

Tuned Mass Damper

سیستم های میراگر جرمی تنظیم شده

مهدی وجودی

زمستان ۱۳۸۱

سیستم های میراگر جرمی تنظیم شده

معرفی

یک میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) ابزاری شامل جرم، یک فنر، و یک میراگر است که به سازه ای جهت کاهش پاسخ دینامیکی آن متصل میگردد. فرکانس میراگر به فرکانس سازه به گونه ای تنظیم میگردد که در آن فرکانس تحریک میگردد، میراگر در فاز مخالف شروع به ارتعاش نماید که بدین نحو انرژی بوسیله نیروی اینرسی میراگر که به سازه اعمال میگردد، کاهش می یابد. فرضیه میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) برای اولین بار توسط Frahm در سال ۱۹۰۹ برای کاهش حرکات سالن کشتی مورد استفاده قرار گرفت. بعدها تئوری TMD بوسیله Ormondroyd و Den Hartog در مقاله ای در سال ۱۹۲۸ ارائه گردید. که بوسیله بحثهای مفصلتری راجع به تنظیمات و پارامترهای میرائی بهینه در کتاب "ارتعاشات دینامیکی" آقای هارتوق پیگیری گردید (۱۹۴۰). تئوری اولیه برای یک سیستم یک درجه آزادی نامیرا تحت اثر بارهای سینوسی مورد استفاده قرار گرفت. تحقیقات مربوط به سیستم های یک درجه آزادی داری میرائی نیز بوسیله محققان زیادی از جمله Randall et al (۱۹۸۱)، (۱۹۸۰، ۱۹۸۱، ۱۹۸۲) Warburton و Tasi & Lin (۱۹۹۳) انجام پذیرفته است.

یک مثال برای معرفی

در این قسمت، میراگر جرمی تنظیم شده بوسیله سیستم دو جرمی در شکل (۱) نشان داده شده است. زیر نویس d به میراگر جرمی تنظیم شده اشاره میکند، و سازه به سازه یک درجه آزادی ایده آل سازی گردیده است.

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

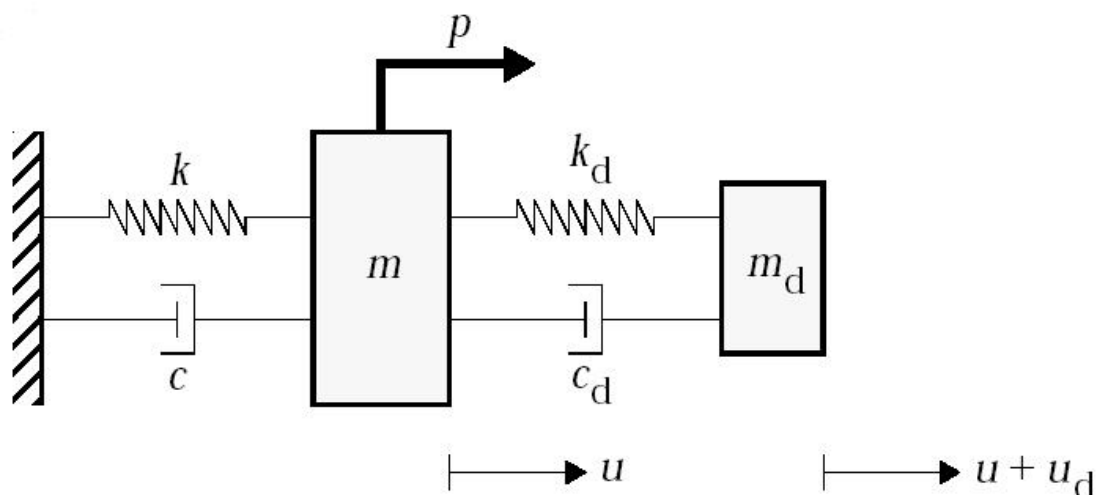
$$c = 2\xi\omega m$$

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d}$$

$$c_d = 2\xi_d\omega_d m_d$$

و نسبت جرمی به صورت مقابل تعریف میگردد ،

$$\bar{\omega} = \frac{m_d}{m} \quad (5)$$



شکل (1) : سیستم *SDOF-TMD*

معادله حرکت به صورت زیر خواهد بود :

$$\text{جرم اصلی} \quad (1 + \bar{m})\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = \frac{p}{m} - \bar{m}\ddot{u}_d \quad (6)$$

$$\text{جرم تنظیم شده} \quad \ddot{u}_d + 2\xi_d\omega_d\dot{u}_d + \omega_d^2 u_d = -\ddot{u} \quad (7)$$

هدف از اضافه کردن میراگر وزنی ، محدود کردن حرکت سازه تحت یک تحریک مشخص می باشد. طراحی میراگر وزنی شامل تعیین جرم ، سختی و ضریب میرایی است. انتخاب بهینه مقادیر در بخش ۴ مورد بحث قرار گرفته است. در این مثال، مقدار تخمینی نزدیک به مقدار بهینه برای فرکانس میراگر، فرکانسی برابر فرکانس سازه میباشد.

$$\omega_d = \omega \quad (8)$$

این مقدار برای نشان دادن مراحل طراحی انتخاب شده است. سختی متناظر با این فرکانس به صورت زیر است :

$$k_d = \bar{m}k \quad (9)$$

رابطه (۸) پریود میراگر را با پریود غالب سازه ، هماهنگ میکند.

با اعمال یک بار تناوبی :

$$p = \hat{p} \sin \Omega t \quad (10)$$

که پاسخ سیستم به وسیله روابط زیر بدست خواهد آمد :

$$u = \hat{u}(\sin \Omega t + \delta_1) \quad (11)$$

$$u_d = \hat{u}_d(\sin \Omega t + \delta_1 = \delta_2) \quad (12)$$

که مقدار \hat{u} و δ مقادیر بزرگنمایی دامنه و جابجائی فاز را مشخص میکنند. مقدار بار بحرانی حالتی است که پدیده تشدید اتفاق بیفتد، $\omega = \Omega$. حل این حالت به فرم زیر می باشد

$$\hat{u} = \frac{\hat{p}}{k\bar{m}} \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2\xi}{m} + \frac{1}{2\xi_d}\right)^2}} \quad (13)$$

$$\hat{u}_d = \frac{1}{2\xi_d} \hat{u} \quad (14)$$

$$\tan \delta_1 = -\left[\frac{2\xi}{m} + \frac{1}{2\xi_d}\right] \quad (15)$$

$$\tan \delta_2 = -\frac{\pi}{2} \quad (16)$$

توجه نمایید که پاسخ جرم تنظیم شده ۹۰ درجه با فاز پاسخ جرم اصلی تفاوت دارد. این تفاوت فاز باعث کاهش انرژی بوسیله جرم میراگر میگردد. پاسخ برای حالت بدون میرائی بصورت زیر است :

$$\hat{u} = \frac{\hat{P}}{k} \left(\frac{1}{2\xi}\right) \quad (17)$$

$$\delta_1 = -\frac{\pi}{2} \quad (18)$$

که برای مقایسه این دو حالت ، میتوان رابطه (۱۳) را به صورت میرائی معادل نوشت :

$$\hat{u} = \frac{\hat{P}}{k} \left(\frac{1}{2\xi_e}\right) \quad (19)$$

که در آن

$$\xi_e = \frac{\bar{m}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\xi}{m} + \frac{1}{2\xi_d}\right)^2} \quad (20)$$

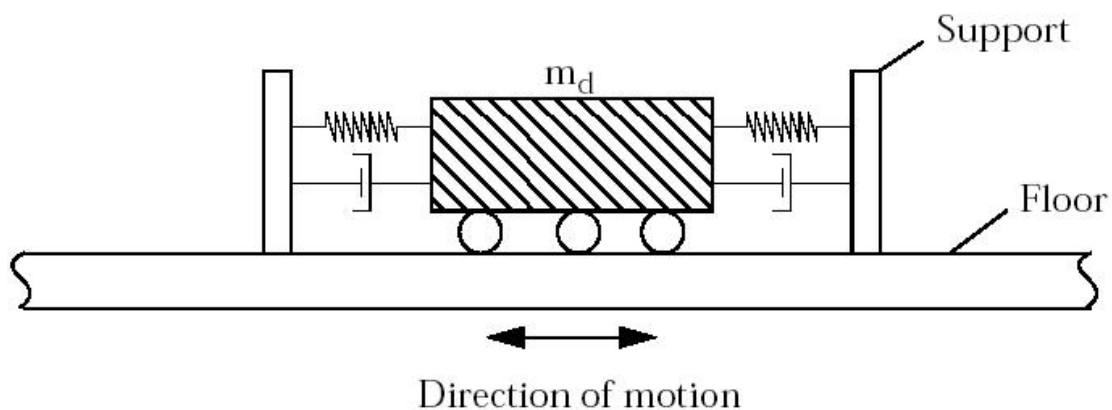
رابطه (۲۰) رابطه توزیع پارامترهای میرائی به میرائی کل را نشان میدهد. با افزایش نسبت جرم میرائی را افزایش میدهد. به هر حال از آنجا که اضافه کردن جرم میرائی را نیز افزایش می‌دهد، یک حد عملی برای \bar{m} وجود دارد. کاهش ضریب میرائی برای میراگر نیز، میرائی را افزایش می‌دهد، که در این حالت نیز همانند جرم، محدودیتی عملی بر جابجائی نسبی میراگر وجود دارد. انتخاب طرح نهایی، نیازمند ترکیب بین این دو محدودیت است.

مثالهایی از میراگرهای جرمی تنظیم شده موجود

با وجود اینکه اساس کاربرد این سیستم برای سیستم‌های مکانیکی بوده است، سیستم‌های میراگر جرمی تنظیم شده در سازه‌ها نیز برای بهبود پاسخ سیستم در مقابل تحریک نیروی باد نیز مورد استفاده قرار گرفته است. توضیحی مختصر در مورد انواع مختلف میراگرها و همچنین چندین سازه که این گونه میراگر در آنها مورد استفاده قرار گرفته است در زیر می‌آید.

۱- میراگر جرمی تنظیم شده جابجائی

شکل (۲) یک سرهم بندی معمول از میراگرهای جرمی تنظیم شده جابجائی، از نوع یک جهتی را نشان می‌دهد. جرم بر روی بلبرینگهایی که به مانند یک تکیه‌گاه غلطکی عمل میکنند، قرار می‌گیرد تا جرم اجازه جابجائی جانبی نسبی به طبقه را داشته باشد. فنرها و میراگرها بین جرم و تکیه‌گاههای ثابت عمودی که نیروی "فاز مخالف" میراگر را به تراز طبقه و در نتیجه به قاب سازه‌ای منتقل میکنند، قرار می‌گیرد. میراگرهای جابجائی دو جهته از فنرها و میراگرهایی که بصورت عمود بر در دو جهت قرار می‌گیرند تشکیل می‌شود و امکان کنترل حرکت سازه در دو جهت را تامین میکند. تعدادی از مثالهای قبلی از این نوع میراگر در زیر توضیح داده می‌شود.



شکل (۲) - دیاگرام شماتیک از میراگر جرمی تنظیم شده جابجائی

• برج جان هانکوک (John Hancock Tower)



دو میراگر به برج ۶۰ طبقه جان هانکوک در بوستن برای کاهش پاسخ سازه به نیروی باد نصب گردید. میراگرها در دو انتهای طبقه پنجاه و هشتم و به فاصله ۶۷ متر از هم نصب گردید. وزن هر میراگر ۲۷۰۰ کیلونیوتن و شامل جعبه فلزی پرشده از سرب به ابعاد ۵,۲ متر و به عمق ۱ متر بود که بر روی یک صفحه فلزی به طول ۹ متر نصب شده است. وزنه سربی، به صورت جانبی به

وسلیه فنرهای سختی که به ستونهای داخلی ساختمان قلاب شده‌اند، مهار و به وسیله استوانه های Servo-Hydraulic کنترل می‌گردد. این وزنه بر روی بلبرینگهای هیدرواستاتیک شامل لایه ای نازک از روغن، میتواند به جلو و عقب حرکت نماید.

هر موقع که شتاب جانبی در دو سیکل پیایی به $0.3g$ برسد، سیستم به صورت خودکار وارد عمل می‌شود. این سیستم به وسیله شرکت انجمن LeMessurier/SCI با همکاری MTS system corp. و با هزینه‌ای بالغ بر ۳ میلیون دلار ساخته شده و انتظار می‌رود که جابجائی ساختمان را بین ۴۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد.

• مرکز Citicorp

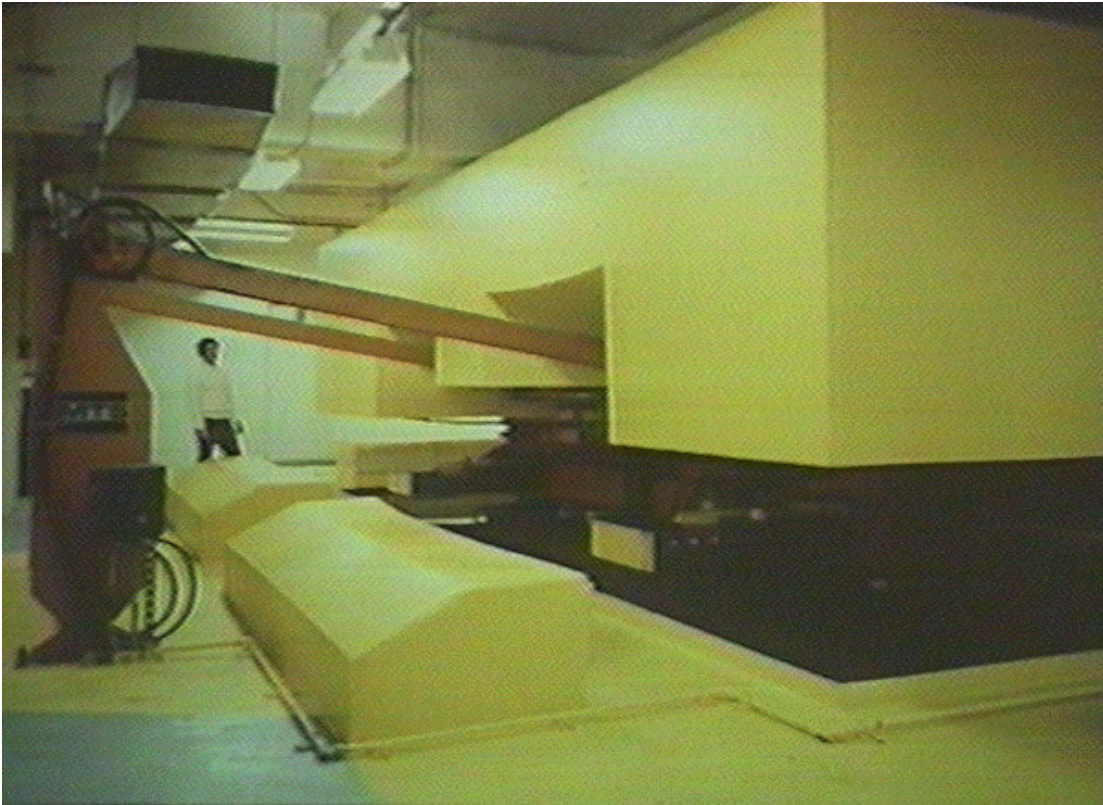


میراگر جرمی تنظیم شده
سیتی کورپ (مانهاتان) نیز به
وسایله انجمن
LeMessurier/SCI با همکاری
MTS system corp. طراحی و
ساخته شد. این ساختمان با ارتفاع
۲۷۹ متر دارای پیوند غالب ۶,۵
ثانیه و نسبت میرایی ۱ درصد در
طول هر محور می باشد. میراگر
جرمی تنظیم شده این ساختمان در
طبقه شصت و سوم در تاج سازه قرار
گرفته و جرمی برابر ۳۶۶Mg ، در
حدود ۲ درصد جرم مودی موثر در

مود اول می باشد که به هنگام نصب ۲۵۰ برابر بزرگتر از همه میراگرهای
جرمی موجود بود.

برای پاسخ در دو جهت سازه ساختمان با پیوند کاری متغیر
 $۶,۲۵S \pm ۲۰\%$ و میرایی خطی قابل تنظیم از ۰,۸٪ تا ۱,۴٪ و حداکثر جابجایی
نسبی $\pm ۱,۴\text{m}$ طراحی گردیده است. انتظار می رود این میراگر دامنه حرکت
سازه را تا ۵۰ درصد کاهش دهد. این کاهش دانه معادل است با اینکه میرایی
سازه را به ۴ درصد افزایش دهیم. بلوک بتونی دارای ارتفاعی در حدود ۲,۶ متر
و ابعاد ۹,۱ متر در ۹,۱ متر دارد و بر روی سری ۱۲ تایی از بلبرینگهایی به قطر
۶۰ سانتیمتر با فشار هیدرولیکی قرار دارد. در هنگام عمل، بلبرینگها روغن را
توسط پمپ هیدرولیکی جداگانه ای که می تواند بلوک جرمی را تا ۲ سانتیمتر
بلند کند دریافت میکنند و در ۳ دقیقه به ارتفاع عملکرد می رسد. سیستم
میراگر زمانی که شتاب افقی به $۰,۰۰۳\text{g}$ طی دو نوسان متوالی برسد، بصورت
خودکار وارد عمل می گردد و بصورت اتوماتیک زمانی که شتاب از $۰,۰۰۰۷۵\text{g}$

در زمان ۳۰ دقیقه بیشتر نگردد خاموش خواهد شد. LeMessurier تخمین میزند که سیتی کورپ با میراگر جرمی با هزینه ۱,۵ میلیون دلار، حدود ۳,۵ الی ۴ میلیون دلار صرفه جوئی کرده است. این مبلغ بر اساس هزینه ۲۸۰۰ تن فولاد سازه ای که برای تامین محدودیت جابجائی لازم بود برآورد میکند.



شکل (۳) - میراگر نصب شده در Citicorp tower

• برج ملی کانادا



آنتن ۱۰۲ متری فلزی بالای برج ملی کانادا در تورنتو (ارتفاع برج با آنتن ۵۵۳ متر) نیازمند ۲ دمپر برای جلوگیری از تغییر شکل زیاد آنتن بر مقابل نیروی باد بود. سیستم میراگر شامل دو حلقه فلزی به عرض ۳۵ سانتیمتر و ۳۰ سانتیمتر عمق و قطرهای ۲،۴ متر و ۳ متر است که در تراز ۴۸۸ متر و ۵۰۳ متر قرار گرفته است. هر حلقه حدود ۹ تن را نگه‌میدارد و به وسیله

سه تیر فلزی که به جوانب دکل آنتن متصل شده است.

چهار اتصال غلطکی که در همه جهات حرکت میکند، حلقه‌ها را به تیرها متصل مینماید. بعلاوه، چهار میراگر هیدرولیکی که در جانب دکل نسب شده و به مرکز هر کدام از اتصالها متصل میباشد، انرژی را از بین می‌برند. سیستم میراگر توسط شرکتهای Nicolet, Carrier, Dressel و Associates با همکاری Vibron Acoustics طراحی گردیده است. میراگرها برای مودهای دوم و چهارم تنظیم شده‌اند تا نیروهای خمشی آنتن را حداقل نمایند. مودهای اول و سوم همان مشخصاتی را دارا هستند که سازه بتنی پیش‌تنیده برای آنتن تامین میکند و نیاز به میرایی‌های اضافی نمیباشد.

• برج بندر Chiba



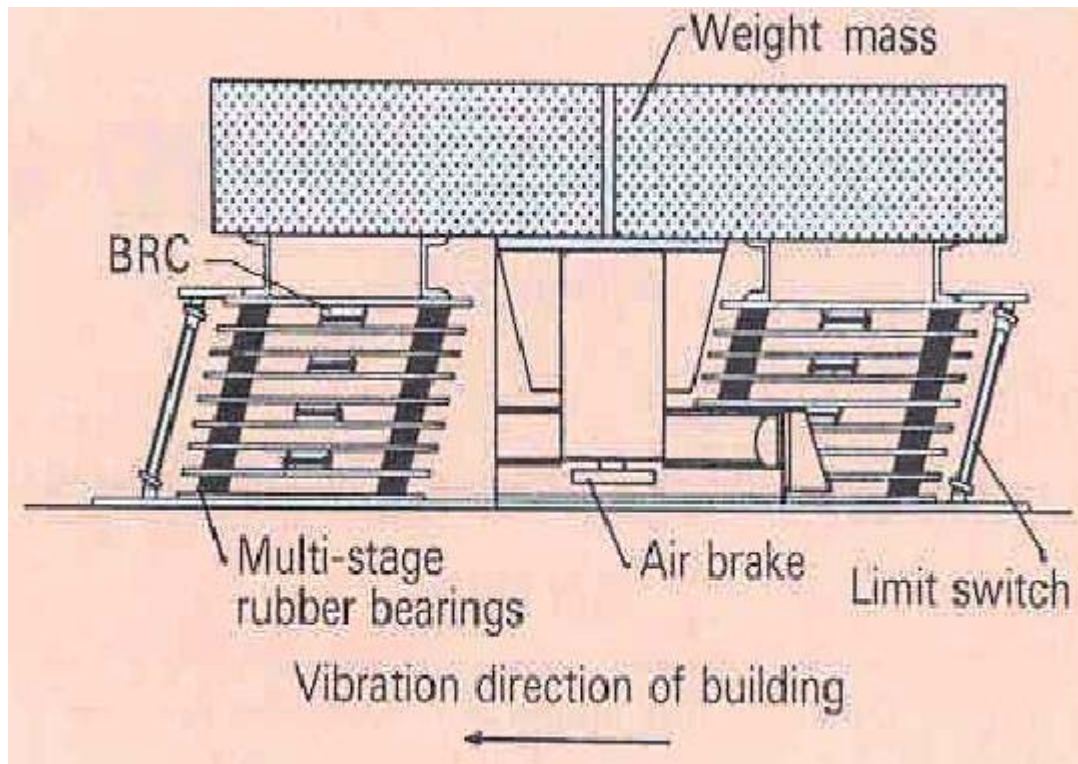
برج بندر چیبایا اولین برج در ژاپن می باشد که به TMD مجهز گردید. این برج یک سازه فلزی با ارتفاع ۱۲۵ متر و وزن ۱۹۵۰ تن متریک و شکل پلان rhombus و طول وجه ۱۵ متر میباشد. پریود مود اول و دوم ۲,۲۵ و ۰,۵۱ ثانیه در جهت X و ۲,۷ و ۰,۵۷ ثانیه در جهت Y میباشد. میرایی برابر ۰,۵ درصد تخمین زده می شود. هدف از نصب TMD افزایش میرایی مود اول در هم جهت X و هم در جهت Y بود. شکل (۴)

سیستم این میراگر را نشان می دهد. بوسیله کارخانه فلز میتسوبیشی ساخته شد.

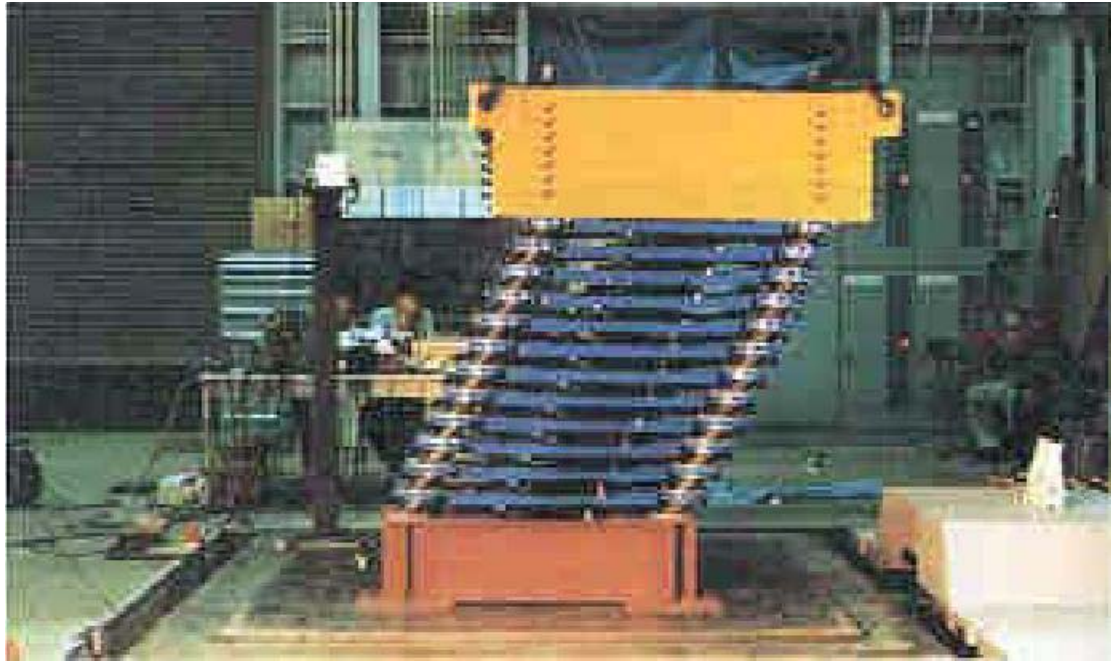


شکل (۴) - میراگر جرمی تنظیمی برای برج بندر چیبایا

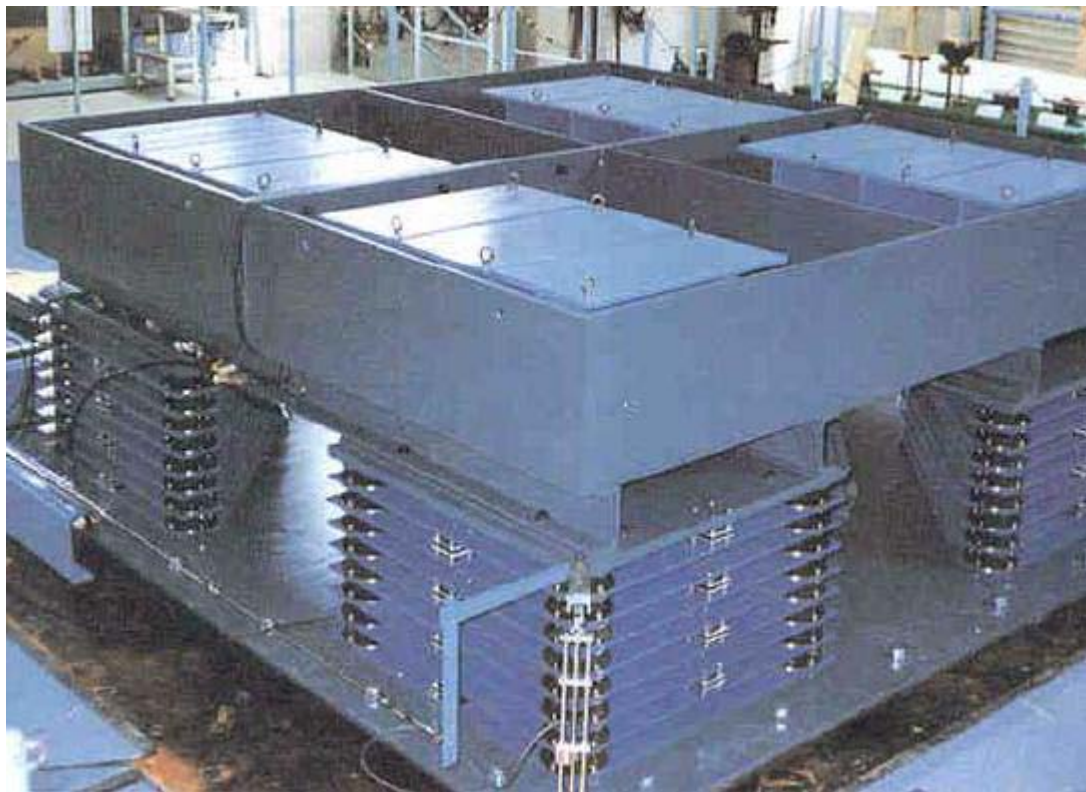
نسخه های اولیه میراگرهای جرمی تنظیم شده مکانیسم های پیچیده ای را برای غلتک و اجزای میراگراستفاده می کردند، نسبتا دارای جرمهای زیادی بودند، فضای زیادی را اشغال می کردند، و کاملا گران بودند. نسخه های اخیر، همانند آنچه که در شکل (۵) نشان داده شده است، بگونه ای طراحی شده اند که این محدودیتها را به حداقل برسانند. از یک غلتک لاستیکی که همانند فنرهای برشی عمل میکند، و نیز اجزایی از ترکیب لاستیک قیری (BRC) که تونایی میراگرهای ویسکو الاستیک را دارا هستند، استفاده می شود. این وسایل، دارای اندازه ای کوچک، نیاز به کنترلهای sophisticated ندارند، چند جهتی هستند، به آسانی نصب و استفاده می شوند. شکل (۶) یک میراگر با اندازه واقعی را که روی میز لرزان تحت آزمایش می باشد را نشان می دهد. و نصب عملی آن در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۵) - TMD با سیستم میراگر و فنر

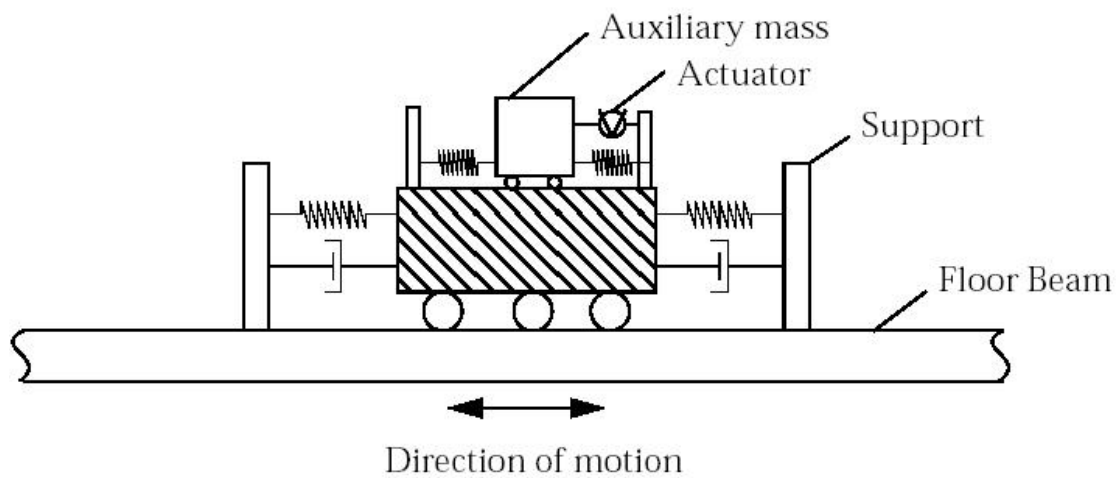


شکل (۶) - حالت تغییر شکل یافته TMD



شکل (۷) - TMD - برج Ten Bosch در ناگاساکی

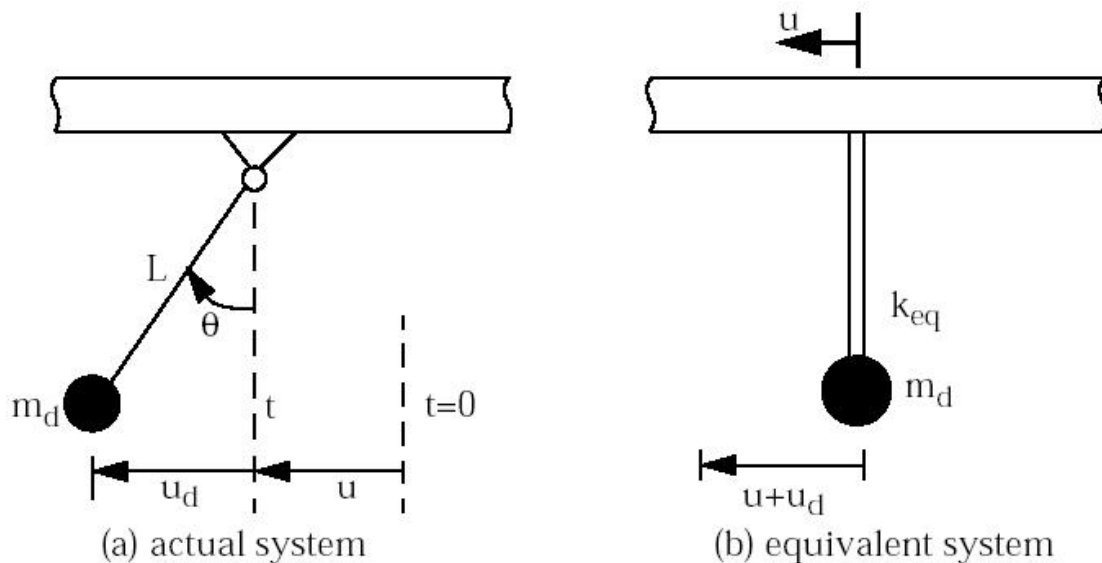
تأثیر میراگر جرمی تنظیم شده را میتوان با اتصال یک جرم کمکی و یک actuator به جرم تنظیم شده و جابجائی جرم کمکی به همراه actuator بگونه ای که پاسخ آن در فاز مخالف با پاسخ جرم تنظیم شده باشد. مانند شکل (۸). اثر جابجائی جرم کمکی ایجاد یک نیروی اضافی است که متمم نیروی ایجاد شده توسط جرم تنظیم شده است و بنابراین میرائی معادل سیستم (TMD) را افزایش خواهد داد. می توان actuator را مستقیماً به جرم تنظیم شده متصل نمود که در این حالت جرم کمکی حذف می شود. از آنجائی که actuator نیاز به یک انرژی خارجی دارد، به این سیستم "میراگر جرمی تنظیم شده فعال" گفته می شود.



شکل (۸) - میراگر جرمی تنظیم شده فعال

۲- میراگر جرمی تنظیم شده پاندولی

مسائل و مشکلات ایجاد شده در رابطه با غلتک‌ها با کمک تقویت‌های کابلی جرم که به سیستم اجازه افتار مانند یک پاندول را می‌دهند قابل حل است. شکل (۹a) یک پاندول ساده را که به سقف آویزان شده است را نشان می‌دهد. حرکت طبقه، پاندول را تحریک می‌کند. جابجائی نسبی پاندول یک نیروی افقی در جهت خلاف حرکت طبقه ایجاد می‌نماید. این عمل را میتوان با استفاده از یک سیستم یک درجه آزادی معادل نشان داد. همانند شکل (۹b).



شکل (۹) - یک میراگر جرمی تنظیم شده از نوع پاندولی

معادله حرکت برای جهت افقی برابر است با

$$T \sin \theta + \frac{W_d}{g} (\ddot{u} + \ddot{u}_d) = 0 \quad (21)$$

که T تنش در طناب می‌باشد. زمانی که θ کوچک است، تقریبهای زیر را بکار می‌بریم:

$$u_d = L \sin \theta \approx L \theta \quad (22)$$

$$T \approx W_d$$

با استفاده از تقریبهای بالا در معادله (۲۱) :

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{L} u_d = -m_d \ddot{u} \quad (23)$$

و این معادله نشان می‌دهد که سختی معادل برشی فنر برابر است با :

$$k_{eq} = \frac{W_d}{L} \quad (24)$$

فرکانس طبیعی پاندول با رابطه زیر به k_{eq} مرتبط است :

$$\omega_d^2 = \frac{k_{eq}}{m_d} = \frac{g}{L} \quad (25)$$

که با توجه به رابطه (۲۵) پریود طبیعی پاندول برابر است با

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (26)$$

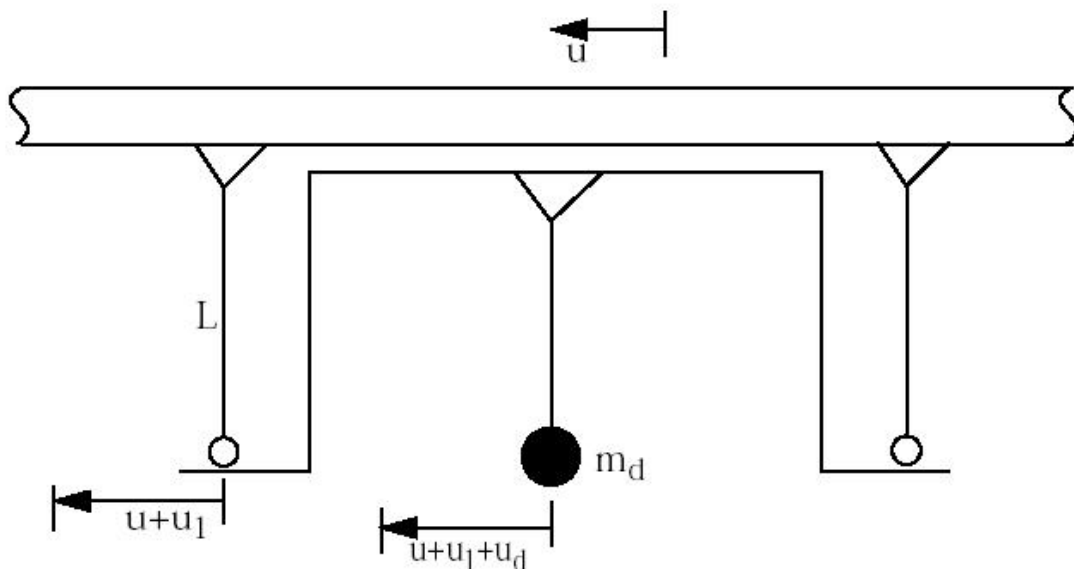
تصویر میراگر جرمی تنظیم شده پاندولی ساده، محدودیتهای جدی دارد. از آنجا که پریود بستگی به L دارد، طول مورد نیاز برای T_d بزرگ، ممکن است از ارتفاع طبقه معمولی بزرگتر باشد. برای نمونه، طول برای پریود ۵ ثانیه، ۶٫۲ متر است درحالی که ارتفاع طبقه معمولا بین ۴ الی ۵ متر خواهد بود. این مسئله را میتوان با شکل شماتیک نشان داده شده در شکل (۱۰) حل نمود. اتصال صلب داخلی، حرکت تکیه‌گاه را برای پاندول بزرگ میکند :

$$m_d(\ddot{u} + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_d) + \frac{W_d}{L}u_d = 0 \quad (27)$$

اتصال صلب در فاز میراگر حرکت می‌کند، و دارای همان دامنه جابجائی است پس :

$$m_d\ddot{u}_d + \frac{W_d}{2L}u_d = -\frac{m_d\ddot{u}_d}{2} \quad (28)$$

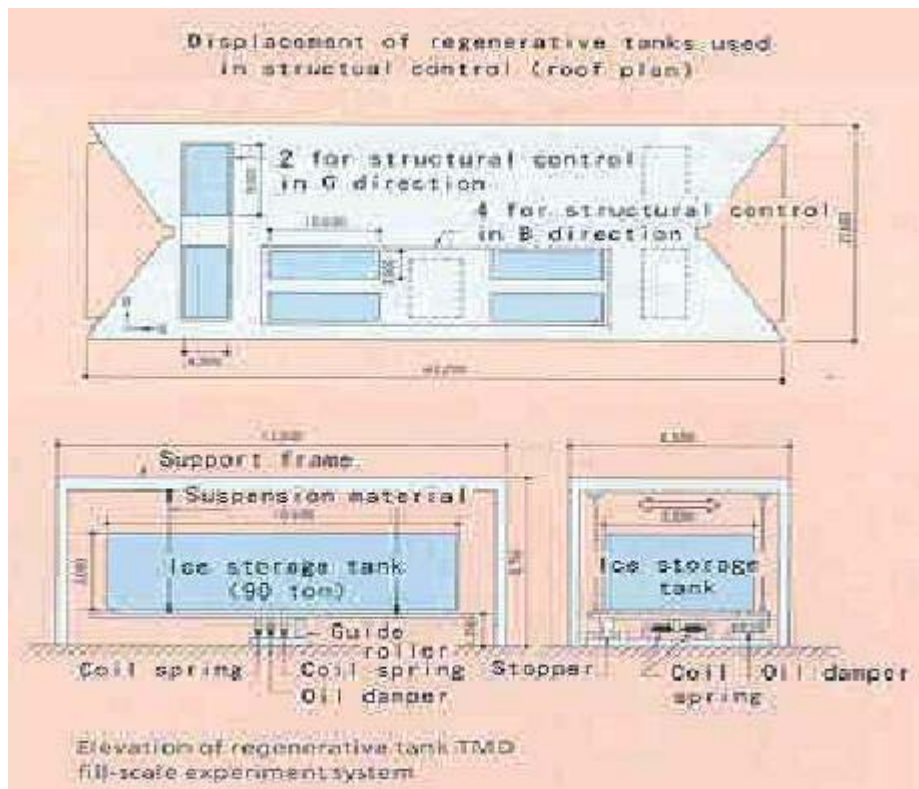
سختی معادل برابر $\frac{W_d}{2L}$ و این بیان میکند که طول موثر برابر $2L$ میباشد.



شکل (۱۰) - پاندول ترکیبی

• برج کریستال (Crystal Tower)

برج در اوزاکای ژاپن واقع شده، دارای ارتفاع ۱۵۷ متر و پلان ۲۸ در ۶۷ متر و وزنی معادل ۴۴۰۰۰ من متریک می‌باشد. پی‌ریز اصلی آن تقریباً ۴ ثانیه در جهت شمال - جنوب و ۳ ثانیه در جهت شرق - غرب می‌باشد. یک میراگر پاندولی در هنگام طراحی اولیه سازه برای کاهش حرکات حاصل از باد تا ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است. شش عدد از نه تهویه هوا و تانکهای ذخیره یخ (هرکدام به وزن ۹۰ تن) از تیرهای اصلی سقف آویزان شده است و مانند یک پاندول عمل می‌کند و پنج عدد از تانکها دارای طول پاندولی ۴ متر و جهت شمال - جنوب لغزش می‌کنند. دو تانک دیگر دارای طول پاندولی ۳ متر بوده و در جهت شرقی - غربی لغزش مینمایند. میراگرهای روغنی که به پاندولها متصل هستند، انرژی پاندولها را جذب می‌کنند. قیمت این میراگر حدود ۳۵۰ هزار دلار بود که کمتر از ۰,۲ درصد هزینه ساخت سازه بود.



شکل (۱۱) - میراگرهای پاندولی برج کریستال



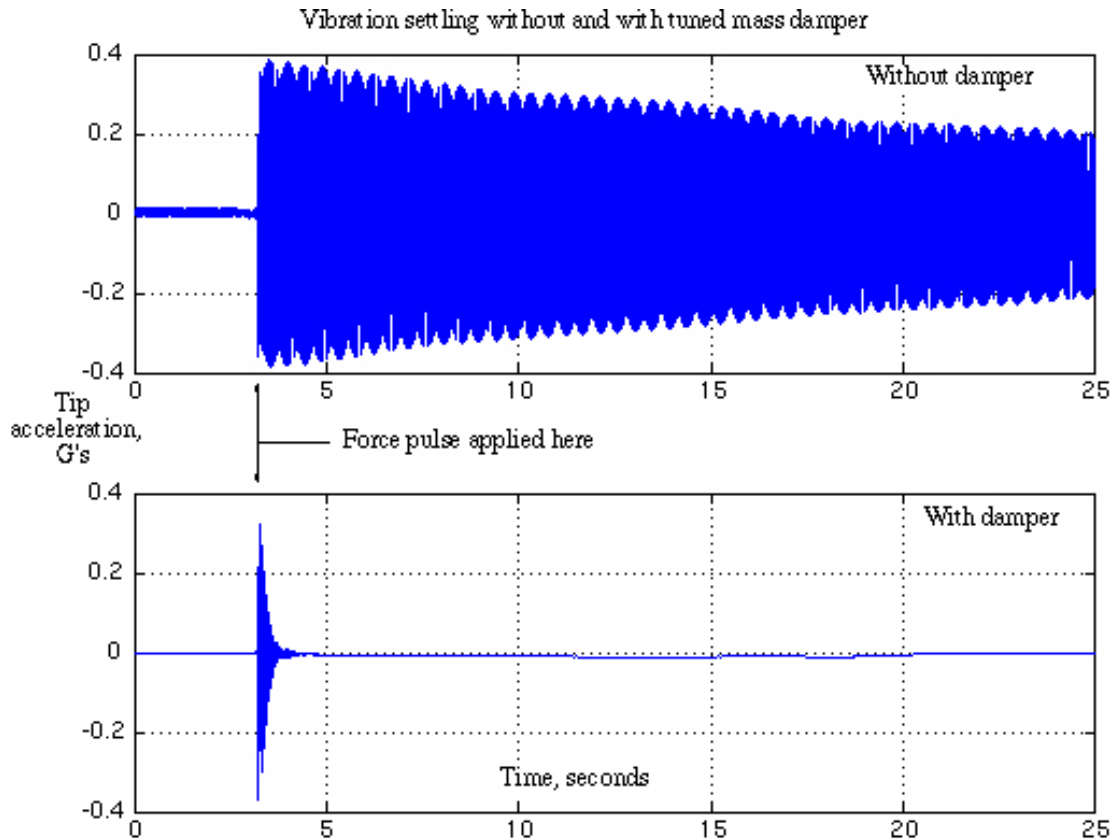
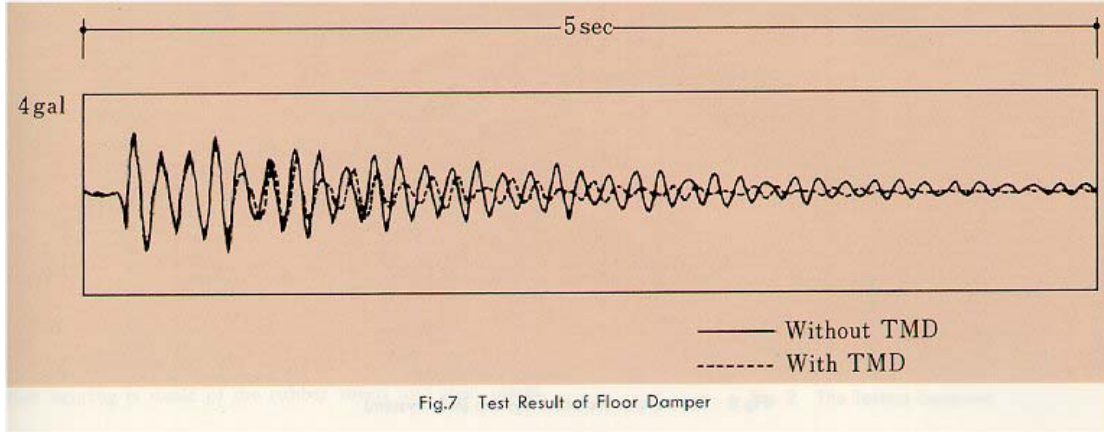
شکل (۱۲) - نمای بیرونی برج کریستال



شکل (۱۳) - تانکهای ذخیره یخ برج کریستال

نمودارهای مقایسه‌ای

در این قسمت چند شتاب نگاشت مختلف که رفتار سیستم های دارای میراگر جرمی تنظیم شده و بدون این نوع میراگر را نشان می دهد آورده شده است.



شکل (۱۴) - مقایسه سازه دارای میراگر و بدون میراگر

جداول

در جدول شماره (۱) لیستی از سازه‌هایی که میراگرهای جرمی تنظیم شده در آنها مورد استفاده قرار گرفته آمده است. این لیست توسط گروه تحقیقاتی Protective Systems در مرکز مطالعات زلزله دانشگاه برکلی کالیفرنیا انجام گرفته و شامل سازه‌های بعد از سال ۱۹۹۴ می‌باشد.

| Worldwide Applications of Tuned Mass Dampers | | | | |
|--|-------------------|---|--------------------------------|---|
| Name and type of structure | City/Country | Type and number of dampers | Date of installation (approx.) | Other information (natural frequencies, effective damper mass etc.) |
| PASSIVE TUNED MASS DAMPERS | | | | |
| CN Tower TV antenna (۵۵۳m) | Toronto, Canada | passive tuned mass damper | ۱۹۷۳ | - |
| John Hancock Building (۲۴۴m) | Boston, USA | passive tuned mass dampers (۲) | ۱۹۷۷ | ۰,۱۴ Hz ۲ x ۳۰۰ t damping ratio: ۴% |
| City Corp Center (high-rise building) (۲۷۸m) | New York, USA | passive tuned mass damper | ۱۹۷۸ | ۰,۱۶ Hz ۳۷۰ t damping ratio: no TMD~۱% with TMD~۴% |
| Sydney Tower (۳۰۵ m) | Sydney, Australia | passive tuned mass damper (pendulum type) | ۱۹۸۰/۱ | ۰,۱۰, ۰,۵۰ Hz ۲۲۰ t |
| Al Khobar ۲ chimnies (۱۲۰ m) | Saudi Arabia | passive tuned mass damper | ۱۹۸۲ | ۰,۴۴ Hz ۷ t |
| Ruwais Utilities chimney | Abu Dhabi | passive tuned mass damper | ۱۹۸۲ | ۰,۴۹ Hz ۱۰ t |
| Deutsche Bundespost cooling tower (۲۷۸ m) | Nornberg, Germany | passive tuned mass damper | ۱۹۸۲ | ۰,۶۷ Hz ۱,۵ t |
| Yanbu Cement Plant chimney (۸۱ m) | Saudi Arabia | passive tuned mass damper | ۱۹۸۴ | ۰,۴۹ Hz ۱۰ t |
| Hydro-Quebec wind generator | Canada | passive tuned mass damper | ۱۹۸۵ | ۰,۷-۱,۲ Hz ۱۸ t |
| Chiba Port Tower (۱۲۵m) | Chiba, Japan | ۲ passive tuned mass dampers | ۱۹۸۶ | ۰,۴۳-۰,۴۴ Hz ۱۰, ۱۵ t |
| Pylon, Aratsu Bridge (cable-stayed) | Japan | passive tuned mass damper | ۱۹۸۷ | - |
| Pylon, Yokohama Bay Bridge (cable-stayed) | Yokohama, Japan | passive tuned mass damper | ۱۹۸۸ | - |
| Bin Quasim Thermal Power Station (۷۰ m) | Pakistan | passive tuned mass damper | ۱۹۸۸ | ۰,۹۹ Hz ۴,۵ t |
| Tiwest Rutile Plant chimney (۴۳ m) | Australia | passive tuned mass damper | ۱۹۸۹ | ۰,۹۲ Hz ۰,۵ t |
| Fukuoka Tower (۱۵۱ m) | Fukuoka, Japan | ۲ passive tuned mass dampers | ۱۹۸۹ | ۰,۳۱-۰,۳۳ Hz ۲۵, ۳۰ t |
| Higashiyama Sky Tower | Nagoya, Japan | passive tuned mass damper | ۱۹۸۹ | ۰,۴۹-۰,۵۰ Hz ۲۰ t |

| | | | | |
|--|--------------------|--|------|----------------------------|
| (135 m) | | | | |
| Pylon, Bannaguru Bridge (cable-stayed) | Japan | passive tuned mass damper | 1990 | - |
| Crystal Tower (107 m) | Osaka, Japan | 3 passive tuned mass dampers | 1990 | 0.24-0.28 Hz 180, 360 t |
| Huis Ten Bosch Domtoren | Nagasaki, Japan | passive tuned mass damper | 1990 | 0.60-0.67 Hz 7.8t |
| Hibikiryokuchi Sky Tower (130 m) | Kitakyushu, Japan | passive tuned mass damper | 1991 | - |
| HKW chimney (120 m) | Frankfurt, Germany | passive tuned mass damper | 1992 | 0.86 Hz 10t |
| BASF chimney (100 m) | Antwerp, Belgium | passive tuned mass damper | 1992 | 0.35 Hz 8.0 t |
| Siemens power station (90 m) | Killingholme, UK | passive tuned mass damper | 1992 | 0.88 Hz 7t |
| Rokko island P & G (117 m) | Kobe, Japan | passive tuned mass damper (pendulum type) | 1993 | 0.33-0.62 Hz 270 t |
| Chifley Tower (209 m) | Sydney, Australia | passive tuned mass damper (pendulum type) | 1993 | 500 t |
| Al Taweeiah chimney (90 m) | Abu Dhabi | passive tuned mass damper | 1993 | 1.5 Hz 1,300 t |
| Akita Tower (112 m) | Akita, Japan | passive tuned mass damper | 1994 | 0.51 Hz |
| ACTIVE MASS DAMPERS | | | | |
| Sendagaya INTES Office Building (208 m) | Tokyo, Japan | 3 active mass dampers | 1991 | 0.09 Hz 72t |
| ORC 2000 Symbol Tower (188 m) | Osaka, Japan | 3 active tuned mass dampers | 1992 | 0.21 Hz 200 t |
| Kansai International Airport | Osaka, Japan | 3 active tuned mass dampers (inverted pendulum) | 1993 | 0.8 Hz 10t |
| Yokohama Landmark Tower (296 m) | Yokohama, Japan | 3 active tuned mass dampers | 1993 | 0.180 Hz 350 t |
| C Office Tower (130 m) | Tokyo, Japan | active mass damper | 1993 | 0.35 Hz 200 t |
| KS Project (121 m) | Kanazawa, Japan | active mass damper | 1993 | 100t |
| MKD^ Hikarigaoka Office Building (100 m) | Tokyo, Japan | active mass damper (pendulum) | 1993 | 0.55 Hz |
| Riverside Sumida (133m) | Tokyo, Japan | 3 active mass dampers | 1994 | 0.29 Hz 30t |
| Act City Office Building (212 m) | Hamamatsa, Japan | active/passive tuned mass damper | 1994 | 0.21 Hz 180 t |
| Shinjuku Park Tower (227 m) | Tokyo, Japan | 3 active tuned mass dampers | 1994 | 330 t |
| TUNED LIQUID DAMPERS | | | | |
| Nagasaki Airport | Nagasaki, | 20 tuned liquid damper | 1987 | 1.07 Hz |

| | | | | |
|--|-------------------|---|------|--|
| Tower (۴۲ m) | Japan | (circular sloshing type) | | ۱ t (approx.) (temporary installation) |
| Yokohama Marine Tower (۱۰۵ m) | Yokohama, Japan | ۳۹ tuned liquid damper (circular sloshing type) | ۱۹۸۷ | ۰,۵۵ Hz ۱,۶t |
| Gold Tower (۱۳۶ m) | Udatsu, Japan | ۱۶ tuned liquid dampers (rectangular unidirectional type) | ۱۹۸۸ | ۰,۴۲ Hz ۹,۶t |
| Shin-Yokohama Prince Hotel (۱۴۹m) | Yokohama, Japan | ۳۰ tuned liquid dampers (circular sloshing type) | ۱۹۹۱ | ۰,۳۱ Hz ۸۳,۵t |
| Mount Wellington Broadcasting Tower (lattice tower, ۱۰۴ m) | Hobart, Australia | ۸۰ tuned liquid dampers (circular sloshing type) | ۱۹۹۲ | ۰,۷ Hz ۰,۶t |
| TYG Building (۱۵۹ m) | Atsugi, Japan | ۷۲۰ tuned liquid dampers (double donut type) | ۱۹۹۲ | ۰,۵۳ Hz ۱۸,۲ t |
| Narita Airport Tower (۸۷ m) | Narita, Japan | tuned liquid dampers (circular sloshing type) | ۱۹۹۳ | ۱,۳ Hz ۱۶,۵ t + floating particles |
| Haneda Airport Tower (۱۷۸ m) | Tokyo, Japan | tuned liquid dampers (circular sloshing type) | ۱۹۹۳ | ۰,۷۷ Hz ۲۱t |

جدول شماره (۱) - ساختمانهایی شامل سیستم TMD

لیست دیگری که نشان دهنده ساختمانهای شامل میراگرهای مختلف و نیز نوع آنها در کشور ژاپن می باشد در جدول شماره (۲) آمده است.

| Name | Place | Year | Design | Total Floor Space (m ^۲) | Scale | | Note |
|---|-------|------|----------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|------|
| | | | | | below ground | above ground | |
| Chiba Port Tower | Chiba | ۱۹۸۶ | Nikken Sekkei | ۲,۳۰۸ | ۰ | ۴ | TMD |
| Crystal Tower | Osaka | ۱۹۹۰ | Takenaka Corporation | ۸۵,۹۹۴ | ۲ | ۳۷ | TMD |
| Sendagaya Intes | Tokyo | ۱۹۹۱ | Takenaka Corporation | ۱۰,۶۰۲ | ۲ | ۱۱ | AMD |
| Applause Tower | Osaka | ۱۹۹۲ | Takenaka Corporation | ۹۶,۷۹۳ | ۳ | ۳۴ | AMD |
| Nakanoshima Intes | Osaka | ۱۹۹۲ | Takenaka Corporation | ۳۵,۷۷۰ | ۱ | ۲۲ | TMD |
| P&G Japan Main Office Technical Center | Hyogo | ۱۹۹۳ | Takenaka Corporation | ۴۲,۸۹۲ | ۱ | ۳۱ | TMD |
| Japan Long-Term Credit Bank Main Office | Tokyo | ۱۹۹۳ | Nikken Sekkei | ۶۲,۸۲۱ | ۵ | ۲۱ | AMD |

| | | | | | | | |
|---|----------|----------|----------------------|---------|---|----|----------------------------------|
| Shinsaibashi Toyo Building | Osaka | ۱۹۹ ۴ | Takenaka Corporation | ۲۷,۰۲۵ | ۳ | ۱۲ | Viscous damper |
| Hakata Sea Hawk Hotel | Fukuoka | ۱۹۹ ۵ | Takenaka Corporation | ۱۳۸,۱۵۵ | ۲ | ۳۶ | Viscous damper |
| Atami Korakuen Hotel | Shizuoka | ۱۹۹ ۶ | Takenaka Corporation | ۲۶,۴۲۱ | ۰ | ۱۹ | Friction damper |
| Herbis OSAKA | Osaka | ۱۹۹ ۷ | Takenaka Corporation | ۱۳۶,۸۲۳ | ۵ | ۴۰ | AMD Viscous damper |
| Dainihoninsatsu Ichigaya Main Office | Tokyo | ۱۹۹ ۸ | Takenaka Corporation | ۱۶,۵۷۰ | ۲ | ۱۰ | Viscous damper |
| Improvement Project for Meiji University Surugadai District | Tokyo | ۱۹۹ ۸ | Nikken Sekkei | ۵۹,۰۶۸ | ۲ | ۲۳ | Ultralow-yield-point steel panel |

جدول شماره (۲) - ساختمانهای شامل میراگر در ژاپن به تفکیک نوع

در جدول شماره (۳) نیز مقایسه ای صورت گرفته است از کارایی سیستم های میراگر TMD و مقابل بارهای مختلف وارده. نکته قابل توجه این است که این نوع میراگر بیشتر در مقابل نیروهای باد کارایی داشته و در سازه های خیلی بلند به عنوان میراگر در مقابل بارهای زلزله مورد استفاده قرار نمی گیرد.

| Structure | Disturbance | Energy absorbing mechanisms | | | Mass control | Active control | |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|--------------|----------------|---------------|
| | | Hysteresis damper | Viscous damper | Friction damper | TMD | AMD | Tendon system |
| | | Low-yield-point steel | Viscous polymer | Steel surface treatment | | | |
| Superhigh-rise building | Earthquake | ○ | ○ | ○ | | | |
| | Wind | | ○ | | ○ | ○ | |
| Observation tower & lattice tower | Earthquake | ○ | | | ○ | | |
| | Wind | | | | ○ | | |
| Long-span structure | Earthquake | ○ | ○ | | | | ○ |
| | Traffic vibration | | | | ○ | ○ | |
| Bridge | Earthquake | ○ | ○ | | | | |
| | Wind | | | | ○ | | ○ |
| | Traffic vibration | | | | ○ | | ○ |

جدول شماره (۳) - کارایی میراگرها در مقابل نیروهای مختلف

منابع و مراجع :

تهیه تعدادی از عکسها از سایتهای مختلف از جمله

۱- <http://www.iesysinc.com/tunedmassdampers.htm>

۲- <http://www.iesysinc.com/tunedmassdampers.htm>

۳- منبع اصلی از کتاب Introduction to Structural Motion control,

by j.j.Connor, ۲۰۰۲ که متن کتاب از اینترنت دریافت شده است.

۴- Engineering Structures, Vol. ۱۷ , No. ۹, November ۱۹۹۵