

POSUDKY MEZNÍCH STAVŮ POUŽITELNOSTI A ÚNAVY PRO PLOŠNÉ MODELY FEM ŽELEZOBETONOVÝCH STAVEB SERVICE LIMIT STATES AND FATIGUE DESIGN OF SPATIAL 2D FEM MODELS OF REINFORCED CONSTRUCTIONS

LIBOR ŠVEJDA, STEFAN KIMMICH,
ECKHARD HELD

Nové evropské normy pro navrhování pozemních a mostních staveb (EN 1992-1-1, EN 1992-2) předepisují, s ohledem na zajištění stanovené odolnosti a životnosti konstrukce, vedle základních požadavků na její únosnost, kontrolu návrhu z hlediska mezních stavů použitelnosti (MSP). Zatímco posouzení konstrukce na mezním stavu únosnosti (MSÚ) lze dnes považovat za běžný standard, je vedení posudků a zejména skutečné navrhování na MSP spojeno s celou řadou vzájemně se podmiňujících, iterativních výpočtů s následnou kontrolou výchozích předpokladů apod. Prokázání požadovaných vlastností a stanovení nutného stupně vyztužení z hlediska všech relevantních posudků je tak početně velmi pracnou úlohou, kterou je třeba řešit zejména v následujících případech: vodotěsnost (bílé vany), agresivní prostředí, masivní, tlustostěnné dílce, podzemní nebo mostní objekty, popř. pohledové plochy apod. Všestranné, hospodárné zvládnutí této úlohy je ve složitějších případech bez využití optimální softwarové podpory nemyslitelné.

The new European Standards for design of concrete structures of buildings and bridges (EN 1992-1-1, EN 1992-2) prescribe beside a standard design in the ultimate limit states (ULS) also design checks in the serviceability limit states (SLS) considering the required resistance and the design life. While the

design in ULS can be presently regarded as a common basic, the real design in SLS can be made harder by various undermining conditions, iterative computing and checks of initial presumptions etc. The establishment of required properties and the determination of the reinforcement ratio considering all relevant effects can be quite an intensive computing task. This task has to be solved especially in the following cases: liquid retaining and containment structures, aggressive environment, massive and heavy-walled elements, geotechnical or bridge constructions, face surfaces etc. These projects can not be effectively solved in general and complex cases without an optimal software support.

NÁVRHOVÉ ÚČINKY PRO MSP

Zatížení stavebních konstrukcí vyplývá zejména z EN 1991-1-1, resp. u zatížení dopravou z EN 1991-2. Na rozdíl od MSÚ, kde zpravidla vystačíme při vyloučení mimořádné a seizmické situace s tzv. základní kombinací pro trvalou a dočasnou návrhovou situaci, využívají posudky MSP ve smyslu EN 1990 následující návrhové účinky:

- charakteristická kombinace
- občasná kombinace
- kvazistálá kombinace

V závislosti na konkrétním typu posudku MSP, je tedy nutné v daném posudkovém průřezu znát uvedené, kombinací hodnoty vnitřních účinků.

V případě počítačového zpracování a vyšetření vnitřních účinků pomocí

dnes běžné metody konečných prvků (MKP) vedou posudky MSP u složitějších úloh doslova na „explozi“ dat. Data je třeba mít při automatickém navrhování k dispozici, aby posuzování netrvalo příliš dlouho. V MKP řešiči Trimas probíhá sestavení všech potřebných kombinací účinků pro MSÚ a MSP automatizovaně. Realizace posudků MSP si však vyžádala přepracování vnitřní struktury dat s centrálním řízením a správou návrhových parametrů, podpořených navíc objektovou databankou s rychlým přístupem (obr. 2).

ŘEŠENÉ MEZNÍ STAVY POUŽITELNOSTI

V závislosti na konkrétním typu konstrukce, jejím provedení, okolním prostředí a požadavcích provozovatele lze kromě běžných posudků na MSÚ v systémech RIB Trimas® a Ponti u plošných konstrukcí nově posuzovat a navrhovat se zohledněním následujících mezních stavů:

- omezení napětí
 - tlaková napětí v betonu σ_c
 - tahová napětí v betonu σ_t
 - napětí ve vyztužení σ_s
- mezní stav trhlin
 - omezení šířky trhlin, nepřímý výpočet
 - vznik a šířka trhlin
 - rané a pozdější vynucené přetvoření
- minimální vyztuž
- povrchová vyztuž
- únava (MSÚ)
 - tlačený beton
 - vyztuž

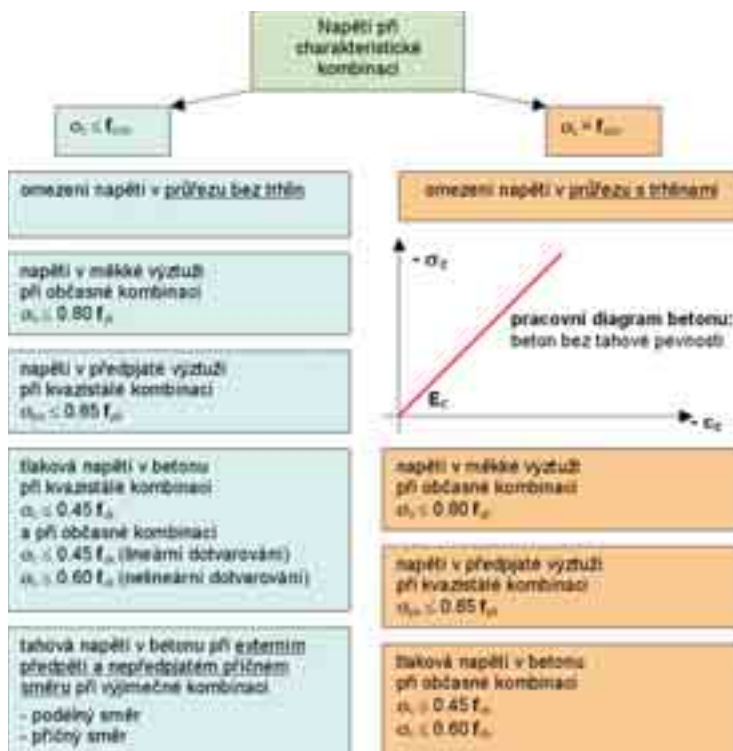
Obr. 1 Aplikační oblasti posudků MSP

Fig. 1 Application areas of SLS design

Obr. 2 Struktura dat a ovládání posudků

Fig. 2 Data structure and design control





Obr. 3 Schéma omezení napětí u mostních staveb

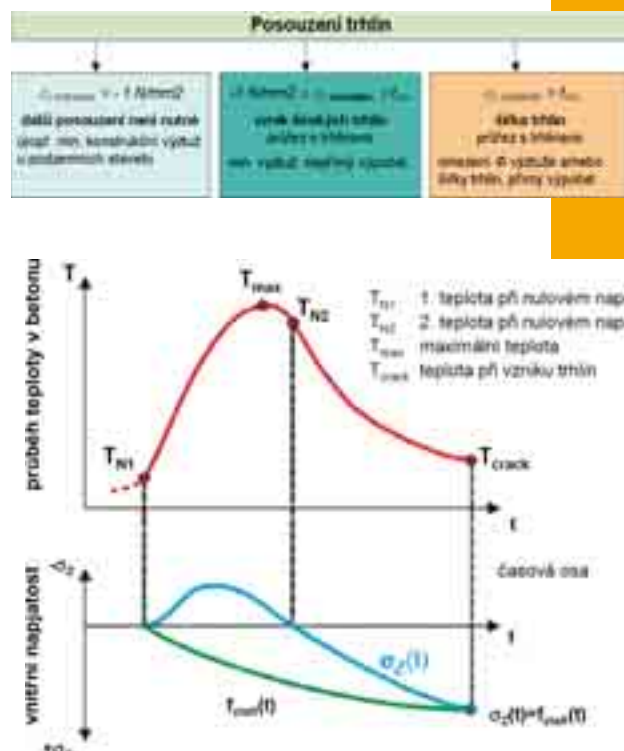
Fig. 3 Chart of stress limits for bridge constructions

Aplikované návrhové algoritmy zohledňují volitelně evropské normy EN 1992-1-1, resp. EN 1992-2 nebo německé normy DIN 1045-1, resp. DIN Fachbericht 102 a předpisy WU pro vodonepropustný beton, ZTV-ING, 853 pro tunelové

stavby a BAW pro masivní, tlustostěnné dílce.

OMEZENÍ NAPĚTÍ

Omezení napětí v konstrukci na předepsané hodnoty je základním posudkem MSP. Napětí v betonu σ_c a ve výztuži σ_s jsou omezoována podmínkami v závislosti na tom, zda napětí v průřezu při charakteristické kombinaci převyšuje tahovou pevnost betonu f_{ctm} (obr. 3).



Obr. 4 Větvení algoritmu programu Trimas u posudku trhlin

Fig. 4 Algorithm chaining of crack check in Trimas

Obr. 5 Průběh tahových napětí při ranném vynuceném přetvoření

Fig. 5 Development of tension stress during an early imposed deformation

Tlaková napětí betonu σ_c jsou pro $t < 28$ dnů stanovena v závislosti na nárůstu

BETOSAN®

alternativa, kterou oceníte

www.betosan.cz

INJEKTÁŽNÍ HYDROIZOLAČNÍ A ZPEVNŮJÍCÍ KOMPOZICE

na PC bázi s přísadou XYPEX® INJEKTOSTOP 2003XPB

ZÁLIVKOVÉ ROZPÍNAVÉ VYSOKOPEVNOSTNÍ KOMPOZICE

na PCC bázi SUPERFIX, SUPERFIX TH

ROZPÍNAVÉ VNITŘNĚ HYDROFOBIZOVANÉ KOMPOZICE

na PCC bázi s přísadami WATERFIX RH

KOROZIVZDORNÉ VYSTÝLKY

na PCC bázi – COROLIT

DRŽITEL CERTIFIKÁTU ČSN EN ISO 9001:2001

SPECIÁLNÍ MALTOVINY PŘÍSADEY DO BETONU A MALT

PŘÍSADEY DO BETONU

ochrana před mrazem FROSTOP L (LQ)
potlačení objemových změn ETRISAN
příprava PCC kompozic in-situ DENSOCRETE PPE TH
PP mikrovýztuž POLYFIX

OBCHODNĚ-TECHNICKÁ KANCELÁŘ

Na Dolinách 23 mobil: +420 602 121 617
147 00 Praha 4 tel./fax: +420 241 431 212
e-mail: praha@betosan.cz



Obr. 6 Schéma posouzení únavy u mostů (MSÚ)

Fig. 6 Chart of fatigue design for bridges (ULS)

pevnosti. V případech $\sigma_c > f_{cm}(t)$ je napětí v průřezu s trhlinami stanoveno iterativně z podmínky rovnováhy vnitřních účinků.

MEZNÍ STAV TRHLIN

Návrh rozlišuje mezi omezením šířky trhlin bez přímého výpočtu a přímým výpočtem charakteristické šířky trhliny w_k (obr. 4).

Omezení šířky trhlin, nepřímý výpočet

Minimální výztuž A_s na zajištění funkčnosti konstrukce i po vzniku trhlin je stanovována tzv. nepřímým výpočtem podle známého vztahu (1), viz např. EN 1992-1-1.

$$A_s = k_c k f_{ct,eff}(t) A_{ct} / \sigma_s \quad (1),$$

Plocha betonu A_{ct} v tažené části průřezu je určována iterací podmínky vnitřní rovnováhy a následnou triangulací průřezu. Součinitel k_c zohledňuje rozdělení napětí v průřezu bezprostředně před vznikem trhlin a změnu ramene vnitřních sil. Např. pro plně tažený průřez nabývá hodnoty 1. Součinitel k vyjadřuje účinek nerovnoměrného rozdělení vnitřních rovno-

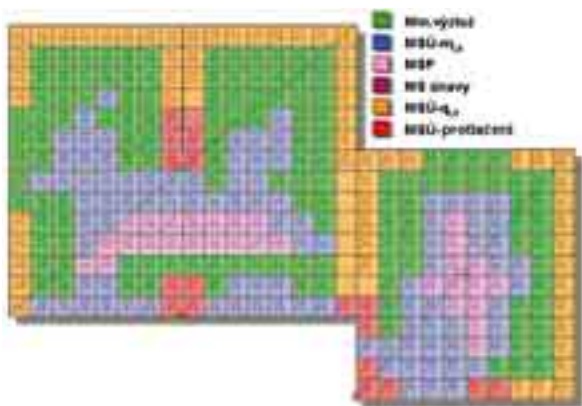
vážných napětí vedoucích ke zmenšení sil vyplývajících z omezených přetvoření; v závislosti na tloušťce dílce se v programu Trimas interpoluje z intervalu 0,5 až 0,8. Pro vodonepropustný beton je uvažováno $k = 1$. Hodnota $f_{ct,eff}(t)$ představuje efektivní pevnost betonu v čase vzniku prvních trhlin ($t < 5$ dnů, 6 dnů $< t < 28$ dnů a $t > 28$ dnů).

Šířka trhlin, přímý výpočet

V návrhových průřezech s $\sigma_c > f_{cm}$ probíhá v programu z požadované šířky trhliny nejprve nepřímý výpočet průměru výztuže ϕ_s a následný přímý výpočet charakteristické šířky trhliny w_k . V případě, kdy je zjištěn menší přípustný průměr výztuže než uvažovaný nebo překročena požadovaná šířka trhliny, program zvyšuje výztuž tažené zóny průřezu a kontrola šířky trhliny je opakována. Tento proces probíhá iterativně až do nalezení vyhovujících hodnot. Charakteristická šířka trhliny je přitom dána vztahem (2)

$$w_k = s_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \leq req w_k \quad (2),$$

kde maximální vzdálenost trhlin $s_{r,max}$ rozdíl poměrných přetvoření výztuže a betonu s přihlédnutím ke spolupůsobení betonu v tahu (tension stiffening) a rovněž přípustný průměr výztuže ϕ_s pro



Obr. 7 Základní panel řízení posudků v programu Trimas

Fig. 7 Initial design control panel of Trimas

danou délku trhliny jsou dány vztahy ve smyslu EN 1992-1-1.

Rané a pozdější vynucené přetvoření

Vznik vnitřní napjatosti odvodem hydratačního tepla, vývoj modulu pružnosti a tahové a tlakové pevnosti betonu při daných vnějších okrajových podmínkách (např. podloží u základových desek) jsou spolu neslučitelně spjaty. „Raným vynuceným přetvořením“ označujeme stav, kdy u prvku z mladého betonu i u staticky určitých konstrukcí vzniká vlastní vnitřní napětí.

Program uvažuje ranou vnitřní napjatost v čase vzniku prvních trhlin $t \leq 7$ dnů, resp. v intervalu stáří betonu 7 dnů $< t < 28$ dnů. V těchto případech jsou uvažovány součinitele $k_c = 1$ a $k = 0,8$ a efektivní pevnost betonu $f_{ct,eff}$.

MINIMÁLNÍ VÝZTUŽ

Minimální výztuž zajišťuje „tvárné“ chování konstrukce a její bezpečnost proti náhlému porušení – princip „kolaps po vzniku trhlin“ tak, aby po vzniku prvních trhlin mohl prvek dále fungovat. Dle EN 1992-1-1 se stanovuje např. pro ohýbané prvky ze vztahu

$$A_{s,min} = 0,26 f_{cm} b_t d / f_{yk} \quad (3),$$

kde b_t je průměrná šířka tažené části betonu.

Program určuje minimální výztuž v oblastech s tahovým napětím při občasné kombinaci analogicky ze vztahu

$$A_{s,min} = M_{\sigma} / f_{yk} z_s \quad (4),$$

kde z_s je rameno vnitřních sil při momentu na mezi vzniku trhlin a $M_{\sigma} = 0,7 f_{cm} W_c$.

Hodnota W_c je průřezový modul betonového průřezu.

POVRCHOVÁ VÝZTUŽ

Povrchová výztuž $A_{s,surf}$ zajišťuje odolnost proti odlupování krycí vrstvy betonu.

Tato výztuž je předepisována v případech průměru výztuže nebo skupinové výztuže s náhradním průměrem > 32 mm. V tomto případě by měla být v obou směrech

$$A_{s,surfmin} > 0,01 A_{ct,ext} \quad (5),$$

kde $A_{ct,ext}$ je tažená část betonového průřezu vně smykových třmínek. Dále v případě krytí hlavní výztuže > 70 mm se stanovuje pro oba směry

$$A_{s,surf} > 0,005 A_{ct,ext} \quad (6)$$

Program standardně uvažuje $0,0393$ mm²/m, tj. $\varnothing 10$ mm na $0,2$ m. Lze však uživatelsky předepsat i jinou požadovanou hodnotu.

ÚNAVA (MSÚ)

Únava je specifickým případem MSÚ. Vzhledem k tomu, že posouzení únavy vychází z obdobných kombinačních účinků jako MSP, je vhodné její programové sloučení s posudky MSP.

Posouzení únavy odděleně pro beton, podélnou a příčnou výztuž vychází z metody ekvivalentního rozkmitu napětí, tj. porovnání tzv. ekvivalentního rozkmitu napětí s korespondujícím rozkmitem odečteným z Wöhlerovy křivky (např. pro výztuž hodnota $\Delta\sigma_{RSK(N^*)}$). Ekvivalentní rozkmit napětí je přitom stanoven z hodnoty napětí v průřezu s trhlinami pro rozhodující kombinaci účinků násobenou součinitelem λ , např. rozhodující kombinace účinků pro mosty (obr. 6).

Součinitel λ je počítán pro každý z materiálů zvlášť obecně vztahem (12)

$$\lambda = \varphi_{fat} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \quad (7),$$

přičemž v programu TRIMAS jsou hodnoty $\Delta\sigma_{RSK(N^*)}$, φ_{fat} a λ_1 až λ_4 uživatelské vstupní parametry. Vlastnosti materiálů jsou uvažovány s dílčími součiniteli $\varphi_{c,fat} = 1,5$ pro beton a $\varphi_{s,fat} = 1,15$ pro výztuž. Konečný návrh nutné výztuže probíhá iterativně, podobně jako u kontroly rozevírání trhlin.

DEFORMACE VE II. MEZNÍM STAVU

Popsané posudky MSP zcela záměrně nerozebírají problematiku stanovení deformací trhlinami porušené monolitické

ké konstrukce. Řešení těchto otázek, popř. i společně s uvážením geometrické nelinearity a stabilního chování, je pro prostorové prutové modely možné. Řešení deformací plošných modelů ve II. mezním stavu jsou připravována.

OBSLUHA A VYHODNOCENÍ POSUDKŮ

Zadávání výpočetního modelu a zatížení probíhá běžným grafickým způsobem. Potřebné návrhové kombinace zatěžovacích stavů jsou sestaveny automaticky. Definice a přiřazení návrhových parametrů konstrukčním dílcům probíhá v centrálním panelu řízení a voleb posudků, obr. 7. Tímto jsou zaručeny opakovatelné, selektivní výpočty a výstupy výsledků.

V programu Trimas neprobíhá jen pouhé posouzení zadaného stavu, ale skutečný iterativní návrh nutných ploch výztuže. Vyhodnocení výsledků posudků poskytuje jak kumulativní textové a grafické informace, např. směrové max. plochy nutné výztuže (obr. 8), rozhodující mezní stav v daném posudkovém místě aj., tak i dílčí, detailní informace z jednotlivých posudků, např. nutnou výztuž na zamezení vzniku trhlin, napětí v betonu a ve výztuži v porušeném průřezu aj.

VÝHLED A ZÁVĚR

Stupeň automatizace posudků na MSP a únavy v systémech Trimas a Ponti je kvalitativním skokem umožňujícím v inženýrské praxi rychlé, hospodárné a spolehlivé navrhování specifických pozemních staveb (např. bílé vany) a mostů. Mostařská varianta Ponti umožňuje navíc vedení těchto posudků i pro prutové, popř. i předpjaté dílce. Obdobné posuzování prutových dílců pozemních staveb s variantou Trimas lze očekávat v krátkém čase.

Ing. Lubomír Švejda
Dr. Stefan Kimmich
Eckhard Held
RIB Software AG

Článek byl lektorován.

ZAJÍMAVÉ WEBOVÉ STRÁNKY

Doporučuje vaši pozornosti webové stránky www.cement.org/building/concrete_tanks.asp, http://en.wikipedia.org/wiki/Hoover_Dam a <http://users.owt.com/chubbard/gcdam>.

Doplňujeme informaci k recenzím knih uveřejněných v předchozím čísle časopisu. Knihy je možno objednat na webových stránkách vydavatelství Birkhäuser www.birkhauser.com nebo www.birkhauser.ch. Platba je možná kartou nebo bankovním převodem na základě faktury.

FIREMNÍ PREZENTACE

SMP	9
Mott MacDonalds	13
Filinger	17
Bauchem	19
E-architekt	25
Nemetschek	37
Betosan	53
RIB	55
Těžební unie	59
Sanace 2006	obal c

II. mezní stav a mezní stavy použitelnosti

Software **FEM TRIMAS**® jsme s využitím aktuálních poznatků a technických norem nově rozšířili o možnosti analýzy a návrhu prutových monolitických konstrukcí na II. mezním stavu a dále o komplexní vedení posudků a navrhování prostorových plošných konstrukcí pro mezní stavy použitelnosti a únavy. Spolu s osvědčenými funkcemi, jako např. předpětí, fáze výstavby, kombinace, stabilní analýza, vrstvenaté podloží, spřažené průřezy, dimenzování na MSÚ aj. tak poskytujeme velmi univerzální nástroj na statiku libovolných pozemních a mostních staveb. Využijte i Vy nabídku produktů a služeb **RIB** opírajících se o 45 roků praktických zkušeností ve stavebním oboru. **Více informací se dozvíte na: >> www.rib.cz**

RIB stavební software s.r.o.
Antala Staška 1565/30
CZ-140 00 Praha 4
telefon: +420 241 442 078
telefax: +420 241 442 085
email: info-cz@rib.cz

<http://www.rib.cz>

