

Primljen / Received: 18.8.2022.
Ispravljen / Corrected: 5.12.2022.
Prihvaćen / Accepted: 11.12.2022.
Dostupno online / Available online: 10.1.2023.

Poboljšanje mostova s potresnom izolacijom primjenom horizontalnih uređaja S-oblika (HS)

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Jelena Ristić**, dipl.ing.građ.
Međunarodno balkansko sveučilište (IBU)
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
jelena.ristic@ibu.edu.mk
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Danilo Ristić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište SS Ćirila i Metoda u Skopju
Sjeverna Makedonija
Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku
seizmologiju (IZIIS), Skopje
danilo.ristic@gmail.com



Prof.dr.sc. **Viktor Hristovski**, dipl.ing.građ.
Sveučilište SS Ćirila i Metoda u Skopju
Sjeverna Makedonija
Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku
seizmologiju (IZIIS), Skopje
viktor@iziis.ukim.edu.mk

Prethodno priopćenje

Jelena Ristić, Danilo Ristić, Viktor Hristovski

Poboljšanje mostova s potresnom izolacijom primjenom horizontalnih uređaja S-oblika (HS)

Na modelu izvedenom u velikom mjerilu provedena su opsežna eksperimentalna ispitivanja na potresnu pobudu koja su pokazala odziv mosta s izolacijom poboljšanog primjenom horizontalnih uređaja S-oblika (HS) koji omogućavaju ograničene pomake (GHS sustav). GHS sustav je sastavljen od dvostrukih sfernih kotrljajućih izolacijskih ležajeva (DSRIB) i razvijenih originalnih uređaja za trošenje energije s komponentama S-oblika (HS-MG). Vrlo stabilni odzivi u svim smjerovima su potvrđeni laboratorijskim cikličnim testovima za oba uređaja, DSRIB i HS-MG. U eksperimentalnom ispitivanju na potresnom stolu, GHS izolacijski sustav mosta je pokazao povoljno ponašanje pri potresnom djelovanju pridonoseći učinkovitoj zaštiti mosta. Novi GHS sustav pokazao je veliki potencijal za kvalitativno poboljšanje sigurnosti mostova s potresnom izolacijom izloženih vrlo jakim potresima.

Ključne riječi:

most, potresna izolacija, trošenje energije, sigurnost mosta, potresni stol

Research Paper

Jelena Ristić, Danilo Ristić, Viktor Hristovski

Upgrading of isolated bridges with uniform gapped HS devices: Seismic tests

The conducted extensive experimental seismic analysis showed seismic performances of a constructed large-scale bridge model representing system of upgraded isolated bridge with uniform gapped horizontal S-shaped devices (GHS System). The GHS system constituted double spherical rolling isolating bearings (DSRIB) and created original uniform horizontal S-shaped multi-gap (HS-MG) energy dissipation devices. With conducted laboratory cyclic tests, stable all-directional hysteretic responses were confirmed for both the DSRIB and HS-MG devices. In the dynamic seismic shaking table testing, the GHS bridge system showed favourable seismic response performances contributing to efficient bridge system protection. The established new GHS system exhibited large potential for qualitative improvement of seismic safety of isolated bridges exposed to very strong earthquakes.

Key words:

bridge, seismic isolation, energy dissipation, bridge safety, seismic shaking table

1. Uvod

Iako su značajne studije vezane uz potresnu izolaciju mostova provedene u mnogim poznatim istraživačkim centrima u Japanu, SAD-u, Italiji itd., ideje i istraživanja iz mnogih drugih zemalja postale su također vrlo važne [1]. Međutim, provedena istraživanja bila su uglavnom usmjerena na razvoj specifičnih pojedinačnih uređaja kao što su: izolacijski uređaji od gume, klizni izolacijski uređaji, kotrljajući izolacijski uređaji, uređaji za ograničavanje pomaka itd. Pregled dostignuća u ovom području istraživanja prikazan je u raznim publikacijama [1, 2]. Ponašanje izolacijskih uređaja od obične gume i olonogumenih uređaja prikazano je u [3, 4]. Specifično ponašanje kliznih izolacijskih uređaja opisano je u različitim objavljenim radovima [5-7], uključujući jednostavne izolacijske uređaje s klatnom [8, 9] i provedena eksperimentalna ispitivanja [10, 11]. Također su predstavljani osnovni koncepti nekih specifičnih uređaja za trošenje energije, kao i nekih uređaja za ograničavanje pomaka [12-14]. Specifični histerezni čelični prigušivači U-oblika su razvijeni i uglavnom se koriste za zgrade [15-17]. U posljednje vrijeme noviteti uključuju studije povezane s fenomenima i/ili konceptima, kao što su sudaranje [18], ponašanje elastomernih izolacijskih uređaja u tlaku [19] ili poluaktivnih prigušivača [20, 21]. Također su uvedeni i propisi za izolaciju mostova [22, 23] te su primijenjeni diljem svijeta u područjima koja imaju izraženu potresnu aktivnost [24]. Naposlijetku, novi složeni sustavi ispitivani su na potresnim stolovima pomoću umanjenih modela građevina [25]. Teška oštećenja mostova uslijed jakih potresa stalno su se događala. Oštećenja donjeg ustroja najčešće se očituju velikim deformacijama, slijeganjima, trajnim pomacima, velikim pukotinama ili prevrtanjem konstrukcije [26]. Gornji ustroj može biti značajno pomaknut ili potpuno urušen [27]. Čak i suvremeni mostovi trpe teška oštećenja pod jakim potresima [28, 29]. Iako su zabilježeni neki dokazi o povoljnom ponašanju mostova s potresnom izolacijom, do danas nije mnogo mostova doživjelo jake potrese u blizini rasjeda [28, 30]. Nedavno su istraživači pokazali veliki interes za instrumentaciju i praćenje u stvarnom vremenu mostova izloženih jakim pomacima tla u blizini rasjeda. Neki recentni radovi pak donose izvještaje o potencijalnim problemima povezanim s mostovima s potresnom izolacijom i njihovom nepovoljnom ponašanju. Tipična nagla oštećenja mostova s potresnom izolacijom primijećena su na velikom vijaduktu Bolu nakon snažnog potresa u gradu Duzce u Turskoj 1999. godine. Otvaranje rasjeda ispod vijadukta proizveo je značajno jači potres od projektiranog [31, 32]. Međutim, vijadukt je izdržao bez potpunog urušavanja. Na primjer, tijekom potresa u Kobeu 1995. godine, most Higashi-Kobe je pretrpio oštećenja povezana s velikim pomacima [33], dok su neki mostovi s potresnom izolacijom oštećeni tijekom Velikog potresa u istočnom Japanu 2011. godine. Zabilježeno je da su se neka manja oštećenja dogodila na mostu preko rijeke Thjorse i mostu Oseyarar na Islandu, nakon pomicanja tla u blizini rasjeda [34]. Rezultati istraživanja predstavljeni u ovom radu dobiveni su iz originalne razvojne studije koja je rezultirala stvaranjem

inovativnih HS-MG uređaja koji mogu kvalitativno doprinijeti ublažavanju problema sigurnosti mostova s potresnom izolacijom pod utjecajima vrlo jakih potresa.

2. Novi GHS sustav mostova

Opsežno eksperimentalno i analitičko istraživanje provedeno je u Institutu za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (IZIIS) na Sveučilištu Ćirila i Metoda (Skoplje), u sklopu NATO projekta Znanost za mir i sigurnost "Seizmičko poboljšanje mostova u jugoistočnoj Europi pomoću inovativnih tehnologija" (SFP: 983828), na čelu s drugim autorom. Razvijeni GHS sustav predstavlja poseban dio integralnog istraživanja. Novi horizontalni sustav s komponentama S-oblika koji omogućava ograničene pomake (GHS-sustav) razvijen je na temelju stvorenog kompaktnog pasivnog HS-MG uređaja za trošenje energije koji omogućava ograničene pomake kako bi se osigurao poboljšani odgovor mosta pri vrlo jakim potresima. Formuliran je implementacijom usvojenog koncepta globalne optimizacije energetske ravnoteže pri potresnom djelovanju. Projektirani uređaji za trošenje energije HS-MG koji se koriste kao dopunsko prigušenje predstavljaju kvalitativno poboljšanje sustava koji imaju samo potresnu izolaciju. Sustav GHS temelji se na uključivanju triju komplementarnih sustava, a to su:

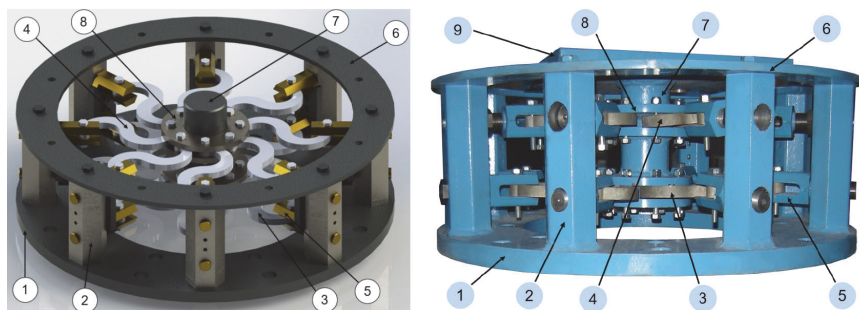
- klasični sustav potresne izolacije (SI sustav) koji osigurava nisku krutost u horizontalnom smjeru
- novi HS-MG sustav trošenja energije za osiguravanje dovoljnog prigušenja trošenjem energije potresa
- uređaji za ograničavanje pomaka (DL) za smanjenje ili uklanjanje prekomjernih pomaka pod jakim udarnim učincima.

Provedeno istraživanje uključivalo je dva glavna dijela. Tijekom početnog istraživanja provedena su originalna kvazistatička ispitivanja prototipskih modela komponenti i uređaja. U drugom dijelu provedena su ispitivanja originalnog GHS modela mosta pod simuliranim djelovanjem jakih potresa. Fizički model mosta projektiran je i izrađen tako da bude kompatibilan za uspješno kvazistatičko ispitivanje i ispitivanje na potresnom stolu.

3. Izrada i testiranje HS-MG uređaja za trošenje energije

3.1. Prototip HS-MG uređaja

S obzirom na specifični cilj ovog eksperimentalnog istraživanja koje je uključivalo kreiranje i originalno testiranje inovativnog koncepta poboljšanja, posebna je pozornost usmjerena na razvoj nove integrirane, kompaktne i duktilne jedinice za poboljšanje. Konstrukcijski ona predstavlja horizontalnu napravu S-oblika za trošenje energije u svim smjerovima (HS-MG) velikog kapaciteta. Konstrukcija višesmjernog HS-MG uređaja (slika 1.) sastoji se od tri osnovna segmenta: S1) metalni bazni prsten s fiksnim bočnim vertikalnim potpornim sustavom koji pruža oslonce za komponente trošenja energije (engl. *Energy Dissipation* - ED) i



Slika 1. Prototip projektiranog i izrađenog HS-MG uređaja: 1. donji prsten za pričvršćivanje; 2. bočni vertikalni nosači; 3. HS-komponente na razini-L1; 4. HS-komponente na razini-L2; 5. potporne naprave koje omogućavaju ograničene pomake; 6. gornja prstenasta ploča; 7. središnji zglobni oslonac; 8. središnji uređaj za aktiviranje; 9. gornja ploča za pričvršćivanje

omogućava ograničene pomake; S2) adekvatno oblikovan središnji zglobni oslonac sa sustavom za aktiviranje ED komponenti i S3) horizontalne HS-MG komponente trošenja energije ravnomjerno raspoređene na dvije razine. Aktivacija i odziv uređaja daje povoljne učinke u slučaju čestih slabijih potresa, značajnog broja jačih i mogućih vrlo jakih i razornih potresa.

Prototip uređaja za trošenje energije HS-MG stvoren je kroz poseban proces projektiranja koji osigurava dosljedne karakteristike svih sastavnih dijelova. Navedena specifična svojstva osmislene HS-MG jedinice, koja je izrađena i korištena u ispitivanju modela mosta na potresnom stolu jesu sljedeća:

a) Donja ploča sa sustavom bočnih potpora

Donji segment konstrukcije sastoji se od krutog metalnog osnovnog prstena (1) na slici 1., promjera 780 mm, širine 155 mm i debljine 25 mm, u koji je učvršćeno osam čvrstih šesterokutnih metalnih bočnih vertikalnih nosača (2) na slici 1., visine 220 mm i poprečnog presjeka oblikovanog na temelju dimenzije 65,0 mm, koja predstavlja razmak između dviju paralelnih stranica presjeka. Ti osmerokutni vertikalni nosači na gornjem su kraju spojeni na metalnu prstenastu ploču (6) također promjera 780 mm, debljine 10,0 mm i širine 85 mm. Metalni bočni vertikalni nosači imaju otvore na dvije razine, i to prvih osam na razini-1 i drugih osam na razini-2, kroz koje se učvršćuju posebne potporne naprave (5) na slici 1. Na taj način omogućena su tri načina oslonca HS komponenti za trošenje energije (ED), uključujući: c) oslonac bez mogućnosti pomaka; d) oslonac s pomakom-G1 i e) oslonac s pomakom-G2, slika 2.

b) Središnji sustav za aktiviranje

Segment gornje konstrukcije uređaja HS-MG formiran je od središnjeg kružnog metalnog elementa promjera 90 mm i visine 200 mm. S gornje strane središnji kruti element pričvršćen je na kvadratnu metalnu završnu ploču s otvorima dimenzija 400 x 400 mm i debljine 20 mm. Ta ploča služi za fiksiranje središnjeg

elementa (koji predstavlja krutu konzolu) na gornju izoliranu konstrukciju. Na odgovarajućim visinama razine-1 i razine-2 izvedeni su odgovarajući nosači oko središnjeg elementa koji je formiran zavarivanjem dva šuplja metalna prstena s bočnim promjerom od 182 mm, debljine 12 mm. Oba imaju osam otvora koji čine zglobne oslonce. Na svakoj razini pravilno je raspoređeno osam potpornih naprava koje su povezane bez mogućnosti pomaka (zglobni nosači) za horizontalne S-komponente trošenja energije HS-MG. Opisani prvi segment uređaja HS-MG fiksiran je na donji segment konstrukcije mosta preko svoje donje ploče. Drugi

konstrukcijski segment uređaja HS-MG je fiksiran na gornju potresno izoliranu AB ploču modela mosta preko svoje krajnje metalne ploče;

c) Horizontalne HS komponente trošenja energije

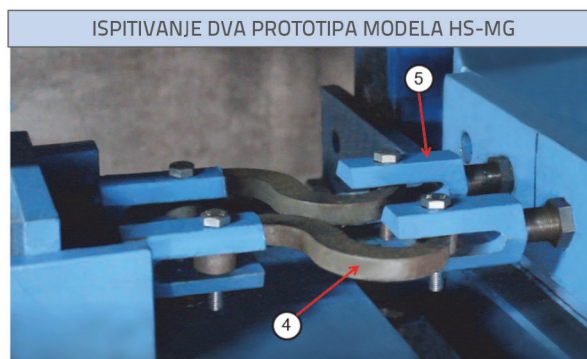
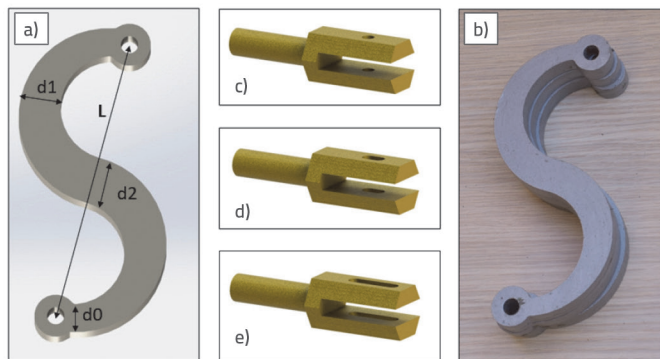
Između dva osnovna segmenta (a) i (b), na obje razine uređaja, postavljen je niz od osam komponenti za trošenje energije HS-MG, prikazanih na slici 1. (lijevo i desno), slici 2. i tablici 1. Njihovi oslonci prema središnjem dijelu mehanički su izrađeni u obliku idealnog zgloba bez mogućnosti pomaka. Međutim, vanjski nosači C-profila posebno su projektirani i izrađeni, slika 2. (d i e), kako bi se osigurao navedeni početni pomak od $G1 = 5,5$ mm na razini-L1 i početni pomak od $G2 = 18,5$ mm na razini-L2, s obje strane od razmatranog početnog položaja pomičnih čeličnih trnova. Čini se da je puni pomak na obje strane dvostruk, u oba razmatrana slučaja. Integracijom tri segmenta sastavljen je originalni kompaktni uređaj za trošenje energije HS-MG.

Osmisljena konstrukcija takvog specifičnog sustava za trošenje energije zapravo je pokazala osiguranu specifičnu sposobnost da se prilagodi i aktivira ovisno o intenzitetu potresa, nakon sukcesivne aktivacije HS-MG komponenti ugrađenih s različitim veličinama mogućeg pomaka.

Projektirano je i izrađeno ukupno šest različitih prototipova horizontalnih komponenata S-oblika za trošenje energije (HS-MG). Oni su razvrstani u dvije skupine prema rasponu središta otvora njihovih oslonaca od 180 mm i 150 mm. Prototipni modeli komponenti za trošenje energije HS-MG projektirani su tako da imaju dvostruke polukružne forme i da se proizvode

Tablica 1. Prototipovi modela HS-MG komponenti

Br.	Oznaka	L [mm]	d_0 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	n
1	HS-1,1	180	18,0	25,0	30,0	25
2	HS-1,2	180	12,0	18,6	23,0	25
3	HS-1,3	180	12,0	15,0	23,0	25
4	HS-2,1	150	18,0	25,0	30,0	25
5	HS-2,2	150	12,0	18,6	23,0	25
6	HS-2,3	150	12,0	16,0	23,0	25



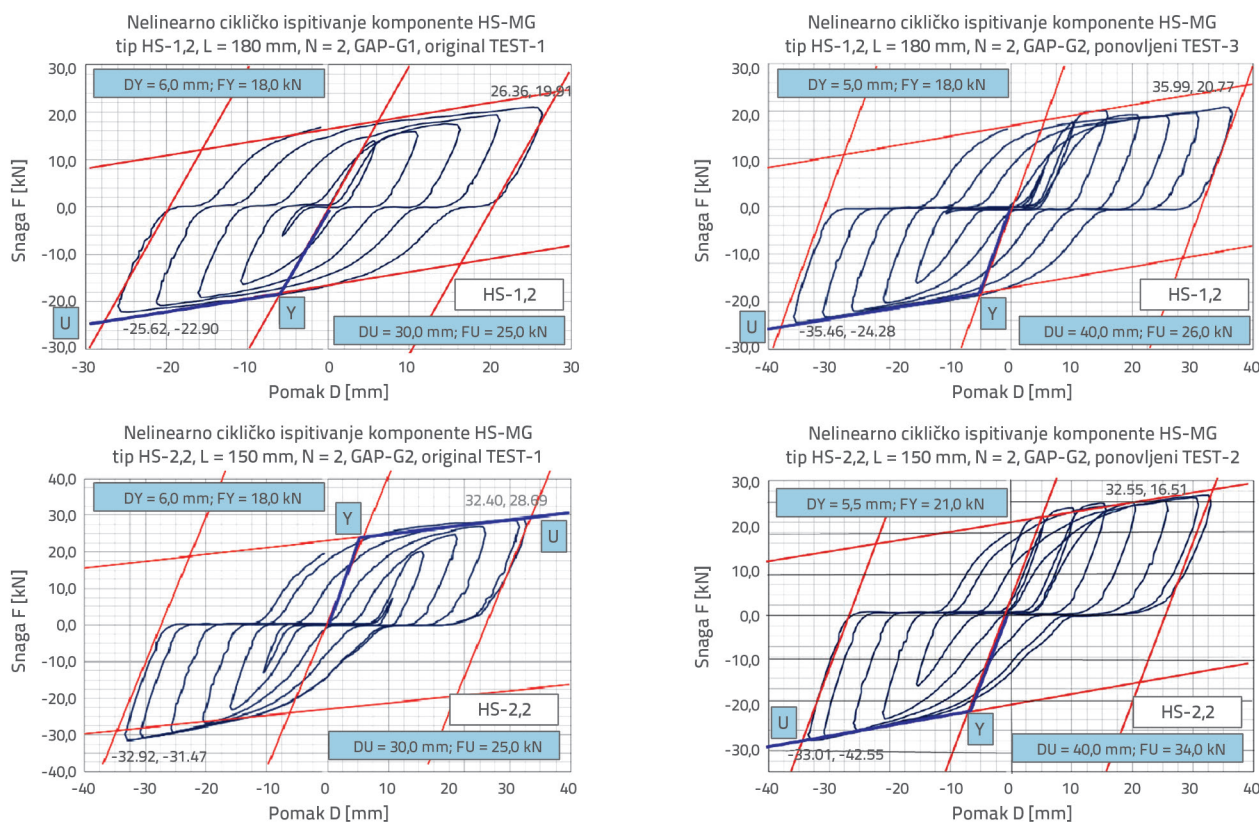
Slika 2. Parametri konstruiranih i ispitanih komponenti prototipa HS-MG: HS-MG komponente i potporni uređaji (lijevo) i Ispitna postavka za testiranje dva prototipna modela HS-MG (desno)

od duktilnog lima debljine 15,0 mm. Usvojena je promjenjiva visina poprečnog presjeka s obzirom na manju dimenziju d_0 u blizini otvora i uključujući pravilno povećane dimenzije d_0 , d_1 i d_2 uzduž polukružnih lukova (slika 2.). Broj proizvedenih primjeraka svakog modela prototipa bio je prilično velik ($n = 25$) kako bi se omogućila realizacija planirane serije ispitivanja komponenti i uređaja s obzirom na različite omogućene pomake i uvjete ispitivanja. Za oblikovanje složenih oblika komponenti HS-MG usvojena je precizna tehnologija za uklanjanje hrapavosti površine i izbjegavanje mogućeg loma tijekom njihove višeciklične tlačne i vlačne deformacije. Naime,

tijekom proizvodnog procesa korišten je CNC stroj za računalno oblikovanje forme, a precizno rezanje izvedeno je tehnologijom "vodenog mlaza" s vrlo malom brzinom čime je osigurana visoka preciznost i kontinuitet područja poprečnih presjeka.

3.2. Ispitivanje HS-MG uređaja

Prije implementacije HS-MG uređaja u model mosta koji se koristi za ispitivanje na potresnom stolu, izvedeni prototipovi ispitani su pod kvazistatičkim cikličnim opterećenjima. Kvazistatička ispitivanja uključivala su ciklična ispitivanja:



Slika 3. Odziv ispitanih karakterističnih tipova komponenti HS-MG: (1) Komponenta HS-1,2 ispitana s pomakom G1 i pomakom G2 (gore); (2) Komponenta HS-2,2 ispitana s pomakom G2 (dolje)

- DSRI B uređaja za potresnu izolaciju
- odabranih komponentata uređaja za trošenje energije.

Za sva kvazistatička ispitivanja korišteno je ciklično opterećenje pomakom s rastućim amplitudama, slika 2. (desno). Svaka komponenta HS-MG testirana je dva ili tri puta. Prvi test oznake TEST-1 je nazvan originalnim testom, a testovi oznake TEST-2 i TEST-3 predstavljaju ponovljena ispitivanja.

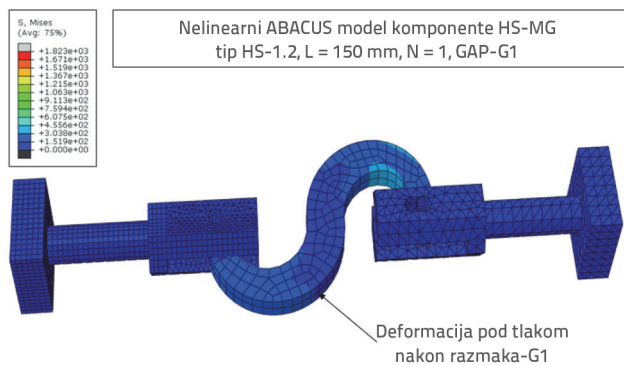
Za ispitivanje šest HS-MG komponentata pod cikličnim opterećenjima, simulirajući pomak G1 (GAP-G1) i pomak G2 (GAP-G2), korišteno je dvanaest komponenti. Predviđenom realizacijom izvornih i ponovljenih ispitivanja svake komponente, ukupno su napravljena 24 nelinearna ciklična ispitivanja. Nakon obrade i iscrtavanja velike količine podataka snimljenih za vrijeme provođenja testova, u svim je slučajevima uočen visok kapacitet trošenja energije. Slika 3. prikazuje eksperimentalno dobivene tipične histereze dviju testiranih komponenti HS-MG. Glavni parametri koji kontroliraju odzive u oba slučaja vrlo su slični. U slučaju ispitivane komponente tipa HS- 1,2, u oba slučaja nije bilo razlike u sili tečenja, dok su pomaci pri tečenju neznatno varirali. Donji dio slike 3. usporedno predstavlja izvorne odzive dobivene iz provedena dva nelinearna ciklična testa iste komponente tipa HS-2,2, najprije ispitane sa simuliranim pomakom G2, a zatim ponovno ispitane s istim simuliranim pomakom G2 (ponovljeno ispitivanje). Dobiveni glavni parametri koji kontroliraju odzive u oba slučaja također su bili vrlo slični. Razlika u sili tečenja bila je manja od 9 %, a zabilježeni pomaci pri su tečenju bili slični. Iz provedenog izvornog eksperimentalnog istraživanja mogu se izvući važna opažanja i zaključci:

- Opaženi odziv komponenti HS-MG djeluje prilično stabilan, ukazujući na gotovo nepromijenjene kontrolne parametre tijekom punih nizova ponovljenih ciklusa
- Rezultirajući oblik histereze bio je izrazito modificiran prema veličini simuliranog cikličnog odziva sustava s pomakom
- Potvrđeno je da se nelinearni ciklični odgovor može vrlo dobro analitički prikazati bilinearnim modelom
- Kompaktni HS-MG uređaj pokazao je napredno, prilagodljivo nelinearno ponašanje, s velikom sposobnošću trošenja energije.

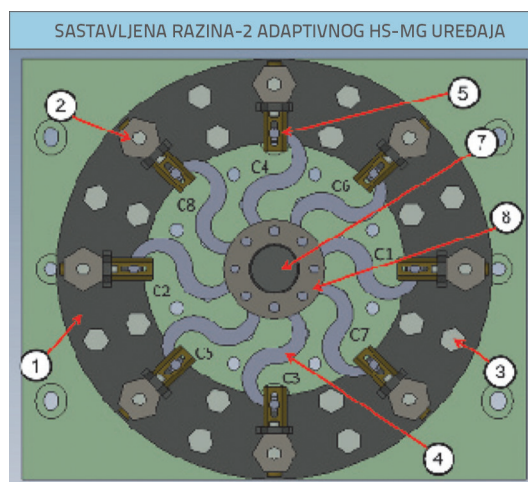
4. Detaljno modeliranje komponenti prototipa HS-MG

Analitička simulacija specifičnog odziva komponenti prototipa HS-MG koji omogućava ograničene pomake predstavljala je važan korak istraživanja. Slijedeći navedene važne ciljeve, provedeno je programirano, specifično ciljano istraživanje temeljeno na implementiranom preciznom (mikro) modeliranju, primjenjivo za realnu simulaciju nelinearnog odziva inovativnih prototipova HS-MG komponenti (slika 4.).

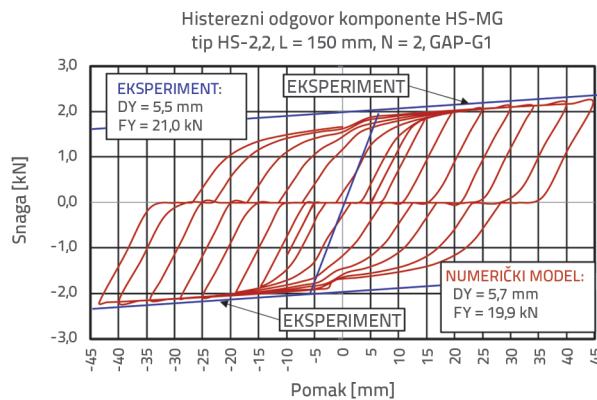
Čelik klase S355 modeliran je volumnim elementima uzimajući u obzir bilinearni kinematički model očvršćivanja materijala. Za linearnoelastičnu domenu razmatran je modul elastičnosti $E1 = 200 \text{ GPa}$ i Poissonov koeficijent $\nu = 0,3$.



Slika 4. Formulirani detaljni 3D Abacus model komponente za trošenje energije HS-MG tipa HS-2,2 s razmakom G1



Slika 5. Tipična ugradnja ED komponenti s razmakom G1 na razini-2



Slika 6. Izračunani teorijski odziv komponente HS-2,2 pod simuliranim cikličnim opterećenjima i pomakom G1, u usporedbi s eksperimentalno određenim linijama envelope

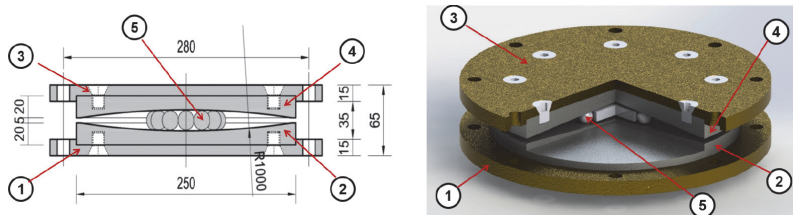
Naprednim oblikom s omogućenim pomacima svake komponente HS-MG osigurani su uvjeti za učinkovito kontroliranje kapaciteta trošenja energije u proizvoljnom smjeru. Takve izvorne, vrlo važne karakteristike učinkovito su aktivirane u kompaktnom uređaju s korištenim nizom radialno razmaknutih HS-MG komponenti, koje predstavljaju bitan dio

trošenja energije bilo kojeg sastavljenog višesmjernog uređaja i s unaprijed definiranim mogućim pomacima u dvije razine (slika 5.). Detaljni 3D matematički model (slika 4.) formuliran je u Abacusu za HS-MG komponentu tipa HS-2,2 s pomakom G1. Zadavanjem stvarnih karakteristika materijala, kao i kreiranjem kalibriranog modela s dobrom diskretizacijom, stvoreni su uvjeti za rješenje visoke preciznosti. Općenito, ako se uspoređi s izvornim eksperimentalnim rezultatima, uočene su prilično male razlike, koje su u rasponu od 2 do 7%. S primijenjenim nelinearnim mikromodelom analizirane su specifične komponente prototipa s obzirom na različite omogućene pomake G1 i G2. Primjer rezultirajućeg odziva sustava s omogućenim pomakom numerički izračunanog za HS-MG komponentu trošenja energije tipa HS-2,2 pod simuliranim cikličnim opterećenjima, u skladu s unaprijed definiranim protokolom pomaka i bočnim osloncem s pomakom G1, prikazan je na slici 6, zajedno s usporednim bilinearnim linijama anvelope dobivene iz provedenog eksperimentalnog reverznog cikličnog testa. Uočene razlike između eksperimentalnog i numerički dobivenog rezultata su očito beznačajne.

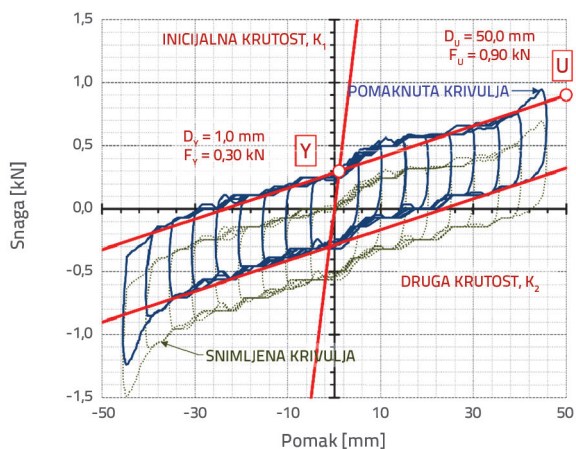
5. Uređaji za izolaciju i ograničavanje pomaka

5.1. Ispitivanje DSRIB izolacijskih uređaja

Sadašnji izolacijski sustav korišten za eksperimentalni GHS model mosta sastavljen je korištenjem razvijenih modela dvostrukih sfernih kotrljajućih izolacijskih ležajeva (DSRIB) s dvije sferne površine velikog radijusa (slika 7.).



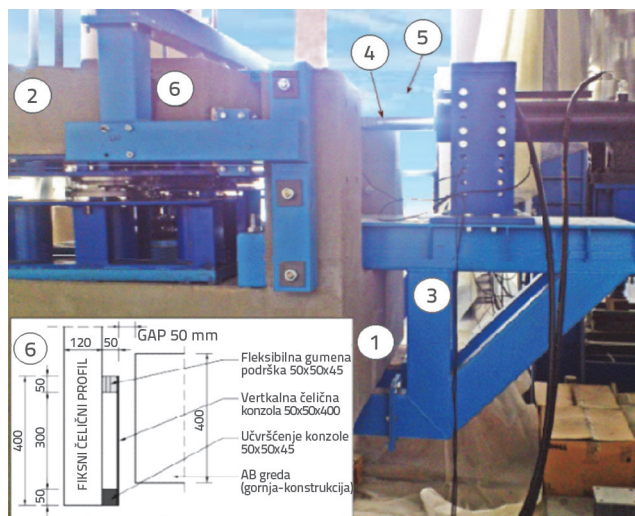
Slika 7. Elementi izrađenih i korištenih prototipova DSRIB uređaja



Slika 8. Tipičan odziv DSRIB uređaja

DSRIB uređaji su izvorno projektirani, izrađeni i korišteni u istraživanju autora Ristica i suradnika iz 2017. [35]. Ispunjeni su prethodno postavljeni ciljevi za projekt i izvedbu uređaja:

- vrlo male horizontalne reakcije i sile trenja (dosežu maksimalno 4,2 % vertikalnog opterećenja)
- postignuto je stabilno histerezo ponašanje u cijelom rasponu velikih pomaka (slika 8).



Slika 9. DLD i pozicija pobuđivača

5.2. Uređaji za ograničenje pomaka

Implementirani DL sustav, u modelu, sastojao se od četiri ugrađena uređaja za ograničenje pomaka u obliku kratkih fleksibilnih čeličnih konzola poduprtih gumenim blokom (slika 9. dio 6), koji djeluju kao graničnici, Ristic i suradnici 2021. [36]. U praksi, novi posebno projektirani gumeni odbojnici mogu biti napredno rješenje.

6. Ispitivanja velikog GHS modela mosta na potresnu pobudu

6.1. Izrada modela prototipa GHS mosta

Projektiranje i izvedba testnog modela inovativnog prototipa mosta GHS predstavljali su složen i specifičan proces, posebno usmjeren na osiguranje uvjeta za realnu eksperimentalnu simulaciju unaprijed definiranih važnih zahtjeva ispitivanja. Tri osnovna skupa podataka, uključujući (a) glavne karakteristike GHS modela mosta; (b) dostupnu veličinu potresnog stola i (c) implementirani sustav za mjerenje GHS modela mosta, prikazani su u [36, 37]. Za potrebe ovog istraživanja korišteni su izvorno izvedeni veliki AB segmenti donjeg i gornjeg ustroja. Novi ispitni model GHS mosta, primjenjen u ovom radu sastavljen



Slika 10. Model prototipa GHS mosta: (1) lijevi krajnji oslonac; (2) desni krajnji oslonac; (3) oslonac iznad kraćih stupova; (4) oslonac iznad viših stupova; (5) potporna konstrukcija pobuđivača; (6) pobuđivač; (7) oslonac za DL uređaje; (8) računalo koje kontrolira ciklična ispitivanja

je ugradnjom novostvorenog inovativnog HS-MG uređaja za trošenje energije. Slijedi kratak opis osnovne geometrije GHS modela, glavnih karakteristika modela i usvojenog sustava za mjerenje kako bi se mogli uspješno pratiti dobiveni rezultati ispitivanja.

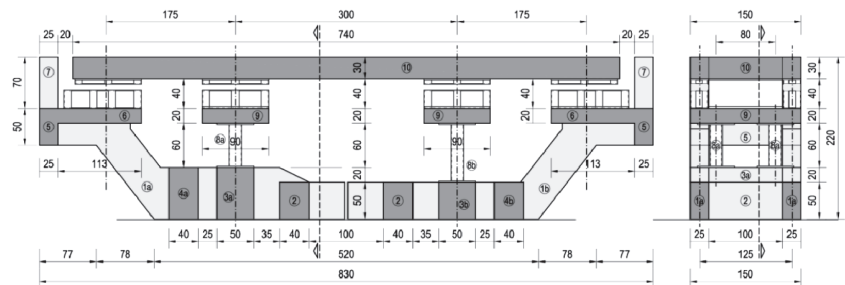
Slijedeći specifične ciljeve istraživanja, odabran je uobičajeni prototip mosta s tri raspona koji ima dva kruta upornjaka i dva fleksibilna srednja stupa. Ukupna duljina odabranog prototipa mosta bila je $L = 15,75 + 27,00 + 15,75 = 58,50$ m. Razmatrana su dva para srednjih stupova različite visine, $h_1 = 9,50$ m i $h_2 = 11,70$ m, simulirajući njihovu različitu krutost. Rasponski sklop sastojao se od krute AB ploče, koja je namjerno postavljena na odgovarajuću udaljenost od donjeg ustroja kako bi se smjestili sastavni uređaji ispitnog modela. Rasponski sklop mosta oslanjao se preko pomičnih ležajeva na upornjake, a na srednje stupove preko zglobnih ležajeva. Za potrebe ispitivanja na potresnom stolu eksperimentalni testni model GHS mosta projektiran je kao geometrijski umanjen u odnosu na odabrani prototip mosta. Što se tiče dimenzija potresnog stola, njegove nosivosti i odgovarajućih karakteristika, usvojen je geometrijski faktor mjerila, $I_r = 1 : 9$. Kako bi se očuvala sličnost modela, sve druge karakteristike povezane s dinamičkim testovima trebalo je pravilno skalirati. Uzimajući u obzir važne čimbenike koji su razmatrani, kombinirani model prave replike – simulacija umjetne mase usvojen je kao najprikladniji. Faktori skaliranja za različite fizičke veličine definirani su kao funkcija geometrijskog faktora mjerila, prema zakonu sličnosti [38]. Slijedeći karakteristike odabranog prototipa mosta i uzimajući u obzir projektne

parametre, eksperimentalni GHS model mosta projektiran je tako da u najvećoj mogućoj mjeri reflektira realne uvjete [35, 39-40]. Model mosta (slike 10. i 11.) zapravo predstavlja konstrukciju koja ima krute upornjake i fleksibilne srednje stupove. Također, model se može koristiti kao jednorasponska konstrukcija, kada srednji stupovi nisu uzeti u obzir. Upornjaci i segment donjeg ustroja projektirani su kao robusni AB elementi. Srednji stupovi od čeličnih cijevi predstavljali su stupove različite krutosti. Prikazana je testirana opcija modela mosta s jednim rasponom, kad nije uključen učinak srednjih stupova. Rasponski sklop modela mosta izveden

je kao kruta ploča čija je ukupna visina prikladno povećana kako bi se omogućila simulacija ukupne mase i velikih generiranih inercijalnih sila. Ukupna duljina donjeg ustroja modela iznosila je 8,30 m. Ukupna širina konstrukcije je bila 1,50 m.

Na oba kraja bile su razmaknute AB ploče, koje su davale dovoljno prostora za ugradnju parova DSrib izolatora i novih HS-MG uređaja za trošenje energije između njih, kao što je prikazano na slici 12.

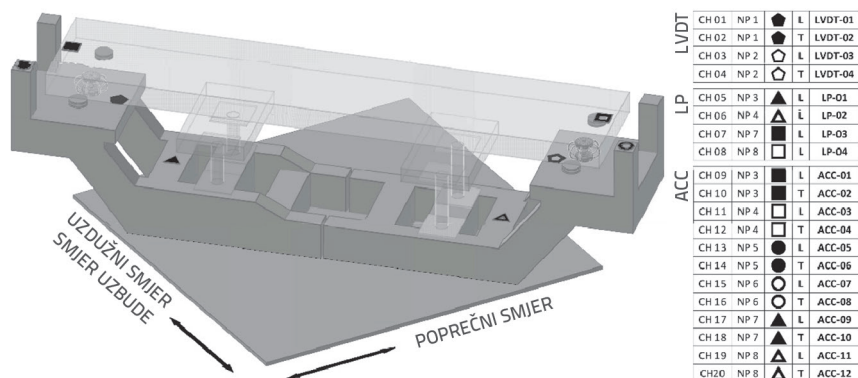
Uređaji za ograničavanje pomaka (DL) projektirani su u obliku vertikalnih čeličnih konzola duljine 400 mm učvršćenih na donjem kraju i poduprtih gumenim blokom 50/50 mm na gornjem kraju (shematski prikazano na slici 9., dio 6). DL uređaji postavljeni su na razmake od 50 mm od AB rasponskog sklopa kako bi se



Slika 11. Uzdužni i poprečni presjeci GHS modela mosta

POLOŽAJI UREĐAJA ZA ISPITIVANI JEDNOPASNI MODEL MOSTA BM-HS-MG					
	1	FREE SHORT MIDDLE PIERS	FREE LONG MIDDLE PIERS	3	
	A			B	
	2			4	

Slika 12. Pozicije DSrib uređaja (1 do 4) i novih HS-MG uređaja (A i B)



Slika 13. Točke prikupljanja podataka sa senzorima i kanalima za snimanje

spriječili razorni učinci potencijalnih prekomjernih pomaka. Svi čelični dijelovi izrađeni su u umanjenom mjerilu pomoću čelika S355, a za konstrukciju svih AB dijelova izgrađenog modela mosta služio je beton C25/30.

Postojeći potresni stol u laboratoriju je kvadratnog oblika (5,0 x 5,0 m). Potresna pobuda se može zadati i u horizontalnom i u vertikalnom smjeru. Kako bi se model GHS mosta u velikom mjerilu prilagodio za ispitivanja na potresnu pobudu, njegova uzdužna os postavljena je duž dijagonale potresnog stola (slika 10). Na taj način omogućeno je generiranje potresnih sila u uzdužnom i poprečnom smjeru modela mosta. Testni model mosta sastavljen je na potresnom stolu i opremljen definiranim mjernim uređajima. Za ispitivanje GHS sustava, rasponski sklop modela je oslonjen na četiri DSRIB izolatora raspoređena na dva upornjaka (koristeći dva para uređaja, slika 12. (1 do 4)). Isključivši srednje stupove, ispitan je model mosta s jednim rasponom. Dva HS-MG uređaja (A i B) postavljena su na odgovarajućim položajima na upornjacima, slika 12. Kako bi se osiguralo prikupljanje svih potrebnih podataka tijekom dinamičkih ispitivanja, ugrađen je dobro osmišljen sustav za mjerenje. Sastojao se od sljedeća tri različita tipa senzora, slika 13. Integralni sustav za mjerenje je već prije korišten i detaljno prikazan [35]. Za potrebe ovog eksperimentalnog istraživanja usvojen je i uspješno korišten identičan sustav.

Četiri pretvornika tipa LVDT korištena su za bilježenje relativnih pomaka između donjeg i gornjeg ustroja u vremenu. Četiri pretvornika tipa LP (linearni potencijometar) korištena su za mjerenje apsolutnih pomaka modela učvršćivanjem jednog njegovog kraja na fiksne točke (izvan potresnog stola). Dvanaest senzora tipa ACC (senzora ubrzanja) korišteno je za bilježenje ubrzanja u uzdužnom i poprečnom smjeru odabranih šest karakterističnih točaka modela u vremenu.

6.2. Ispitivanje GHS modela mosta na potresnom stolu

a) Sastavljanje modela

Inovativni model prototipa GHS mosta prikazan na slici 12. posebno je sastavljen, uključujući četiri DSRIB izolacijska uređaja, dva nova HS-MG uređaja za trošenje energije i četiri uređaja za

ograničavanje pomaka (DLD), slika 9. Izrađeni uređaji za trošenje energije HS-MG sastavljeni su s ugradnjom naprijed odabranih odgovarajućih prototipova komponenti za trošenje energije tipa HS-1.2, tablica 1. Odabrane HS-MG komponente ugrađene su na dvije razine uzimajući u obzir dva različita naprijed definirana pomaka veličine $G1 = 5,0$ mm odnosno $G2 = 18,0$ mm. Što se tiče zakona sličnosti modela, konačan set HS-MG uređaja nastao je odgovarajućom ugradnjom četiri, radijalno raspoređene komponente tipa HS-1.2, na svakoj razini, slika 12.

b) Ispitivanja na kratkotrajnu harmonijsku pobudu

S provedenim dinamičkim testovima na kratkotrajne harmonijske pobude (engl. *sine sweep test*), 0,02g i 0,05g, koje pokrivaju raspon frekvencija (1 do 35 Hz) i korištenjem dostavljenih izvora podataka, definirani su:

- početni temeljni vlastiti period od $T_0 = 0,522$ s, što odgovara slučaju modela mosta samo s instaliranim DSRIB uređajima. Instalirani HS-MG uređaji nisu aktivirani zbog omogućenih pomaka
- prigušenje koje iznosi između 3,0 i 3,5 %.

c) Usporedno ispitivanje

Kako bi se procijenio doprinos HS-MG uređaja za trošenje energije, most je najprije ispitan samo s instaliranim DSRIB izolatorima, na pobudu potresnim zapisom El Centro skaliranim na $PGA = 0,81$ g (PGA - *peak ground acceleration* tj. vršno ubrzanje tla). Usporedni relativni pomaci zabilježeni pod jednakim uvjetima ispitivanja za sustav sastavljen s HS-MG uređajem i bez njega prikazani su na slici 15. Može se primijetiti da je model mosta s ugrađenim HS-MG uređajima zapravo predstavljao vrlo dobru opciju poboljšanja. Na primjer, za sustav samo s potresnom izolacijom dobiven je neprihvatljiv relativni pomak od $De = 42,34$ mm. Međutim, s obzirom na GSH sustav s novim HS-MG uređajima, relativni pomak smanjen je na potpuno kontroliranu vrijednost od $Dc = 21,97$ mm, što predstavlja značajno smanjenje od 48,1 %. Prekomjerni odziv zabilježen za model mosta samo s izolacijom, zapravo je pokazao njegovo kritično stanje, s obzirom na to da je granični pomak potresnih izolatora bio 40,0 mm.

d) Kratak prikaz uvjeta ispitivanja i odabranih rezultata

d-1) Potresna pobuda

Ispitivanja novog modela GHS mosta provedena su upotrebom četiri odabrana realna potresna zapisa. Međutim, kako bi se dobili reprezentativni eksperimentalni podaci, jaki intenziteti potresa uzeti su u obzir u svim slučajevima ispitivanja. Visoki intenziteti ulazne potresne pobude generirani su s obzirom na visoke vrijednosti vršnih ubrzanja tla u iznosu od $PGA = 0,81$ g

Tablica 2. Maksimalni relativni pomaci zabilježeni iz četiri originalna ispitivanja GHS modela mosta

Br.	O-T1: C-El-Centro, PGA = 0,81g			O-T2: C-Petrovac, PGA = 0,77g		
	Channel	Dmax (-) [mm]	Dmax (+) [mm]	Channel	Dmax (-) [mm]	Dmax (+) [mm]
1	LVDT-03	-21,97	18,91	LVDT-03	-12,50	19,59
2	LVDT-04	-6,33	4,15	LVDT-04	-5,88	7,60
Br.	O-T3: C-Landers, PGA = 0,70g			O-T4: C-Northridge, PGA = 0,98g		
	Channel	Dmax (-) [mm]	Dmax (+) [mm]	Channel	Dmax (-) [mm]	Dmax (+) [mm]
1	LVDT-03	-21,46	21,76	LVDT-03	-19,40	25,58
2	LVDT-04	-2,07	17,95	LVDT-04	-6,40	7,16

za zapis El Centro (1940.), PGA = 0,77g za zapis Petrovac (Crna Gora, 1979.), PGA = 0,70g za zapis Landers i PGA = 0,98g za zapis Northridge. Slijedeći zakon sličnosti, izvorni potresni zapisi vremenski su komprimirani za vremenski faktor od 1/3, kao kvadratni korijen od Ir.

d-2) Prikupljanje podataka

Zbog složenosti ispitivanja, opsežne datoteke eksperimentalnih podataka zabilježene su iz svakog kanala za prikupljanje podataka. Integralni sustav za bilježenje podataka uključivao je cijeli set od 20 kanala sa sensorima prema planu instrumentacije modela, a dodatni senzori koriste se za potpuno upravljanje potresnim stolom. Uz tako opsežan mjerni sustav i precizno uzorkovanje podataka iz svakog ispitivanja, zabilježeno je oko 5 milijuna numeričkih vrijednosti. Proces testiranja, koji je sadržavao devet ispitivanja, završen je vrlo uspješno i svi senzori kontinuirano su davali točne i potpune eksperimentalne zapise. Reprezentativni rezultati koji pokazuju stvarni odziv sustava su odabrani, prezentirani i raspravljeni.

d-3) Relativni pomaci

Relativni vršni pomaci, uključujući pozitivne i negativne vrijednosti, zabilježeni iz ispitivanja GHS sustava pod simuliranim potresnim zapisima El-Centro, Petrovac, Landers i Northridge prikazani su u tablici 2. Usporedno, slika 14. lijevo prikazuje zabilježene relativne pomake u vremenu rasponskog sklopa u uzdužnom (L) smjeru i poprečnom (T) smjeru tijekom ispitivanja provedenih simulacijom jakih potresnih zapisa El-Centro, Petrovac i Northridge, redom. S obzirom na prikazane eksperimentalne rezultate, dana su sljedeća važna zapažanja:

- zabilježeni pomaci u L smjeru (smjer pobude potresa) su dominantni
- zabilježeni pomaci u T smjeru okomitom na potresnu pobudu su mali i beznačajni
- apsolutni maksimum zabilježenog relativnog pomaka koji iznosi $D_{max} = 25,58$ mm bio je ispod kritičnog (dopuštenog) relativnog pomaka potresnih izolatora koji iznosi $D_a = 40,0$ mm
- općenito, odziv sastavljenog GHS sustava koji je dvaput ispitan na potresnu pobudu pokazao se vrlo sličnim.

Prikazani su izvorni rezultati iz provedenog izvornog niza testova-1 (O-Ti u tablici 2.). Posljedično, serija ponovljenih ispitivanja-2 (nije prikazana) realizirana je korištenjem ista četiri potresna zapisa. Uočene su samo male, zanemarive razlike u maksimalnim pomacima.

d-4) Ubrzanja

Reprezentativna vršna ubrzanja zabilježena sensorima ACC-01, ACC-03 i ACC-05 u L-smjeru, tijekom ispitivanja GHS modela provedenih pod simuliranim potresnim zapisima El-Centro i Petrovac prikazana su u tablici 3. Senzori ACC-01 i ACC-03 nalazili su se na lijevom i desnom kraju rasponskog sklopa, dok je ACC-05 bio razmaknut na segmentu donjeg ustroja, slika 13. Nadalje, slika 14. desno prikazuje zabilježena ubrzanja u vremenu na ACC-03 u uzdužnom smjeru i ACC-04 u poprečnom smjeru tijekom testova provedenih simulacijom jakih potresa El-Centro, Petrovac i Northridge, redom. S obzirom na prikazane rezultate, ponovno je potvrđeno sljedeće:

- prikazana ubrzanja u vremenu zabilježena na rasponskom sklopu u L-smjeru bila su dominantna
- zabilježena ubrzanja na donjem ustroju i u T-smjeru bila su manja i u očekivanom rasponu
- novi GHS sustav pokazao je odgovarajuću održivost jer su parametri odziva zabilježeni tijekom izvornih testova-1 i ponovljenih testova-2 bili prilično slični
- prikazane vrijednosti DAF-a (faktora amplifikacije) koje su prikazane u tablici 3. pokazuju povoljan i dosljedan odziv. Dobiveni odnosi između maksimalnog odziva i vršnog ulaznog ubrzanja ($DAF = MaxA/PGA$) unutar su očekivanih raspona u svim slučajevima.

d-5) Apsolutni pomaci

Zabilježeni apsolutni pomaci (u L -smjeru) pomoću LP senzora, instaliranih na segmentima donjeg i gornjeg ustroja, dokazali su da je potpuni proces upravljanja potresnim stolom uspješno postignut u svim realiziranim slučajevima ispitivanja.

d-6) Poboljšanje sustava

Općenito, novi GHS sustav mosta pokazao je sigurno i vrlo povoljno ponašanje pri jakim potresnim pobudama.

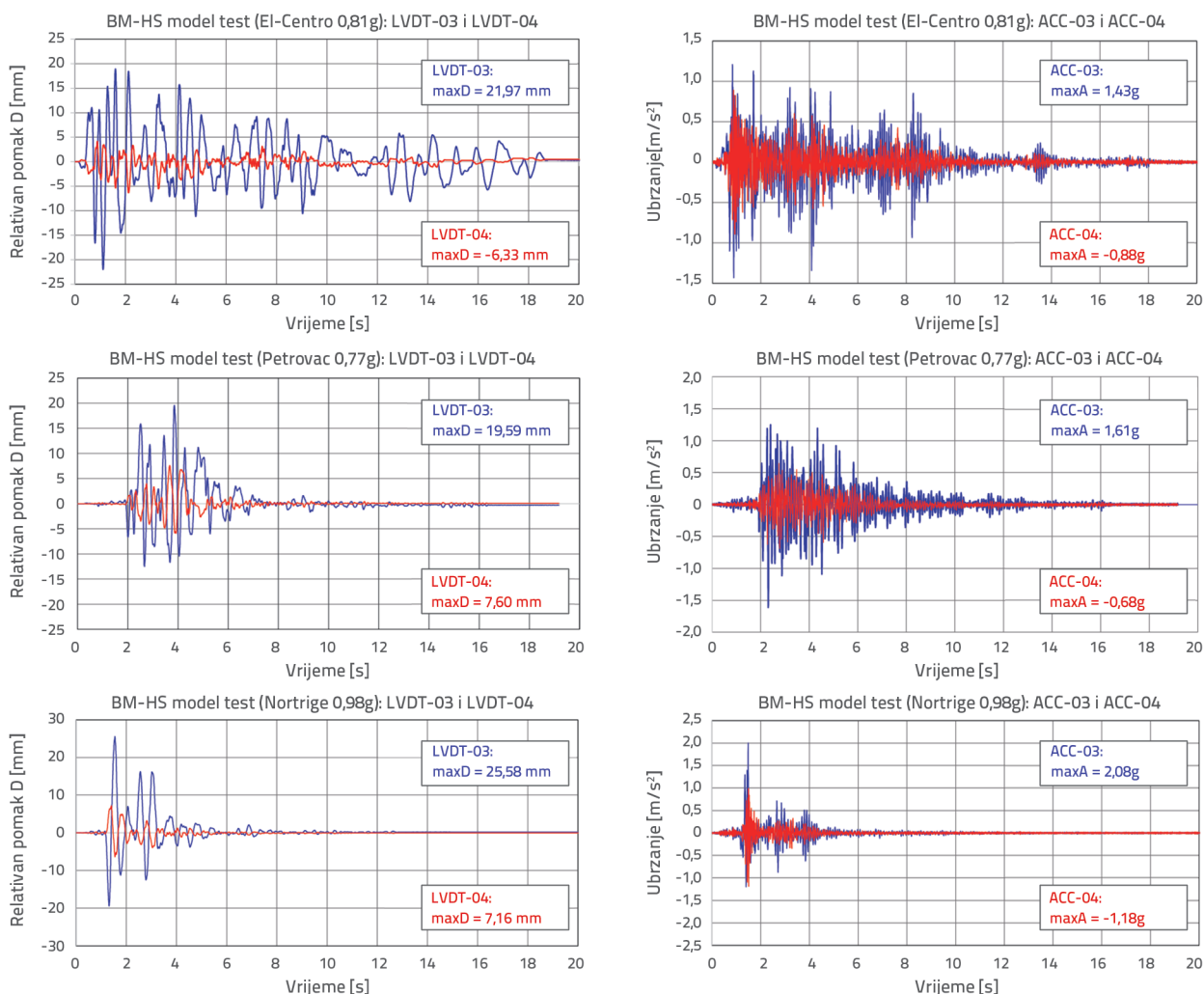
Tablica 3. Zabilježena maksimalna ubrzanja tijekom testiranja originalnog GHS modela provedenog pod simuliranim jakim potresnim zapisima El-Centro i Petrovac

Br.	O-T1: C-El-Centro, PGA = 0,81g					O-T2: C-Petrovac, PGA = 0,77g				
	Channel	MaxA g (-)	DAF	MaxA g (+)	DAF	Channel	MaxA g (-)	DAF	MaxA g (+)	DAF
1	ACC-01	-1,03	1,27	0,88	1,08	ACC-01	-0,71	0,92	0,73	0,94
2	ACC-03	-1,43	1,76	1,20	1,48	ACC-03	-1,61	2,09	1,24	1,61
3	ACC-05	-0,86	1,06	0,77	0,95	ACC-05	-0,54	0,70	0,53	0,68

Uzimajući u obzir obradu više od 75.000.000 snimljenih izvornih numeričkih vrijednosti dobivenih iz petnaest ispitivanja realiziranih na potresnom stolu, glavno kvalitativno poboljšanje inovativnog GHS sustava mostova nadograđenog HS-MG uređajima za trošenje energije, sažeto je na slici 15.

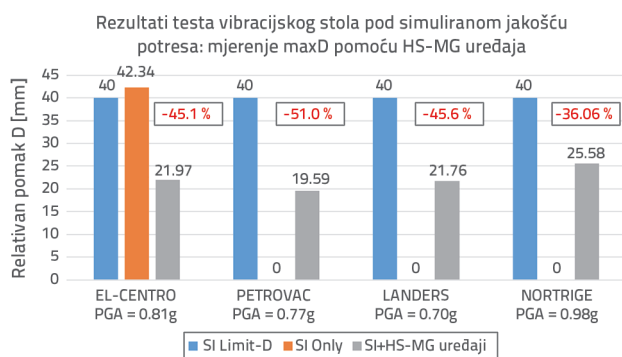
Stabilan, pouzdan i siguran odziv na potresno djelovanje primijećen je u svim slučajevima ispitivanja zahvaljujući osiguranom značajnom smanjenju maksimalnih relativnih

pomaka koji iznose 45,1 %, 51,0 %, 45,6 % odnosno 36,0 %, u slučaju simuliranog zapisa El Centro, Petrovac, Landers i Northridge. Sve zabilježene vršne vrijednosti niže su od projektom definiranog dopuštenog pomaka $Da = 40,0$ mm za potresne izolatore. Važnost poboljšanja izoliranih mostova novim HS-MG uređajima eksperimentalno je validirana i potvrđena provedenim početnim kvantifikacijskim testom modela koji je imao ugrađenu samo potresnu izolaciju. Pod simuliranim jakim potresom El-Centro, ispitani sustav



Slika 14. Maksimalni relativni pomaci rasponske konstrukcije (lijevo) i ubrzanja zabilježena pomoću ACC-03 i ACC-04 (desno) tijekom ispitivanja modela GHS provedenih pod simuliranim jakim potresnim zapisima El-Centro, Petrovac i Northridge

bez HS-MG uređaja pokazao je nepovoljan odziv zbog zabilježenog prevelikog relativnog pomaka koji iznosi $D_{max} = 42,34$ mm, slika 15. (lijevo).



Slika 15. Poboljšanje GHS sustava mostova nadograđenih HS-MG uređajima: Smanjenje maksimalnih relativnih pomaka dobivenih iz ispitivanja modela mosta pod simuliranim stvarnim jakim potresima

7. Zaključak

S obzirom na rezultate dobivene provedenim opsežnim inovativnim eksperimentalnim i analitičkim istraživanjem, izvode se sljedeći zaključci:

- Novi GHS sustav predstavlja povoljnu i eksperimentalno dokazanu opciju poboljšanja za mostove s klasičnom potresnom izolacijom. Sustav pokazuje značajnu promjenu odziva potrebnog za učinkovitu zaštitu mostova izloženih ponovljenim i vrlo jakim potresima.
- Ugrađeni DSIRB izolacijski uređaji potvrđeni su kao povoljni izolacijski ležajevi za nove GHS mostove. Međutim, druge

vrste izolacijskih ležajeva također se mogu smatrati potencijalno dobrom opcijom za primjenu.

- Razvijeni HS-MG uređaji za trošenje energije koji omogućuju ograničene pomake pokazali su vrlo dobar kapacitet trošenja energije i sposobnost stabilnog histereznog odziva pod proizvoljnom potresnom pobudom. Osim toga, novi HS-MG uređaji zadržavaju svoje karakteristike trošenja energije čak i u slučajevima intenzivnog ponovljenog cikličnog potresnog opterećenja.
- Uređaji za ograničavanje pomaka (DL) trebaju biti obvezni sastavni sustav GHS mosta za sprečavanje prekomjernih pomaka rasponskog sklopa mosta. Njihova odgovarajuća konstrukcija osigurava da se aktiviraju samo u kritičnim slučajevima vrlo jakih potresa. Njihova aktivacija omogućit će značajno poboljšanje sigurnosti mosta u slučaju kritičnih potresa.
- Odziv HS-MG komponenti i uređaja s omogućenim pomacima može se uspješno predvidjeti primjenom koncepta mikromodeliranja i primjenom bilinearnog kinematičkog modela očvršćivanja materijala.
- Ovim istraživanjem dobiveni su eksperimentalno dokazani izvori koji omogućavaju razradu odgovarajućih pravila projektiranja potrebnih za implementaciju novog GHS sustava s naprednom, kvalitativno poboljšanom potresnom zaštitom konstrukcija mostova u potresnim područjima.

Zahvala

Ovaj je rad dio NATO-va projekta Znanost za mir i sigurnost: Seizmičko poboljšanje mostova u jugoistočnoj Europi pomoću inovativnih tehnologija (SFP: 983828). Izuzetno smo zahvalni na podršci NATO-a pri realizaciji ovog inovativnog istraživanja.

LITERATURA

- [1] Kelly, J.M.: Aseismic Base Isolation: A Review and Bibliography, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 5 (1986), pp. 202-216
- [2] Kunde, M.C., Jangid, R.S.: Seismic Behavior of Isolated Bridges: A-State-of-the-art Review, Electronic Journal of Structural Engineering, 3 (2003), pp. 140-170
- [3] Turkington, D.H., Carr, A.J., Cooke, N., Moss, P.J.: Seismic design of bridges on Lead-rubber bearings, Journal of Structural Engineering, 115 (1989), pp. 3000-3016
- [4] Robinson, W.H.: Lead-Rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protecting Structures During Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10 (1982), pp. 593-604
- [5] Dolce, M., Cardone, D., Palermo, G.: Seismic Isolation of Bridges Using Isolation Systems Based on Flat Sliding Bearings, Bulletin of Earthquake Engineering, 5 (2007), pp. 491-509
- [6] Iemura, H., Taghikhany, T., Jain, S.K.: Optimum Design of Resilient Sliding Isolation System for Seismic Protection of Equipment, Bulletin of Earthquake Engineering, 5 (2007), pp. 85-103
- [7] Kartoum, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M.: Sliding Isolation System for Bridges: Analytical Study, Earthquake Spectra, 8 (1992), pp. 345-372
- [8] Wang, Y.P., Chung, L., Wei, H.L.: Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27 (1998).
- [9] Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A.: A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, Earthquake Spectra, 6 (1990), pp. 317-334
- [10] Mokha, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M.: Teflon Bearings in Seismic Base Isolation I: Testing, Journal of Structural Engineering, 116 (1990), pp. 438-454
- [11] Constantinou, M.C., Kartoum, A., Reinhorn, A.M., Bradford, P.: Sliding Isolation System for Bridges: Experimental study, Earthquake Spectra, 8 (1992), pp. 321-344
- [12] Xiang, N., Yang, H., Li, J.: Performance of an Isolated Simply Supported Bridge Crossing Fault Rupture: Shake Table Test, Earthquakes and Structures, 16 (2019) 6
- [13] Skinner, R.I., Kelly, J.M., Heine, A.J.: Hysteretic Dampers for Earthquake Resistant Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3 (1975), pp. 287-296
- [14] Guan, Z., Li, J., Xu, Y.: Performance Test of Energy Dissipation Bearing and Its Application in Seismic Control of a Long-Span Bridge, J. of Bridge Eng., 15 (2010).

- [15] Ene, D., Yamada, S., Jiao, Y., Kishiki, S., Konishi, Y.: Reliability of U-shaped Steel Dampers Used in Base-Isolated Structures Subjected to Biaxial Excitation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46 (2017), pp. 621–639
- [16] Oh, S., Song, S., Lee, S., Kim, H.: Experimental Study of Seismic Performance of Base-Isolated Frames with U-shaped Hysteretic Energy-Dissipating Devices, *Engineering Structures*, 56 (2013), pp. 2014–2027
- [17] Jiao, Y., Kishiki, S., Yamada, S., Ene, D., Konishi, Y., Hoashi, Y., Terashima, M.: Low Cyclic Fatigue and Hysteretic Behavior of U-shaped Steel Dampers for Seismically Isolated Buildings under Dynamic Cyclic Loadings, *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, 44 (2014) 10, pp. 1523–1538
- [18] Jankowski, R., Seleemah, A., El-Khoribi, S., Elwardany, H.: Experimental Study on Pounding between Structures During Damaging Earthquakes, *Key Engineering Materials*, 627 (2015), pp. 249–252
- [19] Tubaldi, E., Mitoulis, S.A., Ahmadi, H., Muhr, A.: A Parametric Study on the Axial Behavior of Elastomeric Isolators in Multi-Span Bridges Subjected to Horizontal Seismic Excitations, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14 (2016), pp. 1285–1310
- [20] Serino, G., Occhiuzzi, A.: A Semi-Active Oleodynamic Damper for Earthquake Control: Part 1: Design, Manufacturing and Experimental Analysis of the Device, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1 (2003), pp. 269–301
- [21] Kataria, N.P., Jangid, R.S.: Seismic Protection of the Horizontally Curved Bridge with Semi-Active Variable Stiffness Damper and Isolation System, *Advances in Structural Engineering*, 19 (2016) 7, pp. 1103–1117
- [22] Mayes, R.L., Buckle, I.G., Kelly, T.E., Jones, L.R.: AASHTO Seismic Isolation Design Requirements for Highway Bridges, *Journal of Structural Engineering*, 118 (1992), pp. 284–304
- [23] NHI: LRFD Seismic Analysis and Design of Bridges, Reference Manual: NHI Course No. 130093 and 130093A, National Highway Institute, U.S. Department of Transportation, 2014.
- [24] Unjoh, S., Ohsumi, M.: Earthquake Response Characteristics of Super-Multispan Continuous Menshin (Seismic Isolation) Bridges and the Seismic Design, *ISET J. of Earthquake Engineering Technology*, 35 (1998), pp. 95–104
- [25] Tian, L., Fu, Z., Pan, H., Ma, R., Liu, Y.: Experimental and Numerical Study on the Collapse Failure of Long-Span Transmission Tower-Line Systems Subjected to Extremely Severe Earthquakes, *Earthquakes and Structures*, 16 (2019) 5
- [26] UNCRD: Comprehensive Study of the Great Hanshin Earthquake, UNCRD Research Report Series No. 12, United Nations Centre for Regional Development (UNCRD), Nagoya, Japan, 1995.
- [27] NIST: The January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake: Performance of Structures, Lifelines, and Fire Protection Systems, NIST SP 901, U.S. Department of Commerce, Technology Administration, Washington, USA, 1996.
- [28] Yuan, W., Feng, R., Dang, X.: Typical Earthquake Damage and Seismic Isolation Technology for Bridges Subjected to Near-Fault Ground Motions, 2018 International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control, Hunan, China, 2018.
- [29] Aye, M., Kasai, A., Shigeishi, M.: An Investigation of Damage Mechanism Induced by Earthquake in a Plate Girder Bridge Based on Seismic Response Analysis: Case Study of Tawarayama Bridge under the 2016 Kumamoto Earthquake, *Adv. in Seismic Performance Assessment and Improvement of Structures*, 2018.
- [30] Lee, G.C., Kitane, Y., Buckle, I.G.: Literature Review of the Observed Performance of Seismically Isolated Bridges, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, New York, NY, USA, 2001.
- [31] Ghasemi, H., Cooper, J.D., Imbsen, R., Piskin, H., Inal, F., Tiras, A.: The November 1999 Duzce earthquake: Post- earthquake Investigation of the Structures on the TEM, Publication No. FHWA-RD-00-146, Federal Highway Administration Report, 2000.
- [32] Erdik, M.: Report on 1999 Kocaeli and Duzce (Turkey) Earthquakes, *Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering*, 2001., pp. 149–186
- [33] Fujino Y., Siringoringo D.M., Kikuchi M., Kasai K., Kashima T.: Seismic Monitoring of Seismically Isolated Bridges and Buildings in Japan-Case Studies and Lessons Learned; *Seismic Structural Health Monitoring*, Springer Tracts in Civil Engineering, Springer, Cham., 2019.
- [34] Li, X., Shi, Y.: Seismic Design of Bridges against Near-Fault Ground Motions Using Combined Seismic Isolation and Restraining Systems of LRBs and CDRs, *Shock and Vibration*, (2019), pp. 11
- [35] Ristic, J., Misini, M., Ristic, D., Guri, Z., Pllana, N.: Seismic Upgrading of Isolated Bridges with SF-ED Devices: Shaking Table Tests of Large-Scale Model, *Građevinar*, 70 (2018) 6, pp. 2147–2017
- [36] Ristic, J., Brujic, Z., Ristic, D., Folic, R., Boskovic, M.: Upgrading of isolated bridges with space-bar energy-dissipation devices: Shaking table test, *Advances in Structural Engineering*, (2021) 6; pp. 2948–2965
- [37] Ristic, J.: Modern Technology for Seismic Protection of Bridge Structures Applying Advanced System for Modification of Earthquake Response, PhD Thesis, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), SS Cyril and Methodius University, Skopje, Macedonia, 2016.
- [38] Candeias, P., Costa, A.C., Coelho, E.: Shaking Table Tests of 1:3 Reduced Scale Models of Four-Story Unreinforced Masonry Buildings, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, 2004., Paper No: 2199
- [39] Ristic, D.: Nonlinear Behavior and Stress-Strain Based Modeling of Reinforced Concrete Structures Under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, Doctoral Dissertation, School of Civil Engineering, Kyoto University, Japan, 1988.
- [40] Ristic, D., Ristic, J.: Advanced Integrated 2G3 Response Modification Method for Seismic Upgrading of Advanced and Existing Bridges, *Proceedings of the 15th World Conf. on Earthquake Engineering (WCEE)*, Lisbon, 2012.