

ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب برای ساختارهای غیرخطی در معرض حرکات زمین توالی نوع

چکیده

این مقاله ضریب کاهش مقاومت سیستم با یک درجه آزادی (SDOF) را که در معرض حرکات زمین توالی نوع لرزه اصلی - پس لرزه قرار دارد، بررسی می‌کند. هم شکل‌پذیری جابجایی و هم آسیب تجمعی در ضریب کاهش در نظر گرفته می‌شوند. ثبت زلزله‌های اصلی و پس لرزه جمع آوری و برطبق ویژگی‌های مکان طبقه‌بندی شده‌است. حرکات زمین پس لرزه به طور متوالی به پنج سطح شدت نسبی مقیاس‌بندی شده‌اند. براساس تحلیل زمان تاریخ غیرخطی سیستم‌های SDOF، اثرات دوره طبیعی، ضریب شکل‌پذیری، شاخص آسیب و پس لرزه به طور آماری مطالعه شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که حرکت زمین پس لرزه تاثیر چشمگیری بر فاکتورهای کاهش مقاومت دارد و ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب حدودا 0.6 - 0.9 برابر ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر شکل‌پذیری می‌باشد. سرانجام، یک بیان تجربی برای ضریب کاهش مقاومت به وسیله تحلیل رگرسیون ایجاد شده‌است.

کلید واژه ها: عامل کاهش قدرت طیف پاسخ غیر ارتجاعی شاخص خسارت حرکت زمین از نوع توالی وضعیت سایت

1. مقدمه

بر طبق آمار، تقریبا 88٪ زلزله‌های قوی با پس لرزه همراه بوده‌اند. پس لرزه به عنوان زلزله کوچک پس از زلزله اصلی تعریف می‌شود، که بزرگترین زلزله در دنباله می‌باشد. آسیب ساختاری ناشی از زلزله اصلی تحت پس لرزه‌ها شدیدتر

می‌شود و حتی می‌تواند منجر به فروریختن ساختاری شود. زلزله‌های نیوزیلند در سال 2010 [1] و نپال در سال 2015 [2] هر دو حرکات زمین لرزه اصلی و پس‌لرزه تجربه شد، و این دو مورد مثال‌هایی مناسب برای چرایی اهمیت موضوعات حرکات زمین توالی نوع در مرحله طراحی ساختاری می‌باشند. در سال‌های اخیر، محققان اثر زمین لرزه را از جنبه‌های مختلفی بررسی کردند. برخی مطالعات اثرات حرکات زمین توالی نوع را در طیف غیرالاستیک مانند طیف ضریب کاهش مقاومت [3, 4]، طیف آسیب [5]، طیف ضریب شکل‌پذیری [6, 7] و غیره بررسی کردند. دیگر مطالعات بر تغییرات پاسخ ساختاری، برای مثال، ساختمان‌های قاب فولادی [8] و قاب RC [9]، تحت حرکات زمین توالی نوع تمرکز کرده‌اند. تمامی نتایج به وضوح جابجایی اوج بزرگتر یا افزایش آسیب ساختاری ناشی از حرکات زمین توالی نوع را نسبت به زلزله اصلی نشان می‌دهند. اثر پس‌لرزه ناپیوستگی در مرحله طراحی ساختاری نادیده گرفته شود.

اصول طراحی لرزه‌ای کنونی شامل تحلیل رفتار الاستیک - پلاستیک سازه تحت زلزله‌های متوسط/نادر می‌باشد. چون مقاومت طراحی بیشتر سازه‌ها معمولاً بسیار کمتر از حداقل مقاومت موردنیاز برای حفظ مرحله الاستیک تحت زلزله‌های قوی می‌باشد، اغلب ضریب کاهش برای کاهش تقاضای مقاومت الاستیک بکار می‌رود و به موجب آن تقاضای مقاومت الاستیک - پلاستیک سازه بدست می‌آید. تحلیل نظری و مطالعات تجربی ضرایب کاهش مقاومت نشان داده‌است که شکل‌پذیری ساختار یک اثر چشمگیر بر ضریب کاهش مقاومت دارد. ضریب شکل‌پذیری جابجایی به ارزیابی میزان آسیب سازه [10 - 12] کمک می‌کند. بنابراین، ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر شکل‌پذیری R_{μ} را می‌توان چنین تعریف کرد:

$$R_{\mu} = \frac{F_e}{F_{y,\mu}} = \frac{F_y(\mu = 1)}{F_y(\mu = \mu_i)} \quad (1)$$

که در آن $F_y(\mu = 1)$ مقاومت تسلیم موردنیاز برای حفظ سازه در مرحله الاستیک می‌باشد، و $F_y(\mu = \mu_i)$ مقاومت تسلیم موردنیاز برای حفظ تقاضای شکل‌پذیری سازه است که برابر با مقدار شکل‌پذیری یک هدف معین μ_i می‌باشد.

علاوه بر آن، آسیب تجمعی چرخه‌های پسماند غیرخطی نیز یک نقش مهم در تعیین سطح آسیب سازه ایفا می‌کند. برخی مطالعات نشان دادند که آسیب تجمعی را می‌توان برای تصحیح ظرفیت شکل‌پذیری، مانند روش شکل‌پذیری

معادل [13] یا معرفی ضریب شکل‌پذیری وزنی [14] لحاظ کرد. این روش‌ها به طور غیرمستقیم اثر آسیب تجمعی را لحاظ می‌کنند. برخی دیگر از مطالعات آسیب تجمعی را به طور مستقیم با بکارگیری مدل آسیب در تعیین تقاضای لرزه برای یک سطح آسیب مشخص یا سطح عملکردی معین در نظر گرفتند.

بنابراین ضریب کاهش مقاومت بدست آمده در این روش به عنوان ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب R_D اشاره می‌شود [15] که چنین نوشته می‌شود:

$$R_D = \frac{F_e}{F_{y,D}} = \frac{F_y(\mu = 1, D = 0)}{F_y(\mu = \mu_i, D = D_i)} \quad (2)$$

که در آن $F_{y,D}$ تقاضای مقاومت غیرالاستیک برای محدود کردن پاسخ غیرالاستیک سازه به سطح آسیب مشخص D_i برای ظرفیت شکل‌پذیری معین μ_i می‌باشد. در این مطالعه، سطوح عملکردی سازه با استفاده از شاخص آسیب به منظور لحاظ آسیب تجمعی سازه تعریف می‌شوند.

همان‌طور که در بالا ذکر شد که پس لرزه آسیب سازه را تشدید می‌کند، با این حال، ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب اثر حرکات زمین پس‌لرزه را بازتاب نمی‌کند. از این منظر، مطالعه حاضر این موضوع را از طریق محاسبات عددی گسترده در سیستم SDOF غیرخطی که در معرض حرکات زمین توالی نوع می‌باشد، بررسی می‌کند. بخش 2 رکوردها (موارد ثبت‌شده) حرکت زمین زمین لرزه و پس لرزه واقعی را جمع‌آوری می‌کند که برای بررسی R_D بسیار ضروری می‌باشند. سپس رکوردهای جمع‌آوری شده برطبق شرایط مکان به دسته‌های مختلف تقسیم بندی می‌شوند. بخش 3 سطح عملکردی و پارامترهای محاسباتی مورد استفاده در محاسبه R_D را تعریف می‌کند. در بخش 4، تحلیل تاریخ زمانی الاستیک - پلاستیک گسترده سیستم SDOF غیرخطی با پارامترهای مختلف به منظور تعیین R_D برای دو مورد، یعنی، زمین لرزه اصلی و زمین لرزه به همراه پس لرزه انجام می‌شود. اثر ضریب شکل‌پذیری، شاخص آسیب و برخی دیگر از پارامترها در R_D نیز در بخش 5 از طریق مطالعات پارامتریک بررسی می‌شوند. سرانجام، یک فرمول تجربی برای ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب در بخش 6 ارائه شده‌است.

2. رکوردها و طبقه‌بندی حرکات زمین توالی نوع

رکورد حرکت زمین توالی نوع معمولاً شامل یک رویداد لرزه اصلی و یک یا چند رویداد پس‌لرزه می‌باشد، که زمین‌لرزه (تنها لرزه اصلی)، ترتیبی از دو زلزله (لرزه اصلی بعلاوه یک پس‌لرزه)، ترتیبی از سه زلزله (لرزه اصلی بعلاوه دو پس‌لرزه) و غیره می‌باشد. سناریو لرزه اصلی بعلاوه یک پس‌لرزه معمولاً در مطالعات قبلی در نظر گرفته شده‌است [5, 7, 8]. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که زلزله دو دنباله اطلاعات ارزشمندی را درباره اثر پس‌لرزه فراهم می‌کند. بنابراین، حرکت زمین توالی نوع در این مطالعه به عنوان یک لرزه اصلی بعلاوه یک پس‌لرزه مشخص می‌شود.

برای ایجاد حرکت زمین از دو رویداد زلزله، می‌توان دو حرکت زمین مصنوعی [5] یا یک رکورد زلزله را با تکرار آن متصل کرد [16]. با این حال، این کاربرد از حرکات مصنوعی مصنوعی، ممکن است منجر به فراب‌آورد (برآورد بیش از حد) مهم از حداکثر تقاضای رانش جانبی شود [17]. درجه فراب‌آورد به دلیل ماهیت تصادفی شبیه‌سازی حرکت زمین مصنوعی مبتنی بر مورد می‌باشد. از طرفی، روش زلزله تکراری در واقع فرض می‌کند که لرزه اصلی و پس‌لرزه چگالی طیف قدرت یکسانی را دارا می‌باشند که ممکن است برای شرایط واقعی قابل دفاع نباشد. برای اجتناب از مشکلات بالا، این مطالعه از رکوردهای زلزله واقعی در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام (PEER) [18] و شبکه‌های لرزه نگار حرکت قوی (K-NET, KiK-net) [19] به منظور ایجاد حرکت زمین توالی نوع با استفاده از مراحل و معیارهای زیر استفاده می‌کند: 1- جمع‌آوری رکوردها از ایستگاه‌های لرزه نگاری واقع شده در زمین آزاد یا ساختمان‌های کم‌ارتفاع برای اجتناب از اثرات احتمالی تعامل خاک - سازه؛ 2- در بین تمامی رکوردها از یک ایستگاه و از یک رویداد، رکوردی که اول رخ داده‌است و دارای حداکثر شتاب زمین (شتاب اوج) (PGA) بزرگتر از $0.10g$ است، به عنوان لرزه اصلی در نظر گرفته می‌شود، و رکوردی که دارای دومین PGA بزرگ می‌باشد و PGA آن بزرگتر از $0.05g$ است، به عنوان پس‌لرزه در نظر گرفته می‌شود؛ 3- قدر (بزرگی) زلزله لرزه اصلی و پس‌لرزه به ترتیب بزرگتر از 0.6 و 0.5 می‌باشد؛ 4- اتصال لرزه اصلی و پس‌لرزه انتخابی با شکاف زمانی 100 s در بین آن‌ها، که برای توقف ارتعاشات ساختاری ناشی از لرزه اصلی کافی می‌باشد؛ 5- طبقه‌بندی حرکات زمین توالی نوع برطبق روش طبقه‌بندی مکان تحقیقات جغرافیایی ایالات متحده.

به طور کلی، ما 342 رکورد حرکت زمین توالی نوع را برای کلاس‌های مکان B و C تشکیل دادیم که در جدول 1 لیست شده‌است. تعداد رکوردهای واجد شرایط برای کلاس‌های مکان A و D برای تشکیل یک تحلیل آماری معنی‌دار بسیار کم می‌باشند. برای تحلیل بیشتر، PGA لرزه اصلی تمامی رکوردهای حرکت زمین توالی نوع انتخابی در مقدار دقیق 0.2g درجه‌بندی شدند.

شکل 1: تعداد حرکات زمین توالی نوع ثبت‌شده مورد استفاده در این مقاله

نام زلزله	لرزه اصلی		پس‌لرزه		تعداد	
	Time	M_W	Time	M_W	Site B	Site C
Managua, Nicaragua	1972/12/23 06:29	6.2	1972/12/23 07:19	5.2	0	2
Imperial Valley	1979/10/15 23:16	6.5	1979/10/15 23:19	5.0	0	26
Mammoth Lakes	1980/05/25 16:34	6.1	1980/05/25 16:49	5.7	2	4
Coalinga	1983/05/02 23:42	6.4	1983/05/09 02:49	5.1	0	2
Whittier Narrows	1987/10/01 14:42	6.0	1987/10/04 10:59	5.3	6	14
Superstition Hills	1987/11/24 05:14	6.2	1987/11/24 13:16	6.5	0	2
Northridge	1994/01/17 12:31	6.7	1994/01/17 12:32	6.1	14	13
Umbria Marche	1997/09/26 09:44	6.0	1997/10/03 08:55	5.3	8	4
Chichi	1999/09/20	7.6	1999/09/20 17:57	5.9	49	36
Wenchuan	2008/05/12 14:28	7.9	2008/05/12 19:11	6.1	12	7
L'Aquila	2009/04/06 01:33	6.3	2009/04/07 17:47	5.6	9	0
New Zealand	2010/09/03 16:35	7.0	2011/02/21 23:51	6.2	9	33
East Japan Earthquake	2011/03/11 13:46	9.0	2011/03/11 15:15	7.7	34	29
Kumamoto	2016/04/14 21:26	6.2	2016/04/16 01:25	7.0	11	16
				Total	154	188

حداکثر شتاب نسبی زمین از حرکت زمین پس‌لرزه γ چنین تعریف می‌شود:

$$\gamma = \frac{PGA_{as}}{PGA_{ms}} \quad (3)$$

که در آن PGA_{as} ، PGA حرکت زمین پس‌لرزه، PGA_{ms} حداکثر شتاب زمین حرکت زمین لرزه اصلی می‌باشد. پارامتر γ به منظور نشان دادن سطح شدت نسبی پس‌لرزه نسبت به لرزه اصلی معرفی شده‌است. شدت پس‌لرزه معمولاً کوچکتر از شدت لرزه اصلی می‌باشد. با این حال، شتاب زمین پس‌لرزه با شدت بیشتر نسبت به شدت حرکات زمین

لرزه اصلی در رکوردهای زلزله واقعی موجود می‌باشد. بنابراین به منظور مطالعه اثر شدت نسبی پس‌لرزه بر ضریب کاهش مقاومت، پنج سطح γ در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند که عبارتند از:

$$\gamma = 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5$$

3. پارامترها و روندهای محاسباتی

3.1: تعریف سطح عملکردی و مقادیر حدی متناظر

جابجایی افقی یا رانش طبقه پارامترهای مشترک مورد استفاده در سطوح عملکردی در طراحی ساختاری مبتنی بر عملکرد و ارزیابی می‌باشند. با این حال، آسیب ساختاری تحت یک زلزله شکل‌های مختلفی را به خود می‌گیرد و میزان آسیب سازه ممکن است به طور کامل با حداکثر تغییرشکل یا رانش طبقه تنها بازتاب نشود. به همین دلیل است که می‌بایست شاخص‌های منطقی به منظور ارزیابی میزان آسیب سازه بکار برده شود. حداکثر تغییرشکل یک سازه و انرژی پسماند آن فاکتورهای اصلی برای تعیین کمی آسیب سازه می‌باشند. براساس مدل مشهور ParkAng [22]، در این جا مدل تصحیح‌شده پیشنهادی توسط Kunnath et al. [23] به منظور ارزیابی آسیب سازه‌ها بکار برده می‌شود، که چنین می‌باشد:

$$D = \frac{\mu_m - 1}{\mu_u - 1} + \beta \frac{E_h}{F_y \mu_u x_y} \quad (4)$$

که در آن D شاخص آسیب، μ_m ضریب شکل‌پذیری هنگامی که سازه تحت حرکت زمین زلزله به حداکثر تغییرشکل الاستیک - پلاستیک می‌رسد، μ_u ضریب شکل‌پذیری وقتی سازه تحت بارگذاری یکنواخت شکست می‌خورد، F_y مقاومت تسلیم، x_y جابجایی تسلیم، E_h اتلاف انرژی پسماند انباشته تحت حرکت زمین زلزله، و β یک پارامتر ثابت می‌باشد که نسبت آسیب تجمعی حاصل از انرژی پسماند را نشان می‌دهد. [24] Negro مقادیر β معمول مرتبط با رفتار کلی سازه‌ها را از طریق ارزیابی و برآورد تجربی، ارزیابی کرد. برای سازه با شکل‌پذیری بالا، β باید مقادیر کم را به خود بگیرد، و برعکس. در این مطالعه، β به منظور نشان دادن طراحی شکل‌پذیر پایه برابر با 0.1 در نظر گرفته شده‌است.

برای ارتباط سطوح عملکردی با شاخص آسیب حاصل از مدل Park-Ang پیشنهادی، ابتدا می‌بایست سطوح عملکردی و محدوده شاخص آسیب تعیین شوند. چهار سطح عملکردی، به نام عملیاتی، اشغال فوری، ایمنی زندگی، و جلوگیری از فروریختگی، توسط [25] FEMA-356 به منظور توصیف حالات آسیب ساختاری پیشنهاد شده‌اند. مجموعه بزرگی از آسیب ساختاری لرزه‌ای مشاهده شده‌است، که به منظور کالیبره کردن شاخص آسیب در معادله (4) بکار می‌روند؛ این امر نشان می‌دهد که $D=(0.2-0.5)$ مرز آسیب قابل تعمیر و آسیب غیر قابل تعمیر است در حالی که مقدار D نزدیک به صفر الاستیسیته بدون آسیب را نشان می‌دهد. بنابراین، یک سطح عملکردی اضافی به نام کنترل آسیب بین اشغال فوری و ایمنی زندگی [26] پیشنهاد شد. محدوده شاخص‌های آسیب برای هر سطح عملکردی در جدول 2 لیست شده‌است.

جدول 2: محدوده شاخص آسیب برای سطوح عملکردی مختلف

سطح عملکردی	درجه آسیب	محدوده شاخص آسیب
عملیاتی	قابل چشم‌پوشی	$0 < D < 0.1$
اشغال فوری	جزئی	$0.1 < D < 0.2$
کنترل آسیب	متوسط	$0.2 < D < 0.5$
ایمنی زندگی	شدید	$0.5 < D < 0.8$
جلوگیری از ریزش	نزدیک به سقوط	$0.8 < D < 1.0$
تلفات ساختمان	سقوط	$1.0 < D$

3.2: روش تحلیل و پارامترهای سازه‌ای

معادله تعادل دینامیک سیستم SDOF غیرخطی که در معرض زلزله می‌باشد، با رابطه زیر داده می‌شود:

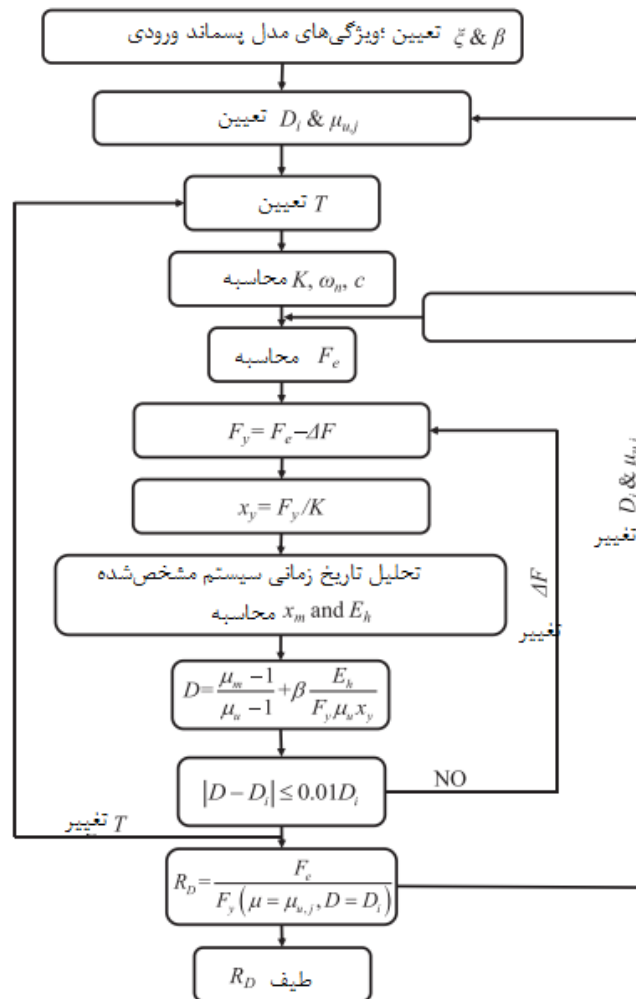
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_s = -m\ddot{x}_g \quad (5)$$

که در آن c ضریب میرایی، f_s نیروی بازگرداننده‌ی سازه، x جابجایی نسبی، و x_g جابجایی زمین می‌باشد.

برطبق تعریف ضریب کاهش مقاومت در معادله (2)، محاسبه طیف R_D توسط معادله (4) وقتی دوره، نسبت میرایی

و مدل نیروی بازگرداننده سیستم SDOF مشخص می‌باشد، امکان‌پذیر است. شکل 1 فلوچارت (نمودار گردشی)

محاسباتی را برای تعیین طیف‌های R_D نشان می‌دهد. برای هر گونه ورودی حرکت زمین، R_D با کاهش تدریجی مقاومت ΔF از مقاومت الاستیک متناظر F_e تحت شکل‌پذیری معین تا زمانی که D مشخص شده در محدود تلورانس 1% حاصل شود، محاسبه می‌شود. سپس، مجموعه‌ای از ضرایب کاهش مقاومت R_D برای سیستم SDOF با ضرایب شکل‌پذیری μ_i و شاخص‌های آسیب D_j مختلف را می‌توان با محاسبه دوره‌های مختلف و حرکات زمین، که طیف‌های R_D را تشکیل می‌دهند، بدست آورد.



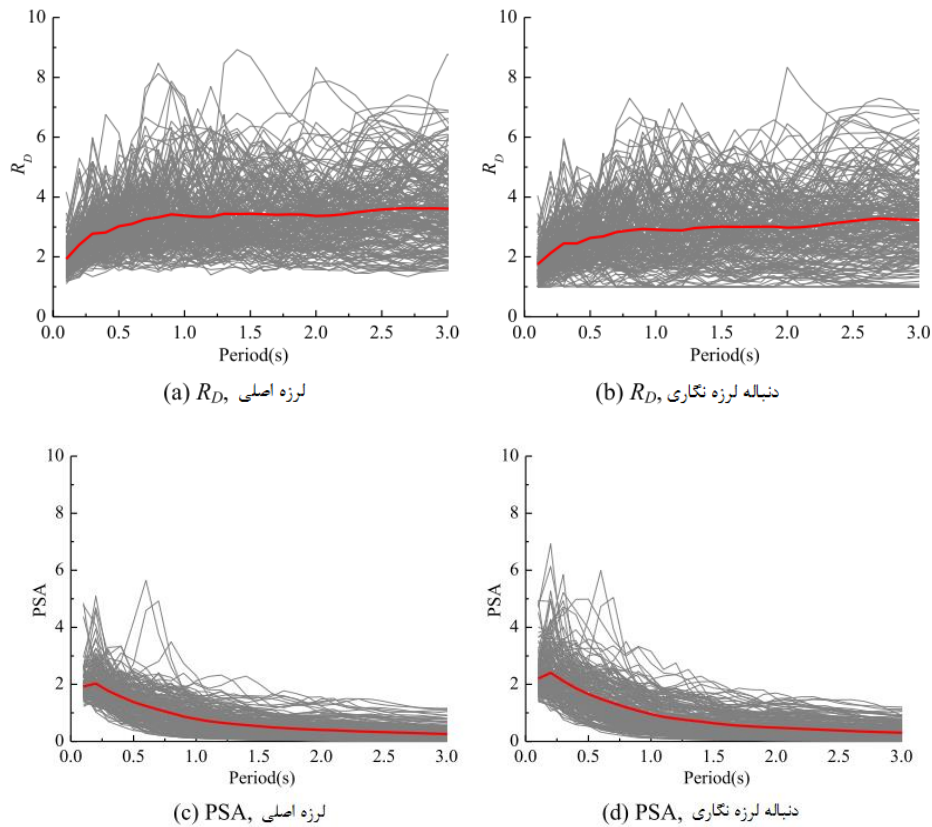
شکل 1: نمودار گردش برای محاسبه ضریب R_D

برای مطالعه جامع ضریب R_D تحت زلزله تنها و زلزله‌های توالی نوع، مجموعه‌ای از سیستم‌های SDOF در محاسبه بکار گرفته شده‌اند. مدل پسماند مورد استفاده در این مطالعه، مدل پلاستیک کاملاً الاستیک، به دلیل رابطه سازنده ساده آن می‌باشد. دوره طبیعی سیستم SDOF از 0.1 تا 0.3 s با بازه 0.1 s متغیر می‌باشد و نسبت میرایی آن نیز

5% فرض می‌شود. پنج ضریب شکل‌پذیری $\mu = 2, 4, 6, 8$ به منظور در نظر گرفتن عملکرد شکل‌پذیری مختلف، و پنج شاخص آسیب $D=0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0$ نیز برای لحاظ سطح آسیب مختلف انتخاب شده‌اند.

4. میانگین ضرایب کاهش مقاومت

با استفاده از روند توصیف‌شده، در مجموع 513000 ضریب کاهش مقاومت، متناظر با سیستم‌های SDOF با 30 دوره تحت پنج سطح مختلف از شکل‌پذیری و پنج سطح مختلف از شاخص آسیب محاسبه شد، سیستم در معرض 342 حرکت زمین لرزه اصلی و 342 حرکت زمین پس لرزه قرار گرفته‌شد. نتایج به طور آماری بر طبق دوره، شکل-پذیری، شاخص آسیب سیستم و شرایط مکانی که در آن رکوردها ثبت شدند، تجزیه و تحلیل شد. برای مثال، شکل 2 به ترتیب منحنی‌های R_D محاسبه شده و منحنی‌های شتاب‌های شبه فضایی (PSA) را برای $\mu = 6$ ، $D=10$ و کلاس مکان C برای لرزه اصلی و دنباله لرزه نگار را نشان می‌دهد. طیف میانگین آن‌ها نیز در خطوط برجسته رسم شده‌است. به دلیل محدودیت فضایی، تنها نتایج اصلی در بخش‌های زیر نشان داده شده‌است، با این حال دیگر موارد نتایج مشابهی را دارند که نشان داده نشده‌اند.



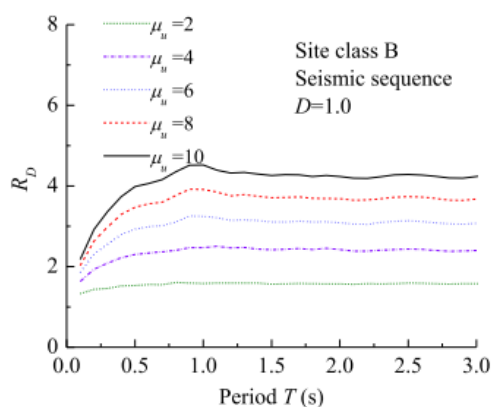
شکل 2: شبه شتاب‌های فضایی (PSA) و ضریب R_D (کلاس مکان C، $D=0.1$ و $\mu_u = 6$) R_D ، لرزه اصلی، (a) R_D ، لرزه اصلی، (b) R_D ، دنباله لرزه نگاری، (c) PSA، لرزه اصلی، (d) PSA، دنباله لرزه نگاری.

طیف میانگین R_D سیستم‌های SDOF با کلاس‌های شکل‌پذیری مختلف و شاخص‌های آسیب برای دو کلاس که در معرض حرکات زمین لرزه اصلی و حرکات زمین لرزه اصلی - پس لرزه با $\psi = 0.5$ می‌باشند، در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، ضریب R_D صرف نظر از شکل‌پذیری، شاخص آسیب، شرایط مکان و نوع حرکات زمین روند مشابهی را نشان می‌دهند. ضریب R_D با افزایش دوره سیستم افزایش می‌یابد، تغییرات در ناحیه با دوره کوتاه (0–1.0 s) بسیار چشمگیر می‌باشد. در ناحیه با دوره بلند (1.0–3.0 s)، ضریب R_D تقریباً مستقل از دوره است و براساس شکل‌پذیری و شاخص آسیب نزدیک به یک مقدار ثابت می‌باشد.

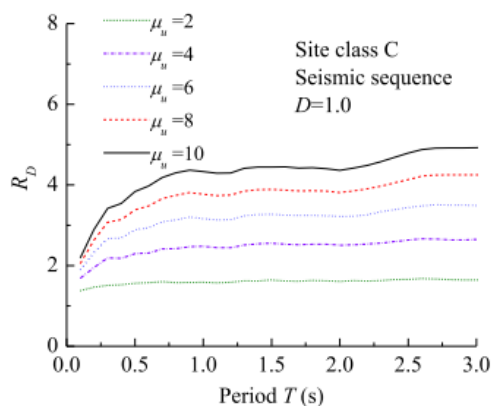
برای یک شاخص آسیب معین، میانگین R_D با افزایش ضریب شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. می‌توان گفت که، تقاضای مقاومت سازه‌ها با شکل‌پذیری بالا کمتر از مورد سازه‌های با شکل‌پذیری ضعیف می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که سازه‌های با شکل‌پذیری کافی قادر به تحمل درجه مشخصی از آسیب ناشی از زلزله می‌باشند. شکل‌پذیری اثر

چشمگیری بر R_D دارد. برای مثال، متوسط اختلاف بین میانگین R_D با $\mu = 2$ و $\mu = 4$ برای سازه‌های با $D=0.1$ در کلاس مکان B که در معرض حرکات زمین توالی نوع می‌باشد، حدودا 34٪ می‌باشد.

برای یک ضریب شکل‌پذیری معین، میانگین R_D با افزایش شاخص آسیب هدف افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که برای دو سازه که در معرض حرکات زمین یکسانی هستند، آسیب سازه با مقاومت بالا کمتر از آسیب سازه با مقاومت کمتر می‌باشد. اثر شاخص آسیب بسیار قابل توجه است. برای مثال، متوسط اختلاف بین میانگین R_D با $D=0.2$ و $D=0.5$ برای سازه با $\mu = 6$ در کلاس B که در معرض حرکات زمین توالی نوع می‌باشد، تقریبا 31٪ می‌باشد.



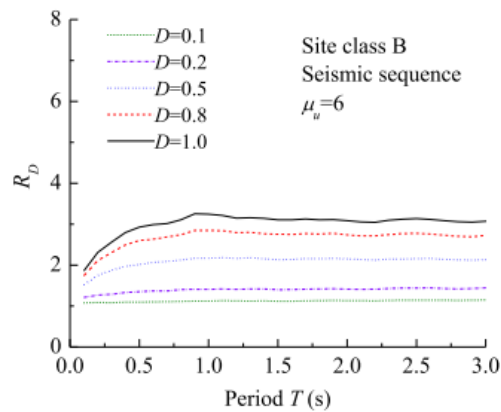
(a) R_D factor on site class B



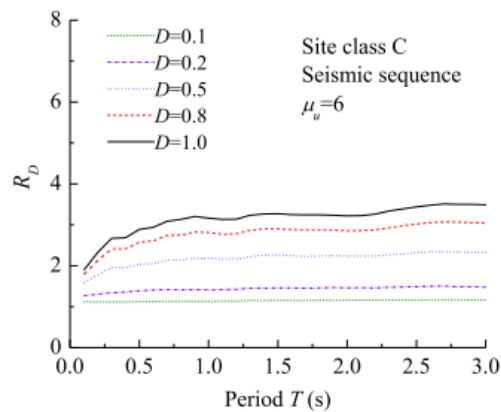
(b) R_D factor on site class C

شکل 3: اثر شکل‌پذیری بر ضریب R_D ، $\psi = 0.5$ ، $D=1.0$ ، ضریب R_D در کلاس مکان B (b) ضریب R_D در

کلاس مکان C



(a) R_D factor on site class B



(b) R_D factor on site class C

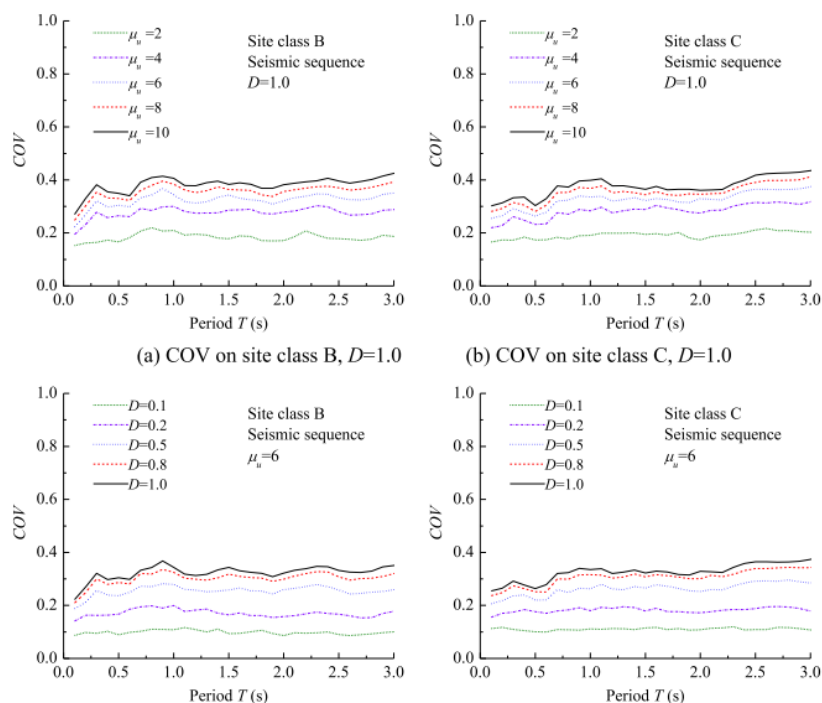
شکل 4: اثر شاخص آسیب بر روی ضریب R_D ، $\mu_u = 6$ ، $\gamma = 0.5$ (a) ضریب R_D در کلاس مکان B، (b)

ضریب R_D در کلاس مکان C

به منظور انعکاس درجه پراکندگی طیف‌های ضریب کاهش مقاومت، ضرایب تغییرات (COV) طیف‌های میانگین R_D

متناظر محاسبه شده‌اند، تغییرات ضرایب طیف‌های R_D با $\gamma = 0.5$ که در معرض حرکات زمین می‌باشند، در شکل

5 نشان داده شده‌است. تغییرات ضرایب به عنوان نسبت انحراف استاندارد به میانگین تعریف می‌شود.



شکل 5: تغییرات ضرایب (COV) میانگین ضریب R_D , $\psi = 0.5$, COV در کلاس مکان B, $D=0.1$.

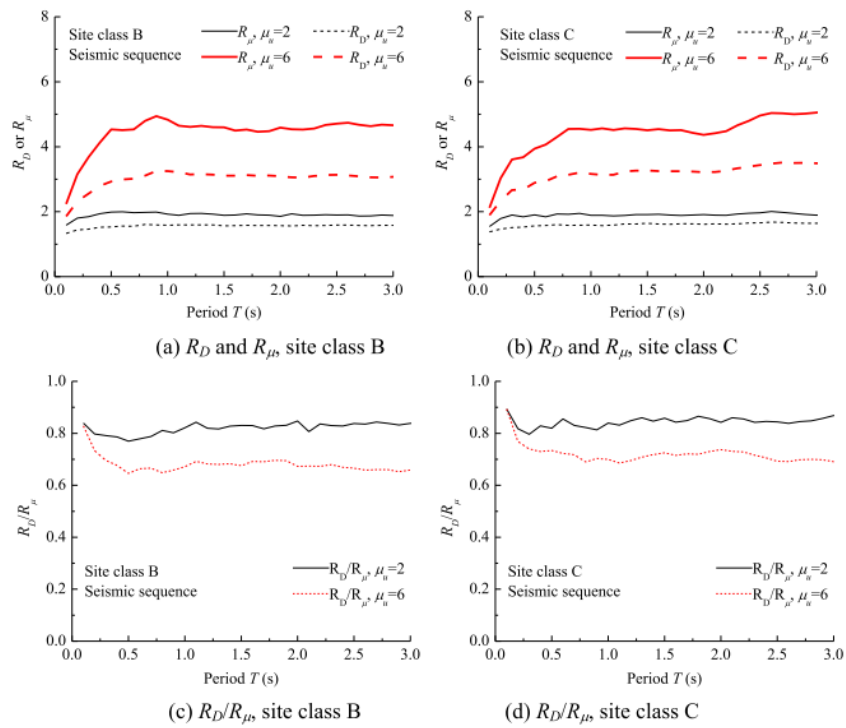
COV در کلاس مکان C, $D=0.1$, COV در کلاس مکان B, $\mu_u = 6$, COV در کلاس مکان C, $\mu_u =$

6

تغییرات ضرایب مستقل از دوره می‌باشند و در کلاس‌های مکان مختلف یک روند تقریبی را نشان می‌دهند. با این حال، برای یک دوره مشخص، تغییر COVs با تغییر شاخص آسیب و ضریب شکل‌پذیری به سرعت تغییر می‌کند. حداکثر ضریب تغییرات از میانگین ضریب کاهش مقاومت محاسبه‌شده تحت هر شرایط مکانی از 45٪ فراتر نمی‌رود، که این امر تصادفی بودن و مجزای بودن حرکت زمین در یک حد معین را نشان می‌دهد.

به منظور مطالعه اثر آسیب تجمعی بر ضریب کاهش مقاومت، ارزیابی پارامترهای آسیب سازه‌ای به ترتیب با استفاده از جابجایی و شاخص آسیب Park-Ang تصحیح‌شده مقایسه شده‌اند و ضریب مقاومت R_μ مبتنی بر اختلاف شکل‌پذیری و ضریب مقاومت R_D مبتنی بر آسیب تحت حرکات زمین توالی نوع یکسان مقایسه شده‌اند که در شکل 6 نشان داده شده‌است. وقتی شاخص آسیب و ضریب شکل‌پذیری یکسان هستند، تغییر R_μ و R_D با دوره سازه عمدتاً یکسان می‌باشد. به دلیل مشارکت آسیب به لحاظ انرژی، تقاضای جابجایی R_D کمتر از مقدار R_μ می‌باشد، بنابراین

مقدار R_D همواره کمتر از مقدار R_μ می‌باشد. تحت حرکات زمین توالی نوع، نسبت بین R_D و R_μ برای ضریب شکل‌پذیری پایین ($\mu = 2$) برابر با 0.8–0.9، و برای ضریب شکل‌پذیری زیاد ($\mu = 6$) برابر با 0.6–0.9 می‌باشد.



شکل 6: مقایسه بین طیف‌های R_D (مبتنی بر آسیب، $D=0.1$) و R_μ (مبتنی بر شکل‌پذیری)، $\psi = 0.5$ ، R_D (a) و R_μ در کلاس مکان B، (b) و R_D در کلاس مکان C (c) و R_D/R_μ کلاس مکان B (d) و R_D/R_μ کلاس مکان C

در ناحیه با دوره کوتاه، میانگین R_D/R_μ برای حرکات زمین توالی نوع با $\psi = 0.5$ به طور چشمگیری با افزایش دوره، کاهش می‌یابد، که این امر نشان می‌دهد که اثر انرژی محاسبه‌شده در شاخص آسیب به سرعت تغییر می‌کند. چون مقاومت تسلیم سیستم هنگامی که دوره نزدیک به صفر است، بزرگ می‌باشد، اتلاف انرژی پسماند نسبتاً کوچک خواهد بود، بنابراین اختلاف R_D و R_μ کم می‌باشد. وقتی دوره افزایش می‌یابد، مقاومت تسلیم سیستم کاهش و اتلاف انرژی پسماند افزایش می‌یابد، بنابراین تغییر R_D بسیار بیشتر از R_μ است و R_D/R_μ به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

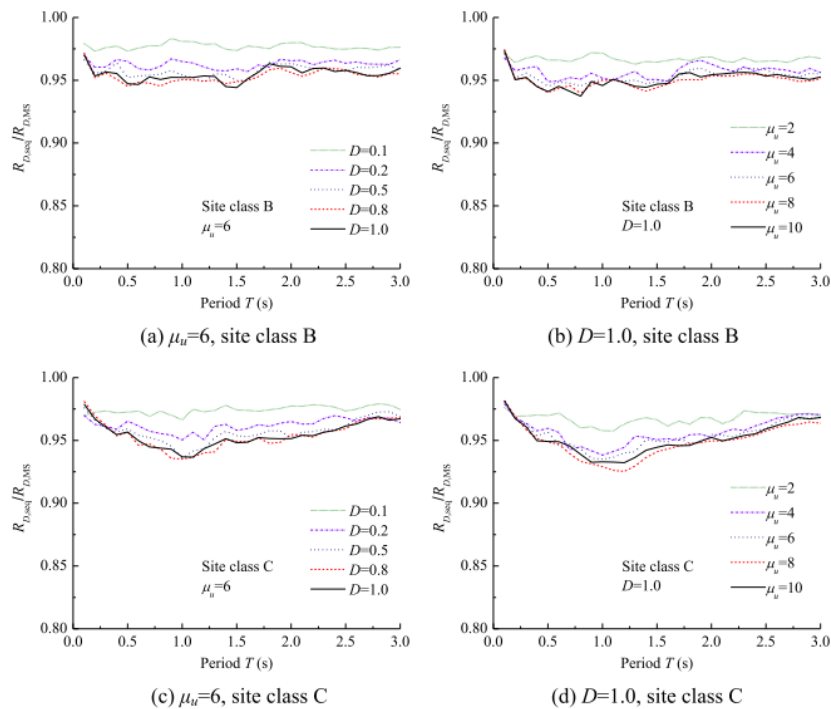
در ناحیه با دوره بلند، میانگین R_D/R_μ برای حرکات زمین توالی نوع با $\psi = 0.5$ ، با افزایش دوره قدری کاهش می‌یابد. مقاومت تسلیم و جابجایی تسلیم نیز قدری کاهش می‌یابند و انرژی لحاظ شده در شاخص آسیب نیز با افزایش دوره، اندکی افزایش می‌یابند.

5. اثر پارامترهای مختلف

5.1 اثر پس‌لرزه بر طیف‌های R_D

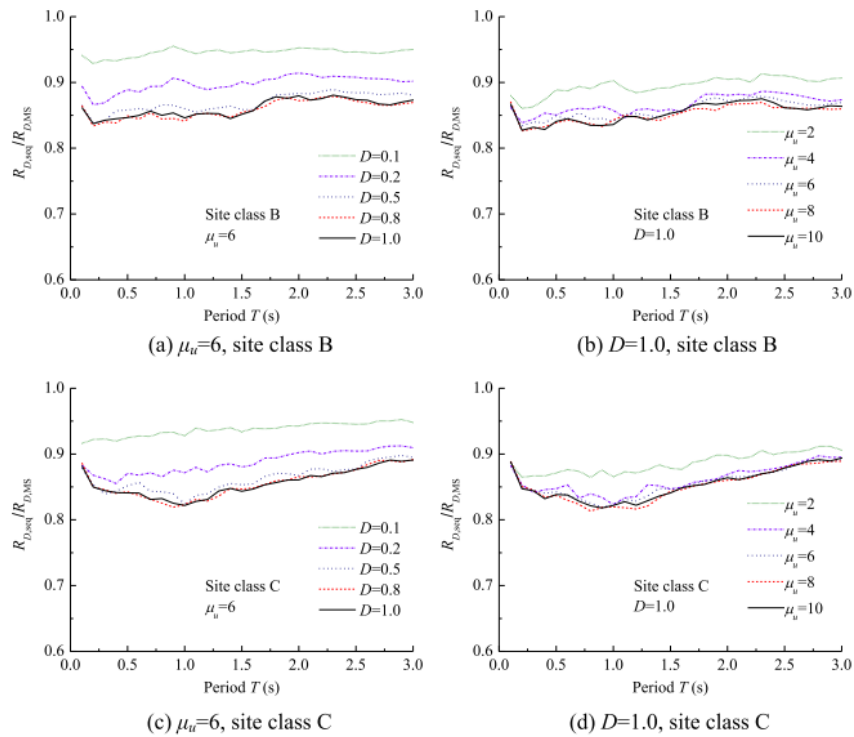
به منظور ارزیابی اثر پس‌لرزه بر ضرایب R_D ، مقدار $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ ، که نسبت بین R_D از حرکات زمین توالی نوع (با $R_{D,seq}$ نشان داده شده‌است) و R_D متناظر از حرکات زمین لرزه اصلی ($R_{D,ms}$) را نشان می‌دهد، بکار برده می‌شود. میانگین R_D برای سازه‌های با ضرایب شکل‌پذیری مختلف و شاخص‌های آسیب که در معرض شدت متفاوت از پس‌لرزه می‌باشند، محاسبه می‌شود؛ بخشی از نتایج در شکل‌های 7-9 نشان داده شده‌است.

شکل 7 میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ را برای حرکات زمین توالی نوع با $\psi = 0.5$ و $\mu = 6$ (شکل 7a و 7c)، و $\psi = 0.5$ و $D=0.1$ (شکل‌های 7b و 7d) نشان می‌دهد. میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ در کلاس مکان C در محدوده [0.94, 0.98] و یا محدوده [0.93, 0.99] می‌باشد. اختلاف بین $R_{D,seq}$ و $R_{D,ms}$ کمتر از 10٪ می‌باشد، بنابراین حرکات زمین پس‌لرزه با $\psi = 0.5$ را می‌توان در ارزیابی ضریب R_D نادیده گرفت.



شکل 7: میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ با $\psi = 0.5$ (a) $\mu_u = 6$ ، کلاس مکان B، (b) $D=0.1$ کلاس مکان B، (c) $\mu_u = 6$ ، کلاس مکان C، (d) $D=0.1$ کلاس مکان C.

وقتی ψ به 1.0 افزایش می‌یابد، میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ برای ضریب شکل‌پذیری همواره برابر با 6 و برای شاخص آسیب همواره برابر با 0.1 می‌باشد که در شکل 8 نشان داده شده‌است. میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ در کلاس مکان B در محدوده $[0.82, 0.96]$ است، در حالی که میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ برای کلاس مکان C در محدوده $[0.81, 0.96]$ می‌باشد. حرکات زمین پس‌لرزه با $\psi = 1.0$ ضریب R_D را به سطح کمتر از 20٪ کاهش می‌دهد. ضریب R_D سیستم که در معرض حرکات زمین توالی نوع می‌باشد، همواره کمتر از حرکات زمین توالی نوع می‌باشد، این امر نشان می‌دهد که تقاضای مقاومت حرکات زمین توالی نوع بزرگتر از تقاضای مقاومت حرکات زمین لرزه اصلی می‌باشد. اثر پس‌لرزه در این مورد بسیار مهم است.



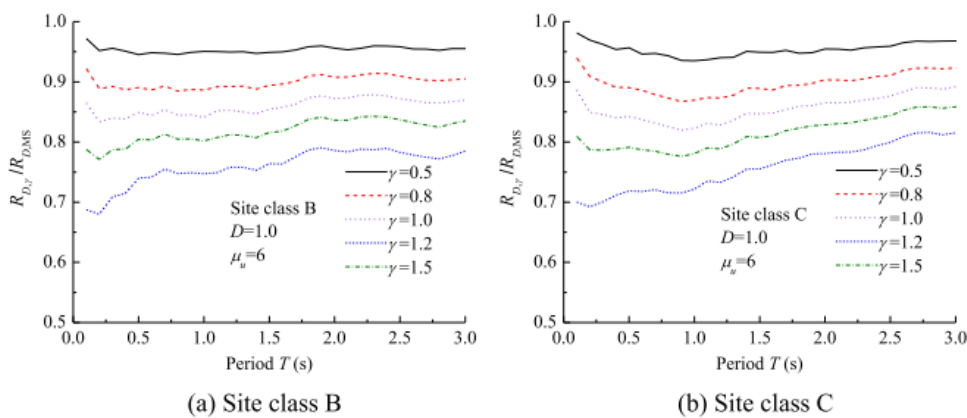
شکل 8: میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ با $\gamma = 0.1$ (a) $\mu_u = 6$ ، کلاس مکان B، (b) $D=0.1$ کلاس مکان B، (c)

(d) $D=0.1$ کلاس مکان C، $\mu_u = 6$

برای شاخص آسیب یکسان، میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ به ضریب شکل پذیری غیرحساس می باشد. این امر نشان می دهد که حرکت زمین پس لرزه برای ضرایب شکل پذیری مختلف، اثرات مشابهی را بر روی R_D دارد. برای ضریب شکل پذیری یکسان، مقادیر $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ برای شاخص های آسیب مختلف به جز برای $D=0.1$ اختلاف اندکی را دارند. مقدار میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ برای $D=1$ کاملاً بزرگتر از دیگر مقادیر D می باشد. این امر به این دلیل است که سیستم ها وقتی $D=0.1$ در ناحیه الاستیک باقی می ماند و آسیب تجمعی آن قدر کوچک است که می توان آن را نادیده گرفت. در این مورد، R_D عمدتاً وابسته به جابجایی بیشینه تاریخی می باشد، بنابراین اختلاف بین $R_{D,seq}$ و $R_{D,ms}$ بسیار کم می باشد که در شکل 8a و 8c نشان داده شده است.

به منظور مطالعه اثر شدت حرکات زمین توالی نوع، میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ با مقادیر مختلف از γ تجزیه و بررسی شدند. میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ سیستم های SDOF با $\mu = 6$ و $D=0.1$ که در معرض حرکات زمین توالی نوع می باشند، در شکل 9 نشان داده شده است. این شکل به وضوح نشان می دهد که میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ با افزایش

γ کاهش می‌یابد. اثر حرکت زمین پس‌لرزه بر سیستم‌ها در ناحیه با دوره کوتاه بسیار بیشتر از مورد سیستم‌های در ناحیه با دوره بلند می‌باشد. با گرفتن میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ از حرکات زمین توالی نوع با $\gamma = 1.5$ همانند مثال، مقادیر میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ در ناحیه با دوره کوتاه برابر با 0.7 است، در حالی که مقادیر $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ در ناحیه با دوره متوسط - بلند بیش از 0.8 می‌باشد؛ بنابراین می‌توان گفت که ضریب R_D در ناحیه با دوره کوتاه بیش از 30٪ و در ناحیه با دوره متوسط - بلند وقتی سیستم‌ها در معرض حرکات زمین پس‌لرزه با $\gamma = 1.5$ می‌باشند، کمتر از 20٪ می‌باشد.



شکل 9: میانگین $R_{D,seq}/R_{D,ms}$ با γ مختلف، $\mu_w=6$ ، $D=0.1$ ، (a) کلاس مکان B، (b) کلاس مکان C

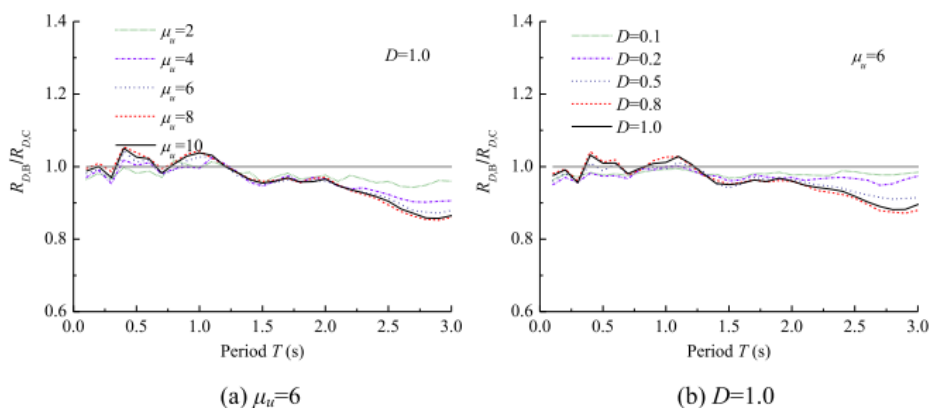
از مباحثات بالا، اثر پس‌لرزه بر ضریب R_D مربوط به دوره سیستم، شاخص آسیب و شدت پس‌لرزه می‌باشد. علاوه بر آن، آسیب‌سازهایی که در معرض حرکات زمین توالی نوع هستند، به دلیل آسیب تجمعی ناشی از پس‌لرزه شدیدتر از مورد سازه‌هایی است که در معرض حرکات زمین لرزه اصلی می‌باشند. بنابراین، تقاضای مقاومت تسلیم حرکات زمین توالی نوع بزرگتر می‌باشد و هر چقدر شدت پس‌لرزه بیشتر باشد، تقاضای مقاومت تسلیم بزرگتری مورد نیاز خواهد بود.

5.2 اثر شرایط مکان بر طیف‌های R_D

اثر شرایط مکان بر طیف‌های R_D را می‌توان در شکل‌های 3 و 4 مشاهده کرد، که در آن میانگین طیف‌های R_D برای سیستم در معرض حرکات زمین توالی نوع ثبت‌شده در کلاس مکان B و کلاس مکان C رسم شده‌است. همان‌طور که

در این شکل‌ها نشان داده شده‌است، طیف‌های R_D در دو شرایط مکان گرایش مشابهی را در تمامی محدوده‌ها دارا می‌باشند.

برای راحتی مقایسه، نسبت بین طیف‌های R_D برای کلاس مکان B و طیف‌های R_D برای کلاس مکان C محاسبه شدند و نتایج در شکل 10 رسم شده‌اند. نشان داده می‌شود که کلاس مکان B مقادیر R_D کوچکتری را در دوره کوتاه (< 1.0 s) نشان می‌دهد، درحالی‌که در دوره طولانی‌تر (1.0–3.0 s) مقادیر R_D بالاتری را نشان می‌دهد. این پدیده بیان می‌کند که چشم‌پوشی اثر شرایط مکان منجر به فرارآورد خاص از تقاضای مقاومت غیرالاستیک در دوره کوتاه (< 1.0 s) می‌شود. طیف‌های R_D در کلاس مکان C یک روند مخالف را نشان می‌دهند. با این حال، خطاها برای سطوح شکل‌پذیری مختلف و شاخص‌های آسیب در محدوده 10٪ می‌باشند. بنابراین، اثر شرایط مکان در طیف‌های R_D را می‌توان چشم‌پوشی کرد. مقدار R_D تنها یک ضریب کاهش از طیف الاستیک به طیف غیرالاستیک می‌باشد. علاوه بر آن، اثر شرایط مکان بر طیف‌های R_D اثر آن بر طیف‌های الاستیک و غیرالاستیک را بازتاب نمی‌کند.

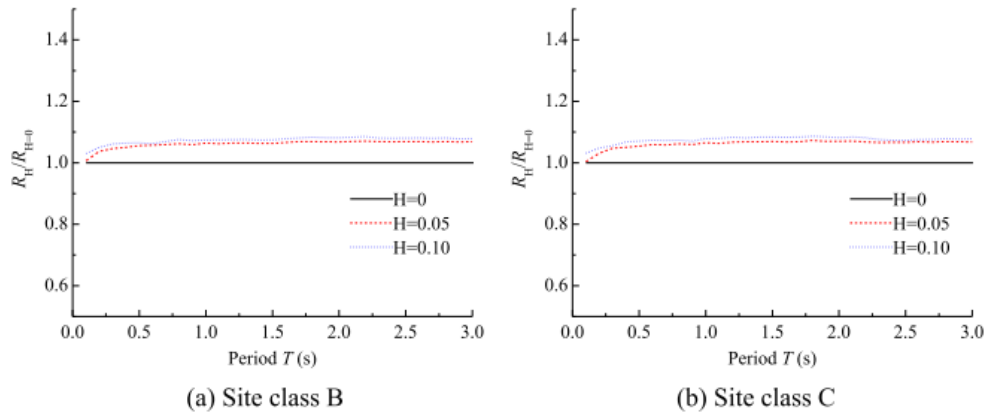


شکل 10: اثر کلاس مکان بر روی ضریب R_D ، $\psi = 0.5$ (a) $\mu_u = 6$ (b) $D = 0.1$

5.3 اثر سختی پس از تسلیم بر طیف‌های R_D

به منظور مطالعه نسبت اثر سختی پس از تسلیم H بر ضریب R_D ، دو سطح (5٪ و 10٪) از نسبت سختی پس از تسلیم برای مقایسه اثر انتخاب شده‌اند. برای راحتی مقایسه، نسبت بین طیف‌های R_D از نسبت سختی پس از تسلیم مختلف و طیف‌های R_D از پلاستیک کاملاً الاستیک محاسبه شده‌اند و نتایج در شکل 11 لیست شده‌اند. ضریب R_D

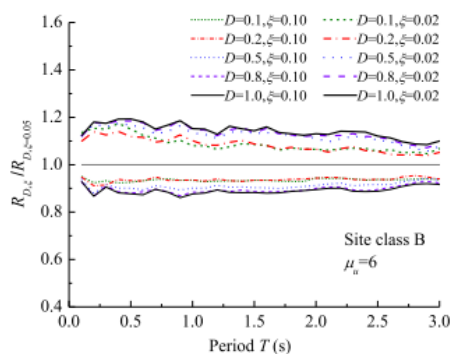
از پلاستیک کاملاً الاستیک 0.9–1.0 برابر ضریب R_D از نسبت سختی پس از تسلیم 5٪ می‌باشد، در حالی که ضریب R_D از نسبت سختی پس از تسلیم 5٪، 0.95–1.0 برابر ضریب R_D نسبت سختی پس از تسلیم 10٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش این نسبت منجر به افزایش جزئی ضریب R_D می‌شود، اما این یک ضریب مؤثر مهم نیست.



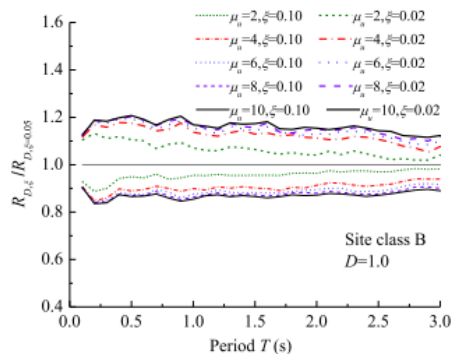
شکل 11: اثر نسبت سختی پس از تسلیم بر ضریب R_D ، $\gamma = 0.5$ ، $\mu_u = 6$ ، $D=0.1$. (a) کلاس مکان B، (b) کلاس مکان C

5.4 اثر میرایی بر طیف‌های R_D

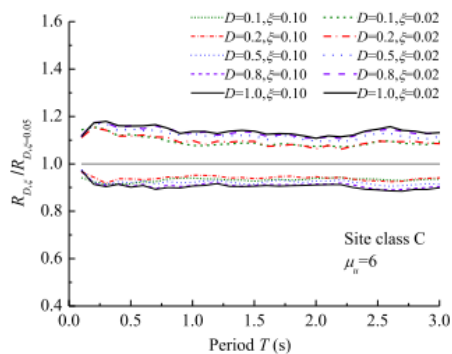
به منظور مطالعه اثر میرایی، مقدار R_D سیستم‌های با نسبت میرایی $\xi = 0.02$ و $\xi = 0.10$ محاسبه شده‌است. مقدار R_D سازه‌های با نسبت میرایی $\xi = 0.02$ و $\xi = 0.10$ نیز با مقدار R_D سازه‌های با $\xi = 0.05$ برای حرکات زمین توالی نوع با $\gamma = 0.5$ نرمال‌سازی شده‌است که در شکل 12 نشان داده شده‌است.



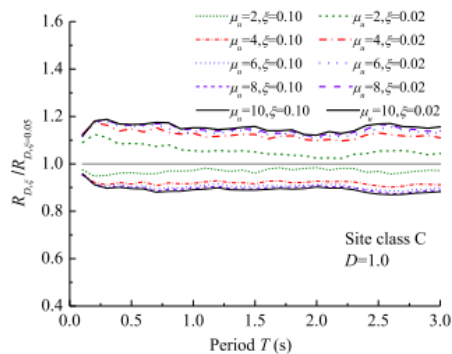
(a) $\mu_u=6$, site class B



(b) $D=1.0$, site class B



(c) $\mu_u=6$, site class C



(d) $D=1.0$, site class C

شکل 12: میانگین نرمال R_D از تمامی حرکات زمین توالی نوع با $\gamma = 0.5$ (a) $\mu_u = 6$ ، کلاس مکان B، (b)

(c) کلاس مکان B، $D=0.1$ ، کلاس مکان C، (d) $D=0.1$ ، کلاس مکان C

آشکار است که کاهش نسبت میرایی همواره منجر به افزایش ضریب R_D با میزان‌های مختلف خواهد شد. برای سازه‌های الاستیک، انرژی ورودی با میرایی سازه اتلاف می‌شود؛ برای سازه‌های غیرالاستیک، انرژی ورودی با میرایی سازه و انرژی پسماند تلف می‌شود. میرایی تاثیر چشمگیری بر سازه‌های الاستیک و تاثیر اندک بر سازه‌های غیرالاستیک دارد. بنابراین، ضریب R_D با افزایش میرایی سازه کاهش می‌یابد.

با در نظر گرفتن R_D با نسبت میرایی $\xi = 0.05$ به عنوان معیار، اثر میرایی برای $\xi = 0.10$ و $\xi = 0.02$ به ترتیب در محدوده 20٪ و 15٪ می‌باشد. با کاهش شاخص آسیب، R_D متناظر با $\xi = 0.02$ یا $\xi = 0.10$ به مقدار R_D با $\xi = 0.05$ می‌رسد.

6. طیف‌های R_D پیشنهادی و مقایسه با طیف‌های R_μ & R_D موجود

6.1 روابط تجربی پیشنهادی برای طیف‌های R_D

برای اهداف عملی، منحنی‌های میانگین کلی R_D به دلیل استفاده از یک بیان واحد و تشابه شکل میانگین R_D برای گروه‌های مختلف از پارامترها بسیار مطلوب می‌باشند. تصحیح ضرایب را می‌توان به منظور ترکیب برای شرایط خاص بکاربرد. براساس مشاهدات بالا، سه ضریب، که اثر چشمگیری بر طیف‌های R_D دارند، به منظور اجرای تحلیل رگرسیون در نظر گرفته شده‌اند. سپس، بیان ساده‌شده از R_D این است که این مقدار تابعی از دوره T ، شاخص آسیب D و شکل‌پذیری μ_u می‌باشد، یعنی:

$$R_D = R_D(T, D, \mu_u) \quad (6)$$

علاوه بر آن، بیان ساده‌شده R_D می‌بایست محدودیت‌های مرزی زیر را نیز برآورده کند:

(1) وقتی دوره سازه نزدیک به صفر است، جابجایی تسلیم متناظر تمایل به صفر شدن دارد و کاهش اندک مقاومت الاستیک منجر به شکل‌پذیری بسیار زیاد می‌شود. بنابراین سازه‌های بسیار سخت می‌بایست به عنوان سیستم الاستیک طراحی شوند:

$$R_D(T \rightarrow 0, D, \mu_u) = 1 \quad (7)$$

(2) برای یک سازه، شاخص آسیب $D=0$ به این معناست که سازه‌ای که در معرض حرکات زمین است، هیچ آسیبی را دریافت نمی‌کند، بنابراین سازه بدون کاهش مقاومت در مرحله الاستیک باقی خواهد ماند:

$$R_D(T, D = 0, \mu_u) = 1 \quad (8)$$

(3) برای یک سازه، شکل‌پذیری $\mu_u = 1$ به این معناست که سازه بدون کاهش مقاومت در مرحله الاستیک باقی خواهد ماند:

$$R_D(T, D, \mu_u = 1) = 1 \quad (9)$$

(4) در محدوده دوره‌های طولانی، R_D به یک مقدار ثابت نزدیک خواهد شد، و با \tilde{R}_D نشان داده می‌شود، که تابعی از شاخص آسیب و شکل‌پذیری می‌باشد:

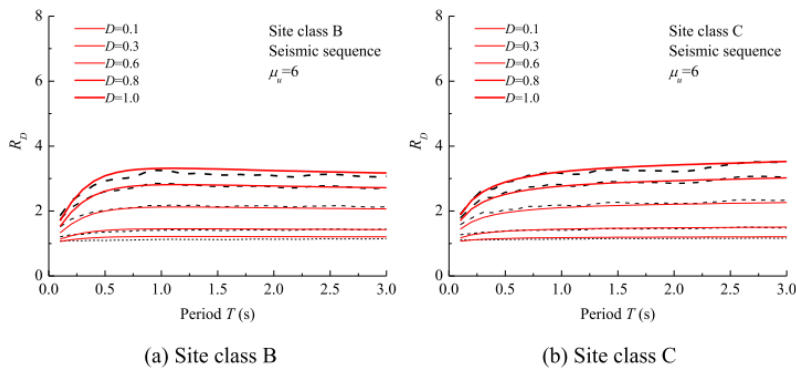
$$R_D(T \rightarrow \infty, D, \mu_u) \rightarrow \tilde{R}_D \quad (10)$$

بر اساس فرضیات بالا، با تحلیل رگرسیون معادله زیر برای طیف‌های میانگین R_D بدست می‌آید:

$$R_D = 1 + \frac{D(\mu - 1)(a_0 T + a_1 T^2)}{(\mu + a_2)(1 + a_3 T + a_4 T^2)} \cdot \frac{1}{0.87 + 0.08e^T} \quad (11)$$

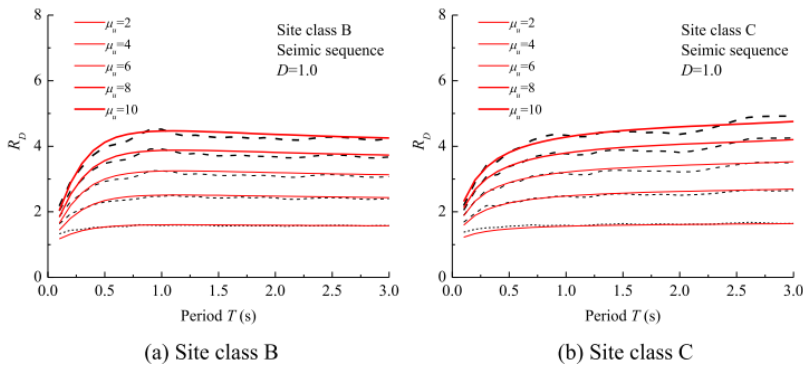
که در آن a_0, a_1, a_2, a_3 و a_4 پارامترهای رگرسیون وابسته به کلاس مکان و سختی پس از تسلیم می‌باشند، مقادیر پارامترها در جدول 3 لیست شده‌اند.

طیف‌های R_D پیش بینی شده با استفاده از معادله (11) با طیف‌های میانگین واقعی حاصل از نتایج آماری و حرکات زمین ترتیبی با $\gamma = 0.5$ مقایسه شدند که در شکل‌های 13 و 14 نشان داده شده‌است. برای تمامی شاخص‌های آسیب و کلاس‌های شکل‌پذیری تطبیق مناسبی مشاهده شد.



شکل 13: مقایسه طیف‌های R_D محاسبه شده با طیف‌های اصلی ($\mu_u = 6, \gamma = 0.5$). (a) کلاس مکان B، (b)

کلاس مکان C



شکل 14: مقایسه طیف‌های R_D محاسبه شده با طیف‌های اصلی ($\gamma = 0.5, D=0.1$) (a) کلاس مکان B، (b)

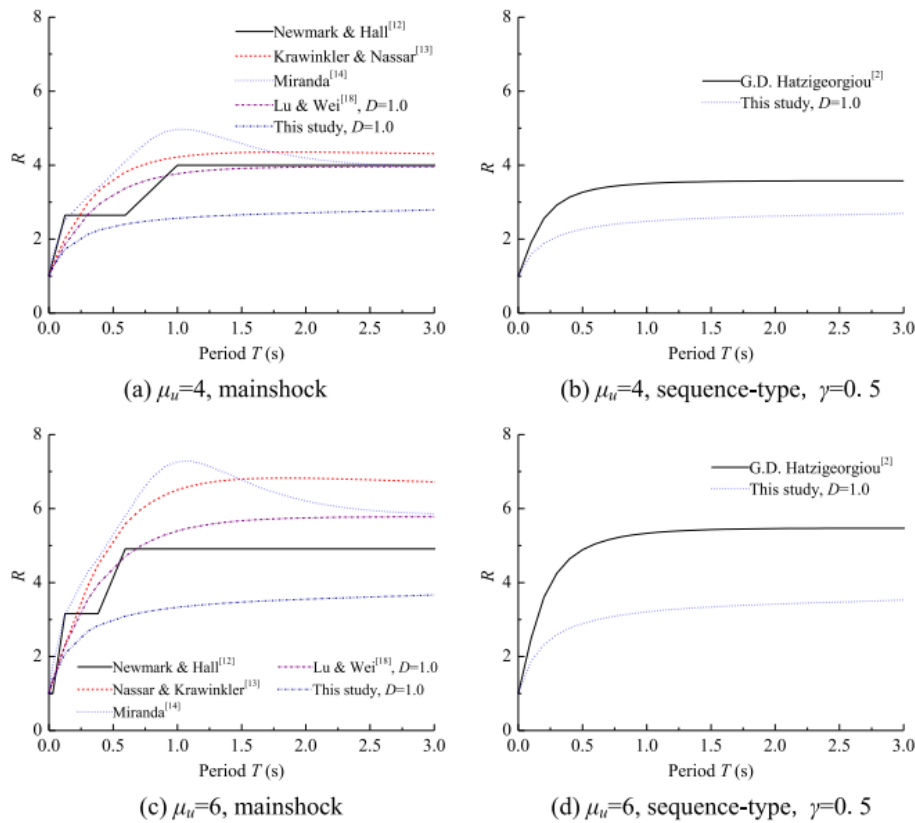
کلاس مکان C

جدول 3: مقدار $a_0 \sim a_4$

پارامتر	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
کلاس مکان B	26.84	37.68	13.76	1.28	4.99
کلاس مکان C	51.88	-13.88	13.44	4.76	-1.35

6.2 مقایسه طیف‌های R_D پیشنهادی با طیف‌های R_μ & R_D موجود

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، روابط قبلی $R_\mu - \mu - T$ بیان می‌کند که ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر شکل‌پذیری مرتبط با شکل‌پذیری و دوره با حالت حدی نهایی می‌باشد. ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب مرتبط با دوره، شکل‌پذیری و شاخص آسیب می‌باشد که با رابطه $R_\mu - \mu - D - T$ نشان داده می‌شود. به منظور مقایسه اختلاف بین R_μ و R_D ، طیف‌های R_D با حالت حدی نهایی $D=1.0$ و طیف‌های R_μ در شکل 15 رسم شده‌اند. به طور کلی، طیف‌های R_μ و R_D روندهای مشابهی را نشان می‌دهند. طیف‌های R_D در شکل‌پذیری یکسان و شرایط خاک مشابه همواره پایین‌تر از طیف‌های R_μ می‌باشند. در همین حال، وقتی ضریب شکل‌پذیری کوچک است، اختلاف بین دو مورد واضح نیست؛ اما با افزایش ضریب شکل‌پذیری، اختلاف بین آنها واضح می‌شود. با مقایسه ضریب کاهش مقاومت حرکت زمین توالی نوع و حرکت زمین پس‌لرزه، اختلاف بسیار چشمگیر است، که این امر نشان می‌دهد که اثر پس‌لرزه را نمی‌توان نادیده گرفت.



شکل 15: مقایسه طیف‌های R_D پیشنهادی با طیف‌های R_D & R_{μ} قبلی در کلاس مکان C؛ (a) $\mu_u = 6$ ، لرزه اصلی، (b) $\mu_u = 6$ توالی نوع اصلی، (c) $\mu_u = 4$ ، لرزه اصلی، (d) $\mu_u = 4$ توالی نوع

7. نتایج

هدف اصلی این مقاله بررسی ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب R_D برای حرکات زمین توالی نوع می‌باشد. ایجاد طیف‌های R_D برای شاخص‌های آسیب مختلف و سطوح شکل‌پذیری یک تعیین بسیار منطقی از تقاضای مقاومت سیستم‌های غیرالاستیک را با در نظر گرفتن آسیب تجمعی با اهداف عملکردی چندگانه نشان می‌دهد. برای این منظور، یک مطالعه آماری از ضریب R_D انجام شد. ضرایب R_D برای مجموعه‌ای از سیستم‌های SDOF الاستیک - پلاستیک تحت سطوح مختلف از شاخص آسیب و ضریب شکل‌پذیری که در معرض تعداد زیادی از حرکات زمین توالی نوع ثبت شده در شرایط مکانی مختلف هستند، محاسبه شده‌است. به طور خاص اثر پس‌لرزه بر R_D مطالعه شد. نتیجه‌گیری زیر را می‌توان از این مطالعه برداشت کرد.

ضریب R_D در دوره کوتاه به شدت وابسته به دوره سیستم و در دوره بلند تقریباً مستقل است

اختلاف بین ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب R_D و ضریب کاهش مقاومت مبتنی بر آسیب R_{μ} بسیار چشمگیر است و در دوره طولانی برای حرکات زمین توالی نوع مورد آخر 40٪ بیشتر از مورد اول می‌باشد. یعنی، تقاضای مقاومت تعیین شده توسط ضریب R_D بزرگتر از تقاضای تعیین شده توسط ضریب R_{μ} می‌باشد.

اثر حرکت زمین پس لرزه بر ضریب R_{μ} با افزایش شدت پس لرزه افزایش می‌یابد. اثر حرکت زمین پس لرزه با $\psi = 0.5$ بر ضریب R_D را می‌توان نادیده گرفت؛ با این حال حرکت زمین پس لرزه با $\psi = 1.5$ قادر به کاهش R_D با دوره کوتاه در سطحی بیش از 25٪ می‌باشد. اثر حرکت زمین پس لرزه بر ضریب R_D وابسته به دوره، ضریب شکل پذیری، شاخص آسیب و شدت حرکت زمین پس لرزه می‌باشد.

بیان پیشنهاد شده از R_D به عنوان تابعی از دوره، شاخص آسیب و ضریب شکل پذیری ارائه شده است. پارامترهای رگرسیون وابسته به شرایط مکان، نسبت سختی پس از تسلیم و شدت حرکت زمین پس لرزه می‌باشد. بیان R_D را می‌توان به منظور برآورد آسان تقاضای مقاومت سیستم‌های غیرالاستیک در طراحی لرزه‌نگار بکاربرد.

References

- [1] Moon I, Ditzhur D, Senaldi I, Derakhshan H, Griffith M, Magenes G, Ingham J. The demise of the URM building stock in Christchurch during the 2010 – 2011 canterbury earthquake sequence. *Earthq Spectra* 2014;30(1):253–76.
- [2] Qu Z, Yang YQ. Seismic damages to owner-built dwellings in the 2015 earthquake sequence in Nepal. *Earthq Eng Struct Dyn* 2015;35(4):51–9.
- [3] Hatzigeorgiou GD. Behavior factors for nonlinear structures subjected to multiple near-fault earthquakes. *Comput Struct* 2010;88(5):309–21.
- [4] Zhai CH, Wen WP, Li S, Xie LL. The ductility-based strength reduction factor for the mainshock-aftershock sequence-type ground motions. *Bull Earthq Eng* 2015;13(10):2893–914.
- [5] Zhai CH, Wen WP, Chen Z Z, Li S, Xie LL. Damage spectra for the mainshock-aftershock sequence-type ground motions. *Earthq Eng Struct Dyn* 2013;45(2):1–12.
- [6] Hatzigeorgiou GD. Ductility demand spectra for multiple near- and far-fault earthquakes. *Soil Dyn Earthq Eng* 2010;30(4):170–83.
- [7] Goda K, Taylor CA. Effects of aftershocks on peak ductility demand due to strong ground motion records from shallow crustal earthquakes. *Earthq Eng Struct Dyn* 2012;41(12):2311–30.
- [8] Li Q, Ellingwood BR. Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock-aftershock earthquake sequences. *Earthq Eng Struct Dyn* 2007;36(3):405–27.
- [9] Hatzigeorgiou GD, Liolios AA. Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. *Soil Dyn Earthq Eng* 2010;30(10):1010–25.
- [10] Newmark NM, Hall WJ. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. Report No 46, building practices for disaster mitigation. National Bureau of Standards; U. S. Department of Commerce; 1973. p. 209–236.
- [11] Krawinkler H, Nassar AA. Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities. In: Fajfa P, Krawinkler H, editors. *Nonlinear seismic analysis and design of RC buildings*. Elsevier; 1992. p. 23–39.
- [12] Miranda E. Site-dependent strength reduction factors. *ASCE J Struct Eng* 1993;119(12):3503–19.
- [13] Fajfar P. Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue. *Earthq Eng Struct Dyn* 1992;21(10):837–48.
- [14] JeanW, LohC. Seismic demand for SDOF system based on structural damage control concept. In: *Proceedings of the sixth east asia-pacific conference on structural engineering and construction*. Taipei, Taiwan; 1998. p. 1633–38.
- [15] Lu Y, Wei J. Damage-based inelastic response spectra for seismic design incorporating performance considerations. *Soil Dyn Earthq Eng* 2008;28(7):536–49.
- [16] Amadio C, Fragiaco M, Rajgelj S. The effects of repeated earthquake ground motions on the non-linear response of SDOF systems. *Earthq Eng Struct Dyn* 2003;32(2):291–308.
- [17] Ruiz-García J, Negrete-Manriquez JC. Evaluation of drift demands in existing steel frames under as-recorded far-field and near-fault mainshock-aftershock seismic sequences. *Eng Struct* 2011;33(2):621–34.
- [18] PEER strong motion database. Available online at: (<http://ngawest2.berkeley.edu/>); 2014.
- [19] Strong-motion seismograph networks (K-NET, KiK-net). Available online at: (<http://http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>); 2016.
- [20] Hatzigeorgiou GD, Beskos DE. Direct damage-controlled design of concrete structures. *ASCE J Struct Eng* 2007;133(2):205–15.
- [21] Yue J, Qian J, Beskos DE. A generalized multi-level seismic damage model for RC framed structures. *Soil Dyn Earthq Eng* 2016;80(1):25–39.
- [22] Park YJ, Ang AH-S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *ASCE J Struct Eng* 1985;111(4):722–39.
- [23] KunnathSK, ReinhornAM, LoboRF. IDARC version 3.0: a program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures. Technical report no. NCEER-92-0022. National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo; 1992.
- [24] Negro P. Experimental assessment of the global cyclic damage of R/C structures. *J Earthq Eng* 1997;1(3):543–62.
- [25] Building Seismic Safety Council (BSSC). *Prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings*. Report. FEMA-356. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency; 2000.
- [26] PriestleyMJN. Performance based seismic design. In: *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*. Auckland, New Zealand; 2000.