

## Izravni postupak ispitivanja vlačne čvrstoće betona

**Tvrtko Renić<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [trenic@grad.hr](mailto:trenic@grad.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [kisha@grad.hr](mailto:kisha@grad.hr)

### Sažetak

Vlačna čvrstoća i energija loma betona značajno utječu na ponašanje betonskih konstrukcija. Uobičajeno je koristiti neizravne metode ispitivanja, cijepanje i savijanje za određivanje vlačne čvrstoće betona. Neizravnim metodama nije moguće precizno procijeniti vlačno ponašanje betona. U radu je objašnjeno zašto su te metode neprikladne te je dan pregled preciznijih, izravnih metoda ispitivanja. Prikazane su prednosti i nedostaci svih metoda te opisani tehnički problemi pri ispitivanju. Nedostatak izravnog postupka ispitivanja je taj da još uvijek nije normiran.

*Ključne riječi: vlačna čvrstoća, energija loma, metoda ispitivanja, cijepanje, mehanika loma*

## Direct tensile strength test of concrete

### Abstract

The behaviour of concrete structures is greatly influenced by the tensile strength and fracture energy of concrete. Tensile strength is usually determined by indirect, splitting, or bending test methods. However, tensile behaviour of concrete can not accurately be estimated using indirect test methods. It is explained why these methods are inappropriate, and an overview of more accurate direct tensile test methods is presented. Advantages and disadvantages of all the methods are discussed, and technical problems that may arise during testing are presented. The biggest issue with the direct tensile test method is the fact that it is still not standardized.

*Key words: tensile strength, fracture energy, test method, splitting, fracture mechanics*

## 1 Uvod

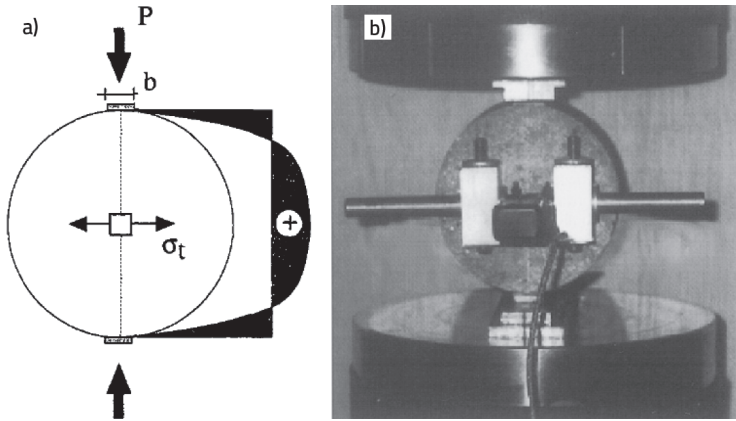
Vlačna čvrstoća svojstvo je betona o kojem ovisi raspucavanje, progib, trajnost, krutost i vodonepropusnost konstrukcije. Zbog toga je važno precizno procijeniti ponašanje betona u vlaku. Osim vlačnom čvrstoćom, ponašanje betona u vlaku određeno je i energijom loma. Iako je energija loma značajno svojstvo betona, u proračun se ne uzima eksplicitno. U situacijama gdje je njezin utjecaj bitan, kao na primjer kod posmika, izrazi za proračun su empirijski određeni [1]. Postupak ispitivanja ponašanja u vlaku stoga je vrlo važan. Uobičajeno se vlačno ponašanje betona određuje neizravnim ispitivanjem cijepanjem, opisanim u [2] ili savijanjem, opisanim u [1]. Neizravni postupci ispitivanja vlačne čvrstoće betona su normirani. Za ispitivanje cijepanjem koristi se norma HRN EN 12390-6:2010 [3], dok se za ispitivanje savijanjem koristi norma HRN EN 12390-5:2009 [4]. Energija loma i čvrstoća dobivene neizravno ne opisuju realno ponašanje betona, što je objašnjeno kasnije. Kako bi se energija loma precizno odredila, potrebno je zabilježiti ponašanje uzorka nakon vršnog opterećenja, odnosno razmatrajući vlačno omekšavanje. Postavke ispitivanja utječu na energiju loma. Ponašanje betona u vlaku preciznije je određeno izravnim postupkom ispitivanja, ali postoje brojni tehnički problemi pri provedbi izravnog postupka. Ekscentričnost unosa sile pri ispitivanju uzrokuje nejednoliku raspodjelu naprezanja u promatranom poprečnom presjeku uzorka. Također, beton je heterogen materijal. Na mezorazini je moguće razlikovati pojedina zrna agregata. Pri savršeno centričnom uzdužnom opterećenju naprezanja nisu jednolika po cijelom presjeku, bez obzira na odabrani način ispitivanja. Razlog nejednolikosti je heterogenost strukture materijala, koja se mora razmotriti pri procjeni vlačnog ponašanja betona. Stoga je ostvarivanje jednolikog stanja naprezanja teško provedivo [5]. Također, izravni postupak ispitivanja nije normiran. Na vlačna svojstva betona utječe niz parametara kao što su vodocementni omjer, veličina uzorka, vlažnost ispitnog uzorka, starost betona, broj i veličina pora te veličina i oblik zrna agregata [5-10]. Vrsta betona (lakoagregatni beton, samozbijajući beton, vlaknima armiran beton, beton visoke čvrstoće...) [11-15] i način opterećenja (statički ili dinamički) [16, 17] također utječu na ponašanje betona u vlaku.

## 2 Neizravne metode ispitivanja

### 2.1 Ispitivanje cijepanjem

Vlačnu čvrstoću betona moguće je odrediti pritiskom cilindra duž njegove izvodnice. Raspodjela naprezanja po visini uzorka prikazana je na slici 1.a, dok je na slici 1.b prikazan uzorak prilikom ispitivanja. Zbog Poissonovog djelovanja dolazi do pojave vlačnih naprezanja u smjeru okomitom na djelovanje sile. Kako je vlačna čvrstoća

betona mala u odnosu na njegovu tlačnu čvrstoću, do sloma dolazi pojavom vlačne pukotine.



Slika 1. Ispitivanje cijepanjem: a) shema raspodjele naprezanja [18]; b) ispitani uzorak [19]

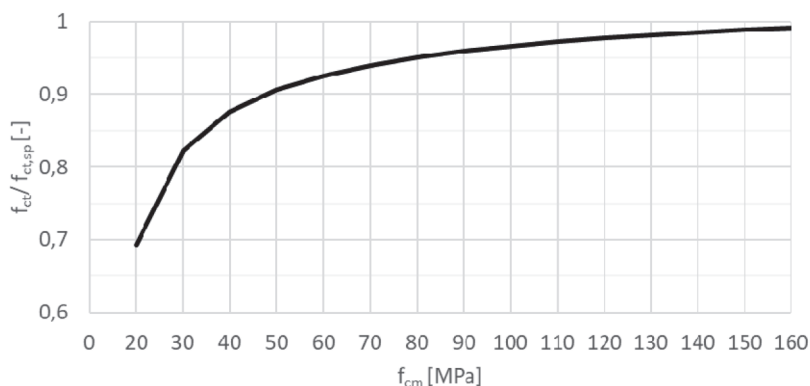
Prednosti postupka su što se može koristiti isti uzorak kao za ispitivanje tlačne čvrstoće, što su uzorci laki i kompaktni, što su uređaji za ispitivanje jednostavniji nego za izravni postupak i što je utjecaj vlastite težine na energiju loma zanemariv [20]. Nedostatak jednostavnijeg uređaja je taj da nije moguće odrediti ponašanje betona nakon vršnog opterećenja. Također, naprezanje koje se javlja u uzorku nije jednoliko po presjeku, već je gradijent naprezanja vrlo velik. Na mjestima unosa sile javlja se tlačno naprezanje okomito na smjer unesene sile, a na sredini poprečnog presjeka javlja se ujednačeno vlačno naprezanje. Nejednolikost naprezanja zbog unosa sile pridodaje se nejednolikosti uzrokovanoj heterogenom strukturom materijala, što je nepovoljno za procjenu ponašanja materijala. Razlika u modulu elastičnosti agregata i cementne paste utječe na stanje naprezanja u uzorku [5]. Rezultati ispitivanja cijepanjem ovise o obliku uzorka [19], veličini uzorka [21] i širini trake preko koje se unosi opterećenje [18]. Vlačna čvrstoća određena cijepanjem nije realna vrijednost. Prema [22], odnos vlačne čvrstoće dobiven izravno i cijepanjem ovisi o tlačnoj čvrstoći betona, a određen je izrazom (1):

$$\frac{f_{ct}}{f_{ct,sp}} = \frac{2,635 \cdot \ln(f_{cm}) - 6,322}{2,329 \cdot \ln(f_{cm}) - 4,71} \quad (1)$$

gdje je:

$f_{cm}$  - srednja tlačna čvrstoća betonskog valjka pri starosti 28 dana

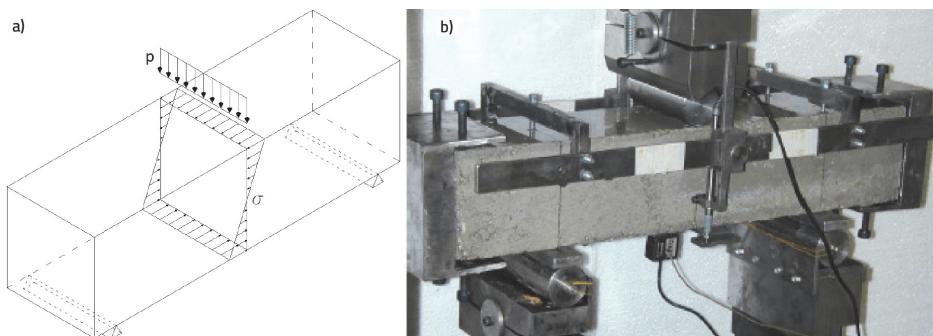
Na slici 2. grafički je prikazan odnos određen izrazom (1). Vidljivo je da za niže razrede betona vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem nije prihvatljiva.



Slika 2. Odnos tlačne čvrstoće betona i omjera vlačnih čvrstoća dobivenih izravno i cijepanjem

## 2.2 Ispitivanje savijanjem

Vlačnu čvrstoću betona moguće je odrediti pritiskom prizme jednom (three point bending test) ili dvjema silama (four point bending test). Na slici 3.a prikazan je poprečni presjek u sredini raspona uzorka. Vidljiva je raspodjela naprezanja u presjeku po visini elementa, pri čemu je tlačno naprezanje negativno, a vlačno pozitivno. Na slici 3.b prikazan je uzorak opterećen jednom silom u sredini raspona.



Slika 3. Ispitivanje savijanjem: a) shema raspodjele naprezanja u poprečnom presjeku; b) ispitani uzorak [23]

Vidljivo je da se javlja problem nejednolikosti naprezanja slično kao i pri ispitivanju cijepanjem. Vlastita težina uzorka utječe na stanje naprezanja, što uzrokuje nekontrolirani lom na kraju ispitivanja. Također, u blizini oslonaca se javlja koncentracija naprezanja pa može doći do oštećenja uslijed gnječenja betona. Na pomičnom

osloncu se zbog nesavršenosti javlja trenje koje sprječava slobodni pomak ruba uzorka. Zanemarenje disipacije energije izvan područja raspucavanja rezultira pogrešnim vrijednostima energije loma koji je dobiven ispitivanjem [5]. Prema [22] odnos vlačne čvrstoće dobiven izravno i savijanjem određen je izrazom (2):

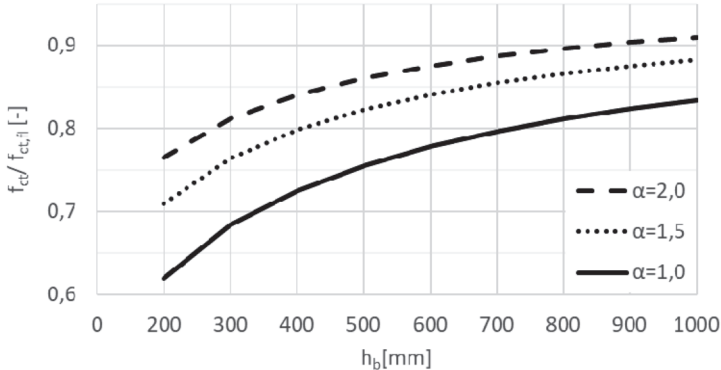
$$\frac{f_{ct}}{f_{ct,fl}} = \frac{\alpha_{fl} \cdot \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0,7}}{1 + \alpha_{fl} \cdot \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0,7}} \quad (2)$$

gdje je:

$\alpha_{fl}$  - koeficijent koji ovisi o krhkosti betona

$h_b$  - visina poprečnog presjeka uzorka u milimetrima

Prema [22], preporučena vrijednost  $\alpha_{fl} = 1,5$  ali on varira u skladu s razredom betona. Veća vrijednost  $\alpha_{fl}$  odgovara nižim razredima betona [22]. Na slici 4. prikazan je odnos određen izrazom (2) za vrijednosti  $\alpha_{fl} = 1$ ,  $\alpha_{fl} = 1,5$  i  $\alpha_{fl} = 2$ . Vidljivo je da za manju visinu presjeka vlačna čvrstoća dobivena savijanjem nije prihvatljiva.



Slika 4. Odnos visine uzorka i omjera vlačnih čvrstoća dobivenih izravno i savijanjem

### 3 Izravna metoda ispitivanja

Postavke ispitivanja različitih autora značajno variraju oblikom uzorka, oslabljenjima, rubnim uvjetima, načinom unosa sile, brzinom unosa sile itd. Razlike u postavkama ispitivanja uzrokuju različite rezultate. Iako je poznat odnos vlačne čvrstoće ispitane izravno i neizravno za standardne betone, za posebne vrste betona i ostale materijale na bazi cementa ti odnosi ne moraju biti prikladni. Jedino je izravnom

metodom moguće uzorak opteretiti jednoliko. Većina sadašnjih modela loma određena je na temelju podataka izravnih ispitivanja [24] pa je izravni postupak potrebno standardizirati.

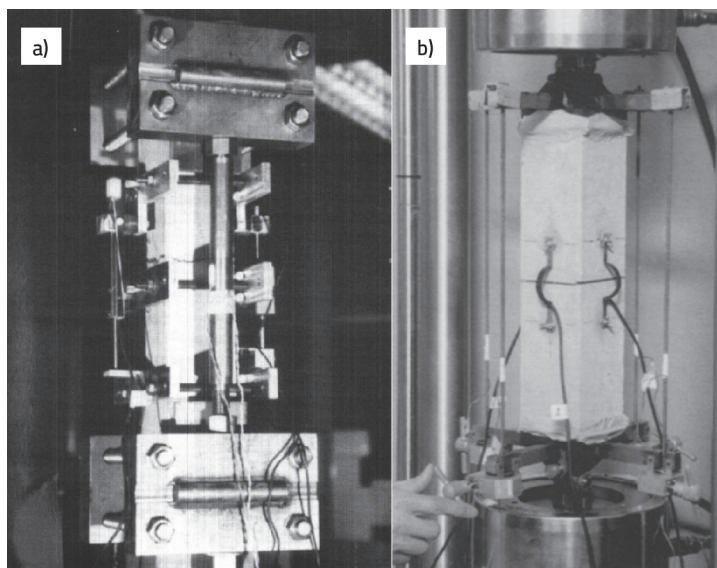
### 3.1 Oblik uzorka

Prvi pokušaji određivanja vlačne čvrstoće betona su bili provedeni na epruvetama postupno promjenjivog presjeka (oblik kosti ili „dog-bone“). Zbog promjenjivog oblika dolazi do pojave koncentracije naprezanja prema sredini visine uzorka. Do sloma može doći u presjeku koji nije najmanji zbog nehomogenosti materijala [5]. Uzorci oblika kosti korišteni su u ispitivanjima opisanim u [16, 17, 25-27]. U ispitivanjima prema [12, 13, 28-31] korišteni su uzorci prizmatičnog oblika, a u ispitivanjima prema [14, 32-34] uzorci cilindričnog oblika. Kompleksniji oblici uzoraka korišteni su u radu [35]. Uzorci su lokalno oslabljeni u ispitivanjima prema [12, 13, 27, 29]. Preporučeni oblik prema [36] je prizmatičan zbog jednostavne izvedbe i lakšeg mjerenja deformacije i energije loma. Nedostatak cilindričnog oblika je taj da vlačna čvrstoća ovisi o smjeru lijevanja betona (vertikalni ili horizontalni), a nedostatak uzorka oblika kosti je komplicirana izvedba i određivanje energije loma. Kvadratni poprečni presjek prikladniji je od pravokutnog jer se koristi manje materijala, a utjecaj ekscentričnosti je manji [36]. Duljina uzorka također utječe na rezultate ispitivanja. Što je element dulji, utjecaj vlastite težine uzorka je veći. Međutim, što je element kraći, nejednolikost naprezanja je izraženija [37].

## 4 Utjecaj ekscentričnosti i rubni uvjeti

Uslijed ekscentričnosti se javlja savijanje uzorka. Bitno je izbjeći savijanje uzorka, jer ono smanjuje vršno opterećenje [37]. Ekscentričnost se javlja zbog postavki ispitivanja, ali i zbog heterogenosti materijala (sekundarna ekscentričnost). Kako bi se spriječila ekscentričnost opterećenja, moguće je uzorak upeti kao na slici 5.a ili ga zglobno povezati kao na slici 5.b (zglob je vidljiv u blizini uređaja za ispitivanje). U određenim ispitivanjima se upetost pokušala ostvariti lijepljenjem čeličnih ploča na uzorak pomoću epoksidnog ljepila. Ploče se zatim izravno razvlače. Međutim, kod tako oblikovanih uzoraka dolazi do male rotacije na kontaktu ljepila i uzorka pa potpuna upetost nije ostvarena [37]. Upetost je moguće osigurati debelim čeličnim pločama preko kojih se sila u uzorak unosi trenjem. Postupak je prikazan na slici 5.a), odnosno u [27]. Energija loma je niža ako su rubni uvjeti zglobni [5], pa se postavlja pitanje koji je postupak prikladniji. Prema [5], zglobnim oslanjanjem ostvaruje se prikladnija vrijednost energije loma. Suprotno tome, u [38] se tvrdi da je realnija energija loma dobivena s upetim rubnim uvjetima. Osim ekscentričnosti, potrebno je osigurati jednolik unos sile u beton. Na slici 5.a jednolik unos ostvaruje se trenjem između bočnih ploča i uzorka. Na slici 5.b jednolik unos ostvaruje se preko aluminijskih

ske ploče koja je zalijepljena na donju i gornju stranu uzorka. Pri tome je bitno da je ploča dovoljne debljine kako bi se ostvario jednolik unos opterećenja. Prema [12, 14, 32] unos jednolike sile ostvaruje se sidrenjem armaturne šipke u uzorak. Prema [25] se jednolik unos ostvaruje obuhvaćanjem šireg dijela uzorka, a u [35] preko čeličnog prstena. Broj različitih načina unosa opterećenja je velik, a rezultati variraju pa je usporedba rezultata različitih istraživača upitna.



Slika 5. Izravno ispitivanje: a) upeto oslanjanje [27]; b) zglobno oslanjanje [29]

Sekundarna ekscentričnost se javlja kad se u nekom presjeku javi oštećenje. Dio presjeka koji je oštećen (omekšan) produljuje se više nego neoštećeni dio pa dolazi do nejednolikog stanja deformacija unutar presjeka. Moguće je nakon oštećenja unijeti u uzorak suprotnu ekscentričnost. Tada će se u nekom drugom presjeku zbog nove ekscentričnosti javiti oštećenje na suprotnoj strani presjeka od prvog oštećenja. U slučaju da se ponovo pokuša korigirati opterećenje, prvi presjek će ponovo uzrokovati ekscentričnost. Problem, dakle, nije moguće riješiti unosom namjerne ekscentričnosti. Da bi se problem riješio potrebno je postaviti oslabljenja u određeni presjek kao što je prikazano na slici 5.b kako bi u tom presjeku došlo do otkazivanja. Utjecaj sekundarne ekscentričnosti detaljnije je objašnjen u [36]. Iako u oslabljenom presjeku naizgled dolazi do koncentracije naprezanja, pri vršnom opterećenju je raspodjela naprezanja u oslabljenom presjeku gotovo jednolika [36]. Oslabljenja je potrebno postaviti na sve četiri strane poprečnog presjeka, uobičajeno u polovici visine uzorka. Dublji zarez osiguravaju da će do otkazivanja doći u oslabljenom presjeku, ali je tako utrošena veća količina materijala [36]. Stoga je potrebno odrediti najmanju zadovoljavajuću dubinu zarez. U [36] ispitivani su uzorci dimenzija  $100 \times 100 \times 400$  mm, a preporučeno je koristiti zarez dubine 10 mm.

### 3.3 Modeliranje

Zbog ranije navedenih problema kod svih metoda vlačnog ispitivanja betona, numeričko modeliranje omekšavanja provedeno paralelno s ispitivanjem čini se prikladnim. Modeliranje je moguće provesti na tri razine: makrorazini, srednjoj (mezo) razini i mikrorazini. Prednost modeliranja na makrorazini je što se koristi najmanje računalne memorije, ali je potrebno pretpostaviti način sloma [5] što može dovesti do pogrešne procjene oblika sloma i ponašanja kao što se pokazalo u [39]. Modeliranjem na mikrorazini može se ostvariti najpreciznija procjena, ali zbog vrlo velikog utroška računalne memorije postupak je zasad neprimjenjiv. Postupak na mezorazini je najprikladniji za modeliranje ponašanja. Modelima na mezorazini formiraju se mehanizmi loma, za razliku od modela na makrorazini gdje mehanizmi loma moraju biti pretpostavljeni na početku analize [5]. Modeliranje može biti koristan alat pri procjeni stanja naprezanja u elementu i prikladnosti metode ispitivanja.

## 4 Zaključak

Vlačna čvrstoća i energija loma bitna su svojstva betona. Velik broj parametara utječe na vlačno ponašanje betona. Uobičajeno je vlačnu čvrstoću betona odrediti neizravnim postupcima ispitivanja, cijepanjem ili savijanjem. Tako dobivena vlačna čvrstoća ne odgovara čvrstoći dobivenoj izravnim ispitivanjem. Energiju loma neizravnim postupcima nije moguće odrediti. Iako je ponašanje betona realnije određeno izravnim postupkom ispitivanja, on nije standardiziran. Pri provedbi izravnog postupka javlja se niz tehničkih problema kao što su ekscentrični unos opterećenja i jednolik unos opterećenja. Velik broj razlika u dimenzijama, materijalu i načinu unosa sile ispitanih uzoraka nije prikladan za usporedbu rezultata različitih ispitivanja. Stoga je potrebno odrediti standardni postupak izravnog ispitivanja vlačne čvrstoće betona.

## Literatura

- [1] Hillerborg, A.: The theoretical basis of a method to determine the fracture energy  $G_F$  of concrete, *Materials and Structures*, 18 (1985) 4, pp. 291-296.
- [2] Carneiro, F., Barcellos, A.: Resistance a la traction des betons, *Bulletin RILEM*, 13 (1953), pp. 97-108.
- [3] HRN EN 12390-6:2010: Ispitivanje očvrslaga betona - 6. dio: Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitnih uzoraka.
- [4] HRN EN 12390-5:2009: Ispitivanje očvrslaga betona - 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje.



- [5] Van Mier, J.G.M., Van Vliet, M.R.A.: Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art, *Engineering Fracture Mechanics*, 69 (2002) 2, pp. 235-247.
- [6] Bisschop, J.: *Drying shrinkage microcracking in cement-based materials*, TU Delft, 2002.
- [7] Li, D., Li, Z., Lv, C., Zhang, G., Yin, Y.: A predictive model of the effective tensile and compressive strengths of concrete considering porosity and pore size, *Construction and Building Materials*, 170 (2018), pp. 520-526.
- [8] Nguyen, D.H., Dao, V.T.N.: A novel approach to estimate the evolution of fracture energy and tensile softening curve of concrete from very early age, *Engineering Fracture Mechanics*, 196 (2018), pp. 43-55.
- [9] Van Vliet, M.R.A.: *Size effect in tensile fracture of concrete and rock*, TU Delft, 2000.
- [10] Bonzel, V.J., Kaldeček, V.: Einfluß der Nachbehandlung und des Feuchtigkeitszustands auf die Zugfestigkeit des Betons, *Betontechnische Berichte*, 20 (1970) 7, pp. 99-132.
- [11] Cornellissen, H.A.W., Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W.: Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete, *Heron*, 31 (1986) 2, pp. 45-56.
- [12] Alhussainy, F., Hasan, H.A., Rogic, S., Neaz Sheikh, M., Hadi, M.N.S.: Direct tensile testing of Self-Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 112 (2016), pp. 903-906.
- [13] Choi, S.J., Yang, K.H., Sim, J.I., Choi, B.J.: Direct tensile strength of lightweight concrete with different specimen depths and aggregate sizes, *Construction and Building Materials*, 63 (2014), pp. 132-141.
- [14] Abbass, W., Khan, M.I., Mourad, S.: Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Construction and Building Materials*, 168 (2018), pp. 556-569.
- [15] Graybeal, B.A.: Practical Means for Determination of the Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete, *Journal of ASTM International*, 3 (2006) 8, pp. 1-9.
- [16] Yan, D., Lin, G.: Dynamic properties of concrete in direct tension, *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 7, pp. 1371-1378.
- [17] Xiao, S., Li, H., Monteiro, P.J.M.: Influence of strain rates and load histories on the tensile damage behaviour of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 62 (2010) 12, pp. 887-894.
- [18] Rocco, C., Guinea, G. V., Planas, J., Elices, M.: Size effect and boundary conditions in the brazilian test: theoretical analysis, *Materials and Structures*, 32 (1999) 6, pp. 437-444.

- [19] Rocco, C., Guinea, G.V., Planas, J., Elices, M.: Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: Experimental verification, *Materials and Structures*, 32 (1999) April, pp. 210-217.
- [20] Ince, R.: Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010) 12, pp. 2233-2250.
- [21] Bazant, Z.P., Mazars, J., Kazemi, M.T., Hasegawa, T.: Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis, *Materials Journal*, 88 (1991) 3, pp. 325-332.
- [22] fib (Fédération International du Béton): Constitutive modelling of high strength/high performance concrete - Bulletin, 42 (2008.), pp. 126.
- [23] Gómez, F.J., Martín-Rengel, M.A., Ruiz-Hervias, J., Fathy, A.M., Berto, F.: New iterative method to obtain the softening curve in concrete, *Procedia Structural Integrity*, 2 (2016), pp. 2841-2848.
- [24] Burns, C.: Serviceability Analysis of Reinforced Concrete Based on the Tension Chord Model, *IBK Bericht*, (2012) 342, pp. 147.
- [25] Nguyen, D.H., Dao, V.T.N., Lura, P.: Tensile properties of concrete at very early ages, *Construction and Building Materials*, 134 (2017), pp. 563-573.
- [26] Boulay, C., Rossi, P., Tailhan, J.L.: Uniaxial tensile test on a new cement composite having hardening behaviour, 6<sup>th</sup> RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Varenna, pp. 61-68, 2004
- [27] Phillips, D.V., Binsheng, Z.: Direct tension tests on notched and un-notched plain concrete specimens, *Magazine of Concrete Research*, 45 (1993) 162, pp. 25-35.
- [28] Chen, X., Wu, S., Zhou, J.: Strength Values of Cementitious Materials in Bending and Tension Test Methods, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (2014) 3, pp. 484-490.
- [29] Akita, H., Koide, H., Tomon, M., Sohn, D.: A practical method for uniaxial tension test of concrete, *Materials and Structures*, 36 (2003) 6, pp. 365-371.
- [30] Swaddiwudhipong, S., Lu, H.R., Wee, T.H.: Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 12, pp. 2077-2084.
- [31] Li, Q., Duan, Y., Wang, G.: Behaviour of large concrete specimens in uniaxial tension, *Magazine of Concrete Research*, 54 (2002) 5, pp. 385-391.
- [32] Lin, W.T., Wu, Y.C., Cheng, A., Chao, S.J., Hsu, H.M.: Engineering Properties and Correlation Analysis of Fiber Cementitious Materials, *Materials*, 7 (2014) 11, pp. 7423-7435.

- [33] Kim, J.J., Reda Taha, M., Kim, J.J., Reda Taha, M.: Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens, *Advances in Civil Engineering*, (2014), pp. 1-8.
- [34] Lin, W.T., Cheng, A., Huang, R., Cheng, T.C.: A method for testing the strength of concrete using uniaxial direct tension, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 36 (2013) 3, pp. 295-303.
- [35] Sarfarazi, V., Haeri, H., Ebneabbasi, P., Bagher Shemirani, A., Hedayat, A.: Determination of tensile strength of concrete using a novel apparatus, *Construction and Building Materials*, 166 (2018), pp. 817-832.
- [36] Akita, H., Koide, H., Mihashi, H.: Specimen geometry in uniaxial tension test of concrete, *International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures 6*, Catania, 2007.
- [37] Akita, H., Koide, H., Ozaka, Y.: Discussion on Secondary Flexure in Uniaxial Tension Test of Concrete, *Brittle Matrix Composites 8*, Warsaw, pp. 187-194., 2006.
- [38] Mechtcherine, V., Müller, H.S.: Effect of the test set-up on fracture mechanical parameters of concrete, *International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures 3*, Gifu, pp. 377-386., 1998.
- [39] Elfgren, L., Eligehausen, R., Rots, J.G.: Anchor bolts in concrete structures: summary of round robin tests and analysis arranged by RILEM TC 90-FMA 'Fracture Mechanics of Concrete-Applications', *Materials and Structures*, 34 (2001), pp. 451-457.