

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.10>

DJELOVANJE EKSPLOZIJE NA STUPOVE NADVOŽNJAKA

EFFECT OF BLAST LOAD ON HIGHWAY BRIDGE COLUMNS

Sanja Lukić¹, Hrvoje Draganić¹

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za materijale i konstrukcije, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, slukic@gfos.hr; draganic@gfos.hr

Sažetak

Posljednjih desetljeća svjedočimo sve učestalijim terorističkim napadima eksplozivnim napravama, a mostovi su zanimljivi zbog lake dostupnosti i velike važnosti u infrastrukturi. Promatrano je djelovanje eksplozije na stup jer gubitak nosivosti stupa mosta utječe na nosivost cijele konstrukcije. Stupovi su kritični elementi jer su u prošlosti dimenzionirani na minimalna horizontalna djelovanja. Stoga su pregledani arhivirani projekti nadvožnjaka na hrvatskim cestama i autocestama te je izabran stup dimenzioniran prema Jugoslavenskim standardima koji će se eksperimentalno ispitati na djelovanje eksplozije. Ciljevi su provjeriti otpornost postojećega stupa na djelovanje eksplozije te povećati bazu eksperimentalnih podataka. Na temelju izmjerenih rezultata kalibrirat će se numerički model koji se može koristiti za daljnje simulacije različitih scenarija djelovanja eksplozije.

Ključne riječi: stupovi nadvožnjaka, eksperimentalno ispitivanje, djelovanje eksplozije

Abstract

In recent decades, we have witnessed an increasing number of terrorist attacks utilizing improvised explosive devices. Bridges are attractive targets because of their easy accessibility and great importance in transportation infrastructure. The failure of the bridge column affects the bearing capacity of the entire structure, therefore the effect of the blast load on the column was observed. Columns are critical because in the past they have been designed to withstand minimal lateral loads. The archived overpass projects on Croatian roads and highways were reviewed, and a column designed according to Yugoslav standards was selected. The selected column will be field blast tested. The aim is to test the resistance of the existing column on the blast load and increase the database of measured blast wave parameters. A numerical model will be calibrated and used for further blast load simulations based on the measured results.

Keywords: highway bridge columns, field blast tests, blast load

1. Uvod

U posljednjih pet desetljeća broj terorističkih napada u svijetu raste. Postoje različite vrste napada, ali prema podacima Nacionalnoga konzorcija za proučavanje terorizma i odgovora na terorizam u posljednja dva desetljeća napadi eksplozivnim napravama premašuju 50 % od ukupnoga broja incidenata [1]. Sve do danas mete napada bile su građevine od velike društvene i ekonomske važnosti jer njihovo uništavanje uzrokuje najveći strah među ljudima. Napadi na „Blizance“ (*The Twin Towers*) Svjetskoga trgovačkog centra 11. rujna 2001. godine i mostove u Kaliforniji i New Yorku utjecali su na projektiranje konstrukcija u Sjedinjenim Američkim Državama, ali i u ostatku svijeta [2]. Prometna infrastruktura neophodna je za obavljanje svakodnevnih aktivnosti te je transportni sustav jedan od zanimljivijih meta [3]. Zbog velikoga broja mostova širom svijeta, puno potencijalnih žrtava, visokih troškova sanacije i važnosti u svakodnevnome životu, mostovi postaju središte terorističkih napada. Oštećivanje i uništavanje određenih prometnih dionica ili konstrukcija, kao što su mostovi, može prouzročiti poteškoće u prometu i odsijecanje strateških točaka. Navedeno potvrđuje činjenica kako je u posljednjih nekoliko napada u Nigeriji u 2020. godini uništeno sedam mostova. Bilo bi nepraktično kada bi se svi mostovi duž visokovrijedne prometne dionice pratili i čuvali, stoga inženjeri moraju osmisliti određene proračunske metode kako bi osigurali određenu razinu otpornosti na djelovanja eksplozija. Kako postoje različite vrste mostova i različiti načini napada na mostove, teško je predvidjeti ponašanje mosta na djelovanje eksplozije [4]. Cooper i dr. [3] navode kako su stupovi jedna od najkritičnijih komponenti na svim vrstama mostova. U prošlosti stupovi nisu bili dimenzionirani kako bi mogli podnijeti velika horizontalna dinamička opterećenja te su i iz toga razloga zanimljiva meta [5]. Cilj je preliminarnim numeričkim analizama utvrditi najkritičniji stup nadvožnjaka na djelovanje eksplozije na hrvatskim cestama i autocestama te ga eksperimentalno ispitati. Nakon provedenoga eksperimentalnog ispitivanja provest će se kalibracija numeričkih modela prema eksperimentalnim rezultatima te će se model koristiti za daljnja istraživanja.

2. Pregled eksperimentalnih ispitivanja

Zbog omjera cijene i kvalitete armiranobetonske konstrukcije široko su zastupljene u svijetu te stoga ne čudi što je najveći broj mostova izgrađen od armiranoga betona. Unatoč njihovoj rasprostranjenosti u literaturi je pronađen mali broj armiranobetonskih stupova ispitanih na djelovanje eksplozije. Davis i dr. [6] ispitali su ih u malome mjerilu i u mjerilu 1 : 2. Na temelju provedenih eksperimenata donijeli su pet zaključaka i smjernica za projektiranje stupova, navedenih i u [4, 7]. Preporuke se odnose na izgled stupa, oblikovanje i preklapanje armature te postavljanje zaštitnih ograda i prepreka kako bi se povećala udaljenost automobila od stupa. Isto tako navode i tri kategorije projektiranja (A, B i C) s obzirom na skaliranu udaljenost Z koja ovisi o količini eksploziva i stvarnoj udaljenosti od stupa. Yuan i dr. [8] promatrali su kvadratni i kružni armiranobetonski stup u mjerilu 1 : 3 na djelovanje kontaktno postavljenoga eksploziva (1 kg TNT-a). Oba su stupa doživjela otpadanje i drobljenje zaštitnoga sloja betona, ali je kod kvadratnoga stupa došlo i do sloma poprečne armature, stoga se oštećenje može okarakterizirati kao značajnije. Zbog sličnosti u djelovanjima potresa i eksplozije Bruneau i dr. [9] te Fujikura i dr. [10] razvili su i ispitali stupište na višestruku opasnost (engl. *multi-hazard*). Uzorci stupova napravljeni su kao čelični cijevni profili ispunjeni betonom (engl. *concrete-filled steel tube* – CFST), različitih promjera u mjerilu 1 : 4. U ispitivanju je eksploziv postavljen tako da simulira scenarij napada kada je eksploziv

postavljen u automobil ispod mosta u blizinu stupa. Stupovi su pokazali duktilno ponašanje i visoku otpornost na djelovanje eksplozije te prednost pred armiranobetonskim stupovima jer ne dolazi do drobljenja i ljuštenja betona odnosno do letećih krhotina. Također eksperimentom su pokazali da čak i minimalno povećanje udaljenosti eksploziva od stupa kao i povećanje promjera stupa bitno smanjuje deformaciju stupa. Isto su ponovili Fujikura i Bruneau [11], ali s običnim armiranobetonskim stupovima i stupovima ovijenim čelikom. Svi su stupovi otkazali na posmik pri dnu, armiranobetonski stupovi doživjeli su i otpadanje betona, dok stupovi ovijeni čelikom nisu imali oštećenje toga tipa. Čelični cijevni profili ispunjeni betonom (CFST) pokazali su duktilnije ponašanje u odnosu na ispitane stupove u ovome radu. Fouché i dr. [12] na stupove omotane čelikom dodali su još čelično ojačanje u obliku ogrlice (engl. *steel collar*) na dnu i vrhu stupa. Zaključili su kako dodano ojačanje djeluje učinkovito na sprječavanje izravnoga smicanja i na povećanje duktilnosti stupa. Fouché i dr. [13] eksperimentalno su ispitali dvanaest stupova s dvostrukim čeličnim cijevima ispunjenim betonom (engl. *Concrete-Filled Double-Skin Tubes* – CFDST) u mjerilu 1 : 4. Varirali su omjer šupljine u odnosu na cijeli poprečni presjek, promjer i debljinu unutarnje i vanjske cijevi. Unutarnja cijev spriječila je izravan slom smicanjem, što je prednost ove vrste stupa u odnosu na armiranobetonski i CFST stup. Na temelju pregleda eksperimentalnih ispitivanja provedenih na stupovima mostova prikazanih u Tablici 1 zaključuje se kako su armiranobetonski stupovi mostova nedovoljno istraženi. Smatra se kako je uzrok tomu složenost izvedbe eksperimenta i visokih troškova za stupove mostova u stvarnome mjerilu. Ove vrste eksperimenta zahtijevaju posebno područje, obično vojni poligon i obučeno osoblje za rukovanje eksplozivima. Međutim, i ispitivanja na vojnim poligonima imaju ograničenja u pogledu maksimalne količine eksploziva koja se može upotrijebiti u jednoj detonaciji te je i time ograničena veličina uzoraka za ispitivanje. Dosadašnji eksperimenti provedeni su većinom u mjerilu 1 : 4, potom 1 : 3, a u mjerilima 1 : 2 i 1 : 1 izvode se pretežno stupovi zgrada. Istraživanja provedena posljednjih desetljeća pokazala su kako ispitivanja na umanjenim uzorcima pružaju dovoljno pouzdane rezultate i potrebno znanje za analiziranje učinaka eksplozije na konstrukcije u stvarnome mjerilu [12].

Tablica 1. Popis eksperimentalnih istraživanja na stupovima mostova

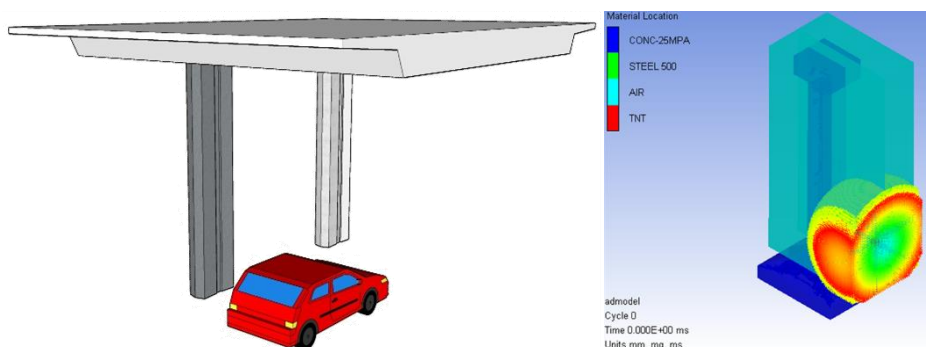
Autori	Godina	Materijal	Mjerilo
Bruneau i dr.[9]	2006.	CFCSC	1 : 4
Fujikura i dr.[10]	2008.	CFST	1 : 4
Davis i dr. [6]	2009.	RC	1 : 2
Fujikura i Bruneau [11]	2010.	RC i RC SJ	1 : 4
Williamson i dr. [4]	2011.	RC	1 : 2
Fouché i dr. [12]	2016.	RC MSJ	1 : 4
Yuan i dr. [8]	2017.	RC	1 : 3
Fouché i dr. [13]	2017.	CFDST	1 : 4

Bilješka (engl.): CFCSC – *Concrete-Filled Circular Steel Columns*, CFST – *Concrete-Filled Steel Tube*, RC – *Reinforced Concrete*, SJ – *Steel Jacket*, MSJ – *Modified Steel Jacket*, CFDST – *Concrete-Filled Double-Skin Tubes*.

3. Preliminarna ispitivanja

3.1. Odabir stupa i scenarija napada

Pregledom državnih arhiva dobivene su opće i detaljne informacije o vrsti, geometriji, korištenim materijalima, izgradnji i projektnim detaljima za postojeće nadvožnjake. Izdvojeni su svi oblici stupova, a za najučestalije napravljena je preliminarna numerička analiza. Visina naboja određena je s obzirom na visinu i geometriju vozila. Zbog postojećih cestovnih barijera oko stupa udaljenost automobila od stupa nadvožnjaka jest 2,0 m. Promatrani scenarij napada prikazan je na Slici 1 (lijevo). U numeričkoj analizi u programu *Ansys Autodyn* [14] modelirani su stupovi u stvarnome mjerilu te su izloženi djelovanju eksplozivnoga naboja koje, prema literaturi, stane u jedan prosječan automobil. Numerički model prikazan je na Slici 1 (desno), a sastoji se od armiranobetonskoga stupa, naboja te zraka oko stupa kroz koji se širi tlak od eksplozije. Daljnja analiza rađena je na stupu s najvećim tlakovima od djelovanja eksplozije, a odabrani stup ujedno ima i najmanje dimenzije poprečnoga presjeka te se smatra najugroženijim na osječkoj obilaznici. Nadvožnjak je građen 1970. godine te je dimenzioniran prema Jugoslavenskim standardima.



Slika 1. Analizirani scenarij napada (lijevo) [15] i numerički model stupa u *Ansys Autodyn* programu (desno)

3.2. Opis eksperimenta

Za eksperimentalna ispitivanja određeni su količina i udaljenost eksploziva od stupa te razina oštećenja koristeći program SBEDS (engl. *Single-Degree-of-Freedom Blast Effects Design Spreadsheets*) koji je utemeljen analizom zamjenjujućega sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF). Prototip stupa bit će u mjerilu 1 : 3, visine 2,0 m jer je prosječna stvarna visina stupa 6,0 m zbog nesmetana prolaza automobila ispod nadvožnjaka. Zbog sigurnosnih razloga informacija o količini eksploziva čuva se kao tajna. Eksperimenti će se provoditi na vojnome poligonu u suradnji s Hrvatskom vojskom. Tijekom eksperimentalnoga ispitivanja mjerit će se tlakovi u slobodnome polju, reflektirani tlakovi, ubrzanja i pomaci stupa. Rezultati će činiti bazu podataka mjerenih parametara uslijed djelovanja eksplozija te će se koristiti za kalibraciju numeričkoga modela u *Ansys Autodyn* programu.

4. Zaključak

Eksperimentalnim ispitivanjem stupova na djelovanje eksploziva postavljenoga u automobil ispod mosta utvrdit će se otpornost najugroženijega stupa nadvožnjaka na osječkoj obilaznici. Izmjereni parametri tijekom eksperimentalnih ispitivanja koristit će se za proširenje baze podataka o parametrima eksplozije te o ponašanju armiranobetonskih stupova na djelovanje eksplozije. Svi izmjereni podatci i oštećenje stupa koristit će se za kalibraciju numeričkih modela. Numerička simulacija znatno je jeftinija, brža i sigurnija nego provedba eksperimentalnoga ispitivanja. Stoga je cilj razviti pouzdan i točan numerički model koji će biti dalje korišten u istraživanjima stupova, tj. bit će moguće numerički istražiti stup mosta koji nije eksperimentalno ispitan.

Zahvala

Znanstveni rad proveden je u okviru istraživačkoga projekta Hrvatske zaklade za znanost *Otpornost stupova nadvožnjaka na djelovanje eksplozije*, pod oznakom UIP-2017-05-7041, te im zahvaljujemo na potpori.

Literatura

- [1] START. 2017. p. National consortium for the study of terrorism and responses to terrorism. Global terrorism database [Data file 2017.], pristupljeno: 15. svibnja 2020.
- [2] Winget DG, Marchand KA, Williamson EB. Analysis and design of critical bridges subjected to blast loads. *Journal of Structural Engineering*. 2005;131:1243-55. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:8\(1243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:8(1243))
- [3] Cooper JD, Smith MC, Ernst SL. BLUE RIBBON PANEL RECOMMENDATIONS FOR BRIDGE AND TUNNEL SECURITY.
- [4] Williamson EB, Bayrak O, Davis C, Williams GD. Performance of bridge columns subjected to blast loads. I: Experimental program. *Journal of Bridge Engineering*. 2011;16:693-702. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000220](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000220)
- [5] Abedini M, Mutalib AA, Raman SN, Alipour R, Akhlaghi E. Pressure–impulse (P–I) diagrams for reinforced concrete (RC) structures: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019;26:733-67. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9260-9>
- [6] Davis CE, Williams GD, Williamson EB, Marchand KA, McKay AE, Bayrak O. Design and detailing guidelines for bridge columns subjected to blast and other extreme loads. *Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*2009. p. 1-10.
- [7] Williamson EB, Bayrak O, Davis C, Daniel Williams G. Performance of bridge columns subjected to blast loads. II: Results and recommendations. *Journal of Bridge Engineering*. 2011;16:703-10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000221](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000221)
- [8] Yuan S, Hao H, Zong Z, Li J. A study of RC bridge columns under contact explosion. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;109:378-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.07.017>
- [9] Bruneau M, Lopez-Garcia D, Fujikura S. Multihazard-resistant highway bridge bent. *Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety*2006. p. 1-4.

- [10] Fujikura S, Bruneau M, Lopez-Garcia D. Experimental investigation of multihazard resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading. *Journal of Bridge Engineering*. 2008;13:586-94. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2008\)13:6\(586\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2008)13:6(586))
- [11] Fujikura S, Bruneau M. Experimental investigation of seismically resistant bridge piers under blast loading. *Journal of Bridge Engineering*. 2010;16:63-71. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000124](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000124)
- [12] Fouché P, Bruneau M, Chiarito VP. Modified steel-jacketed columns for combined blast and seismic retrofit of existing bridge columns. *Journal of Bridge Engineering*. 2016;21:04016035. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000882](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000882)
- [13] Fouché P, Bruneau M, Chiarito V. Dual-hazard blast and seismic behavior of concrete-filled double-skin steel tubes bridge pier. *Journal of Structural Engineering*. 2017;143:04017155. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001883](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001883)
- [14] Ansys. *Ansys Autodyn Users`s Manual*. Canonsburg, PA, USA2010.
- [15] Lukić S, Draganić H. Blast load analysis of overpass columns with various cross-sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;867:012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/867/1/012028>