Archive of SID

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۲۹ تا ۱۳۷
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 129-137

نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر مهندسی عمران و محیط زیست
Amirkabir Journal of Science & Research
Civil and Enviromental Engineering
(ASJR-CEE)

مقاومت جانبی دیوارهای آجری کلافدار

ساسان عشقی[1*]، بهرنگ صرافی[2]

۱- دانشیار، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
۲- دکترای مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت: ۱۳۹۰/۳/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۱۵)

چکیده

سازه‌های آجری غیرمسلح در سراسر دنیا به ویژه در ایران و در شهرهای کوچک سهم عمده‌ای از انواع ساختمان‌ها را به خود اختصاص داده‌اند و این امر به دلیل اقتصادی بودن آن‌ها می‌باشد. ساخت نوعی از ساختمان‌های آجری با عنوان ساختمان‌های آجری کلافدار در ایران مرسوم است. در این ساختمان‌ها دیوارهای آجری توسط کلاف‌های افقی و قائم عموماً بتنی از چهار طرف محصور می‌شوند. این سیستم ساختمان در استاندارد ۲۸۰۰ ایران توصیه شده است. اما توجه به روش‌های تحلیل و طراحی این سیستم‌ها و پیشرفت ضوابط آیین‌نامه‌ای طراحی آن‌ها در این سال‌ها در ایران متناسب با اهمیت و کاربرد آن‌ها نبوده است. تغییرات کم در ضوابط موجود در استاندارد ۲۸۰۰ ایران نسبت به اولین ویرایش‌های آن و همچنین نوع ضوابط ارائه‌شده در سایر دستورالعمل‌های موجود مؤید این امر می‌باشد. در این مقاله مزایای فنی و اجرایی سیستم آجری کلافدار بررسی شده، روابط مختلف موجود در آیین‌نامه‌های مختلف جهان برای محاسبه مقاومت جانبی دیوارهای آجری کلافدار مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس کلیات آزمایش‌هایی که توسط مؤلفان بر روی دیوارهای آجری کلافدار انجام‌شده ذکر می‌شود و با استناد به نتایج این آزمایش‌ها، رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت جانبی دیوارهای آجری کلافدار که بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و به روش‌های ساخت و مصالح مرسوم در ایران ساخته شده‌اند، پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی:

ساختمان‌های آجری کلافدار، مقاومت جانبی، رفتار لرزه‌ای

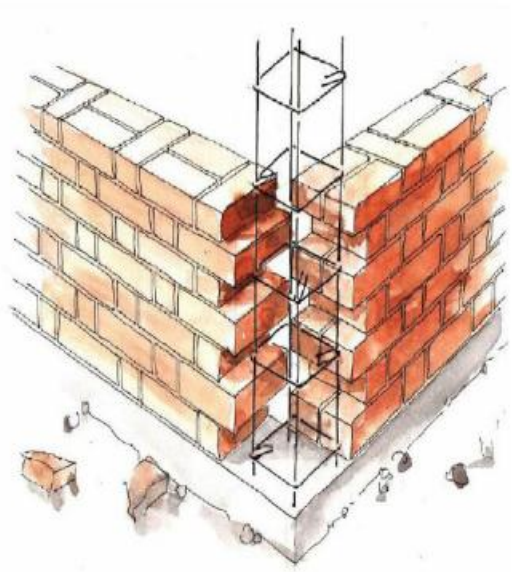
* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: s.eshghi@iiees.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

ساختمان‌های آجری کلافدار همواره در کنار سیستم‌های آجری غیرمسلح و قاب بتنی مسلح مطرح هستند. ساختمان‌های آجری کلافدار مرسوم در ایران از دیوارهای آجری متشکل از آجرهای رسی و ملات ماسه سیمان تشکیل شده‌اند که توسط کلاف‌های افقی و قائم بتنی از چهار طرف محصور می‌شوند. شکل (۱) نحوه اتصال دیوار آجری و کلاف را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نحوه اتصال دیوار وکلاف در ساختمان‌های آجری کلافدار [۲]

این شکل اتصال، پیوستگی مناسب دیوار آجری و کلاف بتنی را میسر می‌سازد. این کلاف‌ها می‌توانند کارکردهای زیر را داشته باشند [۱]:

- افزایش یکپارچگی و پایداری دیوارهای آجری در برابر نیروهای داخل و خارج صفحه ناشی از زلزله
- افزایش مقاومت دیوار آجری در برابر نیروهای جانبی زلزله

افزایش شکل‌پذیری سیستم و توانایی جذب انرژی دیوار آجری در برابر نیروهای زلزله و به تبع آن بهبود عملکردشان در برابر زلزله

به طور کلی عناصر تشکیل‌دهنده ساختمان آجری کلافدار و عملکرد هرکدام به شرح زیر هستند:

- دیوار بنایی: وظیفه انتقال بار ثقلی از دال سقف به فونداسیون را بر عهده دارد. همچنین در برابر بارهای جانبی هر پانل به عنوان عنصر مقاوم جانبی عمل می‌کند. این دیوارها باید توسط کلاف‌های افقی و قائم محصور شده باشند.
- عناصر محصورکننده: شامل کلاف‌های افقی و قائم، تقویت‌کننده مقاومت و یکپارچگی دیوارهای آجری هستند و از فروریزش کامل آن‌ها در زلزله‌های سنگین جلوگیری می‌کنند. این عناصر همچنین قسمتی از بارهای قائم را تحمل می‌کنند و نقش مهمی را در حفظ یکپارچگی ساختمان در برابر زلزله بازی می‌کنند.
- دال سقف: نیروهای ثقلی و جانبی را به دیوارها منتقل می‌کنند. نحوه توزیع نیروی جانبی مابین دیوارها بستگی به میزان صلبیت دال سقف دارد. این سقف‌ها می‌توانند از نوع یک‌طرفه و دوطرفه باشند. سقف مورد استفاده معمول در ساختمان‌های آجری ایران از نوع طاق ضربی یا تیرچه بلوک هستند که در ساختمان‌های آجری به دلیل استفاده از مصالح آجری، بیشتر استفاده از سقف طاق ضربی معمول است.
- فونداسیون و کلاف تحتانی: وظیفه انتقال بار از سازه به زمین را بر عهده دارند.

از نظر ظاهری دیوار آجری کلافدار و میانقاب بنایی ممکن است مشابه به نظر برسند؛ درحالی‌که این دو سیستم تفاوت اساسی با یکدیگر دارند. علت اصلی این تفاوت ترتیب اجرای آن‌ها است. بر این اساس روش مقاومت در برابر بارهای ثقلی و جانبی در این دو کاملاً متفاوت است.

در ساختمان‌های آجری کلافدار ابتدا دیوارهای آجری اجرا می‌شوند، سپس کلاف‌های قائم آرماتورگذاری و بتن‌ریزی می‌گردند و در نهایت کلاف افقی تراز سقف اجرا می‌شود. در ساختمان‌های بتنی، قاب شامل تیر و ستون بتنی اجرا می‌شود. پس از آن، میانقاب بنایی به عنوان عضو غیرسازه‌ای در مراحل بعد در داخل آن اجرا می‌گردد. بدین ترتیب در ساختمان‌های آجری کلافدار عناصر اصلی مقاوم در برابر بارهای ثقلی و جانبی دیوارهای آجری هستند و کلاف‌های افقی و قائم مقاطع کوچکی دارند و اتصال کافی نیز بین کلاف و دیوار آجری برقرار است؛ درحالی‌که میانقاب‌ها عناصر مقاوم در برابر بار جانبی محسوب نمی‌شوند و لزوماً اتصال سازه‌ای بین قاب و دیوار برقرار نمی‌گردد. در ساختمان‌های آجری کلافدار، کلاف‌ها برای مقاومت به عنوان قاب خمشی طراحی نمی‌شوند. بنابراین میلگردگذاری در آن‌ها ساده است.

استفاده از ساختمان‌های آجری کلافدار اولین بار در بازسازی ساختمان‌های تخریب‌شده در زلزله سال ۱۹۰۸ میسینا در ایتالیا گزارش شده است.

در سال‌های اخیر ساختمان‌های آجری کلافدار در اروپای مدیترانه‌ای (ایتالیا، اسلوونی و صربستان)، آمریکای لاتین (مکزیک، شیلی، پرو، آرژانتین و غیره)، خاورمیانه (ایران، هند و پاکستان)، جنوب آسیا (اندونزی) و خاور دور (چین) بکار گرفته شده‌اند. این نکته قابل‌توجه است که ساخت ساختمان‌های آجری کلافدار در کشورهایی که در مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا قراردارند، رواج دارد.

سیستم آجری کلافدار عموماً برای ساخت خانه‌های یک، دو و سه طبقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت ساخت تا ۵ طبقه در بسیاری از آیین‌نامه‌های ساختمانی برای این سازه‌ها اعمال می‌شود. در مکزیک ساخت ساختمان آجری کلافدار ۶ طبقه غیرمعمول نیست.

۲- عملکرد ساختمان‌های بنایی در زلزله‌های گذشته

از سیستم آجری کلافدار در بسیاری از نقاط در ایران استفاده می‌شود. به طور معمول، ساختمان‌های یک طبقه با کلاف‌های افقی و قائم که با

www.SID.ir

Archive of SID

سقف طاق ضربی یا با سقف چوبی پوشیده شده‌اند. بررسی عملکرد این نوع سازه‌ها تحت اثر دو زلزله سال ۱۹۹۰ منجیل و زلزله سال ۲۰۰۳ بم نشان می‌دهد که خرابی ساختمان‌های کلافدار در زلزله منجیل به علت نبود کلاف‌های قائم در نقاطی از سازه بوده است. به طور کلی، عملکرد این سازه‌ها در زلزله بم مطلوب بوده است؛ بخصوص در ساختمان‌هایی که بر اساس آیین‌نامه‌های جدید احداث شده‌اند. تقریباً ۴۰ هزار نفر در زلزله بم جان باختند که علت اصلی آن، فروریزش سازه‌های خشتی و بنایی غیرمسلح بوده است [۳].

شکل ۲: آسیب‌دیدگی جزیی یک ساختمان آجری کلافدار (ساختمان منابع طبیعی بم) در زلزله ۲۰۰۳ بم [۱]

شکل (۲) ساختمان منابع طبیعی بم را نشان می‌دهد. این ساختمان مصالح بنایی با کلاف بتنی است. سقف از نوع طاق ضربی و یک طبقه بوده است. در اثر زلزله بم قسمتی از نما تخریب شده و ساختمان دارای ترک‌های داخلی است، اما سرپا می‌باشد.

اولین گزارش‌هایی که در مورد عملکرد ساختمان‌های آجری کلافدار در زلزله گزارش شده است، مربوط به زلزله سال ۱۹۳۹ شیلی (۷/۸ ریشتر) می‌باشد. این زلزله بزرگای مرکالی اصلاح‌شده برابر IX داشته و بیش از ۵۰ درصد ساختمان‌های آجری کلافدار مورد بررسی، زلزله را بدون خسارت پشت سر گذاشته‌اند. درحالی‌که حدود ۶۰ درصد ساختمان‌های آجری غیرمسلح به طور کامل یا جزیی تخریب شده و سبب جان باختن ۳۰ هزار تن گشتند [۴].

در زلزله سال ۱۹۸۳ کلمبیا[1] به بزرگی ۵/۵ ساختمان‌های آجری کلافدار عملکرد مناسبی داشتند. ساختمان‌هایی که فقط کلاف‌های افقی داشتند خسارتی کمتر از ساختمان‌های بنایی غیرمسلح دیدند و تنها خسارت ناچیز در پایه پنجره‌ها داشتند. درحالی‌که ساختمان‌های دارای کلاف افقی و قائم خسارتی را متحمل نشدند. این ساختمان‌ها همچنین تحت اثر زلزله سال ۱۹۹۹ کلمبیا[2] به بزرگی ۶/۲ قرار گرفتند. ساختمان‌های کلافدار در منطقه زلزله‌دیده، یک طبقه قرار داشتند. در برخی موارد دیوارهای بنایی به خوبی در میان کلاف‌ها محصور نشده بودند که سبب شد بعضی از آن‌ها از قاب به بیرون پرتاب شوند. در بسیاری از دیوارها ترک برشی ایجاد شد.

ساخت ساختمان‌های آجری کلافدار در کشور چین تا قبل از زلزله سال ۱۹۷۶ این کشور[3] به بزرگی ۸/۲ رواج داشته است. در این زلزله بیش از ۲۵۰ هزار نفر کشته شدند و یکی از مرگبارترین زلزله‌های قرن بیستم بود و در حدود ۸۵ درصد ساختمان‌ها در منطقه زلزله‌زده آجری بودند. ساختمان‌های آجری کلافدار در مواردی که کلاف‌های قائم در فواصل منظم و در تمام ارتفاع ساختمان ادامه پیدا کرده بودند، عملکرد خوبی را نشان دادند.

زلزله سال ۲۰۰۸ چین[4] به بزرگی ۸ که خرابی‌های زیادی به بار آورد، نشان داد که طراحی سیستم سازه و سیستم مقاوم در برابر زلزله در ساختمان‌های مصالح بنایی باید مورد توجه بیشتری قرارگیرد و به کیفیت ساخت نیز باید توجه بیشتری شود. از جمله ضعف‌هایی که سبب تخریب تعداد زیادی از این دسته از ساختمان‌ها شد، عبارت بودند از ضعف سیستم سازه‌ای، بکار نگرفتن کلاف‌های افقی و قائم و همچنین اتصال ضعیف دال سقف. نمونه‌هایی از این سیستم که در اثر زلزله تخریب نشده یا به صورت جزیی آسیب دیده‌اند نیز مشاهده شده است. از این رو اثبات می‌شود که این سیستم سازه‌ای توانایی مقابله با زلزله‌های بزرگ را دارد، به این شرط که عناصر مقاوم جانبی مانند کلاف‌های افقی و قائم مد نظر قرارگیرند [۵].

ساخت ساختمان‌های آجری کلافدار در کشورهایی مانند مکزیک، شیلی و پرو، گسترش بسیار دارد و به علت زلزله‌خیز بودن آن‌ها، تحت زلزله‌های مختلف آزموده شده‌اند؛ به ویژه ساختمان‌های کلافدار کوتاه مرتبه عملکرد بسیار خوبی را در زلزله‌های گذشته این منطقه از خود نشان داده‌اند. این مسئله در ساختمان‌هایی که در پلان و ارتفاع منظم هستند و سبکند و میزان دیوار نسبی بالایی دارند، صادق است و تنها در مواردی که نقص در اجرا، طراحی یا ضعف مصالح وجود داشته است، عملکرد ضعیف لرزه‌ای دیده می‌شود. این عملکرد ضعیف در موارد حذف‌شدن کلاف‌های قائم، انقطاع در کلاف‌های افقی، اتصال نامناسب دیافراگم و آرایش نامناسب اجزای سازه‌ای نیز وجود دارد.

ساختمان‌های آجری کلافدار عملکرد بسیار خوبی در زلزله ۲۷ فوریه ۲۰۱۰ شیلی نشان دادند. این زلزله با بزرگای ۸/۸ بزرگترین زلزله‌ای است که تا این تاریخ این حجم از ساختمان‌های آجری کلافدار را تحت تأثیر قرار داده است. اکثریت ساختمان‌های آجری کلافدار یک و دو طبقه خرابی نداشتند؛ بجز تعداد اندکی که خرابی متوسطی را تجربه کردند. در ساختمان‌های سه و چهار طبقه اکثریت بزرگی از ساختمان‌ها بدون خرابی بودند. تعداد کمی از آن‌ها خرابی محدود داشتند و دو ساختمان سه طبقه در این زلزله فرو ریختند. شکل (۳) یک نمونه از ساختمانی سه طبقه که

[1] Popayan
[2] El Quindio
[3] Tangshan
[4] Wenchuan

www.SID.ir

Archive of SID

در زلزله سال ۲۰۱۰ شیلی دچار خرابی‌هایی در طبقه اول شد را نشان می‌دهد [۶].

شکل ۳: عملکرد ساختمان‌های آجری کلافدار در زلزله سال ۲۰۱۰ شیلی، ساختمان سه طبقه، آسیب در طبقه اول [۶]

به طور کلی، ساختمان‌های آجری کلافدار در زلزله‌های گذشته پرو نیز عملکرد مناسبی را نشان داده‌اند. عملکرد ضعیف تنها در مناطق جغرافیایی با خاک ضعیف دیده شده است. در زلزله سال ۱۹۷۰[1] به بزرگای ۷/۸ خرابی‌هایی به علت اتصال ناکافی سقف به دیوار ثبت شده است. ساختمان‌های آجری کلافدار به طور گسترده در منطقه‌ای که مرکز زلزله سال ۲۰۰۷ پرو در آن قرار داشت، مورد استفاده بودند و عملکرد بسیار خوبی داشتند.

۳- ضوابط و آیین‌نامه‌ها

استاندارد ۲۸۰۰ ایران و مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان که در ایران لازم الاجرا هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین دو نمونه آیین‌نامه خارجی مربوط به کشورهای شیلی و مکزیک که به ساختمان‌های آجری کلافدار در آن‌ها پرداخته‌شده، اشاره می‌گردد. آیین‌نامه آمریکایی MSJC (کمیته مشترک سه مؤسسه ACI، ASCE و TMS در ارتباط با ساختمان‌های آجری) به طور خاص ساختمان‌های آجری کلافدار را در بر نمی‌گیرد و از این‌رو مورد بررسی قرار نگرفته است.

۳- ۱- استاندارد ۲۸۰۰ ایران

عمل‌نمودن ضوابط این آیین‌نامه (که اکثراً کیفی است) طراح را ملزم به استفاده از حجم زیادی از دیوار می‌نماید که عملکرد مناسب معماری ساختمان را دچار اختلال می‌کند. بر اساس فصل سوم این آیین‌نامه، جز در مورد ساختمان‌های یک طبقه با اهمیت کم، ساختمان‌های بنایی فقط با کلاف‌بندی افقی و قائم مجاز می‌باشند. تعداد طبقات به دو طبقه محدود می‌شود. محدودیت‌های خاصی نیز نسبت به ابعاد پلان، ارتفاع طبقات و ابعاد بازشوها اعمال می‌گردد. به عنوان نمونه، محدودیت‌های مربوط به بازشوها در ویرایش دوم و سوم شامل موارد زیر است:

- مجموع سطح بازشوها از یک سوم سطح دیوار بیشتر نباشد.
- مجموع طول بازشوها از نصف طول دیوار بیشتر نباشد.
- فاصله اولین بازشو از بر خارجی ساختمان کمتر از دو سوم ارتفاع بازشو یا کمتر از ۷۵ سانتی‌متر نباشد؛ مگر آن‌که در طرفین بازشو کلاف قائم قرار داده‌شود.
- فاصله دو بازشو از دو سوم ارتفاع کوچکترین بازشوی طرفین خود کمتر نبوده و از یک ششم طول آن دو بازشو نیز کمتر نباشد.
- هیچ یک از ابعاد بازشو از ۲/۵ متر بیشتر نباشد. در غیر این صورت، باید طرفین بازشو را با تعبیه کلاف‌های قائم تقویت نمود.

به منظور مقایسه، ضوابط پیشنهادی «آیین‌نامه ایمنی ساختمان‌ها دربرابر زلزله» که در سال ۱۳۴۶ توسط دفتر مطالعات و معیارهای ساختمانی وزارت آبادنی و مسکن ارائه شده است نیز ذکر می‌شود که به این شرح است:

- مجموع سطح بازشو که در هر دیوار خارجی تعبیه می‌شود نباید از یک‌سوم سطح نمای دیوار بیشتر باز شود.
- مجموع عرض بازشوها که در هریک از دیوارهای خارجی تعبیه می‌شود نباید از یک‌دوم طول آن دیوار بیشتر باشد.
- فاصله بین دو بازشو در هر نما باید از یک‌ششم مجموع عرض آن دو بازشو کمتر باشد.

ساختمان‌های بنایی که فقط یکی از ضوابط تعیین‌شده را تأمین نکرده باشند، از نظر این آیین‌نامه غیرقابل‌قبول شناخته می‌شوند. مقایسه ضوابط نشان می‌دهد که این ضوابط مشابه بوده و ویرایش جدید نسبت به اولین نسخه‌های آیین‌نامه زلزله ایران تفاوت چندانی نکرده است.

۳- ۲- مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان [۷]

این مبحث از مقررات ملی نیز ضوابطی مشابه استاندارد ۲۸۰۰ برای ساختمان‌های آجری کلافدار اعمال می‌کند. احداث ساختمان‌های بنایی بدون کلاف را با رعایت ضوابط در مناطق با لرزه‌خیزی کم و متوسط مجاز اعلام می‌نماید. ضوابط مربوط به بازشوها در این مبحث علاوه بر استاندارد ۲۸۰۰ شامل بندهای زیر است:

- بازشوها نباید سبب قطع کلاف‌ها شوند.
- نعل درگاه روی بازشوهای مجاور باید به صورت یکسره باشد.

بر طبق این مبحث نیز ساختمان‌هایی که فقط یکی از ضوابط تعیین‌شده را تأمین نکرده باشند، غیرقابل‌قبول شناخته می‌شوند.

۳- ۳- شیلی NCh2123.Of 97

از سال ۱۹۴۹، ساخت ساختمان‌های یک و دو طبقه آجری کلافدار در شیلی نظام یافت. به طور کلی، این ساختمان‌ها نسبتاً سخت هستند و برش پایه‌ای در حدود ۱۰ تا ۲۲ درصد وزن سازه را بسته به لرزه‌خیزی

[1] Chimbote

www.SID.ir

Archive of SID

منطقه باید تحمل نمایند.

مقاومت برشی دیوارهای آجری کلافدار به تنش برشی مصالح بنایی و بار ثقلی اعمال‌شده بستگی دارد. مقاومت برشی معمول مصالح بنایی از ۰/۵ تا یک مگاپاسکال متغیر است.

کلاف‌های قائم مقطع مستطیلی دارند. عرض مقطع بستگی به ضخامت دارد (۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر) و ارتفاع آن در حدود ۲۰۰ میلی‌متر است. کلاف‌های افقی و قائم باید حداقل با ۴ عدد میلگرد طولی با قطر ۱۰ میلی‌متر مسلح شوند. خاموت‌های نمره ۶ باید در فواصل ۱۰۰ میلی‌متر در دو انتهای ستون و در فواصل ۲۰۰ میلی‌متر در میان کلاف‌های قائم تعبیه شوند و طراحی به روش تنش مجاز انجام می‌شود.

۳- ٤- مکزیک (NTC-M 2004,NTC-S 2004)

محدودیت تغییرمکان نسبی ۰/۲۵ درصد برای ساختمان‌های آجری کلافدار بدون میلگردگذاری افقی و تغییر مکان نسبی ۰/۳۵ درصد در مواردی که میلگردگذاری افقی موجود درنظر گرفته شده است. این محدودیت‌ها بیش از تغییر مکان نسبی ۰/۱۵ درصد برای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح است.

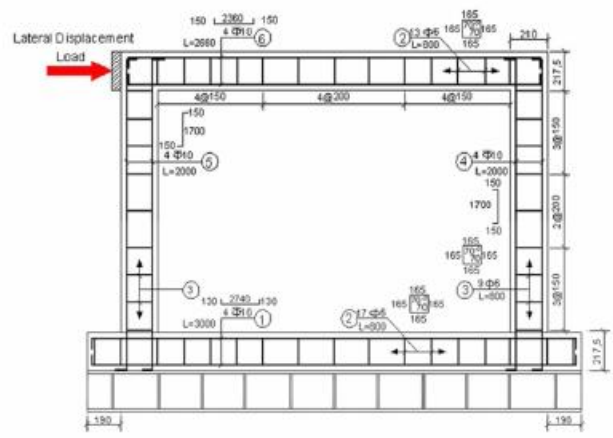
حداکثر فاصله کلاف‌های قائم برابر ۴ متر یا H ۱/۵ (H ارتفاع دیوار) می‌باشد. اگر ابعاد افقی یا قائم بازشو از یک‌چهارم فاصله بین کلاف‌های قائم مجاور یا ۶۰۰ میلی‌متر بزرگتر باشد، کلاف‌های قائم باید در اطراف بازشوها قرارگیرند. کلاف‌های قائم در محل تقاطع دیوارها قرار داده می‌شوند و در داخل جان‌پناه ادامه پیدا می‌کند. در جان‌پناه‌ها کلاف افقی به فاصله حداقل ۵۰۰ میلی‌متر از کلاف سقف قرار می‌گیرد.

حداقل ضخامت دیوار ۱۰۰ میلی‌متر است و نسبت ارتفاع به ضخامت دیوار کمتر از ۳۰ می‌باشد. فاصله بین کلاف‌های افقی کمتر از ۳ متر باشد. میلگردگذاری افقی در دیوار باید به طور ممتد در طول دیوار قرار گیرند. این میلگردها باید در درون کلاف‌های قائم مهار شوند و مهار با خم ۹۰ درجه در انتهای کلاف قائم قرار می‌گیرد. قطر میلگردهای افقی باید بزرگتر از ۳/۵ میلی‌متر و کمتر از سه‌چهارم ضخامت اتصال باشند.

٤- آزمایش‌های انجام‌شده در ایران

در مرجع [۸]، رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ مورد مطالعه آزمایشگاهی قرارگرفته است. آزمایش‌ها بر روی چهار نمونه دیوار با مقیاس ۲:۳ در آزمایشگاه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شده است. یک نمونه از دیوارها به صورت غیرمسلح به عنوان نمونه شاهد، یک نمونه به صورت مسلح و دو نمونه دیگر به صورت کلاف‌بندی‌شده مورد آزمایش قرار گرفتند. بارهای اعمالی شامل بار ثقلی دائم و بار جانبی رفت و برگشتی می‌باشد.

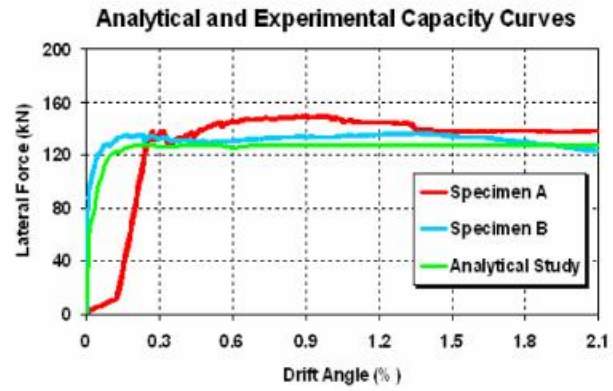
مرجع [۹]، یک اتاق آجری را که در مقیاس واقعی و بر اساس توصیه‌های استاندارد ۲۸۰۰ طراحی‌شده بر روی میز لرزان در دانشگاه صنعتی شریف مورد آزمایش قرار می‌دهد. اتاق مذکور دارای کلاف‌بندی



شکل ۴: مشخصات دیوار مورد بررسی در مرجع [۱۰]

قائم و افقی بوده و سقف آن از نوع طاق ضربی است. بازشوهایی با ابعاد متفاوت برای بررسی اثرات اندازه، هندسه و محل آن‌ها در اطراف اتاق منظور شده است.

در مرجع [۱۰] و [۱۱]، رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های آجری با کلاف ساخته‌شده بر اساس ضوابط آئین‌نامه زلزله ایران (ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، دو نمونه دیوار آجری کلافدار با مقیاس ۱:۲ به طول ۲۰۰، ارتفاع ۱۳۱ و ضخامت ۲۱ سانتی‌متر که با کلاف‌های بتن مسلح به ابعاد ۲۱ در ۲۱ سانتی‌متر محصور شده‌اند (شکل (۴)) در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ساخته‌شده، مورد آزمایش استاتیکی یکنواخت قرار گرفتند تا بتوان به کمک نتایج آن‌ها مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار را آزمود. جهت مدلسازی از نرم‌افزار دیانا[1] استفاده شده است. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی (که منحنی آن در شکل (۵) نشان داده شده و با نتایج آزمایش مقایسه شده است)، نقطه عملکرد ساختمان در چهار سطح خطر استاندارد ۲۸۰۰ محاسبه شد و مشخص گردید که این نقطه برای ساختمان مورد مطالعه پیش از آغاز ترک‌خوردگی مایل در دیوار آجری است. حداکثر زاویه تغییر مکان نسبی ثبت‌شده برای دیوارها کمتر از



شکل ۵: مقایسه نتایج تحلیل با آزمایش دیوار آجری کلافدار [۱۰]

[1] DIANA

www.SID.ir

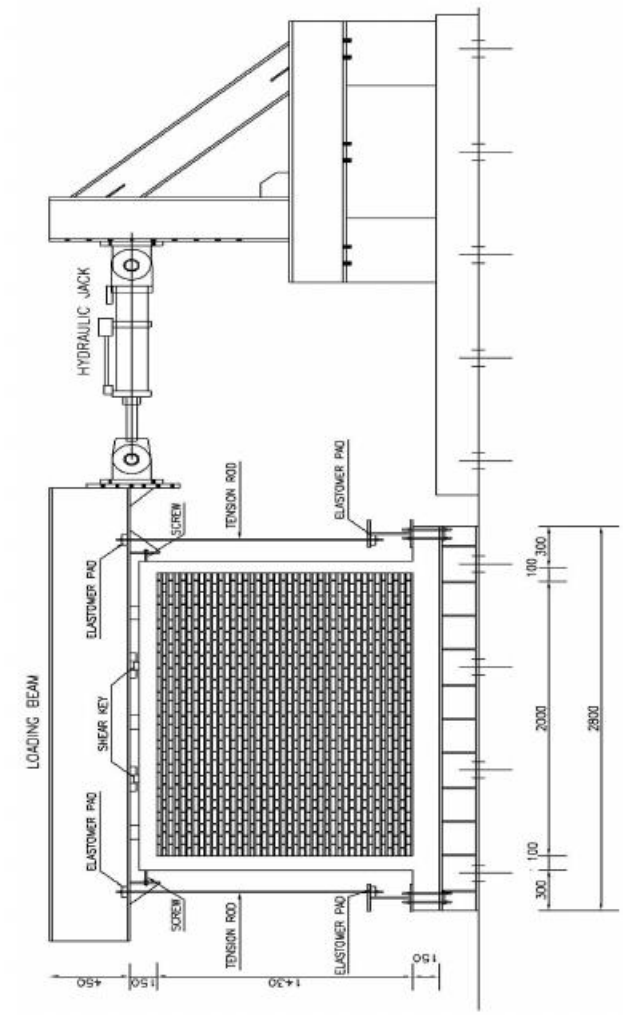
Archive of SID

حداکثر زاویه تغییر مکان نسبی غیرالاستیک مجاز برای دیوارهای آجری کلافدار بر اساس آئین‌نامه‌های موجود می‌باشد.

در مرجع [۱۲]، دو نمونه دیوار آجری کلافدار با مقیاس ۱:۲ در آزمایشگاه سازه دانشگاه تهران مورد آزمایش چرخه‌ای تحت بار جانبی قرار گرفتند. در ساخت نمونه‌ها تلاش شده است تا از روش‌های ساخت معمول در ایران و ملات ضعیف استفاده شود. نسبت طول به ارتفاع دو دیوار برابر ۱/۴ و ۲ هستند. دو دیوار آجری مشابه، اما بدون کلاف نیز برای مقایسه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که حضور کلاف‌های قائم شکل‌پذیری دیوارها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. تغییر مکان نسبی دیوار کلافدار ۱۰۰ درصد نسبت به نمونه مشابه بدون کلاف آن افزایش داشته است؛ درحالی‌که سختی و مقاومت تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشتند.

۵- کار آزمایشگاهی

به منظور مشاهده رفتار واقعی دیوار آجری کلافدار که با شرایط موجود در کشور شامل مصالح و توسط نیروی کار محلی ساخته شده‌اند، مؤلفان هفت نمونه از دیوار آجری کلافدار را در مقیاس ۱:۲ (شکل (۶)) با



شکل ۶: چیدمان نمونه، جک و سیستم‌های نگهدارنده [۱۳،۱۴]

مشخصات متفاوت در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مورد آزمایش تحت بار جانبی چرخه‌ای قرار دادند [۱۳،۱۴].

نمونه اول و دوم با اعمال بار قائم ۲ تن و بار جانبی رفت و برگشتی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در این دو نمونه، سعی شده است تا صرفاً ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ و روش‌های معمول ساخت بکار گرفته شوند (CMSW-01, CMSW-02). بدین ترتیب، درز قائم در این نمونه‌ها پر نشد و نمونه‌های بعدی با رعایت ضوابط آیین‌نامه بعلاوه ضوابط دیگر تحت نظارت کافی ساخته شدند و درز قائم در آن‌ها پر شد. نمونه سوم (CMSW-03) با اعمال بار قائم ۴ تن و نمونه چهارم (CMSW-04) با اعمال بار قائم ۲ تن و بار جانبی رفت و برگشتی مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه پنجم (CMOW-01) و هفتم (CMOW-03) با یک بازشوی مرکزی پنجره (به عرض ۶۰۰ و ارتفاع ۴۵۰ میلی‌متر) و نعل درگاه معمول و نمونه ششم (CMOW-02) با یک بازشوی پنجره و نعل درگاه ممتد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

به منظور تعیین مشخصات دقیق مصالح مورد استفاده در ساخت دیوارها، آزمایش‌های مشخصات مصالح بر روی آجر، ملات، منشور آجری، میلگرد و بتن انجام گرفت.

برای کنترل نتایج به دست آمده و همچنین ارزیابی صحت نتایج آزمایش‌ها، مصالح مدلسازی و تحلیل نمونه‌های آزمایش‌شده نیز توسط نرم افزار دیانا انجام گردید. از روش مدلسازی ماکرو برای مدلسازی بخش آجری استفاده شده است [۱۵].

به عنوان نمونه، در شکل (۷) نمونه CMSW-04 پس از گسترش ترک‌ها در آن نشان داده شده است. همچنین در شکل (۸) مقایسه پوش منحنی هیسترسیز این نمونه با نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از تحلیل بار افزون نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتیجه تحلیل نزدیکی قابل‌قبولی را با نتایج آزمایش نشان می‌دهد.

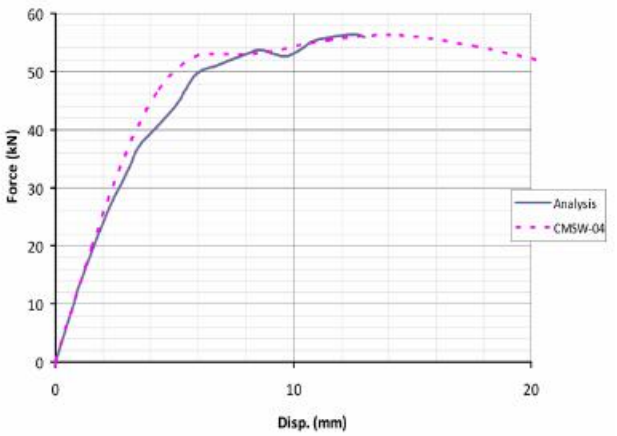
به منظور مشاهده جزییات بیشتر آزمایش‌ها و همچنین تحلیل‌های انجام شده به مرجع [۱۳] یا [۱۴] مراجعه شود.

به طور کلی برای منحنی رفتار دیوارهای آجری کلافدار منحنی

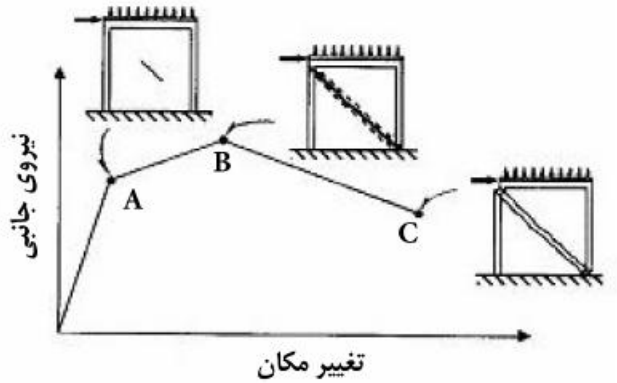
شکل ۷: تصویر نمونه CMSW-04 پس از گسترش ترک‌ها

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸: مقایسه نتیجه تحلیل با پوش منحنی هیسترسیز نمونه CMSW-**04**



شکل ۹: شکل کلی نمودار نیرو–تغییر مکان دیوارهای آجری کلافدار [۱۷]

سه خطی مشابه شکل (۹) پیشنهاد می‌شود [۱۷]. برای رسم این منحنی سه خطی، بر روی منحنی هیسترسیز حاصل از آزمایش سه نقطه حالت حدی ترک‌خوردگی، حداکثر مقاومت و تغییر مکان نهایی شناسایی می‌شوند. برای مشخص‌نمودن این نقاط از روش پیشنهاد شده در فصل دو ASCE/SEI 41 Supplement 1 استفاده می‌گردد. در این روش، ابتدا روی منحنی هیسترسیز خطی رسم می‌گردد که از نقاط حداکثر چرخه اول هر تغییر مکان یا نیرو گذر می‌کند. سپس درون این منحنی، برای هر آزمایش یک نمودار سه خطی رسم می‌گردد. این نمودار سه خطی از سه نقطه حالات حدی مذکور عبور می‌کنند.

دیوارهای آجری کلافدار و کلاف‌های آن‌ها در چرخه‌های اولیه بارگذاری رفتار خطی دارند؛ تا زمانی که ترک‌های مایل در دیوار نمایان می‌شوند و به تدریج به سمت کلاف‌ها امتداد می‌یابند. در این مرحله سختی دیوار کاهش می‌یابد. میزان این کاهش سختی در حدود ۴۰ درصد است. نقطه‌ای که در آن این کاهش سختی اتفاق می‌افتد را نقطه ترک‌خوردگی می‌نامند. در این مطالعه مقاومت جانبی متناظر این نقطه (V_{cr}) که در بسیاری از آیین‌نامه‌ها به عنوان مقاومت جانبی دیوارهای آجری در نظر گرفته می‌شود و در شکل (۹) با نقطه A نشان داده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶- روابط موجود برای تخمین مقاومت جانبی دیوارهای آجری

روابط مختلفی برای تخمین مقاومت جانبی دیوارهای آجری پیشنهاد شده است. در ادامه برخی روابط موجود در آیین‌نامه‌های مختلف ارائه شده‌اند.

۱) آیین‌نامه لرزه‌ای آرژانتین[1]

$$V = (0.6\tau_m A_m + 0.255N) \le 1.5\tau_m A_m \qquad (۱)$$

۲) آیین‌نامه لرزه‌ای مکزیک برای ساختمان‌های آجری[2]

$$V = (0.5\tau_m A_t + 0.3N) \le 1.5\tau_m A_t \qquad (۲)$$

۳) آیین‌نامه لرزه‌ای شیلی[3]

$$V = (0.57\tau_m A_t + 0.3N) \le 0.87\tau_m A_t \qquad (۳)$$

۴) آیین‌نامه لرزه‌ای کلمبیا[4]

$$V = (\frac{\sqrt{f_m}}{12} + \frac{N}{3A_t})A_m \le \frac{\sqrt{f_m}}{6}A_m \qquad (۴)$$

۵) آیین‌نامه لرزه‌ای پرو[5]

$$V = 0.5\tau_m A_t + 0.23N \le 0.65 f_m \qquad (۵)$$

۶) آیین‌نامه اروپایی[6]

$$V = (0.6\tau_m A_m + 0.4N) \le 0.65 f_m \qquad (۶)$$

که در این روابط، V مقاومت جانبی، τ_m مقاومت جانبی اولیه، N نیروی محوری قائم، A_m سطح مقطع دیوار آجری، A_t سطح مقطع دیوار آجری و کلاف بتنی و f_m مقاومت فشاری هستند. شش رابطه فوق بر اساس معیار گسیختگی مشابه موهر–کلمب هستند. دو رابطه دیگر که اولی بر پایه گسیختگی کششی–قطری و دومی با همان فرض و با در نظر گرفتن اندرکنش پانل آجری با کلاف بتنی است به شرح زیر هستند:

۷) پیشنهادی توسط تارنسک و کاکوویچ[7] در سال ۱۹۷۱ [۱۸]

$$V = A_m \frac{f_t'}{b}\sqrt{\frac{\sigma_V}{f_t'} + 1} \qquad (۷)$$

۸) پیشنهادی توسط تومازویچ و کلمنک[8] در سال ۱۹۹۷ [۱۹]

$$V = \frac{f_t' A_m}{bC_i}\left[1 + \sqrt{C_i^2\left(1 + \frac{\sigma_V}{f_t'}\right) + 1}\right] \qquad (۸)$$

که در این روابط، V مقاومت جانبی، A_m سطح مقطع دیوار آجری، b

[1] INPRES-CIRSOC 103
[2] NTCM 2004
[3] NCh 2123
[4] NSR-98
[5] E.070
[6] Eurocode 6, 8
[7] Turnsek and Cacovic
[8] Tomazevic and Klemenc

www.SID.ir

Archive of SID

ضریب توزیع تنش برشی، f'_t مقاومت کششی آجرکاری، σ_v تنش فشاری متوسط بر اثر بار قائم، $C_i=2\alpha bl/h$ ضریب اندرکنش هستند.

با مقایسه نتایج حاصل از رابطه‌های (۱) تا (۸) با نتایج آزمایش‌های توصیف‌شده در بخش (۵) و در نهایت برای تخمین مقاومت جانبی دیوارهای مورد بررسی که بر اساس آیین‌نامه‌های ایران و با مصالح و روش‌های ساخت موجود ساخته شده بودند، رابطه (۹) پیشنهاد می‌شود:

$$V_{cr} = 0.28\tau_m A_m + 0.43N \qquad (۹)$$

که در این رابطه، A_m سطح مقطع دیوار آجری بدون کلاف، N نیروی سربار وارد بر دیوار و τ_m مقاومت برشی آجرکاری است که از آزمایش کشش قطری به دست می‌آید.

برای سنجش دقت رابطه پیشنهادی، مقادیر برای نمونه‌های آزمایش‌شده محاسبه و با نتایج آزمایش مقایسه می‌شوند. در جدول (۱) مقاومت هر یک از دیوارها بر اساس رابطه پیشنهادی (۹) محاسبه شده و با مقادیر به دست آمده از آزمایش مقایسه شده است.

جدول ۱: محاسبه مقاومت جانبی نمونه‌های آزمایش‌شده و مقایسه با نتایج آزمایش

دیوار	N (کیلو نیوتون)	τ_m (مگا پاسکال)	V_{cr} (کیلو نیوتون) (تجربی)	V_{cr} (کیلو نیوتون) (رابطه (۹))	حاصل تقسیم نتایج محاسباتی بر نتایج تجربی
CMSW-01	۲۳	۰/۰۱	۱۲/۵	۱۱/۴	۰/۹۱
CMSW-02	۰/۱۱	۰/۰۱	۱۱/۵	۱۱/۴	۰/۹۹
CMSW-03	۰/۱۱	۰/۲	۲۶/۳	۲۲/۸	۰/۸۷
CMSW-04	۰/۲۰	۰/۲	۳۲/۱	۳۱/۴	۰/۹۸
CMOW-01	۰/۱۱	۰/۵۳	۴۰/۴	۳۵/۵	۰/۸۸
CMOW-02	۰/۱۱	۰/۵۳	۵۰/۹	۳۵/۵	۰/۷
CMOW-03	۰/۱۱	۰/۵۳	۳۳/۵	۳۵/۵	۱/۰۶

برای در نظر گرفتن اثر بازشو بر مقاومت جانبی، از رابطه (۱۰) (که مرجع [۲۰] برای تخمین میزان اثر بازشو در مقاومت جانبی دیوارهای کلافدار ارائه می‌دهد)، استفاده می‌شود. صحت‌سنجی این رابطه با نتایج آزمایش‌ها و تحلیل اجزای محدود، در مرجع [۱۶] صورت گرفته است.

$$V^o/V = -2.2\beta + 1 \qquad (۱۰)$$

که در آن، β نسبت سطح بازشو به سطح دیوار آجری، V مقاومت جانبی دیوار بدون بازشو و V^o مقاومت جانبی دیوار با بازشو می‌باشد.

همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود، نتایج به دست آمده از رابطه (۹) نزدیکی قابل قبولی با نتایج آزمایش‌ها دارند. در نمونه CMOW-02 نوع خاصی از تقویت بازشو اجرا شده است که سبب افزایش مقاومت جانبی دیوار در آزمایش می‌شود. با حذف این نمونه، ضریب همبستگی (R) برای نتایج رابطه (۹) و آزمایش ها ۰/۹۵ می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه بررسی ها و نتایج زیر حاصل گردید:

۱) ساختمان‌های آجری کلافدار در بسیاری از مناطق زلزله‌خیز دنیا وجود دارند و بر اساس مشاهدات گزارش‌شده در زلزله‌های گذشته به طور کلی عملکرد قابل قبولی را داشته‌اند.

۲) بررسی کلی آیین‌نامه‌های ایران و چند کشور دیگر در مورد ساختمان‌های آجری کلافدار نشان می‌دهد که ضوابط آیین‌نامه‌های ایران در مورد این ساختمان‌ها کیفی بوده و نسبت به ویرایش‌های قدیمی خود تفاوت چندانی نکرده‌اند. ولی برخی از آیین‌نامه‌ها خصوصاً در کشورهای منطقه آمریکای جنوبی (که ساختمان‌های آجری کلافدار (تا ۶ طبقه) در آن‌ها رایج است)، شامل ضوابط کمی و تحلیلی برای این دسته از سازه‌ها هستند.

۳) در این تحقیق علاوه بر مرور تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده در ایران، نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته توسط مؤلفان بر روی هفت دیوار آجری کلافدار سوراخدار و بدون سوراخ تحت بار چرخه‌ای جانبی ارائه گردید.

۴) به طور کلی و با توجه به این‌که مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی دیوارهای آجری کلافدار در ایران تاکنون محدود بوده است، استفاده از روش تحلیل اجزای محدود می‌تواند بخشی از این کمبود را جبران نماید. در این تحقیق برای جبران بخشی از این نقیصه، از مدلسازی اجزای محدود نمونه‌ها در نرم افزار دیانا برای تکمیل آزمایش‌ها مصالح و کنترل نتایج استفاده گردید.

۵) بر اساس نتایج آزمایش‌های که توسط مؤلفان انجام گرفت، رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت جانبی دیوارهای آجری کلافدار (که به روش‌های ساخت و مصالح مرسوم در ایران ساخته شده‌اند)، پیشنهاد گردید.

مؤلفان ادامه مطالعات در زمینه ساختمان‌های آجری کلافدار با مشخصات و مصالح معمول در ایران را با توجه به سادگی اجرا و دسترسی آسان به مصالح و همچنین مناسب‌بودن قیمت تمام‌شده این سازه‌ها توصیه می‌نمایند. بدیهی است که یکی از اهداف این مطالعات می‌تواند ارائه ضوابط کمی لازم برای استفاده در آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای آن‌ها باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

۸- قدردانی

این تحقیق تحت عنوان پروژه پژوهشی شماره ۷۳۶۵-۴۶۴ در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام گردید. مؤلفان لازم می‌دانند از آن پژوهشگاه و آزمایشگاه مهندسی سازه (که آزمایش‌ها در آن‌جا انجام شد)، قدردانی نمایند.

۹- مراجع

[1] Blondet, M.; "*Construction and Maintenance of Masonry Houses–For Masons and Craftsmen*", Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima, Peru, 2005.

[2] Schacher, T.; "*Confined Masonry an Illustrated Guide for Masons*", SDC, Swiss, 2007.

[۳] عشقی، ساسان؛ زارع، مهدی؛ ناصر اسدی، کیارش؛ سیدرزاقی، مهران؛ نورعلی آهاری، مسعود؛ معتمدی، مهرتاش؛ گزارش مقدماتی شناسایی زلزله ۵ دی‌ماه ۱۳۸۲، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران ۱۳۸۲.

[4] Moroni, M. O.; Astroza, M.; and Acevedo, C.; "*Performance and Seismic Vulnerability of Masonry Housing Types Used in Chile*", Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, Vol. 18, No. 3, pp. 173-179, 2004.

[5] Lieping, Ye; Xinzheng, Lu; Zhe, Qu; and Peng, Feng; "*Analysis on Building Seismic Damage in the Wenchuan Earthquake*", Proc. 14th World Conf. Earthquake Engng., 2008.

[6] Brzev, S.; Astroza M.; and Moroni, M. O.; "*Performance of Confined Masonry Buildings in the February 27, 2010 Chile Earthquake*", EERI.

[۷] وزارت مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث هشتم؛ طرح و اجرای ساختمان‌های با مصالح بنایی، نشر توسعه ایران، تهران، ۱۳۸۴.

[۸] تسنیمی، عباسعلی؛ رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ (نشریه شماره گ-۴۰۴)، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ۱۳۸۳.

[9] Kazemi, M. T.; Hoseinzadeh Asl, M.; Bakhshi, A.; and Rahimzadeh Rofooei, F.; "*Shaking Table Study of a Full-Scale Single Storey Confined Brick Masonry Building*", Scientia Iranica Transaction A: Civil Engineering, 17(3), pp. 184-193, 2011.

[۱۰] عشقی، ساسان؛ پورآذین، خشایار؛ بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های آجری با کلاف ساخته‌شده براساس ضوابط آئین‌نامه زلزله ایران (ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰)، پروژه پژوهشی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۷.

[11] Pourazin, K.; and Eshghi, S.; "*In-Plane Behavior of a Confined Masonry Wall*", TMS Journal, Vol. 27, No. 1, 2009.

[12] Khanmohammadi, M.; Nahvinia, M. A.; Marefat, M. S.; and Behnam, H.; "*Experimental Investigation of Cyclic Behavior of Confined Masonry Walls with Weak Shear Strength*", Proc. of 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6), 2011.

[۱۳] عشقی، ساسان؛ صرافی، بهرنگ؛ مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی ساختمان‌های آجری کلافدار، پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۱.

[14] Sarrafi, B.; and Eshghi, S.; "*Behavior of Clay Brick Confined Masonry Walls under Cyclic Loads*", TMS Journal, Vol. 30, No. 1, 2012.

[15] Witte, F. C.; and Kikstra, W. P.; "*DIANA-Finite Element Analysis, User's Manual release 9-Material Library*", TNO DIANA BV, 2005.

[۱۶] عشقی، ساسان؛ صرافی، بهرنگ؛ مدلسازی اجزای محدود دیوارهای آجری کلافدار ساخته‌شده بر اساس آیین‌نامه زلزله ایران، مجله علمی و پژوهشی شریف، در نوبت چاپ.

[17] Flores, L. E.; and Alcocer, S. M.; "*Calculated Response of Confined Masonry Structures*", Proc. 11th World Conf. Earthquake Engng., paper No. 1830, 1996.

[18] Turnsek, V.; amd Cacovic, F.; "*Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls*", Proc. 2nd Int. Brick Masonry Conf., pp. 149-156, 1970.

[19] Tomazevic, M.; and Klemenc, I.; "*Seismic Behavior of Confined Masonry Walls*", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26, pp. 1059-1071, 1997.

[20] Riahi, Z.; Elwood, K. J.; and Alcocer, S. M.; "*Backbone Model for Confined Masonry Walls for Performance-Based Seismic Design*", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 6, pp. 644-654, 2009.

www.SID.ir