

Primljen / Received: 4.5.2024.

Ispravljen / Corrected: 18.9.2024.

Prihvaćen / Accepted: 5.10.2024.

Dostupno online / Available online: 10.12.2024.

# Značajke zamora betonskoga spregnutog nosača s čeličnom donjom pločom i valovitim hrptom u jednolikome korozivnom okolišu

## Autori:



Prof.dr.sc. **Genhui Wang**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Lanzhou Jiaotong, Lanzhou, Kina  
Odjel za građevinarstvo  
[13609341991@139.com](mailto:13609341991@139.com)



Dr.sc. **Pulu Han**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Lanzhou Jiaotong, Lanzhou, Kina  
Odjel za građevinarstvo  
[465267760@qq.com](mailto:465267760@qq.com)  
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Xuejun Jin**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Lanzhou Jiaotong, Lanzhou, Kina  
Odjel za građevinarstvo  
[184929439@QQ.com](mailto:184929439@QQ.com)

Prethodno priopćenje

**Genhui Wang, Pulu Han, Xuejun Jin**

## Značajke zamora betonskoga spregnutog nosača s čeličnom donjom pločom i valovitim hrptom u jednolikome korozivnom okolišu

Cilj ovog istraživanja bio je razjasniti značajke zamora betonskog spregnutog nosača s čeličnom donjom pločom i valovitim hrptom (u daljnjemu tekstu: CGSBCW) i izračunati njegov moment inercije pri savijanju pod jednolikim korozivnim uvjetima uključivanjem parametra brzine korozije u izračune. Brzina korozije određena je na temelju vrijednosti naprezanja izmjerene u ispitivanju. Jednadžba amplitude naprezanja – otpornosti na zamor (S–N) CGSBCW-a pod jednolikim korozivnim uvjetima izvedena je primjenom Parisova poluempirijskog zakona i Lemaitreove formule za izračun otpornosti na zamor. Lemaitreovi parametri CGSBCW-a određeni su teorijskim izračunima i numeričkim simulacijama. Odnos između amplitude naprezanja, otpornosti na zamor i brzine korozije, kada je brzina korozije manja od 20 %, postavljen je numerički. Potvrđene su zakrivljenosti za amplitudu naprezanja, otpornost na zamor i brzinu korozije. Rezultati su pokazali da solni korozivni okoliš ima znatan utjecaj na značajke zamora spregnutih nosača. Za istu razinu opterećenja povećana je amplituda naprezanja i smanjena otpornost na zamor. Pri brzini korozije od 9 % naprezanja u ispitnim nosačima porasla su za 10 %, dok se otpornost na zamor smanjila za 24,5 %. Kada je brzina korozije bila manja od 20 %, amplituda naprezanja i otpornost na zamor povećavali su se i smanjivali uglavnom linearno s povećanjem brzine korozije.

### Ključne riječi:

jednolika korozija, valoviti čelični hrbat, brzina korozije, amplituda naprezanja, otpornost na zamor

Research Paper

**Genhui Wang, Pulu Han, Xuejun Jin**

## Fatigue characterisation of concrete composite girder with steel bottom plate and corrugated web under uniform corrosion environment

The objective of this study was to elucidate the fatigue characteristics of a concrete composite girder with a steel bottom plate and a corrugated web (Hereinafter referred to as CGSBCW), and compute its bending moment of inertia under uniform corrosion conditions by incorporating the corrosion rate parameter in the calculations. The corrosion rate was, in turn, determined from the stress value measured in the test. The stress amplitude – fatigue life (S–N) equation of the CGSBCW under uniform corrosion conditions was derived using the Paris semi-empirical law and Lemaitre fatigue life calculation formula. The Lemaitre parameters of the CGSBCW were determined through theoretical calculations and numerical simulations. The relationship among the stress amplitude, fatigue life, and corrosion rate when the corrosion rate was less than 20% was numerically fitted. Curvatures for the stress amplitude, fatigue life, and corrosion rate were confirmed. The results demonstrated that salt-corrosive environment had a significant impact on the fatigue characteristics of composite girders. For the same level of loading, it increased the stress amplitude and decreased the fatigue life. At a corrosion rate of 9%, the stresses in the test girders increased by 10%, while the fatigue life decreased by 24.5%. When the corrosion rate was less than 20%, the stress amplitude and fatigue life, respectively, increased and decreased essentially linearly with the increase in corrosion rate.

### Key words:

uniform corrosion, corrugated steel web girder, corrosion rate, stress amplitude, fatigue life

## 1. Uvod

Prednosti grednih mostova s valovitim čeličnim hrptom su mala težina i visoka učinkovitost prednaprežanja. Navedeni mostovi mogu učinkovito riješiti konstrukcijske probleme uzrokovane toplinskim opterećenjima i skupljanjem, puzanjem i drugim čimbenicima [1-4]. Posljednjih je godina ta gredna konstrukcija postala istaknuta u području izgradnje mostova. Primjena armiranobetonskih ploča kao donjih ploča u konvencionalnim valovitim čeličnim hrptovima sa sobom donosi probleme poput lakog pucanja donje ploče kada je izložena pozitivnim momentima [5]. Istraživanje koje je proveo Idiart [6] pokazalo je da u okolišima s prisustvom soli kao što su konstrukcije na moru pukotine ubrzavaju ulazak korozivnih iona, što ozbiljno utječe na vijek trajanja nosača.

Kako bi riješili taj problem, znanstvenici u Kini odlučili su primijeniti ravne čelične ploče umjesto betonskih donjih ploča koje se obično upotrebljavaju u tradicionalnim spregnutim nosačima. Problemi kao što su pukotine i prodor korozivnih iona u betonske donje ploče mogu se riješiti primjenom ravnih čeličnih ploča umjesto betonskih donjih ploča, jer one imaju prednosti poput otpornosti na pritisak gornje betonske ploče i vlačne otpornosti čelične donje ploče na spregnutu strukturu. Navedeno se postiže smanjenjem težine konstrukcije i poboljšanjem njezina raspona. Također, ti su nosači višenamjenski i jednostavni za uporabu i zato se sve češće primjenjuju. Međutim, provedeno je samo nekoliko istraživanja o otpornosti na zamor te vrste nosača, uključujući zamor zavarenih spojeva u tome novom konstrukcijskom rješenju. Osobito su rijetka istraživanja o otpornosti na zamor tih nosača kada su pod djelovanjem korozije. Fokus trenutačnih istraživanja otpornosti na zamor spregnutih nosača s valovitim čeličnim hrptom na tradicionalnim je grednim mostovima s valovitim čeličnim hrptom [7]. Iako su proučavana svojstva zamora takvih betonskih spregnutih nosača s čeličnim donjim pločama i valovitim hrptovima (engl. *concrete composite girder with a steel bottom plate and a corrugated web* - CGSBCW) [12-15], utjecaj korozivne okoline nije analiziran. Istraživači su usvojili metode naprežanja u zarezu [16] i konstrukcijskog naprežanja [17] za analizu otpornosti nosača na zamor i saželi odgovarajuće modele predviđanja nastanka oštećenja od zamora [18]. U [19] ispitana je otpornost te nove vrste spregnutih nosača na zamor u korozivnome okolišu, no nijedno od navedenih istraživanja nije razradilo specifičnu vezu između brzine korozije i varijabli kao što su amplituda naprežanja (S) i otpornost na zamor (N).

Radi rješavanja navedenih nedostataka, u ovom je istraživanju amplituda naprežanja CGSBCW-a pod jednolikim uvjetima korozije prvo izračunana uključivanjem parametra brzine korozije ( $\eta_s$ ) u moment inercije. Naknadno, oslanjajući se na Parisovo poluempirijsko pravilo i Lemaitreovu jednadžbu otpornosti na zamor, izvedene su formule krivulje S-N CGSBCW-a u jednolikome korozivnome okolišu, a parametri otpornosti CGSBCW-a na zamor određeni su ispitivanjem modela i numeričkom simulacijom. Na kraju su S i N CGSBCW-a pod jednolikim korozivnim uvjetima

analizirani iterativnom numeričkom metodom. Određene su krivulje odnosa  $\eta_s$  sa S i N. Zato ovaj rad služi kao osnova i referenca za optimizaciju dizajna, teoriju i metodologiju proračuna te promicanje primjene CGSBCW mostova.

## 2. Teorijska osnova

### 2.1. Moment korozije

Tijekom snažnog deformiranja valovitog hrpta kontrakcija valovite forme zamjenjuje elastičnu deformaciju ravne čelične ploče na način nalik harmonici. Taj je učinak poznat kao učinak naboranosti (engl. *fold effect*). Prema rezultatima nedavnih istraživanja [4], pri izračunu krutosti na savijanje presjeka nosača s valovitim hrptom gornja i donja ploča zadovoljavaju pretpostavku ravnog presjeka, a doprinos valovitog hrpta krutosti na savijanje zanemaruje se, tj. zadovoljava pretpostavku kvaziravnine. Moment inercije spregnutog nosača u korozivnome okolišu može se procijeniti njegovim izračunavanjem uz pretpostavku da je gornji betonski presjek jednak presjeku čelične ploče, izraz (1):

$$I_f = \sum_{i=1}^2 \left( \frac{b_i h_i^3}{12} + b_i e_i^2 h_i \right) \quad (1)$$

pri čemu je  $I_f$  moment inercije pri savijanju nosača u korozivnome okolišu [ $\text{mm}^4$ ],  $i$  broj ploča koje čine nosač (donja ploča označena je brojem 1, dok je gornja ploča označena brojem 2),  $e_i$  koordinata težišta poprečnog presjeka svake ploče [mm],  $h_i$  visina poprečnog presjeka svake ploče [mm], a  $b_i$  širina svake ploče [mm].

Budući da kloridni ioni predstavljaju primarne korozivne ione u korozivnome okolišu, utjecaj kloridnih soli na betonsku gornju ploču zanemariv je. Gubitak težine nosača nakon pojave korozije uglavnom je posljedica smanjenja visine  $h$  donje čelične ploče (tj. debljine ploče), a  $\eta_s$  čelika može se definirati kao brzina gubitka debljine, izraz (2):

$$\eta_s = \frac{m_0 - m_s}{m_0} = \frac{h_w - h_t}{h_w} \quad (2)$$

Uvođenjem izraza (2) u izraz (1)  $I_f$  spregnutog nosača u korozivnome okolišu može se odrediti pomoću izraza (3):

$$I_f = \frac{b_1 h_{w1} (1 - \eta_s)^3}{12} + b_1 h_{w1} (1 - \eta_s) e_{r1}^2 + \frac{b_2 h_2}{12} + b_2 h_2 e_{r2}^2 \quad (3)$$

pri čemu je  $h_w$  debljina čelične ploče prije pojave korozije [mm].

### 2.2. Amplituda naprežanja (S)

Prema relevantnim normama [22], izračuni opterećenja pri zamoru zahtijevaju da se S pomnoži s dodatnim koeficijentom

uvećanja u slučajevima kada je  $S$  definiran kao razlika između najvećih i najmanjih naprezanja. Prema mehanici materijala,  $S$  nosača opterećenog u trima točkama može se izračunati pomoću izraza (4):

$$S_i = (1 + \Delta\varphi)(\sigma_{M_i} - \sigma_{m_i}) = (1 + \Delta\varphi) \frac{(F_M - F_m)Ly}{4I_i} \quad (4)$$

pri čemu su  $\Delta\varphi$  koeficijent uvećanja,  $\sigma_{M_i}$  i  $\sigma_{m_i}$  maksimalno i minimalno naprezanje,  $F_M$  i  $F_m$  maksimalno i minimalno opterećenje,  $L$  izračunani raspon tijela nosača, a  $y$  vertikalna koordinata presjeka.

### 2.3. Otpornost na zamor (N)

Teorija mehanike kontinuiranog oštećenja može se primijeniti za izračunavanje  $N$  materijala ili strukture. Izračun  $N$  u Lemaitreovu modelu oštećenja [22] ovisi o maksimalnim i minimalnim naprezanjima, a izražava se pomoću izraza (5):

$$N = \frac{(\beta + 1)(\sigma_M^{\beta+1} - \sigma_m^{\beta+1})^{-1}}{2BR_c^{\beta}(\beta + 2)} \quad (5)$$

pri čemu je  $\beta = 2S_0 + m - 1$ ,  $B = m/(2ES_0^m K^m)$ , a  $R_c = 2(1+\nu)/3 + 3(1-2\nu)(\sigma_m/\sigma_{eq})^2$ . U tom su slučaju  $K$ ,  $m$ ,  $S_0$  i  $B$  parametri,  $R_c$  troosnost naprezanja, a  $R_c = 1$  u jednodimenzionalnome slučaju, dok je  $D$  varijabla oštećenja.

Vrijednost  $N$  spregnutog nosača može se odrediti pomoću metode izračuna amplitude naprezanja

$$N_i = \frac{(\beta + 1) \left[ \left( (1 + \Delta\varphi) \frac{F_M Ly}{4I_i} \right)^{\beta+1} - \left( (1 + \Delta\varphi) \frac{F_m Ly}{4I_i} \right)^{\beta+1} \right]^{-1}}{2BR_c^{\beta}(\beta + 2)} \quad (6)$$

### 2.4. Krivulja S–N

Paris je predložio poluempirijski zakon [23] koji predstavlja najčešće primjenjivanu istraživačku metodu za krivulje S–N. U dvostrukome logaritamskom obliku krivulje S–N često se iskazuju na sljedeći način:

$$\log N = \log p - m \log S \quad (7)$$

pri čemu su  $m$  i  $p$  parametri materijala.

Kombinacijom izraza (3), (5) i (6) krivulja S–N spregnutog nosača u korozivnome okolišu dobiva se na sljedeći način:

$$\begin{aligned} & \log \frac{(\alpha + 1) \left[ \left( (1 + \Delta\varphi) \frac{F_M Ly}{4I_i} \right)^{\alpha+1} - \left( (1 + \Delta\varphi) \frac{F_m Ly}{4I_i} \right)^{\alpha+1} \right]^{-1}}{2BR_c^{\beta}(\alpha + 2)} = \\ & = \log p - m \log \left[ (1 + \Delta\varphi) \frac{(F_M - F_m)Ly}{4I_i} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{pri čemu je } I_i = \frac{b_1 h_{w1} (1 - \eta_s)^3}{12} + b_1 h_{w1} (1 - \eta_s) e_{r1}^2 + \frac{b_2 h_2}{12} + b_2 h_2 e_{r2}^2$$

a smanjenje debljine donje ploče ponajprije se ogleda u izračunu momenta inercije.

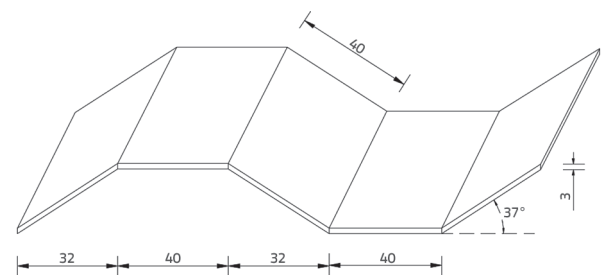
## 3. Modelsko ispitivanje

### 3.1. Parametri materijala i dimenzija

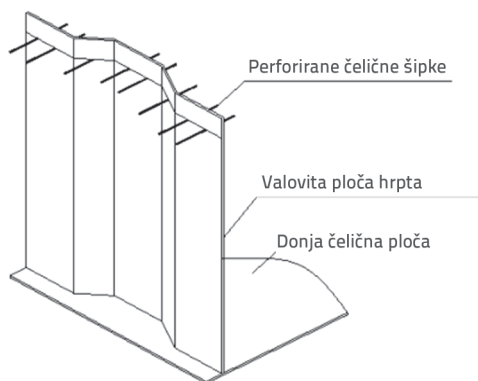
Dva su spregnuta nosača projektirana i proizvedena u umanjenoj modelu. Gornja ploča i dijafragma izrađeni su od betona C50 [22], pri čemu je gornja ploča bila širine 1000 mm i debljine 50 mm. Krajnja dijafragma bila je debljine 150 mm, a središnja dijafragma 100 mm. Hrpat i donja ploča izrađeni su od čelika Q345 [22]. Ploča hrpta izrađena je od valovitoga čeličnog lima, valjanog i lijevanog u tvornici, debljine 3 mm, a donja ploča izrađena je od ravnoga čeličnog lima širine 580 mm i debljine 5 mm. Model nosača imao je raspon  $L$  od 3,4 m, proračunski raspon  $L_0$  od 3,2 m, a visina nosača  $h$  iznosila je 400 mm. Kraj donje ploče nosača bio je slobodno oslonjen, s pet dijafragmi smještenih u ležajnoj točki,  $L/4$  i srednjemu dijelu raspona. Na slikama 1., 2. i 3. prikazane su dimenzije poprečnog presjeka i hrpta od valovitoga čelika te ugrađeni spojevi.



Slika 1. Dimenzije poprečnog presjeka za geometrijski model (mjerna jedinica: mm)



Slika 2. Jedinična veličina valovitosti ploče hrpta (mjerna jedinica: mm)



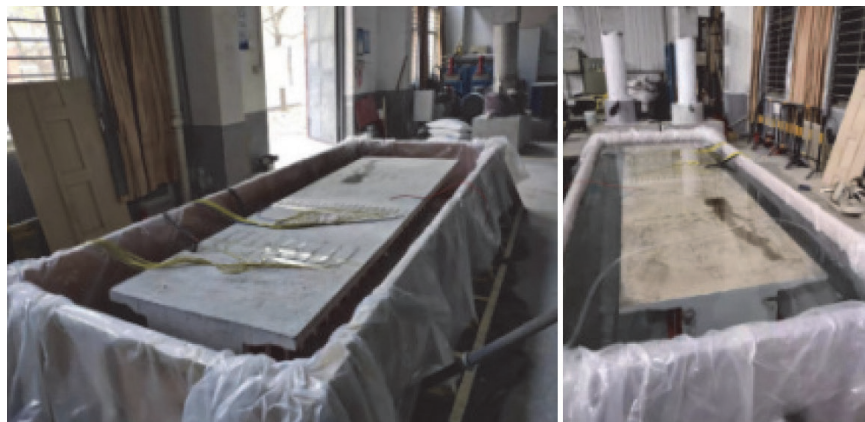
Slika 3. Shema posmičnih spojnih dijelova

### 3.2. Ispitivanje na koroziju pomoću soli

U korozivnome okolišu nosač je općenito okružen korozivnim zrakom, što je ekvivalentno uranjanju. Kako bi se ubrzao proces ispitivanja, provedeno je ispitivanje na koroziju pomoću soli, primjenom metode dugotrajnog uranjanja, pri čemu su nosači bili potpuno uronjeni.

U usporedbi s uronjenim čelikom uronjeni beton bio je u većoj koncentraciji slane otopine tijekom ispitivanja na koroziju pomoću soli. Zbog korozivnog djelovanja betona bila je neophodna difuzija ionskih soli. Čelik je bio izravno izložen korozivnim ionima, što je rezultiralo galvanskom korozijom. Uspoređujući rezultate ispitivanja na koroziju došlo je do kašnjenja u rezultatima ispitivanja betona na koroziju. Time se trebalo utvrditi hoće li navedeno kašnjenje utjecati na primjenu konstrukcije. Na temelju nalaza ispitivanja erozije pomoću kloridnih soli tijekom godina vrijeme uranjanja za ispitivanje na koroziju pomoću soli postavljeno je na 18 mjeseci.

Nosač je izrađen kombinacijom čelika i betona, a dugotrajna ispitivanja uranjanjem mogu se ubrzati povećanjem koncentracije otopine. Zato je za to ispitivanje odabrana koncentracija otopine NaCl od 6 %. Kao što je to prikazano na slici 4., jedan od ispitnih nosača bio je uronjen u otopinu NaCl i označen kao nosač 2, dok je neuronjeni ispitni nosač označen kao nosač 1.



Slika 4. Ispitivanje nosača na koroziju

### 3.3. Opterećenje ispitnog nosača

Oba ispitna nosača podvrgnuta su ispitivanjima zamora i statičkim ispitivanjima pod istim opterećenjem. Opisane su dvije vrste ispitivanja zamora [22]: ispitivanje svojstava zamora i ispitivanje sloma uslijed zamora. Primijenjena su sinusoidna zamorna opterećenja, a frekvencija opterećenja iznosi je 3 Hz. Za izračun zamornog opterećenja izvornog mosta primijenjen je model izračuna zamornog opterećenja iz [21]. Primjenom vrijednosti konstantnog naprezanja i opterećenja kao donje granice za opterećenje modela spregnutog nosača vrijednost naprezanja pri radu s konstantnim opterećenjem pretpostavljena je, a korisno opterećenje na modelu nosača smatrano je gornjom graničnom vrijednosti. Tijekom dva milijuna ciklusa ispitno zamorno opterećenje bilo je podvrgnuto opterećenjima s gornjom granicom od 53,5 kN odnosno donjom od 16,5 kN. Ispitivanje sloma uslijed zamora pokazalo je povećanje amplitude opterećenja i stupnjevani rezultat.

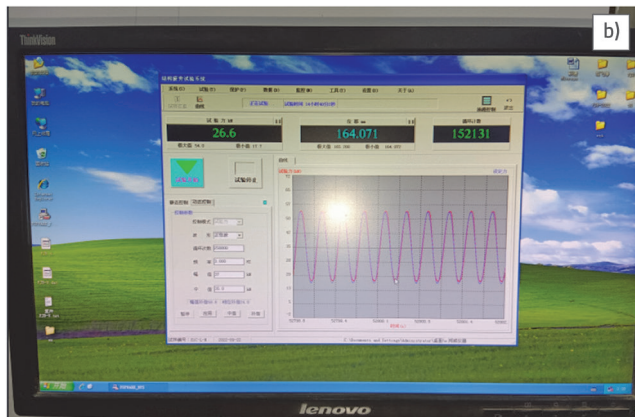
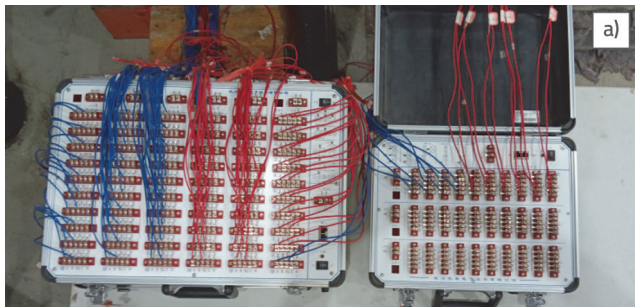
Tablica 1. Faze opterećenja za ispitivanje sloma uslijed zamora

Opterećenje	Srednje opterećenje [kN]	Jačina opterećenja [kN]	Broj ciklusa (×10 000)
1	40	48	40
2	49	64	40
3	57	82	40
4	64	98	40
5	72	114	40
6	80	128	40
7	86	144	30
8	90	160	20
9	96	176	20
10	100	192	slom

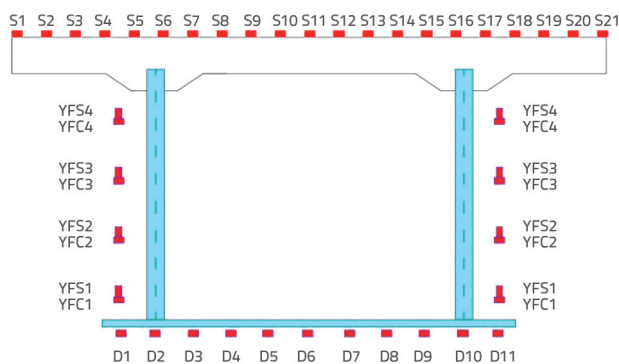
U tablici 1. navedeni su uvjeti opterećenja, a na slici 5. prikazana su zamorna opterećenja. Nakon statičkog opterećenja slijedila je svaka razina ciklusa zamornog opterećenja s maksimalnim opterećenjem od 80 kN. Podaci o ispitivanju prikupljeni su na svakih 10 kN nakon statičkog opterećenja.

### 3.4. Mjerne točke za ispitni nosač

Na slici 6. prikazani su položaj i nazivi tenzometara u srednjemu dijelu ispitnog nosača.



Slika 5. Ispitivanje zamora nosača: a) sustav uzorkovanja naprezanja i deformacije; b) sustav opterećenja na zamor; c) ispitno opterećenje nosača



Slika 6. Raspored tenzometara po površini loma

## 4. Numerička simulacija

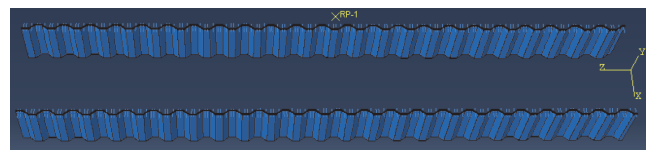
Proces numeričke simulacije sastoji se od dvaju glavnih koraka [25]. Za numeričko modeliranje pomoću metode konačnih elemenata upotrijebljen je *solid*, model ispitnog nosača izrađen u softveru Abaqus. Potom su numerički rezultati uneseni u računalni program Fe-safe radi izračuna zamora.

### 4.1. Izrada elemenata nosača

Za izradu betonskih i čeličnih donjih ploča primijenjeni su parametri poprečnog presjeka, uključujući širinu i visinu nosača, kao što je to prikazano na slici 1. Parametri valovitog čelika prikazani na slici 2. primijenjeni su za izradu čeličnih hrptova. Betonske i čelične ploče simulirane su jedinicama C3D8R, dok je armatura simulirana jedinicama T3D2.

### 4.2. Numeričko modeliranje spojeva

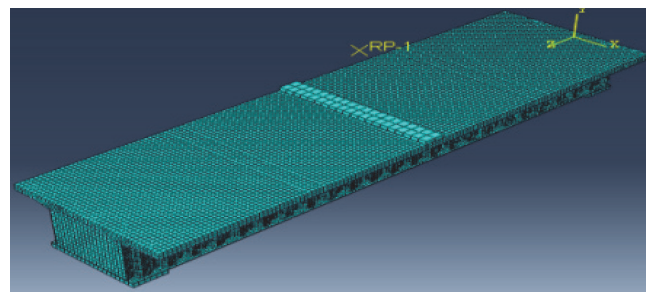
Za izradu spojeva primijenjeni su spojevi prikazani na slici 3. Umetnuto područje olakšalo je spajanje armature na betonsku gornju ploču. Za početak, metoda umetnutog područja uključuje umetanje spojne armature u betonsku gornju ploču. Povezivanje se odnosi na vezu između spojnih šipki i valovitog hrpta. Rupe su izbušene u betonskome dijelu valovitog hrpta, na odgovarajućim mjestima. Kako bi se dovršilo pričvršćivanje valovitog hrpta na gornju ploču, rupe su spojene na središnje točke armature metodom povezivanja. Nosač je imao ukupno 284 spoja za povezivanje s obje strane. Navedeno je prikazano na slici 7.



Slika 7. Modeli spojeva

### 4.3. Sastavljanje valovitog hrpta i donje ploče

Valoviti hrpat s čeličnom donjom pločom povezuje se ograničenim vezama. Numerički simulacijski model grede prikazan je na slici 8.



Slika 8. Model konačnih elemenata eksperimentalnog nosača

#### 4.4. Korozija nosača

Promjenom debljine donje ploče rezultati ispitivanja na koroziju nosača dobiveni su primjenom načela izračuna navedenog u jednadžbi (2). Vrijednost promjene debljine izračunana je retrogradno pomoću jednadžbe (3) i relevantne teorije mehanike materijala, temeljene na rezultatima ispitivanja.

#### 4.5. Analiza zamora nosača

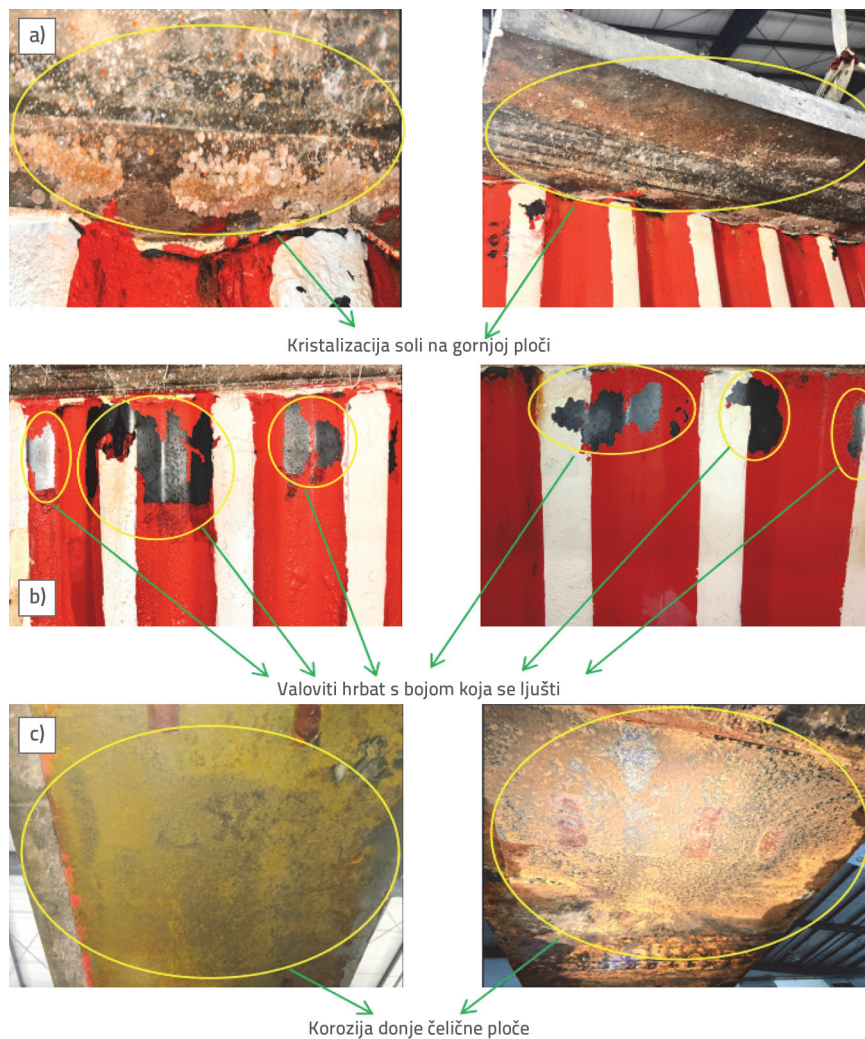
Analiza zamora nosača provedena je primjenom računalnog programa Fe-safe, a obuhvatila je sljedeće korake [25]:

- Model je uspostavljen pomoću računalnog programa Abaqus i na njemu su napravljeni statički izračuni. Na temelju uvjeta ispitnog opterećenja kao vrijednost opterećenja odabrana je minimalna amplituda opterećenja (16,5 kN).
- Rezultati Abaqusa uneseni su u Fe-Safe radi izračuna zamora.
- Zatim je u Fe-safe izabrana računalna skupina. Komponente izračuna zamora identificirane su na temelju rezultata ispitivanja, a to su valoviti hrbat i čelična donja ploča.
- Nakon toga utvrđeni su parametri materijala. Odgovarajući parametri materijala odabrani su iz registra softvera i dodijeljeni odgovarajućim dijelovima.
- Potom je utvrđen spektar opterećenja. Opterećenja su dodavana višestruko, tj. odabirom minimalnog, srednjeg i maksimalnog opterećenja. Spektar opterećenja utvrđen je na temelju odnosa između opterećenja primijenjenih tijekom statičkih izračuna i umnožaka minimalne, srednje i maksimalne vrijednosti opterećenja.
- Zatim su napravljeni izračuni zamora odabirom parametara kao što je parametar N u željenim rezultatima izračuna. Navedeno je odabrano za spremanje rezultata izračuna. Rezultati izračuna mogu se otvoriti i pregledati u Abaqusu.

### 5. Analiza i diskusija rezultata

#### 5.1. Analiza otpornosti na koroziju

Na slici 9. prikazan je izgled ispitnog nosača 2 nakon ispitivanja na koroziju. Ispitni nosači pokazali su kristalizaciju soli na gornjoj



Slika 9. Površina nosača nakon ispitivanja na koroziju: a) kristalizacija soli na gornjoj ploči, b) valoviti hrbat s bojom koja se ljušti, c) korozija donje čelične ploče

ploči, koroziju i ljuštenje boje na hrptu te hrđu na donjoj ploči. S obzirom na to da kristalizacija soli na gornjoj ploči nije bila jaka, korozivni učinak kloridnih soli na beton bio je zanemariv. Zbog zaštitnog učinka sloja premaza, korozija nije imala znatniji učinak na čelični hrbat. Međutim, uočena je znatna korozija na donjim pločama koje su bile u središtu analize nosača nakon ispitivanja na koroziju.

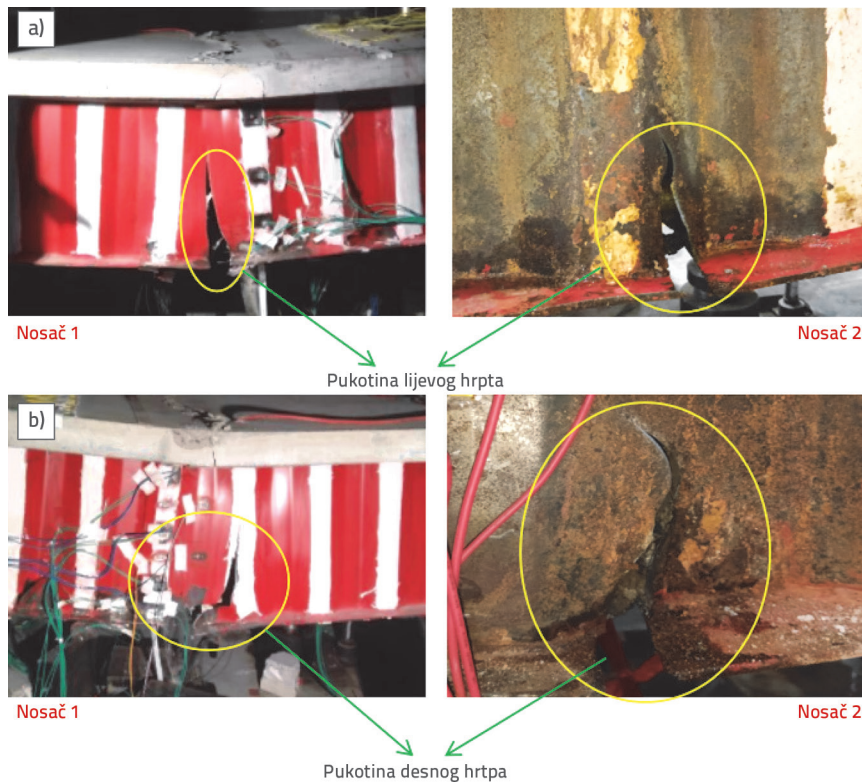
Zbog betonske zaštite nije nastala korozija armature u gornjoj ploči. Kao što je to prikazano na slici 10., kloridni ioni mogu se zanemariti u gornjoj ploči spregnutog nosača.

#### 5.2. Analiza sloma uslijed zamora

Na slici 11. pokazano je da se na dnu ispitnog nosača 1 pojavila samo jedna pukotina. Tijekom otkazivanja ispitnog nosača došlo je do sloma hrpta na lijevoj i desnoj strani, što je rezultiralo pukotinama koje su se širile prema gore.



Slika 10. Korozija čeličnih šipki



Slika 11. Obrasci sloma ispitnog nosača: a) pukotina lijevog hrpta, b) pukotina desnog hrpta

Izvor zamora ispitnog nosača 1 bio je u točki zavarivanja na dodirnoj plohi između donje ploče i hrpta. Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da je slom nastao uslijed zamora nekorodiranoga ispitnog nosača na zavarenome spoju. Proces sloma bio je u skladu s općim zakonom sloma uslijed zamora zavarenih spojeva. Slom ispitnog nosača 2 uzrokovao je pucanje hrpta s obje strane, slično kao kod sloma ispitnog nosača 1. Uzduž presjeka nosača nastala je pukotina koja se širila prema gore. Slom uslijed zamora i dalje je bio prisutan u zavarenim spojevima, a izvor zamora nalazio se na površini, između donje ploče i hrpta. Pukotina u ispitnome nosaču 2 ostala je blizu srednjeg dijela nosača. Navedeno pokazuje da ravnomjerna korozija na površini nije utjecala na zavar, čime

je postala izvor zamora za slom uslijed zamora.

Kada su se uspoređivala mjesta sloma dvaju ispitnih nosača, moglo se uočiti da bi slom uslijed zamora mogao biti uzrokovan središnjim poprečnim presjekom nosača. Ravnomjerna korozija ne bi utjecala na to da zavar postane izvor sloma uslijed zamora u presjeku srednjeg raspona, koji se smatra opasnim presjekom za slom nosača uslijed zamora.

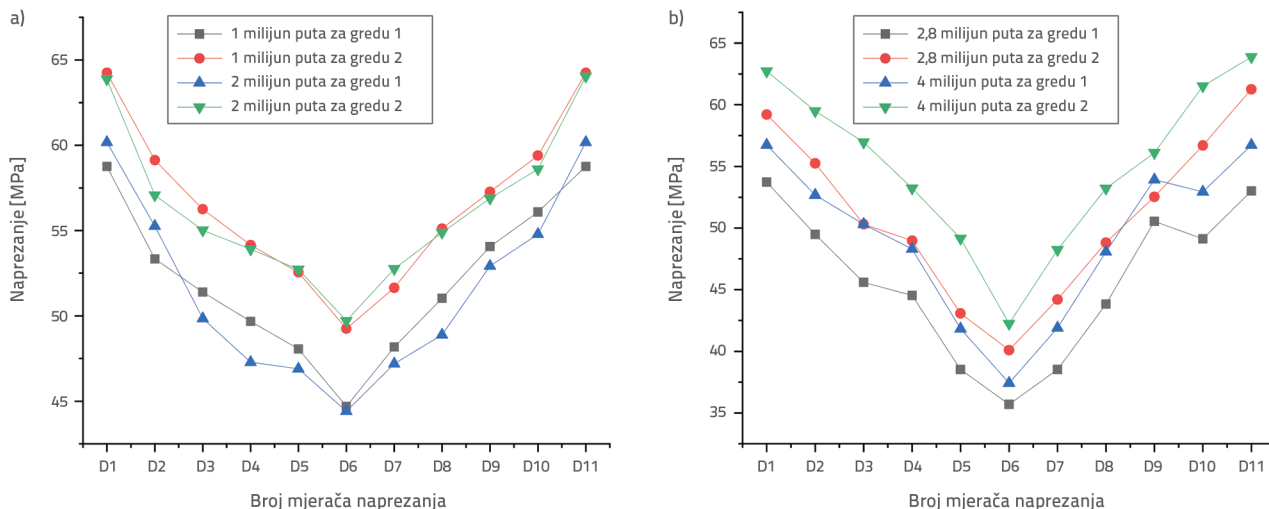
### 5.3. Analiza napreznja prije ispitivanja na koroziju i nakon njega

Pri 80 kN rezultati napreznja dobiveni su primjenom usvojenih vrijednosti statičkih ispitivanja. Kao primjer rezultata nakon jednog i dva milijuna ciklusa zamornog opterećenja prikazane su vrijednosti napreznja pri ispitivanju zamora. Kao primjer rezultata nakon navedenih ciklusa opterećenja pod 49 i 72 kN zamornog opterećenja prikazane su vrijednosti napreznja pri slomu uslijed zamora. Navedeno je prikazano na slici 12.

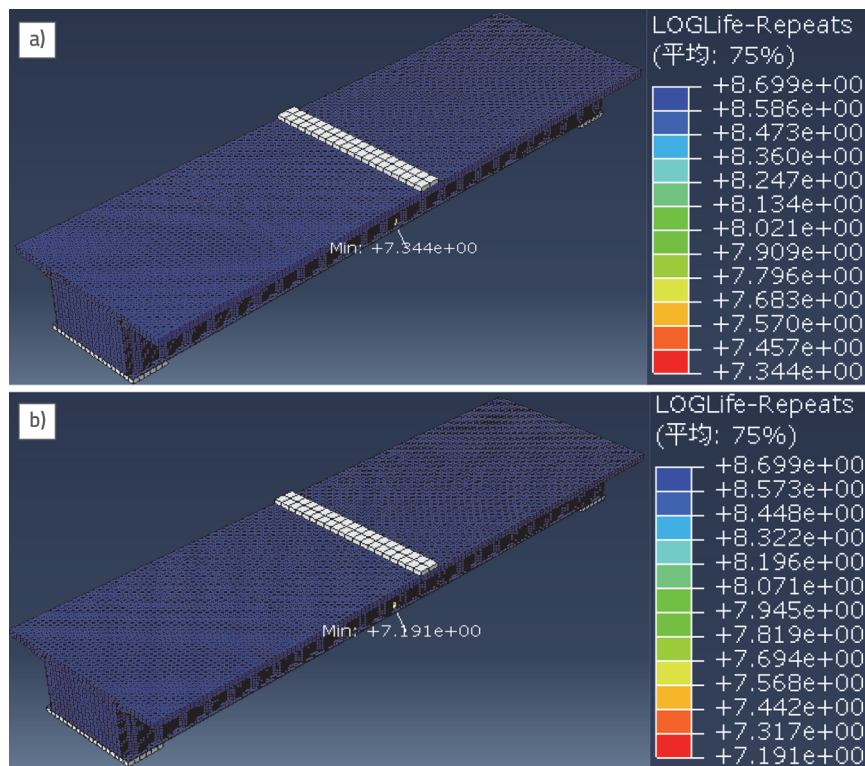
Kao što je to prikazano na slici 14., ispitni nosač 1 pokazao je nižu razinu napreznja od ispitnog nosača 2. Nakon što se pojavila korozija, razine napreznja porasle su za otprilike 10 %. Kombinacija tog rezultata s formulom za izračun napreznja za nosač opterećen na trima točkama omogućila bi izračun parametara kao što je brzina korozije nosača. Kao što je to prikazano na slici 14.a,

nakon jednog i dva milijuna ciklusa opterećenja vrijednosti napreznja dvaju ispitnih nosača bile su relativno slične. Korozija je smanjila efektivnu nosivu površinu ispitnih nosača, dok zamorno opterećenje nije. Kao što je to prikazano na slici 10.b, nakon što je srednje opterećenje primijenjeno nakon određenog broja ciklusa opterećenja ispod vrijednosti zamornog opterećenja od 49 i 72 kN, dva ispitna nosača pokazala su znatne razlike u svojim odgovarajućim vrijednostima napreznja.

To upućuje na to da se efektivna nosiva površina ispitnog nosača smanjila tijekom ispitivanja sloma uslijed zamora. Kako bi se odredio točan broj ciklusa, bili su potrebni izračuni.



Slika 12. Naprezanje donje ploče: a) ispitno zamorno naprezanje, b) ispitivanje sloma uslijed zamora



Slika 13. Dijagram simulirane otpornosti na zamor ispitnih nosača: a) nosač 1, b) nosač 2

### 5.4. Brzina korozije spregnutih nosača

Iz rezultata ispitivanja naprezanja uočeno je da je nakon pojave korozije u ispitnim nosačima došlo do povećanja naprezanja za

približno 10 %. Kombiniranje izraza (2) i (3) te poznavanje mehanike materijala potrebno je za dobivanje sljedećih rezultata: brzina korozije ispitnog nosača je 9 %, a debljina korodirane čelične nosive ploče 4,55 mm.

### 5.5. Otpornost spregnutih nosača na zamor

Na slici 13. pokazano je da numerička simulacija može potvrditi izračun otpornosti na zamor. U tablici 2. prikazani su rezultati izračuna otpornosti na zamor za nosače 1 i 2.

Slika 15. i tablica 2. otkrivaju da bi točnost modela teorijskog izračuna bila naznačena činjenicom da su netočnosti povezane s teorijskim i simuliranim vrijednostima manje od 5%. Ispitni nosači imali su znatno kraći period otpornosti na zamor nakon pojave korozije nego prije. Ispitni nosač 2 imao je dulji period otpornosti na zamor od ispitnog nosača 1 zbog smanjenja brzine korozije od 24,5 %.

Dokazano je da je korozija uzrokovana soli vrlo štetna za otpornost spregnutih nosača na zamor. Na temelju rezultata izračuna otpornosti na zamor u numeričkim simulacijama parametri zamora  $\beta$ ,  $B$  i  $R_c$  spregnutih nosača određeni su povratnim proračunom pomoću izraza (5) i (6).

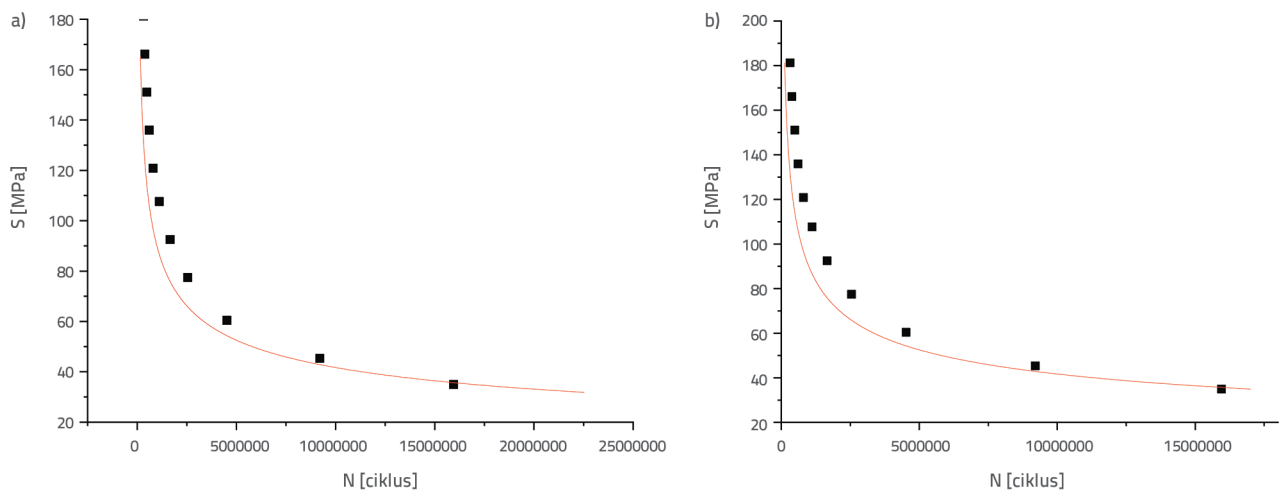
Tablica 2. Otpornost ispitnog nosača na zamor

Ispitni nosač	Otpornost na zamor		Netočnost [%]
	Teoretska vrijednost	Analogna vrijednost	
1	21123995,1	22080047,3	4,5
2	15952654,0	15523870,1	2,7



Tablica 3. Razine opterećenja i otpornost na zamor

Amplituda opterećenja [kN]	Amplituda naprezanja S [MPa]		Otpornost na zamor N [ciklusi]	
	1	2	1	2
37	31,8	34,9	21123995,1	15952654,0
48	41,2	45,3	12189817,4	9205642,1
64	55,0	60,4	5989159,0	4522959,8
82	70,5	77,4	3371952,2	2546468,4
98	84,2	92,5	2198427,8	1660233,2
114	98,0	107,6	1478668,6	1116677,4
128	110,0	120,8	1064116,1	803611,1
144	123,7	135,9	805838,8	608562,3
160	137,5	151,0	647147,3	488720,0
176	151,2	166,1	510764,0	385724,4
192	165,0	181,2	422838,2	319323,7



Slika 14. Krivulja S–N ispitnih nosača 1 i 2: a) nosač 1, b) nosač 2

Prema rezultatima ispitivanja, čelična donja ploča zadržala je jednodimenzionalno vlačno stanje. U skladu s time dobiven je  $R_c = 1$ . Na temelju izračuna  $\beta = 2,22$  i  $B = 1,962 \times 10^{-13}$ .

## 5.6. Krivulje S–N spregnutih nosača

Nakon što su određeni parametri  $\beta$ ,  $B$  i  $R_c$ , otpornost spregnutog nosača na zamor izračunana je pomoću izraza (6). Po primjeni uvjeta opterećenja navedenih u tablici 1, izračunana je amplituda naprezanja i otpornost spregnutih nosača na zamor. Krivulje S–N spregnutih nosača prilagođene su i analizirane. U tablici 3. prikazani su rezultati izračuna amplitude naprezanja i otpornosti na zamor, navodeći koje su krivulje S–N nosača prilagođene. Na slici 14. prikazane su prilagođene krivulje S–N. Za prilagodbu podataka primijenjen je softver Origin, a za jednadžbu prilagođavanja upotrijebljen je eksponencijalni oblik. Zatim je eksponencijalna jednadžba transformirana jednadžbama (7) i (8) te su dobivene krivulje S–N u logaritamskome obliku. Za prikaz krivulja S–N spregnutog nosača primijenjen je logaritamski

oblik s vrijednošću 3 za parametar  $m$ . Krivulje S–N za spregnute nosače prije pojave korozije i nakon toga imale su sljedeće oblike:

$$\text{prije pojave korozije:} \\ \log N_w = 11,8599 - 3 \log S_w \quad (9)$$

$$\text{nakon pojave korozije:} \\ \log N_f = 11,8603 - 3 \log S_f \quad (10)$$

Tablica 3. i slika 16. pokazuju da je nosač 1 imao niži  $S$  u krivulji S–N od nosača 2. Međutim, nosač 1 imao je veću vrijednost  $N$ . Vrijednost  $N$  korodiranih ispitnih nosača smanjena je pri istoj razini naprezanja, kao što je to pokazano u ovome istraživanju. Ispitni nosači koji nisu korodirani mogli su izdržati veća naprezanja, a zadržati istu vrijednost  $N$ . Navedeno implicira da je korozija dovela do povećanja vrijednosti  $S$  i smanjenja vrijednosti  $N$  u krivuljama S–N.

Kada je eksponencijalni parametar  $m$  u krivulji S–N bio određen kao 3, prilagođene vrijednosti  $p$  prije pojave korozije i nakon toga

Tablica 4. Amplituda naprezanja i otpornost na zamor pri različitim brzinama korozije

Brzina korozije $\eta_s$ [%]	Amplituda naprezanja		Otpornost na zamor	
	S [MPa]	Napredak [%]	N [ciklus]	Smanjenje [%]
0	31,8	0,00	21123995,1	0,0
1	32,1	1,0	20501494,6	3,0
2	32,4	2,0	19892011,6	5,8
3	32,8	3,1	19293417,0	8,7
5	33,4	5,2	18165305,8	14,0
7	34,2	7,5	17019859,9	19,4
9	34,9	9,9	15952654,0	24,5
12	36,1	13,6	14437920,4	31,7
15	37,4	17,6	13019908,9	38,4
20	39,7	24,9	10868430,8	48,6

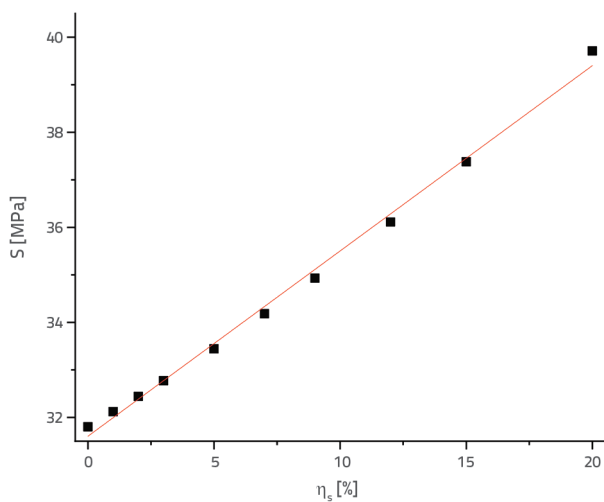
bile su  $p_{w1} = 7,24289 \times 10^{11}$  i  $p_{w2} = 7,24905 \times 10^{11}$ . Razlika od 0,85 promila zanemariva je. Jednolika korozija imala je velik utjecaj na vrijednosti uzete za S i N, što je vidljivo iz ovih rezultata.

### 5.7. Diskusija o rezultatima za različite brzine korozije

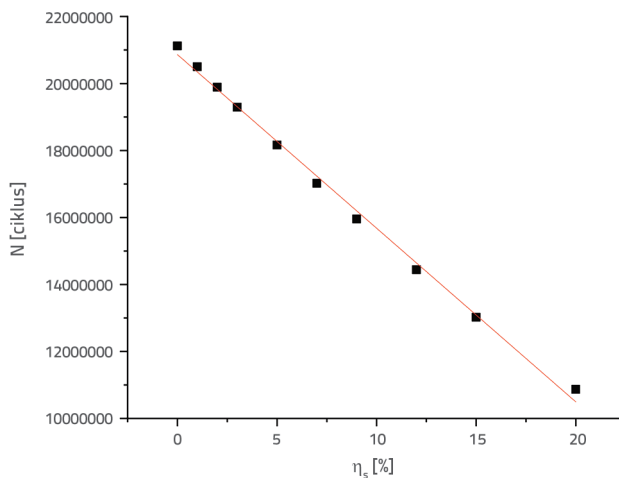
Devet brzina korozije, koje su navedene u tablici 4., odabrano je kako bi se pojasnio zakon utjecaja korozije na amplitudu naprezanja i otpornost ispitnih nosača na zamor. Primijenjeno je ispitno opterećenje od 37 kN. Tablica 4. te slike 15. i 16. otkrivaju to da u slučaju kada je brzina korozije manja od 20 %, amplituda naprezanja i otpornost na zamor rastu i padaju linearno s brzinom korozije. Odnosi između amplitude naprezanja S, otpornosti na zamor N i brzine korozije  $\eta_s$  dobiveni su pomoću izraza (11) i (12):

$$S = 31,602 \pm 0,390 h_s \tag{11}$$

$$N = 2,087 \times 10^7 - 518461,803 h_s \tag{12}$$



Slika 15. Krivulja S- $\eta_s$  ispitnog nosača



Slika 16. Krivulja N- $\eta_s$  ispitnog nosača

### 6. Zaključak

Na temelju ove analize izvedeni su sljedeći zaključci.

- Jednolika korozija nije utjecala na slom uslijed zamora nosača. Pod jednolikom korozijom dio nosača na kojemu je nastao slom uslijed zamora nalazio se blizu sredine raspona. Valoviti kut zavarivanja donje ploče i valoviti hrbat igrali su ulogu u određivanju položaja sloma uslijed zamora. Slom uslijed zamora uzrokovan je slomom zavarenih spojeva uslijed zamora.
- Jednolika korozija uzrokovala je smanjenje debljine ležaja dna ispitnog nosača, što je povećalo naprezanje na dnu nosača i smanjilo njegovu otpornost na zamor. Prema rezultatima izračuna, smanjenje debljine donje ploče uzrokovalo bi promjenu momenta inercije nosača. Prema rezultatima ispitivanja, nakon 18 mjeseci uronjenosti nosača u 6-postotnoj otopini NaCl naprezanje nosača povećalo se za približno 10 %. Prema teorijskim izračunima, stopa korozije iznosila je 9 %.

- Jednolika korozija smanjila je otpornost ispitnog nosača na zamor, što je utvrđeno rezultatima analize. Prema numeričkoj simulaciji i teorijskim izračunima, otpornost na zamor smanjena je za 24,5 % kada je brzina korozije bila 9 %. Kao što je ovo istraživanje pokazalo, korozija uzrokovana soli bila je štetna za otpornost spregnutih nosača na zamor.
- Primjenom numeričke simulacije i teorijskih izračuna utvrđeno je da Lemaitreovi parametri,  $R_c$ ,  $\beta$  i  $B$  spregnutog nosača iznose 1, 2,22 i  $1,962 \times 10^{-13}$ .
- Oni su primijenjeni za analizu odnosa između brzine korozije, amplitude napreznja i otpornosti na zamor. Rezultati su pokazali to da u slučaju kada je brzina jednolike korozije manja od 20 %, amplituda napreznja raste linearno s brzinom

korozije, dok se otpornost na zamor smanjuje linearno s brzinom korozije. Brzina korozije i amplituda napreznja povezani su s otpornošću na zamor:  $S = 31,602 + 0,390h_s$  i  $N = 2,087 \times 10^7 - 518461,803 h_s$ .

## Zahvala

Ovo je istraživanje podržano sljedećim projektima: Posebni plan znanosti i tehnologije pokrajine Gansu (br. 19ZD2GA002), Istraživanje dizajna i tehnologije primjene cestovnih betonskih mostova u provinciji Gansu (br. 2020 05) i financiranje projekata programa znanosti i tehnologije provincije Gansu (21JR7RA306).

## LITERATURA

- [1] Qin, A.: Research on torsion and distortion effects of single-box multi-cell composite box girder with corrugated steel webs and steel bottom plate, Lanzhou Jiaotong University, 2023, <https://doi.org/10.27205/d.cnki.glttc.2023.000024>.
- [2] Luo, K., Ji, W., Wang, X.Y., et al.: Deflection analysis of an improved composite box girder with corrugated steel webs, Journal of Computational Mechanics, (2024), pp. 1-7, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.03.20240718.1717.010.html>.
- [3] Zhang, H., Chen, Y., Ye, J.S., et al.: Full-range analysis of prestressed composite box girder with corrugated steel webs under pure torsion, Journal of Jilin University (Engineering Edition), (2024), pp. 1-7, <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240546>.
- [4] Zhang, Z.C.: Research on bending mechanical properties and model test of steel base plate wave web-concrete combination box girder, Lanzhou Jiaotong University, 2022, <https://doi.org/10.27205/d.cnki.glttc.2022.000006>.
- [5] Ji, W., Luo, K., Ma, W.L., et al.: Dynamic characteristics analysis and experimental study of a fabricated corrugated web steel box-concrete composite girder bridge, Journal of Vibration and Shock, 39 (2020) 20, pp. 1-7+16. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvsv.2020.20.001>.
- [6] Idiart, A.E., López, C.M., Carol, I.: Chemo-mechanical analysis of concrete cracking and degradation due to external sulfate attack: A meso-scale model, Cement and Concrete Composites, 33 (2011) 3, pp. 411-423, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.12.001>.
- [7] Kotaki, N., Ichikawa, A., Sasaki, E., et al.: A proposal of steel girder bridges with ripple web and their fatigue performance, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers (2004) 766, pp. 233-244, <https://doi.org/10.2208/jscej.2004.766-233>.
- [8] Sugimoto, I., Murata, K., Nishida, H., et al.: Fatigue durability of joints under out-of-plane cyclic bending in corrugated steel web PC box railway bridges, Quarterly Report of RTRI, 44 (2003) 4, pp. 142-146, <https://doi.org/10.2219/rtriq.44.142>.
- [9] Wang, Z.Y., Wang, Q.Y., Chen, Y.Y., et al.: Research progress of fatigue behaviour of corrugated web girders, Journal of Highway and Transportation Research and Development, 27 (2010) 06, pp. 64-71, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1933.2012.05.002>.
- [10] Li, L.F., Xiao, X.Y., Liu, Q.: Study on the residual flexural capacity of composite girders with corrugated steel webs after fatigue damage, China Civil Engineering Journal, 45 (2012) 7, p.9, <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.2012.07.005>.
- [11] Dai, Y., Yuan, H., et al.: Research on fatigue property of composite girder with corrugated steel webs, (2024) 22, <https://doi.org/10.25236/matmce.2017.25>.
- [12] Liu, W.Z.: Experimental research on fatigue damage performance of the composite box girder with corrugated steel webs, Lanzhou Jiaotong University, (2018), <https://doi.org/CNKI:CDMD:2.1018.236051>.
- [13] Li, P.H.: Research on fatigue test of composite girders with corrugated steel webs, Lanzhou Jiaotong University, (2018), <https://doi.org/CNKI:CDMD:2.1018.235927>.
- [14] Chen, P.F.: Research on fatigue damage and model test of composite girder with corrugated web and steel bottom plate, Lanzhou Jiaotong University, (2021), <https://doi.org/10.27205/d.cnki.glttc.2021.001037>.
- [15] Song, S.G.: Fatigue performance analysis and model test research of composite girders with corrugated web and steel bottom, Lanzhou Jiaotong University, (2021), <https://doi.org/10.27205/d.cnki.glttc.2021.000749>.
- [16] Huang, J., Wang M., Yang, H., et al.: Study on fatigue analysis of beam with corrugated steel webs using notch stress method, Journal of Railway Science and Engineering, 18(2021) 02, pp. 425-431, <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200357>.
- [17] Wang, H., Yu, Y.T., Huang, X., et al.: Fatigue study of girder with corrugated steel web based on structural stress method, Construction Machinery, 53 (2022), pp. 56-62.
- [18] Wang, G., Hi, N.X., Liu, J.X., et al.: Fatigue characteristics of composite box girder with corrugated web and steel bottom plate, Journal of Railway Engineering, 40 (2023) 07, pp. 40-45.
- [19] Zhou, C.: Effect of chloride corrosion on fatigue properties of composite girder with corrugated web bottom plate and model test, Lanzhou Jiaotong University, (2023), <https://doi.org/10.27205/d.cnki.glttc.2023.001627>.

- [20] Ning, X.: Fatigue damage and model test of composite girder with corrugated web plate under chloride corrosion, Lanzhou Jiaotong University, (2023), <https://doi.org/10.27205/d.cnki.glttec.2023.001130>.
- [21] Zang, X.M.: Mechanical performance analysis and model test study of composite girder with steel bottom plate and corrugated webs under the effect of chloride salt erosion, Lanzhou Jiaotong University, (2023), <https://doi.org/10.27205/d.cnki.glttec.2023.000007>.
- [22] JTG D64-2015: Design specification for highway steel structure bridges Beijing: China Communication Press, 2015.
- [23] Yu, S.W., Feng, X.Q.: Damage mechanics, Huazhong University of Science & Technology Press (1995), ISBN:75609 10688.
- [24] Ding, S., Sun, L.: Fracture mechanics, China Machine Press, (1997), ISBN:7-111-05833-X.
- [25] Ouyang, Y.C.: Multiaxial fatigue life analysis of additive manufacturing titanium alloys based on Abaqus and Fe-safe, Nanchang University, (2023), <https://doi.org/10.27232/d.cnki.gnchu.2023.004097.X>.