بهسازی اجزاء و اتصالات پایه‌های قابی شکل بتن‌آرمه پل‌ها با بهره‌گیری از مواد کامپوزیت

اسلام سازمند*[1] ، شاهرخ مالک[2] و امیر ساعدی داریان[3]

[1]دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

[2]استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

[3]دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت 85/6/25 ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده 89/6/3، تاریخ تصویب 89/12/22)

چکیده

در این مقاله از طریق مدل‌سازی و تحلیل مدل اجزاء محدود، پایه قابی شکل[1] یک پل نمونه به منظور بهسازی مورد بررسی قرار داده شده‌است. برای مدل‌سازی بتن از المان سه بعدی هشت گرهی با قابلیت در نظر گرفتن ترک‌خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار و برای مدل‌سازی آرماتورهای طولی از المان دو گرهی فشاری- کششی تک محوره استفاده شده‌است. آرماتورهای عرضی به‌صورت درصد حجمی در المان بتن منظور شده‌اند و برای مدل‌سازی مصالح کامپوزیت از المان سه بعدی هشت گرهی با خاصیت لایه‌ای استفاده شده‌است. در ابتدا مدل اجزاء محدود پایه قابی شکل پل در شرایط چون ساخت[2] و شرایط بهسازی شده ایجاد و نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشات پیشین مقایسه شده است. پس از اثبات صحت مدل عددی و روش تحلیل، با توجه به‌مشاهدات صورت گرفته از مدهای گسیختگی و نقاط ضعف چنین پایه هایی، مقاوم‌سازی پایه به کمک الیاف FRP در حالات متفاوت صورت گرفته‌است. بر اساس نتایج حاصله راهکارهایی جهت افزایش مقاومت نهایی و شکل پذیری پایه پل ارایه گردیده‌است.

واژه‌های کلیدی: روش اجزاء محدود، پایه قابی شکل[1]، مصالح کامپوزیت FRP ، بارگذاری مونوتونیک، ژاکت فولادی[3]، ژاکت بتنی[4]، ژاکت مصالح کامپوزیت[5]

مقدمه

با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران از یک سو و اهمیت بالای پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزاء شریان‌های حیاتی کشور از سوی دیگر، مقاوم‌سازی و بهسازی پل‌ها و اطمینان نسبی از عملکرد مناسب آنها تحت بارهای جانبی از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به هزینه بالای انجام آزمایشات بر روی پلها، لزوم استفاده از یک روش عددی قابل اعتماد در مطالعه رفتار و مقاوم‌سازی پایه پل‌ها ضروری به نظر می‌رسد[1]. لذا در این مقاله ابتدا مدل ساخته شده از یک پایه قابی شکل[1] تحلیل شده و از مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی همان نمونه، توانایی مدل در ارایه نتایج مطلوب به اثبات رسیده و سپس در مرحله بعد در حالات مختلف به بهسازی پایه قابی شکل به کمک الیاف FRP پرداخته شده است.

کامپوزیت‌های FRP

کامپوزیت‌های FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شود: فیبر (الیاف) و رزین (ماده چسبنده). فیبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند جزء اصلی باربر در کامپوزیت FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع فیبر، قطر آن در محدوده 5 تا 25 میکرون می‌باشد. رزین اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند که فیبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود ماتریس‌های با مقاومت کم به صورت چشمگیر بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی آن اثر نمی‌گذارند. ماتریس (رزین) را می‌توان از مخلوط‌های ترموست و پاترموپلاستیک انتخاب کرد. ماتریس‌های ترمونت با اعمال حرارت، سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی‌آیند. در حالی که رزین‌های ترمو پلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت مایع نمود و با اعمل برودت به حالت جامد درآورد. از انواع رزین‌های ترموست می‌توان از پلی استر، وینیل استر، اپوکسی و از انواع رزین‌های ترموپلاستیک می‌توان از پلی وینیل کلرید (PVC) پلی اتیلن و پلی پروپیلن (PP) نام برد. کامپوزیت‌های FRP از قرار دادن الیاف پیوسته در ماتریس چسب، که الیاف را

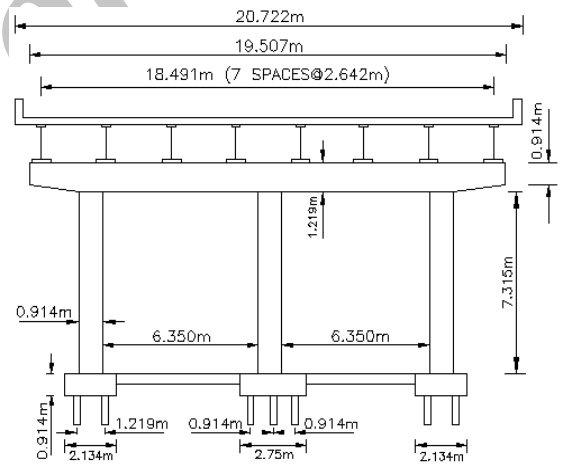
*نویسنده مسئول : تلفن : 61112868 ، فاکس : 66403808 ، Email: maalek@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

کنار هم نگه می‌دارد، ساخته می‌شوند. الیاف متداول عبارتند از الیاف کربن، الیاف شیشه، الیاف آرامید. با توجه به الیاف مورد استفاده، کامپوزیت‌های FRP به سه دسته تقسیم می‌شوند. کامپوزیت‌های پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه (GFRP)، کامپوزیت‌های پلیمر مسلح شده با الیاف کربن(CFRP) و کامپوزیت‌های پلیمر مسلح شده با الیاف آرامید (AFRP) [2].

روش‌های مقاوم سازی اجزاء پایه قابی شکل بتن آرمه پل‌ها

برای بهسازی اجزاء پایه قابی‌شکل[1] اعم از ستون، تیر سر ستون و اتصالات که عمدتاً در مقاومت خمشی و برشی ناشی از کمبود آرماتورهای برشی و طول ناکافی وصله پوششی در مفاصل پلاستیک دارای ضعف می‌باشند، روشهای متعددی موجود می‌باشد که از آن جمله می‌توان به استفاده از ژاکت فولادی[3]، ژاکت بتنی[4]، ژاکت مصالح کامپوزیت[5] و یا بعضاً پیش تنیدگی[6] اشاره کرد[3، 4، 5].

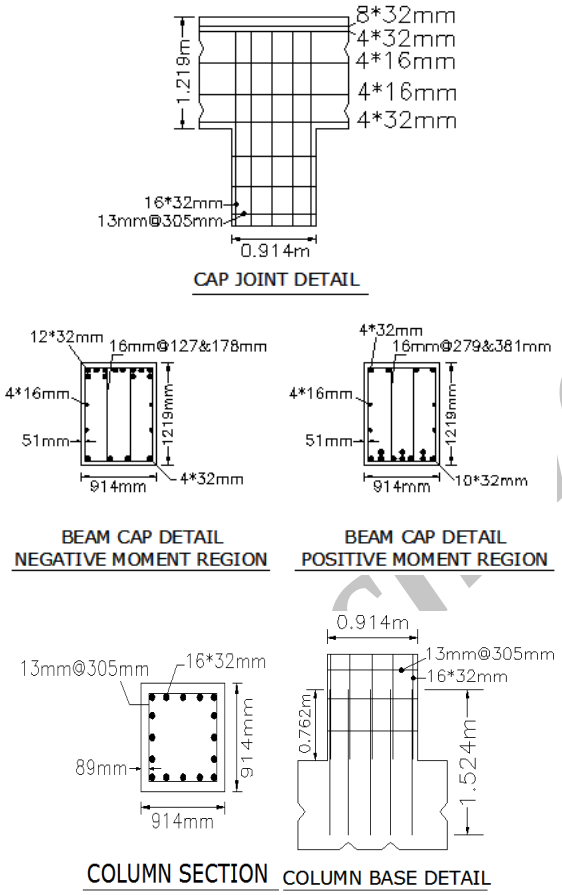


شکل1: نما، ابعاد و جزئیات پایه قابی شکل [6].

معرفی پایه‌های قابی شکل آزمایش شده

با توجه به هزینه بالای انجام تست‌های آزمایشگاهی تمام مقیاس در زمینه پایه‌های قابی شکل و دشواری‌های زیاد انجام این آزمایشات، چنین داده‌هایی محدود و بعضاً دور از دسترس می‌باشند. در این مطالعه یکی از معتبرترین آزمایشات در این زمینه انتخاب شده است. این آزمایشات توسط Pantelides و همکاران در دانشگاه Utah انجام شده است. نحوه انجام این آزمایشات به این ترتیب بوده است که در ابتدا قاب در شرایط چون ساخت آزمایش شده است. و از آنجایی که این پایه قابی شکل مشابه پایه‌های پلی بوده که در سال 1963، قبل از زلزله San Fernando(1971) ساخته شده بود، لذا جزییات آرماتورگذاری برای عملکرد شکل پذیر را دارا نبوده است. بنابراین برای آزمایش دوم پایه قابی شکلی مشابه همان قاب اول ساخته شده و بعد از بهسازی با مصالح کامپوزیت مورد آزمایش قرار گرفته است.

در پل اصلی پایه‌های قابی شکل به فاصله 21/869 متر از همدیگر قرار گرفته‌اند. پایه قابی شکل شامل سه ستون و یک تیر سر ستون می‌باشد که نما، ابعاد و جزئیات پایه قابی شکل در شکل (1) نشان داده شده است[6].



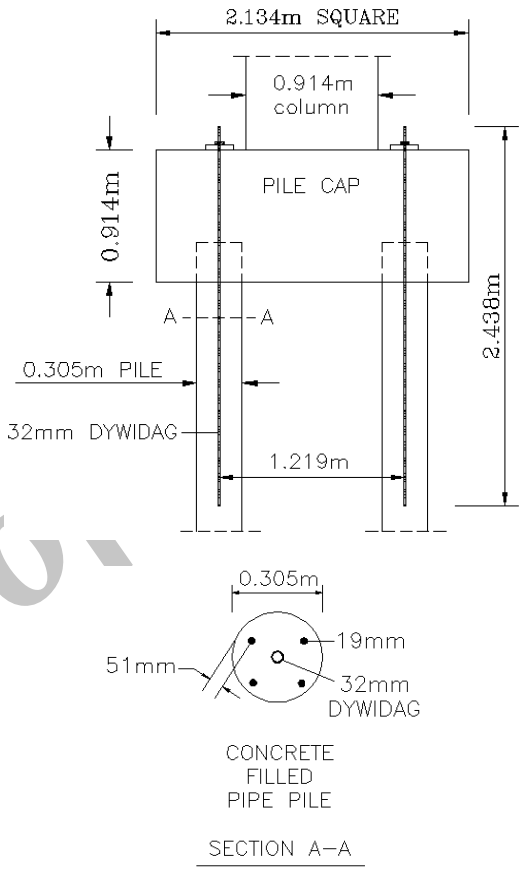
شکل2:جزئیات آرماتورگذاری ستون،تیر سر ستون و اتصالات[6].

جزییات آرماتورگذاری ستون، تیر سر ستون، اتصالات و ... نیز در شکل (2) نشان داده شده است[6].

همانطور که مشاهده می‌شود، ستونها بر روی سرشمع-هایی قرار گرفته‌اند که زیر سرشمع‌های کناری 4 عدد شمع و زیر سرشمع میانی 5 عدد شمع به طول 19/81

www.SID.ir

متر وجود دارد و همچنین شرایط تکیه‌گاهی برای انجام آزمایشات قبل از گسیختگی زودرس فونداسیون، اصلاح شده است. که این کار با استفاده از مهار شمع‌ها و سرشمع با استفاده از میلگردهای با مقاومت بالا انجام شده است. جزییات و ابعاد شمع‌ها و سرشمع‌ها و میلگردهای مهاری در شکل (3) نشان داده شده است[6].



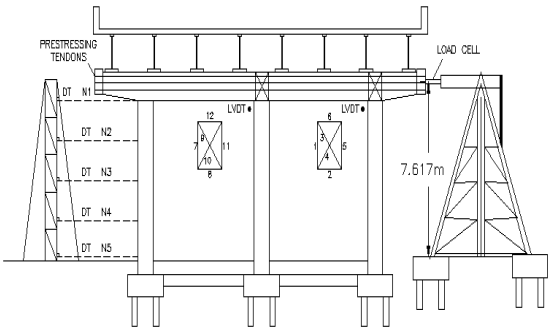
شکل3: جزییات مهار شمع به سر شمع [6].

مشخصات مصالح مصرفی

مقاومت بتن مصرفی برابر با 21 Mpa و آرماتورها دارای رفتار تنش-کرنش الاستوپلاستیک با تنش جاری شدن 275 Mpa می‌باشند[6].

شرایط آزمایش و نحوه اعمال بارها

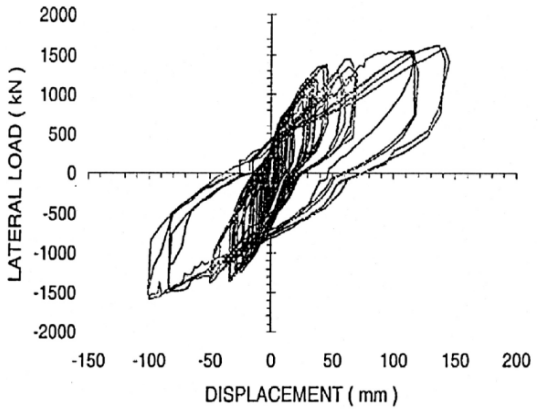
هر کدام از هشت شاهتیر فولادی یک بار ثقلی 240 kN را تحمل می‌کنند و یک بار جانبی سیکلیک شبه استاتیکی در تراز تیر سر ستون و در 3 سیکل اعمال گردید. ابتدائاً تا جاری شدن آرماتورها، بار به صورت کنترل نیرو[7] و بعداً با کنترل تغییر مکان[8] اعمال گردید، که جزییات آن در شکل (4) نشان داده شده است[6].



شکل 4: اعمال بار جانبی و تجهیزات نصب شده[6].

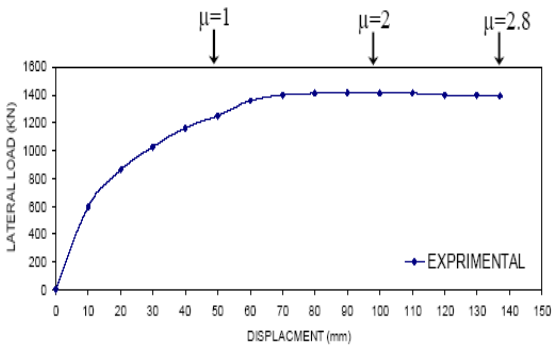
نتایج آزمایش قاب در شرایط چون ساخت

منحنی هیسترزیس بار- تغییرمکان پایه قابی شکل آزمایش شده در شکل (5) نشان داده شده است[6].



شکل 5: منحنی هیسترزیس پایه قابی شکل، قبل از بهسازی[6].

با توجه به منحنی هیسترزیس به دست آمده از آزمایش و در نظر گرفتن میانگین مقدار push و pull برای یک مقدار تغییرمکان از منحنی هیسترزیس، منحنی بار جانبی- تغییرمکان به صورت زیر به دست آمده است (شکل6).



شکل 6: منحنی بارجانبی- تغییرمکان قاب قبل از بهسازی.

Archive of SID

معرفی پایه قابی شکل بهسازی شده

همان‌طور که ذکر شد قاب آزمایش شده دارای نقص‌هایی بوده است که به موجب این نواقص، عملکرد شکل پذیر در برابر بار جانبی از خود نشان نداده است. از جمله این نواقص می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

1- محصور کنندگی ناکافی نواحی وصلهٔ پوششی ستون و نواحی مفاصل پلاستیک.

2- ظرفیت برشی ناکافی در ستون‌ها.

3- کمبود تنگها در نواحی اتصال تیر سرستون.

4- گیرداری ناکافی آرماتورهای طولی ستون که وارد تیر سرستون می‌شوند.

در نتیجه برای رفع نواقص ذکر شده، افزایش شکل پذیری و ظرفیت باربری، پایه قابی شکل با استفاده از کامپوزیت‌های CFRP بهسازی شده است[6].

مشخصات کامپوزیت‌های CFRP مصرفی

مشخصات کامپوزیت‌های CFRP مصرفی، اعم از مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، کرنش محوری نهایی، ضخامت لایه و ... مطابق زیر می‌باشد.

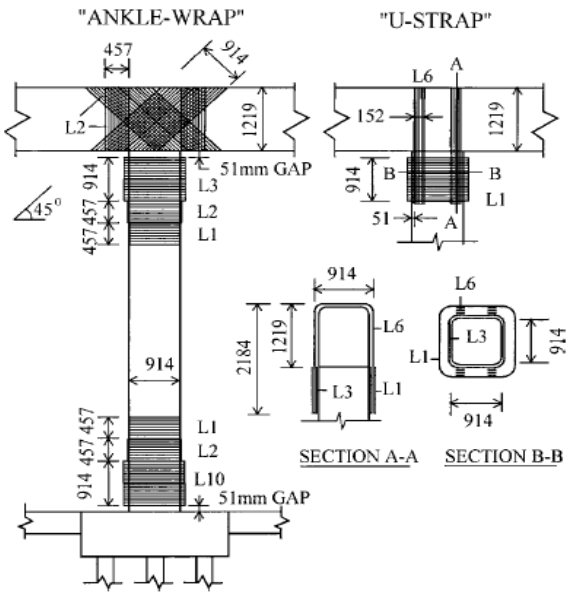
مدول الاستیسیته = 65 Gpa

مقاومت کششی = 628 Mpa

کرنش محوری نهایی = 10 mm/m

ضخامت لایه = 1.32 mm

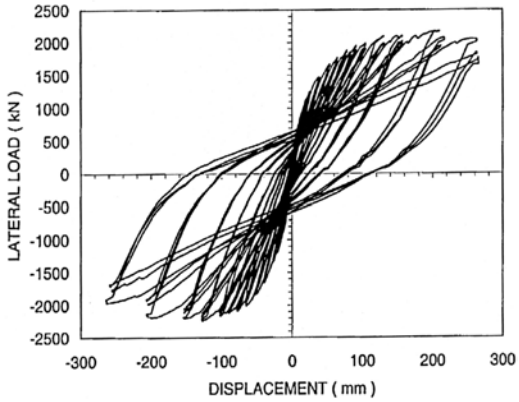
جزئیات مربوط به شیتهای FRP، شامل تعداد لایه ها و محل قرارگیری در شکل (7) نشان داده شده است[6].



شکل 7: تعداد لایه ها و محل قرارگیری شیت‌های FRP [6].

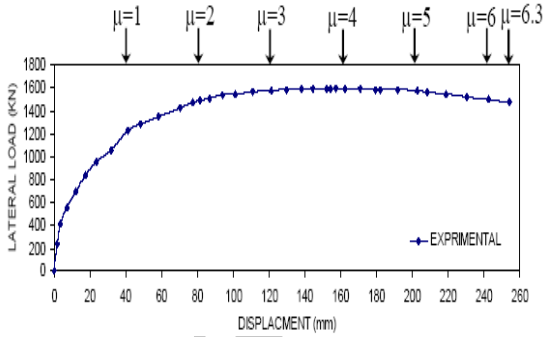
نتایج آزمایش قاب در شرایط بهسازی شده

منحنی هیسترزیس بار- تغییرمکان آزمایش پایه قابی شکل بهسازی شده در شکل (8) نشان داده شده است[6].



شکل 8: منحنی هیسترزیس بار-تغییرمکان قاب بهسازی شده[6].

با توجه به منحنی هیسترزیس بدست آمده از آزمایش و در نظر گرفتن میانگین مقدار push و pull برای یک مقدار تغییرمکان از منحنی هیسترزیس، منحنی بارجانبی- تغییرمکان به صورت زیر به دست آمده است (شکل9).



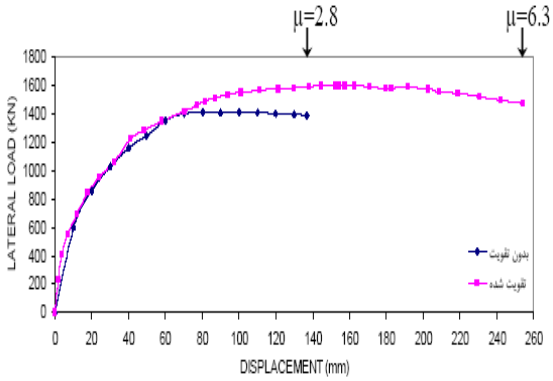
شکل 9: منحنی بارجانبی- تغییرمکان پایه قابی شکل بهسازی شده با کامپوزیت‌های CFRP.

نمودار بارجانبی- تغییرمکان هر دو پایه قابی شکل قبل از بهسازی و بهسازی شده به دست آمده از آزمایش، جهت مقایسه و مشاهدهٔ افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری در شکل (10) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (10) مشاهده می‌شود، شکل پذیری در پایه قابی شکل بهسازی شده به میزان قابل توجه‌ای افزایش پیدا کرده و ظرفیت باربری نیز افزایش یافته است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل 10: مقایسه منحنی بارجانبی- تغییرمکان آزمایشات انجام شده بر روی پایه قابی شکل قبل از بهسازی و بهسازی شده

مدل‌سازی عددی قاب با نرم افزار ANSYS

همان‌طور که اشاره شد با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایش‌های مربوط به پل‌ها و هزینه بالای چنین آزمایشاتی و همچنین با توجه به پیشرفت چشمگیر کامپیوترها در حال حاضر یکی از بهترین روش‌های مطالعه رفتار پل‌ها و بعضاً بهسازی آنها، استفاده از روش‌های عددی می‌باشد. در بین روش های عددی روش اجزاء محدود روشی قابل اطمینان و مناسب جهت مدل‌سازی و تحلیل چنین سازه‌هایی می‌باشد. البته باید توجه داشت که اولین نکته در استفاده از روش عددی اطمینان از صحت نتایج مدل ساخته شده می‌باشد. لذا در این مطالعه ابتدا دو آزمایش معرفی شده در بالا به دقت مدلسازی شده‌اند و سپس با مقایسه نتایج مدل‌ها با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و اطمینان از صحت عملکرد این روش در ادامه حالات مختلف بهسازی پایه قابی شکل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نرم افزار اجزای محدود ANSYS برای مدلسازی پارامتریک نمونه‌ها به کار رفته است. مدل‌های اجزاء محدود پارامتریک نمونه ها با استفاده از APDL ایجاد شده‌اند. با توجه به پارامتری بودن مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح، زمان ایجاد مدل‌های متفاوت به طور چشمگیری کاهش یافته است.

مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن فرضیات زیر صورت گرفته است :

الف- چسبندگی بین هر نوع مصالح المان، کامل فرض می‌شود و هیچگونه جابجایی[9] میان بتن و آرماتور، میان بتن و شیتهای FRP و میان لایه‌های مختلف FRP در نظر گرفته نمی‌شود (تمامی گره‌های المان‌ها به همدیگر بسته[10] شده‌اند).

ب- به علت عدم وجود اطلاعات از خاک منطقه و سختی شمع‌ها، پای ستون‌ها گیردار مدل شده است. (علیرغم اینکه در نمونه آزمایشی در زیر ستون‌ها، سرشمع و شمع وجود دارد، ولی به دلیل سختی زیاد سر شمع و شمع‌ها، خطایی که از فرض گیردار بودن پای ستون‌ها ایجاد می‌شود بسیار ناچیز می‌باشد).

همان‌طور که مشاهده می‌شود این فرضیات خللی در دقت و صحت نتایج ایجاد نکرده و صرفاً به منظور کاهش زمان مدل سازی و تحلیل صورت گرفته است. بار وارده به مدل مشابه بار اعمال شده در آزمایشات بوده و به همان محل نیز اعمال شده است.

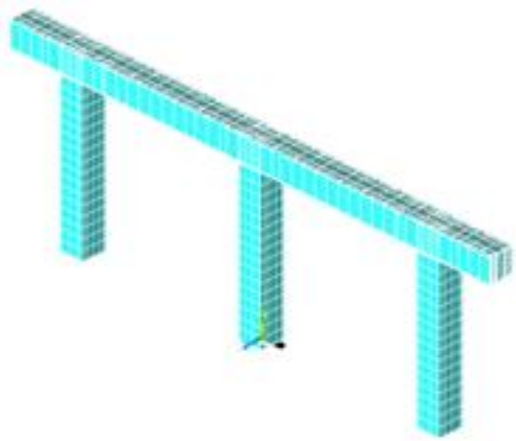
کلیه اجزای اتصال از قبیل تیر و ستون توسط المان‌های درجه اول هشت گرهی SOLID65 مدل شده‌اند. این المان قابلیت ترک خوردن در کشش و خرد شدن در فشار را دارا می‌باشد و می‌تواند دارای آرماتور یا بدون آرماتور باشد. مورد اصلی استفاده از این المان در مدل نمودن بتن می‌باشد. این المان دارای هشت گره است که هر گره دارای سه درجه آزادی در جهات x ، y و z می‌باشد. این المان قابلیت تعریف آرماتور در سه راستا را داراست. با توجه به متقارن بودن نمونه و به منظور کاهش زمان مدل‌سازی، نصف نمونه مدل شده و سپس سمت دیگر با توجه به قابلیت‌های نمونه ایجاد شده است. به منظور مدل کردن آرماتور ها از المان Link استفاده شده است. از این المان می‌توان به عنوان المان خرپا، فنر، رابط، کابل و ... استفاده کرد. این المان بصورت سه بعدی می‌باشد. المان تک محوره فشاری-کششی است و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی در جهات x، y و z می‌باشد. این المان هیچ‌گونه خمشی را نمی‌پذیرد. و با توجه به ویژگی‌های آرماتورها بهترین گزینه جهت مدل‌سازی آنها می‌باشد. با توجه به پیچیدگی این مدل و حجم زیاد آرماتورها و خاموت‌های موجود در این نمونه ها، خاموت‌ها در این مدل به صورت درصد حجمی از المان بتن تعریف شده‌اند. لازم به ذکر است که مراجع متعددی این روش را جهت اعمال اثر خاموت‌ها در مدل و کاهش زمان مدل‌سازی و تحلیل ارایه کرده اند. در نمونه بهسازی شده الیاف پلیمری FRP به کمک المان SOLID46، مدل شده است. این المان مشابه المان SOLID45 است و اضافه بر آن دارای خاصیت لایه‌ای نیز می‌باشد. المان دارای هشت گره و سه درجه آزادی انتقالی در هر گره می‌باشد. برای مدل‌سازی

Archive of SID
www.SID.ir

پوسته های ضخیم لایه‌ای یا مواد لایه‌ای سه بعدی به کار می‌رود و تا 250 لایه با ضخامت یکسان در هر المان و 125 لایه با ضخامت متغیر به طور خطی در المان را می‌تواند مدل‌سازی کند. مصالح FRP به صورت شکننده رفتار می‌کنند و رابطه تنش-کرنش تا مرحله گسیختگی به صورت خطی می‌باشد. در این مطالعه فرض می‌شود که رابطه تنش-کرنش برای مصالح FRP به صورت الاستیک و خطی است.

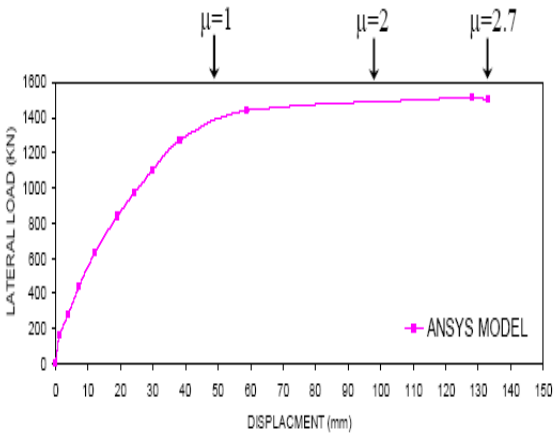
مدل‌سازی قاب قبل از بهسازی، نتایج آنالیز و مقایسه با آزمایشات انجام شده

شکل (11) نمای سه بعدی از المان‌های مدل ساخته شده در ضعیت قبل از بهسازی را نشان می‌دهد.



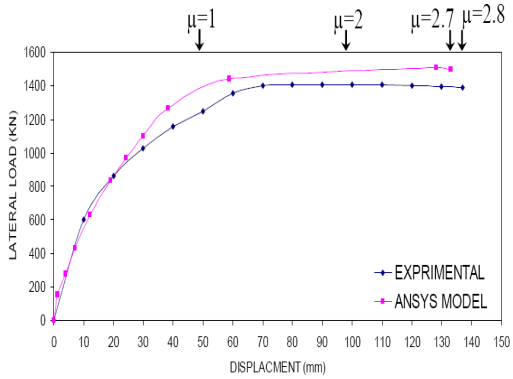
شکل11: نمای سه بعدی از المان‌های مدل، قبل از بهسازی.

نتایج آنالیز پایه قابی شکل، قبل از بهسازی شامل منحنی نیرو جانبی- تغییرمکان جانبی در شکل (12) نشان داده شده است.



شکل12: منحنی بار جانبی- تغییرمکان قاب، قبل از بهسازی.

منحنی بارجانبی- تغییرمکان مربوط به مدل عددی ساخته شده با نرم افزار در شکل (13) با منحنی مربوط به پایه قابی شکل آزمایش شده، مقایسه شده است.



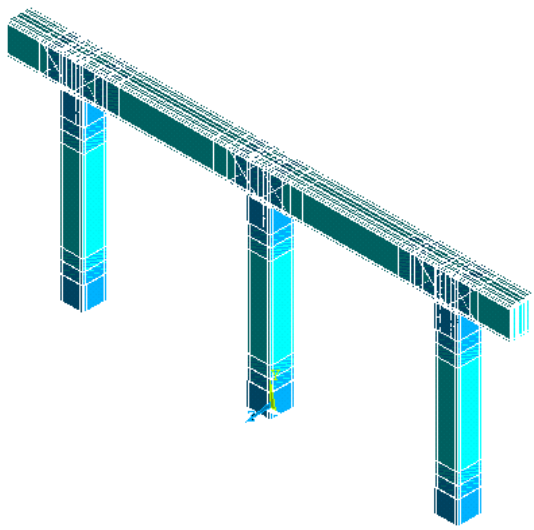
شکل13: مقایسه منحنی‌های بار- تغییرمکان آزمایش با مدل عددی قاب، قبل از بهسازی .

همان‌طور که در شکل (13) مشاهده می‌شود با توجه به فرضیات صورت گرفته در مدل‌سازی، نتایج به دست آمده مطلوب و قابل قبول می‌باشد.

مدل‌سازی قاب بهسازی شده، نتایج آنالیز و مقایسه با آزمایش های انجام شده

شکل (14) نمای سه بعدی از مدل ساخته شده در وضعیت بهسازی شده را نشان می‌دهد، شیت‌های CFRP در شکل زیر به وضوح مشخص می‌باشد.

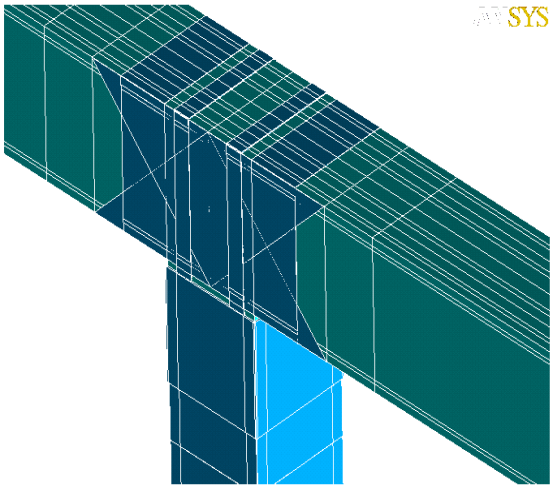
شکل (15) نمای سه بعدی از اتصال میانی مدل ساخته شده در وضعیت بهسازی شده را نشان می‌دهد، شیت‌های CFRP در شکل زیر به وضوح مشخص می‌باشد.



شکل14: نمای سه بعدی از مدل پایه قابی شکل بهسازی شده.

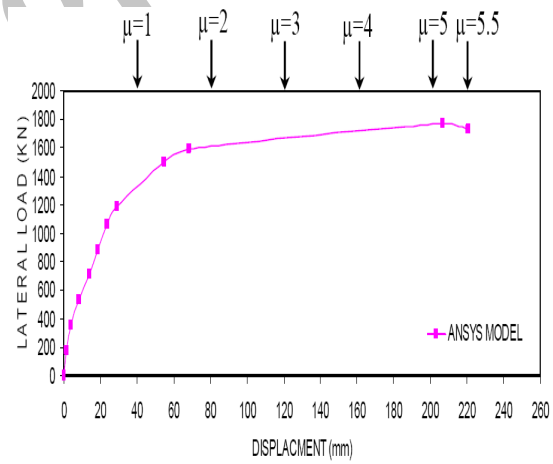
Archive of SID

www.SID.ir



شکل 15: نمای سه بعدی از اتصال میانی مدل قاب بهسازی شده.

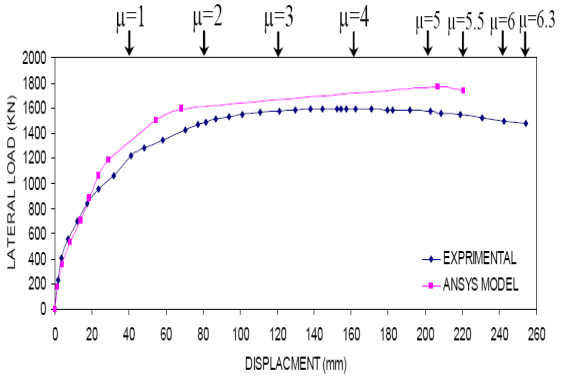
نتایج آنالیز پایه قابی شکل بهسازی شده، شامل منحنی نیروی جانبی- تغییرمکان در شکل (16) نشان داده شده است.



شکل16: منحنی بار جانبی- تغییرمکان قاب بهسازی شده.

منحنی بارجانبی- تغییرمکان مربوط به مدل عددی ساخته شده با نرم افزار در شکل (17) با منحنی مربوط به آزمایش قاب، مقایسه شده است.

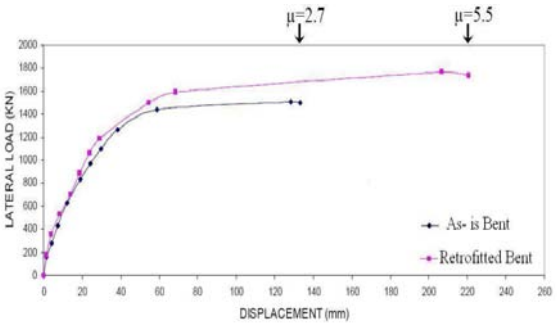
همان‌طور که در شکل (17) مشاهده می‌شود، با توجه به فرضیات صورت گرفته در مدل‌سازی، همانند شکل(13)، نتایج به دست آمده مطلوب و قابل قبول می‌باشد.



شکل17: مقایسه منحنی‌های بار- تغییرمکان قاب بهسازی شده و مدل عددی.

مقایسه نتایج مدل‌سازی در دو حالت قبل از بهسازی و بهسازی شده

نتایج به دست آمده از مدل‌سازی در دو حالت قبل از بهسازی و بهسازی شده، جهت مشاهده افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری، همانند نتایج به دست آمده از تست‌های انجام شده، در شکل (18) مقایسه شده است.



شکل18: مقایسه منحنی بارجانبی- تغییرمکان مربوط به مدل‌سازی قاب قبل از بهسازی و بهسازی شده.

همان‌طور که در شکل (18) مشاهده می‌شود، همانند شکل (10) شکل‌پذیری در قاب بهسازی شده به میزان قابل توجه‌ای افزایش پیدا کرده و میزان شکل‌پذیری از 2/7 به 5/5 افزایش یافته و همچنین ظرفیت باربری نیز افزایش یافته است.

افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری جانبی قاب با استفاده مناسب از مواد کامپوزیت در اتصالات ستون به تیر سرستون قاب

در بخش‌های قبلی در مورد آزمایشات انجام شده بر روی پایه قابی شکل در حالات قبل از بهسازی و بهسازی شده بحث شد. با توجه به آزمایشات انجام شده مشاهده

Archive of SID
www.SID.ir

شد که مدهای گسیختگی کامپوزیت‌های FRP شامل پاره شدن شیت‌های U شکل در اتصال ستون به تیر سرستون و بلند شدن شیت‌ها از روی سطح بتن می‌باشد. لذا با توجه به این مشاهدات، جهت بهبود رفتار پایه قابی شکل و به تاخیر انداختن مدهای گسیختگی تقویت کننده‌های کامپوزیت، پیشنهاد کردیم که برای توزیع یکنواخت تنش و جلوگیری از تمرکز تنش در شیتهای U شکل، عرض این شیت‌ها را افزایش دهیم و همچنین پیشنهاد کردیم که با استفاده از شیتهای افقی بجای شیت‌های مورب در اتصال ستون به تیر سرستون، رفتار پایه قابی شکل را بهبود ببخشیم. زیرا استفاده از شیت‌های افقی به انتقال نیروهای کششی افقی ناحیه اتصال به عنوان بخشی از مکانیزم انتقال نیروی اتصال کمک می‌کند. لذا در این بخش با توجه به مدل عددی ارائه شده در بخش‌های قبل و تطابق این مدل با نتایج آزمایشات، به بهبود رفتار پایه قابی شکل با افزایش عرض شیتهای U شکل و استفاده از شیت‌های افقی FRP به جای شیتهای مورب می‌پردازیم. لازم به ذکر است که در آزمایشات انجام شده و مدل‌های بخش‌های قبل، شیت‌های U شکل دارای عرض 152 میلی‌متر و شش لایه که ضخامت هر لایه 1/32 میلی‌متر می‌باشد و شیت‌های مورب دارای دو لایه که ضخامت هر لایه 1/32 میلی‌متر می‌باشد. طبق توضیحات بخش‌های قبل، در بهسازی اولیه، شیت‌های U شکل به منظور جبران طول ناکافی آرماتورهای ستون که وارد تیر سرستون می‌شوند در نظر گرفته شده بودند و شیت‌های مورب جهت جبران کمبود آرماتورهای برشی اتصال طراحی شده بودند. لذا جهت بهبود رفتار پایه قابی شکل و به تاخیر انداختن مدل‌های گسیختگی تقویت کننده‌های کامپوزیت و پیشنهادات ارائه شده در این راستا، برای توزیع یکنواخت تنش و جلوگیری از تمرکز تنش در شیت‌های U شکل و بهبود انتقال نیروهای کششی افقی ناحیه اتصال، حالت‌های زیر در نظر گرفته شده است:

حالت (1)

در این حالت تقویت برشی اتصال با همان شیت‌های مورب قبلی صورت می‌گیرد، ولی عرض شیت‌های U شکل را به دو صورت زیر افزایش می‌دهیم :

a) افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با سه لایه

توضیحاً اینکه در این حالت میزان مصرف مصالح کامپوزیت تغییر نمی کند و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت‌های U شکل بدون تغییر در میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در بهبود رفتار پایه قابی شکل می‌باشد.

b) افزایش عرض شیتهای U شکل به دو برابر عرض اولیه و با شش لایه

در این حالت میزان مصرف مصالح کامپوزیت در شیت‌های U شکل دو برابر شده است و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه، ضمن افزایش میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در بهبود رفتار پایه قابی شکل می‌باشد.

حالت (2)

در این حالت تقویت برشی اتصال با استفاده از شیت‌های افقی دو لایه بجای شیت‌های مورب که راستای فیبرها در جهت محور افقی تیر می‌باشد، انجام می شود. توضیحاً اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت در دو حالت استفاده از شیت‌های مورب و استفاده از شیت‌های افقی یکسان در نظر گرفته شده است. که حالت دوم نیز به صورت‌های زیر قابل انجام می‌باشد:

a) هیچ تغییری در عرض و تعداد لایه های شیت‌های U شکل صورت نگیرد. هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب بدون هیچ‌گونه تغییری در شیت‌های U شکل می‌باشد و طبق توضیحات ارائه شده در بالا میزان مصرف مصالح کامپوزیت در این حالت نیز تغییری نمی‌کند.

b) افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با سه لایه

در این حالت هم میزان مصرف مصالح کامپوزیت تغییری نمی‌کند و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه، ضمن ثابت نگه داشتن میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در حالت استفاده از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب در بهبود رفتار پایه قابی شکل می‌باشد.

c) افزایش عرض شیتهای U شکل به دو برابر عرض اولیه و با شش لایه

Archive of SID

www.SID.ir

در این حالت هم میزان مصرف مصالح کامپوزیت در شیت‌های U شکل دو برابر می‌شود و هدف از در نظر گرفتن این حالت، مشاهده میزان تاثیر افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه، ضمن افزایش میزان مصرف مصالح کامپوزیت، در حالت استفاده از شیت‌های افقی بجای شیت‌های مورب در بهبود رفتار پایه قابی شکل می‌باشد.

جهت سهولت در مشاهده نتایج حالات ذکر شده و با توجه به توضیحات ارائه شده، پنج حالت فوق به صورت زیر خلاصه و نام‌گذاری می‌شوند :

1-a) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیتهای U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه

1-b) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل شش لایه به دو برابرعرض اولیه

2-a) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و شیت‌های U شکل با عرض و تعداد لایه های اولیه

2-b) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه

2-c) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌هایU شکل شش لایه به دو برابر عرض اولیه

لازم به ذکر است جهت مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایش قاب بهسازی شده، این دو حالت را به صورت زیر نام‌گذاری می‌کنیم :

T2 : نتایج آزمایش پایه قابی شکل بهسازی شده

R2 : نتایج مدل عددی پایه قابی شکل بهسازی شده اولیه

در بخش‌های بعدی به بررسی نتایج و مقایسه هر کدام از حالات فوق الذکر می‌پردازیم.

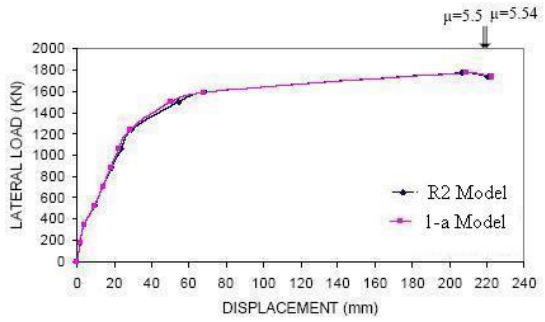
1-a) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه :

منحنی بار جانبی- تغییرمکان این حالت در شکل (19) با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.

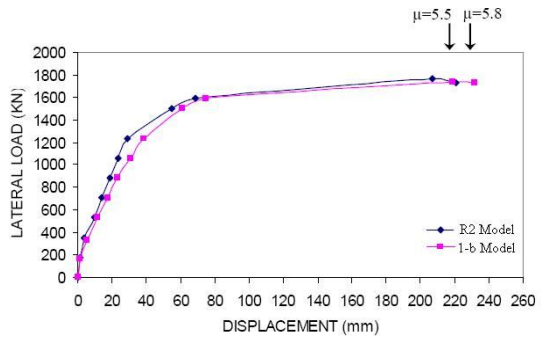
همان‌طور که از شکل (19) مشاهده می‌شود، حالت 1-a تغییری در شکل‌پذیری و ظرفیت باربری پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. یعنی اینکه افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه ولی با سه لایه، علیرغم اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت ثابت می‌ماند، تغییری در رفتار پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. این موضوع ما را بر آن داشت که تعداد لایه‌های شیت‌های U شکل را مانند حالت اولیه برابر شش لایه در نظر بگیریم و نتایج را بررسی کنیم .

1-b) تقویت اتصال با شیت‌های مورب دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل شش لایه به دو برابرعرض اولیه:

منحنی بار-تغییرمکان مدل 1-b در شکل زیر با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.



شکل 19: مقایسه منحنی بارجانبی-تغییرمکان مدل 1-a و R2.



شکل 20: مقایسه منحنی بارجانبی- تغییرمکان مدل 1-b و R2.

منحنی بار- تغییرمکان مدل 1-a، 1-b، R2 و T2 در شکل (21) با هم مقایسه شده است.

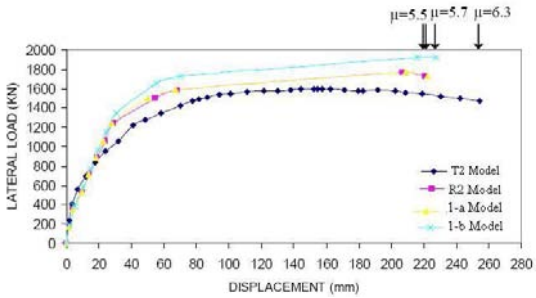
همان‌طور که از منحنی‌های بدست آمده در حالت (1) مشاهده می‌شود، مدل 1-b باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری قاب می‌شود و مقداری هم شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. یعنی با مصرف بیشتر مصالح کامپوزیت به میزان دو برابر حالت اولیه در شیت‌های U شکل، می‌توان ظرفیت باربری را به میزان قابل توجهی افزایش داد. در بخش بعدی به اثر استفاده از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب می‌پردازیم.

2-a) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و شیت‌های U شکل با عرض و تعداد لایه های اولیه :

همان‌طور که قبلا هم توضیح داده شد، هدف از در نظر گرفتن این حالت مشاهدهٔ میزان تاثیر شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب بدون هیچ‌گونه تغییری در شیت‌های U شکل می‌باشد و طبق توضیحات ارائه شده

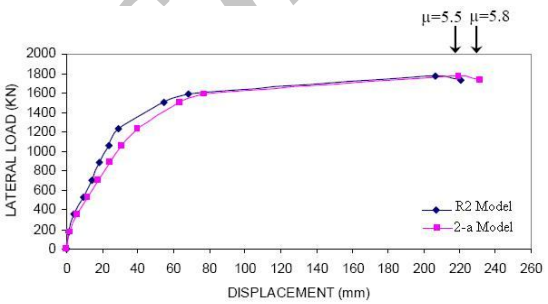
Archive of SID

میزان مصرف مصالح کامپوزیت در این حالت تغییر نمی‌کند.

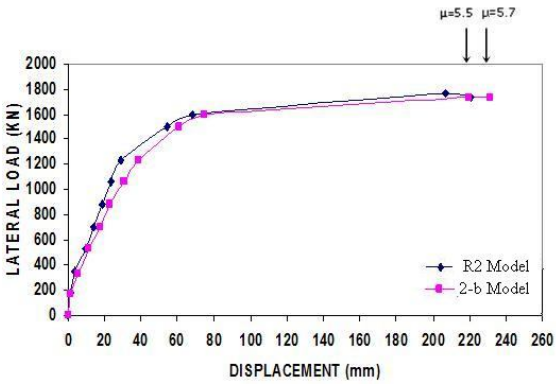


شکل 21: مقایسه منحنی بارجانبی-تغییرمکان مدل‌های 1-a، 1-b، R2 و T2.

منحنی مربوط به مدل 2-a در شکل زیر با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.



شکل 22: مقایسه منحنی بارجانبی-تغییرمکان مدل 2-a و R2.



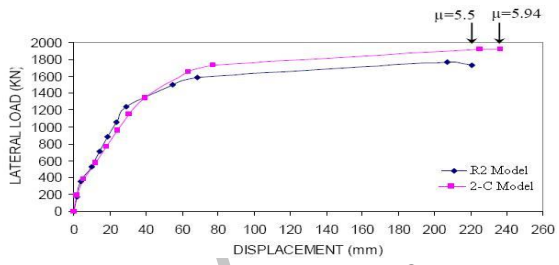
شکل 23: مقایسه منحنی بارجانبی-تغییرمکان مدل 2-b و R2

همان‌طور که از شکل (22) مشاهده می‌شود مدل 2-a تغییری در ظرفیت باربری نهایی پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. ولی شکل پذیری را افزایش می‌دهد. یعنی اینکه استفاده از شیت‌های افقی بجای شیت‌های مورب ضمن اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت ثابت می‌ماند، باعث افزایش شکل‌پذیری پایه قابی شکل می‌شود.

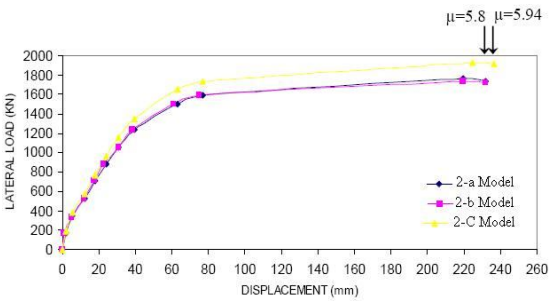
2-b) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل سه لایه به دو برابر عرض اولیه : منحنی مربوط به مدل 2-b در شکل زیر با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل 2-b، تقریبا مانند مدل 2-a می‌باشد و تغییری در ظرفیت باربری نهایی پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. ولی شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. یعنی اینکه افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر حالت اولیه منت‌ها با سه لایه، ضمن استفاده از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب، علیرغم اینکه میزان مصرف مصالح کامپوزیت ثابت می‌ماند نسبت به حالتی که بدون تغییر در شیت‌های U شکل فقط از شیت‌های افقی بجای شیت‌های مورب استفاده کنیم، تغییری در رفتار پایه قابی شکل ایجاد نمی‌کند. این موضوع ما را بر آن داشت که تعداد لایه‌های شیت‌های U شکل را مانند حالت اولیه برابر شش لایه در نظر بگیریم و نتایج را بررسی کنیم.

2-c) تقویت اتصال با شیت‌های افقی دو لایه و افزایش عرض شیت‌های U شکل شش لایه به دو برابر عرض اولیه: منحنی مربوط به مدل 2-c در شکل (24) با منحنی مربوط به مدل R2 مقایسه شده است. منحنی بارجانبی-تغییرمکان مدل 2-a , 2-b و 2-c در شکل (25) جهت مقایسه نشان داده شده است.



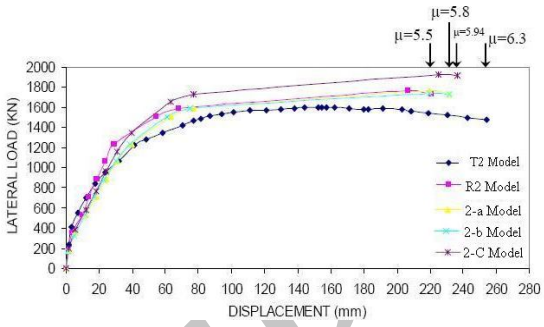
شکل 24: مقایسه منحنی بارجانبی- تغییرمکان مدل 2-c و R2.



شکل 25: مقایسه منحنی بارجانبی-تغییرمکان مدل 2-a، 2-b و 2-c.

www.SID.ir

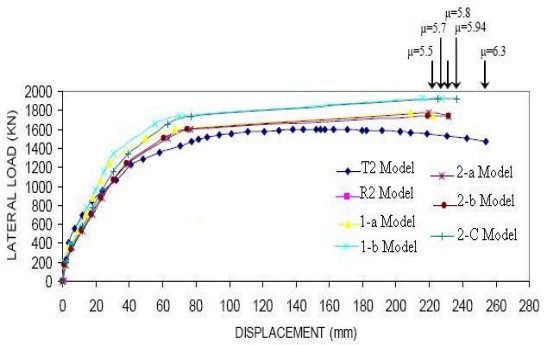
همان‌طور که در شکل (25) مشاهده می شود مدل 2-a و 2-b تقریبا مشابه می‌باشند ولی در مدل 2-c شکل‌پذیری و ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش یافته است، که این افزایش‌ها در شکل (26) در مقایسه با مدل R2 و T2 نشان داده شده‌اند.



شکل 26: مقایسه منحنی بارجانبی-تغییرمکان مدل 2-a، 2-b، 2-c، R2 و T2.

در شکل (26) نیز مشاهده می‌گردد که مدل 2-c نسبت به بقیه مدل‌ها افزایش شکل‌پذیری و باربری بیشتری را دارد و مناسب‌ترین گزینه می‌باشد.

و در نهایت جهت بحث و نتیجه‌گیری نهایی به مقایسه همه حالت‌های ذکر شده می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل (27) ملاحظه می‌شود، استفاده از شیت‌های U شکل شش لایه به عرض دو برابر حالت اولیه (مدل 1-b)، باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری جانبی پایه قابی شکل می‌شود و تا حدودی هم شکل پذیری افزایش می‌یابد.



شکل 27: منحنی بار جانبی- تغییرمکان مدل 1-a، 1-b، ، 2-a، 2-b، 2-c، R2 وT2 .

و همچنین استفاده از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب (مدل 2-a) باعث افزایش قابل توجه شکل‌پذیری می‌گردد ولی ظرفیت باربری تغییر چندانی نمی‌کند. نتیجتاً اینکه اگر مدل 1-b و 2-a را با هم ترکیب کنیم مدلی را خواهیم داشت که افزایش قابل توجهی در هر دو پارامتر ظرفیت باربری و شکل پذیری ایجاد می‌کند (مدل 2-c).

نتیجه گیری

در این بررسی ابتدا روش اجزاء محدود به عنوان یک روش قابل اطمینان و کارا در زمینه مدل‌سازی و تحلیل پایه پل‌ها معرفی شده است و نحوه دقیق مدل‌سازی و تحلیل ارایه شده است و سپس در ادامه حالات مختلف بهسازی پایه پل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل به صورت زیر دسته بندی شده اند :

1- استفاده از مصالح کامپوزیت جهت بهسازی عموماً باعث افزایش قابل توجه شکل‌پذیری و ظرفیت باربری پایه قابی شکل پل‌های بتن آرمه می‌گردد.

2- افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با سه لایه (ثابت بودن میزان مصرف مصالح کامپوزیت) تاثیری در رفتار پایه قابی شکل پل‌های بتن آرمه ندارد.

3- افزایش عرض شیت‌های U شکل به دو برابر عرض اولیه و با شش لایه (دو برابر شدن میزان مصرف مواد کامپوزیت در شیت‌های U شکل) باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری جانبی و تا حدودی شکل‌پذیری پایه قابی شکل می‌گردد.

4- استفاده از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب در اتصال (ثابت بودن میزان مصرف مصالح کامپوزیت) باعث افزایش قابل توجه در شکل‌پذیری پایه قابی شکل پل‌های بتن آرمه می‌گردد و در ظرفیت باربری تاثیر چندانی ندارد.

5- نهایتاً جهت بهبود رفتار پایه های قابی شکل پل‌های بتن آرمه و افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری آنها پیشنهاد می‌گردد که در اتصال از شیت‌های افقی به جای شیت‌های مورب استفاده گردد و عرض شیت‌های U شکل نسبت به مقدار اولیه افزایش یابد (که در این مقاله عرض شیت‌های U شکل دو برابر مقدار اولیه در نظر گرفته شده است).

لازم به ذکر است که تمامی تحلیل‌های انجام شده با توجه به مشاهدات گزارش شده از آزمایشات، نوع جزئیات اجرائی تقویت اتصال و جریان تنشی موجود در اتصال، بدون در نظر گرفتن اثر جدایش لایه نازک بتنی مجاور

Archive of SID
www.SID.ir

لایه چسب یا زوال پیوستگی[11] بوده که با نتایج آزمایشات مرجع [6] تطابق مطلوبی داشته است، معذلک برای افزایش دقت، قابل توصیه است که این اثر در مطالعات آتی مد نظر قرار داده شود.

مراجع

1- Zamani Nejad, S. and Rahaee, A.R. (2004). *Performane Accesment of Strengthened Concrete Components with FRP and Compare to Carbon Fibers*, MSc. Thesis , Amir Kabir University.

2 - Matthews, and Rawlings, R. D. (1994). *Composite Materials Engineering and Science*, Chapman and Hall.

3 - Chai,Y. H., Pristley, M. J. N. and Seibel, F. (1991) "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance." *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, September / October, PP. 572-584.

4 - Priestley, M. J. N., Seibel F. and fyfe, E. (1992). *Column Seismic Retrofit Using Fiberglass /Epoxy Jackets*, November, PP. 247-251.

5 - Priestley, M. J. N., Seibel, F. and fyfe, E. (1993) "Column Retrofit Using Priestesses Fiberglass / Epoxy Jackets." *Proceedings, 93 FIP Symposium*, Kyoto, Japan, October, PP.147-160.

6 - Pantelides, C. P. and Gergely, J. (2002). "Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Seismic Retrofit of RC Bridge Bent: Design and In Situ Validation." *Journal of Composites for Construction*, February.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Bent
2 - As built
3 - Steel jacket
4 - Concrete jacket
5 - Composite jacket
6 - Prestressing
7- Force-controlled
8 - Displacement-controlled
9 - Slippage
10– Merge
11- Debonding

Archive of SID

www.SID.ir