

The effect of air cavities on the mechanisms of cracking and performance levels of side joints concrete frames

Peiman Davari Dolatabadi^{1*}, Behnam Barati²

1- Assistant Professor of Civil Engineering Islamic Azad University, Dehaghan Branch, Islamic Azad University, Dehaghan/Isfahan, Iran

2- Department of Structural Civil Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran

ABSTRACT

The presence of holes in the sensitive areas of the beam-to-column connection can cause unwanted damage. In this article, using the connection truss model and time history loading, the effect of the mentioned holes in changing the functional levels of the connection has been investigated. Validation was done by modeling and numerical analysis of a healthy lateral connection whose cyclic test results are available up to the collapse threshold. Four functional levels were defined based on the crack width and the effect of the presence of the cavity on the change of the crack width in the connection was investigated. It was found that due to the creation of an air cavity, the bearing capacity of the connection is reduced and it enters the failure range earlier, but the presence of the cavity can change the way of damage distribution in the connection so that some cracks are more open and others are closed. Also, the sliding of rebars increases due to the presence of holes in compression cycles, these changes increase the need for connection ductility. So that in the recent study, this slip shows an increase of up to 91%. By dividing the connection into 40 equal parts and placing the hole in different parts, the holes created at the joint of beam and column can be more destructive. On the other hand, the sensitivity is less than the central cavities. Also, the holes placed in the vicinity of the longitudinal bars, even with a small volume, can accelerate the destruction of the connection due to the intensification of the slip. It was found that the presence of a cavity can increase energy consumption, so that a cavity with a volume of 2.5% near the column can improve the average amount of energy loss by 1.6%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 July 2022

Revise Date: 21 October 2022

Accept Date: 23 October 2022

Keywords:

Connection rupture

Performance levels

Cyclicloading

Connection truss model

Air cavity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348769.2873>

*Corresponding author: Peiman Davari Dolatabadi

Email address: pe.davari@iau.ac.ir

اثر وجود حفره‌های هوا در مکانیزم شکست و سطوح عملکردی اتصال‌های کناری قاب‌های بتنی

پیمان داوری دولت آبادی^{۱*}، بهنام براتی^۲

۱- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهقان، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران

چکیده

وجود حفره در نواحی حساس اتصال تیر به ستون می‌تواند خسارت‌های ناخواسته‌ای را موجب شود. در این مقاله با استفاده از مدل خریابی اتصال و بارگذاری تاریخیچه زمانی به بررسی اثر حفره‌های مذکور در تغییر سطوح عملکردی اتصال پرداخته شده است. صحت سنجی با مدل سازی و تحلیل عددی یک اتصال کناری سالم که نتایج آزمایش چرخه‌ای آن تا آستانه فروریزش در دسترس می‌باشد صورت گرفت. چهار سطح عملکردی بر اساس اندازه عرض ترک تعریف و تاثیر وجود حفره در تغییر عرض ترک در اتصال مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از آنالیز غیر خطی مشخص گردید که در اثر ایجاد حفره هوا ظرفیت باربری اتصال کاهش یافته و زودتر وارد محدوده شکست می‌شود اما وجود حفره می‌تواند نحوه توزیع خسارت در اتصال را تغییر دهد به طوری که برخی از ترک‌ها را باز تر و برخی دیگر را ببندد. همچنین لغزش میلگردها در اثر وجود حفره در سیکل‌های فشاری افزایش می‌یابد این تغییرات باعث افزایش نیاز شکل پذیری اتصال می‌شود. به طوری که در مطالعه اخیر این لغزش تا ۹۱ درصد افزایش را نشان می‌دهد. با تقسیم اتصال به ۴۰ قسمت مساوی و قرار دادن حفره در قسمت‌های مختلف، مشخص شد که حفره‌های ایجاد شده در محل اتصال تیر و ستون می‌توانند مخرب تر باشند. در مقابل حساسیت نسبت به حفره‌های مرکزی کمتر است. همچنین مشاهده گردید که حفره‌های قرار گرفته در مجاورت میلگرد های طولی حتی با حجم کم می‌توانند بدلیل تشدید لغزش باعث تسریع تخریب اتصال شوند. در این مطالعه معلوم گردید که وجود حفره می‌تواند باعث افزایش استهلاک انرژی شود به طوری که یک حفره با حجم ۲/۵ درصد در نزدیکی ستون می‌تواند متوسط میزان اتلاف انرژی را حدود ۱/۶٪ بهبود بخشد.

کلمات کلیدی: گسیختگی اتصال، سطوح عملکردی، بارگذاری چرخه‌ای، مدل خریابی اتصال، حفره هوا

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348769.2873	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: 10.22065/jsce.2022.348769.2873	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۸/۰۱	۱۴۰۱/۰۸/۰۱	۱۴۰۲/۰۷/۲۹	۱۴۰۱/۰۴/۲۴	
پیمان داوری دولت آبادی pe.davari@iau.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

شکست‌های ترد پیش بینی نشده اتصالات خمشی تیر و ستون در تحریک‌های لرزه ای در زلزله‌های متعدد مشاهده و گزارش شده است. استراتژی طراحی مقاوم و یا مقاوم سازی اتصالات مستلزم شناسایی آسیب‌های محتمل و قابلیت اعتماد به مقاومت‌های مفروض است. کسب نتایج دقیق تر و قابل اعتماد تر با در نظر گرفتن صحیح تر عدم قطعیت‌های اجرایی امکان پذیر است. این مساله در خصوص اتصالات که عمدتاً انجام آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب در خصوص آن‌ها یا ممکن نیست و یا پر هزینه است از یک طرف ضرورت دقت مضاعف در اجرای کیفی اتصال و از طرف دیگر ضرورت بازنگری در برخی از اصول موجود در طراحی اتصالات از جمله تعیین ضرایب کاهش مقاومت بتن ناحیه اتصال را نشان می‌دهد. اما مدل سازی اتصال نیز یکی دیگر از مسایل مهم در این بخش می‌باشد. مدل به کار رفته در شبیه سازی رفتار اتصال بایستی به گونه ای باشد که اولاً مدل سازی خسارت که عمدتاً شامل ترک خوردگی بتن و لغزش میلگرد می‌باشد امکان پذیر باشد و از طرف دیگر مدل‌های پیشنهادی بایستی به گونه ای باشند که اعمال روش‌های ساده شناسایی خسارت نظیر روش‌های مستقیم شناسایی حوزه زمان [۱] و یا حوزه فرکانس [۲] در آن‌ها قابل اعمال باشند. از آنجایی که مکانیزم ترک خوردگی بتن در اتصال به دلیل شرایط پیچیده ناشی از اندرکنش نیروها قابل پیش بینی نیست، مدل‌هایی که به اصلاح ماتریس سختی در اثر ترک خوردگی می‌پردازند [۳] در مدل سازی این بخش کارایی خود را از دست می‌دهند لذا بایستی به دنبال مدل‌هایی باشیم که بتوانند با چالش‌های مذکور مواجه شوند. انواع مدل‌های تحلیلی برای شرح رفتار اتصالات تیر به ستون در سازه‌های بتنی، با مدل‌های ساده شده یا تجربی، فرموله شده اند به عنوان مثال در مدل خرابایی براساس جریان نیروها و جهات تنش‌های اصلی، ناحیه اتصال به شکل یک خرپا مدل می‌شود. آلت و کونات [۴] برای اتصال یک مدل ساده بر اساس آزمایش‌های برس و همکاران [۵] ارائه نمودند. در این مدل اتصال با تنها یک فنر در محل تلاقی محور تیر و ستون تعریف می‌شود در این مدل برای در نظر گرفتن رفتار غیر خطی، نمودار سه خطی برش تغییر مکان به کار گرفته شده است. این مدل امکان در نظر گرفتن اثر دورگیری بتن و یا لغزش میلگرد را ندارد. بیداه و گوبارا [۶] تغییر شکل‌های برشی و لغزش میلگرد را به کمک اجزای فنری مجزایی در نظر گرفتند. در این مدل برای اتصالات داخلی دو فنر مربوط به لغزش میلگرد و یک فنر برای مدل سازی برشی به کار می‌رود. این در حالی است که برای اتصالات خارجی یک فنر برای مدل سازی لغزش میلگرد کفایت می‌کند. این مدل قادر به در نظر گرفتن اثر پینچینگ به دلیل ترک خوردگی بتن نمی‌باشد و رفتار مصالح بتنی را با دقت کافی در نظر نمی‌گیرد. آندرسون و همکاران [۷] مدلی را بر اساس آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه واشنگتن ارائه کردند. دیاگرام پوش سه خطی که سه سطح مختلف سختی را در نظر می‌گیرد با نمودار چند خطی چرخه ای به گونه ای ترکیب شده است که زوال مقاومت و سختی را به راحتی در نظر می‌گیرد. پائولوپچی و همکاران [۸] دو آزمایش تجربی بر روی اتصال خارجی در مقیاس کامل تحت بارگذاری چرخه ای، بدون میلگرد عرضی انجام دادند. آن‌ها نمونه‌ها را برای در نظر گرفتن نسبت‌های متفاوت میلگرد طولی تیر، با میلگردهای طولی ساده تقویت کردند. به کمک نصب کرنش سنج بر روی اتصال، تغییر شکل چرخشی و کرنش برشی را بدست آوردند. در نهایت با مقایسه مدل‌های موجود و نتایج تجربی، معلوم گردید که شکست کامل اتصال در اثر کمانش میلگردهای طولی ستون و پوسته شدن گوه ای بتن رخ می‌دهد. شایان‌فر و همکاران [۹]، یک مدل تحلیلی را برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی اتصال تیر به ستون بتن مسلح خارجی (RC) تحت بار محوری متغیر را توسعه دادند. برای این منظور، گشتاورهای واژگونی توسط بارهای جانبی ایجاد شد که به عنوان بارهای محوری در ستون‌ها تعریف شدند. این کار باعث ایجاد نیروی محوری فشاری در یک طرف سازه و کشش در طرف مقابل می‌شود که رفتار غیرخطی مرتبط با تنش‌های محوری، خمشی، برشی ستون‌ها و اتصالات RC را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آن‌ها مشاهده کردند که مدل تحلیلی پیشنهادی می‌تواند پاسخ تجربی اتصالات تیر- ستون RC با جزئیات ضعیف را تحت بارهای محوری متغیر یا ثابت با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. شارما و همکاران [۱۰] یک روش جدید برای شبیه سازی برش اتصالات بتن مسلح تحت بار لرزه ای ارائه نمودند. این مدل از معیار شکست تنش نرمال اصلی کششی با توجه ویژه به نیروی محوری ستون بهره می‌برد و به راحتی در نرم افزارهای محاسباتی قابلیت پیاده سازی دارد. گیرگین و همکاران [۱۱]، از جمله محققینی هستند که با به کار گیری مدل خرابایی اتصال و در نظر گرفتن تغییر شکل پلاستیک به

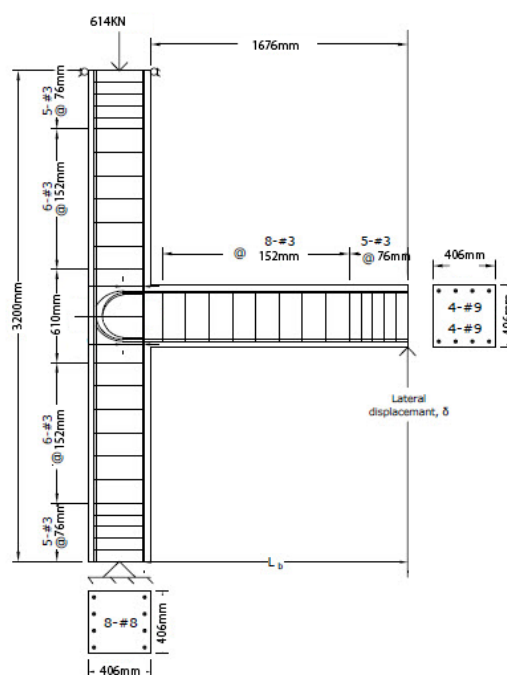
ارزیابی ضریب اصلاح پاسخ در طراحی لرزه ای سازه‌های بتنی پیش ساخته پرداختند. برای درک رفتار حدی اتصال توجه به مکانیزم شکست اتصال اجتناب ناپذیر است. مکانیزم شکست اتصال به گونه ای است که با اعمال نیروی زلزله به اتصال و ایجاد نیروی کششی و فشاری در بالا و پایین مقطع، بتن داخل اتصال بر اثر حرکت چرخه ای دچار ترک شده و فرو می‌ریزد. یکی از مهم ترین عواملی که نقش کلیدی در رفتار اتصال تحت اثر بار ایفا می‌کند لغزش میلگرد می‌باشد. لغزش بین میلگردها و بتن، تأثیر قابل توجهی در رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه دارد. علاوه بر این، لغزش بین میلگرد و بتن باعث عدم سازگاری کرنش بین آن‌ها می‌شود که سبب کاهش سختی و افزایش تغییر شکل در اعضا می‌گردد [۱۲]. پنتلاپدس و همکاران [۱۳] سه نوع اتصال خارجی یک ساختمان بتن آرمه با جزئیات غیر استاندارد را تحت دو نوع بارگذاری مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها توانستند، مدلی را برای شبیه سازی رفتار اتصالات خارجی که مستعد مودهای شکست لغزشی و برشی هستند، ارائه و با آزمایش‌هایی درستی مدل‌های پیشنهادی را مورد ارزیابی قرار دهند. ژانگ و لی [۱۴]، رفتار لرزه‌ای ۸ اتصال خارجی بتن آرمه با میلگردهای مختلف را به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که میلگرد پوسیده تا ۲۰ درصد باعث کاهش مقاومت در برابر بارگذاری جانبی، ۳۲ درصد کاهش اتلاف انرژی و ۱۵ درصد کاهش سختی اولیه می‌شود. همچنین این موارد در نیروهای محوری قسمت‌های فوقانی اتصال، قابل توجه تر است. توسعه روش‌های ریاضی مدل سازی مقاومت برشی اتصال مبتنی بر مدل‌های خرابایی اخیرا توسط برخی از محققین پیشنهاد شده است که نتایج قابل قبولی را در اختیار می‌گذارد [۱۵]. باید توجه داشت که مدل سازی کار دشوار و پیچیده است و به عوامل متعددی از جمله ترکیب مخلوط بتن [۱۶] بستگی دارد به طوری که مدل‌های مکانیکی موجود نمی‌توانند همه پارامترهای موثر را در نظر بگیرند. در چنین شرایطی می‌توان از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده کرد [۱۷]. اتصال تراکم و یکنواختی بتن یکی دیگر از عوامل مهم در شکل گیری نحوه ایجاد خسارت در اتصالات می‌باشد. مقاومت و دوام بتن به تعداد، شکل و اندازه فضاهای خالی هوا در بتن بستگی دارد. استفاده از ویبره، روش خوبی برای متراکم کردن ذرات بتن به یک توده متراکم است. ویبره با چرخش خارج از مرکز با فرکانس و دامنه مشخص، بخش ملات بتن را روان می‌کند و اصطکاک داخلی را کاهش می‌دهد که در نتیجه آن بتن تحکیم و مقاومت افزایش می‌یابد. مقاومت بتن همواره نسبت مستقیم با تراکم و نسبت عکس با حجم منافذ آن دارد. هرچه بتن متراکم تر باشد تاب فشاری آن بیشتر است [۱۸]. در بتن محل اتصال با وجود زدن ویبره به دلایل مختلف از جمله تراکم میلگرد خلل و فرج‌های ناخواسته‌ای به وجود می‌آیند. از سویی در اثر استفاده از مصالحی چون پلی استایرن به عنوان بلوک سقفی و یا جدا کننده در محل درز انقطاع به کرات دیده می‌شود که قطعات کوچک این مصالح به دلیل سبکی به وسیله باد در داخل اجزای بتنی مانند تیرها و ستون‌ها و اتصالات وارد شده و باعث ایجاد حفره می‌شوند.

در این مقاله با استفاده از مدل خرابایی یک اتصال بتنی کناری با و بدون حباب هوا به صورت غیر خطی در نرم افزار سپ مدل سازی و رفتار آن تحت بار تاریخیچه زمانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای انجام این کار اتصال به شبکه‌های مربعی با اعضای قطری خرابایی تقسیم بندی می‌شود به طوری که اعضای قطری، مقاومت برشی و اعضای افقی و قائم مقاومت محوری بتن اتصال را تامین می‌کنند. با حذف اعضای بتنی مذکور متناسب با ناحیه متأثر از حجم حفره، حفره‌هایی با حجم‌های مختلف ایجاد می‌شوند. لغزش میلگرد نیز به کمک المان لینک پلاستیک چند خطی شبیه سازی می‌شود. چهار سطح عملکردی بر اساس اندازه عرض ترک تعریف و تأثیر وجود حفره در تغییر عرض ترک در اتصال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در پایان با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از آنالیز غیر خطی اثر محل و اندازه حفره در میزان لغزش میلگردها، سطوح عملکردی و مکانیزم شکست اتصال به کمک جداول و نمودارهایی نمایش داده می‌شود.

۲- مدل سازی

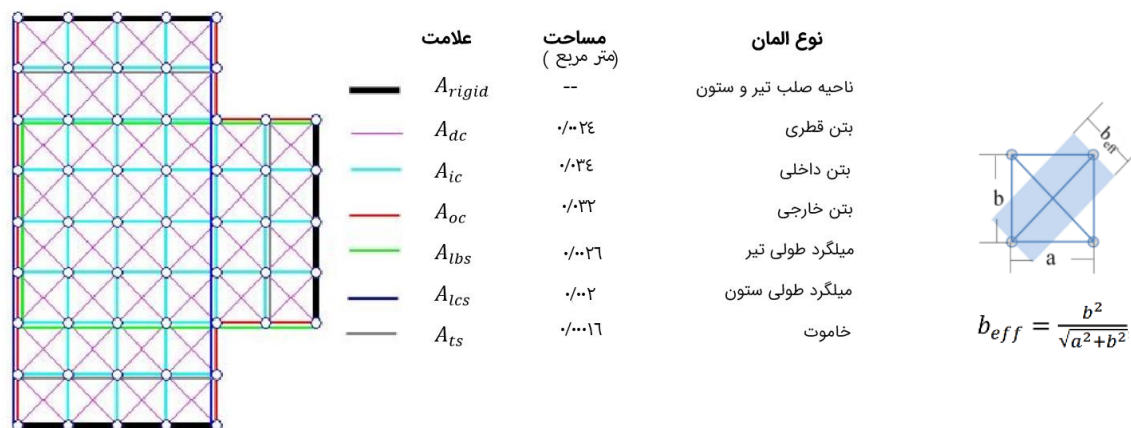
اتصال انتخاب شده شامل یک اتصال بتن مسلح است که مشابه روش توماس باورز [۱۹] به صورت مدل خرابایی غیرخطی، در نرم افزار سپ [۲۰] مدل سازی گردیده است. اتصال به شبکه‌های مربعی با اعضای قطری خرابایی با مقطع مشخص تقسیم بندی می‌شود به طوری که اعضای قطری، مقاومت برشی و اعضای افقی و قائم مقاومت محوری بتن اتصال را شبیه سازی می‌کنند. با حذف اعضای بتنی

مذکور متناسب با ناحیه متاثر از حجم حفره می توان وجود حفره را شبیه سازی کرد. به عنوان مثال برای ایجاد حفره ۲/۵ درصدی در یک نقطه مشخص، دو عضو مورب، یک عضو عمودی و یک عضو افقی در آن نقطه حذف شده است. در این مدل سازی عناصر تیر و ستون به ترتیب تحت بار جانبی و محوری قرار گرفته اند. گره بالای ستون فوقانی در برابر انتقال افقی مقید شده و برای وارد کردن بار محوری فشاری طبقات فوقانی یک نیرو عمودی به ستون اعمال شده است. همچنین در گره انتهایی سمت راست تیر، جابجایی جانبی اعمال می شود. در شکل ۱ نمایی از مدل و آرایش میلگردها و جزئیات اتصال مورد نظر نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است میلگردهای طولی تیر در انتهای ناحیه اتصال منتهی به خم ۱۸۰ درجه می باشند. همچنین از خاموت با فاصله های مشخص در تیر و ستون استفاده شده است. قابل ذکر است که میلگردهای طولی ستون از انتها به انتها پیوسته هستند.



شکل ۱: ابعاد و جزئیات مقاطع تیر و ستون [۱۹].

نحوه مدل سازی اتصال در شکل ۲ قابل مشاهده می باشد. طول عناصر عمودی و افقی خرپا (a و b در شکل ۲) ۸۳ میلیمتر و زاویه شیب اعضای مورب ۴۵ درجه، در نظر گرفته شده اند. عمق مقطع تعریف شده برای اجزای خرپایی برابر با عمق ستون (۴۰۶ میلیمتر) می باشد. عرض موثر اعضای افقی و قائم بر اساس چشمه بار بر هر عضو و اعضای مورب مطابق رابطه نشان داده شده در شکل ۲ به دست می آید. مطابق شکل ۲ قسمت های مختلف بتنی و فولادی خرپای اتصال با رنگ های مجزا قابل مشاهده است. گره های تماسی تیر و ستون در محل تماس با اتصال به صورت صلب مدل سازی شده اند.



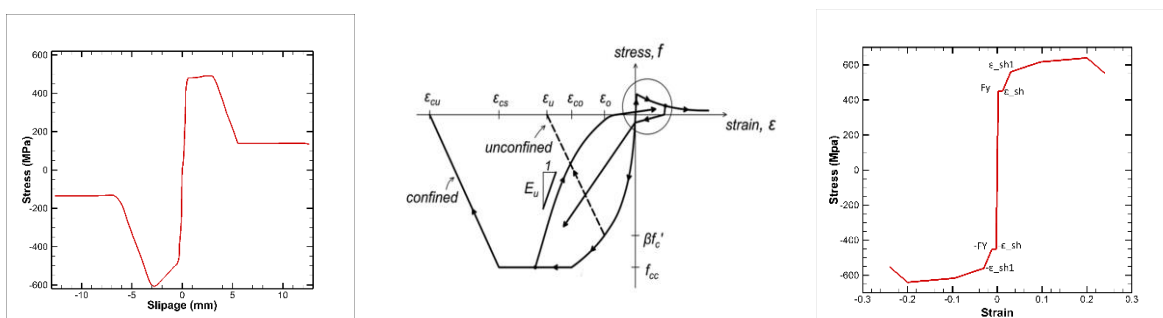
شکل ۲: مشخصات عناصر بر اساس مساحت [۱۹].

مشخصات فولاد میلگرد بکار رفته مطابق جدول ۱ می باشد. مدل رفتاری فولاد مطابق شکل ۳-الف بوده و بر گرفته از تحقیق داد و رستروپو می باشد [۲۱].

جدول ۱: مشخصات فولاد [۱۹].

$f_y (MPa)$	$f_u (MPa)$	$\epsilon_{sh} (\%)$	$\epsilon_u (\%)$	$E_s (MPa)$	$\epsilon_{sh1} (\%)$	$f_{sh1} (MPa)$
۴۵۶/۸۶۹	۶۴۹/۷۷۳	۱/۲	۲۰	۱۹۰۰۰۰	۳	۵۶۸/۵۴۷

مدل رفتاری بتن مطابق شکل ۳-ب بوده و بر گرفته از تحقیق گیرگین و همکاران [۱۱] می باشد. این مدل بدون در نظر گرفتن اثر دور گیری دارای کرنش اولیه $\epsilon_{co} = ۰/۰۰۲$ و کرنش نهایی $\epsilon_u = ۰/۰۰۴$ و با لحاظ اثر دور گیری دارای کرنش اولیه $\epsilon_{co} = ۰/۰۰۲$ و کرنش نهایی $\epsilon_u = ۰/۰۱۶$ می باشد. برای مدل سازی لغزش میلگردها مدل رفتاری المان تماسی منطبق بر مدل توسعه یافته میترا و لووز [۲۲] مطابق شکل ۳-ج در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی لغزش میلگردها شش لینک دو نقطه ای با رفتار چند خطی شکل ۳-ج و با الگوی شکل ۶-الف به کار گرفته شده اند. لینک های مذکور از ناحیه صلب اتصال و گره انتهایی میلگردها متصل شده اند. همچنین بتن هسته با در نظر گرفتن اثر دور گیری و بتن پوسته بدون در نظر گرفتن اثر دور گیری مدل سازی شده اند.



ج: مدل رفتاری لغزش فولاد [۲۲].

ب: مدل رفتاری بتن [۱۱].

الف: مدل رفتاری فولاد [۲۰].

شکل ۳: مدل های رفتاری

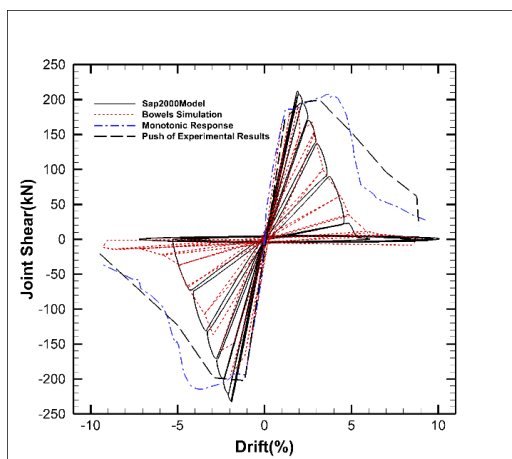
صحت سنجی با مطابقت دادن پاسخ چرخه ای حاصل از مدل سازی انجام شده با پاسخ به دست آمده توسط باورز و همکاران [۱۹] صورت گرفته است. همچنین وضعیت ترک خوردگی مدل آزمایش شده توسط پنتلایدس و همکاران [۱۳] (شکل ۴-الف) با رفتار

عملکردی اتصال مدل شده به صورت کیفی مقایسه شده اند. بار اعمال شده به صورت چرخه ای دینامیکی افزایشی است که جزییات آن در جدول ۲ آمده است.

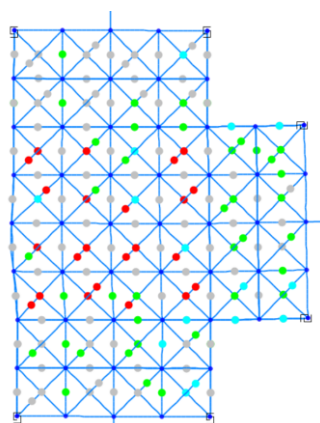
جدول ۲: تاریخچه جابجایی [۱۹].

مرحله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
دریفت (%)	۰/۱	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰	۳/۰	۵/۰	۷/۰	۱۰/۰
تغییر مکان انتهای تیر (mm)	۲/۰۰	۴/۰۰	۹/۰۰	۱۳/۰۰	۱۷/۰۰	۲۶/۰۰	۳۵/۰۰	۵۲/۰۰	۸۷/۰۰	۱۲۱/۰۰	۱۷۳/۰۰

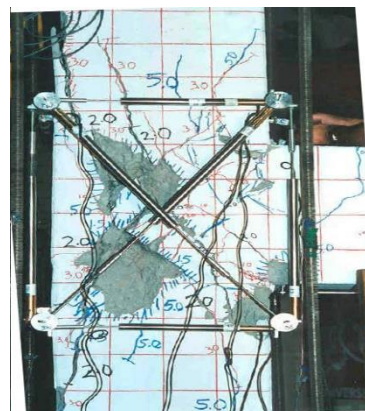
برای ایجاد تغییر مکان چرخه ای مشابه جدول ۲ در برنامه سپ جرم واحدی در انتهای تیر کنسولی تعریف و بار گذاری تاریخچه زمانی به گونه ای کالیبره گردیده تا تغییر مکان های مذکور در جدول فوق در انتهای تیر ایجاد شود. در این مدل سازی از جرم اتصال و اجزای متصل به آن صرفه نظر شده است.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۴: الف: ترک خوردگی اتصال تحت بار چرخه ای [۱۳] ب: رفتار به دست آمده از مدل

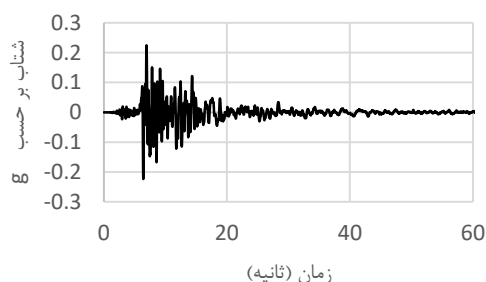
ج: مقایسه رفتار چرخه ای با مدل باورز و نتایج آزمایشگاهی [۱۹].

در شکل ۴-ب رنگ خاکستری محدوده ترک نخورده و یا ترک خورده با عرض کمتر از ۱ میلیمتر، رنگ سبز محدوده ترک خورده با عرض ۱ تا ۲ میلیمتر و رنگ آبی محدوده ترک خوردگی با عرض بین ۲ تا ۳ میلیمتر و رنگ قرمز محدوده ترک خورده با عرض ترک بیش از ۳ میلیمتر را نشان می دهد. همچنین نقطه بحرانی اتصال در مدل معرفی شده توسط باورز و همکاران [۱۹] با نقطه بحرانی به دست آمده از مدل ساخته شده در این پژوهش (شکل ۶-الف) انطباق کامل دارد. شروع خرد شدن قسمت های مورب بتنی در پایه فشاری مدل را می توان در شکل ۴ مشاهده نمود که با تشکیل مکانیسم برشی اتصال در نمونه آزمایشگاهی، هم خوان است. نتایج حاصل از مدل المان محدود در مجموع با آزمایش مشاهده شده مطابقت خوبی دارد و مکانیزم شکست را به درستی نشان می دهد.

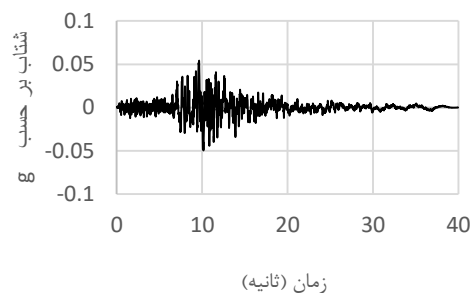
در شکل ۴-ج منحنی چرخه ای نیروی برشی اتصال برحسب دریافت اعمالی (جدول ۲) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود رفتار چرخه ای به دست آمده از مدل سازی صورت گرفته در نرم افزار سپ (منحنی مشکی رنگ) با رفتار چرخه ای حاصل از مدل سازی باورز و همکاران [۱۹] (خط چین قرمز رنگ) هماهنگی قابل قبولی دارد بطوری که زوال سختی و مقاومت در چرخه های بارگذاری هماهنگی مناسبی را نشان می دهند. در این شکل رفتار تحت بار یکنواخت (خط نقطه آبی رنگ) و پوش بارگذاری چرخه ای (خط چین مشکی رنگ) به دست آمده از آزمایش نیز دیده می شوند. همانگونه که مشاهده می شود نتایج به دست آمده از مدل های المان محدود به کار رفته در این تحقیق و مرجع [۱۹] نسبت به نتایج بارگذاری یکنواخت و چرخه ای در آزمایشگاه، شکل پذیری کمتری را نشان می دهند. که می تواند به دلیل عدم امکان مدل سازی ریز ترکها و خسارات جزئی در حین بارگذاری در مدل سازی های کامپیوتری باشد. اتصال تحت ۳ رکورد لرزه ای تاریخچه زمانی مستخرج از سایت PEER [۲۳] مطابق جدول ۳ و شکل ۵ قرار گرفت.

جدول ۳: مشخصات شتاب نگاشت ها [۱۱].

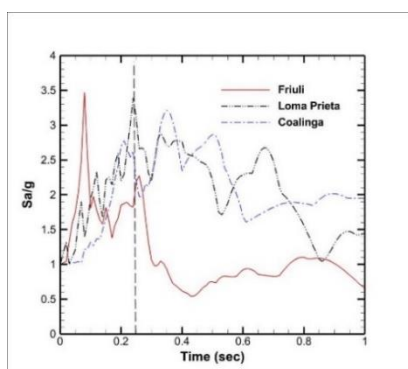
شماره رکورد در Peer	نام زلزله	ایستگاه	PGA	
			H1=0.029	H2=0.03
RSN121	Friuli Italy	Barcis	H1=0.288	H2=0.225
RSN322	Coalinga	Cantua Creek School	H1=0.054	H2=0.11
RSN804	Loma Prieta	San Francisco Sierra Pt.		



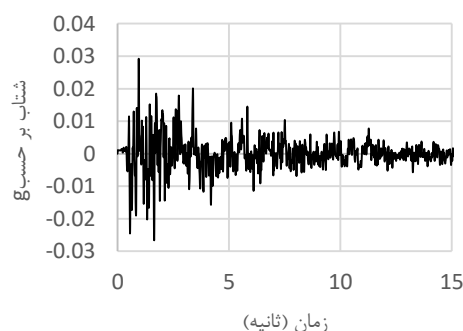
ب



الف



د



ج

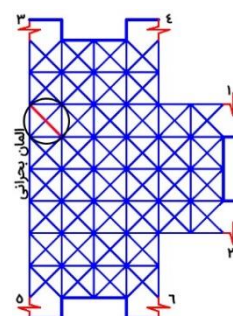
شکل ۵: الف: شتاب نگاشت لوما پریتا [۲۳] ب: شتاب نگاشت کوالینگا [۲۳] ج: شتاب نگاشت فریولی [۲۳]

د: طیف پاسخ شتاب نگاشت ها و زمان تناوب اتصال (خط چین قائم)

این رکوردها شامل مولفه‌های افقی شتاب نگاشت‌های فریولی، لوما پریتا و کوآلینگا می‌باشند. محدوده موثر فرکانسی رکوردهای مذکور نسبت به فرکانس اتصال بارسم طیف پاسخ رکوردها و زمان تناوب اتصال (خط چین قائم) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود فرکانس غالب تحریک لوما پریتا به فرکانس اتصال بسیار نزدیک است و می‌تواند اتصال را وارد ناحیه تشدید نماید. فرکانس غالب دو تحریک دیگر یکی (فریولی) کمتر از فرکانس غالب اتصال و دیگری (کوآلینگا) بیش از فرکانس غالب اتصال می‌باشند. برای حصول اطمینان از ورود اتصال به ناحیه پلاستیک رکوردها به نسبت ۲ برابر شتاب جاذبه ($2g$) مقیاس شده اند. در هر تحلیل برای هر حالت بارگذاری یک حفره $3/5$ در $3/5$ اینچی در نظر گرفته شده است. ساخت حفره در هر مکان با حذف بتن آن مکان شامل دو المان قطری و یک المان قائم و یک المان افقی انجام شده است. در کلیه حالت‌ها پوشش بتن به عرض $1/75$ اینچ از مرکز سطح میلگردهای تیر و ستون تامین شده است. محل قرارگیری حفره در هر تحلیل مطابق شکل ۶-ب در یکی از مکان‌های شماره گذاری شده ۱ تا ۴۰ می‌باشد.

۴۰	۳۹	۳۸	۳۷		
۳۶	۳۵	۳۴	۳۳		
۳۲	۳۱	۳۰	۲۹	۲۸	۲۷
۲۶	۲۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱
۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵
۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹
۸	۷	۶	۵		
۴	۳	۲	۱		

(ب)



(الف)

شکل ۶: الف: محل قرارگیری المان بحرانی و لینک‌های لغزشی به طول صفر ب: محل قرارگیری حفره‌ها

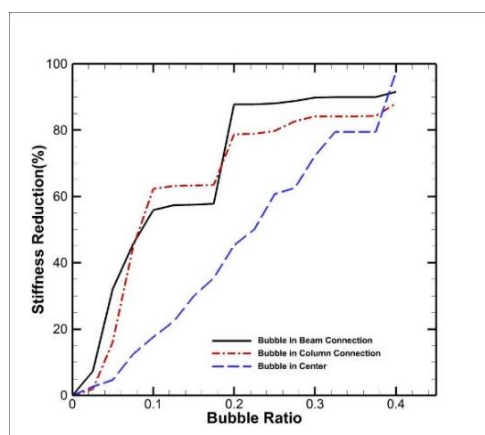
۳- بحث و نتایج

با انجام تحلیل مودال تاثیر ایجاد حفره با حجم‌های مختلف بر روی سختی اتصال مورد بررسی قرار گرفت و معلوم گردید که ایجاد حفره باعث کاهش سختی اتصال می‌شود که این کاهش بستگی به حجم حفره دارد. همچنین مشخص گردید که کاهش سختی ناحیه اتصال در اثر وجود حفره‌های نزدیک به تیر بیش از نواحی دیگر است این در حالی است که حساسیت سختی اتصال نسبت به حفره‌های مرکزی کمتر از سایر نقاط می‌باشد. جدول ۴، درصد کاهش سختی را برای حفره‌های مرکزی و حفره‌های ناحیه اتصال به تیر بر حسب حجم نسبی حفره نشان می‌دهد. حجم نسبی از تقسیم حجم حفره به حجم کل ناحیه اتصال به دست می‌آید. با توجه به تقسیم ناحیه اتصال به ۴۰ قسمت، حجم هر ناحیه معادل یک چهلم یعنی $2/5$ درصد حجم اتصال است.

جدول ۴: تغییر سختی بر حسب حجم و جای حفره.

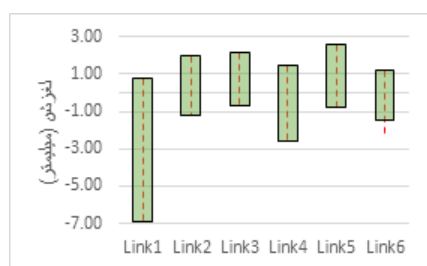
نسبت حجم حفره به حجم اتصال	۲۲/۵	۵	۷/۵	۱۰	۱۲/۵	۱۵	۱۷/۵	۲۰
درصد کاهش سختی (حفره در مرکز اتصال)	۲۲/۶	۴۱/۶	۱۲۲/۳	۱۷۱/۶	۲۲۱/۳	۳۰۱/۰	۳۵۱/۳	۴۵۱/۲
درصد کاهش سختی (حفره در محل اتصال به تیر)	۷۱/۲۹	۳۲/۰	۴۵/۶	۵۵/۹	۵۷/۳	۵۷/۵	۵۷/۸	۸۷/۷

نمودار شکل ۷ درصد تغییرات سختی بر اثر ایجاد و افزایش حجم حفره‌ها را در سه ناحیه اتصال به تیر، اتصال به ستون و نواحی مرکزی اتصال به طور جداگانه به تصویر کشیده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش حجم حفره‌های ناحیه اتصال به تیر و ستون، سختی با شیب تندی کاهش می‌یابد به طوری که با رسیدن حجم حفره به ۲۰٪ حجم اتصال بیش از ۸۰ درصد سختی اتصال زوال می‌یابد. کاهش سختی با افزایش حجم حفره در مرکز اتصال شیب کمتری دارد و با رسیدن حجم حفره در این ناحیه به حدود ۳۳ درصد حجم اتصال شاهد کاهش سختی حدود ۸۰ درصدی هستیم این مطالعه نشان می‌دهد که وجود حفره به شکل قابل توجهی باعث نرم شدن اتصال می‌شود اما میزان نرم شدگی اتصال به خصوص برای حفره‌های با حجم کمتر از ۳۰٪ حجم اتصال به محل ایجاد حفره وابسته است.

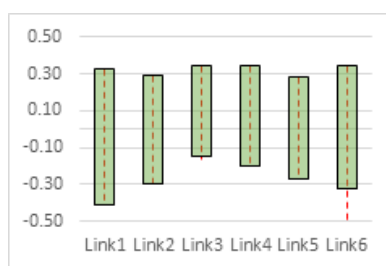


شکل ۷: نمودار تغییرات سختی اتصال در اثر ایجاد حفره.

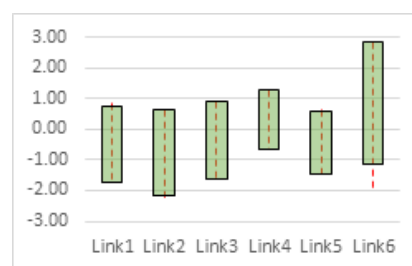
میزان لغزش میلگرد که تاثیر قابل توجهی در رفتار اتصال دارد از متغیرهای دیگری است که در این مطالعه به آن توجه شده است. تاثیر وجود حفره در تغییر میزان لغزش میلگرد تحت زلزله‌های انتخابی در کندل‌های شکل ۸ قابل مشاهده است. همان گونه که دیده می‌شود لغزش در سیکل فشاری المان تماسی شماره ۶ که در نزدیکی محل حفره واقع شده افزایش یافته و در سایر المان‌ها تغییر محسوسی ندارد. در میان تحریک‌های به کار رفته نیز لوما پریتا بیشترین لغزش را ایجاد کرده که می‌تواند به دلیل نزدیکی فرکانس غالب این تحریک به فرکانس اتصال باشد. تغییرات تاریخچه زمانی لغزش المان تماسی شماره ۶ تحت زلزله لوما پریتا با بیشترین میزان لغزش در شکل ۹ برای اتصال متراکم بدون حباب هوا و اتصال با حفره ایجاد شده در ناحیه شماره ۵ (مطابق شکل ۶-ب) و با حجم نسبی ۲/۵ درصد را با یکدیگر مقایسه شده اند.



زلزله لوما پریتا



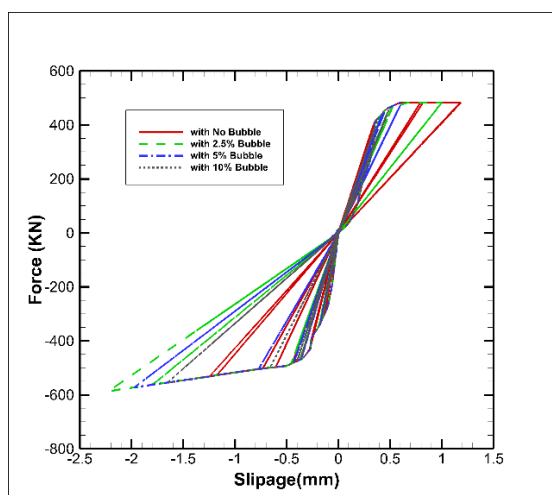
زلزله فریولی



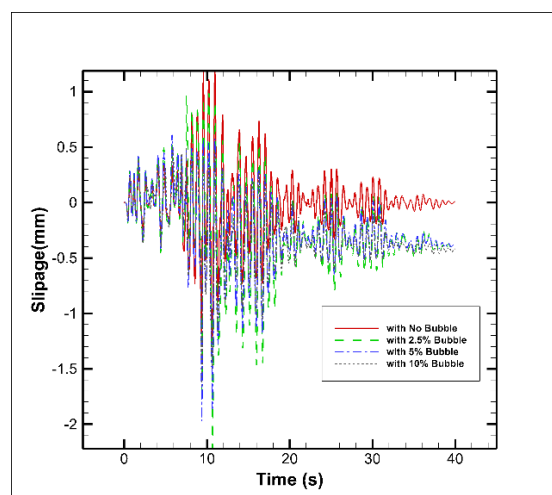
زلزله کوالینگا

شکل ۸: مقایسه لغزش میلگرد با و بدون حفره (مستطیل توپر محدوده لغزش اتصال سالم و خطوط خط چین محدوده لغزش اتصال حبابدار هستند). همان گونه که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود وجود حفره باعث افزایش لغزش در سیکل فشاری شده است. این در حالی است که در سیکل کششی به دلیل کم اثر بودن بتن، حذف بتن و ایجاد حفره تغییر کمتری در لغزش میلگرد ایجاد کرده است. نکته قابل توجه

آن که بیشترین درصد افزایش لغزش در اتصال با ۲/۵ درصد حفره ایجاد می‌شود. یکی از دلایل این امر می‌تواند فرار گیری حفره ۲/۵ درصدی (حفره شماره ۵) در مجاورت میلگرد باشد. مطابقت رفتار چرخه ای لغزش با الگوی شکل ۳-ج را می‌توان در شکل ۹-ب مشاهده کرد. در این شکل نیرو بر اساس تنش ایجاد شده در میلگرد و سطح مقطع آن و تعداد رابط‌های لغزشی به دست آمده است. حداکثر لغزش حاصل در این نمودار ۲/۳۶ میلی‌متر می‌باشد که مربوط به اتصال دارای حفره ۲/۵ درصدی بوده و حدود ۹۱٪ افزایش را نسبت به اتصال متراکم و بدون حباب هوا نشان می‌دهد. این مقدار در اتصال با حفره‌های ۵ و ۱۰ درصدی کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل توزیع بهتر ناپیوستگی در اتصال و عدم تمرکز تنش در یک نقطه مشخص در نزدیکی میلگرد باشد. با توجه به محدوده‌های ترک خوردگی تعریف شده در شکل ۴-ب که در آن رنگ خاکستری محدوده ترک نخورده و یا ترک خورده با عرض کمتر از ۱ میلی‌متر، رنگ سبز محدوده ترک خورده با عرض ۱ تا ۲ میلی‌متر و رنگ آبی محدوده ترک خوردگی با عرض بین ۲ تا ۳ میلی‌متر و رنگ قرمز محدوده ترک خوردگی با عرض بیش از ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد، می‌توان اثر وجود حفره بر مکانیزم شکست و ترک خوردگی اتصال را تحت اثر تحریک‌های لرزه ای بررسی کرد. در این حالت رنگ خاکستری معادل سالم و یا خسارت کم، رنگ سبز معادل خسارت متوسط، رنگ آبی معادل خسارت زیاد و رنگ قرمز معادل خسارت شدید تعریف شده است. در این بررسی با توجه به تعریف اتصال به شکل مدل خرابایی، شکست اعضای قطری معادل زوال مقاومت برشی و شکست اعضای افقی و قایم معادل زوال مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته شد.



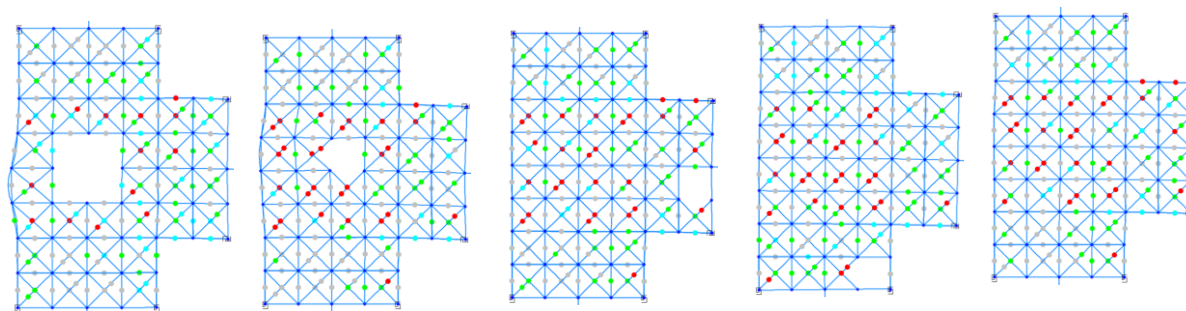
(ب)



(الف)

شکل ۹: الف: تاریخچه زمانی لغزش میلگرد اتصال با و بدون حفره هوا در المان تماسی شماره ۶
ب: منحنی رفتار چرخه ای المان تماسی شماره ۶ اتصال با و بدون حفره هوا.

بررسی نحوه توزیع ترک خوردگی، شدت خسارت‌های وارد شده و نسبت شکست‌های برشی و فشاری بتن در اتصال برحسب مکان‌های مختلف حفره در شکل ۱۰ و جدول ۵ آورده شده است.



(الف) (ب) (پ) (ج) (د)

شکل ۱۰: ترک خوردگی در اتصال تحت زلزله لوما پربتا

الف: اتصال سالم ب: اتصال با حفره در پای ستون پ: اتصال با حفره در مجاورت تیر ج: اتصال با حفره در مرکز د: اتصال با حفره بزرگ در مرکز.

جدول ۵: درصد خسارات وارده به اتصالات شکل ۱۰ تحت زلزله لوما پربتا.

اتصال (الف)		اتصال (ب)		اتصال (پ)		اتصال (ج)		اتصال (د)	
خسارت کم		۴۷٪/۸۳		۴۰٪/۱۳		۴۶٪/۵۰		۵۲٪/۸۷	
خسارت متوسط		۲۴٪/۲۲		۲۸٪/۶۶		۲۶٪/۱۱		۲۲٪/۲۹	
برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری
٪۶۴	٪۳۶	٪۵۸	٪۴۲	٪۶۳	٪۳۷	٪۵۱	٪۴	٪۵۵	٪۲
خسارت زیاد		۱۱٪/۱۸		۱۴٪/۶۵		۱۰٪/۱۹		۷٪/۶۴	
برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری
٪۶۱	٪۳۹	٪۷۰	٪۳۰	٪۵۶	٪۴۴	٪۶۷	٪۳۳	٪۶۲	٪۱
خسارت شدید		۱۶٪/۷۷		۱۶٪/۵۶		۱۷٪/۲		۹٪/۴۰	
برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری	برشی	فشاری
٪۹۳	٪۷	٪۱۰۰	٪۰	٪۹۳	٪۷	٪۹۶	٪۴	٪۹۳	٪۷

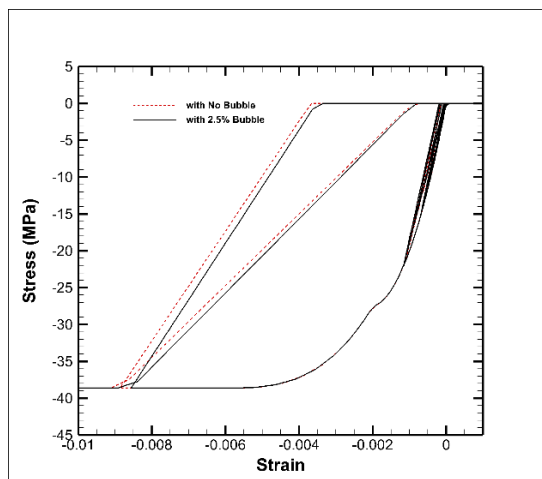
مطابق جدول ۵ بیشترین نقاط سالم را در اتصال ج با حفره ۲/۵ درصدی در مرکز اتصال می‌توان دید به طوری که ۵۲/۸۷ درصد از اجزای اتصال بدون خسارت و یا دارای خسارت‌های کم می‌باشند. نکته جالب این که وجود حفره مذکور سبب بهبود شرایط اتصال از نظر مقدار بتن‌های خسارت ندیده تا حدود ۱۰ درصد شده است. این حفره همچنین خسارت‌های متوسط و زیاد را کاهش داده ولی باعث افزایش ناچیز (حدود ۲/۵ درصدی) خسارت‌های شدید گردیده است. باید توجه داشت که حفره‌های بزرگ در مرکز اتصال می‌توانند باعث بروز خسارت‌های زیاد در نواحی اطراف حفره شوند. مثلاً وجود حفره مرکزی با حجم نسبی ۱۰ درصد حجم اتصال (اتصال د) ۱۹/۴۶ درصد بتن اتصال را دچار خسارت زیاد می‌کند که این عدد رشد ۷۴ درصد را نسبت به اتصال سالم نشان می‌دهد. جالب توجه این که وجود این حفره مقدار خسارت شدید بتن را به میزان ۴۴ درصد کاهش داده است. با افزایش حجم حفره میانی تا مقدار تقریبی ۱۰ درصد حجم ناحیه اتصال،

خسارت‌های شدیدی در اطراف حفره متمرکز شده و مقدار قابل توجهی از انرژی ورودی در این ناحیه مستهلک می‌شود که این خود باعث کاهش سطح خسارت نقاط دور از حفره شده است. در اتصال (پ) ۱۷/۲ درصد از اجزای اتصال دچار خسارت شدید شده اند. در این اتصال حفره در محل تماس با تیر دیده می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود حفره در افزایش نقاط با خسارت‌های شدید نقش زیادی ندارد و حتی در شرایطی باعث کاهش این نقاط می‌شود. همچنین وجود حفره می‌تواند باعث تغییر نحوه توزیع خسارت در اتصال شود. نکته قابل توجه دیگر آن است که شکست برشی بیشترین نقش را در ایجاد خسارت در اتصال دارد و این نقش با افزایش شدت خسارت بیشتر می‌شود. به طور میانگین ۵۸/۴ درصد خسارت‌های متوسط، ۶۲/۲ درصد خسارت‌های زیاد و ۹۵ درصد خسارت‌های شدید برشی هستند. وجود حفره در خسارت‌های متوسط سبب کاهش شکست‌های برشی و در خسارت‌های زیاد باعث افزایش این نوع شکست می‌گردد. باید توجه داشت که شکست غالب برشی در مرکز اتصال ناشی از دورگیر بودن بتن است به طوری که با ایجاد حفره در داخل اتصال و کم شدن اثر دورگیری در المان‌های اطراف حفره، مکانیزم شکست برشی به شکست فشاری تبدیل می‌شود (۱۰-د). شکل ۱۱ تغییر سطوح عملکردی اتصال در اثر ایجاد و جابجایی حفره را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود وجود حفره سطح عملکردی اتصال ج را بدلیل افزایش تعداد نقاط سالم (رنگ خاکستری و تا حدی رنگ سبز) و کاهش نقاط با خسارت زیاد (رنگ آبی) بهبود بخشیده است این در حالی است که سطوح عملکردی در سایر اتصالات تقلیل یافته است.

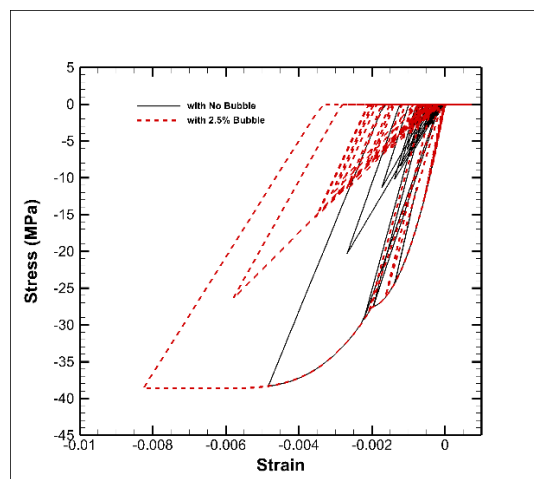


شکل ۱۱: خسارات وارده به اتصالات شکل ۱۰ تحت بار لرزه ای لوما پریتا.

نمودار چرخه ای بتن اطراف حفره شماره ۵ تحت شتاب نگاشت لوما پریتا در شکل ۱۲-الف ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بتن مجاور حفره هوا تغییر مکان و نیاز شکل پذیری بیشتری نسبت به بتن در اتصال بدون حفره دارد. این موضوع در نقطه بحرانی اتصال (شکل ۶-الف) که دچار شدید ترین تنش‌هاست اما از حفره فاصله دارد نیز قابل مشاهده است (شکل ۱۲-ب).



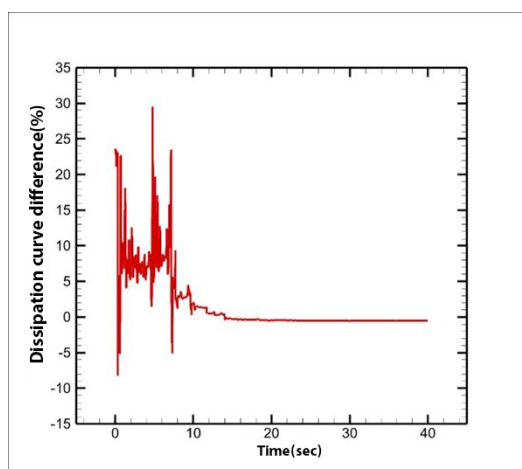
ب: در نقطه بحرانی اتصال



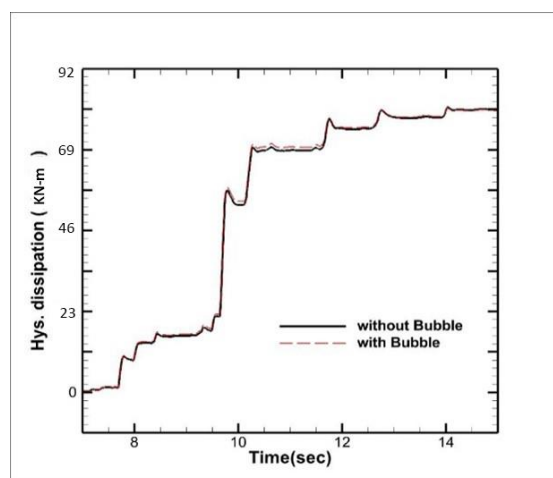
الف: در مجاورت حفره هوا

شکل ۱۲: رفتار چرخه ای بتن اتصال با و بدون حفره هوا

مقایسه استهلاک هیستریزس اتصال با وجود ۲/۵٪ حفره (حفره شماره ۵) و اتصال متراکم بدون حفره نشان می‌دهد که وجود این حفره به طور متوسط میزان اتلاف انرژی را حدود ۱/۶٪ بهبود می‌بخشد. شکل ۱۳-الف سطح انرژی هیستریزس کل اتصال را در بخشی از زمان تحریک لوما پریتا در دو حالت با و بدون حفره نشان می‌دهد.



ب- اختلاف انرژی چرخه ای تلف شده با و بدون حباب هوا



الف- انرژی چرخه ای تلف شده

شکل ۱۳: مقایسه انرژی تلف شده چرخه ای در اتصال با حفره و بدون حفره.

اختلاف سطوح انرژی استهلاکی در شکل ۱۳-ب قابل مشاهده است. همانگونه که دیده می‌شود با افزایش شدت انرژی ورودی زلزله اختلاف استهلاک ایجاد شده تا حدود ۳۰ درصد بالا می‌رود. باید توجه داشت که در پاره ای از زمان‌های تحریک، استهلاک حاصل از اتصال بدون حفره بیش از استهلاک اتصال با حفره می‌باشد که این به دلیل نحوه شکل گیری مفاصل پلاستیک در آن لحظه خاص تحریک می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه انجام شده اثر وجود حفره‌های هوا در داخل اتصال به کمک مدل خرابایی مورد بررسی قرار گرفت. انطباق خوب نتایج مدل سازی المان محدود و نتایج آزمایشگاهی صحت مدل سازی را نشان داد. به کمک مدل خرابایی تاثیر وجود حفره، اندازه و محل قرار گیری آن در متغیرهایی چون لغزش میلگرد و مکانیزم شکست اتصال بررسی شد. همچنین با به کار گیری ۳ شتاب نگاشت با فرکانس‌های غالب کمتر، مساوی و بیشتر از فرکانس غالب اتصال رفتار اتصال مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که محل قرار گیری حفره‌ها از جمله عوامل تاثیر گذار بر روی رفتار اتصال است. ایجاد حفره سبب بروز تمرکز تنش و بالا رفتن احتمال تخریب اتصال می‌شود. جایگیری حفره می‌تواند بر محل، عرض و نحوه انتشار ترک و موضعی شدن خرابی اثر گذار باشد. با انجام تحلیل‌های گسترده معلوم گردید که وجود حفره در اتصال باعث افزایش لغزش میلگردهای نزدیک به حفره می‌شود به طوری که در مطالعه اخیر این لغزش تا ۹۱ درصد افزایش را نشان داد. همچنین بررسی منحنی‌های چرخه ای المان تماسی نشان داد که میزان لغزش میلگرد به دلیل وجود حفره و حذف بتن در سیکل‌های فشاری افزایش و در سیکل‌های کششی تغییر قابل توجهی ندارد که این مساله به دلیل تاثیر کم بتن در کشش می‌باشد. نکته جالب این که وجود حفره با حجم ۲/۵٪ در مرکز اتصال سبب بهبود شرایط اتصال از نظر مقدار بتن‌های خسارت ندیده تا حدود ۱۰٪ شده است. همچنین خسارت‌های متوسط و زیاد را نیز کاهش داده ولی باعث افزایش ناچیز (حدود ۲/۵ درصدی) خسارت‌های شدید گردیده است. این در حالی است که حفره‌های بزرگ تر باعث بروز خسارت‌های زیاد در نواحی اطراف حفره شدند به طوری که با افزایش حجم حفره میانی تا مقدار تقریبی ۱۰ درصد حجم ناحیه اتصال، خسارت‌های شدیدی در اطراف حفره متمرکز شده و مقدار قابل توجهی از انرژی ورودی در این ناحیه مستهلک گردید که این خود باعث کاهش سطح خسارت نقاط دور از حفره شد. وجود حفره می‌تواند باعث تغییر نحوه توزیع خسارت در اتصال شود به طوری که مثلاً عرض ترک‌ها در نقاطی از اتصال کم و در نقاط دیگری زیاد شود. مشاهدات نشان داد که شکست برشی بیشترین نقش را در ایجاد خسارت در اتصال دارد به طوری که با افزایش شدت آسیب این نقش بیشتر می‌شود. به طور میانگین ۵۸/۴ درصد خسارت‌های متوسط، ۶۲/۲٪ خسارت‌های زیاد و ۹۵٪ خسارت‌های شدید برشی هستند. نکته قابل توجه آن که به طور میانگین وجود حفره در خسارت‌های متوسط نسبت شکست‌های برشی را کاهش و در خسارت‌های زیاد نسبت شکست‌های برشی را افزایش می‌دهد. این مطالعه نشان داد که میزان استهلاک هیستریزس اتصال دارای حفره بیش از اتصال متراکم فاقد حباب هواست به طوری که این افزایش با ایجاد حفره ۲/۵٪ به طور متوسط به میزان ۱/۶ درصد رسید. با افزایش شدت انرژی ورودی زلزله اختلاف استهلاک ایجاد شده مذکور به صورت لحظه ای تا حدود ۳۰ درصد بالا می‌رود.

مراجع:

- [1] Dolatabadi, P.D., et al., System identification method by using inverse solution of equations of motion in time domain and noisy condition. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020. 538: p. 122680.
- [2] Ghafory-Ashtiany, M. and M. Ghasemi, System identification method by using inverse solution of equations of motion in frequency domain. *Journal of vibration and control*, 2013. 19(11): p. 1633-1645.
- [3] Dolatabadi, P.D., et al., Sensitivity of beam-column element stiffness matrix to the crack parameters. *Journal of Vibroengineering*, 2018. 20(4): p. 1708-1719.
- [4] Alath, S., Modeling inelastic shear deformation in reinforced concrete beam-column joints. 1995.
- [5] Beres, A., et al., Experimental results of repaired and retrofitted beam-column joint tests in lightly reinforced concrete frame buildings. *Technical Rep. No. NCEER-92*, 1992. 25.
- [6] Biddah, A. and A. Ghobarah, Modelling of shear deformation and bond slip in reinforced concrete joints. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 1999. 7(4): p. 413-432.
- [7] Anderson, M., D. Lehman, and J. Stanton, A cyclic shear stress-strain model for joints without transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 2008. 30(4): p. 941-954.
- [8] Ricci, P., et al., Experimental tests of unreinforced exterior beam-column joints with plain bars. *Engineering Structures*, 2016. 118: p. 178-194.

- [9] Shayanfar, J., H.A. Bengar, and A. Parvin, Analytical prediction of seismic behavior of RC joints and columns under varying axial load. *Engineering Structures*, 2018. 174: p. 792-813.
- [10] Sharma, A., R. Eligehausen, and G. Reddy, A new model to simulate joint shear behavior of poorly detailed beam-column connections in RC structures under seismic loads, Part I: Exterior joints. *Engineering Structures*, 2011. 33(3): p. 1034-1051.
- [11] Girgin, S.C., İ.S. Misir, and S. Kahraman, Seismic performance factors for precast buildings with hybrid beam-column connections. *Procedia engineering*, 2017. 199: p. 3540-3545.
- [12] Mohemmy, M. and V. Broujerdian, Valid simulation of bond-slip behavior between concrete and reinforcement. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021. 50(101): p. 73-82.
- [13] Pantelides, C.P., et al., Seismic performance of reinforced concrete building exterior joints with substandard details. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 2017. 2(1): p. 1-11.
- [14] Zhang, X. and B. Li, Seismic performance of exterior reinforced concrete beam-column joint with corroded reinforcement. *Engineering Structures*, 2021. 228: p. 111556.
- [15] Al-Bayati, A.F., Shear strength of reinforced concrete beam-column joints. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2022: p. 1-33.
- [16] Mousavi, S.S. and M. Dehestani. Influence of mixture composition on the structural behaviour of reinforced concrete beam-column joints: A review. in *Structures*. 2022. Elsevier.
- [17] Liu, T., et al., Machine-learning-based models to predict shear transfer strength of concrete joints. *Engineering Structures*, 2021. 249: p. 113253.
- [18] Sudarshan, N. and T. Chandrashekar Rao, Vibration Impact on Fresh Concrete of Conventional and UHPFRC. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017. 12(8): p. 1683-1690.
- [19] Bowers, J.T., Nonlinear cyclic truss model for beam-column joints of non-ductile RC frames. 2014, Virginia Tech.
- [20] SAP, V., 15.2. 1, CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE, and CSiBridge. *Computers and Structures*, Inc, 2013.
- [21] Dodd, L. and J. Restrepo-Posada, Model for predicting cyclic behavior of reinforcing steel. *Journal of structural engineering*, 1995. 121(3): p. 433-445.
- [22] Lowes, L.N. and A. Altoontash, Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. *Journal of Structural Engineering*, 2003. 129(12): p. 1686-1697.
- [23] Peer, P., Ground motion database. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 2014.