

مطالعه آزمایشگاهی اثر اندازه دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده بر مقاومت چندمحوری بتن سبک

امیرحسین رنجبران^۱، یاسین محمدی^۲، شریف شاه‌بیک^{۳*}

۱. کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳. دانشیار گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

ایمیل: shahbeyk@modares.ac.ir

چکیده

با توجه به اهمیت استفاده از بتن سبک در مهندسی عمران، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی روی خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بتن سبک حاوی دانه‌های پلی‌استایرن منبسط‌شده، EPS، انجام گرفته است. با این حال مرور مطالعات موجود نشان می‌دهند که تاکنون تاثیر نسبت حجمی و اندازه دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده بر رفتار مکانیکی بتن EPS تحت بارگذاری چندمحوری مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، نمونه‌های بتن EPS متنوعی تهیه و تحت آزمایش فشاری تک محوری، کششی برزیلی و سه محوری قرار گرفته‌اند. سه قطر ۲/۲۵، ۲/۷۵ و ۳/۲۵ میلی‌متر برای دانه‌های EPS به کار گرفته شد و نمونه‌ها در درصد تخلخل‌های ۰، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ تهیه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با کاهش قطر دانه‌های EPS برای درصد تخلخل یکسان، مقاومت سه‌محوری بتن EPS در فشارهای جانبی پایین، افزایش می‌یابد. این اثر با بالا رفتن فشار جانبی کاهش می‌یابد که علت آن تبدیل شدن سازوکار خرابی از ایجاد ترک‌های موضعی بزرگ به خردشدگی گسترده در تمام نمونه است.

واژگان کلیدی: بتن سبک EPS، اثر اندازه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت چندمحوری، سطح تخریب، مقطع نصف‌النهاری فشاری.

۱- مقدمه

عایق بودن) از لحاظ اقتصادی گام‌های بلند و مهمی برداشته‌اند. به صورت کلی بتن‌های سبک به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ (۱) بتن‌های سبک اسفنجی که شامل بتن‌های گازی و کفی هستند و (۲) بتن‌های حاوی سبکدانه. یکی از انواع بتن‌های سبک، بتن حاوی دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده (EPS) است که متعلق به گروه دوم از بتن‌های سبک است. پلی‌استایرن منبسط شده به دلیل ساختار سلولی بسته، چگالی بسیار پایینی داشته و امروزه در موارد متعددی در صنعت ساختمان به کار گرفته می‌شود.

امروزه بتن به عنوان رایج‌ترین مصالح ساختمانی کاربرد گسترده‌ای در صنعت ساختمان دارد. با این حال یکی از معایب مهم سازه‌های بتنی وزن بسیار زیاد آنهاست که با میزان نیروی وارد شده به ساختمان در اثر زلزله نسبت مستقیم دارد. مهندسین سازه در دنیا با استفاده از بتن سبک در قسمت‌های مختلف بنا با کاهش وزن سازه به طور مستقیم (به دلیل سبکی ذاتی این نوع بتن) و صرفه‌جویی در مصرف انرژی به طور غیرمستقیم (به دلیل

بازه گسترده از چگالی بررسی کردند. مطابق نتایج به دست آمده، مقاومت فشاری نمونه با EPS به قطر ۲/۵ میلی‌متر به میزان ۳۰ درصد بیشتر از نمونه حاوی EPS به قطر ۶/۳ میلی‌متر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که سازوکار شکست نمونه‌ها وابسته به تخلخل است. برای تخلخل‌های پایین، اثر اندازه EPS بسیار مشهود بوده و شکست ترد با ترک‌های موضعی با تعداد کم رخ می‌دهد در حالی که در تخلخل‌های زیاد اثر اندازه EPS کم‌رنگ شده و سازوکار شکست شکل‌پذیرتر می‌شود.

با بررسی مطالعات انجام‌شده توسط پژوهشگران مختلف روی بتن سبک حاوی دانه‌های پلی‌استایرن، مشاهده می‌شود که هیچ‌یک اثر اندازه دانه‌های EPS بر مقاومت و خواص بتن تحت بارگذاری چندمحوری را در نظر نگرفته‌اند. از این رو هدف از این مطالعه، بررسی اثر اندازه دانه‌های EPS بر مقاومت بتن سبک تحت بارگذاری چندمحوری و مقایسه سطح تخریب به دست آمده از بتن حاوی دانه‌های پلی‌استایرن با سطوح تخریب بتن معمولی است.

۲- مصالح، نمونه سازی و روش انجام آزمایش‌ها

۲-۱ مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان تیپ II در ترکیب بتن استفاده شده است. آب مصرفی در مطالعه حاضر، آب شرب تهران است. همچنین از ماسه بادی به عنوان بخش سنگدانه‌ای مخلوط بتنی استفاده شده است تا نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات شاخص پیشین قابل مقایسه باشد. شکل (۱) نمونه‌ای از این مصالح را نشان می‌دهد.

شکل ۱. نمونه‌ای از ماسه بادی مورد استفاده در مخلوط بتنی



Fig. 1. Fine sand used in concrete mix

تا به امروز مطالعات زیادی روی بتن EPS و خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آن صورت گرفته است. از جمله بررسی‌های انجام شده می‌توان به آزمایش‌های راویندراجاه و همکاران (۱۹۹۴) [1] در زمینه تعیین مشخصات شامل مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی، چگالی، افت، خزش، پایداری شیمیایی و پایداری حرارتی بتن EPS اشاره کرد. در مطالعه‌ای دیگر پری و همکاران (۱۹۹۱) [2] به بررسی جزییات طرح مخلوط، اثر ضربه و رفتار تنش-کرنش این نوع بتن‌ها پرداخته‌اند. بابو و همکاران (۲۰۰۳، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵) [3-5] و تانلیدی (۲۰۰۸) [6] و چن و همکاران (۲۰۱۰) [7] از افزودنی‌های معدنی (میکروسیلیس و خاکستر بادی) در ترکیب بتن EPS استفاده کردند و خواص مکانیکی بتن حاصل را با بتن EPS معمولی مورد مقایسه قرار دادند. مایلد، لروی و همکاران (۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷) [8-10] و بابو و همکاران (۲۰۰۶) [11] به بررسی اثر اندازه ذرات پلی‌استایرن منبسط شده روی مشخصات مکانیکی بتن و پیش‌بینی مقاومت فشاری آن پرداختند. برخی دیگر از پژوهشگران از جمله آمیانتی و بوتارو (۲۰۰۸) [12] و کن و همکاران (۲۰۰۹) [13] در تولید بتن پلی‌استایرنی از خرده‌های پلی‌استایرن بازیافتی استفاده کردند. به تازگی بابولیان و همکاران (۲۰۲۰) [14] با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طرح مخلوط بتن حاوی دانه‌های EPS، تاثیر نسبت‌های حجمی مختلف الیاف بر مقاومت کششی، مقاومت تک محوری و سه محوری بتن سبک EPS را مورد بررسی قرار دادند.

پارانت و لروی (۱۹۹۹) [15] برای اولین بار با انجام آزمایش روی بتن EPS متوجه شدند که برای چگالی یکسان، با کاهش اندازه دانه‌های EPS، مقاومت فشاری نمونه افزایش می‌یابد. در مطالعه مذکور از نمونه‌های استوانه‌ای حاوی دانه‌های EPS با قطر ۱، ۲/۵ و ۶ در نسبت حجمی مختلف استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه حاوی EPS با قطر ۱ میلی‌متر به میزان ۵۰٪ بیشتر از همان نمونه با چگالی یکسان ولی دارای EPS با قطر ۶ میلی‌متر است. همچنین با افزایش تخلخل نمونه اثر سایز EPS ناچیز می‌شود.

در ادامه این مطالعات، مایلد و همکاران (۲۰۰۷) [10] با انجام مطالعات آزمایشگاهی، اثر اندازه EPS بر مقاومت فشاری را در

شکل (۳-الف)، و سپس این دانه‌های در داخل آب با دماهای متفاوت عمل‌آوری شد شکل (۳-ب). با توجه به این‌که قطر دانه‌های خام تقریباً یکسان است، در این روش با تنظیم دمای آب می‌توان دانه‌هایی با قطر متفاوت تهیه کرد. برای اطمینان از جداسازی مناسب اندازه دانه‌ها، نمونه‌های به‌دست‌آمده به کمک الک‌های شماره ۷، ۸ و ۱۰ جداسازی شدند. قطر دانه‌های به دست آمده به ترتیب ۲/۲۵، ۲/۷۵ و ۳/۲۵ میلی‌متر می‌باشند.

شکل ۳. دانه‌های پلی‌استایرن خام (الف) و عمل‌آوری شده (ب)

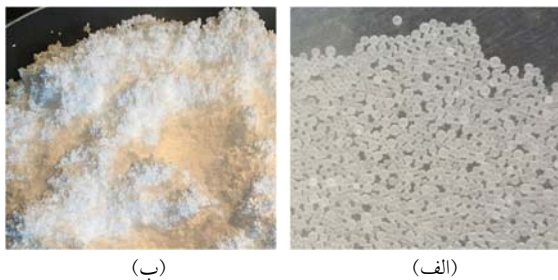


Fig. 3. (a) Raw expandable polystyrene and (b) prepared EPS beads

۲-۲ طرح مخلوط

خواص بتن، با تغییر متغیرهای مختلف به صورت پیچیده‌ای تحت تاثیر قرار می‌گیرند، بنابراین تعیین نسبت‌های مخلوط بتن EPS نیاز به دقت فراوانی دارد. طرح مخلوط مناسب در این پژوهش به صورت تجربی و با انجام آزمایش روی نمونه‌های مختلف به دست آمده است. از آنجایی‌که تمرکز اصلی این تحقیق بررسی اثر اندازه و نسبت حجمی دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده روی خواص مکانیکی بتن EPS می‌باشد، لازم است نمونه‌های تهیه شده به لحاظ ریزساختاری تا حد امکان با نمونه‌های ساخته شده در مطالعات شاخص پیشین قابل مقایسه باشند؛ بنابراین در تحقیق حاضر نیز مشابه مطالعات مایلد و همکاران [10]، ترکیب مصالح بتن بدون حضور درشت دانه است.

برای به دست آوردن طرح مخلوط مناسب بر اساس مصالح مصرفی و مقاومت فشاری، در این مطالعه ۹ طرح مخلوط با نسبت‌های مختلف وزنی ماسه به سیمان و آب به سیمان تهیه شد. برای هر طرح مخلوط دو نمونه مکعبی با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر ساخته و پس از عمل‌آوری و خارج نمودن از آب و خشک شدن در شرایط آزمایشگاه، نمونه‌ها تحت بارگذاری تک‌محوری فشاری قرار گرفتند (شکل ۴).

دانه‌بندی ماسه مورد استفاده با استفاده از الک‌های شماره ۸ تا ۲۰۰ طبق رویه استاندارد ASTM استخراج شد. برای این منظور ابتدا ۸ کیلوگرم از ماسه به چهار گروه ۲ کیلوگرمی تقسیم شده و سپس دانه‌بندی هر یک از گروه ماسه‌ها محاسبه شد. شکل (۲) درصد وزنی مانده روی الک‌های مختلف را برای ماسه مصرفی نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که نمونه‌های مختلف ماسه مورد استفاده دارای رطوبت یکسانی نبود، ضمن محاسبه درصد آب مورد نیاز برای رسیدن ماسه به حالت اشباع با سطح خشک، تمامی ماسه مصرفی ابتدا توسط دستگاه خشک‌کن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه خشک شد.

با توجه به این‌که بتن مورد بررسی در این مطالعه تنها حاوی ریزدانه است، به منظور انتخاب نوع و درصد فوق روان کننده مناسب، سه فوق روان کننده متفاوت با نام‌های BCB16، BC20 و BC23 تولید شده توسط شرکت شیمی بتن خاتم مورد بررسی قرار گرفت. از این میان دو نمونه BC20 و BC23 بر پایه پلی کربوکسیلات و نسل چهارم روان‌سازهای بتن هستند که میزان مصرف آن‌ها نسبت به روان‌کننده‌های نسل اول حدود یک سوم می‌باشند و منجر به کاهش کلی هزینه‌ها و تراکم بهتر و افزایش مقاومت و اسلامپ بتن می‌شوند.

شکل ۲. درصد باقی مانده روی هر الک برای ماسه مصرفی

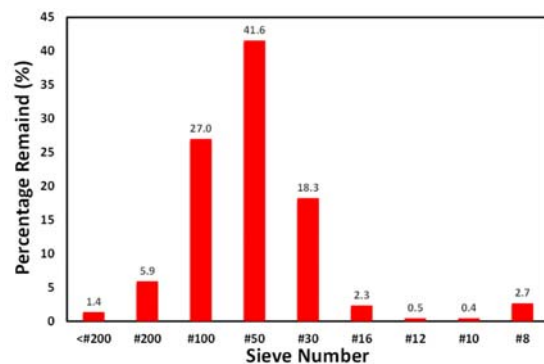


Fig. 2. Percentage remained on each sieve for the sand.

با توجه به نیاز به دانه‌های پلی‌استایرن با قطرهای متفاوت و از آنجایی‌که دانه‌های موجود در بازار بیشتر دارای قطرهای مشابه بودند، دانه‌های مورد نیاز برای نمونه‌سازی در آزمایشگاه تهیه شد. برای این منظور ابتدا دانه‌های خام پلی‌استایرن تهیه شد،

برای محاسبه اسلامپ، دو روش محاسبه مقدار کاهش ارتفاع نمونه و روش اندازه‌گیری میانگین مقدار پخش‌شدگی ملات در دو جهت عمود بر هم، به کار گرفته شد. این اندازه‌گیری‌ها پس از سه دقیقه از پایان اختلاط مصالح صورت گرفته و نتایج آزمایش برای هر نوع روان‌کننده در جدول (۲) ارائه شده است. به دلیل وجود دانه‌های پلی‌استایرن، روانی بیش از اندازه مخلوط مناسب نیست و موجب جداشدگی دانه‌های پلی‌استایرن در هنگام اختلاط می‌شود. پس از مقایسه اسلامپ‌های به دست آمده از فوق روان‌کننده‌های مختلف با درصدهای متفاوت، در نهایت فوق روان‌کننده BC23 با ۰/۶ درصد وزن سیمان مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲. اثر روان‌کننده‌های مورد بررسی بر اسلامپ

Lubricant	Percentage	Spread (mm)	Height Reduction (mm)
BCB16	0.5	107.9	9.25
BCB16	0.8	102.8	9.55
BCB16	1.6	105.6	9.70
BCB16	2.0	104.8	16.00
BC20	0.3	104.8	9.65
BC20	0.8	105.5	8.75
BC20	1.2	106.5	13.50
BC20	1.4	294.4	62.00
BC23	0.2	105.6	9.05
BC23	0.4	103.6	10.15
BC23	0.6	108.0	16.00
BC23	0.8	274.1	60.30

Table 2. The effect of investigated lubricants on slump

۲-۴ ساخت نمونه‌ها

برای بررسی اثر تخلخل نمونه، چهار درصد حجمی از دانه‌های EPS، برابر با ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۴-۱ قالب‌بندی و ساخت

از آنجایی که انجام آزمایش چندمحوری و کششی برزلی نیاز به نمونه‌های استوانه‌ای می‌باشد؛ نمونه‌های نهایی در قالب‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰ و قطر ۵ سانتی‌متر مطابق شکل (۶) ساخته شدند. به دلیل چسبندگی بین لوله‌های آلومینیومی و بتن، از تلق‌های پلاستیکی به عنوان جداکننده در داخل لوله‌ها استفاده شده است.

در پایان با توجه به محدودیت‌های موجود برای انجام آزمایش سه محوری به لحاظ فشار جانبی قابل اعمال، تضمین یکنواختی نمونه‌های مختلف و همچنین جلوگیری از تخلخل بیش از حد نمونه‌ها، از میان طرح‌های مخلوط مورد بررسی، نسبت وزنی آب به سیمان ۰/۵۵ و نسبت وزنی ماسه به سیمان ۲/۰ انتخاب شد. شکل ۴، نمونه مکعبی در آزمایش تک‌محوری فشاری برای تعیین طرح مخلوط بتن



Fig. 4. Cubic sample in uniaxial compressive test to determine concrete mix design

۲-۳ آزمایش اسلامپ

به منظور محاسبه میزان و نوع روان‌کننده مناسب، از هرکدام از فوق روان‌کننده‌های ذکر شده در قسمت قبل، ۴ درصد وزنی مختلف بر اساس وزن سیمان، در ملات ریخته شد. با توجه به توصیه اولیه سازنده، برای فوق روان‌کننده BCB16 درصدهای ۰/۵، ۰/۸، ۱/۶ و ۲، برای فوق روان‌کننده BC20 درصدهای ۰/۳، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۶ و برای فوق روان‌کننده BC23 درصدهای ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به اینکه بتن مورد استفاده در این پژوهش فاقد درشت‌دانه است به منظور اندازه‌گیری اسلامپ نمونه‌های تهیه شده به جای استفاده از مخروط رایج، مطابق رویه پیشنهادی استاندارد EFNARC برای بتن خود متراکم از یک مخروط کوچک به ارتفاع ۶ cm، قطر بالای ۷ cm و قطر پایین ۱۰ cm مطابق شکل (۵) استفاده شد.

شکل ۵. مخروط اندازه‌گیری اسلامپ نمونه‌ها



Fig. 5. Slump cone test tool.

اضافه کرده تا به مدت ۴ الی ۵ دقیقه مخلوط شود. پس از آمیخته شدن کامل اجزای تشکیل دهنده، شکل (۷-ب)، ملات بتن در ۳ مرحله در قالب ریخته و در هر مرحله نیز با یک میلگرد به قطر ۱۰ میلی متر، ۲۵ مرتبه کوبیده می شود.

شکل ۷. فرایند اختلاط بتن EPS



Fig. 7. EPS concrete mixing design process

در انتها نیز سطح تمامی نمونه ها صاف شده و در محیط مرطوب داخل آزمایشگاه به مدت یک روز در داخل قالب ها نگه داشتن می شوند. سپس نمونه ها پس از خروج از قالب به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب با دمای ثابت ۱۸ درجه نگه داری شده اند.

۲-۴-۲ نام گذاری نمونه ها

نام گذاری نمونه ها بدین شرح است که نمونه های دارای دانه های پلی استایرن مطابق شکل (۸) دارای اسم سه قسمتی هستند که حرف ابتدایی نمایانگر درصد EPS موجود در نمونه، قسمت دوم نمایانگر قطر دانه های EPS استفاده شده و قسمت سوم نشانگر شماره ی نمونه است.

شکل ۸. نام گذاری نمونه های بتن EPS

E	D	N
EPS Percentage	EPS Diameter	Sample No.
05	1 → 3.25 mm	01
10	2 → 2.75 mm	to
20	3 → 2.25 mm	15

Fig. 8. Naming EPS concrete sample

بعد از عمل آوری و خشک شدن نمونه ها، به منظور ایجاد سطح صاف در دو سمت نمونه، طبق استاندارد ASTM C617 اندودسازی با گوگرد استفاده شد. بعد از فرایند اندود سازی، نمونه ها ۱۶ ساعت در هوای آزاد قرار می گیرند تا اندود کاملاً خشک شود.

شکل ۶. قالب های استفاده شده در ساخت نمونه ها استوانه ای



Fig. 6. Concrete cylindrical molds

به منظور بررسی اثر اندازه دانه های پلی استایرن بر مقاومت نمونه ها، ۱۰ طرح مخلوط برای ساخت نمونه های نهایی در نظر گرفته شد. این ۱۰ طرح مخلوط شامل یک طرح مخلوط مرجع فاقد دانه های EPS بوده و در ۹ طرح مخلوط دیگر قطر و مقدار دانه های پلی استایرن تغییر می کند. از هر طرح مخلوط ۳ نمونه برای انجام آزمایش فشاری، ۳ نمونه برای انجام آزمایش کششی برزیلی و ۵ نمونه برای انجام آزمایش سه محوری در نظر گرفته شده است.

فرایند ترکیب مصالح برای ساخت بتن EPS در کارهای آزمایشگاهی پژوهشگران پیشین را می توان به دو دسته تقسیم کرد؛ چن و لیو [8]، مایلد و همکاران [7] و پری و همکاران [6] ابتدا مواد تشکیل دهنده خشک را باهم مخلوط کرده اند و سپس آب و سیمان را به مخلوط اضافه کرده اند و در انتها دانه های EPS را به ملات بتن اضافه می کنند. در روش دیگر سارادهی بابو و گانش بابو [2] و ایکس یو و همکاران [11]، ابتدا دانه های EPS را با مقداری آب و فوق روان کننده مخلوط کرده اند تا دانه های EPS مرطوب شوند و سپس تمامی مواد تشکیل دهنده و اضافی آب را به مخلوط اضافه کرده اند.

پس از ساخت نمونه های آزمایشی با تمامی روش های ترکیب موجود و مطالعه مطالعات پیشین، مشخص شد که برای بتن سبک دارای دانه های EPS و بدون درشت دانه بهترین روش برای جلوگیری از جداسازی دانه های EPS بدین صورت است که ابتدا سیمان و ماسه به مدت ۳ دقیقه با یکدیگر مخلوط شوند، سپس دانه های EPS به این مخلوط اضافه شده و با سرعت کم ترکیب شود شکل (۷-الف). سپس آب را به مخلوط خشک

۲-۵ انجام آزمایش‌ها

۲-۵-۱ آزمایش فشاری

تمامی آزمایش‌های فشاری توسط دستگاه UTM ساخت شرکت سنتام و با سرعت بارگذاری 0.3 mm/min انجام شده است. این دستگاه می‌تواند نیروی فشاری و کششی تا ظرفیت ۱۰۰ تن و با سرعت $0.01/0$ تا 180 میلی‌متر بر دقیقه را بر نمونه اعمال کند. دستگاه مذکور دارای دو فک در بالا و پایین است که فک بالایی متحرک و فک پایینی ثابت است.

ایجاد اصطکاک بین دو سر نمونه و فک‌های دستگاه باعث ایجاد محصورشدگی در همان محل‌ها و دقیق نبودن مقاومت به‌دست‌آمده از آزمایش می‌شود. در این تحقیق برای کاهش اصطکاک مذکور، از ورق‌های تفلون PTFE^۱ در بالا و پایین نمونه‌ها استفاده شد. همچنین برای از بین بردن ناترازی‌های احتمالی، از یک تکیه‌گاه با مفصل کروی داخلی در زیر نمونه‌ها استفاده شد. نمونه بتنی استوانه‌ای قبل از بارگذاری برای جلوگیری از پدیده محلی شدن علاوه بر استفاده از تکیه‌گاه با مفصل کروی و اندود سازی نمونه با گوگرد، ابتدا نیرویی بسیار اندک توسط دستگاه بر نمونه وارد کرده و سپس آن نیروی وارد را با استفاده از تکان دادن نمونه روی تکیه‌گاه با مفصل کروی از بین می‌بریم. این کار را تا جایی ادامه داده می‌شود که دیگر امکان کاهش نیرو با جابه‌جا کردن نمونه وجود نداشته باشد و نمونه مطابق شکل (۹-الف) آماده بارگذاری می‌شود.

۲-۵-۲ آزمایش کششی

برای به دست آوردن مقاومت کششی نمونه‌ها از آزمایش برزیلی استفاده شد. در این آزمایش نمونه‌ها مطابق (۹-ب) به صورت افقی در دستگاه مخصوص آزمایش که متناسب با ابعاد نمونه‌ها طراحی و ساخته شده قرار می‌گیرند و بار به صورت عمودی بر نمونه‌ها وارد می‌شود. کلیه آزمایش‌های کششی نیز توسط دستگاه UTM و با سرعت بارگذاری $0.5 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ انجام شده است. برای جلوگیری از پدیده محلی شدن و عدم تمرکز، از دو چوب نازک و انعطاف‌پذیر در محل بارگذاری خطی استفاده شد.

شکل ۹. (الف) نمونه‌ی تحت بارگذاری فشاری (ب) نمونه‌ی تحت بارگذاری کششی برزیلی



Fig. 9. Test setup: (a) uniaxial compression, (b) tensile splitting

۲-۵-۳ آزمایش چندمحوری

آزمایش چندمحوری بتن حاوی دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده توسط سلول هوک شکل (۱۰) با بیشترین ظرفیت بارگذاری ۱۰۰ مگاپاسکال انجام می‌شود. برای ایجاد فشار جانبی، نمونه استوانه‌ای در داخل سلول هوک قرار می‌گیرد و روغن توسط یک پمپ که به سلول متصل است به غشایی که داخل سلول وجود دارد و نمونه داخل آن قرار می‌گیرد فشار وارد می‌کند. سلول هوک نیز زیر دستگاه UTM، مطابق شکل (۱۰) برای اعمال نیروی قائم قرار داده می‌شود.

از هر طرح مخلوط ۵ نمونه تحت آزمایش چندمحوری قرار گرفته است. همچنین به دلیل محدودیت‌های موجود تنها امکان به دست آوردن نقاط خرابی روی نصف‌النهار فشاری ممکن است، بدین صورت که ابتدا فشار جانبی بر نمونه اعمال می‌شود و در طول آزمایش نیز مقدارش ثابت است. سپس نیروی فشاری قائم توسط دستگاه UTM بر نمونه اعمال می‌شود تا در نمونه شکست اتفاق افتد.

فشاری‌های جانبی اعمالی بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری طرح مخلوط‌ها انتخاب و بر نمونه‌ها وارد می‌شوند. بدین صورت که ابتدا فشاری معادل ۱۰ درصد مقاومت فشاری طرح مخلوط بر نمونه ابتدایی و سپس فشار جانبی معادل دو برابر فشار جانبی نمونه ابتدایی بر نمونه بعدی اعمال شده است. این روش روی ۵ نمونه برای هر طرح مخلوط انجام گرفت.

فاصله متوسط بین دانه‌ها افزایش یافته و بنابراین نوع شکست به سمت ایجاد ترک‌های کم تعدادتر و عمیق‌تر سوق پیدا کند که عامل اصلی ایجاد پدیده اثر اندازه محسوب می‌شود [10]. شکل (۱۲) این پدیده را در آزمایش‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد. همچنین مطابق شکل (۱۳) افزایش درصد دانه‌های EPS باعث می‌شود تا شکست از حالت ترک‌خوردگی‌های عمیق و منفرد به حالت خردشدگی تغییر یابد و نمونه امکان تغییر شکل و شکل‌پذیری بیشتری داشته باشد.

شکل ۱۲. تاثیر قطر دانه‌های EPS بر سازوکار شکست نمونه‌های فشاری در تخلخل ۱۰ درصد (افزایش قطر دانه‌ها از راست به چپ)

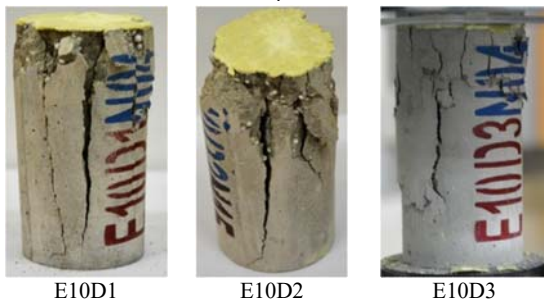


Fig. 12. EPS size effect on failure pattern in samples under uniaxial compression

شکل ۱۳. تاثیر درصد دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده بر سازوکار شکست نمونه‌های فشاری (افزایش درصد دانه‌ها از راست به چپ)

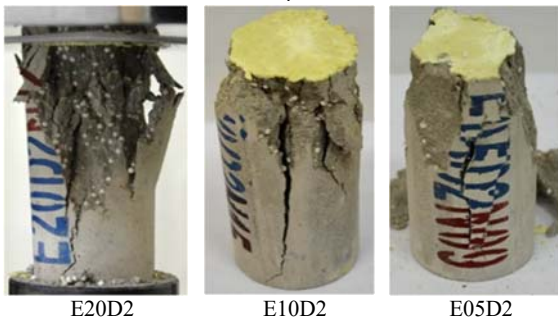


Fig. 13. Effect of porosity on failure pattern in samples under uniaxial compression

۳-۲ آزمایش کششی

مقدار مقاومت کششی در آزمایش شکافت برزلی از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{2\pi}{PBD} \quad (1)$$

شکل ۱۰. بارگذاری چندمحوری نمونه به کمک سلول هوک



Fig. 10. Triaxial compression test using a Hook cell

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج به دست آمده از آزمایش‌های فشاری، کششی و چندمحوری انجام شده روی نمونه‌ها گزارش و مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-۱ آزمایش فشاری

در شکل (۱۱) میانگین مقاومت‌های فشاری تک محوری نمونه‌های با طرح مخلوط مشابه در مقابل درصد تخلخل نمونه ارایه شده است.

شکل ۱۱. اثر اندازه دانه‌های EPS بر مقاومت فشاری

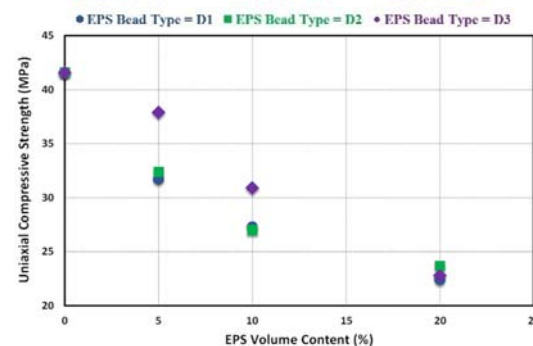


Fig. 11. Effect of EPS beads size on compressive strength

نتایج شکل (۱۱) نشان می‌دهد با افزایش درصد دانه‌های EPS مقاومت نمونه بتنی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش اندازه دانه‌های EPS باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها در درصد یکسان دانه‌ها می‌شود و در درصد‌های بالاتر EPS، اثر اندازه دانه‌های EPS کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در مقدار تخلخل ۲۰ درصد این اثر قابل توجه نیست. این مشاهدات با نتایج مطالعات پیشین همخوانی کامل دارد [10].

با افزایش قطر دانه‌ها در یک درصد حجمی یکسان، تعداد دانه‌های با قطر بزرگ کمتر خواهد بود. این امر موجب می‌شود

دانه‌ها رسم شده است تا در هر یک از این شکل‌ها اثر درصد دانه‌های EPS قابل بررسی باشد.

شکل ۱۵. مقطع نصف‌النهار فشاری برای نمونه‌های حاوی دانه‌های EPS با قطر مختلف

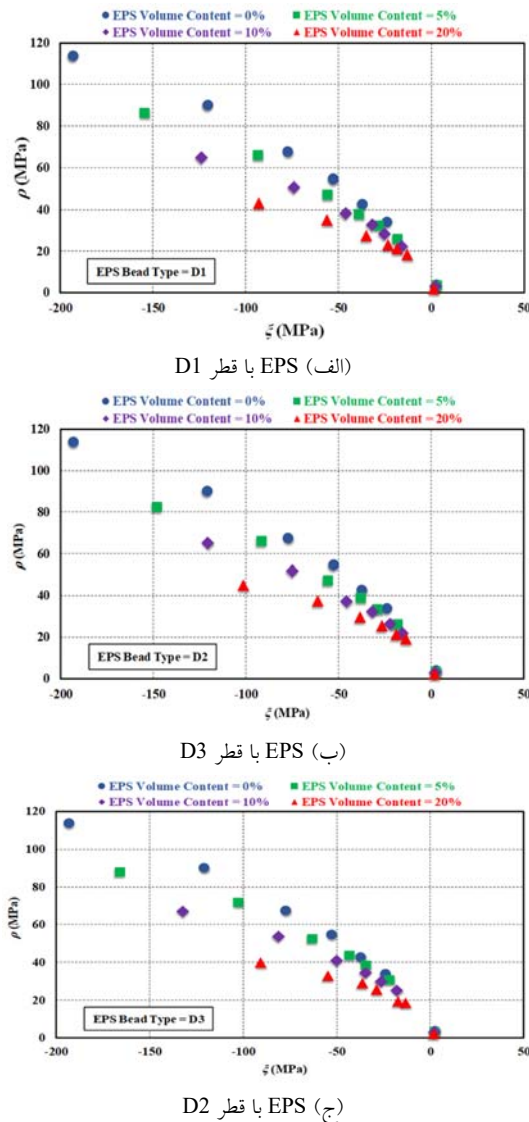


Fig. 15. Compressive meridians of the failure surface for samples containing EPS with different diameters

مشاهده می‌شود که مانند آزمایش‌های فشاری تک‌محوری، حضور دانه‌های EPS به صورت مؤثری بر مقاومت چندمحوری نمونه‌های بتنی اثر گذاشته و با افزایش حجم این دانه‌ها، مقاومت به صورت محسوسی کاهش می‌یابد.

پارامترهای B و D به ترتیب قطر میانگین و طول میانگین نمونه استوانه‌ای می‌باشند. P بار اعمالی و σ تنش کششی است. در شکل (۱۴) مقادیر میانگین مقاومت‌های کششی هر یک از طرح‌های مخلوط مورد آزمایش آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش نسبت حجمی دانه‌های EPS باعث کاهش مقاومت کششی نمونه می‌شود. نکته بسیار مهمی که در آزمایش برزلی روی نمونه‌های بتن EPS با حجم بالاتر مشاهده می‌شود له شدگی در زیر بار است. این موضوع موجب می‌شود تا دیگر نتوان در درصد‌های بالای EPS نتایج به دست آمده را کششی خالص لحاظ کرد و به همین دلیل مشاهده می‌شود که در آزمایش کششی روند اثر اندازه مانند نمونه‌های فشاری قابل بررسی نیست.

شکل ۱۴. اثر اندازه دانه‌های EPS بر مقاومت کششی

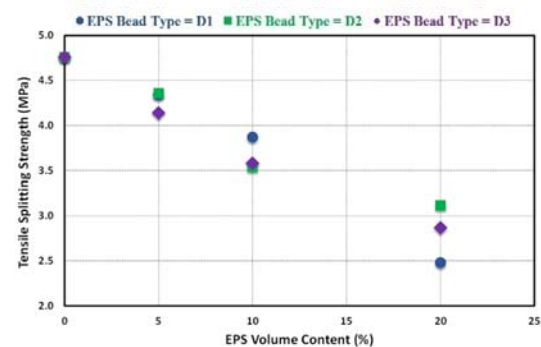


Fig. 14. EPS beads size effect on tensile strength

۳-۳ آزمایش سه محوری

داده‌ها و نتایج مربوط به آزمایش سه محوری در جدول (۵) گزارش شده است. مقدارهای ξ و ρ مولفه‌های هیدروستاتیکی و انحرافی در دستگاه مختصات وسترگارد^۱ هستند و به ترتیب از روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند.

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{2}{3}[(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - 3(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]} \quad (3)$$

σ_1 ، σ_2 و σ_3 تنش‌های اصلی هستند در شکل (۱۵) مقاطع نصف‌النهاری فشاری^۲ سطح تخریب نمونه‌ها بر اساس قطر

ویلام-وارنک برای بتن معمولی با نقاط به دست آمده از شکست نمونه‌های شاهد مقایسه شده است که با توجه به طرح مخلوط استفاده شده برای ساخت نمونه، به دلیل درصد بالای سیمان، نتایج نمونه بتنی این پژوهش در مقایسه با بتن معمولی متفاوت است.

شکل ۱۷. مقایسه مدل ویلام-وارنک برای بتن معمولی با نمونه‌های شاهد این تحقیق

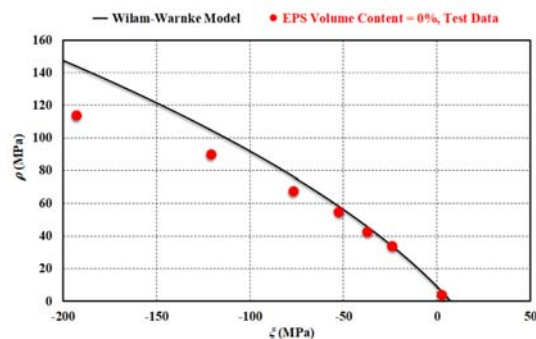


Fig. 17. A comparison between the triaxial failure points of witness samples with normal concrete

۴- نتیجه گیری

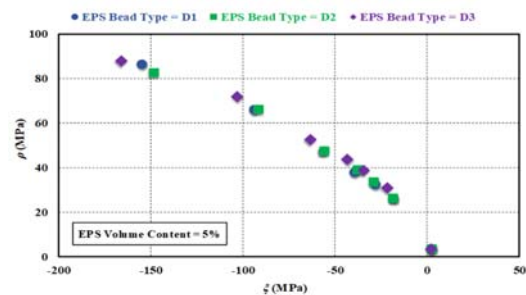
در مطالعه آزمایشگاهی حاضر بتن حاوی دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. برای این منظور ۱۰ طرح مخلوط مختلف بتنی حاوی دانه‌های EPS با اندازه و نسبت حجمی مختلف ساخته شد و تحت آزمایش‌های فشاری تک محوری، کششی برزیلی و سه محوری قرار گرفتند.

نتایج حاصل شده به شرح زیر قابل بیان است:

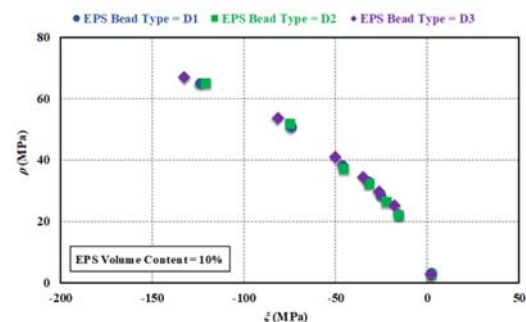
- با افزایش نسبت حجمی دانه‌های EPS، مقاومت فشاری نمونه بتنی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش اندازه و قطر دانه‌های EPS باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها در چگالی یکسان نمونه می‌شود. در درصد‌های بالاتر EPS، اثر اندازه دانه‌های EPS کاهش می‌یابد به طوری که در تخلخل ۲۰ درصد این اثر ناچیز است. این مشاهدات کاملاً هماهنگ با مطالعات پیشین است.

- از سوی دیگر با افزایش قطر دانه‌ها، در یک درصد حجمی یکسان، تعداد دانه‌های با قطر بزرگ کمتر خواهد بود، این امر موجب می‌شود فاصله متوسط بین دانه‌ها افزایش یابد و بنابراین نوع شکست به سمت ایجاد ترک‌های کم تعدادتر و عمیق‌تر سوق پیدا کند که همان عامل اصلی ایجاد اثر اندازه است.

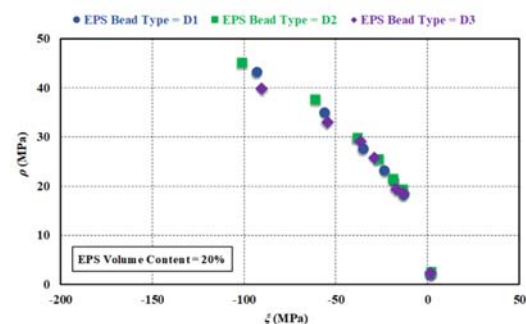
شکل ۱۶. مقطع نصف‌النهار فشاری نمونه‌های با درصد تخلخل مختلف



(الف) تخلخل ۵ درصد



(ب) تخلخل ۱۰ درصد



(ج) تخلخل ۲۰ درصد

Fig. 16. Compressive meridians of the failure surface for samples with different porosity

در شکل (۱۶) مقاطع نصف‌النهاری فشاری در درصد مشخصی از دانه‌های EPS، برای اندازه‌های مختلف دانه‌ها ترسیم شده است. در این شکل مشخص می‌شود که اثر اندازه با بالا رفتن فشار جانبی کاهش می‌یابد که علت آن تبدیل شدن سازوکار ترک‌خوردگی به خردشدگی است. به زبان دیگر در تنش‌های هیدروستاتیکی فشاری بالا، سازوکار اصلی شکست همان خردشدگی گسترده در بخش‌های مختلف نمونه است که کمتر متأثر از تعداد دانه‌ها و در نتیجه اندازه دانه‌ها می‌باشد.

همچنین در شکل (۱۷) مقطع نصف‌النهاری فشاری مدل

- افزایش درصد دانه‌های EPS باعث می‌شود تا شکست از حالت ترک‌خوردگی‌های عمیق و منفرد به حالت خردشدگی تغییر یابد و نمونه امکان تغییر شکل بیشتری را داشته باشد.
- افزایش مقدار دانه‌های EPS باعث کاهش مقاومت کششی نمونه می‌شود. اما در آزمایش کششی برزلی برای نمونه‌های با درصد EPS بالا پدیده له‌شدگی زیر عامل بارگذاری اتفاق می‌افتد و این امر نتایج را به صورت محسوسی تحت تاثیر قرار می‌دهد به گونه‌ای که دیگر اثر اندازه مانند نمونه‌های فشاری و چند محوری قابل ارزیابی از طریق این آزمایش نیست.
- مانند آزمایش‌های فشاری تک‌محوری، حضور دانه‌های EPS به صورت مؤثری بر مقاومت چندمحوری نمونه‌های بتنی اثر گذاشته و با افزایش حجم این دانه‌ها، مقاومت به صورت محسوسی کاهش می‌یابد.
- اثر اندازه بر مقاومت چندمحوری نمونه‌های بتنی با بالا رفتن فشار جانبی کاهش می‌یابد که علت آن تبدیل شدن سازوکار ترک‌خوردگی به خردشدگی می‌باشد. به زبان دیگر در تنش‌های هیدروستاتیکی فشاری بالا، سازوکار اصلی شکست همان خردشدگی گسترده در بخش‌های مختلف نمونه است که کمتر متاثر از تعداد دانه‌ها و در نتیجه اندازه دانه‌ها می‌باشد.
- ### ۵- مراجع
- [1] R. S. Ravindrarajah and A. Tuck, "Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads," *Cement and Concrete Composites*, vol. 16, no. 4, pp. 273-277, 1994.
 - [2] S. Perry, P. Bischoff, and K. Yamura, "Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 43, no. 154, pp. 71-76, 1991.
 - [3] K. G. Babu and D. S. Babu, "Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates," *Cement and concrete composites*, vol. 26, no. 6, pp. 605-611, 2004.
 - [4] K. G. Babu and D. S. Babu, "Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 5, pp. 755-762, 2003.
 - [5] D. S. Babu, K. G. Babu, and T. Wee, "Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash," *Cement and concrete research*, vol. 35, no. 6, pp. 1218-1223, 2005.
 - [6] H. Tanyildizi and A. Coskun, "The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash," *Construction and building materials*, vol. 22, no. 11, pp. 2269-2275, 2008.
 - [7] B. Chen, J. Liu, and L.-z. Chen, "Experimental study of lightweight expanded polystyrene aggregate concrete containing silica fume and polypropylene fibers," *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, vol. 15, no. 2, pp. 129-137, 2010.
 - [8] K. Miled, R. Le Roy, K. Sab, and C. Boulay, "Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode," *Mechanics of materials*, vol. 36, no. 11, pp. 1031-1046, 2004.
 - [9] R. Le Roy, E. Parant, and C. Boulay, "Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction," *Cement and concrete research*, vol. 35, no. 4, pp. 770-775, 2005.
 - [10] K. Miled, K. Sab, and R. Le Roy, "Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling," *Mechanics of Materials*, vol. 39, no. 3, pp. 222-240, 2007.
 - [11] D. S. Babu, K. G. Babu, and W. Tiong-Huan, "Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, no. 6, pp. 520-527, 2006.
 - [12] M. Amianti and V. R. Botaro, "Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP)," *Cement and concrete composites*, vol. 30, no. 1, pp. 23-28, 2008.
 - [13] A. Kan and R. Demirboğa, "A novel material for lightweight concrete production," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 7, pp. 489-495, 2009.
 - [14] A. Babavalian, A. H. Ranjbaran, and S. Shahbeyk, "Uniaxial and triaxial failure strength of fiber reinforced EPS concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 247, p. 118617, 2020.
 - [15] E. Parant and R. Le Roy, "Optimisation des bétons de densité inférieure à 1," Tech. rep., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1999.

An Experimental Study on the Effect of EPS Bead Size on Multiaxial Strength of Lightweight Concrete

Amir Hossein Ranjbaran¹, Yasin Mohammadi¹, Sharif Shahbeyk^{2*}

1. Master of Science in Structural Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

1. Master of Science in Structural Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2. Associate Professor of Structural Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

shahbeyk@modares.ac.ir

Abstract

Concrete as the most widely used building material suffers from the inherent weakness of having high density which results in heavy structures and consequently large inertia forces during seismic excitations. A common practice to reduce the density of normal-weight concrete is to partially replace sand and gravel with natural or synthetic light-weight particles. Among them, ultra-lightweight non-absorbent closed-cell expanded polystyrene (EPS) beads can be effectively used to produce a wide range of light-weight structural and non-structural concretes with appealing physical and mechanical properties. Many empirical researches have been already conducted to reveal the key properties of this class of material such as the tensile and compressive strengths, sound and heat isolations, and durability. New findings show that, in addition to the volume content of EPS beads, the bead size can significantly alter the strength of concrete samples. To be more precise, the bigger the size of EPS beads, the lower the strength of concrete at a constant EPS volume content. Moreover, the existing studies have shown that this size effect fades at higher EPS volumes. An overview of the literature reveals that the effect of EPS bead size and volume content have not been addressed under triaxial loading conditions. Therefore, in this study, twelve different concrete mixes that differ in terms of EPS bead diameter and volume content have been prepared and tested under uniaxial compression, splitting tension, and triaxial loading conditions. Three different EPS sizes (2.25 mm, 2.75 mm, and 3.25 mm), and four EPS volume contents of 0% (witness samples), 5%, 10% and 20% are considered. The constituent materials of tested concrete samples are water, cement, river sand, superplasticizer, and EPS beads. The ratio of sand and water to cement is 2 and 0.55, respectively. The BCB23 superplasticizer is used whose weight content is 0.6% of that of the cement. Samples are all cylinders with 5 cm in diameter and 10 cm in height and are treated in water for 28 days. The results show that increasing the volume of EPS beads would reduce the compressive and tensile strengths of concrete. Moreover, the results of uniaxial compressive tests show clear dependency to the size of EPS beads which is consistent with the results reported by other researchers. Splitting tensile test results are found different as the classical splitting mode of failure has changed to crushing mode beneath the narrow linear loading region for higher EPS contents. This phenomenon cancelled the validity of splitting test for the extraction of uniaxial tensile strength as the hypotheses of the elasticity solution for the Brazilian splitting test is not valid anymore. The failure points at the compression meridian of failure surface have been measured from the triaxial tests. The results confirm that confined strength of EPS concrete is also depends on the size of EPS beads, yet this dependency fades at higher confining stresses. This observation can be interpreted by the change of failure mechanism from local discrete cracking mode to distributed crushing mode which is also the reason behind the fade of size dependency in uniaxial compressive test at higher EPS volume contents.

Keywords: Lightweight EPS concrete, Size effect, Compressive strength, Tensile strength, Multiaxial strength, Failure surface, Compression meridian