CZASOPISMO TECHNICZNE A
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 4-A/2007
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6271

STANISŁAW KARCZMARCZYK*

WSPÓŁCZESNE MATERIAŁY I TECHNOLOGIE W ZASTOSOWANIACH DO STABILIZACJI ZBOCZY I MURÓW OPOROWYCH NA WAWELU W KRAKOWIE

MODERN BUILDING MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR STABILIZING SLOPES AND RETAINING WALLS ON THE WAWEL HILL IN KRAKÓW

Streszczenie

W niniejszym artykule omówiono zainstalowanie geowłóknin i geosiatek do zabezpieczenia i stabilizacji stromych zboczy Wzgórza Wawelskiego. Podano również indywidualny sposób zabezpieczenia i wzmocnienia historycznych murów oporowych za pomocą kątowych konstrukcji odciążających spełniających konserwatorski warunek odwracalności wykonanych zabezpieczeń.

Słowa kluczowe: stabilizacja zboczy, geowłókniny, mury oporowe

Abstract

The article discusses the application of geosynthetics and geogrides to protect and stabilize the steep slopes of the Wawel Hill. It also presents an individual method of protecting and reinforcing historical retaining walls by means of angular discharging structures. The reinforcement applied is reversible which is in accordance with the requirements for conserving historical monuments.

Keywords: slope stabilization, geosynthetics, retaining walls

* Dr inż. Stanisław Karczmarczyk, Instytut Projektowania Budowlanego, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

W publikacjach dotyczących problemów budowlanych i konserwatorskich związanych z odnową i konserwacją Zamku Królewskiego na Wawelu w Krakowie przewijają się najczęściej zagadnienia konserwacji i ochrony historycznych budynków i reliktów archeologicznych. Jednym z istotnych problemów konserwatorskich Wzgórza Wawelskiego, wyniesionego ponad 20 metrów w stosunku do otaczającego terenu, są jego strome zbocza i konstrukcje oporowe spełniające w przeszłości funkcje obronne. Wyniesienie Wzgórza Wawelskiego w stosunku do otaczającego terenu tworzy skała wapienna, natomiast górna powierzchnia wzgórza została uformowana na przestrzeni co najmniej ostatniego tysiąclecia jako nasyp kulturowy. Było to następstwem tworzenia kolejnych ziemnych obwarowań obronnych i bogatej działalności budowlanej.

Szczególnie intensywne działania budowlane prowadzono w drugiej połowie XIX stulecia, kiedy to zaborca austriacki po zajęciu Wawelu w 1846 r. wyburzył kościoły i budynki o łącznej kubaturze ponad 70 tysięcy metrów sześciennych. Równolegle podjęto prace przy wznoszeniu bastionów obronnych i budynku lazaretu (obecny budynek nr 9).

Skutkiem takiej działalności budowlanej była duża ilość gruzu i odpadów. Odkładano je na zboczach, powiększając przy okazji powierzchnię wzgórza. Jednym z miejsc intensywnego gromadzenia odpadów budowlanych były zbocza północne rozciągające się od bastionu Kościuszki do baszty Zygmunta III. Kolejną fazą prac powodujących duże ilości gruzu i odpadów była odnowa Wawelu podjęta po 1905 r. przez Hendla i kontynuowana po 1918 r. przez Szyszko-Bohusza. W tym okresie pojawiło się również wiele materiału odpadowego związanego z prowadzonymi badaniami architektonicznymi i archeologicznymi. W następstwie opisanych działań na stoku północnym uformowała się warstwa nasypu o miąższości od 4,0 do 4,5 m. Pod warstwą tych nasypów znajduje się zwietrzelina skalna i skała wapienna sprzyjająca filtracji wód podziemnych.

Odkładane na północnym stoku nasypy spowodowały między innymi istotne zmiany obciążenia muru oporowego wzdłuż podejścia od strony ulicy Kanoniczej. Zjawisko abrazji spowodowało również zasypanie pierwotnej ścieżki straży wyznaczającej wysokość obciążenia naziomem, a ponadto spełniającej funkcję powierzchniowego odwodnienia. Luźny nasyp za koroną muru oporowego uległ nasyceniu wodą i w ujemnych temperaturach po zamarznięciu wywoływał poziome siły powodujące wychylanie muru oporowego w kierunku zewnętrznym. Pomiary geodezyjne wychyleń prowadzone w latach 80. i 90. XX w. wykazały przemieszczenia górnej korony sięgające 13,0 cm. Równocześnie brak sprawnego odwodnienia powierzchniowego naziomu spowodował uszkodzenia struktury muru oporowego. Uszkodzenie to polegało między innymi na odspojeniu licowej warstwy muru od jego rdzeniowej części. Odspojeniu uległy również pamiątkowe, wmurowane cegiełki upamiętniające zasługi darczyńców wspomagających finansowo odnowę Wawelu po jego odzyskaniu.

Reasumując formy i zakres zagrożenia muru cegiełkowego i stoków północnych Wawelu, można wymienić następującą listę problemów, jakie wymagały rozwiązania w latach 80. i 90. XX stulecia:

1. Deformacje geometryczne zboczy północnych i tendencje do pogłębiania się ich skali w następstwie abrazji i lokalnych zjawisk osuwiskowych.
2. Zasypanie wybrukowanej, pierwotnej ścieżki straży warstwą nasypu o miąższości sięgającej lokalnie wartości do 1,5 m.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Wychylenie muru oporowego w następstwie zwiększonej wysokości naziomu oraz zamarzania nawodnionej, wierzchniej warstwy tego naziomu.
4. Uszkodzenia korozyjne muru oporowego polegające między innymi na odspojeniu warstwy licowej muru wraz z objętymi ochroną konserwatorską cegiełkami upamiętniającymi darczyńców na rzecz Wawelu.

Szybkie narastanie skali opisanych zjawisk spowodowało podjęcie w latach 80. XX w. prac badawczych i projektowych mających na celu eliminację zagrożeń oraz uszkodzeń zboczy i muru oporowego. Opracowano kilka wariantów stabilizacji zbocza za pomocą pali kotwionych w podłożu skalnym i stabilizowanych w płaszczyźnie zbocza żelbetowym rusztem ukrytym pod powierzchnią zbocza. Ze względu na koszt realizacji takich zabezpieczeń i skalę ingerencji w nasypy kulturowe prace te odkładano w czasie. W pierwszej połowie lat 90. skala uszkodzeń muru cegiełkowego była tak znaczna, że konieczne było jego stemplowanie ze względu na zagrożenie podejścia od strony ulicy Kanoniczej.

Ryc. 1. Awaryjne zabezpieczenie muru cegiełkowego przyporami drewnianymi. Fot. P. Stępień

Fig. 1. Emergency protection of brick wall with wooden buttress. Photo. P. Stępień

W tym czasie pojawiły się nowe możliwości technologiczne stabilizacji zboczy. Powrócono do metod zbrojenia gruntu stosowanych już w starożytności, ale z zastosowaniem materiałów trwałych i niewrażliwych na korozję. Na rynku pojawiły się geowłókniny i geosiatki. Tych pierwszych używano do zbrojenia gruntu w sposób zapewniający stabilność stromych zboczy – niezależnie od parametrów geotechnicznych gruntu, z którego formowano zbocze. Natomiast geosiatki stosowano do powierzchniowego zabezpieczenia zboczy przed zjawiskiem abrazji. Zabezpieczenia te były niezbędne szczególnie w początkowych fazach formowania zbocza, kiedy to luźny humus był szczególnie podatny na zmywanie przez opady atmosferyczne.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

2. Historyczne zastosowania stabilizacji nasypów przez ich zbrojenie materiałami włóknistymi

Pierwsze udokumentowane badaniami archeologicznymi zbrojenia gruntu zapewniajace stabilność stromych zboczy były stosowane przy sypaniu starożytnych kopców będących mogiłami władców w Azji Mniejszej. Do zbrojenia gruntów używano wówczas trzciny. W momencie sypania kopców umożliwiało to stabilizację stromych zboczy. Zbrojenie tego typu mogło być skuteczne do momentu biodegradacji włókien trzciny. W międzyczasie następowało samozagęszczenie nasypu, a powierzchnię boczną porastała roślinność, która między innymi częściowo stabilizowała warunki wilgotnościowe.

Również pierwsze odcinki Wielkiego Muru Chińskiego formowane z piasku z pustyni Gobi były zbrojone łodygami trawy porastającej te pustynno-stepowe tereny. Taki sposób formowania wysokich watów obronnych stosowano już w VI w p.n.e., tj. w okresie budowy pierwszych odcinków Wielkiego Muru Chińskiego.

Formowanie zbrojonych nasypów ziemnych rozpowszechniono również na szeroką skalę we Francji po II wojnie światowej. Stosowano w tym celu ocynkowane siatki stalowe. Trwałość takiego zbrojenia była jednak ograniczona trwałością ochrony antykorozyjnej siatki metalowej.

3. Zrealizowane zabezpieczenia stoków północnych i muru cegiełkowego na Wawelu

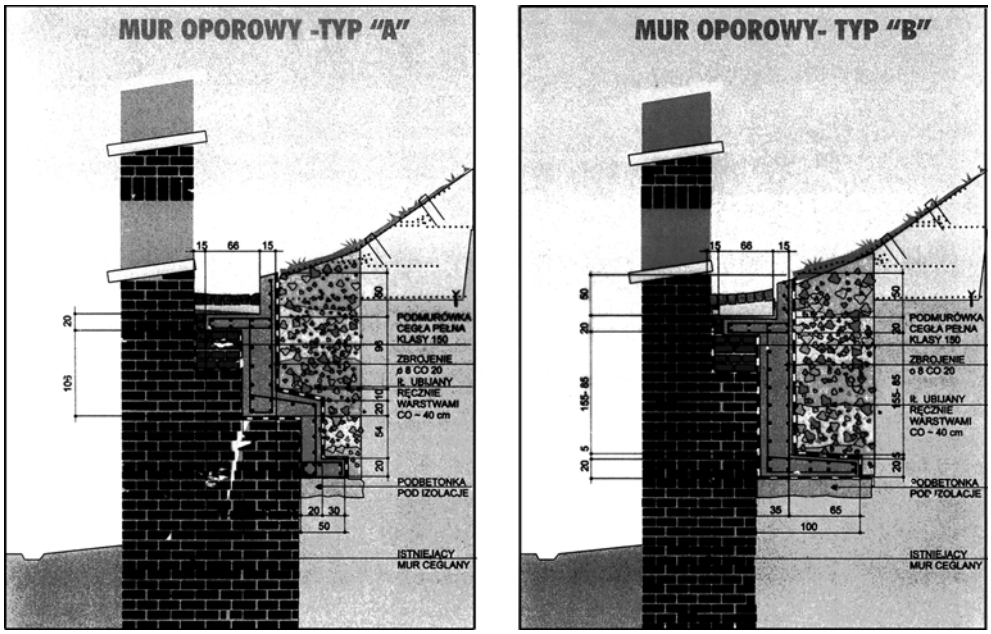
Pierwsze prace miały charakter doraźnych zabezpieczeń i obejmowały zabezpieczenie muru cegiełkowego przyporami drewnianymi. Ze względu na powiększającą się skalę powierzchniowych deformacji zbocza zaprojektowano tymczasowe zabezpieczenie powierzchniowe w formie geosiatki wypełnionej humusem. Prace te miały na celu między innymi uporządkowanie spływu wód powierzchniowych. Równocześnie opracowano dokumentację docelowego uformowania zbocza i zabezpieczenia muru cegiełkowego, ścieżki straży oraz zbocza. Projekt uformowania geometrycznego zbocza wraz z systemem uzbrojenia obejmującego odwodnienie, instalacje elektryczne do iluminacji Wawelu oraz instalacje teletechniczne opracował mgr inż. arch. Jan Kisielewski. W projekcie założono między innymi podniesienie poziomu rekonstruowanej, brukowanej ścieżki straży w stosunku do poziomu pierwotnego. Było to następstwem znacznego przyrostu nasypów. Równocześnie w projekcie uwzględniono potrzebę rozwiązania następujących zagadnień:

1. Stateczności cegiełkowego muru oporowego w sytuacji podniesienia poziomu ścieżki straży, a tym samym zwiększenia siły parcia na mur.
2. Ochrony muru oporowego przed wodami powierzchniowymi powodującymi zagrożenie korozyjne dla wystroju tego muru (kamienne tablice darczyńców) i zagrożenie konstrukcji oporowej przez nawodniony naziom.
3. Stabilizacji profilu zbocza według opracowanego projektu oraz jego ochrony przed zjawiskami osuwiskowymi.
4. Rekonstrukcji ścieżki straży na wyższym poziomie, zgodnie z opracowanym projektem uporządkowania północnych zboczy Wawelu.

Dla poprawy stateczności cegiełkowego muru oporowego zaprojektowano żelbetowe elementy kątowe wsparte na wewnętrznej nadmurowanej odsadzce muru oporowego. Kątowe elementy żelbetowe potraktowano również jako podstawę do rekonstrukcji ścieżki

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

straży. Żelbetowe elementy kątowe miały także z założenia pełnić funkcję nośną dla systemu odwodnienia zbocza. Przyjęto, że przy znacznych spadkach woda opadowa zostanie zebrana i odprowadzona powierzchniowym systemem odwodnienia. Szczegóły rozwiązania zilustrowano na rycinach 2 i 3.



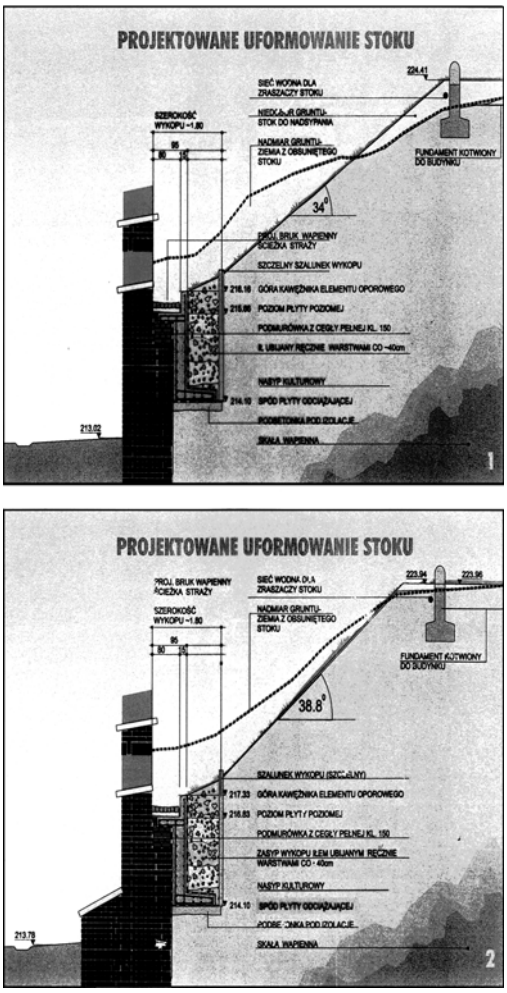
Ryc. 2. Szczegół rozwiązania żelbetowej półki odciążającej dla odcinka zbocza o nachyleniu zbocza do 30° i poniżej 30°

Fig. 2. Detail of the discharging reinforced concrete shelf for the slope section with inclination to 30° and above 30°

Poza systemem odwodnienia rozmieszczonym na dobudowanych elementach kątowych zaprojektowano izolację pionową muru oporowego od strony zbocza, a ponadto na etapie wymiany i konserwacji licowej warstwy muru wykonano na powierzchni styku rekonstruowanego lica izolację pionową za pomocą wodoszczelnej zaprawy typu „Aquafin". Ta wtórna izolacja pionowa miała zapewnić ochronę warstwy licowej przed przypadkowymi nieszczelnościami izolacji zasadniczej. Jej głównym celem była zatem ochrona warstwy licowej przed wysoleniami.

Północne stoki Wawelu charakteryzują się dużym zróżnicowaniem kątów ich spadku. Odcinek o najłagodniejszym pochyleniu ma kąt około 25°, a najbardziej stromy odcinek stoku przy baszcie Zygmunta III jest pochylony pod kątem 56°. Są to pochylenia, które w warunkach naturalnych nie gwarantują utrzymania stabilnego zbocza, ponieważ są to kąty znacznie przekraczające kąt tarcia wewnętrznego nasypu tworzącego zbocze północne.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 3. Schemat formowania profilu zbocza geowłókninami i geosiatkami

Fig. 3. Scheme of forming the profile of the slope with geosynthetics and geogrides

Już na etapie opracowania pierwszych koncepcji zabezpieczenia północnego stoku w latach 80. XX w. istniały duże różnice wyników badań określających parametry geotechniczne nasypu. W świetle badań „Geoprojektu" kąt tarcia wewnętrznego nasypu wynosił 41°, zaś w świetle badań zespołu AGH kąt ten określono jako równy 21°. Ta ogromna różnica mogła wynikać z przypadkowego składu nasypu w miejscu pobierania próbek. Na tle tych skrajnych wyników badań zespół Politechniki Krakowskiej określił na podstawie badań własnych kąt tarcia wewnętrznego równy 29°. Ta wartość powtarzała się również na innych zboczach Wzgórza Wawelskiego. Taką wartość kąta tarcia wewnętrznego przyjęto jako miarodajną do obliczeń stanowiących podstawę prezentowanego rozwiązania.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Porównanie projektowanego profilu zbocza północnego z istniejącym profilem wykazywało konieczność usunięcia znacznej ilości nasypów. W sytuacji polegającej na potrzebie usuwania nadmiaru ziemi, najtrudniejszym problemem było opracowanie technologii zbrojenia zbocza geowłókniną. W rutynowym rozwiązaniu zbrojenie jest realizowane w momencie formowania nasypu warstwami. W przypadku zboczy północnych należało przyjąć skalę przebudowy nasypu i zaprojektować zakres oraz sposób jego zbrojenia. Sposób ten zilustrowano na rycinach 2 i 3. Usuwanie wierzchniej warstwy nasypu do granicy schodkowego, z założenia stabilizującego ukształtowania profilu zbocza odbywało się pasmami o szerokości około 5,0 m. Odtwarzanie zbrojonego geowłókniną profilu zbocza było połączone ze starannym zagęszczaniem nasypu. Okazało się, że pierwotny, wynikający z różnic wyprofilowania zbocza, nadmiar ziemi nie potwierdził się w praktyce. Było to następstwem zmniejszenia objętości starannie zagęszczonego nasypu. Wystąpiła nawet konieczność uzupełnienia nasypu urobkiem pozyskiwanym przy innych pracach na Wawelu.

Ryc. 4. Aktualny stan zachowania zboczy północnych

Fig. 4. The actual state of preserving northern slopes

Po uformowaniu profilu wykonano – zgodnie z zasadami tej technologii – powierzchniowe zabezpieczenie z użyciem geosiatek mocowanych do podłoża za pomocą systemu szpilek metalowych. Na części zbocza zastosowano siatki typu „Tensar", na części zaś siatki typu „Geoweb". W grupie prac uzupełniających system stabilizacyjny zboczy wyko-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

nano kotwienie górnego krawężnika do ścian fundamentowych przyległej zabudowy oraz zrekonstruowano ścieżki straży wraz z systemem powierzchniowego odwodnienia. Opracowany system zabezpieczenia sprawdził się technicznie. Nawet na najbardziej stromych odcinkach nie wystąpiły żadne deformacje sygnalizujące niewłaściwe funkcjonowanie zabezpieczenia. Przy technologii jego realizacji zobrazowanej na załączonych rycinach należy zapewnić niezawodne zabezpieczenie przed możliwością wnikania wód opadowych w strefę styku między pierwotną strukturą nasypu i warstwą zbrojoną geowłókniną. Tego typu błąd wystąpił przy podobnej technologii zabezpieczenia kopca Piłsudskiego w Krakowie.

Literatura

[1] Böhm A., *Budowle ziemne w krajobrazie obszarów zurbanizowanych*, XX Konferencja „Warsztat pracy projektanta konstrukcji", Wyd. Politechniki Krakowskiej, 2005.

[2] Kawalec J., *Projektowanie konstrukcji oporowych z zastosowaniem geosyntetyków*, XX Konferencja „Warsztat pracy projektanta konstrukcji", Wyd. Politechniki Krakowskiej, 2005.

[3] Kania M.M., *Projektowanie geotechniczne posadowień bezpośrednich w obrębie zboczy i skarp*, XX Konferencja „Warsztat pracy projektanta konstrukcji", Wyd. Politechniki Krakowskiej, 2005.

[4] Judycki J., Alenowicz J., Gołos M., Urbański P., DROTEST sp. z o.o., *Przejęcie parcia przez zasypkę z gruntu zbrojonego geosiatkami Tensar na przykładzie obiektów inżynierskich na szkodach górniczych w ciągu autostrady A4*, XX Konferencja „Warsztat pracy projektanta konstrukcji", Wyd. Politechniki Krakowskiej, 2005.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ