

روش جدیدی
برای مشاهده ترک‌های سه‌بعدی در بتن

فن تخلخل‌سنجی فلز مایع

سیامک تقی‌پور بروجنی
هنرآموز هنرستان‌های استان چهارمحال و بختیاری

چکیده

با استفاده از این روش مشاهده ترک‌های بسیار ریز در بتن، در حالت سه بعدی (Three-Dimension)، با روزه‌ها و خلل و فرج بسیار کوچک‌تر از $0/1$ میکرومتر امکان پذیر است. در این روش از یک آلیاژ با نقطه ذوب پایین برای نفوذ و رخنه به ترک‌ها و منافذ، در نمونه استوانه‌ای بتن با مقاومت بالا و بتن معمولی جهت فشار تک‌محوره و محدودکننده استفاده شده است. بعد از مقایسه شکست‌ها، آلیاژ جهت حفظ کردن و نگه‌داشتن شکل و حالت شکست‌های میکرونی، که در اثر فشارهای ناشی از بارگذاری به وجود آمده‌اند، یک پارچه می‌شود. بعد از این که آلیاژ یک پارچه شد، سطح نمونه‌ها را با اسید هیدروکلریک ۱ مولار می‌پوشانند، به‌طوری که اسکلت شبکه آلیاژ بالای سطح جدید قرار بگیرد.

ریزننگارها (Micrographs) جهت آشکار کردن ترکیب سه بعدی شبکه از میکروسکوپ الکترونی (Scanning Electron Microscopy) (SEM) استفاده می‌کنند. شبکه‌هایی که شکست‌ها و فضای خالی آن‌ها با فلز پر شده است.

کلیدواژه‌ها: بتن، کشش سطحی، ترک‌های ریز، ریزننگارها، بارگذاری، آلیاژ فلزی

مقدمه

امروزه بتن، به منزله یکی از پرکاربردترین و پرمصرف‌ترین مواد در صنعت ساخت و ساز، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده است و همه روزه شاهد تحقیقات و مطالعات بسیاری درخصوص این ماده هستیم.

چگونگی عملکرد و مکانیسم تخریب مصالح، که شاخه‌ای از علم مواد است، از موارد بسیار مهم و حیاتی مصالح و حدود کاربرد آن‌ها به حساب می‌آید. بتن نیز ماده مرکبی است که از این امر مستثنا نیست و همواره از آزمایش‌های متعددی برای تعیین ویژگی‌های آن استفاده می‌شود. با بررسی نتایج حاصله از این آزمایش‌ها، می‌توان گام‌های بسیار مؤثری در جهت ارتقای کیفیت آن برداشت. از جمله مهم‌ترین بررسی‌ها، مطالعه نحوه شکست و تخریب بتن است. اطلاع از نحوه شرکت و ترک‌خوردگی بتن اطلاعات بسیار مفید و ارزشمندی را در اختیار محققین قرار خواهد داد. در این مقاله سعی شده است به اجمال یکی از جدیدترین و دقیق‌ترین آزمایش‌ها جهت این امر بیان گردد.

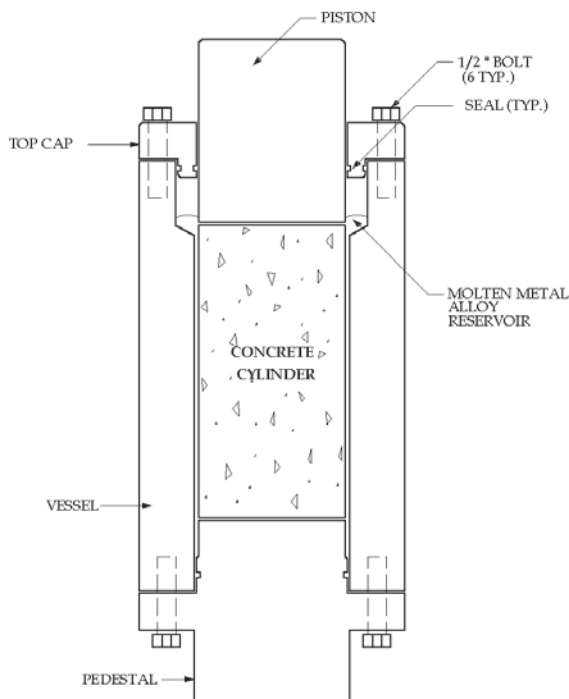
بتن یک ماده ناهمگن و شامل سه قسمت است:

۱. خمیر سیمان؛

۲. افزودنی‌ها؛

۳. ناحیه بین سطحی (ITZ) (لایه‌ای نازک به ضخامت بین

۵۰-۱۰ میکرومتر که حد فاصل ناحیه خمیری و سنگدانه است).



شده باشند. مزیت دیگر این تکنیک نیاز نداشتن به بریدن قسمت نازکی از قطعه یا قطعات برای مشاهده شبکه شکست است و با پوشاندن پیوسته شبکه بتنی تا عمقی متناظر با عمق میدان میکروسکوپ؛ مشاهده شبکه سه بعدی شکست‌های همه نمونه‌ها ممکن می‌گردد.

تکنیک‌های عملی

تجهیزات این آزمایش جهت حفظ کردن ترک‌ها تحت بارهای اعمال شده، طراحی شده و در این مقاله به جزئیات آن‌ها پرداخت نمی‌گردد ولی طرح آن در تصویر یک نمایش داده شده است. نمونه‌های بتن مصرفی برای این آزمایش به صورت استوانه‌های بتنی پرمقاومت و نرمال مقاومت با ابعاد $(102 \times 303 \times 400)$ mm یا (4×8) in هستند که در تراکم با درجات مختلف، آزمایش و تست شده‌اند.

نیروی نهایی برای نمونه‌های بتن نرمال مقاومت و پرمقاومت به ترتیب 52 Mpa (7500 Psi) و 76 Mpa (11000 Psi) به ثبت رسیده است. در حین عملیات بارگذاری فلز-چوب به داخل نمونه‌ها، جهت حفظ ترک‌های تولید شده تزریق می‌شود. فلز-چوب یک آلیاژ با قابلیت ذوب‌شوندگی است و در فاز مایع، رطوبت ناپذیر است و دارای کشش سطحی مؤثر



تصویر ۱

آی‌تی‌زد (ITZ) برای این که از خمیر سیمان و افزودنی‌ها قوی‌تر باشد طراحی شده است. ساختار مولکولی آن به‌طور کامل متمایز از ساختار خمیر سیمان است و خاصیت جذب رطوبت بالای آن برای نسبت W/C بالا سبب ایجاد دیواره ذرات افزودنی می‌شود. به همین دلیل آی‌تی‌زد تأثیر عمیقی بر روی رفتار مکانیکی بتن دارد.

بسیاری از محققان تلاش بسیاری جهت حفظ کردن، مشخص کردن و مطالعه شکست‌های بتن تحت بارهای اعمال شده انجام داده‌اند. در بین آخرین پیشرفت‌هایی که برای حفظ کردن شکست‌ها در بتن و صخره‌ها، که تحت تنش اعمال شده به‌وجود آمده‌اند، استفاده از آلیاژ فلزی است. این آلیاژ به فلز-چوب معروف است، با نقطه ذوبی بین $71-88$ درجه سانتی‌گراد. مزیت استفاده از چنین آلیاژی در این است که می‌تواند بداخل حفرات و ترک‌های ریز تولید شده توسط تنش، زمانی که قطعه تحت بار اعمالی نگه داشته می‌شود، تزریق شود و سپس به حالت جامد تبدیل گردد و با تبدیل به حالت جامد، شکل و ساختار هندسی ترک‌های ریز را حفظ کند.

در ادامه، نمونه‌های بتن را در اسید هیدروکلریک یک مولار غوطه‌ور ساخته است تا قسمت سیمانی آن‌ها به تدریج حل شود، به‌طوری که قالب فلز-چوب همان حفرات و شکست‌های تولید

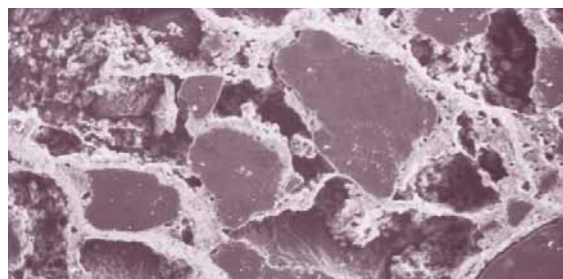
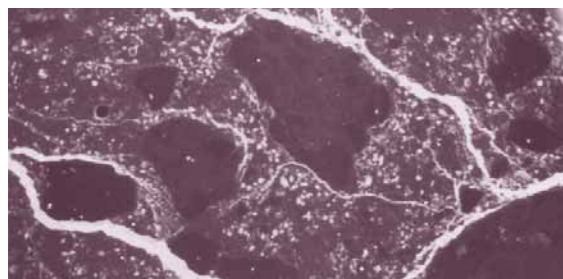
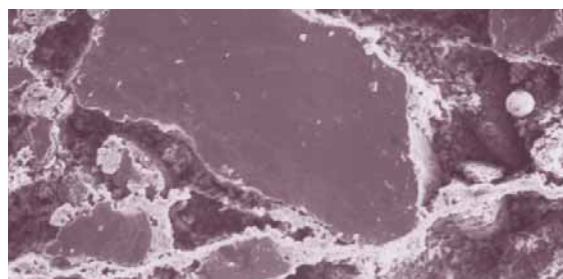
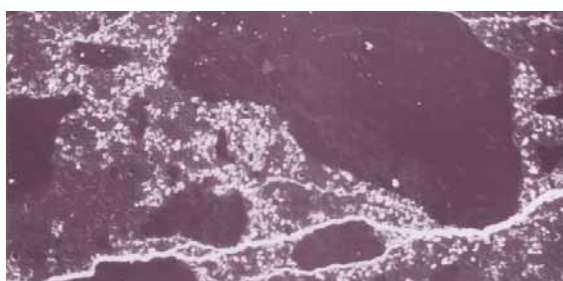
می‌شوند. این طلا جای‌گزین می‌شود و برای مشاهده در SEM قرار می‌گیرد.

برای این که ترک‌های ریز تولیدی با فلز مذاب پر شوند از نیتروژن با فشار ۱۰/۳Mpa (۱۵۰۰ Psi)، که به‌طور پیوسته در طول آزمایش از منفذ فشار دمیده می‌شود، استفاده می‌شود

نتایج

تصویرهای ۲ و ۳:

ریزنکار نمونه‌های بتنی نرمال مقاومت و پرمقاومت را قبل و بعد از پوشانده شدن.



تصویر ۲:

نمونه بتن نرمال مقاومت قبل و بعد از پوشانده شدن.

۴۰۰ mN/m مدول یانگ (الاستیسیته) ۹/۷GPa و چگالی ۹/۴g/cm^۳ است. این آلیاژ از ۴۲/۵٪ بیسموت و ۳۷/۷٪ لید، ۱۱/۳٪ قلع و ۸/۵٪ کادمیم تشکیل شده است.

برای این که ترک‌های ریز تولیدی با فلز مذاب پر شوند از نیتروژن با فشار ۱۰/۳Mpa (۱۵۰۰ Psi)، که به‌طور پیوسته در طول آزمایش از منفذ فشار دمیده می‌شود، استفاده می‌شود. در ضمن در طول آزمایش تنش و نیروی مؤثر بر بتن ثابت می‌ماند و تغییر نمی‌کند.

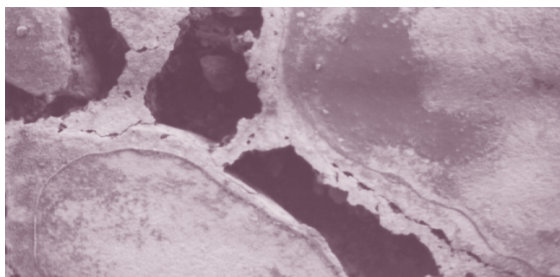
با یک کشش سطحی ۴۰۰ mN/m آلیاژ به‌درون ترک‌های سطح با روزنه‌های ۰/۸ میلی‌متری نفوذ می‌کند. فشار محدودکننده، جهت ایجاد فشار سه محوره‌ای است که توسط سیم‌های فولادی ضدزنگ با قطر ۰/۳mm به‌کار می‌رود. این سیم‌ها که در اطراف استوانه‌های بتنی جهت ایجاد نیروی ۱۳۰KN به‌کار رفته‌اند در تصویر ۱ نشان داده شده‌اند. هر نمونه همانند روش ذکر شده بارگذاری می‌گردد.

بعد از چنین فرایندی و نگهداری از شکست‌های تولیدی توسط تنش در بتن، از آلیاژ مذکور استفاده می‌شود و در ادامه استوانه‌ها در طول محورشان مقطع زده می‌شوند. به این ترتیب که یک صفحه تخت محوری که تقریباً ۵mm ضخامت دارد به موازات مسیر بار اعمال شده برش زده می‌شود. چهار قطعه ۲۵mm که به‌صورت گرد هستند از صفحات تخت محوری استخراج می‌شود.

گام بعدی جلادادن قطعات برای مطالعات SEM است. یک طرف هر نمونه با #۱۲۰، #۲۲۰، #۳۲۰ و #۶۰۰ کاربرد سیلیسیم با استفاده از یک آسیاب دوار و سوار کردن آن برخلاف یک صفحه شیشه‌ای به قطر ۲۵mm با اپوکسی جلا داده شد. برای این که هر دو طرف نمونه با یکدیگر موازی شوند، نمونه‌ها با استفاده از برش الماس به همراه یک نرم‌کننده و روان‌ساز، بدون استفاده از آبرزی و روغنکاری برش زده می‌شوند. در ادامه نمونه‌ها با یک آسیاب گرد و با استفاده از کاربرد سیلیکن #۶۰۰ جلا داده می‌شود.

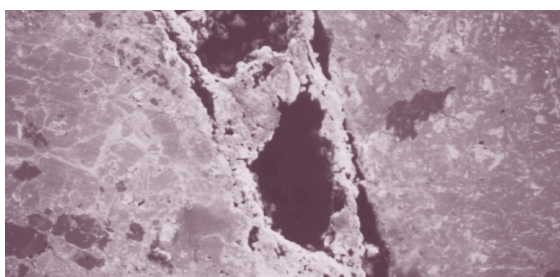
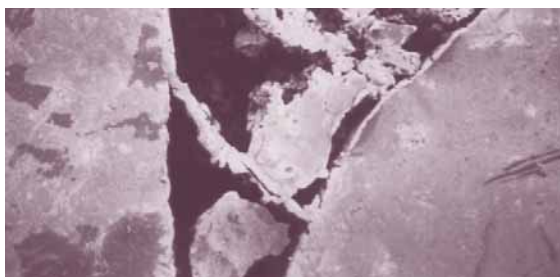
جلای بیشتر با ۱۰۰-۵۰ و ۱۰ میکرون پودر آلومینیوم درون یک صفحه شیشه‌ای صورت می‌پذیرد. مرحله نهایی شامل بررسی قطعات با ۵- و ۳- و ۱/۴- میکرون الماس است. بعد از هر مرحله جلادادن، قطعات در استون فرو برده می‌شود و در یک ماشین فراصوت قرار می‌گیرند تا باقی‌مانده لایه نازک سیلیس از سطحشان خارج گردد. بنابراین آن‌ها برای مرحله بعدی جلا آماده می‌شوند.

در این مرحله نمونه‌ها به مدت بیست دقیقه در اسید هیدروکلریک یک مولار محلول غوطه‌ور می‌شوند، به‌طوری که اسید تمام سطح بتن را بپوشاند و یک اسکلت از شبکه آلیاژ فلزی بر بالای سطح جدید نمودار گردد. این عمل جهت نشان‌دادن شکست‌ها و حفرات در زیر بار است. بعد از آماده کردن همه نمونه‌ها و قبل از مشاهده به‌وسیله SEM، قطعات طلاپوش



تصویر ۵: ترک‌های ناحیه انتقال:

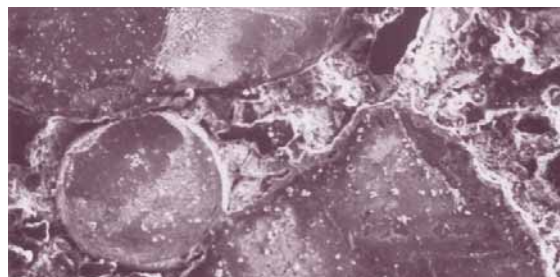
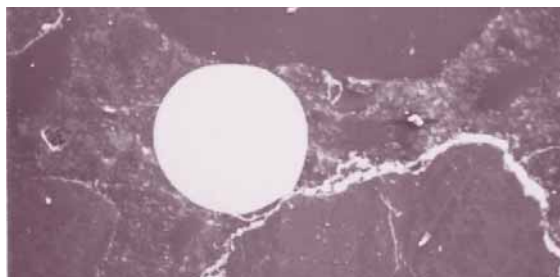
مطالعاتی که براساس آنالیزهای میکروسکوپی صورت گرفته، نشان داده است که ترک‌ها اغلب در سطح مشترک مجموعه و قالب آغاز و سپس به‌درون مجموعه پیشروی می‌کنند؛ که در اینجا ترک‌های ملات به هم می‌پیوندند و یک ناحیه ترک متصل به هم قبل از بارگذاری نهایی تشکیل می‌دهند. تصویرهای ۴ تا ۷ نشان‌دهنده این پدیده هستند.



تصویر ۶: ترک‌های آغازین در سطح مشترک:

گفته می‌شود که ترک‌ها طول محدودی دارند که بازگوکننده شرایط رشد ثابت و پایدار هستند. از تصویر ۷ می‌توان فهمید بعد از این که ترک‌های میکرونی نوکلید شدند، بسته به شرایط فشار تا اندازه‌ای به‌طور غیرپایدار رشد می‌کنند، سپس رشد آن‌ها پایدار می‌شود و نهایتاً به‌دلیل فشار چندجانبه ترک‌ها، رشد آن‌ها ناپایدار می‌گردد.

با وجود شبکه ساختاری ریز و پیشرفته، بتن پرمقاومت ناحیه انتقال قوی‌تری دارد که این مسئله ناشی از کاهش آب مصرفی است

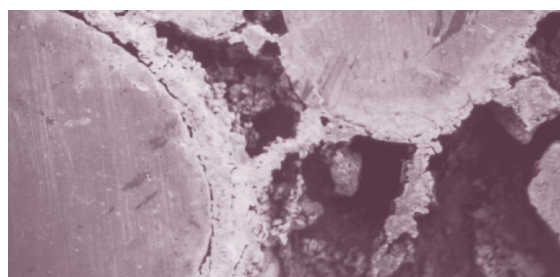


تصویر ۳:

نمونه بتن پر مقاومت قبل و بعد از پوشانده شدن.

اشکال ۴ تا ۷:

بیانگر یافته‌های ریزنگارها از طریق مشاهدات SEM هستند. همه ریزنگارها تفاوت بزرگی میان ترک‌های ریز و حفرات قطعات را نشان می‌دهند. ترک‌ها بیشتر به‌صورت سطوح مرتب و منظم مشاهده می‌شوند و نسبت به یکدیگر کمتر موازی‌اند (تصویر ۴).



تصویر ۴: جهت‌یابی ترک‌ها:

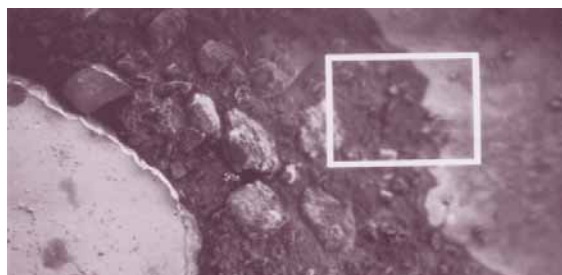
نشان‌دهنده جهت‌یابی ترک‌های میکرونی تولید شده به‌واسطه اعمال نیرو، در محدوده چند درجه در اطراف ماکزیمم نیروی به‌کار رفته است. ترک‌های ناحیه انتقال به‌صورت منحنی با جهت‌یابی رندومی و به‌طور غیرمستقیم، به قابلیت نفوذپذیری بالا اشاره دارند (تصویر ۵).

بعضی از ترک‌های ناحیه انتقال نتیجه به‌کار بردن نیرو هستند، ولی تحقیق و بررسی‌ها نشان داده است که بسیاری از ترک‌های ریز موجود در ITZ، حتی قبل از بارگذاری بتن، به‌وجود آمده‌اند. آغاز و تکثیر ترک در بتن دارای مکانیسم بارزی است که مسئولیت پاسخ غیرخطی بتن در بارگذاری فشاری غیرمحوری را برعهده دارد. آغاز ترک‌ها ممکن است از قالب و یا از افزودنی‌ها و یا از سطح مشترک بین آن‌ها شروع شود.

علاوه بر این شکست در بتن پر مقاومت با مکانیزم شکست خطی ارتجاعی دقیق‌تر از بتن نرمال مقاومت است. این امر ناشی از کاهش در مقدار و میزان ترک‌های میکرونی در ناحیه انتقال سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه‌هاست. به همین دلیل بتن پر مقاومت حالت شکننده‌تر و انبساط حجمی کمتری از خود نشان می‌دهد. بتن پر مقاومت خمیر سیمانی سخت‌تر و قوی‌تری دارد و این ناشی از نسبت W/C کمتر است، که در نهایت باعث بسته‌بندی فشرده دانه‌ها و مقدار کم منافذ و ترک‌ها می‌گردد.

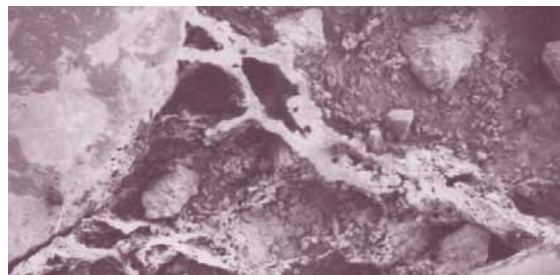
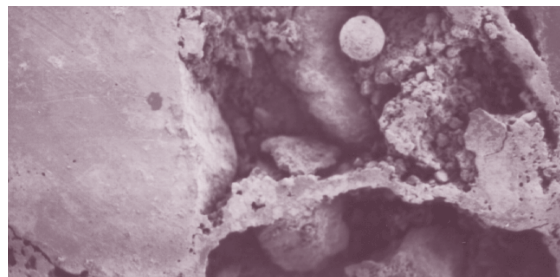
با وجود شبکه ساختاری ریز و پیشرفته، بتن پر مقاومت ناحیه انتقال قوی‌تری دارد که این مسئله ناشی از کاهش آب مصرفی است. پر کردن منافذ با ترکیبات معدنی، که در این آزمایش خاکستر پسته برنج است، صورت می‌پذیرد. تصویرهای ۹-۱۲ دو ریزنگار SEM از بتن پر مقاومت آزمایش شده را نشان می‌دهند. از این ترک‌ها به‌خوبی مشخص است که ترک‌های کمتری در بتن پر مقاومت نسبت به بتن نرمال مقاومت وجود دارد و به علت خمیر سیمانی قوی‌تر بیشتر این ترک‌ها در ناحیه انتقال رخ داده‌اند.

تصویر ۹ یک ریزنگار SEM از نمونه بارگذاری نشده از بتن پر مقاومت را نشان می‌دهد. هیچ ترک‌ای که به‌وسیله نیرو تولید شده باشد در این قسمت مشاهده نمی‌شود. مناطقی از روزه‌های به‌هم پیوسته در منطقه انتقال بین سطحی بسیار کم مشاهده شده‌اند، که ناشی از پالایش ریزساختارهای این منطقه‌اند. این موضوع در تصویر مجاور به‌صورت بزرگ‌تر دیده می‌شود.



تصویر ۹: نشان‌دهنده بتن پر مقاومت بارگذاری نشده است.

بررسی کیفی این مقاطع نشان می‌دهد که علت اصلی شکست ترک‌های بین سطحی میان سنگدانه و خمیر سیمان، حضور مناطقی از روزه‌های به‌هم پیوسته در آ‌ی‌تی‌زد است. بررسی‌های عمیق نشان داده‌اند که ترک‌های خیلی ریز در سطح مشترک بین



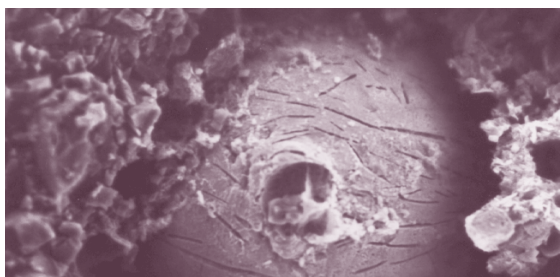
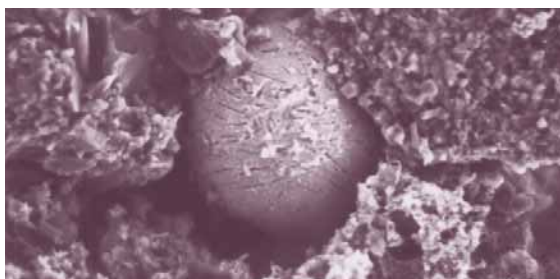
تصویر ۷: رشد ترک‌ها:

یک تصویر سه بعدی قابلیت نشان‌دادن اطلاعاتی را دارد که برای یک تصویر دو بعدی از همان نوع از جهت جزئیات و تضاد و عمق غیرممکن است. این تصاویر تفکیک‌کننده Z-محوری پیوندهایی هستند که از طریق عکس‌های دوبعدی قابل تشخیص نیستند. توانایی دیدن بعد سوم در برابر یک صفحه تخت دوبعدی به فرد امکان بررسی فرآورده‌های ضخیم‌تر را می‌دهد. تصویربرداری جفتی استریو در میکروسکوپ‌های سه‌بعدی، با وضوح بالا، برای مشاهده اجزا به صورت سه بعدی از طریق این تصاویر قابل مشاهده‌اند. تصویر ۸ عکس‌های جفتی استریو از سطوح شکست در بتن، با استفاده از یک میکروسکوپ سه بعدی با وضوح بالا را نشان می‌دهد.



تصویر ۸: عکس‌های جفتی استریو از سطوح شکست در بتن:

بتن با مقاومت بالا نسبت به بتن نرمال مقاومت، بیشتر همانند یک ماده هموزن عمل می‌کند. منحنی تنش - کرنش (stress-strain) در بتن پر مقاومت، برای نسبت‌های بالاتر تنش - کرنش، نسبت به بتن نرمال مقاومت بیشتر به‌صورت خطی عمل می‌نماید.



تصویر ۱۱: روزنه‌ها در بتن:

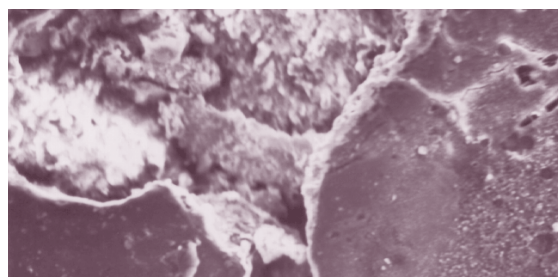
در بتن پرمقاومت واضح است که درصد ترک‌های بتن سطحی در نمونه‌های بارگذاری نشده و به صورت بارگذاری تک‌محوره، خیلی کمتر از درصد نمونه‌های بتنی با مقاومت معمولی است. این واقعیت به صورت جزئی و ناتمام با حذف منطقه‌ای از روزنه‌های به هم پیوسته، که ویژگی مشترکی از آی‌تی‌زد (ITZ) های بتن نرمال مقاومت هستند، توضیح داده می‌شود. این توضیح، مقاومت ارتقا یافته منطقه بین سطحی در بتن پرمقاومت را نیز تأیید می‌کند. در موارد محدود شده درصد ترک‌های بین سطحی شبیه به دو نمونه بتن ذکر شده است.

نتیجه‌گیری

این روش برای حفظ ترک‌های ریزی که در آن‌ها در حین اعمال نیرو، تنش القا می‌شود، توسعه یافته است. در این روش از فلز - چوب‌های مذاب در دمای ۹۶ درجه سانتی‌گراد به صورت یک سیال نافذ در فشاری حدود ۱۰ MPa استفاده می‌شود. از آن‌جا که فلز - چوب ضدآب است، ممکن است به نوک ترک‌ها نفوذ نکند و به یک تنش فشاری مؤثر اضافی در نوک ترک‌ها منجر شود. بنابراین مقدار فاکتور شدت تنش در مقایسه با یک سیال جاذب در شرایط تنشی یکسان کاهش می‌یابد. در نقطه دل‌خواه تنش، دما کاهش می‌یابد تا فلز منجمد شود و ریزساختار تا زمانی که فلز تحت بار قرار دارد حفظ گردد. در این آزمایش استفاده از آلیاژهای فلزی با دمای ذوب پایین، یک روش مؤثر برای حفظ ریز ساختار بتن است. مشاهدات سه بعدی ریزساختار با استفاده از حل کردن مجموعه مواد بتن مورد آزمایش ممکن می‌گردد.

استفاده از آلیاژهای فلزی با دمای ذوب پایین، یک روش مؤثر برای حفظ ریز ساختار بتن است. مشاهدات سه بعدی ریزساختار با استفاده از حل کردن مجموعه مواد بتن مورد آزمایش ممکن می‌گردد

سنگدانه‌های زبر و خشن و خمیر سیمان، حتی قبل از بارگذاری بتن وجود دارد. آغاز و انتشار این ترک‌ها به صورت مکانیسم اصلی دلیل رفتار غیرخطی بتنی که به آن بار فشاری تک محوره اعمال شده باشد، در نظر گرفته می‌شود.



تصویر ۱۰: بتن پرمقاومت:

ترک‌های بین سطحی تا وقتی که مقاومت در حدود ۳۰٪ مقاومت نهایی باشد، پایدار می‌مانند و پس از آن در طول، پهنا و تعداد افزایش می‌یابند. تنش کلی که تحت آن این ترک‌ها توسعه می‌یابند بستگی به نسبت W/C دارد. در ۷۰ تا ۹۰ درصد مقاومت نهایی ترک‌ها شروع به باز شدن از میان خمیر بتن می‌کند و ترک‌های بین سطحی به یکدیگر می‌پیوندند و از این طریق الگوی ترکی به هم پیوسته تشکیل می‌شود.

مطالعاتی که با آنالیز میکروسکوپی انجام شده است نشان داده که ترک‌ها غالباً در سطح مشترک آغاز و سپس به درون مجموعه منتشر می‌شوند، که در آن‌جا ترک‌های ملاط به هم می‌پیوندند و تا قبل از بارگذاری نهایی یک مسیر ترکی به هم پیوسته را تشکیل می‌دهند.

علت اصلی شکست ترک‌های بین سطحی میان سنگدانه و خمیر سیمان، حضور مناطقی از روزنه‌های به هم پیوسته در آی‌تی‌زد است