اهمیت عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی در عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های ژئوتکنیکی

یاسر جعفریان
عضو هیئت علمی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی‌زلزله، تهران، ایران
yjafarianm@iiees.ac.ir

حدیث معظمی
دانشجوی کارشناسی‌ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی‌زلزله، تهران، ایران
h.moazamigoudarzi@iiees.ac.ir

محمدکاظم جعفری
عضو هیئت علمی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی‌زلزله، تهران، ایران
jafari@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: *عملکرد لرزه‌ای، عدم قطعیت، دیوار ساحلی، FLAC2D.*

چکیده

روش‌های نوین بررسی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای ـ ژئوتکنیکی مبتنی بر روش‌های احتمالاتی است. با توجه به اهمیت مفاهیم حالات حدی خرابی و سطوح عملکرد حین و پس از زلزله، لزوم مطالعات احتمالاتی در سیستم‌های ژئوتکنیکی آشکار می‌شود. از سوی دیگر عدم قطعیت پارامترهای سازه‌ای و ژئوتکنیکی اثر به‌سزایی در تحلیل‌های لرزه‌ای دارد که در اکثر بررسی‌ها از اثر عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی علی‌رغم اهمیت آن‌ها صرف‌نظر شده‌است. نظر به متغیر بودن ماهیت فیزیکی خاک، در مطالعه‌ی حاضر با مدل‌سازی عددی یک دیوار ساحلی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D و اعمال عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی در تحلیل دینامیکی این دیوار، اثر این عدم قطعیت‌ها در عملکرد لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌است. از یک مطالعه ی موردی که مشتمل بر اطلاعات لرزه‌ای و ژئوتکنیکی و هم‌چنین مشاهدات محلی می‌باشد استفاده شده تا مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی شود. نتایج این مطالعه اهمیت میزان خطا در ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی را در کنار دیگر پارامترهایی هم‌چون شرایط مدل‌سازی، در عملکرد لرزه‌ای دیوارهای ساحلی تشریح می‌نماید.

مقدمه

سازه‌های دریایی مستعد پذیرش خسارات سازه‌ای و ژئوتکنیکی شدیدی در اثر زلزله هستند. از این رو شناخت عوامل تاثیرگذار در میزان این خرابی‌ها، موجب ارتقای طراحی عملکردی سیستم‌های ساحلی خواهدشد. از سوی دیگر عدم‌قطعیت پارامترهای طراحی سیستم‌های ساحلی، خواه پارامترهای سازه‌ای و خواه ژئوتکنیکی، اثر به‌سزایی در محاسبات و تحلیل‌های لرزه‌ای دارند. با توجه به مطالعاتی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته‌است، می‌توان گفت در اکثر بررسی‌ها از اثر عدم‌قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی صرف‌نظر شده و این پارامترها به عنوان پارامترهایی معین در نظر گرفته‌شده‌اند. از آن‌جا که خاک را (به عنوان مثال نمونه‌های استخراج شده از دو گمانه‌ی مجاور)، به طور مشخص نمی‌توان دارای ماهیت فیزیکی معین و قابل تعمیم در نظر گرفت؛ نمی‌توان پارامترهای آن را هم به‌طور قطع ثابت و معین فرض کرد. به همین دلیل بررسی اثر عدم‌قطعیت این پارامترها از اهمّیت ویژه‌ای برخوردار بوده و پیش‌بینی می‌شود اعمال اثر آن‌ها در عملکرد لرزه‌ای و تعیین حالات حدی خرابی، ضروری باشد.

در مقاله‌ی حاضر دیواری ساحلی در بندر کوبه که تحت زلزله‌ی سال ۱۹۹۵ دچار خرابی شده‌است، در نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC2D مدل‌سازی شده و اثر عدم قطعیت پارامتر عدد نفوذ استاندارد اصلاح‌شده در تحلیل‌های دینامیکی لحاظ شده‌است. هدف از اعمال این عدم قطعیت، بررسی تغییرات تغییرمکان افقی و قائم این دیوار در دو حالت تحلیل دینامیکی تعینی و احتمالاتی است.

مروری بر ادبیات فنی

یکی از قدیمی‌ترین مطالعات درباره‌ی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای ساحلی به مطالعه‌ی Inagaki et al. (1996) روی دیوارهای ساحلی بندر کوبه و نوع و میزان خرابی آن‌ها تحت زلزله‌ی ۱۹۹۵ برمی‌گردد. در ادامه Dakoulas & Gazetas (2005) به بررسی اثر عدم قطعیت تراکم نسبی دانه‌های ماسه‌ای پرداخته و دیوار ساحلی بندر کوبه را تحت تغییرات این پارامتر مورد مطالعه قرارداده اند. در این مطالعه در بندر Rokko Island در منطقه‌ی کوبه‌ی ژاپن با استفاده از یک تحلیل تنش موثر لرزه‌ای با الگوریتم تفاضل محدود به تحلیل سیستم نگهبان ساحلی پرداخته شده‌است. در این مطالعه چهار مدل ساخته شده که مدل اول همان دیوار واقعی کوبه است که در زمین‌لرزه‌ی Hyogoken Nanbo در سال ۱۹۹۵ دچار خسارت شده‌است. در سه مدل دیگر بهسازی خاک با تغییر در میزان تراکم نسبی خاکریز پشت و خاک پی انجام شده‌است. برای بررسی نتایج، جابه‌جایی در بالای دیوار و تغییرات فشار آب حفره‌ای و کرنش پلاستیک در خاک مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. مدل دوم مورد بررسی برای حالتی است که تراکم نسبی خاک پشت و پی افزایش یابد و خاک روانگرا نمی‌شود. مدل سوم حالتی است که خاک بهسازی شود. براساس مدل ارئه شده در این مقاله، که براساس رفتار الاستوپلاستیک است می‌توان رفتار مونوتونیک و سیکلی خاک چسبیده را در تراکم‌های مختلف بررسی کرد. Na et al. (2007) عملکرد یک دیوار ساحلی را که در زلزله‌ی کوبه آسیب دیده‌بود با استفاده از نرم‌افزار FLAC مدل‌سازی کرده و با استفاده از روش‌های احتمالاتی، عدم قطعیت پارامترهای مختلف را مورد بررسی قراردادند. در مطالعه‌ای دیگر Na et al. (2008) به بررسی تاثیر تغییرات بارز در مشخصات مصالح برای عملکرد لرزه‌ای دیوارهای ساحلی پرداخته‌است. به این منظور دیوار ساحلی در بندر Port Island در کوبه‌ی ژاپن انتخاب شده‌است و تحلیل دینامیکی غیرخطّی دو بعدی با استفاده از نرم‌افزا تفاضل محدود FLAC انجام شده‌است. برای بررسی احتمالاتی پاسخ سیستم از آنالیز حساسیت مونت‌کارلو استفاده شده‌است. در این مطالعه بررسی‌ها در مقایسه‌ی پاسخ سیستم در دو حالت رندوم و واحد انجام شده که نتایج حاکی از آن است که در حالت واحد در مقایسه با حالت رندوم، نتایج محافظه‌کارانه است. هم‌چنین این نتیجه حاصل شد که در نظر گرفتن تغییرات بارز در مشخصات خاک در رسیدن به پاسخ سیستم دیوار ساحلی کمک می‌کند. در این راستا از ۱۳۰ تغییرات بارز به صورت رندوم در مقدار مدول برشی با کوواریانس ۱۲٪ در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده‌است. از این مطالعه چنین نتیجه می‌شود که آنالیز احتمالاتی در ارزیابی تغییرات عملکرد سازه‌های دریایی برای تخمین ضعف لرزه‌ای کاربرد بسزایی داشته که این موضوع با توسعه‌ی تحلیل شکست لرزه‌ای انجام می‌گیرد. Shinozuka et al. (2008) اثرات عدم قطعیت پارامتر مدول برشی خاکریز پشت دیوار ساحلی بندر کوبه را بر خرابی این دیوار تحت زلزله‌ی ۱۹۹۵ مورد تحلیل و مطالعه قرار دادند.

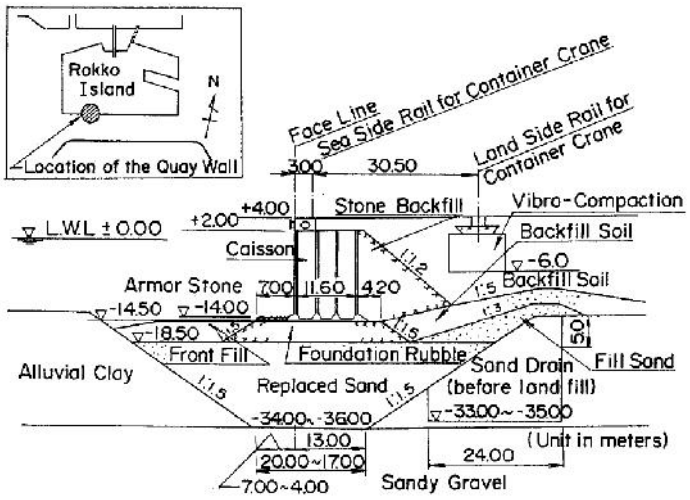
دیوار ساحلی بندر کوبه ژاپن

بندر کوبه در جنوب شهر کوبه واقع است که در اثر وقوع زمین لرزه Hyogoken Nanbo در سال ۱۹۹۵ خسارات زیادی به آن وارد شد. فاصله‌ی بندر کوبه تا مرکز این زمین‌لرزه تقریبا ۱۷ کیلومتر است. براساس گزارش‌های ثبت شده توسط Inagaki et al. (1996)، هنگام زمین‌لرزه در بندر کوبه ۱۸۶ دیوار ساحلی وجود داشته‌است که ۹۰٪ خسارات وارده به دیوارهای ساحلی وزنی وارد شده‌اند. بیشتر این دیوارها به سمت دریا جابه‌جا شده‌اند که جابه‌جایی افقی آن‌ها میانگین ۳ و حداکثر ۵ متر، نشست ۱ تا ۲ متر و دوران آن‌ها به سمت آب نیز ۴ درصد گزارش شده‌است. اسکله‌های بندر کوبه با روش شبه‌استاتیکی با ضریب لرزه‌ای از ۰/۱ تا ۰/۲۵ طراحی شده‌اند. دو بندر به نام‌های Rokko Island و Port Island در بندر کوبه ژاپن وجود دارد که در این مطالعه به بررسی دیواری در Rokko Island پرداخته شده که در ادامه مدل‌سازی و تحلیل عددی با نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 2D، مطالعات احتمالاتی و بررسی نتایج آن‌ها با حالت تعینی آورده شده‌است.

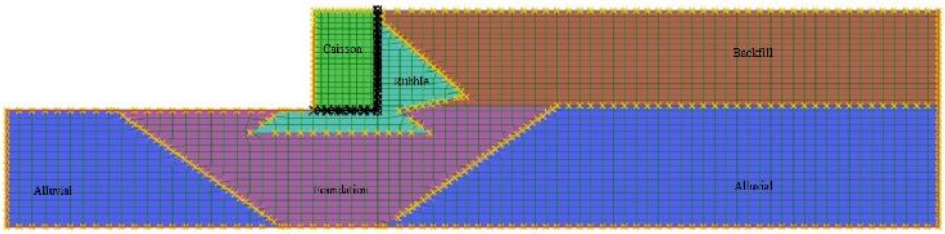
بررسی مدل آنالیز عددی در بندر Rokko Island

در این بخش دیوار ساحلی بندر Rokko Island با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار FLAC 2D مدل‌سازی شده‌است. نرم‌افزار FLAC یک برنامه‌ی تفاضل محدود است که بر پایه‌ی تحلیل لاگرانژی عمل می‌کند. این برنامه رفتار سازه‌هایی که در آن خاک، سنگ و یا سایر مصالحی که ممکن است بعد از حد تسلیم به حالت پلاستیک برسند به خوبی مدل‌سازی می‌کند.

شکل هندسی این دیوار ساحلی در شکل ۱، مدل ساخته شده با مش نسبتاً ریز در نرم‌افزار در شکل ۲ و مشخصات مصالح دیوار و خاک پیرامون آن در جدول ۱ نشان داده‌شده‌است. دیوار ساحلی کوبه به ارتفاع ۱۸/۵ و عرض ۱۲ متر از جنس بتن بوده و در مدل‌سازی الاستیک فرض شده‌است. زاویه‌ی اصطکاک بین دیوار و پی ۳۰ درجه و بین خاکریز و دیوار ۱۵ درجه می‌باشد (Dakoulas & Gazetas, 2005).



شکل ۱: شکل هندسی دیوار ساحلی بندر کوبه (Inagaki et al. (1996)



شکل ۲: مدل هندسی دیوار ساحلی بندر کوبه در نرم‌افزار FLAC با مش‌بندی نسبتاً ریز

جدول ۱: مشخصات اولیه‌ی دیوار و خاک پیرامون آن

مصالح	چگالی خشک (kg/m3)	مدول برشی (Pa)	نسبت پواسون	مدول بالک (Pa)	زاویه اصطکاک (درجه)
فونداسیون	1800	5.8E7	0.3	1.26E8	37
خاکریز	1800	7.9E7	0.3	1.71E8	37
رس	1700	7.5E7	0.3	1.63E8	30
قلوه‌سنگ	2000	8.0E7	0.3	1.73E8	40
دیوار	1854	2.4E9	0.15	2.69E9	-

معرفی مدل رفتاری UBCSAND و پارامترهای آن

مدل UBCSAND، یکی از مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک غیرخطی است که بر پایه‌ی تحلیل‌های تنش مؤثر عمل می‌کند و برای مدل-سازی روانگرایی ماسه‌ها و ماسه‌های رسی در اثر بارگذاری لرزه‌ای استفاده می‌شود. این مدل رفتار تنش-کرنش برشی خاک را با استفاده از روابط هایپربولیک پیش‌بینی کرده و پاسخ حجمی خاک را به‌وسیله‌ی قانون جریان، که تابعی از نرخ تنش فعلی است تخمین می‌زند. از مزایای این مدل می‌توان تحلیل هم‌زمان معادلات مکانیکی و جریان آب را نام برد.

تنش‌های برشی سیکلی در خاک‌های تیزگوشه باعث حالت پلاستیک و تراکم حجمی در این حالت می‌شود. Martin et al. (1975) در بررسی‌های خود نشان دادند که فشار آب حفره‌ای به وجود آمده در هر سیکل؛ وابسته به کرنش‌های حجمی پلاستیک، مدول ارتجاعی خاک و سختی آن است. پاسخ خاک‌های ماسه‌ای با رفتار اسکلتی آن‌ها کنترل می‌شود. به این صورت که هنگامی‌که زهکشی در خاک کم باشد، سیال موجود در حفرات ماسه (مخلوطی از آب و هوا) مانع از تغییرات حجمی خاک می‌شود که جلوگیری از این تغییرحجم باعث افزایش فشار آب حفره-ای و تمایل خاک به روانگرایی خواهدشد.

مدل رفتاری UBCSAND تحت بارگذاری‌های سیکلی و یکنواخت، و با در نظر گرفتن سختی سیال، شرایط زهکشی و اسکلتی خاک؛ آن را مدل کرده و پدیده‌ی روانگرایی و پاسخ خاک در اثر آن را موردبررسی قرار می‌دهد. این مدل، مدل رفتاری جامعی است که به‌طور مستقیم پاسخ اسکلتی خاک را تحت نموهای بارگذاری پیش‌بینی کرده و هم‌چنین پاسخ سیال حفره‌ای را با در نظر گرفتن مدول بالک آن و پاسخ اسکلتی خاک بررسی می‌کند.

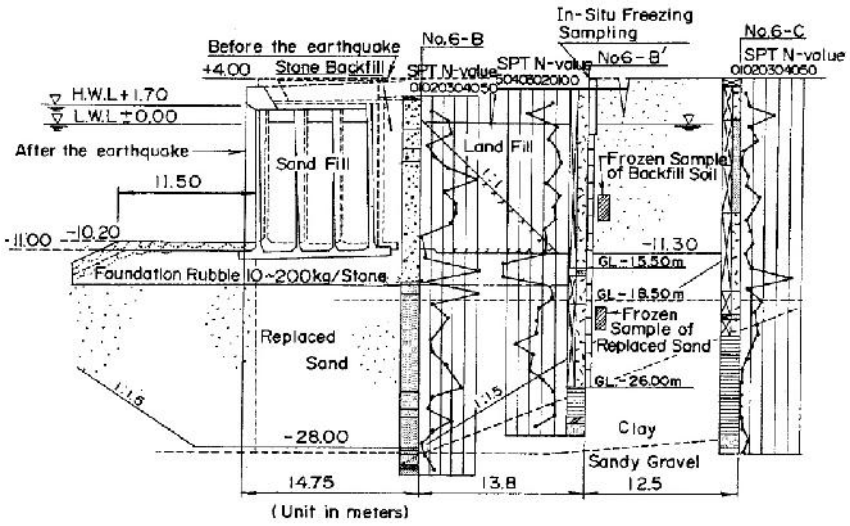
با توجه به این‌که اکثر پارامترهای مدل UBCSAND تابع عدد نفوذ استاندارد هستند، لزوم استخراج دقیق این اعداد بیش‌ازپیش خودنمایی می‌کند. برای به دست آوردن مقادیر عدد نفوذ استاندارد ((N1)60) با استفاده از اطلاعات به دست آمده از سه گمانه در محل دیوار (Inagaki, 1996)، با استفاده از روش درون‌یابی مقادیر عدد نفوذ استاندارد در سایر نقاط پروفیل خاک به دست آمده و پارامترهای مدل UBCSAND به‌طور مستقیم برای آن‌ها محاسبه می‌شود. هم‌چنین مقادیر عدد نفوذ استاندارد طبق روابطی که در ادامه ارائه شده، برای فشار سربار 98kPa و انرژی ۶۰٪ اصلاح شده‌اند. در مدل‌سازی دینامیکی از میرایی رایلی با نسبت میرایی ۵٪ در فرکانس طبیعی سیستم برابر ۱/۱۲۸ استفاده شده‌است.

جدول۲: پارامترهای مدل UBCSAND

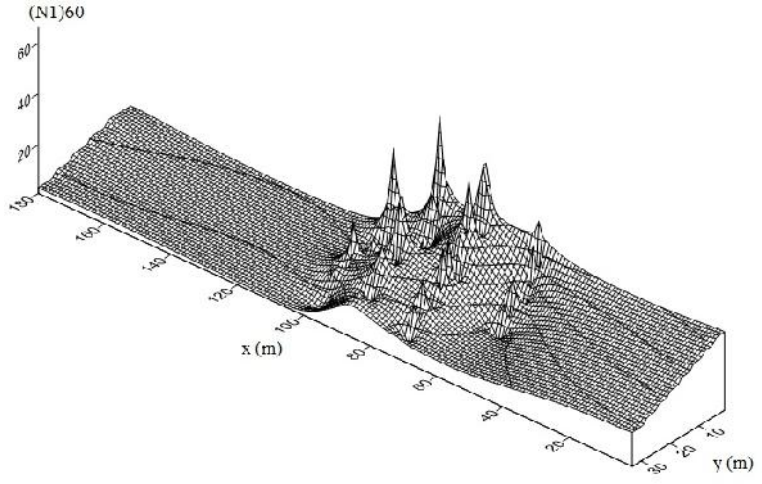
نوع پارامتر	پارامتر		رابطه‌ی ریاضی	توضیحات
پارامترهای عمومی	عددنفوذاستاندارد اصلاح‌شده	m_n160	-	به دست آمده از تست‌های در محل
	فشار اتمسفر	m_pa	-	برابر با 101325 pa
پارامترهای سختی الاستیک	مدول برشی الاستیک	G^e	$G^e = m_kge \times m_pa \times \left(\frac{\pm'}{m_pa} \right)^{m_ne}$	-
	مدول بالک الاستیک	B^e	$B^e = \sim \times G^e$	α پارامتری وابسته به نسبت پواسون و متغیر بین 0.6 و 1.3
	عدد سختی برشی الاستیک	m_kGe	$m_kge = 21.7 \times 15 \times \left((N_1)_{60} \right)^{0.333}$	-
	عدد سختی بالک	m_kb	$m_kb = m_kg \times 0.916$	-
	توان‌های تنش	m_me m_ne	-	متغیر بین 0.4 تا 0.6 و تقریباً برابر 0.5
پارامترهای سختی پلاستیک	مدول برشی پلاستیک	G^p	$G^p = m_kge \times P_{atm} \times \left(\frac{\pm'_m}{P_{atm}} \right)^{m_ne}$	-
	عدد مدول برشی پلاستیک	m_kgp	$m_kgp = m_kge \times \left(\left((N_1)_{60} \right)^2 \times 0.003 \right) + 100$	-
	توان تنش	m_np	-	برابر با 0.4
	پارامتر ناهمسانگردی	m_anisofac	$m_anisofac = 0.0166 \times \left((N_1)_{60} \right)$	متغیر بین 0.333 برای خاک‌های دانه‌ای سست و 1 برای شرایط تنش همسانگرد
	نرخ شکست	m_rf	$m_rf = 1.0 - \left(\frac{\left((N_1)_{60} \right)}{100} \right)$	متغیر بین 0.5 و 0.99
پارامترهای مقاومت و قانون جریان	زاویه اصطکاک در حجم ثابت	m_phicv	-	برابر 33 درجه
	زاویه اصطکاک حداکثر	m_phif	$m_phif = m_phicv + \frac{\left((N_1)_{60} \right)}{5.0}$	-
پارامترهای تطبیقی	پارامتر سخت‌شوندگی اولیه	m_hfac1	$m_hfac1 = a(N) \times \left[\left(\frac{\pm'_{v0}}{P_{atm}} \right)^{b(N)} \right]$	a(N) و b(N) توابعی برحسب m_n160
	پارامتر سخت‌شوندگی ثانویه	m_hfac2	-	برابر 1
	پارامتر سخت‌شوندگی اتساع	m_hfac3	-	برابر 1
پارامترهای کنترل کننده مدل	m_static		-	برابر 1 برای تحلیل استاتیکی اولیه و 0 برای تحلیل دینامیکی
	m_ratmax		-	برابر 0 برای تحلیل‌های لرزه‌ای

$$N_{60} = \frac{ER_r}{60} \times N \quad (1)$$

در شکل ۳ جزییات سه گمانه‌ی واقع در محل دیوار که از آن‌ها برای استخراج مقادیر عدد نفوذ استاندارد استفاده شده (Inagaki et al. 1996) نشان داده‌شده‌است. هم‌چنین در شکل ۴ نمودار حاصل از درون‌یابی مقادیر عدد نفوذ استاندارد در کل پروفیل خاک ارائه شده‌است. در این شکل محور x طول پروفیل خاک و محور y عمق پروفیل خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۳: سه گمانه در محل دیوار جهت استخراج مقادیر (N1)60، Inagaki et al. (1996)



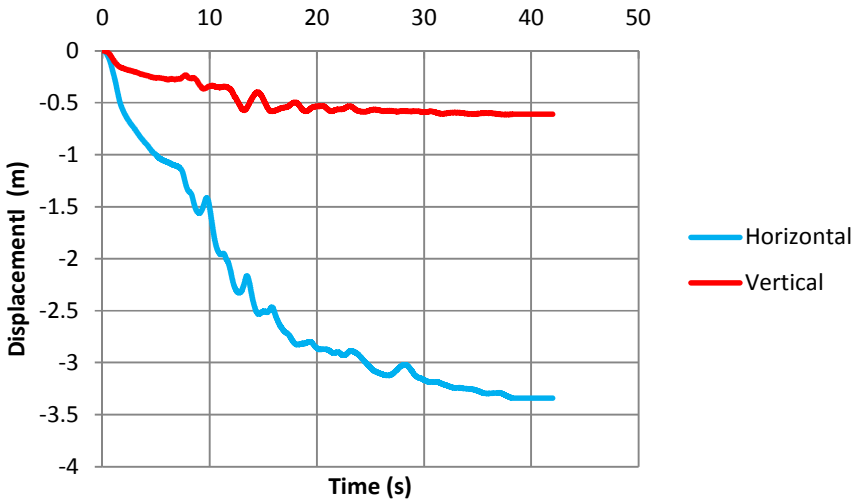
شکل ۴: صفحه‌ی ساخته شده با مقادیر درون‌یابی شده‌ی عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده

مشخصات زلزله

در تحلیل عددی این دیوار و به جهت مطابقت پاسخ به دست آمده در نرم‌افزار با پاسخ واقعی، نیاز است تا تحلیل دینامیکی با شتاب‌نگاشت واقعی انجام گیرد. رکورد افقی و قائم زلزله‌ی کوبه در عمق ۳۲ متری سطح زمین از پایگاه PEER استخراج شده‌است. بیشینه شتاب ثبت شده در سطح زمین در راستای افقی 0.54g و در راستای قائم 0.21g می باشد که در بستر مدل وارد شده‌است.

نتایج تحلیل دینامیکی اولیه

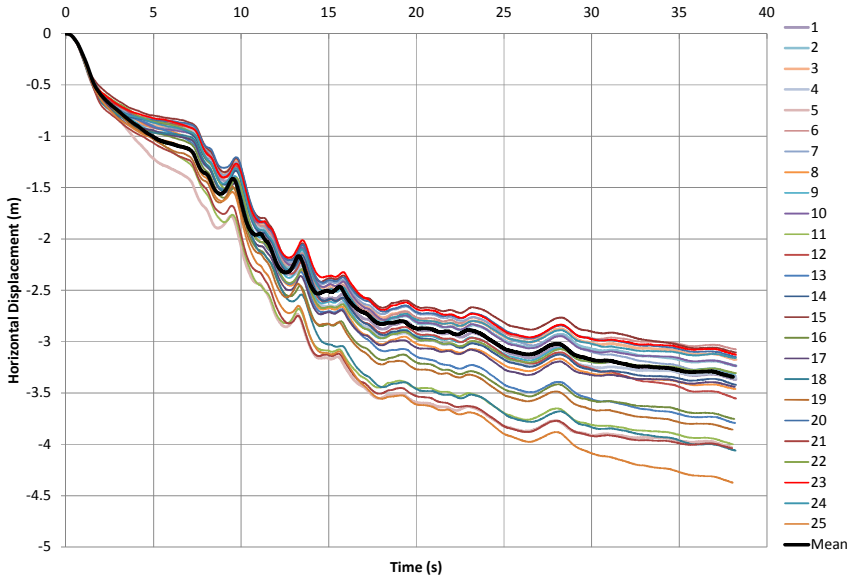
همان‌گونه که در شکل ۵ دیده‌می‌شود، تحلیل عددی نشان می دهد که دیوار در راستای افقی ۳/۴ متر و در راستای قائم ۰/۶ متر جابه‌جایی داشته‌است که با مقادیر واقعی ثبت شده پس از زلزله که میانگین تغییرمکان افقی دیوار ۳ متر گزارش شده (Inagaki et al. 1996)، مطابقت خوبی دارد.



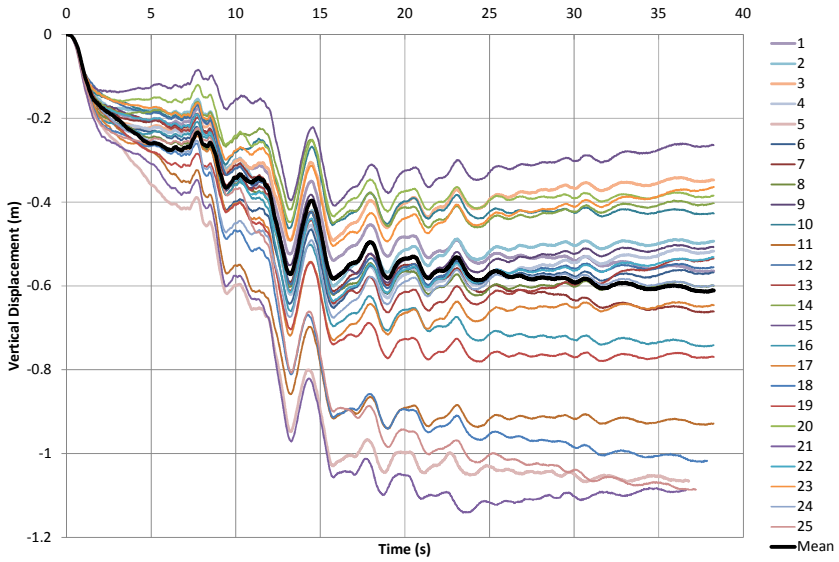
شکل ۵: جابه‌جایی دیوار خروجی از نرم‌افزار FLAC

تحلیل دینامیکی با لحاظ نمودن تغییرات خواص خاک

همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، خاک ماهیتی غیرمعین داشته و نمی‌توان پارامترهای آن را ثابت در نظر گرفت. از همین رو و با توجه به تابعیت پارامترهای مدل استفاده شده در تحلیل دینامیکی (مدل UBCSAND) از پارامتر ((N1)60)، ۲۵ سری داده‌ی تصادفی با استفاده از توزیع نرمال با میانگین اعداد نفوذ استاندارد اصلاح شده‌ی موجود و کوواریانس ۴۵٪ ساخته شده و ۲۵ تحلیل دینامیکی معادل نیز با استفاده از این داده‌های تصادفی انجام گرفته‌است. در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج این ۲۵ تحلیل و مقایسه‌ی آن‌ها با تحلیل مقادیر میانگین ارائه‌شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تغییرمکان‌های نهایی دیوار در حالتی که پارامترهای ژئوتکنیکی متغیر هستند تغییرات قابل‌توجهی نسبت به حالت میانگین دارد. بر این اساس در حالت تغییرمکان افقی و قائم انحراف معیارها به ترتیب برابر ۰/۳۸ و ۰/۲۴ می‌باشند. لذا بحث اهمیت تغییرات پارامترهای خاک و وجود عدم قطعیت در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بهتر است در طراحی دیوارهای ساحلی در نظر گرفته شوند.



شکل ۶: تغییرمکان افقی نوک دیوار برای ۲۵ سری عدد نفوذ استاندارد تصادفی با توزیع نرمال



شکل ۷: تغییرمکان قائم نوک دیوار برای ۲۵ سری عدد نفوذ استاندارد تصادفی با توزیع نرمال

نتیجه‌گیری

در مقاله‌ی حاضر اثر اعمال عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی و به ویژه عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده در عملکرد لرزه‌ای دیوارهای ساحلی مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور دیواری ساحلی در بندر کوبه در نظر گرفته شده و تغییرمکان افقی و قائم آن تحت زمین‌لرزه‌ی ۱۹۹۵ کوبه در دو حالت استخراج شده‌است. در حالت اول مقادیر عدد نفوذ استاندارد با مقادیر میانگین در تحلیل دینامیکی وارد شده‌اند و در حالت دوم ۲۵ سری داده‌ی تصادفی با مقادیر میانگین عدد نفوذ استاندارد ساخته شده و ۲۵ سری تحلیل دینامیکی غیرخطی با نرم‌افزار FLAC انجام شده‌است. همان‌گونه که در منحنی‌های تغییرمکان مشاهده می‌شود مقادیر تغییرمکان افقی در حالت میانگین ۳/۴ متر و تغییرمکان قائم برابر ۰/۶ متر به دست آمده‌است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتر عدد نفوذ استاندارد و انجام ۲۵ سری تحلیل دینامیکی، تغییرمکان افقی بین ۴/۴-۳/۱ متر و تغییرمکان قائم بین ۱/۱-۰/۳ متر متغیر می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی تاثیر به‌سزای عدم قطعیت پارامتر عدد نفوذ استاندارد در مقادیر تغییرمکان دیوار می‌باشد. لذا بحث اهمیت تغییرات پارامترهای خاک و وجود عدم قطعیت در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بهتر است در طراحی دیوارهای ساحلی در نظر گرفته شوند.

مراجع

Dakoulas P and Gazetas G (2005) Effective stress analysis of caisson quay walls: application to Kobe Soil and Foundation , 133-147

Dakoulas P and Gazetas G (2008) Insight into seismic earth and water pressures against caisson quay walls Geotechnique , 95-111

Inagaki H, Iai S, Sugano T, Yamazaki H and Inatomi T (1996) Performance of caisson type qyay wall at Kobe port, Soil and Foundation , 119-136

Na UJ, Chaudhuri SR and Shinozuka M (2008) Probabilistic assessment for seismic performance of port structures Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 147-158