

## SPOSÓB ZABEZPIECZENIA ZABYTKOWEGO MURU OPOROWEGO

Jerzy SĘKOWSKI, Bartosz PIOTROWICZ  
Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

**Słowa kluczowe:** *wzgórze, skarpa, mur oporowy, stateczność, zabezpieczenie, pale CFA.*

### 1. Wprowadzenie

Skarpy narażone są m.in. na niekorzystne wpływy warunków atmosferycznych, a w szczególności długotrwałe i intensywne opady deszczu. W ich następstwie mogą wytworzyć się powierzchnie poślizgu na stropie gruntów nieprzepuszczalnych lub skał i w konsekwencji osuwiska (np.[3,4]). Miały one m.in. miejsce w Polsce w następstwie powodzi w 2010 roku, zagrażając ludziom i zabudowaniom (np. [2]).

Projektanci, dysponując różnorodnymi rozwiązaniami, coraz większą uwagę zwracają na zabezpieczenia zagrożonych skarp. Takie zagadnienie jest też przedmiotem artykułu, w którym przedstawiono zabezpieczenie zagrożonego utratą stateczności zabytkowego muru oporowego Wzgórza Zamkowego w jednym z polskich miast palisadą z pali CFA. Jest to jedna z możliwych i merytorycznie uzasadnionych koncepcji rozwiązania problemu.

Najprostszym i skutecznym sposobem poprawienia stateczności skarpy jest wykonanie odpowiedniego odwodnienia terenu. Nie zawsze jest to jednak warunek wystarczający. Konieczne może być wówczas wykonanie dodatkowych prac lub konstrukcji zabezpieczających skarpy, którymi mogą być m.in. [1]:

- odpowiednie ukształtowanie skarpy,
- pokrycie skarpy roślinnością,
- przypory dociążające,
- kotwy, gwoździe,
- konstrukcje oporowe,
- rozwiązania z wykorzystaniem systemów geokomórkowych, gabionów, geosiatek, a także pali i kolumn iniekcyjnych.

### 2. Charakterystyka Wzgórza Zamkowego

#### 2.1. Informacje ogólne

Wzgórze Zamkowe znajduje się w centralnej części miasta. Wokół niego przebiegają ruchliwe ulice. W odległości około 50 m po stronie północnej i zachodniej Wzgórza, przepływa rzeka. Różnice wysokości pomiędzy poziomem dziedzińca zamku usytuowanego na Wzgórzu a poziomem terenu od strony północnej, zachodniej

i wschodniej pokonywane są dzięki naturalnemu zboczowi o nachyleniu około 40°(rys. 1). Od strony południowej skarpę Wzgórza zabezpiecza mur oporowy, graniczący bezpośrednio z chodnikiem ulokowanym wzdłuż dwupasmowej, dwukierunkowej ulicy o dużym natężeniu ruchu samochodów osobowych i ciężarowych, przecinającej pobliską rzekę.



Rys. 1. Fragment Wzgórza Zamkowego z widocznym zboczem od strony północnej.  
Fig. 1. A fragment of the Castle Hill with the visible slope from the north.

Kształt i wielkość Wzgórza ulegała zmianom, a ich główną przyczyną była przepływająca obok rzeka. Według najstarszych udokumentowanych informacji już w XI wieku istniała tu niewielka osada rolnicza, która uległa spaleniowi na przełomie XI i XII wieku. Po pożarze na Wzgórze został ulokowany gród. W tym okresie wzniesiony został również drewniany zamek, będący siedzibą kasztelana. W 1241 roku rozpoczęta została budowa wieży zamkowej. Zostały też wzniesione mury obronne, których fragmenty zachowały się do dzisiaj. O ostatecznym kształcie wzgórza przesądziły dwie wielkie powodzie w 1805 i 1813 roku. Sprawily one, że część wzgórza wraz z zabudowaniami została zabrana przez wodę. Zmianie uległo też usytuowanie koryta rzeki, „przesuwając się” znacznie bliżej Wzgórza. Również powodzie w 1997 oraz 2010 roku odcisnęły na Wzgórze swoje piętno, przyczyniając się do powstania ruchów osuwiskowych. Jedną z znanych firm z terenu Śląska opracowała projekt zabezpieczenia Wzgórza Zamkowego od strony północnej, wschodniej i zachodniej za pomocą kotew gruntowych oraz wykonując zabezpieczenia powierzchniowe w postaci siatki. Część północno-zachodnią wzgórza, znajdująca się w najbliższym sąsiedztwie rzeki została już zabezpieczona (rys. 2).



Rys. 2. Wykonywanie kotew gruntowych na Wzgórzu Zamkowym (zdjęcie: B. Piotrowicz).  
Fig. 2. Installing ground anchors on the Castle Hill (photo by B. Piotrowicz).

Wszystkie obiekty znajdujące się na Wzgórzu, w tym mur oporowy od strony wspomnianej ulicy, podlegają opiece Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków.

## 2.2. Mur oporowy

Mur oporowy (rys. 3) przebiega wzdłuż ruchliwej ulicy. Lekko zakrzywiony w planie, zabezpiecza zbocze wzgórza, na którym znajduje się kompleks zamkowy. Wybudowano go w latach 1924-1928 z prefabrykowanych bloków o wymiarach 22 x 59 x 30 cm, z zaprawy, piasku i otoczaków, połączonych ze sobą spoinami z zaprawy cementowej. Długość muru wynosi około 39,7 m, a jego wysokość (zmieniająca się skokowo) liczona od poziomu drogi do górnej krawędzi od 1,44 do 4,70 m.



Rys. 3. Mur oporowy od strony ulicy (zdjęcie: B. Piotrowicz).  
Fig. 3. The retaining wall from the street side (photo by B. Piotrowicz).

### 3.Zabezpieczenie skarpy Wzgórza Zamkowego

#### 3.1. Analiza problemu, przeprowadzone badania

Podczas powodzi w 2010 roku w istniejącej konstrukcji oporowej pojawiły się liczne pęknięcia, odspojenia i zarysowania. Przyczyną tego stanu rzeczy mogło być oddziaływanie wód opadowych na konstrukcję. Woda wypełniając pustki między murem a gruntem spowodowała osłabienie materiałów, z których wykonano mur oporowy, jak również w znaczący sposób mogła spowodować wzrost sił oddziałujących na konstrukcję. Dokonano wizji lokalnej oraz wykonano odkrywki zmierzając do określenia faktycznego stanu konstrukcji. Poza pęknięciami i zarysowaniami zauważono również ruchy osuwiskowe po stronie wyższego naziomu. Istniejące zniszczenia muru oporowego przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys.4. Pęknięcie wzdłużne  
(zdjęcie: B. Piotrowicz).  
Fig. 4. Longitudinal crack  
(photo by B. Piotrowicz).



Rys. 5. Odspojenie poprzeczne  
(zdjęcie: B. Piotrowicz).  
Fig. 5. Transverse debonding  
(photo by B. Piotrowicz).

W celu zinventaryzowania muru wykonano trzy odkrywki [5]. Dwie zlokalizowane zostały za murem oporowym po stronie wyższego naziomu, trzecia po stronie niższego naziomu. Okazało się, że poziom posadowienia muru wynosi około 1,55 m poniżej poziomu chodnika, biegnącego wzdłuż ulicy. Od strony wyższego naziomu mur jest pionowy, natomiast od strony niższego naziomu nachylony do pionu pod kątem około 9 stopni. Kształt muru oporowego został przedstawiony na rys. 6. Na podstawie wyników oględzin oraz wykonanych badań (w tym materiałowych) z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że konstrukcja w tym stanie może zagrażać bezpieczeństwu ludzi, pojazdów i zabudowań usytuowanych na wzgórzu.

Autorzy dysponując udostępnionymi danymi wykonali obliczenia stateczności

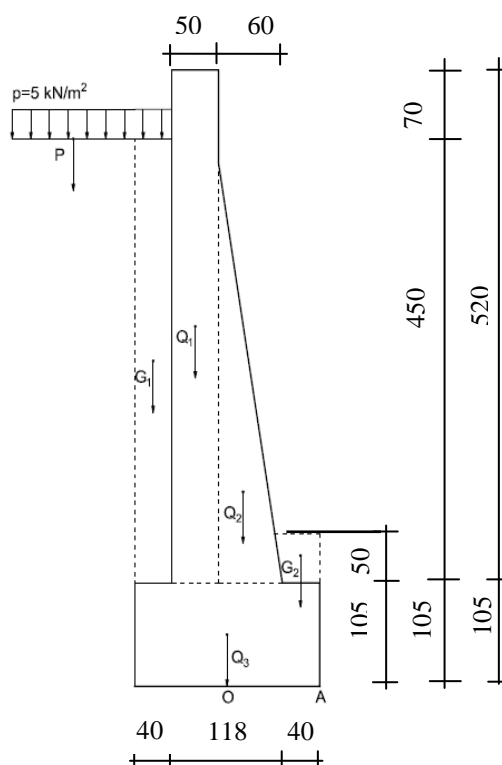
istniejącego muru oporowego i przeanalizowali jedną z koncepcji zabezpieczenia fragmentu Wzgórza Zamkowego.

### 3.2. Analiza stateczności skarpy

W analizie stateczności skarpy Wzgórza Zamkowego założono brak odporu gruntu po stronie niższego naziomu, dopuszczając tym samym, co jest uproszczeniem, pełne odkopanie muru na pewnym odcinku w trakcie np. prowadzonych prac remontowych. Obliczenia stateczności wykonano dla przekroju, w którym mur oporowy jest najwyższy (rys. 3), uwzględniając parcie od strony Wzgórza i zabudowań.

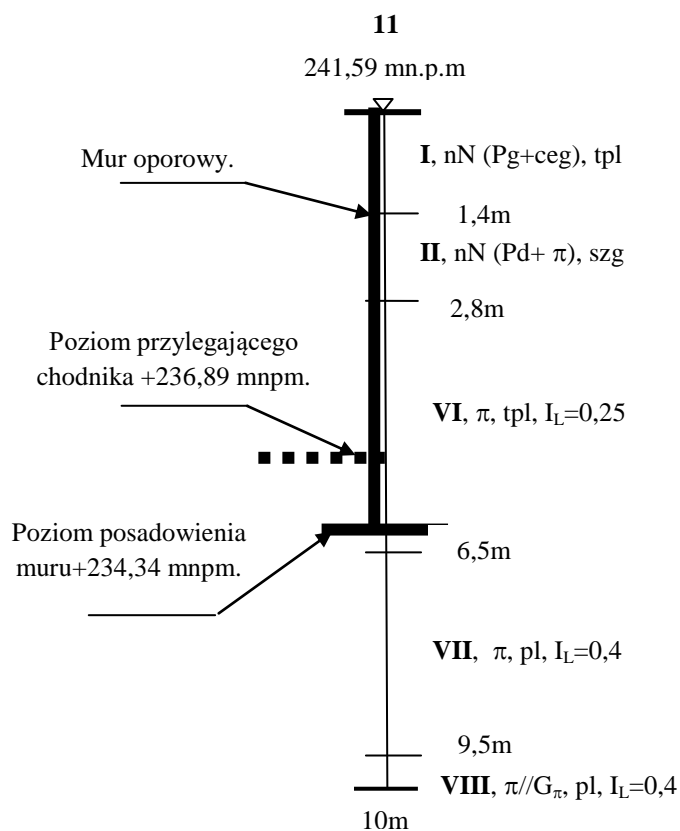
Dla potrzeb prowadzonej analizy przyjęto:

- mur z betonu klasy C12/16 ( $f_{ck}=12$  MPa,  $\gamma_m = 22,63$  kN/m<sup>3</sup>),
- parametry geometryczne muru jak na rys.6,
- parametry geotechniczne warstw gruntów występujących w górnej części profilu otworu nr 11 i uwzględnionych w obliczeniach (rys.7) uzyskane z [5], (tabela 1 i 2),
- obciążenie użytkowe (5 kN/m<sup>2</sup>),
- obciążenie od pobliskich zabudowań (zamku) - 274 kN/m szerokości.



Rys. 6. Parametry geometryczne muru oporowego (w [cm]) i zestawienie obciążeń pionowych.

Fig. 6. The geometric parameters of the retaining wall (in [cm]) and a specification of the vertical loads.



Rys. 7. Profil geotechniczny otworu nr 11 na tle zarysu ściany oporowej.  
Fig. 7. A profile of geotechnical hole no. 11 against an outline of the retaining wall.

Tabela 1. Wartości charakterystyczne parametrów gruntowych ( $X^{(n)}$ ).

Nr warstwy	Opis gruntów	$I_D$	$I_L$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	w [%]	$\Phi$ [°]	c [kPa]	$M_0$ [MPa]
I	nN (Pg+ ceg.)	-	tpl	22,0	9	18,0	5,0	-
II	nN (Pd + π)	szg	-	16,5	6	25,0	-	-
VI.	Pył (π)	-	0,2	20,5	22	15,0	18,0	22

Tabela 2. Wartości obliczeniowe parametrów gruntowych ( $X^{(r)}$ ).

Nr warstwy	Opis gruntów	$\gamma_{\max}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\min}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\Phi_{\max}$ [°]	$\Phi_{\min}$ [°]	$c_{\min}$ [kPa]
I	nN (Pg+ cegła)	24,2	19,8	19,8	16,2	4,5
II	nN (Pd + $\pi$ )	18,2	14,8	27,5	22,5	-
VI	Pył ( $\pi$ )	22,6	18,5	16,3	13,3	16,2

Dla przyjętych założeń i zestawionych powyżej wartości parametrów wykonano obliczenia stateczności ogólnej skarpy i muru oporowego metodą Felleniusa-Pattersona, przy pomocy programu obliczeniowego MMGEO. Jak należało się spodziewać warunek pozostał niespełniony ( $F=1,038$ ). Obliczenia z uwzględnieniem stanu rzeczywistego, przy nieodkopanym murze od strony ulicy, wykazałyco prawda jego stateczność ogólną ( $F=1,57$ ), jednakże na poziomie bliskim dopuszczalnego.

#### 4. Proponowana koncepcja zabezpieczenia skarpy

##### 4.1. Uwagi ogólne

O koncepcji zabezpieczenia istniejącego muru oporowego przez konstrukcję odciążającą pracującą wspornikowo, bez wprowadzenia rozpór czy zakotwień, przesądziła decyzja Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków w Katowicach, który nie wyraził zgody na zmianę parametrów materiałowych i estetycznych istniejącej konstrukcji.

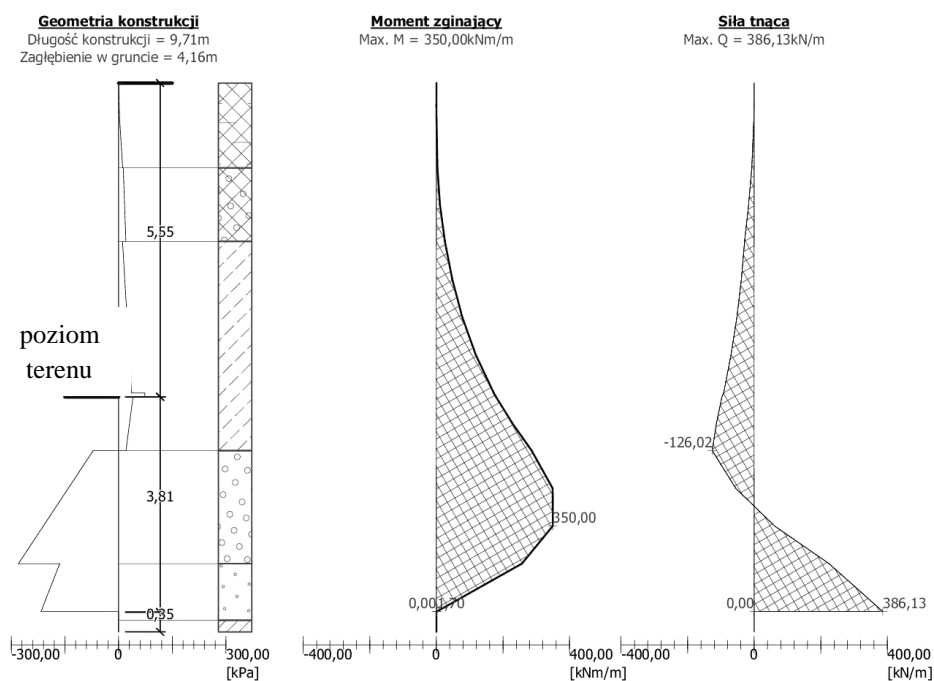
Autorzy przeanalizowali koncepcję zabezpieczenia muru palisadą oporową z pali CFA. Obliczenia numeryczne skutkujące m.in. doбором niezbędnego zagłębienia ściany wykonano w programie GEO5 „ściana analiza”, w którym metodyka prowadzonych obliczeń oparta jest na metodzie modułu reakcji podłoża. Metoda ta uwzględnia w modelu obliczeniowym nieliniowe zachowanie się gruntu oraz jego współpracę ze ścianą oporową. W obliczeniach, analogicznie do modelu Winklera, wykorzystywany jest model jednoparametrowy, który zakłada zależność osiadania powierzchni sprężystego podłoża od obciążenia jednostkowego. Stąd zakłada się, że działanie gruntu na ścianę można zastąpić układem niezależnych podpór sprężystych o współczynnikach sztywności  $k_h$ . Istnieje kilka metod wyznaczania sztywności podpór sprężystych  $k_h$ . W przeprowadzonych obliczeniach z dostępnych w programie metod wyznaczania sztywności  $k_h$  wybrano metodę iteracyjną Schmitt'a.

##### 4.2. Założenia projektowe, wybrane wyniki obliczeń

Projektowana konstrukcja powinna przenieść całość sił wynikających z parcia gruntu. W obliczeniach przyjęto zmienną długość pali w zależności od ich położenia. Bezpośrednim obliczeniom poddane zostały dwa przekroje. Jeden o największej, drugi o najmniejszej różnicy poziomów. Wstępnie założone długości pali wynosiły odpowiednio 10 i 7 m, a ich zakotwienie odpowiednio 5 i 3 m. Długości pali w projektowanej palisadzie, na łącznej długości 39,7 m, dobrane zostały w wyniku interpolacji. W celu zapewnienia współpracy między palami palisada zostanie zwieńczona żelbetową belką.

Palisadę ze względu na to, że będzie formowana z pali CFA wykonywanych bez rur, traktuje się jako szorstką, przyjmując kąt tarcia o ścianę z PN-83/B-03010 [6] – tabela 2, wstępna długość ściany 10 m. Przyjęto obciążenie naziomu 5kPa i uwzględniono oddziaływanie zabudowy zamku – 274 kN/m szerokości.

Po obliczeniu wartości jednostkowych parć i odporów gruntu na istniejącą ścianę oporową dla przekroju o największej i najmniejszej różnicy poziomów określono sztywności podpór  $k_x$  po czym, wykorzystując program Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012, obliczono momenty zginające w ścianie oporowej. Wyniki przedstawiono w postaci wartości momentów zginających i sił ścinających oraz koniecznej długości zagłębienia ściany oporowej oraz jej łączną długość dla obydwu przypadków zestawiono na rys. 8 i 9.



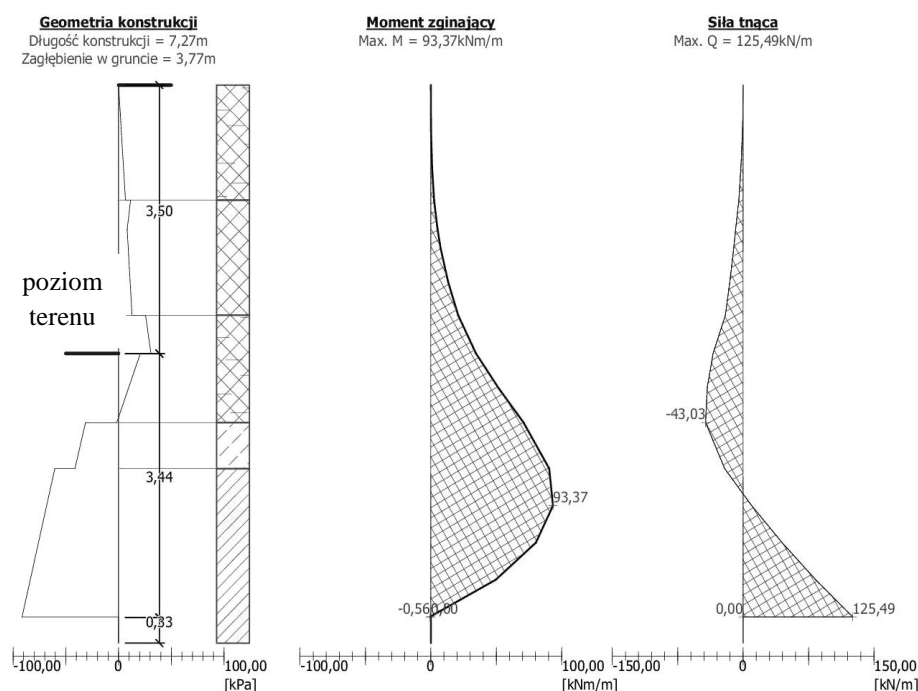
Rys. 8. Wyniki obliczeń ściany oporowej o wstępnie założonej wysokości 10 m (konieczna długość zagłębienia, momenty zginające i siły tnące).

Fig. 8. The results of calculations of the retaining wall of a pre-established height of 10 m (necessary depth of foundation, bending moments and shear forces).

W przypadku ściany oporowej o wstępnie założonej wysokości 10 m (rys. 8) maksymalna wartość siły tnącej wynosi 386,13 kN/m, maksymalny moment zginający 350 kNm/m, wymagane zagłębienie konstrukcji w gruncie 4,16 m, a jej całkowita długość 9,71 m.

Natomiast te same wartości dla ściany oporowej o wstępnie założonej wysokości 7 m (rys. 9) wynoszą odpowiednio: 125,49 kN/m ; 93,37 kNm/m ; 3,77m i 7,27 m.





Rys. 9. Wyniki obliczeń ściany oporowej o wstępnie założonej wysokości 7 m (konieczna długość zagłębienia, momenty zginające i siły tnące).

Fig. 9. The results of calculations of the retaining wall of a pre-established height of 7 m (necessary depth of foundation, bending moments and shear forces).

Punktem wyjścia dla obliczenia zbrojenia palisady, a ściślej tworzących ją pali, są wartości momentów zginających od parcia gruntu na konstrukcję (rys. 8 i 9). Po przyjęciu dla całej palisady większego z nich  $M_{SD}=350$  kNm/m, obliczonego dla charakterystycznych wartości parametrów gruntu i powiększonego do wartości obliczeniowej według wzoru

$$M^o_{SD}=M_{SD} * g_{f1} * g_{f2},$$

gdzie:  $M_{SD}$  – charakterystyczna wartość momentu zginającego,  $g_{f1}$  – współczynnik obciążenia przyjmowany wg tabl. 10 w normie [8],  $g_{f2}$  – współczynnik obciążenia równy: 1,0 w obliczeniach stanów granicznych gruntu lub 1,1 (0,9) w obliczeniach stanów granicznych konstrukcji ściany oporowej, otrzymujemy

$$M^o_{SD} = 350 \text{ kNm/m} * 1,25 * 1,1 = 481,25 \text{ kNm/m}.$$

Palisadę współtworzyć będą pale CFA o średnicy  $\varnothing 60$  cm, wykonane z betonu klasy C30/37 i zbrojone prętami stalowymi wykonanymi ze stali RB500 (łącznie to 46 sztuk o długościach od 7,3 do 10 m, w sumie 405,8m). Tym samym obciążenie przypadające na pojedynczy pał uzyskujemy w wyniku pomnożenia wartości momentu zginającego przypadającego na metr konstrukcji przez średnicę pala, czyli

$$M_{SD\emptyset}^o = M_{SD}^o * \emptyset = 481,25 \text{ kNm/m} * 0,6 \text{ m} = 288,75 \text{ kNm/pal.}$$

Wykorzystując jeden z dostępnych programów obliczeniowych określono zbrojenie główne pali w postaci 14Ø20 i długości dostosowanej do ich wysokości oraz zbrojenie pomocnicze (uzwojenie) w postaci prętów Ø10 w rozstawie co 100 mm.

## 5. Zakończenie

Przedstawiona propozycja jest przykładem praktycznego wykorzystania pali, w formie palisady do zabezpieczenia stateczności skarpy wysokiego nasypu bez konieczności rozbiórki i naprawy podtrzymującego ją przez wiele lat zabytkowego muru oporowego. Rozwiązanie jest w dodatku uzasadnione tym, że spełnia w istotny sposób wymagania konserwatora zabytków, nie ograniczając jednocześnie funkcjonowania ważnej i przelotowej trasy drogowej. Palisadę współtworzyć będą pale CFA o średnicy Ø60 cm, wykonane z betonu klasy C30/37, zbrojone prętami stalowymi ze stali RB500 w liczbie 46 sztuk o długościach od 7,3 do 10 m i łącznej długości 405,8 m. Przedstawione rozwiązanie pozostaje alternatywne w stosunku do podobnych, lecz wykorzystujących kolumny wykonane w technologii iniekcji strumieniowej lub pale wiercone. Współczesna geotechnika umożliwia rozwiązywanie wielu trudnych problemów inżynierskich, w tym zabezpieczenia skarp.

## Oznaczenia symboli

- $I_D$  – stopień zagęszczenia, density index, [-],
- $I_L$  – stopień plastyczności, liquidity index, [-],
- $\gamma$  – ciężar objętościowy, volumetric weight, [ $\text{N/m}^3$ ],
- $w$  – wilgotność naturalna, natural water content, [%],
- $\Phi$  – kąt tarcia wewnętrznego, angle of internal friction, [ $^\circ$ ],
- $c$  – spójność, cohesion, [Pa],
- $M_0$  – edometryczny moduł ściśliwości, constrained modulus, [Pa].

## Literatura

- [1] Dąbska A., Pisarczyk St.: Karpackie osuwiska fliszowe i metody ich stabilizacji. Prace Naukowe, Inżynieria Środowiska, z. 66., Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013, s. 21-55.
- [2] Mazurek J., Cała M.: Warunki rozprzestrzeniania się osuwiska zagrażającemu budynkowi mieszkalnemu. Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 35, zeszyt 2, Wyd. AGH, Kraków, 2011, s. 433-440.
- [3] Obrycki M., Pisarczyk S., Wybrane zagadnienia z fundamentowania. Przykłady obliczeniowe, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1998
- [4] Wiłun Z., Zarys geotechniki, Wyd. 3, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2010.
- [5] Dokumentacja geotechniczna wzgórze zamkowe, Gliwice, 2011.
- [6] PN-83/B-03010. Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [7] PN-81/B-03020. Grunty budowlane Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.

[8] PN-84/B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczeniastatyczne i projektowanie.

## **PROTECTION METHOD FOR A HISTORICAL RETAINING WALL**

### **Summary**

The paper presents a concept of protection of a historical retaining wall located at the top of Castle Hill slope by means of a load-reducing pile wall. The detailed description of the proposal has been preceded by a short overview of the Castle Hill history, its stability problems and applied solutions.

A secant pile wall has been chosen as the method of protection for the historical retaining wall. It consisted of CFA piles 60 cm in diameter and of variable (7.3-10 m) length. The pile depth has been estimated with the use of computer program GEO5 Sheeting Design, in which the method of modulus of subsoil reaction is used. To determine the magnitudes of stiffness coefficients for elastic support the iteration method by Schmitt has been chosen.

