

رفتار تنش- کرنش چرخه ای میلگرد با در نظر گرفتن تأثیر کمانش

خلاصه

انتظار می‌رود که طی زلزله‌های بزرگ، میلگردهای طولی المان‌های سازه‌ای بتن مسلح ممکن است متحمل کرنش کششی و فشاری بزرگی به طور چرخه‌ای شود. به دلیل فاصله ناکافی میلگرد عرضی، این بارگذاری چرخه‌ای در محدوده غیرالاستیک ممکن است منجر به کمانش میلگردها شود. با اینکه این مسئله توسط چندین محقق بررسی شده است، بیشتر این مطالعات بر پایه رفتار یک‌جهته است. در این مطالعه، میلگردها مطابق با استاندارد ASTM 706 ساخته شدند. این نمونه‌ها تحت بارگذاری یک‌جهته کنترل شده با کرنش محوری و بارگذاری چرخه‌ای محوری آزمایش شدند. آزمایشات تا خرابی نمونه‌ها انجام شدند، در همه نمونه‌ها گسیختگی تحت بارگذاری فشاری بود. برای مطالعه تأثیر نسبت فاصله تکیه‌گاه جانبی (S_H) به قطر میلگرد (D) روی پایداری بتن، آزمایشات با نسبت‌های S_H/D ۲، ۴، ۶ و ۸ انجام شدند. بر اساس مشاهدات صورت گرفته از رفتار کمانشی میلگردها تحت بارگذاری چرخه‌ای، یک روشی برای پیش‌بینی آغاز کمانش پیشنهاد شد. استفاده از این روش، همراه با یک مدل آنالیزی پیشنهاد شده در ادبیات فنی برای رفتار چرخه‌ای میلگرد، نتایجی به دست می‌دهد که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از این مطالعه دارد.

معرفی

نتایج به دست آمده از آنالیز ممان-انحناء برای ارزیابی عملکرد المان‌های بتن مسلح مهم می‌باشد. در این نوع آنالیز، دانستن رفتار تنش-کرنش میلگرد با در نظر گرفتن اثر کمانش لازم است. اگر چه مسأله پایداری میلگرد توسط چندین محقق مطالعه شده است، بیشتر این مطالعات بر اساس رفتار یک-جهته صورت گرفته و تحقیقات محدودی، رفتار چرخه‌ای میلگرد را با در نظر گرفتن اثر کمانش آن صورت گرفته است. (Monti and Nuti 1992; Mander et al. 1994; Suda et al. 1996; Pantazopoulou 1998). همچنین قابل ذکر است که در بیشتر مطالعات پایداری میلگرد، به دو دلیل پراکندگی قابل توجهی در بار آزمایشگاهی با کمانش میلگرد مورد انتظار است: (۱) تغییرپذیری تعریف بار کمانشی فقط بر اساس مشاهدات

و (۲) مشکل بودن اندازه‌گیری کرنش‌های میلگرد در عضو بتنی بعد از تسلیم. این فاکتورها باید هنگام ارزیابی داده‌های موجود مرتبط با پایداری میلگرد یا انجام تحقیق جدید درباره موضوع، در نظر گرفته شوند. عوامل متعددی در آغاز کمانش میلگرد طولی المان بتن مسلح تأثیر دارد، مثل تأثیر میلگرد محیطی در مهار آرماتور، مقاومت بتن پوشش در برابر خردشدگی، یا تورم جانبی بتن هسته در کرنش‌های فشاری بالا. ارزیابی تأثیر این عوامل و رابطه آنها از برنامه این مطالعه خارج است. این مقاله بر مطالعه مسئله پایداری میلگرد با در نظر گرفتن فقط رفتار چرخه‌ای آرماتور و طول مهار نشده آن، هدف‌گذاری شده است. نتایج یک بررسی عددی و آزمایشگاهی انجام یافته در دانشگاه بین‌المللی مکزیکو روی پایداری آرماتور در اینجا شرح داده شده است. بر اساس این نتایج، روشی برای ارزیابی رفتار تنش-کرنش چرخه‌ای آرماتور با در نظر گرفتن اثر کمانش آن، پیشنهاد شد.

رفتار یک جهته تنش-کرنش میلگرد

نمودار یک جهته کشش

در شکل ۱ نمودار تنش-کرنش معمول میلگرد در حالت کشش یکنواخت نشان داده شده است. mander et al در سال ۱۹۸۴ یک ایده‌آل‌سازی برای سخت‌شدگی کرنشی پیشنهاد کردند که بیانگر یک رابطه بین تنش f_s و کرنش ϵ_s می‌باشد.

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^P \quad (1)$$

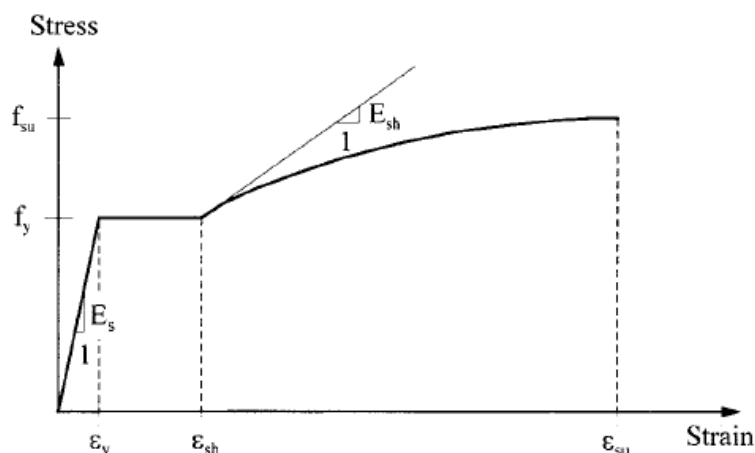


FIG. 1. Monotonic Stress-Strain Curve for Steel

که در رابطه بالا f_{su} و f_y به ترتیب تنش تسلیم و تنش نهایی هستند؛ ϵ_{su} و ϵ_{sh} به ترتیب کرنش‌های متناظر آغاز سخت‌شدگی کرنشی و کرنش نهایی می‌باشند. قابل ذکر است که کرنش نهایی در اینجا کرنش متناظر مقاومت نهایی می‌باشد. پارامتر P به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = E_{sh} \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}}{f_{su} - f_y} \right) \quad (2)$$

جایی که E_{sh} شیب شروع سخت‌شدگی کرنشی است. به جای استفاده از E_{sh} در محاسبه P ، راحت‌تر است از یک رابطه جایگزین برای تعریف P استفاده کنیم:

$$P = \frac{\log \left(\frac{f_{su} - f_{sh1}}{f_{su} - f_y} \right)}{\log \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh1}}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)} \quad (3)$$

که در آن f_{sh1} و ϵ_{sh1} به ترتیب نشانگر بعد عرضی و افقی یک نقطه انتخاب شده روی منحنی سخت‌شدگی کرنشی می‌باشند.

نمودار یک‌جهته (یکنواخت) فشاری:

آزمایش میلگرد تحت فشار کمتر از آزمایش در کشش بوده است. این به دلیل مشکلات اضافی ذاتی انجام آزمایش فشاری است. کمبود اطلاعات کافی در آزمایش فشاری میلگردهای کوتاه ممکن توضیح دهنده این باشد که چرا اغلب آزمایشات روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح بر پایه این فرض صورت گرفته است که نمودار تنش-کرنش یکنواخت یک میلگرد کوتاه در فشار برابر و مخالف نمودار متناظر در تنش می‌باشد. با این حال نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند که هنگام استفاده از تعریف معمول تنش (با استفاده از سطح مقطع اولیه)، این نمودارها متفاوتند. (Mander et al. 1984; Dodd and Restrepo 1995).
 Dodd and Restrepo (1995) فهمیدند که در سیستم مختصات طبیعی، که برای محاسبه آنی مساحت المان به کار می‌رود، نمودار-های کشش و فشار برابر و مخالف هم هستند. بر اساس این یافته‌ها، آن‌ها تنش فشاری، f_{cs} ، و کرنش فشاری، ϵ_{cs} ، را به صورت زیر تعریف کردند:

$$f_{cs} = -f_s(1 + \epsilon_s)^2 \quad (4)$$

$$\epsilon_{cs} = \frac{-\epsilon_s}{1 + \epsilon_s} \quad (5)$$

شکل ۲ نشان‌دهنده نمودارهای تنش-کرنش آزمایشات یک‌جهته روی میلگردهای معمولی تولید شده در مکزیکو را نشان می‌دهد. بعد قائم شکل ۲ نشان‌دهنده تنش‌های بی‌بعد می‌باشد، که با هدایت تنش‌های اندازه‌گیری شده به سمت تنش تسلیم متناظر نمونه‌ها به دست آورده شده‌اند. این منحنی همچنین نشان‌دهنده نمودار فشاری پیش‌بینی شده می‌باشد، که با استفاده از روابط ۴ و ۵ و داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشات کشش به دست آورده شده‌اند.

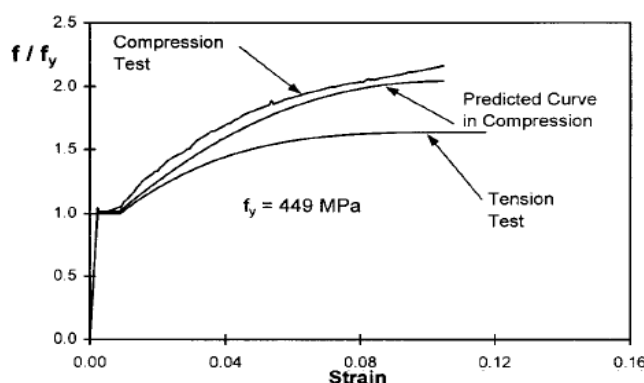


FIG. 2. Comparison of Tension and Compression Stress-Strain Curves

رفتار چرخه‌ای میلگردهای کوتاه

چندین نویسنده مدل‌های عددی را برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش چرخه‌ای میلگردها در غیاب کماتش پیشنهاد کرده‌اند.

(Mander et al. 1984; Dodd and Restrepo 1995). مدل پیشنهاد شده توسط Dodd و Restrepo اثر بوشینگر را به وسیله یک نمودار نرم‌شده توصیف می‌کند که بر پایه‌ی داده‌های جمع‌آوری شده از میلگردهای تولیدشده در نیوزیلند می‌باشد. این مدل از هندسه‌ی آنی میلگردها استفاده می‌کند. مدل پیشنهاد شده توسط Mander و همکاران اثر بوشینگر را در نظر گرفته و رفتار تنش-کرنش چرخه‌ای را با استفاده از چند قانون از نمودارهای اسکلت برای حالت چرخه‌ای همراه با موارد کشش و فشار، تعریف می‌کند. شکل ۳ نشانگر نتایج با استفاده از این مدل و نتایج آزمایشات چرخه‌ای روی میلگردهای تولید شده در مکزیکو در صورت

عدم وجود کمانش می‌باشد. مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.

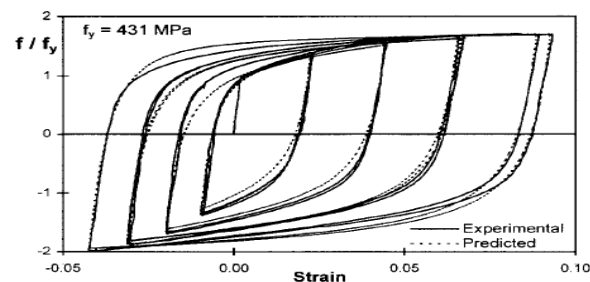


FIG. 3. Comparison of Predicted and Experimental Cyclic Stress-Strain in Absence of Buckling

کمانش آرماتور

چندین مطالعه عددی و آزمایشگاهی در گذشته روی کمانش آرماتور صورت گرفته شده است. با این حال، بیشتر این تحقیقات با در نظر گرفتن بارگذاری یک‌جهته و هم‌تئوری مدول کاهش‌یافته یا مماسی انجام گرفته‌اند.

(Bresler and Gilbert 1961; Mander et al. 1984; Scribner 1986; Papia et al. 1988;

Mau 1990; Watson et al. 1994).

تحقیقات محدودی روی پایداری میلگرد تحت بارگذاری چرخه‌ای صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۲ آقایان مونت و نوتی یک مدل عددی برای پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای میلگرد با در نظر گرفتن کمانش پیشنهاد کردند. این مدل بر اساس نتایج یک سری آزمایش یک‌جهته و چرخه‌ای روی آرماتور بوده و نیازمند کالیبره کردن چندین پارامتر با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش چرخه‌ای روی میلگرد می‌باشد. Pantazopoulou 1992 مکانیزم کمانش آرماتور طولی را در المان‌های RC مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که نیازمند در نظر گرفتن اندرکنش بین اثربخشی میلگرد عرضی، فاصله آنها، ظرفیت تغییرشکل هسته، و قطر میلگرد می‌باشد. با یک آنالیز شواهدات تجربی، این نویسنده قوانین تجربی طراحی برای فاصله خاموت‌ها جهت جلوگیری از کمانش آرماتورهای طولی پیشنهاد کرد. با این حال، چون کرنش کمانشی مشاهده شده فقط در مطالعات اندکی مشاهده شد، پایان سودمندی اعضاء از مشاهدات پاسخ کلی به دست آمد. اینست که، کرنش کمانشی به طور مستقیم در نظر گرفته نشد.

Suda و همکاران فقط مطالعه عددی و آزمایشگاهی شناخته شده توسط نویسندگان در رابطه با پایداری میلگرد در المان‌های RC تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام دادند. آنها آزمایش چرخه‌ای روی ستون‌های RC را انجام

دادند که در آن میلگردها دارای سیستم جدیدی برای اندازه‌گیری کرنش‌ها بعد از مرحله تسلیم بودند. نتایج این تحقیق نشان دادند که میلگردهای طولی در المان‌های RC در بارگذاری چرخه‌ای ممکن است وقتی کماتش کنند که میلگرد تحت تنش فشاری و در محدوده کرنش کششی باشد. بر اساس یافته‌های آنها، suda و همکاران یک مدلی برای نمایش رفتار چرخه‌ای میلگرد در المان‌های RC پیشنهاد کردند.

برنامه تجربی و روش انجام آزمایش

یک سری آزمایش یک‌جهته و چرخه‌ای روی میلگرد در دانشگاه بین‌المللی مکزیکو برای مطالعه پایداری میلگرد صورت گرفته است. میلگردهای استفاده شده در این آزمایش از میلگردهای تجاری در دسترس در مکزیکو و از همان نوعی بودند که در آزمایش قبلی یک‌جهته انجام یافته توسط (Rodriguez and Botero 1995) استفاده شده بود. رفتار تنش-کرنش این میلگردها مطابق با بیشتر مشخصات استاندارد ASTM 706 بودند، که یک مقاومت تسلیم حداقل 415 MPA و مقاومت کششی حداقل 550 MPA را مقرر می‌کند. کنترل دیگر روی مشخصات مقاومت کششی اینست که مقاومت کششی نمی‌تواند از ۱,۲۵ برابر مقاومت تسلیم حداقل کمتر باشد.

میلگردهای با قطر 16mm از میلگردهای با قطر 31 mm مطابق با استاندارد ASTM (۱۹۸۳) تولید شدند. شکل ۴ نشان‌دهنده مشخصات هندسی معمول میلگردهای تست شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

یک پارامتر مهم در پایداری میلگرد در المان‌های RC نسبت فاصله تکیه‌گاه جانبی، S_h ، به قطر میلگرد، D ، می‌باشد. در نمونه‌های آزمایشی، S_h با طول نمونه نشان داده شده است (شکل ۴). نسبت‌های S_h/D انتخاب شده در این آزمایش ۲,۵، ۴، ۶، و ۸ بودند، که می‌تواند حاکی از فاصله رایج خاموت‌ها در طراحی المان‌های RC مطابق با آیین‌نامه‌های رایج برای مناطق لرزه‌خیز، باشد. تعداد کل نمونه‌های تست شده برای آزمایش یک‌جهته و چرخه‌ای به ترتیب ۱۰ و ۲۶ عدد نمونه می‌باشد.

آزمایش‌ها با استفاده از یک ماشین آزمایش یک محوری مدل MTS-810 انجام شدند. نمونه‌ها در هر دو انتها مطابق شکل ۵ گیردار بودند. در شکل ۵ همچنین قابل مشاهده است، کرنش‌ها در نمونه‌های آزمایش توسط کرنش‌سنج نصب شده در طرف مخالف نمونه‌ها با طول ثابت گیج 30 cm (شکل ۴)، اندازه‌گیری شدند. این کرنش‌سنج دارای دقت کافی برای ارزیابی نقطه آغاز کماتش می‌باشد، که، همانطور که بعداً بحث می‌شود، با

استفاده از اختلاف بین داده‌های خوانده شده از کرنش‌سنج‌های قرار داده شده در دو طرف extensometer، تعریف شده است. آزمایش یک‌جهته در فشار یک مدت زمانی هدف حدود ۳ دقیقه داشت. آزمایشات چرخه‌ای، از نوع سینوسی با فرکانس ۰,۰۰۵ هرتز، یک آزمایش کنترل تغییرمکان با دو سیکل برای هر سطح کرنش محوری حداکثر انجام شدند. تعداد سیکل هدف برای این سطوح کرنش قبل از کمانش ۳ بود.

دو چرخه تاریخچه کرنش در نظر گرفته شده برای آزمایش چرخه‌ای برای نمایش تاریخچه کرنش چرخه‌ای در نظر گرفته شد که میلگرد طولی ستونها یا تیرها ممکن است طی زلزله قرار بگیرند. در یک ستون در معرض خمش چرخه‌ای، معمولا موقعیت محور طبیعی نزدیک به وسط ارتفاع مقطع است، که برای افزایش جابجایی جانبی منجر به افزایش کرنش در محدوده کشش و فشار می‌شود. در یک تیر RC در معرض خمش چرخه‌ای، معمولا محور طبیعی نزدیک به تار انتهایی در فشار است، با کرنش‌های کم برای فولاد در فشار. بر پایه آنالیز ممان-انحناء مقاطع معمولی تیرها و ستونها (Rodriquez 1999)، مقادیر معمول در این مطالعه برای نسبت $\epsilon_m^+ / \epsilon_m^-$ انتخاب شده، که ϵ_m^+ و ϵ_m^- به ترتیب حداکثر کرنش کششی و فشاری یک میلگرد در یک چرخه کرنش می‌باشند. برای نمایش یک تاریخچه کرنش لرزه‌ای در یک ستون، نسبت مدنظر تقریبا برابر با ۱ در ۷ نمونه و ۲,۳ در ۱۳ نمونه در نظر گرفته شد. یک تاریخچه بارگذاری معمولی برای نوع دوم آزمایش در شکل ۶ نمایش داده شده است. برای یک تیر، پارامتر ϵ_m^- حدودا صفر تنظیم شد؛ که به این معنی است که نمونه‌های این مورد فقط در معرض چرخه کشش قرار گرفته‌اند. این نوع تاریخچه کرنش در ۵ نمونه اعمال شد.

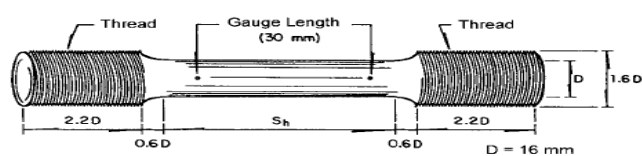


FIG. 4. Dimensions of Test Specimens



FIG. 5. View of Test Setup

خلاصه‌ای از نمونه‌ها و مشخصات اصلی برای آزمایشات یک‌جهته و چرخه‌ای انجام شده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. یک مستندسازی کامل داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند در جای دیگری پیدا شود .

(Rodriguez and Botero 1998)

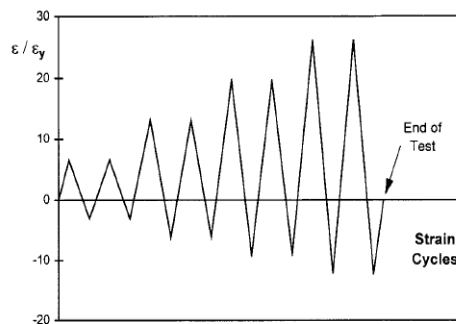


FIG. 6. Strain History Used for Cyclic Axial Loading Test of Specimens Representing a Reinforcing Bar of a Column ($S_r/D = 4$, $\epsilon_m^+/\epsilon_m^- = 2.3$)

آزمایشات یک‌جهته در فشار

تعریف شروع کمانش

تغییر پذیری قابل توجه تعریف شروع کمانش در یک آرماتور بر پایه فقط مشاهدات مورد انتظار است، چون مشاهده کنندگان مختلف یک آزمایش ممکن است نشان‌دهنده شروع‌های مختلف کمانش باشند. برای اجتناب از این تنوع، در این تحقیق تعریف شروع کمانش بر پایه رویکرد تجربی بود. این رویکرد خواهان استفاده از داده‌های

خوانده شده کرنش در سمت‌های مخالف نمونه می‌باشد، از جمله ϵ_1 و ϵ_2 ، که توسط کرنش‌سنج‌ها گرفته می‌شوند. کرنش ϵ_1 در طول یک تار از مقطع اندازه‌گیری شد که در کمانش در معرض یک افزایش در فشار قرار گرفته است (سمت مقعر)، و کرنش ϵ_2 در طول تار از مقطع اندازه‌گیری شد که در معرض یک کاهش فشار قرار گرفته شده است (سمت محدب). با توجه به بحث بالا، شروع کمانش وقتی تعریف شد که $\epsilon_2 - \epsilon_1$ برابر یا بزرگتر از $20\% \epsilon_1$ بود.

چون قبل از انجام آزمایش دانستن جهت کمانش نمونه ممکن نبود، کرنش‌سنج‌ها نباید در این جهت قرار بگیرند. با این حال، خارج از تعداد کل نمونه‌های آزمایش، فقط دو نمونه در جهت دور از محل قرارگیری کرنش-سنج‌ها اتفاق افتاد. این موارد در نمونه‌های کلی آنالیز در نظر گرفته نشدند، که مشخصات آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج تجربی

بارهای محوری اندازه‌گیری شده در آغاز کمانش، همانند بحث قبلی تعریف شدند و در روابط تنش‌های بی‌بعد بیان شده‌اند، در شکل ۷ نمایش داده شده است. این نتایج مطابق با چندین نسبت S_h/D برای ۱۰ نمونه در نظر گرفته شده در این آزمایش می‌باشند (جدول ۱). ۳ مورد از این نمونه‌ها، با نسبت ۲٫۵، کمانش نمی‌کنند. شکل ۸ کرنش‌های محوری اندازه‌گیری شده در آغاز کمانش را نشان می‌دهد، ϵ_p ، برای آزمایشات یک‌جهته همان نمونه‌ها، به عنوان تابعی از نسبت S_h/D .

TABLE 1. Characteristics and Number of Specimens for Monotonic and Cyclic Testing

| S_h/D (1) | Monotonic testing (2) | CYCLIC TESTING | | |
|----------------|-----------------------------|--|--|---------------------|
| | | Column Type | | Beam type (5) |
| | | $\epsilon_m^+/\epsilon_m^- = 1$ (3) | $\epsilon_m^+/\epsilon_m^- = 2.3$ (4) | |
| 2.5 | 3 | 1 | 5 | 2 |
| 4 | 2 | 2 | 3 | — |
| 6 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 2 | 1 |

داده تنش نشان داده شده در شکل ۷ میتواند با مقادیر پیشبینی شده با استفاده از مدل عددی برای تنش فشاری شروع کمانش، f_p ، بر پایه تئوری مدول کاهش یافته مقایسه شود.

$$f_p = \frac{\pi^2 E_r}{16 \left(K \frac{S_h}{D} \right)^2} \quad (6)$$

که در آن E_r مدول کاهش یافته و K ضریب طول مؤثر می باشد. برای محاسبه f_p از رابطه ۶، یک نمودار تنش- کرنش یک جهته میلگرد در فشار با استفاده از روابط ۴ و ۵ تعریف شد، که منجر به پارامترهای کنترل تنش- کرنش به صورت زیر شد:

$$P_c = 2.092 \text{ و } f_{yc} = -457 \text{MPa}; f_{suc} = -916 \text{MPa}; \epsilon_{shc} = -0.0081; \epsilon_{suc} = -0.1048;$$

حرف C نشان می دهد که پارامترها مطابق با نمودار تنش-کرنش فشاری یک جهته بوده، و علامت منفی نشانگر با تنش یا کرنش منفی می باشد. با استفاده از مقادیر پیشبینی شده برای f_p ، کرنش متناظر ϵ_p نشان داده شده در شکل ۸ با نمودار تنش-کرنش یک جهته یک میلگرد کوتاه در فشار ارزیابی شد.

نتایج به دست آمده با استفاده از روش بالا برای چندین مقدار K در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که استفاده از مقدار ۰,۷۵ برای K منجر به هم پوشانی خوبی بین نتایج به دست آمده با استفاده از تئوری مدول مماسی و نتایج تجربی می شود. این مقدار K نشان می دهد که وضعیت انتهایی نمونه های آزمایش بین وضعیت مفصلی کامل و گیرداری کامل می باشد.

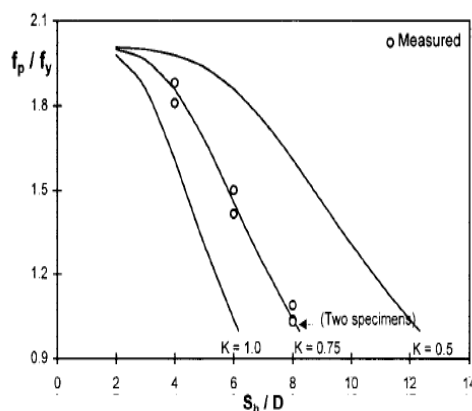


FIG. 7. Stress Data Fit to Model for Compressive Stress at Onset of Buckling in Monotonic Tests

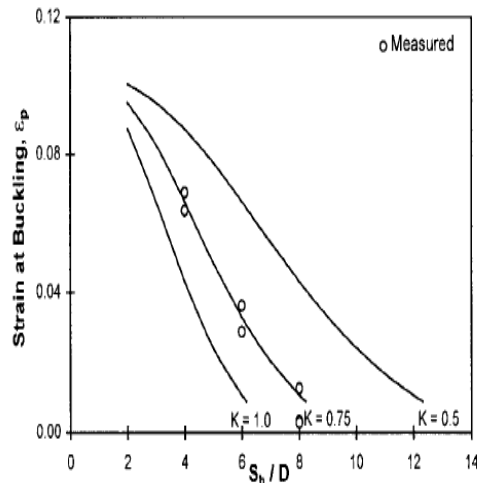


FIG. 8. Strain Data Fit to Model for Compressive Stress at Onset of Buckling in Monotonic Tests

آزمایشات چرخه‌ای

تعریف آغاز کمانش

آغاز کمانش در آزمایش چرخه‌ای با استفاده از کرنش‌های خوانده شده برای ϵ_1 و ϵ_2 و ارتباط دادن این کرنش‌ها با کرنش‌های حداکثر به دست آمده در چرخه مربوطه، ϵ_m^+ و ϵ_m^- تعریف شد. این وضعیت بحرانی وقتی تعریف شد که $\epsilon_1 - \epsilon_2$ برابر یا بزرگتر از $0.2(\epsilon_m^+ - \epsilon_m^-)$ بود. این رویکرد برای تعریف شروع کمانش در آزمایشات چرخه‌ای این مزیت را دارد که تعریف به دست آمده برای آزمایش یک‌جهته یک مورد خاص از مورد آزمایش چرخه‌ای می‌باشد. همانطور که بعداً مشاهده می‌شود، تعریف آغاز کمانش همانند بالا در آزمایش چرخه‌ای در روش پیشنهاد شده برای پیش‌بینی کرنش متناظر کمانش میلگرد در معرض کرنش چرخه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۹ نشان دهنده نتایج تجربی تنش-کرنش چرخه‌ای در موارد کرنش‌های ϵ_1 و ϵ_2 برای نمونه‌های بیانگر میلگردهای یک ستون با نسبت S_h/D برابر ۶ و نسبت $\epsilon_m^+/\epsilon_m^-$ برابر ۲,۳ می‌باشد. نقطه سیاه در شکل ۹ نشان دهنده نقطه نمودار تنش-کرنش در آغاز کمانش می‌باشد، که با تعریف قبلی برای آزمایش چرخه‌ای به دست آمده است. نتایج نشان داده شده در شکل ۹ اجازه یک ارزیابی صحت روش ارائه شده برای تعریف آغاز کمانش را به ما می‌دهد. بعد از این اتفاق (به چرخه تنش-کرنش بعد از نقطه سیاه در شکل ۹ نگاه کنید) اختلاف بین کرنش‌های فشاری اندازه‌گیری شده در دو سمت نمونه اهمیت پیدا می‌کند. به علاوه، برای افزایش سطح کرنش‌های محوری میانگین در نمونه‌ها، تار انتهایی قسمت محدب نمونه با افزایش کرنش کششی افزایش می‌-

یابد. این نوع نتایج همچنین در بیشتر نمونه‌های تست شده تحت بارگذاری چرخه‌ای مشاهده شد (Rodriguez and Botero 1998).

نوع دیگری از نمایش نتایج بحث بالا در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، که در آن اختلاف اندازه‌گیری شده $\epsilon_1 - \epsilon_2$ نمونه‌های بحث شده در آنجا به صورت تابعی از میانگین ϵ_1 و ϵ_2 نشان داده شده است. نتایج شکل ۱۰ برای دو مقدار آخر کرنش‌های محوری حداکثر نشان داده شده است. همانطور که در آنجا مشاهده می‌شود، یک افزایش ناگهانی در اختلاف اندازه‌گیری شده $\epsilon_1 - \epsilon_2$ بعد از آغاز کمانش پیشبینی شده اتفاق می‌افتد، که صحت آغاز کمانش پیشبینی شده را حمایت می‌کند.

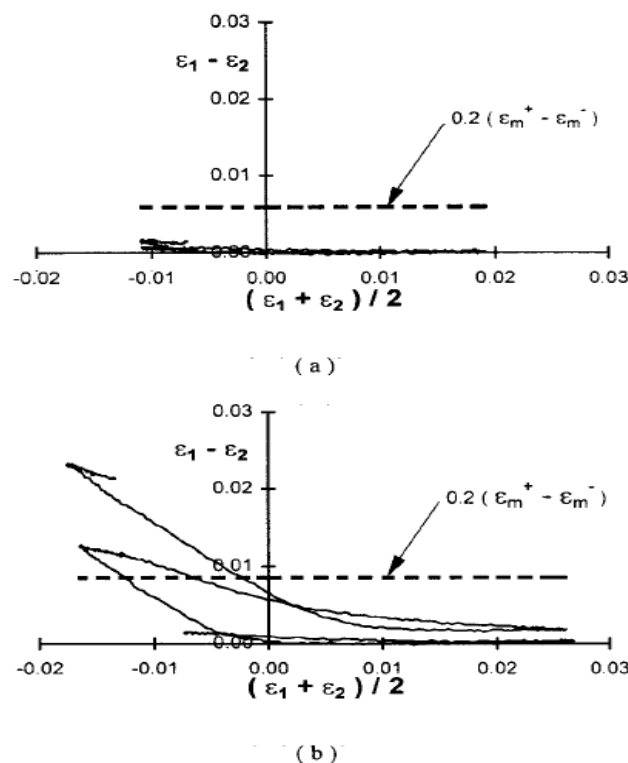


FIG. 10. Difference of Axial Strains Measured at Opposite Sides of a Specimen Representing a Reinforcing Bar in a Column ($S_n/D = 6$): (a) Level 2; (b) Level 3

روش پیشنهاد شده برای پیشبینی آغاز کمانش

در اینجا روشی برای پیشبینی کرنش محوری در آغاز کمانش میلگرد تحت بارگذاری چرخه‌ای معکوس پیشنهاد می‌شود. این روش از پارامتر ϵ_0^+ استفاده می‌کند، که به عنوان کرنش محوری در بارگذاری صفر بعد از چرخه کشش تعریف شده است (شکل ۱۱). به علاوه، پارامتر ϵ_p^* ، که برای ارزیابی کرنش محوری در کمانش استفاده می‌شود، ϵ_p ، مانند شکل ۱۱ تعریف شده است.

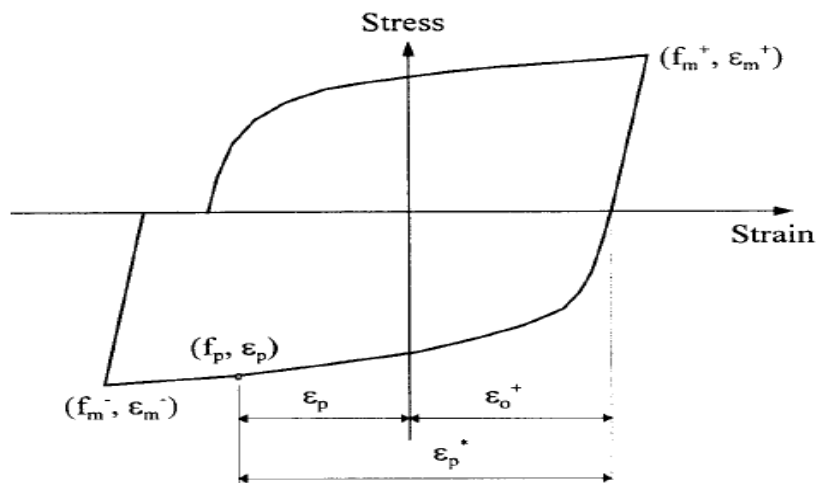


FIG. 11. Cyclic Stress Strain Curve for Steel

$$\varepsilon_p^* = \varepsilon_o^+ - \varepsilon_p \quad (7)$$

تعریف بالا از فرضی استفاده می‌کند که گسترش نمودار تنش- کرنش چرخه‌ای فشاری همزمان با نمودار یک- جهته فشاری می‌باشد. این فرض بر پایه نتایج آزمایشات یک‌جهته و چرخه‌ای میلگردها (monti and noti 1992) می‌باشند و همچنین به عنوان وسیله‌ای در مدل‌های عددی برای تخمین رفتار تنش-کرنش چرخه‌ای میلگرد در صورت عدم کمانش (mander et al 1984) استفاده می‌شود. یک کاربرد این فرض در نمونه بحث شده ($S_H/D=6, \varepsilon_m^+/\varepsilon_m^- = 2.3$) در شکل ۱۲ نشان داده شده است، که اعتبار فرض به کار رفته را حمایت می‌کند. نتایج تجربی نشان داده شده در شکل ۱۲ با در نظر گرفتن بارهای محوری اندازه‌گیری شده ε_1 و ε_2 میانگین متناظر به دست آمده است. همان روش استفاده شده برای به دست آوردن این نمودارهای تجربی در نمودارهای تنش-کرنش چرخه‌ای تجربی به صورت زیر استفاده شده است.

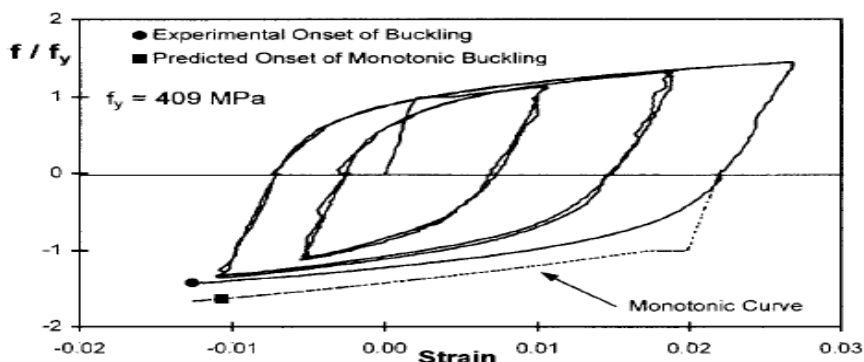


FIG. 12. Comparison of Cyclic and Monotonic Stress-Strain Curves for a Specimen Representing a Reinforcing Bar in a Column ($S_H/D = 6$)

مقادیر اندازه‌گیری شده ε_p^* برای نمونه‌های در معرض آزمایش چرخه‌ای با پارامترهای اندازه‌گیری شده ε_0^+ و ε_p و رابطه ۷ در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. نتایج نسبت $S_H/D=2.5$ در این شکل موجود نیست، چون

این نمونه‌ها شواهدی از کمانش نشان ندادند. نتایج نشان داده شده در شکل ۱۳ همچنین می‌تواند با مقادیر پیشبینی شده ϵ_p^* مقایسه شود، یعنی با کرنش یک‌جهته پیشبینی شده در کمانش با فرض $K=0.75$ و جاگذاری این مقدار برای ϵ_p^* . این مقادیر پیشبینی شده در شکل ۱۳ توسط نمودارهای ادامه‌دار متناظر ۵٪ قسمت پایین، میانگین، و ۹۵٪ مقادیر قسمت بالایی پارامترهای اساسی که در این مطالعه برای تعریف نمودارهای فشاری یک‌جهته استفاده شده است. بارهای محوری اندازه‌گیری شده در آغاز کمانش، که در عبارات تنش‌های بی‌بعد بیان شده است، f_p/f_y در شکل ۱۴ نشان داده شده است، که همچنین توسط نمودارها رسم شده با استفاده از مقادیر پیشبینی شده f_p/f_y از روابط پیشنهاد شده پیشبینی رسم شده است.

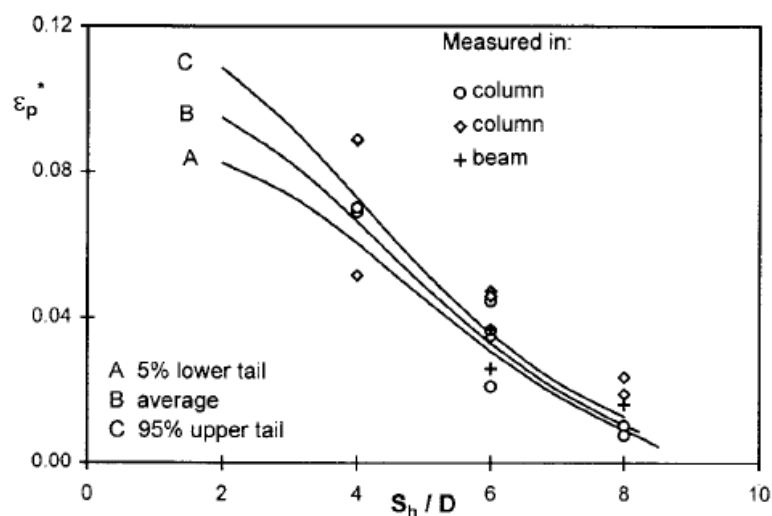


FIG. 13. Strain Data Fit to Model for Compressive Stress at Onset of Buckling in Cyclic Tests ($K = 0.75$)

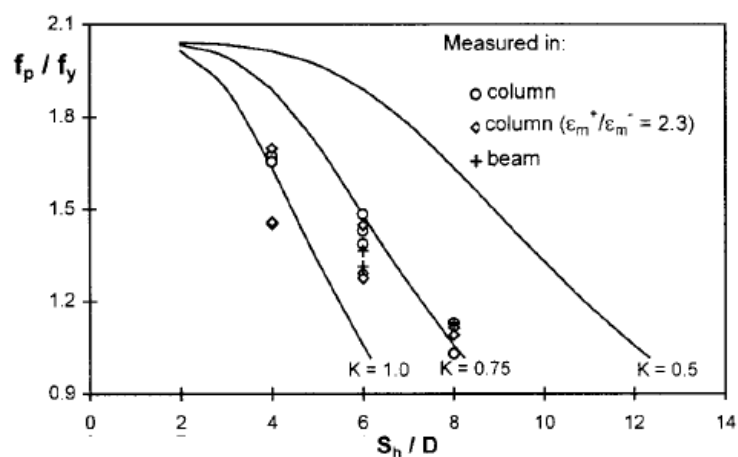


FIG. 14. Stress Data Fit to Model for Compressive Stress at Onset of Buckling in Cyclic Tests

روش ارزیابی نمودارهای تنش- کرنش چرخه‌ای میلگرد با در نظر گرفتن کمانش

برای ارزیابی نمودارهای تنش-کرنش چرخه‌ای با در نظر گرفتن آغاز کمانش، استفاده از بحث قبلی مدل آنالیزی Mander et al 1984 برای تخمین این نمودارها در غیاب کمانش پیشنهاد شده است. در این روش، همچنین استفاده از این نمودارها تا زمانیکه کرنش محوری پیشبینی شده به مقدار بحرانی تعریف شده توسط پارامتر ε_p^* برسد، پیشنهاد شده است.

نتایج اعمال این روش در شکل ۱۵ برای همان نمونه‌ای که نتایج آن در شکل ۹، ۱۰، ۱۲ ($S_h/D =$) ۶، $\varepsilon_m^+/\varepsilon_m^- = 2.3$) آمده است، نشان داده شده است. با مقایسه بین نمودارهای عددی و تجربی نشان داده شده در شکل ۱۵، می‌توان مشاهده کرد که روش پیشنهادی همپوشانی خوبی با داده‌های تجربی دارد. نتایج مشابه برای مقادیر دیگر S_h/D و $\varepsilon_m^+/\varepsilon_m^-$ به دست آمده است. (Rodriguez and botero 1998).

نتایج

با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری یک‌سویه و چرخه‌ای محوری روی میلگردهای ساخته شده در دانشگاه ملی Mexico، روشی برای ارزیابی رفتار تنش-کرنش چرخه‌ای میلگردهای فولادی با در نظر گرفتن کمانش میلگرد پیشنهاد شد. در اینجا نشان داده شد که آغاز کمانش میلگرد تحت بارگذاری چرخه‌ای ممکن است بعد از عوض شدن چرخه از کشش اتفاق بیافتد و این وابسته به مقادیر حداکثر کرنش کششی قبل از عوض شدن چرخه دارد. در این مورد، آغاز کمانش میلگرد ممکن است در ناحیه کششی چرخه هیستریزیس اتفاق بیافتد.

گرچه نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق عوامل مختلف مؤثر روی آغاز کمانش میلگرد در المان‌های RC تحت زلزله را در نظر نمی‌گیرد، این روش یک عامل اساسی ناپایداری میلگرد تحت چرخه‌های هیستریزیس را در نظر می‌گیرد.

APPENDIX. REFERENCES

- Bresler, B., and Gilbert, P. H. (1961). "Tie requirements for reinforced concrete columns." *ACI J.*, 58(26), 555-569.
- Dodd, L. L., and Restrepo-Posada, J. I. (1995). "Model for predicting cyclic behavior of reinforcing steel." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 121(3), 433-445.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1984). "Seismic design of bridge piers." *Rep. 84-2*, Dept. of Civ. Engrg., University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, A. (1993). "Low-cycle fatigue behavior of reinforcing steel." *J. Mat. in Civ. Engrg.*, ASCE, 6(4), 453-468.
- Mau, S. T. (1990). "Effect of tie spacing on inelastic buckling of reinforcing bars." *ACI Struct. J.*, 87(6).
- Monti, G., and Nuti, C. (1992). "Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including buckling." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 118(12), 3268-3284.
- Pantazopoulou, S. J. (1998). "Detailing for reinforcement stability in RC members." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 124(6), 623-632.
- Papia, M., Russo, G., and Zingone, G. (1988). "Instability of longitudinal bars in RC columns." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 114(2), 445-461.
- Park, R., Priestley, M. J. N., and Gill, W. (1982). "Ductility of squared confined concrete columns." *J. Struct. Div.*, ASCE, 8(4), 929-950.
- Rodriguez, M. (1999). "Effects of cyclic behavior of reinforcing steel or seismic performance of reinforced concrete members." *Development of seismic steel reinforcements products and systems*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., in press.
- Rodriguez, M., and Botero, J. C. (1995). "Seismic behavior of structures considering mechanical properties of Mexico manufactured reinforcing steel." *Revista de Ingenieria Sismica*, 49, 39-50 (in Spanish).
- Rodriguez, M., and Botero, J. C. (1998). "Behavior of reinforcing bars subjected to monotonic and cyclic axial loading including buckling." *Rep. No. 610*, Instituto de Ingenieria, National University of Mexico, Mexico City, Mexico (in Spanish).
- Scott, B. D., Park, R., and Priestley, M. J. N. (1982). "Stress strain behavior of concrete confined by overlapping hoops and high strain rates." *ACI J.*, 79(1), 13-27.
- Scribner, C. (1986). "Reinforcement buckling in reinforced concrete flexural members." *ACI J.*, 83, 966-973.
- "Standard test methods for tension testing of metallic materials." (1993). *ASTM EM 8M-93*, ASTM, West Conshohoken, Pa.
- Suda, K., Murayama, Y., Ichinomiya, T., and Shimbo, H. (1996). "Buckling behavior of longitudinal reinforcing bars in concrete column subjected to reverse lateral loading." *Proc., 11th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Elsevier Science, New York, Amsterdam.
- Watson, S., Zahn, F., and Park, R. (1994). "Confining reinforcement for concrete columns." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 120(6), 1798-1824.