

بررسی تأثیر مواد باطله معدن مس بر روی رفتار تنش - کرنش بتن محصورشده

جمشید اسماعیلی*^۱ و حسین اصلانی^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
^۲ دانشجوی دوره دکترای عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۷/۳/۱۴، پذیرش: ۹۸/۴/۲۳، نشر آنلاین: ۹۸/۴/۲۳)

چکیده

شروع ترک خوردگی بین سنگدانه و خمیر سیمان را می توان آغاز رفتار غیر الاستیک بتن به حساب آورد. پاسخ بتن برای این حوزه به توانایی ساختار یا ترکیبات آن بستگی دارد. برای بررسی این موضوع استفاده از محصورکننده جانبی می تواند راه حل مناسبی باشد. این تحقیق قصد دارد که اثرات محصورشدگی و رفتار تنش-کرنش بتن سبز سازه ای ساخته شده با مواد باطله معدن مس را مورد مطالعه قرار دهد. چهار نوع طرح اختلاط برای بررسی اثرات مواد باطله بر رفتار تنش-کرنش بتن محصورشده طراحی گردید. میزان مواد باطله جایگزین سیمان مصرفی با درصدهای صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در مخلوط بتن منظور شد. میلگرد دور پیچ محصورشدگی با گام های ۷۵، ۵۰ و ۲۵ میلی متر (نسبت حجمی ۱/۰۱، ۱/۵۲ و ۳/۰۴ درصد) در نمونه های بتن تعبیه گردید. بر اساس نتایج آزمایش های انجام شده به کارگیری مواد باطله معدن مس در بتن محصورشده قادر به بهبود مقاومت و شکل پذیری آن نسبت به بتن معمولی است. در این خصوص یک مدل تحلیلی برای رفتار تنش-کرنش بتن محصورشده حاوی مواد باطله ارائه شده است.

کلیدواژه ها: رفتار تنش-کرنش بتن، مواد باطله معدن، مواد زائد جایگزین سیمان، بتن سبز.

۱- مقدمه

یکی از مواد مهم در تولید بتن، سیمان پرتلند است. با توجه به توسعه ساخت و ساز در کشورهای مختلف، میزان تولید سیمان سالانه حدود ۳ درصد رو به افزایش است. فرآیند تولید سیمان نیاز به انرژی زیادی دارد و حدود ۵ الی ۷ درصد از گازهای گلخانه ای مانند CO₂ ناشی از این فرآیند است (Deja, 2010).

بررسی روند تولیدات اخیر جهانی سیمان، نشان دهنده این موضوع است که تا سال ۲۰۵۰ به عنوان دومین محصول مصرف شده در این سیاره، پس از آب خواهد بود (Imbabi و همکاران، ۲۰۱۲).

پژوهش های زیادی در جهت چگونگی کاهش تولید این محصول و تقلیل سطح انتشار گازهای گلخانه ای انجام شده است. به کارگیری مواد مکمل مختلف می تواند راه حل مناسبی برای تقلیل و حل این مشکل باشد (Rehan و همکاران، ۲۰۰۵؛ Garther, 2004؛ Flower و Sanjayan, 2007).

در این راستا، تولید بتن سبز از مواد زائد از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده و علاوه بر آن منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، مواد زائد آلوده کننده محیط زیست و حفظ منابع طبیعی

خواهد شد (Glavind و Munch-Petersen, 2002؛ Kumar و همکاران، ۲۰۱۵).

با توسعه صنعت و تولید محصولات متنوع، مواد باطله گوناگون ایجاد می گردد. این نوع مواد اکثراً منجر به بروز مشکلات جدی در آلودگی محیط زیست می شود. برای حل این چالش بزرگ جهانی، یکی از راه حل های مناسب کاهش این نوع مواد به کارگیری آن ها در مصالح ساخت و ساز و یا بازیافت آن ها است. یافتن راه حل بازیافت یا جایگزینی مواد در کارخانه های سیمان و یا سنگدانه ها در بتن یک روش قابل توجه است.

مس یکی از کاربردی ترین فلزات در صنایع مختلف در سرتاسر جهان است. افزایش جمعیت از یک طرف و توسعه صنعت از طرف دیگر باعث افزایش نیاز به این فلز مهم شده است. در فرآیند جداسازی محصول مس (کنسانتره مس با عیار ۰/۶)، از سنگ معدن، تقریباً ۹۸٪ مواد استخراج شده را مواد باطله معدن مس تشکیل می دهد. حجم این مواد زائد به حجم تولید مس بستگی دارد و با افزایش تولید مس، ذخیره سازی و نگهداری مواد باطله رشد کرده و به تبع آن هزینه زیادی بر شرکت های تولیدکننده ایجاد خواهد کرد. فلذا بازیافت و استفاده مجدد از این مواد از اهمیت زیادی برخوردار است. علاوه بر آن، دپو این مواد سطح

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۰۰

آدرس ایمیل: j-esmaeli@tabrizu.ac.ir (ج. اسماعیلی)، haslani49@tabrizu.ac.ir (ح. اصلانی).

CaO و MgO می‌تواند استفاده گردد. به‌کارگیری این مواد منجر به کاهش تولید گازهای گلخانه‌شده و بتن تولیدی سازگار با محیط زیست است.

Desayi و همکاران (۱۹۷۸)، Park (۱۹۷۷)، Watanabe و همکاران (۱۹۸۰)، Fafitis و Shah (۱۹۸۵) و Mander و همکاران (۱۹۸۸) اثر شکل، مقدار و مقاومت تسلیم بتن محصورشده مسلح و مقاومت فشاری بتن اصلی بر روی تنش- کرنش محوری تحت بارگذاری استاتیکی را گزارش و مدل‌هایی برای رابطه تنش- کرنش پیشنهاد کرده‌اند. اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری‌شده درباره رابطه تنش- کرنش بتن محصورشده تحت بارگذاری استاتیکی از روال و استاندارد خاص تبعیت کرده و مورد استفاده کاربران قرار می‌گیرد (Mander و همکاران، ۱۹۸۸؛ Ozbakkaloglu و همکاران، ۲۰۱۳ و Ozbakkaloglu و Saaticioglu، ۲۰۰۶).

توسعه تغییر شکل جانبی بتن عامل تعیین‌کننده در بررسی مشارکت سطح محصورشدگی در بتن مسلح است. از این‌رو، پیش‌بینی رابطه تغییر شکل جانبی و محوری تحت اثر نیروی فشاری محوری یک مسئله مهم است. به‌عبارت‌دیگر، یک پارامتر کلیدی در درک پاسخ بتن به مقاومت و شکل‌پذیری، رفتار تغییر شکل جانبی است؛ بنابراین از طریق نمودار رابطه تغییر شکل محوری و جانبی می‌توان پاسخ متغیرهای بتن از حالت قابل انعطاف به حالت غیرقابل انعطاف و تشکیل میکرو ترک‌ها را درک کرد. پس روش دقیقی برای پیش‌بینی سطح محصورشدگی بتن مسلح توسط انواع محصورکننده‌ها مانند دور پیچ فولادی و الیاف‌های پلیمری تقویتی، رابطه تغییر شکل طولی (محوری) و جانبی است (Shah و Amad، ۱۹۸۲؛ Lokuge و همکاران، ۲۰۰۵ و Talaat، ۲۰۰۷).

مطالعات به‌کارگیری مواد افزودنی معدنی غنی از سیلیس مانند میکرو سیلیس، خاکستر بادی، سرباره و انواع دیگر پوزولان به‌صورت جداگانه یا ترکیبی با درصد‌های مختلف به‌عنوان مصالح و مواد مکمل ادامه دارد. این پژوهش‌ها بر روی رفتار تنش- کرنش بتن محصورشده بیشتر تأکید بر روی افزایش مقاومت بوده و به‌عنوان عملکرد رفتار تنش- کرنش بتن با مقاومت بالا مطرح است. در سال‌های اخیر تحقیقاتی متعددی در مورد تأثیر مواد باطله انواع معادن مانند آهن، مس و نقره بر خواص بتن به‌عنوان سنگ‌دانه ریز یا جایگزین سیمان در حال انجام است. این تحقیقات بر پایه ترکیبات فیزیکی و شیمیایی معادن متفاوت بوده و دارای ویژگی و نتایج مختلف است. در این مقاله تلاش شده که با جایگزینی مواد باطله مس به‌عنوان بخشی از سیمان، توانایی ساختار و ترکیبات آن را در پاسخ به رفتار تنش- کرنش بتن محصورشده بررسی نماید.

اشغال زیادی را لازم داشته و یک منبع آلوده‌کننده محیط‌زیست تلقی می‌گردد. در سال ۲۰۱۶ حدود ۲۰ میلیون تن مس و ۲/۵۶ بیلیون تن مواد باطله در جهان تولیدشده است (Survey، ۲۰۱۸، Gordon، ۲۰۰۲).

براساس استاندارد C618 پوزولان‌های طبیعی با کلاس N بایستی دار مجموع عناصر اصلی آن‌ها ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) بیش از ۷۰ درصد باشد، طبق جدول (۱) مجموع این سه عنصر در مواد باطله معدن مس برابر ۸۱/۸۸ درصد است. پس این مواد دارای پتانسیل مناسب برای استفاده در فرآورده‌های تولیدی به عنوان پوزولان طبیعی است (Thomas و همکاران، ۲۰۱۳).

تحقیقات متعددی در خصوص به‌کارگیری مواد باطله معدن مس انجام‌شده است. تحقیقات Sultan (۱۹۷۹) و Kundu و همکاران (۲۰۱۶) نشان می‌دهد که مواد باطله معدن مس پتانسیل بسیار عالی برای استفاده به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک‌ریزها، مواد بستر جاده، کانال، استخر و مخازن را دارد.

Qiu و همکاران (۲۰۱۱) درباره جایگزینی مواد باطله معدن مس بجای خاک رس در تولید سیمان تحقیق نموده و اعلام کرده‌اند که هنگام استفاده زباله معدن مس بجای خاک رس واکنش حرارتی تقلیل پیدا کرده و به‌کارگیری مقدار زیاد آن می‌تواند مصرف زغال‌سنگ در طول پخت کلینکر را کاهش دهد.

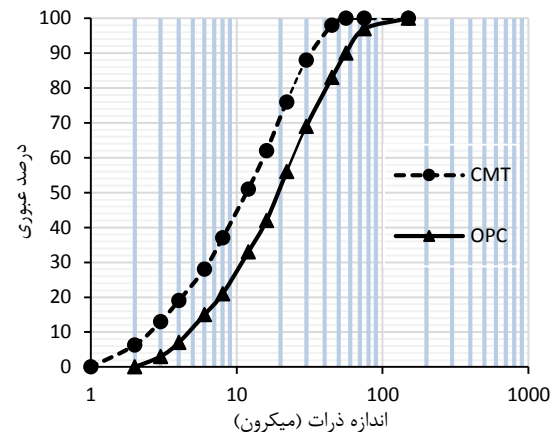
Onuaguluchi و Eren (۲۰۱۳) مواد باطله معدن مس ترکیه با سیلیس ۱۱/۲۰ درصد و اکسید آهن ۸۵/۳۰ درصد بدون آلومینا را با نسبت ۰، ۵ و ۱۰ درصد جایگزین سیمان نموده و مورد آزمایش قرار داده‌اند. آن‌ها بر اساس نتایج تحقیقات گزارش کرده‌اند که استفاده از این مواد باطله به‌عنوان مواد مضاف در خمیریه‌ها منجر به افزایش جزئی در زمان‌گیری شده و اسلامپ بتن را کاهش می‌دهد. به‌کارگیری این مواد در بتن سیمانی با نسبت ۵٪ بجای سیمان به‌صورت آبدار منجر به بهبود مقاومت فشاری و خمشی و کششی می‌شود.

تحقیقات Thomas و همکاران (۲۰۱۳) بر روی مواد باطله معدن مس با سیلیس ۷۵ درصد و آلومینا ۱۲/۱۶ درصد به‌عنوان زباله معدنی از سنگ معدن مس که جایگزین سنگ‌دانه ریز رودخانه طبیعی تا ۶۰ درصد، با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ تا ۰/۵ انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نمونه بتن با مواد باطله به نسبت آب به سیمان مخلوط بستگی دارد. مخلوط بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ تا ۳۰ درصد مواد باطله به‌جای سنگ‌دانه ریز مقاومت فشاری را بهبود می‌بخشد. Huang و همکاران (۲۰۱۲) ساخت بتن سبک هوادار اتوکلاوی با استفاده از مواد باطله معدن مس و سرباره را گزارش کرده‌اند که مواد باطله معدن مس و سرباره کوره به‌عنوان جایگزین آهک برای تولید محصولات بتن سبک اتوکلاوی به‌واسطه مهیاسازی ترکیبات

۲- روش تحقیق

۲-۱- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

در تولید همه نمونه‌ها، سیمان پرتلند (OPC) ^۱ نوع یک کارخانه سیمان صوفیان و مواد باطله معدن مس (CMT) ^۲ سونگون با مشخصات جدول شکل (۱) و دانه‌بندی شکل (۱) استفاده شده است. حداکثر اندازه قطر سنگ‌دانه ۱۲/۵ میلی‌متر به‌عنوان درشت‌دانه، سنگ‌دانه ریز معمولی تولید شرکت سرام تبریز بوده و مقادیر و نسبت‌های اجزاء مخلوط‌های آزمایش و مشخصات مخلوط‌های بررسی شده به ترتیب در جداول (۲) و (۳) قابل مشاهده است. مواد افزودنی فوق روان‌کننده بر پایه نفتالین محصول شرکت آبادگران استفاده شده است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی سیمان و مواد باطله مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات سیمان و مواد باطله مورد استفاده

ویژگی شیمیایی (%)		
سیمان	مواد باطله	
۲۱/۵۷	۶۳/۳	SiO ₂
۴/۶۵	۱۵/۲۹	Al ₂ O ₃
۳/۶۳	۳/۲۹	Fe ₂ O ₃
۶۳/۳۲	۵/۲۱	CaO
۲/۴۰	۳/۶۸	MgO
۲/۱۵	۱/۹۳	SO ₃
۰/۳۲	۰/۸۵	Na ₂ O
۰/۳۱	۲/۷۲	K ₂ O
-	۰/۳۵	CuO
۱/۲۳	۱/۸۳	LOI
ویژگی فیزیکی		
۳۱۵۰	۲۷۵۰	چگالی (kg/m ³)
۳۲۳۴	۵۷۷۶	نرمی (Cm ² /gr)

جدول ۲- دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده

سایز الک (میلی‌متر)	سنگ‌دانه ریز (%)	سنگ‌دانه درشت (%)	سنگ‌دانه مخلوط (%)
۱۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۹/۵۰	۱۰۰	۷۵	۸۹/۲
۴/۷۵	۸۳/۷	۲۵	۵۷/۸
۲/۳۸	۵۵/۲	۰	۳۲/۴
۱/۱۹	۳۶/۸	۰	۲۱/۹
۰/۶۰	۲۵/۵	۰	۱۵/۳
۰/۳۰	۱۱/۱	۰	۸/۱۰
۰/۱۵	۱/۷۰	۰	۱/۰۱

جدول ۳- مشخصات مخلوط‌های بررسی شده

شماره مخلوط	مقدار سیمان مصرفی (kg/m ³)	مقدار مواد باطله (kg/m ³)	نسبت آب به مواد سیمانی	سنگ‌دانه درشت (kg/m ³)	سنگ‌دانه ریز (kg/m ³)	مواد فوق روان‌کننده (%)
A 1	۲۸۵	۰	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۶۸
A 2	۲۵۶/۵	۲۸/۵۰	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۷۳
A 3	۲۴۲/۲۵	۴۲/۷۵	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۷۶
A 4	۲۲۸	۵۷	۰/۴	۱۰۰۵	۸۸۰	۰/۸۰

۲-۲- نمونه‌ها و آزمایش‌ها

در این مطالعه از سیلندر بتن مسلح به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. محصورشدگی نمونه‌ها با میلگردی

به قطر ۶ میلی‌متر با مقاومت تسلیم ۴۴۰ مگاپاسکال به صورت دور پیچ با قطر ۱۲۱ میلی‌متر در گام‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر (با نسبت حجمی ۳/۰۴، ۱/۵۲ و ۱/۰۱ درصد) طبق شکل (۲)

بتن متصل شده است، به دست می‌آید. برای آزمایش آزمون‌های بتنی از دستگاه یونیورسال با سیستم جابه‌جایی کنترل استفاده شده و با سرعت یک میلی‌متر در دقیقه بارگذاری گردیده است. داده‌های بار و تغییر شکل به‌طور مستقیم توسط یک کامپیوتر ثبت شد. نمونه آزمون‌های آزمایش شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- نمونه آزمون‌های آزمایش شده

۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

۳-۱- بتن محصور نشده

در شکل (۵) منحنی تنش- کرنش بتن حاوی مواد باطله معدن مس با درصد‌های مختلف نشان داده شده است. مقادیر حداکثر مقاومت و تغییر شکل متناظر آن در بتن حاوی مواد باطله و بتن کنترل محصور نشده در جدول (۴) گزارش شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقدار مقاومت بتن محصور نشده با اضافه کردن مواد باطله نسبت به بتن کنترل ۵۶٪ روز ارتقاء می‌یابد و نمونه حاوی مواد باطله (۱۵٪) جایگزینی سیمان بهترین نمونه از نظر مقاومت است. مقادیر مقاومت نمونه‌ها برای نمونه صفر، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر ۲۸/۷۴، ۳۳/۳۵ و ۳۲/۲۳ مگاپاسکال است. مقادیر تغییر شکل متناظر حداکثر مقاومت برای نمونه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر ۰/۰۰۲۱۸، ۰/۰۰۲۲۳ و ۰/۰۰۲۲۴ است.

جدول ۴- مقادیر حداکثر مقاومت و تغییر شکل متناظر آن در

بتن محصور نشده

ردیف	مقاومت بتن محصور نشده (مگاپاسکال)	نسبت مقاومت نمونه‌ها به نمونه کنترل	تغییر شکل متناظر حداکثر (mm/mm)	نسبت تغییر شکل متناظر حداکثر	نسبت	
					تغییر شکل	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)
A1	۲۸/۷۴	۱/۰۰	۰/۰۰۲۰۲	۱/۰۰	۱/۰۰	۳۰/۳۴
A2	۳۱/۶۲	۱/۱۰	۰/۰۰۲۱۸	۱/۱۰	۱/۰۸	۳۰/۹۲
A3	۳۳/۳۵	۱/۱۶	۰/۰۰۲۲۳	۱/۱۶	۱/۱۰	۳۱/۲۹
A4	۳۲/۲۳	۱/۱۲	۰/۰۰۲۲۴	۱/۱۲	۱/۱۱	۳۱/۰۹

ایجاد شده است. هر نمونه دارای دو سه‌پایه جاسازی شده در ۷۵ میلی‌متری از سطح بالا و پایین است. این سه‌پایه‌ها به‌منظور اندازه‌گیری تغییر مکان محوری نسبی این دو نقطه جاسازی شده‌اند. نوک هر پایه به پیچ‌های حلقه استاندارد آزمایشی با ۱۲۰ درجه زاویه طبق شکل متصل و حلقه در زمان تست به‌صورت ثابت نگهداری می‌گردد. مقدار کرنش دور پیچ توسط کرنش‌سنج ورقی به طول ۱۰ میلی‌متر (PFL-10-11) که بر روی سطح میلگرد نصب شده است اندازه‌گیری می‌شود (شکل (۲)).

نمونه‌ها بعد از بتن‌ریزی به مدت یک روز در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شده است. بعد از یک روز قالب برداری نمونه‌ها انجام شد. سپس نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش در مخزن آب اشباع شده با آهک در دمای 23 ± 1 درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند.



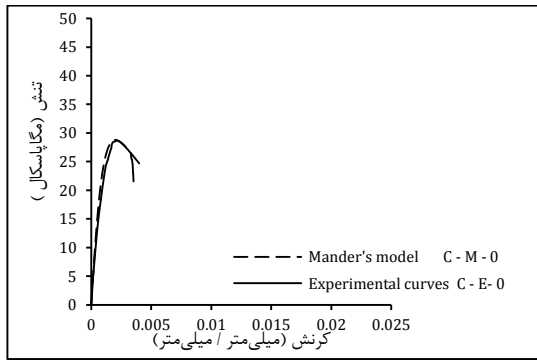
شکل ۲- نمونه نصب کرنش‌سنج بر روی دور پیچ، گام دور

پیچ‌ها ۲۵، ۵۰، ۷۵ میلی‌متر

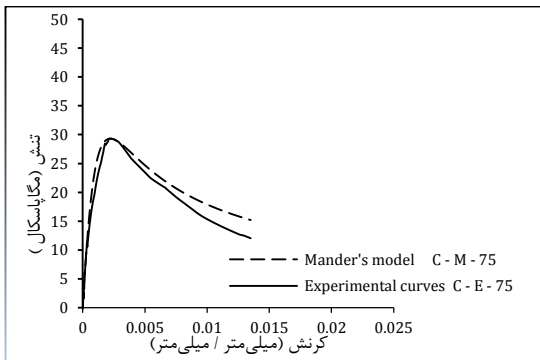


شکل ۱- نمونه نصب کرنش‌سنج بر روی آزمون‌ها و آزمایش آن

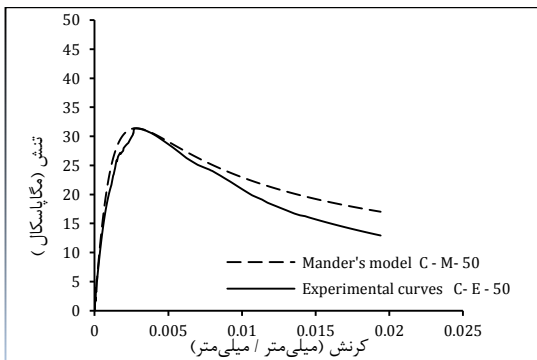
به‌منظور اندازه‌گیری تغییر شکل‌های طولی نمونه‌ها از دو تغییر مکان‌سنج (LVDT) بین دو بست حلقه‌ای شکل مطابق با شکل (۳) نصب و خروجی متوسط دو تغییر مکان‌سنج به‌عنوان یک باند سیگنال سیستم مورد استفاده قرار گرفت. در این مقاله، مقادیر تغییر مکان نسبی بین دو تا سه‌پایه جهت محاسبه کرنش محوری استفاده می‌شود. مقدار کرنش قائم و افقی از قرائت کرنش‌سنج ورقی به طول ۳۰ میلی‌متر (PFL-30-11) که بر سطح



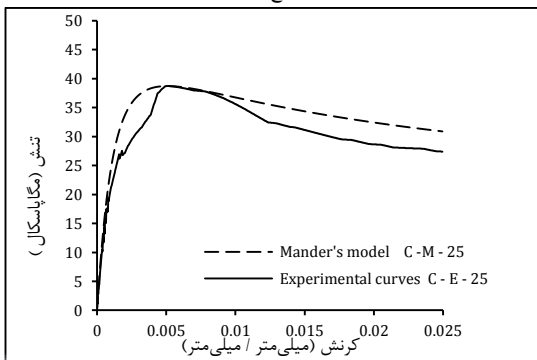
(الف)



(ب)

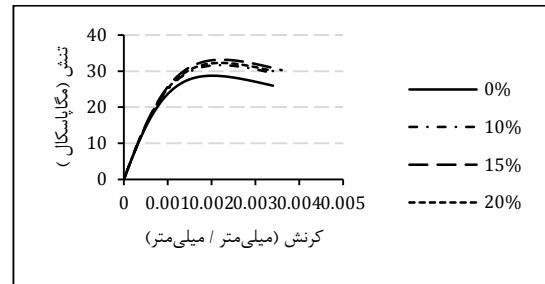


(ج)



(د)

شکل ۲- مقایسه نمودارهای بتن محصور شده بدون مواد باطله معدن مس و مدول پیشنهادی Mander (الف: بتن فاقد دور پیچ، ب) بتن محصور با گام ۷۵ میلی متر، ج) بتن محصور شده با دور پیچ با گام ۵۰ میلی متر، د) بتن محصور شده با دور پیچ با گام ۵۰ میلی متر



شکل ۵- رابطه تنش- کرنش بتن محصور نشده حاوی مواد باطله جایگزین سیمان

بر اساس نتایج آزمایش به کارگیری مواد باطله مس باعث بهبود مقاومت و تغییر شکل متناظر حداکثر مقاومت نسبت به نمونه کنترل می گردد (جدول (۴)). دلیل افزایش مقاومت نمونه ها می تواند ناشی از ریزی مواد باطله و واکنش پوزولانی سیلیس موجود در آن باشد.

۳-۲- بتن محصور شده

شکل (۶) تأثیر محصورشدگی در منحنی تنش- کرنش بتن فاقد مواد باطله که توسط دور پیچ بافاصله گام ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی متر را نشان می دهد. مقایسه این نمونه ها نسبت به نمونه فاقد دور پیچ بیانگر این است که محصورشدگی می تواند منجر به افزایش مقاومت شده و با کاهش فاصله طولی بین دور پیچ ها (گام) تغییر شکل نهائی افزایش قابل توجهی پیدا می کند. میزان افزایش مقاومت نمونه های بتن محصور شده از رابطه نسبت مقادیر حداکثر مقاومت بتن محصور شده به حداکثر مقاومت بتن محصور نشده قابل محاسبه است. بر اساس جدول (۵)، برای نمونه بتن کنترل (فاقد مواد باطله مس)، هنگامی که نسبت حجمی محصورشدگی از ۱/۰۱ به ۳/۰۴ درصد افزایش می یابد، مقاومت بتن محصور شده از ۱/۹ به ۳۴/۷ درصد افزایش پیدا می کند. همچنین افزایش تغییر شکل متناظر با حداکثر مقاومت بتن محصور شده نیز از ۵/۴ به ۱۵۰/۶ درصد است. از طرف دیگر، افزایش نسبت حجمی محصورشدگی در بتن حاوی مواد باطله از ۱/۰۱ به ۳/۰۴ درصد منجر به افزایش مقاومت از ۳/۷ به ۳۷/۵ درصد شده است.

تغییر شکل متناظر با حداکثر مقاومت از ۶/۳ به ۱۸۶/۵ درصد ارتقاء یافته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که در بتن محصور شده حاوی مواد باطله با افزایش نسبت حجمی محصورشدگی از ۱/۰۱ درصد به ۳/۰۴ درصد، مقدار مقاومت از ۱/۸ درصد به ۲/۸ درصد ارتقاء می یابد. روند تغییرات تغییر شکل متناظر با حداکثر مقاومت نمونه بتن محصور شده نیز از ۰/۹ درصد به ۳۵/۹ درصد می رسد. نتایج حاصله نمایانگر این است که استفاده از مواد باطله مس می تواند منجر به بهبود مقاومت و تغییر شکل متناظر حداکثر مقاومت گردد.

جدول ۵- مقادیر حداکثر مقاومت و تغییر شکل متناظر آن‌ها

در بتن محصورشده حاوی مواد باطله مس				
تغییر شکل متناظر با حداکثر مقاومت نسبی	تغییر شکل متناظر با حداکثر مقاومت بتن محصورشده (مگا پاسکال)	مقاومت نسبی	حداکثر مقاومت بتن محصورشده (مگا پاسکال)	شماره نمونه
۱/۰۰	۰/۰۰۲۰۲۵	۱/۰۰	۲۸/۷۴	C-E-0
۱/۰۵۴	۰/۰۰۲۱۳۵	۱/۰۱۹	۲۹/۲۹	C-E-75
۱/۳۹۵	۰/۰۰۲۸۲۵	۱/۰۹۲	۳۱/۳۸	C-E-50
۲/۵۰۶	۰/۰۰۵۰۷۵	۱/۳۴۷	۳۸/۷۱	C-E-25
۱/۰۰	۰/۰۰۲۲۲۵	۱/۰۰	۳۳/۳۵	T-E-0
۱/۰۶۳	۰/۰۰۲۳۶۵	۱/۰۳۷	۳۴/۵۸	T-E-75
۱/۵۷۸	۰/۰۰۳۵۱۲	۱/۱۲۷	۳۷/۶۰	T-E-50
۲/۸۶۵	۰/۰۰۶۳۷۵	۱/۳۷۵	۴۵/۸۷	T-E-25

منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های E-T و E-C به ترتیب نتایج آزمایش بتن محصورشده معمولی و بتن محصورشده حاوی ۱۵٪ مواد باطله با درصد‌های مختلف دور پیچ در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. در این شکل‌ها رفتار این نوع بتن‌ها بر اساس مدل پیشنهادی Mander و همکاران (۱۹۸۸) و نیز برای هر نمونه آزمایشگاهی ترسیم شده است. مدل پیشنهادی Mander و همکاران (۱۹۸۸)، رابطه تنش- کرنش بتن محصورشده را به صورت فرمول زیر ارائه کرده است:

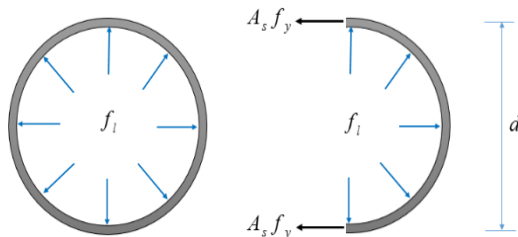
$$f_c = \frac{f_{cc} \times \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}\right) \times r}{r - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}\right)^r} \quad (1)$$

مقاومت در هر نقطه، f_c ، حداکثر مقاومت f_{cc} ، تغییر شکل در هر نقطه از مقاومت ϵ_c ، تغییر شکل متناظر حداکثر مقاومت ϵ_{cc} ، در مدل پیشنهادی فوق مقدار r از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

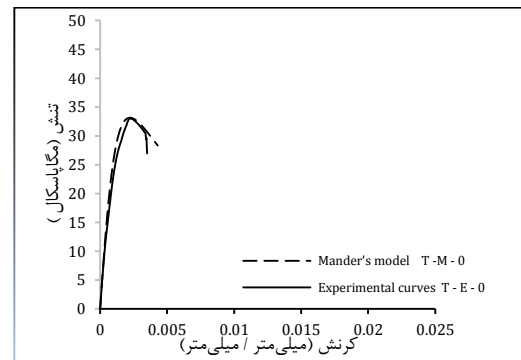
$$r = \frac{E_c}{E_c - E_s} \quad (2)$$

E_c مدول الاستیسیته بتن، E_s مدول الاستیسیته که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

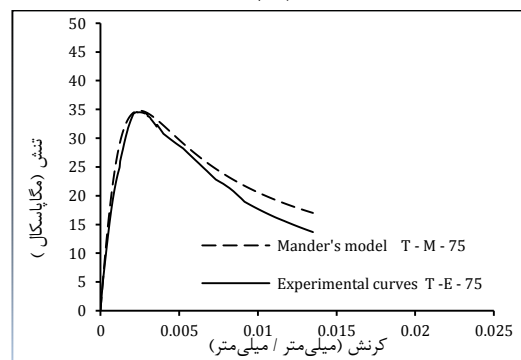
$$E_s = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (3)$$



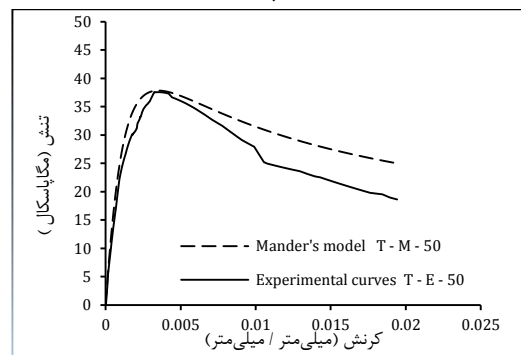
شکل ۸- رابطه بین نیروی محدودکننده و فشار جانبی



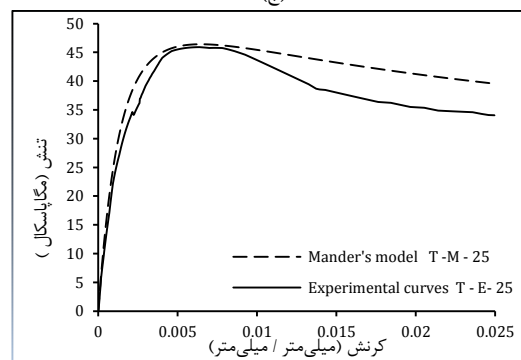
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷- مقایسه نمودارهای بتن محصورشده حاوی ۱۵ درصد

مواد باطله معدن مس و مدول پیشنهادی Mander:

(الف) بتن فاقد دور پیچ، (ب) بتن محصور با گام ۷۵ میلی‌متر،

(ج) بتن محصورشده با دور پیچ با گام ۵۰ میلی‌متر،

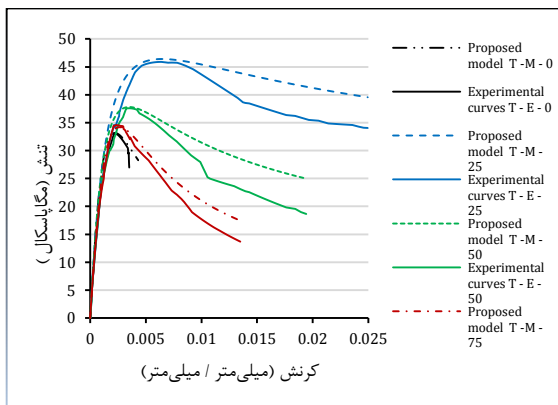
(د) بتن محصورشده با دور پیچ با گام ۲۵ میلی‌متر

کنند. اما در قسمت نزولی منحنی تنش- کرنش، تغییرات قابل- توجه وجود دارد. برای تهیه منحنی یا تابع ریاضی مناسب و منطبق بر نتایج آزمایشگاهی به دست آمده (منحنی برازش) و تعیین مقدار r اصلاح شده از برنامه اکسل استفاده شد. شکل (۹- الف) مقایسه منحنی های تنش- کرنش تجربی با مدل پیشنهادی Mander و همکاران برای نمونه های حاوی مواد باطله را نشان می دهد. شکل (۹- ب)، مقایسه منحنی های تنش- کرنش تجربی با منحنی برازش همان نمونه ها را نشان می دهد. نتایج فرآیند برازش به صورت مقادیر r اصلاح شده گزارش گردیده است. بر اساس مقادیر حاصله می توان رابطه زیر را برای بتن محصور شده حاوی مواد باطله معدن مس پیشنهاد کرد.

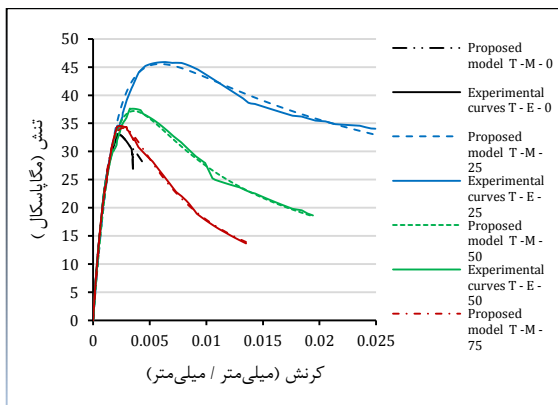
$$r = \frac{E_c}{\frac{E_c}{1.97} + 12000 \times k} \quad (9)$$

مقدار مدول الاستیسیته بتن حاوی مواد باطله معدن مس بر اساس نتایج آزمایش از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$E_c = 4.784 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (10)$$



(الف)



(ب)

شکل ۹- مقایسه منحنی تنش- کرنش مقادیر آزمایشگاهی

بتن محصور شده حاوی مواد باطله با مدل پیشنهادی Mander،

الف) بدون اصلاح r ، ب) با اصلاح مقدار r

شاخصه محصورشدگی به مقاومت بتن و نیروی جانبی محدوده کننده طبق رابطه زیر بستگی دارد. نیروی جانبی محدودکننده طبق شکل (۸) با فشار جانبی در ارتباط است.

$$k = \frac{2 \times f_t}{f'_c} \quad (4)$$

f_t نیروی جانبی محدودکننده یا ماکزیمم فشار جانبی مؤثر بتن برحسب مگاپاسکال، f'_c مقاومت بتن برحسب مگاپاسکال

$$f_t \cong \frac{2 \times A_s \times f_y}{d \times s} \quad (5)$$

A_s سطح مقطع میلگرد دور پیچ برحسب میلی متر مربع، f_y مقاومت جاری شدن میلگرد دور پیچ برحسب مگاپاسکال، d قطر میلگرد دور پیچ برحسب میلی متر، s فاصله طولی میلگرد دور پیچ یا گام دور پیچ برحسب میلی - متر.

در شکل های (۶) و (۷) مشاهده می شود که رفتار تنش- کرنش برای هر دو نوع نمونه ها تقریباً مشابه است. با این حال، مخلوط های T-E (حاوی مواد باطله مس) دارای میزان مقاومت بهبودیافته با سطح محصورشدگی مشابه همانند مخلوط های E-C نسبت به مخلوط های حالت بتن محصور نشده (0-E-C) و T-E-0 است. روند افزایشی تغییر شکل در مخلوط های T-E نسبت به مخلوط های C-E سریع تر و بیشتر است. نمونه مخلوط بتن محصور نشده در هر دو نوع از نمونه ها دارای یک شکست شکننده است، رفتار نمونه های محصور نشده در شاخه صعودی تا حداکثر مقاومت، تقریباً مشابه بوده و شاخه نزولی منحنی آن ها نمی تواند تعیین کننده باشد. این به خاطر این واقعیت است که بتن کمتر محصور شده با دور پیچ به شدت تحت تأثیر مقاومت است. اما رفتار نمونه های بیشتر محصور شده تابع نسبت حجمی محصورشدگی است.

$$\rho = \frac{A_s \times \pi d}{\frac{\pi}{4} \times d^2 \times s} = \frac{4 \times A_s}{d \times s} \quad (6)$$

ρ نسبت حجمی محصورشدگی.

نیروی جانبی یا فشار جانبی مؤثر در اثر محصورشدگی از رابطه زیر به دست می آید:

$$f_t = \frac{\rho \times f_y}{2} \quad (7)$$

بنابراین شاخص محصورشدگی با میلگرد دور پیچ برابر:

$$k = \frac{\rho \times f_y}{f'_c} \quad (8)$$

برای تهیه یک مدل تحلیلی مناسب برای رفتار تنش- کرنش بتن محصور شده حاوی مواد باطله، نتایج آزمون ها با مدل های موجود برای بتن محصور شده مقایسه شد. اکثر مدل ها در قسمت صعودی توانستند به طور صحیح رفتار تنش- کرنش را برآورد

معروف است. شعاع انتقالی (Transition radius) این ناحیه می-تواند با شعاع انتقالی منحنی تنش- کرنش بتن مرتبط باشد. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش محصورشدگی و مواد باطله، شعاع انتقالی نسبت به بتن فاقد مواد باطله مس اندکی افزایش پیدا می-کند. بعد از ناحیه انتقالی، رابطه خطی بین تغییر شکل جانبی پلاستیک و تغییر شکل طولی پلاستیک وجود دارد. یکی از پارامترهای مؤثر در رابطه خطی بین تغییر شکل جانبی پلاستیک و تغییر شکل طولی پلاستیک، می-تواند نشان‌دهنده سطح محصورشدگی باشد (Park و Paulay، ۱۹۷۵). بر اساس نتایج آزمایش شماره ۱۰ و مقایسه (الف) و (ب) قسمت تغییر شکل جانبی بتن محصورشده حاوی مواد باطله نسبت به بتن محصورشده کنترل با گام ۲۵ میلی‌متر افزایش تقریباً ۲٪ دارد که نشان‌دهنده افزایش سطح محصورشدگی است.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده و بررسی‌های صورت پذیرفته در قالب این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت:

۱- مقاومت بتن محصور نشده با اضافه کردن مواد باطله معدن مس نسبت به بتن کنترل (عادی) بهبود پیدا می‌کند و می‌توان آن را برای مصرف در فعالیت‌های ساخت‌وساز پیشنهاد کرد.

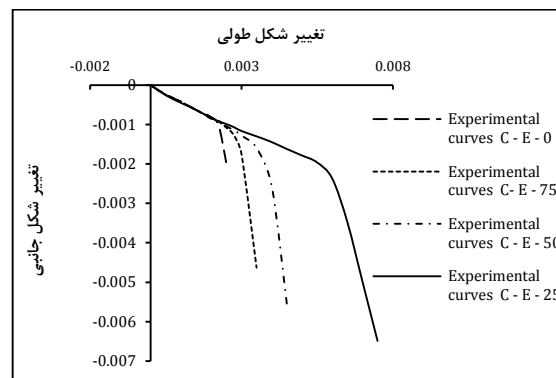
۲- مقاومت بتن و نسبت حجمی محصورکننده دو عامل مهم تأثیرگذار بر ناحیه نزولی منحنی تنش و کرنش برای بتن محصورشده فولادی است.

۳- میزان مقاومت و تغییر شکل متناظر حداکثر مقاومت با افزودن مواد باطله می‌تواند بهبود یابد. مقاومت بتن محصورشده حاوی مواد باطله از ۱/۸ درصد به ۲/۸ درصد و تغییر شکل متناظر با حداکثر مقاومت از ۰/۹ درصد به ۳۵/۹ درصد به ترتیب برای نسبت حجمی محصورشدگی از ۱/۰۱ درصد به ۳/۰۴ درصد است.

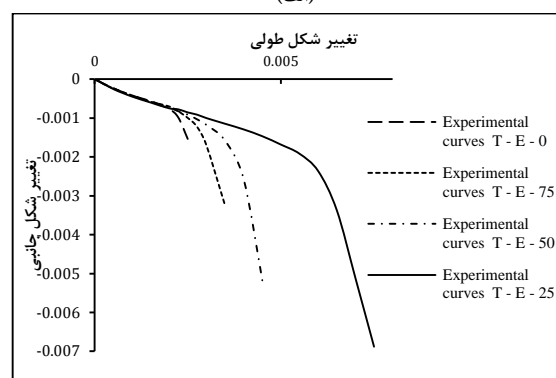
۴- محصور کردن نمونه بتن حاوی مواد باطله سبب بهبود مقاومت و شکل‌پذیری شده و می‌توان به‌کارگیری آن را نیز در پروژه‌های ساخت‌وساز و سازه‌های مقاومت در برابر زلزله پیشنهاد کرد.

۵- مدل پیشنهادی توسط Mander و همکاران را برای بتن محصورشده را می‌توان برای بتن حاوی مواد باطله مس با اصلاح در مقدار r استفاده کرد.

۶- رابطه خطی منحنی تغییر شکل طولی- تغییر شکل جانبی پلاستیک افزایش حدود ۲٪ داشته که ارتقاء سطح محصورشدگی در اثر استفاده از مواد باطله را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- نمودار منحنی تغییر شکل طولی و تغییر شکل جانبی، (الف) بتن محصورشده فاقد مواد باطله، (ب) بتن محصورشده حاوی مواد باطله

نمودار منحنی تغییر شکل طولی به تغییر شکل جانبی بتن محصورشده مورد مطالعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. از شکل (۱۰) قابل مشاهده است که تغییرات اندکی در هر دو نمودار وجود دارد. افزایش مقاومت بتن در اثر به‌کارگیری مواد باطله منجر به پذیرش مقاومت بیشتر شده و با در نظر گرفتن محصورشدگی همسان، مقادیر تغییر شکل جانبی اندکی افزایش پیدا کرده است. بر اساس نتایج به دست آمده از رفتار بتن محصورشده منحنی تغییر شکل جانبی نسبت به تغییر شکل طولی را می‌توان به سه منطقه تقسیم‌بندی کرد. پاسخ بتن به پارهای وارده اولیه (حالت الاستیک) تا حد مجاز به صورت خطی است. سپس تغییرات طبق قسمت سخت‌شوندگی تا حداکثر مقاومت به نمونه به صورت غیرخطی است. در بتن محصورنشده، تغییر شکل جانبی در حداکثر مقاومت تقریباً نصف تغییر شکل طولی در سطح مقاومت حداکثری است. اما برای بتن محصورشده این روند تابع نسبت حجمی میلگرد تقویت جانبی است. اگرچه در این ناحیه مقدار مقاومت حداکثری نقش تعیین‌کننده دارد. محدوده آن از قسمت نهایی خطی الاستیک تا قسمت ابتدایی خطی پلاستیک بوده و به ناحیه انتقال (Transition region)

- spiral", *Matériaux et Construction*, 1978, 11 (5), 339-45.
- Park R, Curvature Ductility of Circular Reinforced Concrete Columns Confined by ACI Spirals. In 6th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials 1977, 1, 342-349. Tech. Papers.
- Watanabe F, Muguruma H, Tanaka H, Katsuda S, Improving the flexural ductility of prestressed concrete beam by using the high yield strength lateral hoop reinforcement, In FIP, Symposia on Partial Prestressing and Practical Construction in Prestressed and Reinforced Concrete, Proceedings: Part, 1980, 2, 398-406.
- Fafitis A, Shah SP, Lateral reinforcement for high-strength concrete columns, ACI Special Publication, 1985, 87, 213-32.
- Mander JB, Priestley MJ, Park R, Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of structural engineering*, 1988, 114 (8), 1804-26.
- Ozbakkaloglu T, Lim JC, Vincent T, "FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models", *Engineering Structures*, 2013, 49, 1068-88.
- Ozbakkaloglu T, Saatcioglu M, "Seismic behavior of high-strength concrete columns confined by fiber-reinforced polymer tubes", *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10 (6), 538-49.
- Ahmad SH, Shah SP, "Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement", In *Journal Proceedings*, 1982, 79 (6), 484-490.
- Lokuge WP, Sanjayan JG, Setunge S, "Stress-strain model for laterally confined concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005, 17 (6), 607-16.
- Talaat MM, "Computational modeling of progressive collapse in reinforced concrete frame structures", University of California, Berkeley, 2007.
- Park RL, Park R, Paulay T, "Reinforced concrete structures", John Wiley & Sons, 1975.
- ۵- مراجع
- Deja J, Uliasz-Bochenczyk A, Mokrzycki E, "CO2 emissions from Polish cement industry", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4 (4), 583-588.
- Imbabi MS, Carrigan C, McKenna S, "Trends and developments in green cement and concrete technology", *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2012, 1 (2), 194-216.
- Rehan R, Nehdi M, "Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry", *Environmental Science & Policy*, 2005, 8 (2), 105-14.
- Gartner E, "Industrially interesting approaches to 'low-CO2' cements", *Cement and Concrete research*, 2004, 34 (9), 1489-98.
- Flower DJ, Sanjayan JG, "Green house gas emissions due to concrete manufacture", *The international Journal of life cycle assessment*, 2007, 12 (5), 282.
- Glavind M, Munch-Petersen C, Green concrete-a life cycle approach, In *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9-11 September 2002*, 771-786. Thomas Telford Publishing.
- Kumar AA, Santhi AS, Ganesh GM, "Strength and durability of green concrete", *International Journal of Structural Engineering*, 2015, 6 (1), 23-32.
- Survey UG, "Mineral commodity summaries 2018", US Geological Survey, 2018.
- Gordon RB, "Production residues in copper technological cycles. Resources", *Conservation and Recycling*, 2002, 36 (2), 87-106.
- Thomas BS, Damare A, Gupta RC, Strength and durability characteristics of copper tailing concrete", *Construction and Building Materials*, 2013, 48, 894-900.
- Sultan HA, "Stabilized copper mill tailings for highway construction", *Transportation research record*, 1979, 734.
- Kundu S, Aggarwal A, Mazumdar S, Dutt KB, "Stabilization characteristics of copper mine tailings through its utilization as a partial substitute for cement in concrete: preliminary investigations", *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75 (3), 227.
- Qiu G, Luo Z, Shi Z, Ni M, "Utilization of coal gangue and copper tailings as clay for cement clinker calcinations", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2011, 26 (6), 1205-10.
- Onuaguluchi O, Eren Ö, "Rheology, strength and durability properties of mortars containing copper tailings as a cement replacement material", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2013, 17 (1), 19-31.
- Huang XY, Ni W, Cui WH, Wang ZJ, Zhu LP, "Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, 2012, 27 (1), 1-5.
- Desayi P, Iyengar KS, Reddy TS, "Equation for stress-strain curve of concrete confined in circular steel

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Effect of Copper Mine Tailing on the Stress-Strain Behavior of Confined Concrete

Jamshid Esmaeili *, Hossein Aslani

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 05 June 2018; Accepted: 15 July 2019

Keywords:

Stress-strain behavior, Copper mine tailing, Confined concrete, Green concrete.

1. Introduction

One of the important factors that affect the concrete behavior is confinement. On the other hand, strength and ductility of concrete depend on the stress-strain characteristics of concrete, which they are also influenced by the confinement of the members (Ahmad and Shah, 1982). Copper mine tailing (CMT) were used to produce environmentally friendly bricks instead of shale and clay by Ahmari and Zhang in 2012. Onuaguluchi and Eren (2016) reported the properties of CMT material used as proper material and a potential additive in mortar and concrete specimens. Huang et al. (2012) studied the application of CMT material to prepare autoclaved aerated concrete. The sum of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 in CMT material is 81.88%, which exceeds the 70 percent requirement for class N raw and calcined natural pozzolanas (ASTM C618). Therefore, CMT materials are expected the proper potential to produce pozzolanas (Thomas et al. 2013).

2. Methodology

Four concrete mix proportions have been designed to investigate the effects of CMT material on the stress-strain behavior of confined concrete. Ordinary Portland Cement (OPC) was replaced by CMT material at 0%, 10%, 15% and 20% by weight of cement. In this study, the coarse and fine aggregates were used Based on ACI 211 with a maximum size of 12.5 mm 4.75 mm respectively. For testing the stress- strain behavior was used the cylindrical molds of 150 mm diameter and 300 mm height. The CMT-concrete specimens were prepared and kept immersed in water for 56 days after one day of casting. The pitch of the spirals used were 75 mm, 50 mm and 25 mm (volumetric ratios 1.01%, 1.52% and 3.04%).

3. Results and discussion

3.1. Stress-strain behavior of unconfined concrete

The stress- strain curves of CMT-concrete specimens with various percentages of CMT material are shown in Fig. 1. The results show that the strength of unconfined concrete increases with increasing CMT material replacement level (up to 15%).

* Corresponding Author

E-mail addresses: j-esmaeili@tabrizu.ac.ir (Jamshid Esmaeili), haslani49@tabrizu.ac.ir (Hossein Aslani).

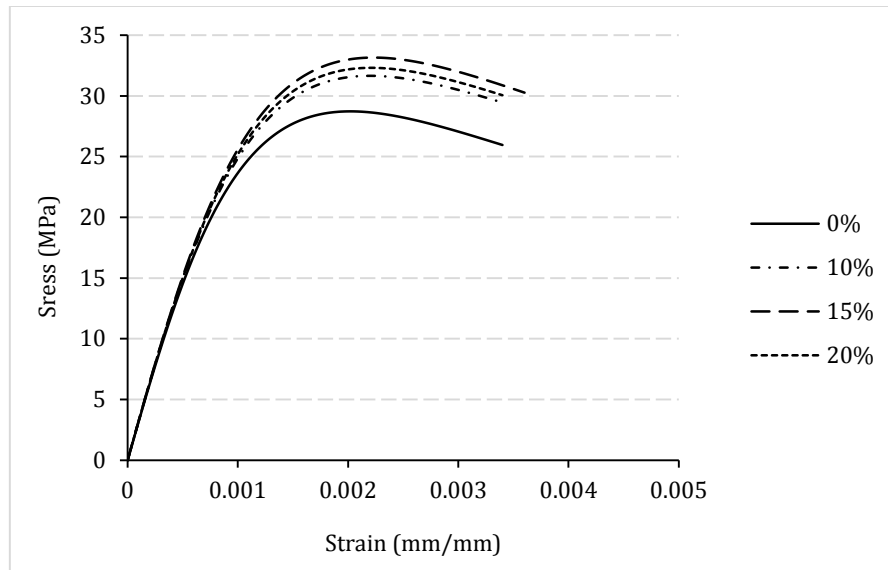


Fig. 1. Relationships between stress and strain of concrete with different CMT material replacement

3.2. Stress-strain behavior of confined concrete

The values of the strength enhancement of confined concrete, which is the ratio of the peak stress of confined CMT-concrete to the peak stress of unconfined concrete are shown in Table 1. Also, the strain enhancement was calculated the ratio of the strain at peak stress of confined concrete to the strain at peak stress of unconfined concrete (see Table 1). The strength and strain enhancement of CMT- concrete increased by 1.8% to 2.8% and 0.9% to 35.9% when the volumetric ratio of confinement was increased from 1.01% to 3.04%, respectively.

Table 1. Effect of confinement on strength and ductility

Specimen ID	Peak stress (MPa)	Strength enhancement	Strain at peak stress	Strain enhancement
C-E-0	28.74	1.00	0.002025	1.00
C-E-75	29.29	1.019	0.002135	1.054
C-E-50	31.38	1.092	0.002825	1.395
C-E-25	38.71	1.347	0.005075	2.506
T-E-0	33.35	1.00	0.002225	1.00
T-E-75	34.58	1.037	0.002365	1.063
T-E-50	37.60	1.127	0.003512	1.578
T-E-25	45.87	1.375	0.006375	2.865

3.2. Stress-strain model

In this study, the available models for the stress–strain behavior of confined CMT-concrete was compared with the model proposed by Mander et al. (1988). The result show that the stress-strain model proposed by Mander et al. (1988) can be used for CMT-concrete with a modification in the curve fitting factor (r).

4. Conclusions

1. The strength of concrete increase with increasing CMT material content (up to 15%). The peak strain also increases with increasing CMT material content.
2. The confined CMT- concrete appears to be suitable for construction activities design since the spiral confinement improves the strength, strain at peak stress.
3. For CMT- concrete confined can be used the stress-strain model proposed by Mander et al. with a modification in the curve fitting factor (r).

5. References

- Ahmad SH, Shah SP, "Stress- strain curves of concrete confined by spiral reinforcement", ACI J, 1982, 79, 484-90.
- Ahmari S, Zhang L, "Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization", Construction Building Material, 2012, 29, 323-331.
- Onuaguluchi O, Eren O, "Reusing copper tailings in concrete: corrosion performance and socioeconomic implications for the Lefke- Xeros area of Cyprus", Journal of Cleaner Prod, 2016, 112, 420-429. Constr. Build. Mater. 2013, 48, 894-900.
- Huang XY, Ni W, Cui WH, Wang ZJ, Zhu LP, "Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag", Construction Building Material, 2012, 27 (1), 1-5.
- Mander BJ, Priestley JNM, Park R, "Theoretical stress-strain model for confined concrete", ASCE Journal Structure Engineering, 1988, 144 (8), 1804-26.