

مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از مهاربندی کابلی

یوسف حسین‌زاده* (استادیار)

محمدرضا فرج‌پور (کارشناس ارشد سازه)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف
دربی ۲-۱۴۶، شماره ۱، ص. ۱۰۱-۹۵

در این نوشتار، رفتار قاب‌های خمشی فولادی مقاوم‌سازی شده با مهاربند بررسی شده است. مهاربندهای ضربدیری با نیمرخ نبشی، مهاربند ضربدیری با کابل و مهاربند با دو کابل عبور داده شده از یک غلاف فولادی استوانه‌یی در محل برخورد کابل‌ها، که سه نوع مهاربندی مورد بررسی برای مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی فولادی را تشکیل می‌دهند. مدل‌های المان محدود فقط با قاب خمشی و سه قاب خمشی مقاوم شده ایجاد شده است. تحلیل غیرخطی قاب‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی با دامنه‌های افزایش‌یافته انجام شده است. مقایسه‌ی نتایج تحلیل المان محدود با داده‌های آزمایشگاهی، دقت مناسب مدل‌های المان محدود را نشان می‌دهد. با تعیین برش پایه، نیروهای محوری ایجاد شده در ستون‌ها، رفتار چرخه‌یی نیروی جابجایی و مکانیزم خرابی قاب‌ها، مزایا و معایب هر کدام از شیوه‌های مقاوم‌سازی بررسی شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از نیمرخ نبشی و کابل برای مقاوم‌سازی قاب، سختی اولیه و بار نهایی قاب را در مقایسه با قاب خمشی به صورت قابل توجهی افزایش و شکل‌پذیری آن را کاهش می‌دهد. در این روش به دلیل افزایش قابل توجه نیروی محوری ستون‌ها، نیاز به تقویت ستون‌ها و پی بیشتر است. در قاب با مهاربند کابلی غلافدار، سختی اولیه با قاب خمشی یکسان بوده و قاب رفتار شکل‌پذیر از خود نشان داده است. در این حالت افزایش نیروی محوری ستون در مقایسه با سایر روش‌های بادبندی کمتر بوده و تقویت لازم ستون‌ها و پی کمتر از سایر روش‌های مقاوم‌سازی است.

واژگان کلیدی: قاب خمشی فولادی، مهاربند کابلی، رفتار غیرخطی، بارگذاری چرخه‌یی، برش پایه.

مقدمه

دلیل عمل بادبندی و در نتیجه نیاز به مقاوم‌سازی ستون و پی، تغییر رفتار شکل‌پذیری قاب به رفتار ترد، کم‌انرژی عضو فشاری مهاربند، و ایجاد تغییر شکل ماندگار در قاب مشاهده می‌شود. برای حذف این معایب تحقیقاتی انجام شده است که در آن‌ها برای مقاوم‌سازی قاب‌ها، به منظور از بین بردن احتمال کم‌انرژی و حفظ شکل‌پذیری قاب، روش‌هایی مانند استفاده از بادبندهای غیرفشاری،^[۱] بادبندهای مقاوم در برابر کم‌انرژی،^[۲] و بادبندهای فولادی استهلاکی^[۳] بررسی شده است. این تحقیقات در پی یافتن روشی است که بتواند به صورت هم‌زمان اهداف بیان شده در بالا را تأمین کند.

روش برای مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از مهاربند کابلی پیشنهاد شده است،^[۴] که در آن دو کابل فولادی در نقطه‌ی برخورد از میان یک غلاف استوانه‌یی عبور داده می‌شوند. عضو مهاربندی برای دامنه‌های ارتعاش کم تا متوسط وارد عمل نمی‌شود و برای دامنه‌های ارتعاش بزرگ، عضو مهاربندی تغییر مکان نسبی بین طبقات را در یک محدوده‌ی معین کنترل می‌کند. همچنین

قاب‌های خمشی فولادی در نواحی با خطر لرزه‌خیزی زیاد و خیلی زیاد و با شکل‌پذیری متوسط یا زیاد طراحی می‌شوند. این قاب‌ها با تحمل تغییر شکل‌ها و دوران‌های خمیری بزرگ در محل مفصل‌های خمیری اعضا و اتصالات، شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک مناسب دارند. بنابراین در طراحی لرزه‌یی این قاب‌ها، ضریب رفتار بزرگی در نظر گرفته می‌شود و نیروهای طراحی آن‌ها نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌یی کمتر است.

مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی موجود در مواردی نظیر حادثه‌های پیش‌بینی نشده، زلزله‌های شدید یا تغییر کاربری سازه ضرورت پیدا می‌کند. برخی محققان از میان روش‌های موجود مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی، استفاده از بادبند برای مقاوم‌سازی را بررسی کرده‌اند. در روش‌های متداول مقاوم‌سازی، قاب‌های خمشی با افزودن مهاربند، معایبی مانند افزایش نیروی محوری ستون‌های مجاور بادبند اضافه شده به

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۰/۴/۱۹، پذیرش ۱۳۹۰/۵/۱.

روش به دلیل نبودن امکان کماتش، تغییرشکل ماندگار در قاب ایجاد نمی‌شود و با محدود شدن تغییرمکان‌های نسبی بین طبقات به وسیله کابل‌ها، شکل پذیری مورد نیاز اعضا افزایش نمی‌یابد. در این شیوه مقاوم‌سازی، افزایش نیروی محوری ستون‌ها محدود است و در نتیجه نیاز به مقاوم‌سازی ستون و پی کمتر خواهد بود.

هندسه‌ی قاب خمشی و قاب‌های مقاوم‌سازی شده

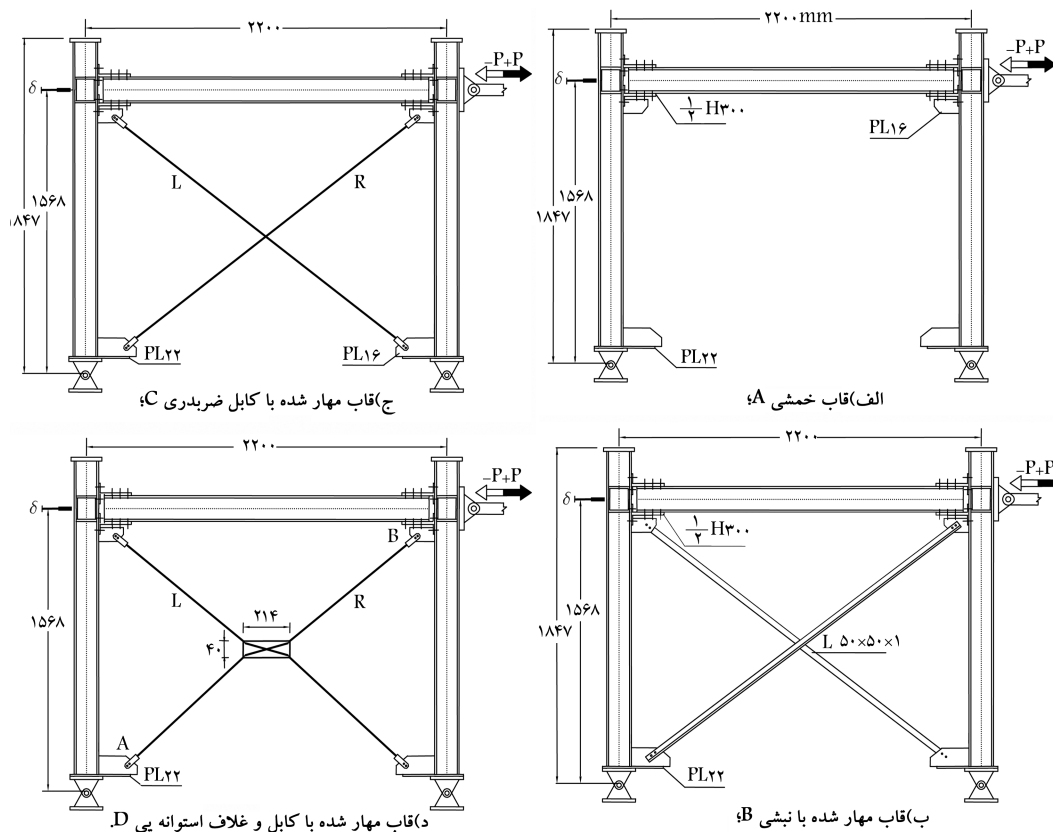
رفتار قاب خمشی مقاوم نشده با رفتار قاب‌های مقاوم شده به وسیله‌ی مهاربند ضربدری از نیمرخ نبشی، مهاربند ضربدری کابلی، و مهاربند با دو کابل عبور داده شده از یک غلاف استوانه‌یی فولادی در محل برخورد کابل‌ها مقایسه شده است. این قاب‌ها به ترتیب قاب‌های A، B، C و D نامگذاری شده‌اند. همچنین رفتار قاب‌های A، C و D در آزمایشگاه تحت اثر بارهای چرخه‌یی مطالعه شده است [۲۳].

اعضای تیر و ستون قاب‌ها، نیمرخ $10 \times 7 \times 150 \times H-150$ از فولاد نرمه‌ی B SN400 است و اجزای T شکل اتصال تیر به ستون با برش نیمرخ $9 \times 675 \times 150 \times H-300$ از فولاد نرمه‌ی SS400 به دست آمده‌اند. طراحی قاب‌ها با این فلسفه انجام شده است که در حالت حدی خرابی قاب، خرابی یا کماتش در ستون ایجاد نشود. همچنین در حالت حدی خرابی، رفتار تیر و ستون کشسان باقی بماند و تسلیم و خرابی فقط به اجزای T شکل اتصالات محدود شود. کابل مورد استفاده از نوع SUS316 با 19×7 رشته و قطر اسمی ۱۰ میلی‌متر، مقاومت تسلیم ۵۷۰/۹ و مقاومت نهایی ۶۰۰/۲ کیلو نیوتن است. پیچ‌های اتصالات از نوع A490 به قطر ۲۰ میلی‌مترند. شکل ۱، مشخصات هندسی قاب‌های

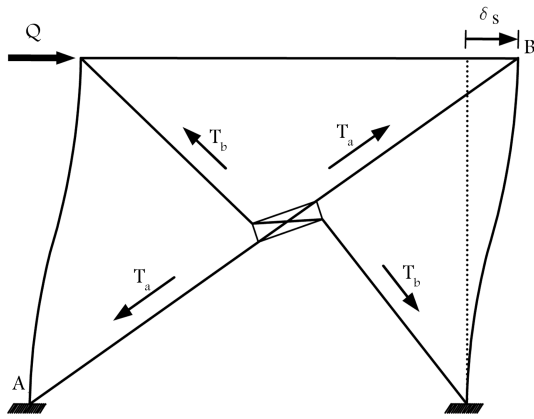
رفتار قاب با یک مهاربندی پیشنهادی، قاب خمشی بدون مهاربند و قاب خمشی مهار شده با کابل‌های ضربدری تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی به صورت تجربی بررسی شده است. [۵].

در این نوشتار، رفتار قاب‌های خمشی فولادی مقاوم‌سازی شده با سه شیوه‌ی مهاربندی مطالعه شده است. برای مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی فولادی، سه شیوه‌ی استفاده از مهاربند ضربدری با نیمرخ نبشی، مهاربند ضربدری با کابل، و مهاربند با دو کابل عبور داده شده از یک غلاف فولادی استوانه‌یی در محل برخورد کابل‌ها بررسی شده‌اند. مدل‌های المان محدود قاب خمشی تنها و سه قاب خمشی مقاوم شده به کمک نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. [۶]. رفتار غیرخطی مصالح فولاد و پیچ‌های اتصال، برخورد و تماس غیرخطی بین اجزای قاب‌ها، مهاربند و غلاف فولادی و فرمول‌بندی غیرخطی هندسی برای پیش‌بینی چرخش غلاف استوانه‌یی و رفتار غیرخطی قاب لحاظ شده است. تمام جزئیات قاب‌ها از جمله سخت‌کننده‌ها، پیچ‌های اتصال، ورق‌های پیوستگی، و ورق‌های تقویتی چشمه‌ی جان در مدل‌های المان محدود لحاظ و تحلیل غیرخطی قاب‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی با دامنه‌های افزایش‌یافته انجام شده است. مقایسه‌ی نتایج تحلیل المان محدود با داده‌های آزمایشگاهی [۵] دقت مناسب مدل‌های المان محدود را نشان می‌دهد. برای قاب‌های مورد بررسی، برش پایه، رفتار چرخه‌یی نیرو-جابجایی، نیروهای محوری ایجاد شده در ستون‌ها و مکانیزم خرابی قاب‌ها تعیین و بررسی شده‌اند.

قاب مقاوم‌سازی شده با کابل‌های عبور داده شده از غلاف فولادی رفتار مناسبی در برابر بارگذاری چرخه‌یی با دامنه‌های افزایش‌یافته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این قاب‌ها رفتاری شکل‌پذیر همانند قاب‌های خمشی فولادی دارند و ظرفیت استهلاك انرژی آن‌ها همانند ظرفیت قاب اصلی خواهد بود. در این



شکل ۱. قاب‌های خمشی و مهاربندی شده.



شکل ۳. قاب مقاوم سازی شده با کابل و غلاف پس از وارد شدن نیروهای جانبی.

برابر است با (رابطه ی ۱):

$$\delta_s = \sqrt{(\sqrt{2}L_B + dP)^2 - h_c^2} - h_b \quad (1)$$

با تنظیم L_B ، قطر و طول غلاف، می توان تغییرمکان را به تغییرمکان جانبی مجاز δ_s محدود کرد.

مدل المان محدود

المان مورد استفاده برای تیر، ستون و اجزای اتصال از نوع شش وجهی کاهش یافته ی C3DAR، با ۸ گره و از مرتبه ی خطی است. کابل با المان کاهش یافته ی میله یی از نوع WIRE-B31 با دو گره و سطح مقطعی برابر با سطح مقطع مؤثر کابل مدل سازی شده است. در مدل المان محدود، رفتار غیرخطی هندسی، غیرخطی مصالح و تغییر شکل های بزرگ در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی مصالح فولاد نرمه ی تیر، ستون، اجزای T شکل اتصال و کابل به صورت دوخطی و مصالح فولادی پیچ پر مقاومت A490 به صورت سه خطی معرفی شده است. جدول ۱، مشخصات مصالح مصرفی را نشان می دهد. مدول یانگ فولاد غلاف استوانه یی به منظور حذف تغییر شکل آن، برابر مدول فولاد نرمه معرفی شده است.

برای جلوگیری از تمرکز تنش در محل تماس کابل با دیوار غلاف، لبه ی داخلی غلاف به شعاع ۵ میلی متر گرد شده است. ناحیه ی تماس و برخورد در اتصال تیر به ستون از نوع اتصال اصطکاکی سخت HARD با قابلیت جدا شونده ی بعد از بار برداری مدل سازی شده است. ضریب اصطکاک بین قطعه ی T شکل و بال تیر و ستون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. براساس آیین نامه ی فولاد ایران، [۱۶] نیروی پیش تنیدگی به اندازه ی ۰/۵۵ نیروی کشش نهایی پیچ، با استفاده از خواص حرارتی مصالح و با کاهش دمای موضعی تنه ی پیچ اعمال شده است. در محل اتصال کابل به صفحه ی بادبند، تمرکز تنش و ناپایداری عددی حاصل از آن مانع پیشرفت تحلیل می شود. به این منظور و برای جلوگیری از تمرکز تنش، مطابق شکل ۴، برای هر کابل در محل اتصال کابل به لچک ها از ۱۲ اتصال فضایی مفصلی (ROTATIONAL JOINT WIRE CONNECTOR) استفاده شده است.

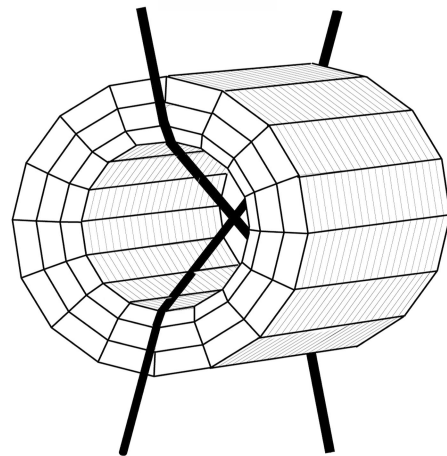
بارگذاری مدل های المان محدود به صورت تغییرمکان جانبی چرخه یی با دامنه ی افزایش یابنده مطابق شکل ۵ در نظر گرفته می شود و اندازه ی مناسب المان ها با آنالیز

خمشی و مهاربندی شده را نشان می دهد. در نمونه با مهاربند کابلی و غلاف فولادی استوانه یی، غلاف به طول ۲۱۴، قطر داخلی ۴۰ و ضخامت دیواره ۱۵ میلی متر است. برای جلوگیری از تمرکز تنش و ایجاد خرابی در کابل، لبه ی داخلی غلاف به شعاع ۵ میلی متر گرد شده است. شکل ۲، غلاف مورد استفاده در آزمایشگاه و مدل المان محدود آن را نشان می دهد. در آزمایشگاه از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن در کشش و فشار با دامنه ی جابجایی ۳۰۰ میلی متر استفاده شده است.

تغییر شکل قاب مهاربندی شده با کابل عبور داده شده از داخل غلاف فولادی، پس از وارد شدن نیروهای جانبی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این قاب، طول کابل بیشتر از قطر قاب است. تحت اثر بار Q، قاب شروع به تغییر شکل می کند. از مراحل اولیه ی بارگذاری، کشش در هر چهار کابل ایجاد می شود و زمانی که عضو AB به شکل مستقیم درآمد ($\delta = \delta_s$)، کابل مقاومت قابل توجهی در مقابل حرکت جانبی از خود نشان می دهد. δ_s با توجه به تغییرمکان نسبی مجاز طبقه در قاب مقاوم سازی شده و شکل پذیری مورد انتظار از قاب خمشی تعیین می شود. تغییرمکان نسبی δ_s که در آن مهاربندها شروع به کار می کنند، براساس طول و قطر استوانه، ابعاد قاب، و تغییرمکان نسبی مجاز بین طبقات محاسبه می شود. [۱۵] اگر طول کابل داخل غلاف dP ، طول کابل خارج از غلاف L_B ، ارتفاع قاب h_c و طول دهنه ی آن h_b باشند، در این صورت δ_s یعنی تغییرمکان جانبی ایجاد شده در تغییر شکل جانبی قاب از حالت اولیه به حالتی که در آن قطر قاب به $\sqrt{2}L_B + dP$ می رسد،



الف) غلاف به کار رفته در آزمایش؛

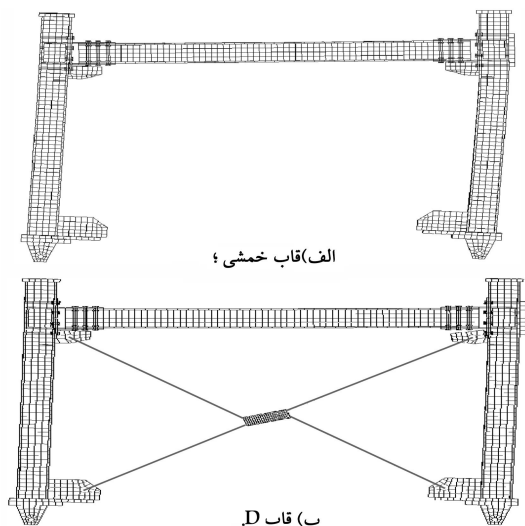


ب) مدل المان محدود غلاف.

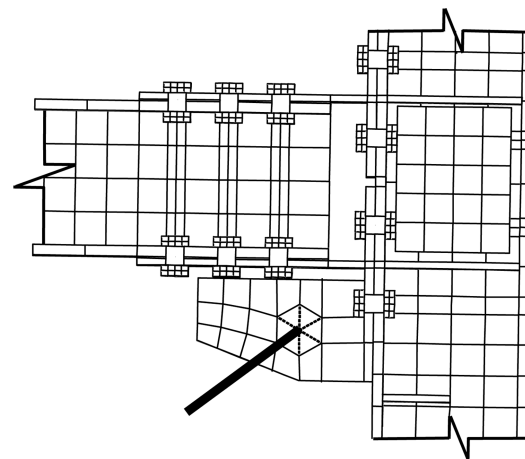
شکل ۲. غلاف استوانه یی فولادی.

جدول ۱. مشخصات مصالح مصرفی.

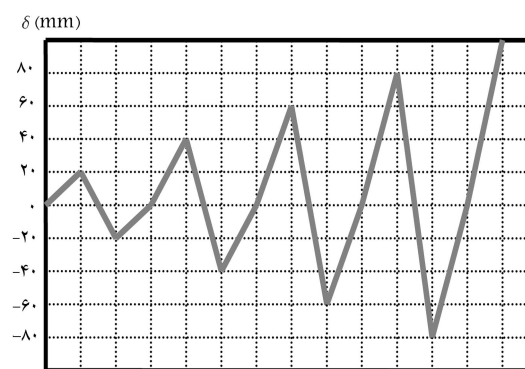
ϵ_{p2}	σ_2 (Mpa)	ϵ_{p1}	σ_1 (Mpa)	E (Gpa)	نوع فولاد
۰٫۳۳	۴۲۹۰	۰٫۲۰	۳۳۱۰	۱۸۰	SN۴۰۰
۰٫۳۲	۴۱۵۰	۰٫۱۹۱	۳۲۳۰	۱۸۰	SS۴۰۰
۰٫۲۸۰۹	۱۰۶۳۰	۰٫۰۰۷۹۹	۹۶۲۰	۲۱۰	A۴۹۰



شکل ۶. مدل المان محدود قاب‌ها پس از تغییر شکل.



شکل ۴. مدل المان محدود در ناحیه‌ی اتصال کابل به صفحات بادبندی.



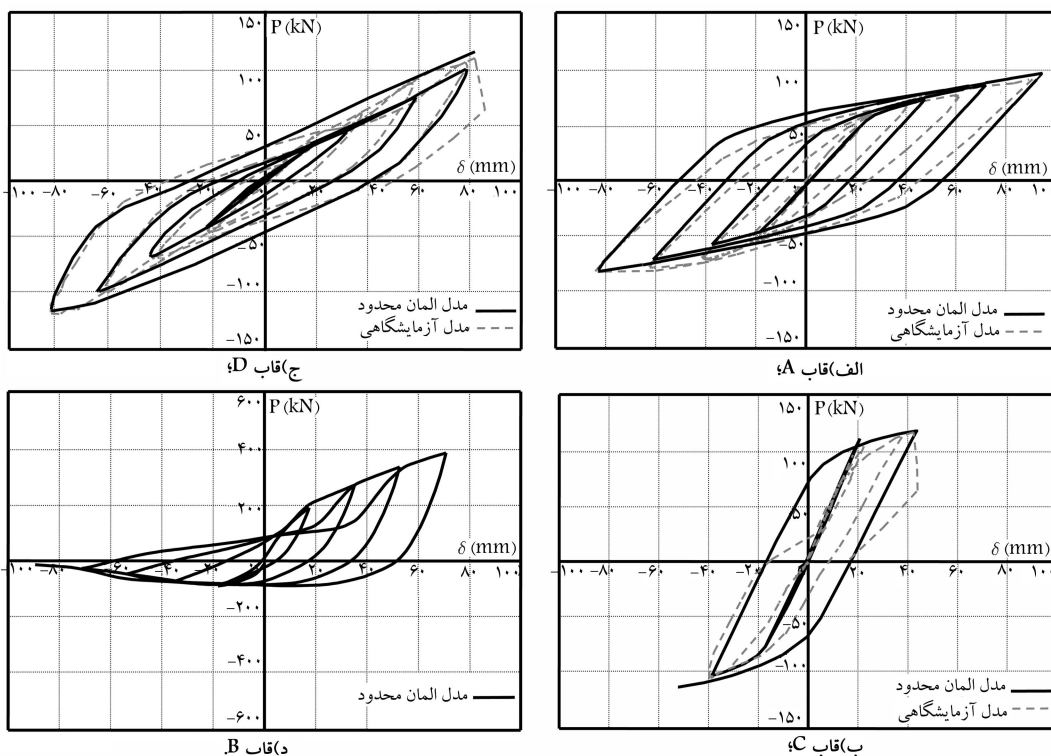
شکل ۵. نمودار تغییرات جابجایی اعمال شده به تراز تیر قاب‌ها.

بیشینه‌ی ثبت شده در آزمایشگاه که در آن نقطه در مدل المان محدود، کرنش‌ها و تنش‌های زیاد در کابل یا جان جزء اتصال T ملاحظه می‌شود، قطع شده است. چرخه‌های هیستریزس برش پایه - جابجایی ثبت شده‌ی تجربی قاب‌ها، [۴] تحت اثر تغییرمکان‌های چرخه‌ی اعمال شده به همراه چرخه‌های حاصل از تحلیل المان محدود، در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مطابقت مناسب چرخه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی دقت کافی مدل المان محدود را در پیش‌بینی رفتار قاب‌ها نشان می‌دهد. تعیین دقیق مقادیر سختی، بار نهایی و تغییرمکان بیشینه، صحت و دقت قابل توجه مدل‌های المان محدود قاب‌ها را نشان می‌دهد. با مشخص شدن اعتبار این مدل‌ها، مدل المان محدود برای قاب مقاوم‌سازی شده با نبشی نیز تهیه شده است. در تحلیل المان محدود خرابی قاب خمشی به صورت کماتش موضعی جان جزء T شکل اتصال ایجاد شده است. در قاب مهار شده با نبشی B با توجه به سختی بالای قاب حاصل از سختی نبشی‌ها، تغییر شکل جانبی کم است و مطابق شکل ۹ خرابی به صورت کماتش عضو فشاری بادبند رخ می‌دهد. در قاب‌های C و D، خرابی به دلیل سختی جانبی زیاد ایجاد شده به وسیله کابل‌ها از ناحیه کابل است. خرابی‌های مشاهده شده در آزمایش قاب خمشی A و قاب‌های مهاربندی شده‌ی C و D با خرابی‌های مشاهده شده در مدل المان محدود مطابقت دارد. خرابی کابل‌ها در مدل المان محدود به صورت تغییر شکل‌های نسبی زیاد آن‌ها خود را نشان می‌دهد. جدول ۳ نسبت‌های سختی اولیه، بار نهایی و جابجایی لحظه‌ی خرابی قاب‌ها به مقادیر نظیر قاب گیردار را که در تحلیل المان محدود تعیین شده است، نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، استفاده از نیم‌رخ نبشی برای مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی در قاب B، سختی اولیه و بار نهایی قاب را به ترتیب به ۴/۰۳ و ۲/۴ برابر افزایش و نسبت جابجایی نهایی قاب را به ۰/۹۳ کاهش داده است. به این ترتیب شکل‌پذیری قاب کاهش یافته است و انتظار می‌رود که ظرفیت جذب

هم‌گرایی تک‌تک اعضا تعیین شده است. شکل ۶، مدل‌های المان محدود قاب خمشی و قاب با مهاربند کابلی عبور داده شده از داخل غلاف فولادی را پس از وارد شدن نیروهای جانبی و تغییر شکل قاب‌ها نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل المان محدود

نمودارهای برش پایه - تغییرمکان جانبی قاب‌ها تحت اثر جابجایی‌های چرخه‌ی در شکل ۷ و منحنی اسکلتون چرخه‌های هیستریزس قاب‌ها در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. در نمودارهای اسکلتون، شیب مماس بر نمودار در مبدأ، سختی اولیه‌ی قاب است و با k نشان داده می‌شود. تغییرمکان و برش پایه‌ی ایجاد شده در لحظه‌ی خرابی به ترتیب با P_{max} و δ_{max} نشان داده می‌شود. در جدول ۲، مقادیر سختی اولیه، جابجایی و برش پایه‌ی لحظه‌ی خرابی قاب‌ها، حاصل از تحلیل المان محدود و ثبت شده در آزمایشگاه آورده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، بیشینه‌ی خطای مدل المان محدود در تعیین برش پایه‌ی نهایی برابر ۴/۳٪ و بیشینه‌ی خطا در سختی اولیه‌ی قاب‌ها ۸/۳٪ است. لازم به ذکر است که تحلیل در نقطه با جابجایی



شکل ۷. چرخه‌های هیستریزس برش پایه - تغییرمکان جانبی قاب‌ها.

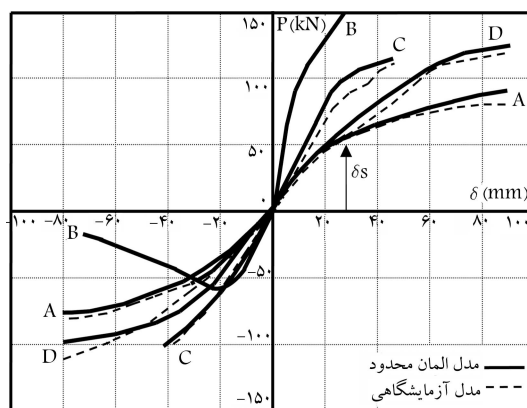
جدول ۲. نتایج تحلیل المان محدود و داده‌های آزمایشگاهی [۴].

نمونه	K (kN/mm)		P _{max} (kN)		δ _u (mm)	
	تحلیل	آزمایش	اختلاف (%)	تحلیل	آزمایش	تحلیل
قاب A	۲,۴۲۵	۲,۲۴	۸,۳	۸۳	۸۲	۱,۲
قاب C	۳,۵	۳,۳۷	۳,۹	۱۱۹	۱۱۷	۱,۷
قاب D	۲,۴۷	۲,۳	۷,۴	۱۳۴,۵	۱۲۹	۴,۳

جدول ۳. نسبت‌های سختی اولیه، بار نهایی و جابجایی لحظه‌ی خرابی قاب‌ها به مقادیر نظیر قاب گیردار در تحلیل المان محدود.

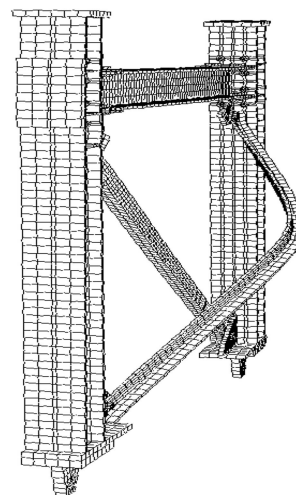
نمونه	نسبت سختی اولیه	نسبت بار نهایی	نسبت تغییرمکان نهایی
قاب B	۴,۰۳	۲,۴۰	۰,۹۳
قاب C	۱,۴۴۳	۱,۴۳	۰,۵۷
قاب D	۱,۰۱۸	۱,۶۲	۱

در مقابل تغییرمکان جانبی مقاومت می‌کند، بنابراین سختی اولیه قاب نسبت به قاب خمشی ۱,۴۴۳ برابر و بار نهایی و تغییرمکان در لحظه‌ی خرابی به ترتیب ۱,۴۳ و ۰,۵۷ برابر مقادیر نظیر در قاب گیردارند. در این قاب، مهاربند کابلی تغییرمکان‌ها را محدود و رفتار قاب را از یک رفتار شکل‌پذیر به رفتاری ترد تبدیل می‌کند و همان‌طور که قبلاً گفته شد، خرابی کابل به صورت پارگی خود را نشان می‌دهد. باریک و ناپایدار بودن چرخه‌های هیستریزس نیز با تأیید این نکته، ظرفیت اندک این قاب را برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل ۸ و جدول ۳ ملاحظه می‌شود که سختی اولیه‌ی قاب با مهاربند کابلی عبور داده شده از داخل غلاف D و قاب خمشی A یکسان است و تا تغییرمکان جانبی δ_S،

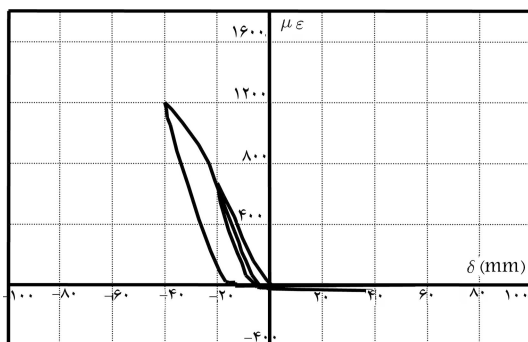


شکل ۸. مقایسه‌ی منحنی‌های اسکلتون چرخه‌های هیستریزس مدل‌های المان محدود و نتایج آزمایشگاهی.

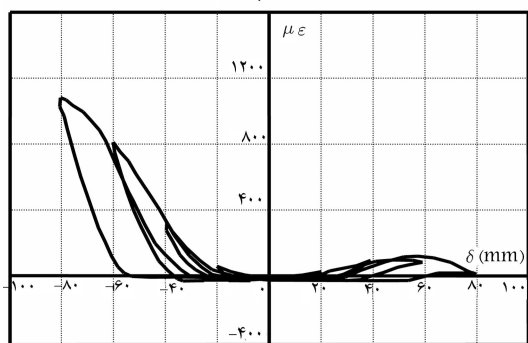
انرژی قاب کاهش یابد. چرخه‌های باریک و ناپایدار هیستریزس این قاب مطابق شکل ۷، این موضوع را تأیید می‌کند و غیرقابل قبول بودن این نوع مقاوم‌سازی را از دیدگاه شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی نشان می‌دهد. در قاب مقاوم شده با کابل ضربدری C، کابل کششی از مراحل اولیه‌ی بارگذاری



شکل ۹. کماتش کلی بادیبند در قاب خمشی با بادیبند نبشی.

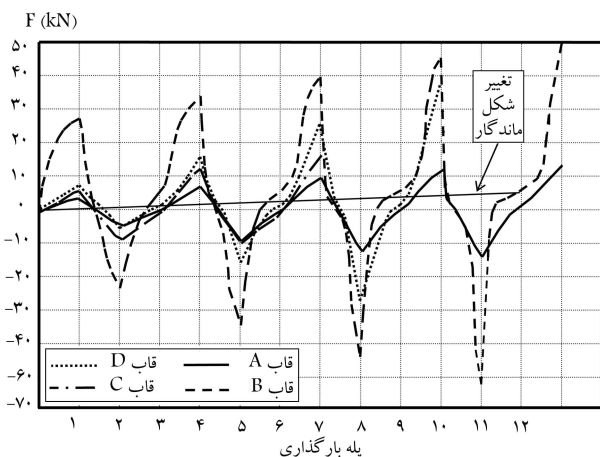


الف) قاب C؛



ب) قاب D

شکل ۱۰. کرنش‌های ایجادشده در کابل سمت چپ.



شکل ۱۱. تغییرات نیروی محوری ستون راست در پله‌های بارگذاری.

نیاز به تقویت، اندازه‌ی این تقویت اندک خواهد بود.

نتیجه‌گیری

مدل‌های المان محدود قاب خمشی تنها و قاب‌های خمشی مقاوم شده با مهاربند کابلی عبور داده شده از داخل یک غلاف فولادی استوانه‌یی، مهاربند ضربدری از نبشی و مهاربند ضربدری با کابل، به کمک نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. تحلیل غیرخطی قاب‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌یی با دامنه‌های افزایش‌یابنده انجام گرفته است. مقایسه‌ی نتایج تحلیل المان محدود با نتایج تجربی، دقت مناسب مدل‌های المان محدود را نشان می‌دهد. برش پایه، نیروهای محوری ستون‌ها، رفتار چرخه‌یی نیرو-جابجایی و مکانیزم خرابی قاب‌ها تعیین و بررسی شده است.

نمودارهای برش پایه-جابجایی این دو قاب برهم منطبق‌اند. به عبارت دیگر، تا لحظه‌ی مستقیم‌شدن مهاربند در امتداد قطر یعنی تا تغییرمکان جانبی δ_S ، قاب مقاوم‌شده همانند قاب خمشی اولیه تغییرشکل می‌دهد و مهاربند در رفتار قاب خمشی بی‌تأثیر است. پس از آن، در صورت تجاوز نیروهای جانبی از نیروهای جانبی نظیر تغییرمکان δ_S ، مهاربند با تأخیر در رفتار قاب مشارکت می‌کند، در نتیجه تا این مرحله رفتار قاب به صورت رفتار شکل‌پذیر یک قاب خمشی است. با گذر از این مرحله، کابل در مقابل تغییرمکان‌های بیشتر قاب مقاومت می‌کند و انتظار می‌رود مقاومت لحظه‌ی خرابی افزایش یابد. نتایج نشان داده شده در جدول ۳ این نکته را تأیید می‌کند، به طوری که بار نهایی قاب ۱/۶۲ و تغییرمکان لحظه‌ی خرابی برابر مقدار نظیر در قاب خمشی است. منحنی هیستریزس برش پایه-تغییرمکان جانبی این قاب نیز ظرفیت مناسب آن را در جذب انرژی نشان می‌دهد. به این ترتیب، در این شیوه ضمن حفظ شکل‌پذیری قاب، مقاومت آن به ۱/۶۲ برابر افزایش یافته است.

منحنی‌های تغییرمکان جانبی-کرنش طولی کابل سمت چپ قاب‌های با مهاربند کابلی C و D در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، کرنش طولی کابل در قاب D، از تغییرمکان جانبی $\pm 20 \text{ mm}$ (تغییرمکان مجاز δ_S) شروع به افزایش کرده است، در حالی که در مدل بادیبندی شده با کابل ضربدری C، کرنش طولی کابل از لحظه‌ی آغاز بارگذاری وجود داشته است و با افزایش تغییرمکان جانبی افزایش می‌یابد. بنابراین، کابل‌های قاب D تا لحظه‌ی رسیدن به δ_S در رفتار قاب مشارکت نمی‌کنند و با تأخیر در لحظه‌ی رسیدن تغییرمکان به تغییرمکان جانبی δ_S ، به کشش کار می‌کنند. این تأخیر در عملکرد سبب می‌شود که تا تغییرمکان جانبی δ_S ، رفتار شکل‌پذیر اولیه‌ی قاب خمشی حفظ شود.

نیروهای ایجادشده در ستون‌های قاب‌های مورد بررسی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بیشینه‌ی نیروی ایجادشده در ستون‌های قاب‌های B و C به دلیل عمل مهاربندی نیم‌رخ‌های نبشی و کابل، به ترتیب ۴/۱ و ۲/۳ برابر نیروهای ستون‌ها در قاب خمشی است و نیروی محوری ستون قاب D حدود ۱/۵۵ برابر مقدار نظیر در قاب خمشی است. بنابراین افزایش نیروی محوری ستون در قاب D نسبت به سایر قاب‌ها کمتر است و در نتیجه مقدار تقویت لازم برای ستون‌ها و پی در این حالت کمتر از حالت‌های دیگر است. در حالت D اضافه‌ی ظرفیت احتمالی موجود در ستون و پی می‌تواند جواب‌گویی این افزایش باشد، یا در صورت

سختی اولیه‌ی قاب با مهاربند کابلی غلافدار و قاب خمشی یکسان است و تا تغییرمکان δ_s نمودارهای نیرو-جابجایی این دو قاب برهم منطبق‌اند. تا این مقدار تغییرمکان و مستقیم‌شدن مهاربند، کابل در رفتار قاب خمشی تأثیری ندارد و پس از آن در صورت تجاوز نیروهای جانبی از نیروهای جانبی نظیر δ_s ، مهاربند با تأخیر در رفتار قاب مشارکت می‌کند. در نتیجه تا تغییرمکان δ_s رفتار قاب به صورت رفتار شکل‌پذیر یک قاب خمشی است. با افزودن مهاربند به این قاب‌ها، ضمن حفظ شکل‌پذیری قاب، مقاومت آن افزایش می‌یابد. در این حالت افزایش نیروی محوری ستون در مقایسه با سایر روش‌های باندبندی کمتر است و تقویت لازم ستون‌ها و پی در این حالت کمتر از سایر روش‌های مقاوم‌سازی است و اضافه‌ی ظرفیت احتمالی موجود در ستون‌ها و پی‌ها می‌تواند جوابگوی افزایش در نیروی محوری در ستون‌ها باشد یا در صورت نیاز به تقویت، اندازه‌ی این تقویت اندک خواهد بود. در این شیوه‌ی مقاوم‌سازی، به دلیل نبودن امکان کماتش، تغییرشکل ماندگار در قاب ایجاد نمی‌شود و با محدودشدن تغییرمکان‌های نسبی بین طبقات به وسیله‌ی کابل‌ها، شکل‌پذیری موردنیاز اعضا افزایش نمی‌یابد.

استفاده از نیمرخ نبشی برای مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی، سختی اولیه و بارنهایی قاب را در مقایسه با قاب خمشی به صورت قابل‌توجه افزایش و جابجایی نهایی آن را کاهش می‌دهد. کاهش شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی قاب، غیرقابل قبول بودن این نوع مقاوم‌سازی را از دیدگاه شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی نشان می‌دهد. در قاب‌های مقاوم‌شده با نبشی به دلیل عمل مهاربندی و افزایش قابل‌توجه نیروی محوری ستون‌ها، نیاز به تقویت ستون‌ها و پی بیشتر است. به دلیل کماتش عضو فشاری در این نوع مقاوم‌سازی، تغییرشکل ماندگار در قاب ایجاد می‌شود. در قاب مقاوم‌سازی‌شده با کابل ضربدری، کابل‌ها از مراحل اولیه‌ی بارگذاری به کشش کار می‌کنند و سختی اولیه‌ی قاب را در مقایسه با سختی قاب خمشی افزایش می‌دهند. در این حالت بارنهایی افزایش و تغییرمکان خرابی کاهش می‌یابد. در این قاب، مهاربند کابلی رفتار قاب را از یک رفتار شکل‌پذیر به رفتاری ترد تبدیل می‌کند. باریک و ناپایدار بودن چرخه‌های هیستریزیس، ظرفیت اندک این قاب را برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی نشان می‌دهد. در این شیوه از مقاوم‌سازی، تقویت لازم برای ستون‌ها و پی قابل‌توجه است.

منابع (References)

1. Tamai, H. and Takamatsu, T. "Cyclic loading tests on a non-compression brace considering performance-based seismic design", *Journal of Constructional Steel Research*, **61**(9), pp. 1301-1317 (September 2005).
2. Bartera, F. and Giacchetti, R., "Steel dissipating braces for upgrading existing building frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **60**(3), pp. 751-769 (2004).
3. Xie, Q. "State of the art of buckling-restrained braces in Asia", *Journal of Constructional Steel Research*, **61**(6), pp. 727-748 (2005).
4. Hou, X. and Tagawa, H. "Displacement- restraint bracing for seismic retrofit of steel moment frames using wire-rope bracing", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**, pp. 1096-1104 (2009).
5. Tagawa, H. and Hou, X. "Seismic retrofit of ductile moment resisting frames using wire-rope bracing", *Proceedings of the 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Singapore (December 2007).
6. ABAQUS, Inc., Ver. 6.9, Analysis User's Manual (2010).
7. National Building Provisious Codification and Promotion Office; 10th Topic, Design and Reward of Steel Structures (In persain)(2008).

RETROFITTING OF FLEXURAL STEEL FRAMES USING CABLE BRACING

Y. Hossein Zadeh (corresponding author)

hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

M.R. Farajpour

mr.farajpour@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering
Tabriz University

Sharif Civil Engineering Journal
Volume 29, Issue 1, Page 95-101, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 30 January 2011; received in revised form 10 July 2011; accepted 23 July 2011.

Abstract

In this paper, the behavior of flexural steel frames using cable bracing is investigated. X bracing with angle profiles, X bracing with a cable, and bracing with two cables passing cylindrical steel sheaths at the intersection of the cables, are the three types of retrofitting of flexural steel frames studied in this paper. The finite element model of a steel frame, with and without the three types of retrofitting has been made. Non-linear analysis of frames under cyclic loading with increasing oscillations has been undertaken. Comparison of the results from the finite element model with experimental data shows that the finite element model has acceptable accuracy. By determining shear base, the axial force of columns, and the cyclic behavior of force-displacement, the failure mechanism of frames and the advantages and disadvantages of each type of retrofitting have been investigated.

According to results, using the Cornerstone profile for retrofitting steel flexural frames increases remarkably the initial stiffness and ultimate load of the frame compared to flexural frame and reduces ultimate displacement. Reduction in plasticity and frame energy absorption capacity shows the unacceptability of this type of

retrofitting, from the perspective of plasticity and energy depreciation capacity. In the frames retrofitted by a cornerstone, because of the bracing function and a significant increase in the axial force of columns, the need to reinforce the columns and foundation is greater. Due to buckling of the compressive member in this type of retrofit, permanent deformation occurs in the frame. In retrofitted frame using cross cables, cables from the early stages of loading begin to pull, which increases the frame's initial stiffness compared to the stiffness of flexural frames. In this case, ultimate load increases and failure displacement reduces. In this frame, the cable brace converts frame behavior from ductile to brittle. Being narrow and unstable in hysteresis cycles shows the meager capacity of this frame to resist lateral forces. In this method of retrofitting, the required reinforcement of columns and foundation is considerable.

The initial stiffness of the frame with a cable brace with sheath and the flexural frame is the same. Up to the fixed amount of displacement and the brace being straight, the cable is ineffective in flexural frame behavior, and, after that, if lateral forces invade lateral forces, the brace contributes with a delay in frame behavior. By adding the brace to these frames while maintaining the plasticity of the frame, its resistance will increase. In this case, the increase in the axial force of the column is less than other methods of bracing, and the existing possible overload in columns and foundation can be responsive to the increase in axial force in columns, or, if retrofitting is needed, the amount of reinforcement is slight.

Key Words: flexural steel frame, cable bracing, non-linear behavior, cyclic loading, base shear.