

高速铁路桥梁工程技术



主讲:李小珍 教授

13880808086

西南交通大学
桥梁动力学研究室

高速铁路桥梁设计关键技术问题

- 垂直变形
- 梁端折角
- 错位
- 桥面扭转
- 过渡段
- 动力响应
- 钢轨力
- 测量
- 空气动力效应
- 系统性和接口

概述

- 为保证桥上轨道平顺、列车运行平稳、安全，桥梁结构应具有一定的刚度。铁路桥梁设计规范通过控制桥梁在荷载作用下的挠跨比、梁端转角、混凝土残余收缩、徐变、梁体竖向自振频率、梁体竖向加速度等指标控制桥梁结构的刚度。
- 桥梁制动力及牵引力与轮轨间粘着系数、轨道纵向阻力、桥梁结构型式及跨度组合、下部结构刚度密切相关。轮轨间粘着系数、轨道纵向阻力由所采用列车类型及轨道系统确定。桥梁设计的关键内容，是确定合理的结构型式及跨度组合、合理的下部结构刚度，以满足桥上轨道结构受力及轨道稳定、以及桥梁下部结构受力的要求。
- 为避免高速运行列车在桥梁上出现剧烈振动，危及行车安全及影响乘坐舒适度，桥梁设计应检查桥梁结构的动力特性。

垂直变形

1、客专无碴轨道设计指南梁体的竖向挠度限值(**ZK**静载)

$L \leq 50\text{m}$, 无碴轨道铺设后徐变上拱 $\leq 10\text{mm}$

$L > 50\text{m}$, 无碴轨道铺设后徐变上拱 $\leq L/5000$, $\leq 20\text{mm}$

2、京沪暂规中的梁体的竖向挠度限值(**ZK**静载)

跨度m	$L \leq 24$	$24 < L \leq 80$	$L > 80$
单跨	$L/1300$	$L/1000$	$L/1000$
多跨	$L/1800$	$L/1500$	$L/1000$

垂直变形

3、200~250km/h客专暂规梁体的竖向挠度限值（ZK静载）

跨度m	$L \leq 24$	$24 < L \leq 40$	$40 < L < 96$
单跨	$L/1300$	$L/1000$	$L/1000$
多跨	$L/1800$	$L/1500$	$L/1200$

4、200km/h客货共线暂规梁体的竖向挠度限值（中一活载）

跨度m	$L \leq 20$	$20 < L \leq 50$	$50 < L \leq 70$	$70 < L \leq 96$
单跨	$L/1000$	$L/1000$	$L/900$	$L/900$
多跨	$L/1400$	$L/1200$	$L/1000$	$L/900$

5、铁路基本规范梁体的竖向挠度限值（中一活载）

- 简支混凝土梁： $L/800$

垂直变形

- 6、德国
- 铺设无碴轨道的高速铁路桥梁，对桥梁变形的要求，参照德国《无碴轨道的总体技术规范技术通告》（**2002.8.1 DB Netz NST**）和**DIN**技术报告**101**：
 - $\delta = \lambda (L) \delta_{UIC} + \delta_{K+S} \leq \text{容许} \delta = \lambda (L) \delta_{804}$
 - **L<3.0 m**时， $\lambda (L) = 0.8$
 - **L>10.0 m**时， $\lambda (L) = 0.4$
 - 以**32m**梁为例， $\lambda (L) = 0.4$

容许 δ 的垂直位移取决于跨度和速度

L=32m、v=350 km/h时

垂直变形

连续、简支结构的最大垂直挠曲的限制值 δ/L

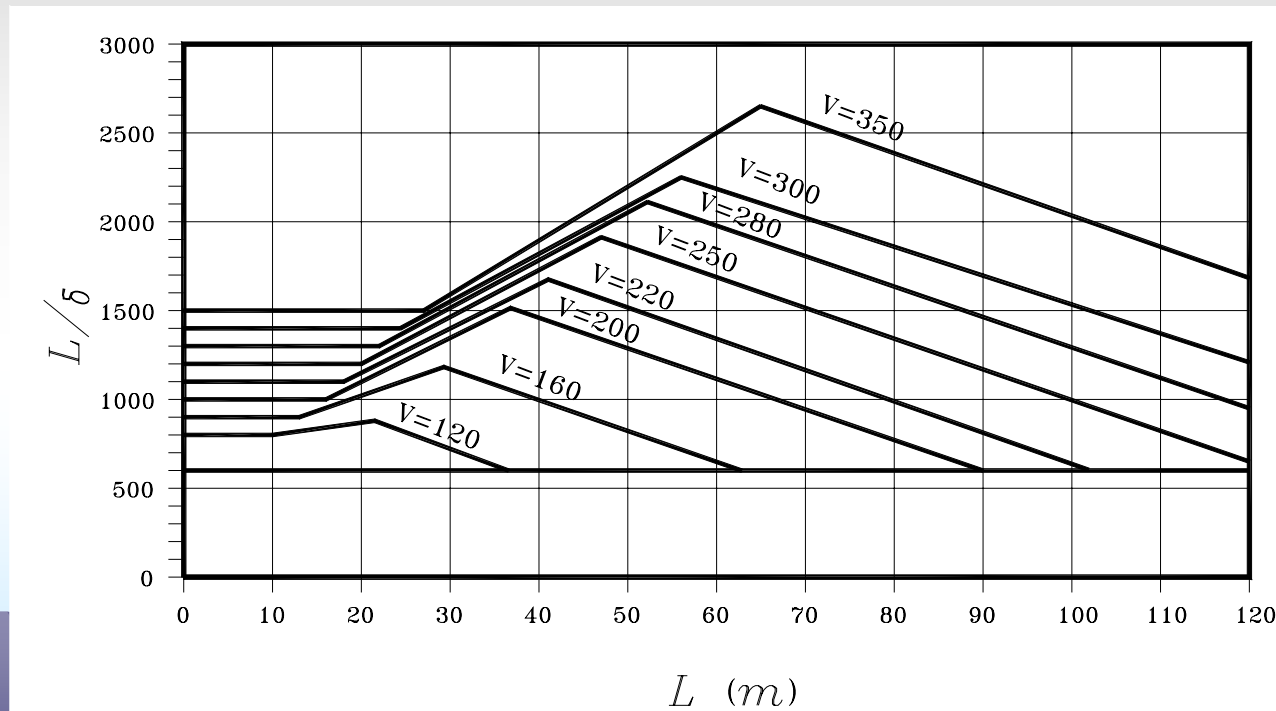
列车速度 (km/h)	跨度 L [m]				
	$L \leq 15m$	$15 < L \leq 30$	$30 < L \leq 50$	$50 < L \leq 90$	$90 < L \leq 120m$
$V \leq 120$	[1/800]	[1/900]	[1/800]	[1/600]	[1/600]
$120 < V \leq 160$	[1/900]	[1/1200]	[1/1200]	[1/800]	[1/600]
$160 < V \leq 200$	[1/1000]	[1/1400]	[1/1500]	[1/1300]	[1/600]
$200 < V \leq 280$	[1/1200]	[1/1500]	[1/2100]	[1/2100]	[1/1400]
$280 < V \leq 350$	[1/1500]	[1/1600]	[1/2100]	[1/2400]	[1/2200]

垂直变形

查101技术报告（上表）， $L/\delta = 1700$

因此，容许变形 $\delta = 0.4 \times 32000/1700 = 7.53 \text{ mm}$

另外，根据德国《无碴轨道的总体技术规范技术通告》 6.4.7条，轨道安装后徐变和收缩引起的桥梁垂直变形限制在1/5000



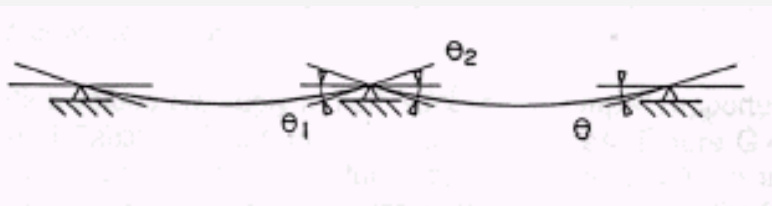
梁端转角

3、200~250km/h客专暂规梁端的竖向转角（ZK静载）

有碴轨道： $\theta \leq 2\text{‰}$

无碴轨道： $\theta \leq 1\text{‰}$

4、200km/h客货共线暂规梁端的竖向转角（中—活载）



路基与桥梁过渡段： $\theta < 3 \times 10^{-3} \text{ rad}$;
两梁之间： $\theta_1 + \theta_2 < 6 \times 10^{-3} \text{ rad}$

5、铁路基本规范中梁体的竖向转角（中—活载）

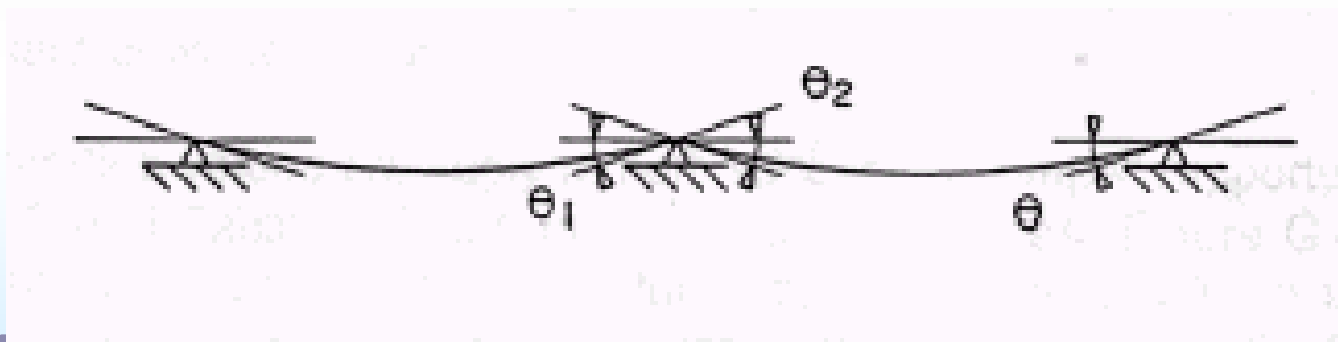
- 无规定

梁端转角

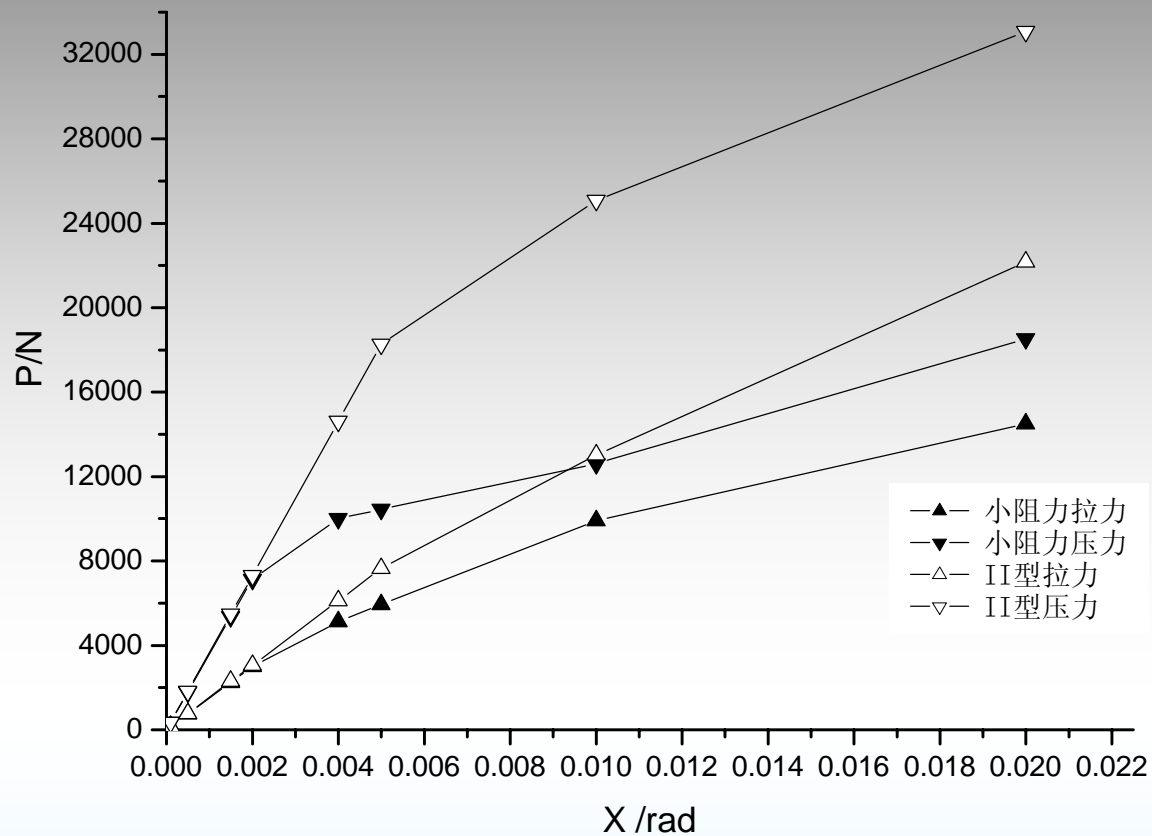
6、德国

考虑冲击系数的**UIC71**活载和温度，

- 1) 单线桥梁：桥梁端头 $\theta < 6.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$;
中间支点处 $\theta_1 + \theta_2 < 10 \times 10^{-3} \text{ rad}$
- 2) 双线桥梁：桥梁端头 $\theta < 3.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$;
中间支点处 $\theta_1 + \theta_2 < 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$



梁端转角

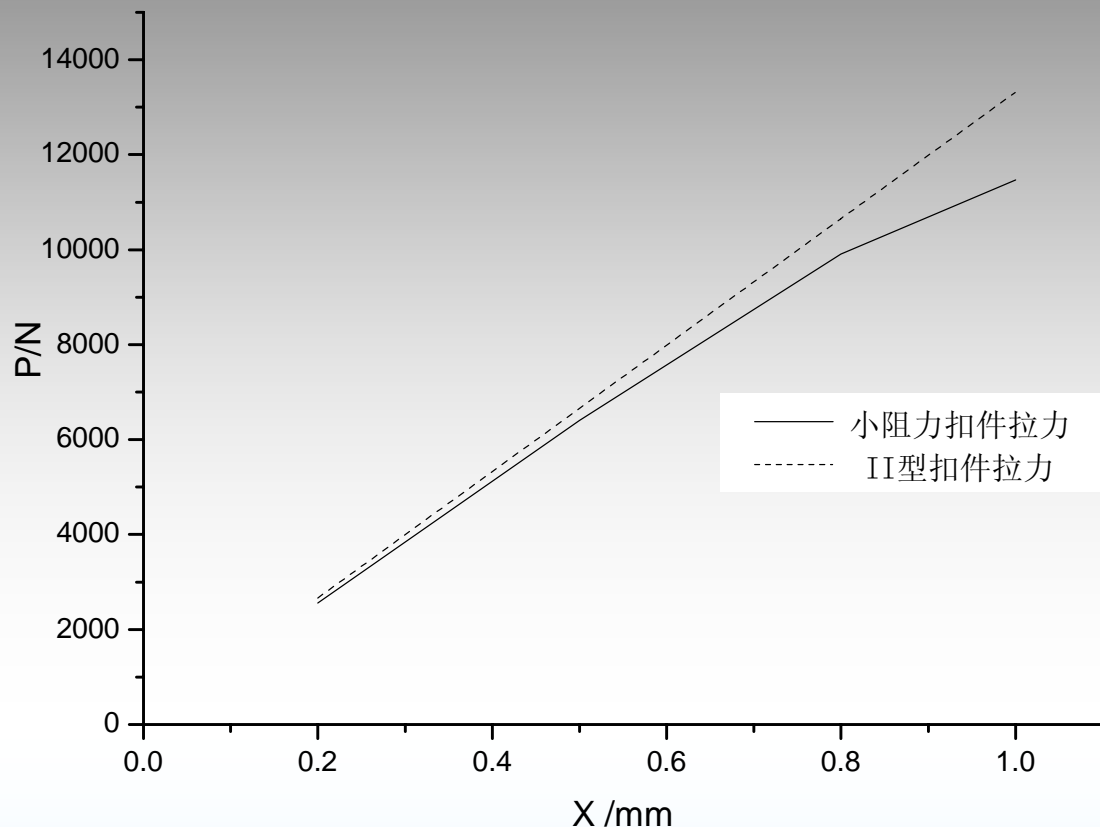


梁端转角对扣件受力的影响

两梁竖向错位

1、《客专无碴轨道设计指南》规定，梁缝钢轨支点相对位移不应大于**1mm**

2、《德国无碴轨道技术规程》规定，设有纵坡的桥梁，由于活动支座产生水平位移引起的梁缝两侧钢轨支点间的竖向相对位移不宜大于**1mm**



两梁竖向错位对扣件上拔力的影响

桥面水平挠曲

1、京沪暂规、 200~250km/h客专暂规、 200km/h客货共线暂规

在列车横向摇摆力、离心力、风力和温度的作用下，梁体水平挠度应小于或等于计算跨度的**1/4000**

2、铁路基本规范

由墩台横向水平位移差引起的相邻结构物桥面处轴线间的水平折角

$L < 40\text{m}, 1.5\text{‰}$

$L \geq 40\text{m}, 1\text{‰}$

桥面水平挠曲

3、德国

最大转角变化和最小曲线半径

速度范围	最大转角变化	最小曲线半径	
		单桥面	多桥面桥
$V \leq [120]$	$[0.0035] \text{ rd}$	$[1700] \text{ m}$	$[3500] \text{ m}$
$[120] < V \leq [220]$	$[0.0020] \text{ rd}$	$[6000] \text{ m}$	$[9500] \text{ m}$
$[220] < V$	$[0.0015] \text{ rd}$	$[14000] \text{ m}$	$[17500] \text{ m}$

横向错位

《客专无碴轨道设计指南》和《德国无碴轨道技术规程》规定，上部结构端点和桥台之间接缝及两相邻上部结构之间的横向移动必须限制到 ± 1 毫米。对此，要求在上部结构中心安装另外的导向支架。

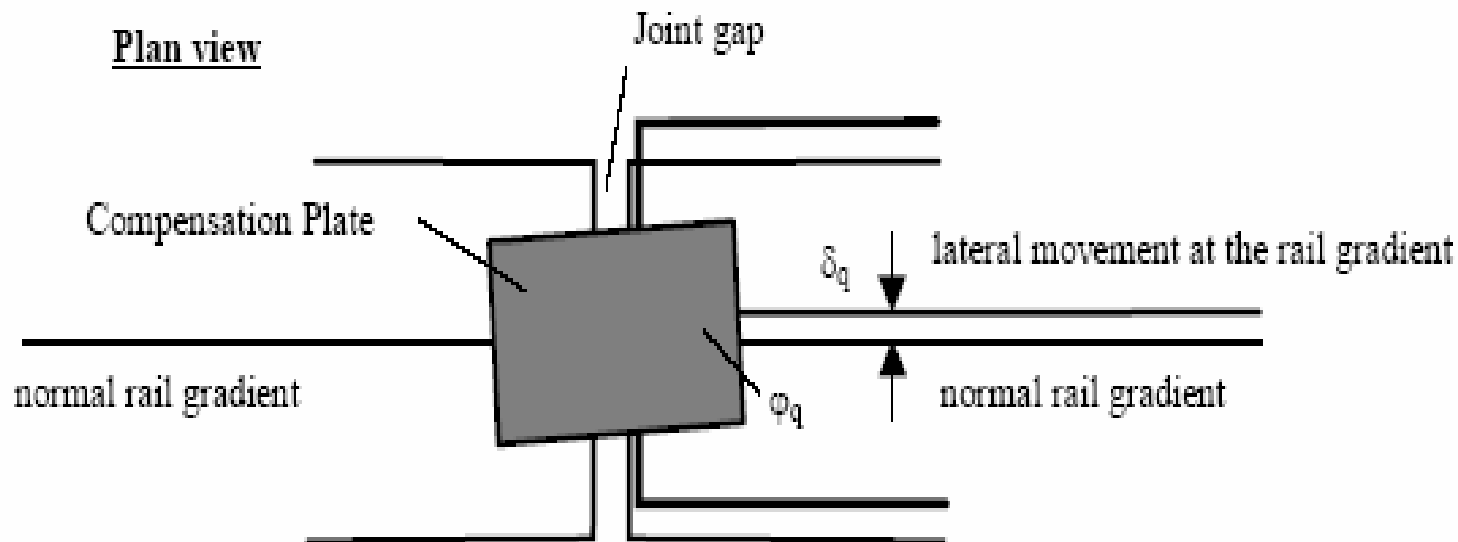
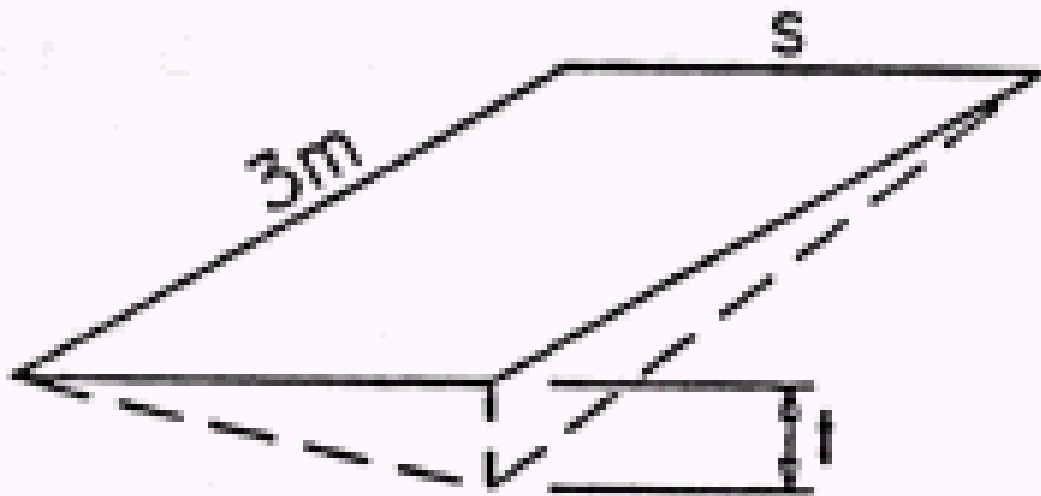


Fig. 11 Compensation Plate - plan view

桥面扭转

1、京沪暂规 (ZK静载)

以 **3m**的长的线路为基准，**ZK**活载作用下，一线两根钢轨的竖向把变形量不大于**1.5mm**；实际运营列车作用下，一线两根钢轨的竖向把变形量不大于**1.2mm**。



桥面扭转

2、200~250km/h客专暂规

以 **3m**的长的线路为基准，**ZK**活载作用下，一线两根钢轨的竖向把变形量不大于**1.5mm**。

3、200km/h客货共线暂规

在中一活载作用下，**3m**梁长的扭曲变形应满足 $t \leq 3\text{mm}$ ，多线桥梁按产生扭曲的最不利工况加载。

桥面扭转

4、德国

在 3m 的长度上测出的最大扭转应不超过下列值：

$$V \leq 120 \text{ km/h}$$

$$t \leq [4.5] \text{ mm/3m}$$

$$120 < V \leq [220] \text{ km/h}$$

$$t \leq [3.0] \text{ mm/3m}$$

$$V > [220] \text{ km/h}$$

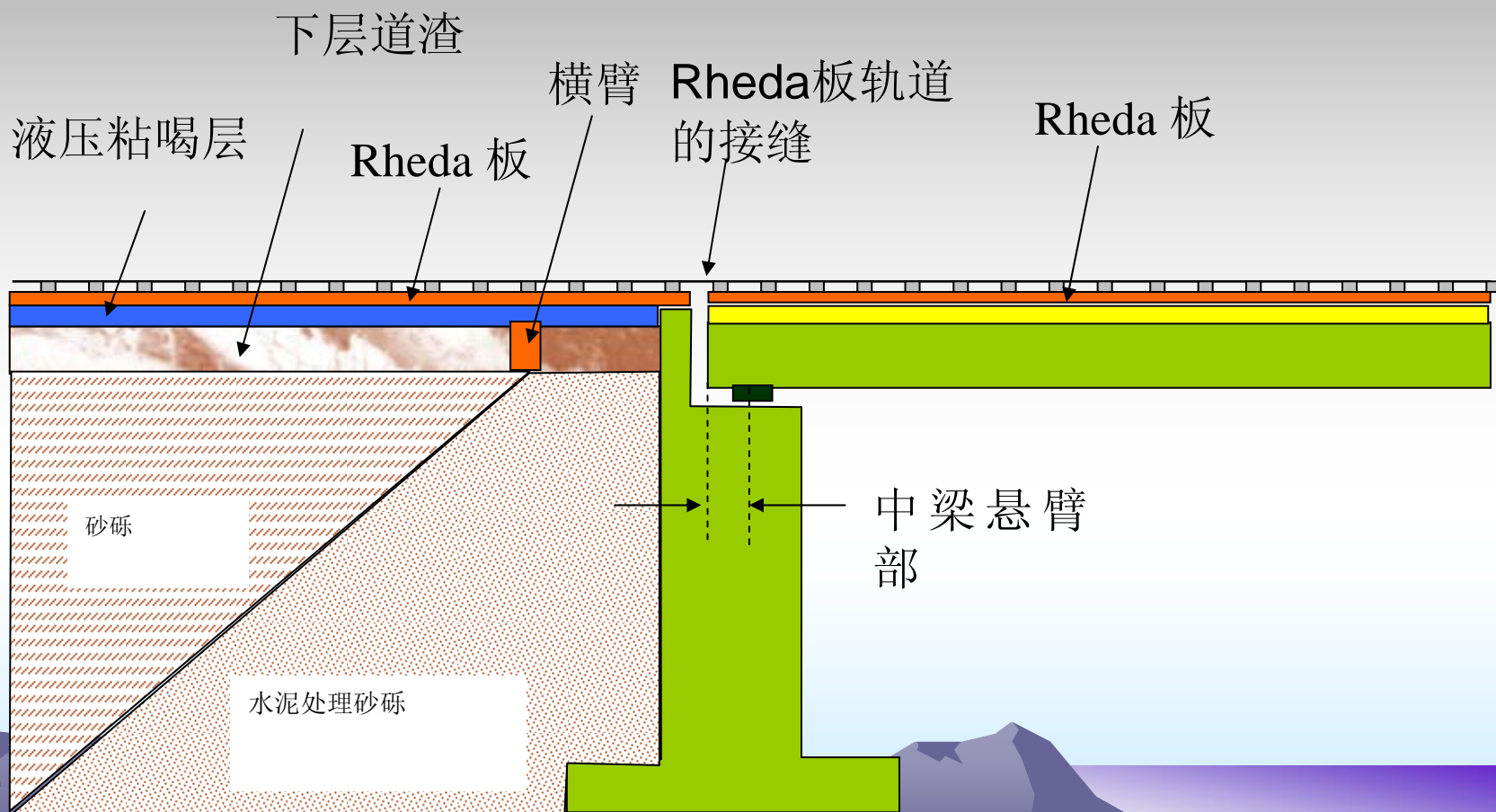
$$t \leq [1.5] \text{ mm/3m}$$

对于速度 $V > [220] \text{ km/h}$ 的情况，要求作一个额外的检验，以保证真实交通荷载乘以相关的动力系数后的 $t \leq [1.2] \text{ mm/3m}$ 。

路桥桥过渡段

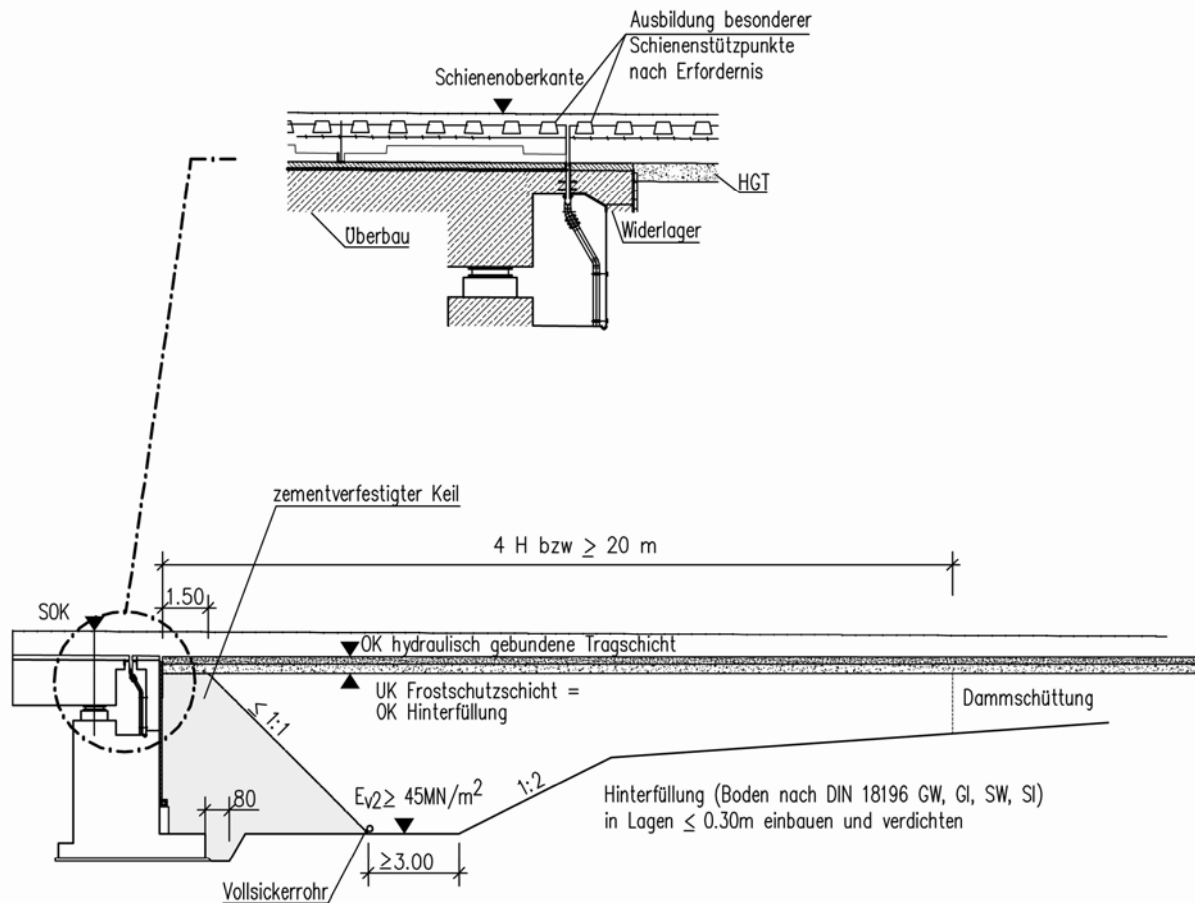
- 由于桥台与台后路基工后沉降的差异，为了保证列车运行安全性、减小列车通过时引起的振动、提高乘坐舒适性，在衔接处应设置一定长度的过渡段
- 过渡段的长度主要由路桥过渡段工后沉降差引起的轨面弯折角的限值控制。根据动力仿真计算结果，确定过渡段长度

桥路桥过渡段



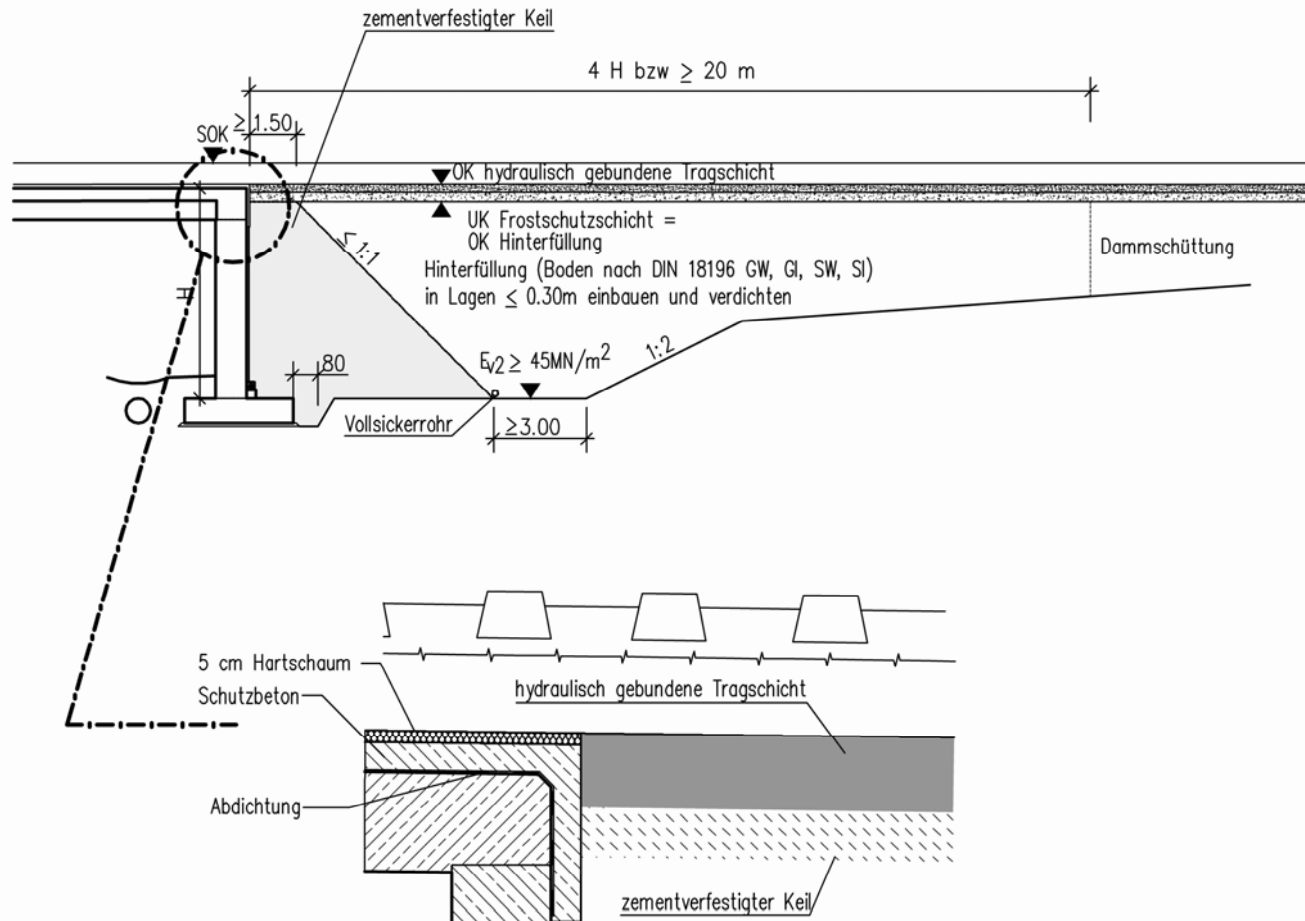
桥路桥过渡段

- 桥长超过 **25米**



桥路桥过渡段

- 桥长小于 **25米**



动力分析

影响动力作用的基本因素

- 结构的自然频率
- 轴的间隔
- 通过桥梁的交通速度
- 结构的阻尼
- 桥面板的均匀分布的支撑和结构(横梁, 轨枕, ...)
- 车轮的缺陷(轮缘扁疤, ...)
- 轨道的垂直缺陷

动力分析

自重频率 n_0 [Hz]的限制和跨长 L [m]的关系

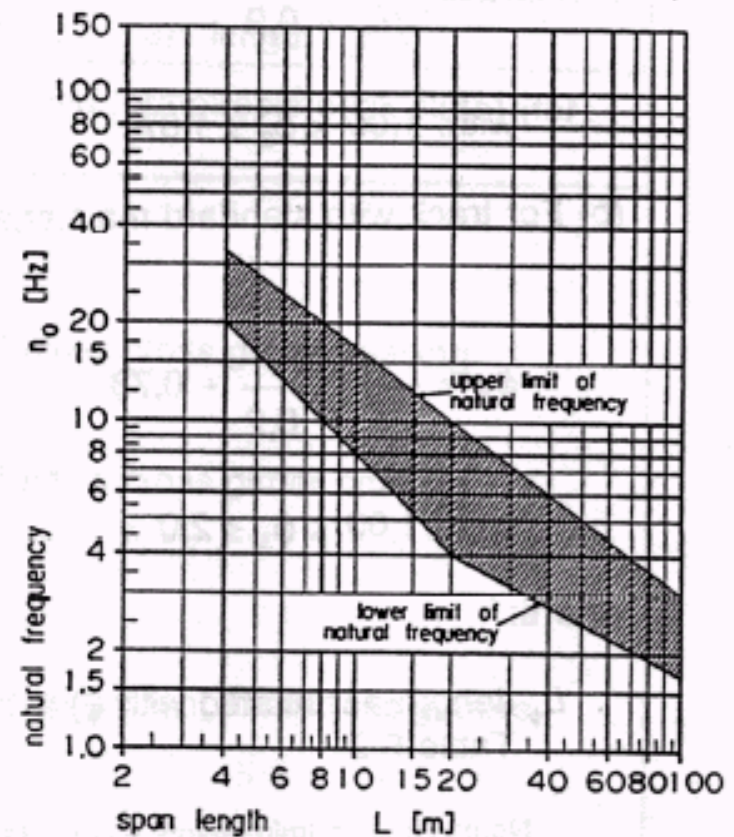
The upper limit of n_0 is given by

$$n_0 = 94,76 \times L^{-0,748}$$

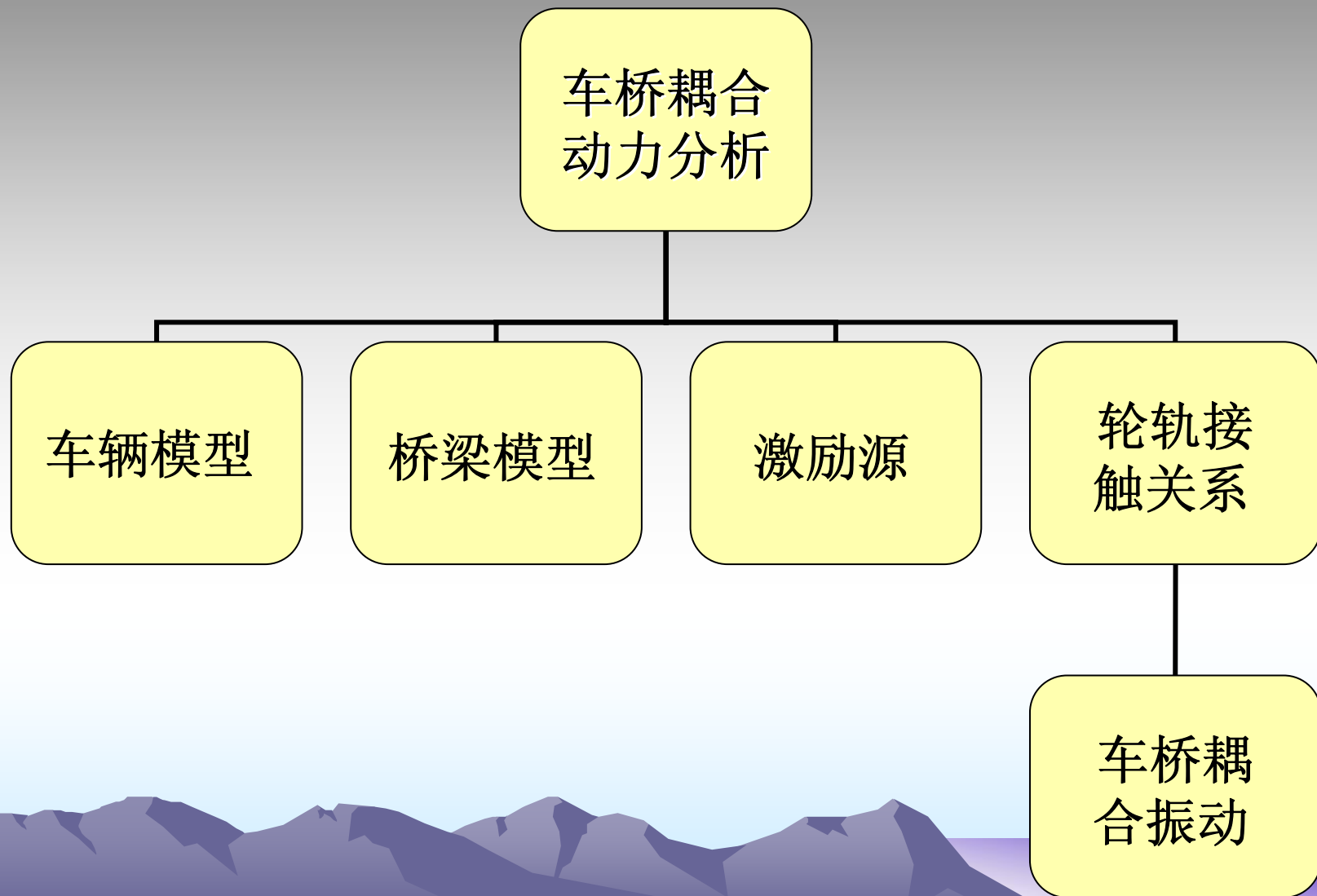
The lower limit of n_0 is given by

$$n_0 = \frac{80}{L} \quad \text{for } 4\text{m} \leq L \leq 20\text{m}$$

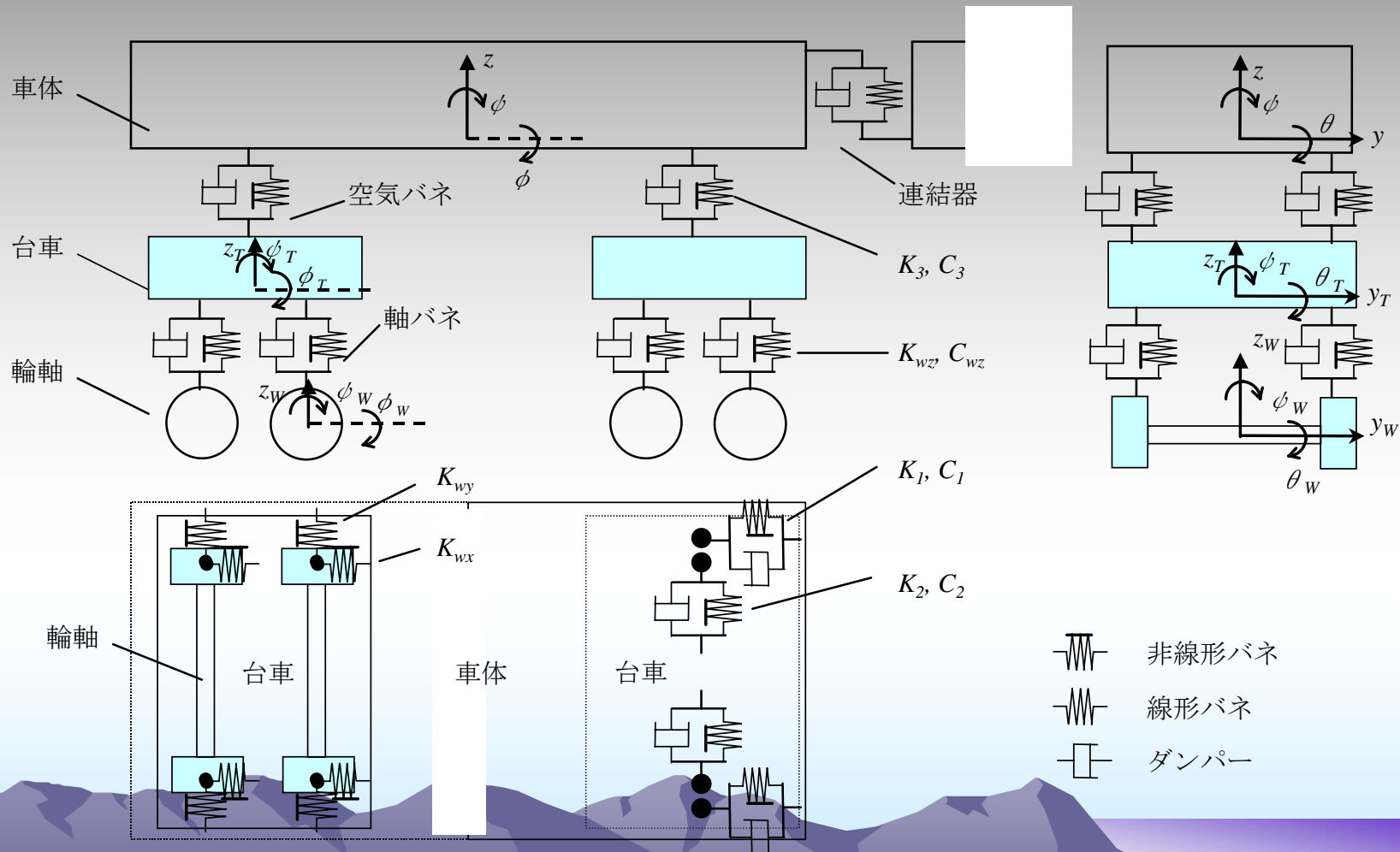
$$n_0 = 23,58 \times L^{-0,592} \quad \text{for } 20\text{m} < L \leq 100\text{m}$$



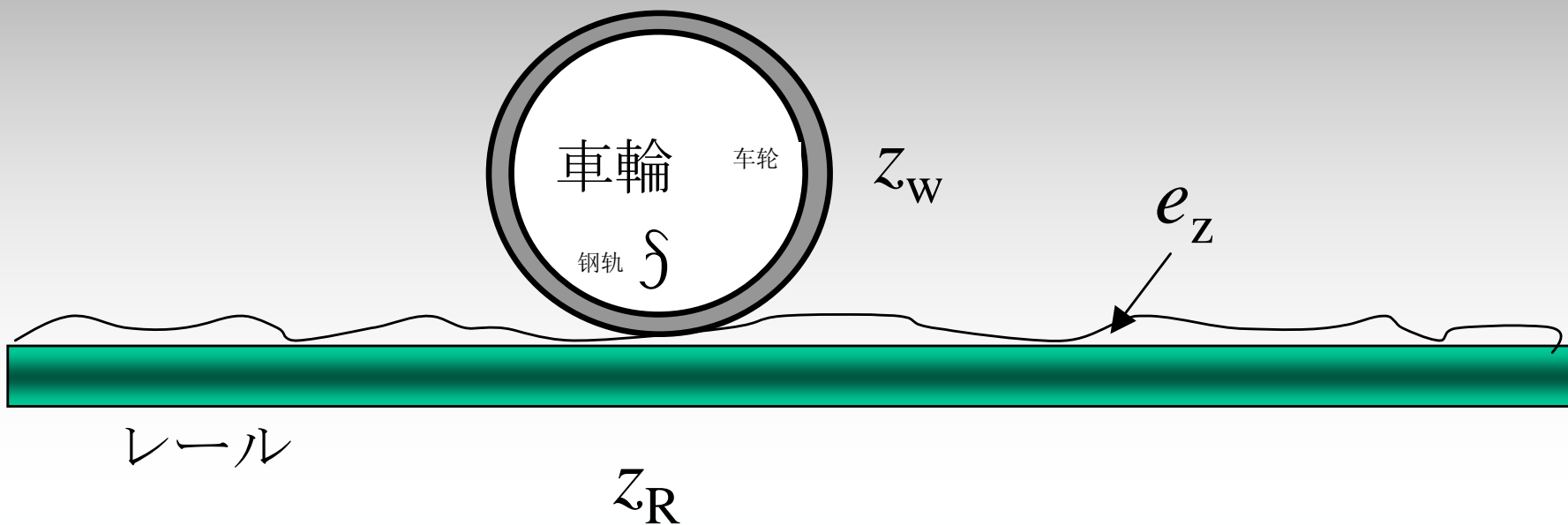
动力分析



動力分析

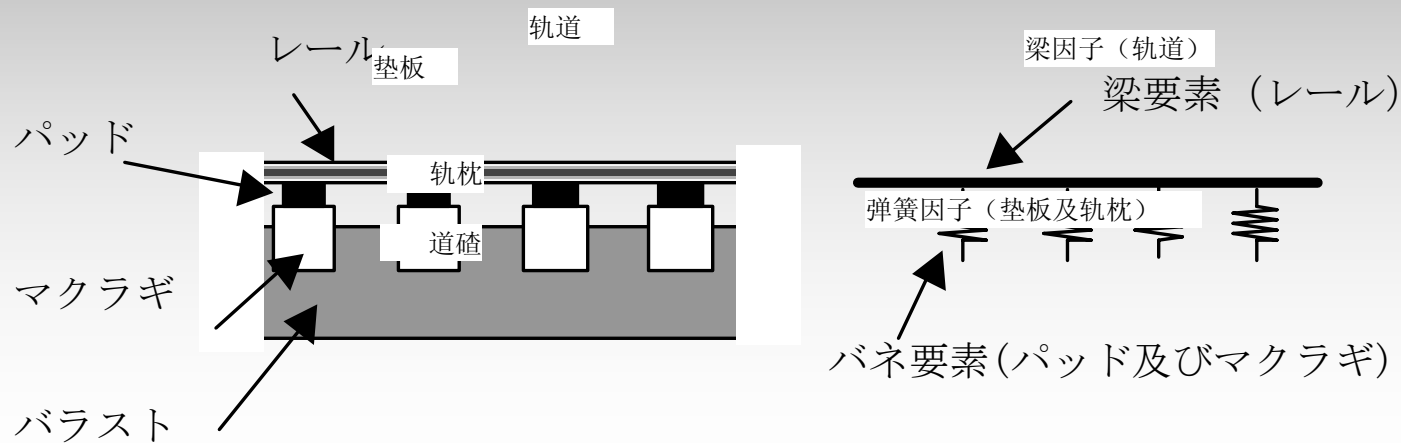


动力分析



车轮与钢轨在垂直方向的相对位移

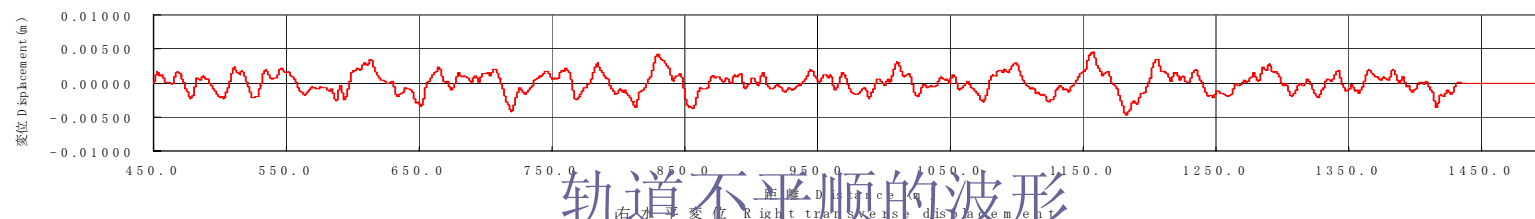
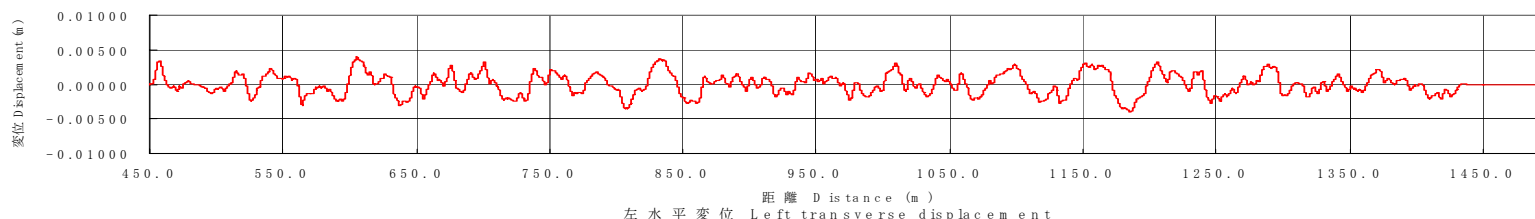
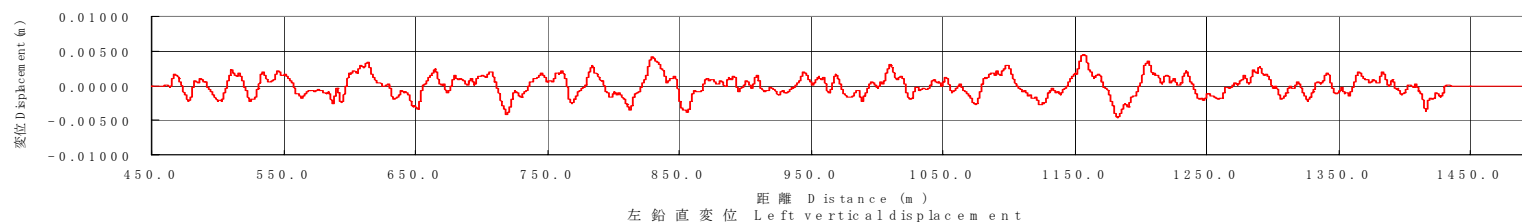
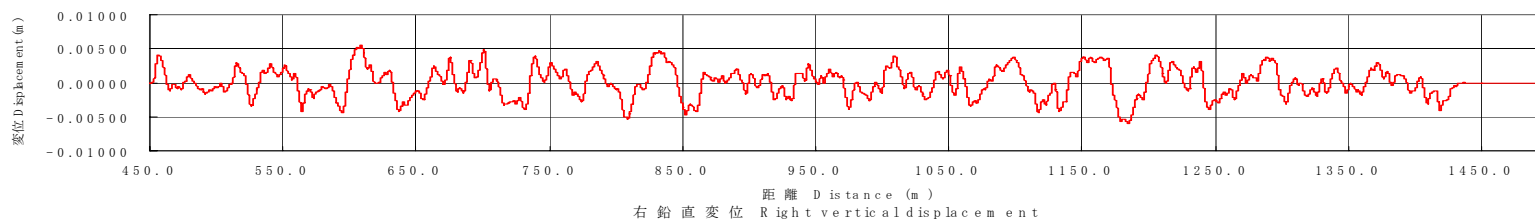
动力分析



轨道模型概念图

动力分析

轨道谱曲线

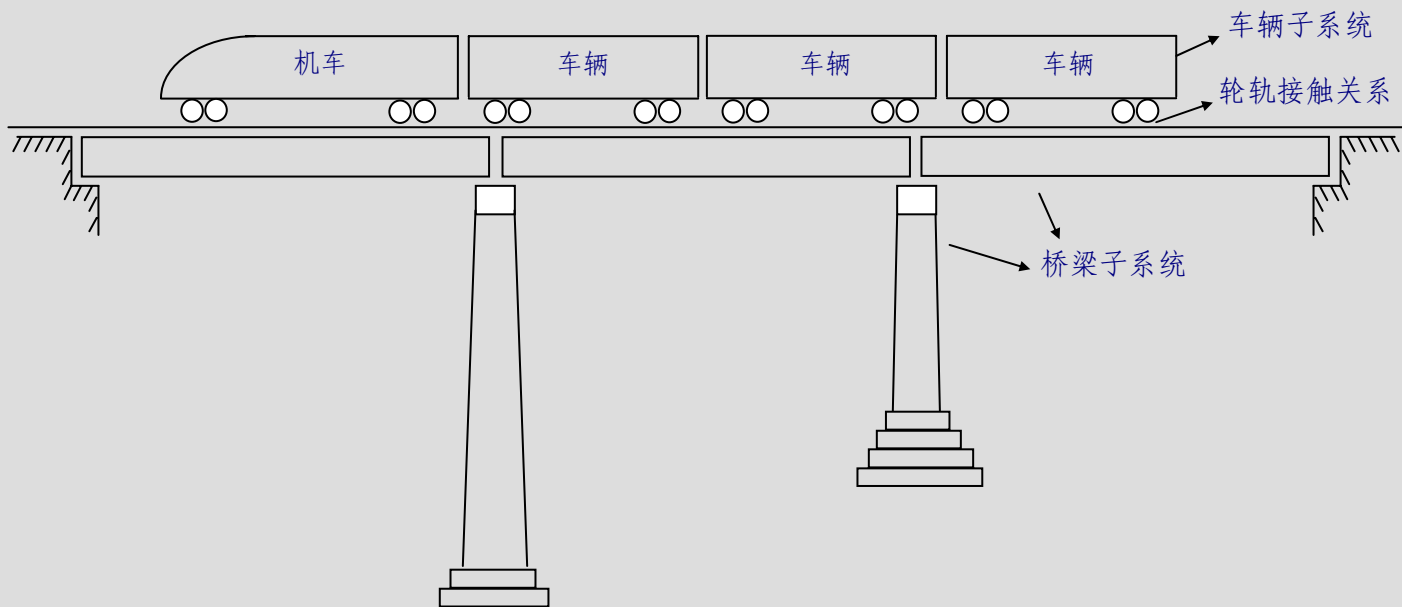


轨道不平顺的波形

动力分析

- a. 安全性指标：脱轨系数、轮重减载率
- b. 乘坐舒适性（对客车车辆）：客车车辆车体振动加速度
客车车辆舒适性评价指标
- c. 运行平稳性（对货车车辆）：货车车辆车体振动加速度
货车车辆平稳性评价指标
- d. 机车运行平稳性：机车车体振动加速度
机车平稳性评价指标

动力分析



车桥动力仿真分析模型

动力分析

..\视频\DEMO(FMV302)\1130.AVI

..\视频\DEMO(FMV302)\1142.AVI

..\视频\DEMO(FMV302)\9140.AVI

..\视频\DEMO(FMV302)\9130.AVI

..\视频\DEMO(FMV302)\E2100.avi

..\视频\DEMO(FMV302)\E2100.avi

..\视频\DEMO(FMV302)\93300s01.AVI

..\视频\DEMO(FMV302)\93420s01.AVI

..\视频\DEMO(FMV302)\12140.AVI

..\视频\DEMO(FMV302)\40350s01.avi

..\视频\DEMO(FMV302)\40350s02.avi

..\视频\DEMO(FMV302)\40350S02sunset.AVI

轨道力

在一座桥梁和结构一端或者两端的路堤之间的钢轨是连续的地方，因牵引或者制动引起的部分纵向作用力将被钢轨连续处的桥台后面的土方阻抗，其余则通过桥梁支座。同时，在钢轨是连续的且提供对桥面自由运动的约束处，钢轨和桥面之间的任何热量变化，或者桥面的移动，将在桥梁支座处产生一种非直接的纵向作用力。

在设计支座和下部结构时，应将纵向作用力考虑在内。同样的方式，在设计上部结构时，也应把纵向作用力考虑在内。

在计算纵向作用力中，应考虑下列情况：

- 列车的牵引和制动
- 热效应
- 因垂直作用力引起的结构变形
- 混凝土结构的收缩与蠕变

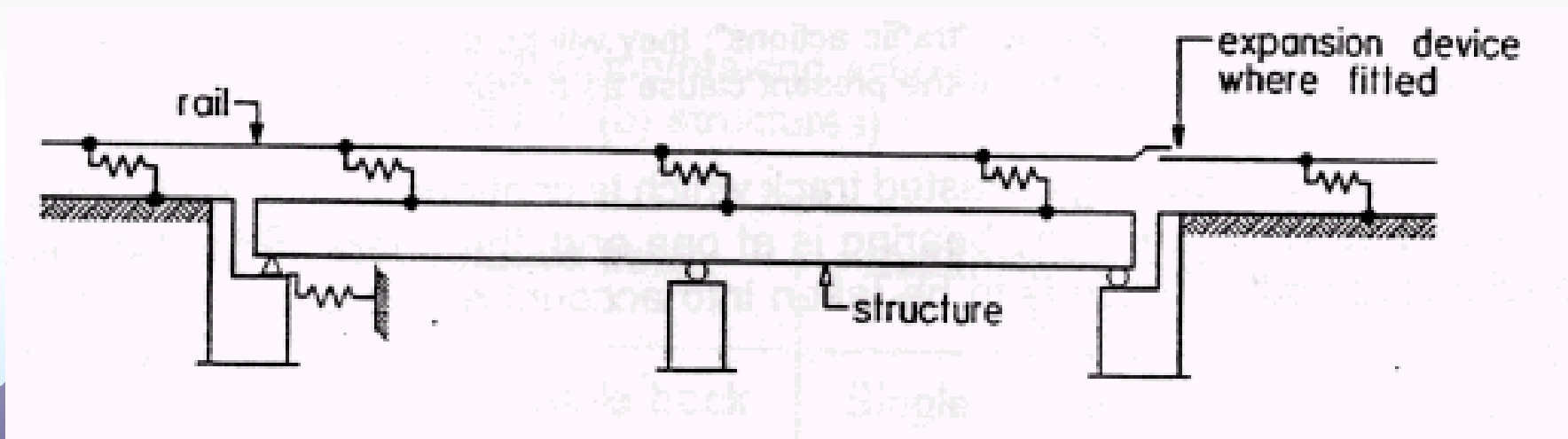
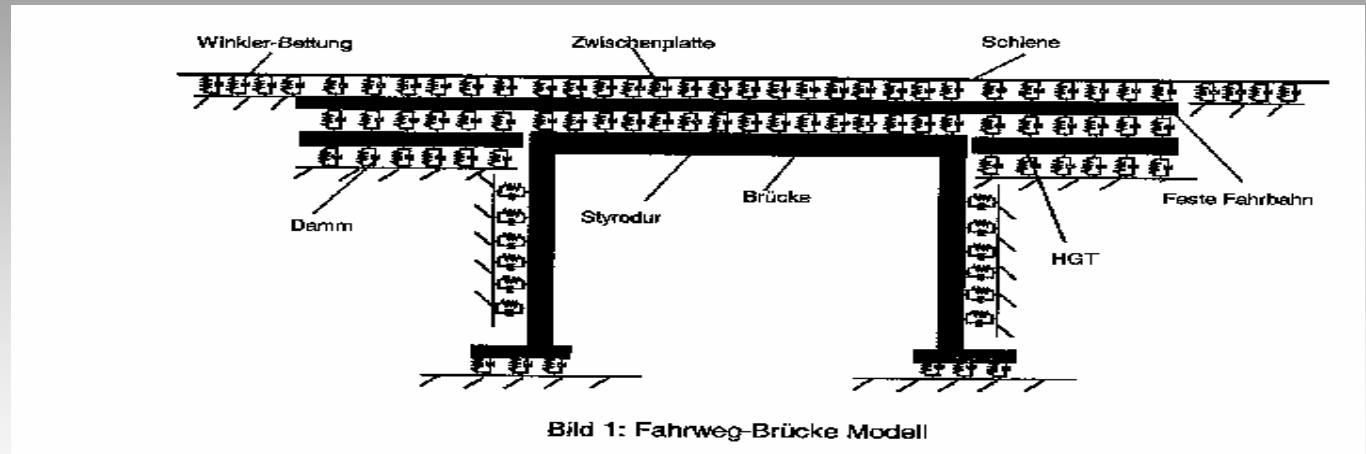
轨道力

在结构的每一端都为轨道提供了伸缩组件的地方，所有纵向作用力都应在支座(和下部结构)处被阻抗。

传递到结构上的纵向作用力的值在计算时，应把对轨道纵向移动的阻力和结构的刚度考虑在内，使用一个与下图所显示的近似的模型。对所使用的轨道阻力的值和附加的钢轨作用力，以及在钢轨和桥面之间被允许的最大相对位移应进行规定。

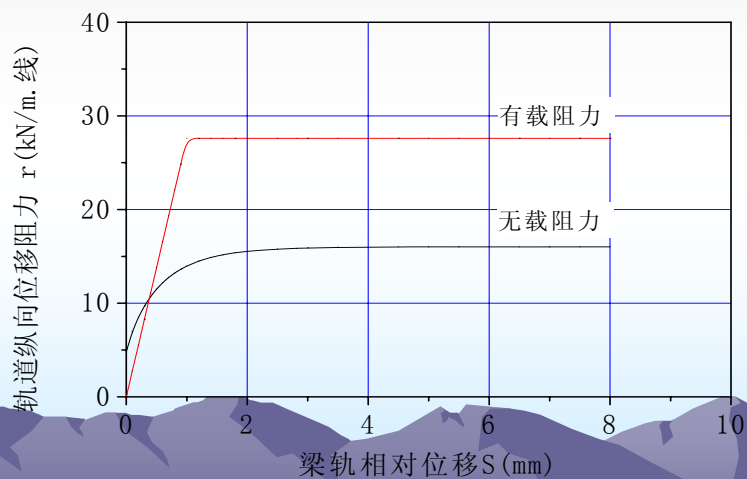
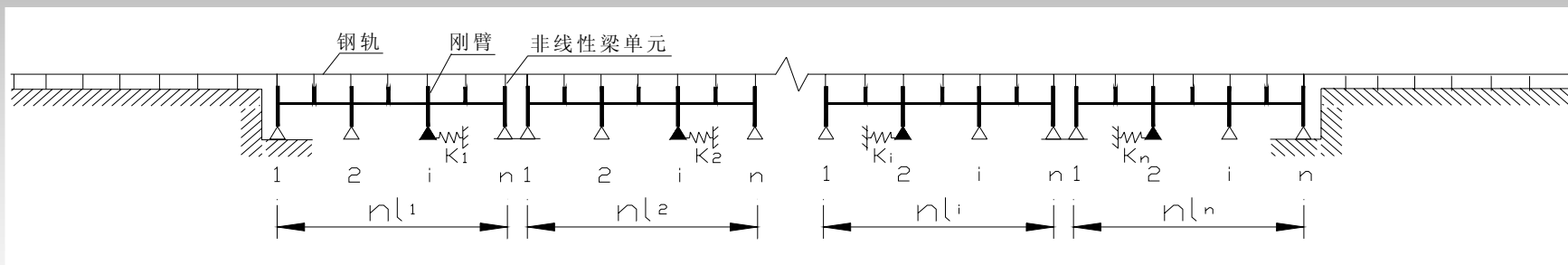
结构的刚度决定了对可被支座处的下部结构移动的桥面的纵向位移的总的阻力。应考虑位于支座下的支撑的挠曲和移动以及地基的旋转。

轨道力



轨道力

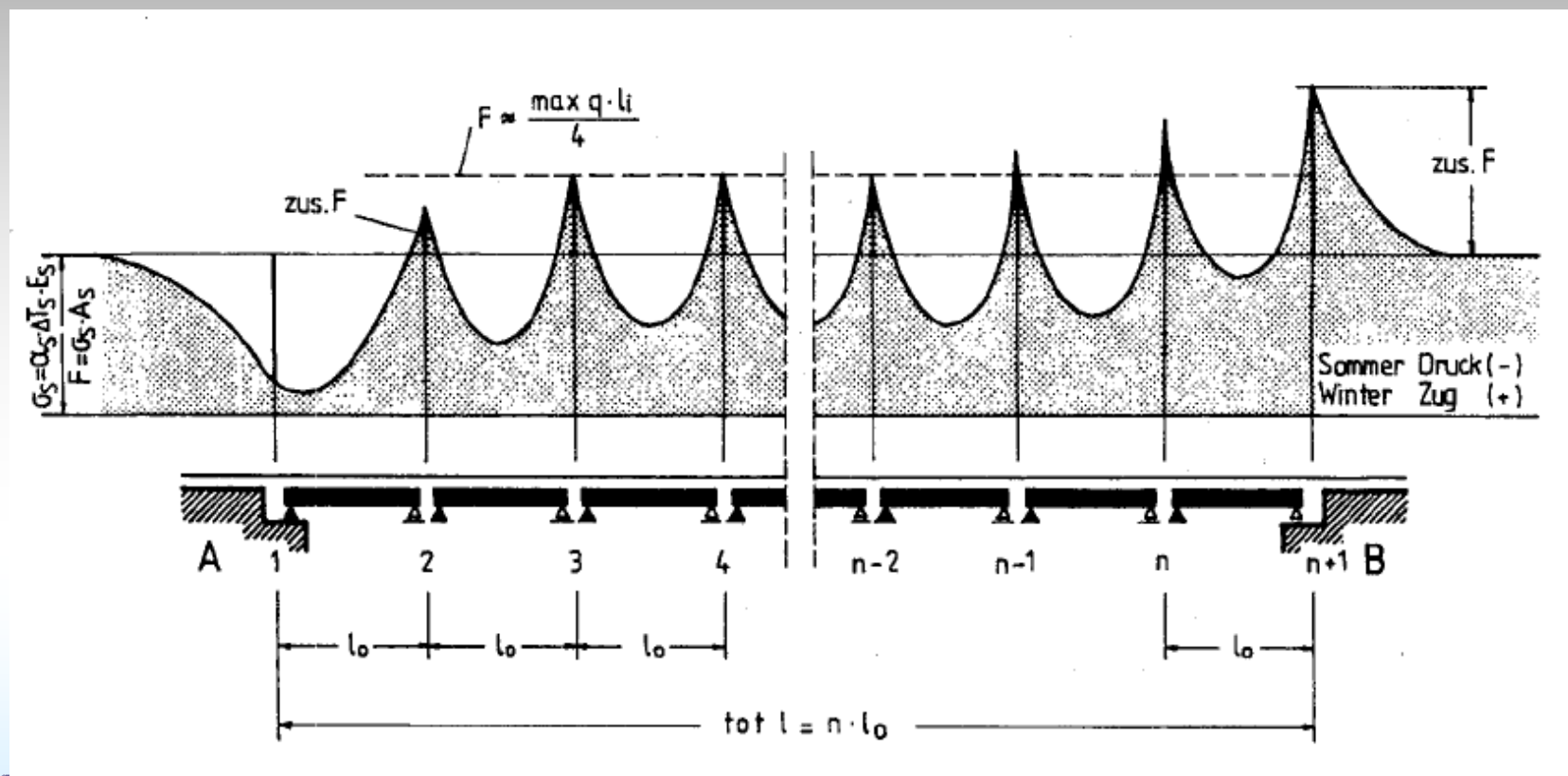
轨道结构与连续结构桥梁共同作用的力学计算模型



轨道纵向位
移阻力曲线

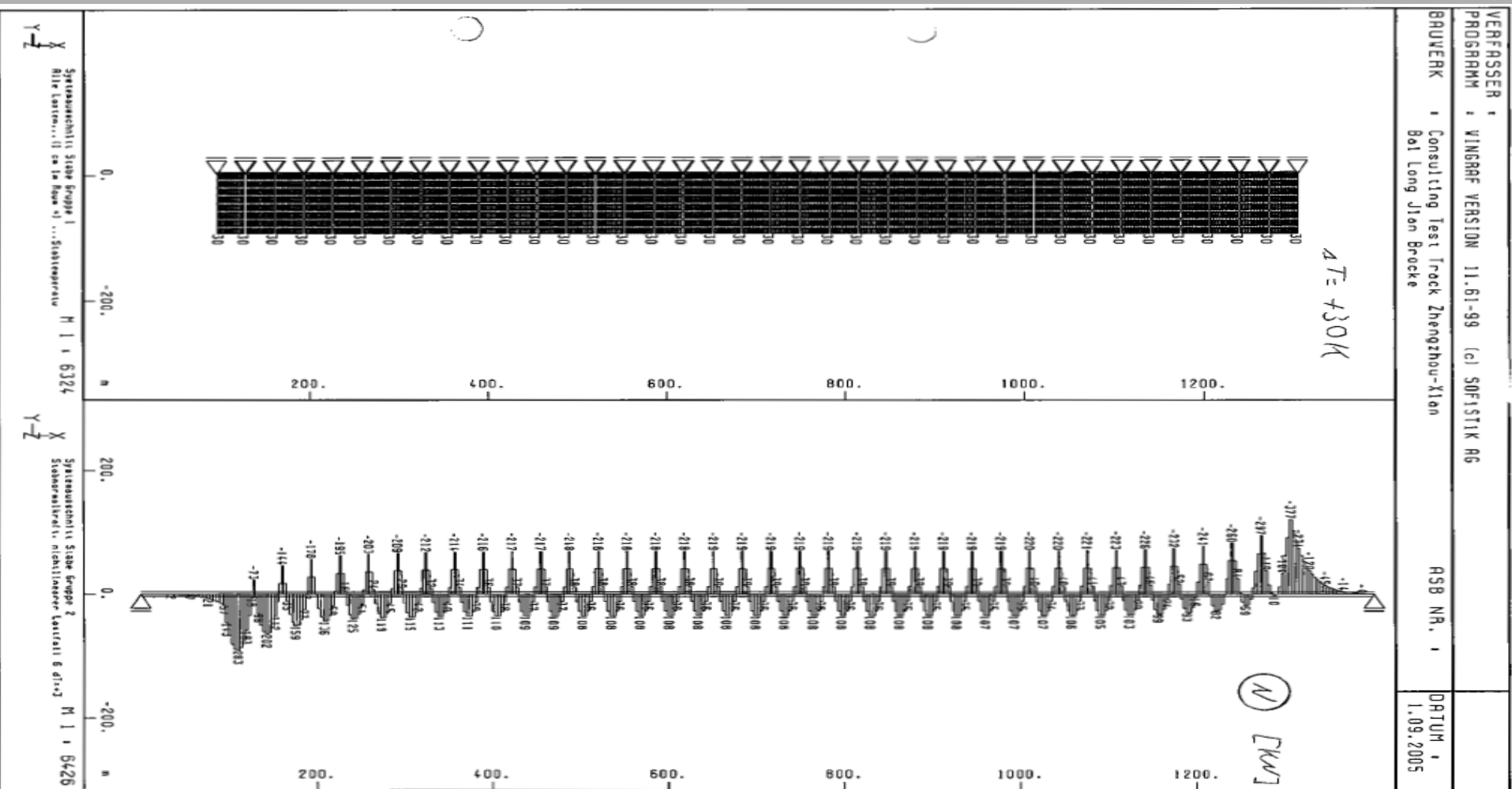
轨道力

轨道结构与连续结构桥梁共同作用的受力分析



轨道力

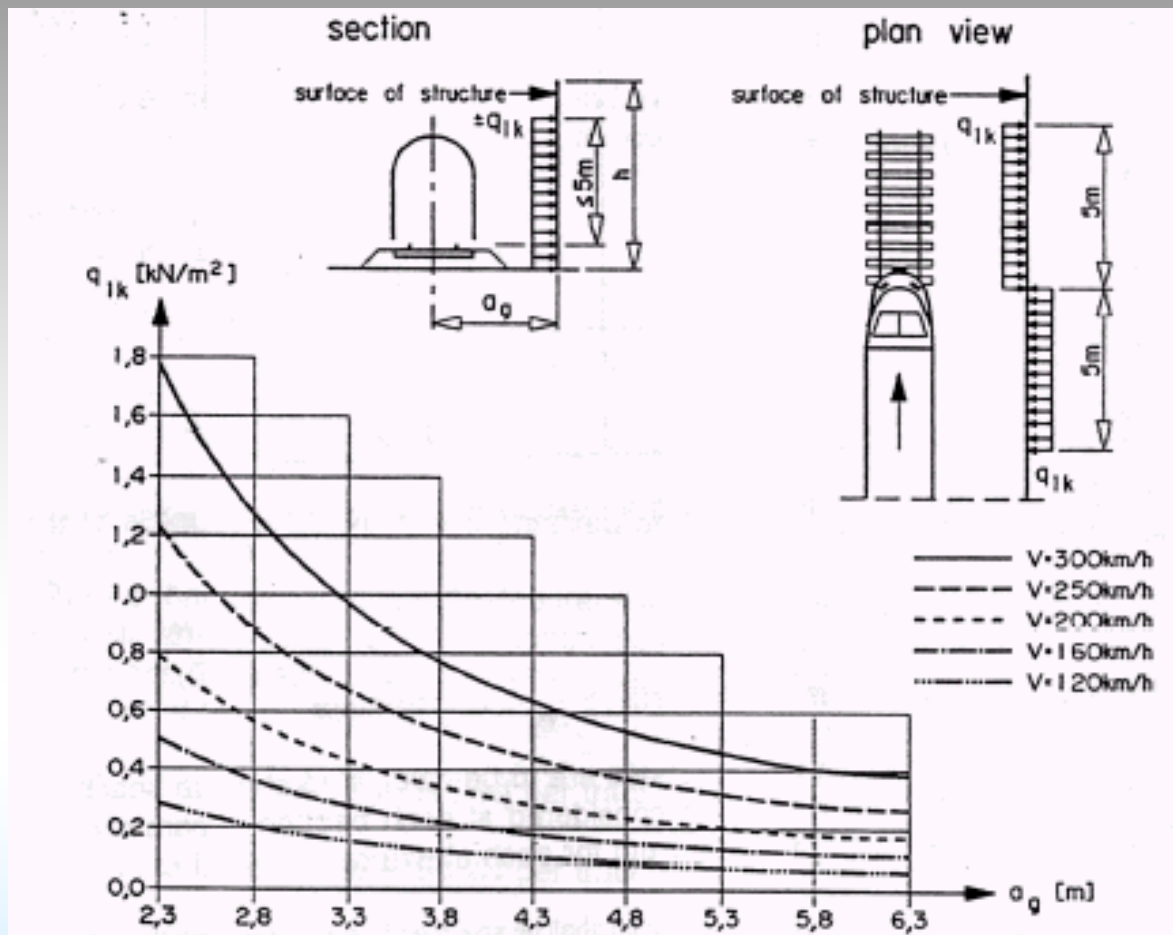
轨道结构与连续结构桥梁共同作用的受力分析



空气动力效应

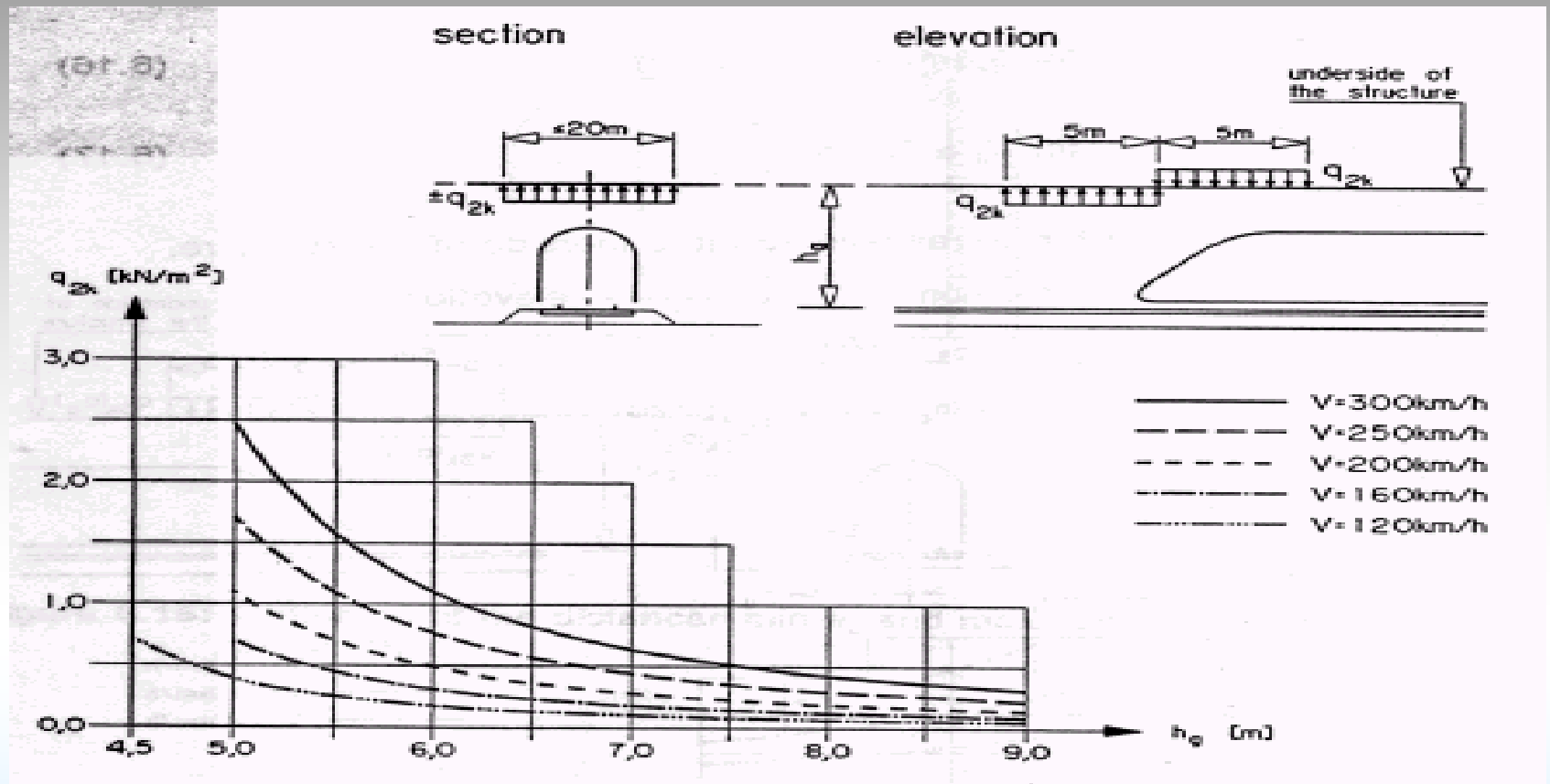
铁路交通的通过使所有靠近轨道的结构都经受一个压力和吸力交替的快速移动波的冲击，作用力的大小主要取决于

- (a)列车速度的平方，
- (b)列车的空气动力形状，
- (c)结构的形状，
- (d)位置，尤其是结构距离轨道的远近。



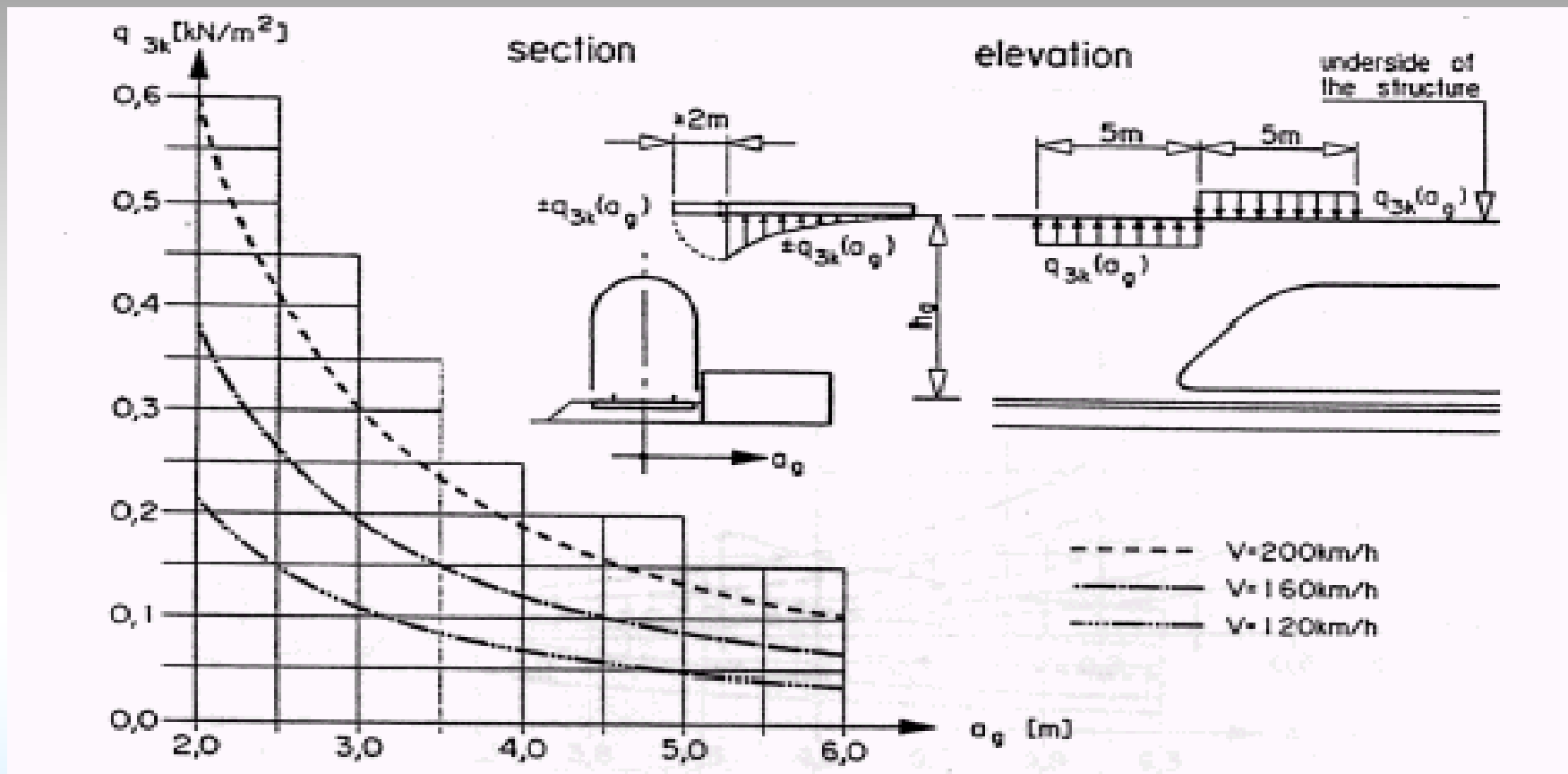
与轨道平行的简单垂直面的作用力的特征值

空气动力效应



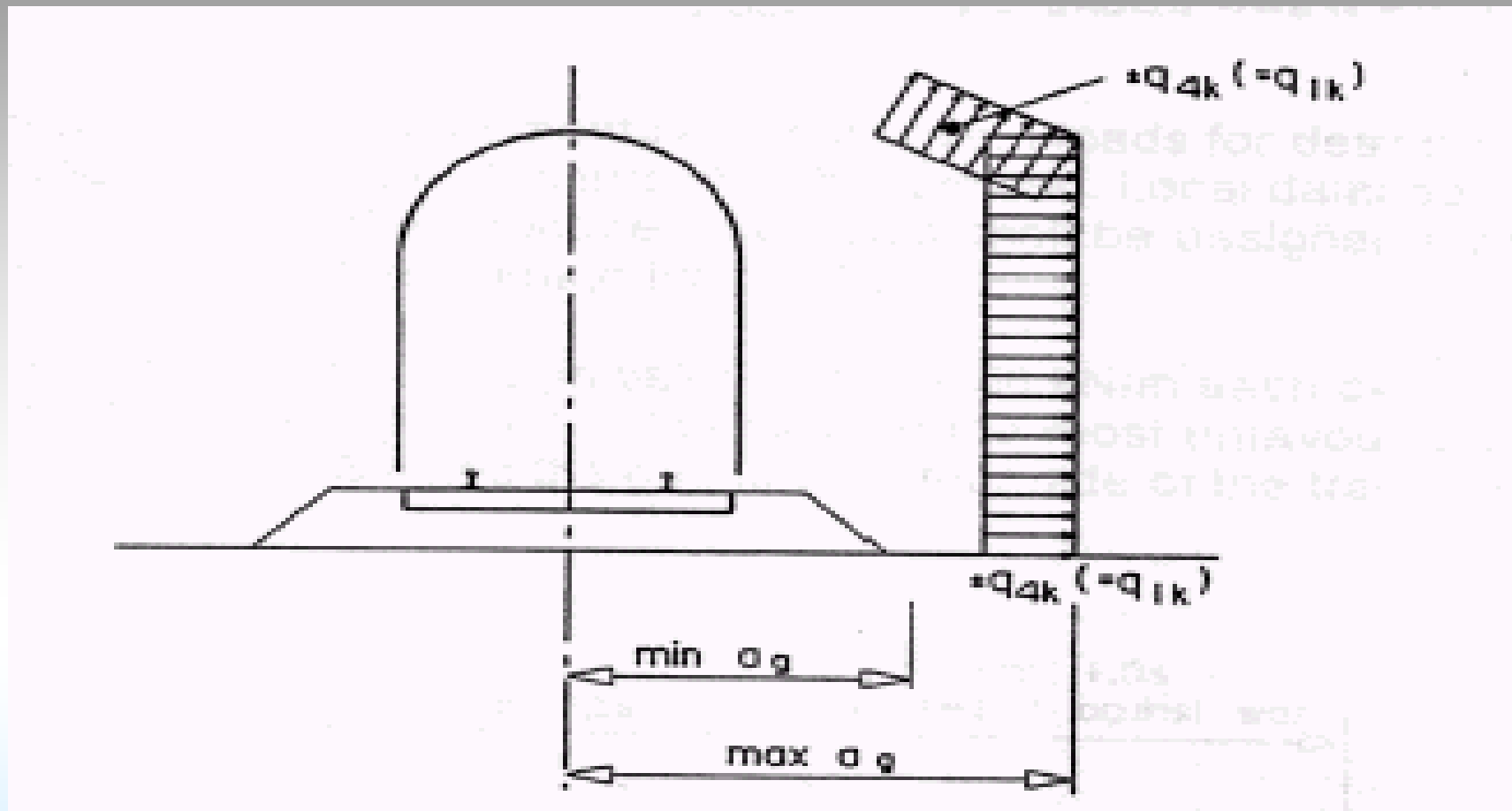
轨道上方的简单水平面的作用力的特征值

空气动力效应



邻近轨道的简单水平面的作用力特征值

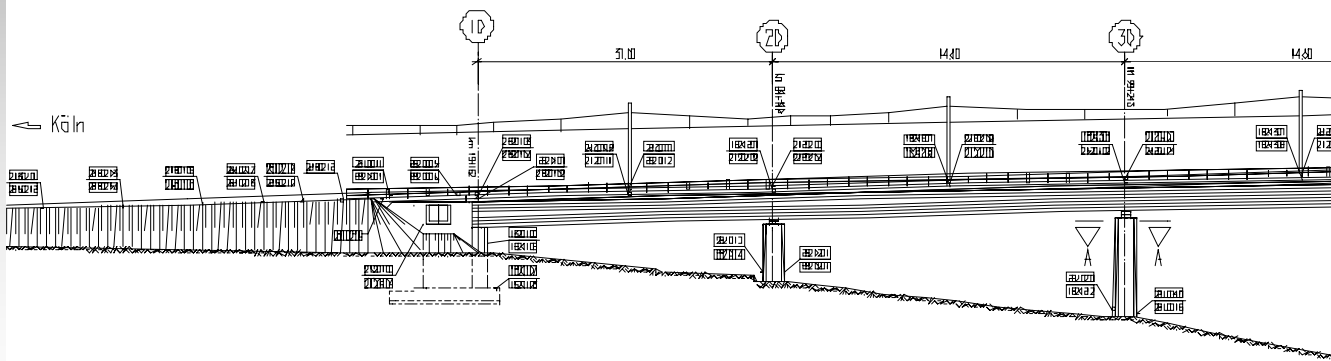
空气动力效应



沿轨道的垂直面和水平面或者倾斜面的多平面结构

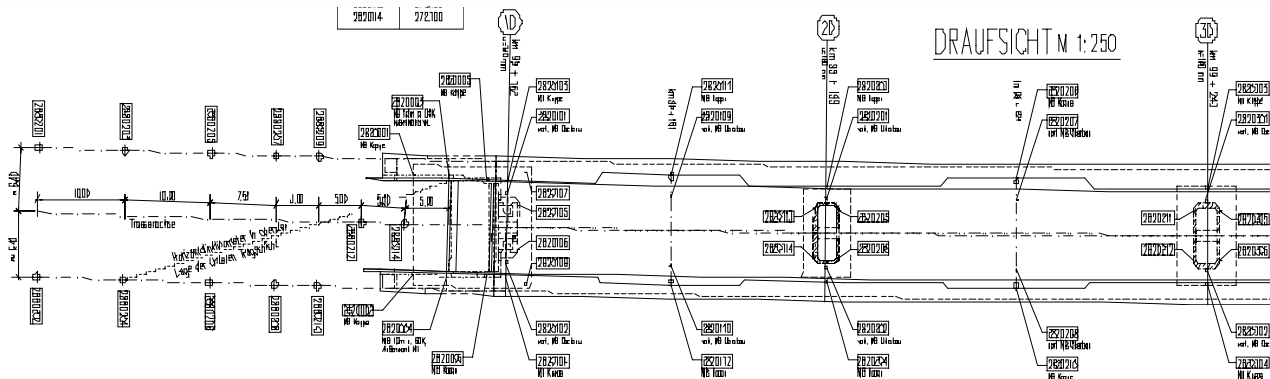
桥梁测量

山谷桥梁“维斯恩格兰德Wiesengrund”的测量方案



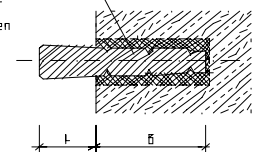
WIDERLAGER ACHSE 10:

Punktnummer	Höhe Meßbolzen
2820001	281.248
2820002	281.248
2820003	277.840
2820004	277.840
2820005	281.463
2820006	281.463



EINBAU MESSBOLZEN M 1:2.5

Meßbolzen Stahl, lauererzinkt
Schraube # 20 - 3mm
Schraublänge 120 mm
in Ausbuchtung mit
Epoxidharz-Kleber
horizontal einbetten



耐久性设计

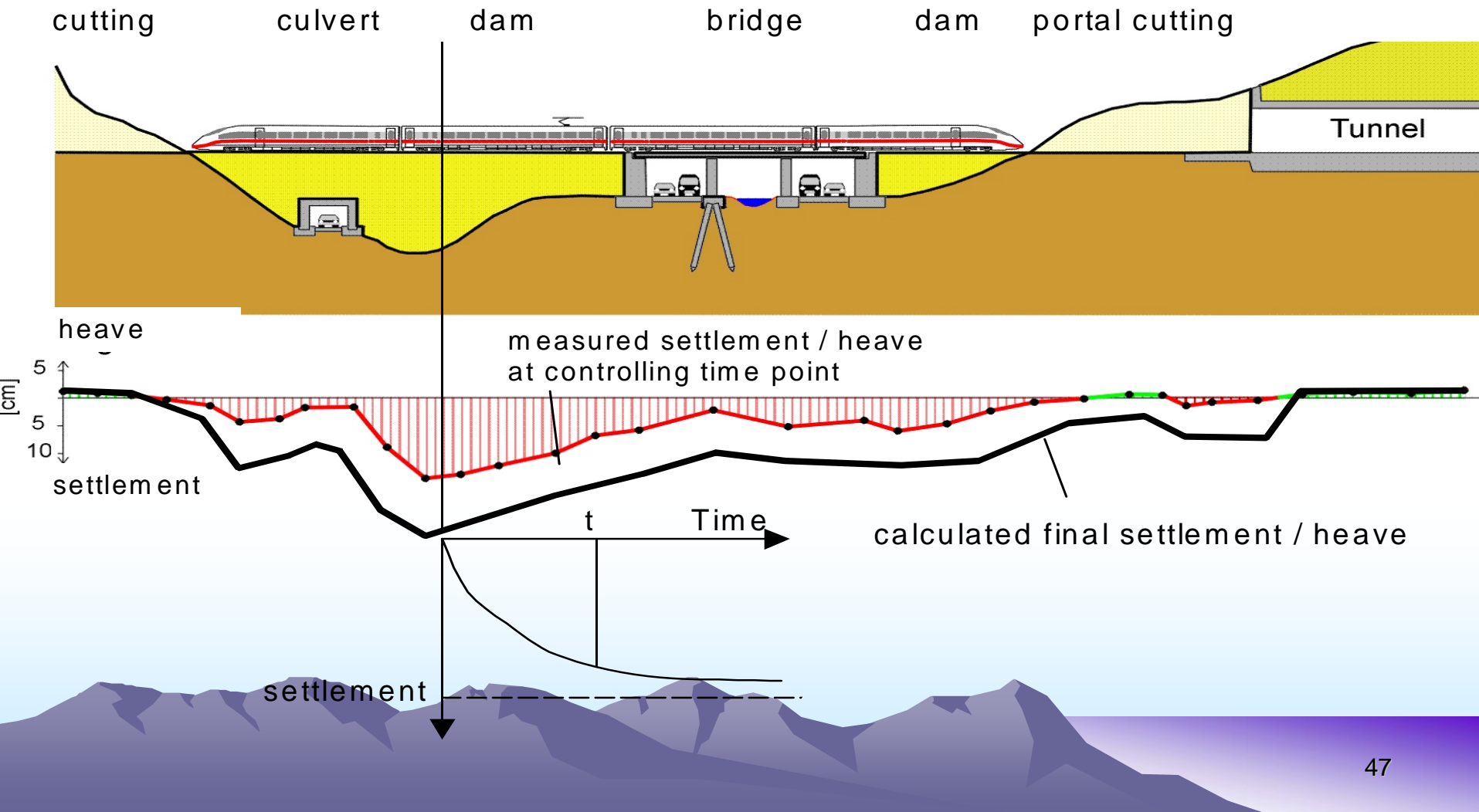
- 按照有关规范要求，对受侵蚀性环境影响的结构采取稳妥可靠有效的防侵蚀措施，保证结构的安全性和耐久性。注意台风、碎浪对桥梁钢构件及钢支座等重要结构物的影响，浪溅区和侵蚀性环境下桥梁可采用高性能混凝土，提出具体的指标，钢结构宜采用铁道部颁布的长效涂装体系，感潮河段的墩台及基础可适当提高混凝土等级和抗渗等级。

耐久性设计

不耐久的
桥梁



系统性与接口



客专咨询中的桥梁技术问题

- 1、桥面布置
- 2、**32m**箱梁铺设轨道后收缩、徐变上拱度
- 3、涵洞结构形式及分节设计
- 4、桩基础承台配筋设计
- 5、制动力或牵引力计算和组合取值
- 6、客运专线抗震设计