Politechnika Świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych

Doktorant: **mgr inż. Justyna Tworzewska**
Promotor: **dr hab. inż. Barbara Goszczyńska prof. PŚk**

Analiza procesu powstawania i rozwoju rys w belkach żelbetowych z zastosowaniem optycznego systemu pomiarowego 3D typu ARAMIS

STRESZCZENIE

Rozwój stosowania konstrukcji żelbetowych w budownictwie przemysłowym, publicznym, mieszkaniowym jak i śmiałe realizacje monumentalnych budowli i konstrukcji inżynierskich inicjują poszukiwanie oszczędności betonu i stali, a także poszukiwanie materiałów odpornych na korozję zastępujących pręty stalowe. Uzyskanie poszukiwanych efektów jest możliwe poprzez rozwój technologii betonu oraz doskonalenie metod obliczeniowych pozwalających na przeanalizowanie współczynników bezpieczeństwa zapewniających niezawodność konstrukcji. Można stwierdzić, że racjonalne projektowanie przekrojów żelbetowych jak i oszczędne stosowanie stali wynika z teorii żelbetu i doświadczenia projektanta. Jedną z wymienianych wad żelbetu jest powstawanie rys, ale jest to jednocześnie zaleta żelbetu gdyż pozwala w pełni wykorzystać wytrzymałość stali. Niezawodność projektowanych konstrukcji oparta jest na metodzie stanów granicznych, czyli sprawdzania stanów granicznych nośności, stateczności, ale także użytkowalności do których należy zarysowanie konstrukcji. Dlatego też mechanizm powstawania rys był szeroko opisywany, a jak wynika z przeglądu piśmiennictwa jest wciąż aktualny. Spowodowane jest to głównie innymi cechami wytrzymałościowymi obecnie stosowanych betonu i stali, jak również możliwością zastosowania nowoczesnej aparatury, która umożliwia rozszerzenie zakresu analiz. W związku z tym, jako główne cele pracy przyjęto:

1. Analizę procesu powstawania i rozwoju rys powstających na skutek dominującego działania momentu zginającego podczas obciążania belek żelbetowych do zniszczenia w sposób monotonicznie rosnący, zmienny i cyklicznie zmienny, z zastosowaniem wyników uzyskanych za pomocą systemu optycznego,
2. Analizę szerokości rys prostopadłych do osi elementu uzyskanych z badań w porównaniu z szerokościami obliczonymi wg EC2 oraz uproszczonego wzoru,

3. Ocenę możliwości wykorzystania nowoczesnej aparatury jaką jest system optyczny typu ARAMIS w badaniach procesu zarysowania belek żelbetowych.

Cele pracy zrealizowano w oparciu o analizę wyników badań obciążanych do zniszczenia 16 belek żelbetowych, z czego:

- badania własne - 3 belki (I seria)
- badania wykonane w ramach projektu badawczo rozwojowego NR 04000710 - 13 belek (II seria) z czego 10 belek niszczonych na zginanie, a 3 belki niszczone na ścinanie. Badane belki o wymiarach 120x300x3300mm (rozpiętość w osiach podpór - 3000mm) wykonane z betonu o projektowanej klasie betonu 40/50 i jednakowym stopniu zbrojenia podłużnego wynoszącego 2%, obciążane były dwoma siłami skupionymi przy zróżnicowanym programie obciążania. Przyjęte programy obciążania to: monotoniczny przyrost sił aż do zniszczenia - 9 belek, obciążanie z odciążeniami na trzech poziomach wartości sił- 2 belki, obciążenie niskocykliczne – 2 belki. Analizy wykonywano na odcinku pomiędzy punktami przyłożenia sił, co w większości belek stanowiło strefę tzw. czystego zginania.

Na początku sprawdzono, czy optyczny system pomiarowy typu ARAMIS może być wykorzystywany do badania procesu zarysowania i z jaką dokładnością. W tym celu porównano wyniki szerokości rys pomierzonych przy użyciu systemu z uzyskanymi za pomocą powszechnie używanej lupki Brinella. Tą analizę sporządzono na belkach I serii. Stwierdzono, że szerokości rys uzyskiwane podczas badania z zastosowaniem systemu optycznego oraz lupki Brinella są zbliżone i mieszczą się w przedziale dokładności lupki. Biorąc pod uwagę, że wykorzystując system optyczny uzyskujemy obraz rysy nie jako pęknięcia, ale jako kumulację odkształceń, a trwałość konstrukcji żelbetowych uzależniona jest od rys dochodzących do powierzchni elementu, należało określić jaką kumulację odkształceń można uznać za rysę.

Proces zarysowania opisywany jest trzema wielkościami, do których należą: moment rysujący, odległość między rysami oraz szerokość rys. Analizę momentu rysującego wykorzystano do określenia rysy. W tym celu wyznaczono wartości momentu rysującego i odczytano odpowiadające wielkości kumulacji odkształceń. Zdefiniowano rysę jako kumulację odkształceń równą co najmniej 0,05mm w odróżnieniu od mikrorys powierzchniowych oraz szumów, co pozwoliło na prowadzenie analiz procesu zarysowania pod kątem odległości między rysami i szerokości rys.

W ramach podjętych analiz sprawdzono czy proces powstawania rys, a więc tworzące się odległości między rysami zależą od sposobu obciążenia oraz sposobu zniszczenia. Testy nieparametryczne wykazały, że nie było podstaw do odrzucenia hipotez zerowych, zakładających że rozstaw rys (proces zarysowania) nie zależy

od przyjętych kryteriów podziału. Można przyjąć więc, że wszystkie wyniki odległości między rysami należą do jednej populacji. To umożliwiło narysowanie wykresów gęstości zarysowania, rozumianej jako liczba rys przypadająca na jednostkę długości, na podstawie których wykazano, że funkcję gęstości zarysowania charakteryzuje rozkład normalny dopiero tuż przed zniszczeniem elementu. Na tej podstawie stwierdzono także, że szerokość rysy nie zależy bezpośrednio od odległości między nimi, a zależy od odcinka na którym nowe rysy nie mogą powstać nazwanego odcinkiem biernym. Podjęto więc analizę przebiegu przyrostu szerokości rys w całym procesie obciążania, która była możliwa tylko przy wykorzystaniu do badań optycznego systemu pomiarowego. Wyodrębniono trzy rodzaje przebiegu przyrostu szerokości rys: liniowy, z jednym załamaniem oraz z dwoma załamaniami.

Wykorzystując wyniki pomiaru szerokości rys wyprowadzono wzory na szacowanie odcinka biernego $2a\omega$ w zakresie obciążeń użytkowych dla belek niszczonych na zginanie oraz typem niszczenia zginająco-ścinającym, które następnie wykorzystano do obliczania szerokości rys według uproszczonego wzoru autorstwa Goszczyńskich $w = 2a\omega * \varepsilon_s$. Po wprowadzeniu do uproszczonego wzoru współczynnika o wartości 1,64 wyrażającego stosunek maksymalnej do średniej szerokości rys uzyskanych w badaniach, uwzględniający więc obserwowany w badaniach duży losowy rozrzut wyników maksymalnej szerokości rysy, uzyskano bezpieczne oszacowanie maksymalnej szerokości rysy.

An Analysis of Crack Formation and Development in Reinforced Concrete Beams with the Use of ARAMIS Optical Measuring System

SUMMARY

Cracking is very important for behavior analysis and structural condition assessment in reinforced concrete structures. This process was widely described but it is still valid. Because materials which are currently use have different strength features. Also the range of analysis can be extend through use modern devices. Based on that information, three aims were accepted in this paper. First aim is the analysis of cracks formation and development which are caused by dominant bending moment during the loading until failure. In this analysis, three type of loading were used (monotonic, load-unload, cyclic). The second aim is the comparison between calculated and measured with the use ARAMIS system width of cracks in RC beams. The last aim is the assessment of the ARAMIS system using possibility to cracks studies in RC beams.

The analyses were made based on 16 beams divided in two series (I series - 3 beams measured in own tests, II series - 13 RC beams tested in EU projects No 04000710).

Based on results for I series of beams, found that ARAMIS optical measuring system allows testing the cracking process. It allows measuring cracks spacing, locations, quantity, width of cracks, and the cracking moment but with some assumptions.

In II series all beams had the same cross sections 120x300mm and length of span 3300mm, reinforcement bars in tension zone and design mark of concrete. Ten beams destroyed by bending (6 beams under monotonic load, 2 load-unload, 2 under cyclic load) and three beams by shearing (all 3 under monotonic load). Load was implemented by two concentrated forces. In that static scheme, between forces the bending moment was almost constant for most beams. All analysis were made on this section.

If the ARAMIS is used during the test, the definition of crack is necessary to analysis phenomenon of cracks. Based on results width of cracks for II series beams under monotonic load and analysis of cracking moment value, defined the crack as the local cumulation of strains equal at least 0.05mm unlike to microcraks and noises.

Analysis of crack spacing was made on beams destroyed by bending. The results was read and next grouped depending on type of load and the non-parametric tests (Kruskal- Wallis or Mann-Whitney) were used. As the conclusion from this statistic tests found that the crack spacing (cracking process) does not depend on the load. Next the data of crack spacing were divided by type of failure (caused by bending or shearing) and also the non-parametric test revealed that crack spacing does not depend on the type of failure. Also discovered that function of cracks density has standard distribution only just before failure which was observed on cracks density graph.

Crack width increase can be measured until failure only with the use ARAMIS system. Based on such kind of measurements the crack width depend on load graphs were drawn. Analysis of that graphs shown that there are three type of curve (linear, with single or double inflection). The second inflection was caused by plasticity of reinforcing steel.

Based on results of crack width, the formulas for $2a\omega$ was created in terms of serviceable loads. That formulas can be used to calculated width of cracks by formula $w = 2a\omega * \varepsilon_s$ created by Goszczyńscy. If the random distribution of maximum crack width will be included as a 1.64 factor, the estimate of crack width will be safe.