

ZAVÁDZANIE EN 1992-1-1: „NAVRHOVANIE BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÍ“ DO PRAXE: ÚNAVA, BETÓN Z ĽAHKÉHO KAMENIVA

INTRODUCTION OF EN 1992-1-1 TO PRACTICE - FATIGUE, LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE



JAROSLAV HALVONÍK,
MÁRIA BELLOVÁ

Príspevok je pokračovaním série článkov, uverejnených v tomto časopise v roku 2003. Táto časť sa zaoberá medznými stavmi únavového porušenia a navrhovaním prvkov z betónov vyrobených s použitím ľahkého kameniva podľa EN 1992-1-1.

This article follows a set of articles, published in this journal in the year of 2003. This part dealing with ultimate limit states induced by fatigue and with design of structural elements cast from lightweight aggregate concrete according to EN 1992-1-1

ÚNAVA

Všeobecne

Posledným medzným stavom únosnosti, ktorým sa zaoberá EN 1992-1-1, je medzný stav únavového porušenia v kapitole 6.8. Únava materiálov je veľmi zložitý jav, ktorý vzniká pri cyklickom zaťažení v dôsledku rozširovania únavových poškodení. Je to jav, pri ktorom môže prvok zlyhať, aj keď napätia v konštrukčných materiáloch nedosiahnu limitné hodnoty pevnosti, stanovené pre jednorázové porušenie. Na únavové poškodenia je citlivá najmä oceľ, zatiaľ čo betón vykazuje podstatne lepšie únavové vlastnosti.

V prípade navrhovania nosných prvkov a konštrukcií sa s problémami únavy a únavového porušenia môžeme stretnúť najmä pri návrhu žeriavových dráh a mostov.

Zaťaženie

Pri výpočte účinkov zaťaženia na konštrukciu pre únavové posúdenia, sa celkové zaťaženie rozdelí na necyklickú zložku a zložku, ktorá predstavuje únavové zaťaženie. **Základnú kombináciu** necyklickej zložky zaťaženia predstavuje časť kombinácia zaťažení, používaná pre medzné stavy použiteľnosti, ktorá slúži na výpočet spodnej hranice napätového spektra (1).

$$E_d = E \left\{ G_{k,j}; P; \psi_{1,i} Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (1)$$

$$E_d = E \left\{ \left\{ G_{k,j}; P; \psi_{1,i} Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\} Q_{fat} \right\} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (2)$$

Únavové (cyklické) zaťaženie Q_{fat} sa potom kombinuje s najnepriaznivejšou základnou kombináciou zaťažení. Táto kombinácia sa volá **základná kombinácia plus cyklické zaťaženie** (2).

Význam označení v (1) a (2) je nasledovný: E – účinok zaťaženia, G – stále zaťaženie, P – predpätie, Q – premenné zaťaženie, súčinn $\psi_1 Q$ – časť hodnota premenného zaťaženia a $\psi_2 Q$ – kvázi stála hodnota premenného zaťaženia.

Výpočet vnútorných síl a napätí

U prierezov namáhaných **ohybovým momentom**, príp. kombináciou **ohybového momentu a normálovej sily** sa výpočet vnútorných síl a napätí pre posúdenie na únavu musí robiť na priereze s trhlinami pri zanedbaní ťahovej pevnosti betónu. Vychádza sa z kompatibility pomerných pretvorení ocele a betónu, a veľkosť pracovného súčiniteľa $\alpha_e = E_s / E_c$ sa môže uvažovať hodnotou $\alpha_e = 10$. U prvkov predpätých súdržnou výstužou sa rozdielne vlastnosti v súdržnosti betonárskej a predpínacej výstuže zohľadnia prenášením napätí v betonárskej výstuži súčiniteľom η :

$$\eta = \frac{A_s + A_p}{A_s + A_p \sqrt{\xi (\phi_s / \phi_p)}} \quad (3)$$

kde A_p (A_s) je prierezová plocha predpínacej (betonárskej) výstuže, ξ je pomer

pevností v súdržnosti predpínacej a betonárskej výstuže (tab.1), ϕ_s najväčší priemer použitej betonárskej výstuže, ϕ_p priemer, (príp. ekvivalentný priemer) predpínacej výstuže, $\phi_p = 1,75 \phi_{wire}$ pre jedno 7 drôtové lano, $\phi_p = 1,20 \phi_{wire}$ pre jedno 3 drôtové lano, f_{wire} je priemer drôtu, $\phi_p = 1,6 \times \sqrt{A_p}$ pre káble vytvorené z niekoľkých lán alebo drôtov.

V prípade overenia únavovej odolnosti prvku z hľadiska šmykového porušenia, sa pri výpočte napätia v šmykovej výstuži uvažuje sklon tlakovej diagonály θ_{fat} , ktorý sa určí podľa vzorca (4):

$$\tan \theta_{fat} = \sqrt{\tan \theta} \leq 1 \quad (4)$$

kde θ je sklon použitý pre overenie šmykovej odolnosti z hľadiska jednorazového porušenia.

Únavová odolnosť ocele

Základnými parametrami, ktoré ovplyvňujú únavovú odolnosť ocele, sú rozkmít napätí $\Delta\sigma_s$, počet zaťažovacích cyklov N a maximálne napätie $\sigma_{s,max} = \sigma_{s,min} + \Delta\sigma_s$. V prípade, že výstuž dosahuje pri cyklickom

Tab. 1 Pomer pevností v súdržnosti ξ medzi predpínacou a betonárskou výstužou

Tab. 1 Ratio of bond strength ξ between tendons and reinforcing steel

Druh predpínacej jednotky	Vopred predpäté	Dodatočne predpäté	
		≤ C50/60	≥ C55/67
hladké dróty a tyče	–	0,3	0,15
7 – drôtové laná	0,6	0,5	0,25
rebierkové predpínacie dróty	0,7	0,6	0,3
rebierkové predpínacie tyče	0,8	0,7	0,35

zaťaženie plastické deformácie (medzu kľzu), už pri malom počte zaťažovacích cyklov dochádza k únavovému porušeniu (nízko cyklická únava). Aby sme sa vyhli tomuto javu, maximálne napätia v betónárskej alebo predpínacej výstuži od kombinácie s únavovým zaťažením nesmú byť väčšie, ako je návrhová hodnota medze kľzu ocele $f_{yk}/\gamma_{S,fat}$, resp. $f_{p0.1,k}/\gamma_{S,fat}$.

Pri rastúcom rozkmitu napätí v oceli klesá počet zaťažovacích cyklov N , potrebných na únavové porušenie, a naopak, pri určitej hodnote rozkmitu napätí, únavové porušenie nenastane pri akomkoľvek počte zaťažovacích cyklov. V EN 1992-1-1 sú priamo definované hodnoty maximálneho rozkmitu napätí v oceli, pre ktoré pri reálnom počte zaťažovacích cyklov z hľadiska stavebných konštrukcií nenastane únavové porušenie. Pri väčších rozkmitoch sa pre posúdenie môžu použiť normové **S-N krivky** (Wohlerové krivky) (obr. 1), ktoré vyjadrujú logaritmickú závislosť medzi rozkmitom napätí a počtom zaťažovacích cyklov, potrebných na únavové porušenie.

Metódy pre overenie únavovej odolnosti ocele

EN 1992-1-1 umožňuje použiť tri rôzne metódy pre overenie únavovej odolnosti

Tab. 2 Parametre pre S-N krivky pre betónársku výstuž

Tab. 2 Parameters for S-N curves for reinforcing steel

Typ betónárskej výstuže	N^*	Napätový exponent		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [MPa] pre N^* cyklov
		k_1	k_2	
priame a zakrivené prúty 1	10^6	5	9	162,5
zvárané siete	10^7	3	5	58,5
spojky	10^7	3	5	35

Poznámka 1: Hodnoty $\Delta\sigma_{Rsk}$ platia pre priame prúty. Hodnoty pre zakrivené prúty získame ich prenosom redukčným súčiniteľom $\zeta = 0,35 + 0,026 D/\phi$ kde: D je priemer oblúka a ϕ je priemer výstuže

Tab. 3 Parametre pre S-N krivky pre predpínaciu výstuž

Tab. 3 Parameters for S-N curves for prestressing steel

Typ betónárskej výstuže	N^*	Napätový exponent		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [MPa] pre N^* cyklov
		k_1	k_2	
vopred predpäté prvky	10^6	5	9	185
dodatočne predpäté prvky 1				
– jednotlivé laná v plastickom kanáliku	10^6	5	9	185
– zakrivené káble v plastickom kanáliku a priame káble	10^6	5	10	150
– zakrivené káble v ocelovom kanáliku	10^6	5	7	120
– spojky	10^6	5	5	80

Poznámka 1: Overenie na únavu nesúdržných vonkajších a vnútorných káblov nie je potrebné vykonať.

Obr. 1 Tvar krivky charakteristickej únavovej pevnosti (S-N krivka pre betónársku a predpínaciu ocel)

Fig. 1 Shape of the characteristic fatigue strength curve (S-N curves for reinforcing and prestressing steel)

Obr. 2 Histogram rozkmitu napätí a S-N krivka

Fig. 2 Histogram of stress range and S-N curve

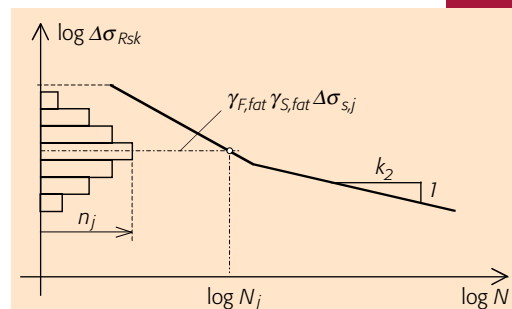
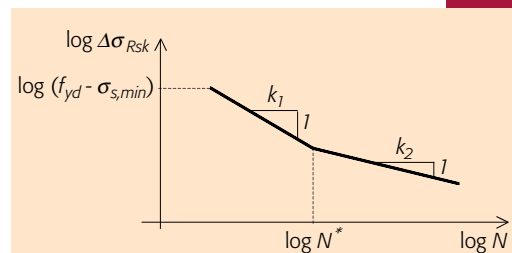
nosnej konštrukcie z hľadiska porušenia výstuže.

Všeobecná metóda využívajúca Palmgren-Minerovo pravidlo, kde overenie únavovej odolnosti môžeme urobiť pomocou **súčiniteľa únavového poškodenia** $D_{Ed} < 1$. Únavové zaťaženie, resp. jeho odozva, tj. rozkmit napätí, obvyčajne nemá konštantnú hodnotu, ale je premenlivé, pričom ak sa dá štatisticky popísať (ak je známa funkcia hustoty rozdelenia), môžeme príspevok každého intervalu rozkmitu napätia do celkového únavového poškodenia určiť pomocou S-N krivky.

Súčiniteľ únavového poškodenia sa vypočíta

$$D_{Ed} = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_j} < 1, \quad (5)$$

kde $\Delta\sigma_{s,j}$ – je rozkmit napätí vo výstuži od únavového zaťaženia, n_j je počet opakovaní rozkmitu napätí s veľkosťou $\gamma_{F,fat} \gamma_{S,fat} \Delta\sigma_{s,j}$, N_j je počet zaťažovacích cyklov potrebných na únavové porušenie pri



rozkmite napätí, $\gamma_{F,fat}$ parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavového zaťaženia ($\gamma_{F,fat} = 1$) a $\gamma_{S,fat}$ je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavovej odolnosti ocele ($\gamma_{S,fat} = 1,15$).

Metóda ekvivalentného rozkmitu napätí je založená na nahradení účinku skutočného spektra rozkmitov napätí jedným, tzv. ekvivalentným rozkmitom napätí $\Delta\sigma_{S,equ}$ pri N^* zaťažovacích cyklov, ktoré spôsobí rovnaké únavové poškodenie ako skutočné spektrum. Overenie únavovej odolnosti má potom tvar (6)

$$\gamma_{F,fat} \Delta\sigma_{S,equ}(N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{S,fat}} \quad (6)$$

Ekvivalentný rozkmit napätia sa dá vo všeobecnosti vyjadriť v tvare $\Delta\sigma_{S,equ} = \lambda_e \phi \Delta\sigma_e$, kde $\Delta\sigma_e$ je rozkmit napätia od modelu únavového zaťaženia, ktorý môžeme nájsť v príslušnej zaťažovacej norme EN 1991-x, ϕ je dynamický súčiniteľ a λ_e je súčinn koeficientov, ktorými zohľadňujeme ďalšie vplyvy, ako je statické usporiadanie konštrukcie, rozpätie prvku, návrhová životnosť, ročný objem zaťaženia, vplyv počtu jazdných pruhov alebo koľají u mostov.

Metóda obmedzenia rozkmitu napätí spočíva v obmedzení maximálneho rozkmitu napätí $\Delta\sigma_{S,max}$ pod hodnotu, ktorá nespôsobí únavové porušenie pri akomkoľvek počte zaťažovacích cyklov. Z hľadiska stavebných konštrukcií hodnotu $\Delta\sigma_{Rsk}$, stanovenú pre $N = 10^8$ zaťažovacích cyklov, považujeme za bezpečnú z hľadiska únavového porušenia.

Podľa EN 1992-1-1, ak hodnota rozkmitu napätí vypočítaná od častej hodnoty cyklického zaťaženia spĺňa podmienku $\Delta\sigma_{s,max} \leq 70$ MPa (pre výstuž bez zvarov), resp. $\Delta\sigma_{s,max} \leq 35$ MPa (pre zváranú výstuž), konštrukciu považujeme za bezpečnú z hľadiska únavového porušenia.

Únavová odolnosť betónu

Ako už bolo spomenuté, betón vykazuje z hľadiska únavového porušenia lepšie vlastnosti ako oceľ. Norma ponúka dve metódy na overenie únavovej odolnosti betónu v tlaku, pričom obe metódy sú kalibrované na únavovú pevnosť $f_{c,fat}$. Návrhovú hodnotu únavovej pevnosti betónu v tlaku môžeme vypočítať podľa (7)

$$f_{cd,fat} = 0,85 \beta_{cc}(t_0) f_{cd} \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (7)$$

kde $\beta_{cc}(t_0)$ je koeficient pre nárast pevnosti betónu v čase, t_0 je vek betónu v čase nástupu únavového zaťaženia a f_{cd} je návrhová pevnosť betónu z hľadiska jednorazového porušenia.

Metóda ekvivalentného rozkmitu napätí pre overenie únavovej odolnosti betónu v tlaku je kompatibilná s metódou použitou pre overenie únavovej odolnosti ocele. Únavovú odolnosť betónu v tlaku môžeme považovať za dostatočnú, ak je splnená podmienka (8)

$$E_{cd,max,equ} + 0,43 \sqrt{1 - R_{equ}} \leq 1 \quad (8)$$

kde:

$$R_{equ} = E_{cd,min,equ} / E_{cd,max,equ} \quad (9)$$

$$E_{cd,min,equ} = \sigma_{cd,min,equ} / f_{cd,fat} \quad (10)$$

$$E_{cd,max,equ} = \sigma_{cd,max,equ} / f_{cd,fat} \quad (11)$$

pričom:

$\sigma_{cd,max,equ}$ – je horná hranica napätia pre medzný rozkmit napätí pri N zaťažovacích cykloch a $\sigma_{cd,min,equ}$ – spodná hranica napätia pre medzný rozkmit napätí pri N zaťažovacích cykloch.

Zjednodušená metóda na overenie únavovej odolnosti betónu v tlaku je vyjadrená podmienkou (12), kde $\sigma_{c,max}$ – je maximálne tlakové napätie v extrémnom vlákne pri častej kombinácii zaťaženia

$$\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \frac{\sigma_{c,min}}{f_{cd,fat}} \leq 0,9 \text{ pre } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa } (\leq 0,8 \text{ pre } f_{ck} > 50 \text{ MPa}) \quad (12)$$

(uvážení častej hodnoty cyklického zaťaženia) a $\sigma_{c,min}$ je minimálne napätie v tom istom vlákne (ak $\sigma_{c,min}$ je ťahové, potom $\sigma_{c,min} = 0$).

Rovnakú podmienku spoľahlivosti môžeme použiť aj pre overenie únavovej odolnosti tlakovej diagonály pri šmyku. Prítom je ale treba $f_{cd,dat}$ redukovať súčiniteľom $\nu = 0,6(1 - f_{ck}/250)$.

U prvkov, ktoré nevyžadujú šmykovú výstuž, môžeme predpokladať, že únavová odolnosť betónu v šmyku nebude dosiahnutá, ak bude splnená podmienka:

- Pre $\frac{V_{Ed,min}}{V_{Ed,max}} \geq 0$

$$\frac{|V_{Ed,max}|}{|V_{Rd,c}|} \leq 0,5 + 0,45 \frac{|V_{Ed,min}|}{|V_{Rd,c}|} \leq 0,9 \text{ pre } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (13)$$

$$\leq 0,8 \text{ pre } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

- Pre $\frac{V_{Ed,min}}{V_{Ed,max}} < 0$

$$\frac{|V_{Ed,max}|}{|V_{Rd,c}|} \leq 0,5 - \frac{|V_{Ed,min}|}{|V_{Rd,c}|} \quad (14)$$

kde $V_{Ed,max}$ je návrhová hodnota maximálnej šmykovej sily pri častej kombinácii, $V_{Ed,min}$ je návrhová hodnota minimálnej šmykovej sily v tom istom priereze pri častej kombinácii a $V_{Rd,c}$ – návrhová hodnota šmykovej odolnosti vypočítaná z hľadiska jednorazového porušenia.

BETÓN Z LAHKÉHO KAMENIVA

Materiály

Betón vyrobený s použitím ľahkého kameniva je konštrukčný materiál, ktorý má uzavretú štruktúru a objemovú hmotnosť po vysušení v sušičke menšiu ako 2200 kg/m³. Obsahuje umelé alebo prírodné kamenivo s objemovou hmotnosťou po vysušení v sušičke menšou než 2000 kg/m³.

V norme EN 206-1 je ľahké kamenivo klasifikované podľa svojej objemovej hmotnosti do šiestich tried (tab. 4).

Naviac tabuľka obsahuje korešpondujúce objemové hmotnosti prostého a vystuženého betónu, ktoré môžu byť použité pre výpočet účinkov vlastnej tiaže alebo ostatného stálego zaťaženia.

Betóny vyrobené s použitím ľahkého kameniva sa označujú podobne ako normálne vážiace betóny, napr. LC12/13, kde LC je skratka z anglického „light-weight concrete“ a číselné označenie predstavuje charakteristické hodnoty valcovej / kockovej pevnosti $f_{ck} / f_{ck,cube}$. Triedy betónov z ľahkého kameniva sú uvedené v tab. 5.

V prípade betónov LWAC je rozdiel medzi valcovou a kockovou pevnosťou

podstatne menší ako pre normálne vážiace betóny (NWC). Je to dôsledok menších priečných pretvoreni týchto betónov

pri dosiahnutí maximálneho zaťaženia.

Pevnosť v ťahu betónov z ľahkého kameniva môžeme získať pre násobenie hodnot ťahovej pevnosti pre NWC súčiniteľom η_1 :

$$f_{ctm} = \eta_1 f_{ctm} \quad (15)$$

kde

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60\rho/2200 \quad (16)$$

a ρ je horná hranica objemovej hmotnosti kameniva po vysušení podľa tab. 5.

Modul pružnosti betónov LWAC závisí nielen od pevnosti betónu, ale aj od objemovej tiaže kameniva. Strednú hodnotu sečnicového modulu pružnosti môžeme získať pomocou vzťahu:

$$E_{ctm} = \eta_E E_{cm} \quad (17)$$

Trieda objemovej tiaže	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Hustota po vysušení v sušičke ρ [kg.m ⁻³]	801-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000
Hustota Prostý betón [kg.m ⁻³]	1050	1250	1450	1650	1850	2050
Hustota Výstužený betón [kg.m ⁻³]	1150	1350	1550	1750	1950	2150

Poznámka 1: LWAC – Light-weight aggregate concrete

Tab. 4 Triedy objemovej hmotnosti a korešpondujúce návrhové hodnoty objemovej tiaže betónu z ľahkého kameniva – LWAC¹

Tab. 4 Density classes and corresponding design densities of LWAC¹

f_{lck}	MPa	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80
$f_{lck,abe}$	MPa	13	18	22	28	33	38	44	50	55	60	65	77	88

Tab. 5 Pevnostné triedy pre betóny z ľahkého kameniva

Tab. 5 Strength classes of LWAC

kde

$$\eta_E = (\rho/2200)^2 \quad (18)$$

a E_{cm} je stredná hodnota sečnicového modulu pružnosti betónov NWC.

Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti betónov LWAC závisí najmä od typu kameniva, pričom sa pohybuje v širokom intervale od 4.10^{-6} až po $14.10^{-6} K^{-1}$. Tam, kde hodnota tohto súčiniteľa nemá veľkú dôležitosť, môže sa súčiniteľ teplotnej rozťažnosti uvažovať hodnotou $8.10^{-6} K^{-1}$.

Rozdiel medzi hodnotami súčiniteľa teplotnej rozťažnosti betónu a výstuže je možné pri návrhu zanedbať.

Súčiniteľ dotvarovania φ_{lc} pre betón z ľahkého kameniva môžeme získať pre násobením súčiniteľa dotvarovania pre NWC súčiniteľom $(\rho/2200)^2$, vzťah (19), pričom pomerné pretvorenia od dotvarovania betónu vypočítané pomocou $\varphi_{lc}(t,t_0)$, je treba ďalej prenasobiť súčiniteľom

$$\varphi_{lct}(t,t_0) = (\rho/2200)^2 \varphi(t,t_0) \quad (19)$$

$$\varepsilon_{lcc}(t,t_0) = \eta_2 \varphi_{lct}(t,t_0) (\sigma_c / E_{lcc}) \quad (20)$$

kde $\varphi(t,t_0)$ je súčiniteľ dotvarovania pre NWC, $\eta_2 = 1,3$ ($f_{lck} < LC20/25$) a $\eta_2 = 1,0$ (pre $f_{lck} \geq LC20/25$).

Konečné hodnoty **pomerného pretvorenia od zmršťovania z vysychania** pre LWAC môžeme získať pre násobením hodnôt pre NWC súčiniteľom η_3 .

$$\varepsilon_{lcd,\infty} = \eta_3 \varepsilon_{cd,\infty} \quad (21)$$

kde $\eta_3 = 1,5$ (pre $f_{lck} \leq LC16/20$) a $\eta_3 = 1,2$ (pre $f_{lck} \geq LC20/25$), $\varepsilon_{cd,\infty}$ je konečná hodnota pomerného pretvorenia od zmršťovania z vysychania betónov NWC.

Pokiaľ ide o autogénnu zložku zmršťovania, vzorce pre NWC predstavujú maximálne hodnoty aj pre také betóny z ľahkého kameniva, u ktorých voda z kameniva nemôže saturovať vysychajúcu mikroštruktúru cementového tmelu. Pokiaľ sa použije vodou saturované alebo čiastočne vodou saturované ľahké kamenivo,

dochádza ku značnej redukcii tejto zložky zmršťovania.

Návrhové pevnosti betónov LWAC môžeme vypočítať rovnako ako pre NWC. Vyššiu krehkosť betónu pri porušení zohľadňujeme menšími hodnotami súčiniteľov α_{lcc} a α_{lct} .

Návrhová hodnota pevnosti betónu v tlaku

$$f_{lcd} = \alpha_{lcc} f_{lck} / \gamma_C \quad (22)$$

v ťahu

$$f_{lctd} = \alpha_{lct} f_{lctk} / \gamma_C, \quad (23)$$

kde α_{lcc} a α_{lct} sa odporúča uvažovať hodnotou 0,85 a γ_C je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre betón, $\gamma_C = 1,5$ (príp. 1,2).

Pri návrhu je možné použiť všetky tri typy **návrhových pracovných diagramov betónov** $\sigma_c - \varepsilon_c$. Rozdiel medzi LWAC a NWC je v hodnotách medzných pomerných pretvorení, ktorých veľkosti sa pre betóny LWAC redukovujú súčiniteľom η_1 .

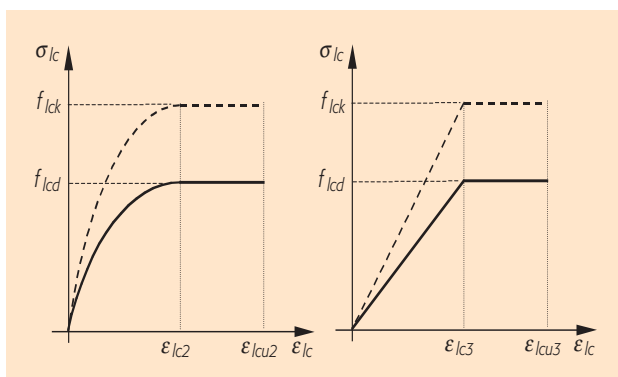
$$\varepsilon_{lcu2} = \eta_1 \varepsilon_{cu2}, \text{ resp. } \varepsilon_{lcu3} = \eta_1 \varepsilon_{cu3}.$$

Potreba redukcii medzných pomerných pretvorení betónov z ľahkého kameniva vyplynula z charakteru porušenia pri jednoosom tlaku. V bežných NWC použité kamenivo má obyčajne vyššiu pevnosť ako cementový tmel. To sa prejavuje tým, že pri vyšších hladinách namáhania (> 60 % tlakovej pevnosti) začínajú mikrotrhliny prechádzať cementovým tmeľom, čo spôsobuje postupné silné zakrivenie vzostupnej vetvy pracovného diagramu a zvyšuje ťažnosť (duktilitu) betónu pred porušením.

Pokiaľ sa použije ľahké kamenivo, ide obyčajne o vysoko porézny materiál, ktorého pevnosť býva často nižšia ako je pev-

Obr. 3 Návrhové pracovné diagramy pre betón z ľahkého kameniva $\sigma_c - \varepsilon_c$

Fig. 3 Design stress-strain diagrams for LWAC $\sigma_c - \varepsilon_c$



BETOSAN[®] sanační a speciální materiály pro stavebnictví

sanace železobetonu

přísady do betonů, náhrada betonu

hydroizolace

sanace vlhkého a zasořeného zdiva

podlahové systémy

speciální maltoviny

materiály na bázi syntetických pryskyřic

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

prodejní sklad
PRAHA
mobil: 602 344 891

výroba a prodejní sklad
BATELOV
mobil: 606 331 430

prodejní sklad
PLZEN
mobil: 603 294 091

prodejní sklad
BRNO
mobil: 603 711 464

www.betosan.cz Držitel certifikátu ČSN EN ISO 9001:2001

$$V_{lRD,c} = \left[C_{lRD,c} \eta_1 k (100 \rho_\ell f_{lck})^{1/3} + 0,15 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq (v_{\ell, \min} + 0,15 \sigma_{cp}) b_w d \quad (24)$$

nosť cementového tmelu. Preto vzostupná vetva má obyčajne takmer lineárny priebeh a po dosiahnutí pevnosti sa výrazne znižuje ťažnosť betónu. Krehkosť LWAC betónov rastie s klesajúcou objemovou hmotnosťou kameniva.

Trvanlivosť a krytie výstuže betónom

Aj pre betóny z ľahkého kameniva sa uvažujú tie isté triedy prostredia ako pre NWC. V prípade betónov z ľahkého kameniva sa musia hodnoty minimálneho krytia zvýšiť oproti NWC o 5 mm.

Medzné stavy únosnosti

Návrhovú hodnotu šmykovej odolnosti prvkov z betónu z ľahkého kameniva bez šmykovej výstuže vypočítame podľa (24). Súčasne musí byť splnené

$$V_{Ed} \leq 0,5 \eta_1 v_\ell f_{lck} b_w d, \quad (25)$$

kde $C_{lRD,c} = 0,15/\gamma_c$ [MPa],

$$v_{\ell, \min} = 0,030 k^{3/2} (f_{lck})^{1/2} \text{ [MPa]}, \quad (26)$$

$$v_\ell = 0,5 \eta_1 (1 - f_{lck} / 250). \quad (27)$$

Literatúra:

- [1] EN 206-1: Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity
- [2] prEN 1991-2 Eurocode 1: Actions on structures, Part 2: Traffic loads on bridges
- [3] prEN 1992-1-1 (apríl-2003) Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1: General rules and rules for buildings
- [4] König G.: Structural Concrete – Fatigue, Basis of Design, Volume 2, fib Bulletin
- [5] Light-weight Aggregate Concrete, fib bulletin 4, Codes and standards, August 1999
- [6] Light-weight Aggregate Concrete, fib bulletin 8, Case studies, May 2000

$$v_{lRD,c} = C_{lRD,c} \eta_1 k (100 \rho_\ell f_{lck})^{1/3} + 0,08 \sigma_{cp} \geq \eta_1 v_{\ell, \min} + 0,08 \sigma_{cp}. \quad (28)$$

$$v_{lRD,c} = C_{lRD,c} \eta_1 k (100 \rho_\ell f_{lck})^{1/3} \left(\frac{2d}{a} \right) \geq \eta_1 v_{\ell, \min} \left(\frac{2d}{a} \right). \quad (29)$$

$$v_{lRD,cs} = 0,75 v_{lRD,c} + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) \left(\frac{1}{u_1 d} \right) A_{sw} f_{ywd,ef} \sin \alpha. \quad (30)$$

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{lck} \left[A_{c1} / A_{c0} \right]^{p/4400} \leq 3,0 f_{lck} A_{c0} \left(\frac{p}{2200} \right). \quad (32)$$

Poznámka: Význam veličín k , ρ_ℓ , σ_{cp} , b_w , d je rovnaký ako v prípade betónov NWC.

U prvkov, **vyžadujúcich šmykovú výstuž**, sa redukčný súčiniteľ tlakovej pevnosti betónu pri overení únosnosti tlakovej diagonály vypočíta podľa (27).

Šmykovú odolnosť v pretlačení na jednotku plochy u doskových konštrukcií z ľahkého betónu vypočítame podľa vzorca (28).

Šmykovú odolnosť v pretlačení dosky z ľahkého betónu v oblasti medzi lícom stĺpa a kritickým (kontrolným) obvodom vypočítame podľa (29).

V oblasti so šmykovou výstužou je možné šmykovú odolnosť proti pretlačeniu vypočítať podľa vzorca (30).

V blízkosti stĺpa je šmyková odolnosť proti pretlačeniu limitovaná

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{lRD, \max} = 0,5 v_\ell f_{lck}. \quad (31)$$

Poznámka: Význam veličín u_0 , u_1 , s_r , A_{sw} , $f_{ywd,ef}$, α je rovnaký ako v prípade betónov NWC.

Návrhovú odolnosť betónu LWAC **v sústredenom tlaku** môžeme vypočítať v prípade rovnomerne rozdeleného zaťaženia pod styčnou plochou A_{c0} podľa vzťahu (32), kde $A_{c0} = b_1 d_1$, $A_{c1} = b_2 d_2$, pričom $b_1 d_1$ sú rozmery styčnej škáry a $b_2 d_2$ sú rozmery roznášacej škáry, pre ktoré platí $b_2 \leq 3b_1$, resp. $d_2 \leq 3d_1$, pričom výška roznášacej oblasti $h \geq (b_2 - b_1)$, resp. $h \geq (d_2 - d_1)$.

Medzné stavy použiteľnosti

V prípade medzných stavov používateľ-

nosti pri použití LWAC norma EN 1992-1-1 sa venuje len limitným štíhlostiam rozpätie/účinná výška prierezu: l_{eff} / d , ktoré nám pri návrhu automaticky zabezpečia splnenie limitných prieťahov prevažne ohýbaných železobetónových prvkov (bez normálovej sily). Pre stanovenie účinnej výšky prierezu prvkov vyrábaných z betónov LWAC môžeme použiť limitné štíhlosti l_{eff} / d pre betóny NWC, ak ich pre násobíme súčiniteľom $\eta_a^{0,15}$.

Konštrukčné zásady

Z konštrukčných zásad sa oproti zásadám pre NWC požaduje, aby sa minimálne priemery zakrivenia ohybov, hákov a slučiek v betónoch z ľahkého kameniva zväčšili o 50 % oproti hodnotám pre NWC.

Priemer pozdĺžnej nosnej výstuže by nemal prekročiť 32 mm a pri skupinových prútoch ich počet by nemal byť väčší ako dva, resp. náhradný priemer by nemal prekročiť 45 mm.

Pri výpočte návrhovej hodnoty pevnosti betónu v súdržnosti f_{lbd} pre stanovenie základnej kotevnej dĺžky $\ell_{b,rd}$ môžeme použiť rovnaký vzťah ako pre NWC, kde miesto návrhovej hodnoty pevnosti betónu v ťahu f_{ctd} použijeme hodnotu pevnosti $f_{lctd} = f_{lctk,0.05} / \gamma_c$.

Doc. Ing. Jaroslav Halvoník, Ph.D.

e-mail: halvonik@svf.stuba.sk

Ing. Mária Bellová, Ph.D.

e-mail: bellova@svf.stuba.sk

tel.: +4212 5296 1749

fax.: +4212 5296 7027

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11, 813 68 Bratislava, SK

www.svf.stuba.sk