

Lecciones Sobre Fallas Estructurales en Puentes

Alberto PATRÓN

Consultora Mexicana de Ingeniería S.A. de C.V.

*X Simposio Nacional
de Ingeniería Sísmica*
30-31 de Enero de 2009
Toluca, Edo. de México

Fallas estructurales en puentes

- Contexto
- Fallas de relevantes de Puentes
- Conclusiones

✓ Contexto

Contexto

Reglamentación sobre construcciones

Riesgo en la industria de la construcción

➤ Código de Hammurabi => 1er reglamento de construcción

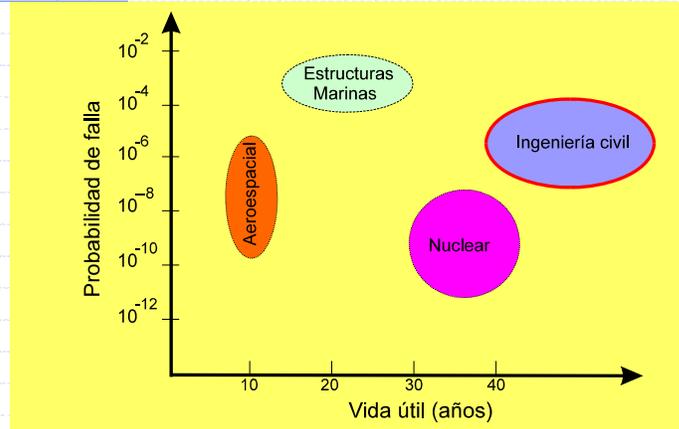


- Art 229 : «... si un albañil construye una casa para alguien, pero si el no ha reforzado suficientemente su estructura y si la casa que el construyó se derrumba y si el propietario de la casa muere, el albañil sera condenado a morir..... ».
- Art 230 : «...si es un hijo del propietario el que muera, se matará a un hijo del albañil.....».

☞ Relación entre un evento y sus consecuencias

Seguridad de estructuras

➤ Probabilidades de falla para diferentes industrias



☞ En ingeniería civil las probabilidades de falla son del orden de 10^{-6}

Seguridad de estructuras

➤ Riesgos asociados a algunas actividades (Melchers, 1995)

Actividad	Tasa media de decesos por hora de exposición ($\times 10^9$)	Exposición (h/año)	Tasa de decesos por año ($\times 10^6$)
Alpinismo	30000-40000	50	1500-2000
Fumar Tabaco	2500	400	1000
Transporte aéreo	1200	20	24
Transporte en automóvil	700	300	200
Transporte en tren	80	200	15
Trabajo en la construcción	70-200	2200	150-440
Incendios	1-3	8000	8-24
Falla de estructuras	0.02	6000	0.1

☞ Riesgo por fallas estructurales bajo

✓ Fallas relevantes de puentes

Fallas en puentes

Falla relevantes de puentes

➤ Estudio americano

(Wardhana, 2003)

☞ Fallas de puentes entre 1989 y 2000

Table 2. Number of Failures with Respect to Phase of Failure Occurrences

Types of failures	Construction	Service	Unknown
Distresses	0	17	0
Partial collapses	3	80	13
Total collapses	5	12	21
Unknown	0	277	75
Total	8	386	109

Table 5. Type and Number of Failure Causes

Failure causes and events	Number of occurrences	Percentage of total
Hydraulic	266	52.88
Flood	165	32.80
Scour	78	15.51
Debris	16	3.18
Drift	2	0.40
Others	5	0.99
Collision	59	11.73
Auto/truck	14	2.78
Barge/ship/tanker	10	1.99
Train	3	0.60
Other	32	6.36
Overload	44	8.75
Deterioration	43	8.55
General	22	4.37
Steel deterioration	14	2.78
Steel-corrosion	6	1.19
Concrete-corrosion	1	0.20
Fire	16	3.18
Construction	13	2.58
Ice	10	1.99
Earthquake	17	3.38
Fatigue-steel	5	0.99
Design	3	0.60
Soil	3	0.60
Storm/hurricane/tsunami	2	0.40
Miscellaneous/other	22	4.37
Total	503	100.00

Falla relevantes de puentes

➤ Fallas por tipo de puentes

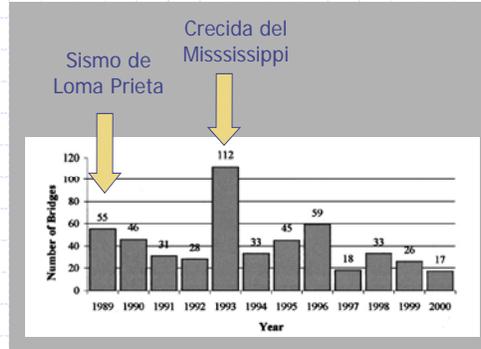
Table 1. Type and Number of Bridge Failures

Bridge type	Material	Number of failures	Percentage
Arch	—	17	3.38
Bailey	Steel	1	0.20
Bascule	—	2	0.40
Beam girder	Concrete	29	5.77
—	Steel	145	28.83
—	Timber	13	2.58
Box	Concrete	2	0.40
—	Timber	5	0.99
Box girder	Concrete	9	1.79
—	Steel	3	0.60
Cable	Steel	1	0.20
Corrugated pipe	Steel	4	0.80
Covered	Timber	6	1.19
Culvert	Steel	17	3.38
—	Other	2	0.40
Slab	Concrete	25	4.97
—	Steel	1	0.20
Span	Steel	7	1.39
—	Timber	8	1.59
Stringer	Steel	12	2.39
—	Timber	12	2.38
Truss	Steel	107	21.27
—	Timber	9	1.79
Tied arch	Concrete	1	0.20
Floating	—	2	0.40
Pedestrian	—	2	0.40
Miscellaneous	—	61	12.13
Total	—	503	100.00

☞ Puentes Metálicos representan casi el 50 % de las fallas,

☞ Las fallas en puentes de concreto son relativamente bajas

➤ Ditrribución de fallas por año



Falla relevantes de puentes

➤ Conclusiones

Principales tipos de falla

- ☞ Inundación (33 %)
- ☞ Arrastre / Socavación (16%)
- ☞ Colisiones (12 %)
- ☞ Sobrecargas (9%)
- ☞ Deterioro (8.5 %)
- ☞ Fuego (3%)
- ☞ Construcción (2.5 %)
- ☞ Sismo (3.5 %)
- ☞ Diseño (0.6 %)

Fallas relevantes de puentes

☞ En México no existen estudios comparables

Principales tipos de falla en mexico

- ☞ Inundación
- ☞ Arrastre / Socavación
- ☞ Sobrecargas
- ☞ Deterioro (falta de mantenimiento)
- ☞ Construcción
- ☞ Diseño
- ☞ Sismo

Puente Tacoma (EU, 1940)

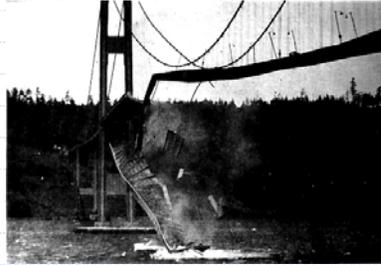
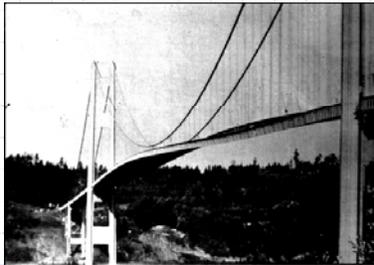
Ejemplo (video)



Puente Tacoma

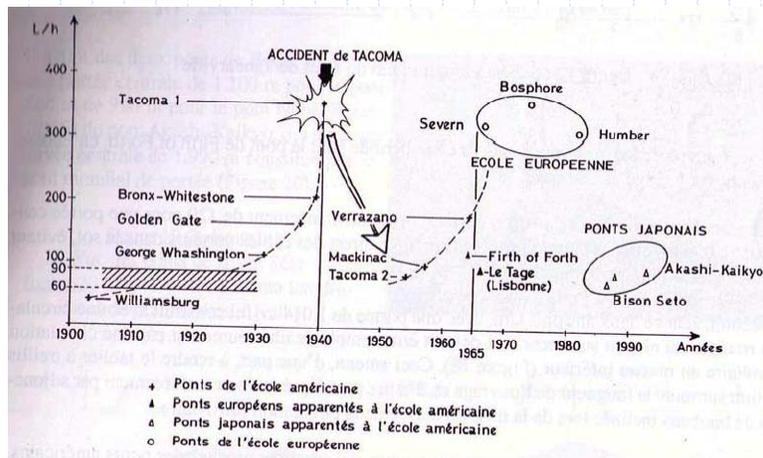
➤ Caso del puente de Tacoma

- ☞ Puente perfectamente diseñado para resistir a los efectos estáticos del viento
- ☞ Record del mundo por su esbeltez (claro/ancho)
- ☞ Falla por no tomar en cuenta los efectos dinámicos del viento

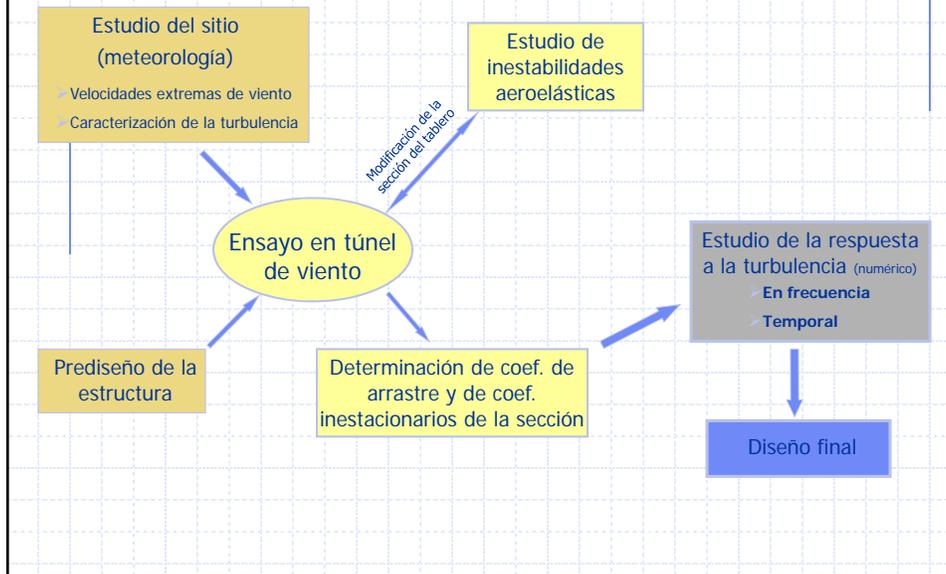


Puente Tacoma

➤ Evolución de la esbeltez de los puentes colgantes



Metodología para el estudio de los efectos dinámicos del viento



Fallas por sismos

Fallas en puentes

Principales defectos en el diseño sísmico de puentes:

- Subestimación de desplazamientos,
 - ☞ No se consideran secciones agrietadas en el cálculo de desplazamientos por sismo
- Subestimación de los efectos combinados de sismo y peso propio,
 - ☞ Puentes no diseñados contra el sismo
- Subestimación de movimientos debidos a condiciones locales del suelo,
 - ☞ Fenómeno de liquefacción y movimientos diferenciales
- Falta de ductilidad en zonas de articulaciones plásticas
 - ☞ Detallado incorrecto del refuerzo

Fallas por sismos

Fallas en puentes

Subestimación de desplazamientos

➤ Caida de claros

Distribuidor I-5, San Fernando, California



Sismo de San Fernando, 1971



Sismo de Northridge, 1994

Fallas por sismos

Fallas en puentes

Falta de ductilidad en articulaciones plásticas

➤ Falta de confinamiento del concreto



Sismo de Northridge, 1994

Fallas por sismos

Fallas en puentes

Falta de ductilidad en articulaciones plásticas

➤ Discontinuidad del refuerzo longitudinal



Vía Rápida Hanhin, sismo de Kobe, 1995

Fallas por sismos

Fallas en puentes

Detallado inadecuado

Diseño inadecuado de articulación plástica

Pandeo de Refuerzo

Falla por Cortante



Santa Monica Interstate 10, Sismo de Northridge

Fallas por sismos

Fallas en puentes

Falla de conexiones

➤ Detallado inadecuado de conexión



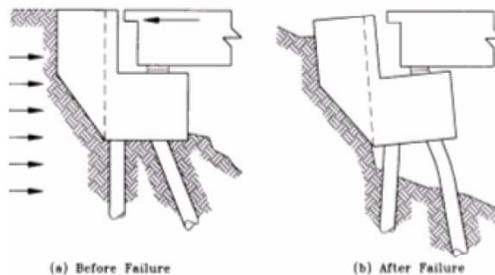
Cypress viaduc, Sismo de Loma Prieta, 1989

Fallas por sismos

Fallas en puentes

Desplazamiento de apoyos

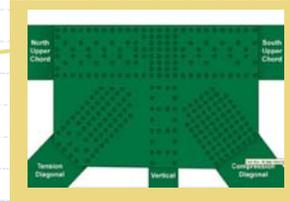
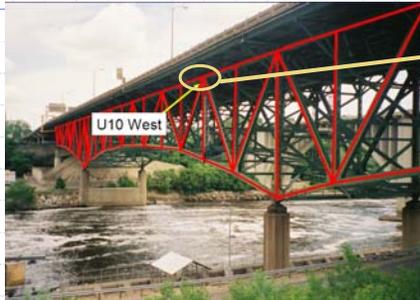
➤ Incremento de la carga Long. del suelo



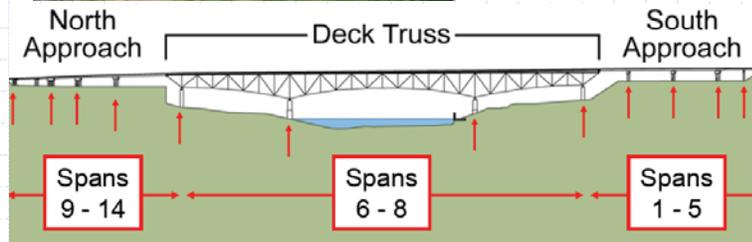
Puente Rio Banano, Sismo de Costa Rica 1990

Puente I-35 W, Minnesota

Armadura metálica con losa de concreto

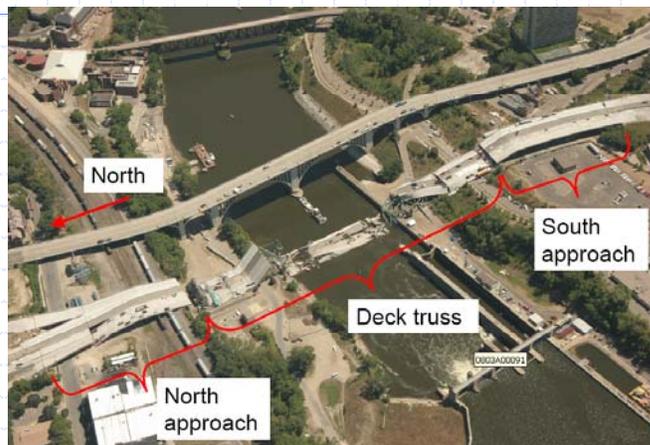


Conexión a base de placas, y remaches



Puente I-35 W, Minnesota

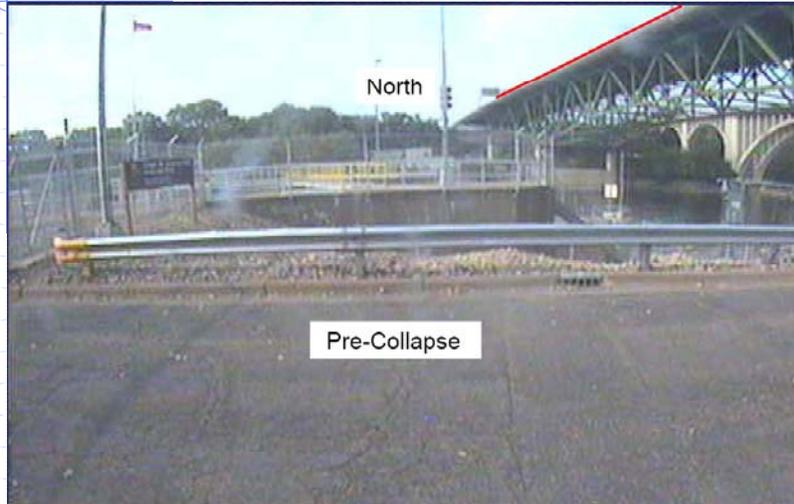
Falla súbita el 1 de Agosto de 2007



13 Muertos, 145 Heridos

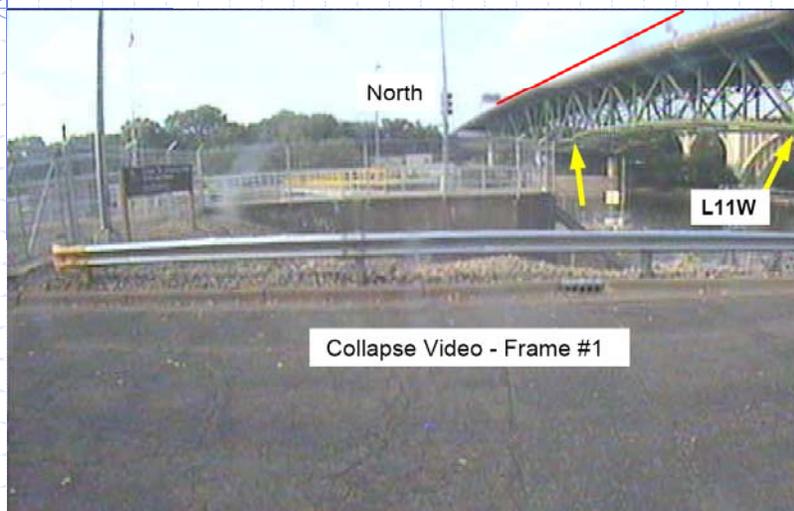
Puente I-35 W, Minnesota

➤ Video: Camara de seguridad



Puente I-35 W, Minnesota

➤ Video: Camara de seguridad



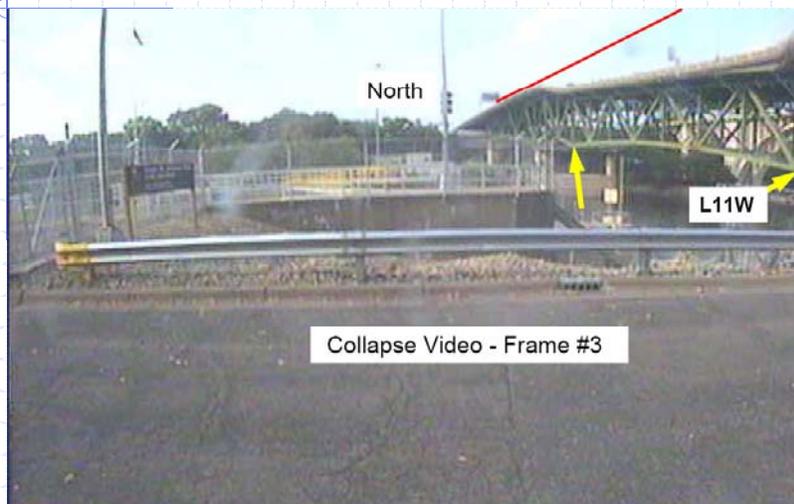
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



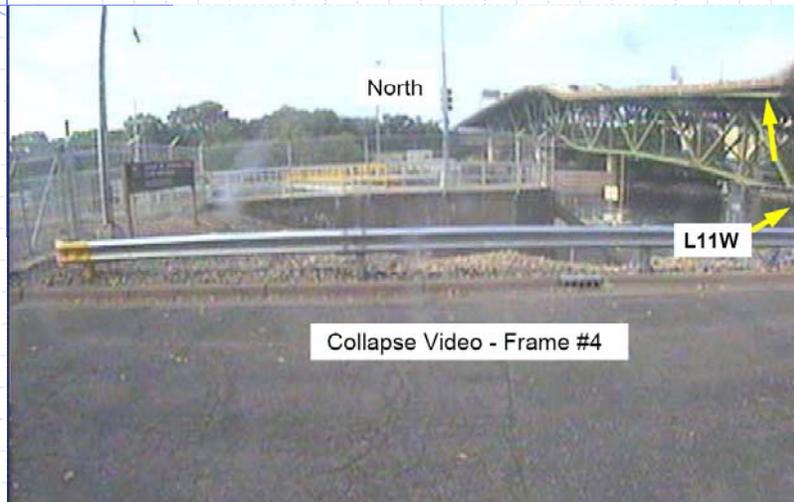
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



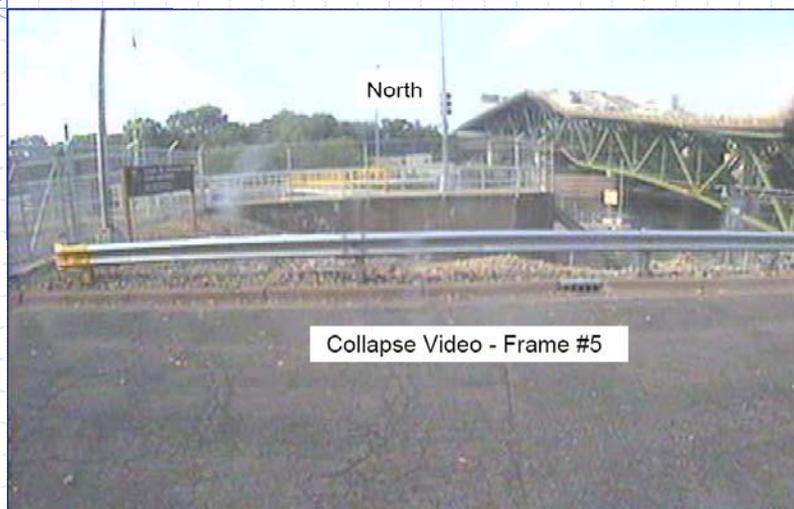
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



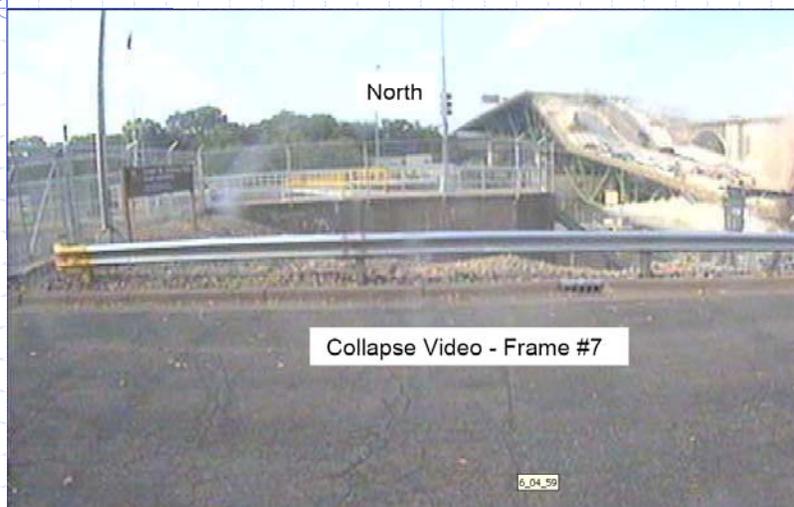
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



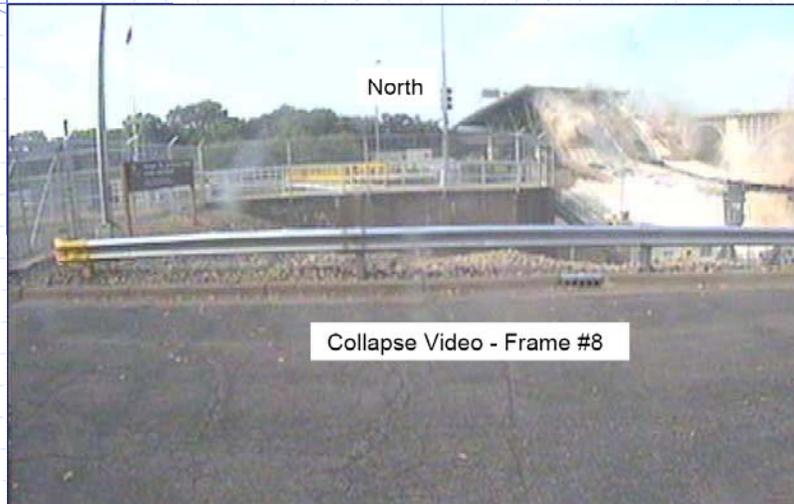
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



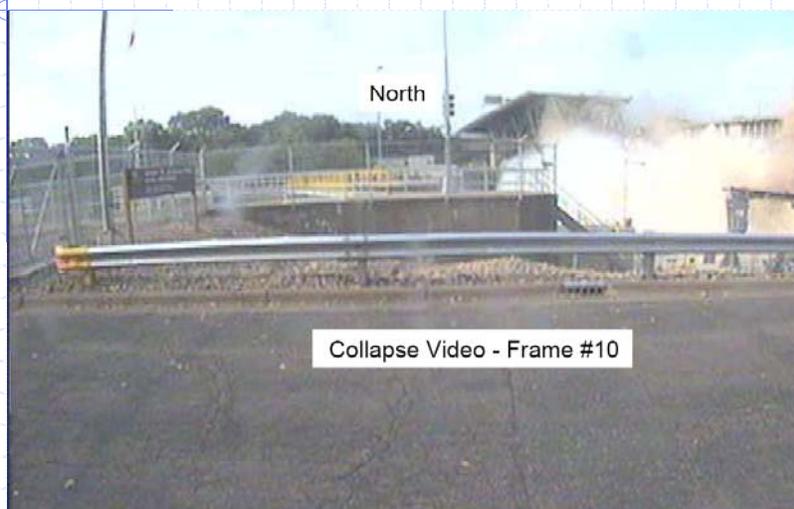
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



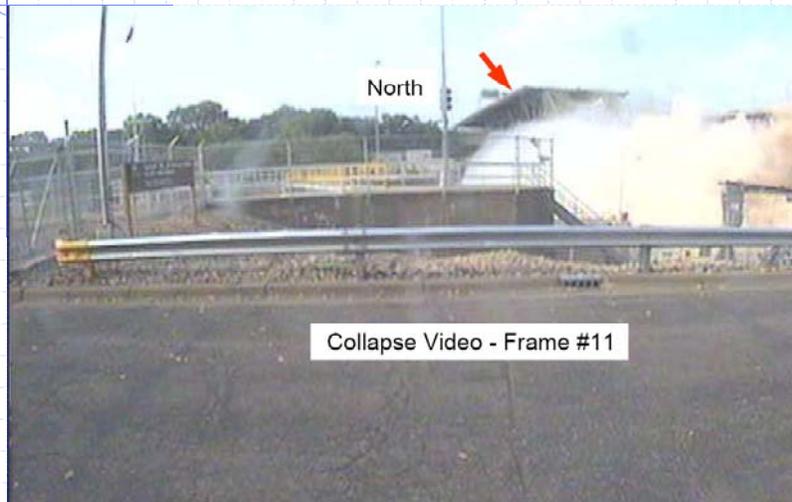
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



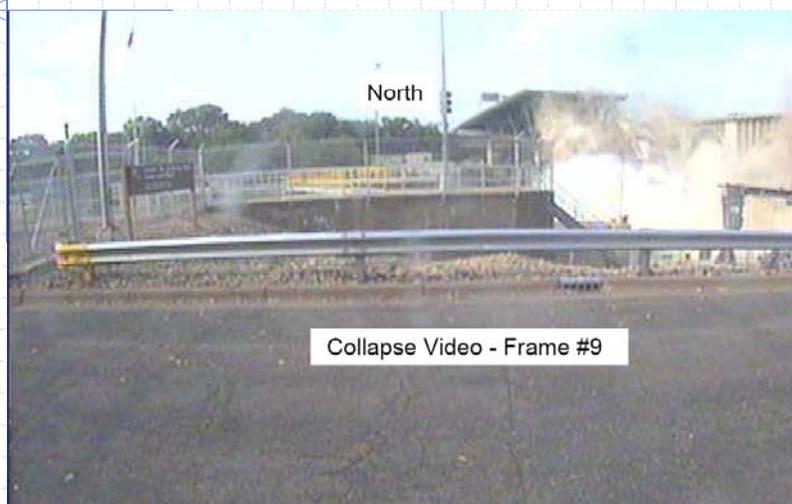
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



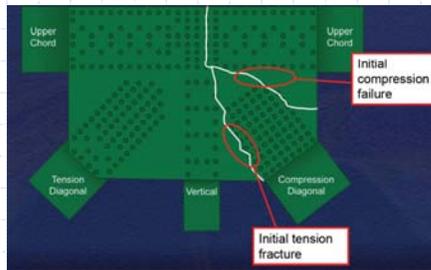
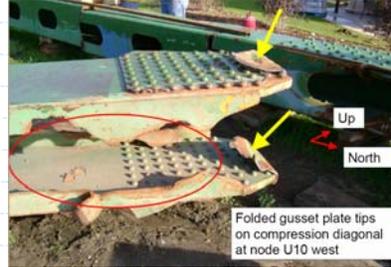
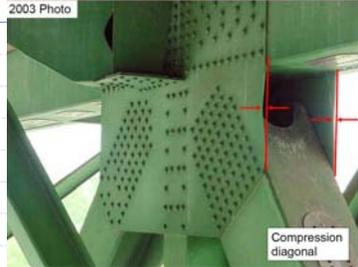
Puente I-35 W, Minnesota

Fallas en puentes



Puente I-35 W, Minnesota

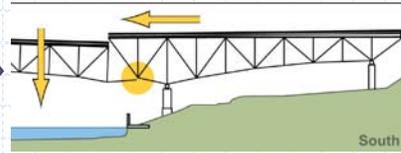
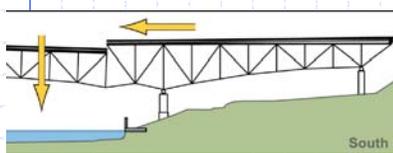
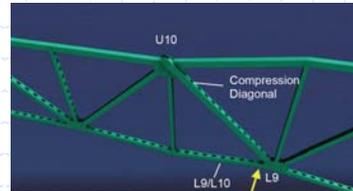
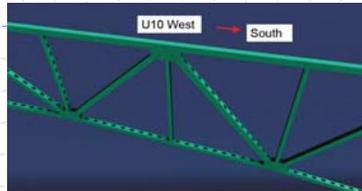
➤ Inicio de la falla: Nudo de Conexión de fibra superior de armadura



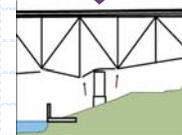
☞ **Falla por Compresión**
+
Falla por tensión

Puente I-35 W, Minnesota

➤ Mecanismo de colapso del puente



☞ **El colapso era inevitable una vez que el nudo de conexión falló !!**



Puente I-35 W, Minnesota

Conclusiones sobre falla del puente (Investigación de NSTB) :

- Placas de conexión mal diseñadas (t=13 mm)
- Incremento en la carga del puente
 - Peso total del puente = 8300 Ton,
 - Incremento del espesor de losa (1977) = + 1360 Ton,
 - Modificación de Parapetos y Guarniciones = + 550 Ton
 - ☞ Incremento del peso del puente en 23 % !!!
- Trabajos de reparación durante la falla del puente
 - Reparación de la losa de rodamiento
 - Peso de lo material y equipo de reparación = 260 Ton
 - ☞ Peso concentrado en las inmediaciones de primer nudo de conexión que falló !!!

Fallas por problemas hidráulicos

- Principal tipo de falla en México
 - Tormenta Tropical Lowell, Septiembre 2008 (Navojoa Sonora)



Fallas por problemas hidráulicos

- Area hidráulica insuficiente para el puente,
 - Fenómenos climáticos (crecidas extraordinarias),
 - Originados por Cambio climático + Deforestación,
- N.A.M.E. = Nivel de Aguas Maximas Extraordinario

- ☞ Valor de diseño de puentes
- ☞ Período de Retorno = 100 años

✓ Conclusiones

Conclusiones

- En general, los Factores de seguridad son suficientes para prevenir una falla originada por un solo fenómeno,
- Colapso de estructuras = combinación de situaciones adversas
- Reglas de buena ingeniería = seguridad
 - ☞ Ductilidad
 - ☞ Redundancia
 - ☞ Calidad en la construcción
 - ☞ Inspección y mantenimiento regular
- Evitar “industrialización” del diseño de puentes
- Evitar optimización en exceso de materiales

GRACIAS POR SU ATENCIÓN