

NADZOR BETONSKIH MOSTOV V NJIHOVI ŽIVLJENJSKI DOBI S POMOŽJO OPTIČNIH INTERFEROMETRIJSKIH SENZORJEV Z DOLGO MERNO OSNOVO

LIFESPAN MONITORING OF CONCRETE BRIDGES USING LONG-GAGE FIBER OPTIC INTERFEROMETRIC SENSORS

Avtorji: Dr. Branko Glišič, univ. dipl. ing. gr., univ. dipl. mat.
Dr. Daniele Inaudi, univ. dipl. fiz.
SMARTEC SA, Manno, Švica
tel.: +41 (0)91 610 18 00
fax: +41 (0)91 610 18 01
e-mail: glisic@smartec.ch

Miran Antauer, univ. dipl. ing. el.
TELEM d.o.o.
Ulica heroja Jevtiča 5
2000 – Maribor, Slovenija
tel.: +386 (0)2 228 44 10
fax.: +386 (0)2 228 44 20
e-mail.: miran.antauer@telem.si

Vsebina

Nadzor gradbenih konstrukcij je proces, katerega cilj je pridobitev točnih in pravočasnih informacij o stanju in obnašanju konstrukcij. Izbor strategije nadzora, namestitvev in vzdrževanje opreme za nadzor ter uporaba rezultatov so glavni sestavni deli procesa nadzora gradbenih konstrukcij. Koristnost informacij dobljenih z nadzorom so vidne na več področjih. Kot prvo, doprinesejo k izboljšanju in razširijo poznavanje dejanskega obnašanja konstrukcije ter omogočajo kalibracijo numeričnih modelov, ki to obnašanje opisujejo in jih poskušajo predvideti. S tem sta lahko projekt konstrukcije in sama izvedba bolj optimirana tako s konstruktivne kot tudi iz ekonomske strani gledanja. Zelo pomembno je, da stalen (kontinuirni) nadzor omogoča odkrivanje nepravilnega delovanja konstrukcije že na samem začetku. To omogoča pravočasne varnostne ukrepe, obenem pa so neizbežne intervencije na konstrukciji izvedene v najkrajšem času in na ta način minimizirajo tveganje in finančne izgube.

Betonski mostovi so v vsaki družbi zelo važen del infrastrukture. Zaradi tega morajo biti obvezen in nujen cilj gradbeništva, ne samo njihovo pravilno projektiranje in kvalitetna izvedba, ampak tudi zanesljiva in dolgotrajna uporaba. Posledica razvoja optičnih senzorjev z dolgo merno osnovo so nove in zanimive možnosti nadzora betonskih konstrukcij oz. mostov. Optična vlakna so po svoji naravni lastnosti trajna in neobčutljiva na vplive okolja kot so elektromagnetna polja, vlažnost, korozija, staranje in podobno. Zaradi tega so idealni izbor za nadzor gradbenih konstrukcij v celotni njihovi življenjski dobi. Merna osnova, ki je lahko dolga tudi do deset metrov, omogoča merjenje relativnih pomikov z mikrometrsko resolucijo. Zelo pomembno za betonsko konstrukcijo je, da je merjenje neobčutljivo na lokalne defekte, kot so razpoke ali zraeni mehureki. Dolga merna osnova omogoča spremljanje celotne konstrukcije z določenim številom senzorjev na način, da je opazen in kvantiziran katerikoli dogodek s posledico spremembe globalnega obnašanja konstrukcije.

V tem prispevku so predstavljene metode nadzora mostov ter izkušnje iz prakse pri uporabi optičnih senzorjev ter sistemov projektiranih za uporabo v celi življenjski dobi betonski mostov.

ABSTRACT

Structural monitoring is a process aiming at providing accurate and in-time information concerning structural condition and performance. It consists of several activities such as selection of monitoring strategy, installation and maintenance of monitoring equipment and data management. The benefits of the information obtained by monitoring are apparent in several domains. First, it helps to improve and enlarge the knowledge concerning real structural behavior and makes accurate calibration of numerical models describing and predicting this behavior possible. Thus, project and construction can be optimized in structural and economical aspects. Second, permanent monitoring can give early indications of structural malfunctioning. In this way, safety measures can be considered in time, and intervention on the structure can be performed immediately and with minimal risk and economic losses.

The concrete bridges represent important part of infrastructure of every society. Therefore, not only their good design and quality construction, but also their durable and safe exploitation are the imperative goals of structural engineering. The availability of long-gage fiber optic sensors has opened new and interesting possibilities for structural monitoring of concrete bridges. The optical fiber nature of sensors provides for durability and insensitiveness to environmental influences such as electromagnetic fields, humidity, corrosion etc. making them ideal for lifespan monitoring of the civil structures in general. The long-gage of the sensors allow the measurement of deformations over measurement basis that can reach tens of meters with resolutions in the micrometer range. It is not sensitive to local defects such as cracks or air pockets, which is very important in case of concrete structures. Using long-gage sensors, it becomes possible to cover the whole volume of a structure with limited number of sensors enabling monitoring of a structure as a whole, so that any phenomena that has an impact on the global structural behavior is detected and quantified.

Bridge monitoring methods and experiences using an optical fiber based monitoring system designed for lifespan monitoring of concrete bridges is presented in this work.

1 UVOD

1.1 Nadzor – osnovni pojmi

Nadzor konstrukcij pomeni zapisovanje časovno odvisnih parametrov v nekem določenem obdobju[1]. Ti parametri so povezani s konstrukcijskimi materiali (beton, jeklo, les itn.) in s samo konstrukcijo. V obeh primerih je povezava lahko fizikalna, mehanska ali kemična.

Življenjska doba betonskega mostu se začne z njegovo izgradnjo - nalivanje betona. Sledi sušenje betona, testiranje mostu in najpomembnejše obdobje uporaba in vzdrževanje. V času vzdrževanja je v odvisnosti od potreb konstrukcija lahko obnovljena, ojačena ali povečana. Končno, po končani uporabi se most lahko podre. Nadzor celotne življenjske dobe mostu je pomemben in je lahko vir pomembnih informacij s pomočjo katerih lažje razumemo obnašanje konstrukcije in posledično boljše planiramo stroškovno gospodarjenje.

1.2 Zakaj nadzor

Z izvajanjem nadzora dosežemo enega ali več ciljev. V nadaljevanju so opisani nekateri od teh ciljev.

Upravljanje s konstrukcijami: Najbolj varne in dolgotrajne konstrukcije so običajno tiste, s katerimi se pravilno gospodari. Meritve in nadzor imajo bistveno vlogo pri tem gospodarjenju.

Podatki pridobljeni iz nadzornega programa se uporabljajo za optimizacijo operacij kot so vzdrževanje, popravila in tudi zamenjava konstrukcije. Vse to temelji na zanesljivih in stvarnih podatkih. Zaznamba tekočih škod služi za odkrivanje odstopanj od projektiranih vrednosti. V sistem gospodarjenja se lahko vključijo podatki pridobljeni z nadzorom in tako se na osnovi zanesljivih in stvarnih informacij poveča kvaliteta odločanja.

Pri številnih objektih se z nadzorom ugotovi, da so v dosti boljšem stanju kot smo pričakovali. V teh primerih se lahko povečajo varnostne meje brez posega v sam objekt. Z izkoriščanjem boljše kakovosti materialov, predimenzioniranja in sinergijskih učinkov je možno podaljšati življenjsko dobo ali obremenitev objekta. Manjše investicije na začetku projekta lahko pripeljejo do precejšnjih prihrankov z izločevanjem ali zmanjšanjem predimenzioniranih elementov objekta.

Nekateri objekti lahko predstavljajo izgubo, ki se ne da identificirati z vizualnim pregledom ali preko modela. V teh primerih je možno povečati varnost in zmanjšati stroške upravljanja [2] s pravočasnim ukrepanjem. Popravilo bo cenejše in bo povzročilo manj prekinitev pri uporabi objekta, seveda če se opravi pravočasno. Nadzor lahko zmanjša tudi stroške zavarovanja.

Gospodarski vpliv izgub na objektu je dvojen: direkten in indirekten. Direktni vpliv se odraža v stroških rekonstrukcije, medtem ko indirektni vpliv vključuje izgube v drugih gospodarskih vejah. Popolno sesutje zgodovinskih spomenikov, kot so stari kamniti mostovi in stolpnice, predstavljajo za družbo nepovratno kulturno izgubo.

Povečanje varnosti: Moteno delovanje javnih objektov ima pogosto resne posledice. Najbolj resne so tiste, kjer pride do človeških žrtev. Celotno takrat, ko ni človeških izgub in je infrastruktura delno ali kompletno nefunkcionalna, je prebivalstvo ohromljeno. Rušenje nekaterih objektov, kot je na primer nuklearna elektrarna, lahko povzroči resno onesnaženje okolja. Nepreostani in zanesljivi nadzorni podatki o objektu lahko pripomorejo k zagotavljanju večje varnosti objekta in njegovih uporabnikov.

Izboljšanje znanja: Spoznavanje obnašanja objekta v resnici ali v laboratorijskih okoliščinah pomaga pri boljšem načrtovanju objektov v prihodnosti. To lahko pripelje do cenejšega, varnejšega in dolgotrajnejšega objekta s povečano zanesljivostjo in učinkom. Raznovrstnost objektov kot posledica zemljepisnega položaja, okoliških vplivov, lastnosti tal, obremenitev itn., onemogoča absolutno znanje o obnašanju. Ne obstajata dva identična objekta.

Dober način za povečanje znanja o delovanju objektov je neprestano opazovanje njegovega obnašanja. Zaradi tega je nadzor v celotni življenjski dobi objekta, od izgradnje do konca uporabe, koristen iz teoretičnega stališča kakor tudi s stališča upravljanja objekta. Teorije se morajo testirati in odlična metoda za testiranje teorij, ki opisujejo javne objekte, je nadzor [3]. Za objekte zgrajene iz neobičajnih materialov (n.pr. podstrešja sestavljena iz tankih plastičnih membran ali napeti objekti) je nadzor učinkovit način za dojetje dejanskega obnašanja objekta in izpopolnjevanja teh teorij.

1.3 Ocenitev nadzora

Obstaja več različnih pristopov za ocenitev objekta in lahko jih uvrstimo v tri osnovne kategorije: statični nadzor, dinamični nadzor in sistemska identifikacija in modalna analiza. Te kategorije se lahko povežejo. Vsaka kategorija ima prednosti in izzive, ki se uporabljajo v odvisnosti od obnašanja objekta in ciljev nadzora.

Vsaka kategorija se lahko izvaja v krajšem ali daljšem obdobju, trajno ali periodično. Āasovni razpored in tempo nadzora je odvisen od spremembe spremljanih parametrov v nekem časovnem obdobju. Za nekatere aplikacije daje periodični nadzor zadovoljive rezultate, vendar so informacije, ki so registrirane med dvema pregledoma izgubljene za vedno. Le trajni nadzor lahko zabeleži njegovo zgodovino, pomaga razumeti njegovo obnašanje in omogoča v celoti izkoristiti sistem nadzora. Investicija v vzdrževanje objekta, z uporabo periodičnega pregleda kot sredstva kontrole, lahko preseže stroške novega objekta [2, 4].

2 NADZORNI SISTEMI IN SENZORJI Z DOLGO BAZO (DEFORMACIJE)

2.1 Nadzorni sistem – osnovni pojmi

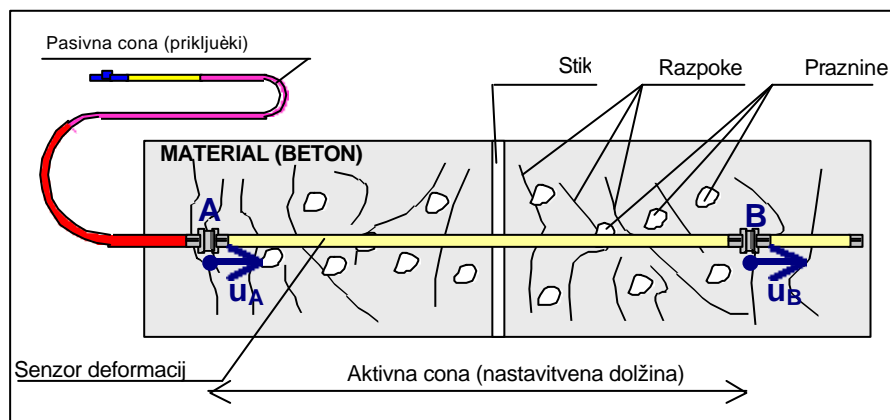
Nadzorni sistem je skupina sredstev, ki je uporabljena za nadzor [1]. Glavne komponente nadzornega sistema so senzori, nosilci informacij, enote za branje, vmesniki in podsistemi za upravljanje s podatki. Naloga senzorjev je, da odkrijejo magnitudo nadziranega parametra in jo spremenijo v prenosljivo informacijo (npr. optična ali električna informacija). Nosilci prenašajo informacijo od sensorja do enote za branje, ki dekodira informacijo in povrne magnitudo nadziranega parametra. Meritev je prikazana operaterju preko vmesnika. Končno, podsistem za upravljanje s podatki je potreben za kontrolo delovanja in za ohranjanje nadzornih podatkov. Komponente nadzornega sistema so lahko ločene ali povezane na različne načine (npr. senzor in nosilec informacij sta lahko ena naprava).

Na splošno so senzori lahko diskretni ali distribuirani. Diskretni senzori imajo lahko kratko ali dolgo merilno bazo. Diskretni senzori odkrijejo opazovani parameter samo na mestih kjer je nameščen, medtem ko distribuirani senzor odkrije opazovani parameter na več lokacijah objekta. SOFO senzori, ki bazirajo na Bragg-mrežasti in Brillouin-razpršeni svetlobi, so primeri diskretnih senzorjev z dolgo bazo, kratko bazo in distribuiranih senzorjev.

2.2 Senzorji z dolgo bazo

V tem delu so podani osnovni pojmi za senzore deformacij z dolgo bazo [5]. Osnovna ideja sensorja deformacij je bila razvita v naprednejši sensor deformacij z dolgo bazo.

Senzor deformacij je namenjen meritvi relativnega premika med dvema že definiranimi točkama objekta. Razdalja med tema dvema točkama se imenuje nastavljena dolžina sensorja.



Slika 1: Shema sensorja z dolgo bazo nameščenega v material z razpokami, prazninami in stiki (za beton)

Pogosto uporabljeni konstrukcijski materiali, še posebej beton, so lahko pod vplivom lokalnih poškodb, kot so razpoke, zraeni žepi ter ostalo. Vse te pomanjkljivosti prinašajo nezveznost v mehanske lastnosti materiala. Npr. okrepljene betonske konstrukcije se navadno analizirajo kot zgradbe iz homogenega materiala – razpokan utrjen beton. Za nadzor tovrstnih objektov je zato nujna uporaba senzorjev, ki so neobčutljivi na nehomogenost materiala.

Senzor deformacij z dolgo bazo je po definiciji senzor z nastavitveno dolžino nekoliko krat večjo kot je maksimalna razdalja med prekinitvami ali maksimalni premer praznine v opazovanem materialu. V primeru razpokanega utrjenega betona mora biti nastavitvena razdalja sensorja z dolgo bazo nekajkrat večja kot oba, maksimalna razdalja med razpokama in premer praznine. Opis meritve izpeljane s senzorjem deformacij z dolgo bazo je prikazan na sliki 1 in zapisan z enačbo 1 [5].

Če sta A in B točki, kjer je senzor pritrjen (slika 1), predstavlja relativni premik točk deformacijo. Meritev sensorja je potem izražen na sledeči način:

$$m_s = \Delta l_{A-B} = u_B - u_A = \int_A^B \epsilon dl + \sum_A^B \Delta w_C + \sum_A^B \Delta w_J + \sum_A^B \Delta w_I \quad (1)$$

kjer je:

m_s – Merilna veličina; Δl_{A-B} – Sprememba razdalje med točkama A in B (podaljšanje ali krajšanje); u_A, u_B – Skupni premik točk A in B v smeri aktivne zone sensorja; ϵ – Natezna napetost v materialu; Δw_C – Sprememba v veličini odprtosti razpoke (če razpoke obstajajo); Δw_J – Spremembe v odprtini stika (če stiki obstajajo); Δw_I – Spremembe v dimenzijah praznin (če praznine obstajajo).

Ker senzor z dolgo bazo meri relativni premik med dvema točkama objekta, predstavlja meritev seštevek integrala natezne napetosti preko dolžine sensorja, vsoto prečnih prekinjenih dimenzijskih sprememb (glej enačbo 1). Povprečna natezna napetost v dolžini sensorja je izračunana kot razmerje med izmerjenim relativnim premikom in nastavitveno dolžino, kot je to prikazano v enačbi 2.

$$\epsilon_s = \frac{m_s}{l_s} \quad (2)$$

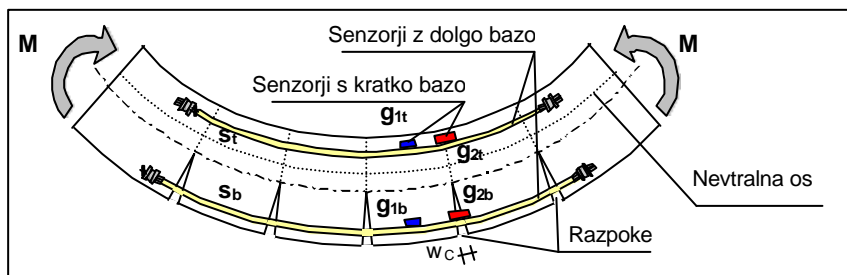
kjer je:

m_s – Merilna veličina; $l_s = l_{A-B}$ – Nastavitvena dolžina (razdalja med točkama A in B); ϵ_s – Meritveno povprečje natezne napetosti v materialu preko nastavitvene dolžine sensorja.

Bistvena prednost takšne meritve je v njeni naravi, saj jo dobimo z računanjem srednje vrednosti preko dolge merilne osnove in ni pod vplivom lokalnih prekinitev in praznin v materialu. Zaradi tega vsebuje meritev informacijo povezano z celotnim obnašanjem objekta in ne samo lokalnim. Primer prikazan v naslednjem odstavku bolj nazorno prikazuje takšne navedbe.

2.3 Primerjava senzorjev z dolgo in kratko bazo – celoten nadzor objekta

Nadzorni parametri se lahko spremljajo na nivoju materiala ali objekta. [1]. Glavna razlika med tema dvema nivojema je v uporabljeni strategiji nadzora in sistemu nadzora. Nadzor materiala daje informacije povezane z obnašanjem materiala, informacije o obnašanju objekta so slabe. Nadzor objekta pa daje informacije povezane z obnašanjem objekta. Razlika med nadzorom materiala in objekta je prikazana na sliki 2.



Slika 2. Razlika med nadzorom material in nadzorom konstrukcij ter paralelna topologija senzorjev z dolgo bazo

Natezna napetost upognjene betonske gredi je nadzorovana z uporabo štirih diskretnih senzorjev s kratko bazo (g_{1t} , g_{1b} , g_{2t} in g_{2b}) in dveh senzorjev z dolgo bazo (s_t in s_b). Pri nastanku razpoke merijo vsi senzorji, ki so namešeni na vrhu gredi (g_{1t} , g_{2t} in s_t) isto vrednost, medtem ko merijo spodnji senzorji (g_{1b} , g_{2b} in s_b) različne vrednosti. Senzorja s kratko bazo (g_{1b} in g_{2b}) sta pod velikim vplivom prisotnosti razpoke in posredujeta informacije povezane samo z njuno lokacijo v gredi. Senzor z dolgo bazo (s_b) meri povprečno vrednost natezne napetosti povezane z odprtjem razpok, kar je povezano z obnašanjem objekta. Konstrukcijsko obnašanje gredi je možno določiti z izračunom njene ukrivljenosti kot razmerjem med merjeno razliko in razdaljo med senzorji [6]. Ne obstaja enostavna tehnika, ki omogoča določanje konstrukcijskega obnašanja z uporabo rezultatov pridobljenih s senzorji s kratko bazo. Iz tega razloga velja za strategijo nadzora prikazano na sliki 2, da senzorji z dolgo bazo omogočajo nadzor na konstrukcijskem nivoju, senzorji s kratko bazo pa omogočajo nadzor na nivoju materiala.

Zaključek prejšnjega primera je ugotovitev, da senzorji s kratko bazo merijo lokalno obnašanje materiala, senzorji z dolgo bazo pa nadzorujejo konstrukcijsko obnašanje obravnavanega elementa.

2.4 Primer senzorja z dolgo bazo– SOFO tehnologija

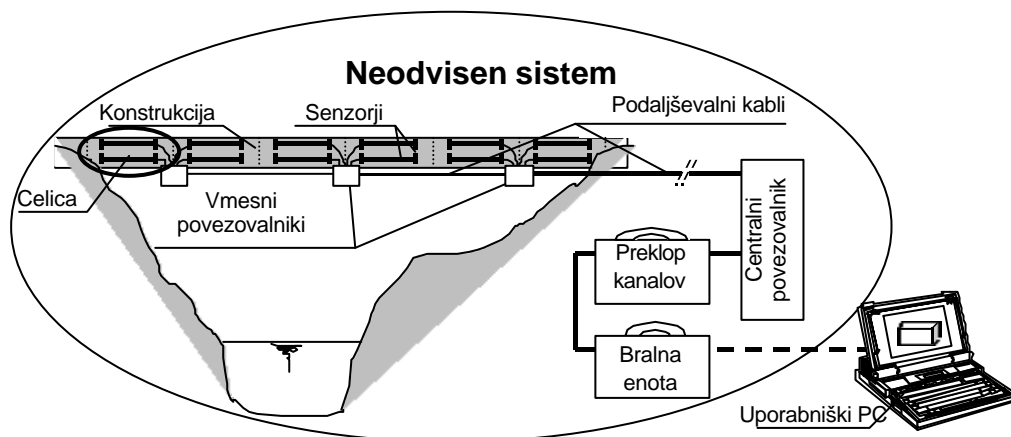
Primer nadzornega sistema s senzorji z dolgo bazo je sistem SOFO (Francoska okrajšava za Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques – nadzor struktur z optičnimi vlakni), zasnovana na nizko koherentni interferometriji v optičnih vlaknih [7].

Osnovni elementi SOFO sistema so senzorji z dolgo bazo, bralna enota in soft-ware za analizo. Senzor sestavljata dva optična vlakna imenovana merilno vlakno in referenčno vlakno. Nahajata se v skupni zaščitni cevi. Merilno vlakno je združeno z konstrukcijo in spremlja njene deformacije. Zaradi možnosti merjenja tako raztezkov kot skrčkov, je merilno vlakno prednapeto za 0,5 %. Referenčno vlakno je prosto in zato neodvisno od konstrukcijskih deformacij. Naloga referenčnega vlakna je kompenzacija temperaturnih vplivov.

Tipične nastavitvene razdalje (dolžine) senzorjev so od 250 mm do 10 m. Resolucija (minimalno zaznana sprememba optičnega signala prenesena v merilno deformacijo) doseže 2 μm , neodvisno od dolžine senzorja, točnost meritve pa je 0,2% merilne vrednosti (linearna korelacija med optičnim signalom in deformacijo). Dinamični obseg senzorja je 0,5% v krčenju in 1.0% v raztezanju, tipična meritev pa traja 6 do 10 sekund.

SOFO sistem je razvit v zgodnjih devetdesetih letih in od leta 1995 uporabljen pri nadzoru širokega spektra civilnih objektov, kot so geotehnične konstrukcije, mostovi, jezovi, stanovanjske in industrijske zgradbe, da naštejemo samo nekatere [8]. Sistem je neobčutljiv na temperaturne spremembe, elektromagnetna polja, vlago in korozijo in je odporen na potopitev vsaj 5 let, kar predstavlja idealno rešitev za kratkoročen in dolgoročen nadzor. Ker je predviden za direktno vstavljanje v beton, senzor omogoča enostavno namestitve, ne zahteva kalibracije, ima visoko obstojnost (več kot 95% za betonsko vgradnjo). Velike dolžine omogočajo boljšo zanesljivost in natančnost v primerjavi s običajnimi senzorji za natezne napetosti, računajo povprečno vrednost na dolgih osnovah in niso pod vplivom lokalnih napak v materialu (razpoke in zraeni žepi). Več informacij o SOFO sistemu in njegovih aplikacijah se lahko najde v literaturi [8].

Tipična aplikacija kakor tudi komponente sistema so prikazani na sliki 3.



Slika 3: Tipična aplikacija in komponente sistema

4. NADZIRANJE MOSTOV SKOZI ŽIVLJENSKO DOBO

Nadzor pri izgradnji novega mostu: Gradnja je zelo občutljiva faza v življenju objekta. Lastnosti materiala se pri betonskih objektih spreminjajo s staranjem. Izrednega pomena je informacija o doseženih in ohranjenih želenih vrednostih. Napake (npr. prezgodnje razpoke), ki nastajajo v času gradnje, lahko imajo resne posledice na delovanje objekta. Nadzorni podatki pomagajo inženirjem, da ugotovijo in razumejo pravo obnašanje objekta, kar jih pripelje tudi do boljše ocenitve dejanskega delovanja in primernih ukrepov.

Zelo pomembne informacije dobljene skozi nadzor pri izgradnji so: ocena časa strjevanja betona z namenom, da se oceni začetek obremenilnega krčenja [9]; meritve deformacij v zgodnji fazi betona s ciljem ocenitve lastne obremenitve in rizik od prezgodnjih razpok [10]; kadar so objekti grajeni v zaporednih fazah, lahko meritev pripomore k izboljšanju sestave betona, ko je potrebno. V primeru vnaprej izdelanih struktur, lahko senzori vršijo kontrolo kvalitete; optimizacija med dvema zaporednima fazama nalivanja zaradi ocenitve sušenja v prejšnjih fazah; za prednapete strukture - nadzor deformacij v vrvi pomaga pri nastavitvi prednapetih sil in določajo sprostitev [11]; nadzor osnovnih nastavitvev pomaga pri razumevanju izvirno vgrajenih obremenitev; poškodbe zaradi neobičajnih obremenitev kot so nevihte ali potresi v času gradnje lahko vplivajo na končno obnašanje strukture; optimalna regulacija pozicije strukture v času postavitve [12]; poznavanje izboljšav in recalibracije modela [13].

Vgradnja nadzornega sistema omogoča v času posameznih faz gradnje izpeljavo nadzora strukture skozi celo življenjsko dobo. Ker mora biti večina struktur v času vzdrževanja večkrat kontrolirana [14], je vgradnja nadzornega sistema od samega začetka, najboljši način za zmanjševanje stroškov nadzora in kontrole.

Nadzor po obnovi, ojačitvi ali povečanja mostu: Pogosti razlogi za obnovo obstoječih objektov so zmanjšanje kvalitete materiala in/ali povzročena škoda [15]. Tudi nove funkcijske zahteve za most (npr. povečanje) vodijo do novih zahtev za ojačitev [16]. Če so elementi ojačitve izdelani iz novega betona, mora biti zagotovljeno dobro vzajemno delovanje novega betona na obstoječo konstrukcijo. Zgodnje deformacije novega betona ustvarijo vgrajeno preobremenitev, slaba zveza pa povzroči razcepitev novega betona in s tem izbriše koristne posledice popravka ali ojačitve.

Ker novi betonski elementi opazovani ločeno predstavljajo novo strukturo, so razlogi za njihov nadzor enaki kot pri novih strukturah, ki so bili predstavljeni v prejšnjih poglavjih. Ugotovitev uspeha obnove ali ojačitve je dodatno opravičilo. [16].

Nadzor v času testiranja mostu: Iz varnostnih razlogov morajo biti mostovi pred uporabo preizkušeni [16]. V tej fazi morajo biti doseženi zahtevani nivoji delovanja objekta. Merijo se tipični nadzorni parametri (kot so deformacije, notranje napetosti, premiki, obračanje prereзов in pojava razpok). Testi se izvajajo z namenom, da se ugotovi pravo obnašanje objekta in se ga primerja s teoretičnimi ocenitvami [17]. Nadzor v tej fazi se lahko uporabi za kalibracijo numeričnega modela, ki opisujejo obnašanje objekta [13].

Nadzor v času vzdrževanja mostu: Vzdrževalna faza je najpomembnejše obdobje v življenjski dobi objekta. V tej fazi so konstrukcijski materiali podvrženi degradaciji s staranjem. Beton poka in leze, jeklo oksidira in se lahko zlomi zaradi prevelikih obremenitev. Slabšanje kvalitete materialov je lahko povzročeno z mehničnim (obremenitve večje kot je to bilo teoretično predpostavljeno) in fizično-kemičnim faktorjem (rjavjenje jekla, vpliv soli in kloridov na beton, zmrzovanje betona itn.). Posledica zmanjšanja kvalitete materiala je upad kapacitete, trajnosti in varnosti objekta.

Nadzor v času vzdrževanja daje informacije o obnašanju objekta pri predvidenih obremenitvah [16], hkrati pa zazna učinek nepredvidenih obremenitev. Podatki pridobljeni z nadzorom so uporabni pri odkritju napak, ocenitvi varnosti in določitvi preostale kapacitete objekta. Zgodnje odkritje napak je posebej pomembno, ker nam omogoča ustrezno in pravočasno ukrepanje. Če napaka ni določena, se čedalje bolj širi in objekt več ne zagotavlja zahtevane nivoje delovanja. Pozno odkritje napak ima za posledico ali zelo povečane stroške obnove [2] ali, v nekaterih primerih, zaprtje objekta in njegovo odstranitev. Pomembnost nadzora je zelo velika v seizmičnih področjih.

Nadzor objekta, ki ni bil nadzorovan v času gradnje, lahko služi kot osnova za razumevanje trenutnih in napoved poznejšega obnašanja objekta [17]. O tem v nadaljevanju.

Nadzor v času odstranitve mostu: Ko objekt več ne ustreza zahtevanemu načinu delovanja in so stroški obnove ali ojačitve pretirano visoki, dosežena je skrajna življenjska doba objekta, ga je treba odstraniti. Nadzor pomaga pri varnejši in uspešnejši razgraditvi.

5. PRIMER NADZIRANJA MOSTOV SKOZI ŽIVLJENSKO DOBO

Severni in južni most v Versoix sta dva paralelna mosta - dvojčka [16]. Na vsakem sta dva pasa švicarske državne avtoceste A9 med Genevo in Lausanno. Z namenom povečanja frekvence prenosa, sta dograjena tretji prometni pas in zasilni pas na zunanji strani, z razširitvijo visečega dela (glej sliko 4).

Zaradi dodane teže in prednapetja, kakor tudi zaradi različnega krèenja med novim in starim betonom, se je most v èasu gradnje upognil (vertikalno in horizontalno) in zvil. Z namenom poglobljenega poznavanja o obnašanju in delovanju mostov ter optimizacije betonske mešanice, so se inženirji odloèili za nadzor notranjih napetosti, premikov in temperature skozi celo življenjsko dobo mostu. V ta namen je bil izbran SOFO nadzorni sistem [7, 8], ker s svojimi zmogljivostmi ustreza zahtevam za tovrstni življenjski nadzor skozi življenjsko dobo.

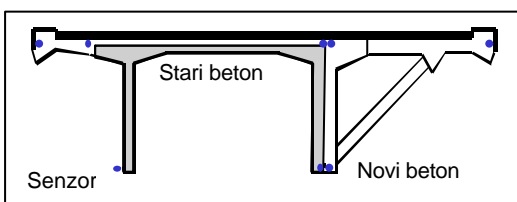


Slika 4: Pogled na Versoix most pred razširitvijo

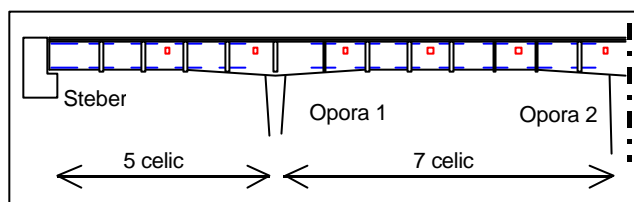


Slika 5: SOFO sistem -enota za branje

Senzorji so namešèeni na površino obstojeèega (starega) dela mostu in vgrajeni v sveži beton novega dela mostu. Osem senzorjev je postavljeno po preseku kot je prikazano na sliki 6 in vseh 12 odsekov je opremljeno kot je prikazano na sliki 7. Senzorji so povezani na enoto za branje preko vmesnih povezovalnikov in vežilnih optiènih podaljševalnih kablov. Centralna meritvena toèka z enoto za branje je namešèena v bližini stebra in je prikazana na sliki 5



Slika 6: Pozicija senzorjev v preseku



Slika 7: Dolžinska pozicija senzorjev

Nadzor v èasu razširitve in po njej: Najveèja pozornost v èasu gradnje je bila posveèena zagotavljanju dobrega vzajemnega delovanja starega in novega betona. Z namenom kontrole tega delovanja so senzorji postavljeni eden zraven drugega v novem in starem betonu. (glej sliko 6). Izvajanje nadzora v veè kot dveh mesecih po nalivanju betona je pokazalo, da sta oba senzorja izmerila iste deformacije in je na podlagi teh rezultatov medsebojno delovanje med starim in novim betonom ocenjeno kot zelo dobro. Pri tem sta tudi odkrita horizontalni odklon in različèn èas nalivanja zaradi neenake temperature na levi in desni strani prereza (glej sliko 10). Primer meritve je prikazan na sliki 8.

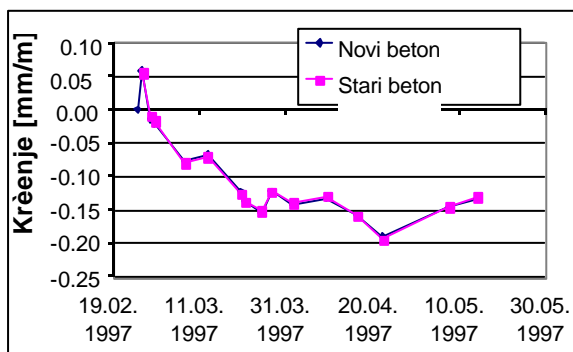
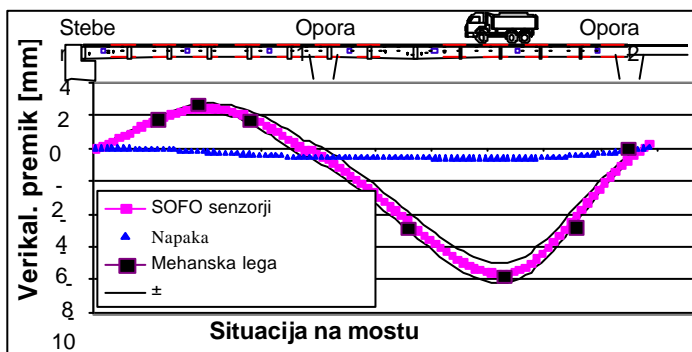
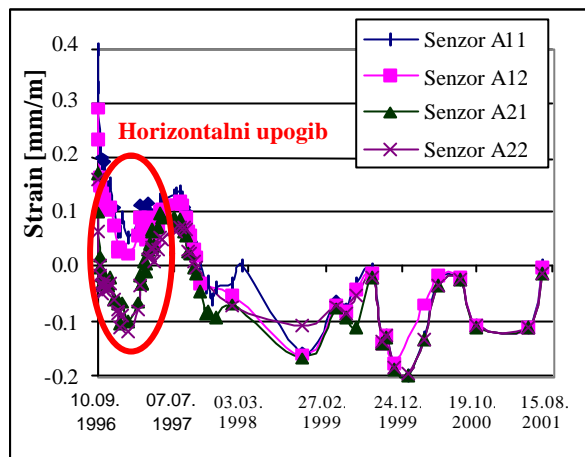


Figure 8: Nadzor staro-nove betonske interakcije

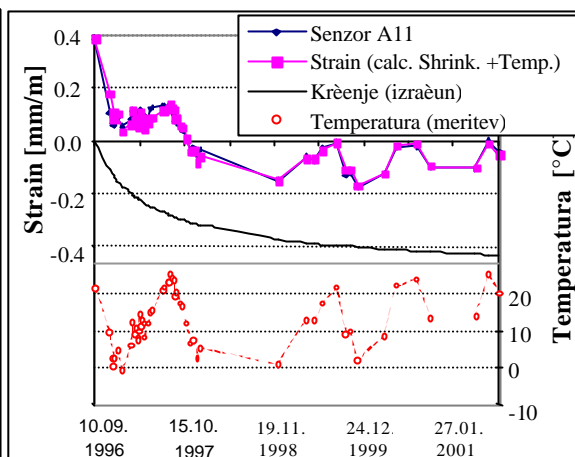


Napaka 9: Nadzor v èasu obremenitve

Nadzor v času testiranja mostu: Tudi nadzor vertikalnih premikov mostu v času preizkusov na obremenitev, ki so bili izvedeni maja 1998 po končanih gradbenih delih, je bil izveden z optičnimi senzorji. Slika 9 kaže primer meritve v času obremenitve mostu. Vrednosti pridobljene preko SOFO senzorjev so izračunane z uporabo dvojne integracije ukrivljenosti [6]. Istočasno so bile izvedene tudi meritve z odčitavanjem na označenih lokacijah (vgrajene invar žice pod mostom in merjene z IBAP-EPFL). Rezultati testa (slika 9) potrjujejo načrtovan način delovanja razširjenega mostu.



Slika 10: Versoix most : 5-letni potek notranje napetosti



Slika 11: Krèenje in temperatura

Nadzor v času vzdrževanja mostu: Dolgoroèni nadzor mosta v Vesoixu se nadaljuje. Z namenom nadzora notranjih napetosti in razvoja premikov mostu, se meseèno izvajajo kvazi-statiène meritve. Petletni potek notranjih napetosti je prikazan na sliki 10. Po horizontalni upogitvi po preseku, ki je nastala zaradi neenake toplote in razliènega èasa nalivanja, so vsi senzorji izmerili približno enake deformacije. To potrjuje, da presek ni izpostavljen neprièakovanemu upogibanju zaradi škode ali razcepitve.

Diagram notranjih napetosti na sliki 11 je pridobljen z meritvijo (senzor A11) in je primerjan z modelom (notranja napetost -izraèun krèenja + temperatura). Opazna je zelo dobra skladnost, kar potrjuje dobro načrtovanje in izvedbo mostu. Potek krèenja ni konèana vendar je stabiliziran (vidi sliko 11) Sezonske spremembe temperature vplivajo na obnašanje mostu in so tudi razvidne iz slike 11.

6 ZAKLJUÈEK

Nadzor skozi življenjsko dobo objekta je kontinuirano ali obèasno zapisovanje parametrov v vseh njegovih fazah. Prednosti tovrstnega nadzora so v boljšem planiranju in manj dragem upravljanju objekta, poveèani varnosti in izboljšanju znanja o pravem obnašanju objekta. Takšen nadzor zahteva sofisticirane nadzorne sisteme, katerih način delovanja zadovoljuje varnostne, tehnološke, ekonomske in estetske vidike, da so enostavni za uporabo, da se hitro namestijo, da so dolgotrajni, zanesljivi, stabilni, neodvisni od èloveškega upravljanja in neobèutljivi na zunanje vplive.

Prednosti nadzora skozi življenjsko dobo objekta so prikazane na dejanskem primeru SOFO nadzornega sistema namešèenega na mostu Versoix v Švici. Prikazane so ugodnosti zbrane v vsaki fazi življenjske dobe mostu in te popolnoma opravièujejo celotni koncept nadzora.

Posebnost sistema so senzorji z dolgo bazo. Prikazane so velike moènosti uporabe senzorjev z dolgo bazo, ker zagotavljajo meritve, ki niso pod vplivom lokalnih napak na materialu. Povpreèna izraèunana vrednost dosežena preko senzorjev z dolgo bazo se popolnoma ujema s filozofijo ojaèitve betona kjer je razpokani beton upoštevan kot homogeni material na makro nivoju.

Senzorji so optični, zato so neobèutljivi na okoliške vplive in posredujejo stabilno in natanèno meritev. Razen tega so zaradi svoje dolgotrajnosti primerni za dolgoroèni nadzor, ter tako zajemajo celo življenjsko dobo objekta, od gradnje do konca uporabe.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Dr. S. Vurpillot, Dr. P. Kronenberg in skupini v IMAC-EPFL, ter IBAP-EPFL za nasvete, diskusije, pomoè in sodelovanje v realizaciji projekta mosta Versoix in tega èlanka.

REFERENCES

- [1] B. Glisic, D. Inaudi, Components of structural monitoring process and selection of monitoring system, 6th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM 2003), Pages 755-761, September 15-18, 2003, Oslo, Norway
- [2] A. Radojicic, S. Bailey, E. Brühwiler, "Consideration of the Serviceability Limit State in a Time Dependant Probabilistic Cost Model", in "Application of Statistics and Probability", Vol. 2, pp 605-612, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1999
- [3] I. F. Markey I. F., "Enseignements tirés d'observations des déformations de ponts en béton et d'analyses non linéaires", Ph.D. Thesis N° 1194, EPFL, Lausanne, Switzerland (1993)
- [4] D. M. Frangopol, A. C. Estes, G. Augusti, M. Ciampoli, "Optimal bridge management based on lifetime reliability and life-cycle cost", Short course on the Safety of Existing Bridges, ICOM&MCS, pp 112-120, EPFL, Lausanne, Switzerland (1998)
- [5] B. Glisic, D. Inaudi, Long-gage fiber optic sensors for global structural monitoring, First International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, ISIS Canada, Pages 285-295., September 19-20, 2002, Winnipeg, Manitoba, Canada
- [6] S. Vurpillot, "Analyse automatisée des systèmes de mesure de déformation pour l'auscultation des structures", Ph.D. Thesis N° 1982, EPFL, Lausanne, Switzerland (1999)
- [7] D. Inaudi, "Fiber Optic Sensor Network for the Monitoring of Civil Structures", Ph.D. Thesis N° 1612, EPFL, Lausanne, Switzerland (1997)
- [8] www.smartec.ch
- [9] B. Glisic, "Fibre optic sensors and behaviour in concrete at early age", Ph.D. Thesis N° 2186, EPFL, Lausanne, Switzerland (2000)
- [10] S. Vurpillot, D. Inaudi, J.-M. Ducret, "Bridge monitoring by fiber optic deformation sensors: design, emplacement and results", SPIE, Smart Structures and materials, Vol 2719, pp. 141 - 149, San Diego, USA, (1996)
- [11] R. L. Idriss, "Nondestructive Evaluation for Lifetime Bridge Assessment: From Construction to Service", 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington DC, USA (2002)
- [12] S.T. Vohra, B. Althouse, G. Johnson, S. Vurpillot, D. Inaudi, "Quasi-Static Strain Monitoring During the "Push" Phase of a Box-Grider Bridge Using Fiber Bragg Grating Sensors", European Workshop on Fiber Optic Sensors, Peebles, Scotland, (1998)
- [13] Bernard O., "Comportement à long terme des éléments de structures formés de bétons d'âges différents", Ph.D. Thesis N° 2283, EPFL, Lausanne, Switzerland (2000)
- [14] SIA 462, Swiss norms
- [15] D. Inaudi, N. Casanova, S. Vurpillot, B. Glisic, P. Kronenberg, S. Lloret, "Deformation monitoring during bridge refurbishment under traffic", 16th Congress of IABSE, Luzern, Switzerland, on CD, (2000)
- [16] D. Inaudi, P. Kronenberg, S. Vurpillot, B. Glisic, S. Lloret, "Long-term monitoring of a concrete bridge with 100+ fiberoptic long-gage sensors", SPIE, Conf. Nondestructive Evaluation Techniques for Aging Infrastructure & Manufacturing, Vol 3587-07, Newport Beach, USA (1999)
- [17] M. Hassan, "Critères découlant d'essais de charge pour l'évaluation du comportement des ponts en béton et pour le choix de la précontrainte", Ph.D. Thesis N° 1296, EPFL, Lausanne, Switzerland (1994)