نشریه علمی
پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران
جلد ۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹٤، صص ۳۵ الی ٤٥
تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۱۱/۱۴
تاریخ تصویب نهایی: ۹۳/۸/۵
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

بررسی اثر زبری بر رفتارهای مقاومتی و تغییرحجمی سطح مشترک ماسه و فولاد

بنیامین فرهادی[۱] و علی لشکری[۲] *

[۱] **دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی**، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز
[۲] **استادیار**، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز
lashkari@sutech.ac.ir

چکیده: ظرفیت باربری پوسته شمع‌ها و همچنین پایداری دیوارهای نگهبان و سازه‌های خاک مسلح به رفتار سطح مشترک خاک-سازه وابسته است. با انجام آزمایش‌های برش مستقیم، رفتار یک ماسه ریزدانه تیزگوشه در این تحقیق بررسی شد. سپس با ساخت صفحات فولادی با زبری‌های سطحی مختلف و قرار دادن آنها در نیمه پایینی جعبه برش مستقیم، رفتار سطح مشترک این صفحه‌ها با نمونه‌های متراکم و شل ماسه بررسی گردید. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت برشی و گرایش به اتساع سطح مشترک ماسه و فولاد همواره کمتر از مقادیر متناظر به دست آمده برای نمونه‌های ماسه است. در این خصوص، زاویه اصطکاک داخلی اوج برای سطح مشترک فولاد زبر با ماسه متراکم و شل به ترتیب در حدود ۴۰ و ۲۵ درصد کمتر از مقادیر متناظر برای ماسه متراکم است. به طور مشابه، زاویه اصطکاک داخلی اوج برای سطح مشترک فولاد با زبری میانه و ماسه متراکم و شل به ترتیب در حدود ۶۰ و ۴۵ درصد کمتر از مقادیر متناظر برای ماسه شل است.

واژگان کلیدی: سطح مشترک خاک - سازه، زبری، مقاومت برشی، اتساع، آزمایش برش مستقیم.

Study on the Influence of Roughness on the Strength and Volume Change Behaviors of Sand-Steel Interfaces

B. Farhadi, and A. Lashkari

Abstract: The bearing capacity of piles shaft and stability of retaining walls and reinforced soil structures depend on the behavior of soil-structure interfaces. Using direct shear apparatus, behavior of a sand with fine angular grains was studied. Steel plates with two surface roughness values were separately embedded at the lower half of the shear box and consequently, the upper half was filled with dense or loose sand. Then, the behavior of interfaces forming between dense/loose sand and rough/medium rough steel plates was studied. Tests show that the shear strength and dilation in sand-structure interfaces are significantly less than the corresponding values for sand. In this regard, the peak friction angle of rough steel plate in contact with dense and loose samples is, respectively, about 40 and 25 percent less than those of dense and loose sand. In a similar fashion, the peak friction angle of medium rough steel plate in contact with dense and loose samples is about 60 and 45 percent less than those in dense and loose sand, respectively.

Keywords: Soil-Structure Interface, Roughness, Shear Strength, Dilation, Direct Shear Test.

۱ - مقدمه

ظرفیت باربری و رفتار تغییر شکلی بسیاری از سازه‌ها در مهندسی خاک و پی مانند پوسته شمع‌ها، سازه‌های خاک مسلح، دیوارهای نگهبان، سازه‌های مدفون و سازه‌های فراساحلی به چگونگی انتقال نیروها میان خاک و سازه وابسته است. یافته‌های آزمایشگاهی و نظری نشان می‌دهد که نیروها میان خاک و سازه به وسیله لایه بسیار باریکی از خاک در تماس با رویه سازه که سطح مشترک خاک- سازه نامیده می‌شود، انتقال می‌یابد. در بررسی‌های آزمایشگاهی، ضخامت سطح مشترک خاک‌های دانه‌ای و رویه‌های فولادی در دامنه ۲ تا ۱۰ برابر اندازه میانه دانه‌ها گزارش شده است[۱]. تاکنون رفتار مکانیکی سطح مشترک خاک-سازه به وسیله ابزارهای آزمایشگاهی گوناگونی مانند برش مستقیم[۱-۷]، برش ساده[۸-۱۱] و مدل‌سازی فیزیکی شمع [۱۲-۱۶] بررسی شده است. بر اساس این پژوهش‌ها، مشاهده شده است که عوامل زیادی بر رفتار مکانیکی سطح مشترک خاک-سازه تأثیرگذار است، که در این میان می‌توان از تراز تنش نرمال، قید اعمال شده بر تغییر حجم سطح مشترک (سختی نرمال)، زبری رویه سازه، جنس کانی‌های خاک، گردگوشگی یا تیزگوشگی دانه‌های خاک و درجه اشباع خاک نام برد. در این خصوص، گزارش شده است که اگر بار قائم در طی بارگذاری برشی ثابت نگهداشته شود، مقاومت برشی اوج و نهایی با افزایش تنش نرمال افزایش می‌یابد[۱-۳، ۶، ۱۰، ۱۱]. همچنین قید اعمال شده بر تغییر حجم می‌تواند موجب تغییر رفتار مقاومتی و اتساعی سطح مشترک شود[۱، ۳ ، ۴، ۱۰-۱۲، ۱۵، ۱۶]. از سوی دیگر، DeJong و همکاران[۱] اثر شکل دانه‌های خاک بر رفتار سطح مشترک خاک‌های دانه‌ای و فولاد را بررسی کردند. آنها نشان دادند که مقاومت‌های برشی اوج و نهایی و همچنین گرایش به رفتار اتساعی با افزایش تیزگوشگی دانه‌های خاک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با بررسی رفتار سطح مشترک لای غیر خمیری نیمه اشباع و فولاد Miller & Hamid[۵] نشان دادند که افزایش مکش بافتی می‌تواند موجب افزایش مقاومت برشی اوج و گرایش به اتساع شود، اما زیادی تأثیری بر مقاومت برشی نهایی ندارد.

اثر زبری بر رفتار مکانیکی سطح مشترک خاک‌های دانه‌ای و سازه مهم و قابل توجه است. اگر رویه سازه صاف باشد، اصطکاک مناسب میان دانه‌های خاک و رویه سازه ایجاد نشده و خاک به راحتی روی سطح سازه می‌لغزد. بنابراین، مقاومت برشی در سطح مشترک خاک-سازه بسیج نمی‌شود و نیروهای چندانی نیز میان توده خاک و سازه مبادله نمی‌گردد. در سوی مقابل، اگر رویه سازه به میزان کافی زبر باشد، مقاومت برشی بسیج شده در سطح مشترک خاک-سازه و در پی آن نیروهای مبادله شده میان توده خاک و سازه به گونه قابل توجهی افزایش می‌یابد. افزایش زبری موجب بهبود پارامترهای مقاومتی سطح مشترک خاک-سازه می‌گردد، اما مقاومت برشی و گرایش به رفتار اتساعی سطح مشترک خاک-سازه همواره از مقادیر متناظر توده خاک کمتر است[۸]. Kishida & Uesugi نشان دادند که زبری نرمال شده که به صورت زیر تعریف می‌شود می‌تواند به عنوان معیاری کارآمد به منظور توصیف میزان اثر زبری بر رفتار سطح خاک-سازه به کار برده شود:

$$R_n = \frac{R_{max}(L = d_{50})}{d_{50}} \qquad (۱)$$

که R_{max} برابر فاصله میان بلندترین قله از عمیق‌ترین دره در طول نمونه گیری (L) می‌باشد. طول نمونه‌گیری معمولا برابر اندازه میانه دانه ها (d_{50}) انتخاب می‌شود. در پژوهش های تجربی مختلف تاثیر قابل ملاحظه زبری نرمال شده بر رفتار مکانیکی سطح مشترک خاک های دانه ای و سازه را گزارش شده است[۱، ۳، ۴، ۶، ۹]. نشان داده شده است که اگر مقدار زبری نرمال شده از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، اوج مقاومت برشی در رفتار مقاومتی سطح مشترک دیده می‌شود و رفتار تغییر حجمی آن عمدتا اتساعی خواهد بود[۶، ۹]. در این حالت سطح مشترک در گروه زبر قرار می‌گیرد. در مقابل، اگر زبری نرمال شده کمتر از مقدار بحرانی باشد، اوج مقاومت برشی در رفتار دیده نمی‌شود و رفتار تغییر حجمی عمدتا تراکمی است. در حالت اخیر، سطح مشترک در گروه با زبری میانه یا صاف دانسته می‌شود[۳، ۶، ۹]. با انجام آزمایش‌های برش ساده، Uesugi & Kishida [۹] مقدار ۰/۰۷ تا ۰/۱۸ را برای زبری بحرانی گزارش کردند[۷]. Lings & Dietz زبری نرمال شده ۰/۰۸۰ را مرز میان سطح مشترک زبر و میانه و زبری ۰/۰۰۳ را مرز میان سطح مشترک با زبری میانه و سطح مشترک صاف دانستند.

با به کارگیری رویکرد پردازش تصویر، DeJong et al. [۱] نشان دادند که می‌توان از مفهوم مکانیک خاک حالت بحرانی برای توصیف رفتار مکانیکی سطح مشترک خاک‌های دانه‌ای و سازه بهره برد. این یافته راه را برای توسعه مدل‌های رفتاری پیشرفته به منظور شبیه سازی عددی رفتار سطح مشترک خاک‌های دانه‌ای و سازه گشود [۶، ۱۷-۱۹].

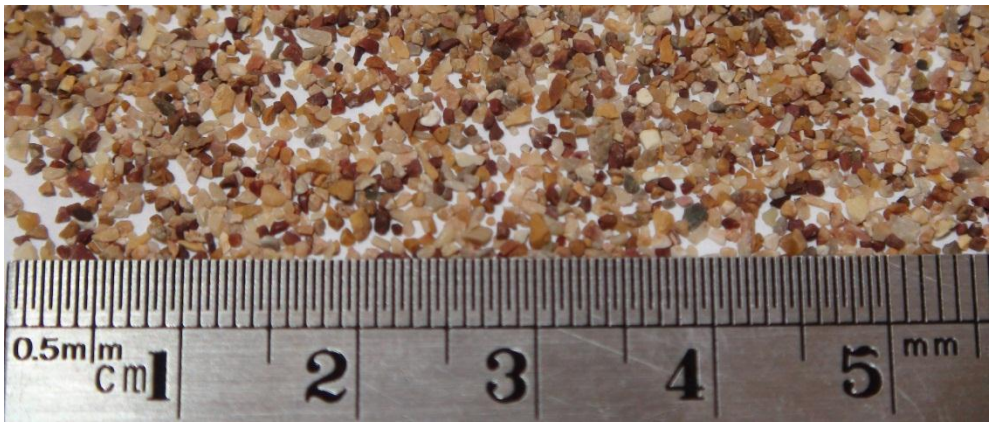
در این مقاله اثر تراکم (نسبت تخلخل) خاک در تماس با رویه سازه، تراز تنش نرمال و نیز زبری رویه سازه بر رفتار مکانیکی سطح مشترک یک خاک ماسه ای تیز گوشه به نسبت ریز و فولاد بررسی شده است. به این منظور، دو صفحه فولادی زبر شده به صورت جداگانه در نیمه پایینی جعبه برش در آزمایش برش مستقیم قرار داده شد. در ادامه، نیمه بالایی جعبه برش با ماسه انتخابی و با مقدارهای مختلف تراکم پر شد. سپس با انجام آزمایش‌های برش مستقیم، چگونگی بسیج مقاومت برشی و نیز رفتار اتساعی سطح مشترک ماسه و فولاد بررسی گردید. با توجه به آنکه مقاومت برشی سطح مشترک خاک-سازه می‌تواند به گونه قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقاومت برشی خاک باشد، یافته‌های این پژوهش می‌تواند موجب به درک بهتر تأثیر زبری پوسته شمع‌ها بر ظرفیت باربری کلی پوسته شمع و همچنین تأثیر زبری عناصر مسلح کننده خاک بر پایداری کلی و ظرفیت باربری سازه‌های خاک مسلح گردد. در این میان، انجام آزمایش‌ها در دامنه به نسبت گسترده تراکم خاک و تنش قائم می‌تواند درک فراگیرتری را از چگونگی تأثیر زبری فراهم آورد.

۲ - خاک مورد بررسی و ابزار آزمایشگاهی

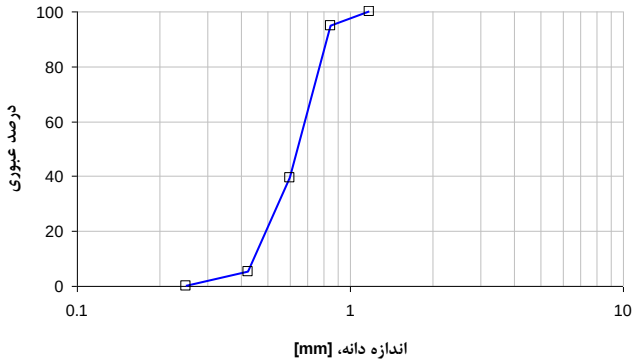
خاک به کار برده شده در این پژوهش یک ماسه تیز گوشه با دانه‌بندی در بازه میان الک‌های استاندارد ۱۶ و۶۰ است. بررسی‌ها نشان داد که میزان خردشدگی این ماسه کم بود و دانه‌بندی خاک پس از انجام آزمایش دست نخورده باقی می‌ماند. نمایش اندازه و شکل دانه‌ها در شکل ۱ و دانه‌بندی این خاک در شکل ۲ نشان داده شده است. ویژگی‌های این خاک نیز در جدول ۱ ارائه شده اند.

آزمایش‌ها بر اساس ضوابط ASTM D3080 و به وسیله یک دستگاه برش مستقیم مرسوم دارای جعبه برش با ابعاد داخلی۲/۲×۱۰×۱۰ (همگی ابعاد به سانتی‌متر) انجام گردید. دیواره‌های جانبی جعبه برش همگی صاف و صفحات بالایی و پایینی جعبه کاملا زبر بود.

نمونه‌های خاک همگی به روش ریزش خشک در جعبه برش ریخته شده و در صورت نیاز برای ساخت نمونه‌های متراکم، کوبیده شدند. با اندازه‌گیری وزن خاک ریخته شده در جعبه برش و نیز اندازه‌گیری ارتفاع نمونه‌ها پس از وارد کردن تنش نرمال، نسبت تخلخل ابتدایی نمونه ها پیش از اعمال تنش برشی، محاسبه گردید. سرعت جابه جایی افقی نیمه بالایی جعبه برش در تمام آزمایش‌ها ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه بوده است. به منظور نمایش تکرارپذیری آزمایش‌ها، نتایج برخی از آزمایش‌ها به همراه آزمایش تکرار در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده اند.



شکل ۱: نمایش دانه‌های ماسه به کار رفته در آزمایش‌ها



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی ماسه به کار رفته در آزمایش‌ها

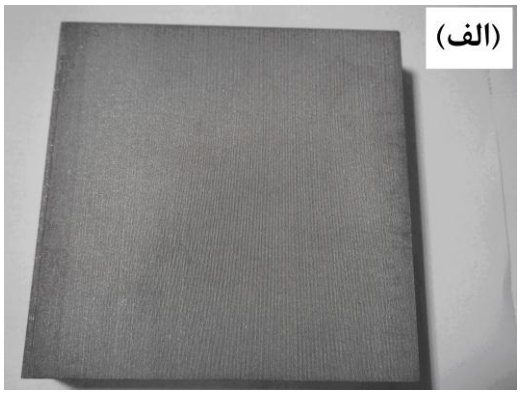
جدول ۱: ویژگی‌های پایه ماسه به کار رفته در آزمایش‌ها

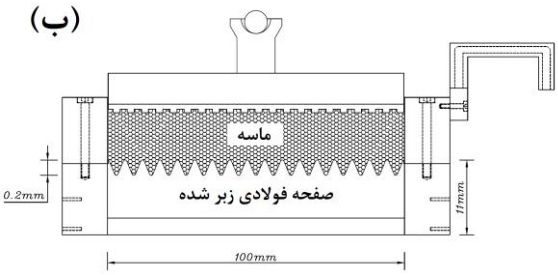
اندازه میانه دانه‌ها، d_{50}	نسبت تخلخل کمینه، e_{min}	نسبت تخلخل بیشینه، e_{max}	G_s	شکل دانه‌ها	ضریب خمیدگی، C_c	ضریب یک‌نواختی، C_u
۰/۶۵	۰/۴۰۴	۰/۹۶۰	۲/۶۷	تیزگوشه	۰/۹۸	۱/۵۳

۳ - صفحه فولادی زبر شده

با توجه به آنکه عمق نیمه پایینی جعبه برش ۱۱ میلیمتر است، از دو صفحه فولادی مربع شکل به ضلع ۱۰ سانتیمتر و ضخامت ۱۱ میلیمتر به منظور شبیه سازی سازه با رویه زبر استفاده شد. به منظور ایجاد سطح زبر، شیارهای موازی کاملا یکسان با عمق و عرض ۰/۲ میلیمتر بر روی یکی از صفحه‌های فولادی و شیارهای با عمق و عرض ۰/۱ میلیمتر بر روی صفحه فولادی دیگر ایجاد شد. با توجه به اندازه میانه دانه‌های ماسه (جدول ۱)، زبری نرمال شده برای صفحه نخست برابر ۰/۰۸ و برای صفحه دوم ۰/۰۴ به دست می‌آید. بنابراین سطح مشترک ماسه و صفحه فولادی نخست در گروه زبر و سطح مشترک ماسه و صفحه فولادی دوم در گروه با زبری میانه قرار می‌گیرد. نمونه‌ای از صفحه‌های زبر شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در بررسی مکانیکی سطح مشترک صفحه‌ها فولادی و ماسه، هر صفحه فولادی در نیمه پایینی جعبه به گونه‌ای قرار داده شد که رویه زبر در بالا قرار گیرد. سپس ماسه در فضای باقیمانده جعبه برش ریخته شد. نمایش کلی چگونگی قرارگیری صفحه‌های زبر شده در جعبه برش در بخش پایینی شکل ۳ نمایش داده شده است.

همچنین لازم به توضیح است که به منظور محاسبه زبری نرمال شده، پروفیل طولی ناهمواری های صفحات فولادی زبر و با زبری میانه در شش مقطع به صورت تصادفی با زبری سنج اندازه گیری شد که دو نمونه در شکل ۴ نمایش داده شده است.





شکل ۳: نمایش یک صفحه فولادی زبر شده به کار رفته در آزمایش‌ها (الف) و نمایش کلی چگونگی قرارگیری صفحه فولادی زبر شده در جعبه برش (ب)

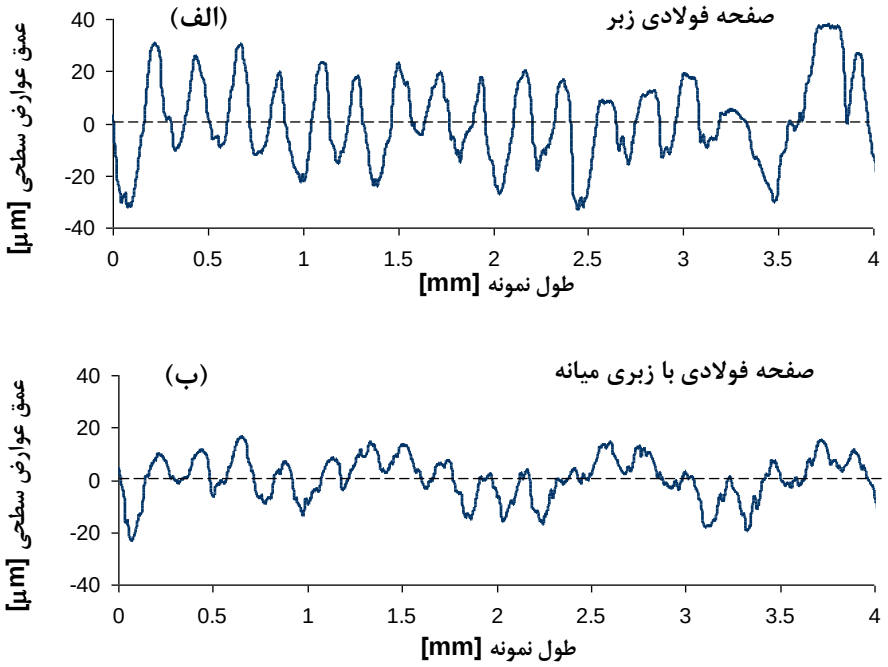
۴ - رفتار نمونه‌های ماسه در آزمایش برش مستقیم

رفتار مقاومتی و تغییر حجمی ماسه انتخابی با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های متراکم و شل این ماسه در مقادیر تنش نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بررسی گردید (شکل ۵). در رفتار مقاومتی نمونه‌های متراکم یک نقطه اوج دیده می‌شود که با افزایش تنش نرمال، این اوج در جابه جایی افقی بالاتری رخ می‌دهد. برای نمونه‌های شل، نقطه اوج مقاومت تنها در آزمایش با تنش نرمال ۵۰ کیلوپاسکال دیده می‌شود و در دو نمونه دیگر رفتار نرم‌شونده پس از مقاومت اوج وجود ندارد.

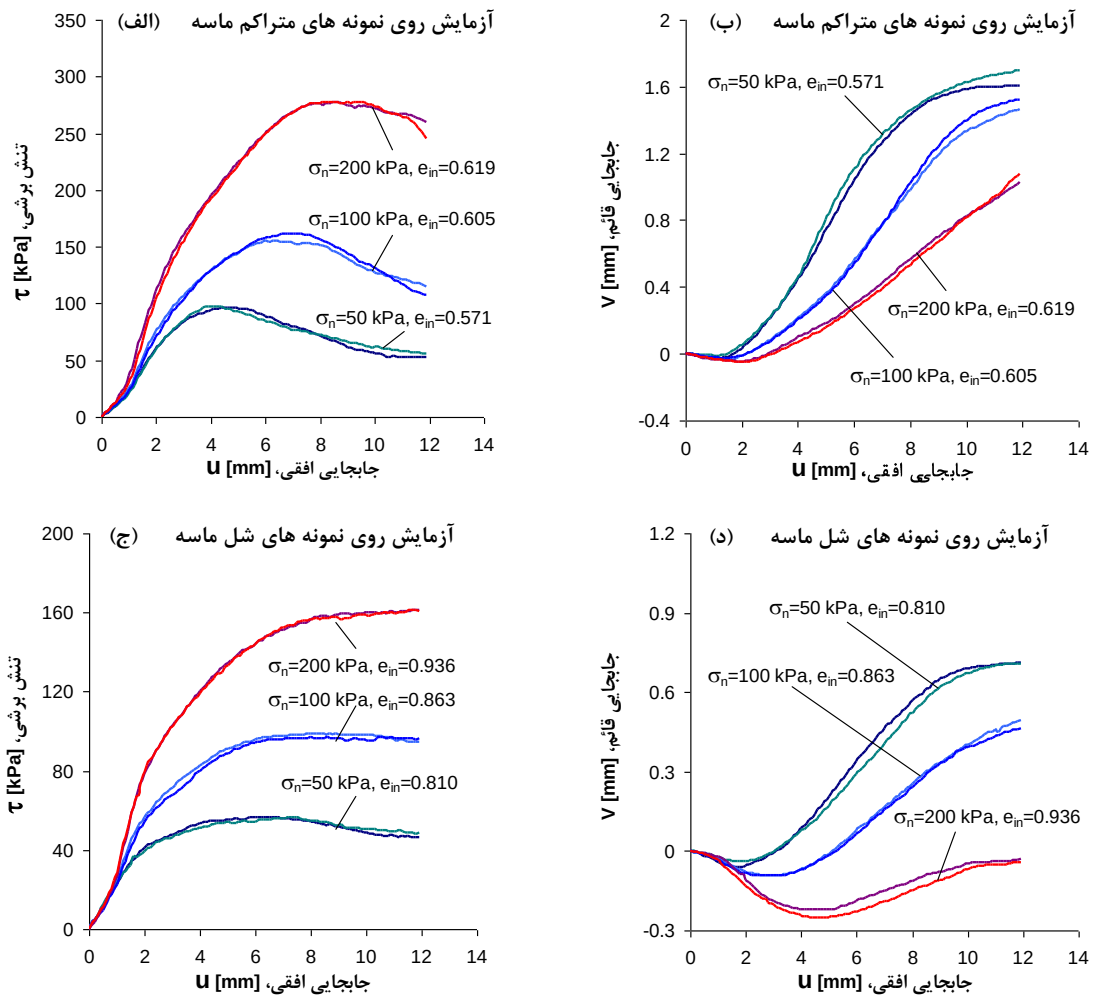
رفتار تغییر حجمی همه نمونه‌های متراکم به شدت اتساعی است ولی در نمونه‌های شل اتساع کمتری دیده می‌شود. همچنین با افزایش تنش نرمال از گرایش به اتساع کاسته شده است. نسبت تخلخل میانگین نمونه‌های متراکم و شل به ترتیب ۰/۵۹۸ و ۰/۸۶۹ بوده است.

۵ - آزمایش‌های سطح مشترک ماسه و فولاد زبر

با قرار دادن صفحه فولادی زبر با زبری نرمال شده ۰/۰۸ در نیمه پایینی جعبه برش، ۹ آزمایش روی نمونه‌های متراکم و شل ماسه انجام پذیرفت. در شکل ۶، رفتار مقاومتی و تغییر حجمی سطح مشترک ماسه و فولاد زبر بررسی شده است. مقایسه میان نتایج ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که مقاومت برشی در آزمایش‌های سطح مشترک زبر به میزان ۴۰ درصد برای نمونه‌های متراکم و ۲۵ درصد در نمونه‌های شل نسبت به مقاومت برشی در آزمایش‌های متناظر روی نمونه‌های ماسه کمتر است. همچنین گرایش به رفتار اتساعی در آزمایش‌های سطح مشترک بسیار کمتر از اتساع نمونه‌های ماسه است، به گونه‌ای که رفتار نمونه‌های شل کاملا تراکمی بوده است. همچنین می‌توان دید که اوج مقاومت برشی در سطح مشترک نمونه‌های متراکم ماسه و فولاد زبر (شکل ۶) در مقایسه با آزمایش‌های ماسه (شکل ۵) در جابه جایی‌های برشی کمتری رخ داده است.



شکل ۴ – سنجش زبری سطحی صفحه‌های فولادی: (الف) صفحه فولادی زبر، (ب) صفحه فولادی با زبری میانه



شکل ۵ – نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های ماسه در مقادیر تنش نرمال ۵۰، ۱۰۰و ۲۰۰ کیلوپاسکال: (الف) و (ب) مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های متراکم ، (ج) و (د) مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های شل

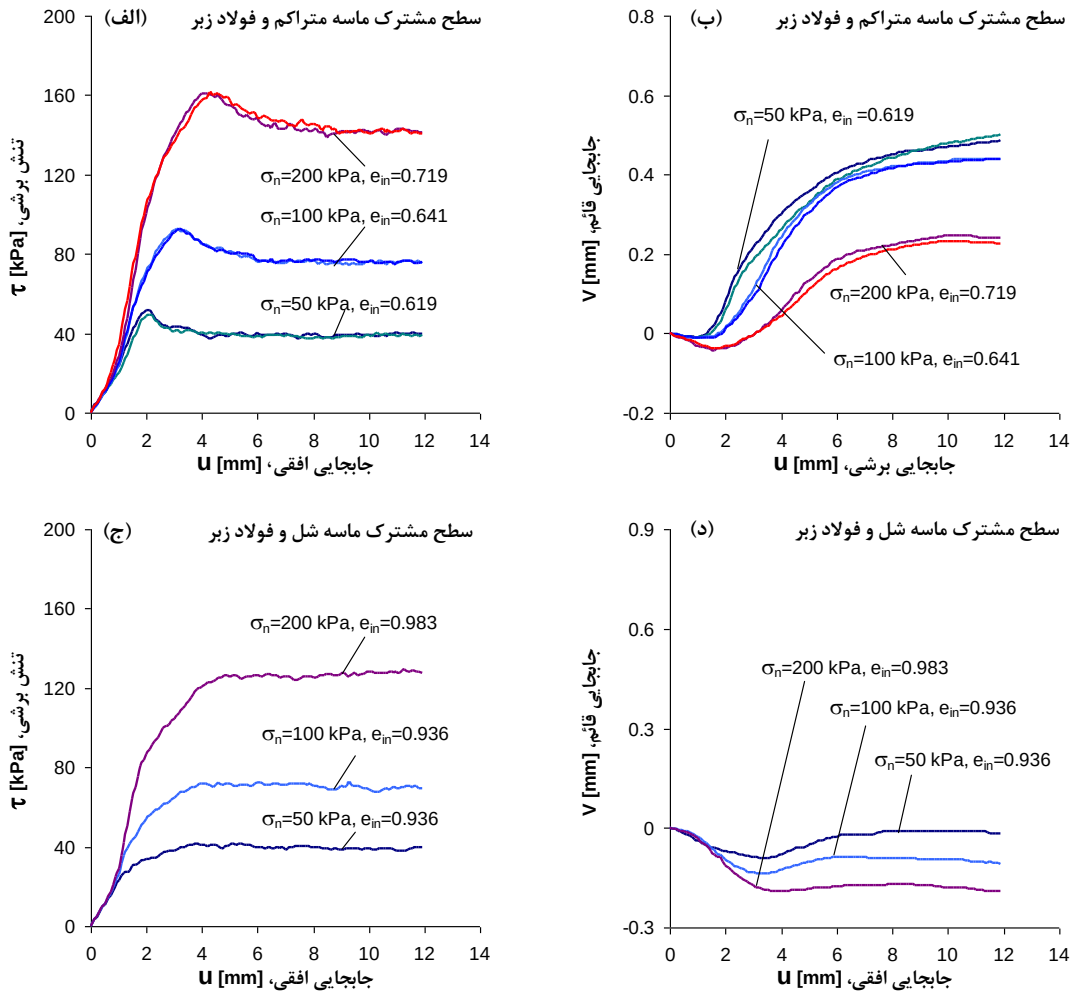
۶ - آزمایش‌های سطح مشترک ماسه و فولاد با زبری میانه

با به کارگیری صفحه فولادی با زبری نرمال شده ۰/۰۴، رفتار سطح مشترک ماسه و صفحه فولادی با زبری میانه بررسی گردید که نتایج آزمایش‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. مقایسه با مقادیر متناظر نشان داده شده در شکل ۵ نشان می‌دهد که مقاومت برشی در آزمایش‌های سطح مشترک با زبری میانه به میزان ۶۰ درصد برای نمونه‌های متراکم و ۴۵ درصد برای نمونه‌های شل نسبت به مقاومت برشی در آزمایش‌های ماسه کاهش یافته است. مقایسه مشابه با شکل ۶ نشان می‌دهد، که مقاومت برشی در آزمایش‌های سطح مشترک با زبری میانه به میزان ۳۸ درصد برای نمونه‌های متراکم و ۳۱ درصد برای نمونه‌های شل از مقادیر متناظر در آزمایش‌های سطح مشترک زبر کمتر است. همچنین گرایش به رفتار اتساعی نیز به گونه قابل توجهی نسبت به نمونه‌های ماسه و نیز سطح مشترک زبر کاهش یافته است.

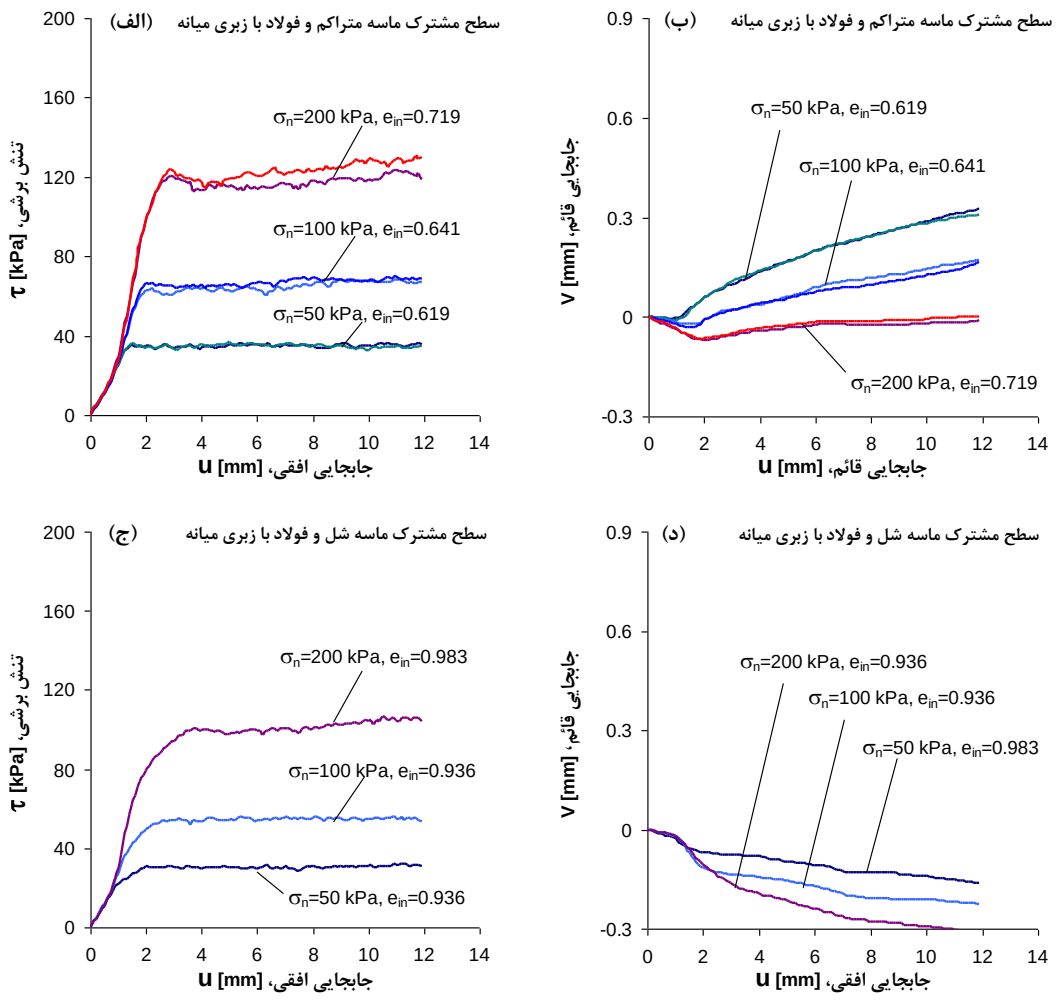
۷– بررسی اثر زبری بر رفتار مقاومتی و اتساعی

برای نمونه‌های متراکم با تنش نرمال ۲۰۰ کیلو پاسکال، چگونگی بسیج شدن مقاومت برشی و همچنین رفتار اتساعی در شکل ۸ بررسی شده است. مقاومت برشی اوج در هر دو سطح مشترک زبر و با زبری میانه کمتر از مقاومت برشی اوج نمونه ماسه است. همچنین می‌تواند دید

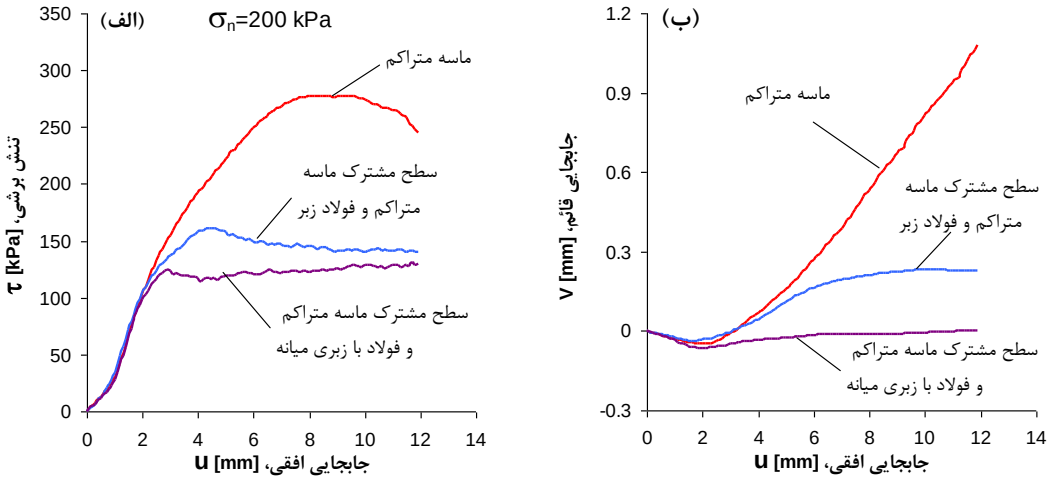
که با کاهش زبری نقطه اوج مقاومت برشی به آرامی محو می‌شود. از سوی دیگر، گرایش به رفتار اتساعی نیز با کاهش زبری کاهش یافته است. مقایسه مشابه برای نمونه‌های شل در شکل ۹ ارائه شده است. در این حالت با آنکه اوج مقاومت برشی رخ نمی‌دهد، می‌توان دید که مقاومت نهایی نیز به گونه ملموسی با کاهش زبری کاهش می‌یابد. رفتار تغییر حجمی نمونه ماسه شل ابتدا تراکمی بود که در جابجایی ۵ درصد تراکم متوقف شده و در پی آن نمونه رفتار اتساعی نشان داده است. می توان دید که رفتار هر دو نمونه سطح مشترک با زبری میانه و زبر به طور کامل تراکمی بوده است و تمایل به رفتار تراکمی با کاهش زبری، افزایش یافته است. نکته جالب توجه دیگر انطباق رفتار مقاومتی و تغییر حجمی نمونه‌های ماسه و سطح مشترک تا مقادیر جابجایی افقی ۳ میلیمتر است که می‌تواند به سرنوشت ساز نبودن تأثیر شکل دانه ها و زبری در تغییر شکل‌های کوچک تعبیر شود. در مقابل، اختلاف قابل ملاحظه‌ای میان رفتارهای مقاومتی و تغییر حجمی در جابه جایی‌های افقی بزرگ مشاهده می‌شود که علت آن کاهش قفل‌شدگی میان دانه‌ها و سطح لغزش (رویه فولادی) با کاهش زبری است.



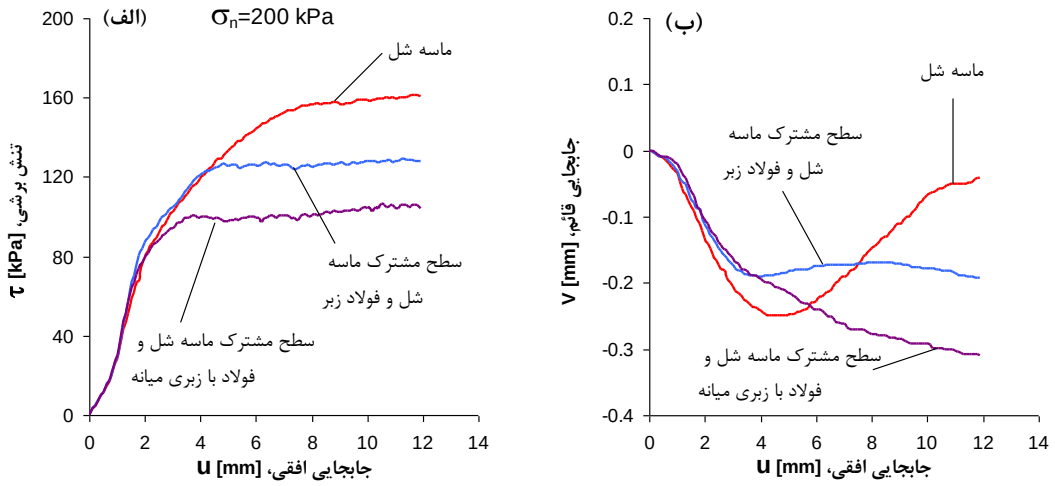
شکل ۶ – نتایج آزمایش‌های سطح مشترک فولاد زبر و ماسه در مقادیر تنش نرمال ۵۰، ۱۰۰و ۲۰۰ کیلوپاسکال: (الف) و (ب) مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های متراکم ، (ج) و (د) مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های شل



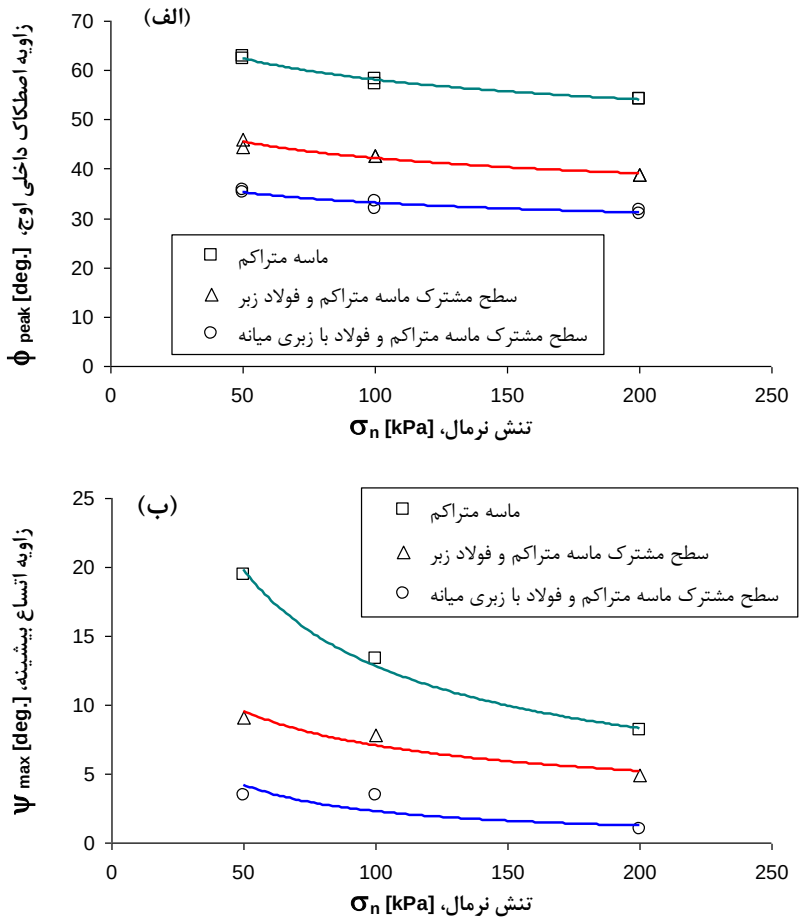
ش‌کل ۷ – نتایج آزمایش‌های سطح مشترک فولاد با زبری میانه و ماسه در مقادیر تنش نرمال ۵۰، ۱۰۰و ۲۰۰ کیلوپاسکال: (الف) و (ب) مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های متراکم ، (ج) و (د) مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های شل



شکل ۸ – بررسی تأثیر زبری صفحه فولادی بر مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های متراکم



شکل ۹ – بررسی تأثیر زبری صفحه فولادی بر مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی نمونه‌های شل



شکل ۱۰ – بررسی تاثیر زبری صفحه فولادی بر: (الف) زاویه اصطکاک داخلی اوج و (ب) زاویه اتساع بیشینه

مقادیر زاویه اصطکاک داخلی بیشنیه در اوج مقاومت برشی نمونه‌ها و نیز مقدار بیشنیه زاویه اتساع نمونه‌ها در شکل ۱۰ مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود این مقادیر با کاهش زبری به گونه قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند. همچنین

می‌توان دید که تأثیر زبری بر این پارامترها بیش از تأثیر تنش نرمال است.

۸ - نتیجه گیری

در این مقاله رفتار مکانیکی نمونه‌های متراکم و شل یک ماسه تیز گوشه در ترازهای مختلف تنش نرمال به وسیله آزمایش برش مستقیم بررسی گردید. با ساخت صفحات فولادی با مقادیر مختلف زبری نرمال شده و قراردهی آنها در کف نیمه پایینی جعبه برش، آزمایش برش مستقیم به گونه ای اصلاح گردید تا بررسی رفتار سطح مشترک ماسه و صفحه‌های فولادی زبر امکان‌پذیر گردد. آزمایش‌های انجام شده نشان داد که مقاومت برشی و نیز گرایش به اتساع در سطح مشترک صفحه‌های فولادی و ماسه همواره کمتر از مقاومت برشی نمونه‌های ماسه است. همچنین کاهش زبری همواره کاهش مقاومت برشی و گرایش به اتساع را در پی دارد. با پیروی از یک الگوی مشابه، دیده شده که کاهش زبری موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی اوج و زاویه اتساع بیشینه می‌شود. مشاهده شد که اثر زبری بر پارامترهای مقاومتی سطح مشترک فولاد و ماسه بیشتر از اثر تنش نرمال است.

برای پوسته شمع‌های فولادی واقعی، R_{max} (رابطه ۱ ملاحظه شود) در حدود ۱۵ μm است، که این عدد نزدیک به ویژگی‌های صفحه فولادی با زبری میانه بررسی شده در این تحقیق است. مقایسه میان یافته‌های به دست آمده از انجام آزمایش روی سطح مشترک نمونه های متراکم و شل ماسه با صفحه فولادی با زبری میانه و صفحه فولادی زبر نشان می‌دهد که افزایش زبری صفحه فولادی، افزایش هر دو مقدار مقاومت برشی اوج و نهایی و همچنین افزایش گرایش به رفتار اتساعی را در پی خواهد داشت. در این خصوص، افزایش گرایش به رفتار اتساعی می تواند موجب بهبود قابل ملاحظه فشار جانبی اعمال شده از خاک بر پوسته شمع های با قطر کوچک شود[۱۵-۱۷]. بنابراین، افزایش زبری پوسته شمع می‌تواند افزایش ظرفیت باربری کلی شمع را موجب شود. در این میان، لازم به توضیح است که با افزایش قابل ملاحظه زبری شمع می‌تواند خردشدگی دانه‌های ماسه در مجاورت پوسته شمع در طی فرایند کوبش شمع و کاهش پارامترهای حالت بحرانی خاک و به تبع آن عدم بهبود ظرفیت باربری پوسته شمع را موجب گردد. بر این اساس، نویسندگان بررسی‌های بیشتر برای خاک‌های دانه‌ای مستعد برای خرد شدگی را در پژوهش‌های آتی ضروری می‌دانند.

مراجع

[1] DeJong, J. T. & Westgate, Z. J. *Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 1, pp. 1646-1660, **2009**.

[2] DeJong, J. T., White, D. J., & Randolph, M. F. *Microscale observation and modeling of soil-structure interface using particle image velocimetry*. Soils and Foundations. Vol. 46, No. 1, pp. 15-28, **2006**.

[3] Porcino, D., Fioravanye, V., Ghionna, V. N., & Pedroni, S. *Interface behavior of sands from constant normal stiffness direct shear tests*. ASTM Geotechnical Testing Journal. Vol. 26, No. 3, pp. 1-13, **2003**.

[4] Fioravante, V. *On the shaft friction modeling of non-displacement piles in sand*. Soils and Foundations, Vol. 42, No. 2, pp. 23-33, **2002**.

[5] Miller, G. A. & Hamid, T. B. *Interface direct shear testing of unsaturated soil*. ASTM Geotechnical Testing Journal. Vol. 30, No. 3, pp. 182-191, **2007**.

[6] Hu, L. & Pu, J. *Testing and modeling of soil-structure interface*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 8, pp. 851-860, **2004**.

[7] Lings, M. L. & Dietz, M. S. *The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation*. Soils and Foundations, Vol. 45, No. 6, pp. 1-14, **2005**.

[8] Kishida, H. & Uesugi, M. *Tests of interfaces between sand and steel in simple shear apparatus*. Géotechnique, Vol. 37, No. 1, pp. 45-52, **1987**.

[9] Uesugi, M. & Kishida, H. Frictional resistance at yield between dry and mild steel. Soils and Foundations. Vol. 26, No. 4, pp. 139-149, **1986**.

[10] Evgin, E. & Fakharian, K. *Effect of stress path on the behavior of sand-steel interface*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, pp. 853-865, **1996**.

[11] Fakharian, K. & Evgin, E. *Cyclic simple shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental

Engineering, Vol. 123, No. 12, pp. 1098-1105, **1997**.

[12] Lehan, B. M., Jardine, R. J., Bond, A. J., & Frank, R. Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 1, pp. 19-35, **1993**.

[13] Krabbenhoft, S., Andersen, A., & Damkilde, L. *The tensile capacity of bored piles in frictional soils*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, pp. 1715-1722, **2008**.

[14] Rollins, K. M., Clayton, R. J., Mikesell, R. C., & Blaise, B. C. *Drilled shaft side friction in gravelly soils*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 8, pp. 987-1003, **2005**.

[15] Tabucanon, J. T., Airey, D. W., & Poulos, H. G. *Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests*. ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 18, No. 3, pp. 350-364, **1995**.

[16] Lehan, B. M., Gaudin, C. & Schneider, J. A. *Scale effect on tension capacity for rough piles buried in dense sand*. Géotechnique, Vol. 55, No. 10, pp. 709-719, **2005**.

[17] Liu, H., Song, E., & Ling, H. I. *Constitutive modeling of soil-structure interface through the concept of critical state soil mechanics*. Mechanics Research Communications, Vol. 33, pp. 515-531. **2006**.

[18] Lashkari, A. *Prediction of the shaft resistance of nondisplacement piles in sand*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. Vol. 37, pp. 904-931, **2013**.

[19] Lashkari, A. *A critical state model for saturated and unsaturated interfaces*. Scientia Iranica, Vol. 19, No. 5, pp. 1147-1156. **2012**.