باسمه تعالی

شماره: JCR-۱۶۱-۰۱۱۴۰

تاریخ: ۹۶/۰۲/۲۵

پیوست:

دو فصلنامهٔ علمی - پژوهشی
تحقیقات بتن

نویسندگان محترم:
منصور قلعه نوی
محمد گل محمدی

با عرض سلام و احترام؛

به به استحضار می‌رساند مقاله شما با عنوان: « **بررسی رفتار برشی بین‌لایه‌ای سازه ساندویچی فولاد-بتن-فولاد با اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله با مقاومت‌بالا** » بر مبنای نظرات داوران پذیرفته شده و در شماره‌های بعدی مجله علمی و پژوهشی تحقیقات بتن چاپ خواهد شد.

دکتر علی صدرممتازی
سردبیر مجله علمی- پژوهشی
تحقیقات بتن

نشانی:
رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده فنی، صندوق پستی ۳۷۵۶

تلفن و فاکس:
۰۱۳۱-۶۶۹۰۴۶۲
پست الکترونیکی:
jcr@guilan.ac.ir
jcrguilan@gmail.com
وبسایت:
http://research.guilan.ac.ir/jcr

بررسی رفتار برشی بین‌لایه‌ای سازه ساندویچی فولاد-بتن-فولاد با اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله مقاومت‌بالا

محمد گل محمدی

دانشجوی دکترای مهندسی عمران-سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

منصور قلعه نوی[1]*

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 به نام هسته از جنس بتن، تشکیل شده است. اتصال رویه‌های خارجی به هسته بتنی توسط اتصال‌دهنده‌های برشی تامین می‌گردد. پیچ‌میله مقاومت‌بالا یکی از انواع اتصال‌دهنده‌های برشی می‌باشد که رفتار برشی بین‌لایه‌ای آنها در مقاله حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی تأثیر تغییر مشخصات هندسی بر رفتار برشی سازه‌های ساندویچی فولاد-بتن-فولاد با اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله مقاومت‌بالا، 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 اتصال‌دهنده‌های برشی پیچ‌میله پیشنهاد گردیده است.

واژه های کلیدی:

پانل ساندویچی فولاد-بتن-فولاد، اتصال‌دهنده برشی، پیچ‌میله مقاومت بالا، آزمایش فشارخارج، رفتار بار-لغزش، مقاومت برشی برشگیر

[1]* نویسنده اصلی : ghalehnovi@um.ac.ir

۱-مقدمه

پانل‌های ساندویچی فولاد-بتن-فولاد[1] (SCS) یکی از ساختارهای ساندویچی می‌باشند که 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 به نام هسته از جنس بتن، تشکیل شده‌اند. در سالهای اخیر پانل‌های ساندویچی به عنوان یک سازه کارآمد در صنعت ساخت‌وساز مورد توجه قرارگرفته‌اند [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 دو رویه نسبتا نازک فولادی با استفاده از چسب اپوکسی به یک هسته بتنی متصل شده بودند [۲]. Tomlinson و همکاران اتصال‌دهنده‌های برشی گلمیخی را با هدف کاربرد در سازه های بندرگاه‌ها و اسکله‌ها جایگزین چسب اپوکسی نمودند که مورد توجه محققین قرار گرفت و به ساندویچ فولاد-بتن-فولاد دوپوسته[2] معروف گردید. در این سیستم برشگیرهای گلمیخی از یک طرف به پوسته جوش شده و سپس با بتن‌ریزی و مدفون‌شدن سر دیگر برشگیرها در بتن، اتصال دوپوسته تامین می‌گردد [۳] (شکل ۱-الف). یکی از ضعف‌های برشگیرهای گلمیخی عملکرد نسبتا ضعیف آنها در نیروهای برشی زیاد و امکان جداشدگی کششی تحت بارهای ضربه‌ای است و به دلیل مقاومت پایین بیرون‌کشیدگی[3] آنها، در بتن ترک ایجاد می‌شود. همچنین، برای هسته بتنی با ضخامت کم بخصوص در بدنه کشتی، استفاده از گلمیخ ها که منجر به مقاومت برشی کم هسته می‌شود، مناسب نیست [۴].

نوع دیگر سازه مرکب SCS، استفاده از اتصال‌دهنده‌های دوسرجوش[4] است [۵] (شکل ۱-ب). در این نوع سازه مرکب، رویه‌های خارجی بوسیله اتصال‌دهنده‌های برشی میله‌ای با جوش اصطکاکی به یکدیگر متصل شده و بدینوسیله 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 اتصال‌دهنده‌های قلابی شکل (J شکل)[5] استفاده شده است (شکل ۱-پ). این اتصال‌دهنده‌های J شکل بصورت جفت در یکدیگر قفل شده و به دورویه فولادی جوش شده‌اند تا نیروهای برشی بین‌لایه‌ای را انتقال داده، در مقابل جداشدگی کششی مقاومت نموده و از کمانش موضعی رویه‌های فولادی جلوگیری نمایند [۸]. این سازه مرکب، عملکرد خوبی در مقابل بارهای استاتیکی، ضربه و خستگی نشان می‌دهد [۹]. علاوه‌براین، سازه ساندویچی با اتصال‌دهنده‌های قلابی J شکل می‌تواند در دال‌های نازک با حداقل ضخامت ۵۰ میلیمتر نیز استفاده شود که در مقایسه با سازه‌ساندویچی با اتصال دوسرجوش که نیاز به ضخامت حداقل ۲۰۰ میلیمتر (به علت مشکلات جوشکاری) دارد، دارای کاربرد بیشتری است.

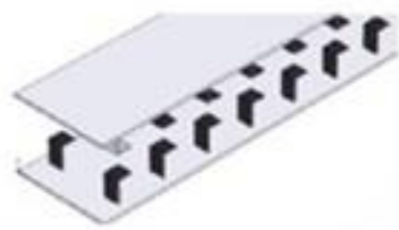
علاوه بر موارد ذکرشده در بالا، اتصال‌دهنده‌های برشی دیگری نیز پیشنهاد شده است (شکل ۱-ت و ۱-ث و ۱-ج) که کاربرد کمتری داشته‌اند.

[1] Steel-Concrete-Steel
[2] Double Skin
[3] Pull-out test
[4] Bi-Steel
[5] J-hook connectors

(الف)اتصال‌دهنده‌های گلمیخی

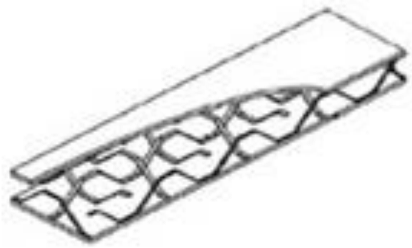
(ب)اتصال‌دهنده دوسرجوش

(پ)اتصال‌دهنده J شکل



(ت)اتصال‌دهنده گونیا

(ث)اتصال‌دهنده ناودانی



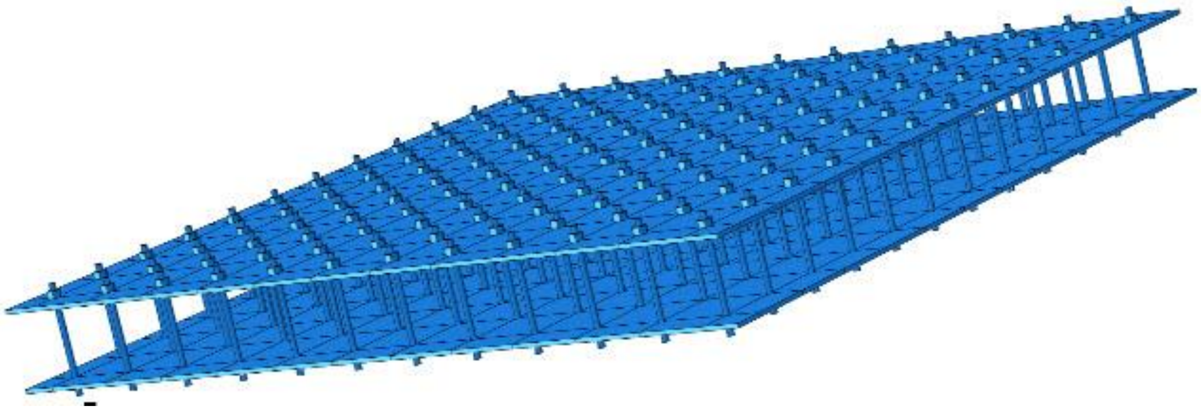
(ج)اتصال‌دهنده نواری موجدار

شکل۱- سازه ساندویچی مرکب با اتصال‌دهنده‌های مختلف [۹]

یکی از اتصال‌دهنده‌های برشی که در تحقیقات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است، اتصال‌دهنده‌های برشی پیچ‌میله[1] مقاومت‌بالا می‌باشند(شکل۲). این نوع اتصال‌دهنده‌ها 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 اینرو در تحقیق حاضر به بررسی رفتار این نوع اتصال‌دهنده‌های برشی در سازه SCS پرداخته شده است. در شکل ۳ دال ساندویچی SCS و برشگیرهای پیچ‌میله 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 قرارگیرد، رفتار برشی بین‌لایه‌ای می‌باشد. برای این منظور در مطالعه حاضر آزمایش فشارخارج[2] بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی SCS با هسته بتنی معمولی و اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله مقاومت بالا، انجام شده است. به‌طورکلی پارامترهای مهم که بر مقاومت برشی بین‌لایه‌ای ساندویچ SCS با اتصال پیچ‌میله موثرند مشخصات مکانیکی مصالح شامل فولاد و بتن و پیچ‌میله و مشخصات هندسی سیستم می‌باشند. در مطالعه حاضر به بررسی تاثیر مشخصات هندسی شامل قطر پیچ‌میله، ضخامت بتن و ضخامت رویه‌های فولادی بر رفتار برشی بین‌لایه‌ای ساندویچ SCS پرداخته شده است.

شکل ۲ - اتصال‌دهنده پیچ‌میله

[1] Studbolt
[2] Push-out test



شکل ۳- مدل دال SCS با اتصال‌دهنده پیچ‌میله

۲-مشخصات مصالح

در تمامی نمونه‌ها از بتن معمولی با مقاومت فشاری استوانه ای 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[1] به‌دست‌آمده که در جدول ۱ مشخصات نمونه‌ها شامل مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی آمده است. پیچ‌میله ها از نوع فولاد A193 B7 ASTM با مقاومت تسلیم اسمی ۷۲۵ مگاپاسکال و مقاومت نهایی اسمی ۸۶۰ مگاپاسکال می‌باشند که مشخصات دقیق‌تر آنها براساس آزمایش کشش مستقیم نمونه‌های کششی در جدول ۱ آمده است. مدول الاستیسیته فولاد مصرفی شامل رویه‌ها و پیچ‌میله‌ها تقریبا E_s=200 GPa می‌باشد.

۳-تجهیزات آزمایش

مقاومت برشی اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله در SCS را می‌توان با استفاده از آزمایش فشارخارج به‌دست‌آورد. این آزمایش اولین‌بار جهت بررسی رفتار برشی ساندویچ‌های SCS با برشگیرهای دوسرجوش استفاده گردیده است [۱۰] . تجهیزات آزمایش فشارخارج در مطالعه حاضر مطابق شکل۴ شامل جک هیدرولیک، بارسنج[2] به ظرفیت ۵۰۰ کیلونیوتن (با دقت ۰/۰۱ کیلونیوتن) و دو عدد جابجایی‌سنج[3] 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 بصورت گسترده منتقل شود. سطح فوقانی نمونه‌ها قبل از بارگذاری به صورت افقی تراز شده است.

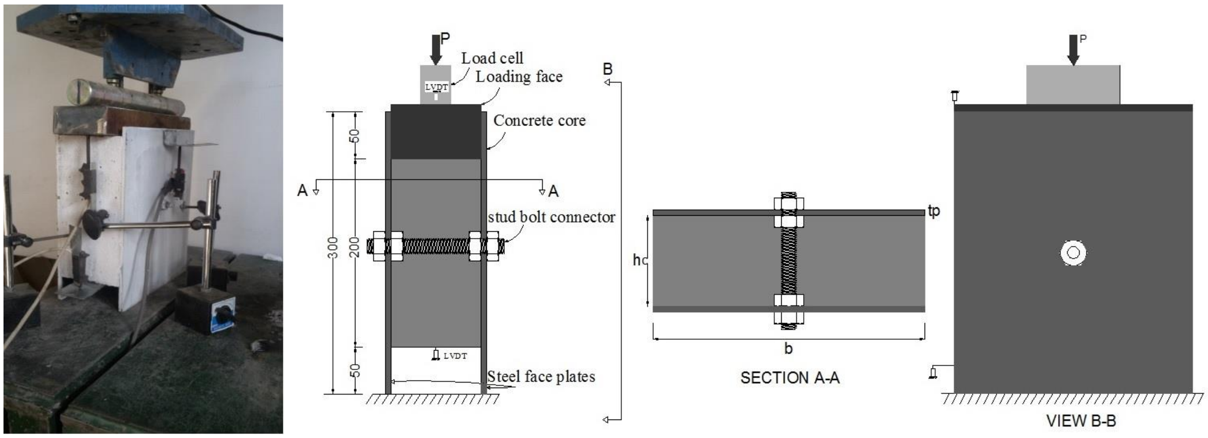
بارگذاری همه نمونه‌ها تا حد گسیختگی ادامه یافته و بار وارده از طریق بارسنج و لغزش هسته بتنی نسبت به رویه‌های فولادی توسط جابجایی‌سنج‌های بالا و پایین هسته به سیستم ثبت و پردازش داده‌ها انتقال یافته است.

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 می باشد 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 ۱۵/۸۸و ۲۲/۲۳ میلیمتر برای پیچ‌میله لحاظ شده است. در نمونه‌های xS-1 و xS-2 با ضخامت بتن، h_c ، برابر۱۰۰ میلیمتر

[1] Dog-bone specimens
[2] Loadcell
[3] LVDT

به‌ترتیب از دو قطر پیچ‌میله 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.



شکل۴- تجهیزات آزمایش فشارخارج

الف-آماده سازی نمونه ها قبل از بتن ریزی

ب-بتن ریزی نمونه ها

شکل۵- نحوه ساخت نمونه‌ها

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 می‌باشدکه به‌دلیل ضعف مقاومت بتن نسبت به قطر زیاد وطول کم پیچ‌میله رخ داده‌است. به‌طوری‌که 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 بصورت گوه‌ای شده‌است.

جدول۱- مشخصات نمونه‌های ساخته شده

شماره	نام نمونه	h_c (mm)	رویه فولادی				پیچ‌میله	
			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=40MPa;E_c=29.4GPa

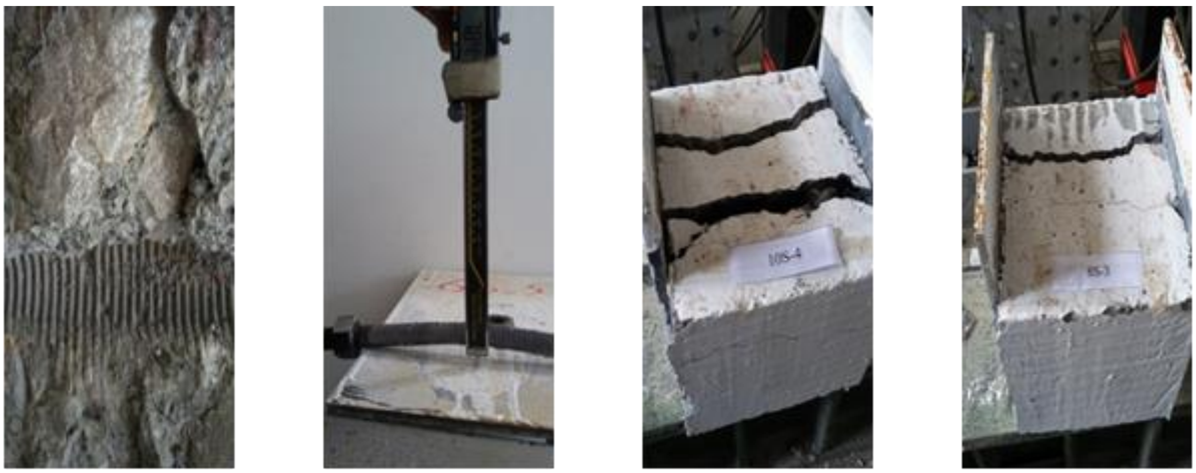
در نمونه 6S-2 (شکل ۶-الف) با ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت رویه‌های فولادی ۶ میلیمتر به دلیل امکان کمانش رویه‌ها، یک ترک بزرگ عمود بر پیچ‌میله رشد نموده‌است، در صورتی‌که در نمونه 10S-2 (شکل ۶-ب) با همان ضخامت بتن و ضخامت رویه برابر ۱۰ میلیمتر، به دلیل افزایش صلبیت رویه‌ها، رشد گوه‌ای ترکها رخ داده‌است.

(الف) نمونه ۶-۲S

(ب)نمونه ۱۰-۲S

شکل۶- مد گسیختگی لغزش بتن

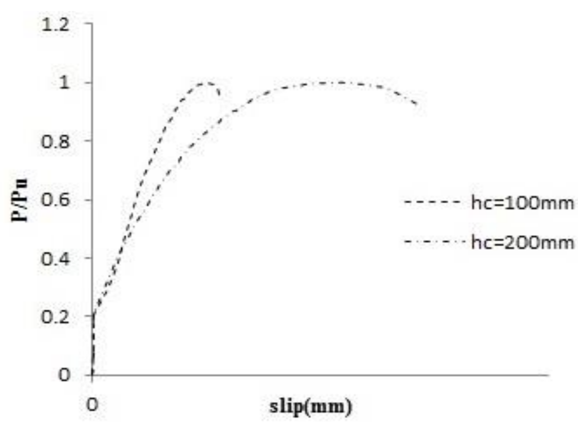
مد گسیختگی بعدی، ترکیب گسیختگی بتن و خمش پیچ‌میله می‌باشد (شکل۷). این نوع گسیختگی در نمونه‌هایی اتفاق افتاده که ضخامت بتن ۲۰۰ میلیمتر بوده و به‌دلیل افزایش طول پیچ‌میله امکان تغییرشکل خمشی در پیچ‌میله وجود داشته‌است. در این‌حالت تغییر شکل پیچ‌میله باعث ترک‌خوردگی در بتن اطراف آن شده و رشد ترک به سطح بتن رسیده است. در نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰ میلیمتر نظیر نمونه‌های 8S-3 و 10S-4 به دلیل افزایش ضخامت هسته بتنی مقاومت هسته به‌قدری افزایش‌یافته که قبل از ایجاد ترک در بتن، تغییرشکل‌های خمشی ماندگاری در پیچ‌میله ایجادشده‌است. هرچند باز هم به دلیل گسیختگی گوه‌ای زودهنگام بتن، از ظرفیت نهایی پیچ‌میله استفاده نگردیده است.



(الف)نمونه ۸-۳S (ب)نمونه ۱۰-۴S (پ)تغییرشکل پیچ‌میله (ت)اثر تغییر پیچ‌میله روی بتن

شکل۷- مدگسیختگی لغزش بتن و خمش پیچ‌میله

نمودارهای بار-لغزش مربوط به نمونه‌های با ضخامت ۱۰۰ میلیمتر و نمونه‌های باضخامت ۲۰۰ میلیمتر به‌صورت بار بدون بعد[1] در شکل ۸ نشان داده‌شده‌است. مطابق این شکل، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی در نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰ میلیمتر به دلیل ایجاد تغییرشکل در اجزای فولادی افزایش داشته است.



شکل۸- منحنی‌های بار-لغزش

[1] Normalize

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 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا نتایج حاصل از آزمایشهای این تحقیق، با نتایج آزمایش‌های محققین پیشین بر روی نمونه‌های ساندویچ SCS با اتصال دوسرجوش مورد مقایسه قرارگرفته‌است. سپس تاثیر تغییر هرکدام از پارامترهای هندسی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جدول ۲ ماکزیمم بار ثبت شده از آزمایش فشارخارج و مدهای گسیختگی آنها را نشان می‌دهد.

جدول۲- ماکزیمم بار ثبت شده از آزمایش فشارخارج و مدهای گسیختگی آنها

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

۶-۱ مقایسه با نتایج پیشینیان

جهت مقایسه نتایج از تحقیقات پیشینیان که برروی نمونه‌های ساندویچ SCS با اتصال دوسرجوش انجام‌گردیده، استفاده‌شده 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 قرارگرفته‌است. در جدول ۳ نمونه‌هایی که از نظر مشخصات هندسی شباهت بیشتری به نمونه‌های M.Xie و همکاران داشته‌اند، آورده شده‌است. تفاوت قابل ملاحظه در این نمونه‌ها، مقاومت بالای پیچ‌میله‌ها نسبت به برشگیرهای دوسرجوش می‌باشد که با مقدار ۸۶۵ مگاپاسکال تقریبا ۱/۵ برابر مقاومت نهایی برشگیرهای دوسرجوش می‌باشد. این اختلاف زیاد بهبودی در رفتار SCS با برشگیرهای پیچ‌میله ایجاد ننموده، بلکه به‌دلیل ضعف مقاومت بتن منجر به گسیختگی ترد و جداشدگی بتن قبل از رسیدن پیچ‌میله‌ها به مقاومت نهایی گردیده‌است.

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 جدول۳ مقاومت برشی

متوسط نمونه‌های دوسرجوش تقریبا 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 تاثیرگذار باشد. ضمن اینکه در مطالعه حاضر کاهش قطر پیچ‌میله‌ها نیز باعث افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتر شده است.

جدول۳- مقایسه نتایج تست فشارخارج نمونه‌های SCS با اتصال‌دهنده پیچ‌میله و با اتصال دهنده دوسرجوش

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

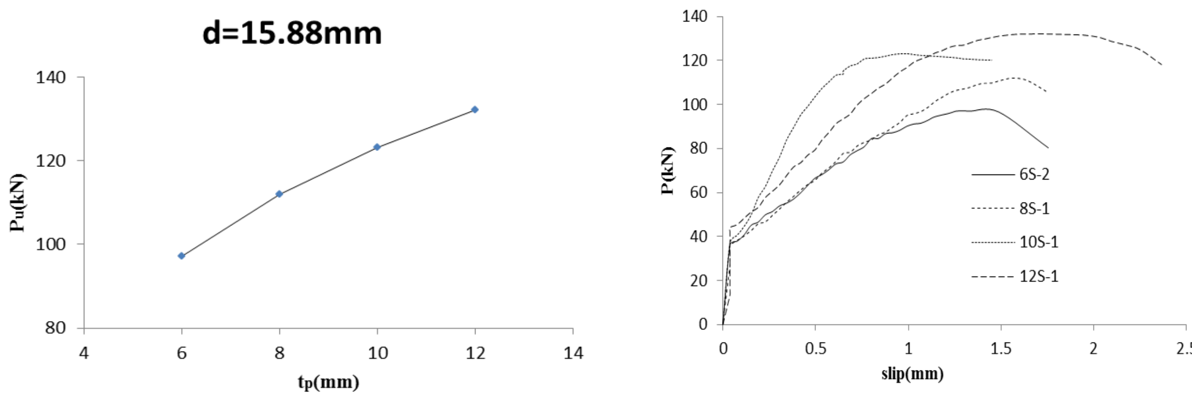
۶-۲ تاثیر پارامترهای هندسی

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 موردمطالعه در مقاله حاضر شامل ضخامت رویه‌های فولادی (t_p)، قطر پیچ‌میله (d) و ضخامت بتن (h_c) می‌باشند که در ادامه مورد بررسی قرارخواهند گرفت.

۶-۲-۱ تاثیر ضخامت رویه‌های فولادی، t_p

در نمونه‌های 12S-1،10S-1، 8S-1،6S-2 ضخامت رویه‌های فولادی به‌ترتیب ۶، ۸، ۱۰ و۱۲ و قطر پیچ ۱۵/۸۸ میلیمتر و ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد. مقاومت نمونه‌ها با افزایش ضخامت ورق از ۹۷/۱۸ تا ۱۳۲/۱ کیلونیوتن (حدود ۳۶درصد) افزایش یافته‌است (شکل‌های ۹-الف و ۹-ب). همچنین در نمونه‌های 12S-2،10S-2، 8S-2،6S-4 ضخامت رویه‌های فولادی به‌ترتیب ۶، ۸، ۱۰ و۱۲ و قطر پیچ ۲۲/۲۳ میلیمتر و ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد که مقاومت نمونه‌ها از ۱۱۶/۳ به ۲۱۹/۵ کیلونیوتن (حدود ۸۹درصد) افزایش یافته است (شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب).

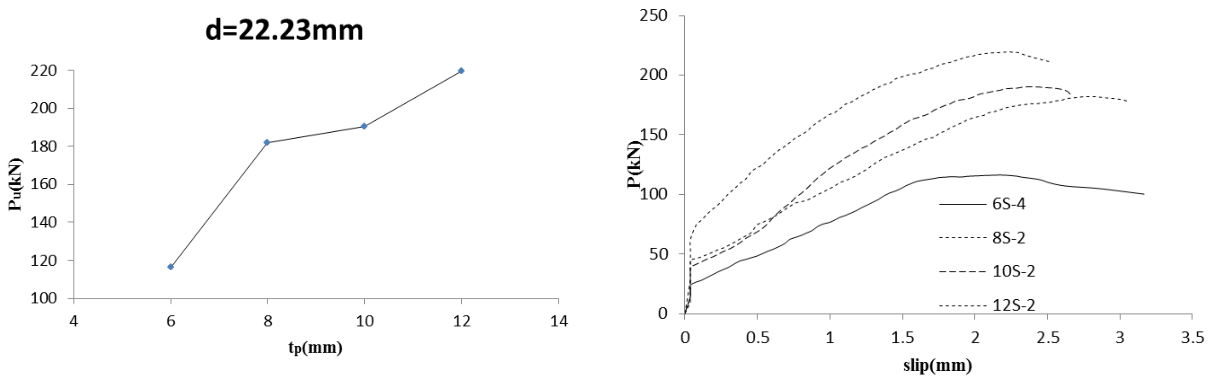
با توجه نتایج بدست آمده ملاحظه می‌گردد که با افزایش ضخامت رویه، مقاومت برشی قطعه نیز اضافه شده است. همچنین با افزایش ضخامت رویه مقاومت نهایی افزایش یافته، ولی شیب روند افزایشی مطابق شکل ۹-ب به‌تدریج کاهش یافته است. این مساله می‌تواند بیانگر این مورد باشد که با افزایش صلبیت رویه‌های فولادی به‌تدریج تاثیر افزایش ضخامت بر مقاومت نهایی کاهش و در نهایت شیب نمودار به سمت صفر میل می کند. مطابق شکل‌های ۹-الف و ۱۰-الف با افزایش ضخامت رویه‌ها بدون تغییر در ضخامت بتن یا طول پیچ‌میله فقط سطح تراز نمودار بالا رفته، اما تغییرشکل نقطه گسیختگی تغییر محسوسی نکرده است.



(الف) منحنی‌های بار–لغزش

(ب) منحنی مقاومت نمونه–ضخامت رویه فولادی

شکل۹– تاثیر ضخامت رویه‌های فولادی برای پیچ میله ۱۵/۸۸میلیمتر (ضخامت بتن ۱۰۰میلیمتر)



(الف) منحنی‌های بار–لغزش

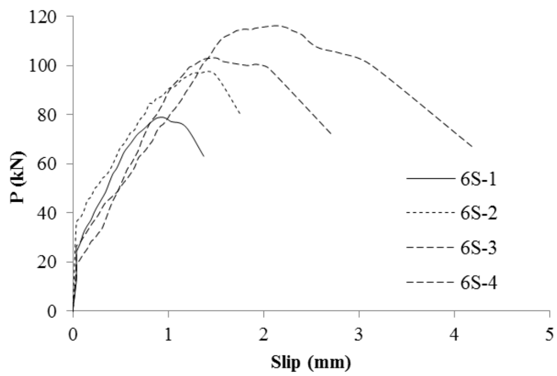
(ب)منحنی مقاومت نمونه–ضخامت رویه فولادی

شکل۱۰– تاثیر ضخامت رویه‌های فولادی برای پیچ میله ۲۲/۲۳میلیمتر (ضخامت بتن ۱۰۰میلیمتر)

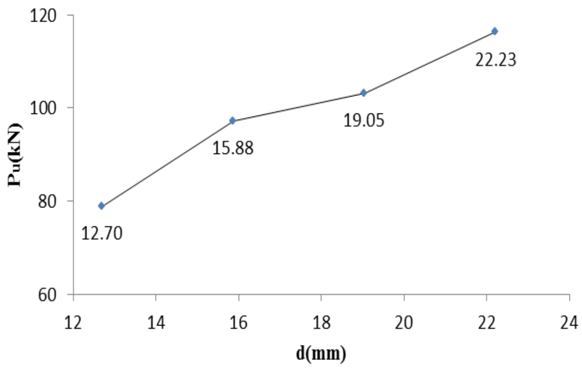
۶–۲–۲ تاثیر قطر پیچ‌میله، d

در نمونه‌های 6S-1،6S-2، 6S-3،6S-4 با ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر و ضخامت رویه‌های فولادی ۶ میلیمتر، قطر پیچ‌میله‌ها به‌ترتیب با مقادیر ۱۲/۷۰، ۱۵/۸۸، ۱۹/۰۵ و۲۲/۲۳ میلیمتر تغییر نموده است. مقاومت نمونه‌ها با افزایش قطر پیچ‌میله از ۷۸/۹۴ تا ۱۱۶/۳ کیلونیوتن (حدود ۴۷درصد) افزایش یافته است (شکل‌های۱۱–الف و ۱۱–ب).

شکل ۱۱–ب نشان می‌دهد که افزایش قطر پیچ‌میله تاثیر مستقیم در افزایش مقاومت نمونه و تاثیر اندکی در افزایش جذب انرژی داشته‌است. نتایج بیان می‌کند که افزایش قطر پیچ‌میله باعث افزایش نسبت مقاومت پیچ‌میله به مقاومت هسته بتنی شده و بنابراین قبل ازاینکه پیچ‌میله‌ها به مقاومت نهایی برسند، بتن بصورت ترد گسیخته می‌شود. انتظار می‌رود که استفاده از دو پیچ‌میله یا بیشتر و با قطرهای کمتر بتواند در افزایش محصورشدگی تنش موثر بوده و کنترل بهتری بر ترک خوردگی بتن ایجاد شود تا از ظرفیت نهایی پیچ‌میله‌های فولادی استفاده گردد.



(الف) منحنی‌های بار-لغزش



(ب) منحنی مقاومت نمونه-قطر پیچ‌میله

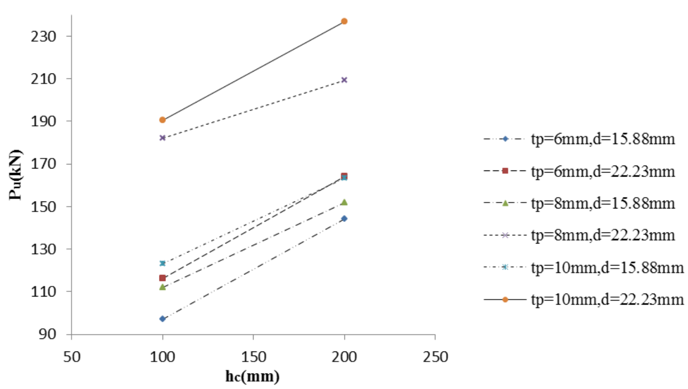
شکل ۱۱- تاثیر قطر پیچ‌میله (ضخامت بتن ۱۰۰میلیمتر)

۶-۲-۳ تاثیر ضخامت بتن، h_c

در شکل ۱۲ نمونه‌های با ضخامت بتن یا طول پیچ‌میله ۱۰۰ میلیمتر و ۲۰۰ میلیمتر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. 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.

همچنین در سایر نمونه‌هایی که ضخامت بتن افزایش یافته است، افزایش مقاومت مشاهده می‌شود. در نمونه‌هایی که ضخامت بتن ۱۰۰ میلیمتر است شکست زودهنگام بتن رخ داده و پیچ‌میله‌ها بدون تغییرشکل باقی می‌مانند. ولی در نمونه‌هایی که ضخامت بتن به ۲۰۰ میلیمتر افزایش یافته است، علاوه بر تخریب بتن، پیچ‌میله‌ها نیز دچار تغییر شکل‌شده‌اند. علت این موضوع افزایش طول پیچ‌میله است که بار بیشتری به آن منتقل شده و منجر به خم شدن پیچ‌میله و سپس تخریب بتن گردیده‌است.

با افزایش ضخامت بتن بدون تغییر در سایر پارامترها تغییرشکل برشگیرها به صورت خمشی افزایش یافته و در نتیجه ضمن اینکه مقاومت برشی نهایی نمونه به مقاومت نهایی پیچ‌میله نزدیکتر خواهد شد، شکل‌پذیری نیز به دلیل افزایش لغزش بین‌لایه‌ای افزایش خواهدیافت.



شکل ۱۲- نمودار مقاومت نمونه-ضخامت بتن(۱۰۰میلیمتر و ۲۰۰میلیمتر)

۷- مدل رفتار بار-لغزش

در بخش حاضر براساس رگرسیون منحنی‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌گرفته با متغیرهای ضخامت هسته بتنی، ضخامت رویه‌های فولادی و مشخصات هندسی برشگیرهای پیچ‌میله بدون تغییر در مشخصات مکانیکی مصالح، یک مدل رفتاری ارائه می‌گردد.

۷-۱ مدل پیشنهادی رفتار بار-لغزش نمونه‌های آزمایش با برشگیرهای پیچ‌میله

منحنی‌های بار بدون بعد آزمایشگاهی (P/P_u) و لغزش (δ)ی نمونه‌ها با برشگیرهای پیچ‌میله مدفون در هسته بتنی با متغیرهای ضخامت رویه‌های فولادی، قطر پیچ‌میله و ضخامت هسته بتنی ۱۰۰میلیمتر در شکل ۱۳ آمده است که رفتار بار-لغزش نمونه‌هایی که شکست بتن در آنها اتفاق افتاده است، را نشان می‌دهند. در حالتی که ضخامت هسته بتنی ۲۰۰ میلیمتر بود، منحنی‌های رفتار بار-لغزش آنها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این منحنی‌ها مربوط به حالتی است که تغییرشکل پیچ‌میله‌ها همراه با شکست بتن می‌باشد.

بنابراین دو رابطه زیر برای این حالتها بدست آمده است:

$$\frac{P}{P_u}=\frac{7.1\delta}{1+0.06\delta}-5.85\delta \qquad \text{(۱-الف)}$$

$$\frac{P}{P_u}=\frac{1.5\delta}{1+1.2\delta}-0.02\delta \qquad \text{(۱-ب)}$$

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 اتصال‌دهنده پیچ‌میله

در این بخش، قبل از پیشنهاد رابطه مقاومت برشی نمونه‌های با اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله، لازم است روابطی که توسط محققین برای اتصال‌دهنده‌های دوسرجوش ارائه شده، مرور گردد.

۸-۱- روابط طراحی موجود برای نمونه‌های با برشگیرهای دوسرجوش

اتصال‌دهنده پیچ‌میله مشابه اتصال‌دهنده دوسرجوش در ساندویچ SCS می‌باشد.آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه Southampton اثر ضخامت رویه های فولادی و ضخامت بتن را بررسی کرده [۱۱] و روابط زیر را ارایه داده‌اند:

$$F_{us}=0.8k_L f_{uB}\pi d^2/4 \qquad \text{(۲-الف)}$$

$$F_{uc}=0.29d^2\left(f_{ck}E_c\right)^{1/2} \qquad \text{(۲-ب)}$$

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

$$k_L=\left(0.024t+0.76\right)\frac{f_{yP}}{355} \qquad \text{(۳)}$$

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

در آیین‌نامه BS5400 در بخش ۵ که در خصوص اتصال‌دهنده‌های 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:

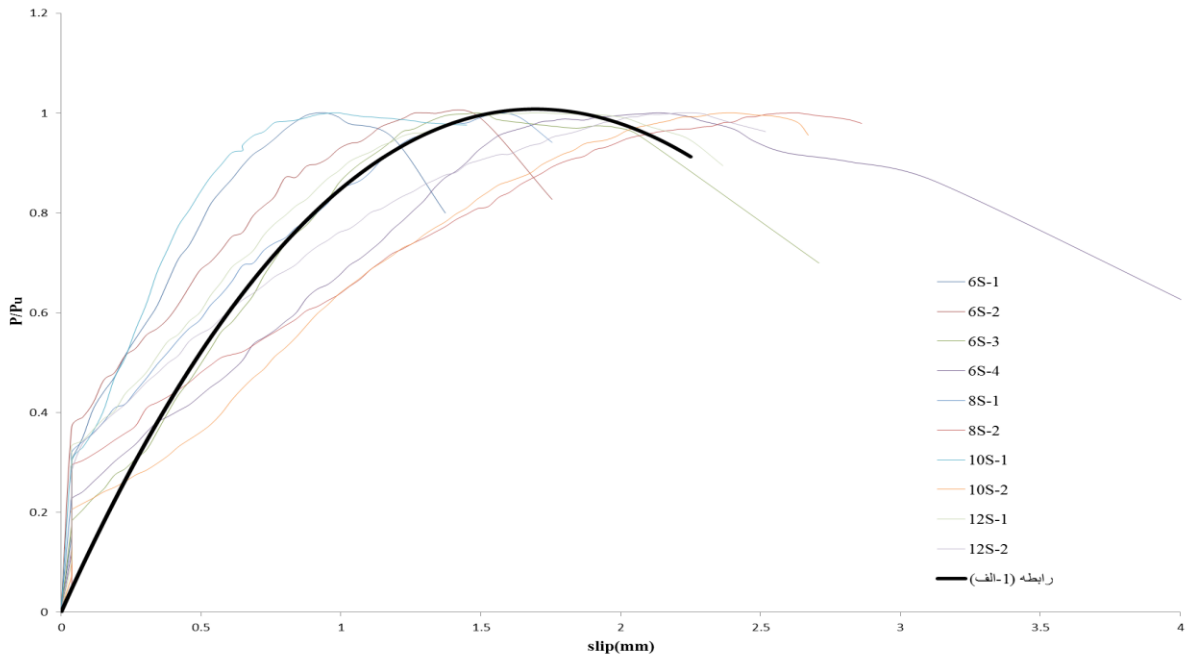
$$F_u=1.46f_{cu}+109.9kN \qquad \text{(۴)}$$

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

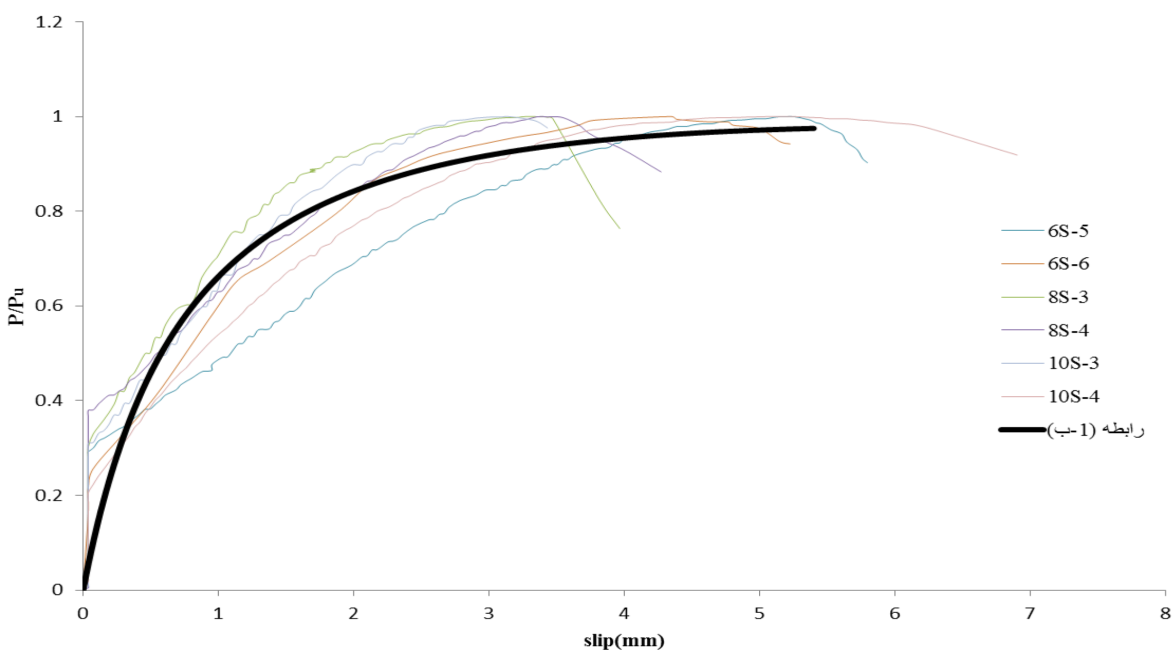
$$F_u=\begin{cases}210(t/10)^{0.45}kN & t\le 10mm, d=25mm\\ 210kN & t\succ 10mm, d=25mm\end{cases} \qquad \text{(۵)}$$

۸-۲- رابطه پیشنهادی مقاومت برشی نمونه‌های با برشگیر پیچ‌میله

با توجه به اینکه مشخصات مکانیکی مصالح ثابت درنظرگرفته شده است، پارامترهای اصلی شامل ضخامت رویه‌های فولادی t_p، ضخامت بتن،h_c، قطر پیچ‌میله، d می‌باشند. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار آماریMINITAB، تحلیل رگرسیون بر روی نتایج ۱۶ نمونه آزمایش فشارخارج انجام شده است. مقاومت برشی برشگیر پیچ‌میله (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 تاثیرگذار بر مقاومت برشی برشگیرهای پیچ‌میله



شکل۱۳- مدل رفتار بار-لغزش نمونه‌های با ضخامت ۱۰۰میلیمتر



شکل۱۴- مدل رفتار بار-لغزش نمونه‌های با ضخامت ۲۰۰میلیمتر

انتخاب شده‌اند. بنابراین برای نمونه‌های شکست‌خورده توسط مد گسیختگی بتن، مقاومت برشی به عنوان تابعی از پارامترهای نامبرده به‌صورت زیر درنظرگرفته شده است:

$$\frac{P_u}{A_s} = a\, h_c^b t_p^e d^{\,f} \qquad (۶)$$

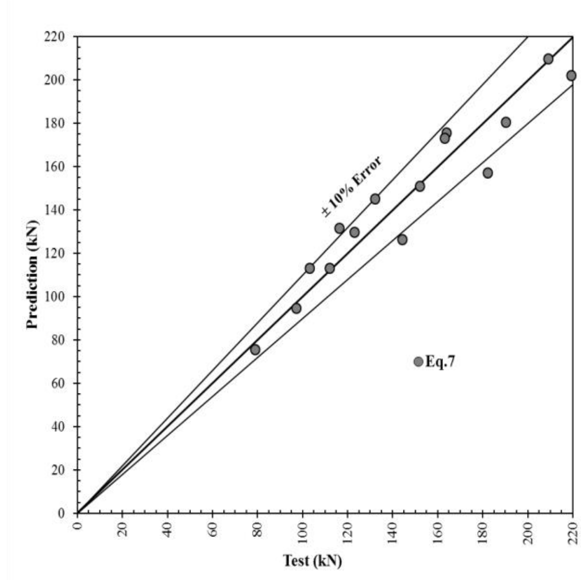
در اینجا a، b، e و f ضرایبی می‌باشند که از تحلیل رگرسیون تعیین گردیده‌اند. برای این منظور از انتقال لگاریتمی استفاده شده

و یک رابطه خطی به‌دست آمده است. سپس تحلیل رگرسیون خطی برای بدست آوردن ضرایب بر روی ۱۶ نمونه آزمایش گردیده است.

ضرایب بدست آمده براساس ریشه مربعات میانگین مجذور خطاها برابر ده درصد محاسبه و مقاومت برشی SCS با پیچ‌میله به صورت زیر بدست آمده است:

$$\frac{P_u}{A_s} = 464.5153 h_c^{0.418} t_p^{0.62} d^{-1.055} \qquad (۷)$$

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.



شکل۱۵- مقایسه بین نتایج آزمایش و نتایج پیش‌بینی بوسیله مدل پیشنهادی(رابطه۷)

نتیجه گیری:

در مطالعه حاضر رفتار بار-لغزش و مقاومت برشی اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله 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 به‌دست آمده است:

(۱) مودهای شکست شامل گسیختگی بتن و تغییرشکل ماندگار پیچ‌میله می‌باشد. در هیچکدام از نمونه‌ها گسیختگی از ناحیه اتصال پیچ‌میله به رویه‌های فولادی مشاهده نگردید.

(۲) باافزایش ضخامت رویه فولادی، مقاومت نهایی افزایش یافته ولی شیب نمودار به تدریج کاهش می‌یابد. این مساله می‌تواند بیانگر این مورد باشد که با افزایش صلبیت رویه‌های فولادی به تدریج تاثیر افزایش ضخامت بر مقاومت نهایی کاهش و درنهایت شیب نمودار به سمت صفر میل می‌کند.

(۳) افزایش قطر پیچ‌میله تاثیر مستقیم در افزایش مقاومت نمونه و جذب انرژی دارد. افزایش قطر پیچ‌میله باعث می‌گردد که قبل از اینکه پیچ‌ها به مقاومت نهایی برسند، بتن بصورت ترد گسیخته شود. انتظار می‌رود که استفاده از دو پیچ‌میله یا بیشتر با قطرهای کمتر بتواند ترک‌خوردگی بتن را بهتر کنترل نموده و در استفاده از ظرفیت نهایی پیچ‌میله‌ها تاثیرگذار باشد.

(۴) با افزایش ضخامت بتن بدون تغییر در سایر پارامترها تغییرشکل برشگیرها به صورت خمشی افزایش یافته و در نتیجه ضمن اینکه مقاومت برشی نهایی نمونه به مقاومت نهایی پیچ‌میله نزدیکتر خواهد شد، شکل‌پذیری نیز به دلیل افزایش لغزش بین‌لایه‌ای افزایش خواهدیافت.

(۵) در مطالعه حاضر منحنی‌های بار-لغزش نمونه‌های با اتصال‌دهنده‌های پیچ‌میله مقاومت‌بالا 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،

استخراج شده $(P/P_u)=[7.1\delta/(1+0.06\delta)]-5.85\delta$ است. با افزایش ضخامت بتن نمودار نیرو–تغییرمکان شکل‌پذیری بیشتری خواهد داشت.

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

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

(۷) با توجه 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 تقریبا دو برابر نمونه‌های با برشگیر پیچ‌میله مقاومت بالا می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که استفاده از بتن مقاومت بالا یا بتن فوق توانمند در بهبود رفتار ساندویچ SCS با پیچ‌میله مقاومت بالا تاثیرگذار باشد.

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 TM STEEL-CONCRETE-STEEL SANDWICH CONSTRUCTION.* Composite construction in steel and concrete IV, 2002. **5**: p. 656-667.

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.

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 [i]

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, exprimental 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.

Keyword:

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

[i] Corresponding Author: ghalehnovi@um.ac.ir