مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۳۵-۴۳

Original Article

بررسی ارتعاشات ناشی از بارهای قائم زلزله و حرکت اجرام روی سازه‌ی پل و کاربرد میراگرهای لوله‌یی غیرفعال در آن

علی نیکخو (دانشیار)
اردلان بهرامی اسکندری* (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ
فیاض رحیم‌زاده رفوئی (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

علی‌رغم اینکه در پل‌ها و تیرهای موازی آن، طراحی براساس مؤلفه‌ی افقی تحریک لرزه‌یی صورت می‌گیرد و از مؤلفه‌ی قائم آن صرف‌نظر می‌شود، شواهدی در دست است که برخی از مودهای شکست در رابطه‌ی مستقیم با مؤلفه‌ی قائم زمین‌لرزه هستند. اگرچه به‌طورکلی مؤلفه‌ی قائم در مقایسه با مؤلفه‌ی افقی زلزله، قدرت کمتری دارد؛ ولی تأثیر بیشتر آن در حوزه‌ی بسامدی به خصوصی واقع است که می‌تواند برای سازه‌هایی با بسامد طبیعی در این حوزه‌ها بسیار مخرب باشد. در این پژوهش، علاوه بر بررسی اثر مؤلفه‌ی قائم تحریک لرزه‌یی در سازه‌ی پل، به بیان تأثیر توأم این نیرو با بارهای به‌صورت اجرام محرک و لزوم درنظرگرفتن این آثار در طراحی پل‌ها و همچنین توجه به کاهش این‌گونه آثار از طرق مختلف پرداخته شده است. در ادامه، با استفاده از یک سیستم میراگر غیرفعال، سعی بر کاهش اثرات ذکرشده و کاربرد آن‌ها در سازه‌ی پل شده است. درنهایت، با بررسی و مقایسه‌ی نتایج، اقدام به کاهش مقاطع این‌گونه سازه‌ها با حضور میراگرها در جهت صرفه‌ی هر چه بیشتر اقتصادی شده است.

واژگان کلیدی: سازه‌ی پل، مؤلفه‌ی قائم نیروی لرزه‌یی، جرم متحرک، میراگر غیرفعال، کاهش پاسخ.

nikkhoo@usc.ac.ir
ar.bahrami@usc.ac.ir
rofooei@sharif.edu

۱. مقدمه

در بررسی و آنالیز حرکت‌های متغیر بر روی تیرها، کارهای بسیاری در دو بخش بارهای عبوری و نیز اجرام عبوری صورت گرفته شده است. همچنین در بررسی اثر توأم نیروهای زلزله و اجرام عبوری روی پل‌های معلق و چنددهانه و نیز نحوه‌ی محاسبه‌ی نیروی قائم زلزله مطالعاتی صورت گرفته است. برای مثال، در مورد نتایج بارهای عبوری روی تیرها و نیز در مورد حرکت اجرام عبوری روی تیر اولر ـ برنولی مطالعاتی انجام شده است.[۱و۲] همچنین در مورد حل‌های عددی معادله‌ی ناشی از حرکت اجرام روی تیرهای اولر ـ برنولی و تیموشنکو پژوهش‌هایی صورت گرفته است.[۳] درخصوص طیف پاسخ سیستم‌های وابسته به زمان، مانند تیرهای تحت تأثیر اجرام عبوری و تحریک پایه‌یی مؤلفه‌ی افقی زلزله نیز مطالعاتی صورت گرفته و نتایج به‌دست‌آمده با ارائه‌ی مقادیر بحرانی اجرام عبوری و طیف پاسخ سه‌بعدی برای تحریک پایه‌یی مختلف در تیرهای با بسامدهای طبیعی مختلف گزارش شده است.[۴]

در بخش دیگر، در زمینه‌ی نیروهای قائم زلزله و اثر آن در تیرهای چنددهانه‌ی پل‌ها، روی پل‌های معلق پژوهش‌هایی صورت گرفته است.[۵و۱] همچنین در مورد رفتار دینامیکی پل‌های معلق تحت بارهای عبوری و بارهای لرزه‌یی افقی و قائم و خط تأثیر دینامیکی آن‌ها مطالعاتی صورت گرفته است.[۶] در بررسی اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله روی پل‌ها و نیز روش‌های متفاوت، و با به دست‌آوردن روشی ساده برای محاسبه‌ی نیروهای قائم زلزله در پل‌ها با استفاده از طیف‌های آیین‌نامه‌یی، روش مذکور برای کاربرد در آیین‌نامه‌های رایج پیشنهاد شده است.[۷] در زمینه‌ی میراگرهای لوله‌یی، در دو بخش به بررسی رفتار آزمایشگاهی این میراگرها و انطباق نتایج حاصل با معادلات و نمودارهای ارائه‌شده و همچنین تأثیر پارامترهای متفاوت در رفتار آن‌ها پرداخته شده است.[۸و۹]

در بخش دیگری نیز از آن‌ها در پل‌های با تیرهای اصلی و فرعی تحت بارگذاری زلزله‌ی افقی استفاده و نتایج حاصل با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی دینامیکی توصیف شده است. در پژوهش دیگری نیز با کاربرد قطعات پیزوالکتریک در تیرهای اولر ـ برنولی با عملکرد محرک، تحت بارگذاری اجرام

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۵/۳۰، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۶.

Archive of SID
www.SID.ir

عبوری به بررسی کاهش پاسخ‌ها با استفاده از الگوریتم‌های کنترل بهینه پرداخته شده است.[۱۰] همچنین در کتاب‌ها و آیین‌نامه‌های منتشرشده از نتایج پژوهش‌ها در این زمینه‌ها استفاده شده است. در کتاب منتشرشده‌یی در این زمینه نیز به بررسی معادلات متفاوت بارهای عبوری و حل‌های بسته‌ی این معادلات پرداخته شده است.[۱۱]

در آیین‌نامه‌های آمریکایی و کانادایی،[۱۲و۱۳] و همچنین در آیین‌نامه‌ی اروپا،[۱۴] از دستورالعمل‌هایی برای تحصیل طیف طراحی قائم زلزله از طیف‌های افقی موجود استفاده شده است. محاسبه‌ی اثر حرکت قائم زلزله در آیین‌نامه‌ی اروپا،[۱۴] زمانی که پل در فاصله‌ی کمتر از ۵ کیلومتر از محل یک گسل لرزه‌زای فعال و یا در یک ناحیه با لرزه‌خیزی بالا قرار می‌گیرد، را مدنظر قرار داده است. به شتاب در جهت عمودی و قائم، مؤلفه‌ی قائم زلزله گفته می‌شود که اثر آن‌ها در طراحی سازه‌ها در وهله‌ی دوم قرار می‌گیرد. محاسبه‌ی این واکنش‌ها به‌صورت قابل‌ملاحظه‌یی در آیین‌نامه‌ها رایج نیست. مثلاً در آیین‌نامه‌ی طراحی پل‌های بزرگراه‌های کانادا،[۱۳] محاسبه‌ی حرکت قائم زمین‌لرزه با استفاده از یک روش ساده از طریق افزایش و کاهش کنش بارهای مرده در ترکیب بارها، صرف‌نظر از بزرگای زمین‌لرزه، فاصله تا گسل و شرایط خاک محل بیان شده است. در آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌یی پل‌های کالیفرنیا،[۱۵و۷] این اثر فقط شامل یک معادله‌ی استاتیک بار قائم در زمانی است که PGA [۱] سایت g ۰٫۶ و یا بزرگ‌تر باشد. در تحلیل دینامیکی تیرهای تحت تأثیر بارها و اجرام عبوری و نیز تحریک پایه‌یی زلزله‌ی افقی، با استفاده‌ی مستقیم از شتاب زمین‌لرزه، معادلات گسترش یافته و نتایج ارائه شده است.[۱۶]

از مطالعات پیشین می‌توان کارها را به چند بخش تقسیم کرد. پژوهش در رابطه با بارها و اجرام عبوری روی تیرها، بررسی تیرها تحت بارگذاری مؤلفه‌های زلزله، پژوهش درخصوص تیرهای تحت تأثیر اجرام عبوری و مؤلفه‌ی افقی زلزله، و درنهایت، مطالعه‌ی پل‌های معلق تحت بارگذاری بارهای عبوری و زلزله‌ی قائم و افقی. همان‌طور که مشخص است، بررسی و مطالعه‌ی تیرهای پل‌های تحت عبور اجرام و نیز زلزله‌ی قائم به‌طور هم‌زمان نادیده گرفته شده است. در این نوشتار، علاوه بر بررسی تیرهای سازه‌ی پل تحت اثر بارگذاری مذکور، با جایگذاری میراگرهای لوله‌یی در تیرها و واردکردن اثر آن‌ها به‌صورت قیدهای مشخص در معادلات، نسبت به بررسی و کاهش ارتعاشات ناشی از اعمال هم‌زمان بارهای اجرام محرک و مؤلفه‌ی قائم زلزله پرداخته شده است.

۲. تعریف مسئله

در پل‌های معمول چنددهانه که شامل چند تیر موازی است و ستون‌ها نقش تکیه‌گاه را برای این تیرها ایجاد می‌کنند و نیز عرشه‌ی پل که بر روی این تیرها استوار است، طراحی براساس آنالیز بیشینه‌ی نیروهای وارد شده‌ی بارهای استاتیکی و دینامیکی (بارهای عبوری و نیز بارهای لرزیی) است. در این میان هدف از طراحی، از یک سو ارضاء مقاومت و سختی و شکل‌پذیری اعضاء تیرهای سازه‌یی براساس روش طراحی و از سوی دیگر، کنترل خیزها و جابه‌جایی‌های بیشینه است، که البته این دو مورد وابسته به یکدیگر نیز هستند. چرا که هر چقدر نیروی بیشتری به اعضا منتقل شود، جابه‌جایی بیشتری را نیز در پی خواهد داشت. لزوم استفاده از یک میراگر برای کاهش پاسخ (نیرو و جابه‌جایی) ناشی از اثر توأم بارهای قائم زلزله و حرکت اجرام روی تیرهای پل را بیان می‌کند. در این نوشتار با استفاده از یک سیستم میراگر لوله‌یی، به بررسی کاهش ارتعاشات در این سازه پرداخته شده است.

۱.۲. فرمول‌بندی مسئله

در این مطالعه، با فرض یک تیر اولر ـ برنولی، معادلات با شرایط حاکم بر مسئله بررسی شده‌اند. در معادلات ۱ و ۲، پارامتر جابه‌جایی Z در تیرها با یک جداسازی متغیرها به‌صورت $\sum_{i=1}^{P}\phi_i(x)A_i(t)$ بیان می‌شود که P برابر با تعداد مودهای در نظرگرفته‌شده در حل سیستم‌های ارتعاش پیوسته است. تابع شکل نیز به‌صورت $\phi_P(x)=\sin P\pi x/L$ در نظرگرفته می‌شود، که برای تیرهای دو سر ساده کاملاً منطبق بر واقعیت است. L معرف طول تیر و $A_i(t)$ نیز بیان‌گر دامنه‌ی حرکت وابسته به زمان است:

$$(\rho A)(\frac{\partial^2 Z}{\partial t^2})+(EI)(\frac{\partial^4 Z}{\partial x})=f(x,t) \qquad (۱)$$

که در آن، (ρA) و (EI) به ترتیب معرف جرم واحد طول و سختی تیر هستند. هنگام استفاده از میراگرهای لوله‌یی، در محل آن‌ها فنر و میراگری با سختی و میرایی مرتبط با لوله‌ی مورداستفاده، به‌صورت قید در معادلات وارد می‌شود (شکل ۱). K و C به ترتیب معرف سختی و میرایی لوله‌ها و x_s محل مورداستفاده‌ی آن است. r نیز بیان‌گر تعداد محل‌های میراگرهای لوله‌یی مورداستفاده است.

$$(\rho A)(\frac{\partial^2 Z}{\partial t^2})+(EI)(\frac{\partial^4 Z}{\partial x^4})+K\sum_{s=1}^{r}z((x=x_s),t)\delta(x-x_s))$$
$$+C\sum_{s=1}^{r}\dot{z}((x=x_s),t)\delta(x-x_s))=f(x,t) \qquad (۲)$$

با درنظرگرفتن نیروهای خارجی به‌صورت اجرام محرک و تحریک تکیه‌گاهی ناشی از زلزله‌ی قائم، $f(x,t)$ از رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید:

$$f(x,t)=M(g-\frac{d^2 Z_s(t)}{dt^2})\delta(x-vt)+(-m\ddot{u}_g) \qquad (۳)$$

اگر جرم با سرعت ثابت v حرکت کند، $x=vt$؛ بنابراین $f(x,t)$ از رابطه‌ی ۴ به‌دست می‌آید:

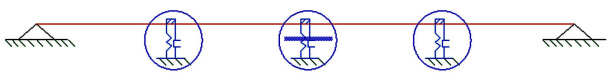
$$f(x,t)=M(g-\frac{d^2 Z(vt,t)}{dt^2})\delta(x-vt)+(-m\ddot{u}_g) \qquad (۴)$$

با مشتق‌گیری زنجیره‌یی نیز $f(x,t)$ از رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید:

$$f(x,t)=M(g-\frac{\partial^2 Z}{dt^2}-2v\frac{\partial^2 Z}{\partial x\partial t}-v^2\frac{\partial^2 Z}{dx^2})_{x=vt}\delta(x-vt)$$
$$+(-m\ddot{u}_g) \qquad (۵)$$

همچنین با جایگذاری Z در معادله‌ی به‌دست‌آمده، $f(x,t)$ از رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آید:

$$f(x,t)=M(g-(\sum_{i=1}^{P}[\phi_i(x)\frac{\partial^2 A_i(t)}{\partial t^2}+2v\phi_i'(x)\frac{dA_i(t)}{dt}$$
$$+v^2\phi''(x)_i A_i(t)]_{x=vt}))\delta(x-vt)+(-m\ddot{u}_g) \qquad (۶)$$



شکل ۱. استفاده از میراگرهای لوله‌یی در طول تیر.

Archive of SID

www.SID.ir

در معادلات ارائه‌شده، M بیان‌گر جرم محرک روی تیر، g شتاب ثقل، m جرم واحد تیر و $\ddot{u}_g$ شتاب قائم ناشی از حرکت زمین در هر زمان است. همچنین با جایگذاری Z در معادله‌ی ۲:

$$(\rho A)\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x)\ddot{A}_i(t)) + (EI)\sum_{i=1}^{P}(\phi_i^{IV}(x)A_i(t)) + K\sum_{s=1}^{r}\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x_s)A_i(t))\delta(x-x_s) + C\sum_{s=1}^{r}\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x_s)\dot{A}_i(t))\delta(x-x_s) = f(x,t) \quad (۷)$$

و با ضرب طرفین معادله در $\phi_m(x)$ و انتگرال‌گیری روی طول دهانه‌ی تیر، رابطه ۸ را خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}(\rho A)\int_0^l \phi_m(x)\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x)\ddot{A}_i(t))dx &+ (EI)\int_0^l \phi_m(x)\sum_{i=1}^{P}(\phi_i^{IV}(x)A_i(t))dx \\ &+ K\sum_{s=1}^{r}\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x_s)A_i(t))\int_0^l \phi_m(x)\delta(x-x_s)dx \\ &+ C\sum_{s=1}^{r}\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x_s)\dot{A}_i(t))\int_0^l \phi_m(x)\delta(x-x_s)dx \\ &= M(g-\sum_{i=1}^{P}[\phi_i(x)\frac{\partial^2 A_i(t)}{\partial t^2} + 2v\phi_i'(x)\frac{dA_i(t)}{dt} \\ &+ v^2\phi''(x)_i A_i(t)]_{x=vt})\int_0^l \phi_m(x)\delta(x-vt)dx \\ &+ \int_0^l (-m\ddot{u}_g)\phi_m(x)dx \end{aligned} \quad (۸)$$

با توجه به تعامد مودها، $\int_0^l \phi_i^2(x)dx = 1$، رابطه‌ی ۹ را خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}(\rho A\delta_{ij})\ddot{A}_i(t) + EI\int_0^l \sum_{i=1}^{P}(\phi_i^{IV}(x)A_i(t))\phi_j(x)dx &+ K\sum_{s=1}^{r}\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x_s)A_i(t))\phi_j(x_s) \\ &+ C\sum_{s=1}^{r}\sum_{i=1}^{P}(\phi_i(x_s)\dot{A}_i(t))\phi_j(x_s) \\ &= M(g-\sum_{i=1}^{P}[\phi_i(x)\frac{\partial^2 A_i(t)}{\partial t^2} + 2v\phi_i'(x)\frac{dA_i(t)}{dt} \\ &+ v^2\phi''(x)_i A_i(t)]_{x=vt})\phi_j(vt) + (-m\ddot{u}_g)\int_0^l \phi_i(x)dx \end{aligned} \quad (۹)$$

بنابراین معادله‌ی ماتریسی ۱۰ به‌دست می‌آید:

$$[F] = [M]\ddot{A} + [C]\dot{A} + [K]A \quad (۱۰)$$

که در آن $[M]$، $[C]$، $[K]$ و $[F]$ از روابط ۱۱ الی ۱۴ به‌دست می‌آیند:

$$[M] = \rho A\delta_{ij} + M\phi_i(vt)\phi_j(vt)H(L-x_{Mm}) \quad (۱۱)$$

$$[C] = C\sum_{s=1}^{r}\phi_i(x_s)\phi_J(x_s) + 2Mv\phi_i'(vt)\phi_j(vt)H(L-x_{Mm}) \quad (۱۲)$$

$$[K] = EI\int_0^l \phi_i^{IV}(x)\phi_j(x)dx + K\sum_{s=1}^{r}\phi_i(x_s)\phi_J(x_s) + Mv^2\phi_i''(vt)\phi_j(vt)H(L-x_{Mm}) \quad (۱۳)$$

$$[F] = Mg\phi_i(vt)H(L-x_{Mm}) + (-m\ddot{u}_g)\int_0^l \phi_i(x)dx \quad (۱۴)$$

تابع $H(x)$ برای درنظرگرفتن اثر حرکت زمانی جرم محرک روی تیر است و به‌صورت رابطه‌ی ۱۵ بیان می‌شود:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{1}{2} & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (۱۵)$$

شکل متعامد تابع شکل به‌صورت $\phi_P(x) = \sqrt{\frac{2}{L}}\sin P\pi x/L$ است و در این پژوهش تعداد ۳ مود اول در محاسبات در نظرگرفته شده است.

ماتریس سختی تیر به‌صورت یک ماتریس قطری $P\times P$ (در اینجا با درنظرگرفتن ۳ مود، 3×3) است. همچنین با توجه به رابطه‌ی هوک، بیشینه‌ی نیروی واردشده به تیر مربوط به بیشینه‌ی جابه‌جایی در وسط دهانه‌ی تیر است؛ به همین منظور برای به‌دست‌آوردن بیشینه‌ی نیروی اعمالی به تیر، رابطه‌ی ۱۶ حاصل می‌شود:

$$F_{\max} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{bmatrix} \times \delta_{\max} \quad (۱۶)$$

با استفاده از ترکیب مودها با یکدیگر با روش آماری جذر مجموع مربعات یا روش SRSS، بیشینه‌ی نیروی وارد به تیر به دست می‌آید (روابط ۱۷ الی ۱۹):

$$F_{1\max} = \delta_{\max} \times K_{11} \quad (۱۷)$$

$$F_{2\max} = \delta_{\max} \times K_{22} \quad (۱۸)$$

$$F_{3\max} = \delta_{\max} \times K_{33} \quad (۱۹)$$

بنابراین رابطه‌ی ۲۰ را خواهیم داشت:

$$F_{\max,total} = \sqrt{F_{1\max}^2 + F_{2\max}^2 + F_{3\max}^2} \quad (۲۰)$$

Archive of SID

www.SID.ir

۲.۲. حل معادلات دیفرانسیل در حوزه‌ی زمان

برای حل معادلات به‌دست‌آمده، از روش‌های عددی گام‌به‌گام زمانی استفاده می‌شود. بدین منظور با انتقال معادلات به فضای حالت،[۱۰] و حل آن‌ها با Δt مفروض نتایج به‌دست می‌آیند. اگر معادله‌ی اصلی به‌صورت رابطه‌ی ۲۱ باشد:[۱۷]

$$\overline{M}(t)\ddot{A}(t)+\overline{C}(t)\dot{A}(t)+\overline{K}(t)A(t)=F(t)$$
$$A(t_0)=Q_0, \qquad \dot{A}(t_0)=Q_{10} \tag{۲۱}$$

که در آن، $A(t)$ دامنه‌ی تیر است که در آن Q_0 و Q_{10} شرایط اولیه‌ی معادله هستند؛ نمایش فضای حالت معادله‌ی اصلی به‌صورت رابطه‌ی ۲۲ خواهد بود:

$$\dot{X}(t)=\overline{A}(t)X(t)+\overline{E}(t) \tag{۲۲}$$

که در آن، $X(t)$، $\overline{A}(t)$ و $\overline{E}(t)$ از مجموعه روابط ۲۳ به‌دست می‌آیند:

$$X(t)=\begin{bmatrix} A(t) \\ \dot{A}(t) \end{bmatrix}_{2p\times 1}$$
$$\overline{A}(t)=\begin{bmatrix} 0 & I \\ -\overline{M}^{-1}\overline{K} & -\overline{M}^{-1}\overline{C} \end{bmatrix}_{2p\times 2p}$$
$$\overline{E}(t)=\begin{bmatrix} 0 \\ -\overline{M}^{-1}E \end{bmatrix}_{2p\times 1} \tag{۲۳}$$

حل تقریبی معادله‌های ۲۳ به‌صورت روابط ۲۴ خواهد بود:

$$\overline{A}_1(t_k)\cong e^{\overline{A}(t_k)\Delta t_k}$$
$$\overline{E}_1(t_k)\cong [\overline{A}_1(t_k)-I]\overline{A}^{-1}(t_k)\overline{E}(t_k) \tag{۲۴}$$

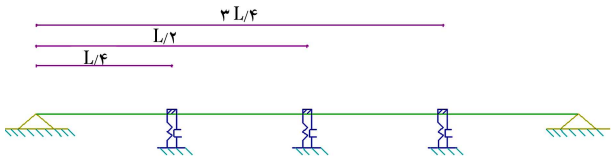
حل معادلات با استفاده از نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است.

۳. میراگر لوله‌یی و جایگذاری روی پل

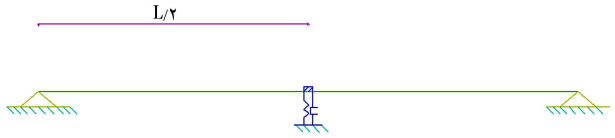
با توجه به اینکه عملکرد میراگرهای لوله‌یی در طول تیر، به‌عنوان یک فنر و میراگر با سختی و میرایی متناسب با مجموع لوله‌ها در محل اثر آن‌ها لحاظ شده است؛ در نتیجه لوله‌های مورداستفاده، در طولی به میزان بیشینه‌ی معادل ۱۰٪ دهانه‌ی تیر در یک محل مشخص در نظر گرفته شوند تا فرض اولیه‌ی مسئله استوار بماند. همچنین در رابطه با محل قرارگیری لوله‌ها، با توجه به اینکه استفاده از میراگرهای لوله‌یی به‌منظور کاهش پاسخ جابه‌جایی و به‌تبع آن نیروی طراحی است، با درنظرگرفتن بیشینه‌ی جابه‌جایی تیر، میانه‌ی دهانه‌ی تیر بهترین مکان برای به‌کارگیری این میراگرهاست. علاوه بر این، آرایش دیگری متناسب با جابه‌جایی تیر برای مقایسه با حالت اولیه انتخاب شده است، تا اهمیت انتخاب محل به‌کارگیری نیز مشخص شود. به این منظور:

الف) لوله‌ها در ۳ نقطه‌ی میانی، $\frac{1}{4}$ دهانه و $\frac{3}{4}$ دهانه به‌صورت طول برابر (جمع آن‌ها معادل ۱۰٪ طول دهانه) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نحوه‌ی قرارگیری میراگرها در شکل ۲ نشان داده شده است.

ب) همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است؛ لوله‌ها به‌صورت یک‌جا در نقطه‌ی میانی دهانه‌ی تیر کارگذاشته شده‌اند.



شکل ۲. نحوه آرایش میراگرهای سه‌تایی در طول تیر.



شکل ۳. نحوه آرایش میراگر واحد در میانه تیر.

در تحلیل تیرهای سازه‌ی پل، که در آن‌ها از میراگرهای لوله‌یی برای کاهش پاسخ استفاده شده است، توجه به این نکته ضروری است که اگر چه در هر مرحله‌ی بارگذاری ممکن است میراگر لوله‌یی وارد فاز خمیری شود، ولی هرگز خود تیر وارد این فاز نمی‌شود و همیشه در محدوده‌ی کشسان واقع است.[۹]

لوله‌ی مورد استفاده در این مطالعه، به ضخامت ۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۱۴ میلی‌متر است. نحوه و جزئیات اتصال لوله‌ها به تیر در محل‌های موردنظر در شکل ۴ ارائه شده است.

معادلات حاکم بر لوله‌ها براساس آزمایش‌های صورت‌گرفته، عبارت از روابط ۲۵ الی ۲۷ هستند:[۸]

$$F_y=0.0088\times l \tag{۲۵}$$
$$K_0=0.0034\times l \tag{۲۶}$$
$$K_p=0.05K_0 \tag{۲۷}$$

که در آن‌ها، l طول لوله برحسب میلی‌متر، F_y نیروی جاری‌شدن لوله یا مقاومت تسلیم آن برحسب کیلونیوتن، K_0 سختی کشسان و K_p سختی خمیری مدل دوخطی برحسب KN/mm هستند. همچنین جابه‌جایی تسلیم لوله نیز برابر ۲٫۶ میلی‌متر و ξ نیز بیان‌گر نسبت میرایی است (رابطه‌ی ۲۸):

$$\xi=\frac{1}{4\pi}\frac{E_D}{E_S} \tag{۲۸}$$

که در آن، E_D برابر سطح زیر منحنی هیسترزیس بار ـ جابه‌جایی برای یک چرخه‌ی کامل است، که بیان‌گر کل انرژی جذب‌شده توسط میراگر و همچنین E_S برابر انرژی کرنش کشسان است. برای لوله‌ی مورد استفاده در این نوشتار، مقدار ξ از رابطه‌ی ۲۹ به‌دست می‌آید:[۸]

$$\xi=\frac{1}{4\pi}\frac{173}{34}=40\% \tag{۲۹}$$

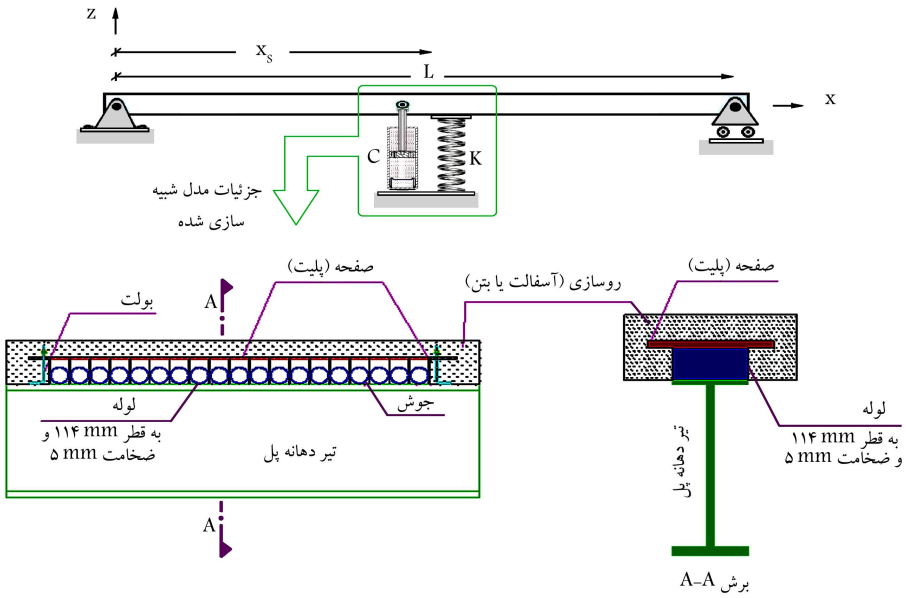
در نتیجه مقدار C از روابط ۳۰ الی ۳۲ به‌دست می‌آید:

$$C=2m\omega\xi \tag{۳۰}$$
$$C=2m\sqrt{\frac{K}{m}}\xi \tag{۳۱}$$
$$C=2\sqrt{mK}\xi \tag{۳۲}$$

جرم لوله نیز برحسب کیلوگرم از رابطه‌ی ۳۳ به‌دست می‌آید:

$$m=7850\times 0.005\times 2\pi\times(\frac{0.114}{2})\times l \tag{۳۳}$$

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۴. جزئیات اتصال لوله‌ها به تیر در محل موردنظر.

که در آن، l طول لوله برحسب متر است، و نهایتاً m برحسب کیلوگرم محاسبه می‌شود. میرایی لوله (C) نیز تابعی از طول و سختی لوله است، که سختی نیز خود تابعی از طول لوله است. لازم به توضیح است که روابط فوق براساس نوع آزمایش‌ها و تحلیل‌ها بیان‌گر مقاومت برشی لوله است، که از آن‌ها در این مطالعه در جهت اطمینان به‌جای مقاومت خمشی لوله‌ها استفاده شده است. بدیهی است که مقاومت خمشی لوله‌ی فلزی بیشتر از مقاومت برشی آن است.

۴. مثال عددی

یکی از تیرهای یک پل معمولی عبور از رودخانه در نظرگرفته شده است. یک گروه از اجرام که هر کدام جرمی معادل ۵۰۰۰۰ کیلوگرم دارند، با سرعت ثابت ۳۰ متر بر ثانیه از روی پل عبور می‌کنند. فاصله‌ی زمانی حرکت اجرام به‌گونه‌یی است که با قرارگرفتن هر کدام از آن‌ها در میانه‌ی پل، جرم بعدی وارد دهانه‌ی پل می‌شود (شکل ۵). این ترتیب حرکت آن‌ها به مدت ۱۶ ثانیه از ورود اولین جرم به دهانه‌ی پل به طول می‌انجامد و شرایط اولیه‌ی تیر، سکون کامل است.

تحریک قائم لرزه‌یی نیز براساس تنوع در محتوای بسامدی و PGA و شدت آن‌ها از محدوده‌ی زلزله‌های اساس طراحی (DBE)[۲] تا بیشترین زلزله‌ی بحرانی (MCE)[۳] برای یک سایت، به تکیه‌گاه‌ها اثر می‌کند. این زلزله‌ها به ترتیب سطوح مختلف عبارت‌اند از:

۱. زلزله‌ی امپریال ولی[۴] ـ (ال‌سنترو)[۵] (۱۹۴۰): $\mathrm{PGA} = ۰٫۲۰۵\,\mathrm{g}$؛

۲. زلزله‌ی کوبه[۶] ـ KJMA (۱۹۹۵): $\mathrm{PGA} = ۰٫۳۴۳\,\mathrm{g}$؛

شکل ۵. نحوه بارگذاری روی تیر.

۳. زلزله‌ی لوماپریتا[۷] ـ (کورالیتوس)[۸] (۱۹۸۹): $\mathrm{PGA} = ۰٫۴۵۵\,\mathrm{g}$؛

۴. زلزله‌ی طبس[۹] - (طبس) (۱۹۷۸): $\mathrm{PGA} = ۰٫۶۸۸\,\mathrm{g}$.

تاریخچه‌های شتاب زلزله‌های مورداستفاده نیز در شکل ۶ ارائه شده است.

طول تیر موردنظر ۶۰ متر است. جابه‌جایی در وسط دهانه‌ی تیر (بیشترین جابه‌جایی) بدون استفاده از میراگرهای لوله‌یی و نیز با استفاده از آن‌ها در ۲ حالت سه‌تایی و تک در طول ۲۵ ثانیه‌ی اول، در ۲ حالت محاسبه شده است:

الف) تیر سخت: در تیرهای سخت، که منظور همان تیرهای طراحی‌شده با ۱۰۰٪ نیروهای دینامیکی وارد شده است؛ سختی EI و جرم واحد تیر $\overline{m}$ مطابق رابطه‌ی ۳۴ است:[۷]

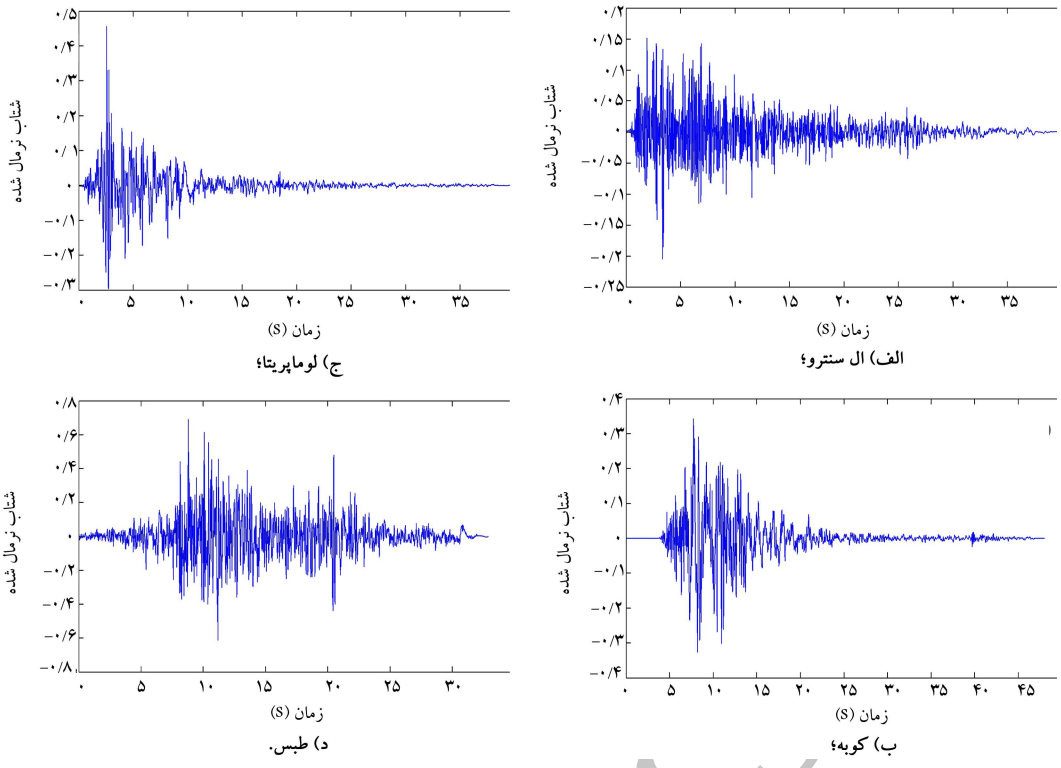
$$EI = ۳٫۴۶۷ \times ۱۰^{۱۰}\ \mathrm{N.m^{۲}}$$
$$\overline{m} = ۲۹۵۶\ \mathrm{Kg/m} \qquad (۳۴)$$

ب) تیر منعطف: تیرهای منعطف، که منظور تیرهای با مقاطع کوچک‌تر و سختی کمتر است، یعنی تیرهایی که از ابتدا با درنظرگرفتن حضور میراگر و کاهش نیروهای دینامیکی وارده طراحی شده‌اند؛ بنابراین ضریبی مابین ۰٫۵ تا ۱ از تیر سخت است، که با سعی و خطا معادل ۷۰٪ مقطع تیر سخت انتخاب شده است (رابطه‌ی ۳۵):

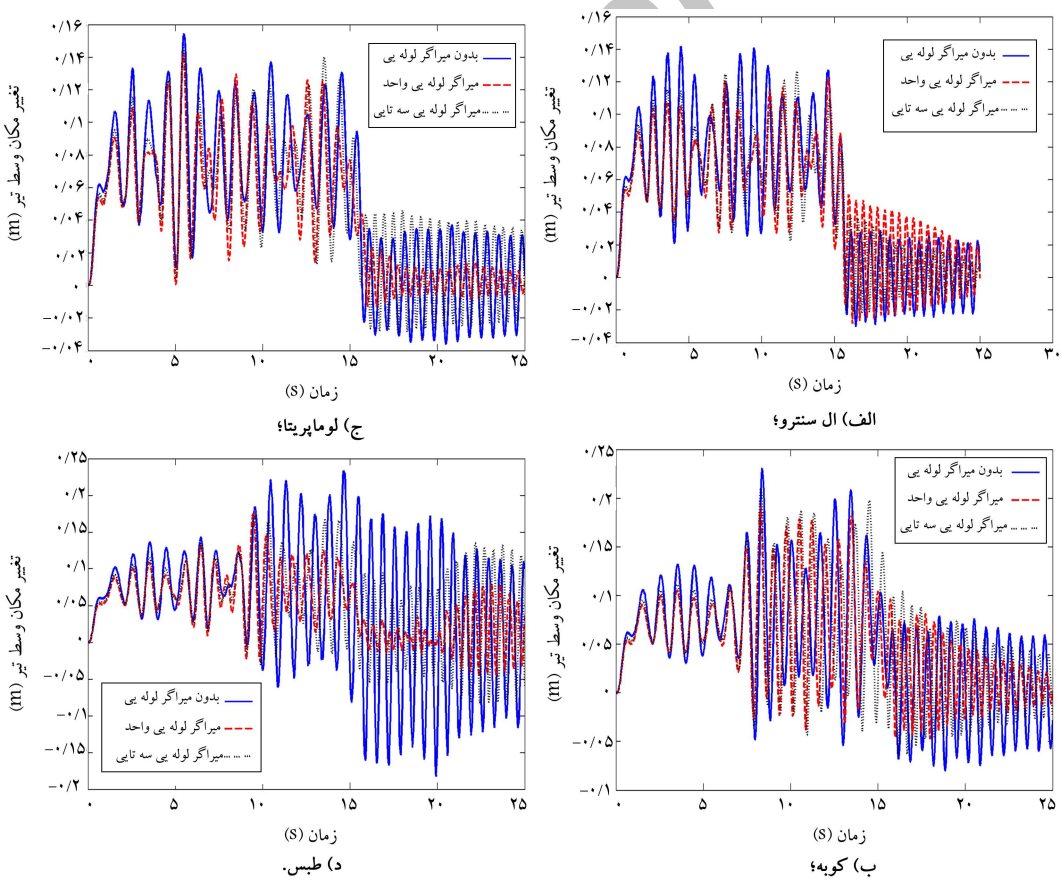
$$EI = ۳٫۴۶۷ \times ۱۰^{۱۰} \times ۰٫۷ = ۲٫۴۲۷ \times ۱۰^{۱۰}\ \mathrm{N/m}$$
$$\overline{m} = ۲۹۵۶ \times ۰٫۷ = ۲۰۶۹٫۲\ \mathrm{Kg/m} \qquad (۳۵)$$

نتایج به دو گروه تیرهای سخت و منعطف تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل ۷، تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی در وسط دهانه را برای تیرهای سخت نشان داده است، که نمودارها برای هر کدام از زلزله‌ها، نتایج را به‌صورت عدم استفاده از میراگرها، کاربرد سه‌تایی آن‌ها و آرایش واحد نمایش داده است. جدول ۱، نیز شامل نتیجه‌ی بیشینه‌ی جابه‌جایی، بیشینه‌ی نیرو، و نیز میزان تغییر هر کدام به ازاء استفاده از میراگرهای

Archive of SID
www.SID.ir

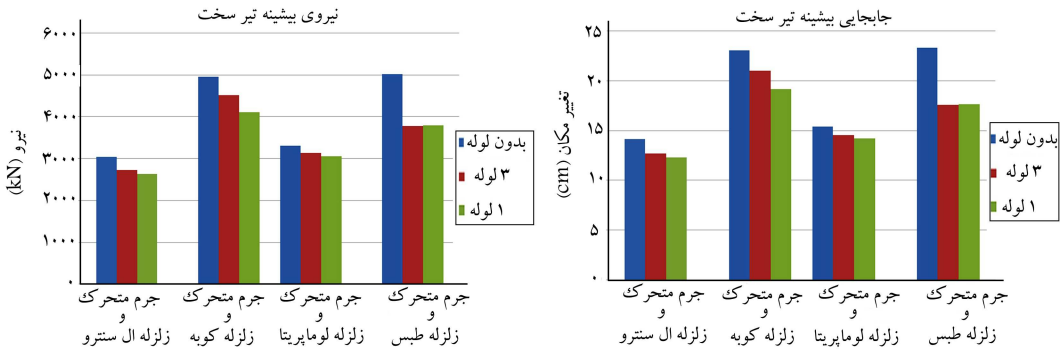


شکل ۶. شتاب‌نگاشت مؤلفه قائم زلزله‌های مورد مطالعه.

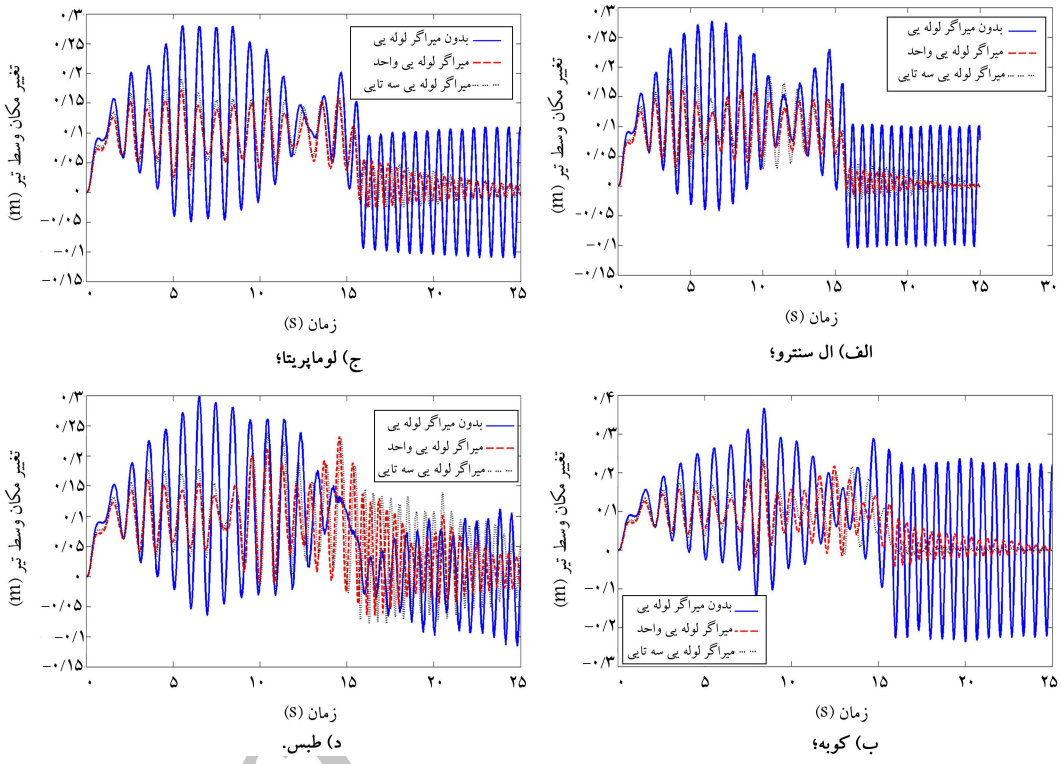


شکل ۷. نمودار جابه‌جایی ـ زمان وسط دهانه تیر سخت تحت زلزله قائم و اجرام محرک.

www.SID.ir



شکل ۸. نمودار میله‌یی بیشینه نیرو و جابه‌جایی در وسط دهانه تیر سخت.



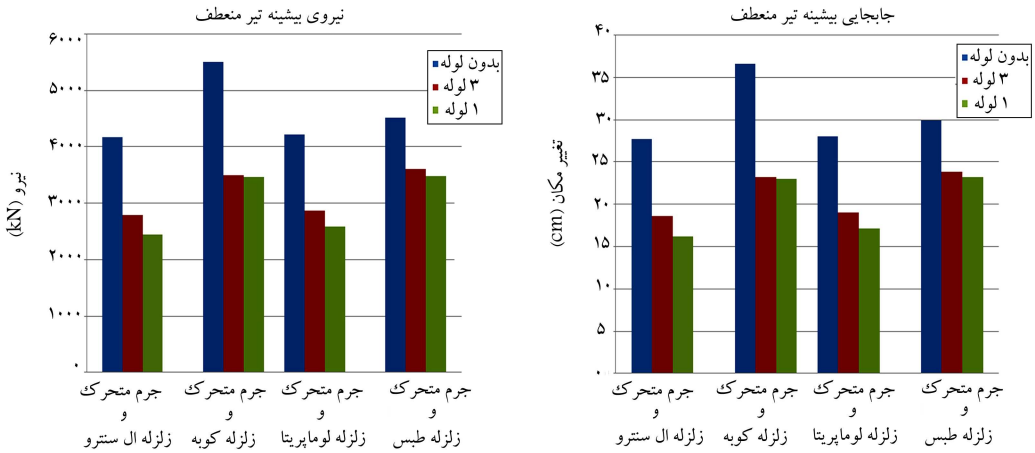
شکل ۹. نمودار جابه‌جایی ـ زمان وسط دهانه تیر منعطف تحت زلزله قائم و اجرام محرک.

لوله‌یی در آرایش‌های مختلف در تیرهای سخت است. در تیرهای سخت، استفاده از میراگرهای لوله‌یی، پاسخ‌ها را شامل: بیشینه‌ی جابه‌جایی، تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی، و بیشینه‌ی نیروی وارده به تیر حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد کاهش داده است. در مورد آرایش لوله‌ها نیز آرایش تکی در وسط دهانه، پاسخ‌ها را به میزان بیشتری کاهش داده است. در شکل ۸، بیشینه‌ی جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر و بیشینه‌ی نیرو برحسب کیلونیوتن برای حالت‌های بدون استفاده از میراگر، استفاده از ۳ میراگر و استفاده از میراگر واحد در تیرهای سخت برای هرکدام از ۴ حالت بارگذاری به‌صورت نمودار میله‌یی نشان داده شده است. در تیرهای منعطف نیز نتایج به‌صورت نمودار جابه‌جایی در وسط دهانه برحسب زمان برای حالات مختلف بارگذاری و کاربرد میراگرها در شکل ۹ به نمایش درآمده است. جدول ۲، نیز خلاصه‌ی نتایج را برای تیرهای منعطف بازتاب داده است که در آن پاسخ‌ها به میزان ۲۰ الی ۴۰ درصد بدون هیچ‌گونه استثنایی کاهش یافته‌اند. در مورد آرایش لوله‌ها در تیرهای منعطف نیز در همه‌ی نمونه‌ها، استفاده از آرایش استفاده از میراگر لوله‌یی تک در وسط دهانه (جایی که بیشترین جابه‌جایی را دارد)، نتیجه‌ی بهتری را در پی داشته است. شکل ۱۰، به ترتیب نمایانگر بیشینه‌ی جابه‌جایی برحسب سانتی‌متر و بیشینه‌ی نیرو برحسب کیلونیوتن برای حالت‌های بدون استفاده از میراگر، استفاده از ۳ میراگر، و استفاده از میراگر واحد در تیرهای منعطف برای هر ۴ حالت بارگذاری به‌صورت نمودار میله‌یی است.

۵. نتیجه‌گیری

ابتدا نسبت به تحلیل تیرهای سازه‌ی پل تحت تأثیر هم‌زمان جرم‌های محرک و مؤلفه‌ی قائم زلزله با استفاده از معادلات حاکم بر آن‌ها اقدام شده است. نتایج بیان‌گر اثر غیرقابل انکار مؤلفه‌ی قائم زلزله در بررسی نیروهای دینامیکی روی تیرهای سازه‌ی پل و لزوم درنظرگرفتن اثر آن‌هاست. همچنین نتایج و بررسی‌های حاصل

www.SID.ir



شکل ۱۰. نمودار میله‌یی بیشینه نیرو و جابه‌جایی در وسط دهانه تیر منعطف.

جدول ۱. نتایج تیر سخت ۶۰ متری.

شماره	طول دهانه L (متر)	نوع بار	نوع دمپر	بیشینه‌ی جابه‌جایی در وسط دهانه (متر)	بیشینه‌ی نیرو در وسط دهانه (نیوتن)	میزان کاهش نیرو و جابه‌جایی (درصد)
۱	۶۰	زلزله Elcentro + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۱۴۱۷	۳۰۴۸۹۲۵	—
۲	۶۰	زلزله Elcentro + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۱۲۶۶	۲۷۲۴۰۲۲	۱۱
۳	۶۰	زلزله Elcentro + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۱۲۲۷	۲۶۴۰۱۰۷	۱۳٫۵
۴	۶۰	زلزله Kobe + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۲۳۰۲	۴۹۵۳۱۶۰	—
۵	۶۰	زلزله Kobe + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۲۰۹۹	۴۵۱۶۳۷۰	۸٫۳
۶	۶۰	زلزله Kobe + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۱۹۱۳	۴۱۱۶۱۵۹	۱۷
۷	۶۰	زلزله Lomaprieta + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۱۵۴۱	۳۳۱۵۷۳۵	—
۸	۶۰	زلزله Lomaprieta + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۱۴۵۶	۳۱۳۲۸۴۳	۵٫۵
۹	۶۰	زلزله Lomaprieta + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۱۴۱۸	۳۰۵۱۰۷۹	۸
۱۰	۶۰	زلزله Tabas + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۲۳۳۳	۵۰۱۹۸۶۷	—
۱۱	۶۰	زلزله Tabas + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۱۷۶	۳۷۸۶۹۵۶	۲۴٫۵
۱۲	۶۰	زلزله Tabas + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۱۷۶۶	۳۷۹۹۸۶۶	۲۴٫۳

جدول ۲. نتایج تیر منعطف ۶۰ متری.

شماره	طول دهانه L (متر)	نوع بار	نوع دمپر	بیشینه‌ی جابه‌جایی در وسط دهانه (متر)	بیشینه‌ی نیرو در وسط دهانه (نیوتن)	میزان کاهش نیرو و جابه‌جایی (درصد)
۱	۶۰	زلزله Elcentro + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۲۷۷۱	۴۱۷۳۶۰۷	—
۲	۶۰	زلزله Elcentro + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۱۸۵۷	۲۷۹۶۹۶۵	۳۳
۳	۶۰	زلزله Elcentro + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۱۶۲۳	۲۴۴۴۵۲۰	۴۱٫۴
۴	۶۰	زلزله Kobe + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۳۶۶۱	۵۵۱۴۱۰۴	—
۵	۶۰	زلزله Kobe + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۲۳۲۳	۳۴۹۸۸۴۳	۳۶٫۵
۶	۶۰	زلزله Kobe + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۲۲۹۷	۳۴۵۹۶۸۳	۳۷٫۳
۷	۶۰	زلزله Lomaprieta + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۲۸۰۱	۴۲۱۸۷۹۶	—
۸	۶۰	زلزله Lomaprieta + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۱۹۰۷	۲۸۷۲۲۷۶	۳۲
۹	۶۰	زلزله Lomaprieta + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۱۷۱۷	۲۵۸۶۱۰۳	۳۸٫۷
۱۰	۶۰	زلزله Tabas + جرم محرک	بدون لوله	۰٫۲۹۹۵	۴۵۱۰۹۹۸	—
۱۱	۶۰	زلزله Tabas + جرم محرک	۳ لوله	۰٫۲۳۸۸	۳۵۹۶۷۵۰	۲۰٫۵
۱۲	۶۰	زلزله Tabas + جرم محرک	۱ لوله	۰٫۲۳۱۷	۳۴۸۹۸۱۲	۲۲٫۶

Archive of SID
www.SID.ir

منتج به این موضوع می‌شود که در کاربرد صحیح از میراگرهای لوله‌یی، به‌واسطه‌ی کاهش مقاطع در تیرهای پل‌ها، میزان قابل‌توجهی صرفه‌ی اقتصادی را به دنبال خواهد داشت. منظور از کاربرد صحیح مطابق نتایج و مقایسه‌ی آن‌ها، استفاده از میراگرهای لوله‌یی و جایگذاری آن‌ها در محلی از تیر است که بیشترین جابه‌جایی را در پی خواهد داشت. در تیر موردمطالعه در این نوشتار، اهمیت جایگذاری لوله‌ها در وسط دهانه‌ی تیر دو سر ساده در مقایسه با آرایش سه‌تایی آن‌ها به‌خوبی مشخص است.

همچنین به‌منظور کاهش مقاطع می‌توان سازه‌ی تیرهای پل را برای ضریب کمتری از بارگذاری اولیه در مرحله‌ی نخست طراحی کرد و با به‌کارگیری میراگرهای لوله‌یی در محل مناسب، تیر را برای بارگذاری کامل کنترل کرد و تا به‌دست‌آمدن مقطع بهینه، این چرخه را ادامه داد. چرا که مطابق انتظار و نتایج تحلیل این پژوهش، هر چه سختی سازه‌ی اصلی کمتر باشد، کارایی میراگرها نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، توجه به طراحی تیرهای پل‌های چنددهانه با درنظرگرفتن استفاده از میراگرهای لوله‌یی به‌منظور کاهش مقاطع، هر چه بیشتر ضروری می‌شود.

پانوشت‌ها

1. peak ground acceleration
2. design basis earthquake
3. maximum credible earthquake
4. Imperial Valley
5. Elcentro
6. Kobe
7. Loma Prieta
8. Corralitos
9. Tabas

منابع (References)

1. Fry'ba, L. and Yau, J. "Suspended bridges subjected to moving loads and support motions due to earthquake", *Journal of Sound and Vibration*, **319**(1-2), pp. 218-227 (2009).
2. Nikkhoo, A., Rofooei, F.R. and Shadnam, M.R. "Dynamic behavior and modal control of beams under moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, **306**(3-5), pp. 712-724 (2007).
3. Kiani, K., Nikkhoo, A. and Mehri, B. "Prediction capabilities of classical and shear deformable beam models excited by a moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, **320**(3), pp. 632-648 (2009).
4. Zarfam, R., Khaloo, A.R. and Nikkhoo, A. "On the response spectrum of Euler-Bernoulli beams with a moving mass and horizontal support excitation", *Mechanics Research Communications*, **47**, pp. 77-83 (2013).
5. Liu, M.F., Chang, T.P. and Zeng, D.Y. "The interactive vibration behavior in a suspension bridge system under moving vehicle loads and vertical seismic excitations", *Applied Mathematical Modelling*, **35**(1), pp. 398-411 (2011).
6. Konstantakopoulos, T.G., Raftoyiannis, I.G. and Michaltsos, G.T. "Suspended bridges subjected to earthquake and moving loads", *Engineering Structures*, **45**, pp. 223-237 (2012).
7. Legeron, F. and Neaz Sheikh, M. "Bridge support elastic reactions under vertical earthquake ground motion", *Engineering Structures*, **31**(10), pp. 2317-2326 (2009).
8. Maleki, SH. and Bagheri, S. "Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study", *Journal of Constructional Steel Research*, **66**(8-9), pp. 1088-1095 (2010).
9. Maleki, SH. and Bagheri, S. "Pipe damper, Part II: Application to bridges", *Journal of Constructional Steel Research*, **66**(8-9), pp. 1096-1106 (2010).
10. Nikkhoo, A. "Investigating the behavior of smart thin beams with piezoelectric actuators under dynamic loads", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **45**(2), pp. 513-530 (2014).
11. Fryba, L., *Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads*, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic 1 (1972)
12. AASHTO, *AASHTO LFRD Bridge Design Specifications*, Washington DC (USA), American Association of State Highway and Transportation Officials (2007).
13. CAN/CSA-S6-06, *Canadian Highway Bridge Design Code*, Toronto (Ontario, Canada), CSA International (2006).
14. EN1998-2:2005, *Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 2: Bridge*, Brussels, European committee for Standardization (2005).
15. Caltrans, California Department of Transportation, California (USA), 1, 2 (1972).
16. Ahmadi, G. "Earthquake response of linear continuous systems", *Nuclear Engineering and Design*, **50**(2), pp. 327-345 (1978).
17. Nikkhoo, A., Farazandeh, A. and Ebrahimzadeh Hassanabadi, M. "On the computation of moving mass/beam interaction utilizing a semi-analytical method", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **38**(3), pp. 761-771 (2014).

Archive of SID

www.SID.ir