

- *Faserbeton*. Vorträge 1.12.1992 in Duisburg (Sborník vláknobetonu);
- *Flughafenbau*. Vorträge 28.11.1991 in München (Sborník Stavba letišť);
- SIVV-Lehrgangs-Handbuch. *Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen*. März 1991 (Učební kurspříručka Ochrana, oprava, spojování a zesilování betonových prvků);
- DBV Mitglieder 1992 (Členové DBV);
- DBV Jahresbericht 1992 (Výroční zpráva DBV).

DBV nás nedávno informoval o připravovaném pozvání zástupců ČBS na pravidelné setkání představitelů evropských betonářských společností, které se má uskutečnit na jaře v Londýně. Při příležitosti tohoto setkání hodláme navázat oficiální kontakt se zástupci sesterských společností, zajistit pravidelnou vzájemnou výměnu informací o odborných aktivitách, výměnu publikací a pozvánek na odborné akce.

Je zřejmé, že důstojná role ČBS v oblasti mezinárodních vztahů je podmíněna odpovědným přístupem k široké škále aktivit, demonstrováných na příkladu DBV. Profesionální management podle obr. 1 je pochopitelně podmíněn pravidelnou finanční podporou neziskové organizace, kterou např. DBV zajišťuje formou smluv s řádnými členy DBV a jejíž výše se odvozuje z jejich zisku a obrátu. Tento žádoucí cíl je nesporně dlouhodobý a v ČR nemá doposud ani pevnou legislativní oporu. Odklad řešení však nemůže ČBS přinést nic pozitivního a bude proto hlavním námětem všech jednání výkonného a rozšířeného výboru ČBS v r. 1994. Uvedené informace o výsledcích činnosti DBV mají za cíl přesvědčit naše potenciální sponzory o smyslu a prospěšnosti obdobných záměrů ČBS a připravit tak půdu pro úspěšná smluvní jednání.

Prof. Ing. Jiří Bradáč, CSc.

ÚBZK FAST VUT Brno, Údolní 53, 662 42 Brno

Vliv velikosti na únosnost betonových konstrukcí

Vladimír Červenka, Radomír Pukl, Jana Margoldová

Souhrn

V příspěvku jsou ukázány výpočty vlivu velikosti na únosnost betonových a železobetonových konstrukcí dosažené pomocí počítačové simulace programem SBETA. Použitý materiálový model je založen na isotropním poškození betonu v tlaku bez trhlin a na orto-tropním poškození betonu po vzniku trhlin. Využívá lomovou houževnatost betonu pomocí nelineární lomové mechaniky a umožňuje zohlednit vliv velikosti konstrukce na její únosnost. V příspěvku jsou uvedeny příklady porušení nosníků z prostého betonu a z vláknobetonu tahem za ohybu a příklady porušení stěnových nosníků smykem.



V. Červenka



R. Pukl



J. Margoldová

je, že řeší problém vzniku diskontinua (nespojivosti) konstrukce pomocí standardní metody konečných prvků. V modelu *crack band* je diskrétní trhlina modelována pomocí svazku trhlin s nekonečně malou vzdáleností. Bezprostředně po vzniku mohou trhliny uvnitř *crack band* přenášet napětí, které klesá s narůstajícím rozvíráním trhliny. Tato vlastnost, nazývaná *tension softening* a projevující se negativní tuhostí materiálu, umožňuje lokalizaci přetvoření a vznik makrotrhliny.

Autoři příspěvku vyvinuli pro výpočetní program SBETA konstitutivní model, založený na výše zmíněném *smeared crack* modelu. Na simulaci zkoušek kotevních prvků, již dříve publikovaných, ukázali, Červenka a kol.[4], Pukl a kol.[9], že tento přístup umožňuje vyjádřit a popsat vliv velikosti na únosnost betonových konstrukcí. Zkušenosti s komerčním využitím programového systému SBETA ukazují, že tento materiálový model umožňuje dostatečně přesně předpovědět většinu způsobů porušení betonových a železobetonových konstrukcí (při rovinném stavu napětí a monotonním statickém zatížení).

Výsledky a zkušenosti popsané v tomto příspěvku byly poprvé uveřejněny na konferenci v Sendai (Japonsko), viz Červenka, V., Pukl, R., [6].

1 Úvod

Chování betonu neodpovídá plně chování dokonale křehkého materiálu a pro popis procesu porušení betonu tahem nestačí pouze tahová pevnost. Přední světoví odborníci se shodují na tom, že objektivnější metodou se jeví lomová mechanika, jejímž kritériem porušení je energie potřebná pro šíření trhliny. Vzhledem k určité houževnatosti betonu nestačí však model lineární, ale je nutno použít nelineární lomovou mechaniku. Na základě těchto nových teoretických poznatků lze vysvětlit i experimentálně pozorovaný vliv velikosti konstrukce na její únosnost. Tato problematika je v poslední době předmětem zájmu mezinárodního výzkumu, viz Bažant [2], van Mier [8], a pod.

Úvodem ještě poznámku k terminologii použité v tomto článku. Vzhledem k tomu, že tato terminologie není v češtině ustálena používají autoři v mnoha případech termíny anglické.

Během procesu tahového porušení je doposud spojitý materiál, uvažovaný jako kontinuum, postupně rozdělován širšími se trhlínami na jednotlivé oddělené části. Řešení tohoto problému nespojitosti bylo věnováno mnoho úsilí a byly pro něj vyvinuty různé modely trhlin, viz *smeared crack model*, Rots [10], nebo *crack band model*, Bažant, Oh [1]. Výhodou těchto metod

2 Materiálový model SBETA

Protože úplný a podrobný popis materiálového modelu užitého v programu SBETA by přesáhl rozsah příspěvku a zvědavý čtenář si jej může vyhledat v publikované literatuře, např. Červenka a Pukl [5], Červenka a kol. [3], jsou zde uvedeny pouze základní rysy modelu a širší pozornost je věnována tahovému porušení, které je rozhodující pro uvedené příklady.

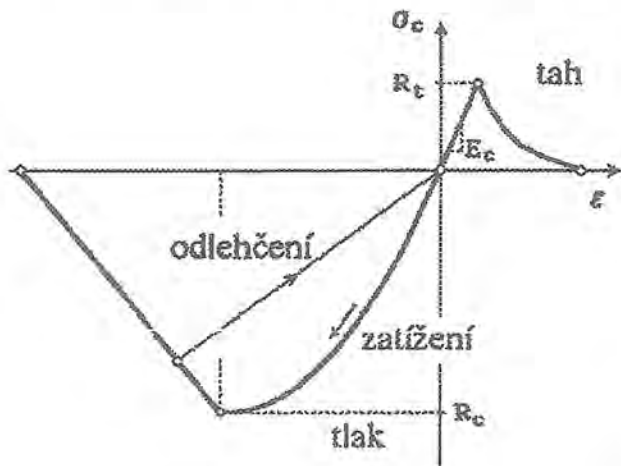
Konstitutivní model programu SBETA je založen na *smeared crack* modelu, v kombinaci s funkcemi poškození a porušení. Vzestupná větev pracovního diagramu betonu je v tlačené oblasti popsána nelineárním vztahem napětí a deformace (parabola druhého stupně) a v tažené oblasti lineární závislostí. Na setupné větvi se v tlačené oblasti předpokládá lineární isotropní *softening*. Ztráta tuhosti v tlaku, *compression softening*, je vztažena k celkovému plastickému posunutí, což činí tlakové porušení nezávislé na velikosti konečného prvku. Odtižení je uvažováno lineární do počátku.

Vrcholy vztahu napětí - přetvoření (tlaková a tahová pevnost) závisí na dvojosém stavu napětí, pro který je užito Kupferova kritéria porušení s redukcí tahové pevnosti v oblasti tah-tlak.

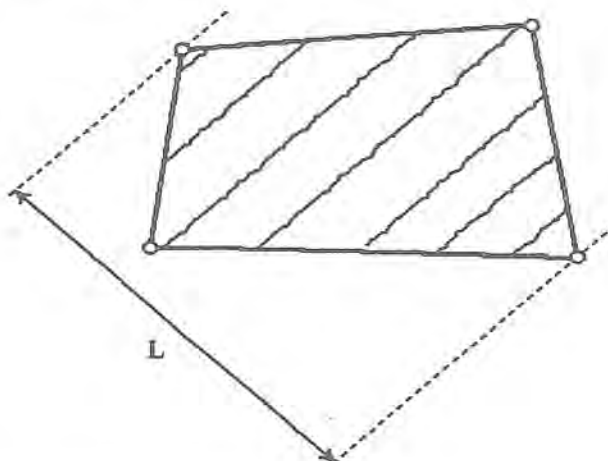
Dosažení hodnoty tahové pevnosti hlavním tahovým napětím inicializuje vznik trhlin. Trhliny se začínají rozevírat ve směru kolmém na toto napětí. Pro výpočet je možno užít model fixovaných nebo rotovaných trhlin. Vznikem trhlin se isotropní materiál mění na ortotropní. Pro každou materiálovou osu platí nelineární vztah vyjádřený graficky na obr. 1. Chování trhliny je popsáno vztahem odvozeným experimentálně autory Hordijk a Reinhardt [7], kteří definují nelineární *softening* vztahem (1).

$$\sigma_c/R_t = \{1+(c_1 \cdot w/w_c)^3\} \exp(-c_2 \cdot w/w_c) - w/w_c \cdot (1+c_1^3) \exp(-c_2) \quad (1)$$

kde $c_1=3$, $c_2=6,93$ a $w_c=5,14 G_f/R_t$. G_f je lomová energie, R_t je vrchol pracovního diagramu, σ_c je normální tahové napětí v trhlíně



Obr. 1 - Ekvivalentní zákon napětí-přetvoření



Obr. 2 - Šířka pásu trhlin L

a w je rozevření diskretní trhliny. Poznamenejme, že R_t lze uvažovat jako tahovou pevnost pouze v případě přímé tahové zkoušky. Poměrné přetvoření e betonu s trhlínami je složeno z pružného přetvoření e (bloky betonu mezi trhlínami) a z přetvoření trhliny e_{cr} (způsobené rozevřením trhliny):

$$e = e_e + e_{cr} = \sigma_c/E_c + w/L \quad (2)$$

kde E_c je modul pružnosti betonu a L je šířka *crack band* (pásu trhlin), která je odvozena ze skutečného směru trhliny a orientace prvku jako kolmý průmět nejdelšího rozměru prvku ke směru trhlin, obr. 2. Rovnice [2] definuje vztah mezi diskretní trhlínou (experimentem) a teoretickým modelem (*crack band*). Materiálový model SBETA zahrnuje další důležité vlastnosti betonu s trhlínami, jako jsou redukce tlakové pevnosti ve směru rovnoběžném s trhlínami a redukce smykové tuhosti. Tyto a další funkce modelu jsou popsány v lit. Červenka, Pukl [5].

Použitý konečný prvek je čtyřúhelník složený ze dvou čtyřuzlových trojúhelníkových prvků. Integrace tuhostí prvků je dána explicitně. Materiál se předpokládá po prvku konstantní a homogenní. Výztuž je možno modelovat dvěma způsoby, buď jako jednotlivé výztužné pruty nebo jako rozptýlenou výztuž (výztužné síť). Pro nelineární numerické řešení lze užít dvě různé techniky, Newton-Raphsonovu iterační metodu nebo metodu *Arc-Length*. Metoda *Arc-Length* umožňuje řešit i pokritické chování konstrukce po dosažení její únosnosti, tj. sestupnou větev diagramu zatížení-průhyb.

Grafická animace procesu porušení během řešení (v reálném čase) doplňuje široké možnosti účinných pre- a post-processorů. Výpočet lze interaktivně řídit nebo přerušit s možností pozdějšího pokračování.

Program SBETA využívá nejnovějších výzkumných poznatků předních světových laboratoří a universit, zejména Stuttgartské university, a mezinárodních organizací CEB, IABSE, RILEM a ACI.

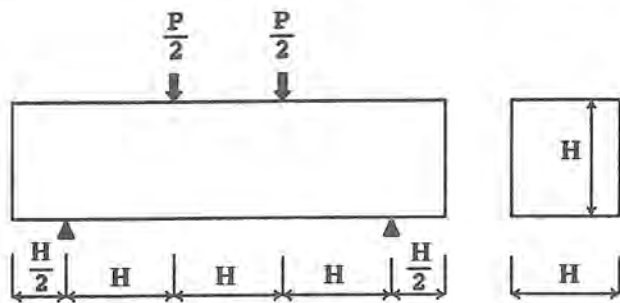
3 Pevnost betonových nosníků v tahu za ohybu

Numerická simulace porušení tahem za ohybu byla provedena pro osm velikostí betonových nosníků $H=0,025\text{m}$, $0,05\text{m}$, $0,1\text{m}$, $0,2\text{m}$, $0,4\text{m}$, $0,8\text{m}$, $1,6\text{m}$, $3,2\text{m}$ a pro dva typy materiálu, normální beton a drátkobeton. Geometrie nosníků je popsána na obr. 3 a materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tab. 1.

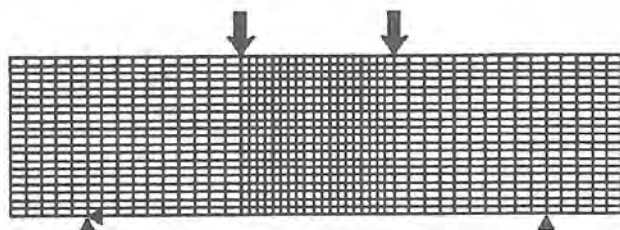
Tab. 1 - Materiálové charakteristiky betonu

Parametr	Beton	Drátkobeton
G_f [N/m]	100,0	8290,0
R_t [MPa]	2,9	3,9
E_c [GPa]	27,5	29,4
Poissonův součinitel	0,2	0,2
R_c [MPa]	34,3	44,1

Tahová pevnost představuje vrchol diagramu napětí-přetvoření, obr. 1, $R_t = f_t$. V případě zkoušky na příčný tah nebo v tahu za ohybu by hodnota R_t byla nižší než f_t .

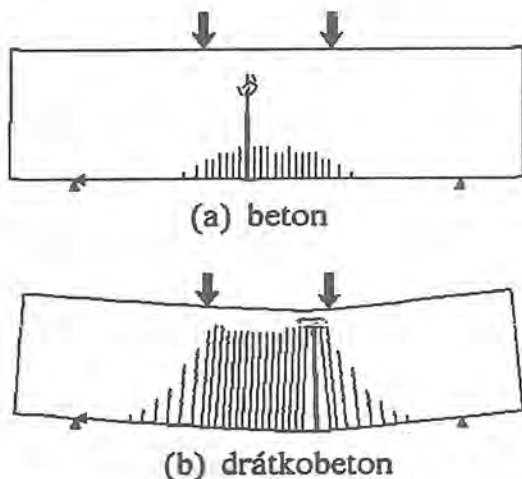


Obr. 3 - Geometrie betonových nosníků



Obr. 4 - Model nosníků MKP

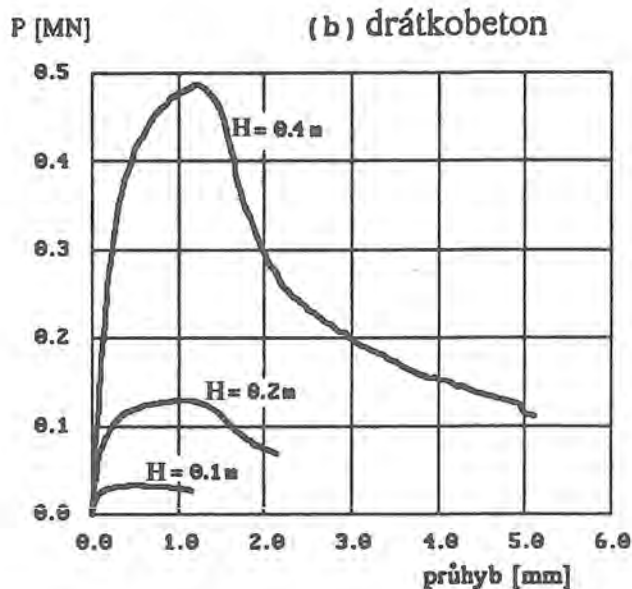
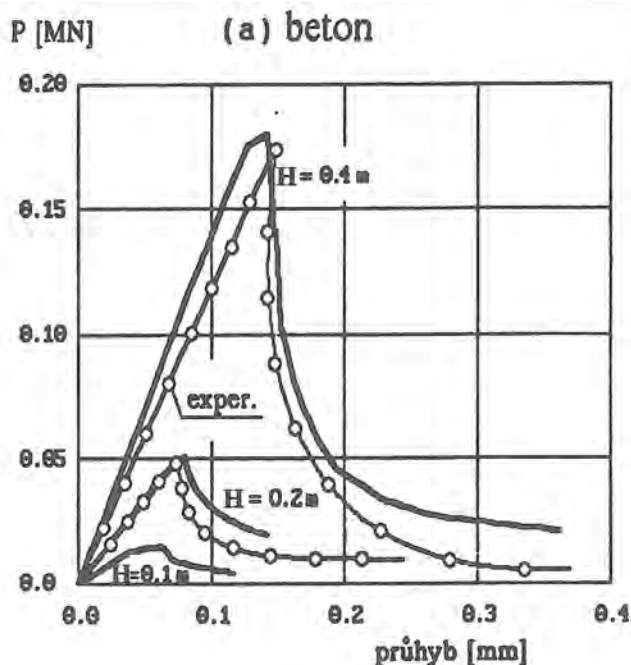
Pro výpočet MKP byly užity modely celých nosníků (tzn. bez využití symetrie úlohy), aby se zabránilo vzniku symetrického porušení nosníku dvěma trhlinami. Pro všechny velikosti nosníků byla užita síť s 20 prvky po výšce nosníku a s celkovým počtem 980 prvků, obr.4.



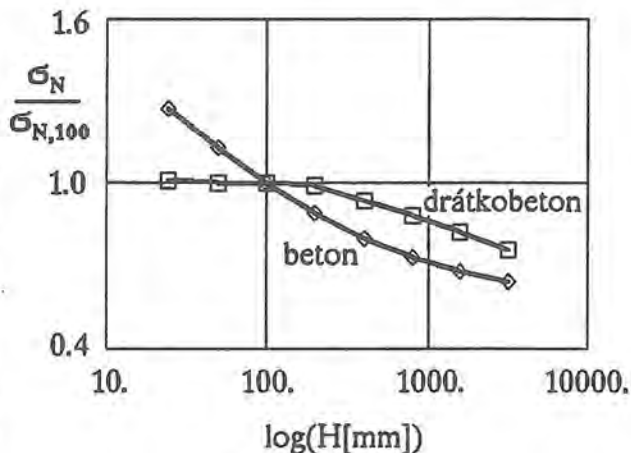
Obr. 5 - Ohybové trhliny při porušení nosníků, $H=0,2$ m

Z výpočetní simulace lze pozorovat proces tahového porušování, který začíná formováním mikrotrhlin v oblasti tahových napětí. Zatížení P_{cr} , při němž začíná rozvoj trhlin, se pohybuje od 0,78 do 0,98 mezního zatížení P_u u nosníků z normálního betonu a mezi 0,48 až 0,57 P_u u nosníků z drátkobetonu. Během procesu lokalizace přetvoření se postupně rozvíjí jedna trhlina, která způsobí porušení nosníku. Příklady výsledného rozdělení trhlin na deformovaných tvarech nosníků $H=0,2$ m z normálního betonu a z drátkobetonu jsou vykresleny na obr.5 a,b. Rozevřená trhlina je vyznačena silnou čarou, kdežto mikrotrhliny jsou vyznačeny tenkými linkami.

Z diagramů závislosti zatížení-průhyb, obr.6, je zřejmé, že nosníky z drátkobetonu vykazují mnohem větší průhyby ve srovnání s nosníky z normálního betonu, což je způsobeno větší houževnatostí drátkobetonu, vyjádřenou G_f . Pro numerické řešení byla použita metoda *Arc.-Length* a řešení bylo ve všech případech stabilní s úplnou sestupnou větví diagramu zatížení-posunutí.



Obr. 6 - Diagramy zatížení-průhyb



Obr. 7 - Vliv velikosti na výsledné nominální mezní napětí

Tab. 2 - Výsledné hodnoty pro nosníky z normálního betonu

Serie	H[m]	P_u [MN]	$\frac{P_{cr}}{P_u}$	$\sigma_N = \frac{P_u}{H^2}$ [MPa]	$\frac{\sigma_N}{f_t}$
1	0,1	0,0149	0,78	4,47	1,54
2	0,2	0,0509	0,91	3,82	1,32
3	0,4	0,11802	0,98	3,38	1,16

Tab. 3 - Výsledné hodnoty pro nosníky z drátkobetonu

Serie	H[m]	P_u [MN]	$\frac{P_{cr}}{P_u}$	$\sigma_N = \frac{P_u}{H^2}$ [MPa]	$\frac{\sigma_N}{f_t}$
4	0,1	0,0324	0,48	3,24	0,83
5	0,2	0,1299	0,55	3,24	0,83
6	0,4	0,4860	0,57	3,03	0,78

Výsledné hodnoty pro tři vybrané velikosti jsou shrnuty v tab. 2 a 3. Hodnota nominálního napětí σ_N umožňuje provést srovnání jednotlivých analýz. Pro výpočet nominálního napětí se pro nosníky z normálního betonu předpokládá pružné rozdělení napětí $\sigma_N = 3P_u/H^2$ a pro nosníky z drátkobetonu plastické rozdělení napětí $\sigma_N = P_u/H^2$ přes celý průřez.

Vliv velikosti na únosnost, ukázaný na obr. 7, je vyhodnocen pro celý rozsah vyšetřovaných velikostí. Na vodorovné ose je logaritmus rozměru H a na svislé ose je poměr nominálního napětí (pevnosti) k jeho hodnotě pro $H=0,1$ m. Pokud by tento vliv na betonových konstrukcích nepůsobil, mělo by mít nominální napětí pro všechny nosníky (ze stejného betonu) stejnou hodnotu. Pro případ normálního betonu se vliv velikosti významně projevuje v celé vyšetřované oblasti. S rostoucí velikostí nosníků klesá mezní nominální napětí (pevnost).

Parametr L (*crack band*), který se rovná velikosti konečného prvku, roste v této studii proporcionálně s velikostí prvku. Určitý limit pro tuto hodnotu lze stanovit z rovnosti hodnot nominální a tahové pevnosti. Tato mezní hodnota velikosti prvku $L_{max} = 2G_f E / R_t^2$, počítaná za předpokladu náhlého poklesu napětí na nulovou hodnotu po dosažení tahové pevnosti, je v tom-to případě $L_{max} = 0,65$ m. Největší užitá velikost konečného prvku $L=0,16$ m je menší. Tato úvaha je důkazem, že nelineární lomová mechanika funguje v celém rozsahu použitých rozměrů.

Vliv velikosti je u drátkobetonu velmi nízký u těles malých rozměrů a projevuje se až u rozměrů přesahujícím 0,2m. Je zřejmé, že je to způsobeno vysokou hodnotou energie lomu G_f ve srovnání s normálním betonem. Malé prvky se chovají téměř plasticky.

Uvedené výsledky ilustrují velmi dobře podstatu vlivu velikosti na tahovou únosnost. Vliv velikosti na únosnost závisí na energii porušení, což je materiálová vlastnost. U velmi malých rozměrů se projevuje výrazně houževnatost materiálu (plastické chování) a u velmi velkých rozměrů se prosadí křehkost (tahová pevnost). V obou těchto krajních případech se jedná o porušení úměrné pevnosti materiálu (nominálnímu napětí), kde se neprojevuje vliv velikosti. Avšak v celém rozsahu velikostí mezi těmito extrémami se uplatňuje *softening* (houževnatost), který je příčinou vlivu velikosti na únosnost. Z uvedeného vyplývá, že rozsah oblastí, kde se projeví vliv velikosti, závisí na lomové energii. Lze říci, že u běžně používaných betonů je tento vliv významný a podstatně snižuje únosnost velkých konstrukcí.

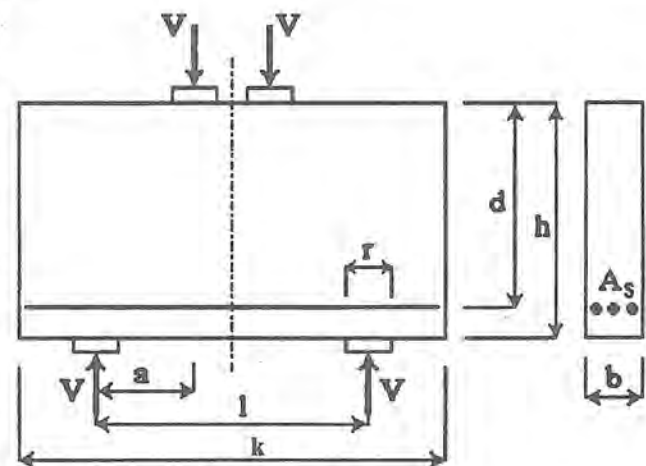
4 Smyková únosnost stěnových nosníků bez smykové výztuže

Rozměry a výztuž nosníků jsou na obr. 8 a v tab. 4. Nosníky jsou výztuženy pouze podélnou výztuží, která je uložena v hloubce d .

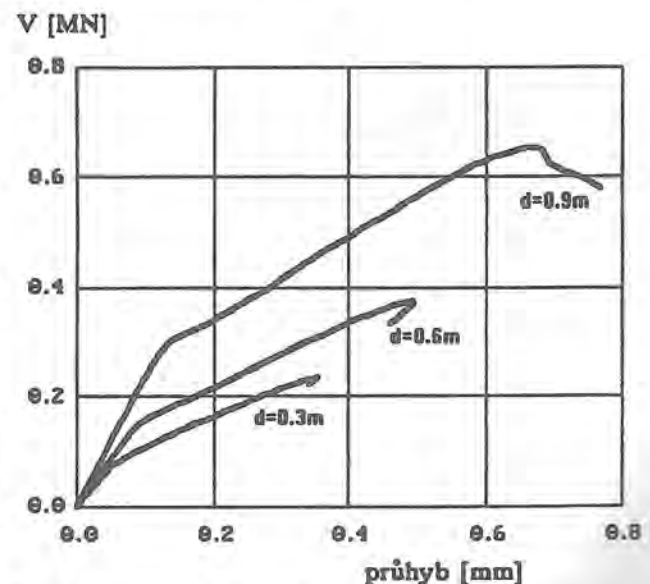
Nosníky jsou vzájemně geometricky podobné, všechny mají stejný poměr výztužení $p = A_s/bd = 0,0176$ a smykové rozpětí $a/d = 0,5$. Materiálové vlastnosti jsou totožné pro všechny tři nosníky: $f_c = 25,4$ MPa, $f_t = 2,31$ MPa, $G_f = 100$ N/m a $E_c = 30,27$ GPa. Mez kluzu výztuže je $f_y = 365$ MPa.

Simulace smykového porušení byla řešena pouze na symetrické polovině nosníku. Síť konečných prvků byla podobná pro všechny nosníky, tj. v centrální části bylo vždy 14 prvků na výšku nosníku, obr. 11. Délka převislého konce nosníku byla různá podle velikosti. Zatěžovací desky byly modelovány jako ocelové prvky. Pro nelineární numerické řešení byla užitá metoda *Arc-Length*.

Zatěžovací diagramy nosníků jsou vykreslené na obr. 9. Počítačová simulace porušení je ukázána pouze pro nosník střední velikosti S11 pro čtyři vybrané stupně zatížení, obr. 11, 12. V počátečním stádiu zatěžování se tvořily ohybové trhliny ve středu rozpětí a diagonální trhliny nad podporami. Diagonální trhliny rostly se zvyšujícím se zatížením šikmo vzhůru. Když dosáhly horního povrchu nosníku poblíž zatěžovacích desek, došlo k porušení konstrukce, které se projevilo náhlým poklesem hodnoty zatížení.



Obr. 8 - Geometrie stěnových nosníků

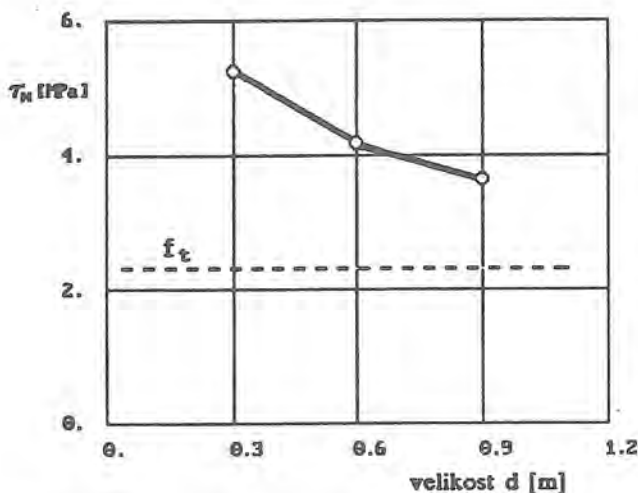


Obr. 9 - Diagram zatížení-průhyb

Formování rozhodující šikmé trhliny je patrné jak z deformovaných sítí na obr. 11, tak z šíření trhlín na obr. 12. Tahové přetvoření se lokalizuje v úzkém pásmu, který se probíhá šikmo přes pravoúhloú síť prvků a má přibližně šifku jednoho prvku. Čáry na obr. 12 nezobrazují jednotlivé diskrétní trhliny, ale představují rozptýlené trhliny (*smearred cracks*). Tenká čára zobrazuje stádium

Tab. 4 - Rozměry nosníků v m a přehled výsledků

Nosník	a	d	b	h	l	k	r	V_u [MN]	τ_N [MPa]
S10	0,15	0,3	0,15	0,35	0,5	0,9	0,9	0,237	5,26
S11	0,30	0,6	0,15	0,65	0,8	1,2	1,2	0,375	4,17
LR0	0,45	0,9	0,20	0,95	1,1	1,5	0,15	0,655	5,26



Obr. 10 - Vliv velikosti na nominální smykovou pevnost

mikrotrhlinek a silná čára zobrazuje místo a směr trhliny, která již nepřenáší žádné napětí.

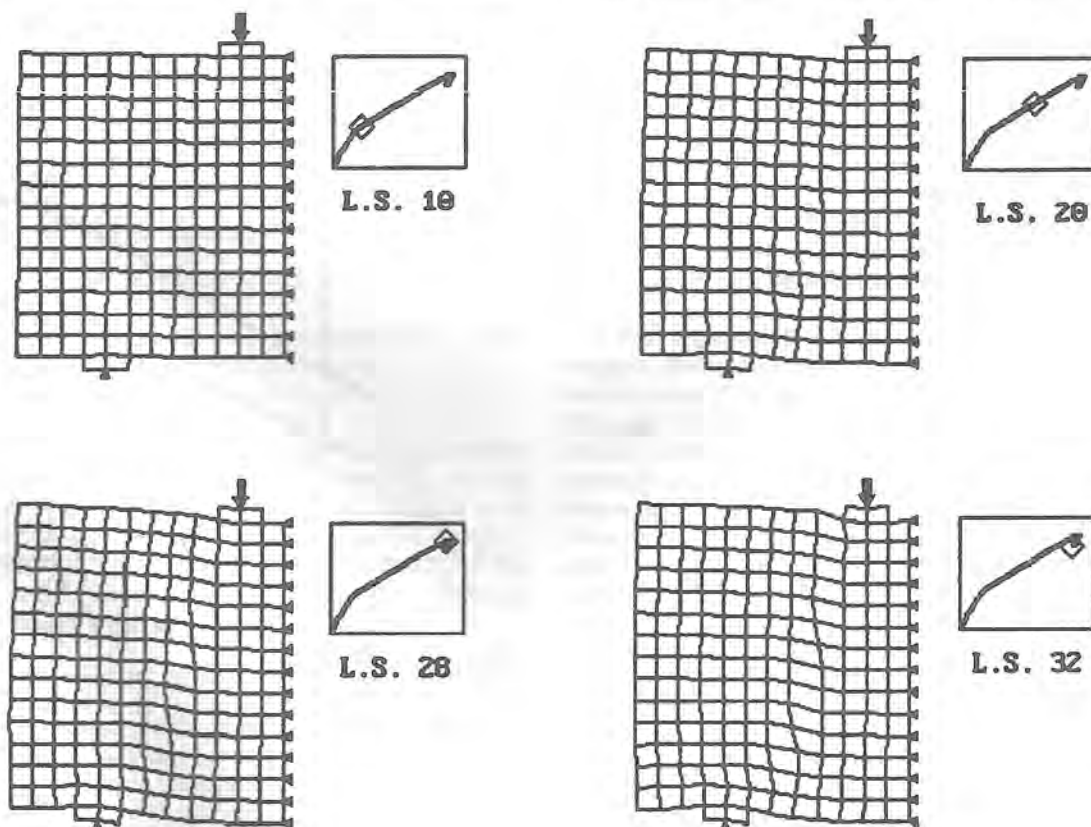
Srovnání lokalizace přetvoření na nosnících různé velikosti je ukázáno na obr. 13. pomocí isochar poměrných tahových přetvoření. Pro účely lepší porovnatelnosti jsou nosníky vykresleny v různých měřítkách tak, aby výsledná velikost byla stejná. Umístění a tvar jednotlivých oblastí lokalizovaného přetvoření jsou u všech velikostí podobné pouze s malými odchylkami. U malých nosníků je patrné rozšíření tahových přetvoření do středu rozpětí, do tahové ohybové zóny. Je

vidět, že největší tahová přetvoření jsou lokalizovaná v úzkém pásmu šířky jednoho prvku, který modeluje šikmou trhlinou. Je třeba si uvědomit, že rozměry převislých konců nosníků různých velikostí nejsou geometricky podobné, což může ovlivňovat směr rozhodující trhliny. Tento jev však nebyl dále vyšetřován.

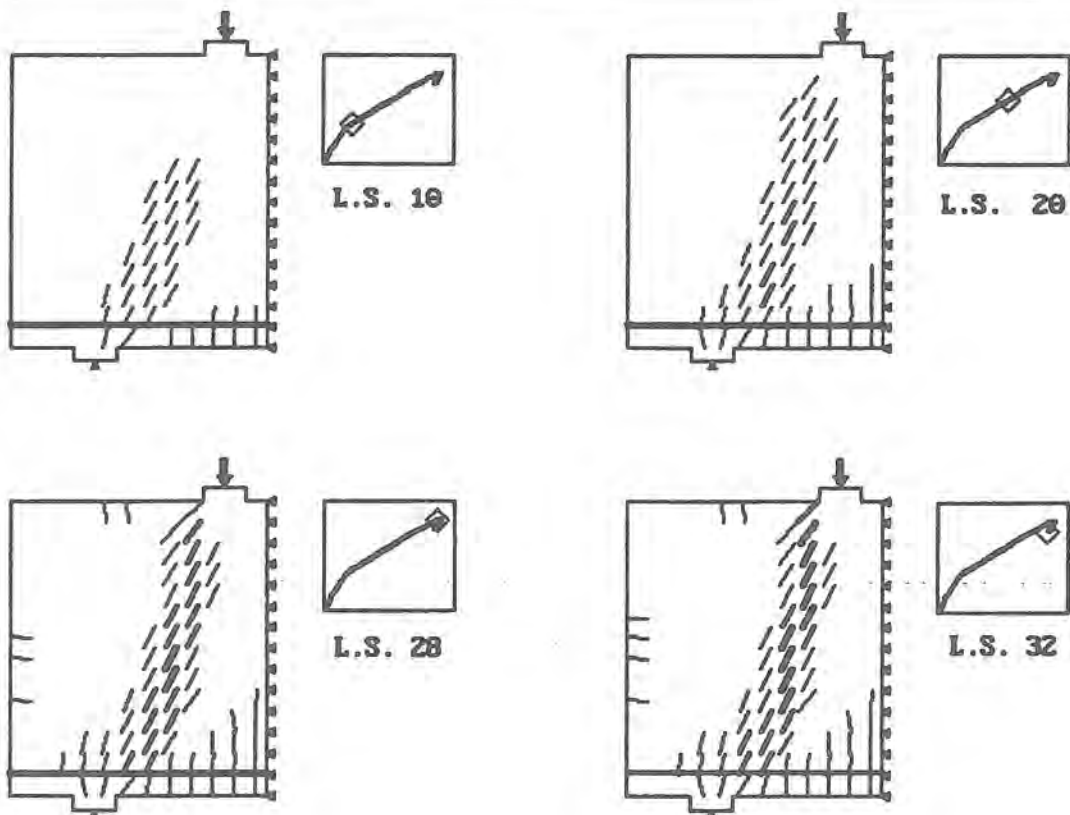
Výsledky jsou shrnuty v tab. 4. V_u značí mezní smykovou sílu. Nominální mezní smykové napětí je uvažováno jako průměrné smykové napětí na účinné ploše betonu $\tau_N = V_u/bd$. Pokud by velikost betonového prvku neměla žádný vliv, nominální mezní smykové napětí by mělo na všech nosnících různé výšky stejnou hodnotu. Pokles nominálního mezního smykového napětí s růstem výšky nosníků nasvědčuje působení vlivu velikosti, viz obr. 10. Čárkovaná přímka označuje hodnotu tahové pevnosti.

5 Závěry

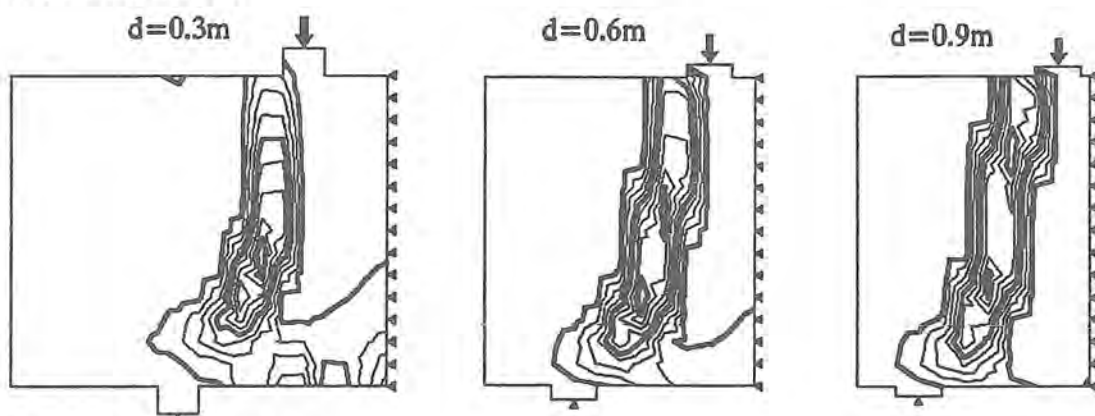
Pomocí výpočetního programu SBETA byly ověřovány možnosti materiálového modelu založeného na nelineární lomové mechanice pro stanovení vlivu velikosti na únosnost betonových konstrukcí. Byly analyzovány dva způsoby porušení, tahové a smykové, a každý v několika velikostech betonových prvků. Tahové porušení bylo vyšetřováno na nosnících z normálního betonu a z drátkobetonu v osmi velikostech. Smykové porušení bylo vyšetřováno na třech velikostech stěnových nosníků s podélnou výztuží. První úloha reprezentuje jednoduchý případ tahového porušení s trhlinami převážně rovnoběžnými se sítí prvků. Druhá úloha je složitější s nehomogenním rozdělením napětí a smykového přetvoření. V obou případech bylo možné pomocí programu SBETA simulovat způsob porušení charakterizovaný jedinou rozhodující trhlinou. Tato trhlina byla modelována pomocí crack band v šířce jednoho prvku. V obou případech byl zjištěn vliv velikosti



Obr. 11 - Deformované sítě nosníku S11



Obr. 12 - Rozvoj trhlin na nosníku S11



Obr. 13 - Lokalizace trhliny na nosnících různé velikosti

na únosnost. Popsaná práce tvoří součást rozsáhlejší studie vypracované pro JCI Round Robin Analysis.

6 Literatura

[1] Bažant, Z.P., Oh, B.H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Mater.Struct. RILEM*, Paris, France, 16, 1983, pp.155-177.

[2] Bažant, Z.P. editor: *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Proc. of the First International Conference FraMCoS1 held at Breckenridge, Colorado, USA, 1-5 June, 1992, Elsevier.

[3] Červenka, V., Eligehausen, R., Pukl, R.: SBETA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, Bericht Nr.4/9-89/22, November 1989.

[4] Červenka, V., Eligehausen, R., Pukl, R.: Computer Simulation of Headed Anchors in Plane Stress State, *American Concrete Institute Special Publication SP-134, Concrete Design Based on Fracture Mechanics*, 1992.

[5] Červenka, V., Pukl, R.: Computer Models of Concrete Structures, *Structural Engineering International Journal of IABSE*, SEI Vol.2, No.2, May 1992, pp.103-107.

[6] Červenka, V., Pukl, R.: SBETA Analysis of Size Effect in Concrete Structures, *Proc. of JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures*, Sendai, Japan, November 1993.

[7] Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W.: A Constitutive Model for Crack Cyclic Behaviour of Plain Concrete, in *Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures* (Ed. D.Firrao), Preprint of 8th European Conference on Fracture (ECF8), EMAS, 1990, pp.579-584.

[8] van Mier, J.G.M. editor: *Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics*, Proc. of the International RILEM/ESIS Conference, held in Noordwijk, The Netherlands, June 19-21, 1991.

[9] Pukl, R., Margoldová, J., Bouška, P.: *Simulation of Pull-Out Tests of Anchoring Bolts - Numerical Study 1991-1992*, Report Nr.1992/8, KÚ ČVUT, Praha, srpen 1992.

[10] Rots, J.G.: *Computational Modeling of Concrete Fracture*, Ph.D.Thesis, Delft University of Technology, 1988.

Dr. Vladimír Červenka

Ing. Radomír Pukl, CSc

Ing. Jana Margoldová, CSc

Pracoviště:

ČERVENKA CONSULTING

Na Hřebenkách 55

150 00 PRAHA 5

tel. / fax: 02 / 524 222