

慧加 WISEPLUS V4.2 新砵规版 新规范解决方案详解之7自由度分析

赵瑜

上海慧加软件有限公司

2018.11.08

◆ 7DOF精细化分析

- 箱梁受力特性
- 新规范相应内容

◆ WISEPLUS 7DOF

- 7DOF——翘曲自由度
- 7DOF单梁模型
- 7DOF与实体对比

◆ 实例演示

箱梁的力学特性

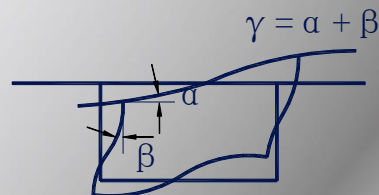
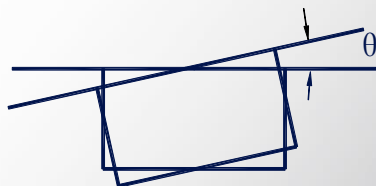
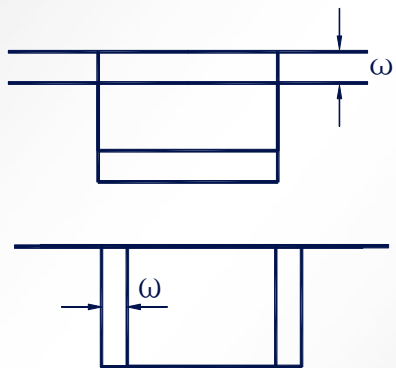
箱梁的力学特性

纵向弯曲
(M_y 、 M_z)

刚性扭转
(自由、约束扭转)

畸变

横向弯曲

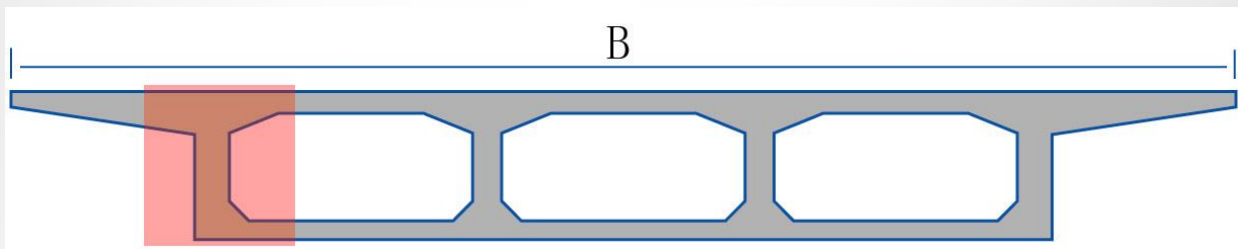


桥梁的空间效应

4.1.8 弯、斜、宽等复杂桥梁结构应考虑剪力滞效应、薄壁效应、各道腹板的受力分布等空间效应，可采用实体单元模型或附录 G “桥梁结构的实用精细化分析模型”计算。

条文说明：

复杂桥梁结构的空间效应主要为三种：剪力滞效应、薄壁效应和各腹板受力分布。



◆ 空间效应的处理方式：放大系数

- 各腹板受力分布 \longrightarrow 横向分布系数
- 剪力滞效应 \longrightarrow 有效分布宽度
- 薄壁效应 \longrightarrow 偏载系数（弯矩、剪力放大系数）

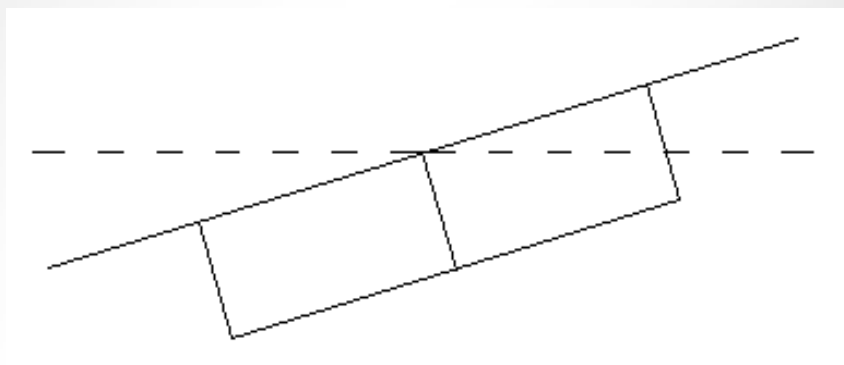
◆ 极限阶段配筋计算采用同样的放大系数

“大包小”的方法：将部分位置扩展至全断面，简化成单梁

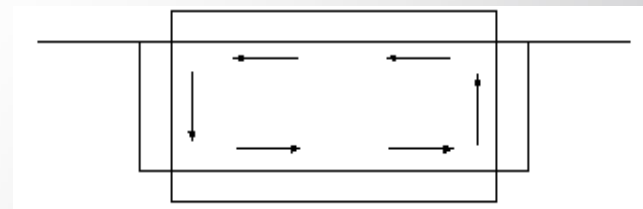
偏载系数的局限性

$$\lambda_{\text{正应力}} = \frac{\sigma_{\text{弯曲}} + \sigma_{\text{翘曲}}}{\sigma_{\text{弯曲}}}$$

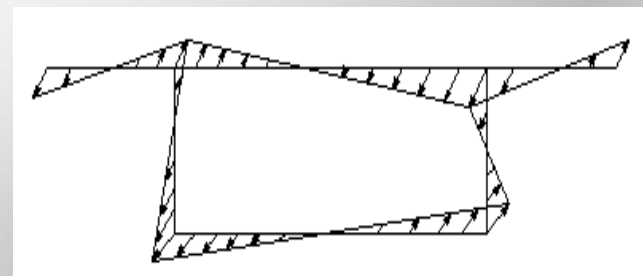
$$\lambda_{\text{剪应力}} = \frac{\tau_{\text{弯曲}} + \tau_{\text{自由扭转}} + \tau_{\text{约束扭转}}}{\tau_{\text{弯曲}}}$$



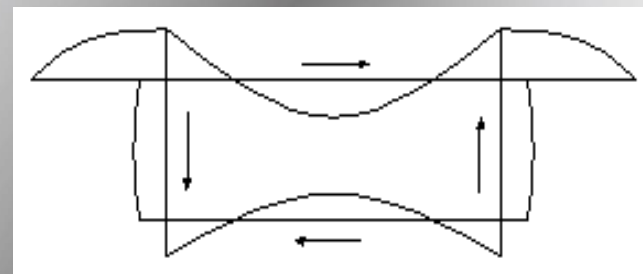
刚性扭转



自由扭转剪应力

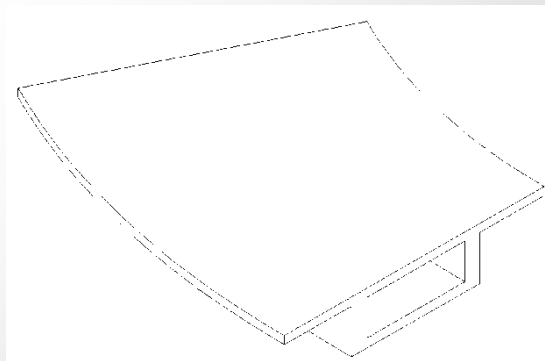
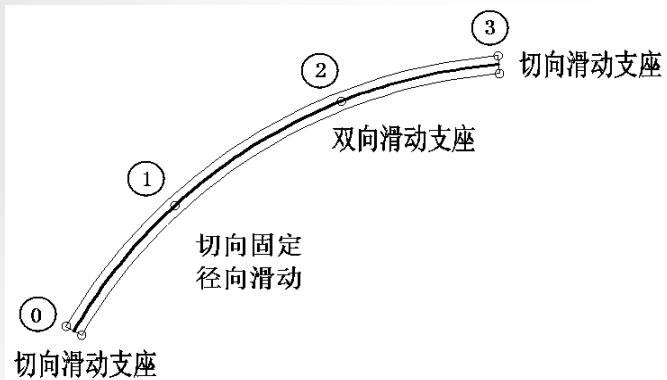


约束扭转—翘曲正应力



约束扭转剪应力

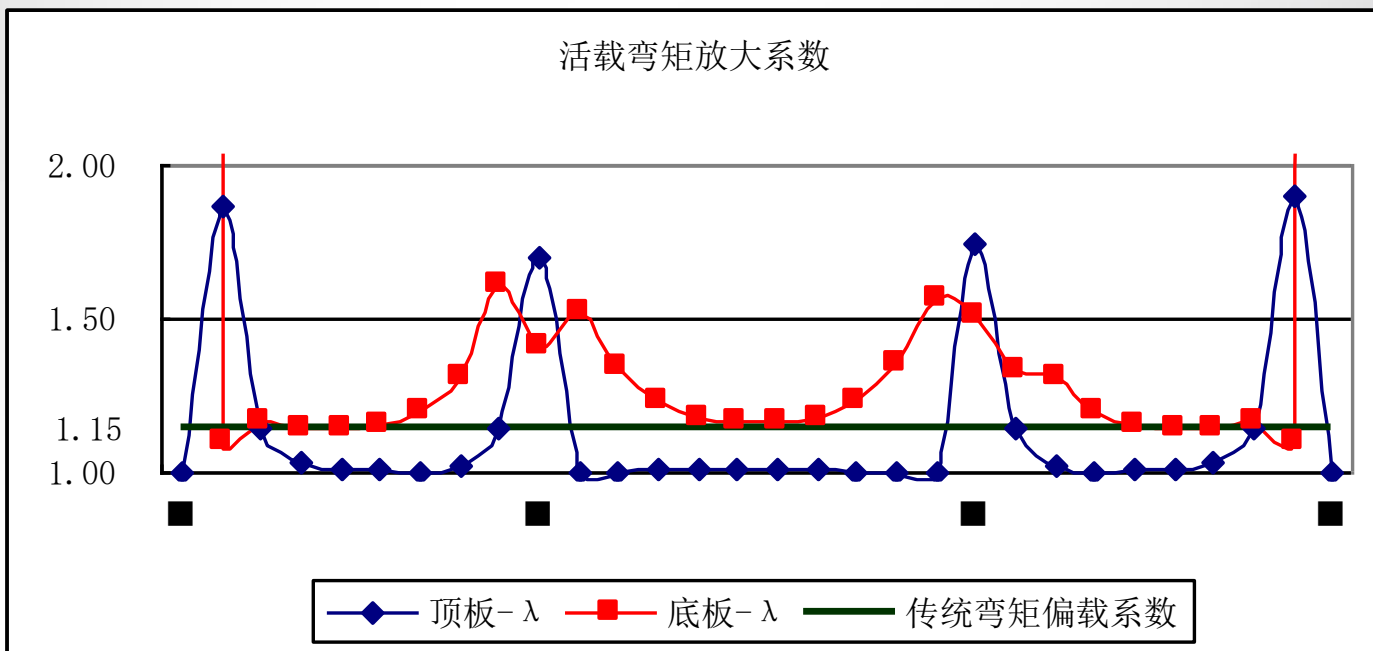
偏载系数的局限性



图示弯桥单梁与空间网格模型自重作用下的支反力比较

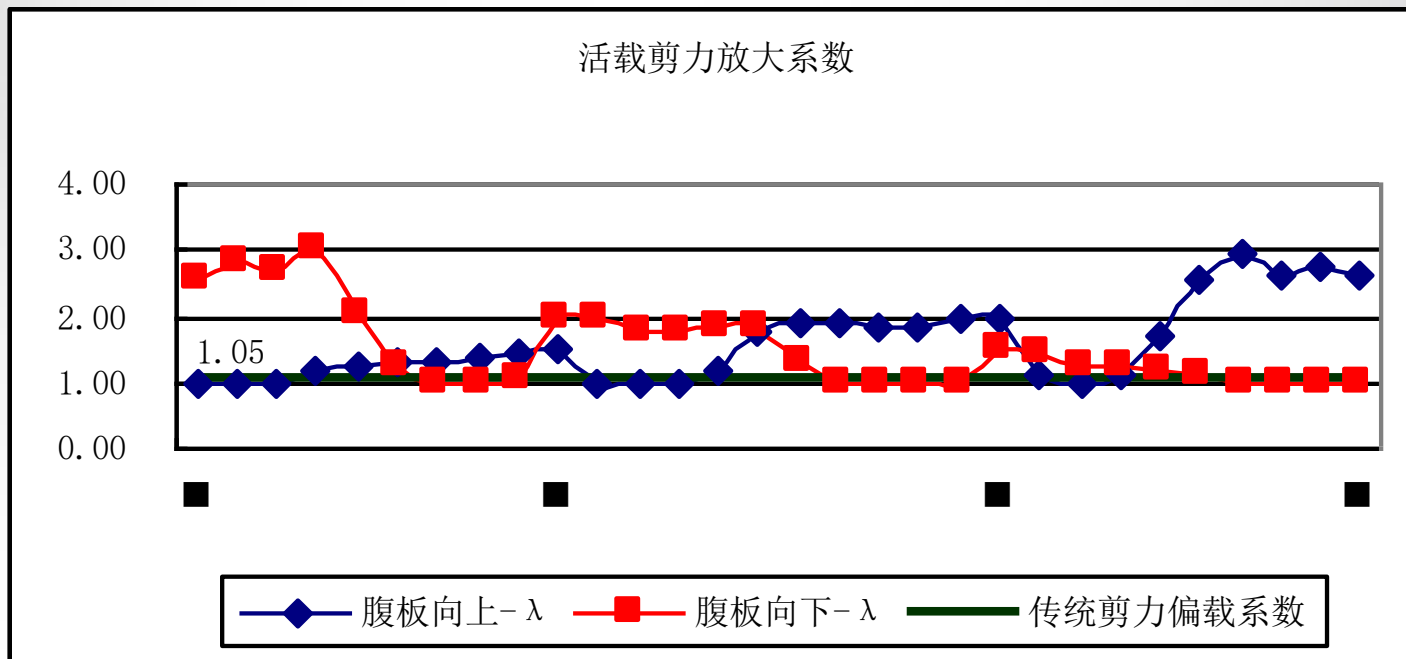
	0号支座		1号支座	2号支座	3号支座		求和
	内侧	外侧			内侧	外侧	
6DOF单梁模型	-308.1	-421.8	-2378.0	-2378.0	-308.2	-421.7	-6215.8
7DOF单梁模型	-307.4	-422.9	-2377.0	-2378.0	-307.8	-422.4	-6215.5
空间网格模型	-235.9	-490.0	-2382.0	-2382.0	-238.7	-487.3	-6215.9
实体模型	-242.6	-493.1	-2403.6	-2403.6	-242.6	-493.1	-6278.7

偏载系数的局限性



活载弯矩放大系数与传统偏载系数比较

偏载系数的局限性



活载剪力放大系数与传统偏载系数比较

新混规内容——分析

附录 A 桥梁结构的实用精细化分析模型 (新增)

A.1 一般规定

A.1.1 本附录桥梁结构的实用精细化分析模型包括空间网格模型、折面梁格模型和 7 自由度单梁模型。

A.1.2 空间网格模型宜用于腹板间距不小于 5m 的混凝土箱梁。

A.1.3 折面梁格模型宜用于多梁式的装配式桥梁、或单箱多室混凝土箱梁。

A.1.4 7 自由度梁单元模型宜用于位于曲线段的混凝土箱梁桥。

A.2.3 7 自由度单梁模型宜满足下列要求：

1 7 自由度单梁模型可按 4.3.4 条的有效分布宽度考虑剪力滞效应。

2 7 自由度单梁模型得到的正应力放大系数 λ_σ 和剪应力放大系数 λ_τ 按下式计算：

$$\lambda_\sigma = \frac{\sigma_M + \sigma_w}{\sigma_M} \quad (\text{A.2.3-1})$$

$$\lambda_\tau = \frac{\tau_M + \tau_K + \tau_w}{\tau_M} \quad (\text{A.2.3-2})$$

式中： σ_M 、 τ_M ——弯曲正应力和剪应力。

σ_w 、 τ_w ——约束扭转正应力和剪应力；

τ_K ——自由扭转剪应力。

新混规内容——验算

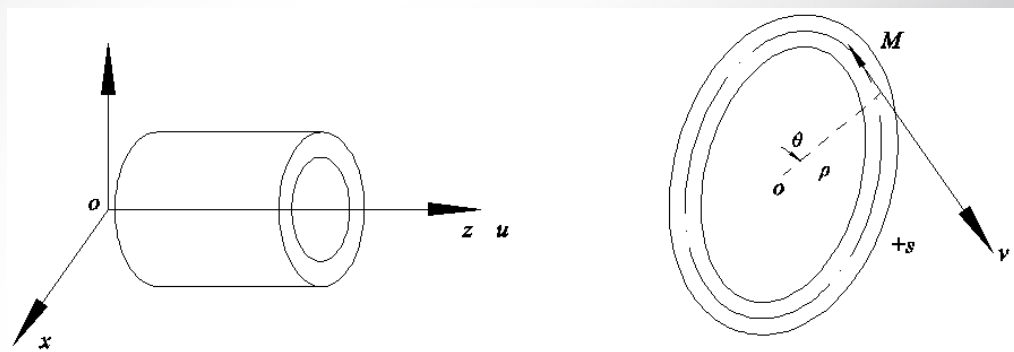
6.1.3 箱型截面的混凝土桥梁宜按表 6.1.3 进行抗裂、裂缝宽度验算。 (新增)

表 6.1.3 箱型结构的抗裂、裂缝宽度验算要求

部位	验算要求		
	全预应力结构和 A 类预应力结构	B 类预应力结构和钢筋混凝土结构	
顶板	上缘的纵桥向正应力	满足 6.3 节规定	按 6.4 节规定进行裂缝宽度验算
	上缘和下缘的横桥向正应力		
	面内的主应力		
底板	下缘的纵桥向正应力		
	上缘和下缘的横桥向正应力		
	面内的主应力		
腹板	面内的主应力		

7DOF——翘曲自由度

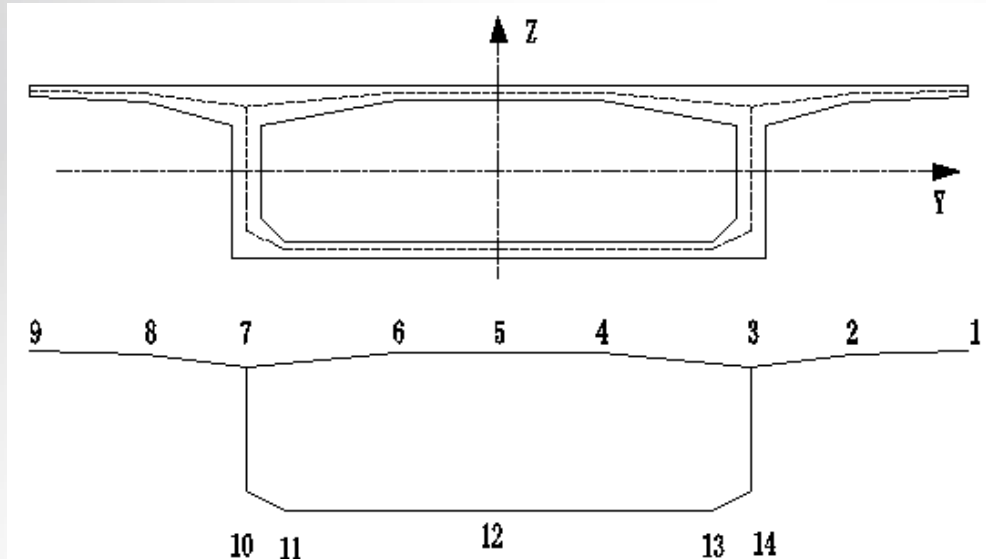
- 空间直梁单元计算偏心荷载下的扭矩
- 薄壁效应算法计算截面的弯曲剪力流和自由扭转剪力流
- 增加截面上的约束扭转双力矩作为第七个自由度，便可以计算箱梁截面的约束扭转效应，包括约束扭转翘曲正应力和约束扭转剪应力



$$u = u(s, z) = f\phi = f(z)\phi(s)$$

$$v = v(s, z) = \rho\theta = \rho(z)\theta(s)$$

7DOF——翘曲自由度



$$J_{db} = \frac{\Omega^2}{\oint \frac{ds}{t}} \quad J_{dk} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} b_i t_i^3$$

$$J_{\phi} = \int_F \phi^2 dF \quad J_{\rho} = \oint_F \rho^2 dF$$

$$(1-\mu) \frac{d\theta}{dz} - (1-\mu)f + \frac{EJ_{\phi}}{GJ_{\rho}} \frac{d^2 f}{dz^2} = 0$$

$$\frac{d^3 f}{dz^3} - \lambda^2 \frac{df}{dz} = (1-\mu) \frac{m}{EJ_{\phi}} = \lambda^2 \frac{m}{GJ_d}$$

$$M^r = -EJ_{\phi} \frac{d^2 f}{dz^2}$$

7DOF——翘曲自由度

$$\sigma_{zz} = \frac{B_\phi}{J_\phi} \phi$$

$$q_M = V_y \left(\frac{S_z}{I_z} - \frac{\int \frac{S_z ds}{I_z t}}{\int \frac{ds}{t}} \right) + V_z \left(\frac{S_y}{I_y} - \frac{\int \frac{S_y ds}{I_y t}}{\int \frac{ds}{t}} \right)$$

$$q_k^u = M^u \frac{J_{dk}}{J_{dk} + J_{db}} \cdot \frac{t^2}{J_{dk}}$$

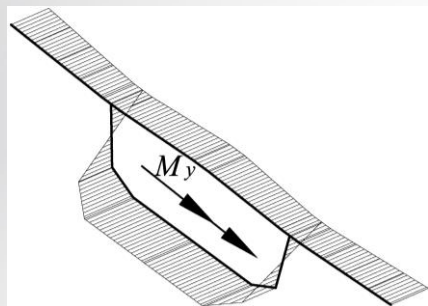
$$q_b^u = M^u \frac{J_{db}}{J_{dk} + J_{db}} \cdot \frac{R}{J_{db}}$$

$$q^r = \frac{M^r}{J_\phi} \bar{S}_\phi$$

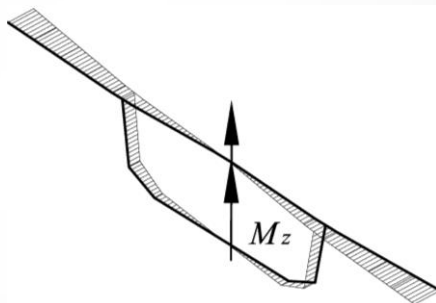
$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} z + \frac{M_z}{I_z} y + \frac{B_\phi}{J_\phi} \phi$$

$$\tau = \tau_M + \tau_k^u + \tau_b^u + \tau^r$$

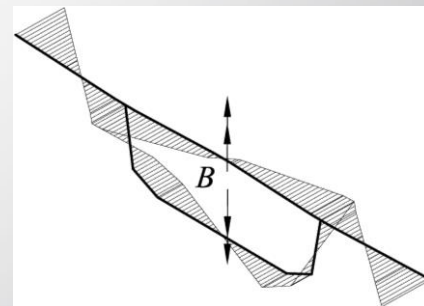
7自由度的输出内容



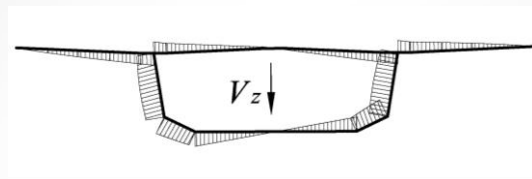
弯曲正应力 (M_y)



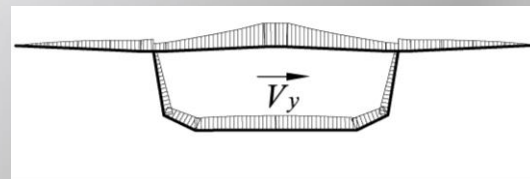
弯曲正应力 (M_z)



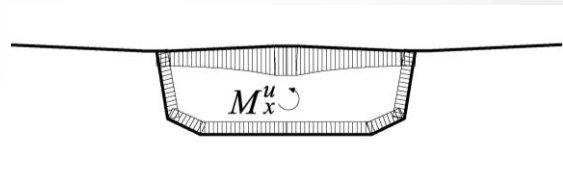
翘曲正应力



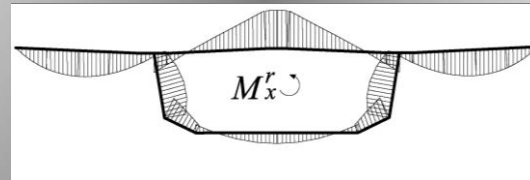
弯曲剪应力 (v_z)



弯曲剪应力 (v_y)



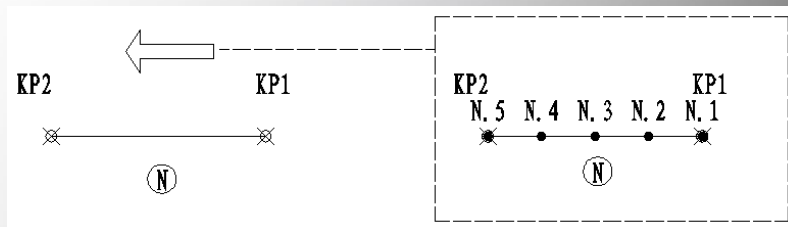
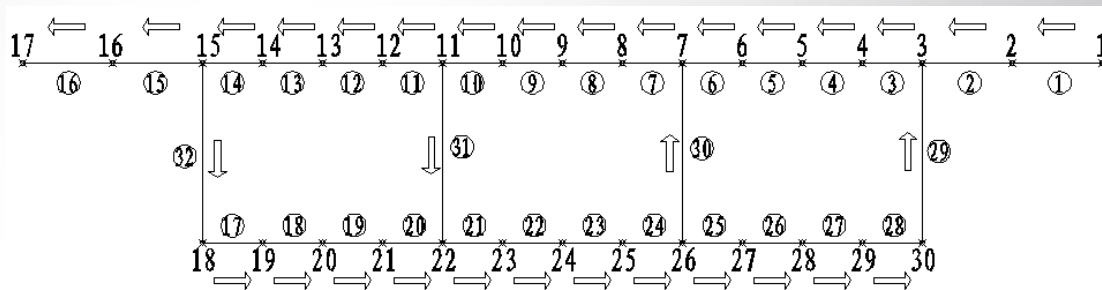
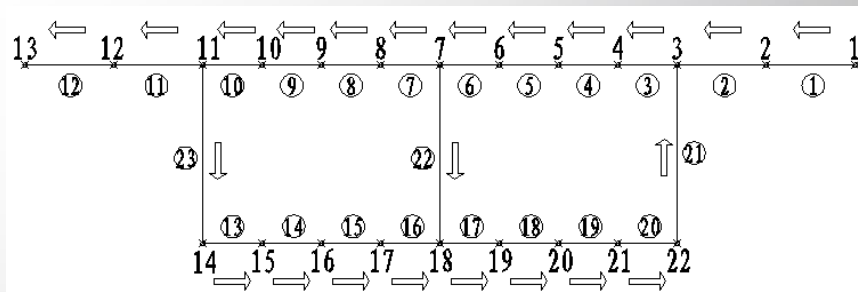
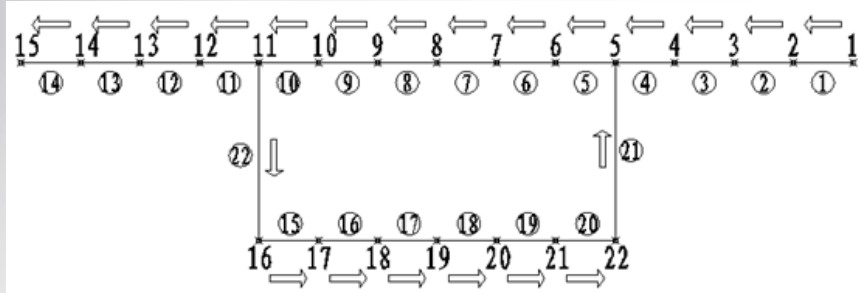
自由扭转剪应力(M_x^u)



约束扭转剪应力(M_x^r)

7自由度分析截面类型

单箱单室、双室及三室7自由度截面框架示意图



7自由度的输出内容

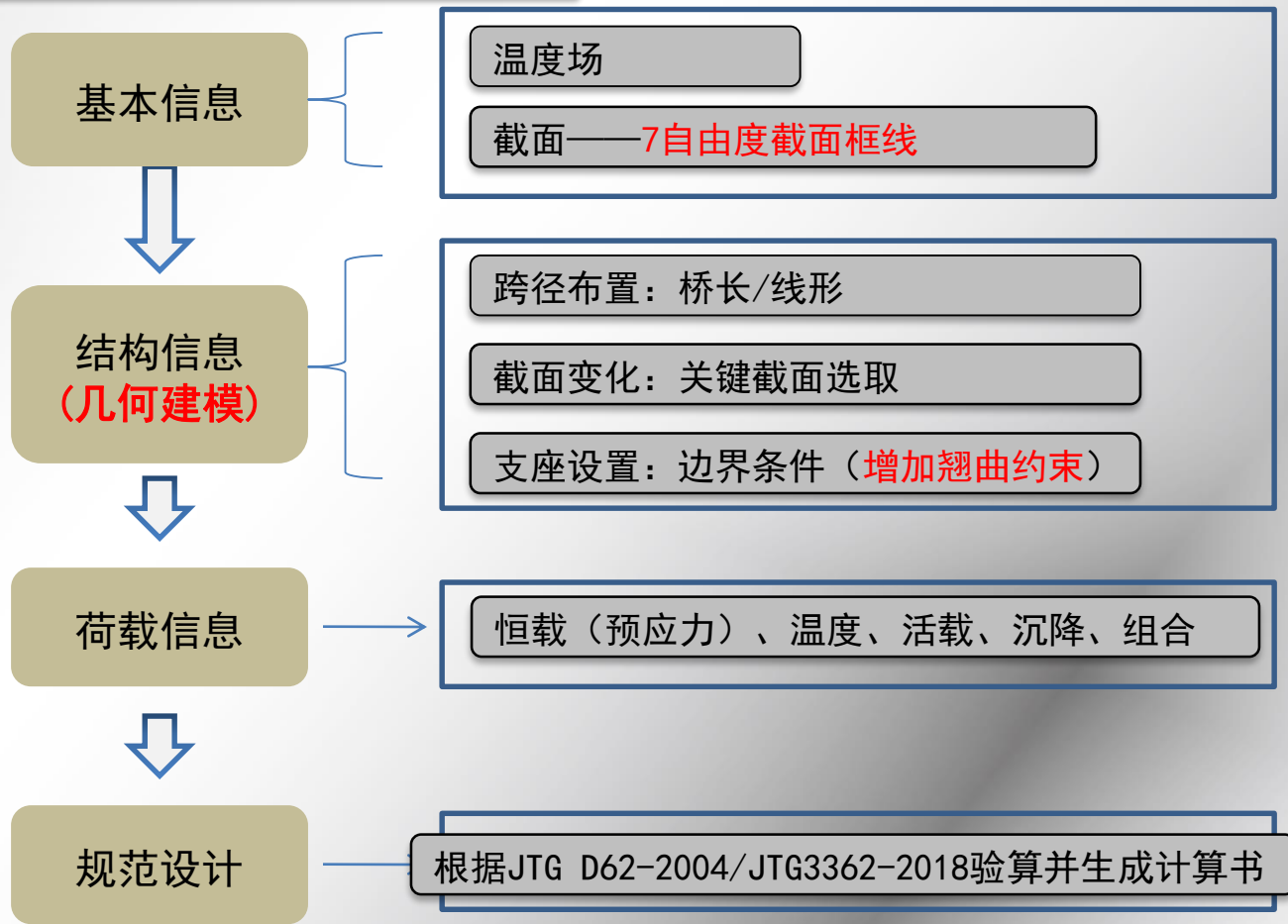
分项	输出内容	备注
内力	F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 、BI、MIU、MIR	BI: 双力矩 MIU: 自由扭转扭矩 MIR: 约束扭转扭矩
应力	正应力 剪应力 主应力	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 全截面应力 ➤ 一般应力图 ➤ 框架应力 ➤ 应力云图
放大系数	正应力放大系数 剪应力放大系数	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 恒载 ➤ 活载

7自由度与6自由度的区别

对比项	六自由度		七自由度	
	可计算项	计算位置	可计算项	计算位置
内力	1、弯矩		1、弯矩	
	2、剪力		2、剪力	
	3、扭矩		3、扭矩	
	4、轴力		4、轴力	
			5、自由扭转扭矩 6、约束扭转扭矩 7、约束扭转双力矩	
正应力	1、弯曲正应力	任意指定点	1、弯曲正应力 2、翘曲正应力	全截面 全截面
剪应力	1、弯曲剪应力	腹板	1、弯曲剪应力	全截面
	2、扭转剪应力	任意指定点	2、自由扭转剪应力	全截面
			3、约束扭转剪应力	全截面

7自由度分析建模

单梁分析



WISEPLUS7自由度建模流程图

7自由度分析建模

The screenshot displays the WISEPLUS software interface for creating a 7-degree-of-freedom frame model for a concrete box girder. The main window shows a 3D wireframe model of the girder section with nodes and elements defined. A secondary window, titled '7自由度框架' (7-degree-of-freedom frame), provides detailed configuration options for the frame type and dimensions.

7自由度框架配置窗口 (7-degree-of-freedom frame configuration window):

- 箱梁类型 (Box girder type):** 单箱单室 (Single box, single chamber), 单箱双室 (Single box, double chamber), 单箱三室 (Single box, three chambers).
- 对称截面 (Symmetrical section):** 勾选 (checked).
- 顶板框架点划分坐标 (Top slab frame point division coordinates):**
 - UX1=6, UX2=6, UX3=7, UX4=6, UX5=9, UX6=1.4, UX7=2.4, UX8=1.4, UX9=9, UX10=1.6, UX11=7, UX12=1.4, UX13=, UX14=, UX15=, UX16=.
- 底板框架点划分坐标 (Bottom slab frame point division coordinates):**
 - BX1=3.4, BX2=6, BX3=4.2, BX4=5, BX5=, BX6=, BX7=, BX8=, BX9=, BX10=, BX11=, BX12=.
- 其他参数 (Other parameters):** 顶板相对横量 (Top slab relative width) 1, 底板相对横量 (Bottom slab relative width) 1, 腹板厚度变化 (Web thickness change) 勾选.

截面计算特性 (Section calculation characteristics):

截面面积 (m ²)	2.361E+01
真实面积 (m ²)	2.361E+01
Ω (m ²)	
I _x (m ⁴)	2.706E+02
I _y (m ⁴)	2.992E+02
I _x (m ⁴)	2.061E+02

角点与形心距离 (Corner and centroid distances):

z左 (m)	4.641E+00	z右 (m)	4.881
z左 (m)	-4.769E+00	z右 (m)	-4.769
y左 (m)	-6.012E+00	y右 (m)	5.988
y左 (m)	-3.512E+00	y右 (m)	3.488

七自由度框架的建立 (混凝土箱梁)

混凝土桥梁智能化设计

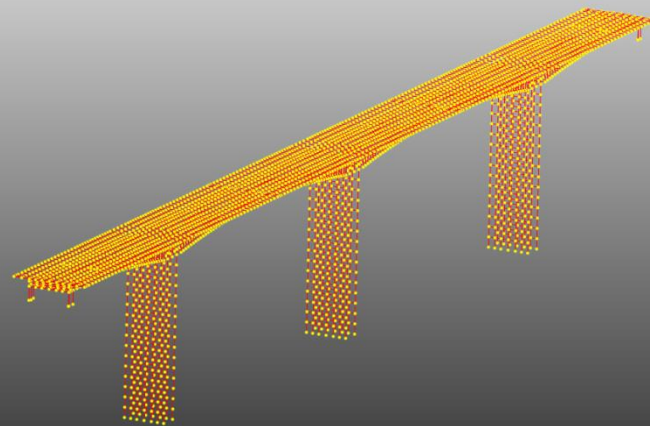
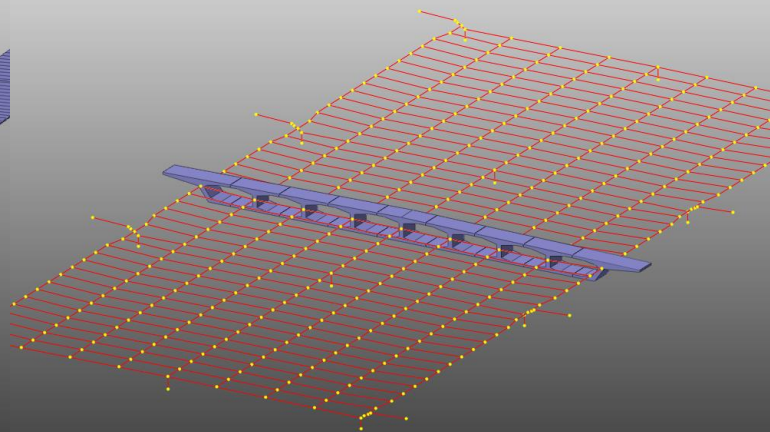
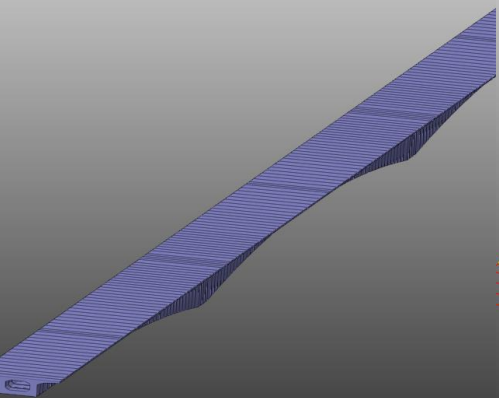
基本信息
(跨径、线形)

结构信息
(混凝土顶底板、加腋)

施工
(一次落架、悬拼)

荷载
(温度、沉降、活载)

一键式建模



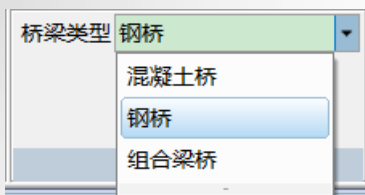
6DOF/ **7DOF** 单梁模型

折面梁格模型

空间网格模型

一键式计算书 (新混凝土规范精细化分析)

钢箱梁7自由度分析



8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于简支或连续钢箱梁桥设计。

8.1.2 应采取措施防止钢箱梁在制作、运输、安装架设和运营阶段的过大变形或丧失稳定。

8.1.3 钢箱梁应设置进入箱内的检修通道和排水孔。

8.1.4 钢箱梁剪应力计算应考虑扭转的影响。

8 钢箱梁

8.1 一般规定

8.1.2 受运输、安装架设条件的限制，钢箱梁尺寸不宜过大，应该尽可能避免将钢箱梁划分为开口断面的运输、安装架设单元。钢箱梁在制作、运输、安装架设过程中的受力往往与成桥运营阶段不同，构件设计应该考虑施工阶段的受力，特别是集中力的作用。结构应该有足够的刚度避免运营阶段的过大变形和失稳。

8.1.3 为便于钢箱梁的制作和维护，通常钢箱梁内部横隔板应设置人孔。钢箱梁不能完全封闭时，由于结露等影响箱内可能积水，应设置排水孔将积水排出箱梁。当箱梁尺寸很小箱内不能设置检修通道时，箱内的防腐寿命应该达到结构使用期的要求；为延缓钢材的腐蚀，不能设置检修通道的箱梁应完全封闭。

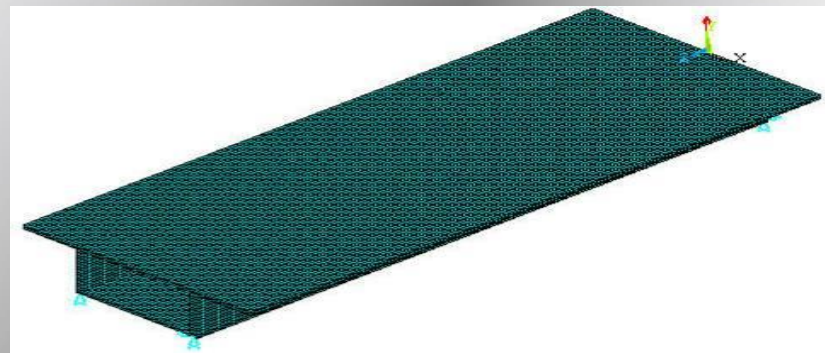
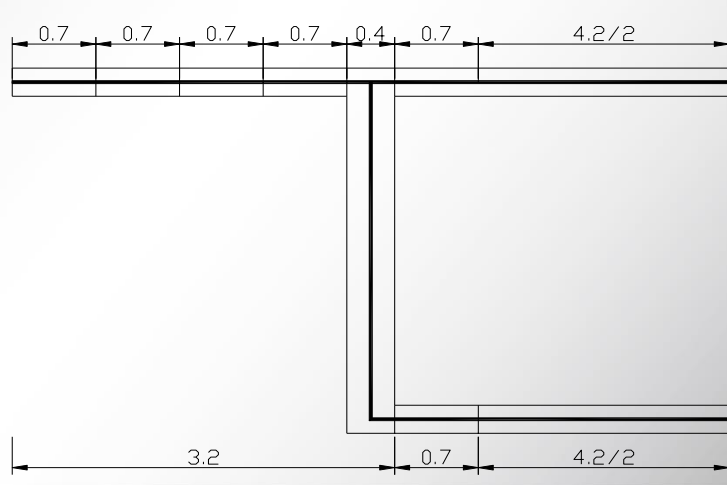
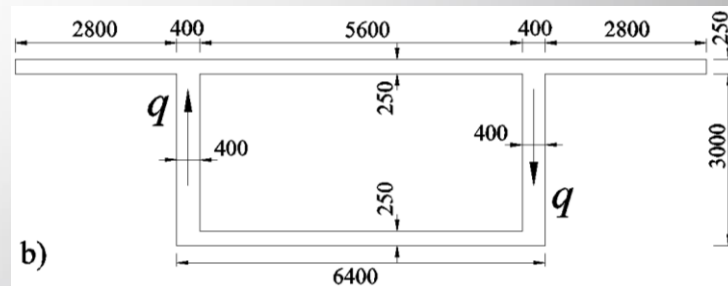
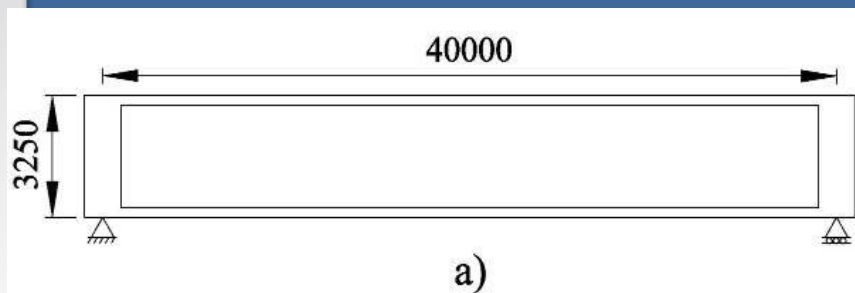
8.1.4 通常钢箱梁的约束扭转剪应力较小，可以忽略不计，仅计算自由扭转剪应力。但是弯梁或高宽比很大（或很小）的箱梁等不应忽略约束扭转剪应力的影响。



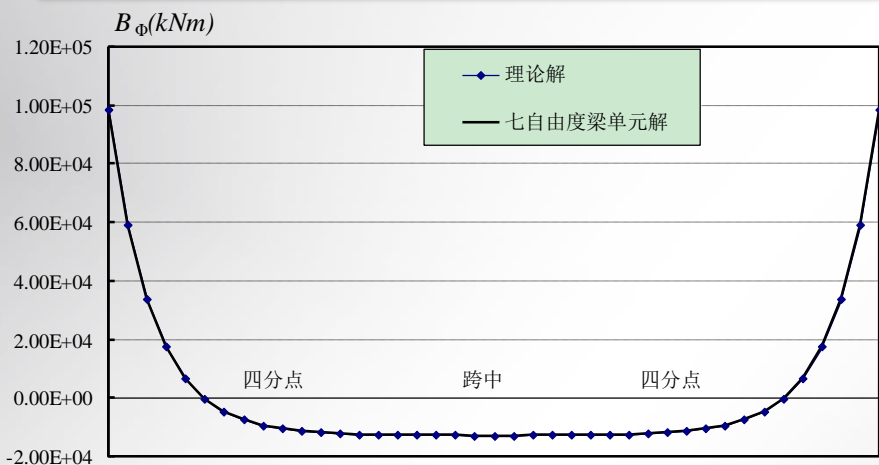
7DOF/理论解/实体对比

工程概况：某单箱单室简支梁桥，跨径40m，梁宽11m，梁高3m。

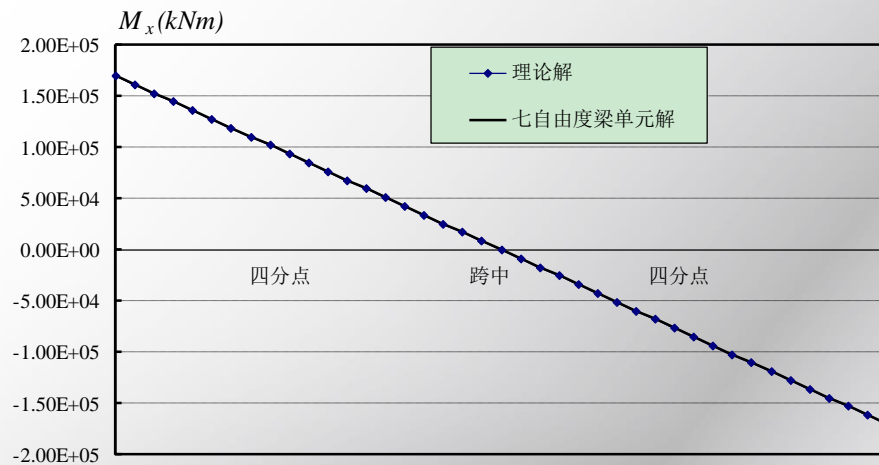
ANSYS中Beam188单元默认为六自由度单元，需要通过设置单元选项将其设置为七自由度单元（考虑翘曲变形）。



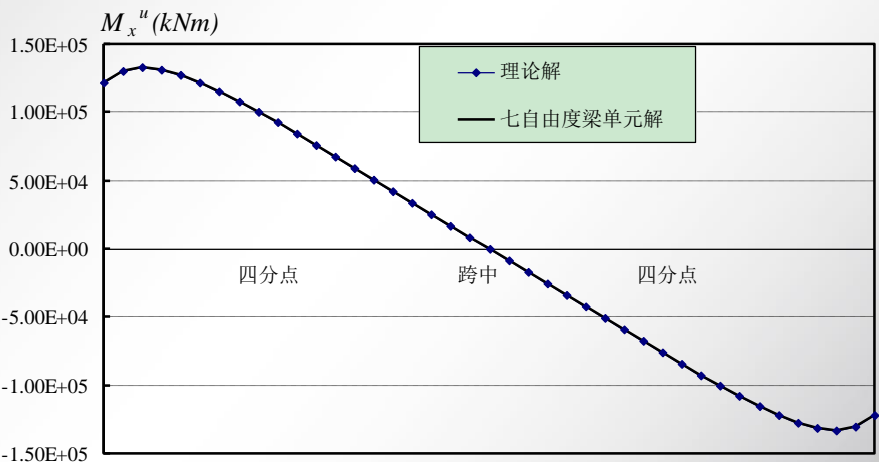
7DOF/理论解/实体对比



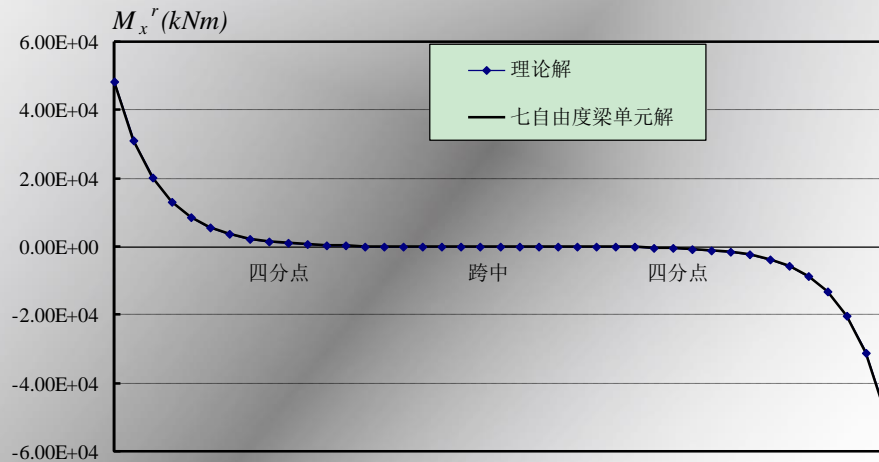
翘曲双力矩对比图



截面总扭矩对比图

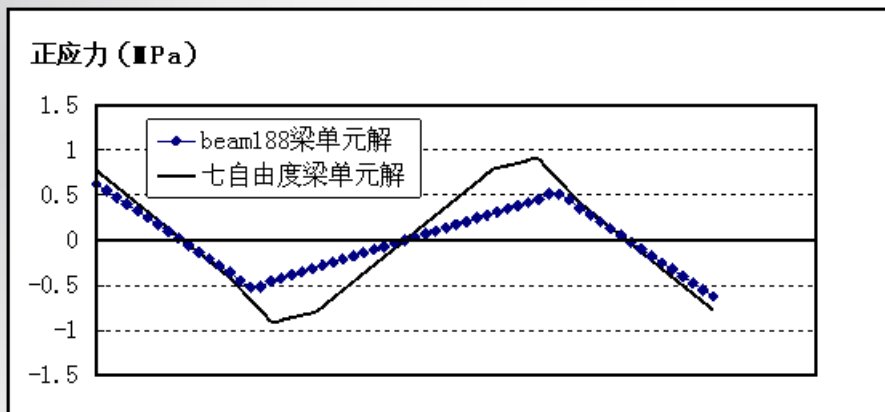


自由扭转扭矩对比图

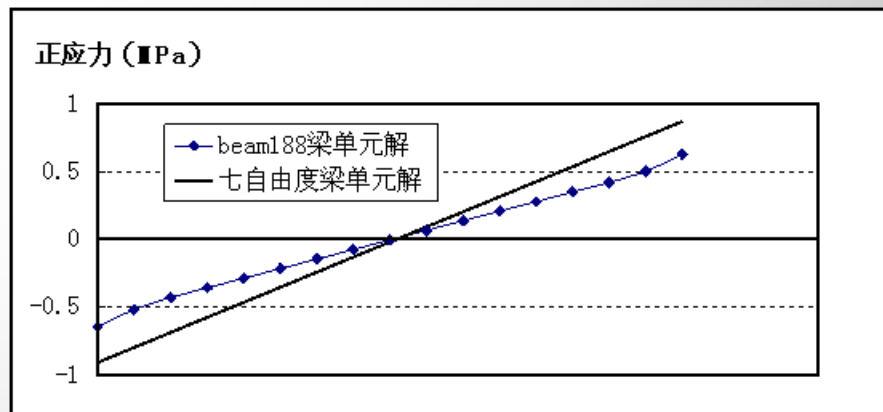


约束扭转扭矩对比图

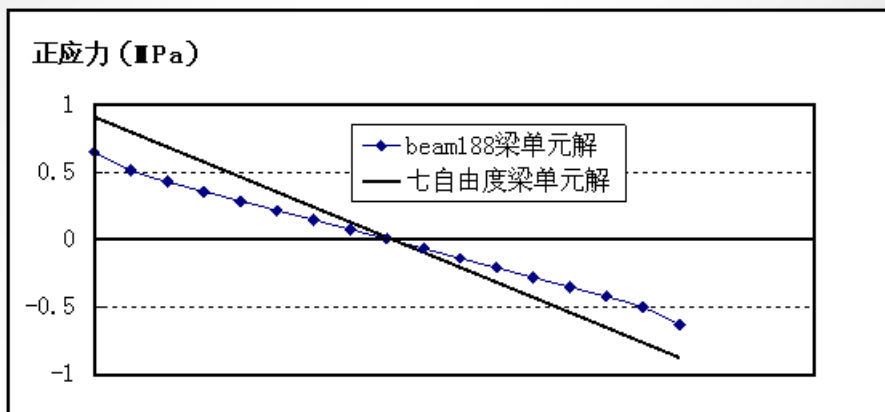
7DOF/理论解/实体对比



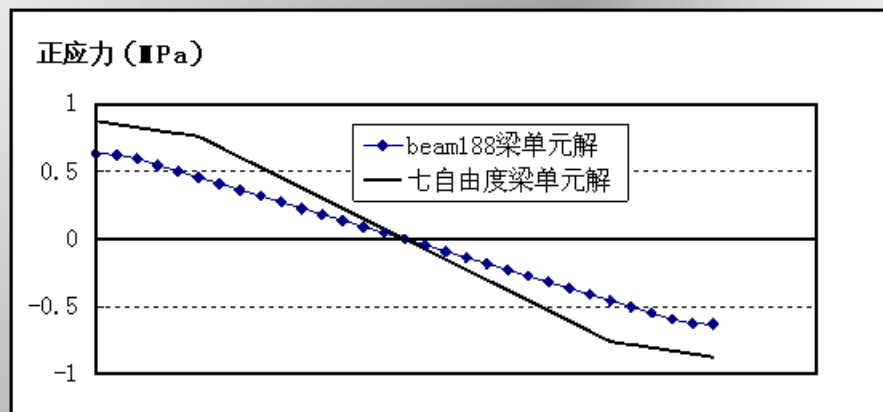
距梁端部4m处截面顶板正应力对比



距梁端部4m处截面左侧腹板正应力对比

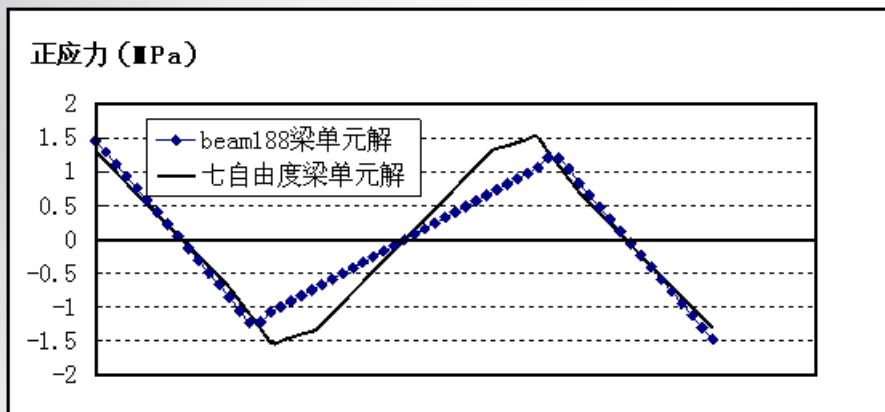


距梁端部4m处截面右侧腹板正应力对比

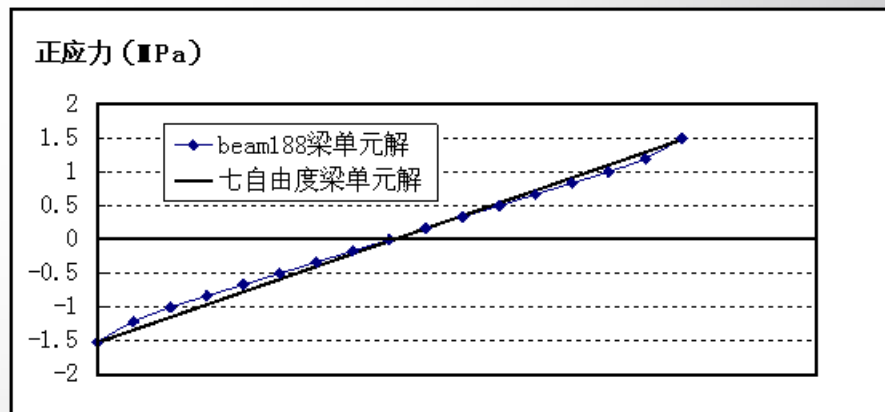


距梁端部4m处截面底板正应力对比

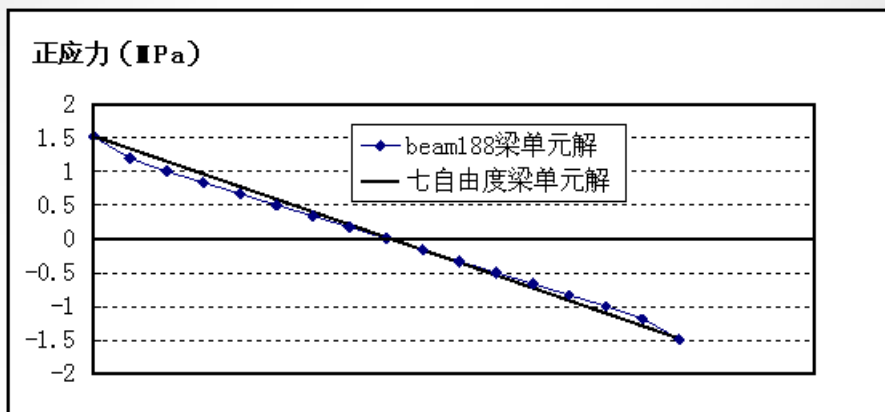
7DOF/理论解/实体对比



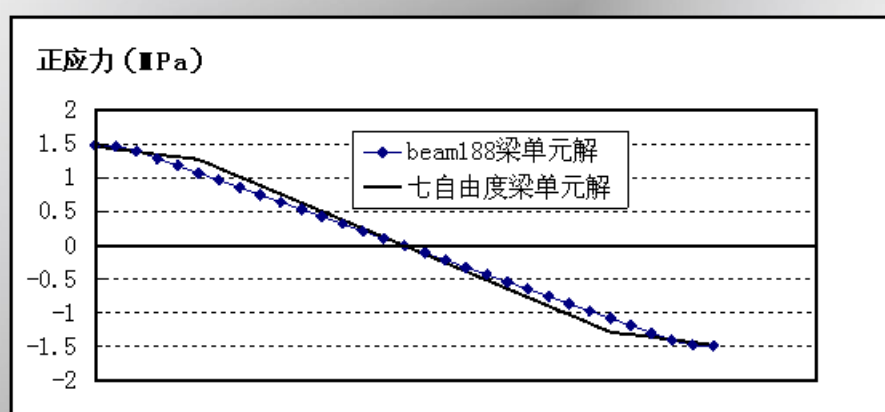
左四分点截面顶板正应力对比



左四分点截面左侧腹板正应力对比

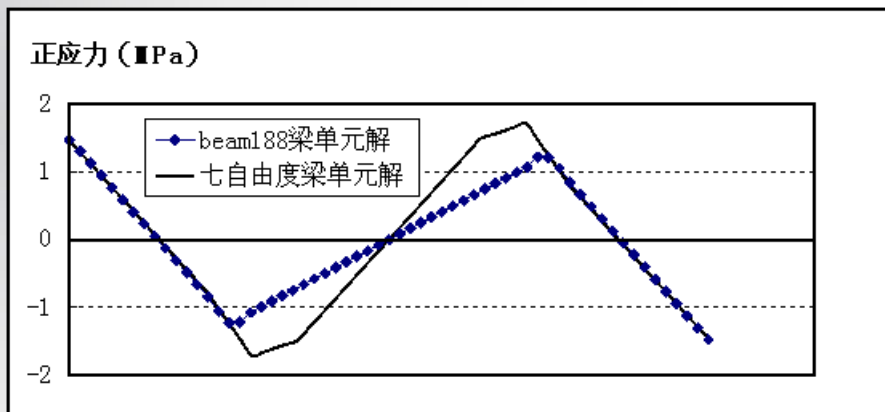


左四分点截面右侧腹板正应力对比

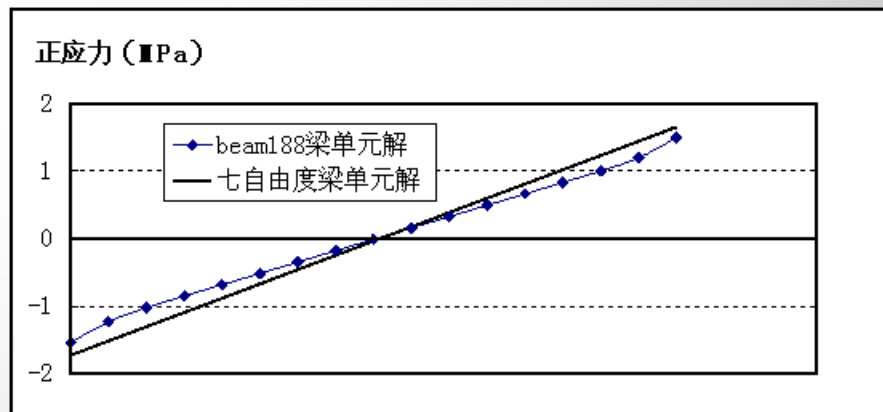


左四分点截面底板正应力对比

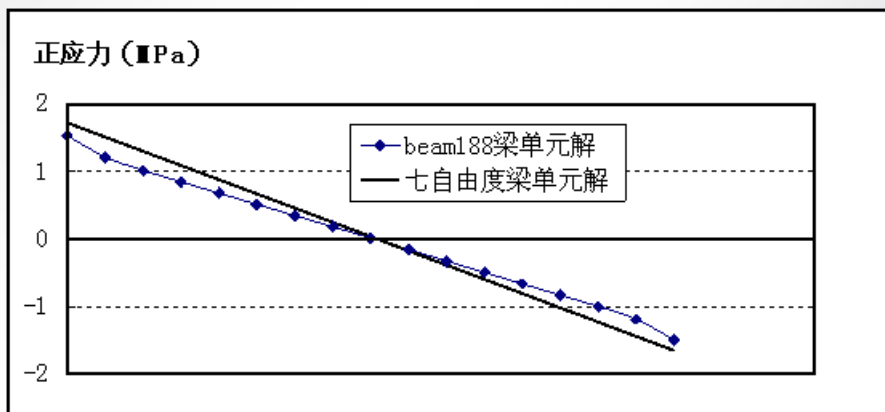
7DOF/理论解/实体对比



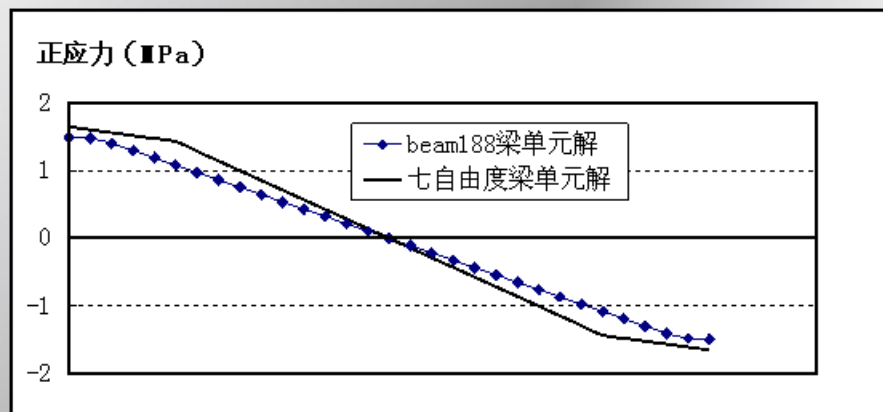
跨中截面顶板正应力对比



跨中截面左侧腹板正应力对比

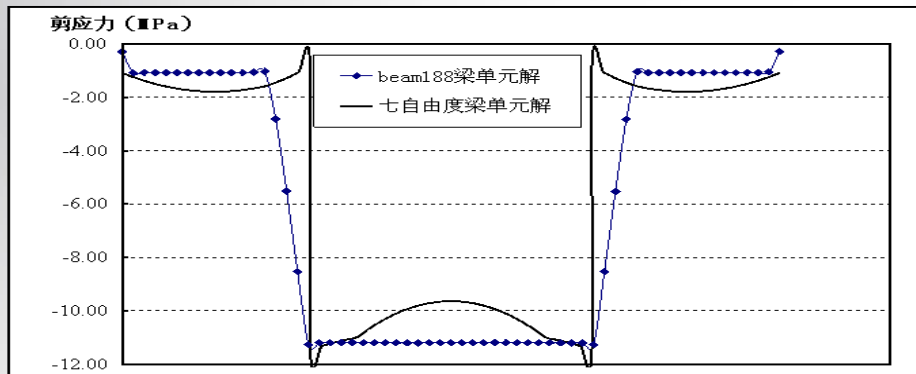


跨中截面右侧腹板正应力对比

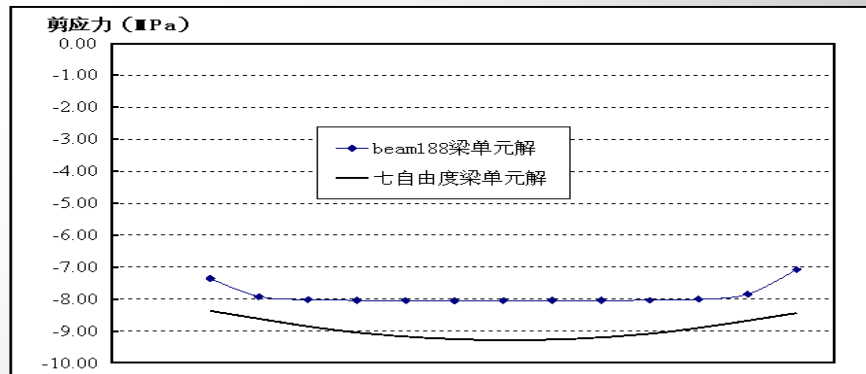


跨中截面底板正应力对比

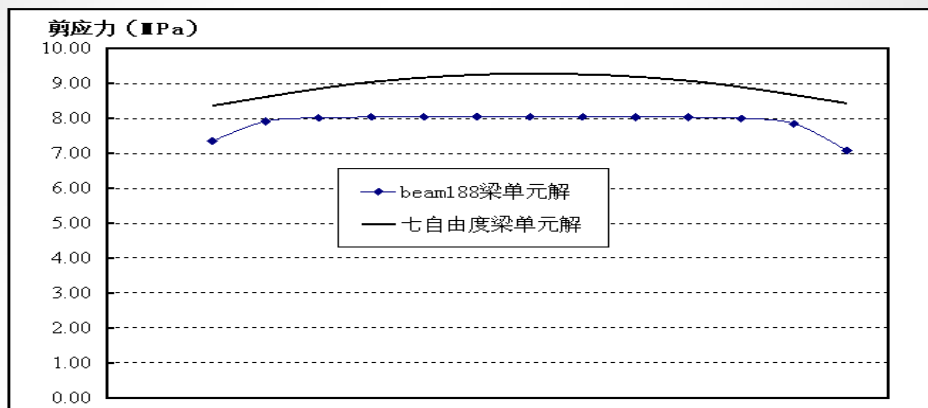
7DOF/理论解/实体对比



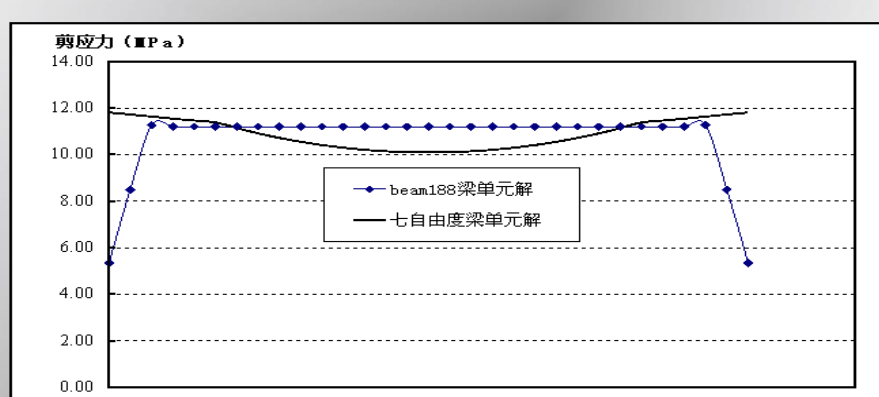
距梁端部4m处截面顶板剪应力对比



距梁端部4m处截面左侧腹板剪应力对比

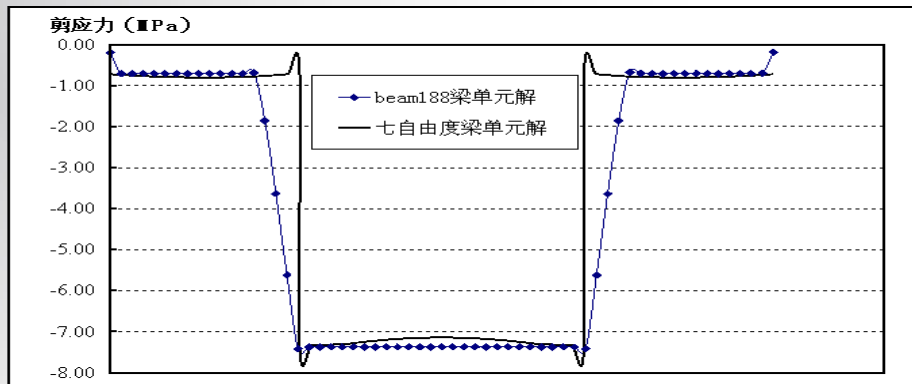


距梁端部4m处截面右侧腹板剪应力对比

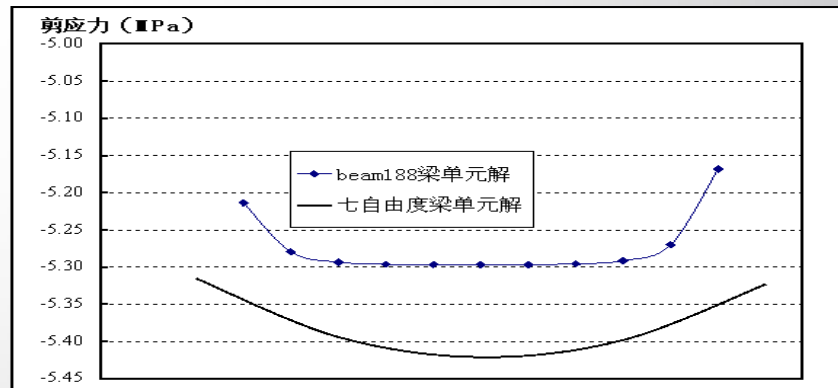


距梁端部4m处截面底板剪应力对比

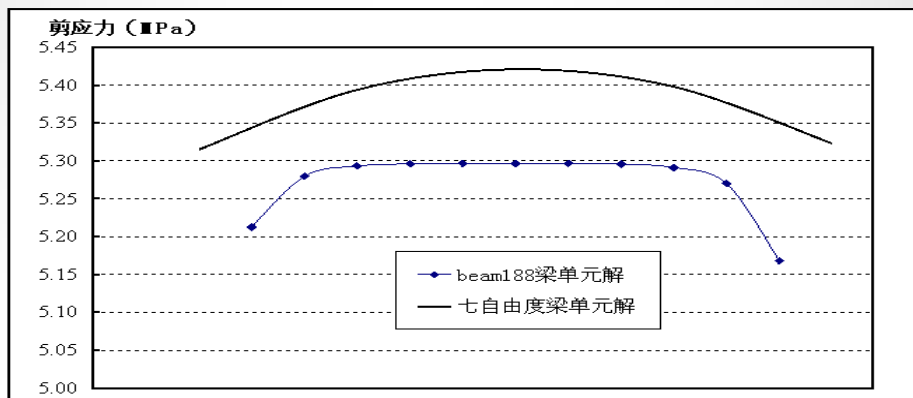
7DOF/理论解/实体对比



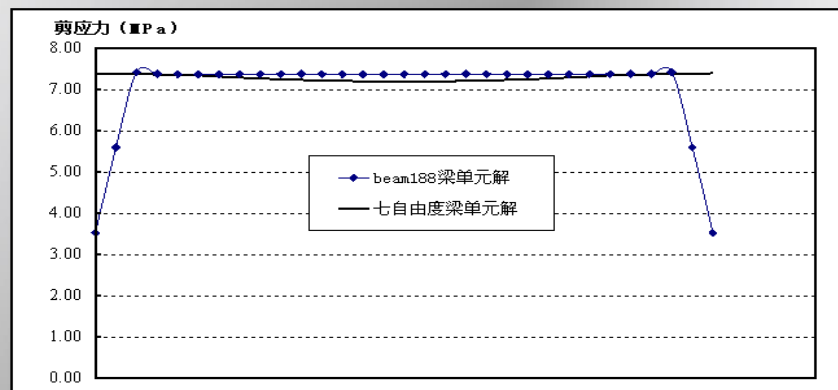
左四分点截面顶板剪应力对比



左四分点截面左侧腹板剪应力对比

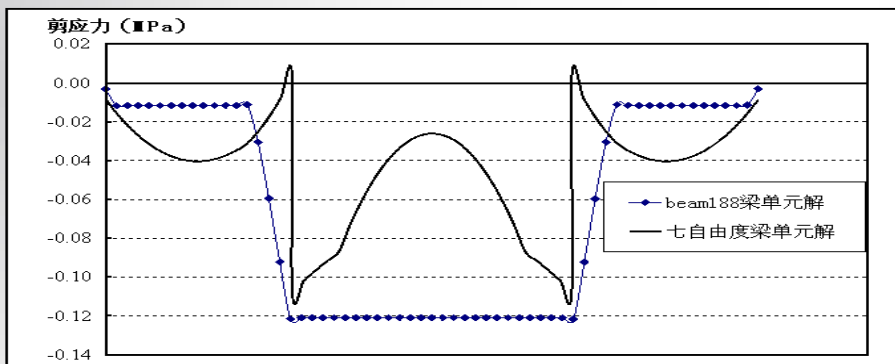


左四分点截面右侧腹板剪应力对比

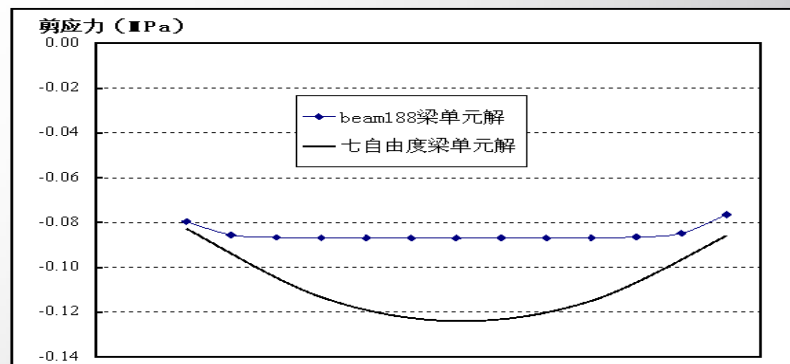


左四分点截面底板剪应力对比

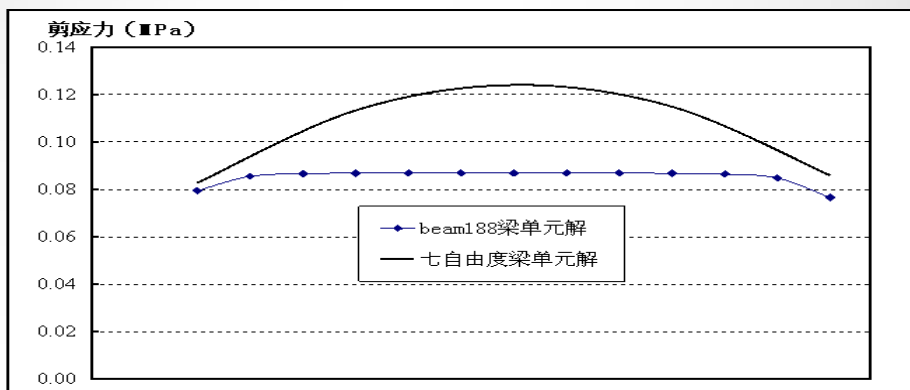
7DOF/理论解/实体对比



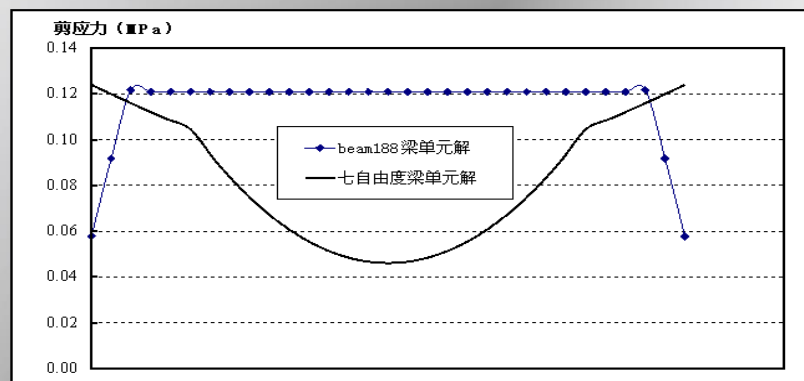
跨中截面顶板剪应力对比



跨中截面左侧腹板剪应力对比



跨中截面右侧腹板剪应力对比



跨中截面底板剪应力对比

代表性应用工程

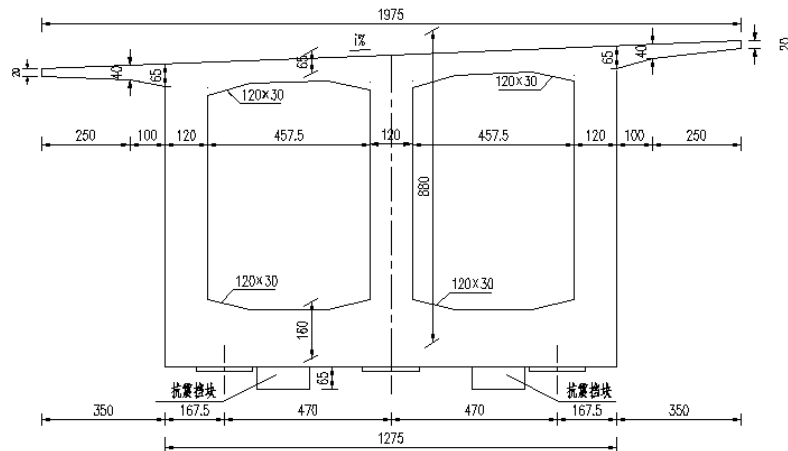
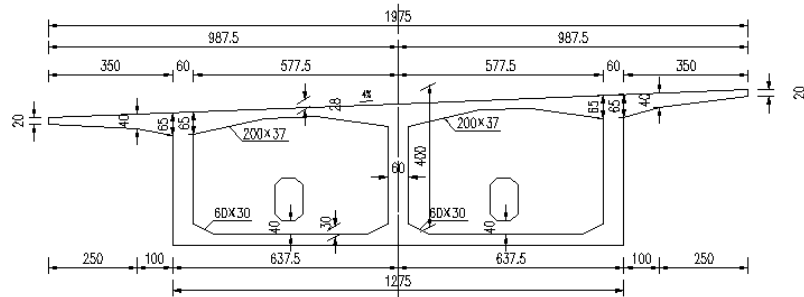
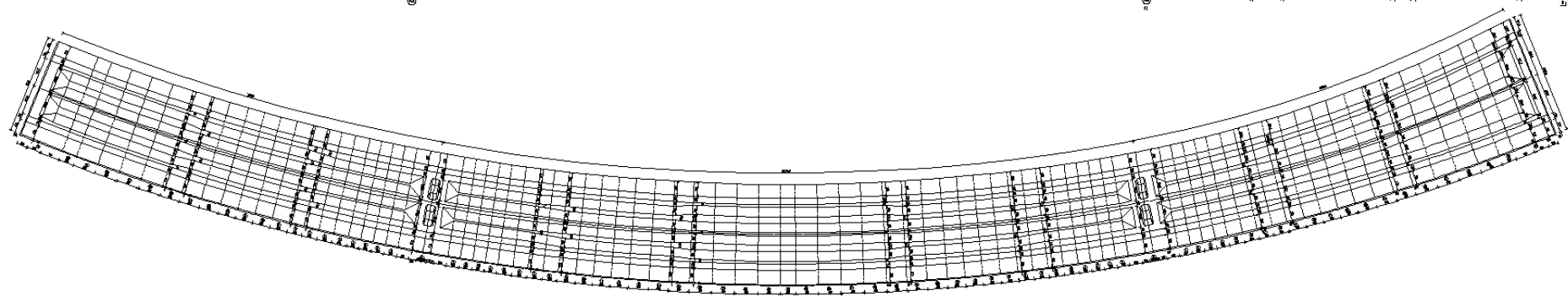
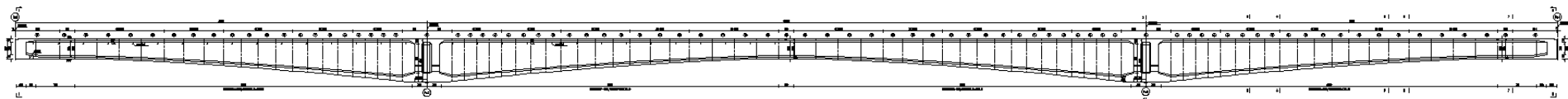
苏通大桥辅航道桥



140m+268m+140m 连续刚构桥，其跨度为同类桥梁工程世界第二。

采用慧加7DOF，对箱梁截面空间受力进行精细化分析，并依据相应放大系数进行配筋设计验算。

大跨连续梁7dof精细化分析



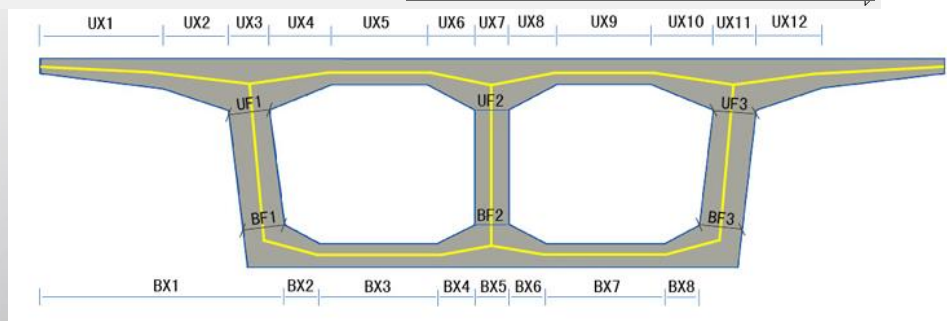
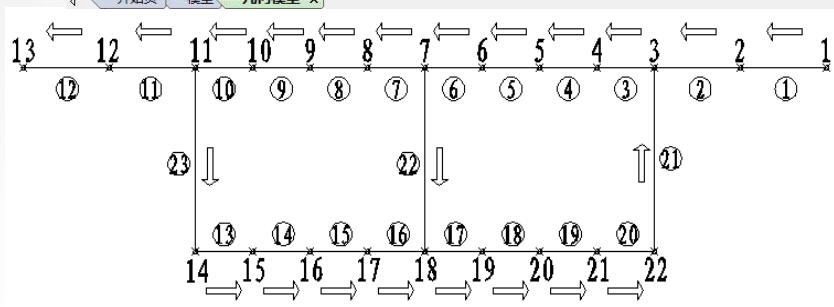
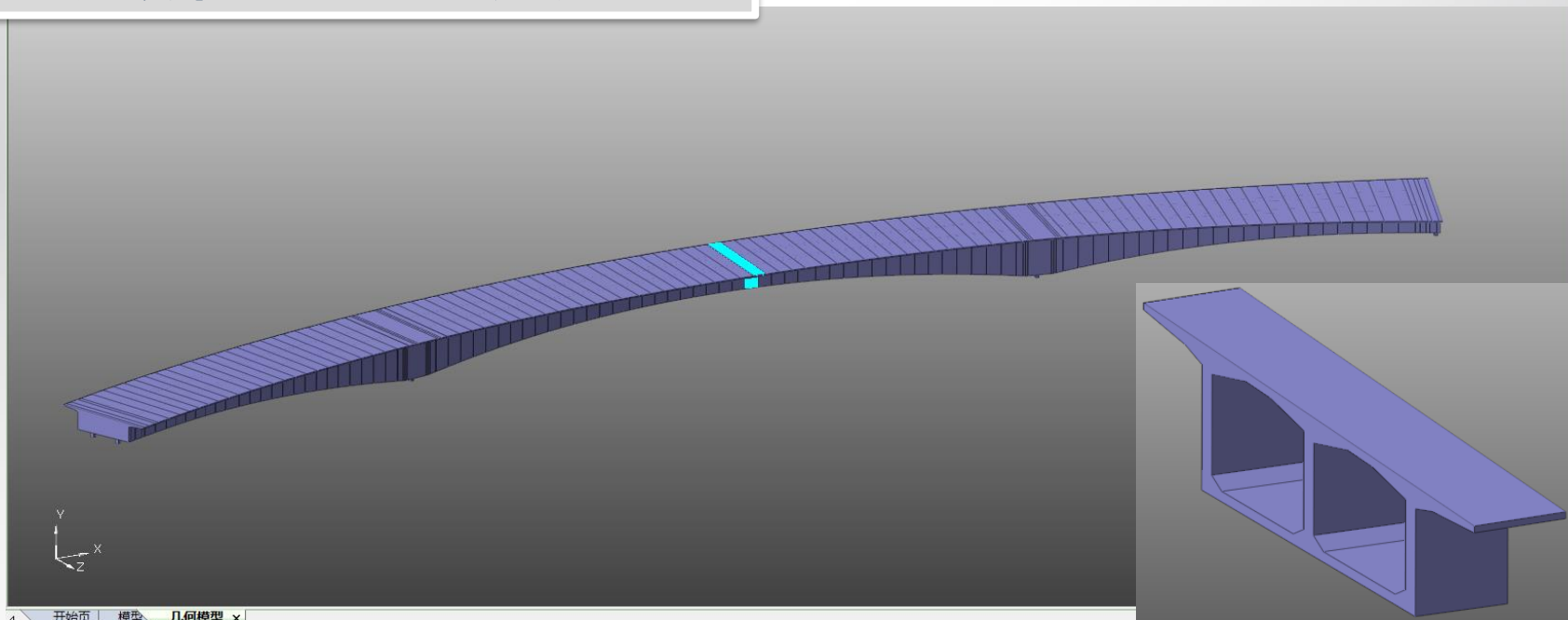
大跨连续弯箱梁

大跨连续梁7dof精细化分析

分析验算智能化

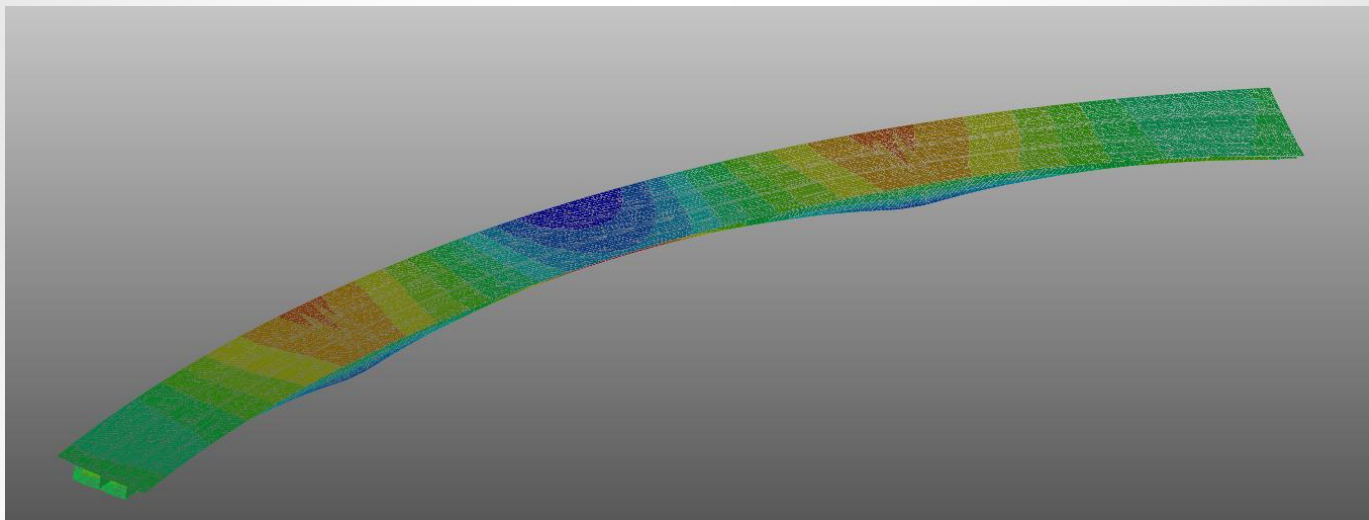
- 截面：定义关键截面、变截面组等（自动）
- 荷载：自重扭矩、二期扭矩（自动）
- 边界：横隔板、弯桥约束（自动）
- 钢筋：预应力钢束（含竖向）、普通钢筋（自动）
- 剪力滞效应：有效分布宽度（自动）
- 新规范计算书：放大系数、顶底板主应力（自动）

大跨连续梁7dof精细化分析

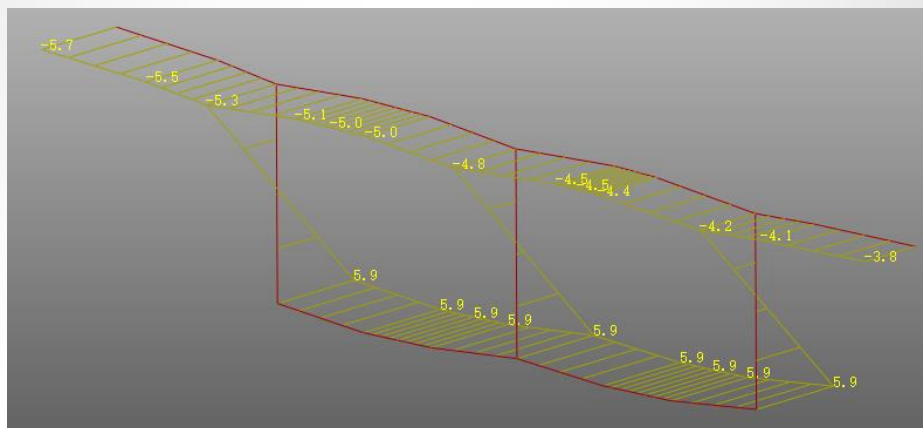


7dof模型及框架应力点定义

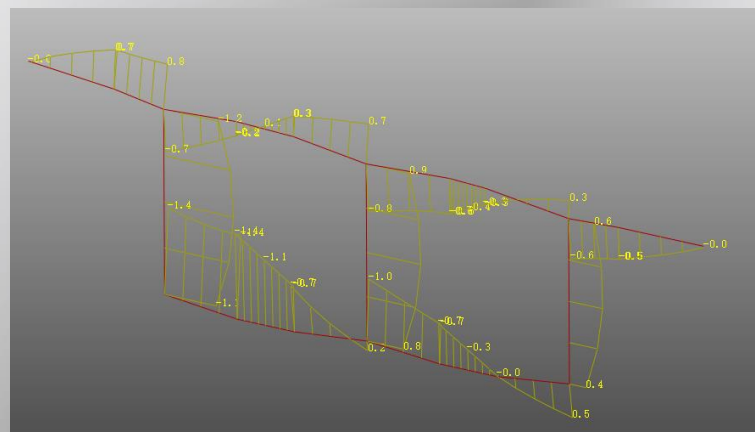
大跨连续梁7dof精细化分析



正应力云图

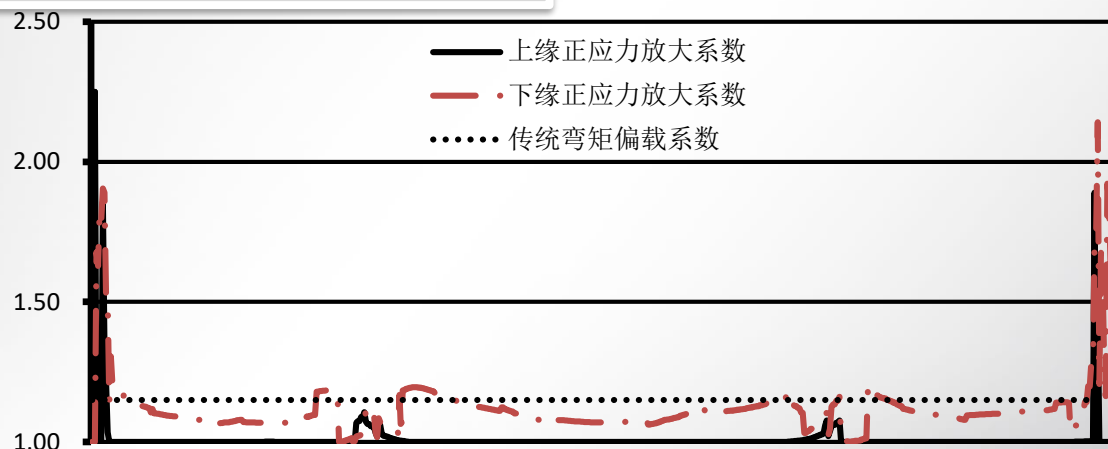


框架正应力

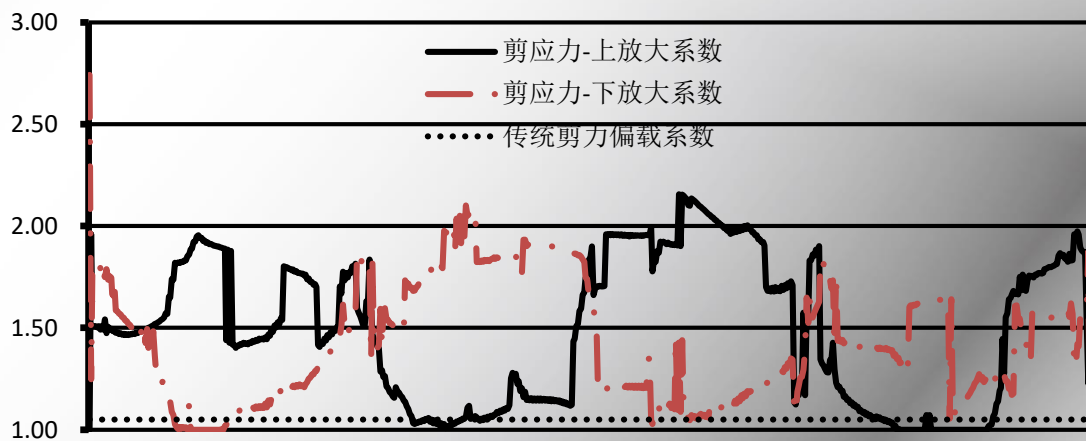


框架剪应力

大跨连续梁7dof精细化分析



正应力放大系数



剪应力放大系数

感谢您的聆听!