

بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون های مرکب CFST*

طالب مرادی شقاقی^(۱) فربرز ناطقی الهی^(۲)

چکیده ستون های فولادی پر شده با بتن CFST، نوعی از ستون های مرکب می باشند که به دلیل مزایای فراوانی که نسبت به ستون های بتن آرمه و فولادی دارند، استفاده از آن ها، مخصوصاً در ساختمان های بلند، در سال های اخیر رواج زیادی پیدا کرده است. از جمله این مزایا می توان به: سادگی نصب و اجرا، مسائل اقتصادی، حذف هزینه های قالب بندی، عملکرد خوب در مقابل نیرو های لرزه ای، مقاومت بیشتر با حجم کم تر و شکل پذیری بالا اشاره نمود. در این تحقیق، اثر تعدادی از پارامترهای مؤثر در رفتار ستون های CFST از جمله نسبت بعد مقطع به ضخامت جدار فولادی D/t ، نسبت طول به بعد مقطع عرضی L/D و شکل مقطع عرضی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می گیرند. در بررسی آزمایشگاهی این ستون ها، ۱۲ نمونه ستون با مقیاس حدود ۱:۳ ساخته شده و تحت بار محوری فشاری توأم با بار جانبی متناوب افزایش یابنده تا انهدام کامل ستون آزمایش شده و منحنی های رفتاری نمونه ها ترسیم و مورد بررسی قرار می گیرند. از لحاظ شکل مقطع عرضی، سه شکل: دایره، مربع و هشت ضلعی در نظر گرفته شده است تا شکل بهینه از لحاظ رفتار تحت بارهای متناوب، مشخص گردد. در تعدادی از نمونه ها، ورق های سخت کننده در داخل ستون تعبیه شده است تا اثرات آن ها در رفتار این نوع ستون ها مورد بررسی قرار گیرد. براساس نتایج آزمایشات، وجود ورق های سخت کننده در نواحی بحرانی ستون، باعث بهبود رفتار ستون در چرخه های بارگذاری جانبی شده و شکل پذیری ستون را افزایش می دهد؛ همچنین رفتار ستون با مقطع عرضی به شکل دایره از لحاظ شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی، بهتر از مقطع هشت ضلعی و رفتار مقطع هشت ضلعی، بهتر از مقطع مربعی است.

واژه های کلیدی ستون های فولادی پر شده با بتن، جداره ی فولادی، ورق های سخت کننده، شکل پذیری.

Experimental Investigation of Steel/Concrete Composite Columns

T. Moradi-Shaghagi

F. Nateghi-A.

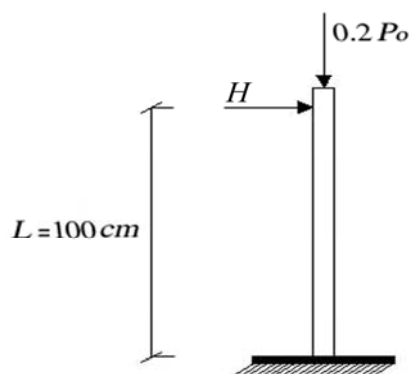
Abstract Steel columns filled with concrete, so called CFST columns are kind of mega composite columns that poses greater mechanical and dynamic behavior. In recent years, due to this enhanced behavior, more and more are being used specially in tall structures. They also result in more cost effective and easy to construct structures. In order to study these columns, an experimental program was launched to provide detailed properties. In doing so, 12 specimens with different cross sectional geometry and D/t ratios with a 1/3 scale were constructed and tested. Testing was performed under cyclic dynamic manner using actuators. It was observed that, both mechanical and cyclic behavior of CFST columns were enhanced while some cross sectional shapes behaved even better meaning accordingly, circular, ortagonal and squared. Also, it was resulted that much ductility was introduced to the columns when they were used as CFST columns. The set up and experimental program as well as test results are provided in this paper. Conclusions and comparisons are also provided in this paper in the forms of cyclic graphs.

Key Words Steel Columns, CFST Columns, Ductility, Hysteric Behavior, Stiffeners, Experiments, Dynamic Behavior.

* تاریخ تصویب مقاله ۸۸/۷/۱۹ و تاریخ دریافت نسخه ی نهایی اصلاح شده ۸۸/۹/۲۰

(۱) نویسنده ی مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

(۲) استاد پژوهشکده ی مهندسی سازه، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران



شکل ۱ مدل نمونه های CFST

تصویر تعدادی از نمونه ها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ تصویر تعدادی از نمونه‌های آزمایش

مشخصات مصالح نمونه ها

مشخصات فولاد جداره‌ی نمونه ها. فولادهای مورد استفاده در آزمایشگاه، تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. فولادها دارای تنش تسلیم $F_y=300$ MPa برای ورق و $F_y=330$ MPa برای لوله های مدور و $F_y=400$ MPa برای باکس فولادی می‌باشند.

نتایج آزمایشات کشش به صورت منحنی در شکل‌های (۳) و (۴) و (۵) نشان داده شده است. مشخصات کلی فولاد نمونه ها در جدول (۱) آمده است.

مقدمه

رفتار ستون‌های مرکب CFST توسط؛ تحقیقاتی توسط Bergman در سال ۱۹۸۴، Cai و Zhong و Sakino در سال ۱۹۹۱، Bridge و Matsui در سال ۱۹۹۵، Shahrooz و Chung در سال ۱۹۹۹، Rangan در سال ۱۹۹۷ و Coh در سال ۲۰۰۰ و Azizinamini در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ انجام شده است [1,2,3]. این بررسی‌ها اکثراً تحلیلی بوده و بررسی‌های آزمایشگاهی تحت بارهای متناوب، خیلی کم تر انجام شده است.

در تحقیق حاضر، برای اولین بار رفتار مقاطع هشت ضلعی و هم‌چنین برای اولین بار تعدادی از نمونه ها با ورق‌های سخت کننده، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار می‌گیرند.

در این تحقیق، جهت بررسی رفتار ستون های CFST، دوازده نمونه ستون با اشل حدود ۱:۳ ساخته شده و در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تحت نیروی فشاری توأم با نیروی جانبی متناوب افزایش یافته مورد آزمایش قرار گرفتند.

هدف از آزمایشات، بررسی اثر نسبت بعد مقطع به ضخامت جداره‌ی فولادی D/t و نسبت طول نمونه به بعد مقطع ستون و شکل مقطع عرضی ستون در رفتار ستون‌های مرکب CFST می‌باشد.

در آزمایش این دوازده نمونه، از محرک نیرو با ظرفیت پانصد کیلو نیوتنی برای اعمال بار فشاری محوری و از محرک نیرو با ظرفیت دویست و پنجاه کیلو نیوتن برای وارد کردن بار جانبی در انتهای ستون به صورت اعمال تغییر مکان جانبی استفاده گردید.

مدل نمونه های تحت آزمایش

مدل نمونه های تحت بار محوری توأم با بار جانبی به صورت شکل (۱) می باشد. این نمونه ها به صورت کنسول قائم مدل شده و در انتهای آزاد تحت بار محوری تا حدود $0.2 P_0$ توأم با بار جانبی افزایش یافته به صورت کنترل تغییر مکان جانبی و به صورت رفت و برگشتی قرار گرفتند (Displacement control).

مشخصات بتن مصرفی در نمونه ها. با توجه به این که نمونه های مورد آزمایش، کوچک تر از مقادیر واقعی و با مقیاس حدود ۱:۳ می باشند؛ لذا مصالح بتن نمونه های ستون با مصالح ستون های واقعی، مقداری فرق خواهند داشت. دانه بندی مواد دانه ای در نمونه ها با دانه بندی مواد دانه ای در مقیاس واقعی ستون ها متفاوت خواهد بود [4,11].

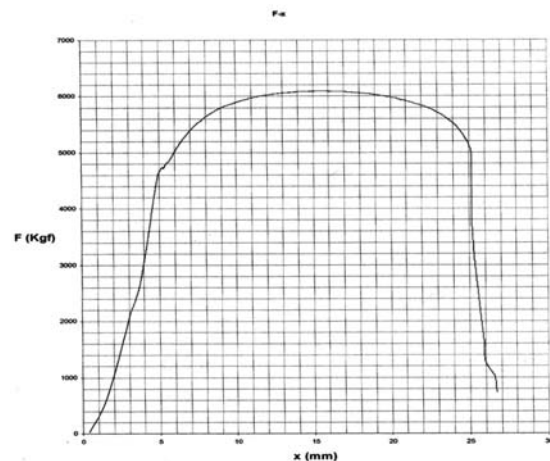
در نمونه های مورد آزمایش، نسبت های وزنی مواد تشکیل دهنده ی بتن ۴:۱:۰/۵۷: (W/C, C, Agg.) بوده و عیار سیمان مصرفی 350 Kg/m^3 می باشد [11]. آزمون های بتن در قالب های استوانه ای و مکعبی در حین بتن ریزی نمونه ها برداشته شده و در روز آزمایش (در سن ۲۸ روزه)، تحت آزمایش فشار قرار گرفتند، که مشخصات آن ها در جدول (۲) آورده شده است.

مشخصات نمونه های آزمایشی. نمونه های آزمایشی ستون های CFST، شامل ۱۲ نمونه بوده که شکل مقاطع نمونه ها، دایره؛ C، مربع؛ S و هشت ضلعی؛ O انتخاب شده اند. در اسامی نمونه ها حرف اول، مشخص کننده ی شکل مقطع و عدد بعد از حرف اول، مشخصه ی ضخامت جداره ی فولادی است. نمونه هایی که حرف سوم آن ها S می باشد، دارای ورق های سخت کننده در سرتاسر طول و نمونه هایی که حرف سوم و چهارم آن ها SN می باشد دارای ورق های سخت کننده در ناحیه ی بحرانی (پایین ستون) می باشند.

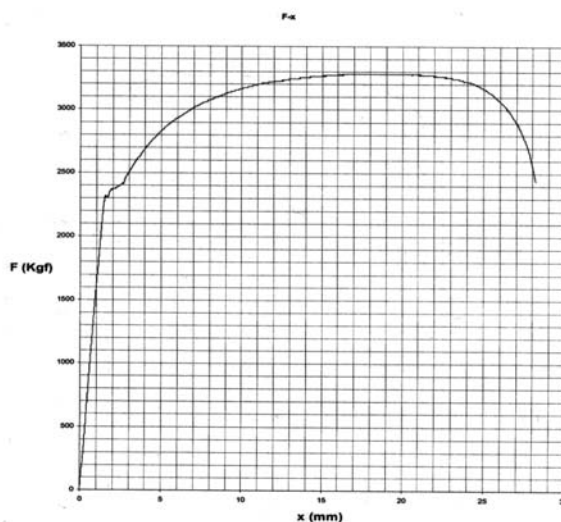
مشخصات هندسی نمونه ها طوری طراحی شده است تا با دستگاه های موجود در آزمایشگاه بتوان نمونه ها را تا حد گسیختگی مورد آزمایش قرار داد. مشخصات هندسی نمونه ها و مقاومت مشخصه ی بتن و تنش تسلیم فولاد جداره ی نمونه ها در جدول (۳) و شکل مقطع عرضی نمونه ها در شکل های (۶) و (۷) آورده شده است. در جدول (۳)، P_o ؛ مقاومت محوری خالص ستون می باشد

$$[5] (P_o = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c)$$

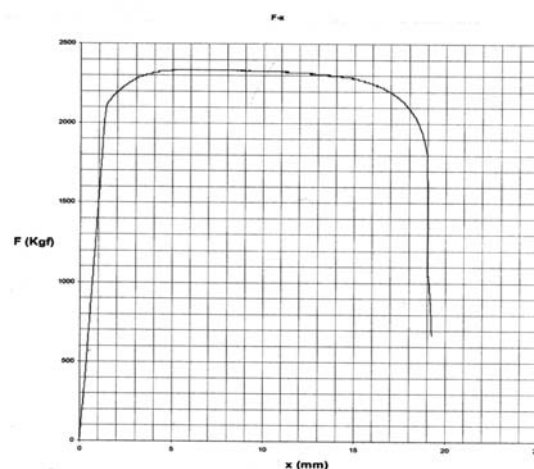
در این جدول، b_s و f_s به ترتیب؛ عرض و ضخامت ورق های سخت کننده A_o و A_s به ترتیب؛ مساحت بتن و فولاد مقطع نمونه ها می باشند.



شکل ۳ منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه های به شکل لوله



شکل ۴ منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه های به صورت ورق



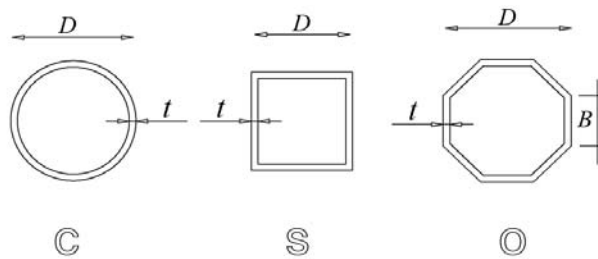
شکل ۵ منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه های به شکل باکس

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های فولادی

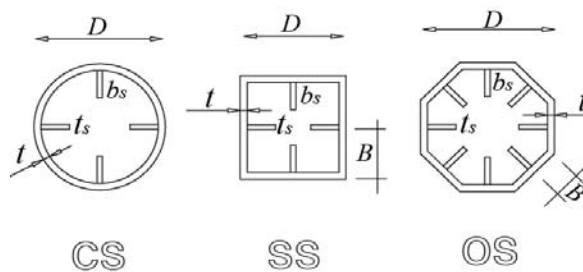
نمونه	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)
فولاد ستون‌های با مقطع هشت ضلعی (O)	307	424	2	24
فولاد نمونه‌های با مقطع مدور (C)	333	428	7	23
فولاد نمونه‌های با مقطع مربعی (S)	401.6	445.6	1	10

جدول ۲ مشخصات بتن نمونه های آزمایشات سری اول

نمونه ها	وزن مخصوص (kN/m^3)	f'_c (MPa)
مکعبی ۱	22.57	30.8
مکعبی ۲	22.74	27.2
استوانه ای ۱	22.44	30.4
استوانه ای ۲	21.85	26.9



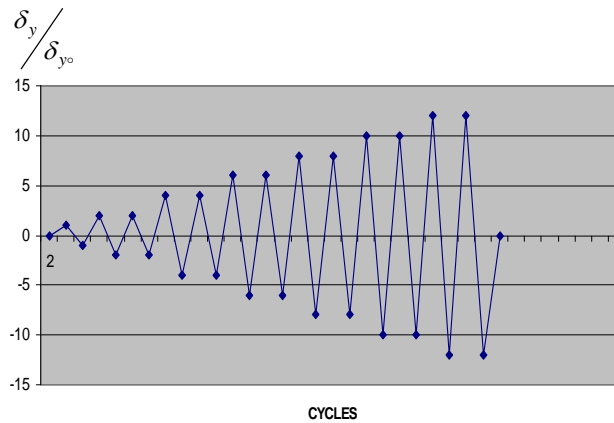
شکل ۶ مقاطع عرضی نمونه‌های بدون ورق‌های سخت کننده



شکل ۷ مقاطع عرضی نمونه های با ورق‌های سخت کننده

جدول ۳ مشخصات نمونه‌های CFST

نمونه‌ها	D - B (mm)	t (mm)	D/t	B/t	L/D	b _s /t _s	A _s (mm ²)	A _c (mm ²)	F _y (MPa)	f _c ' (MPa)	P _o (KN)
C3	160-160	4	40	-	6.75	-	1959.3	18136.6	330	28	825.2
S3	138-138	4	34.5	-	7.82	-	2080	16900	400	28	835.6
O2	144-80	3	66.3	26.7	5.42	-	1420	30402	300	28	1047.76
O3	201-80	4	50.5	20	5.32	-	2560	30402	300	28	1210.9
C3S	160-49	4	40	10	5.37	40/3	2439.3	17656.7	330	28	940.94
S2S	136-68	3	45.3	22.6	6.8	40/3	2040	16420	400	28	816.8
O2S	144-80	3	66.8	26.6	7.9	40/3	2880	29942	300	28	1275.2
O4S	144-80	3	66.8	26.6	5.4	40/3	2400	30422	300	28	1161.4
C3SN	166-41.5	4	41.5	10.4	6.5	40/3	1440.2	19596.7	330	25	848.7
O2SN	199-40	3	64.4	13.33	5.54	40/3	2400	30403	300	25	1170.2
O3SN	213-53.2	4	53.2	13.3	5.07	40/3	2560	30403	300	25	1210.9
S3SN	130-65	4	32.5	16.25	8.3	40/3	2080	16900	400	25	835.6



شکل ۸ منحنی اعمال تغییر مکان در انتهای ستون

ستون نشان می‌دهد [5,6]. در این شکل، δ_y حداکثر تغییر مکان جانبی ایجاد شده و δ_{y0} تغییر مکان جانبی نظیر نقطه‌ی شروع تسلیم می‌باشند. شکل (۹) دستگاه آزمایش و نحوه‌ی اعمال بارهای محوری و جانبی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در

دستگاه آزمایش و نحوه‌ی اعمال بارها

نمونه‌ها به صورت یکسر گیردار در قلاب صلب آزمایشگاه مستقر شده و توسط دستگاه‌های محرک نیرو مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل (۸) منحنی اعمال بار جانبی را به صورت ایجاد تغییر مکان جانبی در انتهای

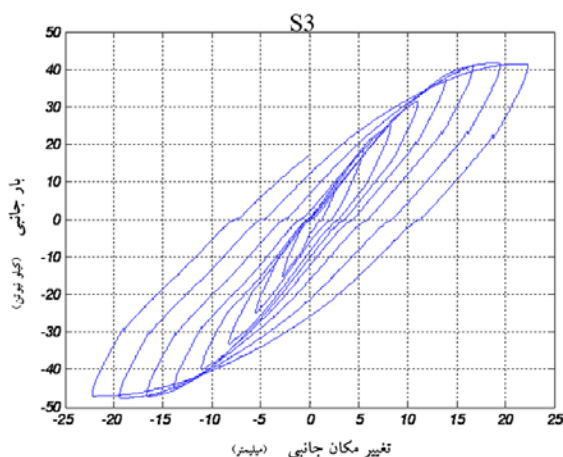
مخصوصاً کرنش‌های پایین ستون بتن، تا کرنش ۰/۰۲۱ را تحمل نموده است. این ستون، شکل پذیری $\mu = 10$ را بدون کوچک‌ترین خرابی و کمانش، تحمل نموده است

$$(\mu = \frac{\delta_{y \max}}{\delta_{yo}})$$

منحنی چرخه‌ای رفتار ستون در شکل (۱۱) نشان دهنده‌ی بالا بودن شکل پذیری، پایدار بودن چرخه‌های هیستریزیس و ظرفیت بالای جذب انرژی می‌باشد [7].

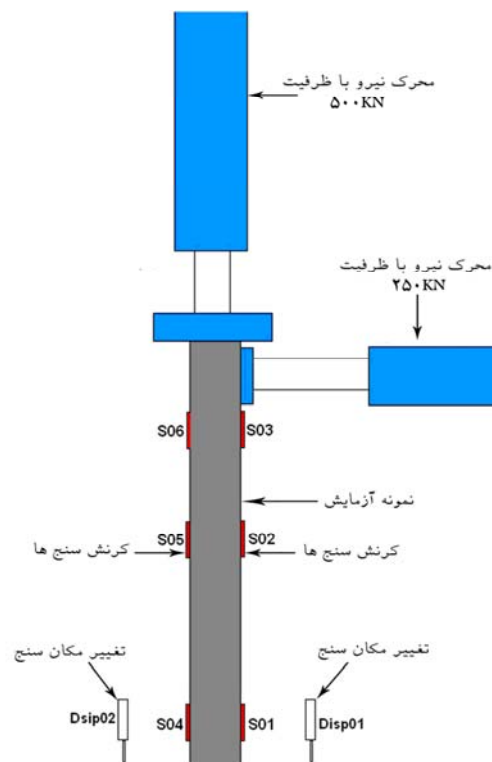


شکل ۱۰ دستگاه آزمایش برای آزمایشات نمونه‌های CFST



شکل ۱۱ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی S3

این شکل، محل کرنش سنج‌ها و تغییر مکان سنج‌ها نشان داده شده است. شکل (۱۰) دستگاه آزمایش را در حین آزمایش نمونه نشان می‌دهد.



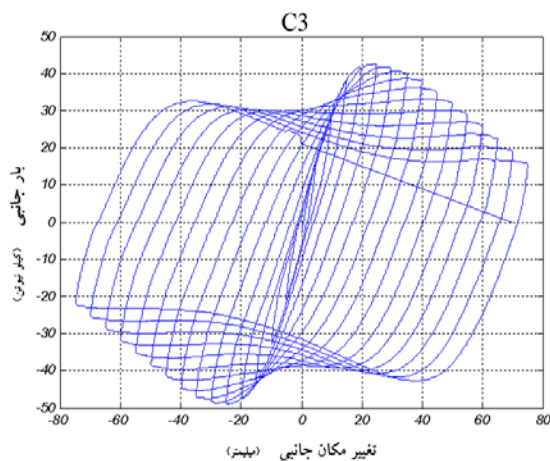
شکل ۹ دستگاه آزمایش و نحوه‌ی اعمال بارها

آزمایشات نمونه‌ها

نمونه‌ی S3. این نمونه، ابتدا تحت بار محوری فشاری ۱۶۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، بار جانبی با ایجاد تغییر مکان در انتهای ستون و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید. در سیکل ۱۰، کمانش ورق‌های سمت محرک افقی نیرو و ورق مقابل آن شروع شد. در سیکل ۱۲، ورق‌های دو سمت دیگر، شروع به کمانش کردند. کمانش ورق‌ها حدود ۲/۵ سانتی متر بالای ناحیه صلب پایین ستون اتفاق افتاد. در سیکل ۱۴، قسمتی از جوش گوشه دو ورق در سمت محرک افقی نیرو با صدا شکسته شده و آزمایش متوقف گردید.

با بررسی کرنش‌های ثبت شده در نقاط مختلف،

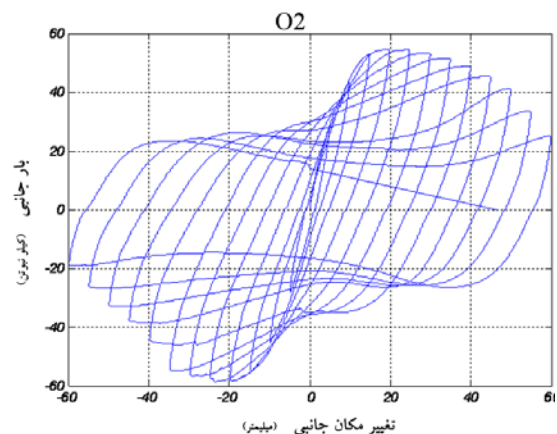
زیاد، مقاومت آزمایش متوقف شد (در سیکل ۱۵). نمونه C3 تا شکل پذیری $\mu = 12$ را توانست تحمل نماید. منحنی چرخه‌ای رفتار نمونه C3 در شکل (۱۳) نشان می‌دهد که این نوع ستون‌ها شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی بالاتری دارند و افت مقاومت در این نوع نمونه‌ها (مقاطع دایره) کم تر است. بتن داخل نمونه، کرنش $0/02$ را تحمل نموده است که مشخص کننده‌ی محصوریت بسیار خوب بتن، توسط جدار فولادی مدور است [8].



شکل ۱۳ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی C3

نمونه‌ی O3. ابتدا تحت بار محوری فشاری ۲۴۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس نیروی افقی با اعمال تغییر مکان در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید. در سیکل ۷، بارگذاری جانبی افت کمی در مقاومت نمونه مشاهده شد و در سیکل ۹، افت مقاومت افزایش یافت. در سیکل ۱۰، کمناش در جداره‌ی فولادی در پایین ستون شروع گردید که در سیکل‌های بعدی کمناش افزایش یافت و در سیکل ۱۳ به علت افت شدید مقاومت، آزمایش متوقف گردید. حداکثر کرنش وارد شده به بتن داخل نمونه در پایین ستون $0/018$ می‌باشد که مشخص کننده‌ی شکل پذیری بالا و محصوریت بسیار خوب جداره‌ی فولادی برای بتن داخل می‌باشد.

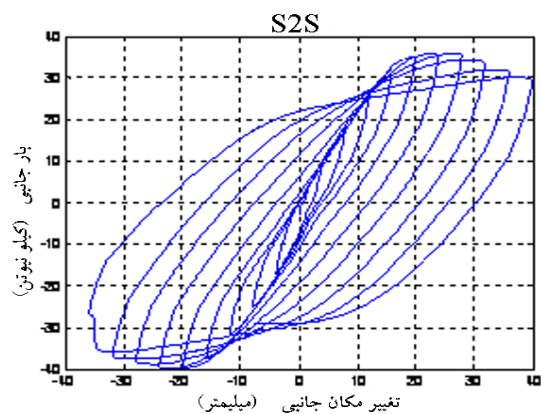
نمونه‌ی O2. ابتدا نمونه، تحت بار محوری فشاری ۲۰۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، بار جانبی با ایجاد تغییر مکان در انتهای ستون و به صورت رفت و برگشتی وارد شد. در سیکل هفتم بارگذاری جانبی، افت مقاومت نسبتاً زیادی به وجود آمد. در سیکل دهم، کمناش کمی در پایین ستون و در ورق سمت محرک افقی نیرو به وجود آمد که در سیکل‌های بعدی، کمناش بیشتر شده و جوش اتصال ورق‌های جداره ستون در پایین بریده شد و بتن داخل ستون کاملاً پوکیده شده و از قسمت جوش بریده شده، همانند شن و ماسه بیرون می‌ریخت. این نمونه، شکل پذیری $\mu = 10$ را بدون خرابی تحمل نمود. حداکثر کرنشی که بتن داخل این نمونه تحمل نموده است $0/018$ می‌باشد. منحنی‌های چرخه‌ای نمونه در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی O2

نمونه‌ی C3. ابتدا تحت بار محوری فشاری ۱۷۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس نیروی افقی با اعمال تغییر مکان در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید (Displacement control). در این نمونه در سیکل ۹، کمناش در ورق جداره‌ی پایین ستون در سمت مقابل محرک افقی نیرو شروع شد. در سیکل ۱۲، کمناش در سمت دیگر ستون شروع و در سیکل‌های بعدی کمناش بیشتر و بیشتر گردید؛ نهایتاً در اثر افت

منحنی‌های چرخه‌ای رفتار این نمونه در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۵ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی S2S

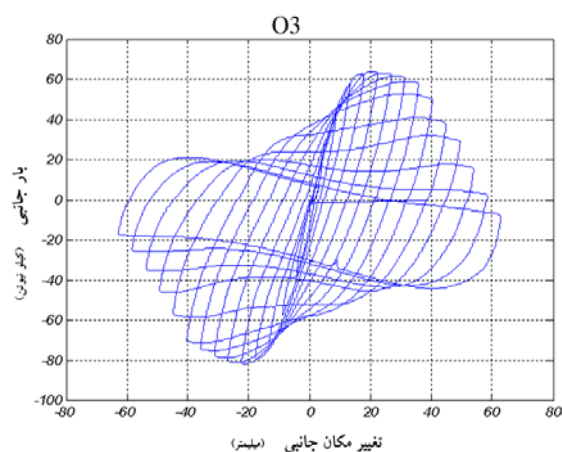
نمونه‌ی O2S. نمونه‌ی O2S با مقطع هشت ضلعی و دارای ورق سخت کننده‌ی داخل در تمام هشت ضلع و به صورت سرتاسری می باشد که ابتدا تحت بار محوری ۲۴۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، بار جانبی با اعمال تغییر مکان در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی شروع گردید و افت مقاومت از سیکل ۹ شروع شده و در سیکل‌های بعدی افزایش یافت. در سیکل ۱۵ به علت افت شدید مقاومت و پاره شدن جوش ورق‌ها در پایین ستون و پوکیدگی بتن داخل و ریزش بتن پوکیده شده از قسمت بریده شده‌ی جداره‌ی فولادی، آزمایش متوقف شد.

منحنی چرخه‌ای رفتار ستون در شکل (۱۶) نشان داده شده است. این منحنی، رفتار شکل پذیرتر و جذب انرژی بالا در ستون را نشان می‌دهد. این نمونه، شکل پذیری $\mu=12$ را تحمل نموده است.

نمونه‌ی O4S. نمونه‌ی O4S با مقطع هشت ضلعی و دارای ورق سخت کننده در چهار ضلع به صورت یک در میان و سرتاسری می‌باشد. این نمونه، ابتدا تحت بار

شکل (۱۴)، منحنی چرخه‌ای رفتار ستون را نشان می‌دهد. این منحنی، مشخص کننده‌ی شکل پذیری بالا و ظرفیت جذب انرژی بالای این نمونه می باشد. این نمونه، شکل پذیری $\mu=9$ را دارا می باشد.

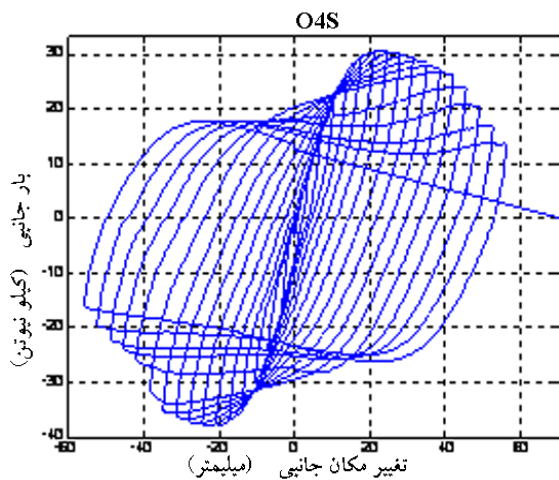
در نمونه O3 بعد از تست، قسمتی از ورق جداره‌ی فولادی ستون در قسمت پایین که کماتش جداره اتفاق افتاده بود، برداشته شد تا بتن داخل مورد ارزیابی قرار گیرد. بتن در محل کماتش جداره‌ی فولادی پوکیده شده و یک ترک افقی نسبتاً عریض در فاصله‌ی ۱۰ سانتی متری اتصال صلب پایین ستون ایجاد شده بود.



شکل ۱۴ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی O3

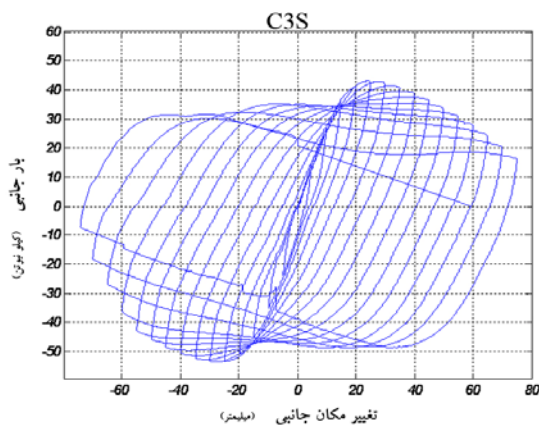
نمونه‌ی S2S. این نمونه، دارای ورق های سخت کننده در داخل و به صورت سرتاسری می باشد. ابتدا نمونه، تحت بار محوری ۱۶۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، بار جانبی در انتهای نمونه با اعمال تغییر مکان به صورت رفت و برگشتی شروع گردید. در سیکل ۹ کماتش، جدار فولادی در پایین ستون شروع شد و در سیکل‌های بعدی کماتش افزایش یافت. در سیکل ۱۲ بارگذاری جانبی، جوش ورق در سمت محرک افقی شکست و افت شدیدی در مقاومت به وجود آمد و آزمایش متوقف شد.

علت افت زیاد مقاومت، آزمایش متوقف شد.



شکل ۱۷ منحنی چرخه ای نمونه ای O4S

منحنی چرخه ای نمونه در شکل (۱۸) نشان داده شده است. این منحنی، نشان دهنده رفتار خوب نمونه از نظر شکل پذیری و جذب انرژی بالا برای بارهای متناوب می باشد.

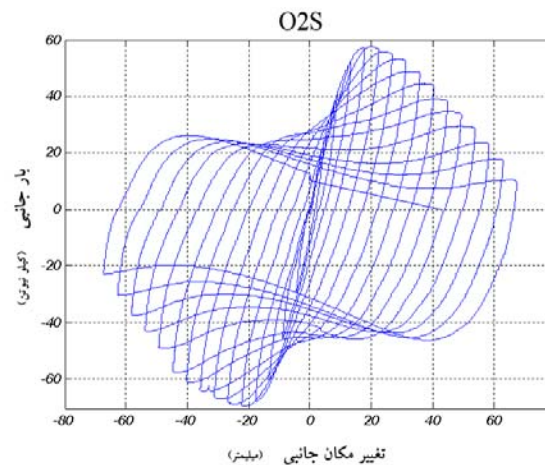


شکل ۱۸ منحنی چرخه ای نمونه ای C3S

این نمونه، شکل پذیری $\mu = \frac{\delta_y}{\delta_{y0}} = 13$ را تحمل نموده است.

نمونه ای C3SN. این نمونه، همانند نمونه ای C3S

محوری ۲۴۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، بار جانبی با اعمال تغییر مکان در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید، از سیکل ۹، افت مقاومت به وجود آمد. در سیکل ۱۰، کماتش موضعی در جداره ی فولادی پایین ستون شروع گردید. در سیکل ۱۶ به علت افت زیاد در مقاومت، آزمایش متوقف شد.



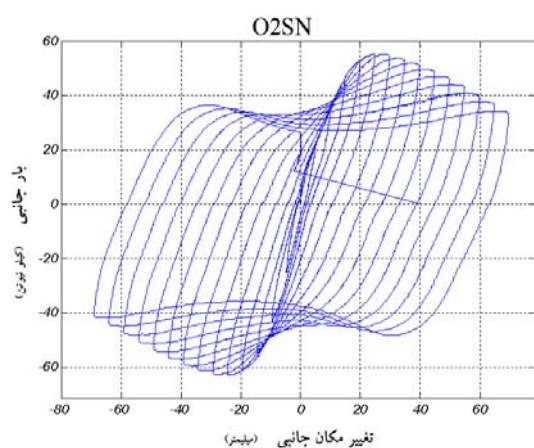
شکل ۱۶ منحنی چرخه ای نمونه ای O2S

منحنی چرخه ای نمونه در شکل (۱۷) نشان داده شده است. این منحنی، نشان دهنده رفتار شکل پذیری و جذب انرژی بالا برای بارهای متناوب در ستون را نشان می دهد. این نمونه، شکل پذیری $\mu = 12$ را تحمل نموده است.

نمونه ای C3S. نمونه ای C3S دارای مقطع مدور و ۴ عدد ورق سخت کننده در داخل نمونه می باشد. این نمونه، ابتدا تحت بار محوری ۲۴۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، بار جانبی با اعمال تغییر مکان در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید. در سیکل ۷، مقداری افت مقاومت مشاهده شد در سیکل ۹، افت مقاومت بیشتر شد و در سیکل ۱۰، کماتش جداره ی فولادی شروع گردید و در سیکل های بعدی، کماتش افزایش یافت. در سیکل ۱۴ به

نمونه‌ی O2SN. این نمونه، همانند نمونه‌ی O2S می‌باشد که ورق‌های سخت کننده فقط در ۳۰ سانتی متری پایین ستون جوش داده شده است. در این نمونه، ابتدا بار محوری فشاری ۲۰۰ کیلو نیوتن توسط محرک نیروی قائم وارد شد و سپس بار جانبی با اعمال تغییر مکان به صورت رفت و برگشتی، توسط محرک افقی نیرو اعمال گردید. در سیکل ۱۰، کمانش موضعی در ورق جداره در بالای ورق‌های سخت کننده‌ی پایین ستون، شروع گردید. در سیکل ۱۳، کمانش کمی در جداره‌ی فولادی در پایین ستون اتفاق افتاد. در سیکل ۱۴، کمانش جداره‌ی فولادی در بالای ورق تقویتی، بیشتر شد و به علت افت زیاد مقاومت، آزمایش متوقف شد.

منحنی چرخه‌ای نمونه در شکل (۲۰) نشان داده شده است. این منحنی، نشان دهنده‌ی اثر سخت کننده‌ها در به تعویق افتادن کمانش (در اثر کاهش D/t) و افزایش شکل پذیری و افزایش ظرفیت جذب انرژی بالاست. این نمونه، شکل پذیری $\mu=11$ را تحمل نموده است.



شکل ۲۰ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی O2SN

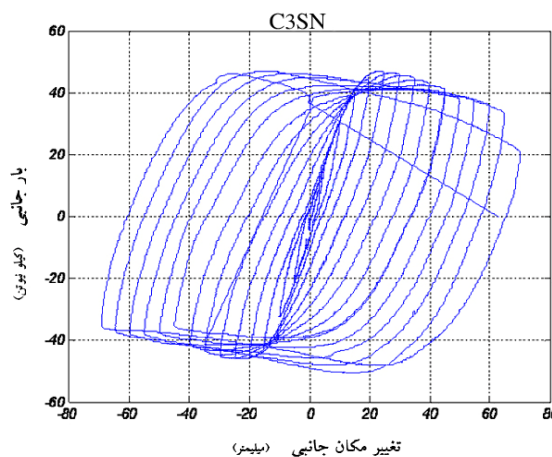
می‌باشد و به علت این که پایین ستون تحت لنگر خمشی بیشتری است، ورق‌های سخت کننده به ارتفاع ۳۰ سانتی متر در ۴ طرف پایین ستون، جوش شده است.

این نمونه، ابتدا تحت بار محوری ۲۰۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، بار جانبی با اعمال تغییر مکان در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید. در سیکل ۱۱، کمانش موضعی در ورق جداره در بالای ورق‌های سخت کننده شروع گردید. در سیکل ۱۳، ورق پایین ستون از ناحیه‌ی جوش، شیاری بریده شد و در سیکل ۱۴، افت مقاومت زیاد ایجاد شده و آزمایش متوقف گردید.

کلاستون C3SN نسبت به ستون C3 و C3S، سیکل‌های بارگذاری بیشتری تحمل نموده است که دلیل آن، جلوگیری از کمانش موضعی جدار فولادی توسط سخت کننده هاست.

این نمونه، شکل پذیری $\mu=13$ را تحمل نموده است.

منحنی چرخه‌ای نمونه در شکل (۱۹) نشان داده شده است. این منحنی، نشان دهنده‌ی اثر سخت کننده‌های پایین ستون را در افزایش شکل پذیری و افزایش جذب انرژی بالا نشان می‌دهد [9,10].

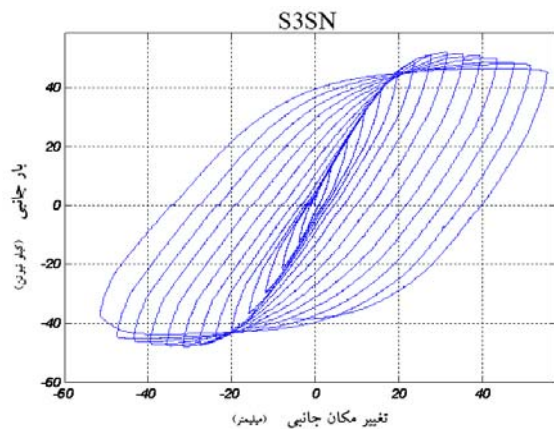


شکل ۱۹ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی C3SN

که فقط در پایین ستون، ورق سخت کننده به ارتفاع ۳۰ سانتی متر در وسط اضلاع قرار دارد.

این نمونه، ابتدا تحت بار محوری ۱۶۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس ضمن ثابت نگه داشتن بار محوری، نیروی افقی با اعمال تغییر مکان جانبی در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید. در سیکل ۱۴، کمانش در پایین ستون در جدار فولادی شروع گردید. در سیکل ۱۵، ورق از ناحیه‌ی اتصال جوشی سخت کننده‌ی افقی در ارتفاع ۱۰ سانتی متری پایین ستون، بریده شد و به علت افت شدید، مقاومت آزمایش متوقف شد. این نمونه، شکل پذیری $\mu = 13$ را تحمل نموده است.

منحنی چرخه‌ای این نمونه که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، نمایانگر افزایش شدید شکل پذیری و به تعویق افتادن کمانش موضعی جداره‌ی فولادی در اثر سخت کننده‌ها (در اثر کاهش D/t) می باشد.



شکل ۲۲ منحنی چرخه ای نمونه‌ی S3SN

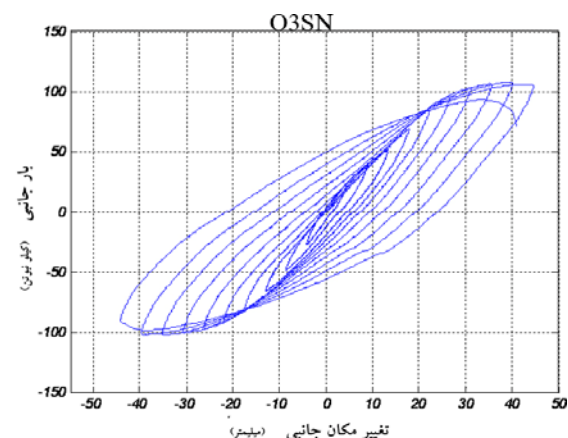
چگونگی خرابی نمونه‌ها

شکست نمونه‌ی S3 در اثر کمانش جدار فولادی در پایین ستون و در سمت محرک افقی و ورق مقابل آن

نمونه‌ی O3SN. این نمونه، همانند نمونه‌ی O3 می باشد که فقط در پایین ستون، ورق سخت کننده به ارتفاع ۳۰ سانتی متر و به صورت یک درمیان جوش داده شده است.

این نمونه، ابتدا تحت بار محوری فشاری ۲۴۰ کیلو نیوتن قرار گرفت، سپس بار جانبی با اعمال تغییر مکان در انتهای نمونه و به صورت رفت و برگشتی وارد گردید. در سیکل ۱۲، ورق در پایین نمونه در محل جوش ورق سخت کننده افقی با صدا بریده شد؛ ضمناً کمانش خیلی کمی در قسمت پایین ستون و در اضلاعی که دارای سخت کننده نبودند، اتفاق افتاد و به علت افت زیاد در مقاومت، آزمایش متوقف شد. این نمونه، شکل پذیری $\mu = 11$ را تحمل نموده است و اگر ورق بریده نمی شد، شکل پذیری بالاتری را تحمل می نمود.

منحنی چرخه‌ای نمونه در شکل (۲۱) نشان داده شده است که در مقاسیه با منحنی نمونه‌ی O3، افزایش شکل پذیری در اثر ورق های سخت کننده را نشان می دهد.



شکل ۲۱ منحنی چرخه‌ای نمونه‌ی O3SN

نمونه‌ی S3SN. این نمونه، همانند نمونه‌ی S3 می باشد



شکل ۲۴ شکست نمونه‌ی O2 در اثر کمناش موضعی جداره‌ی فولادی



شکل ۲۵ شکست نمونه‌ی C3 در اثر کمناش موضعی حلقوی در پایین ستون

شکست نمونه‌ی O3 در اثر کمناش موضعی ورق فولادی در پایین ستون اتفاق افتاده است؛ شکل (۲۶). در این نمونه $D/t = 50.28$ می‌باشد و بعد از شکست، بتن داخل نمونه از جداره‌ی فولادی، حدود ۲ میلی‌متر بیرون زده است که نشان دهنده‌ی لغزش بین بتن و جداره‌ی فولادی است. در نمونه‌ی O3، بتن در اثر کرنش‌های بسیار زیاد، ابتدا پوکیده شده و بعداً کمناش جداره‌ی فولادی اتفاق افتاده است.

جداره‌ی فولادی این نمونه بعد از اتمام آزمایش در قسمت پایین بریده شد، تا بتن داخل، مورد بررسی قرار گیرد و مشاهده شد که بتن، ضمن این که خرد و پوکیده

می‌باشد. بتن داخل جداره‌ی فولادی پوکیده شده و در اثر شکست جوش گوشه ورق‌ها، بتن خرد شده از آن محل در حین آزمایش بیرون می‌ریخت. مقدار نسبت بعد به ضخامت جداره‌ی فولادی، $D/t = 34.5$ می‌باشد. در شکل نمونه‌ی (۲۳)، بتن داخل جداره در اثر لغزش، حدود ۲/۵ میلی‌متر از جداره‌ی فولادی بیرون زده است.

در شکل (۲۴)، شکست نمونه‌ی O2 نیز در اثر کمناش جداره‌ی فولادی و پاره شدن جوش اتصال ورق‌هاست. بتن داخل ستون در سیکل ۱۱ بار گذاری جانبی خرد شده و از محل شکست جوش اتصال ورق‌ها بیرون می‌ریخت. مقدار $D/t = 26.6$ می‌باشد.

در این نمونه همانند نمونه‌ی S3، بتن داخل از جداره‌ی فولادی حدود 2 mm بیرون زده است.

شکست نمونه C3 نیز در اثر کمناش جدار فولادی به صورت حلقه در قسمت پایین ستون اتفاق افتاده است، شکل (۲۵). مقدار $D/t = 40$ می‌باشد. در این نمونه، بعد از شکست، بتن از جداره‌ی فولادی، حدود ۱/۵ میلی‌متر بالا زده است که نشان دهنده‌ی لغزش بین بتن و جداره‌ی فولادی است.



شکل ۲۳ شکست نمونه‌ی S3 در اثر کمناش موضعی جداره‌ی فولادی

مقدار $D/t = 45.3$ می‌باشد. در نمونه‌ی S2S، جدایی بتن از جدایی فولادی در اثر بارگذاری مشاهده نشد.

در نمونه‌ی S2S، که شکست در اثر بریده شدن جوش اتصال ورق در سمت محرک افقی افتاد، ورق آن قسمت، بعد از اتمام آزمایش بریده شد تا داخل ستون مورد بررسی قرار گیرد؛ مشاهده شد که ورق‌های سخت‌کننده‌ی داخل در آن قسمت بریده شده و بتن نیز مقداری خرد شده است؛ شکل (۲۹).

شکست نمونه‌ی O2S نیز در اثر کماتش جداره‌ی فولادی و خرد شدن بتن داخل نمونه، اتفاق افتاده است؛ شکل (۳۰). برای این نمونه $D/t = 66.38$ می‌باشد.

در این نمونه، جدایی بتن و جداره‌ی فولادی و لغزش بین این دو، مشاهده نشد. در شکست این نمونه، جوش ما بین ورق‌های تقویتی و فولاد جداره، ابتدا شکسته و جداره‌ی فولادی کماتش نموده است.

ورق‌های سخت‌کننده، کماتش جداره‌ی فولادی را در مقایسه با مقاطع بدون ورق‌های سخت‌کننده به تعویق انداخته است.

شده است در صفحه‌ای حدود ۷ سانتی متر بالای اتصال صلب پایین ستون در صفحه‌ای عمود بر امتداد ستون شکسته و در اثر ترک نسبتاً عریض ایجاد شده، به دو قسمت تقسیم شده است، شکل (۲۷).

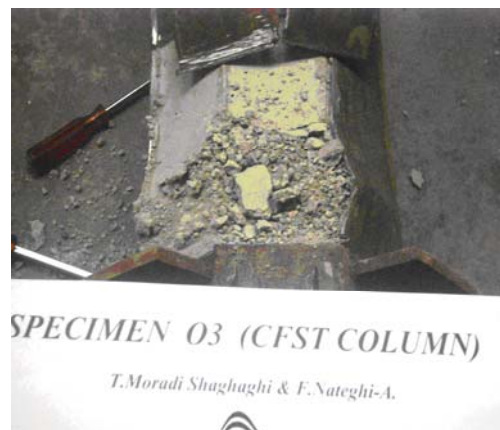
شکست نمونه‌ی S2S، در اثر شکست جوش ورق نمونه در ارتفاع ۴۰ سانتی متر پایین ستون می‌باشد که قبل از شکست جوش مزبور، در ورق جداره در پایین ستون، کماتش موضعی اتفاق افتاده است؛ شکل (۲۸).



شکل ۲۶ شکست نمونه‌ی O3 در اثر کماتش موضعی جداره‌ی فولادی



شکل ۲۸ شکست نمونه‌ی S2S

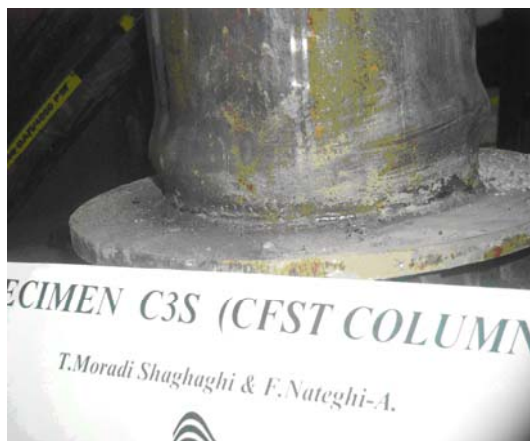


شکل ۲۷ خرد شدن بتن داخل نمونه‌ی O3

افقی بیرونی ستون، اتفاق افتاده است. در واقع وجود ورق‌های سخت کننده، کماتش جداره‌ی فولادی را به تعویق انداخته و در اثر سیکل‌های بیشتر، جدار فولادی بریده شده است؛ شکل (۳۲).



شکل ۳۱ شکست نمونه‌ی O4S در اثر کماتش موضعی جداره‌ی فولادی



شکل ۳۲ شکست نمونه‌ی C3S

شکست نمونه‌ی C3SN، در اثر کماتش جداره‌ی فولادی و پاره شدن ورق جداره در پایین‌ترین



شکل ۲۹ شکست ورق‌های سخت کننده‌ی داخل نمونه‌ی S2S



شکل ۳۰ شکست نمونه‌ی O2S در اثر کماتش موضعی جداره‌ی فولادی

شکست نمونه‌ی O4S مانند نمونه‌ی O2S، در اثر کماتش جداره‌ی فولادی رخ داده است؛ ولی وجود ورق‌های سخت کننده، کماتش جداره‌ی فولادی را به تعویق انداخته است؛ شکل (۳۱).

شکست نمونه‌ی C3S؛ در اثر کماتش موضعی جداره‌ی فولادی در پایین ستون و بریده شدن ورق جداره در پایین و بالای جوش ستون ورق سخت کننده‌ی

سیکل بارگذاری جانبی بیشتری را تحمل نموده است؛ شکل (۳۴).

شکست نمونه‌ی O3SN، در اثر کماتش موضعی مختصر در ورق‌های جداری پایین ستون و در قسمت‌های بدون ورق سخت کننده و نهایتاً پاره شدن ورق در مجاورت جوش ورق‌ها با ورق سخت کننده‌ی افقی افتاده است؛ شکل (۳۵).



شکل ۳۴ شکست نمونه‌ی O2SN



شکل ۳۵ شکست نمونه‌ی O3SN

نقطه و نزدیک جوش اتصال ورق سخت کننده‌ی افقی افتاق افتاده است. نمونه‌ی C3SN، در مقایسه با نمونه‌ی C3 به علت وجود ورق‌های سخت کننده در پایین ستون در ارتفاع ۳۰ سانتی متری، تعداد سیکل‌های بارگذاری جانبی بیشتری را تحمل نموده است. کماتش موضعی در بالای ورق‌های سخت کننده در دو طرف سمت محرک افقی نیرو و در سمت مقابل شروع گردیده و سپس کماتش مختصری در پایین ستون افتاق افتاده و نهایتاً در اثر پاره شدن ورق جداری در پایین ستون در سمت محرک نیرو شکست افتاق افتاده است؛ شکل (۳۳).



شکل ۳۳ شکست نمونه‌ی C3SN

شکست نمونه‌ی O2SN، در اثر کماتش موضعی جداری فولادی در بالای ورق‌های سخت کننده‌ی پایین ستون و مقدار کمی کماتش ورق جداری ستون در پایین ستون افتاق افتاده است. به علت وجود ورق‌های سخت کننده در پایین ستون (ناحیه‌ای که تحت بیشترین لنگر ناشی از بار جانبی می‌باشد) و به تعویق افتادن کماتش موضعی و انتقال محل کماتش موضعی از مقطع تحت لنگر، خمشی حداکثر به ناحیه‌ای تحت لنگر کم تر، تعداد

ستون و افزایش شکل پذیری ستون و افزایش جذب انرژی دارند.

۳- تمام نمونه‌های تحت فشار توأم با بار جانبی چرخه‌ای در اثر کمناش موضعی جداره‌ی فولادی و پکیده شدن بتن در محل کمناش موضعی به شکست رسیده اند و وجود ورق‌های سخت کننده در نواحی بحرانی ستون، مقدار D/t یا B/t (نسبت عرض به ضخامت جداره‌ی فولادی یا ضریب فشردگی مقطع) را کاهش داده و کمناش موضعی را به تعویق می‌اندازد. با توجه به D/t و B/t نمونه‌های مختلف و تعداد چرخه‌های قابل تحمل توسط نمونه‌ها در شروع کمناش موضعی، پیشنهاد می‌گردد، D/t برای مقاطع دایره‌ای بدون ورق‌های سخت کننده، حداکثر به ۳۲ و مقدار B/t برای مقاطع هشت ضلعی و مربعی، حداکثر به ۲۵ محدود گردد.

۴- در آزمایشات از سه نوع مقطع: عرضی دایره، هشت ضلعی و مربع استفاده شده است. مقایسه‌ی نتایج این سه نوع مقطع، نشان می‌دهد که رفتار مقطع دایره از لحاظ شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی و تعداد سیکل‌های قابل تحمل تا افت قابل توجه مقاومت، بهتر از رفتار مقطع هشت ضلعی و رفتار مقطع هشت ضلعی، بهتر از رفتار مقطع مربعی است. در استفاده از مقاطع هشت ضلعی، جهت کاهش B/t در محل اتصالات و نواحی بحرانی، توصیه می‌گردد از ورق‌های سخت کننده استفاده شود.

۵- در مراحل اول بارگذاری، نسبت پواسون فولاد بیشتر از بتن است و در بارهای نزدیک به بار نهایی نسبت پواسون فولاد، کم تر از بتن بوده و فولاد به صورت دورگیر بتن را در بر گرفته که موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. این افزایش مقاومت با افزایش نسبت طول به قطر یا بعد مقطع L/D و نیز



شکل ۳۶ شکست نمونه‌ی S3SN

شکست نمونه‌ی S3SN، در اثر پاره شدن ورق جداره از مجاورت جوش اتصال پایین ستون به ورق‌های سخت کننده‌ی افقی اتفاق افتاده است. این نمونه به علت داشتن ورق‌های سخت کننده در قسمت پایین ستون (ناحیه‌ی تحت لنگر حداکثر) سیکل‌های زیادی را بدون کمناش موضعی تحمل نموده است؛ شکل (۳۶).

نتیجه

۱- تعداد چرخه‌های بارگذاری جانبی متحمل شده توسط نمونه‌ها به مراتب بیشتر از ستون‌های بتنی معمولی است. این مورد در اثر محصوریت هسته‌ی بتن توسط جداره‌ی فولادی است و باعث افزایش قابل توجهی در شکل پذیری و جذب انرژی می‌گردد که در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، دارای اهمیت فراوانی است.

۲- در نمونه‌های با ورق‌های سخت کننده به طول ۳۰ سانتی متر پایین ستون (جایی که مصالح ستون تحت تنش‌های ناشی از فشار و خمش حداکثر قرار دارند)، ورق‌های سخت کننده، نقش مهم و قابل توجهی در افزایش چرخه‌های بارگذاری قابل تحمل توسط

مقاطع هشت ضلعی، حدود ۲۲ درصد و برای مقاطع مربعی، حدود ۱۶ درصد (متوسط نمونه ها) افزایش می یابد.

۹ - در ستون‌های CFST، پدیده‌ی pinching در منحنی‌های چرخه‌ای در مقایسه با ستون‌های بتن مسلح، بسیار کم تر است. در تعدادی از نمونه ها با ورق‌های سخت کننده در نواحی بحرانی پدیده‌ی pinching مشاهده نمی‌شود.

۱۰ - با کاهش مقدار D/t در نمونه‌ها مشاهده می‌شود پدیده‌ی pinching در منحنی‌های چرخه‌ای به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

افزایش ضریب فشردگی مقطع D/t , B/t کاهش می‌یابد.

۶ - پر کردن مقاطع قوطی و توخالی با بتن از کماتش موضعی به طرف داخل جداره‌ی فولادی جلوگیری نموده و در نتیجه، کماتش موضعی جداره‌ی فولادی را به تعویق می‌اندازد.

۷ - حداکثر کرنش وارد شده به بتن در شروع شکست، حدود $0/027$ و حداکثر کرنش بتن در شروع کماتش موضعی جداره‌ی فولادی $0/0092$ می‌باشد (متوسط نمونه‌ها).

۸ - در اثر اندر کنش بین بتن و جداره‌ی فولادی مقاومت بتن برای مقاطع دایره‌ای، حدود ۲۵ درصد و برای

مراجع

1. Compione, G., Scibilia, N., and Zingone, G., "Strength and Ductility of Circular Steel Columns filled with fiber reinforced concrete" Dipartimento di Ing. Struct. Universita di palermo , I - 90128 , Italy,(1997).
2. Susantha, K.A.S., Hanbin Ge., and Tsutomu Usami. "Uniaxial Stress – Strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes". Enginer Struct. No. 23, pp. 1331-1347, (2001).
3. Wang, Y.C., "Tests on slender composite columns" *J. Conollow Str. Steel Revs.* No.49, pp. 25-41, (1999).
4. Harry, G. Harris, and Gajanana, M., "Structural Modeling & Experimental Techniques" 2nd Edition. Boca Rotan, CRC Press, (1999).
5. O`shea , M.D., and Bridge, R.Q., "Circular Thin Walled Tubes With High Strength Concrete Infill" *Proceeding, Engineering Foundation Conference, Composite Construction III*, Irsee , Germany, (1996).
6. Cai, S., and Jiao, Z., "Behaviour and Ultimate Strength of Concrete Filled Steel Tubular Columns under Eccentric Loading " , *Jian Zhu Jie Gou xue Bao*, Vol. 6, No. 4, PP. 32 –42, (1985).
7. Shakir Khalil, H., and Zeghiche, Z., "Experimental Behaviour of Concrete Filled Rolled Rectangular Hollow Section Columns," *The Structural Engineer*, Vol. 67, No .19, PP. 345– 353, (1989).
8. Fujinaga, T., Tsuda, K., and Matsui, C., "Hysteresis Model for Concrete Filled Steel Square Tubular Beam

- Columns" *Journal of 12 WCEE*, 042, (2000).
9. Mino, E., Matsui, C., Tsuda, K., and Ito, F., "Design Method of Slender Concrete Filled Steel Tubular Columns under Constant Vertical and Alternating Horizontal Load ", *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, PP. 965~ 966 (in Japanese), (1996).
10. Chen, W.F., "Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Columns", *Proceedings of the ASCE – IABSE International Conference on Tall Buildings*, Vol. 3, PP. 608 – 612, (1972).
11. *Composite Construction in Steel and Concrete*, ASCE, New York, Vol. 8, PP. 702 –727, (1998).
۱۲. فخری، صادق رضا، « بررسی تحلیلی و تجربی رفتار ستون‌های فلزی پر شده با بتن و اتصالات مربوطه»، دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، (۱۳۷۵).