



Sky Bridge 721 – najdłuższy na świecie pieszy most wiszący

W maju 2022 r. został otwarty najdłuższy na świecie wiszący most dla pieszych Sky Bridge 721. I nikt nawet nie przestraszył się, że był to akurat piątek i trzynastego. Mimo swojej rekordowej rozpiętości 721 m konstrukcja jest bowiem bardzo stabilna i bezpieczna. Znajduje się w czeskiej gminie Dolní Morava na obszarze górskim Králický Sněžník (Masyw Śnieżnika) na wysokości ok. 1100 m n.p.m.

Kładkę zaprojektowano jako stalową konstrukcję zawieszoną na sześciu linach głównych z dodatkową stabilizacją sześcioma mniejszymi linami (ryc. 1). Rekordowe przęsło o rozpiętości 721 m przekracza dolinę między pasmami górskimi Slamník i Chlum. Z jednego wzgórze na drugie można spacerowym krokiem przejść w ok. 15 minut, podziwiając przy tym zapierające dech w piersiach krajobrazy. Subtelna linia wiszącego pomostu znajduje się na wysokości prawie 100 m ponad dnem doliny i świetnie wpisuje się w pejzaż otaczających go łagodnych wzgórz Dolnych Moraw.

Wyzwania

Projektanci musieli spełnić wiele wymagających warunków, jakie zostały im narzucone przez trudną lokalizację i wyjątkowo dużą rozpiętość. W zakresie branych pod uwagę oddziaływań były to np. nietypowe dla mostów duże obciążenia śniegiem

i lodem, ale też wzbudzenia drgań powodowane przez grupy pieszych i aerodynamiczne parcie silnego wiatru.

Nie bez znaczenia były również wyzwania logistyczne. Transport sprzętu i materiałów odbywał się po wąskich, stromych drogach. Wymagał specjalnych pojazdów i doświadczonych kierowców. Odczuwalne były ograniczenia powierzchni przeładunkowej i magazynowej oraz wynikające z tego problemy w organizacji prac montażowych.

Trudnym zadaniem dla projektantów było już samo znalezienie dogodnej lokalizacji mostu przy minimalnej różnicy wysokości punktów skrajnych. Musiał on przecież spełniać swoje funkcje użytkowe i zapewniać odpowiedni poziom komfortu użytkowników. Ostatecznie różnica wysokości pomiędzy pylonami z obu stron wynosi 6 m. Kolejnym ważnym krokiem było dobranie odpowiedniej geometrii i wymiarów poszczególnych elementów. Zostały one określone na podstawie obliczeń statycznych i dy-

namacnych oraz dostępnych możliwości w zakresie produkcji, transportu i montażu.

Rozwiązania konstrukcyjne

Pylony mostu zaprojektowano w kształcie litery V (ryc. 2 i 3). Mają one 11,4 m wysokości i ważą 54 t każdy. Wykonano je ze spawanych kształtowników stalowych. Oparcie pylonów na fundamentach jest przegubowe. Są one nachylone w kierunku skarpy, a przed przesunięciami stabilizuje je system stalowych odciągów. Główne liny nośne zamocowano do głowic pylonów, a generowane przez nie poziome siły przenoszone są na tylne liny kontruujące, które zakotwiono w podłożu.

Fundamenty pylonów składają się z żelbetowej stopy ułożonej bezpośrednio pod pylonem oraz żelbetowego bloku tylnego służącego do kotwienia tylnych kabli kontruujących. Stopy fundamentowe zakotwiczone są w podłożu 24 mikropalami o długości 9 m.

Przed nadmiernymi drganiami poprzecznymi, które mogą być wzbudzone przez wiatr i ruch pieszych, kładka jest zabezpieczona przez sześć lin stabilizujących. Tworzą one trzy łuki działające w kontrze do lin głównych. Jednocześnie zmniejszają i tłumią boczne kołysanie, gdyż ich płaszczyzna jest nachylona pod kątem ok. 15°. Liny stabilizujące zakotwiczone są do betonowych stóp osadzonych w skarpie pod mostem.

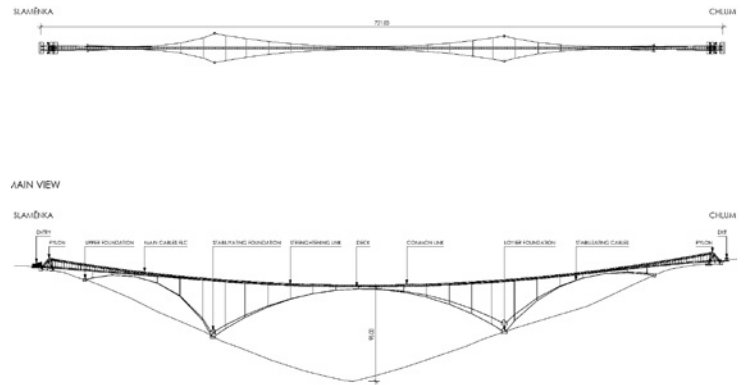
Pomost składa się z dwóch podłużnych belek, na których ułożono 244 ażurowe panele o wymiarach 3 x 1,2 m wykonane ze stalowej kratki pomostowej. Podwieszony jest do głównej liny nośnej przez układ pionowych wieszaków w rozstawie co 3 m. Wieszaki łączące pomost z dolnym układem lin stabilizujących rozmieszczone są co 21 lub 24 m. Towarzyszy temu dodatkowe usztywnienie przekroju poprzecznego w postaci mocniejszej poprzeczniczy i sztywnych wieszaków, które tworzą efekt półramy.

Wszystkie zastosowane liny (typu *fully locked coil* – FLC) stanowią zwarty zespół linowy o dużej wytrzymałości i sztywności oraz gładkiej powierzchni. Składają się one z drutów splotowych o wytrzymałości 1570 MPa i module sprężystości 165 GPa. Łącznie zastosowano 66 lin o różnych średnicach i długościach. Główne liny nośne mają średnicę 76 mm i długość 698,6 m. Liny stabilizujące mają średnicę kolejno 56, 40 i 24 mm.

Analiza statyczna i dynamiczna

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe oraz analiza dynamiczna prowadzone były przy użyciu trójwymiarowego modelu MES zbudowanego z elementów prętowych. Do modelowania wszystkich lin wykorzystano elementy ciągnowe, które przenosiły tylko siły rozciągające. Łącznie powstało aż 16 wariantów modelu obliczeniowego, które różniły się między sobą liczbą i konstrukcją głównych lin nośnych oraz strzałką zwisu. Po kolejnych przybliżeniach model końcowy został już określony bardzo precyzyjnie. Uwzględniał on ostateczną geometrię mostu wraz ze wszystkimi wymiarami zastosowanych profili i połączeń.

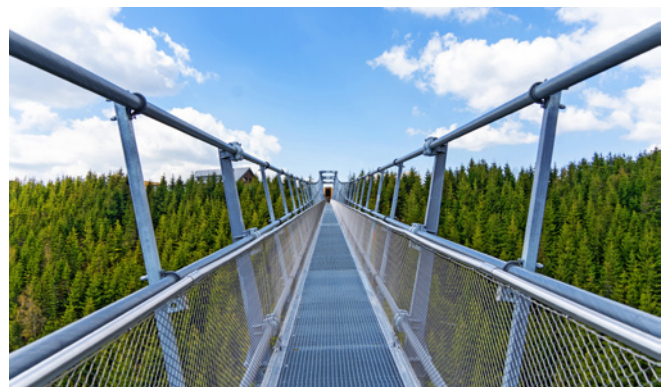
Oprócz modelu zasadniczej konstrukcji w stanie użytkowym utworzono jeszcze szereg modeli przejściowych i lokalnych. Modele przejściowe służyły do określenia warunków montażu konstrukcji i użycia dodatkowych lin montażowych. Natomiast modele lokalne zawierały wybrane fragmenty konstrukcji, które wymagały modelowania w postaci elementów tarczowych lub powłokowych. Wykorzystywane były głównie do szczegółowego projektowania stalowego pylonu i detali połączeń konstrukcyjnych.



Ryc. 1. Rzut pionowy i widok z boku konstrukcji mostu



Ryc. 2. Widok pylonu z tylnymi linami kontruującymi



Ryc. 3. Widok konstrukcji na poziomym pomostu

W obliczeniach uwzględniono różne rodzaje i kombinacje obciążeń. Oprócz stałych i użytkowych wzięto pod uwagę siły od sprężenia oraz oddziaływania klimatyczne spowodowane śniegiem i wiatrem. Założono, że najniekorzystniejsze obciążenie wiatrem przy maksymalnej projektowej prędkości wiatru 48 m/s wystąpi w sytuacji konstrukcji całkowicie obciążonej lodem i to łącznie z balustradą.

Obciążenia użytkowe w modelu statycznym przyjęto w postaci równomiernego parcia o intensywności 2,5 kN/m². Oznacza to, że na kładce może przebywać jednorazowo do 1000 osób. Późniejsza analiza dynamiczna wymusiła jednak korektę tej liczby. Z punktu widzenia operacyjnego i podatności dynamicznej konstrukcji maksymalna liczba pieszych na pomoście wynosi obecnie 500 osób.

Prace montażowe

Budowa mostu trwała ok. dwóch lat. Rozpoczęła się od przygotowania miejsc zakotwienia lin stabilizujących. Prace wymagały



Ryc. 4. Widok na gotowy obiekt

zachowania zwiększonej ostrożności, gdyż prowadzone były na stromym zboczu, a skała macierzysta występowała pod grubą warstwą kamieni. Po ułożeniu betonu wyrównującego wwiercono mikropale i ułożono klatki zbrojenia stóp fundamentowych. Tylne bloki kotwiące ze stalowymi blokami oporowymi wzmocniono kotwami skalnymi w plastikowych osłonach. Po ich zabetonowaniu i naprężeniu na gotowych fundamentach ustawiono stalowe pylony. Ich montaż odbywał się przy użyciu tymczasowych podpór, które zapewniały niezbędne wychylenie pylonów z pionu.

Na głowicach pylonów zainstalowany został stalowy trójkąt, który wraz z pylonem tworzył tymczasową wieżę montażową dla kolei linowej. Następnie przy użyciu drona na przeciwległe zbocze przeniesiona została cienka nylonowa linka. Jej nośność była wystarczająca do późniejszego przeciągnięcia liny o większej średnicy. Proces ten powtarzał się aż do przeprowadzenia pomocniczej liny nośnej o średnicy 40 mm. Taka lina mogła już służyć jako podstawa kolejki linowej, po której transportowano liny główne konstrukcji.

Pomost był montowany segmentami w sposób ciągły i symetryczny z obu stron. Po zawieszeniu wszystkich segmentów naprężono główne liny nośne, aby doprowadzić konstrukcję do stanu zbliżonego do projektowanego. Siła rozciągająca w linach głównych wzrosła do 1500 kN. Liny stabilizujące były napinane w zakresie od 50 do 130 kN. Podczas montażu prowadzono pomiary kontrolne siły naciągu oraz geodezyjne pomiary geometrii strzałki ugięcia pomostu. Wykazały one odchylenia montażowe rzędu 100–150 mm, które później zostały skorygowane za pomocą elementów napinających. Po zakończeniu procesu montażu ponownie skorygowano napięcie w linach głównych.

Proces montażu lin narażony był na wpływy zmiennej w tak długim czasie temperatury oraz różnicy temperatur na tak dużej długości. Różnica temperatur pomiędzy obiema stronami kładki dochodziła nawet do 5 °C w ciągu dnia. W ostatniej fazie zamontowano balustradę z siatką ze stali nierdzewnej oraz zbudowano budynki na wejściu i zejściu wraz z kołowrotowymi bramkami.

Podsumowanie

Przed oddaniem kładki do eksploatacji wykonano próbną obciążenie statyczne i dynamiczne. Próbę statyczną przeprowadzono, obciążając pomost workami z piaskiem i zbiornikami z wodą o łącznej masie 60 t (600 kN). Podczas badania mierzono tensometrycznie odkształcenia w kotwach gruntowych tylnych bloków kotwiących oraz w głównych linach nośnych. Monitorowano również wzrost strzałki ugięcia lin i pomostu. Pomiary wykazały wysoką zgodność z obliczeniami numerycznymi, a odpowiedź konstrukcji była zgodna z przewidywaniami. Badania dynamiczne potwierdziły, że drgania kładki poddanej oddziaływaniom grupy pieszych nie przekroczyły wartości granicznych przyspieszeń, dzięki czemu kładka mogła zostać dopuszczona do eksploatacji (ryc. 4).

Całe przedsięwzięcie zostało zrealizowane w systemie zaprojektuj i zbuduj przez generalnego wykonawcę Taros Nova a.s., który specjalizuje się w nietypowych konstrukcjach drewnianych i stalowych. Realizacja wymagającej technologicznie konstrukcji stanowiła ogromne wyzwanie dla działu projektowego, który dostarczył nie tylko pełną dokumentację projektową z obliczeniami i rysunkami warsztatowymi, ale także opracował technologię montażu.

Na podstawie: Václav Röder, Ph.D., Chief Design Engineer, TAROS NOVA a.s.: *Sky Bridge 721, Czech Republic*. „e-mosty” 2022, nr 3, s. 7-18. Dla „NBI” przeł. z jęz. ang. mgr inż. Kamil Korus, prof. dr hab. inż. Marek Salamak, Politechnika Śląska

<https://e-mosty.cz>



Czytaj więcej

