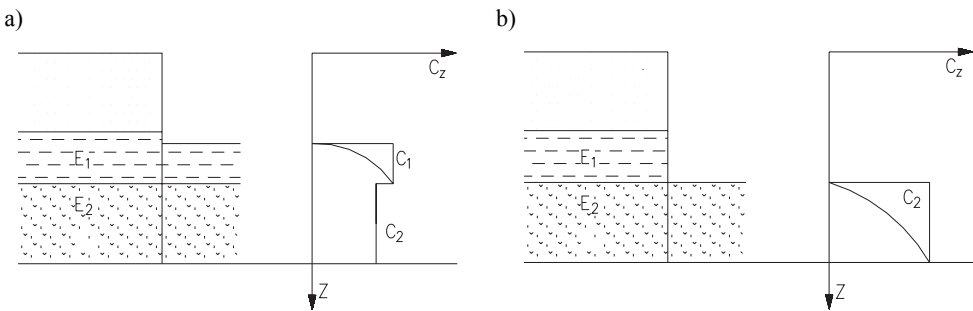
- P_z — nacisk poziomy wywierany przez ścianę na grunt na głębokości z ,
- C_z — współczynnik proporcjonalności odkształceń podłoża,
- y_z — przemieszczenie poziome ściany na głębokości z .

Wartości współczynnika odkształcalności podłoża C_z wyznaczono w funkcji modułu odkształcalności gruntu E_0 wg wzoru

$$C_z = E_0 \cdot 1,0 \text{ m}^{-01} \quad (4)$$

Wykres zależności C_z od rzędnej głębokości wykopu z przyjęto jako uśredniony w postaci paraboli, zgodnie z rysunku 4.

Podpory ściany szczelinowej poniżej dna wykopu zastąpiono oddziaływaniem gruntu, w jednakowym rozstawie $l_p = 0,50 \text{ m}$. Współczynniki sprężystości podpór K_i , przyjęto według wzorów (5). Obliczenia statyczne wykonano komputerowo przy wykorzystaniu programu analizy statycznej RM-WIN, wprowadzając do modelu obliczeniowego wartości sprężystości podpór wyznaczonych ze wzorów (5).



Rys. 4. Rozkład wartości współczynnika odkształcalności podłoża C_z :
a) fazy I–II; b) fazy III–VII

W zależności od fazy pracy ściany szczelinowej, jako obciążenie poziome ściany przyjęto parcie graniczne, pośrednie czy wreszcie spoczynkowe w ostatniej fazie pracy — fazie eksploatacji.

$$K_1 = \frac{l_p}{24} (7C_{z(1)} + 6C_{z(2)} - C_{z(3)})$$

$$K_i = \frac{l_p}{12} (C_{z(i-1)} + 10C_{z(i)} - C_{z(i+1)}) \quad (5)$$

$$K_n = \frac{l_p}{24} (7C_{z(n)} + 6C_{z(n-1)} - C_{z(n-2)})$$

Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych długości zakotwienia ściany z warunku jej stateczności w poszczególnych, charakterystycznych przekrojach poprzecznych parkingu zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Zestawienie wyników obliczeń

Przekrój poprzeczny parkingu	Wyniki obliczeń numerycznych:		
	wysokość ściany, m	moment zginający, kN · m	przemieszczenie ściany, mm
A-B	-/17,6	542	6,4
D-E	21,2/17,2	461	7,5
G-H	19,8/15,8	376	5,9
L-M (południe)	17,6/13,6	262	7,9
L-M (północ)	14,4/11,4	193	7,4
O-P	16,1/14,1	167	6,8

W tabeli podano ponadto pozostałe wyniki obliczeń statycznych. Wartości długości zakotwienia podano dla dwóch wariantów obliczeń: dla normowych oraz dla rzeczywistych wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu otrzymanych z badań.

5. Wnioski

Przeprowadzone obliczenia statyczno-wytrzymałościowe oraz uzyskane na ich podstawie rezultaty dla podziemnej konstrukcji parkingu pod placem Wolności w Poznaniu, posadowionej na łąkach poznańskich, wykazały znaczną „czułość” procesu projektowania ścian szczelinowych na zastosowane w obliczeniach wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów. Uwzględnienie rzeczywistych wartości parametrów geotechnicznych, a w szczególności wpływ spójności c_u i kąta tarcia wewnętrznego ϕ_u — znacznie wyższych od wartości normowych — pozwoliło na istotne zmniejszenie długości projektowanych ścian szczelinowych zamocowanych w podłożu gruntowym. Znacznie mniejszy wpływ przyjętych wartości parametrów geotechnicznych uzyskano na stan graniczny nośności i użyteczności konstrukcji ściany szczelinowej.

W przypadku projektowania głęboko posadowionych obiektów budowlanych na łąkach poznańskich konieczne jest ustalenie rzeczywistych wartości wytrzymałościowych parametrów geotechnicznych na podstawie bezpośrednich testów wytrzymałościowych w terenie lub w laboratorium. Dodajmy, że szereg zrealizowanych, głęboko posadowionych obiektów budowlanych w Poznaniu na łąkach poznańskich potwierdza słuszność proponowanego w pracy podejścia obliczeniowego oraz istniejącą rozbieżność normowych i rzeczywistych wartości parametrów wytrzymałościowych łąki poznańskiego.

LITERATURA

- [1] *Forkiewicz A.*: Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla budowy garażu podziemnego w Poznaniu na Placu Wolności. Poznań, Politechnika Poznańska 2001
- [2] *Florkiewicz A., Troć M.*: Problemy piętrzenia wód gruntowych na przykładzie głębokiego posadowienia obiektów w Poznaniu. *Inżynieria i Budownictwo*, 7/2002
- [3] *Grzegorzewicz K., Kłosiński B.*: Warunki techniczne wykonywania ścian szczelinowych. Warszawa, IBDiM 2003
- [4] *Jarominiak A.*: Lekkie konstrukcje oporowe. Warszawa, WKŁ 2000
- [5] *Michalak H., Pęski S., Pyrak S., Szulborski K.*: O wpływie wykonywania wykopów głębokich na zabudowę sąsiednią. *Inżynieria i Budownictwo*, 1/1998, 12–15
- [6] *Piaskowski A.*: Wytyczne projektowania i wykonywania fundamentów szczelinowych. ITB 230/1980
- [7] PN-81/B-03020: Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [8] PN-B-04452:2002: Geotechnika. Badania polowe
- [9] *Runkiewicz L.*: Zasady realizacji budowli o głębokich posadowieniach w centrach miast. XLVI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Wrocław – Krynica 2000, 397–412
- [10] *Wysokiński L., Kotlicki W., Motak E.*: Zagadnienia geotechniczne w realizacji inwestycji w gęstej zabudowie. *Inżynieria i Budownictwo*, 10/1999, 579–583