Archive of SID

ارائه مدل هیسترزیس ترکیبی جدید نیرو-تغییر مکان در تخمین تقاضای جابجایی پس‌ماند پل‌های بتنی تک ستونه

مختار انصاری، دانشجوی دکتری ، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

فرهاد دانشجو (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مسعود سلطانی محمدی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

E-mail: danesh_fa@modares.ac.ir

دریافت:۱۳۹۳/۰۳/۲٤ پذیرش:۱۳۹۳/۱۲/۱۲

چکیده

هنگامی که پلها دچار تغییر شکلهای غیر الاستیک در زلزله های نزدیک گسل می‌شوند، عمدتاً به راستای قائم اولیه برنمی‌گردند و دچار تغییر شکلهای پسماند قابل توجهی می‌شوند. این تغییر شکل پسماند زیاد باعث می‌شود که پل‌ها با وجود عدم فرو ریزش، غیر قابل تعمیر باشند و امکان استفاده از آنها پس از زلزله مقدور نباشد. بنابراین سنجش و تخمین جابجایی پسماند پل‌ها در زلزله‌های نزدیک گسل از موضوعات مهم ارزیابی سرویس پذیری پل‌ها پس از زلزله است. مدلهای هیسترزیس اولیه برای تحلیل دینامیکی ستونهای بتنی معمولی توسعه داده شده اند و در اکثر مواقع قادر به تخمین صحیح جابجایی‌های پسماند قابل ملاحظه حادث شده در تحریک‌های یک جهته یا متمایل به یک جهت نیستند. هدف از این تحقیق ارائه مدل هیسترزیس از نوع متمایل به بیشینه تغییر مکان است که قادر است در مقایسه با مدل‌های هیسترزیس متعارف، جابجایی‌های پسماند مناسبی تولید کند. این مدل چند خطی متمایل به بیشینه تغییر مکان علاوه بر کاهش سختی در سیکلهای باربرداری، توانایی در نظر گرفتن زوال مقاومت در هر نیم سیکل را نیزدارد. نقطه مربوط به مرحله تسلیم در این منحنی هیسترزیس در دو جهت متفاوت است و در مقاطع غیر متقارن نیز امکان تعریف سختی الاستیک متفاوت در دو جهت وجود دارد. از خواص دیگر این مدل وجود نقطه شکست در مرحله باربرداری و زوال مقاومت در هر نیم سیکل است . در این تحقیق علاوه بر تخمین جابجایی پسماند با مدل هیسترزیس جدید، عملکرد مدلهای هیسترزیس متعارف دیگر در تخمین جابجایی پسماند لرزه ای در تحلیل سیکلی و دینامیکی غیر خطی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان از دقت بهتر مدل هیسترزیس پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌های هیسترزیس دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل هیسترزیس متمایل به بیشینه، تقاضای جابجایی پسماند، زوال مقاومت،کاهش سختی، تحلیل دینامیکی

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

یک مدل هیسترزیس مناسب باید قادر باشد پاسخ سیکلی سیستم بتن مسلح را برآورد کند و علاوه برآن باید اثرات کاهش سختی و مقاومت اجزای مختلف آن را در طول تاریخچه تغییر شکل وارده برآورد نماید [Sengupate and Bing, 2013]. مدلهای هیسترزیس باید دارای خواصی مانند واقع گرایی، دقت، سادگی و پیوستگی باشند. در گذشته مدل‌های هیسترزیس الاستو پلاستیک و دوخطی به سبب سادگی در حل عددی برای تخمین تقاضاهای لرزه‌ای بکار می‌رفتند، اما در هیچ کدام از آنها اثرات پارامترهای زوال در نظر گرفته نمی‌شد. [Gajalakshmi and Helena, 2012] اولین بار کلاف و جانستون [Clough and Johnston, 1966] اثر کاهش سختی در سیکل‌های مختلف بارگذاری را در نظر گرفتند. بعدها تاکدا وهمکاران [Takeda et al, 1970] پس از تست های متعدد نمونه های آزمایشگاهی نشان دادند که نمونه‌های بتن مسلح در طول بارگذاری جانبی وارده همواره در معرض کاهش سختی، زوال مقاومت و جذب انرژی هیسترزیس هستند. مدل‌های اولیه هیسترزیس اعضای بتن مسلح قادر به درنظر گرفتن اثرات زوال نبودند و یا مدل‌هایی که بعداً توسعه پیدا کردند عمدتاً زوال سختی و مقاومت را با لحاظ تاریخچه محدودی از سیکل‌های قبل در نظر می‌گرفتند [Sivaselvan and Reinhorn, 2000] [Kunnath and Reinhorn, 1992] .برای افزایش دقت در تخمین پاسخ لرزه ای اعضای سازه‌ای لازم است تا زوال و افت وابسته به تاریخچه خرابی در مدل هیسترزیس وارد شود. زوال به پارامترهای متعددی وابسته است که عمده آن مربوط به تغییر شکلهای پلاستیک و استهلاک انرژی هیسترزیس در سیکلهای متوالی بارگذاری است [Dong et al, 2003] [Novelli, 2008]. اگرچه تأثیر چرخه‌های هیسترزیس و پارامترهای زوال در برآورد تقاضاهای لرزه‌ای بیشینه بررسی شده است، اما با توجه به اهمیت بررسی کارآیی پل‌ها پس از زلزله‌های شدید، همواره نیاز به تخمین شاخص های عملکردی مهم دیگری نیز مانند جابجایی پسماند در مباحث ارزیابی لرزه‌ای وجود دارد [Hussein, 2010] [Muthukumar and Desroch-es, 2005] [Ramirez and Miranda, 2012] [Yazgan and Dazio,2011]. خسارت‌های مالی ناشی از جابجایی ماندگار در پل‌ها بعد از زلزله‌های شدید، باعث شده تا محققان زیادی در پی راه‌حلی برای کاهش این جابجایی باشند که مهم‌ترین روش در این حوزه استفاده از تاندونهای پیش تنیده مقاومت بالا در پایه‌های بتنی پل‌ها است [Jeong et al, 2008] [Fahmy et al, 2010] [Hachem et al, 2003]. محققان در تست‌های آزمایشگاهی دریافتند که در صورتی که تاندون پیش‌تنیده در مرکز مقطع ستون بکار رود دارای اثر بیشتری نسبت به چیدمان تاندونها در نقاط دورتر از مرکز مقطع ستون پل است [Wang et al, 2011] [Sakai and Mahin, 2004] [Sakai and Mahin, 2006]. اولین و ساده‌ترین مدل‌های هیسترزیس برای تخمین جابجایی پس‌ماند توسط محققین ژاپنی ارائه گردید، در این مدل دوخطی ساده، شیب منحنی بارگذاری و باربرداری مساوی بود و اثرات زوال با توجه به هندسه و مشخصات سازه در آن اعمال نشده بود [Kawashima et al, 1998] [Macrae and Kawashima, 1997]. باتوجه به ماهیت پالس گونه و اثرات جهت پیشرو در زلزله‌های نزدیک گسل، همواره برآورد و تخمین صحیح جابجایی پسماند به وسیله مدلهای هیسترزیس متعارف اعضای بتن مسلح با خطا همراه است، بنابراین توسعه مدل هیسترزیس مناسب به همراه پارامترهای زوال برای تخمین جابجایی‌های پسماند لرزه‌ای از اهمیت خاصی برخوردار است [Sengupate and Bing, 2011] [Bojorquez and Ruiz-Garcia, 2013]. با وجود آنکه امروزه از روش مدلسازی فایبر برای ارزیابی دقیق سازه‌های بتن مسلح به ویژه پل‌ها استفاده می‌شود، اما پیچیدگی‌های مدلسازی روش فایبر و حساسیت نتایج آن به انتخاب درست پارامترهای متعدد از یک سو و سادگی و سرعت بالای تحلیل دینامیکی بر اساس رفتار هیسترزیس نیرو–تغییر مکان، باعث شده تا در تحقیقات متعدد به دقت و محدوده کاربرد این مدلهای هیسترزیس پرداخته شود [Billington and Lee, 2010] [Saiidi and Seyed Ardaka-ni, 2012] [Lehman et al, 2000] [Berry and Eberhand, 2007]. در این تحقیق سعی شده تا اثر مدلهای هیسترزیس، شکل

www.SID.ir

Archive of SID

چرخه‌های هیسترزیس و پارامترهای زوال و کاهنده در برآورد جابجایی پسماند لرزه‌ای پل‌های بتنی در زلزله‌های نزدیک گسل بررسی شود. در انتها با توجه به ماهیت یک جهته تحریک زلزله نزدیک گسل، مدل چند خطی متمایل به بیشینه تغییر مکان ارائه می‌گردد که قادر است با دقت مناسبی جابجایی پسماند لرزه‌ای را تخمین بزند. این مدل هیسترزیس دارای خواص منحصر بفردی مانند شکست مسیر باربرداری روی محور افقی ثانوی، تغییر شیب در مسیر باربرداری به بارگذاری مجدد، زوال مقاومت در هر نیم سیکل بارگذاری مجدد و سختی الاستیک متفاوت در دو جهت است، که باعث شده تا برآورد جابجایی پسماند آن دقت قابل قبولی داشته باشد.

۲. مشخصات هندسی و مکانیکی پایه پل مورد مطالعه

برای بررسی تأثیر کاهندگی مدل هیسترزیس پیشنهادی، پاسخ دینامیکی این مدل برای تعدادی پایه پل مرجع، با نتایج تست میز لرزه مقایسه می‌گردد. پایه‌های پلهای مرجع MN، ETN، NF1 وNF2 هستند که با آئین‌نامه Caltrans طراحی شده‌اند. مشخصات هندسی پایه های مورد مطالعه شامل ارتفاع پایه، قطر پایه، درصد ارماتورهای طولی، درصد آرماتورهای عرضی و ... در جدول (۱) به ترتیب آورده شده است. برای تست میز لرزه و تحلیل دینامیکی نمونه های اشاره شده از رکوردهای جدول (۲)استفاده می‌شود. رکورد این زلزله‌ها دارای پالس شدیدی در تاریخچه زمانی سرعت است که جابجایی پسماند زیادی را ایجاد می‌کند.

۳. معرفی مدل پیشنهادی هیسترزیس دو خطی و برنامه تحلیل غیر خطی

مدل‌های هیسترزیس متعددی برای برآورد تقاضای جابجایی پسماند لرزه‌ای توسعه داده شده است. عمده مدل‌ها دارای دقت مناسبی برای برآورد جابجایی و پاسخ‌های بیشینه است اما در برآورد جابجایی پسماند دقت مناسبی ندارند.

جدول۱. مشخصات هندسی پایه‌های پل مرجع در تست میز لرزه [Choi et al. 2010] و [Jeong et al. 2008]

نمونه	MN	ETN	NF-1	NF-2	RC
ارتفاع(میلی متر)	۱۶۰۰	۲۷۵۶	۱۸۲۸	۱۸۲۸	۲۰۳۲
قطر(میلی متر)	۳۵۶	۳۵۶	۴۰۶/۴	۴۰۶/۴	۳۵۶
درصد آرماتورهای طولی *(%)*	۲/۹	۲/۹	۲	۲/۲	۱/۲
درصد آرماتورهای عرضی *(%)*	۱/۳۷	۱/۵۴	۰/۹۲	۱/۱	۰/۷۶
نسبت وجهی	۴/۵	۷/۷۵	۴/۵	۴/۵	۴/۵
آئین نامه طراحی	Caltrans Near-Fault	Caltrans Near-Fault	Caltrans SDC 2004	AASHTO 2002	Caltrans SDC 2004
زمان تناوب نمونه(ثانیه)	۰/۶۶	۱/۵۰	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۰
شتاب طیفی *(g)*	۱/۳۹۷	۰/۷۵	۱/۲۷۵	۱/۲۷۵	۱/۲
مقیاس نمونه کوچک شده آزمایشگاهی نسبت به پایه اصلی(درصد)	۳۰	۳۰	۳۳	۳۳	۳۰

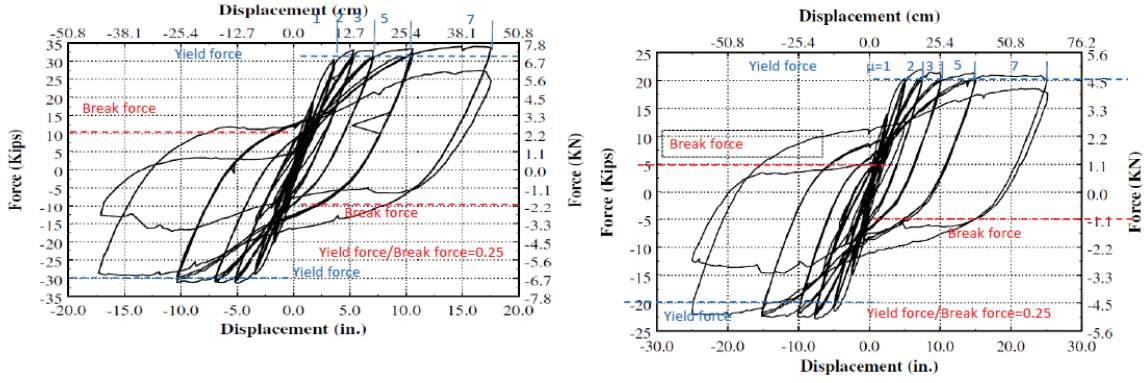
www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲. مشخصات زلزله‌های انتخابی برای تحلیل دینامیکی [Choi et al ,2010] و [Jeong et al,2008]

مقیاس	نمونه	بیشینه جابجایی زمین in(cm)	بیشینه سرعت زمین in/s(cm/s)	بیشینه شتاب زمین(g)	فاصله از گسل (km)	ایستگاه	زلزله (Mw)
۰/٦	MN,ETN	۱۱/۳ (۲۸/۹)	٦٥/٤ (١٦٦)	۰/۸۳۸	٤/٤ (۷/۱)	Rinaldi	Northridge(6.7)
۰/٤٥-۰/٦۰	NF1,NF2	۱۱/۳ (۲۸/۹)	٦٥/٤ (١٦٦)	۰/۸۳۸	٤/٤ (۷/۱)	Rinaldi	Northridge(6.7)
۰/۷	RC	۲٥ (٦٥)	۷۰ (۱۷۳)	۰/۷۱	۲/۲ (۳/٥)	Los Gatos	Loma prieta

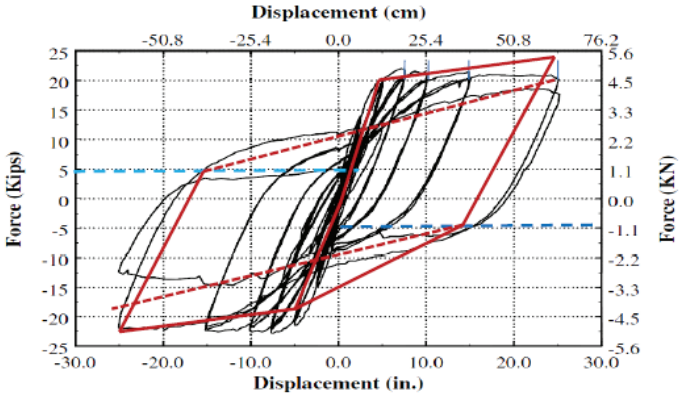
مدل هیسترزیس معرفی شده در واقع اصلاح شده مدل‌های هیسترزیس مدل q و تاکدا است که برای تخمین مناسب جابجایی‌های پسماند ناشی از تحریک های یک جهته در آن تغییراتی ایجاد شده است. در این مدل ۲ خاصیت مهم به مدل هیسترزیس تاکدا اضافه شده است: اول اینکه متناسب با تعداد و دامنه سیکل‌های وارده زوال مقاومت به مدل متمایل به بیشینه تغییر مکان اضافه شده است و دوم اینکه در مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد شکستی در مسیر منحنی هیسترزیس اضافه شده است. در پایه‌های پل که با ضوابط جدید لرزه‌ای طراحی شده‌اند، پاسخ سیکلی به دلیل محصورشدگی مناسب بتن هسته با خاموت دورپیچ با سایر اعضای محوری بتن مسلح قدری متفاوت است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است در مرحله باربرداری این مدل چه در فاز مثبت یا منفی، شکستگی وجود دارد و این شکستگی روی محور افقی ثانوی اتفاق می‌افتد محل این تغییر شیب در شکل (۱) با خط افقی Break force نشان داده شده است. در مدل جدید در محدوده مشخصی از باربرداری به بارگذاری مجدد، روند کاهش سختی سازه کندتر انجام می‌شود و این پدیده و افزایش سختی در مدل به دلیل محبوس شدن مصالح خرد شده دانه‌ای و خمیر سفت‌شده سیمان است در ترک‌های کششی ایجاد شده در مراحل قبلی بارگذاری است. پاسخ سیکلی دو پایه پل محصورشده با دورپیچ با عملکرد خمشی در شکل (۱) نشان داده شده است. مدل هیسترزیس پیشنهادی با خواص شرح داده شده، به‌صورت خط چین روی نتایج تست سیکلی نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل(۲) نمایش داده شده است. در این شکل خط افقی محل شکست مسیر هیسترزیس نیز مشخص شده است.



شکل ۱. پاسخ سیکلی پایه‌های پل با ضوابط طراحی لرزه‌ای جدید

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. مشخصات مسیر مدل هیسترزیس چند خطی پیشنهادی

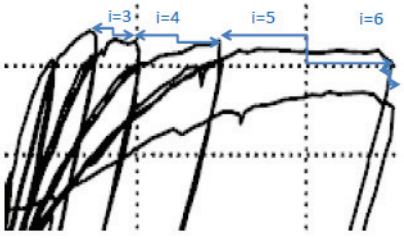
مقاومت سازه یکی از مشخصات سازه‌های بتنی است که تحت تأثیر خرابی‌های تجمعی کاهش می‌یابد و مقدار آن در هر مرحله نسبت به مرحله قبل کاسته می‌شود. زوال مقاومت اعضای بتنی تا حد زیادی به جزئیات اجرایی آنها بسته است در صورتی که جزئیات اجرایی مناسب و کافی باشد میزان این زوال کم است و در صورتی که جزئیات اجرایی مناسب و کافی نباشد، زوال مقاومت تا حد زیادی افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به جزئیات اجرایی پایه پل‌ها و نحوه دورپیچ گذاری آن، تعیین مقدار زوال مقاومت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاهش مقاومت پایه‌های بتنی با ضوابط خاموت گذاری جدید آئین‌نامه‌های طرح لرزه‌ای در شکل (۳) نشان داده شده است. به طور کلی روشهای کاهش مقاومت در هر سیکل به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شود. در این روش‌ها، مقاومت سازه در هر مرحله نسبت به مرحله قبل (به شرط ورود به ناحیه غیر ارتجاعی) کاهش پیدا می‌یابد. مطابق رابطه(۱) مقاومت هر مرحله F_i (مرحله i) با استفاده از مقاومت مرحله قبل F_{i-1} (مرحله i-1) تعیین می‌گردد.

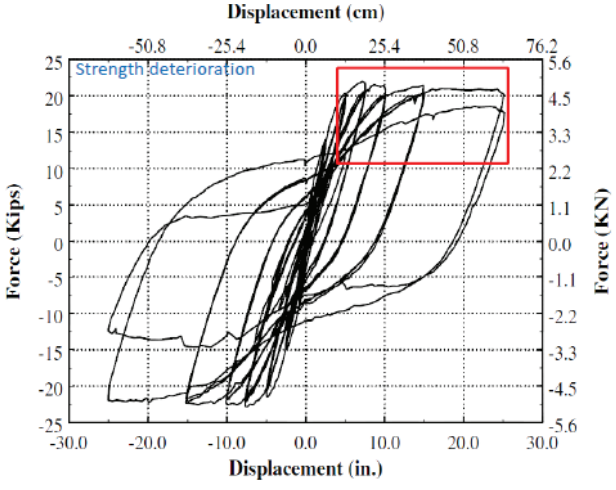
$$F_i = (1-D_i)F_{i-1} = D_s F_{i-1} \quad (۱)$$

$$F_i = (1-D_i)(1-D_{i-1})F_{i-2} \quad (۲)$$

$$F_i = F_y \Gamma_{j=1}^{i}(1-D_j) \quad (۳)$$

در این روش‌های غیر مستقیم پارامتر کاهش مقاومت D_i بر اساس نسبت انرژی هیسترتیک جذب شده در هر سیکل به ظرفیت جذب انرژی هیسترتیک یا نسبت حداکثر تغییرمکان در هر سیکل به ظرفیت تغییر شکل جانبی متناظر با خرابی محاسبه می‌شود. بر





شکل ۳. زوال مقاومت در پاسخ سیکلی پایه پل طراحی شده با ضوابط لرزه‌ای [Lehman, D.E. and Moehle, 2000]

www.SID.ir

Archive of SID

اساس روش انرژی، پارامتر کاهش مقاومت با رابطه (٤) محاسبه می‌شود.

$$\beta_i = \left(\frac{E_i}{E_t - \sum_{j=1}^{i} E_j} \right)^c \quad (٤)$$

$$E_t = \gamma F_y \Delta_y \quad (٥)$$

در رابطه (٤) و (٥) E_i انرژی هیسترتیک جذب شده تا مرحله i، E_t ظرفیت جذب انرژی هیسترتیک، γ ثابت ظرفیت انرژی که عددی بین ۲۵ تا ۱۰۰ است، F_y مقاومت تسلیم، Δ_y تغییر مکان تسلیم اولیه، $\sum_{j=1}^{i} E_j$ مجموع انرژی هیسترتیک جذب شده تا مرحله i و c پارامتر نرخ تنزل مقاومت است. در پاره‌ای از موارد پارامتر کاهش مقاومت بر اساس تغییر مکان محاسبه می‌شود. رابطه (٦) و (٧) نحوه محاسبه را نشان می‌دهد.

$$\beta_i = \frac{e^{\lambda_{i-1}}}{e-1} \quad (٦)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta_i}{\Delta_f} \quad (٧)$$

در این رابطه Δ_i حداکثر تغییر مکان در دور i و Δ_f تغییر مکان متناظر با خرابی تحت بارگذاری تدریجی است.

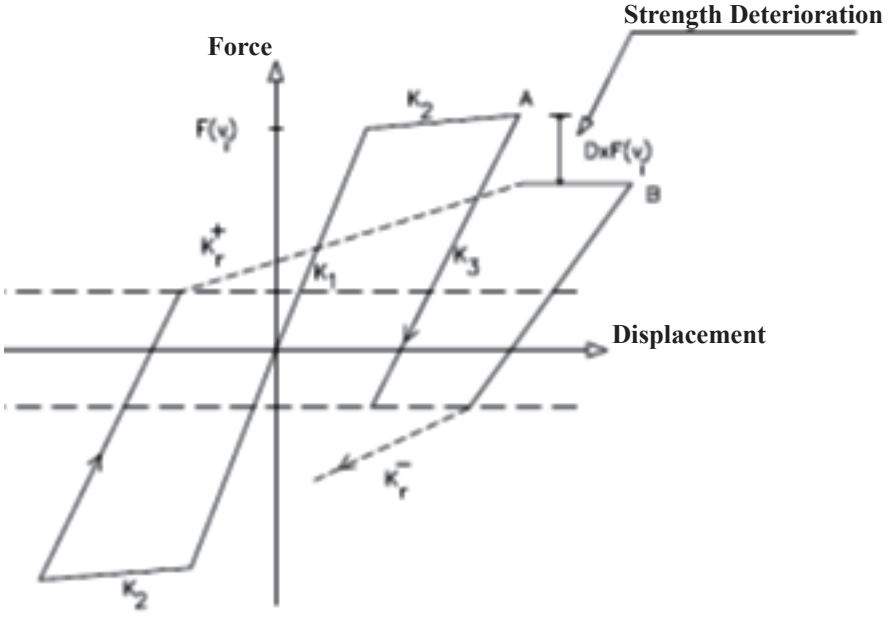
همان‌طور که از روابط پیداست، برای تحلیل سازه با استفاده از مدلهای بالا، می بایست از قبل، از ظرفیت مقاومت اعضا (ظرفیت تحمل انرژی و یا ظرفیت تحمل تغییر مکان) اطلاعات کافی داشت. این موضوع یکی از مشکلات استفاده از روش غیرمستقیم برای تنزل مقاومت است. در مدل هیسترزیس جدید کاهش مقاومت به‌صورت مستقیم اعمال می گردد، به طوری که با توجه به مشخصات مکانیکی مصالح و آرماتورهای طولی و دورپیچ‌ها، بر اساس تجربیات قبل میزان افت مقاومت در هر سیکل محاسبه می شود. شکل (٤) میزان افت مقاومت در سیکلهای متعدد را بصورت مستقیم نشان می‌دهد. رابطه (٨) کاهش مقاومت را محاسبه می‌کند.

$$F_A = F_B + dF \quad (٨)$$

در رابطه بالا F_B نیروی جدید برای گراگرفتن، F_A نیروی بیشینه قبلی، dF مقدار کاهش مقاومت در هر سیکل است. کاهش مقاومت با استفاده از انرژی مستهلک شده مرحله قبل محاسبه می شود.

$$dF = \beta \frac{dE}{\Delta_y} \quad (٩)$$

در رابطه بالا dE انرژی جذب شده در آخرین مرحله بارگذاری



شکل ٤. اعمال زوال مقاومت به‌صورت مستقیم در منحنی هیسترزیس پیشنهادی

www.SID.ir

Archive of SID

و باربرداری، Δ_y جابه‌جایی جاری شدن در بارگذاری تدریجی است. پارامتر تقریبی β با تکیه بر نتایج تست آزمایشگاهی به صورت زیر تخمین زده می‌شود :

$$\beta = \left[(0.37n_0 + 0.36(K_\rho - 0.2)^2)\right] 0.9^{\rho_w} \qquad (۱۰)$$

$$n_0 = \frac{N}{bdf_c^{'}} \qquad (۱۱)$$

$$K_\rho = \frac{\rho_t}{0.85 f_c^{'}} \qquad (۱۲)$$

در روابط بالا ρ_t درصد فولاد کششی، $f_c^{'}$ مقاومت مشخصه بتن مصرفی، N نیروی محوری فشاری و ρ_w نسبت فولاد محصور کننده است.در روابط بالا اثر ρ_t ناچیز و قابل صرفنظر کردن است. مهمترین عامل، درصد فولاد عرضی محصور کننده بتن است که با افزایش آن نرخ کاهش مقاومت، کاهش می‌یابد. اگر برای کاهش مقاومت در هر مرحله از تغییر مکان مرحله قبل استفاده گردد روش ساده‌تر و عملی تر خواهد بود.

$$dF = \beta F_A \qquad (۱۳)$$

در رابطه بالا β ضریب کاهندگی مقاومت، F_A مقاومت نقطه قبلی و dF میزان کاهش مقاومت است. هرچه مقدار β بزرگ‌تر باشد کاهندگی مقاومت سریع‌تر انجام می‌شود. یکی از مزایای استفاده از این روش اعمال زوال مقاومت در منحنی هیسترزیس پیشنهادی، عدم نیاز به برآورد ظرفیت نهایی انرژی و یا تغییرمکان پایه بتنی است.

برای برآورد جابجایی پسماند تحت تحریک رکوردهای زلزله و منحنی هیسترزیس پیشنهادی برنامه توسعه داده شده معادله تعادل دینامیکی زیر را حل می‌نماید.

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = -m\ddot{v}_g(t) \qquad (۱٤)$$

$$\ddot{v}(t) + 2\omega\xi\dot{v}(t) + \omega^2 v(t) = -\ddot{v}_g(t) \qquad (۱۵)$$

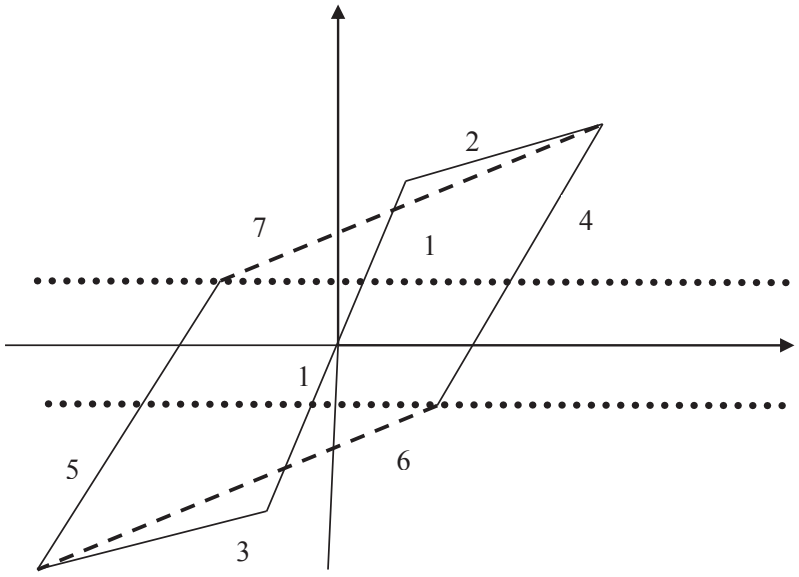
در روابط (۱٤) و (۱۵) $v(t)$ و $\dot{v}(t)$ به ترتیب جابجایی و سرعت نسبی جرم با توجه به حرکت زمین است. k، m و c سختی، جرم و ضریب میرایی سیستم است و $\ddot{v}_g(t)$ شتاب زمین است. ξ و ω نیز به ترتیب نسبت میرایی و فرکانس طبیعی سیستم است.

در این تحقیق برای برآورد صحیح جابه‌جایی پسماند و اعمال اثر پارامترهای زوال روی آن از مدل ترکیبی جدیدی استفاده شده است. در این مدل برای مدلسازی رفتار هیسترزیس مدل دو خطی استفاده شده است که به لحاظ ساختاری دارای تفاوتهای عمده‌ای با مدل‌های هیسترزیس متعارف است. این مدل دو خطی شامل ۷ مرحله مختلف بارگذاری است که به تناسب تاریخچه شتاب زلزله وارده جابجایی اعمالی و نیروی حادث شده محاسبه و با مقایسه با مقادیر حدی در هر مرحله، شماره مرحله بارگذاری تعیین و تغییر شکل‌های واقعی با مراحل سعی و خطا محاسبه می‌گردد. برای انجام این تحلیل برنامه‌ای در محیط MATLAB تهیه شده است که بر اساس روش نیومارک-بتا (Newmark-Beta) با شتاب خطی کار می‌کند که در آن مقادیر β و γ به ترتیب ۰/۵ و ۰/۱٦۷ در نظر گرفته شده است. در برنامه تهیه شده میزان خطای مجاز در گامهای مختلف میزان شتاب محاسبه شده از فرمول نیومارک-بتا و شتاب کنترلی از معادله تعادل ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. منحنی هیسترزیس معرفی شده در شکل (۵) شامل ۷ مرحله است که مراحل ٦،۵،٤،۳،۲،۱ و ۷ به ترتیب مربوط به حالت الاستیک با شیب مثبت و منفی، حالت پلاستیک مثبت، حالت پلاستیک منفی، باربرداری مثبت، باربرداری منفی، بارگذاری مجدد منفی و بارگذاری مجدد مثبت است. هر یک از مراحل بارگذاری با اعداد ۱ تا ۷ مشخص شده است و با توجه به شتاب وارده و نیروی ایجاد شده در سیستم دینامیکی، مشخص می‌شود سیستم در چه مرحله‌ای از مسیر منحنی قرار دارد. شکل (٦) نمودار شاخه‌ای از وضعیت‌های محتمل هر یک از حالتهای ۷گانه بارگذاری را به مرحله بعدی نشان می دهد که در برنامه تحلیل غیرخطی گنجانده شده است.

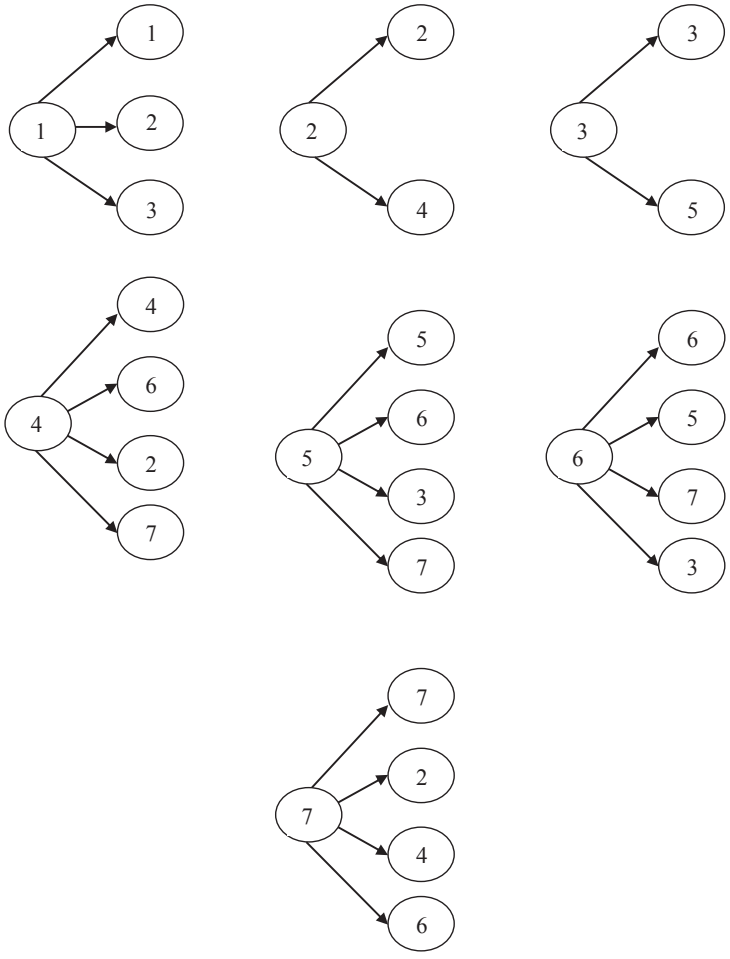
مدل هیسترزیس ارائه شده توسط این محققین در شکل (۷)، در واقع اصلاح شده مدل هیسترزیس q است. در این مدل بر خلاف مدل دو خطی ساده و همانند مدل q سختی باربرداری K_3 در مراحل مثبت و منفی(مراحل ٤ و ۵) شکل (۷) کسری از سختی الاستیک اولیه است. سختی باربرداری در مراحل مثبت و منفی مطابق رابطه ۱٦و ۱۷ قابل محاسبه است. در این روابط d_{pi}- max و d_{ni}max به ترتیب جابجایی بیشینه در مراحل بارگذاری

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵. مراحل ۷ گانه مختلف مدل هیسترزیس چند خطی جدید



شکل ٦. نمودار شاخه‌ای انتقال وضعیت بارگذاری در مراحل ۷ گانه به مرحله بعدی در مدل هیسترزیس جدید

www.SID.ir

Archive of SID

پلاستیک در هر سیکل است. پارامتر β نشانگر فاکتور باربرداری است که مطابق مطالعات آزمایشگاهی ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برخلاف سایر روش‌ها در این روش باربرداری مطابق شیب محاسبه شده تا نقاط شکست محور افقی ثانوی ادامه می‌یابد. این نقاط شکست در شکل (۷) با نیروهای F_b^- و F_b^+ متناظر است. براساس مطالعات آزمایشگاهی، در سعی اولیه نیروی متناظر با این نقاط شکست معادل ۲۰ درصد نیروی معادل تسلیم در نظر گرفته شده است. از سایر خواص مدل هیسترزیس جدید، تفاوت سختی الاستیک یا نیروی معادل تسلیم در دو جهت مختلف است. این خاصیت این امکان را می‌دهد تا این مدل را برای مقاطع نامتقارن که در دو جهت خواص متفاوت دارند نیز استفاده گردد. مراحل ٦ و ۷ در این مدل مربوط به بارگذاری مجدد در دو سمت مثبت و منفی است. با توجه به اینکه این مدل بر اساس مدلهای متمایل به بیشینه تغییر مکان[1] نوشته شده است، در این مدل در مراحل ٦ و ۷، بردار بارگذاری مجدد به سمت بیشینه تغییر شکل سیکل قبلی ($F_{pi}max$ و $F_{ni}max$) حرکت می‌کند.

$$K_3^+ = K_1\left(\frac{d_{pi}\max}{d_y}\right)^{-\beta} \quad (۱٦)$$

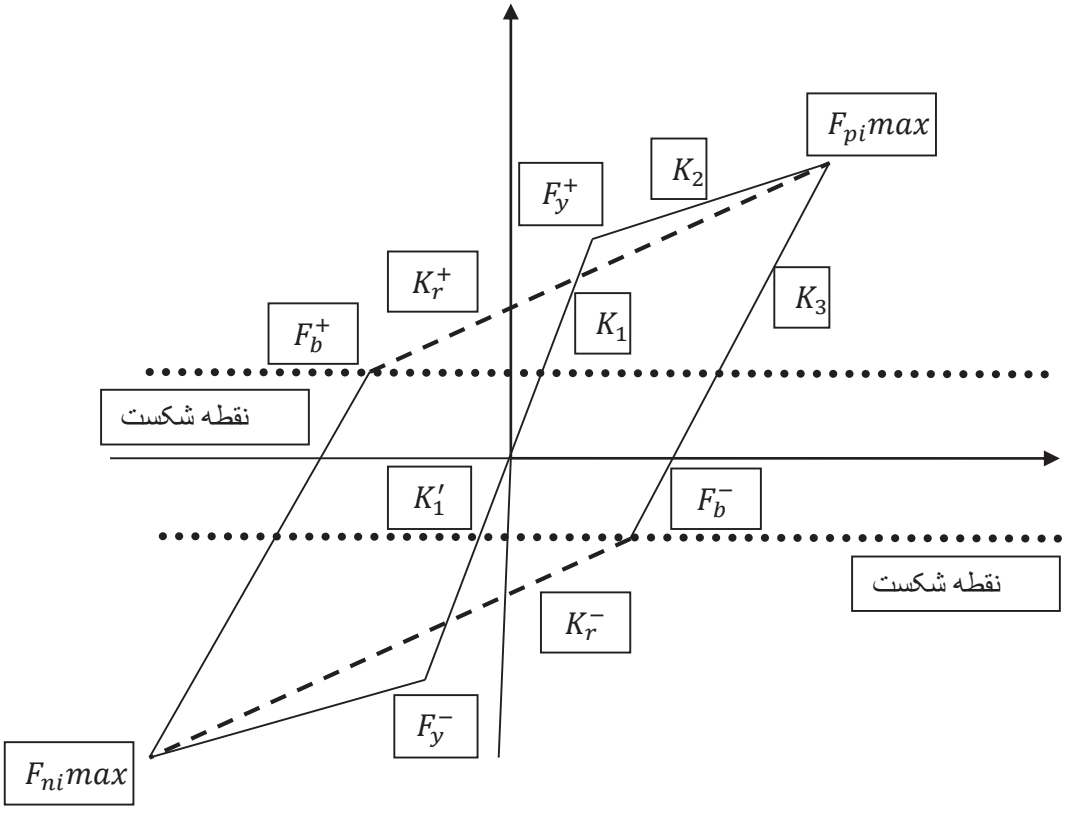
$$K_3^- = K_1\left(\frac{d_{ni}\max}{d_y}\right)^{-\beta} \quad (۱۷)$$

سختی بارگذاری مجدد در مراحل ۷و۸ (شکل۵) با روابط (۱۸)و (۱۹)قابل محاسبه است.

$$K_r^+ = \frac{F_{pi}\max - F_b^+}{d_{pi}\max - d_b^+} \quad (۱۸)$$

$$K_r^- = \frac{F_{ni}\max - F_b^-}{d_{ni}\max - d_b^-} \quad (۱۹)$$

در روابط ۱۸ و ۱۹ K_r^+ و K_r^- به ترتیب شیب باربرداری مجدد در نواحی مثبت و منفی است. ($F_{pi}max$ ،$d_{pi}max$) و ($d_{ni}max$، $F_{ni}max$) به ترتیب نیرو و جابجایی معادل مثبت و منفی در هر سیکل بارگذاری است. (F_b^+, d_b^+) و (F_b^-, d_b^-) به ترتیب



شکل ۷. مشخصات مسیر مدل هیسترزیس چند خطی پیشنهادی

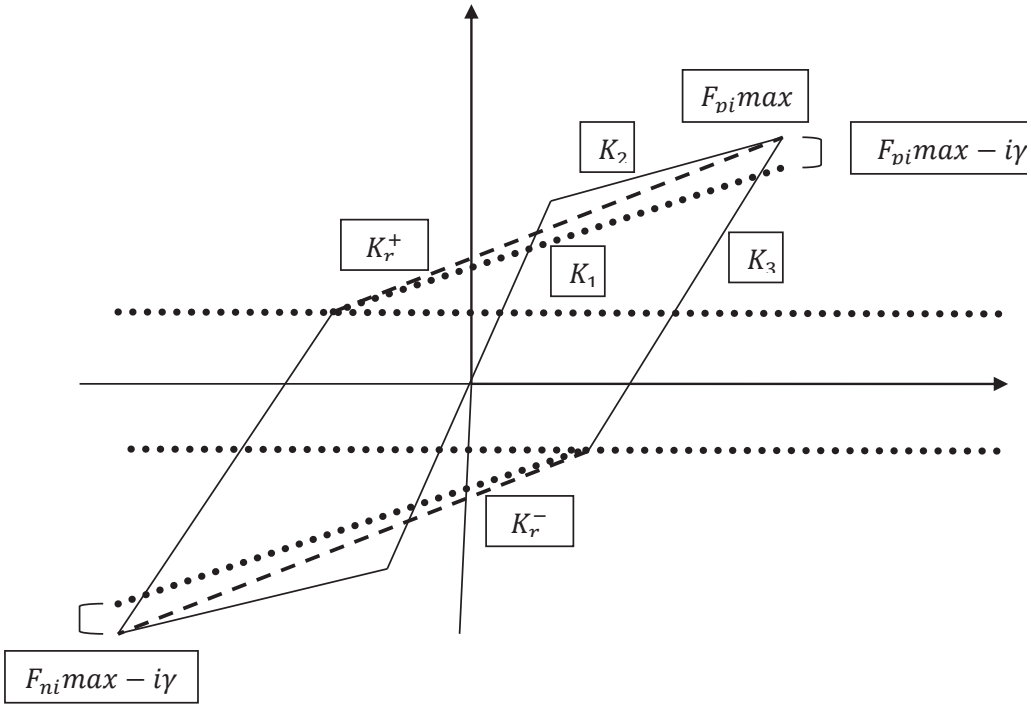
www.SID.ir

Archive of SID

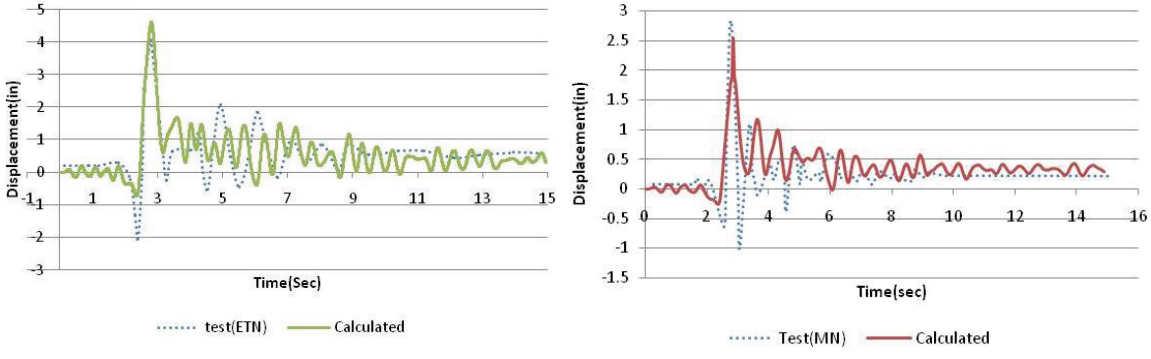
مختصات نقاط شکست در نواحی مثبت و منفی است.

از سایر خواص مدل هیسترزیس اضافه شدن زوال مقاومت[۲] به این مدل متمایل به بیشینه تغییر مکان است. در این مدل در هر نیم سیکل در مرحله بارگذاری مجدد در جهت مثبت و منفی مقاومت بیشینه در هر سمت $F_{pi}max$ و $F_{ni}max$ با روند مشخصی کاهش می‌یابد. در این مدل در هر نیم سیکل مقاومت مثبت و منفی به مقدار $F_{pi}\max-i\gamma$ و $F_{ni}\max-i\gamma$ کاهش می‌یابد (شکل ۸). در این مدل i شماره هر نیم سیکل و میزان زوال سختی است که با توجه به نتایج آزمایشگاهی بین ۱ تا ۱۰ درصد تخمین زده می‌شود. این مدل قادر است تا این فاکتور را به عنوان ورودی در نظر بگیرد. در سعی اولیه مقدار ۳ درصد برای γ نتایج مناسبی نشان داد.

پس از مدلسازی پایه های بتنی با ابعاد و مشخصات بخش (۲) و انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی با برنامه تهیه شده با رفتار هیسترزیس جدید، نتایج خروجی تاریخچه جابجایی جانبی در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) نشان داده می‌شود. در انتها جدول (۳) جابجایی بیشینه و پسماند نمونه‌های مختلف را با نتایج تست میز لرزه در هر حالت نشان می‌دهد.



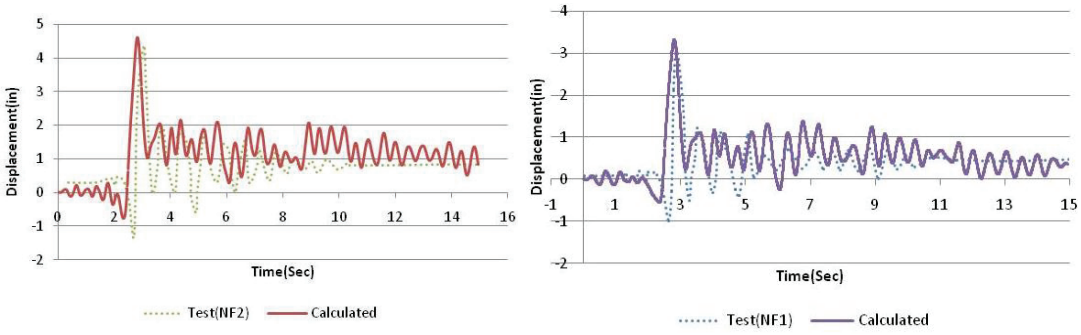
شکل ۸. زوال مقاومت در سیکلهای متوالی در مدل هیسترزیس پیشنهادی جدید



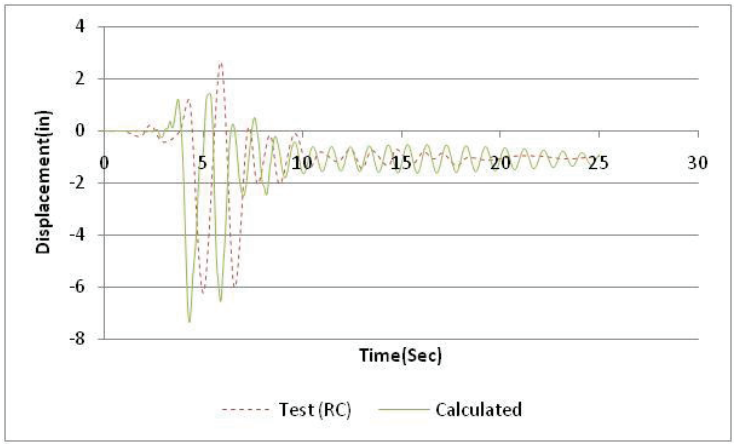
شکل ۹. پاسخ مدل دو خطی پیشنهادی در مقایسه با نتایج تست برای نمونه‌های MN و ETN

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰. پاسخ مدل دو خطی پیشنهادی در مقایسه با نتایج تست برای نمونه‌های NF1 و NF2



شکل ۱۱. پاسخ مدل دو خطی پیشنهادی در مقایسه با نتایج تست برای نمونه‌های RC

جدول۳. مقایسه جابه‌جایی بیشینه و پسماند مدل ترکیبی پیشنهادی با نتایج تست میز لرزه برای نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه مرجع	پارامتر	نتایج آزمایش	نتایج مدل	اختلاف(درصد)
MN	جابجایی بیشینه	۲/۶۲	۲/۷۹	٦
	جابجایی پسماند	۰/۲۲	۰/۲٦	۱۸
ETN	جابجایی بیشینه	۰/۵۸	۰/۵۸	۰
	جابجایی پسماند	۰/۵۸	۰/٤۹	۱۸
NF1	جابجایی بیشینه	۳/۱۲	۳/۳۲	٦
	جابجایی پسماند	۰/٤۷	۰/٤۱	۱٤
NF2	جابجایی بیشینه	٤/۳۷	۵/۰۱	۱٤
	جابجایی پسماند	۰/۸۳	۰/۹۸	۱۸
RC	جابجایی بیشینه	۷	٦/۱	۱٤
	جابجایی پسماند	۱/۱	۰/۹۵	۱۵

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج نشان می‌دهند (شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و جدول۳)، مدل پیشنهادی که به دنبال نقطه‌ای برای شکست منحنی باربرداری خارج از محور افقی اولیه است، دارای نتایج بهتری است در حالی که نتایج مدلهای متعارف نشان داد این مدل‌ها در تخمین پس‌ماند دارای خطای قابل ملاحظه است [Jeong, Sakai and Mahin, 2008 ,and Billington, 2010] در ضمن نتایج سایر محققین برای تخمین پارامتر جابه‌جایی پس‌ماند دارای خطای بیشتری است [Jeong, Sakai and Mahin, 2008 ,and Billington, 2010]. در حالی که مدل معرفی شده مطابق نتایج این بخش خطای کمتری دارد. در مدل پیشنهادی به خواص مدل هیسترزیس q، زوال مقاومت در هر نیم سیکل و شکست مسیر باربرداری روی محور افقی ثانوی (شروع بارگذاری مجدد) اضافه شده و تأثیر مناسبی در تخمین مناسب جابجایی پسماند داشته است.

٤. جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق در مرحله اول به ذکر عدم توانایی مدلهای هیسترزیس متعارف در تخمین تقاضای لرزه‌ای جابجایی پسماند پرداخته شد. این مدلهای هیسترزیس علی‌رغم تخمین مناسب جابجایی بیشینه در تخمین جابجایی پسماند دارای خطای قابل توجهی هستند. در مرحله بعدی مدل هیسترزیس جدیدی ارائه شد که بر خلاف مدلهای هیسترزیس متعارف در مسیر باربرداری به بارگذاری مجدد در فاز مثبت و منفی، روی محوری غیر از محور افقی(محور نیرو صفر) دچار شکست می‌شود. این اختلاف شیب و اختلاف سختی درمسیر باربرداری ناشی از وجود پدیده‌ای است، ناشی از محبوس شدن ذرات خرد شده سنگدانه و خمیر سیمان سفت شده در ترک‌های کششی ایجاد شده از مراحل قبلی بارگذاری. این پدیده باعث شده تا سختی سازه در مرحله باربرداری بیشتر از آن چیزی باشد که در سایر منحنی‌های هیسترزیس متعارف وجود دارد که این اثر افزایش سختی در مرحله باربرداری به بارگذاری مجدد در مدل جدید وارد شده است. به علاوه در مدل جدید بر خلاف سایر مدلهای هیسترزیس متعارف، مسیر بارگذاری مجدد به سوی جابجایی بیشینه سیکل قبلی زوال مقاومت بر اساس روش مستقیم و مبتنی بر مشخصات هندسی و مکانیکی سازه اعمال شده است. خلاصه نتایج کمی و کیفی تحقیق انجام شده به تفکیک در زیر آورده شده است:

– مدلهای هیسترزیس سه خطی مانند تاکدا، مندر و... اگر چه با در نظر گرفتن ترک خوردگی قبل از تسلیم برای تخمین مقادیر بیشینه پاسخ‌های لرزه‌ای مناسب هستند، ولی برای تخمین جابجایی پسماند لرزه‌ای دقت بسیار کمی دارند.

– مدلهای هیسترزیس دو خطی دارای ورتکس(دارای شکستگی بین باربرداری و بارگذاری مجدد) و منحنیهای هیسترزیس صاف مانند کلاف و بوک–ون با کاهش سختی به‌صورت نمایی و زوال مقاومت، برای تخمین مقادیر بیشینه پاسخ‌های لرزه‌ای مناسب هستند، ولی برای تخمین جابجایی پسماند لرزه ای دقت بسیار کمی دارند.

– مدل هیسترزیس دوخطی صاف (دارای شیب ثابت بین باربرداری و بارگذاری مجدد) با همراه شدن اثر باریک شدگی دقت مناسبی در برآورد تقاضای لرزه‌ای جابجایی پسماند دارند.

– منحنی هیسترزیس پیشنهادی از نوع منحنی های متمایل به بیشینه تغییر مکان است که با در نظر گرفتن افت مقاومت در هر نیم سیکل و کاهش سختی به صورت نمایی دقت مناسبی در تخمین و برآورد جابجایی پسماند دارد.

– منحنی هیسترزیس پیشنهادی دارای شکستی روی محور افقی ثانوی است که قادر است تغییر شیب بین باربرداری و بارگذاری مجدد را در نظر بگیرد. مقدار این شکست به صورت نسبتی از مقاومت تسلیم اولیه در برنامه در نظر گرفته شده است که انتخاب صحیح این پارامتر تأثیر مناسبی در تخمین جابه‌جایی پسماند دارد.

– استفاده از مدل‌های هیسترزیس نیرو– تغییر مکان ترکیبی پیشنهادی با توجه به سادگی و قابلیت توسعه آن در کابردهای مهندسی مناسب است و می‌تواند در تحلیلهای تقریبی مورد استفاده قرار گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID

۵. منابع

- Beery, P. M. and Eberhand, O. M. (2007) "Performance modeling strategies for modern reinforced concrete bridge column." PEER-2007/07, Pacific Earthq. Engrg. Res. Center, Univ. of California at Berkeley, California.

-Bojorquez, E. and Ruiz-Garcia, J. (2013) "Residual drift demands in moment-resisting steel frames subjected to narrow-band earthquake ground motions", Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol.42, No.11, pp. 1583–1598.

- Choi, H., Saiidi, S., Somerville, P. and El-Azizy, S. (2010) "Experimental study of reinforced concrete bridge columns subjected to near-fault ground motions", ACI Structural Journal, Vol.107, No.1, January, pp.3-12.

- Clough, R. W. (1966) "Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements." Structural and Materials Research, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, CA, Report 66-16.

- Dong, P., Moss, P. J. and Carr, A. J. (2003) "Seismic structural damage assessment of reinforced concrete ductile framed structures", Proc. of International Conference on Earthquake Engineering.

- Fahmy, M., Wu, Z., Wu, G. and Sun, Z. (2010) "Post-yield stiffness and residual deformations of RC bridge columns reinforced with ordinary rebars and steel fiber composite bars", Engineering Structures Journal, vol.32, No.9, pp. 2969–2983.

- Gajalakshmi, P. and Helena,H. J. (2012) "Behavior of concrete-filled steel columns subjected to lateral cyclic loading". Journal of Constructional Steel Research, vol.75, August, pp. 55–63

-Hachem, M. M., Mahin, S. A. and Moehle, J. P. (2003) "Performance of circular reinforced concrete bridge columns under bidirectional earthquake loading", PEER-2003/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, California

-Hussein, A.T. (2010) "Hysteretic models for mode of system under earthquake effect", American Journal of Scientific Research, Vol. 133, No.12, pp. 45-54.

-Jeong, H. I. Sakai, J. and Mahin, S. A. (2008) "Shaking table tests and numerical investigation of self-centering reinforced concrete bridge columns", PEER-2008/06, Pacific Earthq. Engrg. Res. Center, Univ. of California at Berkeley, California.

-Kawashima, K. MacRae, G. A. Hoshikuma, J. and Nagaya, K. (1998) "Residual displacement response spectrum", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 124, No. 5, pp. 523-530

-Kunnath, S.K., Reinhorn, A. M. and Lobo, R. F. (1992) "IDARC: A program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures", National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Report No. NCEER-92-0022

-Lee, W. K. and Billigton, S .(2010) "Modeling residual displacement of concrete bridge column under earthquake loads using fiber elements", ASCE Journal of Bridge Engineering, vol.15,No.3, pp. 240–249.

-Lehman, D. E. and Moehle, J. P. (2000) "Seismic performance of well-confined concrete bridge columns", PEER-1998/01, Pacific Earthq. Engrg. Res. Center, Univ. of California at Berkeley, California.

-Macrae, G. A. and Kawashima, K. (1997) "Post earthquake residual displacements of bilinear oscillators." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, No.7, pp.701-716

-Mahin, S. A. and Sakai, J. (2006) "Use of partially prestressed reinforced concrete columns to reduce post-earthquake residual displacements of bridges", Fifth National Seismic Conference on Bridges & Highways, San Francisco, CA, September 18-20

-Muthukumar, S. and DesRoches,R. (2005) "Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns", Journal of Earthquake Spectra, Vol. 21, No.4, pp. 1113-1135.

-Novelli, V. I. (2008) ''The unloading stiffness of

www.SID.ir

Archive of SID

reinforced concrete members'', Ph,D dissertation, University of Pavia at Pavia

- Phan, V. T. and Anderson, J. (2005) ''Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns'', Rep. No. CCEER-05-7, Center of Civil Engineering earthquake Research, Dept. of Civil Engineering,Univ. of Nevada.Reno,Nevada.

-Ramirez, C. M. and Miranda, E. (2012) "Significance of residual drifts in building earthquake loss estimation", Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol.41, No.11, pp. 1477–1493.

-Saiidi, M. S .and Seyed Ardakani, S. M. (2012) "An analytical study of residual displacements in RC bridge columns subjected to near-fault earthquakes", ASCE Journal of Bridge Engineering, vol.8, No.1, May,pp. 35–45.

-Sakai, J. and Mahin, S. A. (2004b) "Mitigation of residual displacements of reinforced concrete bridge columns" , Proc. of 20th US-Japan Bridge Engineering Workshop, pp. 87-102, Washington D.C., USA.

-Sengupate, P. and Bing, L. (2011) "Hysteresis behavior of reinforced concrete non-ductile beam-column joints", Proc. of Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society.

-Sengupate, P. and Bing, L. (2013) "Modified bouc-wen model for hysteresis behavior of rc beam-column joints with limited transverse reinforcement", Journal of Engineering Structures, vol.27, January,pp. 392–406.

-Sivaselvan, M. V. and Reinhorn, A. M. (2000) "Hysteretic models for deteriorating inelastic structures", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 133, No.7, pp. 982-989.

-Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielson, N. N. (1970) "Reinforced concrete response to simulated earthquakes", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.96, No.12, pp. 2257–2273.

-Wang, Z., Song, W., Wang, Y. and Wei, H. (2011) "Numerical analytical model for seismic behavior of prestressing concrete bridge column systems." Journal of Procedia Engineering, Vol. 14, No.7, pp. 2333-2340.

-Wang, M. L and Shah, S. P. (1987) "Reinforced concrete hysteresis model based on damage concept". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.15, No.8, pp. 993–1003.

-Yazgan, U. and Dazio, A. (2011) "Simulating maximum and residual displacement of rc structures: I. Accuracy", Journal of Earthquake Spectra, vol.27, No.4, November, pp. 1187–1202.

-Yazgan, U. and Dazio, A. (2011) "Simulating maximum and residual displacement of RC structures: I. Sensitivity", Journal of Earthquake Spectra, vol.27, No.4, November, pp. 1203–1218.

www.SID.ir