

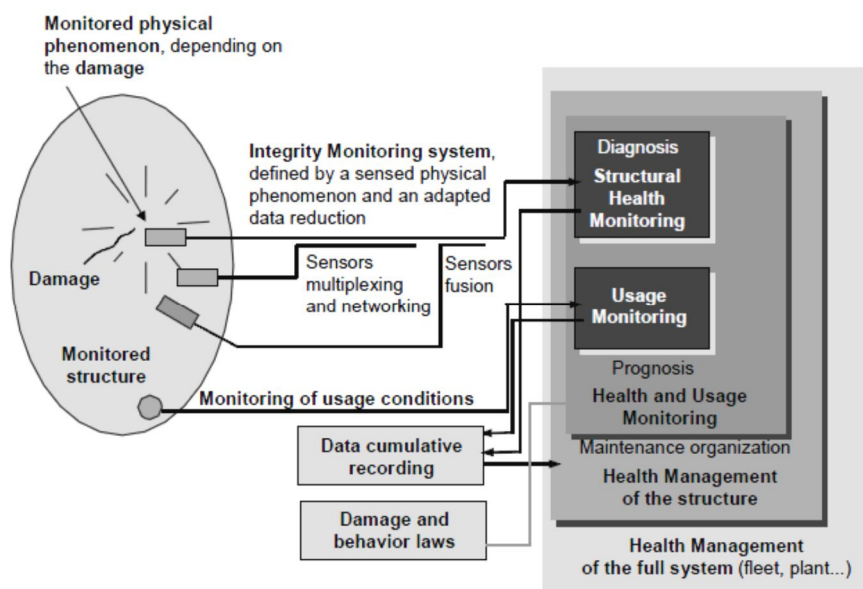
پایش سلامت سازه ها

ایمان الیاسیان، کارشناس ارشد سازه

I.elyasian@gmail.com

چکیده

استفاده از تجهیزات جمع آوری خودکار داده ها در برنامه ریزی بازرسی فنی پل به دلیل افزایش سرعت و دقت روز به روز در حال افزایش است و نگهداری، تعمیر، مقاوم سازی، بازرسی و استراتژی مدیریت عملکرد پل، ارزیابی یکپارچه پلها مهندسی عمران و زلزله را به کاربرد ابزار دقیق و نقش حسگرها در بررسی پارامترهایی چون تنش، کرنش، تغییرات حرارت، رطوبت، فشار، شتاب و سرعت و جابجایی نسبی، زمان، پتانسیل الکتریکی واداشته وامروزه فناوری جدید که در سازه های حساس و با اهمیت چون پلها، سدها، نیروگاهها و ... بکار رفته همان پایش مستمر سلامت سازه از راه دور یا Remote Structural Health Monitoring می باشد.



برای افزایش ظرفیت باربری بایستی ترکیب اقدامات زیر انجام شود

۱-اصلاح محاسبات با استانداردهای روز

۲-مقاوم سازی اجزای سازه ها

۳-تعویض و یا تغییر در بخشهای مختلف سازه

روشهای نگهداری

۱- نگهداری براساس خرابی یا از کارافتادگی

انهدام و خرابی بصورت ناگهانی رخ می دهد-هزینه تعمیرات بیشتر از اقدامات پیشگیرانه قبل از خرابی است

۲- نگهداری برنامه ریزی شده یا پیشگیرانه

تعویض اجزای بحرانی سیستم زمانبر و پرهزینه می باشد- تعیین زمان و فاصله های زمانی بین تعمیرات کارمشکلی است

۳- نگهداری پیشگویانه

توقف کارسیستم بایستی در برنامه ریزی دیده شود- برنامه کاری برای پرسنل نگهداری، ابزار و تجهیزات مورد نیاز است، از خطرات شدید ناشی از خرابی های پرفشار و ناگهانی جلوگیری کرد، زمان تعمیرات را کاهش داده و زمان توقف بهره برداری را به حداقل رسانده، آزمون و خطای پرهزینه برای حل مشکلات، شرایط بهره برداری مناسب و بدون بروز مشکلات شدید

۴- نگهداری پیش از نیاز

سیستمهای حسگرها، جمع آوری اطلاعات، پردازش اطلاعات، ارتباطی و مخابراتی، خطایابها و مدل درپایش مستمر سازه های عمرانی متفاوت هستند و مزایای پایش مستمر سلامت سازه ای ۱- پایش در لحظه و گزارش دهی همزمان ۲- کاهش مانع های تلف شده ۳- افزایش ایمنی، قابلیت اعتماد و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری

1-failure based maintenance 2-preventive maintenance 3-predictive maintenance
4-proactive maintenance 5-condition based maintenance 6- Reliability-Centered Maintenance
7- Total Productive Maintenance 8- Emergency Maintenance 9- Breakdown Maintenance

یک سیستم پایش مستمر سازه ای دارای زیرمجموعه های زیر می باشد

۱- جمع آوری اطلاعات مثل کرنش سنجهای مقاومت الکتریکی، کرنش سنجهای سیم مرتعش، کرنش سنجهای ورقه ای، مبدل های تغییر شکل، گنجهای فیبرنوری، حسگرهای دی الکتریک، پتانسیومتر، گنجهای الکترونیکی

۲- مخابره اطلاعات و ارتباط داده

۳- پردازش هوشمند اطلاعات: تصفیه و تفسیر اطلاعات

هماهنگی و جمع آوری اطلاعات خاص سازه ها - دستکاری و تحلیل اطلاعات خاص سازه ای - ارزیابی و محاسبه خرابی سازه - انتقال میزان کمی خرابی به تأسیسات مرکزی

۴- ذخیره اطلاعات پردازش شده: برای تشخیص و در دسترس بودن داده ها

۵- تشخیص ها ۶- ارزیابی اطلاعات: کمتهایی که مستقیماً با پاسخ سازه ای مرتبط اند

پارامترهای موثر در انتخاب حسگرها

- نرخ نمونه برداری
- دقت مورد نیاز برای اطلاعات برداشتی و سیگنالهای خروجی
- امکان تکرار برای عملیات پایش مستمر
- اثرات دمایی

○ افت و انحراف در کارایی و عملکرد حسگرها

فلسفه های نگهداری

۱- نگهداری براساس شرایط ۲- نگهداری قابلیت اعتماد متوسط ۳- نگهداری فنی با بهره‌وری کامل

خطایابی

-تعیین حضور و وجود خرابی در سازه

-تعیین موقعیت خرابی یافت شده در سازه

-تعیین شدت خرابی موجود در سازه

-تعیین میزان عمر مفید باقیمانده از سازه

گسیختگی Fault - خرابی Damage عیب Defect

خطایابی هوشمند

تعیین Detection روشی که امکان وجود خرابی در سازه را نشان می دهد

مکانیابی localization روشی که محل احتمال خرابی را به مان‌شان می دهد

ارزیابی Assessment روشی که تخمینی از وسعت خرابی برای ما فراهم می سازد

پیش بینی Prediction روشی که اطلاعاتی درباره سازه چون عمر باقیمانده سازه در اختیار ما می گذارد

تستهای غیرمخرب Non Destructive Tests

۱- تست فراصوتی یا التراسونیک Ultra Sonic Test

۲- تست پرتونگاری یا رادیوگرافی Radiography Test

۳- تست جریان گردابی Eddy Current

۴- تست مایعات نافذ Penetration Test

۵- تست ذرات مغناطیسی Magnetic Test

۶- روشهای الکتریکی

۷- روشهای هسته ای

۸- دمانگاری یا ترموگرافی Thermography

۹- رادار

۱۰- دوربینی

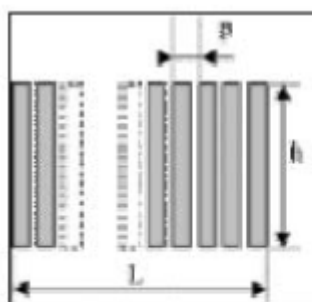
۱۱- شیروگرافی Shearography

روشهای مغناطیسی در کل برای تعیین موقعیت آرماتورها در بتن بکار می رود ولی در تشخیص زوال و خوردگی

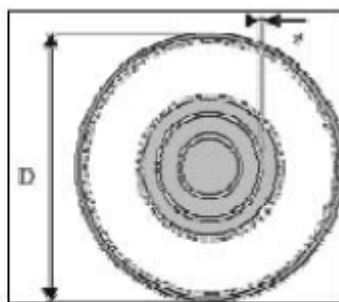
کاربرد ندارد. روشهای الکتریکی به ۲ دسته مقاومت و پتانسیل الکتریکی تقسیم می شود. در روش هسته به

تعیین رطوبت در بتن بوسیله جذب نوترون و تکنیکهای پراکنده سازی و تخمین پتانسیل خوردگی در بتن

پرداخته می شود. در روش دمانگاری مادون قرمز برای تعیین تورق در بتن عرشه پلها استفاده می شود.



پراب خطی



پراب های حلقوی

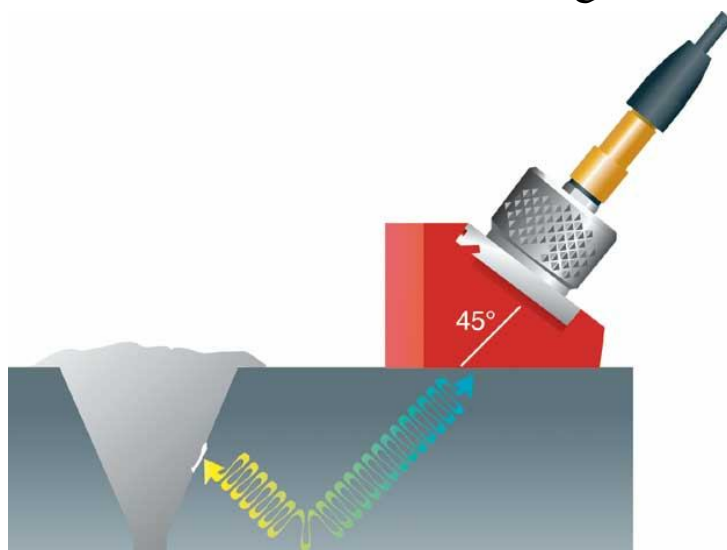


پراب های دایروی



پراب های ماتریسی

انواع پرابهای بکاررفته در آزمایش التراسونیک



✓ عیوب عمود بر امتداد انتشار صوت

✓ عیوب غیر افقی

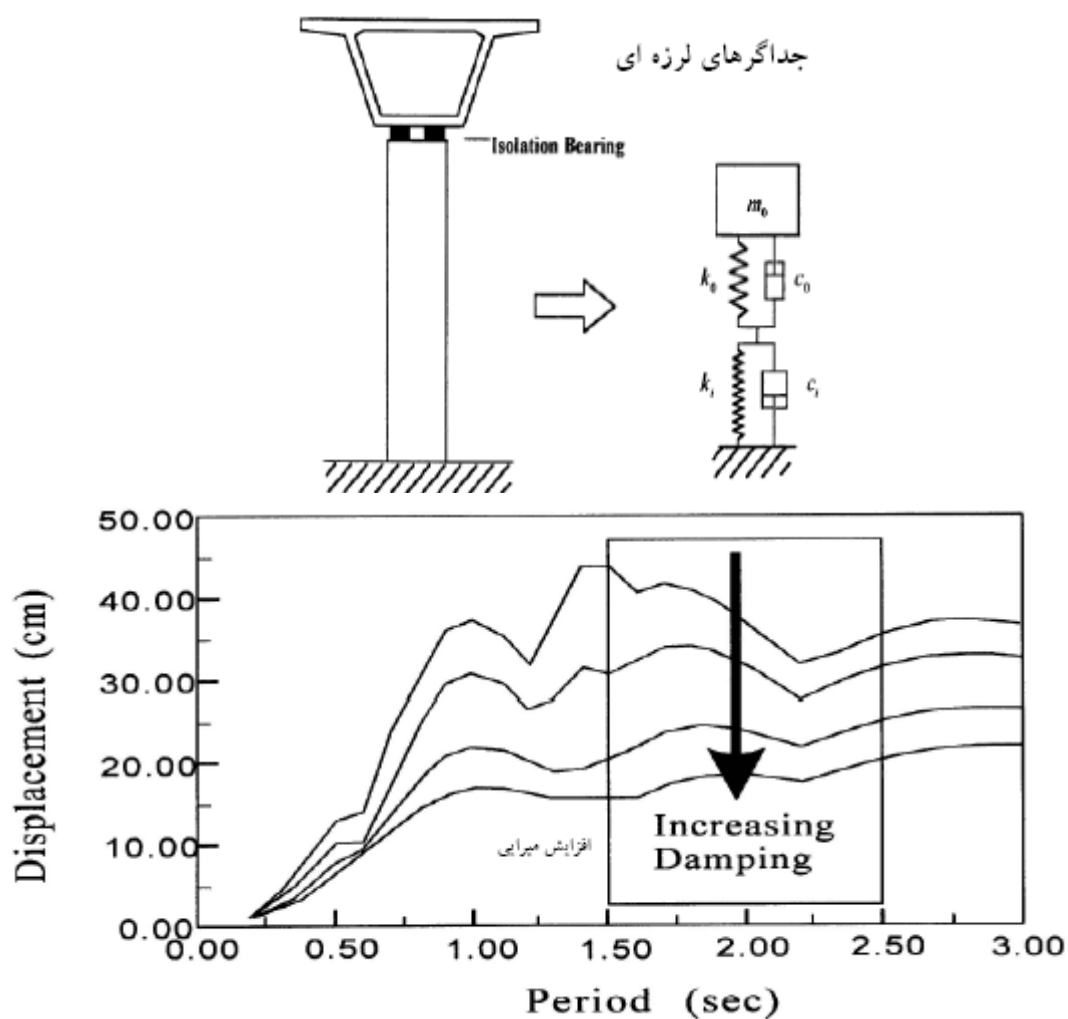
✓ عیوب سطوح انتقال

✓ عیوب شعاعی در لوله ها استوانه ای و محورها

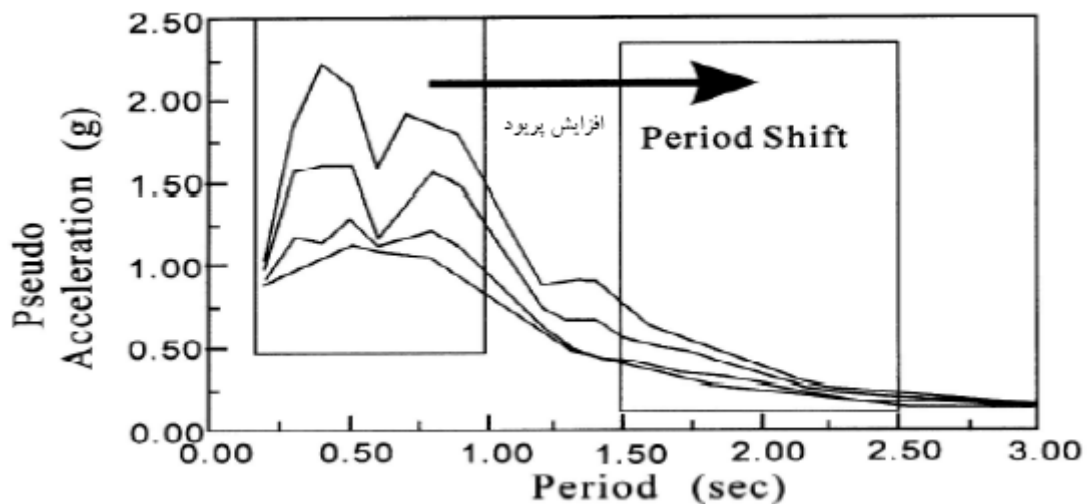
✓ تورق در صفحات نازک

کاربردهای قابلیت اعتماد

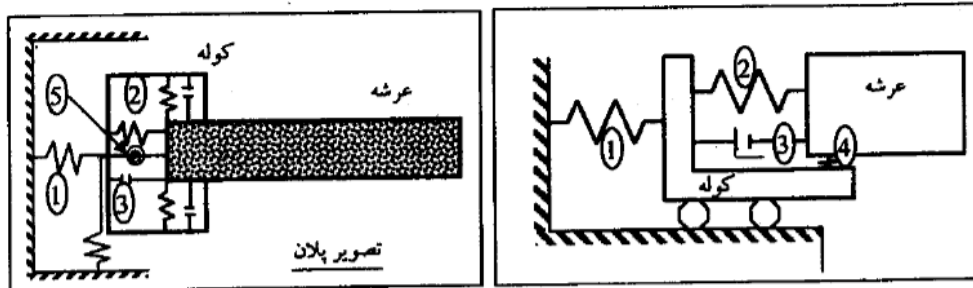
- ☐ ارزیابی تاثیر تنش در عمر
 - ☐ ارزیابی و تشریح قابلیت اطمینان قطعات و سیستمها (درخت خرابی، کاهش شبکه)
 - ☐ تشخیص مدهای خرابی
 - ☐ مقایسه بین دو یا چند محصول
 - ☐ تهیه ضمانت نامه اطمینان
 - ☐ ارزیابی اجزاء و تجهیزات الف. تستهای شتابدار ب. تداخل بار - مقاومت ج. روش فراوانی خرابی
- ابزار با روشهای صوتی بکار رفته در عرشه پل شامل وسیله ضربه زننده، دریافت کننده صوت، تفسر کننده سیگنال می باشد



کاهش شتاب ورودی به سیستم با افزایش پریود



کاهش تغییر مکان سازه با افزایش میرایی



نحوه مدل سازی عرشه در روی کوله: ۱. خاک پشت کوله، ۲: مقاومت برشی بالشتک، ۳: لقی بین عرشه و کوله، ۴: مقاومت فشاری- کششی بالشتک (فایم)، ۵: مقاومت پیچشی ناشی از گویل بالشتکها

سیستمهای حسگر-سیستمهای جمع آوری اطلاعات-سیستمهای پردازش اطلاعات
سیستمهای ارتباطی و مخابراتی-خطایاب و سیستم مدلسازی

۱- آزمایشات برجای استاتیکی ۲- آزمایشات برجای دینامیکی ۳- پایش مستمر بازه ای (دوره ای) ۴- پایش مستمر پیوسته

سیستم مانیتورینگ و پایش سازه			
پایش مستمر پیوسته	پایش مستمر دوره ای	آزمایشات برجای دینامیکی	آزمایشات برجای استاتیکی
مانیتورینگ فعال	برجا	تاریخچه تنش	رفتاری
مانیتورینگ منفعل	تغییرات در سازه	رشد ترک	خطایابی
		قلاب فنر	دوامی

مزایای پایش مستمر سلامت سازه

۱- پایش در لحظه و گزارش دهی هم زمان ۲- کاهش زمان تلف شده
۳- افزایش ایمنی، قابلیت اطمینان و کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات
مراحل پایش مستمر

۱- جمع آوری اطلاعات ۲- مخابره اطلاعات ۳- پردازش هوشمند اطلاعات ۴- ذخیره اطلاعات پردازش شده ۵- تشخیص ها ۶- بازیابی داده

سیستم جمع آوری اطلاعات

۱- کرنش ها ۲- تغییر شکلهای ۳- تغییر طول ها ۴- شتاب ها ۵- دما ۶- رطوبت ۷- زمان ۸- پتانسیل الکتریکی ۹- تنش ها ۱۰- نیروها ۱۱- چرخش ها و دوران ها ۱۲- ارتعاشات ۱۳- خوردگی ۱۴- بارها ۱۵- خصوصیات دینامیکی (میرایی، سختی، جرم و ...)

فعالیت پردازشگر اصلی CPU

۱- هماهنگی و جمع آوری اطلاعات انتقالی از حسگرها ۲- دستکاری و تحلیل اطلاعات خاص سازه ای ۳- ارزیابی و محاسبه خرابی سازه ۴- انتقال میزان کمی خرابی به تاسیسات مرکزی

پایش مستمر سازه های عمرانی از لحاظ زمانی

۱- بلند مدت ۲- کوتاه مدت (تغییر در بار ترافیکی، در سیستم سازه ای، مقاوم سازی یک سازه) ۳- دوره ای ۴- پیوسته و مستمر (موضعی و جامع) ۵- محرک ۱- پایش مستمر سلامت سازه ۲- پایش مستمر شرایط CM ۳- ارزیابی های غیر مخرب NDE ۴- کنترل فرآیندهای آماري SPC

خرابی damage - گسیختگی fault- عیب و نقص defect

خطایابی هوشمند

۱- تعیین detection ۲- مکان یابی localization ۳- ارزیابی assessment ۴- پیش بینی prediction ۵- طبقه بندی classification

پایش مستمر استاتیکی که در آن ۱- تغییر شکل ۲- شیب ۳- نشست ۴- عرض ترک ۵- خوردگی ۶- تاثیرات محیطی مثل دما، رطوبت و باد در آن کنترل می شود

کرنش سنج strain gauge ۱- ورقه ای foil ۲- فیبر نوری fiber optic ۳- سیم مرتعش vibration wire حسگرها ۱- اکتریکی ۲- نوری ۳- مکانیکی ۴- پنوماتیک ۵- ظرفیتی ۶- مقاومتی ۷- القایی ۸- مغناطیسی ۹- پیزو الکتریک ۱۰- حرارتی و دمایی ۱۱- صوتی می باشند

مبدل تفاضل-متغیر خطی linear variable-differential transformer

آزمایشات استاتیکی شامل ۱- رفتاری ۲- تشخیصی ۳- اثباتی می باشند

ردیف	آزمایشات بتن	آزمایشات فولاد	آزمایشات چوب
۱	روش های مقاومتی	رادیو گرافی	روش های نافذ
۲	روش های صوتی		
۳	اولتراسونیک (فراصوتی)	ذرات مغناطیسی	روش های الکتریکی
۴	روش های مغناطیسی		
۵	روش های الکتریکی	جریان گردابی	
۶	روش های هسته ای Nuclear methods		
۷	ترموگرافی thermography	رنگ های نافذ	تکنیکهای اولتراسونیک
۸	رادار(امواج)		
۹	رادیو گرافی	اولتراسونیک	
۱۰	اندوسکوپی (درون بینی) endoscopy		

اولتراسونیک (فراصوتی) براساس اندازه گیری سرعت پالس صوتی براساس خاصیت پیزوالکتریکی استفاده می شوند- روش های مغناطیسی در تعیین موقعیت آرماتورها در بتن کاربرد دارد
روش های الکتریکی به دو دسته اندازه گیری مقاومت و پتانسل الکتریکی می باشند
روش های هسته ای برای تعیین رطوبت بوسیله جذب نوترون و تکنیک های پراکنده سازی و تخمین پتانسیل خوردگی در بتن استفاده می شود- دمانگاری مادون قرمز در تعیین تورق عرشه پلها کاربرد دارد
رادار برای تعیین خرابی عرشه ها بکار می رود و پرتونگاری براساس تابش اشعه نفوذی گاما
در روش اندوسکوپی (درون بینی) از لوله های صلب glass fibers براساس خاصیت منشوری و یا لوله های فیبر نوری fiber optics استفاده می شود
در کنار آزمایشات ذکر شده پایش مستمر استاتیکی چکش اشمیت Schmitt - میله سنجش ویندسور Windsor probe - زنجیره ضربه chain drag - میله های صداساز sounding rods-زوج چکش ها even hammers می توان نام برد

ابزار پایش عرشه پل

۱- وسیله ضربه زننده ۲- دریافت کننده صوت ۳- تفسیر کننده سیگنال

پدیده های قابل اندازه گیری

۱- تغییر شکل خمشی ۲- تغییر طول ۳- کرنش ۴- دوران ۵- دمای بتن ۶- دمای محیط ۷- رطوبت مرتبط ۸- نیروی پیش تنیدگی ۹- نیروی مفصلی ۱۰- بازرسی شکست سیم ۱۱- خوردگی آرماتورها ۱۲- خوردگی غلاف فولادی

آزمایشات برجای بتن						
روش	ترک	قلوه کن شدن	خوردگی	سایش	حمله شیمیایی	کرموشدگی
مقاومتی	نامناسب	نامناسب	ضعیف	نامناسب	ضعیف	نامناسب
صوتی	نسبتا خوب	نامناسب	خوب یافتن لایه لایه شدگی	نامناسب	نامناسب	نامناسب
اولتراسونیک	خوب	نامناسب	نسبتا خوب	نامناسب	ضعیف	نامناسب
مغناطیسی	نامناسب	نامناسب	نسبتا خوب	نامناسب	نامناسب	نامناسب
الکتریکی	نامناسب	نامناسب	خوب	نامناسب	نامناسب	نامناسب
هسته ای	نامناسب	نامناسب	نسبتا خوب	نامناسب	نامناسب	نامناسب
ترموگرافی	نامناسب	خوب لایه های زیر آسفالت	خوب یافتن لایه لایه شدگی	نامناسب	نامناسب	نامناسب
امواج (رادار)	نامناسب	خوب لایه های زیر آسفالت	خوب یافتن لایه لایه شدگی	نامناسب	نامناسب	نامناسب
راديوگرافی	نسبتا خوب	نامناسب	نسبتا خوب	نامناسب	نامناسب	نسبتا خوب

آزمایشات برجای فولادی

روش	ترکهای سطحی کم عمق	ترکهای سطحی عمیق	ترکهای داخلی	ترکهای خستگی	حفره های داخلی	تخلخل جوش	ضخامت	تنش خوردگی	تورم سطحی	حفرات خوردگی
پرتونگاری	نامناسب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	ضعیف	خوب	خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	ضعیف	خوب
ذرات مغناطیسی	خوب	خوب	نامناسب	خوب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	خوب	نامناسب	نامناسب

تر									
ذرات مغناطیسی خشک	نسبتا خوب	خوب	نامناسب	خوب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	ضعیف
جریان گردابی	نسبتا خوب	خوب	نامناسب	خوب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	نامناسب
رنگ نافذ	نسبتا خوب	خوب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	نامناسب	نسبتا خوب
فراصوتی	ضعیف	خوب	خوب	خوب	خوب	نسبتا خوب	خوب	نسبتا خوب	ضعیف

پرتکل پایش مستمر

پارامترهای محیطی و شرایط بارگذاری

۱- باد ۲- حوادث لرزه ای ۳- دما ۴- بار ترافیک

پارامترهای رفتار سازه ای

تغییر شکلهای ۲- کرنشها ۳- تنش ها ۴- خصوصیات دینامیکی

مزایای آزمایش رنگ افذ ۱- ارزان بودن تجهیزات ۲- کاربرد آسان روش ۳- تفسیر راحت نتایج بدست آمده

رنگ قرمز نافذ بیانگر خرابی یا ترک در محل می باشد

۴- ویسکوزیته های متفاوت برای تعیین ترکها به ابعاد گوناگون

۵- استفاده از توسعه دهنده تر به جای توسعه دهنده خشک

۶- استفاده از رنگهای فلورسنت و نمایان کردن آنها با نور ماورا فرابنفش

۷- راحتی اجرا ۸- عدم نیاز به تخصص خاص ۹- هزینه پایین اجرا ۱۰- زمانبر نبودن آزمایش

۱۱- امکان استفاده متناوب در کارگاه عملیات اجرایی ۱۲- قابل حمل نبودن تجهیزات

مزایای آزمایش التراسونیک

۱- مولد موج صوتی ۲- ابزار برداشت موج بازگشتی ۳- نمایشگر موج اولیه بازتابی ۴- سیار و قابلیت حمل آن

۵- حساسیت و توانایی تعیین محل ترکها یا خرابی ها در عمق

- فرکانس صوت- طراحی واحد بررسی - ابزارآلات - پردازش الکتریکی سیگنال بازتابیده - مهارت اپراتور دستگاه

پارامترهای محیطی و شرایط بارگذاری

۱- باد ۲- حوادث لرزه ای ۳- دما ۴- بار ترافیک

پارامترهای رفتار سازه ای

۱- تغییر شکلهای ۲- کرنشها ۳- تنشها ۴- خصوصیات دینامیکی

پایش مستمر بازخورد در پلها

۱- تغییر شکلهای ۲- نیروهای کابل ۳- کرنش ها و تنش های عرشه ۴- شتاب

حسگرهای پل

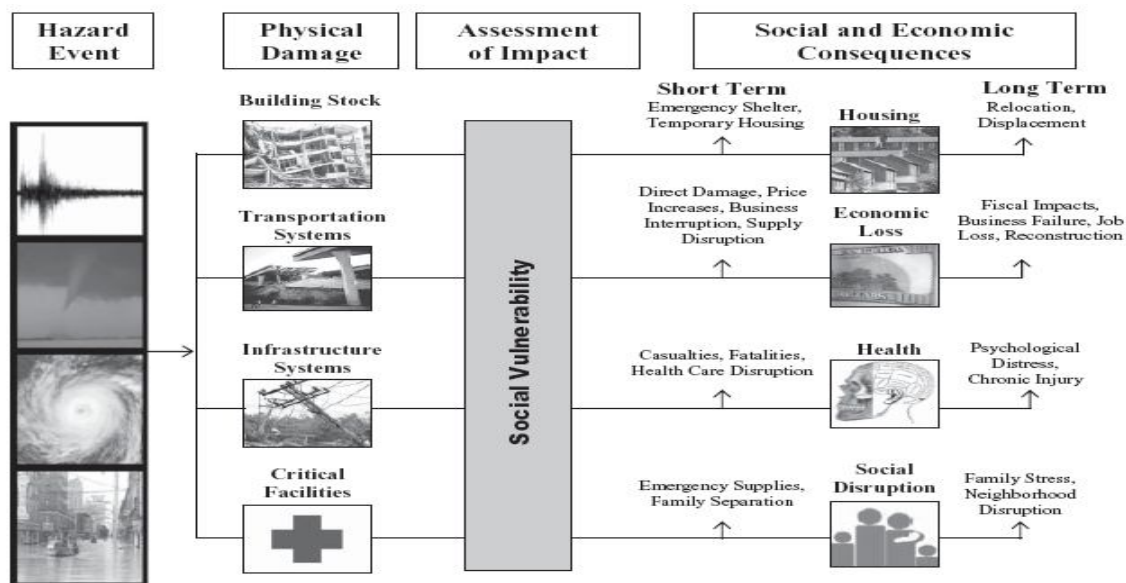
۱- باد ۲- دما ۳- ترافیک ۴- تغییر مکان ۵- سطح ارتفاع ۶- شتاب ۷- کرنش

پدیده های اندازه گیری

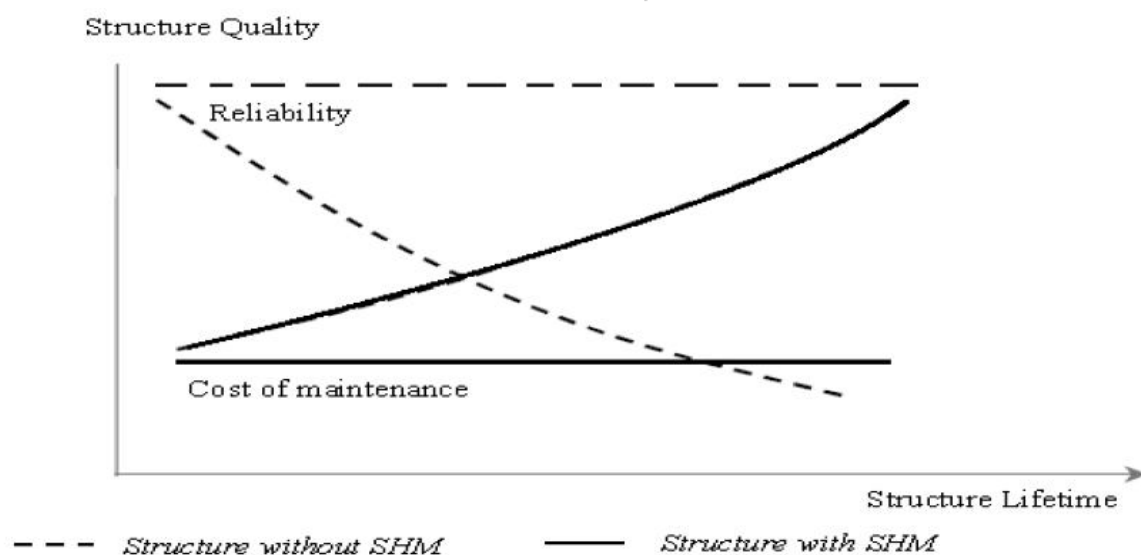
۱- تغییر شکل خمشی ۲- تغییر طول ۳- کرنش ۴- دوران ۵- دمای بتن ۶- دمای پیرامون ۷- رطوبت مرتبط ۸- نیروی

پیش تنیدگی ۹- نیروی مفصلی ۱۰- بازرسی شکست سیم ۱۱- خوردگی آرماتورها با پوشش اپوکسی ۱۲- خوردگی

غلاف شمع فولادی ۱۳- نقشه برداری بناهای تاریخی



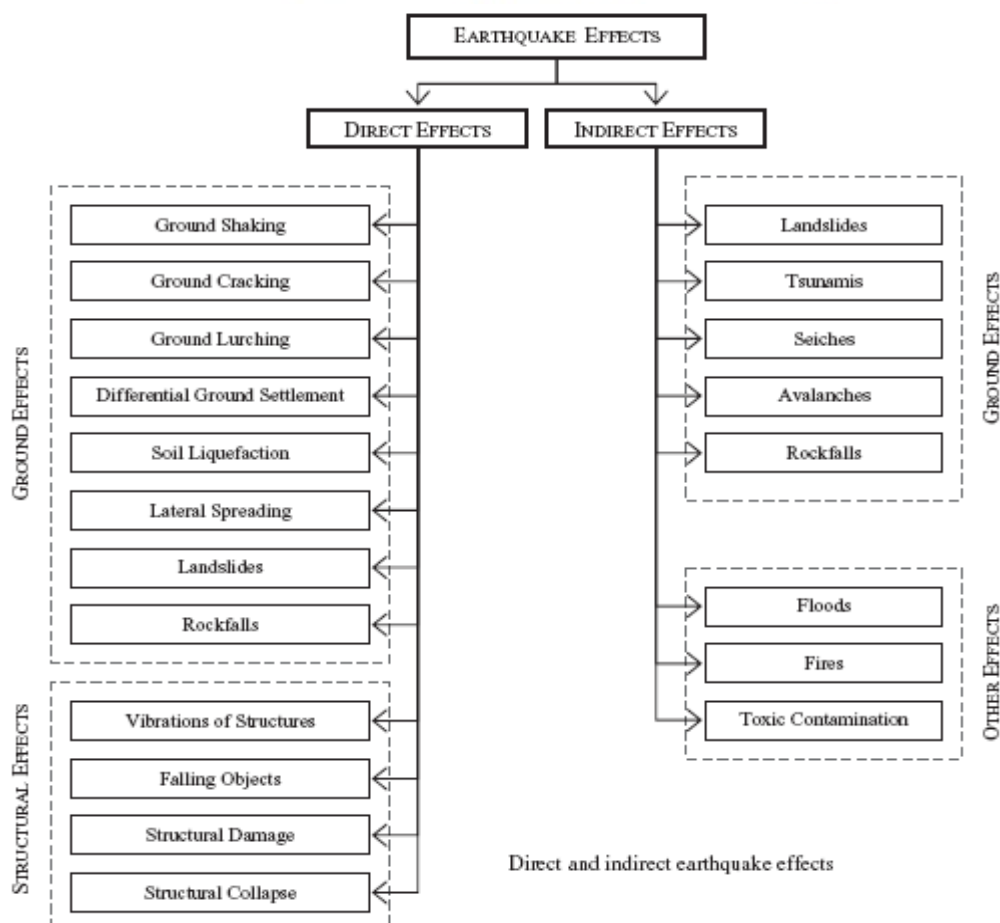
تقسیم بندی روش های تحریک پل ها

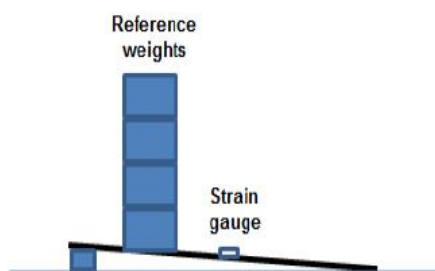


مقایسه تأثیر SHM بر قابلیت اطمینان و هزینه تعمیرات سازه

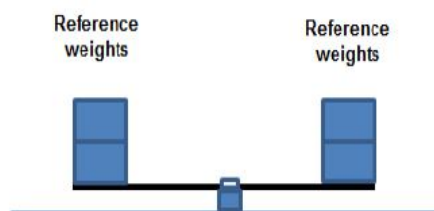


سطوح مختلف شناسایی و ارزیابی در پروسه عیب‌یابی سازه (Rytter, ۱۹۹۳)



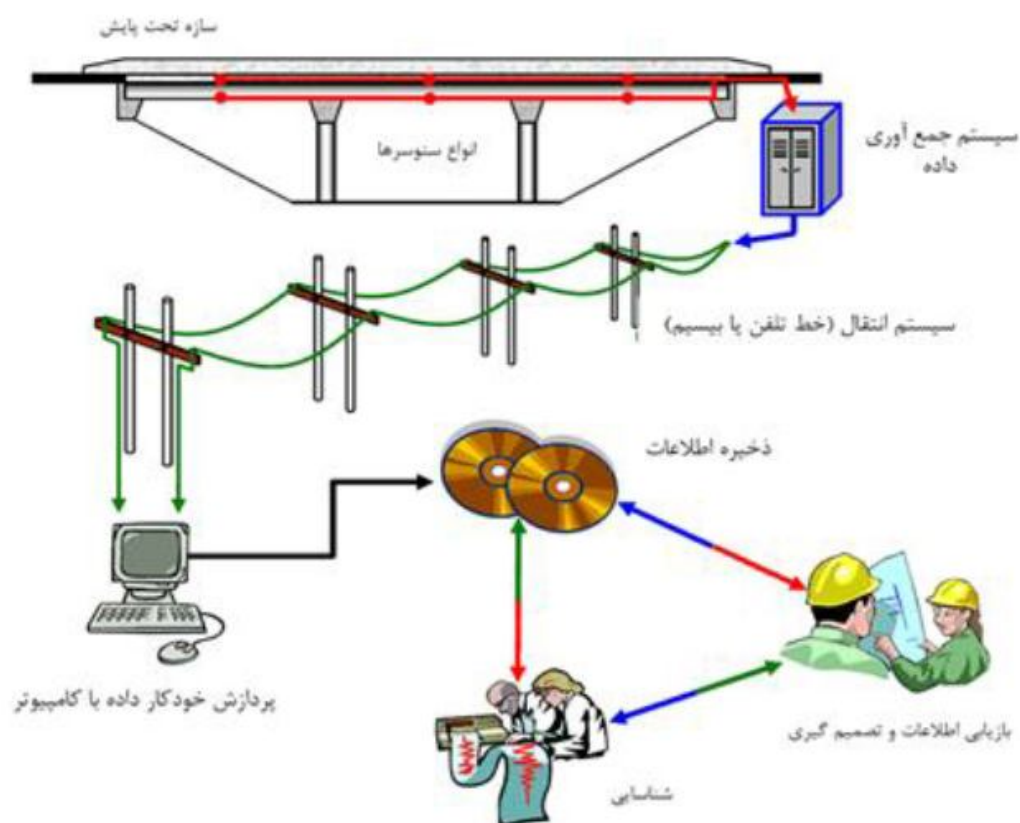


The setup for producing negative strain



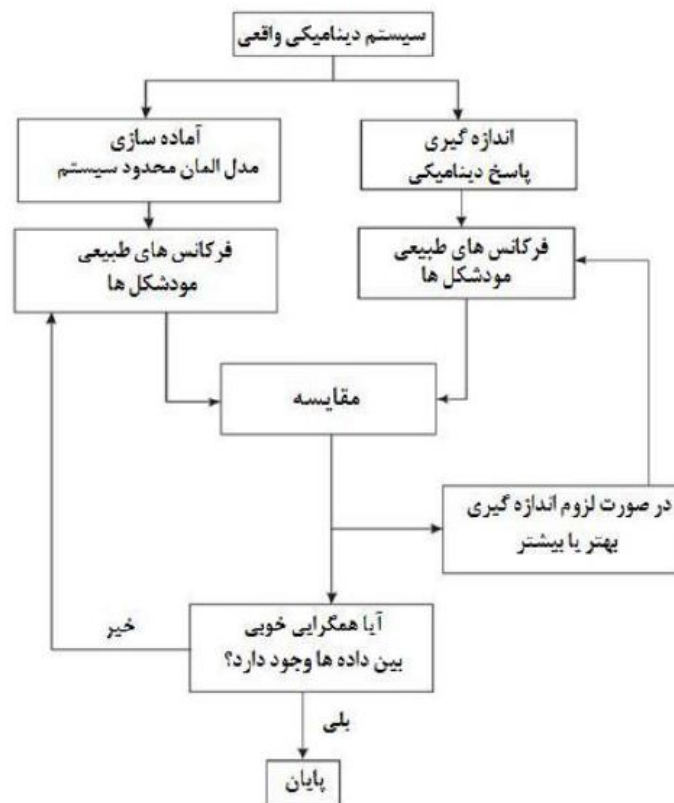
The setup for producing positive strain

the test setup for producing positive and negative strain values on the test specimen.



عناصر تشکیل دهنده یک سیستم پایش سلامتی سازه.

معیار مبنا	نوع ارتعاش	تعریف	تقسیم بندی ارتعاشات
تحریک خارجی	ارتعاش آزاد	ارتعاش تنها تحت تأثیر شرایط اولیه	
	ارتعاش اجباری	ارتعاش در اثر اعمال نیروی خارجی	
وجود میرایی	ارتعاش نامیرا	ارتعاش بدون کاهش انرژی سیستم	
	ارتعاش میرا	ارتعاش به همراه کاهش انرژی سیستم	
خطی بودن	ارتعاش خطی	ارتعاشی که قاعده برهم‌نهی در آن حاکم باشد	
	ارتعاش غیر خطی	ارتعاشی که قاعده برهم‌نهی در آن حاکم نباشد	
قابل پیش بینی بودن	ارتعاش معین	دامنه ارتعاشات در هر زمان مشخص است	
	ارتعاش تصادفی	دامنه ارتعاشات در هر زمان مشخص نیست اما مشخصات آماری معلوم است	



روند بروز رسانی مدل اجزای محدود

آنالیز حساسیت

انواع حساسیت در انجام این تحلیل به شرح زیر است:

- حساسیت مطلق: بیشتر برای پارامترهای محلی مورد استفاده قرار گرفته و در قالب یک معادله دیفرانسیلی بیان میگردد.

- حساسیت نسبی: این حساسیت مستقل از واحد بوده و برای هر دو پارامتر محلی و عمومی بکار میرود.

- حساسیت نرمال: حساسیت نرمال درصد تغییر مقدار پاسخ به یک درصد تغییر در مقدار پارامتر را نشان میدهد. در واقع تعمیم حساسیت نسبی است.

حساسیت نرمال چگالی: این نوع حساسیت برای تعیین اندازه المان که وابسته به پارامترهای محلی و عمومی است بکار رفته و با تقسیم بار حجم المان نرمال میشود.

عیب یابی بر اساس پارامترهای مودال

عیب یابی بر اساس فرکانس طبیعی

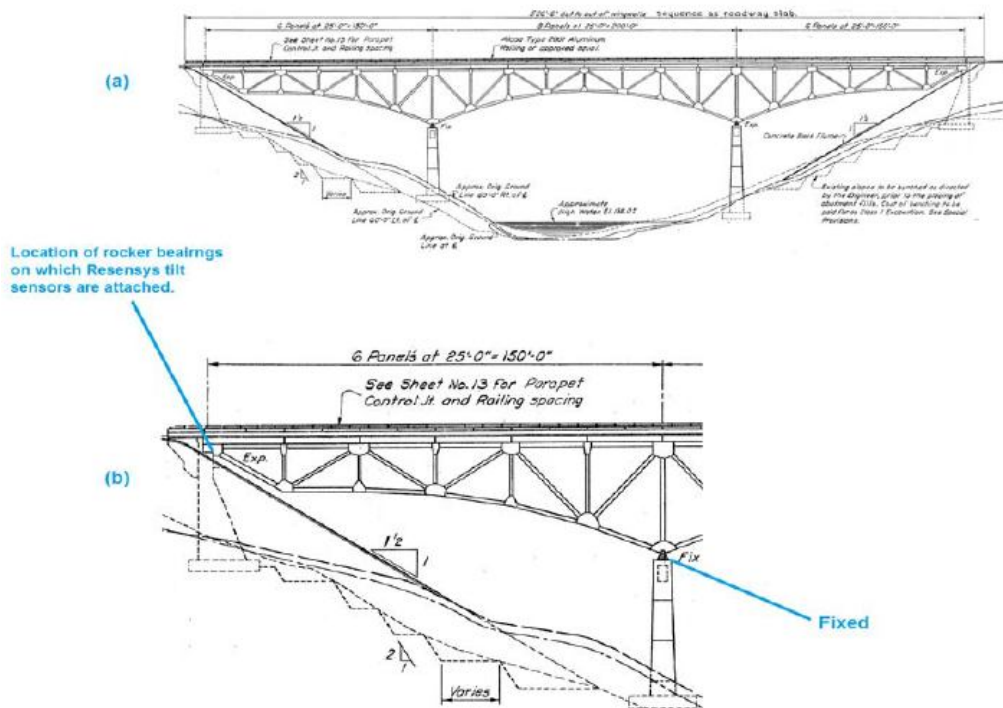
عیب یابی بر اساس مودشکل

عیب یابی بر اساس تابع پاسخ فرکانسی FRF

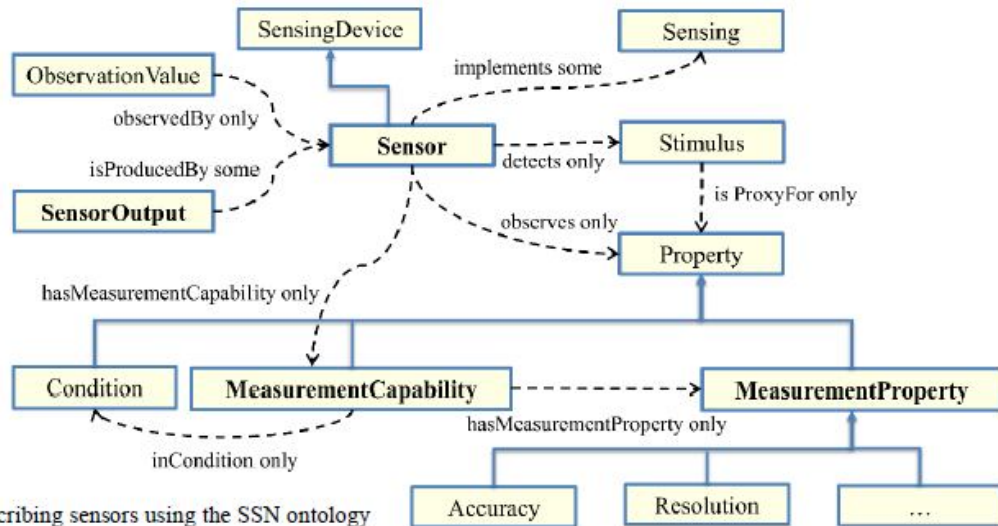
عیب یابی بر اساس ماتریس نرمی دینامیکی



Illustration of a complete bridge health monitoring system based on SenSpot sensors



(a) schematic of the bridge per design sheets. (b) a magnified view of the section of the bridge on which the SenSpot tilt sensor has been installed.



Monitoring-related information		SSN ontology	IFC object model
<i>Global monitoring-related information</i>			
Hardware specifications:	<i>Nodes and Server</i>	<i>ssn:System</i>	[not available]
Topology of the sensor network:	<i>Positions (x,y,z) and story</i>	<i>ssn:Deployment (ssn:Platform)</i>	<i>IfcRelConnectsElement</i> [element to which sensor is attached]
Data storage:	<i>Type of database</i>	[not available]	<i>IfcPropertyListValue</i>
Monitoring strategies:	<i>Sequence of monitoring (send-receive)</i>	[not available]	[not available]

Monitoring-related information		SSN ontology	IFC object model
<i>Local monitoring-related information (about the sensor/wireless sensor node)</i>			
Type of sensor:	<i>MMA7455L Accelerometer</i>	<i>ssn:Sensor</i>	<i>IfcSensorTypeEnum</i> [no defined entity] (<i>IfcRelDefinesByType</i>)
Sensitivity:	<i>±2g, ±4g, ±8g for 8-bit Mode</i>	<i>ssn:Sensitivity (ssn:MeasurementProperty)</i>	<i>IfcPropertySingleValue</i> [to be specified]
Sampling rate:	<i>125Hz / 250 Hz</i>	<i>ssn:Frequency (ssn:MeasurementProperty)</i>	<i>IfcPropertySingleValue</i> [to be specified]
Power range:	<i>2.4 V – 3.6 V</i>	<i>ssn:OperatingPowerRange</i>	<i>IfcPropertySingleValue</i> [to be specified]
Measured values:	<i>Acceleration [g]</i>	<i>ssn:ObservationValue (ssn:SensorOutput)</i>	<i>IfcPropertyListValue</i>
Processed parameters:	<i>List of numbers [double]</i>	[not available]	[not available]
Algorithm:	<i>AR-ARX procedure</i>	[not available]	[not available]

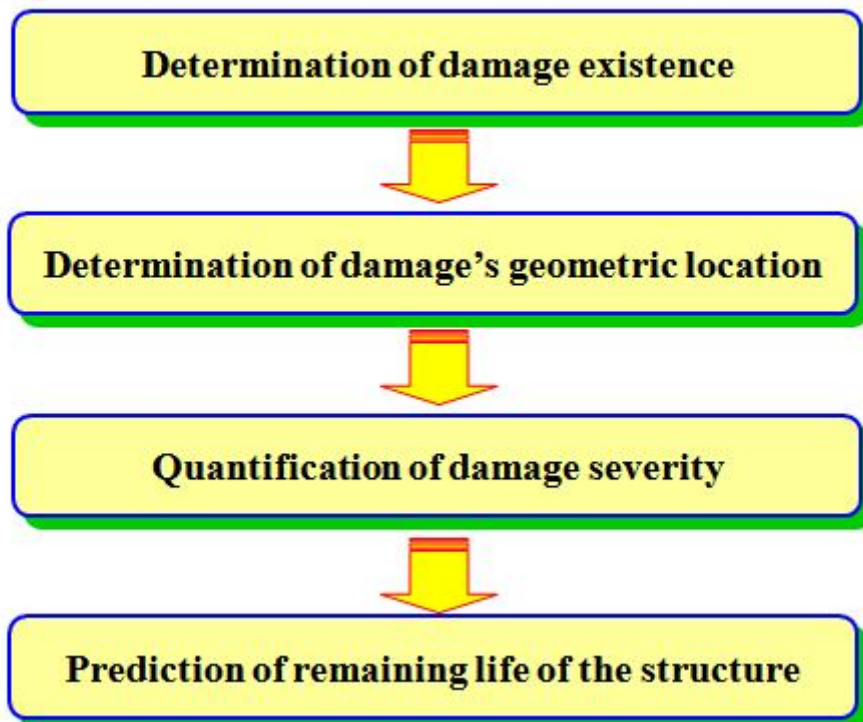
انجام پایش سلامت سازه در ساختمانهای تاریخی، پلها، سدها، سازه های بلند و سکوهاى نفتى، تونلها، برجهاى خنک کننده،
و ژنراتورهای بادی حائز اهمیت می باشند

- ❖ **Structural health monitoring system**
- ❖ **Baseline finite element modeling**
- ❖ **Structural damage alarming**
- ❖ **Data Analysis of GPS Monitoring System**
- ❖ **Data Analysis of Wind Monitoring System**
- ❖ **Data Analysis of Stress Monitoring System**

SHM Involves:

- Health monitoring
- Operational Evaluation
- Data Feature Extraction
- Statistical Models Development

Objective of structural health monitoring



- **Infrastructure is expected to provide:**

- reliable service for long periods of time,
- following major technology changes,
- spanning several generations and experiencing dramatic evolutions

- **Conventional cables**

- **High installation costs**

- **Vulnerable** to ambient signal **noise** corruption

- **Vulnerable to earthquake** conditions

- **Size and complexity** of large structures require a large number of **sensing points** to be installed.

- **Develop Design-to-service Solutions**

- Efficient Monitoring
- DSP strategies
- Evaluation Criteria
- Knowledge bases

- **Develop Smart Control Units**

- Real-time Feedback
- Centralized (or not)

- **Wireless Sensors**
 - Accelerometers/Inclinometers etc
- **Laser Scanning**
- **RFIDs**
- **Acoustic Emissions**
- **MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)**
- **Increase of Computation capabilities**
- **Fiber technologies**

Monitoring Metrics

Measure:

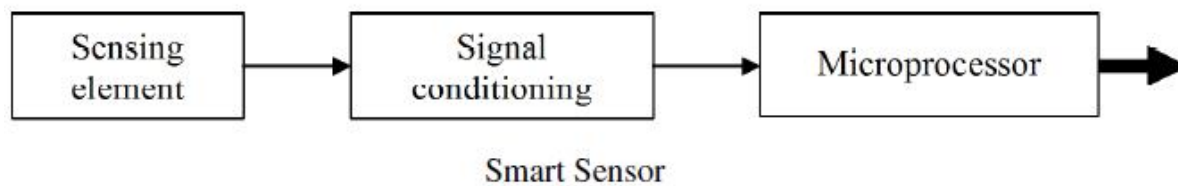
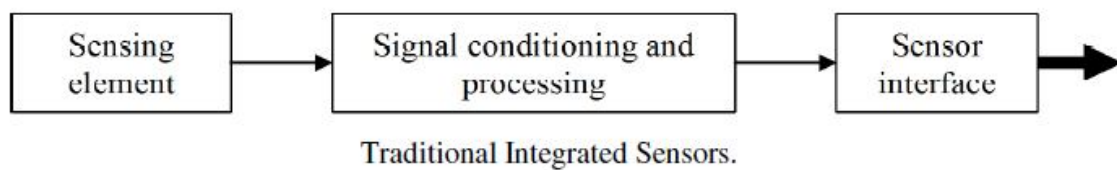
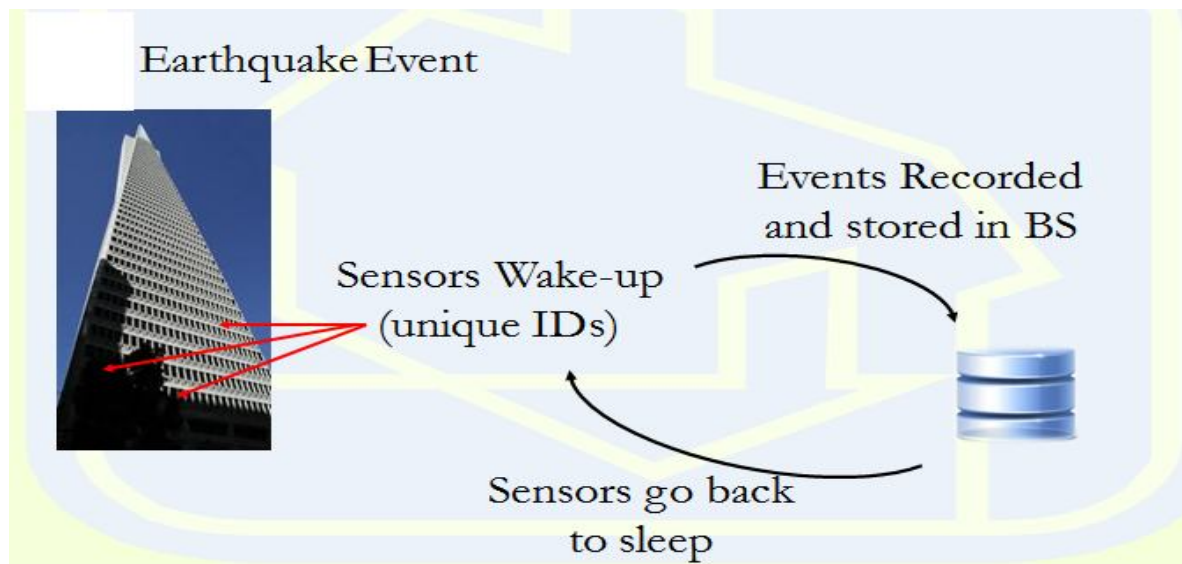
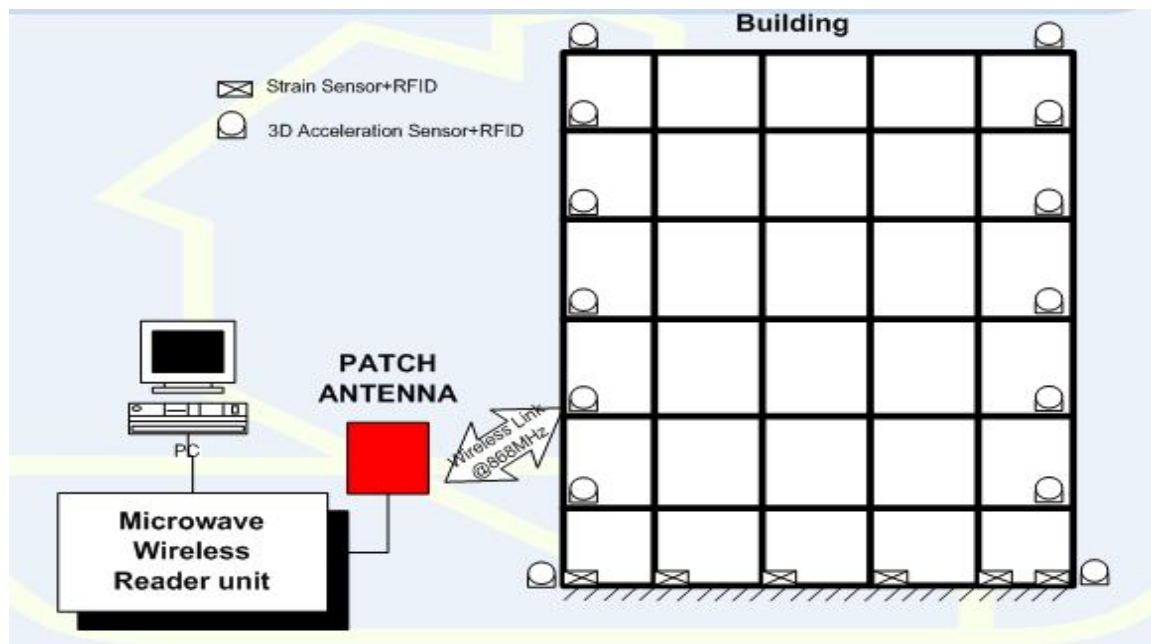
- Acceleration
- Strain
- Climatic Conditions
- Curvature
- Displacements
- Load
- Tilt/Slope
- Scour

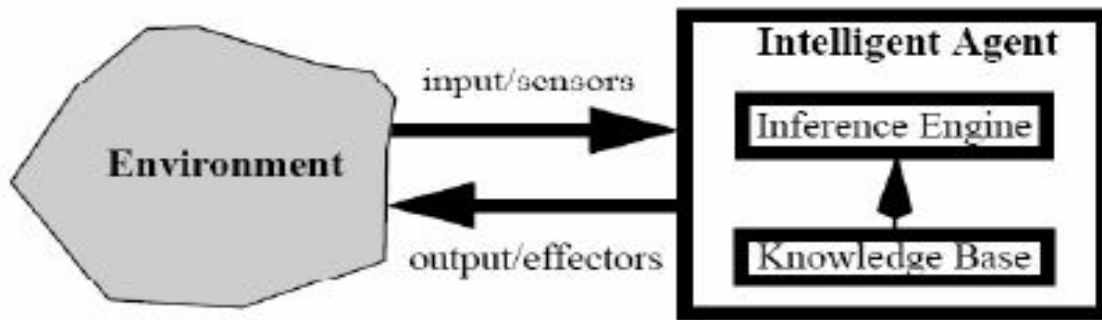


Identify

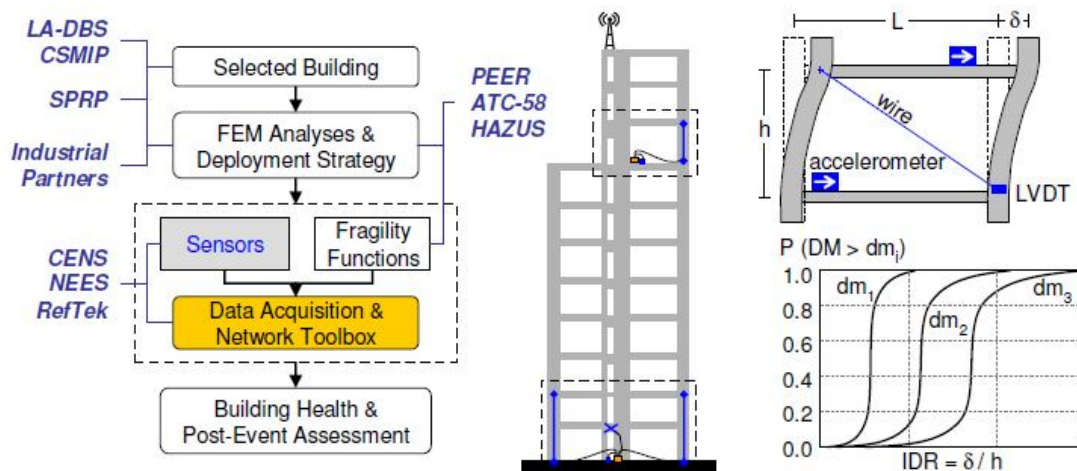
- Corrosion
- Cracking
- Strength
- Tension
- Location of rebar/delaminations

- **Wireless system architecture**
- **Integration technology for the sensors**
- **Software for the structural assessment**
 - Dramatically decrease the number of required strain sensors
 - To assess the structural condition of each and every one of the structural elements, as well as global stability





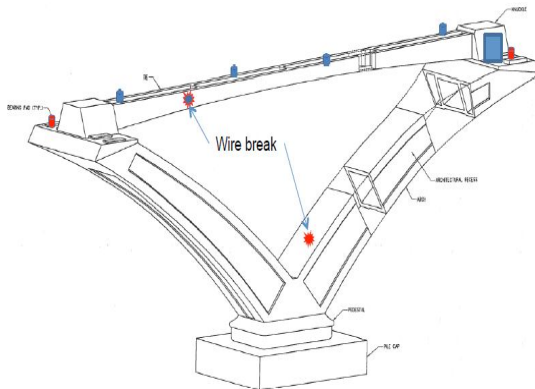
Schematic of Agent-based Framework.



Proposed SHM system with example deployment and accompanying fragility curve example



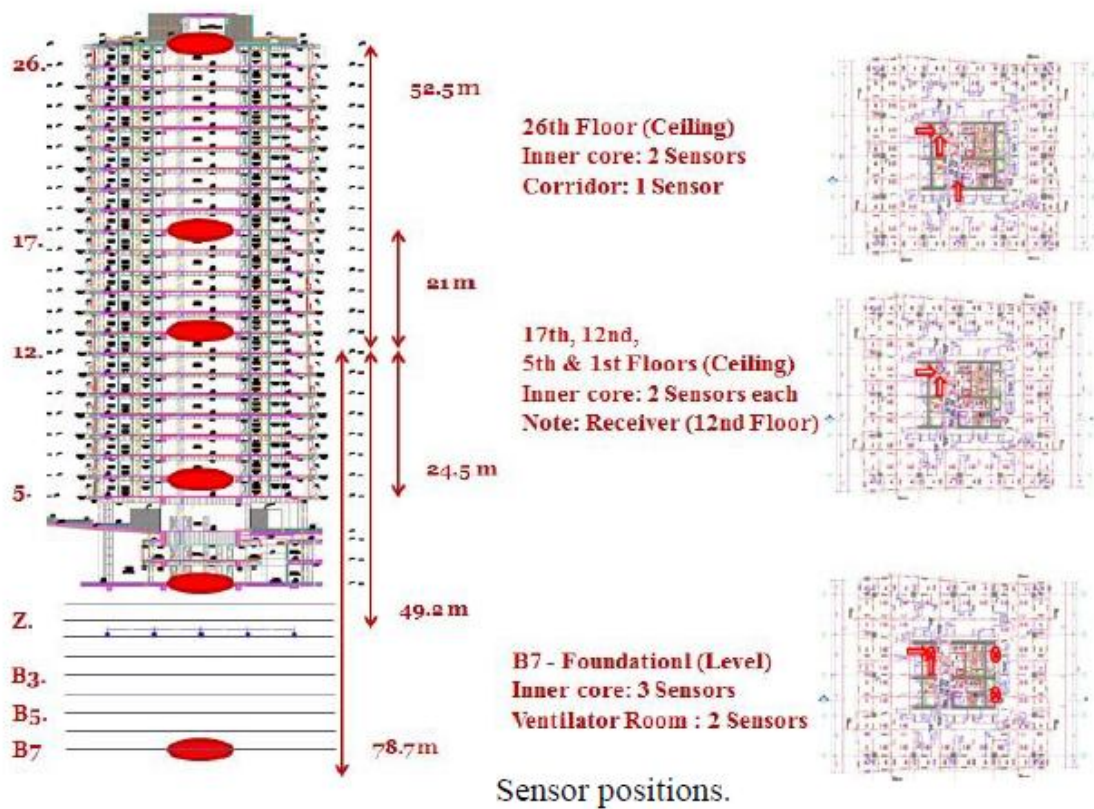
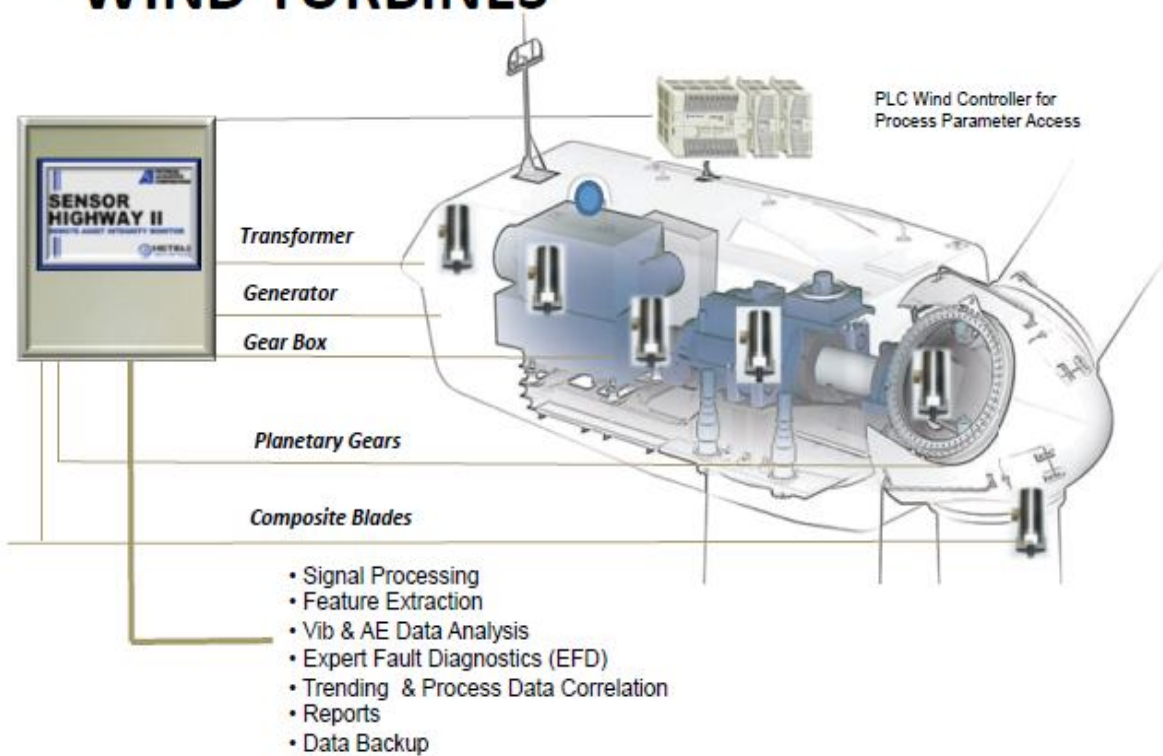
Offshore Platform



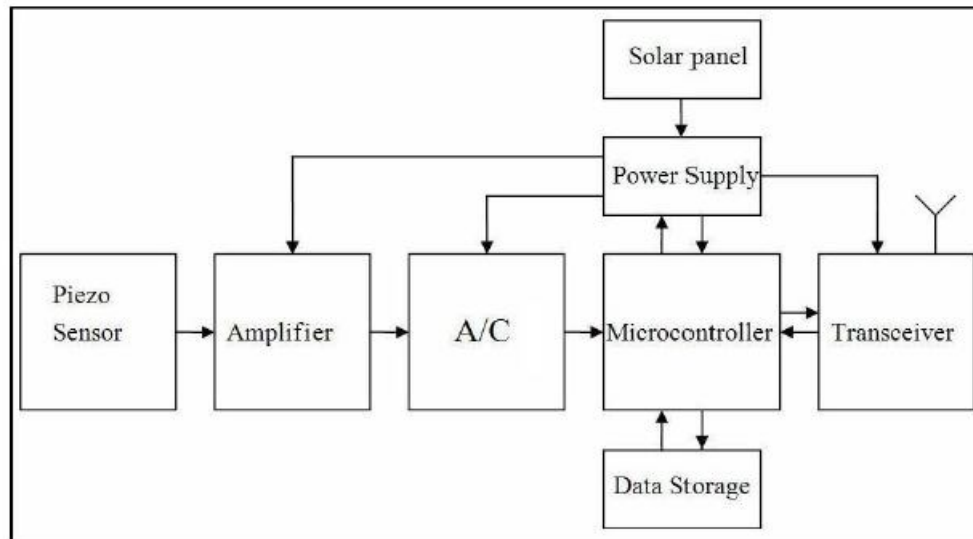
Economical

- Reliable
- Energy aware
- Smart

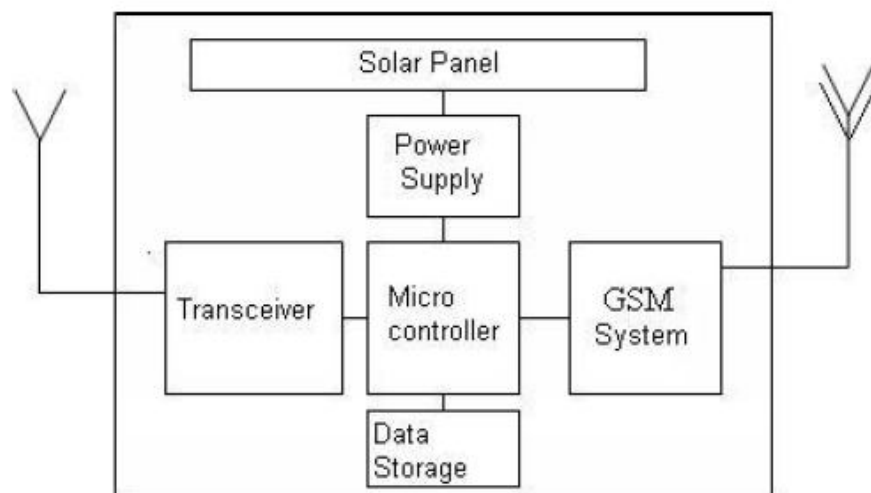
WIND TURBINES



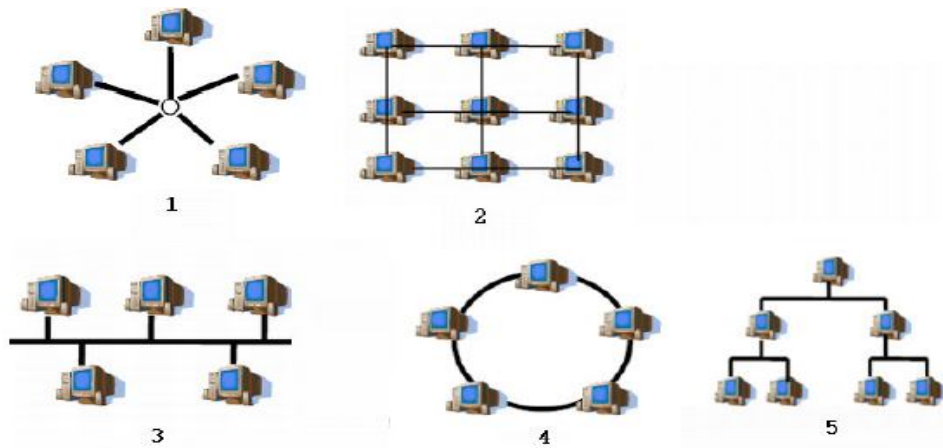
Sensor positions.



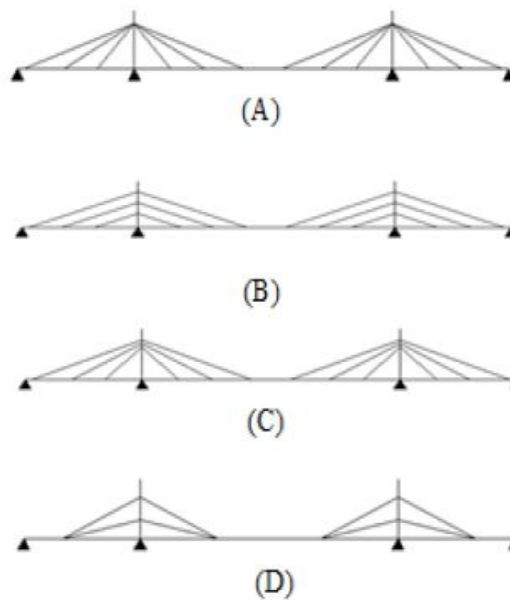
Scheme of the integrated bridge sensor



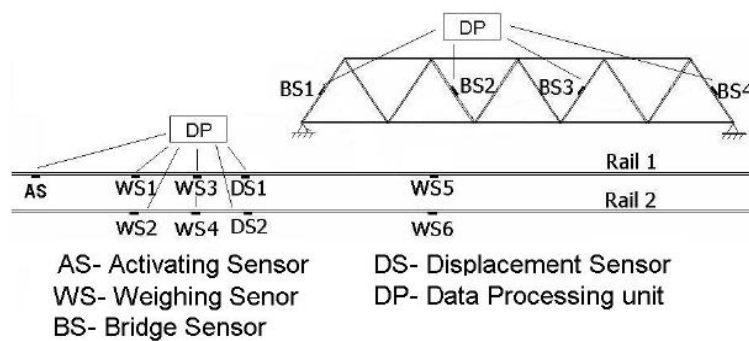
Scheme of the DP unit



Types of wireless networks: 1) star, 2) net, 3) rail, 4) circle, 5) tree

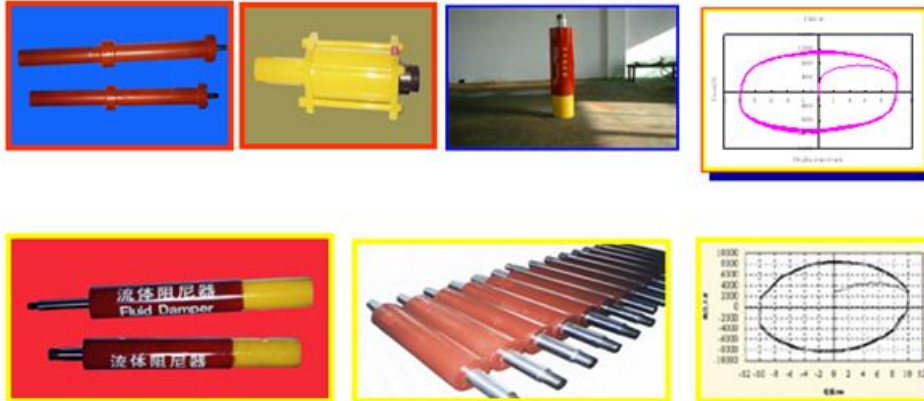


The Types Of Cable-Stayed Arrangements



A scheme of the bridge equipped with sensors and data acquisition unit

Viscous Fluid Damper



Different kinds of Fluid Dampers

Loop of Damping Force and Displacement

Difficulties in SHM Using Smart Sensors and Approaches

Difficulty	Approach
Sensor hardware	- The Imote2 sensor board, which has a triaxial accelerometer, is employed. The performance of the accelerometer is compared with reference sensors. - Sensor board customizability is demonstrated.
Data aggregation	- Model-based data aggregation is proposed. - DCS for SHM allows distributed data processing, eliminating the need for centrally collecting a large amount of data.
Time synchronization	Synchronized sensing middleware service is proposed.
Limited computational capability	- Computational tasks are distributed by employing model-based data aggregation and DCS for SHM. - The Imote2 has a relatively fast microprocessor as well as large RAM.
Power	- Power consumption is kept moderate by employing DCS for SHM and model-based data aggregation. - CPU clock frequency is switched, depending on tasks to perform. - Power harvesting is not addressed in this research.

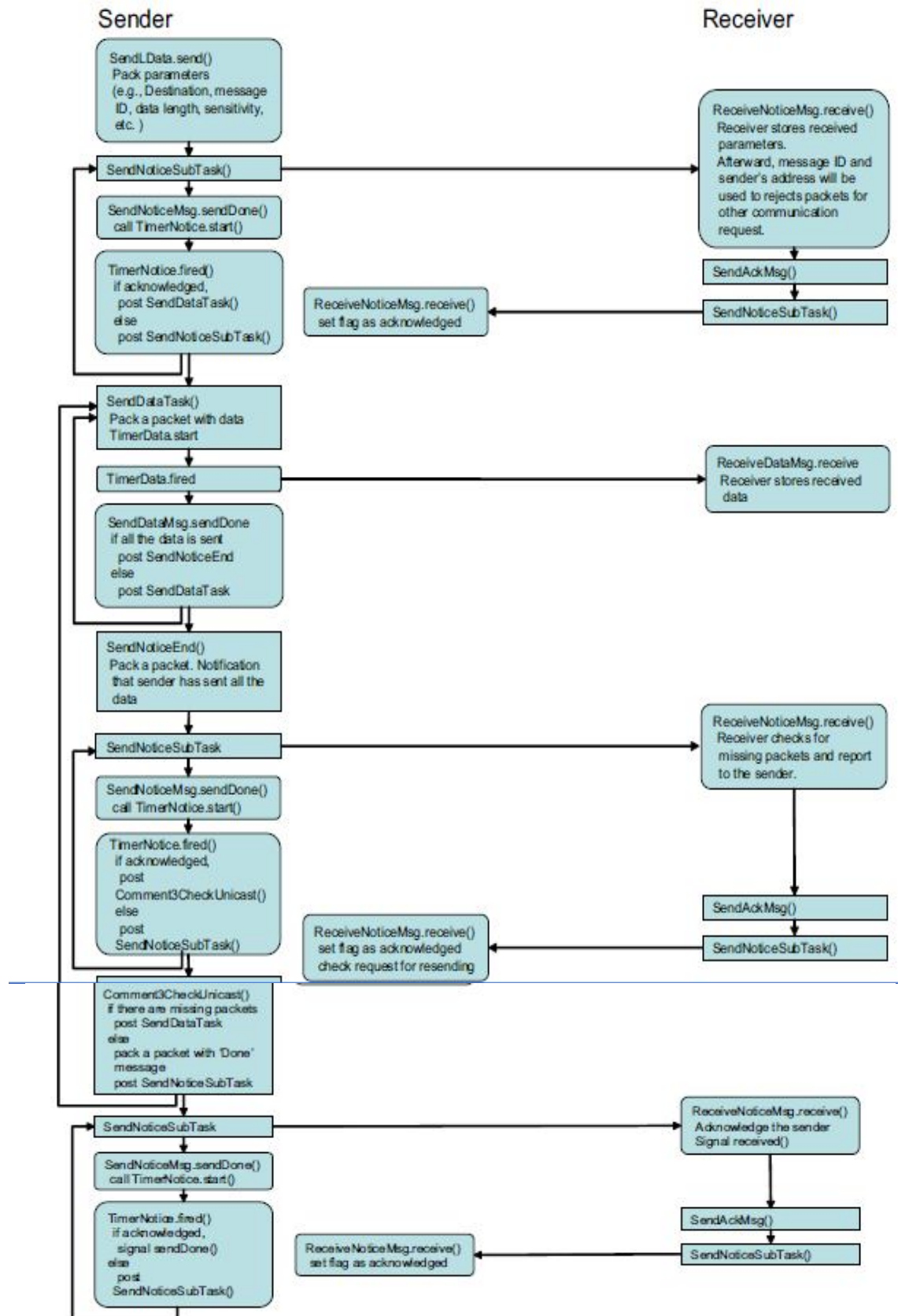
Desirable Characteristics and Approaches

Desirable characteristic	Approach
<i>Scalable resource aware system</i>	
Scalability	DCS for SHM and model-based data aggregation offers scalability.
Power awareness	- RF and flash memory usage are kept moderate through DCS for SHM and model-based data aggregation, as well as implementation ingenuity. - The homogeneous hardware configuration of the network potentially offers reassignment of roles based on available power.
Bandwidth awareness	- RF communication is managed by manager node and cluster heads. - Reliable communication protocols, which wait for longer intervals in a congested communication network, are developed.
Memory awareness	SHM system is designed so that requests for memory usage do not exceed the currently available memory size of the Imote2, that is 256 kB.
Computational power awareness	- Computational tasks are distributed by employing DCS for SHM and model-based data aggregation. - The frequency scalable processor on the Imote2 is utilized to make efficient use of computational power.
Modal operation	- Smart sensors get ready to enter sleep mode. - TinyOS that supports modal operation is employed.
<i>Autonomous distributed embedded computing</i>	
Model-based data aggregation	Model-based data aggregation is proposed and implemented.
Collaborative distributed data processing	DCS for SHM and model-based data aggregation realize collaborative, distributed data processing.

Desirable characteristic	Approach
Autonomous initial configuration and maintenance	Not realized in this report.
<i>Fault tolerant system</i>	
Message packet loss tolerance	Reliable communication protocols are proposed.
Node failure tolerance	The homogeneous hardware configuration of the network potentially addresses the node failure.
Byzantine error tolerance	Not realized in this report.
<i>Desirable algorithmic characteristics specific to SHM for civil infrastructure</i>	
Multiscale information	Not realized in this report.
Collaboration in local sensor communities	DCS for SHM and model-based data aggregation offers this collaboration.
Redundancy	DCS for SHM gives redundancy through overlapping clusters.
Multiple functions	- Baseline measurement and continuous SHM of a structure are implemented on smart sensors. - Rare event monitoring, traffic monitoring, local weather monitoring, etc. are not realized.

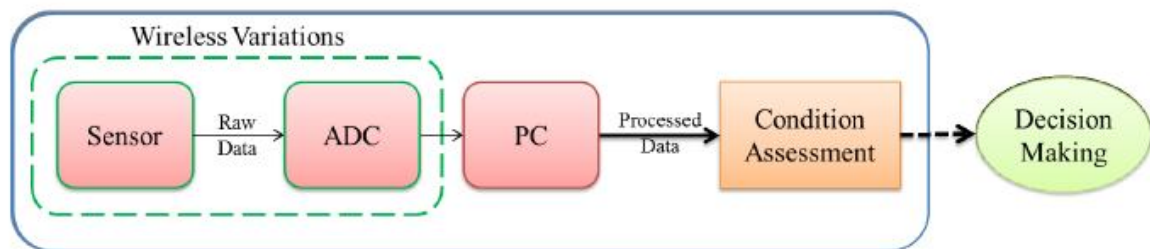
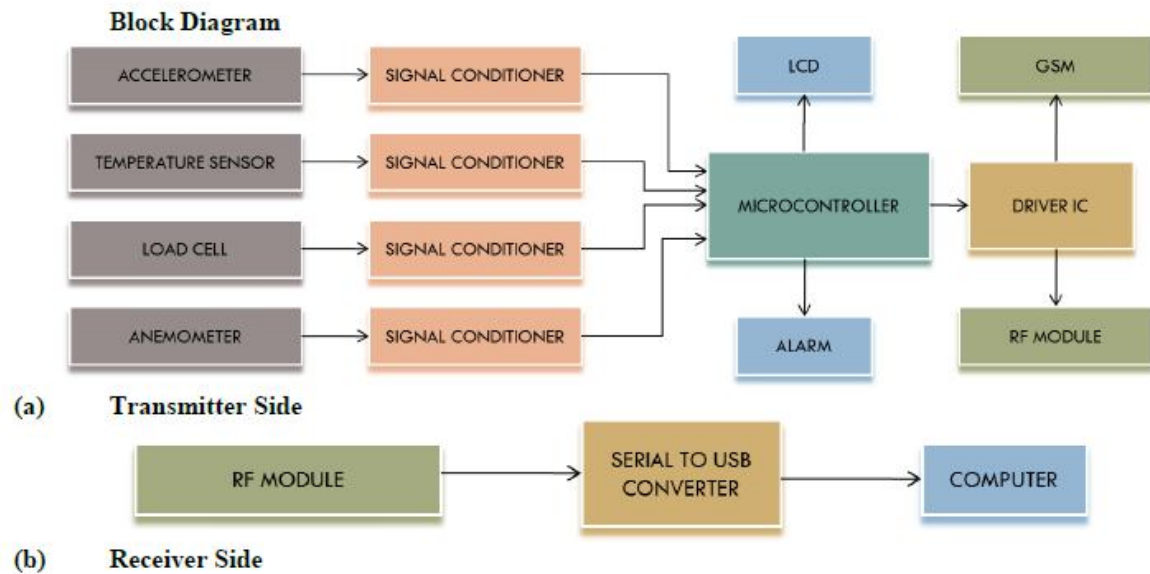
Desirable Characteristics and Approaches

Desirable characteristic	Approach
<i>Desirable platform characteristics specific to SHM for civil infrastructure</i>	
Appropriate sensor availability	- The Imote2 sensor board, which has a triaxial accelerometer, is employed. The performance of the accelerometer is compared with reference sensors. - Sensor board customizability is demonstrated.
Sufficient RAM, flash memory, and RF bandwidth	- The Imote2 has relatively large RAM and flash memory. - The Imote2 has a ZigBee-compliant RF component. The throughput is larger than RF components on other smart sensor platforms such as Mica2.
Environmentally hardened	Not realized in this report.
Open-source OS and interface	TinyOS is employed.



Detailed block diagram of the reliable unicast protocol for long data records.

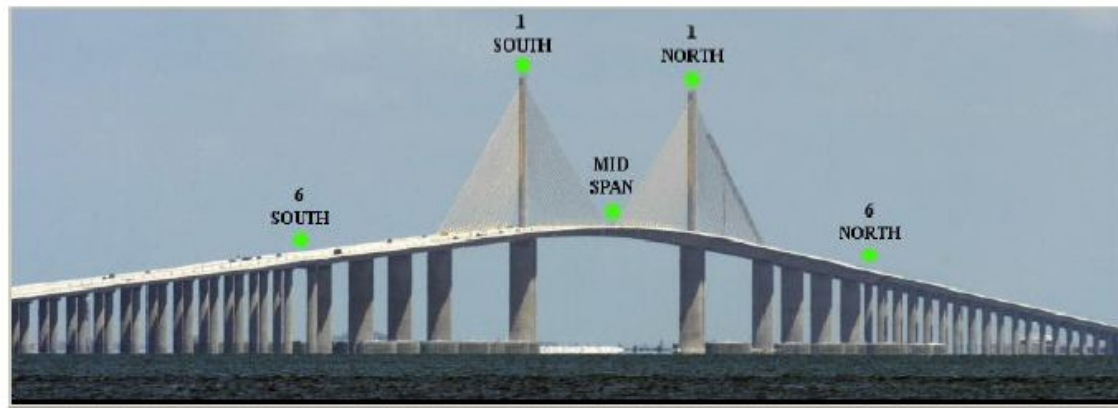
- Accelerometer
- Load Cell
- Anemometer
- Temperature Sensor



SHM approach to bridge assessment and decision support.

Bridge monitoring sensors and measurement functionality.

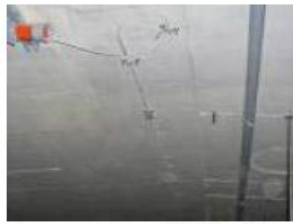
Sensor/Sensor System	Measurement/Functionality	Potential Purpose
Accelerometer	Vibration	Modal analysis
Strain Gauge	Surface or reinforcement strain	Strain/stress response
Anemometer	Wind velocity/direction	Wind load assessment
Tiltmeter	Slope	Pier settlement detection
Thermometers	Temperature	Thermal load assessment
GPS Receivers	Displacement/motion	Model validation, load rating
Sonar	Pier-tip elevation	Scour detection
Reference Electrodes	Voltage potential of steel	Corrosion monitoring



The Skyway Bridge structural health monitoring system

Sensor types, purpose and addressed risk or uncertainty

Sensor Type	Measurement	Purpose
Vibrating-wire strain gauges	Local static strain	Concrete shrinkage and creep (R1,O1) Correspondence with FEM (U1)
	Local curvature	Loss of pre-stress, creep (R1)
Thermistors	Temperature	Concrete T during curing (O1) T induced deformations (U1,O1)
	Temperature gradient	Temperature induced strain (R2, U1)
Linear Potentiometers	Joint and bearings movements	Stuck joints and bearings (R2) Anomalous global movements (R2,U1)
Accelerometers	Traffic induced vibrations	Excessive vibrations (U2) Dynamic amplification (U2)
	Modal Frequencies	Correspondence with analysis (U2)
	Dynamic damping	Stuck joints and bearings (R2) Anomalous global behavior (U1)
Corrosion Sensors	Concrete resistivity	Water exchange in concrete deck (R5)
	Corrosion current	Corrosion of concrete deck rebars (R5)
Long-gauge fiber optic sensors	Average strains	Detection of Cracks (R3) Correspondence with analysis (U1)
	Strain distribution	Temperature induced deformations correspondence with analysis (U1)
	Average Curvature Deformed Shape	Loss of pre-stress, creep (R1) Correspondence with analysis, settlements (R4)
	Dynamic Strains, dynamic deformations, mode shapes	Anomalous global behavior (U2)
Topography	Deformed shape, global deformations	Loss of pre-stress, creep (R1), settlements (R4)



Long-gauge SOFO fiber optic sensor



Vibrating Wire Strain Gauge



Concrete humidity and corrosion sensors



Accelerometer

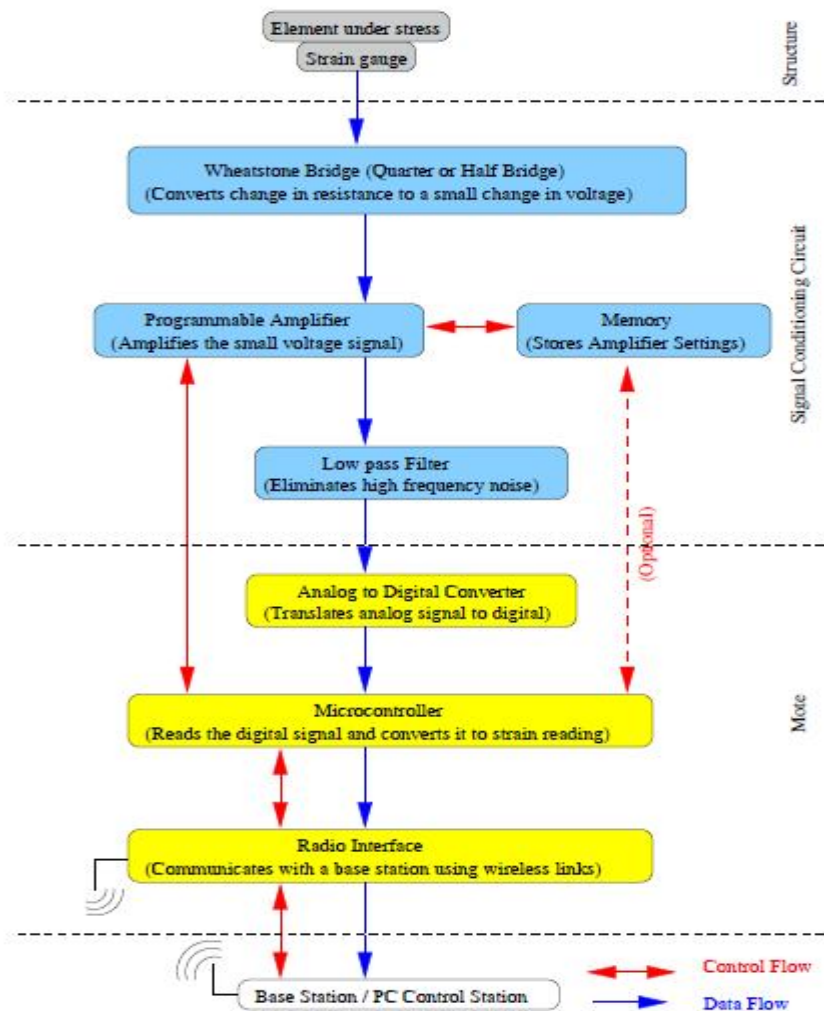


SOFO Fiber Optic Sensor Datalogger

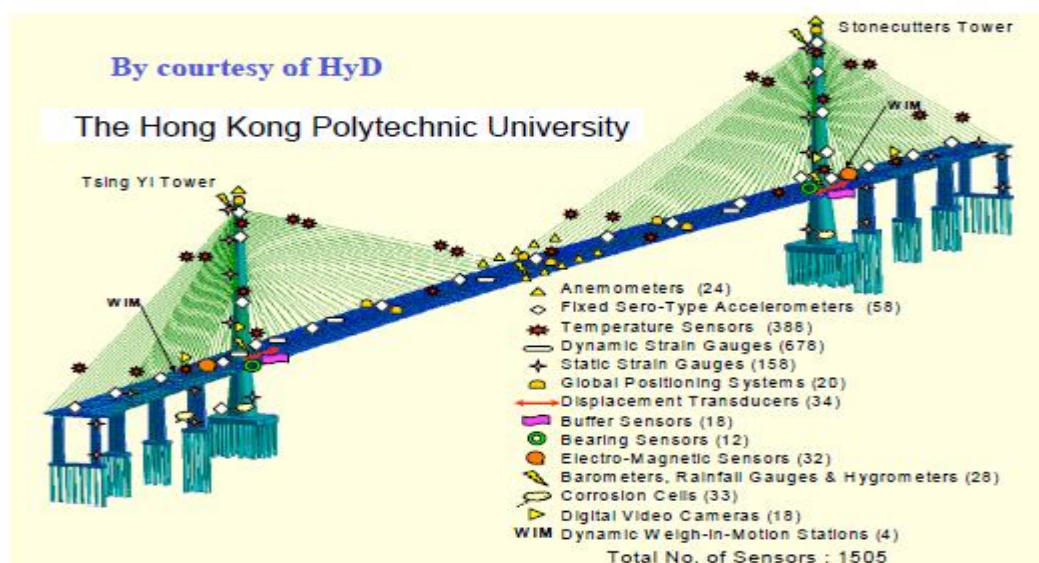
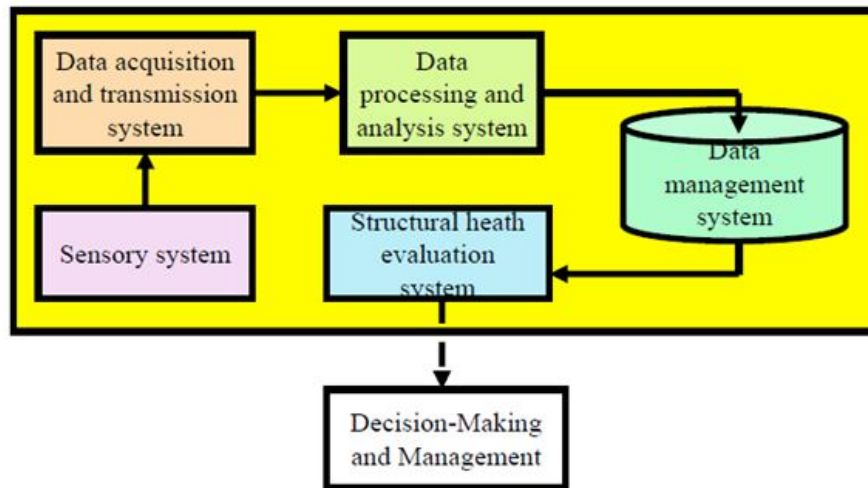


Vibrating wire and temperature sensors datalogger

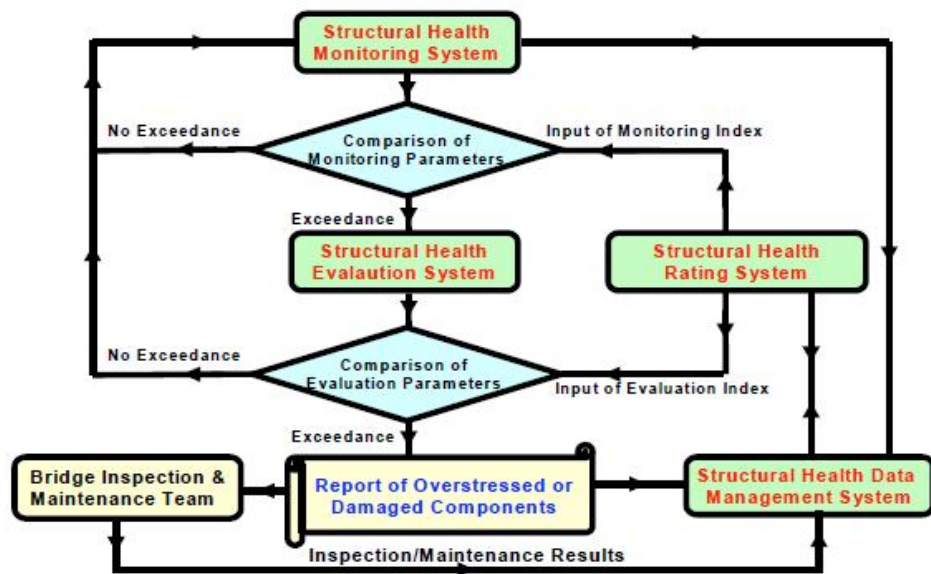
Overview of sensors and data acquisition systems installed in the Bridge



Block diagram of wireless structural health monitoring system

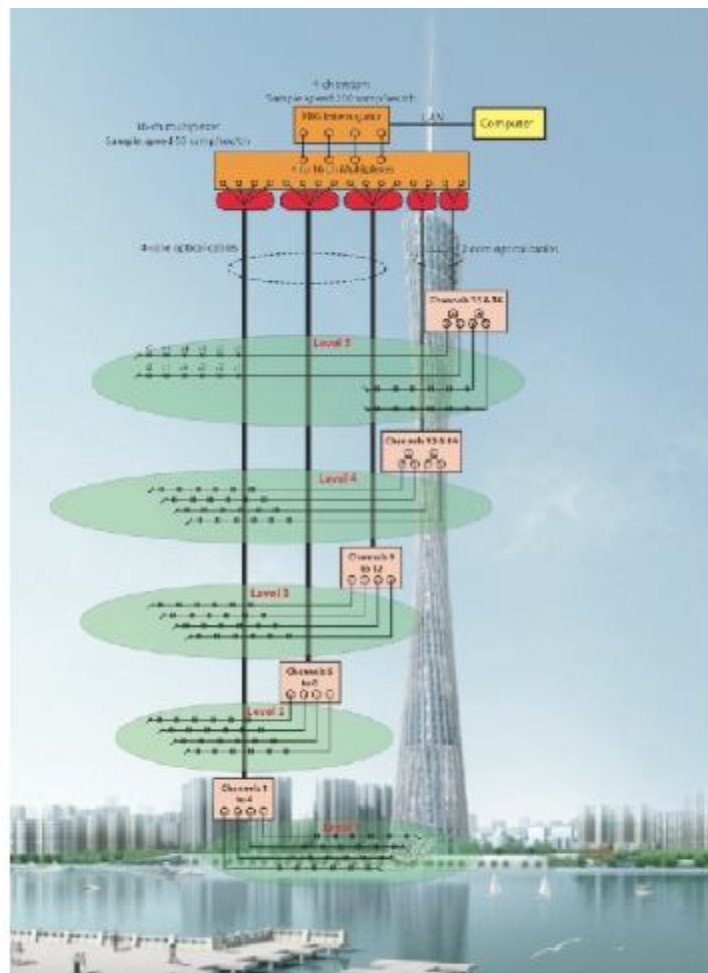


Sensor layout of Stonecutters Bridge



Flow Chart of SHM for Stonecutters Bridge

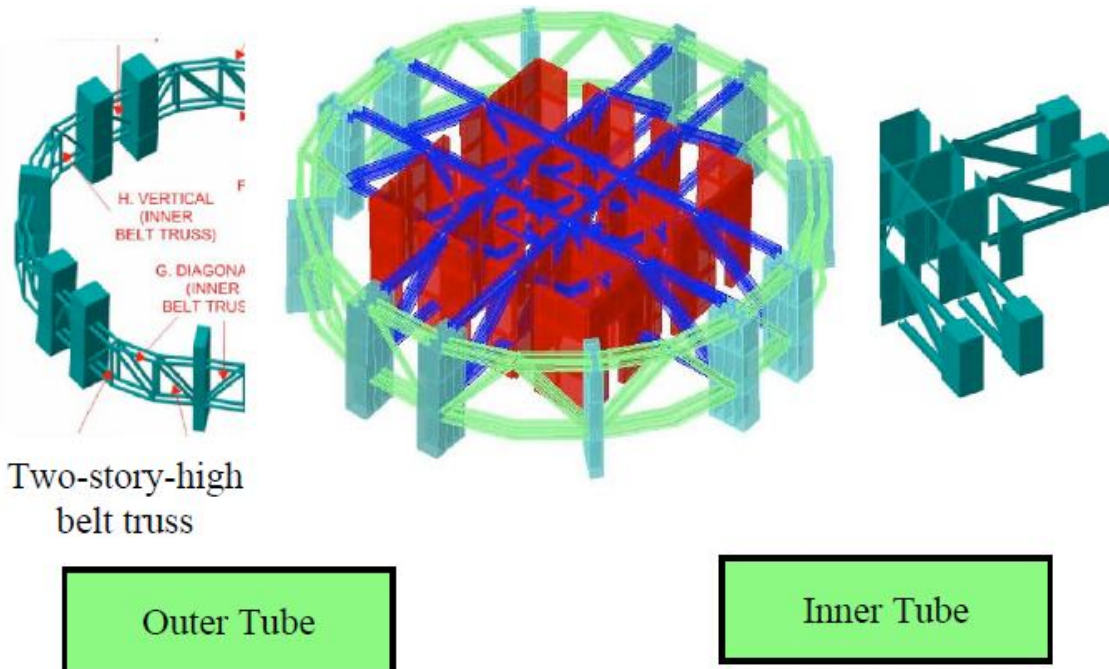
By courtesy of HyD



FBG sensor network

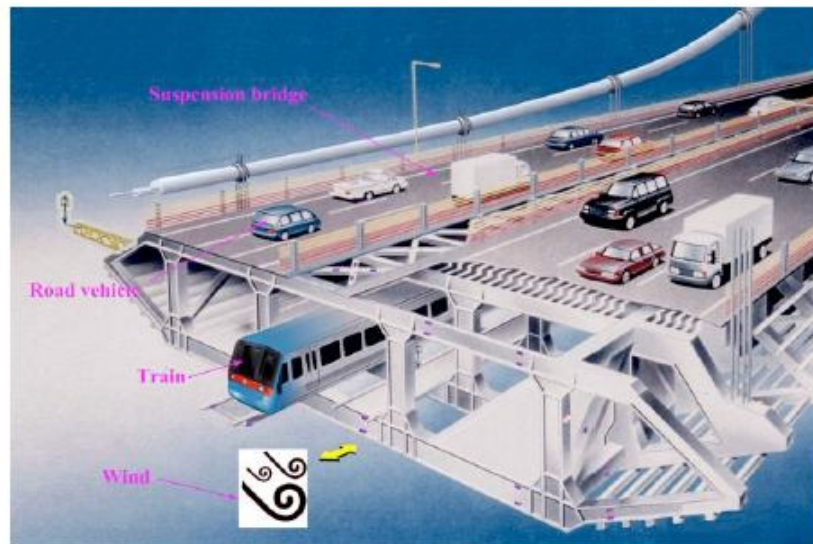
Sensors and sub-stations for in-construction monitoring

Sensors and sub-stations for in-service monitoring



Research Milestones

- SHM-oriented finite element model of the bridge.
- Predominating wind loading.
- Predominating temperature loading.
- Predominating highway loading.
- Predominating railway loading.
- Criticality and vulnerability analyses.
- New bridge rating method.
- SHM-based bridge rating system.

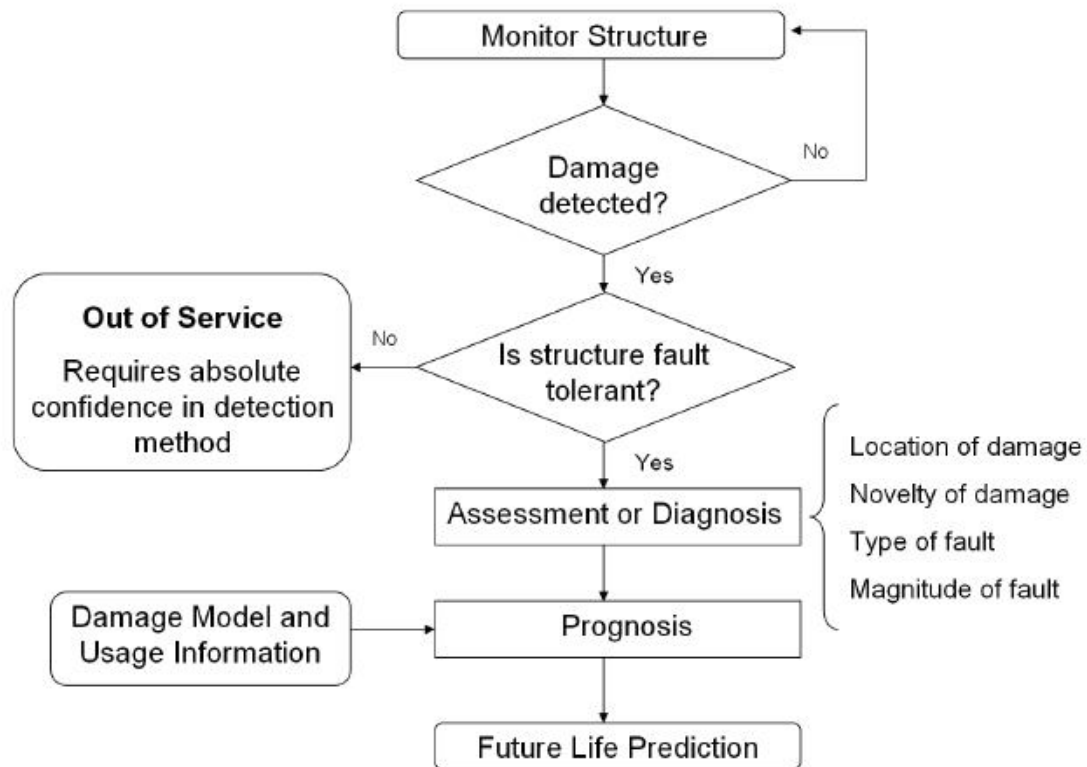


Long-span Suspension Bridge under Railway, Highway, and Wind Loading

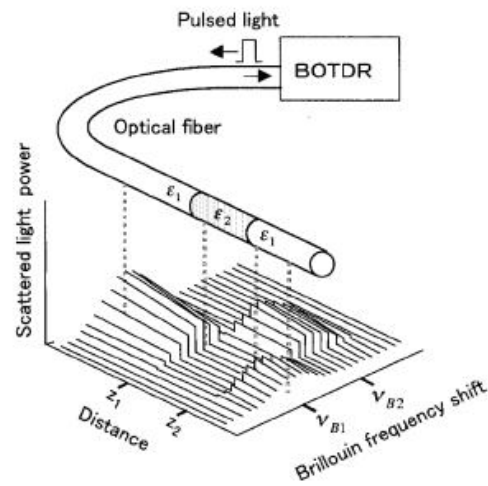
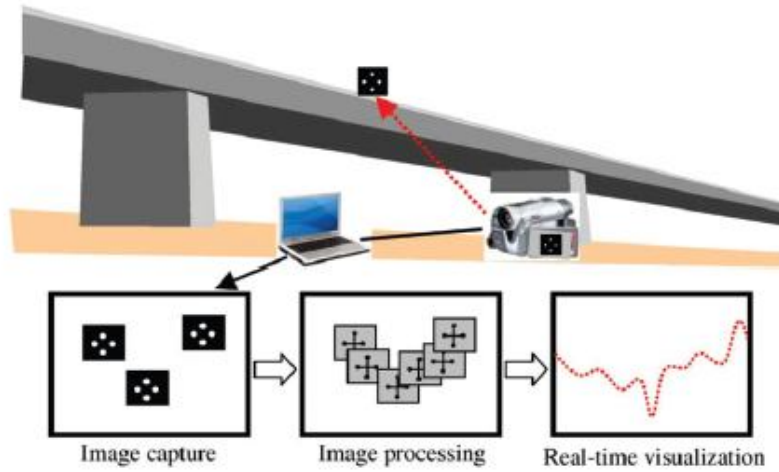
(1) Dynamic stress analysis of long suspension bridges under multiple loading

(2) Fatigue assessment of multi-load suspension bridges over design life

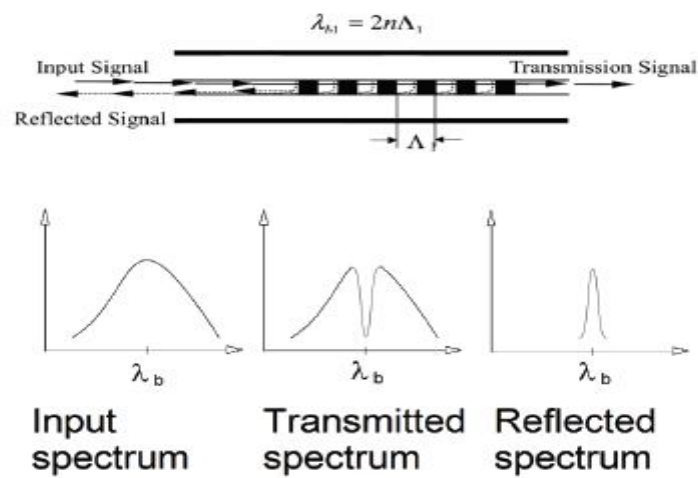
(3) Fatigue reliability analysis of multi-load suspension bridges



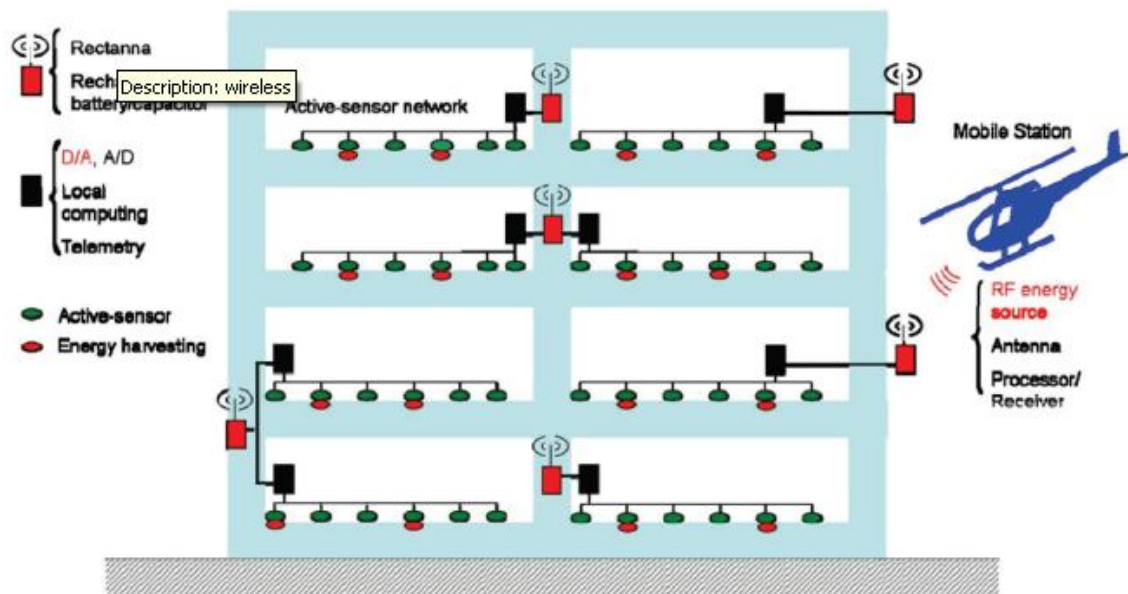
Physical quantity	Sensor	Typical sensors used in structural monitoring
Displacement	Linear variable differential transformer (LVDT) Long gauge fibre optics Optical Laser	
Acceleration	Piezoelectric accelerometer Capacitive accelerometer Force balanced accelerometer MEMS	
Strain	Electrical resistance strain gauges Vibrating wire sensors Bragg grating fibre optics Long gauge fibre optics (Interferometry)	
Force	Electrical resistance load cells Piezoelectric load cells	
Temperature	Electrical resistance thermometers Thermocouples Thermistors Fibre optics based sensors	



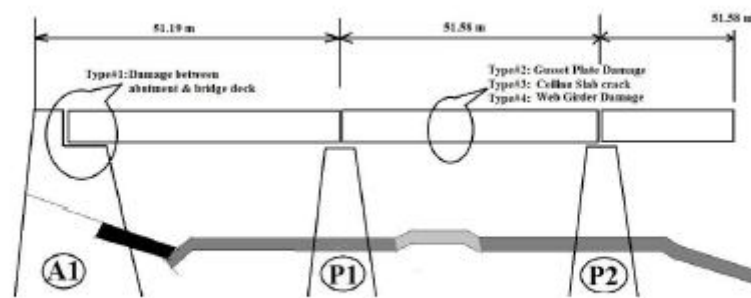
Principle behind the BOTDR in which segments of the fibre with different strains scatter light at different frequencies.



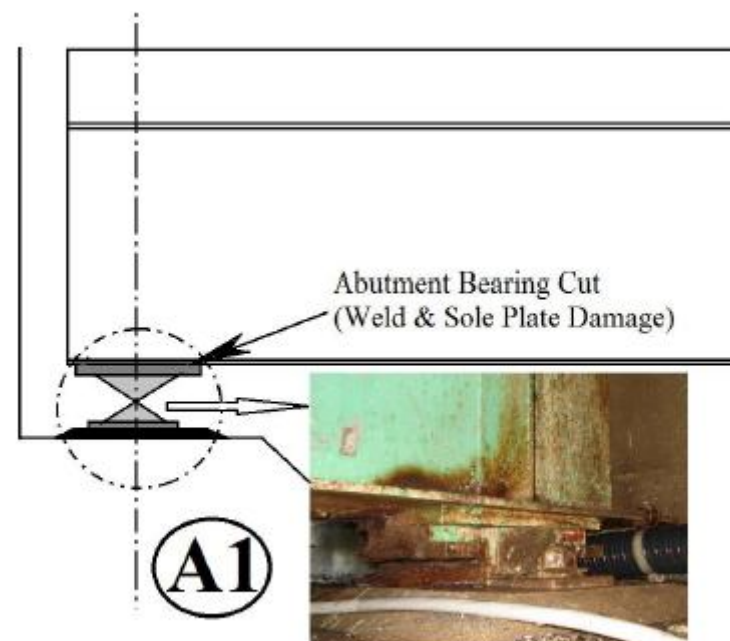
Scheme of a FBG, and its effect on the spectra of transmitted and reflected light.



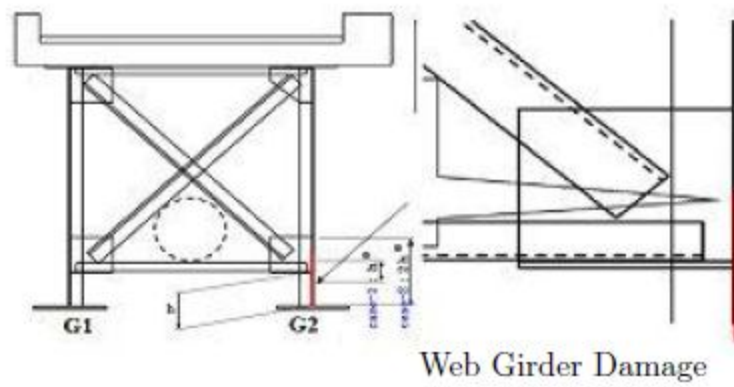
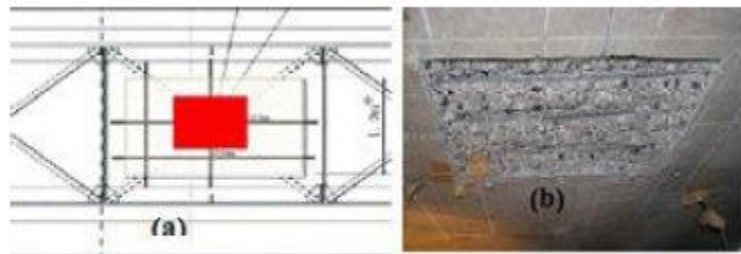
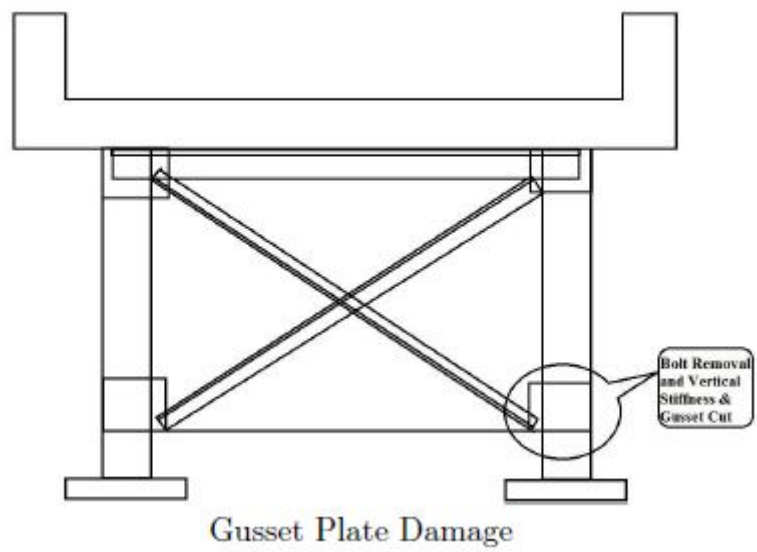
Outline of the complete automated wireless SHM cell-based system proposed

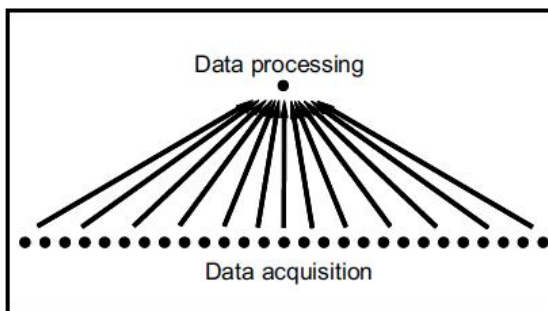
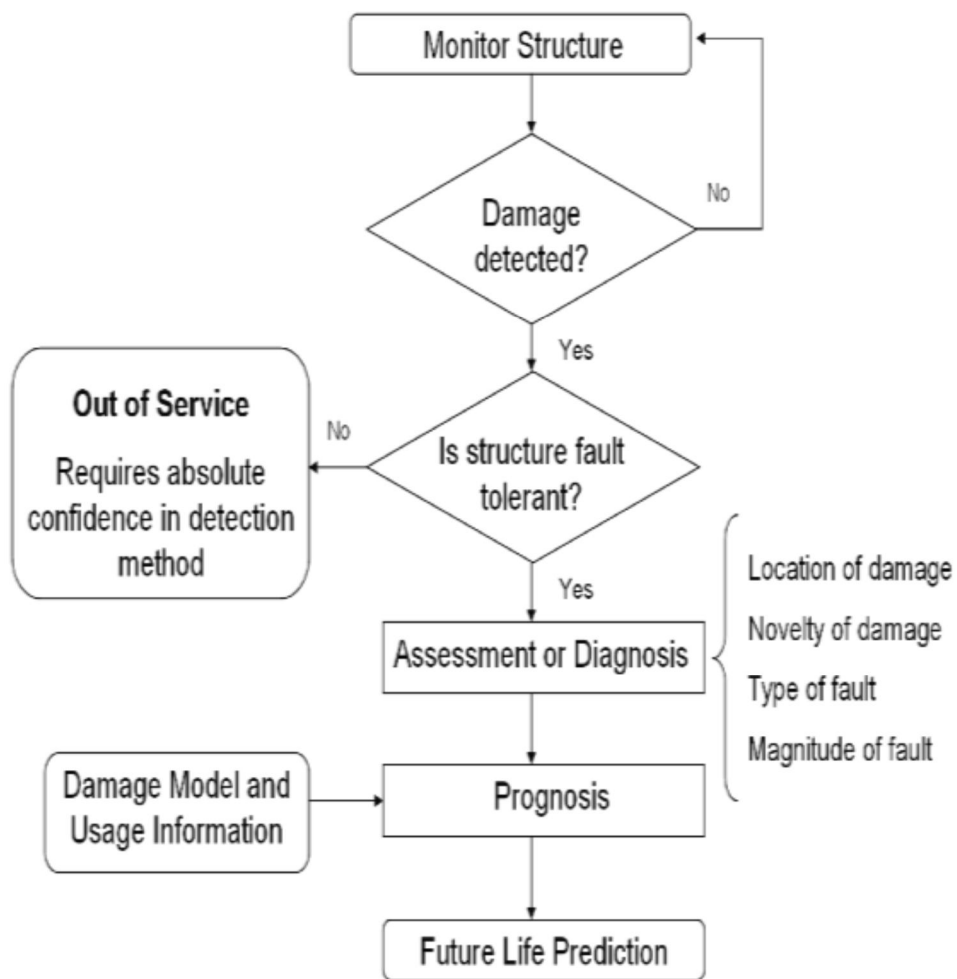


Schematic Diagram of Kando Bridge

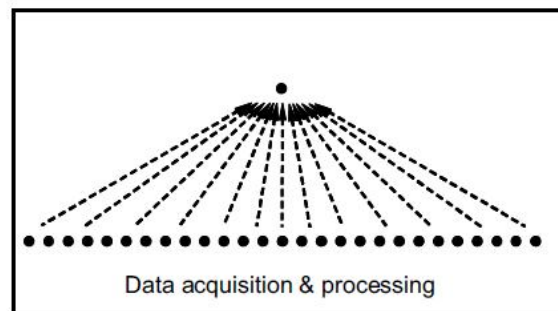


Abutment Bearing Damage

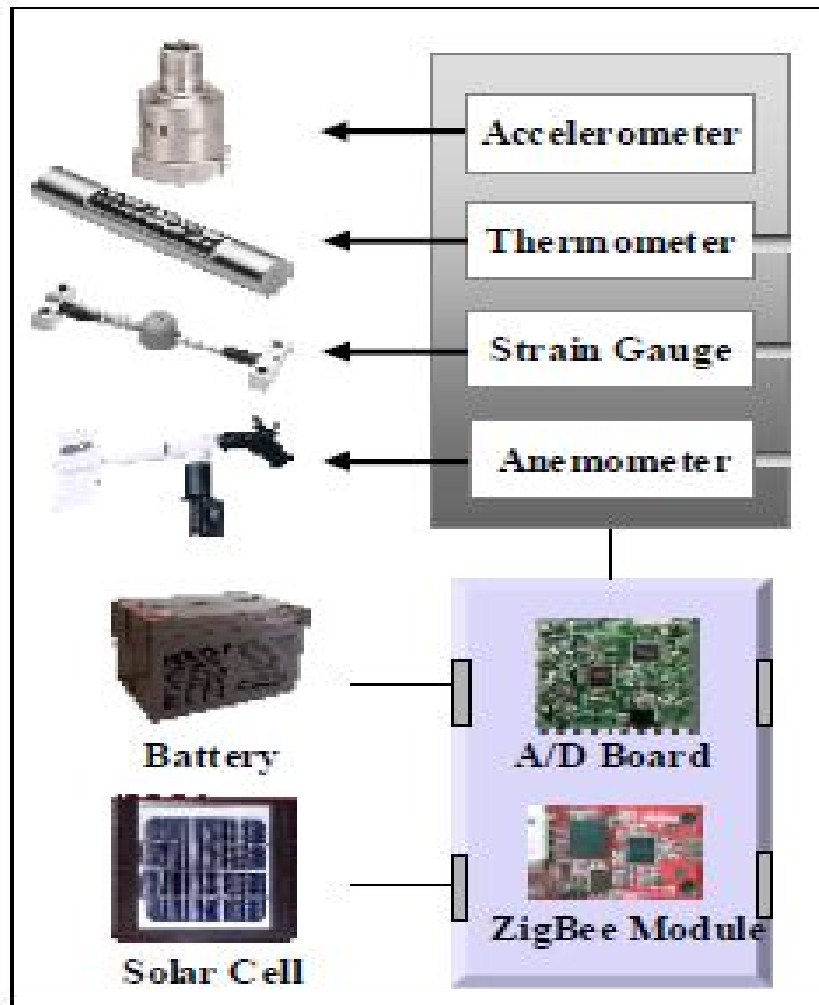




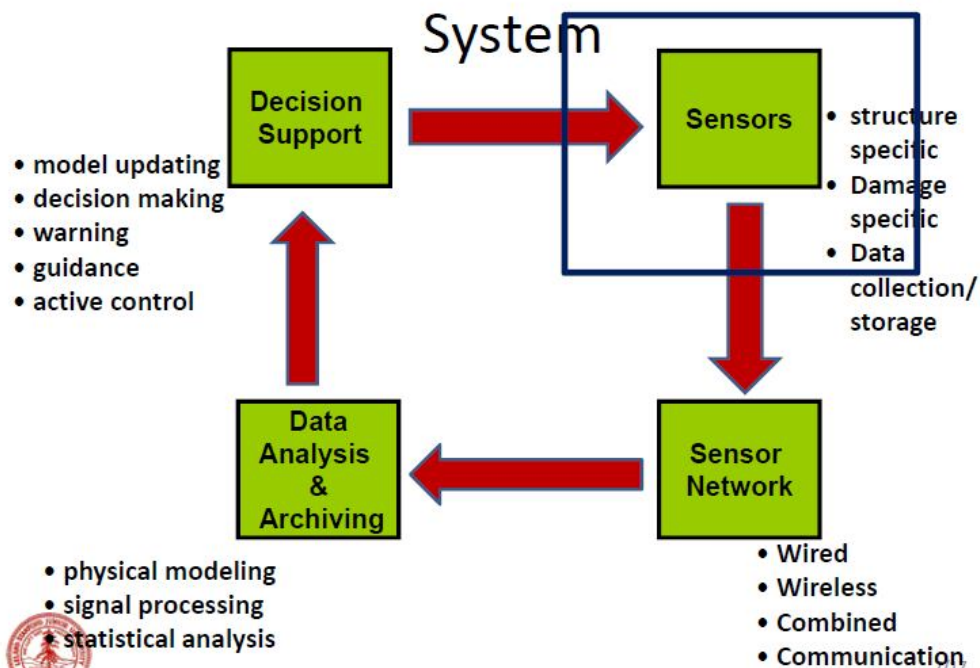
Centralized data acquisition approach.



Independent data processing approach.



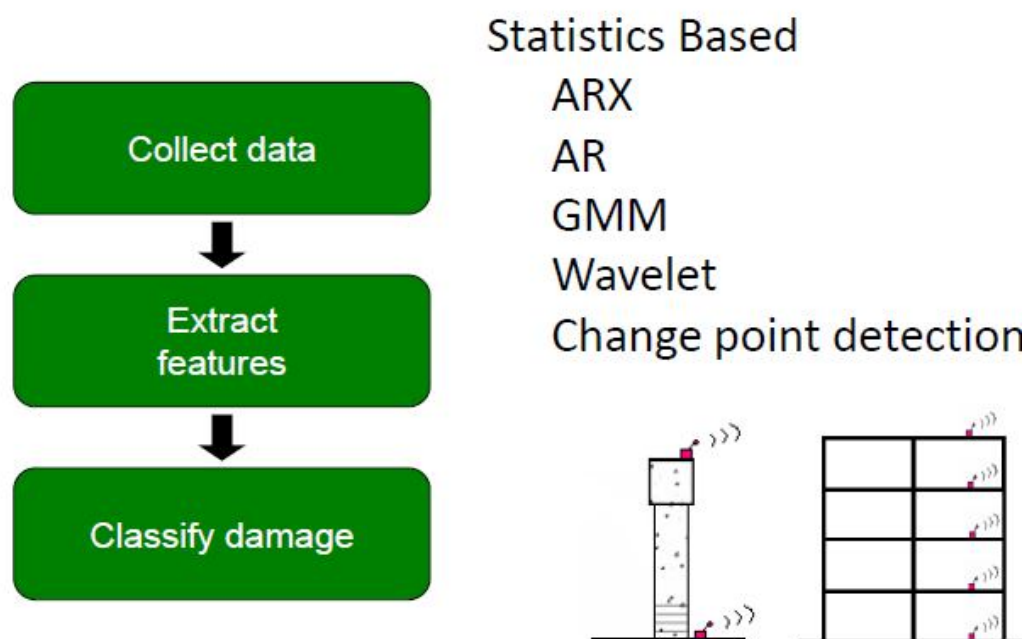
The Smart Structural Monitoring System



Sensor Networks

- Wireless vs. wired
- Advantages of wireless systems
 - Scalable
 - Ease of installation
 - Portability
 - Lower cost
- Challenges
 - Potential signal loss
 - Communication barriers

Steps in Damage Diagnosis



Steps of Structural Health Monitoring

Determination of damage existence



Determination of damage's geometric location



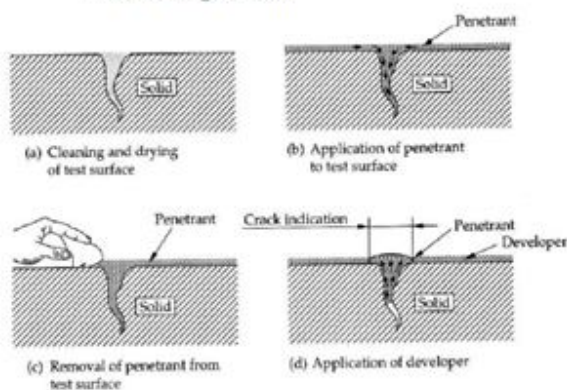
Quantification of damage severity



Prediction of remaining life of the structure

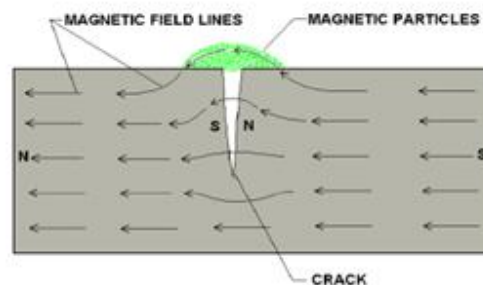


Visual Inspection

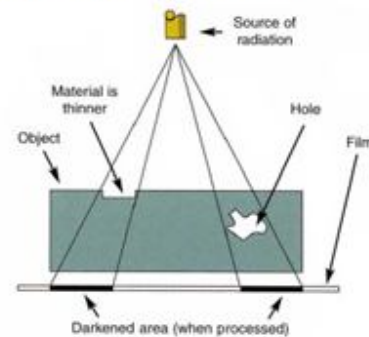


Dye Penetration Test

NDT

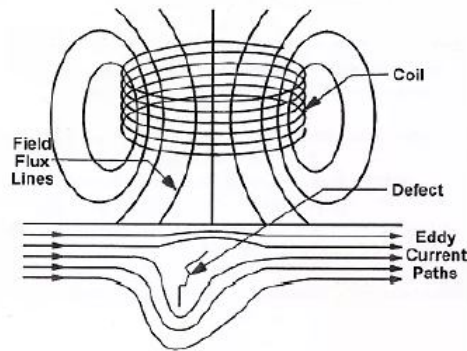


Magnetic Particle Testing

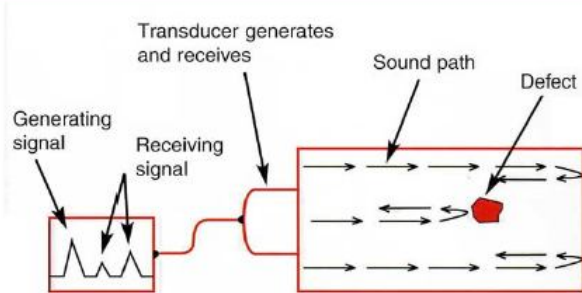


Radiography Test

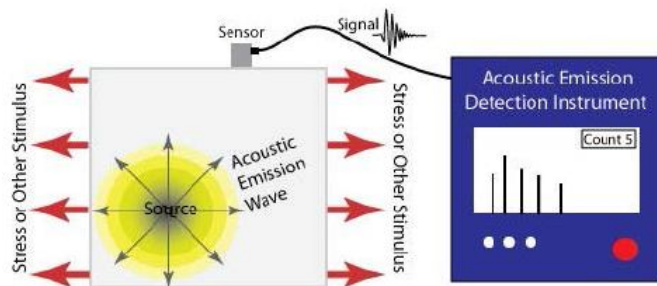
NDT



Eddy Current Example
Eddy Current Test



Ultrasonic Test



Acoustic Emission Test



Thermal Infrared Test

Static-Based SHM

Based on the premise that damage will alter the static properties of the structure.

– e.g. displacements, rotations

Considerable static deflection requires large amount of static force

Vibration-Based SHM

- Based on the premise that damage will alter the dynamic properties of the structure.
- e.g. structural response, frequencies, mode shapes, damping or modal strain energy change

- Laser Displacement Sensors (LDS)
- Velocity Transducers
- Seismometers
- Piezoelectric Accelerometers
- Strain Gauges

Collection of Sensory Information



Load Cell (Force)



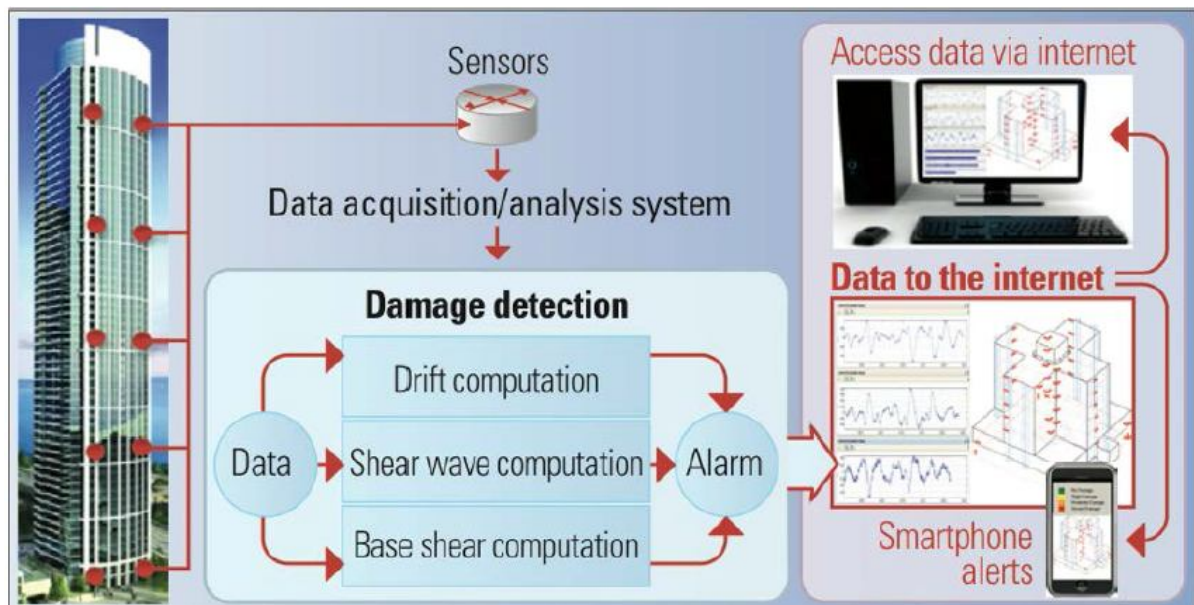
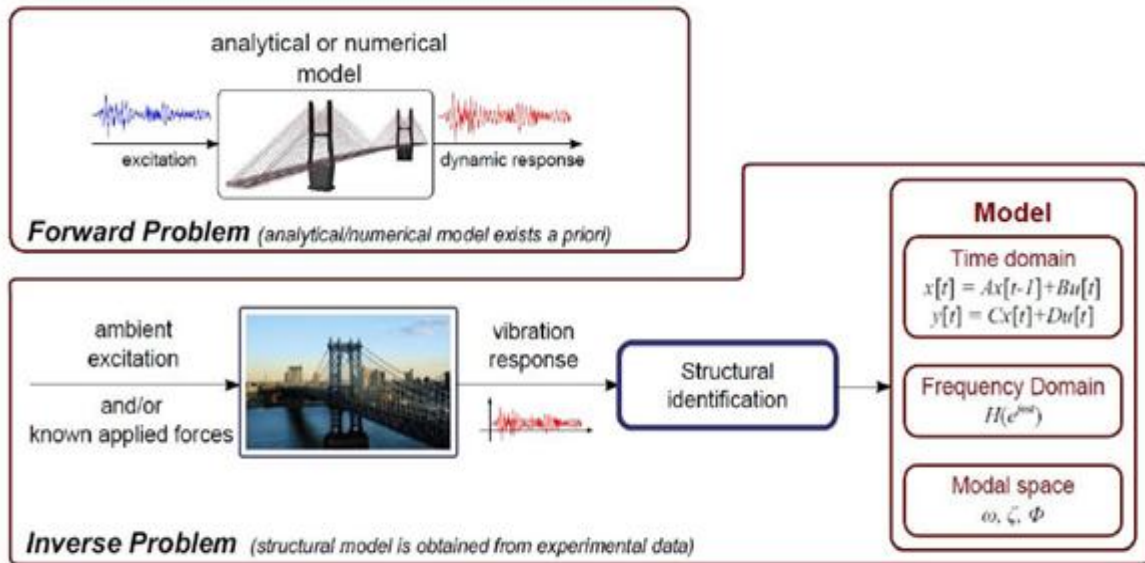
LVDT (Displacement)



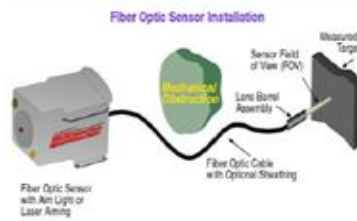
Accelerometer (Acceleration)



Strain Gauge (Strain)



Sensor Technology



Fibre Optics



Laser Vibrometer



Ultrasonic Sensor

Structural Monitoring Challenges

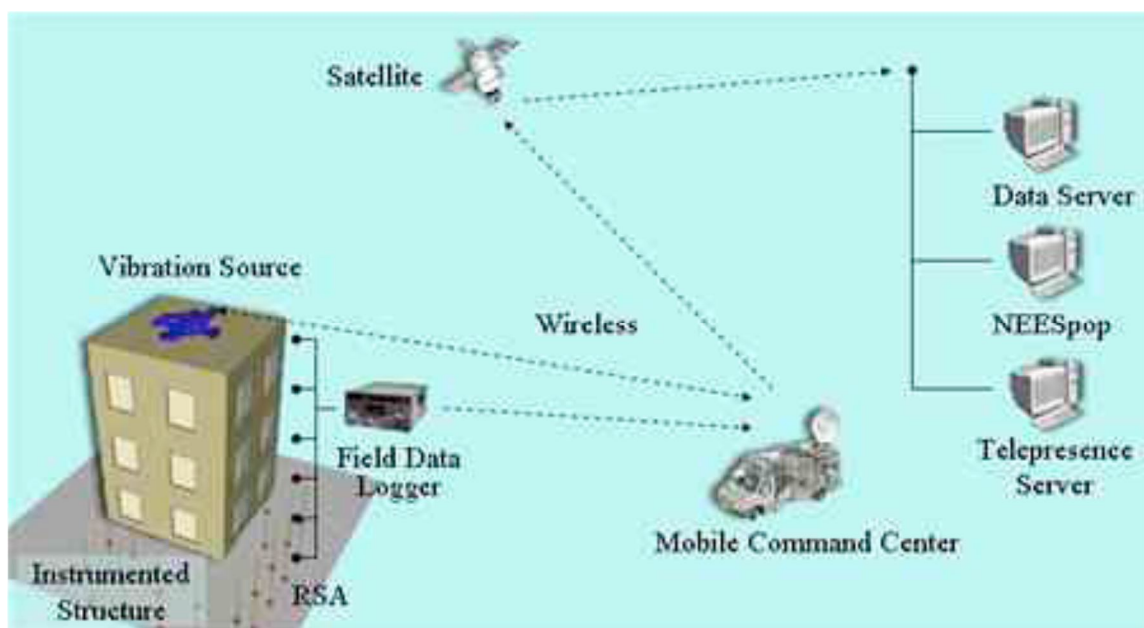
❑ Develop Design-to-service Solutions

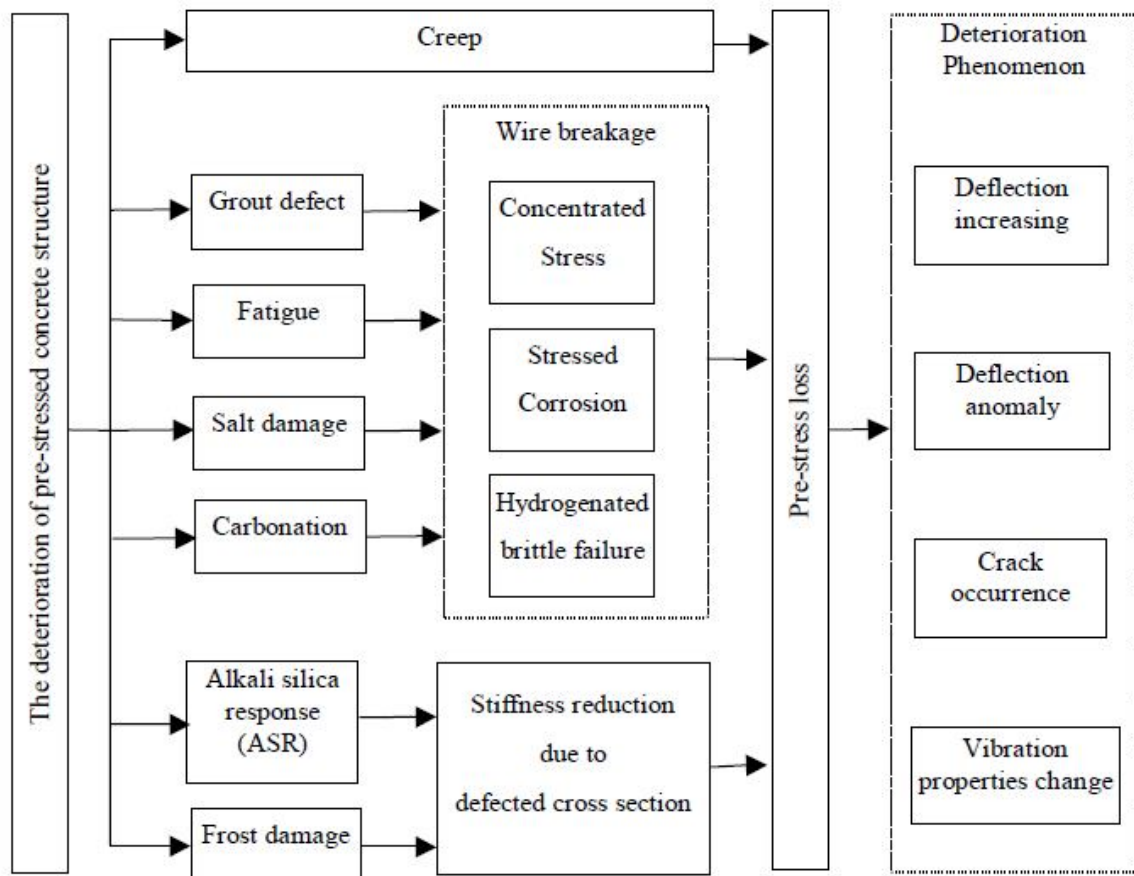
- ❖ Efficient Monitoring
- ❖ Digital Signal Processing strategies
- ❖ Evaluation Criteria
- ❖ Knowledge bases

❑ Develop Smart Control Units

- ❖ Real-time Feedback
- ❖ Centralized (or not)

- Wireless Sensors
 - Accelerometers/Inclinometers etc
- Laser Scanning
- RFIDs (Radio Frequency Identification)
- Acoustic Emissions
- MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)
- Increase of Computation capabilities
- Fiber technologies

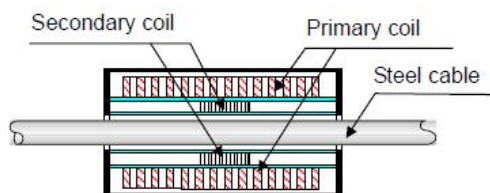
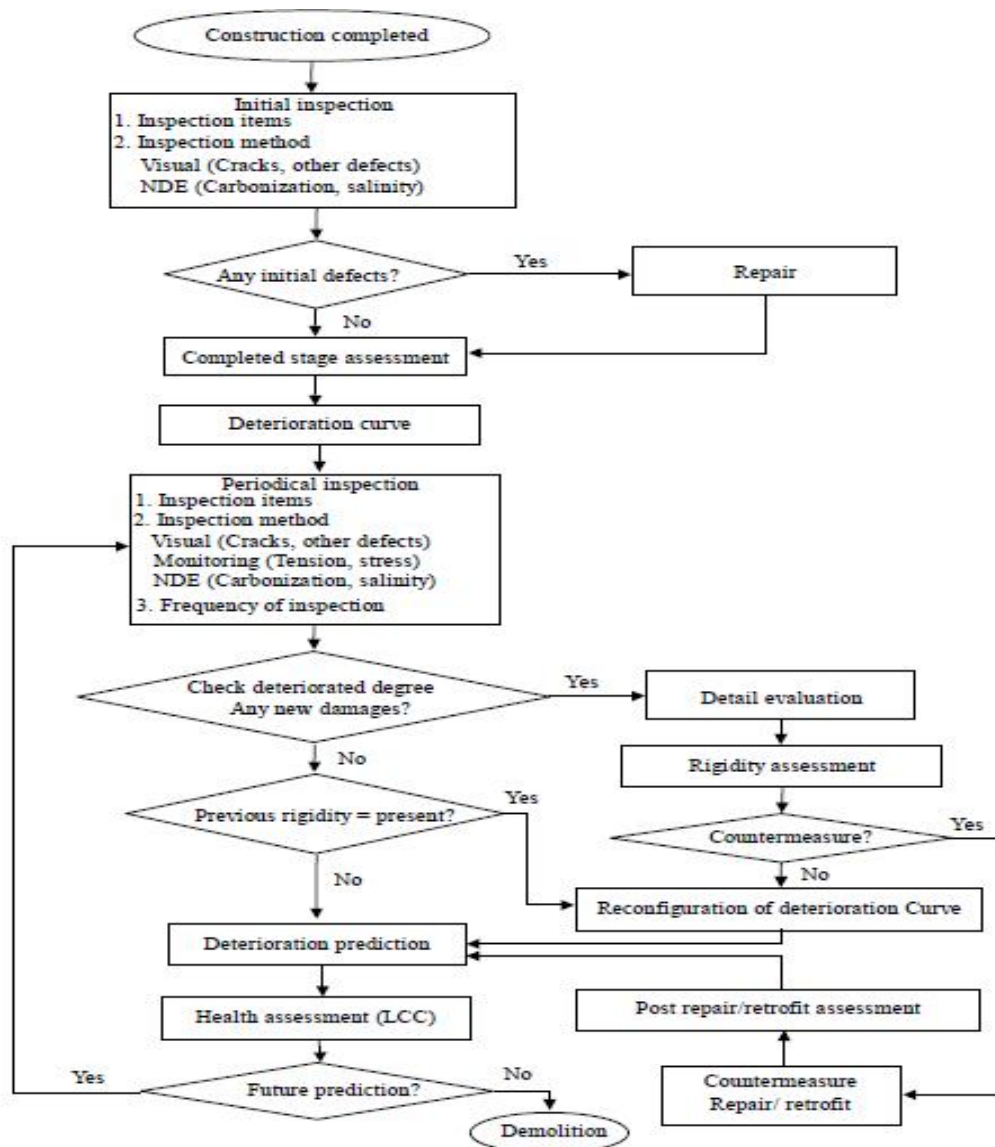




Defects of pre-stressed concrete structure

Monitoring items and their techniques

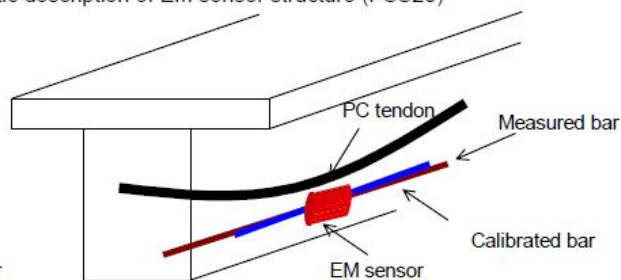
	Monitoring item	Technique	Principle
Direct method	Concrete Stress	Slot stress	Mechanical deformation
	Steel tendon stress	Load cell	Electrical resistance
		EM sensor	Elasto-magnetic
	Wire breakage	AE sensor	Acoustic emission
	Deflection	LVDT	Mechanical
	Crack	Visual inspection Photometry	Visual
Indirect method	Vibration	Accelerometer	Forced vibration
	Grout rigidity	Impact echo test	Elastic wave
		Drilled diagnostic CCD	Visual
		X-ray	Electro magnetic wave
	Corrosion	Electric potential Polar resistance	Electric current

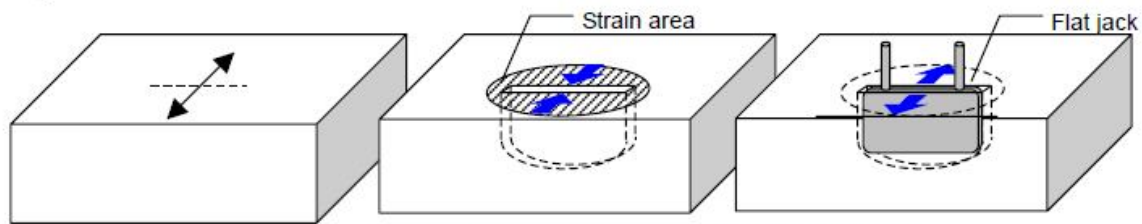


Schematic description of EM sensor structure (PSS20)

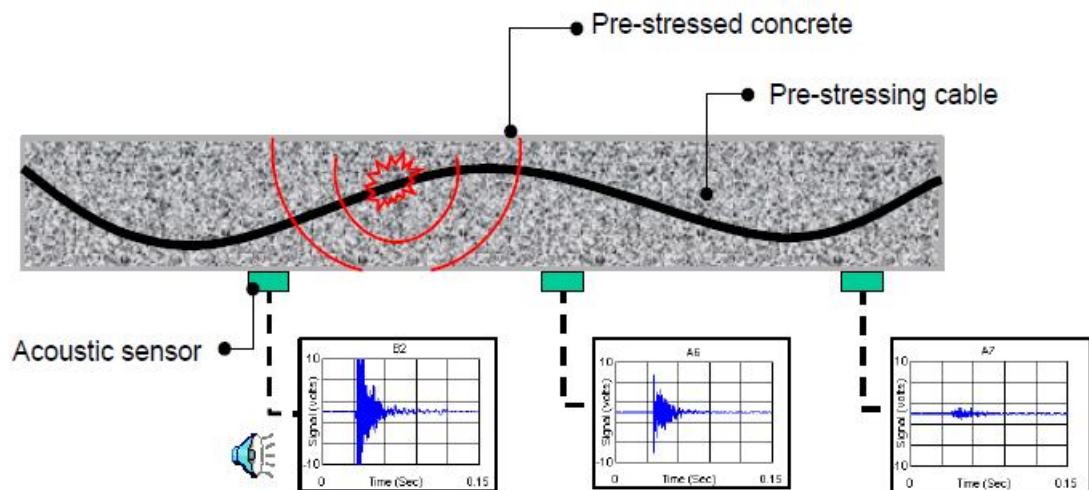


Site fabricated EM sensor

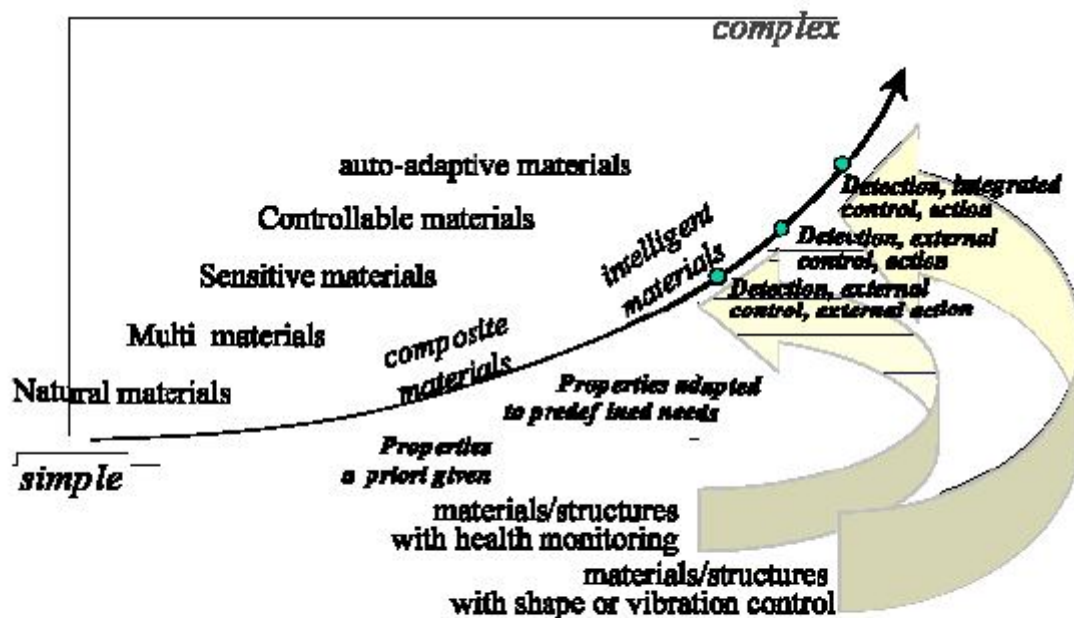




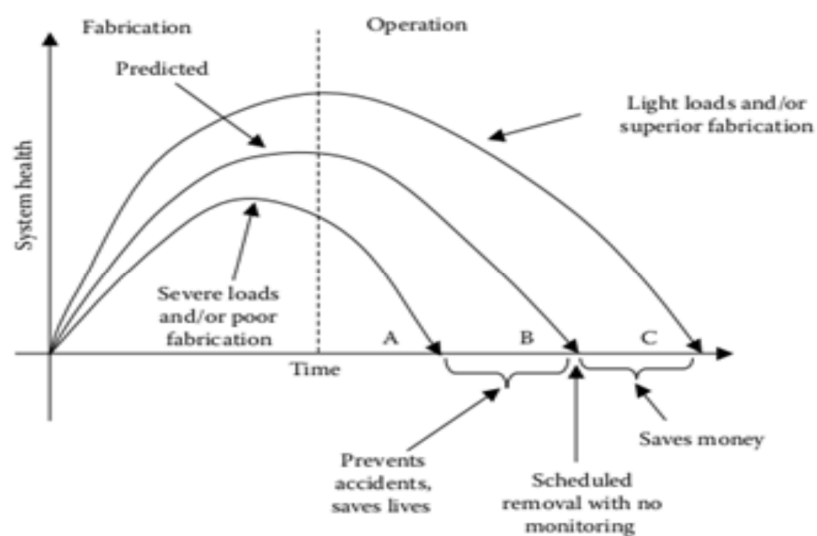
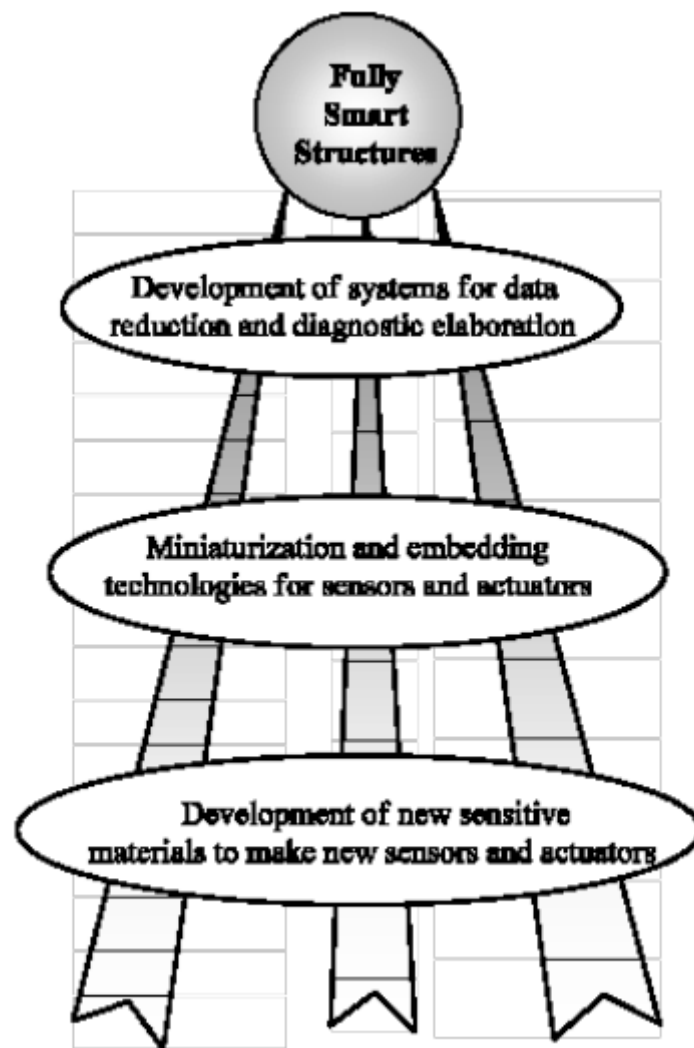
Principle of the strain relief method combined with the flat jack technique

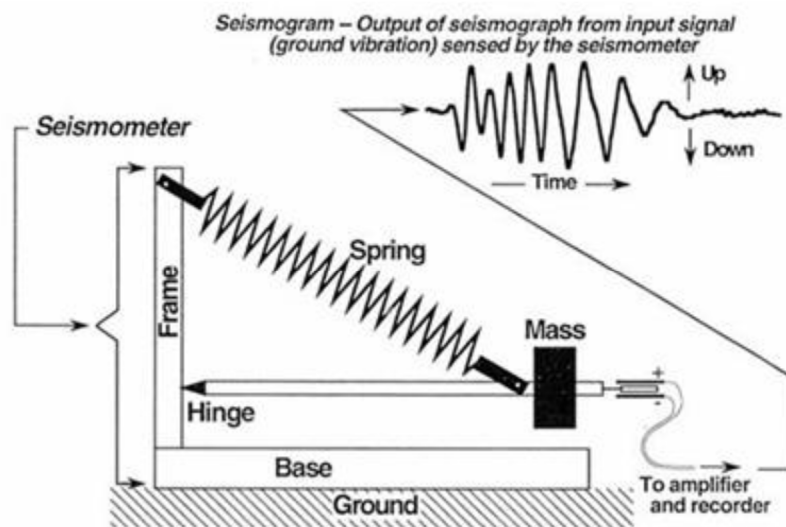
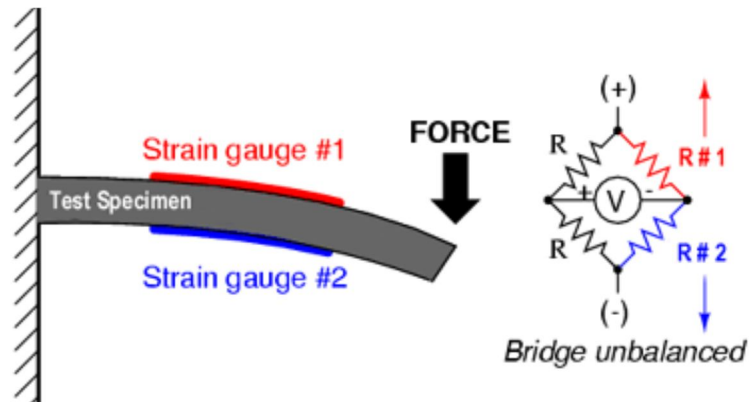
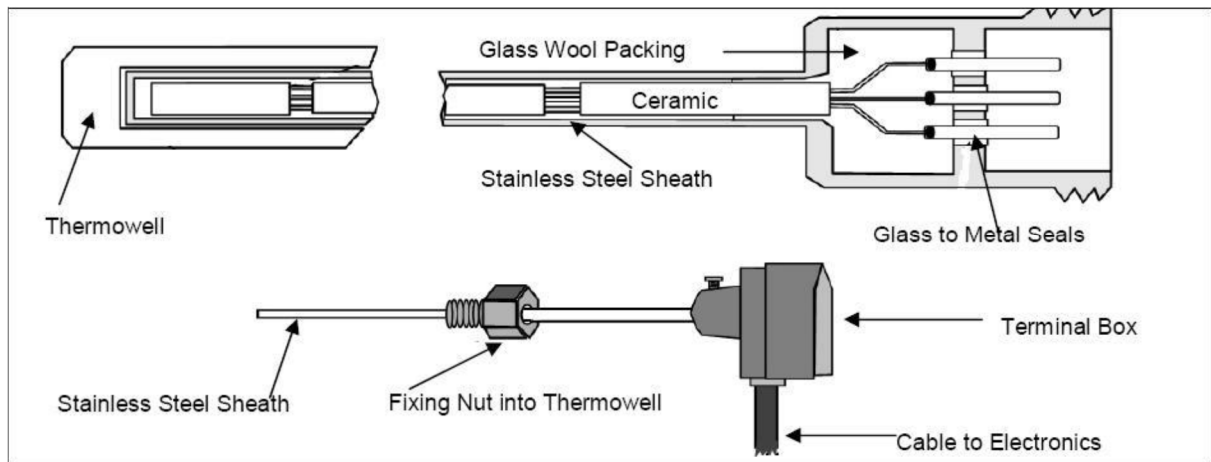


Acoustic energy propagation mechanism at a PC beam

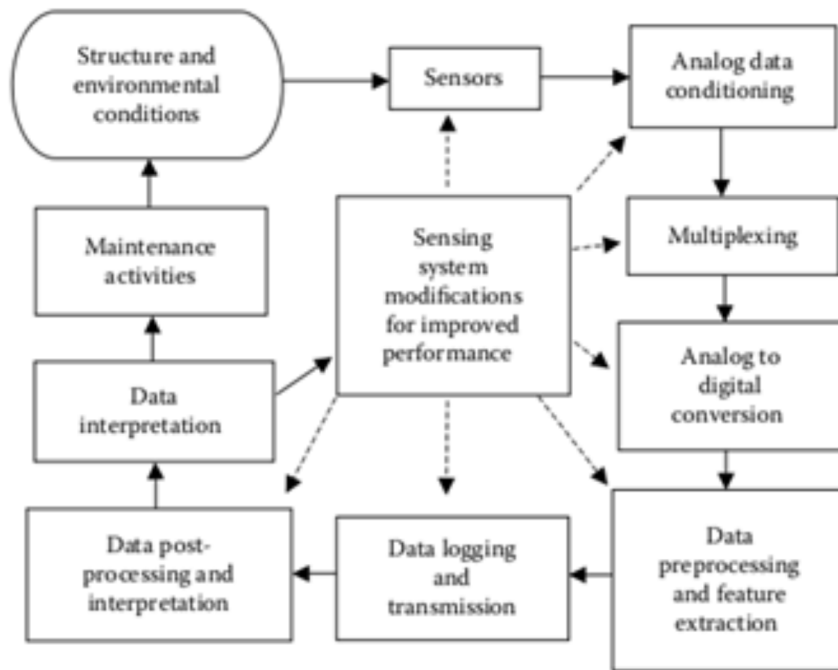


General evolution of materials/structures used by man, and place of smart structures, including structures with SHM.

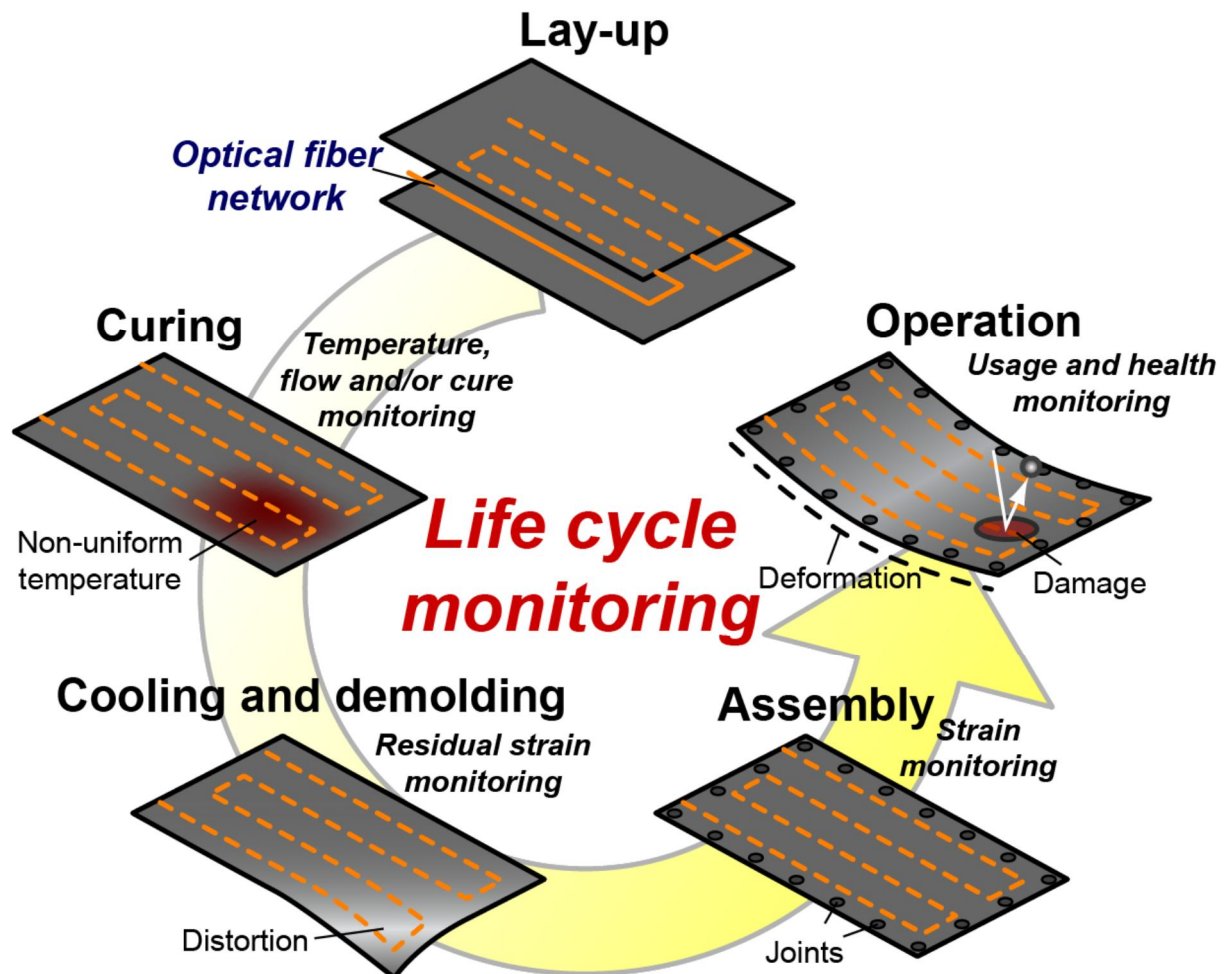


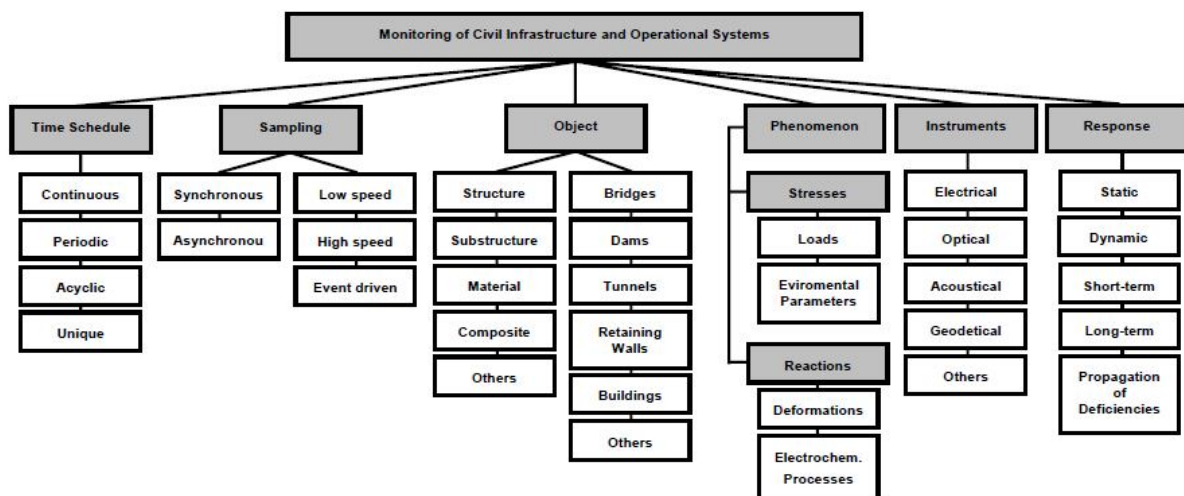
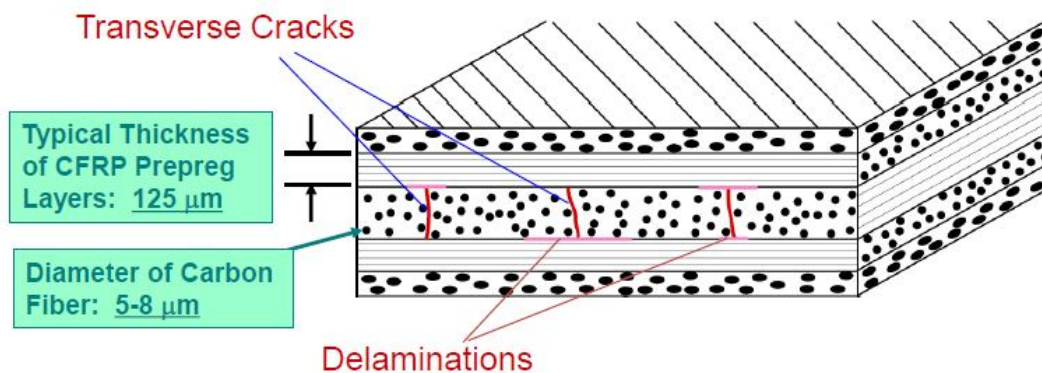
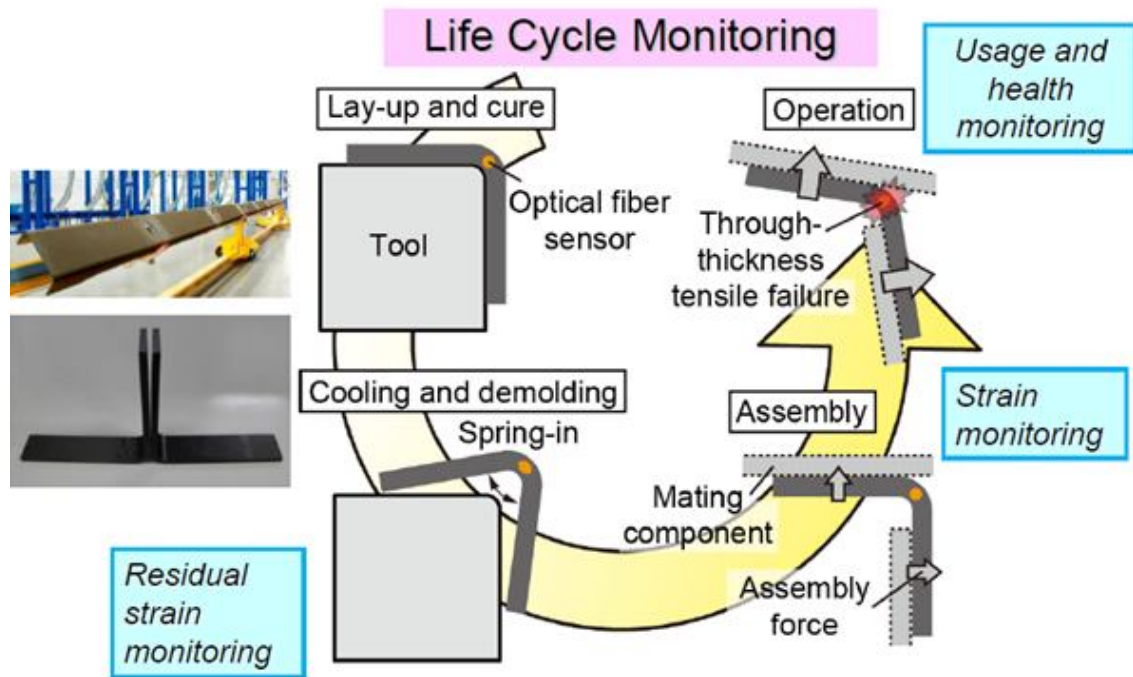


Basic Seismometer

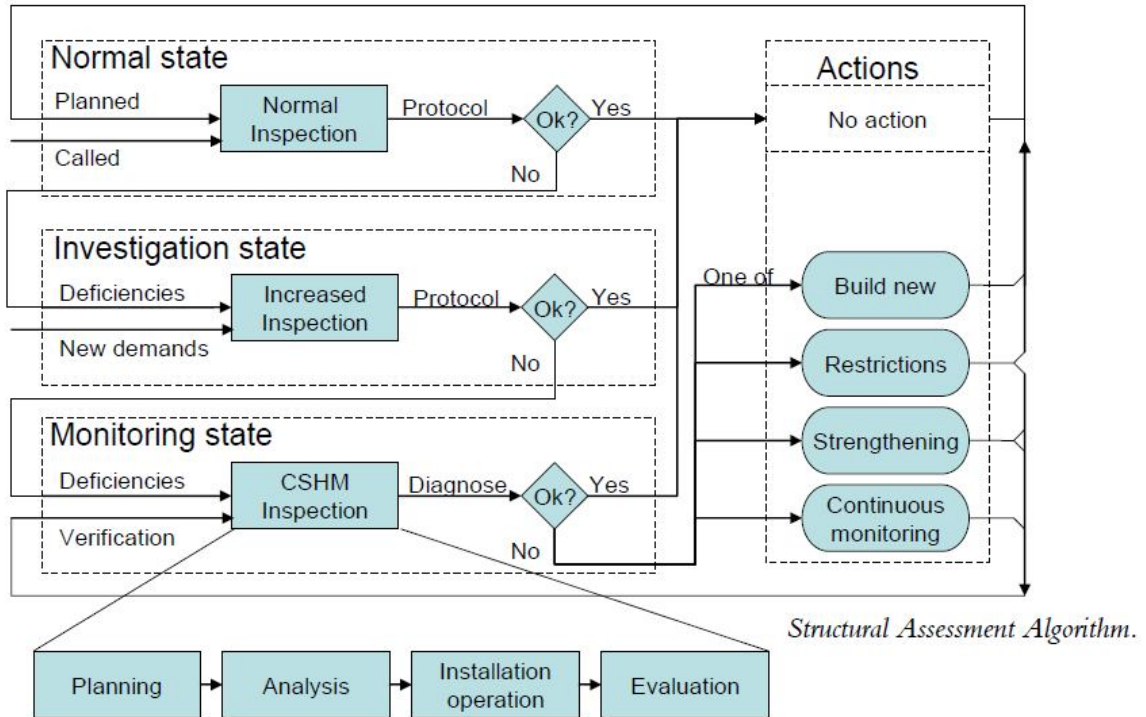


Flow Chart Showing Data Process in SHM



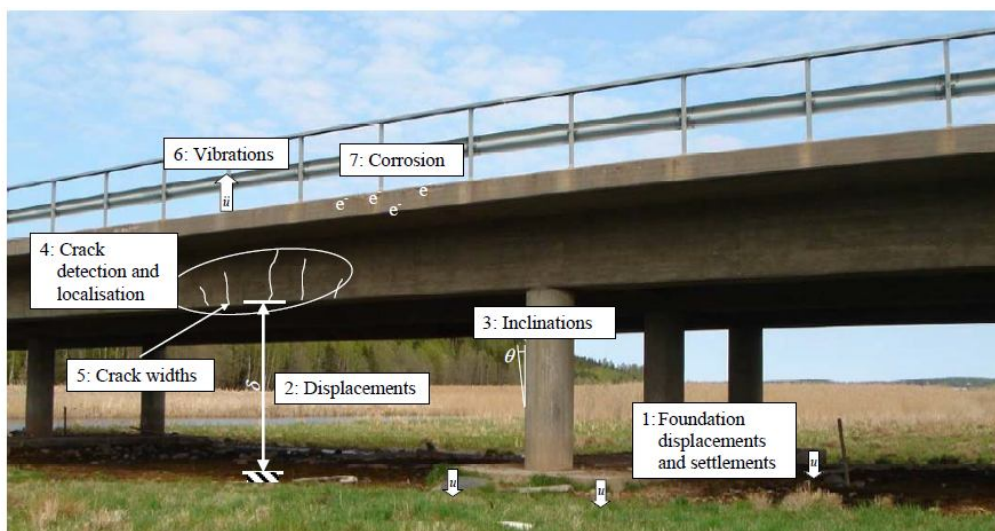
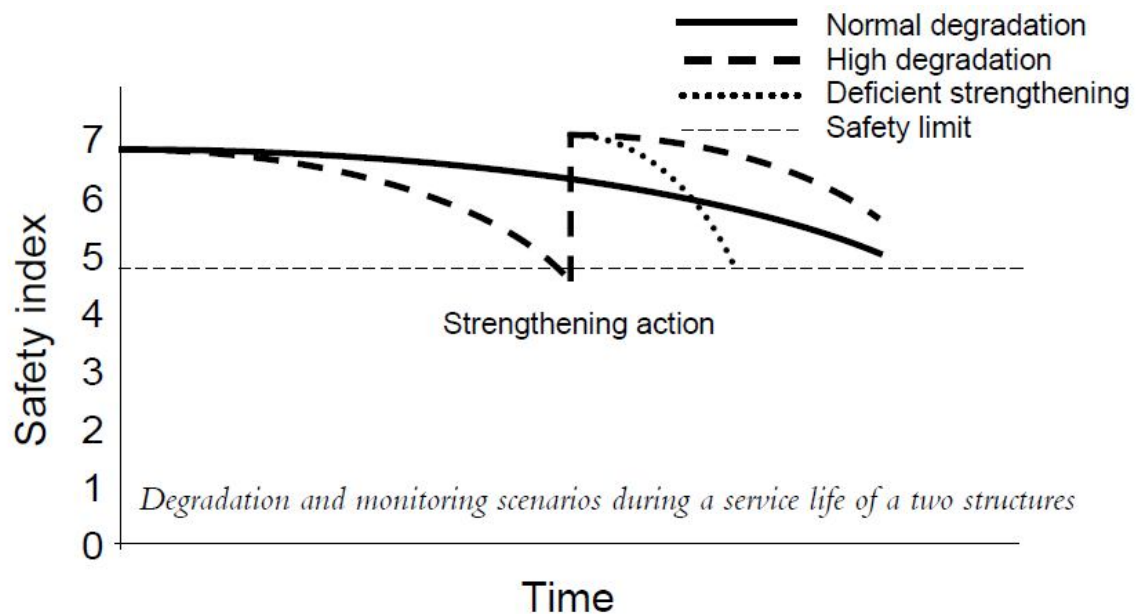


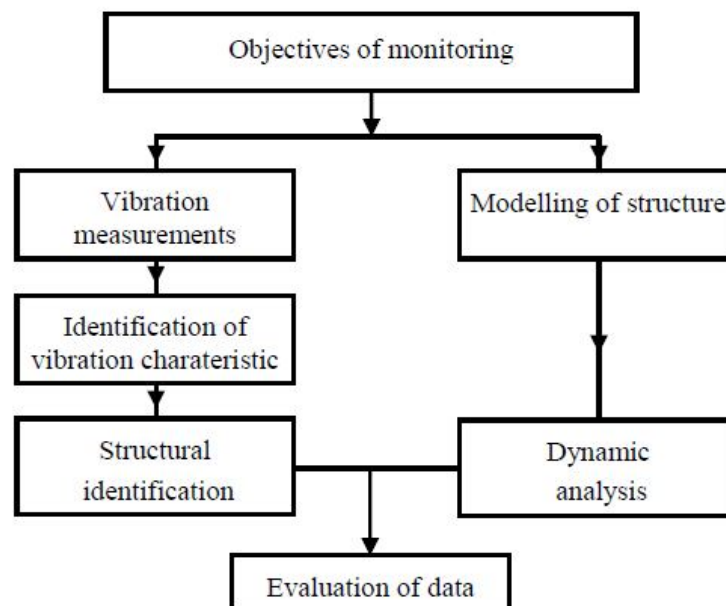
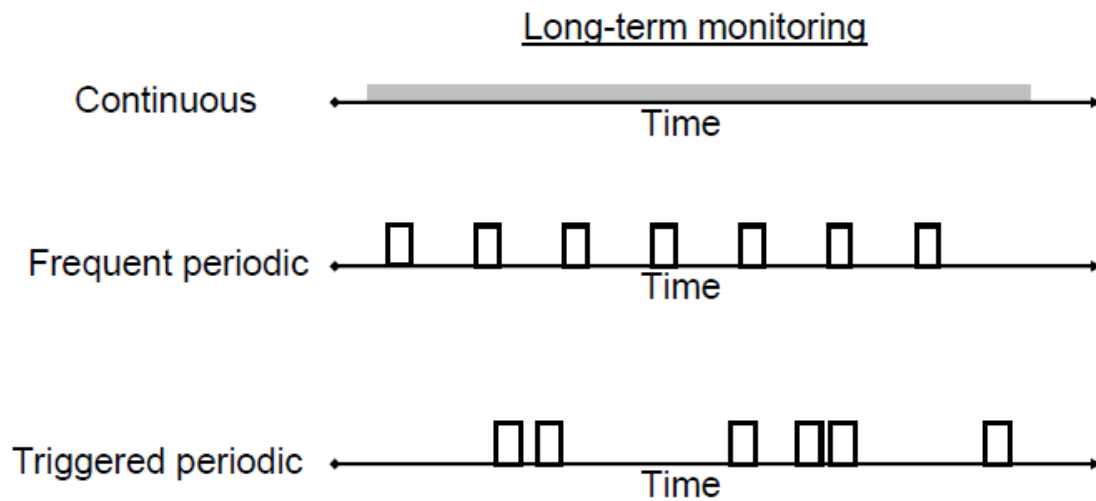
Classification of Surveillance Techniques and Operational Strategies



CSHM	Load effects (S)	
Before	<u>Variables</u>	<u>Distribution</u>
	Loads	Stochastic
	Load positions	Deterministic
	Load effect function	Stochastic
During	<u>Variables</u>	<u>Distribution</u>
	Loads	Deterministic/fixed
	Load positions	Deterministic/fixed
	Load effect function	Deterministic/assumed
After	<u>Variables</u>	<u>Distribution</u>
	Loads	Stochastic
	Load positions	Deterministic
	Load effect function	Stochastic and refined

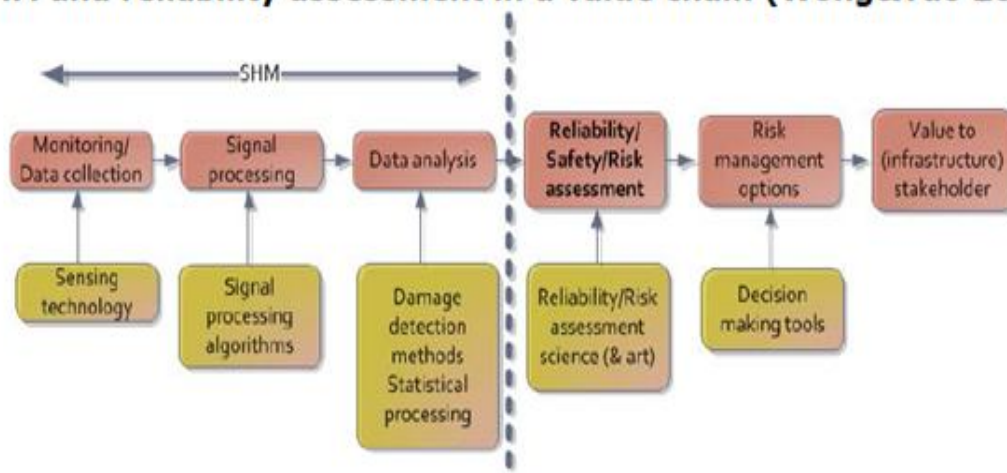
CSHM	Resistance (R)	
Before	<u>Variables</u>	<u>Distribution</u>
	Material properties	Stochastic
	Geometry of structure	Deterministic or Stochastic
During	Carry capacity function	Stochastic
	<u>Variables</u>	<u>Distribution</u>
	Material properties	Deterministic
After	Geometry of structure	Deterministic
	Carry capacity function	Deterministic/assumed
	<u>Variables</u>	<u>Distribution</u>
After	Material properties	Refined
	Geometry of structure	Deterministic
	Carry capacity function	Stochastic and refined



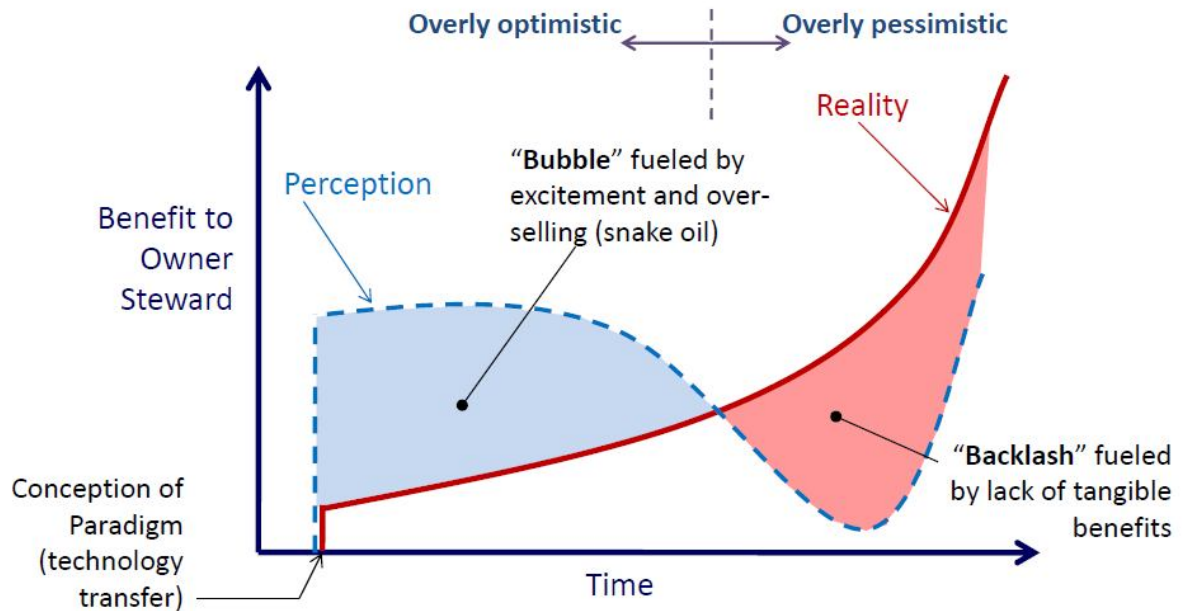


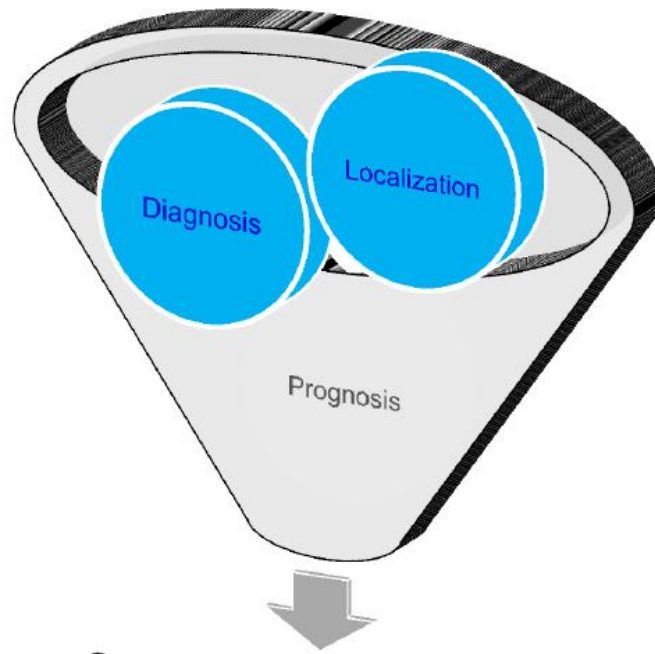
Flowchart of bridge vibration monitoring

SHM and reliability assessment in a value chain (Wong&Yao 2001)

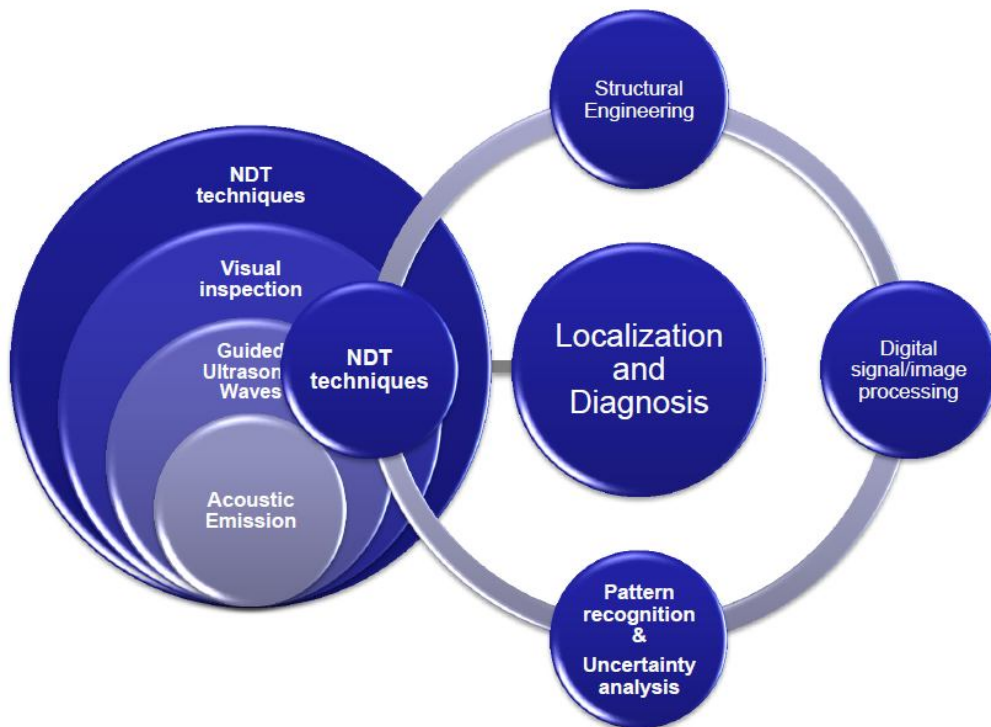


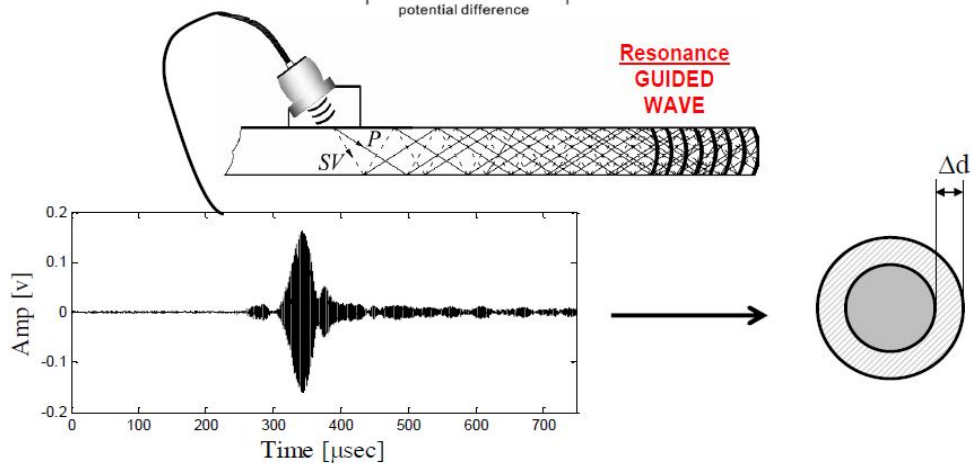
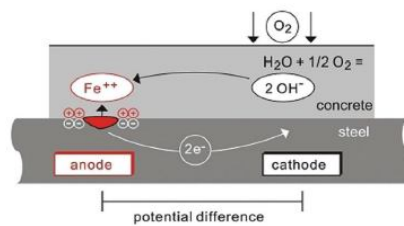
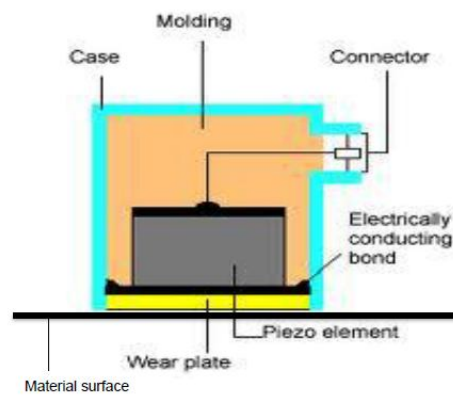
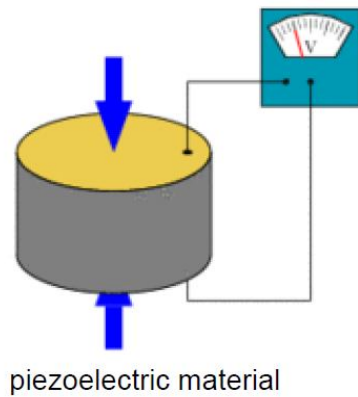
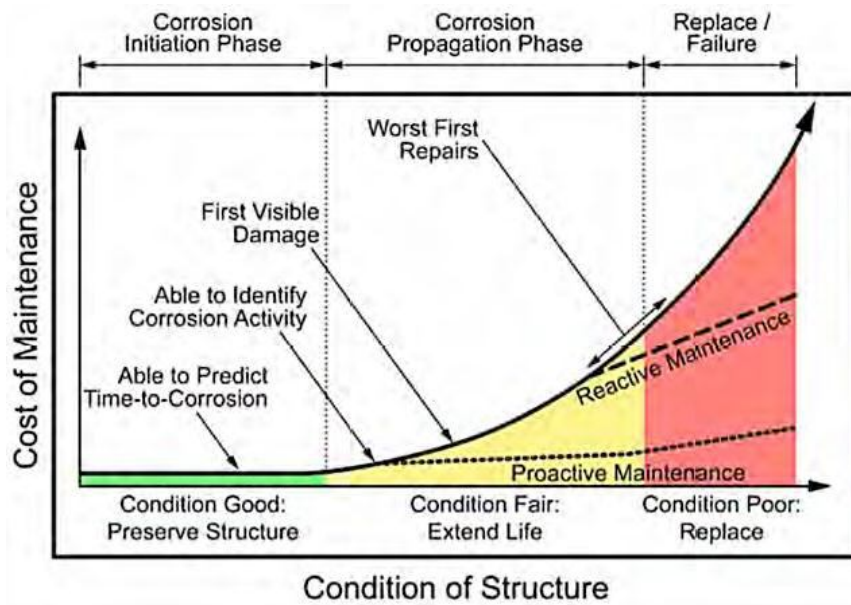
The snake-oil effect in civil SHM



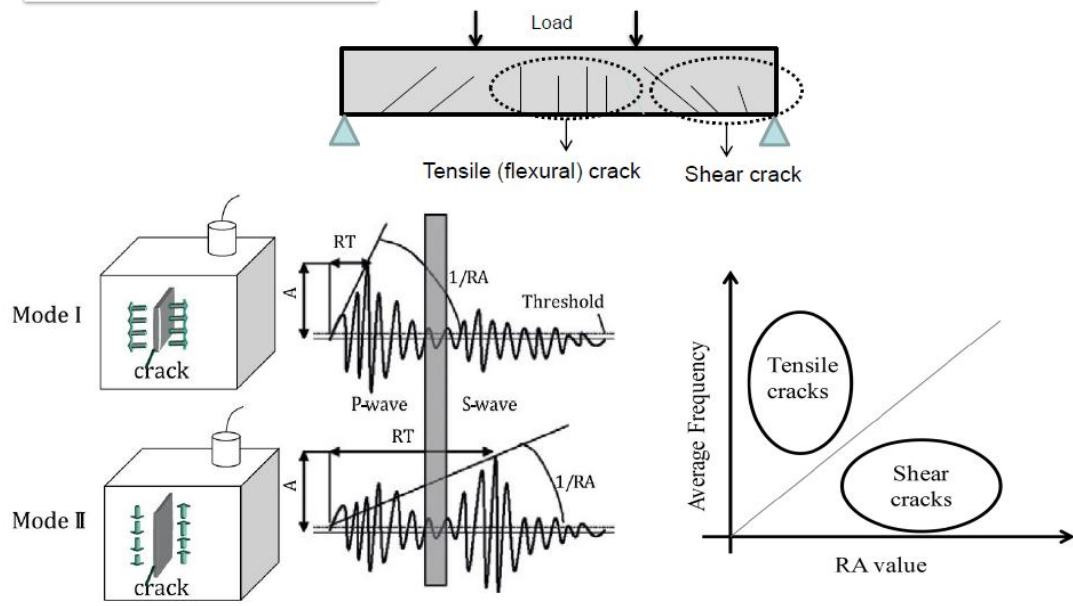


Comprehensive Evaluation



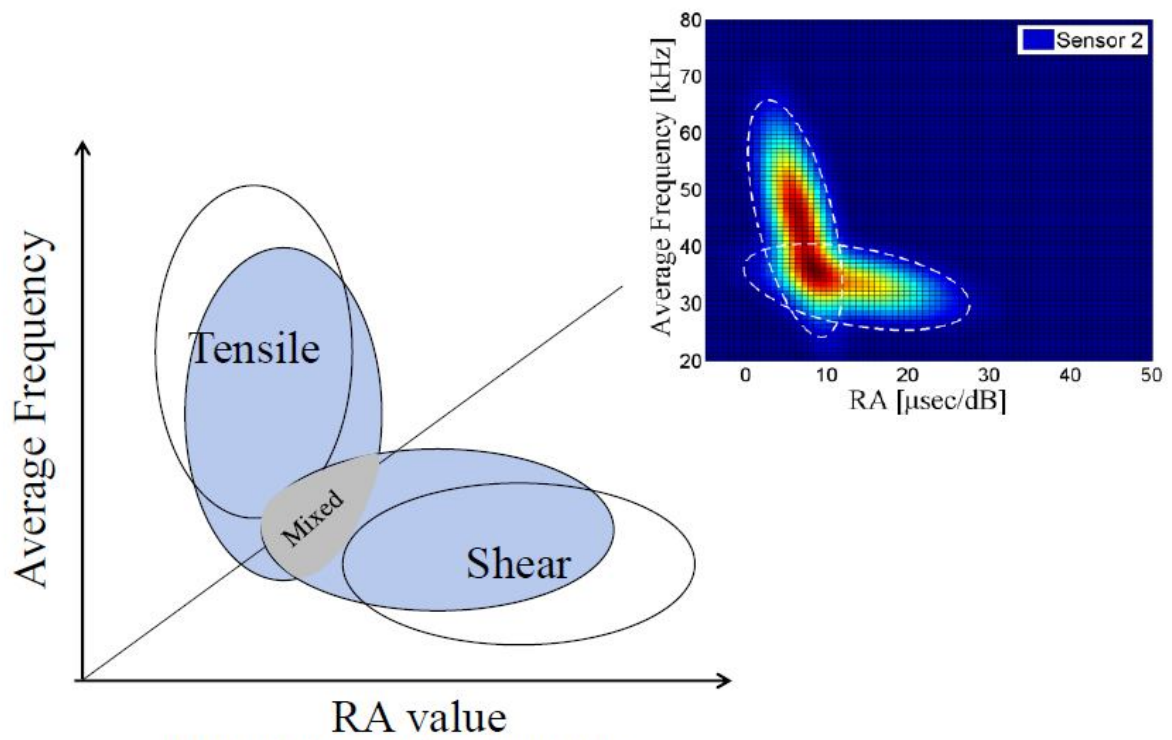


Crack mode identification



Aggelis, D G, et al (2012), Ohtsu, M (2010)

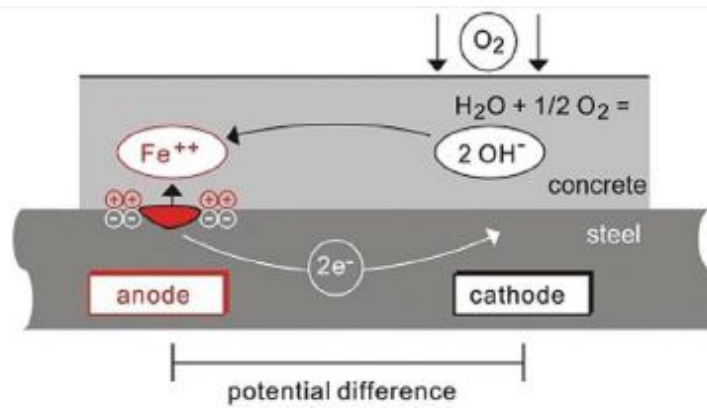
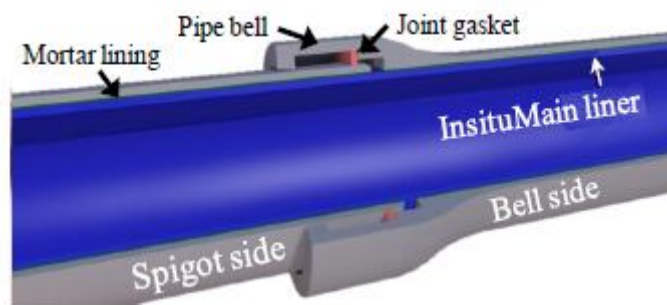
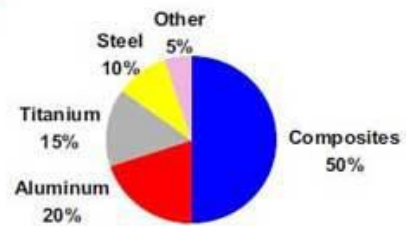
Japan Construction and Material Standard (JCMS)

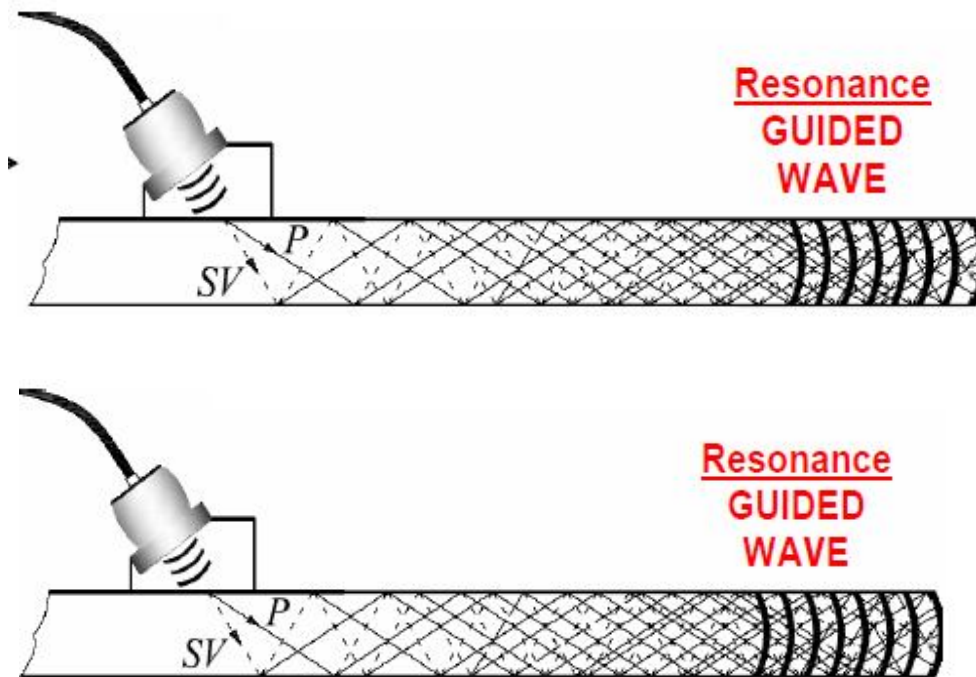


Japan Construction and Material Standard (2003)



- Carbon laminate
- Carbon sandwich
- Fiberglass
- Aluminum
- Aluminum/steel/titanium pylons





Detection (corrosion / cable breaks)

- Visual inspection
- Half-cell potential
- Time-domain reflectometry
- Linear Polarization Resistance (LPR)
- Magnetic flux leakage
- Microwave imaging
- Acoustic emission
- Guided Ultrasonic Waves →

Monitoring stress levels

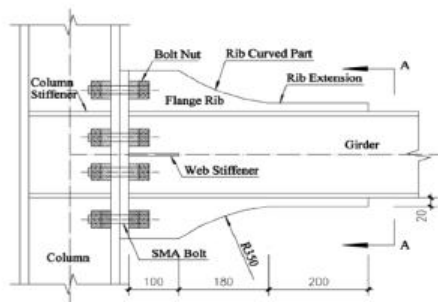
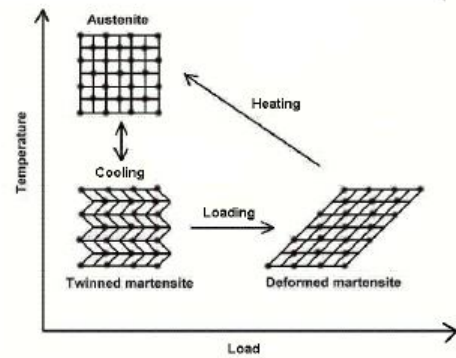
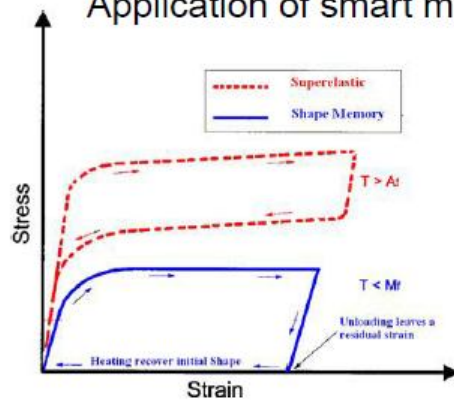
- Fiber-optic strain sensors
- Modal analysis
- Magnetic permeability
- Guided Ultrasonic Waves

Estimating cross-section loss

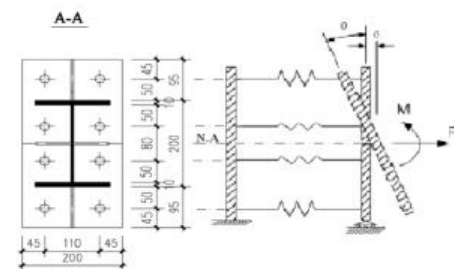
- Modal analysis
- Guided Ultrasonic Waves
- X-ray scanning

Shape Memory Alloys

Application of smart materials in structural design



(a)



(b)

cracks, (width and pattern)

surface pitting,

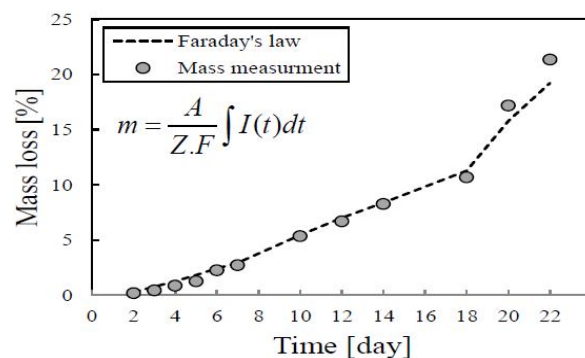
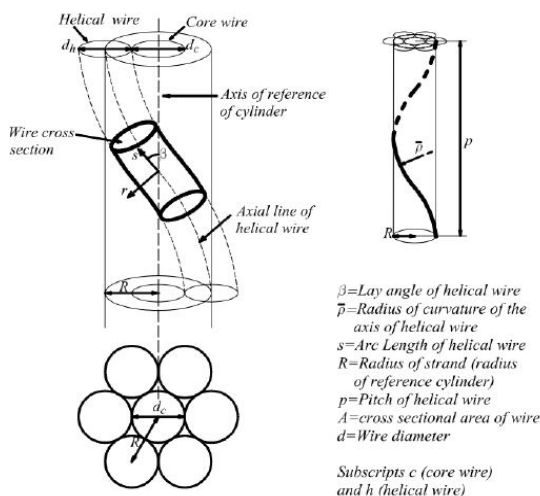
spalling,

delamination,

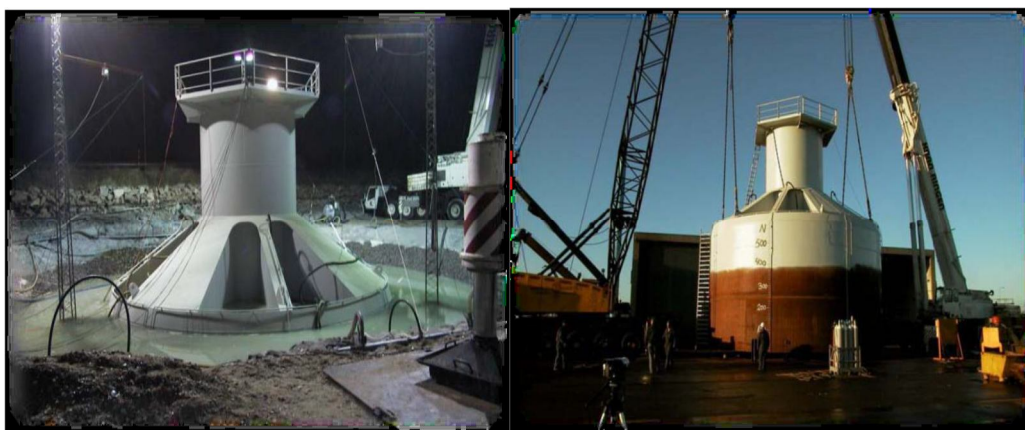
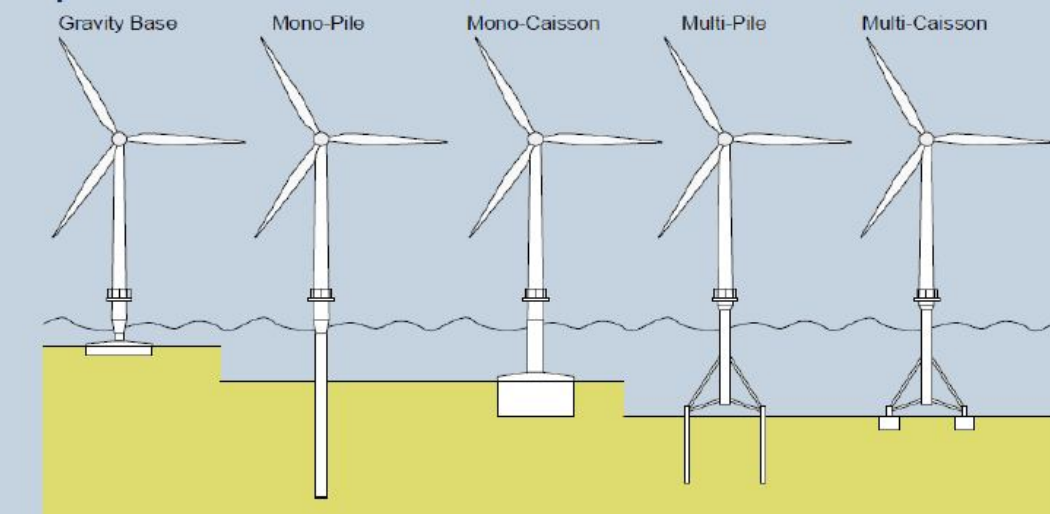
wear or abrasion,

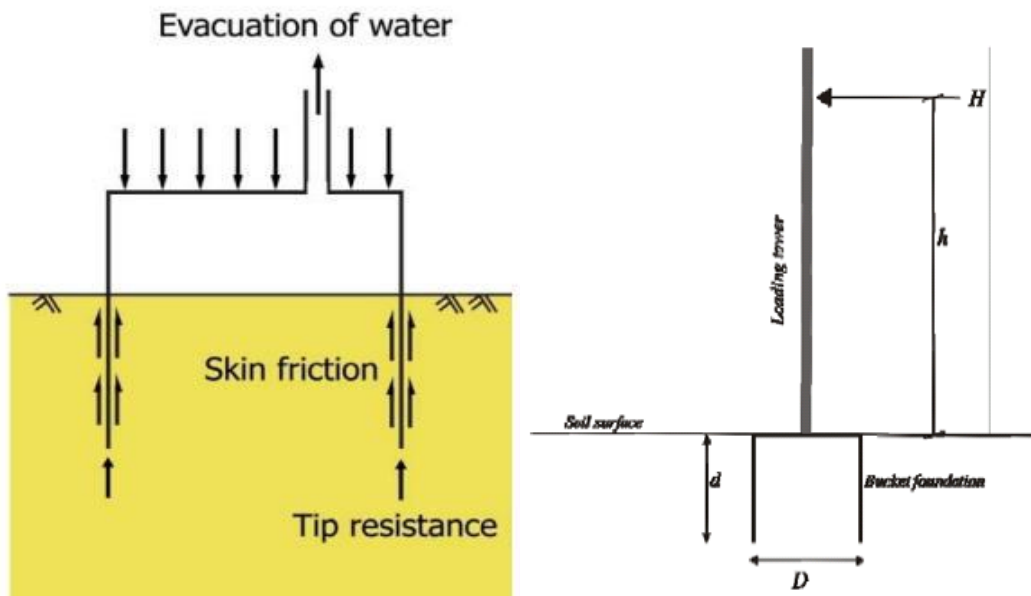
concrete color change, ...

**Cracks
&
Pattern**



Options for Foundations





Offshore wind turbines: Challenges

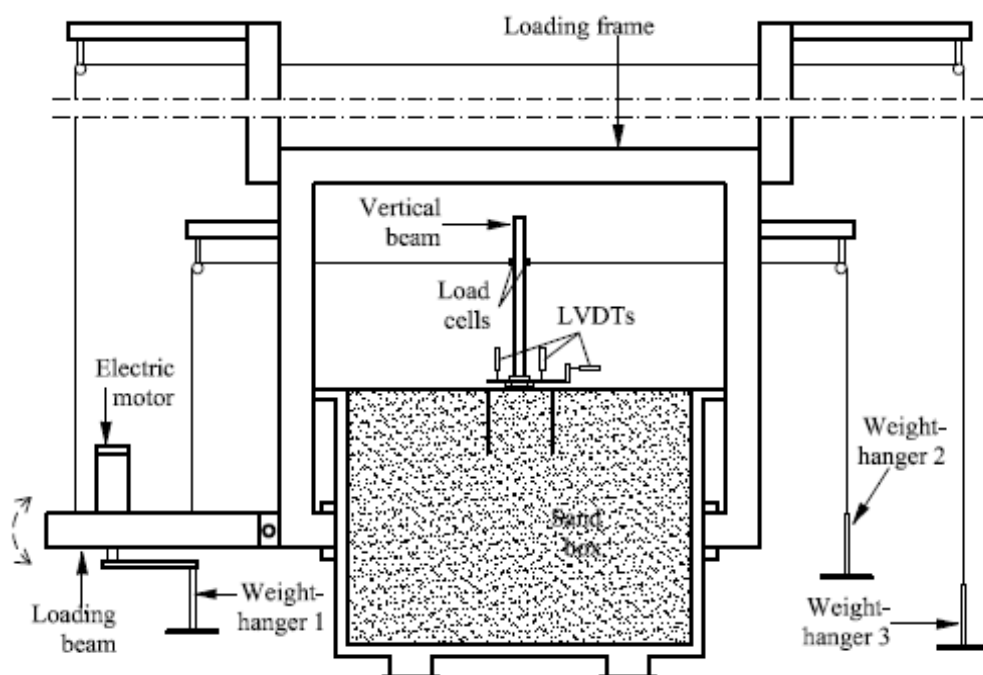
- ☐ Dynamically sensitive because of tall and slender nature
- ☐ Offshore wind turbines are placed in adverse environmental conditions with strong wind and wave loading
- ☐ Wide range of cyclic loads with different forcing frequencies
- ☐ Monitoring the short term and long-term performance
- ☐ Departure of the overall system dynamics from the design assumptions

Long Term Performance of Offshore Foundations

- ❑ Lack of data concerning Long Performance
- ❑ To Predict the future performance of such structures
- ❑ Arguably, this prediction can be carried out using small scale tests and numerical simulations
- ❑ The cyclic nature of the loading on the wind turbine placed in adverse environmental conditions

❑ Performance based design

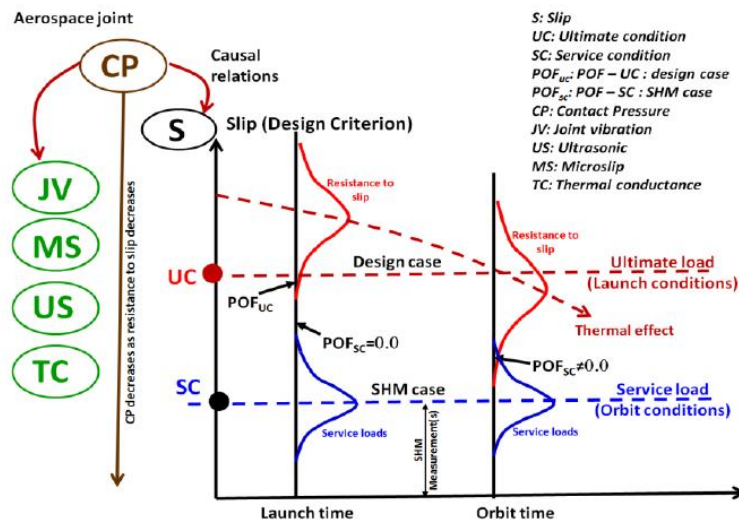
- ❑ Damping
- ❑ Stiffness
- ❑ Pore water pressure build up
- ❑ Fatigue analysis



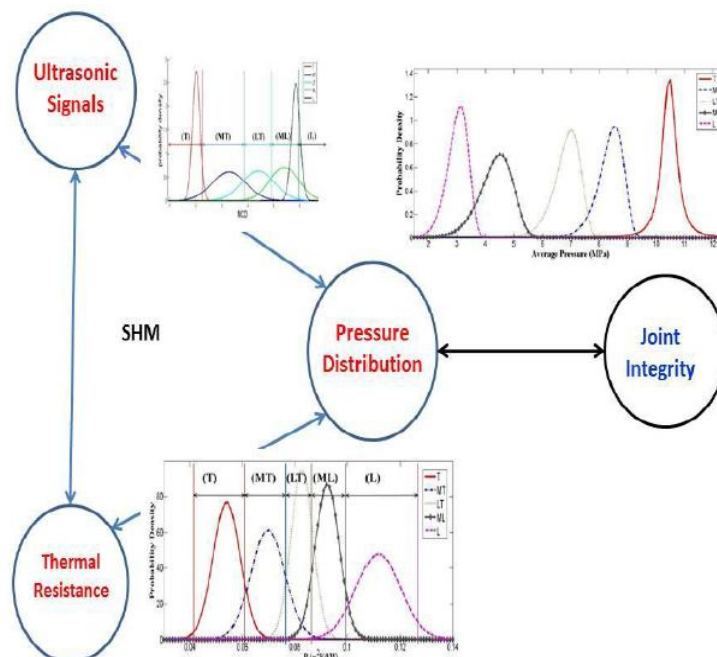
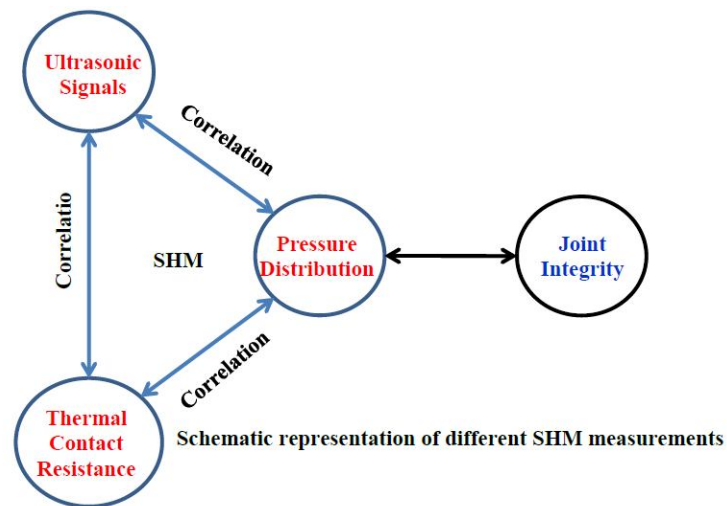
Main Frequencies for wind turbines

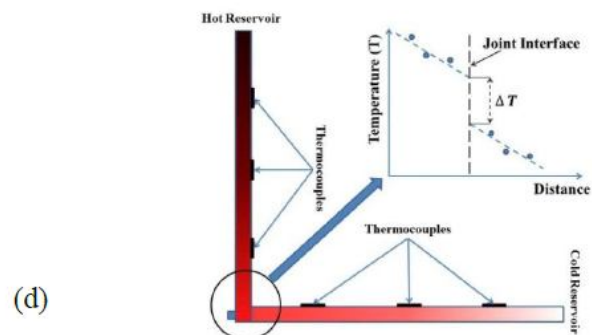
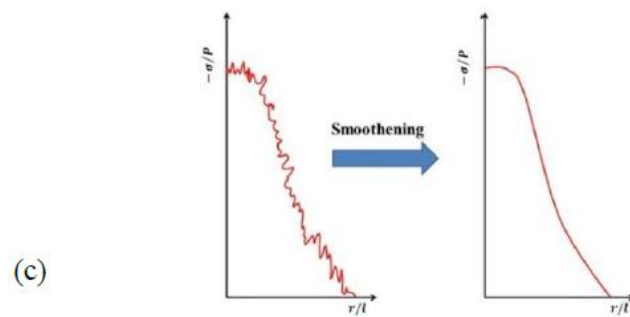
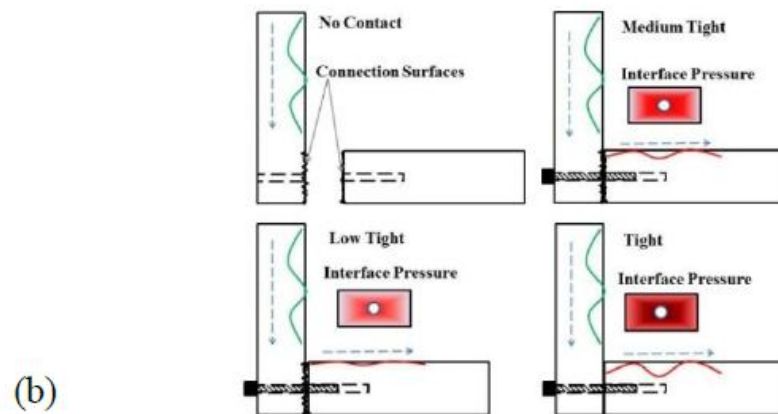
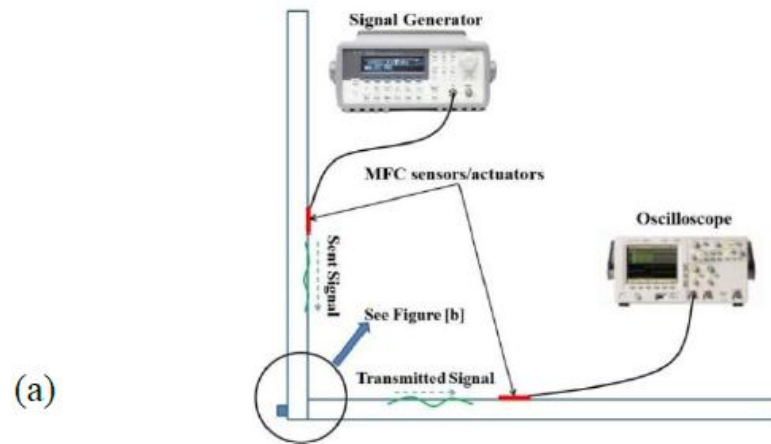
Rotor frequency (1p): 0.115-0.2 HZ

Blade passing frequency (3p): 0.345-0.6 HZ

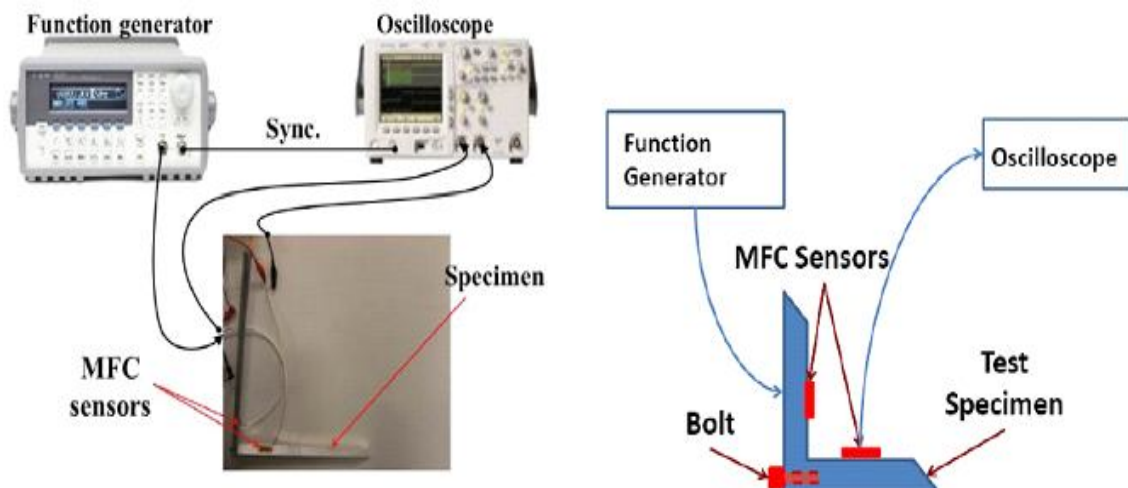
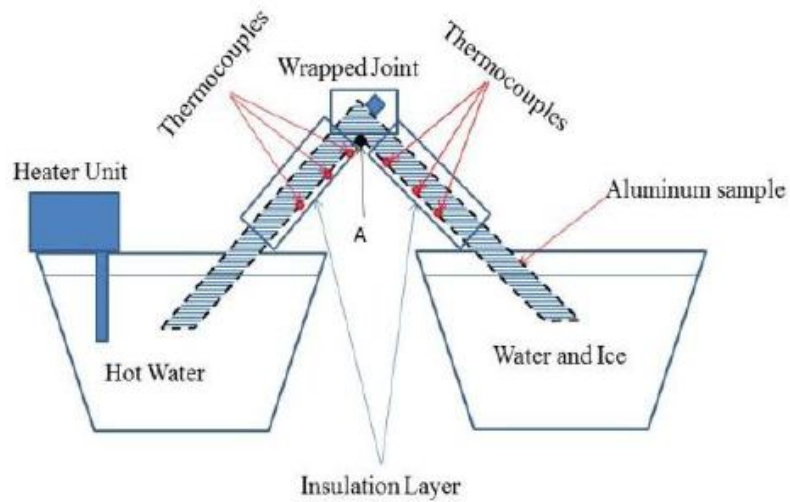
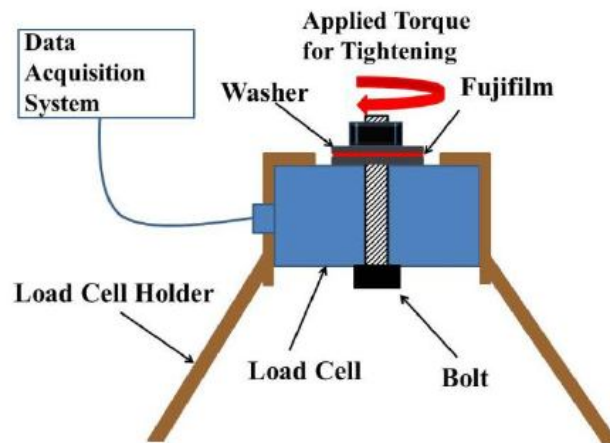


Schematic representation of relationship between ultimate and service conditions

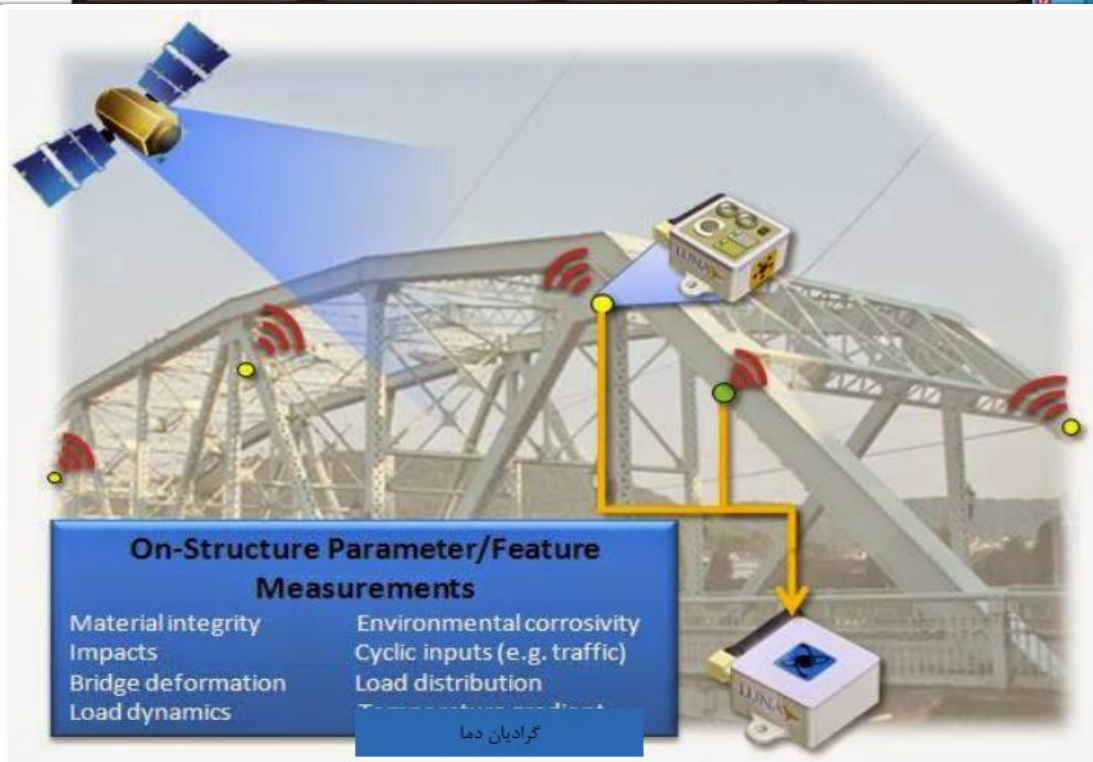
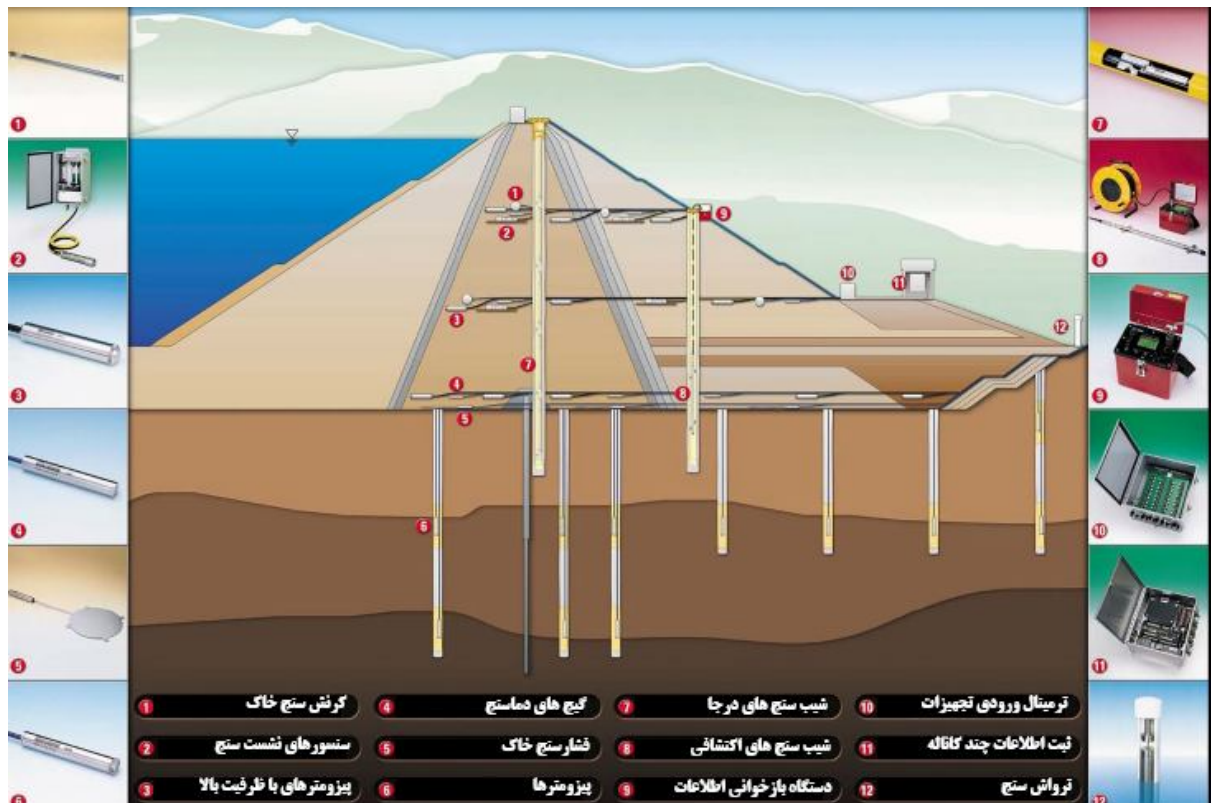




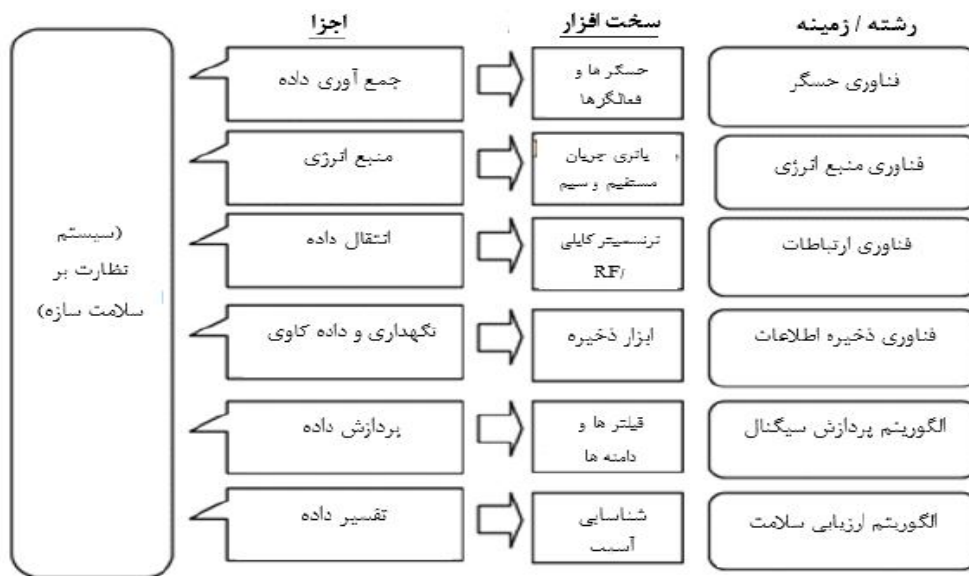
Schematic tests setup, (a) ultrasonic test, (b) joint detail
(c) pressure distribution, (d) thermal contact resistance



Ultrasonic test setup, setup sketch test apparatus

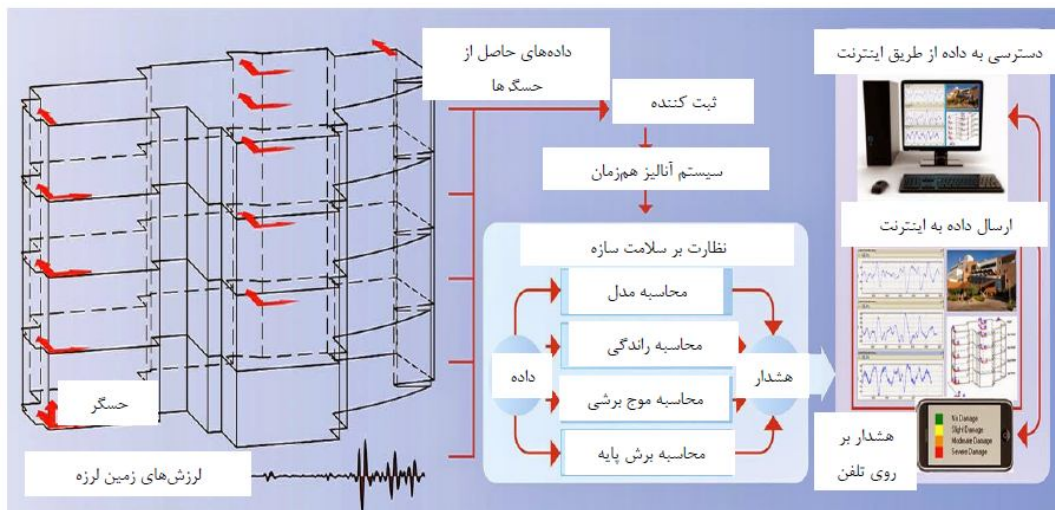


تصویری شماتیک از نحوه عملکرد سیستم‌ها (جمع آوری داده‌ها از ثبت کننده اطلاعات)



سیستم نظارت بر سلامت سازه (MIT)

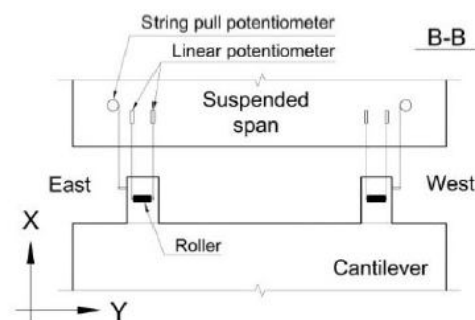
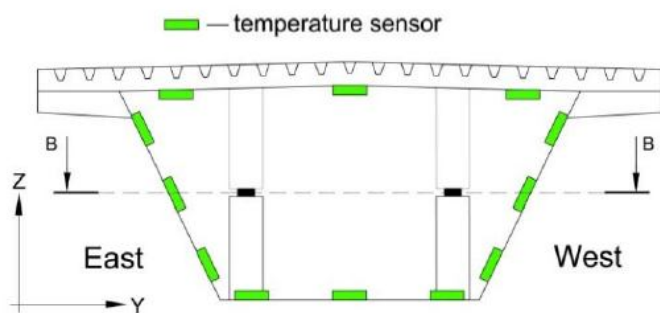
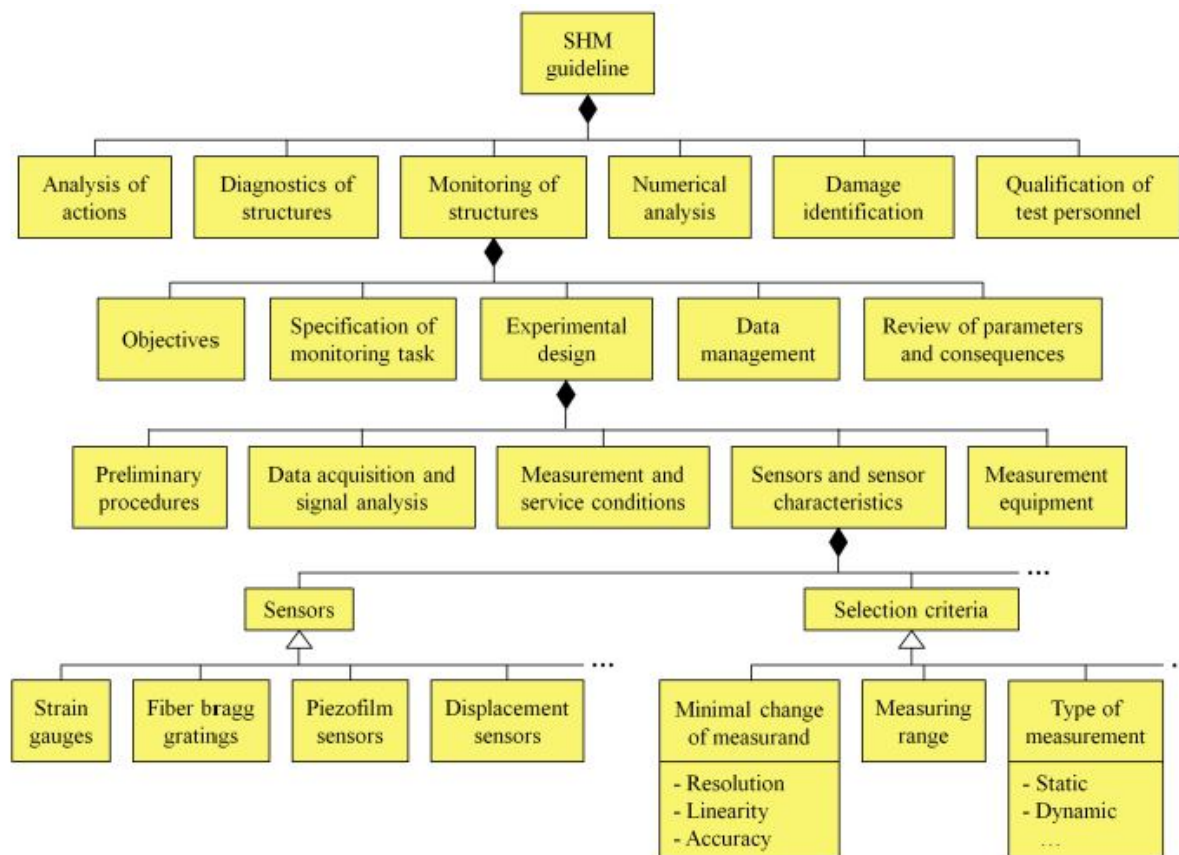
1. تشخیص آسیب وارده به سازه. 2. نوع آسیب. 3. محل آسیب. 4. شدت آسیب.

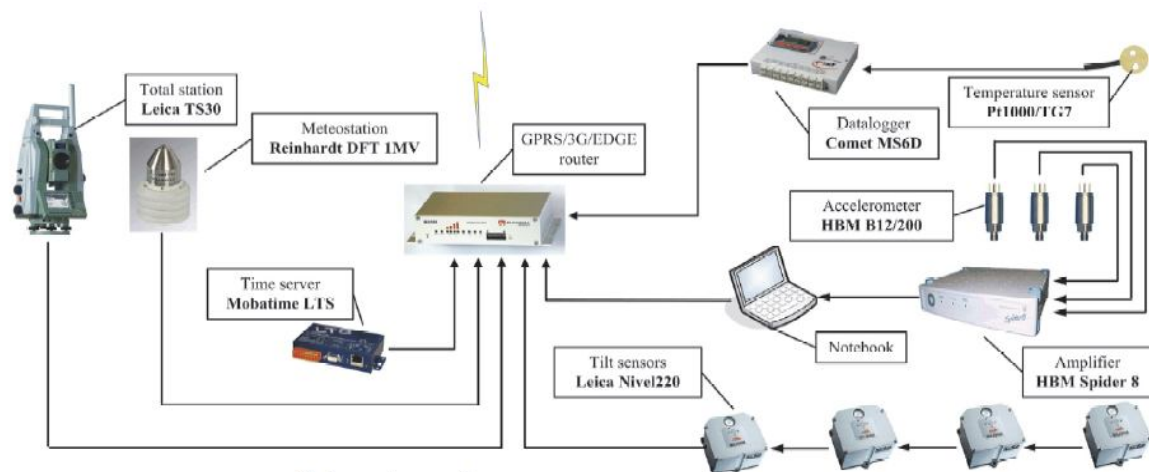


اصول نظارت و پایش سلامت سازه

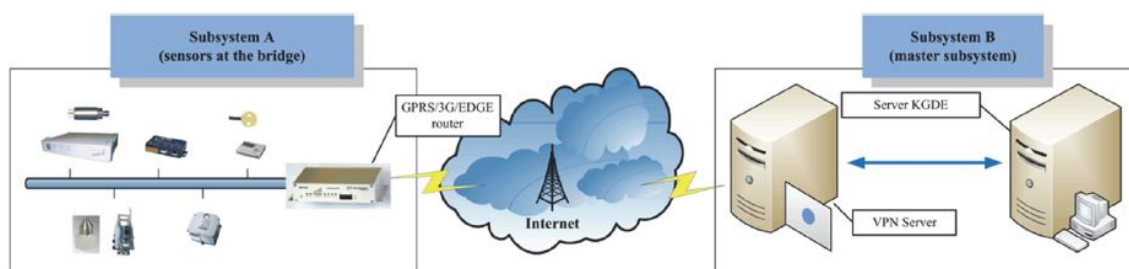
- اصل 1: تمام مصالح دارای معایب و نقص ذاتی هستند.
- اصل 2: ارزیابی آسیب نیاز به مقایسه بین دو حالت سیستم دارد.
- شناسایی وجود و محل آسیب را میتوان بدون نظارت انجام داد، اما شناسایی نوع آسیب موجود و شدت آسیب مستلزم نظارت است.
- حسگرها نمیتوانند آسیب را اندازه بگیرند. استخراج ویژگیها از طریق پردازش سیگنال و طبقه بندی آماری برای تبدیل داده های حسگرها به اطلاعات آسیب، ضروری است.
- طول و مقیاس زمانی وارد شدن آسیب به سازه، مستلزم خصوصیات سیستم سنجش SHM است.

• اندازه آسبهبایی که میتوان از تغییرات در دینامیک سیستم تشخیص داد، نسبت معکوس با بازه فرکانس تحریک دارد.

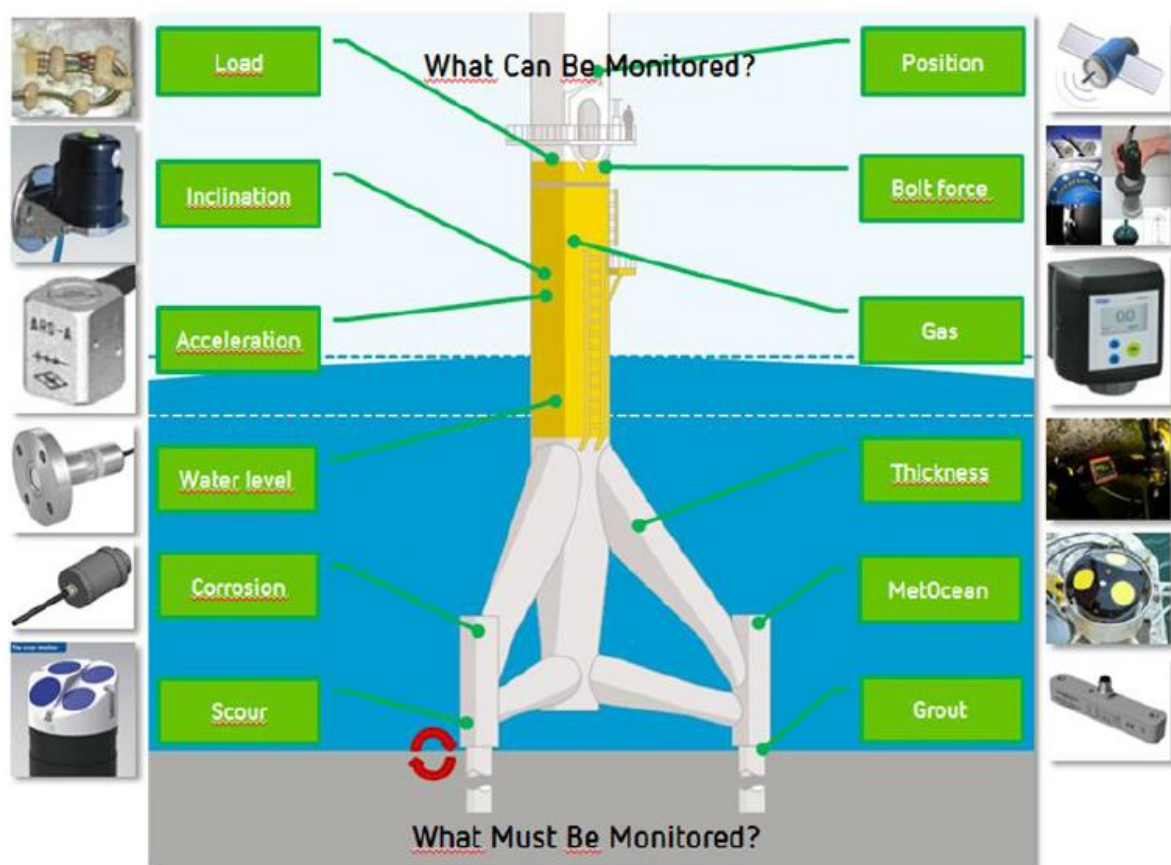


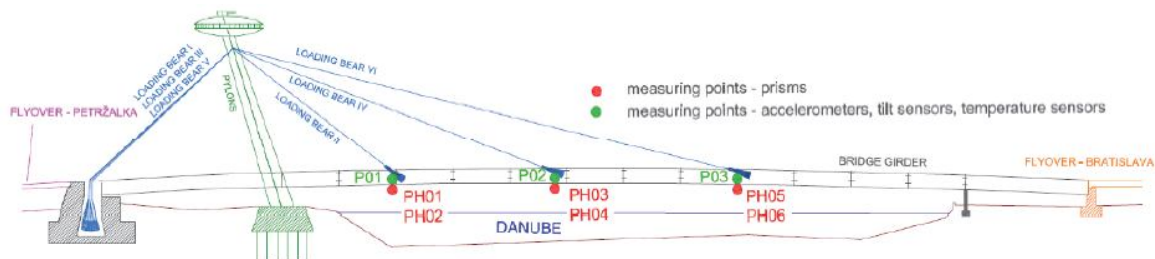


Subsystem of sensors

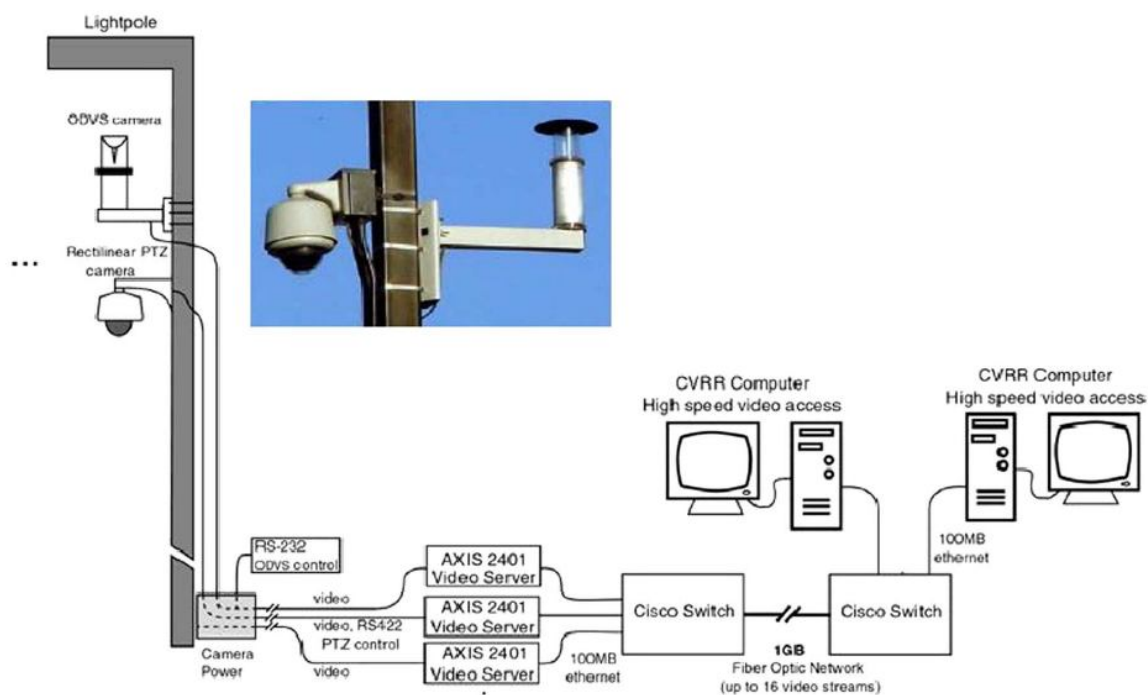
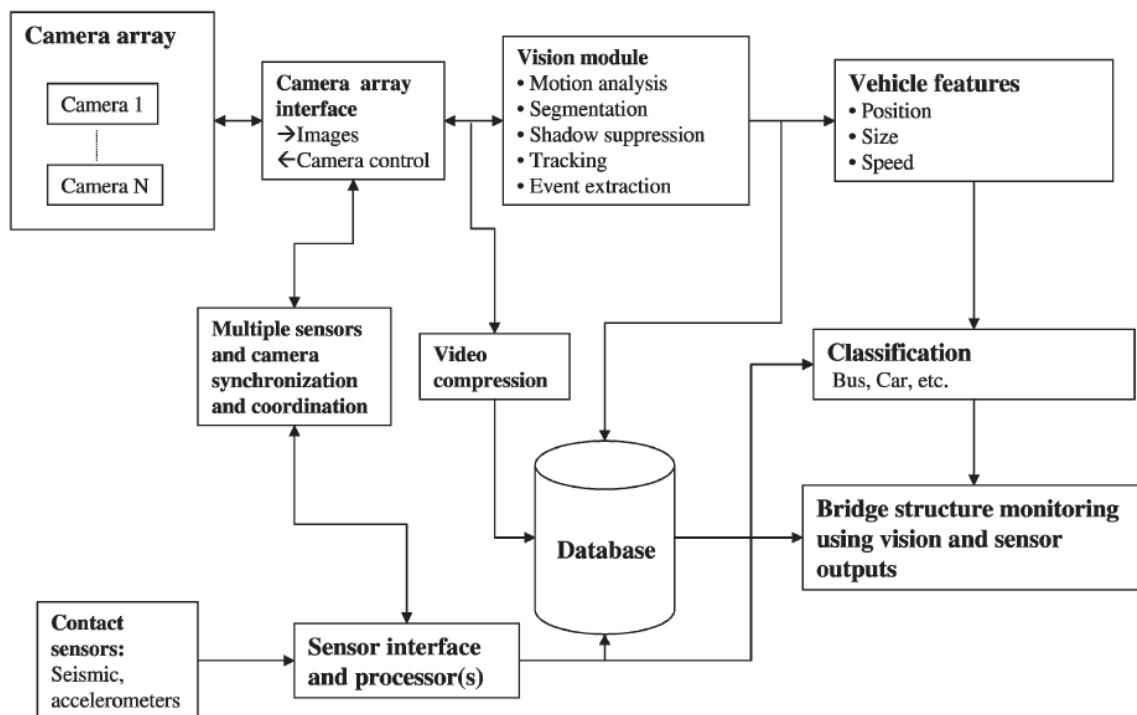


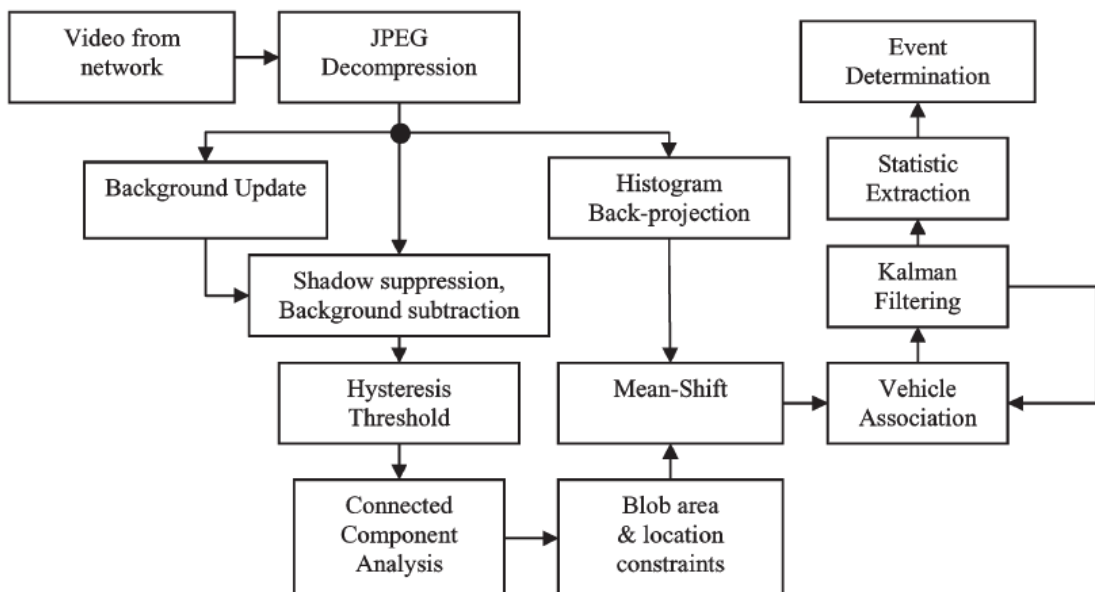
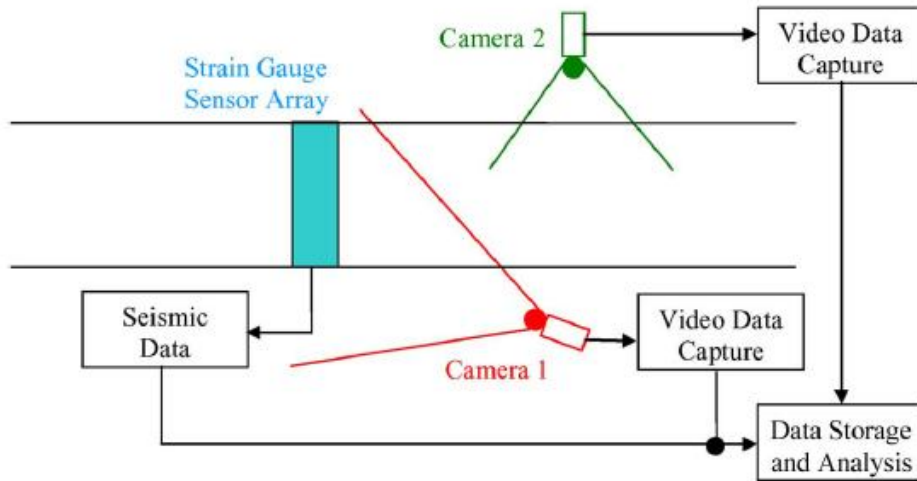
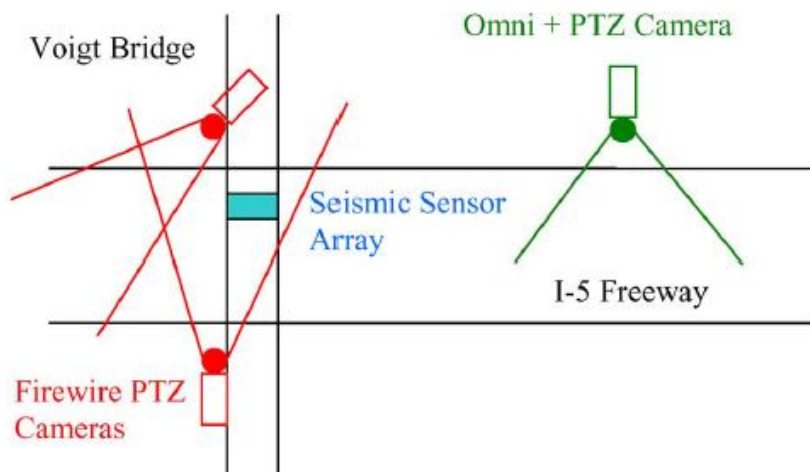
Subsystems of the AMS

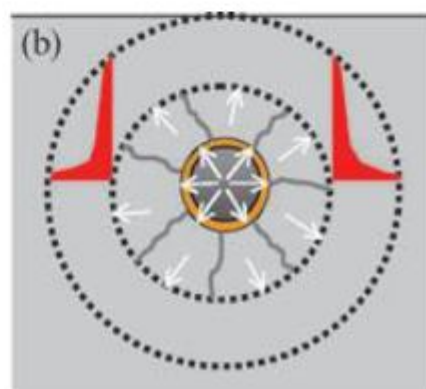
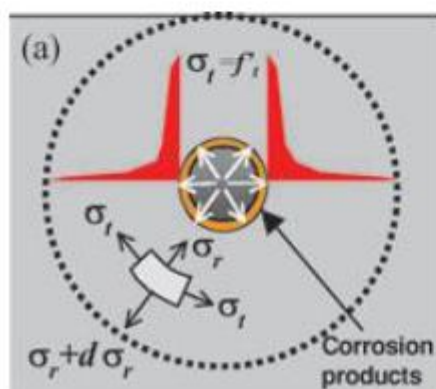
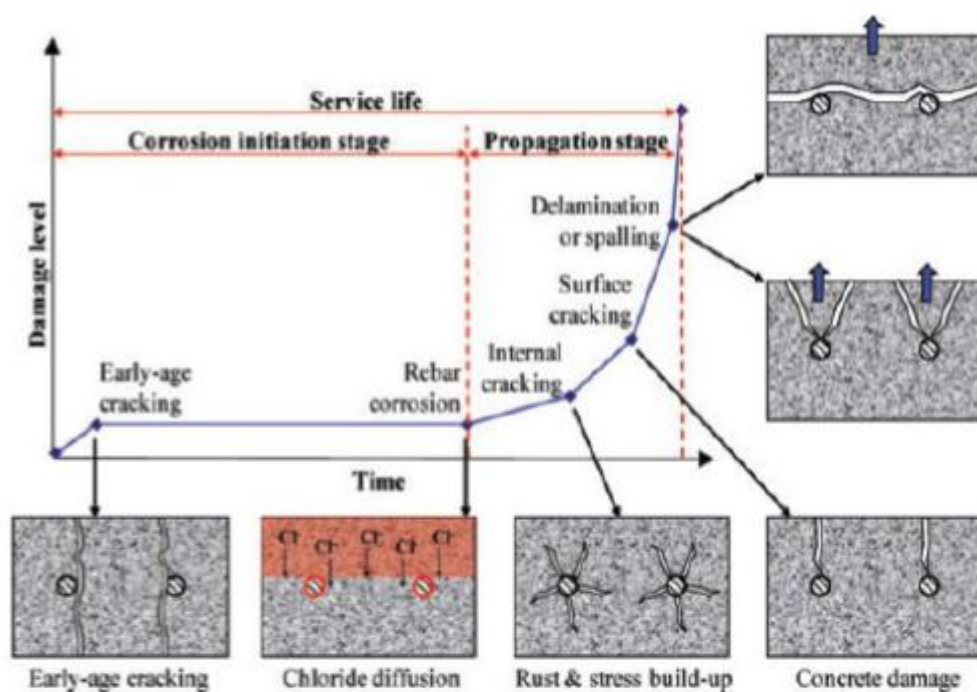
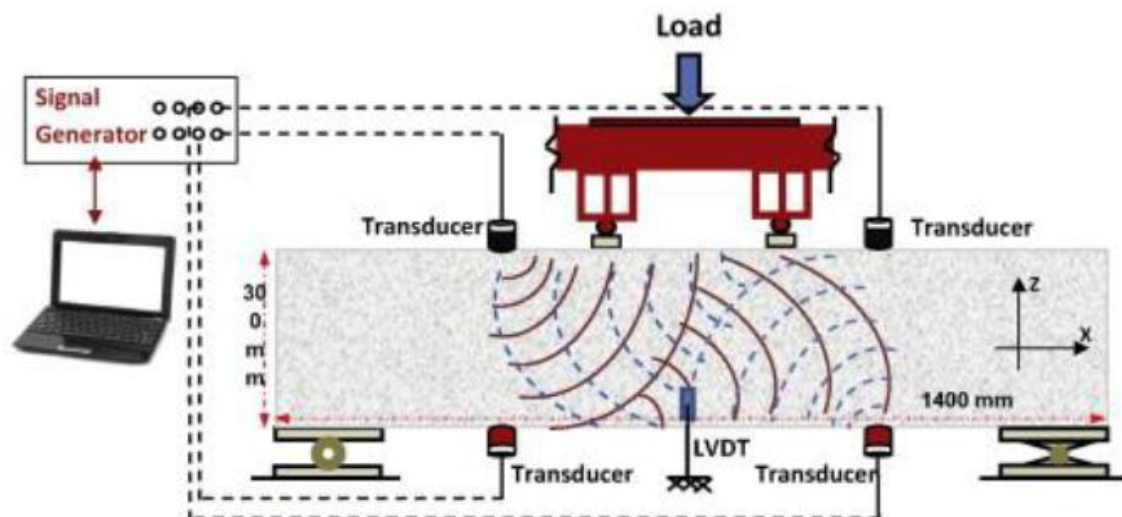


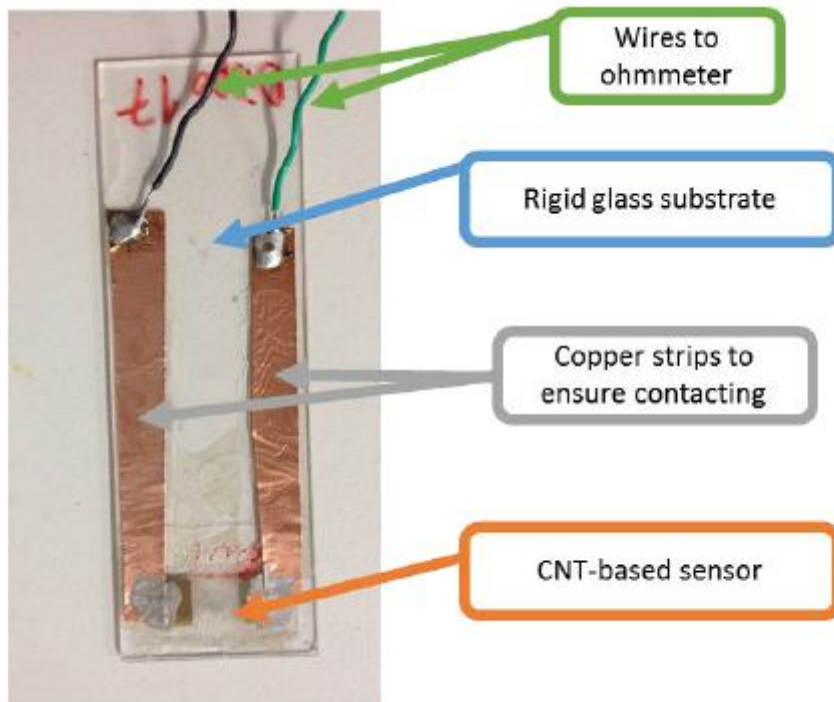
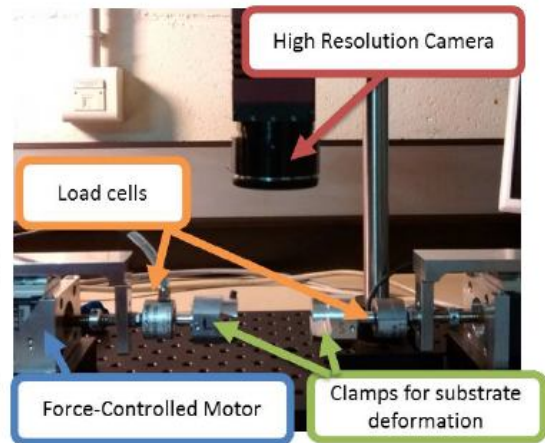
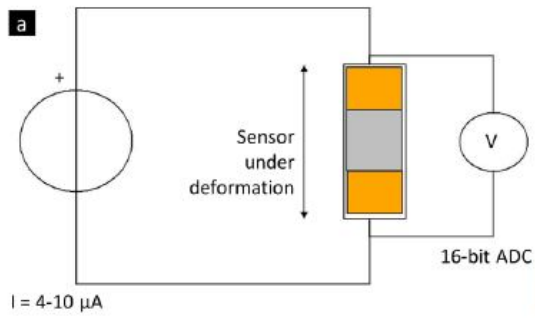


Measuring points configuration





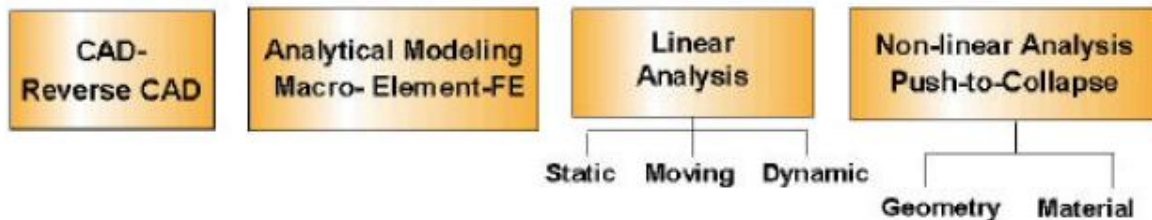




Experimental Technologies



Analytical Technologies



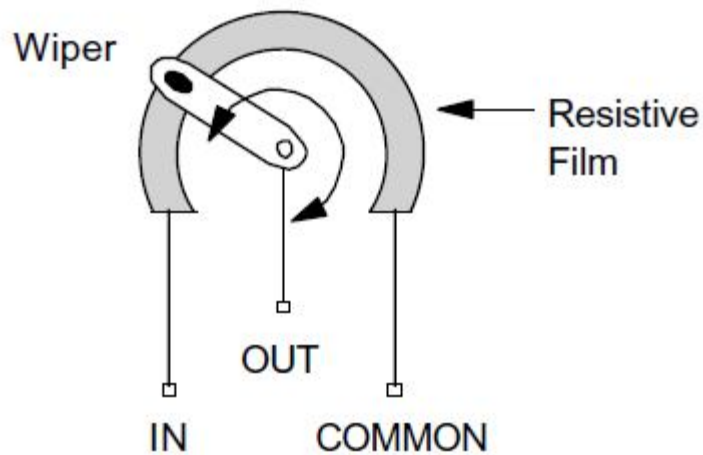
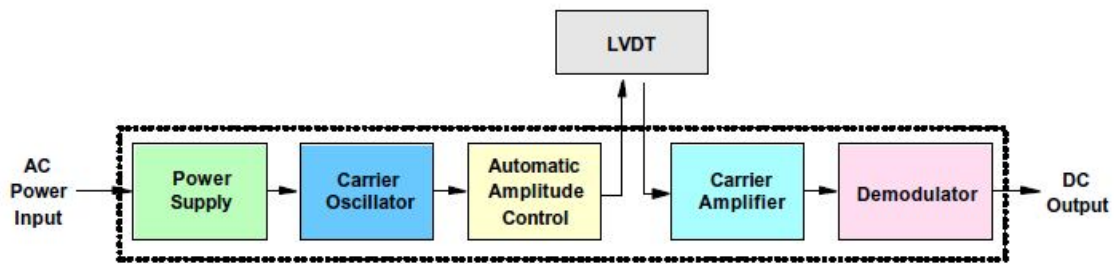
Information Technologies



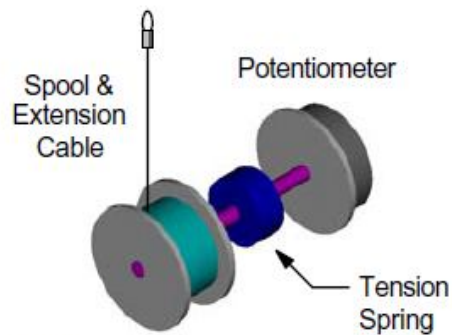
Geometry Monitoring	Short-Term Controlled Structural Testing		Localized NDE Methods	Long-Term Monitoring of Operational and Structural Health and Security	
	Pseudo-Static	Dynamic		Slow-Speed	High-Speed
Surveying	Nondestructive:	Modal analysis:	Material sampling testing	Fabrication	Vibrations
GPS	Static trucks	Impact input		Construction	Traffic loads
Photogrammetry	Crawl tests	Harmonic input	Thermal	Wind	Operations
Laser	Special loading devices	Falling Weight Deflectometer +Response	Magnetic	Temperature	Incidents and accidents
Remote sensing	Weigh In Motion +Response	Ambient vibration monitoring:	Ultrasonic	Movements	Impacts
	Destructive:		Acoustic wave	Displacements	Earthquake
	Progressively loading to damage/failure	Wind	Electrical	Intrinsic forces	Security monitoring
	Progressively inducing local damages	Operation	ElectroChem	Deterioration	
			Optical	Changes in:	
			Nuclear	Geometry	
			Other	Moisture	
				Electro-chemical properties	

Sensor selection criteria

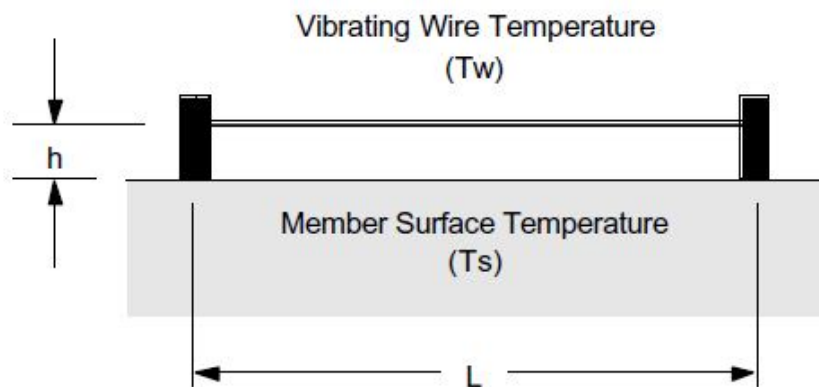
Sensor performance characteristics	Environmental constraints	Economic considerations
Sensitivity Resolution Discrimination Range Linearity Hysteresis Accuracy Error Precision Stability Response time Frequency response	Temperature range Humidity range Size Packaging Isolation Thermal effects	Cost Availability Reliability Ease of installation Data acquisition needs

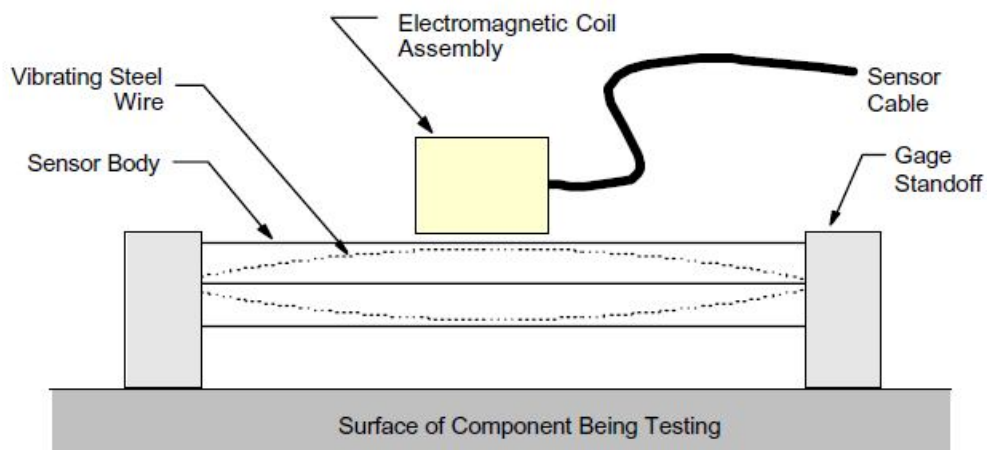


Schematic of an angular potentiometer

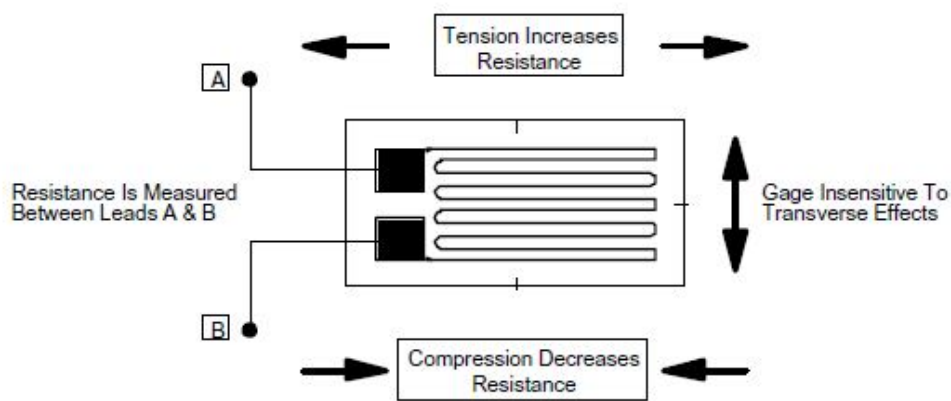


Cable extension displacement transducer

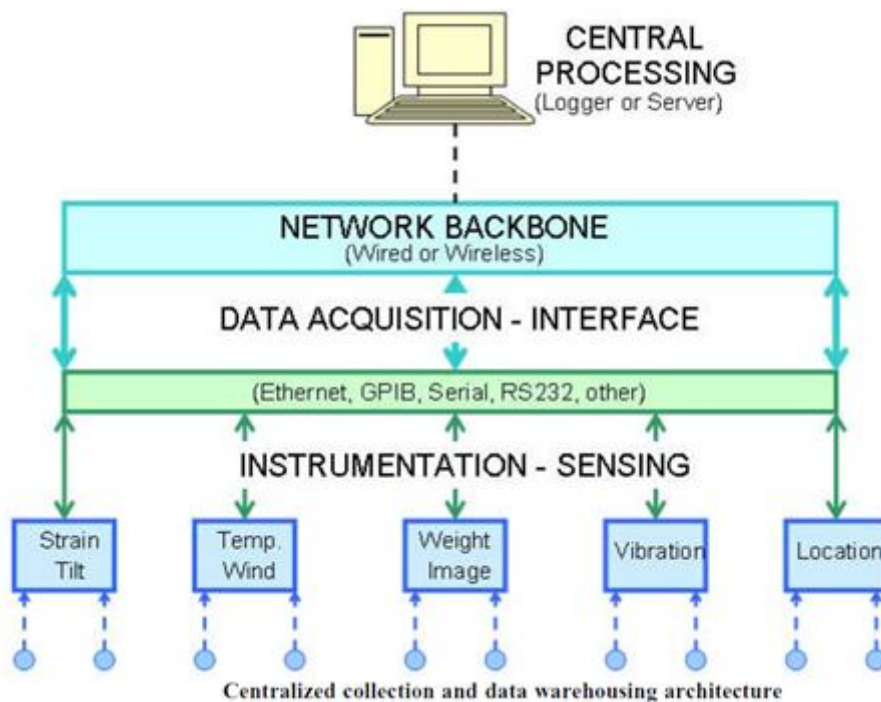




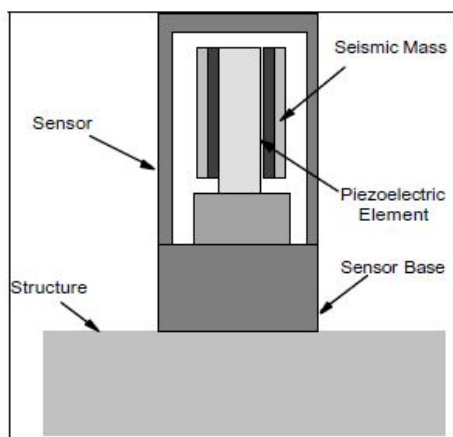
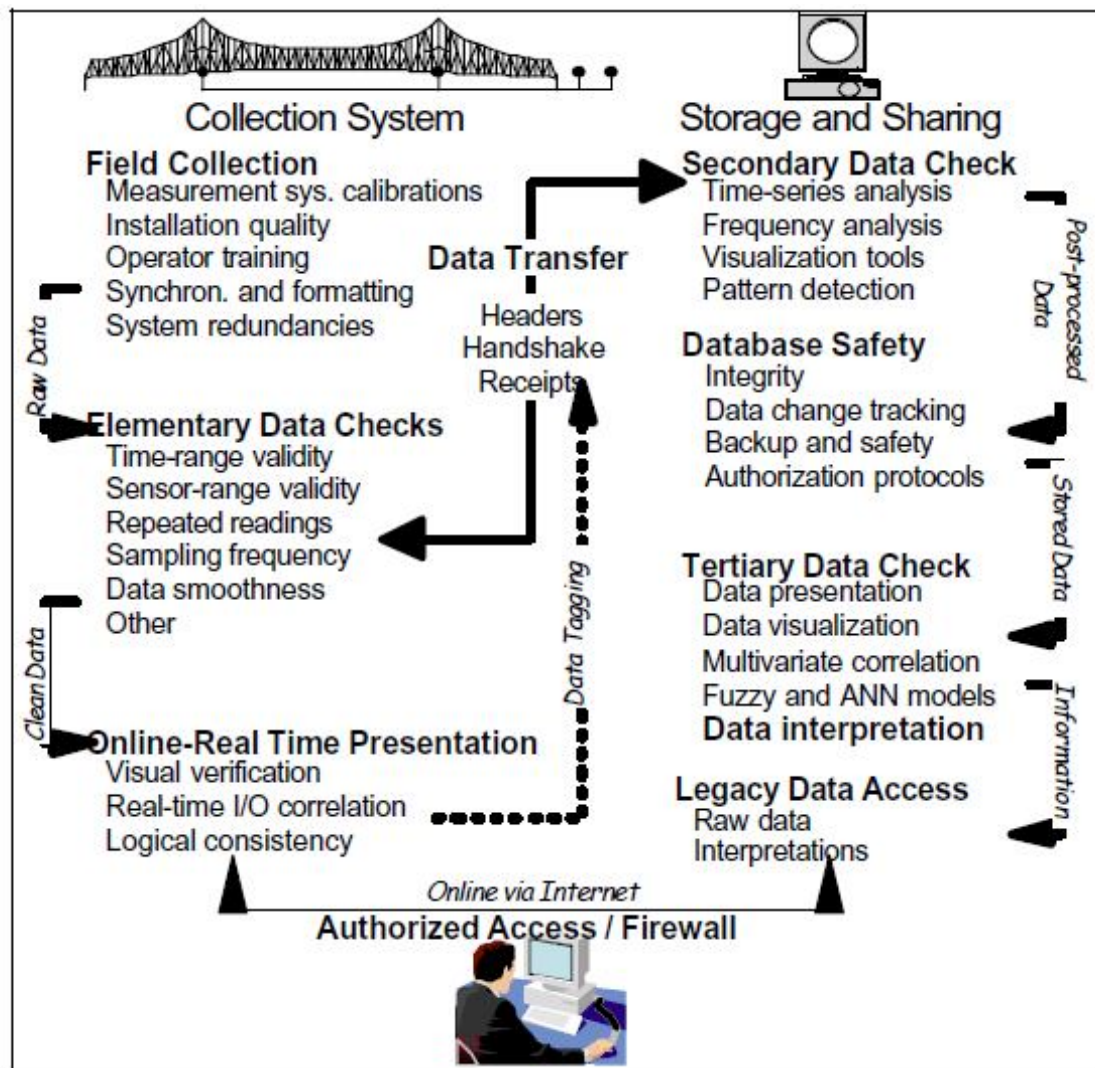
Schematic of surface mounted vibrating wire strain gage



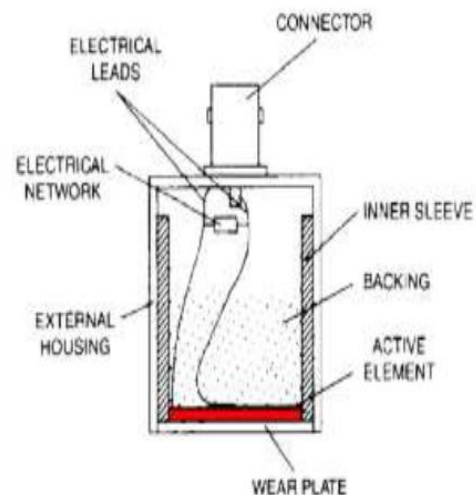
Bonded foil resistance strain gage

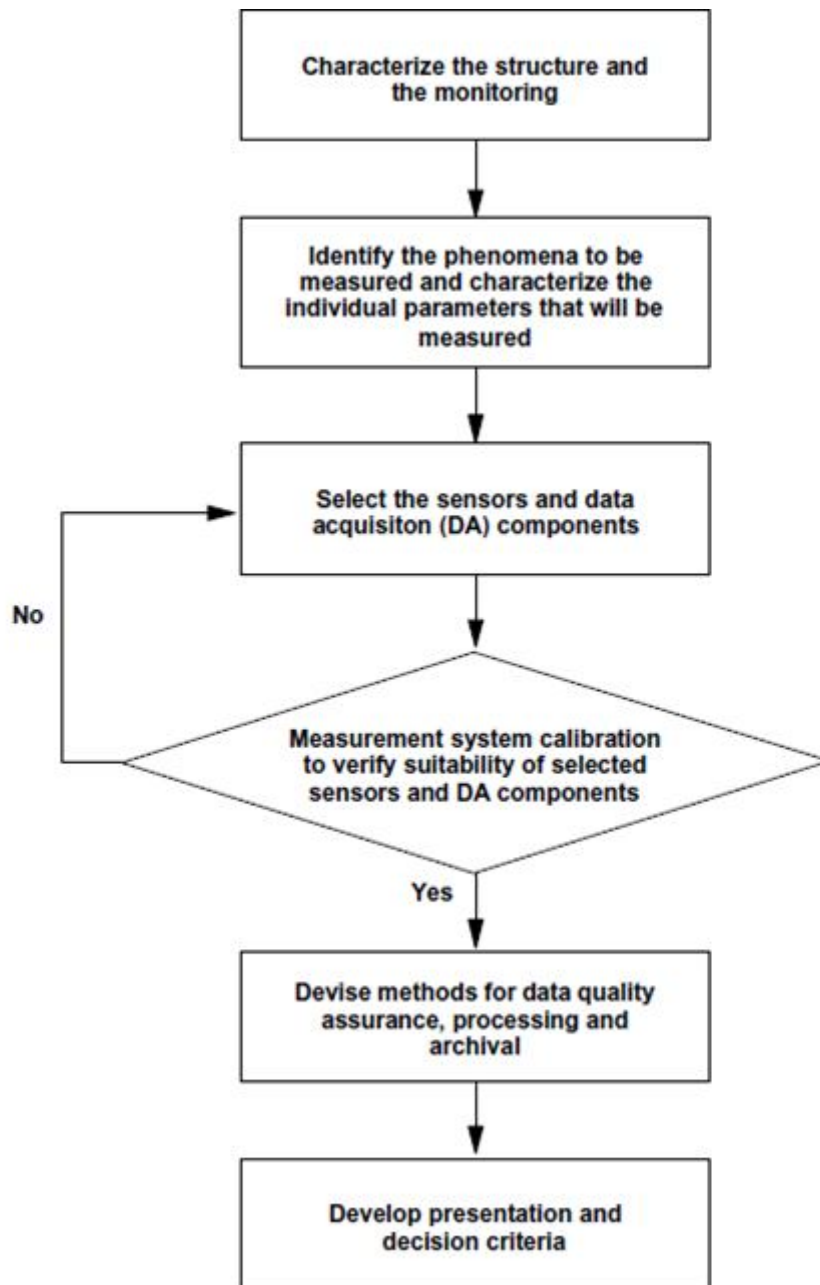


Centralized collection and data warehousing architecture

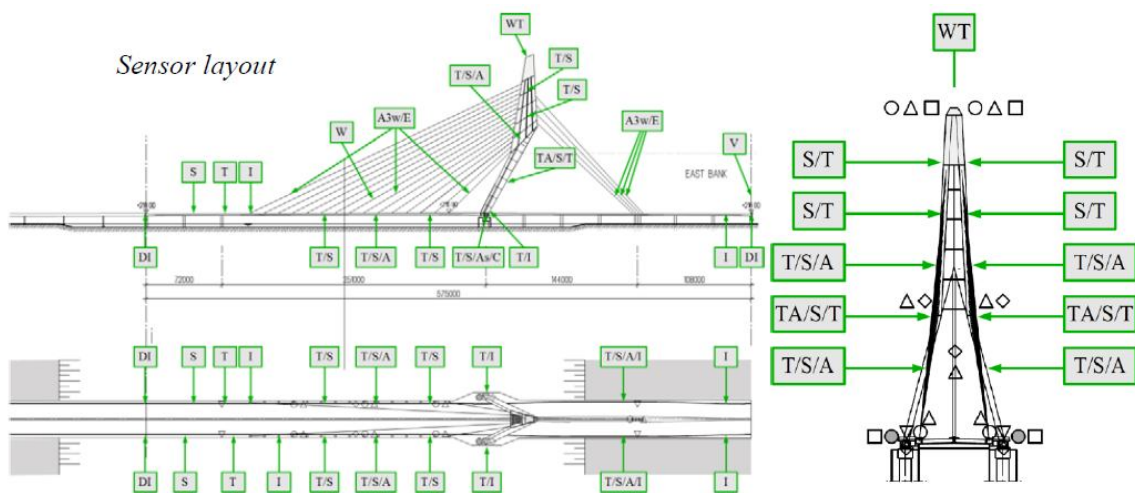


Schematics of shear type piezoelectric sensor

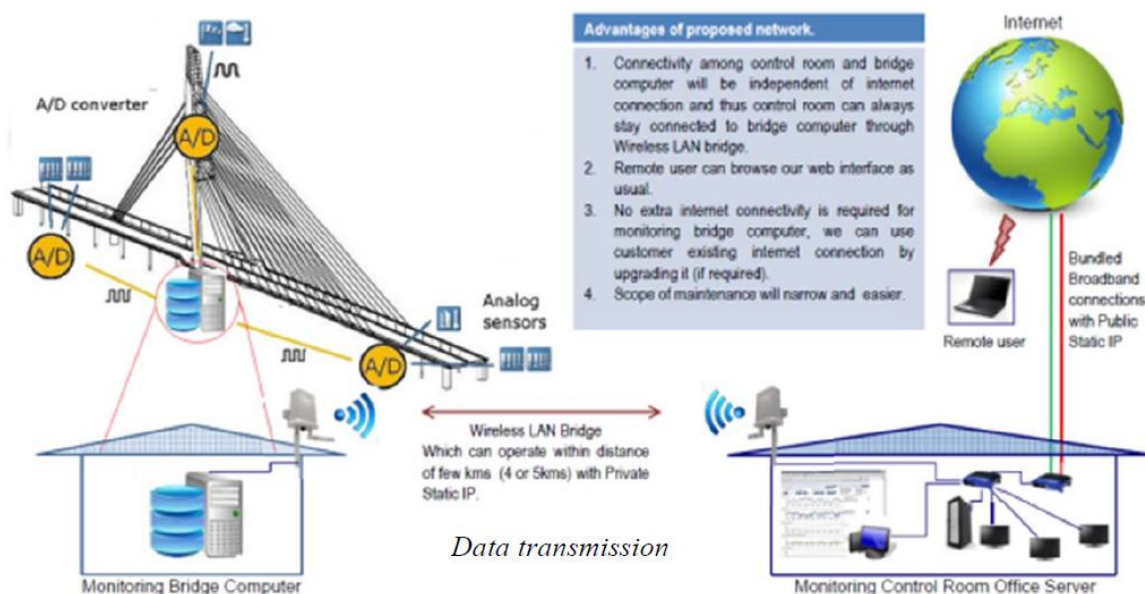




Sensor layout



Sensor	Logo	Sensors according to Specifications	Channels according to Sensors
		Sensors	Channels
Structural temperature	T	20	24
Strain gauge bolttable	S	10	10
Strain gauge weldable/ glueable	S	10	10
Wind sensor 3D	W	1	4
Wind multi-sensor (Wind 2D direction and speed, ambient temperature, precipitation levels, barometric pressure, relative humidity)	WT	1	6
3D accelerometers, cables	A3w	18	54
3D accelerometer, deck & pylon	A	8	24
Seismic accelerometers	As	4	12
Displacement sensor	DI	4	4
Inclination, tilt	I	4	8
Corrosion	C	3	6
DV Camera	V	4	
Traffic analyzer	TA	8	
Electromagnetic sensors	E	9	9
Sum		104	171



مراجع

۱- محمدصادق معرفت، شروان عطایی، ساماعیل قهرمانی آزمایش استاتیک و دینامیک پل قوسی بتنی

اکبرآباد، نشریه دانشکده فنی ۱۳۸۲

۲- فرهاد دانشجو، شاهرخ مالک، رضا آقانوری، تحلیل پارامتری رفتار دینامیکی پلهای خرپایی طره ای بلند دهانه تحت تأثیر زلزله، نشریه دانشکده فنی ۱۳۸۳

۳- سید مهدی زهرایی، کامیار کرباسی آرانی، مقایسه پاسخ لرزه ای غیر همبسته یک جهته و همبسته دو

جهته در جداگرهای لاستیکی-سربی پلهای جداسازی شده، پژوهشنامه حمل و نقل ۱۳۸۸

۴- علیرضا رهایی، سید رسول میرقادری، امیرحجت، ارزیابی عملکرد لرزه ای پل سفید اهواز و روش بهسازی آن، پژوهشنامه حمل و نقل ۱۳۸۶

۵- نصرت ا. . . فلاح، سعید پورزینلی، حسین کریمی، بررسی تأثیر ارتفاع پایه پلها بردقت روش تک مودی آیین نامه آشتودر تحلیل لرزه ای پلها و ارائه پیشنهاد برای اصلاح و توسعه روش، پژوهشنامه حمل و نقل ۱۳۸۷

۶- علیرضا قاری قرآن، سعید ضیایی راد، فرهاد دانشجو، طراحی و ساخت چکش تحریک به منظور ارزیابی دینامیکی تیرها و پلها به کمک چکش طراحی شده مناسب، پژوهشنامه حمل و نقل ۱۳۸۷

۷- کاظم شاکری، محسنعلی شایانفر، تحلیل پوش آورمودال با الگویار بهنگام شونده جهت ارزیابی لرزه ای پلها، پژوهشنامه حمل و نقل ۱۳۸۷

۸- محمدرضا عبادله زاده، شاهرخ مالک، محمدحسین امین فر، اثر مولفه قائم زمین لرزه بر روی عرشه پلها ی پیش تنیده با ساخت طره ای در اندرکنش با رفتارهای تابع زمان مصالح، نشریه دانشکده فنی ۱۳۸۷

۹- فریبرز ناطقی الهی، اکبر واثقی، وحیدلعل شمسواری، توسعه منحنی های تقاضای لرزه ای احتمال اندیشانه برای بررسی رفتار لرزه ای پل پیش تنیده تله زنگ، نشریه دانشکده فنی ۱۳۸۴

۱۰- علیرضا خالو، حسین میرزابرگ، توزیع بار در پلهای مورب با استفاده از روش نیمه پیوسته، نشریه دانشکده فنی ۱۳۸۲

۱۱- غلامرضا فاطمی نایینی، ناصر نعمت بخش، روش جدیدی برای بررسی و تست اعضای پس کشیده پلهای پیش تنیده بتنی، نشریه دانشکده فنی ۱۳۸۱

۱۲- سید مسعود نصر آزادانی، پگاه اسماعیلی، فائز بشیری، آشنایی با اصول و مبانی ابزاربندی سازه های عمرانی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۸۸

۱۳- عبدالحسین نیکجو، حسن میسمی، تستهای غیر مخرب (NDT) آزمونهای فرا صوتی (Ultrasonic Testing) تست اولتراسونیک سازه بتنی

۱۴- بازرسی و تست جوش به روش التراسونیک سه بعدی، مهندسین مشاور مهتاب قدس

15-Amr S. Elnashai, Luigi Di Sarno "Fundamental Earthquake Engineering" John Willey 2008
16-I. Elyasian "Destructive & Non Destructive Tests in Concrete applications for Evaluation Debonding Failures of FRP Strengthened System" 14 European conference on earthquake engineering, 2010 Ohrid in Republic of Macedonia

۱۷-ایمان الیاسیان، آزمونهای مخرب و غیرمخرب در بتن و جوش و کاربرد آنها برای درک و ارزیابی

گسیختگی عدم چسبندگی در سازه های تقویت شده با ورقه های FRP

۱۸-ایمان الیاسیان "مقاوم سازی پل از طریق استهلاک انرژی" سایت Iransaze

۱۹-ایمان الیاسیان "راهکارهای مقاوم سازی پل" سایت Iransaze

۲۰-ایمان الیاسیان، "بازرسی و بررسی آسیب پذیری پلهای بتنی و فلزی" سایت Iransaze

۲۱-ایمان الیاسیان "روش اجرای پلهای بتنی بر مقاوم سازی" سایت Iransaze

۲۲-ایمان الیاسیان، روشهای تقویت لرزه ای و تقویت پلهای، سایت Iransaze

۲۳-ایمان الیاسیان، روشهای نوین در تعمیر و نگهداری پل، سایت Iransaze

۲۴- سید مسعود نصر آزادانی، آشنایی با اصول و مبانی ابزار بندی سازه های عمرانی ، انتشارات دانشگاه

صنعتی شریف

25- Amin Barari, Innovative Solutions for Offshore Wind Turbine Support Structures

26- Alireza Farhidzadeh, Self-Sensing Systems and Smart Structures to Secure Safety

27- Nobuo Takeda Shu Minakuchi, Optical Fiber Based Process and Structural Health Monitoring of Aerospace Composite Structures

28-Shinae Jang And Billie F. Spencer, Jr. NSEL Report Series Report No. NSEL-035

May2015, Structural Health Monitoring for Bridge Structures using Smart Sensors

Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign

29-Tomonori Nagayama and Billie F. Spencer, Jr. NSEL Report Series Report No. NSEL-

001 November 2007, Structural Health Monitoring Using Smart Sensors, Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign

30-Arvid Hejll, Civil Structural Health Monitoring Strategies, Methods and Applications

DOCTORAL THESIS, Luleå University of Technology Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering

31- Koushik Roy, Suparno Mukhopadhyay Structural Health Monitoring, EARTHQUAKE

RESISTANCE OF LOW-COST ENGINEERED HOUSING IN NORTH-EAST INDIA

24-25 June 2016,

32- Mohammad Jalalpour, PHD THESIS STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF BOLTED JOINTS USING THERMAL CONTACT RESISTANCE AND ULTRASONIC SIGNALS SUBMITTED IN NEW MEXICO UNIVERSITY, JULY 2012

33-You-Lin XU, Health monitoring of large civil structures, 2nd future infrastructure

forum, 17-18 January 2012, Cambridge, UK Department of Civil and Structural

Engineering, The Hong Kong Polytechnic University

34-I. ELYASIAN, Smart Materials and new Technologies

کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در عمران، معماری و شهرسازی ۵ آذر ۱۳۹۴، سالن همایش های بین

المللی صدا و سیما