

Ispitivanje prednapete betonske ljuske dugotrajnim opterećenjem i rasterećenjem

Jure Radnić, Domagoj Matešan

Ključne riječi

prednapeta betonska ljuska, dugotrajno opterećenje, rasterećenje, pomaci, deformacije betona armature i kabela

Key words

prestressed concrete shell, long-term loading, unloading, displacements, deformation of concrete embedding reinforcement and cable

Mots clés

coque en béton précontraint, chargement à longue terme, déchargement, déplacements, déformation de béton recouvrant l'armature et le câble

Ключевые слова

предварительно напряженная бетонная оболочка, длительная нагрузка, разгрузка, смещение, деформации бетона, арматуры и кабелей

Schlüsselworte

vorgespannte Betonschale, langdauernde Belastung, Entlastung, Verschiebungen, Verformungen von Beton, Bewehrung und Kabel

J. Radnić, D. Matešan

Izvorni znanstveni rad

Ispitivanje prednapete betonske ljuske dugotrajnim opterećenjem i rasterećenjem

Prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja cilindrične prednapete betonske ljuske dugotrajnim opterećenjem i rasterećenjem. Ljuska je armirana mrežom u gornjem i donjem području, s različitom ploštinom armature u dva smjera i s dva ravna prednapeta uzdužna kabela. Oslonjena je samo u uglovima, sa spriječenim bočnim pomacima. Mjereni su pomaci ljuske, te deformacije betona, klasične armature i kabela u više točaka kroz godinu i pol od prednapinjanja i opterećenja.

J. Radnić, D. Matešan

Original scientific paper

Testing a prestressed concrete shell subjected to long-term loading and unloading

Results obtained by testing a cylindrical prestressed concrete shell subjected to long-term loading and unloading are presented. The shell is reinforced with steel fabric in the top and bottom zones, and features different reinforcement areas in two directions, as well as two straight prestressed longitudinal cables. It is attached at angles only, and lateral displacements are restrained. Shell displacements, and deformation of concrete in the zone of traditional reinforcement and cables, were measured at several points over one and a half year period following the initial prestressing and loading.

J. Radnić, D. Matešan

Ouvrage scientifique original

Essais d'une coque en béton précontraint soumise aux chargements et aux déchargements à longue terme

Les résultats obtenus par l'essai d'une coque en béton précontraint soumise aux chargements et aux déchargements à longue terme sont décrits. La coque est renforcée par treillis dans les zones inférieure et supérieure, avec la superficie d'armature différente dans les deux directions, et avec deux câbles droits précontraints, disposés de manière longitudinale. La coque n'est attachée qu'aux coins, et le mouvement latéral est restreint. Les déplacements de la coque, et les déformations de béton dans la zone de l'armature traditionnelle et des câbles, ont été mesurés à plusieurs points au cours d'une année et demi après la contrainte et le chargement initiaux.

Џ. Раднич, Д. Матешан

Оригинална научна работа

Испытание предварительно напряженной бетонной оболочки под действием длительной нагрузки и при разгрузке

Приведены результаты экспериментального исследования цилиндрической предварительно напряженной бетонной оболочки в условиях длительной нагрузки и при разгрузке. Оболочка армирована сеткой в верхней и нижней части, с различной поверхностью арматуры в двух направлениях и с двумя ровными предварительно напряженными продольными кабелями. Опирается только в углах с предотвращением бокового смещения. Производились измерения смещения оболочки, деформации бетона, классической арматуры и кабелей в нескольких точках в течение полутора лет от предварительного напряжения и нагрузки.

J. Radnić, D. Matešan

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Untersuchung vorgespannter Betonschale unter langdauernder Belastung und Entlastung

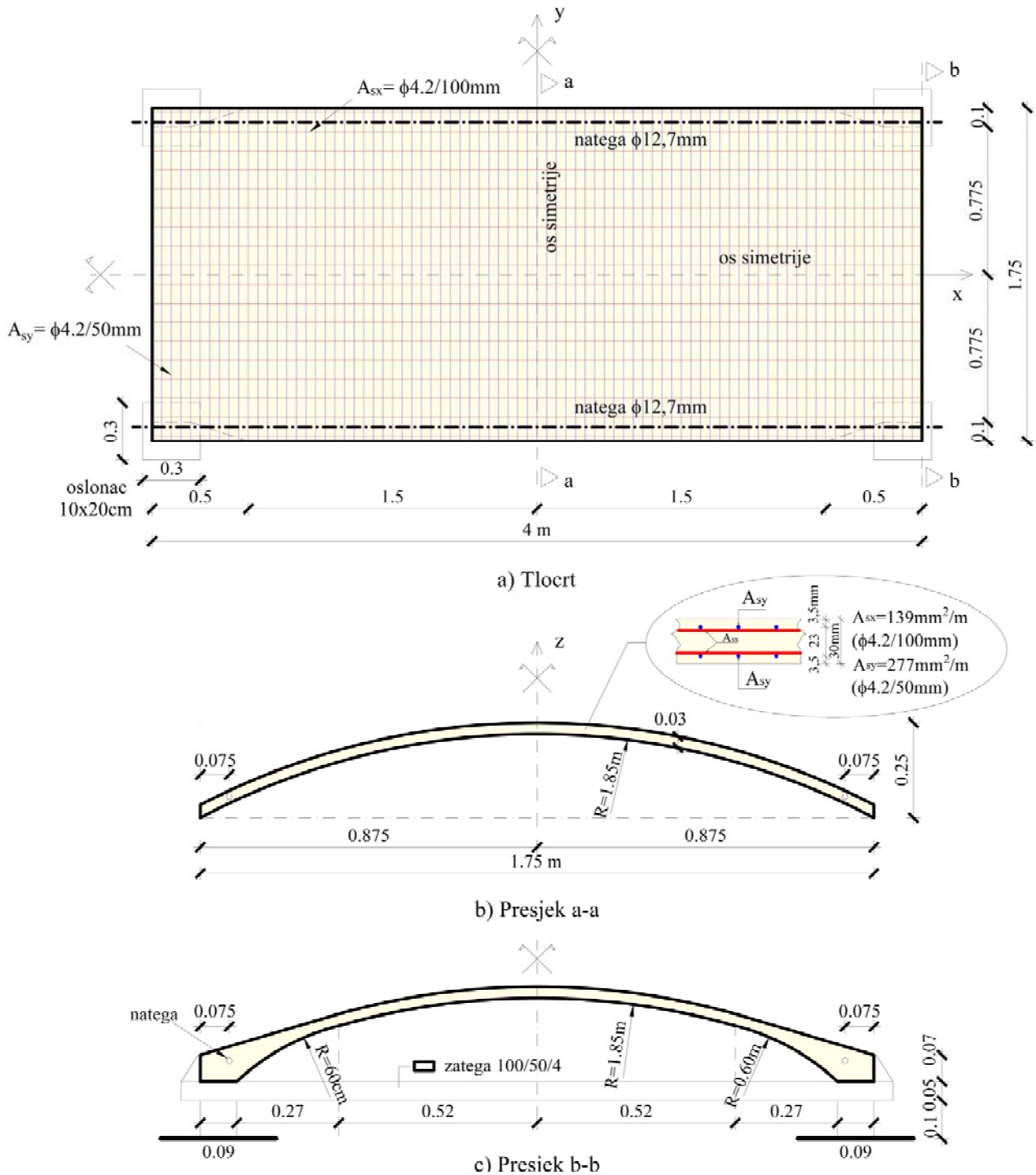
Dargestellt sind Ergebnisse experimentaler Untersuchung einer zylindrischen vorgespannten Betonschale unter langdauernder Belastung und Entlastung. Die Schale ist im oberen und unterem Gebiet netzartig bewehrt mit verschiedenen Bewehrungsquerschnitten in zwei Richtungen, und mit zwei geraden vorgespannten Längskabeln. Die Schale ist nur an den Ecken gestützt, mit verhinderten Seitenverschiebungen. Die Verschiebungen der Schale, Verformungen des Betons, der klassischen Bewehrung und der Kabel wurden in mehreren Punkten durch anderthalb Jahre seit der Vorspannung und Belastung gemessen.

Autori: Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Domagoj Matešan**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15, Split

1 Uvod

Eksperimentalna ispitivanja prednapetih betonskih ljsaka, napose pod dugotrajnim opterećenjem i rasterećenjem, još su uvijek poželjna. Prije svega, ona su i danas zanimljiva zbog daljnjih spoznaja ponašanja betonskih ljsaka tijekom vremena pod utjecajem prednapinjanja i

reoloških svojstava betona. Njihova je važnost u novije vrijeme vjerojatno veća zbog stvaranja eksperimentalne baze za provjeru različitih numeričkih modela za vremensku analizu prednapetih betonskih ljsaka. Neki primjeri eksperimentalnih ispitivanja ljsaka mogu se naći u [1-12]. U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitiva-



Slika 1. Osnovni podaci ispitane ljsuke

nja jedne cilindrične prednapete betonske ljuske: (i) tijekom prednapinjanja, (ii) pri kratkotrajnom mirnom opterećenju, (iii) pri dugotrajnom stalnom opterećenju u trajanju od jedne godine, (iv) pri trenutačnom rasterećenju i (v) nakon rasterećenja kroz idućih šest mjeseci.

Primarna svrha provedenog eksperimenta jest provjera razvijenog numeričkog modela za vremensku analizu armiranih i prednapetih betonskih ploča i ljusaka, što je predmet zasebnog rada. Jedan je od ciljeva ovog rada i doprinos boljem poznavanju ponašanja prednapetih betonskih ljusaka izloženih visokoj razini dugotrajnog opterećenja, kao i nakon rasterećenja.

2 Osnovni podaci o ljusci

Osnovni geometrijski podaci ispitane ljuske prikazani su na slici 1., a njezin izgled za ukupno stalno opterećenje na slici 2. Ljuska je jednostruko zakrivljena – cilindrična, unutrašnjeg polumjera 1,85 m, tlocrtnih dimenzija $4,0 \text{ m} \times 1,75 \text{ m}$. Slobodno je oslonjena na pravokutne oslonce $0,2 \times 0,1 \text{ m}$ u uglovima. Debljina ljuske u polju je konstantna i iznosi 30 mm. Na mjestu usidrenja natega iznad oslonaca, debljina ljuske se postupno povećava s 30 mm na 100 mm.



Slika 2. Izgled ljuske s ukupnim stalnim opterećenjem

Na mjestima oslanjanja ljuska je bočno pridržana krutom horizontalnom zategom od pravokutne čelične cijevi 100/50/4 mm. Horizontalni bočni oslonci su širine 100 mm i visine 50 mm. Deformacije zatege od svih opterećenja su zanemarive pa se može smatrati da je iznad oslonaca potpuno spriječen horizontalni bočni pomak ljuske.

Ljuska je obostrano armirana križnom armaturom od zavarenih mreža. U smjeru x mreža ima šipke promjera 4,2 mm na osnom razmaku 100 mm, a u smjeru y šipke istog promjera na osnom razmaku 50 mm. Šipke su glatke, od čelika objavljene čvrstoće 560 MPa i granice razvlačenja 500 MPa.

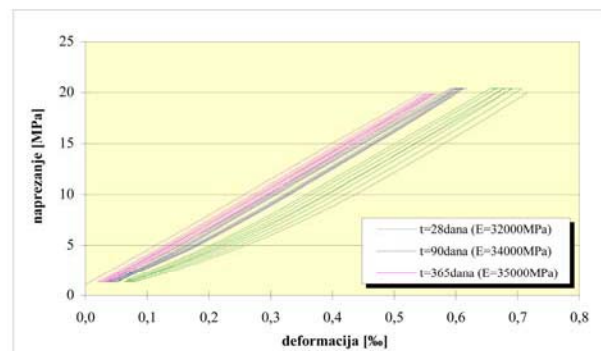
Natege su promjera 12,7 mm (0,5") od čelika objavljene čvrstoće 1860 MPa. Provučene su kroz plastičnu cijev promjera 20 mm. Na jednoj je strani natege nepomično sidro, a na drugoj strani pomično. Na temelju posebno oblikovanoga pomičnog sidra, napinjanje natege obavljeno je ručno s pomoću momentnog ključa, uz kontrolu sile u sredini i na krajevima natege zalijepljenim tenzometrima. Nakon dovršenog napinjanja, natega nije injektirana.

Beton je pripravljen s portlandskim cementom i vapnenačkim agregatom, najvećeg zrna 8 mm, bez dodataka. Betoniranje je obavljeno uz pomoć oplatnog vibratora. Čitavo vrijeme prije i nakon opterećivanja ljuska je držana u prostoriji s kontroliranom temperaturom i vlažnosti, kao i probni uzorci betona. Temperatura prostorije bila je između 18°C i 20°C , a vlažnost između 60 % i 65 %.

Jednoosna tlačna čvrstoća betona ispitivana je normiranim postupkom (HRN EN 12390-3) na valjku promjera 150 mm i visine 300 mm, u vremenu: $t = 28$ dana, $t = 92$ dana i $t = 360$ dana. Prosječna je tlačna čvrstoća betona triju uzoraka iznosila: $f_c = 55 \text{ MPa}$ za $t = 28$ dana, $f_c = 57 \text{ MPa}$ za $t = 92$ dana i $f_c = 60 \text{ MPa}$ za $t = 360$ dana.

Vlačna čvrstoća betona utvrđena je cijepanjem valjka, također normiranim postupkom (HRN EN 12390-5), u isto vrijeme kao i tlačna čvrstoća betona. Prosječna je vlačna čvrstoća betona, određena na trima uzorcima za svako promatrano vrijeme, iznosila: $f_{ct} = 7,3 \text{ MPa}$ za $t = 28$ dana, $f_{ct} = 7,6 \text{ MPa}$ za $t = 92$ dana i $f_{ct} = 8,0 \text{ MPa}$ za $t = 360$ dana.

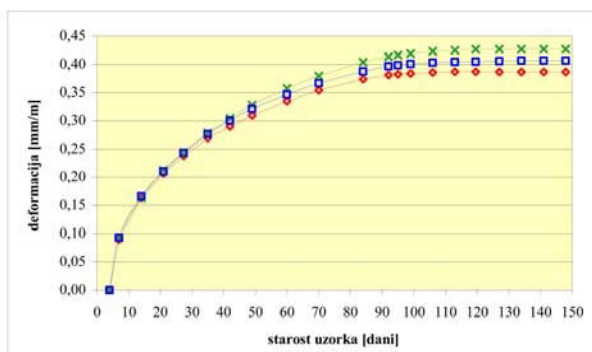
Modul elastičnosti betona također je ispitivan normiranim postupkom (HRN U.M1.025) na betonskim uzorcima, za: $t = 28$ dana, $t = 92$ dana i $t = 360$ dana. Uzorci su opterećeni na tlak do razine naprezanja od 20 MPa. Dobiveni prosječni rezultati modula elastičnosti betona prikazani su na slici 3.



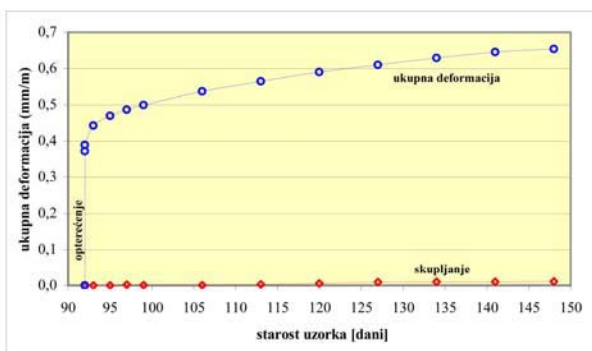
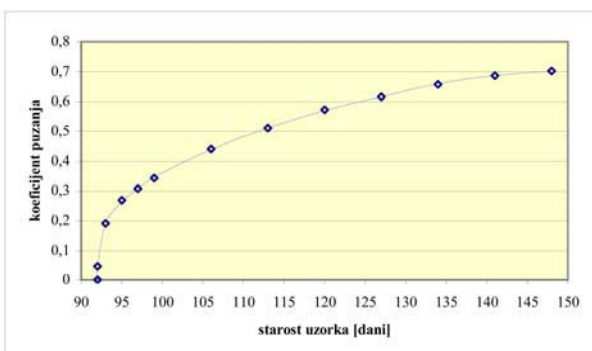
Slika 3. Modul elastičnosti betona

Deformacije skupljanja i puzanja betona također su izmjerene normiranim postupcima na betonskim uzorcima (HRN U.M1.029 i HRN U.M1.027). Rezultati ispitivanja skupljanja betona na trima uzorcima prikazani su na

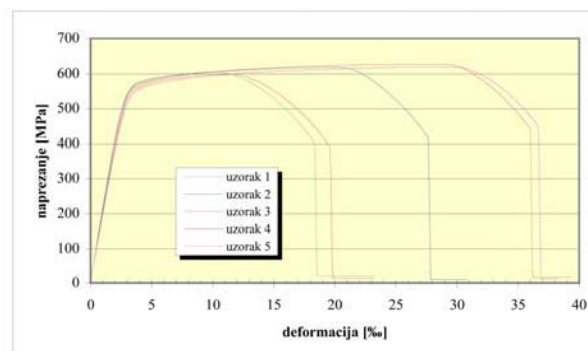
slici 4. Prosječna ukupna vremenska deformacija betona na pet uzoraka pri dugotrajnom opterećenju prikazana je na slici 5., a prosječni koeficijent puzanja betona na slici 6. Pri tome je puzanje ispitivano nakon starosti betona $t = 92$ dana, kada je ljuska prednapeta i opterećena, uz konstantno tlačno naprezanje od 13 MPa. Vremenske deformacije na uzorcima betona mjerene su samo do $t = 150$ dana nakon betoniranja jer se mjernom opremom bilo nužno koristiti za druge potrebe.



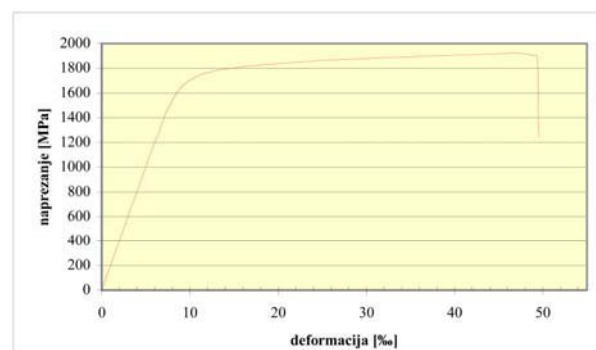
Slika 4. Skupljanje uzoraka betona

Slika 5. Prosječna ukupna vremenska deformacija uzoraka betona pod opterećenjem nanesenim $t = 92$ dana poslije betoniranjaSlika 6. Prosječni koeficijent puzanja betona za opterećenje nakon $t = 92$ dana poslije betoniranja

Veza naprezanje-deformacija za običnu armaturu prikazana je na slici 7., a za prednapeti čelik natege na slici 8. Početni modul elastičnosti čelika je 205 GPa, a prednapetog čelika 200 GPa (HRN EN ISO 15630-2 i HRN EN ISO 15630-3).



Slika 7. Veza naprezanje-deformacija za klasičnu armaturu



Slika 8. Veza naprezanje-deformacija za prednapeti čelik

3 Ponašanje opterećene ljuske

3.1. Prednapinjanje

Nakon $t = 92$ dana od betoniranja, skinuta je oplata i provedeno prednapinjanje ljuske. Sila u svakoj natezi od po 50 kN unijeta je simetrično u pet koraka. Utjecaj trenja između natege i cijevi je zanemariv. U ovoj fazi djeluje samo vlastita težina ljuske i sila prednapinjanja. Za svaki korak sile prednapinjanja izmjereni su pomaci ljuske, te deformacije betona, obične armature i prednapetog čelika u odabranim mjernim točkama.

3.2. Kratkotrajno opterećenje

Odmah nakon dovršenoga prednapinjanja ($t = 92$ dana nakon betoniranja), ljuska je opterećena jednoliko raspodijeljenim linijskim opterećenjem u tjemenu, preko pomoćne drvene skele. Skela je izvedena od poprečnih dasaka i dviju uzdužnih greda poprečnog presjeka 0,12/0,12 m, na razmaku 0,20 m. Donji pojas greda prilagođen je poprečnoj zakrivljenosti ljuske. Ukupna je težina drvene skele 0,75 kN/m.

Za dopunsko stalno opterećenje, osim vlastite težine ljuske i težine drvene skele, upotrijebljene su betonske kocke mase 8 kg. Ukupno opterećenje od $P = 50$ kN (12,5 kN/m) nanoseno je u pet koraka od po 10 kN (2,5 kN/m). Opterećenje na ljusku prenosi se linijski u tjemenu preko drvenih greda.

Za svaki su korak opterećenja također mjereni pomaci i deformacije u istim mjernim točkama kao i za prednapinjanje.

3.3 Dugotrajno opterećenje i rasterećenje

Nakon završetka nanošenja, ukupno kratkotrajno opterećenje od $P = 50$ kN, ostavljeno je da djeluje 365 dana. Poslije 3, 7, 14, 28, 90, 180 i 360 dana od nanošenja punog opterećenja, mjereni su pomaci i deformacije u istim mjernim točkama kao za prednapinjanje i kratkotrajno opterećenje.

Nakon $t = 365$ dana od nanošenja, uklonjena je puna sila $P = 50$ kN i mjereno je stanje pomaka i deformacija u idućih šest mjeseci. Praćeno je stanje ponašanja za $t = 3, 7, 14, 28, 90$ i 180 dana nakon rasterećenja.

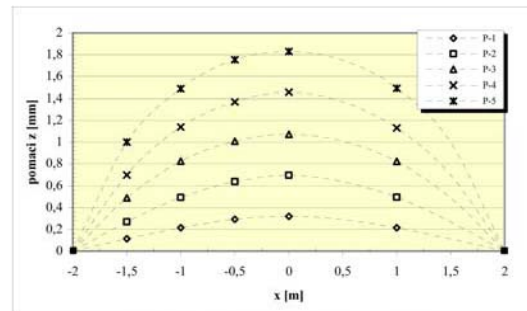
3.4 Prikaz rezultata ispitivanja

Karakteristični pomaci ljsuske za faze prednapinjanja, kratkotrajnog opterećenja i tijekom vremena prikazani su na slikama 9.-13. U fazi prednapinjanja ponašanje ljsuske je linearno-elastično. Najveće izdizanje ljsuske u sredini raspona jest približno 2 mm. Prirast progiba pod kratkotrajnim mirnim opterećenjem također je proporcionalan sve do nanošenja sile u petom koraku. Nakon toga došlo je do pojave pukotina u betonu i smanjenja krutosti ljsuske u najviše naprezanom vlačnom području, što je rezultiralo povećanim prirastom progiba za peti korak stalnog opterećenja. Ukupno dopunsko stalno opterećenje poništilo je izdizanje ljsuske i ostvarilo najveći progib u sredini raspona od oko 5 mm.

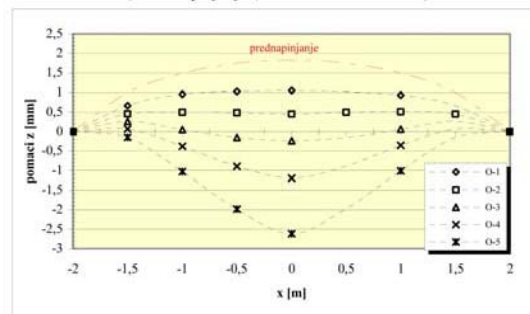
Pri dugotrajnom stalnom opterećenju nakon jedne godine, došlo je do znatnog dopunskog progiba ljsuske zbog reoloških učinaka betona. Tako se najveći početni progib od oko 5 mm u sredini raspona povećao na više od 13 mm. Na slici 13.c vidi se da je prirast pomaka tijekom vremena znatan i da nakon jedne godine od opterećenja pomaci još uvijek imaju progresivan karakter. Ovo se pripisuje utjecaju prosječno visoke razine stalnog naprezanja i učinku nelinearnog puzanja te možebitnom utjecaju geometrijske nelinearnosti ljsuske. Nakon uklanjanja dopunskoga stalnog opterećenja s ljsuske, nastali su znatni povratni trenutačni progibi ljsuske. Kroz razdoblje od 6 mjeseci nakon rasterećenja vratio se još dio progiba. Ipak, ostali su još znatni nepovratni progibi zbog utjecaja puzanja betona, pojave pukotina u betonu i drugih nelinearnih učinaka. Tako je, primjerice, u sredini ljsuske ostao progib od oko $z = -2$ mm, dok je neposredno nakon prednapinjanja ($t = 0$) na tome mjestu bilo izdizanje ljsuske otprilike $z = 2$ mm.

Deformacije betona u nekim mjernim točkama za iste faze opterećenja i rasterećenja ljsuske prikazane su na slikama 14. i 16. Vidi se linearni prirast deformacija za

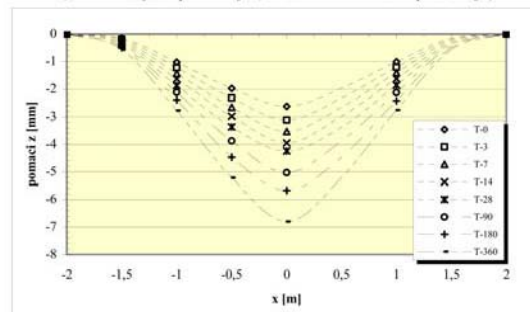
prva četiri inkrementa kratkotrajnog opterećenja, nakon čega za peti inkrement opterećenja dolazi do njihova progresivnog povećanja, osobito za komponente deformacija u uzdužnom smjeru ljsuske. Donji pojas uzdužnih rubova ljsuske u sredini raspona ima tlačnu deformaciju nakon prednapinjanja približno 0,17 %. Nakon nanošenja trećeg inkrementa dopunskog opterećenja, naprezanja su na tome mjestu postala vlačna. Nakon nanošenja petog inkrementa opterećenja, u betonu su se na tome



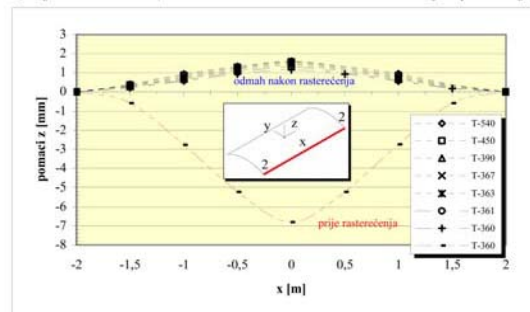
a) Prednapinjanje (P1-P5 ... inkrement sile)



b) Kratkotrajno opterećenje (O1-O5 ... inkrement opterećenja)

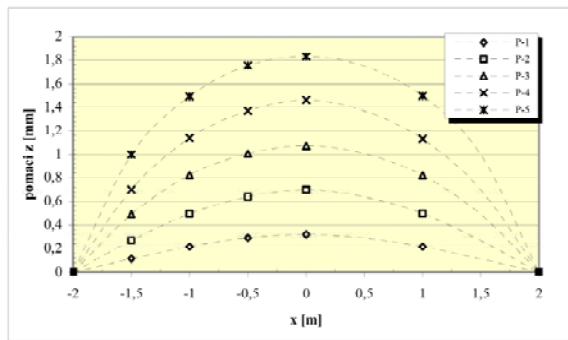


c) Tijekom vremena (od T-0 do T-360 ...dani nakon nanošenja opterećenja)

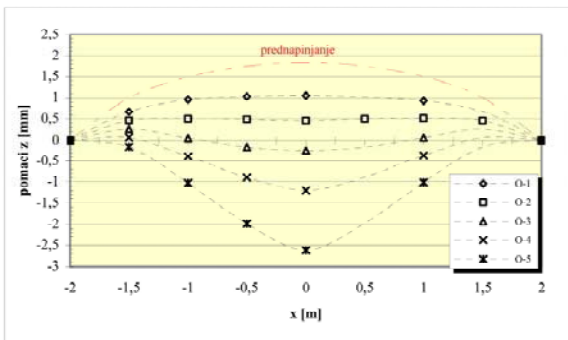


d) Nakon rasterećenja (od T-360 do T-540 ...dani nakon rasterećenja)

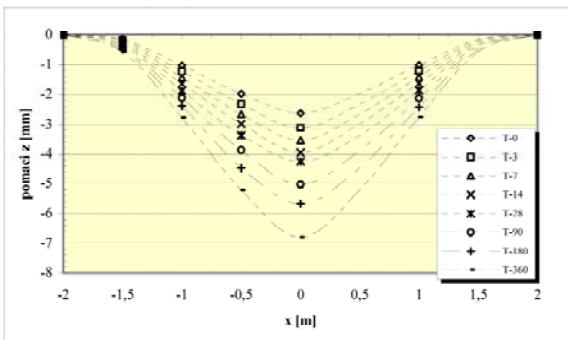
Slika 9. Pomaci ljsuske uzduž tjemena (presjek 1-1)



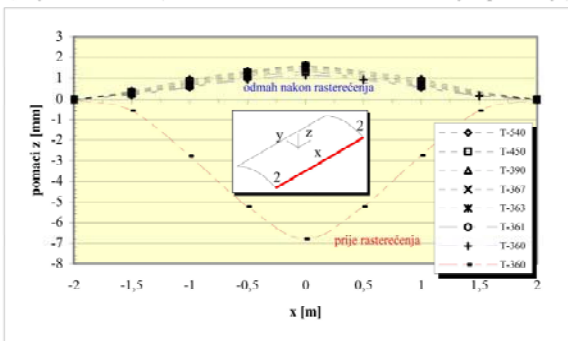
a) Prednapinjanje (P1-P5 ... inkrement sile)



b) Kratkotrajno opterećenje (O1-O5 ... inkrement opterećenja)



c) Tijekom vremena (od T-0 do T-360 ...dani nakon nanošenja opterećenja)

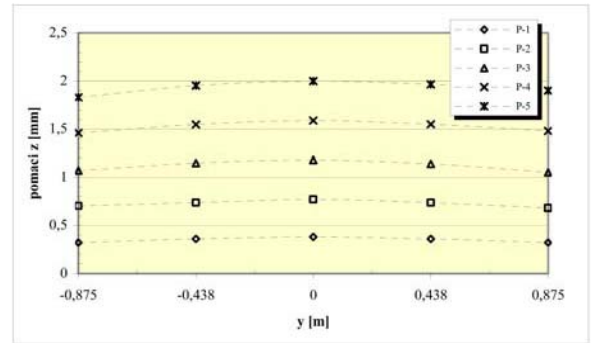


d) Nakon rasterećenja (od T-360 do T-540 ...dani nakon rasterećenja)

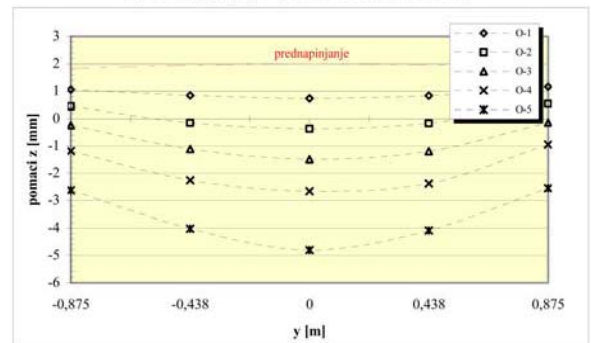
Slika 10. Pomaci uzdužnog ruba ljsuke (presjek 2-2)

mjestu pojave pukotine (slika 16.). Pri dugotrajnom stalnom opterećenju došlo je do znatnog povećanja trenutačnih deformacija betona, s učincima nelinearnog puzanja betona pod visokim razinama stalnog napreznja. Nakon rasterećenja pojavile su se znatne trenutačne

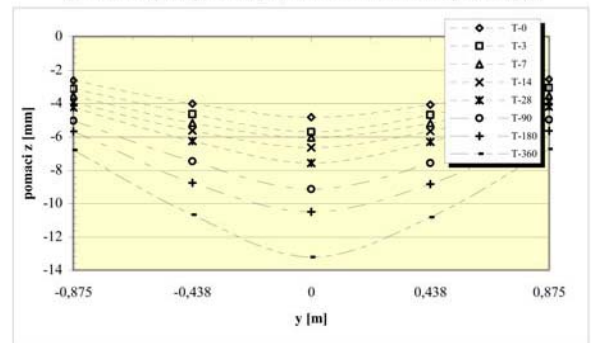
povratne deformacije betona i manji dio povratnih deformacija u razdoblju od šest mjeseci nakon rasterećenja. Zbog djelovanja sile prednapinjanja i ostalih nelinearnih vremenskih učinaka, preostale su znatne deformacije (napreznja) u betonu.



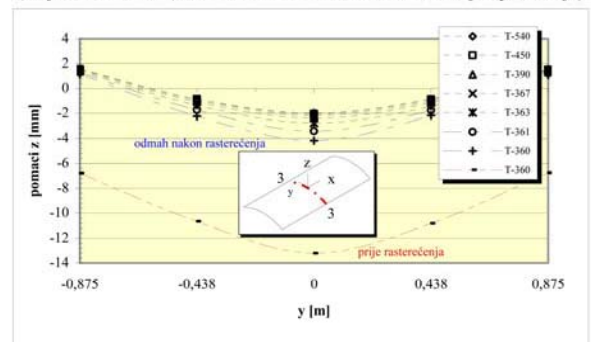
a) Prednapinjanje (P1-P5 ... inkrement sile)



b) Kratkotrajno opterećenje (O1-O5 ... inkrement opterećenja)

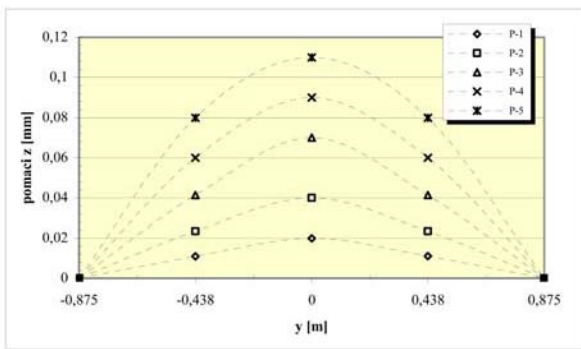


c) Tijekom vremena (od T-0 do T-360 ...dani nakon nanošenja opterećenja)

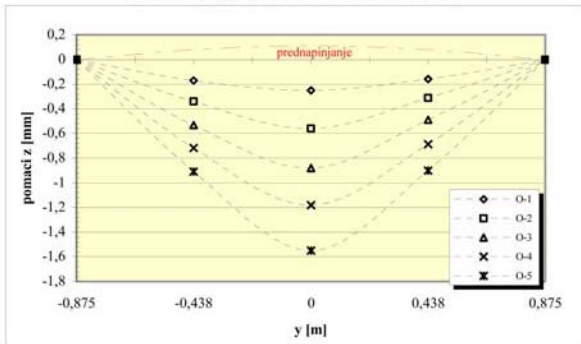


d) Nakon rasterećenja (od T-360 do T-540 ...dani nakon rasterećenja)

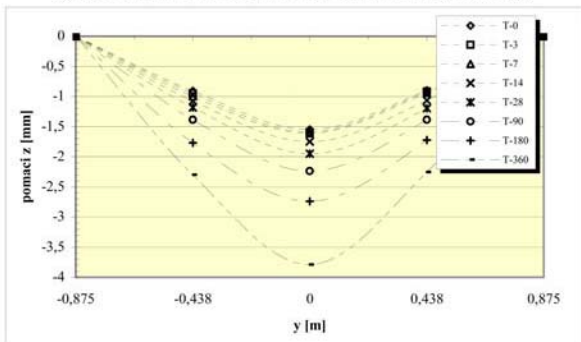
Slika 11. Pomaci ljsuke poprečno u sredini (presjek 3-3)



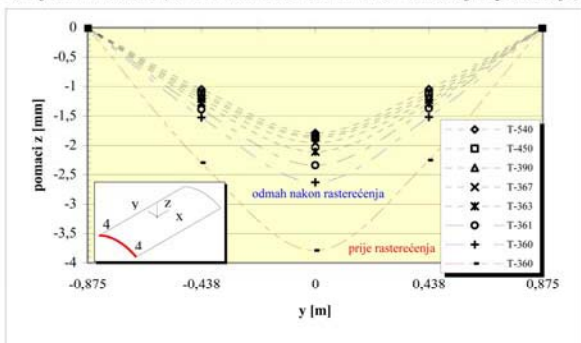
a) Prednapinjanje (P1-P5 ... inkrement sile)



b) Kratkotrajno opterećenje (O1-O5 ... inkrement opterećenja)



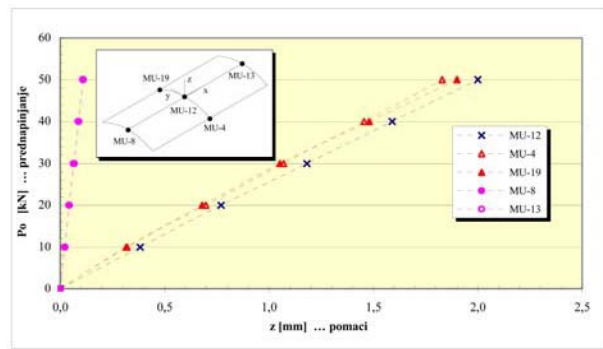
c) Tijekom vremena (od T-0 do T-360 ...dani nakon nanošenja opterećenja)



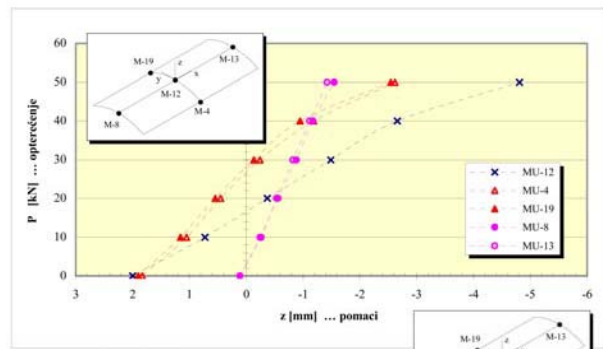
d) Nakon rasterećenja (od T-360 do T-540 ...dani nakon rasterećenja)

Slika 12. Pomaci poprečnog ruba ljske (presjek 4-4)

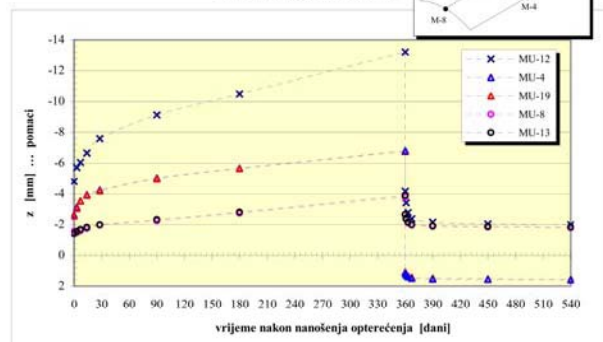
Deformacije obične armature u nekim mjernim točkama prikazane su na slikama 15. i 17. Na slici 15.a vidi se znatan prirast vlačnih napreznja uzdužne armature pojasa ljske u sredini raspona nakon nanošenja sile u pe-



a) Prednapinjanje



b) Kratkotrajno opterećenje

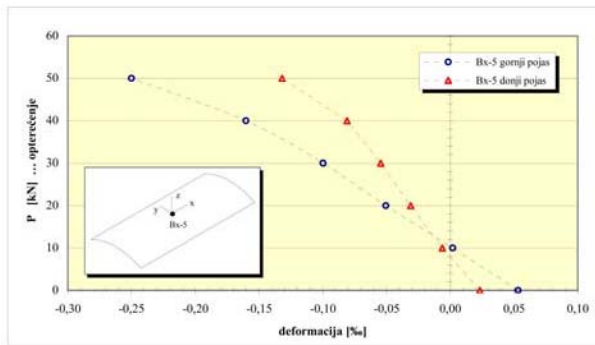


c) Tijekom vremena

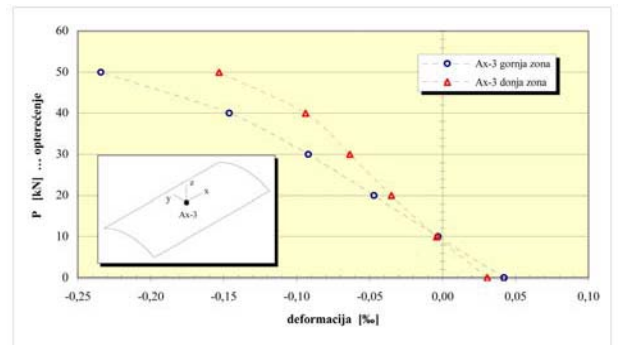
Slika 13. Pomaci ljske u nekim mjernim točkama

tom koraku i pojave pukotina u betonu. Pri dugotrajnom stalnom opterećenju tijekom vremena također je došlo do znatne promjene početnih (trenutačnih) deformacija, ovisno o smjeru armature (uzdužni ili poprečni) i vrsti napreznja (vlak ili tlak). Najveća izmjerena vlačna deformacija armature iznosila je oko 1,7 ‰ (slika 17.b), čemu odgovara vlačno napreznje od oko 340 MPa. Kako su najveća uporabna napreznja za ovu vrstu armature u realnim konstrukcijama do otprilike 260 MPa, očito je da je ovdje armatura znatno prekomjerno napreznja, što je i bilo planirano. Pri trenutačnom rasterećenju i nakon toga, ponašanje obične armature je analogno ponašanju betona.

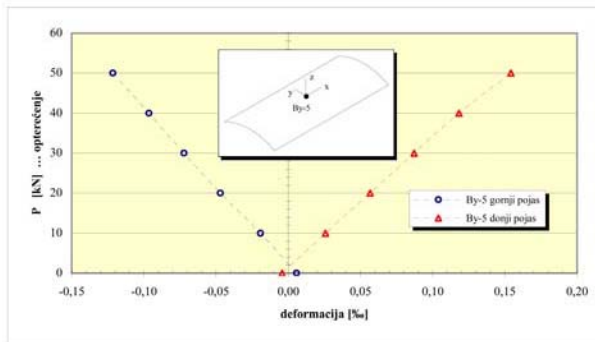
Deformacije natege tijekom prednapinjanja, kratkotrajnog opterećenja te dugotrajnog opterećenja i rasterećenja prikazane su na slici 18. Nakon linearnog ponašanja



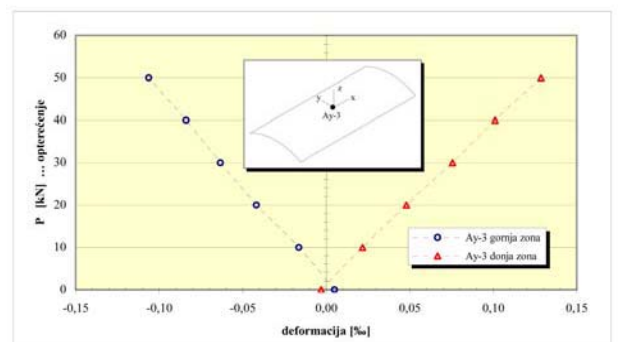
a) Prednapinjanje i kratkotrajno opterećenje - x smjer



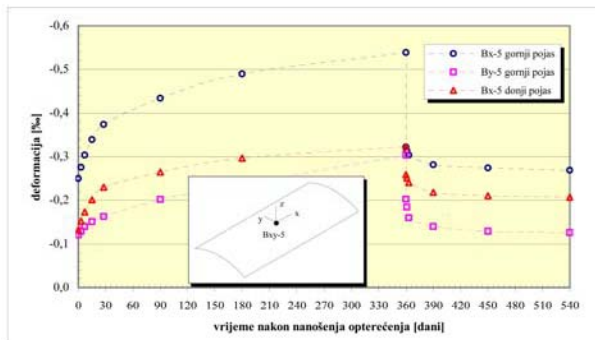
a) Prednapinjanje i kratkotrajno opterećenje (x smjer)



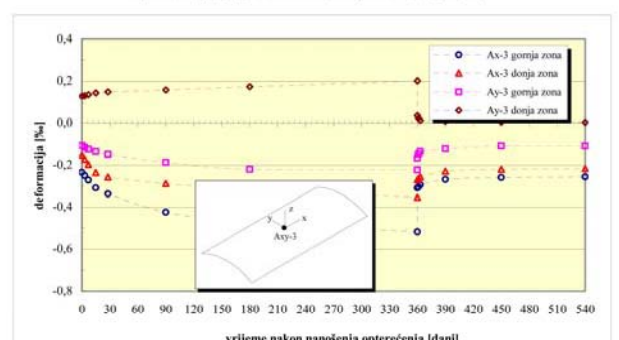
b) Prednapinjanje i kratkotrajno opterećenje - y smjer



b) Prednapinjanje i kratkotrajno opterećenje (y smjer)



c) Tijekom vremena (x i y smjer)



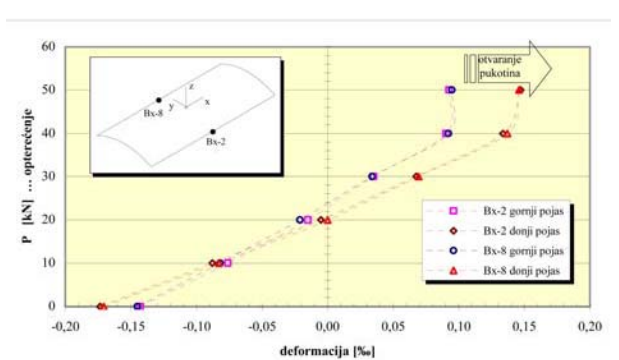
c) Tijekom vremena (x i y smjer)

Slika 14. Deformacije betona u sredini ljsuke (mjerno mjesto B5)

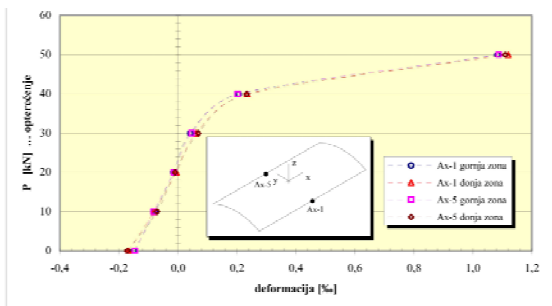
Slika 15. Deformacije armature u sredini ljsuke (mjerno mjesto A3)

natege za vrijeme napinjanja na deformaciju oko 2,5 %, odnosno na prilično malo naprezanje (u odnosu na čvrstoću čelika) od oko 475 MPa, nakon djelovanja kratkotrajnoga stalnog opterećenja deformacija se povećava svega na približno 2,66 %. Tijekom vremena pri dugotrajnom stalnom opterećenju deformacija natege se gotovo nije mijenjala.

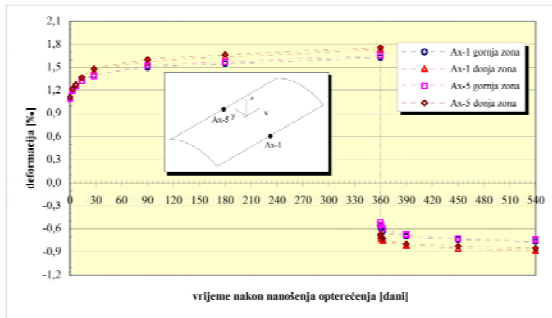
Nakon rasterećenja ljsuke deformacija natege je trenutno smanjena otprilike 0,25 %, a u razdoblju od šest mjeseci nakon toga za još oko 0,07 %. Prosječna vlačna deformacija natege na kraju eksperimenta iznosila je oko 2,34 % (čemu odgovara sila $P = 46,8$ kN), dok je neposredno nakon prednapinjanja natege ona iznosila prosječno 2,5 % (čemu odgovara sila $P = 50$ kN).



Slika 16. Deformacije betona za kratkotrajno opterećenje i prednapinjanje u sredini uzdužnih rubova ljsuke (mjerna mjesta B2 i B8, x smjer)



a) Prednapinjanje i kratkotrajno opterećenje (x smjer)



b) Tijekom vremena (x smjer)

Slika 17. Deformacije armature gornje i donje zone izmjerene tenzometrima oznake A1 i A5

Prve pukotine u betonu, kao što je prethodno navedeno, pojavile su se u polovini raspona u donjem pojasu uzdužnih bokova ljsuke pri nanošenju petog koraka dopunskog opterećenja ljsuke. Tijekom vremena pukotine su se širile, a nakon rasterećenja pukotine su se zatvorile.

4 Zaključak

Provedena eksperimentalna ispitivanja potvrđuju i upotpunjuju dosadašnje spoznaje ponašanja prednapetih betonskih ljsuka pri dugotrajnom stalnom opterećenju i rasterećenju. Specifičnost eksperimenta su prosječno velika naprezanja čelika i betona u nekim područjima u odnosu na njihovu čvrstoću. Vjeruje se da proveden i detaljno opisan eksperiment može biti od koristi za provjeru numeričkih modela za analizu prednapetih betonskih ljsuka s uključenjem reoloških svojstava betona pri dugotrajnom opterećenju i rasterećenju.

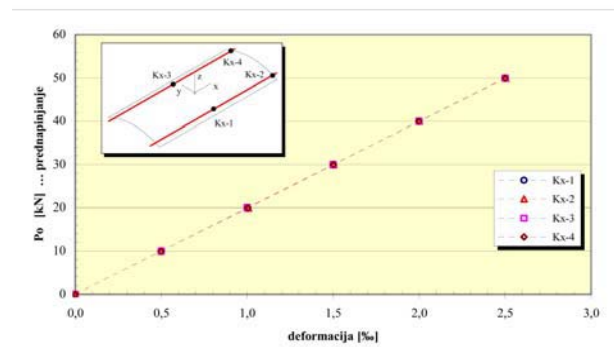
LITERATURA

[1] Bouma, A. L.; Van Riel, A. C.; Van Koten, H.; Beranek, W. J.: *Investigations on models of eleven cylindrical shells made of reinforced and prestressed concrete*, Proceedings of the Symposium on Shell Research, Delft, Amsterdam 1961.

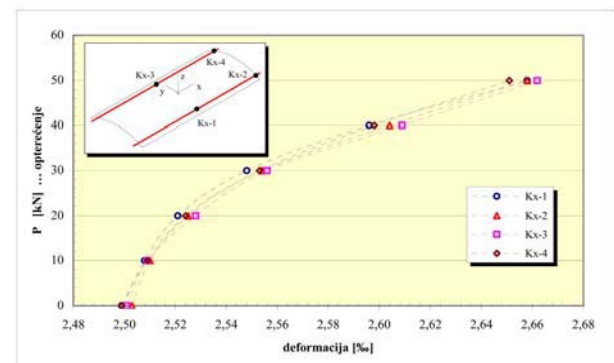
[2] Corley, W. G.; Sozen, M. A.: *Time-dependent deflection of reinforced concrete beams*, ACI Journal (1966) 63, 373-386.

[3] Figueiras, J. A.; Povoas, R.H.C.F.: *Modelling of prestress in non-linear analysis of concrete structures*, Computers & Structures., (1994) 53, 173-187.

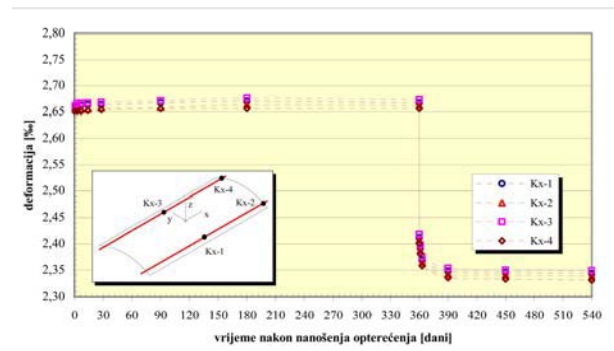
[4] Hedgren, A.W.; Billington, D. P.: *Mortar model test on a cylindrical shell of varying curvature and thickness*, ACI Journal, 1967.



a) Prednapinjanje



b) Kratkotrajno opterećenje



c) Tijekom vremena

Slika 18. Deformacije natege (mjerna mjesta K1, K2, K3 i K4)

[5] Hofstetter G.; Mang H. A.: *Collapse load analysis of prestressed concrete surface structures with unbonded tendons by the finite element method*, Finite Elements in Analysis and Design (1989) 5, 141-165.

[6] Hofstetter, G.; Mang, H.A.: *Computational mechanics of reinforced concrete structures*, Vienna, 1995.

[7] Hughes, T.J.R.; Liu, W.K.: *Nonlinear finite element analysis of shells: Parts I and II: three dimensional and two dimensional shells*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (1981) 26, 331-362, (1981) 27, 167-181.

- [8] Lin, C.S.; Scordelis, A.C.: Nonlinear analysis of RC shells of general form, ASCE Journal of the Structural Division (1975) 101, 523-538.
- [9] Roca, P.; Mari, A.R.: *Nonlinear geometric and material analysis of prestressed concrete general shell structures*, Journal of Computers and Structures (1993) 46, 917-929.
- [10] Roca, P.; Mari, A.R.: *Numerical treatment of prestressing tendons in the nonlinear analysis of prestressed concrete structures*, Journal of Computers and Structures (1993) 46, 905-916.
- [11] Scordelis, A.C.: *Analytical models for nonlinear material, geometric and time-dependent effects*, Int. Symp. Nonlinearity and Continuity in Prestressed Concrete (Edited by M. Z. Cohn) (1983) 2, 25-43.
- [12] Scordelis, A.C.: *Computer models for nonlinear analysis of reinforced and prestressed concrete structures*, PC1 Journal, 1984.