Problematika posuzovaní příčníků betonových komorových mostů dle Eurokódu

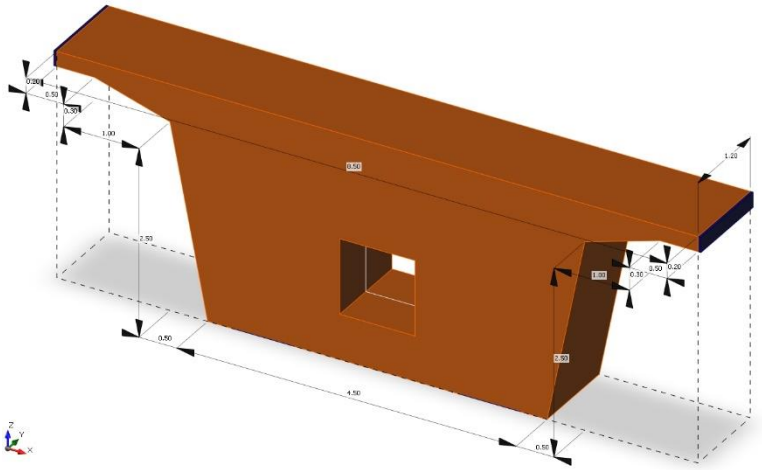
Lukáš Juříček	**Lukáš Bobek**	**Michal Číhal**	**Jaromír Kabeláč**	**Michael Konečný**

Abstrakt:

Chování příčníku betonových komorových mostů je závislé na mnoha aspektech, jako například na typu uložení, úhlu boční stěny komorového průřezu, celkovém statickém schématu konstrukce a dalších. Při samotném návrhu se obecně vychází z analytické metody příhradové analogie, která je uvedena i v platných evropských normách. Tato metoda je ale velmi zjednodušená a neumožňuje posoudit detaily na mezní stavy použitelnosti. Studie provedená na příčníku silničního mostu komorového průřezu ukazuje rozdíl v únosnosti provedenou metodou příhradové analogie a fyzikálně nelineárním řešením pomocí metody konečných prvků na stěnovém modelu. Díky této pokročilejší metodě lze posoudit mezní stav použitelnosti, a to v podobě krátkodobých i dlouhodobých účinků pro omezení napětí, šířku trhlin a deformací.

Popis modelu

Jedná se o příčník komorového silničního mostu o třech polích s rozpětím jednotlivých polí 40 x 45 x 40 m. Příčník výšky 3 m, šířky 8,5 m a tloušťky 1,2 m s krátkými vyloženými konzolami je nepřímo uložen na ložiscích šířky 0,8 m v modelu reprezentovaných roznášecí deskou (Obr.1). Model je zatížen vlastní tíhou, ostatním stálým zatížením v podobě vrstev vozovky a říms, sekundárními účinky od podélného předpětí a dopravou v podobě LM1.



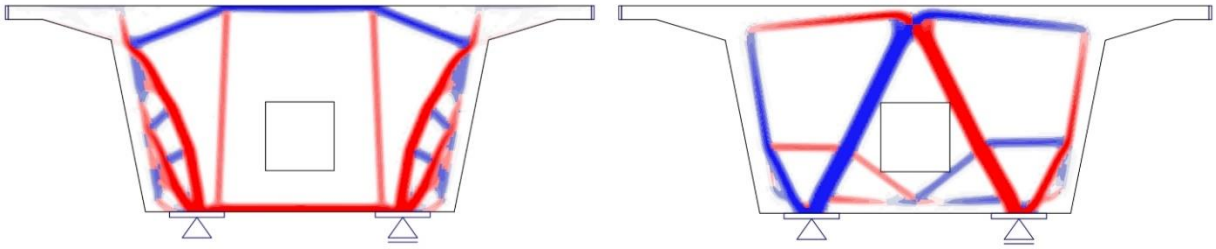
Obr.1- Geometrie příčníku

Předpoklady příhradové analogie

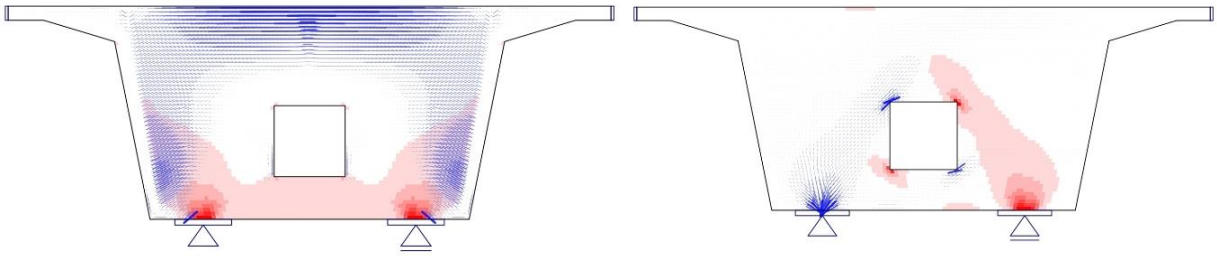
Obecně poskytuje metoda příhradové analogie velmi účinný nástroj pro posouzení prvků betonových konstrukcí, kde se vyskytují tzv. oblasti diskontinuit. Principiálně vzniká příhradová analogie z lineární analýzy a směru hlavních napětí od aplikovaného zatížení. Model je tvořen pomocí vzpěr, uzlů a táhel, které jsou následně jednotlivě posuzovány. Samozřejmě musí být dodrženy všechny konstrukční zásady a výztuž musí být zakotvena na kotevní délku. Jelikož model příhradové analogie vychází z teorie plasticity a bezpečnost návrhu je zaručena dolní mezí únosnosti, musí být splněny podmínky rovnováhy vnějších a vnitřních sil, které nepřekročí návrhovou pevnost materiálu. Vychází se z předpokladu, že betonářská výztuž bude porušena dříve, než dojde k drcení betonu. Nebezpečím je tedy, že metoda automaticky nesplňuje podmínky kompatibility deformací a dostatečná duktilita konstrukce musí být zajištěna jiným způsobem. Vzhledem k daným omezením je nutné se držet pravidel návrhu vyplývajících z [1].

Topologie návrhu příhradové analogie

Návrh příhradové analogie příčníku vychází z topologické optimalizace [2], která je založena na principu nalezení mininální potenciální energie. Tento přístup určuje přesně tvar a napomáhá k správnému vytváření modelu příhradové analogie. Pro vytvoření topologie, která zachycuje účinky smyku a kroucení na příčníku byly vytvořeny dva modely, které v součtu vytváří komplexní model návrhu výztuže a posouzení uzlů. První model zachycuje účinky smyku příhradovou analogií složenou z lahvovitých vzpěr a táhel (Obr.2a). Tento model sloužil pro návrh betonářské výztuže v horním líci příčníku, kde bylo největší tahové namáhání. Druhý model sloužící k zachycení účinků od kroucení vytváří trojúhelníkový tvar příhradové analogie (Obr.2b).



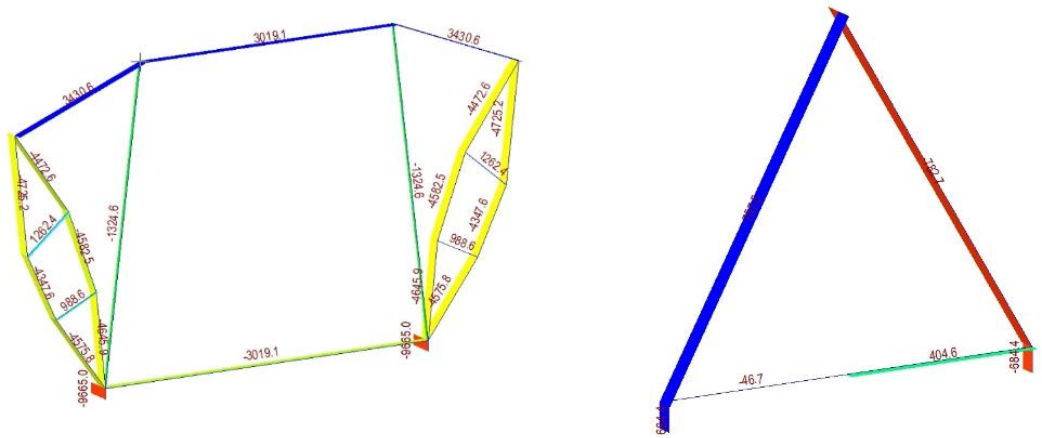
Obr.2 – (a) Model topologické optimalizace vystihující účinky smyku; (b) Model topologické optimalizace vystihující účinky kroucení



Obr.3 – (a) Model lineárního výpočtu vystihující účinky smyku; (b) Model lineárního výpočtu vystihující účinky kroucení

Výsledky příhradové analogie

Modely v programu Midas Civil (Obr.4) byly zatíženy extrémním zatížením. Z tahových sil byla navržena nutná betonářská výztuž a byly posouzeny oblasti uzlů dle ustanovení v [1]. Extrémní hodnotu napjatosti obsahoval uzel na modelu (Obr.2a) pod pravým ložiskem, kde hodnota tlakového napětí nabývala hodnoty σ_{ed} = -10,1MPa [Tab.1].



Obr.4 – (a) Vnitřní síly na prutovém modelu od účinků smyku; (b) Vnitřní síly na prutovém modelu od účinků kroucení

N_{ed}[kN]	f_{ck} [MPa]	b [m]	t [m]	v [-]	k2 [-]	$\sigma_{rd.max}$ [MPa]	σ_{ed} [MPa]	η [%]
-9665	40	0.8	1.2	0.8	0.9	-19.0	-10.1	52.9

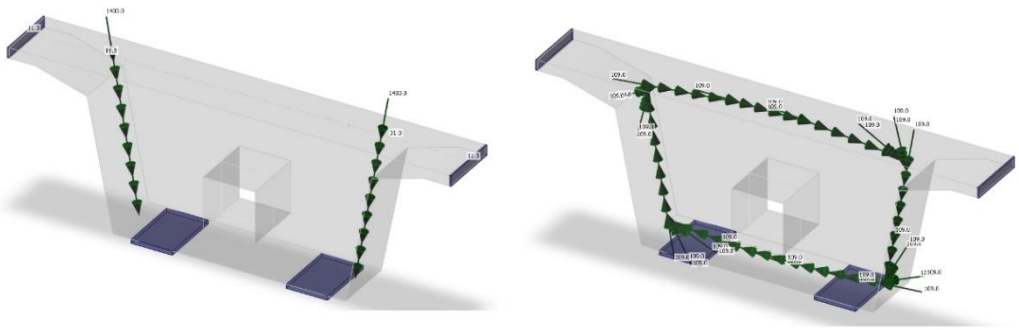
Tab.1 – Extrémní využití betonu v tlaku dle příhradové analogie

Metoda CSFM

Metoda CSFM (Continuous Stress Field Method) odstraňuje nedostatky a zjednodušení metody příhradové analogie. Duktilita konstrukce, nalezení správné geometrie příhradové analogie, iterativní postupy odpadají, jelikož modely jsou řešeny pomocí metody konečných prvků s využitím CSFM metody. Předpoklady nelineárného výpočtu jsou založeny na fiktivní rotující trhlině, ve které se uvažuje otevření trhliny bez pokluzu výztuže. Beton v tahu nepůsobí, ale je uvažován efekt tahového zpevnění na výztuži. Díky modelu tahového zpevnění je možné zachytit průměrné napětí na výztuži a výpočítat šířku trhliny. Metoda CSFM tak umožňuje posoudit příčník i na mezní stav použitelnosti [3].

Zatížení příčníku

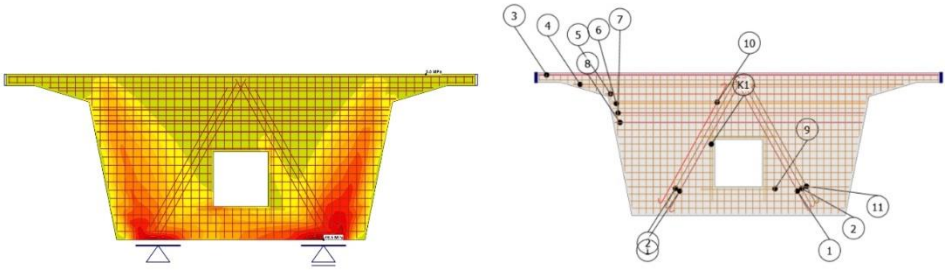
Zatížení je do příčníku přenášeno přes stěny komorového průřezu. Veškerý smyk je přenášen přes boční stěny průřezu do masy betonového příčníku (Obr.5a). Kroucení na průřezu je přenášeno smykovým tokem přes střednici komorového průřezu do objemu příčníku (Obr.5b).



Obr.5 – (a) Zatížení od smyku; (b) Zatížení od kroucení

Porovnání výsledků analýzy S&T a metody CSFM

Srovnání výsledků bylo možné pro mezní stav únosnosti, kdy byly srovnány extrémní napětí v betonu (Obr.6a) s limitními hodnotami. Srovnání napjatosti bylo také provedeno pro betonářskou výztuž (Tab.2), kde byly srovnány i hodnoty přetvoření, které díky tahovému zpevnění v nelineárním modelu vykazují odlišné hodnoty od diagramu bilineární betonářské výztuže [3]. Napjatosti na výztuži byly porovnány s limitní návrhovou hodnotou meze kluzu výztuže, na kterou byly výztuže dimenzovány (Tab.2).

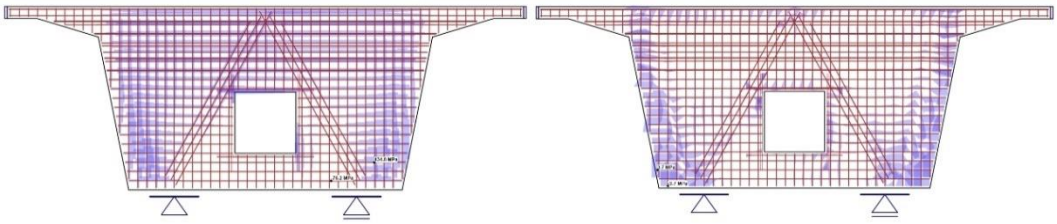


Obr.6 –(a) Hlavní tlakové napětí v betonu; (b) Vyztužení/označení výztuže příčníku

Poloha/označení výztuže	Napětí ve výztuži CSFM [MPa]	Napětí ve výztuži S&T [MPa]	Přetvoření na výztuži CSFM [10-4]	Přetvoření na výztuži S&T[10-4]	Poměr napětí CSFM/S&T	Poměr přetvoření CSFM/S&T
Výztuž při horním líci / 3	259	434.78	9.6	21.7	59.6	44.2
Diagonální výztuž / 1	141	434.78	4.3	21.7	32.4	19.8
Poloha/ místo	Napětí v betonu CSFM [MPa]	Napětí v betonu S&T [MPa]	Návrhové napětí CSFM [MPa]	Návrhové napětí S&T [MPa]	Využití CSFM	Využití S&T
Pravé ložisko	-16.5	-10.1	-24.5	-19	67.3	53.2

Tab.2 – Srovnání výsledků S&T a CSFM napětí na výztuži a betonu

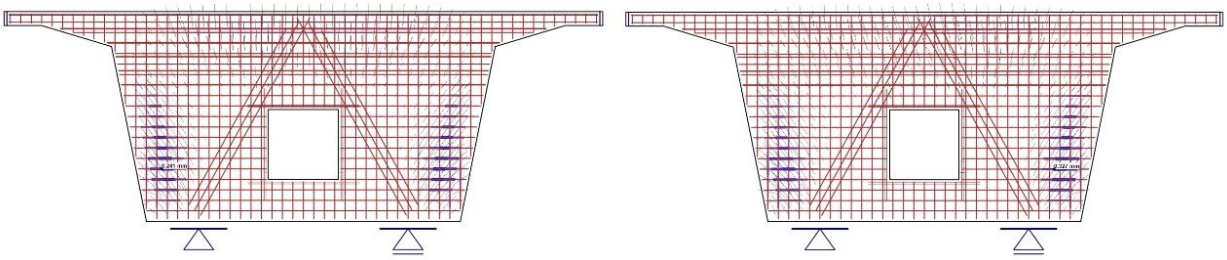
Výsledky analýzy prokázaly, že napětí a přetvoření v mezním stavu únosnosti na navržených výztužích jsou menší než uvažované napětí na mezi kluzu z metody příhradové analogie. Pro výztuž při horním líci dosáhla hodnota poměru napětí přibližně 60 %. Větší rozdíl byl pro diagonální výztuž, která byla navržena z modelu pro kroucení. Hodnoty výsledků z nelineární analýzy ukázaly využití výztuže přibližně na 30 % z celkové návrhové únosnosti. Extrémní napětí bylo na kari síti (Obr.7a) kvůli přičným tahům v lahvovité vzpěře, kterou můžeme vidět na (Obr.4a). Nejvíce byla využita výztuž z pohledu napětí v soudržnosti (kotevní délky) při spodním líci v oblasti ložiska (Obr.7b).



Obr.7 – (a) Maximální napětí na výztuži; (b) Maximální napětí v soudržnosti

Mezní stav použitelnosti

Jelikož plasticitní metoda neumožňuje výpočet šířky trhlin, průhybů ani omezení napětí, nelze provést srovnání mezi jednotlivými metodami. Výsledky analýzy mezního stavu použitelnosti slouží pro představu chování příčníku při běžném provozu na konstrukci. Během životnosti konstrukce jako celku a hlavně detailů jsou velice podstatné šířky trhlin, které významně ovlivňují životnosti konstrukce. Převážně problem s korozí výztuže. Pro model příčníku byly vytvořeny dvě kombinace pro posudek šířky trhlin. První kombinace kvazistálá, která neuvažuje vliv dopravy, a poté častá, která její vliv uvažuje. I když Eurokód předepisuje pro posouzení šířky železobetonových prvků pouze kvazistálou kombinaci zatížení (Obr.8a), bylo provedeno srovnání i s častou kombinací pro předpjaté prvky (Obr.8b).



Obr.8 –(a) Trhliny pro kvazistálou kombinaci; (b) Trhliny pro častou kombinaci

Kombinace	Šířka trhliny [mm]	Limitní šířka trhliny [mm]	Využití [%]
Kvazistálá	0.24	0.3	80.3
Častá	0.33	0.2	163.5

Tab.3 – Srovnání výsledků šířek trhlin pro kvazistálou a častou kombinaci

Maximální šířka trhliny je v oblasti vzniku příčných tahů od vzpěry, vedoucí od ložiska. Je vidět, že vlivem smykového toku jsou trhliny v časté kombinace pod větším úhlem než u kvazistálé kombinace, kde působí pouze smykové zatížení od stálých složek.

Závěr

Metoda příhradové analogie je velice silným nástrojem v rukou projektantů a nabízí ve srovnání s nelineárním výpočtem v aplikaci IDEA StatiCa Detail [5] pomocí metody CSFM bezpečný návrh příčníku komorového průřezu pro mezní stav únosnosti. Nelineární výpočet prokázal, že při návrhu tahové výztuže pří horním povrchu ve srovnání s metodou příhradové analogie jsme na 60 % kapacity únosnosti betonářské výztuže a při návrhu diagonální výztuže dokonce na 30 %. Samozřejmě menší využití výztuže jsou zapříčiněny vlivem kari-sítě, která pomáha v nelineárním modelu přispět v únosnosti výztuže a přebírá účinky zatížení. Tato kari-síť splňuje pouze konstrukční zásady a nebyla uvažována v metodě

příhradové analogie jako nosná. Je tedy evidentní, že návrh pomocí metody příhradové analogie je bezpečný při dodržení konstrukčních zásad dle [1]. Vzhledem ke správné volbě příhradové analogie, která vycházela z [2] se místo extrémního napětí v uzlu styčníku a při nelineárním výpočtu shodovalo. Rozdíl mezi posudkem napětí v betonu dle metody příhradové analogie a nelineárního výpočtu byl přibližně 13 %, kde větší využití bylo při nelineárním výpočtu. Z pohledu mezního stavu použitelnosti byly srovnány šířky trhliny metodou CSFM, které pro kvazistálou kombinaci zatížení vyhověly na 80 %. Častá kombinace s vlivem dopravního zatížení již pro podmínku limitní šířky trhliny nevyhověla hodnotou 163 % oproti limitní šířce trhliny. Celkově tedy můžeme říci, že návrh metodou příhradové analogie pro příčníky komorového průřezu splňuje podmínky mezního stavu únosnosti a v tomto případě i mezního stavu použitelnosti pro kvazistálou kombinaci. Je důležité si uvědomit, že mezní stav použitelnosti nelze postihnout metodou příhradové analogie a je nutné ho řešit jinou metodou, v tomto případě metodou CSFM (Continuous Stress Field Method).

Reference:

[1] EN 1992-1-1 Eurocode, Design of Concrete Structures – Part 1 : General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, December 2004-2016

[2] MATA-FALCÓN, J., TRAN, D., T., KAUFMANN, W., NAVRÁTIL, J. Computer-aided stress field analysis of discontinuity concrete regions, In: *Proceedings of EURO-C 2018 Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures*, Austria, 2018, in print

[3] KABELÁČ J., ČÍHAL M., KONEČNÝ M., JUŘÍČEK L., VALÍČEK J. Posouzení mezního stavu v oblasti diskontinuit, In Sborník ke konferenci 25. Betonářské dny 2018, Czech Republic,ČBS ČSSI, 2018

Ing. Lukáš Juříček
✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Czech Republic
☺ lukas.juricek@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com

Ing. Lukáš Bobek
✉ VUT Fakulta stavební
Veveří 331/95
Czech Republic
☺ lukas.bobek@vutbr.cz
URL www.fce.vutbr.cz

Ing. Michal Číhal
✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Czech Republic
☺ michal.cihal@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com

Ing. Jaromír Kabeláč, Ph.D.
✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Czech Republic
☺ jaromir.kabelac@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com

Ing. Michael Konečný
✉ IDEA StatiCa s.r.o.
U Vodárny 2a, 616 00 Brno
Czech Republic
☺ michael.konecny@ideastatica.com
URL www.ideastatica.com