

درس‌های آموخته شده از شکست پیچ‌های پل خلیج

بعضی از مسائل را تا زمانی که اتفاق نیفتند درک نمی‌کنیم. این موضوع در پل خلیج یا پل خلیج سان‌فرانسیسکو – اوکلند (SFOBB) صادق بود. این پل که روزانه بیش از ۲۴۰۰۰۰ وسیله نقلیه را از طریق راه بین ایالتی ۸۰ عبور می‌دهد، شبه جزیره‌ی سان‌فرانسیسکو را به شهر اوکلند و سمت غربی خلیج سان‌فرانسیسکو متصل می‌کند. گزارش‌های اولیه نشان داد که گالوانیزه کردن گرم به روش غوطه‌ور، باعث شکست بولت‌ها و خرابی شده بود. بعد از تحقیقات بیش‌تر مشخص شد که شکننده شدن به دلیل گالوانیزه شدن نبوده و مشکل بسیار پیچیده‌تری باعث این شکست شده است.

تاریخچه‌ی پل خلیج

در سال ۱۹۸۹، مجموعه پل‌هایی که پل خلیج را تشکیل داده بودند، در طول زلزله‌ی شدید لوماپریتا، آسیب شدیدی دیدند. این زلزله، شهر و مناطق اطراف را لرزاند. بیشترین آسیب‌های شدید در جایی اتفاق افتاد که قسمت شرقی بالایی عرشه به دلیل رفت و آمد سنگین بر روی قسمت پائینی عرشه فرو ریخت و آسیب‌های شدیدی را به خودروهای در حال عبور وارد آورد و سبب کشته و مجروح شدن شمار زیادی از مردم گردید.

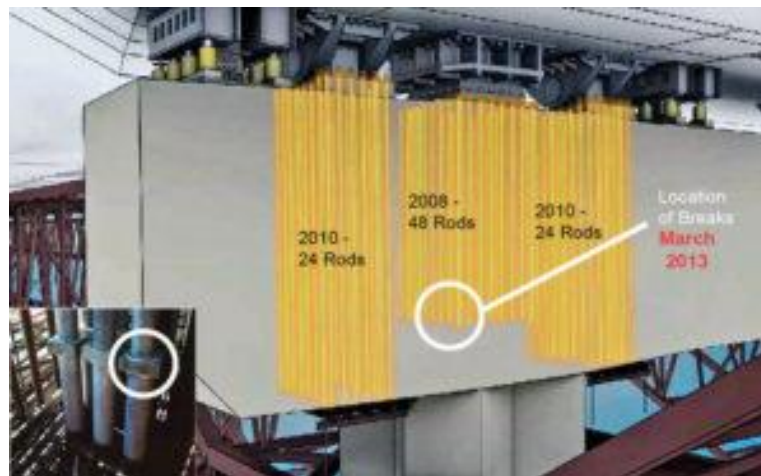


شکل ۱. پل خلیج سن فرانسیسکو – اوکلند

بعد از این زلزله بخش غربی پل در سال ۲۰۰۴ تحت بهسازی لرزه‌ای کامل قرار گرفت، به طوری که مقاومت پل در برابر زلزله و دیگر حرکات زمین افزایش یافت. در سال ۲۰۱۳ بخش شرقی پل کاملاً با یک پل معلق خود مهار (SAS) جایگزین شد و در سپتامبر همان سال هم افتتاح شد (شکل ۱). در این حالت کابل‌های پل بجای اتصال به زمین، به طور کامل به دو انتهای عرشه متصل می‌شوند. در نتیجه انعطاف پذیری بیشتری در طول فعالیت‌های لرزه‌ای به دست می‌آید. با این حال، یکی از مسائل پل‌های SAS، امکان وقوع تشدید تنش در طی یک رویداد لرزه‌ای است که طی آن کابل‌ها تحت تأثیر فشار بیشتری برای نگه داشتن پل قرار می‌گیرند.

طراحی جدید

طراحان و سازندگان پل، همیشه نگران حفظ پل تا بیشترین زمان ممکن، می‌باشند. برای مقابله با تشدید تنش‌ها و جبران پتانسیل تشدید هارمونیک عرشه‌ی پل، طراحان در طرح جدید یکسری کلید برشی را دهانه‌ی شرقی پل تعبیه کردند. کلیدهای برشی، بلوک‌های بتنی متکی به بولتهایی با قطر زیاد هستند. این پیچ‌ها از رده‌ی BD در آئین نامه‌ی ASTM A354 و در قطرهای ۲ الی ۴ اینچی ساخته شده و تحت گالوانیزه‌ی داغ غوطه‌ور نیز قرار گرفته‌اند. کلیدهای برشی انرژی لرزه‌ای منتقل شده به عرشه‌ی پل را تعدیل کرده و به جلوگیری از آسیب در طول زلزله کمک می‌کنند. آن‌ها برای پشتیبانی عرشه‌ی پل در نظر گرفته نشده و صرفاً موجب سرکوب نیروها در طی یک رویداد لرزه‌ای می‌گردند هر پیچ در کلید برشی برای برآورده نمودن حداقل مشخصات خواص مکانیکی، گرما دیده شده و جهت حفاظت در برابر خوردگی نیز آبکاری می‌گردد. این پیچ‌ها نه تنها در نصب کلید برشی جدید بلکه در طول طراحی پل خلیج مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آرماتورهای مهار، A354BD، طبق مقررات باید مقاومت کششی حداقل (F_u) 140000 psi برای بولتهایی با قطر بیش از ۲،۵ اینچ و سختی بین حداقل 31 HRC و حداکثر 39HRC را داشته باشند .



شکل ۲ (a و b). جاگذاری میل مهارهای مورد استفاده برای کلیدهای برشی، در زمانی که پیچ‌ها در موقعیت پایه‌ی E2 نصب گردیدند.

تصاویر 2a و 2b جانمایی آرماتورهای مهاری استفاده شده برای کلیدهای برشی را زمانی که اولین بار بولت‌ها در محل پایه‌ی E2 قرار گرفته بودند نشان می‌دهد. آرماتورهای مهاری در نوامبر ۲۰۰۸ در کلیدهای برشی نصب شدند و دوغاب ریزی آرماتورها در ژانویه ۲۰۱۳ شروع شد. با این وجود آرماتورهای مهاری تا مارس ۲۰۱۳ تحت کشش قرار نگرفته بودند، زیرا تا زمانی که سازه‌ی فوقانی پل در محل خود قرار نمی‌گرفت امکان نصب آن‌ها وجود نداشت. به همین دلیل، انتهای بسیاری از آرماتورهای مهاری تا قبل از آن که به درستی کشیده شوند، جهت نگهداری مهره‌ها دچار آسیب دیدگی می‌شده‌اند. بالای پیش از آن که سازه فوقانی پل نصب شود، ناحیه‌ی فوقانی غلاف لوله‌ی فولادی که نگه دارنده میل مهار کلیدهای برشی است، در معرض محیط قرار می‌گرفته است. این مسئله موجب ایجاد رواداری کمی مابین ناحیه‌ی فوقانی میله‌ها و کف پل می‌شده است.

علائم آغاز مشکل

زمانی که سازه‌ی بالایی پل در سال ۲۰۱۳ نصب شد و انتقال بار به پایان رسید شد، آرماتورهای مهاری تا ۷۰٪ مقاومت کششی نهایی خود (F_u) کشیده شدند. بعد از دو هفته قرار گرفتن در معرض کشش، ۳۲ مورد از ۹۶ آرماتور مهاری شکسته شد. زمانی که حد پیش تنیدگی به ۴۰٪ کاهش پیدا کرد، شکست آرماتورها متوقف شد زمانی که سطح پیش تنیدگی به ۴۰ درصد F_u کاهش پیدا کرد، شکست میله‌ها متوقف گردید. این امر منجر به کنار گذاشتن هر ۹۶ میله شد. یک سیستم مهاری جایگزین با موفقیت طراحی و نصب گردید.



شکل ۳. سطح شکست آرماتور مهاری کلید برشی ۲۰۰۸

با اینکه این میل مهارها دیگر قابل بهره برداری نبودند، اما خرابی‌شان نگرانی بزرگی درباره‌ی عملکرد طولانی مدت باقیمانده‌ی میله‌های A354BD در سراسر پل به وجود آورد. در اثر شکستگی به وجود آمده، سه بررسی متمرکز بر آزمایش متالورژی و تحلیل شکست بر روی دو آرماتور شکسته‌ی کلیدهای برشی شد. مشخص شد که خرابی میله‌ها در اثر شکست هیدروژنی بوده است. در نتیجه، دپارتمان حمل و نقل کالیفرنیا برنامه‌ی آزمایشی دیگری را برای بررسی بیشتر علل خرابی و ارزیابی میله‌های A354BD باقیمانده در سراسر پل به عهده گرفت.

بررسی شکست آرماتور کلید برشی

این بررسی که به فاصله‌ی کوتاهی بعد از کشیدن آرماتورهای کلید برشی شروع شد، شامل انجام آزمایش متالورژی و تحلیل شکست آرماتورها بود. این کار به وسیله‌ی سه محقق انجام شد. طرح این پل، رواداری کمی را مابین میل مهارها و سازه فوقانی

پل به وجود آورد. برای ادامه‌ی آزمایش، آرماتورها باید در مقطع‌های بسیار کوچک با کشیدن آن‌ها تا حد ممکن و بریدن آن‌ها برداشته می‌شدند. این فرآیند بسیار گسترده بود، بنابراین در نهایت آرماتورهای کمی برای مطالعه برداشته شدند.

اولین بسته از آرماتورهای A354BD که در کلیدهای برشی نصب شده بودند، به واسطه بررسی ذرات مغناطیسی (MPI) مورد آزمایش قرار نگرفتند، زیرا پیش از افزوده شدن شرط آزمایش MPI به قرارداد، نصب گردیده بودند. MP در بازرسی ذرات مغناطیسی به دنبال وجود ترک‌های کوچکی در میله‌ها هستیم. همه‌ی میله‌های A354BD پیش از ورود به حمام مذاب روی و با هدف ممانعت از شستشوی اسیدی، بر مبنای دستورالعمل پاک‌سازی SSPC No.10، با بلاست خشک تمیز شدند. به واسطه‌ی عدم استفاده از محلول اسیدی، هیچ گونه هیدروژنی نیز در میله‌ها نیز به وجود نیامد. در طی چهار ساعت پاک‌سازی با بلاست بر مبنای استانداردهای ASTM A123، میل مهارها گالوانیزه شدند. رزوه‌ی پیچ‌ها بر روی میله‌ها را می‌توان برید و یا برداشت و فرآیند عمل آوری گرمایی باید شامل فرو راندن آن‌ها در روغن نیز باشد.

بعد از اینکه بازرسی بصری انجام شد، بررسی‌ها به سمت استفاده از آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM) سطوح در جهت قطر آرماتور حرکت کرد. نتایج بر وجود ترک‌های بین دانه‌ای در نزدیکی ریشه‌ی رزوه شده تأکید دارد. با گسترش ترک‌ها و رسیدن آن به یک اندازه‌ی بحرانی، یک ترک سریع و ناگهانی به وجود می‌آید که به منزله‌ی عدم تحمل بیشتر بار وارده می‌باشد.

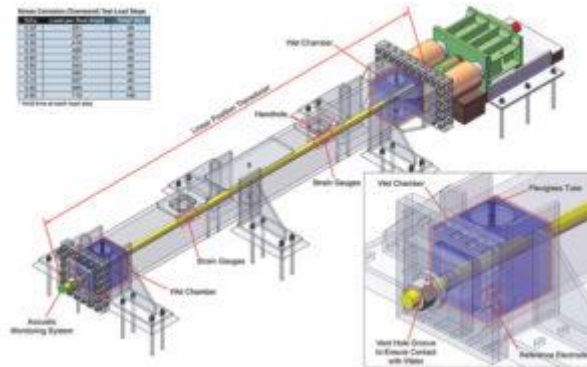
بر طبق نتایج تست‌های صورت گرفته بر روی مشخصه‌های مکانیکی، مقادیر سختی، مقاومت کششی نهایی، تحلیل شیمیایی و میکرو ساختار روکش‌های گالوانیزه‌ی داغ در محدوده‌ی ضوابط مد نظر قرار دارد. با این حال، پس از اجرای تحلیل‌های مبتنی بر تست شکاف V شاری، به این نتیجه رسیدیم که مقادیر حاصل از آزمایش (۱۸-۱۳) پائین تر از حد انتظار (۳۵-۲۵) می‌باشد؛ به این معنا که مصالح در دستیابی به مقاومت مورد انتظار ناتوان بوده و دچار ترد شدگی خواهند گردید. تست شکاف V شاری، به صورت یک تست ضربه‌ای بوده که مقدار انرژی جذب شده توسط مصالح را در طی یک شکاف مشخص می‌سازد.

نتیجه‌ی این مطالعه بیان می‌کند که دلیل، شکست شکنندگی هیدروژنی به همراه تجاوز بار اعمالی از حد آسیب پذیری مصالح آرماتور بوده است. آرماتورهای فولادی مقررات مناسب (A354BD) را برآورده کرده‌اند، اما ریزساختار آن‌ها یکنواخت نبوده است. ناهمگنی ریزساختار به سختی کم و شکنندگی مرزی منجر شده که باعث آسیب پذیر شدن آرماتورها در برابر شکنندگی هیدروژنی شده است.

ارزیابی میله‌های ترک خورده‌ی منتخب

پس از آن که نتایج تحلیل‌های اولیه بر روی میله‌های A354BD وجود علائم ترد شدگی هیدروژنی را نشان دادند، گروه‌های مختلفی که نقشی را در طراحی پل ایفا می‌نمودند، متوجه وجود پتانسیل ترد شدگی هیدروژنی در سایر میله‌های A354BD در مابقی قطعات پل گردیدند؛ بنابراین مطالعه‌ی دیگری برای تست میله‌ها در سرتاسر پل آغاز شد. به منظور اجرای تست‌های دقیق آزمایشگاهی و تعیین ترکیب شیمیایی، سختی و آسیب پذیری آن در برابر ترد شدگی هیدروژنی، میله‌های مختلف با اندازه‌ها و سطوح کشش و موقعیت متفاوت انتخاب شدند. کلیه‌ی تست‌های صورت گرفته بر روی مشخصه‌های مکانیکی نشان داد که مشخصه‌های مصالح عموماً یکنواخت بوده و در محدوده‌ی الزامات آئین نامه می‌باشند. به واسطه‌ی اجرای تست سختی دیگری در مقابل ضربه‌ی شاری، سطح سختی غالب میل مهارها در محدوده‌ی نرمال قرار گرفت. تنها آن دسته از تست‌هایی که بر روی میله‌های ۲۰۰۸ به انجام رسید، منجر به مقادیر سفتی کمتری شد.

پس از آن که این تست‌ها نتایج نرمالی را ارائه نمودند، تست تاونسند برای ارزیابی ترک‌های ناشی از خوردگی تنشی (SCC) بر روی میله‌های قطوری که حاصل از گروه‌های مختلفی از میله‌های منتخب قبلی بوده، صورت گرفت. در این تست، بار کششی به نحوی آرام و مرحله مرحله افزایش پیدا نمود تا به یک سطح بار حدی و مرحله‌ی شروع ترک خوردگی ناشی از ترد شدگی هیدروژنی برسیم (شکل ۴). این افزایش آرام از جهت زمان مورد نیاز برای شناسایی اثرات هیدروژن حائز اهمیت است. به منظور شناسایی مناسب بار حدی برای ورود هیدروژن به فولاد از محیط‌های خورنده (هیدروژن محیطی)، میله‌ها در حالی تحت بار ۱٫۸ میلیون پوند قرار می‌گیرند که در آب نمک محتوی سدیم کلرید ۳٫۵ درصد، غوطه‌ور می‌گردند.



شکل ۴. آزمایش تاونسند

نتایج این تست به قرار زیر است:

- میله‌های ۲۰۰۸ در اثر همان باری دچار ترد شدگی هیدروژنی گردیدند که منجر به خرابی پل با مشخصه‌های شکست مشابه شده بودند (این نتیجه مؤید آن است که تست تاونسند، به شکلی واقعی عملکرد میله‌ها را شبیه سازی می‌نماید).
- سطح شکست بر روی میله‌ها در زمانی ظاهر گردید که ترک آغاز شده بود. با پیشروی ترک‌ها، این سطوح شکست از حالت بین دانه‌ای به شکافت و در نهایت شکست‌های شکل پذیر بدل گردید که بر روی وجه مخالف ترک‌های اولیه رخ داده بود (این شکستگی‌ها در کلیه‌ی پیچ‌های ۲۰۰۸ ارزیابی شده، مشهود می‌باشد).
- پس از تست میله‌های باقی مانده، مشخص گردید که همه‌ی آن‌ها حاوی یکسری بار حدی هستند که بزرگ‌تر از بار طراحی‌شان بوده و بدین ترتیب، در برابر ترد شدگی هیدروژنی آسیب پذیر نمی‌باشند.

گام بعدی آن است که به وجود هیدروژن در فولاد و ارتباط یا عدم ارتباط آن با حد پائین میله‌های ترک خورده پی ببریم. تست تاونسند در هوا و بدون مواجهه با آب نمک تکرار می‌شود. این تست، بر عدم حضور کامل ترد شدگی هیدروژنی دلالت داشته و نتایج زیر را به دنبال دارد:

- شکست میله‌های ۲۰۰۸ در تست مرطوب تاونسند، ناشی از ترد شدگی هیدروژنی زیست محیطی بوده است.
- در صورت محافظت میله‌های ۲۰۰۸ در برابر آب نمک، امکان خرابی آن‌ها وجود نخواهد داشت.

پس از اجرای تست تاونسند، تست ریموند بر روی دو نمونه‌ی کوچک از میله‌های بزرگ مقیاس صورت گرفت. این تست، شامل یک فرآیند خم آزمایشگاهی آهسته با بار تدریجی است که امکان تعیین آسیب پذیری نسبت به ترد شدگی هیدروژنی را مهیا می‌سازد. نتایج آزمایش در تطابق با تست تاونسند بوده و مجدداً این نکته را به اثبات می‌رساند که خرابی حاصل از ترد شدگی

هیدروژنی در صورت مواجهه با محیط بیرونی رخ می‌دهد، نه هیدروژن داخلی. نتایج اصلی این مطالعه به قرار زیر است: میله‌های ۲۰۰۸ به علت ترد شدگی هیدروژنی و در ازای همان باری رخ می‌دهد که خرابی را برای پل به وجود آورده است (0.7Fu).

چکیده

بر طبق نتایج، هیچ معیاری مبنی بر تأثیر فرایند آبکاری (گالوانیزه) بر شکست میله‌ها از سال ۲۰۰۸ وجود نداشته است. حد ترد شدگی کم هیدروژن برای میله‌های آسیب دیده ناشی از روش‌های ساخت و عمل آوری گرمایی میله‌ها می‌باشد. طبق نتایج این مطالعه، آن دسته از میل مهارهای پل خلیج که در سال ۲۰۰۸ نصب گردیده، به علت ترد شدگی هیدروژنی ناشی از کشیدگی زیاد (فرا تر از حالت حدی) و در عین حال غوطه‌وری در آب، شکسته شدند. این مسئله موجب آن گردید که هیدروژن به فولاد راه یابد. هیچ شواهدی دال بر وجود هیدروژن در فولاد پیش از نصب یا کشش و همچنین، تأثیر هیدروژن داخلی بر شکست میله‌های A354BD وجود ندارد. کل میله‌های باقی مانده بر روی پل مورد آزمایش قرار گرفته و از حد ترد شدگی هیدروژنی بالاتری نسبت به سطوح تنش پیش تنیدگی برخوردار بوده و ایمن می‌باشد. میله‌های باقی مانده به نحوی طراحی می‌گردند که حاوی ابزارهای اضافی محافظت در برابر خوردگی اعم از سیستم رنگ آمیزی رطوبت زدا یا گروت باشند. کلیه‌ی این ابزارها مانع از خردشدگی و احتمال ترد شدگی هیدروژنی شده و روکش گالوانیزه را نیز سالم نگه می‌دارد.

بعلاوه، توسعه‌ی فرآیندهای نگهداری ویژه برای سیستم‌های محافظت در برابر خوردگی، اطمینان خاطری را برای کارفرمایان پل به وجود آورده و در دفترچه‌ی راهنمای نگهداری پل‌های معلق خود نگهدار (SAS) قید می‌گردد.

مترجم: پوریا نخعی

منبع:

<http://www.structuremag.org/?p=11041>