

MODELY STRUT-AND-TIE

Alena Kohoutková

Souhrn

Oblasti modelování železobetonových konstrukcí pomocí příhradových analogií lze rozdělit do několika skupin. Tradičně se tyto modely používají k výpočtu konstrukcí a rovinných prvků zatížených ve vlastní rovině – a zejména takových oblastí, u nichž neplatí jednoduché geometrické předpoklady pro stanovení deformací. Samostatnou sféru použití tvoří konstruování detailů. V oblasti výzkumu pomáhají při modelování chování konstrukcí, jejich detailů a nových materiálových vlastností při simulaci experimentů. Novým poznatkem je, že příhradové modely mohou posloužit jako jednotící nástroj v koncepci navrhování železobetonových konstrukcí

1. Úvod

Napětí nebo vnitřní síly a jejich průběhy v konstrukci mohou být znázorněny ve formě trajektorií. (obr.1) Podobně lze znázornit tok sil v konstrukci užitím analogie mezi prouděním kapalin a silovými složkami v konstrukci. Toky sil směřující od zatíženého okraje konstrukce k podpoře jsou účinným nástrojem pro porozumění chování konstrukce. Pokud známe takové toky nebo trajektorie napětí, můžeme je aproximovat formou tlačných a tažených prvků příhradového modelu (obr.1 až 3). Říká se jim strut-and-tie modely (model vzpěra – táhlo), protože původní soustavy měly obvykle jen málo prvků. Příhradové modely nebo modely příhradové analogie (jak jsou též nazývány dnes) byly úspěšně používány od konce 19.století pro nosníky a později pro krátké konzoly a zvláštní případy vyztužených konstrukcí.

2. Principy modelování

Původní příhradový model (Mörsch,1912) pro nosník namáhaný smykem předpokládal vytvoření šikmých trhlin a skládal se z tlačných šikmých prutů a tažených prutů výztuže. Stal se základem dalších modelů, často i dnes používaných.

Příhradové modely byly propagovány a zobecněny pro praktické použití v pracích J. Schlaicha.

Podobný přístup založený na polích napětí byl rozvíjen ve Skandinávii a Švýcarsku (např. Muttoni, Thürlimann), kde byly na základě teorie plasticity učiněny další pokusy o vysvětlení skutečné únosnosti betonových stěnových prvků.

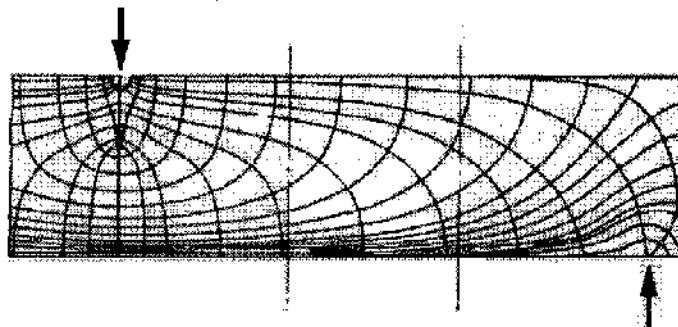
Příhradové modely pro výpočet železobetonových konstrukcí jsou obvykle vytvořeny koncentrací trajektorií hlavních napětí konstrukce do tlačných a tažených prutů, které probíhají podél střednic polí napětí, která znázorňují. Jako základ pro vytvoření modelu může sloužit pružné řešení oblasti analytickými metodami nebo nejčastěji metodou

konečných prvků. Pomocí izolinií nebo izoploch hlavních napětí lze pak zkonstruovat soustavu náhradních prutů. Příhradové modely lze pak řešit snadno dostupnými a hojně rozšířenými programovými systémy pro prutové konstrukce. Liší se od původních modelů obecnějším přístupem a umožňují s jistými omezeními i výpočet deformací.

Na základě sil v tlačenech a tažených prvcích se posuzuje napětí v betonu, ověřují se rozměry prvků a množství výztuže s uvážením tvaru výztužných prutů a jejich kotvení. Návrh doplní požadavky na minimální plochy výztuže včetně hledisek na vznik a šířku trhlin.

Bezpečnost návrhu konstrukce tímto postupem je zaručena dolní mezí únosnosti vyplývající z teorie plasticity, naopak nebezpečnost vzniká tím, že metoda automaticky nesplňuje podmínky kompatibility deformací a musí se tedy dostatečná duktilita konstrukce zajistit jiným způsobem. Je jím např. pravidlo tzv. „příliš“ se neodchylovat od pružného chování konstrukce.

Moderní příhradový model byl v předchozím období dále rozvíjen v podobě nástroje pro řešení tzv. D-oblastí. Konstrukce byla rozdělena na oblasti s běžným chováním (B-oblasti), ve kterých se může při dimenzování užít standardních postupů a na oblasti, kde je porušen ustálený tok průběhu vnitřních sil - oblasti D (discontinuity – nespojitost).

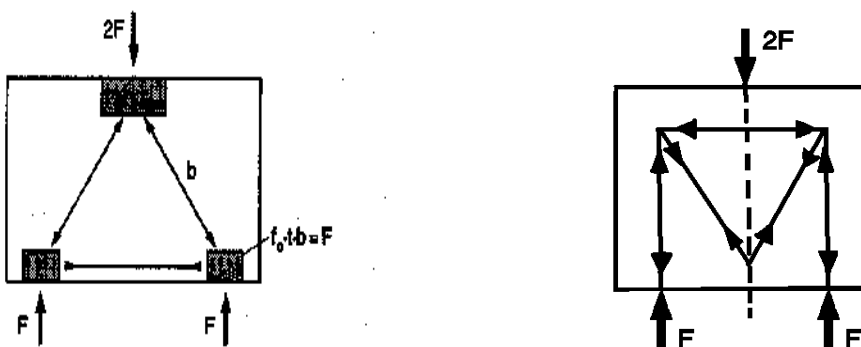


Obr.1

Praktický návrh D-oblastí jen na základě analogie s běžnými pravidly bývá nejčastější příčinou závad a poruch železobetonových konstrukcí.

Pro dosažení věrohodnějších výsledků existují v zásadě dvě možnosti řešení: metoda konečných prvků a strut-and-tie model, v kterém je souvislá konstrukce nahrazena prutovou soustavou. Oba přístupy mají své přednosti i nevýhody, ale při určité míře zjednodušení lze říci, že je možno preferovat metodu konečných prvků pro složitě rozsáhlé konstrukce s rovnoměrně rozloženým zatížením, zatímco příhradový model má své výhody při řešení jednodušší konstrukce zatížené osamělými břemeny. Obě metody se mohou vzájemně doplňovat.

Metoda konečných prvků (obvykle lineární) je pohodlná, protože dává automaticky rozložení vnitřních sil pro určení potřebné výztuže v celé konstrukci. Hlavní problémy přicházejí až při interpretaci těchto výsledků a při praktickém vyztužování konstrukce. Velké odchylky ve vyztužení od výsledků lineární analýzy mohou být nebezpečné, protože následky odchýlení lze jen těžko předvídat. Najít skutečně vhodné rozmístění výztuže v případě, že D-oblast je menšího rozsahu může být při použití MKP velmi obtížné. Pokud v oblasti vzniknou trhliny, lineárně pružný výpočet nepostihuje skutečnost. Dalším problémem kotvení výztuže. Těžko usuzovat na kotvení výztuže v případě použití lineárně pružného výpočtu metodou konečných prvků, když samotná výztuž tam není vůbec modelována. Zde je vhodnější použít příhradový model.



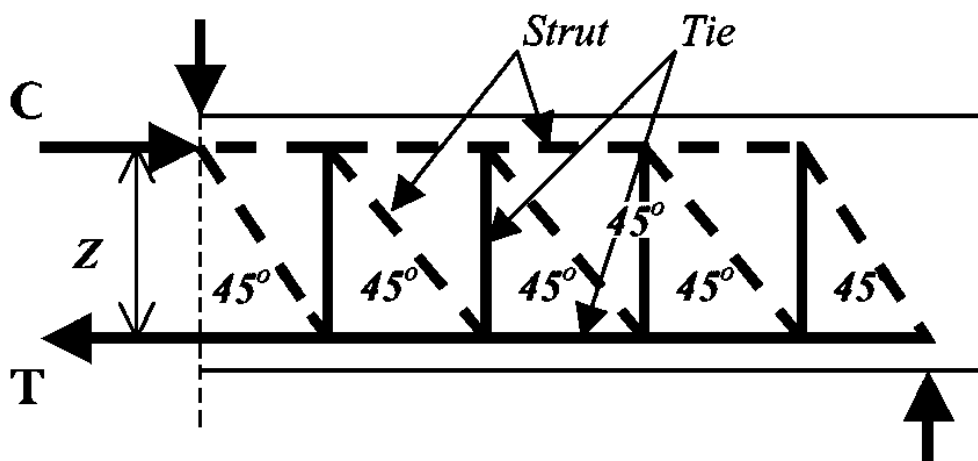
Obr.2

Základní pravidla pro tvorbu jednoduchých modelů tedy jsou: a) vycházet z lineárně pružného stavu – modelové tlačené pruty orientovat pokud možno ve směru hlavních tlakových napětí, b) výztuž umístit podle skutečného způsobu vyztužení – raději přímé pruty, c) úhly, které svírají tlačené a tažené pruty v jednom uzlu (obr.3, úhel θ na obr.4) volit blízké 45° , soustředěná zatížení jako jsou osamělá břemena, podporové reakce a kotevní síly působící na okraji nebo v rohu konstrukce pokud možno rozložit na větší plochu d) raději převzít a přizpůsobit osvědčený model nové situaci než experimentovat. Obr.2 ukazuje dvě možnosti modelu téže oblasti, obě splňují podmínky rovnováhy. Pro výběr nejvhodnějšího modelu z možných variant obvykle platí pravidlo, že model s kratší délkou tahových prutů je účinnější. Při složitějších konstrukcích je možno počítat s tvorbou staticky neurčitých modelů, kde se objevují otázky spojené s jejich optimalizací.

3. Strut-and-tie modely v normových předpisech a doporučeních

Oblíbenost modelů dokumentuje fakt, že většina norem a předpisů se k těmto modelům vyjadřuje, např. bibliografie ACI obsahuje na tři sta odkazů na toto téma.

Základní evropská norma [1] připouští, že některé prvky se smějí idealizovat staticky určitými příhradovinami vytvořenými z přímých tlačných prutů (přenášejících tlakové síly v betonu) a z tažených prutů (výztuž). Způsob řešení se řadí mezi plastické výpočty a požaduje se proto vysoká duktilita prvků, ke které má např. přispět použití výztuže z oceli s vysokou tažností. Síly v prutech příhradového modelu se určují z podmínek rovnováhy. Norma doporučuje kontrolovat, zda napětí v betonu dosahuje přípustných hodnot. Síly v tažených prutech má přenášet odpovídající výztuž. Poměrně velkou roli hrají konstrukční požadavky (např. kotvení veškeré výztuže), jejichž dodržování má např. zajistit přenos sil vyvolávajících soustředěné zatížení ve styčnicích modelu. Kompatibilita deformací není obvykle výpočtem kontrolována – aby byla



Obr.3

přibližně dodržena, norma doporučuje, aby umístění a orientace prutů odpovídalo přibližně rozložení vnitřních sil vyplývajícím z lineárně pružného výpočtu. Při posouzení tlacených prutů modelu [1] se porovnává průměrná hodnota napětí betonu se sníženou (obvykle šedesátiprocentní) návrhovou pevností betonu v tlaku. Norma doporučuje přihlídnout k snížení pevnosti vlivem příčných tahů, trhlin nebo smykových sil, ale blíže je neurčuje. Napětí v tažených prutech jsou omezena návrhovou hodnotou meze kluzu výztuže. Při řešení únosnosti železobetonového trémového prvku namáhaného smykem vychází rovněž z příhradového modelu – např. z násobné staticky neurčité soustavy se zakřiveným horním pasem. Příhradové modely tato norma doporučuje používat při řešení krátkých konzol, stěnových nosníků a stěn a oblastí namáhaných soustředěnými břemeny, např. pro kotvení oblasti dodatečně předpjatých prvků. Sestavený model je předveden pouze pro krátkou konzolu, u ostatních případů jsou uvedena doporučení pro konstrukční uspořádání výztuže. Shrňme-li, informace v této normě jsou kusé a velice obecné.

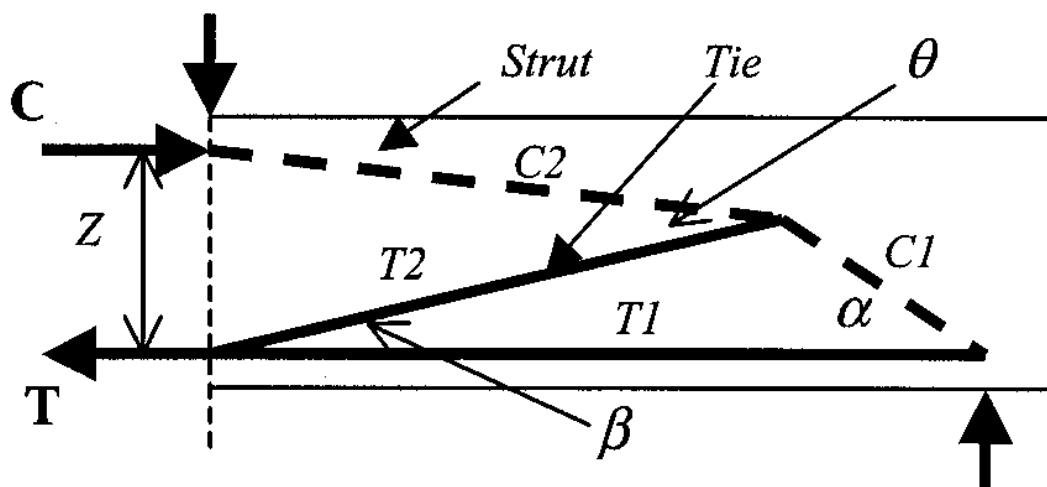
V doporučeních FIB (FIP) [3] je na rozdíl od Euró kodu věnován příhradovým modelům velký prostor. V nových doporučeních pro praktický návrh [2] najdeme nejdříve zcela netradičně zpracovanou samostatnou kapitolu zabývající se definováním tvarů a únosností vzpěr, táhel a uzlů, které tvoří prvky příhradových modelů a potom teprve vlastní postupy navrhování v mezních stavech.

V této kapitole se dozvídáme, že tažený prvek (tie) neboli táhlo může znázorňovat idealizaci vrstvy nebo skupiny výztužných prutů, tlačný prvek (strut) neboli vzpěra je definován výslednicí tlakového pole napětí. Uzel představuje omezený objem betonu, kde se protínají tlačné prvky nebo jsou odchýleny od původního směru táhly kotvenými

V bulletinu FIB [3] jsou pak uvedeny dokonale propracované modely pro různé D-oblasti (soustředěná zatížení a reakce, rámové rohy, oblasti s otvory nebo s náhlou změnou průřezu) včetně důsledků ve vyztužení. Jsou zde zpracovány i příklady.

V doporučeních [2] model strut-and-tie představuje dokonce základ pro jednotnou koncepci v navrhování železobetonových konstrukcí. Nejen pro oblasti nespojitosti v tomto uzlu. Uzel se může vyskytovat také v místě konstrukce, kde výztuž mění směr nebo je stykována. Vysvětlení a zavedení rozhodujících detailů jako je uspořádání sil v místě styčnic, přenášení sil třením ve spoji nebo styku nebo přenášení sil přes trhlinu zároveň ukazuje jejich vliv na únosnost prvků modelu (předpokládá se tedy i vznik

trhlin). Konkrétní požadavky na tvary, přesahy a kotevní délky výztužných prutů vyplývající z tohoto uspořádání, dávají úplnou a jasnou představu o vlastnostech prvků, a tím i o chování modelu.



Obr.4

(D), ale i pro běžné oblasti (B) konstrukce se doručuje použití příhradového modelu. Důležitým důsledkem je pak možnost v libovolném místě (např. v tlačném pásu nosníku) stanovit sílu od kombinace namáhání ohybem, smykem a normálovou silou a zároveň prvek navrhnout i posoudit. Jednotné pojetí představuje nový kvalitativní krok v přechodu od posuzování jednotlivých průřezů k posuzování celkového chování konstrukce.

4. Příklady

V průběhu historie modelování betonových konstrukcí byl smyk vůbec nejdůležitější oblastí, kde se příhradové modely využívaly. Příhradový model v navrhování železobetonového nosníku na smyk byl poprvé vyvinut na přelomu století, aby se vysvětlil podíl třmínků na přenášení sil.

Nosníky o krátkých rozpětích (např. kratší mosty) představují typ konstrukcí, kde smyk může být rozhodujícím typem namáhání. Standardní metody navrhování takovýchto konstrukcí namáhaných smykem dnes doporučují pro vyztužení svislé třmínky a velmi zřídka ohyby pod úhlem 45°. Pro určení nutné plochy výztuže třmínků obvykle používají zjednodušený příhradový model s diagonálami vedenými pod úhlem 45°. Šířka trhlin se potom zpravidla kontroluje zvláštními pravidly pro maximální průměr použitých prutů a pro maximální vzdálenost mezi třmínky. Použití jen svislých třmínků a jen vodorovných prutů je preferováno za účelem zjednodušení výpočtů i technologickými postupy.

U těchto nosníků se znovu objevují snahy o využití příhradových modelů v souvislosti s otázkami **optimalizace výztuže** v novém pojetí. Jednak jde o pokusy restaurace 'starých' systémů vyztužování (např. Hennebique) týkajících se vyztužení s využitím ohybů, jednak hledáním nových typů uspořádání výztuže nosníků, které by zlepšilo chování konstrukce při namáhání kombinací ohybu a smyku.

Německé výzkumy ověřovaly podobný způsob vyztužení. Účelem bylo minimalizovat požadovanou celkovou výztuž, aniž by se zvyšovala smyková výztuž. Bylo testováno

pět různých způsobů vyztužení nosníku (např. pouze vodorovné výztuž, smyková výztuž v podobě pouze třmínků, ale i ohyby s úhlem menším než 45°). Provedené experimenty byly porovnávány s výpočty na příhradových modelech, na nichž byly zjišťovány velikosti sil ve výztuži. Experimentální program byl koncipován tak, aby také ukázal vliv polohy osamělého břemena na nosnících s odlišným způsobem vyztužení.

Zpravidla se stává, že prostý nosník je navržen na ohyb pro jediný průřez [4]. Když se takto standardně vyztužená konstrukce se podrobí zkoušce na ohyb, test ukáže, že bez smykové výztuže dochází ke kolapsu konstrukce už při 75 % vypočteného momentu únosnosti. Použije-li se při stejném uspořádání pravidlo, že 50% podélné výztuže se upraví v blízkosti podpor do tvaru ohybů s menším úhlem než 45°, zvýší se velikost momentu při kolapsu na 90% původního momentu a po dalším přidání výztuže ve tvaru ohybů v blízkosti podpor dosáhne moment při kolapsu teprve teoretické hodnoty, ale velikosti průhybů se sníží o třetinu, v porovnání s nosníkem s přímou výztuží. Testy ukázaly, že takto jednoduché přizpůsobení tvarů výztuže může vést k velké úspoře množství výztuže (až 32 %)[4]. K studiu takovýchto případů uspořádání výztuže posloužily příhradové modely.

5. Závěry

Příhradové modely mají řadu výhod pro modelování D-oblastí a při porovnání experimentů. Někdy je nutno zvažovat, zda toto zjednodušení je bezpečné a ve sporném případě raději dát přednost nelineární metodě konečných prvků [5]. Hlavním příslibem do budoucna je jednotná koncepce navrhování, kterou příhradové modely nabízejí. Záleží na tom, zda bude tato možnost akceptována příslušnými normovými ustanoveními.

Hlavním nedostatkem příhradových modelů je, že výsledkem procesu modelování není jednoznačné řešení. Toto řešení je do velké míry ovlivněno zvoleným rozložením výztuže. Je třeba se chováním těchto modelů blíže zabývat a zkoumat jejich účinnost i při vyšších hladinách namáhání.

Literatura:

- [1] ČSN P ENV 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí, Část 1.1, ČNI,1994
- [2] Practical design of structural concrete, FIP (*fib*) Recommendations, 1999
- [3] Structural Concrete, Volume 2, Basis of design, *fib* Bulletin 2, 1999
- [4] Teo W., Müller G., McKeown J.J.: Optimized reinforcement patterns for short span bridges, Proc. 16th Congress of IABSE, Lucerne, 2000
- [5] Červenka V.: FIP Symposium 1999 Praha sekce 3: Modelování betonových konstrukcí, *Beton a živo*, 2000,2