

Proračunski model – prijedlog za uporabu karbonskih vlakana sistema Carboniar za strukturalno ojačanje

Ovaj izvještaj je proizvod teoretskog i praktičnog iskustva kao i laboratorijskih testova koje smo izveli.

Pošto radimo sa kompozitnim materijalima koji su napravljeni tijekom izvođenja posla, laboratorijski testovi bi trebali biti vođeni za specifične materijale a vrijednosti koje su ovdje iznesene trebale bi se smatrati indikativnima. Tako se varijabilnost karakteristika ne smije zaboraviti, povrh svih čvrstoća i modula elastičnosti.

Za sistem Carboniar –a maksimalni dozvoljeni napon, vrijednosti preporučene za koficijent sigurnosti su između 2.5 i 5. Najviša vrijednost preporučena je uzeta s oprezom zbog radnih uvjeta, nejednolikosti površine podloge i nesavršene linearnosti trake zbog njenog savijanja. Niže vrijednosti se preporučuju za ojačanje betonskih struktura gdje beton ima dobru čvrstoću i nalazi se u dobrim uvjetima.

Više vrijednosti se preporučuju za glinene cigle i kamene strukture ili za armirani beton, gdje beton ima malu čvrstoću i nalazi se u lošim uvjetima.

Srednje vrijednosti se preporučuju za drvene strukture.

Koristeći više vrijednosti i standardna karbonska vlakna deformacija je 0.3%, što je vrlo oprezna vrijednost.

Otporni presjek je dobiven uzimanjem vrijednosti iznesenih u nastavku i množenjem istih sa širinom ojačanja (karbonskih vlakana), izraženom u centimetrima.

Carboniar sistem se uglavnom koristi kao ojačanje za uvjete stresa uzrokovane savijanjem.

Ako jedan od postojećih otpornih presjeka nije u mogućnosti podnijeti savijanje, jednosmjerna traka će se nanijeti na donju stranu kao dodatno stremljenje, ili biaksialna traka na 45° .

Ojačanje protiv savijanje betona Carboniar sistemom

Suradnja betona i karbonskih vlakana ovisi o snazi prionjivosti epoksidne smole. Pletiva karbonskih vlakana djeluju kao dodatna armatura u vlačnoj zoni. Nadalje, osiguravaju zadržavanje širenja pukotina te štite strukturu prevencijom daljnje korozije postojeće čelične armature.

Proračun koeficijenta homogenizacije karbon-beton je iznesen na isti način kao i proračun koeficijenta čelik-beton. Vrijednost dobivena za standardna vlakna je 17, dok je za vlakna visokog modula koeficijent homogenizacije 28.5.

Idealni otporni presjek sastoji se od površine stlačenog betona, površina tlačne i vlačne armature pomnožene s koeficijentom homogenizacije čelik-beton, te površine pletiva karbonskih vlakana pomnožene s koeficijentom homogenizacije karbon-beton. Karbonska vlakna su

položena duž vlačno opterećenog ruba jer Caboniar sistem je ojačanja koje povećaje otpor savijanju.

Aplikacija vlaknastog ojačanja u vlačnoj zoni proizvodi nekoliko efekata. Uzrokuje da se neutralna os pomakne naprijed prema ojačanju, povećanje tlačne površine betona te posljedično smanjenje tlaka i smanjenje vlačne sile u željezu, kao što je izneseno u izrazu niže.

Ovi efekti su dobro poznati onima koji djeluju u ovom području.

Ovaj način projektiranja dopušta nam da primjetimo da je, u praksi, vlak karbonskim vlaknima vrlo smanjen i da garantira visoke vrijednosti za koeficijent sigurnosti, koji čak premašuje onaj propisani.

Ispravan projekt će preusmjeriti postojeći vlak u pojedinim materijalima tako da su oni u granicama dopuštenih vrijednosti. Ovo se obično dobije nanošenjem manje količine karbonskih vlakana, zahvaljujući visokoj razini njezinog modula elastičnosti te veće udaljenosti od neutralne osi.

Idealni presjek otpora ovako definiran štiti toliko dugo dok ignorira otpor vuči betona, koji se koristi zadržavajućim efektom kojeg proizvode karbonska vlakna na deformacijama.

Predloženi proračunski sistem baziran je na metodi dopuštenih napona.

Simboli :

M = moment savijanja od vanjske sile koja djeluje na strukturu

$A'a$ = površina tlačnog željeza

Aa = površina vlačnog željeza

A_f = površina karbonskih vlakana

$\sigma_{dop\ bet}$ = dopušteni napon u betonu

$\sigma_{dop\ \check{c}}$ = dopušteni napon u čeliku

$\sigma_{dop\ k}$ = dopušteni napon u karbonskim vlaknima

n_1 = koeficijent homogenizacije čelik-beton = 15

n_2 = koeficijent homogenizacije karbon-beton = 17 za standardna vlakna

d = udaljenost između osi vlačnog čelika i tlačnog ruba

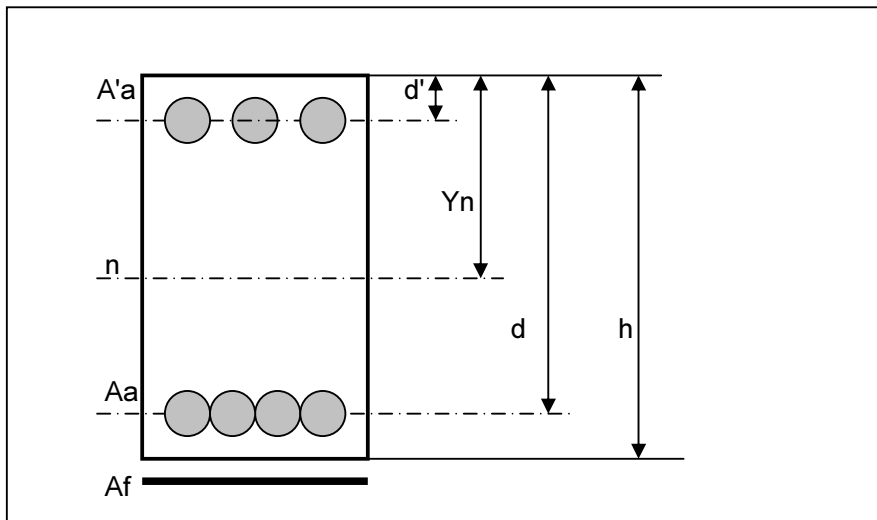
d' = udaljenost između osi tlačnog čelika i tlačnog ruba

h = visina presjeka

h' = udaljenost između karbonskog pletiva i tlačnog ruba, jednako je h + debljina prionjivog sloja + pola debljine karbonskog vlakna. Pošto je dodatna debljina vrlo mala, pretpostavljamo da je $h' = h$ da povećamo sigurnost. Primjetimo da debljina potpore daje pozitivan utjecaj na otpor.

b = širina presjeka

$n-n$ = neutralna os otpornog presjeka



Koristeći prijašnje simbole , dokaz stabilnosti zahtjeva proračun udaljenosti neutralne osi i tlačnoga ruba, Y_n . Ovo se može dobiti jednadžbom, izjednačavanjem statičkih momenata idealnog presjeka otpora, obzirom na neutralnu os n-n :

$$b \cdot Y_n \cdot Y_n / 2 + n_1 A'_a \cdot (Y_n - d') = n_1 A_a \cdot (d - Y_n) + n_2 A_f \cdot (h - Y_n)$$

iz koje je jednadžba drugog stupnja dobivena u uvjetima Y_n :

$$b \cdot Y_n^2 / 2 + Y_n (n_1 A_a + n_1 A'_a + n_2 A_f) - (n_1 A_a d + n_1 A'_a d' + n_2 A_f h) = 0$$

zbog jednostavnosti pretpostavimo :

$$C_1 = n_1 A_a + n_1 A'_a + n_2 A_f$$

$$C_2 = n_1 A_a d + n_1 A'_a d' + n_2 A_f h$$

Rješavanjem, poštujući Y_n , dobivamo udaljenost između tlačnog ruba i neutralne osi :

$$Y_n = [-C_1 + (C_1^2 + 2bC_2)^{0.5}] / b$$

Konačno, ova vrijednost omogućava nam izračunavanje momenta inercije presjeka I_n , poštujući neutralnu os n-n :

$$I_n = b \cdot Y_n^3 / 3 + n_1 A_a \cdot (d - Y_n)^2 + n_1 A'_a \cdot (Y_n - d')^2 + n_2 A_f \cdot (h - Y_n)^2$$

Dobivši gornje vrijednosti, naponi u materijalima koji čine idealni presjek otpora dobiveni su Navierovim izrazima i mogu se usporediti s pojedinačnim dopuštenim naponima :

Tlačni napon u betonu $\sigma_{bet} = M \cdot Y_n / I_n$

Vlačni napon u čeliku $\sigma_{čel} = M \cdot n_1 \cdot (d - Y_n) / I_n$

Vlačni napon u karbonskim vlaknima $\sigma_f = M \cdot n_2 \cdot (h - Y_n) / I_n$

Tlačni napon u čeliku $\sigma_{čel\ tlač} = M \cdot n_1 \cdot (Y_n - d') / I_n$

Gornji izrazi mogu se koristiti za nalaženje dopuštenih napona za sve moguće slučajeve :

$A_a = 0$, $A'_a = 0$, $A_f = 0$ te njihove kombinacije.

Vrijede jednako i za grede i za stupove.

Primjeri

1.

Greda pravokutnog presjeka sa $b = 20\text{cm}$, $h = 40\text{cm}$, armatura se smatra nepostojeća zbog korozije, $A_f = 0,8\text{ cm}^2$ površina pletiva karbonskih vlakana nanošenjem FCU 800/20 jednosmjerne trake iste širine kao greda, dakle 20cm te otpornim presjekom 4.000 mm^2 za centimetar širine, što daje otporni presjek trake $A_f = 4.000 \cdot 20 = 80\text{ mm}^2 = 0,8\text{ cm}^2$.

Pretpostavljajući $\sigma_{dop\ bet} = 10\text{MPa}$, a $M = 20.000\text{ NM}$, dobivamo

$$C_1 = 17 \cdot 0,8 = 13,6$$

$$C_2 = 17 \cdot 0,8 \cdot 40 = 544$$

$$Y_n = [-13,6 + (13,6^2 + 2 \cdot 20 \cdot 544)^{0,5}] / 20 = 6,7\text{ cm}$$

$$I_n = 20 \cdot 6,7^3 / 3 + 17 \cdot 0,8 \cdot (40 - 6,7)^2 = 17,086\text{ cm}^4$$

- Tlačni napon u betonu:

$$\sigma_{bet} = 20.000 \cdot 6,7 / 17,086 = 7,9\text{ MPa} < \sigma_{dop\ bet} = 10\text{ MPa}$$

- Vlačni napon u karbonskim vlaknima:

$$\sigma_f = 20.000 \cdot 17 \cdot (40 - 6,7) / 17,086 = 663\text{ MPa} < \sigma_{dop\ f} = 700 - 1\ 400\text{ MPa}$$

2.

Greda pravokutnog presjeka , $b = 20\text{cm}$, $h = 40\text{ cm}$, $d = 37\text{ cm}$, $A_a = 8,04$ ($4\varnothing 16$) je površina čelika u području vlačnog napona.

Pretpostavljajući: $\sigma_{dop\ bet} = 10\text{ MPa}$, $\sigma_{dop\ a} = 190\text{ MPa}$, $M = 53.000\text{ Nm}$, dobivamo:

$$C_1 = 15 \cdot 8,04 = 121$$

$$C_2 = 15 \cdot 8,04 \cdot 37 = 4,462$$

$$Y_n = [-121 + (121^2 + 2 \cdot 20 \cdot 4,462)^{0,5}] / 20 = 16\text{ cm}$$

$$I_n = 20 \cdot 16^3 / 3 + 15 \cdot 8,04 \cdot (37 - 16)^2 = 80,491\text{ cm}^4$$

- Tlačni napon u betonu:

$$\sigma_{\text{bet}} = 53,000 \cdot 16 / 80,491 = 10,5 \text{ MPa} > 10 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u čeliku

$$\sigma_a = 53,000 \cdot 15 \cdot (37 - 16) / 80,491 = 207,4 \text{ MPa} > \sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$$

Naponi su van dopuštenih vrijednosti, pa je potrebno nanijeti FCU 1200/20 jednosmjernu traku iste širine kao greda koja se ojačava, odnosno 20cm te sa otpornim presjekom $6,00\text{mm}^2$ po centimetru širine, što daje otporni presjek $A_f = 6,00 \cdot 20 = 120 \text{ mm}^2 = 1,2 \text{ cm}^2$.

$$C_1 = 15 \cdot 8,04 + 17 \cdot 1,2 = 141$$

$$C_2 = 15 \cdot 8,04 \cdot 37 + 17 \cdot 1,2 \cdot 40 = 5,278$$

$$Y_n = [-141 + (141^2 + 2 \cdot 20 \cdot 5,278)^{0,5}] / 20 = 17 \text{ cm}$$

$$I_n = 20 \cdot 17^3 / 3 + 15 \cdot 8,04 \cdot (37 - 17)^2 + 17 \cdot 1,2 \cdot (40 - 17)^2 = 91,785 \text{ cm}^4$$

- Tlačni napon u betonu:

$$\sigma_{\text{bet}} = 53,000 \cdot 17 / 91,785 = 9,8 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop bet}} = 10 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u čeliku:

$$\sigma_a = 53,000 \cdot 15 \cdot (37 - 17) / 91,785 = 173 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u karbonskim vlaknima

$$\sigma_f = 53,000 \cdot 17 \cdot (40 - 17) / 91,785 = 226 \text{ MPa} \ll \sigma_{\text{dop f}} = 700 - 1\,400 \text{ MPa}$$

3.

Greda pravokutnog presjeka, $b = 20\text{cm}$, $h = 40\text{cm}$, $d = 37\text{cm}$, $d' = 3\text{cm}$, $A_a = 8,04(4\varnothing 16)$ – površina čelika u vlačnoj zoni, $A'_a = 8,04(4\varnothing 16)$ – površina čelika u tlačnij zoni.

Predpostavljajući $\sigma_{\text{dop bet}} = 10 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$, $M = 60,000 \text{ MPa}$, dobivamo:

$$C_1 = 15 \cdot 8,04 + 15 \cdot 8,04 = 241$$

$$C_2 = 15 \cdot 8,04 \cdot 37 + 15 \cdot 8,04 \cdot 3 = 4.824$$

$$Y_n = [-241 + (241^2 + 2 \cdot 20 \cdot 4.824)^{0,5}] / 20 = 13\text{cm}$$

$$I_n = 20 \cdot 13^3 / 3 + 15 \cdot 8,04 \cdot (37 - 13)^2 + 15 \cdot 8,04 \cdot (13 - 3)^2 = 96.172 \text{ cm}^4$$

- Tlačni napon u betonu

$$\sigma_{\text{bet}} = 60,000 \cdot 13 / 96.172 = 8.1 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop bet}} = 10 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u čeliku

$$\sigma_a = 60,000 \cdot 15 \cdot (37 - 13) / 96.172 = 225 \text{ MPa} > \sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$$

Naponi su viši od dopuštenih vrijednosti, stoga je potrebno nanijeti FCU 1200/20 jednosmjernu traku iste širine kao greda koja se ojačava, odnosno 20cm sa otpornim presjekom 6,000mm² po centimetru širine, što daje otporni presjek trake $A_f = 6,000 \cdot 20 = 120\text{mm}^2 = 1,2\text{cm}^2$

$$C_1 = 15 \cdot 8,04 + 15 \cdot 8,04 + 17 \cdot 1,2 = 262$$

$$C_2 = 15 \cdot 8,04 \cdot 37 + 15 \cdot 8,04 \cdot 3 + 17 \cdot 1,2 \cdot 40 = 5.640$$

$$Y_n = [-262 + (262^2 + 2 \cdot 20 \cdot 5.640)^{0,5}] / 20 = 14\text{cm}$$

$$I_n = 20 \cdot 14,0^3 / 3 + 15 \cdot 8,04 \cdot (37 - 14,0)^2 + 15 \cdot 8,04 \cdot (14,0 - 3)^2 + 17 \cdot 1,2 \cdot (40 - 14,0)^2 = 110,474 \text{ cm}^4$$

- Tlačni napon u betonu:

$$\sigma_{\text{bet}} = 60,000 \cdot 14,0 / 110,474 = 7,6 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop bet}} = 10 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u čeliku;

$$\sigma_a = 60,000 \cdot 15 \cdot (37 - 14,0) / 110,474 = 187 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u karbonskim vlaknima:

$$\sigma_f = 60,000 \cdot 17 \cdot (40 - 14,0) / 110,474 = 240 \text{ MPa} \ll \sigma_{\text{dop f}} = 700 - 1.400 \text{ MPa}$$

-Tlačni napon u čeliku

$$\sigma_a = 60,000 \cdot 15 \cdot (14 - 3) / 110,474 = 90 \text{ MPa} \ll \sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$$

4.

Ploča visine $h = 9 \text{ cm}$ armirana sa $3\varnothing 12$ i $2\varnothing 10$ na svaki metar širine, što daje $A_a = 4,96 \text{ cm}^2/\text{m}$ i smještena na udaljenosti $d = 7 \text{ cm}$ od tlačnog ruba.

Predpostavljajući $M = 9,000 \text{ Nm}$ dobiven iznenadnim opterećenjem od 700 daN/m^2 ,

$\sigma_{\text{dop bet}} = 10 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$, dobivmo:

$$C_1 = 15 \cdot 4,96 = 74$$

$$C_2 = 15 \cdot 4,06 \cdot 7 = 521$$

$$Y_n = [-74,0 + (74,0^2 + 2 \cdot 100 \cdot 521)^{0,5}] / 100 = 2,6 \text{ cm}$$

$$I_n = 100 \cdot 2,6^3 / 3 + 15 \cdot 4,96 \cdot (7 - 2,6)^2 = 2,026 \text{ cm}^4$$

- Tlačni napon u betonu:

$$\sigma_{\text{bet}} = 9,000 \cdot 2,6 / 2,026 = 11,5 \text{ MPa} > 10 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u čeliku:

$$\sigma_a = 9,000 \cdot 15 \cdot (7 - 2,6) / 2,026 = 293 \text{ MPa} > \sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$$

Naponi su viši od dopuštenih, stoga je potrebno na svaki metar ploče nanijeti 5 traka jednosmjerne karbonske trake FCU 500/10 širine 10cm s otpornom presjekom 2,48 mm² po centimetru širine; što daje otporni presjek trake $2,48 \cdot 10 = 24,8 \text{ mm}^2$, pa je otporni presjek karbona po metru širine ploče $A_f = 0,248 \cdot 5 = 1,24 \text{ cm}^2$.

$$C_1 = 15 \cdot 4,96 + 17 \cdot 1,24 = 95$$

$$C_2 = 15 \cdot 4,96 \cdot 7 + 17 \cdot 1,24 \cdot 9 = 710$$

$$Y_n = [-95 + (95^2 + 2 \cdot 100 \cdot 710)^{0,5}] / 100 = 3 \text{ cm}$$

$$I_n = 100 \cdot 3^3 / 3 + 15 \cdot 4,96 \cdot (7 - 3)^2 + 17 \cdot 1,24 \cdot (9 - 3)^2 = 2,849 \text{ cm}^4$$

- Tlačni napon u betonu

$$\sigma_{\text{bet}} = 9,000 \cdot 3 / 2,849 = 9,5 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop bet}} = 10 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u čeliku:

$$\sigma_a = 9,000 \cdot 15 \cdot (7 - 3) / 2,849 = 189,5 \text{ MPa} < \sigma_{\text{dop a}} = 190 \text{ MPa}$$

- Vlačni napon u karbonskim vlaknima:

$$\sigma_f = 9,000 \cdot 17 \cdot (9 - 3) / 2,849 = 322 \text{ MPa} \ll \sigma_{\text{dop f}} = 700 - 1400 \text{ MPa}$$

5.

Ploča, kao u prethodnom primjeru gdje nema poprečnog ojačanja. Ovo je proračunato kao 20% od glavne armature, što je 0,2.

$4,96 = 1,0 \text{ cm}^2$. Koristeći tradicionalne proračunske metode za beton dobijemo $Y_n = 1,3 \text{ cm}$, te $I_n = 561 \text{ cm}^4$. Ovo znači da pletiva karbonskih vlakana moraju biti sposobna ponuditi isti moment otpora.

Daljne procjene su načinjene za aplikaciju na svaki metar unutar 3 trake/metru jednosmjerne FCU 500/10 karbonske trake širine 10 cm, otpornog presjeka $2,48 \text{ mm}^2$ po centru širine metra, što nam daje otporni presjek karbona $2,48 \cdot 10 = 24,8 \text{ mm}^2 = 24,8 \text{ cm}^2$. Otporni presjek karbona po metru širine ploče: $A_f = 0,248 \cdot 3 = 0,744 \text{ cm}^2$. Dobivamo:

$$C_1 = 17 \cdot 0,744 = 12,6$$

$$C_2 = 17 \cdot 0,744 \cdot 9 = 114$$

$$Y_n = [-12,6 + (12,6^2 + 2 \cdot 100 \cdot 114)^{0,5}] / 100 = 1,4 \text{ cm} > 1,3 \text{ cm}$$

$$I_n = 100 \cdot 1,4^3 / 3 + 17 \cdot 0,744 \cdot (9 - 1,4)^2 = 822 \text{ cm}^4 > 561 \text{ cm}^4$$

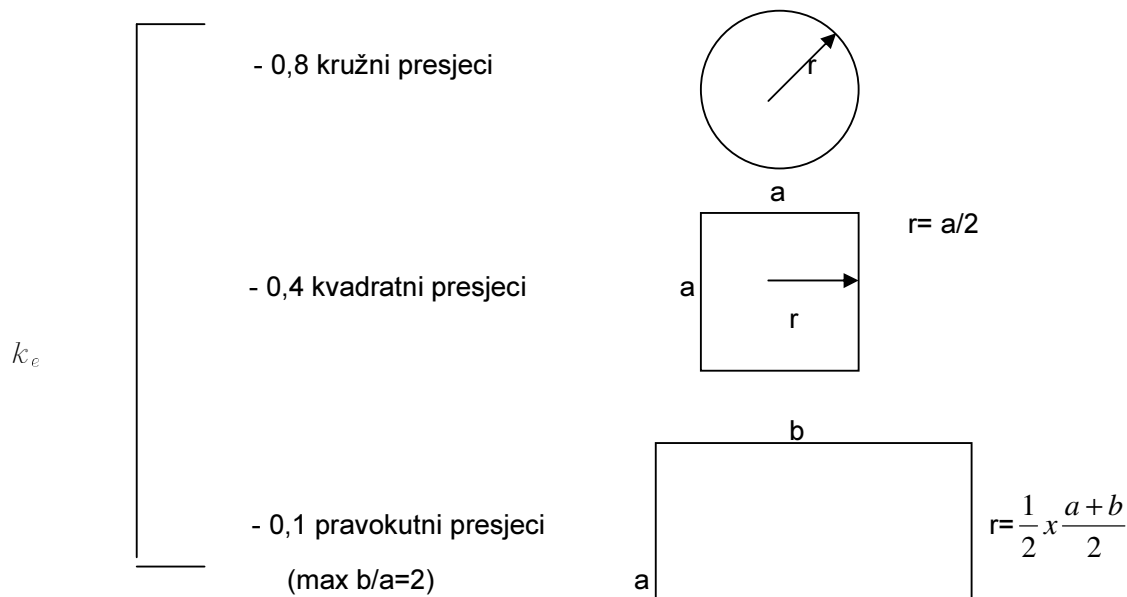
GRANIČNA STANJA OMATANJE

Povećanje konačne otpornosti tlačno opterećenog stupa, omotanog trakama karbonskih vlakana može se izračunati slijedećim izrazom:

$$f_{cc} = f_{co} + 1,0 \times k_e \times \frac{f_{ft} \times t_f}{r} \quad \text{konačna čvrstoća betona}$$

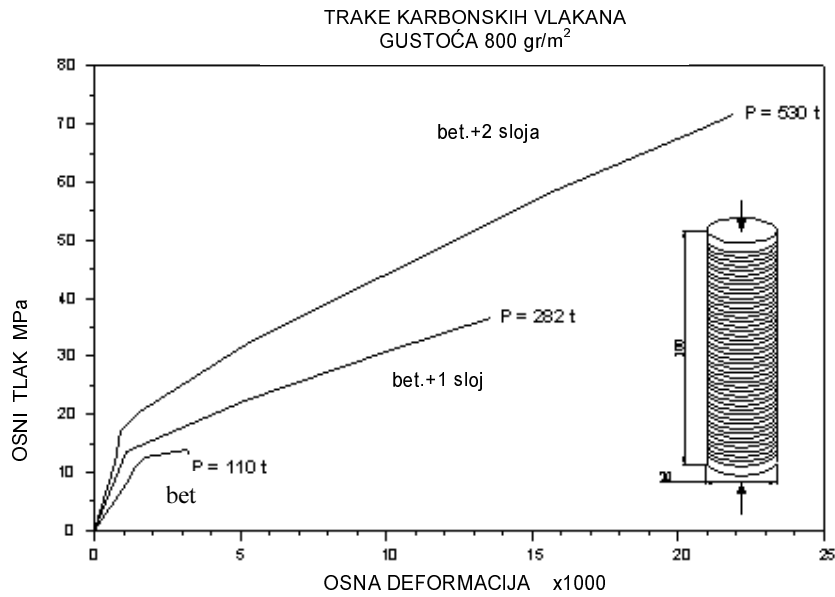
gdje je:

f_{cc} tlačna čvrstoća ojačanog betona [MPa]
 f_{co} tlačna čvrstoća neomotanog betona [MPa]
 k_e numerički koeficijent



r radijus oblika [mm]
 t_f debljina karbonske trake [mm]
 f_{ft} granična vlačna čvrstoća karbonskog vlakna (4800 MPa)

Na slijedećoj slici prikazano je konstitutivno povezivanje dobiveno testom tlačnog loma probnih cilindara dijametra 30 cm, visine 100 cm, ojačanih karbonskim vlaknima.



Primjer : Omatanje stupa okruglog presjeka od armiranog betona, dijametra 300 mm, sa dva sloja karbonskih vlakana tipa FCU 800

$$f_{co} = 15 \text{ MPa}$$

$$k_e = 0,8$$

$$r = 150 \text{ mm}$$

$$f_{ft} = 4800 \text{ MPa}$$

$$t_f = 0,8 \text{ mm}$$

$$f_{cc} = 15 + 4 \times 0,8 \times 4800 \times 0,8/150 = 15 + 82 = 97 \text{ MPa}$$

POSMIK

Posmična čvrstoća presjeka ojačanog karbonskim vlaknima može se izračunati slijedećim izrazom, koji koristi simbole Eurokoda 2 :

$V_{Rd2} = V_{Rd1} + V_{wd} + V_{fd}$ maksimalna posmična sila proračuna koja se može podnijeti bez loma
gdje je:

V_{Rd1} računska čvrstoća elementa bez posmične armature
 V_{wd} doprinos posmičnoj čvrstoći od armature ojačanja
 V_{fd} doprinos posmičnoj čvrstoći od karbonskih vlakana

Jedan od izraza predloženih za vrednovanje doprinosa posmičnoj čvrstoći dobivenog od karbonskih vlakana je (Nanni i drugi 2000):

$$V_{fd} = \frac{0,90 x d_f x A_f x \frac{f_{fe}}{\gamma_f} x (\sin \beta + \cos \beta)}{s_f}$$

doprinos posmičnoj čvrstoći od
karbonskih vlakana

A_f površina karbonskih vlakana
 s_f udaljenost slojeva nanijetog karbona
 β kut određen smjerom karbonskih traka i longitudinalne osi
 γ_f koeficijent sigurnosti (predlaže se 1,3)
 d_f efektivna visina karbonskog vlakna
 $f_{fe} = R \times f_{fu}$ efektivna vlačna čvrstoća vlakna
 f_{fu} nominalna vlačna čvrstoća vlakna
 R koeficijent , ovisi o načinu na koji dolazi do loma ($R < 0,5$)

Vrijednosti R ovise o tipu loma:

a) vlačni lom karbonske trake

$$R = 0,5622 \times (\rho_f \times E_f) - 1,2188 \times \rho_f \times E_f + 0,778$$

gdje je

$$\rho_f \times E_f \leq 0,7 \text{ Gpa}$$

b) odvajanje karbonske trake od betona

$$R = \frac{(R_{ck})^{2/3} x w_{fe}}{\epsilon_{f,u}} x [738,93 - 4,06 x (E_f x t_f)] x 10^{-6}$$

gdje je:

