

Radim ČAJKA¹, Lucie MYNARZOVÁ²

**VYUŽITÍ NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ PŘI ANALÝZE ZDĚNÉ KONSTRUKCE
NA PODDOLOVANÉM ÚZEMÍ**

**NUMERICAL MODELLING IN ANALYSIS OF MASONRY STRUCTURE ON UNDERMINED
AREA**

Abstrakt

Předpínání poškozených zděných konstrukcí patří k nejúčinnějším metodám sanace objektů na poddolovaném území. Při návrhu předpínacích lan lze s výhodou využít numerických modelů, jak je ukázáno v tomto příspěvku. Modelování zdiva není zatím s ohledem na jeho heterogenitu a ortotropii dostatečně přesně popsáno a definováno, přesto již lze aplikovat některé postupy pro tvorbu homogenizovaných vlastností.

Abstract

Prestressing of damaged masonry structures belongs to the most effective ways of reconstruction of buildings on undermined area. Numerical modelling could be used with advantage for design of prestressing tendons as it is shown in this paper. Considering heterogeneity and orthotropy of masonry, its modelling is not defined sufficiently. After all, some methods for homogenized properties of masonry could be already applied.

1 ÚVOD

Zděné stavby patří k nejoblíbenějším konstrukcím na našem území, vznikaly průběžně v předchozích staletích a i přes rozšíření betonu a oceli si u nás doposud zachovávají své místo. Přestože je zdivo osvědčeným stavebním materiálem s dobrou pevností a trvanlivostí, dochází u zděných objektů ke vzniku poruch. Důvodem ke vzniku poruch může být nedostatečná nebo nevhodná údržba objektu, nové využití konstrukce, změna funkce nebo účelu budovy, čímž dojde ke zvýšení zatížení, nebo třeba okolní prostředí, které negativně ovlivňuje stavbu například hlučností, prašností nebo okolní dopravou.

Na území severní Moravy se pak setkáváme se specifickými příčinami poruch souvisejícími s průmyslovou a těžební činností. Ta sice už na mnoha místech nepokračuje, ale následky poddolování se objevují i v horizontu mnoha let po ukončení těžby. Poddolování způsobuje mimo jiné nerovnoměrné sedání základové půdy, kterým trpí všechny stavební objekty. Ve městech lze k tomu analogicky přirovnat například stavby podzemních kolektorů, které mohou způsobit podobné typy poruch jako důlní vlivy. Zděné konstrukce jsou na účinky poddolování velmi citlivé – dochází u nich k poklesům podpor nebo jejich horizontálním posunům, ke vzniku trhlin, částečnému zborcení nebo vybočení zdí, porušení v rozích a křížení zdí.

¹ Prof. Ing. Radim Čajka, CSc., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební (FAST), Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 344, e-mail: radim.cajka@vsb.cz.

² Ing. Lucie Mynarzová, Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební (FAST), Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 363, e-mail: lucie.mynarzova@vsb.cz.

2 SANACE ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ NA PODDOLOVANÉM ÚZEMÍ

Zděné konstrukce poškozené vlivy poddolování (např. vodorovným přetvořením terénu nebo jeho zakřivením) se nejčastěji sanují pomocí dodatečného vodorovného, případně prostorového ztužení objektu (Bradáč, 1999). Vodorovné ztužení se může provést několika způsoby, např. dodatečně provedenými železobetonovými věnci, ocelovými táhly nebo předpínacími kabely. Ztužení se obvykle provádí v několika výškových úrovních – u základové konstrukce (Obr. 1), pak alespoň v nejvyšším podlaží a obvykle také ve všech podlažích v úrovni stropních konstrukcí.

Ocelová táhla i předpínací kabely jsou mnohem účinnější, dají se také použít jako dočasné řešení pouze po dobu trvání důlních vlivů nebo například jako dočasné zajištění konstrukce při stavebních úpravách v okolí objektu. Toto řešení navíc napomáhá celkovému prostorovému ztužení konstrukce. Předpínací lana ihned po napnutí spolupůsobí s konstrukcí, vytvářejí dostatečnou tlakovou rezervu a zachovávají si svou účinnost po celou dobu životnosti objektu.

Když předpínací lana sepnou sanovaný objekt, dojde navíc – kromě vnesení žádoucího předpětí do objektu – k výraznému zvýšení pevnosti konstrukce, aniž by se musela zvyšovat její hmota (množství materiálu). Předpětí dále zabrání vzniku tahových trhlin, popřípadě může dojít i k sevření trhlin stávajících. Vnesení předpětí také dokáže vyvážit vnější zatížení (vítr, zemní tlak, zemětřesení), která by v případě nevyztuženého zdiva mohla způsobit prohýbání zdí nebo tahové trhliny.

Použití předpínacích ocelových lan k sepnutí poškozeného objektu (Obr. 2) je velmi efektivním a rychlým řešením. Vyznačuje se příznivým poměrem ceny k výraznému účinku na statiku objektu a umožní relativně snadno zachránit i hodně poškozené objekty.



Obr.1: Dodatečné vyztužení základů



Obr.2: Sepnutí objektu na poddolovaném území předpjatými lany

Správně navržená soustava předpínacích lan stojí však až na konci poměrně složitého procesu, ve kterém se vyskytují některé zásadní otázky, např. určení skutečných vlastností daného zdiva, souhrnný návrh předpětí dle platných norem, tvorba numerického modelu zdiva nebo posouzení mezního stavu únosnosti a použitelnosti v čase.

Všechny čtyři problematické oblasti uvedené v předchozím odstavci musí být součástí komplexního řešení projektanta. Každý zděný objekt je jiný (použitý materiál a jeho pevnost, způsob poruchy, opotřebení během životnosti konstrukce, historický či společenský význam), proto je pro projektanta nejvýhodnější kombinace více způsobů: normativní postupy, informace od výrobců předpínacích materiálů, zkoušky na vzorcích zdiva, ale také provádění experimentů s využitím větších celků zděných konstrukcí a v neposlední řadě i numerické modelování, které je oproti experimentům výrazně levnější a jednodušší. Tento příspěvek popisuje tvorbu numerického modelu zdiva a následné využití tohoto modelu pro posouzení různých variant návrhu rozmístění předpínacích lan ve stěně porušené poklesem podpor.

3 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ ZDIVA

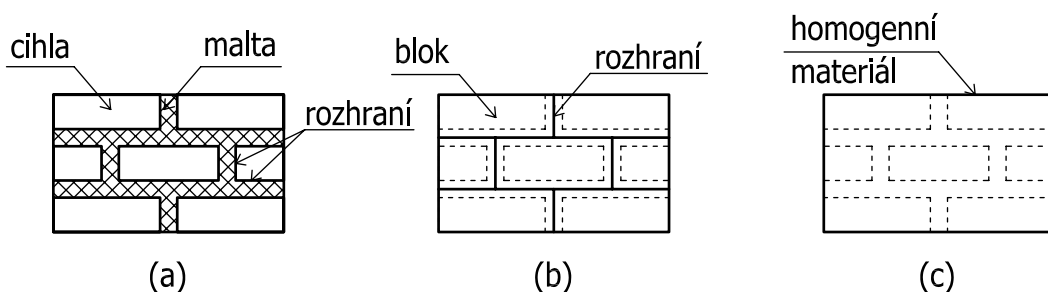
Numerické modelování je dnes užitečným nástrojem při vykonávání vědeckých i projekčních činností. Použití softwarů založených obvykle na metodě konečných prvků je již dlouhá léta běžné při analýzách ocelových i betonových konstrukcí, avšak zdivo stále zůstává specifickým materiálem s vlastnostmi, které dosud není možné přesně a spolehlivě formulovat, a využít tak jako základ pro počítačové programy určené odborné veřejnosti.

Zdivo je anizotropní a heterogenní materiál, jehož základní složky – cihly, resp. zdící prvky, a malta – mají různé složení a také odlišný způsob chování. Zdící prvky mají poměrně vysokou pevnost v tlaku, ale jsou obvykle velmi křehké. Chování cihel má v omezené oblasti zatěžování téměř lineární průběh. A to až do porušení, kdy se u tohoto materiálu může objevit křehký lom. Naproti tomu malta se chová podobně jako beton, takže při jejím modelování se často vychází z postupů zpracovaných pro analýzy betonových konstrukcí. V tlakové oblasti malta vykazuje nelineární chování už od velmi nízkých hodnot napětí, má relativně velkou duktilitu. Při namáhání tahem působí malta téměř lineárně, ale rychle dochází k rozvoji trhlin, a tím i k poklesu vlastností materiálu. Kromě toho, že je nutné brát v úvahu výše zmíněné charakteristiky jednotlivých materiálů, je neméně důležité vhodně formulovat jejich vzájemný vztah na styčných plochách (třecí parametry), a také stanovit způsoby chování prvků po porušení.

3.1 Mikromodel

Vesměř existují dva základní principy pro modelování zdiva, které lze označit jako mikromodelování a makromodelování (Lourenco, 1996). Mikromodel znázorňuje samostatně jednotlivé cihly. Vzniká ovšem problém, jak vyřešit styčné plochy představující maltu mezi jednotlivými cihlami. Při použití tzv. **detailního mikromodelu** (Obr. 3a) jsou cihly i malta modelovány jako dva odlišné materiály s jejich skutečnými rozměry i uspořádáním v konstrukci. **Zjednodušený mikromodel** (Obr. 3b) používá „rozšířené“ jednotky (bloky), které zahrnují cihlu a část okolní maltové spáry. Zjednodušený mikromodel je detailnímu částečně podobný, není ovšem tak přesný – nejsou už zde totiž uvažovány dva odlišné materiály. Styčné plochy – rozhraní – jsou umístěny do os maltových spár a vlastnosti obou materiálů jsou shrnuty do charakteristiky jakýchsi homogenních bloků. Geometrie ale odpovídá skutečnému uspořádání cihel. Největším problémem se stává určení vlastností rozhraní.

Mikromodel může detailně reprezentovat skutečné složky zdiva; obvykle se jím řeší jen malý výřez zdiva, u kterého lze podrobně zkoumat chování cihel a malty. Tento model je vhodný spíše pro vědecké účely, v případě větších celků konstrukcí je nereálné vytvořit takto podrobný model, navíc musíme brát v úvahu příliš velký rozsah výpočtu. Mikromodel může sloužit také jako základ a výchozí bod pro určení vlastností makromodelu.



Obr.3: Základní strategie pro modelování zděných konstrukcí: (a) detailní mikromodel; (b) zjednodušený mikromodel; (c) homogenní makromodel.

3.2 Makromodel

Uvažujeme-li o zdivu jako o materiálu se skladbou sice heterogenní, ale zato pravidelnou, kdy se periodicky opakují jednotlivé stejně velké cihly v pravidelné vazbě, můžeme modelování zdiva upravit. Zjednodušené modelování heterogenního zdiva spočívá v nalezení vhodného modelu (tzv.

makromodelu), který by měl homogenní charakteristiky a mohl by se tedy použít pro znázornění celé konstrukce.

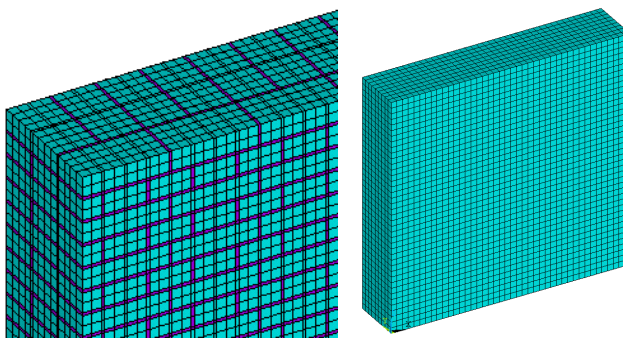
Makromodel (Obr. 3c) je užitečnější pro praxi a projektanty. Přístup zde použitý je odlišný od detailního mikromodelu. Není už důležité přesné vyjádření rozhraní mezi cihlami, protože zdivo je znázorněno jako celek, jako kompaktní ortotropní, ale homogenní materiál s příslušnou pevností v tlaku, tahu a ve smyku. Zájem se soustředí na celkové výsledné chování většího celku zdiva, které je často namáháno ve své nepružné oblasti. Makromodelování by mělo tedy co nejpřesněji postihovat fungování skutečné zděné konstrukce, použité nástroje musí ale zároveň umožnit jak snadnost při tvorbě modelu, tak rozumné nároky na operační paměť běžného počítače.

Otázkou zůstává, jak zjistit nebo určit vhodné homogenizované vlastnosti modelu, které by co nejlépe odpovídaly chování skutečného zdiva. Existuje několik postupů či metod, kterými lze homogenizované vlastnosti získat, ale každá z nich má své nevýhody a obtíže. V zásadě lze vyjít ze dvou základních přístupů pro tvorbu homogenního materiálu:

- použití **konstitutivních vztahů**, které reprezentují chování zdiva (model zdiva je přizpůsoben úpravou modelů pro beton; vychází se z předpokladu, že malta se chová podobně jako beton);
- **homogenizační proces** vycházející z vlastností jednotlivých prvků (cihly a malty) – např. pomocí výpočtů, na základě experimentálních měření nebo použitím mikromodelu jako výchozího kroku jsou definovány homogenní ortotropní vlastnosti makromodelu.

3.3 Příklad určení homogenizovaných vlastností makromodelu

Analýza zděné stěny poškozené svislým poklesem podpor způsobeným vlivy poddolování, která je popsána v následující kapitole, je provedena za použití makromodelu. Jeho vlastnosti byly určeny homogenizačním procesem (Brožovský et al., 2007). Prvním krokem bylo vytvoření detailního mikromodelu stěny o rozměrech 2,09 x 2,015 x 0,44 m. Mikromodel umožňuje přesné vykreslení jednotlivých cihel a maltových spár. V modelované zdi se v každé vrstvě střídají běhouny a vazáky podle pravidel reálné vazby zdiva. Po výšce zdi se vazba pravidelně střídá ve dvou vrstvách tak, že styčné spáry nejsou nad sebou (Obr. 4 vlevo).



Obr.4: Detailní mikromodel – část (vlevo); homogenní makromodel (vpravo).

Zdivo v mikromodelu je tvořeno dvěma odlišnými, ale homogenními materiály. Cihla i malta mají tedy přiřazeny každá své vlastnosti – modul pružnosti E , Poissonův součinitel ν a objemovou hmotnost ρ . Pokud v mikromodelu zatížíme jednu stranu vyšetřované stěny konstantní deformací a protější stranu podepřeme, můžeme z výsledné reakce/síly, příslušné plochy a velikosti použité deformace vypočítat Youngův modul pružnosti v tahu a tlaku E pro daný směr. Analogicky pak zatížením stran v ostatních dvou směrech získáme další dva moduly pružnosti.

Obdobně jako modul pružnosti v tahu a tlaku byly určeny moduly pružnosti ve smyku G . Vyšetřovaná stěna se tentokrát zatížila postupně se zvětšujícími deformacemi tak, aby došlo k jejímu zkošení, a z výsledné reakce, plochy a úhlu se dopočítaly hodnoty modulu G pro všechny tři směry.

Poissonovy součinitele se mohou předpokládat rovny 0,2, nebo se dopočítají z poměrů mezi součiniteli a moduly pružnosti pro příslušné směry (viz Brožovský et al., 2007).

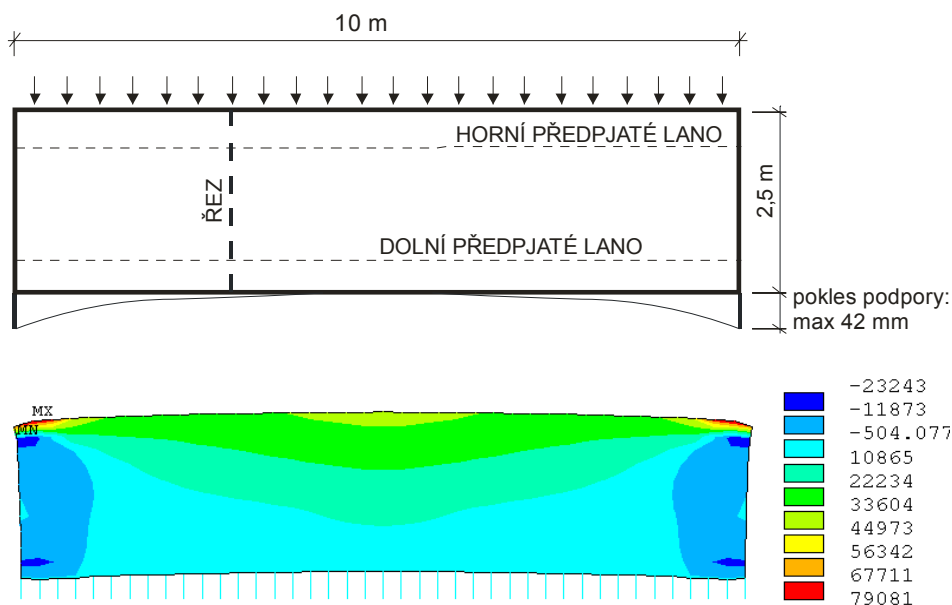
Toto je stručný popis jednoho ze způsobů, jakým lze získat devět materiálových konstant potřebných pro rovnice popisující ortotropní materiál, tedy 3 Youngovy moduly pružnosti v tahu a tlaku (E_x , E_y , E_z), 3 Poissonovy součinitele (ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{zx}) a 3 moduly pružnosti ve smyku (G_{xy} , G_{yz} , G_{zx}).

V dalším kroku následuje vytvoření makromodelu (Obr. 4 vpravo), který je jednoduše namodelován jako homogenní kvádr příslušných rozměrů s nadefinovanými ortotropními vlastnostmi. Tvorba tohoto modelu je oproti mikromodelu vcelku nenáročná, stejně jako jeho nároky na operační paměť počítače.

4 SVISLÝ POKLES PODPOR

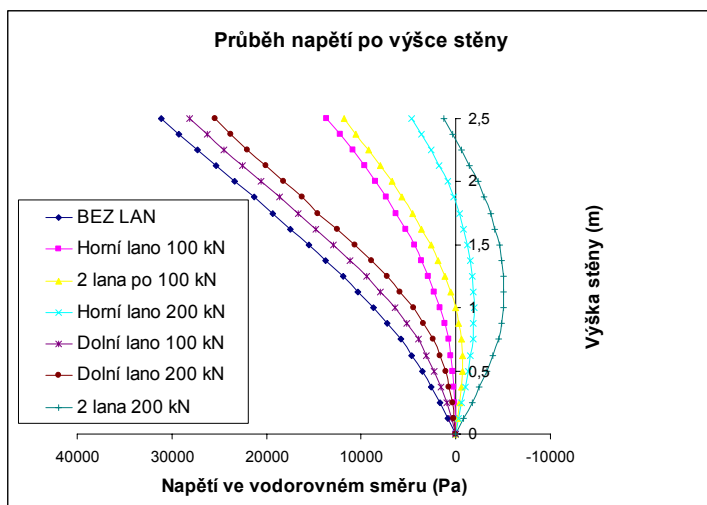
V následujícím příkladu je řešena zděná stěna zatížená vynuceným přetvořením způsobeným zakřivením terénu. Vlivem poddolování došlo ke svislému poklesu podpor. Využití předpínacích ocelových lan by v tomto případě bylo vhodným řešením sanace objektu. Projektant může s výhodou využít makromodel a ověřit několik způsobů umístění předpínacích lan, jejich množství, velikosti předpínacích sil a podobně. Vliv předpínacích lan na průběhy napětí v konstrukci je popsán v této kapitole.

Byl vytvořen 2D model zděné stěny s ortotropními vlastnostmi o rozměrech 10 x 2,5 m (Obr. 5). Homogenizované ortotropní vlastnosti byly určeny analogicky podle kap. 3.3. Stěna je podél spodní hrany podepřena tak, že účinkem zatížení působícího na ni shora dojde ke svislému poklesu podpor. Ve střední části stěny je pokles nulový a zvětšuje se symetricky směrem k oběma okrajům stěny postupně na 42 mm. Vlivem poklesu dochází v nevyztužené stěně ke vzniku nežádoucích tahových napětí. Při sepnutí konstrukce předpínacími lany se tahová napětí snižují, případně se úplně přestanou vyskytovat. Účinnost předpínání ovšem závisí na vhodném umístění lana a na velikosti předpínací síly.



Obr.5: Stěna se svislým poklesem podpor – geometrie; průběh vodorovných napětí.

V grafu na obr. 6 jsou vykresleny průběhy napětí po výšce stěny v řezu, který je veden zhruba v jedné třetině délky stěny – ve vzdálenosti 3 metry od levého okraje stěny. Bylo porovnáno několik variant působení předpjatého lana. Křivka úplně vlevo („bez lan“) odpovídá průběhu napětí po výšce stěny, která není nijak vyztužena. Je vidět, že v celém sledovaném řezu je zdivo plně tažené.



Obr.6: Průběh napětí po výšce stěny.

Pokud do stěny, u které poklesnou její krajní části, umístíme lana blízko pouze dolnímu okraji, předpětí nemá téměř žádný vliv (viz křivky „Dolní lano 100 kN“ a „Dolní lano 200 kN“) – a to ani při zdvojnásobení velikosti předpínací síly ze 100 kN na 200 kN. Teprve při uložení lana k hornímu povrchu stěny, případně k dolní i horní části současně, je vidět výrazný posun hodnot napětí směrem k tlakovému namáhání, které zdivo už přenáší velmi dobře. Horní lano s předpínací silou 200 kN výrazně eliminuje tahová napětí, větší část průřezu je tlačena. Pokud ještě navíc přidáme stejně předpjaté lano k dolnímu okraji stěny, tahová napětí jsou již zanedbatelná.

5 ZÁVĚR

Využití softwaru při návrhu nebo posouzení sanačních opatření poškozených zděných konstrukcí může být velmi užitečnou pomůckou všem projektantům. Přestože modelování zdiva patří k velmi specifickým oblastem zatím často bez jednoduchého a jasného řešení, je určitě možné použít alespoň některých metod pro definování homogenních ortotropních vlastností zdiva. Správně navržená soustava předpínacích lan pak může prodloužit životnost konstrukce o mnoho let.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek byl realizován za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR, projekt 1M0579, v rámci činnosti Centra integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí CIDEAS.

LITERATURA

- [1] BRADÁČ, J. *Účinky poddolování a ochrana objektů, díl první a druhý*. Dům Techniky Ostrava, 1999. ISBN 80-02-01276-3.
- [2] BROŽOVSKÝ, J.; KALOČOVÁ, L.; MATERNA, A. Constitutive modelling of structural masonry. In *Zborník príspevkov z VIII. Vedeckej konferencie Stavebnej fakulty Technickej univerzity v Košiciach, Košice 28.- 30. května 2007*. Place: Technická Univerzita v Košicích, Stavebná fakulta, 2007, s. 21 – 25. ISBN 978-80-8073-790-0.
- [3] LOURENCO, P. B. *Computational strategies for masonry structures*. Delft University Press, 1996.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Tomáš Čejka, Ph.D., Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6