عملکرد پل‌های کابلی در طول زلزله

پل‌های کابلی در مقایسه با سایر انواع پل‌ها، عملکرد بهتری در طول زلزله دارند. نقاطی در کابل‌ها وجود دارد که در مقابل زلزله ضعیف هستند. این نقاط هنگام وقوع زمین‌لرزه، باعث وارد شدن آسیب به سازه پل می‌شوند.

تصور بسیاری از مهندسان پل‌سازی بر این است که پل‌های کابلی موجود زمین‌لرزه‌های شدید را تجربه نخواهند کرد، بنابراین، منطقی این است که نقاط ضعف تحت بررسی قرار گیرند. یکی از دلایل این است که هیچ تکنیک مقاوم‌سازی مناسبی وجود ندارد. دلیل دیگر این است که برای ساخت پلی مقاوم در برابر زمین‌لرزه هیچ راهی به جز بررسی نقاط ضعف کابل‌ها به لحاظ لرزه‌ای نداریم.

در ادامه درباره آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های کابلی بحث خواهیم کرد.

شکل ۱: پل کابلی

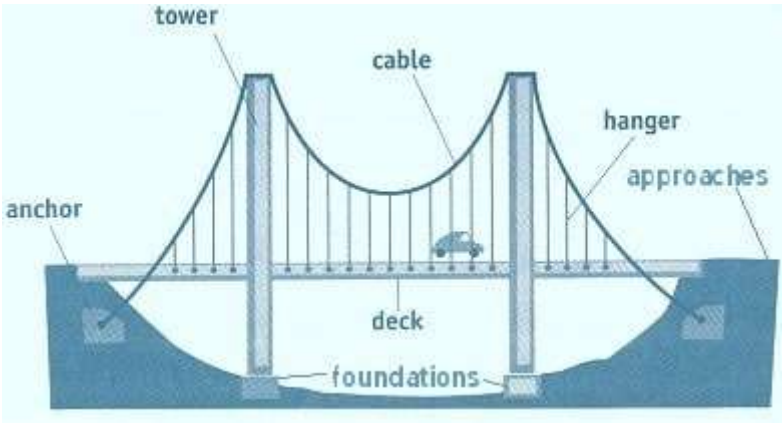
عملکرد پل‌های کابلی در طول زلزله

عملکرد انواع پل‌های کابلی در هنگام وقوع زمین‌لرزه موضوع بحث است:

- پل‌های معلق
- پل‌های کابلی
- پل‌های در حال ساخت

عملکرد پل‌های معلق در طول زلزله

آسیب‌پذیری لرزه‌ای را در قسمت‌های مختلف یک پل معلق می‌توان مشاهده کرد. در مورد این بخش‌ها در ادامه صحبت خواهد شد. شکل ۲ قسمت‌های مختلف یک پل معلق را نشان می‌دهد.



شکل ۲: قسمت‌های مختلف یک پل معلق

عملکرد برج‌های پل‌های معلق در طول زلزله

این برج‌ها اولین اعضا در پل‌ها هستند که در معرض نیروهای باید قرار می‌گیرند. این برج‌ها در اکثر موارد از فولاد ساخته می‌شوند. صفحات برج‌ها، نقطه ضعف آن‌ها در حین زلزله هستند.

صفحات برج‌ها مقاوم نیستند و به همین دلیل دچار کمانش می‌شوند. کمانش شفت برج که عمدتاً تکیه‌گاه بارها محسوب می‌شوند، یکپارچگی کل سازه را به مخاطره می‌اندازد.

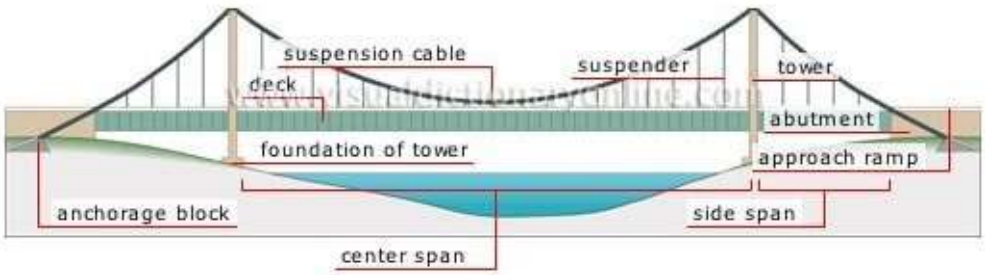
دلیل شکست، تنها جابجایی زیاد برج نیست و اثر پی- دلتا نیز به‌طور قابل‌توجهی بر این امر اثر می‌گذارد.

در طول زلزله، امکان آپلیفت فونداسیون وجود دارد و در نتیجه برج به سمت عقب و جلو یا به طرفین حرکت می‌کند. اگر یک طرف شقت از پایه پل جدا شود، بارها به نقطه‌ای خارج از نقطه اصلی اعمال خواهند شد.

بنابراین، بار فشاری روی شفت برج به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و در نهایت شفت برج دچار کمانش می‌شود. شکل ۳ قسمت‌های مختلف یک پل معلق را نشان می‌دهد.

یک اقدام عملی برای جلوگیری از این نوع شکست‌ها، قرار دادن سخت‌کننده‌های عمودی در ورق‌های غیر فشرده برج‌ها است.

شفت فولادی برج توسط پدستال‌های بتنی پشتیبانی می‌شوند. پدستال‌های بتنی در معرض خمش‌های موضعی بزرگ و تکان‌های بسیار زیاد می‌شود. به همین دلیل ممکن است پدستال‌ها دچار ترک‌های ناشی از تنش و احتمالاً ورقه شدن کاور بتنی شوند راهکار مناسب برای مقابله با این مشکل استفاده از استرندهای پیش‌تنیده است.



شکل ۳: قسمت‌های مختلف یک پل معلق

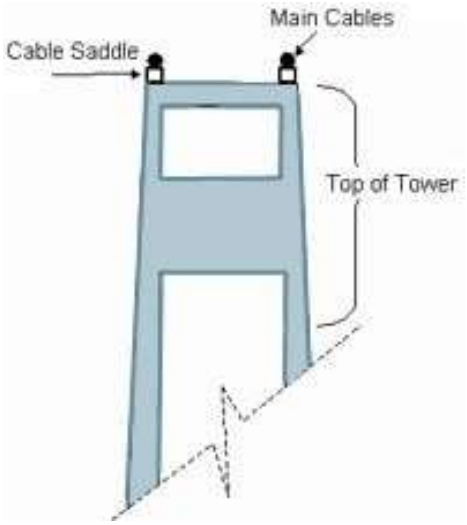
شکل ۴: پل معلق

عملکرد سیستم‌های معلق در طول زلزله

مقاوم‌ترین قسمت یک پل معلق به لحاظ مقاومت در برابر زمین‌لرزه، سیستم معلق آن است که شامل بست سدل‌ها (قسمت زین اسبی)، بست کابل‌ها، کابل‌های معلق عمودی و کابل‌های اصلی می‌شود.

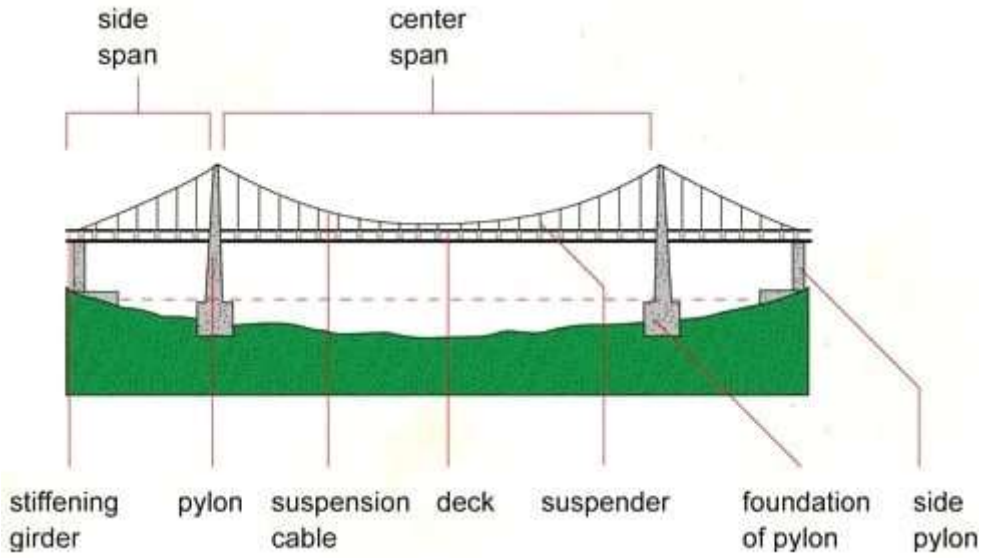
ظرفیت مقاومت در برابر تکان‌های ناشی از زمین‌لرزه ممکن است ناشی از ضریب اطمینان بالای کابل‌ها در فاز طراحی و جذب قابل‌توجهی از تکان‌ها به‌واسطه انعطاف‌پذیری کابل‌ها است.

بزرگ‌ترین نقطه ضعف سیستم معلق در طول زلزله، لغزش اتصال بین سدل کابل‌ها و برج پل است. آسیب‌پذیری لرزه‌ای ناشی از تغییر شکل بزرگ و زاویه زیاد بین دهانه اصلی و دهانه‌های مجاور است.



شکل ۵: بست سدل کابل‌ها

شکل ۶: سدل کابل‌ها

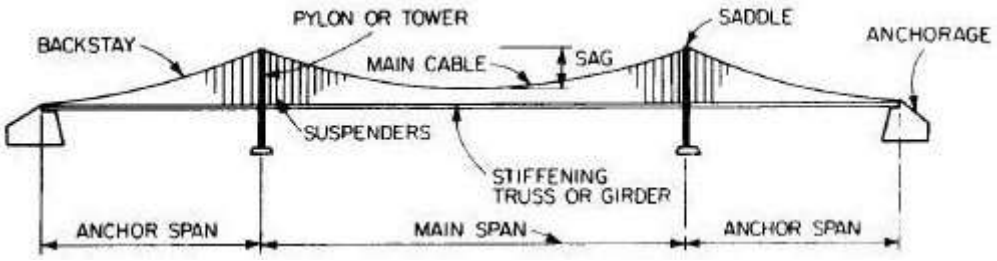


شکل ۷: دهانه اصلی و دهانه مجاور پل

عملکرد شاه‌تیرهای سخت‌کننده در طول زلزله

شاه‌تیرهای سخت‌کننده، ضعیف‌ترین قسمت پل‌های معلق هستند. هدف اصلی از شاه‌تیرهای سخت‌کننده، مقاومت در برابر بارهای زنده و بار باد است؛ بنابراین، در صورتی که نیروهای لرزه‌ای بیشتر از بار باد باشند، این المان‌ها با تخریب فراوان ای روبرو خواهند شد.

برای پل‌هایی که با عمر زیاد طراحی می‌شوند، شاه‌تیرهای سخت‌کننده به شکل خرپا ساخته خواهند شد. مهاربندهای جانبی و اتصالات آن‌ها بیشترین خسارت را در طول زمین‌لرزه متحمل می‌شوند؛ بنابراین، مقاوم‌سازی مهاربندهای جانبی و اتصالات راه‌حل خوبی در جهت بهسازی لرزه‌ای محسوب می‌شود.



شکل ۸: قسمت‌های مختلف پل معلق

شکل ۹: شاه‌تیرهای سخت‌کننده پل گلدن گیت، تقریباً ۵۰ درصد از مهاربندهای جانبی بالا و اتصالات نیاز به مقاوم‌سازی دارند.

عملکرد فونداسیون در طول زلزله

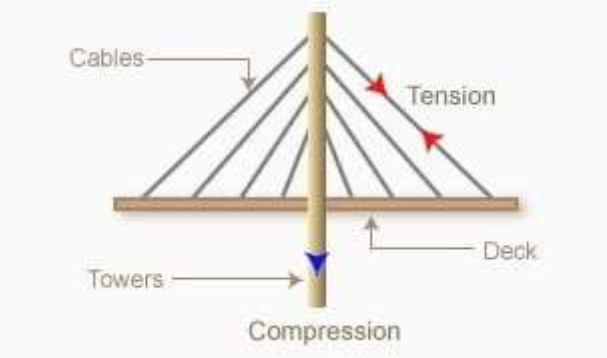
روانگرایی خاکی که فونداسیون روی آن اجرا شده است، خطرناک‌ترین منشأ خسارت هنگام وقوع زمین‌لرزه است. از این رو، این مسئله برای خاک‌هایی که مستعد روانگرایی هستند بسیار مهم است. به همین منظور، تکنیک‌های متعددی همچون ستون سنگی و متراکم سازی را می‌توان برای مقابله با این مشکل استفاده کرد.

عملکرد پل‌های کابلی در طول زلزله

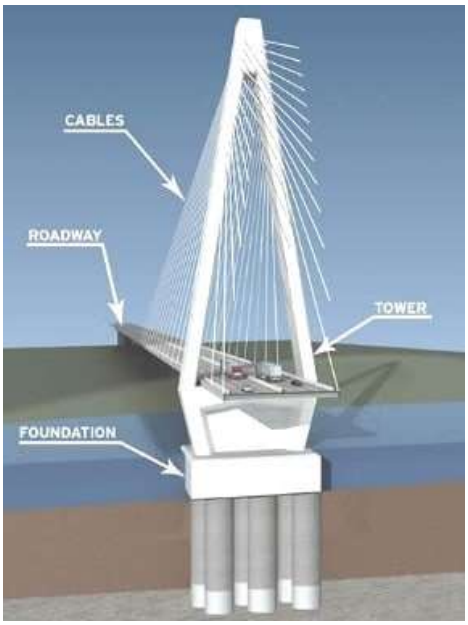
پل‌های کابلی تفاوت چشمگیری با پل‌های معلق ندارند. هر دو دهانه‌های مشابه به لحاظ طول و انعطاف‌پذیری دارند. اجزای تشکیل دهنده پل‌های معلق و پل‌های کابلی تقریباً مشابه هستند و از این رو، نقاط ضعف آن‌ها به لحاظ لرزه‌ای (کمانش برج‌ها و روانگرایی خاک) یکسان است.

همانند سیستم معلق در پل‌های معلق، سیستم ثابت و تکیه‌گاهی پل‌های کابلی هم مقاوم‌ترین قسمت پل‌های کابلی در هنگام وقوع زمین‌لرزه است. لازم به ذکر است که مقاومت برج‌ها در پل‌های کابلی در مقابل نیروهای لرزه‌ای بیشتر از مقاومت برج‌ها در پل‌های معلق در برابر زمین‌لرزه است.

دلیل این است که کابل‌ها مانند مهاربندها عمل می‌کنند. اگر از بتن در ساخت برج‌ها و پایه‌ها استفاده شده باشد، مقاومت این قسمت‌ها کمتر و در نتیجه آسیب‌پذیری بیشتری را در برابر زلزله متحمل خواهند شد.



شکل ۱۰: اعضای تشکیل دهنده پل کابلی



شکل ۱۱: اعضای تشکیل دهنده پل کابلی

شکل ۱۲: پل کابلی ریو انتی ریو در یونان

عملکرد لرزه‌ای پل‌ها در حین ساخت و ساز

بدیهی است که پل‌های در حال ساخت، ضعیف‌تر و آسیب‌پذیرتر هنگام وقوع زمین‌لرزه هستند و به همین دلیل خسارت‌های بیشتری را در مقایسه با پل‌های تکمیل شده متحمل می‌شوند. دلیل این است که این پل‌ها به‌سرعت تحت تأثیر نیروهای لرزه‌ای متوسط و یا حتی کوچک‌تر قرار می‌گیرند؛ بنابراین، باید اقداماتی در جهت محافظت از سازه در برابر نیروهای لرزه‌ای انجام شود. با توجه به این موضوع که تکان‌های ناشی از زمین‌لرزه و حرکت‌های ناشی از باد، به‌ندرت هم‌زمان اتفاق می‌افتند؛ در اغلب موارد اقدامی که مورد توجه قرار می‌گیرد، جلوگیری از اثرات ناشی از ارتعاش باد هنگام ساخت است. از این طریق می‌توان از اثرات مخرب نیروهای لرزه‌ای جلوگیری کرد.

مترجم: بهاره بهرامی

منبع:

https://theconstructor.org/structures/earthquake-cable-supported-bridges/16599/