

# An experimental Investigation into the Strain Profile Measurements of a Curved RC Shear Wall Subjected to Lateral Cyclic Loading

Hatef Abdoos<sup>1</sup>, Alireza Khaloo<sup>2\*</sup>

1. Ph.D. of Structural engineering, Department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
2. Distinguished Professor, Department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Received: 19 March 2024    Revised: 23 April 2024    Accepted: 20 May 2024  
Research paper

## Abstract

This paper aims to experimentally investigate how the strains are distributed within the panel of a curved reinforced concrete shear wall (CRCSW) due to the lateral reversed cyclic loading. In this regard, an experimental testing program is designed and conducted, in which a one-third scale CRCSW is fabricated. In total, 34 strain gauges are affixed to the wall panel, at the target locations, in order to capture the strain variation along as well as across the wall panel. During the loading process, the strain values are monitored within the eight phases of the applied loading and the peak response is reported as the representative of each phase. Thereafter, the variation of the strain profile corresponding to the measured responses are plotted, which indicates the strain evolution process in the tested CRCSW. The strain variations also demonstrate the cracking pattern and damage sequence of the CRCSW subjected to the applied loading. Within the initial stages of the loading, the simultaneous action of bending moment and warping torsion is responsible for the horizontally aligned cracking surfaced at both faces of the wall panel, and then the inclined diagonal cracking pattern was developed and propagated all the wall panel. Moreover, due to the severe localized damages concentrated at the bottom of the wall tips, in some cases, strain gauge debonding was detected. The findings of this study can generally be employed as a benchmark for future studies regarding the calibration of the analytical and numerical investigations.

**Keywords:** Experimental Investigation, Curved RC Shear Wall, Cyclic Loading, Strain Gauge, Strain Profile.

**\*Corresponding Author:** Alireza Khaloo

Abdoos, H., Khaloo, A. An experimental investigation into the strain profile measurements of a curved RC shear wall subjected to lateral cyclic loading. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(2): -. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.449337.1366>

2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# مطالعه آزمایشگاهی توزیع کرنش بتن در یک دیوار برشی بتنی مسلح خمیده تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای

هاتف عبدوس<sup>۱</sup>، علیرضا خالو<sup>۲\*</sup>

۱- دکتری مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استاد ممتاز دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: khaloo@sharif.edu

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱

نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

این مطالعه آزمایشگاهی به بررسی روند توزیع کرنش ایجادشده در بدنه یک دیوار برشی بتنی مسلح خمیده تحت بارگذاری چرخه‌ای و در غیاب بار محوری می‌پردازد. در ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی در مقیاس یک‌سوم در آزمایشگاه دینامیک سازه کف قوی دانشگاه صنعتی شریف ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای تا جابجایی جانبی نسبی هدف ۲ درصد قرار گرفته است. به‌منظور بررسی روند توسعه ترک‌ها در سطوح داخلی و خارجی دیوار در مجموع ۳۴ کرنش‌سنج بر روی بدنه دیوار نصب شده و تغییرات کرنش در طی بارگذاری چرخه‌ای که در هشت گام اعمال‌شده اندازه‌گیری و بیشینه مقدار آن‌ها تعیین شده است. مقادیر ثبت‌شده از کرنش‌سنج‌ها نشانگر نحوه رشد و گسترش انواع ترک‌های ایجادشده روی بدنه دیوار بوده که متأثر از سازوکار خرابی حاکم در هر مرحله از بارگذاری است. در ابتدای بارگذاری ترک‌های افقی سرتاسری روی بدنه دیوار تشکیل شده که متأثر از لنگر خمشی و اعوجاج پیش‌شی بوده و به تدریج ترک‌های قطری و ضربدری شکل با ماهیت برشی تمامی سطوح داخلی و خارجی دیوار خمیده را به‌صورت تقریباً متقارن در بر گرفته است. همچنین بسته به موقعیت قرارگیری کرنش‌سنج‌ها حداکثر تا حدود ۸۰۰۰ میکرواسترین کرنش را تجربه کرده‌اند و در نهایت شدت خرابی در نواحی ابتدایی و انتهایی پای دیوار منجر به خرابی نمونه و جداشدگی و قطع‌شدگی برخی از کرنش‌سنج‌ها شده است. با توجه به مطالعات آزمایشگاهی محدودی که پیرامون دیوارهای برشی بتنی مسلح خمیده صورت گرفته است نتایج این آزمایش می‌تواند به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی و عددی به‌کار گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی دیوار برشی بتنی خمیده بارگذاری چرخه‌ای کرنش‌سنج توزیع کرنش بتن.

امروزه اجزای سازه‌ای با هندسی خمیده و قوسی به اقتضای ملاحظات معماری زیبایی‌شناختی و نیز دلایل سازه‌ای از محبوبیت ویژه‌ای برخوردار هستند و کاربردهای گسترده‌ای در صنعت ساخت و ساز پیدا کرده‌اند [۱-۵]. همچنین استفاده از این اجزای سازه‌ای نه تنها با حذف گوشه‌های نوک تیز منجر به تسهیل فرایند باربری در برابر بارهای جانبی مانند بار باد می‌شود [۶] بلکه اثرات تمرکز تنش ناشی از پدیده تأخیر برشی<sup>۱</sup> را به حداقل می‌رساند [۷-۱۱]. این پدیده عمدتاً با اعمال یک ضریب کاهش در قالب عرض مؤثر<sup>۲</sup> در محاسبات تحلیلی و عددی مد نظر قرار می‌گیرد [۱۲، ۱۳] و در دیوارهای برشی با مقاطع غیرمستطیلی و بالدار<sup>۳</sup> از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۴-۱۷] چرا که موجب کاهش سختی شکل‌پذیری و ظرفیت باربری در این مقاطع می‌شود [۱۸، ۱۹]. با در نظر گرفتن این موضوع بکارگیری دیوارهای برشی خمیده می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای دیوارهای غیرمستطیلی متداول T-شکل، L-شکل، U-شکل، H-شکل و اشکال مشابه مطرح شود.

در ادامه بطور مختصر به مرور ادبیات فنی پیرامون مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در مورد دیوارهای برشی بتنی با مقاطع غیرمستطیلی پرداخته می‌شود که در برخی از این مراجع [۲۰-۲۴] پایگاه داده طبقه‌بندی شده نسبتاً جامعی پیرامون آزمایش‌های انجام شده در این زمینه به همراه متغیرهای اصلی بررسی شده سازوکارهای عملکردی دیوار و نیز دستاوردهای حاصل از انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

در سال ۱۹۷۲ اولین مطالعات آزمایشگاهی پیرامون دیوارهای برشی بتنی دمبلی شکل (I-شکل) توسط بارد<sup>۴</sup> و همکاران [۲۵] انجام شد که در آن ۸ دیوار برشی کوتاه به همراه اجزای مرزی آزمایش شدند. اوسترلی<sup>۵</sup> و همکاران [۲۶] با ساخت ۲ دیوار برشی بتنی به اهمیت قابل ملاحظه عملکرد شاخه‌ای<sup>۶</sup> در نواحی محصورشده مربوط به اجزای مرزی دیوار اشاره نمودند. گودسیر<sup>۷</sup> [۲۷] یک دیوار برشی با مقطع T-شکل در مقیاس یک‌سوم و با نسبت ابعادی ۲/۲ را تحت بارگذاری چرخه‌ای<sup>۸</sup> ارزیابی نمود و به علت جابجایی خارج از صفحه و نیاز به شکل‌پذیری بالا نمونه دچار خردشدگی بتن در نواحی غیرمحصور شد. تامسن<sup>۹</sup> و والاس<sup>۱۰</sup> [۲۸] چهار دیوار برشی شامل دو دیوار مستطیلی و دو دیوار T-شکل را در مقیاس یک‌چهارم ساختند و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند و سپس سازوکار خرابی دیوارها به همراه اثرات ناشی از محصورشدگی در نواحی مرزی تعیین گردید.

ماروتا<sup>۱۱</sup> و همکاران [۲۹] نه دیوار برشی با مقطع H-شکل و در مقیاس یک‌دوازدهم را تحت بارگذاری هم‌زمان ناشی از بار جانبی و لنگر پیچشی آزمایش و اثرات راستای اعمال بارگذاری و نیز نسبت لنگر پیچشی به لنگر خمشی وارده در تراز پایه را بررسی نمودند. پالمو<sup>۱۲</sup> و وکیو<sup>۱۳</sup> [۳۰] اثر نیروی محوری را در عملکرد چرخه‌ای دیوارهای برشی H-شکل بزرگ‌مقیاس با انجام آزمایش در دانشگاه تورنتو کانادا بررسی نمودند و به اثرات قابل ملاحظه نیروی محوری بر سختی مؤثر ظرفیت باربری و نیز سازوکار خرابی دیوار اشاره داشتند.

<sup>1</sup> Shear-lag

<sup>2</sup> Effective width

<sup>3</sup> Flanged sections

<sup>4</sup> Barda

<sup>5</sup> Oesterle

<sup>6</sup> Dowel action

<sup>7</sup> Goodsir

<sup>8</sup> Cyclic

<sup>9</sup> Thomsen

<sup>10</sup> Wallace

<sup>11</sup> Maruta

<sup>12</sup> Palermo

<sup>13</sup> Vecchio

چوبی<sup>۱۴</sup> و همکاران [۳۱] با ساخت دو دیوار T-شکل با جزئیات آرماتورگذاری متفاوت در نواحی مرزی اثر طول ناحیه محصورشدگی را ارزیابی نمودند که نشانگر تأثیر اندک آن (کمتر از دو درصد) در شکل‌پذیری این دیوارها می‌باشد. بیر<sup>۱۵</sup> و همکاران [۳۲] دو دیوار برشی U-شکل با ضخامت‌های مختلف و در مقیاس یک‌دوم را تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی دوجبهت آزمایش کردند و پس از تعیین سازوکار خرابی هر یک از دیوارها به اهمیت لنگر خمشی خارج از صفحه در عملکرد دیوارهای U-شکل و راستای بحرانی اعمال بارگذاری (راستای قطری) اشاره داشتند. هوساکا<sup>۱۶</sup> و همکاران [۳۳] مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی چهار دیوار برشی L-شکل با مقیاس یک‌دوم انجام دادند و مقاومت مشخصه بتن و آرایش آرماتورها به عنوان پارامترهای اصلی مطالعه مد نظر قرار گرفت. اینادا<sup>۱۷</sup> و همکاران [۳۴] با ساخت سه نمونه آزمایشگاهی از دیوارهای برشی با مقطع L-شکل و در مقیاس یک به چهار و نیم تأثیر راستای اعمال بارگذاری و مشخصات هندسه مقطع این دیوارها را تحت بارگذاری چرخه‌ای مطالعه نمودند. کونو<sup>۱۸</sup> و همکاران [۳۵] عملکرد لرزه‌ای دو دیوار L-شکل در مقیاس یک به هفت و نیم را ارزیابی نمودند که بر مبنای شش طبقه پایینی یک ساختمان بتنی ۴۰ طبقه طراحی شده بود. در این آزمایش به وقوع سازوکار خرابی ترد و ناگهانی ناشی از اعمال بار محوری فشاری اشاره شد. همچنین شش دیوار برشی با مقطع L-شکل و با مقیاس یک‌دوم توسط لی<sup>۱۹</sup> و لی<sup>۲۰</sup> [۳۶] آزمایش شد و بر اساس نتایج حاصل تأثیر نسبت بار محوری و نسبت ارتفاع به ضخامت نمونه تعیین گردید. بروگن<sup>۲۱</sup> و همکاران [۳۷] با انجام آزمایش با اعمال بارگذاری جانبی چندجبهت بر روی دو نمونه در مقیاس یک‌دوم به اهمیت پدیده تأخیر برشی در عملکرد چرخه‌ای دیوارهای برشی بتنی T-شکل اشاره نمودند.

ما<sup>۲۲</sup> و لی<sup>۲۳</sup> [۳۸] چهار دیوار برشی H-شکل را تحت بارگذاری توأمان جانبی چرخه‌ای در راستاهای مختلف و نیز مقادیر متفاوت از بار محوری قرار دارند و مشاهدات خود را شامل سازوکار خرابی دیوارها و چگونگی توزیع کرنش در آرماتورهای طولی بال و جان دیوارها ثبت نمودند. بر اساس نتایج این آزمایش سطوح عملکردی دیوارهای L-شکل نیز پیشنهاد شد. در قالب یک پژوهش آزمایشگاهی جامع هان<sup>۲۴</sup> و همکاران [۳۹] دوازده دیوار برشی L-شکل را تحت بارگذاری چرخه‌ای و در حضور مقادیر مختلف از بار محوری تست نمودند و اثر نسبت دهانه برشی<sup>۲۵</sup> و درصد آرماتورهای طولی در نواحی مرزی دیوار را ارزیابی کردند. بهروزی<sup>۲۶</sup> و همکاران [۴۰، ۴۱] سه دیوار برشی C-شکل بزرگ‌مقیاس را تحت بار محوری و نیز بارگذاری جانبی تک‌جبهت و چندجبهت بررسی و سپس سازوکار خرابی دیوارها را کمانش و گسیختگی آرماتورهای طولی در نواحی مرزی دیوار معرفی نمودند. در چارچوب یک برنامه آزمایشگاهی جامع ونگ و همکاران [۴۲] سه دیوار برشی T-شکل و دو دیوار برشی L-شکل را تحت بارگذاری چرخه‌ای تک‌جبهت و دوجبهت تست نمودند و خرابی دیوارها متأثر از کمانش و گسیختگی آرماتورهای طولی در نواحی مرزی بال و جان دیوارها اعلام شد.

<sup>14</sup> Choi

<sup>15</sup> Beyer

<sup>16</sup> Hosaka

<sup>17</sup> Inada

<sup>18</sup> Kono

<sup>19</sup> Li

<sup>20</sup> Li

<sup>21</sup> Brueggen

<sup>22</sup> Ma

<sup>23</sup> Li

<sup>24</sup> Han

<sup>25</sup> Shear span ratio

<sup>26</sup> Behrouzi

عبدوس<sup>۲۷</sup> و خالو<sup>۲۸</sup> [۴] عملکرد یک دیوار برشی بتنی مسلح خمیده را در چارچوب مطالعات آزمایشگاهی جامع و مدون و با استفاده از تجهیزات متعدد اندازه‌گیری و ثبت داده بررسی نمودند. در این آزمایش یک دیوار برشی با ضخامت ثابت و بدون اجزای مرزی که به عنوان بخشی از کمان دایره بود در مقیاس یک‌سوم ساخته شد و سپس تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای در غیاب بار محوری قرار گرفت. سازوکار خرابی دیوار کمانش و گسیختگی آرماتورهای طولی در نواحی ابتدایی و انتهایی پای دیوار بوده و دستاوردهای این آزمایش مشتمل بر تعیین منحنی پاسخ پسماند<sup>۲۹</sup> و پشتواره<sup>۳۰</sup> سختی سکانتی<sup>۳۱</sup> شکل‌پذیری تغییرمکانی قابلیت اتلاف انرژی میرایی معادل و دیگر نتایج به تفصیل ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در بخش پژوهش‌های آزمایشگاهی مطالعات بسیار محدودی پیرامون عملکرد سازه‌های دیوارهای برشی بتنی مسلح خمیده انجام شده است. در این راستا اهداف اصلی این پژوهش در قالب موارد ذیل مطرح می‌شود:

- ارائه یک برنامه آزمایشگاهی جهت ارزیابی عملکرد چرخه‌ای دیوارهای برشی بتنی مسلح خمیده
- تعبیه کرنش‌سنج در بخشهای مختلف از سطوح داخلی و خارجی دیوار جهت ارزیابی روند تغییرات کرنش بتن
- تعیین سازوکار خرابی در هر گام از بارگذاری بر اساس مقادیر قرائت شده از کرنش‌سنج‌ها
- تهیه یک پایگاه داده از مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی جهت استفاده در فرایند صحت‌سنجی مطالعات تحلیلی و عددی

## ۲- برنامه مطالعه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مقدمه

یکی از دلایلی که تاکنون آن طور که باید به عملکرد سازه‌های دیوارهای برشی بتنی خمیده پرداخته نشده این است که به دلیل پیچیدگی‌های موجود در هندسه این اجزای سازه‌ای نیاز به تمهیدات ویژه‌ای مربوط به استفاده از تجهیزات دستگاه‌های برش و نوردکاری در فرایند ساخت قالب دیوارها می‌باشد که دقت بالایی را نیاز دارد. به عنوان یکی از تفاوت‌های مهم در اجرای دیوارهای برشی بتنی خمیده در قیاس با سایر دیوارهای برشی مستطیلی و غیرمستطیلی نیز همین نیاز به ساخت قالب بر اساس مشخصات هندسی قوس دیوار شامل شعاع انحنا ضخامت و ارتفاع آن است که عمدتاً به‌صورت اندازه‌مند<sup>۳۲</sup> وجود ندارد و باید بر اساس نقشه‌های اجرایی طرح به‌صورت ویژه ساخته شوند.

با توجه به اینکه تاکنون مطالعه آزمایشگاهی مدونی پیرامون دیوارهای برشی بتنی مسلح خمیده صورت نگرفته لذا لازم است در گام اول فرضیاتی به‌صورت ساده‌شونده در روند انجام این پژوهش صورت گیرد و مهمترین فرضیات به‌شرح ذیل می‌باشد:

(الف) بارگذاری وارده به سازه به‌صورت چرخه‌ای و جانبی و در غیاب بار محوری است. بارگذاری جانبی با دو تکرار در هر جابجایی هدف و با افزایش یک میلی‌متری تا جابجایی هدف اعمال می‌شود.

(ب) مقیاس نمونه آزمایشگاهی یک‌سوم بوده و این موضوع در تمامی مراحل ساخت و اجرای نمونه لحاظ شده است.

(ج) بار جانبی وارده به مرکز سطح مقطع دیوار وارده شده که دارای خروج از مرکزیت نسبت به مرکز برش آن است

(د) ضخامت مقطع در طول دیوار خمیده ثابت بوده و دیوار فاقد المان‌های مرزی در دو انتها است.

<sup>27</sup> Abdoos

<sup>28</sup> Khaloo

<sup>29</sup> Hysteresis

<sup>30</sup> Backbone

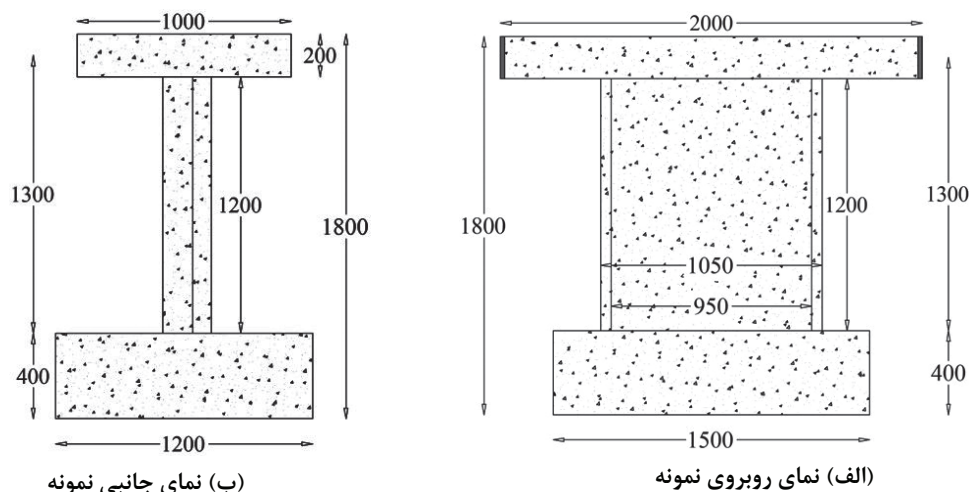
<sup>31</sup> Secant Stiffness

<sup>32</sup> Modular

(ه) آرماتورهای عرضی داخلی و خارجی با شعاع‌های انحنای مختلف به صورت دوتکه و هم‌تراز با سنجاق‌ها اجرا شده است. (و) آرماتورهای طولی دیوار به صورت متحدالفاصله و یکنواخت با زاویه مرکزی ۸ درجه نسبت به یکدیگر در مقطع تعبیه شده است. با توجه به فرض (ج) و اینکه در دیوارهای برشی با هندسه خمیده مرکز برش و مرکز سطح مقطع بر هم منطبق نیستند لذا اعمال نیروی جانبی به دیوار با توجه به خروج از مرکزیت<sup>۳۳</sup> منجر به ایجاد یک لنگر پیچشی و اعوجاج پیچشی<sup>۳۴</sup> در مقطع خواهد شد که علاوه بر لنگر خمشی و نیروی برشی بر دیوارهای خمیده اعمال می‌شود و این موضوع می‌تواند عملکرد دیوار را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین اعوجاج پیچشی می‌تواند منجر به وقوع تغییرشکل‌های خارج از صفحه شود و سیستم اعمال بارگذاری باید قابلیت تعقیب کردن هم‌زمان تغییرشکل‌های درون‌صفحه و خارج از صفحه را داشته باشد. در این راستا با اعمال تغییرات لازم سیستم بارگذاری انعطاف‌پذیری در آزمایشگاه دینامیک کف قوی دانشگاه صنعتی شریف طراحی و ساخته شد که امکان اعمال بارگذاری جانبی به سازه فراهم گردد. جزئیات مربوط به اجزای تشکیل‌دهنده این سیستم و نحوه عملکرد آن به تفصیل در مقاله عبدوس و خالو [۴] آورده شده است.

## ۲-۲- چیدمان آزمایش

در ابتدا با توجه به شرایط و محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه تراز ارتفاعی جک آزمایشگاه جهت اعمال نیرو مشخصات هندسی و مکانیکی نمونه آزمایشگاهی با در نظر گرفتن مقیاس یک‌سوم تعیین گردید و در تمامی مراحل طراحی ساخت و جزئیات اجرایی مربوط به نمونه مد نظر قرار گرفت. نمونه آزمایشگاهی متشکل از سه بخش اصلی: (۱) پی (۲) دیوار و (۳) دیافراگم صلب می‌باشد. بخش‌های (۱) و (۳) با استفاده از شبکه آرماتورهای فولادی به قطر ۲۰ میلی‌متر به صورت دولایه و در فواصل ۱۳۰ میلی‌متری در هر دو راستای اصلی مسلح شده است. همچنین در بخش (۳) علاوه بر آرماتورهای فولادی مذکور از ۵ ورق پیوستگی سرتاسری استفاده شده تا در سازوکار رفت و برگشتی بارگذاری انتقال بار به صورت یکنواخت صورت گیرد. جزئیات هندسی نمونه و تصاویر مربوط به طرح شماتیک نقشه‌های اجرایی دیوار خمیده در شکل ۱ (الف) تا (ج) ارائه شده است. بطور خلاصه مشخصات هندسی دیوار که بخشی از کمان یک دایره است به شرح زیر می‌باشد: (۱) شعاع داخلی: ۹۵۰ میلی‌متر (۲) شعاع خارجی: ۱۰۵۰ میلی‌متر (۳) ضخامت: ۱۰۰ میلی‌متر (۴) ارتفاع پانل دیوار: ۱۲۰۰ میلی‌متر (۵) ارتفاع تا محل اعمال بارگذاری جانبی: ۱۳۰۰ میلی‌متر و (۶) زاویه قوس دیوار: ۶۰ درجه.

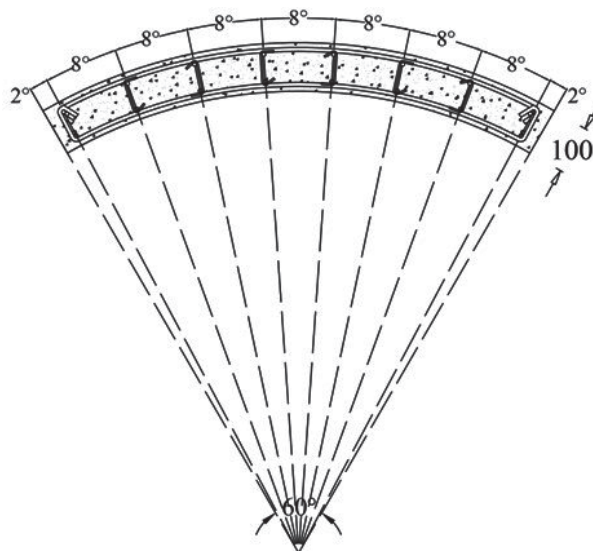


(ب) نمای جانبی نمونه

(الف) نمای روبروی نمونه

<sup>33</sup> Eccentricity

<sup>34</sup> Warping torsion



(ج) بلان مقطع دیوار

شکل ۱) نقشه‌های اجرایی نمونه دیوار برشی بتنی خمیده (تمامی اعداد به میلی‌متر هستند)

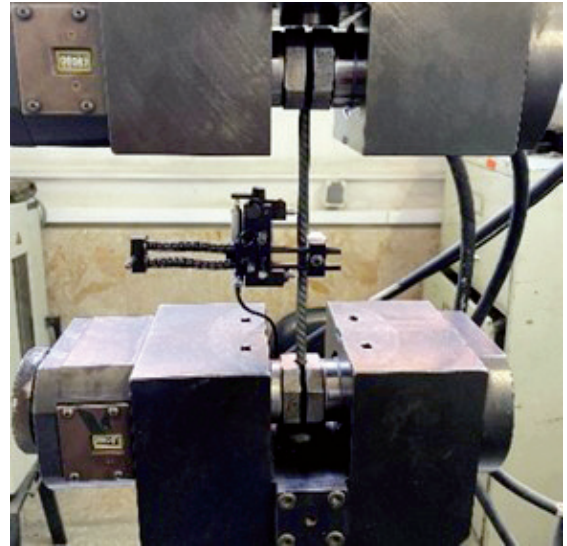
همچنین دیوار با استفاده از آرماتورهای طولی و عرضی با قطر ۸ میلی‌متر و با تنش تسلیم اسمی ۴۲۰ مگاپاسکال (AIII) مسلح شده است. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش کشش مستقیم که بر روی ۳ نمونه میلگرد با قطر ۸ میلی‌متر انجام شده به ترتیب میانگین مقادیر تنش تسلیم ۴۷۷ مگاپاسکال تنش نهایی ۶۰۰ مگاپاسکال و کرنش شکست حدود ۱۸ درصد اندازه‌گیری شده است. مطابق با نقشه‌های اجرایی ۱۶ آرماتور طولی به صورت شعاعی در دو ردیف با فاصله مرکز به مرکز تقریباً ۵۵ میلی‌متر به کار گرفته شده و با توجه به نحوه اعمال بارگذاری که منجر به وقوع اعوجاج پیشی در مقطع می‌شود در دورترین تارهای مقطع یک آرماتور نمره ۸ و در مجموع ۴ آرماتور مازاد نیز تعبیه شده تا خرابی پیش از موعد ناشی از پیشی در مقطع رخ ندهد. لذا با در نظر گرفتن مجموع ۲۰ آرماتور طولی استفاده شده در مقطع دیوار درصد آرماتورهای طولی ۱/۰۰ درصد و با توجه به فاصله مرکز به مرکز ۱۵۰ میلی‌متری آرماتورهای عرضی درصد این آرماتورها در مقطع ۰/۶۷ می‌باشد. همچنین آرماتورهای طولی و عرضی مقطع دیوار با عمق مناسب به داخل پی و تیر بارگذاری نفوذ کرده‌اند تا عملکرد یکپارچه بین اجزای نمونه فراهم شود.

بتن استفاده شده در این آزمایش با توجه به ضخامت کم دیوار و نیز جزئیات قابل‌ملاحظه در آرماتوربندی نمونه از نوع بتن خودتراکم<sup>۳۵</sup> بوده و طرح اختلاط نهایی با در نظر گرفتن مقاومت مشخصه اسمی ۴۵ مگاپاسکال می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش فشاری که در روز انجام آزمایش بر روی ۵ نمونه استوانه‌ای انجام گرفت و مقادیر مقاومت مشخصه بتن خودتراکم ۴۴/۴، ۴۶/۲، ۴۸/۷ و ۴۴/۱ و ۴۷/۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد که میانگین آن‌ها حدوداً ۴۶/۳ مگاپاسکال می‌باشد. شکل ۲ (الف) و (ب) به ترتیب نشانگر تصاویر آزمایش کشش مستقیم بر روی میلگردها و نیز آزمایش تعیین فشاری جهت مقاومت مشخصه بتن‌ها می‌باشد.

<sup>35</sup> Self-compacting concrete (SCC)



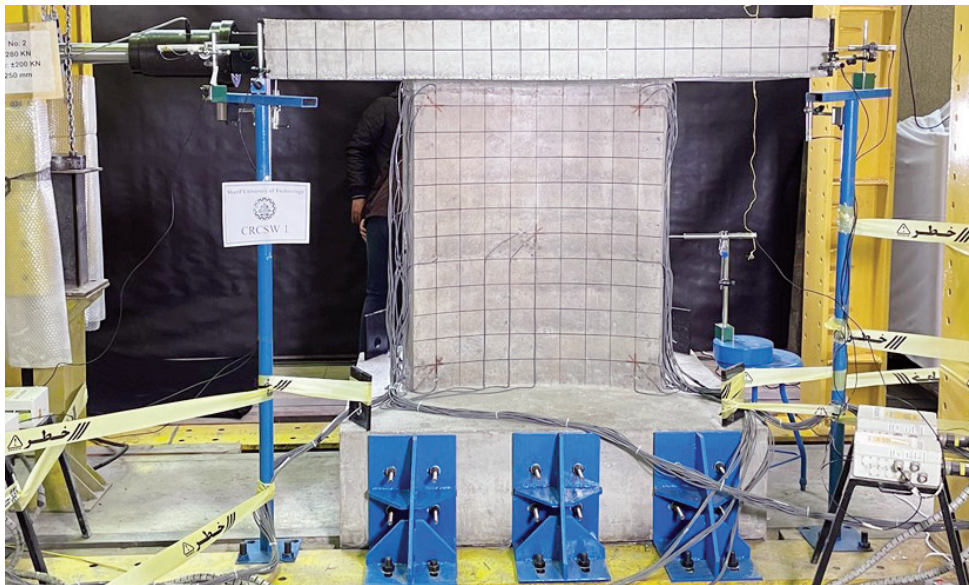
(ب) آزمایش فشاری



(الف) آزمایش کشش مستقیم

شکل ۲) تصاویر آزمایش جهت تعیین مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی و بتن خودتراکم

همچنین بارگذاری جانبی وارده به دیوار به صورت چرخه‌ای با افزایش دامنه جابجایی یک میلی‌متری و با دو تکرار در هر چرخه می‌باشد و مطابق با پژوهش‌های آزمایشگاهی مشابه انجام شده بر روی دیوارهای برشی غیرمستطیلی [۴۳] نرخ اعمال بارگذاری به صورت ثابت و ۵ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شده است. پس از اتمام فرایند ساخت نمونه نصب حسگرها و تجهیزات اندازه‌گیری داده‌ها شرایط برای انجام مطالعات آزمایشگاهی مهیا شد و شکل ۳ تصویر مربوط به چیدمان نهایی نمونه دیوار برشی بتنی مسلح خمیده را در روز آزمایش نشان می‌دهد.

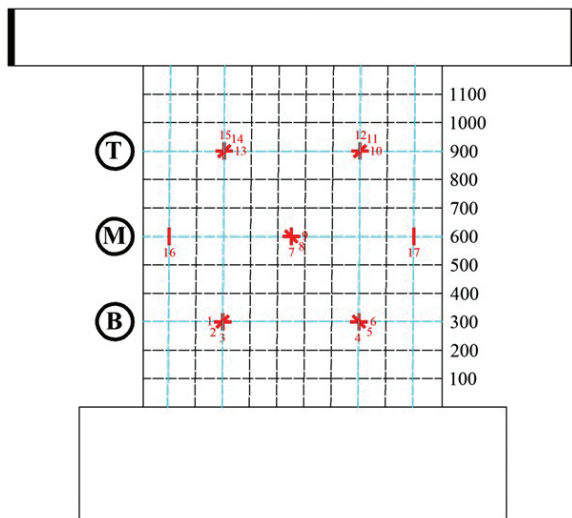


شکل ۳) چیدمان نهایی آزمایش

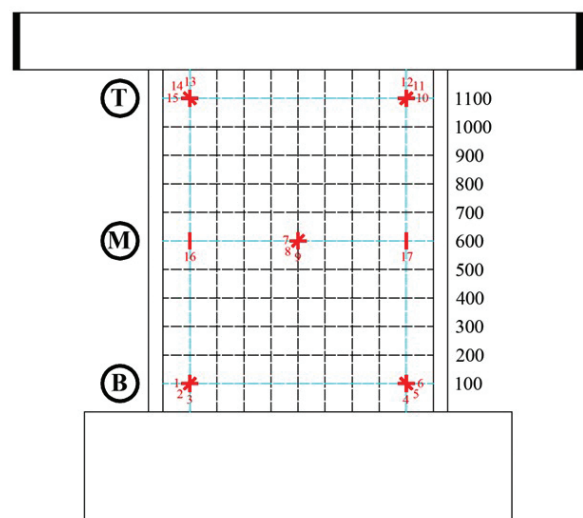
## ۲-۳- آرایش و نام‌گذاری کرنش‌سنج‌ها

در این آزمایش از ۱۰ کرنش‌سنج روزت<sup>۳۶</sup> که خود متشکل از سه کرنش‌سنج با راستای قرارگیری ۴۵، ۰ و ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر بوده به همراه ۴ کرنش‌سنج منفرد استفاده شده است. کرنش‌سنج‌های روزت در گوشه و مرکز پانل دیوار و کرنش‌سنج‌های منفرد در نواحی انتهایی و در تراز میانی ارتفاع دیوار تعبیه شده‌اند و در مجموع ۳۴ کرنش‌سنج (۱۷ کرنش‌سنج روی هر یک از سطوح داخلی و خارجی) بر روی سطح بتنی دیوار نصب شده تا بتوان برآوردی از روند و شدت ترک‌خوردگی در راستای مختلف دیوار بدست آورد. همچنین جانمایی محل نصب کرنش‌سنج‌ها بر اساس برآوردهای اولیه از نتایج مدل‌های اجزای محدود جهت مدل‌سازی دیوار خمیده تعیین شده است. به‌منظور سهولت در نصب کرنش‌سنج‌ها در موقعیت‌های از پیش تعیین‌شده روی بدنه دیوار خطوط مشبک افقی و قائم به ابعاد تقریبی ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر ترسیم شده است. با توجه به تعداد بالای کرنش‌سنج‌ها و تمایز بهتر در برداشت و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش ابتدا کرنش‌سنج‌ها مطابق شکل ۴ نام‌گذاری شدند.

کرنش‌سنج‌ها در سه تراز پایه (B) میانی (M) و فوقانی (T) در نمای داخل قوس دیوار (F) و خارج قوس دیوار (R) تعبیه شده‌اند و بسته به جانمایی برای هر کدام یک شماره اختصاص یافت. به عنوان مثال یکی از کرنش‌سنج‌های نصب‌شده در پای غربی داخل قوس دیوار با F-B-1 و کرنش‌سنج قطری تعبیه‌شده در مرکز نمای خارج قوس دیوار با R-M-8 نشان داده می‌شوند. لازم به ذکر است که در طی آزمایش ثبت و ذخیره‌سازی اطلاعات توسط دو دستگاه سیستم ثبت داده انجام شد و به‌منظور حصول اطمینان از عملکرد آن‌ها پیش از انجام آزمایش توسط متخصصین امر فرایند واسنجی آن‌ها صورت گرفته است.



(۲) نمای خارج قوس دیوار

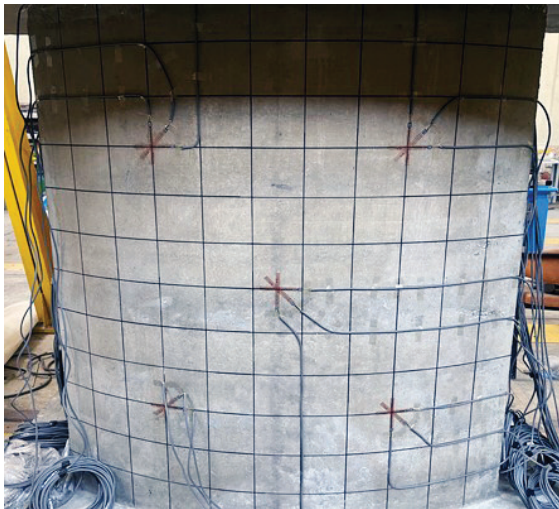


(۱) نمای داخل قوس دیوار

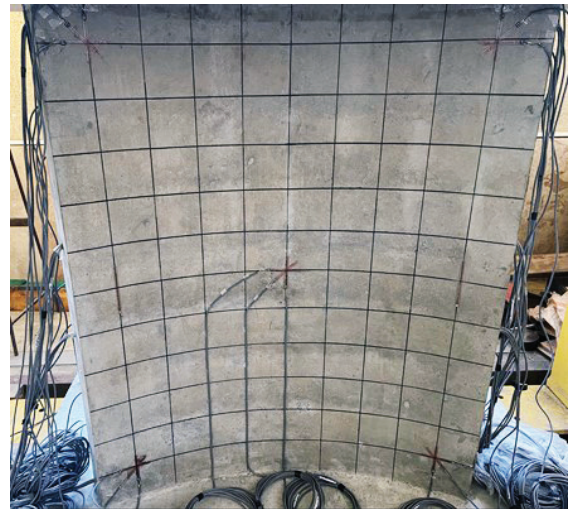
(الف) طرح شماتیک

<sup>36</sup> Rosette Strain Gauge





(۲) نمای خارج قوس دیوار



(۱) نمای داخل قوس دیوار

(ب) طرح اجرایی

شکل (۴) چیدمان و نحوه نامگذاری کرنش‌سنج‌ها

### ۳- یافته‌ها و مشاهدات آزمایشگاهی

انجام بارگذاری جانبی چرخه‌ای بر اساس جدول ۱ و در هشت گام تا رسیدن جابجایی جانبی هدف صورت گرفته که بیشینه جابجایی در هر گام بارگذاری به عنوان نماینده آن گام مد نظر قرار می‌گیرد. به‌منظور سهولت مقادیر جابجایی هدف به‌صورت جابجایی جانبی نسبی<sup>۳۷</sup> معرفی می‌شوند که نسبت به ارتفاع دیوار بی‌بعد شده است و جابجایی هدف ۲۶ میلی‌متر معادل جابجایی جانبی نسبی ۲/۰۰ درصد می‌باشد.

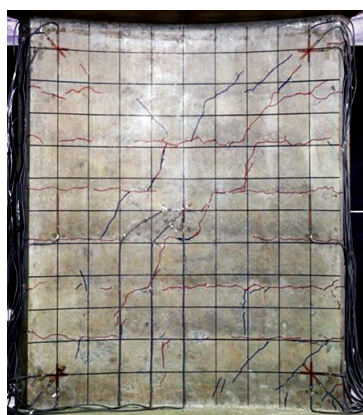
جدول ۱: تعریف مرحله‌بندی اعمال بارگذاری چرخه‌ای در مطالعات آزمایشگاهی دیوارهای برشی بتنی خمیده

شماره فاز	بازه جابجایی هدف (میلی‌متر)	جابجایی جانبی نسبی (درصد)	نماینده فاز (درصد)
۱	۵-۰	۰٫۳۸-۰	۰٫۳۸
۲	۸-۵	۰٫۶۲-۰٫۳۸	۰٫۶۲
۳	۱۱-۸	۰٫۸۵-۰٫۶۲	۰٫۸۵
۴	۱۴-۱۱	۱٫۰۸-۰٫۸۵	۱٫۰۸
۵	۱۷-۱۴	۱٫۳۱-۱٫۰۸	۱٫۳۱
۶	۲۰-۱۷	۱٫۵۴-۱٫۳۱	۱٫۵۴
۷	۲۳-۲۰	۱٫۷۷-۱٫۵۴	۱٫۷۷
۸	۲۶-۲۳	۲٫۰۰-۱٫۷۷	۲٫۰۰

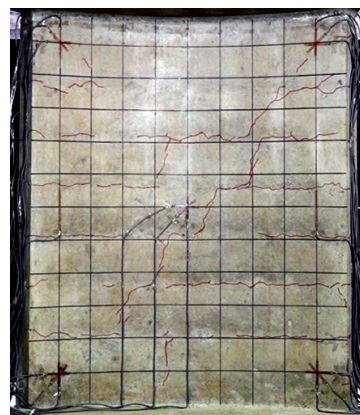
<sup>37</sup> Drift

به منظور ارزیابی روند رشد و گسترش ترک‌ها در طی فرایند بارگذاری جانبی وارده به دیوار در شکل‌های ۵ و ۶ (الف) تا (د) وضعیت ترک‌ها در نمای داخل و خارج قوس دیوار و در انتهای مرحله‌های اول سوم پنجم و هفتم نشان داده شده است. در این تصاویر ترک‌ها به ترتیب با رنگهای قرمز (مرحله‌های اول و دوم) آبی (مرحله‌های سوم و چهارم) سبز (مرحله‌های پنجم و ششم) و مشکی (مرحله‌های هفتم و هشتم) مشخص شده‌اند.

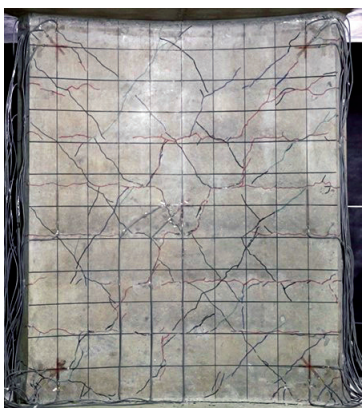
همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود الگوی کلی ترک‌ها در هر دو مرحله از بارگذاری در نمای داخل و خارج قوس تقریباً روند مشابه داشته و نسبت به خط میانی دیوار متقارن هستند. در گام‌های اول بارگذاری ترک‌ها عمدتاً به صورت افقی تشکیل شده و متأثر از لنگر خمشی و اعوجاج پیچشی هستند. این ترک‌ها توسط بزرگترین ترک‌های مورب که در راستای قطر دیوار تشکیل می‌شوند محدود شده‌اند. با اعمال بارگذاری جانبی ترک‌های برشی به صورت مورب و قطری روی بدنه دیوار تشکیل شده و راستای این میدانهای کششی تقریباً در قطر دیوار بوده و به تدریج سطوح داخلی و خارجی دیوار را فرا می‌گیرند. همچنین در جابجایی جانبی ۱/۲۳ درصد در فصل مشترک دیوار و پی لغزش<sup>۳۸</sup> رخ می‌دهد و پس از آن در نواحی مرزی پای دیوار ترک‌خوردگی بتن تشدید یافته و خردشدگی بتن را به همراه دارد. در نهایت خردشدگی بتن در نواحی مرزی آشکار شدن آرماتورهای طولی در دورترین تارهای مقطع و سپس کمانش و گسیختگی آن‌ها منجر به خرابی دیوار خمیده شده است.



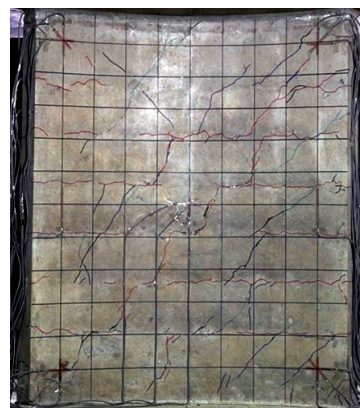
(ب) مرحله سوم (۰/۸۵ درصد)



(الف) مرحله اول (۰/۳۸ درصد)



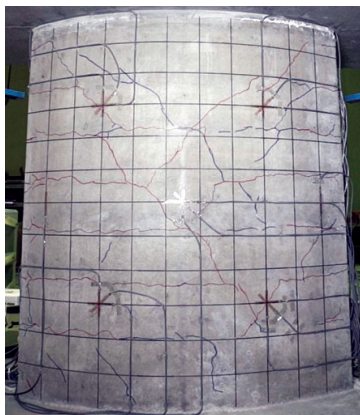
(د) مرحله هفتم (۱/۷۷ درصد)



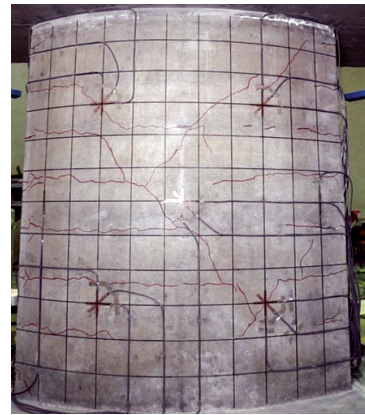
(ج) مرحله پنجم (۱/۳۱ درصد)

شکل ۵) الگوی ترک‌خوردگی در نمای داخل قوس دیوار خمیده در مراحل مختلف بارگذاری

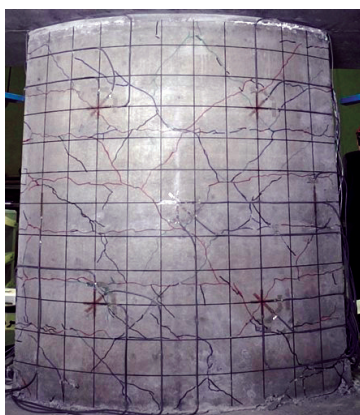
<sup>38</sup> Sliding



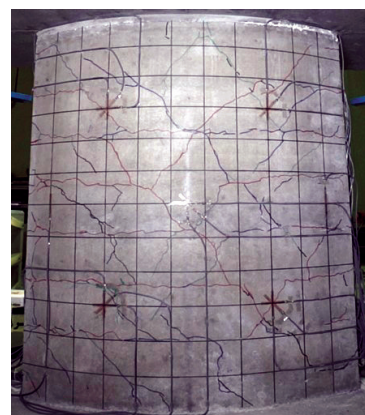
(ب) مرحله سوم (۰/۸۵ درصد)



(الف) مرحله اول (۰/۳۸ درصد)



(د) مرحله هفتم (۱/۷۷ درصد)

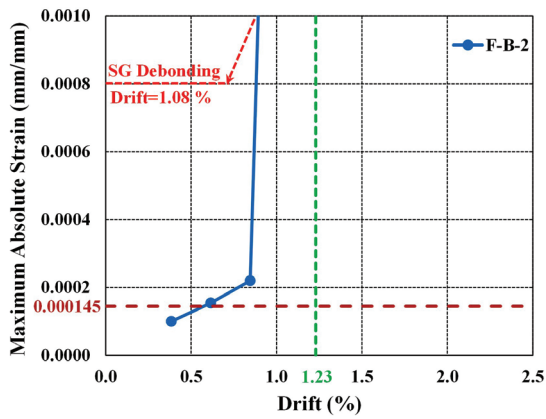


(ج) مرحله پنجم (۱/۳۱ درصد)

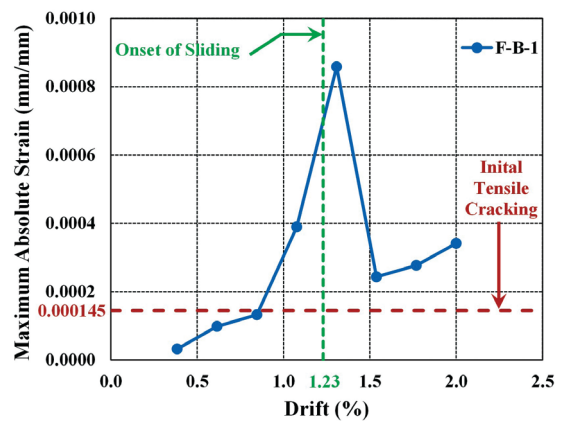
شکل ۶) الگوی ترک خوردگی در نمای خارج قوس دیوار خمیده در مراحل مختلف بارگذاری

همان‌طور که اشاره شد مقادیر اندازه‌گیری شده از کرنش سنج‌ها در هشت گام متوالی تعیین و مقدار بیشینه آن‌ها به عنوان نماینده پاسخ در هر گام مد نظر قرار گرفته و تغییرات آن با درصد جابجایی جانبی نسبی ترسیم شده است. در شکل‌های ۷ (۱) تا (۳۴) به منظور ارزیابی بهتر از نحوه تغییرات مقادیر کرنش خطوط مبنایی در تمامی نمودارها ترسیم شده که خط تیره افقی قرمز رنگ بیانگر کرنش ترک خوردگی معادل کرنش در لحظه شروع ترک خوردگی در سطوح پانل دیوار بوده که مقدار آن بر اساس آزمایش‌های کشش انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی ساخته شده ۱۴۵ میکرواسترین<sup>۱</sup> می‌باشد. همچنین خط تیره سبز رنگ و قائم نشانگر شروع وقوع لغزش در فصل مشترک پی و دیوار بوده که در جابجایی جانبی نسبی ۱/۲۳ درصد رخ داده است.

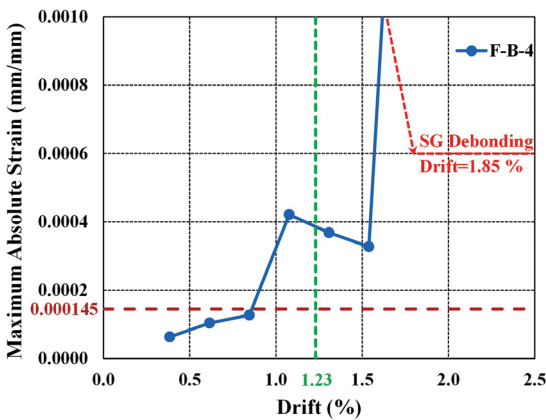
<sup>۱</sup> Microstrain ( $\mu s$ )



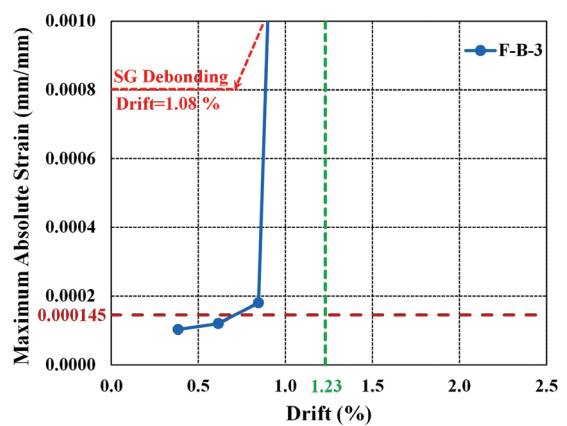
F-B-2 (۲)



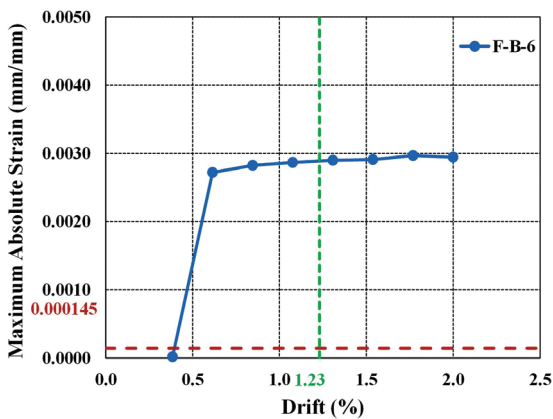
F-B-1 (۱)



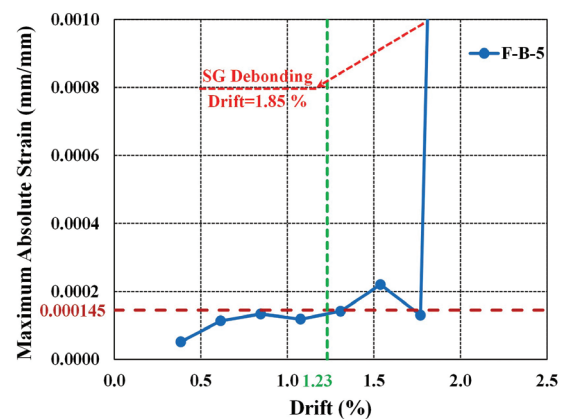
F-B-4 (۴)



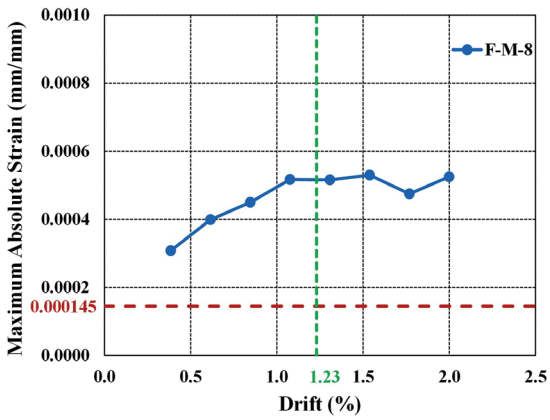
F-B-3 (۳)



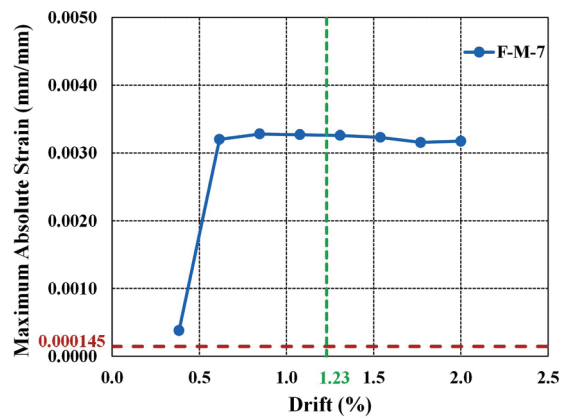
F-B-6 (۶)



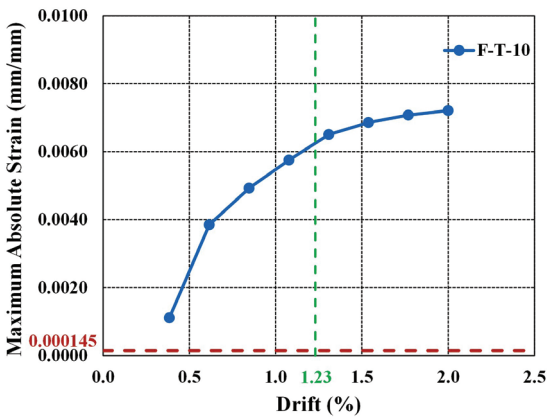
F-B-5 (۵)



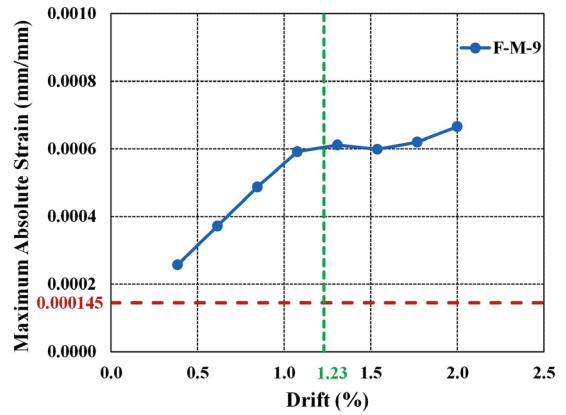
F-B-8 (A)



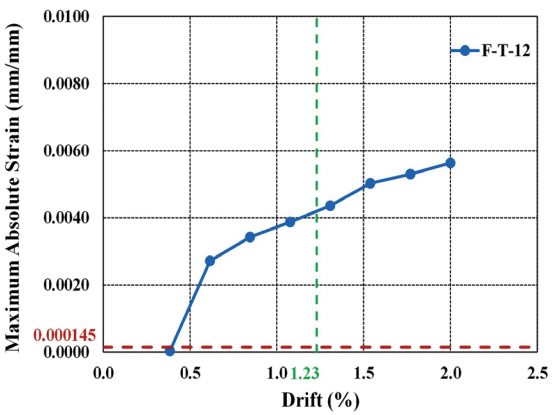
F-B-7 (V)



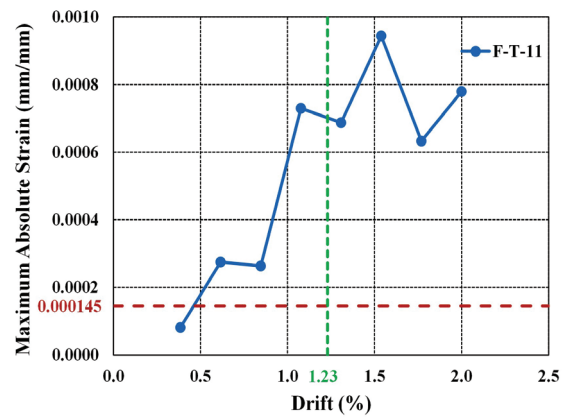
F-B-10 (10)



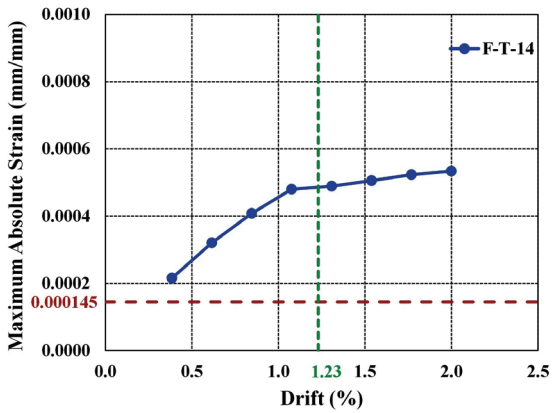
F-B-9 (9)



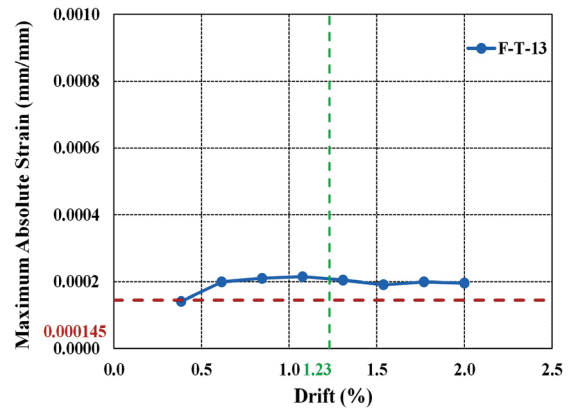
F-B-12 (12)



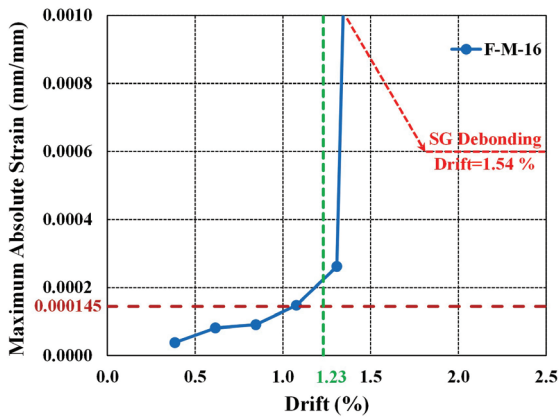
F-B-11 (11)



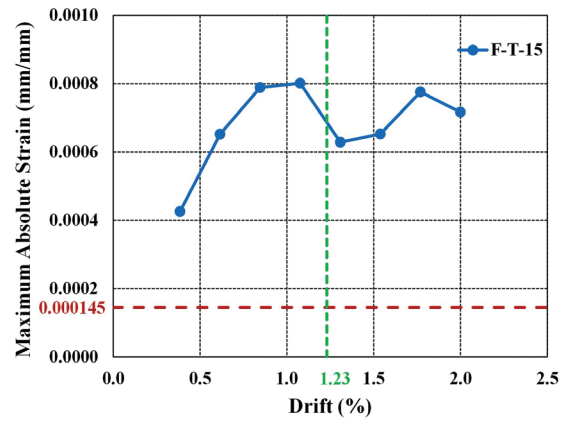
F-B-14 (۱۴)



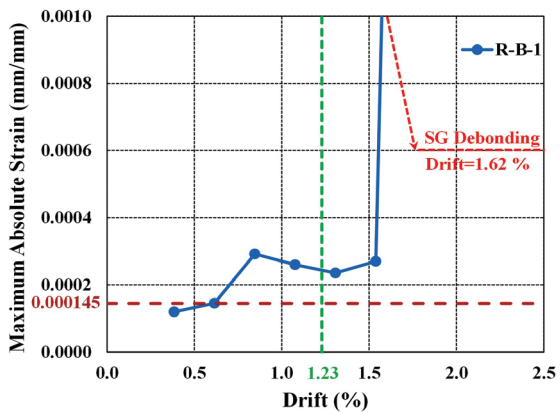
F-B-13 (۱۳)



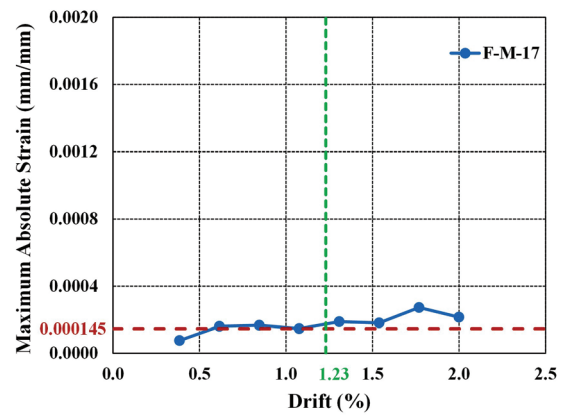
F-B-16 (۱۶)



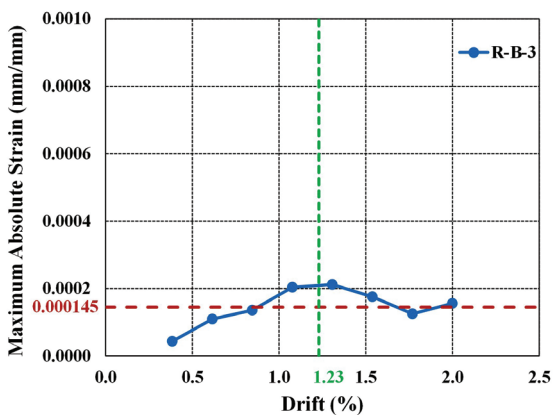
F-B-15 (۱۵)



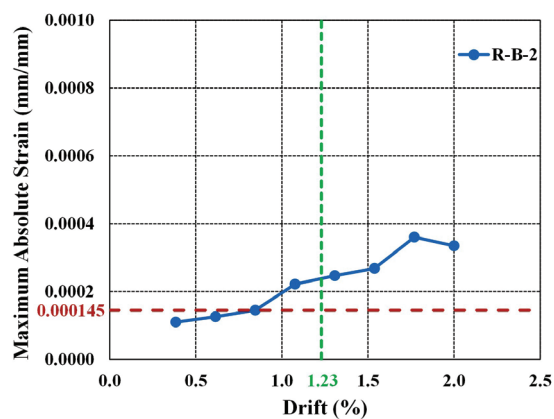
F-B-18 (۱۸)



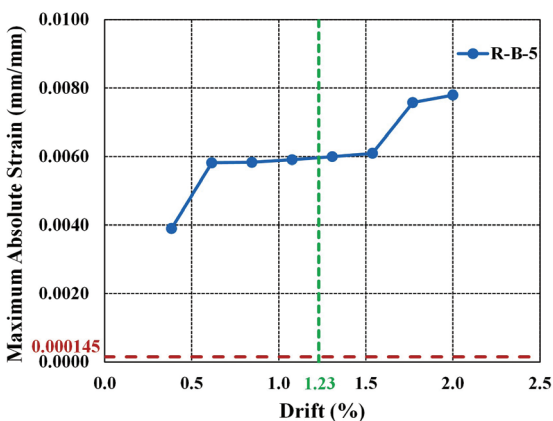
F-B-17 (۱۷)



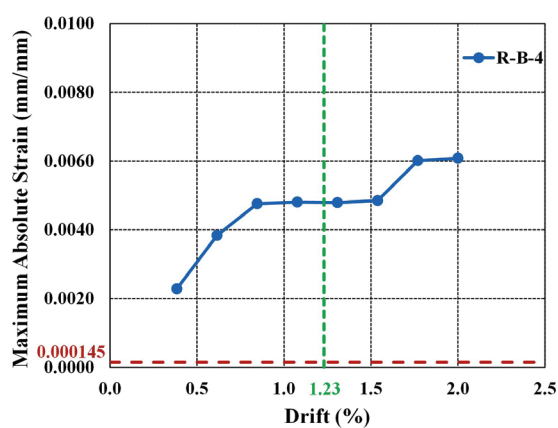
F-B-20 (۲۰)



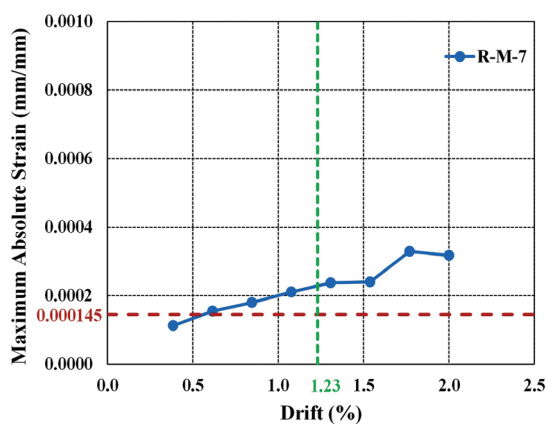
F-B-19 (۱۹)



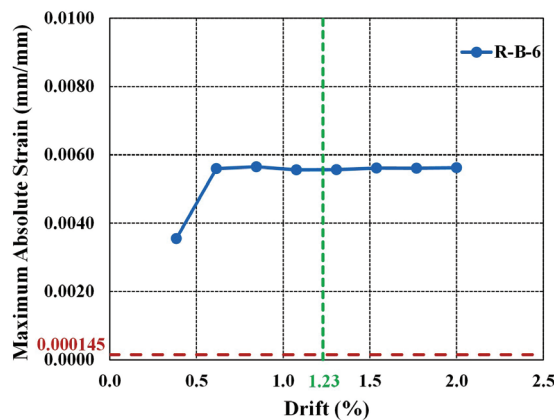
F-B-22 (۲۲)



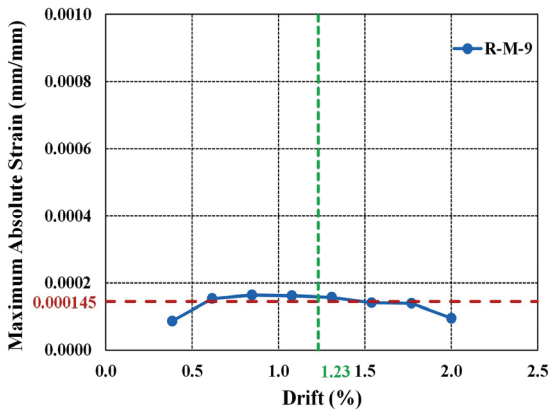
F-B-21 (۲۱)



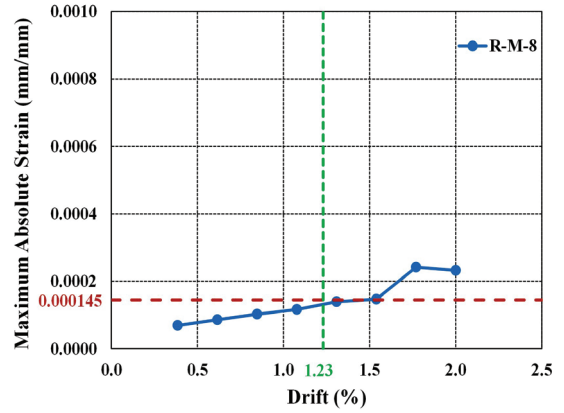
F-B-24 (۲۴)



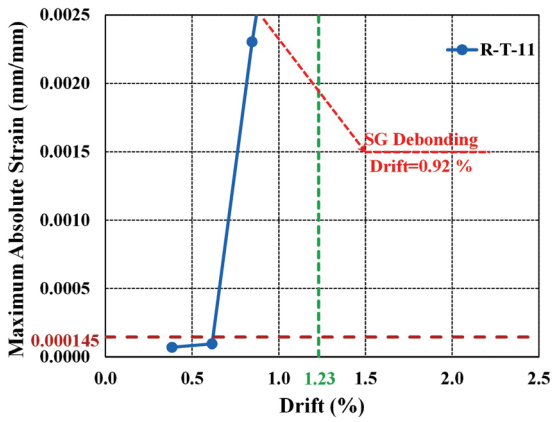
F-B-23 (۲۳)



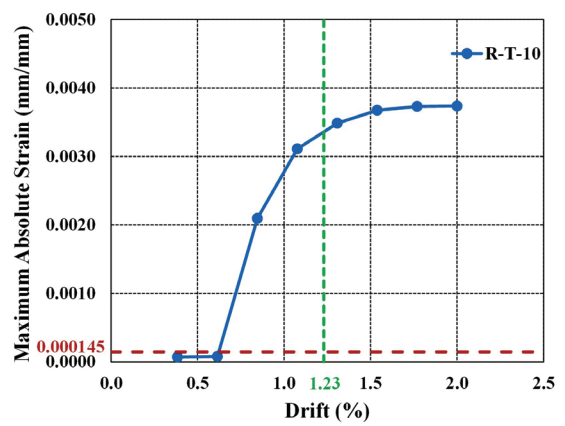
F-B-26 (۲۶)



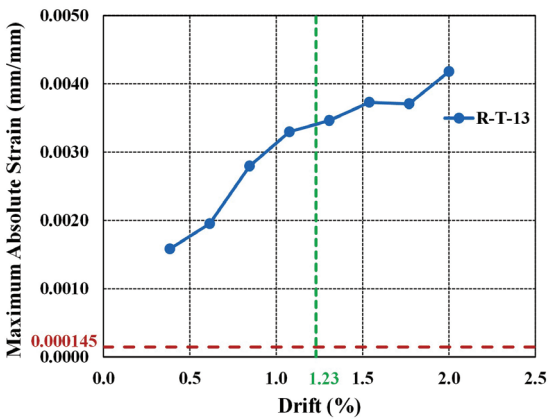
F-B-25 (۲۵)



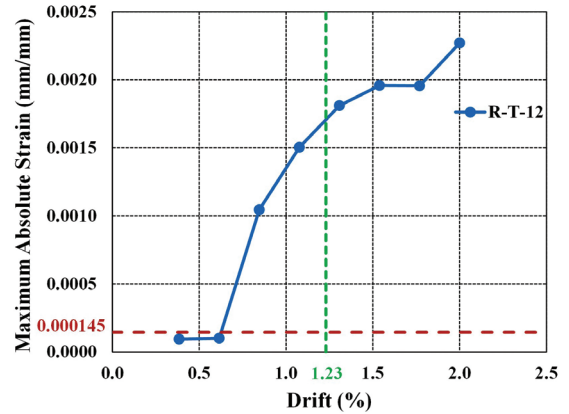
F-B-28 (۲۸)



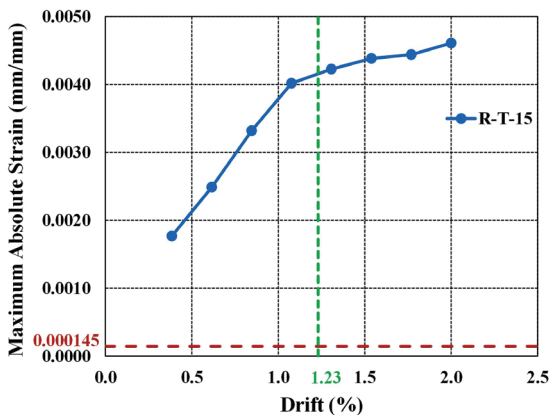
F-B-27 (۲۷)



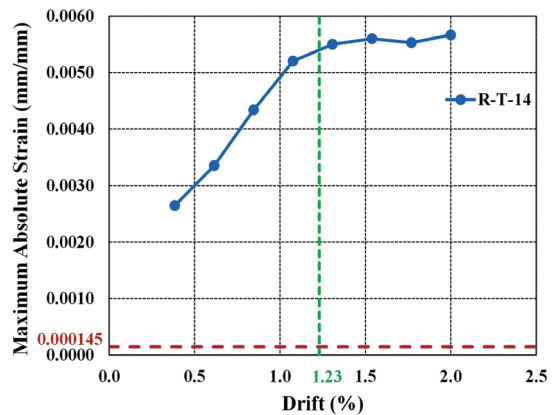
F-B-30 (۳۰)



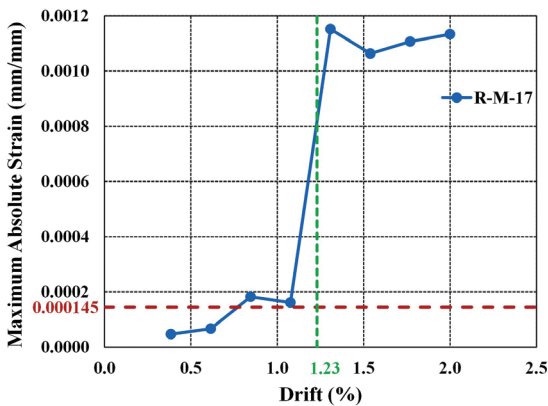
F-B-29 (۲۹)



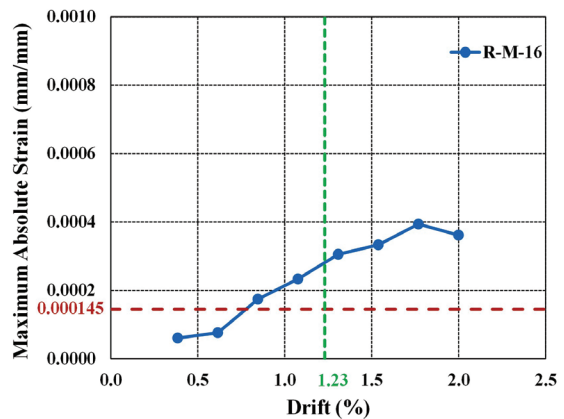
F-B-32 (۳۲)



F-B-31 (۳۱)



F-B-34 (۳۴)



F-B-33 (۳۳)

شکل ۷) نتایج حاصل از کرنش‌سنج‌های نصب‌شده بر روی سطوح بتنی دیوار به ازای تغییرات جابجایی جانبی نسبی.

همان‌طور که اشاره شد نتایج حاصل از مقادیر ثبت‌شده از کرنش‌سنج‌هایی که بر روی سطوح داخلی و خارجی بدنه دیوار خمیده نصب شده‌اند ارائه گردید. در برخی از موارد مانند نتایج کرنش‌سنج‌های F-B ۵-F-B-2 R-B ۱-F-B-2 R-T-11 و سایر کرنش‌سنج‌ها به دلیل شدت ترک‌خوردگی و خردشدگی بتنی و نیز عمق زیاد ترک‌ها که به‌صورت موضعی و در محل نصب برخی از کرنش‌سنج‌ها مشاهده گردید منجر به جدایی کرنش‌سنج‌ها از بدنه دیوار جدا شده و از روند ثبت و اندازه‌گیری داده‌ها حذف می‌شوند. در این راستا و به‌منظور تأکید عبارت SG Debonding با رنگ قرمز در نمودارها درج شده که به معنی جداسازی کرنش‌سنج می‌باشد و درصد جابجایی جانبی نسبی متناظر با وقوع آن نیز تعیین شده که هر یک می‌تواند مقارن با یک مرحله کلیدی در عملکرد سازه و روند تشکیل و گسترش ترک‌ها باشد. بخش مهمی از مشاهدات حاصل از نتایج آزمایشگاهی به‌شرح زیر می‌باشد:

● با توجه به اضافه شدن اعوجاج پیچشی که متأثر از خروج از مرکزیت محل اعمال بار جانبی (مرکز سطح مقطع دیوار) تا مرکز برش مقطع دیوار خمیده بوده به لنگر خمشی وارده به دیوار به‌ویژه در اوایل بارگذاری کرنش‌سنج‌های در معرض ترک‌های افقی دیوار که

در تراز آرماتورهای عرضی رخ داده است مقادیر بیشتری نسبت به سایر کرنش‌سنج‌ها نشان می‌دهند. بر اساس مشاهدات صورت گرفته این ترک‌ها به صورت سطحی و با عمق نفوذ کم بوده و به درون ناحیه محصورشدگی بتن ناشی از حضور آرماتورهای عرضی نفوذ نکرده است. همچنین این ترک‌ها که در بیرونی‌ترین بخش‌های مقطع دیوار تشکیل شده‌اند ناشی از مؤلفه تنش‌های کششی‌ای متأثر از اعوجاج پیچشی بوده که در دورترین تارهای مقطع اتفاق می‌افتد.

● بیشترین مقدار کرنش اندازه‌گیری شده مربوط به کرنش‌سنج R-B-5 بوده و مطابق نقشه جانمایی کرنش‌سنج‌ها در نمای عقب دیوار به صورت قطری (راستای ۴۵ درجه نسبت به محور طولی دیوار) تعبیه شده و حدود ۷۸۰۰ میکرواسترین را تجربه می‌کند. ترک قطری عبوری از مرکز روزت نصب شده در محل فوق و چسبندگی خوب کرنش‌سنج به سطح بتن که بسیار صیقلی و فاقد هرگونه تخلخل است منجر به عدم جداسدگی و یا تأخیر در جداسدگی و به تبع آن سالم ماندن کرنش‌سنج شده است.

● با افزایش جابجایی جانبی نسبی وارده به دیوار نقش ترک‌های قطری که ماهیت برشی دارند و در عمق مقطع تشکیل می‌شوند پررنگتر می‌شود. ترک‌های سطحی‌ای که در بدنه دیوار خمیده ایجاد شده‌اند بیشتر متأثر از لنگر خمشی و اعوجاج پیچشی هم‌زمان بوده و خردشدگی پوشش بتن را به همراه نداشته است. همچنین سایر کرنش‌سنج‌های نصب شده در این محل (R-B-4 و R-B-6) نیز کرنش بالایی را در حدود ۶۰۰۰ میکرواسترین تجربه کرده‌اند. با توجه به عبور با فاصله مسیر گسترش ترک از محل تعبیه کرنش‌سنج نظیر کرنش‌سنج‌های فوق مقادیر کرنش کمتری در کرنش‌سنج‌های R-B-1، R-B-2 و R-B-3 ثبت شده است.

● تفاوت مقادیر کرنش‌سنج‌های مشابه که نسبت به مرکز دیوار به صورت متقارن نصب شده‌اند متأثر از موقعیت ترک‌های تشکیل شده عبوری از حوالی محل نصب کرنش‌سنج‌ها می‌باشد. به عنوان مثال وقوع ترک برشی قطری در جابجایی جانبی نسبی حدود ۰٫۶۲ درصد منجر به ایجاد کرنش قابل ملاحظه در کرنش‌سنج F-T-12 شده است. این در حالی است که برای کرنش‌سنج نظیر آن در سمت مقابل دیوار یعنی F-T-13 به دلیل دور بودن ترک‌ها از محل نصب کرنش‌سنج مقادیر کمتری از کرنش ثبت شده است. با این وجود این کرنش‌سنج مقدار کرنش در بازه ۱۴۰ تا حدود ۲۰۰ میکرواسترین را تجربه کرده که متأثر از ترک قطری عبوری از مجاورت آن بوده و مطابقت خوبی با کرنش ترک خوردگی بتن نمونه دیوار ۱۴۵ میکرواسترین دارد. چرا که ترک‌های مویی در سطح بتن خصوصاً در نواحی فوقانی دیوار که دیوار لنگر خمشی کمتری را تجربه میکند پدیدار شده است.

● با توجه به وقوع گسترده خرابی در نواحی ابتدایی و انتهایی پای دیوار کرنش‌سنج‌های نصب شده در این محل و در نمای روبروی دیوار دچار مانند F-B-2 و F-B-3 جداسدگی پیش از موعد از سطح بتن شده و مقادیر کرنشی در حدود ۱۸۰ تا ۲۲۰ میکرواسترین را ثبت نمودند.

● کرنش‌سنج‌هایی که در تراز میانی و در نواحی انتهایی دیوار نصب شده‌اند (با کدهای عددی ۱۶ و ۱۷) بیشتر در معرض ترک‌های افقی ناشی از اعوجاج پیچشی قرار دارند و ترک‌های مورب در مجاورت آن‌ها مشاهده نشده است.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه مطالعات بسیار محدودی پیرامون عملکرد چرخه‌ای دیوارهای برشی بتنی خمیده وجود دارد. لذا مبنایی جهت مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات موجود در ادبیات فنی وجود ندارد. لذا با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بیشتر و یا با انجام مطالعات عددی می‌توان شناخت جامعتری نسبت به عملکرد دیوارهای برشی خمیده فراهم نمود.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش آزمایشگاهی تعیین روند توسعه و توزیع کرنش در سطوح داخلی و خارجی پانل یک دیوار برشی بتنی مسلح خمیده تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. ابتدا یک نمونه در مقیاس تقریبی یک‌سوم طراحی و ساخته شد و سپس در معرض

بارگذاری جانبی چرخه‌ای و در غیاب بار محوری تا جابجایی جانبی نسبی هدف ۲ درصد قرار گرفت. بر روی هر یک از سطوح داخلی و خارجی بدنه دیوار ۱۷ کرنش‌سنج و در مجموع ۳۴ کرنش‌سنج بر روی سطوح بتنی در نواحی از پیش تعیین شده نصب و بیشینه مقادیر کرنش در هر گام از بارگذاری اندازه‌گیری و ثبت گردید. سپس روند تغییرات کرنش از لحظه اعمال بارگذاری تا وقوع خرابی بر حسب درصد جابجایی جانبی هدف ترسیم شد. در مجموع شدت مقادیر اندازه‌گیری شده متأثر از جانمایی کرنش‌سنج روی بدنه دیوار و مسیر نزدیکترین ترک یا ترک‌های افقی مورب و در برخی موارد قائم عبوری از مجاورت آن است.

نتایج ثبت شده از آزمایش نشان می‌دهد که ابتدا ترک‌های افقی متأثر از لنگر خمشی و اعوجاج پیچشی در بدنه دیوار تشکیل شده و سپس ترک‌های قطری و ضربدری شکل با ماهیت سازوکار خرابی برشی می‌باشد. همچنین با افزایش بارگذاری جانبی وارده به سازه خرابی در نواحی ابتدایی و انتهایی پای دیوار تشدید شد و خردشدگی بتن در این نواحی را به همراه داشت که منجر به جداسازی کرنش‌سنج‌های تعبیه شده در تراز پای دیوار می‌باشد. همچنین حداکثر مقدار کرنش اندازه‌گیری شده در دیوار خمیده در نمای خارج قوس و در تراز پای دیوار بوده و مقدار آن نزدیک به ۸۰۰۰ میکرواسترین می‌باشد.

با توجه به اینکه تاکنون دیوارهای برشی خمیده از منظر معماری و زیبایی‌شناختی مورد توجه بوده‌اند و نیز اطلاعات و مشاهدات آزمایشگاهی مدونی پیرامون رفتار سازه‌های آن‌ها در ادبیات فنی وجود ندارد لذا مستندات ارائه شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی جهت برآورد عملکرد این دیوارها از نقطه نظر تحلیل و طراحی سازه‌ها باشد.

## ۵- تشکر و قدردانی

برنامه مطالعه آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه دینامیک سازه کف قوی دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است و نگارندگان کمال تشکر و قدردانی را از مدیریت آزمایشگاه و کارشناسان مسئول آن دارند.

## ۶- مراجع

- [1] *Abdoos H, Khaloo AR, Foyouzat MA. On the out-of-plane dynamic response of horizontally curved beams resting on elastic foundation traversed by a moving mass. J Sound Vib 2020;115397.*
- [2] *Foyouzat MA, Abdoos H, Khaloo AR, Mofid M. In-plane vibration analysis of horizontally curved beams resting on visco-elastic foundation subjected to a moving mass. Mech Syst Signal Process 2022;172:109013.*
- [3] *Khaloo AR, Foyouzat MA, Abdoos H, Mofid M. Axial force contribution to the out-of-plane response of horizontally curved beams under a moving mass excitation. Appl Math Model 2023;115:148–72. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.10.047>.*
- [4] *Abdoos H, Khaloo AR. Failure mechanism of a curved RC shear wall subjected to cyclic loading: Experimental findings. Eng Struct 2024;304:117703. <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2024.117703>.*
- [5] *Abdoos H, Foyouzat MA, Khaloo AR. Parametric study on the dynamics of horizontally curved beams due to a moving inertial load considering the induced torsional moment. J Struct Constr Eng 2023. <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368612.2964>.*
- [6] *Alaghmandan M, Bahrami P, Elnimeiri M. The future trend of architectural form and structural system in high-rise buildings. Archit Res 2014;4:55–62.*
- [7] *Shi Q, Wang B. Simplified calculation of effective flange width for shear walls with flange.*

*Struct Des Tall Spec Build* 2016;25:558–77.

[8] Ni X, Cao S. Shear lag analysis of I-shaped structural members. *Struct Des Tall Spec Build* 2018;27:e1471.

[9] Lu N, Li W. Analytical Study on the Effective Flange Width for T-shaped Shear Walls. *Period Polytech Civ Eng* 2020;64:253–64.

[10] Tabiee M, Abdoos H, Khaloo A, Kavei S. Effective width estimation of flanged reinforced concrete shear walls. *Struct Des Tall Spec Build* 2023. <https://doi.org/10.1002/TAL.2057>.

[11] Khaloo A, Abdoos H, Tabiee M. A Novel Approach to the Parametric Study on the Effective Flange Width of Non-Rectangular Reinforced Concrete Shear Walls. *J Concr Struct Mater* 2021;6:138–61.

[12] Khaloo, A. R., Tabiee, M, Abdoos H. Analytical study of distribution of shear lag-induced stress in non-rectangular reinforced concrete shear walls, 12th international congress on civil engineering, Mashhad, Iran. [In Persian]; 2021, p. 8.

[13] Khaloo AR, Tabiee M, Abdoos H. Shear lag effect on non-rectangular RC shear walls: a review of the literature. 7th Int. Congr. Civ. Eng. Archit. urban Dev. Tehran, Iran, 2021, p. 11.

[14] Khaloo A, Tabiee M, Abdoos H. A Numerical Laboratory for Simulation of Flanged Reinforced Concrete Shear Walls. *J Numer Methods Civ Eng* 2022;6:92–102.

[15] Tabiee M, Abdoos H, Khaloo A. Investigation of the shear-lag effects on the response of L-shaped RC shear walls. *J Struct Constr Eng* 2023. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.340500.2804>.

[16] Abdoos H, Khaloo A, Tabiee M. Effective width estimation of L-shaped RC shear walls using EPR algorithm. *Sharif J Civ Eng* 2023.

[17] Tabiee M, Abdoos H, Khaloo A. Concurrent effects of the shear-lag and warping torsion on the performance of non-rectangular RC shear walls. *Arch Civ Mech Eng* 2023;23:138.

[18] Hoult RD. Shear lag effects in reinforced concrete C-shaped walls. *J Struct Eng* 2019;145:4018270.

[19] Zhang Z, Luo D, Li B. Strain Nonlinearity and Shear Lag Effect in Compressive Flange of Reinforced Concrete Structural Walls. *ACI Struct J* 2021;118.

[20] Gulec CK, Whittaker AS, Stojadinovic B. Peak shear strength of squat reinforced concrete walls with boundary barbell or flanges. *ACI Struct J* 2009;106:368.

[21] Luna B, Whittaker A, Rivera J. Seismic behavior of low aspect ratio reinforced concrete shear walls 2013.

[22] Grammatikou S, Biskinis D, Fardis MN. Strength, deformation capacity and failure modes of RC walls under cyclic loading. *Bull Earthq Eng* 2015;13:3277–300.

[23] Abdullah SA, Wallace JW. UCLA-RCWalls Database for Reinforced Concrete Structural Walls. Proc. 11th Natl. Conf. Earthq. Eng., 2018.

[24] Abdoos H, Khaloo A, Tabiee M. An analytical investigation into the lateral load response of curved RC shear walls. *Struct Des Tall Spec Build* 2024. <https://doi.org/10.1002/TAL.2097>.

[25] Barda F. Shear strength of low-rise walls with boundary elements. Lehigh University; 1972.

[26] Oesterle RG, Arišizabal-Ochoa JD, Fiorato AE, Russell HG, Corley WG. Earthquake resistant structural walls-tests of isolated walls-phase II. *Constr Technol Lab Portl Cem Assoc* 1979.

[27] Goodsir WJ. The design of coupled frame-wall structures for seismic actions 1985.

- [28] Thomsen JH, Wallace JW. *Displacement-based design of RC structural walls: an experimental investigation of walls with rectangular and T-shaped cross-sections*. Clarkson University, Department of Civil Engineering; 1995.
- [29] Maruta M, Suzuki N, Miyashita T, Nishioka T. *Structural capacities of H-shaped RC core wall subjected to lateral load and torsion*. *Proc 12th WCEE New Zeal New Zeal Soc Earthq Eng* 2000;1028.
- [30] Palermo D, Vecchio FJ, Solanki H. *Behavior of three-dimensional reinforced concrete shear walls*. *ACI Struct J* 2002;99:81–9.
- [31] Choi C-S, Ha S-S, Lee L-H, Oh Y-H, Yun H-D. *Evaluation of deformation capacity for RC T-shaped cantilever walls*. *J Earthq Eng* 2004;8:397–414.
- [32] Beyer K, Dazio A, Priestley MJN. *Quasi-static cyclic tests of two U-shaped reinforced concrete walls*. *J Earthq Eng* 2008;12:1023–53.
- [33] Hosaka G, Funaki H, Hosoya H, Imai H. *Experimental study on structural performance of RC shear wall with L shaped section*. *Proceedings, 14th World Conf. Earthq. Eng. Beijing, China, 2008*.
- [34] Inada K, Chosa K, Sato H, Kono S, Watanabe F. *Seismic performance of RC L-shaped core structural walls*. *14th world Conf. Earthq. Eng., 2008*.
- [35] Kono S, Sakamoto K, Sakashita M. *Simulation of seismic load resistance of core-walls for tall buildings*. *Appl. Mech. Mater.*, vol. 82, *Trans Tech Publ*; 2011, p. 386–91.
- [36] Li W, Li Q. *Seismic performance of l-shaped rc shear wall subjected to cyclic loading*. *Struct Des Tall Spec Build* 2012;21:855–66.
- [37] Brueggen BL, French CE, Sritharan S. *T-shaped RC structural walls subjected to multidirectional loading: test results and design recommendations*. *J Struct Eng* 2017;143:4017040.
- [38] Ma J, Li B. *Experimental and Analytical Studies on H-Shaped Reinforced Concrete Squat Walls*. *ACI Struct J* 2018;115.
- [39] Han X, Chen B, Ji J, Xie S, Lu H. *Deformation limits of L-shaped reinforced concrete shear walls: Experiment and evaluation*. *Struct Des Tall Spec Build* 2019;28:e1627.
- [40] Behrouzi AA, Mock A, Lehman D, Lowes L, Kuchma D. *Seismic Performance of Slender C-Shaped Walls Subjected to UniI-and Bi-Directional Loading*. *Elev. US Natl. Conf. Earthq. Eng. Proc.*, 2018.
- [41] Behrouzi AA, Mock AW, Lehman DE, Lowes LN, Kuchma DA. *Impact of bi-directional loading on the seismic performance of C-shaped piers of core walls*. *Eng Struct* 2020;225:111289.
- [42] Wang B, Wu M-Z, Shi Q-X, Cai W-Z. *Seismic performance of flanged RC walls under biaxial cyclic loading*. *J Build Eng* 2022:105632.
- [43] Hube MA, María HS, Arroyo O, Vargas A, Almeida J, López M. *Seismic performance of squat thin reinforced concrete walls for low-rise constructions*. *Earthq Spectra* 2020;36:1074–95.