

STABILIZACE BAROKNÍ ZDI PŘEDPÍNACÍMI LANY A ROZŠÍŘENÍM ZÁKLADU ■ STABILIZATION OF BAROQUE WALL USING STRANDS AND WIDENING OF THE FOUNDATION

Ladislav Klusáček, Zdeněk Bažant,
Petr Ducháč, Marek Volf

Stabilizace vychýlené památkově chráněné historické zdi s pilíři je zajímavý statický problém. Jedním ze způsobů efektivního zajištění takové konstrukce může být vertikální předpětí a rozšíření základů s využitím prepínacích lan. ■ *Stabilization of declined historic protected masonry wall with pillars is an interesting static problem. Vertical prestressing using strands and widening of the foundation can be the one of effective correction of this situation.*

V mnoha případech se statik setkává s nezbytností stabilizovat stěny či sloupy objektů zděných z cihel nebo smíšeného zdiva, zejména těch, které se vychylují od svislice. K vychýlení dochází vlivem změny statického schématu konstrukce či vlivem účinků vnějšího zatížení, příčinou bývají problémy v podloží objektu (promáčením podzákladů vodou v důsledku porušených řadů, nepříznivým vlivem vegetace apod.) [1]. Pokud se zjistí a odstraní příčina poruchy, je možné dosáhnout účinné nápravy vyvozením svislé stabilizující síly pomocí předpětí.

PŘEDCHOZÍ PODOBNÉ REKONSTRUKCE

Již v minulé době se podařilo tímto způsobem úspěšně stabilizovat podélnou stěnu sto padesát let staré zámecké jízdárny v Letovicích, severně od Brna, která se horním okrajem vychylovala účinkem vodorovných sil střechy De l'Ormovy dřevěné skružové obloukové konstrukce [2, 3, 6]. Obdobným způsobem byly staticky zajištěny barokní kolonáda s pískovcovými sloupy a klenbami [4] v areálu zámecké zahrady ve Vyškově, památkově chráněná hlavní fasáda historického objektu radnice ve Vyškově [7] a také železobetonové sloupy skladovací haly z šedesátých let minulého století v areálu cementárny v Mokrém.

HISTORICKÁ STĚNA S BAROKNÍ BRÁNOU

Historická stěna s barokní bránou do zahrady areálu zámecké kolonády ve Vyškově pochází z období baroka (1673); nelze však vyloučit, že někte-

ré detaily konstrukce jsou mladší. Jedná se o cennou kulturní památku – otvor brány, rámovaný bosáží, plastika na kladí brány a kovaná mříž tvoří celek zvláštní krásy. Bosáž a plastika jsou z pískovce.

Na bránu navazuje zděná pilířová zeď, která je na pravé straně napojena na památkově chráněný zahradní domek a vlevo na další stavbu. Ze strany zahrady je zeď mezi pilíři zúžena a opatřena půlválcovými nikami (výklenky), zaklenutými konchami. Šířka zdi je v místě pilířů cca 810 mm, v místě výklenků cca 450 mm, výška pak 4 950 mm.

Základy zdi a brány (tj. i pod vstupním otvorem) byly provedeny ze smíšeného zdiva (převažuje kámen, občas byla nalezena i cihla) na hliněnou maltu. Byly uloženy do hloubky cca 0,7 až 1,2 m; na jedné straně byly vysazeny o cca 50 mm, na straně druhé se základ pod zdí nerozšiřoval.

Vyklonění zdi a brány

Stav brány a zdi nebyl uspokojivý. Již na první pohled bylo zřejmé, že brána i zeď se vyklánějí z vertikální roviny. Geodetickým měřením na místě samém bylo prokázáno, že výklon brány je značný – na výšce 4 950 mm to bylo cca 145 mm. Výklon brány, ovlivněný problematickými základy a těžkou, nesymetricky umístěnou pískovcovou plastikou na kladí brány, přispíval svojí hmotností k výklonu celé konstrukce. Přepočtem bylo zjištěno, že výsledná tlaková síla se nacházela mimo jádro průřezu, takže zdivo zdi i brány bylo v úrovni terénu namáháno tahem – tato skutečnost jen potvrzovala nedobrou stav památky (obr. 1). Nebylo možné prokázat spolehlivost ani v základové spáře, ani v úložné spáře vlastní zdi na základ.

Pokud se blíže zaměříme na bránu, pak bylo možné po obou jejích bocích nalézt odtržení sloupů s bosáží ode zdi. Bylo zřejmé, že tento stav nastal již před časem (ale až po nedávné náročné umělecko-historické rekonstrukci), neboť spára byla již dříve vyplněna a byla celistvá. Před opravou se výplň znovu odtrhla, spára se znovu rozšířila a v dolní části se na vykloněné straně rozevřela u jednoho sloupu šikmá trhli-

na a došlo k drcení staré výplně (obr. 2).

Nelze též opomenout, že okolní terén je relativně otevřený, takže účinek společného tlaku a sání větru na zeď, která je s bránou spojena, vyvolával obavy ze zřícení zdi. Přepočet zdi na ohyb od větru, uvážil-li se stav jejího zdiva, dále především náklon, výška, plocha a oslabené průřezy, vedl k závěru, že opravu nelze odkládat a je dokonce nutné nakloněnou bránu do doby opravy podepřít (obr. 3).

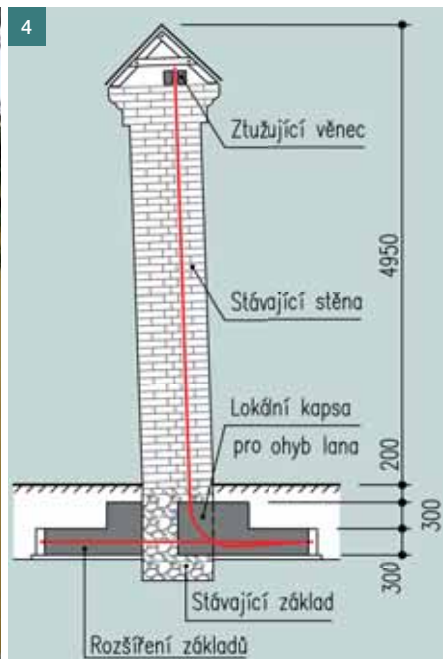
Základy

Všeobecný stav základů nebyl příliš dobrý, navíc byly narušeny u rozvědčů, umístěných ve zdi. To vyvolalo svislé trhliny zdi, jasně viditelné na ploše zdi. Stávající základový pás byl proveden z cihelného zdiva prakticky ve stejné šířce, jako vlastní zeď. Bylo zřejmé, že byl kdysi navržen pouze konstruktivně a s přihlédnutím k malému svislému zatížení. Dlouhodobé stabilitě nebyla v době výstavby věnována pozornost, což je do jisté míry i pochopitelné.

Základovou půdou jsou jemnozrnné neogenní hlíny až navážky, se značnými antropogenními příměsmi – půda je silně zavlhlá, téměř plastická. Tyto základové půdy jsou z hledis-



1



Obr. 1 Vychýlení stěny a provizorní zajištění
 Fig. 1 Wall deflection and its temporary securing

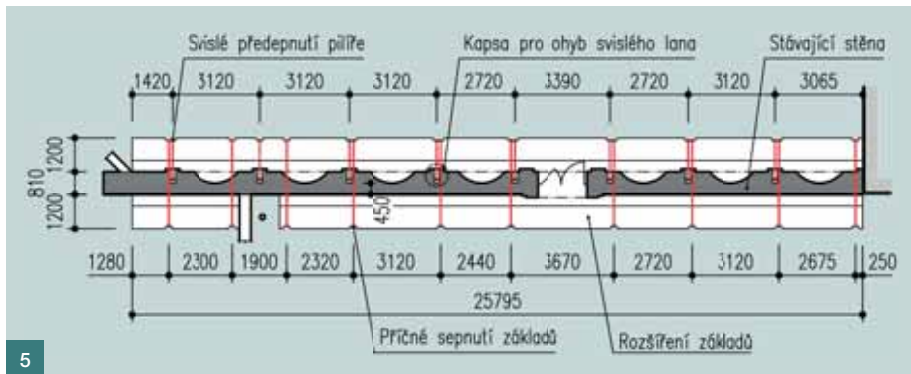
Obr. 2 Trhliny mezi bránou a zdí
 Fig. 2 Cracks between the gate and the wall

Obr. 3 Provizorní podepření zdi, pohled od zámku
 Fig. 3 Temporary wall bearing, view from the castle side

Obr. 4 Koncepte zesílení
 Fig. 4 Design of strengthening

Obr. 5 Situace zdi, rozšíření základu a umístění předpínacích lan
 Fig. 5 Plan of the wall with the foundation widening and arrangement of strands

Obr. 6 Etapy provádění opravy
 Fig. 6 Stages of the repair works



5

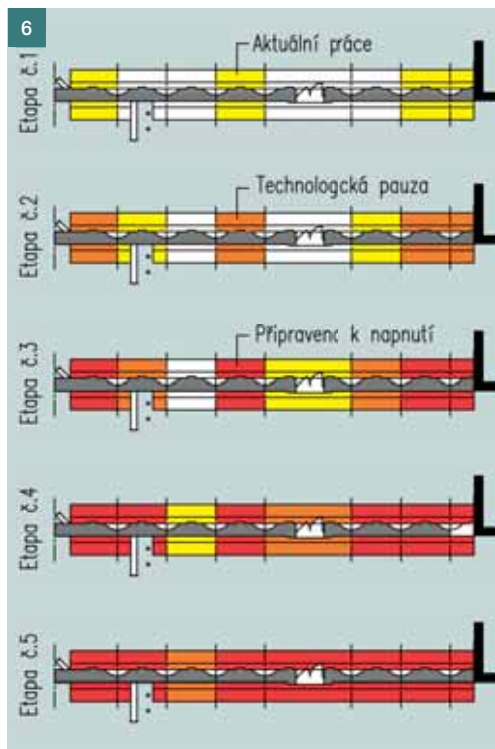
ka dlouhodobé stability zdi nevhodné. Vzhledem ke svažujícímu se terénu a k dlouhodobě zvětšujícímu se náklonu brány a okolní zdi se na nestabilitě zdi mohlo podílet i dlouhodobé ploužení podloží. Charakteristická únosnost byla stanovena mezi 150 až 200 kPa.

KONCEPCE STATICKÉ STABILIZACE

Stabilizace této silně vykloněné konstrukce byla navržena kombinací svislého předepnutí zdi a rozšíření původního základu (obr. 4 a 5). Svislé předepnutí zdi eliminuje tahové napětí v patě zdi (v úložné spáře na původní základ), které zde vzniká již v důsledku momentového působení nakloněné konstrukce a významně se zvětšuje působením větru. Rozšířením původního základu na obě strany se zajišťuje náležitá spolehlivost proti překlopení celé konstrukční sousta-

vy základ – zeď, významně se snižuje napětí v základové spáře a vytváří se rezerva pro případ, že by dlouhodobé deformace základové půdy ještě nebyly ustáleny. Spolupůsobení rozšiřujících pásů a původního základu je dosaženo jejich horizontálním předepnutím.

Statické zásahy spojené s nutností odhalit stávající základy až na základovou spáru nebylo možné provést v jednom pracovním taktu; cenná barokní konstrukce by se totiž pravděpodobně zřítla. Proto bylo navrženo provádění po etapách (obr. 6) se zajištěním stability konstrukce jejím odhalováním pouze v částečných výkopech. Teprve po postupném rozšíření části základu, po jejich zmonolitnění s původním základem vodorovnými předpínacími lany a po stabilizaci příslušného úseku zdi svislými předpínacími lany se přikročilo k výkopu v další etapě.



STANOVENÍ VELIKOSTI PŘEDPĚTÍ SVISLÝCH PILÍŘŮ

Obecně lze říci, že zděné konstrukce, bez ohledu na typ samotného kusového staviva a pojiva (cihla, opracovaný kámen apod.), vykazují velmi malou únosnost v tahu za ohybu. Současně platná norma pro navrhování zděných konstrukcí [8] rozlišuje podle způsobu porušení dva základní případy únosnosti takto namáhaného zdiva:

- rovina porušení je rovnoběžná s ložnými spárami (f_{xk1}),
- rovina porušení je kolmá k ložným spáram (f_{xk2}).

Tyto hodnoty jsou řádově nižší než únosnost zdiva v tlaku (kdy zatížení působí kolmo na ložnou spáru). U zajišťované zdi rozhodoval první z případů porušení, tj. pevnost zdiva v tahu za ohybu. Pro pálené zdicí prvky na obyčejnou maltu norma uvádí hodnotu pevnosti $f_{xk1} = 0,1$ MPa.

Řešenou stěnu lze při jisté míře zjednodušení uvažovat jako samostatně stojící „svislou“ zeď vetknutou do základů. Vzhledem k charakteru konstrukce (štíhlost a výška) je působení tlaku a sání větru rozhodující složkou zatížení, které v kombinaci se současným vychýlením zdi od svislice vyvozují ohybová namáhání v pa-

vek měl být splněn jak pro případ extrémního působení větru, tak i pro úplné bezvětrí. Další omezující parametry, ovlivňující volbu předpínací síly, vyplývaly z použité technologie. Minimální napínací síla pro zajištění funkčnosti samosvorného kotvení (objímka + samosvorný kuželík) se pohybuje v rozmezí 60 až 80 kN, čímž je dána dolní hranice síly. Horní hranice síly u jednolanového předpínacího systému vychází z pevnosti samotného monostrandu – pro sedmidrátové lano typu Y1860–S7–15,7 (ekvivalent stabilizovaného lana Ls) lze ji uvažovat přibližně rovnou 200 kN.

Poslední skutečností, limitující velikost předpětí shora, je pro tuto zeď pevnost zdiva v tlaku. Na základě dřívějších stavebně-konstrukčních průzkumů, při kterých byl posuzován celkový stav konstrukce včetně destruktivních a nedestruktivních zkoušek zdicích prvků a pojiva, byla stanovena pevnost zdiva v tlaku $f_k = 1,3$ MPa. Ze známé geometrie pilíře a únosnosti zdiva byla pak následně dopočtena maximální teoretická předpínací síla o velikosti až 600 kN (což by umožnilo použít i tři lana). Bylo však navrženo pouze jedno lano a pro zvýšení účinnosti navrženého stabilizačního opat-

dem pomyslných pilířů mezi zmíněnými nikami. Volbu předpínací síly ilustruje obr. 7.

STATICKÉ ZAJIŠTĚNÍ STĚNY

Stabilita brány a zdi v úrovni základové spáry byla zajištěna oboustranným rozšířením základu železobetonovými pásy, které se příčně, zhruba po 2 m, vzájemně spojily mírným příčným předepnutím. Rozšíření základu se předpokládalo i v místě brány. Vyztužení základu se provedlo věncové, z běžné betonářské výztuže (obr. 8 a 9).

Základním předpokladem při rozšiřování základů je zajištění spolupůsobení nově zbudované konstrukce se stávajícím základem. Použitá metodika využívající předpětí tento předpoklad bezesporu splňuje. Spára mezi rozšířením a původním základem se nemůže rozevřít (je trvale stlačována působícím předpětím); tím je zajištěno nezbytné zmonolitnění. Výsledkem tohoto působení je příznivěji namáhaná styčná spára nového a stávajícího základu. Styk je tedy namáhán tlakem a smykem na rozdíl od jiných způsobů zesílení, kde je namáhání tahové a smykové.

U zděných či kamenných základů pak tedy zaniká problém kotvení be-

Obr. 7 Souvislost mezi vodorovným zatížením, napětím v patě a předpětím stěny ■ Fig. 7 Relationship between the horizontal load and stress in the basement level and the prestressing of the wall

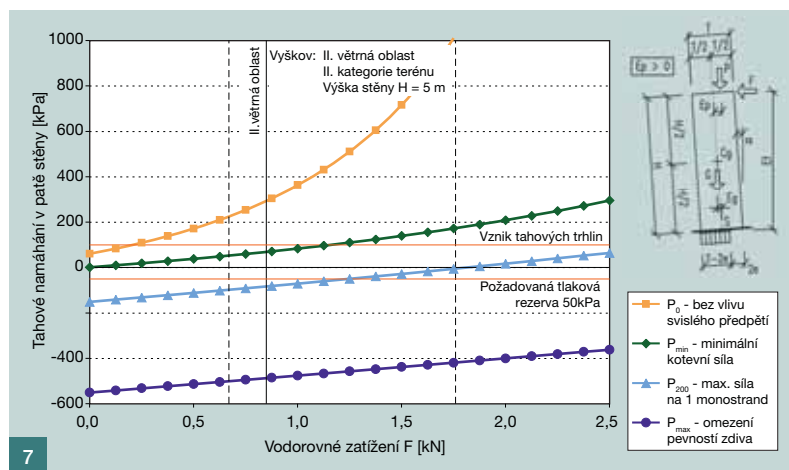
Obr. 8 Zesílení základu, vlevo zeď ■ Fig. 8 Foundation strengthening, wall on the left side

Obr. 9 Zesílení základu, betonáž a poloha kabelu ■ Fig. 9 Foundation strengthening, concreting, cable arrangement

Obr. 10 Vrtání náhradních kabelových kanálků na horním líci stěny ■ Fig. 10 Drilling of substitute cable ducts on the wall upside

Obr. 11 Opravená zeď, pohled od zámku ■ Fig. 11 Repaired wall, view of the castle side

Obr. 12 Opravená zeď, pohled z parku ■ Fig. 12 Repaired wall, view of the park side



tě stěny. Zatížení od větru je možné při posuzování konstrukce aplikovat jako spojité rovnoměrné zatížení, nebo jako silový účinek, vztažený ke konkrétní referenční ploše. Zeď se nachází v II. větrné oblasti se základní rychlostí větru $v_{b,0} = 27,5$ m/s, kde terén je v blízkosti vyšetřované konstrukce otevřený, pokrytý převážně nízkou vegetací.

Hlavním cílem při návrhu velikosti předpínací síly pilířů bylo omezení, popřípadě úplná eliminace tahového namáhání v patě stěny. Tento požada-

ření bylo umístěno vůči střednici zdi excentricky. Výstřednost lana byla navržena po celé výšce stěny konstantní o hodnotě 130 mm tak, aby momentové účinky od předpětí působily proti vlastní tíze v důsledku naklonění stěny.

Konečná hodnota předpínací síly byla volena v rozmezí od 180 až 200 kN s ohledem na počáteční imperfekci konstrukce a na oslabení průřezu zdi nikami z rubové strany (ze strany parku). Svislá lana jsou vedena po vzdálenostech 3,12 m, vždy přibližně stře-

tonářské výztuže pro přenesení tahových sil do původního, často chatrného, základového zdiva.

Využitím možnosti vedení lan excentricky vzhledem ke střednici rozšiřující se konstrukce lze dosáhnout okamžitého odlehčení původní základové spáry. Mimostředním působením síly od předpětí dojde k aktivaci konstrukce jejím vynuceným přetvořením směrem do podloží, které brání svojí tuhostí volnému přetváření od působícího předpětí. Ve styku rozšíření vzniká staticky neurčitá reakce, která od-



8

lehčuje tlaky na původní základovou spáru. V následujícím časovém horizontu dochází k přerozdělení napětí v základové spáře na celou rozšířenou plochu.

Úpravou základu se vytvořila dostatečně široká základna, s kterou zeď s bránou bude v další době schopna odolávat jednak silám z existujícího náklonu, jednak případným dalším pohybům v podloží. Současně tento základ ztužil zeď v podélném směru a eliminoval její dílčí pokles v místě rozvaděčů.

Při rekonstrukci se pak pilíře zdi i brány svisle předepnuly pomocí monostrandů, dole upevněných v novém železobetonu rozšířených základových pásů kotvami ve sklípčích, nahoře se použily kotevní desky se zapouzdřenými chráněnými kotvami ve sklípčích ve zdivu pod střešní krytinou. Síly v laněch se podle výše uvedeného předpokladu pohybovaly okolo 180 kN.

Svislé předpětí (jedno lano do jednoho pilíře) bylo nezbytné pro zajištění řádného spojení se základem tak, aby se zeď s bránou neodlomila od již zajištěných základů. Předepnutím se výsledná tlaková síla opět přemístila do jádra průřezu i při nejnepříznivější kombinaci namáhání.

TECHNICKÉ DETAILY

ÚPRAVY ZDI

Dodatečné vedení a působení zesilujících předpínacích kabelů do zdiva se provedlo metodou náhradních kabelových kanálků (SCDM – Substitute Cable Duct Method, [2] a [3]).

Kotevní oblasti byly dole vytvořeny v betonu rozšiřujících se betonových pásů, nahoře v betonu podélného věnce. Celý předpínací systém byl skryt v hmotě zdi. Náhradní kabelové kanálky $\varnothing 35$ mm se vyrobily diamantovou vrtací technikou s elektrickým pohonem. K vrtání se použilo vrtací polohovací zřízení (vrtací suport), které umožnilo nastavení směru vrtání s přesností ± 2 mm na délce vlastního polohovacího zařízení. Rozmístění kabelových kanálků po konstrukci a teoretické body pro vrtání byly uvedeny ve výkresové dokumentaci. Po napnutí kabelů se provedlo zainjektování kabelových kanálků, injektáž se provedla běžnou injektážní maltou.

Pro napínání byl použit jednolanový napínací lis s rozsahem do 200 kN. Napínalo se postupně z jedné strany, nejprve základové pásy, potom shora pilíře zdi. Při předpínání byl vždy přítomen některý z projektantů. Výsledný stav zdi s bránou je uveden na obr. 11 a 12.



9



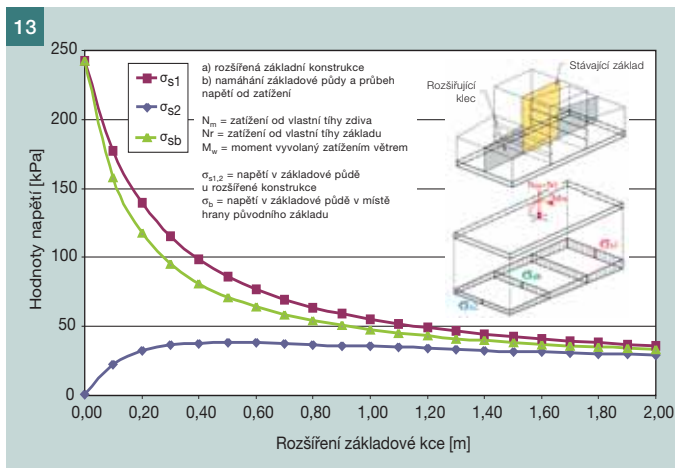
10



11



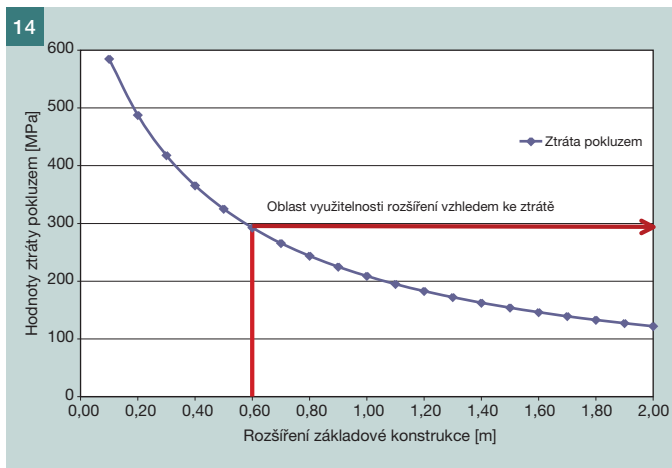
12



Obr. 13 Závislost napětí v základové spáře na délce základové konzoly ■

Fig. 13 Relationship between the subsoil stress and the length of widening cantilever

Obr. 14 Ztráta pokluzem ■ Fig. 14 Loss of prestressing due draw-in



K MODELOVÁNÍ KONSTRUKCE

Pro návrh předpětí a studium vlivu předpětí na zdivo je vhodné modelovat konstrukci pomocí stěnových prvků. Interval hodnot navrhované předpínací síly je omezen shora pevností stávající zděné a základové konstrukce, zdola je ohraničen působícími silami z náklonu konstrukce a působení větru. Na shodném modelu lze i vyhodnotit, zda je nutné stávající konstrukci dodatečně vyztužit injektovanými mikrohréby, potřebnými pro přenesení smykových sil. Při malých hodnotách zatížení lze smyková napětí přenést ozuby, které se provedou v původní konstrukci pomocí rozbrušovací pily.

Návrh velikosti rozšiřující se konstrukce je ovlivněn zejména okolními podmínkami (sousední stavby, zasahování na pozemek jiného vlastníka...) a dále požadovaným výsledným namáháním základové půdy. Závislost přerozdělení namáhání základové spáry na rozšíření základové konstrukce je na obr. 13. Uvedený průběh napětí je předkládán již po jeho přerozdělení a dotvarování zeminy.

Základová spára je zatížena působícím zatížením – v tomto případě vlastní tíhou konstrukce a zatížením větrem. Z grafu je patrné, že již při rozšíření konstrukce o 0,2 m dojde k poklesu namáhání základové půdy pod hranici 150 kPa. Takto malé rozšíření není z důvodu proveditelnosti a vlivem ztráty předpětí vhodné. Vzhledem k použitému typu lan (monostrand), jejich krátkosti a přímému vedení je rozhodující ztrátou pro návrh šířky pokluz. Tuto skutečnost vysvětluje obr. 14, z kterého je patrné, že použitelná šířka rozšiřující se konstrukce je od 0,6 m, kdy ztráta pokluzem klesá pod 25 % napínacího napětí (1 479 MPa, pokluz 5 mm). Vliv tření na velikosti ztráty je vzhledem k uvedeným důvodům zanedbatelný.

ZÁVĚR

Příspěvek upozorňuje na rozsáhlé možnosti podobných rekonstrukčních zásahů u volně stojících zdí historických oplocení, fasádních zdí při odstraňování vnitřních konstrukcí objektu (tj. po odstranění všech jejich vodorovných vazeb), opěrných zdí přenášejících zemní tlak na hranici únosnosti, či z různých důvodů vychylujících se sloupů a stěn. Popsané úspěšné zajištění barokní zdi i dalších podobných konstrukcí je toho dokladem.

Příspěvek byl zpracován za podpory výzkumného záměru MSM 0021630519 „Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce“. Při zpracování příspěvku byly použity výsledky projektu FAST-J-12-40 „Mezní únosnost zesílené krátké konzoly“.

Doc. Ing. Ladislav Klusáček, CSc.
tel.: 541 147 854
e-mail: klusacek.l@fce.vutbr.cz



Doc. Ing. Zdeněk Bažant, CSc.
tel.: 541 147 862
e-mail: bazant.z@fce.vutbr.cz



Ing. Petr Ducháč
tel.: 541 147 877
e-mail: duchac.p@fce.vutbr.cz



Ing. Marek Volf
tel.: 541 147 865
e-mail: volf.m@fce.vutbr.cz



všichni: FAST VUT v Brně, ÚBZK
Veveří 95, 662 37 Brno
www.fce.vutbr.cz

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Literatura:

- [1] Klusáček L., Bažant Z.: Variantní vedení lan při předpínání objektů. Sborník z 2. konference „Zděné a smíšené konstrukce 2002“, Praha 11/2002, s. 55–61, ISBN 80-238-9643-1
- [2] Bažant Z., Klusáček L.: Statika při rekonstrukcích. 5. vydání. VUT Brno, CERM 08/2010, 122 stran, ISBN 978-80-7204-692-8
- [3] Bažant Z., Klusáček L.: Post-tensioning of Historic Masonry Constructions Proceedings of the Structural Faults + Repair Conference, London 7/1999
- [4] Klusáček L., Bažant Z.: Stabilizace nosných stěn svíslým předpětím. Sborník z 3. konference „Zděné a smíšené konstrukce 2004“, Brno 10/2002, s. 142–145, ISBN 80-903501-1-9
- [5] Bažant Z., Strnad J.: Výstavba nových a zajištění starých základů historického objektu. Sborník přednášek XIV. Mezinárodního sympozia „Sanace 2004“, Brno 5/2004
- [6] Bažant Z., Klusáček L., Terzijski I.: Zpevňování zdiva mikrohréby. Materiály a technologie pro stavbu, Praha 4/2001, s. 34–36, ISSN 1211-0787
- [6] Bažant Z., Klusáček L.: Sanace stavebních konstrukcí předpětím. Poster VUT FAST v Brně, 2008
- [7] Bažant Z., Klusáček L., Nečas R.: Rekonstrukce objektu s použitím lokálně podepřených a předpjatých stropních desek. Sborník ČBS „11. Betonářské dny 2004“, Hradec Králové 12/2004, s. 444–449, ISBN 80-903501-3-5
- [8] ČSN EN 1996-1-1: Navrhování zděných konstrukcí