

بررسی رفتار برشی بین لایه‌ای سازه ساندویچی فولاد-بتن-فولاد با اتصال دهنده‌های پیچ‌میله با مقاومت بالا

محمد گل محمدی

دانشجوی دکترای مهندسی عمران-سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

منصور قلعه نوی *

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

پانل‌های ساندویچی فولاد-بتن-فولاد (SCS) از دو رویه خارجی کم‌ضخامت با مقاومت و وزن مخصوص بالا از جنس فولاد و یک لایه ضخیم با مقاومت و وزن مخصوص کم بین دو رویه بنام هسته از جنس بتن، تشکیل شده است. اتصال رویه‌های خارجی به هسته بتنی توسط اتصال دهنده‌های برشی تأمین می‌گردد. پیچ‌میله با مقاومت بالا یکی از انواع اتصال دهنده‌های برشی می‌باشد که رفتار برشی بین لایه‌ای آن‌ها در مقاله حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی تأثیر تغییر مشخصات هندسی بر رفتار برشی سازه‌های ساندویچی فولاد-بتن-فولاد با اتصال دهنده‌های پیچ‌میله با مقاومت بالا، آزمایش فشارخارج تحت اثر بارگذاری تدریجی انجام شده است. برای این منظور نمونه‌های آزمایشگاهی با تغییر در پارامترهای هندسی شامل ضخامت هسته بتنی، ضخامت رویه‌های فولادی و قطر پیچ‌میله‌ها ساخته شده و به ارزیابی و مقایسه میزان شکل‌پذیری، مودهای خرابی و مقاومت برشی نهایی نمونه‌ها پرداخته شده است. سپس براساس آزمایش‌های انجام شده روابطی جهت پیش‌بینی مقاومت برشی نهایی و رفتار بار-لغزش نمونه‌های با اتصال دهنده‌های برشی پیچ‌میله پیشنهاد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: پانل ساندویچی فولاد-بتن-فولاد، اتصال دهنده برشی، پیچ‌میله با مقاومت بالا، آزمایش فشارخارج، رفتار بار-لغزش، مقاومت برشی برشگیر.

* نویسنده مسئول: ghalehnovi@um.ac.ir

۱- مقدمه

نوع دیگر سازه مرکب SCS، استفاده از اتصال دهنده‌های دوسرجوش^۴ است [۵] (شکل ۱-ب). در این نوع سازه مرکب، رویه‌های خارجی به وسیله اتصال دهنده‌های برشی میله‌ای با جوش اصطکاکی به یکدیگر متصل شده و بدین وسیله از جداشدگی کششی جلوگیری می‌شود. جهت جوشکاری این سازه نیاز به جوش اصطکاکی می‌باشد که فقط به صورت کارخانه‌ای قابل اجرا بوده و محدودیت حداقل ضخامت ۲۰۰ میلیمتر را دارد [۶].

نوع دیگری از ساندویچ SCS توسط Liew و همکارش [۷] پیشنهاد گردید که در آن از جفت اتصال دهنده‌های قلابی شکل (J شکل)^۵ استفاده شده است (شکل ۱-پ).

این اتصال دهنده‌های J شکل به صورت جفت در یکدیگر قفل شده و به دورویه فولادی جوش شده‌اند تا نیروهای برشی بین لایه‌ای را انتقال داده، در مقابل جداشدگی کششی مقاومت نموده و از کماتش موضعی رویه‌های فولادی جلوگیری نمایند [۸]. این سازه مرکب، عملکرد خوبی در مقابل بارهای استاتیکی، ضربه و خستگی نشان می‌دهد [۹]. علاوه بر این، سازه ساندویچی با اتصال دهنده‌های قلابی J شکل می‌تواند در دال‌های نازک با حداقل ضخامت ۵۰ میلیمتر نیز استفاده شود که در مقایسه با سازه ساندویچی با اتصال دوسرجوش که نیاز به ضخامت حداقل ۲۰۰ میلیمتر (به علت مشکلات جوشکاری) دارد، دارای کاربرد بیشتری است. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، اتصال دهنده‌های برشی دیگری نیز پیشنهاد شده است (شکل ۱-ت و ۱-ث و ۱-ج) که کاربرد کمتری داشته‌اند.

یکی از اتصال دهنده‌های برشی که در تحقیقات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است، اتصال دهنده‌های برشی پیچ میله^۶ با مقاومت بالا می‌باشند (شکل ۲). این نوع اتصال دهنده‌ها به سهولت در دسترس بوده و در کارگاه‌های ساختمانی نیز به آسانی قابل اجرا می‌باشند. از طرفی اتصال کامل بین دو پوسته را بدون ایجاد محدودیت در ضخامت بین دو رویه تامین می‌نمایند. از این رو در تحقیق حاضر به بررسی رفتار این نوع اتصال دهنده‌های برشی در سازه SCS پرداخته شده است.

پانل‌های ساندویچی فولاد-بتن-فولاد^۱ (SCS) یکی از ساختارهای ساندویچی می‌باشند که از دورویه خارجی کم ضخامت با مقاومت و وزن مخصوص بالا از جنس فولاد و یک لایه ضخیم با مقاومت و وزن مخصوص کم بین دو رویه به نام هسته از جنس بتن، تشکیل شده‌اند. در سال‌های اخیر پانل‌های ساندویچی به عنوان یک سازه کارآمد در صنعت ساخت و ساز مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. این نوع سازه‌ها در عرشه پل‌ها، موج شکن‌های شناور، سازه‌های ضدضربه، مخازن مایعات، بدنه کشتی، هسته مرکزی ساختمان‌های بلند و غیره کاربرد دارند. پانل‌های ساندویچی با نسبت مقاومت به وزن بالا باعث کاهش قابل ملاحظه وزن سازه می‌گردند. اعضای سازه‌ای با وزن مخصوص بالای خود بخش عمده‌ای از کل بار سازه را تشکیل می‌دهند. بنابراین کاهش در وزن اعضای سازه‌ای با روشی مناسب می‌تواند کاهش سطح مقطع عضو، اندازه فونداسیون، هزینه و همچنین خسارت‌های ناشی از زلزله را نتیجه دهد.

ساندویچ SCS اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط Solomon و همکاران پیشنهاد گردید که در آن دورویه نسبتاً نازک فولادی با استفاده از چسب اپوکسی به یک هسته بتنی متصل شده بودند [۲]. Tomlinson و همکاران اتصال دهنده‌های برشی گلمیخی را با هدف کاربرد در سازه‌های بندرگاه‌ها و اسکله‌ها جایگزین چسب اپوکسی نمودند که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت و به ساندویچ فولاد-بتن-فولاد^۲ دوپوسته^۲ معروف گردید. در این سیستم برشگیرهای گلمیخی از یک طرف به پوسته جوش شده و سپس با بتن ریزی و مدفون شدن سر دیگر برشگیرها در بتن، اتصال دوپوسته تأمین می‌گردد [۳] (شکل ۱-الف). یکی از ضعف‌های برشگیرهای گلمیخی عملکرد نسبتاً ضعیف آن‌ها در نیروهای برشی زیاد و امکان جداشدگی کششی تحت بارهای ضربه‌ای است و به دلیل مقاومت پایین بیرون کشیدگی^۳ آن‌ها، در بتن ترک ایجاد می‌شود. همچنین، برای هسته بتنی با ضخامت کم به ویژه در بدنه کشتی، استفاده از گلمیخ‌ها که منجر به مقاومت برشی کم هسته می‌شود، مناسب نیست [۴].

⁴ Bi-Steel

⁵ J-hook connectors

⁶ Studbolt

¹ Steel-Concrete-Steel

² Double Skin

³ Pull-out test



(پ) اتصال دهنده J شکل



(ب) اتصال دهنده دوسر جوش



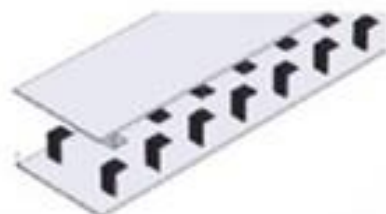
(الف) اتصال دهنده‌های گلمیخی



(ج) اتصال دهنده نواری موجدار



(ث) اتصال دهنده ناودانی



(ت) اتصال دهنده گونیا

شکل ۱- سازه ساندویچی مرکب با اتصال دهنده‌های مختلف [۹]

مصالح شامل فولاد و بتن و پیچ میله و مشخصات هندسی سیستم می‌باشند. در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر مشخصات هندسی شامل قطر پیچ میله، ضخامت بتن و ضخامت رویه‌های فولادی بر رفتار برشی بین لایه‌ای ساندویچ SCS پرداخته شده است.

۲- مشخصات مصالح

در تمامی نمونه‌ها از بتن معمولی با مقاومت فشاری استوانه‌ای ۲۸ روزه برابر ۴۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۹/۴ گیگاپاسکال استفاده شده است. مشخصات مکانیکی رویه‌های فولادی با استفاده از تست کشش نمونه‌های استخوان سگی^۲ به دست آمده که در جدول ۱ مشخصات نمونه‌ها شامل مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی آمده است. پیچ میله‌ها از نوع فولاد ASTM A193 B7 با مقاومت تسلیم اسمی ۷۲۵ مگاپاسکال و مقاومت نهایی اسمی ۸۶۰ مگاپاسکال می‌باشند که مشخصات دقیق‌تر آن‌ها بر اساس آزمایش کشش مستقیم نمونه‌های کششی در جدول ۱ آمده است. مدول الاستیسیته فولاد مصرفی شامل رویه‌ها و پیچ میله‌ها تقریباً $E_s=200$ GPa می‌باشد.

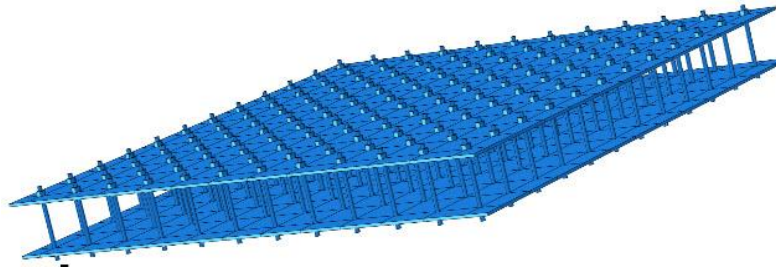


شکل ۲- اتصال دهنده پیچ میله

در شکل ۳ دال ساندویچی SCS و برشگیرهای پیچ میله که یکی از کاربردهای مهم این نوع مصالح می‌تواند باشد نشان داده شده است. یک رفتار مهم در سیستم‌های سازه‌ای نظیر دال که می‌تواند در ابعاد کوچک مورد بررسی قرار گیرد، رفتار برشی بین لایه‌ای می‌باشد. برای این منظور در مطالعه حاضر آزمایش فشارخارج^۱ بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی SCS با هسته بتنی معمولی و اتصال دهنده‌های پیچ میله با مقاومت بالا، انجام شده است. به‌طور کلی پارامترهای مهم که بر مقاومت برشی بین لایه‌ای ساندویچ SCS با اتصال پیچ میله مؤثرند مشخصات مکانیکی

² Dog-bone specimens

¹ Push-out test



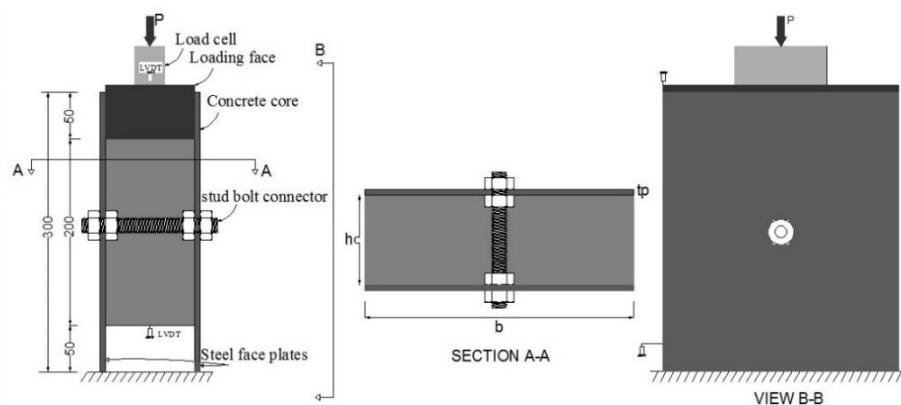
شکل ۳- مدل دال SCS با اتصال دهنده پیچ میله

۳- تجهیزات آزمایش

مقاومت برشی اتصال دهنده‌های پیچ میله در SCS را می‌توان با استفاده از آزمایش فشارخارج به دست آورد. این آزمایش اولین بار جهت بررسی رفتار برشی ساندویچ‌های SCS با برشگیرهای دوسرجوش استفاده گردیده است [۱۰]. تجهیزات آزمایش فشارخارج در مطالعه حاضر مطابق شکل ۴ شامل جک هیدرولیک، بارسنج^۱ به ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن (با دقت ۰/۰۱ کیلونیوتن) و دو عدد جابه‌جایی سنج^۲ نصب شده در بالا و پایین هسته بتنی و سیستم ثبت و پردازش داده، می‌باشند. صفحه صلب فلزی به ضخامت ۴۰ میلیمتر بر روی سطح فوقانی هسته بتنی استفاده شده است تا بار به صورت گسترده منتقل شود. سطح فوقانی نمونه‌ها قبل از بارگذاری به صورت افقی تراز شده است. بارگذاری همه نمونه‌ها تا حد گسیختگی ادامه یافته و بار وارده از طریق بارسنج و لغزش هسته بتنی نسبت به رویه‌های فولادی توسط جابه‌جایی سنج‌های بالا و پایین هسته به سیستم ثبت و پردازش داده‌ها انتقال یافته است.

۴- برنامه آزمایشگاهی

نام‌گذاری پارامترهای هندسی نمونه‌ها بر روی شکل ۴ نشان داده شده و در جدول شماره ۱ مقادیر این پارامترها برای ۱۶ نمونه برنامه‌ریزی شده برای آزمایش فشارخارج آمده است. نام‌گذاری نمونه‌ها به صورت کلی xS-y می‌باشد که x ضخامت ورق برحسب میلیمتر بوده و حرف S حرف اول SCS می‌باشد. y شماره نمونه با ورق موردنظر می‌باشد. در نمونه‌های 6S-5 و 6S-6 ضخامت بتن به ۲۰۰ میلیمتر افزایش داده شده و دو قطر ۱۵/۸۸ و ۲۲/۲۳ میلیمتر برای پیچ میله لحاظ شده است. در نمونه‌های xS-1 و xS-2 با ضخامت بتن، h_c ، برابر ۱۰۰ میلیمتر به ترتیب از دو قطر پیچ میله ۱۵/۸۸ و ۲۲/۲۳ میلیمتر برای رویه‌های فولادی با ضخامت‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتر استفاده شده است. همچنین در نمونه‌های xS-3 و xS-4 نیز این قطرها برای ضخامت بتن ۲۰۰ میلیمتر با رویه‌های فولادی ۸ و ۱۰ میلیمتر استفاده شده‌اند.



شکل ۴- تجهیزات آزمایش فشارخارج

² LVDT

¹ Loadcell



ب- بتن ریزی نمونه‌ها



الف- آماده سازی نمونه‌ها قبل از بتن ریزی

شکل ۵- نحوه ساخت نمونه‌ها

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های ساخته شده

شماره	نام نمونه	h_c (mm)	رویه فولادی				پیچ میله	
			t (mm)	f_y (Mpa)	f_u (Mpa)	E_s (Gpa)	d (mm)	f_u (Mpa)
۱	6S-1	۱۰۰	۶	۲۸۹	۴۸۹/۳۹	۲۰۴/۹	۱۲/۷	۹۰۲/۸۵
۲	6S-2	۱۰۰	۶	۲۸۹	۴۸۹/۳۹	۲۰۴/۹	۱۵/۸۸	۹۰۲/۸۵
۳	6S-3	۱۰۰	۶	۲۸۹	۴۸۹/۳۹	۲۰۴/۹	۱۹/۰۵	۸۶۴/۸۷
۴	6S-4	۱۰۰	۶	۲۸۹	۴۸۹/۳۹	۲۰۴/۹	۲۲/۲۳	۸۶۴/۸۷
۵	6S-5	۲۰۰	۶	۲۸۹	۴۸۹/۳۹	۲۰۴/۹	۱۵/۸۸	۸۶۴/۸۷
۶	6S-6	۲۰۰	۶	۲۸۹	۴۸۹/۳۹	۲۰۴/۹	۲۲/۲۳	۸۶۴/۸۷
۷	8S-1	۱۰۰	۸	۴۱۷	۶۲۲/۲۷	۲۰۳/۲	۱۵/۸۸	۸۶۴/۸۷
۸	8S-2	۱۰۰	۸	۴۱۷	۶۲۲/۲۷	۲۰۳/۲	۲۲/۲۳	۸۶۴/۸۷
۹	8S-3	۲۰۰	۸	۴۱۷	۶۲۲/۲۷	۲۰۳/۲	۱۵/۸۸	۸۶۴/۸۷
۱۰	8S-4	۲۰۰	۸	۴۱۷	۶۲۲/۲۷	۲۰۳/۲	۲۲/۲۳	۸۶۴/۸۷
۱۱	10S-1	۱۰۰	۱۰	۴۰۳	۶۲۲/۲۷	۲۰۵/۹	۱۵/۸۸	۸۶۴/۸۷
۱۲	10S-2	۱۰۰	۱۰	۴۰۳	۶۲۲/۲۷	۲۰۵/۹	۲۲/۲۳	۸۶۴/۸۷
۱۳	10S-3	۲۰۰	۱۰	۴۰۳	۶۲۲/۲۷	۲۰۵/۹	۱۵/۸۸	۸۶۴/۸۷
۱۴	10S-4	۲۰۰	۱۰	۴۰۳	۶۲۲/۲۷	۲۰۵/۹	۲۲/۲۳	۸۶۴/۸۷
۱۵	12S-1	۱۰۰	۱۲	۳۰۶	۵۲۴/۰۶	۲۰۸/۷	۱۵/۸۸	۸۶۴/۸۷
۱۶	12S-2	۱۰۰	۱۲	۳۰۶	۵۲۴/۰۶	۲۰۸/۷	۲۲/۲۳	۸۶۴/۸۷

ابعاد رویه‌های فولادی: 250mm*300mm و ابعاد هسته بتنی: 250mm*250mm و $f_c=40\text{MPa}$; $E_c=29.4\text{GPa}$

۵- بررسی رفتار برشگیرهای پیچ‌میله تحت آزمایش فشارخارج

۵-۱- مدهای گسیختگی

یکی از مدهای گسیختگی نمونه‌های تحت آزمایش فشارخارج مطابق شکل ۶ مد گسیختگی بتن بدون تغییرشکل محسوس در اجزای فولادی می‌باشد که به دلیل ضعف مقاومت بتن نسبت به قطر زیاد و طول کم پیچ‌میله رخ داده است. به طوری که ترک‌ها از اطراف پیچ‌میله شروع به رشد نموده و به سطح فوقانی بتن رسیده‌اند. این مد گسیختگی

در نمونه‌های با ضخامت ۱۰۰ میلیمتر مشاهده شده است. در برخی از نمونه‌ها ترک بتن در راستای عمود بر پیچ‌میله بوده و در مواردی رشد ترک باعث تخریب بتن به صورت گوه‌ای شده است. در نمونه 6S-2 (شکل ۶-الف) با ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت رویه‌های فولادی ۶ میلیمتر به دلیل امکان کمانش رویه‌ها، یک ترک بزرگ عمود بر پیچ‌میله رشد نموده است، در صورتی که در نمونه 10S-2 (شکل ۶-ب) با همان ضخامت بتن و ضخامت رویه برابر ۱۰ میلیمتر، به دلیل افزایش سفتی رویه‌ها، رشد گوه‌ای ترک‌ها رخ داده است.



(ب) نمونه ۱۰-۲S



(الف) نمونه ۶-۲S

شکل ۶- مد گسیختگی لغزش بتن

بعد در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق این شکل، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی در نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰ میلیمتر به دلیل ایجاد تغییرشکل در اجزای فولادی افزایش داشته است.

۶- بررسی رفتار برشگیرهای پیچ‌میله تحت آزمایش فشارخارج

در این بخش رفتار بین‌لایه‌ای ساندویچ فولاد-بتن-فولاد بر روی نمونه‌های معرفی شده در برنامه آزمایشگاهی بررسی شده است. برای این منظور ابتدا نتایج حاصل از آزمایش‌های این تحقیق، با نتایج آزمایش‌های پژوهشگران پیشین بر روی نمونه‌های ساندویچ SCS با اتصال دوسرجوش مورد مقایسه قرار گرفته است. سپس تأثیر تغییر هر کدام از پارامترهای هندسی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جدول ۲ بیشینه بار ثبت شده از آزمایش فشارخارج و مدهای گسیختگی آن‌ها را نشان می‌دهد.

مد گسیختگی بعدی، ترکیب گسیختگی بتن و خمش پیچ‌میله می‌باشد (شکل ۷). این نوع گسیختگی در نمونه‌هایی اتفاق افتاده که ضخامت بتن ۲۰۰ میلیمتر بوده و به دلیل افزایش طول پیچ‌میله امکان تغییرشکل خمشی در پیچ‌میله وجود داشته است. در این حالت تغییر شکل پیچ‌میله باعث ترک خوردگی در بتن اطراف آن شده و رشد ترک به سطح بتن رسیده است.

در نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰ میلیمتر نظیر نمونه‌های 8S-3 و 10S-4 به دلیل افزایش ضخامت هسته بتنی مقاومت هسته به قدری افزایش یافته که قبل از ایجاد ترک در بتن، تغییرشکل‌های خمشی ماندگاری در پیچ‌میله ایجاد شده است. هرچند باز هم به دلیل گسیختگی گوه‌ای زود هنگام بتن، از ظرفیت نهایی پیچ‌میله استفاده نگردیده است. نمودارهای بار-لغزش مربوط به نمونه‌های با ضخامت ۱۰۰ میلیمتر و نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰ میلیمتر به صورت بار بدون



(ت) اثر تغییر پیچ میله روی بتن



(پ) تغییر شکل پیچ میله

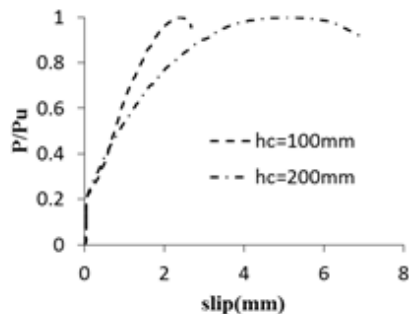


(ب) نمونه ۴S-۱۰



(الف) نمونه S-3۸

شکل ۷- مد گسیختگی لغزش بتن و خمش پیچ میله



شکل ۸- منحنی های بار-لغزش

جدول ۲- بیشینه بار ثبت شده از آزمایش فشارخارج و مدهای گسیختگی آنها

شماره	نام نمونه	$P_{exp.}(kN)$	مد گسیختگی
۱	6S-1	۷۸/۹۴	شکافت بتن
۲	6S-2	۹۷/۱۸	شکافت بتن
۳	6S-3	۱۰۳/۲۳	شکافت بتن
۴	6S-4	۱۱۶/۲۹	شکافت بتن
۵	6S-5	۱۴۴/۳۵	شکافت بتن و خمش پیچ میله
۶	6S-6	۱۶۴/۰۴	شکافت بتن و خمش پیچ میله
۷	8S-1	۱۱۲/۰۰	شکافت بتن
۸	8S-2	۱۸۲/۱۲	شکافت بتن
۹	8S-3	۱۵۱/۹۸	شکافت بتن و خمش پیچ میله
۱۰	8S-4	۲۰۹/۱۳	شکافت بتن و خمش پیچ میله
۱۱	10S-1	۱۲۳/۱۳	شکافت بتن
۱۲	10S-2	۱۹۰/۴۰	شکافت بتن
۱۳	10S-3	۱۶۳/۱۹	شکافت بتن و خمش پیچ میله
۱۴	10S-4	۲۳۷/۰۴	شکافت بتن و خمش پیچ میله
۱۵	12S-1	۱۳۲/۱۳	شکافت بتن
۱۶	12S-2	۲۱۹/۴۵	شکافت بتن

۶-۱- مقایسه با نتایج پیشینان

گردیده است. در نمونه‌های M.Xie و همکاران مدهای گسیختگی پارگی ورق و برش میله حاکم بوده و در تمامی نمونه‌ها از ظرفیت نهایی اجزای فولادی استفاده شده است. مطابق جدول ۳ مقاومت برشی متوسط نمونه‌های دوسرجوش تقریباً دو برابر نمونه‌های با برشگیر پیچ‌میله می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که استفاده از بتن مقاومت بالا یا بتن فوق توانمند در بهبود رفتار ساندویچ SCS با پیچ‌میله آئیر گذار باشد. ضمن این که در مطالعه حاضر کاهش قطر پیچ‌میله‌ها نیز باعث افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتر شده است.

۶-۲- تأثیر پارامترهای هندسی

منحنی‌های بار-لغزش برای نمونه‌های ساخته شده در دو دسته با ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت بتن ۲۰۰ میلیمتر طبقه‌بندی گردیده، و رفتار بار-لغزش و مدهای گسیختگی آن‌ها مقایسه شده‌اند. پارامترهای هندسی مورد مطالعه در مقاله حاضر شامل ضخامت رویه‌های فولادی (t_p)، قطر پیچ‌میله (d) و ضخامت بتن (h_c) می‌باشند که در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

جهت مقایسه نتایج از تحقیقات پیشینان که بر روی نمونه‌های ساندویچ SCS با اتصال دوسرجوش انجام گردیده، استفاده شده است. نمونه‌های دوسرجوش همانند نمونه‌های پیچ‌میله دارای اتصال دوسر به رویه‌های فولادی می‌باشند و از نظر رفتاری می‌توانند قابل مقایسه باشند. برای این منظور نتایج آزمایش‌های M.Xie و همکاران [۱۰] بر روی نمونه‌های دوسرجوش با نتایج آزمایش‌های انجام شده در مطالعه حاضر مورد مقایسه قرار گرفته است.

در جدول ۳ نمونه‌هایی که از نظر مشخصات هندسی شباهت بیشتری به نمونه‌های M.Xie و همکاران داشته‌اند، آورده شده است. تفاوت قابل ملاحظه در این نمونه‌ها، مقاومت بالای پیچ‌میله‌ها نسبت به برشگیرهای دوسرجوش می‌باشد که با مقدار ۸۶۵ مگاپاسکال تقریباً ۱/۵ برابر مقاومت نهایی برشگیرهای دوسرجوش می‌باشد. این اختلاف زیاد بهبودی در رفتار SCS با برشگیرهای پیچ‌میله ایجاد نموده، بلکه به دلیل ضعف مقاومت بتن منجر به گسیختگی ترد و جداشدگی بتن قبل از رسیدن پیچ‌میله‌ها به مقاومت نهایی

جدول ۳- مقایسه نتایج تست فشار خارج نمونه‌های SCS با اتصال‌دهنده پیچ‌میله و با اتصال‌دهنده دوسرجوش

SCS با اتصال میله دوسرجوش						SCS با اتصال‌دهنده پیچ‌میله					
نام نمونه	قطر میله (mm)	F_u (N/mm ²)	F_c (N/mm ²)	P_u (kN)	مد گسیختگی	نام نمونه	قطر پیچ‌میله (mm)	F_u (N/mm ²)	F_c (N/mm ²)	P_u (kN)	مد گسیختگی
6S	۲۵	۵۸۶	۴۰	۳۵۹/۳	پارگی ورق	6S-6	۲۲/۲۳	۸۶۵	۴۰	۱۶۴/۰۴	شکافت بتن و خمش پیچ‌میله
8S	۲۵	۵۸۶	۴۰	۳۷۶/۳	پارگی ورق	8S-4	۲۲/۲۳	۸۶۵	۴۰	۲۰۹/۱۳	شکافت بتن و خمش پیچ‌میله
10S	۲۵	۵۸۶	۴۰	۴۳۶/۹	پارگی ورق	10S-4	۲۲/۲۳	۸۶۵	۴۰	۲۳۷/۰۴	شکافت بتن و خمش پیچ‌میله
12S	۲۵	۵۸۶	۴۰	۴۵۰/۱	برش میله	12S-2	۲۲/۲۳	۸۶۵	۴۰	۲۱۹/۴۵	شکافت بتن

ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد. مقاومت نمونه‌ها با افزایش ضخامت ورق از ۹۷/۱۸ تا ۱۳۲/۱ کیلونیوتن (حدود ۳۶ درصد) افزایش یافته است (شکل‌های ۹-الف و ۹-ب). همچنین در

۶-۲-۱- تأثیر ضخامت رویه‌های فولادی، t_p

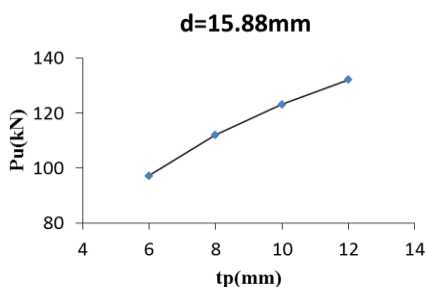
در نمونه‌های 12S-2، 10S-2، 8S-2، 6S-4 ضخامت رویه‌های فولادی به ترتیب ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ و قطر پیچ ۱۵/۸۸ میلیمتر و

۶-۲-۲- تأثیر قطر پیچ میله، d

در نمونه‌های ۶S-۱S، ۶S-۲S، ۶S-۳S با ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت رویه‌های فولادی ۶ میلیمتر، قطر پیچ میله‌ها به ترتیب با مقادیر ۱۲/۷۰، ۱۵/۸۸، ۱۹/۰۵ و ۲۲/۲۳ میلیمتر تغییر نموده است. مقاومت نمونه‌ها با افزایش قطر پیچ میله از ۷۸/۹۴ تا ۱۱۶/۳ کیلونیوتن (حدود ۴۷ درصد) افزایش یافته است (شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب).

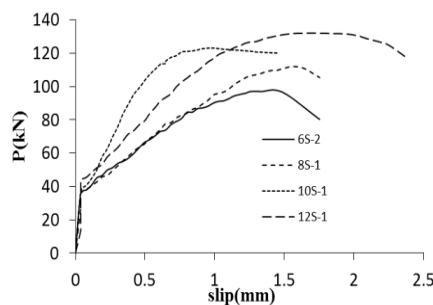
شکل ۱۱-ب نشان می‌دهد که افزایش قطر پیچ میله تأثیر مستقیم در افزایش مقاومت نمونه و تأثیر اندکی در افزایش جذب انرژی داشته است. نتایج بیان می‌کند که افزایش قطر پیچ میله باعث افزایش نسبت مقاومت پیچ میله به مقاومت هسته بتنی شده و بنابراین قبل از این که پیچ میله‌ها به مقاومت نهایی برسند، بتن به صورت ترد گسیخته می‌شود. انتظار می‌رود که استفاده از دو پیچ میله یا بیشتر و با قطرهای کمتر بتواند در افزایش محصورشدگی تنش مؤثر بوده و کنترل بهتری بر ترک خوردگی بتن ایجاد شود تا از ظرفیت نهایی پیچ میله‌های فولادی استفاده گردد.

نمونه‌های 4-6S-2، 8S-2، 10S-2، 12S-2 ضخامت رویه‌های فولادی به ترتیب ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ و قطر پیچ ۲۲/۲۳ میلیمتر و ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد که مقاومت نمونه‌ها از ۱۱۶/۳ به ۲۱۹/۵ کیلونیوتن (حدود ۸۹ درصد) افزایش یافته است (شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب). با توجه نتایج بدست آمده ملاحظه می‌گردد که با افزایش ضخامت رویه، مقاومت برشی قطعه نیز اضافه شده است. همچنین با افزایش ضخامت رویه مقاومت نهایی افزایش یافته، ولی شیب روند افزایشی مطابق شکل ۹-ب به تدریج کاهش یافته است. این مساله می‌تواند بیانگر این مورد باشد که با افزایش سفتی رویه‌های فولادی به تدریج تأثیر افزایش ضخامت بر مقاومت نهایی کاهش و در نهایت شیب نمودار به سمت صفر میل می‌کند. مطابق شکل‌های ۹-الف و ۱۰-الف با افزایش ضخامت رویه‌ها بدون تغییر در ضخامت بتن یا طول پیچ میله فقط سطح تراز نمودار بالا رفته، اما تغییر شکل نقطه گسیختگی تغییر محسوسی نکرده است.

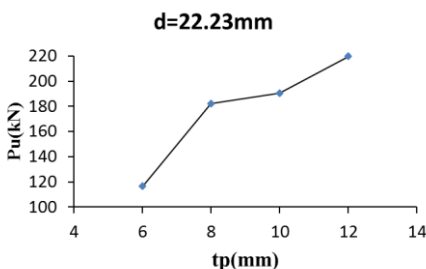


(ب) منحنی مقاومت نمونه-ضخامت رویه فولادی

شکل ۹- تأثیر ضخامت رویه‌های فولادی برای پیچ میله ۱۵/۸۸ میلیمتر (ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر)

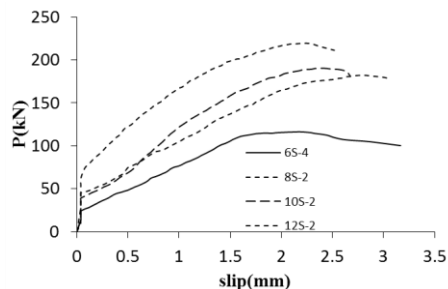


(الف) منحنی‌های بار-لغزش

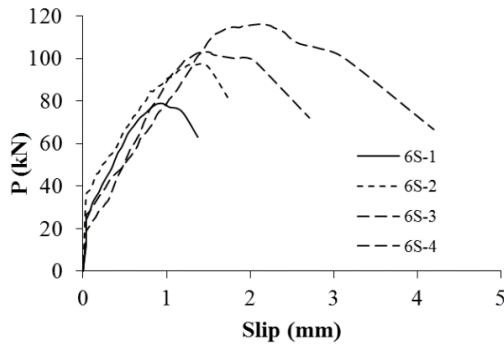


(ب) منحنی مقاومت نمونه-ضخامت رویه فولادی

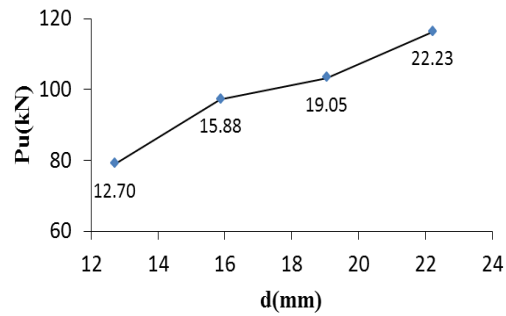
شکل ۱۰- تأثیر ضخامت رویه‌های فولادی برای پیچ میله ۲۲/۲۳ میلیمتر (ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر)



(الف) منحنی‌های بار-لغزش



(ب) منحنی مقاومت نمونه-قطر پیچ میله



(الف) منحنی های بار-لغزش

شکل ۱۱- تاثیر قطر پیچ میله (ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر)

با افزایش ضخامت بتن بدون تغییر در سایر پارامترها تغییر شکل برشگیرها به صورت خمشی افزایش یافته و در نتیجه ضمن این که مقاومت برشی نهایی نمونه به مقاومت نهایی پیچ میله نزدیک تر خواهد شد، شکل پذیری نیز به دلیل افزایش لغزش بین لایه های افزایش خواهد یافت.

۷- مدل رفتار بار-لغزش

در بخش حاضر براساس رگرسیون منحنی های به دست آمده از آزمایش های انجام گرفته با متغیرهای ضخامت هسته بتنی، ضخامت رویه های فولادی و مشخصات هندسی برشگیرهای پیچ میله بدون تغییر در مشخصات مکانیکی مصالح، یک مدل رفتاری ارائه می گردد.

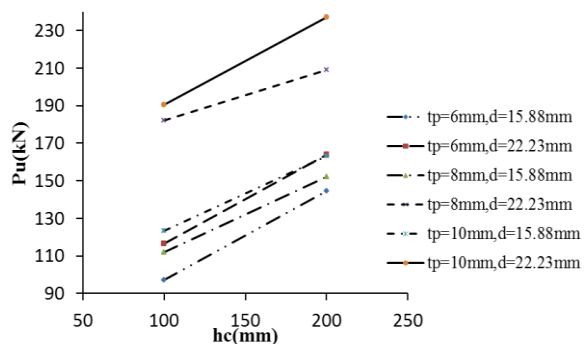
۷-۱- مدل پیشنهادی رفتار بار-لغزش نمونه های

آزمایش با برشگیرهای پیچ میله

منحنی های بار بدون بعد آزمایشگاهی (P/P_u) و لغزش (δ) نمونه ها با برشگیرهای پیچ میله مدفون در هسته بتنی با متغیرهای ضخامت رویه های فولادی، قطر پیچ میله و ضخامت هسته بتنی ۱۰۰ میلیمتر در شکل ۱۳ آمده است که رفتار بار-لغزش نمونه هایی که شکست بتن در آن ها اتفاق افتاده است، را نشان می دهند. در حالتی که ضخامت هسته بتنی ۲۰۰ میلیمتر بود، منحنی های رفتار بار-لغزش آن ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این منحنی ها مربوط به حالتی است که تغییر شکل پیچ میله ها همراه با شکست بتن می باشد. بنابراین دو رابطه زیر برای این حالت ها به دست آمده است:

۶-۲-۳- تأثیر ضخامت بتن، h_c

در شکل ۱۲ نمونه های با ضخامت بتن یا طول پیچ میله ۱۰۰ میلیمتر و ۲۰۰ میلیمتر مورد مقایسه قرار گرفته اند. افزایش ضخامت هسته بتنی از ۱۰۰ میلیمتر در نمونه 6S-2 به ضخامت ۲۰۰ میلیمتر در نمونه 6S-5 باعث افزایش مقاومت برشی از ۹۷/۱۸ کیلونیوتن به ۱۴۴/۳۵ کیلونیوتن (حدود ۳۳ درصد) گردیده است.



شکل ۱۲- نمودار مقاومت نمونه-ضخامت بتن (۱۰۰ میلیمتر و

۲۰۰ میلیمتر)

همچنین در سایر نمونه هایی که ضخامت بتن افزایش یافته است، افزایش مقاومت مشاهده می شود. در نمونه هایی که ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر است شکست زود هنگام بتن رخ داده و پیچ میله ها بدون تغییر شکل باقی می مانند. ولی در نمونه هایی که ضخامت بتن به ۲۰۰ میلیمتر افزایش یافته است، علاوه بر تخریب بتن، پیچ میله ها نیز دچار تغییر شکل شده اند. علت این موضوع افزایش طول پیچ میله است که بار بیشتری به آن منتقل شده و منجر به خم شدن پیچ میله و سپس تخریب بتن گردیده است.

M.Xie و همکاران [۱۰] تعداد ۲۴ نمونه جهت تست فشارخارج از نوع ساندویچ SCS دوسرجوش را ساخته و نتایج را بدست آورده‌اند و به صورت روابط زیر خلاصه کرده‌اند:

$$F_u = \begin{cases} 210(t/10)^{0.45} kN & t \leq 10mm, d = 25mm \\ 210kN & t > 10mm, d = 25mm \end{cases} \quad (5)$$

۸-۲- رابطه پیشنهادی مقاومت برشی نمونه‌های با

برشگیر پیچ میله

باتوجه به این که مشخصات مکانیکی مصالح ثابت در نظر گرفته شده است، پارامترهای اصلی شامل ضخامت رویه‌های فولادی t_p ، ضخامت بتن، h_c ، قطر پیچ میله، d می‌باشند. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار آماری MINITAB، تحلیل رگرسیون بر روی نتایج ۱۶ نمونه آزمایش فشارخارج انجام شده است. مقاومت برشی برشگیر پیچ میله (P_u/A_s) به عنوان متغیر وابسته بوده و پس از انجام تحلیل رگرسیون بر روی نتایج، متغیرهای t_p ، h_c ، d به عنوان متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر مقاومت برشی برشگیرهای پیچ میله انتخاب شده‌اند. بنابراین برای نمونه‌های شکست خورده توسط مد گسیختگی بتن، مقاومت برشی به عنوان تابعی از پارامترهای نامبرده به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{P_u}{A_s} = ah_c^b t_p^e d^f \quad (6)$$

در اینجا a ، b ، e و f ضرایبی می‌باشند که از تحلیل رگرسیون تعیین گردیده‌اند. برای این منظور از انتقال لگاریتمی استفاده شده و یک رابطه خطی به دست آمده است. سپس تحلیل رگرسیون خطی برای به دست آوردن ضرایب بر روی ۱۶ نمونه آزمایش گردیده است. ضرایب به دست آمده بر اساس ریشه مربعات میانگین مجذور خطاها برابر ده درصد محاسبه و مقاومت برشی SCS با پیچ میله به صورت زیر به دست آمده است:

$$\frac{P_u}{A_s} = 464.5153 h_c^{0.418} t_p^{0.62} d^{-1.055} \quad (7)$$

$$\frac{P}{P_u} = \frac{7.1\delta}{1+0.06\delta} - 5.85\delta \quad (1-الف)$$

$$\frac{P}{P_u} = \frac{1.5\delta}{1+1.2\delta} - 0.02\delta \quad (1-ب)$$

رابطه (۱-الف) برای حالتی است که ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر است و رابطه (۱-ب) برای حالتی است که ضخامت بتن ۲۰۰ میلیمتر می‌باشد.

۸- مقاومت برشی نمونه‌های آزمایش با اتصال دهنده

پیچ میله

در این بخش، قبل از پیشنهاد رابطه مقاومت برشی نمونه‌های با اتصال دهنده‌های پیچ میله، لازم است روابطی که توسط پژوهشگران برای اتصال دهنده‌های دوسرجوش ارائه شده، مرور گردد.

۸-۱- روابط طراحی موجود برای نمونه‌های با

برشگیرهای دوسرجوش

اتصال دهنده پیچ میله مشابه اتصال دهنده دوسرجوش در ساندویچ SCS می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه Southampton اثر ضخامت رویه‌های فولادی و ضخامت بتن را بررسی کرده [۱۱] و روابط زیر را ارائه داده‌اند:

$$F_{us} = 0.8k_L f_{uB} \pi d^2 / 4 \quad (2-الف)$$

$$F_{uc} = 0.29d^2 (f_{ck} E_c)^{1/2} \quad (2-ب)$$

که f_{uB} مقاومت کششی نهایی اتصال دهنده میله ای، d قطر میله، f_{ck} مقاومت نمونه استوانه‌ای بتن، E_c مدول الاستیسیته بتن و k_L ضریب کاهش می‌باشد که با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_L = (0.024t + 0.76) \frac{f_{yp}}{355} \quad (3)$$

f_{yp} تنش جاری شدن ورق ($f_{yp} \leq 355 N/mm^2$) و t ضخامت رویه فولادی ($t \leq 10mm$) می‌باشد.

در آیین‌نامه BS5400 در بخش ۵ که در خصوص اتصال دهنده‌های برشی متداول می‌باشد، مقاومت برشی استاتیکی اسمی برای برشگیرهای گلمیخی با قطر ۲۵ میلیمتر و ارتفاع کمتر از ۱۰۰ میلیمتر از رابطه زیر استفاده می‌شود:

۹- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر رفتار بار-لغزش و مقاومت برشی اتصال دهنده‌های پیچ میله با مقاومت بالا در کامپوزیت‌های ساندویچی SCS بر روی ۱۶ نمونه در آزمایش فشارخارج بررسی گردیده و پس از تجزیه و تحلیل انجام شده بر روی داده‌های آزمایش نتایج زیر به دست آمده است:

(۱) مودهای شکست شامل گسیختگی بتن و تغییر شکل ماندگار پیچ میله می‌باشد. در هیچ کدام از نمونه‌ها گسیختگی از ناحیه اتصال پیچ میله به رویه‌های فولادی مشاهده نگردید.

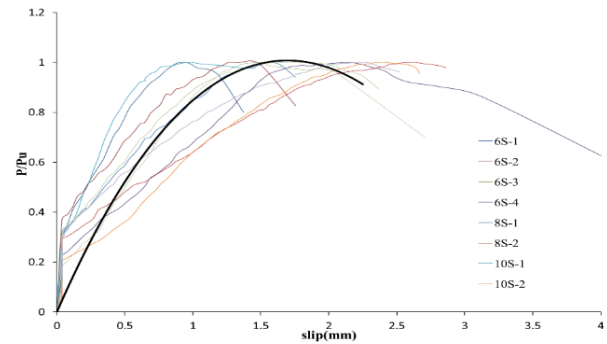
(۲) با افزایش ضخامت رویه فولادی، مقاومت نهایی افزایش یافته ولی شیب نمودار به تدریج کاهش می‌یابد. این مسأله می‌تواند بیانگر این مورد باشد که با افزایش سفتی رویه‌های فولادی به تدریج تأثیر افزایش ضخامت بر مقاومت نهایی کاهش و در نهایت شیب نمودار به سمت صفر میل می‌کند.

(۳) افزایش قطر پیچ میله تأثیر مستقیم در افزایش مقاومت نمونه و جذب انرژی دارد. افزایش قطر پیچ میله باعث می‌گردد که قبل از این که پیچ‌ها به مقاومت نهایی برسند، بتن به صورت ترد گسیخته شود. انتظار می‌رود که استفاده از دو پیچ میله یا بیشتر با قطرهای کمتر بتواند ترک خوردگی بتن را بهتر کنترل نموده و در استفاده از ظرفیت نهایی پیچ میله‌ها تأثیر گذار باشد.

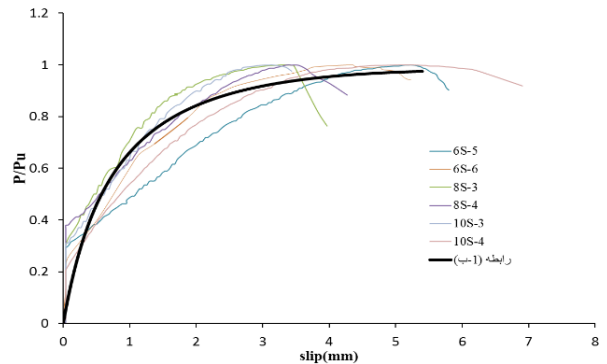
(۴) با افزایش ضخامت بتن بدون تغییر در سایر پارامترها تغییر شکل برشگیرها به صورت خمشی افزایش یافته و در نتیجه ضمن این که مقاومت برشی نهایی نمونه به مقاومت نهایی پیچ میله نزدیک‌تر خواهد شد، شکل پذیری نیز به دلیل افزایش لغزش بین لایه‌ای افزایش خواهد یافت.

(۵) در مطالعه حاضر منحنی‌های بار-لغزش نمونه‌های با اتصال دهنده‌های پیچ میله با مقاومت بالا در حالتی که ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر باشد، به صورت $(P/P_u) = [1.5\delta / (1 + 1.2\delta)] - 0.02\delta$ و در حالتی که ضخامت بتن ۲۰۰ میلیمتر باشد، $(P/P_u) = [7.1\delta / (1 + 0.06\delta)] - 5.85\delta$ استخراج شده است. با افزایش ضخامت بتن نمودار نیرو-تغییر مکان شکل پذیری بیشتری خواهد داشت.

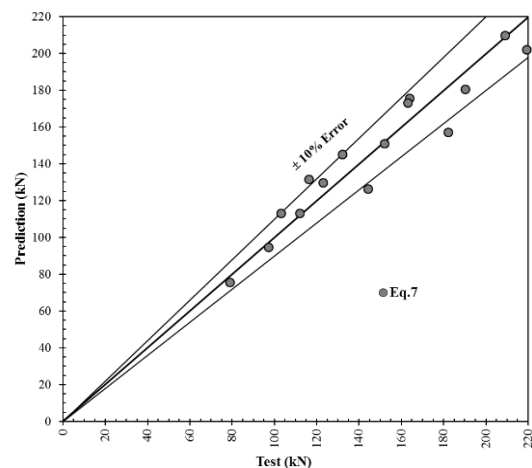
مطابق شکل ۱۵ تعداد ۳ نمونه از محدوده ده درصد خطا خارج بوده و دارای خطای ۱۲/۹۸ و ۱۲/۵۸ و ۱۳/۷۷ درصد به ترتیب مربوط به نمونه‌های 6S-4 و 6S-5 و 8S-2 می‌باشند.



شکل ۱۳- مدل رفتار بار-لغزش نمونه‌های با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر



شکل ۱۴- مدل رفتار بار-لغزش نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر



شکل ۱۵- مقایسه بین نتایج آزمایش و نتایج پیش‌بینی بوسیله مدل پیشنهادی (رابطه ۷)

- [6]. Foundoukos, N., Behaviour and Design of Steel-Concrete-Steel Sandwich Construction. 2005: University of London.
- [7]. Sohel, K. and J.R. Liew, Steel-Concrete-Steel sandwich slabs with lightweight core—Static performance. Engineering Structures, 2011. 33(3): p. 981-992.
- [8]. Yan, J.-B., J.R. Liew, and M.-H. Zhang, Shear-tension interaction strength of J-hook connectors in steel-concrete-steel sandwich structure. ISSN 1816-112X, 2015. 115(1): p. 73.
- [9]. Sohel, K. and J.R. Liew, Behavior of steel-concrete-steel sandwich slabs subject to impact load. Journal of Constructional Steel Research, 2014. 100: p. 163-175.
- [10]. Xie, M., N. Foundoukos, and J. Chapman, Experimental and numerical investigation on the shear behaviour of friction-welded bar-plate connections embedded in concrete. Journal of Constructional Steel Research, 2005. 61(5): p. 625-649.
- [11]. Bowerman, H., M. Gough, and C. King, Bi-Steel design and construction guide. British Steel Ltd, Scunthorpe (London), 1999.

(۶) باتوجه به تعداد محدود نمونه‌های آزمایشگاهی در مطالعه حاضر، برای مقاومت برشی نمونه‌های با پیچ‌میله رابطه (۷) برازندگی مناسبی داشته است.

$$(P_u/A_s) = 464.5153 h_c^{0.418} t_p^{0.62} d^{-1.055}$$

بدیهی است در صورت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بیشتر می‌توان به رابطه دقیق‌تری دست پیدا کرد که می‌تواند زمینه مطالعات بعدی باشد.

(۷) باتوجه به رفتار ترد گسیختگی بتن و رشد سریع ترک انتظار می‌رود که استفاده از دو یا تعداد بیشتری اتصال‌دهنده پیچ‌میله در آزمایش فشارخارج برای مصالح SCS به دلیل افزایش محصورشدگی، تقویت عرضی بهتری برای جلوگیری از مود خرابی جداشدگی بتن فراهم نماید.

(۸) مقاومت برشی متوسط نمونه‌های دوسرجوش تقریباً دو برابر نمونه‌های با برشگیر پیچ‌میله با مقاومت بالا می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که استفاده از بتن مقاومت بالا یا بتن فوق توانمند در بهبود رفتار ساندویچ SCS با پیچ‌میله با مقاومت بالا تأثیرگذار باشد.

۱۰- مراجع

- [1]. Anandavalli, N., et al., Static Response of Steel-Concrete-Steel Sandwich Beam with Bi-Directionally Inclined Connectors. American Journal of Civil Engineering and Architecture, 2013. 1(1): p. 15-20.
- [2]. Solomon, S., D. Smith, and A. Cusens, Flexural tests of steel-concrete-steel sandwiches. Magazine of Concrete Research, 1976. 28(94): p. 13-20.
- [3]. Tomlinson, M., et al. Shell composite construction for shallow draft immersed tube tunnels. in Immersed Tunnel Techniques: Proceedings of the Conference. 1989. Thomas Telford.
- [4]. Mohamedien, A. and A. Omer, Finite Elements Modeling and Analysis of Double Skin Composite Plates. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: p. 2278-1684.
- [5]. Bowerman, H., U.D.S. Park, and J.C. Chapman, BI-STEEL™ STEEL-CONCRETE-STEEL SANDWICH CONSTRUCTION. Composite construction in steel and concrete IV, 2002. 5: p. 656-667.

Investigation on the interlayer shear behavior on steel-concrete-steel sandwich structure with high strength stud bolt connectors

Mohammad Golmohammadi

Ph.D. Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering,, Ferdowsi University of Mashhad

Mansour Ghalehnovi *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract:

Steel-concrete-steel sandwich panels are composed of two thin steel face plates and a thick concrete layer as core. To provide external steel faces connection to concrete layer is used types of shear connectors. This paper is focused on the interlayer shear behavior of the SCS sandwiches with high strength stud bolt shear connectors. In order to investigate the effect of the geometric parameters on the shear behavior, push-out test under progressive loading is conducted. Variable Geometric parameters are included in thickness of the concrete core, steel plates thickness and diameter of the stud bolt. For this purpose, experimental samples prepared and investigated. According to achieved results, the assessment of the ductility, failure modes, and ultimate shear strength is performed. Moreover, two relations are proposed for shear strength and load-slip behavior of stud bolt shear connectors. These formulas are compared with those of the earlier researches on the Bi-steel shear connectors.

Keywords: Steel-concrete-steel sandwich panels, shear connector, high strength stud bolt, push-out test, load-slip behavior.

* Corresponding Author: ghalehnovi@um.ac.ir