

集装箱起重机抗震设计 方法与措施研究



报告人：卢凯良



目录



岸桥在地震中的损坏

- 一、岸桥演变
- 二、损坏形式
- 三、损坏原因
- 四、地震反应



岸桥抗震措施

- 一、加固方案
- 二、新型结构形式
- 三、减隔震装置
- 四、各种措施的对比



岸桥抗震设计分析方法

- 一、岸桥抗震仿真分析模型
- 二、结构模型地震台试验



岸桥在地震中的损坏

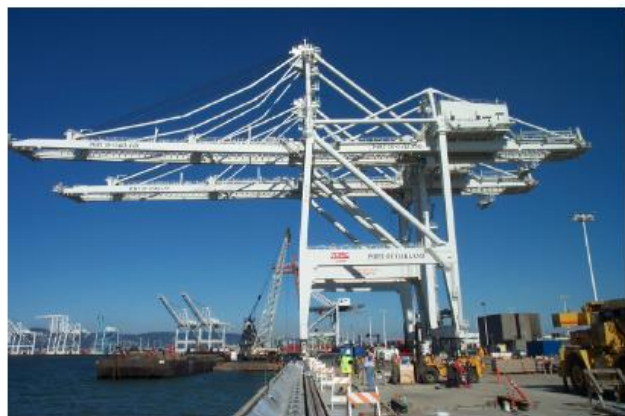
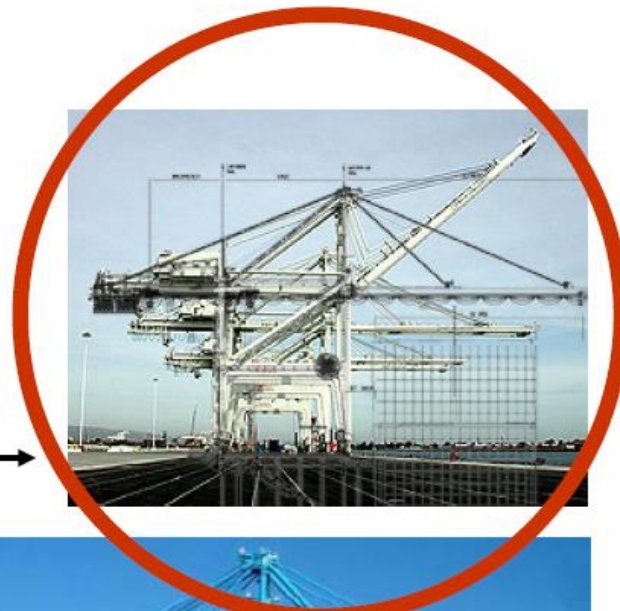
一、岸桥演变



Panamax



Post-Panamax



Super Post-Panamax



Suezmax





岸桥在地震中的损坏

一、岸桥演变



早期小轨距型(1970)



现代苏伊士大轨距型





岸桥在地震中的损坏

二、损坏形式

1995年日本阪神地震神户港岸桥破坏情况分为以下几类：

- 一类：发生**脱轨**，但未对门框等上部结构产生影响；
- 二类：**腿部扩展**，可以看见对门框部位的少量影响；
- 三类：对门框影响显著，腿部可见纵向弯曲；
- 四类：大梁损坏；
- 五类：**倒塌**、全部损坏。





岸桥在地震中的损坏

表1 日本阪神地震中神户港集装箱起重机损坏情况的统计

损坏情况	轨距30m级		轨距16-20m级			合计
	六甲岛	波特岛	六甲岛	波特岛	摩耶码头	
一类	0	0	0	0	0	0
二类	4	0	1	11	6	22
三类	14	7	4	4	1	30
四类	0	0	0	0	1	1
五类	1	0	0	0	0	1
不明			1			1
合计	19	7	6	15	8	55

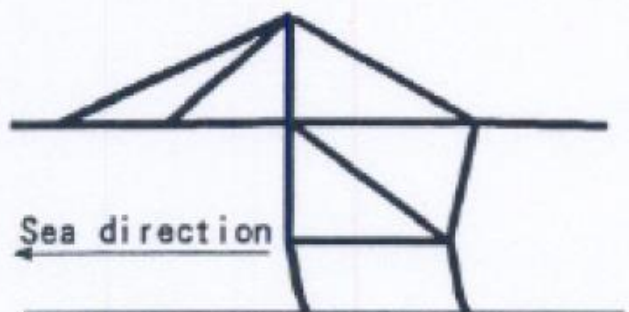
三、损坏原因

- 主要是岸桥受到垂直于大车轨道方向的水平横向地震力和错位位移，造成行走装置起跳、脱轨、损坏和门框支腿破坏，以至于整机倒塌。
- 现代大轨距岸桥比早期小轨距岸桥更危险

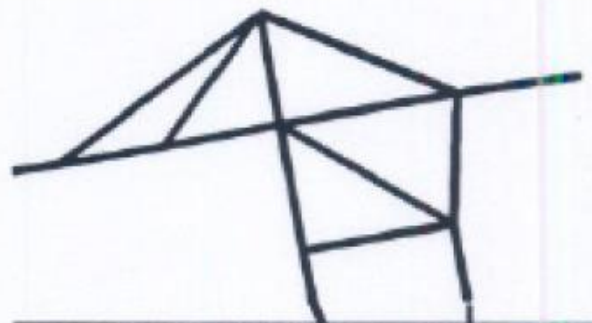


岸桥在地震中的损坏

四、地震反应



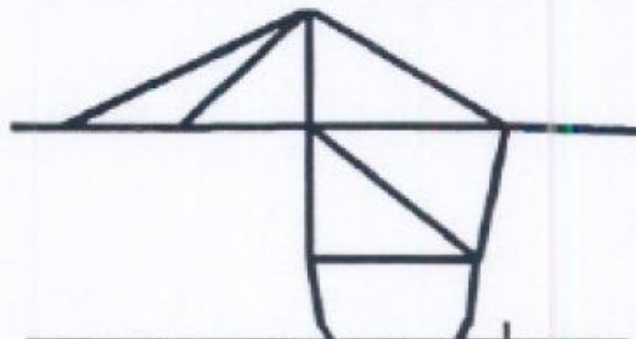
(1) the upper structure moves seaward due to acceleration



(2) the land-side wheels uplift and lose constraint



(3) the sea-side legs deform further



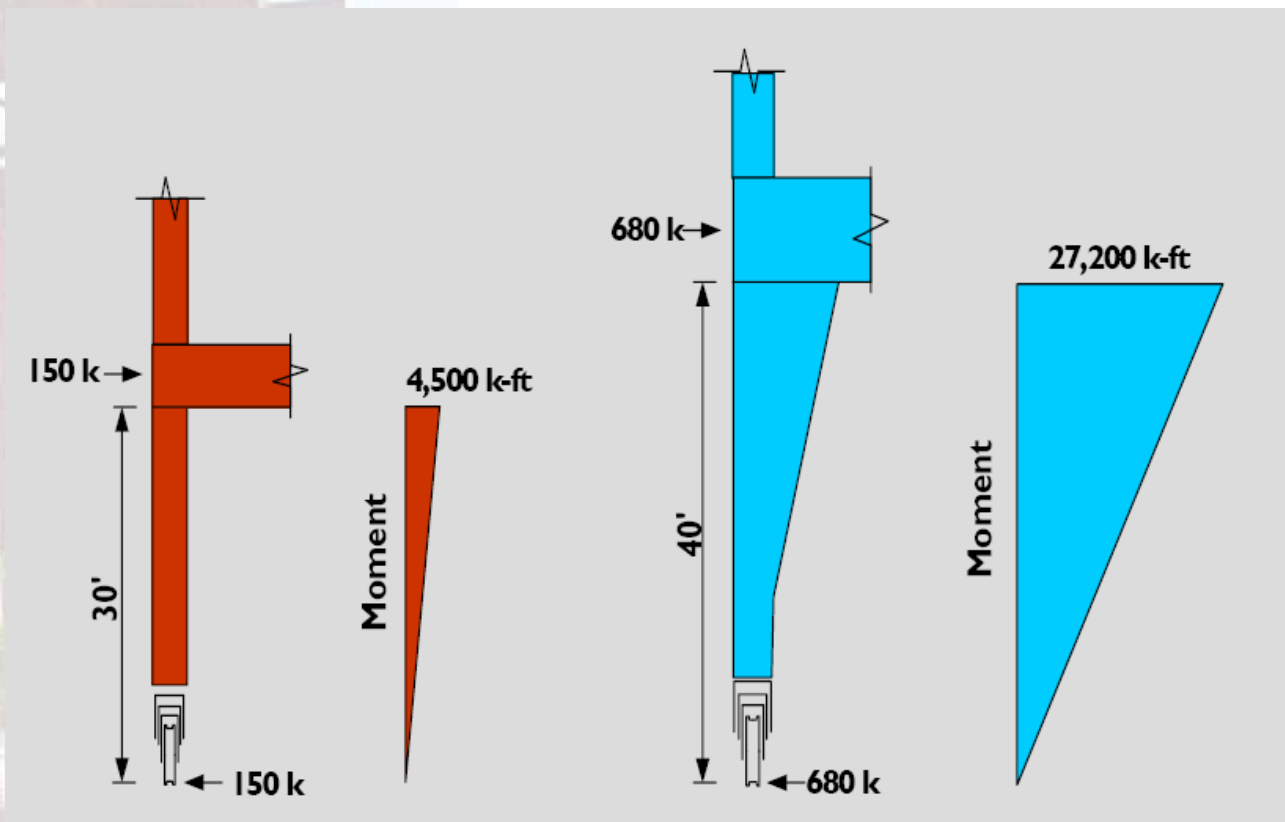
(4) the land-side wheels land on the ground





岸桥在地震中的损坏

四、地震反应



早期小轨距型

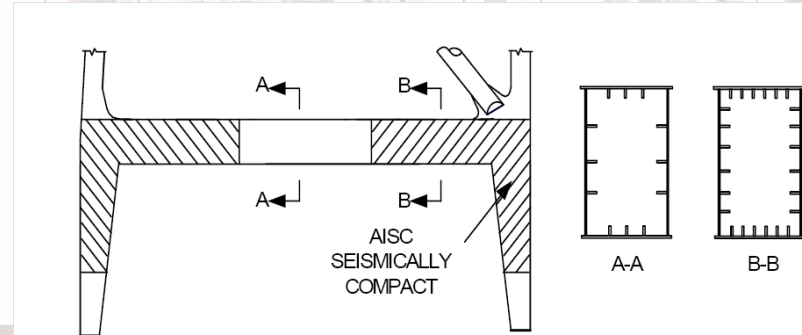
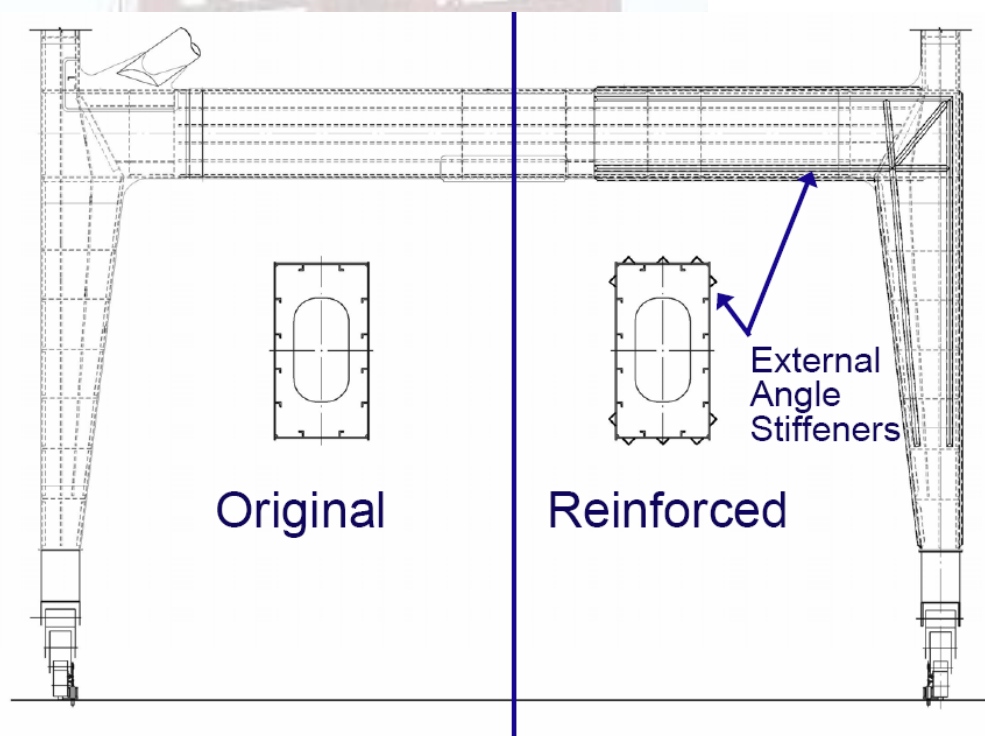
现代苏伊士大轨距型



岸桥抗震措施

一、加固方案

1. 设置加强筋形成塑性铰提高结构延性

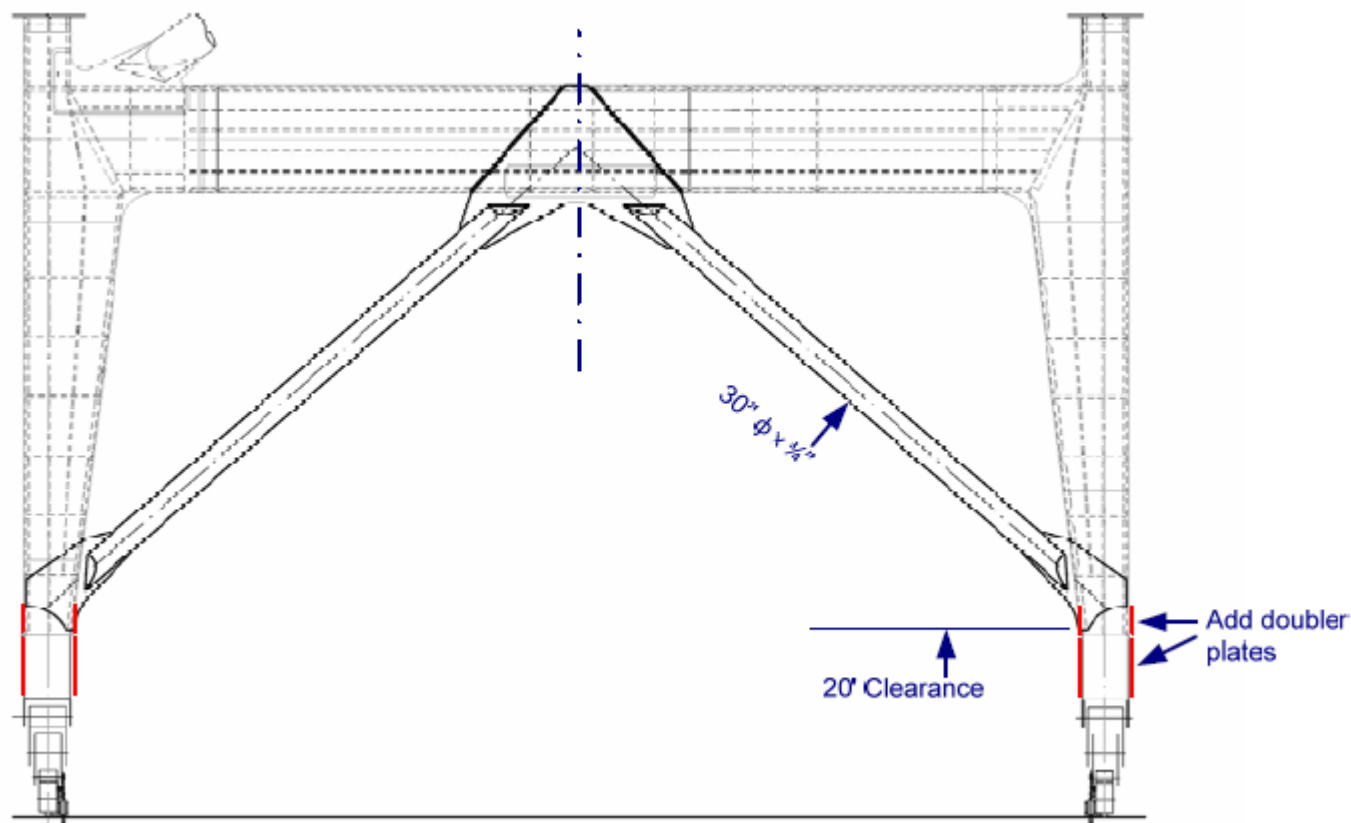




岸桥抗震措施

一、加固方案

2. 增加门架斜撑防支腿起跳屈曲

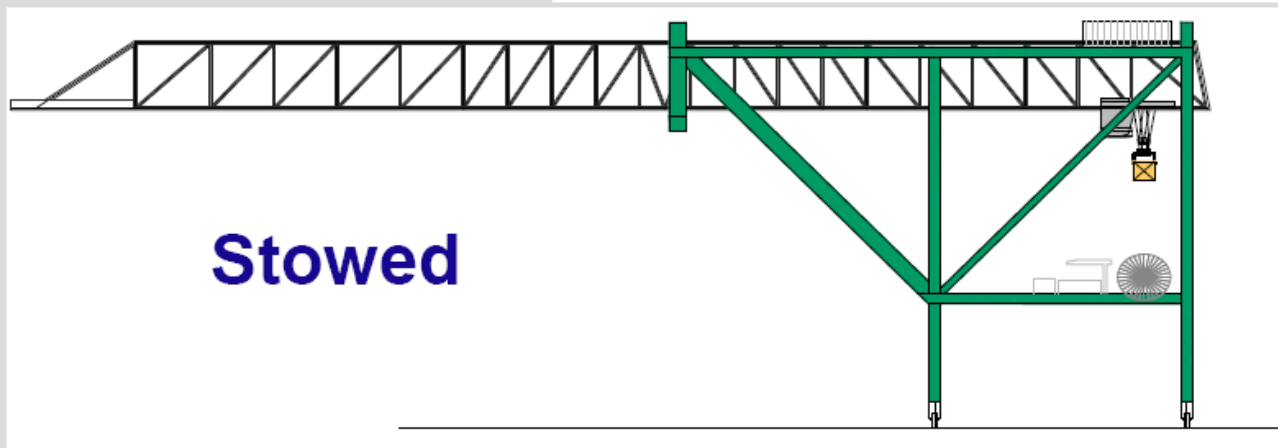
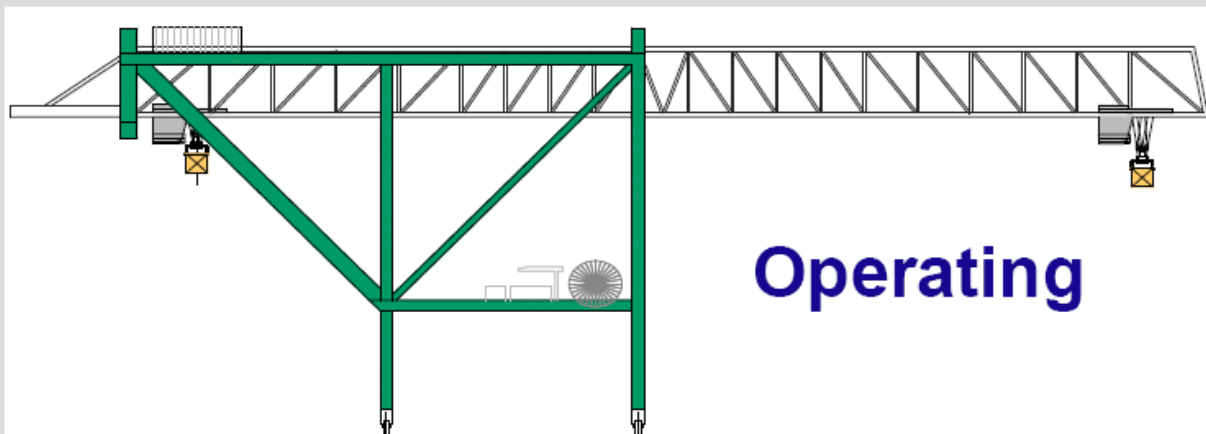




岸桥抗震措施

二、新型结构形式

- 分析大梁位置变化时对整机动态特性、轮压和稳定性的影响



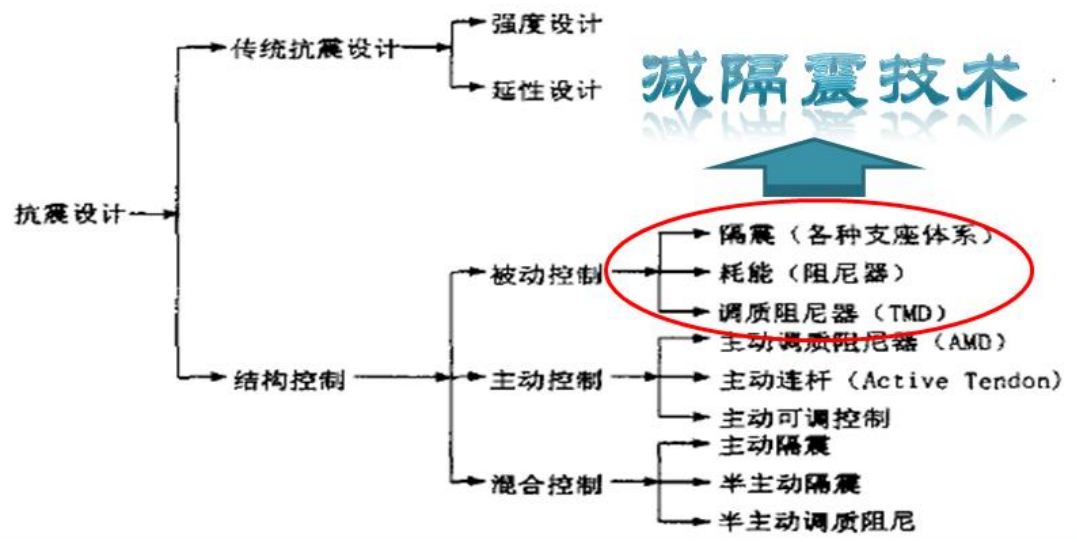
- 设计大梁平移、悬挂系统

低姿态伸缩大梁岸桥

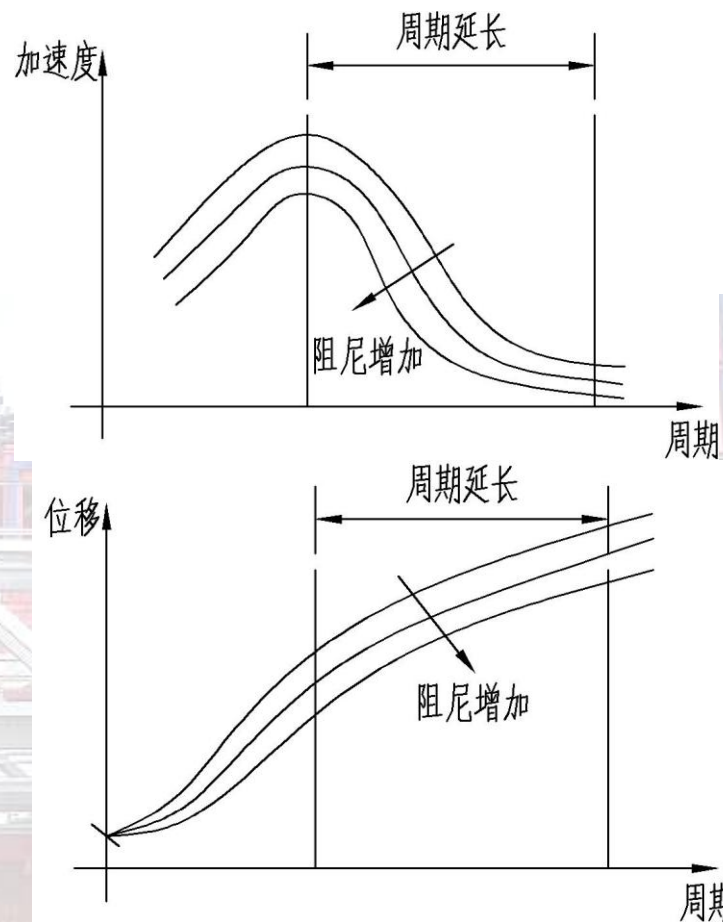


岸桥抗震措施

三、减隔震装置



- 延长岸桥固有周期避开地震卓越频率（ $1s \rightarrow 4s$ ）
- 周期延长会导致位移响应的增大（因此减隔震装置需满足位移要求）
- 引入阻尼吸震耗能，减小加速度、位移响应



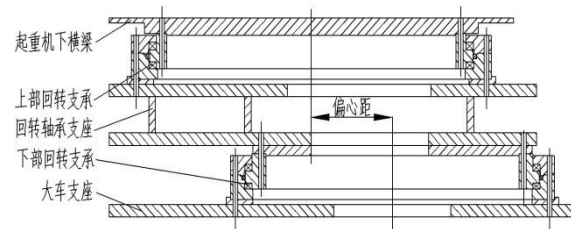
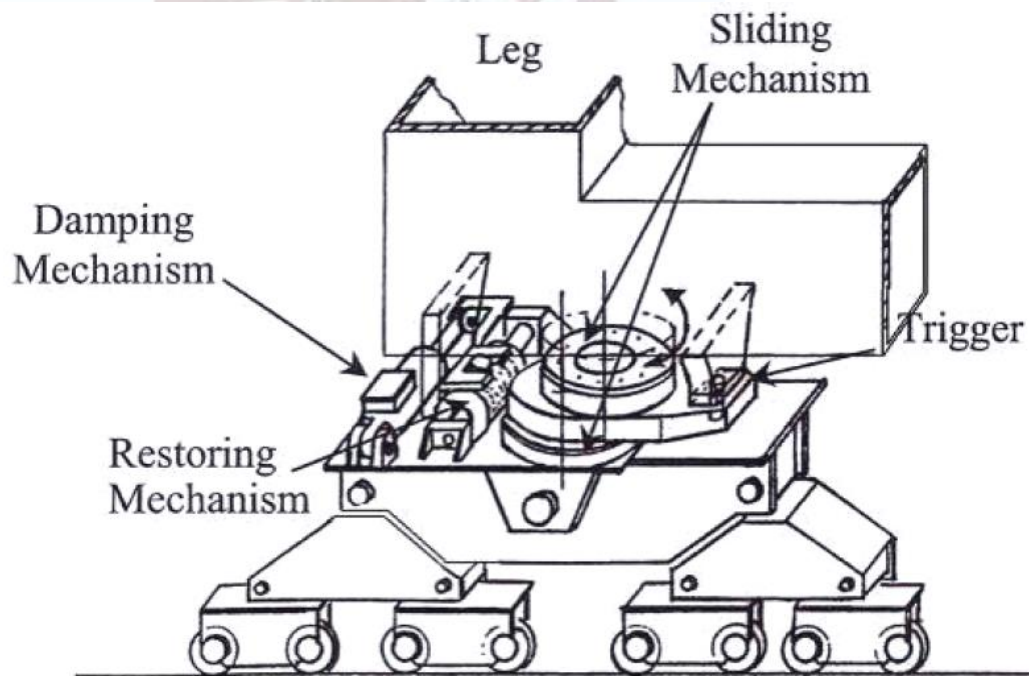
减隔震原理



岸桥抗震措施

三、减隔震装置

触发、衰减、滑动、复原四大功能



双偏心回转轴承式（三菱重工、振华方案）

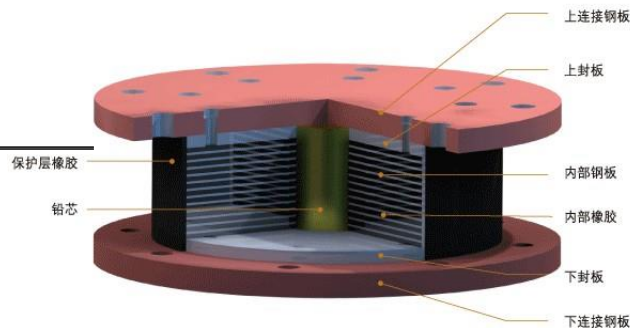
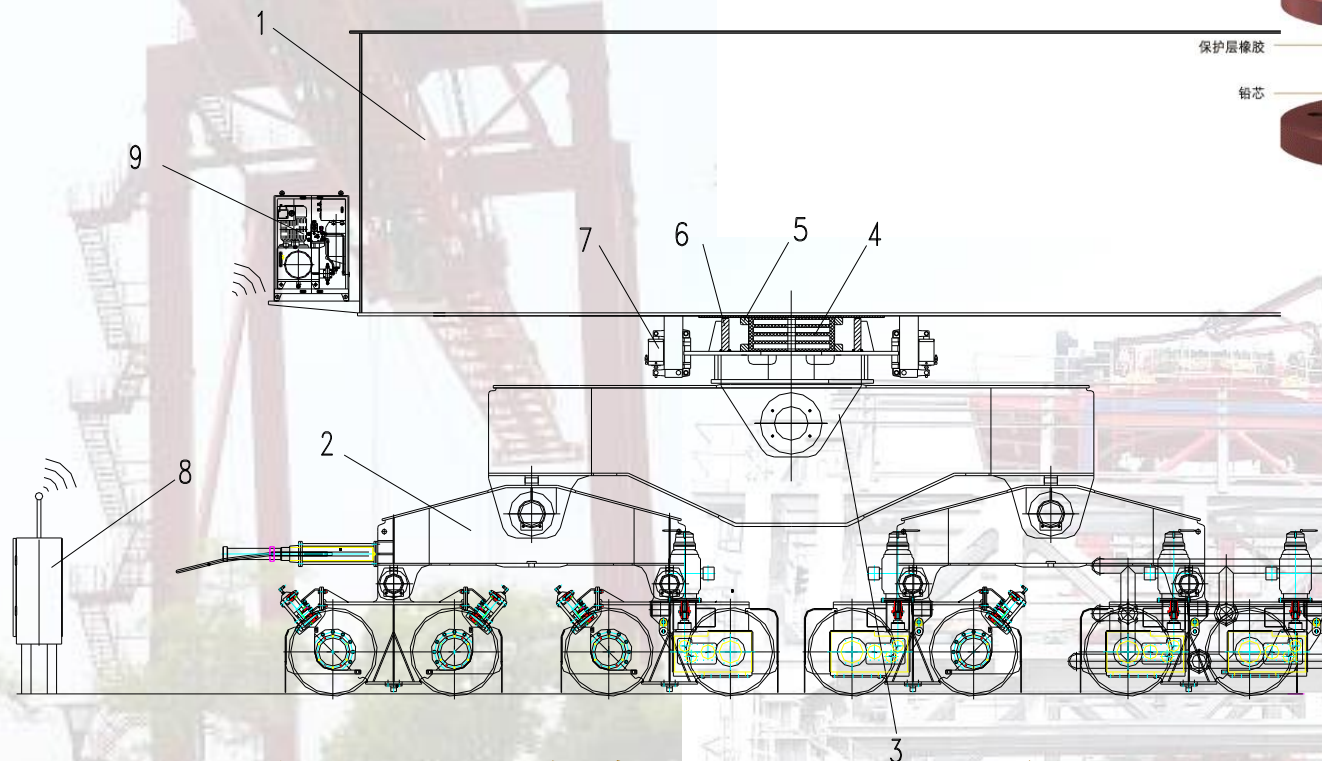
优点：竖向支承能力、抗倾覆能力强。

缺点：结构较复杂，可靠性待验证；装置竖向高度较大。



岸桥抗震措施

三、减隔震装置



- 1—起重机下横梁;
- 2—大车行走机构;
- 3—大车支座;
- 4—铅芯层叠橡胶支座;
- 5—铅芯层叠橡胶弹簧座;
- 6—限位座;
- 7—锁定装置;
- 8—测震仪;
- 9—液压蓄能器

铅芯橡胶支座 (LRB) + 带触发功能阻尼器式

优点: LRB在桥梁建筑中应用广泛、成熟; 横向、竖向均有减震效果; 横向允许变位大; 安装方便, 价格便宜; 带触发功能的油阻尼器。

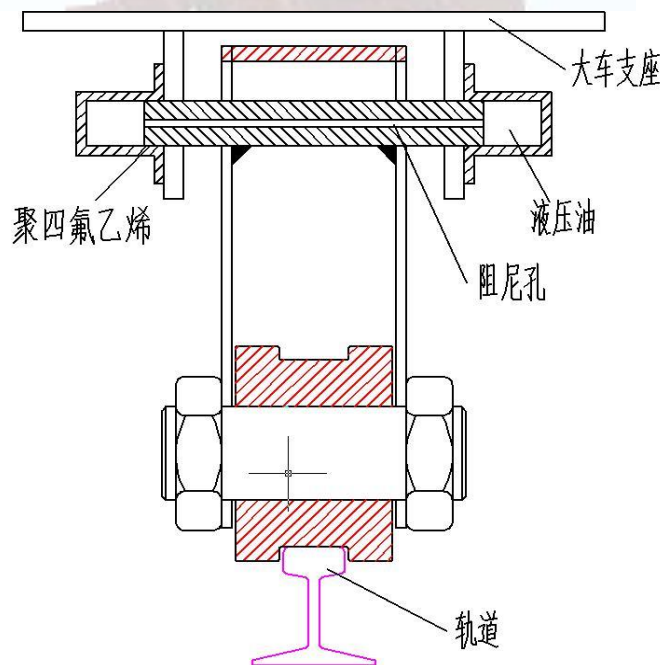
缺点: 抗倾覆能力差, 需限位; 可能引起竖向小幅振动。





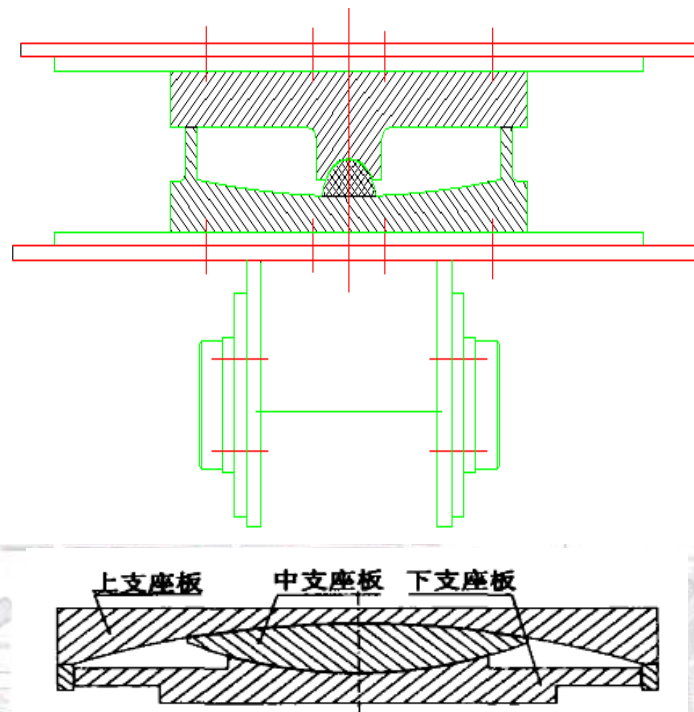
岸桥抗震措施

三、减隔震装置



滑移式

优点：滑移阻力小，结构简单。
缺点：调频功能弱，横向限位难。



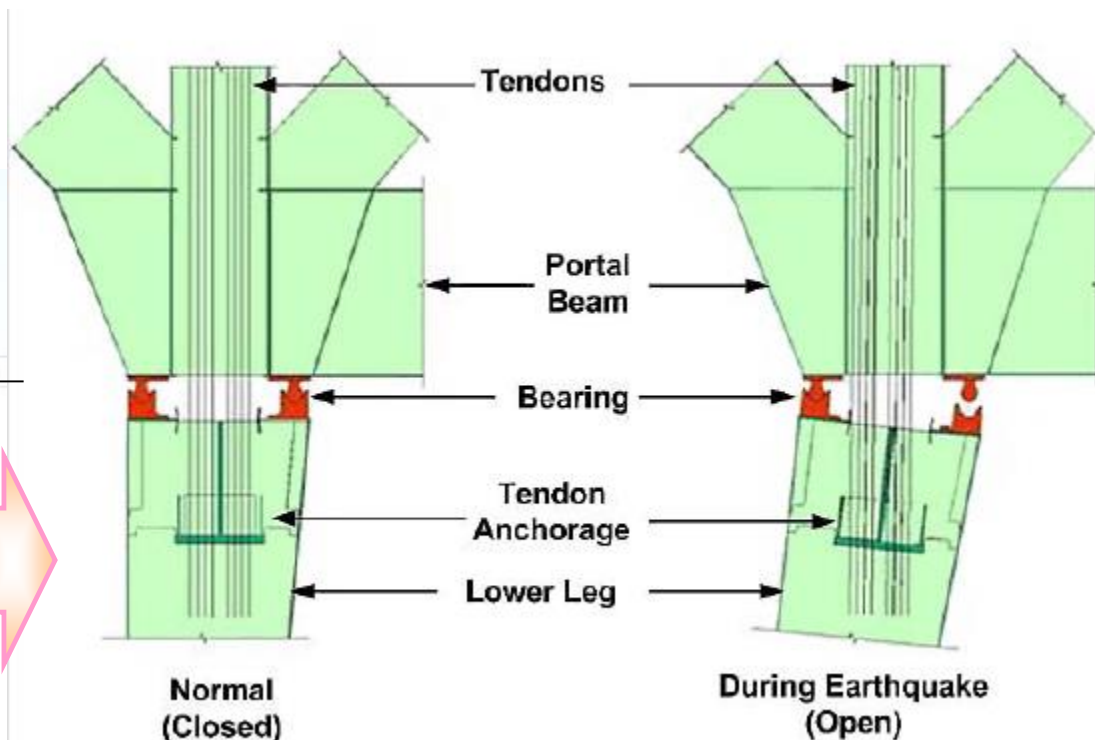
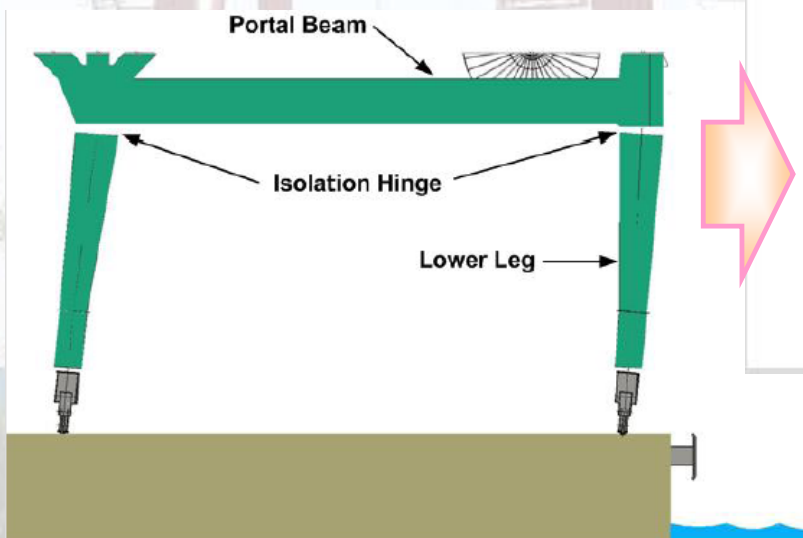
单摆式

优点：支承能力强，滑移阻力小，结构简单，调频方便，自动复位。
缺点：横向限位弱，抗倾覆能力弱（可通过双层单摆式解决）。



岸桥抗震措施

三、减隔震装置



安裝位置



岸桥抗震措施

四、各种措施的对比

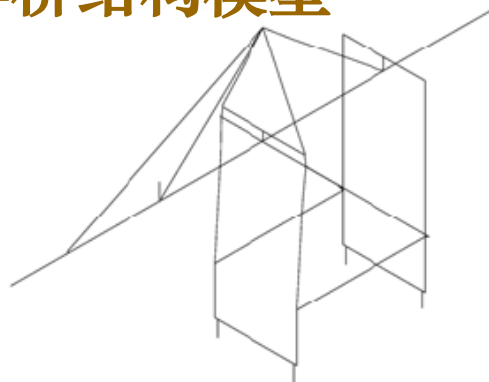
措施	优点	缺点	适用性
加固方案	施工方便、费用较低	不能衰减地震作用，可能导致塑性变形；斜撑方案影响门架净空	小轨距旧岸桥改造
减隔震方案	衰减地震作用，可有效保护岸桥整机结构	减隔震装置需可靠设计；费用较高	大轨距新岸桥或在起升高度方向上需要改造的岸桥
新结构形式	降低岸桥重心高度，从根本上抗震	新结构形式造成机构、电气控制需要重新布置设计，研发成本较高	新产品开发



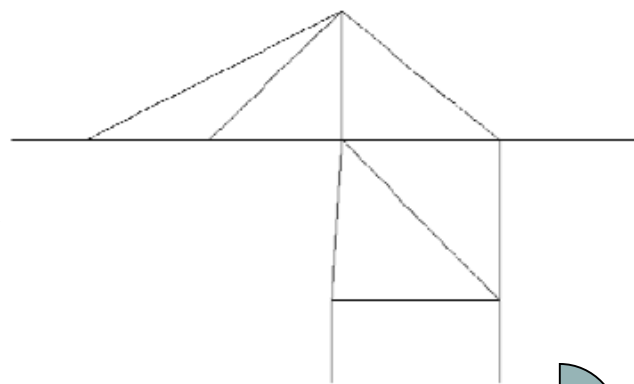
岸桥抗震设计分析方法

一、岸桥抗震仿真分析模型

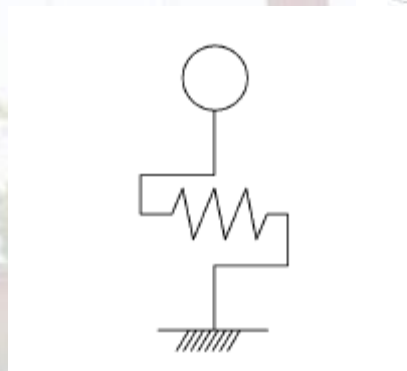
1. 岸桥结构模型



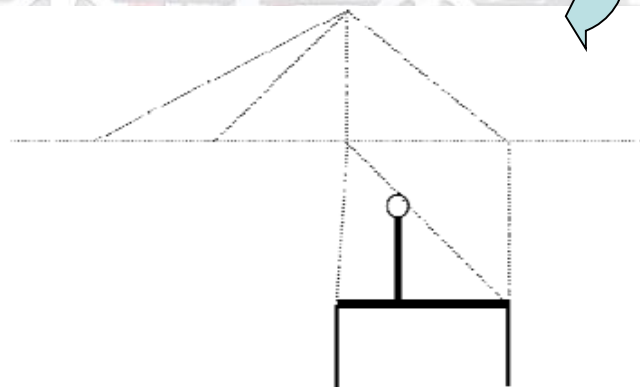
3D-FEM



2D-FEM



SDOF

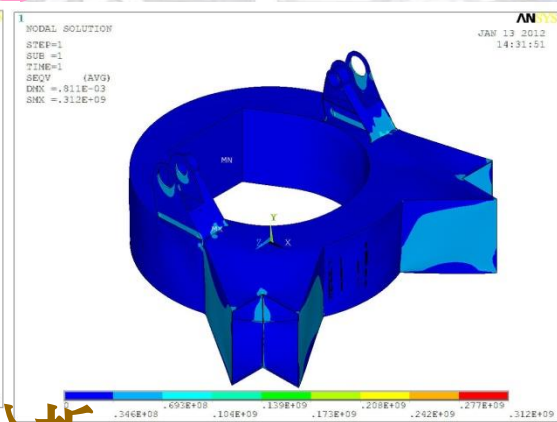
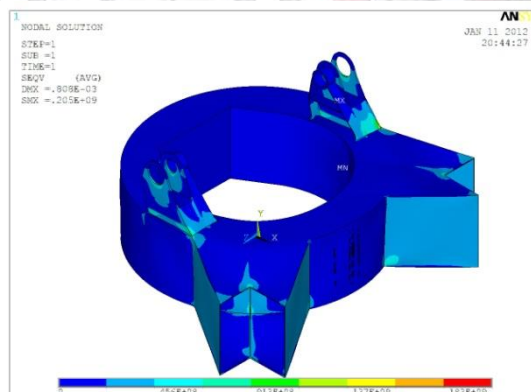
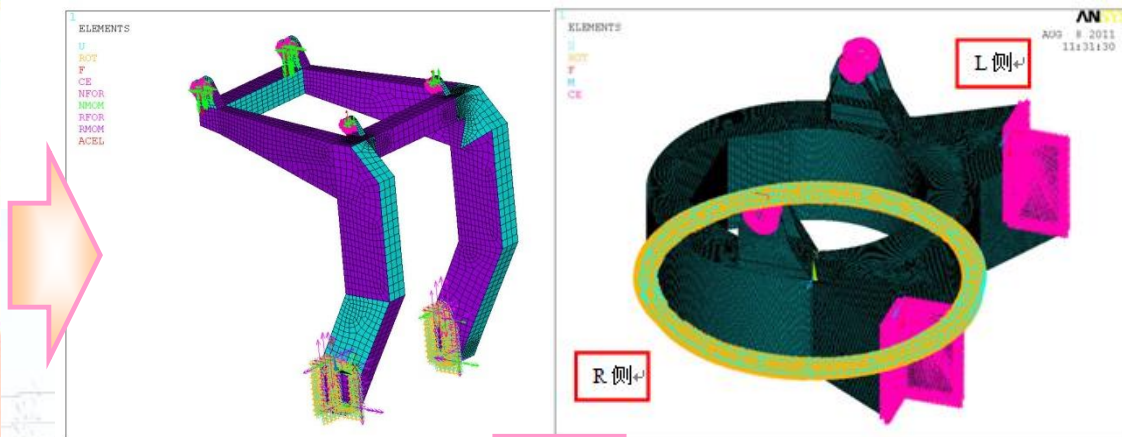
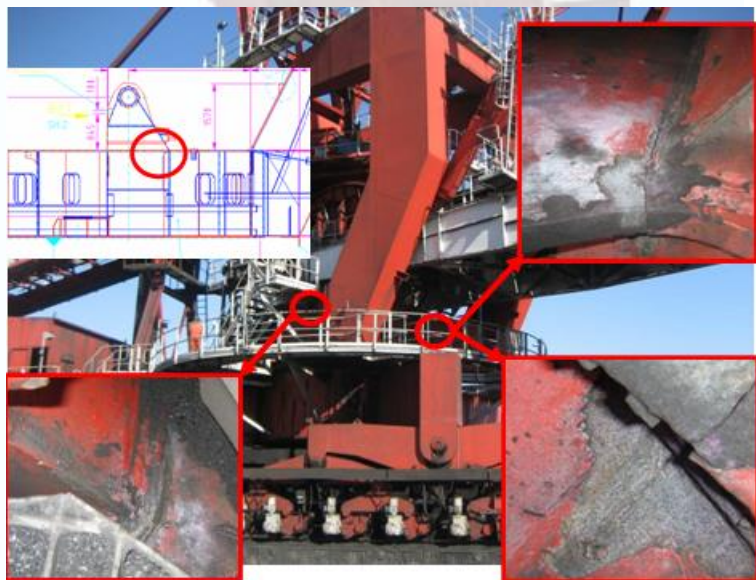


Frame Model



岸桥抗震设计分析方法

一、岸桥抗震仿真分析模型



斗轮堆取料机L梁开裂有限元分析

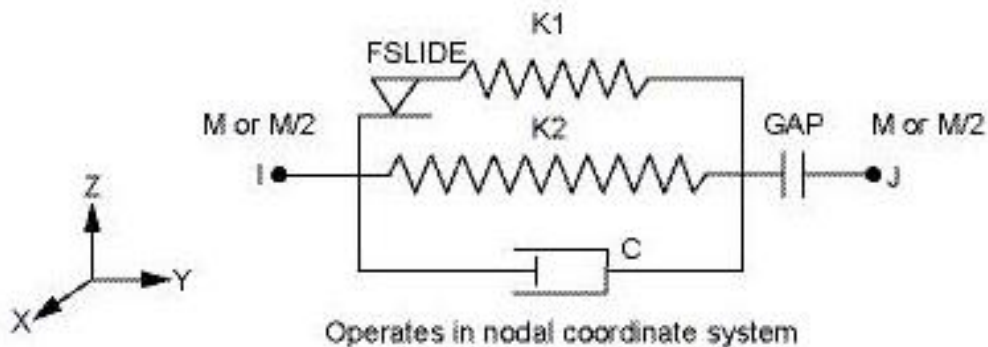
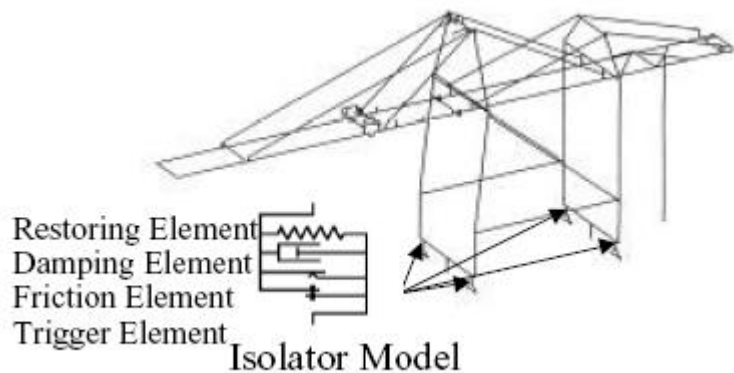




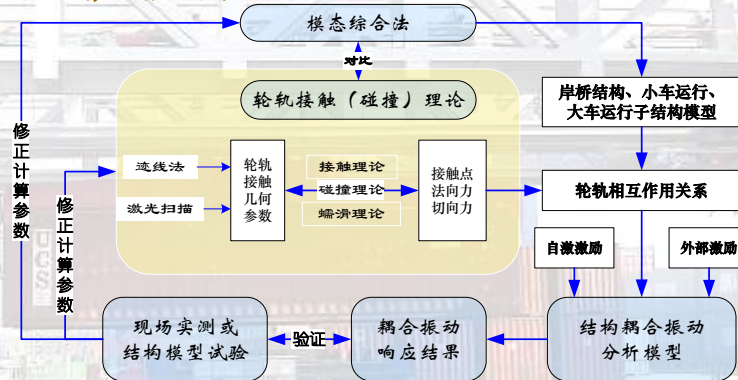
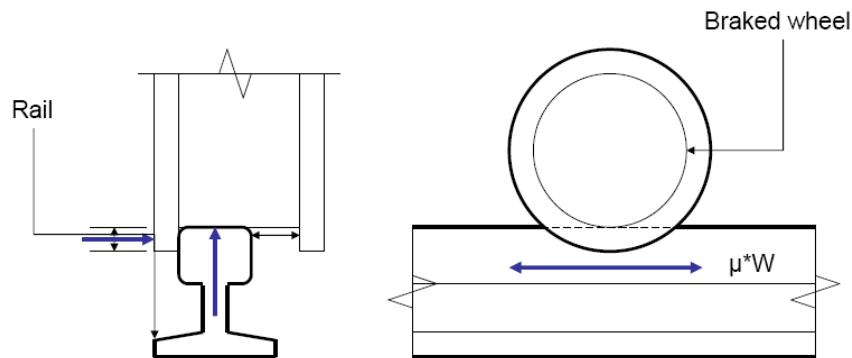
岸桥抗震设计分析方法

一、岸桥抗震仿真分析模型

2. 减隔震装置的模拟 — Combin40



3. 边界条件 — 双轮缘平踏面轮轨接触





岸桥抗震设计分析方法

二、结构模型地震台试验

1. 相似条件（不考虑重力加速度和应力）

物理量	单位	换算式（模型/实物）	物理量	单位	换算式（模型/实物）
长度	m	C_l	时间	s	$C_t = \sqrt{C_l}$
位移	m	$C_u = C_v C_t = C_t^2 = C_l$	频率	$1/s$	$C_f = 1/C_t$
密度	kg/m^3	$C_\rho = 1$	速度	m/s	$C_v = C_a C_t = C_t = \sqrt{C_l}$
质量	kg	$C_m = C_l^3$	加速度	m/s^2	$C_a = 1$
力	N	$C_F = C_l^3$	弹性	N/m	$C_k = C_F / C_u = C_l$
压力	N/m^2	$C_p = C_F / C_A = C_l$	阻尼	$N \cdot s/m$	$C_c = C_F / C_v = C_l^{\frac{5}{2}}$

- 在考虑了地震台性能、施工条件、起吊能力等因素后，确定模型的几何相似常数为1/15
- 试验模型与原型采用相同的材料，为了使模型上的加速度与原型上的加速度相同，取加速度相似常数为1，其他物理量的相似比可以由量纲分析法推导出来



岸桥抗震设计分析方法

一、结构模型地震台试验

2. 结构动力模型相似条件

表 3 结构动力模型试验部分物理量的相似条件

物理量	量纲	相似条件	相似常数
长度 l	$[L]$	c_l	$1/30$
质量 m	$[FL^{-1}T^2]$	$c_m = c_\rho c_l^3$	$1/30^2$
刚度 k	$[FL^{-1}]$	$c_k = c_E c_l$	$1/30$
阻尼 c	$[FL^{-1}T]$	$c_c = c_E c_l^{3/2}$	$1/30^{3/2}$
密度 ρ	$[FL^{-4}T^2]$	$c_\rho = c_E / c_l$	30
时间 (周期) T	$[T]$	$c_t = c_l^{1/2}$	$1/\sqrt{30}$
速度 v	$[LT^{-1}]$	$c_v = c_l^{1/2}$	$1/\sqrt{30}$
加速度 a	$[LT^{-2}]$	$c_a = c_E / (c_\rho c_l)$	1





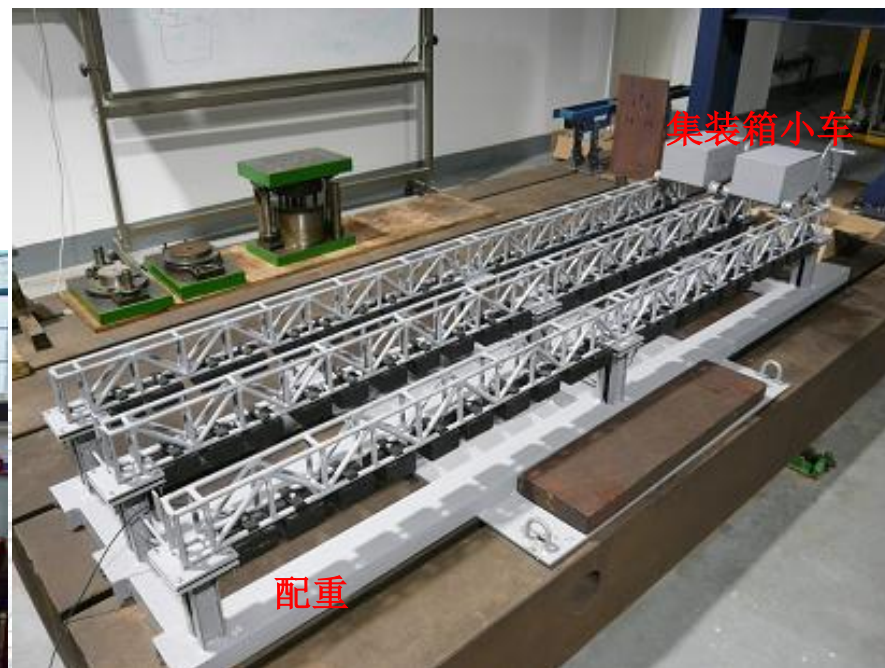
岸桥抗震设计分析方法

二、结构模型地震台试验

3. 试验模型



集装箱起重机1/15模型



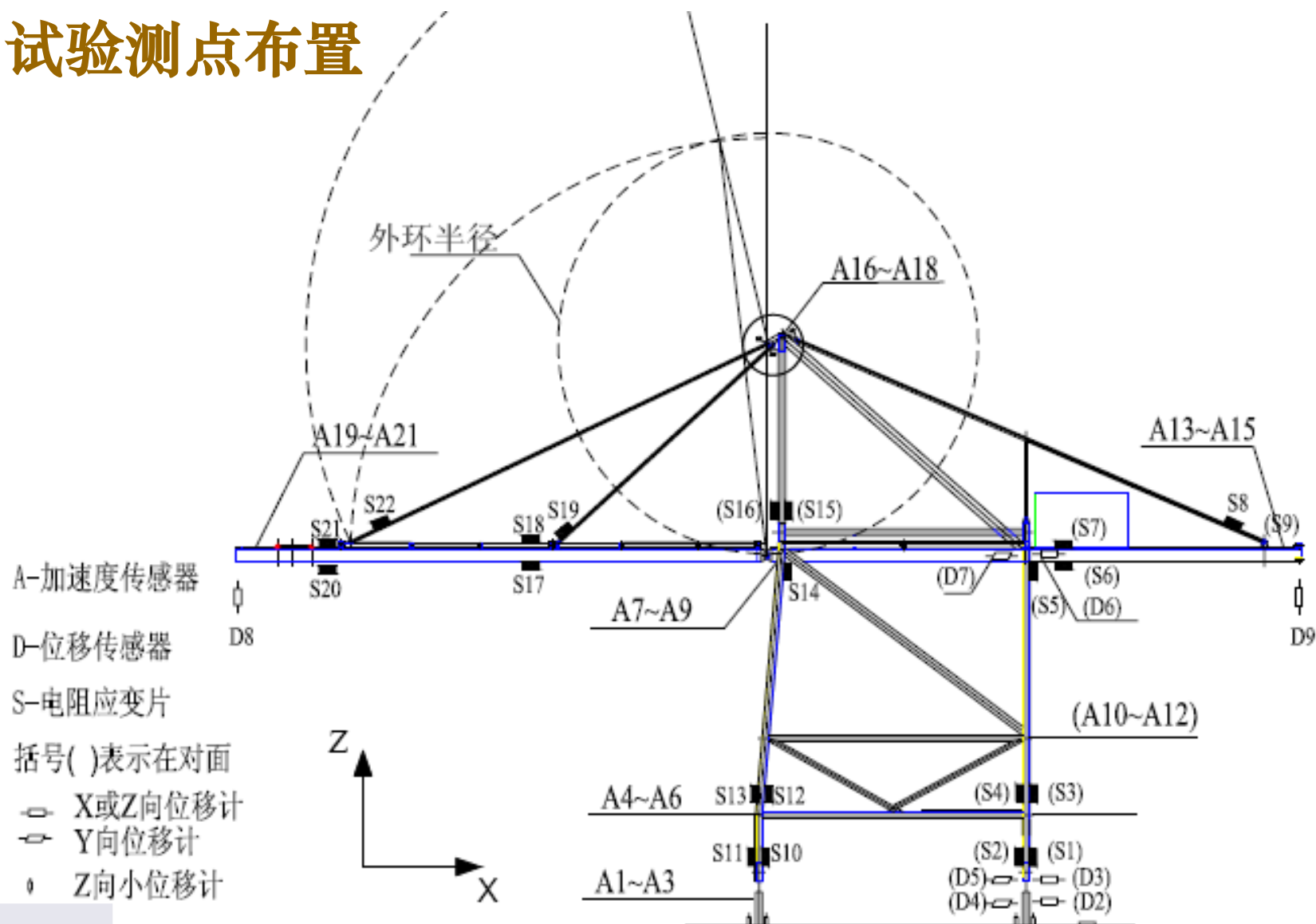
自动化码头低架桥1/30模型

附：地震台模型试验

同济大学土木工程防灾国家重点实验室，2007

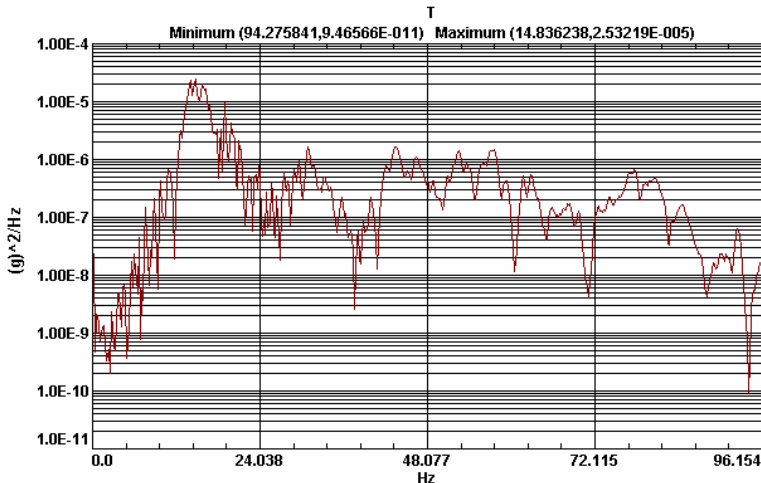
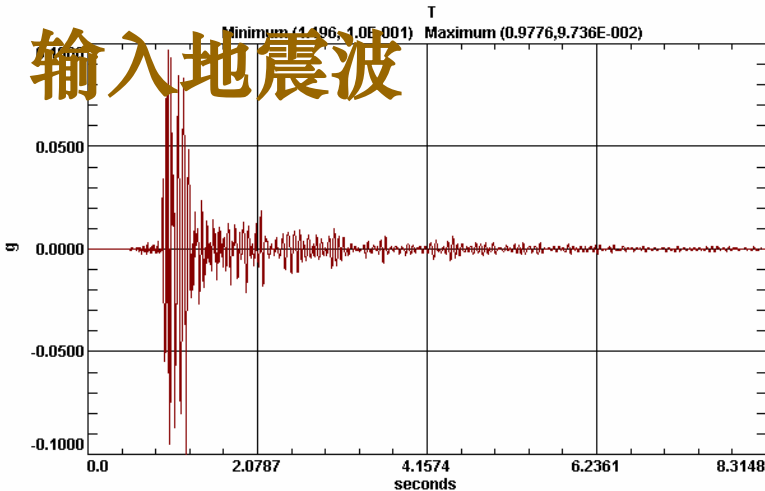


试验测点布置





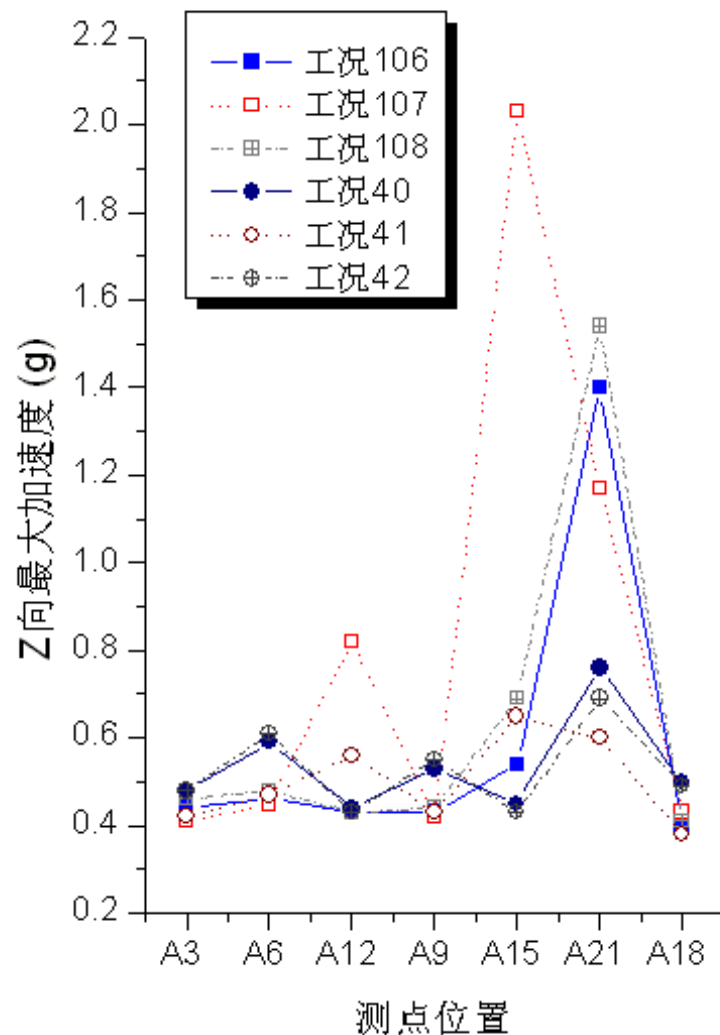
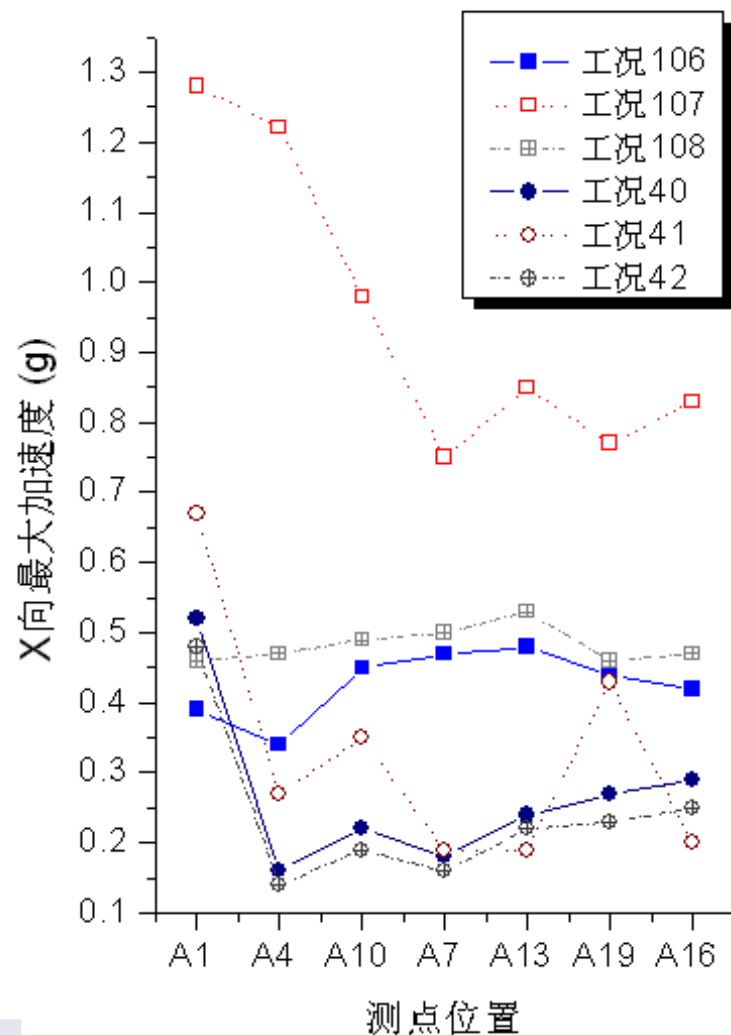
输入地震波



工况 序号	工况 状态	地震激励	地震输入值 (g)	
			X向	Z向
39	状态一： 大梁放平， 减隔震装置 工作	双向白噪声	0.05	0.05
40		双向地震波LT	0.34/L	0.23/T
41		双向地震波TV	0.34/T	0.23/V
42		双向地震波VL	0.34/V	0.23/L
105	状态二： 大梁放平， 减隔震装置 锁死	双向白噪声	0.05	0.05
106		双向地震波LT	0.34/L	0.23/T
107		双向地震波TV	0.34/T	0.23/V
108		双向地震波VL	0.34/V	0.23/L



试验结果：加速度反应



试验结果：位移响应

