

شکل پذیری اعضاء خمشی بتن مسلح پرآرمه ساخته شده با بتن مقاومت بالا

ياسر شريفى^۱؛ على اكبر مقصودى^۲

چکیده

شکست اعضاء بتن مسلح (با فولاد زياد) ساخته شده از بتن مقاومت بالا، ترد و ناگهانی است. بنابراین بررسی شکل پذیری چنین اعضایی اهمیت ویژه دارد. بدین منظور در تحقیق حاضر تعداد شش عدد تیر دارای بتن با مقاومت بالا با درصد فولاد کششی و فشاری متغیر شده ساخته و به کمک نصب ابزارهای دقیق اندازه گیری، بصورت آزمایشگاهی بررسی شدند. تیرها تحت بار فزاینده تا مرحله تخریب، بارگذاری شده و مقادیر کرنش میلگردهای طولی کششی و فشاری و همچنین کرنش فشاری بتن همراه با خیز در چند نقطه در طول تیر در حین افزایش بار ثبت شد. بمنظور بررسی تاثیر فولاد فشاری بر شکل پذیری، نتایج بدست آمده از تیرهای دارای فولاد مضاعف با نتایج تیرهای مشابه دارای فقط فولاد کششی مقایسه شده است. نتایج تحلیل آزمایشگاهی با نتایج تئوری برگرفته از آیین نامه های CSA و ACI مقایسه شده است. در این مقاله همچنین مقایسه شکل پذیری جابجایی و شکل پذیری انحناء اعضاء نیز صورت گرفته است.

کلمات کلیدی

شکل پذیری، بتن با مقاومت زیاد، اعضاء خمشی با فولاد زیاد، آیین نامه های ACI و CSA

Ductility Performance of Heavily Steel Reinforced Concrete Flexural Members with High Strength Concrete

Y. Sharifi and A. A. Maghsoudi

ABSTRACT

The nature of fracture in reinforced high strength concrete (HSC) members is brittle and therefore in the seismic areas the ductility investigation of heavily reinforced HSC members is important. Six reinforced HSC beams with different percentage of tensile and high compression bars with attaching electrical strain gauges cast and loaded experimentally up to failure. During the test, the strains on the concrete middle face and on the tension and compression bars along with deflection at different points of the span length measured. Ductility of doubly reinforced members was compared with the singly reinforced members. The theoretical results based on ACI and CSA codes have been compared with the experimental results. In this paper, the displacement and curvature ductility of such members are also reported.

KEYWORDS

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۶/۱۱

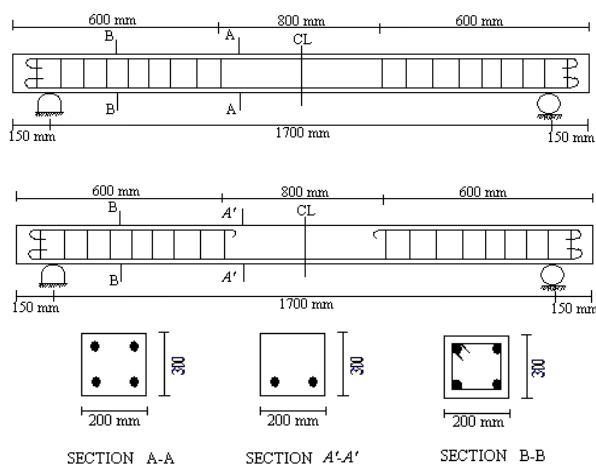
تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۱/۲/۱۰

^۱ نویسنده مسئول و استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، y.sharifi@vru.ac.ir

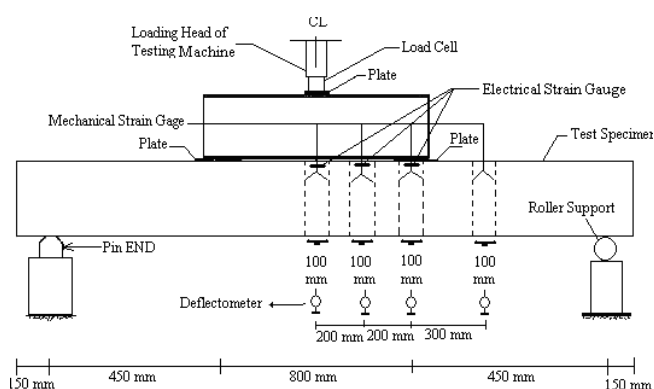
^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، maghsoudi.a.a@uk.ac.ir

Ductility, HSC, heavily reinforced members, codes

فولاد فشاری نیز هستند و اعداد ۶، ۷، ۸ و ۱۳ نشان‌دهنده تغییر در مقدار فولاد کششی و فشاری مقطع است. در شکل (۱) اطلاعات مربوط به نوع، شکل مقطع تیرها، نحوه بارگذاری، محل نصب پولکی‌ها برای خواندن کرنش بتن و تکیه‌گاه‌ها آورده شده است.



الف) جزئیات تیرهای آزمایش شده



ب) نحوه قرارگیری و جزئیات تیرهای آزمایش شده

شکل (۱): جزئیات تیرهای آزمایش شده در هنگام بارگذاری

در شکل (۲) نوع و نحوه پیشرفت ترک‌ها با هر افزایش بار نشان داده شده است. فولاد برشی بنحوی طراحی شده است تا در بار نهایی از شکست برشی تیر جلوگیری شود (بعبارت دیگر، سعی شده تا شکست خمشی مقدم بر شکست برشی شود). فاصله بین دو بار نقطه‌ای در تمام نمونه‌ها ثابت و برابر 800 mm است. خیز در نقاط مختلف دهانه بوسیله خیزسنج‌ها اندازه‌گیری شد، کرنش در فولاد کششی و فشاری بوسیله کرنش‌سنج‌های الکتریکی نصب شده بر آنها، اندازه‌گیری شد. بدین منظور در محل موردنظر، ابتدا آج می‌گردد برای طول مشخص، از قسمتی از

۱- مقدمه

امروزه کاربرد بتن با مقاومت زیاد در سازه‌ها با توجه به خصوصیات و مزایای قابل توجه آنها به سرعت رو به افزایش است. مسئله‌ای که در طراحی مقاطع خمشی بتن مسلح بویژه بتن‌های با مقاومت زیاد بدلیل خصوصیات ترد بودن آنها مطرح است، لزوم شکل‌پذیری بودن آنها به خصوص در مناطق زلزله‌خیز است. پارامترهای زیادی مانند مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور کششی و فشاری، مقدار خاموت محصورکننده بتن، فاصله دو خاموت مجاور، مقاومت تسلیم فولادهای طولی و نسبت عرض به عمق و همچنین شکل هندسی مقطع بر شکل‌پذیری سازه‌های بتنی موثرند [۶-۱]. تحقیقات نشان می‌دهند برخلاف اینکه مطالعات محدودی درباره تیرهای بتن مسلح کم آرمه دارای بتن با مقاومت زیاد موجود است لیکن، تحقیق در زمینه شکل‌پذیری بتن‌های با مقاومت زیاد پر آرمه دیده نشد. این در حالیست که محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای، طراحان را به سوی طرح‌های کم آرمه سوق می‌دهند اما، آشنایی با عملکرد این نوع تیرهای پر آرمه از جنبه کاربردی و تحقیقاتی به خصوص برای مناطق با خطر زلزله کم اهمیت دارد. در این تحقیق، تیرهای بتنی دارای بتن با مقاومت زیاد با درصد فولاد کششی و فشاری مختلف ساخته و تحت بارگذاری قرار گرفت. با رسم نمودارهای لنگر-انحناء، بار-خیز، مقادیر نسبت‌های شکل‌پذیری در مقاطع و کل تیرها به دو روش شکل‌پذیری انحناء (μ_ϕ) و شکل‌پذیری جابجایی (μ_Δ) تعیین شده و نتایج با نتایج تئوریک دو آیین‌نامه CSA و ACI که در آنها استفاده از بتن‌های با مقاومت زیاد مجاز شمرده شده است، مقایسه شده است.

۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

شش عدد تیر بتن مسلح با بتن مقاومت زیاد به ابعاد 20×30 و طول 200 سانتی‌متر ساخته شده و تحت بارگذاری دو نقطه‌ای قرار گرفتند. ۳ عدد تیر دارای فولاد کششی و فشاری زیاد و ۳ عدد تیر مشابه لیکن دارای فقط فولاد کششی زیاد که بعضی گزارشهای آن در مرجع [۲] موجود است، مورد مقایسه قرار گرفته است. فولاد برشی فقط در بازوی برش قرار دارد و از فولاد برشی در منطقه ممان ثابت استفاده نشده است. در جدول (۱) جزئیات تیرها آمده است. در جدول، حرف B نشان‌دهنده تیرهایی که در منطقه ممان ثابت فقط فولاد کششی دارند و حروف BC نشان‌دهنده تیرهایی که در منطقه ممان ثابت دارای

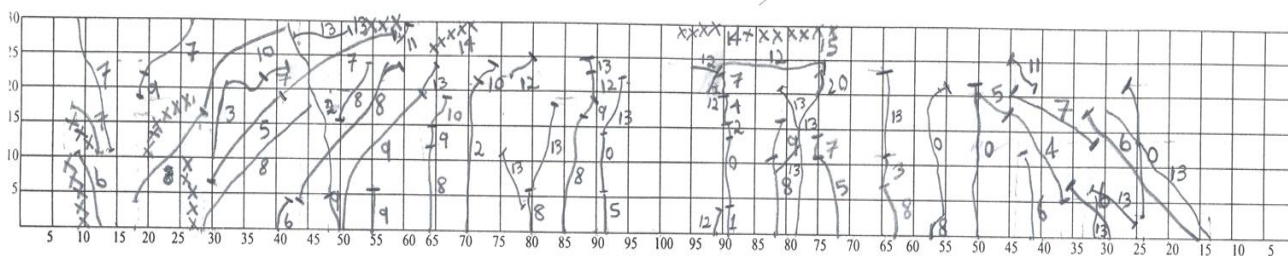
لازم صورت گرفته است. پولکی‌ها (صفحات فلزی) بر سطح بتن، در چندین ارتفاع مقطع، برای خواندن کرنش بتن نصب شده و در ضمن مراحل بارگذاری هر تیر تا لحظه شکست انجام شده است.

قطر میلگرد برداشته شده سپس در سطح صیقلی شده عاری از هر گونه آلودگی با چسب مخصوص، کرنش‌سنج الکتریکی نصب شد و در حین آزمایش تیرها، خواندن کرنش‌سنج‌های الکتریکی توسط دیتالاگر در هر مرحله از بارگذاری انجام و پردازش‌های

جدول (۱): مشخصات تیرها

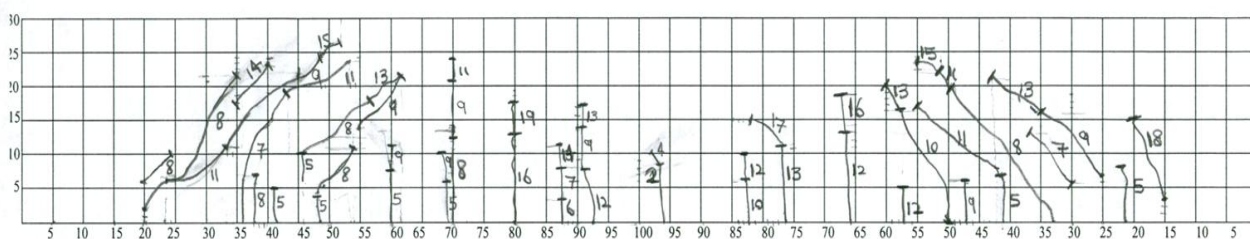
شماره تیر	f_c (MPa)	d (mm)	d' (mm)	A_s	ρ (%)	A'_s	ρ' (%)
BC13	۷۳/۶۵	۲۵۶	۴۰	۴Φ۲۸	۴/۸۱	۴Φ۲۸	۴/۸۱
B6	۷۱/۰۰	۲۵۶	-	۴Φ۲۸	۴/۸۱	-	-
BC7	۶۶/۸۱	۲۶۶	۵۷	۴Φ۲۸ + ۲Φ۱۶	۵/۳۸	۳Φ۲۲ + ۲Φ۱۴	۲/۷۲
B7	۷۰/۵۰	۲۶۶	-	۴Φ۲۸ + ۲Φ۱۶	۵/۳۸	-	-
BC8	۷۷/۷۲	۲۵۸	۵۹	۲Φ۲۸ + ۶Φ۲۲	۶/۸۱	۲Φ۲۸ + ۲Φ۱۴ + ۱Φ۱۶	۳/۳۷
B8	۷۱/۸۰	۲۵۸	-	۲Φ۲۸ + ۶Φ۲۲	۶/۸۱	-	-

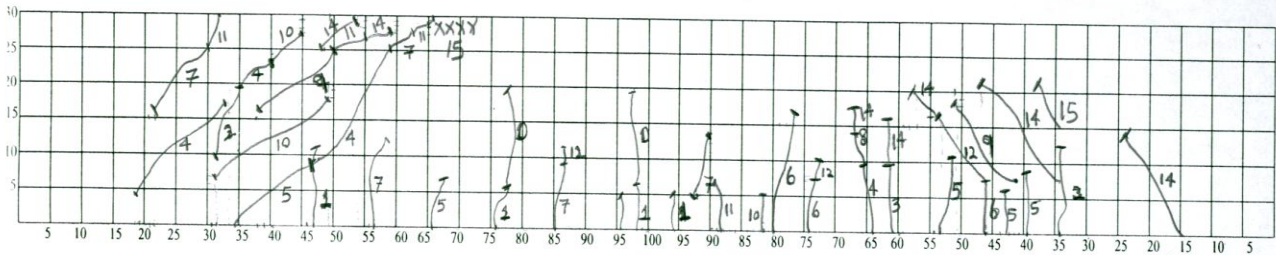
NO.BEAM: BC13



NOTE:

NO.BEAM: BC7





شکل (۲): چگونگی نوع، نحوه وقوع و پیشروی ترکها با هر افزایش بار در وجه طولی تیرها



شکل (۳): نحوه بارگذاری، پیشروی ترکها در تیر BC7

در هر افزایش بار مشاهدات عینی، خواننده‌های لازم و غیر ارتجاعی (خمیری) داشته و دوباره بعضی از اثرات بارگذاری بیش از حد را به قسمت‌های دیگر سازه پخش می‌نماید [۳].

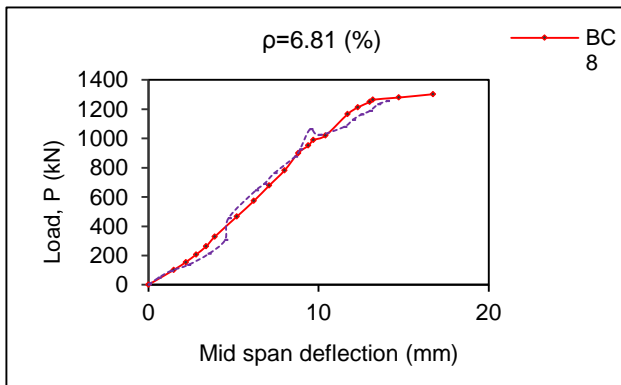
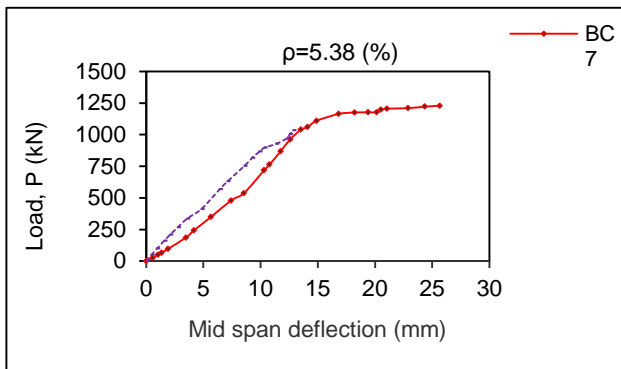
۴- شکل‌پذیری جابجایی (μ_d)

در این تحقیق برای بررسی رفتار کل تیر، از شکل‌پذیری جابجایی (μ_d) و برای بررسی رفتار انفرادی مقاطع از شکل‌پذیری انحناء (μ_ϕ) استفاده شده است. شکل‌پذیری جابجایی عبارتست از نسبت جابجایی در بار نهایی (Δ_{II}) به جابجایی در اولین نقطه‌ای که فولاد کششی جاری (Δ_y) می‌شود. بارنهایی در آزمایش تیر در اینصورت تعریف شده است که، بیشترین باری که یک تیر در حین بارگذاری قادر به تحمل آن است و پس از آن، با کمترین افزایش بار، منحنی در نمودار بار-خیز دارای سیر نزولی می‌شود. بنابراین با این تعریف، (Δ_y) در نمودار بار-خیز، نقطه‌ای روی منحنی است که شیب در آن تغییر می‌نماید و به صفر نزدیک می‌شود، و (Δ_{II}) نقطه‌ای است که شیب منحنی منفی می‌شود. در شکل (۴) نمودار بار-خیز تیرهای مورد بررسی در این تحقیق آورده شده است. در جدول (۲) مقادیر (Δ_y)، (Δ_{II}) و (μ_d) محاسبه و آورده شده است.

در هر افزایش بار مشاهدات عینی، خواننده‌های لازم و پیشروی ترک روی سطح تیر ثبت می‌شود. در شکل (۳) نحوه بارگذاری، پیشروی ترکها و غیره مربوط به تیرهای آزمایش شده نشان داده شده است. در ضمن از کرنش سنج‌های الکتریکی نیز برای خواندن کرنش، سطح بتن و مقایسه آنها با مقادیر حاصل از کرنش‌سنج‌های مکانیکی، استفاده شد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان‌دهنده دقت بیشتر کرنش‌سنج‌های الکتریکی نسبت به مکانیکی است و بنابراین از نتایج کرنش‌سنج‌های الکتریکی استفاده شد.

۳- شکل‌پذیری

مصلح شکل‌پذیر به موادی گفته می‌شوند که در حین تحمل بار، کرنش‌های زیادی از خود نشان می‌دهند. کاربرد این تعریف برای اعضاء و سازه‌های بتن مسلح، عبارت است از توانایی حمل تغییرشکل‌های غیر ارتجاعی قابل توجه قبل از تخریب عضو می‌باشد. به عبارت دیگر یک ماده یا سازه ترد با رسیدن به بار بیشینه بطور ناگهانی شکسته می‌شود. در صورتی که یک سازه شکل‌پذیر نامعین از نظر ایستایی در معرض نشست غیر منتظره یا بارگذاری بیش از حد قرار گیرد، سازه تمایل به تغییر شکل



شکل (۴): نمودار بار-خیز تیرهای آزمایش شده

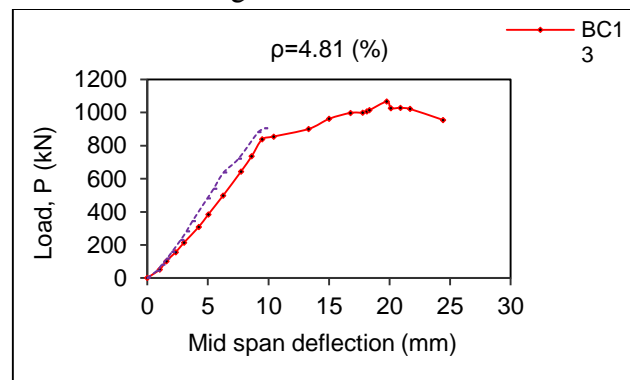
توضیح در مورد کفایت یک مقدار خاص به عنوان نسبت شکل پذیری μ امر مشکلی است زیرا این نسبت فقط یک معیار اختیاری از ظرفیت چرخش غیر الاستیک یک مقطع است. شکل پذیری مورد نیاز در یک وضعیت بخصوص بر حسب وضعیت مورد نظر و کمیت کرنش فشاری نهایی در بحرانی ترین تار بتن " ϵ_{ii} " بکار رفته برای تعیین ضریب شکل پذیری " μ " متفاوت است. برخلاف اختلاف نظر محققین [۷ تا ۹] در مورد کمترین میزان شکل پذیری (که بیشتر در محدوده ۶ تا ۳ توصیه شده است)، توصیه می شود [۳] برای اهداف طراحی، نسبت شکل پذیری بدست آمده از معادله (۱) و (۳ و ۵) برای سازه های نواحی زلزله خیز باید حداقل ۴ و در سازه هایی که نیاز به شکل پذیری محدود دارند حداقل ۳ باشد.

۵- بررسی شکل پذیری جابجایی در مقاطع مختلف

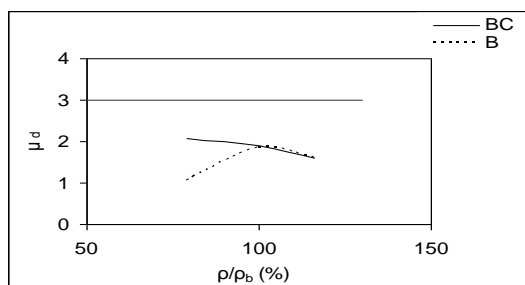
با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، خیز در مقاطع مختلف در طول تیر به کمک خیزسنج های با دقت ۰/۰۱ میلی متر در حین بارگذاری برای هر افزایش باری خوانده شد، بنابراین برای مقایسه شکل پذیری جابجایی به دست آمده از خیز مقاطع مختلف تیر، مقادیر شکل پذیری جابجایی (با فرض اینکه مقاطع مختلف در یک بار مشخص به مرحله تسلیم و هم زمان به مرحله نهایی

همانطور که از شکل (۷ الف)) مشخص است غیر از قسمت اول نمودار، مقایسه دو منحنی رسم شده برای تیرهای با و بدون فولاد فشاری نشان می دهد که شکل پذیری جابجایی تیرهای مشابه از نظر مقدار فولاد کششی بر هم منطبق هستند. همانطور که از جدول (۲) مشخص است تنها تفاوت در مقادیر شکل پذیری جابجایی بین دو نوع تیر با و بدون فولاد فشاری مربوط به تیر B6 است که علت آن شکست برشی زود هنگام آن است. در صورتی که در تیر B6 شکست برشی اتفاق نمی افتاد، شکل پذیری جابجایی آن به طور حتم بیشتر می شد.

همان گونه که از شکل (۵) مشخص است، حداقل شکل پذیری جابجایی برابر با ۳، نشان داده شده است و مقایسه این مقدار با مقادیر بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی (شکل ۵) حاکی از این است که هیچیک از تیرهای با و بدون فولاد فشاری قادر به تامین کمترین شکل پذیری نیستند. همچنین یادآوری می شود، ساختمان های موجود که بر اساس آیین نامه های ACI قبل از سال ۲۰۰۲ طراحی شده باشند، بطور غیر مستقیم مقدار حداقل شکل پذیری جابجایی برابر با ۲ در صورتی که از مقدار ρ_b $\rho_{max} = 0.75$ استفاده شود را بدست خواهند داد که همچنان کمتر از مقدار حداقل ۳ نشان داده شده در شکل (۵) است که می توان از آن بعنوان یک نقیصه نام برد. این نقص در آیین نامه ACI، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ برطرف شده و روش طرح تغییر یافته است.



می‌رسند) به صورت جداگانه در جداول (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است. شکل (۵-الف): اثر فولاد کششی و فشاری بر شکل‌پذیری جابجایی

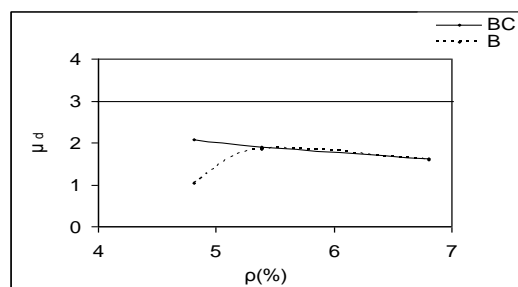


شکل (۵-ب): اثر فولاد کششی و فشاری بر شکل‌پذیری جابجایی

در شکل (۷) اثر فولاد کششی و فشاری (ρ' و ρ) بر شکل‌پذیری و اثر فولاد کششی بصورت عامل ρ/ρ_b در شکل‌پذیری تیرها نشان داده شده است.

جدول (۲): شکل‌پذیری جابجایی (μ_d)، Δ_y و Δ_u تیرهای آزمایش شده

شماره تیر	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	$\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$
BC13	۹/۴۸	۱۹/۷۷	۲/۰۸
B6	۹/۲۸	۹/۷۰	۱/۰۴
BC7	۱۳/۵۳	۲۵/۶۷	۱/۹۰
B7	۶/۹۵	۱۲/۸۴	۱/۸۴
BC8	۱۰/۴۰	۱۶/۷۳	۱/۶۱
B8	۸/۷۶	۱۴/۰۰	۱/۵۹



جدول (۳): شکل‌پذیری جابجایی (μ_d)، Δ_y و Δ_u در مقاطع مختلف تیر آزمایش شده BC13

BC13	وسط تیر	۲۰ سانتیمتر از وسط تیر	۴۰ سانتیمتر از وسط تیر	۷۰ سانتیمتر از وسط تیر
(mm) خیز در مرحله تسلیم	۹/۴۸	۹/۳۷	۸/۴۳	۵/۳۷
(mm) خیز در مرحله نهایی	۱۹/۷۷	۲۰/۰۹	۱۷/۱۸	۱۰/۰۷
شکل‌پذیری	۲/۰۸	۲/۱۴	۲/۰۴	۱/۸۷

جدول (۴): شکل‌پذیری جابجایی (μ_d)، Δ_y و Δ_u در مقاطع مختلف تیر آزمایش شده BC7

BC7	وسط تیر	۲۰ سانتیمتر از وسط تیر	۴۰ سانتیمتر از وسط تیر	۷۰ سانتیمتر از وسط تیر
(mm) خیز در مرحله تسلیم	۱۳/۵۳	۱۳/۲۵	۱۲/۶۵	۱۰/۱۸
(mm) خیز در مرحله نهایی	۲۵/۶۷	۲۳/۳۹	۱۹/۹۱	۱۳/۱۴
شکل‌پذیری	۱/۹۰	۱/۷۶	۱/۵۷	۱/۲۹

جدول (۵): شکل‌پذیری جابجایی (μ_d)، Δ_y و Δ_u در مقاطع مختلف تیر آزمایش شده BC8

BC8	وسط تیر	۲۰ سانتیمتر از وسط تیر	۴۰ سانتیمتر از وسط تیر	۷۰ سانتیمتر از وسط تیر
(mm) خیز در مرحله تسلیم	۱۰/۳۶	۱۰/۲۹	۹/۶۳	۶/۹۸
(mm) خیز در مرحله نهایی	۱۶/۷۳	۱۶/۲۱	۱۳/۸۲	۹/۸۴
شکل‌پذیری	۱/۶۱	۱/۵۷	۱/۴۳	۱/۴۱

جدول (۶): مقایسه شکل‌پذیری انحاء آزمایشگاهی و تئوری تیرها

شماره تیر	آزمایشگاهی			تئوری (ACI)			تئوری (CSA)		
	$\phi_y \times 10^{-3}$	$\phi_u \times 10^{-3}$	μ_ϕ	$\phi_y \times 10^{-3}$	$\phi_u \times 10^{-3}$	μ_ϕ	$\phi_y \times 10^{-3}$	$\phi_u \times 10^{-3}$	μ_ϕ
BC13	۱/۳۸	۷/۰۵	۵/۱۰	۱/۴۸	۴/۶۱	۳/۱۱	۱/۴۸	۵/۷۸	۳/۹۰
B6	۲/۳۵	۲/۵۵	۱/۰۸	۱/۵۸	۲/۳۶	۱/۴۹	۱/۵۸	۲/۹۴	۱/۸۶
BC7	۱/۷۳	-	-	۱/۴۴	۲/۹۹	۲/۰۷	۱/۴۴	۳/۸۲	۲/۶۵

B7	۱/۲۶	۲/۲۵	۱/۷۷	۱/۶۵	۲/۲۰	۱/۳۳	۱/۶۵	۲/۷۴	۱/۶۶
BC8	۱/۵۰	۵/۰۷	۳/۳۸	۱/۵۸	۲/۷۸	۱/۷۶	۱/۵۸	۳/۴۵	۲/۱۸
B8	۱/۷۷	۲/۴۸	۱/۴۰	-	۱/۸۶	-	-	۲/۱۰	-

ب- مقطع با فولاد فشاری

$$k = \left[n^2(\rho + \rho')^2 + 2n \left(\rho + \frac{\rho'd'}{d} \right) \right]^{1/2} - n(\rho + \rho') \quad (2)$$

اگر فولاد فشاری در لحظه شکست جاری شود:

$$\mu = \frac{\alpha\beta_1 f'_c \varepsilon_{cu} E_s (1-k)}{f_y^2 (\rho - \rho')} \quad (3)$$

اگر فولاد فشاری در لحظه شکست جاری نشود:

$$X_u = \left[\frac{(\rho' E_s \varepsilon_{cu} - \rho f_y)^2 d^2}{(2\alpha f'_c)^2 \beta_1^2} + \frac{\rho' E_s \varepsilon_{cu} d d'}{\alpha f'_c \beta_1} \right]^{1/2} - \frac{(\rho' E_s \varepsilon_{cu} - \rho f_y) d}{(2\alpha f'_c) \beta_1} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{E_s \varepsilon_{cu} (1-k) d}{f_y X_u} \quad (5)$$

در تیرهای پرآرمه برای محاسبات حالت تئوریک شکل پذیری همانطور که از تئوری‌های مختلف مشهود است، شکل پذیری، مفهوم واقعی ندارد (میلگردهای طولی، تسلیم نمی‌شوند). بنابراین در این تحقیق انحناء در حالت نهایی با استفاده از معادله (۵) برای تیرهای پرآرمه محاسبه شده است. در شکل (۷) نمودار ممان - انحناء تیرهای آزمایشی دارای فولاد فشاری و مقایسه آنها با تیرهای مشابه ولی فاقد فولاد فشاری نشان داده شده است. همچنین در جدول (۶) مقادیر مقایسه انحناء در لحظه جاری شدن فولاد کششی (ϕ_y) و انحناء در بار نهایی (ϕ_u) و شکل پذیری انحناء (μ) برای نتایج آزمایشگاهی و تئوری که بر اساس رابطه (۱) تا (۵) بدست آمده‌اند، نشان داده شده است. در این روابط مقادیر α ، β_1 ، ε_{cu} و E_c بر اساس پیشنهاد آیین‌نامه‌های [۱۱] CSA و [۱۰] ACI عبارت است از:

جدول (۷): مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI و CSA جهت پارامترهای بلوک تنش فشاری معادل و مدول الاستیسیته تن با

مقاومت بالا

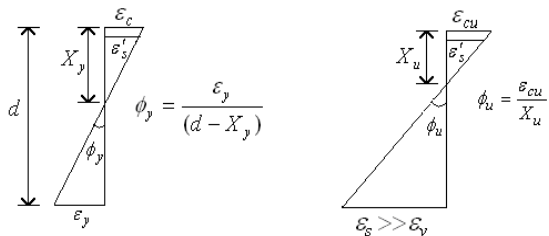
	ACI	CSA
α	۰/۸۵	۰/۸۵ - ۰/۰۱۵ $f'_c \geq ۰/۶۷$
β_1	۱/۰۹۰ - ۰/۰۰۸ $f'_c \geq ۰/۶۵$	۰/۹۷ - ۰/۰۰۲۵ $f'_c \geq ۰/۶۷$
ε_{cu}	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۵
E_c	$۳۲۰۰ \sqrt{f'_c} + ۶۹۰۰$	$(۳۲۰۰ \sqrt{f'_c} + ۶۹۰۰) \omega$

$$\omega = \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{1.5}$$

با بررسی و مطالعه جداول فوق مشخص است، برخلاف اینکه با دور شدن از مقطع وسط تیر شکل پذیری جابجایی (μ_d) کاهش یافته است ولی این کاهش چشم‌گیر نیست و به نظر می‌رسد فرض استفاده از شکل پذیری جابجایی مقطع وسط برای شکل پذیری کل تیر برای تیرهای دارای HSC با فولاد زیاد، معقول است.

۶- شکل پذیری انحناء (μ)

شکل پذیری انحناء عبارتست از نسبت انحناء در بار نهایی (ϕ_u) (منظور لحظه اعمال بار تخریب تیر است) به انحناء در اولین نقطه‌ای که فولاد کششی جاری، (ϕ_y) می‌شود. بنابراین، (ϕ_y) در نمودار ممان-انحناء نقطه‌ای روی منحنی است که شیب آن تغییر نموده و به صفر نزدیک می‌شود و (ϕ_u) نقطه دیگری که شیب آن دارای سیر نزولی می‌شود، است. برای طراحی، به‌طور معمول محاسبات مربوط به انحناء را میتوان از تئوری خط مستقیم انجام داد [۳]. با بکارگیری مفاهیم شکل (۶) می‌توان شکل پذیری انحناء ($\mu = \phi_u / \phi_y$) را در تیرهای با و یا بدون فولاد فشاری محاسبه نمود. مفاهیم و فرمول‌ها با دقت کافی از تئوری خط مستقیم استخراج شده است.



شکل (۶): انحناء تسلیم ϕ_y و انحناء نهایی تخریب ϕ_u (لحظه

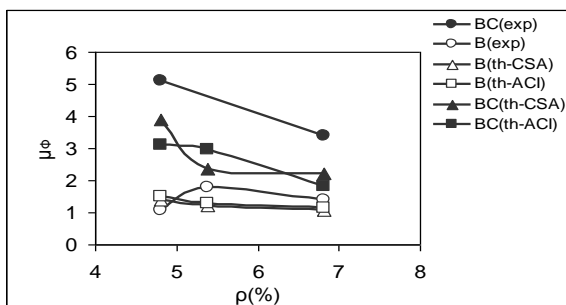
اعمال بار تخریب) خمشی

الف - مقطع بدون فولاد فشاری

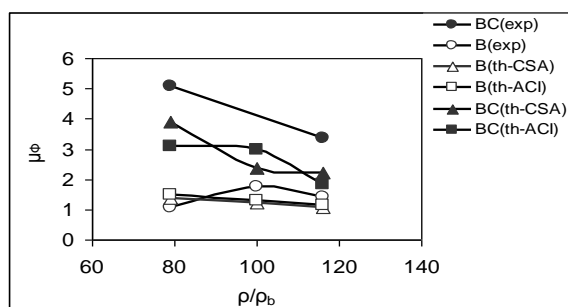
$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\varepsilon_{cu} (\alpha\beta_1 f'_c) E_s (1 + \rho n (2\rho n + \rho^2 n^2)^{1/2})}{\rho f_y^2} \quad (1)$$

f_y : تنش تسلیم فولاد کششی، d : عمق مؤثر، Kd : عمق منطقه فشاری (X_y)، ε_{cu} : کرنش فشاری در هنگام خردشدن بتن، X_u : عمق منطقه فشار در حالت نهایی، α : ضریب بلوک تنش فشاری بتن، β_1 : ارتفاع بلوک تنش فشاری بتن به عمق

$$\text{محورخنتی (X)}: \rho = \frac{A_s}{bd} \text{ و } n = \frac{E_s}{E_c}$$



شکل (۸-الف): اثر فولاد کششی و فشاری بر شکل‌پذیری انحناء



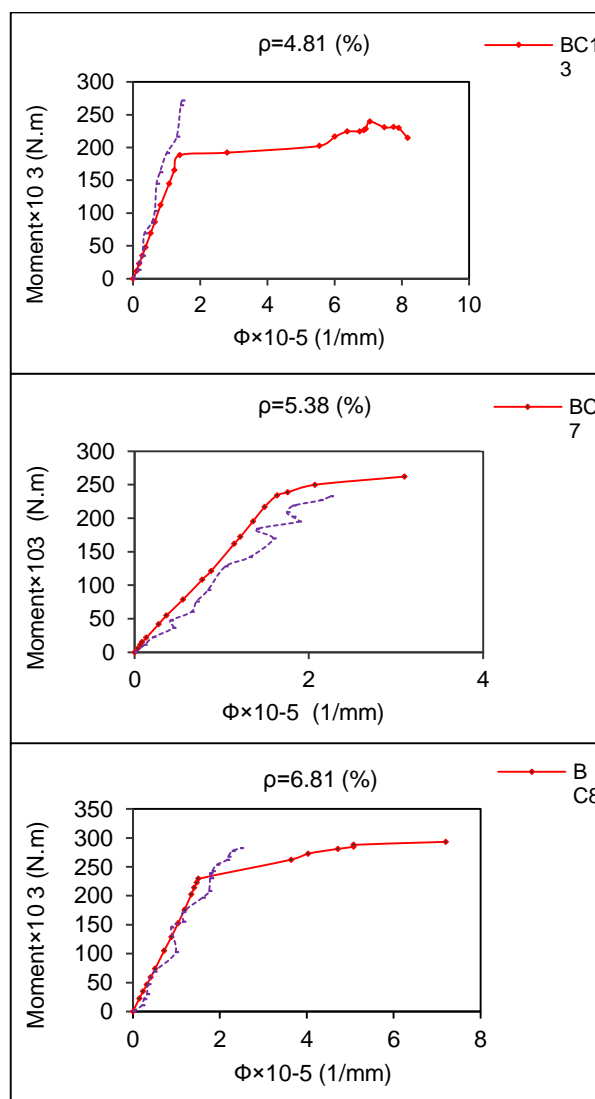
شکل (۸-ب): اثر فولاد کششی و فشاری بر شکل‌پذیری انحناء

از آنجا که بیشتر شکل‌پذیری کل تیر با توجه به نسبت جابجایی در حالت نهایی به حالت تسلیم بدست می‌آید، اما محاسبه تئوریک آن نسبت به محاسبه شکل‌پذیری مقطع تیر مشکلتر است. بنابراین ساده‌ترین و رایج‌ترین روش بیان شکل‌پذیری تئوری یک مقطع عبارت از نسبت انحناء نهایی محاسبه شده به انحناء تسلیم محاسبه شده یک مقطع.

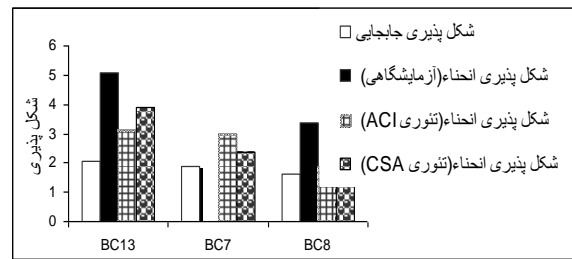
۷- مقایسه شکل‌پذیری انحناء آزمایشگاهی و تئوری

در جدول (۶) نتایج به‌دست آمده از شکل‌پذیری انحناء آزمایشگاهی در تیرهای مورد بررسی با نتایج محاسبه شده به‌کمک دو آیین‌نامه [۱۱] CSA و [۱۰] ACI که در آنها استفاده از بتن با مقاومت زیاد مطرح است، مقایسه شده است. نتایج این مقایسه به صورت نمودار میله‌ای در شکل (۹) نشان داده شده است. در شکل (۹) به دلیل نبود شکل‌پذیری انحناء آزمایشگاهی تیر BC7 به دلیل پاره شدن کرنش‌سنج الکتریکی، محل موردنظر خالی در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول شماره (۶) شکل‌پذیری محاسبه شده با استفاده از روابط تئوری به یکدیگر نزدیک بوده در حالی که شکل‌پذیری به‌دست آمده آزمایشگاهی از شکل‌پذیری محاسبه شده با استفاده از روابط تئوری، بیشتر است و این موضوع در مورد تیرهای با فولاد فشاری واضح‌تر است.

همان‌گونه که از جدول (۶) مشهود است، در هنگام آزمایش تیر BC7، بعلت پاره شدن کرنش‌سنج الکتریکی، مقدار کرنش در فولاد کششی در بار نهایی امکان‌پذیر نشد و بنابراین امکان محاسبه انحناء در این بار مقدور نیست. در شکل (۷) بسیار واضح است که تیرهای دارای فولاد فشاری، سطح زیر نمودار بیش‌تری را نسبت به تیرهای بدون فولاد فشاری در دیاگرام‌های ممان-انحناء، که بیانگر میزان انرژی جذب شده توسط سازه است را دارد. این موضوع در مورد دیاگرام‌های بار-خیز بررسی نشد زیرا تفاوت چندانی بین دو حالت با و بدون فولاد فشاری وجود نداشت.



شکل (۷): نمودار ممان - انحناء تیرها



شکل (۹): مقایسه شکل پذیری تیرها

۸- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تعداد شش عدد تیر دارای بتن با مقاومت بالا با درصد فولاد کششی و فشاری متغیر شده ساخته و به کمک نصب ابزارهای دقیق اندازه گیری بررسی شدند. تیرها تحت بار تا مرحله تخریب، بارگذاری شده و مقادیر کرنش میلگردهای طولی کششی و فشاری و همچنین کرنش فشاری بتن همراه با خیز در چند نقطه در طول تیر در حین افزایش بار ثبت شد. بمنظور بررسی تاثیر فولاد فشاری بر شکل پذیری، نتایج بدست آمده از تیرهای دارای فولاد مضاعف با نتایج تیرهای مشابه دارای فقط فولاد کششی مقایسه شده است. نتایج تحلیل آزمایشگاهی با نتایج تئوری برگرفته از آیین نامه های CSA و ACI مقایسه شده است. با توجه به مطالب بحث شده نتایج زیر استخراج می شود:

۱- با تعیبه فولاد فشاری در تیرهای دارای بتن با مقاومت زیاد، بر میزان بارنهایی به مقدار قابل توجهی افزوده نمی شود ولی مقدار خیز و انحناء، در بار نهایی مقدار زیادی افزایش می یابد.

۱۰- مراجع

- [۱] تارویوردیلوی اصل، سعید، "بررسی تجربی و تئوریک پارامترهای موثر در شکل پذیری اعضا خمشی بتن مسلح"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۳
- [۲] مقصودی، علی اکبر، قنبری نینز، فرهاد، محمد حسنی، محمد، "شکل پذیری تیرهای بتن مسلح دارای بتن با مقاومت بالا ی کم آرمه" اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، کد مقاله ۱۰۲۱، ۱۳۸۳.
- [۳] مقصودی، علی اکبر، "شکل پذیری سازه های بتن آرمه ویژه مناطق زلزله خیز"، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۷۵.
- [۴] مقصودی، علی اکبر، اکبرزاده بنگر، حبیب "آنالیز شکل پذیری تیرهای محصور شده دارای بتن مقاومت بالا" اولین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۸۳، کد مقاله ۱۰۲۴

۲- با بررسی نتایج آزمایشگاهی برای تامین رفتار شکل پذیری جابجایی اعضا، خمشی با حد پایین قابل قبولی برابر با ۳، هیچ یک از تیرهای با و بدون فولاد فشاری به دلیل استفاده از فولاد کششی زیاد به این حداقل دسترسی پیدا نموده اند.

۳- شکل پذیری انحناء آزمایشگاهی تقریباً بیش از دو برابر شکل پذیری جابجایی تیرهای مورد آزمایش است. بطور کلی در تیرهای بررسی شده شکل پذیری انحناء آزمایشگاهی و تئوری بیش از شکل پذیری جابجایی که بیانگر شکل پذیری کل تیر است بدست آمده است.

۴- برای مناطق زلزله خیز استفاده از تیرهای پرآرمه (بیش از $\rho_b \geq 0.75$) به دلیل شکل پذیری کم توصیه نمی شود. در این تحقیق برای کمترین ρ استفاده شده در تیرها ($\rho_b \geq 0.79$) بیشترین شکل پذیری جابجایی و انحناء، بترتیب برابر با $2/0.8$ و $5/1.0$ به دست آمد.

۵- برای تیرهای بدون فولاد فشاری، شکل پذیری انحناء و جابجایی تفاوت چندانی ندارند ولی در تیرهای با فولاد مضاعف شکل پذیری انحناء به طور تقریب بیش از دو برابر شکل پذیری جابجایی است.

۹- تقدیر و تشکر

نویسنده بر خود لازم می داند از حمایت دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان تشکر نماید.

- [۵] Ashour, A.A., "Effect of Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams," Engng. Struct. J., 2000, pp. 413-423.
- [۶] Mattock, A.H., "The Rotational Capacity of Hinging Region in Reinforced Concrete Beams", Proceedings of the International Symposium on Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ASCE-ACI, Miami, Nov., 1964, pp. 143-181.
- [۷] Corley, W.G., "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams," Proc-American of Civil Engineers, J.Struct, Div. 92(ST5), 1966.
- [۸] Tsong, Y., Yue, L.H., Jaw, W.T., "Amelioration of Stirrup and Compression Reinforcement on the Ductility of Reinforced High-Strength Concrete Beam," Proceeding of the sessions related to seismic engineering and structures congress, San Francisco, CA., 1989, pp. 569-604.
- [۹] Blume, J.A., Newmark, N.M., and Coring, L.H., "Design of Multi Story reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions," Portland Cement Association, 1961.

CSA Technical Committee, "Design of Concrete Structure for Buildings," CAN3-A23.3-M94, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 2004. [۱۱]

ACI Committee 363, "Review of ACI Code for Possible Revisions for High-Strength Concrete," American Concrete Institute, Detroit, 2005. [۱۰]

۱۱- زیر نویس

Demec