

بررسی تاثیر زلزله بر سازه‌های زیرزمینی

با نگرشی ویژه بر

تونلها و ایستگاههای زیرزمینی مترو

مهدی وجودی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله

تابستان ۱۳۸۲

فهرست مطالب

فهرست مطالب :

چکیده

بخش اول - بررسی آسیب پذیری سازه‌های زیر زمینی در زلزله

۲	۱- تاریخچه تونل سازی و سازه‌های زیرزمینی
۵	۲- مطالعه خرابی‌های گذشته
۸	۳- تعاریف مربوط به زلزله
۱۲	۴- تعاریف مربوط به تونلها و ساختگاه
۱۵	۵- تاثیر گسلش بر تونلها
۲۲	۶- تاثیر ارتعاشات زلزله بر تونلها
۳۱	۷- برآورد خطر آسیب پذیری تونلها
۴۱	۸- خلاصه بخش اول

بخش دوم - بررسی آسیب پذیری تونلها و ایستگاههای زیر زمینی مترو

۴۳	۱- تفاوت عملکردی مترو
۴۴	۲- اندرکنش تونل و سازه‌های مجاور
۴۵	۳- روشهای کاهش خسارات متروها
۴۷	۴- معیارهای طراحی لرزه‌ای مترو
۵۹	۵- مطالعه موردی تونل متروی دایکایی
۶۶	۶- نتایج مطالعه ارزیابی متروی شهر قاهره

چکیده

امروزه با پیشرفت فن آوری، سهولت نسبی در حفاری و ساخت سازه‌های زیرزمینی، محدودیتهای فضاهای سطحی برای اجرای طرحهای عمرانی و نیز به واسطه مسائل سیاسی و امنیتی، توجه بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به احداث سازه‌های زیر زمینی برای کاربریهای عمرانی، نظامی و معدنی معطوف شده است. راهها و بزرگراههای زیرزمینی، انواع تونلها، شبکه متروی شهری، نیروگاهها و سایر مغارهای زیر زمینی برای دفن زباله‌های هسته‌ای و یا به عنوان مخازن نفت، معادن، پناهگاهها و انبارها، تعدادی از سازه‌هایی هستند که در کشورهای مختلف به سرعت در حال ساخت و اجرا می‌باشند.

با توجه به توسعه روز افزون سازه‌های زیر زمینی و هزینه‌های فراوانی که برای ساخت هر یک از این سازه‌ها صرف می‌گردد و نیز اهمیت آنها در شبکه حمل و نقل بین شهری و داخل شهری و خطری که در صورت آسیب دیدگی آنها متوجه جان مردم میشود، لازم است که پایداری آنها در برابر خطرات ناشی از زلزله مورد مطالعه قرار گیرد. در این گزارش پس از نگرشی اجمالی به تاریخ صنعت سازه‌های زیر زمینی و آسیبهای گذشته این سازه‌ها در زلزله، به بررسی تعاریف مربوط به تونلها و نیز مشخصات کلی امواج زلزله و نحوه تاثیر آنها بر تونلها می‌پردازیم و برآورد خطر پذیری این گونه سازه‌ها را بیان می‌نماییم.

بخش دوم این گزارش، به تونلها و ایستگاههای زیر زمینی مترو اختصاص دارد که پس از بیان تفاوت عملکردی اینگونه تونلها نسبت به سایر تونلها، به مطالعه موردی تونل متروی دایکایی که در زلزله کوبه دچار آسیب شده بود و نیز بررسی خطرپذیری تونل متروی شهر قاهره خواهیم پرداخت. سپس معیارهای طراحی لرزه‌ای تونلها بیان میگردد.

بخش اول

بررسی آسیب پذیری سازه‌های زیر زمینی در برابر زلزله

۱- تاریخچه تونل سازی و سازه‌های زیر زمینی

احتمالا اولین تونل‌ها در عصر حجر برای توسعه خانه‌ها با انجام حفريات توسط ساکنان شروع شد. این امر نشانگر این است که آنها در تلاشهایشان جهت ایجاد حفريات به دنبال راهی برای بهبود شرایط زندگی خود بوده اند. پیش از تمدن روم باستان، در مصر، یونان، هند و خاور دور و ایتالیای شمالی، تماما تکنیکهای تونلسازی دستی مورد استفاده قرار می‌گرفت که در اغلب آنها نیز از فرایندهای مرتبط با آتش برای حفر تونل‌های نظامی، انتقال آب و مقبره‌ها کمک گرفته شده است. در ایران نیز از چند هزار سال پیش، به منظور استفاده از آبهای زیر زمینی تونل‌هایی موسوم به قنات حفر شده است که طول بعضی از آنها به ۷۰ کیلومتر و یا بیشتر نیز می‌رسد. تعداد قنات‌های ایران بالغ بر ۵۰۰۰۰ رشته برآورده شده است. جالب توجه است که این قنات‌های متعدد، طویل و عمیق با وسایل بسیار ابتدایی حفر شده اند.

رومی‌ها نیز در ساخت قنات‌ها و همچنین در حفاری تونل‌های راه پرکار بودند. آنها در ضمن اولین دوربینهای مهندسی اولیه را در جهت کنترل تراز و حفاری تونل‌ها به کار بردند.

اهمیت احداث تونل‌ها در دوران‌های قدیم، تا بدین جاست که کارشناسان کارهای احداث تونل در آن تمدن‌ها را نشانگر رشد فرهنگ و به ویژه رشد تکنیکی و توان اقتصادی آن جامعه دانسته‌اند. تمدنهای اولیه به سرعت، به اهمیت تونل‌ها، به عنوان راه‌های دسترسی به کانی‌ها و مواد طبیعی نظیر سنگ چخماق به واسطه اهمیتش برای زندگی، پی‌بردند. همچنین کاربرد آنها دامنه گسترده‌ای از طاق زدن بر روی قبرها تا انتقال آب و یا گذرگاههایی جهت رفت و آمد را شامل می‌شد. کاربردهای نظامی تونل‌ها، به ویژه از جهت بالابردن توان گریز یا راههایی جهت یورش به قرارگاهها و قلعه‌های دشمن، ازدیگر جنبه‌های مهم کاربرد تونلها در تمدن‌های اولیه بود.

تونل سازی همزمان با انقلاب صنعتی، به ویژه به منظور حمل و نقل، تحرک قابل ملاحظه‌ای یافت. تونلسازی به گسترش و پیشرفت کانال سازی کمک کرد و این امر در توسعه صنعت به ویژه در قرون ۱۸ و ۱۹ میلادی در انگلستان سهم بسزایی داشت. کانال‌ها یکی از پایه‌های انقلاب صنعتی بودند و توانستند در مقیاس بسیار بزرگ هزینه‌های حمل و نقل را کاهش دهند. تونل مال پاس با طول ۱۵۷ متر بر روی کانال

دومیدی در جنوب فرانسه اولین تونلی بود که در دوره‌های مدرن در سال ۱۶۸۱ ساخته شد. همچنین اولین تونل ساخته شده با کاربرد حفاری و انفجار باروت بود. در انگلستان، قرن ۱۸ نیز جیمز بریندلی از خانواده ای مزرعه دار با نظارت بر طراحی و ساخت بیش از ۵۸۰ کیلومتر کانال و تعدادی تونل به عنوان پدر کانال و تونل های کانالی ملقب شد. وی در سال ۱۷۵۹ با ساخت یک کانال به طول ۱۶ کیلومتر مجموعه معدن زغال دوک بریدجواتر را به شهر منچستر متصل نمود. اثر اقتصادی تکمیل این کانال نصف شدن قیمت زغال در شهر و ایجاد یک انحصار واقعی برای معدن مذکور بود.

در اوایل قرن نوزدهم به منظور عبور از قسمتهای پایین دست رودخانه تایمز هیچ سازه ای موجود نبود و ۳۷۰۰ عابر مجبور بودند با طی یک راه انحرافی ۳ کیلو متری با قایق مسیر روترهایت به وینینگ را طی کنند. اقدام به ساخت یک تونل نیز به دلیل ریزشی بودن و مناسب نبودن رسوبات کف رودخانه متوقف شد. تا اینکه در حدود سال ۱۸۲۰ فردی بنام مارک ایرامبارد برونل از فرانسه ایده استفاده از سپر را مطرح نمود و در سال ۱۸۲۵ کار احداث تونل بین روترهایت و وینینگ را آغاز و علی رغم جاری شدن چند نوبت سیل در سال ۱۸۴۳ آن را باز گشایی نمود. این تونل تامس نام گرفته و اولین تونل زیر آبی بود که بدون هر گونه رودخانه انحرافی حفر شد.

در دیگر موارد تونلهای زهکشی بزرگ ، نظیر تونلی با طول ۷ کیلو متر در هیل کارن انگلستان ، اهمیت زیادی در توسعه صنعت معدنکاری داشته‌اند. البته بررسی تاریخچه پیشرفت در روش ها و تکنیک ها و به عبارتی در هنر تونل سازی نشانگر این مطلب است که مانند بسیاری دیگر از علوم و فنون بیشتر رشد این هنر در قرن گذشته صورت گرفته و تا حال نیز ادامه دارد.

ویژگی های فضاهای زیرزمینی و نمونه های بارز آنها

هم اکنون در زمینه های مختلف کاربرد تونل ها ، مزایای متفاوت و گوناگونی را بر می شمردند. از آن جمله ویلت، استفاده فزاینده فعلی از فضاهای زیر زمینی را به دلایل زیر رو به افزایش دانسته است.

۱- تفوق محیط ساختاری به معنای وجود یک حصار و ساختار طبیعی فراگیر.

۲- عایق سازی با سنگهای فراگیر که دارای ویژگیهای عالی عایق ها می باشند.

۳- محدودیت کمتر در احداث سازه های بزرگ به دلیل نیاز کمتر به استفاده از وسایل نگهداری عمده در مقایسه با احداث همان سازه بر روی سطح زمین.

۴- کمتر بودن تأثیرات منفی زیست محیطی.

از دیگر مزایای تونل ها در راههای ارتباطی می توان به :

۱- کوتاهتر شدن مسیرها و افزایش راند مان ترافیکی

۲- بهبود مشخصات هندسی مسیر

۳- جلوگیری از خطرات ریزش کوه و بهمن

۴- ایمنی بیشتر در برابر زلزله،

اشاره کرد .

مثال های متعددی می توان از نقش و تأثیر عمده تونلسازی و پروژه های بزرگ این صنعت از گذشته تا حال ذکر کرد . تونل مشهور مونت بلان دو کشور فرانسه و ایتالیا را به هم متصل می سازد. عملیات ساختمانی آن در سال ۱۹۵۹ آغاز گردید و حفر این تونل فاصله بین میلان و پاریس را به طول ۳۰۴ کیلو متر کوتاهتر نموده است. از دیگر نمونه ها کشور فنلاند است که سازه های زیر زمینی را به صورت غارهای عظیم بدون پوشش بتنی ، به منظور انبار مواد نفتی مورد استفاده قرار داده و در حال حاضر بیش از ۷۵ انبار نفتی در سراسر کشور فنلاند با گنجایی بیش از ۱۰ میلیون متر مکعب ساخته شده.

۲- مطالعه خرابیهای گذشته

بر اساس یک پندار کهن، سازه‌های زیر زمینی ایمن‌ترین سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشند. در تمام نقاط جهان خطوط متروی زیر زمینی به عنوان پناهگاه برای نجات و اسکان در زمان وقوع زلزله مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای اثبات صحت و سقم این پندار، لازم است عملکرد تونلها و سازه‌های زیر زمینی در برخی از کشورهای پیشرفته در طول قرن گذشته مورد مطالعه و بررسی قرار بگیرد.

در کشور ژاپن تونلهای بسیاری احداث شده است، از این رو از دیدگاه تونلسازی در زمره پیشرفته‌ترین کشورها قرار دارد. با توجه به شدت زلزله خیز بودن ژاپن و اهمیتی که پدیده زلزله در آن کشور دارد، گزارشهای متعددی در زمینه صدمات وارده بر تونلها در اثر زلزله در این کشور منتشر نموده‌اند. اولین زلزله‌ای که صدمات زیادی را به تونلها وارد نمود زلزله کانتو (Kanto) در سال ۱۹۲۳ بود. در این زلزله به بیش از ۱۰۰ تونل آسیب وارد آمد. پس از آن مجدداً بر اثر زلزله‌های ۱۹۳۰ کیتا-ایزو (Kita-Izu)، ۱۹۶۴ نیگاتا (Nigata) و ۱۹۷۸ ایزو-اوشیما-کینکای (Izu-Oshima-Kinkai) صدمات شدیدی در بسیاری از تونلهای موجود در ناحیه‌های زلزله زده گزارش گردید. جدول (۳-۱) صدمات مربوط به تونلها را در زلزله‌های مختلف کشور ژاپن از سال ۱۹۲۳ تا سال ۱۹۹۳ را نشان می‌دهد.

یکی از جدیدترین رویدادهای لرزه‌ای در ژاپن که منجر به صدمات شدیدی به تونلهای زیر زمینی در منطقه زلزله زده گردید، زلزله ۱۹۹۵ کوبه یا هیوگوکن-نانبو بوده است. عمده‌ترین صدمات به تاسیسات زیر زمینی در این زلزله مربوط به سه ایستگاه راه آهن زیرزمینی در شهر کوبه بود. در محل ایستگاه دایکایی ستونهای مرکزی بر اثر تغییر شکل حاصل از زلزله دچار شکستگی برشی گردیده و قابلیت باربری خود را از دست دادند و در نتیجه سقف بر اثر وزن خود ریزش نمود. از آنجایی که برای طراحی این ایستگاه بر اساس استاندارد طراحی موجود تنها بارهای استاتیکی در نظر گرفته شده بود، لذا دیوارهای کناری و ستونهای مرکزی فاقد مهارهای برشی بودند. همچنین بر اثر وقوع این زلزله بیش از ۳۰ تونل از مجموع ۱۰۰ تونل موجود در منطقه دچار صدمات نسبتاً شدیدی شدند. عمده‌ترین نوع این صدمات ایجاد ترکهای برشی

روی تاج و سقوط گوه‌های سنگی از آن، شکستگی همراه با سقوط سنگ از سقف و دیواره‌ها و سقوط سنگ از محل اتصال قطعات بتنی به یکدیگر بوده است. در این زلزله خسارتهای ایجاد شده به حدود ۱۱۰ تونل در این منطقه بالغ بر نیم بلیون دلار ارزیابی شد.

با بررسی زلزله‌های بزرگ قرن اخیر در ایران، مشاهده میکنیم که تقریباً هیچ گونه گزارشی مبنی بر وارد آمدن خرابی بر تونلها ارائه نشده است. آنچه در گزارشها در مورد تونلها می‌یابیم حاکی از رفتار مناسب تونلها در این زلزله‌ها می‌باشد. در مورد زلزله گلباف تنها گفته شده که تونل ۲/۷ کیلومتری در نزدیکی کانون زمین لرزه رفتار خوبی داشته است همچنین بنابر گزارشها در زلزله منجیل، تونل ۹۵۰ متری نزدیک منجیل رفتار خوبی نشان داده، منتهی دو دروازه آن در اثر ریزش سنگ از کوه آسیب دیده است [برجیان-۱۳۷۷ - ص ۳۴ و ۳۵].

جدول (۱-۳) صدمات وارده به تونلهای حمل و نقل و انتقال آب بر اثر وقوع زلزله از سال ۱۹۲۳ تا سال ۱۹۹۳ در کشور ژاپن

سال و نام زمین لرزه	بزرگا	وضعیت صدمات بر تونل
۱۹۲۳ کانتو	۷/۹	آسیب بسیار زیاد به بیش از ۱۰۰ تونل در منطقه کانتوی جنوبی
۱۹۲۷ کیتا - تانگو	۷/۳	آسیب مختصر به دو تونل راه آهن در رومرکز
۱۹۳۰ کیتا-ایزو	۷/۳	آسیب بسیار زیاد به یک تونل راه آهن در محل تقاطع با گسل زمین لرزه
۱۹۴۸ فوکویی	۷/۱	آسیب شدید به دو تونل راه آهن در فاصله حدود ۸ کیلومتری از گسل زمین لرزه
۱۹۵۲ توکای-اکی	۸/۲	آسیب مختصر به ۱۰ تونل راه آهن در هوکایدو
۱۹۶۱ کیتا-می نو	۷	صدمات ناشی از ترک خوردگی به دو تونل انتقال آب
۱۹۶۴ نیگاتا	۷/۵	آسیب بسیار زیاد به حدود ۲۰ تونل راه آهن و یک تونل جاده
۱۹۶۸ توکاچی-اوکی	۷/۹	آسیب مختصر به ۲۳ تونل راه آهن در هوکایدو
۱۹۷۸ ایزو-اوشیما-کینکایی	۷	آسیب بسیار زیاد به ۹ تونل راه آهن و ۴ تونل جاده در یک منطقه محدود
۱۹۷۸ میاگی کن-اکی	۷/۴	آسیب مختصر به ۶ تونل راه آهن که در ناحیه میاگی شدت صدمات بیشتر بوده است.
۱۹۸۲ اوراکاوا-اوکی	۷/۱	آسیب جزئی به ۶ تونل راه آهن نزدیک اوراکاوا
۱۹۸۳ نیهونکای-چوبو	۷/۷	آسیب جزئی به ۸ تونل راه آهن در آکیتا و ...
۱۹۸۴ ناگانو کن-سی بو	۶/۸	صدمات وارده بر اثر ترک خوردگی به یک تونل
۱۹۸۷ چیتاکن-توهو-اکی	۶/۷	خسارت به دیواره یک تونل راه آهن در مرز کیتا گاو - یاماناشی
۱۹۹۳ نوتوهانتو-اکی	۶/۶	آسیب بسیار زیاد به یک تونل جاده
۱۹۹۳ هوکایدو-نانسی-اکی	۷/۸	آسیب بسیار زیاد به یک تونل جاده تحت تاثیر سقوط سنگ

۳- تعاریف مربوط به زلزله

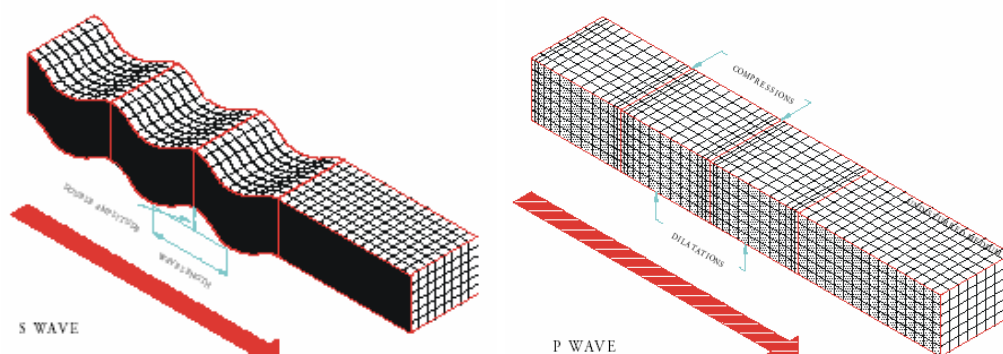
از نظر زلزله شناسی، زلزله دارای مفاهیم و خصوصیات متعددی از جمله کانون زلزله، شدت و بزرگی زلزله و ... می‌باشد که بررسی هر کدام در جای خود مهم است. اما در اینجا به مشخصات تاثیر گذار عمده و مفاهیم کلیدی مربوط به بحث اشاره می‌شود و تاثیر هر کدام از پارامترها در رفتار سازه‌های زیر زمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- امواج زلزله :

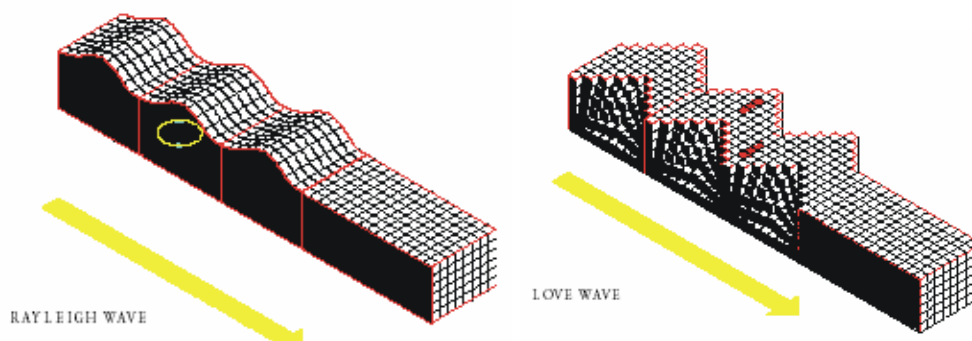
انرژی آزاد شده در زلزله، بصورت امواج در زمین منتقل گردیده و باعث تحریک سازه‌های دور از کانون زلزله میشود. بررسی این امواج بصورت کلی، امری است بسیار دشوار که در عمل برای سهولت، امواج به یکسری امواج ساده‌تر تجزیه می‌گردد.

امواج زلزله از نوع امواج الاستیک هستند و بر حسب کرنش ایجاد کننده به دو نوع حجمی (مانند امواج فشاری و برشی) و سطحی (مانند امواج لاو و ریلی) تقسیم می‌گردند. شکل (۳-۱) بصورت شماتیک، انواع امواج ایجاد شده در زلزله را نشان می‌دهد.

بر اساس مشاهدات، قدرت و توان هر کدام از امواج کاملاً وابسته به بزرگای زلزله، فاصله بین رو مرکز و ساختگاه و مشخصات خاک در این فاصله می‌باشد. از طرف دیگر امتدادهای مختلف برخورد موج با امتداد اصلی تونل سبب ایجاد تغییر شکلهای مختلفی در سازه می‌گردد. بدلیل اهمیت موضوع امواج و ارتعاشات، این موضوع در فصلی جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



(a) امواج حجمی



(b) امواج سطحی

شکل (۱-۳) : دیاگرام شماتیک از انواع مختلف امواج ایجاد شده در یک زلزله

۲-۳- بیشینه شتاب زمین (PGA)

از معیارهای مهم در طراحی و علت اصلی آسیبها، بیشینه شتاب سطح زمین در هنگام زلزله می‌باشد که بر اساس ضریبی از g شتاب جاذبه زمین سنجیده می‌شود. علاوه بر این، معیارهای دیگری از جمله بیشینه سرعت ذره‌ای در سطح زمین نیز در تعیین میزان خرابی‌ها تعریف شده‌اند. بطور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهند که اگر شتاب سطحی بیشینه تا $0.2g$ باشد، آسیبی به تونل وارد نمی‌شود و چنانچه این شتاب بین $0.2g$ تا $0.5g$ باشد، صدمات خفیف و قابل تعمیر را شاهد خواهیم بود و از شتاب $0.5g$ به بالا، انتظار آسیبهای شدیدتری خواهد بود.

۳-۳- فرکانس و طول موج زلزله:

نزدیک بودن فرکانس ارتعاش سازه به فرکانس مولد ارتعاش، سبب پدیده تشدید می‌گردد. تحقیقات نشان می‌دهند که امواج زلزله دارای فرکانس کم و طول موج زیاد هستند. هر چه اندازه طول موج برخوردی به تونل نزدیک به قطر تونل باشد (حداکثر تا ۴ برابر قطر تونل)، امکان تقویت نوسان وجود دارد، بطوری که طول موج تا دو برابر قطر تونل می‌تواند موجب آسیب‌هایی به تونل گردد. اگر تونلی به قطر ۱۰ متر و در محیط ماسه سنگی که سرعت موج در آن $1/8$ کیلومتر بر ثانیه است، در نظر گرفته شود، با فرض برخورد موجی که دو برابر قطر تونل، طول موجش است، مقدار فرکانس لازم برای تحریک سقف به ریزش برابر است با ۹۰ هرتز ($f=c/\lambda$)؛ که تولید این فرکانس برای زلزله‌های متداول ممکن نیست. مگر اینکه تونل به کانون زلزله و محل وقوع گسیختگی گسل بسیار نزدیک باشد و شاید فقط در انفجارهای عظیم امکانپذیر باشد.

۳-۴- فاصله از مرکز زلزله:

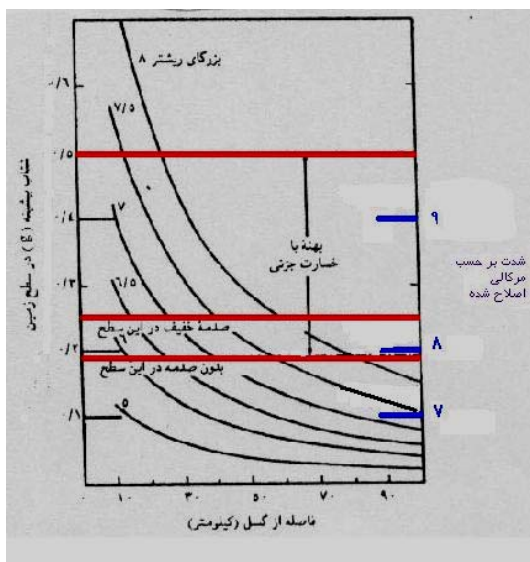
بدیهی است که هرچقدر تونل از مرکز زلزله فاصله می‌گیرد، امکان آسیب کمتر می‌شود. توجه به این نکته لازم است که در فرکانسهای پایین، میرایی دامنه نوسانها شدیدتر است بطوری که افت انرژی در امواج حجمی متناسب با عکس مجذور فاصله و در امواج سطحی متناسب با عکس فاصله می‌باشد.

۳-۵- دوام نوسانها (Duration):

عموماً پدیده زلزله دارای فرکانسهای کم و تعداد سیکلهای تنش زیاد می‌باشد. تعداد دفعات نوسان سازه- به خصوص آن تعدادی که سازه را وارد محدوده غیرخطی می‌کند- عامل بسیار مهمی در بالا رفتن میزان آسیبهای وارده به تونل می‌باشد. دوام و تعداد زیاد نوسانها باعث پدیده خستگی (Fatigue) می‌شود و این پدیده موجب تغییرشکلهای بزرگ در اطراف تونل می‌گردد.

۳-۶- شدت و بزرگی زلزله :

بزرگی زلزله را نمی‌توان به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار داد زیرا این عامل مربوط به دامنهٔ امواج ارتجاعی و انرژی تولید شده در مرکز زلزله می‌باشد.



اگر بزرگی زلزله با پارامتر فاصله از مرکز زلزله در نظر گرفته شود، می‌توان نمودارهایی مانند شکل ۲-۳ تهیه نمود. در این شکل بطور مثال اگر زلزله‌ای با بزرگی ۷/۵ ریشتر (Richter) مبنا باشد، در فواصل بیش از ۶۰ کیلومتر انتظار آسیب‌دیدگی نخواهیم

شکل ۲-۳: ارتباط شدت و بزرگی. شتاب بیشینه زلزله با فاصله از گسل

داشت. برخلاف بزرگی زلزله، شدت زلزله را می‌توان به‌تنهایی

به عنوان معیاری در تعیین آسیب‌دیدگی مطرح ساخت زیرا بر اساس میزان تخریب زلزله تدوین شده است.

۳-۷- گسلش

گسلش از ویژگیهای زلزله به شمار نمی‌رود، و در واقع عامل ایجاد کننده زلزله است. در حوزه‌های مختلف مهندسی عمران و ساخت و ساز و در مطالعات آسیب پذیری شهری، بدلیل محدود بودن ابعاد سازه‌ها و احتمال بسیار کم تقاطع این سازه‌ها با خط گسلش، این قسمت از اهمیت زیادی برخوردار نیست. ولی در حوزه تونل سازی، بدلیل ویژگی اصلی این سازه‌ها که طولانی بودن آنها می‌باشد، احتمال تقاطع این سازه‌ها با محل گسلش، بسیار زیاد و تقریباً امری اجتناب‌ناپذیر است. بدلیل اهمیتی که گسلش در امر تونل سازی دارد، این موضوع بصورت جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴- تعاریف مربوط به تونلها و ساختگاه

مشخصات و ویژگیهای تونلها و نحوه ساخت آنها در تاثیر پذیری آنها از زلزله موثر است. در این قسمت تعاریف مربوط به تونلها بیان شده و اثر هر کدام در تاثیر پذیری تونلها بررسی می‌شود.

۴-۱- عمق تونل :

بطور کلی تونلها در مقابل زلزله، نسبت به سایر سازه‌های سطحی بسیار پایدارترند. چرا که جابجائی زمین، دامنه حرکات، شتاب و سرعت ذره‌ای زمین عموماً با زیاد شدن عمق، کاهش می‌یابد (مخصوصاً اگر زمین نرم باشد)؛ بطوری که در مواردی شتاب زلزله در عمق بیش از ۵۰ متر، حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که اگر چه شتاب و بعضی پارامترهای دیگر در عمق کمتر از لایه سطحی است، اما مشخصاتی مثل فرکانس زلزله به منبع تولید موج بستگی دارد و تابع عمق زمین نمیباشد. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که میزان جابجائی ناشی از گسلش در عمق بیشتر از سطح است که این موضوع در بخش جداگانه‌ای مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۴-۲- شکل و اندازه تونل :

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، هر چه مقطع تونل بزرگتر باشد، حساسیت آن به زلزله بیشتر است. یکی از موارد بزرگ بودن موضعی تونلها، در تقاطع ها و ایستگاههای مترو می‌باشد. همچنین وجود دو یا چند تونل در کنار هم معمولاً باعث تمرکز تنشهای استاتیکی در محیط بین تونلها می‌گردد. همین حالت در هنگام گذر موج زلزله که نوعی تنش است، اتفاق می‌افتد.

۳-۴- وضعیت لایه بندی و جنس زمین:

امواج تولید شده در حین حرکت، تحت تاثیر خواص زمین قرار می‌گیرند. امواج فشاری و برشی در سطح برخورد با لایه‌های مختلف دچار انکسار و انعکاس می‌شوند و این باعث افزایش یا کاهش دامنه نوسانها می‌گردد. از طرف دیگر، شرایط و وضعیت خاک تحت الارضی و حتی توپوگرافی یک ناحیه ممکن است عامل افزایش اساسی در شدت جنبشهای سطح زمین گردد. تقویت شتاب در انباشته‌ای نرم بزرگتر از مقدار آن در انباشته‌های سفت می‌باشد.

۴-۴- نحوه ساخت تونل

روشهای مختلفی برای ساخت تونل (کندن تونلها) وجود دارد که بستگی به شرایط ساختگاهی و زمین ساختی روش مناسب انتخاب می‌شود. روشهایی که بیشتر معمول هستند روش حفاری شده و خاکبرداری شده است. در مورد تاثیر نحوه ساخت بر رفتار تونلها جدول زیر در HAZUS۹۹ توسط NIBS آمریکا ارائه شده است (جدول ۴-۱). نحوه ساخت تاثیر بسیار زیادی بر اثر پذیری از امواج زلزله دارد، چرا که در روش حفاری، خاک اطراف کاملاً دست نخورده باقی می‌ماند و از طرف دیگر این گونه تونلها معمولاً در جایی ساخته می‌شوند که عمق قرار گیری تونل زیاد باشد. ولی در تونلهای سطحی مانند تونلهای مترو، اغلب از روش خاکبرداری و پوشش استفاده می‌شود.

حداکثر شتاب زمین PGA			
نوع تونل	حالت خرابی	میانۀ (g)	β
حفاری شده	حداقل	۰/۶	۰/۶
	متوسط	۰/۸	۰/۶
خاکبرداری شده	حداقل	۰/۵	۰/۶
	متوسط	۰/۷	
تغییر شکل پایدار زمین PGD			
نوع تونل	حالت خرابی	میانۀ (in)	β
همه تونلها	حداقل و متوسط	۶	۰/۷
	زیاد	۱۲	۰/۵
	کامل	۶۰	۰/۵

جدول (۴-۱) پارامترهای توابع خرابی تونل HAZUS ۹۹

۴-۵- پوشش داخلی تونل (Lining)

پس از حفاری تونل در صورت نیاز از پوشش داخلی برای محافظت در مقابل ریزش استفاده می‌شود. البته مواردی نیز وجود دارد که در صورت استحکام کافی سنگها، از پوشش استفاده نمی‌شود، ولی در غیر این صورت امکان استفاده از شاتکریت، بتن درجا، و یا اجزای پیش ساخته وجود دارد.

۵- تاثیر گسلش بر تونلها:

گسلش یکی از عواملی است که میتواند در هنگام وقوع زلزله خسارات زیادی را به سازه‌های زیر زمینی و بخصوص سازه‌های خطی زیر زمینی وارد نماید.

۵-۱- اهمیت مطالعه گسلش در طراحی سازه‌های زیر زمینی

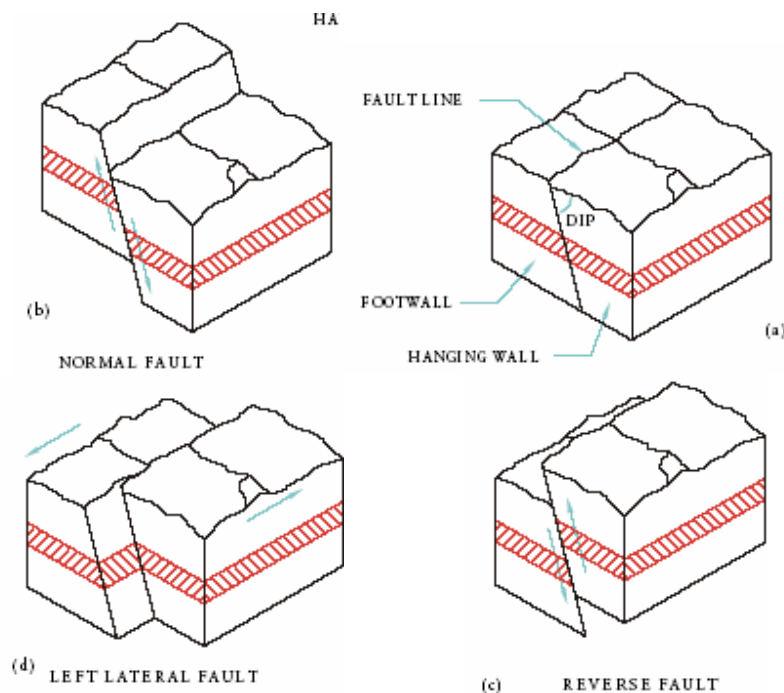
جابجائی برشی در یک پهنه باریک در دو طرف گسل آثار تخریبی شدیدی بر روی سازه‌های زیر زمینی خواهد داشت. تنشهای حاصل از گسلش در مقاطع تونل یا سایر سازه‌های زیر زمینی می‌تواند به مراتب از تنشهای حاصل از لرزش و لغزش بیشتر باشند. طراحی تونلها به نحوی که بتواند در برابر جابجایی‌های چند سانتیمتری تا چند متری ناشی از گسلش مقاومت کنند، نیز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست؛ بدین لحاظ مطالعه خطر گسلش در مسیر یک تونل و یا سایر سازه‌های زیر زمینی از اهمیت خاصی برخوردار است.

در واقع بسیاری از سازه‌های زیر زمینی و بخصوص تونلها دارای تقاطع‌هایی با گسلها می‌باشند که این امر باعث آسیب پذیری آنها بر اثر حرکت گسل می‌گردد. به همین جهت در حین بررسیهای ساختگاه برای ساخت سازه‌های زیرزمینی باید به وجود گسلها توجه خاصی مبذول شود تا بتوان با شناخت کامل آنها، پیش گیریهای لازم را در جهت کاهش میزان صدمات ناشی از گسلش انجام داد. در این راستا، نه تنها مکان گسلهای فعال باید دقیقاً شناسایی گردند، بلکه باید نوع گسل و نحوه حرکت آن، نحوه حرکت گسل در گذشته، نحوه انتخاب رویداد مناسب برای طراحی و اهمیت و یا تاثیر گسلش در کاربری سازه زیر زمینی نیز دقیقاً بررسی گردد. بررسی نوع گسل نحوه حرکت آن را در جهات افقی یا قائم و یا هر دو، مشخص می‌کند. جابجائی گسل میزان حرکت آن را در جهات مختلف نشان می‌دهد. رویدادهای تاریخی میتوانند برای پیش بینی نوع حرکت، میزان جابجائی و زمان احتمالی گسلش در آینده مورد استفاده قرار گیرند و انتخاب رویداد مناسب نیز می‌تواند امکان طراحی بهینه و اقتصادی سازه را فراهم آورد. همچنین تاثیر گسلش بر کاربری طرح باید به دقت مشخص گردد. به عنوان مثال، در تونلهای راه آهن حساسیت زیادی در برابر

جابجائی وجود دارد؛ زیرا، امکان قطع شدن ریلها یا مختل شدن سیستم آنها به واسطه جابجائی حاصل از گسلش وجود دارد و این امر می‌تواند حوادث ناگواری را بوجود آورد. در مقابل در تونل‌های انتقال آب حتی اگر جابجائی قابل توجهی نیز رخ دهد خطر جانبی به همراه نخواهد داشت و سیستم انتقال آب نیز می‌تواند با مقداری تفاوت دبی به کار خود ادامه دهد.

۵-۲- انواع جابجایی های گسلی

معمولا جابجایی گسلها به سه شکل نرمال، معکوس و امتداد لغز انجام می شود که در نوع امتداد لغز جابجائی افقی و در دو نوع دیگر جابجایی قائم می‌باشد. البته معمولا در طبیعت حالات ترکیبی از این حرکات مشاهده می‌شود و به ندرت می‌توان گسلی را یافت که صرفا در جهت افقی یا قائم حرکت کند. قسمتهای مختلف یک گسل و انواع حرکات گسل در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱ قسمتهای مختلف یک گسل و انواع جابجائی آن

۵-۳- جابجائی گسل در چند رویداد مهم لرزه‌ای:

هر چند در اکثر مواقع در هنگام زلزله جابجائی گسلها در حد چند ده سانتی متر می‌باشد، ولی در رویدادهای بزرگ لرزه‌ای این جابجائی می‌تواند به چند متر نیز برسد. در این قسمت مثالهایی از برخی زلزله های مهم جهانی و داخلی جهت روشن شدن اهمیت گسلش ارائه می‌گردد:

- زلزله سان فرانسیسکو (۱۹۰۶): در این زلزله حرکت گسل سان آنریاس موجب تخریب و برهم خوردگی وضعیت بسیاری از راهها، حصارها، خطوط لوله، پل و تونلها در امتداد گسل شد. پهنای منطقه شکستگی در این مورد از چند ده سانتی متر تا بیش از ۱۵ متر متغیر بود و ترکهای زیادی نیز در دو طرف گسل اصلی تا شعاع چند ده متری ایجاد شد. مقدار جابجائی افقی با آنچه که توسط جابجائی حصارها و یا راهها قابل اندازه‌گیری بود از ۲/۵ متر تا ۴/۵ متر متغیر بوده است که در بعضی نقاط به ۶/۵ متر هم می‌رسیده است.
- زلزله سان فرناندو (۱۹۷۱): نوع گسل در این زلزله شیب لغز معکوس بوده است. گسلش در ناحیه‌ای به وسعت ۱۵ کیلومتر ایجاد شد و با حرکات لغزشی معکوس و امتداد لغز چپ گرد همراه بوده است. در ناحیه سان فرناندو حداکثر جابجائی بصورت چپ گرد ۱/۹ متر و بصورت شیب لغز ۱/۵ متر بوده است. اختلاف سطح عمودی حاصله برابر با ۱/۳۹ متر بوده و کوتاه شدگی در جهت قائم بر روند زون ۰/۵۵ متر بوده است.
- در زلزله کوبه ژاپن (۱۹۹۵) با بزرگای ۷/۲ گسل نوجیما در جهت قائم ۱/۳ متر و در جهت افقی ۱/۸ متر جابجا شده است.
- در زلزله های ایران نیز جابجائی های قابل توجهی در گسلها در برخی از زلزله‌های بزرگ دیده شده است که خلاصه‌ای از آن در جدول (۵-۱) آورده شده است.

تاریخ	نام رویداد	بزر گا	طول گسل Km	جابجائی افقی به چپ (m)	جابجائی افقی به راست (m)	جابجائی قائم (m)
۱۹۰۹/۱/۲۳	سیلاخور	۷/۴	۴۵			۲/۵
۱۹۱۱/۴/۱۸	راور	۶/۲	۱۵			۰/۵
۱۹۲۹/۵/۱	کپه داغ	۷/۳	۷۰			۲/۱
۱۹۳۰/۵/۶	سلماس	۷/۲	۳۰		۴/۰	۶/۰
۱۹۴۱/۲/۱۶	محمد آباد	۶/۱	۱۰			۰/۵
۱۹۴۷/۹/۲۳	دوست آباد	۶/۸	۲۰		۱	۰/۸
۱۹۴۷/۹/۱	بوئین زهرا	۷/۲	۸۰	۰/۶		۱/۴
۱۹۶۸/۸/۳۱	دشت بیاض	۷/۴	۸۰	۴/۵		۲/۱
۱۹۷۸/۹/۱۶	طبس	۷/۷	۷۵			۰/۷
۱۹۷۹/۱۱/۱۴	کریزان - خواف	۶/۶	۱۷			۰/۶
۱۹۷۹/۱۱/۲۷	کولی - بیناباد	۷/۱	۶۵	۲/۲۵	۰/۹	۳/۸

جدول (۵-۱) برخی از زلزله‌های مهم ایران در سالهای ۱۹۰۰ تا ۱۹۸۰ که همراه با گسلش قابل توجه بوده‌اند.

۴-۵- جابجائی در سطح و جابجائی در عمق :

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که در اکثر موارد میزان جابجائی در عمق با میزان آن در سطح فرق می‌کند. به عنوان مثال، میزان جابجائی حاصل از گسلش در زلزله ۱۹۵۲ کالیفرنیا در سطح زمین حدود یک متر و در عمق ۱۶۰ متری این مقدار ۲/۵ متر بوده است. در زلزله ۱۹۷۸ ژاپن نیز میزان جابجایی در عمق حدود ۰/۵ متر و در سطح زمین تنها برابر ۰/۱۹ متر بود. در تمام موارد اندازه‌گیری شده، میزان جابجائی در عمق بیش از سطح زمین بوده است؛ ولی در حال حاضر با توجه به کمبود اطلاعات از میزان جابجائی در عمق نمی‌توان رابطه‌ای را بین عمق و جابجائی حاصل از گسلش تعیین کرد. لذا، معمولاً از همان مقادیر سطحی با ضرایبی که به اهمیت طرح بستگی دارند برای عمق استفاده می‌گردد. به عنوان مثال، در یک مطالعه کاربردی در رابطه با متروی لوس آنجلس که با گسل هالیوود و چین خوردگی کویوت (Coyote) برخورد

دارد از حداکثر جابجایی سطحی برای طراحی تونل در محل برخورد با گسل استفاده شده است. در این مورد حداکثر جابجایی سطحی برای طراحی تونل در محل برخورد با گسل استفاده شده است. در این مورد حداکثر جابجایی سطحی ثبت شده در مورد گسل هالیوود برابر دو متر و برای چین خوردگی کویوت برابر ۰/۵ متر بوده است. باید توجه داشت که تونل در عمق ۵۰ متری با این ساختارهای زمین شناسی برخورد می‌کند.

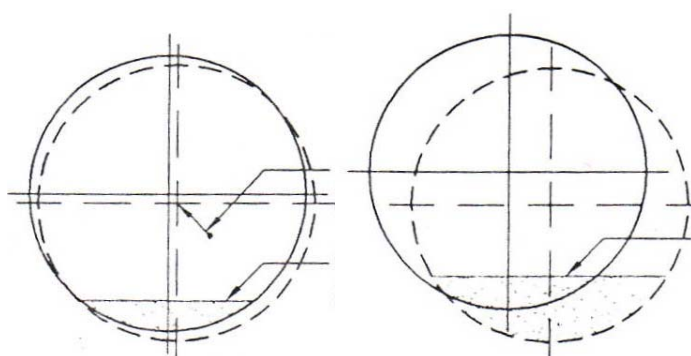
لازم به توضیح است که بررسی خصوصیات جابجائی و گسیختگی در طول یک گسل نشان می‌دهد که میزان جابجایی در نقاط مختلف در طول گسل یکسان نیست. با توجه به متغیر بودن مقدار جابجائی در نقاط مختلف یک گسل، لازم است جهت تحلیل میزان جابجایی از روشهای آماری استفاده شود. تا کنون کلیه روابطی که برای برآورد جابجایی با استفاده از بزرگای ارائه شده‌اند بر اساس تحلیل‌های انجام شده بر روی حداکثر مقادیر جابجائی بوده‌اند. مقادیر جابجائی که با این روابط بدست می‌آید درواقع مطابق با وضعیتی می‌باشد که سازه در محلی ساخته شده است که حداکثر جابجائی در آن محل وجود دارد؛ ولی محاسبات نشان می‌دهند که این مقدار جابجائی حداکثر تنها در قسمت کوچکی از کل طول گسیختگی و در حدود ۳ تا ۵ درصد آن ایجاد می‌شود. لذا احتمال برخورد حداکثر جابجائی با ساختگاه طرح کم است و طراحی بر این اساس مقرون به صرفه نیست. امروزه روشهای آماری مختلفی در طراحی سازه‌ها و فضاهای زیر و رو سطحی روی گسلها ارائه شده‌اند که می‌توان از آنها استفاده نمود.

۵-۵- روشهای کاهش صدمات ناشی از گسلش روی تونلها و سازه‌های زیر زمینی

معمولا طراحی تونلها یا سایر سازه‌های زیر زمینی به گونه‌ای که بتوانند در برابر گسلش مقاومت نمایند، اقتصادی نیست؛ لذا سعی می‌شود که با تعیین محل دقیق گسلها با روشهای زمین شناسی و ژئوفیزیکی از برخورد تونلها با آنها ممانعت به عمل آید. این عمل بخصوص در نواحی فعال زمین ساختی در مورد سازه‌های خطی نظیر تونلها که حداقل صدها متر طول دارند مشکل است.

چنانچه امکان دوری از گسل مقدور نباشد معمولاً با قبول مقداری جابجایی در مقطع تونل سعی می‌شود که در محل برخورد تونل با گسل اتصالاتی تعبیه گردد تا صدمات را به حداقل ممکن کاهش دهد و امکاناتی نیز برای بازسازی سریع در نظر گرفته شود.

بدین منظور می‌توان با استفاده از نقاط ضعف عمده در تونل (نظیر درزه‌های ساختمانی و ...) صدمات را در قسمتهای خاصی متمرکز نمود. روش دیگر کاهش صدمات ناشی از گسلش در تونلها، افزایش سطح مقطع در محل تقاطع با گسل می‌باشد. در این مورد در محل برخورد تونل و گسل سطح مقطع را با اندازه جابجائی قابل انتظار بر اثر گسلش بزرگتر در نظر می‌گیرند و قسمت اضافی را با سنگ ریزه پر می‌کنند. چنانچه گسلش اتفاق افتد سطح مقطع حاصله برابر با سطح مقطع مفید مورد نظر است. این عمل در مورد خط متروی لوس آنجلس انجام شده است. در این تونل زیر زمینی در محل برخورد تونل با گسل هالیوود، سطح مقطع به اندازه دو متر که برابر با حداکثر جابجایی محتمل ناشی از گسلش بود بزرگتر از سطح مقطع سایر نقاط، طراحی و اجرا شد و قسمت اضافی با سنگ ریزه پر شد. شکل ۵-۲ نحوه انجام این کار را روی مقطع تونل نشان می‌دهد.



مقطع تونل پس از وقوع زلزله امتداد لغز

مقطع تونل قبل از وقوع زلزله

شکل (۵-۲) طراحی تونل متروی لوس آنجلس در محل برخورد با گسل هالیوود

- در محل برخورد با گسلها پیشنهادهایی توسط هرا دیلک ارائه شده است:
- درزه‌های لرزه‌ای در فواصل نزدیکی قرار داده شوند.
 - مقاومت برشی کل اطراف درزه‌ها طوری باشد که رابطه $2R < qI$ صادق باشد. در این رابطه R مقاومت برشی درزه، q حداقل بار طراحی عرضی بر واحد طول مجرا و L فاصله بین درزه‌ها می‌باشد.
 - اگر ناحیه گسله، فعال تشخیص داده شده است و یا مجرا بسیار حائز اهمیت باشد، در انتهای قطعات و نواحی ضعیف مجرا باید مقاوم سازی انجام گیرد.
 - اگر امکان تغییر مکان زیادی وجود دارد، سطح مقطع بزرگتر از حد مورد نیاز طراحی و ساخته شود.
 - در نواحی گسله تغییرات در هندسه یا خواص مجرا (بجز در درزه‌های لرزه‌ای) تغییرات ناگهانی جهت، تقاطع‌ها و ... نباید انجام شود.
 - درزه‌های دارای زهکشهای جانبی باید کمی حرکت را تحمل کنند. بدین منظور می‌توان از اتصالات یقه‌ای نئوپرن (Neoprene) یا مصالح مشابه استفاده کرد.

۶- تاثیر ارتعاشات زلزله بر تونلها

آسیب پذیری سازه‌های زیر زمینی در برابر زلزله هم می‌تواند به واسطه گسیختگی زمین در هنگام وقوع زلزله و هم به دلیل ارتعاشات ناشی از زلزله روی دهد. گسیختگی زمین در هنگام وقوع زلزله عمدتاً شامل گسلش، زمین لغزش و روانگرایی می‌باشد.

بحث مربوط به گسلش در فصل قبل بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت، ولی بجز گسلش، زمین لغزش و روانگرایی نیز از پدیده‌های طبیعی ناشی از زلزله می‌باشد. زمین لغزش‌ها که معمولاً توسط زلزله تحریک می‌گردند، بخصوص در ورودی-خروجی تونلها می‌توانند صدمات زیادی را به فضاهاى زیر زمینی وارد نمایند. بسیاری از گزارشات مربوط به آسیب فضاهاى زیر زمینی در اثر زلزله، به واسطه ایجاد لغزش در مدخلهای تونلها بوده‌اند. روانگرایی نیز بخصوص چنانچه فضای زیر زمینی در رسوبات سست دارای درصد بالای ماسه و سیلت احداث شده باشد، می‌تواند صدمات زیادی را به فضای زیر زمینی وارد نماید. این آسیبها بیشتر در رابطه با تونلهای مترو در نواحی شهری که از رسوبات منفصل عبور میکنند دیده شده است.

۶-۱- اهمیت مطالعه ارتعاشات زلزله

هر چند که گسیختگی زمین در اثر گسلش، روانگرایی و زمین لغزش می‌تواند اثرات ویرانگری را بر سازه‌های زیر زمینی وارد نماید، ولی صدمات ناشی از ارتعاشات زلزله به دلایل زیر به مراتب مهمتر از این صدمات هستند:

- صدمات ناشی از گسیختگی (نظیر گسلش یا زمین لغزش) در نواحی خاصی اتفاق می‌افتند که می‌توان با مطالعات دقیق زمین شناسی مهندسی از قبل این نواحی را شناسایی نموده و تمهیداتی را در آنها در نظر گرفت ولی ارتعاش می‌تواند در اثر جنبش هر گسلی در فواصل دور یا نزدیک به فضای زیر زمینی ایجاد گردد و شدت آن نیز می‌تواند بسیار متغیر باشد.

- ارتعاش منحصر به قسمت خاصی از تونل یا فضای زیر زمینی نمی‌شود و خسارات حاصله در کل مسیر تونل یا فضا می‌تواند ایجاد شود ولی

گسلش یا زمین لغزش (و تا حدودی روانگرایی) در قسمتهای محدودی از مسیر اثر می‌گذارند و به کل سیستم آسیب نمی‌رسانند.

■ ارتعاشات ناشی از زلزله می‌تواند به شکل امواج مختلف طولی، عرضی یا برشی فضای زیر زمینی را تحت تاثیر قرار دهند و لذا تغییر شکل‌های گوناگونی در مقاطع یا سازه‌های زیر زمینی در اثر ارتعاش امکان وقوع دارد. امواج اولیه یا P که به موازات محور طولی تونل یا سازه زیر زمینی انتشار می‌یابند، تونل را در جهت طولی دچار فشار یا کشش می‌کنند که می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های کششی یا خرد شدگی‌های فشاری در امتداد آن گردد. امواج برشی یا S که بخش اصلی انرژی را انتقال می‌دهند، چنانچه در جهت طولی تونل انتشار یابند باعث ارتعاش در جهت عمود بر محور تونل شده و یا ایجاد جابجایی‌های برشی، آسیب‌های زیادی را به فضای زیر زمینی وارد می‌کنند. چنانچه جهات برخورد این امواج با تونل مایل یا عمود بر محور تونل باشد، باز هم اشکال دیگری از تغییر مکان در فضای زیر زمینی ایجاد می‌گردد. در حالیکه گسیختگی‌های ناشی از گسلش یا زمین لغزش معمولاً جهت تغییر شکل از بررسی‌های ساختگاهی قابل پیش‌بینی است.

۶-۲- اثر امواج مختلف بر سازه زیر زمینی

با توجه به بررسی امواج زلزله در فصل چهارم، امواج زلزله دارای انواع مختلفی است که هر کدام از این امواج تاثیر خاص خود را بر سازه زیر زمینی اعمال می‌کند. با توجه به این موضوع، هر کدام از امواج بصورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۲-۱. امواج فشاری:

امواج فشاری PW، معمولاً همراه با امواج برشی افقی HSW می‌باشند. HSW مولفه قائم و PW مولفه محوری امواج فشاری می‌باشد. PW بر روی سازه‌های زیر زمینی فشار و کشش طولی ایجاد می‌کند در حالی که HSW سازه خاکی را به جنبش جانبی

و ادا می‌کند. HSW اثر جدی بر روی سازه‌های بلند دارد ولی تاثیر چندانی بر روی سازه‌های زیر زمینی ندارد. تونلها و سازه‌های زیرزمینی طولی انعطاف‌پذیر، بر اساس انعطاف‌پذیری اتصال حلقوی بر اثرات امواج HSW فائق می‌آیند. PW سریعترین موج انتشار یافته از زلزله است. بنابراین اولین موجی است که ساختگاه سازه خاکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در شکل (۶-۱-۸) اثر این گونه امواج بر تونل و تغییر شکلهای حاصله نشان داده شده است.

۶-۲-۲. امواج برشی قائم:

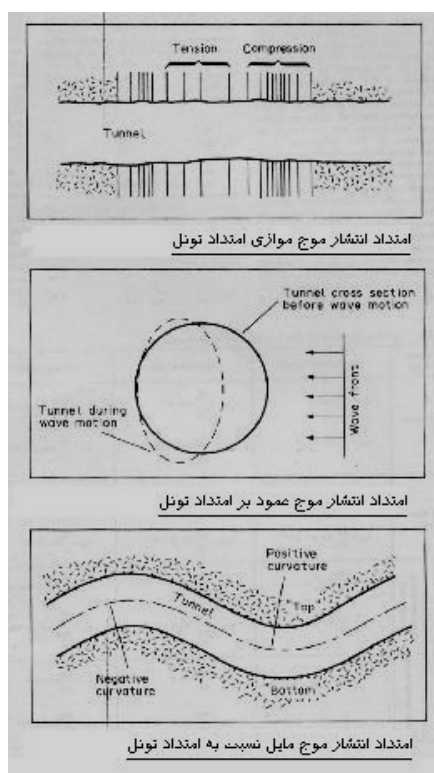
امواج برشی قائم اصلی‌ترین نوع امواج هستند که حدودا شامل دوسوم (۲/۳) انرژی آزاد شده هستند. VSW باعث جابجائی قائم سیستم سازه‌ای می‌شود که برای سازه‌های بزرگ بسیار خطرناک است ولی تاثیر زیادی بر روی تونلها و سازه‌های زیر زمینی ندارد زیرا که اثر آن را بر بوسیله اتصالات انعطاف پذیر جذب می‌کند. VSW نسبت به HSW کندتر حرکت می‌کند، لذا فاصله زمانی بین VSW و HSW کاملا وابسته به فاصله ساختگاه تا رومرکز است. به شکل (۶-۱-۸) مراجعه نمایید.

۶-۲-۳. امواج رایی RW :

در امواج رایی، جهت چرخش ذرات در بالاترین قسمت آنها، در خلاف جهت حرکت موج می‌باشد و حرکات ذرات در سطح مسیر به صورت بیضی است که قطر بزرگ آن عمود بر انتشار موج است. امواج رایی همانند امواج برشی قائم برای سازه‌های بزرگ عمل می‌کنند. سیستمهای زیر زمینی متحمل تغییر مکانهای قائم بر اساس ارتفاع آنها می‌شوند.

۴-۲-۶. امواج لاو LW :

این امواج شکل ویژه‌ای از امواج HSW هستند، که جابجائی‌های جانبی با عمق خاک کاهش می‌یابد. بطور کلی امواج تنها عامل تهدید کننده سازه‌های زیر زمینی هستند. سازه تحت اثر این امواج متحمل تغییرات دینامیکی جانبی می‌شود. مقدار جابجائی جانبی بین بالا و پایین سازه متفاوت است. اگر اضافه تنش ایجاد شده توسط امواج لاو، از مرز ایمنی فزونی یابد، سختی جانبی سازه زیر زمینی باید برای متناسب شدن با شرایط بارگذاری افزایش یابد. شکل (۶-۱-۷) تغییر شکل نظیر این موج اعمال شده بر تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱ اثر امواج مختلف و انواع تغییر شکلهای ناشی از ارتعاش زمین در هنگام زلزله

۳-۶- بررسی تغییر شکلهای ایجاد شده در تونل

همانطور که بیان شد، پاسخ فضاهای زیر زمینی در برابر ارتعاشات ناشی از زلزله می‌تواند به سه شکل تغییر شکلهای محوری، انحنایی و حلقه‌ای (Hoop) باشد.

تغییر شکل محوری با کرنشهای فشاری و کششی همراه می‌باشد و همراه با عبور موج در طول محور تونل یا فضای زیر زمینی جابجایی انجام می‌گیرد. تغییر شکلهای انحنایی باعث ایجاد انحناهای مثبت و منفی در امتداد تونل می‌گردند. در انحنای مثبت جدار فضای زیر زمینی در قسمت فوقانی دچار فشردگی و در قسمت تحتانی دچار کشیدگی می‌شود. تغییر شکلهای حلقه‌ای نیز در اثر رخورد امواج به صورت عمودی یا تقریباً عمودی نسبت به محور تونل یا فضای زیر زمینی ایجاد می‌گردد. این حالت تنها زمانی که طول موج لرزه‌ای کمتر از شعاع فضای زیر زمینی باشد ایجاد می‌شود.

۳-۶-۱- تغییر شکلهای محوری و انحنایی

تنشهای دینامیکی حاصل از امواج لرزه‌ای به تنشهای استاتیکی موجود در جدار تونل یا فضای زیر زمینی و سنگهای مجاور آن افزوده می‌گردند. در اثر افزایش تنشهای فشاری حاصل از بارگذاری دینامیکی امکان ایجاد خرد شدگی و حالت پوسته شدن (Buckling) در محیط فضای زیر زمینی وجود دارد. تنشهای لرزه‌ای کششی باعث کاهش تنشهای استاتیکی فشاری موجود در محل شده و این خود ایجاد تنشهای کششی می‌نماید که نتیجه آن باز شدن درزه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت برشی، سست شدن پیچ سنگها (Rock bolts) و نهایتاً ریزش سنگ از سقف یا جداره‌های تونل می‌باشد. برای تعیین تغییر شکلهای محوری و انحنایی می‌توان از مدل‌های یک بعدی استفاده نمود. شاید ساده‌ترین راه بدین منظور در نظر گرفتن تونل بعنوان یک تیر سازه‌ای و انجام تحلیل‌های مربوطه روی آن باشد. اما برای مغاره‌ها یا تونلهای بزرگتر لازم است از مدل‌های سه بعدی جهت برآورد این تغییر شکلهای استفاده نمود. روابط زیر میتوانند جهت تخمین تنشهای میدان آزاد بکار روند :

$$\sigma_{\max} = \pm \rho V_p |V_{Peal}| \quad (۱-۶)$$

$$\tau_{\max} = \pm \rho V_s |Vn_{Peal}| \quad (۲-۶)$$

در این روابط:

σ_{\max} حداکثر تنش محوری

τ_{\max} حداکثر تنش برشی

ρ دانسیته مصالح

V_p سرعت موج P

V_s سرعت موج S

V_{Peak} سرعت اوج ذره‌ای در جهت انتشار

$V_{n,Peak}$ سرعت اوج ذره‌ای در جهت عمود بر انتشار

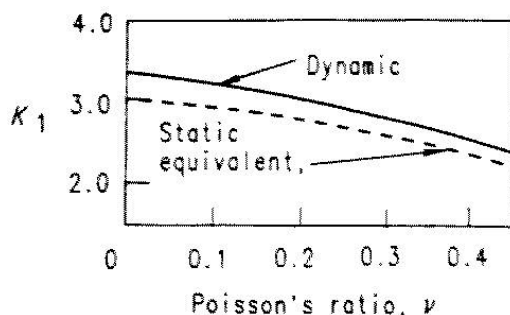
۶-۳-۲- تغییر شکل حلقه‌ای:

تمرکز تنش‌های حلقه‌ای حاصل از تغییر شکل را می‌توان با استفاده از روابط مربوط به میدان آزاد تنش به شرح زیر برآورد نمود:

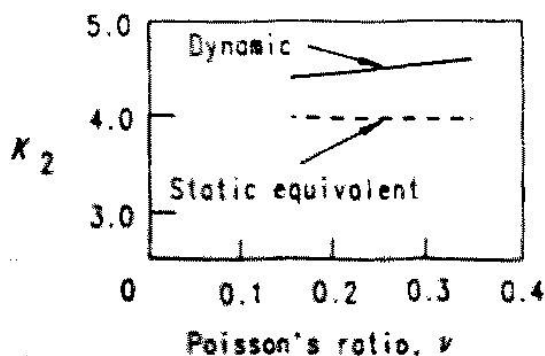
$$\sigma_{\max} = \pm K_1 \rho V_p |V_{Peal}| \quad (۳-۶)$$

$$\tau_{\max} = \pm K_2 \rho V_s |Vn_{Peal}| \quad (۴-۶)$$

در این روابط K_1 فاکتور تمرکز تنش دینامیکی برای موج P می‌باشد و مطابق شکل (۲-۶) تعیین می‌شود و K_2 فاکتور تمرکز تنش دینامیکی برای موج S است و مطابق شکل (۳-۶) تعیین می‌شود.



شکل (۲-۶) رابطه بین فاکتور تمرکز تنش دینامیکی K_1 برای موج P و نسبت پواسون



شکل (۳-۶) رابطه بین فاکتور تمرکز تنش دینامیکی K_2 برای موج S و نسبت پواسون

روابط فوق برای برآورد تنشهای دینامیکی حداکثر در اطراف فضاهای زیر زمینی استوانه‌ای شکل بدون جدار ارائه شده‌اند که البته با اندکی تغییر می‌توان از آنها برای تونل‌های دارای جدار نیز استفاده نمود.

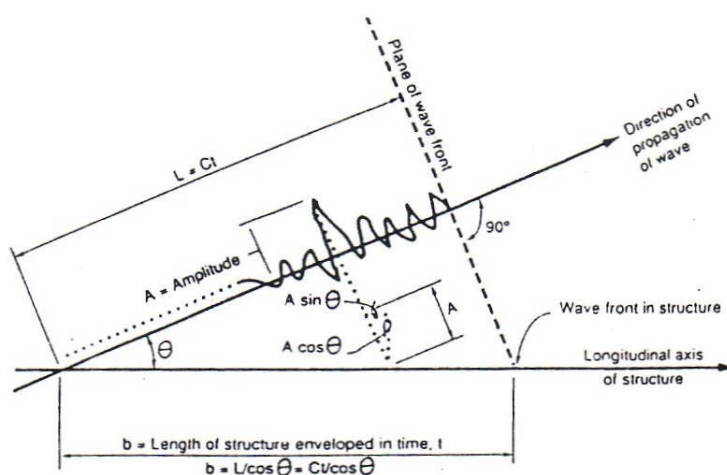
۴-۶- بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مدفون در رسوبات منفصل

مهمترین فرضی که برای تحلیل رفتار سازه‌های مدفون در رسوبات منفصل انجام می‌شود این است که خاک در مقایسه با سازه زیر زمینی صلب است و لذا تغییر شکل حاصل از زلزله در خاک به فضای زیر زمینی منتقل می‌شود و سازه هماهنگ با زمین اطرافش حرکت می‌کند. با توجه به اینکه معمولاً در اثر زلزله تغییر شکلهای مختلفی در جهات مختلف بصورت تصادفی ایجاد می‌شود لذا امکان مقاوم سازی سیستم جهت مقابله با این تغییر شکلهای بسیار دشوار بوده و در بسیاری موارد امکان پذیر نیست. از طرفی صلبیت بیش از حد سازه زیر زمینی تنها آسیب پذیری آن را در برابر زلزله افزایش می‌دهد و لذا معمولاً در طراحی سازه‌های زیر زمینی لازم است که سیستم به صورت انعطاف پذیر و دارای قطعات شکل پذیر طراحی شود به شرطی که پایداری استاتیکی آن به مخاطره نیفتد.

همچنین لازم است به مسایلی نظیر امکان تشدید و اثر اندر کنش سازه با محیط اطراف نیز توجه نمود. این عوامل می‌توانند باعث افزایش جنبشهای لرزه‌ای گردند. اندر کنش خاک - سازه در سازه‌های زیر زمینی اثرات مهمی دارد، اما اگر سازه طوری طراحی گردد که سیستم از جنبش زمین تبعیت کند، آنگاه اثر اندر کنش به

حداقل کاهش می‌یابد. در بسیاری از معیارهای طراحی فضاهای زیر زمینی در رسوبات منفصل سعی می‌شود اثر اندر کنش با طراحی سیستم به نحوی که سیستم از جنبشهای زمین تبعیت کند، خنثی شود اما اگر فضای زیر زمینی در خاک خیلی سست احداث شده باشد، اثر اندرکنش نسبتاً زیاد می‌باشد و باید مورد توجه قرار گیرد.

عامل دیگری که در رفتار فضاهای زیر زمینی در برابر ارتعاش حاصل از زمین لرزه حائز اهمیت است زاویه برخورد امواج با جدار تونل می‌باشد. امواج لرزه‌ای به سازه‌های خطی نظیر تونلها می‌توانند با زوایای مختلفی برخورد کنند و هر چه (به واسطه کاهش زاویه برخورد موج با تونل) طول تحت تاثیر قرار گرفته تونل بیشتر باشد، دامنه تغییر مکان زمین کاهش می‌یابد. این اثر در شکل (۷-۴) نشان داده شده است.

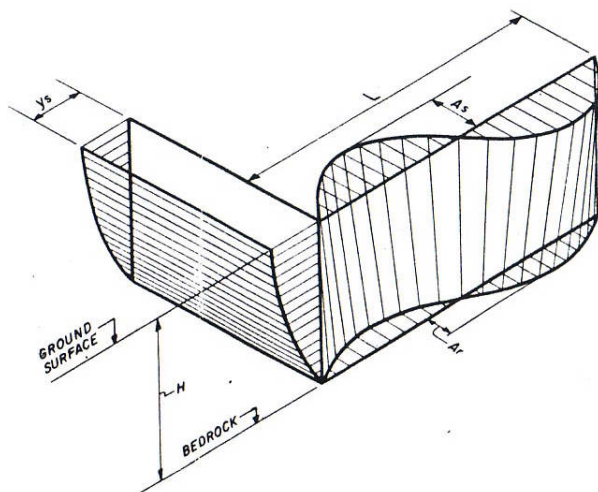


شکل (۴-۶) اثر زاویه برخورد موج با یک سازه خطی نظیر تونل و پارامترهای مرتبط با آن

زاویه برخورد موج با تونل اثر قابل توجهی در مقادیر انحنای خمیدگی تونل و در نتیجه در تغییر شکل تونل هنگام وقوع زلزله دارد.

۶-۴-۱- انواع تغییر شکلهای لرزه‌ای خاک

دو نوع تغییر شکل عمده حاصل از زلزله می‌تواند روی سیستم‌های حمل و نقل زیر زمینی تاثیر نماید که عبارتند از تغییر شکلهای انحنایی و تغییر شکلهای برشی. تغییر شکلهای انحنایی در اثر قرارگیری مستقیم محل انحنای خاک (حاصل از زلزله) روی سازه زیر زمینی بوجود می‌آید. سازه زیر زمینی باید ظرفیت جذب کرنشهای حاصله را داشته باشد. تغییر شکل برشی نیز نشان دهنده تاخیر زمانی در پاسخ به یک شتاب پایه وارده به آن از سنگ بستر می‌باشد. این حالت را می‌توان به حرکت یک کاسه ژله در پاسخ به تکان ظرف آن تشبیه نمود. اثر این حرکت تغییر شکل مقطع مستطیلی فضا به شکل لوزی می‌باشد. این تغییر شکلهای در شکل (۵-۶) نشان داده شده است.



شکل (۵-۶) تغییر شکلهای حاصل از امواج برشی لرزه‌ای در خاک

باید توجه داشت که هرچند دامنه جابجائی زلزله می‌تواند زیاد باشد ولی در سازه‌های زیر زمینی خطی نظیر تونلهای مترو، این جابجایی در طول نسبتاً زیادی انجام می‌شود و لذا نرخ بهم ریختگی حاصل از زلزله معمولاً کم و در حد تغییر شکلهای الاستیک قرار می‌گیرد.

مقادیر حداکثر این تغییر مکانها (انحنایی و برشی) و روش طراحی این گونه سازه‌ها در برابر این بارهای وارده، در فصل طراحی لرزه‌ای تونلهای بصورت کامل بیان می‌گردد.

۷- برآورد خطر پذیری تونلها

۸-۱- برآورد خطر بر اساس HAZUS^{۹۹}:

در مجموعه HAZUS^{۹۹} که توسط NIBS آمریکا تهیه گردیده، بصورت کامل آسیب پذیری سازه‌های مختلف در برابر زلزله مورد بررسی قرار گرفته است، این مجموعه بر اساس داده‌های آمریکا تهیه شده و بصورت مجموعه‌ای در ۳۰ سی دی منتشر گردیده است. HAZUS^{۹۹} دارای راهنمای کاملی است که فصل هفتم آن به شریانهای حیاتی اختصاص دارد. در بررسی آسیب پذیری شریانهای حیاتی، آنها را به هفت زیر مجموعه تقسیم می‌نماید که عبارتند از:

- بزرگراه
- راه آهن
- قطار برقی
- حمل و نقل اتوبوسی
- بندر
- حمل و نقل آبی
- فرودگاهها

در تقسیم بندی فوق، هرکدام از سیستم های حمل و نقل دارای اجزائی می‌باشند که تونل جزو اجزای بزرگراهها و سیستم راه آهن میباشد. لذا ما نیز بصورت جداگانه نقش تونل را در هر کدام از تقسیم بندی‌های شریانهای حیاتی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

تونل در سیستم بزرگراهی :

تونل یکی از اجزای سیستم بزرگراهی می‌باشد که به همراه سیستم راه و پلهای بزرگراهی، مجموعه بزرگراهها را تشکیل می‌دهد. از میان اجزای مختلف سیستم بزرگراهی ما فقط به بررسی آسیب پذیری تونلها می‌پردازیم.

۱- داده های ورودی مورد نیاز

- مکان ژئوفیزیکی تونلها (طول و عرض)

• حداکثر شتاب زمین و حداکثر جابجائی زمین (PGA , PGD) در محل تونل.

• کلاس بندی تونل

۲- تونلها در بحث آسیب پذیری بر اساس نحوه ساخت کلاس بندی می‌شوند:

• تونل حفاری شده (سوراخ شده)

• تونل خاکبرداری شده

۳- تعاریف مربوط به سطح آسیب به تونلها

• $Ds1$: بدون آسیب

• $Ds2$: آسیب جزئی

آسیب جزئی به تونلها شامل ترکهای جزئی در پوشش تونل (خرابی

فقط نیاز به یک تعمیر سطحی داشته باشد) و افتادن چند سنگ و یا

نشست جزئی در زمین در ورودی تونل

• $Ds3$: خرابی متوسط

بصورت ترکهای متوسط در پوشش و فروریزش سنگ تعریف

می‌شود.

• $Ds4$: خرابی گسترده

بصورت نشستهای جدی در یک ورودی تونل و ترکهای گسترده در

پوشش تونل

• $Ds5$: خرابی کلی

ترکهای جدی در پوشش تونل که ممکن است شامل ریزش احتمالی

باشد.

۴- منحنی های تعمیرات اجزا

بر اساس تعداد روزهای مورد نیاز برای تعمیر خرابی های حاصل از زلزله

پارامترهایی تعریف گردیده که برای تونل بصورت جداول و شکل زیر میباشد.

Damage State	Roadways		Highway Bridges		Highway Tunnels	
	Mean (Days)	σ (days)	Mean (Days)	σ (days)	Mean (Days)	σ (days)
Slight/Minor	0.9	0.05	0.6	0.6	0.5	0.3
Moderate	2.2	1.8	2.5	2.7	2.4	2.0
Extensive	21	16	75.0	42.0	45.0	30.0
Complete			230.0	110.0	210.0	110.0

جدول (۱-۷) توابع بازسازی پیوسته برای اجزای بزرگراهی

Roadways				
Restoration Period	Functional Percentage			
	Slight	Moderate	Extensive/Complete	
1 day	90	25	10	
3 days	100	65	14	
7 days	100	100	20	
30 days	100	100	70	
90 days	100	100	100	
Bridges				
Restoration Period	Functional Percentage			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
1 day	70	30	2	0
3 days	100	60	5	2
7 days	100	95	6	2
30 days	100	100	15	4
90 days	100	100	65	10
Tunnels				
Restoration Period	Functional Percentage			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
1 day	90	25	5	0
3 days	100	65	8	3
7 days	100	100	10	3
30 days	100	100	30	5
90 days	100	100	95	15

جدول (۲-۷) توابع بازسازی منقطع برای اجزای بزرگراهی

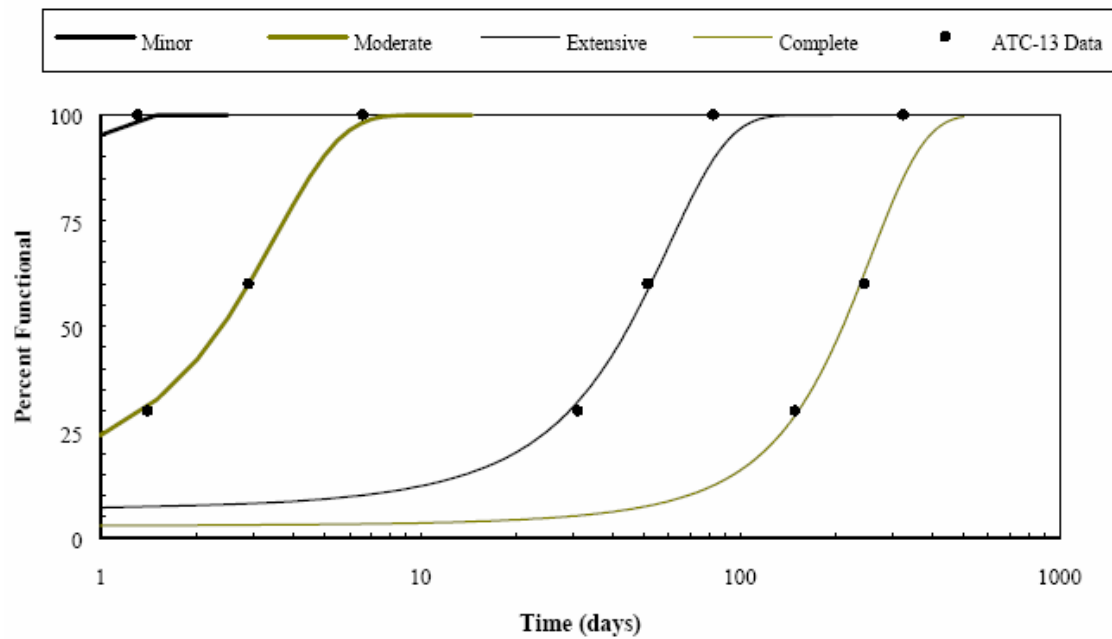
۵- توابع خرابی تونلها

خرابی تونلها بر اساس خرابی زیر اجزای آن می‌باشد که عبارتست از پوشش و ورودی تونل (G&E ۱۹۹۴). یافته‌های شرکت G&E بر اساس داده‌های زلزله گزارش شده توسط دودینگ و همکارانش می‌باشد در سال ۱۹۷۸ و اون در سال ۱۹۸۱ می‌باشد. خرابی این زیر سازه‌ها در جداول زیر ارائه شده است. کلا ۱۰ تابع خرابی برای تونلها بدست آمده است که چهار تابع برای PGA و شش تابع برای PGD می‌باشد. (توجه شود که هر کلاس تونل بصورت جداگانه مورد بحث قرار گرفته است). مقادیر متوسط و انحراف معیار این توابع در جدول دیگری ارائه شده است.

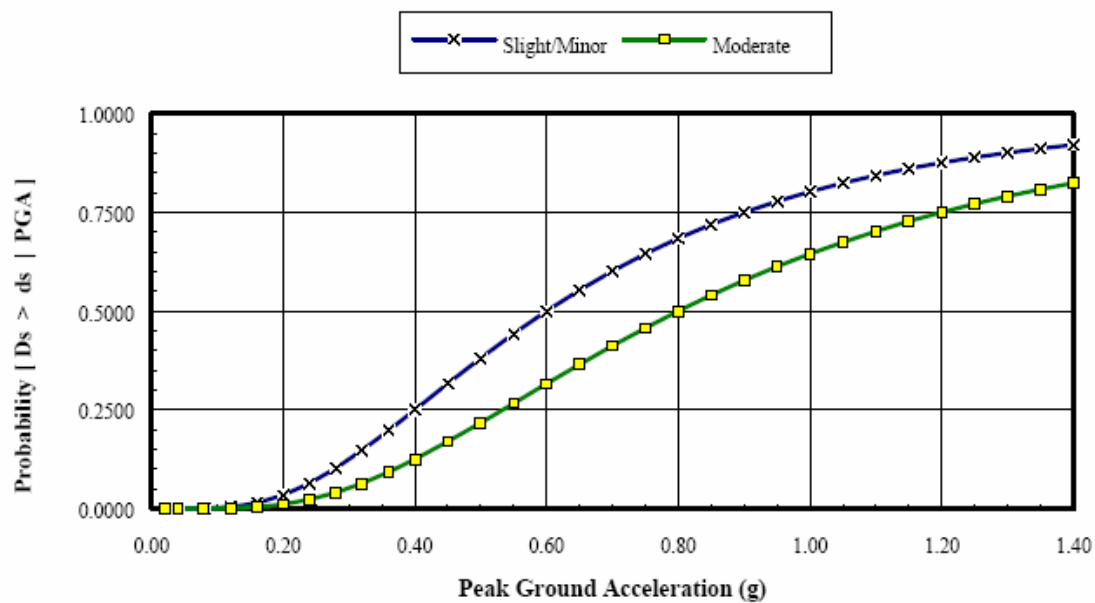
Peak Ground Acceleration			
Classification	Damage State	Median (g)	β
Bored/Drilled (HTU1)	slight/minor	0.6	0.6
	moderate	0.8	0.6
Cut & Cover (HTU2)	slight/minor	0.5	0.6
	moderate	0.7	0.6

Permanent Ground Deformation			
Classification	Damage State	Median (in)	β
All Tunnels	slight/moderate	6.0	0.7
	extensive	12.0	0.5
	complete	60.0	0.5

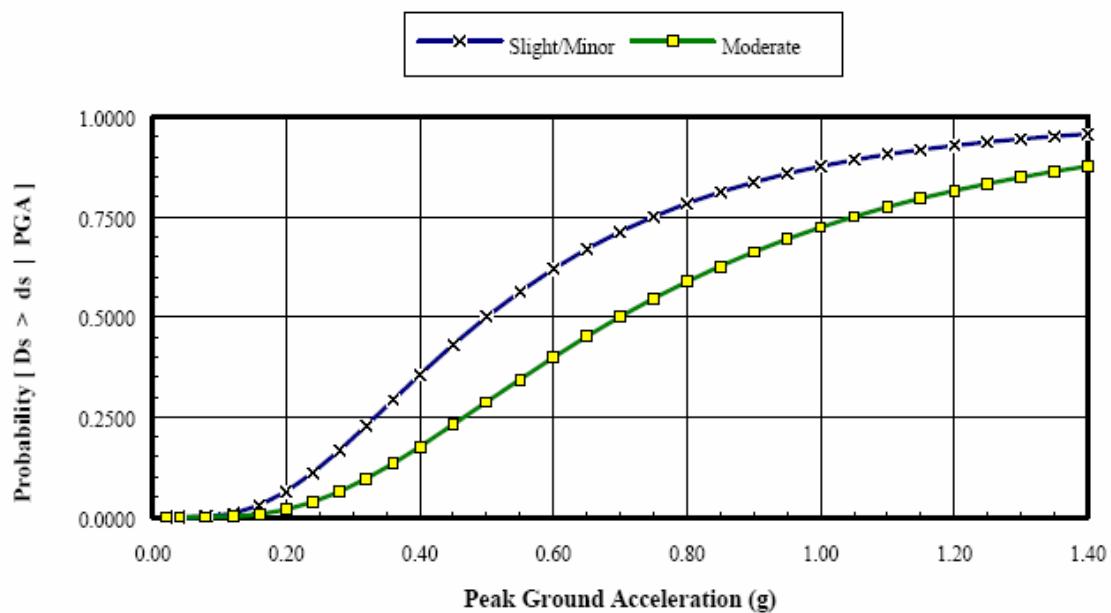
جدول (۷-۳) الگوریتم‌های خرابی برای تونلها (G&E ۱۹۹۴)



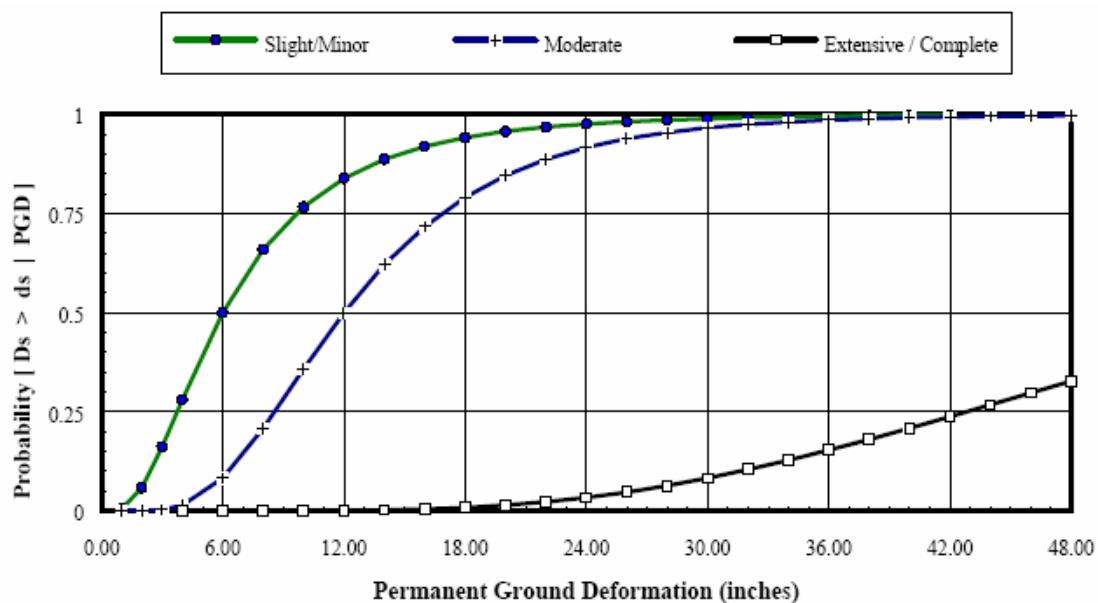
شکل (۱-۷) منحنی های بازسازی برای تونلهای بزرگراهی



شکل (۲-۷) منحنی خرابی در سطوح مختلف برای تونلهای حفاری شده بر اساس حداکثر شتاب زمین



شکل (۳-۷) منحنی خرابی در سطوح مختلف برای تونلهای خاکبرداری شده بر اساس حداکثر شتاب زمین



شکل (۴-۷) منحنی خرابی در سطوح مختلف برای همه انواع تونلها بر اساس جابجائی ماندگار زمین

تونل در سیستم راه آهن :

در مورد تونل در HAZUS۹۹ تاکید زیادی نشده است و فقط عنوان شده که تونل‌های راه آهن معمولاً مانند پلها، باعث بند آمدن ترافیک و ... نمی‌شوند مگر اینکه کاملاً عملکرد خود را از دست داده باشند.

بسیاری از تعاریف در تونل‌های راه آهن دقیقاً همان تعاریف تونل‌های بزرگراهی می‌باشد، باید توجه نمود که ایستگاه‌های راه آهن شهری جزو اجزای این سیستم حمل و نقل می‌باشد قسمتهای مورد نیاز در اینجا بیان می‌شود.

در راه آهن نیز تونلها به دو نوع حفاری شده و خاکبرداری شده تقسیم می‌شوند. در مورد ایستگاه‌های شهری در این آیین نامه گفته شده است که ایستگاه‌های مترو در حکم اتصالات حیاتی سیستم هستند و از نظر عملکرد سیستم بسیار مهم می‌باشند. در آمریکای غربی، این تسهیلات معمولاً به صورت دیوارهای برشی بتنی مسلح و یا قابهای خمشی ساخته می‌شوند در حالی که در آمریکای شرقی ایستگاه‌های کوچک اغلب چوبی هستند و ایستگاه‌های بزرگتر معمولاً با مصالح بنایی و یا قاب فلزی مهاربندی شده هستند.

۱- داده های ورودی مورد نیاز

- برای تونل‌های راه آهن :
 - همانند تونل‌های بزرگراهی
- برای ایستگاه‌های شهری :
 - مکان جغرافیایی تسهیلات
 - PGA و PGD در محل تسهیلات
 - کلاس بندی تسهیلات

۲- شکل توابع خرابی

توابع خرابی و یا منحنی های خرابی برای تمام اجزای راه آهن که در زیر توضیح داده شده است، بصورت تابع لوگ نرمال تعریف شده اند که احتمال رسیدن و یا گذشتن از سطوح خرابی مختلف برای یک سطح مشخص شده حرکت زمین می‌باشد. هر منحنی خرابی با یک مقدار میانگین از سطح حرکت

زمین و مقدار انحراف معیار مشخص می‌شود. حرکت زمین با پارامتر بیشینه شتاب زمین (PGA) و خرابی زمین با پارامتر جابجائی ماندگار زمین (PGD) تعیین میشود.

- برای تونلها، منحنی های خرابی بر اساس PGA و PGD تعیین می‌شود.

- برای تسهیلات راه‌آهن مانند ایستگاههای شهری نیز PGA و PGD مشخص کننده هستند.

۳- تعاریف مربوط به سطح آسیب

سطوح آسیب تونلها همانند تعاریف مربوط به تونلهای بزرگراهی می‌باشد. و در مورد ایستگاهها :

- Ds_1 : بدون آسیب
- Ds_2 : آسیب جزئی به سازه
- Ds_3 : خرابی متوسط سازه
- Ds_4 : خرابی گسترده
- Ds_5 : آسیب کلی و خرابی گسترده

۴- منحنی های تعمیرات اجزا

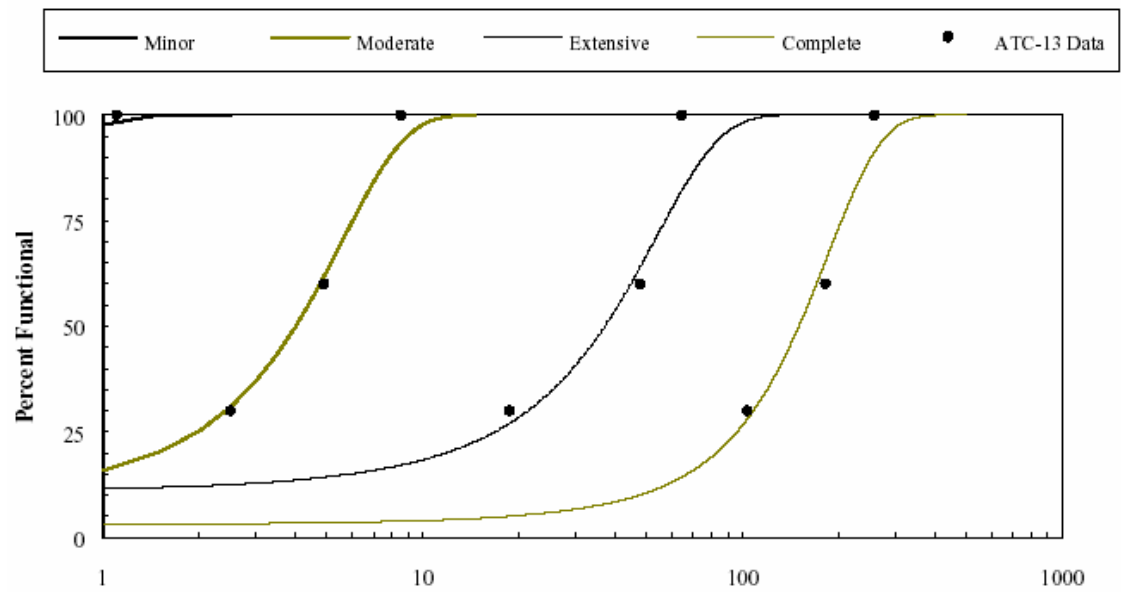
منحنی های بازسازی بصورت زیر می‌باشد.

Classification	Damage State	Mean (Days)	σ (days)
Railway Tracks	slight/minor	0.9	0.07
	moderate	3.3	3.0
	extensive	15.0	13.0
	complete	65.0	45.0
Railway Bridges	slight/minor	0.9	0.06
	moderate	2.8	1.8
	extensive	31.0	22.0
	complete	110.0	73.0
Railway Tunnels	slight/minor	0.9	0.05
	moderate	4.0	3.0
	extensive	37.0	30.0
	complete	150.0	80.0
Railway Facilities	slight/minor	0.9	0.05
	moderate	1.5	1.5
	extensive	15.0	15.0
	complete	65.0	50.0

جدول (۴-۷) توابع بازسازی پیوسته برای اجزای راه آهن

Classification	Damage State	1 day	3 days	7 days	30 days	90 days
		Functional Percentage				
Railway Tracks	slight/minor	90	100	100	100	100
	moderate	22	46	90	100	100
	extensive	14	18	28	87	100
	complete	6	8	10	22	70
Railway Bridges	slight/minor	80	100	100	100	100
	moderate	15	55	100	100	100
	extensive	9	10	14	50	100
	complete	7	7	8	14	40
Railway Tunnels	slight/minor	95	100	100	100	100
	moderate	16	38	85	100	100
	extensive	11	13	16	40	97
	complete	3	4	4	7	22
Railway Facilities	slight/minor	95	100	100	100	100
	moderate	37	85	100	100	100
	extensive	15	20	29	83	100
	complete	10	11	12	25	70

جدول (۵-۷) توابع بازسازی منقطع برای اجزای سیستم حمل نقل ریلی



شکل (۵-۷) منحنی‌های بازسازی برای تونل‌های راه آهن

۸- خلاصه بخش اول

با توجه به بحثهای انجام شده در مورد تونلها و سازه‌های زیر زمینی، بطور کلی رفتار این سازه‌ها در زلزله بصورت زیر خلاصه می‌شود:

مدهای خرابی

- تغییر شکل مقطع تونل
 - بوجود آمدن ترک یا باز شدن درزه‌ها
 - ریزش از سقف یا دیواره‌ها
 - جابه‌جایی محور تونل در محل تقاطع با گسل
 - پوسته‌ای شدن سقف و دیواره‌ها، که در اثر انعکاس امواج فشاری در برخورد با سطح تونل بوجود می‌آید.
 - آسیب در ورودی یا خروجی تونل (Portals)، که البته این نوع آسیبها از نوع آسیبهای سطحی می‌باشند.
- عوامل آسیب رساننده به تونلها در هنگام زلزله:

- حرکت گسلهای متقاطع با تونل
 - لغزش بلوکهای سست، شکست زمین و ریزش خاک
 - لرزش و ارتعاش و آسیب دیدگی پوشش
- عوامل موثر در رفتار تونلها به هنگام زلزله:

- قطر تونل
- عمق تونل
- نوع خاک ساختگاه (رسوبی، سنگی)
- صلیبیت پوشش تونل

لذا با توجه به بحثهای انجام شده معلوم می‌شود، بر خلاف تصور عمومی، سازه‌های زیر زمینی زیاد هم در برابر زلزله ایمن نیستند و امکان خرابی آنها وجود دارد. در مورد تونلها و ایستگاههای آن بدلیل سطحی بودن سازه‌ها، شرایط خاص دیگری نیز حکم فرماست که در بخش بعدی بصورت کلی به این موضوع می‌پردازیم.

بخش دوم

بررسی رفتار لرزه‌ای تونلها و ایستگاههای زیر زمینی مترو

(تحلیل و طراحی)

۱- تفاوت عملکردی مترو

در بخش قبل اثر زلزله بر سازه‌های زیر زمینی بطور کلی مورد بررسی قرار گرفت، مترو یکی از سازه‌های زیر زمینی است که با وجود شباهت فراوانی که با تونل‌های کوهستانی دارد، بدلیل داشتن یکسری شرایط، نیازمند بررسی دقیقتر و در نظر قرار دادن شرایط خاص و ویژه ای می‌باشد.

این شرایط را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- متروها در شهرهای پرجمعیت برای حل مشکل ترافیک ساخته می‌شوند و معمولاً از زیر مراکز عمده تجاری و اقتصادی شهرها عبور میکنند، لذا در صورت آسیب دیدن آنها، خطرات اقتصادی و جانی فراوانی ایجاد میشود.
 - بدلیل اینکه تونلها و ایستگاه‌های مترو، در عمق زیادی ساخته نمی‌شوند، لذا علاوه بر شرایط حاکم بر سازه‌های زیر زمینی، اثرات وارد بر سازه‌های سطحی نیز باید در آنها در نظر گرفته شود.
 - بدلیل اینکه شهرها معمولاً در مکانهای مسطح و آبرفت‌ها بنا می‌شوند، لذا این گونه سازه‌ها نیز، بناچار در لایه‌های رسوبی منفصل ساخته می‌شود که شرایط خاصی را بر این سازه‌ها حاکم می‌سازد.
 - در ایستگاهها و نیز قسمتهایی که چند تونل بهم می‌رسند، معمولاً نیاز به فضاهای با دهانه بزرگ وجود دارد که این خود آسیب پذیری این سازه‌ها را افزایش می‌دهد.
 - بحث اندرکنش تونل و سازه‌ها مجاور در تونل‌های مترو مطرح می‌شود
 - اتصال اجزای تاسیساتی از قبیل ترانسفورماتورهای برق و تجهیزات برودتی و حرارتی ایستگاهها رفتار سازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد.
- با توجه به موارد ذکر شده، معلوم می‌شود که بررسی آسیب پذیری و نیز تحلیل و طراحی لرزه‌ای تونل‌های مترو و ایستگاههای آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

۲- اندرکنش تونل و سازه‌های مجاور

بر اساس بررسی‌های انجام شده، نتایج حاصل برای اندرکنش تونل و سازه‌های

مجاور به صورت زیر خلاصه می‌شود [خشنودیان ۱۳۸۲]:

- اثر اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان مجاور آن بستگی به فاصله بین تونل و ساختمان دارد و با افزایش فاصله بین ساختمان و تونل اثر اندرکنش (افزایش نیروهای داخلی تونل مجاور ساختمان نسبت به تونل تنها) کاهش می‌یابد و اگر فاصله بین تونل و ساختمان از $6d$ (d قطر تونل) بیشتر شود وجود ساختمان هیچ تاثیری بر نیروی داخلی ایجاد شده در تونل تحت بار زلزله نخواهد داشت.
 - اثر اندرکنش دینامیکی تونل-ساختمان با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش می‌یابد.
 - با تغییر عمق قرارگیری تونل در داخل خاک اندرکنش دینامیکی تونل-ساختمان تغییر محسوسی میکند و برای حالت $h/d = 2/7$ و $h/d = 0/9$ اثر اندرکنش محسوس‌تر است.
 - عریض‌تر شدن ساختمان باعث افزایش اندرکنش بین تونل و ساختمان مجاور آن به صورت افزایش نیروهای داخلی تونل به ویژه نیروهای محوری تونل می‌شود.
 - افزایش ارتفاع ساختمان سبب افزایش اندکی در نیروهای داخلی تونل می‌شود و برای موارد بررسی شده افزایش طبقات از ۶ به ۲۰ سبب افزایش حدود ۲۰ درصد در نیروهای داخلی تونل خواهد شد.
- در مجموع با توجه به بررسی‌های انجام شده، وجود ساختمان مجاور تونل سبب افزایش نیروی داخلی تونل تحت بار زلزله خواهد شد که این افزایش بستگی به فرکانس بارگذاری، عمق قرارگیری تونل، ابعاد تونل، ابعاد و ارتفاع ساختمان دارد.

۳- روشهای کاهش خسارات متروها

۳-۱- کاهش اثرات زمینهای آبرفتی

- با افزایش قابلیت شکل پذیری سازه‌های زیر زمینی می‌توان تا حدودی تغییر شکلهای ناشی از زلزله را جذب نمود. البته میزان قابلیت شکل پذیری سیستم نباید به قدری باشد که قابلیت تحمل بارهای استاتیکی آن از بین برود.
- آسیب پذیرترین نقاط در سیستم‌های مترو محل های اتصال اجزای مختلف سازه‌ای دارای سطح مقاطع مختلف به یکدیگر هستند. برای ساخت این نقاط باید از تمهیدات خاص سازه‌ای نظیر ایجاد درزه‌های مناسب بین قطعات استفاده نمود.
- در محلهایی که تونل از حد فاصل بین خاک و سنگ عبور می‌کند باید حداقل یک یا دو فوت رسوبات خاکی و دانه‌ای بین سطح حفاری و جدار تونل قرار داده شود تا بدیل ترتیب از ایجاد نقاط صلب در حین وقوع زلزله ممانعت بعمل آید.
- قطعاتی که بصورت صلب به سازه اصلی متصل می‌شوند باید طوری طراحی شوند که در جهت سازه اصلی و به همان مقدار مرتعش شوند. می‌توان این قطعات را بصورت جزیی از سازه اصلی طراحی نمود.
- قطعاتی که به صورت سست به سازه اصلی متصل می‌شوند باید طوری طراحی شوند که بصورت یک واحد مجزا در حین زلزله عمل نمایند. اتصال آنها با سازه اصلی باید شکننده و قابل تعمیر و یا بصورت درزه‌های مناسب باشد.
- در کیه درزه‌هایی که امکان تغییر شکل پلاستیک وجود دارد باید تمهیداتی جهت ممانعت از ورود آ به سیستم در نظر گرفته شود. این درزه‌ها را میتوان با بنتونیت پر کرد.
- در سیستم‌های ایزولاسیون لرزه‌ای با توجه به رفتار مناسب آنها در هنگام زلزله، در ستونها و سایر نقاط استفاده شود.

۲-۳ - کاهش اثرات عبور از گسلها

بحث مربوط به کاهش خطرات ناشی از گسلها، در بخش اول بیان گردید، ولی برای کامل شدن بحث در اینجا نیز اشاره‌ای می‌شود.

- حداقلامکان از برخورد تونلها با گسلها خودداری شود
- استفاده از اتصالات انعطاف پذیر در محل تقاطع با گسل
- استفاده از نقاط ضعف عمده در تونل برای متمرکز نمودن صدمات در نقاط خاص
- افزایش سطح مقطع در محل تقاطع با گسل به اندازه جابجائی قابل انتظار ناشی از گسلش، تا بعد از گسلش نیز، سطح مقطع حاصله برابر با سطح مفید مورد نیاز باشد. (به شکل فصل ۵-۲ بخش اول مراجعه شود)

۴- معیارهای طراحی لرزه‌ای مترو

آیین نامه جامعی که به عنوان طراحی لرزه‌ای تونلها و سازه‌های زیر زمینی باشد، وجود ندارد و در آیین نامه‌های مختلف فقط به طراحی در برابر بارهای استاتیکی اکتفا می‌شود. ولی در یکی از مقالاتی که توسط آقای کاسل منتشر شده است، معیارهای طراحی لرزه‌ای مترو بطور تقریباً جامعی تشریح شده است. بدلیل کامل بودن این معیار، کل این معیار بدون تغییر ارائه می‌گردد. [Kuesel ۱۹۶۹] توجه شود که مبانی مربوط به تغییر مکان انحنائی و برشی در بخش یک بصورت مفصل مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

آیین نامه "بارت" برای طراحی لرزه‌ای متروها

I. زلزله طراحی

تمام سازه‌های سیستم متروی BART باید بر اساس بزرگترین زلزله باورکردنی در منطقه طراحی گردند. زلزله طراحی باید در سنگ و خاکهای "کم عمق"، حداقل شتاب حداکثر افقی برابر با $0.33g$ برابر شتاب جاذبه داشته باشد و این مقدار برای خاکهای "عمیق" برابر $0.5g$ برابر شتاب جاذبه می‌باشد. خاک به ارتفاع 70 فوت بالای بستر سنگی به عنوان "کم عمق" و اعماق بیشتر به عنوان "عمیق" طبقه بندی می‌شود. حداکثر شتاب قائم باید برابر دو سوم مقدار شتاب افقی در نظر گرفته شود. تغییر مکان انحنایی باید از طیف دامنه و طول موج برای زلزله طراحی که در شکل ۱ داده شده است تعیین شود.

تغییر مکان برشی زمین باید بر اساس آنچه که در شکل ۲ نشان داده شده است تعیین گردد. برای هدف طراحی، سرعت انتشار امواج زلزله باید بر اساس آنچه که در جدول ۱ نشان داده شده است، باشد مگر اینکه اطلاعات دقیقتری از آزمایشهای لرزه‌ای خاک در آزمایشگاه موجود باشد.

برای خاکهای لایه‌ای، مشخصات لایه‌های خاکی، بصورت میانگین ریاضی مشخصات هر کدام از لایه‌ها می‌تواند باشد.

II. نیازهای جابجایی

جابجایی/انحنایی - سازه‌های مترو باید برای پاسخ گوئی به تغییر مکان انحنایی اعمال شده از زمین بر اساس طیف شکل ۱ طراحی شوند. حداکثر کرنش واحد سازه از برخورد موجی که به صورت مایل با زاویه 32° درجه نسبت به محور تونل منتقل می‌شود بدست می‌آید. موج مایل تشکیل شده از دو مولفه جانبی و طولی است که مولفه جانبی، جابجایی خمشی و کرنش در سازه ایجاد میکند و مولفه طولی، جابجایی فشاری-انکساری و کرنش ایجاد میکند.

حداکثر کرنش واحد حاصل از موج مایل باید بصورت زیر در نظر گرفته شود :

$$\varepsilon = \frac{5.2A}{L} \quad (۱)$$

که L برابر طول موج بحرانی است که برابر ۶ برابر حداکثر عرض سازه در صفحه خمش می‌باشد؛ و A برابر است با دامنه متناظر با طول موج L ، که از شکل ۲ بدست می‌آید. (شکل ۲ دامنه افقی را می‌دهد، برای دامنه قائم، دو سوم این مقدار را استفاده کنید.)

اگر ε کمتر از ۱۰۰ میلیونیم اینچ در هر اینچ شود (0.0001 in/in)، تغییر شکل باید الاستیک در نظر گرفته شود و تمهیدات اضافی لازم نیست که در سازه در نظر گرفته شود. اگر ε از ۱۰۰ میلیونیم اینچ در هر اینچ بیشتر شود، سازه باید با اتصالات جانبی برای جذب کرنش محاسبه شده، طراحی گردد. (بجز برای سازه‌ها یا خاکهای خیلی غیر عادی، تغییر شکل انحنائی معمولاً در محدوده الاستیک قرار می‌گیرد. شکل ۴ وضعیت های عمومی را نشان می‌دهد.)

تغییر شکل برشی - سازه‌های مترو باید برای حرکت گهواره‌ای (Rocking)
بگونه‌ای که سازه برای تغییر مکان برشی آمادگی داشته باشد، طراحی گردد. مقدار این جابجائی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{Y_s}{H} = \frac{5}{2} \frac{H}{V^2} \quad (۲)$$

که در فرمول فوق $\frac{Y_s}{H}$ زاویه تغییر مکان برشی به رادیان، H برابر عمق لایه خاکی به فوت، و V برابر سرعت انتشار متوسط برای زلزله طراحی در لایه خاکی می‌باشد. (به بخش زلزله طرح مراجعه نمایید).

برای لایه‌های خاکی $\frac{Y_s}{H}$ باید برابر حداکثر مقدار محاسبه شده برای دو حالت زیر باشد: (۱) لایه‌ای که به تنهایی روی سازه قرار دارد (۲) کل ضخامت لایه خاک با سرعت V متوسط برای لایه‌ها. شکل ۲ یک نمودار گرافیکی از فرمول فوق را ارائه می‌دهد.

ظرفیت تغییر شکل الاستیک - ظرفیت یک قاب سازه‌ای پیوسته، یا بتن مسلح و یا سازه فلزی برای جذب حرکت گهواره‌ای در محدوده الاستیک بصورت زیر برآورد می‌شود. بررسی مقطع سازه‌ای، صلب ترین قسمت چهارچوب پیوسته را مشخص میکند (معمولا پایتترین سلول خارجی). هر سلول، بصورت عمومی شامل کف و دالهای دیواره، ستونهای داخلی و لایه‌هایی که صلبیت کافی مقاومت خمشی لازم را ندارند. ظرفیت تغییر شکل گهواره‌ای الاستیک ممکن است به صورت ظرفیت چرخشی صلب ترین گوشه خارجی اتصال محاسبه شود. این مقدار بصورت زیر است :

$$\alpha = \frac{1}{1000} \left[\frac{L_f}{5t_f} + \frac{L_w}{5t_w} \right] \quad (۳)$$

که در فرمول فوق α ظرفیت چرخشی الاستیک اتصال به رادیان، L طول خالص دال بین نقاط محدود شده خمشی، t ضخامت سازه‌ای دال به فوت، و زیر نویسه‌های w و f نشان دهنده کف و دیوار اعضای دال می‌باشند.

اگر ظرفیت چرخشی الاستیک صلب ترین اتصال گوشه، از تغییر مکان برشی تحمیل شده $\frac{Y_s}{H}$ بیشتر باشد، نیاز تغییر مکان برشی، ارضا شده است و تمهیدات بیشتری نیاز نمی‌باشد. (بررسی شکل ۲ نشان میدهد که تغییر مکان برشی تحمیل شده در خاکها، بطور کلی از دو قسمت در ۱۰۰۰ کمتر است. اگر ضخامت کف خارجی و دارهای دیواره از یک پنجم دهانه خالص آن کمتر باشد، ظرفیت چرخشی الاستیک آن از این مقدار بیشتر خواهد بود).

ظرفیت تغییر مکان پلاستیک مجاز - حداکثر چرخش انتهایی مجاز برای عضو دال سازه‌ای از یک چهارچوب پیوسته، باید به مقادیر زیر محدود باشد، حاصلضرب کرنش در یک میلگرد کششی، و یا تار انتهایی در یک تیر فلزی، برابر با دوبرابر کرنش در نقطه تسلیم الاستیک.

اگر تغییر مکان برشی اعمال شده از ظرفیت چرخشی الاستیک صلب ترین اتصال گوشه بیشتر باشد، تغییر مکان پلاستیک به نرم ترین عضو در آن گره اعمال می‌شود.

رخش الاستیک در این عضو، از تغییر مکان اهمال شده در خاک بدست می‌آید تا حداکثر چرخش انتهایی عضو پلاستیک بدست آید.

مقدار مجاز برای چرخش کل انتهایی (الاستیک و پلاستیک) برابر مقدار $\theta = \frac{1}{1000} \left[1.4 + \frac{L}{5t} \right]$ است. اگر چرخش اعمال شده، از این مقدار برای یک عضو

تنها بیشتر شود، اتصال باید برای توضع تغییر مکان تسلیم پلاستیک بین دو عضو گره با مساوی قرار دادن سختی الاستیک طراحی شود. این مورد تنها در شرایط بسیار غیر عادی ایجاد خواهد شد.

جزئیات برای اتصالات پلاستیک - وقتی که تغییر مکان برشی اعمال شده، باعث ایجاد اتصالات چرخشی پلاستیک می‌شود، این گره‌ها باید بر اساس توصیه‌های طراحی، دیتیل شود.

اثرات بر دیافراگم‌های صلب - وقتی که دیافراگم‌های صلب بصورت موازی با قابهای سازه‌ای انعطاف پذیر عمل می‌کنند، تغییر مکان قاب باید از نزدیکی به دیافراگم جلوگیری شود. این موقعیت برای مثال در دیوارهای انتهایی جانبی سازه ایستگاه مترو اتفاق می‌افتد.

تغییر مکان نسبی جانبی بالا و پایین دالهای کف باید با ضرب کردن بهم ریختگی اعمال شده توسط خاک $\frac{Y_s}{H}$ در ارتفاع کلی سازه محاسبه شود. اگر نتیجه محاسبه جابجائی نسبی از $1/1000$ عرض جانبی دال سقف بیشتر باشد، اتصالات ویژه سازه‌ای باید در دیوار خارجی، دالهای سقف و کف نزدیک دیافراگم برای جذب این جابجائی، باید به کار گذاشته شود.

III اثرات خاک منفصل

خاکهای منفصل، مانند خاکهای ماسه‌ای سنگی، نیاز به طراحی سازه‌ای خاصی ندارند. این بدلیل شناخت رویه‌های سنگ - خاک در رده بندی BART می‌باشد که مناطق قابل توجهی از سنگهای ترک خورده و هوازده دارند که اتصالات و قفلهای مکانیکی بین خاکهای رسوبی و سنگ را ایجاد می‌کنند. در هر منطقه

خاک به سنگ، سازه مترو نباید بطور مستقیم در کنار سنگ و یا هر لبه سنگی در خاک ساخته شود، بلکه باید حداقل بر روی ۲ فوت خاک پر شده برای جلوگیری از هر گونه نقاط سخت به هنگام عملکرد زلزله ساخته شود. این نیاز معمولاً بصورت راه حلی برای زهکشی آب زیر زمینی و یا مسائل مربوط به نشستهای نامتقارن مطرح می شود.

انفصالات خاکی بین خاکهای ماسه‌ای سفت و رس پلاستیک نرم معمولاً یک انتقال تدریجی را ایجاد می کند که نیازی به تمهیدات لرزه‌ای خاصی برای سازه ندارد. هر انفصال خاکی، بهر حال باید مورد آزمایش قرار گیرد و سازه بگونه‌ای ساخته شود که با شرایط ساختگاهی هماهنگی داشته باشد.

IV. اعضای داخلی

اعضای سازه‌ای که با خاک اتصال مستقیم ندارند، باید به عنوان اعضای داخلی مطرح شوند. وقتی که این اعضا با اعضای سخت پوسته سازه‌ای خارجی که بیش از ظرفیت چرخش الاستیک خود جابجا می شوند، بصورت پیوسته عمل میکنند، ممکن است آنها نیز به صورت پلاستیک تغییر شکل دهند. در این شرایط، اعضای شکل پذیر و یا مفاصل بین این اعضا باید طراحی شوند.

ستونهای داخلی، دیوارها، تیرها و دالها باید برای مقاومت در برابر نیروهای دینامیکی قائم بر محور طولیشان طراحی شوند. آنها باید بر اساس استانداردهای موجود طراحی شوند.

لایه‌های فشاری - طراحی و آرماتور گذاری اعضای محوری تحت فشار، باید مورد توجه خاصی در اتصالات انتهایی و اثرات حرکت گهواره‌ای کل سازه قرار گیرند. اعضای فشاری که در ارتباط با دیافراگم‌های پیوسته عمل می کنند (مثلاً دالهای کف) معمولاً جزئیات آرماتور گذاری ویژه‌ای برای اطمینان از عملکرد آنها مطابق فرضیات طراحی مورد نیاز است.

V. سازه‌های جانبی

سازه‌های جانبی در دو رده قابل تقسیم بندی هستند. (۱) سازه‌هایی که به صورت صلب به سازه اصلی مترو متصل می‌شوند و بعنوان زیر مجموعه آن بشمار می‌روند، مانند پهن شدگی طبقه فوقانی (۲) سازه‌هایی که با اتصال سست به سازه اصلی متصل می‌شوند و دارای یک اتصال طراحی شده برای تغییر مکانهای متغیر می‌باشند.

وقتی که بهم ریختگی برشی حاصل از زمین، سازه اصلی را ورای ظرفیت الاستیک آن جابجا نکند، همه اجزا قابل طراحی به صورت اتصال صلب هستند. وقتی که تغییر مکانهای پلاستیک سازه اصلی قابل پیشبینی باشد، سازه‌های جانبی اصلی، باید بصورت اتصال سست طراحی شوند. برآمدگی‌های محلی در این موارد ممکن است که به صورت اتصال صلب طراحی شوند با این تفاوت که توجه خاصی به آرما تور گذاری برای تامین شکل پذیری اتصال باید مبذول شود.

اجزای متصل شده به صورت صلب، باید در همان جهت سازه اصلی به تحریک واداشته شود. این اعضای جانبی ممکن است به صورت یک قسمت از سازه اصلی طراحی شوند که این مزیت پیوستگی با با چهارچوب سازه اصلی است.

اعضای جانبی با اتصال سست باید بگونه‌ای طراحی شود که بتواند بصورت یک واحد مجزا عمل کند. اتصال باید بصورت یک اتصال شکننده که بسادگی قابل تعمیر باشد طراحی شود و یا اینکه از اتصالاتی که امکان جابجائی‌های متفاوت بین سازه اصلی و سازه جانبی را می‌دهد، استفاده شود.

VI. ملاحظات جزئی

وقتی که جابجائی‌های پلاستیک برای سازه اصلی قابل پیشبینی است، توجهات خاصی باید به موارد زیر مبذول کرد :

- در انتهاهای سازه‌های اصلی مترو، اتصالات بین دیوارهای دیافراگم انتهایی و سقف و دالهای دیوارهای جانبی باید بتوانند تغییر مکانهای متفاوت را قبول کنند.

- اتصال دال سقف به دیوار انتهایی باید حرکت جانبی دینامیکی مساوی با تغییر مکان برشی اعمال شده بین دالهای بالا و پایین را تحمل نماید و دال کف میانی باید جابجائی‌هایی به همین اندازه و یا به نسبت کمتر را تحمل نماید.
- اتصال بین دیواره کناری و دیوار انتهایی، باید حرکت گهواره‌ای جانبی مورد انتظار برای سازه را تحمل نماید.
- دیوارهای دیافراگم انتهایی در سازه‌های ایستگاه، که بصورت صلب، در برابر حرکت گهواره‌ای طولی، بوسیله دالهای جانبی، کف و سقف محدود شده است، باید برای مقاومت در برابر افزایش دو برابری در مقابل فشار استاتیکی زمین در افزایش یک سومی در تنشهای مجاز طراحی شود.
- اتصالات جابجائی بین دیوارهای انتهایی و دالهای طولی جانبی، سقف و کف باید در دالهای طولی جاگذاری شود. این اتصالات باید بدین گونه جاگذاری شود تا اعضای سازه‌ای که در بررسی احتمال افزایش تنش آنها در زلزله می‌رود، قابل مقاوم سازی و یا تعمیر باشند.
- توجه اصلی در جاگذاری اتصالات جابجائی این است که هیچ گونه خرابی در اثر تغییر مکانهای پلاستیک در قاب سازه ایجاد نشود.
- در همه اتصالات که تغییر مکان پلاستیک قابل پیشبینی است، و در همه اتصالات تغییر شکل پذیر، تمهیداتی برای جلوگیری از نفوذ آب زیرزمینی باید اعمال شود. این ممکن است با استفاده از یک منبع محلی بتونیت انجام شود.
- برای همه سازه‌های جانبی، همه اتصالات سست و اتصالات شکننده که ممکن است پایین تر از سطح آب زیر زمینی باشند، باید با بتونیت نرم پوشانده شود.

VII. فشار زمین

وقتی که سازه مترو برای فشار پسیو (At rest) طراحی می شود، نیاز به هیچ گونه افزایشی در فشار در طول یا بعد از زلزله نمی باشد. وقتی که سازه ها برای فشار فعال زمین طراحی می شوند، آنها باید قادر به مقاومت در مقابل فشار پسیو در یک سوم افزایش در فشار واحد هستند.

هیچ کدام از سازه های صلب مانند دیوارهای طره و سایر اعضای بدون مهاربندی که زمین را در یک سمت خود تحمل می کنند، باید برای فشارهای بدست آمده از شکل ۴ با استفاده از شتاب 0.5 برابر شتاب جاذبه زمین طراحی شوند.

VIII. سازه های موقت

بصورت کلی، سازه های موقت باید برای مقاومت در برابر شتاب زلزله ای برابر با 0.1 شتاب جاذبه زمین طراحی شوند. دامنه انحنای زمین و تغییر شکل برشی ممکن است که به اندازه یک پنجم مقادیر بیاد شده در شکل ۱ یا ۲ بدست آید ولی بصورت کلی قابل صرف نظر کردن است.

برای مقابله در برابر ارتعاشات، حرکات گهواره ای، بهم ریختگی ناشی از پاسخ غیر هم فاز اعضا با صلبیت های متفاوت، تمهیدات زیر باید در طراحی و آرماتور گذاری سازه های موقت حفاری مورد نظر قرار بگیرد.

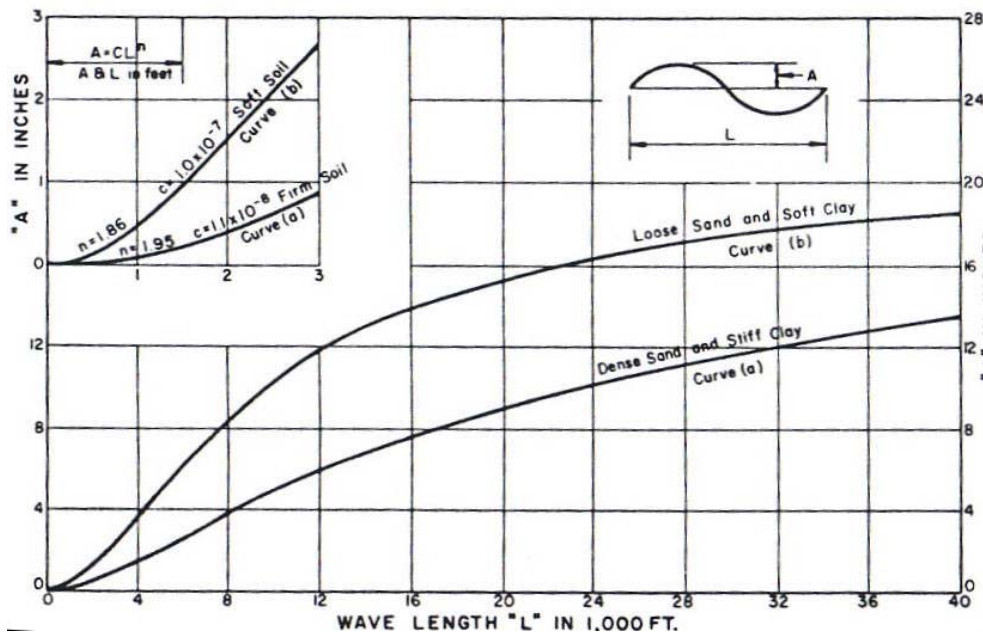
۱- همه اتصالات لایه ها، سیستم های دیوارها باید برای مقاومت در برابر تنش و بارهای برشی برابر با 10 درصد بارهای فشاری استاتیکی و با افزایش یک سومی در تنش های مجاز، طراحی و آرماتور گذاری شوند.

۲- حداکثر نسبت لاغری لایه ها باید به 120 محدود شود و حداکثر تنش واحد برای بارهای استاتیکی به 12000 psi محدود است.

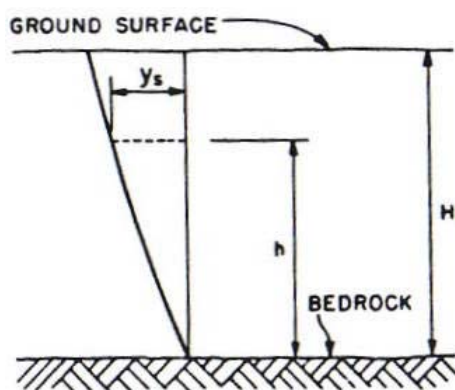
۳- حداکثر نسبت لاغری برای اعضای مهاربندی ثانویه باید به 200 محدود شود.

نتیجه گیری

با مراجعه به معیار طراحی لرزه‌ای متروهای BART، طراحی سازه‌های زیر زمینی به سرعت اثر زلزله با شدتی برابر با بزرگترین زلزله محتمل در کالیفرنیا را تعیین می‌کند. در بیشتر موارد عملی، سازه‌های بتنی مسلح، شکل پذیری لازم برای جذب تغییر شکل‌های الاستیک را دارند و نیاز به در نظر گرفتن هیچ تمهید اضافی نیست. اگر تغییر شکل پلاستیک به سازه وارد شود، پیشنهادات برای سازه‌های ویژه در این معیار قابل دسترسی است.

شکلها و جداول

شکل ۱ - طیف تغییر مکان جانبی زمین

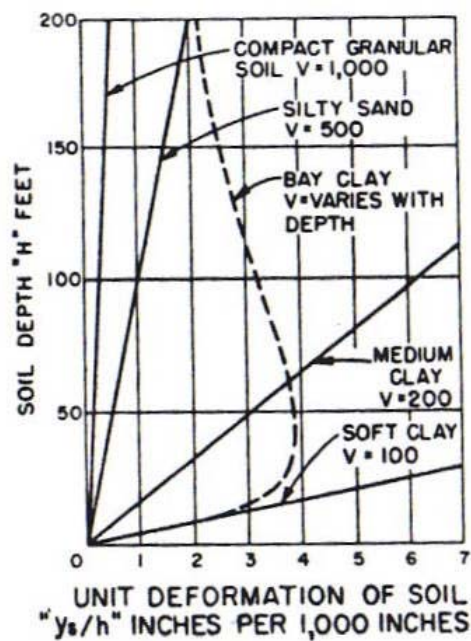


$$\frac{y_s}{h} \approx \frac{5}{2} \left(\frac{H}{V^2} \right)$$

H = DEPTH OF SOIL ABOVE BEDROCK - FT.

V = VELOCITY OF PROPAGATION OF SHEAR WAVE IN SOIL - FT./SEC.

NOTE: $V \approx \frac{1}{2}$ TO $\frac{1}{3}$ SEISMIC VELOCITY FOR SMALL AMPLITUDES



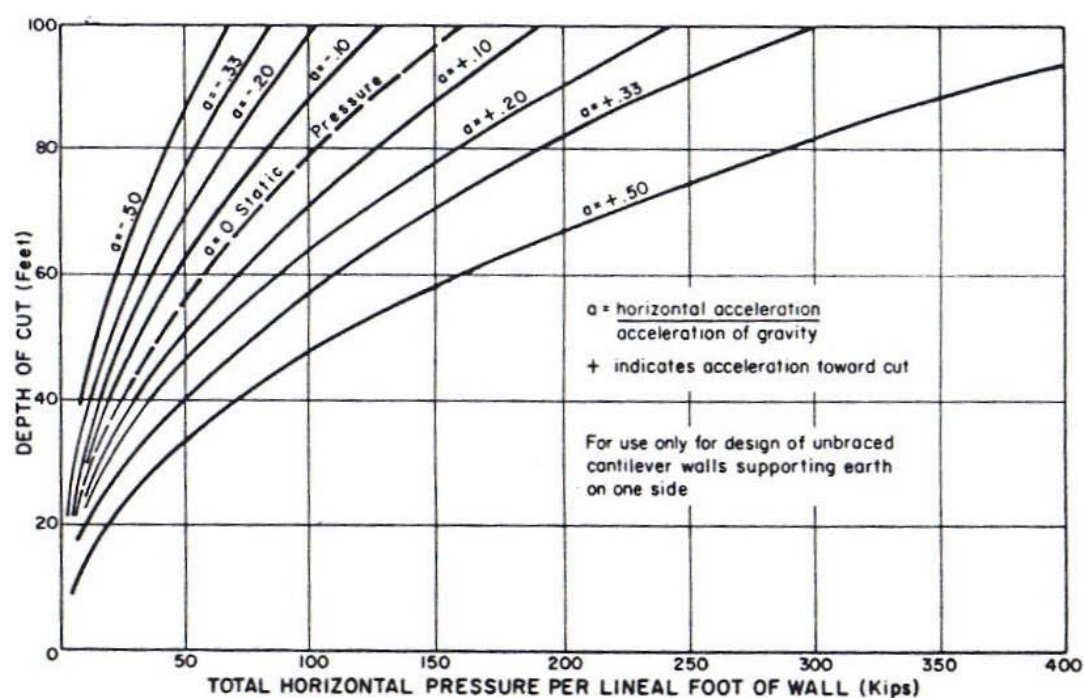
شکل ۲ - جهت برش در زمین

جدول ۱ - سرعت انتشار امواج زلزله

سرعت بر اساس فوت بر ثانیه	طبقه بندی خاک
۱۰۰۰	خاک فشرده دانه‌ای
۵۰۰	ماسه سیلت دار
۲۰۰	رس میانه
۱۰۰	رس نرم

	LINE STRUCTURE		STATION BOX	
TYPICAL OVERALL WIDTH, W, FEET	35		70	
CRITICAL WAVE LENGTH, $L = 6W$, FEET	210		420	
SOIL TYPE	DENSE SAND	SOFT CLAY	DENSE SAND	SOFT CLAY
AMPLITUDE ~ INCHES	0.0044	0.025	0.017	0.090
~ FEET	0.00037	0.0021	0.0014	0.0075
RADIUS OF CURVATURE, $R = \frac{L^2/4\pi^2A}{5280}$, MILES	580	101	610	114
UNIT STRAIN INDUCED BY OBLIQUE WAVE, FOR $\psi = 32^\circ$, $E = 5.2 \frac{A}{L}$, MILLIONTHS INCH/INCH	9	52	17	93
UNIT STRESS INDUCED, PSI FOR $E = 4,000,000$ PSI	36	208	68	372

شکل ۳ - مثالهایی از کرنش بر اساس بهم ریختگی انحنایی



شکل ۴ - فشار زمین با شتاب لرزه‌ای

۵- مطالعه موردی تونل متروی دایکایی

از میان تونلها و ایستگاههای زیر زمینی مترو که در زلزله ۱۹۹۵ هیوگوکن - نانبو آسیب دیدند، ایستگاه دای کایی بطور کامل تخریب گردید. ریزش کامل در محلی اتفاق افتاد که بیش از نیمی از ستونهای مرکزی در آن قسمت قرار داشتند. در نتیجه این زلزله، سقف ریزش نمود و نشست معادل ۲/۵ متر در سطح زمین ایجاد شد. با توجه به اهمیت این رویداد لرزه‌ای در توسعه مطالعات مربوط به بررسی رفتار لرزه‌ای فضاهای زیر زمینی، در این قسمت مختصری در رابطه با آن توضیح داده می‌شود. شکل ۱ نمای از محل قرار گیری این ایستگاه را نشان میدهد.

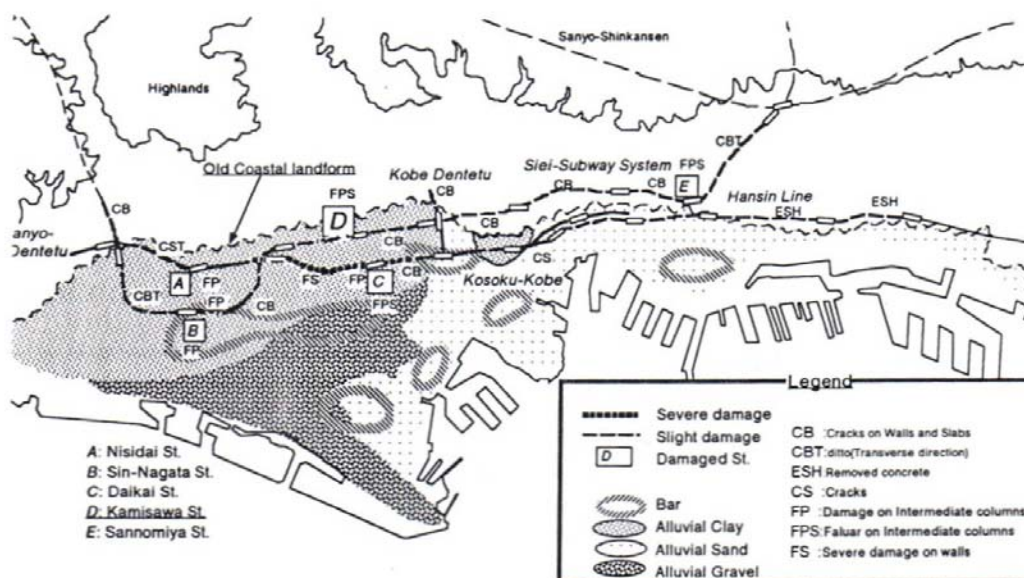


Fig.1 Location of the damaged underground subway systems with subsurface geological structure

شکل ۱ محل قرار گیری ایستگاه دایکایی

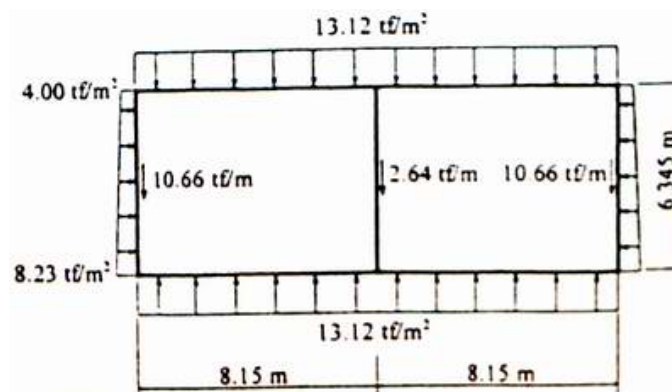


شکل ۲ نمایی از خرابی ستونهای میانی



شکل ۳ نمایی از خرابی ستونهای میانی

این ایستگاه با روش خاکبرداری و خاکریزی احداث شده بود و بر حسب وزن خاک سربار، فشار جانبی خاک و وزن خود سازه طراحی شده بود و بارهای زلزله در حین طراحی در نظر گرفته نشده بود. شکل ۴ نمایی از توزیع بارهای در نظر گرفته شده در هنگام طراحی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - توزیع بارهای در نظر گرفته شده برای طراحی ایستگاه دایکایی

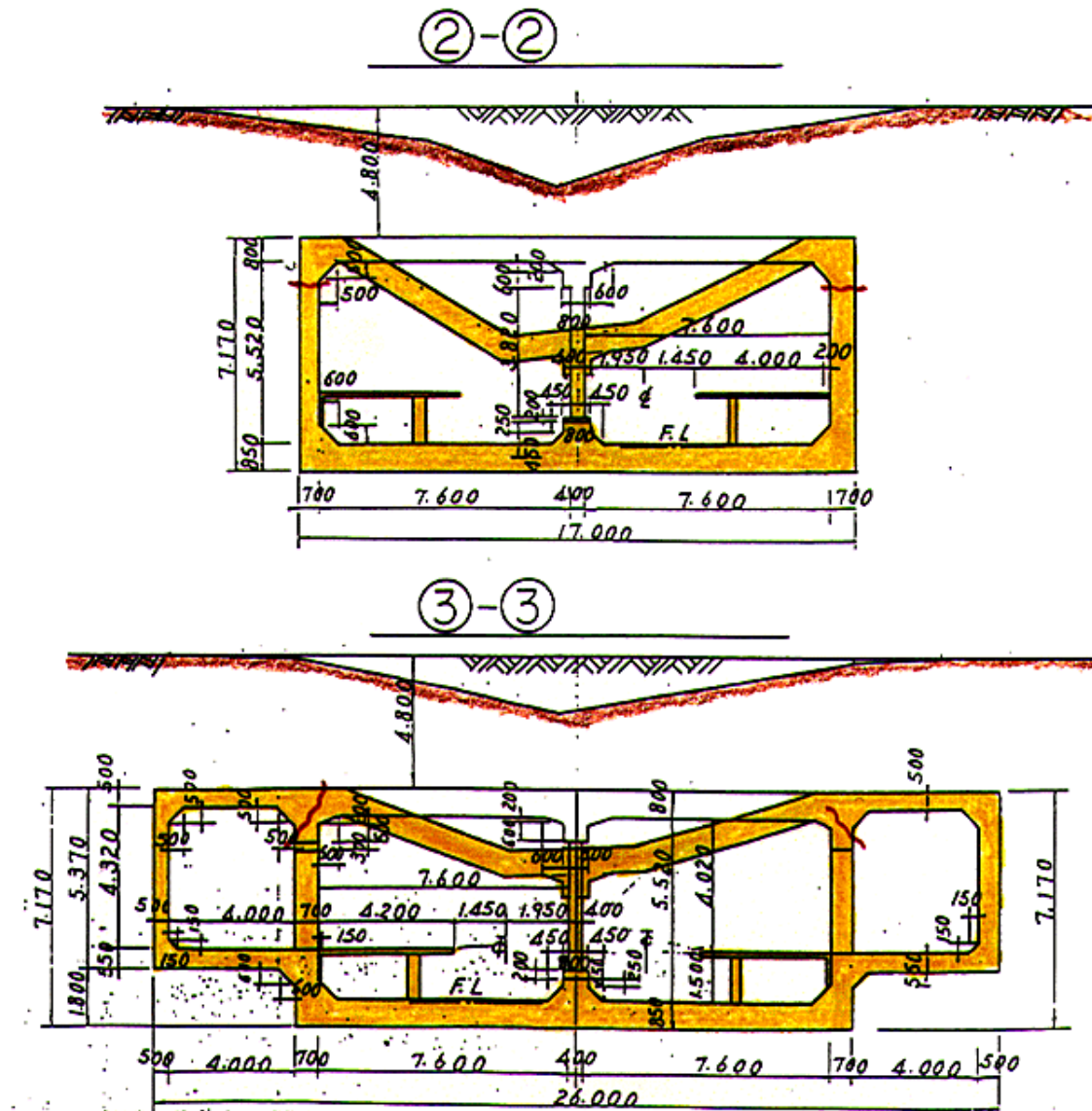
بعد از زلزله مشخص شد که در این ایستگاه ابتدا ستونهای مرکزی دچار آسیب شده‌اند و بعد ناپایداری به جوانب گسترش داشته است. مکانیسم این ناپایداری به این شرح بوده است که ابتدا جابجائی نسبی زیادی در اثر جنبش افقی شدید ایجاد شده است و ترکهای برشی در ستونهای مرکزی در قسمت کف و بالای ستونها ایجاد گردیده است و همچنین در اثر ممان خمشی روی دیوارهای جانبی بعلت تغییر شکل برشی مقطع تونل، ترکهایی حاصل گردیده که ریزش را در ستونهای مرکزی شتاب بخشیده است. با توجه به اینکه بخش اصلی بارهای فشاری توسط ستونهای مرکزی تحمل می‌شده است، با از بین رفتن قابلیت تحمل پذیری آنها ریزش سقف سریعاً انجام شده است. در شکل ۴ وضعیت کلی خرابی قسمتهای مختلف دیوارهای جانبی و ستونهای میانی نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز وضعیت کلی نشست زمین و نیز وضعیت خاک را در نقاطی که بعد از زلزله گمانه زنی شده است نشان می‌دهد.



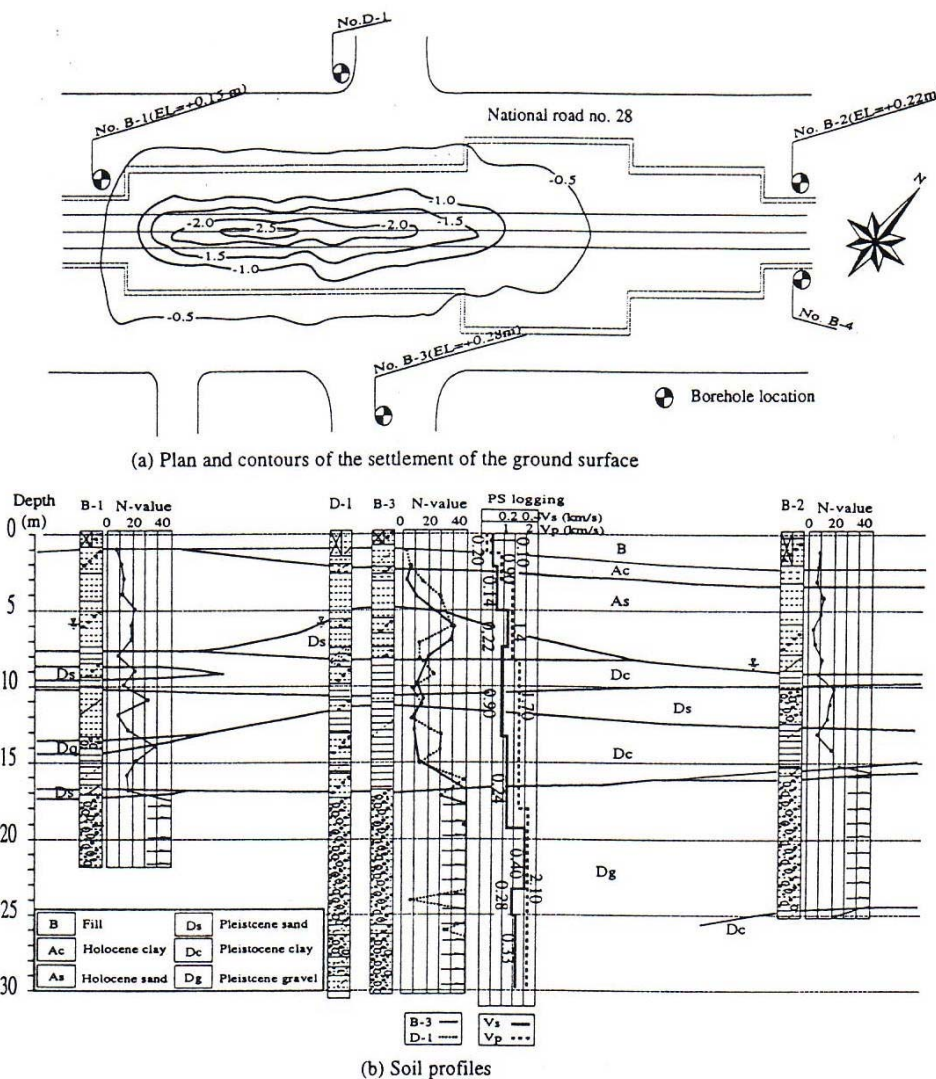
شکل ۵ وضعیت نشست سطح زمین بعد از زلزله در اثر خرابی ستونهای میانی



شکل ۶ وضعیت نشست سطح زمین بعد از زلزله در اثر خرابی ستونهای میانی

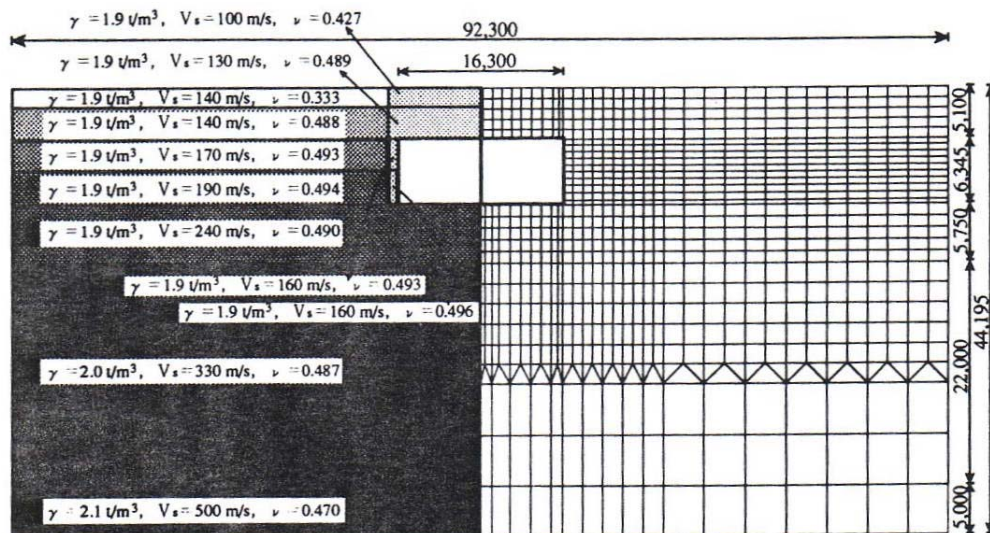


شکل ۷ وضعیت شماتیک خرابی دیوارهای جانبی و ستونهای میانی



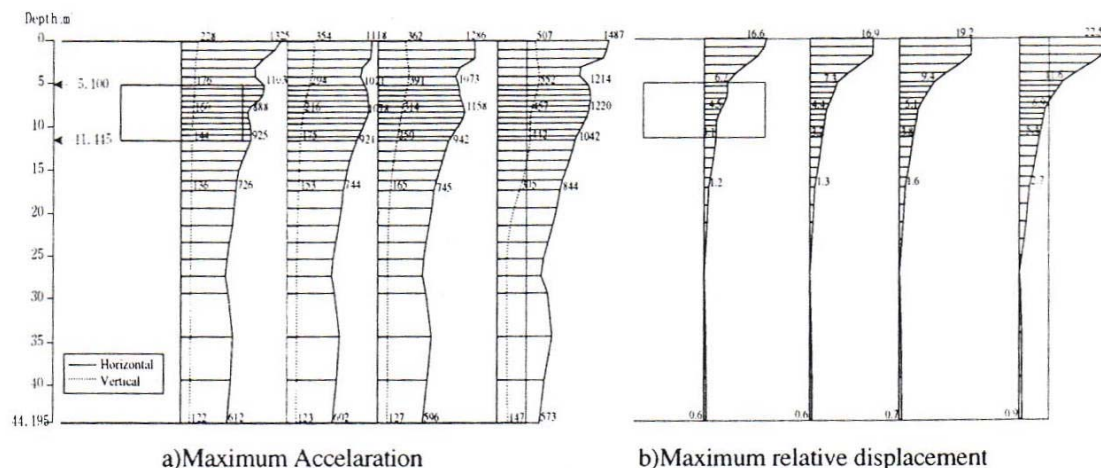
شکل ۱ - کنتورهای نشست سطح زمین پس از زلزله و وضعیت خاک در نقاط مختلف

پس از وقوع زلزله، تحقیقات بسیار زیادی در مورد این ایستگاه انجام گرفته، در یکی از این تحلیل ها که بوسیله سیستم نرم افزار Super Flush استفاده شده است، و هر دوی حرکات افقی و قائم بعنوان جنبش ورودی به سیستم اعمال شده است. مدل اجزای محدود برای این ایستگاه در شکل زیر نمایش داده شده است



شکل ۹ - مدل خاک-سازه برای تحلیل اجزای محدود دو بعدی ایستگاه دایکایی

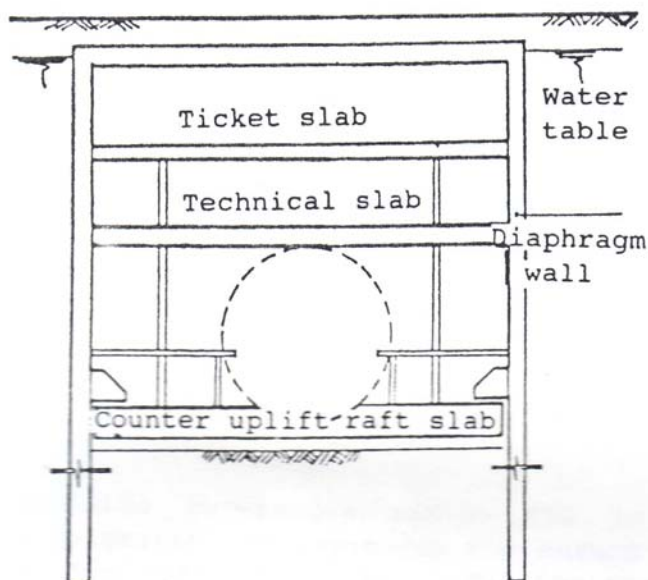
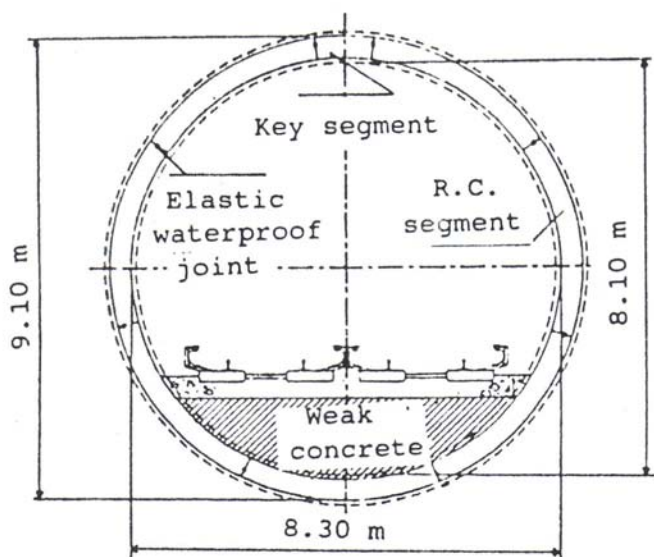
محاسبات نشان می‌دهند که شکست برشی ستون مرکزی هنگامی رخ داده است که تغییر مکان نسبی سقف نسبت به کف برابر $1/39$ سانتیمتر بلافاصله بعد از تسلیم بوده است. شکل زیر نتایج را بصورت گرافیکی نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - حداکثر پاسخهای محاسبه شده زمین در تابعی از عمق

۶- نتایج مطالعات لرزه‌ای متروی قاهره

تونل متروی قاهره، توسط آقای عبدالسلام در سال ۱۹۹۴ مورد بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای قرار گرفت. در اینجا فقط به نتایج این بحث اشاره می‌شود.



مقطع عمومی از تونل حفاری شده و ایستگاه خاکبرداری شده سه طبقه

نتایج بررسی

- a. خطوط متروی قاهره عموماً در زمینهای ماسه‌ای اشباع قرار گرفته است.
- b. حداکثر زلزله طراحی زلزله‌ای به بزرگای ۶/۷ و در خلیج سوز قرار دارد (به فاصله ۱۳۰ کیلومتر از قاهره)
- c. مقادیر مورد انتظار برای شتابهای قائم و افقی کمتر از $g/0.4$ میباشد.
- d. خطرات اصلی لرزه‌ای که انتظار میرود خطوط متروی قاهره را تحت تاثیر قرار دهد عبارتند از:
 - ۴-۱- امواج منتشر شده از مرکز زلزله. مطالعه نشان داد که پنج نوع موج منتشر شده یعنی PW, HSW, VSW, RW, LW اثری بر روی ایمنی سازه ندارد. تاثیر امواج بوسیله اتصالات انعطاف پذیر سازه زیر زمینی جذب می شود.
 - ۴-۲- احتمال خرابی دینامیکی محلی خاک بدلیل گسلش و روانگرایی بدلیل طبیعت خاک و عمق سازه زیر زمینی وجود ندارد.
- e. روش شبه استاتیکی برای مقاومت لرزه‌ای، قابل اعتماد ترین روش برای هدف لرزه‌ای می‌باشد.
- f. سازه مترو قاهره ایمن‌ترین سازه با توجه به زلزله به بزرگای ۶/۷ و در خلیج سوز می‌باشد و مقاوم سازی لرزه‌ای آن نیاز به هیچ گونه سخت کننده‌های سازه‌ای ندارد.
- g. انعطاف پذیری اتصالات بین واحدهای باید برای پاسخ لرزه‌ای جانبی چک شود.

منابع و مراجع :

- میرمیرانی، شهریار. بررسی تاثیر زلزله بر تونلها، پنجمین کنفرانس تونل ایران ۷ الی ۹ آبان ماه ۱۳۸۰، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، صفحات ۲۰۱ الی ۲۰۷
- جعفری م.ک ، امینی حسینی. ک ، ۱۳۷۷، بررسی رفتار سازه های زیر زمینی تحت اثر زلزله با نگرشی ویژه بر پایداری تونلها در برابر گسلش، نشریه پژوهشکده زلزله شناسی و مهندسی زلزله، شماره اول، صفحات ۳۵ الی ۴۴.
- شکیب ح. مختاری م. ارزیابی رفتار لرزه ای تونلهای با پوشش بتن آرمه. سومین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. ۱۳۸۰. صفحات ۲۶۷ الی ۲۷۲.
- برجیان حبیب الله ، آسیب پذیری لرزه ای شریانهای ترابری ایران ، اولین همایش ملی مهندسی زلزله شریانهای حیاتی، موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، اردیبهشت ۱۳۷۷ صفحات ۱۸۹ الی ۱۹۴.
- شریعت افشین ، ارزیابی شریانهای حیاتی حمل و نقل در هنگام زلزله ،پایان نامه ، اسفند ۱۳۸۰، دانشگاه علم و صنعت.
- بهنیا ابوالحسن، بهنیا کامبیز. روشهای کلی اجرای بناهای زیر زمینی، انتشارات دانشگاه تهران. ۱۳۷۶
- فرامرز خوشنودیان، سجاد تیماس، ۱۳۸۲، اثر سازه های مجاور بر رفتار سازه های تونل، چهارمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله
- *T.Iwatate, T.Domon, S. Nakamura (1997), Earthquake damage and seismic response analysis of subway station and tunnels during great Hanshin-Awaji Earthquake, Tunnels for people, Balkema, Rotterdam, pp 45~51*
- *Ahmet Gursoy (1996), Seismic joints and transition tunnels for the Messina Straits Fixed-Link Crossing, North American Tunneling 96, Balkema, Rotterdam, pp 203~209*
- *M.E.Abdel salam, M.Abdel Fattah I.B. ,(1994), Seismic hazards for Greater Cairo underground metro lines, Tunneling and Ground Conditions, Balkema, Rotterdam, pp 293~301*
- *EERA Manual, A computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits, University of Southern California, Department of Civil Engineering, August 2000*
- *Naeem, Seismic design handbook*

- *Hazus ۹۹ Technical Manual, Chapter ۷, Direct Physical Damage to Transportation Systems*
- *Toshihiro ASAKURA, Yukio SHIBA, Yutaka SATO, Takahiro IWATATE, Mountain Tunnels Performance in the ۱۹۹۵ Hygoken-Nanbu Earthquake, The ۱۹۹۵ Hygoken-Nanbu Earthquake, Investigation into damage to civil eng. Structures, June ۱۹۹۶, JSCE*
- *Thumas R. Kuesel, ۱۹۶۹, Earthquake Design Criteria for Subways, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.*
- *J.E.Monsees, J.L.Merritte, Seismic Designt of Underground Structuies Southern California Metro Rail Project, Lifeline EQ performance design and construction, ۱۹۸۴, ASCE*
- *P.D. Guptill, B.M.Fhadiali, G.F.Miller, J.J.Sandberg ,Designing for tectonic deformation, Los Angeles Metro Rail System, Tunnels for people, ۱۹۹۷Balkema, Rotterdam.*