

PRZYCZYNY POWSTANIA USKOKU POMIĘDZY WIADUKTEM A NASYPEM NA TRASIE SIEKIERKOWSKIEJ¹

Mirosław BUKOWSKI*, Przemysław ŁYSIAK,
Radosław OLESZEK*, Wojciech TROCHYMIAK*

* Politechnika Warszawska,

Wiadukty drogowe w ciągu Trasy Siekierkowskiej nad ul. Wał Miedzeszyński są elementem warszawskiej infrastruktury drogowej wybudowanej w latach 2000÷2002. Są obiektami trójprzęsłowymi, żelbetowymi z podporami skrajnymi w postaci przyczółków pośrednich z gruntu zbrojonego. W lipcu 2016r. na podporze P1, na urządzeniach dylatacyjnych pomierzono uskok (próg) o wysokości 15÷25mm, który powodował silne (odczuwalne) drgania towarzyszące przejazdom taboru ciężarowego. W referacie, uwzględniając poczynione obserwacje, pomiary geodezyjne i pomiary drgań oraz dostępne badania geotechniczne, przedstawiono wyniki analiz przyczyn powstania uskoku. Przyjęto i omówiono dwa potencjalne schematy wystąpienia osiadań dodatkowych jako bezpośrednią przyczynę wystąpienia uskoku. Pierwszy to osiadania podpory w efekcie dogęszczania się piasków aluwialnych w wyniku oddziaływań dynamicznych na jezdni ul. Wał Miedzeszyński. Drugi to opóźnione osiadania konsolidacyjne warstwy gruntów spoistych w podłożu nasypu z gruntu zbrojonego co mogło doprowadzić do wyniesienia przez obrót końców płyt przejściowych powyżej poziomu jezdni na wiadukcie. Podczas analiz stosowano podejścia analityczne oraz numeryczne z zastosowaniem programów PLAXIS (2D) i MIDAS (3D). Przedstawiono również propozycje zlikwidowania istniejącego uskoku.

Słowa kluczowe: przyczółki z gruntu zbrojonego, osiadanie, uskok.

1. WPROWADZENIE

Obiekty drogowe w ciągu Trasy Siekierkowskiej nad ul. Wał Miedzeszyński są elementem warszawskiej infrastruktury drogowej wybudowanej w latach 2000÷2002 (rys. 1÷2). Wiadukty są konstrukcjami trójprzęsłowymi. Podpory skrajne są oddalone o 43 cm od murów oporowych z gruntu zbrojonego [1].

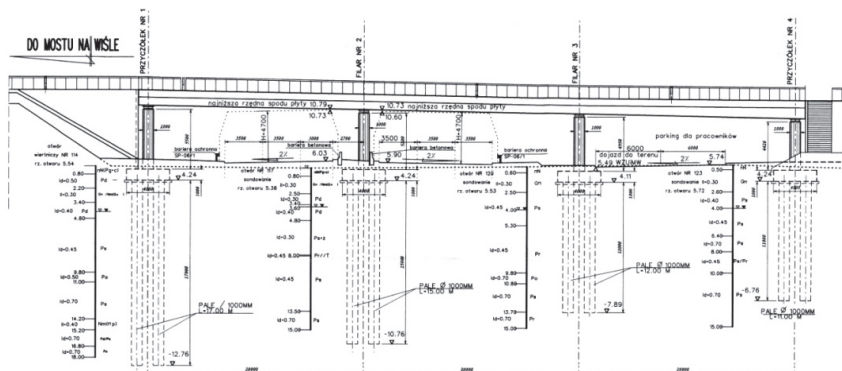
Podpory skrajne P1 i P4 (rys. 2÷4) przejmują siły pionowe z przęseł i siły oporu w łożyskach, mury oporowe przejmują parcie poziome gruntu nasypów

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.24.03

i obciążeń naziomu. Słupy opierają się na prostokątnych oczepach pali, posadowionych na dwóch rzędach pali wierconych o średnicy 1,0m długości 11,0÷15,0m. Pobocznicze pali otacza (licząc od spodu oczepu) warstwa nasypów o miąższości 0÷3,0m, zastoiskowej gliny pylastej 1÷3,0m, warstwa aluwialnych piasków średnich lub grubych o aktualnym stopniu zagęszczenia $I_D = 0,60$. Pod stopami pali, które posadowiono w piaskach grubych z przewarstwieniami pospółki o $I_D = 0,80$, wykonano iniekcję cementową.



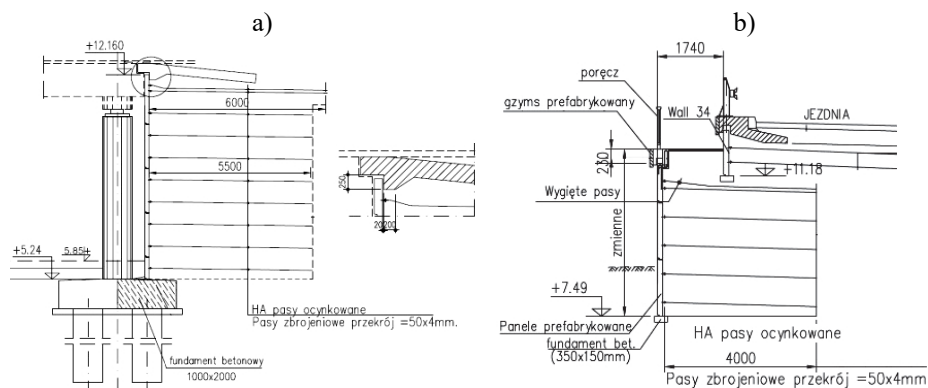
Rys. 1. Widok ogólny wiaduktów Trasy Siekierkowskiej nad ul. Wał Miedzeszyński



Rys. 2. Szkic boczny wiaduktów TS nad ul. Wał Miedzeszyński [1]



Rys. 3. Widok ogólny podpory P1 w trakcie budowy (2000r.)



Rys. 4. Fragmenty dokumentacji [1]: a) schemat podpory skrajnej P1 i połączenia z płytą przejściową, b) schemat bocznych ścian przyczółka z gruntu zbrojonego



Rys. 5. Uskoki na urządzeniach dylatacyjnych: a) widok od góry, b) widok z boku

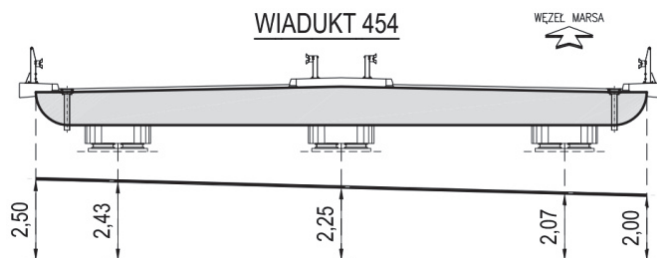
W lipcu 2016r. na podporze P1 (rys. 5÷6), na urządzeniach dylatacyjnych pomierzono uskoki (progi) o wysokości 15÷25mm, które powodowały silne (odczuwalne) drgania towarzyszące przejazdom taboru ciężarowego [6]. Z wy-

ników pomiarów geodezyjnych, wykonywanych w latach 2015÷2016 nad podporą P1, wynikało, że nad płytą przejściową o długości 4,0m i na odcinku 8,0m za płytą nie utworzyła się niecka (lokalne obniżenie), która mogłaby świadczyć o osiadaniu nasypu z gruntu zbrojonego. Na podstawie pomiarów stwierdzono również, że pomosty wiaduktów uległy skróceniu (poprzecznym przemieszczeniom). Podczas rocznej obserwacji wiaduktów (08/2015÷12/2016r.) nie odnotowano przyrostu pionowych i poziomych przemieszczeń.

W lecie 2016r. dokonano pomiaru drgań (przyspieszeń x , y , z) na dwóch słupach podpory P1, na wysokości około 0,5m powyżej chodnika [6].

W referacie, uwzględniając poczynione obserwacje, pomiary geodezyjne i pomiary drgań oraz dostępne badania geotechniczne, przedstawiono wyniki analiz przyczyn powstania uskoku. Przyjęto i omówiono dwa potencjalne schematy wystąpienia osiadań dodatkowych, jako bezpośrednią przyczynę wystąpienia uskoku:

- **schemat 1** polegający na osiadaniach podpory w efekcie dogęszczania się piasków aluwialnych, w wyniku oddziaływań dynamicznych na jezdni ul. Wał Miedzeszyński, prostopadłej do osi podłużnej wiaduktów,
- **schemat 2** wynikający z opóźnionych osiadań konsolidacyjnych warstwy gruntów spoistych w podłożu nasypu z gruntu zbrojonego, co mogło doprowadzić do wyniesienia przez obrót końców płyt przejściowych powyżej poziomu jezdni na wiadukcie.



Rys. 6. Szkic zakresu uskoku w wiadukcie środkowym (nr 454) [w cm]

Podczas analiz stosowano następujące podejścia obliczeniowe:

- analityczne, w przypadku pala pojedynczego i grup pali z uwzględnieniem wyników próbnych obciążeń pali,
- numeryczne za pomocą MES z zastosowaniem programów PLAXIS (2D) [7] i MIDAS GTX NX (3D) [8],
- analityczne według normy palowej z uwzględnieniem wpływu efektów dynamicznych oraz stanu granicznego naprężeń w gruncie zbrojonym.

W referacie przedstawiono również propozycje zlikwidowania istniejącego uskoku.

2. ANALIZA PRZEMIESZCZEŃ PODPÓR I NASYPU

2.1. Informacje wstępne, założenia i zakres analizy

Celem analiz było stwierdzenie i obliczeniowe potwierdzenie potencjalnych przyczyn ujawnienia się uskoku.

Jako uskok zdefiniowano różnice rzędnych profili dylatacyjnych na jednym urządzeniu dylatacyjnym. Za przyczynę jego powstania przyjęto wystąpienie dodatkowych przemieszczeń, wynikających z osiadań podpór w osi P1 i dochodzących nasypów zrealizowanych w technologii gruntu zbrojonego.

Analizowano wystąpienie nierównomiernych osiadań i obrotów płyty przejściowej w wyniku osiadań dochodzącego nasypu. W kontekście posadowienia podpór na palach wierconych wykonanych z iniekcją podstawy, gdzie podstawa i większa część poboczniczy pali, znajdują się w gruntach niespoistych, przyjmuje się założenie, że osiadania podpór od obciążeń stałych zrealizowały się na etapie wznoszenia obiektu. Przyjmując, że urządzenie dylatacyjne zostało zamontowane po obciążeniu fundamentów ciężarem konstrukcji obiektu i nasypu, to wystąpienie uskoku na dylatacji, można zinterpretować jako efekt długofalowych zjawisk, przyczyniających się do wystąpienia osiadań dodatkowych.

Przeprowadzono analizę w trzech podejściach obliczeniowych. Interpretacja określonych zjawisk, oddziaływań czy parametrów ośrodka była indywidualna w każdym z podejść. Przyjęto dwa potencjalne schematy wystąpienia osiadań dodatkowych, jako bezpośredniej przyczyny wystąpienia uskoku:

- **schemat 1** polegający na osiadaniu przyczółków w efekcie zmiany zwierciadła wód gruntowych, oddziaływań dynamicznych od ruchu na jezdni ul. Wał Miedzeszyński, stanowiących o dogęszczaniu się warstw piasków aluwialnych średniozageszczonych (średnio $I_D = 0,45$), występujących w ośrodku gruntowym do poziomu ~10m p.p.t.,
- **schemat 2** wynikający z przedłużającej się konsolidacji gruntów spoistych pod nasypem z gruntu zbrojonego, co przy specyficznym schemacie realizacji płyt przejściowych mogło doprowadzić do wyniesienia przez obrót płyt przejściowych ponad poziom dochodzącego przęsła.

2.2. Osiadanie podpory skrajnej - podejście obliczeniowe 1/ schemat 1

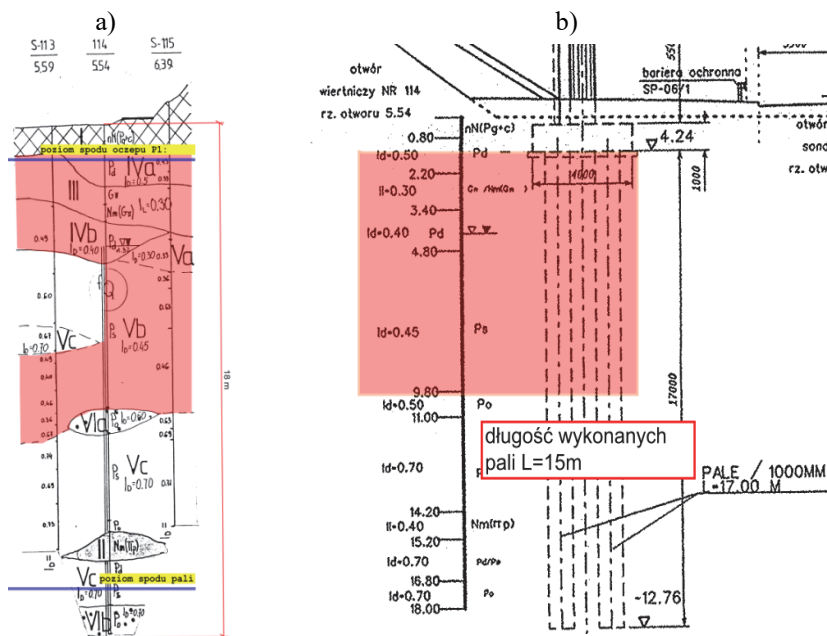
Ocena efektu oddziaływań dynamicznych i zmiany zwierciadła wody. W analizowanym schemacie założono wystąpienie dodatkowych osiadań na skutek dogęszczania się piasków średnich średniozageszczonych, występujących na znacznym odcinku poboczniczy wykonanych pali wielkośrednicowych. Zjawisko dogęszczenia piasków, redukcji objętości, stanowi efekt oddziaływań dynamicznych od ruchu drogowego pod obiektem, w bezpośredniej bliskości podpory P1, a także skutek występujących znaczących wahań zwierciadła wód gruntowych w zależności od stanu wody w Wiśle.

Grunty niespoiste o stosunkowo niskim stopniu zagęszczenia są predestynowane do wykazania wpływu na tego rodzaju oddziaływania. Obawy o wystąpienie tego rodzaju niekorzystnego zjawiska zostały już zasygnalizowane przez Projektantów obiektu w Opisie technicznym [1].

Innym czynnikiem mogącym przyczynić się do zaistnienia dodatkowych osiadań jest dogęszczanie się mocnych warstw piasków dolnej części pali wskutek ich rozluźnienia podczas wykonywania pali w technologii wiercenia w rurze obsadowej [6]. Efekty z tym związane nie zostały ujęte jako dodatkowe oddziaływania podczas analiz z uwagi na iniekcję podłoża podstaw pali.

Przeprowadzone w 2016r. dodatkowe badania ośrodka gruntowego w sąsiedztwie podpór [6], wskazują na wzrost stopnia zagęszczenia średniozagęszczonych piasków w porównaniu do wyników badań dla podpory P1 zaznaczonych na archiwalnych przekrojach geotechnicznych [1]. Według badań z 2016r. w chwili obecnej strefa piasków średniozagęszczonych uległa dogęszczeniu do początkowej fazy stanu zagęszczonego ($I_D \geq 0,60$). Stan głębszych stref nie uległ zmianie, ponieważ ich stopień zagęszczenia $I_D \geq 0,60$.

Zestawienie przekroi geotechnicznych w sąsiedztwie podpory P1 ilustruje rys. 7. Wskazano na nim warstwy potencjalnie zmieniające w czasie stopień zagęszczenia i warstwy nadległe (kolor czerwony). Zaznaczone długości pali 15m względem 17m według [1] wynikają z metryk pali [2] i zostały przyjęte jako długości rzeczywiste.



Rys. 7. Przekroje geotechniczne z ujętym sposobem posadowienia według [4]

Zmianę stopnia zagęszczenia wskazanych warstw, a tym samym zmniejszenie objętości ośrodka, zinterpretowano jako oddziaływanie w postaci tarcia negatywnego przekazywanego na pale. Założono potencjalne wystąpienie zjawiska na długości „dogęszczanych” w czasie warstw gruntów niespoistych oraz nadległych utworów spoistych. Wartość tarcia negatywnego założono jako wartości maksymalnych oporów na poboczniczy analizowanych gruntów według PN-B-02482:1983 z uwzględnieniem współczynników technologicznych jak dla pali wyciąganych.

W przypadku podpory P1, jako referencyjny, przyjęto układ warstw według otworu wiertniczego (OW) nr 114 (rys. 7). Obciążenie dodatkowe w postaci tarcia negatywnego (Q_{TN}) wyznaczono na poziomie $Q_{TN} = 933\text{kN}$.

W kolejnym etapie analizy przyjęto, że efekt od dynamicznego dogęszczania ośrodka ogranicza się do objętości gruntu pod jezdnią (między podporami) i bezpośrednio wokół pali. Wynika to z założenia o ograniczeniu wpływu dynamicznego w ośrodku, przez swoistą „barierę” w postaci wykonanych pali podpory P1.

Ocena analityczna osiadania pojedynczego pala podpory P1. W celu oszacowania oddziaływania od dodatkowego obciążenia tarcie negatywnym, w kontekście osiadania podpory, przeprowadzono próbę odtworzenia prawdopodobnej krzywej $Q - s$ (siła – przemieszczenie), oddającej charakter pracy pali. Analizę wykonano według założeń [11] i [12].

Przyjęta na potrzeby analizy długość pali $L = 15\text{m}$, zredukowana względem długości z dokumentacji rysunkowej [1], wynika z długości pali wykazanych w dostępnych metrykach pali [4]. W ramach prognozy charakteru pracy rozpatrywanych pali, przeanalizowano wyniki próbnych obciążeń pali podpór P2 i P4 według [4]. W założeniach „Projektu próbnych obciążeń pali”, ocenianych obiektów, przyjęto wykonanie badania pali wielkośrednicowych:

- podpory P2, z palami bez iniekcji podstawy,
- podpory P4 dla pali z iniekcją podstaw.

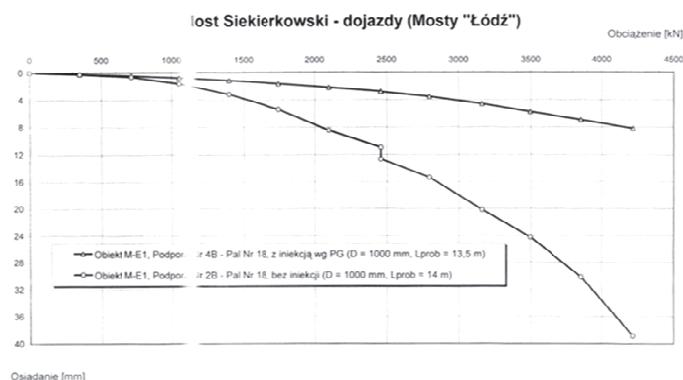
Badania przeprowadzono przed przeprowadzeniem zasadniczych robót palowych.

Na podstawie interpretacji krzywych osiadania pali testowych dokonano oszacowania nośności pali według podstawowych założeń PN-B-02482:1983. Ponadto, na podstawie uzyskanych wartości nośności, odtworzono analityczne wykresy $Q - s$ dla pali testowych, według założeń funkcji transformacyjnych. Pominęto efekt sprężystego skrócenia pali.

Średnice pali pod wszystkimi podporami wynoszą 100cm, a warunki geotechniczne są stosunkowo jednolite, co umożliwiło skalibrowanie sposobu obliczania nośności pali i wyznaczanie przebiegu funkcji $Q - s$ dla pali podpory P1. Na wykresie $Q - s$ (rys. 8) sporządzonym dla przebadanych pali [4] wyraźnie widać różnicę w charakterze pracy pali wynikającą z wpływu iniekcji podstawy.

Skalibrowany charakter pracy pala zaadoptowano do warunków gruntowych reprezentatywnych dla podpory P1 według OW nr 114 [1], [4]. Wyłączono

z udziału w pracy pala warstwy gruntów, w których założono efekty tarcia negatywnego, wyodrębnionych na załączonym profilu gruntu kolorem czerwonym (rys. 7). Osiadania pali oszacowano dla wariantów z iniekcją i bez iniekcji podstawy.



Rys. 8. Wykresy zależności obciążenie – osiadanie (Q – s) [4]

Pomimo wykazanej w dokumentacji powykonawczej iniekcji podstawy wszystkich pali, w przypadku podpory P1, oszacowano także osiadania wariantu bez iniekcji w celu zbadania potencjalnych efektów, które mogły przyczynić się do powstania osiadań dodatkowych. Z analizy wynika, że ewentualny udział w osiadaniu pali, dogęszczania warstw średniozagęszczonych piasków, w efekcie oddziaływań dynamicznych i zmiany zwierciadła wody, istotnie różni się przy założonym charakterze pracy pala bez iniekcji, bądź z iniekcją podstawy. Przy wyliczonych potencjalnych osiadaniach dodatkowych, odpowiednio do dwóch rozpatrywanych wariantów, 9mm i 3mm przyjęto, że możliwe było wystąpienie sytuacji pośredniej, wynikającej z niewykluczonych niedoskonałości technologicznych podczas wykonywania iniekcji i samych pali. Z tego względu zasadne jest oszacowanie dodatkowych osiadań, wywołanych dogęszczeniem ośrodka, na poziomie 6mm.

W celu oszacowania dodatkowego osiadania pojedynczego pala przeprowadzono obliczenia potencjalnych średnich osiadań podpór posadowionych na grupie pali. Wykonano je metodą analityczną na podstawie wzoru:

$$S_{g,d} = S_{p,d} \cdot R_{sr} \quad (2.1)$$

w którym:

R_{sr} – empiryczny współczynnik ujmujący wzrost osiadania oczepu palowego opartego na grupie pali w stosunku do pojedynczego pala [11].

Współczynnik $R_{sr} = 2,62$ określono uwzględniając wymiary układu pali podpory północnej (wiadukt 452) – grupa 2×4 pale.

Szacunkowe osiadanie grupy pali wynosi $S_{g,d} = 2,62 \cdot 6\text{mm} = 15,72\text{mm}$.

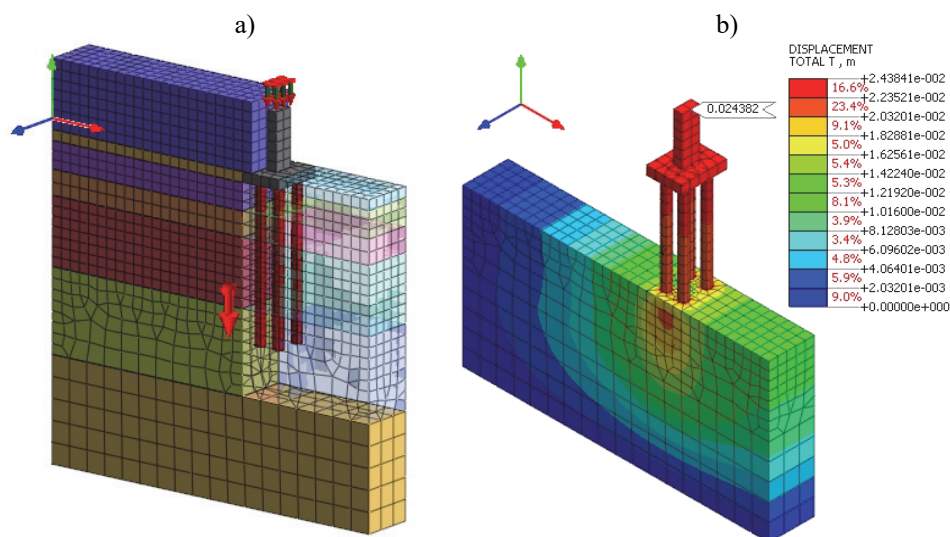
2.3. Analiza numeryczna osiadania grupy pali podpory P1

W celu weryfikacji osiadań grupy pali, w wyniku oddziaływań od obciążeń stałych i tarcia negatywnego, przeprowadzono obliczenia metodą elementów skończonych (MES). Przyjęto założenia analogiczne jak w przypadku oszacowania wykonanego na podstawie informacji z próbnych obciążeń. Analizę przeprowadzono wykonując bryłowy model przestrzenny 3D (klasy e^3 , p^3), za pomocą specjalistycznego oprogramowania MIDAS [8] do zagadnień geotechnicznych (rys. 9).

Podstawowe wymiary przyjęto zgodnie z dokumentacją wykonawczą [1], modelując „wycinek” podpory (rys. 9), reprezentujący wiadukt środkowy (454), z rozstawem pali $\sim 2,6$ m, szerokości 5,2m (model obejmuje 4 pale). Pale zamodelowano elementami objętościowymi (e^3). Parametry gruntów przyjęto na podstawie wyników badań z 2016r. Rozpatrywany „wycinek” podpory obciążono siłą odpowiadającą obciążeniu 4 pali.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że możliwe było wystąpienie, stosunkowo istotnych, dodatkowych osiadań pod wpływem rozpatrywanych oddziaływań. Wyznaczone szacunkowe wartości osiadań wyniosły odpowiednio:

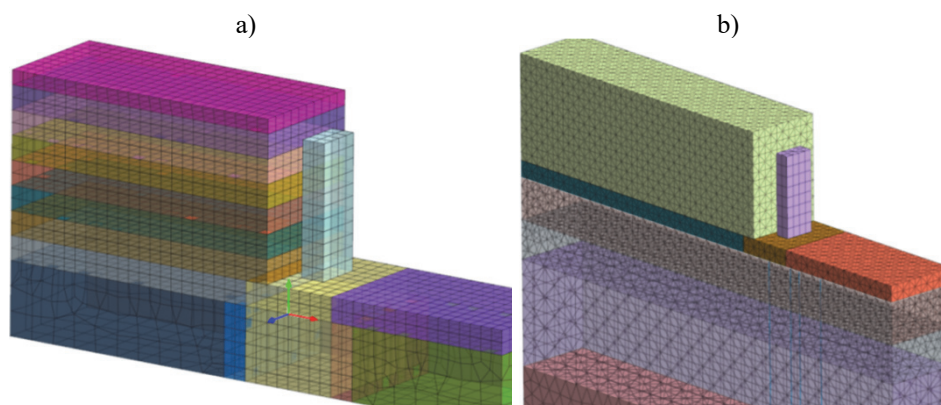
- od obciążeń stałych: 13mm (rys. 9a),
 - od obciążeń dodatkowych (tarcie negatywne): $S_{g,d} = 12$ mm (rys. 9b).
- Obliczenia MES potwierdzają wyniki uzyskane w podejściu analitycznym.



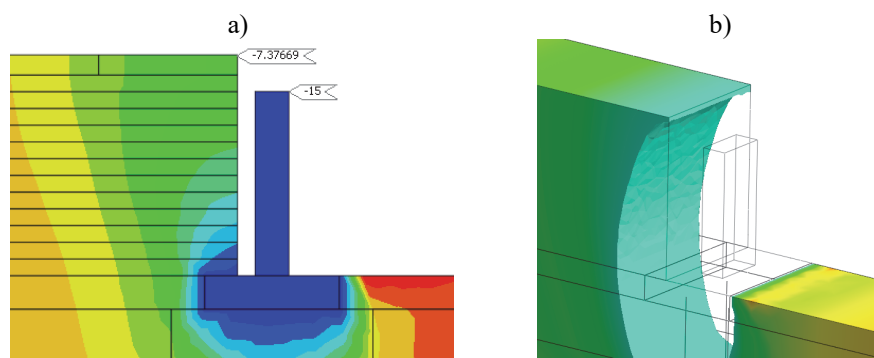
Rys. 9. Model obliczeniowy grupy pali: a) wizualizacja modelu, b) wizualizacja przykładowych wyników analizy [8] – osiadania całkowite od obciążeń stałych i tarcia negatywnego (kolor czerwony – wartości max, kolor niebieski – wartości min)

2.4. Analiza numeryczna przemieszczeń - połączenie nasypu z gruntu zbrojonego z konstrukcją podpory P1

W celu dokładniejszego zbadania zjawiska przeanalizowano charakter przemieszczeń w nasypie z gruntu zbrojonego za pomocą oprogramowania MIDAS [8]. Wykonano model MES typu 2D (rys. 11, klasy e^2, p^2) w płaskim stanie odkształceń (PSO) oraz model przestrzenny 3D (rys. 10, klasy e^3, p^3) przy obciążeniu podpory P1 wymuszonym przemieszczeniem 15mm.



Rys.10. Wizualizacja modeli obliczeniowych 3D [8]: a) wariant-1, b) wariant-2



Rys.11. Wizualizacja przemieszczeń pionowych [8] od obciążeń dodatkowych – tarcie negatywne w postaci wymuszonego przemieszczenia: a) model w płaskim stanie odkształceń (2D), b) od obciążeń dodatkowych – tarcie negatywne (osiadania podpory) [8], fragment modelu z „wyciętymi” obszarami o przemieszczeniach mniejszych od występujących na krawędzi przydylatacyjnej nasypu – wariant-2

Podstawowe wymiary (gabaryty) przyjęto zgodnie z dokumentacją wykonawczą [1], modelując fragment podpory (rys. 10) reprezentujący wiadukt środkowy – 454, szerokości 5,2m. Zamodelowano układ w dwóch wariantach (rys.

10a i 10b) różniących się budową modelu, siatkowaniem i sposobem odtworzenia posadowienia podpory.

Analizę przeprowadzono także niezależnie w PSO (2D) za pomocą programu PLAXIS [7], przy analogicznych założeniach jak w modelu 3D w celu weryfikacji uzyskanych wyników.

Przedstawione fragmenty map przemieszczeń (rys. 11) stanowią wizualizację efektu utrzymywania się górnych warstw nasypu względem poziomów dolnych, osiadających wraz z oczepem palowym na skutek dodatkowych osiadań, pochodzących między innymi od dogęszczenia ośrodka gruntowego. Zobrazowany efekt można opisać poprzez analogię klifu.

Analiza stanu przemieszczeń nasypu na połączeniu z podporą P1 od oddziaływań dodatkowych wskazuje na możliwość wystąpienia zjawiska polegającego na nierównomiernym osiadaniu oczepu palowego i góry, opartego na skraju oczepu, nasypu z gruntu zbrojonego.

Przeprowadzone obliczenia różnych wariantów modelu, implementacji obciążeń, wprowadzanych ograniczeń oddziaływań, wykazały złożoność sposobu odtworzenia numerycznego ścisłej wartości przemieszczeń w „uskoku”. Wyniki symulacji potwierdzają jednakże możliwość wystąpienia obserwowanej różnicy rzędnych przylegających profili dylatacyjnych od przyjętych w analizach oddziaływań i stanowią o słuszności założeń przyjętych w rozpatrywanym scenariuszu powstania „uskoku” na dylatacji.

Na podstawie przeprowadzonych wariantowych symulacji numerycznych można wyciągnąć następujące wnioski:

- analizowany schemat osiadań oczepu palowego stanowi prawdopodobnie dominujący czynnik efektu „uskoku” na dylatacji,
- uznać można, że dodatkowe osiadania podpory wywołane oddziaływaniem dynamicznym od ruchu pod obiektem, jak i zmieniającym się zwierciadłem wód gruntowych, przyczyniły się do powstania „uskoku”,
- modelowanie i analiza dochodzącego nasypu z gruntu zbrojonego, wraz z konstrukcją drogi i płytami przejściowymi, do skrajnej podpory P1 (przyczółek pośredni z gruntu zbrojonego) jest złożonym zagadnieniem, jednakże jakościowa interpretacja uzyskanych wyników wskazuje na możliwość pojawienia się zróżnicowanych przemieszczeń po dwóch stronach dylatacji,
- przeprowadzona analiza nie służyła ilościowemu określeniu wielkości przemieszczeń, umożliwiła natomiast jakościową ocenę i weryfikację przyjętych, możliwych mechanizmów zachowania się ośrodka gruntowego.

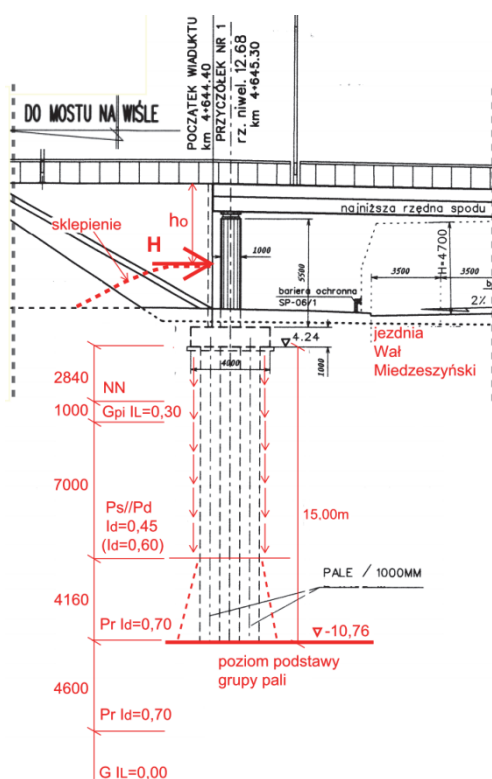
2.5. Analiza osiadań podpory skrajnej i nasypu - podejście obliczeniowe 2/ schemat 1

Stwierdzono, że przyczynę dodatkowych osiadań podpory P1 (od strony północnej) rozpatrywanego wiaduktu 452 stanowi dogęszczenie piasków aluwialnych, w wyniku drgań od ruchu samochodowego na jezdni ul. Wał Miedze-

szyński i Trasy Siekierkowskiej [6]. Przekrój geotechniczny przyjęty do obliczeń podano na rys. 12 [1]. Rozważano dwa przypadki uwarstwienia podłoża grupy pali, mając na uwadze wyniki badań z 2016r.:

- obecność zastoiiskowej gliny pylastej o nieprzewierconej miąższości,
- brak gliny pylastej przy założeniu, że zastępuje ją piasek gruby (Pr), zagęszczony [3].

Dogęszczeniu ulega piasek średni o początkowym stopniu zagęszczenia $I_D=0,45$, natomiast grunty zalegające powyżej (rys. 12 - glina pylasta oraz nasyp) ulegają osiadananiu [6].



Uzyskano następujące wartości tarcia ujemnego T_n oraz ciężarów warstw G_i :

Nasyp;

- $T_n=485,11\text{kN}$,
- $G_n=1460,80\text{kN}$,

G_{pi} ;

- $T_n=969,63\text{kN}$,
- $G_g=488,68\text{kN}$,

$P_s // P_d$

- $T_n=9938,47\text{kN}$,
- $G_p=1800,40\text{kN}$ (z wyporem).

Rys. 12. Obliczeniowy przekrój geotechniczny [6]

Wartość jednostkowego tarcia negatywnego (t) na pobocznicy pali wierconych z rurą obsadową wyciąganą, określono w [6] przyjmując za poziom pierwotny terenu rzędną 6,03m (0 „Wisły”). W przypadku nasypu przyjęto wartość stałą $t = 10\text{kPa}$. Nie uwzględniono współczynników technologicznych S_w zakładając, że grunty ulegają dogęszczeniu oraz dodatkowemu obciążeniuarciem poziomym od nasypu. W odniesieniu do grupy pali podpory P1 wiaduktu 452

obliczono globalną wartość tarcia ujemnego w każdej warstwie gruntu oraz ciężar warstw w obrębie oczepu pali.

Sumaryczna wartość maksymalnego tarcia ujemnego wynosi $T = 11393,21\text{kN}$, ciężarów warstw $G = 3750\text{kN}$. Do obciążeń przyjęto wartość większą, na podstawie analizy modelu warstwy piasku średniego traktowanej jako belka ograniczona jednostronnie, oparta na sprężystym podłożu *Winklera*, której ugięcia wynikają wyłącznie ze ścinania. Ugięcia belki opisuje równanie:

$$y = \frac{q}{U} \left[1 - e^{-(AU)^{\frac{1}{2}} x} \right] \quad (2.2)$$

w którym:

q – nacisk pionowy,

$A = 1,5/(GF)$,

G – moduł *Kirchhoffa*,

F – pole przekroju poprzecznego belki,

U – współczynnik sprężystości podłoża,

x – odcięta rozpatrywanego punktu belki.

W środkowej strefie warstwy P_s/P_d (rys. 12) naprężenie styczne na obwodzie grupy palowej jest rzędu 40 kPa, co jest zbliżone do wartości granicznej 56 kPa, uzyskanej według normy palowej PN-B-02482:1983. Z obliczeń podpory P1 wynikają następujące charakterystyczne wartości obciążeń fundamentu palowego: ciężar własny i wyposażenie $Q_{ng} = 4027\text{kN}$, zmienne $Q_{nz} = 1939\text{kN}$. Wpływ obciążeń zmiennych i drgań od ruchu samochodowego uwzględniono stosując współczynniki zmęczenia do modułów odkształcenia podłoża fundamentu palowego [9]. Dla gruntów sypkich przyjęto 0,65, a dla spoistych 0,45.

Przyrosty nacisków w podstawie grupy pali wynoszą:

- od tarcia ujemnego: 380,00 kPa,
- od ciężaru własnego i wyposażenia: 134,32 kPa,
- od obciążeń zmiennych: 64,67 kPa.

Moduły odkształcenia gruntów, zalegających w podłożu grupy pali, określono z normy PN-B-03020:1981 przyjmując dla piasków $E_0 = 100\text{MPa}$, gliny pylastej $E_0 = 33\text{MPa}$. W przypadku zalegania w podłożu grupy pali tylko piasków przyrost osiadań podpory wiaduktu obliczony metodą odkształceń wyniósł $\Delta s_1 = 9,0\text{mm}$. W przypadku obecności gliny pylastej $\Delta s_2 = 20,0\text{mm}$. Biorąc pod uwagę sztywność giętą gruntu zbrojonego wzmocnionego dodatkowo nawierzchnią i kapami chodnikowymi obliczone przyrosty osiadań uznaje się za równoważne uskocom na dylatacji.

Osiadania gruntu wokół oczepu pali (rys. 12) wpływają również na lokalne deformacje przyległego nasypu z gruntu zbrojonego. Do obliczeń przyjęto następujące parametry gruntu w nasypie: kat tarcia wewnętrznego $\varphi = 35^\circ$, ciężar objętościowy $\gamma = 19,0\text{kN/m}^3$.

Zastępczą wartość spójności gruntu zbrojonego, wynikającą z wyciągania zbrojenia, oszacowano według [1] na co najmniej $c = 23,0\text{kPa}$.

W takim przypadku wykształca się sklepienie w dolnej części nasypu, którego zasięg poziomy oraz strzałkę określono na podstawie profilu skarpy znajdującej się w stanie granicznym. Profil takiej skarpy opisać można równaniem charakterystyk naprężeń granicznych [10] przy zerowym warunku naprężeniowym na profilu skarpy. Zasięg poziomy przesklepienia wyniesie około 7,0m, licząc od lica ściany gruntu zbrojonego i w tym wymiarze naniesiono jego geometrię na rys. 12. Zgodnie z teorią stanu granicznego gruntów [10] powyżej klucza sklepienia zlokalizowana jest warstwa „sprężysta” o grubości h_0 . Wartość $h_0 \approx 4,6\text{m}$, a więc wysokość sklepienia w kluczu wyniesie $\sim 3,0\text{m}$.

Wykształcone sklepienie spowodowało brak lokalnej niecki osiadań nad płytą przejściową i poza nią, o czym wspomniano wcześniej w niniejszym opracowaniu. Dodatkowe skutki powstania przesklepienia:

- odciążenie dolnego zbrojenia a więc zmniejszenie wytrzymałości na wyciąganie,
- w otoczeniu klucza przesklepienia powstała dodatkowa siła pozioma naporu H (rys. 12) na prefabrykowane panele osłonowe o wartości $H \approx 230\text{kN/m}$.



Rys. 13. Przykłady deformacji układu prefabrykowanych paneli przyczółka z gruntu zbrojonego podpory P1: a) zwiększone odstępy między panelami, b) przemieszczenia poziome paneli

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń szacunkowych można wyciągnąć następujące wnioski:

- przyczyną powstania uskoków na dylatacji są różnice osiadań podpór wiaduktu i czoła gruntu zbrojonego,
- dodatkowe obciążenia podpór wiaduktów powstały w wyniku dogęszczenia się piasków aluwialnych od drgań pochodzących od ruchu samochodowego na ul. Wał Miedzeszyński i na Trasie Siekierkowskiej,

- obecność przesklepień w nasypie z gruntu zbrojonego skutkuje odciążeniem strefy zakotwienia zbrojenia w dolnej strefie nasypu oraz dociążeniem prefabrykowanych paneli osłonowych, co prowadzi do deformacji ścianek z prefabrykatów (rys. 13), zarówno w kierunku podłużnym jak i poprzecznym nasypu (widoczne w terenie).

2.6. Analiza osiadań nasypu - podejście obliczeniowe 3/schemat 2

Ocena dostępnych danych pod kątem możliwość wystąpienia dodatkowych osiadań dojazdu – nasypu. Z inwentaryzacji geodezyjnej wykonanej w 2016r. wynika, że nie ma przesłanek świadczących o osiadaniu nasypu z gruntu zbrojonego w obrębie i za płytą przejściową. Nie zaobserwowano wytworzenia się „niecki”, która świadczyłaby o tym zjawisku.

Charakter nieciągłości konstrukcji kap i chodników na dojeździe do przyczółka (rys. 14) wskazuje jednak na możliwość wystąpienia osiadań dodatkowych w obrębie nasypu i czyni zasadnym analizę ewentualnego efektu w postaci przemieszczeń płyty przejściowej.



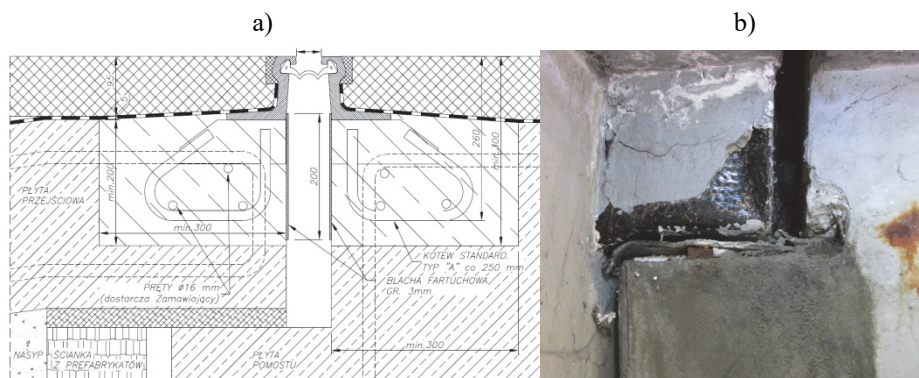
Rys.14. Przykłady istniejących kap chodnikowych: a) ściana boczna – wiadukt 452, b) ściana boczna z pomostem schodów – wiadukt 452

Ocena potencjalnego schematu wystąpienia dodatkowych osiadań. Uwzględniając stosunkowo małe wartości parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych gruntów [3], występujących w zakresie wpływu obciążeń od nasypu, przyjęto możliwość wystąpienia osiadań samego nasypu względem przyczółka. W tym wariantcie, osiadania przy posadowieniu na palach w gruntach niespoistych, potencjalnie zrealizowały się w znacznej części w trakcie budowy obiektów. Przyjęto, że nasyp z gruntu zbrojonego wykonano w jednym z ostatnich etapów prac (rys. 3), a tym samym ewentualny wpływ wydłużonej w czasie konsolidacji gruntów na przemieszczenie płyty przejściowej, wynikający z obrotu.

Analizowany efekt wynika ze specyfiki rozwiązania połączenia płyty przejściowej z obiektem. Płyta opiera się w na nasypie z gruntu zbrojonego, a końcówka, z wmontowanym urządzeniem dylatacyjnym, spoczywa na wsporniku

płyty pomostu (rys. 15). Układ taki determinuje ewentualny ruch końca płyty przy dylatacji wynikający z nierównomiernego osiadania nasypu.

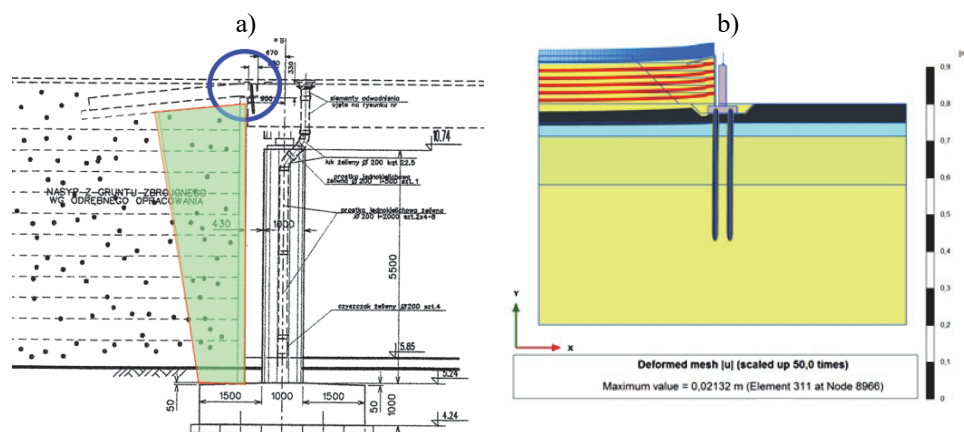
Analiza MES połączenia podpory i nasypu z gruntu zbrojonego. W celu weryfikacji założeń rozpatrywanego wariantu zachowania się układu nasyp i przyczółek pośredni z gruntu zbrojonego, analizowano przemieszczenia węzłów modelu MES. Parametry gruntów przyjęto na podstawie wyników badań z 2016r. [6]. Symulację przeprowadzono w PSO za pomocą programu PLAXIS 2D [7]. Przyjęto gabaryty zgodnie z dokumentacją wykonawczą [1], zakładając sztywności pali wynikające z wyników próbnych obciążeń [4] i według pkt. 2.2 – pośrednie jak dla pali z iniekcją podstawy i bez. Sztywność geotechniczną pali jak i strukturalną zredukowano z uwagi na dostosowanie modelu PSO do rozstawu pali (jak dla nasypu dochodzącego do wiaduktu środkowego 454).



Rys.15. Połączenie płyty przejściowej z konstrukcją nośną nad podporą P1:
a) schemat rozwiązania konstrukcyjnego, b) widok z boku – stan z 2016r.

Grunt zamodelowano według hipotezy *Culomba Mohra* i *HS (Hardening soil)*, w zależności od warstwy litologicznej. Dostępne z badań cechy gruntów nie stanowią pełnej informacji, co do parametrów w przyjętych modelach. Z tego względu przyjęto zastosowanie modelu *HS*, nawet przy określeniu niektórych parametrów na podstawie ogólnych doświadczeń i praktyki, jako celowe w przypadku analizowanego zagadnienia.

Różnica przemieszczeń, zobrazowana na rys. 16, dla obu końców płyty przejściowej wynosi ~ 17 mm. Charakter przemieszczeń płyty wskazał na niewielki obrót płyty przyjęty w założeniach. Przemieszczenia wyznaczone za pomocą analizy numerycznej potwierdziły także przesunięcie płyty w płaszczyźnie prostopadłej do obliczania. Zostało to potwierdzone podczas oględzin oparcia płyt przejściowych w rejonie pomiędzy wiaduktami 453 i 454.



Rys.16. Podpora P1: a) przekrój wzdłuż osi obiektu [1], b) wizualizacja modelu obliczeniowego [7]

Analizowany schemat przemieszczeń płyty przejściowej (rys. 16) prawdopodobnie nie stanowi dominującego efektu powstania „uskoku” na dylatacji. Uznać jednak należy, że przemieszczenia płyty przejściowej w wyniku konsolidacji gruntu pod nasypem nie zdecydowały o powstaniu „uskoku”, ale pogłębiły jego wielkość. Należy podkreślić, że sposób oparcia płyty przejściowej, z zainstalowanym bezpośrednio w płycie urządzeniem dylatacyjnym, jest bardzo wrażliwy na efekty osiadań i deformacji bloku gruntu zbrojonego, w porównaniu do innych spotykanych w praktyce rozwiązań.

3. WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z WYKONANYCH ANALIZ

Przeprowadzona wieloetapowa analiza różnorodnych wariantów powstania przemieszczeń elementów konstrukcji, objawiających się „uskokiem” na dylatacji, potwierdza złożoność rozpatrywanego zagadnienia. Na podstawie wykonanych symulacji można wyciągnąć jednak pewne wnioski ogólne:

- przyczyną powstania „uskoku” na dylatacji są różnice osiadań podpór wiaduktów – skrajnej podpory P1 i czoła przyczółków z gruntu zbrojonego,
- dodatkowe osiadania podpór skrajnych wiaduktów powstały w wyniku dogęszczania się piasków aluwialnych od drgań wynikających z ruchu taboru drogowego na ul. Wał Miedzeszyński,
- obrót płyty przejściowej i wynikające z niego przemieszczenia płyty spowodowane osiadaaniem nasypu z gruntu zbrojonego sklasyfikowano jako zjawisko drugorzędne, w szczególności przemieszczanie się krawędzi płyty przejściowej, w której są zamocowane urządzenia dylatacyjne, powodują zwięk-

- szanie się „uskoku” na dylatacji, co również wpływa negatywnie na warunki eksploatacji obiektu i zwiększanie dyskomfortu jego użytkowników,
- powstanie przesklepień w nasypie z gruntu zbrojonego skutkuje odciążeniem strefy zakotwienia zbrojenia w dolnej części nasypu i przyczynia się do lokalnego zmniejszenia oporu zakotwienia zbrojenia w gruncie, przy czym zjawisko to powoduje deformację ścianki z prefabrykatów na kierunku poprzecznym i poprzecznym nasypu.

4. KONCEPCJE NAPRAWY

Rozważano kilka scenariuszy naprawy, scharakteryzowanych poniżej.

Wariant 1, polegający na wymianie istniejących urządzeń dylatacyjnych na odpowiednio zmodyfikowane (bez podnoszenia konstrukcji nośnych) z jednoczesną reprofiliacją powierzchni użytkowych (nawierzchni jezdni i chodników). W tym wariantcie naprawa mogłaby być skuteczna pod warunkiem, że proces osiadania podpór już się zakończył. Zaletą tego typu naprawy byłby dogodny dostęp do miejsc naprawianych oraz możliwość dogodnego zmodyfikowania rozwiązania konstrukcyjnego oparcia płyty przejściowej i uszczelnienia strefy dylatacyjnej. Do wad tego rozwiązania należy zaliczyć niestandardową eksploatację konstrukcji nośnych w „nieco zdeformowanej” geometrii.

Wariant 2 to podniesienie konstrukcji nośnych wiaduktów z ewentualnym zabezpieczeniem podpór z gruntu zbrojonego „konstrukcjami ograniczającymi” wpływ intensywnej eksploatacji wiaduktów, w szczególności oddziaływań dynamicznych i późniejszym monitoringiem geodezyjnym umożliwiającym stwierdzenie czy proces osiadania podpór już się zakończył. Zaletą tego typu naprawy jest wykonywanie części prac „pod ruchem”, brak konieczności reprofiliacji powierzchni użytkowych oraz brak konieczności wymiany łożysk elastomerowych (przy potwierdzeniu podczas podnoszenia dobrego ich stanu technicznego).

Wariant 3, zakładający naprawę „od góry” z jednoczesnym podniesieniem konstrukcji nośnych. Nietypowe wykonstruowanie połączenia płyty przejściowej opartej na wsporniku ustroju nośnego może spowodować „zakleszczenie się” płyty przejściowej podczas podnoszenia wiaduktu oraz możliwością uszkodzenia konstrukcji nośnych pomostów, zabudów chodnikowych, wyposażenia, w tym prefabrykatów gzymsowych w strefach przydylatacyjnych.

Wszystkie wymienione scenariusze wymagają monitoringu geodezyjnego, w szczególności słupów, ścian czołowych i bocznych przyczółków umożliwiającym stwierdzenie czy proces osiadania i przemieszczania podpór się zakończył.

W przypadku stwierdzenia, że przyrosty pionowych przemieszczeń i deformacji ścian oporowych, w tym przemieszczenia prefabrykatów trwają, należy rozważyć podjęcie dalszych działań naprawczych.

W chwili obecnej można teoretycznie rozważyć następujące sposoby potencjalnych napraw:

- niskociśnieniową iniekcję cementową wybranych fragmentów gruntu zbrojonego,
- „obłożenie” wybranych fragmentów lica ścian przyczółków z gruntu zbrojonego dodatkowymi osłonami z jednoczesnym doprężeniem kotwami gruntowymi,
- sukcesywne wyburzenie i odbudowa przyczółków z gruntu zbrojonego, łącznie z realizacją konstrukcji spełniającej założenia płyty przejściowej i umożliwiającej wbudowanie urządzenia dylatacyjnego, w formie mniej wrażliwej na ewentualnie nierównomierne osiadanie nasypu względem podpory,
- wzmocnienie piasków aluwialnych w bezpośrednim sąsiedztwie podpór o niestabilizowanych osiadaniach.

LITERATURA

- [1] Fragmenty dokumentacji projektowej: *Projekt wykonawczy wiaduktu w ciągu Trasy Siekierkowskiej nad ulicą Wał Miedzeszyński – obiekt M-E1*. Transprojekt Gdański sp. z o.o., Gdańsk, 10/1998.
- [2] Fragmenty dokumentacji powykonawczej: *Budowa Trasy Siekierkowskiej w Warszawie. Węzeł Wał Miedzeszyński: Zadanie 1B+1C. Badania laboratoryjne. Metryki Pali. Obiekt M-E1*. Wykonawcy: WPRD S.A., PPRM S.A., PRM „Mosty Łódź” S.A., Warszawa, 01-07/2001.
- [3] Fragmenty dokumentacji powykonawczej: *Budowa Trasy Siekierkowskiej w Warszawie. Węzeł Wał Miedzeszyński: Zadanie 1B+1C. Obiekt M-E1. Badania laboratoryjne. Badania geologiczne. Wyniki sondowań dynamicznych SC w rejonie podpór przy ul. Wał Miedzeszyński*, Geoteko sp. z o.o., Warszawa, 02-03/2001.
- [4] Fragmenty dokumentacji powykonawczej: *Budowa Trasy Siekierkowskiej w Warszawie. Węzeł Wał Miedzeszyński: Zadanie 1B+1C. Obiekt M-E1. Badania laboratoryjne. Próbné obciążenia pali*. Katedra Geotechniki, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 12/2000-02/2001.
- [5] Fragmenty dokumentacji powykonawczej: *Budowa Trasy Siekierkowskiej w Warszawie. Węzeł Wał Miedzeszyński: Zadanie 1B+1C. Obiekt M-E1. Badania laboratoryjne. Metryki iniekcji pali*. Katedra Geotechniki, Politechnika Gdańska, Firma Usługowa „Ekspert” Marek Byczkowski, Gdańsk, 12/2000-007/2001.
- [6] Praca zbiorowa: *Ekspertyza techniczna osiadania obiektów Trasy Siekierkowskiej nad ul. Wał Miedzeszyński*. Instytut Dróg i Mostów PW, Warszawa 2016.
- [7] Instrukcja programu PLAXIS 2D, Plaxis bv Delft, 2016.
- [8] Instrukcja programu MIDAS GTS NX v1.1, Midas IT Co. Ltd, 2016.
- [9] Kosecki M., *Statyka ustrojów palowych*. PZiITB, Szczecin 2006.
- [10] Sokołowski W. W., *Statyka ośrodków sypkich*. PWN Warszawa 1958 (tłumaczenie).
- [11] Gwizdała K., Krasieński A., *Fundamenty palowe, obliczenia z zastosowaniem EC7 i doświadczeń krajowych*, Acta Sci. Pol. Architectura 15 (2) 2016, 3–22.
- [12] Tejchman A., *Nośność i osiadanie fundamentów palowych*, Politechnika Gdańska, 2001.

REASONS OF EMERGENCE OF DIFFERENCES IN SOIL SETTLEMENT BETWEEN THE VIADUCT AND THE EMBANKMENT ON SIEKIERKOWSKA ROUTE

Summary

The road viaducts which span over Wał Miedzeszyński Street and are part of Siekierkowska Route form an element of Warsaw's road infrastructure which was constructed in the years 2000÷2002. They are triple-bay, reinforced concrete facilities whose end sections are supported on embankments made of reinforced soil. In July 2016 a fault with a height of 15-25 mm was identified in the support P1, in the expansion joints. The fault caused heavy (discernible) vibration as trucks passed over the viaduct. While accounting for the observations, surveying measurements and vibration measurements as well as the available geotechnical surveys, the paper presents the results of the analyses which are aimed at explaining the origin of the fault. Two potential scenarios of occurrence of additional settlements have been adopted and discussed as the major reasons causing the fault. The first one concerns settlement of the supports as a result of condensing of the alluvial sands, caused by the dynamic influence of the loads/forces affecting the road surface of ul. Wał Miedzeszyński. The second one is the delayed consolidation settlement of the cohesive soil layer in the substrate of the embankment made of reinforced soil, which could have led to raising of the ends of the transition slabs above the road surface on the viaduct. Analytical and numeric approaches were used during the analyses while relying on PLAXIS (2D) and MIDAS (3D) software. A proposal of elimination of the fault is also presented.