بهسازی لرزه‌ای با فیبرهای پلیمری تقویت شده

استفاده از ASCE-41 برای مقاوم سازی یک ساختمان چند طبقه بتنی:

قدیمی شدن زیر ساخت‌ها و همچنین دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای دقیق سبب شده‌اند تا بسیاری از سازه‌ها نیازمند بهسازی لرزه‌ای باشند. این موضوع به‌طور ویژه‌ای در مورد شمال غربی اقیانوس آرام صدق می‌کند که در آن منطقه دریا راه پیوجت (Puget Sound Area) در معرض رانش‌های بزرگ روی کمربند زلزله است. زمین‌لرزه نیسکوالی (شهری در غرب واشنگتن-Nisqually) در سال ۲۰۰۱ یکی از بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ها در تاریخ واشنگتن به حساب می‌آید که خسارتی بالغ بر ۲ میلیارد دلار و صدها زخمی بر جای گذاشت. این زمین‌لرزه حتی تا کیلومترها دورتر در شرق این ایالت نیز احساس شد.

در حالی که مقاوم سازی لرزه‌ای سبب کاهش قابل توجه خطرات مالی و جانی می‌شود، بسیاری از این اقدامات مقاوم سازی تنها زمانی انجام می‌شوند که الزامات اداری و قضایی یا سرمایه‌گذار و وام‌دهنده در نظر گرفته شود. ساختمان‌های قدیمی‌تر ممکن است بارها در طول عمر خود مورد بهسازی لرزه‌ای قرار بگیرند. یکی از پروژه‌های اخیر بهسازی لرزه‌ای در مورد ساختمان Sunset House در مرکز شهر سیاتل صورت گرفت که موضوع این مقاله نیز هست، در این پروژه کاربرد فیبرهای پلیمری تقویت شده با موفقیت صورت گرفت.

فیبرهای پلیمری تقویت شده:

فیبرهای پلیمری تقویت شده به‌عنوان یک مصالح مؤثر برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی موجود شناخته شده‌اند. این نوع از صنعت مقاوم سازی بیشتر از ۲۰ سال سابقه دارد و تا کنون چندین پروژه به‌وسیله این روش با موفقیت مقاوم سازی شده‌اند. برخی از این ساختمان‌های بهسازی شده در زلزله‌های بعدی ثابت کردند که بهسازی آن‌ها با موفقیت صورت گرفته است. تست‌های آزمایشگاهی گسترده و زلزله‌های واقعی سبب شدند تا روش‌های طراحی قابل قبول و همچنین دستورالعمل‌های مربوط به استفاده از FRP توسعه یابند تا جامعه مهندسی بتواند از آن‌ها بهره ببرد.

روش‌های بسیاری برای مقاوم سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها وجود دارد که از جمله آن‌ها عبارت‌اند از: افزایش اندازه مقطع به‌وسیله بتن و یا فولاد، اضافه کردن عضوهای جدید مثل دیوارهای برشی، ستون‌ها یا تیرها، عایق بندی فونداسیون و قاب‌های مهاربند. در حالی که این روش‌ها در بهبود عملکرد ساختمان بسیار مؤثر عمل می‌کنند، اما ممکن است منجر به نتایجی همچون محدودیت در فضا، قابل استفاده نبودن ساختمان در حین عملیات یا اثرگذاری زیاد در ساختمان شوند. بیشتر از ۲۰ سال است که در ایالت متحده آمریکا FRP جایگزین روش‌های مقاوم سازی سازه برای بهسازی ساختمان‌های موجود شده است و همچنین عنوان یک روش قابل قبول برای تعمیر سازه‌ها در سراسر جهان دریافت کرده است.

مصالح FRP فیبرهایی با مقاومت بالا و در قالب شبکه‌های پلیمری هستند. فیبرها مقاومت و سختی لازم را تأمین می‌کنند و این شبکه‌ها علاوه بر انتقال بار از فیبرها و محیط زیست در مقابل یکدیگر محافظت می‌کند. الیافی که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند از جنس شیشه و کربن هستند. طراحی FRP به خواص ترکیب این دو ماده استوار است. معیارهای قابل قبول ICC AC 125 برای مقاوم سازی ساختمان‌های بنایی که در آن‌ها از سیستم‌های کامپوزیت فیبرهای پلیمری تقویت شده استفاده می‌شود، دارای برنامه جامعی است که پایداری زیست محیطی را برای اطمینان حاصل کردن از تأمین عملکرد مورد انتظار در برمی‌گیرد. موسسه بتن امریکا (ACI) مشخصاتی را برای مصالح FRP لحاظ کرده است، این اطاعات در قسمت ACI 440/8R-13 درج شده‌اند و به خصوصیات الیاف کربنی و شیشه‌ای که در تقویت خارجی سازه‌های بنایی و بتنی نقش دارند، اشاره کرده است. این اولین دستورالعملی است که در رابطه با مصالح FRP در ایالت متحده آمریکا تدوین شده است.

مصالح FRP نسبت به وزن مقاومت بالایی دارند و همین موضوع سبب شده تا استفاده از این مصالح برای مقاوم سازی لرزه‌ای ایده خوبی باشد. این مصالح جرم قابل توجهی را به سازه اضافه نمی‌کند، در حالی که می‌توانند انعطاف پذیری و ظرفیت برشی سازه را نیز افزایش دهند. از این سازه‌ها می‌توان برای تقویت موضعی یک مکان استفاده کرد بدون این‌که نگران وارد شدن بار اضافی به فونداسیون بود. استفاده از FRP می‌تواند به گونه‌ای باشد که تغییری در سفتی حاصل نشود و میزان تجزیه و تحلیل سازه در شرایط پس از مقاوم سازی به حداقل برسد. مصالح FRP حداقل عمق و ضخامت را به سازه اضافه می‌کند یعنی کمتر از $\frac{1}{4}$ اینچ.

مصالح FRP عضوهایی کششی هستند که برای اتصال به اعضای موجود استفاده می‌شوند. در حال حاضر، چندین استاندارد طراحی و همچنین پیشنهادهایی در خصوص کاربرد این مصالح در سراسر جهان وجود دارد. در ایالت متحده آمریکا، استاندارد ACI 440.2R-08، راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های FRP برای مقاوم سازی سازه‌های بتنی، دستورالعمل‌های گسترده‌ای برای استفاده از این مصالح را دربرمی گیرد. این دستورالعمل در سال ۲۰۰۲ برای اولین بار منتشر شد و در سال ۲۰۰۸ به چاپ مجدد رسید. با این حال، در حال حاضر این راهنما موضوع بهسازی لرزه‌ای را پوشش نمی‌دهد.

استانداردهای بهسازی لرزه‌ای در آن زمان:

در آن زمان که پروژه ساختمان Sunset House اجرا شد، استانداردهای بین المللی ساختمان‌های موجود (IEBC) نیز و استانداردهای شهر سیاتل و استانداردهای اولیه در ASCE 31-03 (ارزیابی) و ASCE 41-06 (مقاوم سازی) به طور رسمی پذیرفته شده بودند. در حال حاضر شهر سیاتل استاندارد IEBC را همراه با اصلاحات محلی پذیرفته است و استاندارد ASCE 31-13 نیز با دو استاندارد قبلی (ASCE 31-03 و ASCE 41-06) ادغام شد.

IEBC در حال حاضر دو روش تجزیه و تحلیل و مقاوم سازی ساختمان‌های موجود را نیز پذیرفته است. مورد اول این است که سیستم سازه نسبت به استانداردهای فعلی ساختمان‌های بین‌المللی بررسی شود و این کار به وسیله کاهش نیروی مورد نیاز و جزئیات لازم برای شناسایی مقاومت سازه اصلی انجام می‌شود. روش دیگر، روش دوم مجاز در IEBC، ASCE 31-13 است که مربوط به بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود می‌باشد.

در گذشته، مهندسان با اختلاف بین نیروهای حاصل شده از این دو روش روبرو بودند. این دو روش بررسی مصالح و رفتار سازه را به دو صورت متفاوت انجام می‌دهند. بارهای حاصل شده در روش IEBC به طور قابل توجهی کمتر از بارهای حاصل شده در روش ASCE 41 به نظر می‌رسند. به طور کلی، راه‌حل‌های سازه‌ای که در روشی مشابه ASCE 41 ارائه می‌شوند، جزئیات بیشتری را از ساختمان‌های موجود در اختیار قرار می‌دهند. روش ASCE 41، اهداف عملکردی را بر اساس عملکرد مورد انتظار از ساختمان ارائه می‌کند. هدف اصلی عملکرد ساختمان‌های موجود (BPOE) ارائه الزاماتی برای ساختمان‌های موجود است که سطح عملکرد ایجاد شده برابر با مقادیر کاهش یافته در IBC شود.

در حال حاضر، ASCE 41-13 استفاده از FRP را به‌عنوان مصالحی در یک سیستم لرزه‌ای نمی‌پذیرد. استفاده از FRP در اعضایی که تغییر شکل کنترل شده‌ای دارند از نظر ASCE 41-13 پذیرفته نیست. در حال حاضر از FRP می‌توان به‌عنوان اعضایی که نیروی کنترل شده‌ای دارند و بر اساس حداکثر باری که متحمل می‌شوند، استفاده نمود.

شکل ۱. فضای کاری محدود هنگام نصب FRP

ارزیابی سازه ای ساختمان Sunset House با استفاده از ASCE 41

این ساختمان ده طبقه در دهه ۱۹۷۰ به‌عنوان یک خانه مسکونی ساخته شد. در این ساختمان از ترکیب دیوارهای برشی بنایی، بتن مسلح و همچنین کف‌های پیش ساخته بتنی استفاده شده است (شکل ۱). ارزیابی لرزه‌ای یک قیمت از کارهای مورد نیاز برای نوسازی گسترده این ساختمان بود. این ارزیابی با استفاده از ASCE 41-06، استاندارد بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود انجام می‌شود. از یک ردیف چک لیست، یک ردیف ارزیابی و یک ردیف تحلیل دینامیکی خطی برای شناسایی و حل موضوعات لرزه‌ای در ساختمان استفاده شد. ASCE 41 راهنمایی مبتنی بر عملکرد است که در اختیار طراحان قرار می‌گیرد تا به ارزیابی و بازسازی ساختمان‌های موجود بپردازند و همچنین آسیب‌های مشاهده شده در حوادث قبلی را با تست‌های آزمایشگاهی کنار هم قرار دهند. اهداف عملکرد لرزه‌ای را می‌توان بسته به هدف‌های مالک، نوع ساختمان و ... به طور ویژه‌ای تعریف کرد.

مقاوم سازی ساختمان Sunset House به منظور دستیابی به اهداف عملکردی ایمنی حیاتی و شناسایی نقص‌ها در ظرفیت کششی برخی از دیوارهای برشی و بعضی از تیرهای متصل در دیوارهای راهروها انجام شد. در حالی که این نقص‌ها نسبتاً جدا بودند، اثر بالقوه آن‌ها در عملکرد سازه احتمالاً قابل توجه بوده است.

طراحی FRP برای ساختمان Sunset House در شرایطی که این نقص‌های سازه‌ای در کریدورها و یا فضاهای زندگی قرار داشتند، به طور قابل توجهی میزان راه‌حل‌های مقاوم سازی قابل ارائه را با محدودیت روبرو کرد. پس از تحقیقات بسیاری که در خصوص روش‌های بالقوه مقاوم سازی انجام شد، FRP به دلیل مقرون به صرفه بودن و همچنین همراه داشتن حداقل اثرات به لحاظ معماری در فضاها انتخاب شد. FRP نه تنها حداقل اثر را روی فضاها دارد بلکه مقاومت لازم را برای سازه بدون افزایش قابل توجه در سفتی تأمین می‌کند. گزینه‌های دیگر، مانند اضافه کردن فولاد و بتن به دیوارها به دلیل ایجاد محدودیت در فضاها رد شدند.

از FRP برای طراحی دو جزء اصلی در مقاوم سازی استفاده شد، افزایش ظرفیت واژگونی و ظرفیت برشی در دیوارها و افزایش ظرفیت برشی تیرهای متصل به هم در راهروها. افزایش ظرفیت برشی در دیوارهای برشی نیازمند افزایش ظرفیت کششی در اتصالات مرزی دیوارها بود. این امر با اضافه کردن لایه‌هایی پیوسته از الیاف شیشه و کربن و اتصال آن‌ها به دیوارهایی که بین سطح‌های مختلف کف قرار دارند، محقق شد. ظرفیت برشی در دیوارها نیز به‌طور مشابه از طریق اضافه کردن ورق‌های فیبر شیشه‌ای به بالا و پایین دیوارها افزایش یافت. ظرفیت تیرهای متصل به هم نیز با اتصال FRP به آن‌ها افزایش یافت.

به دلیل این که ACI 440-2R بخشی در رابطه با طراحی لرزه ای ندارد، معادلات طراحی برای دیوارهای برشی از ICC AC 125 گرفته می شود که اساس طراحی FRP برای دیوارهای برشی است. عناصر مرزی دیوارهای برشی و تیرهای متصل به هم بر اساس اصول طراحی مناسب توسعه یافته از تغییر مکان مورد انتظار در دیوارها و رفتار ترکیبی FRP طراحی می‌شوند.

نصب:

در این ساختمان در طول عملیات مقاوم سازی و نصب FRP محدودیت‌هایی ایجاد شد. این چالش در ساخت و ساز در هر دو مرحله برنامه‌ریزی و هماهنگی برای ساکنین ایجاد شد. عملیات نصب به‌صورت مرحله‌ای و با دسترسی محدود یعنی تنها یک طبقه فضای کاری خاص در یک زمان معین صورت گرفت. راهروها باریک بودند و در فضاهای زندگی نیاز بود که دسترسی به آن‌ها در طول عملیات ساخت میسر باشد (شکل ۲). پس از آماده سازی سطح، سطح بتنی با سیستم سازگار اپوکسی پوشانده شد. اپوکسی موادی بدون بو و عاری از هر گونه مواد فرار هستند. علاوه بر این، از دستگاه‌هایی برای تصفیه هوا در محیط‌های کاری استفاده می‌شد. پس از آماده سازی سطح و آغشته کردن صفحات FRP با اپوکسی، آن‌ها را روی سطح دیوارها قرار می‌دهند.

شکل ۲

طرح مقاوم سازی شامل فیبرهایی عمودی است که مستلزم اجرای پیوسته و بدون وقفه از سطح بالا به سمت پایین هستند تا از دوام مسیر بارگذاری اطمینان حاصل شود.

شکل ۳

نصب نهایی سیستم FRP با ضخامت کمتر از نیم اینچ و با در نظر داشتن عرض مورد نیاز مسیرهای خروجی صورت گرفت. مقاوم سازی با استفاده از FRP به طور چشمگیری شکل پذیری اتصالات بحرانی را افزایش می‌دهد.

سیر تکامل FRP در آینده:

ساختمان Sunset House نشان دهنده مؤثر بودن استفاده از FRP و استاندارد ASCE 41 در طراحی بهسازی لرزه‌ای است. در پی توسعه این امر، کمیته ACI 440 در تلاش است تا بخش طراحی لرزه‌ای را در ACI 440-2R وارد کند. این فصل راهنمایی‌های بیشتری را در خصوص استفاده از FRP برای مقاوم سازی سازه‌ها در اختیار مهندس طراح قرار می‌دهد.