

بررسی خواص مکانیکی بتن های پلیمری به همراه تاثیر افزودنی در مقاومت خمشی

محسن میرابی زاده^۱

۱- دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه ایلام،

Mohsen.Mirabizadeh@gmail.com

ابراهیم ولدی^۲

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه ایلام، E.valadi@ilam.ac.ir

چکیده:

در طول ده سال گذشته، توسعه تحقیقات بتن پلیمری باعث استفاده گسترده از آنها شده است. بتن PC - پلیمری (ریخته گری معدنی)، ناهمگن و ماده ای که از یک پرکننده به شکل طبیعی تشکیل شده است دانه های سنگدانه های مختلف و یک چسب به شکل رزین پلیمری همراه با یک سخت کننده است [۱-۵]. پلیمر بتن برای تولید محصولات مختلف استفاده می شود. مانند دستگاه های بهداشتی پیش ساخته، مقاوم در برابر خوردگی سازه ها، مخازن اسید، چاه ها، زهکش ها، موانع بزرگراه، مواد تعمیر، [۶-۹]. بتن پلیمری خواص دینامیکی بسیار خوبی دارد. با این حال، خواص مکانیکی با مقادیر کم مشخص می شود مولفه های مقایسه ای از خواص مکانیکی و دینامیکی مصالح ساختاری سنتی، مانند فولاد و چدن، با بتن پلیمری در مقالات نامبرده ارائه شده است [۱۱، ۱۰، ۳، ۶]. در دهه ۹۰ میلادی، تأثیر تعداد مواد تشکیل دهنده بر روی خواص مکانیکی قالب های معدنی مورد مطالعه قرار گرفت. کیم و همکاران مطالعاتی در مورد تأثیر میزان پرکننده و بایندر بر روی مکانیکی و خواص حرارتی یک ریخته گری معدنی انجام دادند و در تحقیقات خود، آنها از سنگ هایی در اندازه های مختلف، ماسه و رزین استفاده می کردند [۱۲]. لوگگ و آراوینتان اثر خاکستر بادی (FA) را بررسی کردند و انواع رزین های موجود در کانی بر روی خواص مکانیکی آن ریخته می شود. سه نوع رزین برای آزمایشات استفاده شده است: پلی استر، وینیل و اپوکسی. از تحقیقات انجام شده، ممکن است استنباط شود که مقدار مقاومت فشاری برای هر سه نوع رزین از ۹۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال بود. ارزش استحکام کششی برای ریخته گری معدنی به سطح ۱۵ مگاپاسکال رسید که با استفاده از رزین وینیل [۱۳] ساخته شد.

لغات کلیدی: بتن پلیمری، ساختار بتن، مقاومت خمشی، مواد افزودنی، مقاومت فشاری

Abstract:

During the last ten years, polymer concrete research has led to their use. PC-polymer concrete (mineral casting), is a heterogeneous material consisting of a natural filler, different aggregate grains and a polymer resin binder with a hardener [1-5]. Concrete polymer is used to produce various products. Such as prefabricated sanitary devices, corrosion-resistant structures, acid tanks, wells, drains, highway structures, repair materials, [6-9]. Polymer concrete has very good dynamic properties. However, the mechanical properties are poorly defined. Comparative components of the mechanical and dynamic properties of traditional structural materials, such as steel and cast iron, with polymer concrete are presented in the aforementioned articles [3, 6, 10, 11]. In the 1990s, the effect of the number of ingredients on the mechanical properties of mineral molds was studied. Kim et al. conducted a study on the effect of filler and binder amount on the mechanical and thermal properties of a mineral casting, and in their research, they used stones of different sizes, sand, and resin [12]. Lukeg and Aravinthan investigated the effect of fly ash (FA) and various resins present in the mineral cast on its mechanical properties. Three types of resin have been used for the experiments: polyester, vinyl and epoxy. From the conducted research, it may be concluded that the value of compressive strength for all three types of resin was from 90 to 100 MPa. The value of tensile strength for mineral casting reached the level of 15 MPa, which was made using vinyl resin [13].

Key words: Polymer concrete, concrete structure, bending strength, additives, compressive strength

مقدمه

بتن پلیمری (PC)، همچنین به عنوان بتن رزینی مصنوعی شناخته می شود، یک ماده مرکب است که در آن مونومر (بایندر) پس از افزودن مواد افزودنی، کاتالیزورها و شتاب دهنده ها، تحت پلیمریزاسیون (سخت دادن) قرار می گیرد. سنگدانه ها مانند سنگ خرد شده، ماسه، شن و خاکستر بادی به طور گسترده ای به عنوان پرکننده های معدنی در تولید بتن های پلیمری استفاده می شوند. که به منظور بهبود خواص مکانیکی بتن های پلیمری می توان از مواد معدنی مانند سنگ مرمر، بازالت و کوارتز به جای ماسه استفاده کرد. به عنوان یک ملات، PC را می توان با ضخامت های کمتر از ۱۰ میلی متر رسوب داد. بتن های پلیمری همچنین به دلیل پخت سریع، نفوذپذیری بسیار کم و مقاومت بالا در برابر مواد شیمیایی به طور گسترده برای پوشش پل ها و کف های صنعتی استفاده می شوند. چرخه های انجماد و ذوب بتن های پلیمری را می توان در نمای خانه و ساختمان نیز به کار برد. مزیت اصلی بتن های پلیمری نسبت به بتن سنتی توانایی آنها در ادغام مواد زائد بازیافتی به دلیل ماهیت ایزوله رزین است [۱۳].

در تحقیقات گلفسکی بررسی اثر FA بر خواص مکانیکی، ریزترک های سطحی و کاهش انرژی مصرفی در تولید سیمان [۱۴-۱۶] بررسی شده است. بر اساس نتایج آزمایش به دست آمده [۱۴]، مشخص شد که استفاده از ۲۰٪ افزودنی FA باعث ایجاد می شود تغییرات مطلوب در ریزساختار بتن بالغ در این ترکیب، مقدار متوسط عرض از ریزترک ها بیش از ۴۰ درصد در مقایسه با آن کمتر

بود به نتیجه به دست آمده برای بتن مرجع. در مقابل، بتن حاوی ۳۰ درصد افزودنی FA بیشتر بود ریزترک ها در ناحیه انتقال سطحی توسط بیش از ۶۰٪ در مقایسه با مواد بدون افزودنی که در همه کامپوزیت های تجزیه و تحلیل، افزایش در عرض ریزترک ها تقریباً ۷۰٪ تا بیش از ۱۱۰٪ در مورد ارزش دارند وقوع بارهای دینامیکی نیز مشاهده شده است [۱۴].

بر اساس نتایج آزمون به دست آمده [۱۵] مشخص شد که بتن های ساخته شده بر روی چسب های چهارتایی حاوی نانو افزودنی ها دارای پارامترهای مکانیکی بسیار مطلوبی هستند. این بتن چهارتایی حاوی ۸۰٪ OPC، ۵٪ FA، ۱۰٪ SF و ۵٪ nS بهترین نتایج را از نظر استحکام فشاری خوب و استحکام کششی شکاف نشان داده است، در حالی که بدترین پارامترهای مکانیکی توسط بتن با محتوای بیشتر افزودنی FA مخلوط بتن، یعنی ۱۵٪، علاوه بر این، نتایج مقاومت فشاری و استحکام کششی شکافتگی از نظر کیفی همگرا هستند مشخص شد. علاوه بر این، کاهش میزان OPC در ترکیب مخلوط بتن در بتن های چهارتایی باعث مزایای زیست محیطی مرتبط با کاهش مواد خام مورد نیاز برای سوزاندن کلینکر شده است.

الکتریسیته و انرژی گرمایی در تولید سیمان [۱۵] و استفاده از برخی افزودنی های معدنی به عنوان جایگزین برای سیمان، به عنوان مثال، FAS سیلیسی، تأثیر مثبتی بر کاهش انرژی مصرفی در تولید سیمان دارد. از سوی دیگر دست، چنین فعالیت هایی ممکن است اثرات منفی به دلیل کاهش پارامترهای مقاومتی کامپوزیت ها در مراحل اولیه مراحل پخت را دارد. [۱۶]

در کمتر از یک قرن بتن به پرمصرف ترین مصالح ساختمانی تبدیل شده است در سراسر جهان. در کمتر از نیم قرن، تصور یک بتن کاملاً بدون آن دشوار است که پلیمرها کاشت در بتن به شکل بتن تاثیر گذاشته است کامپوزیت پلیمری: C-PC. از آن زمان (۱۹۷۵) توسعه طبقات جدید بتن آغاز شده است در حال انجام: C-PC=PMC+PCC+PI+PC، که در آن PMC بتن اصلاح شده پلیمری (ادامه پلیمر > ۱٪ جرم بتن)؛ PCC بتن سیمانی پلیمری (< ۱٪ جرم بتن)؛ PIC پلیمر بتن آغشته (۳-۸٪ جرم بتن)، PC بتن پلیمری (۸-۱۲٪ جرم بتن).

بر فراز زمانی که نقش پلیمرها گسترش یافته و توسط پلیمرهای اضافی پوشانده شده است پلیمرهای روی بتن (روکش ها، پوشش ها، عایق های رطوبتی و مواد محصور کننده) بررسی شده است. همه این کامپوزیت های پلیمری کاربرد بی بدیلی در صنعت ترمیم بتن پیدا کرده اند. کافی است بگوییم که در ده قسمت از استانداردهای اروپایی، EN 1504، دسته پلیمر می تواند ۷۳ بار پیدا شده است و این گواه بر اهمیت زیاد این ماده در تعمیرات و حفاظت از بتن فقط برای مقایسه، کلمه سیمان در کل فقط ۵۹ بار ظاهر می شود قطعات EN 1504. در واقع، اگر بتن ترمیم شده از کلاس بالاتری برخوردار باشد، مواد ترمیم باید انجام شود محتوای پلیمر بیشتر توجه مربوط به چسبندگی است که یک چالش اساسی است برای تعمیر بتن اما همچنین زمان کوتاهی برای آمادگی بهره برداری و بسیاری از پلیمرهای دیگر مزایای کامپوزیت ها در نظر گرفته شده است. در مقاله این سوال: چگونه پلیمرها

افزایش عملکرد تعمیر بتن را دارد؟ مورد بحث قرار می گیرد. قوانین و روش های تعمیر در مقابل پلیمر مواد تعمیر در نظر گرفته خواهد شد.

در اولین ICCRRR در سال ۲۰۰۵، پروفسور دیوید فاوئر از دانشگاه تگزاس در عنوان مقاله خود [۱۶] پرسید سوال: پلیمر در بتن برای تعمیر: کجا وجود دارد ما بودیم و کجا می رویم؟ برای من افتخار است که برگزارکنندگان من را به پنجمین ICCRRR دعوت کردند در شرایط فعلی به این سوال پاسخ دهید. به خصوص جالب این واقعیت است که سوال فاوئر در همان سالی که سریال از استانداردهای اروپایی EN 1504 1-10 در این کشور آغاز شد محدوده تعمیر و حفاظت سازه های بتنی (۲۰۰۵ - ۲۰۱۳) را داشت. در ده قسمت از EN 1504 2، اصطلاح "پلیمر" ۷۳ بار ذکر شده است که اهمیت این ماده در تعمیرات و حفاظت از بتن را نشان می دهد؛ برای مقایسه، اصطلاح "سیمان" ۵۹ بار در تمام قسمت های استاندارد ظاهر می شود. که در در مقابل، دسته "پلیمر" در استاندارد EN206 بتن اصلا ذکر نشده است.

بتن پلیمری یک ماده کامپوزیتی است که از سنگدانه ها و رزین پلیمری به عنوان چسباننده ساخته می شود. این کاربردهای بتن پلیمری نه تنها به حوزه مهندسی عمران محدود می شود، بلکه به سازه ها نیز نفوذ کرده است. کاربردها در ساختارهای ماشین ابزار تا به امروز هیچ روش استاندارد طراحی مخلوط برای بتن پلیمری در سیستم ها موجود نیست. در این تحقیق، نمونه های بتن پلیمری با استفاده از رزین اپوکسی به عنوان بایندر، خاکستر بادی به عنوان پرکننده و ضایعات سنگ مرمر به عنوان سنگدانه نسبت های مختلف مخلوط با استفاده از مفهوم طراحی مخلوط توسعه داده شد آزمایش. مقاومت فشاری و خمشی برای هر ترکیب بتن پلیمری به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت. اثر متغیرهایی مانند رزین اپوکسی، خاکستر بادی و سنگدانه ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یک ترکیب مخلوط بهینه دارد با استفاده از معادلات رگرسیون توسعه یافته است. ضریب همبستگی (R^2) بین تجربی مقدار و مقدار پیش بینی شده نزدیک به یک که برازندگی مدل را ثابت می کند، بالا بود.

مصلح ساختمانی معمول یعنی بتن سیمانی از چسباندن سنگدانه با سیمان پرتلند تهیه می شود. هزینه کم، سهولت کاربرد و فشردگی آن قدرت دلایل اصلی جهانی بودن آن است پذیرش - پذیرفته شدن آن است. در زمان تولید سیمان بتن با افزودن مواد افزودنی پلیمری و پلیمری بهبود یافته است موادی برای جایگزینی به طور جزئی یا کامل استفاده شد چسب سیمان هیدرولیک بتن پلیمری بخشی است گروهی از بتن که از پلیمر برای جایگزینی استفاده می کنند سیمان به عنوان چسب بتن پلیمری یک کامپوزیت است موادی که در آن مصالح در الف گنجانده شده است ماتریس پلیمری استفاده از رزین پلیمری به جای سیمان پرتلند در مخلوط بتن بهبود می بخشد رفتار مکانیکی و خواص دوام آن شده است [۱۷، ۱۸].

پلیمرهای موجود در بتن به میزان قابل توجهی توجه در ۲۵ سال گذشته دریافت شده اند که بتن پلیمری (PC) در دهه ۱۹۷۰ به خوبی شناخته شد و برای آن استفاده می شود تعمیر، روکش های نازک برای کف و پل در ورزش عرصه ها و استادیوم ها، آزمایشگاه ها، بیمارستان ها، کارخانه ها، و ورودی فروشگاه ها و قطعات پیش ساخته برای تولید طیف وسیعی از محصولات استفاده شده است، از جمله زهکش ها، جعبه های زیرزمینی، منهول ها، روکش ساختمان، مخازن اسید و سلول ها، پوسته برای تعمیر پایه ماشین آلات، کاشی کف و ماشین آلات ابزار و پایه [۱۸].

مشخصات نهایی بتن پلیمری بسته به نوع و دوز بایندر رزین، نوع و میزان پرکننده و سنگدانه ها، شرایط پخت، عملیات سیلانی سنگدانه ها و غیره مشخص می شود. مطالعات پلیمری بتن با انواع مختلف رزین مانند: اپوکسی رزین [۱۹، ۲۰]، رزین پلی استر [۲۱-۲۵]، رزین فوران [۲۶، ۲۷]، پلی متیل متاکریلات [۲۸] در منابع ذکر شده گزارش شده است. برای افزایش خواص پلیمر بتن آرماتورهای مختلف الیاف نیز استفاده می شود (شیشه، الیاف کربن، PVA و غیره) [۲۹-۳۱]. انواع متفاوت از پرکننده ها می توان استفاده کرد، به ویژه با توجه به ضایعات صنعتی مانند خاکستر بادی، سرباره، میکرو سیلیس، خاکستر [۳۲، ۳۳].

نتیجه گیری

بتن پلیمری اپوکسی (EPC) کاربردهای مختلفی در مهندسی عمران پیدا کرده است. برای افزایش عملکرد خمشی EPC، دو نوع الیاف طبیعی کوتاه با استحکام ویژه بالا (الیاف سیزال و الیاف رامی) در EPC گنجانده شده است. این نتایج آزمایش های مکانیکی نشان می دهد که بارگذاری اندک الیاف طبیعی (۰.۳۶ درصد حجمی) می تواند به طور قابل توجهی مقاومت خمشی را افزایش دهد. EPC با ۲۵.۳٪ (الیاف رامی) یا ۱۰.۴٪ (الیاف سیزال) که این افزایش بدون هیچ گونه تسلیم شدن از فشار حاصل می شود قدرت EPC اثرات تقویتی الیاف طبیعی کوتاه بر خواص خمشی و خواص فشاری EPC با افزایش بیشتر محتوای فیبر، به دلیل خیس شدن ناکافی الیاف توسط رزین اپوکسی که منجر به ضعیف شدن الیاف می شود، کاهش می یابد. پیوند بین سطحی مکانیسم های تقویت کننده الیاف طبیعی کوتاه با توجه به مشاهده شکستگی بررسی می شوند. سطوح و مدلسازی میکرومکانیکی مشخص شد که مدل موازی مبتنی بر قاعده اختلاط می تواند خوب باشد تقریبی برای توصیف بهبود مقاومت خمشی EPC تقویت شده با الیاف طبیعی کوتاه در حجم الیاف کم کسری نیز باشد.

بتن پلیمری اپوکسی (EPC) نوعی بتن پلیمری است که در آن از رزین اپوکسی به عنوان بایندر برای جایگزینی استفاده می شود چسب سیمان سنتی [۳۴، ۳۵]. به دلیل استحکام بالا، خوب است مقاومت در برابر خوردگی و ویژگی های گیرش سریع، EPC به عنوان یک ماده مهندسی امیدوار کننده در ساخت و ساز در نظر گرفته شود. و کاربردهای مختلفی پیدا کرده است، به عنوان مثال سنگفرش جاده، روکش ساختمان، اجزای زهکشی و تخت های ماشینی [۳۶-۳۸] نیز از این دسته می باشند.

این آسیب پذیری به طور قابل ملاحظه ای بر عملکرد خمشی پلیمر بتن تأثیر می گذارد ، زیرا شکست زودرس در منطقه تحت تنش قرار گرفته رخ خواهد داد. برای بهبود عملکرد خمشی بتن پلیمری، الیاف کوتاه به عنوان یک فاز تقویت کننده اضافی ترکیب شده است برونفسکی و همکاران [۳۹] دریافتند که افزودن ۳.۵ درصد وزنی الیاف فولادی کوتاه منجر به افزایش قابل توجهی می شود افزایش مقاومت خمشی EPC حدود ۴۰٪. در کار گزارش شده توسط ویپالوندان و همکاران [۴۰]. افزودن ۳ درصد وزنی الیاف شیشه کوتاه استحکام خمشی پلی استر را افزایش می دهد بتن پلیمری حدود ۳۲ درصد بهبود مشابهی مشاهده شده بود که توسط گریفیث و بال [۴۱] که ۱.۵ درصد وزنی را پراکنده کردند الیاف شیشه کوتاه به بتن پلیمری پلی استر و افزایش ۱۹ درصدی در مقاومت خمشی رخ داده شده است.

مراجع

- [1] Hameed A, Hamza M. Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials. *Energy Proc.* 2019;157:43–50.
- [2] Erbe T, Król J, Theska R. Mineral casting as material for machine base-frames of precision machines. Twenty-third Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering and Twelfth ICPE, October 2008. Portland, Oregon
- [3] Gurgen S, Sofuoglu MA. Vibration attenuation of sandwich structures filled with shear thickening fluids. *Compos Part B.* 2020;186:107831.
- [4] Gurgen S, Sofuoglu MA. Smart polymer integrated cork composites for enhanced vibration damping properties. *Compos Struct.* 2020;258:113200.
- [5] Vrtanoski G, Dukovski V. Design of polimer concrete main spindle housing for CNC lathe. 13th International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering, Gliwice-Wisła; 2005. p. 695–8.
- [6] Niaki MR, Fereidon A, Ahangari MG. Mechanical properties of epoxy/basalt polimer concrete: experimental and analytical study. *Struct Concr.* 2017;19(5):1–8
- [7] Ferdous W, Manalo A, Aravinthan T, Van Erp G. Properties of epoxy polymer concrete matrix: Effect of resin-to-filler ratio and determination of optimal mix for composite railway sleepers. *Constr Build Mater.* 2016;124:287–300.
- [8] Rahman M, Mansur MA, Lee LK, Lum JK. Development of a polymer impregnated concrete damping carriage for linear quideways for machine tools. *Int J Mach Tools Manuf.* 2001;41:431–41.
- [9] Sung-Kyum Ch, Hyun-Jun K, Seung-Hwan Ch. The application of polymer composites to the table-top machine tool components for higher stiffness and reduce weight. *Compos Struct.* 2011;93:492–501.

- [10] Honczarenko J. Obrabiarki sterowane numerycznie. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo – Techniczne; 2008.
- [11] Kosmol J. Projektowanie hybrydowych korpusów obrabiarek. *Mechanik* 2016. 2016;8(9):904–13.
- [12] Kim HS, Park KY, Lee DG. A study on the epoxy resin concrete for ultra-precision machine tool bed. *J Mater Process Technol.* 1995;48:649–55.
- [13] Lokuge W, Aravinthan T. Effect of fly ash on the behaviour of polymer concrete with different types of resin. *Mater Des.* 2013;51:175–81.
- [14] Golewski GL. The beneficial effect of the addition of fly ash on reduction of the size of microcracks in the ITZ of concrete composites under dynamic loading. *Energies.* 2021;14:668.
- [15] Golewski GL. Energy savings associated with the use of fly ash and nanoadditives in the cement composition. *Energies.* 2020;13:2184.
- [16] D.W. Fowler, Proceedings of the Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2005; 354-355 (2006).
- [17] Kirlikovali E. Polymer/Concrete composites- A Review. *Polym Eng Sci* 1981; 21(8): 507-9.
- [18] Fowler DW. Polymers in concrete: A vision for the 21st century. *Cem Concr Compos* 1999; 21: 449-52.
- [19] Barbuta M, Lepadatu D. Mechanical characteristic investigation of polymer concrete using mixture design of experiment and response surface method. *J Appl Sci* 2008; 8(12): 2242-9.
- [20] Harja M, Barbuta M, Rusu L. Obtaining and characterization of polymer concrete with fly ash. *J Appl Sci* 2009; 9(1): 88- 96.
- [21] Vipulanandan C. Characterization of Polyester Polymer and Polymer Concrete. *J Mater Civ* 1993; 5(1): 62-82.
- [22] Maksimov RD, Jirgens L, Jansons J, Plume E. Mechanical properties of polyester polymer concrete. *Mech Compos Mater* 1999; 35(2): 99-103.
- [23] El-Hawary MM, Abdel-Fatteh H. Temperature effect on the mechanical behaviour of resin concrete. *Constr Build Mater* 2000; 14: 317-23.
- [24] Gorninski JP, Dal Molin DC, Kazmierczak CS. Strength degradation of polymer concrete in acidic environments. *Cem Concr Compos* 2007; 29: 637-45.
- [25] Mahdi F, Abbas H, Khan AA. Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from postconsumer PET bottles. *Constr Build Mater* 2010; 24: 25-36.
- [26] Muthukumar M, Mohan D. Studies on Furan polymer concrete. *J Polym Res* 2005; 12: 231-41.
- [27] Muthukumar M, Mohan D. Studies on polymer concrete based on optimized aggregate mix proportion. *Eur Polym J* 2004; 40: 2167-77.
- [28] Brockenbrough TW. Fibre Reinforced methacrylate polymer concrete. *ACI Mater J* 1982; 322-5.
- [29] Griffiths R, Ball A. An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete. *Compos Sci Technol* 2000; 60: 2747-53.

- [30] Sett K, Vipulanandan C. Properties of polyester polymer concrete with glass and carbon fibers. ACI Mater J 2004; 101: 30-41.
- [31] Reis JML. Mechanical characterization of fiber reinforced polymer concrete. Mater Res 2005; 8(3): 357-60.
- [32] Rebeiz KS, Serhal SP, Craft AP. Properties of Polymer Concrete Using Fly Ash. J Mater Civ Eng 2004; 16: 15-9.
- [33] Varughese KT, Chaturvedi BK. Fly ash as a fine aggregate in polyester based polymer concrete. Cem Concr Res 1995; 18: 105-8.
- [34] Davydov S S, Solomatov V I, Shvidko Y I. Epoxy polymer concrete. Hydrotech Construct, 1970, 4: 849–852
- [35] Abdel-Fattah H, El-Hawary M M. Flexural behavior of polymer concrete. Constr Build Mater, 1999, 13: 253–262
- [36] Ohama Y. Recent progress in concrete-polymer composites. Adv Cement Based Mater, 1997, 5: 31–40
- [37] Fowler D W. Polymers in concrete: A vision for the 21st century. Cement Concrete Composites, 1999, 21: 449–452
- [38] Bedi R, Chandra R, Singh S P. Mechanical properties of polymer concrete. J Compos, 2013, 2013: 1–12
- [39] Broniewski T, Jamrozy Z, Kapko J. Long life strength polymer concrete. In: Proceedings of the 1st International Congress on Polymer Concretes—Polymers in Concrete, 1976
- [40] Vipulanandan C, Dharmarajan N, Ching E. Mechanical behaviour of polymer concrete systems. Mater Struct, 1988, 21: 268–277
- [41] Griffiths R, Ball A. An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete. Compos Sci Technol, 2000, 60: 2747–2753