

PRZYZCÓŁKI MOSTOWE WSPOMAGANE KONSTRUKCJAMI Z GRUNTU ZBROJONEGO¹

Marcin CUDNY, Angelika DUSZYŃSKA, Kazimierz GWIZDAŁA,
Przemysław KALITOWSKI, Krzysztof ŻÓŁTOWSKI
Politechnika Gdańska

W referacie przedstawiono syntezę prac związanych z oceną projektów przyczółków wykorzystujących odciążenie w postaci konstrukcji z gruntu zbrojonego geosyntetykami, realizowanych na drogach ekspresowych S3 i S7. W ramach przeprowadzonych audytów dokonano oceny zastosowanych rozwiązań szczegółowych i materiałów jak również obliczeń zamieszczonych w projektach. Zwrócono szczególną uwagę na przestrzenną pracę bloków z gruntu zbrojonego pod obciążeniem ruchomym oraz na wpływ płyty przejściowej. Pracę zakończono zestawieniem wniosków szczegółowych podsumowujących przeprowadzone analizy.

Słowa kluczowe: przyczółki, konstrukcja odciążająca z gruntu zbrojonego, geosyntetyki, trwałość.

1. GRUNTY ZBROJONE

Pod pojęciem gruntu zbrojonego kryje się kompozyt, składający się z gruntu nasypowego oraz elementów, które celowo wprowadza się pomiędzy warstwy gruntu, nazywanych zbrojeniem. Funkcję zbrojenia pełnić mogą różne materiały, a ich cechą wspólną jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie. Konstrukcja ziemna z elementami zbrojenia jest w stanie przenieść siły ścinające dzięki oporowi gruntu i siłom rozciągającym zmobilizowanym w odpowiednio zastosowanych elementach zbrojenia.

W pionierskich projektach, wykorzystujących współpracę gruntu ze zbrojeniem, według pomysłu Vidala, stosowano zbrojenia stalowe. Nowoczesną alternatywą dla tych rozwiązań jest zbrojenie syntetyczne. Wśród wielu zastosowań gruntu zbrojonego geosyntetykami, ważne miejsce zajmują elementy budownictwa komunikacyjnego m.in. przyczółki mostowe, wysokie nasypy drogowe i kolejowe o stromych skarpach.

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.24.04

Pomimo niewątpliwego postępu w dziedzinie wykorzystania geosyntetyków w funkcji zbrojenia, na polskim rynku budowlanym widocznym mankamentem jest nadal duża dowolność w wyborze norm i metod wymiarowania, doborze współczynników bezpieczeństwa i różnice w dostępnych programach obliczeniowych. Powoduje to dużą rozbieżność co do wymaganej wytrzymałości zbrojeń i prowadzi do znaczących różnic w specyfikacjach technicznych oraz budzi nieufność zarówno inwestorów, jak i projektantów.

2. GEOSYNTETYKI JAKO ZBROJENIE

Mechanizm działania zbrojenia geosyntetycznego w konstrukcji zależy w głównej mierze od: rodzaju budowli ziemnej (np. konstrukcja oporowa, nasyp), charakteru obciążenia (statyczne, dynamiczne), jak również od sposobu i technologii wykonania posadowienia (bezpośrednio czy na elementach nośnych). Informacje te są kluczowe dla procesu projektowania budowli i warunkują prawidłowy dobór wyrobów geosyntetycznych do ich wykonania.

Spośród szerokiej gamy geosyntetyków w funkcji zbrojenia najczęściej stosowane są: geosiatki, geotkaniny oraz geokompozyty. [1]

Geosiatki (georuszty)

Geosiatki wykonuje się najczęściej z polipropylenu, poliestru lub polietylenu (wysokiej gęstości), a także z włókien poliwinylu alkoholowego i innych. Węzły geosiatek (miejsca skrzyżowań pasm – żeber) mogą być monolityczne lub elastyczne. Przy doborze geosiatek w funkcji zbrojenia bardzo istotne jest sprawdzenie wytrzymałości materiału oraz wielkości oczek w odniesieniu do frakcji kruszywa wykorzystanego do współpracy z geosiatką.

W zależności od charakteru pracy geosiatek możemy wyróżnić:

- geosiatki jednokierunkowe – zalecane do zbrojenia gruntu gruboziarnistego w przypadku konstrukcji, w których występują duże siły rozciągające w kierunku podłużnym (np. przyczółki i ściany oporowe)
- geosiatki dwukierunkowe – zalecane dla konstrukcji, w których przewidywane siły wewnętrzne w obydwu kierunkach są do siebie zbliżone,
- geosiatki heksagonalne – (rozwiązanie oparte na trójkącie równobocznym), wykazujące niemal jednorodne właściwości mechaniczne we wszystkich kierunkach oraz wysoki efekt skrepowania bocznego przy współpracy z kruszywem.

W przypadku konieczności zapewnienia funkcji separujących lub/i filtracyjno-drenażowych, geosiatki należy stosować w połączeniu z geowłókninami, ewentualnie geotkaninami.

Geotkaniny

Do produkcji geotkanin wykorzystywane są różne rodzaje polimerów, które wpływają na właściwości fizyczne i mechaniczne gotowego wyrobu. Najczęściej



stosowane są włókna polipropylenowe, polietylenowe i poliestrowe. Geotkaniny stosowane w funkcji zbrojącej najlepiej spełniają swoje funkcje, jeżeli przy ich produkcji zastosowany został splot płócienny. Ułożona na podłożu geotkanina dostosowuje się do znacznych deformacji gruntu i nie ulega zerwaniu, aż do momentu przekroczenia wartości siły rozciągającej w materiale.

Geokompozyty

Geokompozyty stanowią oddzielną grupę wyrobów o bardzo zróżnicowanych parametrach i pełnionych funkcjach w kontakcie z gruntem. Geokompozyty wzmacniające grunty zbudowane są przeważnie z geotkaniny lub geowłókniny odpowiadającej za parametry filtracyjne, połączonej z elementem wzmacniającym.

Geokompozyty w funkcji zbrojenia stosowane są najczęściej do wzmacniania podłoża nasypów komunikacyjnych o małej nośności, ale mogą być wykorzystywane również do zbrojonych nasypów, konstrukcji oporowych i przyczółków, pod warunkiem że charakteryzują się odpowiednimi cechami wytrzymałościowymi.

Polimery

Ze stosunkowo szerokiego wachlarza polimerów, które są obecnie produkowane na skalę przemysłową, do wyrobów geosyntetycznych stosuje się przede wszystkim [2]:

- Polietylen o wysokiej gęstości (HDPE) – tworzywo o dobrej odporności na ścieranie i zużycie oraz wysokiej udarności. Cechuje go doskonała odporność chemiczna, średnia wytrzymałość mechaniczna, średnia sztywność oraz średnia odporność na pełzanie, jednak ulega on starzeniu pod wpływem promieniowania UV;
- Polipropylen (PP) – tworzywo o nieco lepszych właściwościach mechanicznych od polietylenu (jest sztywniejsze), przy czym poniżej temperatury 0°C wykazuje znaczny spadek udarności, dlatego wzmacnia się go włóknem szklanym. Cechuje go wysoka odporność chemiczna oraz niska gęstość. Tworzywo to ulega starzeniu pod wpływem światła i promieniowania UV oraz temperatury;
- Poliester (głównie PET) – tworzywo o bardzo dużej wytrzymałości mechanicznej, sztywności oraz twardości; cechujące się również bardzo dużą odpornością na pełzanie oraz ścieranie (porównywalna lub wyższa niż dla poliamidów). Jest to tworzywo odporne na oleje, tłuszcze i większość rozpuszczalników, jednakże nie jest odporne na działanie silnych kwasów i zasad. Charakteryzuje go stosunkowo duża gęstość oraz odporność na wysoką temperaturę. Cechuje go też wysoka udarność oraz odporność na działanie promieniowania UV.

W mniejszym zakresie wykorzystywane są również [2]:

- Polichlorek winylu (PVC) – tworzywo o znakomitej odporności chemicznej, niskiej odporności termicznej. Cechuje go również duża wytrzymałość me-



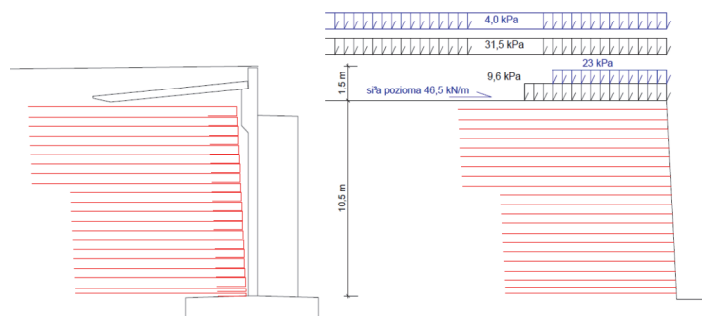
chaniczna oraz odporność na spękania naprężeniowe, a także niewielka odporność na ścieranie;

- Poliamid (PA) – tworzywo charakteryzujące się dużą sztywnością, twardością, trwałością oraz wytrzymałością mechaniczną, a przy tym bardzo elastyczne i posiadające bardzo dobrą odporność na ścieranie. Wyróżniają go dobre właściwości elektroizolacyjne oraz wysoka zdolność tłumienia drgań, a także odporność na uderzenia. Cechuje go także wysoka odporność na promieniowanie UV, dobra odporność chemiczna na oleje, tłuszcze i benzynę oraz dobra obrabialność.

W ostatnich latach, do wyrobu geosyntetyków (głównie geosiatek) stosowane są również specjalne tworzywa o znacznej sztywności na rozciąganie, małym pełzaniu i dobrej odporności chemicznej, do których należą poliwinyl-alkohol (PVA) i aramid (A).

3. KONSTRUKCJA ODCIĄŻAJĄCA STOSOWANA W OBIEKTACH MOSTOWYCH W CIAGU DRÓG S3 I S5

Rozwiązanie zastosowane na obiektach mostowych w ciągu dróg S3 i S5 polega na całkowitym oddzieleniu konstrukcji przyczółka od nasypu. W takim przypadku przyczółek nie pełni funkcji muru oporowego i jest poddany tylko obciążeniom pochodzącym od przęsła. Typowy schemat pracy dla konstrukcji z gruntu zbrojonego pokazano na rysunku nr 1 [3].



Rys. 1. Schemat pracy konstrukcji gruntowej – obiekt WD-29 S-3 [3]

Posadowienie podpór zaprojektowano jako bezpośrednie, ale nie jest to regułą. W związku z występowaniem szkód górniczych zaprojektowano materac geosyntetyczny o grubości 0,6 m. Wypełnienie materaca pod fundamentem stanowi grunt niespoisty, piasek średni o wskaźniku zagęszczenia $I_s < 0,85$ lub rozwiązanie równoważne według projektu technologicznego. Przyczółki zaprojektowano jako żelbetowe ścianowo - słupowe, ze skrzydłami bocznymi równoległymi do osi



podłużnej obiektu. Ściany boczne zostały oddylatowane od korpusu. Szczeliny dylatacyjne na przyczółkach (między ścianami bocznymi) oraz między trzonami przyczółka zabezpieczono taśmami dylatacyjnymi.

Założenia projektowe dla gruntu zbrojonego za przyczółkiem [3]:

- wskaźnik zagęszczenia materiału nasypowego wewnątrz konstrukcji zbrojących powinien wynosić $I_s \geq 1,0$, kąt tarcia wewnętrznego $\phi \geq 32^\circ$, spójność $c = 0 \text{ kPa}$, ciężar objętościowy $\gamma = 19 \div 21 \text{ kN/m}^3$, materiał powinien być niewysadzinowy,
- pozostawiona przestrzeń pomiędzy ścianą przyczółka, a gruntem zbrojonym $20 \div 30 \text{ cm}$ - zależnie od wysokości przyczółka, tak, aby uwzględniając wszystkie przemieszczenia (okres budowy, obciążenie, efekt reologiczny) grunt zbrojony nie zetknął się ze ścianą przyczółka przekazując jakiegokolwiek obciążenia.
- trwałość materiałów powinna gwarantować zachowanie parametrów w okresie minimum 100 lat,
- obciążenie gruntu zbrojonego powinno być zgodne z klasą obciążenia danego obiektu oraz normą PN 85/S-100030.

Założenia projektowe:

- Konstrukcja z gruntu zbrojonego odciążającego przyczółek nie stanowi wzmocnienia podłoża gruntowego. W podstawie bryły gruntu zbrojonego zakłada się podłoże nośne, zabezpieczone przed nadmiernymi osiadaniami.
- Nasyp odciążający za przyczółkami zaprojektowano w technologii zbrojonej konstrukcji ziemnej ze zbrojeniem geosiatką jednokierunkową i gruntu nasypowego, układanego w kolejnych warstwach. Aktywne siły wywierane przez grunt i obciążenia zewnętrzne są przenoszone w odpowiednich proporcjach przez zasypkę i zbrojenie.
- Blok z gruntu zbrojonego ma za zadanie całkowite zredukowanie parcia na przyczółek oraz jego ściany boczne.
- Jako zbrojenie nasypu odciążającego przyjęto dwa rodzaje geosiatek jednokierunkowych o długoterminowej wytrzymałości obliczeniowej z uwzględnieniem okresu 120 lat eksploatacji i współczynników redukcyjnych A_1 , A_2 , A_3 , A_4 oraz współczynnika globalnego $\gamma = 1,3$:
 - geosiatka PVA 80/30 $F_d = 25,5 \text{ kN/m}$;
 - geosiatka PVA 150/30 $F_d = 47,8 \text{ kN/m}$.
- Maksymalne odkształcenia geosiatek w okresie eksploatacji (założony 120 lat) $\varepsilon = 3,1 \%$.
- Materiał zasypowy: kruszywo mineralne o kącie tarcia wewnętrznego $\phi = 33^\circ$ i ciężarze objętościowym $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.
- Obciążenia charakterystyczne do wymiarowania konstrukcji z gruntu zbrojonego:
 - oddziaływania zmienne pionowe od pojazdów samochodowych:



- klasa obciążenia A – obciążenie $q = 4$ kPa, obciążenie $K = 800$ kN,
- obciążenie równomiernie rozłożone od „K” (w koronie drogi) o długości 4,8 m i szerokości 3,3 m na gł. 1,5 m poniżej korony drogi i przy założonym kącie rozchodzenia się naprężeń $\beta = 39^\circ$ przyjmuje wartość $R''_{\text{pion.}} \cong 23$ kPa na odcinku 6,0 m,
- oddziaływania zmienne, poziome od pojazdów samochodowych:
 - $K/3 = 266,7$ kN na głębokości 1,5 m poniżej korony drogi $R_{\text{poz.}} \cong 46,5$ kN/m;
 - oddziaływania stałe od ciężaru płyty przejściowej podpory A $R^A_{\text{płyty}} = 9,6$ kPa na odcinku 7,5 m;
 - oddziaływania stałe od ciężaru płyty przejściowej podpory C $R^C_{\text{płyty}} = 8,4$ kPa na odcinku 6,5 m;
 - oddziaływania stałe od ciężaru gruntu i konstrukcji drogowej na całej długości przekroju obliczeniowego $R_{\text{dr.}} = 31,5$ kPa.

Wartość współczynnika dynamicznego do obciążeń $\phi = 1$.

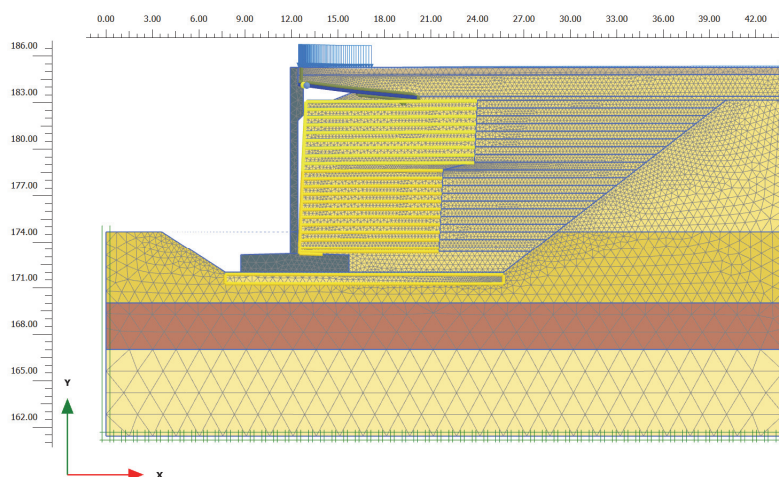
4. ANALIZA 2D

W celu weryfikacji wykonanych obliczeń statycznych masywu z gruntu zbrojonego przeprowadzono analizę zagadnienia metodą elementów skończonych [3]. W zagadnieniu brzegowo-początkowym uwzględniono zalegające podłoże naturalne, ławę fundamentową z materacem geosyntetycznym, ścianę wraz z płytą przejściową oraz sam masyw gruntu zbrojonego z geosyntetykami według specyfikacji w projekcie technologicznym. W obliczeniach odtworzono postępowanie robót budowlanych: podłoże naturalne z warunkami naprężenia początkowego w zalegających warstwach gruntu, wykop, instalację materaca geosyntetycznego, budowę ławy i ściany żelbetowej, wprowadzanie kolejnych warstw masywu z gruntem zbrojonym, wykonanie przegubowo podpartej płyty przejściowej z fundamentem, wykonanie podbudowy i drogi oraz obciążenia użytkowe w postaci obciążenia od pojazdu K (50 kPa na odcinku 4,8 m w dwóch wariantach ustawienia) oraz obciążenia od ruchu drogowego w postaci obciążenia równomiernie rozłożonego o wartości 4 kPa.

Geosyntetyki zamodelowano poprzez elementy membranowe z parametrem sztywności wzdłużnej EA oraz wytrzymałością na rozciąganie F_{max} wg dostarczonej specyfikacji produktów. Począwszy od fazy obliczeniowej wprowadzania poszczególnych warstw zbrojenia zastosowano tzw. opcję uaktualnianej siatki obliczeniowej polegającą na zmianie położenia węzłów z postępującymi przemieszczeniami. Pozwala to na bardziej realistyczne oszacowanie sił generowanych w zbrojeniu oraz zmian naprężeń w masywie gruntu zbrojonego. Płytę przejściową zamodelowano poprzez element belkowy (płytowy w płaskim stanie odkształcenia). Kontakt płyty fundamentowej z gruntem zamodelowano poprzez elementy kontaktowe *interface*. Sztywność i wytrzymałość podłoża naturalnego



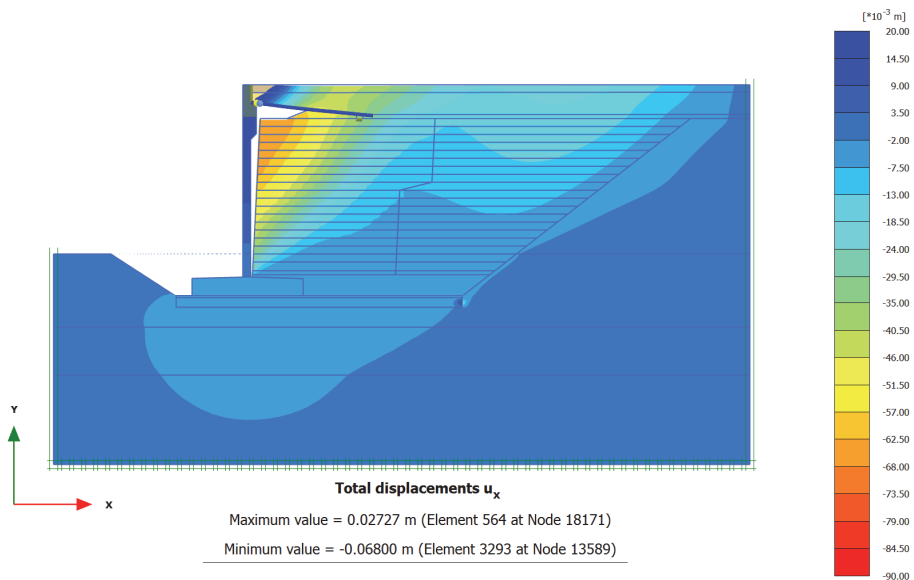
oraz gruntu zasypowego opisano odpowiednio modelami konstytutywnymi *Hardening Soil* oraz *Mohra-Coulomba*. Schemat obliczeniowy pokazujący ostateczną geometrię oraz dyskretyzację analizowanego zagadnienia brzegowo-początkowego przedstawiono na rysunku nr 2.



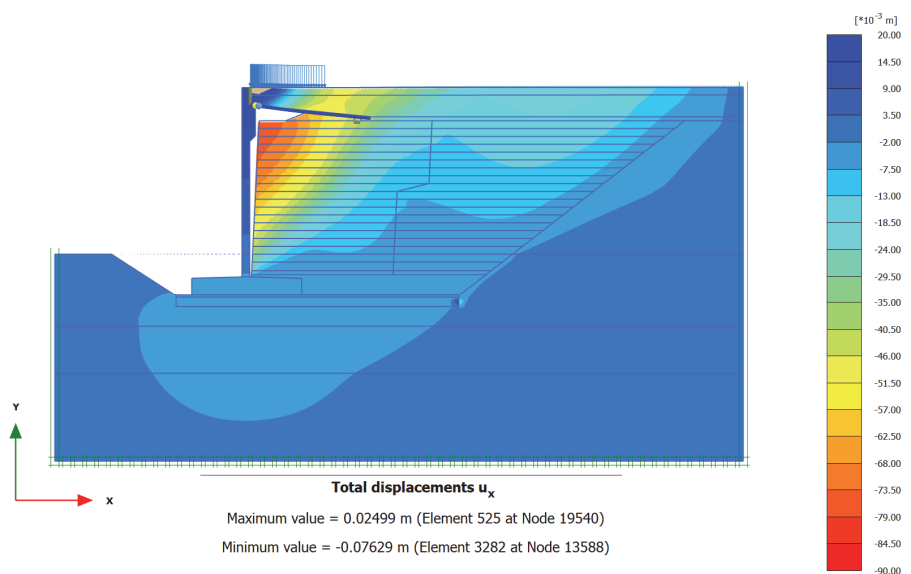
Rys. 2. Geometria i dyskretyzacja modelu podpory A obiektu WD29 [3]

Jedną z najważniejszych zmiennych dotyczących zachowania się masywu z gruntu zbrojonego jest składowa pozioma przemieszczenia. W przypadku osiadań (składowej pionowej przemieszczenia) niwelacja jest możliwa w trakcie budowy, natomiast przemieszczenia poziome akumulują się w kolejnych fazach budowy masywu z gruntu zbrojonego. Szczególnie ważne jest zatem oszacowanie realistycznych wartości przemieszczeń poziomych. Dystrybucję składowej poziomej przemieszczenia w różnych fazach i wariantach obliczeniowych przedstawiono na rysunkach nr 3 i 4.

Na rysunku nr 5 pokazano wykres sił w zbrojeniu w jednym z analizowanych schematów obciążenia użytkowego od pojazdu K. Maksymalną siłę, $F_{max}=41,4$ kN/m, zarejestrowano w schemacie obciążenia użytkowego od pojazdu K nad fundamentem płyty przejściowej. Wartość ta jest znacznie niższa od wytrzymałości przyjętych elementów zbrojenia gruntu.

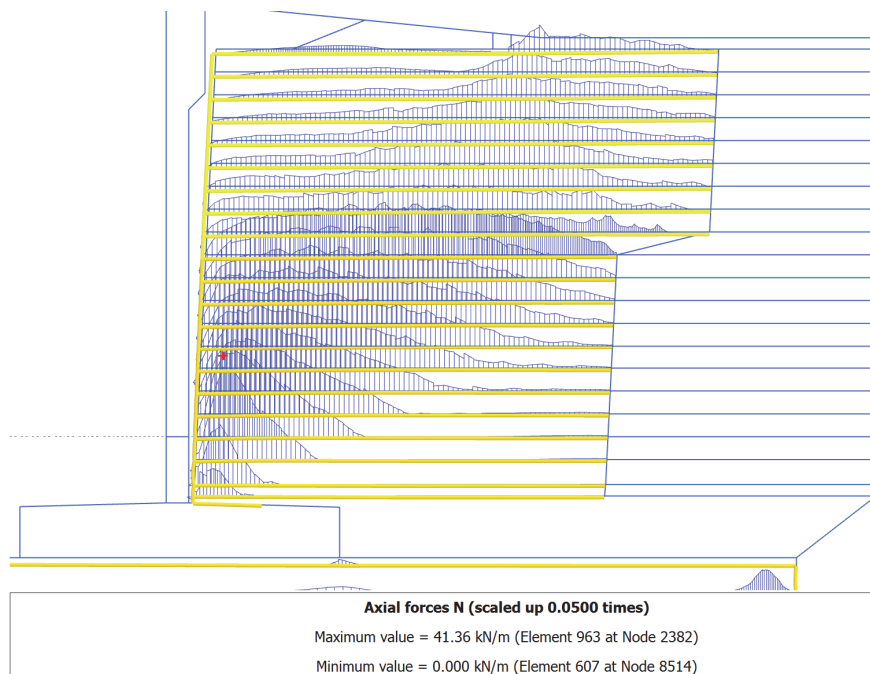


Rys. 3 Składowa pozioma przemieszczenia otrzymana w fazach obliczeniowych zakończenia budowy masywu zbrojonego oraz wprowadzenia obciążeń stałych



Rys. 4. Składowa pozioma przemieszczenia otrzymana w fazach obliczeniowych obciążenia użytkowego od pojazdu K oraz obciążenia od ruchu pojazdów

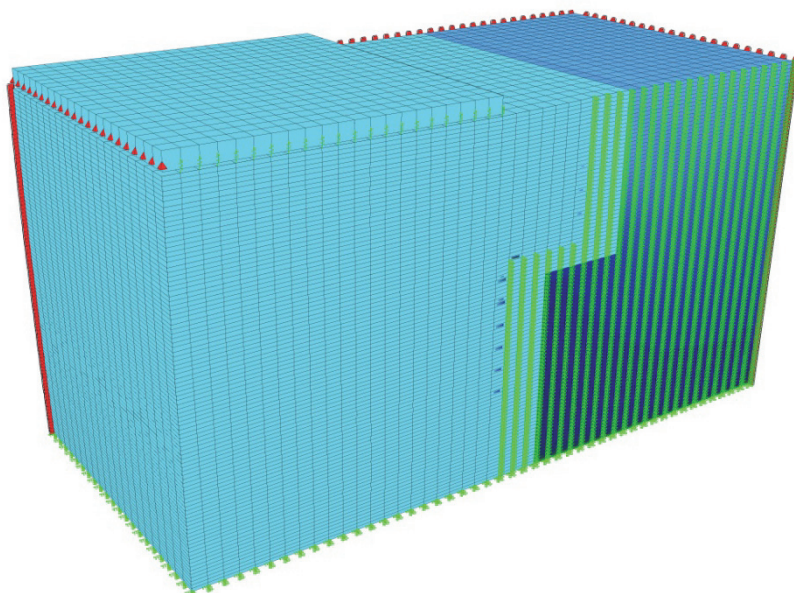




Rys. 5. Siły w zbrojeniu – wyniki z faz dwóch wariantów obciążenia użytkowego od pojazdu K oraz obciążenia od ruchu pojazdów [3]

5. ANALIZA 3D

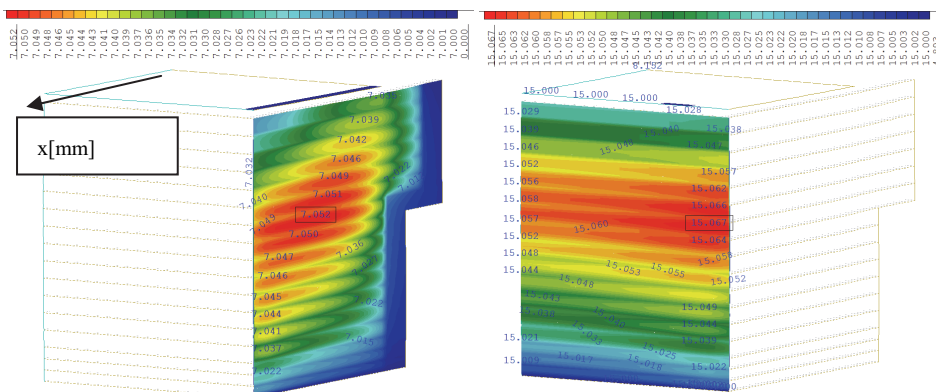
W celu uwzględnienia przestrzennych efektów związanych z dwukierunkowym (ortogonalnym) zbrojeniem konstrukcji gruntowej i ograniczonego powierzchniowo obciążenia eksploatacyjnego „K” wykonano [3] przestrzenny model numeryczny MES gruntu zbrojonego geosyntetykami (rys. 6), który jest integralną częścią zaprojektowanej podpory. Wykorzystano symetrię pracy konstrukcji i ograniczono analizy do fragmentu przyczółka o wymiarach 15x7m zawierającego naroże. Model uwzględnia występowanie płyty przejściowej (elementy powłokowe), 17 warstw gruntu (elementy bryłowe) z modelem materiału Mohra-Coulomba, kontakt pomiędzy płytą przejściową, a gruntem oraz geosyntetyki (ortotropowe elementy powłokowe) pracujące jednokierunkowo i posiadające zróżnicowane charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe. Materiał gruntu zasypowego opisują następujące parametry: moduł sprężystości $E=20\text{MPa}$, $\nu=0,3$, kąt tarcia wewnętrznego $\phi = 34^\circ$, spójność $c=1\text{kPa}$.



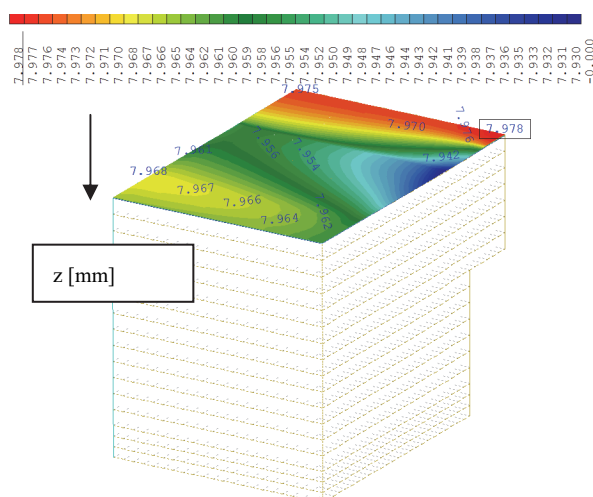
Rys. 6. Wizualizacja modelu konstrukcji gruntu zbrojonego geosyntetykami – WD-29 podpora C [3]

Wykonana analiza obejmuje odwzorowanie procesu budowy konstrukcji gruntowej warstwa po warstwie, aż do momentu wybetonowania płyty przejściowej na szczycie. Ciężar naziomu oraz pozostałych elementów zalegających powyżej płyty przejściowej uwzględniono przykładając do płyty i odkrytego gruntu obciążenie o wyznaczonej wartości (stan beużytkowy). Obciążenia ruchome przyjęto o wartościach charakterystycznych zgodnie z PN-85/S-10030 jako pojazd K dla klasy A obciążeń oraz obciążenie równomiernie rozłożone taborem samochodowym (stan użytkowy). Uwzględniając przepisy, pojazd K ustawiono na płycie przejściowej możliwie jak najbliżej bocznej ściany swobodnej konstrukcji gruntowej.

Wyznaczono przemieszczenia ścian w każdej z faz budowy i eksploatacji. Na rysunkach od nr 7 i 8 pokazano współrzędne węzłów ścian w fazie beużytkowej przy założeniu pierwotnej współrzędnej $Y = 7.000\text{m}$ dla ściany bocznej, $X = 15.000\text{m}$ dla ściany czołowej i $Z = 8.000\text{m}$ dla warstwy szczytowej gruntu. Oś Y skierowana jest prostopadle do osi obiektu, natomiast oś X jest do niej równoległa.

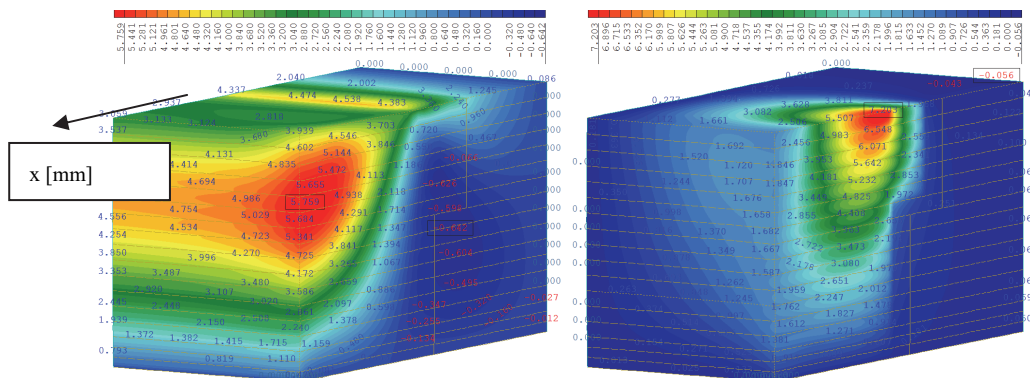


Rys. 7. Współrzędne X ściany szczytowej konstrukcji w fazie bezużytkowej [m],
Współrzędne Y ściany bocznej konstrukcji w fazie bezużytkowej [m]. [3]

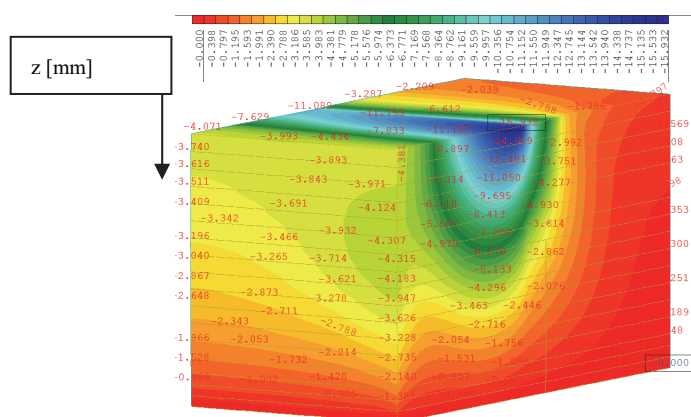


Rys. 8. Współrzędne Z najwyżej położonej warstwy konstrukcji gruntu zbrojonego
w fazie bezużytkowej [m] [3]

Na rysunkach nr 9 i 10 pokazano maksymalne wartości przemieszczeń konstrukcji gruntu zbrojonego wywołane działaniem obciążenia ruchomego. Schemat nr 1 ustawienia obciążenia ruchomego uwzględnia pojazd K zbliżony maksymalnie do czoła konstrukcji gruntu, natomiast w schemacie nr 2 pojazd K jest maksymalnie oddalony od czoła jednocześnie wciąż znajdując się na płycie przejściowej. Maksymalne przemieszczenia wystąpiły dla schematu 2 (tab. 1 i 2).



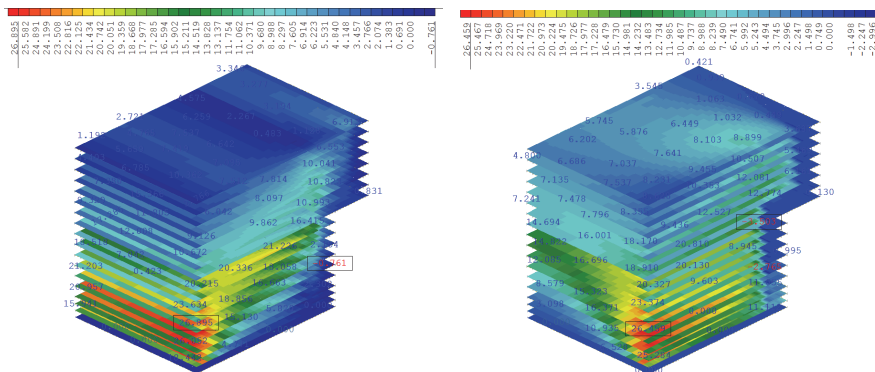
Rys. 9. Schemat 2. Przemieszczenia na kierunku X i Y powierzchni zewnętrznych konstrukcji. Obciążenie ruchome [mm] [3]



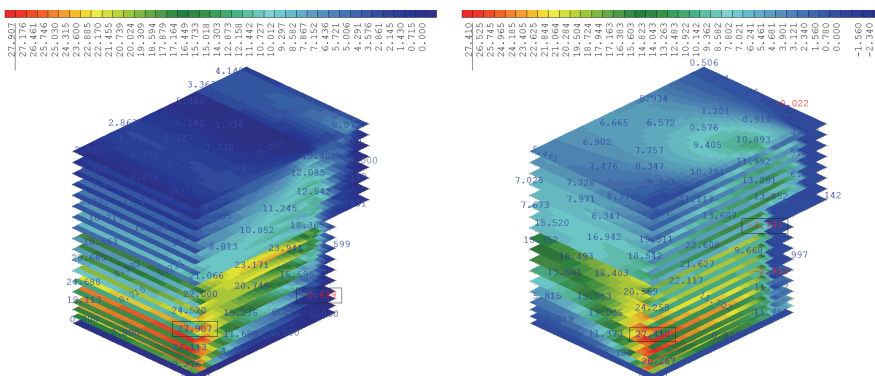
Rys. 10. Schemat 2. Przemieszczenia na kierunku Z powierzchni zewnętrznych konstrukcji. Obciążenie ruchome [mm] [3]

Wyznaczono siły membranowe w kierunku pracy poszczególnych powłok. Zgodnie z założeniem w kierunku prostopadłym geosyntetyki nie przenosiły obciążeń. Na rysunku 11 pokazano siły w elementach powłokowych na kierunku ich pracy konstrukcji w stanie bezużytkowym. Na rysunku 12 pokazano siły w elementach powłokowych na kierunku ich pracy konstrukcji pod obciążeniem ruchomym w schemacie nr 2.

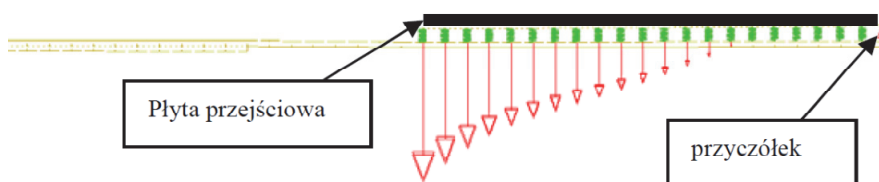
Dodatkowo przeanalizowano rozkład sił w połączeniu kontaktowym pomiędzy płytą przejściową, a warstwą szczytową gruntu. Przekrój podłużny przez konstrukcję wraz z jakościowym rozkładem sił pokazano na rysunku 13.



Rys. 11. Siły membranowe w powłokach między warstwami gruntu: kierunek równoległy do osi (lewo), kierunek prostopadły do osi (prawo), stadium bezużytkowe [kN/m] [3]



Rys. 12. Siły membranowe w powłokach między warstwami gruntu: kier. równoległy do osi (lewo), kierunek prostopadły do osi (prawo), stadium użytkowe [kN/m] [3]



Rys. 13. Jakościowy rozkład obciążenia pomiędzy płytą przejściową a gruntem – przekrój podłużny [3]

6. PODSUMOWANIE OBLICZEŃ

W tabelach 1 i 2 podano zestawienie wyników obliczeń.

Tabela 1. Przemieszczenia powierzchni konstrukcji gruntu zbrojonego [3]

Stadium	Kierunek X [mm]	Kierunek Y [mm]	Kierunek Z [mm]
bezużytkowe	67	52	70
użytkowe	5,8	7,2	15,93

Tabela 2. Siły membranowe w poziomych warstwach geosyntetyków [3]

Stadium	Kierunek pracy geosyntetyku	Materiał	Siła [kN/m]
bezużytkowe	X	geosiatka 150/30	26,9
		geosiatka 80/30	11,4
	Y	geosiatka 150/30	26,5
		geosiatka 80/30	13,2
użytkowe	X	geosiatka 150/30	27,9
		geosiatka 80/30	12,5
	Y	geosiatka 150/30	27,4
		geosiatka 80/30	15,2

W świetle wykonanych obliczeń 2D i 3D modelu MES gruntu zbrojonego za przyczółkiem stwierdzono, że:

- doraźne poziome przemieszczenia nie są duże i zapewniają funkcjonowanie strefy dylatacyjnej pomiędzy ścianą przyczółka i licem gruntu zbrojonego,
- doraźne siły w membranie są znacznie mniejsze od sił dopuszczalnych.

7. WNIOSKI KOŃCOWE

W toku wykonanych obliczeń [3] nie natrafiono na przeciążenia geozbrojenia lub na nadmierne przemieszczenia geokonstrukcji. Zidentyfikowano jednak szereg nierozwiązanych lub niepokazanych w opiniowanych projektach zagadnień, które zebrano we wnioskach poniżej.

- Poważną wadą ocenianych projektów jest brak spójności pomiędzy elementami konstrukcji i ośrodka gruntowego (posadowienia). Skupienie się na ocenie deformacji pionowych i poziomych konstrukcji gruntowej oraz wyliczenie sił w geozbrojeniu to tylko część zadania projektowego. Jeżeli przyjmiemy założenie, że konstrukcja z gruntu zbrojonego jest niezależna od konstrukcji przyczółka, należy wtedy wykonać wszystkie obliczenia wymagane dla konstrukcji oporowych posadowionych bezpośrednio (sprawdzenia stateczności ogólnej uskoku naziomu tj. obliczeń stateczności globalnej konstrukcji przyczółka



z gruntu zbrojonego wraz z podłożem gruntowym, z zastosowaniem np. kołowej powierzchni zniszczenia).

- Istotnym problemem jest współpraca (lub jej brak) konstrukcji gruntowej z ławą fundamentową przyczółka. W przypadku posadowienia bezpośredniego ławy problem ten jest na tyle istotny, co w przypadku ławy posadowionej na palach. Wtedy wystąpią różnice osiadań pomiędzy ławą i gruntem zbrojonym. W rozwiązaniach, w których grunt zbrojony opiera się na ławie może dojść do nieuwzględnionych w obliczeniach przeciążeń zbrojenia gruntowego (szczególnie w dolnych warstwach. Konsekwencje zerwania geozbrojenia mogą być poważne dla konstrukcji przyczółka i dla nawierzchni w strefie przejściowej pomiędzy korpusem drogowym i obiektem mostowym.
- W przypadku przyczółków ze skrzydełkami równoległymi do osi podłużnej mostu pominięto szereg istotnych dla budowy lub eksploatacji detali związanych z konstrukcją naroża i z zapewnieniem trwałego utrzymania strefy dylatacyjnej pomiędzy gruntem zbrojonym i ścianami przyczółka. Ten element jest fundamentalnym czynnikiem decydującym o poprawnej pracy konstrukcji. W większości analizowanych projektów brakuje precyzyjnych rozwiązań detali gwarantujących utrzymanie gruntu w konstrukcji zbrojonej (w narożach i strefach przejściowych w nasyp klasyczny).
- W większości rozwiązań nie opisano precyzyjnie oparcia płyty przejściowej na konstrukcji z gruntu zbrojonego i nie pokazano naziomu i konstrukcji nawierzchni na płycie przejściowej. Grubość konstrukcji na płycie przejściowej może dochodzić do 2 m (na podstawie dokumentacji).
- W większości ocenianych projektów w obliczeniach nie uwzględniono działania płyty przejściowej. Obliczenia w modelu 3D pokazały, że płyta przejściowa skutecznie odciąża ścianę frontową konstrukcji gruntowej i praktycznie eliminuje tam efekty oddziaływania obciążeń użytkowych. Niestety w przypadku konstrukcji ściany bocznej tego odciążającego efektu nie zauważono. Dlatego w przypadku przyczółków ze skrzydełkami równoległymi do osi podłużnej obiektu istnieje konieczność wykonania analizy 3D (lub przynajmniej obliczeń 2D w drugim kierunku).
- W opiniowanych projektach [3] nie było jednolitej dokumentacji materiałowej określającej trwałość zastosowanych geosyntetyków. Zdaniem Autorów należy zastosować jednolite standardy bazujące na wynikach badań certyfikowanych laboratoriów określających kompleksowo efekty starzenia się materiału. Bazowanie tylko na oświadczeniach dostawcy w przypadku wymaganej trwałości dłuższej niż 100 lat jest niewystarczające.
- W większości projektów nie oszacowano prawidłowo obciążenia eksploatacyjnego „K” sprowadzonego do modelu 2D. Rozłożenie obciążenia K na nieskończoną półprzestrzeń gruntową jest błędne, ponieważ w praktyce obciążenie to może stać przy krawędzi czołowej lub bocznej konstrukcji z gruntu zbrojonego.



Zgodnie z obowiązującymi przepisami dotyczącymi projektowania geotechnicznego wiążące są zapisy normy PN-EN 1997-1 [4], a nie wycofanych norm sprzecznych np. PN-81/B-03020 [5] i PN-83/B-03010 [6], na które wielokrotnie powoływali się Autorzy analizowanych projektów wykonawczych i technologicznych. Niestety posługiwanie się normami EN w przypadku konstrukcji mostowych jest utrudnione ponieważ nie ma do dnia dzisiejszego załącznika krajowego do EC dotyczącego obciążeń obiektów mostowych. Fakt ten jednak nie zwalnia projektantów z obowiązku kompleksowego projektowania podpory mostowej.

LITERATURA

1. Duszyńska A., Sikora Z., *Dobór wyrobów geosyntetycznych do zbrojenia gruntu*, Inżynieria Morska i Geotechnika 5/2014.
2. Wesołowski A., Krzywosz Z., Brandyk T., *Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2000.
3. Gwizdała K., Duszyńska A., Żółtowski K., Cudny M., Kalitowski P., *Opinia naukowo-techniczna. Projektowanie i budowa przyczółków mostowych z odciążającą konstrukcją z gruntu. Droga Ekspresowa S-3 i Droga Ekspresowa S-5*, Konsultacyjne Biuro Projektowe Krzysztof Żółtowski, Gdańsk, 2016.
4. PN-EN 1997-1;2008 *Projektowanie geotechniczne. zasady ogólne*.
5. PN-81/B-03020 *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
6. PN-83/B-03010 *Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.

BRIDGEHEADS SUPPORTED WITH REINFORCED SOIL

Summary

The paper presents the synthesis of works related to the evaluation of projects of bridgehead structures supported with soil reinforced with geosynthetics, which were realized on expressways S3 and S7. During the audits, the documented technical requirements and materials as well as calculations included in the projects were reviewed. Attention was drawn to the spatial work of reinforced blocks under load and the influence of the transition plate. The study concluded with a summary of conclusions summarizing the analyzes carried out.

