نقش شاتکریت در افزایش ضریب ایمنی باربری نگهداری سازه‌های زیرزمینی در مقابل بارهای لرزه‌ای

فریدون خسروی[1]، شهریار نجفوند[2]

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۳/۰۱
تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۳/۳۰

چکیده

احداث فراوان سازه‌های زیرزمینی طی قرن اخیر، سیر انبوهی از تحقیقات محققین علمی مخصوصاً در بخش‌های معدن، راه، استحکامات نظامی و... را به سوی چگونگی اجرای این سازه‌ها رهنمون ساخته است. روند رو به رشد قدرت‌های برتر نظامی جهان و توسعه و تجهیز سلاح‌های آفندی ایجاب می‌نماید تا اقدامات پدافند غیرعامل و در راس آن احداث سازه‌های امن و استحکامات دفاعی در قالب سازه‌های زیر زمینی تونلی بطور اساسی در حال گسترش باشد.

چگونگی حفظ استحکام، پایداری و نگهداری سازه‌های زیرزمینی در مراحل احداث و زمان بهره‌برداری، از جمله موضوعات مهم و در دست بررسی است. استفاده از شاتکریت به‌عنوان سیستم نگهداری موقت و بعضاً دائم در حفره‌های زیرزمینی سابقه‌ای یکصد ساله دارد؛ اگرچه در اوایل از شاتکریت صرفاً جهت جلوگیری از هوازدگی سنگ‌ها و صاف نمودن سطوح استفاده می‌گردید، ولیکن امروزه با پیشرفت‌های نوین علمی تحقیقات مناسبی بر روی عملکرد شاتکریت در کمک به پوشش دائمی سازه‌های زیرزمینی صورت گرفته و همچنان در حال انجام می‌باشد.

در این مقاله سعی شده است ضمن تشریح مشخصات و نحوه عملکرد شاتکریت در نگهداری سازه‌های زیرزمینی، به بررسی نقش آن در مقابل بارهای لرزه‌ای بپردازیم و با بهره‌گیری از روابط موجود، نقش شاتکریت در تحمل بارهای ناشی از اثر امواج زلزله بر پوشش تونل را مورد بررسی قرار دهیم.

کلیدواژه‌ها: شاتکریت، لاینینگ، سازه‌های زیرزمینی، سیستم نگهداری، امواج لرزه‌ای

۱- استادیار دانشگاه امام حسین(ع)
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران – سازه، دانشگاه امام حسین(ع)

۱- مقدمه

شاتکریت را می‌توان به عنوان بتن یا ملاتی که از طریق شیلنگ‌های لاستیکی حمل شده و با استفاده از هوای فشرده با سرعت زیاد به سطوح مورد نظر پاشیده می‌شود تعریف کرد. اولین کاربرد شاتکریت به سال ۱۹۰۹ میلادی بر می‌گردد که در آن زمان تحت عنوان گونیت (gunite) نامیده شد و به کمک دستگاهی موسوم به تفنگ سیمان (cement gun) به کار می‌رفت و در یک معدن آزمایشی در ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. سپس این سیستم برای پوشش سطوح سنگ و حفاظت آنها در برابر هوازدگی و گاه نیز به عنوان سیستم نگهداری موقت و ایجاد سطحی صاف در جدار تونل استفاده می‌شد. با گذشت زمان و بهره‌گیری از الیاف فولادی و پیچ‌سنگ (راک بولت) به نقش مفید شاتکریت به عنوان سیستم نگهدارنده در بسیاری از سازه‌های تونلی پی برده شد و با انجام تحقیقات و آزمایشات و بررسی تجربیات مشخص شد که شاتکریت می‌تواند نقش اساسی در نگهداری سازه‌های زیرزمینی مخصوصاً یکپارچه نمودن ترک‌ها و درزهای موجود پس از عملیات حفاری داشته باشد که هنوز هم این مسأله در حال بررسی و تحقیق است. به‌دنبال پیشرفت‌هایی که در فناوری استفاده از شاتکریت انجام گرفت، کاربرد آن به‌عنوان سیستم نگهداری حفره‌های زیرزمینی و به‌ویژه در تونل‌ها گسترش بیشتری یافت، به‌نحوی که استفاده از آن در شیوه تونل‌سازی اطریشی جدید تقریباً اجباری می‌باشد [۱]. در زمینه نقش شاتکریت در مقابل بارهای لرزه‌ای تحقیقات جامعی صورت نگرفته، شاید علت اساسی این است که تحقیقات انجام شده در راستای اثر بارهای لرزه‌ای بر سازه‌های زیرزمینی دارای سابقه چندان طولانی نیست و این تحقیقات عمدتاً از قرن بیستم به بعد در حال گسترش می‌باشند؛ تنها تحقیقی که در ارتباط با تاثیر بارهای دینامیکی در شاتکریت بدست آمده مربوط به آزمایشی است که در معدنی در سوئد انجام شده که شرح این آزمایش و نتایج حاصله در ادامه بیان شده است.

در این مقاله با بهره‌گیری از روابط ریاضی مربوط به آنالیز سازه‌های زیرزمینی در مقابل بارهای ناشی از زلزله و با تحلیل یک نمونه سازه زیرزمینی با مشخصات مفروض و محاسبه تنش‌های ایجاد شده، نقش شاتکریت و اثر آن بر نگهداری سازه‌های زیرزمینی در مقابل امواج ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- عوامل تأثیرگذار در شاتکریت

اصولاً شاتکریت نوعی بتن ترکیب شده از سیمان، ماسه، آب و بعضاً همراه با مواد افزودنی می‌باشد که به کمک هوا با سرعت زیاد به‌صورت دینامیکی فشرده شده و به سطوح پاشیده می‌شود. بسته به نوع مواد اولیه، روش اضافه کردن آب و نحوه اجراء، شاتکریت را به انواع خشک و تر تقسیم می‌نمایند [۲].

در طراحی سیستم‌های نگهداری، سه نوع فشار وارد بر سیستم درنظر گرفته می‌شود که عبارتند از: فشار سست شدگی (Loosing)، فشار آماسی یا تورمی (Swelling) و فشار خالص زمین (genuine ground pressure). ناپایداری ناشی از سست‌شدگی سنگ‌های درزدار می‌تواند در قالب سه نوع مکانیزم: لغزش قطعات سنگ، جدایش قطعات سنگ و یا ترکیبی از حالت لغزش و جدایش اتفاق افتد [۳]. در صورتی که پوشش تونل قبل از تغییر مکان شعاعی اجرا شود، فشاری از طرف سنگ‌های پیرامون بر شاتکریت وارد خواهد شد که به زمان اجرای پوشش، انعطاف‌پذیری تکیه‌گاه و گستردگی ناحیه پلاستیک اطراف تونل بستگی دارد.

در صنعت تونل‌سازی، شاتکریت را معمولاً به عنوان سیستم نگهداری موقت استفاده می‌نمایند؛ در عین حال می‌توان آن را به عنوان سیستم نگهداری دایم نیز بکار برد که این امر بسته به شرایط و مشخصات سازه، جنس زمین، آب‌های زیرزمینی، روش حفاری و... متفاوت است [۲].

امروزه شاتکریت با وسایلی نظیر پیچ‌سنگ، میلگرد، الیاف فولادی و توری فلزی مسلح می‌گردد. قابلیت چسبندگی این ماده به هر نوع سنگ و گیرش و سخت‌شدگی سریع آن از اهم خصوصیات آن است و به‌طور کلی مزایای عمده آن عبارت است از: امکان کاربرد آن در سطوح ناصاف و انواع مقاطع حفاری شده، مانع تمرکز تنش در محل شیارها و درزها با ایجاد سطحی یکپارچه، به حداقل رساندن فاصله بین بلوک‌های سنگی و کاهش تنش وارده از ناحیه بلوک‌های سنگی، ایجاد یک تکیه‌گاه توأم با سنگ و تحمل بار نسبتاً زیادی از ناحیه سنگ، مانع هوازدگی سنگ‌ها و نفوذ آب از خلل و فرج سنگ‌ها و نیز مانع ایجاد ترک در جداره می‌شود و به توده سنگ جدار تونل کمک می‌کند تا بارهای وارده را تحمل نماید.

۳- تاثیر امواج لرزه‌ای بر سازه‌های زیر زمینی

زمانی که امـواج حجمـی و سـطحی ناشـی از زلزلـه در محـیط منتشر می‌شوند، پارامترهای مقاومتی و ضرایب الاستیک سـنگ را تغییـر داده و تحـت تـأثیر ناپیوسـتگی‌هـا و درزهـا سـازه‌ی زیرزمینی را تحـت‌الـشعاع قـرار مـی‌دهـد [۴]. اثـر تـنش‌هـای دینامیکی ناشی از امواج لرزه‌ای در لاینینگ تونل‌ها ممکن است سبب ترک خوردگی، پوسـته‌پوسـته شـدن و شکـست پوشـش گردد. همچنین در سازه‌های زیرزمینـی بـدون پوشـش، خرابـی می‌تواند به صورت سقوط سنگ، پوسته‌پوسته شدن، بـاز شـدن موضعی درزهای سنگ و حرکت بلوک ظاهر شود. گاهی ممکـن است حرکات وارد بر تونل و یا پوشش آن باعث ریـزش نـشود و فقط باعث تغییر شکل گرددکه می‌توان این تغییر شکل‌ها را بـه چهار دسته اساسی تغییـر شـکل محـوری، خمـشی، بیـضوی و برشی تقسیم نمود [۵].

۳-۱- محاسبه تغییر شکل‌ها و تـنش‌هـا در تونـل‌هـای دایره‌ای با در نظر گرفتن اندرکنش زمین- سازه

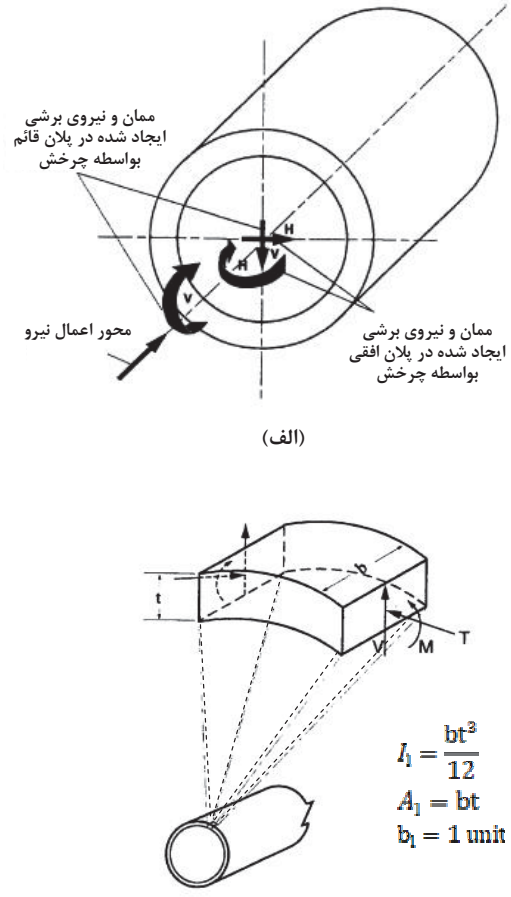
مقطع عرضی یک تونل تحت بارگذاری لـرزه‌ای بایـستی تغییـر شکل‌های محوری، خمشی و برشی را تحمل کند. با اسـتفاده از روابط الاستیسیته بـه شـکل بـسته در روش انـدرکنش زمـین- سازه مقادیر ماکزیمم این کـرنش‌هـا و تـنش‌هـا قابـل محاسـبه می‌باشد [۶]. نیروها و لنگرهای جدار تونل ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای در طول محور تونل در شکل (۱) نشان داده شده است.

ماکزیمم نیروهای اصطکاکی که می‌توانـد بـین جـدار و محـیط اطراف گسترش داده شود محدود به کرنش محـوری در جـداره می‌باشد. ماکزیمم نیروی اصطکاکی (Qmax) می‌تواند بـه‌عنـوان نیروی اصطکاکی نهایی در هر واحد طول بـه زمانهـای یـک بـه یک چهارم طول موج‌ها تخمین زده شود که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

ماکزیمم کرنش محوری تحت اثر موج برشـی بـا زاویـه برخـورد ۴۵ درجه حادث می‌شود که از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\varepsilon^{a}_{max}=\frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)A}{2+\frac{E_l A_c}{K_a}\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2}\leq\frac{fL}{4E_l A_c} \qquad (۱)$$

ماکزیمم کرنش خمشی تحت اثر موج برشـی بـا زاویـه برخـورد صفر درجه حادث می‌شود که از رابطه ۲ قابل محاسبه است.



(الف)

(ب)

شکل ۱- نیروها و لنگرهای تحمیل شده به علت امواج لرزه‌ای (الف) نیروها و لنگرهای تحمیل شده ناشی از انتشار امواج در راستای محور تونل (ب) نیروها و لنگرهای تحمیل شده ناشی از اتتشار امواج عمود بر محور تونل[۶]

$$\varepsilon^{b}_{max}=\frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 A}{1+\frac{E_l I_c}{K_t}\left(\frac{2\pi}{L}\right)^4}r \qquad (۲)$$

ماکزیمم نیروی برشی عمل کننده بر یک مقطـع عرضـی تونـل برابر است با:

$$V_{max}=\frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 E_l I_c A}{1+\frac{E_l I_c}{K_t}\left(\frac{2\pi}{L}\right)^4}=\left(\frac{2\pi}{L}\right)M_{max}=\left(\frac{2\pi}{L}\right)\left(\frac{E_l I_c \varepsilon^{b}_{max}}{r}\right) \qquad (۳)$$

به‌منظور محافظه‌کاری بیشتر (بحرانی‌ترین حالت) ترکیب کرنش‌های محوری و خمشی را کنترل می‌نماییم [۶]:

$$\varepsilon^{ab} = \varepsilon^{a}_{max} + \varepsilon^{b}_{max} \qquad (۴)$$

در این روابط ضرایب ارتجاعی ka وkt با استفاده از رابطه مطرح شده توسط (St.john & Zahrah در سال ۱۹۸۷) محاسبه می‌شود [۷]:

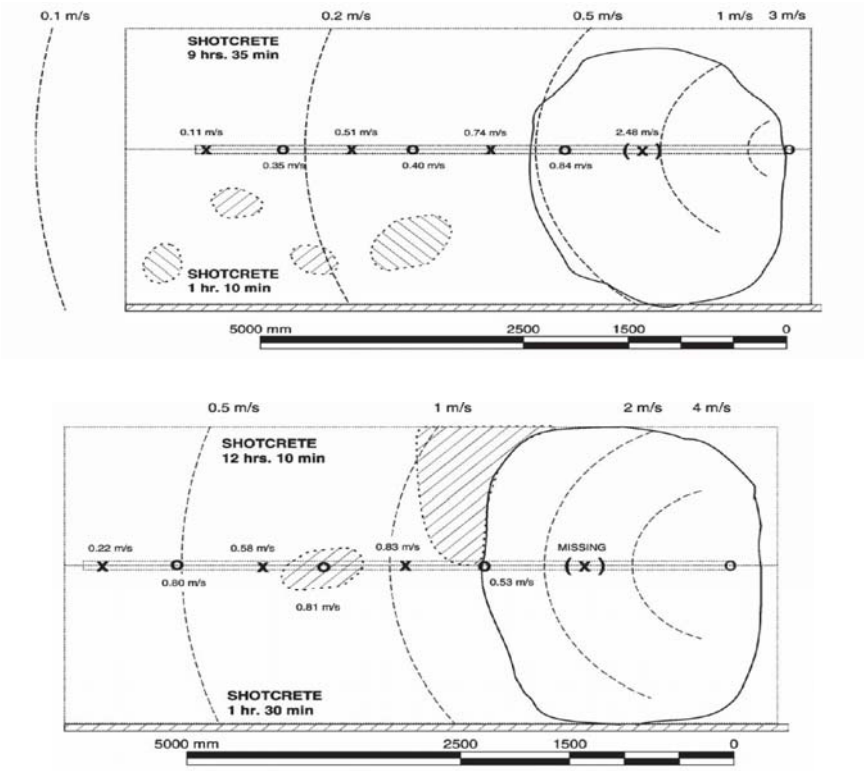
$$K_t = K_a = \frac{16\pi G_m (1-\nu_m)}{(3-4\nu_m)} \frac{d}{L} \qquad (۵)$$

۳-۲- تأثیر بارهای لرزه‌ای بر پایداری شاتکریت

تأثیر بارهای دینامیکی بر پایداری شاتکریت با انجام آزمایش برجایی در معدنی واقع در سوئد مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش در قسمتی از دیوار معدن یک چال با زاویه ۴۰ درجه حفر گردید و یک انفجار مصنوعی با استفاده از ۸/۴ کیلوگرم آنفو جهت ایجاد امواج لرزه‌ای طراحی شد. سپس بالا و پایین چال حفر شده دو لایه شاتکریت با ضخامت‌های مورد نظر، اجرا شدند که بین این دو لایه، ژئوفن‌هایی جهت ثبت شتاب لرزه‌ای نصب گردید [۹].

مقاومت فشاری شاتکریت قبل از وقوع انفجار توسط آزمایش Pull out اندازه‌گیری شده و پس از انفجار، ژئوفن‌ها شتاب‌های لرزه‌ای را ثبت کردند. سپس مقاومت شاتکریت توسط دو آزمایش نفوذسنج (penetrometer) و میله متحرک (piston tool) اندازه‌گیری شد.

در شکل (۲) قسمت‌هایی که به صورت خط توپر مشاهده می‌گردد مربوط به بخش‌هایی از سنگ بوده که از محل پرتاب شده‌اند که ارتباطی به امواج لرزه‌ای ندارد، بلکه ناشی از انرژی انفجار می‌باشد. نتایج حاصله نشان داد که امواج لرزه‌ای بر چسبندگی شاتکریت با ضخامت و خصوصیات شیمیایی مربوطه، تأثیرچندانی نداشته و تنها به دلیل انرژی انفجار قسمت‌هایی از سنگ از محل پرتاب شده‌اند که ربطی به امواج لرزه‌ای ندارد.



شکل ۲- تأثیر امواج لرزه‌ای بر چسبندگی شاتکریت با خصوصیات مربوطه

۴- خواص مکانیکی شاتکریت

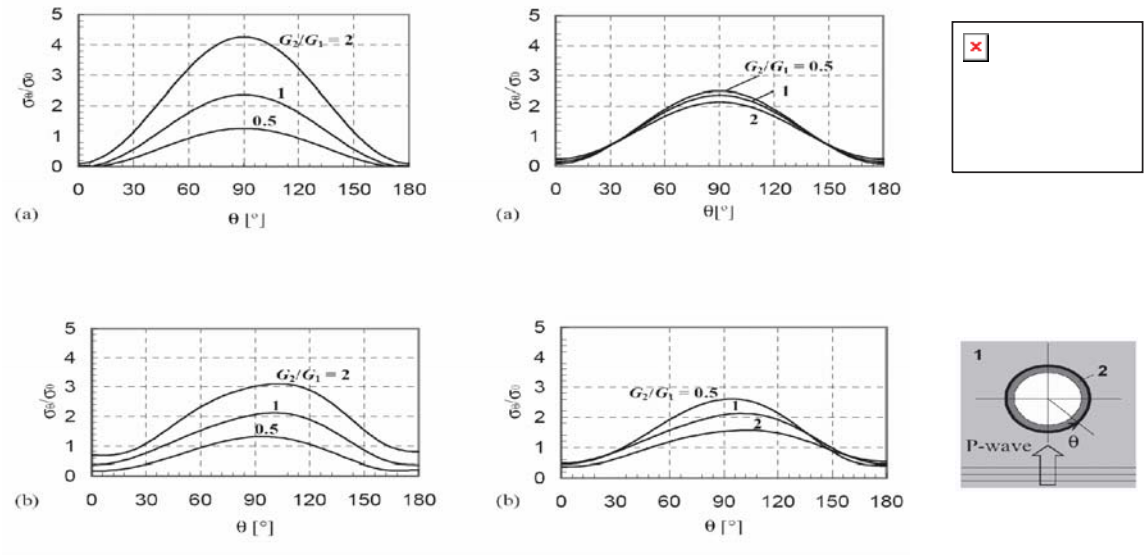
خواص مکانیکی و مشخصات شاتکریت از شاخص‌های مهمی است که به مشخصات و نحوه ترکیب مواد تشکیل‌دهنده آن بستگی دارد. مهم‌ترین این خصوصیات عبارتند از: مقاومت‌های فشاری، خمشی، کششی، چسبندگی و مدول الاستیسیته. آنگونه که از روابط ارایه شده ملاحظه می‌گردد مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در تأثیر امواج لرزه‌ای بر پوشش اهمیت زیادی دارند [۸]. مدول الاستیسیته شاتکریت که نقش موثری در مباحث مطرح شده دارد ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری آن دارد و مقدار آن از رابطه (۶) بدست می‌آید [۲].

$$E = 0.135\rho_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \qquad (۶)$$

۵- تأثیر سختی پوشش بر تمرکز تنش و جابجایی اطراف تونل و پوشش بر اثر بارهای لرزه‌ای

میزان سختی پوشش و فرکانس موج برخوردی، دو عاملی هستند که نقش بسزایی در تمرکز تنش و تغییر شکل اطراف تونل دارند. تأثیر نسبت سختی پوشش به محیط اطراف را می‌توان در تحقیق به‌عمل آمده توسط Sakurai و Uenishi ارزیابی نمود. این محققین در یک تحقیق عملی با برخورد دادن یک موج که به طور عمود بر محور تونل اصابت می‌کرد توانستند روابطی را جهت تعیین جابجایی مماسی، شعاعی، تنش شعاعی، مماسی و تنش برشی اطراف تونل و همچنین اطراف پوشش ارایه دهند. نکته جالب در این روابط، حضور فرکانس زاویه‌ای موج و مدول برشی بود که با حضور این دو مؤلفه، امکان مقایسه تأثیر فرکانس‌ها و نسبت مدول برشی پوشش بتن به زمین اطراف در حالت‌های متفاوت میسر گردید. با استفاده از نتایج حاصله و نمودارهای ترسیم شده (شکل ۲) می‌توان تأثیر نسبت مدول برشی مختلف پوشش به اطراف را بر تنش مماسی ایجاد شده در قشر داخلی و خارجی پوشش ارزیابی نمود [۹].

نمودارها نشان می‌دهند که در قشر داخلی پوشش با افزایش نسبت مدول برشی، تمرکز تنش افزایش می‌یابد و برعکس در قشر خارجی پوشش با افزایش نسبت مدول برشی، تمرکز تنش کاهش می‌یابد ولیکن در هر دو حالت همواره تمرکز تنش در دیواره‌ها (زاویه ۹۰) دارای مقدار حداکثر می‌باشد؛ همچنین مشخص گردید با افزایش فرکانس‌ها انرژی آن کاهش یافته و در هر دو حالت - هم در قشر داخلی و هم در قشر خارجی پوشش - میزان تمرکز تنش کاهش می‌یابد.



شکل ۳- تأثیر نسبت مدول برشی مختلف پوشش بر زمین اطراف بر تنش مماسی ایجاد شده در قشر داخلی و خارجی پوشش [۹]

۶- بررسی تأثیر کاهش ضخامت پوشش تحت اثر امواج لرزه‌ای

با بهره‌گیری از روابط ارایه شده (روابط ۱ تا ۵)، طرح مثال عددی زیر، داشتن مشخصه‌های شاتکریت، خصوصیات منبع امواج لرزه‌ای و مشخصات زلزله طرح (حداکثر زلزله طرح MDE) با کاهش ضخامت پوشش (tc) و به تبع آن کاهش Ac و Ic می‌توانیم تأثیر کاهش ضخامت پوشش را در مقابل اثرات ناشی از بارهای لرزه‌ای بررسی نماییم. در صورتی که با کاهش ضخامت پوشش، تنش‌های وارده (کرنش‌ها، لنگر خمشی، نیروی برشی) در محدوده مجاز حفظ شوند، استفاده از جدارهای بتنی با ضخامت کم (شاتکریت) با توجه به مزایای مطرح شده آن به عنوان پوشش جهت نگهداری سازه‌های زیر زمینی در مقابل بارهای لرزه‌ای روش مناسبی است.

مثال عددی: تونل خطی دایره‌ای با پوشش بتنی ساخت درجا که در زمینی ضعیف قرار گرفته است، دارای مشخصات (پارامترهای ژئوتکنیکی، سازه‌ای و زلزله‌ای) به شرح ذیل می‌باشد که در ادامه به بررسی کرنش‌ها و تنش‌های حاصل از تأثیر زلزله با درنظر گرفتن میزان ضخامت پوشش درآن می‌پردازیم:

پارامترهای ژئوتکنیکی:

سرعت ظاهری انتشار موج S C_s=110 m/s

وزن مخصوص خاک γ_t=17 KN/m^3

ضریب پواسون خاک (رس نرم اشباع شده) ν_m=0.5

ضخامت نهشته‌های خاک روی بستر سنگی صلب h=30 m

پارامترهای سازه‌ای:

ضخامت جدار t=0.3 m

قطر جدار d=6 m → r=3 m

طول تونل L_t=125 m

$$I_c = \frac{\pi(3.15^4 - 2.85^4)}{4} \times 0.5 = 12.76\, m^4$$

ممان اینرسی مقطع تونل

یک نصفه از ممان اینرسی برشی کامل برای تغییر شکل گهواره‌ای بتن و حالت خطی در طول بیشینه زلزله طرح MDE حساب می‌شود [۷].

سطح مقطع جداره A_c=5.65 m^2

مدول الاستیسیته بتن E1=24840 MPa

مقاومت تسلیم ارتجاعی بتن f_c=30 *MPa*

کرنش فشاری مجاز بتن تحت فشار خمشی و محوری ترکیب شده در طول بیشینه زلزله طرح $\varepsilon_{allow} = 0.003$

پارامترهای زلزله‌ای

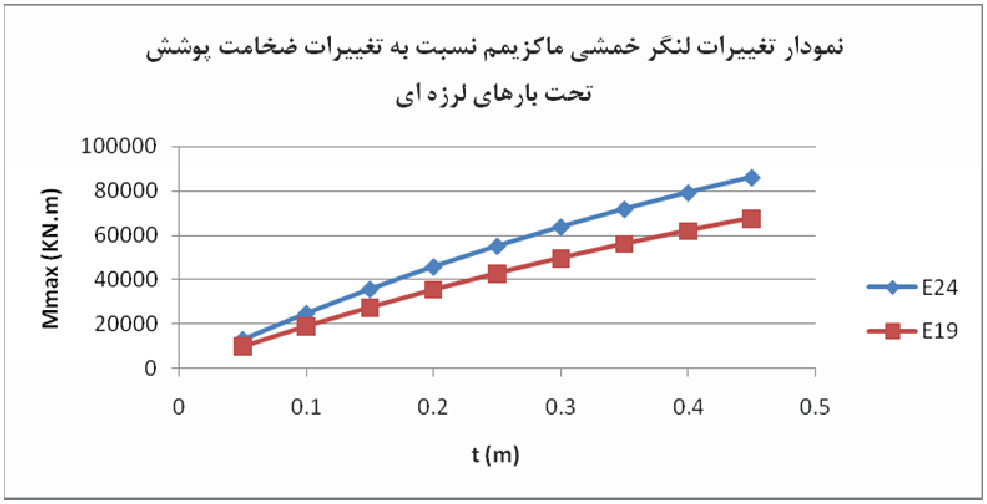
پیک شتاب ذره زمین در خاک $a_s = 0.6\ g$

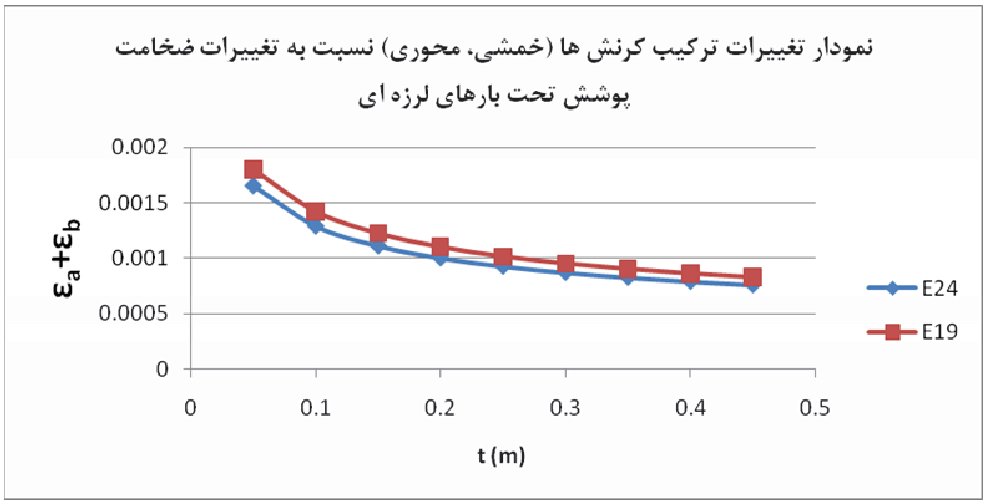
پیک سرعت ذره زمین در خاک $V_s = 1.0\ m/s$

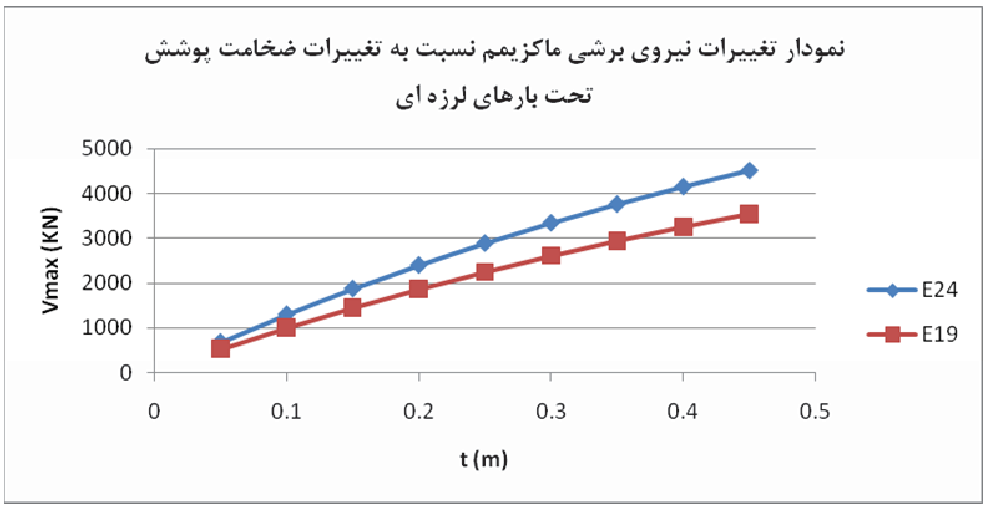
با بهره گیری از روابط اندر کنش زمین- سازه (روابط ۱تا ۴) تاثیر کاهش ضخامت پوشش بر نیروهای وارده در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- محاسبه کرنش‌ها، لنگر خمشی و نیروی برشی ماکزیمم با کاهش ضخامت لاینینگ

tc=R1-R2	Ac	IC	εa	εb	εa+εb	Mmax	Vmax
۰/۴۵	۸/۲۷	۱۷/۷۹	۰۰۰۲۴۲۵	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۸۳	۶۷/۶۲۸	۳/۵۴۱
۰/۴۰	۷/۴۱	۱۶/۲۰	۰/۰۰۰۲۶۷۲	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۸۶	۶۲/۰۷۵	۳/۲۵۰
۰/۳۵	۶/۵۴	۱۴/۵۳	۰/۰۰۰۲۹۸۰	۰/۰۰۰۶۰	۰/۰۰۰۹۰	۵۶/۱۱۵	۲/۹۳۸
۰/۳۰	۵/۶۵	۱۲/۷۶	۰/۰۰۰۳۳۷۷	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۹۵	۴۹/۷۱۶	۲/۶۰۳
۰/۲۵	۴/۷۵	۱۰/۸۹	۰/۰۰۰۳۹۰۶	۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۱۰۲	۴۲/۸۴۷	۲/۲۴۳
۰/۲۰	۳/۸۳	۸/۹۲	۰/۰۰۰۴۶۴۷	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۱۱۰	۳۵/۴۶۹	۱/۸۵۷
۰/۱۵	۲/۹۰	۶/۸۵	۰/۰۰۰۵۷۵۸	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۱۲۳	۲۷/۵۴۲	۱/۴۴۲
۰/۱۰	۱/۹۵	۴/۶۸	۰/۰۰۰۷۶۰۷	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۱۴۲	۱۹/۰۲۳	۹۹۶
۰/۰۵	۰/۹۵	۲/۴۰	۰/۰۰۱۱۲۹۴	۰/۰۰۰۶۸	۰/۰۰۱۸۱	۹/۸۶۱	۵۱۶


نمودار تغییرات لنگر خمشی ماکزیمم نسبت به تغییرات ضخامت پوشش
تحت بارهای لرزه ای
Mmax (KN.m)
100000
80000
60000
40000
20000
0
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
t (m)
E24
E19


نمودار تغییرات ترکیب کرنش ها (خمشی، محوری) نسبت به تغییرات ضخامت
پوشش تحت بارهای لرزه ای
εa+εb
0.002
0.0015
0.001
0.0005
0
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
t (m)
E24
E19


نمودار تغییرات نیروی برشی ماکزیمم نسبت به تغییرات ضخامت پوشش
تحت بارهای لرزه ای
Vmax (KN)
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
t (m)
E24
E19

با بررسی نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می‌شود که با کاهش ضخامت پوشش تونل، نیروی برشی و لنگر خمشی ناشی از بارگذاری لرزه‌ای وارده بر پوشش نیز کاهش یافته ولیکن کرنش‌های ایجاد شده در آن افزایش می‌یابند (هرچند از کرنش مجاز بتن تجاوز ننموده). نکته قابل توجه اینکه اگر چه با کاهش ضخامت پوشش، تنش‌های وارد بر آن در محدوده مجاز می‌باشند ولیکن کمترین ضخامت حاصل از این روابط تنها معیار و ملاک صحت موضوع نیست، بلکه حداقل ضخامت پوشش بایستی در عمل قابل اجرا باشد و معیار دیگری به نام سختی پوشش و محیط را نیز در روابط اقناع نماید.

یکی از معیارهای استفاده از روابط اندر کنش زمین - سازه (روابط مطرح شده)، میزان سختی تونل نسبت به زمین اطراف آن است. سختی یک تونل نسبت به محیط اطراف بوسیله نسبت تراکم‌پذیری و انعطاف‌پذیری (C و F) که از سختی انبساطی و سختی انعطافی اندازه گرفته شده است، به ترتیب از محیط نسبت به جدار از روابط زیر حاصل می‌شود [۶].

$$C = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r}{E_l t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)} \qquad (۷)$$

$$F = \frac{E_m(1-\nu_l^2)R^3}{6E_l I(1+\nu_m)} \qquad (۸)$$

در این روابط، E_m و E_L مدول الاستیسیته محیط و جدار، I ممان اینرسی جدار تونل در واحد عرض، R و t به‌ترتیب شعاع و ضخامت جدار تونل و ν_l و ν_m نیز به‌ترتیب ضریب پوآسون جدار و محیط می‌باشد.

در صورتی که نسبت انعطاف‌پذیری (F) بسیار بزرگ باشد، در حقیقت پوشش بتنی تونل بدون تحمل هیچ‌گونه نیرویی همزمان با محیط اطراف و به‌طور یکسان تغییر شکل می‌یابد. از طرفی با تمایل این نسبت به سمت صفر (یعنی صلبیت کامل)، جدار تونل کمتر از زمین طبیعی کج و معوج می‌شود و با تحمل کل نیروهای وارده بدون تغییرشکل باقی می‌ماند.

بر اساس تحقیقات به عمل آمده توسط Peak و همکاران (۱۹۷۲) چنانچه F کوچک‌تر از ۲۰ باشد بایستی بحث اندرکنش زمین- سازه درنظر گرفته شود؛ در غیر این صورت بایستی از شرایط و روابط مربوط به میدان آزاد بهره‌گیری نمود [۱۰].

از آنجائیکه روابط ارایه شده در این مقاله بر اساس روش اندرکنش زمین- سازه مطرح شده است، لذا اطمینان از برقراری شرایط فوق (F<۲۰) بایستی احراز شود. بر این اساس در مثال ارایه شده حداقل ضخامت قابل قبول بایستی در محدوده F<۲۰ قرار گیرد. مقادیر محاسبه شده F به ازای ضخامت‌های مختلف شاتکریت در جدول (۲) آورده شده است. بنابراین با توجه به معیارهای ارایه شده، حداقل ضخامت شاتکریت لازم در این مورد مطالعاتی، ۱۶ سانتی‌متر می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر F (ضریب انعطاف‌پذیری) برای ضخامت‌های مختلف جدار

F	I_l	tc=R1-R2
۰/۹۵	۰/۰۰۷۵۹	۰/۴۵
۱/۳۵	۰/۰۰۵۳۳	۰/۴۰
۲/۰۱	۰/۰۰۳۵۷	۰/۳۵
۳/۱۹	۰/۰۰۲۲۵	۰/۳۰
۵/۵۲	۰/۰۰۱۳۰	۰/۲۵
۱۰/۷۸	۰/۰۰۰۶۷	۰/۲۰
۲۰/۰۴	۰/۰۰۰۳۴	۰/۱۶
۲۵/۵۶	۰/۰۰۰۲۸	۰/۱۵
۸۶/۲۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۱۰
۶۹۰/۰۹	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۵

۷- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایجی را که از مباحث فوق می‌توان گرفت به قرار زیر می‌باشد:

- ✓ همانگونه که از روابط مطرح شده ملاحظه گردید، در سازه‌های زیرزمینی می‌توان با کم نمودن ضخامت پوشش، تنش‌های ناشی از تأثیر بارهای لرزه‌ای را در محدوده مجاز حفظ نمود، و در واقع روابط نشان می‌دهد که در سازه‌های زیرزمینی جهت مقاومت در مقابل اثر بارهای لرزه‌ای نیازی به پوشش با ضخامت قوی نیست و صرفاً با طراحی و اجرای جداره‌های با ضخامت کم همانند

شاتکریت با مقاومت فشاری مناسب در لایه‌های ۲۰-۱۵ سانتی‌متر می‌توان تنش‌های ناشی از بارهای لرزه‌ای را در محدوده مجاز حفظ نمود.

- ✓ استفاده از پوشش ضخیم برای مقابله با امواج لرزه‌ای راه‌حل مناسبی نیست؛ زیرا پوشش ضخیم‌تر دارای سختی بیشتری است و باعث تمرکز تنش در دیواره‌ها می‌گردد و همانگونه که نشان داده شد استفاده از پوشش‌های با ضخامت کم نیز در مقابل بارهای لرزه‌ای کفایت می‌کند. بنابراین با استفاده از شاتکریت با ضخامت‌های مناسب می‌توان با یکنواخت نمودن سطوح حفاری شده و پر نمودن شکاف‌ها که محل تمرکز تنش‌ها می‌باشند تأثیر تنش‌ها را در نقاط ضعیف به حداقل رساند.
- ✓ عدم تماس بین پوشش (lining) و محیط اطراف، به نوعی باعث ایجاد سختی‌های متفاوت گردیده که تمرکز تنش را به دنبال دارد (و همین شرایط در زمین هایی که دارای سختی متفاوت هستند نیز وجود دارد)؛ اگر چه در چنین شرایطی تماس بین پوشش تونل و زمین پیرامون را می‌توان با استفاده از تزریق بهبود بخشید ولیکن واقعیت امر این است که در هر حال عملاً اجرای لاینینگ‌های بتنی درجا، تماس لازم با سطوح حفاری شده را ندارد و استفاده از شاتکریت به عنوان پوشش چسبنده که با مسلح‌کننده‌ها انعطاف‌پذیری مناسبی دارد از مؤثرترین روش‌ها برای رفع این مشکل است.
- ✓ با اجرای شاتکریت لایه نازکی از آن با چسبیدن به سطح کار سبب ایجاد سطحی مقاوم در نقاط ضعیف شده و این سطوح مقاوم بارهای وارده را به کمک مقاومت‌های چسبندگی و برشی به سنگ‌های پایدار مجاور منتقل می‌کنند. به‌عبارتی می‌توان گفت که شاتکریت بر خلاف دیگر سیستم‌های نگهداری، بارهای وارده را خود تحمل نمی‌کند بلکه با تقویت و یکپارچه نمودن توده سنگ کمک می‌نماید تا سطوح حفاری شده، خود بارهای وارده را تحمل نمایند.
- ✓ امواج لرزه‌ای تاثیری روی پایداری، چسبندگی و مقاومت شاتکریت نداشته و تنها انرژی داخلی ناشی از لرزه حاصل از انفجار در محل کانون انفجار باعث از بین رفتن چسبندگی بین شاتکریت و سطح کار و احیاناً پرتاب سنگ از سطح آن می‌شود.

نمادهای به‌کار رفته

L= طول موج یک موج برشی سینوسی نمونه

A= دامنه پاسخ جابجایی زمین طبیعی

E_l= مدول الاستیسیته جدار تونل

I_c= اینرسی مقطع تونل

R_r= شعاع تونل دایره‌ای یا نصف ارتفاع تونل مستطیلی

d = قطر تونل دایره‌ای (یا ارتفاع سازه مستطیلی)

ρ_c = دانسیته شاتکریت

K_a= ضریب ارتجاعی طولی محیط (در تغییر شکل واحد هر نیرو، هر واحد طول تونل)

A_c= مساحت مقطع عرضی جدار تونل

f= نیروی اصطکاک نهایی (هر واحد طول) بین تونل و محیط

K_t= ضریب ارتجاعی عرضی محیط

Gm و Vm = مدول‌های برشی وضریب پواسون محیط

f'_c = مقاومت ۲۸ روزه شاتکریت

MDE= حداکثر زلزله طرح (Maximum Design Earthquake)

مراجع

۱. مدنی، حسن. تونل‌سازی (جلد سوم)، تحلیل پایداری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (**۱۳۸۶**).

۲. مدنی، حسن. تونل‌سازی (جلد چهارم)، طراحی و اجرای سیستم نگهداری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

3. Jafari. M. K., Pellet, F., Boulon. M., Amini Hosseini. K. Experimental Study of Mechanical Behaviour of Rock Joints Under Cyclic Loading, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol 37, pp 3-23, (**2004**).

۴. جیمز اندرسن – کریستوفر آرنولد. طراحی سازه‌های ضد زلزله، انتشارات دانشگاه تهران.

5. Zhao. J., Zhou. Y.X.M.,Hefny. A. M.,Cai., J. G., Chen. S. G., Li. H.B., Liu. J. F. Rock Dynamic Research Related to Cavern Development for Ammunition storage, (**2000**).

6. Youssef M. A. Hashasha, Jeffrey J. Hooka, Birger Schmidtd, John I-Chaing Yaoa, Seismic design and analysis of underground structures, Tunnelling and Underground Space Technology, 16, 247- 293, (**2001**).

7. Youssef, M. A. Ovaling deformation tunnel under seismic loading an update on seismic design and analysis of underground structures, tunneling and underground space technology, Volume 20 Issue 5, PP 344-345, (**2005**).

۸. فرخ‌نیا، احسان - عبـدالرزاق‌نـژاد، علـی - بیگـی، مرتـضی. تأثیر امواج لرزه‌ای بر سازه‌های زیرمینی (**۱۳۸۷**).

۹. سـرفرازی، وهـاب. بررسـی تـأثیر بارهـای دینـامیکی و تنش‌های ناشی از آتشباری در پایداری فضاهای زیرزمینی، سمینار درس حفریات زیرزمینی پیشرفته، دانشگاه تربیـت مدرس، (**۱۳۸۳**).

10. Mohammad C. Pakbaz, Akbar Yarvand. 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 20, 411–417, (**2005**).

Influence of Shotcrete on Increase Safety Factor in Underground Tunnels Support Structure to Versus Earthquake Load

Fereidoun Khosravi[1], Shahryar Najafvand[1]

Abstract

During new century, underground structures are important research in science of mining, transportation, fortification and so on. This knowledge will be improve power of military in countries and it will be develop armament of military and also will be rise the security of underground structures , such as tunnels and buildings of underground.

The aim of this research consist design of solid structure, resistance and support underground structures. Utilize of shotcrete in underground cavities is for interim structure and sometimes for perennial structure, which its history return about one hundred years ago. However, initial utilization of shotcrete was support of stones in contrast of weathering. Yet, nowadays shotcrete will be substitute inverse of underground concrete structures.

This paper shows the shotcrete specification in underground structures will be resistance during seismic loads, and also we will consider shotcrete in opposite of seismic loading effects on state of tunnel lining.

Key Words: *Shotcrete, Lining, Underground Structures, Support System, Seismic Waves*

1- Department of Civil engineering, Emem Hosain University, Tehran, Iran