

АНАЛИЗА СТАТИЧКИХ И ДИНАМИЧКИХ ОПТЕРЕЋЕЊА МОСТОВСКИХ
КОНСТРУКЦИЈА ПОСТУПЦИМА ПРАЋЕЊА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУANALYSIS OF STATIC AND DYNAMIC LOAD ON BRIDGE CONSTRUCTIONS WITH
REAL TIME MONITORING.

Бора Савић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОМАТИКА

Кратак садржај – У оквиру мастер рада утврђени су кључни параметри који се прате код одређених типова мостовских конструкција. Описани су основни појмови везани за мониторинг мостова у реалном времену. Спроведени су експерименти који показују утицај статичког оптерећења, динамичких удара и вибрација на мостовске конструкције. Резултати експеримената су анализирани и из анализа су изведени закључци и препоруке.

Кључне речи: Мост, геосензорске мреже, деформације.

Abstract – This master thesis presents crucial parameters which are being observed on all variations of bridge constructions. Main informations about bridge monitoring in real time are presented. Experiments that are showing impact of static load, dynamic forces and vibrations on bridge constructions are made. Results of those experiments were analysed, so conclusions are made

Keyword: Bridge, geosensor networks, deformations

1. УВОД

У оквиру мастер рада утврђени су кључни параметри који се прате код одређених типова мостовских конструкција. Описани су основни појмови везани за мониторинг мостова у реалном времену. Спроведени су експерименти који показују утицај статичког оптерећења, динамичких удара и вибрација на мостовске конструкције. Резултати експеримената су анализирани и из анализа су изведени закључци и препоруке.

2. ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНАТА

Спроведена су три независна експеримента у лабораторијском окружењу. Експеримент статичког оптерећења изведен је за потребе анализе утицаја статичког оптерећења на мостовске конструкције које је узроковано тежином возила која саобраћају и сопственом конструкцијом.

Експеримент динамичких удара изведен је у вертикалној равни и описује ударна оптерећења проузро-

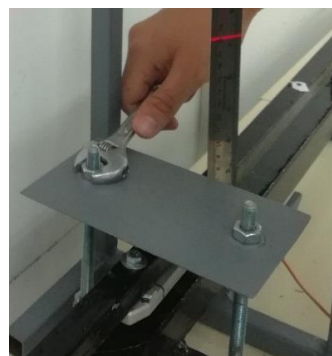
кована проласком возила преко неравних делова моста (шахтова, дилатација, рупа итд.). Оглед који описује утицај вибрација на мостовску конструкцију, дефинише утицај ветра и других динамичких сила.

2.1 Експеримент статичког оптерећења

У оквиру експеримента мериће се силе које утичу на истезање моста у правцу осовине које је последица савијања (слика 1). Такви утицаји могу довести до пуцања појединих конструктивних елемената или чак до потпуног урушавања моста. Зато је битно пронаћи зависност између интензитета силе која се јавља при статичком оптерећењу и савијања конструктивних сегмената моста.

У експерименту ће то бити могуће учинити на основу израза за Јангов модул где фигурише релативно истезање цеви, које се мери, модул еластичности, који је спецификован особинама материјала, површина попречног пресека која се једноставно израчуна на основу попречног профила цеви и интензитет силе, као једина непозната величина. Из наведеног израза могуће је добити однос силе која делује у материјалу и савијености цеви.

Ово ће бити врло корисна информација у реконструкцији догађаја који би изазвали критична оптерећења што јесте крајњи циљ експеримента.



Слика 1. Мерње савијања цеви

Сила истезања која се јавила у материјалу може се израчунати коришћењем Јанговог модула еластичности (једначина 1).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}; \sigma = \frac{F}{A}; E = \frac{F}{\epsilon \times A} \Rightarrow F = E \times A \times \epsilon [1] \quad (1)$$

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Александар Ристић, ред. проф.

2.2 Експеримент динамичких вертикалних удара

У овом експерименту вршена су мерења убрзања која су последица ударног оптерећења (пада тега) на мостовску конструкцију (конструкцију модела). Мерено је више удара тега различитих маса што ће бити основа за поређење силе којом је тег реаговао на површину и убрзања којим се удар даље манифестовао кроз конструкцију. Крајњи циљ експеримента биће откривање критичне границе интезитета силе који би изазвао оштећења мостовске конструкције.

Поставка модела над којим се врши експеримент је истакао код експеримента за мерење динамичких оптерећења. Коришћен је двоосни акцелерометар (*ADXL 203*) постављен на средину цеви и оријентисан тако да прати убрзања у правцу осовине и у вертикалном правцу. Са њим и са мерном траком се мерио утицај динамичког оптерећења са тегом од 100g у првој сесији мерења и 200g у другој сесији мерења, они су пуштани са висине од 100mm у односу на плочу која је фиксирана на цев. Тегови су пуштани при 4 различита статичка оптерећења.



Слика 2. Пуштање тега на плочу са висине од 100mm.

Да би се израчунала критична сила деформисања цеви на основу мерења убрзања при слободном паду тега прво се рачуна брзина (*једначина 2*) како би се одредио импулс силе.

$$V = \sqrt{2 \times g \times s} \text{ [m/s]} \quad [2]$$

Брзина је иста без обзира на масу јер је отпор ваздуха у овом случају занемарљив.

Затим се рачуна импулс силе (*једначина 3*) за ударац тега.

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{m1 \times V - 0}{\Delta t} \quad [4]$$

На основу граничног стреса (*једначина 4*) који доводи до пуцања материјала може се израчунати колика маса тега треба да буде да при паду од 10cm изазове пластичне деформације по формулама:

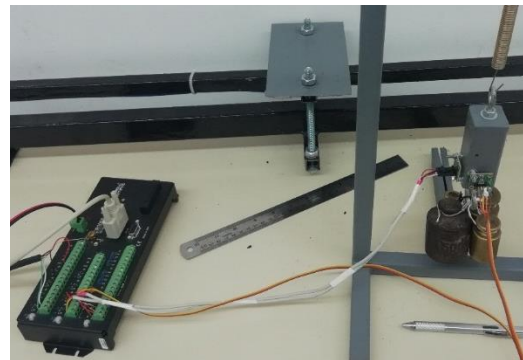
$$\sigma = \frac{F}{A} \Rightarrow F = \sigma \times A \quad [5]$$

2.3 Експеримент утицаја ветра и других динамичких сила на осциловање моста

Свака конструкција различито реагује на утицај сила, нарочито комбиновани (збирни) утицај појединих

сила које у неким случајевима, истовременим деловањем могу представљати опасност за стабилност конструкције иако потенцијално појединачним деловањем не би изазвале никакво оштећење. Овај експеримент је осмишљен да симулира три различита облика вибрација моста. Део експеримента са осциловањем тега у вертикалној равни чини модел који опонаша реалан систем са вибрирањем мостовске конструкције услед утицаја вертикалних динамичких сила из разнородних извора. У стварности овакве осцилације су готово непрестано присутне у мосту и изазване су преласком возила и пешака преко моста као и утицајем вибрација околине.

У оквиру експеримента мериће се убрзања услед осциловања тега у вертикалној равни, затим клађење тега и комбинација ова два осциловања. Циљ експеримента је да покаже однос еластичности опруге и утицај промене масе која осцилује у истим условима. Основни циљ експеримента је одређивање критичне области резонанције конструкције, као и да се анализира утицај комбинованих сила додатно на укупно осциловање мостовске конструкције.



Слика 3. Поставка експеримента који симулира вибрације услед утицаја ветра и других динамичких сила, са видљивим положајем акцелерометара.

Почетна, максимална кружна брзина (*једначина 5*) може се добити на основу максималног убрзања забележеног током осциловања користећи следећу формулу.

$$a_{max} = \omega_0^2 \times A \quad [6]$$

Како би се одредила фреквенција која би изазвала резонанцију потребно је још одредити и пригушење β (*једначина 6*).

$$\beta = -\ln\left(\frac{A_0}{A(t+N \times T)}\right) \times \frac{n}{N} \quad [6]$$

Кончан израз за добијање критичне фреквенције спољне силе (*једначина 7*):

$$\omega_{критично} = \sqrt{\omega_0^2 - 2 \times \beta^2}. \quad [7]$$

3. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

У овом поглављу дискутоваће се о резултатима са посебним акцентом на поређење стварних ситуација са добијеним резултатима. Објасниће се вредности у

конкретним примерима заснованим на добијеним резултатима.

3.1 Дискусија резултата експеримента статичког оптерећења

Коришћењем Јанговог модула еластичности, а на основу резултата мерења израчуната је подужна сила истезања која се јавља у цеви приликом савијања цеви.

Савијеност цеви	F [N]
3 [mm]	80.64
6 [mm]	161.28
9 [mm]	241.92

Табела 1. Однос савијености цеви и сила које делују у правцу осовине.

3.2 Дискусија резултата експеримента динамичких, вертикалних удара

За спроведени експеримент у лабораторији дошло се до прорачуна да је потребно да на цев падне тело масе 257.02kg са висине од 100mm како би дошло до пластичних деформација. Што се може искористити за поређење са већим моделима, односно мостовима оваквих конструкција.

3.3 Дискусија резултата експеримента вибрација

3.3.1 Дискусија резултата вертикалног вибрирања моста

Како је највећа претња за разарање мостовских конструкција прелазак возила преко моста биће дат један пример који повезује ову методу одређивања критичне фреквенције удара са стварном ситуацијом. На основу резултата, ако би се кретала колона возила са међусобним одстојањем од 4m и растојањем осовина точкова од 4m преко дилатације или рупе на коловозу, возила би морала да се крећу брзином од $13.33\text{m/s} = 48\text{km/h}$ ($s/t; s=4\text{m}; t= 0.3\text{s}$), или у случају моста који је за трећину „крући“ $12.12\text{m/s} = 43.63\text{km/h}$ ($s/t; s=4\text{m}; t= 0.33\text{s}$).

3.3.2 Дискусија резултата експеримента о клађењу моста

Како би се експеримент приближило случају стварног моста узеће се да је мост окачен на сајлама дужине 30m. То би резултовало сопственом кружном брзином моста од (једначина 8).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9.81[\text{m/s}^2]}{30[\text{m}]}} = 0,327[\text{rad/s}]. \quad [6] \quad (8)$$

У том случају остало би још само да се одреди пригушење истом методом као у овом експерименту. Оно би било сигурно веће него у овом случају, јер мост свакако не би осциловао у идеалним условима као математичко клатно.

Пошто се одреди пригушење кружна брзина осциловања ветра која би изазвала резонацију рачунала би се по (једначини 7).

3.3.2 Дискусија резултата експеримента о клађењу моста

Како би се експеримент приближило случају стварног моста узеће се да је мост окачен на сајлама дужине 30m. То би резултовало сопственом кружном брзином моста од $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9.81[\text{m/s}^2]}{30[\text{m}]}} = 0,327[\text{rad/s}]$. У том случају остало би још само да се одреди пригушење истом методом као у овом експерименту. Оно би било сигурно веће него у овом случају, јер мост свакако не би осциловао у идеалним условима као математичко клатно. Пошто се одреди пригушење кружна брзина осциловања ветра која би изазвала резонацију рачунала би се по формули (једначина 7).

3.3.3 Дискусија резултата о вертикалним осцилацијама при клађењу моста

Очигледно је да утицај клађења потпомаже вертикалном осциловању – те својим утицајем води ка резонанцији, односно осцилације изазване вертикалним ударима знатно дуже задржавају велике амплитуде. Из тог разлога знатно лакше долази до резонанције јер задржавањем високе амплитуде даје се више времена спољним утицајима да се „придруже у повећању амплитуде“.

3.3.4 Дискусија резултата о клађењу при вертикалним осцилацијама моста

Као и у при праћењу вертикалног клађења при сплету сила и овде је изражена значајна промена при осциловању тега највеће масе где се додатно потврђује како осцилације међусобно поспешују једно другу и тако смањују пригушење.

4. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог мастер рада извршена је анализа карактеристичних типова мостовских конструкција са посебним освртом на виталне параметре који су праћени геосензорском мрежом у реалном времену. На примењеним лабораторијским моделима мостовских конструкција извршена су мерења статичких и динамичких оптерећења. Резултати су анализирани у студији случаја.

Са становишта мониторинга мостова, на основу овог рада, може се закључити да код озбиљнијих габарита и комплекснијих конструкција није довољно пратити само ове параметре који су праћени у овом мастер раду. За адекватан мониторинг који нам даје комплетну слику ситуације и дешавања унутар мостовске конструкције потребно је пратити не само деформације, вибрације и ударе него и стање у којем се налазе поједини елементи конструкције.

Треба тежити ка модерним техникама мониторинга које су набројане и описане у теоријском делу рада где се описују врсте сензора и њихова намена као и врсте конструкција и њихове карактеристике. У оквиру овог мастер рада утврђени су параметри који се прате у реалном времену и који се користе за

анализу реакције конструкције на силе које су изазвале одређена кретања и напрезања.

Такође, издвојени су детаљи који су више утицајни на стабилност моста и они који су занемарљиви, на тај начин рад је показао како и на шта треба обратити пажњу при мониторингу мостова.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] <https://www.toppr.com/guides/physics-formulas/youngs-modulus-formula/> - Чланак о Јанговом модулу

[2] <http://physicsnet.co.uk/a-level-physics-as-a2/materials/young-modulus/> - Чланак који описује Јангов модул еластичности и објашњава његову примену.

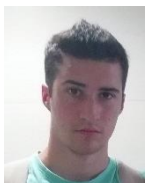
[3] <http://fizis.rs/osnovna-skola/vii-%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%B4/%D0%BA%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B0%D1%9A%D0%B5-%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B0-%D0%BF%D0%BE%D0%B4-%D0%B4%D0%B5%D1%98%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D0%BC-%D1%81%D0%B8%D0%BB%D0%B5-%D1%82%D0%B5%D0%B6%D0%B5/slobodno-padanje-tela-bestezinsko-stanje-hitac-navise-i-hitac-nanize/> - Формуле за рачунање величина при слободном паду.

[4] <https://svafizika.org/2017/05/02/sta-je-to-impuls/> - Чланак о импулсу силе и сударима тела.

[5] https://www.engineeringtoolbox.com/stress-strain-d_950.html - Објашњење зависности стреса и деформација у пластичном подручју.

[6] http://tesla.pmf.ni.ac.rs/f_odeljenje/ucenicki%20folder/ucenici2009-2010/osc2009.pdf - Наставни материјал са Природно-математичког факултета који описује осциловање.

Кратка биографија:



Бора Савић рођен у Новом Саду 1996. год. Средњу школу Милева Марић Ајнштајн завршио смер геодезија завршио у Новом Саду 2015. год. Исте године уписује Факултет Техничких Наука, смер Геодезија и геоматика у Новом Саду. Завршни ра из области ГНСС технологија одбранио је 2019. год.