

Analiza zachowania się geozbrojenia w konstrukcjach odciążających przyczółki

Analysis of georeinforcement behavior in structures relieving abutments

dr inż. Angelika Duszyńska, prof. PG (ORCID: 0000-0001-5986-6739), Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, mgr inż. Ewelina Sawicka, Europrojekt Gdańsk S.A.

DOI 10.5604/01.3001.0053.6998

Streszczenie: W artykule podjęto, bardzo istotny z punktu widzenia bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji, temat zachowania się w czasie przyczółków mostowych, które zaprojektowano z wykorzystaniem konstrukcji odciążających z gruntu zbrojonego geosyntetykami. Na dwóch przykładach przeanalizowano zmienność odkształceń w warstwach geosyntetycznych oraz temperatur wewnątrz bloku z gruntu zbrojonego, jak również przemieszczenia podatnego lica.

Słowa kluczowe: przyczółek, monitoring, grunt zbrojony, geosyntetyki.

Abstract: The long-term behavior of bridge abutments, which is very important from the point of view of safety and durability of the structure, designed with the use of geosynthetic reinforced soil relieving structures, was discussed in the paper. The variability of elongation of geosynthetic reinforcement, temperatures inside the reinforced soil block and the displacement of the flexible face were analyzed for two structures.

Keywords: abutment, monitoring, reinforced soil, geosynthetics.

1. Wprowadzenie

W praktyce inżynierskiej brakuje prostych, zwalidowanych metod do wyznaczania deformacji konstrukcji z gruntu zbrojonego i wydłużenia geozbrojenia, od których w dużej mierze zależy zachowanie się konstrukcji (stan graniczny użytkowości). W typowych pomiarach terenowych najczęściej wykorzystywane są m.in.: inklinometry, ekstensometry, płyty do pomiaru osiadań, czujniki do pomiaru parcia oraz naprężeń występujących w gruncie, termistory oraz czujniki do pomiaru wilgotności [1]. Urządzenia te są montowane w konstrukcji, podczas jej budowy. Dodatkowo można wykonywać geodezyjne pomiary przemieszczeń lica konstrukcji. W literaturze najczęściej spotyka się prace dotyczące pomiarów naprężeń w geosyntetykach oraz ich przemieszczeń pionowych [8, 9], rzadziej poziomych [2, 13]. W artykule przedstawiono analizę zachowania się konstrukcji bloku odciążającego przyczółek wiaduktu, wykonanego z gruntu zbrojonego geosyntetykami na przykładzie dwóch rzeczywistych obiektów.

2. Opis przypadków

Oba analizowane przykłady dotyczą konstrukcji odciążających przyczółki wiaduktów drogowych z gruntu zbrojonego geosyntetykami. W założeniach do projektów przyjęto m.in., że [5, 6]:

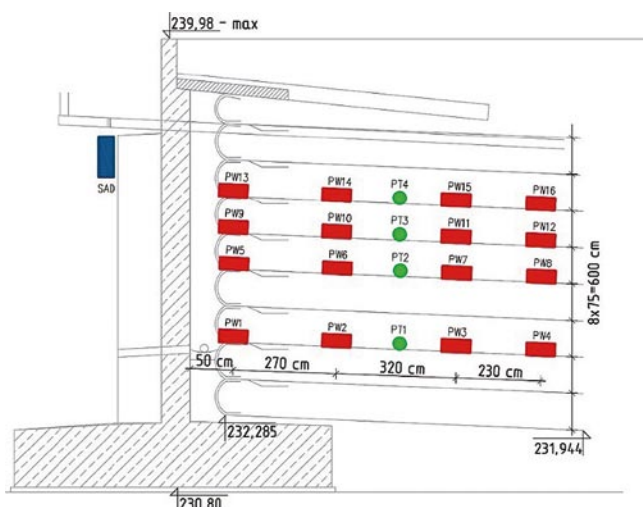
- blok z gruntu zbrojonego ma za zadanie całkowite zredukowanie parcia na przyczółek oraz jego ściany boczne,

- pozostawiono przestrzeń pomiędzy ścianą przyczółka a gruntem zbrojonym tak, aby uwzględniając wszystkie przemieszczenia (okres budowy, obciążenie, efekt reologiczny), grunt zbrojony nie zetknął się ze ścianą przyczółka,
- zasypka jest wykonana z gruntów niespoistych,
- trwałość materiałów powinna gwarantować zachowanie parametrów w okresie minimum 100 lat.

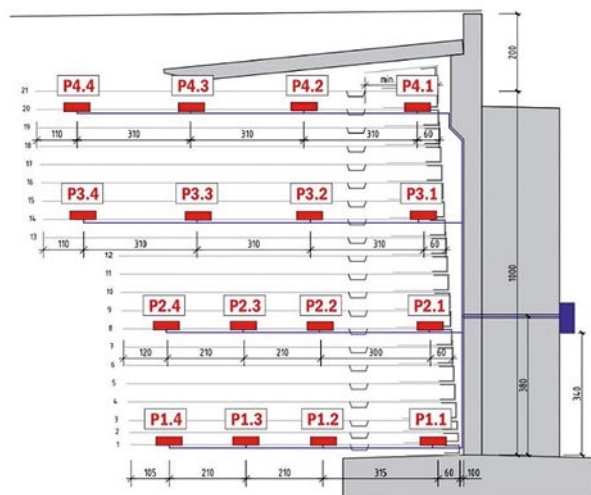
Opisywane obiekty różnią się od siebie wysokością konstrukcji odciążającej i zastosowanym zbrojeniem geosyntetycznym (rodzajem wyrobu, długością i rozstawem warstw). Analizowane przyczółki miały różnych projektantów, wykonawców i dostawców systemu monitoringu. Obserwacje zachowania się bloków odciążających trwają od połowy 2017 roku do dzisiaj. W przypadku obu obiektów przed instalacją systemu monitoringu zostały wykonane analizy MES dotyczące odkształceń w konstrukcji z gruntu zbrojonego (program PLAXIS 2D) i rozkładu temperatur (program SOFiSTIK) [3, 7].

3. System monitoringu

W obu przypadkach zastosowano podobne systemy pomiarowe, których zadaniem jest ciągły pomiar wydłużenia zbrojenia geosyntetycznego oraz temperatury konstrukcji w wybranych punktach pomiarowych. Poszczególne elementy systemów monitoringu były instalowane wraz z postępem robót budowlanych. Podstawowymi elementami zastosowanych systemów pomiarowych są czujniki zintegrowane Geokon, które umożliwiają pomiar wydłużenia



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych w obiekcie nr 1 [5]



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych w obiekcie nr 2 [6]

i temperatury zbrojenia. Zakres pomiarowy wydłużeń wykorzystywanych czujników wynosi ± 25 mm (baza pomiarowa 250 mm), a temperatury: od -40 do $+85^{\circ}\text{C}$. W obu konstrukcjach zastosowano 16 zintegrowanych czujników rozmieszczonych po 4 sztuki na długości w 4 wybranych warstwach zbrojenia (u dołu konstrukcji, w górnej części – w pewnej odległości pod płytą przejściową oraz na dwóch poziomach w części środkowej konstrukcji). Lokalizację i numerację punktów pomiarowych w przekrojach poprzecznych przyczółków przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1 i 2. Informacje uzyskiwane z czujników, dostępne na dedykowanych platformach gromadzenia danych, umożliwiają ocenę pracy konstrukcji w aspekcie zmieniających się obciążeń oraz upływającego czasu. Oprócz systemu ciągłego zdalnego monitoringu odkształceń geozbrojenia i temperatury na obiektach wykonywane są okresowe pomiary odkształceń podatnego lica i oględziny za pomocą endoskopu [5, 6].

4. Analiza temperatur

Temperatura środowiska ma wpływ na parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe geosyntetyków – jej zwiększenie powoduje obniżenie wytrzymałości i zwiększenie odkształceń. W sytuacjach gdy wyroby geosyntetyczne, zwłaszcza poliestrowe, mogą być narażone na działanie temperatur powyżej 25°C lub poniżej 0°C przez długi okres czasu, należy w projektowaniu zastosować odpowiednie współczynniki redukcyjne [4, 11]. W artykule [7], w którym szczegółowo przeanalizowano rozkład temperatur w gruncie w obu opisywanych obiektach w okresie od uruchomienia pomiarów do 30.05.2020, wykazano dużą zmienność temperatur wewnątrz bloku odciążającego z gruntu zbrojonego, w przypadku obu konstrukcji. Maksymalna temperatura, notowana w analizowanym okresie wyniosła $21,8^{\circ}\text{C}$ w przypadku obiektu nr 1 i $27,4^{\circ}\text{C}$ w przypadku obiektu nr 2. W obu przypadkach wahania temperatur zależne były od dnia

i lokalizacji punktów pomiaru, z wyraźną tendencją spadkową (lub odpowiednio wzrostową) wraz z obserwowanym spadkiem (lub odpowiednio wzrostem) temperatury powietrza [7]. W pracy [12], w której poddano analizie oba obiekty w okresie obserwacji o 2 lata dłuższym, stwierdzono jeszcze większe wartości amplitudy temperatur. Zestawienie maksymalnych i minimalnych temperatur w gruncie zbrojonym przedstawiono w tabeli 1.

Temperatury maksymalne i minimalne w konstrukcji nr 2 występują w miesiącach najcieplejszych i najzimniejszych, a w przypadku obiektu nr 1 są one notowane miesiąc po

Tabela 1. Porównanie maksymalnych temperatur

Obiekt nr 1			Obiekt nr 2		
Punkt	Temp. max [°C]	Temp. min [°C]	Punkt	Temp. max [°C]	Temp. min [°C]
PW1	20,1	3,20	P1.1	20,67	1,46
PW2	20,4	7,05	P1.2	20,94	5,27
PW3	20,3	7,20	P1.3	23,49	5,51
PW4	19,1	8,05	P1.4	25,16	5,06
PW5	20,30	7,20	P2.1	18,80	0,40
PW6	19,57	3,05	P2.2	17,40	0,30
PW7	20,54	6,20	P2.3	15,50	2,11
PW8	20,70	5,20	P2.4	19,80	2,27
PW9	22,39	5,10	P3.1	19,70	1,10
PW10	22,05	5,91	P3.2	20,80	3,90
PW11	18,65	5,05	P3.3	19,40	3,50
PW12	21,82	1,02	P3.4	20,30	5,10
PW13	21,05	6,05	P4.1	26,50	-0,60
PW14	20,57	3,92	P4.2	28,00	-0,81
PW15	20,04	5,20	P4.3	26,15	-0,72
PW16	19,19	4,05	P4.4	26,24	-0,72

wystąpieniu ekstremów temperatury powietrza. W przypadku obu obiektów zauważalna jest duża zmienność temperatury wewnątrz bloku z gruntu zbrojonego. Maksymalna temperatura dla obiektu nr 2 wynosiła 28°C, podczas gdy na obiekcie nr 1 zanotowano maksymalną temperaturę 22,4°C. W obiekcie nr 2 wszystkie czujniki w najwyższej położonej warstwie zbrojenia zarejestrowały temperatury ujemne. Oba obiekty znajdują się w odległości ok. 80 km od siebie. Monitoring na obiekcie nr 2 został uruchomiony jeszcze w trakcie budowy, a na obiekcie nr 1 po jej zakończeniu. Dodatkową różnicą był sam czas trwania budowy. Ze względów niezależnych od inwestora budowa obiektu nr 2, po wykonaniu dwóch warstw zbrojenia, została wstrzymana. W przypadku tego obiektu największą zmienność temperatur obserwowano w okresie, gdy na konstrukcji odciążającej nie było jeszcze płyty przejściowej, która została wykonana 4 lata po uruchomieniu monitoringu. Na różnice w uzyskanych odczytach temperatur może również wpływać wysokość bloku odciążającego. W przypadku obiektu nr 2 jest to ok. 12 m, natomiast obiekt nr 1: ok. 7,5 m. Okres, w którym geosyntetyk jest najbardziej narażony na działanie temperatury, występuje podczas budowy konstrukcji, co potwierdzono w analizie wyników z obiektu nr 2. Wykonanie płyty przejściowej nad blokiem odciążającym ma pozytywny wpływ na trwałość geosyntetyku. Występuje efekt przesłonięcia i ograniczenie amplitudy temperatur w gruncie [12].

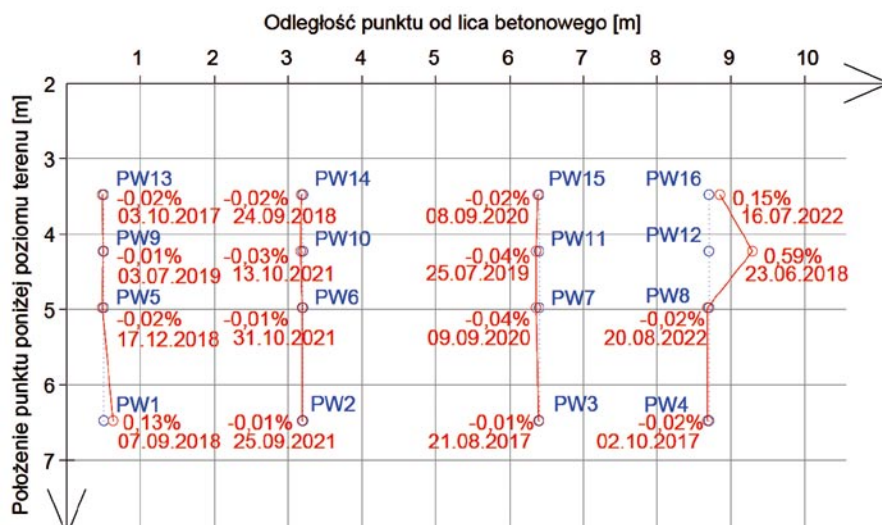
5. Analiza wydłużenia zbrojenia

Wykres maksymalnych rejestrowanych odkształceń geosyntetyków odpowiednio dla obiektu nr 1 i 2 w 4 pionach pomiarowych przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Pominięto wyniki, w których wystąpiły chwilowe anomalie w odczytach. Kolorem niebieskim oznaczone jest pierwotne położenie czujników pomiarowych w bloku odciążającym, natomiast czerwony kolor obrazuje pomierzone wartości odkształceń w tych punktach. W przypadku obiektu nr 2 odnotowano większe odkształcenia niż w konstrukcji nr 1. Przemieszczenia powodujące rozciąganie geosyntetyków występują w przypadku większości punktów pomiarowych obiektu nr 2. Odwrotna tendencja występuje w pierwszym z obiektów – tylko trzy czujniki (PW1, PW12, PW16) wskazują na występowanie odkształceń rozciągających (rys. 3). Odkształcenia występujące w PW12 osiągają 30% wartości

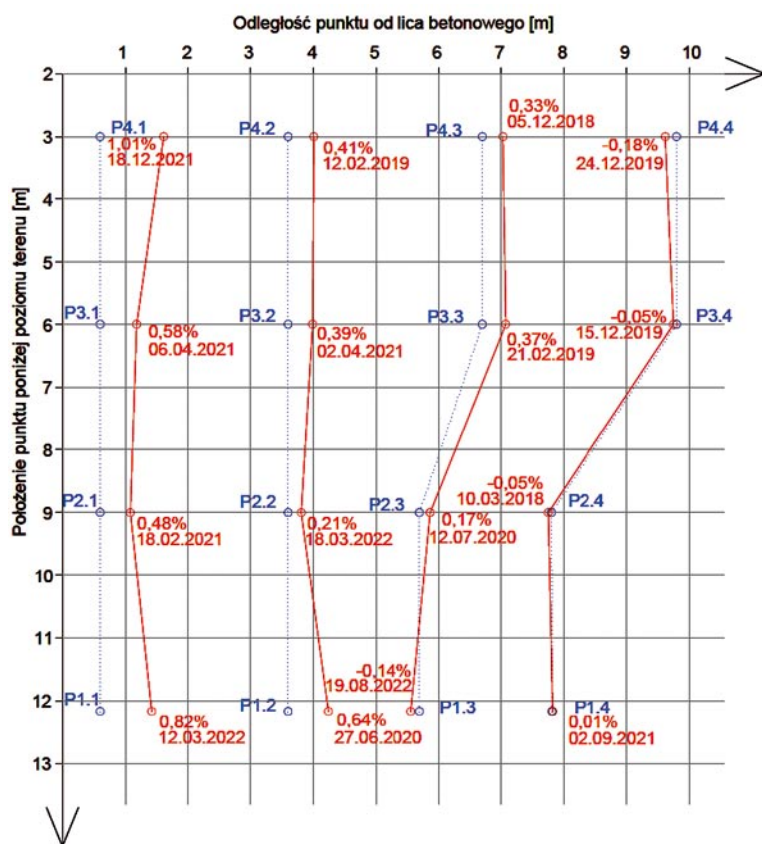
odkształceń dopuszczalnych wg instrukcji ITB [10]. Pozostałe punkty pomiarowe tego obiektu wykazują odkształcenia na poziomie 2% wartości odkształceń dopuszczalnych. Czujnikiem, który zarejestrował największe odkształcenia, jest P4.1 (rys. 4) zlokalizowany w warstwie położonej najbliższej korony i w pionie pomiarowym najbliższej lica przyczółka w obiekcie nr 2. Maksymalna wartość odkształcenia rejestrowanego w tym punkcie jest równa połowie wartości dopuszczalnej według instrukcji ITB [10]. Kolejnymi punktami, w których występują odkształcenia powyżej 0,5%, są: P1.1, P1.2 i P3.1 (rys. 4).

Rezultaty monitoringu uzyskane dla obiektu nr 2 są dużo łatwiejsze w analizie. Wyniki uzyskane dla poszczególnych warstw i punktów układają się w sposób przewidywany. Największe wartości rozciągające wystąpiły najbliższej lica konstrukcji betonowej, natomiast największe ściskanie wystąpiło w ostatniej warstwie pomiarowej geozbrojenia. Wyniki uzyskane w punktach P1.4, P2.4, P3.4 oraz P4.4 (rys. 4) wskazują na występowanie ściskania. Punkty te znajdują się na końcowym odcinku warstw zbrojenia (najdalej od lica).

Analizując powiązanie między temperaturą i odkształceniami, w ogólności dla obu obiektów zaobserwowano, że zmiana wartości odkształceń była również spowodowana zmianą temperatury. W miesiącach zimowych długość geosyntetyku ulegała skróceniu, a w miesiącach letnich – wydłużeniu. Analizując jednak wyniki w poszczególnych punktach pomiarowych, można ustalić, że zależność między temperaturą i odkształceniem nie jest jednoznaczna. W przypadku obiektu nr 1 można zauważyć, że najwyższe wartości odkształceń występują w punkcie (PW12), w którym czujnik zarejestrował najwyższą wartość temperatury. Jednakże w punkcie, w którym zanotowano najniższą temperaturę, nie stwierdzono najmniejszych wartości odkształceń. Czujniki pomiarowe w bloku odciążającym wiadukt nr 2, również nie wykazują występowania korelacji między ekstremum odkształceń i temperatur w danym



Rys. 3. Wykres maksymalnych odkształceń dla obiektu nr 1



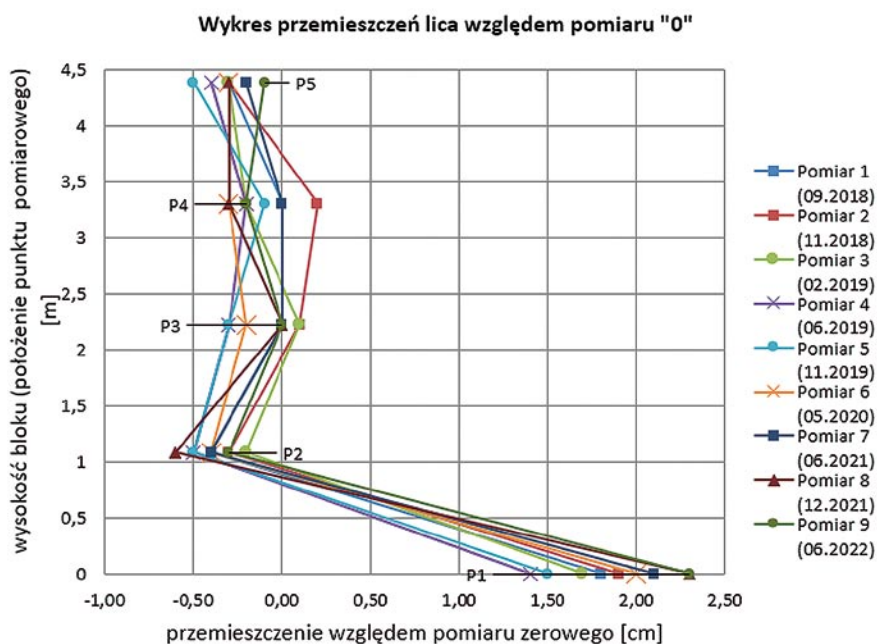
Rys. 4. Wykres maksymalnych odkształceń dla obiektu nr 2

punkcie pomiarowym. Czujnik P4.2 notował najwyższą oraz najniższą temperaturę, jednak maksymalne odkształcenia wystąpiły w punkcie P4.1, a najniższe w punkcie P4.4.

6. Analiza przemieszczeń lica bloku odciążającego

Oprócz systemu zdalnego monitoringu odkształceń geozbrojenia i temperatury, w celu okresowego pomiaru przemieszczeń (za pomocą przymiaru) i oględzin (dzięki endoskopowi) fragmentów podatnego lica bloku odciążającego, przewidziano wykonanie w ścianie czołowej przyczółków otworów rewizyjnych. Pomiar przemieszczeń lica (wewnątrz tzw. pustki powietrznej) wykonany we wrześniu 2018 r. uznano za pomiar zerowy, do którego odniesiono wyniki uzyskane w późniejszych pomiarach. Ostatni pomiar, którego wyniki analizowano, miał miejsce w czerwcu 2022 r.

Rys. 5. Obiekt nr 1 – zmiana przemieszczeń lica bloku odciążającego



Na wykresie zamieszczonym na rysunku 5 przedstawiono przemieszczenia punktów pomiarowych lica (ściany czołowej) bloku gruntu zbrojonego względem pomiaru zerowego w przypadku obiektu nr 1. Na wykresie wyraźnie widać znaczne przesunięcie punktu P1 w głąb bloku zbrojonego, co może być związane z błędem wykonawczym na etapie realizacji obiektu. Największe rzeczywiste przesunięcia bloku odciążającego w kierunku betonowej ściany przyczółka obserwowane są w punkcie P2. Wartość maksymalna 0,6 cm stwierdzona została w pomiarze nr 8 wykonanym w grudniu 2021 r. Kolejne co do wartości przemieszczenia (0,5 cm) stwierdzono w punkcie nr 5 w serii pomiarowej nr 5.

Wykres przemieszczeń punktów pomiarowych lica bloku gruntu zbrojonego względem pomiaru zerowego w przypadku obiektu nr 2 zaprezentowano na rysunku 6. Obserwowane przemieszczenia są znacznie mniejsze niż obliczone na etapie projektowania. Największa różnica w przemieszczeniach, którą zaobserwowano, wystąpiła w punktach przy koronie konstrukcji, jednakże nie zawsze w spodziewanym kierunku. W punkcie pomiarowym P2.5 (którego otwór rewizyjny był niedrożny przez pierwsze dwa lata wykonywania pomiarów) w serii nr 8 i 9 nastąpiło przemieszczenie o ponad 4 cm do wewnątrz bloku gruntu zbrojonego. Pozostałe punkty pomiarowe, po ukończeniu budowy obiektu, przemieszczają się zgodnie z przewidywaniami w kierunku lica betonowego, w zakresie od 0,4 cm do 1,8 cm.

Rys. 6. Obiekt nr 2 – zmiana przemieszczeń lica bloku odciążającego

7. Podsumowanie

Zdefiniowanie, obserwacja oraz pomiar natężenia różnych związków przyczynowo-skutkowych, których podmiotem jest trwałość zbrojenia konstrukcji oporowej, jest istotnym instrumentem lepszego poznania zachowania się badanego materiału w warunkach pracy w budowni ziemnej, co ułatwia podejmowanie decyzji w praktycznej działalności inżynierskiej.

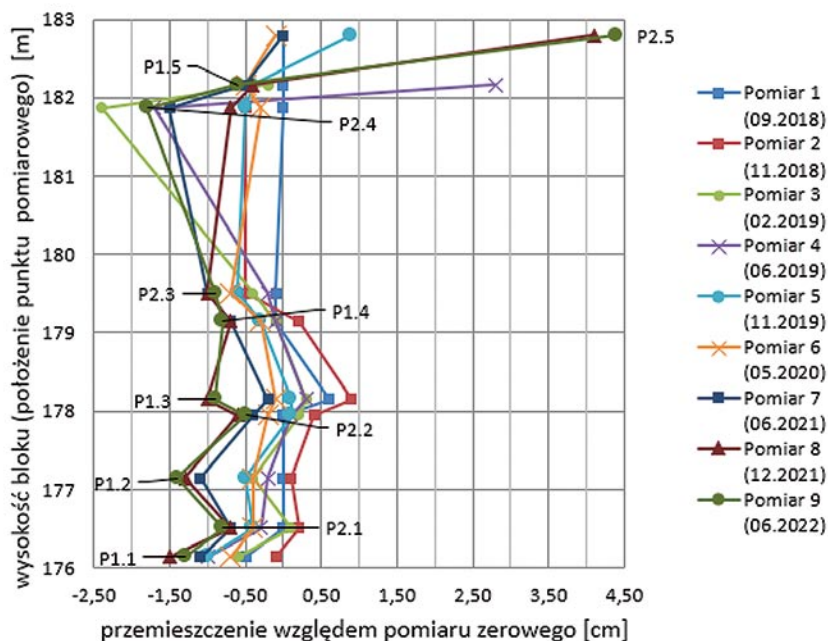
Informacje uzyskiwane z monitoringu umożliwiają ocenę sposobu pracy konstrukcji w aspekcie zmieniających się obciążeń, warunków środowiskowych i upływającego czasu.

Na podstawie oględzin ogólnych obu omawianych obiektów i podatnego lica konstrukcji z gruntu zbrojonego w otworach inspekcyjnych można stwierdzić, że konstrukcje pracują prawidłowo.

Analizując zachowanie się obiektów pod kątem odkształceń, stwierdzono, że odczyty z monitoringu nie zawsze układają się w oczekiwany dla gruntu zbrojonego zbiór wyników i są trudne do interpretacji. Największe wydłużenia geozbrojenia zaobserwowano w obiekcie nr 2, na etapie budowy. Można zauważyć spodziewany sposób pracy bloku odciążającego przyczółek wiaduktu. Największe odkształcenia występują w koronie lica konstrukcji podczas gdy przy podstawie są one najmniejsze. Punkty pomiarowe położone najdalej lica konstrukcji betonowej wykazują najmniejsze przemieszczenia. W przypadku obiektu nr 1 monitoring został uruchomiony dopiero po zakończeniu wykonywania prac konstrukcyjnych. W obu przypadkach system monitoringu pokazuje tylko fragment konstrukcji i nie ukazuje pełnego zachowania się obiektu. Podsumowując analizę wyników zmian temperatury, można zauważyć, że w przypadku obu obiektów wahania temperatur zależne były od dnia i lokalizacji punktów pomiaru, z wyraźną tendencją spadkową (lub odpowiednio wzrostową) wraz z obserwowanym spadkiem (lub odpowiednio wzrostem) temperatury powietrza. Okresem, w którym geosyntetyk jest najbardziej narażony na jej działanie, jest etap budowy.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że monitoring bloku odciążającego z gruntu zbrojonego w obiektach mostowych jest ważnym elementem inwestycji, a poprawność pomiarów zależy m.in. od: rodzaju czujników, ich liczby i rozmieszczenia, jak również wiarygodności danych. System monitoringu powinien gwarantować wysyłanie powiadomień w momencie awarii lub przekroczenia przyjętego poziomu bezpieczeństwa.

Wykres przemieszczeń lica względem pomiaru "0"



BIBLIOGRAFIA

- [1] Abu-Hejleh N., Wang T., Zornberg J. G., Performance of Geosynthetic-Reinforced Walls Supporting Bridge and Approaching Roadway Structures, ASCE Geotechnical Special Publication 103, Denver, Colorado, sierpień 2000
- [2] Bathurst R. J., Benjamin D. J., Failure of a Geogrid-Reinforced Soil Wall, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, styczeń 1990
- [3] Cudny M., Duszyńska A., Gwizdała K., Kalitowski P., Żółtowski K., Przyczółki mostowe wspomagane konstrukcjami z gruntu zbrojonego, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 24/2017
- [4] Duszyńska A., Projektowanie geotechniczne przyczółków z gruntu zbrojonego geosyntetykami, Mosty 1/2016
- [5] Duszyńska A., Kalitowski P., Żółtowski K., Ekspertyza naukowo-techniczna. Pomiary odkształceń i interpretacja wyników monitoringu gruntu zbrojonego za przyczółkiem obiektu mostowego WS-32, wykonawca: KBP Krzysztof Żółtowski, Gdańsk, 2020
- [6] Duszyńska A., Kalitowski P., Żółtowski K., Ekspertyza naukowo-techniczna. Pomiary odkształceń i interpretacja wyników monitoringu gruntu zbrojonego za przyczółkiem obiektu mostowego WD-29, wykonawca: KBP Krzysztof Żółtowski, Gdańsk, 2020
- [7] Duszyńska A., Żółtowski K., Kalitowski P., Konstrukcje z gruntu zbrojonego geosyntetykami odciążające przyczółki – Analiza temperatur, Mosty 3/2020
- [8] Ehrlich M., Becker L. D. B., Reinforced soil wall measurements and predictions, Proc., 9th Int. Conf. on Geosynthetics: Geosynthetics for a challenging world, tom 1, IGS Brasil and ABMS, Brazil, 2010
- [9] Garnier-Villarreal M., Fratta D., Oliva M., Evaluation of Deformation of a Geosynthetic-Reinforced Soil Bridge Abutment, Geo-Congress 2014, Technical Papers, GSP 234
- [10] Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami, Instytut Techniki Budowlanej, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki 429/2007, Warszawa
- [11] Miskowska A., Stepień S., Jasko A., Koda E., Wpływ temperatury na parametry wytrzymałościowe geotkaniny wykorzystanej do budowy konstrukcji oporowej na składowisku, Acta Scientiarum Polonorum Architectura 14(1)2015
- [12] Sawicka E., Analiza wyników monitoringu odkształceń i temperatur w gruncie zbrojonym odciążającym przyczółki wiaduktów drogowych Praca dyplomowa magisterska, promotor: Angelika Duszyńska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, listopad 2022
- [13] Zornberg J. G., Abu-Hejleh N., Wang T., Geosynthetic-reinforced soil bridge abutments, Geotechnical Fabrics Report, styczeń 2001