

## ANALIZA SIŁ WEWNĘTRZNYCH I PRZEMIESZCZEŃ ROZPIERANEJ ŚCIANY SZCZELINOWEJ

Tomasz Pasik, Eugeniusz Koda

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano zabezpieczenie głębokiego wykopu w postaci rozpieranej ściany szczelinowej na przykładzie planowanej inwestycji przy ulicy Tamka w Warszawie. Przeprowadzono obliczenia sił wewnętrznych i przemieszczeń z wykorzystaniem metod Bluma i modułu reakcji podłoża. Sprawdzone możliwe do wystąpienia stany graniczne nośności i użyteczności. Przeanalizowano także osiadanie powierzchni naziomu i jego wpływ na pobliski obiekt budowlany na podstawie wzorów empirycznych.

**Słowa kluczowe:** głębokie wykopy, ściana szczelinowa, metoda modułu reakcji podłoża, wzory empiryczne

### WSTĘP

Podczas wykonywania ściany szczelinowej nieodłącznym zjawiskiem są jej przemieszczenia, które przyczyniają się również do osiadania naziomu. Zadanie polegające na oszacowaniu rodzaju i zasięgu przemieszczeń powierzchni naziomu jest szczególnie istotne w przypadku gęstej zabudowy miejskiej, gdyż może doprowadzić to do uszkodzenia sąsiednich obiektów budowlanych i w następstwie – do wysokich dodatkowych kosztów inwestycji, wynikających z rozczeń sąsiadów [Wysokiński 2007].

W celu przewidzenia następstw, wynikających z zabezpieczenia planowanego wykopu, zrealizowano następujące czynności:

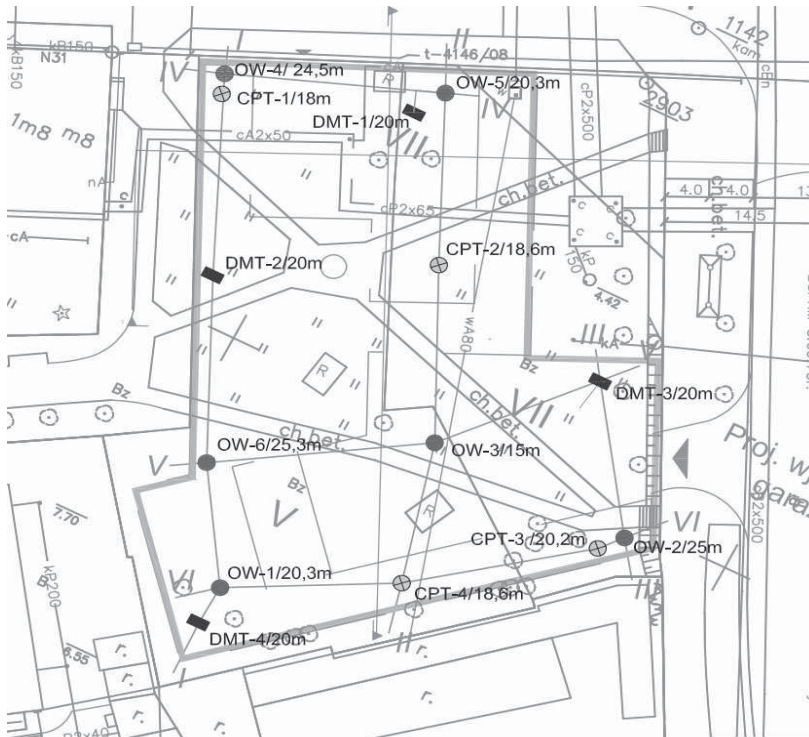
- opracowanie analizowanego przekroju obliczeniowego,
- wybór metody wykonania i zabezpieczenia wykopu,
- zaprojektowanie wymiarów geometrycznych konstrukcji,
- analiza sił wewnętrznych i przemieszczeń z zastosowaniem programu GEO 5 „Ściana Analiza” [FINE 2012] oraz graficzno-analitycznej metody Bluma,
- sprawdzenie warunków stateczności ściany wykopu z zastosowaniem programu GEO 5 i metod klasycznych,
- przeprowadzenie obliczeń osiadania powierzchni naziomu na podstawie wzorów empirycznych.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Tomasz Pasik, Eugeniusz Koda, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159,02-776 Warszawa, e-mail: pasiktomasz@gmail.com; eugeniusz\_koda@sggw.pl

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU I ZAKRES BADAŃ

Zaplanowano obiekt zabudowy wielorodzinnej zlokalizowanej w Warszawie przy ulicy Tamka, w strefie Skarpy Warszawskiej [Bajda i Koda 2013]. Budynek będzie składał się z 8 kondygnacji nadziemnych w części wyższej i 5 kondygnacji w części niższej oraz 2 kondygnacji podziemnych. Na potrzeby projektowania i realizacji wykonano dokumentację geologiczno-inżynierską [Koda i in. 2012b] na podstawie badań terenowych (rys. 1): 6 wierceń badawczych, 4 sondowań CPT, 4 sondowań DMT oraz badań laboratoryjnych (właściwości fizycznych gruntów, ściśliwości w edometrze i wytrzymałości na ścinanie w aparacie trójosiowym). Do analizy pracy ściany szczelinowej wybrano przekrój obliczeniowy pokazany na rysunku 2. W rozpatrywanym podłożu wydzielono warstwy geotechniczne przedstawione w tabeli 1. W kontekście projektowania planowanego obiektu, równoległe z rozpoznaniem podłoża, przeprowadzono szczegółową inwentaryzację stanu technicznego najbliższych istniejących obiektów budowlanych i zaproponowano monitoring przemieszczeń w fazie realizacji wykopu i budynku [Koda i in. 2012a].



Rys. 1. Lokalizacja miejsc wierceń i sondowań geotechnicznych [Koda i in. 2012b]  
 Fig. 1. Location of drilling and geotechnical tests



Tabela 1. Wydzielone warstwy geotechniczne [Koda i in. 2012b]  
Table 1. Separate of geotechnical layers

Opis wydzielonych warstw geotechnicznych Description of geotechnical layers	Parametry gruntu Soil parameters
Warstwa geotechniczna I – warstwa ilów jeziornych plicenu, wykształconych jako ily i ily pylaste, bezwęglanowe. Grunty w stanie twardoplastycznym i półzwartym (stopień plastyczności $I_L = 0-0,05$ , lokalnie $I_L < 0$ ).	$\gamma = 21 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ $\phi' = 19^\circ$ $c' = 11 \text{ kPa}$
Warstwa geotechniczna III – zbudowana z piasków różnej granulacji z przelawieniami piasków gliniastych i pyłów. Warstwa ta stanowi przypowierzchniowy, nieciągły poziom wodonośny. Grunty w stanie średnio zagęszczonym (stopień zagęszczenia $I_D = 0,35-0,45$ ).	$\gamma = 19,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ $\phi' = 30^\circ$
Warstwa geotechniczna IV – zbudowana z glin pylastych (deluwialno-koluwalnych), glin piaszczystych i piasków gliniastych z domieszką substancji humusowej. Depozycja tej warstwy przebiegała prawdopodobnie bardziej intensywnie w obrębie stożka napływowego „ulicy Tamka” niż w sąsiednich strefach podnóża skarpy. W profilu wiercenia obserwowane sączenia wody ze ścian otworu. Grunty te są w stanie twardoplastycznym na pograniczu plastycznego (stopień plastyczności $I_L = 0,20-0,25$ ).	$\gamma = 22 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ $\phi' = 14^\circ$ $c' = 15 \text{ kPa}$
Warstwa geotechniczna V – najmłodsza z wydzielonych warstw, stanowi ją seria gliniastych utworów nasypowych, gruntowo-gruzowych, w przypowierzchniowej strefie z humusem, w stanie plastycznym (stopień plastyczności $I_L = 0,25-0,35$ ).	$\gamma = 22 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ $\phi' = 14^\circ$ $c' = 10 \text{ kPa}$

## METODYKA OBLICZEŃ

Aby poprawnie zaprojektować obudowę głębokiego wykopu, należy jego wykonanie dokładnie zaplanować, dzieląc roboty na poszczególne fazy, dla których zmieniają się warunki statyczne. Zaproponowano zabezpieczenie głębokiego wykopu rozporami stalowymi. Prace powinny być wykonane w następujących fazach (rys. 3):

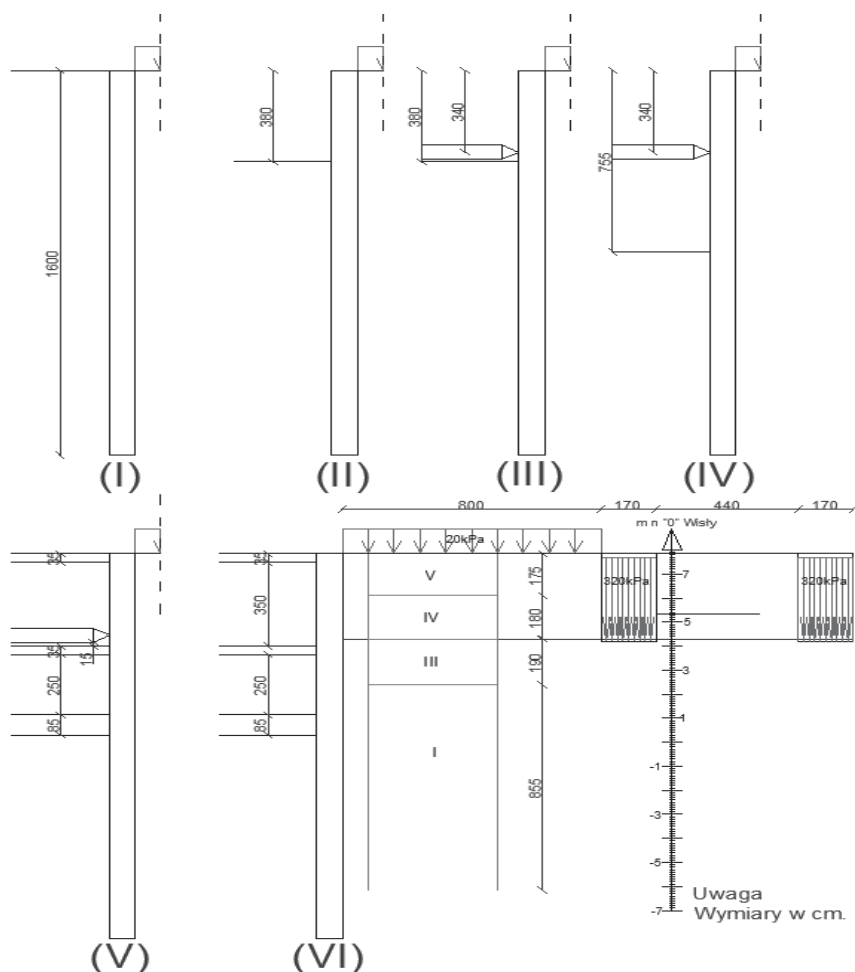
- I. Wykonanie obudowy z powierzchni terenu w technologii ściany szczelinowej.
- II. Wykonanie wykopu na głębokość 3,8 m.
- III. Instalacja rozpór na głębokości 3,4 m.
- VI. Wykonanie wykopu do głębokości docelowej 7,55 m.
- V. Wykonanie płyty dennej oraz stropów kondygnacji podziemnych.
- VI. Demontaż rozpór.

W niniejszej pracy analizowano fazy od II do IV, z uwagi na fakt, że są one newralgiczne pod względem analizy statycznej.

Przez wiele lat do analizy konstrukcji oporowych używano założenia normy PN-83/B-03010. W ostatnich latach dla rozpieranej ściany szczelinowej dodatkowo należy uwzględnić zalecenia normy Eurokod 7 [PN-EN 1997-1, Wysokiński i in. 2011], według której przede wszystkim należy sprawdzić warunki stateczności zestawione w tabeli 2.

Jedną z klasycznych metod obliczeniowych do wyznaczania sił wewnętrznych jest metoda Bluma. Tok postępowania przy obliczaniu tą metodą dobrze opisują publikacje akademickie, na przykład Krasieński [2007] lub Puła i inni [1999]. Na rysunku 5 przedstawiono schemat obliczenia analizowanej ściany szczelinowej.

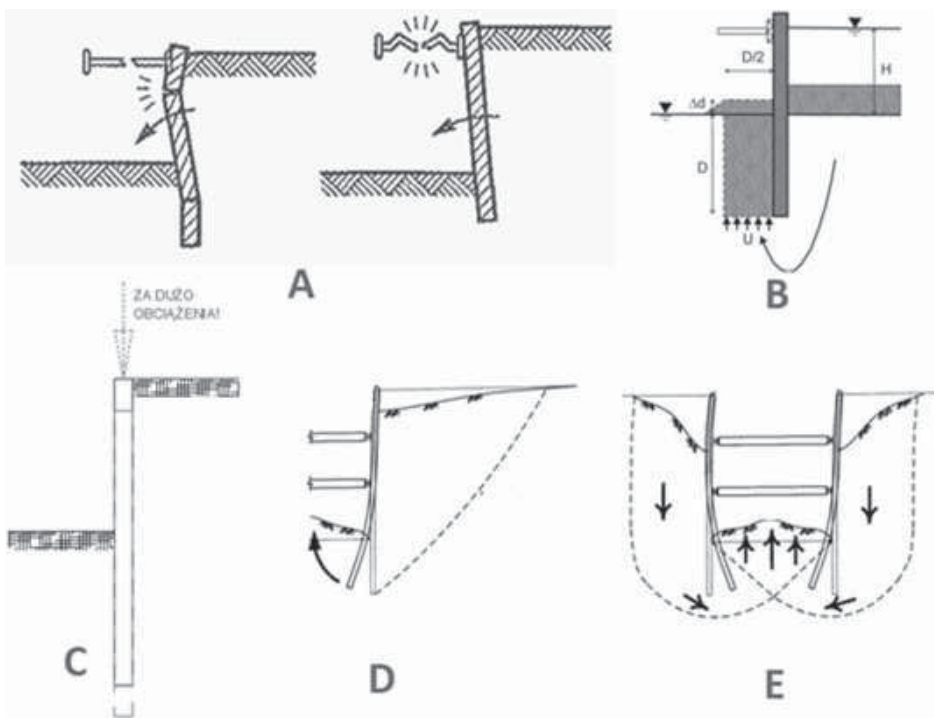
Metoda modułu reakcji podłoża pozwala na uwzględnienie w matematyczny sposób współpracy konstrukcji oporowej z utrzymywanym gruntem, modelując ją jako belkę na podłożu jednoparametrowym Winklera.



Rys. 3. Fazy realizacji kondygnacji podziemnych i posadowienia budynku  
 Fig. 3. Realization phases of the underground floors and foundation of the building

Tabela 2. Stany graniczne nośności  
 Table 2. The ultimate limit states

Opis stanu granicznego Description of ultimate limit states	Typ stanu według Euro-kodu 7 Type of states according to EC7	Symbol na rys. 4 Sign in Fig. 4
Nośność konstrukcji ściany i elementów podpierających	STR	A
Wypiętrzenie lub przebite hydrauliczne	HYD, UPL	B
Utrata nośności gruntu w wyniku działających na ścianę obciążeń pionowych	GEO	C
Utrata stateczności na obrót względem punktu podparcia najniższej rozpory	EQU	D
Stateczność ogólna ściany oporowej	GEO	E



Rys. 4. Stany graniczne nośności dla rozpiętej ściany szczelinowej [PN-EN 1997-1, Ou 2006]  
 Fig. 4. Ultimate limit states for wall protected by struts

Związki różniczkowe dla belki na sprężystym podłożu są analogiczne jak dla zwykłej belki, z wyjątkiem obciążenia ciągłego, które uzupełnić należy członem wynikającym z odporu podłoża  $r(x)$ :

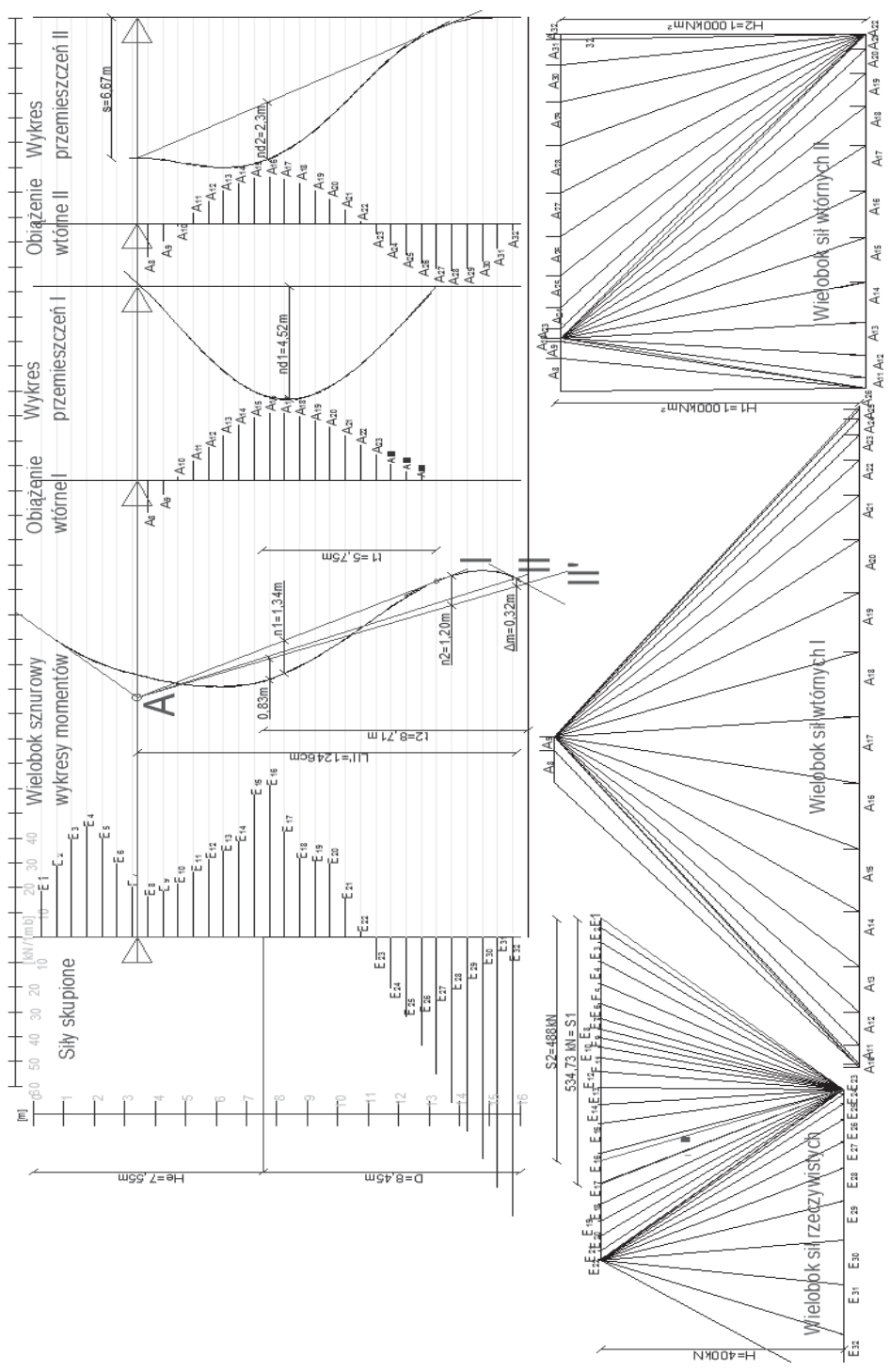
$$EJ \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = g_o(x) - r(x) \quad (1)$$

$$r(x) = b \cdot k \cdot w(x) \quad (2)$$

gdzie:  $EJ$  – sztywność belki,  
 $b$  – szerokość belki,  
 $k$  – współczynnik podatności podłoża,  
 $w(x)$  – funkcja ugięcia belki,  
 $g_o$  – funkcja obciążenia belki.

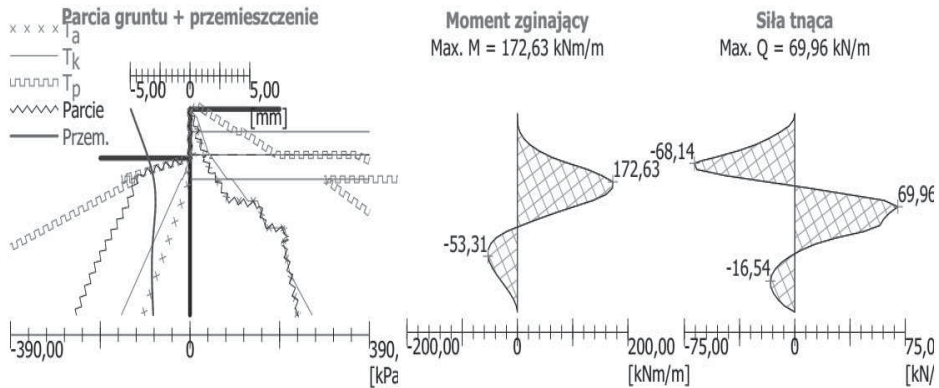
Istotną stałą charakteryzującą współpracę konstrukcji oporowej z gruntem jest współczynnik podatności podłoża  $k_h$  [ $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ ] wyznaczany najczęściej ze wzorów empirycznych opracowywanych przez wielu autorów, przedstawionych m.in. w publikacjach Mitew-Czajewskiej [2005] i Siemieńskiej-Lewandowskiej [2010].





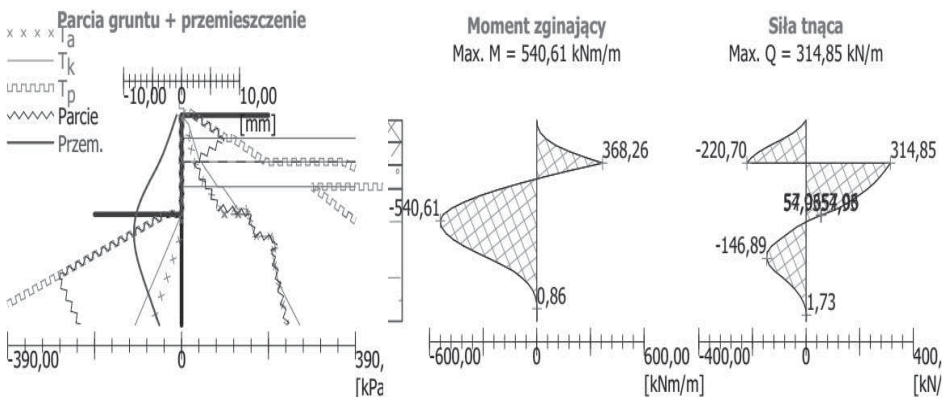
Rys. 5. Obliczenie statyczne analizowanej ściany metodą graniczną Bluma  
 Fig. 5. Static calculation of analyzed wall according to Blum method

Ze względu na pracochłonność rozwiązania równania różniczkowego czwartego rzędu posłużono się programem komputerowym GEO 5 „Ściana Analiza” [FINE 2012]. Wykresy parć, momentów i sił tnących przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Analiza sił wewnętrznych i przemieszczeń ściany szczelinowej dla fazy II wykopu według wzoru Chadeissona [FINE 2012]:  $T_a$  – parcie aktywne,  $T_p$  – parcie pasywne,  $T_k$  – parcie spoczynkowe, Parcie – parcie pośrednie, Przem. – przemieszczenie, Max M – moment zginający, Max Q – siła tnąca

Fig. 6. Analysis of internal forces and displacements of diaphragm wall for phase II according to Chadeisson formula [FINE 2012]:  $T_a$  – active earth pressure,  $T_p$  – passive earth pressure,  $T_k$  – lateral earth pressure, Parcie – indirect earth pressure, Przem. – displacements, Max M – bending moment, Max Q – internal shear force



Rys. 7. Analiza sił wewnętrznych i przemieszczeń ściany szczelinowej dla fazy IV wykopu według wzoru Chadeissona [FINE 2012]; objaśnienia jak pod rysunkiem 6

Fig. 7. Analysis of internal forces and displacements of diaphragm wall for phase IV according to Chadeisson formula [FINE 2012]; legend see Figure 6



Do obliczeń zastosowano współczynniki podatności podłoża:

- według Chadeissona [1961]

$$k_h = \left[ 20 \cdot EJ \cdot \left( \frac{K_p \cdot \gamma \cdot \left( 1 - \frac{K_o}{K_p} \right)^4}{0,015} \right)^{\frac{1}{5}} + A_p \cdot c' \cdot \frac{\operatorname{tgh} \left( \frac{c'}{30} \right)}{0,015} \right] \quad (3)$$

gdzie:  $\gamma$  – ciężar objętościowy gruntu,

$K_p$  – współczynnik parcia biernego,

$K_o$  – współczynnik parcia spoczynkowego,

$c'$  – spójność efektywna,

$A_p$  – współczynnik uwzględniający spójność gruntu (1–15),

$E$  – moduł Younga dla konstrukcji,

$J$  – moment bezwładności przekroju belki,

- według Schmitta [1995]

$$k_h = 2,1 \cdot \left( \frac{E_{oed}^{\frac{4}{3}}}{EJ^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (4)$$

gdzie  $E_{oed}$  – moduł edometryczny.

## WYNIKI OBLICZEŃ SIŁ WEWNĘTRZNYCH I PRZEMIESZCZEŃ ŚCIANY SZCZELINOWEJ

Wyniki obliczeń analizowanej ściany szczelinowej zestawiono w tabeli 3, w której przedstawiono wielkości momentu maksymalnego, maksymalne poziome przemieszczenie ściany, zagłębienie poniżej dna wykopu oraz siłę w rozporze. Obliczenia metodą modułu reakcji podłoża zostały wykonane z zastosowaniem programu GEO 5 „Ściana Analiza” [FINE 2012], w którym zastosowano współczynniki bezpieczeństwa przyjęte na podstawie Eurokodu 7. Do dalszej analizy przemieszczeń wybrano wyniki metody modułu reakcji podłoża według Chadeissona, dla których otrzymano zgodność w momentach z metodą Bluma.

Tabela 3. Wyniki obliczeń analizowanej ściany szczelinowej

Table 3. The calculation results analyzed diaphragm wall

Obliczona wielkość Calculated value	Metoda modułu reakcji podłoża Beam on elastic foundation method				Metoda Bluma Blum method	
	Chadeisson		Schmitt		„podparcie”	„utwierdzenie”
	Faza I	Faza II	Faza I	Faza II	Faza II	Faza II
$M_{\max}$ [kNm·m <sup>-1</sup> ]	172	540,61	169,57	601,6	536	480
$\delta_{hm}$ [mm]	5	8,2	7,2	12,6	3,2	1,6
$D$ [m]	8,45	8,45	8,45	8,45	6,9	10,45
$S$ [kN·m <sup>-1</sup> ]	xxx	535,55	xxx	491,67	534,73	488

### OSIADANIE POWIERZCHNI NAZIOMU

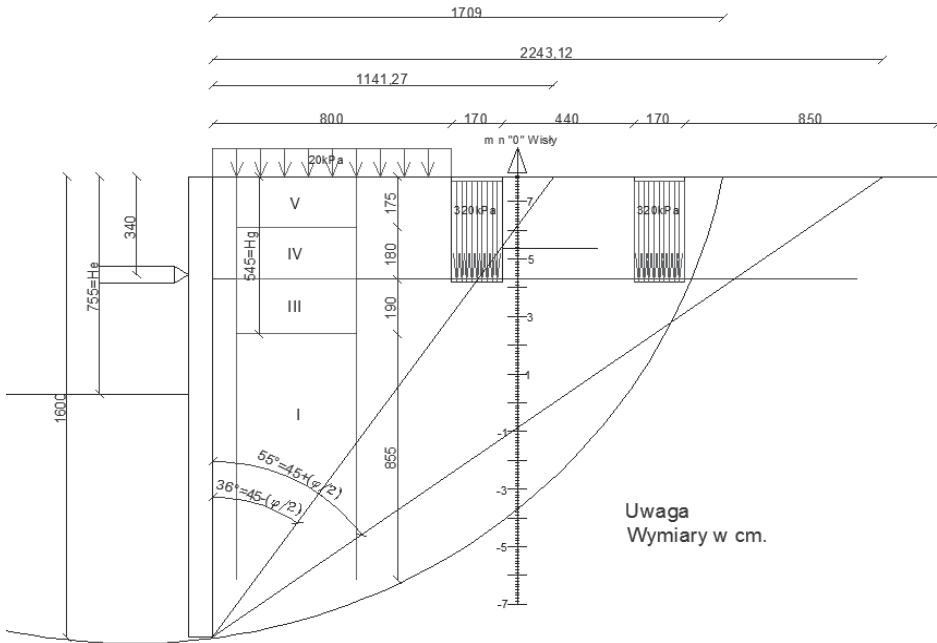
Peck [1969], jako pierwszy, zaproponował metodę do wyznaczenia osiadania naziomu. Wyprowadził nomogram dla różnych typów gruntów, który sporządził na podstawie analizy wsteczne wybranych wykopów w Chicago i Oslo. Następnie Clough i O'Rourke [1990] przedstawili wykresy do oszacowania przemieszczeń pionowych naziomu dla poszczególnych rodzajów gruntów na podstawie analizy wielu przypadków archiwalnych. Z kolei Hsieh i Ou [1998] zaproponowali metodę do wyznaczania osiadania powierzchni naziomu na podstawie charakteru odkształceń (pachwinowe lub wklęsłe osiadanie naziomu), zasięgu oddziaływania wykopu (PIZ) oraz maksymalnego przemieszczenia poziomego ściany.

Wszystkie powyższe metody dobrze opisuje publikacja Ou [2006]. Aby wyznaczyć krzywą osiadania powierzchni naziomu, w pierwszej kolejności określa się maksymalne przemieszczenia poziome ściany szczelinowej oraz zasięg strefy oddziaływania wykopu.

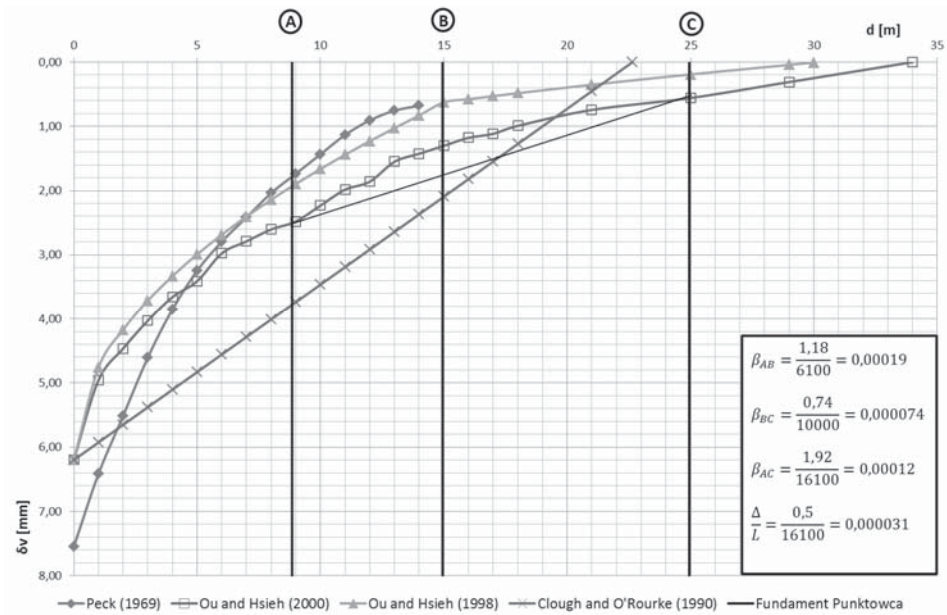
Na rysunku 8 przedstawiono zasięg strefy oddziaływania wykopu na podstawie klinów odłamu lub krzywej poślizgu dla mechanizmu zniszczenia przyjętego z analizy stateczności ogólnej. W literaturze są opisane także inne sposoby dla innych przypadków obliczeniowych [Ou 2006, IBDiM 2010].

Aby ocenić wpływ wykopu na sąsiedni obiekt budowlany, należy przyrównać wartości odkształcenia kąowego ( $\beta$ ) do wartości dopuszczalnych wyznaczonych przez Bjerruma [1963] oraz współczynnik odkształcenia  $\left(\frac{\Delta}{L}\right)$ , do wartości zamieszczonych w pracy na przykład Burlanda i Wrotha [1974].

Na rysunku 9 zestawiono wyniki obliczeń osiadania powierzchni naziomu dla rozpatrywanej ściany z wykorzystaniem metod proponowanych przez różnych autorów. Wyznaczono także współczynnik odkształcenia  $\left(\frac{\Delta}{L}\right)$  i wartości odkształcenia kąowego ( $\beta$ ) dla wykresu Hsieh i Ou [1998], który najlepiej odwzorowuje zachowanie się naziomu według badań przedstawionych w publikacji Ou [2006].



Rys. 8. Strefa oddziaływania wykopu  
Fig. 8. Influence zone of excavation



Rys. 9. Osiadanie powierzchni naziomu  
Fig. 9. Ground surface settlements

## WNIOSKI

1. Otrzymane wyniki sił wewnętrznych i przemieszczeń są tego samego rzędu wielkości, co świadczy o poprawności wykonanych obliczeń i założeń przyjmowanych w poszczególnych metodach.

2. Wielkości przemieszczeń nie przekraczają wartości dopuszczalnych.

3. Do określenia sił wewnętrznych i zagłębienia ściany szczelinowej dobrze sprawdza się metoda graficzna Bluma, której tok obliczeń jest stosunkowo prosty do przeprowadzenia i nie wymaga posiadania specjalistycznego oprogramowania.

4. Nieprawidłowy dobór parametru  $k_h$  prowadzi do rozbieżności wyników przemieszczeń ściany, które w przypadku gęstej zabudowy miejskiej powinny być zweryfikowane, dlatego też zaleca się wówczas dodatkowe analizy z zastosowaniem innych metod, na przykład z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

5. Założenie utwierdzenia dołu ścianki jest niezgodne z rzeczywistością, co zauważono podczas analizy wyników.

6. Godne uwagi są empiryczne metody do oszacowywania osiadania powierzchni naziomu, głównie ze względu na swoją prostotę, jednak wymagają dalszych analiz w inwestycjach na terenie Polski.

7. Istotną kwestią, która determinuje otrzymane wyniki, jest wybór odpowiedniej teorii parcia gruntu. Przy szacowaniu wartości sił wewnętrznych korzysta się zwykle z teorii Rankine'a, z której otrzymuje się większe wartości parcia gruntu i tym samym bezpieczniejsze wyniki. Przy szacowaniu przemieszczeń z wykorzystaniem programów komputerowych korzysta się zwykle z teorii Coulomba, która uwzględnia tarcie gruntu o konstrukcję i zróżnicowany kształt powierzchni naziomu. Dzięki temu wyniki otrzymywane za pomocą tej metody są bliższe rzeczywistości, jednak z mniejszym zapasem bezpieczeństwa.

8. W celu zminimalizowania przemieszczeń, szczególnie w fazie „wspornika” (faza II), można zastosować metodę półstropową lub stropową zabezpieczenia wykopu, które w ostatnich latach dominują przy realizacji inwestycji w centrach dużych aglomeracji miejskich.

## PIŚMIENNICTWO

- Bajda M., Koda E., 2013. Badania geotechniczne do oceny warunków posadowienia w strefach przykrawędziowych Skarpy Warszawskiej. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 60, 126–136.
- Bjerrum L., 1963. Allowable settlement of structures. *Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Weisbaden, Germany* 2, 35–137.
- Burland J.B., Wroth C.P., 1974. Settlement of buildings and associated damage. *Proceedings of Conference on Settlement of Structures*. Pentech Press, London, 611–654.
- Chadeisson R., 1961. Parois continues moulées dans le sols. *Proceedings of the 5th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Dunod, Paris, 2, 563–568.
- Clough G.W., O'Rourke T.D., 1990. Construction-induced movements of in situ wall. *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE Special Publication 25, 439–470.
- FINE Ltd. 2012. *GEO5 – Podręcznik użytkownika*. Wersja 14.

- Hsieh P.G., Ou Ch.Y., 1998. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian Geotechnical Journal* 35 (6), 1004–1017.
- IBDiM, 2010. Seminarium „Ściany szczelinowe”. IBDiM, Warszawa.
- Koda E. i in. 2012a. Ocena wpływu projektowanego budynku wielorodzinnego z garażami podziemnymi przy ulicy Tamka w Warszawie na sąsiednie obiekty budowlane i powierzchnię terenu wraz z obliczeniami stateczności. Maszynopis. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Koda E. i in. 2012b. Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki geologiczno-inżynierskie na potrzeby posadowienia budynku mieszkalnego wielorodzinnego z częścią usługową na parterze i garażami podziemnymi przy ulicy Tamka w Warszawie. Maszynopis. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Kraśniński A., 2007. Pomoce dydaktyczne. Obliczanie i projektowanie ścianek szczelnych. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- Mitew-Czajewska M., 2005. Numerical analysis of displacements of diaphragm wall. Proceedings of the 5th International Symposium TC28. A.A. Balkema, Amsterdam.
- Ou Ch.Y., 2006. Deep Excavation Theory and Practice. Taylor & Francis Group, London.
- Peck R.B., 1969. Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, State-of-the-Art, 225–290.
- PN-83/B-03010 Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 1997-1 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- Puła O., Rybak C., Sarniak W., 1999. Fundamentowanie. Projektowanie posadowień. DWE, Wrocław.
- Schmitt P., 1995. Estimating the coefficient of subgrade reaction for diaphragm wall and sheet pile wall design (in French). *Revue Française de Géotechnique* 71, 3–10.
- Siemieńska-Lewandowska A., 2011. Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. WKŁ, Warszawa.
- Wysokiński L., 2007. Błędy systematyczne w rozpoznawaniu geotechnicznym i ich wpływ na projektowanie budowlane. XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje.
- Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T., 2011. Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. ITB, Warszawa.

## ANALYSIS OF INTERNAL FORCES AND DISPLACEMENTS OF THE DIAPHRAGM WALL WITH STRUTS

**Abstract.** The paper analyses solutions of deep excavation by diaphragm wall with struts on the example of planned investment on the Tamka street in Warsaw. Conducted calculation of the internal forces and displacements using the Blum and beam on elastic foundation methods. Possible ultimate limit states were verified. Analyze of ground surface settlement and its impact on adjacent building based on empirical formulas was also done.

**Key words:** deep excavations, diaphragm wall, beam on elastic foundation method, empirical formulas

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.12.2013