

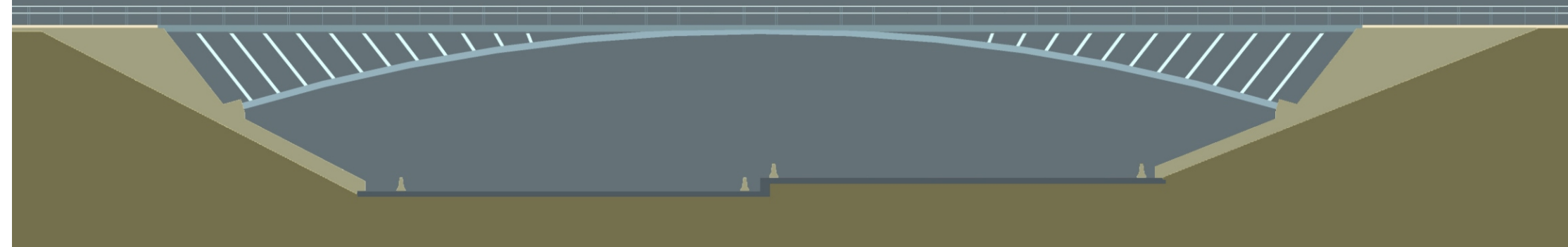
Erasmusrand Pedestrian Bridge

Pretoria, South Africa

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

theory, analysis
Vladimír Budinský SSK



KEYWORDS : bridge, footbridge, pedestrian bridge, arch bridge, computation, calculation, structural analysis, most, obúkový most, statický výpočet, SSK

ÚVOD (Introduction)

Ponad desaťpruhovú diaľnicu N1 v hlavnom meste Juhoafrickej republiky, takmer trojmiliónovej Pretórii, viedol starší oceľový most pre peších. Okrem zlého technického stavu bola aj jedna z hlavných oceľových podpier mosta značne poškodená nárazom vozidla. Preto sa rozhodlo o výmene pôvodného mosta, ktorý zbúrali v roku 2016. Nové spojenie medzi mestskými časťami Erasmusrand a Hoërskool Waterkloof dokončili v máji roku 2019. Lávka pre peších a cyklistov je moderný oblúkový most o rozpone 61,8 m a celkovej dĺžke nosnej konštrukcie 74,4 m.



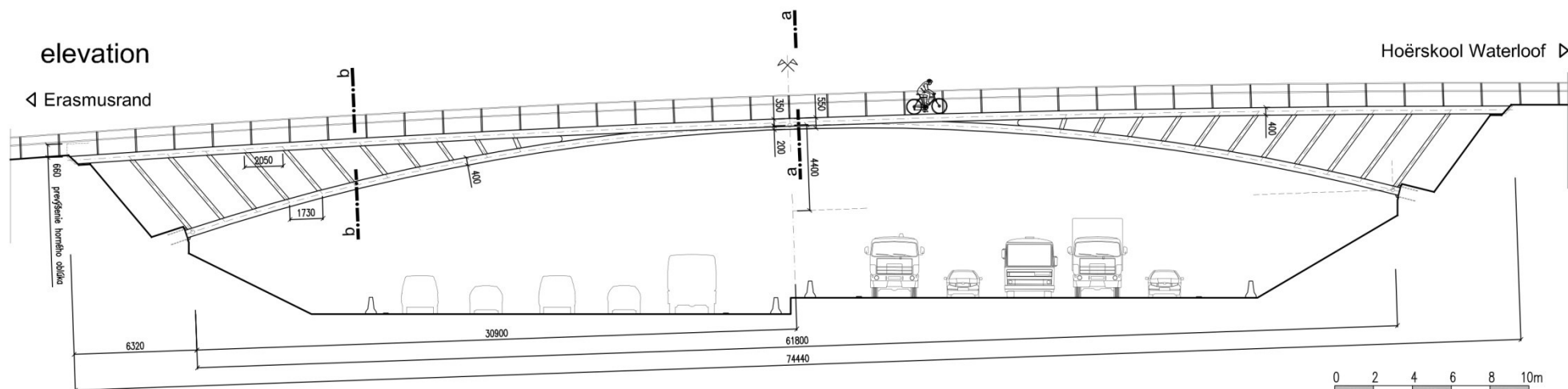
IDENTIFIKAČNÉ ÚDAJE MOSTA

Client : South African National Roads Agency SOC Ltd (SANRAL)
Consulting engineer : LEO-Superstructures Consulting Engineers Joint Venture
Main contractor : Ndugane Teichmann Structures Joint Venture
Steel contractor : CADCON PROJECT
Structural steel detailing : MONDO CANE, Cape Town, South Africa
Completed : May 2019

Ďalšie údaje

Náklady : 1,5 mil. USD
Rozpon : 61,8 m (spodný oblúk)
Celková dĺžka NK : 74,4 m
Priechodná šírka : 2,0 m
Výška ocel'. mostovky : 0,4 m 0,55 m v spojení oblúkov
Typ mosta : oblúčový

UPOZORNENIE : Vo všetkých vizualizáciách a výpočtoch nie je zohľadnené zvislé zakrivenie hornej mostovky (okrem pozdĺžneho rezu dole ↓)
NOTE : Views and calculations do not take into account the vertical curvature of the upper bridge deck (except elevation ↓)



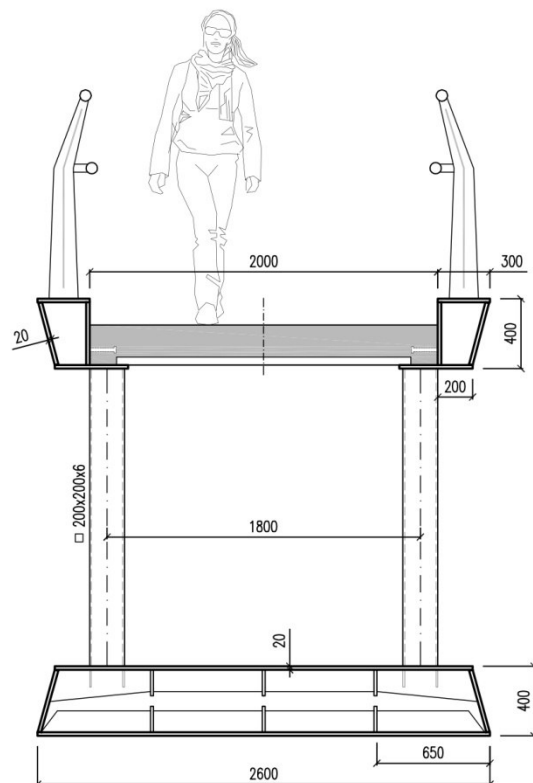
POPIS KONŠTRUKČNÝCH PRVKOV

Vzopätie spodného oblúka : 4,40 m
Vzopätie horného oblúka : 0,66 m
Typ konštrukcie v spojení oblúkov : spriahnutie → ocel' - železobetón
Software konzultačnej firmy : most bol analyzovaný podľa softvéru SOFiSTiK
Založenie hlavného oblúka : v stredne tvrdej bridlicovej skale v záreze cestného násypu
Kotvenie oblúka : 22 kotevných skrutiek ø30 na jednej strane → votknutie

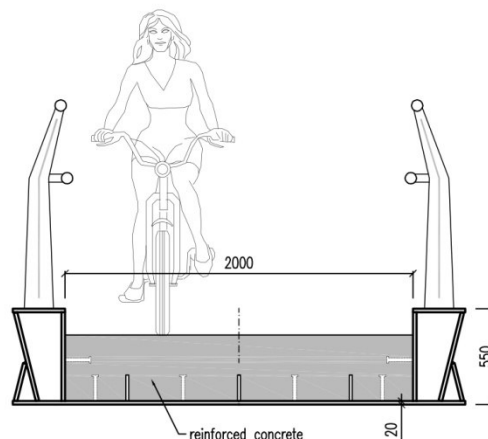
Uloženie horného oblúka (mostovky) :
Materiál oceľovej konštrukcie :

konce horného oblúka tvoria konzoly a uloženie je len na poslednej šikmej vzpere (tzv. falošné opory)
S355 JR

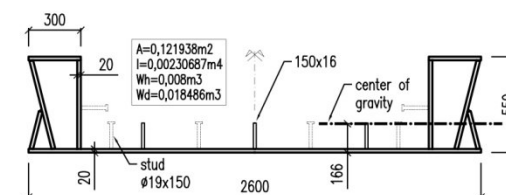
cross section b-b



cross section a-a



steel structure - cross section a-a



Materiál betónu v reze b-b nie je konštrukčný, ale tvorí len spevnenie pochôznej plochy a slúži ako balastné zaťaženie pre vylepšenie dynamických charakteristík mosta.

Návrh podľa juhoafrickej normy **TMH7** (*Reliability performance of bridges designed according to TMH7 NA load model*) sa nevzťahuje na oceľové konštrukcie. Most bol preto navrhnutý podľa Eurokódov, a to Eurokódu 3 pre oceľové konštrukcie a Eurokódu 4 pre spriahnuté oceľovo-betónové konštrukcie. Zaťaženie bolo brané ako maximum medzi TMH7 a Eurokódmi.

Dynamické výpočty boli v pôvodnom projekte analyzované a posudzované na základe podkladu [HEINEMEYER C., BUTZ C., KEIL A., et al., "Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations", JRC Scientific and Technical Reports, JRC-ECCS Cooperation, 2009](#). Podľa tohto dokumentu sú kritické rozsahy, v ktorých sa môžu mosty pre chodcov stať náchylnými na dynamické budenie, 1.25 Hz až 2.3 Hz pre vertikálne a 0.5 Hz až 1.2 Hz pre bočné vibrácie. Komfortné triedy sú v rozsahu od maximálneho stupňa komfortu so súvisiacim zrýchlením 0.5 m/s² až na neprijateľné nepohodlie pri zrýchleniach väčších ako 2.5 m/s².



POSTUP VÝSTAVBY

Oceľová konštrukcia bola vyrobená z dvoch polovic, ktoré boli pri výstavbe podoprené dočasným stredovým pilierom. Po umiestnení oboch polovic sa tieto navzájom zvarili a zmonolitnili spriahujúcou železobetónovou doskou do tuhého oblúka. Každý z dvoch oblúkov vážil približne 50 t a na stavenisko bol dopravený vo vodorovne polohe. Ľahšie sa napíše,

ťažšie sa realizuje. Pri takomto postupe a takejto veľkej a štíhlej konštrukcii museli projektanti a zhotovitelia vyriešiť a vypočítať množstvo technických komplikácií. Do úvahy sa museli vziať prieťahy ocelevej konštrukcie, ako aj dotvarovanie a zmrašťovanie železobetónových zálievok v časových horizontoch. Bolo vyvinuté inovatívne riešenie projektantom a oceliarňou dodávateľa, prostredníctvom ktorého boli segmenty predpínané dočasnými tyčami $\varnothing 40$ mm, umiestnenými na spodnej hrane oblúka. Predpínacie tyče viedli medzi pätou oblúka a vrcholom oblúka v počte dve tyče na každý segment.

Týmto sa dosiahlo presné vyladenie polohy segmentov na vzájomné zvarenie a následnú betónovú zálievku, ako aj vygenerovanie predbežného opačného napätia v konštrukcii, ktoré má priaznivý účinok voči teplotným zmenám a prípadným možným sadnutiam podpôr. Vlastnej montáži predchádzalo množstvo nelineárnych výpočtov vo všetkých fázach výstavby.

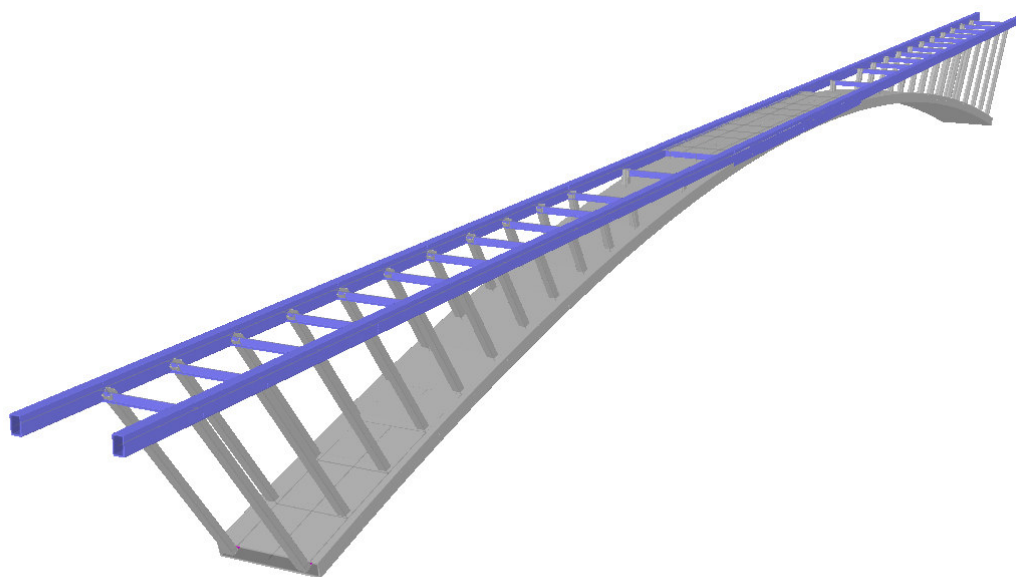
Samotná montáž oceľových segmentov prebehla počas dvoch víkendových nocí za výluky dopravy na diaľnici. Stredová montážna podpera bola odstránená až po ukončení betonáže spriahujúcich dosiek a ich predpísanom vytvrdnutí.



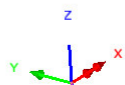
VÝPOČTY

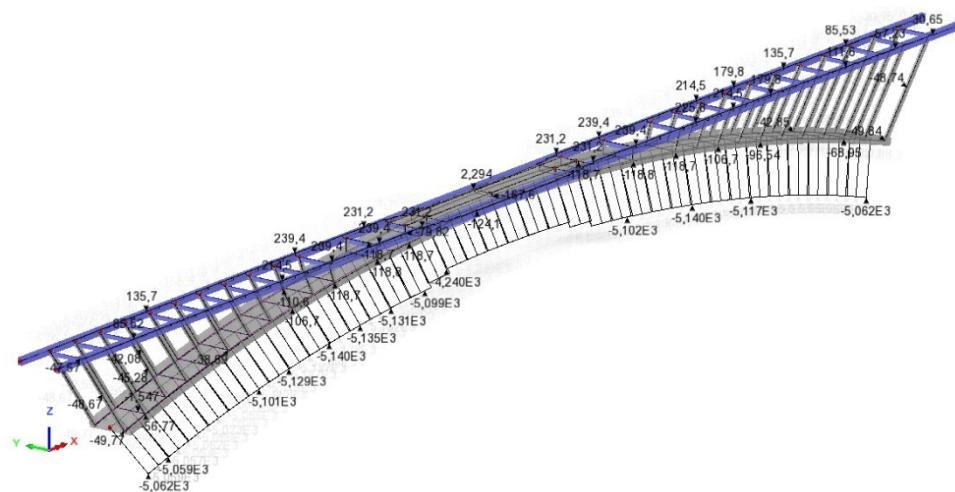
Na základe niektorých veľmi zjednodušených predpokladov a prepočtov sme sa pokúsili interpretovať pôsobenie sústavy. Ako základné zaťaženia sme uvažovali vlastnú tiaž konštrukcie a zaťaženie mostov dopravou – v tomto prípade *zaťaženie lávok pre chodcov*, a konkrétne *rovnomerné spojité zaťaženie*, ktoré vykazuje globálne a na most najnepriaznivejšie účinky. Situáciu sme mali uľahčenú aj tým, že pôvodne bol most počítaný v podstate podľa eurokódov. Tiež sme zistili, že nezanedbateľný vplyv má aj *zaťaženie teplotou*, keďže sa jedná o votknutý oblúk. Aj keď v STN EN 1990/A1 je v *Tabuľke A2.2 – Odporúčané hodnoty súčiniteľov ψ pre lávky pre chodcov* v poznámke (1) uvedené, že $\psi_0 = 0,6^{(1)}$ pre zaťaženie teplotou možno vo väčšine prípadov redukovať na nulovú hodnotu pre EQU, STR a GEO.

Rovnomerné zaťaženie je uvažované v hodnote $q_{lk} = 2,0 + (120 / (L + 30)) = 3,16 \text{ kN/m}^2$ pre $L = 73,4 \text{ m}$ v dvoch zaťažovacích stavoch : pre celý most a pre polovicu mosta.

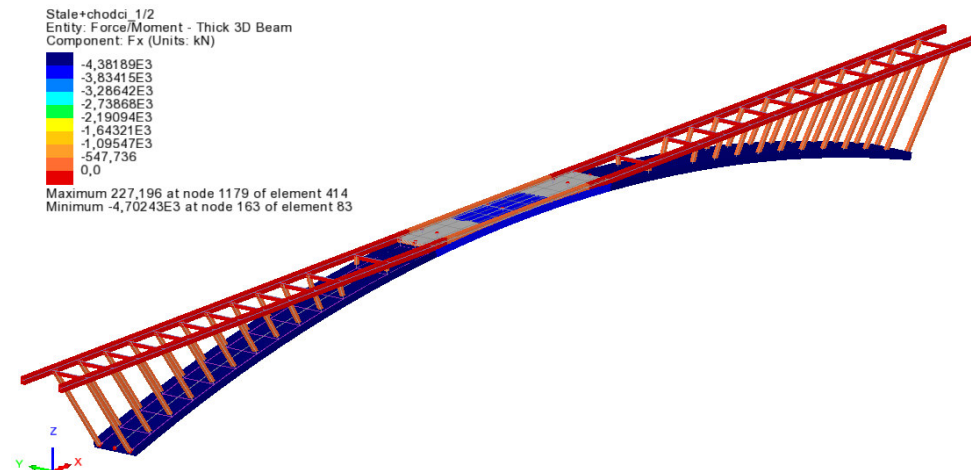


Základný model FEM zložený z prútových a plošných prvkov

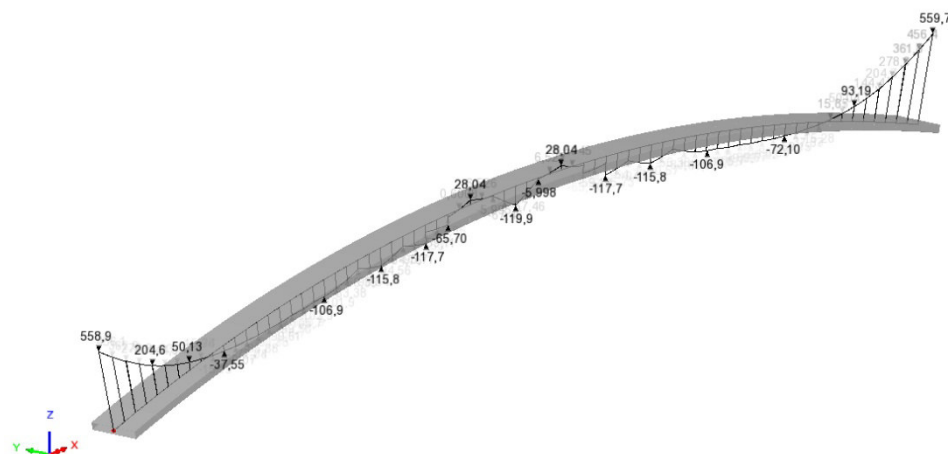




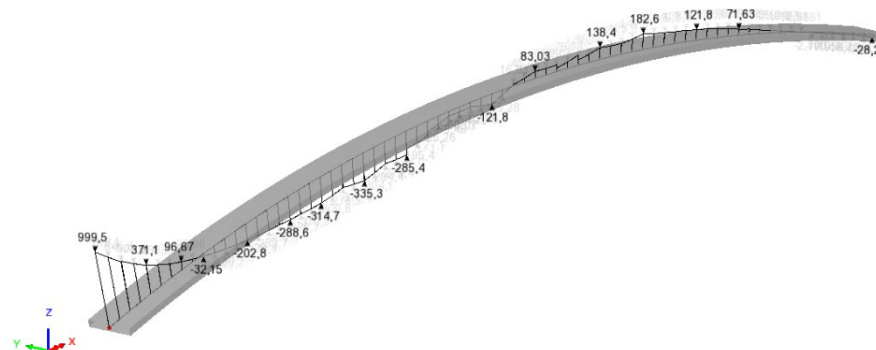
↑ Priebeh osových síl F_x v oblúku pre kombináciu ULS a plné zaťaženie chodcami bez vplyvu teploty. [kN]



↑ Priebeh osových síl F_x pre kombináciu ULS a polovičné zaťaženie chodcami bez vplyvu teploty.



↑ Priebeh ohybových momentov M_y v oblúku pre kombináciu ULS a plné zaťaženie chodcami bez vplyvu teploty. [kNm]

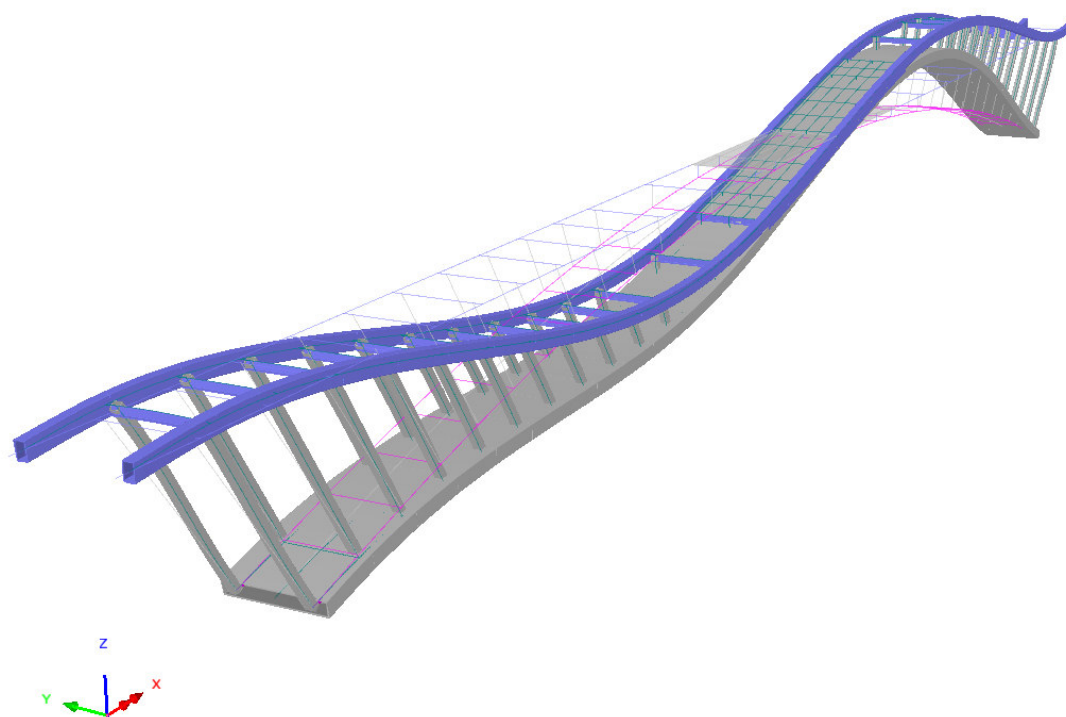


↑ Priebeh ohybových momentov M_y v oblúku pre kombináciu ULS a polovičné zaťaženie chodcami bez vplyvu teploty.



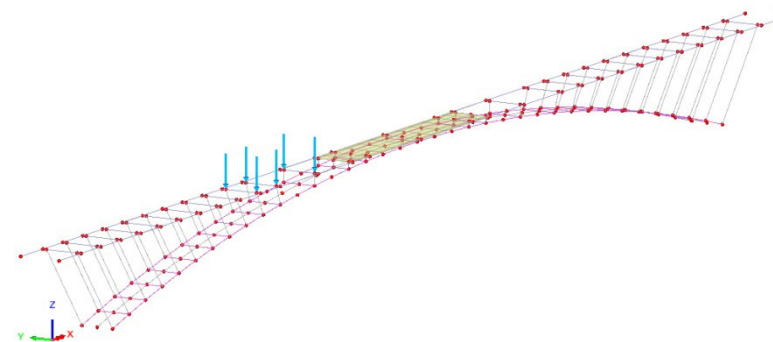
Na porovnávacie hodnoty dynamického správania konštrukcie sme využili šiestich vandalsky sa tváriacich chodcov, ktorí súčinným budením mosta v najvyššej kmitni prvého zvislého vlastného tvaru, ktorý nám vyšiel vo frekvencii 1,42646 Hz, pôsobili silou $6 \times 280 \text{ N}$. Výsledné zrýchlenia (pozri ďalej grafický výstup) vychádzajú pod $0,22 \text{ m/s}^2$.

V ďalšom uvádzame niekoľko posúdení pre medzný stav únosnosti (ULS) aj s pôsobením teploty $\pm 40^\circ\text{C}$ od strednej hodnoty. Na výpočet povolenia podpôr sme nemali k dispozícii relevantné charakteristiky skalnej bridlice, takže sme uvažovali plné votknutie. Napätia v ocelovej konštrukcii vyšli všetky pod 150 MPa , z toho vyplýva, že spriahnutie oblúka v korune má skôr konštrukčný význam pre fázy výstavby a ako uvádzajú projektanti, aj pri úprave dynamických charakteristík konštrukcie, aby nebolo nutné inštalovať tlmiče kmitania. Toto sa nám nepodarilo preukázať.



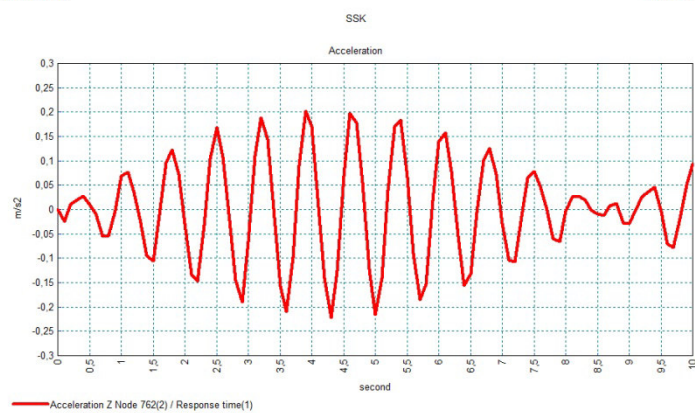
← Prvý zvislý vlastný tvar kmitnia

↓ Umiestnenie budiacich síl (6x 280 N)



LUSAS 21.0-0c3

March 15, 2025



← Zrýchlenia v kmitni konštrukcie pri danej excitácii

Posúdenie ULS napätosti ocelového prierezu v päte oblúka (extrém pre chodcov na 1/2 mosta) : poznámka : hodnoty 999,5; 4702; 335 a 5140 sú už návrhové (factored) hodnoty z kombinácie

$$\sigma = (\gamma_{G, Q1} * M_{y, [SW; chodci]} + \gamma_{Q, T} * \psi_{0, T} * M_{y, T}) / W_{min} + (\gamma_{G, Q1} * N_{x, [SW; chodci]} + \gamma_{Q, T} * \psi_{0, T} * N_{x, T}) / A = (-999,5 + 1,5 * 0,6 * -607) / 0,0188 + (-4702 + 1,5 * 0,6 * -200) / 0,1144 = -124\,946 \text{ kPa}$$

Posúdenie ULS napätosti ocelového prierezu v strede oblúka – extrém : poznámka : posúdený je len čistý ocelový prierez bez vplyvu spriahnutia. Prierezové hodnoty pozri stranu 3 steel structure – cross section

$$\sigma = (\gamma_{G, Q1} * M_{y, [SW; chodci]} + \gamma_{Q, T} * \psi_{0, T} * M_{y, T}) / W_{min} + (\gamma_{G, Q1} * N_{x, [SW; chodci]} + \gamma_{Q, T} * \psi_{0, T} * N_{x, T}) / A = (-335 + 1,5 * 0,6 * -306) / 0,008 + (-5140 + 1,5 * 0,6 * -200) / 0,121 = -119\,000 \text{ kPa}$$

ZÁVER

Návrh a konštrukcia mosta predstavovali niekoľko unikátnych riešení, ale aj veľa problémov. Tieto sa mohli prekonať len efektívnou komunikáciou medzi investorom, projektantmi a dodávateľmi. Projekt bol úspešne dokončený v rámci rozpočtu a harmonogramu. Vznikla mimoriadne štíhla a elegantná lávka bez medziláhlych stĺpov a s krajnými oporami mimo priameho nárazu vozidiel.

Niektoré ZDROJE, použité pri tvorbe článku :

- [1] Design and construction of the Erasmusrand Pedestrian Bridge, Gerhard du Plessis Pr Eng Technical Executive: WSP Australia, March 2020, Civil Engineering
- [2] <https://mondocane.co.za/case-studies/study1>, Erasmusrand Bridge
- [3] Standard TMH7 – Reliability performance of bridges designed according to TMH7 NA load model
- [4] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
- [5] STN EN 1991–2 Zaťaženie mostov dopravou
- [6] Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations, Heinemeyer C., Butz C., Keil A., et al., JRC Scientific and Technical Reports, 2009

Všetky obrázky a prepočty v tomto príspevku sú pôvodné a nekopírované.

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné POČÍTAČOVÉ PROGRAMY :

LUSAS Bridge Plus, SketchUp, AutoCad LT, Microsoft Word, PDF Creator, IrfanView, Corel Draw

