

Příspěvky v sekci podávají přehled o stavu výpočtových modelů betonových konstrukcí. Pozornost je věnována široké oblasti modelování zahrnující obecné chování konstrukcí, vlivy prostředí a nové technologie. Úvodní přednáška se zabývá přehledem modelů a trendem jejich vývoje od jednoduchých modelů založených pouze na rovnováze až po náročné nelineární modely MKP.

Papers in this section reflect the state of the art in the field of modelling of concrete structures. A broad range of effects include general structural behavior, environmental effects and new technologies. The keynote lecture presented an overview of models and review of development trends from simple to complex nonlinear FE-based models.

Současný stav

Sekce o modelování betonových konstrukcí, fib SYMPOSIUM (1999) [1] byla zaměřena na novinky ve výpočtových modelech a obsahovala širokou oblast, což svědčí o aktuálnosti této problematiky. V této sekci bylo celkem předneseno 39 příspěvků. Z nich si lze udělat představu o tom, co je předmětem největšího zájmu v oblasti modelování. Témata jsou shrnuta v tab. 1 a rámcově vyhodnocena. Modelování konstrukcí s ohledem na jejich mechanické chování byla věnována 12 příspěvků, 17 příspěvků ze zabývalo vlivy prostředí a stavy použitelnosti konstrukcí. Novým technologiím bylo věnováno 11 příspěvků.

Tab. 1 – Přehled příspěvků v Sekci 3 Modelování betonových konstrukcí / Papers in Section 3: Modelling of concrete Structures

Oblast	Téma	Počet	Autor
Konstrukce	Numerické modely, MKP, simulace skutečného chování	7	Červenka, Yoshioka, Fanning, Gjørven, Keogh, Köppel, Giannatasio
	Plasticita, plastické klouby	3	Denton, Gatsc, Dancygier
	Stochastické metody	2	Boer, Kinash
Vlivy prostředí	Dotvarování, smršťování	7	Sato, Gwozdziwicz, Křístek, Navrátil, Štěpánek, Chiorino, Takacs
	Teplota a prostředí	3	Fouad, Fouad, Tanaka
	Trvanlivost, použitelnost, únava	5	Edwardsen, Figueiras, Favre, Laurencet, Rudolf
	Seismické vlivy	2	Yamada, Kawaguchi
Nové technologie	Externí výztuž	4	Badoux, Hang, Taerve, Hegger
	FRP, nekovová výztuž	4	Aiello, Kitoh, Taerve, Mathys
	Vysokopevnostní beton	3	Mesureur, Papanicolau, Esfahani

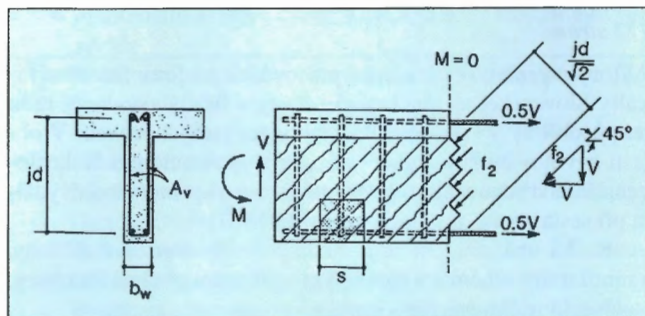
Z tab. 1 je zřejmé, že největší pozornost byla věnována modelování vlivů prostředí a obecným modelům konstrukcí. Jejich společným problémem jsou požadavky na co největší výstižnost skutečného chování železobetonových konstrukcí na jedné stra-

ně, a jednoduchost, průhlednost a použitelnost na straně druhé. Vzhledem k rozsáhlosti a obsahové zajímavosti většiny příspěvků se zde nepokoušíme o popis obsahu jednotlivých příspěvků, neboť by to značně překročilo rozsah tohoto článku. Zájemcům o podrobnější informace doporučujeme nahlédnout do sborníku.

Trendu ve vývoji modelů byla věnována úvodní přednáška prezentovaná na sympoziu autorem tohoto článku, spoluautorem byl Michael Braestrup z dánské firmy Rambol. Obecná část této přednášky je ve stručnosti shrnuta v druhé části tohoto příspěvku. Část zabývající se moderními numerickými metodami zaměřenými na simulaci skutečného chování bude předmětem samostatného článku v některém z příštích vydání časopisu Beton a zdivo.

Původní příhradový model

Vývoj výpočtových modelů úzce sledoval vývoj technologie betonových konstrukcí. Téměř přesně před sto lety byly uveřejněny první Hennebiqueovi patenty pro betonové stavby. Následovaly články Ritter (1899) [2], Mörsch (1912) [3] s prvními modely pro výpočet únosnosti železobetonových trámů. Z celé řady známých stavů namáhání se budeme zabývat pouze smykovým způsobem namáhání, které, na rozdíl od namáhání normální silou a momentem, vždy skrývá řadu úskalí. Původní model (obr. 1), byl založen na příhradové analogii a je základem mnohých dnešních modelů.



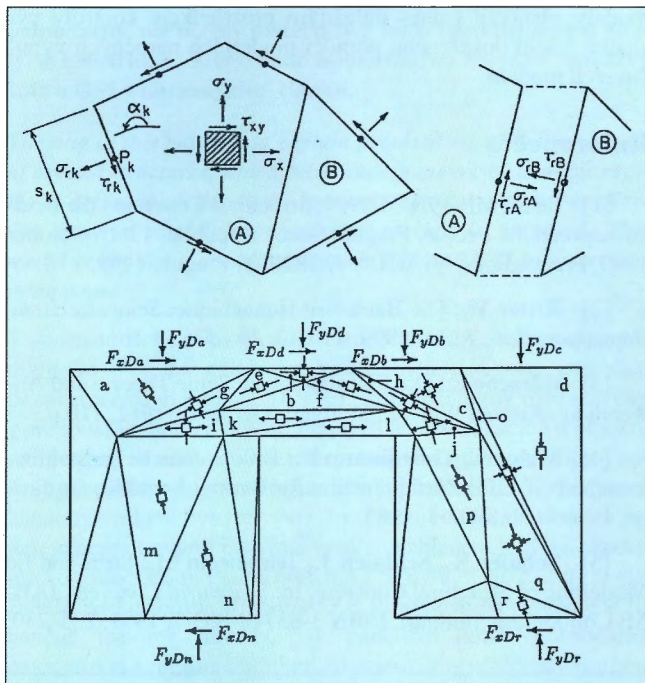
Obr. 1 – Model smykové únosnosti nosníku, Mörsch (1912) / Model of shear strength of beam, Mörsch (1912)

Základní mechanismus působení železobetonových konstrukcí byl tedy rozeznán již při jejich uvedení do praktického použití. Předpokládal vytvoření šikmých trhlín a spočíval v soustavě tažených výztužných prutů a tlacených šikmých vláken betonu. V průběhu let však byly postupně zjišťovány nedostatky tohoto jednoduchého modelu, například pevný sklon šikmých

trhlin pod úhlem 45° , existence tahových a smykových napětí v trhlinách a další. To vedlo ke zpřesňování modelů, ale i komplikacím, jak bude ukázáno dále.

Modely založené na teorii plasticity

Teorie plasticity v této formě pracuje pouze se silami a jejich rovnováhou. Deformace a jejich kinematická kompatibilita se neberou v úvahu. Toto zjednodušení zaručuje nalezení dolní meze únosnosti a nabízí velmi úsporné řešení. Příkladem jsou rozsáhlé práce, které vedl v Dánsku Nielsen nebo ve Švýcarsku Thürliman (1985) [4], viz obr. 2.



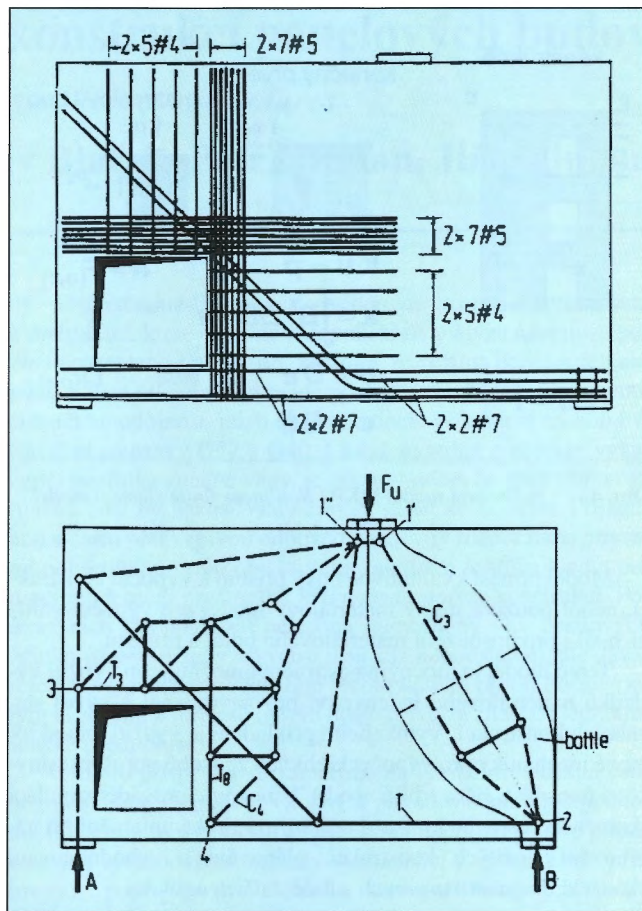
Obr. 2 – Pole napětí v modelu stěny z práce Maier, Thürliman (1985) / Stress field in a wall, work by Maier, Thürliman (1985)

Tyto modely byly úspěšně aplikovány na prutové, deskové i stěnové konstrukce. Jejich zřejmou nevýhodou je, že neuvažují deformace. Nelze s nimi tedy modelovat přetvoření konstrukce ve stavu použitelnosti a plastické deformace ve stavu mezní únosnosti. Z tohoto důvodu se model založený na mezní rovnováze hodí pouze jako model pro řešení dílčích problémů a nikoliv jako komplexní model.

Moderní příhradový model

Původní příhradový model byl v posledním období znovu rozvíjen pod názvem „Strut-and-tie“ v souvislosti s řešením tak zvaných oblastí „D“ (diskontinuity). Důvodem byla též možnost využití existujících prutových programů. V tomto modelu se spojitě těleso nahradí soustavou tlacených prutů (představujících beton) a tažených prutů (výztuž). Jako základ pro vytvoření modelu může sloužit pružné řešení kontinua metodou konečných prvků. Z nich se pomocí izoploch hlavních napětí může stanovit soustava náhradních prutů. Velkým průkopníkem tohoto modelu byl Schlaich (1991) [5] ve Stuttgartu, Německo, obr. 3.

Na rozdíl od původních jednoduchých příhradových modelů je model „Strut-and-tie“ mnohem obecnější. Sklon prutů není omezen, a při využití prutových programů umožňuje i výpočet deformací. Při praktickém použití má však řadu nedostatků, jejichž příčinou je problém náhrady kontinua prutovou kon-



Obr. 3 – „Strut-and-tie“ model stěny, Schlaich (1991) / Strut-and-tie model of a wall, Schlaich (1991)

strukcí. Jedná se zde o problém diskretizace kontinua, neboli redukce spojité úlohy na úlohu diskrétní s konečným počtem neznámých (například posuvů). Ukazuje se, že je teoreticky lépe zdůvodněné a prakticky lépe řešitelné tuto diskretizaci provádět metodou konečných prvků. Proto se před příhradovou náhradou dává přednost nelineární metodě konečných prvků již je věnována další část.

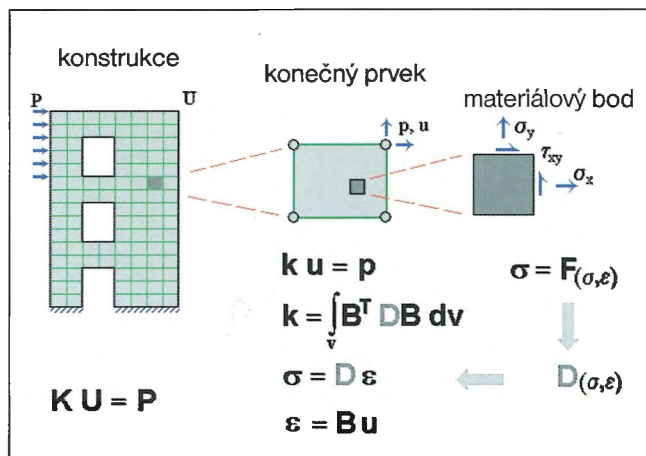
Nelineární MKP

Výpočetní model založený na nelineární metodě konečných prvků je zatím nejobecnější a teoreticky nejlépe podložený model, je však výpočetně nejnáročnější. Vzhledem k rychlému pokroku ve výpočetní technice, jehož výsledkem je neustále rychleji rostoucí výkon a klesající cena, roste i využití těchto metod v praxi.

Model MKP splňuje všechny tři základní podmínky mechaniky konstrukcí: rovnováhu vnitřních sil, kompatibilitu deformací a materiálové konstitutivní vztahy. Tyto podmínky však splňuje pouze přibližně. Přitom důležitým momentem je, že stupeň aproximace a chybu řešení lze ovlivnit a kontrolovat. Tato metoda proto umožňuje stavět modely s vyváženou aproximací na všech úrovních. Tyto úrovně jsou schematicky znázorněny na obr. 4.

Model má tři úrovně:

- (1) Konstrukce složená z konečných prvků, popsána maticí tuhostí a rovnicí rovnováhy.
- (2) Konečný prvek, definující přibližně deformaci a napjatost pomocí básových funkcí.
- (3) Materiálový bod a konstitutivní vztah pro jeho chování.



Obr. 4 – Nelineární model MKP / Nonlinear finite element model

Model přináší kvalitativně nový přístup k výpočtu konstrukcí, neboť používá stejný materiálový model pro výpočet vnitřních sil i pro posouzení materiálového bodu a průřezu.

Tento model je mocným nástrojem umožňujícím využití výsledků materiálového inženýrství pro navrhování a vývoj stavebních konstrukcí. Vynikajícím příkladem je využití metod lomové mechaniky pro výpočet křehkých způsobů porušení (smyková únosnost, šířka trhlin apod.). Umožňuje provádět simulaci skutečného chování konstrukce, což má široké uplatnění při navrhování složitých konstrukcí, plánování a vyhodnocování zkoušek, diagnostiku poruch a řadě dalších aplikací.

Srovnání modelů

Srovnání některých modelů uvedených v tomto pojednání z hlediska podmínek mechaniky stavebních konstrukcí je ukázáno v tab. 2. Z přehledu je patrný trend vývoje směřující od jednoduchých modelů vycházejících pouze z podmínky rovnováhy

Tab. 2 – Přehled modelů / Survey of models

Model	Podmínka rovnováhy sil	Podmínka kompatibility deformací	Konstitutivní vztahy
Příhradová analogie 45°	ANO	-	-
Plasticita	ANO	-	-
Příhradová analogie "Strut-and-tie"	ANO	částečně	částečně
Nelineární MKP	ANO	ANO	ANO

k modelům velmi výstižným, avšak též složitým. Jednoduché modely zůstávají i dnes důležitým prostředkem kontroly výsledků řešení dosaženého pomocí moderních náročných výpočtových modelů.

Reference:

- [1] fib SYMPOSIUM 1999, Structural Concrete - the Bridge between the People, Prague, Czech Republic, 12-15 October 1999, Proceedings, VIACON AGENCY, Prague, 1999.
- [2] Ritter W.: Die Bauweise Hennebique. *Schweizerische Bauzeitung* 5, 6, 7 (33) 1899, 41 - 43, 49 - 52, 59 - 61.
- [3] Mörsche E.: Die Eisenbetonbau. Seine Theorie und Anwendung. Konrad Wittwer, Stuttgart, Germany, 1912, 710 p.
- [4] Maier J., Thürlimann B.: Bruchversuche an Stahlbetonscheiben. ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Bericht Nr.8003-1, 1985.
- [5] Schäfer K., Schlaich J., Jennewein M.: Strut-and-tie Modelling of Structural Concrete. In: *Structural Concrete*, IABSE Colloquium Stuttgart, ISBN 3-85748-063-7, 1991, 235-240.

Dr. Vladimír Červenka, Červenka Consulting, Předvoje 22, 162 00 Praha 6

O dobrých vlastnostech vyztuženého betonu (4)

Praha 1909 – Velecennou vlastností staveb z vyztuženého betonu jest jejich bezpečnost vůči ohni, jež byla v neposlední řadě příčinou jejich rozmachu. Jest totiž známo, že železo vůči ohni dokonalé jistoty neskýtá, ba že sluší v této příčině dřevu někdy dáti přednost. Stoupen-li totiž teplota tak, že se železo ohřeje do červena (600-700 °C), měkne a ztrácí úplně velikou svou pevnost (obr. 1). Vad těchto armo-



Obr. 1 – Železná konstrukce po požáru / Steel structure after a fire

vaný beton v takové míře nemá; beton sám jest značně ohnivzdorný, a jsa špatným vodičem, chrání železo od přílišného ohřátí a tedy ztráty pevnosti. Z popudů soukromých i veřejných bylo podniknuto množství zkoušek, při nichž se armo vaný beton vždy znamenitě osvědčil právě tak, jako i za ohromných požárů, při nichž podlehly i sousední stavby železné, kdežto betonové zůstaly ušetřeny.... (Z knihy Vyztužený beton – jeho upotřebení a výpočty hlavně k účelům pozemního stavitelství, napsali F. Klokner a J. Fidler, vydali vlastním nákladem v Praze 1909).

Petr Hájek