

Monika MITEW*
Politechnika Warszawska

OCENA PRZEMIESZCZEŃ ŚCIAN GŁĘBOKICH WYKOPÓW METODĄ PODŁOŻA SPRĘŻYSTEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono jedną z metod analizy statycznej ścian szczelinowych, uwzględniającą sprężystą podatność podłoża gruntowego. Opisano 3 wybrane sposoby wyznaczania wartości modułu podatności podłoża k_H . Dla przyjętego przekroju obliczeniowego przeprowadzono analizę statyczną i wyznaczono teoretyczne przemieszczenia ściany szczelinowej, różnicując wartość modułu k_H . Artykuł kończą: podsumowanie i wnioski autorki.

ESTIMATION OF DISPLACEMENTS OF DEEP EXCAVATION WALLS USING SUBGRADE REACTION MODEL

Summary. The article presents a method of static analysis of diaphragm walls, which takes into account a subgrade reaction of the subsoil. Three ways of calculating the subgrade reaction modulus (k_H) have been described. For the assumed section of a diaphragm wall static analysis have been carried out and theoretical displacements has been calculated for different values of k_H modulus. The article is closed by a summing up and author's conclusions.

1. Wstęp

Celem artykułu jest przedstawienie analizy statycznej ścian szczelinowych stanowiących zabezpieczenie głębokich wykopów, z uwzględnieniem sprężystości podłoża. Wyróżnia się trzy podstawowe metody analizy statycznej tego typu konstrukcji [8].

- 1) Metody klasyczne, upraszczające zagadnienie do modelowania ściany szczelinowej jako belki statycznie wyznaczalnej, poddanej obciążeniu wywołanemu parciem i odporem gruntu oraz obciążeniami dodatkowymi, takimi jak: parcie hydrostatyczne, obciążenie naziomu i siły skupione przyłożone w miejscach podparcia ściany. Jednak gdy ściany

*Opiekun naukowy: Dr inż. Anna Siemińska – Lewandowska

szczelinowe stanowią zabezpieczenie głębokich wykopów, sąsiadujących z istniejącymi obiektami, konieczne jest wyznaczenie przemieszczeń projektowanej konstrukcji i wpływu jej realizacji na otoczenie. Metody klasyczne nie umożliwiają przeprowadzenia tego typu analiz.

- 2) Metoda modułu podatności podłoża (inaczej nazywana metodą podłoża sprężystego), uwzględniająca współpracę konstrukcji z podłożem, pozwalająca na wyznaczenie sił wewnętrznych i przemieszczeń konstrukcji w dowolnej fazie jej realizacji. Możliwość wyznaczenia przemieszczeń projektowanej konstrukcji jest obecnie szczególnie istotna ze względu na wprowadzanie w Polsce norm europejskich [11], gdzie narzucono obowiązek wymiarowania ścian szczelinowych zarówno w stanie granicznym nośności, jak i użytkowania. Pomimo iż metoda ta nie umożliwia modelowania dalszego otoczenia projektowanej konstrukcji i bezpośredniego określenia wpływu jej realizacji na objekty sąsiadujące z wykopem, jest szeroko stosowana w Europie.
- 3) Analizy numeryczne metodą elementów skończonych (MES) modelu konstrukcji obejmującego, oprócz projektowanej ściany szczelinowej, także współpracujący z nią ośrodek gruntowy oraz objekty znajdujące się w jej otoczeniu. Dobór modelu ośrodka właściwie odwzorowującego stan rzeczywisty jest podstawowym elementem analizy MES. Wyróżnia się [4] wiele modeli, z których najczęściej stosowane w geotechnice są modele sprężysto-idealnie plastyczne o stowarzyszonym prawie płynięcia i izotropowej powierzchni plastyczności (np. Coulomba-Mohra, Tresca, Hubera-Misesa-Hencky'ego, Druckera-Pragera) oraz modele sprężysto-plastyczne o wzmocnieniu izotropowym typu objętościowego. (np. Cam-Clay, Modified Cam-Clay). W zależności od zastosowanego modelu gruntowego do analizy obliczeniowej niezbędne są różne parametry. W praktyce inżynierskiej największą popularnością cieszy się model sprężysto-idealnie plastyczny Coulomba-Mohra z uwagi na prostotę i małą liczbę parametrów modelu (ϕ , c , E , ν), które można wyznaczyć na podstawie badań laboratoryjnych lub in situ.

2. Metoda podłoża sprężystego

2.1. Model obliczeniowy

Metoda modułu podatności podłoża do modelowania ośrodka gruntowego wykorzystuje jednoparametrowy, analogowy model podłoża Winklera [10]. Styk gruntu ze ścianą zastępowany jest układem niezależnych podpór sprężystych o sztywności k_H . Ściana jest traktowana jako belka sprężysta o jednostkowej szerokości, a wartość poziomego oporu sprężystego gruntu w rozpatrywanym punkcie jest wprost proporcjonalna do poziomych przemieszczeń ściany w tym samym punkcie:

$$p_z = k_H y \quad (1)$$

oraz

$$y = y(z) \quad (2)$$

W przypadku omawianej metody kluczowym zagadnieniem jest wyznaczenie współczynnika k_H , którego nie można utożsamiać ze współczynnikiem podatności podłoża zdefiniowanym przez Winklera. Poniżej przedstawiono metody wyznaczania parametru k_H .

2.2. Analityczne i empiryczne metody wyznaczania wartości modułu k_H

Jako że parametr k_H (moduł podatności podłoża) nie jest wielkością fizyczną charakteryzującą grunt, lecz parametrem obliczeniowym zależnym od sztywności ściany (EI), geometrii układu (głębokość wykopu w stosunku do zagłębienia ściany poniżej jego dna) i warunków gruntowych, nie ma możliwości wyznaczenia go metodami in situ. Większość metod określania k_H wykorzystuje obliczenia przemieszczeń sztywnej ściany szczelinowej pracującej w warunkach odporu.

W literaturze znanych jest wiele sposobów wyznaczania modułu podatności podłoża k_H , bazujących na klasycznej teorii sprężystości lub badaniach empirycznych, w tym w szczególności wykorzystujących wyniki badań presjometrycznych. W niniejszym artykule omówione zostaną 3 z nich: metoda Terzagiego, Chadeissona i Monnet oraz Menarda i Bourdona, jako charakteryzujące odrębne podejścia do zagadnienia, a jednocześnie umożliwiające przeprowadzenie numerycznej analizy obliczeniowej w oparciu o dane uzyskane z poletka badawczego.

Metoda Terzagiego

Metoda Terzagiego [9] w głównej mierze bazuje na zasadach klasycznej teorii sprężystości. Według założeń Terzagiego w przypadku gruntów niespoistych, wartość k_H na danej głębokości z zależy od prostopadłego do przemieszczenia wymiaru ściany, ciężaru gruntu i jego stopnia zagęszczenia. Przemieszczenie ściany jest konsekwencją odkształcenia ośrodka gruntowego charakteryzującego się modułem sprężystości. $E_s = Ap_v$. Bazując na tym założeniu, sformułowano równanie (3):

$$k_H = \frac{p}{y} = \frac{Ay}{1,35 B} z = m_H z = n_H \frac{z}{B}, \quad (3)$$

gdzie:

B – prostopadły do przemieszczenia wymiar ściany,

n_H – stała zależna od stopnia zagęszczenia gruntu; jej wartości przedstawiono w tabelcy 1.

Tabela 1

Wartości n_H [kN/m ³] dla ściany szerokości $B=1$ m, zagłębionej w piaskach			
Stopień zagęszczenia	Luźny	Srednio-zagęszczony	Zagęszczony
Piasek suchy i wilgotny	2230	6700	17890
Piasek nawodniony	1280	4470	10860

Równanie (3) można stosować w odniesieniu do gruntów niespoistych. W przypadku gruntów spoistych wartość k_{HI} utożsamia się z wartością parametru k_{SI} ustaloną dla belki spoczywającej na poziomej powierzchni tego samego gruntu. Przyjmując powyższe założenie, wartość k_H dla ściany o szerokości jednostkowej można wyrazić równaniem (4):

$$k_H = \frac{1}{B} k_m = \frac{1}{B} k_{s1} = \frac{1}{1,5B} \bar{k}_{s1}, \quad (4)$$

gdzie:

B – szerokość ściany,

k_{SI} – stała zależna od stopnia plastyczności gruntu.

Przyjmując $B=1$ m, na podstawie tabeli wartości parametrów \bar{k}_{s1} w zależności od stopnia plastyczności (I_L) gruntu spoistego można określić wartości parametru k_H (tabela 2).

Tabela 2

Wartości k_H [kN/m ³] dla ściany szerokości 1 m, zagłębionej w gruntach spoistych			
Stan glin	Twardoplastyczny	Półzwały	Zwały
	16000	32000	63900

Metoda Monnet

Podstawą tej empirycznej metody jest ocena wielkości przemieszczenia, jakie jest niezbędne do mobilizacji granicznego parcia biernego. R. Chadeisson [2], na podstawie wieloletnich doświadczeń z realizacji ścian szczelinowych o grubości 60 i 80 cm, w zróżnicowanych warunkach geotechnicznych, określił wartość k_H w zależności od wytrzymałości gruntu na ścinanie (kryterium Coulomba-Mohra), tzn. parametrów c' i ϕ' , uwzględniając geometrię ściany pośrednio poprzez wprowadzenie do obliczeń jej sztywności. Opracowany przez Chadeisson'a i w późniejszych latach uproszczony przez Monnet [6] wzór dla określenia wartości modułu podatności podłoża k_H przedstawia się następująco:

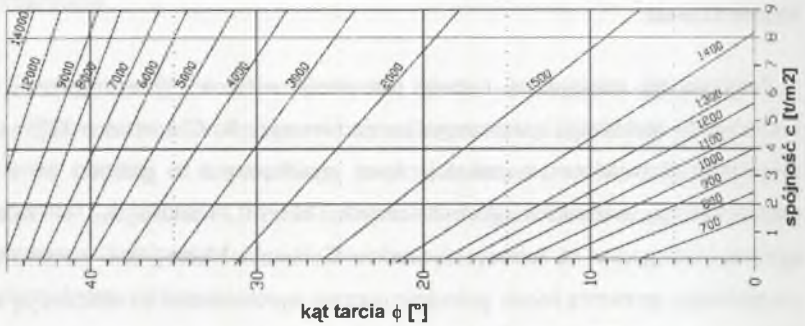
$$k_H = \left[20EI \left(\frac{K_p \gamma (1 - K_0 / K_p)}{dr_0} \right)^4 \right]^{\frac{1}{3}} + A_p c' \frac{th(c' / c_0)}{dr_0}, \quad (5)$$

gdzie:

- γ - ciężar właściwy gruntu,
- K_p - współczynnik parcia biernego (oporu),
- K_0 - współczynnik parcia spoczynkowego,
- dr_0 - przemieszczenie charakterystyczne (0,015 m),
- c' - spójność efektywna,
- A_p - współczynnik uwzględniający spójność gruntu,
- c_0 - 30 kPa.

Podstawiając do powyższego wzoru wartości parametrów K_p , K_0 , γ , c' , przyjmując ścianę o grubości 80 cm ($E=2 \times 10^7 \text{ kPa}$), otrzymano przedstawiony na rys. 1 nomogram do wyznaczania k_H na podstawie wartości parametrów c' i ϕ' .

Na podstawie przedstawionego przez Chadeissona nomogramu można określić wartości parametru k_H dla ścian szczelinowych grubości 60 – 80 cm zagłębionych w gruncie stosunkowo zagęszczonym (zwartym). Od momentu jego opracowania zrealizowano wiele wykopów w zróżnicowanych warunkach gruntowych i sam autor w najnowszych edycjach nomogramu podkreśla, iż nie ma on zastosowania dla gruntów luźnych (plastycznych).



Rys. 1. Nomogram Chadeissona do wyznaczania k_H na podstawie wartości parametrów c' i ϕ'

Fig. 1. The chart of Chadeisson for the evaluation of k_H basing on c' and ϕ' values

Metoda Menarda i Bourdona

Pierwszego podejścia do doświadczalnego wyznaczenia wartości modułu podatności podłoża z wykorzystaniem wyników badań presjometrycznych podjęli się Menard i Bourdon [5]. Opracowana przez nich metoda była w późniejszych latach uzupełniana przez Balay [1], Gigan [3] oraz Schmitta [7]. Na podstawie wyników badań presjometrycznych w otoczeniu ścian oporowych Menard i Bourdon określili zależność pomiędzy k_H a modulem presjometrycznym następującym wzorem:

$$k_H = \left[\frac{1}{E_M} \left[\frac{\alpha a}{2} + 0.133(9a)^\alpha \right] \right]^{-1}, \quad (6)$$

gdzie:

- E_M - moduł presjometryczny gruntu,
- α - współczynnik reologiczny gruntu (przyjmowany: $\frac{1}{3}$ w gruntach niespoistych, $\frac{1}{2}$ w pyłach, $\frac{2}{3}$ w gruntach spoistych),
- a [m] - wysokość, w obrębie której grunt pracuje w odporze, określona przez Menarda na $\frac{2}{3}$ wysokości zagłębienia ściany poniżej dna wykopu w jego ostatecznej fazie.

3. Zastosowanie metody podłoża sprężystego w analizie statycznej ściany szczelinowej

Analizę obliczeniową przeprowadzono dla głębokiego wykopu zrealizowanego w obudowie ścian szczelinowych grubości 80 cm z zastosowaniem metody stropowej. Dla wybranego przekroju charakterystycznego przeprowadzono trzy cykle obliczeń, pozostawiając bez zmian podstawowe parametry geotechniczne (określone w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej), a różnicując moduł podatności podłoża k_H z wykorzystaniem metod jego określania omówionych w punkcie 2 niniejszej pracy. W tabelicy 3 zestawiono parametry poszczególnych warstw geotechnicznych wraz z odpowiadającymi im modułami podatności podłoża k_H określonymi na podstawie wzorów Terzagiego, Chaidessona – Monnet oraz Menarda – Bourdona.

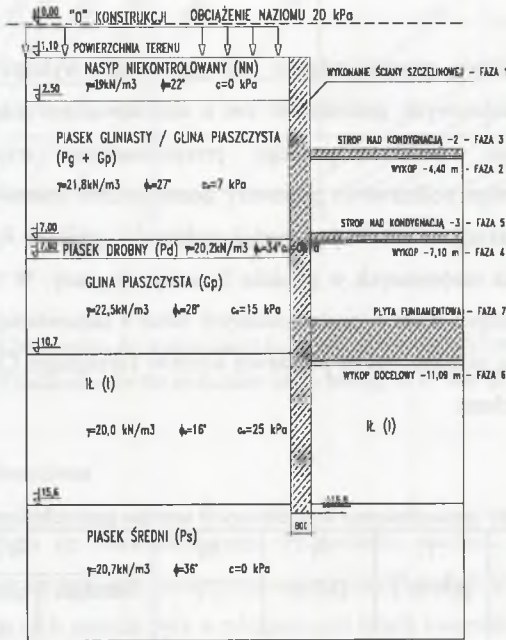
Tabela 3

Parametry geotechniczne wydzielonych warstw geotechnicznych

nr	opis	I_D / I_L	γ [kN/m ³]	c_u [kPa]	φ_u [°]	k_H [kN/m ³]		
						Terzaghi	Chaidesson -Monnet	Menard -Bourdon
1	NN	-	19,0	0	22	2230	16000	6000
2	Pg/Gp	0,27	21,8	7	27	8000	20500	4100
3	Pd	0,60	20,2	0	34	4470	37000	20200
4	Gp	0,00	22,5	15	28	32000	27000	14400
5	I	0,10	20,0	25	16	16000	15000	7500
6	Ps	0,70	20,7	0	36	10860	43000	41500

Przekrój obliczeniowy, wraz z opisem warunków geotechnicznych i faz realizacji konstrukcji, przedstawiono na rysunku 2. Fazy realizacji uwzględnione w obliczeniach:

- wykonanie ściany szczelinowej w gruncie i obciążenie naziomu – 20 kPa,
- głębienie wykopu 10 cm poniżej stropu nad kondygnacją –2,
- wykonanie stropu nad kondygnacją –2,
- głębienie wykopu 10 cm poniżej stropu nad kondygnacją –3,
- wykonanie stropu nad kondygnacją –3,
- głębienie wykopu do rzędnej docelowej,
- wykonanie płyty dennej.



Rys. 2. Przekrój obliczeniowy
Fig. 2. Calculation scheme

Celem analizy było porównanie teoretycznych przemieszczeń ściany z wartościami rzeczywistymi wyznaczonymi na podstawie pomiarów inklinometrycznych. Badania ściany szczelinowej autorka prowadziła w firmie Geokonstrukcja Sp. z o.o., która też udostępniła program RIDO v 4,0 umożliwiającą analizę teoretyczną zagadnienia. Wyniki każdego toku obliczeń (maksymalne przemieszczenia ściany, siły wewnętrzne – momenty zginające oraz maksymalne siły w poziomach podparcia – na strop nad kondygnacją –2 i –3) zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4

Zestawienie wyników obliczeń

		TERZAGHI	CHAIDESSON -MONNET	MENARD -BOURDON	POMIAR RZECZYWISTY
MAX PRZEMIESZCZENIE	[mm]	9,2	9,7	18,9	16,5
MAX MOMENT ZGINAJĄCY	[kNm/m]	434	375	582	-
MAX SIŁA NA STROP NAD -2	[kN/m]	-95	-138	-116	-
MAX SIŁA NA STROP NAD -3	[kN/m]	-432	-380	-499	-

4. Podsumowanie i wnioski

Otrzymane w analizie statycznej z zastosowaniem modelu podłoża sprężystego wyniki wykazują znaczący wpływ wartości modułu sprężystości podłoża zarówno na wyznaczone przemieszczenia teoretyczne ściany, jak i siły wewnętrzne. Moduł k_H , określony różnymi metodami, dla poszczególnych warstw geotechnicznych, zawiera się w granicach:

- 4100 – 20500 kN/m³ – warstwa 2 – piasek gliniasty / glina piaszczysta,
- 4470 – 37000 kN/m³ – warstwa 3 – piasek drobny,
- 14400 – 32000 kN/m³ – warstwa 4 – glina piaszczysta,
- 7500 – 16000 kN/m³ – warstwa 5 – ił,
- 10860 – 43000 kN/m³ – warstwa 6 – piasek średni.

Tak duży rozrzut wartości powoduje znaczne rozbieżności w uzyskanych wynikach. Można zaobserwować, iż przemieszczenia, wyznaczone z zastosowaniem metod teoretycznych (Terzaghi, Monnet) określania modułu k_H , są zbieżne pomimo znacznych różnic w wartościach modułów poszczególnych warstw. Wyniki uzyskane w oparciu o k_H wyznaczone na podstawie metod empirycznych (Menard) znacznie różnią się od bazujących na metodach teoretycznych, są natomiast bardziej zbliżone do rzeczywistych. Ponadto, porównując uzyskane wyniki łącznie z wartościami modułów k_H poszczególnych warstw, można wysnuć przypuszczenie, iż największy wpływ na wyliczone przemieszczenia ma dobór k_H dla gruntu w strefie zakotwienia ściany.

Biorąc pod uwagę trudności w określeniu modułów podatności podłoża oraz dużą rozbieżność uzyskanych wyników, stwierdza się, iż bez względu na metodę oznaczania k_H w analizie statycznej metodą podłoża sprężystego, w procesie inwestycyjnym niezbędnym elementem jest obserwacja przemieszczeń rzeczywistych ścian szczelinowych.

LITERATURA

1. Balay J.: *Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction*. Note d'information technique, Paris : LCPC, 1984.

2. Chadeisson R.: Parois continues moulées dans le sol, Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris : Dunod - 1961, Vol. 2, str. 563-568.
3. Gigan J.P.: Expérimentation d'un rideau en palplanches ancré par tirants actifs. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées Nr 129, 1984, str. 5 –20
4. Gryczmański M.: Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów, Wyd. KILiW PAN, IPPT PAN Studia z zakresu inżynierii, Nr 40, 1995, str.156.
5. Ménard L., Bourdon G., Houy A.: Étude expérimental de l'encastrement d'un rideau en fonction des caractéristiques pressiométriques du sol de fondation. Soil, Sols Nr. 9, 1964.
6. Monnet A.: Module de réaction, coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul élastoplastique. Revue Française de Géotechnique, 66, 1994, str.67-72.
7. Schmitt P.: Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis à vis des ouvrages de soutènement souples. Revue Française de Géotechnique, 71, 1995, str. 3-10.
8. Siemińska-Lewandowska A.: Przemieszczenia kotwionych ścian szczelinowych, Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace naukowe, Budownictwo z. 139, Warszawa 2001.
9. Terzaghi K.: Evaluation of coefficients of subgrade reactions. Géotechnique, Vol. 4, 1955.
10. Winkler E.: Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit. Dominicus, Prague 1967.
11. Norma europejska, European Committee for Standardization, ENV 1997 Eurocode 7, Geotechnical design.
12. Instrukcja użytkowania programu RIDO v. 4 Robert Fages Logiciels (1974...1998).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maciej Gryczmański

Abstract

The article presents a method of static analysis of diaphragm walls, which takes into account a subgrade reaction of the subsoil. Three ways of calculating the subgrade reaction modulus (k_H) have been described. For the assumed section of a diaphragm wall static analysis have been carried out and theoretical displacements has been calculated for different values of k_H modulus. Calculation results has been compared to the real displacement values measured on site.