

بررسی اثر ترک های سطحی بتن بر رفتار و میزان خوردگی آرماتورهای فولادی در آب خلیج فارس (بوشهر)

اصغر رجبی
کارشناسی ارشد
سازمان انرژی اتمی ایران

عبدالله افشار
دانشیار
دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

حضور ترک های سطحی در بتن علاوه بر اینکه به پایداری و یکپارچگی سازه بتنی آسیب می رسانند، سبب تسریع نفوذ عوامل مخرب به داخل بتن و خوردگی آرماتورها نیز می شوند. در این مقاله اثر عرض ترک در رفتار و میزان خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن های حاوی سیمان های نوع I و II بررسی و مقایسه شده است. نتایج حاصل از آزمایشات در آب خلیج فارس نشان می دهند که میزان خوردگی آرماتورهای فولادی در محل ترک هایی با عرض کمتر از 0.4 میلی متر در هر دو نوع بتن تقریباً صفر بوده و لی با افزایش پهنای دهانه ترک به بیش از 0.7 میلی متر خوردگی آرماتورها سریع افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهند که رفتار خوردگی آرماتورها در تیرچه های بتنی حاوی سیمان های نوع I و II با عرض ترک مساوی یکسان بوده ولی میزان خوردگی آنها در بتن حاوی سیمان نوع I بیشتر است. از طرف دیگر، بازرسی چشمی آرماتورها پس از تخریب تیرچه ها نشان می دهد که سطح فولادی مورد حمله در محل ترک ها تقریباً 6 تا 7 برابر پهنای ترک می باشد.

The Effect of Superficial Cracks of the Concrete on the Behavior and Corrosion Rate of Steel Rebars in Persian Gulf (Booshehr)

A. Afshar
Associate Professor
Sharif University of Technology

A. Rajabi
MSc. Corrosion
Iranian Atomic Energy Organization

Abstract

The presence of superficial cracks in concrete increases the diffusion of destructive agents into concrete and the corrosion of rebars will take place.

In the present work, the effects of cracks width on the behavior and corrosion rate of steel rebars in the concrete containing cements type I and II at Persian Gulf water have been studied.

The results show that the corrosion rate of steel rebars in the concrete with cracks width less than 0.4 mm is negligible, but with increasing the cracks width to 0.7 mm, the corrosion rate increase rapidly. Also, the corrosion rate of rebars in the concrete containing cement type I is more than that of cement type II. The visual inspection of the surface area of rebars shows that the corroded area is 6-7 times of the crack width and length.

می‌توانند از محصولات خوردگی آرماتورها تشکیل شده باشند. دانسیته و در نتیجه نفوذپذیری این رسوبات به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و ترکیبات بتن می‌باشند [۸].

روش تحقیق

به منظور بررسی اثر پهنای ترک در رفتار و میزان خوردگی آرماتورهای فولادی، ابتدا نمونه‌های بتنی استوانه‌ای شکلی به قطر ۶ Cm و ارتفاع ۵۰ Cm از ملات بتنی با ترکیب ارائه شده در جدول ۱ از دو نوع سیمان، نوع I (کارخانه سیمان آبیگ) و نوع II (کارخانه سیمان تهران) با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۲ ساخته شده و سپس به مدت ۷ روز در محیط اشباع از آب عمل آورده شده‌اند. درون هر کدام از نمونه‌ها یک میلگرد ساده ساختمانی (با ترکیب شیمیایی اشاره شده در جدول ۳) به قطر ۱۰ mm و به طول ۵۰ Cm به نحوی جایگذاری شده که ۵ Cm از طول آن جهت ایجاد ارتباط الکتریکی خارج از بتن بوده و ناحیه بیرونی برای جلوگیری از واکنش با اتمسفر با رنگ و نوار تفلون پوشش داده شده است. تیرچه‌ها پس از عمل آوری جهت ایجاد ترک به روش بارگذاری سه محوری، در دستگاهی که از دو فک و یک تکیه گاه تشکیل شده است قرار گرفته‌اند. دو سر انتهایی نمونه در داخل فک‌ها قرار گرفته که با محکم کردن پیچ مربوط به فک‌ها، نمونه از محل تکیه گاه ترک خواهد خورد. عرض ترک ایجاد شده در این حالت به مدار پیچش پیچ‌ها بستگی دارد. بدین ترتیب بر روی تیرچه‌های بتنی ترک‌هایی با عرض $0/3$ ، $0/4$ ، $0/5$ ، $0/7$ و $1/5$ میلی‌متر ایجاد گردیده است. نمونه‌ها پس از ایجاد ترک با پوشش Coal Tar Epoxy به نحوی پوشش داده شده‌اند که فقط ترک‌ها بتوانند بدون حفاظت در معرض محیط خورنده قرار گیرند. سپس نمونه‌ها در ظروفی محتوی آب خلیج فارس غوطه‌ور گردیده‌اند.

آرماتورهای موجود در تیرچه‌ها، از طریق رابط‌های الکتریکی به یک صفحه فولادی ضد زنگ به ابعاد 20×50 cm متصل شده‌اند. در این حالت آرماتور درون ترک به عنوان آند عمل خواهد کرد و صفحه فولادی علاوه بر آنکه نقش کاتد را به عهده خواهد داشت، نیروی محرکه فرایند خوردگی را نیز تأمین می‌کند. بدین ترتیب دو بخش آندی و کاتدی از یکدیگر جدا شده و لذا

خوردگی بتن مسلح در انواع مختلفی از ساختمان‌ها، مخصوصاً در سازه‌های دریایی، پل‌ها، سدها و ... اتفاق می‌افتد. سازه‌های بتنی مسلح باید عاری از مسائل خوردگی بوده و عمر مفید طولانی داشته باشند، ولی مواردی دیده شده است که بتن بر خلاف انتظار عملکرد مطلوبی نداشته و خیلی زودتر از عمر پیش‌بینی شده‌اش آسیب دیده و یا به کلی تخریب شده است. [۱، ۲].

استفاده روزافزون از فولادهای با مقاومت بالا در بعضی از طرح‌ها که تحت تأثیر بارهای زیاد قرار می‌گیرند، منجر به ترک‌های ناشی از بارهای خمشی می‌شود و این امر اجازه می‌دهد تا رطوبت و نمک‌ها توأم با هم با اکسیژن از درزها به درون بتن رسوخ کرده و در اثر واکنش با آرماتورها سبب خوردگی شوند. بنابراین کنترل ترک‌ها نقش بسیار با اهمیتی را در مسائل خوردگی بازی می‌کند و اگر چنانچه عمل خوردگی به وسیله ترک‌ها به موقع کنترل نگردد، نتیجه کار به تشکیل بیشتر آنها مخصوصاً ترک‌های طولی منجر خواهد شد و در این مرحله است که مقاومت آرماتورها به علت خراب شدن اتصالاتشان با بتن مجاور به حد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۳].

ترک‌های ایجاد شده در طول مراحل اجرا و در طول دوره اولیه سخت شدن ممکن است عامل اصلی و اولیه شتاب گرفتن واکنش‌های آسیب رسان باشند. این ترک‌ها باعث می‌شوند تا آب و مواد مهاجم مانند دی‌اکسید کربن و یا سولفات از این طریق وارد بتن شوند [۴]. معمولاً آرماتورها به وسیله خواص شیمیایی آب موجود در منافذ بتن محافظت می‌شوند، ولی اگر در بتن ترک‌هایی ایجاد شود، مواد مهاجم به داخل بتن نفوذ کرده و باعث از بین رفتن خاصیت حفاظتی بتن شده و به فولاد موجود در آن صدمه می‌زنند. خاصیت حفاظتی بتن‌های واقع در خشکی به علت عمل کربناسیون و بتن‌های غوطه‌ور در آب تحت تأثیر یون کلر کاهش می‌یابد. [۵].

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که ترک‌هایی که در سازه‌های بتنی روی می‌دهد ممکن است توسط رسوبی که از واکنش شیمیایی بین املاح آب دریا و بتن حاصل می‌شوند، دوباره پر شده و مسدود گردند [۶]. نفوذپذیری فضای داخل ترک عمدتاً به نوع و مقدار رسوبات درون ترک بستگی دارد. این رسوبات می‌توانند از آلودگی محیط و یا از خروج مواد قلیایی کربناته شده از درون بتن بوجود آیند [۷]. همچنین این رسوبات

می‌توان سرعت و یا شدت جریان خوردگی آرماتور واقع در منطقه ترک را محاسبه کرد [۹].

مدت این آزمایش ۲۶ هفته بوده و هر هفته مقدار جریان بین آرماتور و صفحه فولادی با یک مولتی متر دیجیتالی حساس اندازه‌گیری شده است. جریان اندازه‌گیری شده در واقع ارتباط مستقیمی با میزان خوردگی آرماتور در محل ترک دارد. بسته به شرایط، سرعت خوردگی متغیر بوده ولی درجه یا شدت آن تا حد زیادی تابع سطح فولاد بی حفاظ است. پس از پایان مدت مذکور از رسوب ایجاد شده در محل ترک‌ها، نمونه برداری شده و رسوبات توسط روش XRD آنالیز گردیده‌اند. هم‌چنین جهت بررسی سطح فولادی خورده شده در محل ترک‌ها، نمونه‌ها تخریب شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی اثر پهنای ترک بر شدت جریان خوردگی آرماتورهای واقع در منطقه ترک برای تیرچه‌های بتنی حاوی سیمان‌های نوع I و II در جدول ۴ و شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج رفتار خوردگی آرماتور واقع در منطقه ترک را می‌توان به چهار طبقه تقسیم بندی نمود:

۱ - نمونه‌هایی که پس از گذشت یک مدت زمانی، خوردگی در آنها شروع شده و سپس تا میزان صفر کاهش می‌یابد (مانند نمونه‌های دارای ترک با عرض ۰/۳ و ۰/۴ میلی‌متر).

۲ - نمونه‌هایی که پس از گذشت یک مدت زمانی خوردگی در آنها شروع شده و پس از یک افزایش کاهش یافته و میزان خوردگی در حد کمی ثابت باقی می‌ماند (مانند نمونه دارای ترک با عرض ۰/۵ mm).

۳ - نمونه‌هایی که در آنها خوردگی بلافاصله شروع شده و پس از یک افزایش، کاهش یافته و میزان خوردگی در حد نسبتاً بالایی ثابت باقی می‌ماند (مانند نمونه دارای ترک با عرض ۰/۷ mm).

۴ - نمونه‌هایی که در آنها خوردگی بلافاصله از مقادیر بالایی شروع شده و در مدت آزمایش همچنان بالا باقی می‌ماند (مانند نمونه دارای ترک با عرض ۱/۵ mm).

این تنوع رفتار می‌تواند مربوط به چگونگی و مقدار رسوبات تشکیل شده در محل ترک‌ها باشد. زیرا پس از پایان آزمایش مشاهده گردید که سطح تمامی نمونه‌ها با

رسوب سفید رنگی پوشیده شده است (شکل‌های ۳ و ۴). آب دریا حاوی سولفات‌ها بوده و لذا در اثر تهاجم این سولفات‌ها به بتن محصولاتی تشکیل می‌شود که این محصولات می‌توانند سبب انسداد ترک‌ها شوند. آنالیز رسوبات تشکیل شده توسط روش XRD نشان می‌دهد که این رسوبات از جنس $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg Ca} (\text{CO}_3)_2$ و اکسید هیدراته آهن می‌باشند. مسدود شدن ترک‌ها با این رسوبات تهاجم آب دریا به داخل بتن‌ها را ملایم‌تر می‌نماید. بررسی ماکروسکوپی نمونه‌ها، اثری از زنگ آهن را در محل ترک با عرض کمتر از ۰/۴ mm نشان نمی‌دهند، ولیکن با افزایش عرض ترک بر مقدار زنگ تشکیل شده در محل آن افزوده می‌شود. زنگ آهن هیدراته محصولی با تخلخل بالا بوده و با افزایش مقدار آن، تخلخل رسوب و در نتیجه میزان خوردگی آرماتورها هم افزایش می‌یابد که این امر بر پتانسیل آرماتورها نیز اثر می‌گذارد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل آرماتورها که در جدول ۵ و شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است، نشان می‌دهند که در نمونه‌های با عرض ترک کمتر از ۰/۴ mm تا قبل از شروع خوردگی پتانسیل منفی تر شده و در هنگام خوردگی نسبتاً ثابت شده و هم‌زمان با تشکیل رسوب در محل ترک، پتانسیل نیز مثبت‌تر شده و به حدود (S.C.E.) $200 -$ mV که معادل پتانسیل لایه سفید تشکیل شده (معروف به لایه کلکاریوس) می‌باشد، می‌رسد. در نمونه‌های با عرض ترک ۱/۵ mm تغییرات پتانسیل نسبت به زمان در یک حد نسبتاً ثابتی که معادل پتانسیل فولاد در تماس با آب دریا می‌باشد، باقی می‌ماند.

در نمونه‌های با عرض ترک ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر، پس از شروع خوردگی پتانسیل نسبتاً ثابت مانده و پتانسیل اندازه‌گیری شده ما بین دو حالت قبلی است و این امر نشان می‌دهد که لایه تشکیل شده بر سطح آرماتور فولادی ترکیبی از لایه کلکاریوس و زنگ آهن می‌باشد. زنگ آهن هیدراته ترکیب متخلخلی بوده و حضور آن در کنار رسوب دریایی کلکاریوس باعث افزایش تخلخل رسوب حاصله شده و سطح فولاد از طریق این تخلخل‌ها در تماس با آب دریا خواهد بود. این امر دلیل اصلی عدم توقف خوردگی در نمونه‌های با عرض ترک ۰/۴ میلی‌متر به بالا می‌باشد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری کاهش وزن و کاهش سطح مقطع آرماتور در محل ترک‌ها، پس از تخریب

نمونه‌ها که در جدول ۶ و در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است نشان می‌دهند که میزان کاهش وزن و کاهش سطح مقطع آرماتورها در نمونه‌های با عرض ترک کوچکتر از ۰/۵ میلی‌متر ناچیز بوده ولی با افزایش بیشتر پهناي دهانه ترک، سریع افزایش می‌یابند. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های بتنی حاوی سیمان نوع I دارای کاهش وزن و کاهش سطح مقطع بیشتری نسبت به نمونه‌های بتنی حاوی سیمان نوع II می‌باشند. دلیل این موضوع را باید در ترکیب شیمیایی این دو نوع سیمان جستجو کرد. جهت مقابله با حمله سولفات‌ها، سیمان نوع II دارای سه کلسیم آلومینات (C₃A) کمتری نسبت به سیمان نوع I می‌باشد. این عامل که ترکیبی از اکسید کلسیم و آلومینیم می‌باشد، در واکنش با سولفات‌ها تولید گچ می‌کند، که این محصول تا اندازه‌ای در محلول‌های کلریدی حل می‌شود. انحلال این محصول تولید فضای خالی (تخلخل) بیشتری در محل رسوبات کرده و محلول خورنده آب دریا از طریق این تخلخل‌ها، راحت‌تر به سطح آرماتورها می‌رسد و با افزایش سطح فولادی در تماس با محیط، میزان خوردگی هم افزایش می‌یابد. از این رو نمونه‌های بتنی حاوی سیمان نوع I، به دلیل دارا بودن مقادیر بیشتری از ترکیب C₃A، مقدار کاهش وزن و کاهش سطح مقطع بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی سیمان نوع II دارند. همچنین بررسی ظاهر آرماتورها پس از تخریب نشان می‌دهد که با افزایش پهناي دهانه ترک سطح فولادی مورد حمله نیز افزایش یافته و از حدود ۲cm برای نمونه با عرض ترک

۱/۵mm به حدود ۱۱cm برای نمونه با عرض ۱/۵mm در نمونه‌های بتنی حاوی سیمان نوع I افزایش یافته است. به عبارت دیگر در هر نمونه سطح فولادی مورد حمله در محل ترک تقریباً ۷ برابر پهناي دهانه ترک است. این نسبت در نمونه‌های حاوی سیمان نوع II اندکی کمتر است. این موضوع در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

- ۱- رفتار عرض ترک در خوردگی آرماتورها در نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های نوع I و II یکسان می‌باشد.
- ۲- میزان خوردگی آرماتورها در محل ترک‌هایی با عرض کمتر از ۰/۴ میلی‌متر بسیار ناچیز بوده ولی با افزایش پهناي دهانه ترک با بیش از ۰/۷ میلی‌متر سریع افزایش می‌یابد.
- ۳- توقف خوردگی در نمونه‌های با عرض ترک کمتر از ۰/۴ میلی‌متر، ناشی از انسداد کامل ترک‌ها با یک ترکیب کربناتی و گچ می‌باشد.
- ۴- در نمونه‌های بتنی حاوی سیمان نوع I، آرماتورها در محل ترک‌ها، حساسیت بیشتری نسبت به خوردگی دارند و میزان خوردگی در آنها نسبت به نمونه‌های بتنی حاوی سیمان نوع II بیشتر است.
- ۵- سطح فولادی مورد حمله در محل ترک‌ها تقریباً ۶ تا ۷ برابر عرض دهانه ترک (در مدت ۶ ماه) می‌باشد.

جدول (۱) ملات بتنی مورد استفاده جهت ساخت ۱m^۳ بتن.

۱۳۳۰ Kg	ماسه (با ابعاد کوچکتر از ۰/۸ mm)
۲۲۰ Kg	سنگریزه (با ابعاد بین ۸-۱۶ mm)
۴۰۰ Kg	سیمان
۱۸۶ Lit	آب

جدول (۲) ترکیب شیمیایی سیمان‌های مورد استفاده.

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loi	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ A	C ₄ AF
نوع I	۲۱/۳	۵/۹۸	۳/۰۲	۶۴/۹۸	۳/۰۷	۲/۵۳	۱/۲۲	۴۹/۱	۲۴/۳	۱۱/۱	۹/۴
نوع II	۲۱/۴	۲/۷۸	۲/۳۸	۶۱/۹۲	۳/۴۸	۲/۲۲	۱/۷	۴۵/۹	۲۶/۸	۶/۹	۱۰/۳

جدول (۳) ترکیب شیمیایی آرماتور فولادی مورد استفاده.

عنصر	Mn	Si	C	P	S	Fe
ترکیب	۱/۲۳	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	باقیمانده

جدول (۴) تغییرات شدت جریان خوردگی نسبت به پهنای ترک در بتن های حاوی سیمان های نوع I و II.

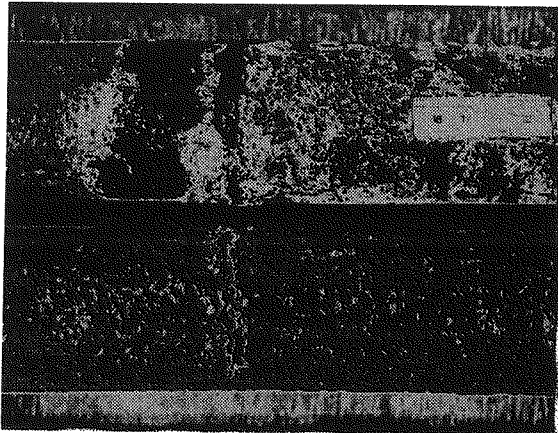
زمان (هفته)	بتن حاوی سیمان نوع I					بتن حاوی سیمان نوع II				
	پهنای دهانه ترک (mm)					پهنای دهانه ترک (mm)				
	شدت جریان خوردگی (μA)					شدت جریان خوردگی (μA)				
	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۱/۵	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۱/۵
۱	۰	۰	۰	۱۶	۲۲۸	۰	۰	۰	۱۰	۲۴۰
۳	۰	۷	۱۲	۴۷	۲۵۵	۰	۳	۱۳	۴۱	۲۵۷
۵	۱۳	۲۳	۳۵	۸۱	۲۷۹	۱۷	۲۰	۳۶	۷۷	۲۶۰
۸	۲۶	۳۶	۵۵	۱۱۲	۲۹۰	۲۹	۳۵	۵۴	۱۰۸	۲۵۸
۱۰	۳۰	۳۷	۶۰	۱۰۹	۲۷۳	۲۷	۳۹	۵۹	۱۰۵	۲۴۷
۱۲	۳۱	۳۵	۶۵	۱۰۷	۲۵۱	۲۳	۳۸	۶۳	۱۰۳	۲۱۹
۱۴	۲۳	۲۹	۶۳	۱۱۰	۲۲۳	۱۹	۳۱	۶۲	۱۰۵	۱۹۱
۱۶	۱۵	۲۵	۵۷	۱۰۵	۲۰۶	۸	۲۳	۶۱	۱۰۷	۱۷۲
۱۸	۶	۱۹	۴۸	۱۰۳	۱۷۹	۳	۱۴	۵۷	۹۹	۱۵۵
۲۰	۰	۱۱	۳۶	۹۵	۱۵۵	۰	۷	۴۱	۸۵	۱۴۱
۲۲	۰	۷	۲۹	۸۱	۱۴۷	۰	۵	۳۲	۷۳	۱۳۰
۲۴	۰	۰	۲۴	۷۴	۱۴۰	۰	۰	۲۳	۶۵	۱۲۴
۲۶	۰	۰	۲۶	۷۳	۱۳۹	۰	۰	۲۳	۶۴	۱۲۱

جدول (۵) پتانسیل آرماورها نسبت به زمان در نمونه های حاوی سیمان نوع I و II با عرض ترك متفاوت.

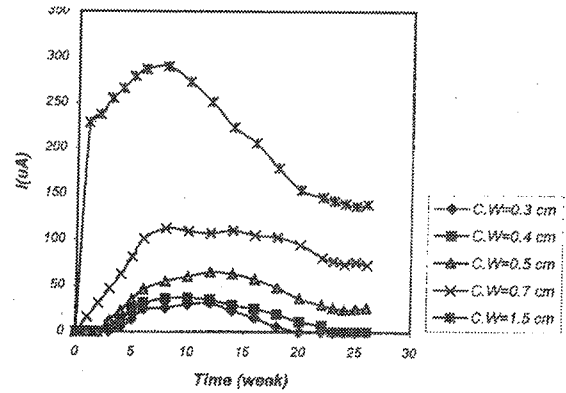
عرض ترك (mm)	بتن حاوی سیمان نوع I		بتن حاوی سیمان نوع II	
	کاهش سطح مقطع (%)	کاهش وزن (mgr)	کاهش سطح مقطع (%)	کاهش وزن (mgr)
۰/۳	۱/۶	۵۳	۱/۴	۴۷
۰/۴	۲/۶	۸۲	۲/۵	۷۷
۰/۵	۶/۸	۱۷۹	۵/۶	۱۵۷
۰/۷	۱۲/۳	۳۸۰	۱۱/۵	۳۵۶
۱/۵	۳۰/۵	۹۳۶	۲۷/۸	۸۵۲

جدول (۶) کاهش وزن و سطح مقطع آرماورها در پایان آزمایش.

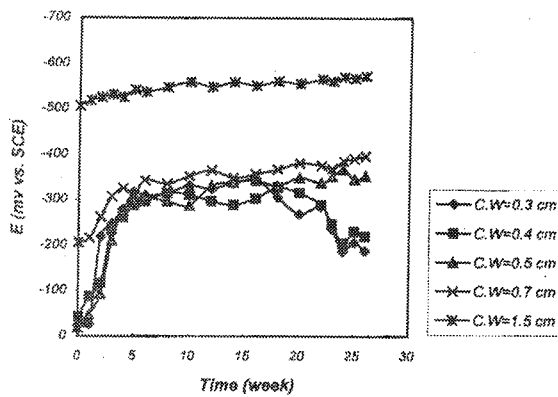
زمان (هفته)	بتن حاوی سیمان نوع I					بتن حاوی سیمان نوع II				
	پهنای دهانه ترك (mm)					پهنای دهانه ترك (mm)				
	پتانسیل (mV)					پتانسیل (mV)				
	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۱/۵	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۱/۵
۱	-۲۷	-۸۷	-۴۹	-۲۱۷	-۵۱۸	-۸۳	-۷۳	-۷۱	-۲۴۳	-۵۲۵
۳	-۲۴۷	-۲۳۳	-۲۱۷	-۳۰۷	-۵۳۱	-۲۱۹	-۲۲۵	-۲۵۳	-۳۰۷	-۵۲۳
۵	-۳۱۷	-۲۸۷	-۲۹۸	-۳۱۱	-۵۴۱	-۲۷۹	-۲۸۳	-۲۹۹	-۳۳۲	-۵۳۶
۸	-۳۱۵	-۳۱۷	-۲۹۶	-۳۳۶	-۵۴۷	-۳۰۷	-۲۹۷	-۳۰۸	-۳۴۵	-۵۳۳
۱۰	-۳۳۱	-۳۱۱	-۲۸۷	-۳۵۳	-۵۵۹	-۳۱۲	-۳۲۵	-۳۱۱	-۳۱۹	-۵۴۹
۱۲	-۳۲۵	-۲۹۷	-۳۳۱	-۳۶۵	-۵۴۸	-۳۲۷	-۳۳۶	-۳۳۵	-۳۲۵	-۵۳۳
۱۴	-۳۳۷	-۲۸۹	-۳۳۹	-۳۴۹	-۵۵۶	-۲۸۵	-۳۳۵	-۳۵۳	-۳۵۶	-۵۳۹
۱۶	-۳۳۵	-۳۰۳	-۳۳۳	-۳۵۷	-۵۵۱	-۲۷۶	-۳۰۵	-۳۴۳	-۳۷۳	-۵۴۶
۱۸	-۳۰۶	-۳۲۷	-۳۳۱	-۳۶۷	-۵۶۱	-۲۵۱	-۲۸۳	-۳۴۹	-۳۸۳	-۵۵۲
۲۰	-۲۶۹	-۳۱۵	-۳۴۹	-۳۸۱	-۵۵۹	-۲۴۷	-۲۷۱	-۳۵۸	-۳۶۱	-۵۶۳
۲۲	-۲۸۵	-۲۸۹	-۳۳۷	-۳۷۶	-۵۶۶	-۲۳۱	-۲۱۷	-۳۶۳	-۳۶۷	-۵۶۷
۲۴	-۲۸۷	-۲۴۷	-۳۶۷	-۳۸۵	-۵۷۰	-۲۲۵	-۲۰۳	-۳۷۶	-۴۰۳	-۵۶۶
۲۶	-۱۸۹	-۲۰۵	-۲۵۳	-۳۹۷	-۵۷۳	-۲۰۵	-۲۰۴	-۳۷۵	-۳۹۸	-۵۸۶



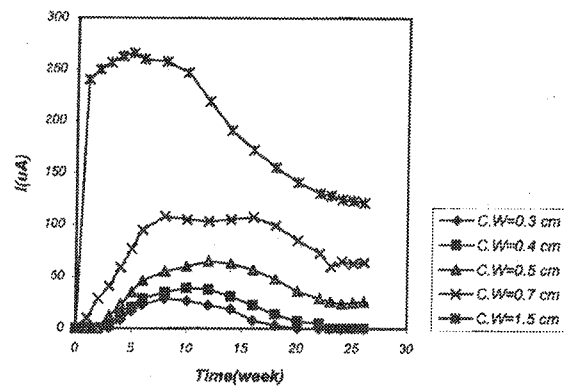
شکل (۳) پر شدن دهانه ترک در نمونه حاوی سیمان نوع I با عرض ترک ۱ / ۵ میلیمتر.



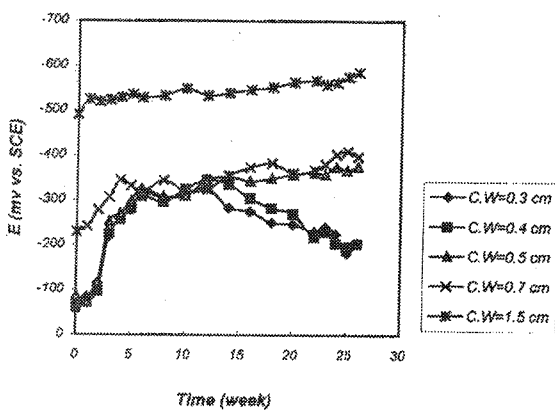
شکل (۱) منحنی‌های تغییرات شدت جریان خوردگی فولاد در بتن حاوی سیمان نوع I با عرض ترک متفاوت نسبت به زمان.



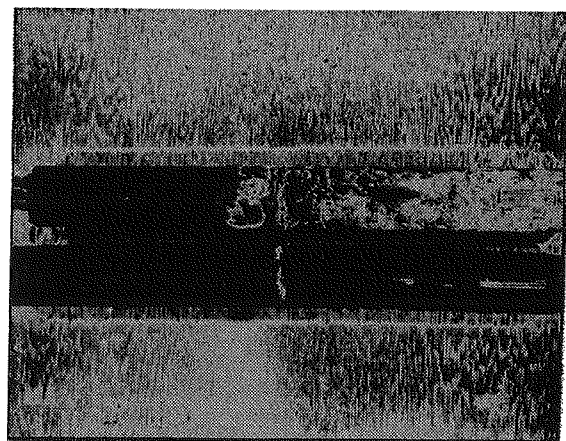
شکل (۵) منحنی‌های تغییرات پتانسیل آرمانور نسبت به زمان در بتن حاوی سیمان نوع I با عرض ترک متفاوت نسبت به زمان.



شکل (۲) منحنی‌های تغییرات شدت جریان خوردگی فولاد در بتن حاوی سیمان نوع II با عرض ترک متفاوت نسبت به زمان.



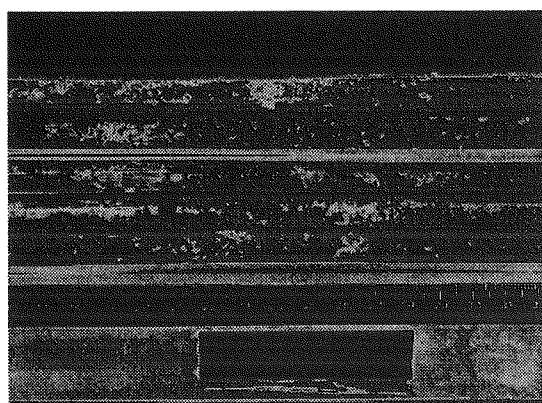
شکل (۶) منحنی‌های تغییرات پتانسیل آرمانور نسبت به زمان در بتن حاوی سیمان نوع II با عرض ترک متفاوت نسبت به زمان.



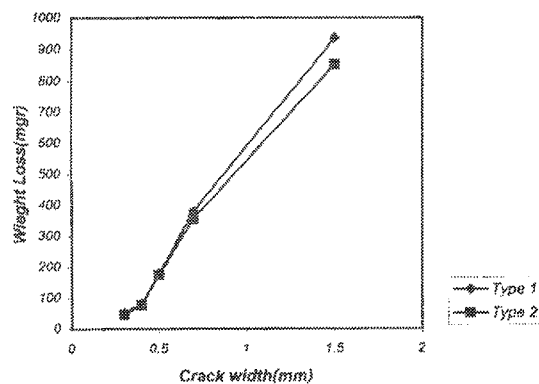
شکل (۳) شکل ظاهری نمونه حاوی سیمان نوع I با عرض ترک ۱ / ۵ میلیمتر (۱) قبل و (۲) بعد از آزمایش.



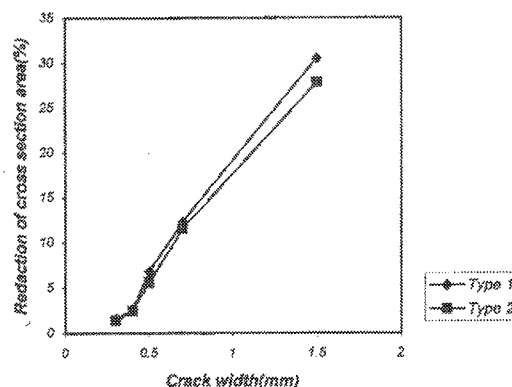
شکل (۹) گستردگی خوردگی بر سطح آرماتورهای فولادی پس از تخریب نمونه های بتنی حاوی سیمان نوع I با عرض ترک متفاوت.



شکل (۱۰) گستردگی خوردگی بر سطح آرماتورهای فولادی، پس از تخریب نمونه های بتنی حاوی سیمان نوع II با عرض ترک متفاوت.



شکل (۷) منحنی های تغییرات کاهش وزن آرماتور نسبت به عرض ترک در بتن های حاوی سیمان نوع I و II.



شکل (۸) منحنی های تغییرات کاهش سطح مقطع آرماتور نسبت به عرض ترک در بتن های حاوی سیمان نوع I و II.

مراجع

- [1] Omar S.B., "Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Environments", ACI Materials Journal, pp 236-244, May-June 1994.
- [2] Shaw J., "Concrete Repairs and Coating", Concrete, pp 23-25, September 1997.
- [3] Borgard B. and Worren C., "Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete.", ASTM STP 1065, Philadelphia, pp 174-188, 1990.
- [4] John P. "Carbonation and Chloride in Concrete", Concrete, pp 18-21, September 1997.
- [5] Schiessl P., "Corrosion of Steel in Concrete", Chapman and Hall Ltd., 1988.
- [6] Lorentz T. and French C., "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete: Effects of Materials, Mix Composition and Cracking", ACI Materials Journal, pp 181-190, March-April 1995.
- [7] Allan M.L., "Factors Controlling the Amount of Corrosion for Cracking in Reinforced Concrete", Corrosion, pp 426-430, May 1992.
- [8] Odd E. Gror and Oystein V., "Effect of Cracks in Submerged Concrete Sea Structure on Steel Corrosion", Materials Performance, pp 49-51, August 1981.
- [9] Oystein V. and Olav G., "Effect of Cracks on Corrosion of Embedded Steel in Silica-Cement Compared to Ordinary", Nordic Concrete Research, No.2, pp 17-28, 1985.