

Technická dokumentace a protokol

o ověření a následném uplatnění funkčního vzorku č. DG18P02OVV033-2021-3

„Systém pro zesilování a renovaci prvků“

Původ technologie:

Navržený funkční vzorek je výsledkem výzkumných aktivit projektu DG18P02OVV033 Metody pro zajištění udržitelnosti ocelových mostních konstrukcí industriálního kulturního dědictví, řešeného v rámci programu NAKI II pro Ministerstvo kultury ČR.

Popis funkčního vzorku:

Funkční vzorek „Systém pro zesilování a renovaci prvků“ má za cíl zajistit novou progresivní metodu zesilování pomocí materiálu s tvarovou pamětí Fe-SMA, vhodnou zejména pro ocelové mostní konstrukce kulturního dědictví, která by umožnila zajištění jejich funkčnosti a především bezpečnosti a mohla nahradit tradičně užívané metody zesilování. Cílem bylo vyvinout a aplikovat zesílení s minimálním zásahem do stávající konstrukce zároveň se zajištěním reverzibility aplikovaného systému. Dalším cílem bylo také zajistit možnost jednoduché a rychlé aktivace předpětí bez nutnosti mohutných kotevních oblastí, složitých předpínacích systémů, omezení dopravy na mostě, a to i ve stísněných podmínkách.

Popis technické řešení funkčního vzorku:

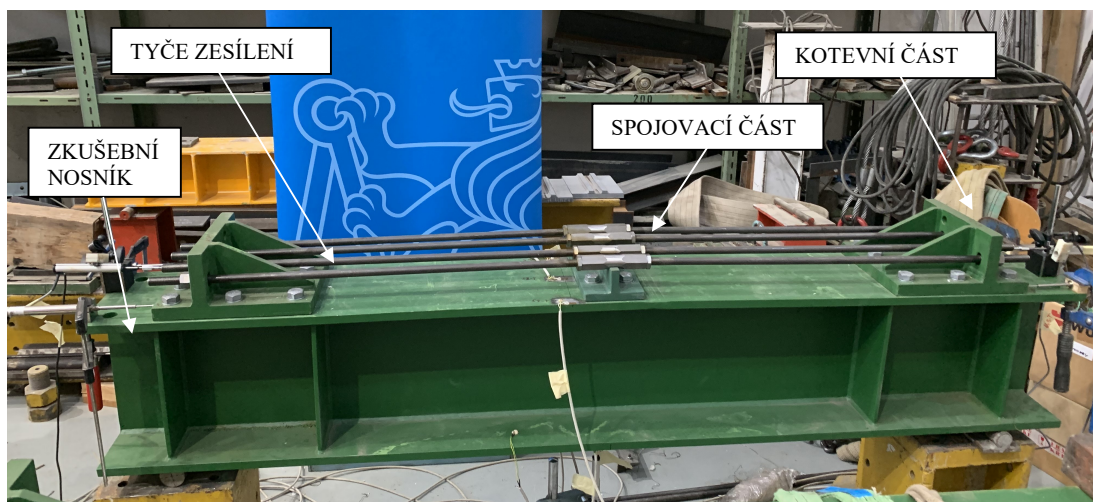
Funkční vzorek - systém pro rychlé a efektivní zesilování a renovaci oslabených či jinak nedostačujících prvků mostních konstrukcí. Systém zesílení se skládá ze tří částí, prvky zesílení, části kotevní a části spojovací.

Prvky zesílení jsou tvořeny válcovanými tyčemi D18 z materiálu Fe-SMA. Fe-SMA je progresivní materiál zvolený pro jeho schopnost obnovit svůj původní tvarový stav v důsledku aktivačního zahřátí, tzv. tvarová paměť, díky tomu je možné tyto tyče použít jako předpínací výztuž. Tyče zesílení mají na konci vyválnován závit pro spojení s kotevní i spojovací částí.

Kotevní část je tvořena svařencem z plechů tl. 30 mm ve tvaru nesymetrického písmene „T“ a výztuž z plechů tl. 15 mm. Samotné kotvení ke stávající konstrukci mostu je navrženo pomocí vysokopevnostních šroubů M20 10.9 pro které jsou ve vodorovném plechu kotevní části vyřezány závity. Ve svislém plechu kotevního bloku je 6 otvorů pro osazení a kotvení tyčí zesílení. Čtyři pozice jsou v první řadě blíže vodorovnému plechu, dvě zbývající pozice slouží jako rezervní místa pro možnost dodatečného zvýšení účinku zesílení. Spojení je zajištěno pomocí kotevních matic a podložek s upraveným kontaktním povrchem tak, aby eliminovali možnost vzniku parazitních ohybových momentů v kotevní oblasti.

Vzhledem k maximální dodávané délce tyčí Fe-SMA, která je 5 m, byla navržena i spojovací část, a to ze závitových spojek s kontramaticemi. Závitové spojky jsou po krajích šestihrného průřezu a ve střední části opracovány do tvaru válce. Součástí této části je také deviátor zajišťující excentricitu systému zesílení. Deviátor je tvořen svařencem z plechů tl.

20 mm tvaru písmene „T“. Ve svislém plechu jsou tvarovány žlábký pro uložení středu závitové spojky.



Obr. 1 Sestavený systém zesílení na prostě podepřeném nosníku

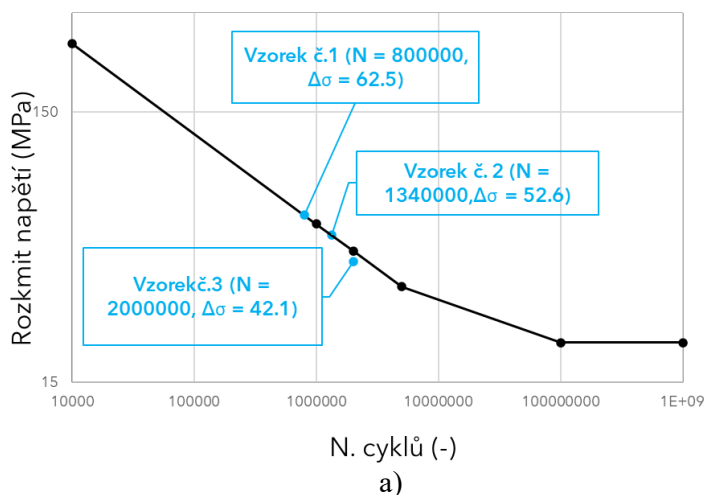
Numerická analýza a Experimentální ověření funkčního vzorku

Funkční vzorek byl ověřen řadou zkoušek a numerických analýz provedených týmem řešitelů. Jednotlivá ověření a popis bude uveden dále. Jedná se zejména o:

- Únavové zkoušky navrženého šroubovaného spoje
- Numerická analýza navrženého systému zesílení
- Ověření navrženého systému zesílení na prostě podepřeném nosníku
- Ověření funkčního vzorku aplikací na reálnou konstrukci mostu za provozu

- Únavové zkoušky navrženého šroubovaného spoje

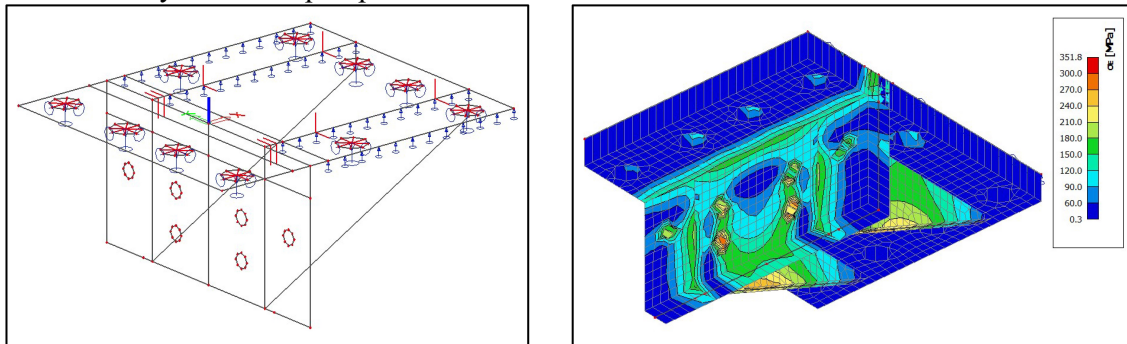
Na základě výsledků série únavových zkoušek byl stanoven odhad únavové pevnosti šroubovaného spoje tyčí Fe-SMA.



Obr. 2 a) Únavová křivka šroubovaného spoje tyčí zesílení a b) zkušební přípravek při únavové zkoušce

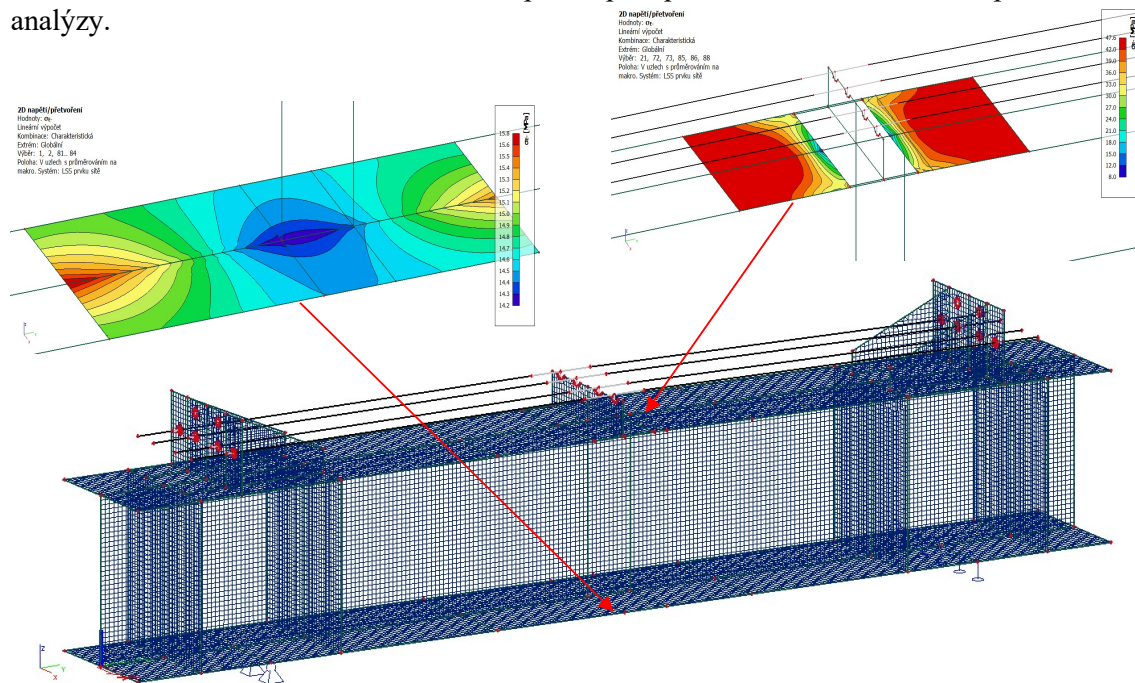
- Numerická analýza navrženého systému zesílení

Samotná kotevní část byla modelována nejprve samostatně, a to na deskostěnovém numerickém modelu kotevního bloku vytvořeném v programu SCIA Engineer 20.0.0043. Modelovány byly plechy kotevního bloku, pomocí deskostěnových prvků se zadáním příslušné tloušťky, včetně kotevních otvorů. Zatížení předpínací silou bylo zadáno bodovými silami ve středu otvorů ve svislém plechu kotvy a pomocí tuhých ramen vztaženo k okrajům otvorů. Kotevní část byla posouzena dle napětí Von Mises na deskostěnových prvcích. Uvažována byla zatížení předpětím Fe-SMA a vlastní tíhou kotevního bloku.



Obr. 3 Deskostěnový numerický model kotevní části

Celý navržený systém zesílení osazený na prostě podepřeném nosníku byl modelován v programu SCIA Engineer 20.0.0043. Tento model byl následně využit pro možnost verifikace reálného účinku zesílení instalovaného na prostě podepřeném nosníku v rámci experimentální analýzy.



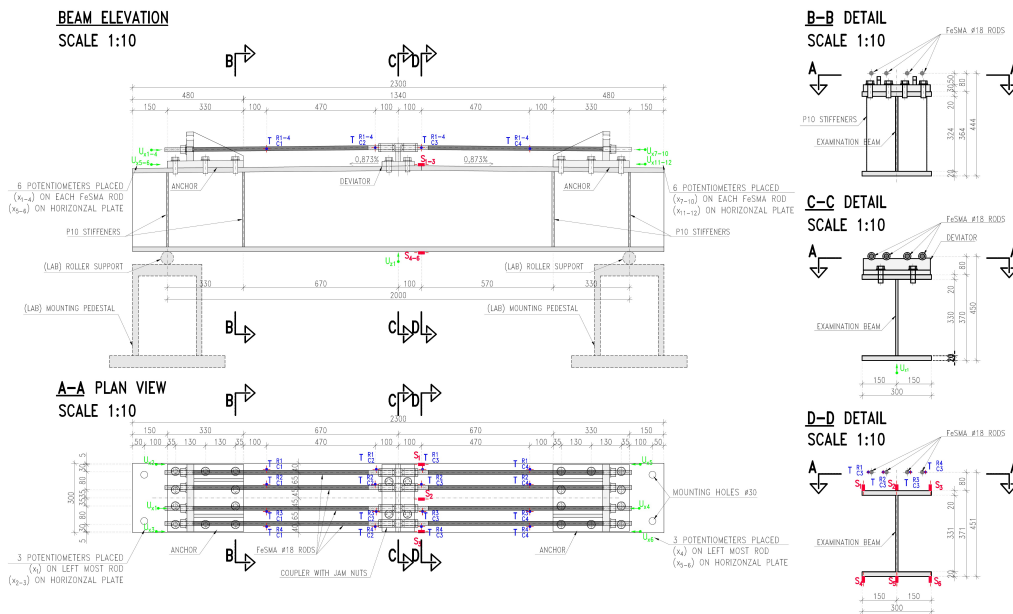
Obr. 4 Deskostěnový a prutový model prostě podepřeného nosníku s instalovaným systémem zesílení

Účinek zesílení byl stanoven na 48 MPa v tlaku na horní pásnici zkušební nosníku a 16 MPa v tahu při jeho dolní pásnici. Uvažováno bylo s aktivací ohřevem na 300 °C. Testování výrobcem prokázalo při aktivaci na 300 °C získání předpětí v důsledku zamezení smrštění o hodnotě 350 MPa, včetně ztrát vlivem nerovnoměrného ohřevu materiálu.

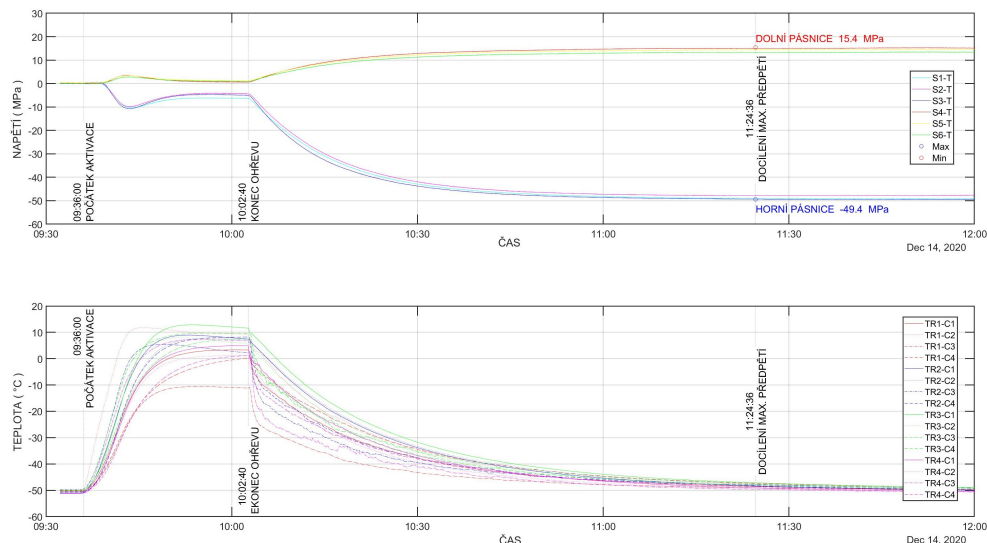
- **Ověření navrženého systému zesílení na prostě podepřeném nosníku**

Experimentální ověření v laboratorních podmínkách spočívalo v aplikaci systému zesílení na prostě podepřený nosník a následné vyhodnocení účinku zesílení ve srovnání s numerickou analýzou. Systém zesílení byl proveden v délce 2 m. Schéma zkušební sestavy je zobrazeno na Obr. 5.

Tyče Fe-SMA byly aktivovány ohřevem na 300 °C. Ohřev byl proveden za pomoci odporového drátu v ohřevných keramických elementech. Účinek zesílení na zkušební nosník byl sledován trojicí tenzometrů při horním a dolním povrchu zkušební nosníku uprostřed rozpětí. Průběh teploty na Fe-SMA během aktivčního ohřevu byl sledován čtveřicí termočlánků na každé tyči zesílení. Výsledky měření jsou zobrazeny na Obr. 6.



Obr. 5 Schéma zkušební sestavy a měřených bodů



Obr. 6 Průběh napětí (horní graf) uprostřed rozpětí zkušební nosníku a průběh teploty na Fe-SMA (dolní graf)

Výsledné hodnoty napětí měřené na zkušebním nosníku potvrdili dobrou shodu s výsledky numerického modelu zkušebního nosníku opatřeného systémem zesílení. Experimentální ověření prokázal funkčnost a proveditelnost navrženého systému zesílení.

- **Ověření funkčního vzorku aplikací na reálnou konstrukci mostu za provozu**

Aplikace systému zesílení na reálnou mostní konstrukci byla provedena na most ev. č. M-27 v Karlových Varech (viz. Obr.7) ve spolupráci s firmou SMP CZ, a.s. . Cílem této aplikace bylo zvýšení ohybové únosnosti a snížení nadměrného průhybu nosné konstrukce mostu. Vzhledem k malé světlé výšce pod mostem byl navržený systém zesílení zvolen také z důvodu snadné a lehké aplikace ve stísněných prostorech.



Obr. 7 Most ev. č. M-27

Aplikace spočívala v instalaci systému zesílení na nosnou konstrukci ze sedmnácti ocelových zabetonovaných nosníků. Systém zesílení byl v tomto případě navržen v délce 12 m pod každým nosníkem. Tyče zesílení sestávaly ze tří částí délky 5 + 2 + 5 m. Systém v tomto případě obsahoval vždy dvě spojovací části se závitovými spojkami a deviátory. Na koncích byly tyče zesílení osazeny do kotevních částí. Aktivace byla provedena stejně jako při experimentální analýze na prostě podepřném nosníku pomocí odporového drátu v ohřevných keramických elementech, vzhledem k délce zesílení byly ohřevné prvky přikládány k tyčím zesílení ve speciálních dřevěných kastlících vyplněných tepelnou izolací. Nosníky byly aktivovány postupně směrem od středu vozovky ke krajům s chodníkovými římsami, a to vzhledem k možným ztrátám účinku zesílení postupným předpínáním. Během procesu aktivace byla konstrukce mostu sledována za pomoci trvalého monitoringu, a to měřením napětí pomocí tenzometrických polomostů ve středu rozpětí při dolní pásnici každého ze sedmnácti ocelových nosníků. Na mostě byla před a po osazení zesílení provedena statická zatěžovací zkouška.



Obr. 8 Osazený systém zesílení pod každým nosníkem v délce 12 m



a)



b)

Obr. 9 a) Kotevní oblast a b) ohřevný kastlík pro osazení na tyče zesílení



Obr. 10 Aktivace zesílení pomocí ohřevných deček a aktivačních kastlíků s tepelnou izolací



Obr. 11 Statická zatěžovací zkouška se čtveřicí nákladních vozidel o tíze 32 tun

Při aplikaci se potvrdily předpoklady návrhu systému zesílení. Nově navržený systém zesílení pomocí progresivního materiálu Fe-SMA byl úspěšně a trvale aplikován na stávající silniční most, a to jakéhokoliv omezení provozu na mostě. Předpokládaný účinek zesílení byl validován s hodnotami numerické analýzy. Most byl monitorován ještě 6 měsíců po aktivaci zesílení. Průměrné napětí na dolní pásnici bylo i po 6 měsících 28 MPa v tlaku, relaxace efektu tvarové paměti nabývala hodnot do 10,0 %.

Závěr

Cílem bylo vytvořit a ověřit progresivní metodu zesilování a renovaci prvků. Navržený systém byl vytvořen a následně ověřen experimentem na prostě podepřeném nosníku a následně na ocelových prvcích reálné konstrukce mostu za provozu. Během experimentální části došlo k potvrzení předpokladů numerických modelů. Provedený návrh a následný analýza potvrzují proveditelnost a účinnost vytvořeného systému zesílení.

Využitelnost funkčního vzorku

Funkční vzorek je plně využitelný pro rychlé a jednoduché zesilování a renovaci nedostatečných či jinak poškozených prvků mostních konstrukcí, a to i ve stísněných prostorech, které by jinými metodami byly jen těžko dostupné.

Ekonomické parametry:

Hlavním ekonomickým parametrem je zajištění bezpečnosti a funkčnosti stávající stárnoucí mostní infrastruktury a zároveň vyhnutí se nutnosti nahrazování konstrukcí kulturního a technického dědictví novými. S tím jsou spojené významné finanční úspory.

Závěrečná ustanovení

Tento protokol osvědčuje ověření a uplatnění funkčního vzorku pro účely hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů podle platné metodiky Rady vlády pro výzkum, vývoj a inovace (RVVI).

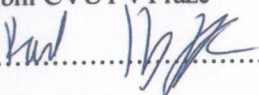
Protokol vyjadřuje zájem aplikační firmy využívat funkční vzorek zejména v oblasti pro aplikaci jako zesílení mostních konstrukcí, nezakládá však žádné právní ani jiné povinnosti níže podepsaných stran.

Protokol je vyhotoven v 4 stejnopisech platností originálu, po jednom obdrží každá organizace a dva jsou určeny pro účel archivace.

Za kolektiv autorů funkčního vzorku a za aplikační firmu

Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

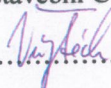
Fakulta stavební ČVUT v Praze

Podpis.....

V Praze dne 20.12.2021

Ing. Jakub Vůjtěch

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Podpis.....

V Praze dne 20.12.2021

Za aplikační firmu

Ing. Michal Kužník

SMP CZ, a.s.

Podpis.....

V Praze dne 20.12.2021