

## A Review Study on the Shear Performance of Joints in Precast Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Reinforced Bridge Components

Gholamreza Havaei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Precast concrete bridges with ultra-high-performance concrete (UHPC) are among the most promising structural systems due to their high potential for application in advanced philosophies such as green and intelligent construction technology, industrialization, prefabrication, and automation. The joints, where precast segments are connected, play a significant role in the construction and structural performance of precast UHPC bridges. This study reviews the state-of-the-art knowledge on the shear behavior of UHPC joints, which includes the following aspects: (1) introduction of joints in precast UHPC bridges, including their role, types, experimental methods, and typical shear responses; (2) development of the experimental database of push-off tests conducted on UHPC joints; (3) discussion of the influence of critical factors (e.g., UHPC strength, joint type, confining stress, fiber characteristics, and shear key design) on the shear behavior of UHPC joints; (4) summary and evaluation of current analytical models and formulas for predicting the shear resistance of UHPC joints; and (5) identification of current challenges and recommendations for future research directions for UHPC joints. This review aims to provide a comprehensive understanding of the shear performance of UHPC joints and facilitate the research and application of UHPC structures.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 April 2023

**Revise Date:** 20 July 2023

**Accept Date:** 31 July 2023

### Keywords:

Precast Bridges  
Concrete Bridges  
Joint Shear  
Concrete Joints

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525684.3734>

\*Corresponding author: Gholamreza Havaei

Email address: [havaei@aut.ac.ir](mailto:havaei@aut.ac.ir)

## مطالعه مروری عملکرد برشی اتصالات در قطعات پل‌های پیش‌ساخته با بتن فوق توانمند مسلح

غلامرضا هوائی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

پل‌های بتنی پیش‌ساخته با بتن فوق توانمند (بتن فوق توانمند) از جمله سیستم‌های ساختاری بسیار امیدوارکننده به شمار می‌آیند، به دلیل پتانسیل بالای آن‌ها برای کاربرد در فلسفه‌های پیشرفته‌ای مانند فناوری ساخت سبز و هوشمند، صنعتی‌سازی، پیش‌ساختگی و اتوماسیون. مفاصل، جایی که قطعات پیش‌ساخته به هم متصل می‌شوند، نقش قابل توجهی در ساخت و عملکرد ساختاری پل‌های بتنی پیش‌ساخته با بتن فوق توانمند دارند. این مطالعه به بررسی دانش روز در مورد رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند می‌پردازد که شامل جنبه‌های زیر است: (۱) معرفی مفاصل در پل‌های بتنی پیش‌ساخته، از جمله نقش آن‌ها، انواع، روش‌های تجربی و پاسخ‌های معمول برشی؛ (۲) توسعه پایگاه داده تجربی از آزمایش‌های فشار بر مفاصل بتن فوق توانمند؛ (۳) بحث در مورد تأثیر عوامل بحرانی (مانند مقاومت بتن فوق توانمند، نوع مفصل، فشار محصورکننده، ویژگی‌های الیاف و طراحی کلید برشی) بر رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند؛ (۴) خلاصه و ارزیابی مدل‌ها و فرمول‌های تحلیلی موجود برای پیش‌بینی مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند؛ و (۵) شناسایی چالش‌های موجود و پیشنهادات جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده برای مفاصل بتن فوق توانمند. این مرور به منظور درک جامع از عملکرد برشی مفاصل بتن فوق توانمند و تسهیل تحقیق و کاربرد سازه‌های بتن فوق توانمند انجام شده است.

کلمات کلیدی: پل‌های پیش‌ساخته، پل بتنی، برش، اتصالات بتنی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525684.3734">https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525684.3734</a>	۱۴۰۲/۰۸/۳۰	۱۴۰۲/۰۵/۰۹	۱۴۰۲/۰۵/۰۹	۱۴۰۲/۰۴/۲۹	۱۴۰۲/۰۲/۰۳
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525684.3734">10.22065/jsce.2025.525684.3734</a>	غلامرضا هوائی				*نویسنده مسئول:
<a href="mailto:havaei@aut.ac.ir">havaei@aut.ac.ir</a>					پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای (PCSBs) به دلیل پیشرفت‌های فناوری پیش‌تندگی و روش‌های ساخت به یکی از انواع پرترفدار پل‌ها تبدیل شده‌اند. این پل‌ها مزایای زیادی دارند، از جمله سرعت بالاتر در ساخت، کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، تضمین کیفیت بتن‌ریزی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها. با این حال، دوام پایین بتن معمولی (NC) می‌تواند منجر به پیری و تخریب ساختاری شود که باعث نیاز به تعمیرات پرهزینه می‌شود. علاوه بر این، مقاومت پایین بتن معمولی منجر به سنگین‌تر شدن عناصر ساختاری می‌شود که باعث محدود شدن دهانه پل‌ها و نیاز به تجهیزات ساخت بزرگتر می‌شود. این معایب ویژگی‌های مواد مانع توسعه پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای و سازه‌های بتن معمولی می‌شود. برای رفع این چالش‌ها، محققان به طور مداوم در حال توسعه مواد ساخت جدید با عملکردهای بهبود یافته هستند.

بتن فوق توانمند (بتن فوق توانمند) به عنوان یک ماده ساخت پیشرفته با ویژگی‌های مکانیکی برتر مانند مقاومت بالا و دوام خوب ظاهر شده است. مطالعات زیادی برای بررسی رفتار خمشی، برشی، پیچشی و دینامیکی انواع مختلف قطعات بتن فوق توانمند، از جمله تیرها، ستون‌ها، دک‌ها و مفاصل انجام شده است. بر اساس این تحقیقات، بتن فوق توانمند به تدریج در سازه‌های مختلف از جمله پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان‌ها استفاده شده است. به طور چشمگیری، انقباض بتن که تأثیر زیادی بر رفتار بلندمدت سازه‌های بتن معمولی دارد، می‌تواند پس از درمان حرارتی در سازه‌های بتن فوق توانمند از بین برود. بتن فوق توانمند می‌تواند با درمان حرارتی در حدود دو روز به مقاومت بالای مورد انتظار دست یابد. بنابراین، بتن فوق توانمند یک ماده عالی برای اجزای سازه‌ای پیش‌ساخته است. در میان این‌ها، پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) یکی از جذاب‌ترین موضوعات تحقیقاتی به شمار می‌آیند، زیرا توانایی فراهم کردن سازه‌هایی با اجزای پیش‌ساخته سبک‌تر، مقاومت بالاتر، دوام بهتر و هزینه چرخه عمر پایین‌تر را دارند.

پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) از قطعات پیش‌ساخته متعددی تشکیل شده‌اند که از طریق مفاصل به هم متصل شده و با استفاده از میله‌های پیش‌تندگی یکپارچه می‌شوند. در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند، هم آرماتور طولی و هم تیرها در مفاصل قطع می‌شوند که منجر به کاهش مقاومت ساختاری نسبت به پل‌های یکپارچه می‌شود. به طور خاص، به دلیل مقاومت استثنایی بتن فوق توانمند، پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند می‌توانند با وب‌ها و لبه‌های نازک‌تری نسبت به پل‌های بتنی پیش‌ساخته طراحی شوند. در نتیجه، تنش منتقل شده از طریق مفاصل در این پل‌ها به طور قابل توجهی بیشتر از پل‌های بتنی پیش‌ساخته است. در این پل‌ها معمولاً درجه بالایی از پیش‌تندگی و مقدار زیادی میله پیش‌تندگی برای تأمین مقاومت خمشی کافی اعمال می‌شود. اما این عمل باعث افزایش بیشتر سطح تنش در مفاصل می‌شود. بنابراین، مفاصل به‌عنوان بخش‌های ضعیف پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند شناخته شده‌اند، به دلیل گسستگی‌ها، وضعیت پیچیده تنش و ضخامت نازک آن‌ها. شکست برشی شکننده و فاجعه‌آمیز باید برای پل‌ها اجتناب شود، بنابراین عملکرد برشی مفاصل در این پل‌ها باید مورد توجه ویژه قرار گیرد تا ایمنی و عملکرد سازه تضمین شود. در چند دهه گذشته، محققان به طور گسترده‌ای به مطالعه رفتار برشی مفاصل در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای پرداخته‌اند و عوامل مختلفی که بر عملکرد برشی مستقیم آن‌ها تأثیر می‌گذارد، شناسایی کرده‌اند، از جمله مقاومت بتن، فشار محصورکننده، سطح تماس، روش‌های سطحی، پارامترهای کلید برشی (مانند شکل و تعداد)، آرماتور و نوع مفصل [۱، ۳-۵، ۳۹-۴۳]. بر اساس دانش مفاصل بتن معمولی، تحقیقات تجربی، عددی و نظری زیادی از دهه ۲۰۱۰ به بعد برای بررسی رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند انجام شده است. [70-44]

پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای (PCSBs) به دلیل پیشرفت‌های فناوری پیش‌تندگی و روش‌های ساخت به یکی از انواع پرترفدار پل‌ها تبدیل شده‌اند [۱-۳]. این پل‌ها مزایای زیادی دارند، از جمله سرعت بالاتر در ساخت، کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، تضمین کیفیت بتن‌ریزی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها [۳-۶]. با این حال، دوام پایین بتن معمولی (NC) می‌تواند منجر به پیری و تخریب ساختاری شود که باعث نیاز به تعمیرات پرهزینه می‌شود [۷، ۸]. علاوه بر این، مقاومت پایین بتن معمولی منجر به سنگین‌تر شدن عناصر ساختاری می‌شود که باعث محدود شدن دهانه پل‌ها و نیاز به تجهیزات ساخت بزرگتر می‌شود [۹، ۱۰]. این معایب ویژگی‌های مواد مانع توسعه پل‌های بتنی

پیش‌ساخته قطعه‌ای و سازه‌های بتن معمولی می‌شود. برای رفع این چالش‌ها، محققان به طور مداوم در حال توسعه مواد ساخت جدید با عملکردهای بهبود یافته هستند.

بتن فوق توانمند (UHPC) به عنوان یک ماده ساخت پیشرفته با ویژگی‌های مکانیکی برتر مانند مقاومت بالا و دوام خوب ظاهر شده است [۱۱-۱۵]. مطالعات زیادی برای بررسی رفتار خمشی، برشی، پیچشی و دینامیکی انواع مختلف قطعات بتن فوق توانمند، از جمله تیرها، ستون‌ها، دک‌ها و مفاصل انجام شده است [۱۶-۲۶]. بر اساس این تحقیقات، بتن فوق توانمند به تدریج در سازه‌های مختلف از جمله پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان‌ها استفاده شده است [۲۷-۳۳]. به طور چشمگیری، انقباض بتن که تأثیر زیادی بر رفتار بلندمدت سازه‌های بتن معمولی دارد، می‌تواند پس از درمان حرارتی در سازه‌های بتن فوق توانمند از بین برود [۳۴-۳۶]. بتن فوق توانمند می‌تواند با درمان حرارتی در حدود دو روز به مقاومت بالای مورد انتظار دست یابد. بنابراین، بتن فوق توانمند یک ماده عالی برای اجزای سازه‌ای پیش‌ساخته است. در میان این‌ها، پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) یکی از جذاب‌ترین موضوعات تحقیقاتی به شمار می‌آیند، زیرا توانایی فراهم کردن سازه‌هایی با اجزای پیش‌ساخته سبک‌تر، مقاومت بالاتر، دوام بهتر و هزینه چرخه عمر پایین‌تر را دارند [37,38].

با این حال، مطالعات جاری در این زمینه محدودیت‌هایی دارند. از یک سو، یافته‌های مطالعات قبلی به دلیل تعداد محدود نمونه‌ها و پارامترهای مورد نظر در هر مطالعه، مغرضانه و ناکافی هستند. از سوی دیگر، روش‌های آزمایشی متفاوت، پیکربندی نمونه‌ها و ویژگی‌های بتن فوق توانمند، چالش‌هایی در درک رفتار مفاصل بتن فوق توانمند ایجاد می‌کند. علاوه بر این، مشخصات طراحی برای سازه‌های بتن فوق توانمند هنوز در بسیاری از کشورها در حال پیشرفت است؛ بنابراین، فلسفه طراحی پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند تنها می‌تواند به مقررات پل‌های بتنی پیش‌ساخته که چند دهه پیش منتشر شده‌اند، ارجاع دهد [۷۱،۷۲]. اگرچه مدل‌های تحلیلی و روش‌های عددی استفاده شده در ادبیات برای پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند از آن‌هایی که برای مفاصل بتن معمولی توسعه داده شده‌اند گسترش یافته‌اند، تفاوت‌های قابل توجهی در ویژگی‌های مواد، ابعاد هندسی و سطوح تنش بین مفاصل بتن فوق توانمند و بتن معمولی وجود دارد. بنابراین، لازم است که روش‌ها و مدل‌های پیش‌بینی موجود در ادبیات جمع‌بندی و ارزیابی شوند تا به عنوان مرجع در کاربردهای عملی استفاده شوند. همچنین، جهت‌گیری‌ها و روندهای پژوهشی آینده برای پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند باید مورد بحث قرار گیرد تا پیشرفت تحقیقات در این زمینه تسهیل شود. به طور کلی، نیاز به یک مرور سیستماتیک از عملکرد برشی مفاصل بتن فوق توانمند احساس می‌شود.

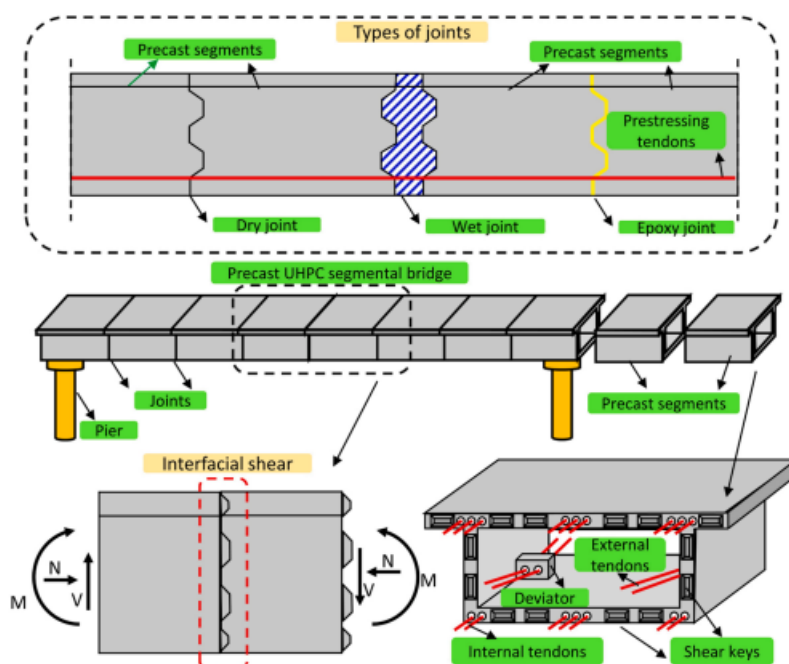
این مقاله یک مرور جامع از تحقیقات جاری در مورد رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند ارائه داد. ابتدا، نقش معمول، انواع، روش‌های تجربی، حالت‌های شکست و روابط بار-جابجایی مفاصل بتن فوق توانمند معرفی شد. سپس، پایگاه داده تجربی آزمایش‌های فشار بر مفاصل بتن فوق توانمند از ادبیات موجود توسعه یافت. در مرحله بعد، یک تحلیل پارامتری برای ارزیابی تأثیر پارامترهای کلیدی (مانند مقاومت بتن فوق توانمند، نوع مفصل، فشار محصورکننده، ویژگی‌های الباف، ویژگی‌های کلید برشی و شرایط سطحی) بر عملکرد برشی مفاصل بتن فوق توانمند انجام شد. چهارم، مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند جمع‌بندی شده و فرمول‌های محاسباتی موجود بر اساس پایگاه داده تجربی ارزیابی شدند. در نهایت، روندها و چشم‌اندازهای تحقیقات آینده در مورد مفاصل بتن فوق توانمند مورد بحث قرار گرفت، که به توسعه و کاربرد پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند کمک خواهد کرد.

## ۲- آزمایش‌ها در مورد عملکرد برشی مفاصل بتن فوق توانمند

### ۲-۱ نقش و انواع مفاصل در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند

پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs)، که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، نوعی پل هستند که با استفاده از قطعات پیش‌ساخته جداگانه ساخته می‌شوند و سپس در محل ساخت به هم متصل می‌شوند. مفاصل برای اتصال این قطعات پیش‌ساخته استفاده می‌شوند و همزمان انتقال نیروهای محوری، گشتاورهای خمشی و نیروهای برشی در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق

توانمند را تسهیل می‌کنند. رفتار این مفاصل پیچیده است و تحت تأثیر اثرات ترکیبی تماس فشاری، برش در سطح، اصطکاک و چسبندگی قرار دارد. عملکرد این مفاصل حیاتی است، زیرا نه تنها توزیع تنش محلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه بر رفتار کلی ساختاری پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند تأثیر زیادی دارند. بنابراین، ضروری است که رفتار مفاصل به طور کامل مطالعه شود تا پاسخ ساختاری پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند تحت شرایط بارگذاری پیچیده به درستی ارزیابی شود. به طور کلی، سه نوع مختلف مفصل برای پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای وجود دارد: مرطوب، اپوکسی و خشک. در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای اولیه معمولاً قطعات با بتن ریخته‌شده در محل در مفاصل (یعنی مفصل مرطوب) به هم متصل می‌شدند. با این حال، ساخت مفاصل مرطوب نیاز به قالب‌بندی و ریختن بتن در محل دارد که زمان‌بر است. بنابراین، سرعت ساخت پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند به طور کامل با مفاصل مرطوب قابل بهره‌برداری نیست؛ به همین دلیل، مفاصل مرطوب با بتن فوق توانمند معمولاً در اتصالاتی استفاده می‌شود که بتن ریخته‌شده در محل اجتناب‌ناپذیر است. مانند اتصالات تیر-ستون [۲۳]، اتصالات تیر-صفحه [۷۳، ۷۴] و اتصالات ستون-پایه [75].



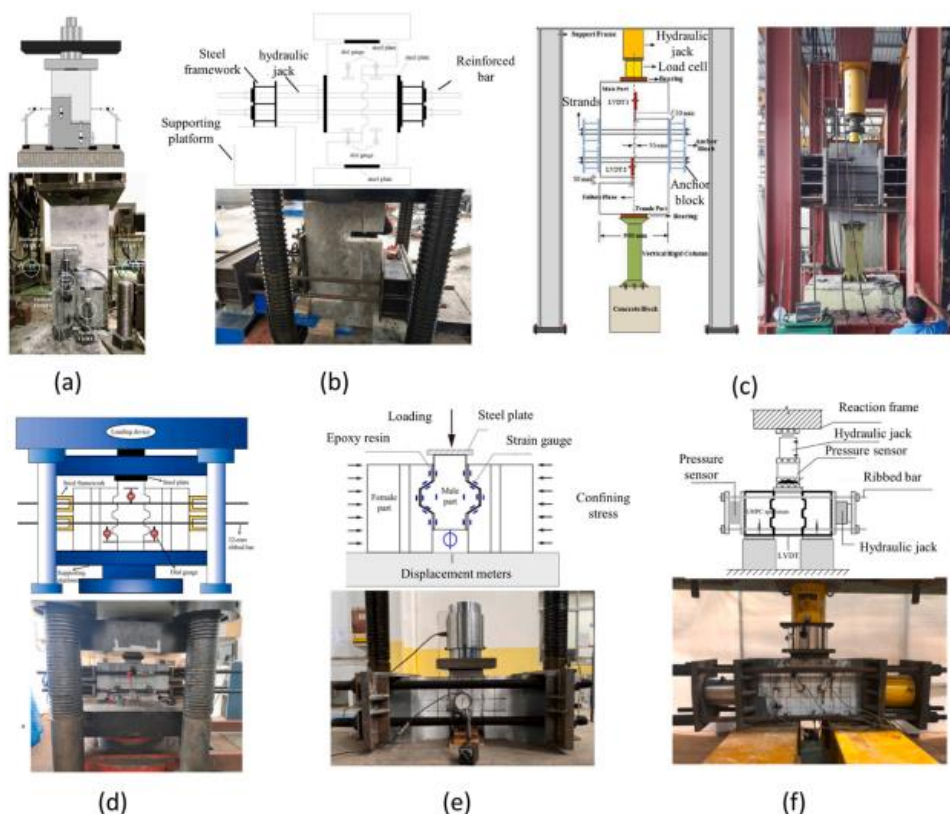
شکل ۱- نمای کلی پل‌های پیش‌ساخته بتنی مسلح

از آنجایی که رفتار مفاصل مرطوب به طور قابل توجهی تحت تأثیر مقاومت بین‌سطحی قرار دارد، رفتار بین‌سطحی بین بتن پیش‌ساخته معمولی (NC) و بتن فوق توانمند (UHPC) و بتن فوق توانمند ریخته‌شده در محل به طور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته است [۷۶-۹۰]. علاوه بر این، مفاصل مرطوب بتن فوق توانمند به دلیل مقاومت بالای خود، به طور گسترده‌ای در اتصالات دک‌های پل‌های پیش‌ساخته استفاده می‌شود. سپس مهندسان تلاش کردند تا مفاصل مرطوب در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای را با استفاده از چسب اپوکسی روی سطح مفاصل برای اتصال قطعات جایگزین کنند [۵]. استفاده از مفاصل اپوکسی مزایای زیادی دارد، از جمله توانایی اصلاح خطاهای تراز، پر کردن نقص‌های جزئی، و کاهش تنش متمرکز و فشار تماس [۶۷]. علاوه بر این، اپوکسی می‌تواند از تاندون‌های داخلی در برابر خوردگی محافظت کند و به این ترتیب دوام پل‌ها را افزایش دهد [۵]. با این حال، ساخت مفاصل اپوکسی نیاز به پیش‌فشرده‌سازی دارد و اغلب وابسته به شرایط جوی است که می‌تواند باعث کند شدن روند ساخت و افزایش هزینه‌ها شود. به منظور بهبود کارایی ساخت پل‌ها، مفاصل خشک به عنوان یک روش جایگزین برای اتصال قطعات پیش‌ساخته بدون نیاز به درمان اضافی پیشنهاد شده‌اند. با این حال، نقص‌ها و خطاهای تطابق می‌توانند باعث تجمع تنش‌های محلی در مفاصل شوند که ممکن است بر رفتار محلی و کلی پل‌های بتنی پیش‌ساخته

قطعه‌ای تأثیر بگذارد. بنابراین، انتخاب نوع مفصل باید بر اساس چندین عامل از جمله طراحی پل، برنامه زمان‌بندی ساخت و شرایط خدمات پیش‌بینی شده انجام شود تا بهترین عملکرد کلی سازه تضمین شود.

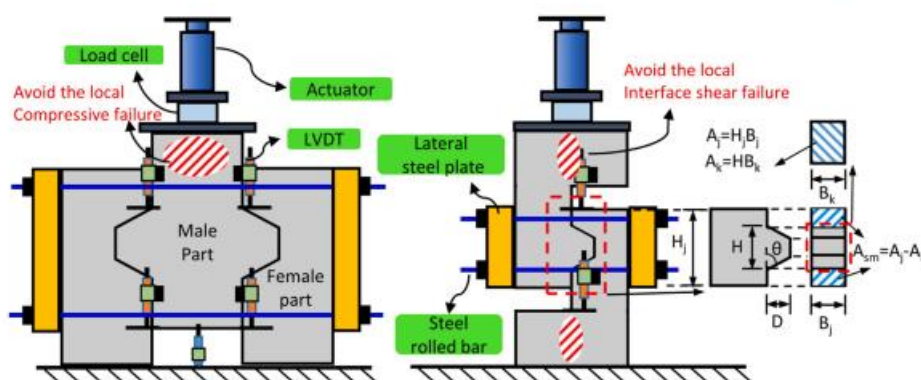
## ۲-۲ روش‌های آزمایشی و نمونه‌های مفصل

شکست برشی مستقیم که تحت بارهای متمرکز در نزدیکی مفصل بتن فوق توانمند (UHPC) رخ می‌دهد، یکی از نگرانی‌های اصلی است زیرا عواقب فاجعه‌آمیز آن می‌تواند بسیار جدی باشد. بنابراین، این موضوع توجه زیادی از سوی پژوهشگران را جلب کرده است. آزمایش‌های فشار بر مفصل (شکل ۲) به طور معمول توسط پژوهشگران برای مطالعه عملکرد برشی مفاصل بتن فوق توانمند استفاده شده است [۴۴-۷۰]. این آزمایش‌ها معمولاً شامل دو نوع نمونه مفصل هستند: مفصل تک (SJ) و مفصل دوگانه (DJ)، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است. در ابتدا، نمونه‌های SJ معمولاً استفاده می‌شدند زیرا ساخت آن‌ها آسان‌تر و مصرف مواد کمتری دارند. با این حال، ممکن است ظرفیت برشی آن‌ها نسبت به نمونه‌های DJ کمتر باشد و در هنگام بارگذاری‌های بزرگ و تغییرات شکل، اطمینان از هم‌راستایی صحیح موقعیت بار با سطح برش مفصل دشوار باشد. نمونه‌های DJ در طول بارگذاری پایداری بیشتری دارند و اطمینان حاصل می‌شود که موقعیت بار در مرکز نمونه قرار دارد، که آن‌ها را به انتخاب ترجیحی برای پژوهشگران اخیر تبدیل کرده است [۶۷-۶۹]. مهم است که از بروز شکست محلی در مفاصل جلوگیری شود، زیرا این امر می‌تواند بر شکست برشی مورد انتظار تأثیر منفی بگذارد. برای نمونه‌های DJ، منطقه بالایی نزدیک به موقعیت بار باید مقاومت فشاری محلی را تقویت کند به دلیل ظرفیت برشی بالای آن‌ها، در حالی که برای نمونه‌های SJ باید اطمینان حاصل شود که مقاومت برشی سطح رابط در نواحی بالایی و پایینی بیشتر از مقاومت مفصل باشد.



شکل ۲- تنظیمات آزمایش فشار بر مفاصل بتن فوق توانمند:

(a) چنگ و همکاران [۵۳]، (b) لیو و همکاران [۵۶]، (c) گوال و همکاران [۵۸]، (d) پیه و همکاران [۶۷]، (e) چن و همکاران [۶۸]، و (f) ژنگ و همکاران [۶۹].



شکل ۳- تنظیمات آزمایش معمولی و نمونه‌ها برای آزمایش‌های فشار بر مفاصل بتن فوق توانمند (UHPC).

شایان ذکر است که روش‌ها و دستگاه‌های استفاده شده برای اعمال فشار محصورکننده جانبی در مطالعات مختلف متفاوت است. اگرچه سلول‌های بار یا سنسورهای فشار می‌توانند فشار محصورکننده اولیه را تنظیم کنند، پیگیری تغییرات فشار محصورکننده در طول فرآیند بارگذاری معمولاً در مطالعات اولیه نادیده گرفته شده است. همچنین، سختی دستگاه‌های محدودکننده جانبی و نمونه‌ها در طول بارگذاری متفاوت بود که منجر به تفاوت‌های قابل توجهی در درجه تغییرات فشار محصورکننده شد. در مطالعات مختلف، تفاوت‌های مشهودی در نمونه‌ها، دستگاه‌ها و روش‌های آزمایشی وجود داشت. در نتیجه، نمونه‌هایی که تحت فشار محصورکننده اولیه یکسان در مطالعات مختلف قرار گرفتند، ممکن است تغییرات بسیار متفاوتی در فشار محصورکننده در طول بارگذاری تجربه کنند. این تفاوت‌ها مقایسه اثرات فشار محصورکننده بین نمونه‌ها در مطالعات مختلف را دشوار می‌سازد. علاوه بر این، فشار محصورکننده به طور یکنواخت در سطح برش مفاصل توزیع نمی‌شود، به‌ویژه تحت جابجایی‌های قابل توجه. توزیع نابرابر فشار نه تنها بر گسترش ترک‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه ظرفیت برشی مفاصل را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه، بحث در مورد اثر فشار محصورکننده بر اساس مقدار اولیه آن صورت گرفته است. برای بهبود درک رفتار مفاصل بتن فوق توانمند، پژوهش‌های آینده باید توجه بیشتری به تغییر و توزیع فشار محصورکننده در طول آزمایش‌ها داشته باشند.

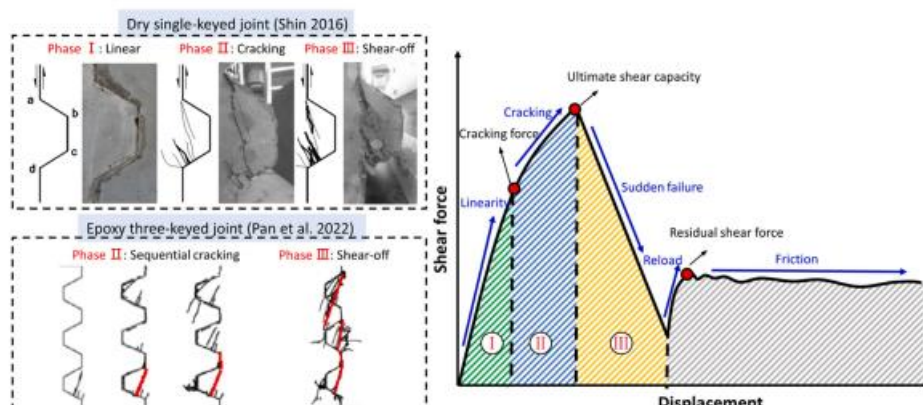
برای بررسی تأثیر عوامل بحرانی بر رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند، یک پایگاه داده تجربی از مطالعات موجود جمع‌آوری شد. پایگاه داده این مطالعه شامل ۲۱۰ آزمایش روی مفاصل بتن فوق توانمند می‌باشد. به طور خاص، این پایگاه داده شامل ۱۷ نمونه یکپارچه، ۷۵ مفصل خشک، ۳۴ مفصل مرطوب و ۸۴ مفصل اپوکسی است. اثرات مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ( $f_c$ )، مقاومت کششی بتن فوق توانمند ( $f_t$ )، انواع مفاصل، فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ )، ویژگی‌های الیاف و پارامترهای کلید برشی بر رفتار برشی مفاصل مورد بحث قرار گرفته است. دامنه پارامترهای کلیدی در پایگاه داده در جدول ۱ خلاصه شده است. لازم به ذکر است که  $f_c$  از نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای بدست آمده است و تبدیل بین این دو نوع مقاومت طبق مطالعات قبلی [۵۶،۶۷،۹۱] نادیده گرفته شده است، در حالی که  $f_t$  از آزمایش مقاومت شکاف‌زنی، آزمایش کشش مستقیم یا آزمایش خمشی بدست آمده است. برای دو مطالعه که  $f_t$  را ارائه ندادند [۴۴،۶۷]، این مقدار از فرمول  $f_t = 0.648 \sqrt{f_c}$  [۹۲] محاسبه شده است. علاوه بر این، مقدار  $f_t$  به عنوان  $0.9$  برابر مقاومت بدست آمده از آزمایش مقاومت شکاف‌زنی در نظر گرفته شده است. [51]

جدول ۱- محدوده پارامترها در پایگاه داده تجربی

Parameter	$D$ (mm)	$B_k$ (mm)	$H$ (mm)	$B_j$ (mm)	$H_j$ (mm)	$N_k$	$\sigma_n$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$\rho_f$	$l_f$ (mm)	$d_f$ (mm)
Min	0	0	0	60	100	0	0	71.4	5.6	0	13	0.2
Max	80	200	300	200	800	5	30	193.1	13.41	3%	40	0.4

## ۲-۳ حالت شکست معمول و منحنی بار - جابجایی

مفاصل کلیددار به طور معمول در ساخت پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) استفاده می‌شوند زیرا این مفاصل برای هم‌راستایی قطعات مفید هستند و ظرفیت برشی بالایی نشان می‌دهند. بنابراین، در اینجا رفتار برشی معمول مفاصل کلیددار معرفی می‌شود. آزمایش‌های فشار بر مفاصل کلیددار بتن فوق توانمند می‌توانند به سه مرحله معمول تقسیم شوند [۵۱، ۵۲، ۵۸، ۶۴]، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است. در مرحله اولیه خطی، هم بار اعمالی و هم جابجایی عمودی افزایش‌های نسبتاً کوچکی دارند. به طور خاص، مفاصل خشک تمایل دارند که جابجایی‌های بزرگتری نسبت به مفاصل اپوکسی و مرطوب نشان دهند، زیرا نقص‌ها و خطاهای هم‌راستایی وجود دارند. سپس، فرآیند بارگذاری به مرحله ترک‌خوردگی وارد می‌شود، که با ظهور اولین ترک قطری مشخص می‌شود. در مفاصل اپوکسی، دو نوع ترک مشاهده می‌شود: ترک در سطح چسب و ترک در کلیدها. برای مفاصل مرطوب، الگوهای ترک‌خوردگی پیچیده‌تر هستند که به مواد قطعات پیش‌ساخته و شرایط سطحی بستگی دارند. به طور کلی، وقوع و ماهیت این ترک‌ها تحت تأثیر عواملی مانند فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) و پیکربندی کلیدهای برشی قرار دارد [۶۴، ۶۷]. هنگامی که ترک‌ها شروع به شکل‌گیری می‌کنند، تغییر قابل توجهی در شیب منحنی بار-جابجایی مشاهده می‌شود. ترک‌های قطری تمایل دارند از گوشه پایین کلیدهای برشی ناشی شوند، زیرا در آنجا تمرکز تنش وجود دارد. این ترک‌ها معمولاً در زاویه‌ای تقریباً ۴۰-۷۰ درجه در جهت افقی شکل می‌گیرند و به تدریج به سمت بالا گسترش می‌یابند با افزایش بار [۵۲، ۵۶، ۶۷]. مفاصل اپوکسی و مرطوب به دلیل اتصال قوی با پرکننده‌ها، بار ترک‌خوردگی بالاتری نسبت به مفاصل خشک نشان می‌دهند. گالپال و همکاران [۵۸] گزارش کردند که مفاصل کلیددار اپوکسی نیروی ترک‌خوردگی بالاتری دارند که از ۱۱٪ تا ۵۰٪ بیشتر از مفاصل کلیددار خشک است. با ادامه افزایش بار اعمالی، ترک‌های قطری بیشتری در پایه کلیدهای برشی ظاهر می‌شوند. هنگامی که بار اعمالی به ظرفیت نهایی برشی می‌رسد، یک شکست برشی ناگهانی رخ می‌دهد که با لغزش نسبی قابل توجه در سطح برش مشخص می‌شود. ترک‌های بحرانی زمانی شکل می‌گیرند که ترک‌های پراکنده در پایه کلیدها به هم متصل شوند، که منجر به شکست شکننده می‌شود و کلیدها در طول ترک‌های بحرانی برش می‌خورند. این امر باعث کاهش فوری بار اعمالی به یک مقدار بسیار کم می‌شود. بارگذاری مجدد مفاصل پس از شکست نشان می‌دهد که این مفاصل توانایی مقاومت در برابر نیروی برشی کمتری از طریق اصطکاک در سطح مفصل را دارند. اگرچه حالت شکست و منحنی بار-جابجایی بین مفاصل خشک و اپوکسی تفاوت قابل توجهی ندارند، مفاصل اپوکسی تمایل دارند که شکننده‌تر از مفاصل خشک باشند. با این حال، حالت‌های شکست بین مفاصل تک‌کلید و چندکلید تفاوت دارند. بارزترین تفاوت در نحوه شکست کلیدهای برشی در مفاصل چندکلید است که به طور متوالی از پایین به بالا رخ می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که هر کلید در زمان‌های مختلف به ظرفیت برشی خود می‌رسد، پدیده‌ای که به اثر کاهش چندکلید معروف است [۱، ۵، ۵۵، ۵۸، ۶۴، ۶۷، ۶۸]. این اثر در بخش ۳.۵.۳ به طور مفصل‌تر مورد بحث قرار خواهد گرفت. مطالعات قبلی نشان می‌دهند که این اثر می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند نوع مفاصل، تعداد کلیدهای برشی و سطح فشار محصورکننده قرار گیرد. این مشاهدات تجربی معمول نشان می‌دهند که شکست برشی مفاصل بتن فوق توانمند شکننده و فاجعه‌آمیز است، که باید در طراحی پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) توجه ویژه‌ای به آن صورت گیرد.

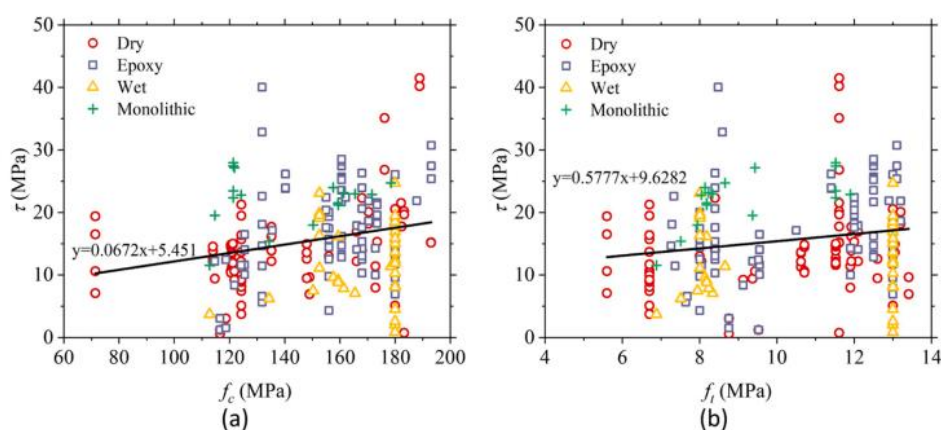


شکل ۴- حالت شکست معمول و رابطه بار-جابجایی مفاصل بتن فوق توانمند (UHPC) [52,64]

### ۳- تحلیل تأثیر پارامترهای کلیدی بر رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند

#### ۳-۱ مقاومت فشاری و کششی

مقاومت یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن فوق توانمند (UHPC) است که تأثیر زیادی بر رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند دارد. معمولاً، مقاومت فشاری ( $f_c$ ) و مقاومت کششی ( $f_t$ ) بتن فوق توانمند از جمله عوامل اصلی برای تعیین ظرفیت برشی مفاصل هستند. شکل‌های ۵ (a) و (b) روابط بین مقاومت برشی ( $\tau$ ) و مقاومت بتن فوق توانمند ( $f_c$  و  $f_t$ ) از داده‌های جمع‌آوری شده مفاصل بتن فوق توانمند را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که بتن فوق توانمند با ترکیبات مختلف ممکن است مقاومت فشاری ( $f_c$ ) در محدوده ۱۲۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال داشته باشد، در حالی که مقاومت کششی ( $f_t$ ) عمدتاً توسط بافت، شکل، حجم الیاف و مقاومت پیوند الیاف-ماتریس تعیین می‌شود. مفاصل بتن فوق توانمند با مقاومت‌ها و پیکربندی‌های مختلف نشان‌دهنده  $\tau$  در محدوده تقریباً ۰ تا ۴۲ مگاپاسکال هستند، که پتانسیل باربری مفاصل بتن فوق توانمند را برجسته می‌کند. همانطور که در شکل ۵ (a) نشان داده شده است، مفاصل اپوکسی با مقاومت فشاری ( $f_c$ ) معادل ۱۳۰ مگاپاسکال،  $\tau$  معادل ۴۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهند که به طور نزدیک به  $\tau$  مفاصل خشک با مقاومت فشاری بیش از ۱۸۰ مگاپاسکال می‌رسد. این مشاهدات نشان می‌دهند که پیکربندی مناسب مفصل می‌تواند به طور مؤثر از قدرت ذاتی بتن فوق توانمند بهره‌برداری کرده و به مقاومت برشی استثنایی منجر شود. در مطالعات قبلی روی مفاصل بتن معمولی [1,3,5,39,40,42] (NC)، مقاومت برشی به عنوان یک عبارت از رادیکالی بیان شده بود. در مطالعات اخیر [۴۴-۷۰]، هم جذر مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی در فرمول‌های مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند استفاده شده‌اند. معادلات رگرسیون خطی در شکل ۵ نشان می‌دهند که هم  $f_c$  و هم  $f_t$  به طور مثبت با  $\tau$  مفاصل مرتبط هستند، که نشان‌دهنده منطقی بودن بیان  $\tau$  مفاصل بتن فوق توانمند با استفاده از جذر مقاومت فشاری و مقاومت کششی است. قابل توجه است که شکست کلیدهای برشی با برش در پایه کلید رخ می‌دهد که به دلیل شکست مقاومت بتن فوق توانمند است. با این حال، شکست در سطوح تماس به دلیل شکست سطح رابط است که عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های رابط قرار دارد. بنابراین، تنها مقاومت برشی ناشی از کلیدهای برشی می‌تواند با استفاده از مقاومت بتن فوق توانمند بیان شود، در حالی که مقاومت برشی ناشی از سطوح تماس مفاصل به ویژگی‌های مقاومت رابط بستگی دارد.



شکل ۵- تأثیر مقاومت بتن فوق توانمند (UHPC) بر مقاومت برشی مفاصل: (الف)  $f_c$  و (ب)  $f_t$ .

## ۳.۲. انواع مفاصل

انواع مختلف مفاصل از مواد پرکننده مختلفی استفاده می کنند که منجر به رفتار متفاوت رابط می شود. به همین دلیل، انواع مختلف مفاصل بتن فوق توانمند (UHPC) تفاوت های زیادی در مقاومت و سختی خود نشان می دهند که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کلی سازه های پل های بتنی پیش ساخته قطعه ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) دارند. په و همکاران [۳۷] گزارش دادند که پل های بتنی پیش ساخته قطعه ای با بتن فوق توانمند و مفاصل اپوکسی تحت پیش تنیدگی خارجی، ظرفیت باربری، سختی و مقاومت به ترک خوردگی کمتری نسبت به تیرهای یکپارچه نشان می دهند، اما انعطاف پذیری و ظرفیت تغییر شکل بهتری دارند. در مقابل، پل های بتنی پیش ساخته قطعه ای با بتن فوق توانمند و مفاصل خشک، کاهش قابل توجهی در مقاومت و سختی نسبت به تیرهای یکپارچه نشان دادند [۳۸]. بنابراین، ضروری است که تفاوت های رفتار برشی سه نوع مفصل رایج (خشک، اپوکسی و مرطوب) مورد بررسی قرار گیرد تا درک بهتری از نحوه تأثیر آن ها بر عملکرد کلی سازه های پل های بتنی پیش ساخته قطعه ای با بتن فوق توانمند به دست آید.

کیم و همکاران [۴۷-۵۰] مقاومت برشی مفاصل خشک، اپوکسی و مرطوب بتن فوق توانمند را با آزمایش ۳۵ نمونه با فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) در محدوده ۲ تا ۸ مگاپاسکال ارزیابی کردند. نتایج آزمایش ها نشان داد که مفاصل اپوکسی ظرفیت برشی بالاتری نسبت به مفاصل مرطوب دارند و تفاوت های مقاومت بین این دو نوع مفصل با افزایش فشار محصورکننده کاهش می یابد. مفاصل خشک کمترین بار شکست را در میان این سه نوع مفصل نشان دادند. اگرچه این سه نوع مفصل سختی مشابهی در طول لغزش نسبی داشتند، مفاصل مرطوب کمترین جابجایی عمودی را داشتند، در حالی که مفاصل اپوکسی بیشترین جابجایی عمودی را نشان دادند. مفاصل اپوکسی بهترین رفتار برشی را نشان دادند به دلیل پرکننده های اپوکسی که به طور مؤثر می توانستند مفاصل را پر کرده و تمرکز تنش بین قطعات جدا شده را کاهش دهند. علاوه بر این، پرکننده های بتن فوق توانمند ریخته شده در محل در مفاصل مرطوب نیز می توانستند نقص های سطح مفصل را کاهش دهند، که منجر به مقاومت برشی کمی کمتر از مفصل اپوکسی می شود. این مطالعه پیشنهاد می کند که مفاصل اپوکسی از نظر رفتار و قابلیت ساخت، بیشتر برای کاربرد عملی توصیه می شوند. با این حال، ضروری است که تحقیقات بیشتری در مورد عملکرد بلندمدت مفاصل اپوکسی انجام شود، با توجه به احتمال تخریب رزین اپوکسی در محیط های دمای بالا و یا محیط های خورنده. فنگ و همکاران [۴۴، ۹۴] رفتارهای برشی نمونه های مسطح، کلیددار و یکپارچه را با  $pf$  معادل ۲.۵٪ مقایسه کردند. آن ها دریافتند که مقاومت های برشی مفاصل مرطوب مسطح و کلیددار به ترتیب حدود ۴۰٪ و ۵۳٪ از مقاومت های نمونه های یکپارچه بودند. جیانگ و همکاران [۶۱] همچنین اشاره کردند که رابط های یکپارچه در مقایسه با مفاصل خشک در زمینه های ترک خوردگی، برش و مقاومت باقی مانده بهتر عمل می کنند. مفاصل خشک ظرفیت برشی حدود ۵۰٪-۵۷٪ از نمونه های یکپارچه داشتند.

گوال و همکاران [۵۸] آزمایش هایی بر روی مفاصل کلیددار تک، سه کلید و پنج کلید بتن فوق توانمند (UHPC) تحت فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) معادل ۱۰ و ۲۰ مگاپاسکال انجام دادند. آن ها دریافتند که استفاده از اپوکسی در مفاصل کلیددار ظرفیت برشی آن ها را تا ۲۵.۳٪ نسبت به مفاصل کلیددار خشک بهبود می دهد. با این حال، تأثیر اپوکسی بر مقاومت برشی با افزایش تعداد کلیدها (Nk) تمایل به کاهش دارد که با یافته های په و همکاران [۶۷] مطابقت دارد. برخلاف کیم و همکاران، گوال و همکاران [۵۸] تفاوت قابل توجهی در منحنی های بار-جابجایی بین مفاصل خشک و اپوکسی مشاهده نکردند که ممکن است به دلیل فشار محصورکننده بالاتر مفاصل باشد. از آنجا که فشار محصورکننده بالاتر باعث اتصال محکم تر مفاصل می شود، تأثیر نقص ها و شکاف های کوچک در مفاصل می تواند کاهش یابد. علاوه بر این، دستگاه های محدودکننده جانبی استفاده شده توسط گوال و همکاران [۵۸] دارای سختی بیشتری نسبت به دستگاه های استفاده شده توسط کیم و همکاران [۴۷] بودند که این امر نیز ممکن است بر سختی نمونه ها تأثیر داشته باشد. په و همکاران [۶۷] گزارش دادند که تحت فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) معادل ۹ مگاپاسکال، استفاده از اپوکسی در مفاصل کلیددار تک و سه کلید مقاومت برشی آن ها را به ترتیب ۱۰.۳٪ و ۷.۴٪ نسبت به مفاصل خشک بهبود می دهد. آن ها همچنین دریافتند که مفاصل خشک سختی کمتری دارند و شاخه های نزولی ملایم تری نسبت به مفاصل اپوکسی نشان می دهند، که نشان دهنده این است که در حالی که مفاصل اپوکسی دارای مقاومت و سختی بالاتری هستند، مفاصل خشک نسبت به آن ها انعطاف پذیری نسبی بهتری نشان می دهند. هوانگ [۶۰، ۶۱] عملکرد برشی مفاصل کلیددار خشک و اپوکسی را تحت فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) معادل ۱، ۲، ۳ و ۵ مگاپاسکال مقایسه کرد. به طرز شگفت انگیزی،

آن‌ها کاهش ظرفیت برشی حدود ۳-۱۴٪ برای مفاصل کلیددار تک با استفاده از اپوکسی مشاهده کردند. با این حال، این روند با افزایش فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) افزایش یافت و افزایش تعداد کلیدها (Nk) اثر کاهش‌دهنده اپوکسی را معکوس کرد. چن و همکاران [۶۸] دریافتند که استفاده از اپوکسی در مفاصل کلیددار تک تحت فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) معادل ۳ مگاپاسکال ظرفیت برشی آن‌ها را به میزان ۲۱٪ افزایش می‌دهد. پان و همکاران [۶۴] گزارش دادند که استفاده از اپوکسی در مفاصل کلیددار سه‌کلید تحت فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) معادل ۴ مگاپاسکال ظرفیت برشی آن‌ها را به میزان ۳۸.۶٪ افزایش می‌دهد.

شکل ۶ حالت‌های شکست انواع مختلف مفاصل بتن فوق توانمند را نشان می‌دهد. تفاوت‌های قابل توجهی در رفتار انواع مختلف مفاصل وجود دارد، به ویژه از نظر مقاومت به ترک خوردگی، سختی، ظرفیت برشی، حالت‌های شکست و تغییر شکل. این تفاوت‌ها ناشی از استفاده از پرکننده‌های مختلف در انواع مفاصل است که همراه با تفاوت‌های در مکانیزم‌های باربری برشی می‌باشد. نمونه‌های یکپارچه، همانطور که در شکل ۶ (e) نشان داده شده‌اند، به عنوان یک قطعه یکپارچه ریخته می‌شوند و بالاترین ظرفیت برشی را نشان می‌دهند که عمدتاً توسط مقاومت برشی مستقیم رابط یکپارچه بتن فوق توانمند تعیین می‌شود. با این حال، معرفی مفاصل، مقاومت برشی رابط یکپارچه را کاهش می‌دهد و مکانیزم مقاومت برشی کلی را به ترکیبی از قفل مکانیکی، اصطکاک و چسبندگی تغییر می‌دهد. اگرچه هم مفاصل مرطوب و هم اپوکسی از همان قفل مکانیکی مانند مفاصل خشک استفاده می‌کنند، اما در استفاده از بتن فوق توانمند و اپوکسی به عنوان پرکننده‌های مفصل تفاوت دارند.

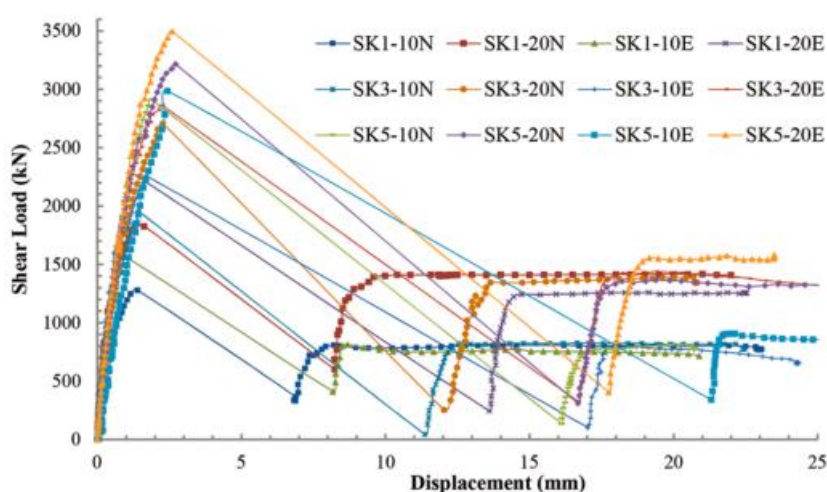
این پرکننده‌ها به منظور کاهش نقص‌های مفاصل خشک به کار می‌روند و در نتیجه اتصالات بهتری ایجاد کرده و یکپارچگی کلی سازه را بهبود می‌بخشند. هم مفاصل مرطوب (شکل ۶ (a)) و هم مفاصل اپوکسی (شکل ۶ (b)) و (c) شکست پیوند در رابط عمودی مفصل و شکست برشی در کلید برشی نشان می‌دهند. با این حال، زاویه سطح شکست در کلید برشی بین مفاصل مرطوب و اپوکسی به دلیل تفاوت در ضخامت پرکننده‌ها متفاوت است. مفاصل مرطوب دارای سطح شکست قطری هستند که از گوشه پایین کلید، نزدیک به پشتیبانی، به گوشه بالای کلید، نزدیک به نقطه بارگذاری، گسترش می‌یابد. در مقابل، مفاصل اپوکسی سطح شکست عمودی در کلیدها نشان می‌دهند. مفاصل خشک برای مقاومت برشی خود به اصطکاک و قفل مکانیکی که توسط کلیدهای برشی فراهم می‌شود، متکی هستند. با این حال، نقص‌ها و خطاهای هم‌راستایی در مفاصل خشک می‌توانند منجر به تمرکز تنش محلی و توزیع نامساوی تنش شوند، همانطور که در شکل ۶ (d) نشان داده شده است. این امر منجر به کاهش مقاومت برشی نسبت به مفاصل اپوکسی و مرطوب می‌شود.



شکل ۶- حالت‌های شکست انواع مختلف مفاصل: (a) مفصل مرطوب [۴۷]، (b) مفصل اپوکسی [۴۷]، (c) مفصل اپوکسی [۶۷]، (d) مفصل خشک [۶۷]، و (e) رابط یکپارچه [61]

شکل ۷ نشان می‌دهد که مفاصل اپوکسی ظرفیت برشی و سختی بالاتری نسبت به مفاصل خشک دارند. یک مشاهده جالب این است که مفاصل بتن فوق توانمند، چه خشک و چه اپوکسی، تحت سطوح معادل فشار محصورکننده، همان نیروی برشی اصطکاکی باقی مانده را نشان می‌دهند. این بدان معناست که مفاصل خشک و اپوکسی بتن فوق توانمند پس از شکست همان ضریب اصطکاکی باقی مانده را حفظ می‌کنند.

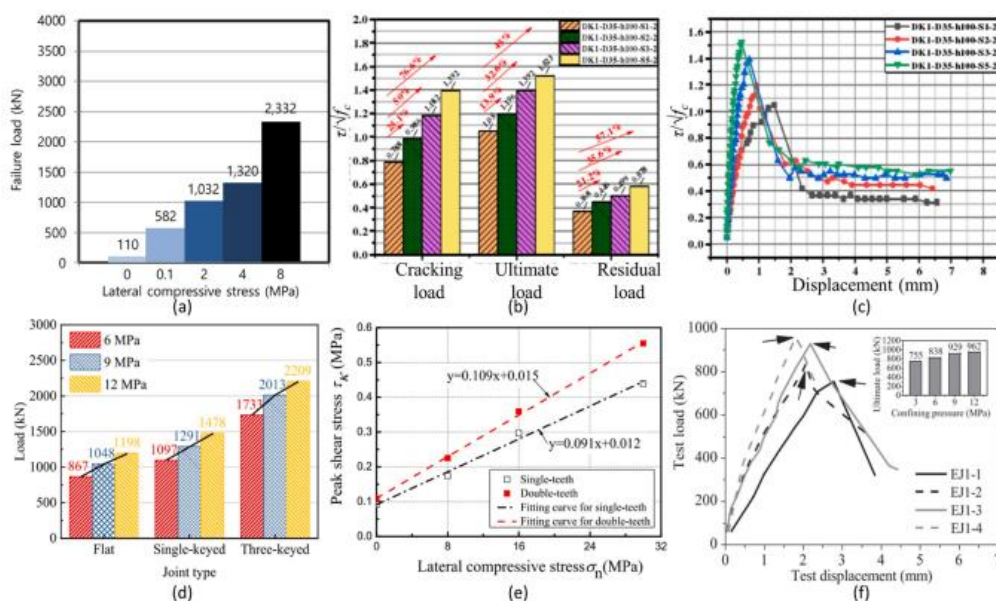
مطالعات فوق نشان داده‌اند که مقاومت برشی مفاصل معمولاً از حدود ۵۰٪-۷۰٪ رابط‌های یکپارچه متغیر است، که باید به عنوان یک ملاحظه بحرانی در طراحی پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSB) در نظر گرفته شود. بر اساس ظرفیت برشی، مفاصل بتن فوق توانمند می‌توانند به ترتیب به صورت اپوکسی <مرطوب > خشک رتبه‌بندی شوند. با این حال، مهم است که توجه داشته باشیم که این یافته‌ها تنها درک کلی از تفاوت‌های بین انواع مختلف مفاصل را فراهم می‌کنند. تفاوت‌های مشاهده شده همچنین تحت تأثیر پیکربندی مفصل‌ها، روش‌های آزمایشی و سایر عوامل قرار دارند. بنابراین، تحقیقات تجربی بیشتر می‌تواند برای بررسی این تغییرات و کسب درک جامع از رفتار مفصل‌ها برای شیوه‌های طراحی قابل اعتماد و بهینه انجام شود.



شکل ۷. منحنی بار-جابجایی مفاصل خشک و اپوکسی بتن فوق توانمند [58]

### ۳-۳ فشار محصورکننده

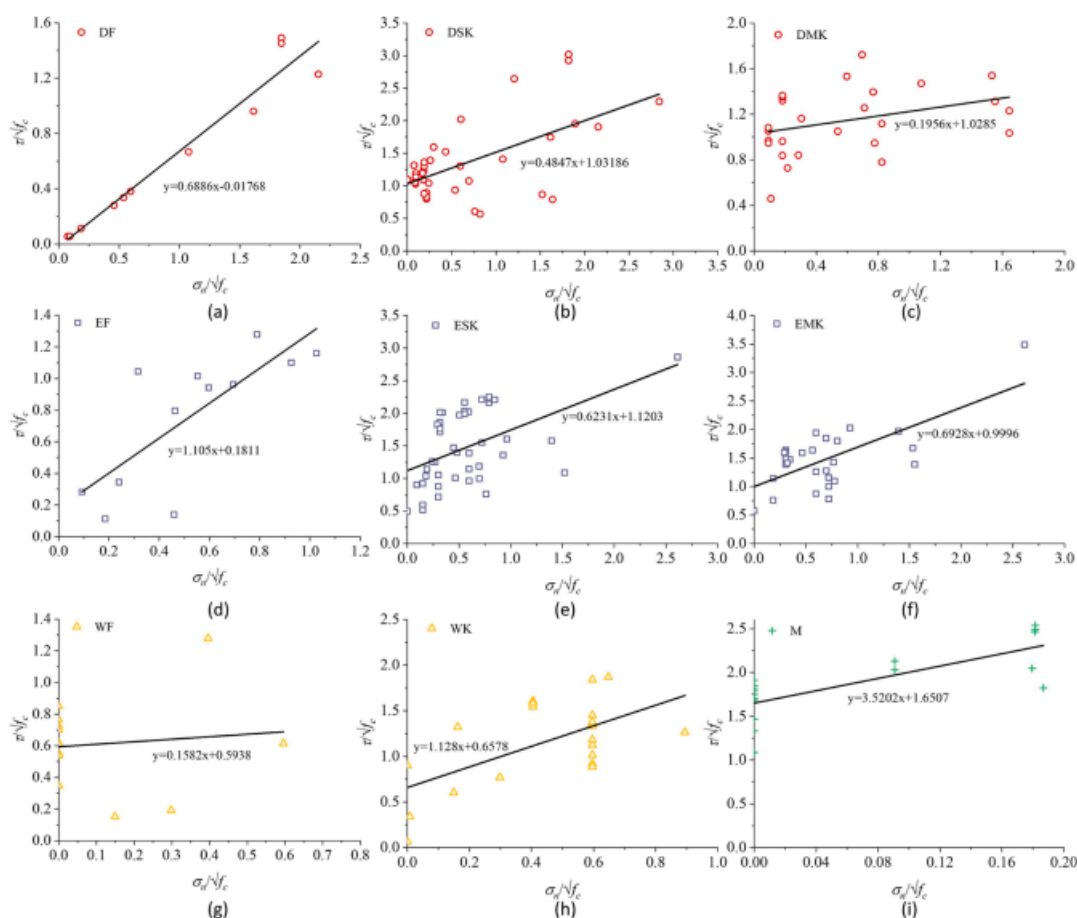
فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) به سطوح جانبی مفاصل اعمال می‌شود تا پیش‌تنیدگی فشاری در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) که توسط تاندون‌های پیش‌تنیدگی ایجاد می‌شود را شبیه‌سازی کند، که همچنین مهم‌ترین پارامتر مورد مطالعه است. مفاصل تحت فشار دو محوری در اثر ترکیب بارگذاری عمودی و فشار محصورکننده جانبی قرار دارند و در نتیجه ظرفیت برشی می‌تواند با افزایش  $\sigma_n$  بهبود یابد. کیم و همکاران [۴۹] رابطه خطی بین ظرفیت برشی و  $\sigma_n$  برای مفاصل اپوکسی کلیددار و مفاصل مرطوب کلیددار را مشاهده کردند. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، سایر پژوهشگران [۶۷، ۶۰، ۴۹-۶۹] نیز گزارش کردند که مقاومت برشی مفاصل خشک، مرطوب و اپوکسی به طور خطی با افزایش  $\sigma_n$  افزایش می‌یابد. علاوه بر این، سختی مفاصل نیز تمایل دارد با افزایش  $\sigma_n$  افزایش یابد. این نتایج نشان می‌دهند که ظرفیت برشی مفاصل به طور مستقیم با  $\sigma_n$  متناسب است، صرف نظر از نوع مفصل؛ بنابراین، افزایش سطح پیش‌تنیدگی یک روش مؤثر برای بهبود مقاومت برشی مفاصل است. لازم به ذکر است که حداکثر  $\sigma_n$  که در مطالعات قبلی [۵۰، ۴۴-۵۸، ۵۶، ۵۲-۶۷، ۶۴، ۶۳، ۶۱-۶۹] اتخاذ شده است، ۳۰ مگاپاسکال است، بنابراین شرایط با  $\sigma_n$  بالاتر از ۳۰ مگاپاسکال باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۸- مقایسه مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند (UHPC) با  $\sigma_n$  متفاوت: (a) مفاصل کلیددار مرطوب [۴۹]؛ (b) مفاصل کلیددار تک خشک [۶۰]؛ (c) مفاصل کلیددار تک خشک [۶۰]؛ (d) مفاصل کلیددار اپوکسی [۶۷]؛ (e) مفاصل کلیددار اپوکسی [۶۸]؛ (f) مفاصل کلیددار تک اپوکسی [69].

شکل ۹ روابط بین مقاومت برشی نرمال شده ( $\tau/\sqrt{f_c}$ ) و فشار محصورکننده نرمال شده ( $\sigma_n/\sqrt{f_c}$ ) را برای نه نوع مختلف مفصل نشان می‌دهد. در اینجا،  $E$ ،  $D$ ،  $W$ ، و  $M$  نمایانگر مفاصل خشک، اپوکسی، مرطوب و یکپارچه هستند. همچنین،  $SK$  و  $MK$  نمایانگر مفاصل کلیددار تک و چند کلیددار هستند. یک همبستگی مثبت در معادلات رگرسیون خطی برای  $\tau/\sqrt{f_c}$  و  $\sigma_n/\sqrt{f_c}$  دیده می‌شود. شیب معادله رگرسیون خطی ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) مفاصل صاف را نشان می‌دهد که می‌تواند به عنوان ضریب اصطکاک معمولی برای مفاصل کلیددار و رابط‌های یکپارچه در نظر گرفته شود. شکل ۹ (a)–(c) نشان می‌دهند که شیب معادلات برای مفاصل خشک صاف، مفاصل کلیددار تک، و مفاصل کلیددار چندگانه کاهش می‌یابد که این امر نشان‌دهنده این است که افزایش  $Nk$  ممکن است اثرات اصطکاک یا مقاومت برشی را که توسط اصطکاک در رابط مفصل ایجاد می‌شود، کاهش دهد. از سوی دیگر، در شکل ۹ (d)–(f)، با اینکه مقدار شیب با استفاده از کلیدهای برشی کاهش می‌یابد، تفاوت چندانی بین مفاصل کلیددار تک و مفاصل کلیددار چندگانه وجود ندارد، که نشان‌دهنده این است که  $Nk$  تأثیر کمی بر ضریب اصطکاک معمولی مفاصل کلیددار دارد. برخلاف مفاصل خشک و اپوکسی، ضریب اصطکاک معمولی مفاصل مرطوب هنگامی که از کلیدهای برشی استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد (شکل ۹ g تا h). معادله رابط‌های یکپارچه نشان‌دهنده بزرگترین شیب و عرض از مبدأ است که نشان می‌دهد مقاومت رابط به طور قابل توجهی با معرفی مفاصل کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، شکل ۹ (a)، (d)، و (g) نشان می‌دهند که مفاصل صاف مرطوب دارای بزرگترین عرض از مبدأ هستند که نشان می‌دهد این مفاصل مقاومت پیوند بالاتری نسبت به مفاصل خشک و اپوکسی دارند. با این حال، مفاصل صاف مرطوب همچنین کوچک‌ترین شیب را داشتند که نشان‌دهنده پتانسیل کمتر برای افزایش مقاومت با افزایش فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) است. لازم به ذکر است که داده‌ها در مورد مفاصل مرطوب محدود است و تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. علاوه بر این، تفاوت واضحی در عرض از مبدأ معادلات رگرسیون مفاصل کلیددار وجود ندارد، که نشان می‌دهد مقاومت برشی که به  $\sigma_n$  مربوط نیست، وابسته به نوع مفصل نیست. مقادیر شیب برای این سه نوع مفصل کلیددار نشان می‌دهند که مفاصل مرطوب بزرگترین ضریب اصطکاک معمولی را دارند، پس از آن مفاصل اپوکسی و در نهایت مفاصل خشک قرار دارند.



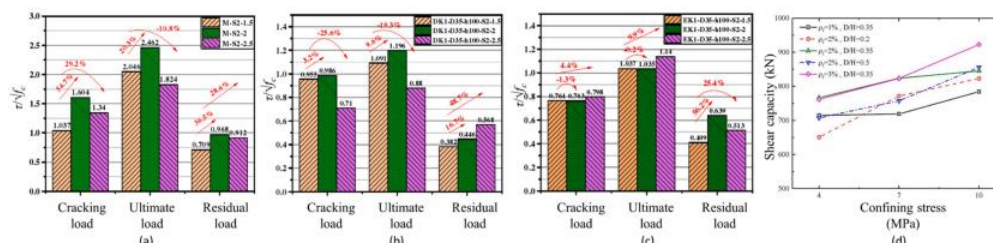
شکل ۹- تأثیر  $\sigma_n$  بر مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند: (a) مفاصل DF، (b) مفاصل DSK، (c) مفاصل DMK، (d) مفاصل EF، (e) مفاصل ESK، (f) مفاصل EMK، (g) مفاصل WF، (h) مفاصل WK، و (i) رابط‌های یکپارچه.

### ۳-۴ الیاف فولادی

الیاف می‌توانند به طور قابل توجهی ویژگی‌های کششی بتن فوق توانمند (UHPC) را با محدود کردن شروع و توسعه ترک‌ها بهبود بخشند. ویژگی‌های الیاف، مانند بافت، شکل، طول ( $l_f$ )، قطر ( $d_f$ ) و شرایط سطحی، می‌توانند تأثیر زیادی بر ویژگی‌های بتن فوق توانمند داشته باشند [۱۱، ۱۳، ۱۴]. با این حال، تأثیر ویژگی‌های الیاف بر رفتار مفاصل به طور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار نگرفته است. هوانگ [۶۰، ۶۱] نه نمونه با فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) معادل ۲ مگاپاسکال آزمایش کرد تا تأثیر حجم محتوای الیاف ( $\rho_f$ ) را بر رفتار برشی مفاصل بتن فوق توانمند بررسی کند (شکل ۱۰). نتایج نشان داد که بارهای ترک‌خوردگی، اوج و باقی‌مانده برای رابط‌های یکپارچه و مفاصل کلیددار خشک با افزایش  $\rho_f$  از ۱.۵٪ به ۲٪ افزایش یافت. با این حال، این بارها زمانی که  $\rho_f$  از ۲٪ به ۲.۵٪ افزایش یافت کاهش یافت. برای مفاصل کلیددار اپوکسی تک، بارهای ترک‌خوردگی و نهایی کمی با افزایش  $\rho_f$  از ۱.۵٪ به ۲.۵٪ افزایش یافتند. این نتایج ممکن است غیرمنتظره به نظر برسند زیرا معمولاً اعتقاد بر این است که مقاومت کششی ( $f_t$ ) با افزایش  $\rho_f$  افزایش می‌یابد [۱۱، ۱۳]، بنابراین باید انتظار داشت که مقاومت برشی نیز به تبع آن افزایش یابد. هوانگ [۶۰، ۶۱] توضیح داد که افزایش  $\rho_f$  از ۲٪ به ۲.۵٪ ممکن است منجر به توزیع نابرابر الیاف شود.

پان و همکاران [۶۳، ۶۴] آزمایش‌هایی بر روی سه مفصل کلیددار اپوکسی سه‌کلید تحت فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) معادل ۴ مگاپاسکال و نه مفصل کلیددار بزرگ اپوکسی تحت فشار محصورکننده  $\sigma_n$  معادل ۴، ۷ و ۱۰ مگاپاسکال انجام دادند. نمونه‌ها دارای  $\rho_f$  در

محدوده ۱٪ تا ۳٪ بودند. نتایج نشان داد که برای مفاصل کلیددار سه کلید اپوکسی، افزایش  $p_f$  از ۱٪ به ۲٪ و از ۲٪ به ۳٪ به ترتیب منجر به افزایش مقاومت برشی به میزان ۲۳.۸٪ و ۳۰.۰٪ شد. این روند مشابه یافته‌های هوانگ [۶۰، ۶۱] بود که مشاهده کرد افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی با افزایش  $p_f$  از ۰ به حدود ۲٪ وجود دارد، اما بهبود کمی در مقاومت برشی زمانی که  $p_f$  از مقدار معینی تجاوز کرد مشاهده نشد. به طور مشابه، برای مفاصل کلیددار بزرگ اپوکسی (شکل ۱۰ (د))، تأثیر  $p_f$  بر مقاومت برشی مشاهده شد و به نظر می‌رسید که تأثیر  $p_f$  تحت تأثیر  $\sigma_n$  نباشد.



شکل ۱۰- تأثیر  $p_f$  بر مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند (UHPC): (a) رابط‌های یکپارچه [۶۰]; (b) مفاصل کلیددار تک خشک [۶۰]; (c) مفاصل کلیددار تک اپوکسی [۶۰]; و (d) مفاصل کلیددار بزرگ اپوکسی با فشار محصورکننده متفاوت [63]

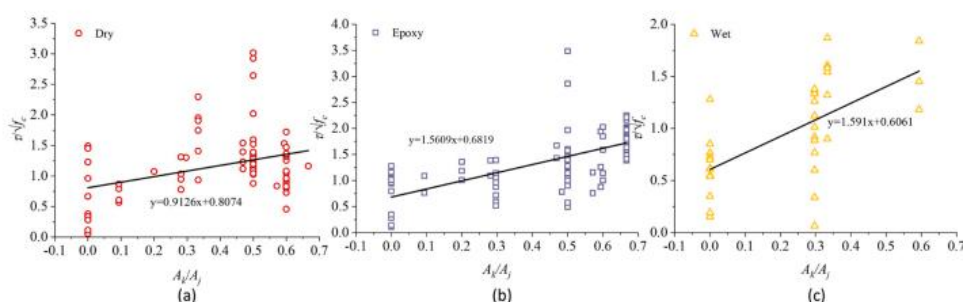
### ۳-۵ کلیدهای برشی

کلیدهای برشی در مفاصل برای بهبود ظرفیت برشی با فراهم کردن مقاومت در برابر قفل مکانیکی و هم‌راستایی قطعات پیش‌ساخته در حین ساخت استفاده می‌شوند. ویژگی‌های کلیدهای برشی، شامل تعداد، شکل و چیدمان، تأثیر قابل توجهی بر رفتار مفصل‌های بتن فوق توانمند (UHPC) دارند. این بخش تأثیرات این عوامل را معرفی می‌کند.

#### ۳-۵-۱ نسبت مساحت کلید برشی به سطح برش ( $A_k/A_p$ )

$A_k$  و  $A_j$  به ترتیب نمایانگر مساحت‌های کلیدها و مفصل هستند، بنابراین  $A_k/A_j$  نمایانگر نسبت کلیدهای برشی به مساحت کل سطح برش است. افزایش در  $A_k/A_j$  نشان‌دهنده افزایش در مساحت کل سطح برش است که با کاهش در مساحت ناحیه صاف همراه است. این نشان می‌دهد که افزایش در مقاومت برشی از طریق قفل مکانیکی کلیدهای برشی است، در حالی که سهم برشی از رابط‌های سطحی به دلیل اصطکاک یا چسبندگی در این رابط‌ها قرار دارد. با این حال، نسبت  $A_k/A_j$  در مفصل به‌طور نادری به عنوان یک پارامتر آزمایشی در مطالعات قبلی اتخاذ شده است. با این وجود، رابطه  $\tau/\sqrt{f_c}$  و  $A_k/A_j$  از داده‌های جمع‌آوری شده قابل ارائه است.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که همبستگی مثبت بین  $\tau/\sqrt{f_c}$  و  $A_k/A_j$  وجود دارد که نشان می‌دهد قفل مکانیکی کلیدهای برشی در بهبود مقاومت برشی از طریق اصطکاک یا چسبندگی در رابط‌ها مؤثرتر است. علاوه بر این، شیب معادلات رگرسیون نشان می‌دهد که مفصل مرطوب و اپوکسی دارای نرخ‌های رشد مقاومت برشی بزرگتری نسبت به مفاصل خشک با نسبت  $A_k/A_j$  مشابه هستند، به طوری که نسبت سرعت رشد مقاومت برشی با  $A_k/A_j$  برای مفاصل خشک، اپوکسی و مرطوب تقریباً به ترتیب ۱:۵.۵ و ۱:۱.۵ است. تعداد کلیدهای برشی ( $N_k$ ) نمی‌تواند در مقدار  $A_k/A_j$  منعطف شود، بنابراین اثر  $N_k$  در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت.



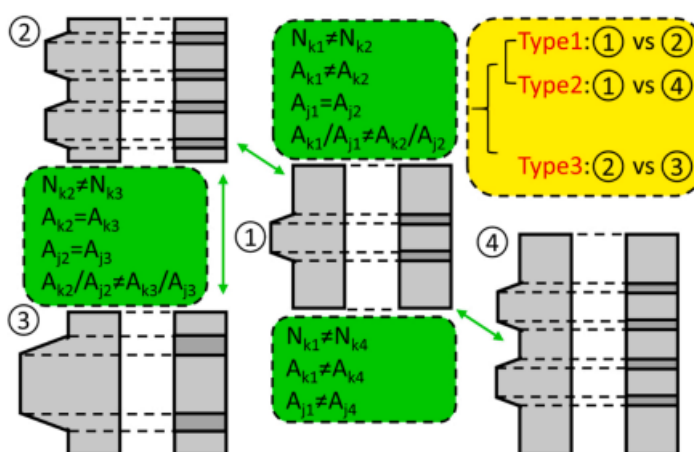
شکل ۱۱- تأثیر  $A_k/A_j$  بر مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند: (a) مفاصل خشک، (b) مفاصل اپوکسی، و (c) مفاصل مرطوب.

### ۳-۵-۲ تعداد کلیدهای برشی (Nk)

Nk تأثیر قابل توجهی بر مقاومت، سختی و حالت شکست مفاصل UHPC دارد. سه نوع اصلی آزمایش در مورد مفاصل UHPC وجود دارد (شکل ۱۲): (۱) مقایسه مفاصل با اندازه‌های مختلف کلید برشی و  $A_k/A_j$  ثابت، اما با Nk متفاوت؛ (۲) مقایسه مفاصل با اندازه‌های یکسان کلیدهای برشی، اما با Nk متفاوت؛ (۳) مقایسه مفاصل با Nk متفاوت اما با  $A_k/A_j$  متفاوت. اولین و دومین نوع آزمایش‌ها به‌طور عمده برای بررسی تأثیر Nk بر مکانیزم شکست مفاصل با Nk مختلف انجام شده است.

در اولین نوع آزمایش، کیم و همکاران [۴۷، ۴۹، ۵۰] گزارش دادند که اضافه کردن دو کلید به مفاصل اپوکسی (با  $A_k/A_j = 0/3$ ) ظرفیت برشی مفصل را ۴۷.۵٪ و اضافه کردن سه کلید با  $A_k/A_j = 0.6$  (ظرفیت برشی را ۱۰۶٪ نسبت به مفاصل صاف افزایش می‌دهد. مفاصل مرطوب نیز افزایش مشابهی نشان دادند. وو و همکاران [۵۱] مشاهده کردند که مقاومت برشی مفاصل خشک تحت فشار محصورکننده  $\sigma_n = 10$  مگاپاسکال به ترتیب ۳۶.۶٪ و ۹۵.۹٪ با افزایش Nk از ۱ به ۳ و از ۱ به ۵ افزایش یافت. این نمونه‌ها در همان فشار محصورکننده و با مقادیر مشابه  $A_k/A_j$  آزمایش شدند. علاوه بر این، فنگ و همکاران [۴۴] گزارش دادند که استفاده از یک کلید برشی با  $A_k/A_j = 0/33$  در مفاصل مرطوب، ظرفیت برشی مفاصل اپوکسی را حدود ۲۰٪ بیشتر از مفاصل صاف افزایش می‌دهد، در حالی که آن‌ها ۵ مگاپاسکال است.

نوع دوم آزمایش برای مقایسه ظرفیت برشی مفاصل با  $A_k/A_j$  یکسان و با Nk متفاوت انجام شد. هوانگ [۶۰] کاهش در مقاومت برشی را برای هر دو مفصل اپوکسی و خشک با افزایش Nk مشاهده کرد، که احتمالاً به این دلیل است که کلیدهای برشی به نوبت و نه به‌طور همزمان اثر می‌گذارند. به‌طور مشابه، جیانگ و همکاران [۵۹] کاهش در مقاومت برشی برای مفاصل خشک با افزایش Nk مشاهده کردند، اما این اثر با افزایش فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) از بین رفت. پان و همکاران [۶۴] افزایش در سختی، ظرفیت برشی، و مقاومت باقی‌مانده مفاصل اپوکسی با افزایش Nk را مشاهده کردند. پان و همکاران [۶۴] همچنین نتایج مشابهی در مورد مفاصل کلیددار سه‌کلید و پنج‌کلید با  $\sigma_n = 20$  مگاپاسکال مشاهده کردند. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش Nk تأثیر چشمگیری در بهبود مقاومت برشی برای مفاصل اپوکسی دارد. چن و همکاران [۶۸] همچنین کاهش در مقاومت برشی ۲۵٪ و ۳۵٪ برای مفاصل کلیددار دو-کلید و سه‌کلید به ترتیب در مقایسه با مفاصل کلیددار تک مشاهده کردند. این نتایج نشان‌دهنده کاهش اثرات استفاده از کلیدهای چندگانه در مقایسه با کلیدهای تک است.

شکل ۱۲- نمودار مربوط به آزمایش‌ها در مورد  $N_k$ .

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تحقیقاتی که در مورد عملکرد برشی مفاصل در پل‌های بتنی پیش‌ساخته قطعه‌ای با بتن فوق توانمند (PUSBs) انجام شده است، به طور جامع مرور شده‌اند. بر اساس مرور ادبیات و تجزیه و تحلیل داده‌های مفاصل بتن فوق توانمند (UHPC)، تأثیر پارامترهای بحرانی مورد بحث قرار گرفته، روش‌های محاسباتی خلاصه شده، فرمول‌های موجود ارزیابی شده و نتایج زیر به دست آمده است:

۱. مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند از طریق اصطکاک رابط، پیوند و قفل مکانیکی کلیدهای برشی تأمین می‌شود که به نوع مفصل بستگی دارد. اگرچه حالت‌های شکست انواع مختلف مفاصل تفاوت کمی دارند، مفاصل اپوکسی تمایل به شکست شکننده‌تری دارند. علاوه بر این، تعداد کلیدهای برشی ( $N_k$ ) و وجود کلیدهای برشی تأثیر قابل توجهی بر حالت شکست دارند. شکست مفاصل معمولاً با لغزش رابط شروع شده و با برش کلیدها پایان می‌یابد.

۲. مقاومت برشی مفاصل بتن فوق توانمند از حدود ۵۰٪-۷۰٪ مقاومت رابط‌های یکپارچه است که باید به عنوان یک ملاحظه بحرانی در طراحی برشی PUSB در نظر گرفته شود. در حالی که مفاصل اپوکسی مقاومت برشی کمی بالاتر از مفاصل مرطوب دارند، مقاومت برشی مفاصل اپوکسی می‌تواند تا ۴۰٪ نسبت به مفاصل خشک بهبود یابد. علاوه بر این، مفاصل مرطوب و اپوکسی تمایل دارند که سختی بالاتر و حالت شکست شکننده‌تری نسبت به مفاصل خشک داشته باشند.

۳. مقاومت برشی و سختی مفاصل خشک، مرطوب و اپوکسی به طور خطی با افزایش فشار محصورکننده ( $\sigma_n$ ) افزایش می‌یابد. مفاصل مرطوب بیشترین نرخ رشد مقاومت برشی را با  $\sigma_n$  نشان می‌دهند، پس از آن مفاصل اپوکسی و سپس مفاصل خشک قرار دارند. با این حال، این نرخ رشد تمایل به کاهش با استفاده از کلیدهای برشی دارد.

۴. عملکرد برشی مفاصل بتن فوق توانمند می‌تواند به طور قابل توجهی با افزایش حجم محتوای الیاف (pf) از ۰٪ به یک مقدار مناسب (حدود ۲٪) بهبود یابد؛ با این حال، این تأثیر با افزایش بیشتر pf بهبود نمی‌یابد. علاوه بر این، شاخص تقویت‌کننده الیاف ( $\lambda f$ ) عمدتاً بر مقاومت برشی نمونه‌های مرطوب و یکپارچه تأثیر می‌گذارد و تأثیر کمی بر  $\tau/\sqrt{f_c}$  مفاصل خشک و اپوکسی دارد.

۵. زمانی که مساحت کل مفاصل ( $A_j$ ) ثابت است، افزایش نسبت مساحت کلیدهای برشی ( $A_k$ ) به  $A_j$  یک روش مؤثر برای افزایش مقاومت برشی مفاصل است. نسبت نرخ رشد مقاومت برشی با  $A_k/A_j$  برای مفاصل خشک، اپوکسی و مرطوب به ترتیب تقریباً ۱.۵:۱.۵:۱.۱ است. هنگامی که  $A_k/A_j$  ثابت است، تأثیر  $N_k$  بر رفتار برشی مفاصل در مطالعات مختلف متفاوت است که نیاز به تحقیق بیشتر دارد.

۶. مقاومت برشی مفاصل کلیددار بتن فوق توانمند معمولاً با افزایش  $N_k$  کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده اثر کاهش تعداد کلیدها است. مفاصل خشک تمایل دارند اثر کاهش بیشتری نسبت به مفاصل اپوکسی و مرطوب نشان دهند. با این حال، در برخی موارد، چندین

نمونه از مفاصل اپوکسی و مرطوب کاهش ضریب بیشتر از ۱ را نشان دادند، که نشان می‌دهد اثر کاهش تعداد کلیدها ممکن است به اثر بهبود تبدیل شود. برای در نظر گرفتن این اثر کاهش، فرمول‌هایی برای ضریب کاهش تعداد کلیدها برای طراحی مفاصل بتن فوق توانمند پیشنهاد شده است.

۷. مقاومت برشی مفاصل کلیددار بتن فوق توانمند تمایل دارد با افزایش نسبت عمق به ارتفاع (D/H) کلیدهای برشی افزایش یابد. توصیه می‌شود که کلیدهای برشی با  $D/H = 0.5$  در مهندسی واقعی طراحی شوند. علاوه بر این، تأثیر D/H بر عملکرد برشی مفاصل به  $\sigma_n$  بستگی دارد.

## مراجع

- [1] Zhou, X., Mickleborough, N., & Li, Z. (2005). Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges. *Acids Struct J*, 102(1), 3–11.
- [2] Yuan, A., Dai, H., Sun, D., & Cai, J. (2013). Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending. *Eng Struct*, 48, 623–634.
- [3] Ahmed, G.H., & Aziz, O.Q. (2019). Influence of intensity & eccentricity of posttensioning force and concrete strength on shear behavior of epoxied joints in segmental box girder bridges. *Constr Build Mater*, 197, 117–129.
- [4] Shamass, R., Zhou, X., & Wu, Z. (2017). Numerical analysis of shear-off failure of keyed epoxied joints in precast concrete segmental bridges. *J Bridge Eng*, 22(1), 04016108.
- [5] Ahmed, G.H., & Aziz, O.Q. (2019). Shear strength of joints in precast posttensioned segmental bridges during 1959–2019, review and analysis. *Struct*, 20, 527–542.
- [6] Yan, W.T., Han, B., Xie, H.B., Li, P.F., & Zhu, L. (2020). Research on numerical model for flexural behaviors analysis of precast concrete segmental box girders. *Eng Struct*, 219, 110733.
- [7] Brühwiler, E., & Denarié, E. (2013). Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete. *Struct Eng Int*, 23(4), 450–457.
- [8] Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H.H., & Chen, G. (2020). Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. *Eng Struct*, 205, 110035.
- [9] Ye, M., Li, L., Hu, F., Wang, L., & Shao, X. (2022). UHPC-based precast large-cantilevered thin-walled bent caps: Design and experiments. *Eng Struct*, 272, 114909.
- [10] Zou, Y., Yu, K., Heng, J., Zhang, Z., Peng, H., Wu, C., & Wang, X. (2023). Feasibility study of new GFRP grid web-Concrete composite beam. *Compos Struct*, 305, 116527.
- [11] Yoo, D.Y., & Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cem Concr Compos*, 73, 267–280.
- [12] Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., & Zhang, Z. (2020). Durability of ultra-high performance concrete—A review. *Constr Build Mater*, 255, 119296.
- [13] Du, J., Meng, W., Khayat, K.H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., & Wang, H. (2021). Ultra-high-performance concrete (UHPC), *Compos B Eng*, 224, 109220.
- [14] Yoo, D.Y., Oh, T., & Banthia, N. (2022). Nanomaterials in ultra-high-performance concrete (UHPC)—A review. *Cem Concr Compos*, 134, 104730.
- [15] Piao, R., Oh, T., Kim, G.W., Choi, H.J., Banthia, N., & Yoo, D.Y. (2023). Enhanced microstructure and mechanical properties of cementless ultra-high-performance fiber-reinforced alkali-activated concrete with silicon dioxide nanoparticles. *Constr Build Mater*, 398, 132514.
- [16] Li, H., Li, L., Fan, X., Ye, M., Shao, X., & Yi, L. (2022). Experimental and numerical investigation on the flexural behavior of a large-scale prestressed UHPC T-Shaped girder. *Eng Struct*, 272, 115027.
- [17] Jiang, H., Hu, Z., Cao, Z., Gao, X., Tian, Y., & Sun, X. (2022). Experimental and numerical study on shear performance of externally prestressed precast UHPC segmental beams without stirrups. *Structures*, 46, 1134–1153.
- [18] Ye, M., Li, L., Pei, B., Yoo, D.Y., Li, H., & Li, H. (2023). Shear behavior of externally prestressed ultra-high-performance concrete (UHPC) T-beams without stirrups. *Eng Struct*, 288, 116217.
- [19] Zhou, C., Wang, J., Jia, W., & Fang, Z. (2022). Torsional behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) rectangular beams without steel reinforcement: Experimental investigation and theoretical analysis. *Compos Struct*, 299, 116022.
- [20] Zhou, C., Wang, J., Shao, X., Li, L., Sun, J., & Wang, X. (2023). The feasibility of using ultra-high performance concrete (UHPC) to strengthen RC beams in torsion. *J Mater Res Technol*, 24, 9961–9983.
- [21] Wang, Z., Wang, J.Q., Tang, Y.C., Liu, T.X., Gao, Y.F., & Zhang, J. (2018). Seismic behavior of precast segmental UHPC bridge columns with replaceable external cover plates and internal dissipaters. *Eng Struct*, 177, 540–555.

- [22] Lu, K., Xu, Q., Li, W., Hu, Y., Wang, J., & Yao, Y. (2021). Fatigue performance of UHPC bridge deck system with field-cast dovetail joint. *Eng Struct*, 237, 112108.
- [23] Ma, F., Deng, M., & Yang, Y. (2021). Experimental study of internal precast beam-column ultra-high-performance concrete (UHPC) connections shear capacity and joints. *J Build Eng*, 44, 103204.
- [24] Ye, M., Li, L., Yoo, D.Y., Wang, L., Li, H., & Zhou, C. (2023). Shear performance of prestressed composite beams with ultra-high-performance concrete and corrugated steel webs under different loading conditions. *Thin-Walled Struct*, 186, 110675.
- [25] Yang, J., Chen, R., Zhang, Z., Zou, Y., Zhou, J., & Xia, J. (2023). Experimental study on the ultimate bearing capacity of damaged RC arches strengthened with ultra-high-performance concrete. *Eng Struct*, 279, 115611.
- [26] Manny, A., Stempniewski, L., Albers, A., & Simons, K. (2022). Conceptual design and investigation of an innovative joint for the rapid and precise assembly of precast UHPC elements. *Eng Struct*, 265, 114454.
- [27] Yoo, D.Y., & Yoon, Y.S. (2016). A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Int J Concr Struct Mater*, 10(2), 125–142.
- [28] Zhou, M., Lu, W., Song, J., & Lee, G.C. (2018). Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering. *Constr Build Mater*, 186, 1256–1267.
- [29] Graybeal, B.A., Brühwiler, E., Kim, B., Toutlemonde, F., Voo, Y.L., & Zaghi, A. (2020). International perspective on UHPC in bridge engineering. *J Bridge Eng*, 25(11), 04020094-1.
- [30] Xue, J., Briseghella, B., Huang, F., Nuti, C., Tabatabai, H., & Chen, B. (2020). Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. *Constr Build Mater*, 260, 119844.
- [31] Hung, C.C., El-Tawil, S., & Chao, S.H. (2021). A review of developments and challenges for UHPC. *Struct Eng: Behav, Anal, Des, J Struct Eng*, 147(9), 03121001.
- [32] Bajaber, M.A., & Hakeem, I.Y. (2021). UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review. *J Mater Res Technol*, 10, 1058–1074.
- [33] Amran, M., Huang, S.S., Onaizi, A.M., Makul, N., Abdelgader, H.S., Ozbakkaloglu, T. (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. *Constr Build Mater*, 352, 129029.
- [34] Yoo, D.Y., Park, J.J., Kim, S.W., & Yoon, Y.S. (2014). Influence of reinforcing bar type on autogenous shrinkage stress and bond behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Cem Concr Compos*, 48, 150–161.
- [35] Yoo, D.Y., Min, K.H., Lee, J.H., & Yoon, Y.S. (2014). Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age. *Constr Build Mater*, 73, 357–365.
- [36] Valipour, M., & Khayat, K.H. (2018). Coupled effect of shrinkage-mitigating admixtures and saturated lightweight sand on shrinkage of UHPC for overlay applications. *Constr Build Mater*, 184, 320–329.
- [37] Ye, M., Li, L., Yoo, D.Y., Wang, L., Li, H., Shao, X. (2023). Shear behavior of precast ultra-high-performance concrete (UHPC) segmental beams with external tendons and dry joints. *Archiv. Civ Mech Eng*, 23, 143.
- [38] Ye, M., Li, L., Yoo, D.Y., Li, H., Shao, X., Zhou, C. (2023). Mechanistic understanding of precast UHPC segmental beams with external tendons and epoxy joints subject to combined bending and shear. *Eng Struct*, 280, 115698.
- [39] Buyukozturk, O., Bakhoun, M.M., Beattie, S.M. (1990). Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges. *J Struct Eng*, 116(12), 3380–3401.
- [40] Turmo, J., Ramos, G., Aparicio, A.C. (2006). Shear strength of dry joints of concrete panels with and without steel fibres. *Eng Struct*, 28(1), 23–33.
- [41] Turmo, J., Ramos, G., Aparicio, A.C. (2006). FEM modelling of unbonded post-tensioned segmental beams with dry joints. *Eng Struct*, 28(13), 1852–1863.
- [42] Jiang, H., Wei, R., Ma, Z.J., Li, Y., Jing, Y. (2016). Shear strength of steel fiber-reinforced concrete dry joints in precast segmental bridges. *J Bridge Eng*, 21(11), 04016085.
- [43] Yuan, A., Yang, C., Wang, J., Chen, L., Lu, R. (2019). Shear behavior of epoxy resin joints in precast concrete segmental bridges. *J Bridge Eng*, 24(4), 04019009.
- [44] Feng, Z., Li, C., Pan, R., Yoo, D.Y., He, J., Ke, L. (2022). Shear capacity of ultra-high-performance concrete with monolithic interface and wet-joint interface. *J Mater Civ Eng*, 34(7), 04022153.
- [45] Yin, Y., Yi, F., Yang, J., Su, Q., Zhang, G. (2022). Numerical calculation and analysis of mechanical properties of UHPC wet joint interface of prefabricated segmental beams. *Case Stud Constr Mater*, 17, e01426.
- [46] Feng, J., Hu, Z., Jiang, H., Hu, J., Qiu, Y. (2021). Influence of RPC grouting materials on shear behavior of wet joints in PCSBs with confining stress. *Constr Build Mater*, 299, 123993.
- [47] Lee, C.H., Chin, W.J., Choi, E.S., Kim, Y.J. (2011). An experimental study on the joints in ultra high performance precast concrete segmental bridges. *J Korea Concr Inst*, 23(2), 235–244.
- [48] Kim, H.S., Chin, W.J., Cho, J.R., Kim, Y.J., Yoon, H. (2015). An experimental study on the behavior of shear keys according to the curing time of UHPC. *Eng*, 07(04), 212–218.
- [49] Kim, Y.J., Chin, W.J., Jeon, S.J. (2018). Interface shear strength at joints of ultra-high performance concrete structures. *Int J Concr Struct Mater*, 12(1), 1–14.

- [50] Kim, Y.J., Chin, W.J., Jeon, S.J. (2020). Interface shear strength at various joint types in high-strength precast concrete structures. *Materials*, 13(19), 4364.
- [51] Voo, Y.L., Foster, S.J., & Voo, C.C. (2015). Ultrahigh-performance concrete segmental bridge technology: Toward sustainable bridge construction. *J Bridge Eng*, 20(8), B5014001-1.
- [52] Shin, J. (2016). Ultra-high performance concrete (UHPC) precast segmental bridges, Doctoral dissertation, Technische Universität Hamburg, Germany: Hamburg.
- [53] Jang, H.O., Lee, H.S., Cho, K., & Kim, J. (2017). Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC). *Constr Build Mater*, 152, 16–23.
- [54] Jang, H.O., Lee, H.S., Cho, K., & Kim, J. (2018). Numerical and experimental analysis of the shear behavior of ultrahigh-performance concrete construction joints. *Adv Mater Sci Eng*, 2018, 1–17.
- [55] Liu, T. (2017). Experimental and theoretical research on shear behavior of joints in precast UHPC segmental bridges, M.S. thesis, Southeast University, China: Nanjing.
- [56] Liu, T., Wang, Z., Guo, J., & Wang, J. (2019). Shear strength of dry joints in precast UHPC segmental bridges: Experimental and theoretical research. *J Bridge Eng*, 24(1), 04018100-1.
- [57] Gopal, B.A., Hejazi, F., Hafezolghorani, M., & Voo, Y.L. (2019). Numerical analysis and experimental testing of ultra-high performance fibre reinforced concrete keyed dry and epoxy joints in precast segmental bridge girders. *Int J Adv Struct Eng*, 11, 463–472.
- [58] Gopal, B.A., Hejazi, F., Hafezolghorani, M., & Voo, Y.L. (2020). Shear strength of dry and epoxy joints for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Acids Struct J*, 117(1), 279–288.
- [59] Jiang, H., Huang, C., Feng, J., Gao, X., Wang, T., & Zhong, Z. (2021). Direct shear behavior of castellated dry RPC joints in precast concrete segmental bridges. *Structures*, 33, 4579–4595.
- [60] Huang, W. (2022). Direct shear behavior of castellated UHPC joints in precast concrete segmental bridges, M.S. thesis, Guangdong University of Technology, China: Guangzhou.
- [61] Jiang, H., Huang, C., Mei, G., Gao, X., Tian, Y., & Sun, X. (2023). Experimental and numerical investigations on direct shear performance of UHPC dry joints. *Eng Struct*, 283, 115872.
- [62] Pan, R., He, W., Cheng, L., & Li, C. (2021). Direct shear behavior and dimensional parameter analysis of UHPC dry joint with big shear key. *J Human Univ (Nat Sci)*, 48(07), 129–137.
- [63] Pan, R., He, W., Cheng, L., & Li, C. (2022). Direct shear strength of UHPC large-keyed epoxy joint: Theoretical model and experimental verification. *J Bridge Eng*, 27(9), 04022083.
- [64] Pan, R., Cheng, L., He, W., Zhou, X., & Shen, X. (2022). Direct shear performance of UHPC multi-keyed epoxy joint. *Structures*, 44, 1898–1909.
- [65] Hu, Y., Qiu, J., Li, Z., Wang, J., & Tao, Y. (2022). Shear strength prediction method of the UHPC keyed dry joint considering the bridging effect of steel fibers. *Eng Struct*, 255, 113937.
- [66] Yu, K., Zhang, Z., Zou, Y., Jiang, J., Zeng, X., & Tang, L. (2022). Interfacial shear performance of epoxy adhesive joints of prefabricated elements made of ultra-high-performance concrete. *Polymers*, 14(7), 1364.
- [67] Ye, M., Li, L., Li, H., & Zhou, C. (2022). Shear behavior of joints in precast UHPC segmental bridges under direct shear loading. *Constr Build Mater*, 357, 129212.
- [68] Chen, L., Yan, J., Xiang, N., & Zhong, J. (2022). Shear performance of ultra-high-performance concrete multi-keyed epoxy joints in precast segmental bridges. *Structures*, 46, 1696–1708.