



کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در سازه های بتنی

حسین خورشیدی^۱، سید مسعود میر طاهری^۲، نادر فنائی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

hossein.khorshidi@mail.kntu.ac.ir

mirtaheri@kntu.ac.ir

fanaie@kntu.ac.ir

خلاصه

آلیاژهای حافظه دار شکلی^۱ (SMAs) دسته منحصر به فردی از فلزات هستند که می توانند تغییر شکل و کرنش های دائمی که بر آنها اعمال می شود را بازیابی نموده و در نهایت، به شکل اولیه خود بازگردند. دو مکانیزم برای برگشت پذیری تغییر شکل ها در مواد حافظه دار وجود دارد. اثر حافظه داری و اثر ابر کشسانی که در اثر تبدیل فازهای آستنیت و مارتنزیت در دماهای مختلف و یا در اثر بارگذاری و باربرداری به وجود می آید. سازه های بتن مسلح در مواجهه با زلزله های قوی، جابه جایی های بزرگی را تجربه می کنند که منجر به کرنش های قابل توجهی در آرماتورهای فولادی می گردد. بیش تر کرنش های فولادی دائمی هستند و منجر به تغییر شکل های باقی مانده در سازه و غیر قابل استفاده بودن سازه ها بعد از زلزله می شوند. ماده جایگزین که به عنوان آرماتور پیشنهاد می شود SMA های ابر کشسان هستند که کرنش ها را تحت باربرداری بازیابی می کنند. هدف از این مقاله، مرور مطالعاتی است که تا کنون بر روی عملکرد و رفتار اعضا و سازه های بتنی مسلح شده با آلیاژ حافظه دار شکلی انجام شده است.

کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه دار شکلی، سازه های بتن مسلح، اثر ابر کشسانی، کرنش دائمی

۱. مقدمه

نقشه پهنه بندی لرزه خیزی ایران نشان دهنده این است که هیچ نقطه ای از کشورمان را نمی توان در مقابل اثر زلزله مصون پنداشت. بنابراین طراحی و ساخت سازه هایی که به طور مناسب بتوانند در مقابل زلزله ها پایدار باشد الزامی است. علاوه بر این ها، گزارشات حاکی از آسیب ساختمان های بتن مسلح در مواجهه با زلزله است. استهلاک انرژی زلزله در این ساختمان ها از طریق جاری شدن آرماتورها و تغییر شکل های غیر الاستیک است. اگرچه ایمنی جانی تأمین می گردد، اما تغییر شکل ساختمان های بتنی منجر به آسیب ها و خسارات اقتصادی می گردد. اخیراً طراحی لرزه ای سازه ها بر اساس عملکرد می باشد که به اعضا و سیستم های سازه ای نیازمند است که دارای ظرفیت تغییر شکلی و شکل پذیری بیشتر، مقاومت بیشتر در برابر آسیب ها و کاهش دهنده و بازیابنده تغییر شکل های دائمی باشند. به همین منظور از آلیاژ حافظه دار شکلی به عنوان آرماتور استفاده شده است. آلیاژ حافظه دار شکلی ماده منحصر به فردی است که قابلیت غلبه بر تغییر شکل های بزرگ و بازگشت به حالت اولیه قبل از بارگذاری را دارا می باشد. هدف از این مقاله، مرور مطالعاتی است که تا کنون بر روی سازه های بتنی مسلح شده با آلیاژ حافظه دار انجام شده است.

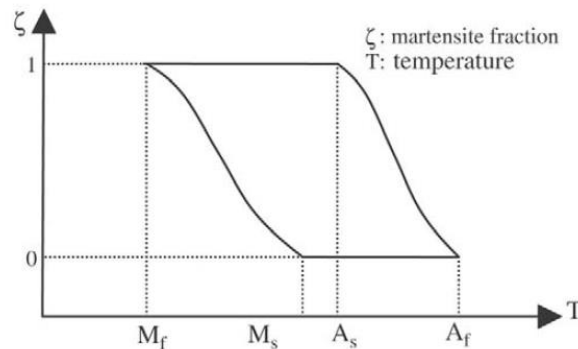
¹ Shape Memory Alloys

۲. معرفی آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMAs)

اولین مشاهدات از رفتار حافظه دار شکلی در سال ۱۹۳۲ توسط اولاندر^۱ در مطالعه‌اش درباره اثر لاستیک مانند^۲ در نمونه های طلا کادمیم می باشد. در سال ۱۹۶۲ ویلیام بوهرلر^۳ و همکارانش در آزمایشگاه مهمات نیروی دریایی آمریکا اثر حافظه شکلی را در آلیاژ نیکل و تیتانیوم (Ni-Ti) کشف کردند و نام ماده را به دلیل محل کارشان نایتینول (NiTiNOL^۴) گذاشتند [۱]. نایتینول به دلیل برخورداری از ویژگی های برجسته مانند اثر حافظه داری و ابر کشسانی وزیست سازگاری معروفترین و پر کاربردترین آلیاژ حافظه دار شکلی است. این آلیاژ دارای کاربرد های وسیعی در زمینه های مختلف صنعتی، تجاری، پزشکی می باشد. رفتار آلیاژهای حافظه دار، بر اساس یک دگرگونی فازی و تغییر ساختار کریستالی رخ می دهد. این آلیاژها دارای دو فاز در محدوده دمای عملیاتی می باشند که هر کدام از این فازها دارای شبکه بلوری متفاوت و در نتیجه ویژگی های متفاوت می باشند. آلیاژهای حافظه دار معمولاً به صورت یکی از دو فاز مارتنزیت^۵ و آستنیت^۶، پایدار می باشند. به طور کلی، فاز مارتنزیت در دماهای پایین و تنش های بالا پایدار است در حالی که فاز آستنیت، در دماهای بالا و تنش های پایین پایدار می باشد. آستنیت ساختار بلوری مکعبی و متقارن دارد و همین تقارن موجب مقاوم تر بودن آن شده در حالی که مارتنزیت ساختاری متوازی الاضلاع گونه و نامتقارن دارد و به همین جهت مقاومت کمتری دارد [۲]. طرح کلی هر دو فاز آستنیت و مارتنزیت به صورت دو بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است.



در آلیاژ حافظه دار این فازها وابسته به دما و تنش اعمالی می باشند. دماهای مشخصه نشان دهنده درجه حرارت های متناظر تبدیلات فاز و رفتار هیستریزس مواد حافظه دار در طی گرم کردن و سرد کردن می باشند. این دماها شامل M_s ، دمای شروع مارتنزیت، M_f ، دمای پایین مارتنزیت، A_s ، دمای شروع آستنیت و A_f ، دمای پایین آستنیت می باشد. در دمای زیر M_f ، ماده حافظه دار در فاز مارتنزیت با اشکال متعدد می باشد، در حالی که در دمای بیشتر از A_f ، ماده در فاز آستنیت است. در حالت بدون تنش، می توان این دماهای مشخصه را نشان داد. در شکل ۲، نسبت مارتنزیت در مقابل دما برای ماده حافظه دار در حالت بدون تنش قابل مشاهده است [۳].



شکل ۲ - رفتار SMA ها در حالت بدون تنش و تحت تأثیر تغییرات دما [۳]

¹ Olander

² Rubber like effect

³ William J. Buehler

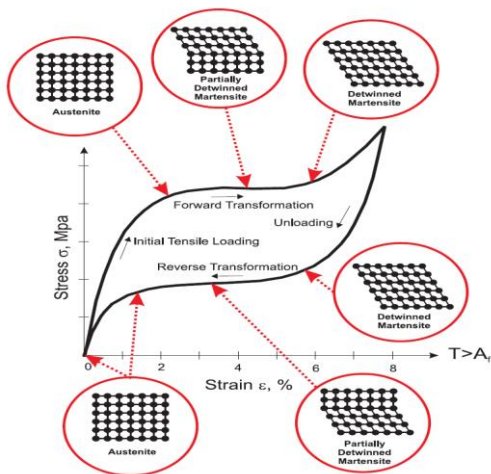
⁴ For Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory

⁵ Martensite

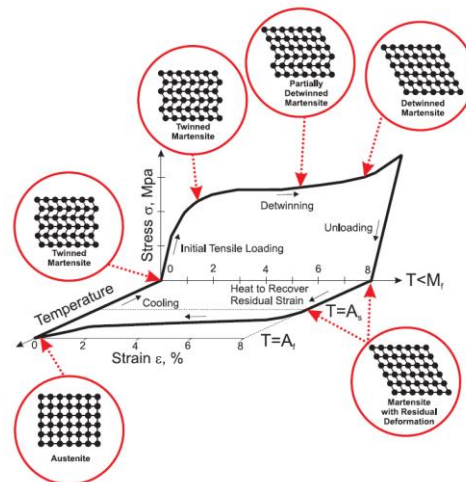
⁶ Austenite

دو مکانیزم برای برگشت پذیری تغییر شکل‌ها در مواد حافظه دار وجود دارد. اثر حافظه داری و اثر ابر کشسانی. اثر حافظه داری در دمای کمتر از M_f رخ می‌دهد (ماده به شکل مارتنزیت به اشکال مختلف باشد). همراه با بارگذاری، مارتنزیت با اشکال متعدد به مرز تنش تسلیم می‌رسد که در آن نقطه حرکت مرزی و تغییر موقعیت آغاز می‌شود. بعد از پایان تغییر فاز، تا وقتی که به تنش بحرانی حد لغزش برسد، تغییر شکل الاستیک بیشتر ایجاد می‌شود (به عبارتی دیگر، در مارتنزیت با شکل واحد تغییر شکل الاستیک به وجود می‌آید) در صورت باربرداری، کرنش پسماند در ماده وجود دارد. برای برگشت شکل اولیه و از بین رفتن کرنش پسماند، باید ماده را تا درجه حرارت بالای A_f گرم کنیم، این عمل باعث وقوع تبدیل فاز و تولید فاز آستنیت با درجه حرارت بالا می‌شود. با سرد کردن، ماده به شکل اولیه خود (مارتنزیت با اشکال متعدد) می‌رسد که کرنش پسماند صفر یا دارای مقدار کوچکی می‌باشد [۴]. شکل ۳ منحنی تنش کرنش با وقوع تبدیل حافظه داری را نشان می‌دهد.

دومین طریقه بازگشت شکل در مواد حافظه دار، رفتار ابرکشسان آن‌هاست. این رفتار، در دمای بالاتر از A_f که ماده حافظه دار در شروع بارگذاری در فاز آستنیت می‌باشد، رخ می‌دهد. با بارگذاری، شاهد تغییر شکل الاستیک فاز آستنیت می‌باشیم البته تا وقتی که به تنش تسلیم (تنشی که مارتنزیت پایدار شود) برسیم. در نقطه تسلیم، تبدیل فاز آغاز می‌گردد. با توجه به شکل، با شروع هموار شدگی (هم تراز شدن تنش) در نمودار تنش کرنش تبدیل فاز از حالت آستنیت تا هنگام تشکیل کامل مارتنزیت ایجاد شده توسط تنش (یا شکل واحد) ادامه می‌یابد. بعد از اتمام کامل تبدیل فاز، تا هنگامی که تنش از سطح تنش بحرانی حد لغزش کمتر باشد، فاز مارتنزیت با شکل واحد فقط تغییر شکل الاستیک خواهد داشت. در صورت باربرداری فاز مارتنزیت پایدار نبوده (مارتنزیت در تنش‌های بالا پایدار می‌باشد) و برگشت به فاز اولیه آستنیت صورت می‌گیرد [۴]. شکل ۴ منحنی تنش کرنش رفتار ابرکشسان را نشان می‌دهد.

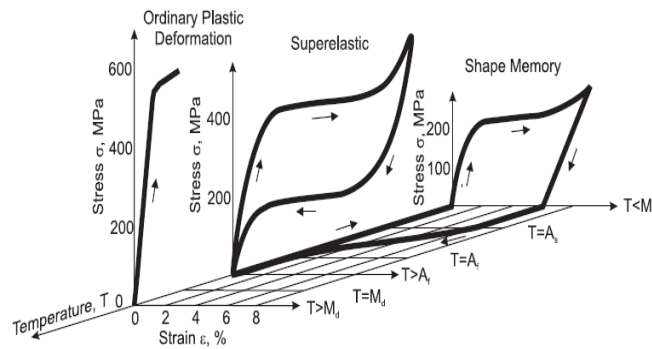


شکل ۴- منحنی تنش - کرنش SMA با اثر ابر کشسانی [۴]



شکل ۵- منحنی تنش - کرنش SMA با اثر حافظه شکلی [۴]

خاصیت دیگری که باید به آن اشاره کرد، ترمو الاستیک بودن تبدیل فاز مارتنزیت می‌باشد که نشان می‌دهد، رفتار آلیاژهای حافظه دار علاوه بر تنش و کرنش به درجه حرارت نیز وابسته می‌باشد. طبیعت ترمو الاستیک چنین است که کاهش در درجه حرارت آلیاژ حافظه دار، انرژی معادل با افزایش تنش خواهد داشت، چون رشد و گسترش صفحات مارتنزیت باعث افزایش تنش درونی خواهد شد. به همین خاطر است که رفتارهای حافظه داری و فوق الاستیک در دماهای مختلف دیده می‌شود. شکل ۵ به صورت سه بعدی رفتارها را با نمایش تنش، کرنش و دما نشان می‌دهد [۴].

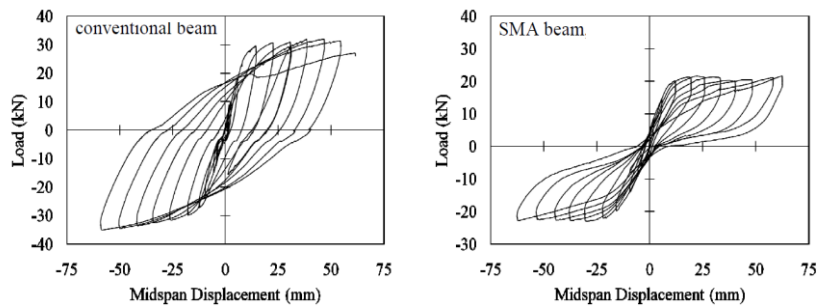


شکل ۵- رابطه سه بعدی تنش، کرنش و دما در رفتار مکانیکی آلیاژ حافظه دار [۵]

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد آلیاژهای حافظه دار، کاربرد‌های گوناگونی در مهندسی سازه به منظور بهبود پاسخ ساختمان‌ها و پل‌ها دارد. از جمله می‌توان به کاربرد آن‌ها در جداگرهای لرزه‌ای، سیستم‌های مهاربندی، ابزارهای استهلاک انرژی (میراگرها)، اتصالات سازه‌های فولادی، ترمیم و مقاوم‌سازی و کاربرد آن در بتن اشاره نمود.

۳. کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در اعضا و سازه‌های بتن مسلح

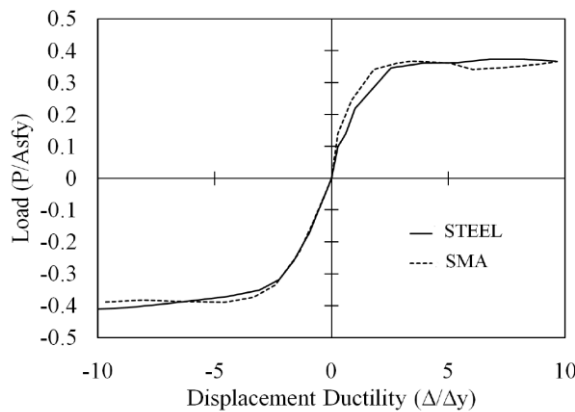
ابدولریها^۱ و همکاران [۶] در یک برنامه جامع آزمایشگاهی در دانشگاه اوتاوا^۲ به بررسی استفاده از میلگرد های SMA در ناحیه مفصل پلاستیک تیرها و دیوارهای برشی بتن مسلح پرداختند. هفت تیر با تکیه گاه ساده در مقیاس بزرگ، با آرماتورهای ابرکشسان و فولاد معمولی تحت شرایط بارگذاری مختلف (یکنواخت، چرخه ای و چرخه ای معکوس) مورد آزمایش قرار گرفتند. در حالی که دو دیوار برشی با مقیاس بزرگ قسمتی از آزمایش هستند که تحت آزمایش بارگذاری چرخه ای معکوس آزمایش شده است. نتایج آزمایش تیر نشان می‌دهد که اعضا با آرماتور SMA قابلیت بازگرداندگی دارند و مقاومت و شکل پذیری تغییر مکانی مشابه اعضا با آرماتور معمولی دارند.



شکل ۶- پاسخ بار - جابه‌جایی وسط دهانه تیر های SMA و معمولی [۶]

^۱ Abdulriha

^۲ Ottawa



شکل ۷- پوش نرمال شده شکل پذیری بار- تغییر مکان تیرها تحت بارگذاری چرخه ای معکوس [۶]

شکل ۶ کاهش پیش رونده در قابلیت بازگرداندگی تیر های معمولی را نشان می دهد که در اثر رفتار غیرخطی باربرداری آرماتورها می باشد که نتیجه انباشته شدن کرنش های دائمی است. از طرف دیگر تیر های SMA، ظرفیت بازیابی را برای بار تحمیلی در طول آزمایش، تقریباً ۷۵-۱۰۰ درصد حفظ می کند. نتایج نشان می دهد که تیر های با آرماتور معمولی و SMA، بار نهایی، بار جاری شدن و شکل پذیری مشابهی دارند. بنابراین تیر های با آرماتور SMA شکل پذیری و ظرفیت های مقاومتی مشابه تیر های با آرماتور معمولی دارند که به وسیله میلگردهای طولی با ظرفیت نیرویی جاری شدن مشابه تأمین می شود. مطالعه نشان می دهد که تیر SMA تحت بارگذاری چرخه ای انرژی را مشابه تیر با آرماتور معمولی مستهلک می کند. اما تحت بارگذاری چرخه ای معکوس، تیر با آرماتور SMA تقریباً ۵۴٪ انرژی مستهلک شده توسط تیر با آرماتور معمولی را مستهلک می نماید. تیر های با آرماتور SMA، افزایش قابل توجهی را در ظرفیت بازیابی ترک در مقایسه با تیر های معمولی نشان می دهند. میانگین ظرفیت بازیابی تیر های SMA ۹۰٪ در سراسر آزمایش بوده است در صورتی که تیر های معمولی به طور میانگین ۲۵٪ بازشدگی ترکها را بازیابی کردند.

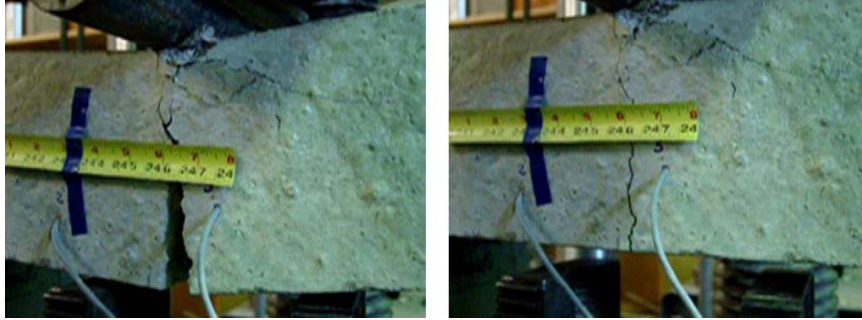
چادرسکی^۱ و همکاران [۷] رفتار تیر بتنی مسلح شده با سیم هایی از جنس آلیاژ حافظه دار را با آزمایش مورد بررسی قرار دادند و با تیر بتن مسلح معمولی مقایسه کردند. نتایج آزمایش بیانگر امکان استفاده از سیم های حافظه دار شکلی در تیر های بتن مسلح به منظور به دست آوردن سختی و مقاومت متغیر می باشد. علاوه بر این یک پیش تنیدگی متغیر نیز در میله های حافظه دار شکلی ایجاد گردید و با انجام آزمایش، رفتار های متفاوت آلیاژ های حافظه دار شکلی مانند رفتار حافظه داری شکلی، اثر احیا مقید و روابط تنش - کرنش در دماهای مختلف به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، نکته مهم، لزوم توجه به نحوه ساخت مواد در کارخانه و نورد گرم انجام شده بر روی مواد به منظور کاهش تغییر شکل های پسماند روی آنها می باشد. نکته دیگر چگونگی ایجاد چسبندگی کافی بین میله های آلیاژ حافظه دار شکلی و بتن است. بر اساس بررسی های انجام شده، ایجاد خار روی میله ها، روش بهینه می باشد. استفاده از رفتار احیا مقید بیش تر از رفتار های استهلاک انرژی و تغییر سختی می تواند مفید واقع شود.

اترو^۲ و همکاران [۸] در دانشگاه هاستون^۳ به بررسی تیر بتنی با ابعاد ۲۴ in × ۶ in × ۴ in که به صورت پس کشیده با استفاده از چهار مفتول SMA به قطر ۱ / ۸ in مسلح شده بود پرداختند. سپس باری به مقدار ۱۱۰۰۰ Ibs به تیر اعمال شد و در اثر آن ترک بزرگی در تیر ایجاد گردید. بعد از باربرداری عرض ترک ایجاد شده توسط نیروی بازگردانده ی SMA کاهش یافته و تیر به حالت اولیه خود بازگشت (شکل ۸)

¹ Czaderski

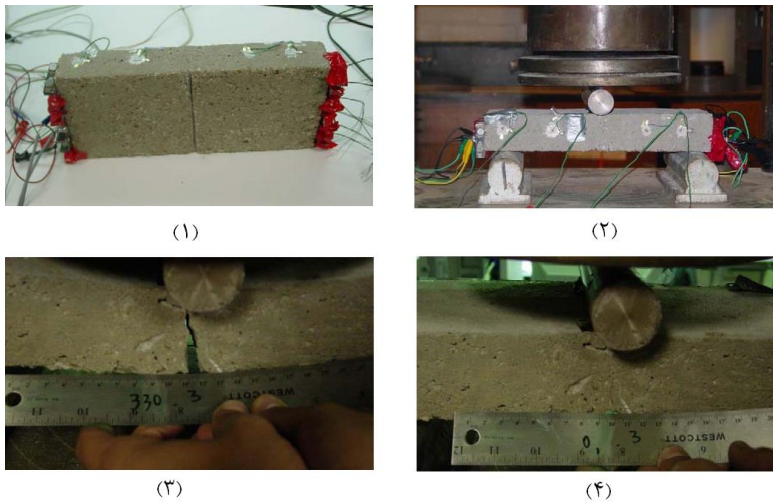
² Otero

³ Houston



شکل ۸- بسته شدن ترک‌ها بعد از بارگذاری [۸]

سونگ^۱ و همکاران [۹] برای اولین بار مفهوم بتن مسلح هوشمند^۲ (IRC) را مطرح کردند. در این بتن از سیم‌های مارتنزیتی برای پس کشیدگی استفاده شد. توزیع کرنش در داخل این بتن‌ها با کنترل مقاومت الکتریکی مفتول‌های SMA با استفاده از پیزوسرامیک‌ها ارزیابی می‌شود و زمانی که ترک ایجاد می‌گردد، به وسیله گرمایش الکتریکی، مفتول SMA منقبض و جمع می‌شوند و در نتیجه اندازه ترک کاهش می‌یابد. این نوع بتن به دلیل دارا بودن قابلیت تشخیص ترک و خود ترمیمی^۳، هوشمند نامیده می‌شود. برای بررسی این قابلیت چندین نمونه کوچک بتنی به ابعاد $2 \text{ in} \times 6 \text{ in} \times 6 \text{ in}$ را مورد آزمایش خمشی سه نقطه ای قرار دادند. در هر یک از نمونه‌ها رشته‌های SMA مارتنزیتی تعبیه شده بودند. هر یک از این رشته‌ها از هفت مفتول به قطر 0.15 in و دمای تبدیل $A_f = 90^\circ\text{C}$ و $M_f = 70^\circ\text{C}$ تشکیل شده بودند. در اثر آزمایش یک ترک به عرض 0.32 in ایجاد شد. در اثر باربرداری و حرارت دادن به SMA ها ترک ناپدید شد. در طول عملیات بارگذاری مقدار مقاومت الکتریکی SMA ها تا ۱۵٪ تغییر پیدا کرده بود و همین تغییر مقاومت برای کنترل ایجاد ترک مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۹).



شکل ۹- نمونه بتنی و مراحل بارگذاری و باربرداری [۹]

ابدولریها^۴ و همکاران [۱۰] در یک برنامه آزمایشگاهی متصل کننده های پیچ دار^۵ را در تیرهای بتن مسلح و متصل کننده های قفل شونده پیچی^۶ را در دیوار برشی مورد بررسی قرار دادند. هر دو نوع سیستم متصل کننده تحت بارگذاری چرخه ای مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل) سیستم‌های متصل کننده عملکرد رضایت بخشی از خود نشان دادند؛ هیچ لغزش و گسیختگی ناگهانی در بازه کرنش‌های ابرکشسان SMA مشاهده و ثبت نشد.

¹ Song

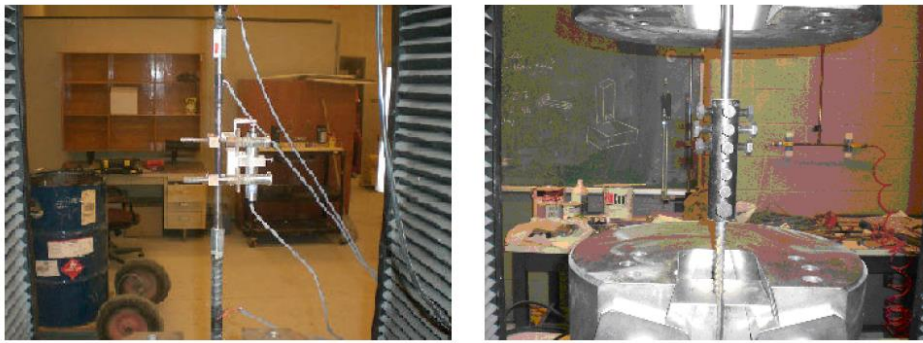
² Intelligent Reinforced Concrete (IRC)

³ Self Rehabilitation

⁴ Abdulriha

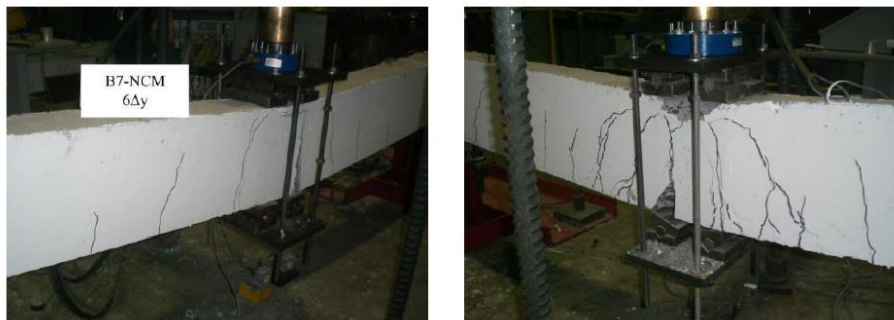
⁵ threaded couplers

⁶ screw lock couplers



شکل ۱۰ - سمت چپ : سیستم متصل کننده پیچ دار استفاده شده در تیرها، سمت راست : سیستم متصل کننده قفل شونده پیچی استفاده شده در دیوار برشی [۱۰]

آزمایشات تیر نشان داد که وجود متصل کننده‌ها می‌تواند بر رفتار عمومی تأثیر گذار باشد. هم چنین امکان بهبود رفتار تیر های SMA با تنظیم محل قرارگیری متصل کننده‌ها وجود دارد. در آزمایشات بر روی دیوار برشی، چیدمان های متفاوت سیستم‌های متصل کننده بین میلگرد های فولاد معمولی و SMA مورد آزمایش قرار گرفتند و سیستم متصل کننده بهینه انتخاب شد، که متصل کننده قفل شونده پیچی می‌باشد. یکی دیگر از معایب SMA، مدول الاستیسیته پایین آن می‌باشد که منجر به تغییر شکل‌های بزرگ‌تر در حالت تسلیم می‌شود. دامنه تغییرات مدول الاستیسیته SMA ۱/۶ تا ۱/۲ مدول فولاد است. نسبت مدول الاستیسیته SMA به فولاد که در این مطالعه استفاده شد تقریباً ۱/۴ بوده است. مدول کمتر آرماتورها منجر به سختی ترک خورده کمتر تیر های SMA و جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر تحت بار های بهره برداری می‌باشد. بنابراین اگر چه تیر های با آرماتور SMA در محدود کردن پهنای ترک بعد از حذف بار تأثیر گذار می‌باشند، اما پهنای ترک بزرگ بوده و فضای زیادی دارند. برای تمامی تیرها، ترک خوردگی خمشی اولیه بیشتر در نواحی بحرانی مشاهده شد. با افزایش بار ترک‌های خمشی در تیر های SMA پهن تر گردید و در مقایسه با تیر های متداول فاصله‌هایشان بیشتر گردید. (شکل)



شکل ۱۱ - سمت چپ : نحوه ترک خوردن تیر های SMA و سمت راست : نحوه ترک خوردن تیر های متداول [۱۰]

تغییر شکل های طولی آرماتور های معمولی به مهارها کمک می‌کند تا از طریق گسترش ترک‌های با فاصله‌ی نزدیک و پهنای کوچک‌تر باعث احاطه کردن بتن شوند. بر عکس، میلگرد های نرم SMA باعث به وجود آمدن ترک‌های با فاصله بیشتر و پهنای بزرگ‌تر می‌شوند. در تیر های با آرماتور های معمولی، ترک‌های با پهنای زیاد، نگرانی‌هایی در حالت استفاده از آن‌ها ایجاد می‌کند. این نگرانی‌ها مخصوصاً در مورد پتانسیل خوردگی آن‌ها می‌باشد. اما SMA ها در برابر خوردگی مقاوم می‌باشند، بنابراین ترک‌های با پهنای بزرگ‌تر می‌توانند در اعضا با آرماتور SMA می‌توانند تحمل گردند. اما بر اساس زیبایی شناسی، پهنای زیاد ترک‌ها مطلوب نمی‌باشد.

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به بررسی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی شامل مروری بر تاریخچه و بررسی پدیده تغییر فاز در آن‌ها، بررسی دقیق خاصیت حافظه داری و رفتار ابرکشسان آلیاژها پرداخته شده است. سپس پژوهش‌ها و آزمایشات صورت گرفته بر روی کاربرد آلیاژ حافظه دار شکلی در اعضا و سازه های بتنی ارائه گردیده است. نتایج تحقیقات بیانگر افزایش ظرفیت بازیابی شکل و کاهش تغییر مکان ماندگار در اعضای بتنی در اثر استفاده از آلیاژ

حافظه دار شکلی می باشد. همچنین تحقیقات بیانگر لزوم طراحی صحیح تیر های مسلح شده با SMA به منظور کاهش جابه جایی ها تحت بارهای بهره برداری می باشد.

مراجع

1. Schetky L. M.,(1979), “Shape-Memory Alloys”, Scientific American, Vol. 241, No. 5.
2. Wayman, C. M. and Duerig, T. W., (1990), “An introduction to martensite and shape memory.” Engineering aspects of shape memory alloy, Butterworth Heinemann, Boston.
3. G. Song, N. Maa, H.-N. Li., (2006) , “Applications of shape memory alloys in civil structures” Engineering Structures 28 1266–1274.
4. McCormic, J. ,(2006), “Cyclic Behavior of Shape Memory Alloys: Material Characterization and Optimization” Ph.D. thesis, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
5. DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. , (2004), “Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars.” Journal of Structural Engineering, 130(1) , 38–46.
6. Abdulridha, A., Palermo, D., and Foo, S.,(2010), “Seismic Behaviour of SMA Reinforced Concrete Beams” 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering: Reaching Beyond Borders, Toronto, Canada.
7. Czaderski C, Hahnebach B , Motavalli M, (2005), “RC beam with variable stiffness and strength” Construction and building material.
8. Otero K.,(2004), “ Intelligent reinforced concrete structures using shape memory alloys” MSc Dissertation, under the supervision of Prof G.Song; university of Houston.
9. Mo Yl, Song G, Otero K.,(2004), “Development and testing of a proof-of-concept smart concrete structures”. Proceeding of Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering.
10. Abdulridha A. , Palermo D and Simon F.,(2011), “Superelastic SMA Reinforced Concrete Elements: Applicability and Practicality”. fib Symposium, Session 2B-9: Construction Technology, PRAGUE.