

Stan graniczny użyteczności konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego geosyntetykami – analiza wytycznych projektowych

Mgr inż. Piotr Kieliszczyk – Optem Sp. z o.o.

Dr inż. Angelika Duszyńska – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

W przypadku konstrukcji oporowych pełniących funkcję szczególnej wagi (np. przyczółków z gruntu zbrojonego w ciągu drogi głównej, murów oporowych zabezpieczających nasypy kolejowe) często zachodzi potrzeba sprawdzenia stanu granicz-

nego użyteczności. W wielu sytuacjach projektowych problematyczne bywa oszacowanie przemieszczenia lica konstrukcji oporowej. Projektanci posiadają zazwyczaj wiedzę zebraną z wcześniejszych realizacji i na tej podstawie próbują progno-

zować przemieszczenia konstrukcji „typowych”. W przypadku braku doświadczeń z podobnych realizacji, trudno jest wiarygodnie przewidzieć przemieszczenia konstrukcji ze względu na brak szczegółowych wytycznych projektowych w tym zakresie.

W niniejszym artykule przedstawiono syntetyczny przegląd zapisów dotyczących stanu granicznego użyteczności konstrukcji oporowych, zawartych w wybranych aktualnych normach i wytycznych projektowych.

EUROKOD 7

Aktualnie obowiązującą w kraju normą w zakresie projektowania konstrukcji geotechnicznych jest Eurokod 7 [12]. W rozdziale 9, dotyczącym konstrukcji oporowych, w punkcie 9.8 (Sprawdzenie stanu granicznego użyteczności) przedstawiono następujące postanowienia ogólne:

- należy sprawdzić projekt konstrukcji oporowej w stanie granicznym użyteczności (SGU) z zastosowaniem odpowiednich sytuacji obliczeniowych;
- wartości parcia i oporu gruntu przy sprawdzaniu SGU należy ustalić przy zastosowaniu wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych;
- należy stosować wartości charakterystyczne stałych obciążeń naziomu;
- wyznaczając obliczeniowe wartości parcia i oporu gruntu, zaleca się uwzględnić naprężenia początkowe, sztywność i wytrzymałość podłoża gruntowego oraz sztywność elementów konstrukcji;
- obliczeniowe wartości parcia gruntu zaleca się wyznaczać z uwzględnieniem dopuszczalnych odkształceń konstrukcji w SGU; nie muszą to być graniczne wartości parcia.

Odnośnie przemieszczeń w Eurokodzie 7 [12] zapisano:

- „należy określić maksymalne wartości dopuszczalnych przemieszczeń ścian oporowych i przyległego do nich gruntu, uwzględniając przy tym podatność na przemieszczenia zabezpieczanych konstrukcji oraz instalacji;
- zawsze należy wykonać ostrożne oszacowanie odkształceń i przemieszczeń ścian oporowych oraz ich wpływu na zabezpieczane konstrukcje i urządzenia, na podstawie porównywalnych doświadczeń. Oszacowanie powinno uwzględniać również skutki wykonania ściany. Jeśli wykaże się, że przewidywane przemieszczenia nie przekraczają wartości dopuszczalnych, projekt taki można zaakceptować;
- w przypadku, gdy wstępnie ostrożnie oszacowane przemieszczenie przekracza wartości dopuszczalne, należy wykonać bardziej szczegółowe sprawdzenia dotyczące obliczenia przemieszczeń;
- należy przeanalizować wpływ oddziaływań zmiennych (np. drgań wywołanych ruchem pojazdów za ścianą oporową) na przemieszczenia konstrukcji oporowej;
- szczegółowe analizy (w tym obliczenia przemieszczeń) należy wykonać w sytuacjach, gdy:

- a) pobliskie konstrukcje lub instalacje są niezwykle wrażliwe na przemieszczenia,
- b) nie udokumentowano porównywalnych doświadczeń;
- zaleca się wykonać obliczenia przemieszczeń w przypadkach, gdy:
 - a) ściana podpira uskok naziomu o wysokości 6 m z gruntu spoistego o małej plastyczności,
 - b) ściana podpira ponad 3 m gruntu o dużej plastyczności,
 - c) ścianę podpierają słabonośne grunty spoiste (występujące na jej wysokości lub pod jej podstawą);
- obliczając przemieszczenia należy uwzględnić sztywność podłoża oraz elementów konstrukcji, a także kolejność wykonywania robót;
- zaleca się kalibrowanie zachowania materiałów przyjętych w obliczeniach przemieszczeń, na podstawie porównywalnych doświadczeń, z użyciem tego samego modelu obliczeniowego. W przypadku, gdy założono liniowe zachowanie modelu, zaleca się przyjmować sztywności podłoża i materiałów odpowiadające zakresowi obliczonych wartości odkształceń. Można również stosować modele obliczeniowe opisujące pełną zależność naprężenie – odkształcenie materiałów;
- należy uwzględnić wpływ drgań na przemieszczenia.”

INSTRUKCJA ITB NR 429/2007

Od 10 lat jedynym polskim zbiorem zaleceń odnośnie ścian oporowych z gruntu zbrojonego geosyntetykami jest instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej nr 429/2007 [10]. Nie obejmuje ona, zgodnie z zapisem w niej zawartym, projektowania elementów konstrukcji, dla których dominującym obciążeniem jest obciążenie od ruchu drogowego oraz kolejowego, a także obciążenia od parcia wody i ciśnienia spływowego.

Zgodnie z instrukcją, konstrukcje z gruntu zbrojonego (podobnie jak konstrukcje tradycyjne o zbliżonej funkcji) należy sprawdzać w szczególnych przypadkach ze względu na możliwość przekroczenia stanów granicznych użyteczności. Sprawdzenie to powinno polegać na wykazaniu, że przemieszczenia i odkształcenia korpusu konstrukcji nie przekraczają wartości dopuszczalnych ze względu na wymagane warunki użytkowania konstrukcji lub współpracującego z nią obiektu.

Kontrola SGU powinna obejmować sprawdzenie:

- osiadań korpusu,
- różnic osiadań korpusu,
- odkształceń korpusu.

W przypadku konstrukcji, którym nie stawia się określonych wymagań użytkowych, w instrukcji zapisano możliwość pominięcia obliczeń sprawdzających. Do grupy tej zalicza się konstrukcje pierwszej kategorii geotechnicznej, konstrukcje tymczasowe oraz te, które nie znajdują się w strefie oddziaływań innego obiektu.

Sprawdzenie maksymalnych osiadań oraz różnicy osiadań korpusu należy przeprowadzić analogicznie jak dla obiektów o konstrukcji tradycyjnej. W przypadku braku jasnych kryteriów granicznych wartości osiadań lub różnicy osiadań należy ich wartości uzgodnić z inwestorem.

Sprawdzenie odkształceń konstrukcji należy wykonać w przypadku ścian oporowych z gruntu zbrojonego geosyntetykami:

- z konstrukcją lica typu sztywnego,
- nasypów będących podparciem dla innych obiektów (np. mostu czy wiaduktu).

W instrukcji [10] proponuje się sprawdzenie stanu granicznego użytkowności, analizując wartość odkształceń zbrojenia. Warunek przedstawiono w następującej postaci:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{gr}$$

gdzie:

ε – maksymalna wartość odkształcenia zbrojenia (z uwzględnieniem pełzania w projektowanym okresie użytkowania konstrukcji),
 ε_{gr} – dopuszczalna wartość odkształceń.

Wartości odkształceń ε należy wyznaczać, wykorzystując izochrony sporządzone na podstawie wyników badań pełzania wyrobu przy różnych wartościach obciążenia w temperaturze 10°C lub 20°C. Ustalając odkształcenia ε , należy brać pod uwagę projektowany okres użytkowania konstrukcji oraz maksymalne siły występujące w zbrojeniu. Wartości maksymalnej siły występującej w zbrojeniu należy ustalać przy wykorzystaniu charakterystycznych wartości obciążeń oraz parametrów geotechnicznych materiału gruntowego.

W tabl. 1. przedstawiono wartości dopuszczalnych odkształceń ε_{gr} w zależności od rodzaju konstrukcji.

W instrukcji ITB [10], wzorem zapisów zawartych w wytycznych niemieckich z 1997 roku, dopuszcza się połączenie sprawdzenia stanu granicznego odkształceń ze sprawdzeniem utraty stateczności wewnętrznej (SGN), zgodnie z następującym algorytmem:

- wyznaczenie sił $F_k(\varepsilon_{gr})$, jakie można dopuścić w zbrojeniu dla projektowanego okresu użytkowania konstrukcji oraz dopuszczalnych odkształceń ε_{gr} ; siły te wyznacza się na podstawie izochron wyrobów zbrojących, zgodnie ze wzorem:

$$F_{k,\varepsilon} = \frac{F_{0,k} \cdot \beta_\varepsilon}{A_2}$$

gdzie:

$F_{0,k}$ – charakterystyczna wytrzymałość krótkoterminowa geosyntetyku na rozciąganie,
 β_ε – dopuszczalny stopień obciążenia zbrojenia odpowiadający dopuszczalnemu wydłużeniu zbrojenia ε_{gr} oraz projektowanemu okresowi użytkowania budowli t ; wyznacza się go w oparciu o izochrony odpowiednie dla danego wyrobu.
 A_2 – współczynnik materiałowy dla geosyntetyku uwzględniający wpływ uszkodzenia podczas transportu przy wbudowywaniu oraz przy zagęszczaniu zasypki.

Dodatkowo, w przypadku przyczółków mostowych oraz podpór wyznacza się analogicznie siłę dopuszczalną z warunku nieprzekroczenia przyrostu odkształcenia w czasie użytkowania konstrukcji $F_k(\Delta\varepsilon_{gr})$.

- sprawdzenie stateczności wewnętrznej, przy założeniu, że w zbrojeniu wystąpi mniejsza z sił dopuszczalnych ze względu na rozciąganie zbrojenia lub odkształcenia.

WYTYCZNE NIEMIECKIE EBGeo 2010

Zalecenia ogólne

Zgodnie z wytycznymi Niemieckiego Komitetu Geotechniki z 2010 roku – EBGeo [6] analiza stanu granicznego użytkowności powinna zawierać sprawdzenie położenia wypadkowej obciążeń działających na podstawę bryły z gruntu zbrojonego zgodnie z DIN 1054 (7.6.1.) [3] oraz analizę deformacji i przemieszczeń konstrukcji oporowej. Należy każdorazowo brać pod uwagę osiadanie podłoża gruntowego, osiadanie własne (wewnętrzne) materiału zasypki, przemieszczenia poziome lica konstrukcji oraz odkształcenia postaciowe.

Maksymalną wartość dopuszczalnych deformacji określa się w zależności od funkcji użytkowej konstrukcji oraz założeń projektowych (np. w zależności od tego, czy zastosowano lico sztywne czy podatne). Konstrukcje oporowe z gruntu zbrojonego uznaje się za odporne na osiadania wewnętrzne.

Współpraca między gruntem zasypowym a zbrojeniem może mieć wpływ na charakter deformacji konstrukcji oporowej. Należy podkreślić, że w rzeczywistości, w gruncie, materiały geosyntetyczne wykazują z reguły mniejsze odkształcenia niż jest to przewidywane na podstawie charakterystyki obciążenie – odkształcenie tych materiałów (standardowe badanie laboratoryjne „w powietrzu”) [5].

Powołując się na wieloletnie badania laboratoryjne oraz wyniki monitoringu tymczasowych i stałych konstrukcji oporowych, w wytycznych EBGeo [6] stwierdzono, że empiryczna wartość poziomego przemieszczenia lica konstrukcji oporowej wynosi około 1 ÷ 2% wysokości konstrukcji H .

Według wytycznych EBGeo, jeśli w przypadku konstrukcji prostej (kategoria geotechniczna I: $H < 3$ m) nie stosuje się specjalnych wymagań odnośnie analizy charakteru odkształcenia i dopuszcza się zastosowanie wyników badań empirycznych, można pominąć wykonywanie analiz numerycznych konstrukcji w stanie granicznym użytkowności. W przypadku, gdy istnieją specjalne wymagania odnośnie analizy charakteru odkształcenia lub brak jest danych empirycznych, należy przeanalizować deformacje konstrukcji oporowej oraz gruntu zasypowego.

W przypadku konstrukcji należących do III kategorii geotechnicznej ($H \geq 9$ m), oprócz szacowania odkształceń na

Tabl. 1. Wartości dopuszczalnych odkształceń zbrojenia geosyntetycznego, w zależności od rodzaju konstrukcji [10]

Rodzaj konstrukcji	ε_{gr} [%]
Ściany oporowe ze sztywną konstrukcją osłonową, występujące poza strefą oddziaływań sąsiednich obiektów	6,0
Nasypy oraz ściany oporowe będące podparciem dróg publicznych	5,0
Nasypy oraz ściany oporowe będące podparciem torów kolejowych	2,0
Przyczółki mostów oraz podpory ($\Delta\varepsilon$ w fazie eksploatacji)	2,0 (0,5)

W przypadku płytkich fundamentów bezpośrednich, do sprawdzenia bezpieczeństwa ze względu na dopuszczalne przemieszczenia podstawy, zgodnie zaleceniami normy DIN 1054 [3], należy wziąć pod uwagę jedno z poniższych zaleceń:

- gdy sprawdza się stateczność na poślizg, nie uwzględnia się reakcji podłoża na pionowej powierzchni lica fundamentu,
- w przypadku gruntów niespoistych co najmniej średnio-zagęszczonych lub spoistych co najmniej twardoplastycznych, przyjmując pełną wartość charakterystycznej siły oporu na poślizg w celu zapewnienia równowagi charakterystycznych sił równoległych do podstawy fundamentu, można uwzględnić reakcję podłoża o wartości mniejszej od 30% charakterystycznej wartości oporu gruntu na pionowej powierzchni lica fundamentu.

W przypadku, gdy odpór gruntu na pionowej powierzchni lica fundamentu jest zmobilizowany w większym stopniu niż podano powyżej lub gdy warunki gruntowe nie odpowiadają wymaganiom opisanym wyżej, należy wykazać, że nie wystąpią niedopuszczalne przemieszczenia w poziomie posadowienia konstrukcji, uwzględniając charakterystyczne wartości obciążeń stałych i zmiennych oraz charakterystyczne wartości obciążeń wyjątkowych [3].

Osiadanie podłoża gruntowego v_u

W wytycznych EBGeo [6] zaleca się określać wartość osiadania fundamentów bezpośrednich na podstawie normy DIN 4019 [4].

W przypadku gruntów niespoistych, obliczając osiadanie, należy uwzględnić cykliczne obciążenia zmienne. Sprawdzając osiadania konsolidacyjne gruntów spoistych, można pominąć obciążenia zmienne, jeśli czas ich występowania jest zdecydowanie krótszy niż czas potrzebny na dyssypację nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu.

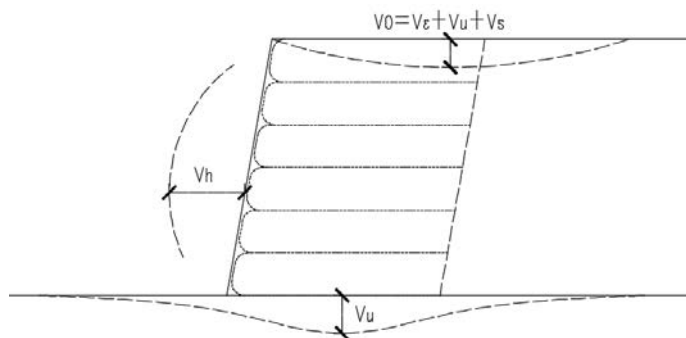
W przypadku występowania obciążeń cyklicznych, należy wykonać dodatkowe analizy powiązanego z nimi osiadania, szczególnie w nawodnionych gruntach spoistych. Jeśli występuje taka potrzeba, należy jednocześnie wprowadzić metodę obserwacyjną.

Obliczając osiadanie, należy uwzględnić wpływ sąsiednich konstrukcji.

Jeśli konstrukcję wymiaruje się ze względu na osiadania, należy podać charakterystyczne wartości średnich osiadań obiektu lub wartość minimalnego oraz maksymalnego osiadania.

Zalecenia zawarte w normie DIN 4019 [4] należy zastosować w przypadku, gdy określa się osiadania podłoża gruntowego wynikające z ciężaru własnego konstrukcji z gruntu zbrojonego oraz obciążeń naziomu. Osiadania te mogą być wiodącym warunkiem w przypadku słabonośnych, ściśliwych gruntów. Należy szczególnie zwrócić uwagę na przebieg osiadań w czasie (konsolidację).

Zaletą konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego jest to, że same w sobie są niewrażliwe na osiadania. Konstrukcja kom-



Rys. 1. Charakter typowych odkształceń konstrukcji oporowej [6]

podstawie wcześniejszych badań oraz obliczeń, należy monitorować przemieszczenia konstrukcji występujące w czasie wykonawstwa oraz użytkowania.

Jeśli istnieją wysokie wymagania co do konstrukcji lub przewiduje się duże obciążenia, należy przeprowadzić dokładniejszą analizę deformacji mogących wystąpić w czasie wznoszenia konstrukcji oraz w okresie jej eksploatacji.

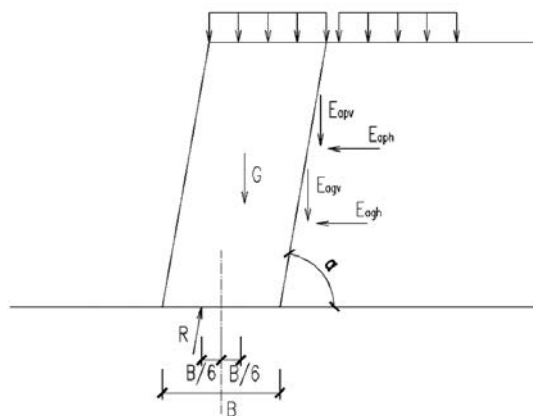
Analizując stan graniczny użytkowości, należy uwzględnić (patrz rys. 1):

- osiadanie podłoża gruntowego v_u ,
- osiadanie własne (wewnętrzne) gruntu zasypowego v_ϵ ,
- poziome przemieszczenie lica konstrukcji na poziomach poszczególnych warstw zbrojenia v_h ,
- odkształcenia postaciowe v_s .

Poszczególne składowe odkształcenia mogą być oszacowane na podstawie prostego podejścia opisanego w EBGeo [6] lub z wykorzystaniem złożonego modelu np. w metodzie elementów skończonych. Ważne jest, aby sprawdzić, czy uzyskane wyniki można uznać za wiarygodne.

Sprawdzenie położenia wypadkowej siły obciążeń

Zgodnie z zaleceniami EBGeo w ramach analizy stanu granicznego użytkowości należy również wykazać, że nie powstanie szczelina między podstawą konstrukcji a podłożem gruntowym (nie wystąpi odrywanie krawędzi) w wyniku działania obciążeń stałych (wypadkowa obciążeń powinna mieścić się w rdzeniu podstawy) (patrz rys. 2).



Rys. 2. Układ sił działających na blok z gruntu zbrojonego [6]

pensuje różnice osiadań. Ten rodzaj konstrukcji jest szczególnie korzystny w przypadku podłoża słabonośnego, przy zastosowaniu odpowiedniego obliczania.

Osiadanie własne (wewnętrzne) gruntu zasypowego v_E

Kluczowe jest odpowiednie zagęszczanie zasyпки podczas wznoszenia konstrukcji z gruntu zbrojonego. Dane empiryczne wykazują, że zazwyczaj występują osiadania własne rzędu $0,2 \div 1,0\%$ wysokości konstrukcji. Osiadania wewnętrzne występują w większości przypadków podczas wznoszenia konstrukcji.

Osiadanie zasyпки pod wpływem obciążenia naziomu może być oszacowane na podstawie analizy wykorzystującej model sprężysty gruntu.

Poziome przemieszczenia lica konstrukcji v_h

Proces deformacji konstrukcji, składającej się z gruntu i zbrojenia, jest złożony i można go opisać jedynie w sposób przybliżony.

Materiał zasypowy odkształca się na skutek procesu wznoszenia konstrukcji oraz pod wpływem oddziaływań zewnętrznych. Wbudowywane zbrojenie geosyntetyczne przejmuje obciążenia, aż do osiągnięcia równowagi między siłą rozciągającą a odkształceniem.

Badania laboratoryjne rozciągania geosiatek oraz analizy numeryczne wskazały, że konstrukcje z gruntu zbrojonego zachowują w przybliżeniu liniowy charakter pracy obciążenie – odkształcenie w zakresie obciążeń użytkowych. Odkształcenia plastyczne zbrojenia oraz poślizg geosiatek po gruncie nie wystąpiły w zakresie obciążeń użytkowych przy zastosowaniu odpowiednio zagęszczonych gruntów zasypowych. Odkształcenia w zbrojeniu były w przybliżeniu proporcjonalne do obciążeń. Na tej podstawie stwierdzono, że przemieszczenia lica konstrukcji można oszacować w zakresie obciążeń użytkowych, na podstawie zmian długości poszczególnych warstw zbrojenia. Do określenia zmiany długości zbrojenia, oprócz siły rozciągającej, niezbędna jest znajomość zależności obciążenie – odkształcenie materiału geosyntetycznego.

W celu określenia przemieszczeń lica konstrukcji konieczne jest wykonanie następujących kroków [6]:

- określenie sił rozciągających w zbrojeniu w stanie granicznym użyteczności,
- określenie sztywności osiowej każdej z warstw zbrojenia,
- określenie rozkładu odkształceń na długości każdej z warstw zbrojenia,
- całkowanie odkształceń po długości zbrojenia, wynikowo otrzymując zmianę długości warstwy zbrojenia.

Mechanizm zniszczenia powodujący wystąpienie stanu granicznego w każdej z warstw zbrojenia określa się iteracyjnie, analizując siły rozciągające w poszczególnych warstwach zbrojenia, wykorzystując współczynniki częściowe dla stanu granicznego użyteczności. W ten sposób otrzymuje się siłę roz-

ciągającą w każdej z warstw zbrojenia. Na tej podstawie można określić powiązane odkształcenia zbrojenia geosyntetycznego.

Maksymalna wartość siły występująca w warstwie zbrojenia może być przyjęta jako stała na całej długości zbrojenia. Jest to jednak podejście konserwatywne.

W przypadku materiałów zbrojenia o niewielkich odkształceniach strukturalnych, takich jak geotkaniny lub geosiatki, zależność obciążenie – odkształcenie (sztywność osiowa) może być w przybliżeniu określana na podstawie badań rozciągania metodą szerokich próbek według normy DIN EN ISO 10319 [2]. Zaleca się w tych przypadkach przyjmować liniową zależność obciążenie – odkształcenie. Jest to założenie konserwatywne. Na podstawie wspomnianego badania [2] otrzymuje się zachowawczą wartość osiowej sztywności, dlatego następuje przewymiarowanie odkształceń w zbrojeniu, jak również odkształceń w konstrukcji oporowej zbrojonej geosyntetykami. W rzeczywistości zależność obciążenie – wydłużenie geosyntetyku zależy od rodzaju i stanu gruntu oraz obciążenia naziomu.

Zmiany długości warstw zbrojenia wynikają z ich odkształceń. Odpowiadają one w przybliżeniu przemieszczeniom lica konstrukcji na wysokości danej warstwy zbrojenia.

Stosując krzywe izochroniczne, możliwe jest oszacowanie przemieszczeń lica konstrukcji w okresie projektowym (np. 120 lat).

Odkształcenia postaciowe konstrukcji oporowej v_s

Odkształcenia postaciowe v_s wynikają przede wszystkim z odkształceń zbrojenia niezbędnych do osiągnięcia równowagi statycznej (przy ścinaniu) konstrukcji z gruntu zbrojonego. Te poziome odkształcenia powodują pionowe odkształcenia na powierzchni naziomu.

Na podstawie analiz wykazano [6], że w przypadku równomiernego obciążenia naziomu oraz jednolitego układu warstw zbrojenia dodatkowe osiadania w konstrukcji z gruntu zbrojonego wynoszą w przybliżeniu $30 \div 50\%$ wartości poziomego przemieszczenia lica muru v_h (dla największego z przemieszczeń poziomych występujących w różnych warstwach zbrojenia).

Pionowe przemieszczenie powierzchni górnego naziomu v_0

Pionowe przemieszczenie powierzchni górnego naziomu v_0 jest sumą osiadania podłoża gruntowego pod podstawą konstrukcji v_p , osiadania własnego gruntu zasypowego v_E oraz odkształcenia postaciowego konstrukcji z gruntu zbrojonego v_s .

Metody numeryczne

Charakter deformacji całego systemu można określić za pomocą analiz numerycznych (np. metody elementów skończonych). Ze względu na brak wystarczających danych dotyczących materiałów kompozytowych, zazwyczaj modeluje się osobno grunt oraz warstwy zbrojenia. Do określenia zachowania się złożonego ośrodka stosuje się wyniki badań bezpośredniego ścinania. W modelowaniu można wykorzystać podpory

sprężyste równoległe do zbrojenia, podobnie jak w metodach stosowanych w mechanice skał. Modele takie powinny symulować sprężysto-plastyczny rozkład sił ścinających (jak w badaniu bezpośredniego ścinania) [6].

Zbrojenie może być zamodelowane z użyciem podpór sprężystych lub elementów prętowych. W zależności od zachowania się materiału zbrojenia podczas procesu obciążenia – wydłużenie odpowiednie może być przyjęcie dla materiałów praw linowo-sprężystych lub innych.

Analizując wyniki, należy zwrócić uwagę na ewentualne nierealne naprężenia rozciągające mogące wystąpić w konstrukcji w wyniku różnic sztywności w strefie kontaktu zbrojenia z gruntem. Analiza numeryczna powinna być zawsze sprawdzona pod kątem realności uzyskanych wyników.

Osiowa sztywność geosyntetyku w stanie granicznym użyteczności

Sztywność geosyntetyku, będąca miarą zachowania się zbrojenia podczas obciążenia osiowego, jest określona jako konserwatywna, charakterystyczna wartość odczytana z krzywej obciążenie-wydłużenie geosyntetyku lub z izochron geosyntetyku (bez uwzględniania kontaktu z gruntem). Izochrony umożliwiają określenie długoterminowej osiowej sztywności wyrobu $J_{a-b,k,t}$ [5, 6].

NORMA BRYTYJSKA BS 8006:2010

Zalecenia ogólne

Zgodnie z zapisami zawartymi w normie BS 8006 [1], w stanie granicznym użyteczności sprawdza się, czy konstrukcja zachowa swoje właściwości wystarczające do tego, by pełnić założoną funkcję przez cały czas jej eksploatacji, bez potrzeby prowadzenia napraw.

Podejście do sprawdzenia stanu granicznego użyteczności zależy w dużej mierze od funkcji użytkowej konstrukcji. Zasadniczo warunki użyteczności powinny być opisane w postaci dopuszczalnych odkształceń. W stanach granicznych użyteczności współczynniki częściowe dla materiałów powinny być równe jedności.

Projektując konstrukcje z gruntu zbrojonego, należy brać pod uwagę właściwości materiału geosyntetycznego podczas pełzania. Nieprzewidziana degradacja zbrojenia może prowadzić do nadmiernych deformacji.

Stan graniczny użyteczności

Osiadanie

Całkowite osiadania konstrukcji z gruntu zbrojonego są sumą osiadań podłoża gruntowego wynikających z obciążeń od konstrukcji i obciążenia zewnętrznego oraz osiadania własnego (wewnętrznego) zbrojonego gruntu zasypowego.

Konstrukcja z gruntu zbrojonego posadowiona na nośnym i mało ściśliwym podłożu zachowuje się podobnie do konwencjonalnych konstrukcji oporowych i nie ulega znaczącym osiadaniam. Tego rodzaju konstrukcje zaleca się również w przypadku występowania gruntów słabonośnych lub ściśliwych ze względu na zdolność do kompensowania nadmiernych lub nierównomiernych osiadań.

Wykonując konstrukcję z gruntu zbrojonego w sąsiedztwie innych obiektów budowlanych, należy uwzględnić możliwość wzajemnego oddziaływania między nimi. Osiadanie konstrukcji może mieć wpływ na użyteczność ścian lub przyczółku. Może również zagrażać użyteczności drenażu oraz decydować o funkcjonalności obiektu.

Osiadanie podłoża gruntowego

Każde podłoże gruntowe ulega osiadaniam, gdy poddane jest dodatkowym, zwiększonym naciskom. Jednakże, konstrukcje z gruntu zbrojonego mają zdolność do kompensowania wpływu osiadań podłoża gruntowego.

Decyzja, czy konieczne jest obliczanie osiadań, należy do projektanta. Może być to uwarunkowane rodzajem konstrukcji lub przylegających obiektów wrażliwych na osiadania.

Obciążenie przekazywane z konstrukcji z gruntu zbrojonego na podłoże gruntowe jest mniejsze i bardziej równomiernie rozłożone niż w przypadku standardowych, betonowych konstrukcji, co wpływa na redukcję osiadań podłoża.

Osiadania wewnętrzne gruntu zasypowego

Kluczowy wpływ na wartość osiadania wewnętrznego ma grunt zasypowy. Zastosowanie materiału o odpowiednich parametrach oraz jego właściwe zagęszczenie pozwala znacząco redukować osiadania wewnętrzne.

Różnice osiadań

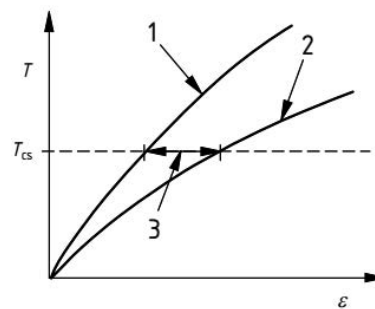
Nierównomierne osiadanie może powodować znacznie więcej poważnych szkód w typowym obiekcie budowlanym niż osiadanie równomierne o większej wartości. Należy zauważyć,

Tabl. 2. Tolerancje konstrukcji na nierównomierne osiadania [1]

Maksymalna różnica osiadań	Komentarz
1 / 1000	Pomijalne
1 / 200	Otwieranie oraz zamykanie połączeń może mieć wpływ na panele pełnej wysokości. Typowy wymóg przy licu z bloczków prefabrykowanych.
1 / 100	Typowy wymóg dla paneli betonowych o częściowej wysokości.
1 / 50	Typowy wymóg dla półeliptycznych stalowych elementów licu. W przypadku betonowych paneli o częściowej wysokości może dochodzić do zamykania złączy.
< 1 / 50	Podatne lica mogą ulegać odkształceniom, które pogarszają ich zdolności oporowe.

że grunt zbrojony jest odporny na duże różnice osiadań, a ograniczenia są związane zazwyczaj z zastosowanym obliczaniem.

Gdy przewidywane są duże osiadania (na przykład na terenach szkód górniczych), należy rozważyć zastosowanie specjalnych dylatacji lica (przesuwnych złączy) konstrukcji oporowej. Tolerancje konstrukcji lica na nierównomierne osiadania w ich płaszczyźnie przedstawiono w tabl. 2. Podane informacje są tylko wskazówkami do projektowania i nie stanowią sprecyzowanych ograniczeń normowych dla poszczególnych rodzajów oblicowań.



Rys. 3. Wyznaczanie dopuszczalnych sił rozciągających w zbrojeniu [1]
1 – izochrona na etapie zakończenia wykonawstwa, 2 – izochrona na etapie zakończenia projektowanego okresu użytkowania konstrukcji, 3 – graniczne odkształcenia w okresie użytkowania konstrukcji, T – obciążenie (siła rozciągająca w warstwie zbrojenia), ε – odkształcenie podłużne zbrojenia

Tolerancje wykonawcze oraz warunki użytkowalności

Konstrukcje z gruntu zbrojonego ulegają deformacji w trakcie wykonawstwa. Należy zwrócić uwagę na potrzebę przewidzenia odpowiednich luzów pozwalających konstrukcji osiągnąć stabilny kształt oraz sprawdzić czy przemieszczenia występujące w trakcie budowy oraz po jej zakończeniu mieszczą się w dopuszczalnych granicach.

Odształcenia powstałe w trakcie wykonawstwa

Odształcenia lica i powierzchni górnego naziomu nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych. Dodatkowo:

- lico konstrukcji powinno być wizualnie akceptowalne oraz wolne od wybrzuszeń, zwisów i nierówności;
- wszystkie wierzchołki powinny łączyć linie proste lub łagodne krzywizny;
- kolejność wykonania konstrukcji może mieć decydujące znaczenie w celu zapewnienia braku nieakceptowalnych deformacji powodujących utratę właściwości użytkowych konstrukcji;
- lico muru nie powinno odkształcać się ani wykazywać zniszczeń w materiale oblicowania.

Tabl. 3. Dopuszczalne tolerancje konstrukcji dla lica murów oporowych oraz -przyczółków [1]

Cecha	Dopuszczalna tolerancja
Położenie płaszczyzny lica	± 50 mm
Pionowość	± 5 mm / 1 m wysokości muru (1/200)
Wybrzuszanie (pionowe) oraz wykrzywianie (poziome)	± 25 mm / 4,0 m

Wartości podane w tabl. 3. są orientacyjnymi tolerancjami konstrukcyjnymi dopuszczalnymi po zakończeniu budowy konstrukcji. Podane wartości są jedynie wskazówkami, a konstrukcje z wyższymi tolerancjami są stosowane często.

Odształcenia powstałe w trakcie użytkowania konstrukcji

Użytkowalność konstrukcji może być często uzależniona od deformacji, które powstają w okresie jej użytkowania. Deformacje te zależą od pełzania materiału zbrojenia, zagęszczania

(kompresji) gruntu zasypowego w czasie oraz osiadania podłoża gruntowego w czasie użytkowania konstrukcji.

Odształcenia konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego powstałe w czasie użytkowania konstrukcji mogą wynikać z:

- osiadania podłoża,
- osiadania wewnętrznego zasypki gruntowej (jej zagęszczania),
- wewnętrznych odkształceń zbrojenia spowodowanych pełzaniem,
- osiadań wynikających ze szkód górniczych itp.,
- odkształcenia związanego z pełzaniem gruntu o dużej zawartości frakcji pylastych lub ilastych.

Wymienionym przemieszczeniom konstrukcji w okresie użytkowania można zazwyczaj zapobiec poprzez odpowiednie podejścia projektowe. Odształcenia wewnętrzne zbrojenia spowodowane pełzaniem należy ograniczyć do wartości podanych w tabl. 4. (chyba że projektant dopuszcza inne wartości).

Tabl. 4. Dopuszczalne wartości odkształceń geosyntetyków w okresie użytkowania dla zbrojenia przyczółków mostowych oraz ścian oporowych z gruntu zbrojonego[1]

Konstrukcja	Odształcenie [%]
Przyczółki mostowe oraz ściany oporowe z gruntu zbrojonego poddane stałym obciążeniom	0,5
Ściany oporowe bez stałego obciążenia (tylko tymczasowe obciążenie użytkowe)	1,0

Sprawdzenie warunku wydłużenia zbrojenia geosyntetycznego sprowadza się do określenia dopuszczalnych sił w zbrojeniu określonych na podstawie dopuszczalnych odkształceń geosyntetyków oraz izochron odpowiednich dla danego materiału, zgodnie z wykresem przedstawionym na rys. 3.

Wytrzymałość zbrojenia w stanie SGU

W Stanie Granicznym Użytkowalności charakterystyczną długoterminową wytrzymałość zbrojenia należy przyjmować równą T_{cs} przy ograniczeniu odkształceń zbrojenia [1, 5]. Projektową (obliczeniową) wytrzymałość zbrojenia w SGU obliczać należy według wzoru:

$$T_D = \frac{T_{CS}}{f_m}$$

gdzie:

f_m – materiałowy współczynnik bezpieczeństwa.

ZALECENIA AMERYKAŃSKIE FHWA

Stan graniczny użyteczności

W odniesieniu do ograniczeń odkształceń zbrojenia metody szacowania odkształceń różnią się znacząco i brak jest zgody środowiska amerykańskich projektantów [9], co do poprawnej metody analitycznej pozwalającej wiarygodnie określić odkształcenia konstrukcji. Pomiary *in situ* wykazały znacznie niższe wartości odkształceń zbrojenia geosyntetycznego niż oszacowane na podstawie aktualnie stosowanych metod analitycznych. W związku z tym, dopóki nie będzie uzgodniona odpowiednia metoda określania odkształceń, zaleca się, aby nie nakładać wymogów granicznego odkształcenia zbrojenia gruntu.

Osiadania

Zgodnie z zapisami zawartymi w FHWA NHI-10-024 [9] należy przeprowadzić analizę osiadań podłoża, aby upewnić się, czy osiadanie natychmiastowe, wtórne oraz konsolidacyjne gruntu spełniają wymagania projektowe zgodnie z FHWA NHI-06-088 [7] oraz FHWA NHI-06-089 [8].

W przypadku przewidywania znacznych osiadań powykonawczego fundamentu należy dostosować do nich poziom górnej krawędzi lica konstrukcji oporowej. Można to zrealizować poprzez podniesienie górnej krawędzi obliczania w trakcie projektowania lub poprzez dostosowanie jej rzędnej w trakcie wykonawstwa. W tym przypadku należy zaplanować wykonanie górnej krawędzi obliczania (wierzchniego rzędu paneli/blozków lub kapy gzymsowej) dopiero po zakończeniu procesu wznoszenia konstrukcji. Rzędą szczytu konstrukcji określa się wtedy z uwzględnieniem możliwości wystąpienia dalszych osiadań.

Znaczące różnice w wartościach osiadań na długości konstrukcji lica (ponad 1/100) wskazują na potrzebę zastosowania złączy poślizgowych pozwalających na niezależne ruchy pionowe sąsiednich paneli. W przypadku, gdy wartości osiadań lub czas ich realizacji powoduje, że nie mogą być kompensowane powyższą metodą, należy rozważyć wykonanie wzmocnienia podłoża gruntowego, zastosowanie lekkiego materiału zasypowego lub wykonanie konstrukcji z licem w systemie biernym, gdzie obliczanie pracuje niezależnie od konstrukcji oporowej.

Przemieszczenia poziome

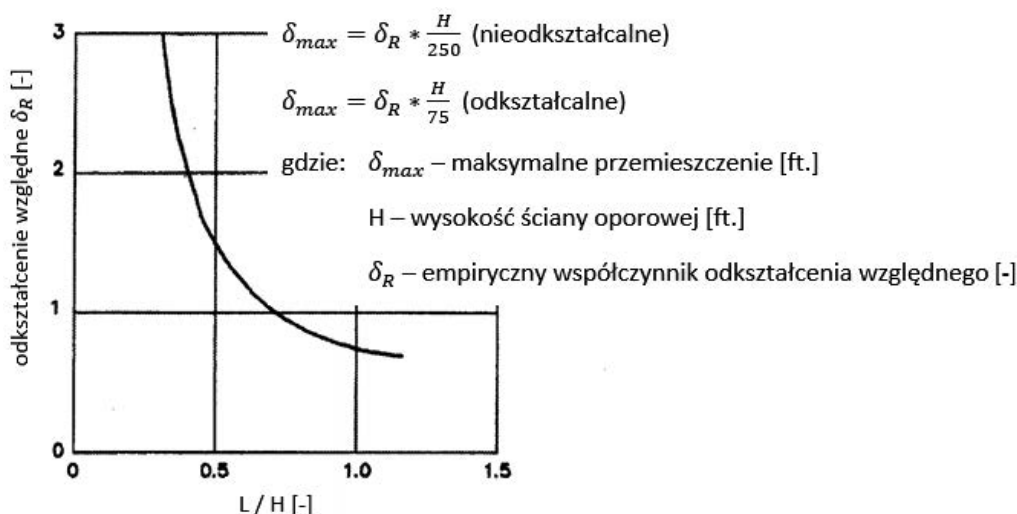
W [9] stwierdza się, że ze względu na to, iż przemieszczenia oblicza się dla stanu granicznego użyteczności, ocena poziomych przemieszczeń według metody globalnego współczynnika bezpieczeństwa jest identyczna jak w przypadku metody dopuszczalnych naprężeń. Większa część odkształceń poziomych ścian oporowych z gruntu zbrojonego występuje zazwyczaj w czasie wznoszenia konstrukcji. Przemieszczenia po zakończeniu budowy mogą wystąpić w wyniku obciążeń zewnętrznych, osiadań gruntu zasypowego lub długoterminowych osiadań podłoża gruntowego.

Zgodnie z zapisami w wytycznych FHWA [9] nie ma obecnie metody pozwalającej oszacować poziome przemieszczenia, których znaczna większość występuje w czasie wznoszenia konstrukcji. Wielkość poziomych przemieszczeń zależy od technologii układania gruntu zasypowego, efektywności zagęszczania, sztywności podłużnej zbrojenia, jego długości, sposobu połączenia zbrojenia z licem konstrukcji oraz od sztywności lica.

Na rys. 4. przedstawiono wykres umożliwiający przybliżone oszacowanie poziomych przemieszczeń ściany oporowej z gruntu zbrojonego w zależności od stosunku długości geozbrojenia do wysokości konstrukcji [9].

Dla $L = 0,7 H$:

- stalowe (nieodkształcalne) zbrojenie $\approx 1,9$ cm na 3,0 m wysokości ściany oporowej,
- geosiatki (średnio odkształcalne) $\approx 2,5$ cm na 3,0 m wysokości ściany oporowej,



Rys. 4. Odkształcenia względne ściany oporowej w zależności od stosunku długości zbrojenia do wysokości konstrukcji [8]

- geotekstyli (odkształcalne) $\approx 3,8$ cm na 3,0 m wysokości ściany.

Na podstawie badań ściany oporowej o wysokości 6,1 m stwierdzono, że względne odkształcenie ściany rośnie średnio o 25% na każde 20 kPa obciążenia naizomu. Doświadczenie wskazuje, że w przypadku wyższych ścian, dodatkowe obciążanie może mieć większy wpływ na odkształcenia.

Zazwyczaj zwiększając wskaźnik zbrojenia (stosunek długości geosyntetyku do wysokości konstrukcji oporowej) z jego teoretycznej dolnej granicy równej $0,5 H$ do zalecanej przez AASHTO wartości $0,7 H$, zmniejsza się prognozowane deformacje o około 50%. W przypadku wrażliwych konstrukcji wymagających szczególnej dokładności (jak na przykład przyczółki mostowe) mogą być wymagane bardziej precyzyjne analizy przy użyciu metod numerycznych.

Analiza odpowiedzi konstrukcji na deformację pozwala na uzyskanie przewidywanej reakcji konstrukcji na poziome (oraz pionowe) przemieszczenia. Analizy przemieszczeń poziomych są najtrudniejsze do wykonania oraz najmniej dokładne ze wszystkich przeprowadzanych obliczeń. Wyniki mogą mieć wpływ na wybór obliczania, połączeń lica oraz etapowania wykonania gruntu zasypowego.

Przemieszczenia pionowe

Wewnętrzne osiadanie materiału zasypowego następuje praktycznie natychmiastowo z jedynie bardzo małymi przemieszczeniami występującymi po zakończeniu wykonawstwa w związku z zagęszczaniem się gruntu zasypowego. Wielkość całkowitego przemieszczenia jest sumą wewnętrznego osiadania oraz osiadania podłoża gruntowego pod konstrukcją.

PORÓWNANIE PODEJŚĆ PROJEKTOWYCH

W normie PN-EN 1997-1 [12] opisano, jakie elementy należy uwzględnić projektując ścianę oporową. Wyszczególniono wpływy oddziaływań, które należy wziąć pod uwagę, wykonując obliczenia oraz przedstawiono, kiedy można pominąć wykonywanie obliczeń odkształceń konstrukcji z gruntu zbrojonego. Nie podano niestety żadnego algorytmu obliczeń. Jest to sytuacja charakterystyczna dla większości zapisów normy [12]. W konsekwencji projektanci otrzymują wymagania bez narzędzi, przy użyciu których mogliby rozwiązać przedstawione zagadnienia. O ile w przypadku prostszych i bardziej rozpoznanych obecnie zagadnień taka sytuacja nie byłaby problemem, o tyle w przypadku obliczania odkształceń ścian oporowych z gruntu zbrojonego jest to duża trudność.

W instrukcji ITB [10] określono wymagania dotyczące sprawdzenia stanu granicznego użyteczności konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego, podano również sposób, w jaki można takie sprawdzenie wykonać. Wymagania te są również często stosowane przez projektantów obiektów mostowych. Bardzo często dodatkowym wymogiem jest określenie wartości przemieszczeń poziomych konstrukcji. Niestety, nie podjęto tego zagadnienia w opracowaniu [10].

W niemieckich wytycznych EBGeo [6] oraz DIN-1054 [3] opisano szczegółowo, jakie warunki powinna spełniać konstrukcja w konkretnych przypadkach. W przeciwieństwie do pozostałych wytycznych, zaproponowano sposób obliczania przemieszczeń poziomych konstrukcji. Zakłada się, że zbrojenie pracuje elastycznie oraz brak jest poślizgu po gruncie. W efekcie można obliczyć odkształcenia lica muru, mając wartości sił w zbrojeniu geosyntetycznym, zgodnie z algorytmem:

- wyznaczyć siły w zbrojeniu przy obciążeniach charakterystycznych,
- odczytać sztywność osiową wyrobu geosyntetycznego z wykresu krzywych izochronicznych,
- mając siły podłużne oraz sztywności osiowe, obliczyć odkształcenia geozbrojenia, zgodnie z prawem Hooke'a,
- na podstawie wydłużenia określić przemieszczenia poziome lica muru.

Problemem pozostaje rozkład sił na długości zbrojenia. W EBGeo [6] zaproponowano przyjęcie maksymalnej siły na długości całej warstwy zbrojenia geosyntetycznego, zaznaczono jednak, że jest to rozwiązanie bardzo konserwatywne. Przyjmując takie założenie, otrzymuje się nierealne odkształcenia konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego. Nie można zatem uznać tej metody za użyteczną w projektowaniu inżynierskim. Zdaniem autorów artykułu metoda mogłaby mieć zastosowanie w praktyce, gdyby działanie siły maksymalnej było przyjmowane na pewnej „aktywnej” długości zbrojenia. Problemem pozostaje niestety odpowiednia długość strefy aktywnej dla każdej z warstw zbrojenia. Logiczne wydawałoby się przyjęcie strefy aktywnej jak dla najmniej korzystnego klina odłamu, dla którego odczytano analizowane siły w zbrojeniu. Jest to jednak sposób dosyć „losowy”. Kształt krytycznego klina odłamu łatwo ulega zmianie pod wpływem zmiany geometrii modelu czy obciążeń. Wprowadzając niewielką zmianę, możemy w ten sposób otrzymać nawet $2 \div 3$ razy większe przemieszczenia. Jarominiak [11] opierając się na zaleceniach francuskich, sugeruje przyjęcie szerokości strefy aktywnej równej $0,16 H$ dla taśm poliestrowych oraz $0,30 H$ dla zbrojenia stalowego, gdzie H – wysokość całkowita ściany oporowej.

Dodatkowym warunkiem stanu granicznego użyteczności (SGU), występującym jedynie w zaleceniach niemieckich EBGeo [6], jest sprawdzenie położenia wypadkowej sił oraz stateczności na poślizg.

W normie BS 8006-1:2010 [1], podobnie jak instrukcji ITB [10], wskazuje się na potrzebę sprawdzenia warunku wydłużenia zbrojenia geosyntetycznego konstrukcji oporowej. W wymienionych wytycznych nie wspomniano o potrzebie analizy odkształceń poziomych konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego.

Według zaleceń amerykańskich FHWA NHI-10-024 [9] nie ma aktualnie metody pozwalającej realnie określić odkształcenia poziome konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego. W związku z tym nie zaleca się nakładania na projektantów wymagań w stosunku do odkształceń poziomych konstrukcji. Zgodnie z zaleceniami wszystkie obecnie stosowane metody nie są jednoznaczne, a ich wyniki znacznie różnią się od wartości pomierzonych w rzeczywistych konstrukcjach.

PODSUMOWANIE

Analizując zapisy krajowych i najbardziej rozpowszechnionych zagranicznych norm i wytycznych projektowych dotyczących konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego, można dojść do wniosku, że problem obliczania czy szacowania odkształceń poziomych konstrukcji oporowych nie został do tej pory dostatecznie opracowany. Część zapisów wytycznych z poszczególnych krajów znacząco się różni. Zalecenia polskie oraz angielskie nakładają wymóg sprawdzenia odkształcenia zbrojenia w postaci sprawdzenia warunku nieprzekroczenia dopuszczalnych sił rozciągających. W wytycznych niemieckich podano metodę, zgodnie z którą można (w konserwatywny sposób) oszacować odkształcenia poziome konstrukcji. W zaleceniach amerykańskich zapisano wprost, że nie należy nakładać na projektantów obowiązku sprawdzania takiego warunku, ponieważ zagadnienie to nie zostało jeszcze odpowiednio rozpoznane.

Ze względu na brak dostępnych spójnych i szczegółowych wytycznych projektowych do określania przemieszczeń konstrukcji, obecnie często stosuje się analizy z wykorzystaniem metod elementów skończonych (MES). Niestety, zazwyczaj obliczenia takie nie są łatwe dla „przeciętnego” projektanta. Problemy stanowią między innymi czasochłonność przeprowadzanych analiz, wrażliwość na zmiany parametrów materiałowych oraz często skomplikowane metody obliczeniowe stanowiące rdzeń programów (np. parametry analizy nieliniowej, różnorodne modele konstytutywne gruntów, wśród których projektanci są zmuszeni dokonywać wyborów w zależności od charakteru pracy konstrukcji i warunków geotechnicznych).

Podsumowując, należy podkreślić, że zdobyte w ostatnich latach doświadczenia projektantów i wykonawców wykazują,

że rzeczywiste odkształcenia poziome konstrukcji w przypadku prawidłowego ich zaprojektowania (w ramach stanów granicznych nośności) oraz braku błędów wykonawczych nie osiągają wartości mogących zagrażać ich użyteczności.

LITERATURA

1. BS 8006-1:2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
2. DIN EN ISO 10319 (2015). Geosynthetics – Wide-width tensile test.
3. DIN 1054. (2005) Ground – Verification of the safety of earthworks and foundations.
4. DIN 4019. (2014) Soil – Analysis of Settlement.
5. Duszyńska A., Sikora Z.: „Dobór wyrobów geosyntetycznych do zbrojenia gruntu”, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5/2014.
6. EBGeo 2010: Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements. Ernst W. & Sohn Verlag.
7. FHWA NHI-06-088. (2006) Soils and Foundations. Reference Manual – Volume I.
8. FHWA NHI-06-089. (2006) Soils and Foundations. Reference Manual – Volume II.
9. FHWA NHI-10-024. (2009) Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes.
10. Instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej nr 429/2007. Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami.
11. Jarominiak A. Lekkie konstrukcje oporowe. Warszawa 1982.
12. PN-EN 1997-1. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.