

Metodologije za identifikaciju oštećenja konstrukcije na osnovu dinamičkih mjerena

Zovkić, Jurko; Sigmund, Vladimir; Sigmund, Zvonko

Source / Izvornik: Tehnički vjesnik, 2008, 15, 29 - 34

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:260183>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-08***



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil
Engineering and Architecture Osijek](#)



METODOLOGIJE ZA IDENTIFIKACIJU OŠTEĆENJA KONSTRUKCIJE NA OSNOVU DINAMIČKIH MJERENJA

Jurko Zovkić, Vladimir Sigmund, Zvonko Sigmund

Pregledni članak

Modeliranje ponašanja stvarnih konstrukcija je složeno i sadrži mnoge nepoznate veličine: način gradnje, ugrađeni materijal, raspodjela mase i krutosti, stanje konstrukcije, itd. koje je nužno pretpostaviti. Ove nepoznance čine nerazumnim primjenu složenih matematičkih modela, jer loši ulazni rezultati vode ka lošim izlaznim rezultatima, bez obzira na točnost primijenjenih matematičkih modela. Pojednostavljeni modeli koji se baziraju na primjeni eksperimentalnih rezultata daju bolje uvide u stanje materijala i konstrukcija. Kvantitativno određivanje stvarnog stanja konstrukcije moguće je mjerjenjem dinamičkog odgovora na ograničenom broju mjernih mjesta. Dinamičkim ispitivanjem dobivaju se: vlastite frekvencije, forme i koeficijenti prigušenja koji predstavljaju osobnu iskaznicu konstrukcije i sadrže u sebi sve bitne podatke o konstrukciji. Poznato je da se praćenjem stanja dinamičkih karakteristika dobiva dobra informacija o trenutnom stanju konstrukcije u eksploataciji. Moguće je na temelju razlike stanja dinamičkih karakteristika između dvaju razdoblja odrediti promjene krutosti konstrukcije odnosno ocijeniti mjesto i intenzitet oštećenja koja su u međuvremenu nastala. U radu su prikazane metodologije za identifikaciju i kvantifikaciju intenziteta oštećenja na stvarnoj konstrukciji, a koja su bazirane na provedenim dinamičkim mjerjenjima ambijentalnim vibracijama. Metodologije su kalibrirane i provjeravane na jednostavnim matematičkim i eksperimentalnim modelima s jednim i s tri stupnja slobode.

Ključne riječi: Metodologija, stanje konstrukcije, identifikacija stanja, dinamička svojstva konstrukcije, procjena oštećenja

Methodologies for structural damage identification by means of dynamical testing

Subject review

Dynamic characteristics of the structure represent its personal card. By monitoring them it is possible to get relevant information about the structural state and its degradation. The differences in measured dynamic characteristics at two stages in the life of structure reveal change in the stiffness/mass of the structure, location of the change and it is possible to conclude about the size of change in regard to the initial state. Outlined are two methodologies for structural damage identification by means of dynamical testing. They have been calibrated on the simple models and have proven its applicability to the real building structure for which only a limited amount of measured data is available. Methodology 1 requires knowledge of the measured dynamical characteristics of a structure at its initial state and after the damaging event. By means of the structural identification from the measured dynamical characteristics and comparing the change of relative shear stiffness between the neighboring stories the location and amount of structural change/damage is estimated. Methodology 2 is used when there are no data about the initial structural dynamic characteristics. A structural model with the use of finite element is made for the structure in its undamaged state. Measured dynamic properties such as frequencies and mode shapes of the structure in its damaged state are also needed. Using system identification techniques on both data sets and using the method of relative shear stiffness or the method of residual forces the location and amount of the structural damage could be estimated. It is applicable for the structures that could be described by the FEM.

Key words: Methodology, buildings, identification, structural damage, location, amount

1

Uvod

Introduction

Kvalitativno i kvantitativno određenje stvarnog stanja konstrukcije moguće je mjerjenjem dinamičkog odgovora na ograničenom broju mjernih mjesta tijekom uporabnog vijeka građevine. Dinamičkim ispitivanjem dobivaju se: vlastite frekvencije, forme i koeficijenti prigušenja koji predstavljaju osobnu iskaznicu konstrukcije i sadrže u sebi sve bitne podatke o konstrukciji. Poznavanjem dinamičkih svojstava moguće je iznaći inženjerski odgovor kako najbolje sanirati nosive strukture u današnjem vremenu i s današnjim vrijednosnim sustavom (troškovi, rokovi, kvaliteta, nenarušavanje ambijenta). Eventualne mjere sanacije objekata moraju biti takove da ni u čemu ne remete značajke objekta, a da daju dovoljnu sigurnost za uporabno i opterećenje od eventualnih katastrofalnih događaja.

Poznato je da se praćenjem dinamičkih karakteristika tijekom uporabnog vijeka građevine dobiva dobra informacija o trenutnom stanju konstrukcije. Sve eventualne promjene dinamičkih karakteristika nakon nekog zahvata ili katastrofalnog događaja ukazuju na promjene u krutosti/masi i skrivena oštećenja u konstrukciji. Na temelju razlike stanja dinamičkih karakteristika između dvaju razdoblja mogu se odrediti promjene krutosti konstrukcije odnosno ocijeniti lokacija i nivo oštećenja koja su u međuvremenu nastala.

Identifikacija sistema na bazi dinamičkih mjerena s

ciljem utvrđivanja stanja inženjerskih konstrukcija privlači mnogo pažnje posljednjih godina. Uobičajeni se pristup sastoji od:

- a) Mjerjenja dinamičkih svojstava, analize snimljenih podataka te određivanja modalnih parametara;
- b) Identifikacije sustava (definiranje matrice krutosti i matrice masa) na osnovi izmjerениh dinamičkih svojstava;
- c) Procjene stanja konstrukcije na osnovi izmjerениh i procijenjenih veličina.

U radu su prikazane osnove dviju metodologija za identifikaciju i kvantifikaciju intenziteta oštećenja građevinskih konstrukcija zgrada. One su razvijene na podlozi modela s jednim i tri stupnja slobode u okviru [1], a provjerene su na stvarnoj zgradi tijekom njene sanacije.

2

Metodologije za identifikaciju oštećenja

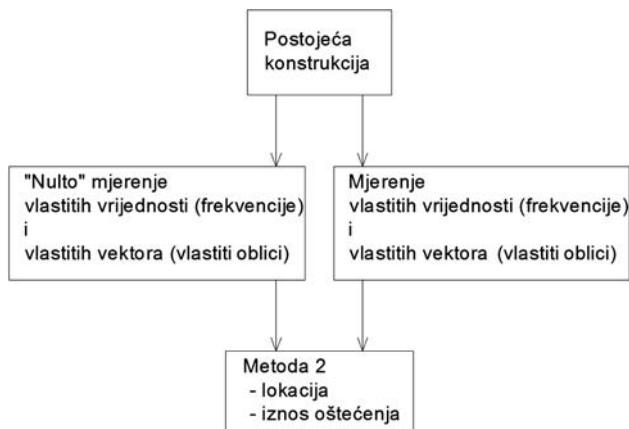
Methodologies for structural damage identification

U praksi su moguća dva slučaja:

- 1) da za dotičnu građevinu postoji "nulto" mjerjenje dinamičkih svojstava te se nakon nekog događaja koristi novo mjerjenje za utvrđivanje položaja i intenziteta oštećenja;
- 2) da za dotičnu građevinu ne postoji "nulto" mjerjenje te se za nju pravi matematički model u odnosu na kojeg se vrši usporedba između izmjerениh dinamičkih

svojstava nakon nekog događaja i izračunatih svojstava prije.

Na osnovu istraživanja upotrebljivosti metoda za identifikaciju parametara konstrukcije provedenih u [1] radi utvrđivanje stanja građevinskih konstrukcija, definirane su dvije metodologije za identifikaciju oštećenja konstrukcije. Obje su bazirane na primjeni mjerena dinamičkih svojstava građevina, a mogućnost njihove primjene pojašnjena je na primjeru.



Slika 1 Metodologija 1 - identifikacija oštećenja konstrukcije na osnovu razlike u izmjerenoj i izračunatoj dinamici

Figure 1 Methodology 1-structural damage identification based on differences in measured dynamic characteristics

2.1

Metodologija 1

Methodology 1

Metodologija 1 primjenjiva je na konstrukcijama kod kojih znamo početno stanje ("nulto mjerjenje") na neoštećenoj konstrukciji. Ona traži poznavanje izmjerenih dinamičkih svojstava (svojstvene frekvencije i forme) neoštećene i oštećene građevine. Za određivanje lokacije i intenziteta oštećenja koristi se Metoda relativne posmične krutosti (Metoda 2).

2.2

Metodologija 2

Methodology 2

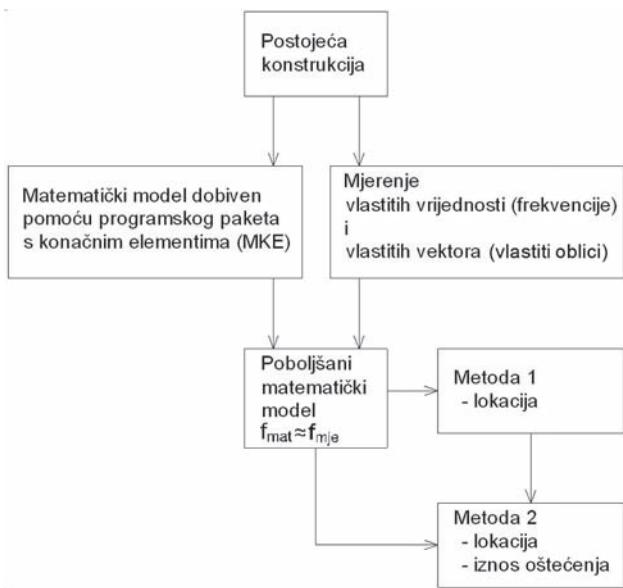
Metodologija 2 primjenjuje se kada ne postoji podatak o početnom stanju konstrukcije te mjerene dinamičke odzive vršimo nakon nekog događaja. Ona traži uporabu numeričkih metoda za modeliranje konstrukcije u neoštećenom stanju te izmjerenih dinamičkih svojstava konstrukcije u oštećenom stanju. Za određivanje lokacije oštećenja koristimo Metodu rezidualnih sila (Metoda 1), a za lokaciju i intenzitet oštećenja koristi se Metoda relativne posmične krutosti (Metoda 2).

3

Identifikacija svojstava konstrukcije

Structural identification

U cilju identifikacije svojstava konstrukcija (masa i krutost), na osnovi istraživanja provedenih u okviru rada [1], u građevinarstvu su primjenjive dvije dalje navedene metode.



Slika 2 Metodologija 2 - identifikacija oštećenja na osnovu razlike u izmjerenoj i izračunatoj dinamici

Figure 2 Methodology 2- structural damage identification based on differences between the calculated and measured dynamical characteristics

3.1

Metoda 1 - Metoda rezidualne sile

Method 1 – Residual force method

Metoda rezidualne sile je pobliže pojašnjena u [3], gdje se koristi vektor pseudo sila konstrukcije izведен s ciljem lociranja oštećenja na konstrukciji.

Oštećenje konstrukcije se matematički manifestira kroz promjene u matrici krutosti i matrici masa, a fizikalno u dinamičkim svojstvima (svojstvene frekvencije i oblici).

Jednadžba gibanja neprigušenih oscilacija za sustav s n -stupnjeva slobode u matričnoj formi je:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f}(t), \quad (1)$$

gdje su \mathbf{M} i \mathbf{K} $n \times n$ matrice mase i krutosti neopterećene konstrukcije, a \mathbf{u} i $\ddot{\mathbf{u}}$ su $n \times 1$ vektori pomaka i ubrzanja, odnosno $\mathbf{f}(t)$ je $n \times 1$ vektor sile uzbude.

U slučaju slobodnih vibracija ($\mathbf{f}(t)=\mathbf{0}$) iz jednadžbe (1) izvodi se karakteristična jednadžba svojstvenog oblika:

$$(\mathbf{K} - \lambda_i \cdot \mathbf{M}) \cdot \varphi_i = 0, \quad (2)$$

gdje je λ_i i -ta vlastita vrijednost konstrukcije (koja je jednaka kvadratu prirodne frekvencije, $\lambda_i = \omega_i^2$), a φ_i je prirodnji oblik koji odgovara ω_i .

Uvodimo označku d kao označku oštećene konstrukcije, te definiramo vektor rezidualne sile u obliku:

$$\mathbf{R}_i = (-\mathbf{K}_u + \lambda_{di} \cdot \mathbf{M}_u) \cdot \varphi_{di}. \quad (3)$$

Ako nam je dostupan skup izmjerenih svojstvenih frekvencija i oblika, modalni vektor rezidualne sile \mathbf{R}_i može se izračunati iz jednadžbe (3).

Rezidualne sile nastaju na mjestima na kojima postoji oštećenje na konstrukciji. Analizom vektora \mathbf{R}_i možemo ustanoviti da za izmjerene svojstvene frekvencije i oblike (koji nisu poremećeni utjecajem šumova), j -ti član vektora \mathbf{R}_i koji odgovara j -tom stupnju slobode iščezava za slučaj

da niti jedan element pridružen promatranom stupnju slobode nije oštećen; međutim, poprima vrijednost različitu od nule ako je bilo koji element pridružen promatranom stupnju slobode oštećen.

3.2

Metoda 2 - Metoda relativne posmične krutosti

Method 2 - Relative shear stiffness method

Metoda relativne posmične krutosti je pobliže opisana u [4], a ovdje je kratko izložena. Temeljna jednadžba osciliranja konstrukcije u j -tom obliku poprečnih vibracija, uz zanemarivanje prigušenja, može se napisati u obliku:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \Phi j = 0, \quad (4)$$

gdje je \mathbf{K} matica posmične krutosti, \mathbf{M} je matica masa, ω_j je prirodna frekvencija j -tog oblika, a Φ_j je vektor oblika. Svi elementi matrice eksperimentalno su utvrđeni tijekom dva suksesivna mjerena (prije i nakon oštećenja).

Veza između modalnih karakteristika ω_j i Φ_j i konstrukcijskih parametara $R_{i,i+1}$ (za pojednostavljeno prikazanu posmičnu zgradu) je:

$$R_{i,i+1} = \frac{\omega_j^2}{\Phi_{i,j} - \Phi_{i+1,j}} \sum_{i=1}^i m_i \Phi_{i,j}, \quad (5)$$

Poznavanjem konstrukcijski parametra $R_{i,i+1}$ za svaki kat građevine, prije i nakon oštećenja, indeks oštećenja pojedinog kata se računa na sljedeći način:

$$\eta_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1}^* - R_{i,i+1}}{R_{i,i+1}^*} \cdot 100, \quad (6)$$

gdje je $R_{i,i+1}^*$ relativna posmična krutost kata osnovne neoštećene konstrukcije, a $R_{i,i+1}$ je relativna krutost kata oštećene konstrukcije.

4

Primjena metodologija na stvarnu zgradu

Application of methodologies on buildings

4.1

Opis objekta

Measured building

Građevina je izgrađena 1986. godine kao montažna armirano-betonska konstrukcija u sustavu "IMS"-Žeželj (slika 3). Tijekom domovinskog rata građevina je oštećena ratnim i djelovanjem požara te je bila neophodna njena sanacija. Prije, tijekom i nakon izvedbe sanacije vršena su mjerenja dinamičkih svojstava metodom ambijentalnih vibracija.

Tablica 1 Pregled ispitivanja sa opisom sanacije
Table 1 Dynamic measurements and strengthening progress

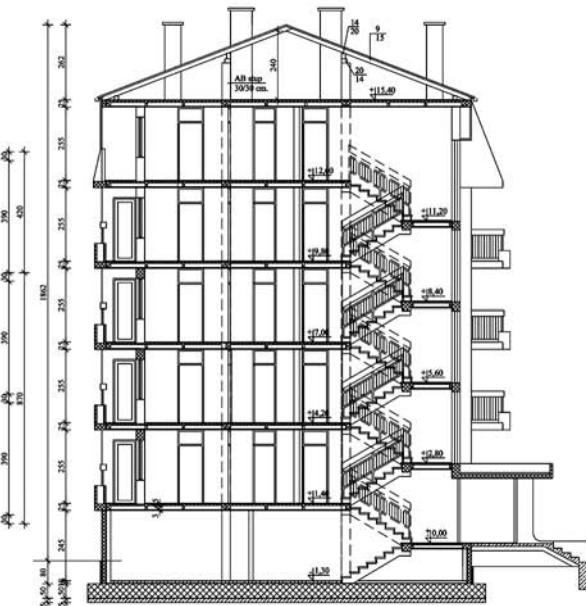
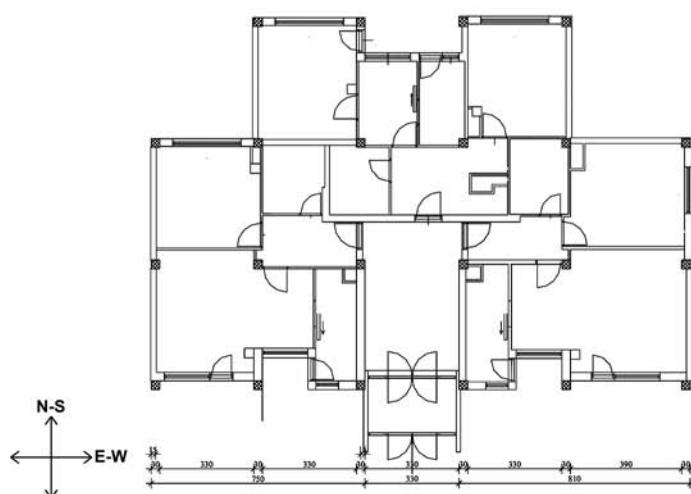
MODEL	MJERENJE	OPIS SANACIJE
M 10-1	11.08.2003.	Postojeća građevina
M 10-2	13.07.2005.	Sanacija izvedena do 2. kata
M 10-3	04.05.2006.	Sanirana (ojačana) građevina

4.1.1

Eksperimentalni rezultati

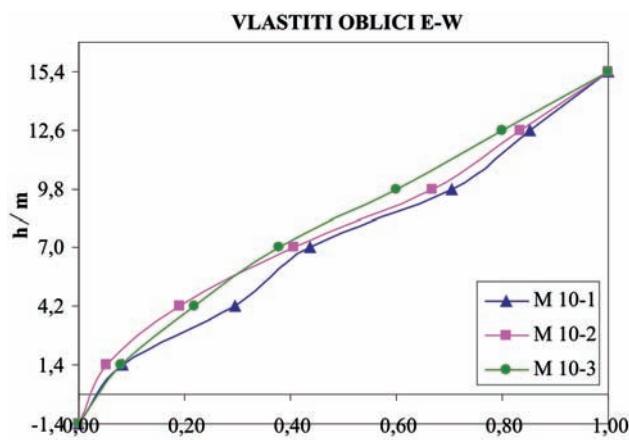
Measured dynamic characteristics

Ispitivanjem objekata metodom ambijentalnih vibracija dobivene su dinamičke karakteristike konstrukcije objekta za smjer N-S (slika 4) te E-W (slika 5), te forme osciliranja po vertikali (poprečni smjer osciliranja) i koeficijenti prigušenja.

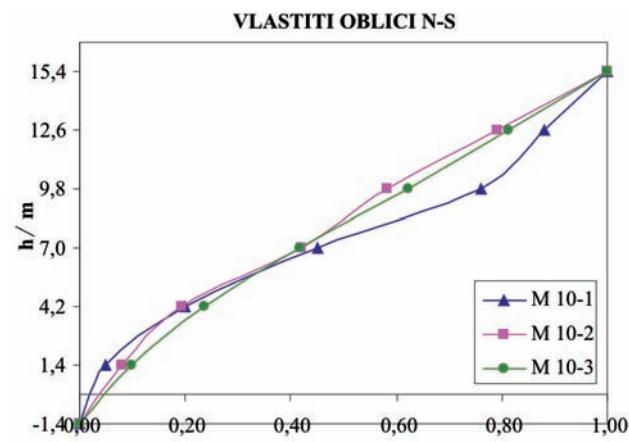


Tablica 2 Izmjerene vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja
Table 2 Measured natural frequencies and damping coefficients

MODEL	MJERENJE U SMJERU N-S		MJERENJE U SMJERU E-W	
	f_1/Hz	prigušenje/%	f_1/Hz	prigušenje/%
M 10-1	3,710	3,00	3,125	2,00
M 10-2	4,030	-	3,540	-
M 10-3	4,350	2,00	3,910	2,00



Slika 4 Vertikalne forme osciliranja za smjer E-W
Figure 4 Measured natural forms for E-W direction



Slika 5 Vertikalne forme osciliranja za smjer N-S
Figure 5 Measured natural forms for N-S direction

4.1.2

Matematički rezultati Calculated characteristics

Za dobivanje matematičkog modela (matematički rezultat) korišten je programski paket Tower5.2 koji koristi metodu konačnih elemenata (MKE). Početni model građevine dobiven je na osnovu snimljenih geometrijskih svojstava elemenata i na bazi podataka o mehaničkim svojstvima materijala. Početni je model iterativno poboljšavan kroz promjenu krutosti pojedinih elemenata i uzimanjem u obzir interakcije između konstrukcije i tla sve dok se numerički model svojim svojstvima nije približio onima izmjerenima na samom objektu. Takav poboljšani model predstavlja stvarni model realne konstrukcije na kojem se mogu provoditi daljnje simulacije.

Tablica 3 Dobivene frekvencije i vlastiti oblici pomoću matematičkog modela
Table 3 Calculated natural frequencies and forms by mathematical model

Vlastiti oblici za smjer E-W	Izračunati TOWER	Normalizirani TOWER		
Model / Frekvencija/ Hz	Kat	H/m	3,054	3,054

potkrovље	15,40	0,897	1,000
4	12,60	0,730	0,814
3	9,80	0,505	0,564
2	7,00	0,372	0,414
1	4,20	0,206	0,229
prizemlje	1,40	0,069	0,076
pod	-1,40	0,000	0,000

Vlastiti oblici za smjer N-S	Izračunati TOWER	Normalizirani TOWER		
Model / Frekvencija/ Hz	Kat	H/m	3,694	3,694

potkrovље	15,40	0,993	1,000
4	12,60	0,812	0,818
3	9,80	0,627	0,632
2	7,00	0,444	0,447
1	4,20	0,270	0,271
prizemlje	1,40	0,112	0,113
pod	-1,40	0,000	0,000

Tablica 4 Prikaz indeksa oštećenja za oba smjera osciliranja
Table 4 Calculated structural damage index

Model	M 10-1 M 10-2 M 10-3			
	Indeks oštećenja E-W / %	η	η	η
Kat	H/m			
potkrovље	15,40	0,00	-14,20	-16,10
4	12,60	0,00	-12,81	-12,12
3	9,80	0,00	-27,23	-75,75
2	7,00	0,00	17,82	-27,47
1	4,20	0,00	-85,69	-114,91
prizemlje	1,40	0,00	-81,03	-44,88
pod	-1,40	-	-	-

Model	M 10-1 M 10-2 M 10-3			
	Indeks oštećenja N-S / %	η	η	η
Kat	H/m			
potkrovље	15,40	0,00	32,08	12,37
4	12,60	0,00	36,00	16,26
3	9,80	0,00	-98,27	-86,63
2	7,00	0,00	-16,07	-76,51
1	4,20	0,00	-39,82	-39,47
prizemlje	1,40	0,00	34,03	35,97
pod	-1,40	-	-	-

4.2

Primjena metodologije 1 Application of the Methodology 1

Indeks intenziteta i lokacija oštećenja dobiveni su ovom metodologijom za svaki promatrani kat i smjer osciliranja prikazani su u Tablici 4. Pri tom je kao referentni

model ("nulto stanje") korišteno prvo izvršeno mjerjenje dinamičkih svojstava, predznak minus označava podizanje krutosti po pojedinim etažama.

Za smjer E-W vidimo da imamo povećanje krutosti svih stupnjeva slobode u odnosu na početno stanje ("nulto stanje"). Također, vidimo da se iznos indeksa oštećenja za većinu stupnjeva slobode (katova) nakon mjerjenja povećava u odnosu na prethodno mjerjenje, jedino je smanjen na prizemlju nakon trećeg mjerjenja (pozitivan indeks oštećenja nam govori da imamo smanjenu krutost, a negativni da imamo povećanu krutost).

Za smjer N-S vidimo da imamo povećanje i smanjenje krutosti u odnosu na početno stanje. Povećanje krutosti odnosi se na 1., 2. i 3. kat, a smanjenje na prizemlje, 4. kat i potkrovjlje. Također, vidimo i razliku povećanja odnosno smanjenja iznosa indeksa oštećenja u odnosu na prethodno mjerjenje.

Uzimanjem u obzir detekcije mjesta i iznosa promjene u krutostima po etažama, već se tijekom izvedbe sanacije moglo utjecati na povoljan konačan ishod sanacije nosive konstrukcije građevine.

4.3

Primjena metodologije 2

Application of the Methodology 2

Matrica krutosti "neoštećenog" objekta dobivena je na osnovu matrice popustljivosti matematičkog modela i ona daje "nulto stanje" neoštećenog objekta. Dinamička mjerjenja provedena na građevini indiciraju stanje građevine. Vektor rezidualnih sila sačinjen je za svaku naknadno mjerjenje u odnosu na izračunato "nulto stanje".

Tablica 5 Prikaz vektora rezidualnih sila za smjer E-W za svako mjerjenje
Table 5 Calculated residual force vector for E-W direction

Ri (mat. model)	Ri (M 10-1)	Ri (M 10-2)	Ri (M 10-3)
0,000	5,45E+04	2,85E+04	7,22E+04
0,000	2,12E+05	3,13E+03	8,92E+04
0,000	7,43E+04	3,15E+04	5,07E+04
0,000	1,13E+05	9,07E+04	2,32E+04
0,000	5,20E+04	6,56E+04	8,05E+04
0,030	5,27E+04	5,58E+04	3,07E+04

Tablica 6 Prikaz vektora rezidualnih sila za smjer N-S za svako mjerjenje
Table 6 Calculated residual force vector for N-S direction

Ri (mat. model)	Ri (M 10-1)	Ri (M 10-2)	Ri (M 10-3)
0,000	1,86E+04	3,51E+04	5,10E+04
0,000	3,44E+04	4,78E+03	5,04E+04
0,000	1,38E+04	4,03E+04	9,04E+03
0,000	1,29E+05	4,25E+04	2,83E+04
0,000	1,13E+04	6,17E+04	7,65E+04
0,000	9,51E+04	9,51E+03	4,74E+04

Iz prikazanih tablica i intenziteta vektora rezidualne sile za smjer E-W i N-S vidimo da imamo promjene u krutosti/masi na svakom katu u odnosu na "neoštećenu" konstrukciju, što ukazuje na oštećenja na tom katu (odnosi se na Ri (M 10-1)). Također, vidimo da se vrijednosti tih promjena sa svakim naknadnim mjerjenjem ustaljuju (napredovanjem sanacije), što ukazuje na približno jednakne

promjene na tim katovima, odnosno stupnjevima slobode.

Indeks intenziteta i lokacija oštećenja na konstrukciji dobiveni su pomoću Metodologije 2 i navedeni su u Tablici 7, a "nulto stanje" simulirano je s modificiranim matematičkim modelom.

Tablica 7 Prikaz indeksa oštećenja za oba smjera kada je referentni model (neoštećena konstrukcija), matematički model
Table 7 Calculated structural damage index

Model		M 10-1	M 10-2	M 10-3
Indeks oštećenja E-W / %	Kat	H / m	η	η
potkrovље		15,40	-31,55	-50,23
4		12,60	-81,15	-104,35
3		9,80	36,05	18,64
2		7,00	-48,09	-21,69
1		4,20	17,39	-53,39
prizemlje		1,40	-7,41	-94,45
pod		-1,40	-	-

Model		M 10-1	M 10-2	M 10-3
Indeks oštećenja N-S / %	Kat	H / m	η	η
potkrovље		15,40	-53,46	-4,22
4		12,60	-62,89	-4,25
3		9,80	34,56	-29,76
2		7,00	23,82	11,58
1		4,20	-10,48	-54,47
prizemlje		1,40	-138,62	-57,42
pod		-1,40	-	-

Za smjer E-W i smjer N-S vidimo da imamo povećanje krutosti svih stupnjeva slobode u odnosu na inicijalni matematički model za početno stanje (oštećena konstrukcija). Također, vidimo da se iznos indeksa oštećenja za većinu stupnjeva slobode (katova) nakon svakog mjerjenja povećava u odnosu na prethodno mjerjenje, što ukazuje na povećanje krutosti u odnosu na inicijalno oštećeno stanje konstrukcije.

5

Zaključak

Conclusion

Izlaze su dvije metodologije za utvrđivanje položaja i intenziteta oštećenja primjenjive na sanacijama građevinskih konstrukcija zgrada. Utvrđivanje lokacije i intenziteta oštećenja uzrokuju promjenu u svojstvima krutosti/mase konstrukcije.

Metodologija 1 zahtijeva poznavanje inicijalnih dinamičkih karakteristika konstrukcije kao i podatke o dinamičkim svojstvima konstrukcije nakon nekog događaja, a koji se dobivaju mjerjenjem dinamičkih svojstava. Identifikacijom sustava i primjenom metode relativne posmične krutosti dobivaju se podaci o mjestu i intenzitetu oštećenja. Primjenjiva je za sve vrste konstrukcija na kojima je provedeno mjerjenje.

Metodologija 2 zahtijeva uporabu matematičkog modela s metodom konačnih elemenata za neoštećeno stanje te podatke o dinamičkim svojstvima konstrukcije

dobivene mjerjenjem u oštećenom stanju. Identifikacijom sustava i primjenom bilo metode relativne posmične krutosti ili metode rezidualnih sila dobivaju se podaci o mjestu i intenzitetu oštećenja. Primjenjiva je za konstrukcije koje se mogu dovoljno točno opisati metodom MKE.

Uporabljivost metoda na stvarnim građevinama prikazana je na primjeru zgrade koja je bila višekratno ispitivana tijekom provedbe mjera ojačanja i dokazana je njihova pouzdanost i u slučaju relativno malog broja podataka.

Iz provedene analize rezultata može se zaključiti sljedeće:

- iz vrijednosti rezidualne sile R_i prema Metodi 1 za oba smjera vidimo da imamo promjene na svakom katu u odnosu na "neoštećenu" konstrukciju, što ukazuje na prisutnost oštećenja na tom katu odnosno stupnju slobode
- vidimo da se vrijednosti tih promjena sa svakim mjerjenjem ustaljuju, što ukazuje na približno jednake promjene na tim katovima odnosno stupnjevima slobode.
- primjena Metodologije 2 pokazala se relativno složena u odnosu na matematički model stvarnih zgrada (MKE)
- prisutnost odnosno iznos oštećenja (η) prema Metodologiji 1 može se sa sigurnošću utvrditi.

6

Literatura

References

- [1] Zovkić, J. Identifikacija parametara konstrukcije na osnovu dinamičkih mjerena, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku, Osijek, 2007., 169 str.
- [2] Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku: "Utvrđivanje stanja konstrukcije objekta u ulici A. Hebranga 10, 12 i 14 u Pakracu", 2003-2006.
- [3] Ge, Ma; Lui, Eric M. Structural identification using system dynamic properties. // Computers and Structures 83 (2005), str. 2185-2196.
- [4] Barasan, George-Mihail; Dinsoreanu, Mihaela. Modal System Identification Technique in Structural Damage Assessment, IABSE Colloquium Berlin, 4-5 June, 1998.
- [5] Sigmund, V.; Herman, K. Dynamic characteristics as indicator of structural integrity. // IABSE Colloquium "Saving buildings in Central and Eastern Europe", Berlin, 4.-5.6.1998, IABSE Report Volume 77, tiskan kao Sažetak u knjizi na str. 42-44 i kao cijeli rad 2012 na CD-ROM-u IABSE-Berlin98;
- [6] Sigmund, V.; Brana, P.; Guljaš, I.; Stanić, A.; Zovkić, J. Ambient vibration measurements. // 6. Symposium: Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen / Dr. Armien Ziegler (ur.), Zürich, Švicarska : Ziegler Co. und SYSCOM Instruments SA, 2003. str. 25-37 (pozvano predavanje, pregledni rad).
- [7] Sigmund, V.; Brana, P.; Zovkić, J.; Stanić, A. Evaluation of structural state by vibration measurements. // 1st Symposium celebrating 40th anniversary of computing at the Faculty of Civil Engineering, Zagreb, December 4th-6th, 2003, Zagreb, str. 67-75.
- [8] Sigmund, V.; Brana, P.; Zovkić, J. Choice of the optimal strengthening technology. // XIII WCEE, Vancouver, Canada, 01.-06.08.2004., International association for earthquake engineering, DVD, Paper No. 3137, 10 str.
- [9] Zovkić, J.; Sigmund, V.; Sigmund, Z. Metodologija za identifikaciju i kvantifikaciju intenziteta oštećenja konstrukcija. // Drugi internacionalni naučno-stručni skup: Građevinarstvo - Nauka i Praksa / Rutešić, Snežana (ur.), Podgorica, Crna Gora : Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, 2008. str. 1173-1179.

Adrese autora Authors' Address

*Mr. sc. Jurko Zovkić
Prof. dr. sc. Vladimir Sigmund
Zvonko Sigmund*
Građevinski fakultet Osijek
Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Drinska 16a
31000 Osijek, R. Hrvatska
jzovkic@gfos.hr
sigmund@gfos.hr
z.sigmund@yahoo.com