

چکیده

در این مقاله عملکرد لایه‌های کاهنده فشار پلیمری در بهبود پاسخ دینامیکی دیوارهای حائل بررسی گردیده است. برای این منظور با انجام یک سری آزمایش میز لرزه ۱g، رفتار دیوار حائل تسلیم نشده در دو حالت با و بدون لایه کاهنده فشار مدل‌سازی شده است. جهت ساخت لایه کاهنده فشار از فوم پلی‌یورتان (PU) استفاده شده که ضمن دارا بودن خصوصیات مکانیکی مناسب، برخی از محدودیت‌های مصالحی که در تحقیقات گذشته به کار برده شده را مرتفع می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که اجرای لایه کاهنده فشار از جنس فوم PU، نیروی افقی کل و دینامیکی وارد بر دیوار را به ترتیب به طور متوسط ۳۰ و ۴۵ درصد کاهش داده است. به‌ازای سختی بی‌بعد یکسان، این نوع فوم در مقایسه با مصالح مشابه نظیر فوم پلی‌استایرن انبساطی (EPS) عملکرد بهتری را حاصل نموده است. همچنین ملاحظه گردیده که این روش در تحریک‌های متوسط و شدید (دامنه شتاب ورودی بزرگ‌تر از ۰/۲۴g) بازدهی بیشتری دارد.

واژگان کلیدی: آزمایش میز لرزه ۱g، دیوار حائل، فشار خاک، لایه کاهنده فشار لرزه‌ای، فوم پلی‌یورتان.

بهبود پاسخ لرزه‌ای دیوارهای حائل تسلیم نشده با استفاده از لایه‌های کاهنده فشار پلیمری

ایمان گل‌پذیر

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

عباس قلندرزاده (نویسنده مسئول)

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
aghaland@ut.ac.ir

محمد کاظم جعفری

استاد، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۱- مقدمه

ارزیابی عملکرد لایه‌های کاهنده فشار بر بهبود پاسخ لرزه‌ای دیوارهای حائل انجام پذیرفته که تمامی آنها بر استفاده از مصالحی نظیر خرده لاستیک^۵ و به‌ویژه بلوک‌های فوم پلی‌استایرن انبساطی^۶ (EPS) متمرکز بوده است [۳-۸]. انتخاب مصالح مناسب برای ساخت لایه کاهنده فشار لرزه‌ای بر اساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و صرفه اقتصادی آنها صورت می‌گیرد. بررسی‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیکی بر روی خرده لاستیک و فوم EPS انجام شده بیانگر آن است که این مصالح به دلیل دارا بودن مدول الاستیسیته کمتر و تراکم‌پذیری و نسبت میرایی بیشتر در مقایسه با خاکدانه‌ها، گزینه ایده‌آلی برای ساخت لایه کاهنده فشار لرزه‌ای محسوب می‌شوند [۹-۱۴]. میزان کاهش فشار در این روش به عوامل متعددی نظیر سختی و ضخامت مصالح تراکم‌پذیر، سختی دیوار و خصوصیات محرک ورودی بستگی دارد. در بهترین شرایط، استفاده از خرده لاستیک و فوم EPS به ترتیب سبب کاهش ۵۵ و ۵۰ درصدی در نیروهای کل وارد بر دیوار گردیده است [۵، ۷].

ساخت لایه کاهنده فشار لرزه‌ای^۱ با مصالح تراکم‌پذیر^۲ یکی از روش‌های نوین بهبود پاسخ دینامیکی دیوارهای حائل است که سابقه آن به کمتر از دو دهه می‌رسد [۱-۲]. در این روش لایه‌ای از مصالح تراکم‌پذیر با سختی نسبی کم و ضخامت محدود در حد فاصل دو مصالح سخت‌تر (دیوار حائل و خاک‌ریز) قرار داده می‌شود. لایه کاهنده فشار لرزه‌ای به دلیل خاصیت تراکم‌پذیری بالا به صورت یک ضربه‌گیر عمل کرده و بخش عمده‌ای از اضافه فشار دینامیکی را مستهلک می‌سازد. چنانچه این لایه در مجاورت دیوارهای حائل تسلیم نشده^۳ نظیر دیوارهای زیرزمین ساختمان‌ها و کوله‌پل‌ها^۴ اجرا شود، علاوه بر کاهش فشار دینامیکی خاک، فشار جانبی استاتیکی را نیز کاهش می‌دهد. در چنین شرایطی با فشردگی لایه کاهنده، فشار خاک‌ریز از حالت سکون به محرک تبدیل شده و با بسیج شدن مقاومت برشی خاک، فشار جانبی وارد بر دیوار حائل کاهش می‌یابد.

طی دو دهه اخیر، مطالعات آزمایشگاهی نسبتاً جامعی جهت

میز لرزه $1g$ تحت دامنه‌های شتاب مختلف و در دو وضعیت تدارک دیده شده است: (۱) دیوار با لایه کاهنده فشار پلیمری از جنس فوم PU (مدل بهسازی شده) و (۲) دیوار بدون لایه کاهنده فشار (مدل بدون بهسازی). هدف از این تحقیق، بررسی کارایی فوم PU به‌عنوان گزینه‌ای جدید در ساخت لایه کاهنده فشار لرزه‌ای با توجه به مزایای آن می‌باشد.

۲- روش آزمایش

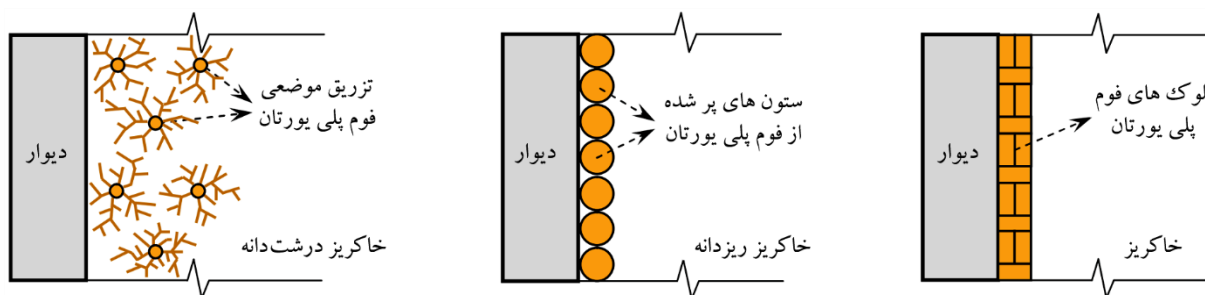
۲-۱- دستگاه و تجهیزات مدل‌سازی فیزیکی

در تحقیق حاضر از دستگاه میز لرزه $1g$ موجود در آزمایشگاه مدل‌سازی فیزیکی و سانتریفیوژ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران برای ارزیابی رفتار دینامیکی سیستم (شامل دیوار حائل، لایه کاهنده فشار و خاک‌ریز) استفاده شد. آزمایش‌های میز لرزه $1g$ به‌ویژه در مواردی که هدف درک رفتار لرزه‌ای خاک و سازه مجاور آن و یا اعتبارسنجی مدل‌های عددی باشد، گزینه‌ای ایده‌آل به‌شمار می‌روند. مدل‌های فیزیکی شامل دو مدل بهسازی شده و بدون بهسازی (فاقد لایه کاهنده فشار) بودند که درون جعبه‌ای از جنس پلکسی گلاس 11 به طول 178 سانتی‌متر، عرض 45 سانتی‌متر و ارتفاع 70 سانتی‌متر آماده‌سازی شدند.

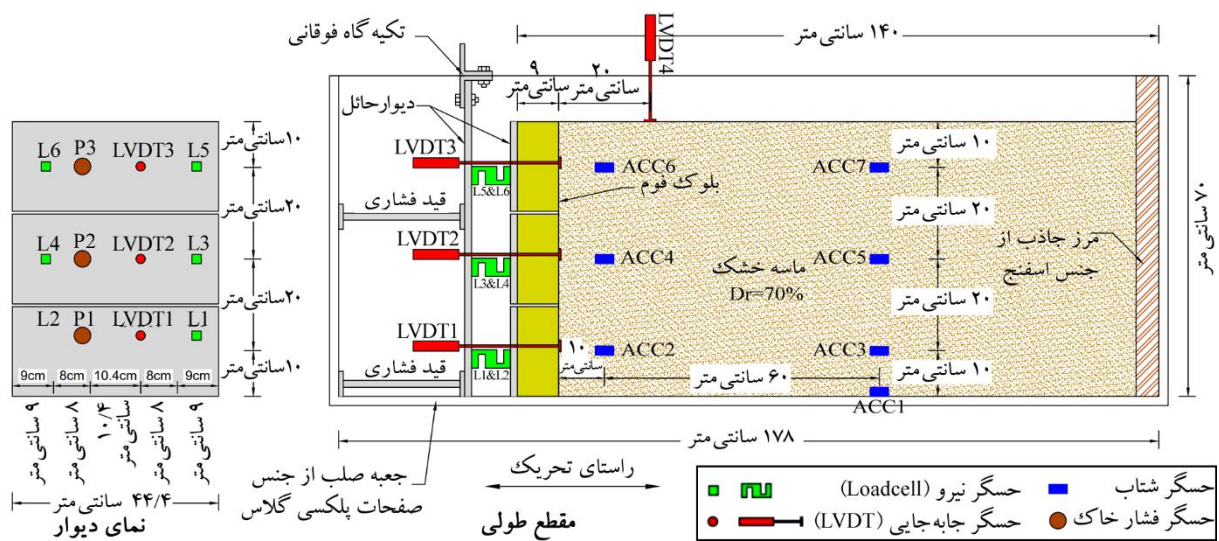
جزئیات کامل پیکربندی مدل‌های آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق شکل، دیوار حائل آزمایش از دو رویه آلومینیوم آلیاژی سخت، هر یک به ضخامت 8 میلی‌متر تشکیل یافت که در فاصله 10 سانتی‌متر از یکدیگر قرار داشتند.

علاوه بر خرده لاستیک و فوم EPS، فوم قابل تزریق پلی‌یورتان^۷ (که از این پس PU خوانده می‌شود) نیز به دلیل مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری کم و نسبت میرایی قابل توجه، به‌صورت بالقوه ویژگی‌های یک مصالح مناسب برای ساخت لایه کاهنده فشار را دارا می‌باشد [۱۵]. این نوع فوم در مقایسه با فوم EPS گزینه ارزان‌تری به حساب می‌آید. از طرفی با توجه به حالت اولیه مایع فوم PU، می‌توان از آن به شکل‌های مختلف از جمله بلوک‌های پیش‌ساخته (به‌صورت فوم خالص یا مخلوط فوم-خاک) و تزریق در خاک جهت ایجاد لایه کاهنده فشار استفاده نمود (شکل ۱). قابل تزریق بودن فوم PU، امکان ساخت لایه کاهنده فشار لرزه‌ای در پشت دیواره‌های موجود (که پیش‌تر ساخته شده و نیاز به بهسازی دارند) را به‌صورت تزریق موضعی^۸ و بدون نیاز به حفر ترانشه‌های طویل برای استقرار مصالح تراکم‌پذیر فراهم می‌سازد. به این ترتیب مشکلات اجرایی ناشی از ناپایداری موقت این ترانشه‌ها (به‌ویژه در خاک‌های ریزشی) مرتفع می‌گردد. در خاک‌ریزهای ریزدانه که به دلیل نفوذپذیری کم خاک و ویسکوزیته بالای فوم، شعاع تأثیر تزریق بسیار محدود است، راهکار عملی می‌تواند حفر چاه و ایجاد ستون‌های فوم در کنار یکدیگر (مشابه شمع‌های مماسی) باشد. با وجود مزایای یاد شده، تاکنون عملکرد این پلیمر به‌عنوان لایه کاهنده فشار لرزه‌ای ارزیابی نشده است.

در این مقاله با انجام مدل‌سازی فیزیکی^۹، اثر اجرای لایه‌های کاهنده فشار پلیمری بر پاسخ دیوارهای حائل تسلیم نشده بررسی شده است. برای این منظور، مجموعه‌ای از آزمایش‌های



شکل (۱): روش‌های مختلف اجرای لایه کاهنده فشار در پشت دیوار حائل (دید از بالا).

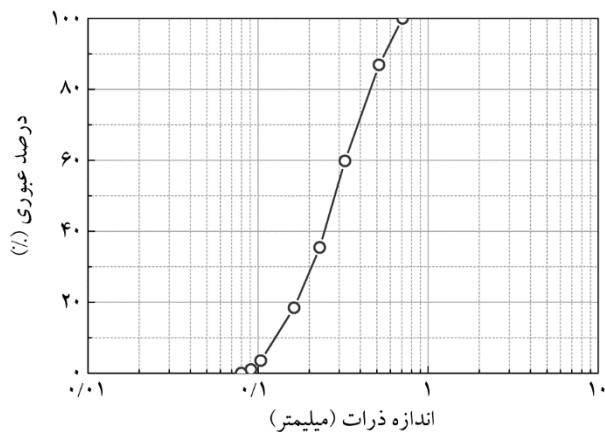


شکل (۲): پیکربندی مدل و جانمایی حسگرها.

۲-۲- مشخصات مصالح

۲-۲-۱- خاک ریز

از ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ خشک با تراکم نسبی ۷۰ درصد به عنوان مصالح خاک ریز استفاده شد. ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱، ماسه ریزدانه سیلیکاتی با دانه‌های شکسته به رنگ زرد-طلایی است که مطابق نمودار دانه‌بندی شکل (۳)، دارای دانه‌بندی یکنواخت می‌باشد. این ماسه، از جمله انواع ماسه مرجع در تحقیقات ژئوتکنیکی بوده و در آزمایش‌های مدل فیزیکی پیشین در کشورمان اغلب از آن استفاده شده است [۱۶]. ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ دارای ضریب یکنواختی ۲/۵۸ و ضریب



شکل (۳): حدود اندازه ذرات ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ [۱۸].

رویه مجاور خاک ریز از سه صفحه مجزا به ابعاد $19/8 \times 44/4$ سانتی متر ساخته شد. این صفحات با قرارگیری بر روی هم دیواری به ارتفاع ۶۰ سانتی متر را تشکیل دادند که با توجه به مقیاس ۱:۸ مدل فیزیکی، یک دیوار حائل صلب به ارتفاع ۴/۸ متر در مقیاس واقعی را نمایندگی می‌کرد. برای کاهش اثر جداره ۱۲، صفحات با فاصله ۳ میلی متر از یکدیگر و سطوح جعبه قرار گرفتند و فاصله بین آنها با اسفنج پر شد. این صفحات مجزا توسط شش عدد نیروسنج (سه ردیف دو تایی) به صفحه‌ای یکپارچه که دورتر از خاک ریز به جعبه آزمایش مقید شده بود، متصل گردید. برای تأمین گیرداری دیوار، این صفحه یکپارچه توسط دو نبشی با ابعاد $6 \times 6 \times 60$ میلی متر از بالا به صورت سرتاسری و دو ردیف قید فشاری در ترازهای میانی و تحتانی دیوار به جعبه آزمایش مقید گردید. چنین سیستمی معرف یک دیوار حائل صلب تسلیم نشده است که صفحات مجزای رویه مجاور خاک ریز، امکان اندازه‌گیری نیروهای وارده در ترازهای مختلف دیوار را فراهم می‌سازد. برای کاهش انعکاس امواج ناشی از صلبیت جداره جعبه نیز یک لایه اسفنج به عنوان مرز جاذب در انتهای دور جعبه در حد فاصل خاک ریز و جداره قرار داده شد.

تک‌محوری^{۱۳} بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل انجام گرفت که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. منحنی تنش - کرنش فوم PU به صورت الاستوپلاستیک با سخت‌شوندگی بوده و رفتار پلاستیک از حدود کرنش‌های ۳ درصد آغاز می‌شود [۱۵]. ضریب پواسون با اندازه‌گیری تغییر شکل‌های جانبی (در راستای شعاعی) نمونه‌ها در خلال بارگذاری، محاسبه گردیده است.

جدول (۲): مشخصات فیزیکی و مکانیکی فوم PU [۱۵].

مقدار	واحد	مشخصات
۰/۳۱	kN/m ³	وزن مخصوص، γ
۲/۶	MPa	مدول الاستیسیته مماسی، E_i
۶۸	kPa	تنش تسلیم، σ_y
۰/۰۲	-	ضریب پواسون، ν

۲-۳- قوانین مقیاس

اغلب مدل‌های فیزیکی در مقیاسی کوچک‌تر از مدل واقعی ساخته می‌شوند تا پاسخی سریع‌تر با صرف هزینه‌های کمتر و کنترل بیشتر به دست آید. نخستین گام مدل‌سازی فیزیکی، ایجاد شرایط تشابه بین مدل و سازه واقعی است. برای استخراج روابط تشابه لازم است معادلات خاک و سازه نوشته شده و شرایط مرزی برای این معادلات به دست آید. سپس روابط تشابه با ارضای معادلات به دست آمده محاسبه گردد. رابطه بین هر کمیت فیزیکی در مقیاس مدل و واقعیت به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$(V)_p = \lambda_v (V)_m \quad (1)$$

که در این رابطه، V_p ، کمیت مورد نظر در مقیاس واقعی؛ V_m ، کمیت در مقیاس مدل و λ_v ، ضریب مقیاس کمیت مورد نظر می‌باشد. با توجه به اینکه نمی‌توان تمام پارامترهای مدل را به گونه‌ای مقیاس نمود که در تمام جنبه‌ها شبیه مدل واقعی باشند، در هر آزمایش اولویت با مقیاس نمودن کمیت‌های مهم‌تر می‌باشد. بر اساس پیشنهاد یایی [۱۹] در مسائل مربوط به بررسی رفتار خاک-سازه-سیال، سه پارامتر طول (l)، جرم مخصوص (ρ) و کرنش (ϵ) به عنوان کمیت‌های اصلی و مستقل در نظر گرفته شده

انحنای ۰/۹۷ بوده و مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد خاک [۱۷]، ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) نامیده می‌شود. در جدول (۱)، مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ ارائه گردیده است. پارامترهای مقاومت برشی خاک ریز (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) با انجام یک سری آزمایش برش مستقیم بر روی این خاک با تراکم مشابه با خاک ریز در مدل فیزیکی تعیین گردید.

جدول (۱): مشخصات ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱.

مقدار	واحد	مشخصات
۱۵/۳	kN/m ³	وزن مخصوص، γ
۲/۶۵۸ ^(۱)	-	چگالی خاکدانه‌ها، G_s
۲/۵۸ ^(۱)	-	ضریب یکنواختی، C_u
۰/۹۷ ^(۱)	-	ضریب انحنای، C_c
۷۰	%	تراکم نسبی، D_r
۰/۹۴۳ ^(۱)	-	نسبت تخلخل حداکثر، e_{max}
۰/۶۰۳ ^(۱)	-	نسبت تخلخل حداقل، e_{min}
۳۹ ^(۲)	°	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ
۰ ^(۲)	kN/m ²	چسبندگی، c

۱- بر اساس نتایج تحقیقات پیشین [۱۸].

۲- بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم در تحقیق حاضر.

۲-۲- لایه کاهنده فشار

برای ساخت لایه کاهنده فشار پلیمری از بلوک‌هایی از جنس فوم PU استفاده شد. فوم مورد استفاده در این تحقیق از نوع تک‌جزئی انعطاف‌پذیر با ساختار سلولی باز بوده و وزن مخصوص آن در محدوده ۰/۲۸ kN/m³ تا ۰/۴۴ kN/m³ تغییر می‌کند. فوم PU قبل از پاشش یا تزریق در حالت مایع قرار دارد. در خلال واکنش شیمیایی فوم با آب یا سایر عوامل پف‌دهنده در زمان گیرش، حجم زیادی دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. دی‌اکسید کربن تولید شده در فضای درون فوم محبوس شده و با اعمال فشار به لایه سلول‌های PU سبب افزایش حجم و کاهش دانسیته فوم پس از گیرش می‌گردد. زمان گیرش این نوع فوم به کیفیت عامل پف‌دهنده و شرایط محیطی (رطوبت، دما و فشار) بستگی دارد. جهت تعیین مشخصات مقاومتی فوم مورد استفاده، آزمایش بارگذاری فشار

با تراکم نسبی ۷۰ درصد متراکم گردید. در شکل (۵) تصویر مدل، قبل و پس از خاک‌ریزی نشان داده شده است.

جدول (۳): ضرایب مقیاس در آزمایش میز لرزه ۱g.

ردیف	کمیت	ضریب مقیاس کلی (در حالت $\lambda_p=1$ و $\lambda_s=1/5$)	ضریب مقیاس تحقیق حاضر
۱	طول، l	λ_1	۸
۲	جرم مخصوص، ρ	۱	۱
۳	کرنش، ε	$\lambda_1^{-0.5}$	۲/۸۳
۴	تنش، σ	λ_1	۸
۵	نسبت تخلخل خاک، e	۱	۱
۶	تغییر مکان، u	$\lambda_1^{-0.5}$	۲۲/۶۳
۷	سرعت، \dot{u}	$\lambda_1^{-0.75}$	۴/۷۶
۸	شتاب، \ddot{u}	۱	۱
۹	زمان، t	$\lambda_1^{-0.75}$	۴/۷۶
۱۰	نیرو در واحد طول دیوار، F	λ_1^2	۶۴
۱۱	سختی، E	$\lambda_1^{-0.5}$	۲/۸۳
۱۲	فرکانس، f	$\lambda_1^{-0.5}$	۰/۳۵

و سایر کمیت‌ها بر اساس آنها تعیین خواهد شد. به این ترتیب در مدل فیزیکی ۱g تحقیق حاضر، سه ضریب مقیاس مستقل شامل ضریب مقیاس طولی (λ_1)، ضریب مقیاس جرم مخصوص (λ_p) و ضریب مقیاس کرنش (λ_s) وجود دارد. ضریب مقیاس جرم مخصوص برابر یک می‌باشد ($\lambda_p=1$) و با فرض اینکه خاک‌ریز در حین آزمایش در سطوح کرنش کوچک قرار داشته و مدول برشی اولیه ماسه (G_0) آن با مجذور سرعت موج برشی (V_s) متناسب باشد، بین ضرایب مقیاس طول و کرنش رابطه زیر برقرار است:

$$\lambda_\varepsilon = \lambda_1^{0.5} \quad (2)$$

ضریب مقیاس کمیت‌های وابسته نیز بر اساس قوانین تشابه و معادلات اساسی آنها تعیین می‌شوند. در جدول (۳)، ضرایب مقیاس هر کمیت مطابق با ضریب مقیاس هندسی این تحقیق که برابر ۸ انتخاب شده، ارائه گردیده است. از این بین، کنترل و تغییر تنها برخی از کمیت‌ها از جمله طول، جرم مخصوص، نفوذپذیری و نسبت تخلخل خاک نسبت به حالت واقعی ممکن بوده و با انتخاب مناسب آنها می‌توان پارامترهای دیگر را از روابط فیزیکی به دست آورد.

۲-۴- ساخت مدل و ابزارگذاری

لایه‌های کاهنده فشار با تزریق فوم PU به درون قالب‌های مکعبی و اسپری نمودن هم‌زمان حجم معینی آب بر روی آن (برای افزایش حجم) ساخته شد. بلوک‌های مکعبی برای مدت یک هفته در محیط مرطوب نگهداری و سپس در ابعاد ۲۲/۲×۱۹/۸ و ضخامت ۹ سانتی‌متر برش داده شدند (شکل ۴). به این ترتیب نسبت ضخامت لایه کاهنده فشار به ارتفاع دیوار ($t/h=0.15$) در محدوده نسبت بهینه ۰/۰۵ تا ۰/۴۰ [۲۰] قرار گرفت. شش عدد بلوک فوم به نحوی به رویه دیوار مجاور خاک‌ریز چسبانده شد که هر دو بلوک در تماس با یکی از صفحات مجزای دیوار قرار گرفته و فشار وارده را فقط به همان صفحه منتقل نماید. پس از استقرار بلوک‌ها، ماسه خشک فیروزکوه در شش لایه و با روش بارش خشک درون جعبه ریخته شد. لایه‌های خاک تا رسیدن به ارتفاع نهایی ۶۰ سانتی‌متر



شکل (۴): بلوک‌های آماده‌سازی شده برای ساخت لایه کاهنده فشار پلیمری.

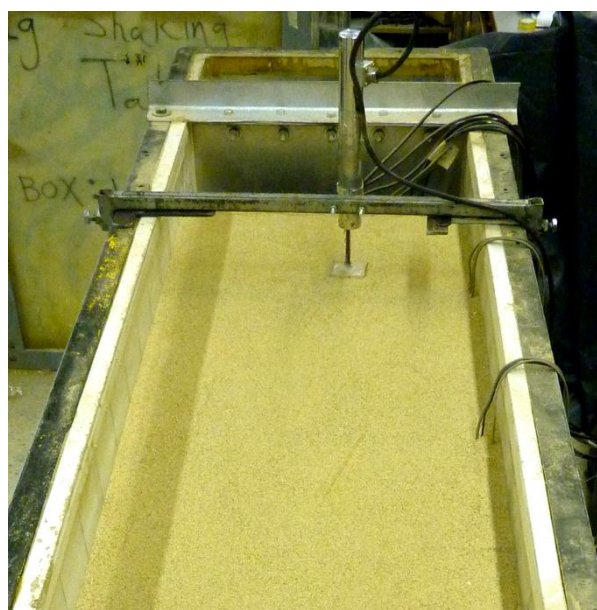
شش حسگر نیرو هر یک با ظرفیت ۲۵۰ کیلوگرم و دقت ۰/۰۲ درصد در حد فاصل رویه‌های مجزای دیوار حائل (مجاور خاک ریز) و صفحه تکیه گاه (مقید شده به جعبه) قرار داده شدند. با چنین ظرفیتی و بر اساس ابعاد مدل تحقیق حاضر، حسگرهای نیرو قادر بودند نیروهایی متناسب با شتاب تا ۱۰g را نیز اندازه‌گیری نمایند. این حسگرها به صورت سه ردیف دوتایی در فاصله ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر از کف مدل جانمایی گردیدند تا ضمن اندازه‌گیری نیروی کل، بررسی توزیع نیروها (فشار) در ارتفاع دیوار نیز امکان‌پذیر شود. علاوه بر حسگرهای نیرو، از سه عدد حسگر فشار خاک نیز جهت محاسبه فشار وارد بر دیوار استفاده گردید. این حسگرها از نوع دیافراگم‌دار، با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر بودند و می‌توانستند فشارهای تا حداکثر ۵۰ کیلوپاسکال را اندازه‌گیری کنند. با توجه به سطح تماس کوچک این نوع حسگرها، فشار محاسبه شده (به‌ویژه در شرایطی که مصالح مجاور رویه کاملاً صافی نداشته باشد) الزاماً نمی‌توانست نماینده فشار خاک در کل مدل باشد. از این رو پس از مقایسه با نتایج حسگرهای نیرو و حصول اطمینان از ناموثق بودن پاسخ حسگرهای فشار خاک، از ارائه نتایج آنها صرف‌نظر گردید. با نصب و استقرار هفت حسگر شتاب با ظرفیت ۲g به جداره بیرونی جعبه آزمایش و قسمت‌های مختلف خاک‌ریز، دامنه شتاب اعمالی در زمان تحریک مدل ثبت گردید. برای احتراز از اثر جداره‌های جعبه آزمایش بر پاسخ شتاب، حسگرهای شتاب مستقر در خاک‌ریز در وسط مدل (بر روی صفحه تقارن طولی) قرار داده شدند. توسط سه حسگر جابه‌جایی که از درون بلوک‌های فوم و صفحات دیوار عبور داده شدند، تغییرات فشردگی لایه کاهنده فشار در حین تحریک مدل اندازه‌گیری گردید و از یک حسگر جابه‌جایی نیز برای اندازه‌گیری نشست خاک‌ریز پشت دیوار استفاده شد.

۲-۵- تحریک مدل

در این مقاله نتایج ۱۳ آزمایش میز لرزه بر روی دو مدل شامل دیوار با لایه کاهنده فشار پلیمری (مدل بهسازی شده) و دیوار



(الف)



(ب)

شکل (۵): آماده‌سازی مدل فیزیکی: (الف) استقرار بلوک‌های کاهنده فشار، (ب) مدل نهایی پس از خاک‌ریزی.

برای ثبت پاسخ مدل از ۲۰ حسگر شامل حسگرهای نیرو، شتاب، تغییر مکان و فشار خاک استفاده شد. الگوی چینش و محل استقرار این حسگرها در شکل (۲) نشان داده شده است. ظرفیت حسگرها متناسب با دامنه محرک‌های ورودی و تخمین پاسخ‌های مدل بر اساس تئوری‌های مرسوم فشار جانبی خاک انتخاب شد.

گردید. در شکل (۶)، نمودار تاریخچه زمانی شتاب آزمایش PB-6 نشان داده شده است. جهت مقایسه با خصوصیات محرک ورودی آزمایش PB-6، نمودار تاریخچه زمانی شتاب آزمایش NB-5 (مدل بدون بهسازی با دامنه شتاب $0/37g$) نیز نمایش داده شده است (شکل ۷). در هیچ‌یک از دو آزمایش NB-5 و PB-6 بزرگنمایی قابل توجهی در سطوح مختلف مدل تحت فرکانس اعمالی رخ نداده است. در بیشترین حالت بزرگنمایی، دامنه شتاب ماکزیمم در شتاب‌نگار ACC7 (در فاصله 50 سانتی‌متر از کف مدل و فاصله 70 سانتی‌متر از لایه کاهنده فشار) به $0/40g$ رسیده است که افزایش قابل توجهی محسوب نمی‌شود. با توجه به مقدار بیشتر نیروهای دینامیکی و جابه‌جایی خاک ریز در ترازهای فوقانی (که در ادامه ملاحظه خواهد شد)، جابه‌جایی نسبی حسگرهای فوقانی شتاب (ACC4 تا ACC7) در حین تحریک مدل بیشتر بوده است. لذا بخشی از این بزرگنمایی احتمالاً در نتیجه جابه‌جایی‌های بیشتر در شتاب‌سنج‌های مدفون در لایه‌های سطحی خاک رخ داده است.

جدول (۴): مشخصات آزمایش‌های میز لرزه $1g$.

نوع مدل	شماره آزمایش	دامنه شتاب پایه (g)	ضخامت لایه کاهنده فشار (cm)
مدل بدون بهسازی	NB-1	$0/07$	-
	NB-2	$0/14$	-
	NB-3	$0/21$	-
	NB-4	$0/29$	-
	NB-5	$0/38$	-
	NB-6	$0/46$	-
مدل بهسازی شده	PB-1	$0/06$	۹
	PB-2	$0/12$	۹
	PB-3	$0/19$	۹
	PB-4	$0/24$	۹
	PB-5	$0/29$	۹
	PB-6	$0/37$	۹
	PB-7	$0/46$	۹

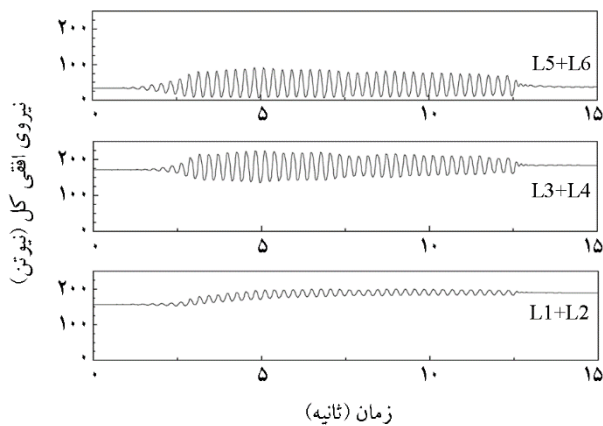
بدون لایه کاهنده فشار (مدل بدون بهسازی) در دامنه‌های شتاب مختلف ارائه شده است. در همه آزمایش‌ها یک محرک ورودی به صورت موج سینوسی با فرکانس ثابت (بین $3/5$ تا $3/6$ هرتز) و برای مدت 10 ثانیه در راستای طولی اعمال گردید. بر اساس قوانین مقیاس پیشنهادی یایی [۱۹]، تحریک مدل دیوار حائل به ارتفاع 60 سانتی‌متر با دامنه شتاب $0/4g$ و فرکانس $3/6$ هرتز در مدت‌زمان 10 ثانیه با ضریب مقیاس 8 (مقیاس تحقیق حاضر) معادل بار دینامیکی با همین دامنه شتاب و فرکانس $1/3$ هرتز می‌باشد که در مدت‌زمان 47 ثانیه به دیوار حائل به ارتفاع $4/8$ متر وارد می‌گردد. ضریب مقیاس وزن مخصوص و نسبت تخلخل خاک نیز برابر یک بوده و مقدار آنها در مقیاس واقعی و مقیاس مدل یکسان است. به این ترتیب محدوده‌ی فرکانس اعمالی در مدل فیزیکی معادل فرکانس طبیعی در یک زلزله با فرکانس غالب پایین می‌باشد. دامنه شتاب پایه به تفکیک هر آزمایش در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به ماهیت غیر تخریبی آزمایش‌ها، دامنه شتاب اعمالی در هر مدل به صورت مرحله‌ای افزایش یافت. مزیت این کار، امکان بررسی اثرات دامنه شتاب بدون وجود عدم قطعیت‌های ناشی از ساخت مدل جدید می‌باشد. چنانچه در ادامه ملاحظه خواهد شد، رفتار بلوک‌های فوم در همه آزمایش‌ها در محدوده الاستیک (تنش کمتر از 68 kPa کرنش کمتر از 3 درصد) قرار گرفت و بنابراین جز افزایشی مختصر در تراکم نسبی خاک ریز، تغییر قابل ملاحظه‌ای در رفتار سیستم به سبب بارگذاری مرحله‌ای حاصل نگردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اطلاعات کلی حسگرها

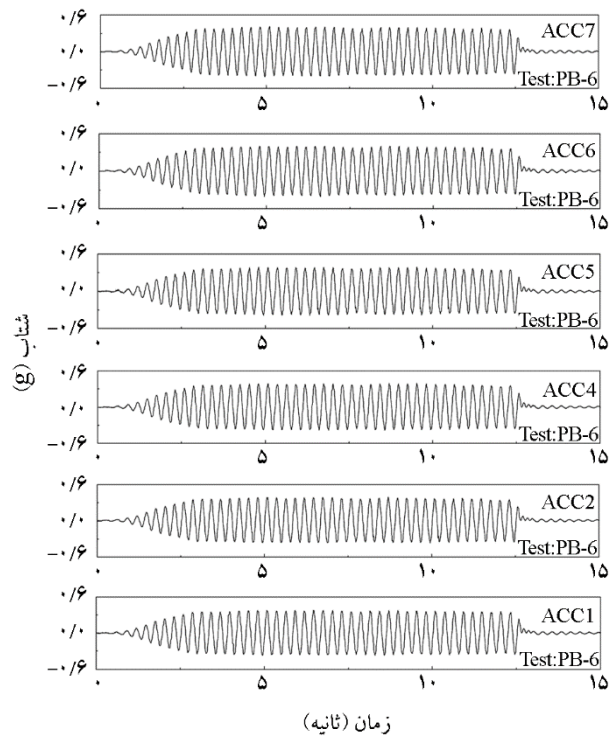
در این قسمت تعدادی از اطلاعات کلی حسگرهای شتاب، نیرو و تغییر مکان آزمایش PB-6 ارائه شده است. در آزمایش PB-6، لایه کاهنده فشار پلیمری از جنس فوم PU با ضخامت 9 سانتی‌متر پشت دیوار حائل قرار داده شد و سیستم تحت یک موج سینوسی با دامنه شتاب $0/37g$ با فرکانس $3/6$ هرتز مرتعش

مجموع نیروهای ثبت شده توسط دو حسگر مستقر در آن تراز حاصل گردیده است. ملاحظه می‌شود که نیروی کل وارد به دیوار (مجموع نیروهای استاتیکی و دینامیکی) در ترازهای پایینی بزرگ‌تر است در حالی که سهم عمده نیروهای دینامیکی به ترازهای میانی و فوقانی دیوار اعمال شده و دامنه تغییرات نیرو در این ترازها بیشتر می‌باشد.

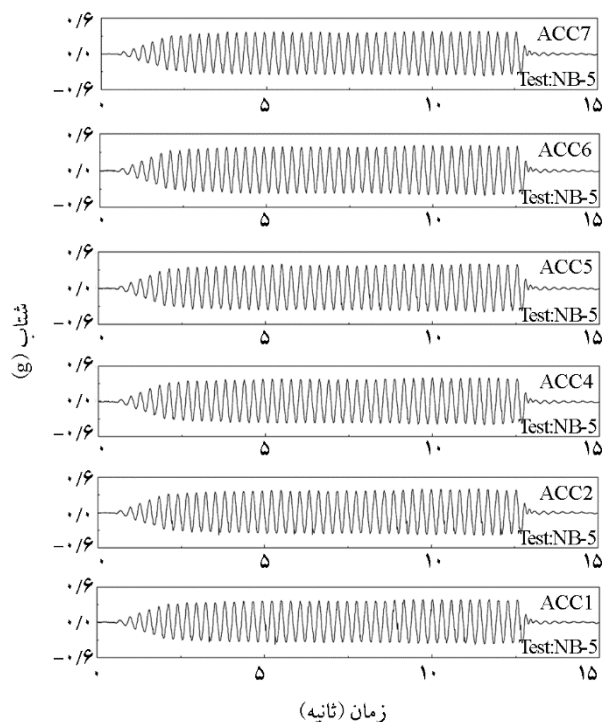


شکل (۸): تاریخچه زمانی نیروی کل در آزمایش PB-6.

در شکل (۹) تاریخچه زمانی حسگرهای اندازه‌گیری تغییر مکان (LVDT) نشان داده شده است. سه عدد حسگر (LVDT1، LVDT2، و LVDT3) عبوری از لایه‌های کاهنده فشار با هدف اندازه‌گیری میزان فشردگی بلوک‌های فوم PU در زمان تحریک مدل تعبیه شد. حسگر چهارم بر روی سطح خاک‌ریز و در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از دیوار قرار گرفت تا نشست قائم خاک‌ریز اندازه‌گیری شود. ملاحظه می‌گردد که بیشترین دامنه تغییر مکان‌های افقی (فشردگی لایه کاهنده فشار) مربوط به تراز میانی دیوار است. اختلاف دامنه تغییر مکان‌ها در ابتدا و انتهای بارگذاری در هر سه نمودار از دامنه تغییر شکل‌های ماندگار سیکیلی در مدت بارگذاری (تائیه ۳ تا ۱۳ نمودارها) بیشتر است که نشان می‌دهد تنها بخشی از تغییر مکان ماندگار ثبت شده در نتیجه فشردگی لایه‌های کاهنده فشار حاصل شده است. سهم عمده‌ای از تغییر مکان اندازه‌گیری شده در نتیجه جابه‌جایی لایه‌های کاهنده فشار ایجاد شده که می‌تواند به دلیل وجود خطای بستر^{۱۴} در سطح تماس بین بلوک‌های فوم و دیوار پدید آمده باشد. این خطا در نتیجه وجود ناهمواری در سطوح مشترک رخ



شکل (۶): تاریخچه زمانی شتاب در آزمایش PB-6.



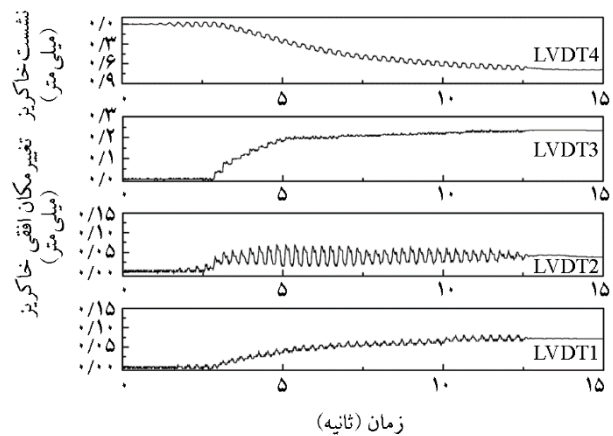
شکل (۷): تاریخچه زمانی شتاب در آزمایش NB-5.

در شکل (۸) تاریخچه زمانی نیروی آزمایش PB-6 در ترازهای مختلف دیوار نشان داده شده است. نیروی وارد بر دیوار در هر تراز از

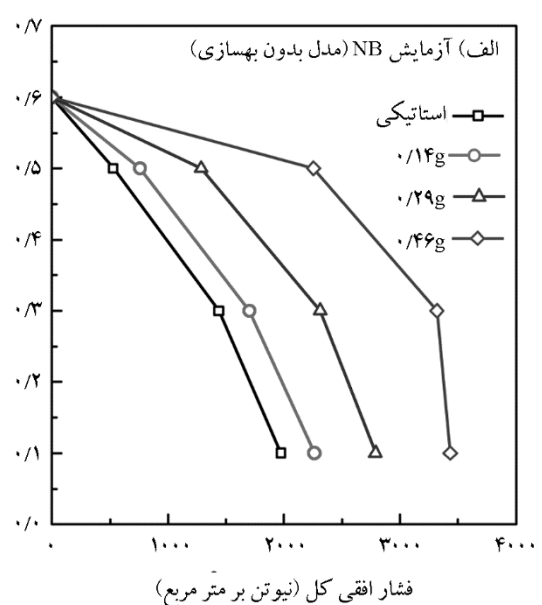
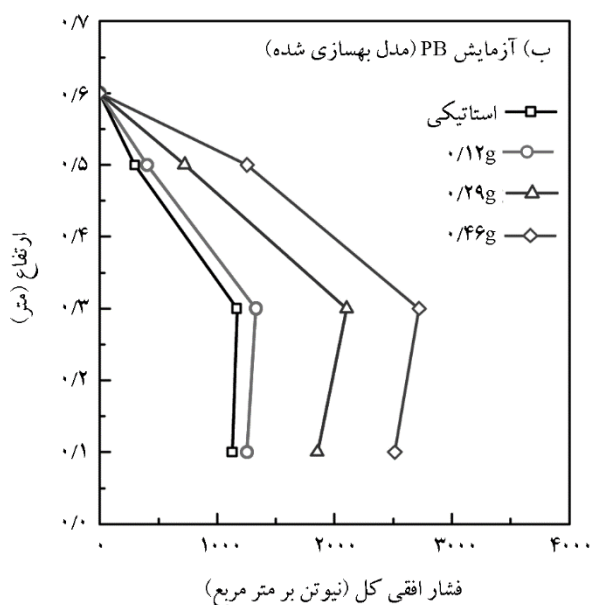
۲-۳- توزیع فشار وارد بر دیوار

هدف اصلی از اجرای لایه‌های کاهنده فشار، کاهش نیروهای وارد بر دیوار در زمان زلزله می‌باشد. بنابراین پاسخ نیرو و فشار معیار ارزیابی عملکرد این روش بهسازی محسوب می‌شود. با توجه به نحوه استقرار حسگرهای نیرو، برای ترسیم تغییرات توزیع فشار در هر آزمایش از دو فرضیه استفاده گردید: (۱) فشار در سطح خاک ریز برابر صفر است (شرط مرزی)؛ (۲) فشار افقی بین هر دو حسگر متوالی در عمق به صورت خطی تغییر می‌کند. فشار افقی از تقسیم مجموع نیروهای ثبت شده توسط حسگرهای نیروی متصل به هر رویه بر مساحت همان رویه، محاسبه و با بهره‌گیری از فرضیات فوق، نمودار توزیع فشار کل در ارتفاع دیوار ترسیم گردید (شکل ۱۰). فشار دینامیکی در شکل (۱۱) نیز از اختلاف فشار استاتیکی اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای نیرو در ابتدای هر آزمایش (معادل با فشار افقی پسماند در انتهای بارگذاری آزمایش قبلی) و کل فشار ماکزیمم اندازه‌گیری شده در حین تحریک همان آزمایش محاسبه شده است.

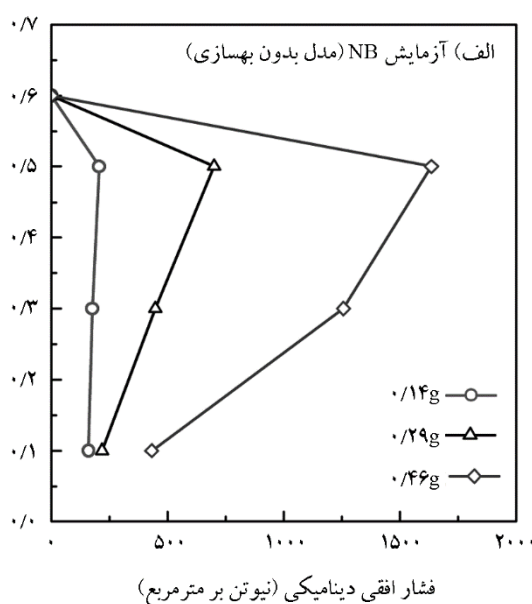
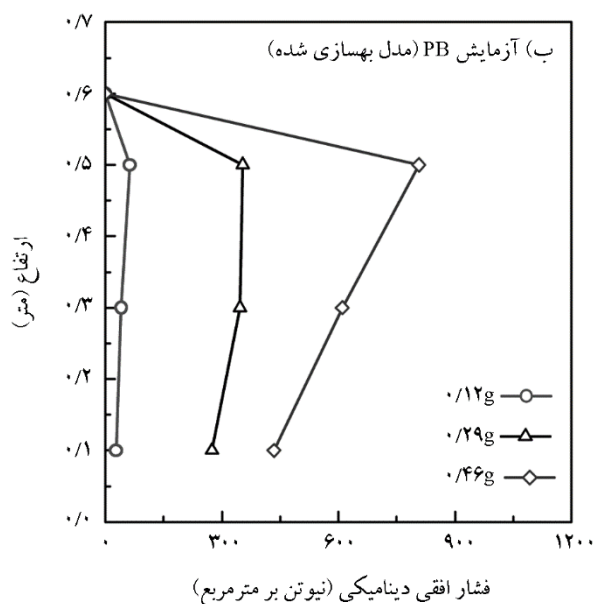
داده و با ایجاد تغییر شکل‌های مضاعف در نمونه، یکی از منابع مهم خطا در آزمون‌های آزمایشگاهی نظیر آزمایش سه محوری می‌باشد [۲۱]. با وجود دقت فراوان در برش بلوک‌های کاهنده فشار، وجود ناهمواری‌های جزئی در سطح بلوک‌ها احتمالاً دلیل اصلی وقوع این تغییر شکل‌ها (به‌ویژه در دامنه‌های شتاب پایین) بوده است. در زمان تحریک مدل (ثانیه ۳ تا ۱۳) نشست خاک ریز پیوسته افزایش یافته که بخشی از این نشست در نتیجه فشردگی و جابه‌جایی لایه‌های کاهنده فشار و حرکت خاک به فضای خالی ایجاد شده در پشت آنها و بخش دیگر در نتیجه تراکم خاک در اثر لرزش می‌باشد.



شکل (۹): تاریخچه زمانی جابه‌جایی در آزمایش PB-6.



شکل (۱۰): توزیع فشار افقی کل: (الف) مدل بدون بهسازی، (ب) مدل بهسازی شده.



شکل (۱۱): توزیع فشار افقی دینامیکی: (الف) مدل بدون بهسازی، (ب) مدل بهسازی شده.

لایه کاهنده فشار به‌طور متوسط سبب کاهش ۴۵ درصدی در نیروهای وارد بر دیوار گردیده است. اختلاف بین نیروهای دینامیکی در دو حالت با و بدون لایه کاهنده فشار از دامنه شتاب $0.24g \sim 0.29g$ به بالا شتاب بیشتری به خود می‌گیرد. افزایش بازدهی لایه کاهنده فشار پلیمری در دامنه‌های شتاب بزرگ‌تر که در نتیجه فشردگی تراکم‌پذیری بلوک‌های فوم PU تحت تنش‌های جانبی بزرگ‌تر حاصل شده، با استفاده از شکل (۱۳) قابل توجه می‌باشد. در این شکل تغییر مکان‌های افقی و قائم (نشست) ماندگار خاک ریز به‌ازای دامنه شتاب پایه نشان داده شده است. تغییر مکان افقی خاک ریز نتیجه جابه‌جایی‌های کوچک و فشردگی لایه کاهنده فشار در اثر اعمال نیروهای دینامیکی می‌باشد که از مجموع فشردگی ماندگار بلوک‌های فوم در انتهای هر مرحله از بارگذاری به دست آمده است. ملاحظه می‌شود که تغییرات فشردگی لایه کاهنده فشار با دامنه شتاب پایه غیرخطی بوده و نرخ فشردگی لایه کاهنده فشار از دامنه شتاب $0.24g$ افزایش یافته است. این آستانه کاملاً سازگار با دامنه شتابی است که در آن روند افزایش بازدهی لایه کاهنده فشار آغاز شده است. به‌عبارت‌دیگر، دامنه شتاب $0.24g$ در این آزمایش، آستانه‌ای است که پس از آن، لایه کاهنده فشار متراکم شده و با افزایش انرژی‌های کرنشی و بسیج نمودن مقاومت برشی خاک ریز،

به‌روشنی قابل مشاهده است که اجرای لایه کاهنده فشار پلیمری سبب کاهش فشار دینامیکی و کل گردیده است. اثرات کاهندگی در ترازهای فوقانی دیوار قابل توجه‌تر است. به‌ازای دامنه شتاب $0.46g$ ، فشار دینامیکی در تراز 0.5 متر به میزان ۵۱ درصد (نسبت به مدل بدون بهسازی) کاهش یافته، درحالی‌که در تراز 0.1 + عملاً تغییری در فشار دینامیکی وارد بر دیوار حاصل نشده است. با افزایش دامنه شتاب و اعمال سهم عمده فشار دینامیکی در ترازهای فوقانی، توزیع فشار کل غیرخطی شده و نقطه اثر آن به ترازهای بالاتر دیوار منتقل گردیده است. این انتقال نقطه اثر فشار به ترازهای فوقانی کاملاً با تئوری‌های مرسوم فشار جانبی خاک نظیر مونتونوبه-اکابه سازگار می‌باشد. سطح تنش انتقالی به دیوار در بحرانی‌ترین شرایط به 3 kPa محدود شده که به‌مراتب از تنش تسلیم فوم (68 kPa) کوچک‌تر است. بنابراین در بازه ابعادی مدل و دامنه شتاب، رفتار لایه‌های کاهنده فشار در محدوده الاستیک قرار داشته است.

۳-۳- نیروی دینامیکی دیوار و تغییر مکان خاک ریز

شکل (۱۲) تغییرات نیروهای افقی دینامیکی به شتاب ماکزیمم پایه را نمایش می‌دهد. به‌ازای دامنه‌های شتاب ماکزیمم مختلف،

خاک ریز (تحت اثر تحریک‌های شدیدتر) می‌باشد. الگوی تغییرات نشست نیز کاملاً مشابه تغییر مکان‌های افقی بوده و از دامنه شتاب بزرگ‌تر از ۰/۲۴g، نشست قائم با سرعت بیشتری افزایش یافته است.

۳-۴- بازدهی ایزوله‌سازی

جهت ارزیابی کارایی لایه کاهنده فشار پلیمری و مقایسه با نتایج تحقیقات مشابهی که بر روی فوم EPS انجام یافته، از دو کمیت بدون بعد استفاده شده است: (۱) سختی بی‌بعد لایه کاهنده فشار (جداًگر تراکم‌پذیر) λ (۲) بازدهی ایزوله‌سازی I_E . اثربخشی لایه کاهنده فشار تابعی از مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح آن بوده و با پارامتر بدون بعد λ که «سختی بی‌بعد لایه کاهنده فشار» نامیده می‌شود، تعریف می‌شود [۲۲]:

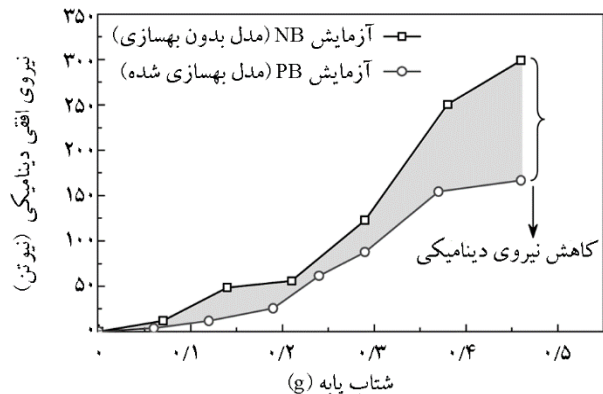
$$\lambda = \frac{E_{ci} \cdot H}{t_{ci} \cdot P_{atm}} \quad (۳)$$

در این رابطه E_{ci} ، مدول یانگ مصالح تراکم‌پذیر؛ H ، ارتفاع خاک ریز پشت دیوار؛ t_{ci} ، ضخامت لایه کاهنده فشار و P_{atm} ، فشار اتمسفریک (برای بدون بعد نمودن λ) می‌باشد. مقادیر حدی λ بین صفر تا بینهایت به ترتیب برای لایه کاهنده فشار کاملاً انعطاف‌پذیر و کاملاً صلب تغییر می‌کند. به منظور ارزیابی تأثیر این روش بر پاسخ دیوارهای حائل نیز از کمیت بدون بعد I_E تحت عنوان «بازدهی ایزوله‌سازی» استفاده می‌شود:

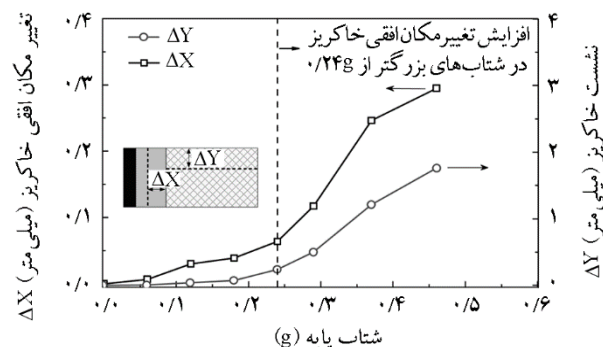
$$I_E = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100 \quad (۴)$$

که در آن، F_0 ، نیروی ماکزیمم دیوار بدون استفاده لایه کاهنده فشار و F ، نیروی ماکزیمم دیوار در حضور لایه کاهنده فشار می‌باشد. بازدهی صفر به معنای بی‌تأثیر بودن لایه کاهنده فشار (لایه کاملاً صلب) و بازدهی ۱۰۰ درصد به مفهوم تأثیر کامل لایه و عدم انتقال نیرو به دیوار می‌باشد. در شکل (۱۴) تغییرات بازدهی ایزوله‌سازی به سختی بی‌بعد لایه کاهنده فشار ترسیم و با نتایج تحقیقات زرنانی و بتارست [۲۳] و دیو و همکاران [۲۴] مقایسه شده است. شرایط مختلف آزمایش شامل مصالح خاک ریز (ماسه خشک)، روش

نیروهای دینامیکی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که کاهندگی نیروهای وارده در اثر تراکم‌پذیری و فشردگی مصالح کاهنده فشار عملاً در لرزش‌های شدیدتر آغاز می‌شود.

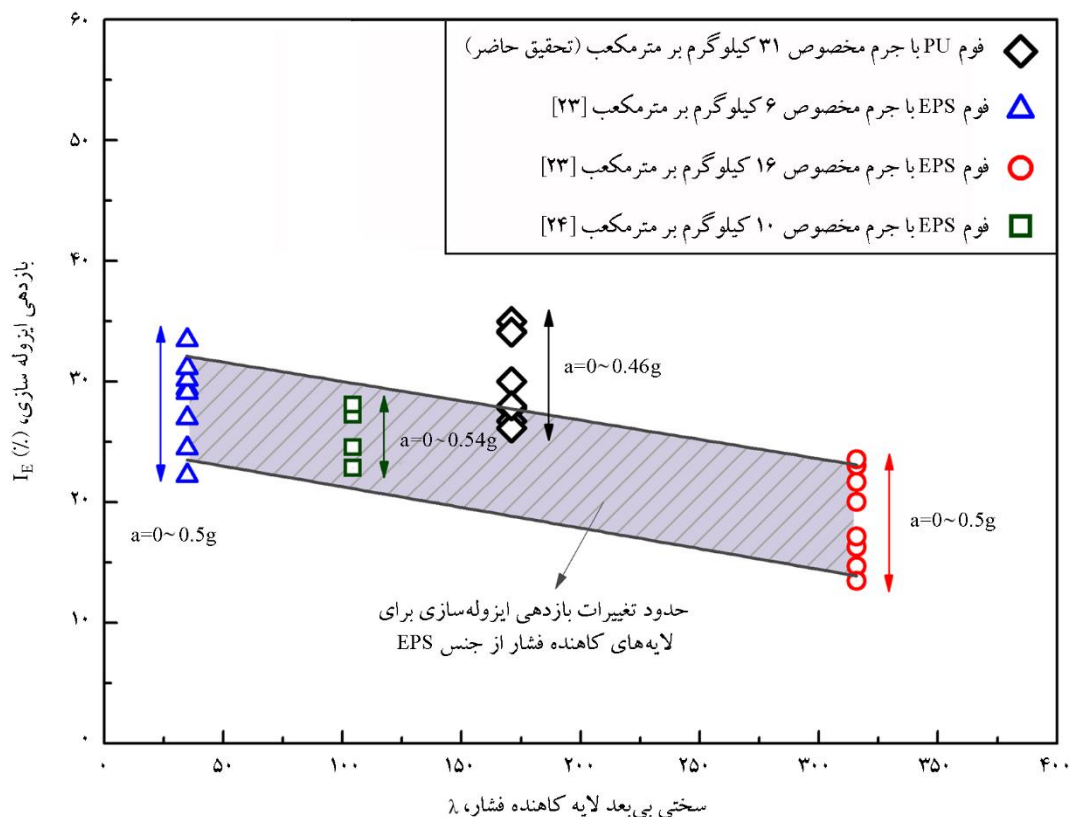


شکل (۱۲): تغییرات نیروی افقی دینامیکی به ماکزیمم شتاب پایه.



شکل (۱۳): تغییر مکان افقی و قائم خاک ریز به ماکزیمم شتاب پایه.

مطابق شکل (۱۳)، دامنه مجموع تغییر مکان افقی خاک ریز (فشردگی لایه کاهنده فشار) از ۰/۳ میلی متر (معادل کرنش ۰/۳۳ درصد) فراتر نرفته است. با توجه به اینکه سطوح تنش اعمالی از حد تسلیم فوم بسیار کوچک تر بوده و رفتار مصالح در تمامی آزمایش‌ها در محدوده الاستیک قرار داشته است، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر شکل‌های ماندگار در اثر جابه‌جایی و فشردگی بلوک‌های فوم به دلیل افزایش تنش‌های پسماند خاک حاصل شده است. تغییر مکان قائم (نشست) خاک ریز نتیجه فشردگی لایه کاهنده فشار (جابه‌جایی خاک ریز) و افزایش تراکم



شکل (۱۴): بازدهی ایزوله‌سازی به‌ازای تغییرات سختی بی‌بعد مصالح کاهنده فشار.

ایزوله‌سازی ندارد. این نتیجه کاملاً با یافته‌های هوروات [۲۵] سازگار می‌باشد. به‌عنوان یک قاعده کلی، جرم مخصوص فوم متناسب با مدول الاستیسیته آن می‌باشد [۲۶] و فوم‌های سبک‌وزن، به این دلیل که مدول الاستیسیته کمتری دارند، کاهندگی بیشتری را موجب می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام یک سری آزمایش‌های لرزه‌ای، عملکرد فوم PU به‌عنوان مصالحی جدید در ساخت لایه کاهنده فشار لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. با ساخت یک مدل کوچک مقیاس، پاسخ دینامیکی دیوار حائل تسلیم نشده در دو حالت با و بدون لایه کاهنده فشار پلیمری بررسی شد. فوم PU خصوصیات دینامیکی مناسبی جهت ساخت لایه‌های کاهنده فشار داشته و به دلیل قابلیت تزریق در خاک، برخی از محدودیت‌های مصالح به‌کار رفته پیشین را از میان برمی‌دارد.

آزمایش (آزمایش‌های میز لرزه ۱g) و نوع سازه نگهبان (دیوار حائل تسلیم نشده) در هر سه تحقیق یکسان بوده و بازدهی ایزوله‌سازی نیز صرفاً در بازه شتاب یکسان (کمتر از ۰/۵۴g) محاسبه شده است. لذا تنها متغیر، عملاً جنس مصالح کاهنده فشار می‌باشد. این شرایط یکسان، مقایسه عملکرد فوم PU را با فوم EPS که کارایی آن پیش‌تر به اثبات رسیده، امکان‌پذیر ساخته است.

مطابق شکل (۱۴)، بازدهی ایزوله‌سازی فوم PU به‌ازای دامنه‌های شتاب مختلف در بازه ۲۶ الی ۳۵ درصد (به‌طور میانگین ۳۰ درصد) تغییر می‌کند که بالاتر از حدود تغییرات فوم EPS قرار دارد. لذا به‌ازای سختی یکسان لایه کاهنده فشار، فوم PU عملکرد بهتری در کاهش نیروهای وارد بر دیوار نشان می‌دهد. نکته قابل توجه اینکه کارایی بهتر فوم PU علی‌رغم جرم مخصوص بیشتر (در مقایسه با فوم EPS) حاصل گردیده که نشان می‌دهد جرم مخصوص تأثیر مستقیمی بر بازدهی

Vancouver Geotechnical Society, Canada.

3. Hazarika, H., Okuzono, S. and Matsou, Y. (2003) Seismic stability Enhancement of rigid nonyielding structures. *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu, USA.
4. Bathurst, R.J., Zarnani, S. and Gaskin, A. (2007) Shaking table testing of geofom seismic buffers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25, 324-332.
5. Hazarika, H., Kohama, E. and Sugano, T. (2008) Underwater shake table tests on waterfront structures protected with tire chips cushion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(12), 1706-1719.
6. Hazarika, H., Yasuhara, K., Kikuchi, Y., Karmokar, A.K. and Mitarai, Y. (2010) Multifaceted potentials of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical applications and their evaluation. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(3), 303-315.
7. Athanasopoulos-Zekkos, A., Lamote, K. and Athanasopoulos, G.A. (2011) Seismic isolation of earth retaining walls using EPS compressible inclusions - Results from centrifuge testing. *Proceedings of the 4th International Conference on Geofom Blocks in Construction Applications*. Lillestrom, Norway.
8. Ertugrul, O.L. and Trandafir, A.C. (2014) Seismic earth pressures on flexible cantilever retaining walls with deformable inclusions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 417-427.
9. Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C. and Xenaki, V.C. (1999) Dynamic properties of EPS geofom: an experimental investigation. *Geosynthetics International*, 6(3), 171-194.
10. Zheng-Yi, F. and Sutter, K.G. (2000) Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 23(3), 338-344.
11. Lee, H.J. and Roh, H.S. (2007) The use of recycled tire chips to minimize dynamic earth pressure during compaction of backfill. *Construction and Building*

نتایج این تحقیق نشان داد که:

- ۱- لایه کاهنده فشار از جنس فوم PU نیروی کل و دینامیکی وارد بر دیوار را به ترتیب به طور متوسط ۳۰ و ۴۵ درصد کاهش می‌دهد. به‌ازای سختی یکسان، فوم PU نسبت به فوم EPS عملکرد مؤثرتری در کاهش نیروهای وارد بر دیوار دارد.
- ۲- اثرات کاهندگی در تمام ارتفاع دیوار ثابت نیست. در ترازهای بالاتر که نیروهای دینامیکی شدت بیشتری دارد، اثرات کاهندگی محسوس‌تر است. توزیع نیروهای وارد بر دیوار نیز که در شرایط استاتیکی مثلثی است، با افزایش دامنه شتاب و اعمال سهم عمده نیروهای دینامیکی در ترازهای فوقانی غیرخطی می‌گردد. لذا در دامنه‌های شتاب بیشتر نقطه اثر نیروی وارد بر دیوار به ترازهای بالاتر انتقال می‌یابد.
- ۳- از دامنه شتاب بزرگ‌تر از $0.24g$ ، بازدهی لایه کاهنده فشار افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که کاهندگی نیروهای وارد شده در اثر تراکم‌پذیری و فشردگی مصالح کاهنده فشار در لرزش‌های شدید، چشمگیرتر است.
- ۴- بازدهی ایزوله‌سازی تابعی از سختی بی‌بعد لایه کاهنده فشار (سختی و ضخامت مصالح کاهنده فشار و ارتفاع خاک‌ریز) بوده و جرم مخصوص فوم به‌طور مستقیم تأثیری بر کارایی این روش به‌سازی ندارد.
- ۵- رفتار لایه کاهنده فشار در بازه ابعادی و دامنه شتاب آزمایش میز لرزه $1g$ در محدوده الاستیک قرار دارد. تغییرشکل‌های ماندگار لایه کاهنده فشار در اثر افزایش تنش‌های پسماند خاک (پس از اتمام بار دینامیکی) حاصل گردیده و برگشت‌پذیر می‌باشد.

مراجع

1. Horvath, J.S. (1995) Geofom geosynthetic. *Horvath Engineering*. P.C., Scarsdale, New York, U.S.A.
2. Inglis, D., Macleod, G., Naesgaard, E. and Zergoun, M. (1996) Basement wall with seismic earth pressures and novel expanded polystyrene foam buffer layer. *Proceedings of the 10th Annual Symposium of the*

- media. *Geotechnique*, **30**(1), 302–309.
22. Horvath, J.S. (2000) *Integral-Abutment Bridges: Problems and Innovative Solutions Using EPS Geofoam and Other Geosynthetics*. Research report No. CE/GE-00-2, Manhattan College, Bronx, New York, USA.
23. Zarnani, S., Bathurst, R.J. (2007) Experimental investigation of EPS geofoam seismic buffers using shaking table tests. *Geosynthetics International*, **14**(3), 165–177.
24. Dave, T.N., Dasaka, S.M., Khan, N. and Murali Krishna, A. (2013) Evaluation of seismic earth pressure reduction using EPS geofoam. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and geotechnical Engineering*, Paris, France.
25. Horvath, J.S. (2010) Lateral Pressure Reduction on Earth-Retaining Structures Using Geofoams: Correcting Some Misunderstandings. *Proceedings of the ER2010: Earth retention conference 3*, Washington, USA.
26. Hazarika, H. (2006) Stress-strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications. *Geotextiles and geomembranes*, **24**(2), 79-90.
- Materials*, 21(5), 1016-1026.
12. Trandafir, A.C., Bartlett, S.F. and Lingwall, B.N. (2010) Behavior of EPS geofoam in stress-controlled cyclic uniaxial tests. *Geotextiles and Geomembranes*, **28**, 514–524.
13. Nakhaee, A. and Marandi, M. (2011) Reducing the forces caused by earthquake on retaining walls using granulated rubber-soil mixture. *IJE Transactions B: applications*, **24**(4), 337-350.
14. Ossa, A. and Romo, M.P. (2011) Dynamic characterization of EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, **29**, 40–50.
15. Golpazir, I., Ghalandarzadeh, A., Jafai, M.K. and Mahdavi, M. (2016) Dynamic properties of polyurethane foam-sand mixtures using cyclic triaxial tests. *Construction and Building Materials*, **118**, 104-115.
16. Sadrekarimi, A., Ghalandarzadeh, A. and Sadrekarimi, J. (2008) Static and dynamic behavior of hunchbacked gravity quay walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(2), 99-117.
17. ASTM D 2487-10. (2000) Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system). *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
18. Haghghat, S. (2001) *Investigation of Total Stress and Lateral Strains Ratio Effects on Undrained Behavior of Saturated Sandy Soils by Stress Path Triaxial Tests*. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran (in Persian).
19. Iai, S. (1989) Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1-g gravitational field. *Soils and Foundations*, **29**, 105-118.
20. Athanasopoulos-Zekkos, A., Lamote, K. and Athanasopoulos, G.A. (2012) Use of EPS geofoam compressible inclusions for reducing the earthquake effects on yielding earth retaining structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **41**, 59-71.
21. Sarsby, R.W., Kalteziotis, N. and Haddad, E.H. (1980) Bedding error in triaxial tests on granular

واژه‌نامه

Seismic Buffer	۱- لایه کاهنده فشار لرزه‌ای
Compressible Materials	۲- مصالح تراکم‌پذیر
Non-yielding Retaining Wall	۳- دیوار حائل تسلیم نشده
Bridge Abutment	۴- کوله پل
Tire Chip	۵- خرده لاستیک
Expanded Polystyrene	۶- پلی استایرن انبساطی
Polyurethane	۷- پلی یورتان
Local Injection	۸- تزریق موضعی
Physical Modeling	۹- مدل‌سازی فیزیکی
1g Shaking Table Test	۱۰- آزمایش میز لرزه 1g
Plexiglas	۱۱- پلکسی گلاس
Side Effect	۱۲- اثر جداره

۱۳- آزمایش بارگذاری فشار
Uniaxial Compression Test
تک محوری

۱۴- خطای بستر
Bedding Error

۱۵- سختی بی بعد لایه کاهنده فشار
Normalized Compressible Inclusion Stiffness

۱۶- بازدهی ایزوله سازی
Isolation Efficiency

Seismic Response Improvement of Non-yielding Retaining Walls Using Polymeric Seismic Buffers

Iman Golpazir¹, Abbas Ghalandarzadeh^{2*} and Mohammad Kazem Jafari³

1. PhD Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: aghaland@ut.ac.ir
3. Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Isolating the earth structures such as retaining walls, bridge abutments and buried pipes using the compressible materials is a novel solution to reduce the lateral earth pressure. In this technique, a layer of the compressible material with relatively small stiffness and limited thickness is implemented between the retaining wall and the backfill. This material acts as a seismic buffer due to its high compressibility, which absorbs the excess dynamic earth pressure significantly and attenuates the transmitted force to the retaining structure. Choosing the appropriate materials for construction of seismic buffers is based on their physical and mechanical properties as well as cost-effective considerations. Most of the previous studies were focused on some specific materials such as expanded polystyrene (EPS) foam blocks and tire chips.

This paper investigated the performance of polymeric seismic buffers made from Polyurethane (PU) foam on seismic response of non-yielding retaining walls. PU foam has appropriate properties and eliminates some of limitations on materials used in previous studies. The purpose of current study was to evaluate the applicability of PU foam as a new option for construction of seismic buffers with regard to its benefits. Hence, the behavior of non-yielding retaining walls was investigated in two conditions of with and without presence of the seismic buffers by conducting of a series of 1g shaking table tests. Seismic buffers included PU foam blocks, which were prepared by injecting foam into the cubic molds and spraying a certain amount of water on the specimens. A total of 13 tests were carried out on two models (retaining wall with and without seismic buffer) with changing the input base acceleration from 0.07g to 0.46g. The input motion was a horizontal sinusoidal excitation with a constant frequency of 3.6 Hz, which was applied for 10 seconds to the longitude direction of the model. The model responses including wall force and backfill soil displacement were measured during the excitation in each test.

The results showed that the implementing seismic buffers made from PU foam reduce the total and dynamic horizontal wall forces on average of 30% and 45%, respectively. The force attenuation and backfill soil displacement have an inverse relationship to each other. For an equal Normalized compressible inclusion stiffness, this type of foam has a better performance in comparison with similar materials such as expanded polystyrene foam (EPS). Moreover, it is identifying that the force attenuation is not uniform along the height and the maximum attenuation occurs at the top of the retaining wall. The force distribution is triangular for static conditions. As the peak base acceleration is increased and the contribution of dynamic loads on upper elevations is increased, the force distribution becomes nonlinear. Therefore, at earthquakes with moderate to high intensity, the point of application of total horizontal force is transferred to the upper elevations of the retaining wall. Moreover, it is revealed that the efficiency of this technique increases for moderate to high-intensity earthquakes (acceleration amplitude more than 0.24g).

Keywords: 1g Shaking Table Test, Retaining Wall, Earth Pressure, Seismic Buffer, Polyurethane Foam.