

Primljen / Received: 1.11.2024.

Ispravljen / Corrected: 22.4.2025.

Prihvaćen / Accepted: 20.5.2025.

Dostupno online / Available online: 10.8.2025.

# Nosivost kratkog stupa od kružnih čeličnih cijevi ispunjenih UHPC-om pod osnim tlakom

Autor:

**Shengbing Fang**, dipl.ing.građ.

Institut za istraživanje i projektiranje kineskih željeznica, Xi'an Kina

[15129367667@163.com](mailto:15129367667@163.com)

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Shengbing Fang**

## Nosivost kratkog stupa od kružnih čeličnih cijevi ispunjenih UHPC-om pod osnim tlakom

Ovo istraživanje predstavlja izraz za procjenu osne tlačne nosivosti kratkih stupova od kružnih čeličnih cijevi ispunjenih betonom vrlo visokih svojstava (kružni UHPCFST). Osnovu za utvrđivanje tog izraza čine postojeći izraz za određivanje osne tlačne nosivosti uobičajenih kratkih stupova od kružnih čeličnih cijevi ispunjenih betonom i relevantna prethodna istraživanja. Kako bi se provjerila prihvatljivost izraza, uspostavljen je model konačnih elemenata za simulaciju osnovog tlačnog ponašanja kratkih kružnih UHPCFST stupova, pri čemu su korišteni aktualni eksperimentalni podaci. Rezultati pokazuju da predloženi izraz može točno predvidjeti osnu tlačnu nosivost kratkih kružnih UHPCFST stupova. U usporedbi s izrazom za osnu tlačnu nosivost kratkih kružnih UHPCFST stupova u drugim istraživanjima, u ovom je istraživanju koeficijent varijacije smanjen za 21,10 do 115,73 %, što dokazuje da je izraz u ovome istraživanju manje diskretna i ima bolju primjenjivost. Utvrđeno je da je interakcija između čelične cijevi i UHPC-a poželjna, a povećanje omjera promjera i debljine dovodi do slabljenja međusobnog sprezanja.

### Ključne riječi:

čelična cijev ispunjena UHPC-om, numerička simulacija, model konačnih elemenata, osni tlak, granična nosivost

Research Paper

**Shengbing Fang**

## Bearing capacity of UHPC-filled circular steel tube short column under axial compression

This study establishes a predictive formula for the axial compression bearing capacity of Ultra High Performance Concrete (UHPC) filled circular steel tube (circular UHPCFST) short columns. The basis for establishing this formula is the derivation method of the axial compression-bearing capacity formula for common concrete-filled circular steel tube short columns and relevant research. To verify the rationality of the formula, a finite element model of the axial compression of circular UHPCFST short columns was established, and the current axial compression bearing capacity test values of the circular UHPCFST short columns were used for the simulation. These results indicate that the proposed formula can accurately predict the axial compression bearing capacity of circular UHPCFST short columns. Compared with the axial compression bearing capacity formula of circular UHPCFST short columns in other studies, the coefficient of variation of the formula in this study is reduced by 21.10 % to 115.73 %, which proves that the formula in this study is less discrete and has better applicability. It was found that the interaction between the steel tube and UHPC was desirable, and the increase in the diameter-thickness ratio weakened the composite action of the section.

### Key words:

UHPC-filled steel tube, numerical simulation, finite element model, axial compression performance, ultimate bearing capacity

## 1. Uvod

Čelične cijevi ispunjene betonom (eng. *concrete filled steel tube* - CFST) postaju sve popularnije u građevinarstvu zbog svojih izvrsnih seizmičkih svojstava, izvrsne nosivosti te kratkog vremena izgradnje i isplativosti [1-9]. S razvojem društveno-gospodarskih prilika raste potreba za raznovrsnim visokim zgradama, stupovima i potpornim sustavima koji moraju izdržati vrlo visoka tlačna ili seizmička opterećenja. Takve konstrukcije često su složene i karakterizira ih visoka cijena održavanja. Zbog svojih iznimnih mehaničkih svojstava i dugotrajnosti nude učinkovito rješenje [10, 11].

Nedavno su mnogi istraživači proučavali čelične cijevi ispunjene betonom vrlo visokih uporabnih svojstava (eng. *Ultra High Performance Concrete Filled Steel Tube* - UHPCFST) i postigli napredak [12-16]. Otkrili su da je nosivost kratkih UHPCFST stupova uglavnom određena čvrstoćom čeličnih cijevi, veličinom presjeka, čvrstoćom betona i debljinom čeličnih cijevi [17-19]. Guler i sur. [20] proveli su ispitivanja osnog tlaka na kružnim kratkim UHPCFST stupovima s omjerom promjera i debljine kao istraživačkim parametrom. Rezultati ispitivanja pokazali su da se s povećanjem debljine čelične cijevi s 2,5 na 3,65 mm koeficijent nosivosti povećava u prosjeku za 5 %, a koeficijent duktilnosti u prosjeku za 69 %. Xu i sur. [21] utvrdili su da su komponente s malim faktorima ograničenja uglavnom podložne posmičnim slomovima, dok su komponente s velikim faktorima ograničenja uglavnom pretrpjele tipične slomove stupova. Nosivost UHPCFST-a usko je povezana s faktorom ograničenja te omjerom promjera i debljine. Međutim, potrebno je ispitati odnosi li se trenutna specifikacija na UHPCFST [15, 19]. Huang i sur. [22] usporedili su nosivost dobivenu simulacijom u ABAQUS-u s eksperimentalnom vrijednošću i utvrdili da je simulirana vrijednost nosivosti bila znatnija od predviđene vrijednosti izraza određenog prema važećim normama. Hoang i Fehling [23] usporedili su rezultate ispitivanja s nekim od trenutno važećim propisima i otkrili da je EC4 precijenio krajnje opterećenje kružnih UHPCFST stupova, dok su AISC i AIJ podcijenili krajnje opterećenje kružnih UHPCFST stupova. Kako bi kvantificirali nosivost UHPCFST-a, neki su znanstvenici analizirali podatke ispitivanja kako bi dobili

izraze [12, 14, 16]. Le Hoang i Fehling [24] proveli su numeričku simulaciju kratkih kružnih UHPC-FSTC-ova te uočili da deblje čelične cijevi i veći faktori ograničenja pokazuju bolju čvrstoću i duktilnost, a potom su predložili izraz za predviđanje graničnog opterećenja i napreznja. Na temelju rezultata regresijske analize Chen i sur. [25] razvili su izraz za predviđanje UHPCFST-ove nosivosti. Utvrđeno je da granica razvlačenja čelika i omjer promjera i debljine čeličnih cijevi igraju odlučujuću ulogu u čvrstoći UHPC-ove jezgre.

Ovo istraživanje pionirski je pristup predviđanju osne tlačne nosivosti kratkih kružnih UHPCFST stupova. Razvijen je i potvrđen novi izraz za predviđanje utemeljen na metodi graničnog stanja nosivosti primjenom simulacije konačnih elemenata u ABAQUS-u, koje su pojasnile utjecaj koeficijenta ograničenja i omjera promjera i debljine na nosivost. Dobiveni izraz pokazao je poboljšanu primjenjivost i točnost u usporedbi s postojećim metodama, što je znatan napredak u tome području.

## 2. Izvod izraza za osnu tlačnu nosivost

Shematski prikaz kratkog stupa od kružnih čeličnih cijevi ispunjenih betonom vrlo visokih uporabnih svojstava (UHPC) primijenjenog u ovome istraživanju prikazan je na slici 1.a. Prema definiciji kratkih stupova u normiranim standardima, stupovi s omjerom duljine i promjera manjim ili jednakim 4 ( $H/D \leq 4$ ) smatraju se kratkim stupovima.

U skladu s izrazom za osnu tlačnu nosivost uobičajenih kratkih CFST stupova, pet nepoznatih veličina utječe na sile u čeličnim cijevima i betonskim jezgrama: vanjsko opterećenje ( $N$ ), uzdužno naprezanje čelične cijevi ( $\sigma_1$ ), obodno naprezanje čelične cijevi ( $\sigma_2$ ), uzdužno naprezanje betona ( $\sigma_c$ ) i bočni tlak ( $p$ ) između betonske jezgre i čelične cijevi [26]. Navedeno je prikazano na slici 1.b.

Tlačna čvrstoća betona pod troosnim tlakom veća je nego pod jednoosnim. Prema zaključcima istraživanja, postoji linearni odnos između osne tlačne čvrstoće i bočnog tlaka pri troosnom tlaku. Zato se odnos između tlačne čvrstoće UHPC-a pod ograničenjem čelične cijevi i bez bočnog tlaka može napisati kao

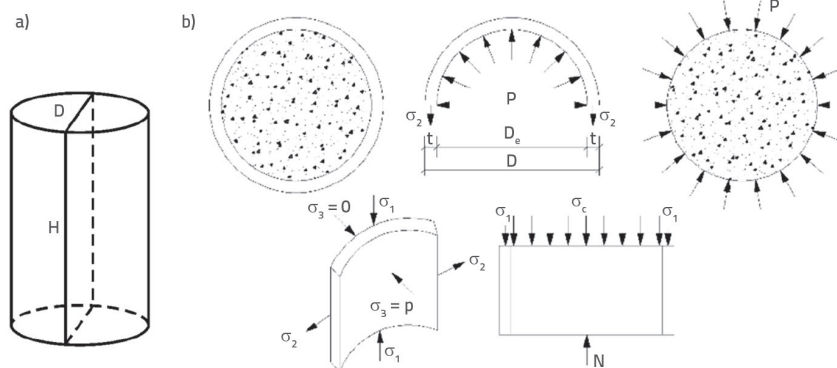
$$\sigma_c = f_c + K \cdot p \quad (1)$$

$$K = m + n \sqrt{p/f_c} \quad (2)$$

pri čemu je  $\sigma_c$  uzdužno naprezanje betona pod ograničenjem čelične cijevi,  $f_c$  osna tlačna čvrstoća betona bez bočnog tlaka,  $K$  koeficijent mjerenja tlaka određen ispitivanjem,  $p$  bočni tlak između jezgre betona i čelične cijevi, a  $m$  i  $n$  koeficijenti  $K$ -a.

Zamjenom izraza (2) u izraz (1) dobiva se:

$$\sigma_c = f_c \left( 1 + m \frac{p}{f_c} + n \sqrt{\frac{p}{f_c}} \right) \quad (3)$$



Slika 1. Kratki stup od kružnih čeličnih cijevi ispunjenih betonom vrlo visokih uporabnih svojstava: a) shematski prikaz; b) dijagram napreznja

Čelična cijev usvaja Von Missov kriterij popuštanja, točnije:

$$\sigma_1^2 + \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = f_y^2 \quad (4)$$

pri čemu je  $f_y$  granica popuštanja čelika.

Iz slike 1. utvrđen je izraz statičke ravnoteže:

$$N = A_c \sigma_c + A_s \sigma_1 \quad (5)$$

$$\sigma_2 t = \frac{D_c}{2} p \quad (6)$$

pri čemu  $A_s$  označava površinu presjeka čelične cijevi,  $A_c$  površinu betonskog presjeka,  $\sigma_1$  uzdužno naprezanje čelične cijevi,  $t$  debljinu čelične cijevi, a  $D_c$  unutarnji promjer čelične cijevi.

Uzimajući u obzir malu debljinu stijenke čelične cijevi može se dobiti sljedeći izraz:

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{4\pi D_c t}{\pi D_c^2} = \frac{4t}{D_c} \quad (7)$$

Povezano s izrazima (3), (4), (6) i (7).

$$\sigma_1 = \sqrt{f_y^2 - 3p^2 \left( \frac{A_c}{A_s} \right)^2} - p \frac{A_c}{A_s} \quad (8)$$

Izraz (8) može se pojednostaviti na sljedeći način:

$$\sigma_1 = \left( \sqrt{1 - \frac{3}{\xi^2} \left( \frac{p}{f_c} \right)^2} - \frac{1}{\xi} \cdot \frac{p}{f_c} \right) f_y \quad (9)$$

pri čemu se  $\xi = (f_y A_s) / (f_c A_c)$  naziva faktorom ograničenja.

Zamjenom izraza (3) i (9) u (5) dobiva se  $N$ .

$$N = f_c A_c \left[ 1 + \left( \sqrt{1 - \frac{3}{\xi^2} \left( \frac{p}{f_c} \right)^2} + \frac{m}{\xi} \cdot \sqrt{\frac{p}{f_c}} + \frac{n-1}{\xi} \cdot \frac{p}{f_c} \right) \xi \right] \quad (10)$$

Iz izraza (9) može se vidjeti da je izraz (10) funkcionalni izraz bočnog tlaka  $p$ . Izvod izraza (10) i odgovarajući bočni tlak  $p^*$  pod maksimalnim opterećenjem mogu se dobiti iz ekstremnog uvjeta  $d_N/d_p = 0$ .

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{-\frac{6}{\xi^2} \cdot \frac{p^*}{f_c}}{\sqrt{1 - \frac{3}{\xi^2} \left( \frac{p^*}{f_c} \right)^2}} + \frac{m}{2\xi \sqrt{\frac{p^*}{f_c}}} + \frac{n-1}{\xi} = 0 \quad (11)$$

Izraz (11) može se pojednostaviti na sljedeći način:

$$\frac{3 \frac{p^*}{f_c}}{\sqrt{\xi^2 - 3 \left( \frac{p^*}{f_c} \right)^2}} - \frac{m}{2 \sqrt{\frac{p^*}{f_c}}} - (n-1) = 0 \quad (12)$$

Zamjenom  $p^*/f_c$  u izrazu (9) izraz za predviđanje osne tlačne nosivosti kratkih stupova kružnih čeličnih cijevi ispunjenih UHPC-om može se dobiti na sljedeći način:

$$N = f_c A_c \left( 1 + a \sqrt{\xi} + b \xi \right) \quad (13)$$

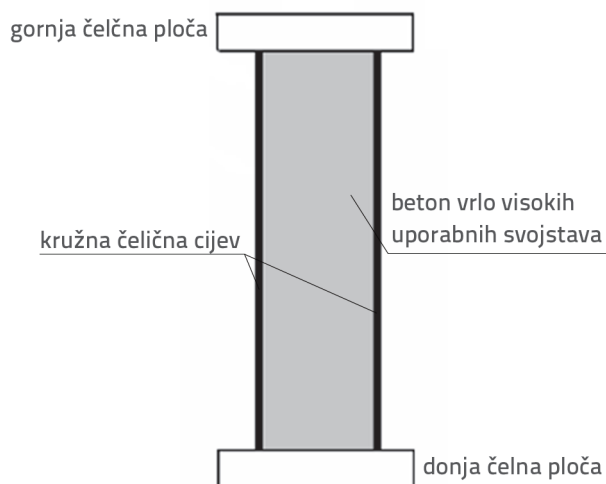
pri čemu su  $a$  i  $b$  koeficijenti  $m$  i  $n$ .

### 3. Numeričke simulacije nosivosti

Za dobivanje koeficijenata  $a$  i  $b$  provedena je numerička analiza primjenom računalnog programa ABAQUS, a rezultati numeričke simulacije dodatno su prilagođeni radi njihove primjenjivosti.

#### 3.1. Metoda simulacije

Kako bi model konačnih elemenata bio što sličniji stvarnoj komponenti, gornja i donja čelna ploča postavljene su tako da simuliraju ploču za prenošenje opterećenja ispitne preše, čime je smanjena pogreška modeliranja. Kratki stup s čelnim pločama prikazan je na slici 2.



Slika 2. Kratki stup s gornjom i donjom čelnom pločom

Osim toga gornja i donja čelna ploča smatrane su krutim tijelima, a da u obzir nije uzet utjecaj deformacije čelne ploče na rezultate simulacije. Komponente čelične cijevi, UHPC-a i čelne ploče modelirane su trodimenzionalnim krutim reduciranim integralnim elementom s osam čvorova (C3D8R). Tijekom procesa primjene opterećenja nije bilo klizanja između čelne ploče i čelične cijevi ili između čelne ploče i UHPC-a. Zato su gornja i donja površina kružnih čeličnih cjevastih stupova spriječene u svim stupnjima

slobode osim pomaka gornje površine u smjeru Z-osi. Interakcija između čelične cijevi i UHPC-a ponajprije uključuje normalno i tangencijalno ponašanje, a normalni kontakt definiran je kao kontakt bez prodiranja. Tangencijalni kontakt jest mehaničko trenje izraženo Coulombovim modelom trenja, a koeficijent trenja je 0,3.

## 3.2. Materijalni model

### 3.2.1. Materijalni model čelika

U ovom je istraživanju usvojen idealni elastično-plastični model koji ne samo da zadovoljava točnost izračuna, već šteti računalne resurse i skraćuje vrijeme izračuna modela. Izrazi za idealni elastično-plastični model prikazani su u izrazu (14).

$$\begin{aligned} \sigma_s &= E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s &\leq \varepsilon_y \\ \sigma_s &= f_y & \varepsilon_s &\geq \varepsilon_y \end{aligned} \quad (14)$$

pri čemu je  $E_s$  modul elastičnosti čelika,  $\sigma_s$  naprezanje čelika,  $\varepsilon_s$  deformacija čelika,  $\varepsilon_y$  deformacija pri popuštanju čelika, a  $f_y$  granica razvlačenja čelika.

### 3.2.2. Materijalni model betona

U ovom je istraživanju primijenjen model betonske jezgre iz Han Linhaijeva konstitutivnog modela. Nadalje, rezultati simulacije tog modela odražavaju stvarno mehaničko ponašanje elemenata. Linhaijev konstitutivni model prikazan je u izrazima (15) i (16).

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (15)$$

$$y = \begin{cases} 1 + q \cdot (x^{0,1\xi} - 1) & (\xi \geq 1,12) \\ \frac{x}{\beta \cdot (x-1)^2 + x} & (\xi < 1,12) \end{cases} \quad (x > 1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \left[ 1 + (-0,054 \cdot \xi^2 + 0,4 \cdot \xi) \cdot \left( \frac{24}{f_c} \right)^{0,45} \right] \cdot f_c \\ \varepsilon_0 &= \varepsilon_{cc} + \left[ 1400 + 800 \cdot \left( \frac{f_c}{24} - 1 \right) \right] \cdot \xi^{0,2} \quad (\mu\varepsilon) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12,5 \cdot f_c \quad (\mu\varepsilon)$$

$$\beta = (2,36 \times 10^{-5})^{[0,25 + (\xi - 0,5)^7]} \cdot f_c^2 \cdot 3,51 \times 10^{-4}$$

$$q = \frac{\xi^{0,45}}{2 + \xi}; \quad x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}; \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

Tablica 1. Postavke parametara koraka analize

| Vremensko trajanje | Maksimalni inkrementalni koraci | Veličina inkrementalnog koraka |                               |                                |
|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|                    |                                 | Početni inkrementalni korak    | Minimalni inkrementalni korak | Maksimalni inkrementalni korak |
| 1                  | 1000                            | 0,01                           | $1 \cdot 10^{-5}$             | 0,1                            |

pri čemu je  $\sigma_0$  vršno naprezanje betona,  $\varepsilon_0$  vršna deformacija betona,  $\sigma$  naprezanje betona,  $\varepsilon$  deformacija betona,  $\xi$  koeficijent ograničenja čelične cijevi ispunjene betonom,  $x$  omjer  $\varepsilon$  do  $\varepsilon_0$ ,  $y$  omjer  $\sigma$  do  $\sigma_0$ ,  $q$  koeficijent s obzirom na  $\xi$ , a  $\beta$  koeficijent s obzirom na  $\xi$  i  $f_c$ .

## 3.3. Numerička simulacija

### 3.3.1. Proces numeričke simulacije

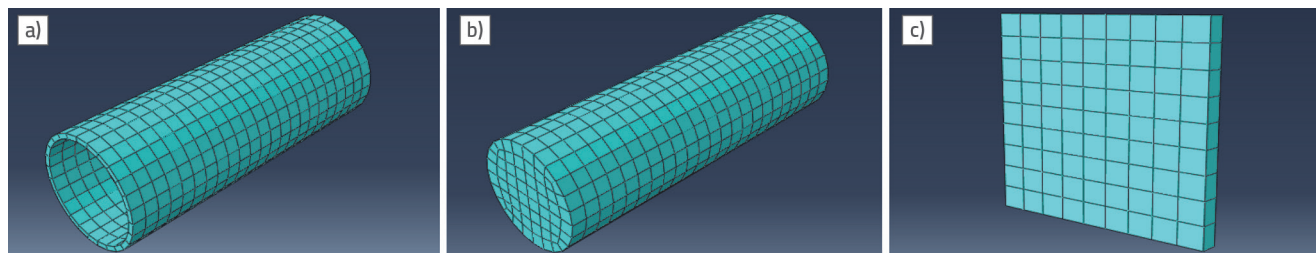
Modul elastičnosti i Poissonov koeficijent čelične cijevi postavljeni su na 206000 MPa, odnosno 0,3. Modul UHPC-ove elastičnosti izračunan je prema sljedećemu izrazu, a iznos Poissonova omjera je 0,2.

$$E_c = 0,2501 \sqrt{f_c} + 1,446 \times 10^4$$

Kako bi se osiguralo da su materijalna svojstva gornje i donje čelne ploče u modelu konzistentna sa svojstvima gornje i donje metalne ploče preše, gornja i donja čelna ploča tretirane su kao kruta tijela. Drugim riječima, utjecaj deformacije čelne ploče na rezultate simulacije nije uzet u obzir. Zato je čelnoj ploči zadan samo modul elastičnosti koji je dovoljno velik, dok je Poissonov omjer dovoljno malen. U ovom su istraživanju moduli elastičnosti gornje i donje čelne ploče 206000000 MPa, a Poissonov koeficijent 0,0001.

Pravilno postavljanje koraka analize ima znatan utjecaj na konvergenciju modela. Premala veličina koraka povećava broj potrebnih izračuna, što povećava računalno opterećenje. Zato manje veličine koraka ne jamče neophodno bolje rezultate. Premala veličina koraka može zahtijevati znatne računalne resurse, a da pritom ne doprinese znatnome poboljšanju točnosti. Postavke parametara koraka analiziranih u ovome istraživanju navedene su u tablici 1.

Pri podjeli mreže složeni se modeli prvo mogu segmentirati, a broj elemenata može se povećati u područjima ključnima za analizu i u područjima visokih koncentracija naprezanja kako bi se zadovoljili zahtjevi ključnog područja analize za brojem mreža. U drugim područjima analize koja nisu ključna broj elemenata može se prikladno smanjiti kako bi se smanjio broj mreža. Zato je prvi korak bio rezanje čeličnih cijevi i UHPC-ovih komponenti kako bi podjela mreže između čeličnih cijevi i UHPC-a bila ujednačenija. Trodimenzionalna mrežasta podjela svake komponente u kratkome stupu od kružnih čeličnih cijevi ispunjenih UHPC-om prikazana je na slici 3.



Slika 3. Trodimenzionalna raspodjela mreže konačnih elemenata kratkog stupa od čeličnih cijevi ispunjenih UHPC-om: a) mreža konačnih elemenata čeličnih cijevi; b) mreža UHPC-ovih konačnih elemenata; c) mreža konačnih elemenata čelne čelične ploče

Tijekom primjene opterećenja, zbog odsutnosti klizanja između čelne ploče i čelične cijevi te između čelne ploče i UHPC-a, održavan je krut kontakt. Zato je kontakt između čelne ploče i čelične cijevi, kao i između čelne ploče i UHPC-a, modeliran kao veza bez međusobnog pomaka. Istodobno čelna je ploča postavljena kao glavna površina, a čelična cijev i betonske čelne površine postavljene su kao sekundarne površine.

Normalni smjer površine između čelične cijevi i UHPC-a bio je u kontaktu. Taj se pristup može opisati primjenom ABAQUS-a, koji primjenjuje kontaktna ograničenja između čelične cijevi i UHPC-a samo kada je razmak između dviju kontaktnih površina jednak nuli. Ne postoji ograničenje veličine kontaktnog tlaka koji se može prenijeti između dviju kontaktnih površina. Točnije, tlak okomit na kontaktnu površinu može se u cijelosti prenijeti između površina. Kada je tlak između kontaktnih površina jednak nuli ili negativan, dolazi do razdvajanja dviju kontaktnih površina, što upućuje na prekid ograničenja.

Coulombov model trenja primijenjen je za tangencijalni smjer površine između čeličnih cijevi i UHPC-a. Normalni tlak na dvije kontaktne površine izravno utječe na granično smično naprezanje. Njihov međusobni odnos može se izraziti sljedećim izrazom:

$$\tau_{crit} = \mu p$$

Trenje između dviju kontaktnih površina prikazano je koeficijentom trenja  $\mu$ , pri čemu je  $p$  normalni kontaktni tlak između dviju kontaktnih površina. Koeficijent trenja između čeličnih cijevi i betona obično se kreće od 0,2 do 0,6. Nakon izračuna koeficijent trenja u ovom je istraživanju postavljen na 0,3.

Svi su modeli u ovome radu bili opremljeni čelnim pločama. Glavni razlog bio je približiti model konačnih elemenata stvarnim komponentama postavljanjem gornje i donje čelne ploče tako kako bi simulirale ploču za prenošenje opterećenja ispitne preše i smanjile pogreške. Nadalje, koncentracija naprezanja na površini komponente sprječava se zbog računalnog programa, što može uzrokovati to da metoda opterećenja simuliranoga kratkog stupa od čeličnih cijevi ispunjenih UHPC-om bude nedosljedna s idealnom metodom opterećenja.

### 3.3.2. Rezultati numeričke simulacije

U ABAQUS-u uspostavljen je model osnog tlaka za 63 kružna kratka UHPCFST stupa, a simulirane vrijednosti nosivosti navedene su u tablici 2.

U tablici 2. prvi je parametar debljina čelične cijevi, označena s T3, T5, T6 i T7, što predstavlja debljine od 3, 5, 6 i 7 mm. Drugi parametar jest granica popuštanja čelika, označena kao S1, S2, S3 i S4, što predstavlja granice popuštanja od 235, 300, 345 i 390 MPa. Treći je parametar osna tlačna čvrstoća betona, označena s C1, C2, C3 i C4, što predstavlja čvrstoću betona od 100, 120, 130 i 150 MPa. Četvrti parametar jest promjer kružne čelične cijevi, označen s 9, 11, 13 i 16, što predstavlja promjere od 90, 113, 135 i 169 mm. Na primjer, T3-S1-C1-11 jest element kružnog presjeka s debljinom čelika od 3 mm, osnom tlačnom čvrstoćom betona od 100 MPa, granicom popuštanja čelika od 235 MPa i promjerom od 113 mm. U ovome slučaju D predstavlja promjer kružnog presjeka. Omjer duljine i promjera elemenata jest 3.  $N_E$  je simulirana vrijednost osne tlačne nosivosti kratkih UHPCFST stupova,  $N_0$  nominalna nosivost,  $N_0 = f_y A_s + f_c A_c$ . CCR jest stopa doprinosa betona (engl. *concrete contribution rate*), a predstavlja udio  $N_E$  u nosivosti čelične cijevi. Izračunava se pomoću izraza (17).

$$CCR = \frac{N_E}{N_H} \quad (17)$$

pri čemu je  $N_H$  vrijednost nosivosti čelične cijevi, a  $N_H = f_y A_s$ . SI jest indeks čvrstoće UHPCFST-a, čini ga omjer  $N_E$  i  $N_0$ , a izračunava se pomoću izraza (18).

$$SI = \frac{N_E}{N_0} \quad (18)$$

### 3.4. Prilagodba koeficijenata

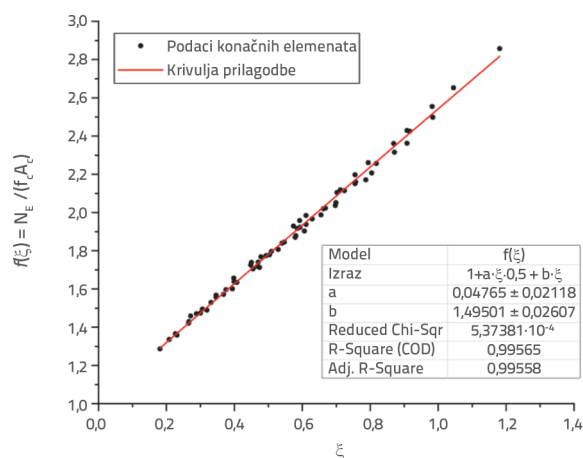
Na temelju podataka u tablici 2. približne vrijednosti  $a$  i  $b$  u izrazima (13) dobivene su primjenom metode linearne regresije u računalnom programu Origin. Kao što je to prikazano na slici 4.,  $a = 0,04765$ ,  $b = 1,49501$ .

Zato je koeficijent za predviđanje dobiven prilagođavanjem izraza (13):

$$N = f_c A_c \left( 1 + 0,04765 \sqrt{\xi} + 1,49501 \xi \right) \quad (19)$$

Tablica 2. Pojediniosti o uzorku UHPCFST-a

| Uzorak      | D/t  | $\xi$ | $N_E$<br>[kN] | $N_0$<br>[kN] | CCR   | SI    | Uzorak      | D/T  | $\xi$ | $N_E$<br>[kN] | $N_0$<br>[kN] | CCR   | SI    |
|-------------|------|-------|---------------|---------------|-------|-------|-------------|------|-------|---------------|---------------|-------|-------|
| T3-S1-C1-11 | 37,7 | 0,27  | 1312          | 1143          | 5,385 | 1,148 | T6-S1-C3-11 | 18,8 | 0,46  | 1776          | 1516          | 3,747 | 1,172 |
| T3-S1-C2-11 | 37,7 | 0,23  | 1474          | 1323          | 6,050 | 1,114 | T6-S1-C4-11 | 18,8 | 0,39  | 1924          | 1676          | 4,059 | 1,148 |
| T3-S2-C1-11 | 37,7 | 0,35  | 1410          | 1210          | 4,534 | 1,165 | T6-S2-C3-11 | 18,8 | 0,58  | 1957          | 1647          | 3,234 | 1,189 |
| T3-S2-C2-11 | 37,7 | 0,29  | 1587          | 1390          | 5,103 | 1,142 | T6-S2-C4-11 | 18,8 | 0,50  | 2138          | 1807          | 3,533 | 1,183 |
| T3-S2-C3-11 | 37,7 | 0,27  | 1671          | 1480          | 5,373 | 1,129 | T6-S3-C1-11 | 18,8 | 0,87  | 1892          | 1497          | 2,719 | 1,264 |
| T3-S2-C4-11 | 37,7 | 0,23  | 1833          | 1660          | 5,894 | 1,104 | T6-S3-C2-11 | 18,8 | 0,72  | 2033          | 1657          | 2,922 | 1,227 |
| T3-S3-C1-11 | 37,7 | 0,40  | 1490          | 1257          | 4,166 | 1,185 | T6-S3-C3-11 | 18,8 | 0,67  | 2107          | 1737          | 3,028 | 1,213 |
| T3-S3-C2-11 | 37,7 | 0,33  | 1651          | 1437          | 4,616 | 1,149 | T6-S3-C4-11 | 18,8 | 0,58  | 2248          | 1898          | 3,231 | 1,185 |
| T3-S3-C3-11 | 37,7 | 0,31  | 1748          | 1527          | 4,887 | 1,145 | T6-S4-C1-11 | 18,8 | 0,98  | 2047          | 1588          | 2,602 | 1,289 |
| T3-S3-C4-11 | 37,7 | 0,27  | 1917          | 1707          | 5,360 | 1,123 | T6-S4-C2-11 | 18,8 | 0,82  | 2170          | 1748          | 2,759 | 1,241 |
| T3-S4-C1-11 | 37,7 | 0,45  | 1564          | 1304          | 3,868 | 1,200 | T6-S4-C3-11 | 18,8 | 0,76  | 2241          | 1828          | 2,849 | 1,226 |
| T3-S4-C2-11 | 37,7 | 0,38  | 1723          | 1483          | 4,261 | 1,162 | T6-S4-C4-11 | 18,8 | 0,66  | 2389          | 1988          | 3,037 | 1,201 |
| T3-S4-C3-11 | 37,7 | 0,35  | 1820          | 1573          | 4,501 | 1,157 | T7-S1-C1-11 | 16,1 | 0,71  | 1631          | 1318          | 2,977 | 1,238 |
| T3-S4-C4-11 | 37,7 | 0,30  | 1989          | 1753          | 4,919 | 1,135 | T7-S1-C2-11 | 16,1 | 0,59  | 1776          | 1472          | 3,242 | 1,207 |
| T5-S1-C1-11 | 22,6 | 0,48  | 1474          | 1232          | 3,697 | 1,197 | T7-S1-C3-11 | 16,1 | 0,55  | 1847          | 1549          | 3,372 | 1,193 |
| T5-S1-C2-11 | 22,6 | 0,40  | 1639          | 1399          | 4,111 | 1,172 | T7-S1-C4-11 | 16,1 | 0,47  | 1978          | 1703          | 3,611 | 1,162 |
| T5-S1-C3-11 | 22,6 | 0,37  | 1703          | 1482          | 4,272 | 1,149 | T7-S2-C1-11 | 16,1 | 0,91  | 1870          | 1469          | 2,674 | 1,273 |
| T5-S1-C4-11 | 22,6 | 0,32  | 1862          | 1649          | 4,671 | 1,130 | T7-S2-C2-11 | 16,1 | 0,76  | 1995          | 1623          | 2,853 | 1,229 |
| T5-S2-C1-11 | 22,6 | 0,61  | 1654          | 1342          | 3,250 | 1,232 | T7-S2-C3-11 | 16,1 | 0,70  | 2053          | 1700          | 2,936 | 1,208 |
| T5-S2-C2-11 | 22,6 | 0,51  | 1797          | 1509          | 3,531 | 1,191 | T7-S2-C4-11 | 16,1 | 0,61  | 2198          | 1854          | 3,143 | 1,186 |
| T5-S2-C3-11 | 22,6 | 0,47  | 1885          | 1592          | 3,704 | 1,184 | T7-S3-C1-11 | 16,1 | 1,05  | 2042          | 1574          | 2,539 | 1,297 |
| T5-S2-C4-11 | 22,6 | 0,41  | 2043          | 1759          | 4,014 | 1,162 | T7-S3-C2-11 | 16,1 | 0,87  | 2139          | 1728          | 2,660 | 1,238 |
| T5-S3-C1-11 | 22,6 | 0,70  | 1754          | 1419          | 2,997 | 1,237 | T7-S3-C3-11 | 16,1 | 0,80  | 2209          | 1805          | 2,747 | 1,224 |
| T5-S3-C2-11 | 22,6 | 0,59  | 1917          | 1585          | 3,275 | 1,209 | T7-S3-C4-11 | 16,1 | 0,70  | 2352          | 1959          | 2,925 | 1,201 |
| T5-S3-C3-11 | 22,6 | 0,54  | 1993          | 1669          | 3,405 | 1,195 | T7-S4-C1-11 | 16,1 | 1,18  | 2200          | 1679          | 2,420 | 1,310 |
| T5-S3-C4-11 | 22,6 | 0,47  | 2148          | 1835          | 3,670 | 1,170 | T7-S4-C2-11 | 16,1 | 0,98  | 2308          | 1833          | 2,539 | 1,259 |
| T5-S4-C1-11 | 22,6 | 0,79  | 1884          | 1495          | 2,848 | 1,260 | T7-S4-C3-11 | 16,1 | 0,91  | 2364          | 1910          | 2,600 | 1,238 |
| T5-S4-C2-11 | 22,6 | 0,66  | 2020          | 1662          | 3,053 | 1,216 | T7-S4-C4-11 | 16,1 | 0,79  | 2507          | 2064          | 2,758 | 1,215 |
| T5-S4-C3-11 | 22,6 | 0,61  | 2099          | 1745          | 3,173 | 1,203 | T5-S3-C1-9  | 18,0 | 0,92  | 1219          | 963           | 2,646 | 1,265 |
| T5-S4-C4-11 | 22,6 | 0,53  | 2259          | 1912          | 3,414 | 1,182 | T5-S3-C1-13 | 27,0 | 0,57  | 2368          | 1932          | 3,361 | 1,226 |
| T6-S1-C1-11 | 18,8 | 0,59  | 1569          | 1275          | 3,310 | 1,230 | T5-S3-C1-16 | 33,8 | 0,45  | 3427          | 2874          | 3,856 | 1,192 |
| T6-S1-C2-11 | 18,8 | 0,49  | 1706          | 1435          | 3,599 | 1,189 |             |      |       |               |               |       |       |



Slika 4. Prilagodba koeficijenta

### 3.5. Provjera valjanosti izraza

Rezultati ispitivanja za 78 eksperimentalnih uzoraka, prikazani u tablici 3., prikupljeni su radi procjene točnosti izraza za izračun nosivosti [21, 27, 28]. Prikupljeni podaci ispitivanja zadovoljavaju sljedeće zahtjeve:

- betonska jezgra bila je od UHPC-a
- omjer duljine i promjera bio je manji od četiri
- uzorak ispitivan pod osnim statičkim opterećenjem.

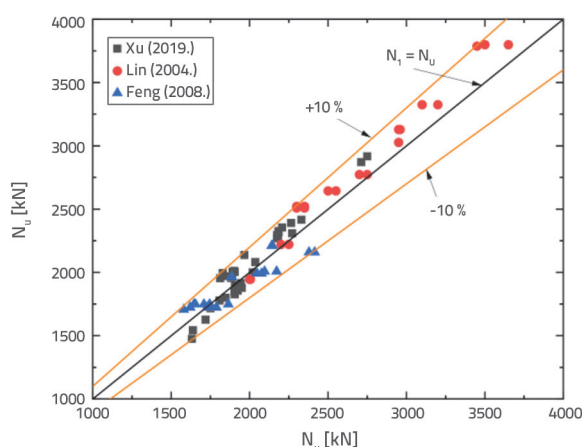
Ne postoji ograničenje čvrstoće čelika pri razvoju izraza za predviđanje sa širim područjem primjene.

Na temelju podataka iz tablice 3. nosivost svakog ispitivanog elementa izračunana je pomoću izraza (19). Razlike između predviđenih i eksperimentalnih vrijednosti nosivosti prikazane su

Tablica 3. Prikupljeni podaci HUPCFST-a

| Izvor             | D [mm]  | t [mm] | D/t       | L [mm] | L/D     | $f_y$ [MPa] | $f_c$ [MPa] | $\xi$     | Broj |
|-------------------|---------|--------|-----------|--------|---------|-------------|-------------|-----------|------|
| Xu (2019.) [21]   | 108     | 3,5-12 | 9-30,9    | 324    | 3       | 351-430     | 90-130      | 0,55-3,11 | 37   |
| Lin (2004.) [27]  | 133     | 3-12   | 11,1-44,3 | 400    | 3       | 290-376     | 109-154     | 0,18-1,33 | 22   |
| Feng (2008.) [28] | 108-113 | 5-6,5  | 17,4-22   | 300    | 2,7-2,8 | 310-391     | 116-145     | 0,46-0,77 | 19   |

grafički na slici 5. Rezultati pokazuju da se vrijednosti dobivene izrazom za nosivost uglavnom podudaraju s eksperimentalnim rezultatima. Osim toga odstupanja su uglavnom bila unutar 10 %, što je prihvatljivo. Zato je izvedivo izračunati osnu tlačnu nosivost kratkih UHPCFST stupova pomoću izraza (19), a rezultati izračuna dobiveni izrazom (19) mogu bolje odražavati osnu tlačnu nosivost konstrukcijskih elemenata.



Slika 5. Usporedba predviđenih vrijednosti izraza i prikupljenih ispitnih vrijednosti

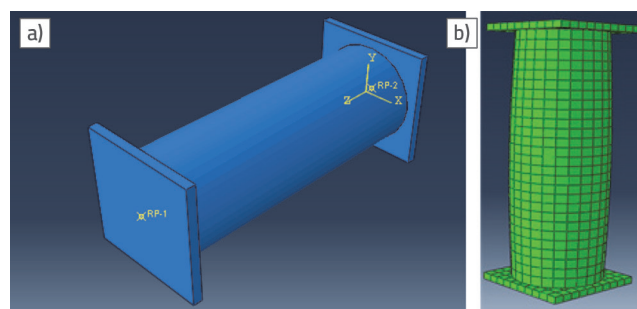
#### 4. Rasprava o tlačnim svojstvima kratkih UHPCFST stupova

Modeli konačnih elemenata kratkih UHPCFST stupova prije primjene opterećenja i nakon nje prikazani su na slici 6. Kao što je to prikazano na slici 6. b, nakon opterećenja uočeno je blago izbočenje u sredini cijevi. Nakon toga raspravlja se o tlačnim svojstvima.

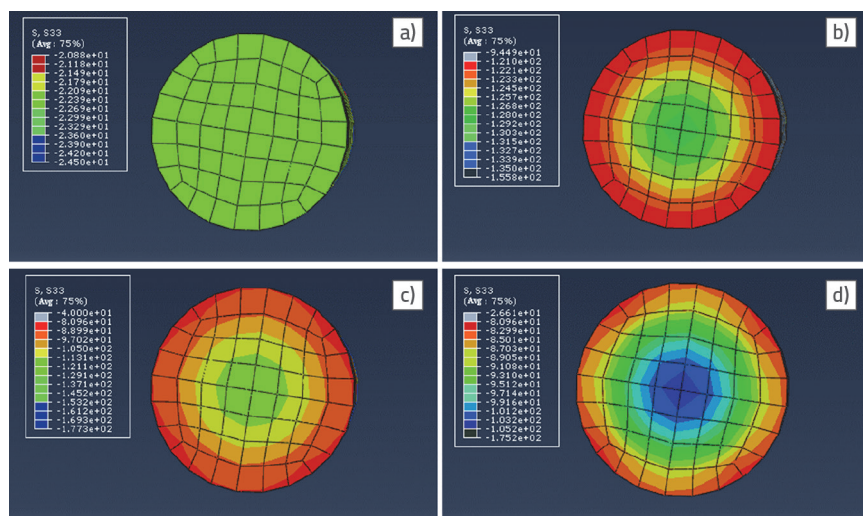
##### 4.1. Raspodjela naprezanja

Na slici 7. prikazana je raspodjela UHPC-ova uzdužnog naprezanja ( $S_{33}$ ) tijekom primjene opterećenja na odabranome primjeru modela (od a do d). Na početku primjene opterećenja uzdužno naprezanje UHPC-ova presjeka bilo

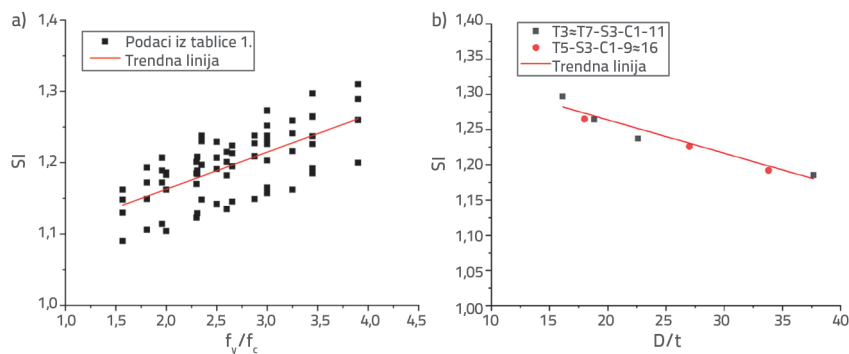
je raspoređeno jednoliko (slika 7.a), što upućuje na to da je UHPC još uvijek u elastičnome stanju. Na slici 7.b prikazana je raspodjela naprezanja kada uzorak dostigne svoju granicu nosivosti. Kao što je to prikazano, vrijednost naprezanja u središnjemu području bila je veća nego na vanjskome dijelu. Naprezanje se smanjuje od jezgre prema vanjskome dijelu, a naprezanje betona jednoliko je u obodnome smjeru. Kao što je to prikazano na slici 7.c, nakon što je uzorak dosegnuo krajnju nosivost, uzdužno naprezanje u središtu presjeka ostaje visoko, što je rezultat ujednačenoga ograničenja koje osigurava čelična cijev. Na slici 7.d beton blizu ruba uglavnom je bio zdrobljen na kraju primjene opterećenja, a zaostalo naprezanje bilo je malo. Međutim, središnje područje i dalje je pokazivalo visoko uzdužno naprezanje.



Slika 6. Dijagrami modela konačnih elemenata: a) prije primjene opterećenja; b) nakon primjene opterećenja



Slika 7. Raspodjela uzdužnog UHPC-ova naprezanja u presjeku srednjeg raspona

Slika 8. Učinak  $f_v/f_c$  i  $D/t$  na  $SI$ 

## 4.2. Indeks nosivosti

Kada se čelična cijev i betonska jezgra spajaju kompozitom,  $SI$  se često primjenjuje za procjenu čvrstoće kompozita. Na slikama 8.a i 8.b prikazan je odnos između  $SI$ -a i omjera čvrstoće čelične cijevi i čvrstoće betona ( $f_v/f_c$ ) te odnos između  $SI$ -a i omjera promjera i debljine. Na slici 8. pokazano je da se  $SI$  smanjivao s povećanjem omjera promjera i debljine, dok se povećavao s povećanjem omjera čvrstoće čelične cijevi i čvrstoće betona. Zato povećanje omjera promjera i debljine slabi sprezanje, dok povećanje  $f_v/f_c$  pogoduje sprezanju odnosno poboljšanju međudjelovanja između komponenti presjeka. Tri su glavna razloga za navedeno. Prvo, s povećanjem omjera promjera i debljine radijalno samonaprezanje i čvrstoća veze betonske jezgre smanjuju se, čime se slabi sprezanje presjeka. Drugo, nedostaci poput mikropora i mikropukotina u običnome betonu puno su brojniji nego nedostaci u UHPC-u. Zato čelične cijevi imaju veći utjecaj na uobičajenu čvrstoću betona nego UHPC. Treće, budući da se UHPC samostalno skuplja, što dodatno otežava kvalitetu kontaktne veze između čelične cijevi i betonske jezgre, to može smanjiti razinu sprezanja. Važno je navesti da je  $SI$  svih kružnih kratkih UHPCFST stupova bio veći od jedan, što upućuje na to da je osna tlačna nosivost kružnih kratkih UHPCFST stupova bila veća od čvrstoće kružne čelične cijevi i UHPC-a.

## 4.3. Stopa doprinosa betona

Stopa doprinosa betona (CCR) definirana je kao učinak ojačanja betonske jezgre na UHPCFST-u.

Na slici 9. prikazan je dijagram CCR-a i omjera promjera i debljine, čvrstoće betona i faktora ograničenja. Pokazano je da se CCR povećava s omjerom promjera i debljine te s povećanjem čvrstoće betona, a smanjuje s povećanjem faktora ograničenja. Razlog je taj što je s povećanjem promjera i debljine čeličnih cijevi čelična cijev bila sklonija lokalnome

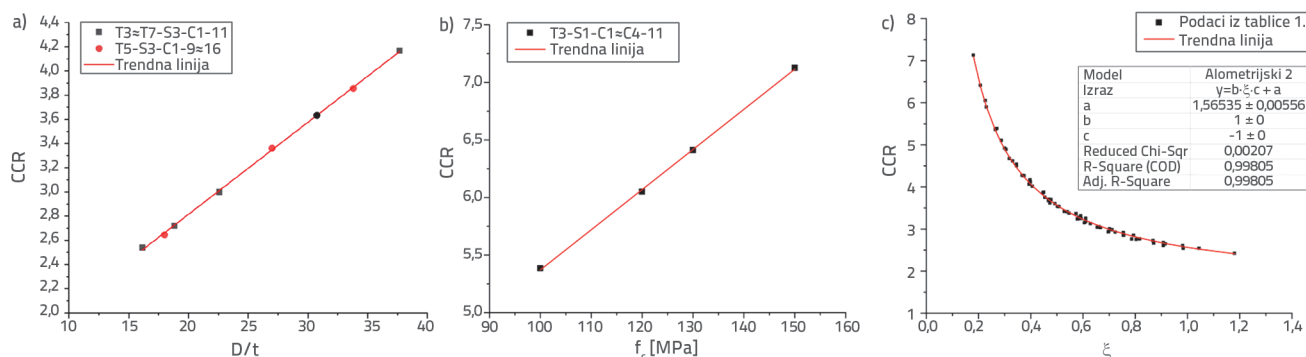
savijanju, slabeći svoje učinke ograničenja na betonsku jezgru. Za kvantificiranje odnosa između CCR-a i faktora ograničenja provedena je regresijska analiza podataka na slici 9.c te je dobiven izraz (20).

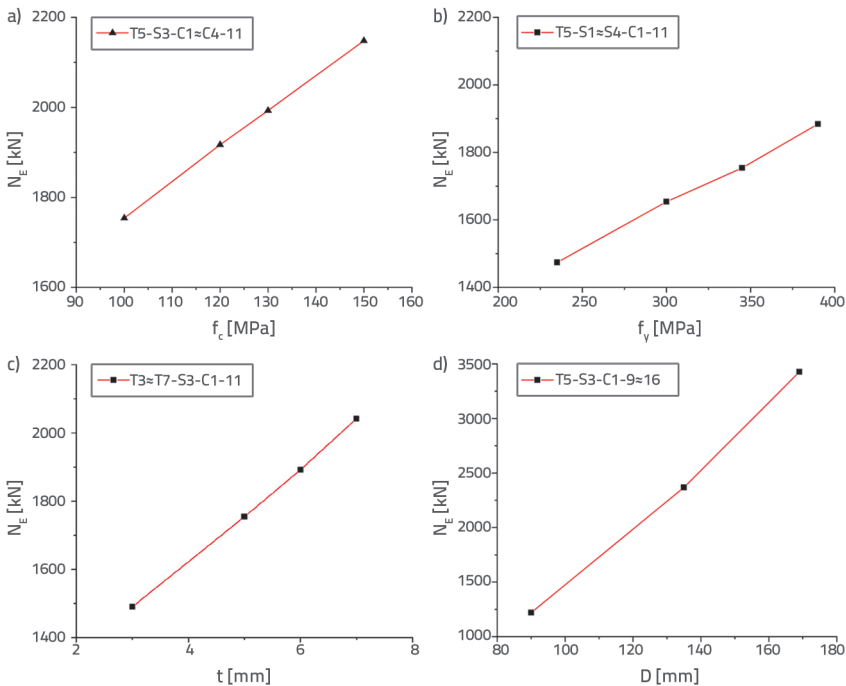
$$CCR = \frac{1}{\xi} + 1,56535 \quad (20)$$

## 4.4. Analiza utjecaja nosivosti

Na slici 10. prikazan je utjecaj različitih parametara na osnu tlačnu nosivost kratkih UHPCFST stupova. Sve prikazane krivulje slijede sličan trend porasta nosivosti s povećanjem pojedinog parametra. Na slici 10.a prikazan je odnos između nosivosti i tlačne čvrstoće betona. Nosivost se povećala za 22,46 posto s 1754 kN na 2148 kN, dok se čvrstoća betona povećala za 50,0 % sa 100 MPa na 150 MPa. Drugim riječima, porast nosivosti koji odgovara svakome povećanju čvrstoće betona od 1 % iznosi 0,45 %.

Na slici 10.b prikazan je odnos između nosivosti i čvrstoće čelične cijevi. Čvrstoća čeličnih cijevi povećala se s 235 MPa na 390 MPa, što je povećanje od 65,96 %, a nosivost se povećala s 1474 kN na 1884 kN, što je povećanje od 27,82 %, odnosno nosivost se povećava za 0,42 % za svaki 1 % povećanja čvrstoće čelične cijevi.

Slika 9. Utjecaj  $D/t$ , čvrstoće betona  $f_c$  i faktora ograničenja  $\xi$  na stopu doprinosa betonu (CCR)



Slika 10. Utjecaj čvrstoće betona ( $f_c$ ), čvrstoće čeličnih cijevi ( $f_v$ ), debljine čeličnih cijevi ( $t$ ) i veličine presjeka ( $D$ ) na nosivost ( $N_E$ )

Na slici 10.c prikazanje odnos između nosivosti i debljine čelične cijevi. Za debljine od 3, 5, 6 i 7 mm odgovarajuće nosivosti bile su 1490, 1754, 1892 i 2042 kN. Na temelju debljine čeličnih cijevnih elemenata od 3 mm debljina elemenata od 5, 6 i 7 mm povećala se za 66,67, 100,00 odnosno 133,33 %, a nosivost za 17,72, 26,98 odnosno 37,05 %. Kada se debljina čelične cijevi povećala za 1 %, nosivost se povećala za 0,27, 0,27 i 0,28 %. Na slici 10.d prikazan je odnos između nosivosti i veličine presjeka. Konačna se nosivost znatno povećala s povećanjem veličine presjeka. Nosivosti elemenata promjera 90, 113, 135 i 169 mm iznose 1219, 1754, 2368 i 3427 kN. Kao referentna

vrijednost uzeta je komponenta promjera 90 mm. Promjeri komponenti promjera 113, 135 i 169 mm povećali su se za 25,56, 50 i 87,78 %, a nosivost za 43,89, 94,26 i 181,13 %. Za svako povećanje promjera komponente od 1 % nosivost se povećala za 1,72, 1,89 i 2,06 %. Osim toga u tablici 3. pokazano je da su rasponi čvrstoće za čelične cijevi bili 290 do 430 MPa, za beton 90 do 154 MPa, a za faktor ograničenja 0,18 do 3,11. Zato se izraz nosivosti u ovome istraživanju može primijeniti ne samo na izračun nosivosti čvrstoće čeličnih cijevi u rasponu od 235 do 390 MPa i faktor ograničenja u rasponu od 0,18 do 1,18, već i na čelične cijevi i beton veće čvrstoće.

5. Usporedba i rasprava

Na temelju prikupljenih eksperimentalnih podataka osna tlačna nosivost svakog ispitnog elementa izračunana je primjenom izraza za nosivost predloženog u ovome radu i primjenom drugih izraz (tablica 4.). Srednja vrijednost i koeficijent varijacije omjera predviđene vrijednosti svakog izraza i eksperimentalne vrijednosti sažeti su u tablici 5. Iz tablice 5. vidljivo je da je pogreška predviđanja koju su naveli Rong i sur. [29] bila unutar 10 %, dok su pogreške predviđanja ostalih izraza bile unutar 5 %. što upućuje na to da je model Ronga i sur. [29] sklon podcjenjivanju nosivosti UHPCFST stupova. Takva podcjenjivanja mogu rezultirati neekonomičnim projektiranjem. Predviđeni rezultati izraza (19) bili su u prosjeku 2,7 % viši od eksperimentalno dobivenih vrijednosti, što upućuje na blago precjenjivanje nosivosti. Pogreška između predviđenih

Tablica 4. Odabrani izrazi za predviđanje osne tlačne nosivosti kratkih kružnih UHPCFST stupova

| Autori                | Izrazi                                                                                    | Oznake                                                                                              |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rong (2018.) [29]     | $N = f_c A_c (1 + 1,25\xi)$                                                               | $f_c$ - osna tlačna čvrstoća betona                                                                 |
| Chen (2018.) [25]     | $N_u = f_c A_c + (1+k) f_c A_c$<br>$k = 0,17 - 0,0013D/t/f_v/235$                         | $k$ - koeficijent ojačanja, koji odražava učinak ojačanja čeličnih cijevi na čvrstoću jezgre UHPC-a |
| Wu i Lin (2005.) [30] | $N = f_{v_s} A_s + f_{co} A_c$<br>$f_{co} = f_c [1,2 + 0,25(100/f_c)1,25\xi^2 - 0,04\xi]$ | $f_{co}$ - jednoosna tlačna čvrstoća betonske jezgre uzimajući u obzir utjecaj ograničenja          |

Tablica 5. Usporedba predviđenih vrijednosti navedenog i drugih izraza

|           | Rezultat               | Rong (2018.) [29] | Chen (2018.) [25] | Wu i Lin (2005.) [30] | Izraz (19) |
|-----------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------|
| $N_t/N_p$ | Srednja vrijednost     | 0,921             | 0,991             | 1,016                 | 1,027      |
|           | Koeficijent varijacije | 0,064             | 0,113             | 0,088                 | 0,053      |
|           | (A-B)/B                | 21,10 %           | 115,73%           | 67,37 %               | 0,00 %     |

Napomena:  $N_t$  jest nosivost ispitnih komponenti navedenih u tablici 2., a  $N_p$  predviđena vrijednost nosivosti ispitnog elementa, pri čemu je A koeficijent varijacije Ronga, Chena, Wua i Lina, a B koeficijent varijacije izraza (17).

rezultata i rezultata ispitivanja Chena i sur. [25] iznosila je samo 0,9 %, a predviđeni rezultati bili su najbolji. Međutim, koeficijent varijacije pokazao je da su rezultati predviđanja koje su dobili Chen i sur. [25] bili najnestabilniji, a koeficijent varijacije omjera predviđene vrijednosti i eksperimentalne vrijednosti u ovom je radu bio najmanji. U usporedbi s koeficijentom varijacije izraza u ovome istraživanju, koeficijent pogreške varijacije Ronga i sur. [29] bio je veći za 21,10 %, Chena i sur. [17] za 115,73 %, a Wua i Lina [30] za 67,37 %, što upućuje na to da je prediktivna vrijednost izraza (19) manje diskretna i točna. Zato je izraz (19) primjenjiv za predviđanje osne tlačne nosivosti kratkih UHPCFST stupova.

## 6. Zaključak

U ovom je radu teorijski izveden izraz za predviđanje osne tlačne nosivosti kratkih UHPCFST stupova. Koeficijenti  $a$  i  $b$  dobiveni su na temelju numeričkih simulacija ispitivanja primjenom računalnog programa za metodu konačnih elemenata ABAQUS. Predviđene vrijednosti uspoređene su s vrijednostima drugih izraza i izvedeni su sljedeći zaključci:

- Kratki kružni UHPCFST stupovi analizirani su i proučavani na temelju metode granične ravnoteže. Predložen je izraz za predviđanje osne tlačne nosivosti kratkih kružnih UHPCFST stupova, uključujući omjer promjera i debljine čelične cijevi i faktor koeficijenta.
- Izvedivost izraza potvrđena je na temelju prikupljenih eksperimentalnih podataka, a izraz je uspoređen s drugim izrazima. Rezultati su pokazali da je prediktivna vrijednost tog izraza manje diskretna, da ima veću točnost i primjenjivija je.
- Povećanje omjera promjera i debljine oslabilo je kompozitno djelovanje presjeka, dok ga je povećanje  $f_y/f_c$  ojačalo.

- CCR se povećava s omjerom promjera i debljine te s čvrstoćom betona, a smanjuje s faktorom ograničenja. Određen je izraz za predviđanje CCR-a na temelju faktora koeficijenta.
- Izraz u trenutačnome zakoniku za čelik ispunjen betonom prikladan je samo za izračun čeličnih cijevi ispunjenih betonom s razinama čvrstoće betona nižima od C100. Izraz dobiven u ovome radu specifičan je za čelične cijevi ispunjene betonom vrlo visoke čvrstoće (razina čvrstoće veća od C100), što popunjava prazninu u trenutačnome istraživanju.

Izraz dobiven u ovome radu ima manju disperziju, veću točnost i širi raspon primjene, čime se može bolje predvidjeti osna tlačna UHPCFST-ova nosivost i pružiti teorijska osnova za proračun UHPCFST-a. Međutim, u stvarnim primjenama u građevinarstvu UHPCFST-ovi elementi također su izloženi uvjetima opterećenja kao što su osni tlak u kombinaciji s momentom i smičnom silom te vlačnom silom u kombinaciji s momentom i smičnom silom. Buduća istraživanja usredotočit će se na te scenarije opterećenja kako bi se dodatno poboljšali točnost i praktičnost predloženih izraza. Osim toga izraz primijenjen u ovome radu primjenjiv je samo za kratke stupove. U budućim istraživanjima trebat će razmotriti utjecaj stabilnosti i proučiti izraz za izračun nosivosti uskih stupova.

## Zahvale

Ovo su istraživanje podržali Posebni opći projekt za tehnološke inovacije i razvoj aplikacija u Chongqingu (cstc2020jcsx-msxmX0084), Ključni projekt plana građevinske znanosti i tehnologije u Chongqingu (Urban Science 2021, br. 1-8) i Istraživački projekt Ureda za obrazovanje Guangzhou (2024312467).

## LITERATURA

- [1] Patel, V., Liang, Q., Hadi, M.: Nonlinear analysis of axially loaded circular concrete-filled stainless steel tubular short columns, J CONSTR STEEL RES, 11 (2014), pp. 9-18, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.036>
- [2] Han, L., Li, W., Bjorhovde, R.: Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members, J CONSTR STEEL RES, 100 (2014), pp. 211-228, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.016>
- [3] Patel, V., Uy, B., Prajwal, K., et al.: Confined concrete model of circular, elliptical and octagonal CFST short columns, STEEL COMPOS STRUCT, 22 (2016) 3, pp. 497-520, <https://doi.org/10.12989/scs.2016.22.3.497>
- [4] Liew, J., Xiong, M., Xiong, D.: Design of Concrete Filled Tubular Beam-columns with High Strength Steel and Concrete, STRUCTURES, 8 (2016), pp. 213-226, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.005>
- [5] Zheng, J., Wang, J.: Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges in China, ENGINEERING-PRC, 4 (2018) 1, pp. 143-155, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.003>
- [6] Gunawardena, Y., Aslani, F., Uy, B.: Review of strength behaviour of circular concrete filled steel tubes under monotonic pure bending, J CONSTR STEEL RES, 158 (2019), pp. 460-474, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.04.010>
- [7] Xie, K., Wang, H., Pang, J., et al.: Study of the Ultimate Bearing Capacity of Concrete-filled Steel Tube K-Joints, KSCE J CIV ENG, 23 (2019) 5, pp. 2254-2262, <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1268-7>
- [8] Zhu, H., Zhang, H., Liu, L.: Experimental Study on Cyclic Lateral Loaded Circular CFST Members with Initial Imperfections, KSCE J CIV ENG, 25 (2021) 8, pp. 3064-6074, <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1931-7>
- [9] Almasslawi, A., Ekmekyapar, T., Al-Eliwi, B.: Repair of Buckled Concrete Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression, KSCE J CIV ENG, 24 (2020) 5, pp. 1499-1508, <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0321-x>
- [10] Hoang, A., Fehling, E.: A review and analysis of circular UHPC filled steel tube columns under axial loading, STRUCT ENG MECH, 62 (2017) 4, pp. 417-430, <https://doi.org/10.12989/sem.2017.62.4.417>

- [11] Liew, J., Xiong, D.: Ultra-High Strength Concrete Filled Composite Columns for Multi-Storey Building Construction, *ADV STRUCT ENG*, 15 (2012) 9, pp. 1487-1503, <https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.9.1487>
- [12] Yu, C., Yu, M., Xu, L., et al.: Experimental investigation of the behavior of UHPCFST under repeated axial tension, *ENG STRUCT*, 314 (2024) 118293, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118293>
- [13] Yu, M., Liao, W., Liu, S., et al.: Axial compressive performance of ultra-high performance concrete-filled steel tube stub columns at different concrete age, *STRUCTURES*, 55 (2023), pp. 664-676, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.113>
- [14] Zhao, Z., Wei, Y., Wang, G., et al.: Axial compression performance of square UHPC-filled stainless-steel tubular columns, *CONSTR BUILD MATER*, 408 (2023) 133622, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133622>
- [15] Cai, H., Zeng, Y., Xu, L., et al.: Axial behavior of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete filled circular steel tubular columns, *STRUCTURES*, 68 (2024) 107186, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107186>
- [16] Li, J., Deng, Z.: Performance of square UHPC filled high-strength steel tubular columns under axial compression: Experiment and theory analysis, *STRUCTURES*, 46 (2022), pp. 1395-1406, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.019>
- [17] Yu, C., Yu, M., Xu, L., et al.: Experimental research on mechanical behavior of UHPCFST under repeated axial compression, *J CONSTR STEEL RES*, 218 (2024) 108690, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108690>
- [18] Wu, F., Xu, L., Zeng, Y., et al.: Experimental investigation of axially loaded circular ultra-high performance concrete with coarse aggregate (CA-UHPC) filled steel tube slender columns, *STRUCTURES*, 58 (2024) 105355, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105355>
- [19] Ren, Z., Wang, D., Kondo, G.: Axial compressive capacity prediction and optimal design of circular UHPC-filled steel tube based on Hybrid Symbolic Regression - Neural Network model, *STRUCTURES*, 68 (2024) 107084, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107084>
- [20] Guler, S., Çopur, A., Aydoğan, M.: Axial capacity and ductility of circular UHPC-filled steel tube columns, *MAG CONCRETE RES*, 65 (2013) 15, pp. 898-905, <https://doi.org/10.1680/mac.12.00211>
- [21] Xu, L., Lu, Q., Chi, Y., et al.: Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber, *Constr Build Mater*, 204 (2019), pp. 754-767, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.202>
- [22] Huang, W., Fan, Z., Shen, P., et al.: Experimental and numerical study on the compressive behavior of micro-expansive ultra-high-performance concrete-filled steel tube columns, *CONSTR BUILD MATER*, 254 (2020) 119150, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119150>
- [23] Hoang, A., Fehling, E.: Analysis of circular steel tube confined UHPC stub columns, *STEEL COMPOS STRUCT*, 23 (2017) 6, pp. 669-682, <https://doi.org/10.12989/scs.2017.23.6.669>
- [24] Le Hoang, A., Fehling, E.: Numerical analysis of circular steel tube confined UHPC stub columns, *COMPUT CONCRETE*, 19 (2017) 3, pp. 263-273, <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.3.263>
- [25] Chen, S., Zhang, R., Jia, L., et al.: Structural behavior of UHPC filled steel tube columns under axial loading, *THIN WALL STRUCT*, 130 (2018), pp. 550-563, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.016>
- [26] Xiong, M., Xiong, D., Liew, J.: Axial performance of short concrete filled steel tubes with high- and ultra-high-strength materials, *ENG STRUCT*, 136 (2017), pp. 494-510, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.037>
- [27] Lin, Z.: Researches on Behavior of RPC Filled Circular Steel Stub Axial Columns, M.Sc. Dissertation (2004), Fuzhou University, Fuzhou, China.
- [28] Feng, J.: Study on mechanical behavior of reactive powder concrete filled steel tubular columns, M.Sc. Dissertation (2008), Tsinghua University, Beijing, China.
- [29] Rong, Q., Zeng, Y., Hou, X., et al.: Finite element analysis and bearing capacity calculation for RPC-filled circular steel tube columns under axial compression, *Journal of Harbin Institute of Technology*, 22 (2018) 3, pp. 61-66, <https://doi.org/10.11918/j.issn.0367-6234.201807186>
- [30] Wu, Y., Lin, Z.: Experimental study of behavior on RPC filled steel tubular stub columns under axial compression, *China Journal of Highway and Transport*, 18 (2005) 1, pp. 57-62, <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2005.01.013>