

Ing. Miloš Lavický, Ph.D.
Ing. Jan Pěničik, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Ústav stavební mechaniky
E-mail: lavicky.m@fce.vutbr.cz
pencik.j@fce.vutbr.cz

MOŽNOSTI APLIKACE PROSTOROVÝCH VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PŘI ZNALECKÉM ZKOUMÁNÍ PŘÍČIN HAVÁRIE HALY

Přednáška na konferenci znalců ÚSI VUT v Brně, dne 24. 1. 2004.

1. VŠEOBECNĚ

Při pracích na znaleckých posudcích zaměřených na zjišťování příčin poruch nebo havárií stavebních konstrukcí není v četných případech možné získat věrohodné výsledky pouze výpočtovými metodami a postupy, které jsou uváděny v platných normách pro navrhování konstrukcí (ČSN nebo EN), nebo které jsou v praxi obecně vžit. Tyto metody, jsou sice vhodné k účelu, pro který jsou určeny, tedy pro projektanty a konstruktéry, kterým vymezují potřebné meze pro odpovědný návrh a výpočet konstrukcí. Pro forenzní inženýrství zejména v oblasti statiky stavebních konstrukcí však nebývají dostačující, neboť neposkytují výstižné údaje o skutečném chování konstrukce. Jelikož je vyžadováno odhalit skutečnou příčinnou souvislost poruchy nebo havárie, nelze se jen omezit na kontrolu správnosti návrhu nebo výpočtu, ale je nutné postupovat jinak a v procesu zjišťování skutečné příčiny poruchy vycházet z komplexní analýzy ověření skutečného průběhu poruchy či havárie.

Pokud se při zjišťování příčin poruch a havárií vychází jen z kontroly výpočtových metod a z postupů a údajů z norem či předpisů pro navrhování konstrukcí, nelze odkrýt skutečný stav napětí v konstrukci a její chování. Závěry pak mohou být nesprávné a z hlediska hledání příčin poruchy nebo havárie zavádějící. Ani samotný fakt, že byly porušeny konstrukční zásady dané dohodnutými ustanoveními předpisů, nemůže vést k jednoznačnému závěru, že k poruše či havárii došlo v příčinné souvislosti s nedodržením těchto zásad. Vada díla nemusí nevyhnutelně představovat poruchu nebo ohrožení konstrukce a je nutné podrobně zkoumat, zda se tato vada podílela na vzniku poruchy nebo havárie a jakou úlohu sehrála v mechanismu porušení.

Pro statické výpočty při zkoumání příčin poruchy nebo havárie je často potřebné uplatnit náročnější třídu úloh řešení, než by postačovala při návrhu konstrukce, a při řešení se stále více prosazují propracované a rozsáhlé programové systémy založené na metodě konečných prvků, které umožňují uplatnění uživatelem volených konstitučních modelů materiálu konstrukčních prvků, modelování jednostranných vazeb, zohlednění nelineárního chování materiálů a konstrukcí, možnost časově závislých analýz apod.

Na konkrétním případě si ukažme aplikaci prostorového výpočtového modelu (3D) vypracovaného v programového systému ANSYS 6.0 jako nástroje při zkoumání příčin havárie. Znalecký posudek ve věci zjištění příčin havárie železobetonové montované haly byl v rámci činnosti technického znalectví vypracován Ústavem soudního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (Ing. Lubomír Weigel, CSc., Ing. Miloš Lavický, Ph.D., Ing. Jan Pěničik, Ph.D.).

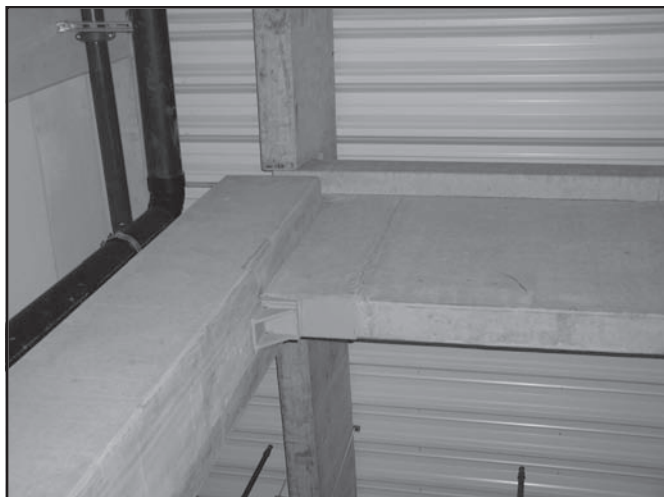
2. POPIS ŘEŠENÉHO PŘÍPADU

Jednalo se o přístavbu vícelodní přízemní montované haly k stávajícímu komplexu na sebe navazujících halových objektů. Přistavovaná a stávající část komplexu vycházela z obvyklé koncepce uplatňované u toho typu stavebních objektů. Konstrukce sestávala z vyztužených betonových monolitických základových patek s prohlubní (tzv. kalichových), do jejichž prohlubni se osazují železobetonové prefabrikované sloupy. Sloupy se při montáži fixují dřevěnými klíny, které se odstraňují, když nabude betonová zálivka prohlubni s osazenými sloupy, zhotovená po spodní úroveň dřevěných klínů, dostatečné pevnosti. Po odstranění dřevěných klínů se provede dobetonování po horní úroveň základové patky. Spojení základové patky a sloupu v provozním stavu považujeme za tuhé a ze stavebně mechanického hlediska vzhledem k tomu, že se obvykle připouští uvažovat sloupy za vetknuté, hovoříme o konzolových sloupech. Na těchto sloupech jsou na trny osazeny prefabrikované vazníky. U prutového modelu uvažujeme spojení sloupů a vaznic jako kloubové. Na vaznicích byly osazeny prefabrikované vaznice, nesoucí střešní plášť.

Vlastní řešení původní a dostavované části komplexu hal se však značně lišilo dimenzemi jednotlivých konstrukčních prvků. Zatímco konstrukční prvky původní části komplexu hal se vyznačují proporcemi u dílců naší provenience obvyklými, obr. 1, konstrukční prvky dostavby mají navrženy rozměry velmi subtilní na hranici realizovatelnosti, obr. 2. Byla tak navržena konstrukce velmi citlivá na pečlivost při výrobě dílců a při provádění a na důsledné



Obr. 1 Pohled na uložení vazníku na krajní sloup v původní části komplexu hal.



Obr. 2 Pohled na uložení vazníku na krajní sloup v dostavované části komplexu hal (po rekonstrukci pomocí ocelových prvků v místě uložení vazníků na sloup).



Obr. 3 Pohled na havarovanou přístavbu halového komplexu.



Obr. 4 Zničený autojeřáb, v kterém při havárii haly seděl jeho řidič, jehož nepříjemné pocity si snad ani nelze představit.

dodržování technologických zásad a předpisů při výrově, dopravě a montáži.

V průběhu montáže haly při osazování vaznic došlo k jejímu zřícení. Podle výpovědi svědků havárie nastala u prvního vazníku druhé řady, kde v otvoru pro kotevní trn byla ponechána dřevěná lať. Otvor pro kotevní trn zde nebyl probetonován. Krajní sloup pod tímto vazníkem se zlomil a následně došlo z řetězovému zřícení



Obr. 5 Zničený dodávkový automobil, v němž v okamžiku havárie haly našťastí nikdo nebyl.



Obr. 6 Detail vazníku, u něhož v otvoru pro kotevní trn byla ponechána dřevěná lať.

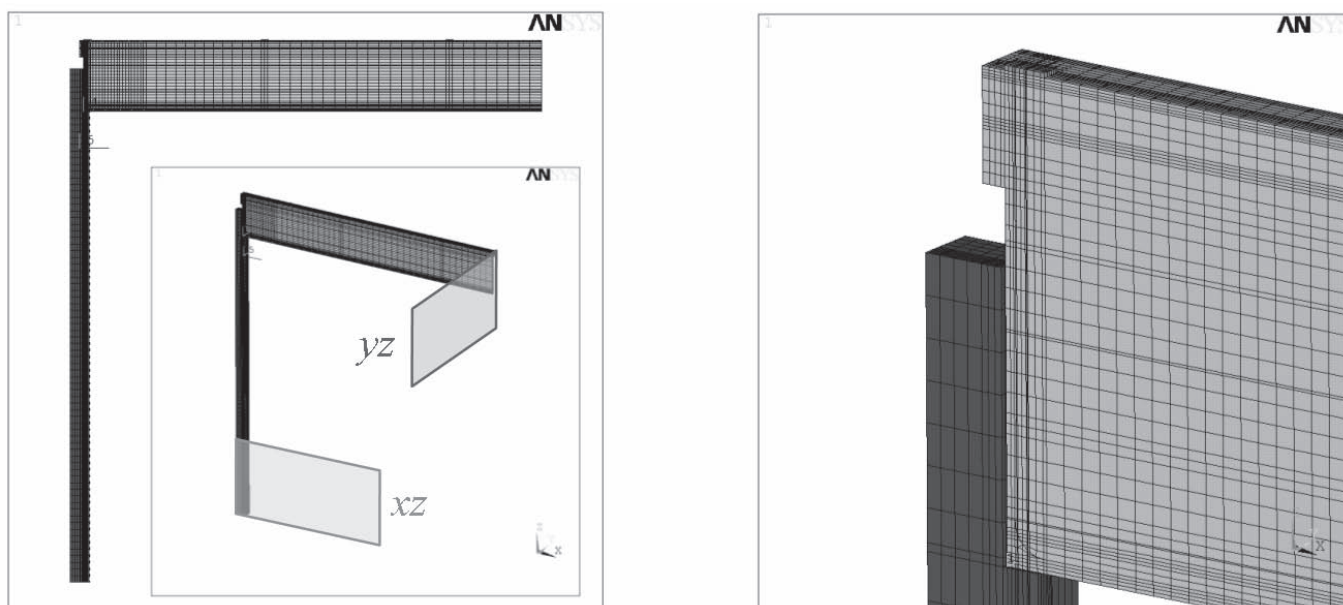
všech vazníků a vaznic druhé řady. Konstruktivní prvky sousedních řad byly poškozené a některé se i zřítily.

3. ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

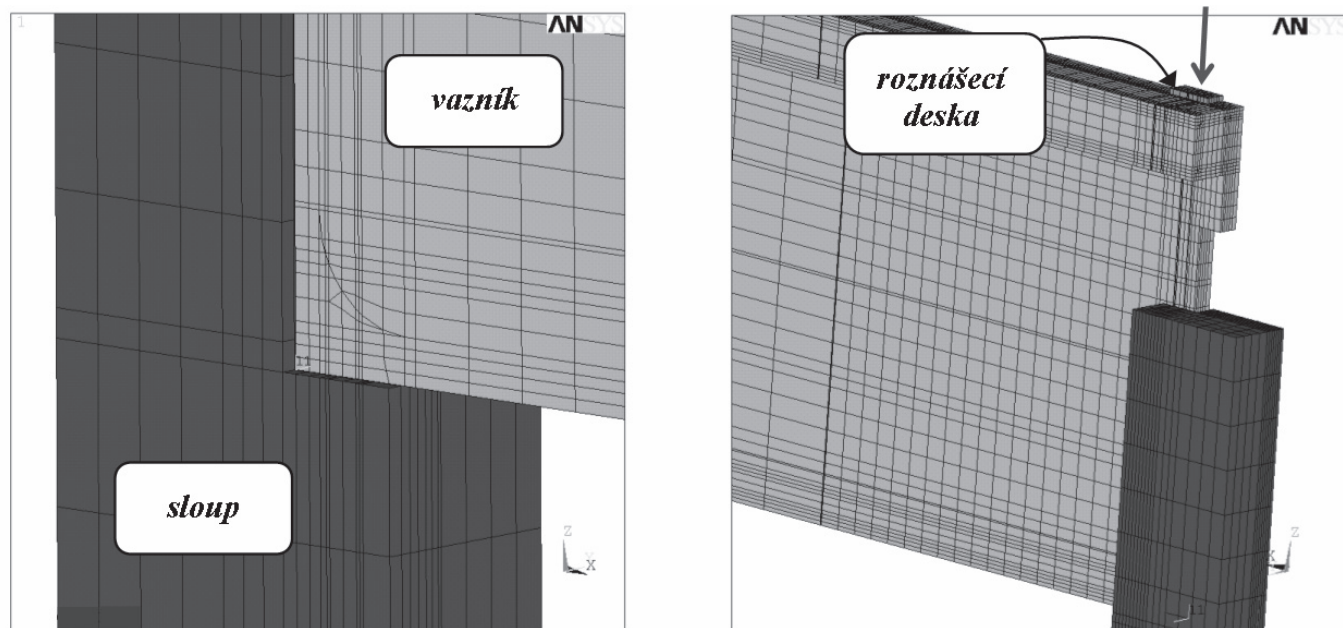
Jednou z možných příčin havárie konstrukce se jevílo porušení v místě uložení vazníku na sloup. Z tohoto důvodu byla provedena kromě ověření uvedeného místa výpočtem na mezni stav porušení soustředěným tlakem podle ČSN 73 1201-86 podrobnější analýza pomocí programového systému ANSYS 6.0 založeného na metodě konečných prvků. Důvodem volby tohoto systému byla potřeba zjištění prostorové napjatosti v okolí místa uložení.

Podle dokumentace byl vytvořen prostorový (3D) výpočtový model, který se skládal z 2658 konečných prvků typu LINK8, 43341 konečných prvků typu SOLID45, 54 konečných prvků typu TARGE170 a 54 konečných prvků typu CONTAC174, obr. 7.

Ke snížení již tak poměrně velkého množství konečných prvků byla v příčném směru, tj. ve směru souřadnicové osy y, modelována pouze symetrická polovina vazníku a sloupu (rovina symetrie xz). V podélném směru byla uvažována také pouze polovina vazníku (rovina symetrie yz procházela polovinou rozpětí vazníku), obr. 7. „Nemodelovaná“ část konstrukce byla nahrazena pomocí symetrických okrajových podmínek.



Obr. 7 Prostorový výpočtový model vazníku a sloupu – roviny symetrie.



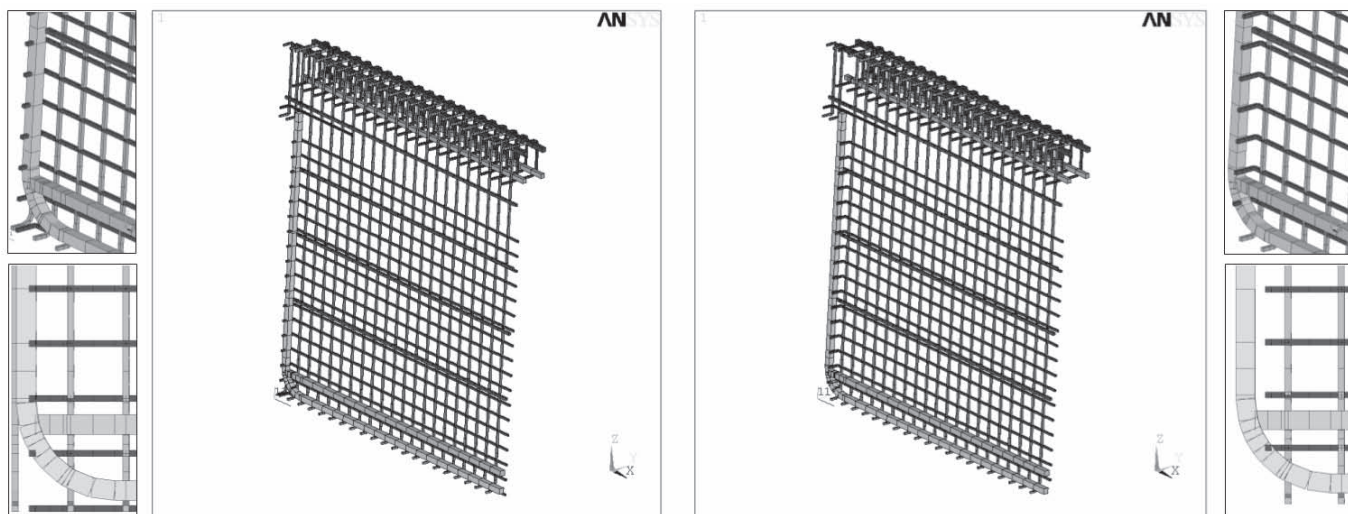
Obr. 8 Prostorový výpočtový model vazníku a sloupu.

K modelování vazníku a sloupu byly použity prostorové prvky typu SOLID45. Pomocí tohoto typu prvku byly také modelovány ložiska na horní přírubě trámy resp. roznášecí desky, pomocí kterých byl vazník zatížen vazničkami, obr. 8.

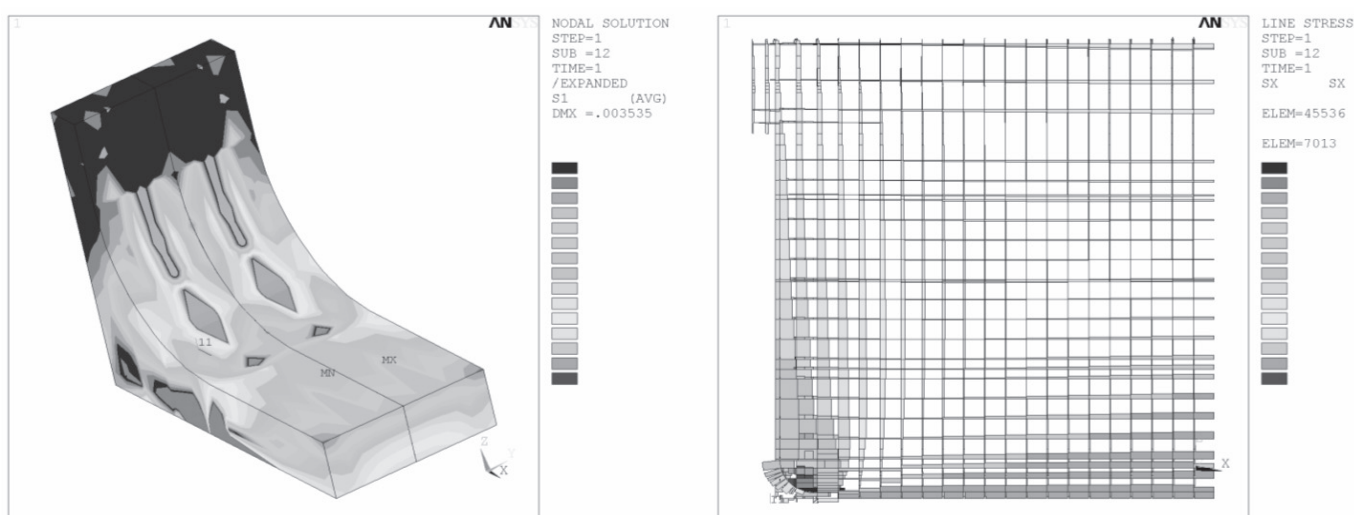
Prvky typu LINK8 byly použity k modelování betonářské výztuže, obr. 9. Profily jednotlivých položek betonářské výztuže a jejich pozice ve vazníku byla uvažována podle dokumentace.

Prvky typu TARGE170 a CONTAC174 byly použity k modelování vzájemného kontaktu vazníku se sloupem, obr. 8. Při výpočtu byl uvažován standardní typ kontaktu, u kterého je po jeho otevření uvažováno nulové normálové napětí σ ve směru normály na kontakt. V počáteční fázi výpočtu byl kontakt uzavřen. Součinitel tření kontaktu (typ beton – beton) byl uvažován hodnotou $\mu = 0,2$.

Při výpočtech místě uložení vazníku na sloup byla uvažována geometrická nelinearita a materiálová linearita (konstrukce byla zatížena pouze vlastní tíhou). Geometrická nelinearita vychází z teorie II řádu, kdy jsou podmínky rovnováhy sestavovány na přetvořené konstrukci se zahrnutím vlivu velkých deformací. Materiálově lineární chování vychází z Hookeova zákona tj. z lineární závislosti mezi napětím a poměrnou deformací. Řešení bylo prováděno z důvodu výpočtu s uvažováním geometrické nelinearity a existence kontaktu mezi vazníkem a sloupem v krocích. Celkové působící zatížení bylo rozděleno do 20 přírůstků, tj. v jednom zatěžovacím stavu byla konstrukce zatížena 5% celkového zatížení „vlastní tíha vazníku, tíha vazniček“. Při geometricky nelineárním výpočtu kopíruje veškeré zatížení pohyb deformovaného tělesa, a tím také výslednici síly. Vlastní výpočet



Obr. 9 Varianty uspořádání betonářské výztuže vazníku – armokoše, detaily v místě uložení.



Obr. 10 Pole hlavního napětí σ_1 [Pa] v blízkosti hlavní nosné betonářské výztuže (a) a normálové napětí v betonářské výztuži (b).

probíhá v iteračním procesu, který je značně náročný na operační paměť a je také velmi časově náročný.

Pomocí vytvořeného výpočtového modelu byla analyzována různá konstrukční uspořádání detailu (poloha betonářské výztuže, způsob provedení pro kotevní trn atp.). Pro jednotlivé výpočtové modely bylo vyhodnoceno rozložení pole maximálního hlavního napětí σ_1 [Pa] v blízkosti hlavní nosné betonářské výztuže, obr. 10a. Současně bylo vyhodnocováno normálového napětí v betonářské výztuži, obr. 10b.

4. ZÁVĚR

Příspěvek nebyl zaměřen na vysvětlení mechanismu vzniku havárie a její příčin, ale na možnosti uplatnění statické analýzy ve forenzním inženýrství. Popsaná analýza významným přispěla k stanovení pravděpodobných příčin havárie přistavované části komplexu hal. Další údaje o výsledcích šetření a vyjádření o příčinách havárie, uvedené ve vypracovaném znaleckém posudku, nemohou být zatím zveřejněny.

Poděkování

Článek vznikl za podpory vědecko výzkumného záměru JN MSM 261100007 „Teorie, spolehlivost a modely porušení staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí“.

5. LITERATURA

- [1] BRADÁČ, A. a kol.: *Soudní inženýrství*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 1997. ISBN 80-7204-057-X.
- [2] OŠLEJŠEK, J. – BRADÁČ, A.: *Znalecká činnost ve stavebnictví*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 1994. ISBN 80-85867-06-0.
- [3] ANSYS Theory Reference 6.0, Ansys, Inc., SAS IP, Inc., Houston, 2000.