

تأثیر میکروسیلیس و الیاف فولادی بر عملکرد دینامیکی بتن های پر مقاومت

حسین دورمحمدی¹، احمدرضا رافتی²، پیام حسینی²، سیاوش وحیدی²

۱- دانشجوی دکتری سازه و زلزله دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

p.hosseini@civil.sharif.edu

خلاصه

در این مقاله به بررسی نتایج بدست آمده از تست های مختلف که از تحقیقات گوناگون بدست آمده اند و نیز انجام تست های تکمیلی در رابطه با عملکرد ضربه ای و خستگی بتن های پر مقاومت (HSC)، پر مقاومت میکروسیلیسی (SIFUHSC)، پر مقاومت با الیاف فولادی (SFRHSC) و پر مقاومت میکروسیلیسی با الیاف فولادی (SSFHSC) تحت بارگذاری های دینامیکی پرداخته شده است. ساز و کار کاهش خرابی ناشی از استفاده میکروسیلیس و الیاف فولادی نیز بررسی شده است. نتایج نشان دهنده آن است که الیاف فولادی به مقدار زیادی باعث کاهش گسترش ترک ها طی شکست و خرابی بتن های پر مقاومت، کاهش تمرکز تنش در انتهای ترک ها و تاخیر نابودی بتن تحت ضربه و خستگی می شود. میکروسیلیس نیز به طرز قابل ملاحظه ای ساختار ناحیه انتقالی (ناحیه بین خمیر سیمان و سنگدانه ها) را بهبود داده، ضعف موجود در این ناحیه را از بین برده، تعداد و اندازه ترک ها را کاهش و توانایی الیاف فولادی را در جلوگیری از ترک خوردن و خرابی افزایش می دهد. در نتیجه، همراهی میکروسیلیس و الیاف فولادی به طرز قابل ملاحظه ای مقاومت بتن های پر مقاومت را در برابر ضربه و خستگی افزایش می دهد.

کلمات کلیدی: ناحیه انتقالی، خستگی، میکروسیلیس، تقویت الیافی، بتن پر مقاومت

مقدمه

بتن معمولی و حتی بتن پر مقاومت شکننده اند به طوری که با افزایش مقاومت بتن شکنندگی آن نیز افزایش پیدا می کند. در سالهای اخیر به دلیل استفاده روزافزون بتن های پر مقاومت در پل ها، روسازی ها، سازه های دریایی و مکان های دیگر عملکرد دینامیکی بتن های پر مقاومت تحت بارگذاری های ضربه ای بسیار مورد توجه قرار گرفته است و محققان زیادی به بررسی عملکرد بتن تحت ضربه و بارگذاری های دینامیکی پرداخته اند. [1-4] آزمایش های زیادی نشان دهنده تاثیر مثبت میکروسیلیس بر ساختار میکروسکوپی نواحی بین سطوح انتقالی و حتی خصوصیات توده ای بتن است. به همان مقدار الیاف فولادی در مهار ترک های ناشی از بارگذاری و افزایش سختی بتن تاثیرگذار است. [5-8] این مقاله در کل به بررسی عملکرد ضربه ای و خستگی بتن های پر مقاومت میکروسیلیسی با الیاف فولادی تحت بارگذاری های دینامیکی می پردازد. در اینجا ۴ نوع بتن پر مقاومت استفاده شده اند: بتن های پر مقاومت (HSC)، پر مقاومت میکروسیلیسی (SIFUHSC)، پر مقاومت با الیاف فولادی (SFRHSC) و پر مقاومت میکروسیلیسی با الیاف فولادی (SSFHSC).

آزمایش ها

مصالح

نسبت مصالح و ویژگی های مکانیکی ۴ طرح اختلاط بتن مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است. مقدار SiO_2 واکنش پذیر و سطح مخصوص آن به ترتیب 94.48% و 24 m²/g است. الیاف فولادی نیز الیاف مستطیلی مستقیم است که از برش صفحات فولادی کم کربن به دست آمده است. طول الیاف (l_f)، قطر الیاف (d_f) و نسبتشان (l_f/d_f) نیز به ترتیب 25mm، 0.417mm و ۶۰ می باشد. سنگدانه درشت، گرانیت خرد شده با دانه بندی یکنواخت بین 5 تا 20mm و حداکثر اندازه 20mm است. سنگدانه ریز ماسه رودخانه ای با ضریب نرمی ۲,۳۸ است. افزودنی کاهنده آب با عملکرد بالا نیز جهت ساخت بتن های پر مقاومت مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱- نسبت مواد و ویژگی های مکانیکی بتن

نوع بتن	سیمان (Kg/m ³)	میکروسیلیس (Kg/m ³)	حجم الیاف فولادی (%)	نسبت به مواد سیمانی (%)	نسبت آب مواد سنگدانه (%)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	مقاومت خمشی ۲۸ روزه (Mpa)
HSC	500	0	0	0.28	32	80	7.0
SIFUHSC	400	100	0	0.28	32	100	9.0
SFRHSC	500	0	1.5	0.28	36	100	15.0
SFRSIFUHS	400	100	1.5	0.28	36	120	21.0

روش انجام تست‌ها

آزمایش های مقاومت ضربه ای

عملکرد ضربه ای بر اساس ACI 544 به روش رها کردن آزاد گوی، اندازه‌گیری شده است. برای تست ضربه از نمونه‌های استوانه‌ای 150*64mm استفاده شده است. جرم و ارتفاع سقوط گوی نیز به ترتیب 4.5Kg و 457mm است. عملکرد ضربه ای با ۴ شاخص بیان می‌شود: تعداد ضربه ها تا آغاز ترک خوردن (N₁)، تعداد ضربه ها تا خرابی کامل (N₂)، اختلاف N₁ و N₂ (dN = N₂ - N₁) و سختی ضربه (T).

آزمایش های خستگی خمشی

برای این آزمایش ها از نمونه های 100*100*400mm و بارگذاری ۳ محوری استفاده شده است. اندازه دوره بارگذاری (ρ) برابر با ۰٫۱ است. نسبت تنش (n) که طبق تعریف به نسبت مقاومت خستگی خمشی به مقاومت خمشی اطلاق می شود از مقادیر زیاد به مقادیر کم تغییر داده شده تا عدد خستگی به ۱۰^۶ برسد. سپس در این مقدار، نسبت تنش اندازه گیری شده تا زمانیکه نمونه ها به خرابی کامل برسند. بسامد بارگذاری ها نیز برای n > 0.8 بین ۵ تا 7 Hz و برای n < 0.8 بین ۱۵ تا 20 Hz اعمال شده است.

۱ - ۲ - ۳ اندازه گیری ویژگی های ناحیه انتقالی

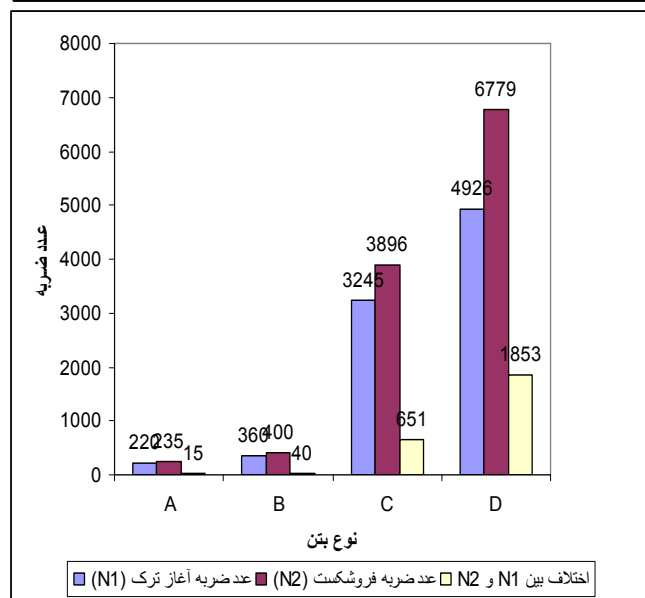
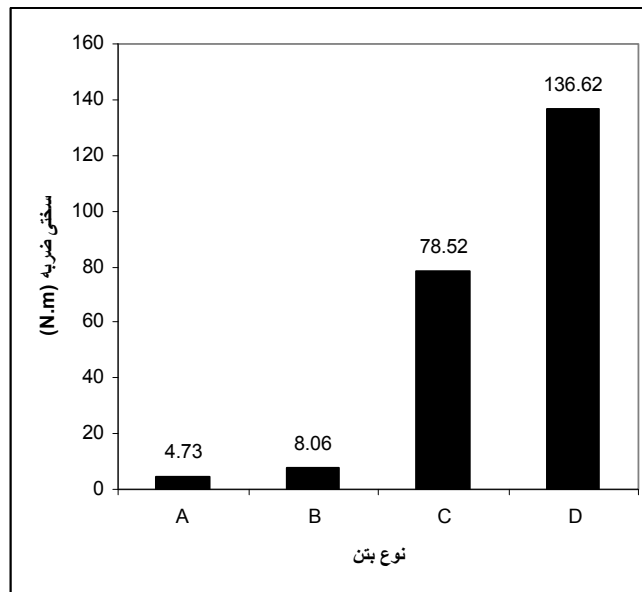
ویژگی های نواحی انتقالی با روش اندازه گیری سختی میکروسکوپی اندازه گیری شده اند. در این اندازه گیری ها، سختی میکروسکوپی به صورت لایه به لایه و نقطه به نقطه از الیاف فولادی یا سطح سنگدانه به یک مقدار ثابت سختی میکروسکوپی بررسی شده است.

نتایج و تحلیل

ویژگی های ضربه ای

پهبود مقاومت ضربه ای هر ۴ نوع بتن در شکل ۱ نشان داده شده است. تمامی شاخص های رفتاری بتن SIFUHSC به مقدار کمی نسبت به HSC افزایش یافته اند اما تقریباً در همان نسبت برابر قرار دارند. با ورود الیاف فولادی به HSC، ۴ شاخص بتن SFRHSC نسبت به HSC به مقادیر (N₁) ۱۵ بار، (N₂) ۲۹ بار، (dN) ۱۲۳ بار و (T) ۲۹ بار افزایش یافته اند. همچنین اختلاف بین N₁ و N₂ از ۱۵ به ۱۸۵۳ افزایش یافته است که افزایشی بسیار بالاست. این‌ها نشان دهنده‌ی توانایی فوق العاده SSFHSC در جذب انرژی جنبشی و مهار گسترش ترک ها طی ضربات وارده به بتن به خاطر تاثیر همزمان میکروسیلیس و الیاف فولادی است. SSFHSC حتی بعد از شروع ترک خوردگی نیز تاب تحمل ضربات دینامیکی زیادی را دارد. الگوی خرابی کامل SSFHSC، شکست های متعدد در نواحی ترک خورده بدون خستگی و نابودی کامل است.

A: HSC , B: SIFUHSC , C: SFRHSC , D: SFRSIFUHSC



شکل ۱. خصوصیات ضربه ای ۴ نوع بتن

ویژگی های خستگی ۴ نوع بتن

نتایج آزمایش های خستگی که شامل ۵۰۰ نمونه از ۴ نوع بتن است به روش رگرسیون خطی مورد تحلیل قرار گرفته است. معادلات رگرسیونی که نسبت تنش و لگاریتم عدد خستگی (lgN) را به هم مرتبط می سازند در تساوی های ۱ تا ۴ نشان داده شده است:

$$(1) \quad n = 1.029 - 0.061 \lg N \quad \gamma = 0.954, S = 0.021$$

$$(2) \quad n = 1.045 - 0.057 \lg N \quad \gamma = 0.967, S = 0.019$$

$$(3) \quad n = 1.048 - 0.0556 \lg N \quad \gamma = 0.973, S = 0.02$$

$$(4) \quad n = 1.0511 - 0.0539 \lg N \quad \gamma = 0.973, S = 0.02$$

که γ ضریب نسبیّت و S خطای رگرسیون است.

نسبت های تنش در جدول ۲ نشان داده شده اند. نسبت تنش (هر نوع بتن می تواند عددهای خستگی مختلفی را تحمل کند) با کسر کردن ۳ مرتبه ای انحراف معیار از مقدار رگرسیون به دست آمده تا به عددی با ضریب اطمینان 99.7% برسیم.

جدول ۲- نسبت تنش محاسبه شده با معادله رگرسیون

نوع بتن	عدد خستگی				
	۱۰ ^۲	۱۰ ^۳	۱۰ ^۴	۱۰ ^۵	۱۰ ^۶
HSC	۰,۸۴۴	۰,۷۸۳	۰,۷۲۲	۰,۶۶۱	۰,۶۰۰
SIFUHSC	۰,۸۷۴	۰,۸۱۷	۰,۷۶۰	۰,۷۰۳	۰,۶۴۶
SFRHSC	۰,۸۷۷	۰,۸۲۱	۰,۷۶۶	۰,۷۱۰	۰,۶۵۴
SFRSIFUHS	۰,۸۸۳	۰,۸۲۹	۰,۷۷۶	۰,۷۲۲	۰,۶۶۸

وقتی عدد خستگی از ۱۰^۲ به ۱۰^۶ افزایش پیدا می کند نسبت تنش همه انواع بتن کاهش پیدا می کند. ترتیب کاهش نیز به صورت HSC > SIFUHSC > SFRHSC > SSFHSC است. این نشان دهندهی این واقعیت است که کاهش نسبت تنش با ورود میکروسیلیس، الیاف فولادی و یا هر دو کم می شود و ظرفیت خستگی نیز به وضوح افزایش پیدا می کند. جدول ۳ نشان می دهد که در عدد خستگی ۱۰^۶ مقاومت خستگی خمشی SIFUHSC و SFRHSC نسبت به HSC به ترتیب 38% و 134% افزایش دارد اما این افزایش برای SSFHSC بیشتر از ۳ برابر است که این نشان دهنده تاثیر بسیار بیشتر ترکیب این دو ماده نسبت به حالات یگانه آنهاست.

جدول ۳- مقاومت خستگی خمشی (MPa) محاسبه شده با معادله رگرسیون*

نوع بتن	عدد خستگی				
	۱۰ ^۲	۱۰ ^۳	۱۰ ^۴	۱۰ ^۵	۱۰ ^۶
HSC	۶,۰۵	۵,۵۶	۵,۰۰	۴,۴۴	۴,۲۰
SIFUHSC	۸,۱۰	۷,۵۳	۶,۸۸	۶,۳۲	۵,۸۰
SFRHSC	۱۳,۳۷	۱۲,۴۷	۱۱,۶۱	۱۰,۶۹	۹,۸۳
SFRSIFUHS	۱۸,۵۶	۱۷,۵۹	۱۶,۴۴	۱۵,۳۱	۱۴,۳۵

*اندازه دوره بارگذاری $\rho = 0.1$

ساز و کار تاثیر ترکیبی میکروسیلیس و الیاف فولادی

نکته کلیدی در مورد افزایش عملکرد HSC در برابر ضربه و خستگی افزایش مقاومت آن در برابر ترک خوردگی است. این موضوع شامل دو منظر می شود:

- کاهش تعداد و اندازه ترک خوردگی های بزرگ و ۲- کنترل آغاز و گسترش این ترک ها.
- کاهش تعداد و اندازه ترک خوردگی های بزرگ و ۲- کنترل آغاز و گسترش این ترک ها.

با افزایش الیاف فولادی تمام ساختار HSC بهبود می یابد. الیاف فولادی باعث مهار گسترش ترک، کاهش تمرکز تنش، تغییر جهت گسترش ترک و کاهش نرخ رشد ترک در راس های ترک ها می شود. با این حال نیاز به بهبود بیشتر خصوصیات نواحی انتقالی هستیم و این کار را با افزودن میکروسیلیس به ماتریس بتن HSC انجام می دهیم تا شاهد افزایش مقاومت، افزایش سفتی و افزایش توانایی مهار ترک ها تا بهترین سطح خود باشیم. نواحی انتقالی به دلیل خاصیت پراکنندگی، متبلور شدن و واکنش پوزولانی میکروسیلیس بهبود می یابند. از نتایج آزمایش های انجام شده که در جدول ۴ آنها را مشاهده می کنیم در می یابیم وقتی که 20% میکروسیلیس جایگزین سیمان موجود در HSC می شود، اختلاف سختی میکروسکوپی ماتریس بتن و ضعیف ترین نقطه سطوح انتقالی به طور میانگین از ۷۶ تا 80MPa به ۰,۱ تا 0.7MPa کاهش می یابد. این اختلاف زیاد نشان دهنده یک فرایند متغیر بین سطوح نواحی انتقالی است که از حضور این سطوح تا از بین رفتن آنها و تقویت بتن ادامه می یابد در نتیجه ضخامت لایه های سطوح انتقالی و اختلاف بین نواحی بین سطوح انتقالی و ماتریس بتن بسیار کم شده و رو به صفر شدن می گذارند. صفر شدن و از بین رفتن این اختلاف ناشی از ضعف سطوح داخلی است. تعداد و

اندازه ترک‌های بزرگ در سطوح انتقالی نیز کاهش یافته که این خود به تاثیر بیشتر بین سطوح کمک می‌کند و توانایی الیاف فولادی در جلوگیری از ترک خوردن و گسترش آنها نیز به مقدار بسیار زیادی افزایش می‌یابد.

پس در SSFHSC، آغاز و گسترش ترک‌ها با دو مانع روبرو می‌شود: قدرتمند شدن سطوح بین لایه‌ای ناشی از وجود میکروسیلیس و تاثیر دوچندانی که الیاف فولادی در بهبود قدرت سطوح بین لایه‌ای و مقاومت در برابر گسترش ترک خوردگی‌ها می‌گذارد. میکروسیلیس یک ماده دانه ای و الیاف فولادی یک ماده الیافی با خصوصیات کاملا متفاوت است. این دو ماده در کنار هم با تاثیری ترکیبی ناشی از یک ماده دانه ای و یک ماده الیافی تاثیر کاملی در بهبود مقاومت HSC می‌گذارند. بنابراین تمامی شاخص های مقاومتی HSC تحت تاثیر افزایش مقاومت ضربه ای و خستگی افزایش می‌یابند.

جدول ۴ - رابطه بین سختی میکروسکوپی و خصوصیات بین صفحه ای در نواحی انتقالی

نوع بتن	سختی میکروسکوپی در ضعیف ترین نقطه سطوح داخلی (MPa)	سختی میکروسکوپی ماتریس (MPa)	اختلاف میکروسکوپی ماتریس و ترین نقطه سطوح داخلی (MPa)	سختی ضخامت بین سطوح (um)	فاصله میانگین پیوند بین سطوح (Mpa)	قدرت
HSC	406.2	488.6	80.4	50	--	
SIFUHSC	989.2	988.4	0.2	تقریبا صفر	--	
SFRHSC	410.1	486.3	76.2	50	3.52	
SFRSIFUHS	989.3	989.4	0.1	تقریبا صفر	7.63	

نتایج

۱ - میکروسیلیس و الیاف فولادی دو ماده با خصوصیات کاملا متفاوت هستند. پراکنندگی، متبلور شدن و پوزولان بودن میکروسیلیس، تعداد و اندازه ترک های بزرگ در سطوح نواحی انتقالی و کل بتن را کاهش و تاثیر متقابل بین صفحه ای را افزایش می‌دهد. الیاف فولادی نیز مقاومت، سختی و مقاومت در برابر ترک خوردگی بتن HSC را افزایش می‌دهد و در نتیجه میکروسیلیس و الیاف فولادی طی سازوکارهای مختلف و تکمیلی، خرابی ناشی از ضربه و خستگی را در بتن HSC کاهش می‌دهند.

۲ - وقتی یکی از دو ماده میکروسیلیس یا الیاف فولادی به ماتریس بتن HSC افزوده شود، مقاومت HSC در برابر بارگذاری‌های ضربه‌ای، خستگی و بارگذاری‌های دینامیکی مکرر افزایش پیدا می‌کند. شاخص های ضربه SFRHSC می‌تواند تا ۲ برابر در HSC افزایش داشته باشد. در عدد خستگی 10^6 مقاومت خستگی خمشی SIFUHC و SFRHSC نسبت به HSC به ترتیب 38% و 134% افزایش دارد. این نتایج نشان دهنده این است که الیاف فولادی به تنهایی تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت بتن نسبت به میکروسیلیس تنها دارد.

۳ - وقتی هر دو ماده میکروسیلیس و الیاف فولادی در کنار هم در ماتریس بتن HSC به کار برده شوند، مقاومت ضربه‌ای و خستگی HSC به مقدار قابل ملاحظه ای می‌تواند افزایش یابد. در عدد خستگی 10^6 مقاومت خستگی تا ۴ برابر هم افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که تاثیر ترکیبی میکروسیلیس و الیاف فولادی در کنار یکدیگر بسیار بیشتر از مجموع تاثیر تک تک هر یک از این دو ماده است.

۴ - نتایج آزمایش‌های سختی میکروسکوپی بین سطوح HSC نشان می‌دهد که میکروسیلیس می‌تواند باعث بهبود ساختار و کاهش ضعف سطوح داخلی در نواحی انتقالی و افزایش قدرت پیوند بین سطوح و کاهش تعداد و اندازه ترک‌های بزرگ شود. سپس میکروسیلیس به مقدار بسیار زیادی تاثیر الیاف فولادی در افزایش مقاومت، کاهش خرابی و جلوگیری از ترک خوردن را افزایش می‌دهد. این موضوع بیشتر نمایانگر این است که ترکیب میکروسیلیس و الیاف فولادی با سازوکارهای مختلفی باعث کاهش خرابی HSC تحت بارگذاری‌های ضربه‌ای و خسته کننده می‌شوند و در نتیجه آن مقاومت بتن HSC در برابر ضربه و خستگی افزایش پیدا می‌کند.

منابع

- [1] Su, E.C.M. and Hsu, T.T.C. (1987) *Durability of Construction Materials*. Chapman and Hall. pp. 967-974. London and New York.
- [2] Banthia, N.P. and Mindess, S. A. (1987) *Durability of Construction Materials*, Chapman and Hall. pp. 1033-1040. London and New York.
- [3] Mindess, S. and Yan, C. (1993) *Cem Con Res*. **23**. pp.83.

- [4] Sun, W. and Yan, Y. (1994) China Civil Engineering Journal. **27**. pp.20.
- [5] Sun, W. and Yan, Y. (1994) Journal of the Chinese Ceramic Society. **22**. pp.107.
- [6] Huang, Ch.Y. Feldman, R.F. (1985) Cem Con Res. **15**. pp.285.
- [7] Monacio, P.J. Gjorv, O.E. Mehta, P.K. (1989) Cem Con Res. **19**. pp.114.
- [8] Chen, M.D. Goldman, A. Chen, W.F. (1994) Cem Con Res. **24**. pp.95.