

اثر ترک بر باربری تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 با استفاده از تحلیل مکانیک شکست

سید محمد فرنام

دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه بوعلی سینا
Seyed.Farnam@yahoo.com

فریدون رضایی

دانشیار دانشگاه بوعلی سینا

دریافت مقاله: ۱۳۹۶-۷-۲۷

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷-۱-۲۸

چکیده

در این پژوهش با تکیه بر اصول مکانیک شکست در بتن مسلح، رفتار شکست در تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 به روش عددی و آزمایشگاهی تحلیل شده است. در بخش عددی این پژوهش، مدل غیرخطی خرابی پلاستیک با استفاده از نرم‌افزار Abaqus و در بخش آزمایشگاهی، روش‌های رپلیکاگیری و تحلیل عکس استفاده شده است. تراورس‌ها با طول پیش‌ترک از صفر تا ۴۵ میلی‌متر و عرض پیش‌ترک از صفر تا ۸ میلی‌متر تحت بار سه نقطه‌ای لنگر خمشی منفی وسط دهانه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش میزان کاهش مقاومت قطعه‌ی تراورس پیش‌ترک‌دار در ایجاد ترک و ناپایداری ترک (شکست) برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهند که وجود پیش‌ترک آن‌هم با عرض‌های بسیار کوچک، باعث کاهش بسیار زیاد نتایج آزمایش‌های ۲۸ روزه تراورس می‌شوند که در طراحی به روش مقاومت مصالح در نظر گرفته نشده است. در نتیجه طرح مقاومت مصالحی موجود برای طراحی قطعه‌ی تراورس تا زمانی پاسخ‌گو است که هیچ آسیب یا پیش‌ترکی در قطعه وجود نداشته باشد. همچنین به نظر می‌رسد برای تحلیل و طراحی یک قطعه‌ی بتن پیش‌تنیده‌ای مانند تراورس احتیاج به بازرسی‌های دقیق در مورد وجود عیب در آن وجود دارد تا در صورت نیاز با تحلیل مکانیک شکست به‌همراه تحلیل مقاومت مصالح، ظرفیت قطعه و به‌طبع آن عمر قطعه تخمین زده شود.

کلمات کلیدی: طراحی مقاومت مصالح، طراحی مکانیک شکست، تراورس بتنی پیش‌تنیده، درصدکاهش مقاومت

۱.۱. تراورس بتنی پیش‌تنیده

تراورس بتنی ساده برای اولین بار در سال ۱۹۰۶ برای استفاده بین خط راه‌آهن نورمبرگ به بامبرگ در آلمان مورد استفاده قرار گرفت. به‌علت کمبود چوب، بالا رفتن قیمت آن و عدم خورده شدن بتن توسط حشره‌ها و قارچ‌ها و مقاومت خوب آن، کاربرد تراورس‌های بتنی بعد از جنگ جهانی دوم به سرعت رواج پیدا کرد. اما هنوز تراورس بتنی ساده پاسخگوی نیاز صنعت راه‌آهن نبود. کیفیت پایین بتن باعث مقاومت کم و نیز مشکلات بتن در کشش باعث شد تا بتن‌های با مقاومت بالا و همچنین پیش‌تنیده از سال ۱۹۴۳ وارد این صنعت شده و امروزه با گسترش چشمگیری در دنیا و البته ایران مواجه شوند. تراورس یکی از مهم‌ترین اجزای خطوط راه‌آهن است که وظیفه‌ی آن دریافت نیروهای وارده از چرخ‌ها به ریل و سپس انتقال آن نیروها به لایه بالاست و در نهایت به زیرسازی مسیر می‌باشد. در شبکه‌ی راه‌آهن ایران، تراورس بتنی پیش‌تنیده منوبلوک B70 به‌علت مقاومت بالا، سبک بودن و سایر مزایای آن بیشتر مورد توجه است.

پژوهش‌های مکانیکی بر روی تراورس‌های بتنی به قرن ۲۱م برمی‌گردد. گوستاوسن در رابطه با آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی تراورس بتنی تحقیقاتی انجام داد و تراورس را تحت بارهای وارده از ریل و بالاست به روش اجزا محدود قرار داد [۱]. آنتونی و ولن‌اسکی پژوهش‌هایی در ارتباط با رفتارهای انعطاف‌پذیر تیرهای بتنی پیش‌تنیده و مسلح با استفاده از روش اجزا محدود انجام دادند [۲]. کاونرون و رمیکوف، رفتار استاتیکی تراورس بتنی پیش‌تنیده را با به‌کار بردن مشخصات غیرخطی مصالح به روش اجزا محدود و آزمایشگاهی بررسی کردند [۳ و ۴]. رضایی و همکاران، مطالعاتی با موضوع "بررسی تجربی و تحلیلی کنترل ترک طولی در تراورس بتنی پیش‌تنیده" انجام دادند. در این مطالعه تأثیر عوامل به‌وجود آورنده‌ی ترک‌های طولی حاصل از فشار اضافی درون رولپلاک‌ها توسط فشار سیلندری در محل سوراخ‌ها تقریب و مدل‌سازی شد [۵]. در ادامه رضایی و فرنام، در سال ۲۰۱۵ با مدل‌سازی عددی تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 پیش‌ترک‌دار، ضریب شدت تنش بحرانی در مود شکست I را در ترک اولیه و ترک نهایی محاسبه کردند و نشان دادند که برخلاف بتن معمولی ضریب شدت تنش بحرانی مود I در تراورس بتن پیش‌تنیده به طول پیش‌ترک وابسته بوده و با افزایش طول پیش‌ترک به‌صورت خطی رشد می‌کند [۶]. همچنین فرنام و رضایی در سال ۲۰۱۶ در دو مقاله‌ی مختلف نتایج تحلیل مکانیک شکست بر روی تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 را به‌صورت آزمایشگاهی با استفاده از روش رپلیکاجیری و تحلیل عکس بر روی اندازه‌ی واقعی تراورس بررسی کردند. آن‌ها با اندازه‌گیری پارامترهای مختلف خرابی و شکست شامل: گسترش خرابی، رشد ترک، بازشدگی دهانه‌ی ترک (CMOD)، ضریب شدت تنش بحرانی و نمودار نیرو- تغییرمکان، علاوه‌بر تأیید مدل عددی، تحلیل کامل مکانیک شکست بر روی تراورس را انجام دادند [۷ و ۸].

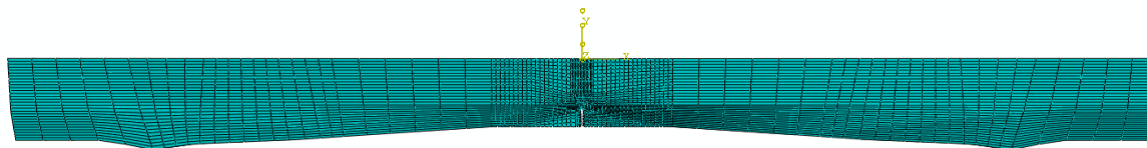
از زمان تولد علم مکانیک شکست در اوایل قرن بیستم به‌علت کاربرد زیاد ماده‌ی بتنی از یکسو و رفتار شبه ترد آن از سوی دیگر، تعداد زیادی پژوهش‌های عددی و تئوری بر روری ویژگی‌های شکست یک قطعه بتنی با در نظر گرفتن شرایط مختلف قطعه یا با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف انجام شده است [۹]. بتن سنگ مصنوعی است که مقاومت فشاری بالایی دارد در مقابل اما مقاومت کششی ناچیزی دارد که قابل صرفه‌نظر کردن است. از دیرباز بحث افزایش مقاومت کششی بتن مطرح بوده تا با استفاده از ویژگی مثبت بتن یعنی مقاومت فشاری آن بتوان به یک قطعه‌ی کامل برای باربری‌های مختلف دست پیدا کرد. ایده‌ی بتن مسلح و به‌طبع آن بتن پیش‌تنیده با فلسفه‌ی ارتقا دادن به این موضوع، ترکیبی را در بتن ایجاد کردند که نتایج مختلف نشان‌گر بهبود مشخصات باربری و مکانیک شکستی در بتن شده است. وجود آرماتور باعث افزایش مقاومت کششی ماده کامپوزیت بتن و فولاد شده و پیش‌تنیدگی می‌تواند در فولاد باعث جلوگیری از ایجاد ترک و رشد ترک شده است. در حوزه‌ی بتن مسلح مطالعات تئوری و آزمایشگاهی برای تعیین انرژی شکست در بتن معمولی توسط آزاد و همکاران انجام شده

است [۱۰]. رویز و همکاران از روش جدیدی برای مطالعه‌ی شکست در قطعه بتن کم‌آرمه استفاده کردند و نشان دادند که ظرفیت باربری رابطه‌ی مسقیم با نسبت آرماتور در مقطع دارد [۱۱]. در سال ۲۰۰۷، فرور و همکاران از مکانیک شکست خطی برای محاسبه K_{Ic} در بتن مسلح و با مدل چسبندگی در نوک ترک استفاده کردند [۱۲]. شاووی و همکاران در سال ۲۰۱۱ از روش انتشار آکوستیک برای محاسبه‌ی پارامترهای مکانیک شکست بتن ساده استفاده کردند. در این پژوهش سعی شده که از نتایج موجود در تحلیل مکانیک شکست بر روی قطعه‌ی تراورس با اندازه‌ی واقعی شامل پارامترهای اصلی شکست: مانند نمودار بار-تغییر مکان، رشد ترک و بازشدگی دهانه‌ی ترک به‌منظور تخمین میزان کاهش مقاومت تراورس در برابر ایجاد ترک و ناپایدار شدن ترک (شکست نهایی) استفاده و حساسیت باربری قطعه به‌وجود پیش ترک در مبانی تئوری و آزمایشگاهی طراحی مقاومت مصالح تراورس دیده شود [۱۳]. در واقع با طرح مکانیک شکستی با فرض وجود پیش ترک نتایج تئوری مقاومت مصالحی تراورس بتنی پیش‌تنیده به چالش کشیده می‌شود.

۲. روش انجام پژوهش

۱.۲. مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی و تحلیلی از نرم‌افزار ABAQUS/CAE 6.12-1 استفاده شده است. مدل غیرخطی پلاستیک خرابی بتن به‌منظور بررسی ایجاد خرابی و اثرات آن بر تراورس در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در ایجاد هندسه‌ی مدل سعی شده است که تا حد امکان مدل با حداقل تغییرات نسبت به واقعیت ساخته شود. ابعاد و اندازه‌ها بر اساس نمونه‌های ساخته شده در کارخانه بتنون صنعت بریس به نرم‌افزار معرفی شده‌اند. در شکل ۱ مدل سه‌بعدی مش‌بندی شده تراورس بتنی پیش‌تنیده‌ی B70 نشان داده شده است. در این مدل‌سازی برای تراورس از مدل Solid، ۸ گره‌ای و برای کابل از مدل Link استفاده شده است.

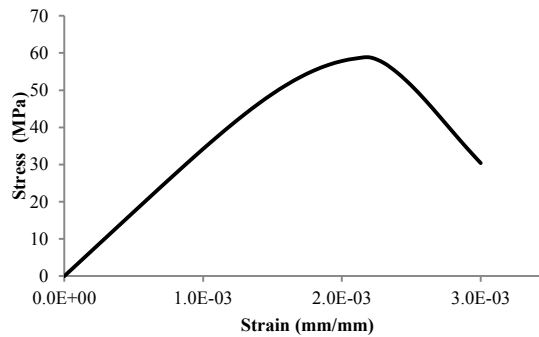
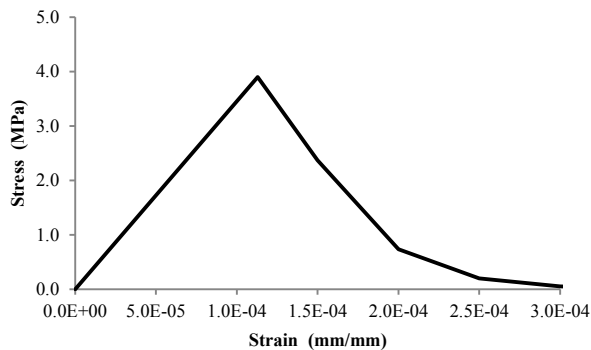


شکل ۱. مدل سه‌بعدی تراورس بتنی پیش‌تنیده B70

مواد تشکیل‌دهنده‌ی قطعه‌ی تراورس بتنی پیش‌تنیده شامل: بتن و کابل هستند که برای ایجاد مدل باید به شکل نزدیک به واقعیت تولید در شرکت بتون صنعت بریس در مدل نرم‌افزاری Abaqus تعریف شوند.

۱.۱.۲. مشخصات بتن

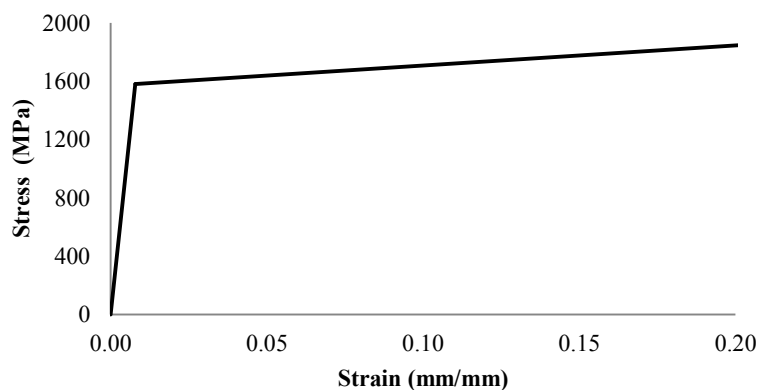
بتن اصلی‌ترین ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی تراورس است که باید دارای مقاومت (f_c') ۷ روزه 450 kg/cm^2 برای نمونه‌های استوانه‌ای $30 \times 15 \text{ cm}$ باشد. حداقل مقاومت ۲۸ روزه برای نمونه‌های بتن تراورس باید برابر با 600 kg/cm^2 باشد [۱۴]. تغییر شکل بتن تحت تنش فشاری با منحنی تنش-کرنش آن مشخص می‌شود، با توجه به مدل پلاستیک خرابی بتن نمودارهای تنش-کرنش در فشار و کشش بتن به‌ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. منحنی تنش کرنش بتن $f_c' = 58.84 \text{ MPa}$ شکل ۳. نمودار تنش-کرنش بتن تحت کشش $f_t' = 3.9 \text{ MPa}$

۲.۱.۲. مشخصات کابل

کابل مصرفی برای ساختن تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده از نوع ST-160 به قطر ۷ mm است. برای این کابل مقدار تنش تسلیم، f_y برابر با ۱۴۰۰ MPa و حد کشش مجاز ۱۸۰۰ MPa می‌باشد. نمودار تنش-کرنش رشته‌های فولاد به‌طور یکسان در فشار و کشش را می‌توان به صورت دوخطی، همانند شکل ۴ در نظر گرفت. اطلاعات موجود در رابطه با رشته‌های فولادی در خط تولید شرکت "بتون صنعت بريس" خلاصه شده به مقدار تنش تسلیم و حد کشش مجاز است و این نمودار، فرضی به‌منظور مدل‌سازی رشته‌های فولادی در مدل عددی می‌باشد. باید توضیح داده شود که، مشاهدات نشان می‌دهند که در شکست نهایی تراورس رشته‌های فولادی بریده نمی‌شوند در نتیجه حداکثر کرنش موجود در رشته‌های فولادی عدد بزرگ ۲۰ درصد فرض شده تا در مدل عددی نیز این اتفاق رخ ندهد. دیگر مشخصات مکانیکی فولاد کابل پیش‌تندگی در جدول ۱ آمده است [۱۵]. لازم به ذکر است که مقدار نیروی اولیه کشش در جک ۷۰ کیلونیوتن بود که اندازه‌گیری‌ها نشان دهنده افت به اندازه‌ی ۳۶٪ و مقدار نیروی باقی‌مانده ۴۵ کیلونیوتن بعد از ۲۸ روز بوده است.



شکل ۴. نمودار تنش-کرنش رشته‌های فولاد همراه با سخت‌شوندگی خطی

جدول ۱. مشخصات مکانیکی رشته‌های فولادی [۱۵]

چگالی kg/m^3	ضریب پواسون، ν	مدول سخت‌شدگی، E_t (MPa)	مدول الاستیسیته، E_s (MPa)
۷۸۵۰	۰/۳	۲۰۰۰	۱۹۵۰۰۰

۲.۲. روش آزمایشگاهی

در این پژوهش، آزمایش استاتیکی سه نقطه‌ای لنگر خمشی منفی وسط دهانه بر روی ۲۵ تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 پیش‌ترک‌دار تولید شرکت "بتون صنعت بریس" انجام شده است (شکل ۵ و ۶). این تراورس‌ها پس از طی مراحل ساخت و عمل‌آوری و بعد از گذشت ۲۸ روز در آزمایش تحت بارگذاری قرار گرفته است.



شکل ۶. سیستم جک آزمایش سه نقطه‌ای خمشی.



شکل ۵. تراورس بتنی پیش‌تنیده B70.

در روند آزمایش سه نقطه‌ای بار با سرعتی بارگذاری می‌شود که برای رسیدن از نیروی صفر به نیروی حداکثر، ۵ دقیقه (حداکثر نرخ بارگذاری ۱۲۰ کیلو نیوتن بر دقیقه) وقت صرف شود [۱۶]. بار اعمالی و در آزمایش‌های مختلف، نیرو، تغییر مکان و مشخصات ترک برداشت می‌شود. در این پژوهش از دو روش رپلیکاگیری^۱ و تحلیل عکس^۲ برای برداشت نتایج آزمایش لنگر خمشی منفی وسط دهانه‌ی تراورس بتنی پیش‌تنیده پیش‌ترک‌دار B70 استفاده شده است.

۱.۲.۲. آزمایش رپلیکاگیر

اندازه‌گیری پارامترهای شکست و خرابی با روش جدید رپلیکاگیری در این پژوهش انجام گرفته است. رپلیکا ماده‌ای ترکیبی است از دو جز سخت^۳ و نرم^۴ که در محفظه‌ی نشان داده شده در شکل ۷ قرار می‌گیرند. ماده‌ی نرم خصوصیت نفوذپذیری بالا به رپلیکا می‌دهد تا در منافذ قطعه نفوذ کند و ماده‌ی سخت باعث می‌شود تا رپلیکا بعد از نفوذ سخت شده و البته به راحتی از نمونه جدا شود. ماده‌ی ترکیبی^۵ رپلیکا توسط دستگاه تفنگی تزریق رپلیکا در محل ترک تزریق می‌شود (شکل ۷).

¹ Replica

² Image Analysis

³ Hard component

⁴ Soft component

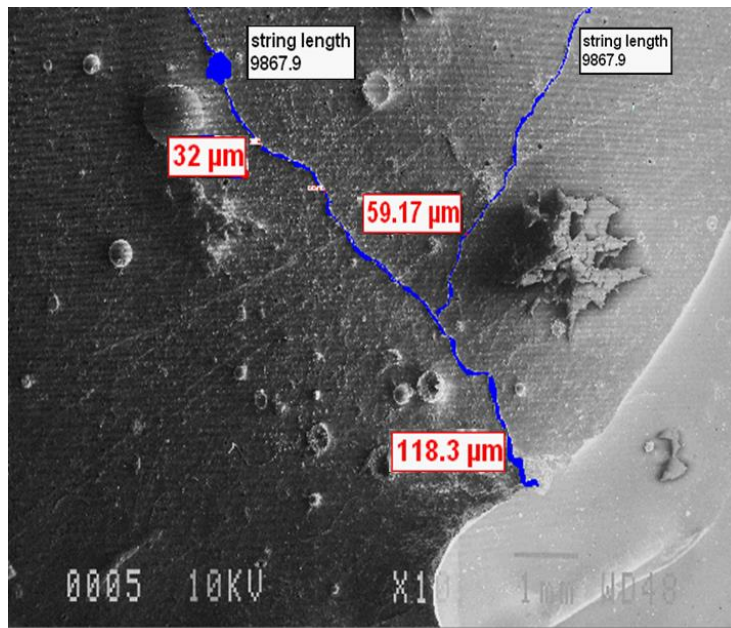
⁵ Compound



شکل ۷. تزریق ماده‌ی رپلیکا.

۲.۲.۲. تحلیل عکس

روش دیگری که در این پژوهش برای بررسی و تحلیل ترک در تراورس بتنی پیش‌تنیده مورد استفاده قرار گرفته، روش تحلیل عکس است. تحلیل عکس هم به‌منظور تحلیل ترک‌های بزرگ برداشت شده توسط رپلیکا مورد استفاده قرار گرفته (SEM^۶)، هم به‌صورت مجزا و بر روی عکس‌هایی که مستقیم از ترک گرفته شده است (شکل ۸).



شکل ۸. نمونه‌ی آزمایش میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) تحلیل عکس شده بر روی رپلیکا.

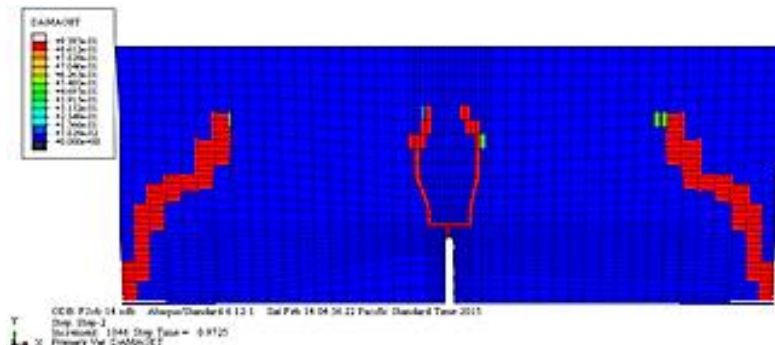
۳. نتایج

۱.۳. اثر طول پیش ترک

گسترش ترک مهم‌ترین پارامتر تحلیل و طراحی مکانیک شکست یک قطعه به‌شمار می‌آید. هرچه ترک بیشتر رشد می‌کند، مقاومت باقی‌مانده در قطعه کاهش می‌یابد و در نتیجه بار کمتری نسبت به بار اولیه‌ای که طراحی براساس آن انجام شده بود، تحمل می‌کند. نتایج تحلیل خرابی نشان داد که خرابی از محل پیش ترک شروع و بعد از

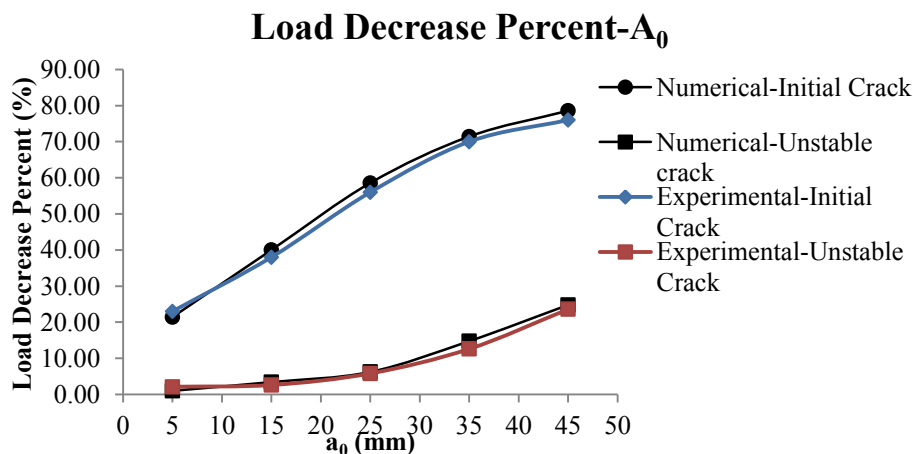
^۶ Scan Electron Microscope

دوشاخگی به صورت متقارن ادامه پیدا می کند تا به مرحله ی شکست نهایی برسد، همان طور که در شکل ۹ دیده می شود [۶]. در این بخش از پژوهش، گسترش ترک بر اساس نمودار بار-طول ترک در محل پیش ترک در تحلیل عددی و آزمایشگاهی به صورت همزمان بررسی می شود. طول ترک تراورس بتنی پیش تنیده در محل پیش ترک و در یکی از شاخه های دوشاخگی ترک (به علت تقارن) در مدل عددی مورد تحلیل قرار می گیرد. در این بخش تاثیر طول پیش ترک و عرض پیش ترک به صورت جداگانه بررسی شده است.



شکل ۹. مدل کیفی خرابی نهایی تراورس بتنی پیش تنیده B70 در محل پیش ترک [۶].

برای بررسی اثر طول پیش ترک بر روند رشد ترک، عرض ترک ثابت و طول ترک تغییر می کند. بدین منظور عرض پیش ترک (d_0) ۸ میلی متر و طول پیش ترک (a_0) صفر، ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰، بررسی بر روی محل پیش ترک انجام و با ثابت نگه داشتن مقدار عرض پیش ترک به مقدار ۸ میلی متر میزان کاهش مقاومت تراورس در برابر ایجاد ترک اولیه و همچنین ترک ناپایداری در تحلیل عددی و آزمایشگاهی ترسیم شده است.

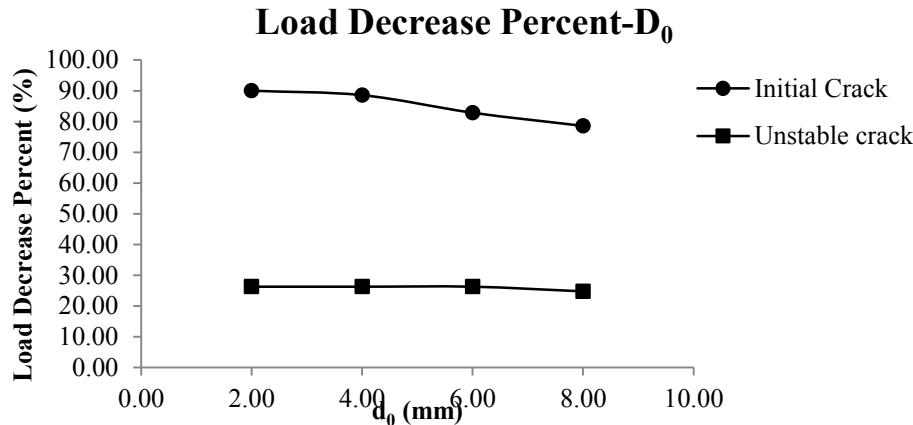


شکل ۱۰. تاثیر طول پیش ترک a_0 در کاهش مقاومت ایجاد ترک اولیه و ترک ناپایدار در محل پیش ترک تراورس.

همان طور که در شکل ۱۰ (در نتایج آزمایشگاهی و عددی) دیده می شود میزان کاهش مقاومت به مراتب در ترک اولیه بیشتر و همچنین در ابتدا با شیب تندتری این کاهش مقاومت رشد می کند. تفاوت دیگری که از مقایسه ی این دو نمودار مشهود است شیب نمودارها در طول ترک های بزرگتر است که برخلاف ترک های کوچکتر و در تضاد باهم در ترک اولیه کاهش اما در ترک ناپایداری افزایش یافته است. این نتایج نشان می دهد که حساسیت ترک اولیه به وجود ترک بسیار بالاتر از ترک ناپایداری است. برعکس در طول ترک های بزرگتر به نظر می آید که حساسیت قطعه به ایجاد ترک در مقایسه با طول ترک اولیه کمتر شده در عین حال که حساسیت ترک ناپایدار بیشتر شده است.

۲.۳. اثر عرض پیش ترک

برای بررسی اثر عرض پیش ترک بر روند رشد ترک، طول ترک ثابت و عرض ترک تغییر می‌کند. به این منظور طول پیش‌ترک ۴۵ mm و عرض پیش‌ترک ۲، ۴، ۶ و ۸ در مدل عددی بررسی شده است. کاهش مقاومت قطعه در شکل ۱۱ برای ترک اولیه و ناپایداری ترک بطور یک‌جا نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. تأثیر عرض پیش‌ترک d_0 در کاهش مقاومت ایجاد ترک اولیه و ترک ناپایدار در محل پیش‌ترک تراورس.

در شکل ۱۱ اثر متفاوت عرض پیش‌ترک بر ایجاد ترک و ناپایداری ترک به‌خوبی دیده می‌شود. طبق این نمودار تقریباً می‌توان گفت مقدار عرض پیش‌ترک تأثیری بر کاهش مقاومت قطعه در برابر ایجاد ترک ندارد در واقع با افزایش عرض پیش‌ترک تقریباً میزان کاهش مقاومت در برابر ترک اولیه ثابت و مقدار تقریبی ۸۰٪ است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج کاهش مقاومت با افزایش طول پیش‌ترک نشان می‌دهد که میزان کاهش مقاومت به‌مراتب در ترک اولیه بیشتر و همچنین در ابتدا با شیب تندتری این کاهش مقاومت رشد می‌کند. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که حساسیت ترک اولیه به وجود ترک بسیار بالاتر از ترک ناپایداری است. همچنین نتایج کاهش مقاومت به‌علت عرض پیش‌ترک نشان می‌دهد که عرض ترک اولیه تأثیری در کاهش مقاومت قطعه در برابر ایجاد ترک ندارد در واقع با افزایش عرض ترک اولیه تقریباً میزان کاهش مقاومت در برابر ترک اولیه ثابت و مقدار تقریبی ۸۰٪ است.

نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی هر دو موید نتایج ذکر شده هستند. این نتایج نه تنها روش‌های طراحی مرسوم مقاومت‌مصلحی را زیر سؤال می‌برند بلکه طرح‌های آزمایشگاهی که بر روی تراورس‌ها تعریف می‌شوند را نیز با چالش روبرو می‌کنند. نتایج به‌خصوص در ترک اولیه بسیار تامل برانگیز است. وجود ترک آن‌هم با عرض‌های بسیار کوچک باعث افت‌های بسیار زیاد در نتایج آزمایش‌های ۲۸ روزه بر روی تراورس می‌شوند که در طرح‌های مقاومت‌مصلحی اصلاً دیده نشده است. به‌طور مثال یک پیش‌ترک با طول ۵ mm و عرضی کمتر از ۲ mm باعث می‌شود در نیروهای به‌اندازه‌ی ۸۰٪ کمتر ترک اولیه رخ دهد. قابل ذکر است که در آزمایش‌ها و روش‌های طراحی مرسوم ایجاد ترک به اندازه‌ی ۱۵ mm نشان دهنده‌ی کفایت یا عدم کفایت قطعه‌ی تراورس می‌باشد. نتایج این پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد که طرح مقاومت‌مصلحی موجود برای قطعه‌ی تراورس تا زمانی پاسخ‌گو است که هیچ آسیب یا پیش‌ترکی در قطعه وجود نداشته باشد. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد که برای تحلیل و طراحی یک قطعه‌ی بتن پیش‌تنیده‌ای مانند تراورس، طراحان احتیاج به بازرسی‌های دقیق در مورد وجود عیب دارند تا در صورت نیاز با تحلیل مکانیک شکست به‌همراه تحلیل مقاومت‌مصلحی ظرفیت قطعه و به‌طبع آن عمر قطعه تخمین زده شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که طراحی‌های مرسوم نیاز به مکملی به نام طرح مکانیک شکست دارند.

۵. قدردانی

نویسندگان این مقاله از کارخانه تولید تراورس بتنی پیش‌تنیده‌ی B70 "بتون صنعت بریس" برای حمایت مالی و تجهیزاتی از این پژوهش تشکر می‌کنند.

۶. مراجع

- [1] Gustavson, R. 2000. "Static and dynamic finite element analysis of concrete sleepers". Licentiate of Engineering Thesis. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [2] Anthony, J., & Wolanski, B. S. 2004. "Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis". A Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School, Marquette University, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science Milwaukee, Wisconsin.
- [3] Kaewunruen, S., & Remennikov, A. M. 2006. "Nonlinear finite element modelling of railway prestressed concrete sleeper". *Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. 3-5 August, Bangkok, Thailand, pp. 323-328.
- [4] Kaewunruen, S. & Remennikov, A. M. 2007. "Experimental and numerical studies of railway prestressed concrete sleepers under static and impact loads". *Civil Comput*, Vol. 3: 25-28.
- [5] Rezaei, F., Shiri, M. R. & Farnam, S. M. 2012. "Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre-stressed concrete sleepers". *Eng Fail Anal*, Vol. 26: 21-30.
- [6] Rezaei, F. & Farnam, S. M. 2015. "Fracture mechanics analysis of pre-stressed concrete sleepers via investigating crack initiation length". *Eng Fail Anal*, Vol. 58: 267-280.
- [7] Farnam, S. M. & Rezaei, F. 2016. "Part A- Experimental: Experimental analysis of crack propagation in pre-stressed concrete sleepers by fracture mechanics". *Int J Transport Eng*, Vol. 4 (3): 163-177.
- [8] Farnam, S. M. & Rezaei, F. 2016. "Part B- Analysis: Experimental analysis of fracture and damage mechanics of pre-stressed concrete sleepers B70". *Int J Transport Eng*, Vol. 5 (1): 17-29.
- [9] Thai DK, Kim SE. *Damage analysis of reinforced concrete walls under impact loading using the finite element approach*. *Eng Fail Anal* 2014;45:252-277.
- [10] Azad, A., Mirza, M., Chan, P., 1989. *Fracture energy of weakly reinforced concrete beams [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 12 (1), 9-18.
- [11] Ruiz, G., Elices, M., Planas, J., 1998. *Experimental study of fracture of lightly reinforced concrete beams [J]. Materials and Structures* 31 (214), 683-691.
- [12] Ferro, G., Carpinteri, A., Ventura, G., 2007. *Minimum reinforcement in concrete structures and material structural instability [J]. International Journal of Fracture* 146 (4), 213-231.
- [13] Shaowei, Hu., Jun, Lu., Xiaoqing, Zhong, 2011. *Study on characteristics of acoustic emission property in the normal concrete fracture test [J]. Advanced Materials Research* 189-193, 1117-1121.
- [14] مشخصات فنی عمومی روسازی راه‌آهن، ۱۳۸۴. نشریه ۳۰۱. معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (سازمان مدیریت سابق).
- [15] ASTM 416/A416M – 06, "Standard specification for steel strand, uncoated seven-wire for prestressed concrete". 2006.
- [16] EN 13230-1, "Railway Applications – Track - Concrete sleepers and bearers, Part 1: General Requirements". 2014.

Crack effect on pre-stressed concrete sleeper of B70 with fracture mechanics analysis

S. M. Farnam^{}, PhD, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering,
Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran
F. Rezaie, Associate Professor, Faculty of Engineering,
Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran
Seyed.farnam@yahoo.com*

Abstract

In this research, the principles of fracture mechanics in concrete, pre-stressed mono block concrete sleeper of B70 is analyzed with numerical and experimental method. Plastic damage nonlinear analysis with Abaqus software and Replica test and image analysis are research methods in numerical and experimental study, respectively. To evaluate fracture mechanics parameters, a pre-stressed concrete sleeper with an initial crack length from 0 to 45 mm and crack width from 0 to 8 mm is being loaded under three-point bending test and has been modeled in FE software, simultaneously. In this study, strength decrease of notched sleeper is evaluated in initial and unstable crack. The results show that notch with small width (sharp notch) is caused strength decrease that it doesn't show in the strength of materials design. As a result, the strength of materials design as long as responsive that there aren't any fault or notch in the element. Also, for analysis and design of pre-stressed concrete element like sleeper, it needs accurate inspections about fault or notch existence to estimate capacity and life of sleeper with the fracture mechanics analysis together the strength of materials design.

Keywords: *The strength of materials design, the fracture mechanics analysis, pre-stressed concrete sleeper, strength decrease percent.*