

Małgorzata Wszędyrówny-Nast

Ocena metod oznaczania modułu odkształcenia do projektowania ścian szczelinowych

Estimation of the modulus of elasticity determination methods for the displacements analysis of the diaphragm wall

Streszczenie: Dobór adekwatnego modelu gruntu i jego parametrów jest podstawową kwestią w szacowaniu przemieszczeń ścian. W artykule oceniono efektywność metod określania modułu odkształcenia E . Wykonano obliczenia na modelu numerycznym metodą elementów skończonych programem PLAXIS w celu określenia przemieszczeń ścian szczelinowych. Obliczenia wykonano, różnicując moduł odkształcenia warstwy ilów, i zweryfikowano je z rzeczywistymi pomiarami.

Słowa kluczowe: iły plioceniśkie, moduł odkształcenia E , metoda elementów skończonych, ściana szczelinowa

Abstract: The choice of appropriate constitutive model and its parameters are main problem in assessing displacements of walls. In this paper the effectiveness of the modulus of elasticity determination methods was estimated. The calculations were carried out on number of models using the Finite Elements Method in PLAXIS software. The aim of this procedure was to estimate the displacements of the diaphragm wall. The calculations were made by differentiation of the modulus of elasticity of clays and by verifying it with real measurements.

Key words: Mio-Pliocene clays, modulus of elasticity E , Finite Elements Method, diaphragm wall

Wstęp

Ściany szczelinowe od ponad 15 lat są powszechnie stosowane w budynkach z głębokimi podziemiami oraz w budownictwie komunikacyjnym. Pełnią one funkcję konstrukcji oporowych. Ściana szczelinowa najczęściej stanowi obudowę wykopu do czasu wykonania konstrukcji podziemia, a następnie jest wykorzystywana

jako element konstrukcyjny. Jednym z kluczowych zagadnień jest ocena przemieszczeń ścian szczelinowych oraz masywu gruntowego współdziałającego ze ścianą. Znaczącym problemem w projektowaniu ścian jest wybór metody analizy statycznej, jak również wyznaczenie parametrów do przyjętego modelu gruntu. Celem analizy opisaney w niniejszym artykule była próba oceny efektywności metod określania modułu odkształcenia E i odpowiedź na pytanie, jak odnoszą się one do rzeczywistości. Oceny dokonano na przykładzie jednej z warszawskich stacji metra.

Charakterystyka obiektu



Ryc. 1. Widok wykopu stacji Marymont; etap realizacji stropu górnego

Fig. 1. View of the excavation; A19 underground station Marymont

Analizowany obiekt stanowi stacja metra A19 Marymont położona na terenie dzielnicy Żoliborz, ok. 200 m od stromej krawędzi oddzielającej wysoczyznę polodowcową od doliny Wisły. Budowa tej stacji realizowana była metodą stropową (ryc. 1). W konstrukcji stacji wyróżniamy część halową, w której strop pośredni występuje tylko po stronie zachodniej i nie rozpiera ścian szczelinowych, oraz dwupoziomowe części stacji (północną i południową) rozparte stropem



Ryc. 2. Widok podwieszonego stropu pośredniego w dwupoziomowej części stacji

Fig. 2. Two-level part of station; view of the suspended ceiling

Tabela 1. Zestawienie wartości modułów odkształcenia otrzymanych czterema różnymi metodami

Table 1. Modulus of elasticity values – comparison of four different determination methods

Metoda	E [MPa]
1 Edometr	20
2 Aparat trójosiowego ściskania (TRX)	25
3 Bender element test (BET)	201
4 CSWS	260

kształcenia [MPa]; δ – współczynnik [-]; M_o – pierwotny moduł ściśliwości [MPa]). Wartości współczynnika δ przyjęte zostały na podstawie Wiłun (1974). Autor ten, podając wartości tego współczynnika, różnicuje je, uwzględniając stan gruntów.

Do wyznaczenia modułu na podstawie badania trójosiowego ściskania (2) posłużono się krzywymi zależności dewiatora naprężeń ($\sigma_1 - \sigma_3$) od odkształceń osiowych (ϵ). Interpretacji dokonano w zakresie pseudosprężystych odkształceń dla 0,2% odkształcenia próbki.

Badanie typu Bender Element Test (BET) (3) wykonuje się w zmodyfikowanej komorze trójosiowego ściskania. W badaniu tym wykorzystuje się przetworniki piezoelektryczne, które pod wpływem zmiany kształtu wytwarzają pole elektryczne, a pod wpływem pola elektrycznego odkształcają się. Wmontowane są one w podstawę i kopułkę komory aparatu trójosiowego. System składa się z nadajnika, który wzbudza falę, fala przechodzi przez próbkę i jest rejestrowana przez odbiornik, który generuje sygnał elektryczny. Czas przejścia fali przez próbkę rejestrowany jest przez specjalne oprogramowanie komputerowe. Na podstawie czasu przejścia przez próbkę fali poprzecznej i podłużnej, jej wymiarów oraz gęstości objętościowej wyznaczone zostały następujące parametry: V_s (prędkość fali poprzecznej), V_p (prędkość fali podłużnej) i G (moduł ścinania). Na ich podstawie za pomocą poniższych wzorów obliczone zostały wartości parametrów ν i E :

$$\nu = 0,5 \cdot \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Parametry te odpowiadają odkształceniom z zakresu tzw. „małych odkształceń”, tj. 0,0001 – 0,001%.

Ostatnia metoda – CSWS (Continuous Surface Wave System) (4), którą oznaczono moduł odkształcenia jest metodą geofizyczną wykorzystującą fale Rayleigha. System badawczy składa się z elektromagnetycznego wibratora generującego fale

Ma on zastosowanie przy prognozowaniu odkształceń terenu i obudowy wykopu w fazach budowy. Jego wartość ma podstawowy wpływ na wyniki otrzymane z analizy komputerowej. W tabeli 1 pokazano, jak znacząco wartości tego parametru różnią się w zależności od metody jego wyznaczania.

Moduł odkształcenia metodą edometryczną (1) obliczony został na podstawie wcześniej wyznaczonych pierwotnych modułów ściśliwości wg wzoru: $E_o = \delta \cdot M_o$ (E_o – moduł od-

oraz liniowo ułożonych geofonów, które te fale odbierają i mierzą ich prędkość. Szybkość fali Rayleigha zależna jest od modułu ścinania G oraz od gęstości ośrodka, przez który przechodzą. Strefa badania wyznaczona jest rozstawem geofonów. Badanie to zostało wykonane przez IHiGI Wydziału Geologii UW bezpośrednio w wykopie stacji A19. Parametry uzyskane tą metodą, podobnie jak w przypadku metody BET, odpowiadają odkształceniom z zakresu „małych odkształceń” 0,0001–0,001%.

Krzywa zależności ε od E (ryc. 4) jest wyraźnie nieliniowa. Wartość modułu odkształcenia E w przedziale odkształceń $\varepsilon = 0,00001$ –0,01% zmienia się dziesięciokrotnie osiągając od 25 do 260 MPa.

Wartości parametrów zastosowane do obliczeń zostały przyjęte na podstawie tabeli „Wydzielenia geotechniczne i normowe wartości parametrów gruntów występujących w rejonie I linii metra w Warszawie” (Rymsza, Petri, 1976) oraz na podstawie badań własnych (moduł odkształcenia E dla warstwy 27). Ich wartości zestawione zostały w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości parametrów przyjęte do obliczeń wg tabeli 1

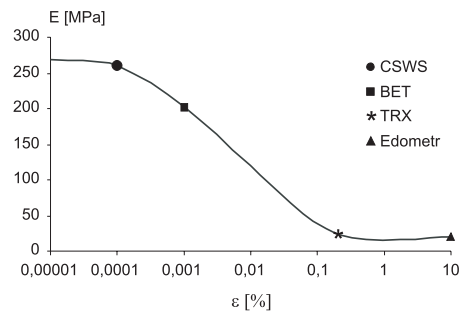
Table 2. The values of the parameters used in calculation – according to Table 1

Numer wydzielenia	γ [kN/m ³]	c [kPa]	Φ [°]	ν [–]	E [MPa]
1 (nasyp)	21	18	12,5	0,27	80
14 (G_p, G, P_g)	22	25	19	0,25	40
15 (P)	20	3	34	0,3	70
16 (G_r, G_{rz}, P_p)	21	25	18	0,3	30
17 (G_p)	22,5	35	23	0,25	47
27 (I, I_r, G_{rz})	19	55	13	0,37	20 ⁽¹⁾ 25 ⁽²⁾ 201 ⁽³⁾ 260 ⁽⁴⁾
żelbeton	25	10000	45	0,182	326

Wyniki analizy

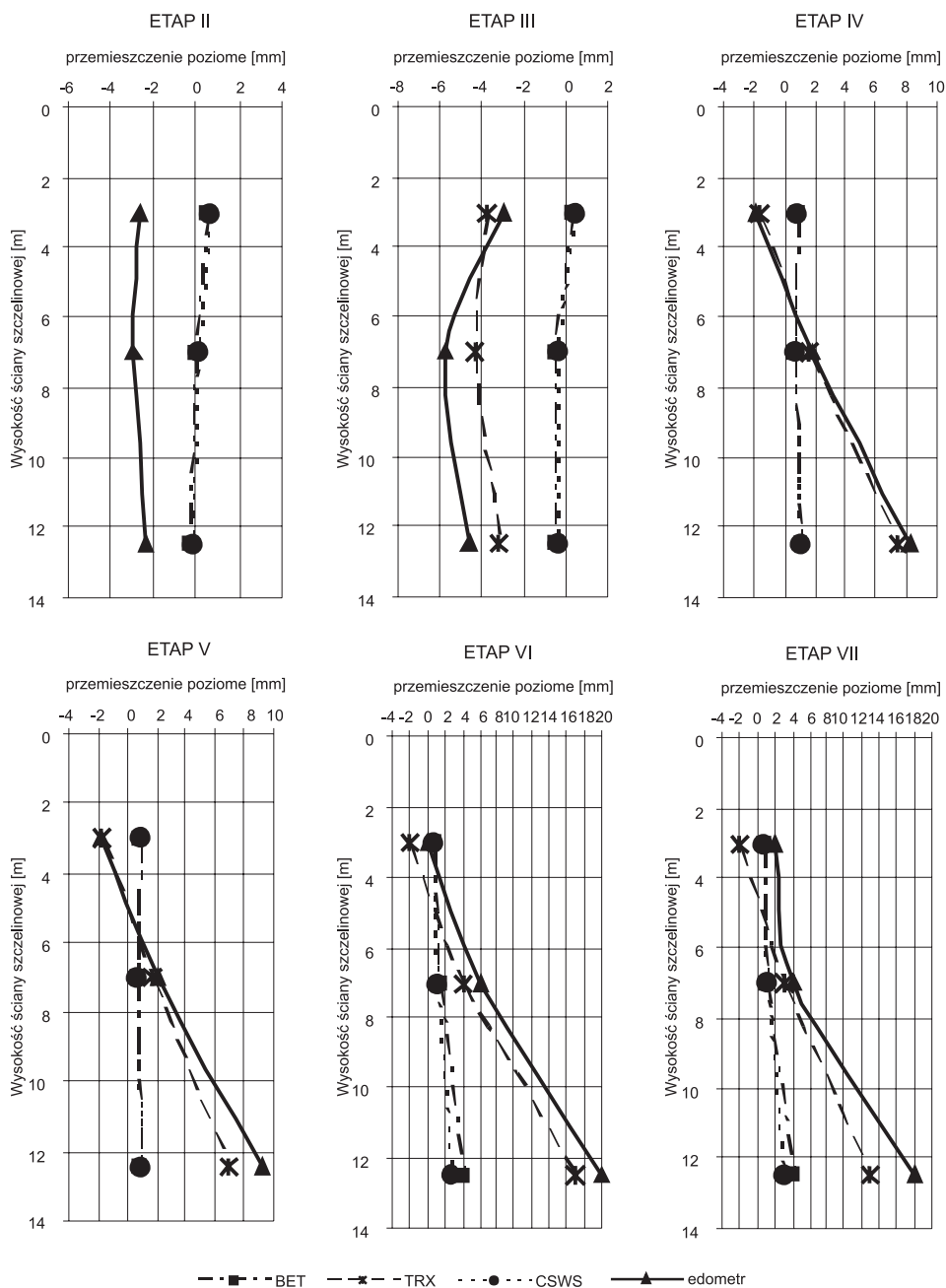
Analiza została wykonana w 7 etapach:

- 1) wykonanie ścian szczelinowych,
- 2) wybranie gruntu do poziomu stropu górnego,
- 3) wykonanie stropu górnego,
- 4) pogłębienie wykopu,
- 5) wykonanie stropu pośredniego,
- 6) wykonanie wykopu do spodu płyty dennej,
- 7) wykonanie płyty dennej.



Ryc. 4. Krzywa zależności modułu odkształcenia E od odkształcenia ε

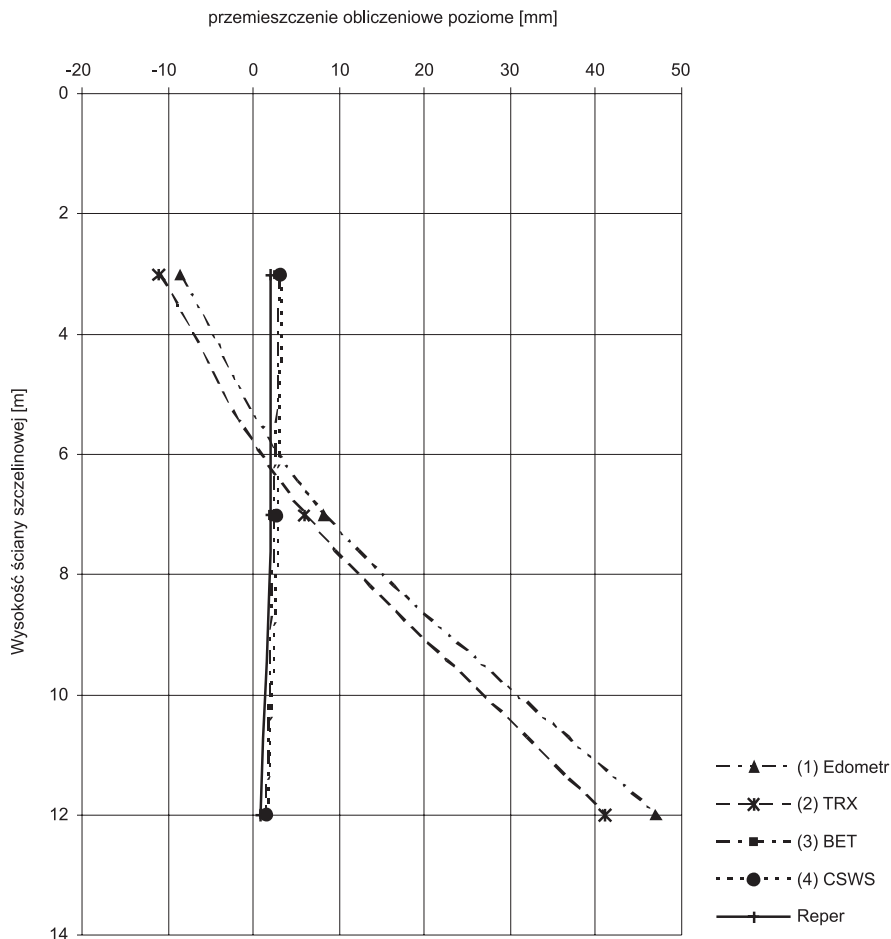
Fig. 4. Relationship between modulus of elasticity and strain



Ryc. 5. Wykresy przemieszczeń ściany szczelinowej zachodniej w zależności od etapu powstawania stacji

Fig. 5. Displacements of the west diaphragm wall for each construction phase

Obliczenia wykonano, różnicując moduł odkształcenia E. Dla poszczególnych etapów wznoszenia konstrukcji uzyskano przemieszczenia poziome ściany szczelinowej dla czterech różnych modułów. Analizie poddano zachodnią ściankę. Kształty wykresów przemieszczeń poziomych wykazały różnice w przemieszczeniach w zależności od zastosowanych modułów odkształcenia. Różnice pomiędzy poszczególnymi przypadkami przedstawiono na wykresach (ryc. 5). Dla modułu wyznaczonego metodą BET maksymalne przemieszczenie poziome wyniosło 3 mm i występuje na wysokości 3 m poniżej poziomu stropu górnego. Dla modułu wyznaczonego z aparatu trójosiowego ściskania, maksymalne przemieszczenie wyniosło 41 mm i występuje na wysokości 12 m poniżej poziomu stropu górnego. Dla



Ryc. 6. Wykres całkowitych obliczeniowych przemieszczeń ściany szczelinowej zachodniej w porównaniu z rzeczywistymi pomiarami (1, 2 – wartości przemieszczeń przy przyjęciu do obliczeń wartości uzyskanych z badań edometrycznych i badań trójosiowych; 3, 4 – wartości przemieszczeń przy przyjęciu do obliczeń wartości uzyskanych z badań typu BET i CSWS)

Fig. 6. The measured and calculated total displacements of the west diaphragm wall

modułu wyznaczonego metodą CSWS, maksymalne przemieszczenie wyniosło 3,3 mm i występuje na wysokości 12 m poniżej poziomu stropu górnego. Dla modułu wyznaczonego metodą edometryczną maksymalne przemieszczenie wyniosło 47 mm i występuje na wysokości 12 m poziomu stropu górnego.

Podsumowanie i wnioski

W celu oceny efektywności metod określania modułu odkształcenia uzyskane wyniki zweryfikowano z rzeczywistymi precyzyjnymi pomiarami geodezyjnymi poziomych przemieszczeń ścian szczelinowych wykonanymi na stacji A19 (ryc. 6).

Wartości parametru E uzyskane z badań BET i CSWS okazały się bliższe uzyskanym z pomiarów niż te uzyskane z badań edometrycznych i z aparatu trójosiowego ściskania. Zastosowanie do obliczeń parametrów z zakresu dużych odkształceń lub z normy PN-81/B-03020 prowadzi do nierealistycznych rezultatów. Analiza z wykorzystaniem parametrów wyznaczonych w zakresie małych odkształceń prowadzi do uzyskania wartości przemieszczeń zbliżonych do rzeczywistych. W przypadku stacji metra do współpracy z konstrukcją włączone są duże obszary gruntów, a w nich odkształcenia są małe. Wydaje się więc słuszne stosowane w programach komputerowych bazujących na MES przyjmowanie wartości modułów dla modelu Coulomba-Mohra, które są wartościami modułów sprężystych gruntów.

Autorka dziękuje serdecznie za konsultacje i cenne wskazówki merytoryczne prof. dr. hab. R.R. Kaczyńskiemu. Artykuł napisany został na podstawie pracy magisterskiej „Analiza warunków geologiczno-inżynierskich i odkształcalności obudowy obiektów metra na przykładzie stacji A19 Marymont” (2006).

Literatura

- Badania uzupełniające podłoża gruntowego wraz z opracowaniem dokumentacji geologicznej podłoża dla potrzeb wykonania projektów wykonawczych oraz późniejszej realizacji budowy stacji A19 „Marymont” na odcinku metra od hm Z 17958,115 do hm Z 18115,371, 2004. ITB.
- Dłużewski J.M., 1997. Analiza numeryczna współpracy ścian szczelinowych z płytą dolną i podłożem gruntowym. *Inżynieria i Budownictwo* 3: 159–162.
- Dokumentacja geologiczno-inżynierska i hydrogeologiczna dla I linii metra na odcinku od stacji A19 Marymont do stacji A23 Młociny wraz z torami odstawczymi, 2003. Metroprojekt, ITB.
- Grzegorzewicz K., 2005. Projektowanie i wykonywanie ścian szczelinowych. *Geoinżynieria. Drogi mosty tunele* 3: 43–51.
- Rymsza B., Petri R., 1976. Dokumentacja technicznych badań podłoża gruntowego dla metra warszawskiego. Wydział geotechniczny i normowe wartości parametrów. Metroprojekt, Warszawa.
- Wiłun Z., 1974. *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa.
- Wszędyrówny M., 2006. Analiza warunków geologiczno-inżynierskich i odkształcalności obudowy obiektów metra na przykładzie stacji A19 Marymont. Warszawa. Praca magisterska.