

STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI LEHKÝCH KONSTRUKČNÍCH BETONŮ ■ STATIC ELASTICITY MODULUS OF LIGHT-WEIGHT STRUCTURAL CONCRETE

Michala Hubertová

Je známo, že lehké betony vykazují nižší hodnoty statického modulu pružnosti oproti obyčejnému betonu, neboť jeden z největších vlivů na hodnotu modulu pružnosti betonu má modul pružnosti použitého kameniva. Článek popisuje vliv složení lehkého betonu s využitím lehkého kameniva na bázi expandovaného jílu (např. podíl lehkého a přírodního kameniva), jeho objemové hmotnosti a případně konzistence (oblast prefabrikace, transportbetonu, samozhutnitelný beton) na jeho statický a dynamický modul pružnosti. ■ We know that light-weight concrete shows lower values of static elasticity modulus than common concrete, because the elasticity modulus of aggregate is one of the most important factors of elasticity modulus of concrete. The article describes composition of light-weight concrete with light-weight aggregate based on expanded clay (e.g. proportion of light-weight and natural aggregate), its volumetric characteristics and consistence (for purposes of prefabrication, ready-mix and self-compacting concrete) and their influence on static and dynamic elasticity modulus.

PROBLEMATIKA STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI

Vliv statického modulu pružnosti na chování betonových konstrukcí je významný, zejména v současné době, kdy je trendem používání subtilnějších konstrukcí. Význam modulu pružnosti také narůstá se statickou náročností konstrukce (velkorozponové střešní a stropní konstrukce, sportovní objekty, mosty atd.).

Eurokód ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí uvádí směrné hodnoty pro obecné použití, ale upozorňuje na fakt, že v případech citlivých konstrukcí se mají hodnoty stanovit přesněji. Je obecně známo, že modul pružnosti betonu je závislý na modulech pružnosti jeho složek. Směrné hodnoty uvedené v této normě platí pro silikátové kamenivo (tab. 3.1. normy) s tím, že při použití jiných typů se hodnota buď poníží (vápencové kamenivo o 10 %, pískovcové kamenivo o 30 %) nebo navýší (čedičové kamenivo o 20 %).

Praxe ale ukazuje, že závislost pevnosti v tlaku na statickém modulu pružnosti je velmi variabilní. Norma ČSN EN 1992-1-1 zohledňuje pouze materiálovou podstatu použitého kameniva, nikoliv např. plynulost křivky, použitou frakci, dále např. druh použité přísady a příměsi, vodní součinitel, podíl objemu cementového kamene vůči objemu kameniva, způsob dopravy, ukládání atd.

Problém v komunikaci investora a dodavatele stavby resp. dodavatele stavby a dodavatele betonu je znám. Vzhledem k tomu, že ČSN EN 206-1 neudává žádné požadavky na statický modul pružnosti, nemá výrobce povinnost tuto vlastnost sledovat a ani deklarovat. Pouze v případě, kdy projektant určí modul pružnosti pro konkrétní betonovou konstrukci, což se ale neděje příliš často. Je známo, že existuje variabilita hodnot statického modulu pružnosti v rámci jedné pevnostní třídy betonu.

Pro stanovení statického modulu se běžně používá zkušební metoda dle normy ČSN ISO 6784. Dynamický modul pružnosti lze stanovit více metodami, k nejčastějším patří rezonanční a ultrazvuková metoda. Protože při ne-destruktivním stanovení modulu pružnosti není beton vystavený reálnému zatížení, ve vzorku tedy nejsou žádná napětí, nedochází ani k vzniku mikrotrhlin na rozhraní kameniva a cementového kamene. V důsledku toho dynamický modul pružnosti odpovídá přibližně počátečnímu tečnovému modulu pružnosti při statickém stanovení, a je tedy podstatně vyšší oproti sečnovému modulu pružnosti (známý pod pojmem statický modul pružnosti), který se určuje při zatížení zkušebních těles tlakovým napětím.

Vzhledem k heterogenní struktuře betonu a rozdílným způsobům stanovení dvou typů modulu pružnosti není možné určit jednoznačný vztah mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti. Přesto se v odborné literatuře určité empirické vztahy mezi nimi uvádějí. Velmi zjednodušeně a obecně lze konstatovat, že dynamický modul je cca o 20 % vyšší než statický modul pružnosti. Předností dynamického modulu pružnosti je rychlost a jednoduchost stanovení. Nevýhodou je nižší přesnost a spolehlivost naměřených hodnot v porovnání se statickým modulem pružnosti [2].

STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI LEHKÉHO BETONU S PÓROVITÝM KAMENIVEM

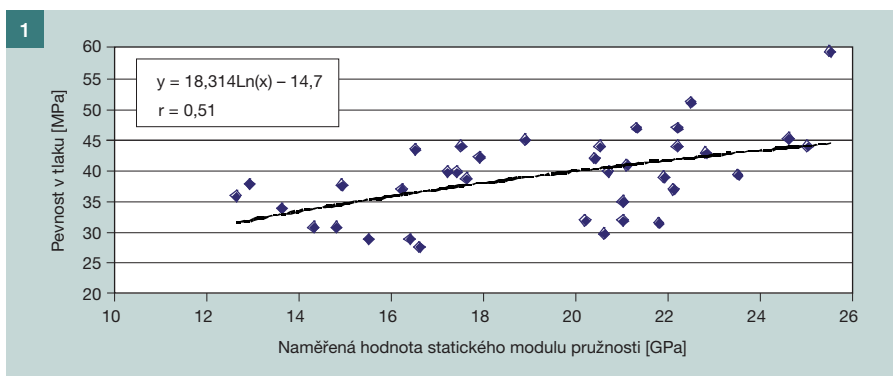
Dle ČSN EN 1992-1-1 lze odhad průměrných hodnot sečnového (statického) modulu E_{icm} pro lehký beton s pórovitým kamenivem získat vynásobením hodnot modulu pružnosti E_{cm} z tabulky 3.1. pro normální beton součinitelem $\eta_E = (\rho/2000)^2$, kde ρ je objemová hmotnost betonu ve vysušeném stavu dle ČSN EN 206-1.

Tab. 1 Hodnoty statického modulu pružnosti lehkého betonu s kamenivem Liapor dle ČSN EN 1992-1-1 ■ Tab. 1 Values of static elasticity modulus of light-weight concrete with the Liapor aggregate according to CSN EN 1992-1-1

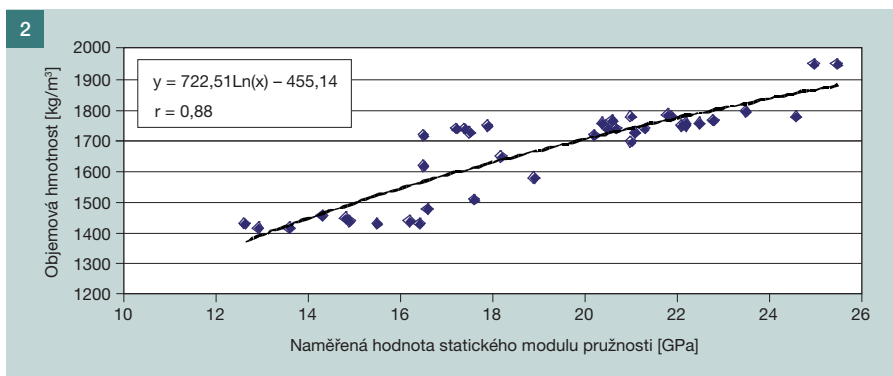
| Pevnostní třída betonu podle ČSN EN 206-1 | LC12/13 | LC16/18 | LC20/22 | LC25/28 | LC30/33 | LC35/38 | LC40/44 | LC45/50 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Třída objemové hmotnosti podle ČSN EN 206-1 | D 1,2 | D 1,4 | D 1,4 | D 1,6 | D 1,6 | D 1,8 | D 2,0 | D 2,0 |
| Součinitel η_E | 0,298 | 0,405 | 0,405 | 0,529 | 0,529 | 0,669 | 0,826 | 0,826 |
| Modul pružnosti E_{icm} [GPa] stanovený dle ČSN EN 1992-1-1 | 8 | 11,7 | 12,2 | 16,4 | 17,6 | 22,7 | 28,9 | 29,7 |
| Modul pružnosti pro adekvátní pevnostní třídu obyčejného betonu E_{cm} [GPa] dle ČSN EN 1992-1-1 | 27 | 29 | 30 | 31 | 33 | 34 | 35 | 36 |

Tab. 2 Hodnoty statického modulu pružnosti lehkého betonu s kamenivem Liapor třídy LC35/38 D 1,8 dle ČSN EN 1992-1-1 ■ Tab. 2 Values of static elasticity modulus of light-weight concrete with the Liapor aggregate class LC35/38 D 1.8 according to CSN EN 1992-1-1

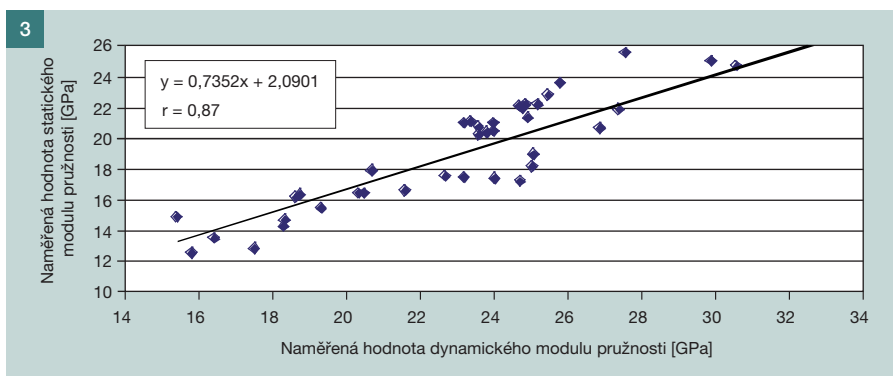
| LC35/38 D 1,8 – objemová hmotnost [kg/m ³] | 1 650 | 1 700 | 1 750 | 1 800 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Modul pružnosti E_{icm} [GPa] stanovený dle ČSN EN 1992-1-1 | 19,1 | 20,3 | 21,5 | 22,7 |



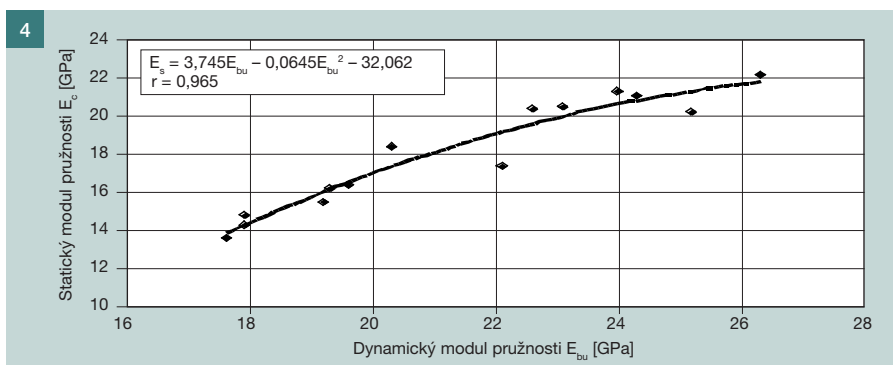
Obr. 1 Pevnost v tlaku vs. statický modul pružnosti lehkého betonu s kamenivem Liapor ■ Fig. 1 Compressive strength vs. static elasticity modulus of LW concrete with Liapor aggregate



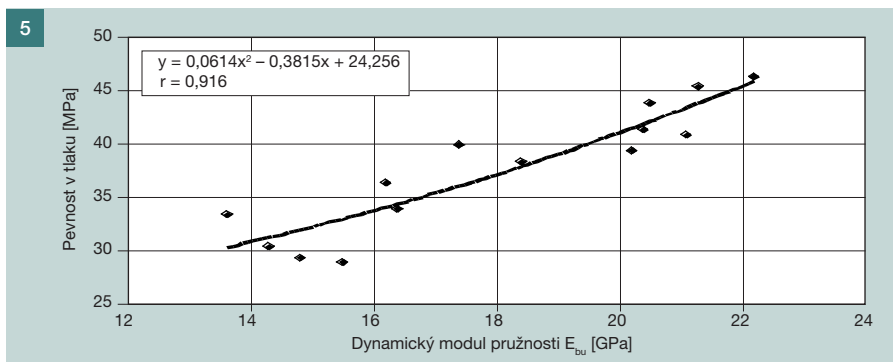
Obr. 2 Objemová hmotnost ve vysušeném stavu vs. statický modul pružnosti lehkého betonu s kamenivem Liapor ■ Fig. 2 Dry volume weight vs. static elasticity modulus of LW concrete with Liapor aggregate



Obr. 3 Dynamický vs. statický modul pružnosti lehkého betonu s kamenivem Liapor ■ Fig. 3 Dynamic vs. static elasticity modulus of LW concrete with Liapor aggregate



Obr. 4 Dynamický vs. statický modul pružnosti lehkého samozhutnitelného betonu s kamenivem Liapor ■ Fig. 4 Dynamic vs. static elasticity modulus of LWSCC with Liapor aggregate



Obr. 5 Pevnost v tlaku vs. dynamický modul pružnosti lehkého samozhutnitelného betonu s kamenivem Liapor ■ Fig. 5 Compressive strength vs. dynamic elasticity modulus of LWSCC with Liapor aggregate

V tabulce 1 jsou uvedeny vypočítané hodnoty dle tohoto normového postupu pro pevnostní a objemové třídy lehkého betonu s kamenivem na bázi expandovaného jílu (Liapor), které lze v podmínkách České republiky vyrobit pro oblast transportbetonu a prefabrikace. Protože ale v rámci jedné třídy objemové hmotnosti se jedná o rozmezí $\pm 1000 \text{ kg/m}^3$, dochází tím pádem ještě k většímu rozptýlu vypočítaných hodnot modulu dle ČSN EN 1992-1-1. Tabulka 2 uvádí příklad na často používané třídě LC35/38 D 1,8, kde třída D 1,8 zahrnuje objemovou hmotnost od 1650 do 1800 kg/m^3 .

STATICKÝ A DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI LEHKÉHO BETONU S PÓROVITÝM KAMENIVEM V PRAXI

Tato kapitola je věnována analýze výsledků statického modulu pružnosti stanoveného dle ČSN ISO 6784 a dynamického modulu pružnosti stanoveného ultrazvukovou **impulsní** metodou u lehkých betonů s kamenivem Liapor tuzemské výroby.

Jedná se o výsledky cca čtyřiceti receptur vyrobených převážně na betonárnkách (menší část laboratorně). Receptury byly vyrobeny v různých místech zařízeních v různých regionech České republiky, tzn. že jediná společná složka je lehké kamenivo Liapor kombinovaná v různých poměrech s přírodním kamenivem. Receptury by-

Tab. 3 Porovnání hodnot statického modulu pružnosti lehkého betonu s kamenivem Liapor třídy LC35/38 D 1,8 stanovených experimentálně a dle ČSN EN 1992-1-1 ■ Tab. 3 Comparison of experimentally determined values of static elasticity modulus of light-weight concrete with the Liapor aggregate class LC 35/38 D 1.8 according to CSN EN 1992-1-1

| LC35/38 D 1,8 – objemová hmotnost [kg/m ³] | 1 650 | 1 700 | 1 750 | 1 800 |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Modul pružnosti E_{icm} [GPa] stanovený dle ČSN EN 1992-1-1 | 19,1 | 20,3 | 21,5 | 22,7 |
| Reálné hodnoty modulu pružnosti [GPa] | 15 až 18 | 16 až 18 | 18 až 23 | 20 až 24 |

Tab. 4 Zvýšení hodnot statického modulu pružnosti nahrazením části lehkého kameniva přírodním kamenivem ■ Tab. 4 Increase of values of static elasticity modulus by partial replacement of light-weight aggregate with natural aggregate

| Nahrazení lehkého kameniva přírodním kamenivem [%] | Zvýšení statického modulu pružnosti [%] |
|--|---|
| 80 | 30 |
| 60 | 25 |
| 40 | 20 |
| 20 | 10 |

ly určené pro oblast transportbetonu i prefabrikace.

Stejně jako u obyčejných betonů se potvrzuje, že závislost tlakové pevnosti na výsledné hodnotě není vysoká (obr. 1). Těsnost korelace u závislosti statického modulu pružnosti na objemové hmotnosti je podstatně vyšší (obr. 2). Toto potvrdil i velký evropský projekt Eurolightcon u dalších typů lehkých pórovitých kameniv.

Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti z měření ultrazvukovou impulsní metodou a statickým modulem pružnosti zjišťovaným postu-

pem dle ČSN ISO 6784 je znázorněna na obr. 3. Tato závislost se nevyznačuje vysokou těsností korelace ($r = 0,87$).

Oproti tomu na obr. 4 a 5 jsou znázorněny závislosti statického a dynamického modulu a tlakové pevnosti na dynamickém modulem pružnosti u lehkých samozhutnitelných betonů, které byly vyrobeny ve stejném období, na stejné laboratorní míchačce se stejnými vstupními surovinami a byly zkoušeny v jedné laboratoři. Právě tomuto faktu lze přisuzovat větší rozptýlení závislostí u receptur z praxe, tzn. že konzistence spojená s výší vodního součinitele, druh dalších surovin (přírodní kamenivo, cement atd.) včetně způsobu míchání má vliv na výsledné hodnoty nejen modulu pružnosti.

Otázka konzistence, spojená s výší vodního součinitele a způsobu případné vlhkostrávy lehkého kameniva před samotným mícháním, je úzce spjatá s kvalitou kontaktní zóny lehké-



Obr. 6 Ukázka praktických realizací v průběhu posledních let, a) Stadion Eden Praha, LC35/38 D 1,8 XF4 XC4 V5, objemová hmotnost 1 730 kg/m³, pevnost v tlaku 47 MPa, statický modul pružnosti 25 GPa, dynamický modul pružnosti 30 GPa, b) Multifunkční stadion Karlovy Vary, LC25/28 D 1,6 XF4 XC4 V5, objemová hmotnost 1 550 kg/m³, pevnost v tlaku 34 MPa, statický modul pružnosti 22 GPa ■

Fig. 6 An example of practical application in last few years: a) Sports Stadium Eden Prague, LC35/38 D 1,8 XF4 XC4 V5, volume weight 1 730 kg/m³, compressive strength 47 MPa, static elasticity modulus 25 GPa, dynamic elasticity modulus 30 GPa, b) Multi-functional stadium Karlovy Vary, LC25/28 D 1,6 XF4 XC4 V5, volume weight 1 550 kg/m³, compressive strength 34 MPa, static elasticity modulus 22 GPa

Obr. 7 Plnostěnný trémový otevřený most, R6 Sokolov-Tisová, LC35/38 D 2,0 XF2, objemová hmotnost 1 850 kg/m³, pevnost v tlaku (3 dny) 41 MPa, pevnost v tlaku 46 MPa, statický modul pružnosti (3 dny) 21 GPa, statický modul pružnosti (7 dní) 22,5 GPa, statický modul pružnosti 24 GPa ■ Fig. 7 Plate girder form beamed open bridge, R6 Sokolov-Tisová, LC35/38 D 2,0 XF2, volume weight 1 850 kg/m³, compressive strength (3 days) 41 MPa, compressive strength 46 MPa, static elasticity modulus (3 days) 21 GPa, static elasticity modulus (7 days) 22,5 GPa, static elasticity modulus 24 GPa

ho kameniva s cementovým tmelem. Důležitým aspektem je také samotné ošetřování betonu. Pokud se lehký beton řádně ošetřuje, dochází k navýšení modulu pružnosti až o 15 %.

U závislosti statického modulu na objemové hmotnosti (obr. 2) jsou patrné největší rozptyly v okolí objemové třídy D 1,6 a D 1,8. Jedná se o třídy, kde se nejvíce objevuje různý poměr objemu přírodního a lehkého kameniva. Odhad vlivu poměru lehkého a přírodního kameniva na hodnotu modulu pružnosti získaný na základě zkušeností je uveden v tabulce 4. V tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty modulu pružnosti dle ČSN EN 1992-1-1 v porovnání s reálnými hodnotami na příkladu nejčastěji používané třídy lehkého konstrukčního betonu LC35/38 D 1,8.

Na obr. 6 jsou uvedeny dvě zajímavé aplikace lehkého betonu z posledních dvou až tří let s výsledky statického modulu použitého lehkého konstrukčního betonu s kamenivem Liapor.

Poslední zajímavou aplikací, která v současné době probíhá, je výstavba plnostěnného trémového otevřeného mostu o sedmi polích, jehož členěné pilíře a masivní opěry jsou hlubinně založené (obr. 7). Jedná se o ve střední Evropě ojedinělý projekt, neboť mosty z konstrukčního lehkého betonu byly a jsou převážně budovány v severovýchodních zemích (např. Grenland Bridge, Nordhordland Bridge a Eidsvoll Bridge v Norsku atd.).

Nosná konstrukce budovaného mostu je navržena jako spojitý nosník o sedmi polích. V příčném směru se jedná o dvoutrémový monolitický most z dodatečně předpjatého betonu LC35/38 XF2. Z hlediska nosné konstrukce platí obecný požadavek ČSN 73 6207 na předpínání po dosažení 80% pevnosti dané třídy, tj. 34 MPa kontrolní krychelné pevnosti, což beton LC35/38 XF3 bez problémů po třech dnech splní (hodnoty uvedeny po obr. 7). Délka přemostění je 278,5 m,

Literatura:

- [1] Misák P., Vymazal T.: Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku, Beton TKS 2/2009, p. 58-59
- [2] Unčák S., Ševčík P.: Modul pružnosti betonu. Edice betón racio. ISBN 978-80-969182-3-2
- [3] ČSN EN 206-1/Z3 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [4] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby
- [5] The economic potential of lightweight aggregate concrete in c.i.p. concrete bridges, EuroLightCon, document BE96-3942/R22. EU 2000
- [6] Komanec J., Němec P.: Technická zpráva R6 Sokolov-Tisová SO 201 – most přes silnici III/2124 a potok Tisová v km 0,406 část 300 – Nosná konstrukce. Pontex, s. r. o.

délka mostu 296,3 m, délka nosné konstrukce 281,5 m a rozpětí jednotlivých polí je 35 + 5 x 42 + 35 m a výška mostu je 8,066 m.



| | |
|------------------|--------------------------------------|
| HIP | Ing. Petr Hradil, SUDOP Praha, a. s. |
| Projekt | Ing. Jan Komanec, Pontex, s. r. o. |
| Dodavatel stavby | SMP CZ, a. s., Ing. Petr Popsimov |
| Realizace | říjen 2008 až říjen 2011 |

ZÁVĚR

Vzhledem k uvedeným výsledkům lze konstatovat, že není relevantní využívat pevnost v tlaku pro odhad modulu pružnosti lehkého betonu s kamenivem Liapor. Odhad na základě objemové hmotnosti je přesnější, ale přesnost korelace dosavadních výsledků není vysoká. Hodnoty modulů pružnosti stanovené na základě normy ČSN EN 1992-1-1 se mohou od reálných hodnot velmi lišit. Z těchto důvodů se vždy při zahájení důležité stavby (monolitické konstrukce, prefabrikovaných dílců) stanovuje na začátku statický modul pružnosti dané receptury lehkého konstrukčního betonu dle ČSN ISO 6784. Takto se v poslední době postupovalo u všech významných staveb.

Příspěvek byl zpracován za podpory projektu MPO FI-IM5/016 „Vývoj lehkých vysokohodnotných betonů pro monolitické konstrukce a prefabrikované dílce“.

Ing. Michala Hubertová, Ph.D.
m.hubertova@centrum.cz
hubertova.m@fce.vutbr.cz
mob.: 777 740 014

