

f_{cm}

$0,4f_{cm}$

$$\tan \alpha = E_{cm}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

MODUL PRUŽNOSTI BETÓNU

Autori:
Stanislav Unčík
Patrik Ševčík



edícia
betón
ráció

MODUL PRUŽNOSTI BETÓNU

Autori:
Stanislav Unčík
Patrik Ševčík

Trnava 2008



edícia
betón
racio

OBSAH

1	Úvod.....	7
2	Deformácie betónu.....	8
3	Vzťah napätia a deformácie.....	9
4	Modul pružnosti.....	10
5	Vzťah pevnosti betónu a modulu pružnosti.....	13
6	Vplyv zloženia betónu na modul pružnosti.....	15
7	Dynamický modul pružnosti.....	18
8	Stanovenie statického modulu pružnosti betónu v tlaku.....	20
	Literatúra.....	24

1 ÚVOD

Modul pružnosti patrí k základným charakteristikám betónu. Výrazne ovplyvňuje deformačné vlastnosti betónu a teda aj deformácie betónových konštrukcií, ako sú priehyby, posuny, skrátene a pod. Vo všeobecnosti platí, čím je väčší modul pružnosti betónu, tým menšie sú jeho deformácie a naopak. S narastaním modulu pružnosti klesajú deformácie betónu a znižujú sa priehyby železobetónových konštrukcií.

Význam modulu pružnosti ako jednej zo základných charakteristík betónu narastá so statickou náročnosťou konštrukcie, s narastaním rozponov a zaťaženia konštrukcie. Veľký význam má pri takých konštrukciách, ako sú mosty, estakády, veľkorozponové strešné a stropné konštrukcie priemyselných hál, športových objektov a tiež pri rôznych náročných inžinierskych konštrukciách. Pri takýchto konštrukciách sú veľmi dôležité malé priehyby a ďalšie deformácie.

Napriek mimoriadnemu významu modulu pružnosti betónu pre deformačné správanie sa železobetónových konštrukcií je až na výnimky venovaná minimálna, väčšinou žiadna pozornosť tejto charakteristike betónu v realizačnej fáze, teda v priebehu výstavby.

Projektanti síce pracujú v statickom výpočte s touto charakteristikou, ale pracujú s normovými (tabuľkovými) hodnotami, ktoré sú odvodené pre jednotlivé triedy betónu. Tieto teoretické hodnoty modulu pružnosti nemusia zodpovedať reálnym hodnotám, ktoré sa dosiahnu na stavbe. Navyše, ak modul pružnosti nie je predpísaný v projekte, nedostane sa do špecifikácie betónu, a pri návrhu zloženia betónu a tiež pri preukazovaní zhody sa s touto charakteristikou vôbec neuvažuje a skutočná hodnota modulu pružnosti betónu nie je známa.

Vedecký pokrok v oblasti technológie betónu v posledných rokoch umožňuje veľkú variabilnosť v zložení betónu pre dosiahnutie vyžadovanej pevnostnej triedy. Pri návrhu zloženia betónu sa prihliada spravidla nie len na pevnosť (triedu betónu), ale aj na ďalšie požiadavky, ako sú konzistencia, maximálne zrno kameniva, agresivnosť prostredia, požadovanú rýchlosť tuhnutia, ročné obdobie, spôsob dopravy a pod. Tieto technologické požiadavky môžu výrazne ovplyvniť zloženie betónu z hľadiska výberu druhu, triedy a množstva cementu, druhu kameniva a prísad. V dôsledku toho možno vyrobiť betón vyžadovanej pevnostnej triedy s veľmi rozdielnymi ďalšími vlastnosťami a teda aj rozdielnym modulom pružnosti. Spoliehať sa na normové hodnoty modulu pružnosti pre jednotlivé triedy betónu je preto dnes už nedostatočné. Pri konštrukciách náročných z hľadiska deformácií je preto nutné predpísať aj modul pružnosti betónu a zahrnúť ho do špecifikácie betónu.

2 DEFORMÁCIE BETÓNU

Každé teleso vystavené vonkajšiemu zaťaženiu nadobudne určitú deformáciu. Tvar, resp. charakter deformácie závisí od charakteru pôsobiacej sily a teda od charakteru napätí v priereze. Pri pôsobení tlakových síl vznikajú tlakové napätia, ktoré spôsobujú zmenšenie rozmeru telesa alebo konštrukcie v smere pôsobiacej sily (stlačenie materiálu). V prípade ťahových napätí dochádza naopak k zväčšeniu rozmeru v smere pôsobiacej sily (k natiahnutiu materiálu). Ak deformácia po skončení pôsobenia sily (po odľahčení telesa) vymizne a teleso nadobudne pôvodný tvar a rozmery, takáto deformácia sa nazýva pružná. Schopnosť materiálu nadobudnúť po odľahčení pôvodný tvar a rozmery sa nazýva pružnosť.

Ak teleso po odľahčení zostane v deformovanej podobe, nevráti sa na pôvodné rozmery a tvar, ide o deformáciu plastickú. Schopnosť materiálu nadobudnúť plastickú deformáciu sa nazýva tvárlosť.

Veľkosť deformácie materiálu sa najčastejšie vyjadruje formou pomerného pretvorenia. Pomerné pretvorenie predstavuje pomer zmeny rozmeru (prírastku alebo úbytku) k pôvodnému rozmeru. Podľa charakteru zaťaženia to môže byť pomerné skrátene, pomerné predĺženie, pomerné posunutie, alebo pomerné skrútenie.

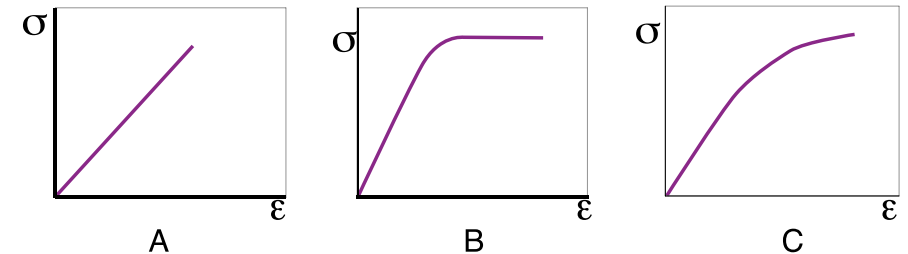
Vzhľadom na skutočnosť, že betón je materiál, ktorý prenáša v konštrukcii hlavne tlakové napätia, najdôležitejšie je pružné správanie sa betónu pri tlakovom namáhaní. Pri takomto namáhaní dochádza k zmenšeniu rozmeru v smere pôsobiacej sily, čo možno vyjadriť pomerným skrátene ε podľa vzťahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

Kde ε je pomerné pretvorenie (skrátene),
 Δl - zmena dĺžky v mm,
 l_0 - pôvodná dĺžka telesa v mm.

3 VZŤAH NAPÄTIA A DEFORMÁCIE

Veľkosť deformácie betónu je úmerná jeho zaťaženiu a teda napätiu v priereze. Čím väčšie je zaťaženie (napätie) tým väčšia je aj deformácia. Závislosť medzi deformáciou a napätím sa znázorňuje v σ - ε diagramoch (v staršej literatúre sa uvádza tiež názov pracovné diagramy).



Obr. 1 Idealizované σ - ε diagramy pre rôzne materiály
 A – dokonale (lineárne) pružný materiál
 B – pružno-plastický materiál
 C – nelineárne pružný materiál

Na obr. 1 sú znázornené idealizované σ - ε diagramy vybraných materiálov. Ideálne (lineárne) pružný materiál (A) nemá po odľahčení žiadnu deformáciu. Prírastok deformácie je vždy úmerný prírastku napätia.

Pružno-plastický materiál (B) sa správa do dosiahnutia určitej hodnoty napätia ako pružný, po dosiahnutí tohto napätia ako plastický materiál.

V prípade nelineárne pružných materiálov (C) sa prírastok deformácie s narastajúcim napätím zväčšuje. Prírastok deformácie sa teda pri rovnomernom náraste napätia zrýchľuje. Po odľahčení však deformácia vymizne aj v prípade nelineárne pružných materiálov.

Reálne materiály majú σ - ε diagramy podstatne zložitejšie, hlavne pružno-plastické materiály (napr. oceľ). Taktiež v prípade betónu, ktorý môžeme zaradiť k nelineárne pružným materiálom môže byť priebeh uvedenej závislosti zložitejší, ako sa uvádza na obr. 1.

Zaťaženie pôsobiace v pozdĺžnom smere vyvoláva okrem pozdĺžnej deformácie aj priečnu deformáciu. Ak deformáciu vyvoláva tlaková sila, deformácia v pozdĺžnom smere je skrátene telesa, v priečnom smere rozšírenie telesa. Pomer priečnej deformácie k pozdĺžnej deformácii sa nazýva Poissonovo číslo.

4 MODUL PRUŽNOSTI

Modul pružnosti možno definovať ako pomer napätia a ním vyvolaného pomerného pretvorenia, čo možno vyjadriť vzťahom:

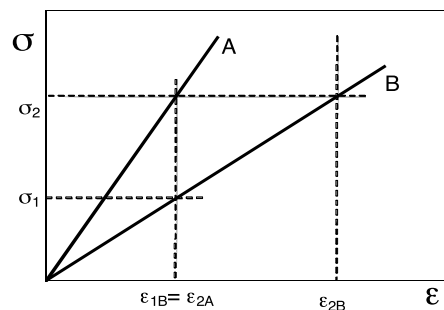
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Kde E je modul pružnosti v MPa,
 σ - napätie v MPa,
 ε - pomerné pretvorenie.

Na základe uvedeného vzťahu možno modul pružnosti charakterizovať ako teoretické napätie, pri ktorom dosiahne pomerné pretvorenie ε hodnotu 1. Ak má dosiahnuť ε hodnotu 1, musí platiť: $\Delta l = l_0$, to znamená, zmena dĺžky sa rovná pôvodnej dĺžke. V takom prípade by musel byť materiál stlačený na nulovú výšku. Je zrejmé, že takéto napätie nemožno reálne dosiahnuť, pevnosť materiálu sa vyčerpá pri podstatne nižších hodnotách napätia.

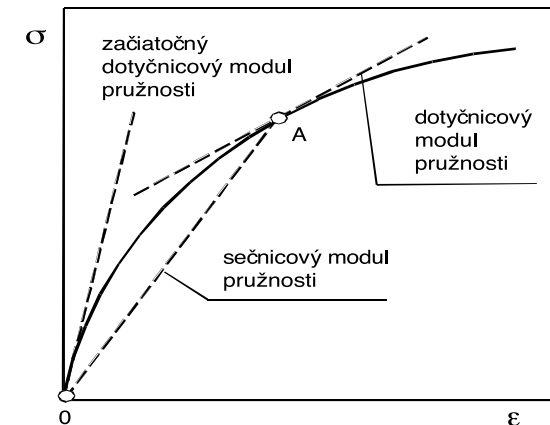
Modul pružnosti stanovený zo závislosti medzi napätím a pomerným pretvorením sa označuje ako statický modul pružnosti.

Vyššiu hodnotu modulu pružnosti majú materiály, ktoré potrebujú na dosiahnutie určitej deformácie vyššie napätie, teda materiály so strmšou závislosťou $\sigma - \varepsilon$ (obr. 2). Materiály s väčším modulom pružnosti majú menšie deformácie. Ako vyplýva z obrázka 2, pri rovnakom napätí má materiál „B“ podstatne väčšiu deformáciu, ako materiál „A“ a teda aj modul pružnosti materiálu „A“ je podstatne väčší ako materiálu „B“.



Obr. 2 Diagramy σ - ε dvoch pružných materiálov s rozdielnym modulom pružnosti
 A – materiál s vysokým modulom pružnosti
 B – materiál s nízkym modulom pružnosti

Keďže závislosť medzi napätím a pomerným pretvorením betónu nie je lineárna, modul pružnosti betónu závisí od napätia, pri ktorom sa stanovuje. Modul pružnosti daný pomerom σ_x/ε_x je známy ako sečnicový modul pružnosti (napr. modul pružnosti charakterizovaný smernicou OA na obr. 3). Modul pružnosti daný smernicou ku krivke σ - ε pri danom napätí je dotyčnicový modul pružnosti. Modul pružnosti charakterizovaný smernicou v začiatku závislosti je začiatkový dotyčnicový modul pružnosti. Najväčšiu hodnotu má začiatkový dotyčnicový modul pružnosti (sklon dotyčnice je najstrmší), nižšie hodnoty má sečnicový modul pružnosti a najnižšie dotyčnicový modul pružnosti (obr. 3).

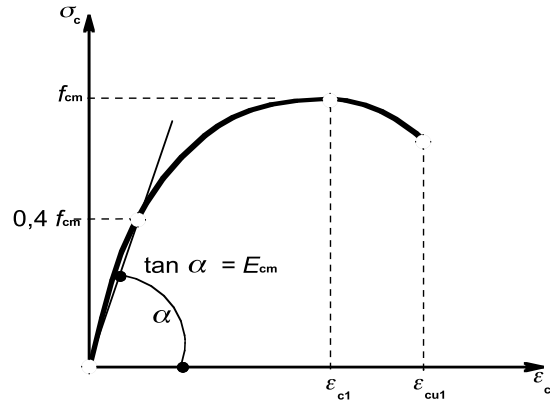


Obr. 3 Závislosť medzi napätím a pomerným pretvorením betónu a znázornenie rôznych modulov pružnosti

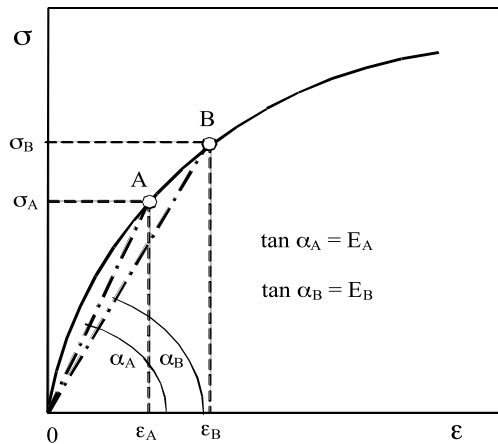
Schematické znázornenie závislosti medzi napätím a pomerným pretvorením betónu uvádzané európskou normou pre navrhovanie betónových konštrukcií STN EN 1992-1-1 je na obr. 4. Modul pružnosti E_{cm} je tu definovaný ako $\tan \alpha$, teda uhla, ktorý zvierá sečnica σ - ε závislosti s osou x pri napätí na úrovni 40 % pevnosti v tlaku ($0,4f_{cm}$).

Modul pružnosti sa stanovuje ako sečnicový modul pri definovanej úrovni napätia. Keďže betón je materiál nelineárne pružný, s narastaním napätia sa výraznejšie zväčšuje jeho deformácia. S narastaním napätia sa teda znižuje strmota sečnice (obr. 5) čo znamená, že čím vyššie je napätie pri stanovení modulu pružnosti, tým nižšia je jeho hodnota.

Pri určovaní modulu pružnosti sa uvažujú len pružné deformácie. Pri krátkodobom zaťažení a pri napätíach neprevyšujúcich 40 % pevnosti betónu je závislosť medzi napätím a pretvorením približne lineárna. Predpokladá sa, že pri takýchto napätíach je sečnicový modul pružnosti konštantný.



Obr. 4 Schematické znázornenie vzťahu napätie - pomerné pretvorenie (STN EN 1992-1-1)



Obr. 5 Vplyv hodnoty napätia pri stanovení modulu pružnosti na jeho hodnotu

Pri stanovení statického modulu pružnosti v tlaku sa postupuje podľa STN ISO 6784. Postup stanovenia sa uvádza v kapitole 8.

5 VZŤAH PEVNOSTI BETÓNU A MODULU PRUŽNOSTI

Vo všeobecnosti možno konštatovať, že modul pružnosti betónu narastá s jeho pevnosťou. Táto závislosť však nie je lineárna. Prírastku pevnosti teda nemusí zodpovedať adekvátny prírastok modulu pružnosti.

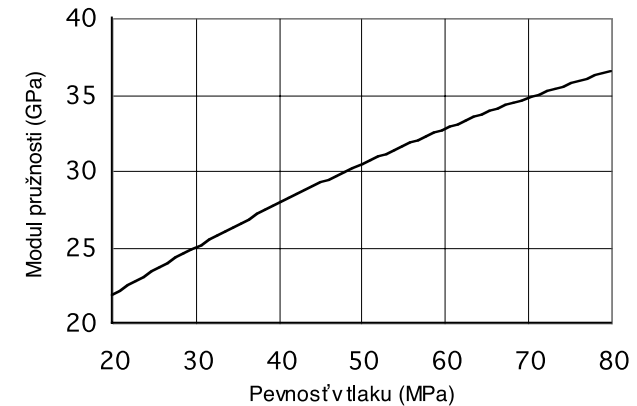
V odbornej literatúre je publikovaných niekoľko vzťahov medzi pevnosťou v tlaku a modulom pružnosti betónu. Neville [1] uvádza pre normálne betóny vzťah:

$$E_c = 4,73(f_c)^{0,5} \quad (3)$$

a pre betóny s pevnosťou do 83 MPa vzťah:

$$E_c = 3,32(f_c)^{0,5} + 6,9 \quad (4)$$

Kde E_c je modul pružnosti betónu (GPa),
 f_c - valcová pevnosť v tlaku betónu (MPa).



Obr. 6 Závislosť medzi modulom pružnosti a pevnosťou v tlaku podľa vzťahu (4)

Empirický vzťah medzi modulom pružnosti a pevnosťou v tlaku môže platiť pre betóny s podobným zložením. V prípade väčších rozdielov v zložení betónu, v použitom kamenive, druhu a dávke cementu, v použitých prísadách a prímiesiach môže byť táto závislosť podstatne odlišná.

Závislosť medzi modulom pružnosti betónu a jeho pevnosťou v tlaku je reflektovaná aj v európskej norme pre navrhovanie betónových konštrukcií EN 1992-1-1. Približné hodnoty modulu pružnosti E_{cm} (sečnicová hodnota medzi $\sigma_c=0$ a $0,4f_{cm}$) pre betóny s kremečným kamenivom sú uvedené v tabuľke 1. Pri vápencovom a pieskovcovom kamenive odporúča norma redukovať uvedené hodnoty o 10 %, resp. 30 %, pri bazaltovom kamenive zvýšiť o 20 %.

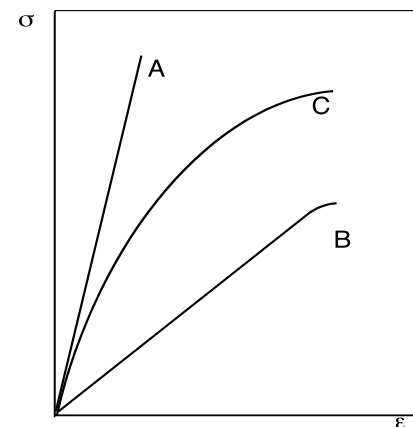
Tabuľka 1 Základné pevnostné charakteristiky a modul pružnosti betónu podľa STN EN 1992-1-1

Trieda betónu	Charakteristická valcová pevnosť	Charakteristická kocková pevnosť	Stredná hodnota pevnosti v tlaku	Modul pružnosti E_{cm}
	f_{ck} (MPa)	$f_{ck,cube}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	(GPa)
C12/15	12	15	20	27
C16/20	16	20	24	29
C20/25	20	25	28	30
C25/30	25	30	33	31
C30/37	30	37	38	32
C35/45	35	45	43	34
C40/50	40	50	48	35
C45/55	45	55	53	36
C50/60	50	60	58	37
C55/67	55	67	63	38
C60/75	60	75	68	39
C70/85	70	85	78	41
C80/95	80	95	88	42
C90/105	90	105	98	44

6 VPLYV ZLOŽENIA BETÓNU NA MODUL PRUŽNOSTI

Modul pružnosti betónu je ovplyvňovaný kvalitou jeho zložiek a ich vzájomným pomerom. Kvalitné prírodné kamenivo má vždy vyšší modul pružnosti ako zatvrdnutá cementová pasta. Modul pružnosti betónu sa pohybuje medzi modulom pružnosti kameniva a cementového kameňa (obr. 7).

Je zaujímavé, že kým závislosť σ - ε prírodného kameňa a tiež zatvrdnutého cementového tmelu je v podstate lineárna, v prípade kompozitného materiálu – betónu je táto závislosť nelineárna. Príčinou zakrivenia tejto závislosti je existencia vzájomných väzieb medzi povrchom kameniva a cementovým kameňom a rozvoj mikrotrhlín v tejto spojovacej vrstvičke. To vedie k vzniku lokálnych napätí na rozhraní: zrno kameniva - cementový kameň. Tieto napätia môžu prevýšiť nominálne napätia určené pri zohľadnení celkového prierezu vzorky. V dôsledku toho pretvorenie rastie rýchlejšie ako nominálne napätie vo vzorke a závislosť σ - ε získava charakteristické zakrivenie.



Obr. 7 Závislosť napätia a pomerného pretvorenia
A - kamenivo, B – cementový kameň, C - betón

Modul pružnosti zatvrdnutej cementovej kaše je ovplyvňovaný rovnakými činiteľmi ako pevnosť v tlaku.

Výrazný vplyv na modul pružnosti cementového kameňa má jeho pórovitosť. Čím vyššia je pórovitosť, tým nižší je modul pružnosti. Podľa literárnych údajov [2] je

modul pružnosti približne úmerný tretej mocnine pomeru gél/priestor. Pri zohľadnení kapilárnej pórovitosti cementového kameňa platí vzťah:

$$E_p = E_g (1 - P_c)_3 \quad (5)$$

Kde E_p je modul pružnosti zatvrdnutej cementovej kaše,
 E_g - modul pružnosti zatvrdnutej cementovej kaše pri nulovej pórovitosti,
 P_c - kapilárna pórovitosť.

Pórovitosť cementového kameňa je podstatným spôsobom ovplyvňovaná vodným súčiniteľom. S narastaním vodného súčiniteľa sa zvyšuje obsah voľnej vody v čerstvom cementovom kompozite, v dôsledku čoho narastá jeho pórovitosť. Pri požiadavke dosiahnuť vysoký modul pružnosti betónu je preto dôležité navrhnuť a vyrobiť betón s nízkym vodným súčiniteľom.

Pórovitosť cementového kameňa je ovplyvnená aj obsahom vzduchu, ktorý sa dostane do betónu počas miešania. S narastaním obsahu vzduchu narastá aj pórovitosť a klesá modul pružnosti. Dôkladné zhutnenie čerstvého betónu a odstránenie prebytočného vzduchu je preto veľmi dôležité aj z hľadiska modulu pružnosti betónu.

Modul pružnosti kameniva v betóne je podstatne vyšší ako cementového kameňa. Kým v prípade cementového kameňa sa modul pružnosti pohybuje v rozsahu 5 až 25 GPa, v prípade kvalitného prírodného kameniva (prírodných hornín) býva modul pružnosti v rozsahu 30 až 100 GPa (tabuľka 2).

Keďže kamenivo vyplňa v betóne približne 70 až 80 % objemu, podstatný vplyv na modul pružnosti betónu má modul pružnosti použitého plniva (kameniva). Čím vyšší je modul pružnosti kameniva, tým vyšší je aj modul pružnosti betónu.

Modul pružnosti ovplyvňuje nielen kvalita kameniva, ale aj jeho množstvo. Keďže modul pružnosti kameniva je podstatne väčší ako modul pružnosti cementového kameňa dá sa očakávať, že modul pružnosti betónu je tým väčší, čím väčší priestor v betóne zaberá kamenivo a čím menší je podiel cementového kameňa. Modul pružnosti betónu teda narastá s narastaním pomeru: objem kameniva / objem cementového kameňa.

Tabuľka 2 Mechanické vlastnosti skalných hornín

Hornina	Pevnosť v tlaku [MPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Poissonova konštanta
<i>Vyvreté horniny</i>				
Granit	100-300	7-25	30-70	0,17
Diorit	100-350	7-30	30-100	0,10-0,20
Gabro	150-250	7-30	40-100	0,20-0,35
Ryolit	80-160	5-10	10-50	0,2-0,4
Andezit	100-300	5-15	10-70	0,2
Čadič	100-350	10-30	40-80	0,1-0,2
<i>Usadené horniny</i>				
Zlepence	30-230	3-10	10-90	0,10-0,15
Pieskovce	20-170	4-25	15-50	0,14
Lupky	5-100	2-10	5-30	0,10
Dolomit	20-120	6-15	30-70	0,15
Vápenec	30-250	6-25	20-70	0,30
<i>Premenené horniny</i>				
Rula	100-250	7-20	30-80	0,24
Filit	50-150	6-20	10-85	0,26
Bridlica	50-180	7-20	20-90	0,20-0,30
Mramor	50-200	7-20	30-70	0,15-0,30
Kremence	150-300	5-20	50-90	0,17

Významný vplyv na modul pružnosti má pevnosť spoja medzi zrnom kameniva a cementovým kameňom. Pre dosiahnutie vysokých hodnôt modulu pružnosti betónu je preto dôležité, aby zrná kameniva neboli znečistené prachovými časticami ulipnutými na povrchu.

7 DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

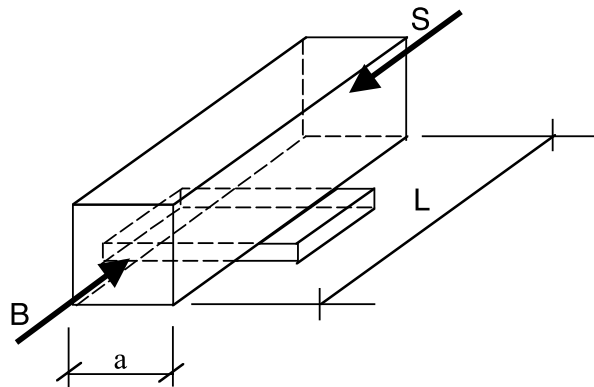
Okrem statického modulu pružnosti, ktorý sa určuje z reálneho napätia a deformácie vzorky vystavenej namáhaniu, existuje aj iný typ modulu pružnosti, ktorý sa nazýva dynamický modul pružnosti.

Dynamický modul pružnosti možno stanoviť viacerými metódami, k najčastejším patria rezonančná a ultrazvuková, metóda.

Rezonančná metóda sa zakladá na meraní prvej vlastnej frekvencie kmitania skúšobnej vzorky. Určenie modulu pružnosti betónu vychádza z korelačných vzťahov medzi vlastnou frekvenciou kmitania a pružnosťou betónu. Pri skúške sa skúšobná vzorka uloží na podklad tak, aby sa neobmedzoval jej pohyb pri kmitaní a kmitanie podložky bolo mimo rozsahu vlastného kmitania vzorky. Spravidla sa používa gumová podložka. Na vzorky sa následne priložia sondy skúšobného prístroja a generuje sa kmitanie s meniacim sa kmitočtom. Súčasne sa sleduje amplitúda kmitania. Maximálna amplitúda ukazuje vznik rezonancie, teda zhodu kmitočtu budiaceho oscilátora s vlastným kmitočtom skúšobnej vzorky. Hodnota dynamického modulu pružnosti betónu v tlaku $E_{br,L}$ sa vypočíta zo vzťahu:

$$E_{br,L} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (6)$$

Kde L je dĺžka skúšobnej vzorky v m,
 f_L - prvý vlastný kmitočet pozdĺžneho kmitania skúšobnej vzorky v kHz,
 ρ - objemová hmotnosť betónu v kg/m^3 .



Obr. 8 Schéma merania dynamického modulu pružnosti rezonančnou metódou:
 B – budič kmitania, S – snímač.

Pri ultrazvukovej metóde ide o meranie rýchlosti pozdĺžneho ultrazvukového vlnenia. Hodnota dynamického modulu pružnosti betónu v tlaku alebo ťahu ultrazvukovou impulzovou metódou sa stanoví zo vzťahu:

$$E_c = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

Kde E_c je dynamický modul pružnosti v N/mm^2 (MPa),
 ρ - objemová hmotnosť betónu v kg/m^3 ,
 v_L - impulzová rýchlosť pozdĺžneho UZ vlnenia v m/s,
 k - súčiniteľ rozmernosti prostredia.

Keďže pri nedeštruktívnom stanovení modulu pružnosti nie je betón vystavený reálnemu zaťaženiu a teda vo vzorke nie sú žiadne napätia, nedochádza ani k vzniku mikrotrhlín na rozhraní kameniva a cementového kameňa. V dôsledku toho dynamický modul pružnosti zodpovedá približne začiatočnému dotyčnicovému modulu pružnosti (obr. 3) pri statickom stanovení, a je teda podstatne vyšší ako sečnicový modul pružnosti (statický modul pružnosti), ktorý sa určuje pri zaťažení skúšobných vzoriek tlakovým napätím. Vzhľadom na heterogénnosť štruktúry betónu a rozdielne princípy stanovenia dvoch typov modulu pružnosti, nie je možné určiť jednoznačný vzťah medzi statickým a dynamickým modulom pružnosti. Napriek tomu, v odbornej literatúre sa uvádzajú určité empirické vzťahy medzi týmito modulmi pružnosti. K najjednoduchším patrí vzťah, ktorý navrhli Lydon a Balendran [1]:

$$E_c = 0,83 E_d \quad (8)$$

Kde E_c je statický modul pružnosti v GPa,
 E_d - dynamický modul pružnosti v GPa.

Neville [1] uvádza vzťah:

$$E_c = 1,25 E_d - 19 \quad (9)$$

Prednosťou dynamického modulu pružnosti je rýchlosť a jednoduchosť stanovenia. Nevýhodou je nižšia presnosť a spoľahlivosť nameraných hodnôt v porovnaní so statickým modulom pružnosti.

8

STANOVENIE STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI BETÓNU V TLAKU

Pre stanovenie statického modulu pružnosti betónu v tlaku na skúšobnej vzorke z vytvrdnutého betónu, ktorá môže byť vyrobená vo forme, alebo môže byť odobratá zo stavebnej konštrukcie, platí v Slovenskej republike STN ISO 6784.

Ako skúšobné vzorky sa v súčasnosti najčastejšie používajú betónové hranoly rozmerov 100 x 100 x 400 mm. Vhodnou vzorkou pre odbery betónu z hotovej konštrukcie sú valce s priemerom 150 mm a výškou 300 mm. Použiť však možno akékoľvek vzorky, ak spĺňajú podmienku, že pomer dĺžka/priemer (dĺžka strany) sú v intervale $2 \leq L/d \leq 4$ a priemer (dĺžka strany) d je minimálne 4 - násobok veľkosti maximálneho zrna kameniva v betóne. Požiadavky na skúšobné telesá sú uvedené v STN EN 12390-1. Výroba a príprava skúšobných telies musí byť vykonaná v súlade s STN EN 12390-2.

V prípade, že vzorka je vyvŕtaná alebo vyrezaná z konštrukcie a tieto požiadavky nemôžu byť splnené, výsledok skúšky sa považuje za informatívny.



Obr. 9 Osadenie vzorky v skúšobnom zariadení

Skúšobný lis musí spĺňať požiadavky STN EN 12390-4. Zariadenie by malo byť schopné aplikovať určené zaťaženie so stanoveným časovým nárastom napätia a udržiavať ho na požadovanej výške. Pri požiadavke na získanie reziduálnej vetvy pracovného diagramu je potrebné, aby zariadenie bolo schopné regulovať zaťaženie v závislosti na deformácii vzorky.

Zariadenie na meranie dĺžkových zmien musí mať dĺžku meracej základne minimálne 2/3 priemeru (dĺžky strany) vzorky a musí byť pripojené takým spôsobom, že meracie body sú rovnako vzdialené od koncov vzorky a taktiež vo vzdialenosti nie menšej než 1/4 dĺžky od koncov skúšanej vzorky. Zmeny dĺžky musia byť merané na minimálne dvoch opačných stranách vzorky. Presnosť merania musí byť minimálne $\pm 5 \times 10^{-6}$.

Statický modul pružnosti v tlaku E_c (N/mm²) sa stanovuje ako sečnicový modul, počítaný z rovnice:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (10)$$

Kde $\Delta\sigma$ a $\Delta\varepsilon$ sú odchýlky v napätí a deformácii medzi zaťažovacou úrovňou 0,5 N/mm² a hornou úrovňou zaťaženia rovnou 1/3 tlakovej pevnosti vzorky.

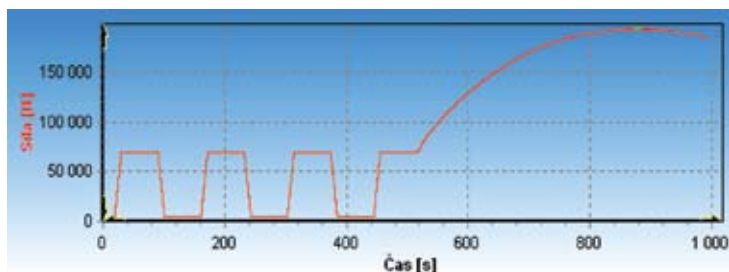
Postup pri stanovení statického modulu pružnosti:

Skúšobné teleso s osovo pripojenými meracími prístrojmi sa centrálne umiestni v skúšobnom zariadení. Aplikuje sa základne napätie $\sigma_b = 0,5$ N/mm². Namerané hodnoty sily a deformácií sú kontinuálne spracovávané a zaznamenávané.

Rovnomerne sa zvýši napätie rýchlosťou 0,6±0,4 N/mm² za sekundu až po hodnotu $\sigma_a = 1/3$ očakávanej hodnoty pevnosti v tlaku (očakávaná pevnosť v tlaku sa určí na pomocných vzorkách rovnakej veľkosti a tvaru a za rovnakých podmienok ako pri vzorkách na stanovenie statického modulu pružnosti).

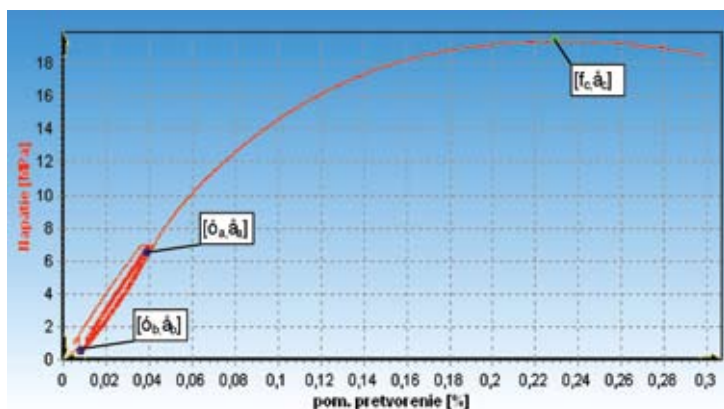
Toto napätie sa udržiava po dobu 60 s. V prípade, že sa jednotlivé pretvorenia líšia od priemernej hodnoty viac než 20%, je potrebné skúšku prerušiť, opätovne vycentrovať vzorku a skúšku zopakovať. Ak nie je možné zredukovať rozdiely na hodnoty menšie než 20% je potrebné upraviť rovinnosť koncov vzoriek, alebo vzorku vylúčiť.

V prípade ak je centrovanie vzorky dostatočne presné, zníži sa zaťaženie rovnakým spôsobom, ako počas zaťažovania, na hodnotu základného napätia. Následne sa vykonajú minimálne dva ďalšie zaťažovacie cykly použijúc rovnaké zaťažovacie a odľahčovacie úrovne na ktorých sa udržiava konštantné napätie (σ_a a σ_b) po dobu 60 s. Po skompletizovaní posledného zaťažovacieho cyklu a čakacej doby 60 s pri napätí σ_b sa vzorka opätovne zaťaží na napätie σ_a a zvýši sa zaťaženie na skúšobnej vzorke špecifikovaným spôsobom až do porušenia. Grafický priebeh cyklovania zaťaženia je uvedený na obr.10.



Obr. 10 Grafický priebeh cyklovania – priebeh zaťažovacej sily v čase

Priemerné pomerné pretvorenia ε_a a ε_b sa vypočítajú zo všetkých meraných miest v meranom zaťažovacom cykle nasledujúcim po centrovani a vykonaní minimálne dvoch predbežných zaťažovacích cyklov)



Obr. 11 Diagram σ - ε (pracovný diagram) pri stanovení statického modulu pružnosti.

Statický modul pružnosti v tlaku, E_c (N/mm²) je daný rovnicou:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (11)$$

Kde

- σ_a je horné zaťažovacie napätie v N/mm² (1/3 z maximálneho napätia f_c)
- σ_b - základné napätie (0,5 N/mm²)
- ε_a - priemerné pomerné pretvorenia pri hornom zaťažovacom napätí
- ε_b - priemerné pomerné pretvorenia pri základnom napätí

Body: $[\sigma_a, \varepsilon_a]$; $[\sigma_b, \varepsilon_b]$; $[f_c, \varepsilon_c]$ použité pri stanovení statického modulu pružnosti sú znázornené na obr. 11.

Skúšanie statického modulu pružnosti betónu sa donedávna vykonávalo len veľmi sporadicky a predpokladalo sa, že platia hodnoty uvedené v tabuľkách noriem navrhovania. Výsledky skúšok za posledné obdobie však poukazujú na skutočnosť, že modulom pružnosti je potrebné sa vážne zaoberať už v štádiu návrhu betónu.

LITERATÚRA

- [1] Neville, A., M.: Properties of concrete. Longman, London, 1996
- [2] Bajza, A., Rouseková, I.: Technológia betónu. JAGA, Bratislava, 2006
- [3] Bilčík, J., Fillo, L., Halvoník, J.: Betónové konštrukcie. Bratislava 2005
- [4] STN EN 206-1 Betón. Časť 1: Špecifikácia, vlastnosti, výroba a zhoda, 2002
- [5] STN EN 1992-1-1 Navrhovanie betónových konštrukcií.
Časť 1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre pozemné stavby. December 2004
- [6] STN ISO 6784:1993 Betón. Stanovenie statického modelu pružnosti v tlaku
- [7] STN EN 12390-1/AC:2005 Skúšanie zatvrdnutého betónu.
Časť 1: Tvar, rozmery a iné požiadavky na skúšobné telesá
- [8] STN EN 12390-2:2001 Skúšanie zatvrdnutého betónu.
Časť 2: Výroba a príprava skúšobných telies na skúšky
- [9] Internetová stránka:
http://lmrwww.epfl.ch/en/ensei/Rock_Mechanics/ENS_080312_EN_JZ_Notes_Chapter_4.pdf



*Váš betón môže byť **INÝ**.
Môže byť **PRÍJEMNÝ, PEKNÝ, FAREBNÝ**.*

Pigmenty do betónov a mált.

BETÓN RACIO, s.r.o., Skladová 2, 917 02 Trnava, tel.: +421_33_5531_531, www.betonracio.sk



Modul pružnosti patrí k základným charakteristikám betónu. Výrazne ovplyvňuje deformačné vlastnosti betónu a teda aj deformácie betónových konštrukcií, ako sú priehyby, posuny, skrátenia a pod. Vo všeobecnosti platí, čím je väčší modul pružnosti betónu, tým menšie sú jeho deformácie a naopak. S narastaním modulu pružnosti klesajú deformácie betónu a znižujú sa priehyby železobetónových konštrukcií.



Publikácia bola realizovaná v spolupráci
s Technickým a skúšobným ústavom stavebným v Bratislave.



ISBN 978-80-969182-3-2



9 788096 918232