

# Výpočet prefabrikovaných hlavic pro bezprůvlakové desky programem SBETA

Vladimír Červenka

Prefabrikované hlavice jsou použity jako součást monolitických bezprůvlakových stropních desek podepřených sloupy. Hlavice slouží k bezpečnému zajištění přenosu zatížení z desky do sloupu a musí rovněž spolehlivě působit v provozním stavu z hlediska deformací a šířky trhlin. Vzhledem ke složitosti konstrukce byl výpočet únosnosti proveden nelineární metodou konečných prvků programem SBETA. Prostorové působení detailu bylo rozděleno na dva případy: (a) osově symetrický model při působení svislého zatížení, (b) rovinný model při současném působení momentu a svislé síly. Výpočet simuluje skutečné chování konstrukčního detailu, poskytuje průkaz mezní únosnosti, dokumentuje způsob porušení a nahrazuje zatěžovací zkoušku.

*Precast column heads are used as parts of flat slabs supported by columns and serve to transfer the load from slab to column and to maintain the safety against punching. Due to complexity of the structure the analysis of load bearing capacity was performed by the nonlinear finite element method with the program SBETA. The three-dimensional behavior of joint was separated into two cases: (a) axially symmetrical model under vertical load, (b) plane model under the simultaneous action of moment and vertical loading. The analysis provides the assessment of load carrying capacity of the structural detail, determines the mode of failure on the basis of a simulation of its real behavior, and can substitute a laboratory loading test.*

Konstrukce bezprůvlakových stropních monolitických desek kombinovaných s prefabrikovanými sloupy a hlavicemi spojují výhody obou prováděcích systémů. Prefabrikovaná hlavice desky obsahuje výztužné prvky a vyšší kvalitu betonu, potřebné pro zajištění smykové únosnosti desky v okolí sloupu. Nadbetonovaná monolitická deska slouží zejména pro umístění výztuže pro krytí podporových momentů v desce a k zajištění celistvosti konstrukce. Účinnost sprážených prefabrikovaných a monolitických desek je zajištěna výztužnými žebříčky vyčnívajícími z horního povrchu prefabrikované hlavice.

Vzhledem k tomu, že výpočet sprážených hlavic nebyl dostupnými metodami dostatečně spolehlivý, byl v minulosti průkaz únosnosti doplněn nákladnými laboratorními zatěžovacími zkouškami. Dnes je možno použít programy, jako na příklad SBETA [1], které umožňují přesnější výpočty a nahrazení zkoušky počítačovou simulací skutečného chování. Výhodami počítačové simulace jsou zřejmé – nízká cena, rychlost a odpadá kapacitní omezení zkušebních zařízení. Samozřejmě, že laboratorní zkoušky zůstanou důležitou a nezeměnitelnou metodou, ale jejich úloha se přesouvá do oblasti ověřování výpočetních metod.

Z podrobnějšího rozboru konstrukce vyplývá, že chování hlavice desky při zatížení závisí zejména na těchto vlivech:

- (1) vznik šikmých trhlin doprovázejících porušení hlavním tahem, které může vést k propíchnutí desky,
- (2) pevnosti betonu při trojsem štavu napětí, neboli vzrůst tlakové pevnosti betonu vlivem sevření,
- (3) uspořádání a množství výztuže,
- (4) spolupůsobení jednotlivých částí sprážené konstrukce.

Uvedené vlivy odpovídají možným způsobům porušení, navzájem se ovlivňují, a proto je nutné je posuzovat komplexně.

Zejména lze očekávat, že spolupůsobení prefabrikované a monolitické konstrukce značně ovlivňuje chování celého detailu hlavice. Je možno uvést některé z problémů zdůvodňujících použití obecnějších (a složitějších) výpočetních modelů. Klasický nosníkový nebo deskový model předpokládá rovinnost deformovaných průřezů, což není dodrženo při porušení soudržnosti obou desek. Z těchto důvodů je nutné volit dvourozměrné, případně trojrozměrné kontinuální modely MKP. Dále, vlivem tahových trhlin a výztuže dochází ke značné redistribuci napětí a proto nevystačíme s klasickým pružným materiálem.

Pro výpočet byl použit program SBETA, popsáný podrobněji v publikacích [1] a [4], jehož vlastnosti lze stručně shrnout následovně: dvourozměrný model MKP (rovinný stav napětí, přetvoření), osová symetrie, čtyřúhelníkové prvky, prutová a rozptýlená výztuž, nelineární materiál a geometrie. Nelineární materiálový model betonu je založen na konceptu rozptýlených trhlin, teorii poškozování a lomové mechanice, zahrnuje nelineární chování v tlaku a tahu, dvojosou pevnost, změkčení po dosažení mezních napětí a vliv velikosti konstrukce na pevnost. Výpočet simuluje skutečné chování konstrukce, poskytuje průkaz mezní únosnosti a dokumentuje způsob porušení. Jiné příklady použití programu SBETA jsou uvedeny v publikacích [2], [3] a [4]. Praktické nasazení programu je podporováno grafickým uživatelským prostředím s nástroji pro automatické generování sítě prvků, grafickým zobrazením chování modelu během výpočtu a sadou postprocesorů.

## Výpočetní modely hlavice

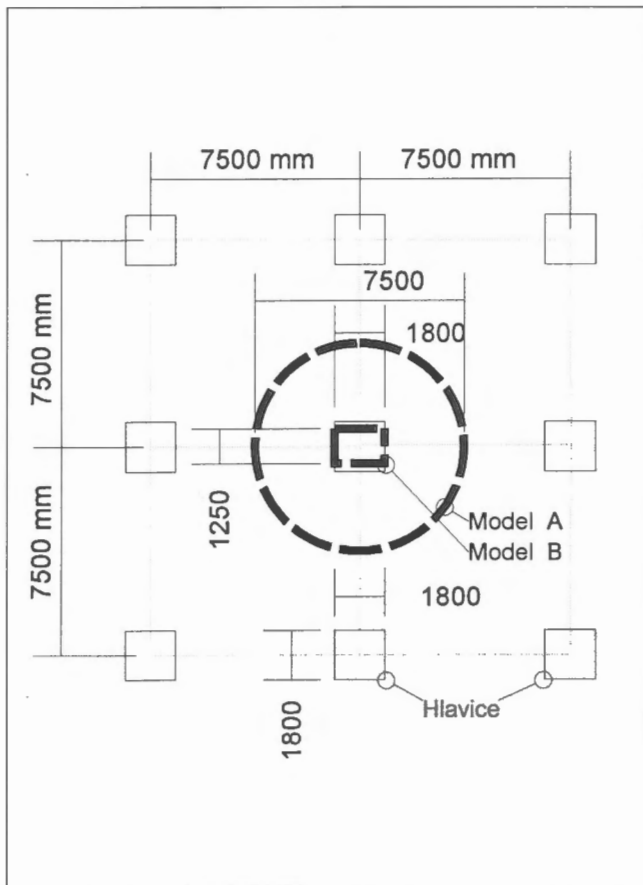
Prostorové působení hlavice je zjednodušeno způsobem, který je přijatelný pro dosažení cíle, jímž je simulace skutečného chování. Plné prostorové působení je zredukováno na dva případy, osově symetrický a rovinný, přičemž osově symetrický případ uvažuje pouze svislé zatížení a rovinný případ kombinaci svislého zatížení s momentem.

Schematické uspořádání konstrukce je ukázáno na obr. 1. Deska o konstantní tloušťce 0,22 m je podepřena sloupy ve čtvercové síti na rozpětí 7,5 m.

Osově symetrický model A zahrnuje kruhovou část desky o průměru 7,5 m. Na okraji desky jsou uvažovány okrajové podmínky odpovídající ose symetrie uprostřed pole: nulové pootočení a volný průhyb. Svislé zatížení desky je rovnoměrné. Tento model do jisté míry zkrusluje čtvercovou geometrii desky, sloupu i hlavice, avšak odpovídá charakteru napjatosti a deformace v okolí podpory, který se velmi blíží osově symetrii. Předpokládá trojrozměrnou napjatost s osově symetrickým omezením.

Sloup je modelován pomocí kontaktních pružin, které jsou aktivní pouze v tlaku a v tahu se vypínají. Spojení sloupu a hlavice je tedy modelováno pouze jako pružný, kontaktní spoj. Sloup nad deskou není modelován, je tedy uvažován případ stropu posledního horního podlaží. Přítomnost horního sloupu pod zatížením by zvýšila únosnost betonu hlavice mezi sloupy v důsledku účinku sevření. Uvažovaný případ je tedy na straně bezpečnosti.

Svislá výztuž probíhající ze sloupu do hlavice se v modelu neuvažuje, neboť k tahovému namáhání výztuže při tomto způsobu zatížení nedojde. Na kontaktní ploše mezi hlavicí a nadbetonovanou deskou je uvažováno plné spolupůsobení. Případné porušení soudržnosti může nastat v betonu horní desky a projeví se vznikem trhlin.



Obr. 1 – Schéma konstrukce bezprůvlakového stropu s umístěním výpočetních modelů / Flat slab structural scheme with analyzed models

Rovinný model B zahrnuje podporový pruh desky pouze v oblasti hlavice. Jedná se o spřažený nosník modelovaný v rovinném stavu napětí, tedy nikoli o nosníkovou teorii. Působení okolní desky je uvažováno prostřednictvím dvojice sil na okraji hlavice, které jsou rozděleny podle účinku na svislé  $P_v$  a momentové  $P_m$  složky, obr. 10. Sloup je opět modelován pomocí pružin. Na rozdíl od modelu A je u modelu B uvažován sloup (pomocí pružin) jak nad deskou tak pod ní. Toto je nutné, pro přenesení momentu z desky do sloupu. Tento model je schopen plně vystihnout ohybové a smykové chování v rovině ohybu, avšak zanedbává smykové působení v rovinách rovnoběžných. Šíře podporového pruhu byla zvolena tak, aby byl kritický průřez v obou modelech stejně dlouhý. (U osově symetrického modelu A je kritický průřez předpokládán jako kruh kolem sloupu o průměru 0,8 m, o délce 2,5 m a z toho je pro model B určena šíře podporového pruhu 1,25 m.) Vzhledem k odlišnostem obou modelů, je jejich srovnání obtížné a ani nebylo cílem výpočtu. Spíše se jednalo o vytvoření dvou modelů, výstižných pro jednotlivé situace.

Materiálové vlastnosti betonů hlavice – B55 a monolitické části B20 jsou uvažovány výpočtovými hodnotami dle ČSN 731201. Výztuž hlavice  $\varnothing$  V8 v obou směrech je umístěna při spodním povrchu ve vzdálenostech po 0,2 m a při horním povrchu po 0,3 m. Výztuž nadbetonované desky při horním povrchu je  $\varnothing$  V14 po 0,125 m v obou směrech. V modelu A jsou směry výztuže předpokládány osově symetricky, t.j. radiální a obvodové. Svislá výztuž je tvořena žebříčky  $\varnothing$  6, jejichž pruty jsou prostorově nakloněny. Tato výztuž je v modelu A uvažována průměrně v transformaci na svislou výztuž se stupněm vyztužení  $p = 0,0018$ . Proto její grafické znázornění na obr. 2c je pouze schematické a vyjadřuje pouze přítomnost svislé výztuže, nikoliv vzdálenosti prutů. V modelu B jsou žebříčky podle skutečného tvaru prutů v průmětu na rovinu modelu, obr. 10.

## Výsledky výpočtu

Nelineární výpočet probíhá tak, že referenční zatížení je zvyšováno po krocích až do maximálního zatížení při porušení. Výsledkem jsou stavy napjatosti a deformace pro každý zatěžovací krok. Tato soustava výsledků může být převedena i do grafické animace chování konstrukce, jejímž hlavním účelem je stanovení způsobu porušení. Některé výsledky pro model A jsou uvedeny na obr. 2 až 9.

Závislost zatížení na průhybu je ukázána na obr. 3. Nelineární výpočet byl proveden v 22 krocích. Mírou zatížení je reakce ve sloupu, průhyb je měřen na okraji hlavice. Maximálně dosažené zatížení je 0,91 MN. Po dosažení maximálního zatížení došlo k náhlému (explozivnímu) porušení betonu v tlaku uprostřed hlavice, obr. 5 a 6. V tomto místě je snížený účinek sevření v důsledku deformace – zvedání povrchu prefabrikátu. Po dosažení maximálního zatížení došlo k poklesu zatížení a protože nebylo možno dosáhnout rovnováhy, je v diagramu zatížení-průhyb naznačena tendence sestupné části diagramu.

Ze sledování deformací sítě, obr. 4, vyplývá, že dochází k posuvu mezi hlavicí a horní deskou, což je doprovázeno otevíráním trhlin a tečením svislé výztuže na styku dvou betonů. Z rozboru grafických výsledků, obr. 4 až 8, a též numerických hodnot vyplývá, že dochází k posuvu na styku mezi oběma betony. Tento posuv, projevující se jako smykové přetvoření prvků slabšího betonu desky, je pouze lokální, omezující se na líc sloupu a nerozšíří se na celou hlavicí. To potvrzuje průběh napětí a poměrných přetvoření v lici sloupu, který je sice nelineární v důsledku trhlin, avšak není významně ovlivněn porušením soudržnosti betonů. Důvodem porušení konstrukce je dosažení pevnosti betonu hlavice v trojosém stavu napětí na spodním povrchu uprostřed hlavice. Meze průtažnosti bylo dosaženo pouze u svislé výztuže v místě porušení soudržnosti betonů hlavice a desky. Veškerá hlavní výztuž byla v pružném stavu. Došlo k inicializaci šikmých trhlin, avšak k propíchnutí betonu hlavice nedošlo.

Zajímavé je srovnání s výpočtem podle dosud užívaného empirického vzorce (odvozeného ze zkoušek), podle kterého vychází únosnost 0,701 MN. Hodnota dosažená programem SBETA je o 30 % vyšší, což lze vysvětlit lepším využitím materiálových vlastností, ale patrně i jiným pojetím kritéria bezpečnosti.

U modelu B, obr. 10, bylo zatížení zavedeno ve dvou fázích. V první fázi bylo ve dvou krocích zavedeno zatížení momentem  $M = 0,075$  MNm. Moment je zaveden dvojicí sil  $P_m$  na krajích hlavice na rameni 1,675 m. Ve druhé fázi je moment udržován konstantní a je přidáno svislé zatížení silami  $P_v$ , které je zvyšováno až do dosažení únosnosti. Takto získaná maximální svislá síla je 0,35 MN. Výsledky modelu B ve zkrácené formě jsou uvedeny na obr. 11, 12 a 13. Při mezním zatížení je dosažena mez průtažnosti podélné výztuže a jedná se tedy o typický ohybový způsob porušení. Porušení soudržnosti dvou betonů ani vznik šikmých trhlin nebyl zaznamenán. K modelu B je třeba poznamenat, že únosnost i způsob porušení je vypočten pouze pro jednu kombinaci a historii zatížení. Pro komplexní posouzení by bylo možno provést parametrickou studii pro různé kombinace zatížení momentem a svislou silou a sestavit tak interakční diagram únosnosti styčnicku jako pomůcku pro navrhování.

Šířky trhlin jsou stálou součástí výsledků. Jejich maximální hodnoty při polovičním a maximálním zatížení pro model A činily 0,016 a 0,048 mm a pro model B 0,07 a 0,19 mm.

## Závěr

Výpočet únosnosti systému prefabrikovaných hlavic spřažených s monolitickou deskou byl proveden pomocí nelineární metody konečných prvků. Pro tento účel byl s úspěchem použit program SBETA. Výpočet poskytuje hodnoty únosnosti nutné pro posouzení bezpečnosti, které jsou podloženy podrobnou simulací skutečného chování konstrukce a které nahrazují zatěžovací zkoušku.

Výpočet umožňuje maximální využití skutečných vlastností konstrukce, její geometrie, uspořádání výztuže a vlastností materiálů, a je vhodný zejména tam, kde jsou pochybnosti při použití jednoduchých metod, například v důsledku redistribuce vnitřních sil.

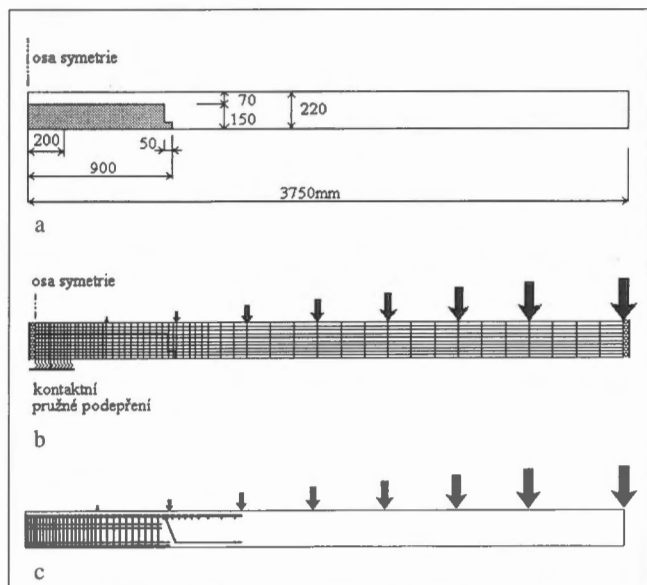
## Literatura

[1] SBETA – Programová dokumentace, Červenka Consulting, Praha, 1996, s. 339.

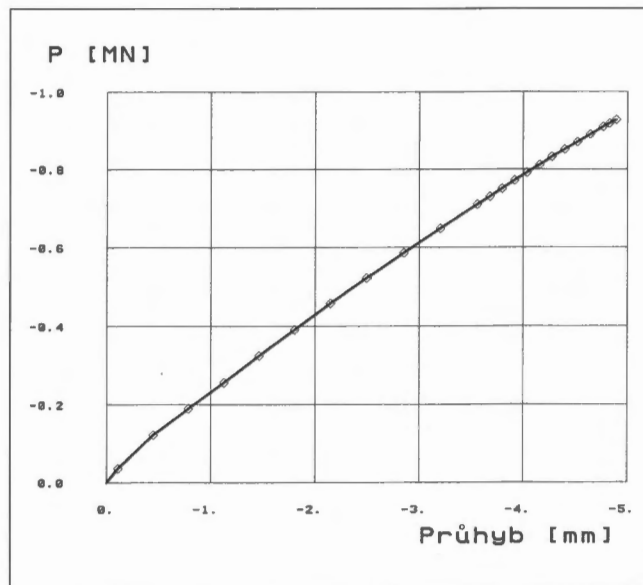
[2] Červenka V., Margoldová J., : *Simulace porušení železobetonové ropné těžní věže*, Beton a zdivo, 1996/4, s. 5-7.

[3] Margoldová J.: *SBETA – Přesnější výpočty železobetonových konstrukcí, CAD*, Ročník 7, č. 2, 1997, březen-duben, s. 46-49.

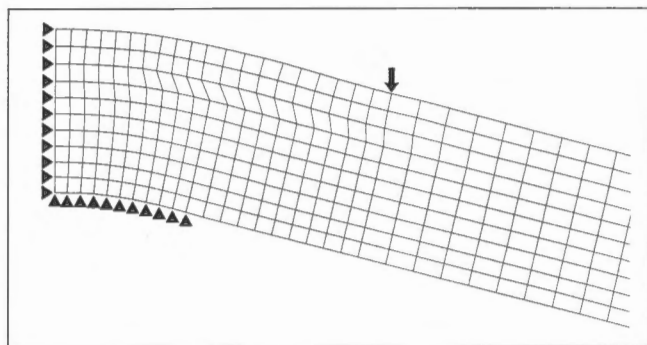
[4] Červenka V., Pukl R.: *Computer Models of Concrete Structures, Structural Engineering International*, 2/92, IABSE, Zürich, s. 103-107.



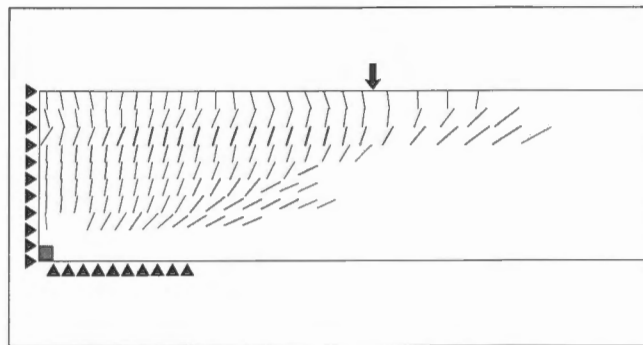
Obr. 2 – Osová symetrie, model A / Axial symmetry, model A  
a – Geometrický tvar / Geometric form  
b – Síť konečných prvků, okrajové podmínky a zatížení / Finite element mesh, boundary conditions and loading  
c – Vyztužení / Reinforcement



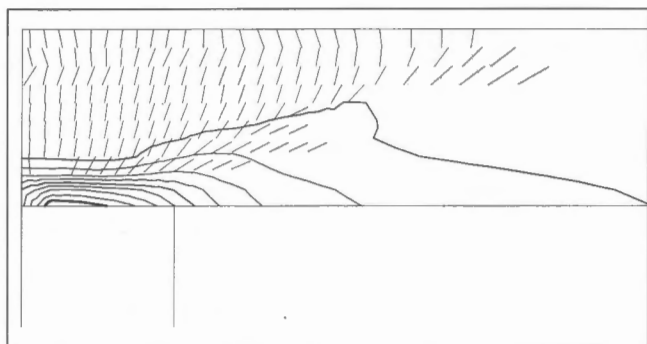
Obr. 3 – Závislost zatížení-průhyb, model A / Load-displacement diagram, model A



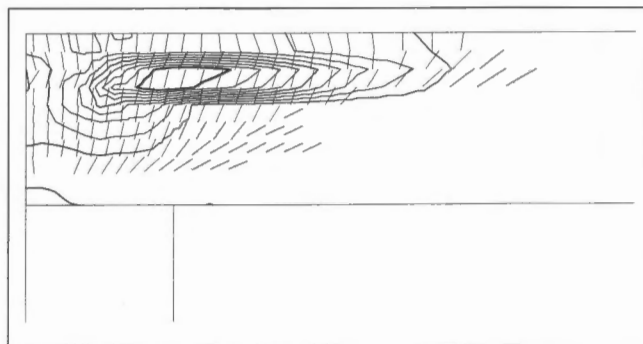
Obr. 4 – Deformovaný tvar při dosažení mezní únosnosti, model A / Deformed shape under ultimate load, model A



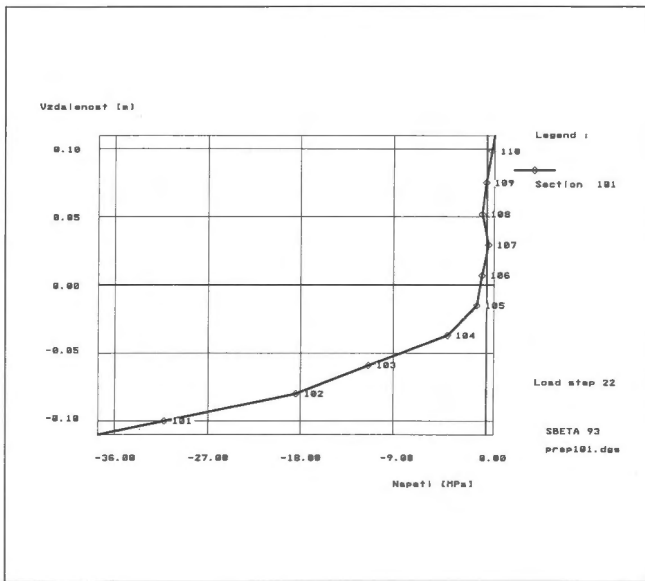
Obr. 5 – Obráz trhlin při dosažení únosnosti, model A / Crack pattern at the ultimate load, model A



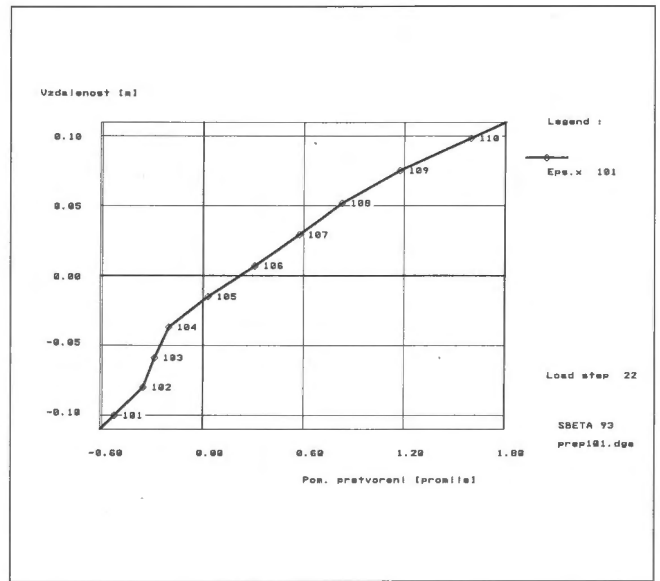
Obr. 6 – Izočáry hlavních tlakových napětí, model A / Isolines of principal compressive stresses, model A



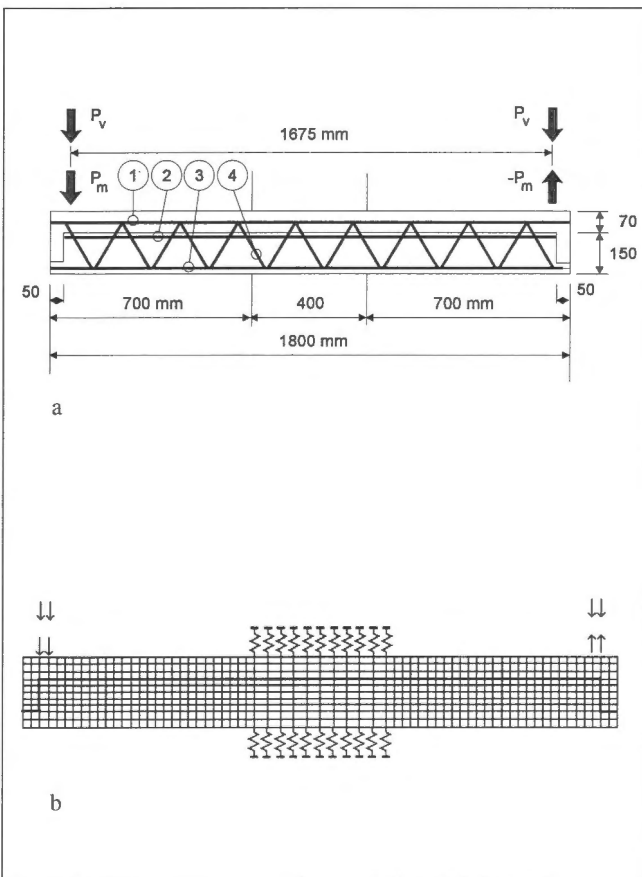
Obr. 7 – Izočáry hlavních tahových poměrných přetvoření, model A / Isolines of principal tensile strains, model A



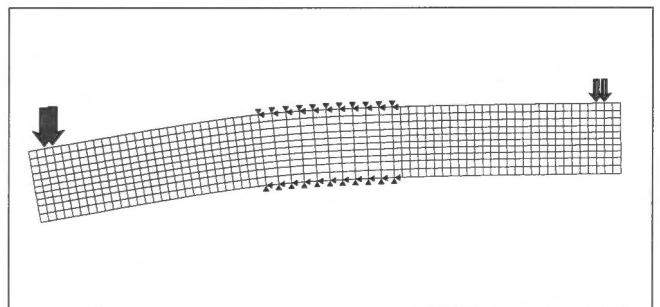
**Obr. 8** – Průběh napětí podél tloušťky desky v lici podpory, model A / *Distribution of stresses in the slab cross section adjacent to column, model A*



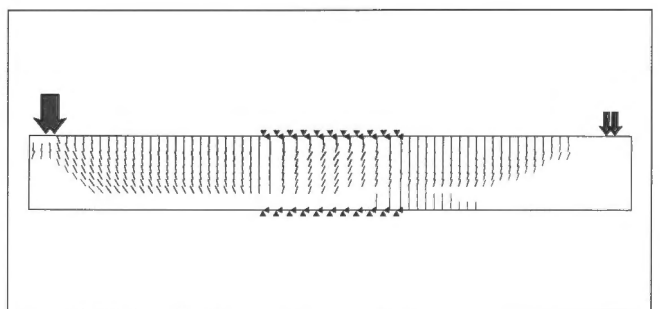
**Obr. 9** – Průběh poměrných přetvoření podél tloušťky desky v lici podpory, model A / *Distribution of strains in the slab cross section adjacent to column, model A*



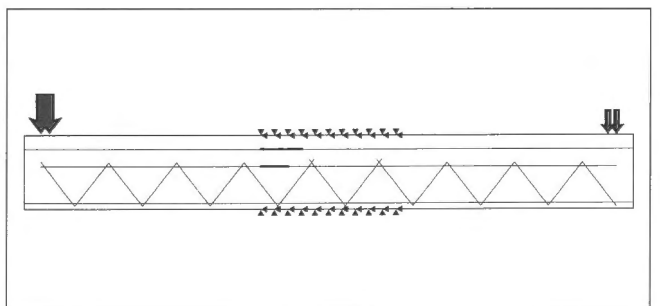
**Obr. 10** – Hlavice v rovinném stavu napětí, model B / *Head in plane stress state, model B*  
 a – Geometrický tvar a výztuž / *Geometric form and reinforcement*  
 b – Síť konečných prvků, okrajové podmínky a zatížení / *Finite element mesh, boundary conditions and loading*



**Obr. 11** – Deformovaný tvar při dosažení mezní únosnosti, model B / *Deformed shape under ultimate load, model B*



**Obr. 12** – Obrázek trhlin při dosažení únosnosti, model B / *Crack pattern at the ultimate load, model B*



**Obr. 13** – Stav výztuže, model B. Dosažení meze pružnosti vyznačeno silně / *Reinforcement state, model B. Yielding is indicated by bold line*