LESŁAW NIEWIADOMSKI, *leslaw.niewiadomski@polsl.pl*
SZYMON SWIERCZYNA, *szymon.swierczyna@polsl.pl*
WALTER WUWER, *walter.wuwer@polsl.pl*
Politechnika Śląska

STAN PRZEDAWARYJNY WYSOKIEGO EKRANU AKUSTYCZNEGO

IMMINENT FAILURE CONDITION OF THE HIGH NOISE BARRIER

Streszczenie W referacie opisano przyczyny stanu przedawaryjnego wysokiego ekranu akustycznego, polegającego na wysuwaniu się i wypadaniu paneli z części pochyłej ekranu. Przyczyną zagrożenia konstrukcji był brak zapewnienia stateczności ogólnej słupom wspornikowym o wysokości 8,5 m oraz stateczności globalnej całej budowli o łącznej długości 920 m. Opisano konstrukcję i jej stan techniczny, przedstawiono wnioski z wykonanej analizy oraz podano sposób naprawy obiektu.

Abstract The paper describes the reasons for imminent failure state of high acoustic barriers, consisting of slipping and falling of the panels out of the sloping part of the barrier. The reason of threat was the lack of the overall stability of cantilever columns 8,5 m high and global stability of the structure with a total length of 920 m. Structure and its technical condition were described, conclusions of performed analysis were presented and a way to repair was given.

1. Wprowadzenie

W związku ze wznoszeniem, w ostatnich latach, licznych ekranów akustycznych wzdłuż istniejących i nowobudowanych w naszym kraju autostrad, problemem bardzo ważnym może być – jak się okazało – zapewnienie niektórym z tych obiektów należytej stateczności ogólnej. Szczególnie istotne jest staranne ich zaprojektowanie na obciążenie wiatrem w przypadku, gdy są one wysokie, pochylone na wysokości oraz o znacznej długości (rys. 1), dodatkowo na końcach, w rzucie poziomym, zaprojektowane na łukach (rys. 2).

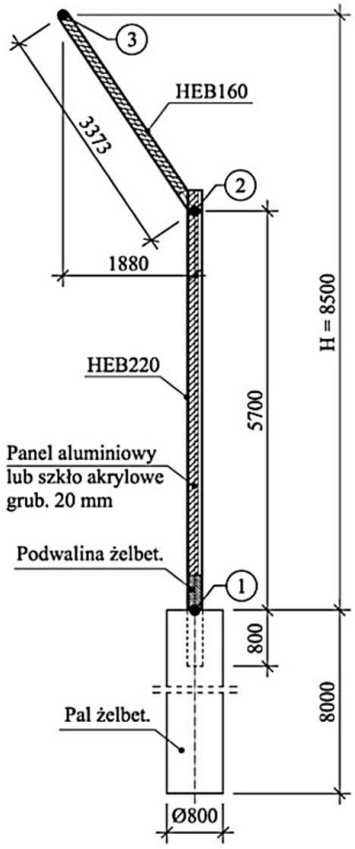
Rys. 1. Widok ekranu o wysokości 8,5 m

Rys. 2. Widok ekranu zakrzywionego w planie poziomym

Zdarzyło się ostatnio, że panele zabudowane między sąsiednimi słupami stalowymi o przekrojach dwuteowych, tj. „osadzone” pomiędzy środnikami tych kształtowników, wysunęły się ze wsporników pochylonej ściany ekranu (rys. 3). Aby zapewnić bezpieczeństwo użytkownikom autostrady, spowodowano zdemontowanie wszystkich paneli, które uznano jako narażone na wypadnięcie na pasy jezdni. Wykonano szczegółową analizę statyczno-wytrzymałościową w celu ustalenia przyczyny wypadania paneli.

a)

b)



Rys. 3. Stalowe słupy nośne ekranu o wysokości 8,5 m: a) widok z zabudowanymi w części pionowej panelami przeźroczystymi (w części pochyłej zdemontowane), b) schemat konstrukcyjny słupa

2. Opis konstrukcji nośnej ekranu

Konstrukcję nośną ekranu stanowią stalowe słupy wykonane z dwuteowników HEB, utwierdzone w fundamentach rozstawionych co 4,0 m. Słupy składają się z części pionowej

o wysokości 6,0 m wykonanej z kształtownika HEB 220 i części nachylonej, o długości ok., 4 m, wykonanej z kształtownika HEB 160 (rys. 3b). Część nachylona została w warsztacie przyspawana do pasa dwuteownika gałęzi pionowej obwodową spoiną pachwinową.

Słupy zostały osadzone w fundamentach, którymi były wiercone pale żelbetowe o średnicy 0,8 m i długości 8,0 m (rys. 3b). W głowicach pali przewidziano gniazda, zabetonowywane dopiero po wstawieniu i rektyfikacji słupów, zapewniające długość zakotwienia równą 0,8 m.

Poszczególne odcinki na długości ekranu akustycznego o całkowitej długości 920 m zostały zróżnicowane pod względem konstrukcyjnym w wyniku odmiennego sposobu powiązania paneli z kształtownikami słupów wspornikowych. Część ekranu posiadała wypełnienie nieprzeźroczyste, które stanowiły panele aluminiowe z jednostronną perforacją szczelinową, wypełnione wełną mineralną (rys. 1, 2), w pozostałej części zastosowano płyty ze szkła akrylowego gr. 20 mm, osadzone w ramach aluminiowych (rys. 3). Panele akustyczne w części pionowej ekranu oparto na cokole w postaci prefabrykowanych podwalin żelbetowych (rys. 3).

W projekcie budowlanym obu rodzajów ekranu założono, że całkowita długość panelu jest mniejsza od osiowego rozstawu słupów o 40 mm. Oparcie paneli na półce dwuteownika HEB 220 miało wynosić wtedy 90 mm, a na półce dwuteownika HEB 160 – 60 mm. W części pionowej ekranu nieprzeźroczystego panele stabilizowano za pomocą kątownika L50×40×5 przytwierdzonego od zewnętrznej strony ekranu do słupa HEB 220.

Z uwagi na rozwiązanie konstrukcyjne czoła panelu przeźroczystego efektywne oparcie zewnętrznych płaszczyzn tych paneli na półkach dwuteowników było mniejsze o ok. 20 mm aniżeli paneli nieprzeźroczystych, tj. około 70 mm w przypadku dwuteownika HEB 220 i 40 mm dla dwuteownika HEB 160. Projekt warsztatowy zawierał jednak praktyczny zapis, aby długości paneli domierzać na budowie, dostosowując ich wymiary do rzeczywistych rozstawów wykonanych słupów.

W projekcie warsztatowym ekranów zmieniono – w stosunku do projektu wykonawczego – długość zakotwienia słupów stalowych w fundamentach palowych z 1,50 m na 0,80 m. Zamieniono ponadto profil górnej ukośnej części słupa z kształtownika HEB 220 na HEB 160. Autorzy referatu nie mieli dostępu do szczegółowej dokumentacji dotyczącej technologii zabudowania słupów w gniazdach oraz wykonania zakotwień słupów i głowic pali, zastosowanej na budowie.

Zgodnie ze Specyfikacją Techniczną Wykonania i Odbioru [1] dopuszczono następujące tolerancje montażu elementów nośnych ekranu: odległość wzajemna słupów ±5 mm, rzędne wysokościowe ±5 mm, odchylenie słupów od pionu ≤ 1%. Dopuszczalne wychylenie głowicy pionowej części słupa o wysokości 6,0 m mogło więc wynosić 60 mm, a wierzchołka pochylonego odcinka słupa na wys. 8,5 m – aż 85 mm.

Brak inwentaryzacji powykonawczej uniemożliwił odniesienie wyników pomiarów geometrii konstrukcji wykonanych po wystąpieniu zagrożenia konstrukcji do tzw. stanu zerowego, istniejącego w dniu oddania obiektu do użytkowania.

3. Stan techniczny ekranów

Konieczność częściowego zdemontowania paneli była spowodowana przypadkami samoistnego ich wysuwania się i wypadania z ukośnej części ekranu (rys. 1 i 3). Podczas oględzin stwierdzono, że stan techniczny pozostałej konstrukcji jest dobry, odnotowano jednak zróżnicowane odchylenia słupów od pionu na długości ekranu. Jedynie w części łukowej ekranu nieprzeźroczystego stwierdzono zbyt małe oparcie niektórych paneli na łuku (widoczne obróbki blacharskie czoła dwóch paneli) – rys. 4. Zdarzały się też wyraźne różnice w długości oparcia paneli przeźroczystych sąsiednich pól na pionowej części słupa.

Rys. 4. Zbyt małe oparcie paneli na części pochyłej ekranu

Analiza wyników pomiarów geodezyjnych wykonanych po dwóch latach od oddania obiektu do eksploatacji wykazała, że odchylenia słupów od pionu na wysokości 6,0 m są mniejsze od dopuszczonej w [1] tolerancji montażowej wynoszącej 1%. Na 217 słupów jedynie 3 wykazały odchylenia równe 1,1÷1,2%. Jednocześnie zauważono, że zdecydowana większość słupów (aż 155 na 217) była wychylona w kierunku autostrady, tj. w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ekranu.

Wyniki badań laboratoryjnych próbek stali pobranych z losowo wybranych słupów wskazały na większe, średnio o ok. 10%, wartości granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w stosunku od wartości normowych wg [2], dla stali gatunku S355K2, z której zaprojektowano słupy.

4. Analiza konstrukcji nośnej w stanie projektowym

W pierwszej kolejności wykonano obliczenia konstrukcji wg norm aktualnych w okresie, kiedy sporządzano projekt: obciążenie wiatrem ustalono według [3], natomiast nośność konstrukcji sprawdzono wg [4]. Ze względu na znaczną smukłość słupa, w modelu obliczeniowym uwzględniono, wg Eurokodu 3 [5], wstępne imperfekcje przechyłowe o wartości ϕ = 0,0035 rad oraz wstępne imperfekcje łukowe $e_0 = L/500$, przy uwzględnieniu wpływu zwichrzenia (gdzie L to długość elementu między węzłami). Ponieważ konstrukcja oparcia paneli na słupach nie wykluczała wzajemnych przemieszczeń sąsiednich słupów, założono, że panele nie współpracują ze słupami, a więc nie zapewniają stalowym wspornikom geometrycznej niezmienności w płaszczyznach międzysłupowych ekranu.

W obliczeniach uwzględniono następujące przypadki obciążeń: G – obciążenia stałe (ciężar własny dwuteownika i paneli akustycznych), $W1$ – wiatr działający prostopadle do płaszczyzny ekranu od strony, w którą nachylona jest część górna, W – wiatr działający w kierunku przeciwnym do $W1$, $W3$ – wiatr działający stycznie do płaszczyzny ekranu, przy współczynniku tarcia C_t = 0,04 wg [6].

Naprężenie zredukowane wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego w przekroju u podstawy słupa (węzeł nr 1, rys. 3b) dla kombinacji $K3$ ($1{,}1 \cdot G + 1{,}3 \cdot W2$) wyniosło σ = 267 MPa. Przemieszczenia wierzchołka słupa (węzeł nr 3 rys. 3b) uzyskane dla kombinacji charakterystycznych wynosiły: z płaszczyzny ekranu dla K25 ($G + W2$) u_x = 182 mm ($1/47 \cdot H$), w płaszczyźnie ekranu dla K26 ($G + W3$) u_y = 153 mm ($1/55 \cdot H$) oraz pionowe dla K25 u_z = -58 mm.

Sprawdzono, że nośność zakotwienia słupów została wykorzystana w 47% [7] i [8].

Należy zauważyć, że ograniczenie poziomych przemieszczeń głowic słupów w układach jednokondygnacyjnych wynosi w przepisach norm stalowych [4] – (1/150)·H. Taką samą wartość podano w normie dotyczącej projektowania drogowych urządzeń przeciwhałasowych [9], gdzie dodatkowo ograniczono przemieszczenia pionowe pochyłych części ekranu do 1/300 długości elementu. Uwzględniając powyższe, przemieszczenie poziome na końcu wspornika nie powinno przekraczać 57 mm; jak się okazało przemieszczenia 3÷5 razy przekraczały graniczne wartości normowe.

5. Analiza konstrukcji nośnej w stanie istniejącym

Dla istniejącego stanu konstrukcji przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową pojedynczego słupa ekranu o geometrii jak w stanie projektowym (rys. 3b). Obliczenia przeprowadzono wg teorii II rzędu z uwzględnieniem imperfekcji normowych jak w punkcie 3. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia najbardziej wychylonego z pionu słupa z uwzględnieniem rzeczywistych pomierzonych przemieszczeń jego końców. Na podstawie operatu geodezyjnego przyjęto przemieszczenia głowicy pionowej części słupa (HEB 220) na poziomie 6,0 m (węzeł 2): w płaszczyźnie ekranu równe 30 mm, w płaszczyźnie prostopadłej do ekranu – 72 mm (w kierunku autostrady).

Obciążenia i ich kombinacje przyjęto podobnie jak w przypadku analizy konstrukcji w stanie projektowym (punkt 3), przy czym obciążenie wiatrem obliczono wg PN-77/B-2011/Az1 [10]. Dodatkowo na podstawie [11] uwzględniono przypadek obciążenia W4, tj. obciążenie aerodynamiczne ciśnieniem powietrza wynikającym z oddziaływania pojazdów poruszających się po autostradzie. Przyjęto, że obciążenie wiatrem i obciążenie aerodynamiczne mogą oddziaływać jednocześnie. Należy jednak podkreślić, że zgodnie z [9] obciążenia te można rozpatrywać jako nie działające równocześnie. Obciążenie aerodynamiczne wg [9] jest w przypadku analizowanego ekranu mniejsze od obciążenia wiatrem wg [10].

W stanie istniejącym dla konstrukcji z uwzględnieniem imperfekcji normowych otrzymano naprężenia zredukowane σ = 381,5 MPa wg kombinacji K23: 1,1·G +1,5·W2+1,5·0,9·W4. Gdy w obliczeniach przyjęto imperfekcje rzeczywiste uzyskano σ = 385,1 MPa. Przemieszczenia końca wspornika z uwzględnieniem imperfekcji normowych wynosiły: z płaszczyzny ekranu u_x = 197 mm (K25: G + W2), w płaszczyźnie ekranu u_y = 273 mm (K26: G + W3), natomiast dla słupa z imperfekcjami rzeczywistymi u_x = 199 mm (K25: G + W2) oraz u_y = 276 mm (K26: G + W3).

Nośność słupów okazała się przekroczona: w przypadku imperfekcji normowych o ok. 16%, zaś imperfekcji rzeczywistych – ok. 17%. Jest to spowodowane przede wszystkim zwiększonym obciążeniem wiatrem wg znowelizowanej normy [10], w stosunku do obliczeń dla stanu projektowego. Przy dodatkowym uwzględnieniu obciążenia ciśnieniem powietrza wg [11], nośności są przekroczone odpowiednio o 25% i 26%.

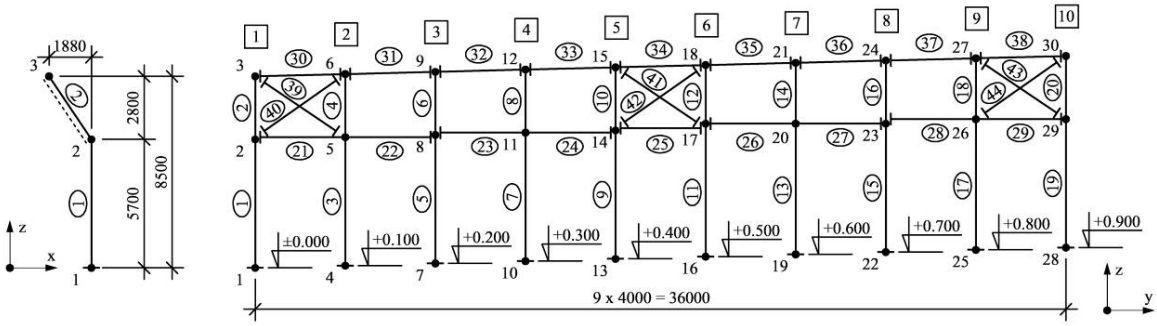
Stwierdzono duże przemieszczenia poziome i pionowe końca wspornika (węzeł nr 3 na rys. 3b) pojedynczego słupa przy obciążeniu wiatrem. Maksymalne przemieszczenie poziome z płaszczyzny ekranu jest równe ok. (1/43)·H, a w płaszczyźnie ekranu ok. (1/31)·H. Należy zauważyć, że obliczone przemieszczenia sprężyste są większe w płaszczyźnie ekranu o ok. 384%, a z płaszczyzny ekranu o ok. 249%, od wartości granicznych podanych w [4] i [9].

6. Analiza konstrukcji nośnej po wzmocnieniu

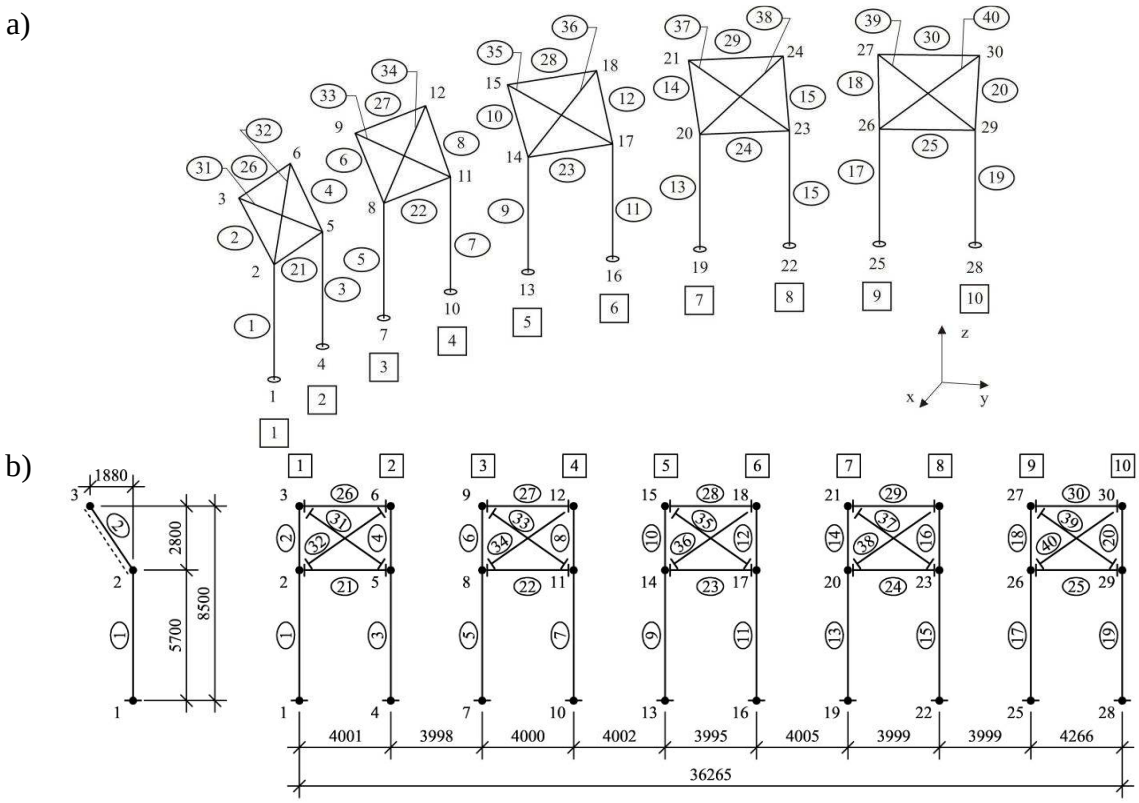
Wobec znacznych poziomych przemieszczeń poprzecznych i podłużnych słupów, niedopuszczalnych z punktu widzenia eksploatacji ekranów, wystąpiła konieczność wzmocnienia konstrukcji nośnej. Ekrany na długości podzielono na 9-cio polowe segmenty, ze słupami

połączonymi górą za pomocą prętów poziomych, oddzielone polem dylatacyjnym, w którym sąsiednich słupów nie połączono. Segment 9-cio polowy stanowi układ konstrukcyjny złożony z 10 słupów, których końce połączono prętami poziomymi na wys. 6,0 m i 8,5 m oraz stężeń pionowych typu X, zabudowanych w wybranych polach w płaszczyźnie ukośnej ekranu (stężenie górne). Przeanalizowano szereg wariantów konstrukcyjnych z różnym rozmieszczeniem stężeń typu X, zabudowanymi dodatkowo między słupami pionowymi (stężenie dolne) oraz także przy braku stężeń dolnych. Celem analizy było dokonanie wyboru rozwiązania konstrukcyjnego, które ograniczy przemieszczenia poziome końców wsporników w płaszczyźnie ekranu, a zarazem nie spowoduje nadmiernego usztywnienia konstrukcji, prowadzącego do zwiększenia wytężenia słupów.

Wyniki analizy przemawiały za rozwiązaniem konstrukcyjnym segmentu 9-cio polowego lecz tylko na prostych odcinkach ekranu (rys. 5). Odmienne rozwiązanie okazało się skuteczne dla ekranu na łukach, gdzie słupy łączono ze sobą parami w segmenty 1-polowe (rys. 6).



Rys. 5. Schemat statyczny 9-cio polowego segmentu prostego



Rys. 6. Schemat statyczny segmentów 1-no polowych na łuku:
a) widok aksonometryczny, b) rozwinięcie

Na łukach korzystne okazało się założenie na przemian pola stężonego i niestężonego pola dylatacyjnego. Stężenia typu X zastosowano tylko w płaszczyźnie nachylonej powierzchni ekranu. W polach dylatacyjnych założono, że zabudowane tam panele nie przekazują sił w płaszczyźnie ekranu między sąsiednimi segmentami.

Pręty poziome łączące głowice pionowych części słupów na poziomie 6,0 m przyjęto z ceownika C200, pręty poziome łączące końce wsporników na poziomie 8,5 m – w polach stężeń typu X – przyjęto z rury okrągłej RO 63,5/8, a pręty łączące końce wsporników w polach bez stężeń oraz stężenia typu X z prętów okrągłych ϕ14 mm. Do napinania prętów stężeń typu X przewidziano śruby rzymskie. Ceowniki C200 zamocowane zostały do półek dwuteowników HEB 220 od strony zewnętrznej, pręty łączące końce wsporników łączono z dolnymi pasami dwuteowników HEB 160, a pręty stężeń typu X do ich półek górnych. Wszystkie połączenia przewidziano jako śrubowe.

W obliczeniach uwzględniono wszystkie mimośrody konstrukcyjne wynikające z niewspółosiowego połączenia elementów w węzłach. Przypadki i schematy obciążeń przyjęto jak dla konstrukcji w stanie istniejącym z uwzględnieniem imperfekcji normowych. Dla segmentu 9-cio polowego największe naprężenia σ = 349,9 MPa okazały się w pręcie nr 9 węzeł 13 (rys. 5) wg kombinacji K23 (p. 5). Przemieszczenia na końcu wspornika natomiast wynosiły: u_x = 19,4 cm, u_y = 1,6 cm oraz u_z = -6,3 cm wg kombinacji K25. Dla segmentu jednopolowego na łuku maksymalne naprężenie σ = 331,4 MPa wyznaczono dla pręta nr 17 w węźle 25 (rys. 6) wg kombinacji K23.

Dodatkowo sprawdzono wartości wzajemnych przemieszczeń końców słupów w polach dylatacyjnych. Dla ekranu na odcinku prostym, tj. pomiędzy segmentami 9-cio polowymi przemieszczenia te nie przekraczały 1,5 cm, natomiast dla ekranu na łuku pomiędzy segmentami jednopolowymi – 6,3 cm. Przy tak określonych wartościach wzajemnych przemieszczeń panelom umieszczonym między sąsiednimi segmentami nie zagrażało wypadnięcie.

Po wzmocnieniu konstrukcji nośność najbardziej wytężonego słupa segmentu 9-cio polowego jest przekroczona o ok. 6% (15% – przy dodatkowym uwzględnieniu obciążenia ciśnieniem powietrza wynikającym z oddziaływania przejeżdżającego pojazdu [11]), a dla segmentu jednopolowego na łuku o ok. 7%.

7. Podsumowanie

Uwzględniając wyniki pomiarów geodezyjnych, oględzin konstrukcji, wyników badania próbek stali oraz sprawdzających obliczeń elementów konstrukcji nośnej ekranu, wykonanych dla trzech przypadków: stanu projektowego, stanu istniejącego oraz stanu po wzmocnieniu konstrukcji stalowej, ustalono następujące przyczyny wysuwania się i wpadania paneli:

1. Niewystarczająca sztywność słupów nośnych, zwłaszcza ich części ukośnych, przejawiająca się dużymi przemieszczeniami poziomymi w płaszczyźnie i z płaszczyzny ekranu oraz pionowymi na końcach wsporników, sięgającymi w stanie istniejącym konstrukcji, odpowiednio 276 mm, 199 mm i 67 mm.
2. Zbyt małe efektywne oparcie paneli na dolnych pasach nachylonych części słupów, nie dostosowane do dużych przemieszczeń słupów pod wpływem obciążeń.
3. Za duże tolerancje wykonawcze, dotyczące pochylenia słupów, które dopuszczały przesunięcie końca wspornika na wysokości 8,5 m, względem poziomu utwierdzenia słupa w fundamencie, sięgające aż ±85 mm.
4. Kłopotliwy montaż paneli w przypadku, gdy sąsiednie słupy nie leżały w jednej płaszczyźnie (na łuku, przy podłużnym nachyleniu ekranu).

5. Zabudowanie prętów stężenia w płaszczyznach ukośnych ekranu przywróciło w sposób skuteczny bezpieczne użytkowanie obiektu. Udało się w sposób wystarczający zredukować przemieszczenia słupów wspornikowych w płaszczyznach paneli. Nośność z kolei najbardziej wytężonych przekrojów stalowych nie została przekroczona dzięki dodatkowej rezerwie wynikającej z podwyższonych o 10% parametrów wytrzymałościowych zbadanych próbek stali, z której wykonano kształtowniki dwuteowe.
6. Nadal jednak występują zbyt duże poziome przemieszczenia sprężyste z płaszczyzny ekranu oraz pionowe końców wsporników. Te pierwsze wynoszą 194 mm dla segmentu 9-cio polowego i 192 mm dla segmentu jednopolowego na łuku. Nie zagrażają one bezpieczeństwu konstrukcji ekranów, wymagają jednak okresowych przeglądów ekranów pod kątem osadzenia paneli między słupami oraz pionowości słupów.

Literatura

1. Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M.20.01.32 Ekrany z plexiglasu. Mosty Katowice Sp. Z o.o.
2. PN-EN 10025-2:2007: Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych
3. PN-B-02011:1977: Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
4. PN-B-03200:1990: Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
5. PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
6. Żurański J. A.: Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji, Arkady, Warszawa 1978.
7. PN-B-03215 Konstrukcje Stalowe. Połączenia z fundamentami. Projektowanie i wykonanie.
8. PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
9. PN-EN1794-1:2011: Drogowe urządzenia przeciwhałasowe. Wymagania pozaakustyczne. Część 1: Właściwości mechaniczne i stateczność.
10. PN-B-02011:1977/Az1: Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem (zmiana Az1, lipiec 2009).
11. Design manual for Road and Bridges, Volume 10: Environmental Design and Management, Section 5: Environmental Barriers, Part 2 HA 66/95.