

PREDPOVEDANIE ODOLNOSTI ŠTÍHLÝCH BETÓNOVÝCH STĹPOV PRI STABILITNOM ZLYHANÍ ■ PREDICTION OF THE SLENDER CONCRETE COLUMNS RESISTANCE AT STABILITY FAILURE

Vladimír Benko, Marián Kišac,
Peter Kendický, Alfred Strauss,
Tomáš Šalát, Lubomír Lašán

V rámci aplikovaného výskumu Stavebnej fakulty STU v Bratislave v spolupráci s firmou ZIPP Bratislava spol. s r. o. je naplánované experimentálne overovanie globálnej spoľahlivosti štíhlych železobetónových stĺpov z normálneho betónu C45/55 a vysokohodnotného betónu C100/115. Stĺpy sú navrhnuté tak, aby zlyhanie stĺpov na stabilitu predchádzalo zlyhaniu kritických prierezov na odolnosť. ■ *Experimental verification of global reliability of slender reinforced concrete columns from the regular concrete C45/55 and high performance concrete C100/115 is being realized within the applied research of the Faculty of Civil Engineering at Slovak University of Technology in Bratislava and in cooperation with ZIPP Bratislava spol. s r. o. Columns are designed in such a way to collapse to stability before the resistance of the critical cross sections is reached.*

Pri navrhovaní tlačných železobetónových prvkov je dôležité, a často veľmi náročné, pri návrhu zohľadniť teóriu druhého rádu. Vyššia náročnosť fyzikálno-matematického modelu oproti iným stavebným materiálom je z dôvodov zmeny tuhostí v oblastiach, kde vznikajú trhliny, t.j. po prechádzaní zo stavu napätosti I na stav napätosti II. Náročnosť sa zvyšuje aj potrebou zohľadňovať pri navrhovaní reologické vplyvy.

Odborná literatúra ako aj normové predpisy, uvádzajú viacero metód, ktoré sú mnohokrát založené na výrazne zjednodušujúcich predpokladoch. Európska norma pre navrhovanie železobetónových konštrukcií ponúka tri metódy zohľadnenia vplyvu teórie druhého rádu pre návrh tlačných železobetónových prvkov [1] kap. 5.8. Zjednodušenú metódu vychádzajúcu z menovitej kritivosti [1] kap. 5.8.8, zjednodušenú metódu vychádzajúcu z menovitej tuhosti [1] kap. 5.7 a všeobecnú metódu – nelineárnu [1] kap. 5.8.7 a kap. 5.8.6, ktorá by mala presnejšie vystihovať správanie sa tlačných železobetónových prvkov. Vplyv deformácie prvku, teda zvyšovanie excentricity pôsobenia normálovej sily, je v prípade tlačných prvkov s malou štíhlosťou možné zanedbať [1] kap. 5.8.3.

Pri experimentálnom overovaní k stra-

te stability tlačného železobetónového prvku v závislosti od štíhlosti tlačných železobetónových prvkov a od excentrického pôsobenia osovej sily na nedeformovanej sústave môže dôjsť aj pred dosiahnutím odolnosti v kritických prierezoch. K strate stability môže dôjsť aj v definičnom obore návrhového interakčného diagramu betónu oveľa skôr ako sa využitie materiálov priblíži k svojim dovoleným hraničným hodnotám. V takýchto prípadoch by bolo vhodné definovanie parciálneho súčiniteľa spoľahlivosti pre stabilné zlyhanie tlačného prvku, keďže parciálne súčinitele materiálov sa ešte nemohli uplatniť, a teda neprispievajú k zabezpečeniu celkovej požadovanej spoľahlivosti návrhu.

Dôležitosť správnej definície parciálneho súčiniteľa pre stabilné zlyhanie tlačných prvkov zvyšuje fakt, že pri stabilnom zlyhaní sa jedná o krehké porušenie bez varovania, čo si vyžaduje vyššiu globálnu spoľahlivosť ako zlyhanie duktilné. V európskych normových predpisoch sa dá nájsť odporúčaný parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre stabilné zlyhanie v rakúskej národnej prílohe [3].

STABILITNÉ ZLYHANIE TLAČENÝCH ŽELEZOBETÓNOVÝCH STĹPOV

Nárast ohybového momentu v kritických prierezoch tlačného železobetónového prvku je výrazným spôsobom ovplyvnený štíhlosťou prúta (obr. 1). Pri štíhlych železobetónových tlačných prútoch nárastom normálovej sily do-

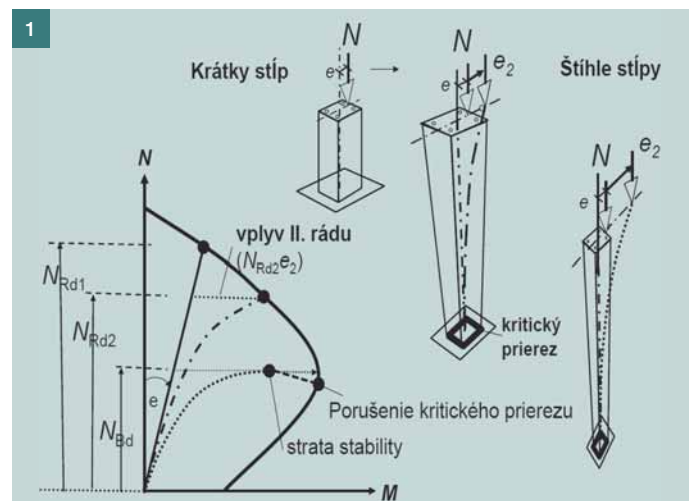
chádza k deformácii prúta, čím narastá celková excentricita pôsobenia sily na kritické prierezy. Nárast excentricity druhého rádu môže byť tak veľký, že k zlyhaniu železobetónového tlačného prvku dôjde vo vnútri definičného oboru interakčného diagramu porušenia prierezu (sila N_{Bd} na obr. 1) skôr ako sa dosiahne návrhová odolnosť v kritickom priereze.

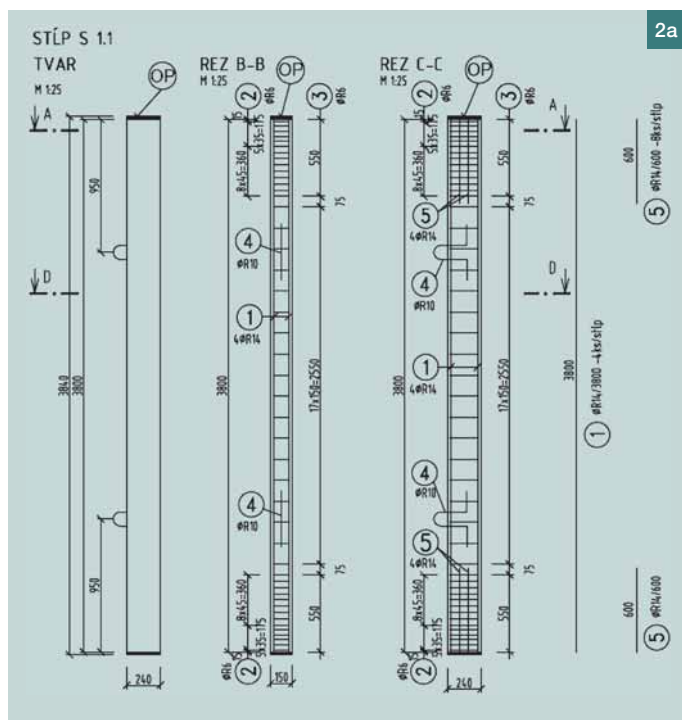
Pre navrhovanie všeobecnou metódou podľa [2] kap. 5.7 (4)P „pri používaní nelineárnej analýzy sa musia používať materiálové charakteristiky reprezentujúce skutočnú tuhosť...“, čo znamená použitie stredných hodnôt materiálových charakteristík. Príspevok parciálneho súčiniteľa spoľahlivosti v európskej norme pre praktické použitie všeobecnej metódy nie je definovaný. Praktické použitie presnejšej všeobecnej metódy je umožnené podľa [2] kap. 5.8.6 (3) za použitia návrhových vlastností materiálov, čo je v rozpore s definíciou „...sa musia používať...“ v kap. 5.7 (4)P, a navyše zníženou tuhosťou materiálov sa takto získané pretvorenia tlačných prvkov, ako aj prerozdelenie zaťaženia v nosných sústavách vzdiaľujú od ich skutočného pôsobenia.

GEOMETRIA, MATERIÁLY A VYSTUŽENIE SKÚŠOBNÝCH ŽELEZOBETÓNOVÝCH STĹPOV

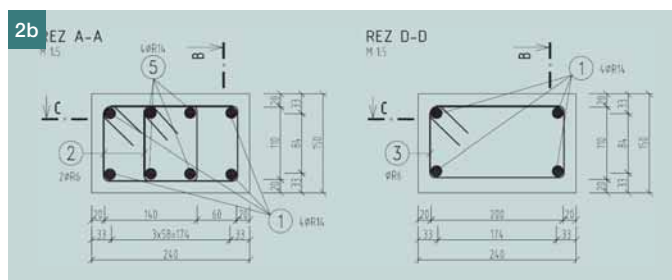
Geometria stĺpov navrhnutých pre experimentálne overovanie je zrejماً z obr. 2. Stĺpy v pripravovanom experimente sú v priečnom reze obdĺžnikového prierezu s rozmermi 240 x 150 mm. Celková dĺžka stĺpov vrá-

Obr. 1 Vplyv štíhlosti na odolnosť stĺpov ■ Fig. 1 Slenderness influence on the resistance of columns





2a



2b

Obr. 2 Tvar a vystuženie stĺpov ■ Fig. 2 Shape and reinforcement of columns

Obr. 3 Počiatočná excentricita pre stabilné zlyhanie, ktoré predchádza porušeniu v odolnosti kritických prierezoch C45/55 ■ Fig. 3 Initial eccentricity for stability failure preceding the breach of resistance at the critical cross section of C45/55

Obr. 4 Počiatočná excentricita pre stabilné zlyhanie, ktoré predchádza porušeniu v odolnosti kritických prierezoch C100/115 ■ Fig. 4 Initial eccentricity for stability failure preceding the breach of resistance at the critical cross section of C100/115

Obr. 5 Plánovaná excentricita a statická schéma stĺpov ■ Fig. 5 Planned eccentricity and static scheme of columns

Obr. 6 Fotodokumentácia z výroby a betonáže stĺpov ■ Fig. 6 Photographic documentation of columns production and casting

tane oceľových roznášacích platní je 3840mm. Stĺpy sú vystužené štyrmi prútmi pozdĺžnej výstuže priemeru $\varnothing 14$ mm. Na obidvoch koncoch stĺpa v kritických miestach je pozdĺžna výstuž doplnená štyrmi prídavnými prútmi priemeru $\varnothing 14$ mm, dĺžky 600 mm, ktoré sú privarené nosnými zvarmi na oceľové platne hrúbky 20 mm, osadené na obidvoch koncoch stĺpa. Takýmto spôsobom je zabezpečená zvýšená odolnosť koncových častí stĺpa na zabránenie lokálneho porušenia stĺpa v mieste vnášania zaťažovacej sily počas skúšania, ktoré by mohlo predchádzať stabilnému zlyhaniu stĺpov. Pričnú výstuž stĺpa tvoria dvojstržné strmene priemeru $\varnothing 6$ mm. Vzhľadom na prídavnú pozdĺžnu výstuž v kritických miestach uloženia sme navrhli štvorstržné strmene, a tým sme zvýšili efekt ovinutia. Presné uloženie výstuže je znázornené na obr. 2.

Spracovaná realizačná dokumentácia

s predpísanými triedami materiálov bola odoslaná do výroby ZIPP Bratislava spol. s r. o. v Seredi. Vzhľadom na to, že sa jedná o plánovaný experiment a nie sú k dispozícii presné materiálové charakteristiky, ktoré by dobre vystihovali použité materiály, bolo pre zadanie predpovedí pre nelineárne analýzy uvažované s plánovanými normovými hodnotami príslušných materiálov betón C45/55, resp. C100/115 a betonárska výstuž triedy B500 B (R 10505).

PLÁNOVANÉ NAMÁHANIE PRE STABILNÉ ZLYHANIE

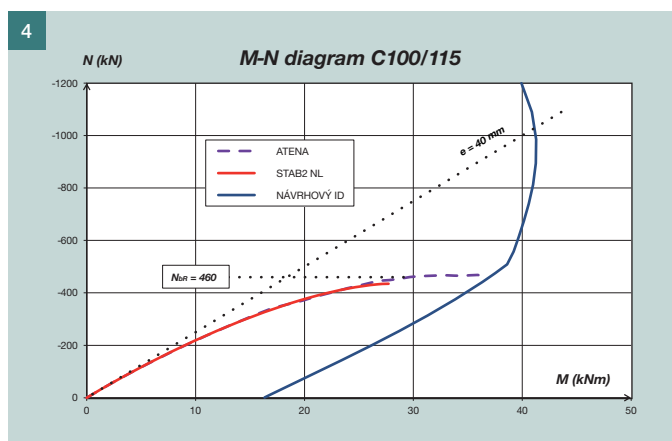
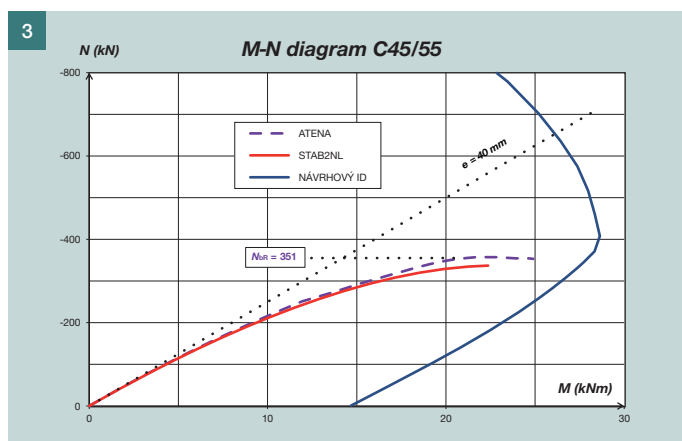
Geometria stĺpov pre experimentálne overovanie, vystuženie stĺpov, ako aj plánovaná excentricita na koncoch stĺpa, bola určovaná na základe nelineárnych výpočtov autorov takým spôsobom, aby pre plánované stĺpy došlo k stabilnému porušeniu stĺpov v definičnom obore návrhových interakčných diagramov, a teda pred dosiahnutím

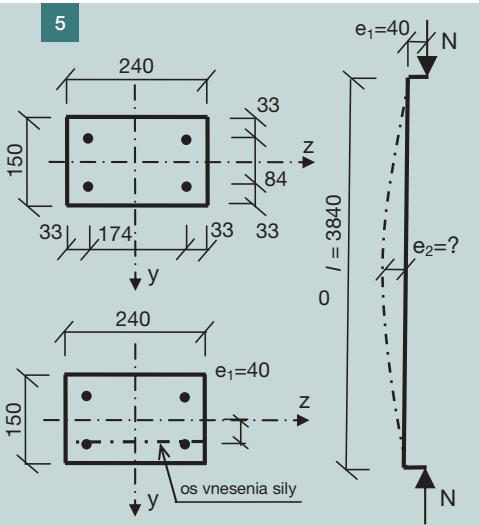
návrhovej odolnosti kritických prierezov. Kritická sila pri dosiahnutí stabilného zlyhania pre stĺpy z betónu C45/55 je graficky znázornená na obr. 3 a pre stĺpy z betónu C100/115 na obr. 4 určená z dvoch nelineárnych výpočtov za použitia softvéru ATENA a STAB 2NL.

VÝROBA SKÚŠOBNÝCH STĽPOV

Výroba stĺpov prebiehala vo výrobnej hale betonárky ZIPP Bratislava spol. s r. o. Pri betonáži sa rovnomerné rozloženie betónovej zmesi zabezpečovalo pomocou ponorných vibrátorov (obr. 6).

Súčasne so stĺpmi sa zhotovovali skúšobné vzorky pre testovanie normových charakteristík betónu po 28 dňoch, ako aj skúšobné vzorky uskladnené so stĺpmi na určenie materiálových charakteristík betónov v čase skúšania stĺpov. Po dosiahnutí 60% pevnosti boli stĺpy prevezené do skúšobného laboratória Stavebnej fakulty STU.





MERANIA NA SKÚŠOBNÝCH STĽPOCH

Meranie a zapisovanie meraných hodnôt na skúšaných stĺpoch okrem zaužívanej meracej techniky v laboratóriu Stavebnej fakulty bude doplnené paralelným meraním realizovaným firmou SYLEX.

Meracia technika firmy SYLEX je založená na odraze signálu z Braggovej mriežky (FBG), ktorá je vytvorená pomocou masky a UV žiarenia v optickom vlákne. FBG odráža iba špecifickú vlnovú dĺžku a odrazený signál je zachytený vyhodnocovacou jednotkou – interogátorom. Pri pôsobení napätia (ťah, tlak, teplota) na FBG dochádza k posu-

nu vlnovej dĺžky, ktorý je priamo úmerný sile pôsobiaceho napätia. Ako generálne mladšia a nastupujúca technológia merania, vyniká oproti konvenčným elektrickým alebo hydraulickým meracím systémom niektorými bezkonkurenčnými vlastnosťami, napr.:

- imúnosť voči elektromagnetickému žiareniu,
- rýchla a jednoduchá inštalácia,
- dlhá životnosť (>20 rokov),
- elektricky nevodivé a pasívne – eliminácia rizika výbuchu alebo vzniku iskry,
- multiplexovanie – viac meracích bodov na jednom vlákne (jedno vlákno môže merať rôzne veličiny v rôznych pozíciách),
- meracia vzdialenosť až do 10 km.

PREDPOVEDE ZLYHANIA STĽPOV NA STABILITU

Používanie nelineárnych výpočtov v posledných rokoch umožňuje rýchly vývoj softvérových produktov aj pre oblasť navrhovania stavieb. Preto je možné využitie presnejších výpočtov nielen pre oblasť vedecko-výskumnú v laboratóriách univerzít a skúšobných ústavoch, ale použitie presnejších výpočtov sa otvára aj projektovým kanceláriám pre praktické navrhovanie.

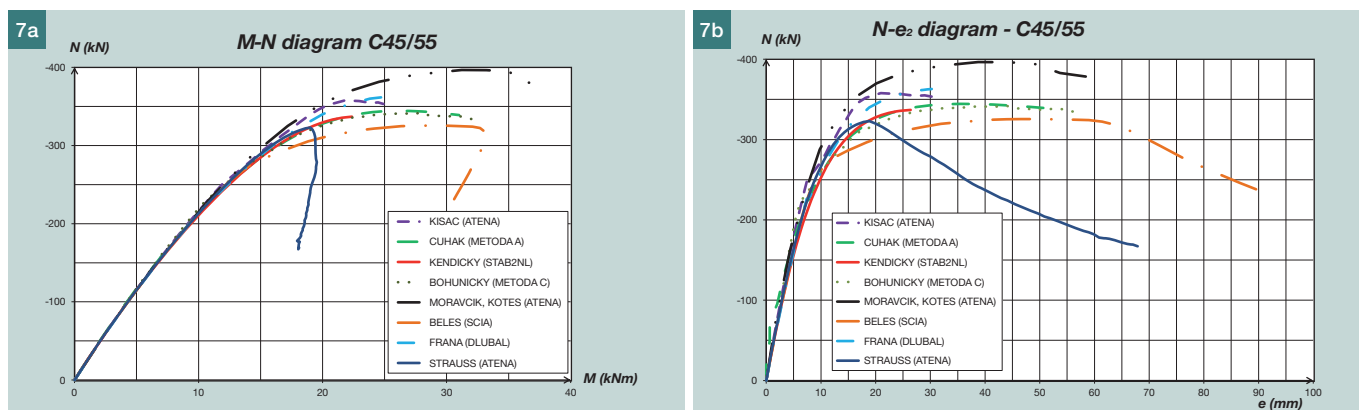
Používanie nelineárnych analýz pre železobetónové prvky je značne náročné a vyžaduje skúsenosti spojené s po-

rovnáním mnohých výsledkov na experimentálne overených prvkoch a konštrukciách. Používanie nelineárnych metód vzhľadom na neplatnosť superpozície čiastkových výsledkov jednotlivých zaťažovacích stavov je pre praktické navrhovanie, ktoré si pre semiprobabilistické metódy vyžaduje desiatky až stovky rôznych kombinácií zaťaženia, výrazne znevýhodnené.

Overovanie výsledkov experimentálnych meraní nelineárnymi metódami sa stalo samozrejmosťou. Možnosti zadávania vstupných parametrov pre nelineárne analýzy umožňujú v dnešných podmienkach hardvéru a softvéru namodelovať prakticky čokoľvek a výsledkami sa priblížiť tam, kde sa autor analýzy potrebuje dostať. Vyžaduje si to samozrejme dobrú znalosť nie len používaného softvéru, ale aj skúsenosti s nelineárnymi analýzami. Pravdivé preverenie svojich skúseností a zručností s nelineárnymi analýzami je možné predpovedaním výsledkov ešte pred samotným experimentálnym meraním.

Z tohto dôvodu sme oslovili odborníkov v okolitých krajinách, ktorí majú s nelineárnymi metódami značné skúsenosti, aby predpovedali správanie sa štíhlych železobetónových stĺpov, ktoré sa pripravujú na skúšky v laboratóriu STU v Bratislave. Výsledky nelineárnych analýz jednotlivých autorov zo Sloven-





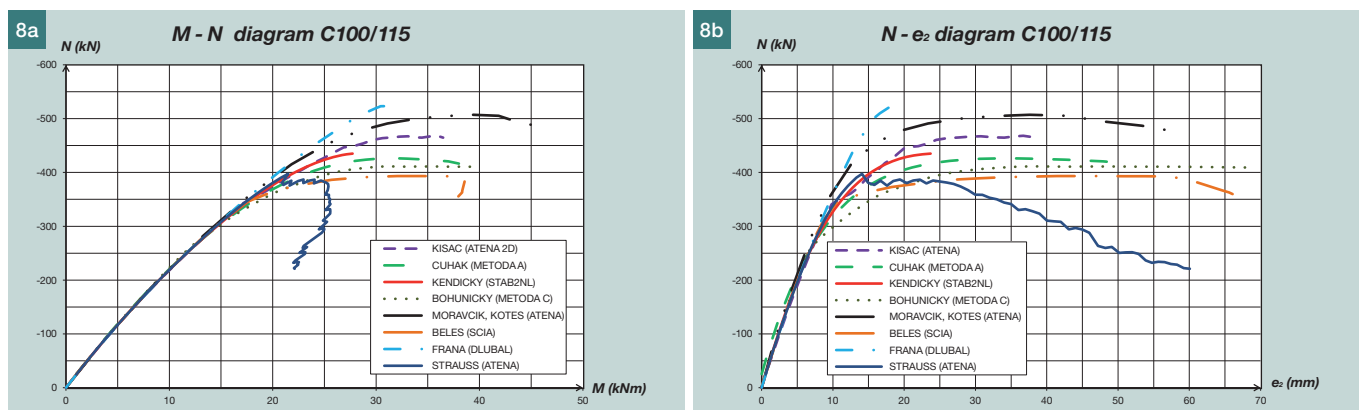
Tab. 1 Výsledky predpovedí pri stabilnom zlyhaní stĺpov z betónu C45/55
 Tab. 1 Predictions results of stability failure of the C45/55 concrete columns

Spoločnosť	Riešiteľ	Softvér	N [kN]	u_y [mm]	M [kN.m]
STU Bratislava	Kišac M.	ATENA	357,8	20,9	21,8
STU Bratislava	Čuhák M.	Metóda A	344,4	35,5	26
STU Bratislava	Kendický P.	Stab2NL	336,8	26,4	22,4
Leptón s. r. o.	Bohunický B.	Metóda C	342	44	28
ZU Žilina	Moravčík M., Koteš P.	ATENA	396,6	38,7	31,2
Nemetschek-Scia	Beleš I.	Scia	325,5	49,4	29,1
Dlúbal - CZ	Fráňa J.	Dlúbal	363	30,3	25,5
BOKU Wien - A	Strauss A.	ATENA	323	18,9	19

ska, Čiech a Rakúska sú uvedené na obr. 7 a 8. a tab. 1 a 2.

V tab. 1 a na obr. 7 pre stĺpy z betónu C45/55 a v tab. 2 a na obr. 8 pre stĺpy z betónu C100/115 sú uvedené mená jednotlivých odborníkov, ich pracovisko, použitý softvér, ako aj veľkosť osovej sily, deformácia stĺpa a celkový ohybový moment, pri ktorom stĺpy stratia stabilitu. V diagramoch označených „M - N diagram“ sú uvedené priebe-

hy nárastu normálovej sily a celkového ohybového momentu, ktorým je namáhané kritické miesto (stred stĺpa). V diagramoch označených „N - e_2 diagram“ sú uvedené priebehy nárastu normálovej sily a nárastu excentricity e_2 – deformácia stĺpa v jeho kritickej strednej časti, kde očakávame aj celkové zlyhanie stĺpa. Maximálne hodnoty odolnosti normálovej sily definujú zároveň aj okamih, pri ktorom stĺp zlyháva na stabilitu.



Tab. 2 Výsledky predpovedí pri stabilnom zlyhaní stĺpov z betónu C100/115
 Tab. 2 Predictions results of stability failure of the C100/115 concrete columns

Spoločnosť	Riešiteľ	Softvér	N [kN]	u_y [mm]	M [kN.m]
STU Bratislava	Kišac M.	ATENA	468,1	36,7	35,9
STU Bratislava	Čuhák M.	Metóda A	426,2	35,1	32
STU Bratislava	Kendický P.	Stab2NL	435,1	23,7	27,7
Leptón s. r. o.	Bohunický B.	Metóda C	411,5	37,9	31
ZU Žilina	Moravčík M., Koteš P.	ATENA	507,1	37,6	39,4
Nemetschek-Scia	Beleš I.	Scia	393,4	41,4	32
Dlúbal - CZ	Fráňa J.	Dlúbal	523,5	19,8	31,3
BOKU Wien - A	Strauss A.	ATENA	397,4	14,1	21,5

ZÁVERY

Po uskutočnení a vyhodnotení experimentálnych meraní budeme odbornú verejnosť informovať aj o výsledkoch predpovedí a porovnaní s nameranými hodnotami, ktoré ako jediné možno považovať za presný výpočet.

Ďakujeme všetkým odborníkom, ktorí sa do predpovedí skutočného správania sa stĺpov pripravených na stabilné zlyhanie zapojili.

Ďakujeme firme ZIPP Bratislava spol. s r. o. za odbornú spoluprácu a podporu pri výrobe skúšobných stĺpov a skúšobných vzoriek. Naše poďakovanie patrí aj firme TAZUS n. o., ktorá v spolupráci so SvF STU Bratislava podporila projekt prevedením materiálových skúšok skúšobných vzoriek.

Projekt bol realizovaný za finančnej podpory Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva a vedy SR. Registračné číslo projektu je VEGA č.1/0690/13.

Obr. 7 Predpovede pracovných diagramov stĺpov z betónu C45/55
 Fig. 7 Working diagrams predictions of the C45/55 concrete columns

Obr. 8 Predpovede pracovných diagramov stĺpov z betónu C100/115
 Fig. 8 Working diagrams predictions of the C100/115 concrete columns

prof. Dipl.-Ing. Dr. Vladimír
Benko, PhD.
e-mail: vladimir.benko@stuba.sk



Ing. Marian Kišac
e-mail: marian.kisac@stuba.sk

Ing. Peter Kendický
e-mail: peter.kendicky@stuba.sk



všetci: Fakulta stavebná
STU v Bratislave
Katedra betónových konštrukcií
a mostov
Radlinského 11, 813 68 Bratislava
Slovenská republika

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Alfred
Strauss
e-mail: alfred.strauss@boku.ac.at
University of Natural Resources
and Life Sciences
Dept. of CE and NH
Peter Jordanstr. 82, A-1190 Wien
Austria



Ing. Tomáš Šalát
e-mail: tsalat@sylex.sk
SYLEX, s. r. o.
Mlynské luhy 31, 821 05 Bratislava
Slovenská republika



Ing. Ľubomír Lašán
e-mail: lubomir.lasan@strabag.com
ZIPP Bratislava spol. s r. o.
Mlynské nivy 61/A
820 15 Bratislava
Slovenská republika



Literatúra:

- [1] EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004
- [2] STN EN 1992-1-1:2006 (73 1201) Eurokód 2 – Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy, 2006
- [3] ÖNORM B 1992-1-1:2011 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, 2011
- [4] Moravčík M., Brodňan M., Koteš P., Kotula P.: Skúsenosti s mostami zo starších typov prefabrikátov, Betonárske dni 2012, zb., STU v Bratislave, 2012, ISBN 978-80-8076-104-2, s. 439–444
- [5] Burtscher S. L., Rinnohofer G., Benko V., Kollegger J.: Zerstörende Großversuche an hochbewehrten Schleuderbetonstützen. Bauingenieur, Band 78, April 2003, S. 187–193

VZPOMÍNKA NA DOC. ING. VOJTĚCHA MENCLA, CSC.

Ve věku svých nedožitých 77 let zemřel 11. listopadu 2013 doc. Ing. Vojtěch Mencl, CSc., vzácný člověk, významným odborník a vynikající pedagog.

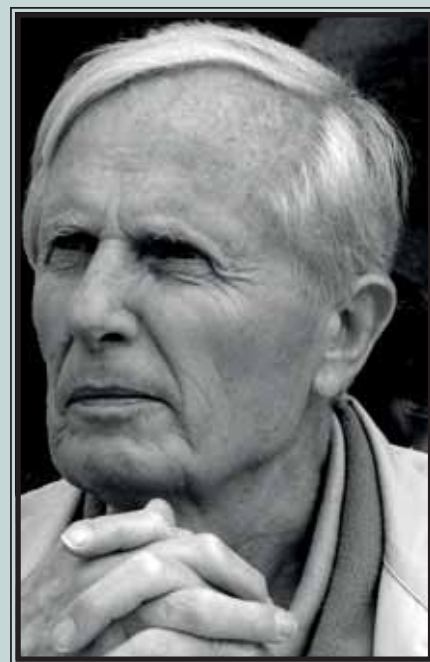
Jeho životní pouť začala v roce 1936 v Praze, jeho pozdější léta a doba studií však již probíhala v Brně. Maturitu skládal uprostřed padesátých let a následné studium na Fakultě inženýrského stavitelství v Brně ukončil v roce 1960. Od tohoto roku až do roku 1990 pak pracoval na vývojových pracovištích stavebních firem. Zaměřoval se na předpjaté betonové konstrukce mostů a průmyslových staveb, kde získával velké praktické zkušenosti, které pak zúročoval během své pozdější pedagogické činnosti.

Poznatky získané během vysokoškolského studia mu nestačily, a proto postupně absolvoval dvě postgraduální studia, a to v oblasti „Nedestruktivního zkoušení“ a následně „Mostů z předpjatého betonu“ – těmto oborům se pak věnoval po celý svůj život.

Společenské změny, které prožívala naše společnost po roce 1989, se velkou měrou odrazily i v životě doc. Vojtěcha Mencla. Rychle dokončil již dávno připravovanou aspiranturu a v roce 1990 se habilitoval na Fakultě stavební v oboru Betonové konstrukce.

Stal se vedoucím ústavu „Stavební a zkušební metod“ a jeho odborné znalosti byly využity i v jeho akademické funkci Prorektora pro výstavbu a dislokaci na VUT v Brně, kterou zastával od roku 1991 do roku 1997. Jako stavební inženýr s velkými zkušenostmi se podílel na znovuoživení Českého svazu stavebních inženýrů a na založení „České komory stavebních inženýrů a techniků“. V obou těchto stavovských organizacích zastával významné funkce a přispěl k jejich rozkvětu.

Rád připojuji i pár svých vzpomínek na milého kolegu Vojtěcha. Přesně si vzpomínám na naše první setkání na jeho pracovišti na Bidlácích v roce 1977, kde mi umožnil betatronem prozářit několik předpjatých nosníků. Výsledky jsem potřeboval dát do své



kandidátské disertační práce. Možná nebudu přehánět, pokud budu tvrdit, že jsme si tehdy „padli do oka“. Během 80. let jsme společně publikovali řadu článků u nás i v zahraničí, které byly zaměřené na nedestruktivní kontrolu předpjatých konstrukcí. Úzce jsme spolupracovali i v 90. letech, neboť zaměření našich ústavů bylo velmi podobné. Těž štafetu Prorektora pro výstavbu a dislokace na VUT jsem po něm přebíral. Po sloučení našich ústavů v roce 2002 měl Vojtěch u nás stále „svůj stůl“. I když své zkušenosti předával na Technické univerzitě v Ostravě, často se u nás zastavoval a rád jsem s ním diskutoval a probíral aktuální stavební problémy. Velmi si vážím toho, že jsem mu na podzim 2013 mohl předat cenu „Karla Hollana“ v rámci konference „Zkoušení a jakost ve stavebnictví“, které se on vždy aktivně zúčastňoval.

Pan docent Mencl již mezi námi není. Natrvalo však zůstává ve vzpomínkách a v podvědomí naší odborné stavební veřejnosti. Pro naše stavebnictví vykonal velmi mnoho a patří mu za to upřímný dík.

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.