

OCENA INTEGRITETA BETONSKIH KONSTRUKCIJA NA OSNOVU RIZIKA RISK BASED INTEGRITY ASSESSMENT OF CONCRETE STRUCTURES

Originalni naučni rad / Original scientific paper
UDK / UDC: 624.012.3.042:519.245
Rad primljen / Paper received: 28.05.2007.

Adresa autora / Author's address:
PM Lucas Enterprises Ltd. Nicosia, Cyprus–Beograd,
Srbija, m.pavistic@gmail.com

Ključne reči

- betonska konstrukcija
- rizik
- integritet
- oštećenje
- Monte Karlo metoda

Izvod

Inicijacija i razvoj procesa oštećenja betonskih konstrukcija je vremenski zavisna pojava, sa negativnim posledicama po nosivost konstrukcije, smanjujući ukupnu otpornost, i kao konačnu posledicu smanjujući stepen sigurnosti konstrukcije i njenu pouzdanost. Raniji, deterministički postupak ocene integriteta betonske konstrukcije je skup i konzervativan, i dovodi do donošenja prilično subjektivne inženjerske odluke i do zaključka bez pravog odgovora o stvarnom stepenu sigurnosti konstrukcije i uvođenja postupka opravke koji nije optimalan. U radu je predložen probablistički pristup kojim se, na osnovu prethodne analize kritičnih elemenata konstrukcije i mogućeg mehanizma otkaza konstrukcije, a na osnovu usvojenog odgovarajućeg graničnog stanja, određuje verovatnoća dostizanja tog graničnog stanja, i u skladu sa očekivanim negativnim posledicama utvrđuje stepen rizika kojem je konstrukcija izložena. Primera radi, postupak je primenjen na ocenu integriteta drumskog mosta od prednapregnutog betona na autoputu. Most je bio teško oštećen prilikom NATO bombardovanja Jugoslavije i hitno je tražena urgentna odluka o najpovoljnijim merama za popravku mosta. Primenom metode Monte Karlo za predloženo granično stanje konstrukcije mosta, proračunat je stepen rizika i doneta najpovoljnija odluka.

UVOD

Od samog početka eksploatacijskog veka betonska konstrukcija je izložena različitim radnim uslovima i ekstremnim i štetnim pojavama – opasnostima (preopterećenje, vatra, eksplozija, poplava, zemljotres itd.). Kao posledica, opšti integritet konstrukcije je ugrožen i neko granično stanje konstrukcije može bit dostignuto.

Rizik je verovatnoća pojave posebno nepovoljnog stanja (granično stanje) u određenom vremenskom periodu, umnožena posledicama. Inicijacija i razvoj oštećenja u betonskoj konstrukciji je vremenski zavisan proces određen brojnim faktorima, kao što su: agresivna sredina, kvalitet konstrukcije, istorija opterećenja i kvalitet održavanja. U isto vreme, napredovanje oštećenja utiče na otpornost, sigurnost i pouzdanost konstrukcije, smanjujući ih tokom vremena, /2,4/.

Keywords

- concrete structure
- risk
- integrity
- damage
- Monte Carlo method

Abstract

Damage process initiation and propagation in concrete structures is a time dependent phenomenon with the negative implication to the structure load bearing capacity, decreasing its overall resistance and as a final consequence, decreasing degree of structural safety and reliability. Previous deterministic procedure of concrete structural integrity assessment is expensive and conservative, leading to a rather subjective decision and to conclusions without proper answers about the true structural safety degree, and thus leading to implementation of non-optimal repair procedures. In the paper, the probabilistic approach is proposed which, on the basis of previous analysis of critical structural elements and virtual structural failure mechanism, and accepted corresponding marginal state, determines the probability of reaching the marginal state and in conjunction with expected negative consequences, assesses the degree of risk that the structure is exposed to. As an example, the procedure is applied in integrity assessment of the prestressed concrete highway bridge. The bridge was heavily damaged during NATO bombing of Yugoslavia and an urgent decision on optimal measures for bridge repair was requested. The Monte-Carlo method was applied for proposed marginal state of bridge structure, and the degree of risk is calculated and the right decision was made.

INTRODUCTION

From the very start of service life, the concrete structure is exposed to various loading conditions, and excessive and adverse events – hazards (overload, fire, explosions, floods, earthquake etc). As a consequence, the overall integrity of the structure is jeopardized and some marginal structural states could be reached.

Risk is a probability that a particular adverse event (marginal states) will occur during a given period of time multiplied by the consequences. Damage initiation and development in concrete structures is a time dependent process determined by many factors as: aggressive environment, quality of construction, loading history and quality of maintenance. At the same time, the damaging progress affects structural resistance, safety and reliability, constantly decreasing them in time, /2,4/.

FUNKCIJA OŠTEĆENJA

Imajući u vidu sve navedeno, pravo pitanje koje se odnosi na integritet betonske konstrukcije je: koji stepen oštećenja konstrukcije može da se dopusti i toleriše bez primene bilo kakve zaštitne akcije na konstrukciji ili, koja je granica prihvatljivog oštećenja? Odgovor na ovo pitanje je od velikog značaja ne samo sa stanovišta ocene integriteta konstrukcija, već i za donošenje odluke o neophodnosti popravke konstrukcije i pri predviđanju njenog preostalog veka (sl. 1).

Proces inicijacije i razvoja oštećenja – akumulacija oštećenja – ima negativne posledice na nosivost konstrukcije, smanjujući njenu sigurnost i pouzdanost:

$$r = R - S \quad (1)$$

gde je: r – pouzdanost konstrukcije; R – otpornost konstrukcije; S – opterećenje.

Dva parametra (R i S), koji određuju pouzdanost, menjaju se izuzetno nepovoljno tokom vremena – otpornost se smanjuje, a opterećenje raste sve dok se ne dostigne granično stanje konstrukcije ($R = S$). Razvoj oštećenja betonske konstrukcije se odvija kontinualno, gledano u celini, ali ustvari dolazi do naglog pada, jer do otpuštanja akumulirane energije dolazi s vremena na vreme. Sve u svemu, mogu da se istaknu tri značajna stanja tokom ovog procesa: (1) inicijacija oštećenja, (2) granično stanje upotrebljivosti i (3) završno granično stanje.

Bez obzira na uzrok pojave razaranja i oštećenja, oni se uglavnom pojavljuju u obliku vidljive prsline. Međutim, bez obzira na to koliko je pojava prsline štetna i nepoželjna, ona predstavlja vidljivo upozorenje i pokazatelj stanja konstrukcije. Treba napomenuti da pojava prsline u betonskoj konstrukciji (u kojoj se prsline posmatra kao sastavni deo prirodnog stanja konstrukcije) ima bitno drugačije značenje nego pojava prsline u metalnoj konstrukciji. Naime, prsline u betonskoj konstrukciji ne označava da je dostignuto kritično stanje, koje prethodi potpunom otkazu konstrukcije. Inicijacija prsline u betonskoj konstrukciji je posledica male otpornosti betona na dejstvo zatežućeg napona (čvrstoća betona na zatezanje je jednaka približno 1/10 delu čvrstoće betona na pritisak). Neposredno pošto je dostignuta čvrstoća zatezanja betona (i prsline su inicirane) naponi zatezanja se preraspodeljuju na ojačanje od čelika. Dalje napredovanje razaranja betona zavisi od kvaliteta ugrađene armature (iskazan kao odnos ojačanja $\mu = A_s/A$, A_s je površina poprečnog preseka armature, A – ukupna površina preseka) i dolazi do „igre“ uravnoteženja između malog intenziteta deformacije zatezanja armature (veća vrednost μ) i sve većeg stepena deformacije pritiska u betonu (manja vrednost μ) i obrnuto.

Bilo kakav da je uzrok inicijacije oštećenja, sledeće vrlo važne činjenice moraju biti uzete u razmatranje u odnosu na pravilno utvrđivanje integriteta betonske konstrukcije:

- Betonski materijal sadrži mikro greške (postojeće mikro prsline) pre nego što opterećenje počinje da deluje.
- Posle opterećenja, brzo se dostiže zatezna čvrstoća betona, zbog čega je prihvaćeno da je pojava prsline normalna i očekivana.

DAMAGE FUNCTION

Having in mind all mentioned, the right question concerning integrity assessment of concrete structure is: what degree of structural damage may be permitted and is tolerable when taking no protective actions on the structure or, what is the limit of acceptable damage? The response to this question is very important not only from the point of view of structural integrity assessment, but for making decisions about the needs for structural repair and predicting its remaining service life (Fig. 1)

The process of damage initiation and propagation – damage accumulation – has negative implication to structural bearing capacity, decreasing its safety and reliability:

$$r = R - S \quad (1)$$

where: r – reliability of the structure; R – resistance of the structure; S – load.

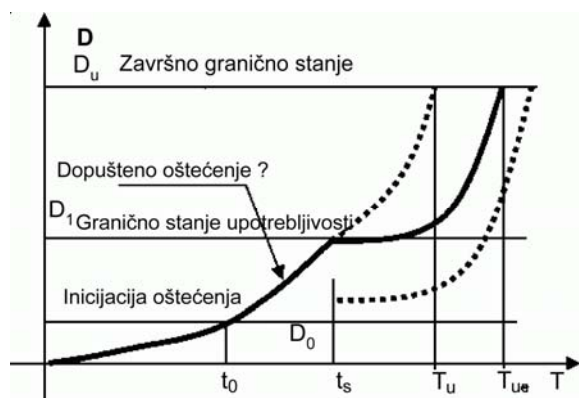
The two parameters (R and S), characterizing reliability, change extremely unfavourably in time – resistance decreases but loading increases until the structural marginal state ($R = S$) is reached. Damage development in concrete structures takes place continuously in large scale, but actually sudden drops happen since accumulated energy release occurs from time to time. All in all, three significant states during this process may be pointed out: (1) damage initiation, (2) marginal state of applicability and (3) final marginal state.

Concrete deterioration and damage, regardless of their cause, mainly appear visible as a crack. However, no matter how much crack occurrence is detrimental and undesirable, it presents is a visible warning and an indicator of structural state. It should be noted that crack occurrence in concrete structures (where the crack is treated as constitutive element in the natural state of structure) has an essentially different meaning than cracks in metal structures. Namely, a crack in the concrete structure does not mean that a critical structural state is reached that precedes total structural failure. Crack initiation in concrete structures is due to low resistance of concrete to the action of tensile stresses (concrete tensile strength is approximately 1/10 of concrete compression strength). Soon after concrete tensile strength is reached (and cracks initiated) the tension stresses are redistributed to the steel reinforcement. Further concrete deterioration advance depends on the quality of imbedded reinforcement (given by reinforcement ratio $\mu = A_s/A$, A_s is reinforcement cross-section area, and A – total cross section area) and a balancing “game” occurs between the lower rate of tensile strain in the reinforcement (greater values of μ) and the increasing rate of compressive strain in concrete (lower values of μ), and vice versa.

Whatever the cause to damage initiation, the following important facts need to be considered in regard to proper concrete structural integrity assessment:

- Concrete material contains micro defects (pre-existing microcracks) before the load is applied.
- After loading, concrete tensile strength is quickly reached and crack occurrence is thus accepted as normal and expected.

- Razvoj prslina i razaranje materijala su posledica produženog nepovoljnog stanja (porast napona u armaturi) u agresivnoj sredini.
- Pravac rasta prslina je uvek upravan na pravac glavnih zateznih napona.
- Inicijacija i rast prslina (do izvesnog stepena) ne znači prelaz u kritično stanje konstrukcije.



Slika 1. Razvoj oštećenja konstrukcije sa vremenom

Sve napred navedeno suočava inženjere i eksperte sa veoma složenim problemima ispravne ocene integriteta betonskih konstrukcija. Naime, ocena integriteta je ustvari proračun preostale otpornosti konstrukcije, uzimajući u obzir sva otkrivena oštećenja na konstrukciji. U cilju otkrivanja i lociranja oštećenja potrebno je izvesti kontrolu ili dugotrajni monitoring konstrukcije. Kontrola, koja se obično izvodi periodično, ne sastoji se samo od vizuelnog ispitivanja konstrukcije, već i od primene pogodne metode za ispitivanje bez razaranja (IBR) i tehnike ispitivanja razaranjem. Ovo ustvari predstavlja već odavno uspostavljen i dobro poznat deterministički inženjerski pristup problemu. Kao što će biti kasnije pokazano, postoji opravdana osnova da se ovaj postupak zameni novim – probabilističkim pristupom, koji prihvata određeni stepen rizika. Prihvatanje verovatnoće da u konstrukciji može da se dostigne granično stanje, iz osnove menja tradicionalno ponašanje u pogledu sigurnosti konstrukcije.

OCENA INTEGRITETA ZASNOVANA NA RIZIKU

Već je dobro poznata činjenica da su promenljive koje karakterišu integritet betonske konstrukcije neizvesne ili slučajne po prirodi i da mogu da se opišu kao statističke promenljive ili promenljive teorije verovatnoće. Zbog toga svi parametri koji opisuju integritet betonske konstrukcije imaju sopstvenu gustinu funkcije verovatnoće.

S druge strane, betonske konstrukcije, kao sve druge, su izložene verovatnoći različitih spoljnjih i ponekad izraženih aktivnosti – štetnih događaja ili hazarda (preopterećenje, vatra, poplava, zemljotres, sudar vozila, eksplozije), što može da dovede do oštećenja konstrukcije ili do njenog otkaza. Rizik je verovatnoća pojave nekog od tih štetnih događaja pomnožena sa posledicama i karakteriše se na osnovu tri aspekta: (1) neizbežnost, (2) verovatnoća i (3) posledica.

Različiti rizici kojima konstrukcije mogu biti izložene, su neizbežni.

- Crack propagation and material deterioration are a result of prolonged unfavourable state (increased stress in the reinforcement) in an aggressive environment.
- Crack growth direction is always perpendicular to the direction of principal tensile stresses.
- Crack initiation and propagation (up to a certain degree) does not mean a transition to a critical structural state.

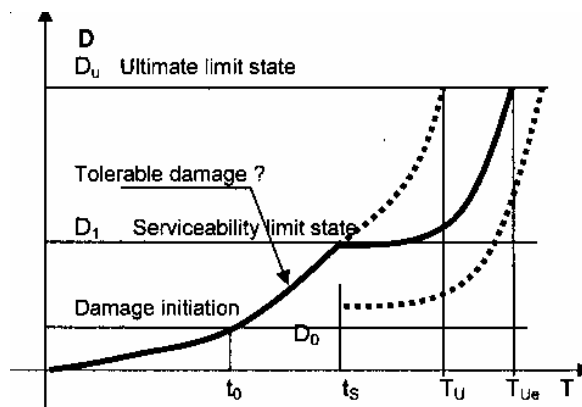


Figure 1. Development of structural damage vs. time.

All of the above mentioned faces engineers and experts with very complex problems of proper concrete structural integrity assessment. Namely, integrity assessment is in fact the calculation of remaining structural resistance, taking into account all damage detected in the structure. In order to detect and to locate damage, it is necessary to perform inspection or long term monitoring of the structure. Inspections, usually performed periodically, do not only consist of structural visual examination, but also of applied convenient non-destructive test (NDT) methods and destructive test techniques. This represents an already established and known deterministic engineering approach to the problem. As it will be shown further, there is a reasonable basis for replacing this procedure with the new – probabilistic approach that accepts a certain level of risk. Accepting the probability that some marginal state may be reached in the structure, fundamentally alters the traditional approach to structural safety.

RISK BASED INTEGRITY ASSESSMENT

It is already a well known fact that variables characterizing the integrity of a concrete structure are uncertain or random by nature and that they can be described by variables of statistics and the probability theory. Thus, all parameters describing concrete structural integrity have their own function of probability density.

Alternatively, concrete structures, as any other, are exposed to the probability of various external and sometimes excessive actions – adverse events or hazards (overloads, fires, floods, earthquakes, vehicle impacts, explosions) that could lead to structural damage or failure. The risk is the probability of appearance of some of these adverse events multiplied by the consequences and is characterized based on three aspects: (1) inevitability, (2) probability, and (3) consequences.

Different risks, to which structures can be exposed to, are inevitable.

Moguće je razumno smanjiti rizik, njime može da se upravljati, ali on ne može da svede na „nulti“ nivo. Smanjenje rizika sa ciljem da se poveća sigurnost konstrukcije neizbežno podrazumeva povećanje finansijskih investicija. Razumljivo je očekivanje vlasnika da ostvari viši nivo sigurnosti konstrukcije sa najmanjom investicijom. To je ustvari početak procesa optimizacije u oceni integriteta konstrukcije, primoravajući ga da prihvati izvestan nivo rizika, odnosno da prihvati izvesnu verovatnoću da može da dođe do pojave nekog „štetnog događaja“.

Već je rečeno da je verovatnoća otkaza (graničnog stanja) konstrukcije vremenski zavisna funkcija. Vremenski zavisna verovatnoća P otkaza može da se izrazi kao:

$$Pf(t) = P_r [R \leq S] = P_r [g(R, S) \leq 0] = \int_0^{\infty} f_R(t) f_S(t) dt \quad (2)$$

gde je $g(R, S)$ – funkcija graničnog stanja, $f_R(t)$ – funkcija gustine verovatnoće otpornosti konstrukcije, $f_S(t)$ – funkcija gustine verovatnoće opterećenja konstrukcije.

Posledice otkaza konstrukcije mogu da se iskažu kao neposredan finansijski gubitak (trošak popravke, rušenje, demontaže) kroz zagađenje okoline i gubitak ljudskih života. Na taj način rizik može da dobija dimenziju, tj. broj ljudskih žrtava po događaju.

Pojam konačnog stanja takođe može da se proširi na bilo koje neželjeno stanje inženjerski definisano kao kritično za posmatranu konstrukciju. Ustvari, granično stanje se definiše uvek posle izvedene inspekcije konstrukcije i dobijenih zapisa o oštećenju. Treba da se naglasi da ovo važi čak iako inspekcija betonske konstrukcije nije bila deterministička, već zasnovana na riziku. Inspekcija treba da je dobro planirana, usmerena na najkritičnije elemente konstrukcije i programirana prema prethodnoj analizi preostalog nosećeg kapaciteta konstrukcije. Analiza rizika koja sledi posle toga treba da obuhvati sve moguće hazarde, scenario mogućih oštećenja i mehanizama loma koji se pojavljuju i verovatnoću da se dostigne određeno granično stanje konstrukcije. Za sve moguće mehanizme loma određuje se verovatnoća pojave i odgovarajuće posledice, odnosno ocenjuje stepen rizika (FMECA – metoda kritične analize načina otkaza i posledica), posle koje treba da usledi konačna odluka. Postupak je predstavljene na sl. 2.



Slika 2. Blok shema ocene integriteta betonske konstrukcije zasnovane na riziku

It is possible to reasonably reduce risk; it can be managed, but it cannot be narrowed down to “zero” level. The reduction of risk in the aim to increase structural safety necessarily implicates increase of financial investments. The owner has reasonable expectation to accomplish a higher level of structural safety with least investment. In fact, this is the beginning of the optimization process in structural integrity assessment, forcing one to take certain level of risk, in respect, to accept a certain probability that some “adverse event” might appear.

It is already mentioned that the probability for failure of a structure (marginal state) is a time dependent function. The time dependent failure probability P may be expressed as:

$$Pf(t) = P_r [R \leq S] = P_r [g(R, S) \leq 0] = \int_0^{\infty} f_R(t) f_S(t) dt \quad (2)$$

where: $g(R, S)$ – marginal state function, $f_R(t)$ – probability density function of structural resistance, $f_S(t)$ – probability density function of structural loading.

Consequences of structural failure can be expressed as direct financial loss (expense for reparation, demolition, disassembling) through environmental pollution and loss of human life. In this way, risk is ascribed a dimension e.g. number of human lives per event.

The conception of marginal state can also be extended to any undesired state defined by an engineer as critical for any particular structure. In fact, marginal state is defined every time after inspection of the structure and a damage record obtained. It is to mention that this is valid even if the inspection of the concrete structure was not deterministic, but based on risk. Inspection has to be well planned, targeted to the most critical structural elements and scheduled according to prior analysis of remaining structural bearing capacity. Further risk analysis should include all possible hazards, scenarios of possible damage, fracture mechanisms appearing, and the probability of reaching a determined marginal state of structure. The probability of an event and corresponding effects are determined for all possible fracture mechanisms, thus a degree of risk is evaluated (FMECA – Failure Modes and Effects Criticality Analysis method) followed by final decision making. The procedure is presented in Fig. 2.

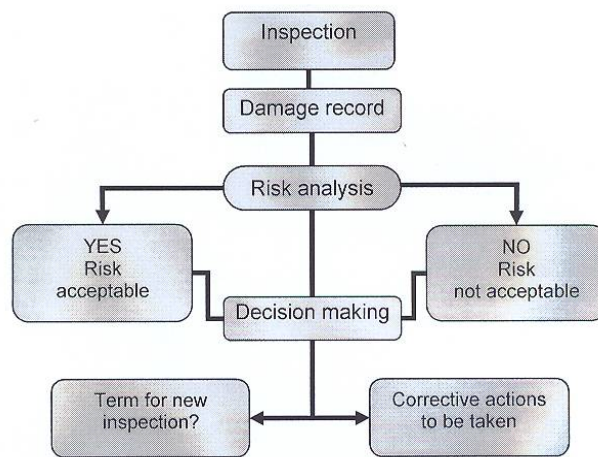


Figure 2. Block scheme for risk based integrity assessment of concrete structures.

Odluka o prihvatljivosti rizika je najdelikatniji korak u oceni integriteta betonske konstrukcije na bazi rizika. Naime, pojmovi „rizičan“ i „siguran“ se određuju na osnovu ukupnog ponašanja određene zajednice i oni nemaju isto značenje, na primer u Nemačkoj, Afganistanu ili Srbiji. Postoje pokušaji da se nađe opšte rešenje, kako je pristup zasnovan na „indeksu kvaliteta života“, /3/.

Praktično ovaj problem može da se prevaziđe na dva načina. Jedan, koji je u osnovi kvalitativan, zasniva se na takozvanoj matrici donošenja odluke. Matrica se formira od redova u kojima su posledice razvrstane po stepenu, od katastrofalnih do potpuno zanemarljivih, i kolona koje se sastoje od stepena verovatnoće da se granično stanje uspostavi, od vrlo verovatnog do onog sa veoma malom verovatnoćom. Matrica je dijagonalno podeljena na tri područja, u kojima je rizik (1) prihvatljiv, (2) dovoljno razumno nizak ili (3) neprihvatljiv.

Drugi način određivanja ciljanog rizika je složeniji, ali i precizniji pristup koji uslovljava uvođenje neke tehnike optimizacije (na primer analizu troškova životnog ciklusa).

Metoda Monte Karlo

Monte Karlo metoda je jednostavan i efikasan alat za statističku analizu neizvesnosti u inženjerstvu konstrukcija i za proračun verovatnoće graničnog stanja. Kada je izvedena inspekcija i potpuna analiza integriteta, definiše se granično stanje konstrukcije. Na primer, uzmimo da se granično stanje, definisano kada se u konstrukciji pojavi prslina širine $a \geq 2,0$ m pri odgovarajućem momentu savijanja M_R . Pretpostavimo da normalna funkcija gustine verovatnoće važi za vrednosti R i S , odnosno da su $M(R)$ i $M(S)$ sa poznatim srednjim i standardnim devijacijama. Dva niza ovih vrednosti se zatim paralelno srede jedna prema drugoj tako da se principski generišu slučajni brojevi od 0 do 1. Između dva niza brojeva može se definisati broj slučajeva (N_f) kada se $M(S) \geq M(R)$ uzme kao uslov graničnog stanja. Verovatnoća pojave ovog graničnog stanja se proračunava kao:

$$P_f = N_f / N \quad (3)$$

gde je N ukupan broj slučajno generisanih veličina.

PRIMER

Tokom NATO vazdušnih udara protiv Jugoslavije most na autoputu E-75 na reci Moravi je potpuno srušen (desna strana) i ozbiljno oštećen (leva strana konstrukcije). Ustvari, leva strana konstrukcije je pogođena sa četiri rakete što je izazvalo ozbiljno oštećenje mosta. Najozbiljnije oštećenje konstrukcije mosta pretrpela je zona stuba S3, gde je kao posledica udara rakete i eksplozije gornji i donji pojas sandučastog nosača potpuno razoren u dužini od ~12 m i više od 30 užadi za prednaprežanje (16 Ø 7 mm.) je bilo presečeno. Jedini element u tom preseku koji je ostao neoštećen je bio uzvodni podužni zid sandučastog nosača (sl. 3).

Most je izrađen kao kontinualni kutijasti nosač od prednaprežnutog betona raspona: 41,4 + 52 + 62 + 52 + 41,4 m (sl. 4) i u eksploataciji je od 1982.

Zbog preke potrebe da se omogući saobraćaj u što je moguće kraćem roku zahtevana je ocena stanja mosta.

The risk acceptability decision is the most delicate step in risk based integrity assessment of concrete structures. Namely, the terms “risky” and “safe” are determined based on overall attitude of a particular society and do not have the same meaning, i.e. in Germany, Afghanistan, or Serbia. Attempts have been made to find a general solution, since the approach is based on the “life quality index”, /3/.

Practically, there are two ways to overcome this problem. The first, basically qualitative, is based on the so called matrix of decision making. The matrix is formed of rows where consequences are lined up gradually, from fatal to quite negligible and columns consist of degrees of probability of marginal state appearance – from the very likelihood to one of very low probability. The matrix is divided diagonally at three areas where risk is (1) acceptable, (2) as low as reasonably possible, or (3) unacceptable.

The second way of determining targeted risk is more complex, but a more exact approach requiring use of some optimization techniques (e.g. Life Cycles Cost Analysis).

Monte-Carlo method

The Monte-Carlo method is a simple and effective tool for statistical analysis of uncertainty in structural engineering and for calculating probability of marginal states. After structural inspection and thorough integrity analysis is carried out, the corresponding structural marginal state is defined. For example, let's say the marginal state is to be defined as a state when a crack of width $a \geq 2.0$ m appears in the structure with corresponding bending moment M_R . Let's assume the normal probability density function is valid for values of R and S , thus $M(R)$ and $M(S)$ with known mean and standard deviations. Two sets of these values are then listed parallel to each other so that random numbers from 0 to 1 are principally generated. Between two sets of numbers one identifies the number of cases (N_f) where $M(S) \geq M(R)$ is taken as the marginal state condition. Probability appearance of this limit state is calculated as:

$$P_f = N_f / N \quad (3)$$

where N is the total number of randomly generated values.

EXAMPLE

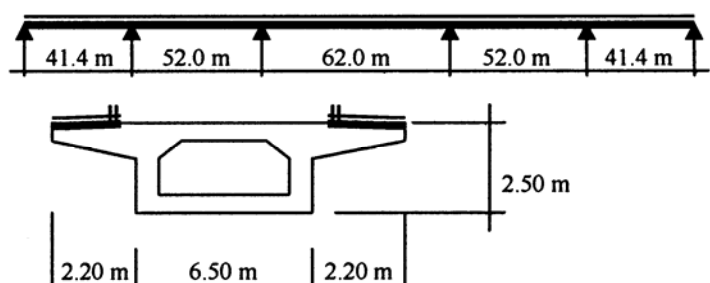
During NATO air strikes against Yugoslavia the highway bridge on route E-75 over river Morava was completely destroyed (right-side) and seriously damaged (left-side structure). Actually, the left-side structure was hit by four missiles causing serious bridge damage. The most serious damage to the bridge structure was in the zone of pillar S3 where, as a result of missile strike and explosion, the deck and lower belt of the box girder were completely destroyed in length of ~12 m, and over 30 pre-stressed cables (16 Ø 7 mm.) were cut. The only undamaged element of the section was the upper-stream wall of box girder (Fig. 3).

The bridge was constructed as a concrete pre-stressed continuous box girder with spans: 41.4 + 52 + 62 + 52 + 41.4 m (Fig. 4) and was in service since 1982.

Due to the pressing need to enable traffic as soon as possible, the assessment of bridge state was requested.



Slika 3. Most preko reke Morave oštećen tokom NATO bombardovanja Jugoslavije
Figure 3. Bridge over river Morava damaged during NATO bombing of Yugoslavia.



Slika 4. Raspon i poprečni presek mosta
Figure 4. Bridge span and cross section.

Državna komisija za izgradnju i rekonstrukciju je zahtevala brzo osposobljavanje mosta za laki saobraćaj (do 5 t) korišćenjem jedne trake na manje oštećenoj strani nosača mosta. Veliki otvor na saobraćajnoj kolovoznoj traci (oštećenje T4 na sl. 5) je trebalo premostiti pontonskim mostom raspona 20,0 m i postaviti saobraćajnu pokrivku sa osloncima na potpori S4 i na nosaču koji drži privremeni montažni cevasti oslonac (sl. 6).

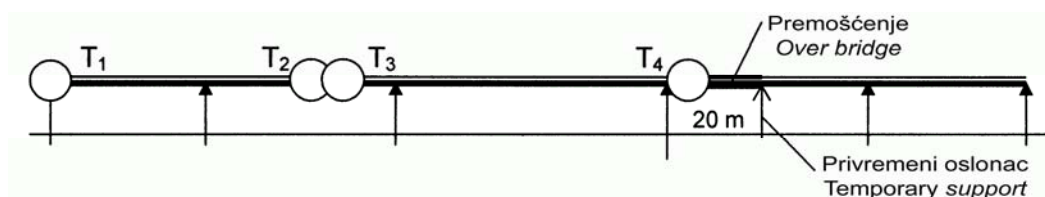
Oštećena i delimično premošćena i privremeno poduprta konstrukcija je analizirana na osnovu prethodno izvedene detaljne vizuelne kontrole i ispitivanja. Pre svega je definisan analitički model oštećene konstrukcije u postojećem stanju mosta, uzimajući u obzir samo sopstvenu težinu kao opterećenje mosta.

Oštećenje T1 je razmatrano zanemarujući uticaj savijanja i podeljenog opterećenja na nosaču, a oštećenja T2–T4 su modelirana svođenjem momenta inercije površine punog preseka na realnu veličinu. Na primer, moment inercije površine u T4 je sveden na 16%. Veliko smanjenje savojne krutosti glavnog nosača mosta proizvelo je kao posledicu specifičnu preraspodelu momenta savijanja, koja je jasno uočljiva kada se uporedi model oštećenog mosta sa odgovarajućim, ali neoštećenim mostom. Posebno, vrednost pozitivnog momenta u sredini centralnog raspona i negativnog momenta na osloncu S3 su značajno povećani do 26% ili 10% posmatrajući samo sopstvenu težinu u oba slučaja, sl. 6. i tab. 1.

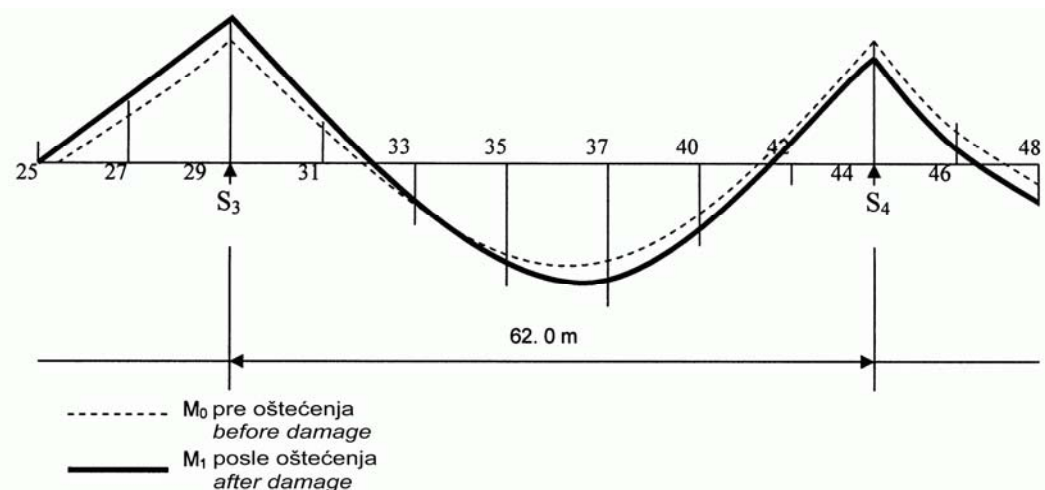
The State commission for rebuilding and reconstruction requested fast repair of the bridge for light traffic (up to 5 t) using one lane on the less damaged side of bridge girder. The large hole on the traffic deck (damage T4 in Fig. 5) was to be overbridged with pontoon-assembled truss bridge spanning 20.0 m and laid on the traffic deck with supports on peer S4 and on girder supported by temporary strut (Fig. 6).

The damaged and partially over-bridged and temporarily supported structure was then analysed based on previous thorough visual inspection and tests on the bridge. First of all, an analytical model of the existing damaged bridge structure is defined taking into account only dead weight acting as the load on the bridge.

Damage T1 is considered by disregarding any influence on the bending and dead load of the girder and the damages T2–T4 are modelled by reducing the full area moment of inertia to real value. For example, the area moment of inertia on T4 is reduced up to 16%. The great reduction of bending stiffness of main bridge girder has consequentially lead to a particular bending moment redistribution that is clearly visible when the damaged bridge model is compared to the corresponding, but undamaged bridge. Particularly, positive moment value in central part of central span and negative value on support S3 are significantly increased to 26% or 10 % considering only dead load in both cases, Fig. 6 and Table 1.



Slika 5. Oštećena konstrukcija mosta
Figure 5. Damaged bridge structure.



Slika 6. Dijagram momenata od sopstvene težinu pre i posle oštećenja
Figure 6. Moment diagram for dead load before and after damage.

Tabela 1. Veličine momenata savijanja M_0 za neoštećenu i M_1 za oštećenu konstrukciju nosača mosta
Table 1. Values of bending moments M_0 for non-damaged and M_1 for damaged structure of bridge girder.

Spojevi (Joints)	27	29	31	33	35	37	40	42	44	46
M_0	-20135	-61591	-13955	16843	31880	34070	16677	-14199	-61880	-40846
M_1	-25570	-67947	-16397	18316	37121	41408	29889	2925	-40845	-20292

Kao sledeći korak u procesu ocene stanja mosta je isti analitički model analiziran za delujuće pokretno opterećenje koje se sastoji od dva stvarna troosovinska kamiona pojedinačne težine po 28,0 t (56 t ukupno) (sl. 7).

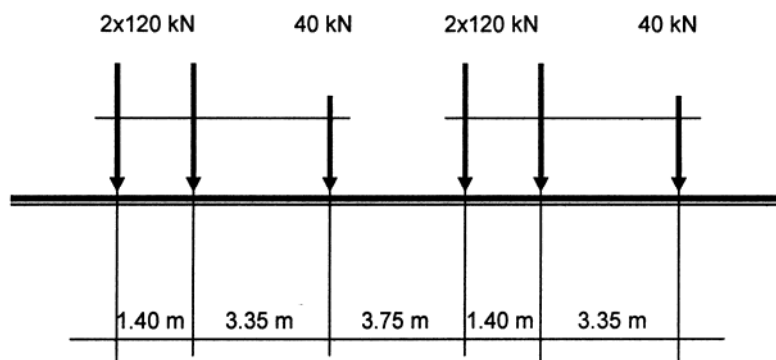
Korišćenjem već definisanog analitičkog modela pokretno opterećenje je primenjeno na svakom rasponu u najkritičnijem položaju i sračunati su odgovarajući momenti, vertikalna pomeranja i naponi.

Da bi se postigla što tačnija ocena stanja postojeće konstrukcije izvedeno je ispitivanje opterećivanjem mosta uz korišćenje realnih kamiona. Ispitno opterećenje je postepeno povećavano kretanjem kamiona jednog za drugim preko najkritičnijih položaja od jednog do drugog raspona. Promene merodavnih vertikalnih pomeranja i nagiba su uzastopno merene. Kad god je dostignut kritični položaj most je rasterećen i kontrolisano je prisustvo zaostale deformacije. Osim toga, upoređene su izmerene veličine dobijene ispitivanjem opterećenjem i vrednosti sračunate korišćenjem analitičkog modela da bi se proverio stvarni model konstrukcije. Kao najosetljivija veličina (čak i za vrlo sporo kretanje kamiona preko mosta), promena nagiba na osloncima srednjeg raspona je korišćena kao odlučujući parametar za odluku u pogledu identifikacije sistema (sl. 8).

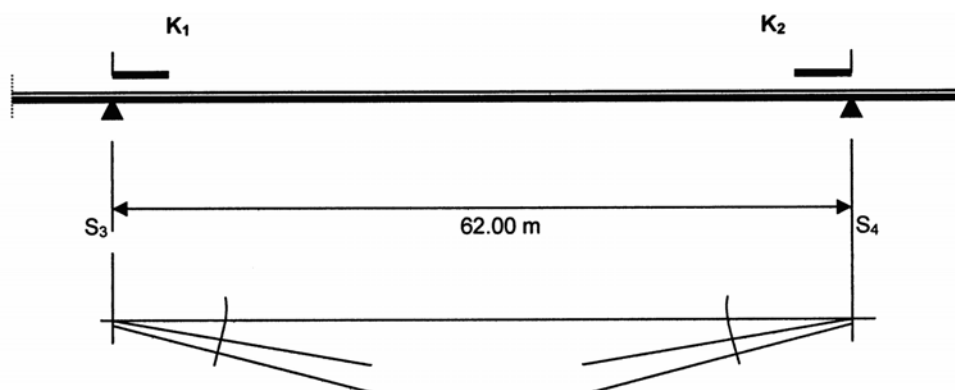
The subsequent step in the process of bridge evaluation uses the same analytical model but analysed by applying live load consisting of two real three-axle trucks weighing 28.0 t each (56 t in total) (Fig. 7).

By using the already defined analytical model, live load is applied on every span at the most critical position and corresponding moments, vertical displacements and stresses are calculated consecutively.

In order to make the evaluation of the existing structural state as much exact as possible, the bridge load test using real trucks is carried out. The testing load has been increased gradually moving the trucks one by one at the most critical position from span to span. Changes of relevant vertical displacements and slopes are measured consecutively. Every time a critical position is reached the bridge is unloaded and appearance of residual deformations are controlled. In addition, the measured values obtained by load testing and calculated values obtained from the analytical model are compared in order to identify the real structural model. As a most susceptible value (even for very slight movement of the truck along the bridge), the change of slopes at supports in the central span is used as a decisive comparative parameter for system identification (Fig. 8).



Slika 7. Pokretno opterećenje – kamioni, rasponi osa i rastojanja
Figure 7. Live load – trucks, axle forces and distances.



I korak	I step	$\alpha_{c1} = 2.4970 \times 10^{-4}$	$\alpha_{c1} = 2.7460 \times 10^{-4}$
Izmereno	Measured	$\alpha_m = 2.9967 \times 10^{-4}$	$\alpha_m = 3.7700 \times 10^{-4}$
II korak	II step	$\alpha_{c2} = 2.6170 \times 10^{-4}$	$\alpha_{c2} = 3.0990 \times 10^{-4}$

Slika 8. Sračunate i izmerene vrednosti nagiba raspona S3S4
Figure 8. Calculated and measured slope values of span S3S4.

ZAKLJUČAK

Na osnovu poređenja tradicionalnog, ali konzervativnog determinističkog pristupa ocene integriteta betonskih konstrukcija predložen je novi, probabilistički pristup zasnovan na riziku.

Novi koncept uzima u obzir neizvesnosti i slučajni karakter pri određivanju potrebnih veličina (osobine materijala i karakteristike integriteta) sračunavanjem verovatnoće dostizanja graničnog stanja. Granično stanje je izabrano na osnovu ranijih kontrola konstrukcije i analize mehanizma otkaza virtualne konstrukcije. Čitav postupak je prikazan kroz jedan primer, u kome je teško oštećena konstrukcija mosta analizirana i sračunata je verovatnoća otkaza konstrukcije.

LITERATURE – REFERENCES

- Hart, G.C., Uncertainty Analysis, Loads and Safety in Structural Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- Pavišić, M., In Proceedings of 7th International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Hague, The Netherlands, 1995.
- Nathwani, J.S., Lind, N.S., Pandey, M.D., Affordable Safety By Choice: The Life Quality Method, Institute for Risk Research, Waterloo, Ontario, Canada, 1997.
- Stewart, G.M., Rosowsky, V.D., J. Struct. Safety, Vol. 20, 91-109, 1998.
- Sinicin, A. P., Structural Analysis Based on Risk Theory, Moscow, 1985 (In Russian).

CONCLUSION

A comparison of the traditional, but more conservative deterministic approach in the integrity assessment of concrete structures a new, probabilistic risk based approach is proposed.

The new concept takes into account uncertainty and randomness in determining necessary values (material properties and characteristics of integrity) by calculating the probability of reaching a marginal state. The marginal state is chosen based on previous inspection of structure and on the analysis of virtual structural failure mechanisms. The entire procedure is presented through an example, where the heavy damaged bridge structure is analysed and the probability of structural failure calculated.