

Physical modelling of geosynthetic reinforced earth wall as a bridge abutment

Seyed Mohammad Hussein Husseini¹, Ali Noorzad^{2*}, Mostafa Zamanian³

1- PhD Student, faculty of civil, water and environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, faculty of civil, water and environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, faculty of civil, water and environmental engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) walls could be used as appropriate substitutes for abutment of integrated bridges, for they not only offer financial advantages but also have an enormous impact on reducing asymmetric settlement between the deck and the surrounding soil. Since the bridges constitute a key element of the lifelines, investigating monotonic and cyclic behavior of these structures is of particular importance. To this aim, a series of physical models of the abutment were tested in order to investigate the behavior of bridge footings on GRS walls. In this study, the effect of footing distance from the wall facing on the stress and deformations of the wall has been investigated. The walls were constructed with a scale factor of 1 to 5. The wall elements were simulated using cubic concrete blocks of 50×50×45mm for facing, four geosynthetic layers as reinforcing elements, and Firoozkouh D11 sand as filling material. Monotonic loading was imposed on a strip footing with a width of 75 mm located at different distances from the facing. Results showed that the distance of footing from the wall facing strongly influence GRS failure mode. The failure mode was local failure of the wall facing for near face footing, whereas enormous footing settlement was controlling factor for the load bearing capacity of the far footing. Results indicated that, if the critical distance (2B) from the wall facing is observed and the bearing capacity of the footing is provided, a proper bridge performance could be expected.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 April 2020

Revise Date: 23 July 2020

Accept Date: 27 July 2020

Keywords:

Geosynthetic Reinforced Soil
Wall

Physical Model

Abutment

Failure Mode

Bearing Capacity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.226452.2118>

*Corresponding author: Ali Noorzad

Email address: a_noorzad@sbu.ac.ir

مدلسازی فیزیکی دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی بعنوان کوله‌ی پل

سیدمحمدحسین حسینی^۱، علی نورزاد^{۲*}، مصطفی زمانیان^۳

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، تهران، ایران

چکیده

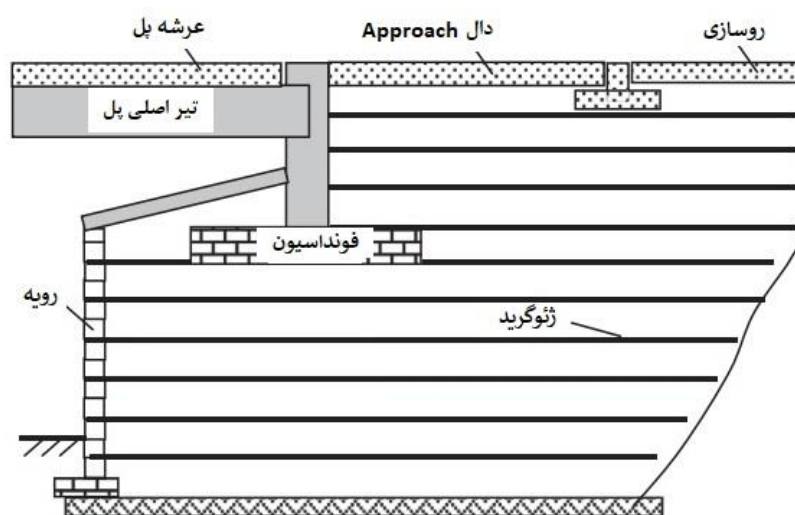
دیوارهای خاک مسلح ژئوسنتتیکی (GRS) می‌توانند به عنوان یک جایگزین مناسب برای کوله‌ی پل‌های یکپارچه مورد استفاده قرار گیرند که علاوه بر مزایای اقتصادی، تاثیر زیادی بر کاهش نشست‌های نامتقارن بین عرشه و خاک اطراف دارند. با توجه به اهمیت پل‌ها به عنوان یکی از عناصر شریان حیاتی، بررسی رفتار این سازه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور یکسری مدل فیزیکی برای بررسی رفتار پی پل‌های واقع بر دیوار خاک مسلح، مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق تاثیر فاصله پی از لبه‌ی دیوار بر مقادیر تنش و تغییر شکل دیوار مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل فیزیکی ساخته شده دارای مقیاس ۱ به ۵ بود. برای شبیه سازی اجزای دیوار از بلوک‌های بتنی به ابعاد ۴۵×۵۰×۵۰ میلیمتر برای رویه آن، چهار لایه ژئوسنتتیک به عنوان المان‌های مسلح کننده و ماسه D11 فیروزکوه برای مصالح پرکننده، استفاده شد. بارگذاری استاتیکی بر روی پی نواری با عرض ۷۵ میلیمتر و در فواصل مختلفی از لبه دیوار اعمال شد. نتایج نشان داد که مد غالب گسیختگی دیوار عمیقاً تحت تاثیر محل قرارگیری پی از رویه دیوار است. با نزدیک شدن پی به لبه دیوار، خرابی از نوع گسیختگی موضعی است و با افزایش فاصله از لبه‌ی دیوار، نشست فونداسیون، عامل کنترل کننده ظرفیت باربری پی خواهد بود. نتایج نشان داد که بعد از فاصله‌ی بحرانی 2B (دو برابر عرض پی نواری) از لبه‌ی دیوار می‌توان انتظار داشت که با تامین ظرفیت باربری پی، عملکرد پل دچار اختلال نشود.

کلمات کلیدی: دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی، مدل فیزیکی، کوله پل، مد خرابی، ظرفیت باربری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.226452.2118	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.226452.2118	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۳۹۹/۰۵/۰۶	۱۳۹۹/۰۵/۰۶	۱۳۹۹/۰۵/۰۲	۱۳۹۹/۰۱/۲۳
علی نورزاد			*نویسنده مسئول:			
a_noorzad@sbu.ac.ir			پست الکترونیکی:			

۱- مقدمه

مرسوم‌ترین روش ساخت پل با دهانه‌های تا ۶۰ متر، اجرای یکپارچه عرشه و کوله بتنی است. در این روش، ظرفیت باربری پل از طریق اجرای شمع در زیر کوله‌ی بتنی تامین می‌شود و درزهای انبساط بین عرشه و کوله بتنی حذف می‌شوند. تحمل تغییر شکل‌های بین عرشه و پل با حذف درزهای انبساط، اگر چه ممکن است مشکلات نگهداری پل را در کوتاه مدت مرتفع نماید ولی سیکل‌های بارگذاری ناشی از تغییرات دما می‌توانند در دراز مدت منجر به افت مقاومت در محل اتصال عرشه و کوله شوند. علاوه بر این، تغییرات فشار جانبی خاک در محل تماس پل و خاک (پشت شمع‌های کوله)، منجر به تغییر و گاهاً افت ظرفیت باربری قائم کوله و شمع خواهند شد [۱]. دیوارهای خاک مسلح ژئوسنتتیکی (GRS) جایگزین مناسبی برای کوله‌های بتنی هستند که علاوه بر هزینه‌های اجرایی کمتر و ساخت سریع‌تر، مشکلات ناشی از انقباض و انبساط عرشه و تامین ظرفیت باربری از طریق اجرای شمع را نیز مرتفع می‌نمایند [۲،۳]. طبق تعریف دیوارهای GRS شامل لایه‌هایی از مسلح کننده ژئوسنتتیکی و مصالح خاکریز دانه‌ای متراکم هستند که لایه‌های مسلح کننده با فاصله کم از هم قرار می‌گیرند [۴]. در شکل ۱ مقطع دیوار GRS استفاده شده برای کوله پل Foinders/Meadows، مشاهده می‌شود.



شکل ۱. مقطع کوله پل خاک مسلح (ساده شده مقطع پل Foinders/Meadows) [۵]

مطالعه‌های آزمایشگاهی و عددی مختلفی بر روی دیوارهای خاک مسلح ژئوسنتتیکی انجام شده است. در این مطالعات تاثیر عواملی همچون فاصله پی از دیوار [۶،۷،۸]، اثر گیرداری پنجه دیوار [۶]، اثر میزان تراکم خاکریز [۷،۸]، اثر زاویه رویه دیوار [۹]، اثر جنس مصالح خاکریز [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. هلوانی^۱ و همکاران با شبیه سازی عددی یک کوله GRS بیان کردند یکی از پارامترهای مهم برای توصیف عملکرد کوله‌های GRS در معرض بارهای سازه‌ای بزرگ، فاصله عمودی و افقی نشیمن‌گاه عرشه از لبه دیوار است [۱۲]. همچنین نتایج تحقیق میرمادی^۲ و ارلیج^۳ بر روی یک مدل آزمایشگاهی نشان داد که محل قرارگیری سربار می‌تواند موقعیت نیروهای کششی بسیج شده بیشینه در امتداد مسلح کننده را جابجا کند [۱۳]. در یک مطالعه آزمایشگاهی دیگر ژائو^۴ و همکارانش عنوان نمودند وقتی طول ژئوگریدهای درون دیوار بیش از دو برابر ارتفاع باشد تنش قائم نهایی با افزایش فاصله پی از لبه دیوار، افزایش می‌یابد [۱۴].

¹ Helwany

² Mirmoradi

³ Ehrlich

⁴ Xiao

همچنین در مطالعات عددی ژنگ^۵ و فوکس^۶، میزان بار فونداسیون به عنوان یکی از پارامترهای موثر بر جابجایی جانبی رویه و نشست‌های نشیمن‌گاه آن معرفی شدند [۱۵،۱۶]. محققان دیگری از جمله ابوفرسخ^۷ و همکاران و نیز میرمردی و ارلیچ با شبیه‌سازی عددی مشاهده کردند که طول دهانه پل، اثرات زیادی بر توزیع کرنش بیشینه در طول ژئوسنتتیک و جابجایی جانبی رویه دارد و از مهمترین پارامترهای اثرگذار بر طراحی این دیوارهاست [۱۷،۱۸].

بیشتر مطالعات قبلی بر روی دیوارهای خاک مسلح با اتصال مکانیکی رویه به خاکریز (MSE) انجام گرفته است و در این بین کمتر به طور خاص دیوارهای GRS بررسی شده‌اند. وجود اتصال بین رویه و مسلح‌کننده سبب کاهش فشار جانبی خاک در نزدیکی رویه میشود [۱۹،۲۰] که این مساله امکان افزایش فاصله لایه‌های مسلح‌کننده را فراهم می‌آورد. این تفاوت همچنین منجر به تفاوت در مد گسیختگی MSEها و GRSها میشود. در این تحقیق با تمرکز بر روی GRSها، فاصله‌ی فونداسیون از لبه‌ی دیوار به عنوان یکی از تاثیرگذارترین پارامترها بر عملکرد آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. علیرغم تاثیر زیاد این پارامتر بر تغییر شکل‌های رویه‌ی دیوار و نیز ظرفیت باربری فونداسیون عرشه، تحقیقات مدونی بر روی این پارامتر انجام نشده است. در بخش زیادی از تحقیقات انجام شده، فواصل به حدی از رویه دور شده است که صرفاً تنش‌های درون المانهای مسلح‌کننده و یا نشست زیر فونداسیون پارامتر تعیین‌کننده ظرفیت باربری سیستم خاک مسلح شده هستند. در این تحقیق یک مطالعه‌ی جامع بر روی اثر فاصله‌ی پی از لبه‌ی دیوار با هدف تعیین تاثیر این پارامتر بر ظرفیت باربری دیوار و تعیین مد خرابی دیوار انجام شده است. به منظور حذف سایر عوامل تاثیرگذار، تمامی دیوارها با مشخصات یکسان ساخته شده و تنها متغیر در مدل‌های ساخته شده فاصله‌ی پی از لبه‌ی دیوار است. به همین منظور مدل فیزیکی با مقیاس ۱ به ۵ و با فواصل مختلف از لبه‌ی دیوار مورد آزمایش قرار گرفته و تغییر شکل‌ها و ظرفیت باربری فونداسیون ارزیابی شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه از ماسه D11 فیروزکوه استفاده شد که منحنی دانه بندی آن (طبق استاندارد ASTM D422-63) [۲۱] به همراه تصویر میکروسکوپی دانه‌های ماسه در شکل شماره ۲ ارائه شده است. همانطور که از شکل ۲ - الف مشخص است دانه‌های ماسه عمدتاً نیمه تیز گوشه با کرویت پایین می‌باشند. اندازه میانگین ذرات (D_{50}) ۱/۴۵ میلی‌متر، ضریب یکنواختی (C_u) و ضریب انحنای (C_c) به ترتیب ۱/۶ و ۱/۲ می‌باشند. وزن مخصوص حداکثر و حداقل ماسه طبق استاندارد ASTM D4253 [۲۲] به ترتیب ۱۷/۸ و ۱۴/۳ کیلو نیوتن بر متر مکعب (kN/m^3) بدست آمد. ماسه در لایه‌های دو سانتیمتری با درصد رطوبت بهینه ۲/۵ درصد با کوبه دستی کوبیده شد. پس از ساخت نمونه درصد تراکم نمونه ۸۱ درصد شد. با انجام آزمایش برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی این ماسه در شرایط تراکم بیشینه استاندارد حدوداً ۴۳ درجه می‌باشد. با توجه به عدد مقیاس که در این مطالعه ۱:۵ در نظر گرفته شده است از یک ژئوگرید با اندازه چشمه‌های ۱۰۰ میلی‌متر مربع و مقاومت کششی گسیختگی در هر جهت ۶/۱ کیلو نیوتن بر متر (استاندارد ASTM D6637) [۲۳] استفاده شد. مشخصات این نوع ژئوگرید در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق با مقیاس ۱:۵ مدل فیزیکی، برای ساخت رویه دیوار از بلوک‌های بتنی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر عرض، ۵۰ میلی‌متر طول و ۴۵ میلی‌متر ارتفاع استفاده شد. در شکل‌های ۲ ج و ۲ د، بلوک‌های بتنی رویه و ژئوگرید مورد استفاده، نشان داده شده است.

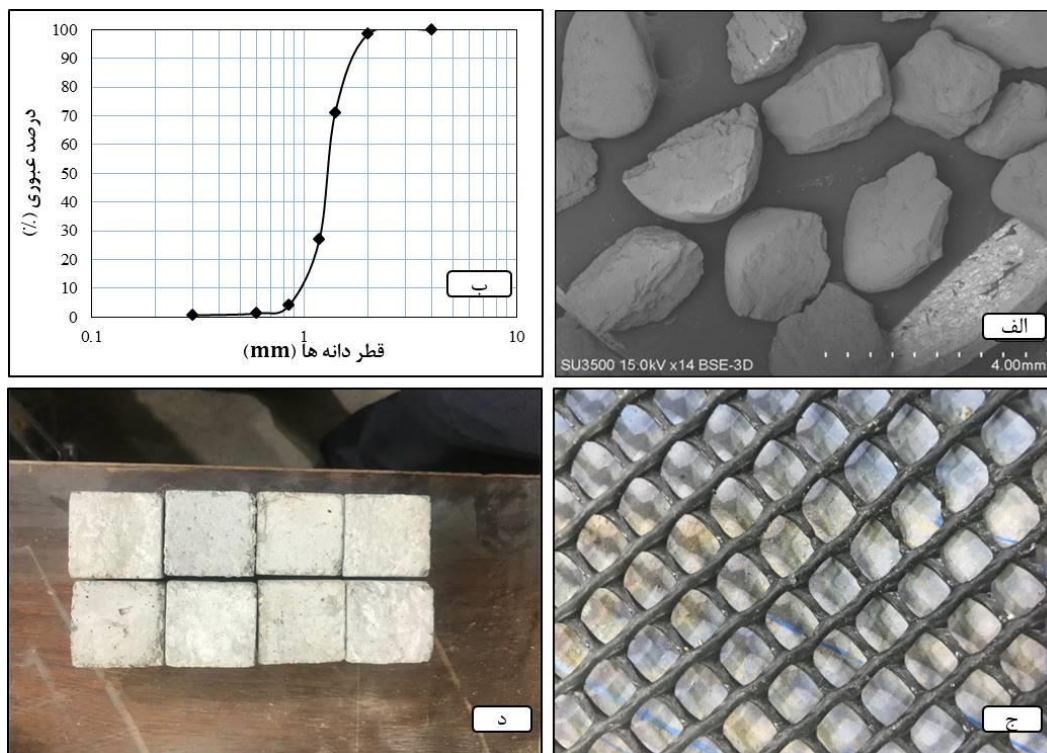
⁵ Zheng

⁶ Fox

⁷ Abu-Farsakh

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید

مشخصات مکانیکی		مشخصات فیزیکی	
۶/۱	مقاومت کششی بیشینه (kN/m)	۱۰×۱۰	اندازه چشمه ها (mm)
۵۱/۷	کشیدگی بیشینه در مقاومت بیشینه (%)	۳/۳	ضخامت (mm)
۲/۹	مقدار بار در کشش ۱۰٪ (kN/m)	۷۰۰	وزن واحد سطح (gr/m ²)
		HDPE	جنس پلیمر

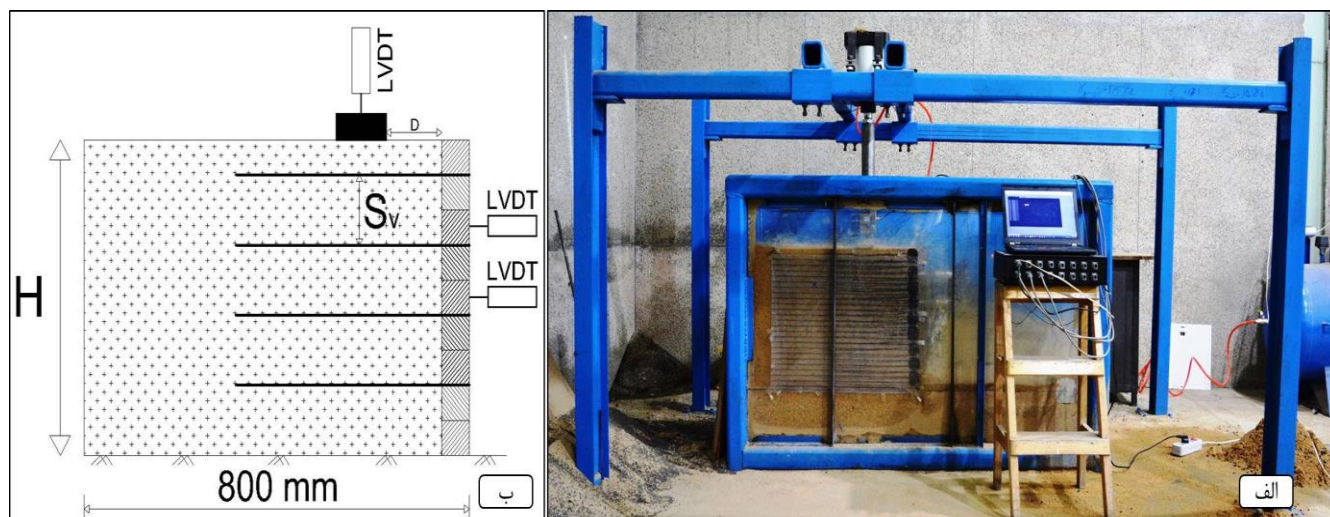


شکل ۲. الف) تصویر ماسه استفاده شده (ماسه D11 فیروزکوه)، ب) منحنی دانه بندی، ج) تصویر ژئوگرید، د) بلوک های رویه

جدول ۲. مقیاس شبیه سازی (نسبت نمونه واقعی به نمونه مدل)

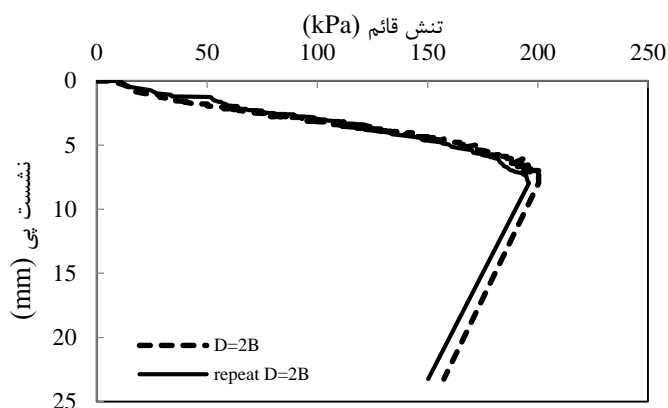
ابعاد واقعی	ابعاد مدل	عدد مقیاس	پارامتر
۲۲۰۰	۴۵۰	N	ارتفاع نمونه (mm)
۴۰۰۰	۸۰۰		طول نمونه (mm)
۲۲۰۰	۴۵۰		طول لایه ژئوگرید (mm)
۴۵۰	۹۰		فاصله قائم لایه های ژئوگرید (mm)
۳۷۵	۷۵		عرض پی نواری (mm)
۲۲۵×۲۵۰×۲۵۰	۴۵×۵۰×۵۰		ابعاد بلوک های رویه (mm)
۵۰×۵۰	۱۰×۱۰		ابعاد چشمه ژئوگرید (mm ²)
۷/۲۵	۱/۴۵		قطر متوسط دانه ها (D ₅₀) (mm)
۱۵۲/۵	۶/۱	N ²	مقاومت کششی ژئوگرید (kN/m)

سیستم بارگذاری و محفظه آزمایش در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، طراحی و ساخته شد که طول، عرض و ارتفاع محفظه آزمایش به ترتیب ۱۶۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر است. برای ثبت تغییر شکل‌های مدل فیزیکی، در یک وجه از دیوار از دیواره شفاف از جنس پلکسی گلس استفاده شد. بارگذاری نمونه توسط یک جک پنوماتیک با سیستم کنترل بار و تغییر شکل انجام شد که از طریق یک لوپ بسته، بارها بطور پیوسته و سریع توسط سیستم بارگذاری (CDAS) کنترل و اندازه‌گیری می‌شد. مقادیر تنش و جابجایی‌های رویه دیوار و نیز نشست پی از طریق سنسورهای بار و تغییر شکل اندازه‌گیری و توسط سیستم قرائت داده‌ها^۸ به کامپیوتر منتقل شد. به منظور شبیه سازی دو بعدی (کرنش صفحه‌ای) سیستم پل و کوله، از یک صفحه فلزی صلب به ضخامت ۲۵ میلی‌متر و عرض ۷۵ میلی‌متر و طولی برابر با عرض محفظه آزمایش (۴۰ سانتی‌متر) استفاده شد. برای حذف اصطکاک بین دانه های ماسه و دیوارهای جانبی یک لایه طلق نازک به دیوارهای جانبی چسبانده و روی آن گریس مالی شد. بار جک به وسط پی نواری وارد شد. در شکل ۳- ب محل قرارگیری لایه‌های مسلح کننده و موقعیت جابجایی سنج‌ها نشان داده شده است. فاصله لایه‌های ژئوگرید و زاویه اصطکاک خاک بیشترین تاثیر را در مقدار نیروی کششی ژئوگرید دارد [۸] و این فاصله باید به گونه ای انتخاب شود که عملکرد مجموعه خاکریز و مسلح کننده ها مختل نشود و عملاً ظرفیت باربری بین المان ها توزیع شود. مدل فیزیکی در این تحقیق دارای چهار لایه ژئوگرید به فواصل ۹۰ میلی‌متر و ارتفاع کلی ۴۵۰ میلی‌متر است که یک کوله خاک مسلح به ارتفاع ۲۲۰۰ میلی-متر را شبیه‌سازی می‌کند، در جدول ۲ ابعاد نمونه مدل و نمونه واقعی آورده شده است. طول لایه‌های ژئوگریدی برای ساخت دیوارهای خاک مسلح طبق توصیه FHWA [۲۴] معمولاً بین ۰٫۶ الی ۰٫۷ ارتفاع دیوار در نظر گرفته می‌شود تا از بیرون کشیدگی ژئوگرید که از مدهای غالب گسیختگی داخلی سازه‌های خاک مسلح می‌باشد، جلوگیری شود. در این تحقیق طول ژئوگرید در جهت اطمینان برابر با ارتفاع دیوار در نظر گرفته شد. آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه با قرارگیری پی در سه محل با فواصل B، 2B و 3B از لبه دیوار (که در آن B عرض پی می باشد) و بارگذاری با سرعت ثابت ۰/۵ کیلوگرم در ثانیه تا نقطه گسیختگی ادامه یافت. برای بررسی صحت داده ها و تکرار پذیر بودن نتایج، پی در فاصله 2B از لبه دیوار قرار گرفت و پس از دو بار آزمایش نتایج تنش قائم در برابر نشست پی بر هم منطبق شد که در شکل ۴ آمده است.



شکل ۳. الف) تصویر دستگاه آزمایش، ب) تصویر شماتیک نمونه

⁸ Data Logger

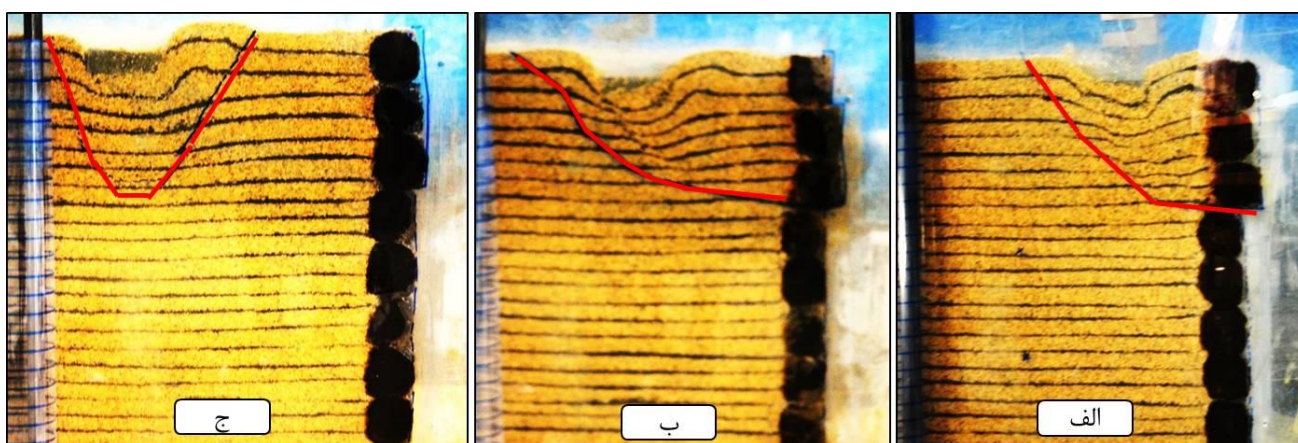


شکل ۴. آزمایش تکرار پذیری نتایج برای فاصله پی از لبه دیوار برابر 2B

۳- بحث و نتایج

در این تحقیق پی نواری واقع بر روی دیوار در سه فاصله مختلف از لبه داخلی دیوار قرار داده شد. سپس مدل تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفت و تا زمان خرابی پی تنش‌ها و تغییر شکل‌ها ثبت شد.

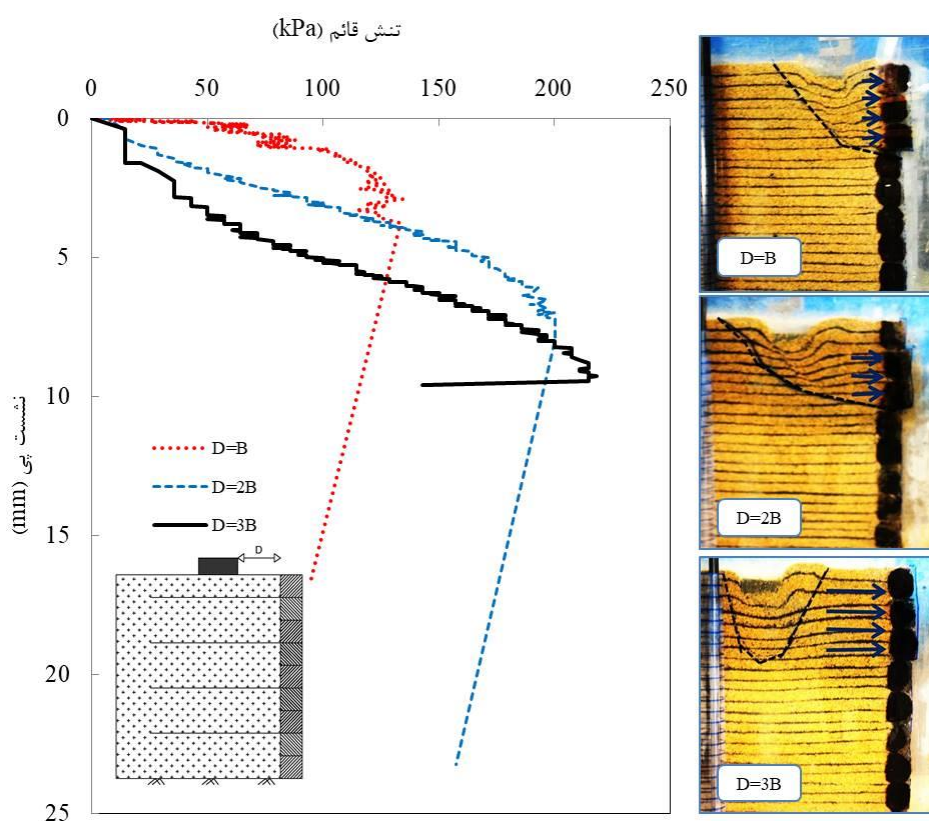
شکل ۵، تصویر مدل فیزیکی در شرایط گسیختگی را نشان می‌دهد. خطوط قرمز رنگ، مسیر خرابی (تجمع کرنش^۹) را در مدل فیزیکی نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، در فواصل کم پی از رویه دیوار، مد گسیختگی غالب عمدتاً ناشی از خرابی رویه دیوار است و با افزایش فاصله از رویه دیوار، ظرفیت باربری مصالح پرکننده دیوار (ماسه) و المان‌های ژئوسنتتیک تعیین کننده مقدار باربری پی هستند. بازارست [۲۵] در سال ۲۰۱۴ بیان کرد به دلیل عدم وجود اتصال مکانیکی بین رویه و خاکریز مد گسیختگی غالب در GRSها لغزش داخلی در جسم دیوار می‌باشد. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق نیز نمایانگر همین مورد می‌باشد.



شکل ۵. مدهای مختلف گسیختگی دیوار در حالت فواصل پی به ترتیب الف) B، ب) 2B و ج) 3B از لبه دیوار

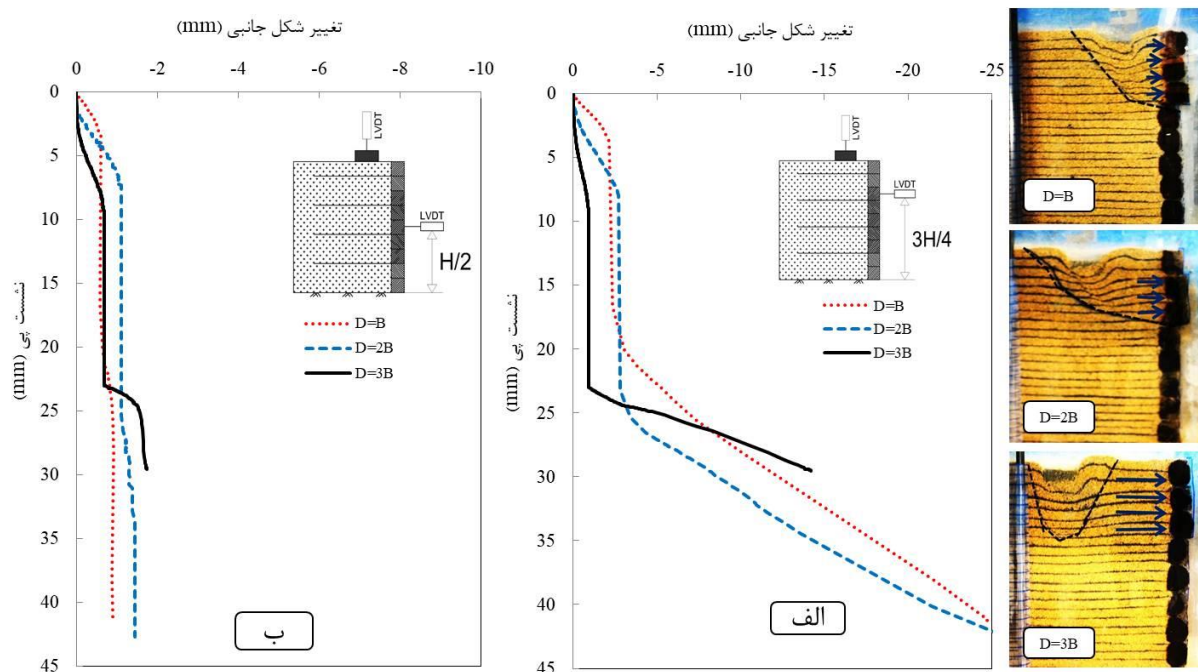
⁹ Strain localization

شکل ۶ تغییرات نشست پی در مقابل بار وارد بر پی را برای فواصل مختلف قرارگیری پی نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، با افزایش فاصله پی از لبه دیوار، حداکثر باربری پی افزایش می‌یابد. در شرایط مختلف قرارگیری پی (فواصل B، 2B و 3B) مقدار حداکثر باربری نهایی پی (صرف نظر از مقدار تغییر شکل فونداسیون) به ترتیب ۱۳۰، ۲۱۰ و ۲۳۰ کیلو پاسکال می‌باشد. ژائو و همکاران [۱۴]، افزایش ظرفیت باربری پی را با افزایش فاصله مطرح کردند و عنوان نمودند که در فواصل بیش از ۰/۴ ارتفاع دیوار مقدار ظرفیت باربری پی ثابت می‌ماند. در تحقیق حاضر، مقدار D/H (فاصله از لبه رویه به ارتفاع دیوار) برای محلهای مختلف قرارگیری پی (یعنی فواصل B، 2B و 3B) به ترتیب ۰/۱۶، ۰/۳۴ و ۰/۵ ارتفاع دیوار می‌باشد. در نتایج به دست آمده ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله از لبه تا ۰/۵ برابر ارتفاع همچنان افزایش ظرفیت باربری رخ می‌دهد اما مقدار افزایش ظرفیت باربری در حالت 3B نسبت به حالت 2B بسیار کمتر از حالت B به 2B می‌یابد. نکته قابل توجه در این شکل، شیب افزایش بار با تغییر شکل است. همانطور که از این شکل مشخص است با افزایش فاصله پی از رویه دیوار، شیب منحنی بار تغییر شکل کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر با افزایش فاصله از رویه دیوار، رفتار مجموعه خاک مسلح به سمت رفتار تغییر شکل پذیر می‌رود. دلیل این امر نوع گسیختگی حاکم بر مدل است. برای شرایطی که پی در فاصله B از لبه دیوار قرار دارد، گسیختگی موضعی دیوار منجر به افت ظرفیت باربری پی و تغییر شکل‌های زیاد آن می‌شود. در این شرایط سختی حاکم بر مجموعه خاک مسلح، عمدتاً ناشی از افت مقاومت برشی ماسه است که با توجه به سختی بالای ماسه منجر به رفتار ترد (شکننده) مجموعه خاک مسلح خواهد شد. اما در شرایطی که پی در فاصله 3B از لبه دیوار قرار دارد، ظرفیت باربری پی تقریباً مستقل از تغییر شکل‌های رویه دیوار است و با گسیختگی ژئوگرید، پی به خرابی می‌رسد. در این شرایط، رفتار انعطاف پذیر ژئوگرید بر سیستم خاک مسلح حاکم می‌شود. با افزایش بار و به کار افتادن ژئوگریدها، گسیختگی خاک زیر پی تحت تاثیر رفتار انعطاف پذیر ژئوگرید است که از گسیختگی ناگهانی ماسه جلوگیری می‌کند.



شکل ۶. تغییرات نشست در مقابل تنش قائم پی برای فواصل مختلف قرارگیری پی از لبه دیوار

از آنجا که محل قرارگیری سربار و پی می‌تواند پروفیل تغییر شکل رویه دیوار را عوض کند [۱۳] و تغییر شکل رویه دیوار یک پارامتر با اهمیت در ارزیابی پایداری و دیوارهای مسلح شده به شمار می‌رود، تغییرات جابجایی افقی رویه دیوار در مقابل میزان نشست پی برای دو نقطه میانه دیوار و یک چهارم بالایی آن ثبت شد که در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان جابجایی افقی در یک چهارم بالایی دیوار در تمامی مدل‌ها تقریباً دو برابر جابجایی میانه دیوار است. با افزایش نشست پی تا ۵ میلی‌متر، جابجایی جانبی در نمونه‌های با فاصله B و 2B بطور خطی افزایش یافت و پس از آن تا نشست حدود ۲۰ الی ۲۵ میلی‌متر تغییر شکل جانبی رویه دیوار ثابت ماند. دلیل این موضوع رفتار سیستم خاک مسلح است. با افزایش نشست پی به میزان ۵ میلی‌متر و تبدیل بارهای قائم وارد بر پی به فشار جانبی بر روی دیوار، بخش زیادی از ظرفیت باربری مجموعه خاک مسلح توسط مصالح پرکننده (ماسه) تامین می‌شود. بعبارت دیگر در تغییر شکل‌های اولیه مجموعه خاک مسلح، هنوز المان‌های تسلیح شروع به باربری نکرده‌اند و این مقدار از تغییر شکل ناشی از تغییر شکل خاک ماسه‌ای است. با افزایش مقدار تغییر شکل‌های مجموعه، اندرکنش بین خاک و ژئوگرید شروع شده و المان‌های مسلح کننده شروع به باربری می‌کنند. در این شرایط و با افزایش تغییر شکل‌های زیر پی از ۵ تا حدود ۲۰ الی ۲۵ میلی‌متر، بخش زیادی از تنش‌ها و تغییر شکل‌های پی توسط مجموعه خاک و ژئوسنتتیک تحمل می‌شود و لذا رویه دیوار تغییر شکل چندانی نمی‌یابد. پس از این مرحله و با افزایش نشست فونداسیون از مقدار بحرانی (آستانه ظرفیت باربری مجموعه دیوار)، تغییر شکل‌های رویه بطور فزاینده‌ای، افزایش می‌یابند که شروع خرابی مجموعه خاک مسلح است. این روند با توجه به ابعاد فونداسیون سطحی عمدتاً در یک چهارم فوقانی دیوار رخ می‌دهد و در میانه دیوار، تغییر شکل‌های زیادی رخ نخواهد داد. نکته قابل توجه، افزایش تغییر شکل‌های میانی دیوار در فونداسیون دورتر (فاصله 3B) نسبت به فونداسیون‌های نزدیک‌تر است. از آنجا که مد گسیختگی این فونداسیون از نوع افت مقاومت خاک زیر فونداسیون است (تاثیر خرابی رویه بر ظرفیت باربری کمتر است)، بخش زیادی از تنش وارده به عمق خاک منتقل می‌شوند و از این رو تغییر شکل‌های میانی دیوار بیشتر خواهد بود. در مطالعات قبلی [۱۴،۲۷] نیز عنوان شده است که تغییر شکل دیوارهای GRS معمولاً در نیمه بالایی و در یک سوم بالایی دیوار رخ می‌دهند.



شکل ۷. نشست پی در مقابل تغییر شکل افقی دیوار در فواصل مختلف قرارگیری آن از لبه دیوار، محل قرارگیری LVDT به ترتیب در الف) یک چهارم فوقانی دیوار و ب) قسمت میانی دیوار

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار دیوارهای خاک مسلح شده بعنوان کوله پل، یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی (با مقیاس ۱ به ۵) ساخته شد. رویه دیوار از بلوک‌های بتنی ساخته شد و در کوله‌ی خاک مسلح، از چهار لایه ژئوگرید برای تسلیح خاک استفاده شد. تاثیر محل پی نواری بر روی تغییر شکل‌های رویه دیوار، ظرفیت باربری و نشست زیر پی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

- ۱- در فواصل نزدیک پی به رویه دیوار GRS، مد گسیختگی غالب دیوار، خرابی موضعی دیوار است. در حالیکه با افزایش فاصله از رویه دیوار، مد گسیختگی غالب، باربری مجموعه خاک و ژئوگرید می‌باشد.
- ۲- در شرایطی که مد گسیختگی غالب ناشی از عملکرد همزمان ژئوگرید و ماسه است (یعنی در شرایطی که فاصله محل پی از رویه دیوار زیاد باشد)، رفتار تغییر شکل پذیر ژئوگرید منجر به افزایش تدریجی تغییر شکل‌های زیر فونداسیون می‌شود که نتیجه آن بروز یک رفتار انعطاف پذیر برای پی است. بر خلاف آن، در شرایطی که گسیختگی دیوار مد خرابی غالب مجموعه است، بدلیل عدم اندرکنش بین خاک و المان ژئوگرید، گسیختگی سریع ماسه منجر به وقوع یک رفتار ترد و شکننده برای مجموعه خاک مسلح می‌شود.
- ۳- مقایسه تغییر شکل‌های افقی رویه دیوار برای پی‌های با محل‌های مختلف نشان می‌دهد با توجه به ماهیت سطحی فونداسیون، بخش عمده تغییر شکل‌های رویه در یک چهارم فوقانی دیوار رخ می‌دهند.
- ۴- برای همه فونداسیون‌ها، یک مقدار مشخص نشست زیر فونداسیون (تقریباً ۵ میلیمتر) برای شروع عملکرد همزمان خاک و ژئوگرید مورد نیاز است. پس از وقوع این نشست که ناشی از تغییر شکل ماسه است، عملکرد همزمان خاک و ژئوگرید شروع شده و بخش زیادی از تغییر شکل‌های رویه توسط ژئوگرید، تحمل می‌شود. در این شرایط تغییر شکل‌های رویه تقریباً ثابت بوده و افزایش چندانی نخواهد داشت. افزایش تغییر شکل جانبی دیوار پس از این مرحله می‌تواند نشانه‌ای از وقوع خرابی پیش رونده در مجموعه خاک مسلح باشد.

منابع

- [1] R.J. Lock, Integral Bridge Abutments, 2002.
- [2] M.C. M Brown, Abutment : An Overview, in: 2014: pp. 4203–4212.
- [3] M.T. Adams, W. Schlatter, T. Stabile, Geosynthetic reinforced soil integrated abutments at the bowman road bridge in Defiance County, Ohio, Geotech. Spec. Publ. (2007) 12. [https://doi.org/10.1061/40909\(228\)12](https://doi.org/10.1061/40909(228)12).
- [4] M. Adams, J. Nicks, T. Stabile, J. Wu, W. Schlatter, J. Hartmann, Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System, Synthesis Report, (2011) 64. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11027/11027.pdf>.
- [5] N. Abu-Hejleh, T. Wang, J.G. Zornberg, Performance of geosynthetic-reinforced walls supporting bridge and approaching roadway structures, in: Proc. Sess. Geo-Denver 2000 - Adv. Transp. Geoenvironmental Syst. Using Geosynth. GSP 103, 2000: pp. 218–243. [https://doi.org/10.1061/40515\(291\)15](https://doi.org/10.1061/40515(291)15).
- [6] S.H. Mirmoradi, M. Ehrlich, Evaluation of the effect of toe restraint on GRS walls, Transp. Geotech. 8 (2016) 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.03.002>.
- [7] M. Ehrlich, S.H. Mirmoradi, R.P. Saramago, Evaluation of the effect of compaction on the behavior of geosynthetic-reinforced soil walls, Geotext. Geomembranes. 34 (2012) 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.05.005>.
- [8] Y. Zheng, P.J. Fox, J.S. McCartney, Numerical study on maximum reinforcement tensile forces in geosynthetic reinforced soil bridge abutments, Geotext. Geomembranes. 46 (2018) 634–645. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.007>.

- [9] O. Rahmouni, A. Mabrouki, M. Mellas, Numerical study of geogrid-reinforced segmental earth retaining wall, *J. Appl. Eng. Sci. Technol.* 1 (2015) 43-49-49.
- [10] S.M.B. Helwany, G. Reardon, J.T.H. Wu, Effects of backfill on the performance of GRS retaining walls, *Geotext. Geomembranes.* 17 (1999) 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(98\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(98)00021-1).
- [11] B. Hatami, Kianoosh, PARAMETRIC ANALYSIS OF REINFORCED SOIL WALLS WITH DIFFERENT BACKFILL MATERIAL PROPERTIES Kianoosh Hatami School of Civil Engineering and Environmental Science Richard J . Bathurst GeoEngineering Centre at Queen ' s-RMC Royal Military College of Canada , K, (2005) 14-16.
- [12] S.M.B. Helwany, J.T.H. Wu, A. Kitsabunnarat, Simulating the behavior of GRS bridge abutments, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 133 (2007) 1229-1240. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:10\(1229\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:10(1229)).
- [13] S.H. Mirmoradi, M. Ehrlich, Experimental evaluation of the effects of surcharge width and location on geosynthetic-reinforced soil walls, *Int. J. Phys. Model. Geotech.* 19 (2019) 27-36. <https://doi.org/10.1680/jphmg.16.00074>.
- [14] C. Xiao, J. Han, Z. Zhang, Experimental study on performance of geosynthetic-reinforced soil model walls on rigid foundations subjected to static footing loading, *Geotext. Geomembranes.* 44 (2016) 81-94. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.06.001>.
- [15] Y. Zheng, P.J. Fox, Numerical investigation of the geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system under static loading, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 143 (2017) 1-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001665](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001665).
- [16] Y. Zheng, P.J. Fox, Numerical investigation of geosynthetic-reinforced soil bridge abutments under static loading, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 142 (2016) 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001452).
- [17] M. Abu-Farsakh, A. Ardah, G. Voyiadjis, Numerical Investigation of the Performance of a Geosynthetic Reinforced Soil-Integrated Bridge System (GRS-IBS) under Working Stress Conditions, *Geotech. Spec. Publ.* 2018-March (2018) 76-87. <https://doi.org/10.1061/9780784481608.008>.
- [18] M.Y. Abu-Farsakh, A. Ardah, G.Z. Voyiadjis, Numerical parametric study to evaluate the performance of a Geosynthetic Reinforced Soil-Integrated Bridge System (GRS-IBS) under service loading, *Transp. Geotech.* 20 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.04.001>.
- [19] H. Ahmadi, A. Bezuijen, Full-scale mechanically stabilized earth (MSE) walls under strip footing load, *Geotext. Geomembranes.* 46 (2018) 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.12.002>.
- [20] Y. Zheng, A.M. Asce, P.J. Fox, F. Asce, P.B. Shing, M. Asce, J.S. McCartney, F. Asce, Physical Model Tests of Half-Scale Geosynthetic Reinforced Soil Bridge Abutments . I: Static Loading, 145 (2019) 1-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002152](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002152).
- [21] Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 2007. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E01.2>.
- [22] Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a, 2006. <https://doi.org/10.1520/D4253-00R06>.
- [23] Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or, 2010. <https://doi.org/10.1520/D6637-10.2>.
- [24] J. Nicks, M. Adams, P.S.. Ooi, T. Stabile, Geosynthetic Reinforced Soil Performance Testing — Axial Load Deformation Relationships, *Fed. High W. Adm.* (2013).
- [25] R.J. Bathurst, Challenges and recent progress in the analysis, design and modelling of geosynthetic reinforced soil walls, 10th Int. Conf. Geosynth. ICG 2014. (2014).
- [26] J.E. Nicks, D. Esmaili, M.T. Adams, Geotextiles and Geomembranes Deformations of geosynthetic reinforced soil under bridge service loads, *Geotext. Geomembranes.* 44 (2016) 641-653. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.03.005>.