

دیوارهای آجری کلاف‌دار مقاوم‌شده با FRP

ارشیا خفاف^۱، فریدون اربابی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

farbabi@mtu.edu

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۲/۱۵

چکیده- در زلزله‌های گذشته ساختمان‌های بنایی کلاف‌دار، برعکس ساختمان‌های بنایی غیرمسلح بدون کلاف، عملکرد مناسبی داشتند؛ حتی وقتی خرابی در این ساختمان‌ها ایجاد شده، ریزش سقف و خسارت‌های جانی کمتری پیش آمده است. استفاده از کلاف سبب افزایش پایداری، یکپارچگی، مقاومت و شکل‌پذیری دیوارهای آجری در برابر زلزله می‌شود. با توجه به آیین‌نامه ۲۸۰۰ که استفاده از کلاف‌های افقی و قائم را الزامی دانسته، نیاز به مطالعه‌ی بیشتر درباره این ساختمان‌ها احساس می‌شود. در این مقاله، پس از تأیید مدل‌سازی، دیوارهای آجری کلاف‌دار با ابعاد، شرایط تکیه‌گاهی و مشخصات مختلف مصالح بررسی شده است. از نتایج چنین برمی‌آید که در آنها دو مود شکست قطری و چرخشی معمول است. برای این دو مود شکست، الگوهای مختلف تقویت با FRP بررسی گردیده است.

کلیدواژگان: دیوار آجری، کلاف، مقاوم‌سازی، FRP

۱- مقدمه

سازه‌های بدون کلاف پیدا می‌کند. بر همین اساس ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ استفاده از کلاف‌های افقی و قائم را با ضوابطی خاص، در همه‌ی ساختمان‌های بنایی الزامی می‌داند. تحقیقات آزمایشگاهی و نظری زیادی درباره‌ی ساختمان‌های بنایی کلاف‌دار انجام شده است. در سال ۱۹۹۲، کاتو و همکارانش برای بررسی عملکرد کلاف‌های قائم، نمونه‌هایی از دیوار آجری با مقیاس $\frac{1}{2}$ و با ویژگی‌های متفاوت آزمایش کردند [۲]. نتایج این پژوهش نشان داد که میلگردهای طولی کلاف‌های قائم ظرفیت باربری دیوار کلاف‌بندی‌شده را افزایش می‌دهد؛ از طرف دیگر، وجود این کلاف‌ها علاوه بر محصورکردن دیوار، از شکست ترد آن در برش جلوگیری می‌کند.

ساختمان‌های آجری کلاف‌دار از واحدهای آجری و عناصر بتن مسلح محصورکننده قائم و افقی تشکیل می‌شوند که در چهار طرف قاب دیوار آجری قرار می‌گیرند. بنابر گزارش‌های World Housing Encyclopedia، این نوع ساخت‌وساز در کشورهای زلزله‌خیزی مانند اسلونی، صربستان، ایران، مکزیک، شیلی، پرو و آرژانتین رایج است [۱].

بررسی زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که در این‌گونه ساختمان‌ها، حتی در صورت ایجاد خرابی، سقف ریزش نکرده و از خسارت‌های جانی جلوگیری می‌شود. با اجرای درست کلاف مقاومت سازه به‌میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و مقاومت، شکل‌پذیری و سختی بیشتری نسبت به

۲- مشخصات رفتاری مصالح بنایی

در این بررسی از روش اجزای محدود برای مطالعه رفتار غیر خطی دیوارهای بنایی استفاده شده است. مدل‌سازی مصالح بنایی با روش میکروی ساده‌شده انجام شده است؛ چون این نوع مدل‌سازی جزئیات بیشتری از رفتار مصالح بنایی ارائه می‌دهد و ساز و کار مختلف شکست با آن بررسی می‌شود. در این روش ملات به‌طور مستقیم مدل نمی‌شود و رفتار با المان واحد بنایی و المان حد فاصل مدل می‌شود. سختی الاستیک مماسی و عمودی المان حد فاصل با در نظر گرفتن خواص ملات و واحد بنایی با روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$k_n = \frac{E_b E_m}{h_m (E_b - E_m)} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{G_b G_m}{h_m (G_b - G_m)} \quad (2)$$

E_m و E_b به ترتیب مدول ارتجاعی آجر و ملات و G_m و G_b مدول برشی آجر و ملات است. h_m ضخامت واقعی ملات است.

در روش میکروی ساده‌شده همه‌ی رفتار غیرالاستیک به المان حد فاصل نسبت داده می‌شود [۶]؛ افزون بر این، قابلیت ترک‌خوردگی قائم وسط واحدهای بنایی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، رفتار الاستیک در المان حدفاصل متمرکز شده و به وسیله سطح تسلیم ترکیبی مشتمل بر گسیختگی‌های کششی، برشی و فشاری (همراه نرم‌شوندگی کرنش) کنترل می‌شود (شکل ۱).

۳- مشخصات رفتاری بتن و آرماتور

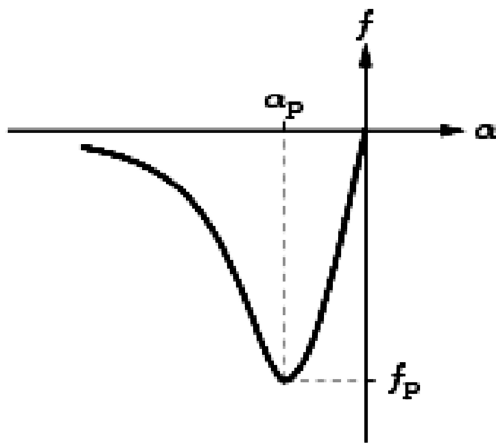
رفتار بتن با استفاده از مدل ترکیبی با ساز و کار شکست غیرخطی ایده‌آل‌سازی شده است. این مدل ترکیبی بر مبنای

Tomazevic دیوارهایی با مقیاس $\frac{1}{5}$ را در دو حالت محصورشده با کلاف‌های قائم بتن‌آرمه و دیوارهای بدون کلاف قائم آزمایش کرد [۳]. گرچه در همه‌ی نمونه‌های آزمایش‌شده، شکست برشی رخ می‌دهد؛ ولی رفتار نمونه‌های محصورشده برعکس دیوارهای بنایی ساده، شکل‌پذیر است.

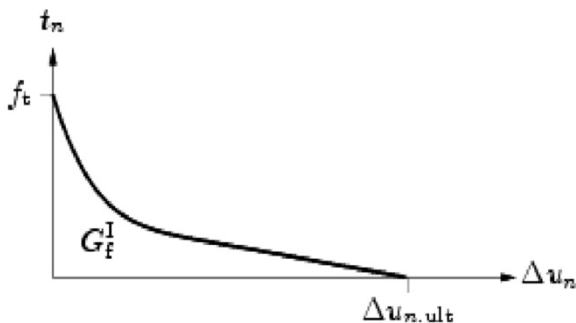
Alcocer نمونه‌های دیوار کلاف‌دار ساخته‌شده با آجر رسی را با آزمایش چرخه‌ای بررسی کرد و اثر انواع میلگردگذاری افقی در دیوار را بر رفتار آن‌ها سنجید [۴]. نتایج نشان می‌دهد که این نوع دیوار، به شرط وجود کلاف قائم کافی، در برابر بار جانبی مقاومت خوبی دارد.

در ایران تعدادی آزمایش انجام شده است. یکی از آن‌ها به‌وسیله‌ی تسنیمی انجام شد که نتایج آن مشابه آزمایش‌های بالا بوده است [۵].

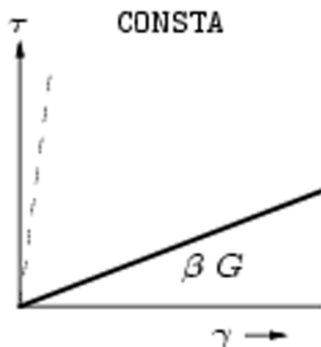
با وجود الزامی بودن استفاده از کلاف در ساختمان‌های آجری بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، مطالعات تحلیلی کمی در این زمینه انجام شده است. در این مقاله، ابتدا مدل‌سازی با یک آزمایش موجود روی قاب بتنی تأیید شده است؛ سپس با توجه به اختلاف نحوه و اجرای دیوار آجری کلاف‌دار با ساخت قاب و میان‌قاب از درستی مدل‌سازی با آزمایش دیوار کلاف‌دار اطمینان حاصل شده است. برای تأیید مدل‌سازی FRP و عملکرد آن در تقویت دیوارهای آجری از آزمایش دیگری استفاده شده است. تأثیر کلاف روی مقاومت برای ابعاد، مشخصات مصالح و شرایط تکیه‌گاهی دیوارهای مختلف بررسی شده است؛ ابتدا مودهای شکست دیوارهای آجری کلاف‌دار معین و برای هر مود شکست، الگوهای مختلف تقویت بررسی و گزینه برتر برای آن مود شکست، تعیین شده است.



شکل (۲) مدل رفتاری غیرخطی فشاری بتن

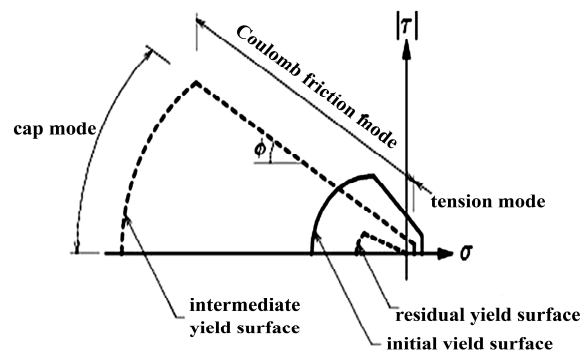


شکل (۳) مدل رفتاری غیرخطی نرم‌شونده کششی بتن



شکل (۴) مدل رفتاری کاهش برش در بتن

رابطه تنش-کرنش تک‌محوره است که رفتار کششی و فشاری را توصیف می‌کند. برای رفتار فشاری بتن از مدل محصورنشده پیشنهادی به وسیله‌ی Thorenfeldt et al. استفاده شده است [۷]. سخت‌شدگی کششی بتن به وسیله یک منحنی صعودی خطی تا مرز ترک‌خوردگی در نظر گرفته می‌شود. بخش نرم‌شوندگی کششی منحنی تنش-کرنش بر مبنای مدل Hordijk است [۸]. روابط تنش-کرنش در فشار و کشش به ترتیب مطابق شکل‌های ۲ و ۳ است. یک ضریب کاهش برش ثابت (β) برای کم کردن سختی برشی بعد از ترک اولیه لحاظ شده است که با توجه به مطالعات انجام‌شده برابر با ۰/۱ است (شکل ۴). انرژی شکست وضعیت I (G_f^I) با استفاده از رابطه ۳ به‌دست می‌آید.



شکل (۱) سطح تسلیم ترکیبی در المان اتصال

$$G_f^I = \alpha_F \cdot \left(\frac{f_c'}{10}\right)^{0.7} \quad (3)$$

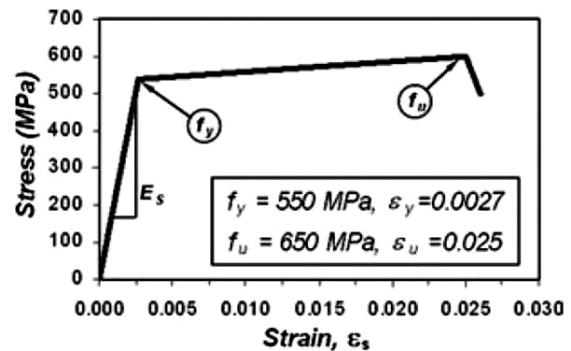
در این رابطه α_F ضریبی است که به پیشینه‌ی اندازه دانه‌ها (d_{max}) وابسته است و میزان آن مطابق جدول ۱ است.

جدول (۱) محاسبه α_F بر اساس پیشینه اندازه دانه‌ها

d_{max} (mm)	α_F
۸	۰/۰۲۵
۱۶	۰/۰۳
۳۲	۰/۰۵۸

رفتار آرماتور با استفاده از معیار پلاستیسیته Von-Mises همراه سخت‌شوندگی کرنش ایزوتروپ، مدل می‌شود. در این مدل رفتاری، مقاومت و سختی آرماتورها، مستقیم به داخل المان‌های بتن منتقل می‌شود. از آنجایی که لغزش بین آرماتور و بتن احاطه‌کننده ناچیز است، بین گره‌های آرماتور و بتن چسبندگی کامل در نظر گرفته می‌شود. رفتار تنش-

کرنش آرماتور با رابطه دو خطی مطابق شکل ۵ مدل می‌شود.



شکل (۵) مدل رفتاری برای آرماتور

در این رابطه واحدها برحسب psi است.

۵- مشخصات رفتاری FRP

برای کامپوزیت‌های پلیمری با توجه به این‌که مقاومت در جهت الیاف نسبت به جهت‌های دیگر نسبتاً زیاد است؛ گسیختگی تابعی از جهت تنش است. گسیختگی کششی در جهت الیاف به وسیله مقاومت الیاف و در جهت عمود بر آن به وسیله مقاومت ماتریس و مقاومت چسبندگی الیاف و ماتریس کنترل می‌شود. چون مدول الاستیسیته FRP در سایر جهات نسبت به جهت الیاف بسیار ناچیز است می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. همچنین مقاومت کششی و فشاری FRP در سایر جهات نسبت به مقاومت کششی در جهت الیاف، ناچیز و قابل چشم‌پوشی است؛ بنابراین FRP با استفاده از المان truss در جهت الیاف، مدل‌سازی شده است.

۶- جدا شدن FRP از دیوار

یکی از اشکالات استفاده از FRP، جدا شدن آن از دیوار است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده که جداشدگی به سبب ضعف کششی دیوار آجری و شکست در مصالح بنایی است [10]. دو روش برای در نظر گرفتن اثر جداشدگی FRP از دیوار وجود دارد:

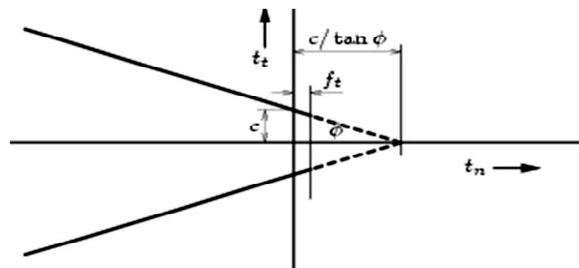
الف) روش ساده‌شده [10]. در این روش مقاومت کششی المان‌های FRP با توجه به فاصله آن‌ها از تکیه‌گاه‌ها محدود می‌شود. در صورتی که طول چسبندگی (I_b) از طول چسبندگی بهینه کمتر باشد، مقاومت کششی بیشینه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{fdd,nd} = f_{fdd} \frac{I_b}{l_e} \left(2 - \frac{I_b}{l_e} \right) \quad (5)$$

اگر طول چسبندگی (I_b) از طول چسبندگی بهینه بیشتر

۴- مشخصات رفتاری المان‌های میانی کلاف و دیوار آجری

بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ در دیوارهای آجری کلاف‌دار، ابتدا دیوار ساخته و سپس کلاف اجرا می‌شود، المان‌های میانی کلاف و دیوار آجری از جنس بتن است.



شکل (۶) معیار اصطکاکی کولمب

معیار شکست المان‌های میانی کلاف و دیوار آجری معیار اصطکاکی کولمب است (شکل ۶). پارامترهای مورد نیاز در مدل اصطکاکی کولمب عبارت است از مقاومت کششی بتن (f_t)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی ($\tan \phi$). مقادیر c و $\tan \phi$ بر اساس آیین‌نامه ACI با رابطه زیر به دست می‌آید [۹]:

$$V_c = 2 \left(1 + \frac{N_u}{2000 A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4)$$

$$f_b = 0.064 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (9)$$

باشد، مقاومت کششی بیشینه برابر است با:

در این رابطه f_{ck} و f_{ctm} به ترتیب مقاومت فشاری و کششی مصالح بنایی است. k_b با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (10)$$

b_f و b به ترتیب عرض دیوار بنایی و عرض FRP است و مقدار k_1 از رابطه ۱۱ به دست می‌آید.

$$k_1 = \frac{c_1}{t_a/G_a + t_c/G_c} \quad (11)$$

G_a و G_c به ترتیب مدول برشی چسب و دیوار بنایی است. t_a ضخامت اسمی چسب و t_c عمق مؤثر دیوار بنایی است. مقادیر پیشنهادی برای t_c و c_1 به ترتیب ۲۰-۳۰ و ۰/۷-۰/۵ میلی‌متر است.

۷- تأیید مدل سازی قاب بتنی

برای بررسی درستی عملکرد قاب بتنی از آزمایش‌های محرابی استفاده شد [۱۱]. این نمونه‌ها در مقیاس ۰/۵ ساخته شده بود. نسبت ارتفاع به طول $(\frac{h}{l})$ ، برابر ۱ به ۱/۵ است. برای تأیید مدل سازی قاب بتنی از نمونه‌ای استفاده شد که قاب آن ضعیف و میان قاب آن قوی است. علت این انتخاب نزدیکی عملکرد به کلاف است.

در این نمونه‌ها ابتدا بار قائم ۲۹۴ KN اعمال شده و سپس بار جانبی اضافه شد. پارامترهای مورد نیاز از نتایج آزمایشگاهی استخراج شده است که در جداول ۲ تا ۵ آمده است. واحدها برحسب نیوتن و میلی‌متر است.

$$f_{idd} = \frac{1}{\gamma_{fd} \sqrt{\gamma_M}} \sqrt{\frac{2 \cdot E_{FRP} \cdot \Gamma_{FK}}{t_{FRP}}} \quad (6)$$

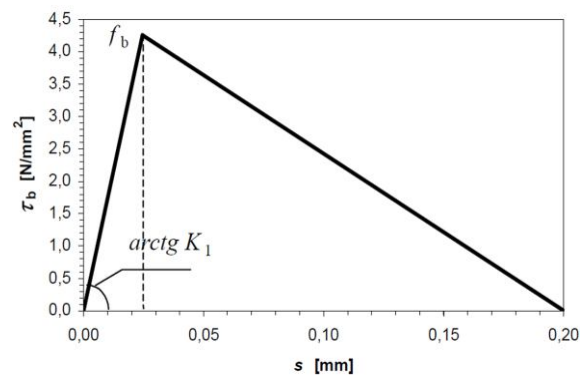
$$\Gamma_{FK} = c_1 \sqrt{f_{mk} \cdot f_{mtm}} \quad (7)$$

طول چسبندگی بهینه (l_e) از رابطه ۸ بدست می‌آید.

$$l_e = \sqrt{\frac{E_{FRP} \cdot t_{FRP}}{2 \cdot f_{mtm}}} \quad (8)$$

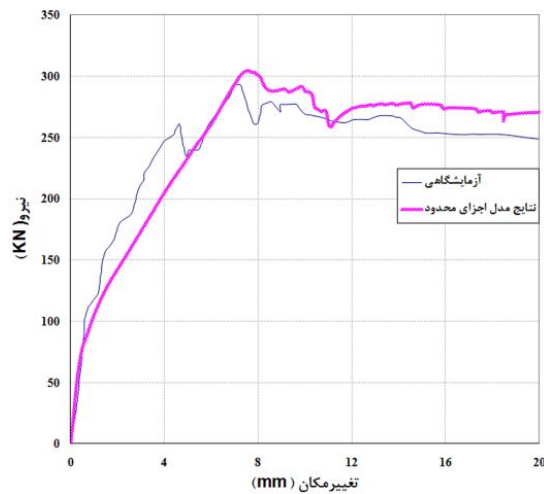
در روابط بالا f_{mtm} مقاومت کششی مصالح بنایی است. γ_M معمولاً برابر با ۱ و γ_{fd} برابر با ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب رفتار المان FRP، شکننده در نظر گرفته می‌شود و بیشینه‌ی مقاومت کششی آن به مقادیر بالا محدود می‌شود.

ب) استفاده از المان‌های میانی [10]. در این روش بین FRP و دیوار آجری المان‌های میانی قرار می‌گیرد. این المان‌ها برای در نظر گرفتن اثر جدا شدن FRP از دیوار است. این المان‌های معمولاً با رفتار دوخطی مدل می‌شوند (شکل ۷).

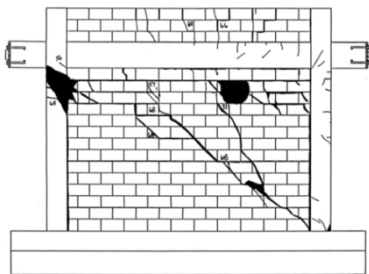


شکل (۷) رابطه دوخطی $(\tau_b - s)$

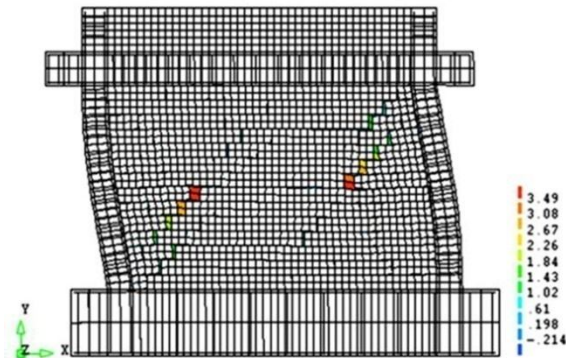
میانگین بیشینه‌ی مقاومت چسبندگی بر اساس نتایج آزمایشگاهی از رابطه ۹ به دست می‌آید.



شکل (۹) منحنی نیرو-تغییر مکان قاب با میان‌قاب



(الف)



(ب)

شکل (۱۰) مدل ترک‌خوردگی (الف) در نمونه آزمایش (ب) در مدل تحلیلی

۸- تأیید مدل دیوار آجری کلاف‌دار

برای بررسی درستی مدل‌سازی دیوار آجری کلاف‌دار از آزمایش‌های تسنیمی در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن استفاده شده است [۱۲]. آزمایش‌ها روی دو

جدول (۲) مشخصات الاستیک مصالح

Brick		Joint	
E	ν	K_n	K_s
۱۲۰۰۰	۰/۱۵	۴۶۷	۲۰/۳

جدول (۳) مشخصات غیرالاستیک Joint

Tension		Cap	
f_t	G_f^I	f_m	K_p
۰/۱	۰/۰۹	۱۴/۴	۰/۰۹۳
Shear			
C	$\tan \phi$	G_f^{II}	
۰/۳	۰/۷۵	۰/۰۹	

جدول (۴) مشخصات بتن

E	ν	f_t	f_c	G_f^I
$1/94 \times 10^4$	۰/۲	۲/۹۵	۲۷/۶۶	۰/۱۲

جدول (۵) مشخصات آرماتور

E	f_y	f_u
2×10^5	۴۲۰	۶۵۰

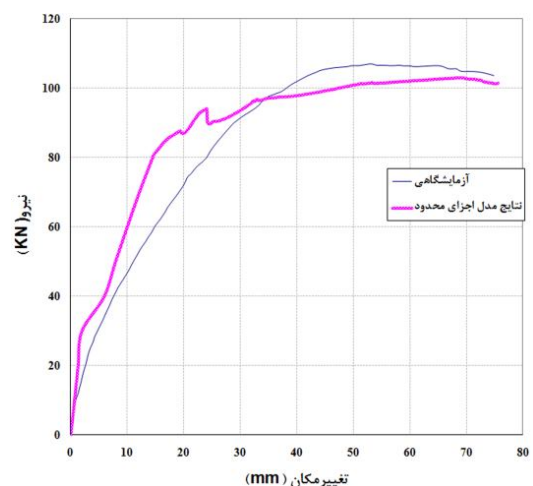
شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد که نتایج عددی و

آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم دارند.

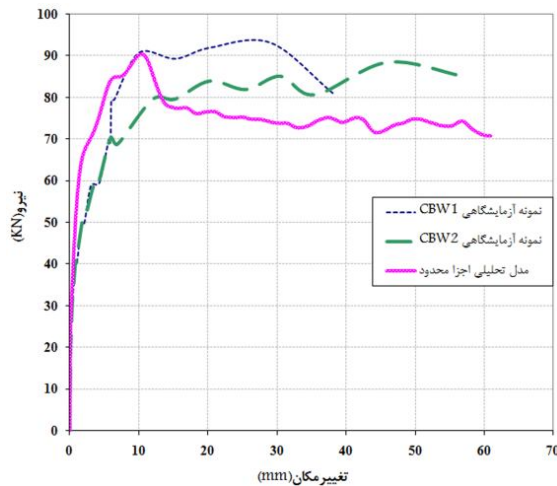
در سیستم قاب ضعیف و میان‌قاب قوی، ابتدا در دیوار

ترک‌های قطری-برشی شروع شد؛ سپس در کنج‌های

فشاری، خردشدگی در بتن رخ داد (شکل ۱۰).



شکل (۸) منحنی نیرو-تغییر مکان قاب



شکل (۱۱) مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل آزمایشگاهی دیوار کلاف‌دار با مدل اجزای محدود

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، ابتدا ترک‌های قطری وسط دیوار ایجاد شده و سپس یک ترک، موازی ترک اول در گوشه بالایی دیوار ایجاد می‌شود. با افزایش بار جانبی، ترک‌های افقی خمشی در کلاف‌های قائم و یک ترک مورب در محل اتصال کلاف‌های افقی و قائم ایجاد می‌شود. در شکل ۱۲ نحوه ترک‌خوردگی مدل اجزای محدود در دیوار آجری دیده می‌شود که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.

۹- تأیید مدل سازی دیوار تقویت شده با FRP

برای تأیید مدل عددی و رفتار کامپوزیت پلیمری از آزمایش مرجع [۱۳] استفاده شده است. علت انتخاب این آزمایش دسترسی به خصوصیات مصالح است. در این آزمایش دیواری به ابعاد 270×290 میلی‌متر مربع با یک لایه افقی کامپوزیت پلیمری کربنی به عرض $1/25$ سانتی‌متر، مقاوم‌سازی شده است. یک بار فشاری تدریجی وسط دیوار اعمال شده است. مشخصات مورد نیاز برای مصالح بنایی و CFRP در جداول ۱۰ تا ۱۲ آمده است. واحدها برحسب نیوتن و میلی‌متر است.

نمونه دیوار کلاف‌دار با مقیاس $\frac{2}{3}$ انجام شده است. دو نمونه کلاف‌بندی شده از نظر ابعاد و مشخصات مصالح تقریباً مشابه است و تنها اختلاف آن‌ها در سرعت بارگذاری است.

شدت بار گسترده وارد بر دیوار واقعی موردنظر $32/57 \text{ KN/m}$ است. مشخصات مصالح مطابق جداول ۶ تا ۹ است. واحدها برحسب نیوتن و میلی‌متر است.

جدول (۶) مشخصات الاستیک مصالح

Brick		Joint	
E	ν	K_n	K_s
۳۵۵۰	۰/۲	۱۵	۶۳

جدول (۷) مشخصات غیرالاستیک Joint

Tension		Cap	
f_t	G_f^I	f_m	κ_p
۰/۱۵	۰/۰۰۵	۸/۵	۰/۰۹۳
Shear			
C	$\tan \phi$	G_f^{II}	
۰/۲۱۳	۰/۵۱۸	۰/۰۲۱	

جدول (۸) مشخصات بتن

E	ν	f_t	f_c	G_f^I
$2/44 \times 10^4$	۰/۲	۲/۷۲	۲۷/۲	۰/۲۴

جدول (۹) مشخصات المان‌های میانی دیوار و کلاف

K_n	K_s	C	f_t	$\tan \phi$
۴۱۶۱	۱۷۳۳	۰/۸۸	۲/۷۲	۰/۰۶۵

برای المان‌های میانی شالوده و دیوار آجری از ضریب اصطکاک بیشتر ($\tan \phi = 0/8$) استفاده شده تا شرایط نمونه آزمایش را ایجاد کند. مطابق شکل ۱۱ انطباق خوبی بین مقادیر مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی دیده می‌شود.

جدول (۱۱) مشخصات غیرالاستیک Joint

Tension		Cap	
f_t	G_f^I	f_m	K_p
۰/۲	۰/۰۲	۸/۵	۰/۰۱۲
Shear			
C	$\tan \phi$	G_f^{II}	
۰/۳	۰/۵۷	۰/۰۲	

جدول (۱۲) مشخصات CFRP

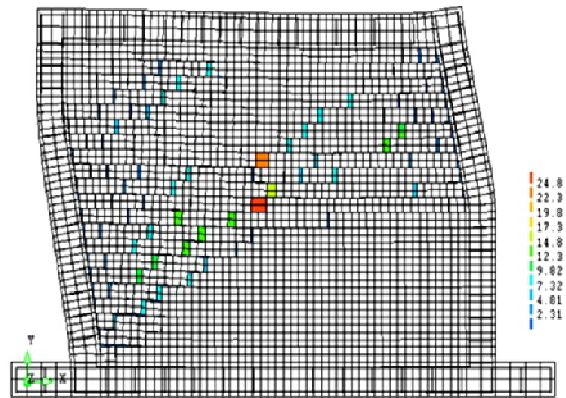
در راستای الیاف E	۲۳۰۰۰۰	عمود بر الیاف E	۳۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۳	در راستای الیاف ft	۳۴۳۰
عمود بر الیاف ft	۵۰	مقاومت فشاری	۸۰
		مقاومت برشی	۳۰

منحنی‌های نیرو-تغییر مکان نشان می‌دهد که نتایج تحلیل عددی با مقادیر آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). مطابق شکل ۱۴ در منحنی به دست آمده از تحلیل عددی، افت نیرو در تغییر مکان بیشتری رخ می‌دهد که علت آن چشم‌پوشی از پدیده جدا شدن FRP از دیوار بنایی است.

۱۰- مطالعه پارامتری دیوار آجری کلاف‌دار

پارامترهای دیوارهای کلاف‌دار شامل ابعاد دیوار، شرایط تکیه‌گاهی، مشخصات مصالح و بار قائم است. ابعاد دیوار در سه حالت لاغر (۱/۶×۳ مترمربع)، متوسط (۳×۳ مترمربع) و چاق (۵×۲/۷ مترمربع) و با دو ضخامت ۲۰ و ۳۵ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شود. شرایط تکیه‌گاهی در دو حالت یک‌سر گیردار و دوسر گیردار بررسی شد. بار قائم برای همه‌ی حالت 32.57 KN/m^2 و 65.14 KN/m^2 است.

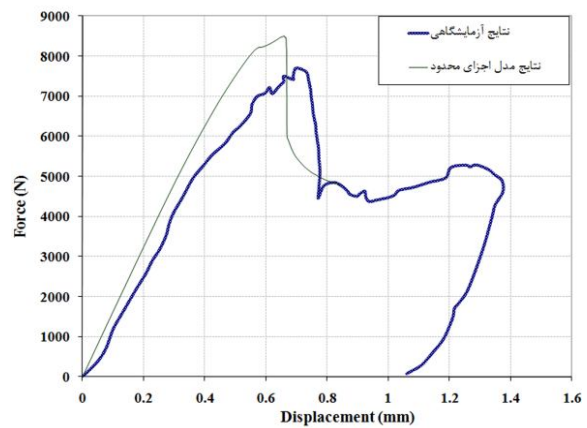
جدول ۱۳ مشخصات مصالح را برای چهار نوع ملات گل، ماسه-سیمان ۱-۱۲، ماسه ۶-۱ و سیمان ۳-۱ به کاررفته نشان می‌دهد. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آجر در همه‌ی حالت‌ها $3822 \frac{N}{\text{mm}^2}$ و ۰/۲ است. همچنین زاویه اصطکاک ($\tan \phi$) و زاویه اتساع ($\tan \psi$) ۰/۷۵ و



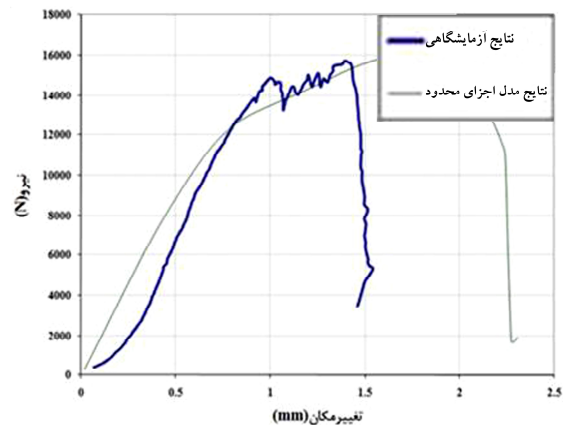
شکل (۱۲) نحوه ترک‌خوردگی در مدل تحلیلی

جدول (۱۰) مشخصات الاستیک مصالح

Brick		Joint	
E	ν	K_n	K_s
۱۷۸۵	۰/۱۷	۲۶۴	۱۱۲



شکل (۱۳) مقایسه نتایج آزمایشگاهی دیوار با مدل اجزای محدود

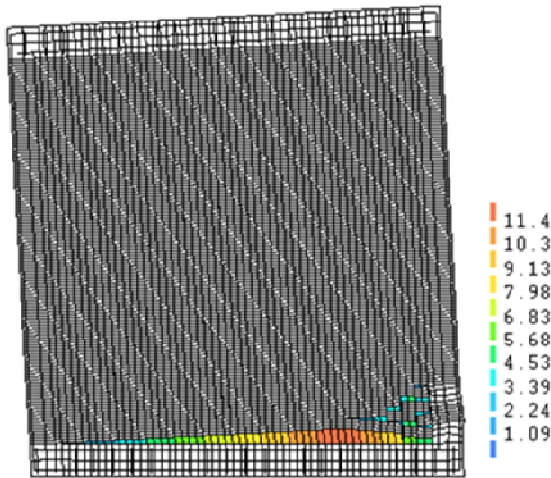


شکل (۱۴) مقایسه نتایج آزمایشگاهی FRP با مدل اجزای محدود

ب) مود شکست کشش قطری. در این حالت ابتدا در دیوار ترک قطری ایجاد شده و سپس دیوار در پنجه دچار خردشدگی می‌شود. کلاف نیز در پایه فشاری دچار خردشدگی می‌شود. این مود شکست در سایر موارد رخ می‌دهد (شکل ۱۶).

در همه موارد، وجود کلاف نقش مؤثری در افزایش ظرفیت دیوار در رفتار داخل صفحه دارد. می‌توان این اثر را در طراحی لحاظ کرد. بنابراین کلاف نه تنها موجب انسجام و پایداری ساختمان آجری می‌شود بلکه نقش مهمی در افزایش ظرفیت سازه دارد.

با افزایش بار قائم در دیوارهای با شرایط تکیه‌گاهی یک‌سر گیردار، ظرفیت دیوار افزایش می‌یابد ولی در دیوارهای دوسر گیردار ظرفیت در برخی موارد کاهش می‌یابد که نیاز به بررسی بیشتری دارد.



شکل (۱۵) نحوه ترک‌خوردگی دیوارهای متوسط کلاف‌دار با ملات ماسه-سیمان ۱-۳ و شرایط تکیه‌گاهی یک‌سرگیردار

از حالات بررسی شده تنها در یک مورد جداسازی کلاف قائم از دیوار اتفاق افتاد. در دیوار لاغر کلاف‌دار دوسر گیردار با ملات ماسه-سیمان ۱-۳ با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر و بار $32/57 \text{ KN/m}^2$ ، علاوه بر ترک قطری،

صفر انرژی شکست برشی (G_f^H) طبق توصیه c Lourenco ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

با توجه به استاندارد ۲۸۰۰، عرض کلاف‌ها ۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها هم‌عرض دیوار است. ۴ میلگرد آجدار ۱۰ میلی‌متری در گوشه‌های کلاف‌ها تعبیه شده است. مشخصات بتن در جدول ۸ آمده است. مشخصات المان‌های میانی بین دیوار و کلاف مطابق جدول ۹ است.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده دو دسته مود شکست در دیوارهای آجری کلاف‌دار مشخص شد:

الف) مود شکست چرخشی. در این حالت در پایه دیوار، چرخش رخ می‌دهد و دیوار دچار خردشدگی می‌شود. سپس کلاف قائم در پای کششی دچار شکست می‌شود. این مود شکست در موارد زیر رخ می‌دهد (شکل ۱۵).

۱- دیوارهای یک‌سر گیردار لاغر با ملات‌های ماسه-سیمان ۱-۳ و ۱-۶.

۲- دیوارهای یک‌سرگیردار متوسط با ملات ماسه-سیمان ۱-۳.

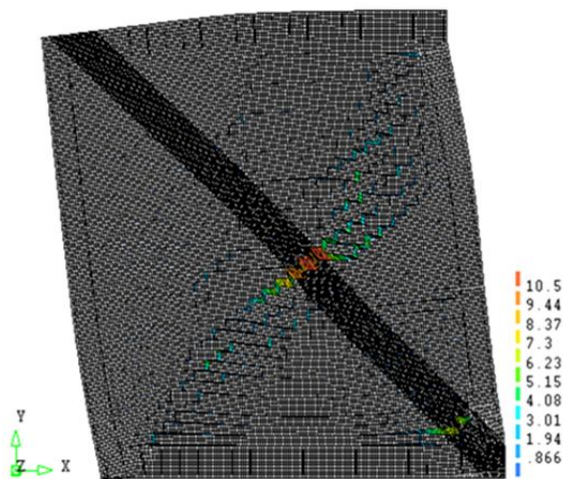
جدول (۱۳) مشخصات دیوار در مطالعات پارامتری [۱۴]

پارامترها	ماسه-سیمان ۱-۳	ماسه-سیمان ۱-۶	ماسه-سیمان ۱-۱۲	گل
K_s $(\frac{N}{mm^3})$	۱۷/۴۳	۹/۸۷	۵/۴۸	۲/۶۷
K_n $(\frac{N}{mm^3})$	۴۱/۸۳	۲۳/۶۹	۱۳/۱۷	۶/۴۳
f_t $(\frac{N}{mm^2})$	۰/۷۲	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳
G_f^I $(\frac{N.mm}{mm^2})$	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
f_m $(\frac{N}{mm^2})$	۹/۵۹	۶/۲۳	۵/۴۷	۴/۸۴
K_p	۰/۰۱۵۶	۰/۰۲۰۹	۰/۰۳۰۳	۰/۰۴۸۶

(۱) تقویت دیوار در دو انتها در جهت قائم؛
 (۲) تقویت دیوار به صورت قطری و
 (۳) تقویت دیوار به صورت پوشش کامل در جهت‌های افقی و قائم.
 نحوه تغییر مود شکست و میزان افزایش ظرفیت در این حالت‌ها در جدول ۱۴ آمده است.

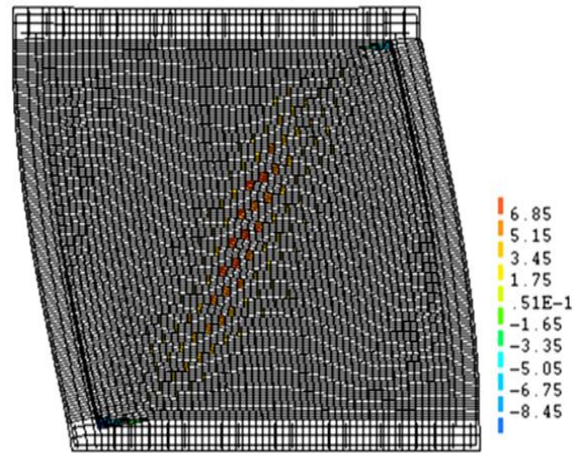
در حالات تقویت دیوار کلاف‌دار در دو انتها و پوشش کامل با الیاف در جهت قائم، وجود FRP مانع وقوع مود شکست چرخشی می‌شود. یعنی مود شکست به کشش قطری تغییر می‌کند. در تقویت دیوار به صورت پوشش کامل در جهت افقی، مود شکست همچنان به صورت چرخشی باقی می‌ماند زیرا وجود FRP با الیاف در جهت افقی نمی‌تواند مانع وقوع مود چرخشی شود.

همچنین در تقویت دیوار با FRP با الیاف در جهت قطر، به ازای عرض‌های ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری، مود شکست به کشش قطری تغییر می‌کند (شکل ۱۷) ولی در تقویت با عرض‌های بیشتر، مود شکست همچنان چرخشی باقی می‌ماند (شکل ۱۸).



شکل (۱۷) نحوه ترک‌خوردگی در دیوار کلاف‌دار با FRP قطری با عرض ۲۵ سانتی‌متر

بخشی از دیوار از کلاف قائم جدا شد. همچنین وجود کلاف در این حالت افزایش کمی در مقاومت دیوار ایجاد کرد که علت آن جداسازی دیوار از کلاف بود.
 منحنی‌های نیرو-تغییر مکان و نحوه ترک‌خوردگی در مرجع [۱۵] آمده است.



شکل (۱۶) نحوه ترک‌خوردگی دیوارهای متوسط کلاف‌دار با ملات ماسه-سیمان ۱-۳ و شرایط تکیه‌گاهی دوسرگیردار

۱۱- تقویت دیوارهای کلاف‌دار با FRP

در این بخش برای هر دو مود شکست دیوار کلاف‌دار، حالت‌های مختلف تقویت با FRP بررسی و روش مناسب برای تقویت انتخاب می‌شود.

الف) تقویت دیوار آجری کلاف‌دار با مود شکست

چرخشی:

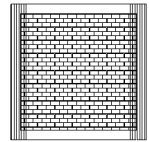
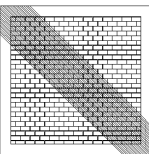
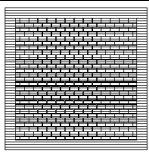
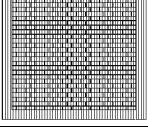
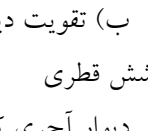
دیوار آجری کلاف‌دار به گونه‌ای انتخاب شده که در آن مود شکست، چرخشی باشد. با توجه به مطالعات انجام‌شده در بخش قبل، دیوار آجری کلاف‌دار متوسط (۳×۳×۰/۲) با شرایط تکیه‌گاهی یک‌سرگیردار در نظر گرفته شد. ملات آن ماسه-سیمان ۱-۳ و بار قائم وارد شده $32/57 \text{ KN/m}^2$ است.

حالت‌های مختلف تقویت این دیوار کلاف‌دار عبارت

است از:

جدول (۱۴) بررسی طرح‌های مختلف برای دیوار کلاف‌دار با مود

شکست چرخشی

میزان افزایش ظرفیت	مود شکست	عرض‌ها و فواصل	نحوه تقویت
حدود ۱/۰۵ برابر	کشش قطری	۶۵ و ۴۵ سانتی‌متر	
۱/۴۶ و ۱/۲ برابر	کشش قطری	۵۰ و ۲۵ سانتی‌متری	
۱/۷۸، ۱/۶۳ و ۱/۹۵ برابر	چرخشی	۲، ۱ متری و پوشش کامل	
۱/۱۷ برابر	چرخشی	پوشش کامل افقی	
۱/۳۱ برابر	کشش قطری	پوشش کامل قائم	

ب) تقویت دیوار آجری کلاف‌دار با مود شکست کشش قطری

دیوار آجری کلاف‌دار به گونه‌ای انتخاب شده که مود شکست آن کشش قطری باشد. با توجه به مطالعات انجام‌شده در بخش قبل، دیوار آجری کلاف‌دار متوسط (۳×۳×۰/۲ متر) با شرایط تکیه‌گاهی یک‌سر گیردار در نظر گرفته شد. ملات آن ماسه-سیمان ۶-۱ و بار قائم وارد شده بر $32/57 \text{ KN/m}^2$ است.

حالت‌های مختلف برای تقویت این دیوار عبارتند از:

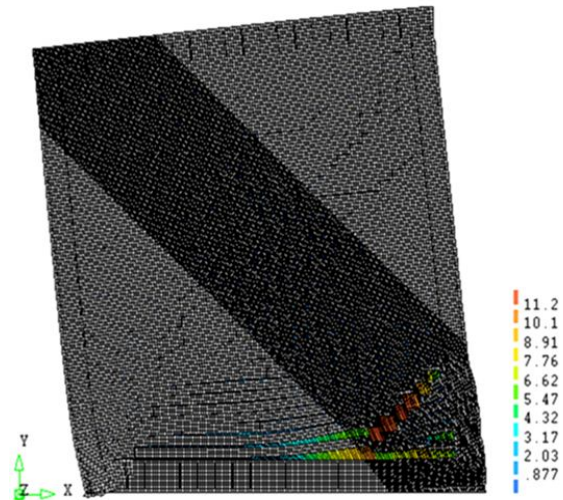
(۱) تقویت دیوار در دو انتهای آن در جهت قائم؛

(۲) تقویت دیوار به صورت قطری و

(۳) تقویت دیوار به صورت پوشش کامل در جهت افقی و قائم.

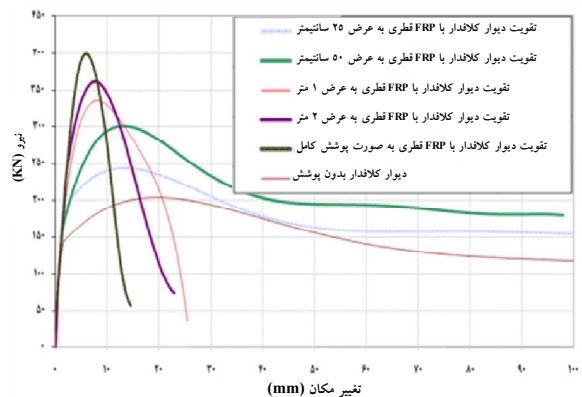
نحوه تغییر مود شکست و میزان افزایش ظرفیت در این

حالت‌ها در جدول ۱۵ آمده است.



شکل (۱۸) نحوه ترک‌خوردگی دیوار کلاف‌دار با FRP قطری با عرض ۱ متر

با توجه به جدول ۱۴ و میزان مصرف FRP شده در هر حالت می‌توان به راحتی پی برد که بهترین شیوه تقویت در این نوع دیوار کلاف‌دار، تقویت با الیاف در جهت قطری است. ظرفیت با توجه به عرض FRP مصرف شده از ۱/۲ تا حدود ۲ برابر افزایش می‌یابد. در شکل ۱۹ منحنی نیرو-تغییر مکان برای دیوار تقویت شده به این شیوه با عرض‌های مختلف نمایش داده شده است.



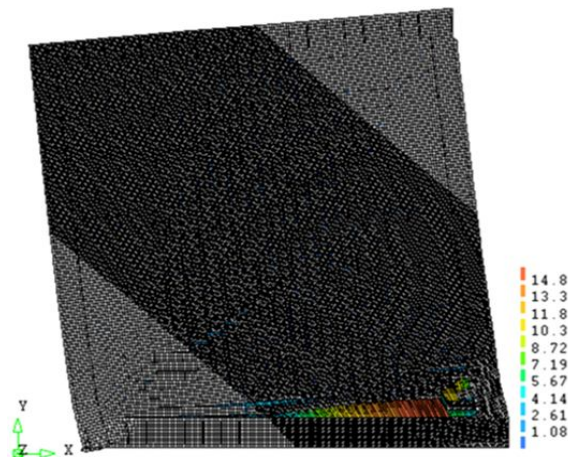
شکل (۱۹) منحنی نیرو-تغییر مکان برای تقویت دیوار کلاف‌دار با ملات ماسه-سیمان ۳-۱ با FRP قطری

جدول (۱۵) بررسی طرح‌های مختلف برای دیوار کلاف‌دار با مود

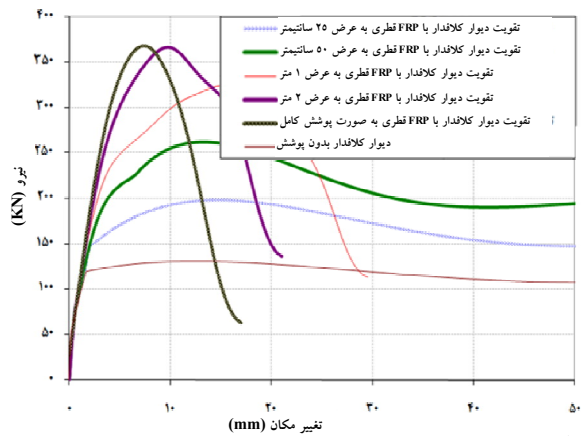
شکست کشش قطری

نحوه تقویت	عرض‌ها و فواصل	مود شکست	میزان افزایش ظرفیت
	۴۵ و ۶۵ سانتی‌متر	کشش قطری	حدود ۱/۱ برابر
	۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری	کشش قطری	۲/۵، ۱/۵۳ و ۲ برابر
	۲ متری و پوشش کامل	چرخشی	۲/۸۴ و ۲/۹ برابر
	پوشش کامل افقی	کشش قطری	۱/۴۲ برابر
	پوشش کامل قائم	کشش قطری	۱/۲۳ برابر

در تقویت دیوار کلاف‌دار با الیاف در جهت قطر، با عرض ۲۵،۵۰ سانتی‌متر و ۱ متری، مود شکست تغییر نمی‌کند (شکل ۲۰). مطابق شکل ۲۱ در تقویت با عرض‌های ۲ متر و پوشش کامل، مود شکست از حالت قطری-برشی به چرخشی تغییر می‌کند. در شکل ۲۲، منحنی نیرو-تغییر مکان برای این نوع تقویت با عرض‌های مختلف نمایش داده شده است.

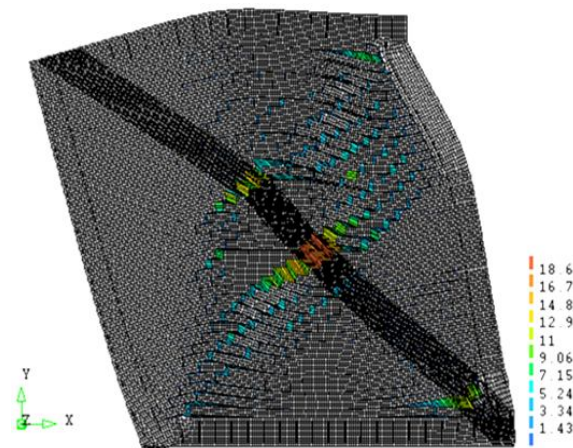


شکل (۲۱) نحوه ترک‌خوردگی دیوار کلاف‌دار با FRP قطری با عرض ۲ متر



شکل (۲۲) منحنی نیرو-تغییر مکان برای تقویت دیوار کلاف‌دار با ملات

ماسه-سیمان ۳-۱ با FRP قطری



شکل (۲۰) نحوه ترک‌خوردگی دیوار کلاف‌دار با FRP قطری با عرض

۲۵ سانتی‌متر

۹- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

(۱) مطالعات پارامتری نشان می‌دهد که موده‌های شکست

- [18] Kato, H., T. Goto, and H. Mizuno; "Cyclic Loading Test of Confined Masonry Wall Element for Structural design development of apartment houses in the Third World", Proceedings of the 10th WCEE; Madrid-Spain: 19-24 July 1992, PP. 3539-3544.
- [19] Tomazevic, M. and Klemenc, I., "Seismic Behaviour of Confined Masonry Walls", Earthquake Engng. Struct. Dyn., 26, 1059-1071, 1997.
- [20] Alcocer, S.M., and Zepeda, J.A., "Behavior of multi-perforated clay brick walls under earthquake-type loading", Proc. 8th NAMC, 2000.
- [۲۱] تسنیمی، عباسعلی، «رفتار ساختمان‌های آجری با کلاف و بی‌کلاف»، پژوهشکده سوانح طبیعی.
- [22] Lourenco, P.B., Rots, J.G., "Multi-Surface interface model for analysis of masonry structures", Journal of Engineering Mechanics, vol. 123, pp. 660-668, 1997.
- [23] Thorenfeldt E, Tomaszewicz A, Jensen JJ. 1987. Mechanical properties of high strength concrete and application in design. In Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Stavanger, Norway, June. Tapit: Trondheim; 149-159.
- [24] Hordijk DA. 1991. Local approach to fatigue of concrete. PhD thesis, Delft University of Technology.
- [25] ACI 318-95 (1995) Building Code Requirements for Structural Concrete (318-95) and Commentary (318 R-95), American Concrete Institute (ACI), Fifth Printing, Farmington Hills, Michigan, USA.
- [26] CNR-DT200. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Italy: CNR, National Research Council; 2006.
- [27] Mehrabi Armin B., Shing P. Benson., Schuller Michael P., Noland James L., "Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC FRAMES", Journal of Structural Engineering 1996, Vol 122, No. 3, pp. 228-237.

[۲۸] تسنیمی، عباسعلی، (۱۳۸۴) «رفتار دیوارهای آجری مندرج در استاندارد ۲۸۰۰»، مرکز تحقیقات ساختمان

دیوار آجری کلاف‌دار به دو دسته کشش قطری و چرخشی تقسیم می‌شود. در دیوارهای یک‌سرگردار لاغر و متوسط با ملات‌های قوی، مود شکست، چرخشی است. در سایر حالات مود شکست، کشش قطری است.

(۲) در تحلیل و طراحی ساختمان‌های آجری کلاف‌دار معمولاً تنها ظرفیت دیوار در نظر گرفته می‌شود و نقش کلاف فقط ایجاد انسجام و یک‌پارچه کردن ساختمان است. در حالی که این بررسی نشان می‌دهد استفاده از کلاف، نقش مهمی در افزایش ظرفیت دیوار دارد که برای دقت بیشتر می‌توان این اثر را در طراحی لحاظ کرد.

(۳) در دیوارهای کلاف‌دار، چه آن‌ها که مود شکست کشش قطری دارد و چه آن‌ها که مود شکست، چرخشی است، بهترین گزینه، تقویت با FRP الیاف‌دار در جهت قطری است. میزان افزایش ظرفیت در دیوارهای با مود شکست چرخشی و کشش قطری بسته به عرض FRP مصرف شده به ترتیب بین $1/2-2$ و $1/5-3$ برابر تغییر می‌کند.

(۴) در همه‌ی تحلیل‌های غیرخطی انجام شده کلاف‌ها کاملاً به دیوار متصل بوده و جداشدگی بین آن‌ها حادث نشده است؛ بنابراین در مطالعات تحلیلی می‌توان از مدل‌سازی المان‌های میانی کلاف و دیوار بنایی چشم‌پوشی کرد و گره‌های آن‌ها را یکی کرد.

(۵) یکی از مسائل مهم در تقویت دیوار آجری با FRP، مسئله جدا شدن FRP از دیوار آجری است. این بررسی نشان می‌دهد که جداشدگی به سبب ضعف کششی دیوار آجری و شکست در مصالح بنایی است. برای جلوگیری از جداشدگی FRP از دیوار آجری می‌توان از فتیله‌هایی استفاده کرد که از ضخامت دیوار عبور می‌کند.

۱۰- مراجع

- [17] EERI, Confined Masonry Construction, 2004, World Housing Encyclopedia Report.

[۳۱] خفاف، ارشیا، بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوار آجری

کلافدار مقاوم‌سازی شده با FRP، پایان‌نامه دوره

کارشناسی ارشد سازه، تهران: پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تابستان ۱۳۸۹.

و مسکن.

[29] Milani G, Rotunno T, Sacco E, Tralli A. Failure load of FRP strengthened masonry walls; Experimental results and numerical models. *Structural Durability and Health Monitoring* 2006;2(1):29-50.

[۳۰] عبدشریف‌آبادی، هوشمند، زلزله و ساختمان‌های

متداول، نشریه شماره ۵۵، ج ۱، چ ۳، تهران: مرکز

تحقیقات ساختمان و مسکن، مرداد ماه ۱۳۷۰.

Confined Masonry Walls Retrofitted with FRP

A. Khaffaf¹, F. Arbabi^{2*}

1- M.Sc. Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

2- Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

farbabi@mtu.edu

Abstract:

Masonry buildings with confined walls have performed well during the past earthquakes. The same cannot be said for unreinforced masonry walls. In the former buildings, even when damage occurs, falling roofs and losses of life do not usually follow. This is because confined masonry walls have higher strength ductility and are more stable. The Iranian Seismic Code (Standard 2800) makes the use of horizontal and vertical ties mandatory for masonry buildings. In spite of this, such confined walls have not been studied sufficiently.

In this study, the nonlinear behavior of masonry walls is examined using finite element discretization. From the two types of modeling that are commonly used for the study of masonry material, namely macro- and micro- modelings, the latter are employed here. This is because such a model can provide more detailed information. Micro- models are the best tools available for understanding the behavior of masonry structures. They can depict all the failure mechanisms of the system. The behavior of mortar joints and masonry unit-mortar interface is lumped into a set of discontinuous elements. In this way, each joint, consisting of mortar and two unit-mortar interfaces, is modeled by a zero-thickness interface element. In other words, the masonry structure is modeled by a set of elastic blocks bonded together with potential fracture/slip lines at the joints. The composite interface model includes a tension cut-off for mode I failure, a coulomb friction envelope for mode II failure and a cap mode for compressive failure. For modeling the behavior of concrete, a model suggested by Thorenfeldt and Hordijk is used.

For the longitudinal reinforcing bars, the failure criterion is that of Von Mises. The hardening of steel is also considered. The interface between the reinforced concrete members and the masonry units panel is modeled by the coulomb friction model including a tension cut-off mode. A parametric study is conducted for confined masonry walls by changing with different dimensions, boundary conditions and loading patterns. The results indicate that failure has one of the two failure modes: diagonal tension or rocking. In cantilever walls with rather large heights compared to their length, the failure mode is rocking. In the other cases, diagonal tension failure mode occurs. The use of tie also affects the capacity of the wall. This can be considered in the design of masonry structures. The results of nonlinear analyses show that deboning does not occur between the ties and the body of masonry walls. Therefore, in analytical studies, the adjoining nodes for the two parts can be merged.

Upon determination of failure modes, different patterns of FRP were investigated for the dominant mode in order to select the most suitable pattern. The FRP configuration patterns considered for strengthening the wall were:

Abstracts

1. FRP in vertical direction;
2. FRP at both ends in vertical direction;
3. FRP in diagonal direction;
4. FRP covering the whole surface of the wall.

The last pattern was considered only for reference as it cannot be justified because of the increased cost. In confined masonry walls with diagonal tension or rocking mode, the best strengthening configuration is diagonal.

The increase in the capacity of strengthened walls with rocking and diagonal tension failure modes depends directly on the amount of FRP. In fact, the capacity increases from 1.2 to 2 for the walls with rocking mode. For the walls with diagonal tension mode, this increase is from 1.5 to 3.

Keywords: Masonry wall, Tie, Retrofit, FRP