

ANALIZA WSTECZNA ZACHOWANIA SIĘ NASYPU DROGOWEGO POSADOWIONEGO NA KOLUMNACH Z WARSTWĄ TRANSMISYJNĄ NA PODSTAWIE DŁUGOOKRESOWEGO MONITORINGU

Grzegorz Sołtys, Tadeusz Brzozowski✉

Keller Polska Sp. z o.o.

STRESZCZENIE

W 2013 roku pod nasypem w pobliżu obiektu mostowego w ciągu drogi ekspresowej zainstalowano monitoring konstrukcji posadowienia nasypu. Głównym celem poznawczym monitoringu była obserwacja zaprojektowanego i wykonanego przez Keller Polska sposobu posadowienia nasypu drogowego w postaci kolumn przemieszczeniowych CSC® (*Controlled Stiffness Columns*) z warstwą transmisyjną i siatką stalową. W ramach systemu monitoringu zaprojektowano pomiary osiadania nasypu, odkształceń i przemieszczeń siatki stalowej, nacisków pionowych na kolumny i grunt, sił w kolumnach oraz przemieszczeń poziomych skrajnych kolumn i gruntu między kolumnami na krawędzi nasypu. Mimo problemów podczas instalacji i utrzymania sprawności systemu pomiarowego udało się prowadzić monitoring przez ponad 4 lata. W artykule, oprócz szczegółowych wyników monitoringu, autorzy przedstawili wsteczną analizę MES zachowania się konstrukcji posadowienia nasypu na podstawie uzyskanych danych z długookresowego pomiaru, pozwalającą na weryfikację doboru odpowiednich modeli konstytutywnych i metodyki obliczeń konstrukcji tego typu.

Słowa kluczowe: kolumny przemieszczeniowe CSC, warstwa transmisyjna z siatką stalową, modelowanie nasypów drogowych, MES

WSTĘP

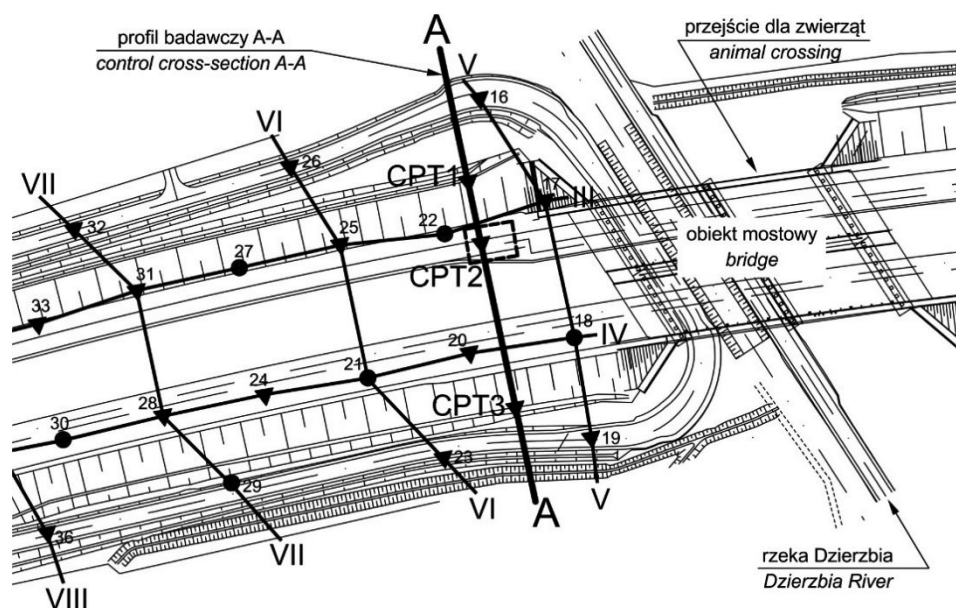
Monitoring zaprojektowano i wykonano dla nasypu drogowego przy obiekcie mostowym, będącym jednocześnie przejściem dla zwierząt, wybudowanym w ciągu obwodnicy miejscowości Stawiski na drodze krajowej S-61 na odcinku Łomża–Budzisko (rys. 1).

Nasyp został posadowiony na kolumnach przemieszczeniowych (CSC) o średnicy 360 mm, zaprojektowanych i wykonanych przez Keller Polska. W celu poprawnego przeniesienia obciążeń na kolumny i podłoże pod nasypem zaprojektowano platformę transmisyjną (LTP – *load transfer platform*) o grubości 0,5 m ze zbrojeniem w postaci siatki z ocynkowanych

prętów stalowych o średnicy 10 mm. Projekt warstwy transmisyjnej i metody obliczeń w nawiązaniu do pomiarów terenowych przedstawiono już w artykule Sondermana i Topolnickiego (2014), a kompleksowe zalecenia w ASIRI (2012).

Głównym celem monitoringu było uzyskanie informacji na temat reakcji i współpracy kolumn przemieszczeniowych CSC z warstwą LTP. Szczególny nacisk położono na uzyskanie danych dotyczących sił wewnętrznych w zbrojeniu stalowym, reakcji wewnętrznych rzędów kolumn na obciążenie poziome, rozkładu obciążeń na kolumny i podłoże oraz osiadania podłoża pod nasypem. System monitoringu oraz wszystkie sesje pomiarowe wykonano przy współ-

✉tbrzozowski@keller.com.pl



Rys. 1. Plan obiektu z przekrojami geotechnicznymi oraz profilem badawczym A-A

Fig. 1. Site plan with geotechnical and control cross-section A-A

pracy z Politechniką Gdańską oraz firmą Wilde Engineering pod kierunkiem prof. Krzysztofa Wildego i dr. Mikołaja Miśkiewicza.

Dane miały być wykorzystywane do późniejszych analiz wstecznych i obliczeń MES, w celu opracowania i weryfikacji procedur projektowych umożliwiających lepszą ocenę ryzyka związanego z podobnymi projektami wzmocnienia gruntu (Topolnicki, 2013). Program monitoringu obejmował następujące pomiary:

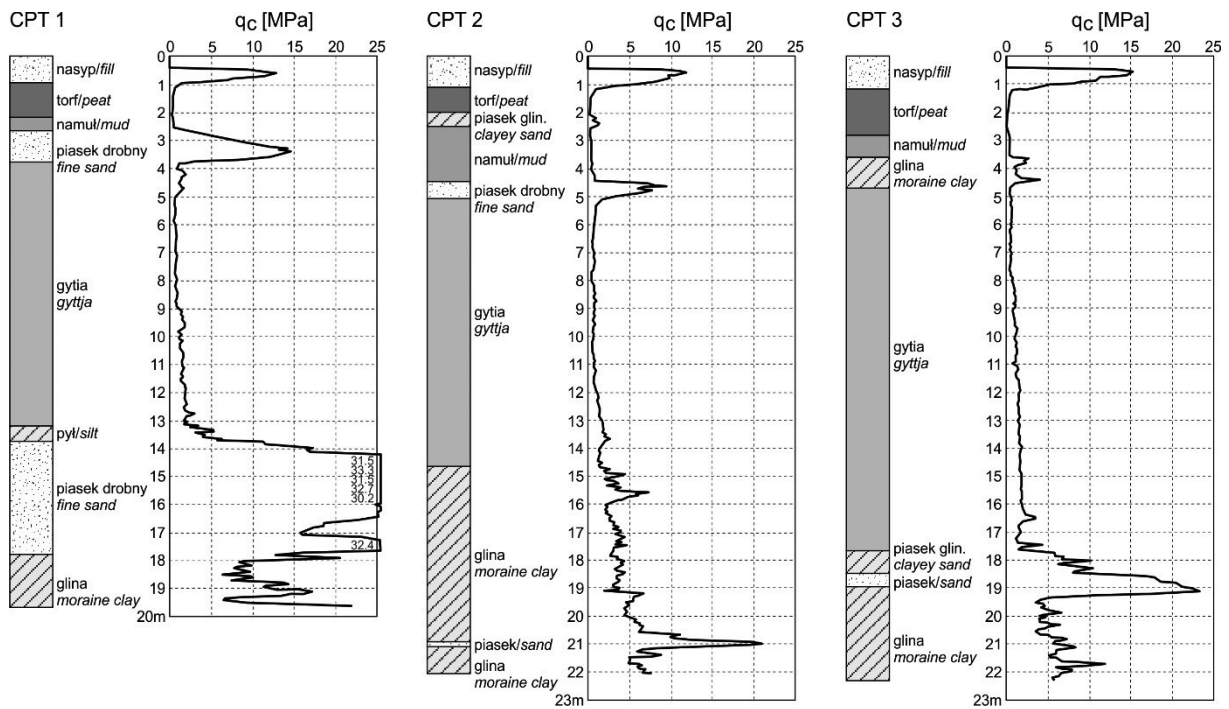
1. Siły w siatce stalowej.
2. Rozkładu naprężenia pionowego w kolumnie i podłożu między kolumnami.
3. Osiadania podstawy nasypu.
4. Przemieszczeń poziomych i odkształceń siatki stalowej.
5. Sił wewnętrznych w skrajnej kolumnie CSC.
6. Przemieszczeń poziomych zewnętrznych kolumn CSC.
7. Przemieszczeń poziomych podłoża między kolumnami zewnętrznymi.

W ramach prac przygotowawczych wykonano dodatkowe badania podłoża w postaci trzech sondowań statycznych CPT wykonanych w profilu poprzecznym nasypu. Sondowania pozwoliły doprecyzować

położenie warstw nośnych w przekroju badawczym. Na rysunku 2 wyraźnie widoczne jest zwiększenie miąższości gruntów organicznych w kierunku prawej krawędzi nasypu (wynik sondowania CPT3). W tabeli 1 przedstawiono parametry gruntów słabonośnych zalegających w podłożu pod nasypem.

INSTALACJA CZUJNIKÓW

Instalację poszczególnych czujników na poletku badawczym dostosowano do aktualnie prowadzonych prac budowlanych. Proces instalacji szczegółowo opisano w publikacji Miśkiewicza, Meronka, Brzozowskiego i Wildego (2017). Jako pierwsze zainstalowano czujniki i rury inklinometryczne w skrajnym rzędzie kolumn, w rejonie sondowania CPT1. Do pomiaru naprężenia w kolumnie zastosowano czujniki strunowe, których bazy przyspawane były do profilu zbrojeniowego kolumny (IPE160). Łącznie zainstalowano 12 czujników, po 4 na każdym poziomie pomiarowym. Pomiar kontrolny po zainstalowaniu profilu w kolumnie wykazał, że wszystkie czujniki są sprawne, a odczyty znajdują się w zakresie pomiarowym. W dwóch kolumnach do profilu zbrojeniowego przyspawano rury o profilu kwadratowym służące



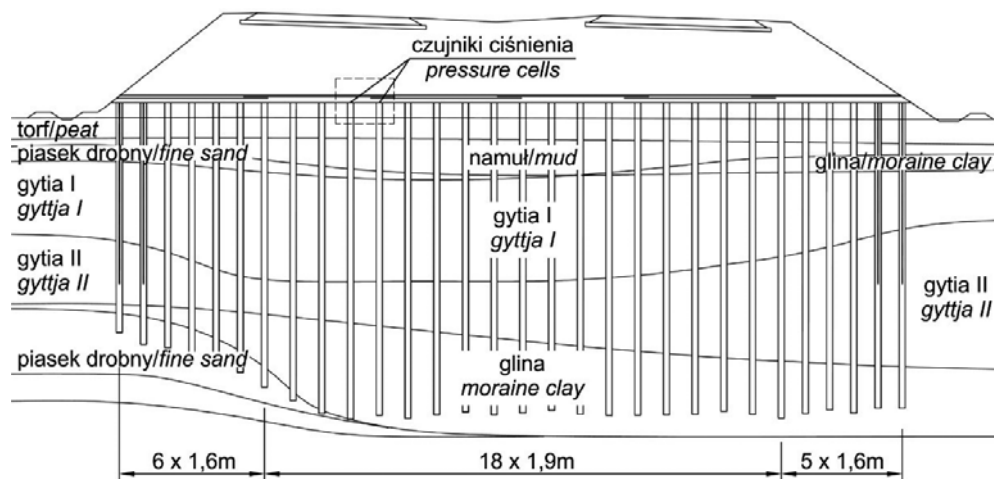
Rys. 2. Opór stożka (q_c) sondowań statystycznych CPT w profilu badawczym A-A

Fig. 2. Cone resistance of the CPT in control cross-section A-A

Tabela 1. Parametry gruntów słabonośnych

Table 1. Parameters of soft soils

Grunt Soil	Opór stożka sondy statycznej CPT Cone resistance of the CPT q_c [MPa]	Wytrzymałość na ściananie Shear strength S_u [kPa]	Moduł odkształcenia Deformation modulus $E_{1\%}$ [MPa]	Moduł dylatometryczny Dilatometric modulus M_{DMT} [MPa]
Torf – Peat	0–0,5	0–20	0,8–1,5	1,0
Namul – Mud	0,5–1	25–40	–	1,0–2,0
Gytia I – Gyttja I	0,2–0,8	30–50	4–20	3–30
Gytia II – Gyttja II	1,0–2,0	50–100		



Rys. 3. Przekrój poprzeczny przez profil badawczy A-A

Fig. 3. Control cross-section A-A

do pomiarów poziomych przemieszczeń kolumn inklinometrem. Zainstalowano również okrągłe rury inklinometryczne do pomiaru przemieszczeń poziomych gruntu między kolumnami. Otwory na rury inklinometryczne zostały wywiercone do warstwy piasków.

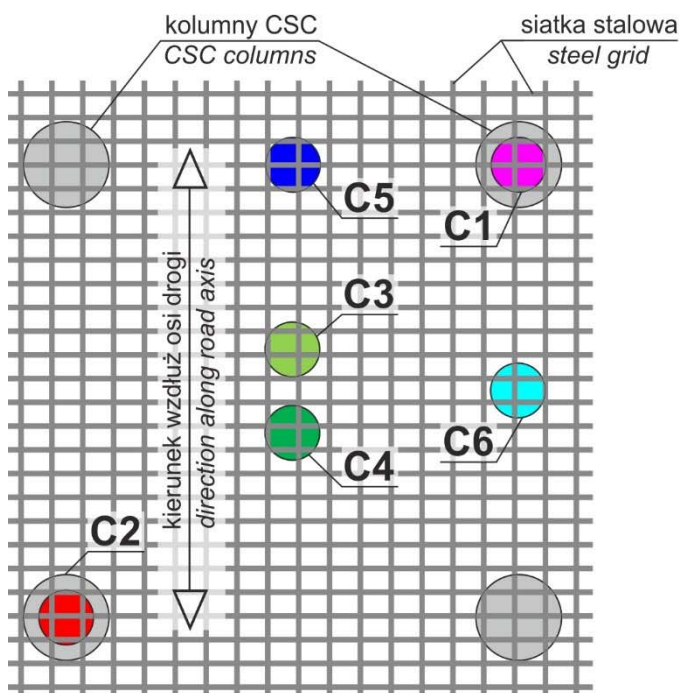
W kolejnym etapie, na części poletka badawczego zlokalizowanej bezpośrednio pod pasem drogi w kierunku Łomży, zainstalowano sześć czujników ciśnienia o średnicy 230 mm, przy czym dwa czujniki umieszczono na kolumnach, a cztery czujniki na gruncie, według schematu na rysunku 4. Czujniki instalowane na kolumnach zamocowano „na mokro” za pomocą zaprawy szybkowiążącej. Czujniki „gruntowe” położono wprost na zagęszczonym podłożu pomiędzy kolumnami, a następnie ustabilizowano szpilkami.

Po zasypaniu kolumn w rejonie zainstalowanych czujników ciśnienia, do siatki stalowej przyspawano bazy czujników, a następnie zamocowano czujniki strunowe w wodoszczelnych obudowach (rys. 5). Zadaniem czujników zainstalowanych na siatce stalowej

miała być rejestracja sił rozciągających w prętach siatki. Niestety, w czasie procesu zagęszczania pozostałej części warstwy transmisyjnej, dla wszystkich 14 czujników mierzone sygnały znalazły się poza zakresem pomiarowym, a dla połowy z nich całkowicie zanikły. Pozostałe odczyty z siedmiu działających czujników również nie nadawały się do interpretacji. Podobną zależność odnotowano dla czujników zainstalowanych w skrajnej kolumnie. Podczas wykonywania sąsiednich kolumn wszystkie wartości pomiarowe znalazły się poza zakresem pomiarowym i dlatego nie nadawały się do interpretacji.

Zbyt duże naprężenia zginające w obu przypadkach prowadzą do wniosku, że do pomiaru sił rozciągających należy zastosować inny rodzaj czujników (np. czujniki strunowe o krótszej bazie pomiarowej), wprowadzić „mocniejsze” osłony czujników lub zastosować zupełnie inną technikę pomiaru.

Kolejnym elementem systemu pomiarowego, zainstalowanym bezpośrednio na siatkach było prototypowe urządzenie do pomiaru odkształceń i przemieszczeń poziomych siatek stalowych, skonstruowane



Rys. 4. Schemat instalacji czujników ciśnienia
Fig. 4. Pressure cell installation scheme



Rys. 5. Układanie siatek stalowych oraz czujniki strunowe zamontowane na siatkach (i w szczelnych obudowach)
Fig. 5. Steel grid arrangement and vibrating wire sensors on grid (and in hermetic housings)

specjalnie do prowadzenia tego monitoringu. Urządzenie składało się z czterech ekstensometrów o długości od 14,465 do 23,743 m wykonanych z drutu stalowego. Wszystkie ekstensometry zostały zamocowa-

ne do siatki stalowej, a system pomiarowy znajdował się w wodoszczelnej skrzynce w osi nasypu. Wszystkie ekstensometry drutowe osłonięte zostały rurkami z PVC (rys. 6).



Rys. 6. System pomiaru przemieszczeń i odkształceń siatek stalowych za pomocą ekstensometrów
Fig. 6. Extensometers system to measuring displacement and strain of steel grid

Ostatnim zainstalowanym elementem systemu monitorowania były dwie poziome rury do pomiaru osiadania w przekroju poprzecznym nasypu. Rury ułożono na warstwie transmisyjnej. System wykonano z rur PVC o średnicy 10 cm perforowanych na zewnątrz i gładkich wewnątrz. Na obu końcach, od spodu każdej z rur, przymocowano dwuteownik stalowy o długości 1,0 m. Element walcowany pozwolił ustabilizować końce rur i posłużył do zamocowania reperów roboczych.

Pomiar osiadania wykonywany był za pomocą niwelatora hydrostatycznego, który również jako konstrukcja prototypowa wykonany został w Politechnice Gdańskiej (rys. 7). Urządzenie składa się z sondy, którą przeciąga się za pomocą liny przez każdą z rur. Do sondy doprowadzony jest przewód z ciecżą oraz skrętka sygnałowa. Koniec przewodu z ciecżą znajduje się w zbiorniku wyrównawczym, a przewód do transmisji danych poprzez wzmacniacz podłączony jest do komputera. Wewnątrz sondy znajduje się czujnik z membraną rejestrującą nawet niewielkie zmiany ciśnienia pozwalające na określenie wysokości względnej sondy z dokładnością do 0,01 mm. Pomiary wykonywano co 0,5 m przemieszczenia poziomego sondy. Względny pomiar różnicy wysokości był następnie przeliczany

do wartości bezwzględnych na podstawie geodezyjnego pomiaru wysokości reperów na końcach profili pomiarowych.

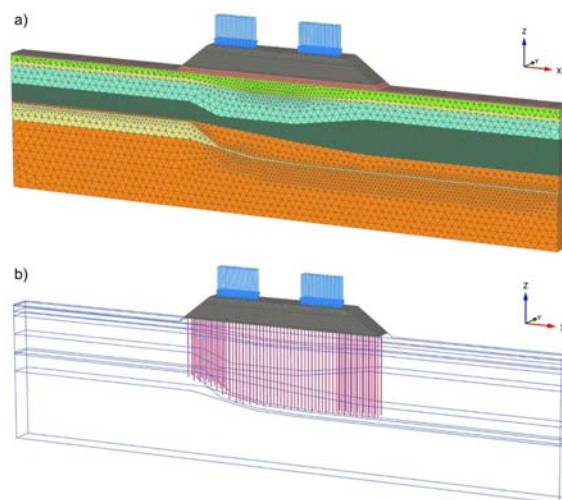
MODEL OBLICZENIOWY

Wstępne obliczenia statyczne do projektu budowlanego i wykonawczego wykonano dla dwóch profili obliczeniowych oddalonych od profilu badawczego. W czasie przygotowania materiałów do artykułu zdecydowano się na ponowne wykonanie obliczeń dla uszczegółowionego profilu gruntowego określonego na podstawie wyników wykonanych dodatkowych sondowań CPT. Podstawą analizy obliczeniowej były dwa modele obliczeniowe: ogólny model przestrzenny MES wycinka nasypu gruntowego posadowionego na kolumnach betonowych (rys. 8) oraz model szczegółowy wykonany w przestrzeni osiowo-symetrycznej dla wycinka obejmującego pojedynczy element betonowy (rys. 9). Model ogólny (przestrzenny) wykorzystano przede wszystkim do prognozy osiadania nasypu oraz określenia przemieszczeń elementów wzmocnienia, tj. kolumn betonowych, siatki stalowej, oraz oceny sił wewnętrznych w elementach betonowych. Model szczegółowy opracowano głównie w celu oceny roz-



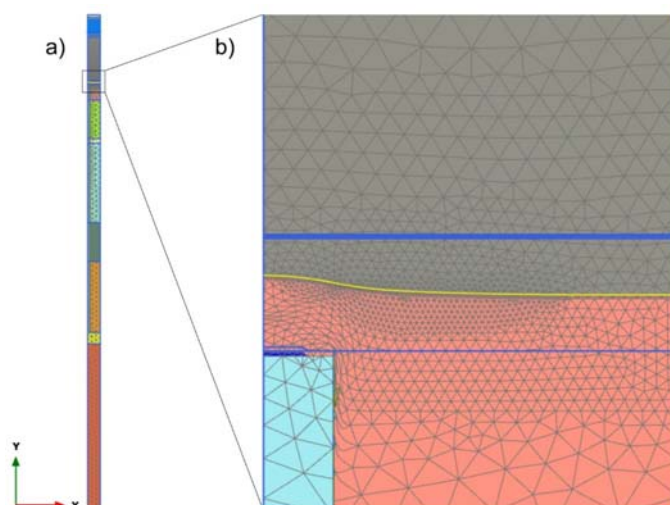
Rys. 7. System pomiaru osiadania nasypu

Fig. 7. Settlement monitoring of embankment



Rys. 8. a – Przestrzenny model obliczeniowy MES dla wycinka nasypu posadwionego na kolumnach, b – widok elementów strukturalnych typu *embedded beam* do modelowania kolumn betonowych

Fig. 8. a – Spatial FEM calculation model for the embankment section on the columns, b – view of the *embedded beam* structural elements for the modeling of concrete columns



Rys. 9. Szczegółowy model obliczeniowy – układ osiowo-symetryczny: a – widok komórki obliczeniowej, b – szczegół modelu nad głowicą kolumny

Fig. 9. Detailed calculation model – axisymmetric system: a – view of the computing cell, b – detail above the column head

działu obciążenia między elementami betonowymi, gruntem i siatką stalową.

Ogólny model obliczeniowy 3D wykonano dla wycinka nasypu obejmującego trzy rzędy kolumn betonowych, których długości przyjęto na podstawie

danych z automatycznego zapisu parametrów produkcyjnych kolumn. Elementy betonowe zdecydowano się modelować elementami strukturalnymi typu *embedded beam* (Plaxis 3D, 2017), które nie wpływają na kształt siatki MES i nie wymagają złożonej kali-

bracji. Analogiczne obliczenia z elementami objętościowymi i elementami kontaktowymi wydłużyłyby istotnie czas obliczeń, z uwagi na znaczne zwiększenie liczby elementów siatki MES. W modelu ogólnym siatka MES złożona jest z ok. 136 tys. 10-węzłowych elementów przestrzennych dla gruntu. Siatkę stalową modelowano elementem powłokowym sprężysto-plastycznym, z anizotropową sztywnością odpowiadającą różnym sztywnościom siatki stalowej w kierunkach głównych.

Model szczegółowy opracowano według układu osiowo-symetrycznego z Plaxis 2D (2017). W modelu tym znacznie zagęszczono liczbę elementów MES w strefach szczególnie istotnych z punktu widzenia rozdziału obciążenia, tj. nad głowicą kolumny, w obszarze mobilizacji efektu przesklepienia oraz wzdłuż pobocznic kolumny. Element betonowy modelowano elementem objętościowym, o charakterystyce materiałowej liniowo sprężystej z elementem kontaktowym, umożliwiającym redukcję wytrzymałości i sztywności gruntu w płaszczyźnie styku elementu betonowego i gruntu. Objętościowy sposób modelowania kolumny zapewnia bardzo dobre odwzorowanie pracy kolumny w jednoosiowym stanie naprężenia i jest równoważny dla przestrzeni środka nasypu oddalonego od wpływu oddziaływania skarp gruntowych. Z uwagi na znaczne przemieszczenia kolumn i gruntu zdecydowano się na prowadzenie obliczeń z ciągłym uaktualnieniem kształtu elementów siatki MES, wykorzystując opcję „Updated Mesh” Plaxis 2D. Siatkę stalową, podobnie jak w modelu ogólnym, modelowano elementem powłokowym. W analizowanym przekroju do modelu szczegółowego wybrano przekrój geologiczny odpowiadający przekrojowi z badania CPT2.

W obu modelach przeprowadzono obliczenia konsolidacji ośrodka gruntowego, co umożliwiło prowadzenie bieżącego porównania wyników pomiarów oraz prognoz obliczeniowych w dowolnym przedziale czasowym.

Do opisu ośrodka gruntowego poniżej poziomu posadowienia nasypu wykorzystano dla wszystkich warstw gruntowych model *hardening soil* (Plaxis 2D i 3D, 2017) o parametrach odkształceniowych zgodnych z tabelą 1. Parametry wymagane do przeprowadzenia podstawowych obliczeń konsolidacji podłoża (tzn. współczynnik filtracji podłoża gruntowego – k),

z uwagi na brak danych pomiarowych, przyjęto na podstawie dostępnej literatury.

Kroki obliczeniowe obejmowały wszystkie etapy budowy i były zgodne z tempem prowadzenia prac budowlanych i oddania nasypu do użytkowania. Po zainstalowaniu aparatury pomiarowej na wykonanych kolumnach nastąpiła pierwsza faza formowania nasypu budowlanego do wysokości 5,1 m. Formowanie nasypu ukończono w ciągu 18 dni. Następnie, z uwagi na roboty związane z budową skrzydełek przyczółka, przez kolejne 101 dni formowano nasyp do wysokości 5,4 m, po czym po 23 dniach uformowano nasyp do docelowej wysokości. Po tym okresie, czyli łącznie po 142 dniach, włączono nasyp do użytkowania. Monitoring i obliczenia prowadzono przez kolejne 1500 dni po oddaniu nasypu do eksploatacji.

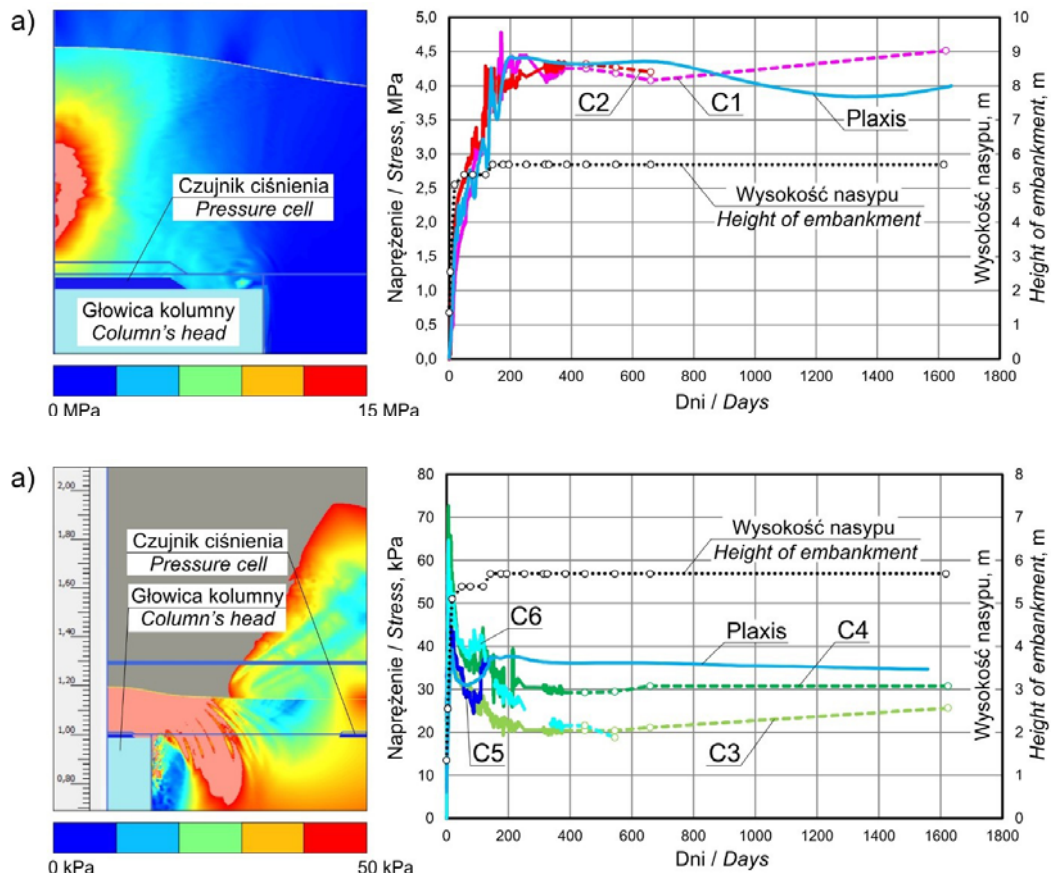
W obliczeniach MES uwzględniono odpowiednie mobilizowanie wysokości nasypu i obciążenia użytkowego nasypu w każdym kroku czasowym wraz z równoczesnym prowadzeniem obliczeń konsolidacji podłoża gruntowego.

WYNIKI POMIARÓW A OBLICZENIA

Porównanie pomierzonych wartości naprężenia na głowicy kolumny i na poziomie gruntu między kolumnami przeprowadzono na podstawie wyników obliczeń dla modelu szczegółowego w układzie osiowo-symetrycznym. Z uwagi na bardzo dużą zmienność naprężenia nad głowicą kolumny, z obliczeń MES przyjęto średnią wartość z kilku punktów rozłożonych ponad głowicą kolumny. W celu zobrazowania dużej zmienności rozkładu naprężenia w miejscach pomiarowych, na rysunku 10 przedstawiono przykładowy rozkład naprężenia pionowego dla końcowego czasu obliczeń ($t_k = 1642$ dni) dla punktów charakterystycznych na głowicy kolumny (a) i w środku pomiędzy kolumnami (b).

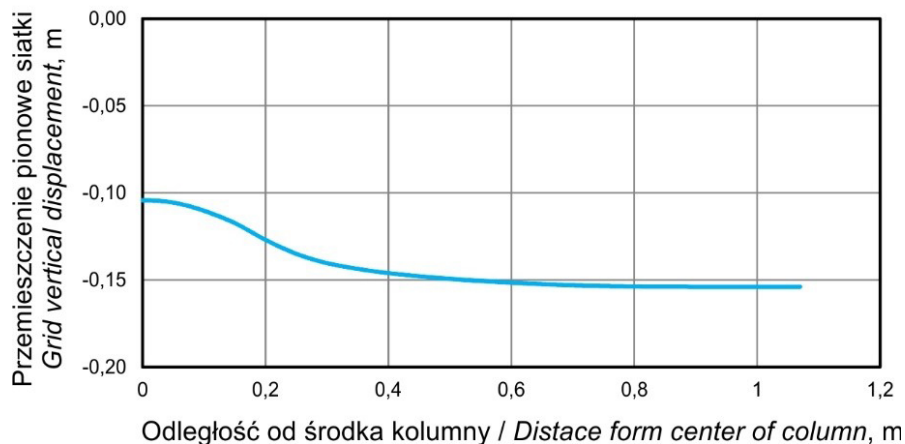
W dalszej części artykułu przedstawiono porównanie wyników pomiarów i obliczeń dla całego okresu prowadzenia monitoringu.

Osiadanie siatki stalowej z obliczeń MES wynosiło 10,4 cm nad głowicą kolumny i 15,4 cm pomiędzy kolumnami. Różnica osiadania wynosiła 5 cm. Rozkład osiadania siatki stalowej z obliczeń pokazano na rysunku 11.



Rys. 10. Rozkład naprężenia pionowego w otoczeniu punktów pomiarowych: a – ponad głowicą kolumny; b – w środku rozpiętości pomiędzy kolumnami

Fig. 10. The distribution of vertical stress in the vicinity of the measuring points: a – above the head of the column; b – in the middle of the space between the columns



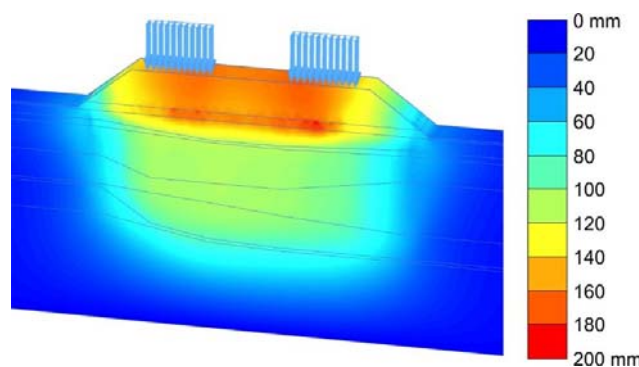
Rys. 11. Przemieszczenie pionowe siatki stalowej ze szczegółowego modelu obliczeniowego

Fig. 11. Vertical displacement of a steel grid from a detailed calculation model

Model ogólny 3D posłużył do wyznaczenia osiadania podstawy nasypu oraz określenia deformacji i ugięcia kolumn betonowych. Z modelu ogólnego oszacowano średnie wydłużenie i siłę w siatce stalowej. Zdaniem autorów lepszym podejściem do oszacowania maksymalnej siły w siatce stalowej byłby model szczegółowy, w którym siatkę stalową modelowano by specjalnym elementem lub systemem elementów. System taki, w odróżnieniu od czystego rozciągania, podobnego do tego, który zastosowano w modelu ogólnym i szczegółowym, miałby możliwość przeniesienia ściskania i zginania. Podejście takie wymaga jednak sporych nakładów obliczeniowych i weryfikacji. Rozkład osiadania nasypu na kolumnach betonowych pokazano na rysunku 12.

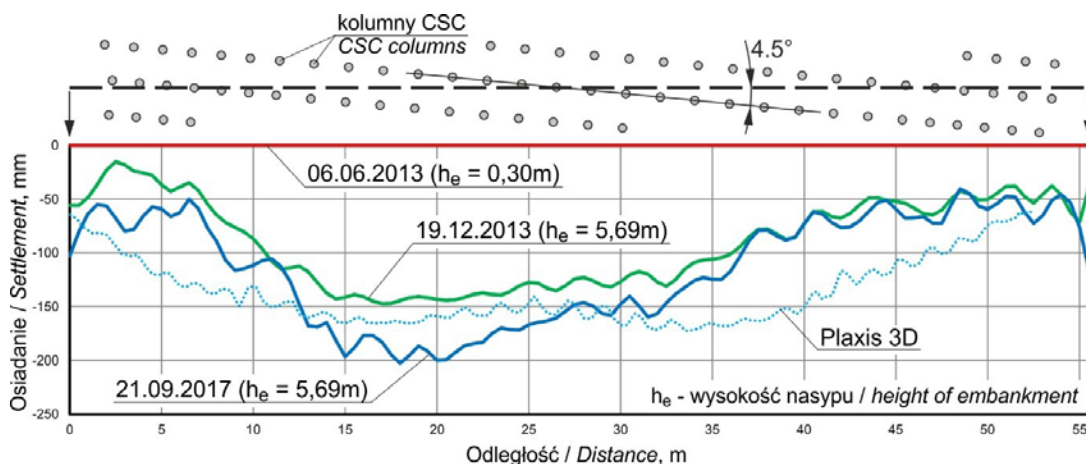
Na rysunku 13 pokazano porównanie wyników obliczeń z ogólnego modelu 3D z wynikami pomiarów. Pomiar zerowy wykonano 6.06.2013 r. bezpośrednio po zasypaniu profili pomiarowych (czerwona linia), obiekt oddano do użytkowania 19.12.2013 r. (zielona linia), a ostatni pomiar osiadania wykonano 29.09.2017 r. (niebieska linia).

Z porównania wyników pomiarów i obliczeń można wysunąć następujące wnioski. Ogólny trend oszacowania wartości minimalnej i maksymalnej osiadania z obliczeń MES można uznać za porównywalny z pomiarami. Charakter osiadania z obliczeń MES odznacza się wyraźną symetrycznością i zwiększeniem osiadania pod pasami obciążenia użytkowego, czego nie udało się potwierdzić w prowadzonych pomiarach. Maksymalna



Rys. 12. Rozkład osiadania nasypu dla czasu $t_z = 1642$ dni

Fig. 12. The settlement distribution of the embankment for $t_z = 1,642$ days



Rys. 13. Porównanie osiadania nasypu z pomiarów i obliczeń MES dla sytuacji końcowej

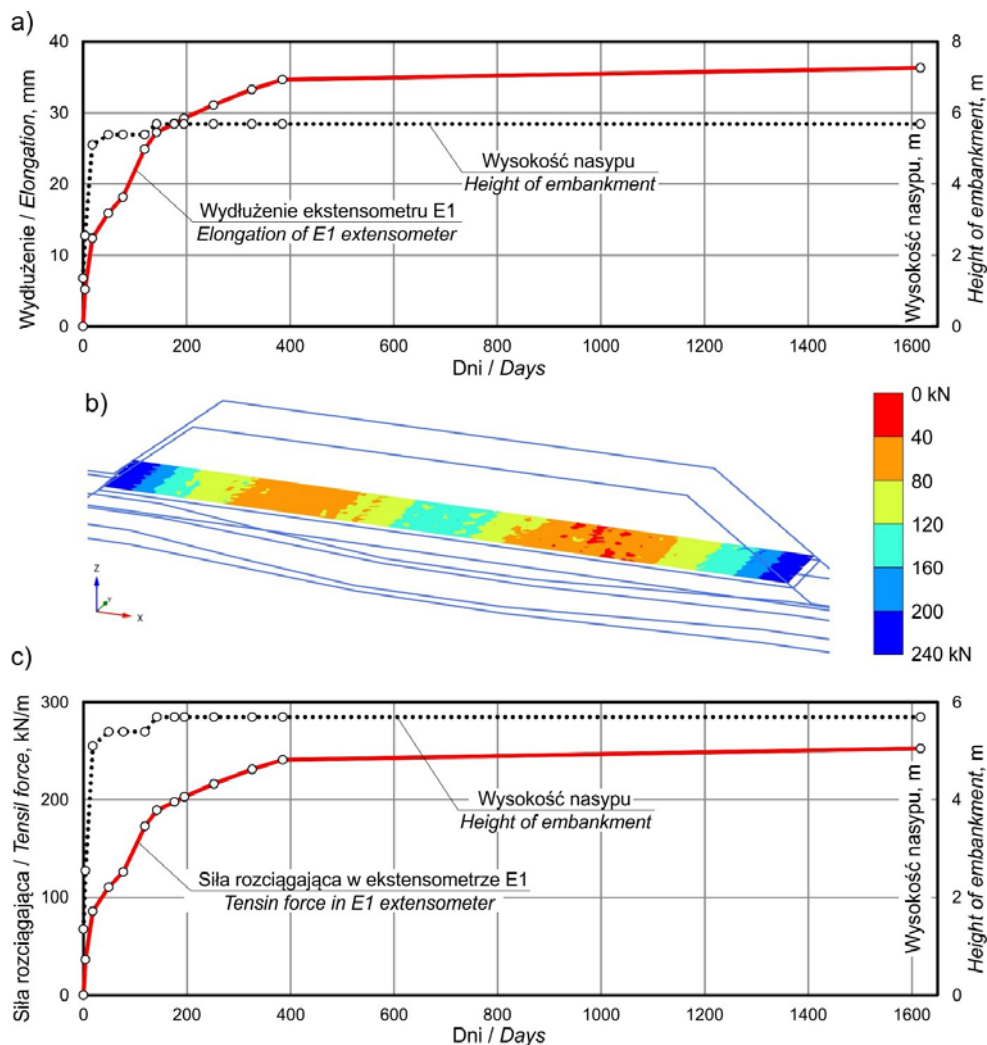
Fig. 13. Comparison of embankment settlement with measurements and FEM calculations for the final situation

lokalna różnica osiadania w otoczeniu głowicy kolumny z pomiarów wynosi maksymalnie około 3 cm, z modelu ogólnego nie przekracza od 2 do 3 cm. W modelu szczegółowym różnica ta jest jednak większa i sięga wartości 5 cm. Wskazuje to na możliwość znacznego lokalnego niedoszacowania siły w siatce stalowej w modelu ogólnym 3D. Ostatni pomiar wykazał około 38 mm wydłużenia siatki stalowej, natomiast z modelu ogólnego uzyskano wydłużenie równe 44 mm.

Wynik taki mógłby wskazywać, że faktyczna sztywność siatki stalowej jest nieco większa niż ta przyjęta w obliczeniach. Wynik ten był dla autorów dużym zaskoczeniem, gdyż należało by się spodziewać raczej

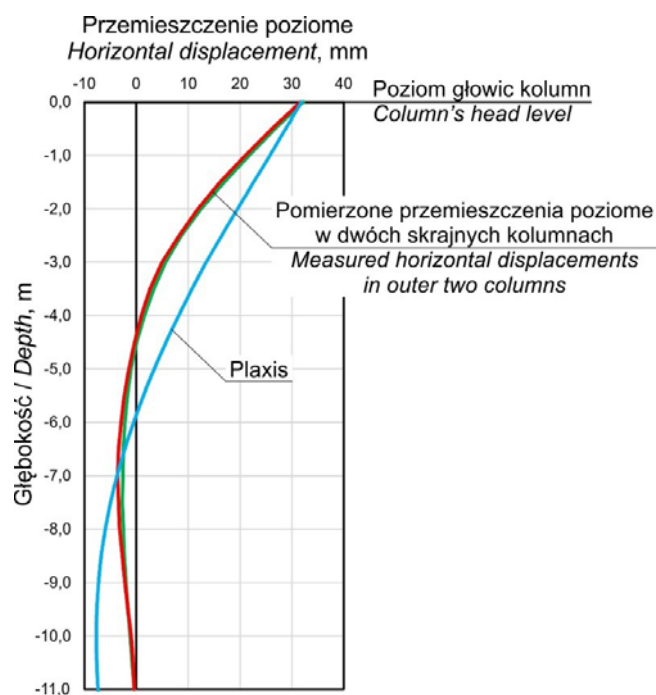
degradacji sztywności siatki w miarę budowy nasypu, związanej z dopasowywaniem się arkuszy siatki stalowej na łączeniach. Z powodu trudności w modelowaniu nie uwzględniano ewentualnej zmiany sztywności siatki stalowej w trakcie budowy. W obliczeniach MES sztywność siatki stalowej utrzymywano na stałym poziomie, dla wszystkich etapów budowy.

Na rysunku 14 przedstawiono przemieszczenia najdłuższego ekstensometru pod nasypem dla całego okresu pomiarowego. Maksymalna siła w siatce stalowej uzyskana z modelu ogólnego wynosiła 229 kN dla etapu końcowego. W pomiarach osiągnięto siłę około 250 kN.



Rys. 14. Wydłużenie (a) i siła w siatce stalowej (b, c)

Fig. 14. Elongation (a) and force distribution in steel grid (b, c)



Rys. 15. Pomierzone i obliczone przemieszczenia poziome w skrajnych kolumnach

Fig. 15. Measured and calculated horizontal displacements in outer columns

Interesujące wydaje się porównanie wyników obliczeń i pomiarów inklinometrycznych w kolumnach betonowych. Otrzymano wręcz idealną zgodność przemieszczeń poziomych dla kolumn pomiarowych na poziomie ich głowic. Maksymalne przemieszczenie tych kolumn w modelu ogólnym wynosiło około 32 mm i równe było wartości pomiarowej. Nieco inne zachowanie zarejestrowano jednak na całej długości inklinometru. W założeniach do pomiarów inklinometrycznych przyjęto brak przemieszczeń w dolnej części kolumny, z modelu obliczeniowego otrzymano natomiast przemieszczenie około 7 mm. Taki charakter przemieszczenia wskazuje na występowanie dużo mniejszego zginania elementu betonowego, niż wynikałoby to z pomiarów ugięcia zarejestrowanych przez inklinometr (rys. 15).

PODSUMOWANIE

Analizę wsteczną przeprowadzono na podstawie dwóch modeli obliczeniowych, z których otrzymano zadowalającą zbieżność z pomiarami. Aktualizacja

profilu obliczeniowego na podstawie dodatkowych sondowań statycznych pozwoliła na obliczenie osiadania zbliżonego do wartości pomierzonych.

Wykorzystana metodyka obliczeń w dużej mierze potwierdziła swoją skuteczność mimo przyjęcia w obliczeniach relatywnie prostych modeli konstytutywnych, których parametry oszacowano na podstawie standardowego rozpoznania geotechnicznego, bez zaawansowanych badań laboratoryjnych.

W związku ze zniszczeniem czujników do pomiaru naprężenia w siatkach stalowych zdecydowano się na prowadzenie pomiarów na kolejnym poletku badawczym. Nasyp poletka jest obecnie w trakcie wznoszenia.

PIŚMIENNICTWO

- ASIRI, 2012: *Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements*. Presses des Ponts.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumaraswamy, S. i Swolfs, W. M. (2017). *Plaxis 2017 2D*. Plaxis B.V.

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M. i Foria, F. (2017). *Plaxis 2017 3D*. Plaxis B.V.

Miśkiewicz, M., Meronk, B., Brzozowski, T. i Wilde, K. (2017). Monitoring System of Road Embankment. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 12(4), 218–224.

Sondermann, W. i Topolnicki, M. (2014). Bemessung von

Lastverteilungsschichten mit unterschiedlichen Berechnungsmodellen und Vergleich mit In-situ Messungen. *Baugrundtagung*, 33.

Topolnicki, M. (2013). Ryzyko związane ze wzmocnieniem gruntu za pomocą kolumn o różnej sztywności. *XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji* (strony 225–240). Wisła.

BACK ANALYSIS OF BEHAVIOR EMBANKMENT FOUNDED ON COLUMNS WITH A TRANSMISSION LAYER ON THE BASIS OF LONG-TERM MONITORING

ABSTRACT

In 2013, monitoring of the embankment foundation structure was installed under the embankment near the bridge facility along the expressway. The main cognitive objective of the monitoring was observation of the method of road embankment foundation designed and made by Keller Poland in the form of displacement columns CSC® (Controlled Stiffness Columns) with transmission layer and steel grid.

As part of the monitoring system, settlement measurements of the embankment, deformations of the steel grid, vertical pressure on column head and soil surface. Forces and horizontal displacement of the columns and soil between the columns at the edge of the embankment. Despite the problems during the installation and maintenance of the efficiency of the measurement system, it was possible to conduct monitoring for over 4 years.

In addition to detailed monitoring results, the authors provided a FEM back analysis of the foundation structure based on the obtained long-term measurement data, allowing for verification of applied constitutive models and used calculation methodology.

Key words: CSC displacement columns, transmission layer with steel grid, road embankments modeling, FEM