مقایسه رفتار لرزه ای درون صفحه دیوارهای بنایی غیرمسلح آجر فشاری و آجر مجوف

مهران موسوی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
mousavi_civileng@yahoo.com

محمد خلف رضایی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
mohammadkhalaf65@gmail.com

صادق دردایی
استادیار، دانشکده فناوریهای نوین، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
dardaei@modares.ac.ir

حمزه شکیب
استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
shakib@modares.ac.ir

مسعود صمدیان
مدیر بخش پژوهش، شرکت گاز استان تهران، شرکت گاز ایران، تهران، ایران
m_samadian@yahoo.com

کلید واژه‌ها: *دیواربنایی غیرمسلح، آجر فشاری، آجر مجوف، رفتار درون صفحه، مطالعه آزمایشگاهی*

چکیده

سازه‌های بنایی به عنوان یکی از متداولترین سازه های کشور محسوب می گردند. در این مقاله اثر نوع آجر مورد استفاده در ساخت دیوار بررفتار درون صفحه دیوارهای بنایی غیرمسلح به صورت آزمایشگاهی بررسی گردیده است. بر این اساس دو دیوار با مقیاس واقعی طراحی و ساخته می‌شوند. در ساخت دیوار آزمایش اول از آجر فشاری (رسی توپر) استفاده گردیده و در آزمایش دوم آجر سورخدار (مجوف) در ساخت دیوار استفاده شده است. بر این اساس سعی گردیده است شرایط آزمایش من الجمله مشخصات مصالح مورد استفاده در هردو آزمایش یکسان باشد. دیوارهای ساخته شده تحت اثر بارهای سیکلیک قرار گرفته و رفتار و ظرفیت دیوارها با هم مقایسه گردیده است. بر اساس نتایج آزمایش مود رفتاری دیوارها بسیار شبیه بهم می باشد. همچنین مقاومت برشی هر دو دیوار نزدیک بهم می باشد ولی برای دیوار با آجر فشاری، افت مقاومتی در تغییر مکانهای کوچک در منحنی ظرفیت دیوارها مشاهده می گردد.

مقدمه

ساختمان‌هایبنایی کلافدار از المان‌های آجری و عناصر بتن‌مسلح محصورکننده افقی و قائم که در چهارطرف هر دیوار آجری قرارمی‌گیرند، تشکیل می‌شوند. کلاف‌ها دارای عملکردهای زیر هستند:

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

- افزایش شکل‌پذیری دیوار آجری در برابر نیروهای زلزله و به تبع آن، بهبود عملکرد دیوار در برابر زلزله

در سازه‌های بنایی با دیوار باربر، دیوارهای غیرمسلح به عنوان دیواربرشی برای انتقال بارهای جانبی زلزله و باد به تکیه‌گاه‌های سازه عمل می‌کنند. در این سازه‌های بنایی، دیوارهای برشی بنایی تحت هر دو بار افقی و عمودی در درون‌صفحه خود قرار می‌گیرند. مودهای شکست معمول دیوارهای برشی بنایی شامل موارد زیر است: لغزش درز ملات، حرکت گهواره‌ای، کشش قطری و شکست پنجه (صرافی ۱۳۹۱)

درخصوص روشهای مناسب ارزریابی آسیب‌پذیری سازه‌های بنایی غیرمسلح تلاشهای فراوانی صورت گرفته است که از جمله می‌توان به تحقیقات انجام گردیده توسط Durgesh C. Rai و همکاران (2004) برای ارائه روش ارزیابی آسیب پذیری ساختمانهای بنایی به روش تجویزی و تحقیقات انجام گردیده توسط Abrams برای ارائه روشهای ارزیابی به روش عملکردی اشاره کرد(Abrams 1997). عموماً در کنار انجام مطالعات پارامتریک، در این زمینه آزمایشهای مختلفی جهت بررسی رفتار دیوارهای بنایی و مشخص شدن مودهای رفتاری آنها انجام گردیده است، که می‌توان به تحقیقات انجام گردیده توسط Abramsو Shah که در گزارشهای FEMA هم استناد گردیده‌اند اشاره کرد.

در این مطالعه سعی می‌شود رفتار درون صفحه دیوارهای بنایی ساخته شده با آجر فشاری و آجر مجوف مقایسه گردد. برای مقایسه رفتار درون صفحه دیوار، دو دیوار با مقیاس واقعی ساخته و مورد آزمایش قرار می گیرد. در ساخت آزمایش اول از آجر فشاری و برای ساخت دیوار دوم از آجر مجوف استفاده گردیده است.

ساخت نمونه‌ها

برای هر دو نمونه دیوار با آجر فشاری و آجر مجوف مشخصات نمونه دیوارهای این مطالعه از طریق مطالعه میدانی به ابعاد اسمی،۲۰×۲۶۰×۲۶۰ سانتیمتر و کلاف‌های قائم و کلاف افقی روی دیوارها به ابعاد ۲۰×۲۰ سانتیمتر و کلاف زیرین به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتیمتر درنظر گرفته شدند. ، در کلاف‌های فوق از میلگردهای طولی $\Phi 12$ ومیلگردهای عرضی $\Phi 8$استفاده شد. همچنین با توجه به مقاومت بسیار پائین بتن به‌کار گرفته شده در فونداسیون وکلاف‌های دیوارها، مقاومت ۱۲ مگاپاسکال برای این اعضا به عنوان مقاومت مبنا در طرح اختلاط بتن انتخاب گردید.

آماده‌سازی محل اجرای دیوار

برای اجرای دیوار بر روی کف قوی، از یک ورق فولادی به ضخامت یک سانتیمتر و به طول ۳۶۰ سانتیمتر استفاده گردید. این ورق پس از سوراخ کردن توسط پیچ و مهره به کف آزمایشگاه متصل شد. با محاسبات اولیه‌ای در بار نهایی کلیه دیوارها به کمک آئین‌نامه *FEMA*، تعداد پیچ‌ها به‌گونه‌ای محاسبه شد که مقدار نیروی برشی و لنگر قابل تحمل توسط پیچ‌های بکار گرفته شده، بیش از ۲ برابر ظرفیت نهایی نمونه‌ها باشد. برای جلوگیری از حرکت صلب نمونه در زمانی که نمونه تحت بار قرار دارد، از تعدادی نبشی به عنوان برشگیر استفاده شد که به ورق جوش شدند. نبشی‌های بکارگرفته شده ازنوع $L10\times10$ و به طول ۱۴ سانتیمتر بودند.

بتن‌ریزی فونداسیون

قبل از بتن‌ریزی فونداسیون، آرماتوربندی فونداسیون و کلاف‌های افقی و قائم انجام شد. آرماتورهای مربوط به فونداسیون در محل اجرای آن قرار داده شد و همچنین آرماتورهای کلاف‌های قائم نیز به منظور تأمین میلگرد انتظار، در محل خود نصب و قالب‌بندی کلاف زیرین انجام شد. بتن‌ریزی در لایه‌های افقی با ضخامت یکنواخت صورت گرفت و هر لایه قبل از ریختن لایه بعدی به طور کامل متراکم شد. میزان و سرعت بتن‌ریزی به نحوی بود که هنگام ریختن لایه جدید، لایه قبلی در حالت خمیری باشد. بتن‌ریزی از دو انتهای عضو شروع شده و به سوی قسمت مرکزی کلاف زیرین ادامه داده شد. این بتن به مدت حداقل ۷ روز نگهداری شده تا رطوبت آن حفظ شود و سپس مرحله بعدی ساخت، انجام گرفت.

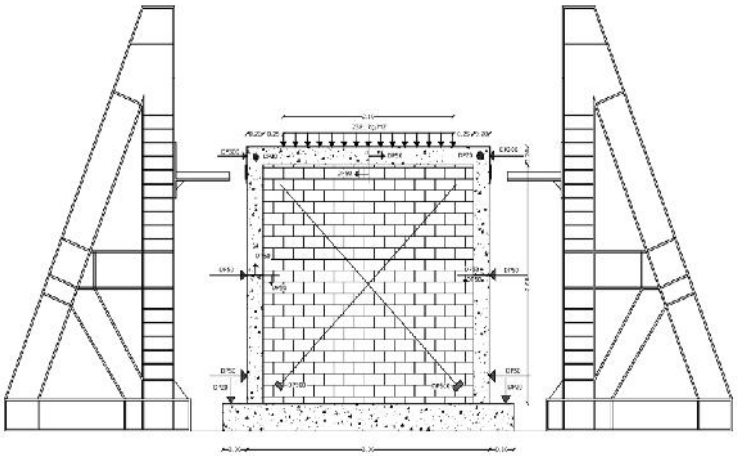
دیوارچینی

پس از خشک شدن بتن کلاف زیرین(حداقل ۷ روز)، عملیات دیوارچینی آغاز شد. برای اجرای دیوار بنایی، بتن فونداسیون آب گرفته شد تا از جذب آب دیوار توسط بتن جلوگیری شود. سپس یک لایه ملات روی بتن ریخته شده و عملیات چینش دیوار صورت گرفت. برای انجام دیوارچینی از ملات ۱ به ۳(یک نسبت سیمان و سه نسبت ماسه)استفاده شد که با اختلاط آن با درصد مناسب آب، جهت دیوارچینی مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام عملیات دیوارچینی به مدت ۲۸ روز نمونه‌های موردنظر خشک شده که در این مدت نگهداری دیوار با حفظ رطوبت آن برای انجام عمل هیدراتاسیون ملات انجام می‌گیرد.

بتن‌ریزی کلاف‌ها

پس از گذشت یک هفته از دیوارچینی، بتن‌ریزی کلاف‌های افقی و قائم انجام می‌شود. قالب‌بندی این کلاف‌ها وبتن‌ریزی آنها همزمان انجام می‌گیرد تا یکپارچگی کاملی در بتن این کلاف‌ها ایجاد شود. برای اجرای کلاف افقی فوقانی بر روی دیوار، شبکه آرماتوربندی شده بر روی سطح بالای دیوار قرار داده می‌شود. دو صفحه فولادی برای اعمال بارگذاری رفت و برگشتی با ضخامت ۲ سانتیمتر در بالای کلاف قائم و در دو طرف دیوار قرار داده شدند. بتن‌ریزی کلاف‌های قائم در ۴تا۵ مرحله انجام شد که پس از هر مرحله ریختن بتن در کلاف‌های قائم، عمل ویبره صورت گرفت. پس از اتمام این مرحله و بازکردن قالب، نگهداری از بتن کلاف‌ها نیز برای مدت ۲۸ روز مدنظر قرار داشت.

پس از ساخت و آماده‌شدن هر نمونه دیوار، قاب‌های انتقال‌دهنده بار[1] به نمونه، به اطراف دیوار منتقل می‌شوند و توسط پیچ و مهره به کف صلب آزمایشگاه متصل می‌شوند.



شکل۱: قرارگیری جابجایی‌سنج‌ها، قاب‌های اعمال‌کننده بار و بارعمودی

سیستم اعمال نیرو

از آنجاییکه لازم است دیوارهای موردآزمایش تحت نیروهای قائم وجانبی قرار گیرند، دو سیستم متفاوت برای اعمال این بارها وجود دارندکه درادامه شرح داده می‌شوند.

سیستم اعمال بار قائم

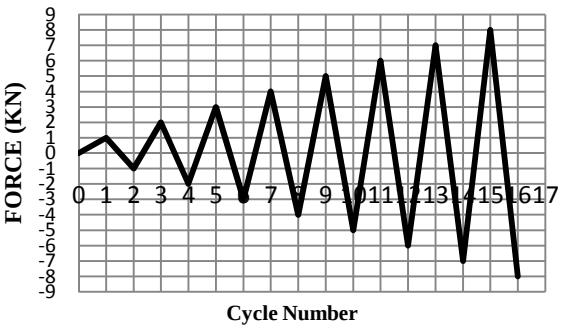
بارگذاری با استفاده از شمش‌های سرب که وزن هر کدام ۲۰ کیلوگرم است انجام گرفت. در این روش بار وارده برنمونه‌ها کاملاًواقعی بوده ودرحین آزمایش تغییراتی درمقدار بار ایجادنمی‌گردد. کل بار ثقلی بر روی دیوار یک تن می باشد که با استفاده از شمشهای سربی تامین گردیده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.

سیستم اعمال بار جانبی

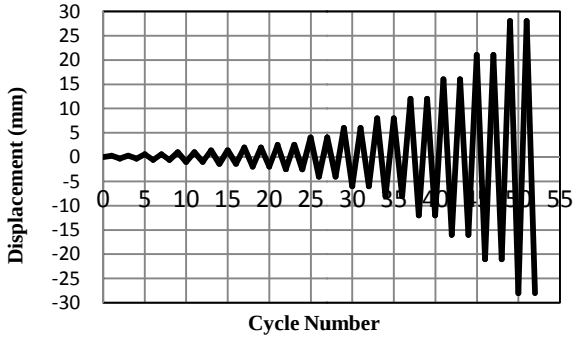
نیرو دربارگذاری شبه استاتیکی به وسیله جک هیدرولیکی دوطرفه وارد می‌شود. در اینروش جابجایی یاکرنش بر اساس شتابنگاشت ثبت شده یک زلزله خاص اعمال نمی‌گردد، بلکه دربعضی مواقع جابجایی برحسب ضریب شکلپذیری به صورت شبه استاتیک به سازه اعمال می‌گردد. در این پژوهش، بارگذاری شبه استاتیکی برای اعمال بارجانبی مورداستفاده قرارگرفت.برای اعمال بار جانبی ازدو قاب مثلثی که در شکل ۱ نشان داده شده است،استفاده می‌گردد. دوعدد جک فشاری ودو عدد نیروسنج (load cell) که درطرفین دیوارقرارداده شده‌اند،بهترتیب اعمال تغییر مکان جانبی و ثبت نیروی جانبی را برعهده دارند. با این سیستم بارگذاری می‌توان بارجانبی را به صورت سیکلی (رفت و برگشتی) اعمال نمود.

آزمایش‌های دیوارهای ساخته شده به صورت سیکلیک فزاینده و در تراز کلاف فوقانی انجام شده است. با توجه به سختی بالای دیوارها، این آزمایش‌ها در ابتدا به صورت نیروکنترل انجام شده و پس از اعمال بار تا ۸ تن به صورت کنترل‌شونده با جابجایی انجام شده است. شکل‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده پروتکل بارگذاری وارد بر نمونه‌ها می‌باشد.

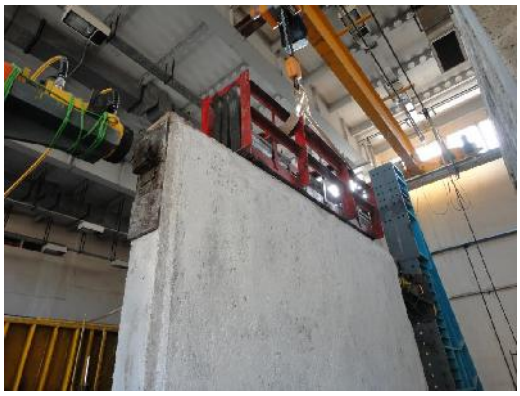
[1]- Reaction Frame



شکل۲: پروتکل بار وارده بر نمونه در ابتدای آزمایش

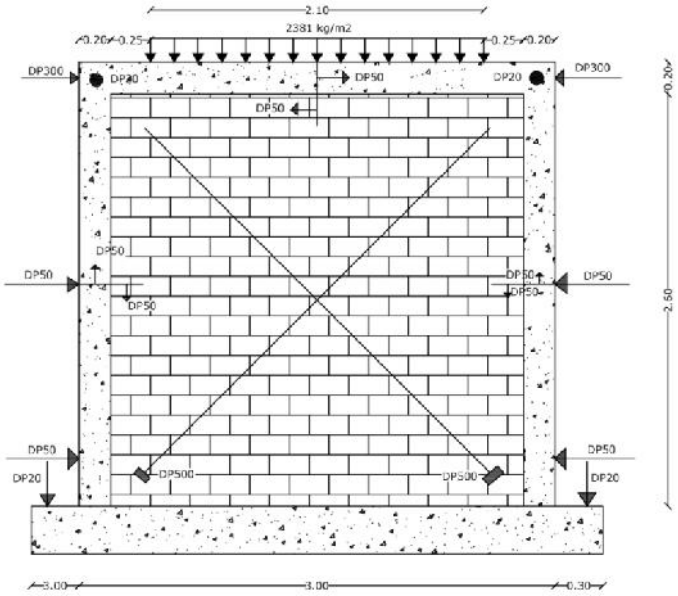


شکل۳: پروتکل جابجایی وارد بر نمونه‌ها



شکل۴ : اعمال بار ثقلی و جانبی

برای محاسبه تغییرمکان در تراز بالای دیوار، از جابجایی‌سنج‌هایی با ظرفیت ۲۰۰ و ۳۰۰ میلیمتر استفاده شده است که در شکل ۵ موقعیت آنها نشان داده شده است.



شکل۵: نحوه قرارگیری تغییرمکان‌سنج‌ها

نتایج

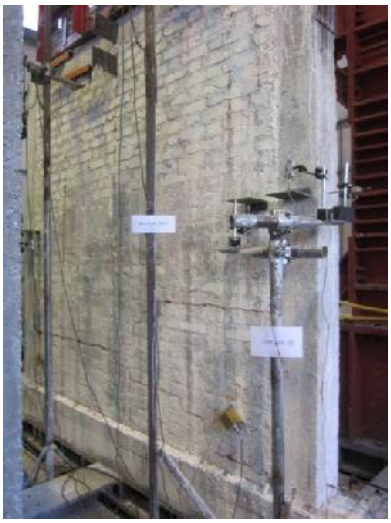
نتایج آزمایش دیوار غیرمسلح با آجر فشاری

طبق توضیحات بخش قبل، پروتکل بارگذاری به دیوار با آجر فشاری اعمال شد. اولین آسیب وارده به دیوار به صورت یک ترک خمشی در محل اتصال رج اول دیوار بنایی به فونداسیون و در نیروی ۹۰ کیلونیوتن و جابجایی ۲ میلیمتر رخ داد. تا این مقدار نیرو، رفتار دیوار تقریباً دارای

رفتار خطی بود. با تکرار این سیکل بارگذاری، ترک در محل اتصال دیوار و فونداسیون به اتصال کلاف قائم به فونداسیون نیز گسترش یافت که در شکل ۶ نشان داده شده است.

با اعمال جابجایی ۲/۶ میلیمتر، ترک‌هایی در پای کلاف قائم و به علت تحت کشش قرارگرفتن میلگردهای انتظار این کلاف‌ها به‌وجود آمد.در جابجایی برابر با ۴ میلیمتر ترک‌هایی در محل اتصال دیوار به کلاف قائم و همچنین یک ترک افقی در داخل دیوار ایجاد شد. عرض این ترک‌ها با جابجایی ۵ میلیمتر بزرگتر شده و ماکزیمم نیروی قابل تحمل دیوار شاهد در این مقدار و برابر با ۱۴۸ کیلونیوتن بدست آمد. در ادامه کاهش ناگهانی در ظرفیت دیوار رخ داده و بار به ۱۱۱کیلونیوتن در جابجایی تقریبی۷ میلیمترکاهش یافت. در ادامه آزمایش و با پیشرفت بارگذاری ترک اصلی در دیوار شکل گرفت که این امر بیانگر مود شکست لغزشی دیوار بود.شکل ۷ شکست لغزشی[۲] دیوار شاهد را نشان می‌دهد.

شکل۶: اولین ترک در محل اتصال فونداسیون و دیوار



شکل۷: شکست لغزشی دیوار غیرمسلح

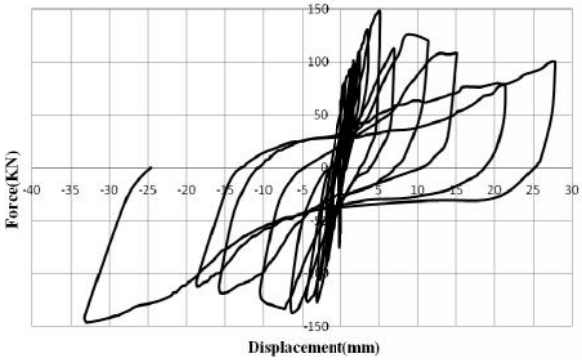
با اضافه کردن جابجایی به دیوار، عرض ترک‌ها افزایش یافته و جداشدگی دیوار از کلاف به کل ارتفاع گسترش یافت ضمن این که در کلاف قائم و در محل خاموت‌ها، ترک‌های ریز در کلاف قائم ایجاد شد و همچنین از جابجایی ۱۶ میلیمتر به بعد در پنجه دیوار و بتن پای کلاف قائم، خردشدگی به وجود آمد که شکلهای زیر نشانگر مودهای خرابی دیوار می‌باشد.

شکل۸: جدایی کامل دیوار از کلاف

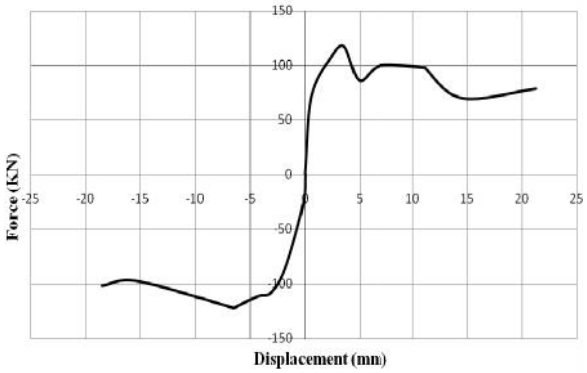
شکل۹: خردشدگی پنجه دیوار و پای کلاف قائم

منحنی رفت و برگشتی نیرو-تغییر مکان و همچنین پوش دیوار در شکل‌های ۱۰و ۱۱ نشان داده شده است.

[2]-Bedjoint sliding



شکل۱۰: منحنی رفت و برگشتی دیوار غیرمسلح(آجرفشاری)



شکل۱۱: منحنی پوش حاصل از بارگذاری سیکلیک

نتایج آزمایش دیوارغیرمسلح آجر مجوف

همانطور که عنوان شده است روند ساخت، ابعاد اسمی، نوع ملات و مقاومت بتن مصرفی این دیوار کاملاً مشابه با دیوار غیرمسلح ساخته شده از آجر فشاری است وتنها نوع واحدبنایی با آزمایش قبل متفاوت بوده که در این صورت می‌توان اثر آجر مجوف را در دیوار مشاهده کرد. پس از شروع بارگذاری مشاهده شد که تا نیروی ۶۰کیلونیوتن، رفتار دیوار تقریباً خطی بوده و خرابی قابل‌ملاحظه‌ای در دیوار مشاهده نشد. همانند آزمایش قبل، اولین ترک در مرز بین کلاف و فونداسیون و در نیروی ۷۰ کیلونیوتن و جابجایی۰/۹ میلیمتر رخ داد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

شکل۱۲: ترک در مرز کلاف و فونداسیون

در جابجایی ۱/۴ میلیمتر و نیروی ۸۴ کیلونیوتن ترک عمودی در پنجه دیوار شکل گرفت و با ادامه بارگذاری در نزدیکی کلاف قائم و تقریباً در وسط ارتفاع نمونه ترک عمودی در جابجایی ۲/۵۴ میلیمتر و ۷۹ کیلونیوتن گسترش یافت که در شکل ۱۳ مشاهده می گردد.

شکل۱۳ : ترک‌های اولیه در دیوار

عرض این ترک‌ها در دیوار با افزایش بارگذاری بیشتر شدند و این ترک‌ها توسط ترک افقی به هم متصل شدند. به عبارت دیگر شکست دیوار همانند دیوار ساخته شده از آجر فشاری به صورت لغزش بود. این ترک‌خوردگی در جابجایی ۴ میلیمتر رخ داد. شکل ۱۴ مود شکست لغزشی دیوار و شکل ۱۵ ترکهای ایجاد شده در کلاف قائم را نشان می‌دهد.

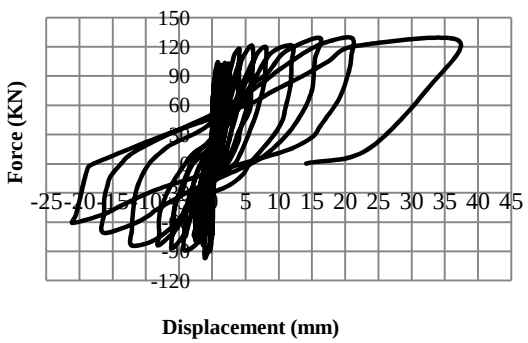
شکل۱۴: شکست لغزشی دیوار آجر مجوف

شکل۱۵: ترک‌های ایجادشده در کلاف

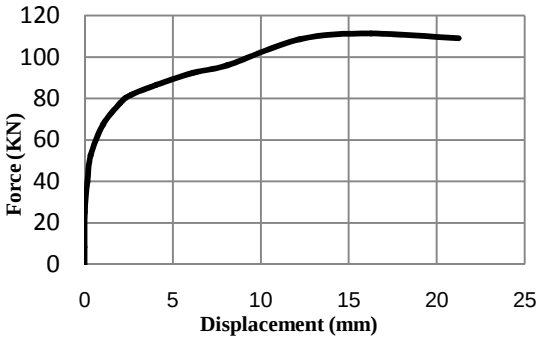
با ادامه بارگذاری مشاهده شد که دیوار همچنان با افزایش مقاومت روبرو است و علاوه بر گسترش و بازشدگی ترک‌های قبلی، خردشدگی در محل پنجه ستون رخ داده و ترک لغزشی دیوار در طول کل دیوار گسترش یافت. دیوار به حداکثر ظرفیت مقاومتی خود یعنی نیروی ۱۲۹ کیلونیوتن رسیده و پس از آن کاهش نیرو رخ داد. بارگذاری در یک سیکل بعد ادامه پیدا کرد و پس از آن آزمایش متوقف شد. در طول آزمایش ترک‌های ریزی در محل قرارگیری خاموت‌ها و در کلاف‌های قائم ایجاد شدند. شکل زیر ترک‌های مذکور را به همراه جابجایی ایجادکننده هر ترک نشان می‌دهد.همانطور که گفته شد در جابجایی ۶ میلیمتر ترک‌خوردگی در پای کلاف قائم رخ داده و با افزایش بارگذاری خردشدگی در این محل و در پنجه دیوار گسترش یافت.

شکل۱۶:خردشدگی پای کلاف قائم

پس از بررسی نتایج حاصل از آزمایش، منحنی‌های هیسترسیس و پوش‌اور دیوار غیرمسلح با آجر مجوف به صورت زیر بدست می‌آید:

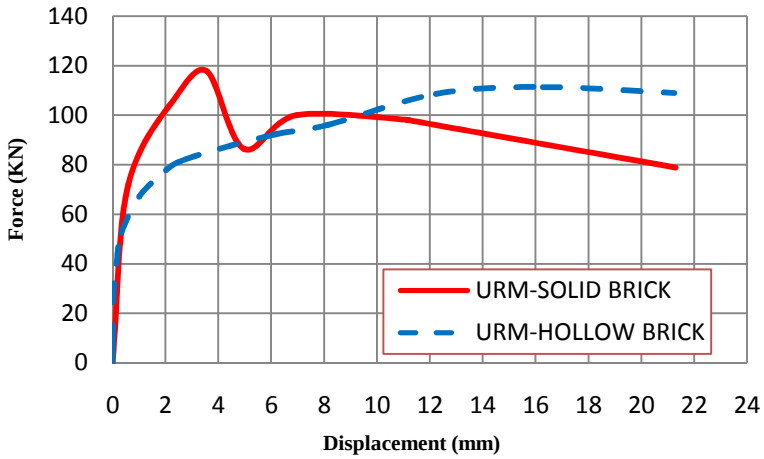


شکل۱۷: منحنی رفت و برگشت دیوار غیرمسلح آجرمجوف



شکل۱۸: منحنی پوش دیوار آجرمجوف

در ادامه مقایسه منحنی‌های پوش آور هر دو دیوار باهم مقایسه می گردد. همانطور که مشاهده می‌گردد هر دو نمونه دارای مقاومت برشی نزدیک بهم می‌باشند بر این اساس میزان ظرفیت برشی دیوار با آجر رسی توپر، ۱۱۷.۵ کیلونیوتن و برای آجر سوراخدار ۱۱۰ کیلونیوتن استخراج گردید. براساس این مقایسه در ظرفیت برشی دیوار ساخته شده با آجر فشاری افت مقاومت برشی در تغییرمکانهای کوچک مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۹: مقایسه منحنی پوش دیوار با آجر فشاری و دیوار با آجرمجوف

نتیجه گیری

بررسی دیوارهای شاهد با آجر رسی توپر (فشاری) و سوراخدار (مجوف) نشان می‌دهد که در شرایط مشابه، مود شکست دیوار، در هر دو حالت از نوع لغزش بوده و همچنین میزان ظرفیت دیوارها نیز برای دیوار با آجر رسی توپر، ۱۴۸ کیلونیوتن و برای آجر سوراخدار، ۱۲۹ کیلونیوتن بدست آمده است. بنابراین تغییر در نوع واحد بنایی دارای اثر بسیار کمی در رفتار دیوار بنایی کلافدار بوده است.

بر اساس منحنی های پوش آور میزان ظرفیت برشی دیوار با آجر رسی توپر و آجر سوراخدار نزدیک بهم می باشد ولی در ظرفیت برشی دیوار ساخته شده با آجر فشاری افت مقاومت برشی در تغییر مکانهای کوچک مشاهده می گردد.

تقدیر و تشکر

این مطالعه از طرف شرکت گاز استان تهران مورد حمایت مالی و فکری قرار گرفته است که بدینوسیله از کارشناسان بخش پژوهش و مسئولان این شرکت قدردانی و تشکر می گردد.

مراجع

صرافی ب و عشقی س (۱۳۹۱)مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی ساختمان‌های آجری کلافدار، تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

Abrams DP(1997) Response of unreinforced masonry buildings. *Journal ofEarthquake Engineering*, Vol. 1, No. 1

DurgeshCRai(2004) Seismic Evaluation and Strengthening of Existing Buildings, Indian Institute of Technology, Kanpur,, Final Draft

Federal Emergency Management Agency,FEMA-306(1998) Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings