

# Analiza oštećenja stupova malog luka Krčkoga mosta

---

Šimunić, Želimir; Ožbolt, Joško; Kučer, Anto

Source / Izvornik: **Građevinar, 2008, 58, 113 - 120**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:880525>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Analiza oštećenja stupova malog luka Krčkoga mosta

Želimir Šimunić, Joško Ožbolt, Anto Kučer

## Ključne riječi

Krčki most, mali luk, stup, oštećenja, eksperimentalna ispitivanja, proračun, dinamički utjecaji

## Key words

Krk bridge, small arch, pier, damage, experimental testing, analysis, dynamic influences

## Mots clés

pont de Krk, petit arc, pile, endommagement, essais expérimentaux, analyse, influences dynamiques

## Ключевые слова

Крчки мост, малая арка, повреждение, экспериментальные испытания, расчёт, динамические влияния

## Schlüsselworte

Krk-Brücke, kleiner Bogen, Pfeiler, Beschädigungen, experimentale Untersuchungen, Berechnung, dynamische Einflüsse

Ž. Šimunić, J. Ožbolt, A. Kučer

Pregledni rad

## Analiza oštećenja stupova malog luka Krčkoga mosta

U radu su opisani uzroci oštećenja stupova malog luka Krčkoga mosta. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i provedenih proračuna nosivih sklopova pokazali su da je stup S21 iznad malog luka dinamički vrlo osjetljiv element. Proveden je trodimenzijski nelinearni proračun najosjetljivijeg dijela stupa. Zaključuje se da su interakcije djelovanja agresivnog okoliša, dinamičkih utjecaja i puzanja betona glavni uzroci nastalih oštećenja koja ugrožavaju mehaničku stabilnost mosta.

Ž. Šimunić, J. Ožbolt, A. Kučer

Subject review

## Pier damage analysis on the small arch of the Krk bridge

The analysis of pier damage on the small arch of the Krk bridge is described in the paper. The results of experimental testing and analysis of the load bearing portions of the structure have revealed that the pier S21 above the small arch is a dynamically very sensitive element. The three-dimensional non-linear analysis was conducted on the most sensitive part of the pier. The authors conclude that this damage endangering the mechanical stability of the bridge is mostly caused by the interactions between the aggressive environment, dynamic influences and creep of concrete.

Ž. Šimunić, J. Ožbolt, A. Kučer

Ouvrage de synthèse

## Analyse d'endommagement des piles sur le petit arc du pont de Krk

L'analyse d'endommagement des piles sur le petit arc du pont de Krk est décrit dans l'ouvrage. Les résultats obtenus par les essais expérimentaux et l'analyse des parties portantes de la structure montrent que la pile S21, située au dessus du petit arc, est un élément très sensitive de point de vue dynamique. L'analyse tridimensionnelle a été conduite sur la partie la plus sensitive de la pile. Les auteurs concluent que cet endommagement, affectant la stabilité mécanique du pont, est causé pour la plupart par l'interaction entre le milieu agressif, les influences dynamiques et le fluage du béton.

Ж. Шимунич, Ђ. Ожболт, А. Кучер

Обзорная работа

## Анализ повреждений колонн малой арки Крчкогo моста

В работе описаны причины повреждения колонн малой арки Крчкогo моста. Результаты экспериментального испытания и проведённых расчётов несущих узлов показали, что колонна S21 выше малого лука в динамическом отношении является очень чувствительным элементом. Проведён трёхмерный нелинейный расчёт самой чувствительной части колонны. Заключается, что интеракции действия агрессивной окружающей среды, динамических влияний и ползучести бетона являются главными причинами возникших повреждений, которые угрожают механическую устойчивость моста.

Ž. Šimunić, J. Ožbolt, A. Kučer

Übersichtsarbeit

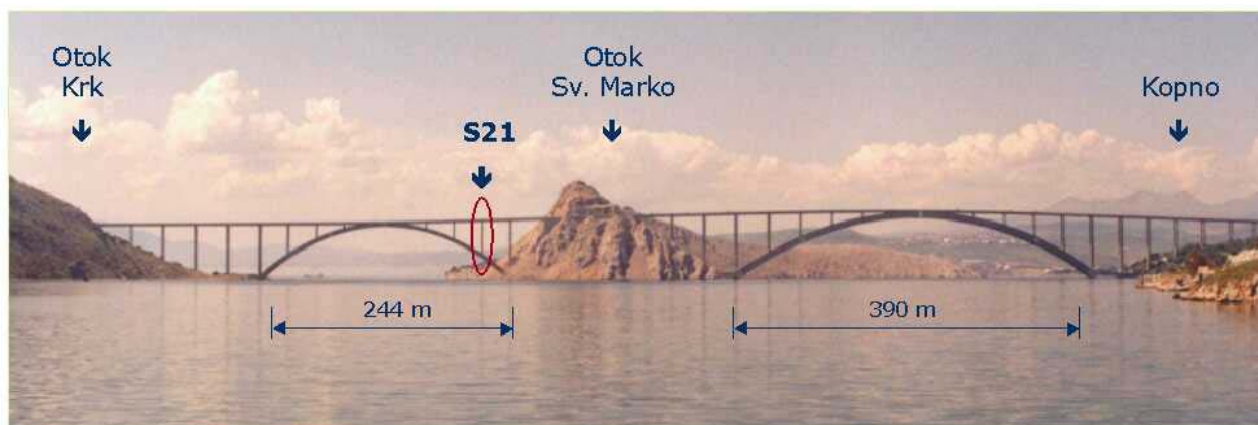
## Analyse der Beschädigungen der Pfeiler des kleinen Bogens der Krk-Brücke

Im Artikel beschreibt man die Ursachen der Beschädigungen der Pfeiler des kleinen Bogens der Krk-Brücke. Die Ergebnisse der experimentalen Untersuchung und der durchgeführten Berechnungen der Traggefüge zeigten dass der Pfeiler S21 oberhalb des kleinen Bogens ein dynamisch sehr empfindliches Element ist. Durchgeführt wurde eine dreidimensionale unlineare Berechnung des empfindlichsten Teils des Pfeilers. Man schliesst dass die Interaktionen der Einwirkung der aggressiven Umgebung, der dynamischen Einflüsse und der Betonschwindung die Hauptursachen der entstandenen Beschädigungen sind welche die mechanische Stabilität der Brücke gefährden.

Autori: Prof. dr. sc. **Želimir Šimunić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; prof. dr. sc. **Joško Ožbolt**, dipl. ing. građ., Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart; **Anto Kučer**, dipl. ing. geol., Hrvatski institut za mostove i Konstrukcije, Zagreb

## 1 Uvod

Krčki je most izgrađen 1980. dugo bio betonski lučni most s najvećim rasponom na svijetu. Osim što još uvijek imponira i izgledom i rasponima velikoga (390 m) i maloga (244 m) luka (slika 1.), most karakteriziraju i velika oštećenja nosivih elemenata. Ubrzo nakon puštanja u promet na mostu su uočena oštećenja ležajnih dijelova glavnih nosača, zbog neodgovarajućega projektnog rješenja detalja oslanjanja glavnih nosača. Također, budući da je most projektiran i izveden s minimalnim dimenzijama nosivih elemenata te minimalnim zaštitnim slojem betona (2,5 cm), agresivno je djelovanje morske okoline uzrokovalo velika oštećenja. Ispitivanja mosta koja su uslijedila pokazala su da je dinamička osjetljivost mosta (posebno maloga luka) u nepovoljnoj interakciji s navedenim uzrocima oštećenja [1], [2], [3].



Slika 1. Krčki most s označenim položajem stupa S21

Već je ispitivanjem i pregledom 1993. [4] uočen stup S21 nad malim lukom Krčkoga mosta kao jedan od najoštećenijih konstrukcijskih elemenata s brojnim pukotinama uzduž pojasnica te uznapredovalom korozijom i otpadanjem betona na prečkama (slika 2.a). Do 2001. [3] loše se stanje stupa pogoršalo, pa je došlo do odlamanja rubova pojasnice i znatog širenja pukotina (slika 2.b).



a.



b.

Slika 2. Stup S21: a) pukotine na stupu 1993.; b) odlamanja rubova pojasnice i širenje pukotina 2001.

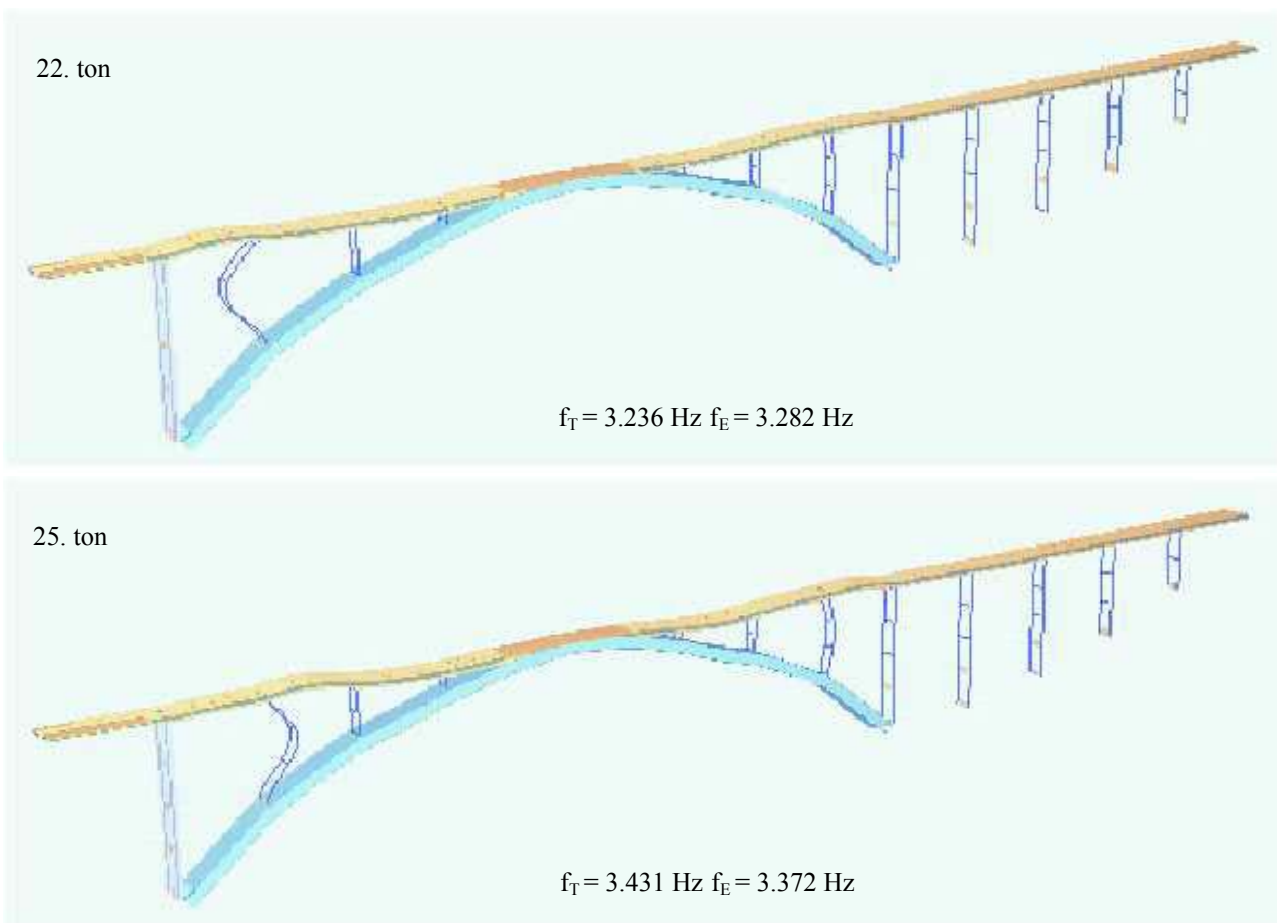
Oštećenja i pukotine dostigli su razinu na kojoj je ugrožena mehanička otpornost i stabilnost stupa S21 i susjednih nosivih sklopova, a slično je stanje manjeg intenziteta uočeno i na ostalim stupovima. Sanacija stupova je hitna i neizbježna, a nužni su uvjeti njezina uspjeha detaljna eksperimentalna i numerička ispitivanja uzroka nastanka i razvoja oštećenja te kontinuirano praćenje stanja i ponašanja stupova.

## 2 Dinamički proračun

S obzirom na to da se dinamičkim proračunom mogu dobiti vrlo vrijedni podaci o karakteristikama konstrukcije, 2001. i 2002. detaljno su ispitani i analizirani stupovi i oslonci nad malim lukom [3]. Dinamički je proračun proveden programom za statičku i dinamičku analizu SOFISTIK koji se pokazao vjerodostojnim u prijaš-

njim proračunima. Dinamičko je ispitivanje provedeno snimanjem odziva konstrukcije na različite uzbude (prelasci kamiona sa simuliranim dinamičkim udarom i bez njega, promet i vjetar) privremeno postavljenim senzovima.

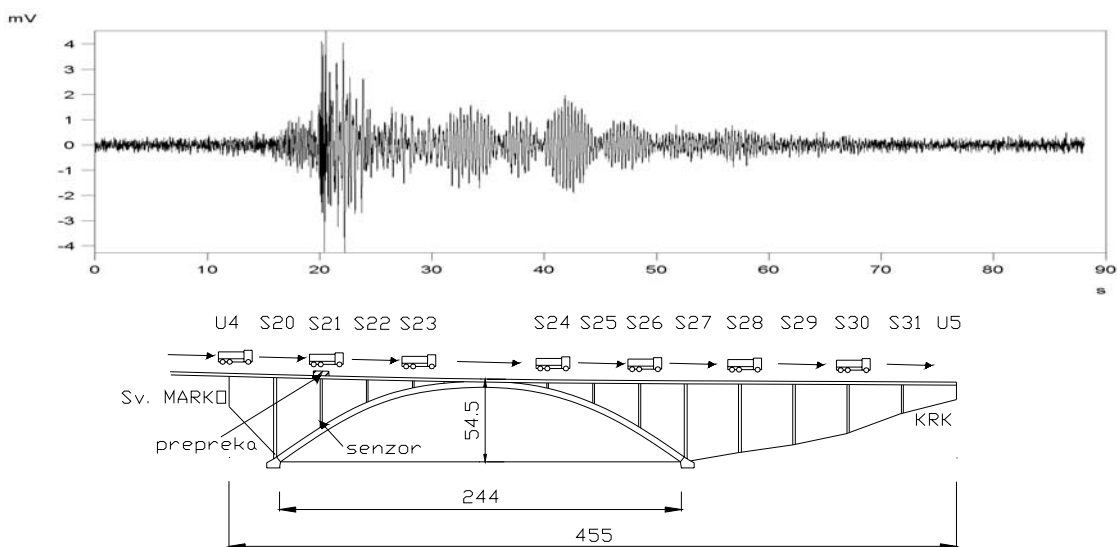
Proračun i mjerenja su pokazali da su svi nosivi sklopovi maloga luka dinamički osjetljivi, što je potvrda rezul-



Slika 3.  $f_T$  je frekvencija dobivena na numeričkom modelu, a  $f_E$  je frekvencija izmjerena 2001.

tata prijašnjih ispitivanja. Najučestaliji i najopasniji su modalni oblici karakteristični za stup S21 i mali luk (slika 3.). Budući da su ove frekvencije vrlo bliske i po obliku i po frekvenciji, ne iznenađuju uočene česte rezonantne pojave pri prolasku vozila preko mosta (slika 4.), pri čemu do-

laze do izražaja i mala prigušenja registrirana na stupu S21. Kao posljedica pojavljuju se velike promjene stanja naprezanja i deformacija u stupu pri prijenosu prometnog opterećenja na mali luk. S obzirom na to da su tijekom ispitivanja izmjereni dinamički faktori od promet-



Slika 4. Frekventni zapis odziva konstrukcije na uzbuđivanje prelaskom kamiona preko prepreke s pripadajućim prikazom položaja kamiona na mostu

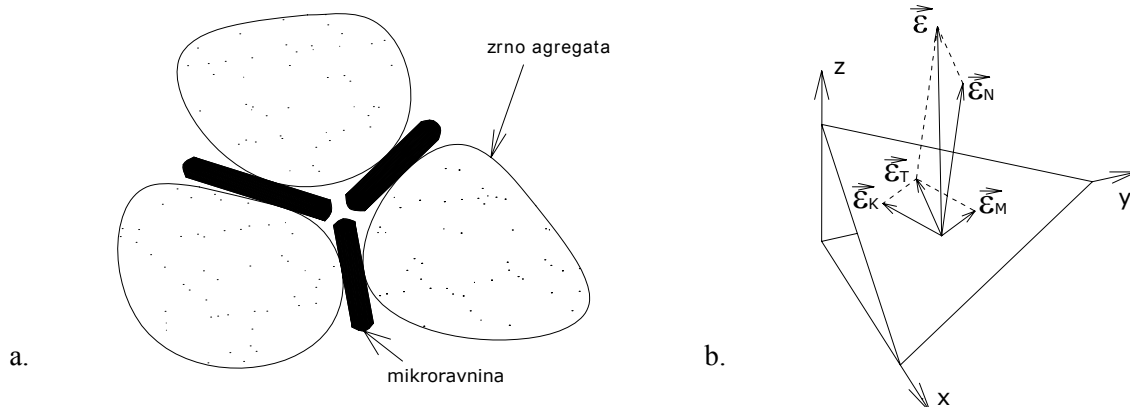
nog opterećenja čak 2,879 i 3,262, nameće se zaključak da je učestalo ponavljanje nepovoljnih stanja naprezanja uzrokovalo nastajanje pukotina, a time i ubrzalo procese korozije. Posljedica interakcije dinamičkih utjecaja i djelovanja agresivnog okoliša jest brzi razvoj pukotina i nastajanje oštećenja, odnosno narušavanje mehaničke otpornosti i stabilnosti stupa.

S obzirom na to da su ispitivanja trajala samo petnaest dana, postoji realna mogućnost da se u stupu pojavljuju i veći dinamički faktori od izmjerenih. Osim toga, vizualnim je pregledom uočena geometrijska imperfekcija stupa S21 koja može uzrokovati dodatne rezne sile. Za obuhvaćanje svih nepovoljnih kombinacija opterećenja i nedostataka konstrukcijskih detalja, potrebno je provesti dugotrajnija ispitivanja nosivih sklopova uz stup S21.

### 3 Proračun oštećenja stupa S21

#### 3.1 Teorijske podloge

Nelinearni je proračun modela karakterističnog dijela stupa S21 napravljen s pomoću programa MASA 3. Namjena programa jest trodimenzijska nelinearna numerička analiza betonskih i armiranobetonskih konstrukcija metodom konačnih elemenata, uz primjenu modela tzv. razmazanih pukotina (*smearred crack approach*) [5], [6], [7], [8]. Ponašanje materijala opisano je primjenom tzv. mikroravninskoga (*microplane*) konstitutivnog modela u kojem s fizikalnog motrišta mikroravnine predstavljaju smjerove mogućih oštećenja ili osjetljiva mjesta u mikrostrukturi betona, npr. kontakti slojevi između zrna agregata i morta (*interface*) (slika 5.a).



Slika 5. Mikroravninski model betona: a) kontakti slojevi između zrna agregata; b) komponente deformacija u mikroravnini

Mikroravnine su definirane jediničnim normalnim vektorom s komponentama  $n_i$ , a komponente deformacije na mikroravnini određuju se kao projekcije poznatog tenzora deformacije u točki kontinuuma (integracijska točka u metodi konačnih elemenata) u smjeru unaprijed definiranih komponenata vektora deformacije na mikroravnini – normalna i posmična komponenta. Normalna

je mikroravninska deformacija  $\varepsilon_N$  rastavljena na volumensku komponentu  $\varepsilon_V$  i devijatorsku komponentu  $\varepsilon_D$ , a posmična mikroravninska deformacija  $\varepsilon_T$  na dvije međusobno okomite komponente  $\varepsilon_K$  i  $\varepsilon_M$  (slika 5.b). Za svaku od mikroravninskih komponenata uvodi se tzv. efektivna deformacija [5]:

$$\varepsilon_{V,eff} = \varepsilon_V \Psi; \quad \varepsilon_{D,eff} = \varepsilon_D \Psi; \quad \varepsilon_{T,eff} = \varepsilon_T \Psi \quad (1)$$

kako bi se realno modeliralo ponašanje betona za proizvoljnu povijest opterećenja. U jednadžbi (1)  $\Psi$  je funkcija diskontinuiteta globalnog polja deformacija koje se pojavljuje kao posljedica lokalizacije deformacija zbog pucanja betona. Ona osigurava da se u slučaju tzv. jake lokalizacije deformacija (vlačna pukotina) mikroravnine orijentirane u smjeru normale pukotine opterećuju, a one okomito na taj smjer rasterećuju. Za svaku mikroravninu potrebno je unaprijed odrediti jednoosne zakone ponašanja materijala za sve tri komponente deformacija (V, D, T):

$$\sigma_V = F_V(\varepsilon_{V,eff}); \quad \sigma_D = F_D(\varepsilon_{D,eff}); \quad \sigma_T = F_T(\varepsilon_{T,eff}) \quad (2)$$

primjenom kojih se iz poznatih komponenata deformacija na mikroravnini proračunaju pripadajuće komponente naprezanja. Globalni tenzor naprezanja dobije se iz uvjeta jednakosti virtualnog rada na jediničnoj sferi materijala (polumjer sfere = 1) i virtualnog rada po ploštini te iste sfere (tzv. slaba forma ravnoteže):

$$\frac{2\pi}{3} \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} = \int_S (\sigma_N \delta \varepsilon_N + \sigma_M \delta \varepsilon_M + \sigma_K \delta \varepsilon_K) \Omega(\mathbf{n}) dS \quad (3)$$

gdje su  $\sigma_{ij}$  i  $\varepsilon_{ij}$  tenzor naprezanja odnosno deformacije u

točki kontinuuma (indeksna notacija),  $\mathbf{n}$  je jedinični vektor okomit na mikroravninu, a  $\delta \varepsilon_{ij}$ ,  $\delta \varepsilon_N$ ,  $\delta \varepsilon_M$  i  $\delta \varepsilon_K$  su male promjene deformacija na globalnoj razini (tenzor deformacija), odnosno na razini mikroravnine (komponente deformacija mikroravnine za sve smjerove mikroravnine). Funkcijom  $\Omega(\mathbf{n})$  moguće je definirati početnu anizotropiju materijala. Za obični se beton obično uzima

$\Omega(\mathbf{n}) = 1$ , što podrazumijeva početnu izotropiju. Uvođenjem odnosa iz (2) u jednadžbu (3), za globalni se tenzor naprezanja konačno dobije veza između tenzora naprezanja  $\sigma_{ij}$  komponenta naprezanja mikroravnine:

$$\sigma_{ij} = \sigma_V \delta_{ij} + \left. \begin{aligned} &+ \frac{3}{2\pi} \int_S \left[ \sigma_D \left( n_i n_j - \frac{\delta_{ij}}{3} \right) + \frac{1}{2} \sigma_M (m_i n_j + m_j n_i) + \right. \\ &\left. + \frac{1}{2} \sigma_k (k_i n_j + k_j n_i) \right] \Omega(n) dS \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Za postizanje rezultata proračuna neovisnih o veličini konačnih elemenata pri primjeni metode razmazanih pukotina, u programu se primjenjuje tzv. *crack band* postupak [9]. Glavna je pretpostavka tog postupka lokalizacija vlačnog i tlačnog oštećenja u traci konačnih elemenata čija širina odgovara širini jednoga konačnog elementa. Da bi se pri oštećenju betona osigurala konstantna disipacija energije (energija sloma betona  $G_F$ ), neovisna o veličini konačnih elemenata, potrebno je radni dijagram betona vezati uz veličinu konačnog elementa tako da vrijedi:

$$G_F = A_f h = konst. \quad (5)$$

gdje je  $A_f$  ploština ispod jednoosnoga vlačnoga radnog dijagrama betona, a  $h$  je prosječna veličina konačnih elemenata (širina razmazane pukotine). Uz pretpostavku da je i tlačna energija sloma betona ( $G_C$ ) materijalna konstanta, vrijedi:

$$G_C = A_{fc} h = konst. \quad (6)$$

$A_{fc}$  je ploština ispod jednoosnoga tlačnoga radnog dijagrama betona. Pretpostavlja se da je  $G_C$  približno sto pu-

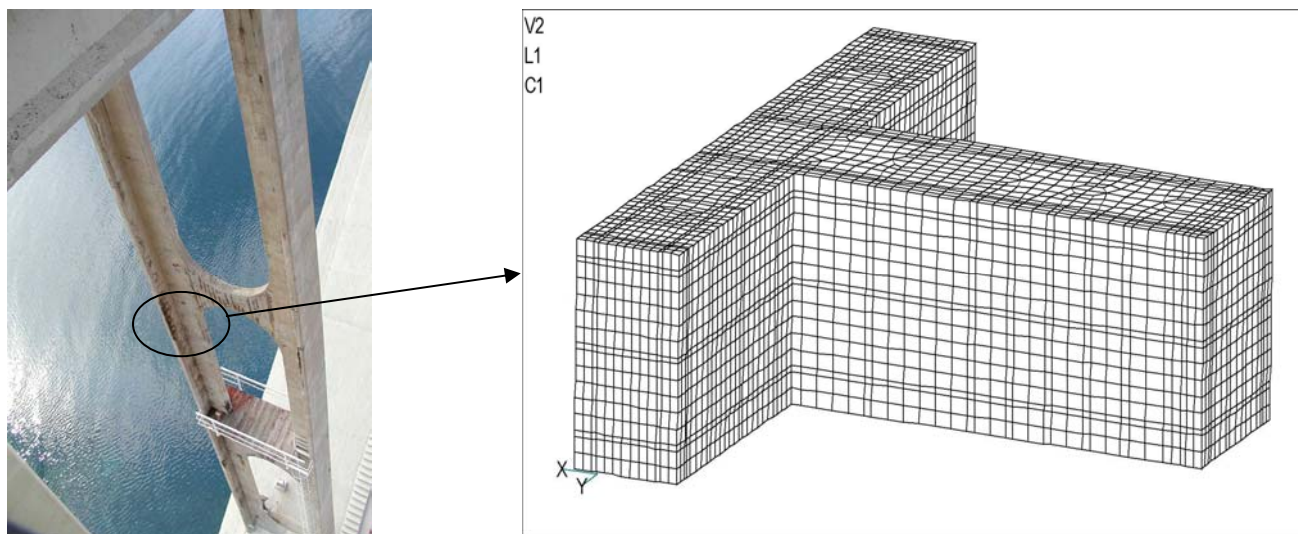
ta veći od  $G_F$ . U izrazima (5) i (6) vlačna i tlačna čvrstoća betona te pripadajuće deformacije moraju biti neovisni o veličini konačnog elementa. To znači da samo grana omekšanja radnog dijagrama betona mora biti prilagođena veličini konačnog elementa.

### 3.2 Proračun karakterističnog dijela stupa S21

Za proračun je izabran dio stupa S21 na kojem je došlo do odlamanja betona na pojasnici (slika 6.).

Kao opterećenje zadane su rezne sile dobivene iz linearnoga statičkog proračuna provedenog programom SOFISTIK. Kao i za dinamički proračun, primijenjen je 3D štapni model cijelog mosta (slika 3.). Raspored čvorova i elemenata stupa S21 napravljen je tako da se mogu očitati rezne sile u odgovarajućem presjeku. S obzirom na to da ne postoje izmjereni podaci koji bi omogućili točno modeliranje geometrije stupa S21, u štapnoj analizi pretpostavljena je geometrijska nesavršenost te je stup zadan uz pretpostavku horizontalne nesavršenosti od  $H/75$  ( $H$  = visina stupa). Prometno je opterećenje zadano uvećano za faktor uvećanja približno pet u odnosu na projektne vrijednosti zbog velikih dinamičkih faktora izmjerenih na stupu (približno tri) i zbog znatno smanjenog broja ciklusa opterećenja (30). Također su analizirani vlastita težina i vjetar okomito na uzdužnu os mosta prema projektiranom opterećenju.

U detaljnom trodimenzijskom modelu T-presjeka diskretizirana je samo polovica poprečnog presjeka stupa (pretpostavljena je simetrija oko uzdužne ravnine presjeka). Ukupna je duljina modeliranog presjeka 40 cm, što obuhvaća tri reda poprečne armature (slika 6.). Iako program MASA 3 omogućuje zadavanje armature štapnim elementima, radi što realnijeg modeliranja primijenjeni



Slika 6. Modelirani dio stupa S21

su 3D konačni elementi ne samo za diskretizaciju betona nego i za diskretizaciju armature. Svi su konačni elementi u obliku prizme s osam čvorova i osam integracijskih točaka. Prosječna veličina konačnih elemenata jest:

$$h = \sqrt[3]{V_E} = 21,4 \text{ mm} \quad (7)$$

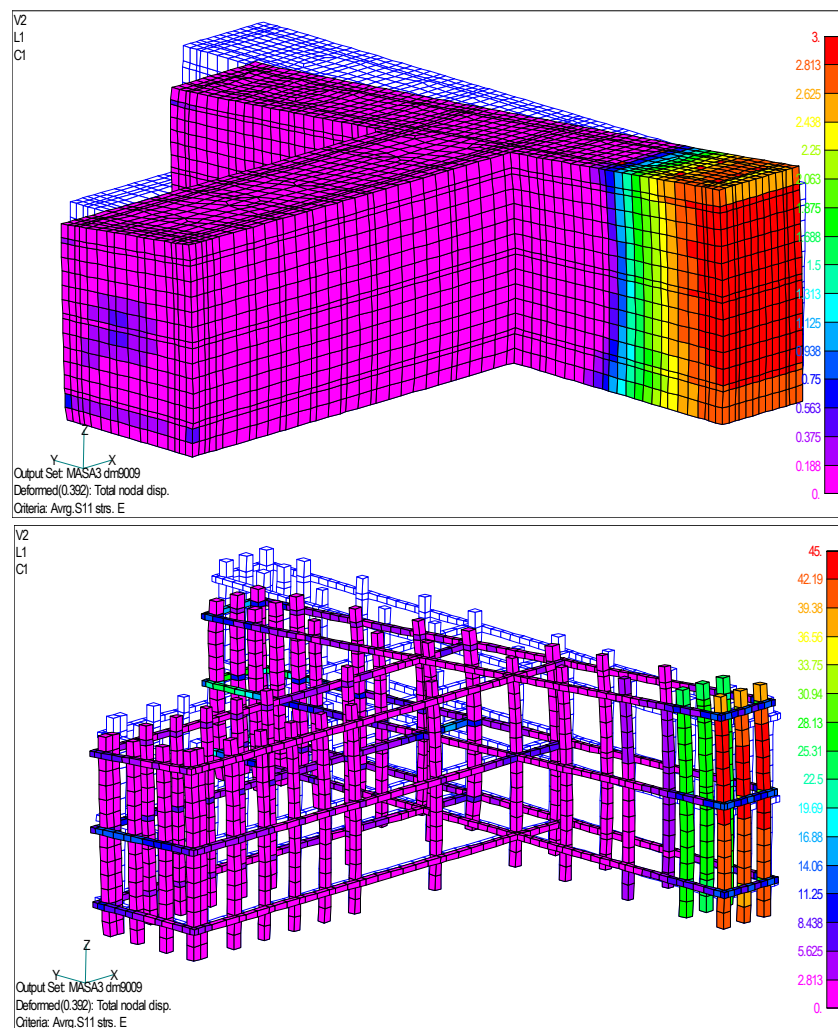
gdje je  $V_E$  prosječni obujam konačnog elementa. Karakteristike betona i čelika prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Karakteristike materijala.

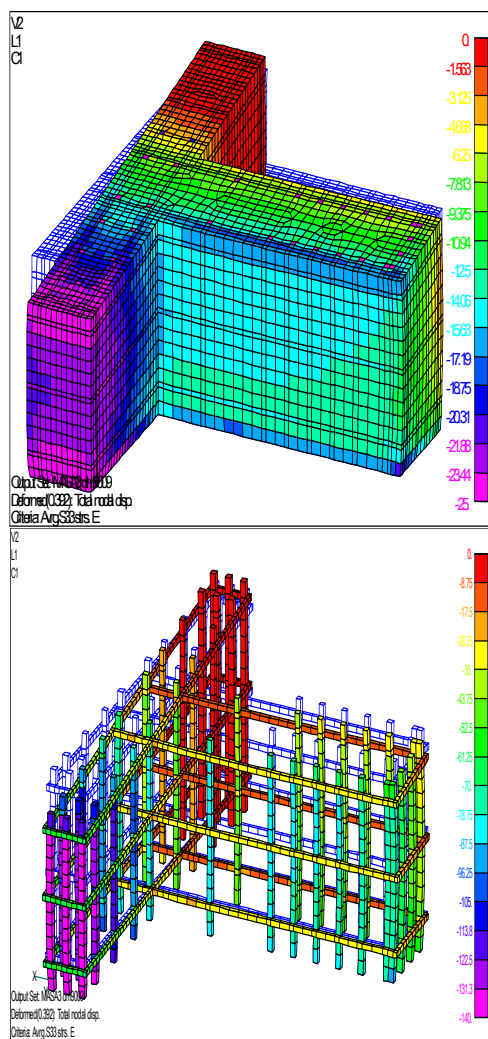
Beton	Čelik
$E_C = 43000 \text{ MPa}$	$E_S = 210000 \text{ MPa}$
$\nu = 0,18$	$\nu = 0,33$
$f_t = 2,9 \text{ MPa}$	$f_y = 360 \text{ MPa}$
$f_c = 70 \text{ MPa}$	$f_u = 500 \text{ MPa}$
$G_F = 0,053 \text{ N/mm}$	-
$\varphi_\infty = 1,75$	-

S obzirom na to da ne postoje eksperimentalni podaci za energiju sloma  $G_F$ , karakteristike mikroravninskog modela betona za odabrane konačne elemente određene su izrazom (5) uz pretpostavku  $G_F = 0,053 \text{ N/mm}$ .

Opterećenje je zadano silama koncentriranim u čvorovima na gornjoj strani modela, a prenosi se na model preko sloja elastičnih elemenata koji sprječavaju lokalno oštećenje betona na mjestu unošenja koncentriranih sila. Oslanjanje je također riješeno vertikalnim pridržanjem sloja elastičnih elemenata na donjoj strani modela, pri čemu su dva čvora i horizontalno pridržana radi osiguranja numeričke stabilnosti modela. Kako je svrha proračuna prikaz utjecaja promjenjivog opterećenja na razvoj pukotina na stupu, važan je redosljed nanošenja opterećenja. Opterećenje i puzanje od vlastite težine mosta zadani su prvi te održavani konstantnima, a zatim su zadana opterećenja prometom i vjetrom. Za ovu izrazito nepovoljnu kombinaciju opterećenja dobivena su naprezanja u betonu i armaturi koja ukazuju na još prisutnu rezervu nosivosti (slike 7. i 8.).



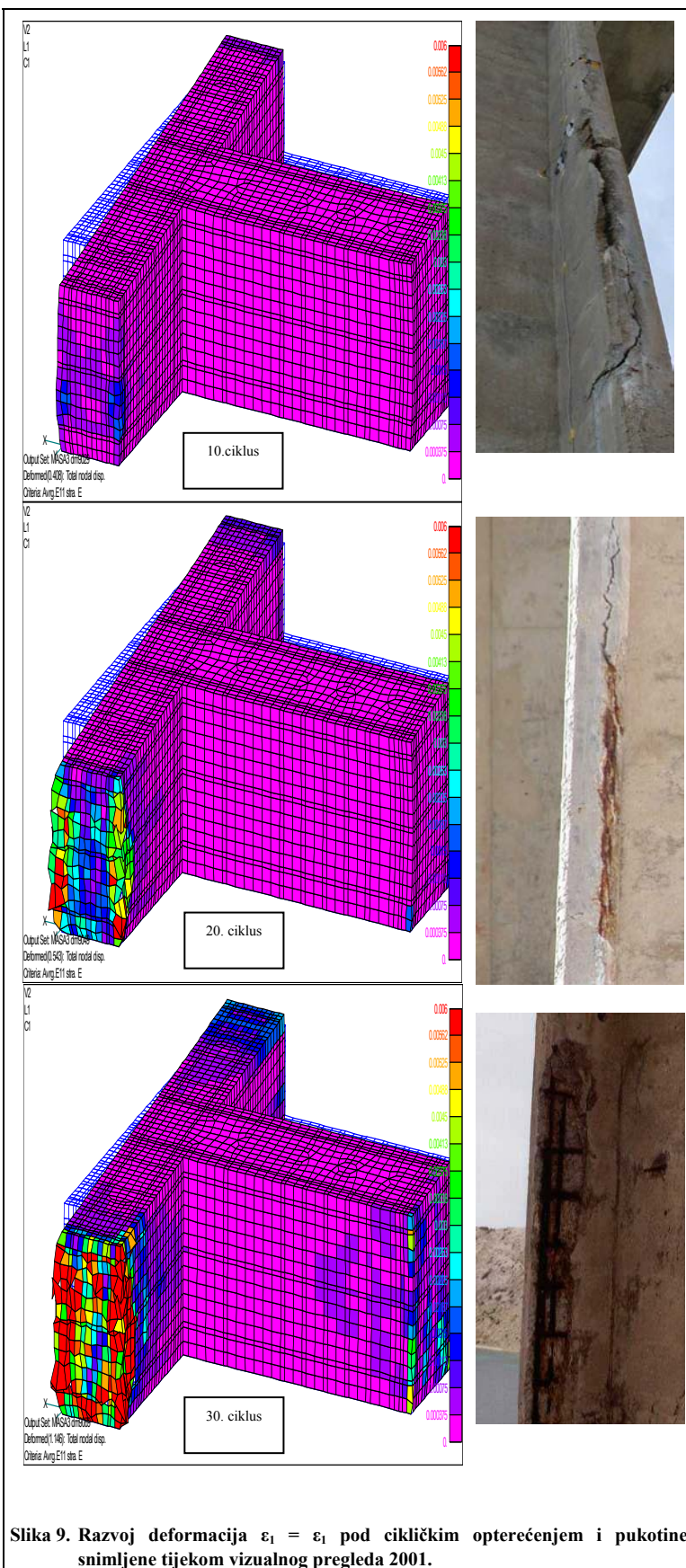
Slika 7. Glavna naprezanja  $\sigma_1$  (MPa) u betonu i armaturi za opterećenje vlastitom težinom, vjetrom i prometom uvećanim dinamičkim faktorom



Slika 8. Glavna naprezanja  $\sigma_3$  (MPa) u betonu i armaturi za opterećenje vlastitom težinom, vjetrom i prometom uvećanim dinamičkim faktorom

Model je nadalje ciklički izložen rasterećenju i ponovnom opterećenju prometom i vjetrom. Nakon svakog su ciklusa promatrani zaostale deformacije i razvoj pukotina. Na rubovima tlačno opterećene pojasnice modela nakon 10. ciklusa javljaju se glavne vlačne deformacije  $\varepsilon_1 = 0,002$ , što odgovara širini pukotina  $w = \varepsilon_1 h = 0,04$  mm. Nakon 20. je ciklusa širina pukotina premašila 0,10 mm, a svakim se sljedećim ciklusom stanje ubrzano pogoršava (slika 9).

Rezultati proračuna pokazuju lokalno oštećenje zaštitnog sloja betona. Naime, osna krutost "sloja" armature mnogo je veća od krutosti zaštitnog sloja betona. Ova lokalna nekompatibilnost (heterogenost) materijala pri dominantnom tlačnom opterećenju uzrokuje generi-



Slika 9. Razvoj deformacija  $\varepsilon_1 = \varepsilon_1$  pod cikličkim opterećenjem i pukotine snimljene tijekom vizualnog pregleda 2001.



ranje vlačnih naprezanja u ravninama koje su okomite na smjer armature. Osim toga, stalnim opterećenjem i rasterećenjem poprečnog presjeka stupa, uzrokovanim dinamičkim opterećenjem mosta (vjetar i vozila) te zbog puzanja betona, dolazi do akumulacije tzv. zaostalih vlačnih deformacija što potencira oštećenje zaštitnog sloja. Usporedbom numeričkih rezultata i stvarnog stanja oštećenja stupa (slika 9.) može se zaključiti da numerički model realno pokazuje osjetljiva mjesta poprečnog presjeka stupa. Iako u numeričkoj studiji nije analiziran negativni utjecaj neelastičnih deformacija betona (skupljanje betona i temperatura) kao niti vrlo nepovoljan i vjerojatno dominantan utjecaj korozije armature na lokalna oštećenja zaštitnog sloja stupa, proračun pokazuje postojanje oštećenja betona već i bez uzimanja u obzir ovih nepovoljnih utjecaja. Oštećenja prognozirana proračunom, koja su u stvarnosti vjerojatno nastala u prvim godinama uporabe mosta, omogućila su prodor klorida u poprečni presjek stupa pa je to osnovni uzrok oštećenja zaštitnog sloja betona. Interakcija između numerički predviđenog oštećenja betona i korozije armature uzrokuje daljnji progresivni prirast oštećenja stupa što može ugroziti stabilnost mosta.

#### 4 Zaključak

Međusobno dopunjavanje i potvrđivanje rezultata dinamičkih ispitivanja i proračuna, uz primjenu specijaliziranog programa za nelinearni proračun betonskih konstrukcija MASA 3, pokazuju se vrlo korisnima pri rješavanju složenog problema oštećenja armiranobetonskih stupova malog luka Krčkoga mosta.

Rezultati dinamičkog proračuna trodimenzijskim štapnim modelom mosta pokazali su da je stup S21 dinamički najosjetljiviji nosivi element malog luka i da dinamička djelovanja (prometno opterećenje i vjetar) presudno utječu na ugrožavanje mehaničke otpornosti i stabilnosti

stupa. Rezonantne su pojave pri titranju stupa toliko izražene da u stupu izazivaju učestalu pojavu složenih i nepovoljnih stanja naprezanja i deformacija.

Presudan utjecaj cikličkog ponavljanja nepovoljnih stanja naprezanja na oštećenja stupova potvrđen je i rezultatima nelinearnog proračuna karakterističnog dijela detalja stupa S21. Pojavljivanje i razvoj vertikalnih pukotina pokazuju se kritičnijim od razvoja pukotina okomitih na glavnu vertikalnu armaturu. To se moglo i očekivati s obzirom na to da su stupovi nosivi elementi pretežno tlačno opterećeni te da na tim kritičnim mjestima poprečnog presjeka stupa postoje velike razlike u lokalnim krutostima. Naime, krutost "sloja" armature mnogo je veća od krutosti zaštitnog sloja betona. Ova lokalna nekompatibilnost (heterogenost) uzrokuje generiranje vlačnih naprezanja u ravninama koje su okomite na smjer armature. Uz to, stalnim opterećenjem i rasterećenjem poprečnog presjeka stupa i zbog puzanja betona dolazi do akumuliranja zaostalih vlačnih deformacija što uzrokuje vertikalne pukotine. Ovi procesi najizraženiji su na mjestima promjene horizontalne krutosti stupova, odnosno na dijelu stupova uz horizontalnu prečku. Nastale pukotine znatno olakšavaju prodor kloridima kroz oštećen i nedovoljan zaštitni sloj betona, pa do procesa korozije armature dolazi brže i intenzivnije. Interakcija dinamičkih utjecaja, puzanja betona i djelovanja agresivnog okoliša glavnim je uzrokom stanja u kojem se stupovi nalaze.

S obzirom na to da zasad nisu predviđeni sanacijski zahvati kojima bi se znatno promijenile dinamičke karakteristike stupova, realna je opasnost da utjecaj cikličkog ponavljanja nepovoljnih dinamičkih djelovanja bude uzrokom novih oštećenja. Provjerom dimenzija, određivanjem relevantnih karakteristika materijala (npr. energije sloma  $G_F$ ) te dugotrajnijim ciljanim dinamičkim ispitivanjima stvorile bi se podloge za točnije modeliranje i usporedbu ponašanja stupova prije i poslije sanacije.

#### LITERATURA

- [1] Šimunić, Ž.; Pavlović, B.; Medak, M.; Šimunić, D.: *Dinamičko ispitivanje i analiza Krčkoga mosta sa svrhom utvrđivanja sanacije za 1998. godinu*, Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb, 1999.
- [2] Šimunić, Ž.; Pavlović, B.; Medak, M.; Kučer, A.; Bleiziffer, J.: *Dinamička analiza Krčkoga mosta*, Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb, 2000.
- [3] Šimunić, Ž.; Pavlović, B.; Medak, M.; Kučer, A.; Bleiziffer, J.; Janjuš, G.; Šuto, G.; Kalafatić, I.: *Dinamičko ispitivanje i analiza pouzdanosti sklopova stupova S21, S28 i susjednih sklopova malog luka Krčkoga mosta*, Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb, 2002.
- [4] Šimunić, Ž.; Krstić, V.; Puž, G.: *Izješće o glavnom pregledu i ispitivanjima Krčkoga mosta*, Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb, 1993.
- [5] Ožbolt, J.; Li, Y.-J.; Kožar, I.: *Microplane Model for Concrete with Relaxed Kinematic Constraint*, International Journal of Solids and Structures, 38 (2001), 2683-2711.
- [6] Ožbolt, J.; Mayer, U.; Vocke, H.: *Smeared Fracture FE-Analysis of Reinforced Concrete Structures – Theory and Examples*, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, Committee Report, American Society of Civil Engineers.
- [7] Ožbolt, J.; Meštrović, D.; Li, Y.-J.; Eligehausen, R.: *Compression Failure of Beams Made of Different Concrete Types and Sizes*, Journal of Structural Engineering, February 2000., 200-209.
- [8] Karihaloo, B. L.: *Fracture Mechanics & Structural Concrete*, Concrete Design & Construction Series, 1994.
- [9] Bažant, Z. P.; Oh, B. H.: *Crack band theory for fracture of concrete*, RILEM, 93(16), 1983, 155-177.