

Deformacja ściany oporowej z gruntu zbrojonego – teoria i eksperyment

**Dr hab. inż. Marek Kulczykowski, prof. nadzw. IBW PAN
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, Zakład Geomechaniki**

W praktyce inżynierskiej brakuje prostych metod wyznaczania deformacji lica i korony ściany oporowej z gruntu zbrojonego. Natomiast znajomość tych wartości jest bardzo ważna, gdyż nadmierne deformacje mogą nie tylko zakłócić estetykę konstrukcji, ale przede wszystkim doprowadzić do uszkodzenia, a nawet zniszczenia posadowionych na jej koronie budowli.

W praktyce, by ograniczyć deformacje gruntu zbrojonego, stosuje się odpowiednio sztywne zbrojenie lub wstępnie napręża elementy zbrojenia. W poważniejszych przypadkach, gdy nad-

mierne przemieszczenia mogą zagrozić obiektom posadowionym na koronie konstrukcji, określa się potencjalne odkształcenia masywu, stosując metody numeryczne. Przykładem może być program PLAXIS [7], umożliwiający, przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, wyznaczenie odkształceń konstrukcji przy różnych modelach gruntu i zbrojenia. Jednak stosunkowo wysoki koszt takiego oprogramowania, szczególnie w wersji do celów komercyjnych, mocno ogranicza jego dostępność dla przeciętnego inżyniera.

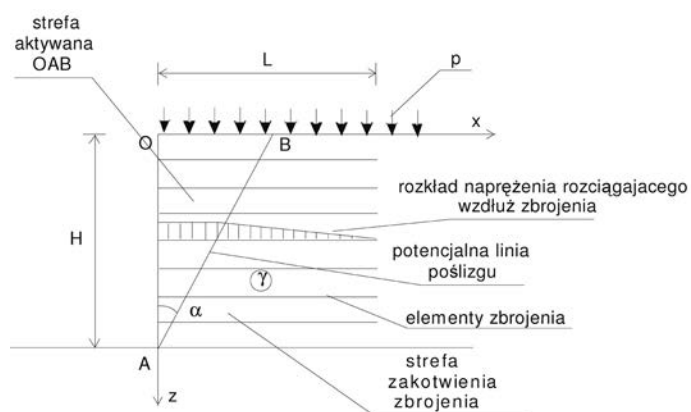
W literaturze brakuje prac poświęconych metodom wyznaczania odkształceń konstrukcji z gruntu zbrojonego, nie wymagających stosowania kosztownych metod numerycznych. Pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku Jewell i Milligan (1989) [1] przedstawili zestaw nomogramów pozwalających na szybkie wyznaczenie maksymalnych przemieszczeń pionowej ściany oporowej z gruntu zbrojonego. Jednak poważnym mankamentem tej metody było ograniczenie jej stosowalności jedynie do analizy konstrukcji obciążonej wyłącznie ciężarem własnym, zaś w wyniku otrzymuje się jedynie informację o maksymalnym przemieszczeniu poziomym i pionowym krańdzi lica i korony konstrukcji.

Inną metodę wyznaczania deformacji konstrukcji z gruntu zbrojonego, opartą na zasadach mechaniki gruntu zbrojonego, zaproponował prof. A. Sawicki z Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku [Sawicki (2000)] [6]. Ta stosunkowo prosta metoda pozwala na wyznaczenie odkształceń lica i korony konstrukcji obciążonej ciężarem własnym i obciążeniem zewnętrznym. Może być ona stosowana zarówno przy zbrojeniu geotekstylami lub geosiatkami, jak i taśmami lub prętami.

W Laboratorium Geomechaniki IBW PAN wykonano eksperymenty z modelem pionowej ściany z gruntu zbrojonego, w trakcie których mierzono deformacje konstrukcji [Kulczykowski (2012)] [3]. Porównanie rezultatów tych doświadczeń z wynikami analizy teoretycznej posłużyło do weryfikacji powyższej metody.

METODA ANALIZY ODKSZTAŁCEŃ PIONOWEJ ŚCIANY OPOROWEJ Z GRUNTU ZBROJONEGO – PODSTAWOWE INFORMACJE

Zaproponowana przez A. Sawickiego metoda pozwala na wyznaczenie poziomych przemieszczeń lica oraz pionowych osiadań korony ściany oporowej z gruntu zbrojonego. Metoda dotyczy pionowej konstrukcji obciążonej ciężarem własnym oraz równomiernym obciążeniem zewnętrznym korony (rys. 1). Analizę deformacji ogranicza się wyłącznie do zbrojonego masywu, nie uwzględniając ewentualnego osiadania podłoża pod konstrukcją. W metodzie nie przedstawiono rozwiązań pozwalających na określenie pionowych deformacji spowodowanych obciążeniem korony sztywnym stemplem. Również nie uwzględnia się wpływu czasu (zjawiska pełzania zbrojenia) na deformację konstrukcji.



Rys. 1. Analizowana konstrukcja z gruntu zbrojonego

Zakłada się, że konstrukcja o wysokości H z obciążeniem zewnętrznym p jest wykonana z gruntu niespoistego o ciężarze objętościowym γ i kącie tarcia wewnętrznego Φ , wzmocnionego poziomymi warstwami zbrojenia o długości L . Przyjmuje się, że zbrojenie jest równomiernie rozmieszczone wzdłuż wysokości konstrukcji, a jej lico jest zbudowane z idealnie sztywnych elementów osłonowych. Grunt traktuje się jako ośrodek sztywno plastyczny opisany warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra, zaś zbrojenie uważa się za materiał sprężysto-plastyczny o module sprężystości E_r i wytrzymałości na rozciąganie R . Tarcie między gruntem i zbrojeniem scharakteryzowane jest tzw. współczynnikiem tarcia μ .

Przyjmuje się, że w konstrukcji z gruntu zbrojonego mechanizm zniszczenia polega na poślizgu sztywnego klina OAB po powierzchni (linii) AB. Linia ta w zbrojonym masywie rozgranicza dwie strefy: tzw. strefę aktywną OAB ograniczoną licem, koroną konstrukcji i linią poślizgu OA oraz leżącą poza nią tzw. pasywną strefę zakotwienia zbrojenia. W stanie granicznym rozpatruje się przypadki zniszczenia polegające na jednoczesnym uplastycznieniu gruntu i zbrojenia lub/i wyciąganiu zbrojenia z warstw sztywnego gruntu (zjawisko *pull-out*). Jednak zasadnicza analiza dotyczy stanów obciążenia poprzedzających ostateczne zniszczenie. Uwzględnia się tu również możliwość poślizgu lub deformacji zbrojenia w strefie zakotwienia. We wszystkich powyższych przypadkach przyjmuje się, że naprężenie rozciągające w elemencie zbrojenia w strefie aktywnej (między licem i potencjalną linią poślizgu AB) jest równomierne, natomiast w strefie zakotwienia maleje od linii AB ku końcowi zbrojenia.

W zaproponowanej metodzie poziome przemieszczenia lica wyznacza się na podstawie odpowiednich odkształceń warstw zbrojenia, przy założeniu znajomości rozkładu naprężenia w tych warstwach. W tym celu określa się stan naprężenia w zbrojeniu, na różnych etapach obciążenia konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości wystąpienia zjawiska *pull-out*.

Pionowe deformacje korony konstrukcji wyznacza się przy założeniu, że grunt w strefie aktywnej jest uplastyczniony oraz, że obowiązuje stowarzyszone prawo płynięcia. W takim przypadku, przy znajomości poziomych odkształceń gruntu, jest możliwe wyznaczenie jego odkształceń pionowych z prawa płynięcia.

Szczegółowy opis powyższej metody przedstawiono również w pracy Kulczykowskiego [4], gdzie wyselekcjonowano i uporządkowano materiał z książki A. Sawickiego pod kątem analizy odkształceń i przemieszczeń konstrukcji. Zamieszczono tam zależności opisujące stan naprężenia i odkształcenia w zbrojeniu z uwzględnieniem ewentualnego poślizgu zbyt krótkiego zbrojenia w postaci niezbędnej do przygotowania kodów numerycznych. Na bazie powyższych rozwiązań opracowano program numeryczny służący do obliczania przemieszczenia lica i korony ściany oporowej z gruntu zbrojonego pod obciążeniem ciężarem własnym i obciążeniem zewnętrznym. Rezultaty obliczeń tym programem, wykonane z parametrami konstrukcji eksperymentalnej, porównano w dalszej części niniejszej pracy z wynikami badań doświadczalnych.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było dostarczenie danych doświadczalnych do weryfikacji zaproponowanej analizy de-

formacji. Eksperyment wykonano z modelem pionowej ściany oporowej z gruntu zbrojonego, zbudowanej z piasku wzmocnionego taśmami z folii aluminiowej. Równomierne obciążenie stanowiła warstwa piasku nasypywana w trakcie doświadczenia na koronę konstrukcji. Badania przeprowadzono w Laboratorium Geomechaniki IBW PAN w skrzyni pomiarowej o wymiarach $180 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 37 \text{ cm}$ z przeszkloną ścianą frontową. Rejestrowano wysokość warstwy obciążającej oraz deformacje lica modelu.

Do analizy teoretycznej była konieczna znajomość parametrów konstrukcji (wysokość masywu, długość i odstęp warstw zbrojenia), parametrów gruntu (ciężar objętościowy i kąt tarcia wewnętrznego) oraz zbrojenia (wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości oraz współczynnik tarcia między gruntem i zbrojeniem). Parametry piasku wyznaczono w trakcie typowych badań właściwości gruntu, natomiast parametry zbrojenia określono w badaniach rozciągania próbek folii. Współczynnik tarcia między gruntem i zbrojeniem wyznaczono w teście *pull-out* wyciągania taśmy zbrojenia z gruntu.

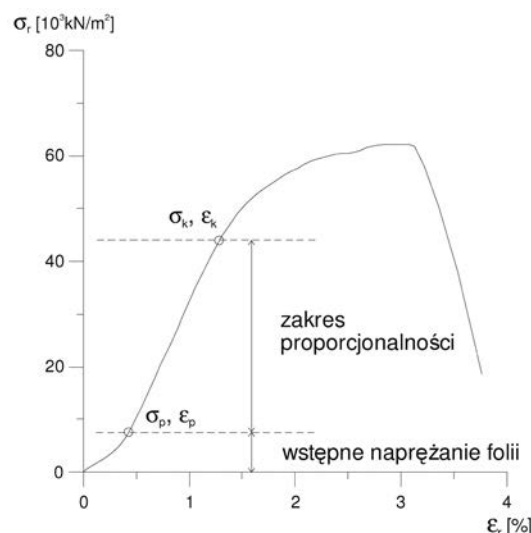
PARAMETRY GRUNTU I ZBROJENIA

Do budowy konstrukcji doświadczalnych użyto suchego piasku kwarcowego, tzw. piasku „Stogi”, pochodzącego z plaży w Gdańsku-Stogach. Wykonano analizę uziarnienia gruntu, wyznaczono minimalną i maksymalną gęstość objętościową ośrodka, sprawdzono jego wilgotność oraz wyznaczono kąt tarcia wewnętrznego w aparacie trójosiowym. W tabl. 1 zestawiono parametry piasku „Stogi”, który określono jako piasek drobnoziarnisty, równoziarnisty, suchy i dobrze zagęszczony.

Tabl. 1. Parametry piasku „Stogi”

Gęstość objętościowa	ρ [g/cm ³]	1,85
Kąt tarcia wewnętrznego	ϕ [°]	34,5
Spójność	c [kN/m ²]	0
Wilgotność	w [%]	1,55
Stopień zagęszczenia	I_d [1]	0,73
Wskaźnik porowatości	e [1]	0,47
Średnica cząsteczek	d_{50} [mm]	0,15
Wskaźnik uziarnienia	U [1]	2,0

Do zbrojenia gruntu zastosowano folię aluminiową - materiał wiotki, o niewielkiej grubości i małej odkształcalności przy zrywaniu. Użyta folia miała grubość $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ i masę powierzchniową $23,8 \text{ g/m}^2$. Jej parametry wytrzymałościowe wyznaczono w zrywarkę z krótkimi próbkami: o długości 2 cm i szerokości 5 cm. Aby szczęki zrywarki nie uszkadzały delikatnej folii, próbki zbrojenia były przyklejone do kartoników o wymiarach $4 \times 5 \text{ cm}$, które umieszczano w uchwytach zrywarki. Próbkę rozciągano aż do zerwania, ze stałą prędkością 9 mm/min ($45\%/min$), mierząc siłę zrywającą i wydłużenie. Wytrzymałość zbrojenia na zerwanie wyznaczona z 10 badań zrywania wynosiła $R = 60,9 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$, natomiast odkształcenie folii przy zerwaniu $\epsilon_{\max}$ wynosiło $3,7\%$.



Rys. 2. Przykładowy wynik badania rozciągania próbki folii aluminiowej

Wartości modułu sprężystości zbrojenia E_r określono z powyższych wyników rozciągania próbek folii. Przykładowy wykres σ - ϵ otrzymany w trakcie jednego z takich badań przedstawiono na rys. 2. Do określenia modułu sprężystości przyjęto wartości naprężenia i odkształcenia w granicach zmian proporcjonalnych, wyznaczając go z zależności:

$$E_r = \frac{\sigma_k - \sigma_p}{\epsilon_k - \epsilon_p}$$

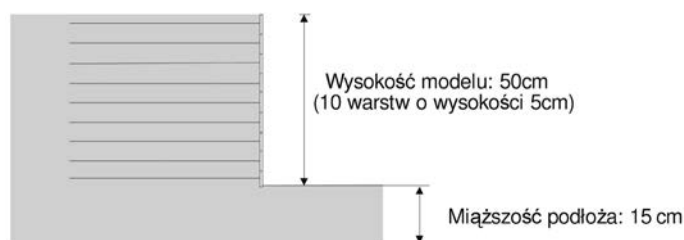
Otrzymana w powyższych badaniach średnia wartość modułu sprężystości wynosiła $E_r = 3533 \cdot 10^3 \text{ kPa}$.

Współczynnik tarcia między gruntem i zbrojeniem określono w badaniu *pull-out*. Ze względu na niewielkie wymiary modelu konstrukcji taśmę z gładkiej folii aluminiowej wyciągano z piasku przy stosunkowo małej wartości obciążenia pionowego około $1,4 \text{ kPa}$. Wartość współczynnika tarcia między gruntem i zbrojeniem wyniosła $\mu_{\text{pull}} = 0,05$.

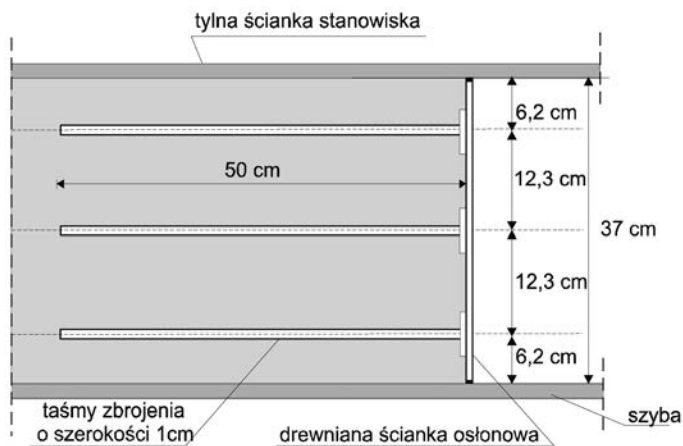
BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania wykonano z modelem pionowej ściany oporowej o wysokości 50 cm , wzmocnionym 10 poziomymi warstwami zbrojenia ułożonymi w równych odstępach 5 cm (rys. 3).

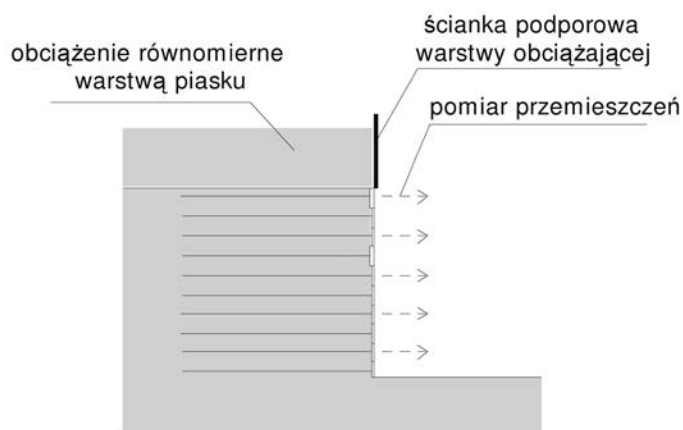
Ścianka czołowa modelu była zbudowana ze sztywnych, korytkowych elementów o wymiarach $37 \times 5 \text{ cm}$, wykonanych z listewek sosnowych. Po wewnętrznej stronie elementu znajdowały się aluminiowe uchwyty służące do przytwierdzania



Rys. 3. Wymiary konstrukcji doświadczalnej



Rys. 4. Układ taśm w warstwie zbrojenia (widok z góry)



Rys. 5. Równomiernie rozłożone obciążenie warstwą piasku

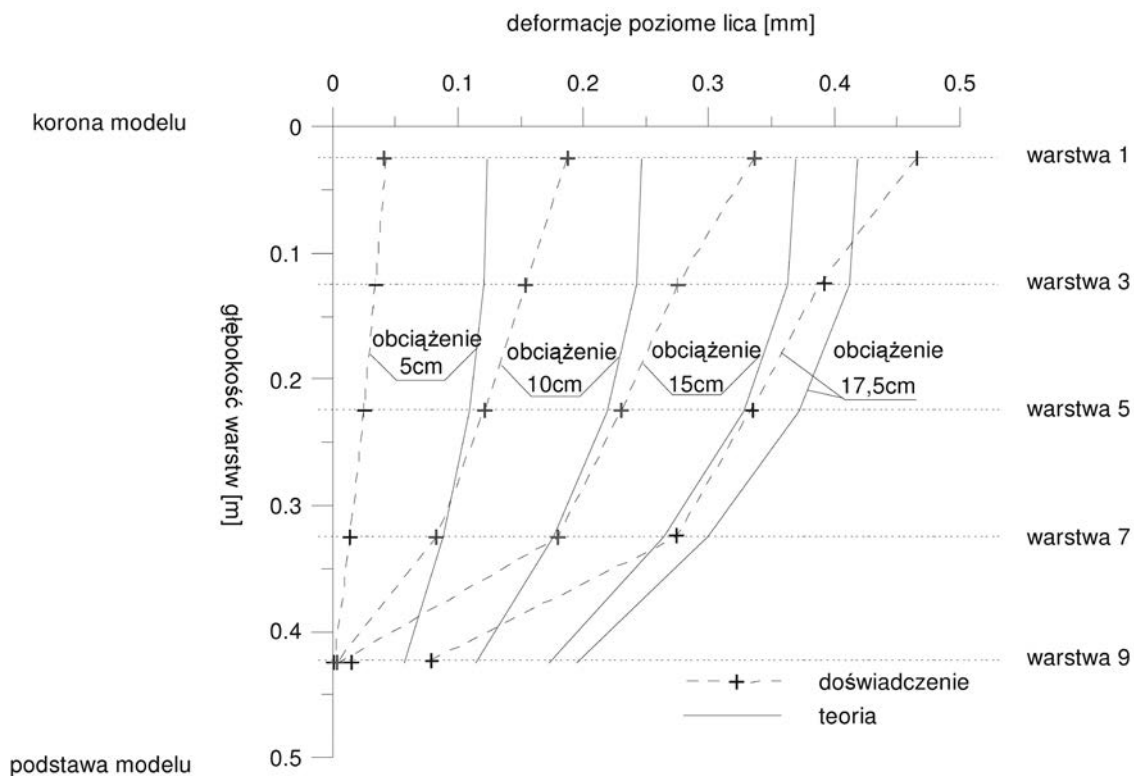
zbrojenia. Do każdego elementu mocowano 3 taśmy zbrojenia o długości 50 cm i szerokości 1 cm. Układ taśm w warstwie przedstawiono na rys. 4.

Przy budowie konstrukcji doświadczalnej, na wstępie usypało warstwę podłoża. Piasek sypano metodą deszczu piaskowego ze stałej wysokości 1 m. Ciężar objętościowy gruntu, kontrolowany na etapie sypania podłoża i każdej warstwy, wynosił $\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3$. Po usypaniu i wyrównaniu podłoża ustawiano tymczasową ściankę podporową, przy której kontynuowano budowę konstrukcji. Model budowano warstwami, usypując i układając kolejne warstwy gruntu i zbrojenia. Położenie taśm zaznaczano przy szybie cienką warstwą zabarwionego na czarno piasku, co umożliwiało obserwację deformacji zbrojonego masywu, zarówno przy zdejmowaniu ścianki podporowej, jak i w trakcie obciążania modelu.

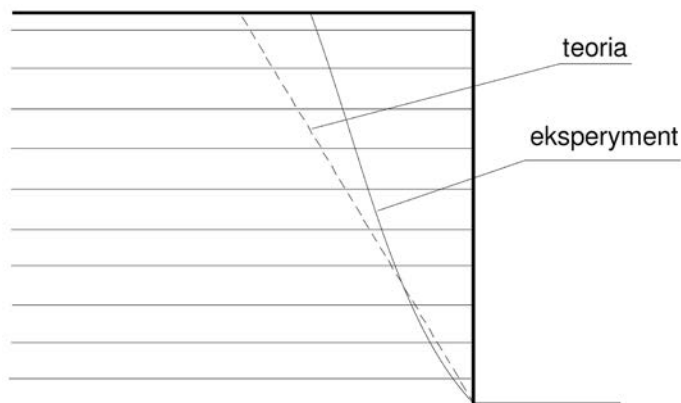
Do pomiaru odkształceń lica zastosowano czujniki przemieszczeń przymocowane do specjalnej ramy z kształtowników aluminiowych. Rejestrowały one w sposób ciągły przemieszczenia poziome elementów lica na wysokości 1, 3, 5, 7 i 9-tej warstwy zbrojenia, licząc od korony modelu (rys. 5).

Koronę obciążano warstwą równomiernie nasypywanego piasku. Aby zapobiec wysypywaniu się obciążającego piasku poza koronę konstrukcji, przed rozpoczęciem obciążania nad modelem ustawiono pionową ściankę, bezpośrednio nad najwyższym elementem lica (rys. 5).

W trakcie obciążania piasek sypano ze stałej wysokości 1 m, rejestrując przyrost wysokości warstwy obciążającej oraz deformacje lica. Pomiar odkształceń prowadzono w sposób ciągły, wraz z wzrostem obciążenia zewnętrznego, aż do zniszczenia modelu. Przebieg eksperymentu dokumentowano dodatkowo aparatem fotograficznym i kamerą wideo.



Rys. 6. Porównanie teoretycznych i doświadczalnych deformacji lica



Rys. 7. Teoretyczna i doświadczalna strefa zniszczenia

Na każdym etapie obciążenia najmniejsze deformacje poziome lica rejestrowano przy podstawie, zaś największe przy koronie modelu. Deformacje rosły wraz z wzrostem wysokości warstwy obciążającej. Konstrukcja uległa zniszczeniu przy warstwie o wysokości nieznacznie wyższej od 17 cm. Mechanizm zniszczenia polegał na gwałtownym obsunięciu się w dół jednolitej bryły odłamu o kształcie zbliżonym do trójkątnego klina. Strefa zniszczenia objęła całą wysokość modelu. Lekko zaokrąglona powierzchnia poślizgu przechodziła przez podstawę konstrukcji. Jej zasięg przy koronie, odczytany z zapisu wideo, wynosił około 20 cm. W trakcie obciążania nie odnotowano widocznego osiadania konstrukcji i wypierania gruntu spod podstawy modelu. Niestety z rejestracji fotograficznej eksperymentu nie udało się odczytać deformacji pionowych korony konstrukcji.

PORÓWNANIE WYNIKÓW TEORETYCZNYCH I DOŚWIADCZALNYCH

Obliczenia teoretycznych przemieszczeń lica konstrukcji doświadczalnej wykonano przy wybranych wartościach obciążenia – przy wysokości warstwy obciążającej: 5 cm, 10 cm, 15 cm oraz przed zniszczeniem modelu, przy 17,5 cm. Wyniki obliczeń zestawiono z rezultatami eksperymentu na rys. 6, natomiast teoretyczną i doświadczalną strefę zniszczenia porównano na rys. 7.

Z powyższego porównania rezultatów teoretycznych i doświadczalnych wynika, że na każdym etapie obciążenia lico deformowało w podobny sposób. Przy podstawie odkształcenia były minimalnie, dalej rosły wraz z wysokością konstruk-

cji, osiągając największe wartości przy jej koronie. Zarówno w teorii, jak i w doświadczeniu przemieszczenia poziome rosły wraz z wzrostem obciążenia. Wartości doświadczalne były nieco mniejsze od teoretycznych. Przyczyną tego mogło być tarcie masywu gruntowego i elementów lica o ścianki stanowiska, ograniczające deformacje modelu. Tarcie to mogło mieć również wpływ na mniejszy zasięg doświadczalnej strefy zniszczenia przy koronie modelu.

WNIOSKI

Z porównania wyników teoretycznych i doświadczalnych wynika zadowalająca zgodność pomiędzy teorią i doświadczeniem. Rozkład przemieszczeń poziomych wzdłuż wysokości konstrukcji jest podobny w obu przypadkach – największe wartości występują przy lico, najmniejsze przy podstawie konstrukcji. Wyniki analityczne są nieco większe od doświadczalnych, co można wyjaśnić tarcie konstrukcji modelowej o ścianki stanowiska, ograniczającym przemieszczenia poziome lica.

Zbieżność wyników wskazuje na celowość kontynuacji prac na dalszą weryfikację analizowanej metody, poprzez wykonanie dodatkowych badań modelowych, jak również wykorzystanie dostępnych w literaturze rezultatów badań konstrukcji pełnowymiarowych. Celowe jest też porównanie wyników obliczeń otrzymanych niniejszą metodą z wynikami programów komercyjnych.

LITERATURA

1. Jewell R. A., Milligan G.W.E.: Deformation calculations for reinforced soil walls. Proc. of 12th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 2 1989, 1257-1262.
2. Jewell R. A.: Application of the revised design charts for steep reinforced slopes. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 10, 1991, 203-233.
3. Kulczykowski M.: Eksperymentalna analiza deformacji konstrukcji z gruntu zbrojonego. Raport z badań, IBW PAN, 2012.
4. Kulczykowski M.: Analiza teoretyczna i numeryczna deformacji konstrukcji z gruntu zbrojonego. Raport z badań, IBW PAN, 2013.
5. Sawicki A.: Modelling of geosynthetic reinforcement in soil retaining walls. Geosynthetics International, 5, 3, 1998, 327-345.
6. Sawicki A.: Mechanics of Reinforced Soil. A. A. Balkema, Rotterdam 2000.
7. Palxis (2002) PLAXIS 9 2D – Reference Manual. Plaxis bv, The Netherlands.