

ZAVÁDĚNÍ EN 1992: „NAVYHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ“ DO PRAXE - PORUCHOVÉ OBLASTI

INTRODUCTION OF EN 1992-1-1 TO PRACTICE - DISTURBED REGIONS

SERIÁL
EN 1992

ALENA KOHOUTKOVÁ,
JITKA VAŠKOVÁ

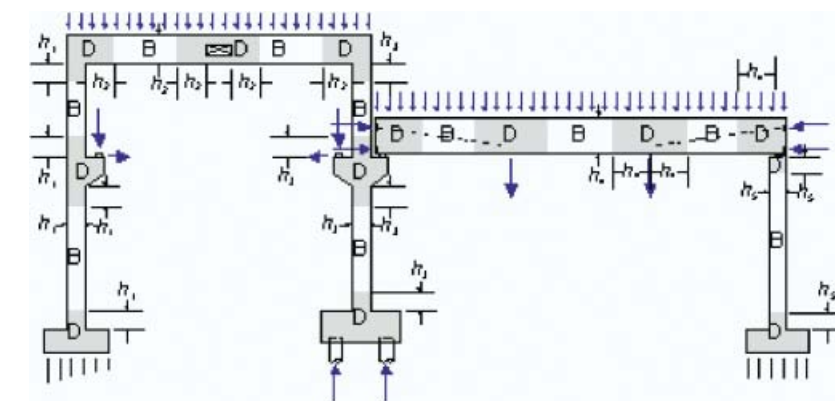
Tento příspěvek, který je pokračováním částí uveřejněných v předchozích číslech časopisu, je věnován problematice navrhování částí konstrukcí s geometrickou nebo statickou nespojitostí.

Following the introductory parts published in the previous numbers of the journal, this paper provides a brief overview of problems in design of regions with static or geometric discontinuities.

V řadě běžných případů postačí při analýze konstrukce globální výpočet, kdy je pro stanovení účinků zatížení konstrukce idealizována jako celek a na tyto účinky jsou průřezy konstrukce posouzeny. Pro určité části prvků a konstrukcí je třeba doplnit lokální výpočet. Je nezbytný všude tam, kde neplatí předpoklad lineárního rozložení poměrných přetvoření. Tyto části konstrukcí a prvků můžeme souhrnně nazvat poruchovými oblastmi. Praktický návrh poruchových oblastí jen na základě analogie s běžnými pravidly bývá nejčastější příčinou závad a poruch železobetonových konstrukcí. Patří sem např. části konstrukce:

- v blízkosti podpór
- v okolí soustředěných zatížení
- ve styčných konstrukčních prvcích, např. v rámových styčnicích
- v kotevních oblastech předpjatých prvků
- při náhlých změnách průřezu
- v blízkosti otvorů
- ve zvláštních případech.

Při zobecnění uvedených úvah pro navrhování konstrukcí je tedy vhodné rozlišovat dva typy oblastí v konstrukcích. Kon-



Obr. 1 Příklad poruchových oblastí
Fig. 1 Examples of disturbed regions

strukce je rozdělena na B – oblasti s běžným chováním, ve kterých se může při dimenzování užít standardních postupů, a na oblasti – D (discontinuity – nespojitost), kde je porušen ustálený tok průběhu vnitřních sil, tj. poruchové oblasti se statickou nebo geometrickou nespojitostí (obr. 1).

V zásadě existuje několik možností, jak poruchové oblasti řešit: oblíbené jsou přibližné a empirické vzorce, možný je rozklad sil, nejčastější a dobře propracovaná je metoda příhradové analogie. Nejpokročilejším nástrojem jsou programy pro nelineární výpočet betonových konstrukcí.

METODA PŘÍHRADOVÉ ANALOGIE

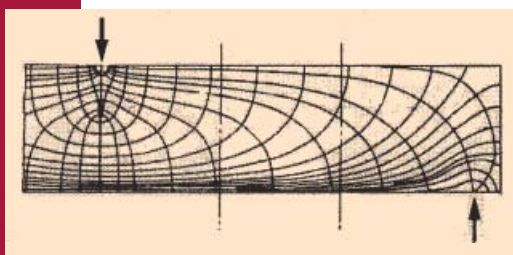
Napětí nebo vnitřní síly v konstrukci mohou být znázorněny ve formě trajektorií (obr. 2). Podobně lze znázornit tok sil v konstrukci užitím mechanické analogie mezi prouděním kapalin a silovými složkami v konstrukci. Toky sil směřující od zatíženého okraje konstrukce k podpoře jsou účinným nástrojem pro porozumění chování konstrukce. Pokud známe takové toky nebo trajektorie napětí, můžeme je kondenzovat a napřímít ve formě tlačných a tažených prvků příhradového modelu (obr. 5 až 10). Říká se jim modely strut-and-tie (modely složené ze vzpěr

a táhel), protože původní soustavy měly obvykle jen málo prvků. Příhradové modely nebo modely příhradové analogie (jak jsou též nazývány) byly úspěšně používány od konce devatenáctého století pro nosníky, později pro krátké konzoly a zvláštní případy vyztužených konstrukcí.

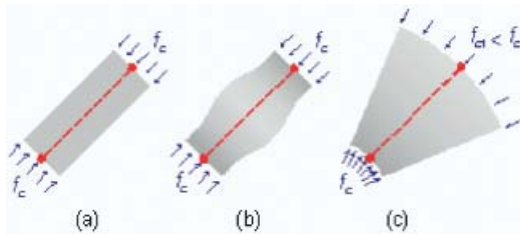
Z historického pohledu původní příhradový model (Mörsch, 1912) pro nosník namáhaný smykem předpokládal vytvoření šikmých trhlín a skládal se z tlačných šikmých vzpěr a tažených prutů výztuže. Stal se základem pro další modely, často i dodnes používané.

Příhradové modely byly propagovány a zobecněny pro praktické použití v pracích J. Schlaicha. Podobný přístup založený na polích napětí byl rozvíjen ve Skandinávii a ve Švýcarsku (např. Muttoni, Thürlimann), kde byly na základě teorie plasticity učiněny další pokusy o vysvětlení skutečné únosnosti betonových stěnových prvků.

Modelování železobetonových konstrukcí pomocí příhradových analogií má ovšem širší použití než jen v poruchových oblastech. Tradičně jsou tyto modely používány 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.



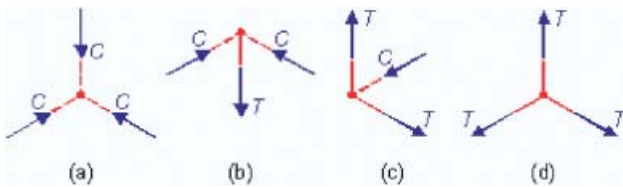
Obr. 2 Trajektorie napětí v nosníku
zatíženém osamělým břemenem
Fig. 2 Stress trajectories in a beam
loaded by a concentrated force



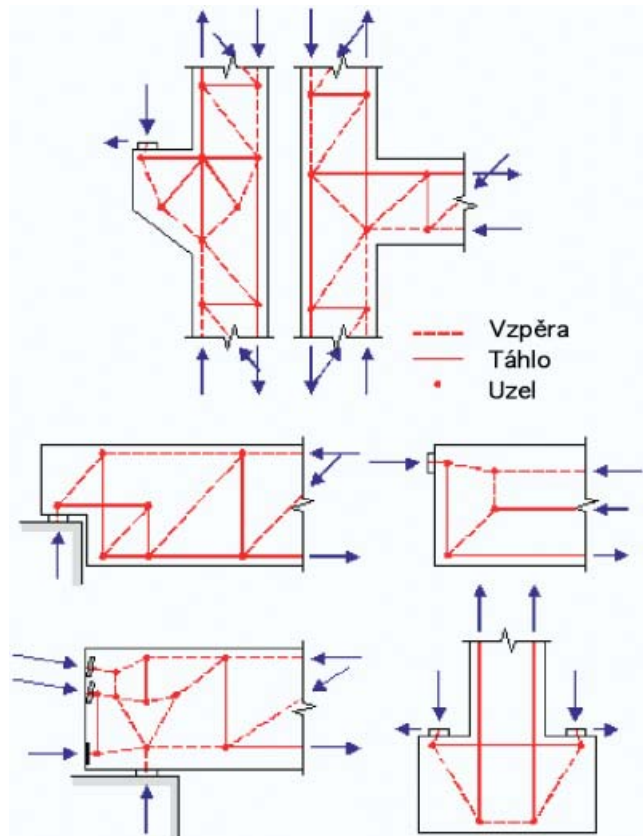
Obr. 3 Příklady tvarů vzpěr a) prizmatická, b) lahvová, c) vějířová
Fig. 3 Examples of struts a) prismatic, b) bottle-shaped, c) fan-shaped

Obr. 4 Základní typy uzlů: a) tři vzpěry, b) a c) kombinace vzpěr a táhla, d) tři táhla

Fig. 4 Basic types of nodes: a) CCC, b) CCT, c) CTT, d) TTT



Obr. 5 Příklady modelů pro různé konstrukce a detaily
Fig. 5 Examples of models for various structures and details



V oblasti výzkumu pomáhají při modelování chování konstrukcí, jejich detailů a nových materiálových vlastností při simulaci experimentů.

PRINCIPY MODELOVÁNÍ

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 probíhají. 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.

Principy metody spočívají v tom, že příhradový model tvoří **táhla** (ties), **vzpěry** (struts) a **uzly** (nodes). Táhla jsou obvykle výslednice vrstvy prutů betonářské nebo předpínací výztuže, vzpěra reprezentuje výslednici pole tlakového napětí. Pole může mít tvar paralelní (např. tlačný pas

nebo skloněné vzpěry ve stěně) nebo vějířový, příp. lahvový. Uzel je ohraničený objem betonu, kde se vzpěry buď protínají nebo jsou odkloněny táhly kotvenými v uzlech. Uzly jsou umístěny rovněž v místech, kde je odkloněna nebo stykována výztuž. Vzpěry, táhla i uzly musejí být navrženy tak, aby napětí od účinků návrhového zatížení nepřekročilo příslušná pevnostní kritéria a aby byly splněny příslušné konstrukční požadavky.

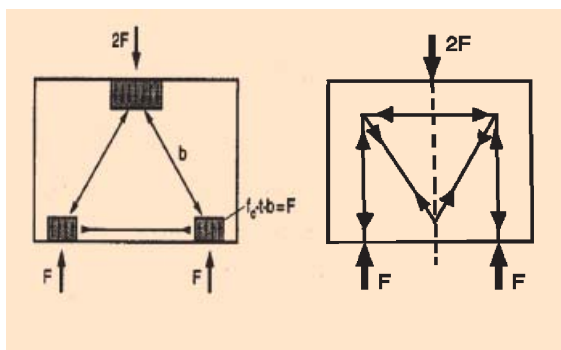
Veškeré síly v těchto prutových prvcích musejí být v rovnováze s vnějším zatížením a s reakcemi, jednotlivé prvky modelu mají být orientovány podle napětí stanovených pružným řešením. Model však může být upraven s ohledem na vznik trhlin v betonu a dosažení meze kluzu v oceli, poloha předpokládaných uzlů a táhla musí odpovídat uspořádání výztuže a zároveň musí být model v souladu s přílehlou B – oblastí.

Podle hodnot sil v tlačných prvcích je posuzováno napětí v betonu a ověřovány rozměry prvku. Síly v tažených prvcích určují množství výztuže včetně uvážení směru jejího vedení a tvaru výztužných prutů a v odpovídajícím uzlu musí být zajištěno jejich správné zakotvení. Návrh je doplněn požadavky na minimální plo-

chy výztuže případně i s ohledem na vznik a šířku trhlin.

Proces vytváření modelu se tedy skládá z pěti základních kroků. V prvním kroku jsou definovány hranice poruchové oblasti a určeny hraniční síly (mezí návrhové síly) – reakce a průřezové síly od zatížení. V druhém kroku je sestaven příhradový model a vyřešeny síly v jednotlivých prutech. Ve třetím kroku je zvolena plocha betonářské nebo předpínací výztuže odpovídající požadované únosnosti táhla a je zajištěno její řádné zakotvení v uzlech. V dalším kroku je stanovena velikost vzpěr a uzlů tak, aby jejich únosnost byla dostatečná k přenesení sil v jednotlivých prutech příhradoviny. V pátém kroku je navržena uspořádaná výztuž rozložená do několika prutů v místě každého táhla tak, aby byla zajištěna duktilita prvku.

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 dostatečná duktilita konstrukce musí být zajištěna jiným způsobem. Je jím např. pravidlo „příliš“ se neodchylovat od pružného chování konstrukce.



Obr. 6 Jednoznačnost modelu - výběr vhodnější varianty

Fig. 6 Uniqueness of a model – choice of alternatives

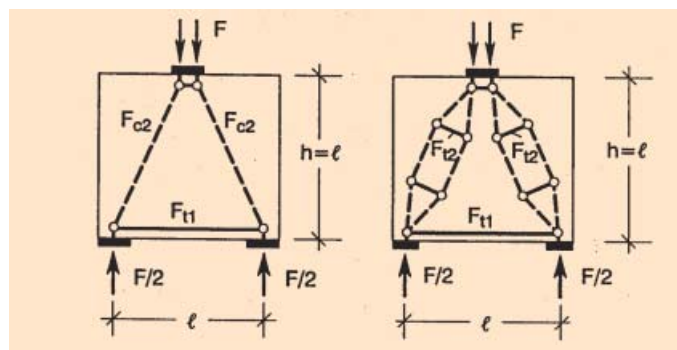
Základní pravidla pro tvorbu jednoduchých modelů tedy jsou:

- vycházet z lineárně pružného stavu – modelové tlačené pruty orientovat pokud možno ve směru hlavních tlakových napětí,
- výztuž umístit podle skutečného způsobu vyztužení – raději přímé pruty,
- úhly, které svírají tlačené a tažené pruty v jednom uzlu 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
- raději převzít a přizpůsobit osvědčený model nové situaci než experimentovat.

Obr. 6 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. U složitějších konstrukcích je možno počítat s tvorbou staticky neurčitých modelů, kde se objevují otázky spojené s jejich optimalizací.

Obr. 8 Stěnový nosník, a) vhodný model, b) nevhodný model

Fig. 8 Deep beam, a) correct model, b) incorrect model



Obr. 7 Zpřesňování modelu

Fig. 7 Refinement of a model

Modelů pro konkrétní případ může být celá řada, ale jen některé jsou vhodné. Podrobnější zhodnocení a pokyny je možno najít v [3]. Modely závisí na řadě dalších parametrů, např. na místě působení zatížení. Obr. 7 ukazuje zpřesnění jednoduchého modelu tak, aby podrobnější model dokázal popsat příčné tahy ve vzpěrách. Na obrázcích F_c nebo C označují síly v tlačných prvcích neboli vzpěrách, F_s nebo T síly v tažených prvcích neboli táhlech. Při volbě je třeba zkušeností a je doporučováno užít raději ověřený model z literatury a příliš neexperimentovat, a tím se vyvarovat zásadních chyb.

Při srovnání platných modelů na obr. 8 je možno označit za nevhodný model b), který neodpovídá pravidlu volit modely s co nejkratšími táhly.

Vliv polohy zatížení na model, a tím i na vyztužení, ukazuje obr. 9 pro prvky zatížené soustředěným zatížením v blízkosti podpory nebo nad ní, např. osamělé břemeno umístěné v blízkosti rohu nosníku. Síly v táhlech T_3 znázorňují příčné tahy se štěpným účinkem na prvek. Platí obecně: tam, kde jsou umístěna táhla v modelu, je třeba navrhnout výztuž podle předepsaných zásad. Ale i naopak: předpokládáme-li příčné tahy v konstrukci a víme, že podle konstrukčních pokynů určité uspořádání výztuže v konstrukci bude vyžadováno, je třeba umístit v uvažovaném místě modelu táhla.

Obr. 10 ukazuje úzkou souvislost příhradových modelů s konstrukčními zásada-

mi pro vedení výztuže. V příkladu je znázorněna doporučená velikost oblasti, v níž je rozmístěna výztuž odpovídající poloze jediného vodorovného táhla F_t modelujícího příčné tahy v konstrukci.

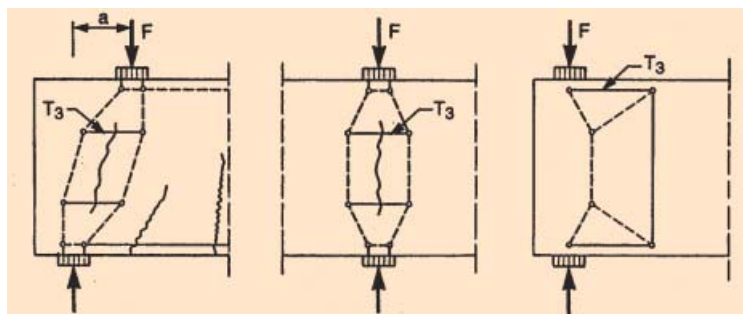
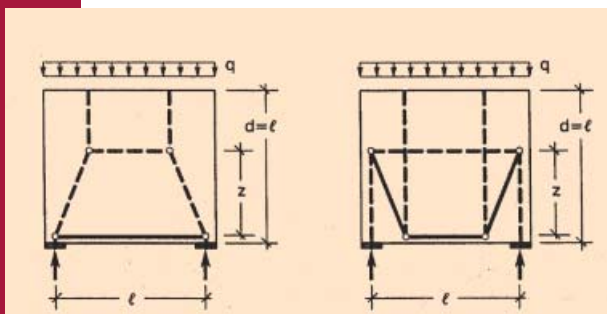
PŘÍHRADOVÉ MODEL Y V NORMOVÝCH PŘEDPÍSECH A DOPORUČENÍCH

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.

Předběžná evropská norma [2] připouští, že některé prvky se smějí idealizovat staticky určitými příhradovými vytvořenými z přímých tlačných prutů (přenášejících tlakové síly v betonu) a z tažených prutů (výztuž). Poměrně velkou roli hrály konstrukční požadavky (např. kotvení veškeré výztuže), jejichž dodržováním měl být zajištěn např. přenos sil vyvolávajících soustředěné zatížení ve styčných modelech. Při posouzení tlačných prutů modelu byla porovnávána průměrná hodnota napětí betonu se sníženou (obvykle sedesátiprocentní) návrhovou pevností beto-

Obr. 9 Modely pro vodorovné vyztužení u soustředěného zatížení nad podporou

Fig. 9 Models for horizontal reinforcement for loads over support



nu v tlaku. Norma doporučovala přihlednout ke snížení pevnosti vlivem příčných tahů, trhlin nebo smykových sil, ale blíže je neurčovala. Napětí v tažených prutech byla omezena návrhovou hodnotou meze kluzu výztuže. Příhradové modely byly doporučeny pro řešení krátkých konzol, stěnových nosníků, stěn a poruchových oblastí namáhaných soustředěnými břemeny, např. pro kotevní oblasti dodatečně předpjatých prvků. Sestavený model byl předveden pouze pro krátkou konzolu, u ostatních případů byla uvedena doporučení pro konstrukční uspořádání výztuže. Shrneme-li, informace v této normě byly stručné a velice obecné.

Naopak v doporučeních *fib* a v konečné verzi normy EN je věnován příhradovým modelům velký prostor. V pomůcce pro praktický návrh [3] 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 bulletinu *fib* [4] jsou uvedeny propracované modely pro různé poruchové oblasti včetně důsledků ve vyztužení. Jsou zde zpracovány i číselné příklady návrhu.

Příhradový model představuje také základ pro jednotnou koncepci v navrhování železobetonových konstrukcí. Nejen pro oblasti nespojitosti ale i pro běžné oblasti konstrukce dobře funguje představa příhradového modelu. Důležitým důsledkem je možnost v libovolném místě (např. v tlačeném pásu nosníku) stanovit sílu od kombinace namáhání ohybem, smykem a normálovou silou a zároveň průřez navrhnout i posoudit. Uzel se může vložit v místě konstrukce, kde výztuž mění směr nebo je stykována. Vysvětlení a zavedení rozhodujících detailů jako je uspořádání sil v místě uzlů, přenášení sil třením ve spoji nebo styku nebo přenášení sil přes trhlinu zároveň ukazuje jejich vliv na únosnost prvků modelu (je tedy předpokládán i vznik trhlin). Konkrétní požadavky na tvary, přesahy a kotevní délky výztužných prutů vyplývající z tohoto uspořádání, dávají úplnou a jasnou před-

Obr. 11 Posouzení uzlů: a) tlakový uzel, b) uzel s táhlem ve 2 směrech a vzpěrou

Obr. 11 Posouzení uzlů: a) tlakový uzel, b) uzel s táhlem ve 2 směrech a vzpěrou

Obr. 10 Rozmístění výztuže pro příčný tah
Fig. 10 Corresponding reinforcement for splitting tension

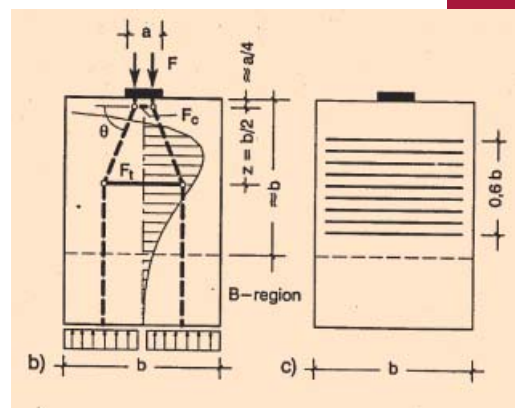
stavu o vlastnostech prvků, a tím i o chování modelu. Jednotné pojetí představuje nový kvalitativní krok v přechodu od posuzování jednotlivých průřezů k posuzování celkového chování konstrukce.

Pro navrhování poruchových oblastí je v konečné verzi EN [1] přímo doporučeno použití analogických příhradových modelů. Zásady metody jsou obecně pojednány v kapitole o analýze konstrukcí. V samostatném oddílu je zde poprvé věnována pozornost návrhu vzpěr, táhel a uzlů, tj. částem modelů strut-and-tie. Vzpěry, táhla i uzly musejí být navrženy tak, aby napětí od účinků návrhového zatížení nepřekročilo příslušná pevnostní kritéria a aby byly splněny příslušné konstrukční požadavky.

Únosnost **vzpěry** je odvozována z hodnoty jednoosé pevnosti v tlaku f_{cd} , která je počítána plnou hodnotou v případě, kdy v příčném směru není napětí nebo v případě dvojosé napjatosti, je-li příčné napětí tlakem. V případě víceosého tlaku je dovoleno hodnotu pevnosti zvýšit. Naopak hodnota návrhové pevnosti vzpěry je snižována, je-li v příčném směru tah a vznikají trhliny. Přesnější výpočty únosnosti vzpěr jsou uvedeny pro krátké konzoly a stěnové nosníky.

Pro únosnost **táhla** platí obecně pravidla o množství a uspořádání tahové výztuže. Explicitně jsou uvedeny vztahy pro táhla umístěná v tlakových polích.

Pro návrh a posouzení **uzlů** je uvedeno několik příkladů základních typů uspořádání uzlů (tlakový, různé kombinace táhel se vzpěrami). Musí být splněna rovnováha sil v uzlu a výztuž táhel řádně v uzlu zakotvena. V uzlu je opět nutno prokázat, že návrhová pevnost betonu v uzlu $\sigma_{Rd,max}$ nepřestoupí stanovenou hodnotu, která

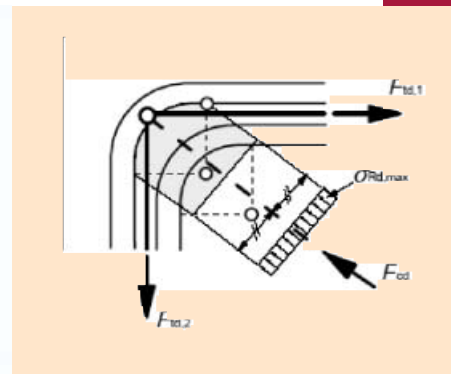
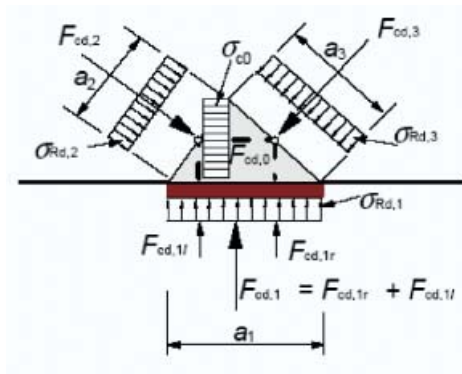


je odvozena z hodnoty jednoosé pevnosti v tlaku f_{cd} a její hodnota snížena nebo zvýšena podle uspořádání uzlu. Pravidla pro uzly je v tomto smyslu možno použít pro libovolné místo v konstrukci, kde jsou přenášeny velké koncentrované síly jako jsou reakce, osamělá břemena, v kotevních oblastech předpjatých prvků, ve styčích nebo místech, kde výztuž mění směr, i když k návrhu nebyla použita metoda příhradová analogie. V normě jsou dále uvedeny příklady vhodných příhradových modelů pro řešení poruchových oblastí typu rámových rohů a krátkých konzol.

ZÁVĚR

Navrhování poruchových oblastí pomocí analogických příhradových modelů má řadu výhod včetně možnosti ověřování experimentů. Metoda výpočtu je jednoduchá, názorná, získání výsledků není pracné a řešení je snadno ověřitelné. Obecně však platí, že v netypických případech je nutno zvažovat, zda je zjednodušení bezpečné a ve spomém případě raději dát přednost nelineární metodě konečných prvků.

Navrhování poruchových oblastí pomocí analogických příhradových modelů je zcela v souladu se současnými trendy navrhování podle evropských norem.



Literatura:

- [1] pr EN 1992-1-1 Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings, CEN, Final draft 12/2003
- [2] ČSN P ENV 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí, Část 1.1, ČNI, 1994
- [3] Practical design of structural concrete, FIP (*fib*) Recommendations, 1999
- [4] Structural Concrete, Volume 1, 2, 3, Basis of design, *fib* Bulletin 1, 2, 3, 1999

*Tento příspěvek byl vypracován
za podpory VZ MSM 210000001.*

Doc. Ing. Alena Kohoutková, CSc.
tel.: 224 353 740
e-mail: akohout@fsv.cvut.cz

Ing. Jitka Vašková, CSc.
tel.: 224 354 636
e-mail: jitka.vaskova@fsv.cvut.cz

*obě: ČVUT Stavební fakulta
Katedra betonových konstrukcí a mostů
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
fax: 233 335 797*