

مدلسازی شکست برشی ستون‌های بتنی به علت برهم‌کنش با دیوار پرکننده آجری

محمدرضا تابش پور، علی افضلی فرد، علی اکبر گل افشانی

۱- عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

۳- عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

tabeshpour@sharif.edu

چکیده

حضور پرکننده در داخل قاب باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رفتار سازه می‌شود. وجود دیوار در داخل قاب عملاً از جابجایی قاب در صفحه خود جلوگیری کرده و در نتیجه بخشی از نیروی جانبی وارد به قاب به میانقاب منتقل می‌گردد. مشاهدات و تجربیات گذشته و تحقیقات گسترده نظری و آزمایشگاهی نشان داده است که مقاومت و سختی این قابها به مراتب بیشتر از قاب خالی (بدون دیوارهای پرکننده) است. حضور پرکننده باعث ایجاد اثرات مثبت و منفی مختلفی در سازه خواهد شد که بایستی مهندس طراح در هنگام طراحی این پارامترها در نظر بگیرد. یکی از اثرات منفی پرکننده، اندرکنش پرکننده با قاب و ایجاد تنش‌های فشاری قابل ملاحظه در کنج‌های فشاری است که باعث تحمیل نیروی برشی قابل ملاحظه‌ای به ستون در ناحیه اندرکنش خواهد شد. در این تحقیق طریقه مدلسازی امکان ایجاد شکست برشی در ستون بتنی و در نظر گرفتن اندرکنش پرکننده با قاب بر اساس مطالعات الوود در نرم‌افزار OpenSees مورد توجه قرار گرفته است. سپس با انجام آنالیز پوش‌آور بر روی یک قاب تک دهانه دارای پرکننده و مقایسه منحنی نیروی برشی ایجاد شده در ستون با حالت قاب خالی مشاهده میشود که نیروی برشی ماکزیمم وارده به ستون به دلیل حضور پرکننده در حدود ۳۳٪ افزایش یافته است. بنابراین بایستی با افزایش مقاومت ستون در ناحیه کنج‌های فشاری با تامین درصد مناسب و فواصل مناسب برای میلگردهای عرضی از وقوع این نوع گسیختگی جلوگیری کرد.

کلمات کلیدی: شکست برشی، پرکننده آجری، ستون بتنی، برهم‌کنش پرکننده و قاب

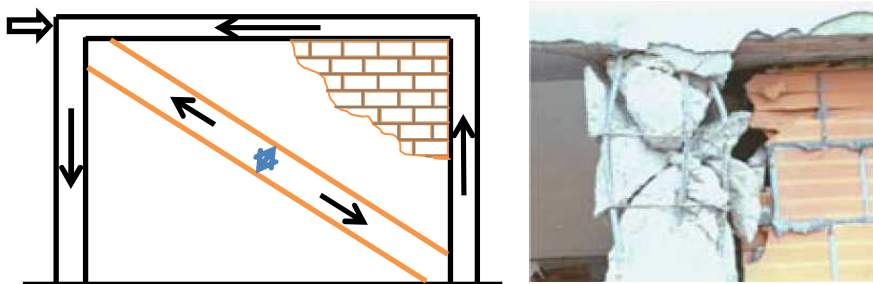
۱. مقدمه

در دهه‌های گذشته محققین و مهندسين زیادی روی اثرات دیوارهای آجری پرکننده‌ی درون قاب‌های ساختمانی، تحقیق و پژوهش نموده‌اند و همواره اثراتی که دیوارهای آجری پرکننده می‌توانند بر روی رفتار سازه داشته باشند یکی از دغدغه‌های مهندسين بوده است. از آن‌جا که مصالح مورد استفاده و در نتیجه مقاومت و سختی این دیوارها تا حد بسیار زیادی به محل ساخت و مصالح در دسترس وابسته است، اکثر کشورها با توجه به شرایط اقلیمی موجود خود ضوابطی را برای در نظر گرفتن اثرات دیوارهای آجری پرکننده، در طراحی‌ها و آیین‌نامه‌های خود وارد کرده‌اند. در بسیاری از ساختمان‌ها، دیوارهای آجری به دلایل معماری ساخته می‌شوند لیکن بدلیل پیچیده بودن مسئله و عدم وجود مدل تحلیلی منطقی و در عین حال ساده، ترکیب دیوارهای پرکننده آجری اغلب در تحلیل سازه‌های ساختمانی صرف‌نظر می‌شود. این فرض ممکن است باعث کاهش دقت در تخمین سختی جانبی، مقاومت و شکل‌پذیری سازه گردد. تحقیق بر روی عملکرد دیوارهای پرکننده موضوع جدیدی نیست، مطالعات اولیه در حدود ۵۰ سال پیش آغاز شده است. علیرغم تداوم مطالعات در سال‌های اخیر بعضی از آیین‌نامه‌های ساختمانی هنوز به طور دقیق نحوه طراحی سیستم‌های سازه‌ای دارای دیوار پرکننده و نحوه ارزیابی خسارت را در این سیستم‌ها مشخص نکرده‌اند. وجود دیوار در داخل قاب فولادی یا بتنی عملاً از جابجایی قاب در صفحه خود جلوگیری کرده و در نتیجه بخشی از نیروی جانبی وارد به قاب به میانقاب منتقل می‌گردد. مشاهدات، تجربیات گذشته و تحقیقات گسترده نظری و آزمایشگاهی نشان داده است که مقاومت و سختی این قابها به مراتب بیشتر از قاب لخت (بدون دیوارهای پرکننده) است. به

طور کلی میتوان گفت که اندرکنش قاب با پرکننده موجب افزایش سختی و مقاومت از یک سو و افزایش نرمی (شکل پذیری) پرکننده از سوی دیگر می شود و در نتیجه خواص لرزه ای رابه طور چشمگیری بهبود می بخشد [۱].

۲. اندرکنش بین قاب و دیوار پرکننده آجری

در ابتدای اعمال نیروی جانبی به پرکننده ها، رفتار تقریباً الاستیک است. با افزایش نیرو و جابجایی، میانقاب از قاب اطراف خود جدا می شود. بعد از این جدادگی که در جابجایی های بسیار کمی رخ می دهد، تنش در مناطق کششی کاهش یافته و به سمت صفر می روند و تنش در گوشه های فشاری افزایش می یابد. به دلیل این رفتار، با تقریب زیاد می توان میانقاب را مشابه یک عضو فشاری قطری تلقی نمود.



شکل ۲- اندرکنش قاب و پرکننده

در شکل ۱ نمونه ای از اندرکنش بین قاب و دیوار پرکننده و ستون بتنی نشان داده شده است چنان که ملاحظه می شود به علت عدم یکپارچگی بین بتن ستون و تیر و همچنین عدم کفایت مقاومت برشی ستون در قسمت فوقانی چنین شکستی رخ داده است. مطابق شکل مشاهده می شود که حتی در صورت وجود دیوار پرکننده با بلوک سفالی غیر ضخم نیز در ستون شکست برشی شدید ایجاد می شود. ممکن است رفتار مهاربند معادل دیوار به صورت تیر به تیر باشد که در این صورت شکست برشی متمرکز در لبه ی تیر رخ می دهد [۲].

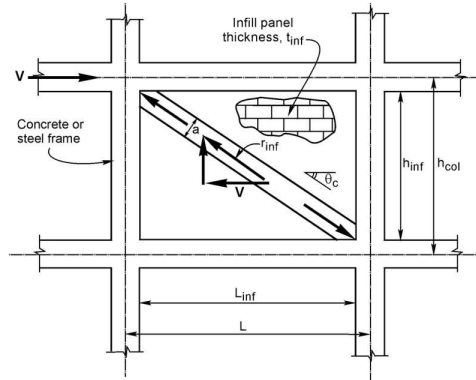
۳. مدل سازی پرکننده آجری

مدول یانگ و مقاومت برای پانل دیوار پرکننده به صورت زیر است:

الف- برای دیوار پرکننده بتن مسلح $E_{ce} = 4700\sqrt{f'_{ce}}$ که f'_{ce} مقاومت مورد انتظار استوانه بتن بر حسب MPa است.

ب- برای مصالح آجری رسی $E_{me} = 500f'_{me}$ بوده که در آن f'_{me} مقاومت مورد انتظار منشور آجر است.

در دستور العمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود از مدل دستک فشاری با عرض موثر معادل، برای شبیه سازی رفتار پرکننده مصالح بنایی غیر مسلح استفاده شده است. مدول یانگ و ضخامت دستک فشاری معادل باید با میانقاب برابر باشد. روش مدلسازی دستور العمل FEMA273 با دستور العمل بهسازی لرزه ای یکسان می باشد.



شکل ۲- مدلسازی پانل دیوار پرکننده با میله معادل

دستک معادل فشاری دارای ضخامتی برابر ضخامت دیوار پرکننده (t_{inf}) و طول قطری برابر r_{inf} بوده و پهنای مؤثر آن برابر است با:

$$a = 0.175(\lambda h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (1)$$

$$\lambda_L = \left[\frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\theta}{4E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right] \quad (3)$$

که در آن h_{col} ارتفاع ستون از محور تا محور تیر (m)، h_{inf} ارتفاع پانل دیوار پرکننده (m)، E_{fe} مدول ارتجاعی مورد انتظار برای مصالح قاب (MPa)، E_{me} مدول مورد انتظار مصالح دیوار پرکننده (MPa)، I_{col} ممان اینرسی ستون (mm^4)، L_{inf} طول پانل پرکننده (m)، r_{inf} طول قطری پانل دیوار پرکننده (m)، t_{inf} ضخامت پانل دیوار پرکننده و میله‌ی معادل (m)، θ زاویه‌ای که تانژانت آن برابر ارتفاع پانل به طول آن است (رادیان) [۳]:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_{inf}}{L_{inf}} \right) \quad (3)$$

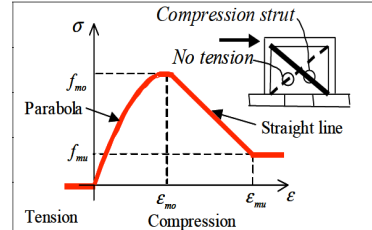
۴. تعیین پارامترهای مصالح بکاربرده شده در OpenSees

در این تحقیق به منظور مدلسازی اندرکنش قاب و پرکننده از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. برای مدل‌سازی در این نرم‌افزار برای انجام آنالیز غیرخطی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است. پای ستون‌ها گیردار بوده و ستون‌ها بصورت سرتاسری مدل شده‌اند. کف طبقات با بستن درجه آزادی گره‌ها در راستای افقی به هم (Equal Dof) به صورت دیافراگم در نظر گرفته شده است. جرم طبقات بصورت بار گسترده بر روی تیرها و جرم ستون‌ها به صورت گره‌ای در نقاط اتصال تیر و ستون تعریف شده است.

پرکننده در نظر گرفته شده در این تحقیق دارای ضخامت ۱۷ سانتی‌متر می‌باشد. معادله تنش- کرنش مصالح بنایی (آجری) در فشار مطابق جدول ۱ معمولاً به صورت تابع سهمی تا تنش ماکزیمم f_{mo} در نظر گرفته می‌شود. سپس با افزایش کرنش، مقدار تنش به صورت خطی کاهش یافته و بعد از آن تنش ثابت می‌ماند.

جدول ۱- خصوصیات مصالح دستک معادل فشاری

	Thickness 17 (Cm)
f_{mo} (MPa)	3.68
ϵ_{mo}	0.0014
f_{mu} (MPa)	0.736
ϵ_{mu}	0.0028

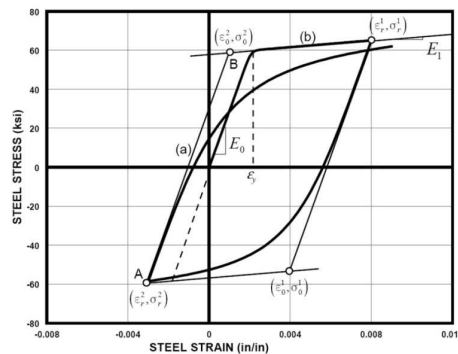


با توجه به پیشنهاد صورت گرفته در گزارش شماره ۱۰۰ موسسه PEER رابطه تنش- کرنش تارهای بتنی با استفاده از مدل Concrete01 نرم افزار OpenSees شبیه سازی شده است. این مدل بر اساس روابط اصلاح شده کنت-پارک ایجاد شده است.

جدول ۲- جزئیات تنش و کرنش تارهای بتنی مقاطع فایبر

	ϵ_{mo}	f_{mo} (MPa)	ϵ_{mu}	f_{mu} (MPa)
Core	0.002	28	0.01	5.6
Cover*	4		5	
	0.002	24	0.00	4.8
			5	

رابطه تنش-کرنش آرماتورهای مقاطع با استفاده از مدل Steel02 نرم افزار OpenSees شبیه سازی شده است. این مدل بر اساس روابط مینگتو-پینتو ایجاد شده که در این مطالعه E_0 برابر 2×10^{11} مگاپاسکال، تنش جاری شدن 4×10^8 مگاپاسکال و b برابر با ۱ درصد در نظر گرفته شده است.

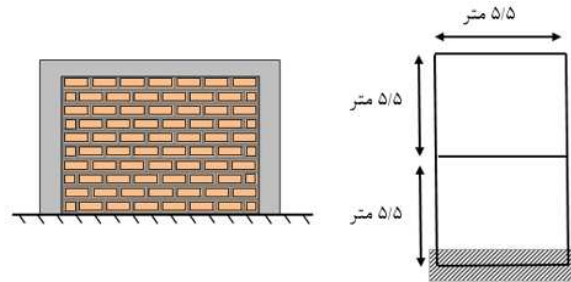


شکل ۳- منحنی تنش-کرنش فولاد

۵. تعیین پارامترهای فنر برشی و محوری در OpenSees

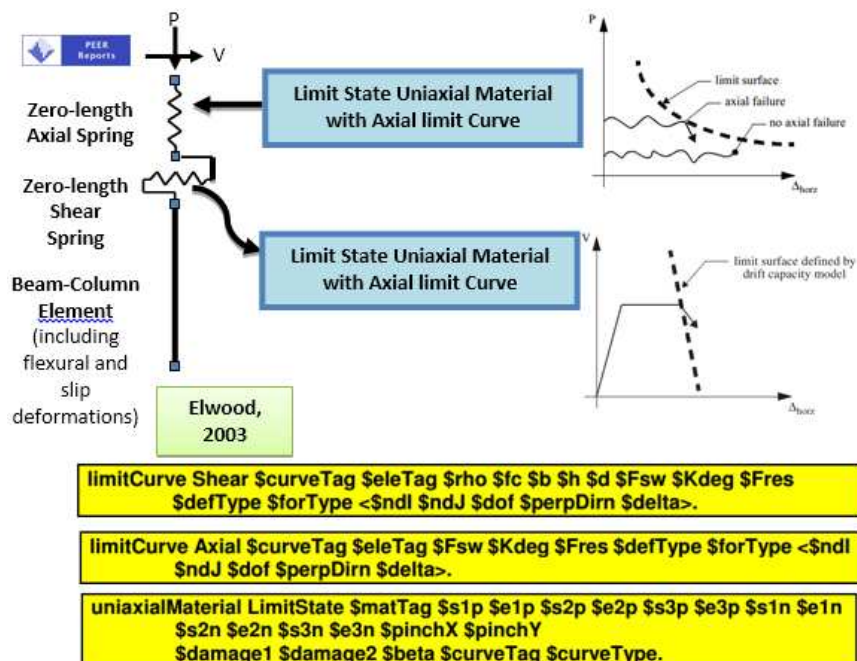
در سال ۲۰۰۳ الود برای مدل کردن امکان گسیختگی برشی و همچنین امکان از دست رفتن مقاومت محوری ستون در OpenSees، مصالح حدی و منحنی‌های حدی برش و نیروی محوری را معرفی کرد [۴]. در این قسمت بدلیل عدم وجود توضیحات کافی برای محاسبات پارامترهای این مصالح در راهنمای OpenSees، تک تک پارامترها بصورت کامل برای مدل

موجود محاسبه می‌شود. قاب مورد بررسی در این قسمت یک قاب تک دهانه یک طبقه می‌باشد. بار مرده و زنده به ترتیب برابر ۵۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ارتفاع قاب ۳ متر و طول دهانه‌ها برابر ۵/۵ متر می‌باشد. با توجه به طراحی صورت گرفته در نرم‌افزار SAP2000 برای ستون‌ها از مقطع " ۹Φ۱۸ * ۳۵ * ۳۵ " و برای تیرها از مقطع " ۴Φ۱۶ * ۴۰ * ۳۵ " استفاده شده است.



شکل ۴- مدل مورد مطالعه

بدلیل اینکه برخی روابط پیشنهادی بر حسب واحد انگلیسی داده شده است در این قسمت محاسبات بر حسب Kips, in صورت می‌گیرد.



شکل ۵۵- مدل الوود برای امکان ایجاد شکست برشی در ستون بتنی در OpenSees

✓ داده‌های اصلی و مشخصات مصالح

$$L = 5.5m = 216.53in$$

$$H = 3m = 118.11in$$

$$b = h = 35cm = 13.78in$$

با در نظر گرفتن کاور ۶/۵ سانتی‌متری برای ستون داریم:

$$d = 11.22in$$

$$\rho = 0.18\%$$

$$A_g = 189.78in^2$$

$$s = 5.5in$$

$$E_c = 3400Kips / in^2$$

$$E_s = 29000Kips / in^2$$

$$f_y = 4000kg / cm^2 = 56Kips / in^2$$

$$f'_c = 250kg / cm^2 = 3.558Kips / in^2$$

مشخصات مصالح بصورت زیر می باشد:

✓ پارامترهای منحنی حدی برش

$$F_{sw} = \frac{(0.0018 \times 11.22 \times 13.78) \times 56 \times 11.22}{5.5} = 31.79kips \quad (4)$$

$$V_u = V_c + V_s = 53.48kips \quad (5)$$

$$V_c = k \left(\frac{6\sqrt{f'_c}}{a/d} \times \sqrt{1 + \frac{P}{6A_g \sqrt{f'_c}}} \right) 0.8A_g \quad (6)$$

$$= 1.0 \left(\frac{6\sqrt{3557}}{16/11.22} \times \sqrt{1 + \frac{20000}{6 \times 13.78^2 \times \sqrt{3558}}} \right) \times 0.8 \times 13.78^2$$

$$= 25.9kips$$

$$V_s = k \frac{A_{sw} f_y d}{s} = 31.79kips \quad (7)$$

$$\frac{\Delta_s}{L} = \frac{3}{100} + 4\rho'' - \frac{1}{500} \frac{v}{\sqrt{f'_c}} - \frac{1}{40} \frac{P}{A_g f'_c} \geq \frac{1}{100} (psi) \quad (8)$$

$$\frac{\Delta_s}{L} = \frac{3}{100} + 4(0.0018) - \frac{1}{500} \frac{v}{\sqrt{3558}} - \frac{1}{40} \frac{P}{13.78^2 \times 3558}$$

$$= 2.7\% \geq \frac{1}{100} (psi)$$

$$v = \frac{V_u}{bh} = \frac{20000}{13.78^2} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta_a}{L} = \frac{4}{100} \times \frac{1 + \tan^2 \theta}{\tan \theta + P \left(\frac{s}{A_{st} f_{yt} d_c \tan \theta} \right)} (psi) \quad (10)$$

$$= \frac{4}{100} \times \frac{1 + \tan^2 65}{\tan 65 + P \left(\frac{5.5}{(0.0018 \times 13.78 \times 11.22) 56000 \times 11.22 \times \tan 65} \right)} (psi)$$

$$= 9.19\%$$

$$K'_{deg} = \frac{V_u}{\Delta_a - \Delta_s} = \frac{53.48}{\left(\frac{9.19}{100} - \frac{2.7}{100} \right) \times 118.11} = 6.98kips \quad (11)$$

$$K_{unload} = 12 \frac{EI_{eff}}{L^3} = 12 \frac{(0.5EI_g)}{L^3} \quad (12)$$

$$= \frac{12 \times (0.5 \times 3400 \times \frac{13.78^4}{12})}{118.11^3}$$

$$= 37.2 \text{ kips / in}$$

$$K_{deg} = \left(\frac{1}{K'_{deg}} - \frac{1}{K_{unload}} \right)^{-1} \quad (13)$$

$$= \left(\frac{1}{6.98} - \frac{1}{37.2} \right)^{-1} = 8.58$$

✓ پارامترهای مصالح حدی برش

$$Rigidslope = \frac{G \times Ag}{L} \quad (14)$$

$$= \frac{3400}{2(1+0.2)} \times \frac{13.78^2}{118.11} = 2277.4$$

✓ پارامترهای منحنی حدی محوری

$$K_{deg} = -0.02 \times \frac{E_c \times Ag}{L} \quad (15)$$

$$= -0.02 \times \frac{3400 \times (13.78)^2}{118.11^2} = -109.3$$

✓ پارامترهای مصالح حدی محوری

$$AxialElasticSlope = 99 \times \frac{E_c \times Ag}{L} \quad (16)$$

$$= 99 \times \frac{3400 \times 13.78}{118.11}$$

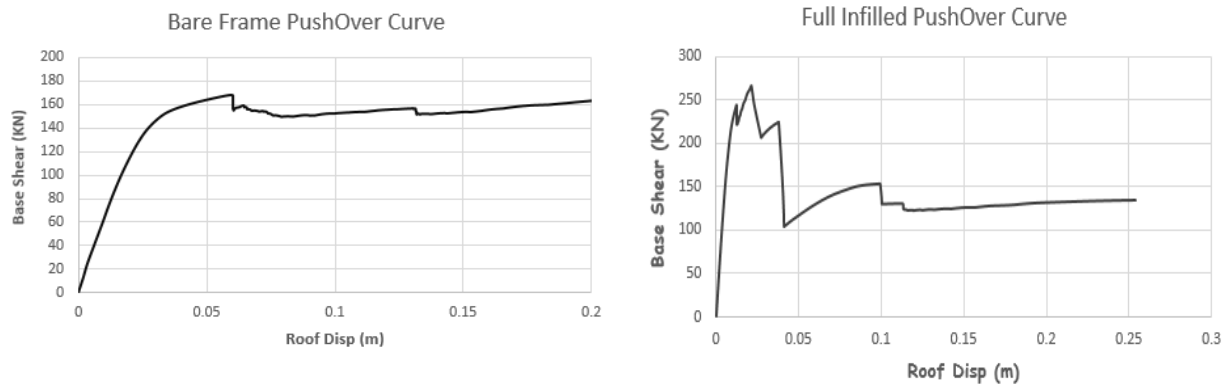
۶. نتایج آنالیز

نمودار مربوط به آنالیز پوش‌آور مدل مورد مطالعه در حالت قاب خالی و قاب دارای پرکننده کامل را در شکل ۵ مشاهده می‌فرمایید. همانطوری که انتظار داشتیم حضور پرکننده باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت نهایی و سختی سازه شده است. افت‌های موجود در منحنی پوش‌دارای پرکننده بدلیل شکست ستون در ناحیه اندرکنش و شکست دستک‌های معادل پرکننده می‌باشد.

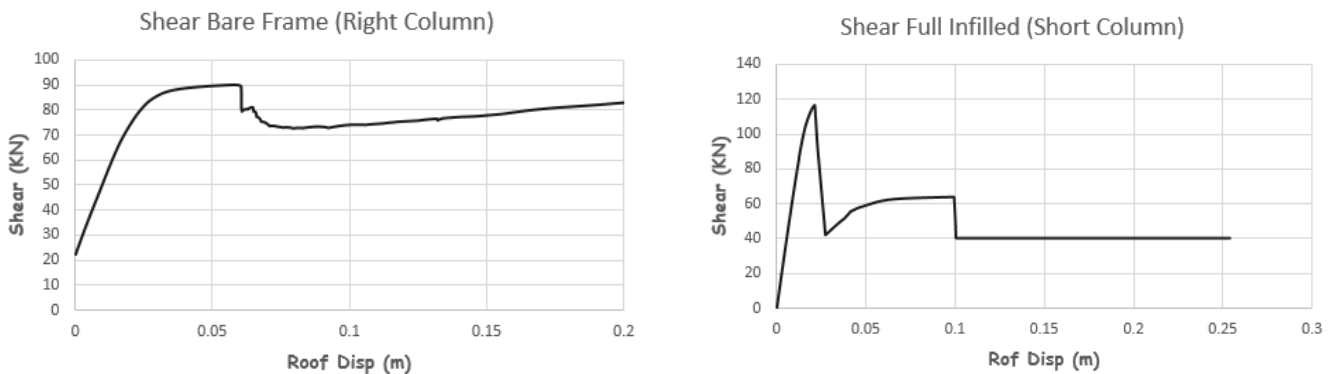
همچنین مقایسه نیروی برشی وارده به ستون سمت راست در طول آنالیز پوش‌آور در شکل ۶ ترسیم شده است. همانطوری که واضح است حضور پرکننده سبب ایجاد نیروی برشی متمرکز تحمیلی به ستون شده و بدلیل عدم وجود مقاومت برشی کافی در مقابل این نیرو در ناحیه اندرکنشی، ستون به صورت برشی دچار شکست شده است. بنابراین حضور پرکننده در داخل قاب بدلیل عملکرد پرکننده به صورت دستک فشاری، باعث می‌شود مجبور به افزایش مقاومت برشی ستون در ناحیه اندرکنشی توسط خاموت‌های ویژه باشیم تا مقاومت کافی در برابر نیروی برشی تحمیلی حاصل شود.

۷. نتیجه‌گیری

با دقت در منحنی‌های شکل ۶ نیروی برشی ماکزیمم وارده به ستون به دلیل حضور پرکننده از حدود ۹۰ کیلونیوتن به حدود ۱۲۰ کیلونیوتن افزایش یافته که بیانگر افزایش ۳۳٪ نیروی برشی ماکزیمم می‌باشد. نکته مهم در این قسمت این است که این افزایش نیروی برشی در ناحیه اندرکنشی است، بنابراین با افزایش مقاومت ستون در ناحیه کنج‌های فشاری با تامین درصد مناسب و فواصل مناسب برای میلگردهای عرضی میتوان از وقوع این نوع گسیختگی جلوگیری کرد.



شکل ۷- مقایسه نمودار پوش آور قاب خالی و قاب دارای پرکننده



شکل ۸- مقایسه منحنی نیروی برشی ستون در آنالیز پوش آور

۸. مراجع

- [۱] ح. مقدم، طرح لرزه ای ساختمان های آجری، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۳.
- [۲] تابش پور، محمدرضا، دست‌نامه ۱۸ مهندسی زلزله، دیوار پرکننده آجری در قاب‌های سازه‌ای، ۱۳۸۸: انتشارات فدک ایستاتیس.
- [۳] تابش پور، محمدرضا، تحلیل و طراحی قاب دارای میانقاب آجری یا بتنی، کنفرانس ملی مقاوم سازی و بهسازی ایران یادبود زلزله بم، ۱۳۸۵: تهران.

[4] Elwood, K. J. Moehle, J. P. "Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames" PEER Report, University of California, Berkeley, 2003