

慧加 WISEPLUS V4.2 新砵规版 新规范解决方案详解之抗倾覆及体外束

赵瑜

上海慧加软件有限公司

2018. 11. 29

◆ 抗倾覆计算

- 新规范内容解读
- 慧加（WISEPLUS）V4.2实现方式
- 实例演示

◆ 体外束设计

- 新规范内容解读
- 慧加（WISEPLUS）V4.2实现方式
- 实例演示

倾覆案例分析



- 整体式箱形截面，联端横向双支座（抗扭支承）+联中横向单支座（点铰支承）
- 偏心荷载作用，或结构的支承体系失效，或两者共同作用，重载车辆的偏载作用尤为突出
- 破坏无明显预兆、猝然发生、危害极大；倾覆事故后主梁、桥墩的整体性能基本保持良好

新混规内容——验算

4.1.8 持久状况下，梁桥不应发生结构体系改变，并应同时满足下列规定：

1 在作用基本组合下，单向受压支座始终保持受压状态。

2 按作用标准值进行组合时（按本规范第 7.1.1 条取用），整体式截面简支梁和连续梁的作用效应应符合下式要求：

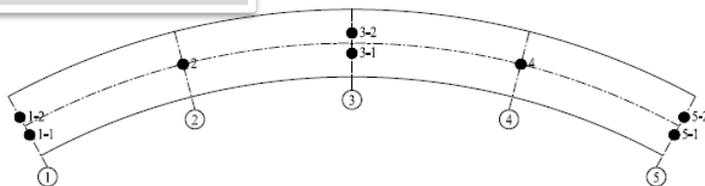
$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qf} \quad (4.1.8)$$

式中： k_{qf} ——横向抗倾覆稳定性系数，取 $k_{qf}=2.5$ ；

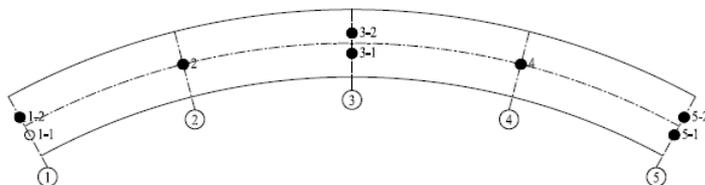
$\sum S_{bk,i}$ ——使上部结构稳定的效应设计值；

$\sum S_{sk,i}$ ——使上部结构失稳的效应设计值。

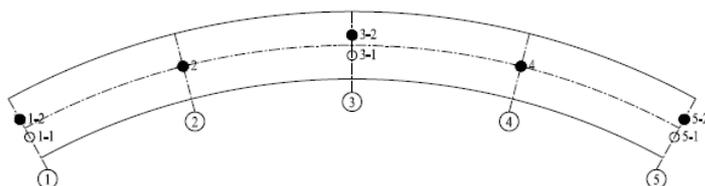
新混规内容——验算



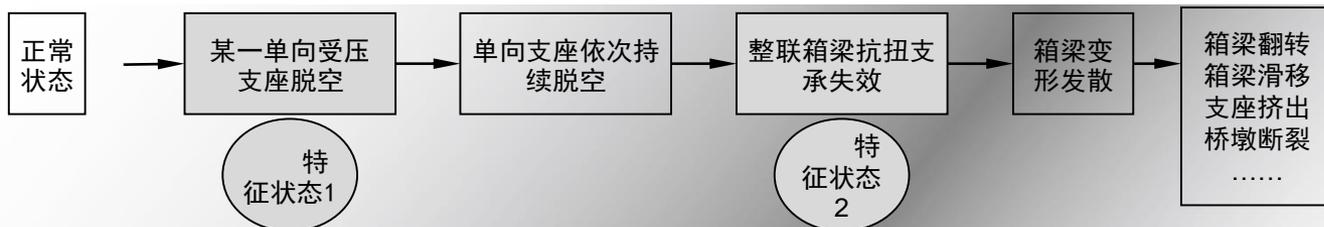
a) 处于正常状态时，全部支座处于有效状态



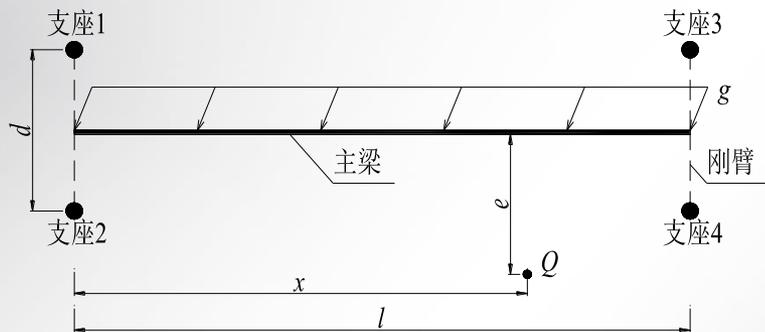
b) 处于特征状态 1 时，支座 1-1 失效，支座 1-2 仅约束扭矩



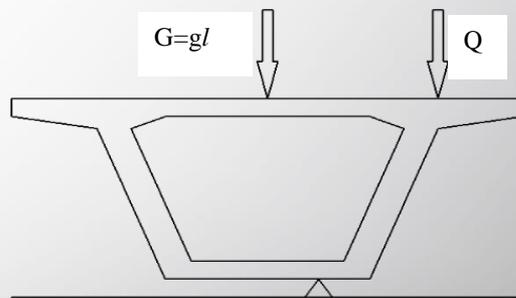
c) 处于特征状态 2 时，支座 1-1、3-1 和 5-1 失效，有效支座不能约束箱梁的扭转变形



新混规内容——验算



简支梁桥的计算模型



横向简化模型

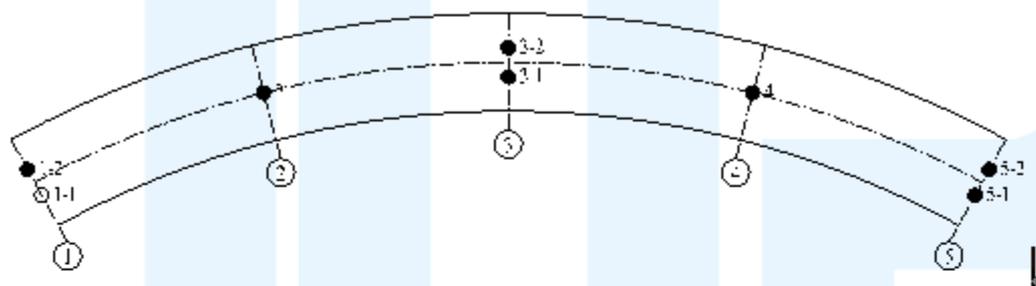
$$S_b = R_{1g} * d + R_{3g} * d = gl * d / 2$$

$$S_s = R_{1Q} * d + R_{3Q} * d = Q_u * (e - 0.5d)$$

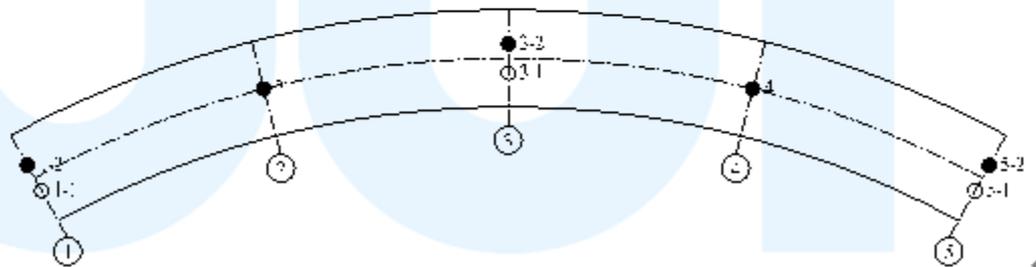
$$Q_u > gl * d / 2 / (e - 0.5d)$$

$$K_{qf} > 1$$

新混规内容——慧加

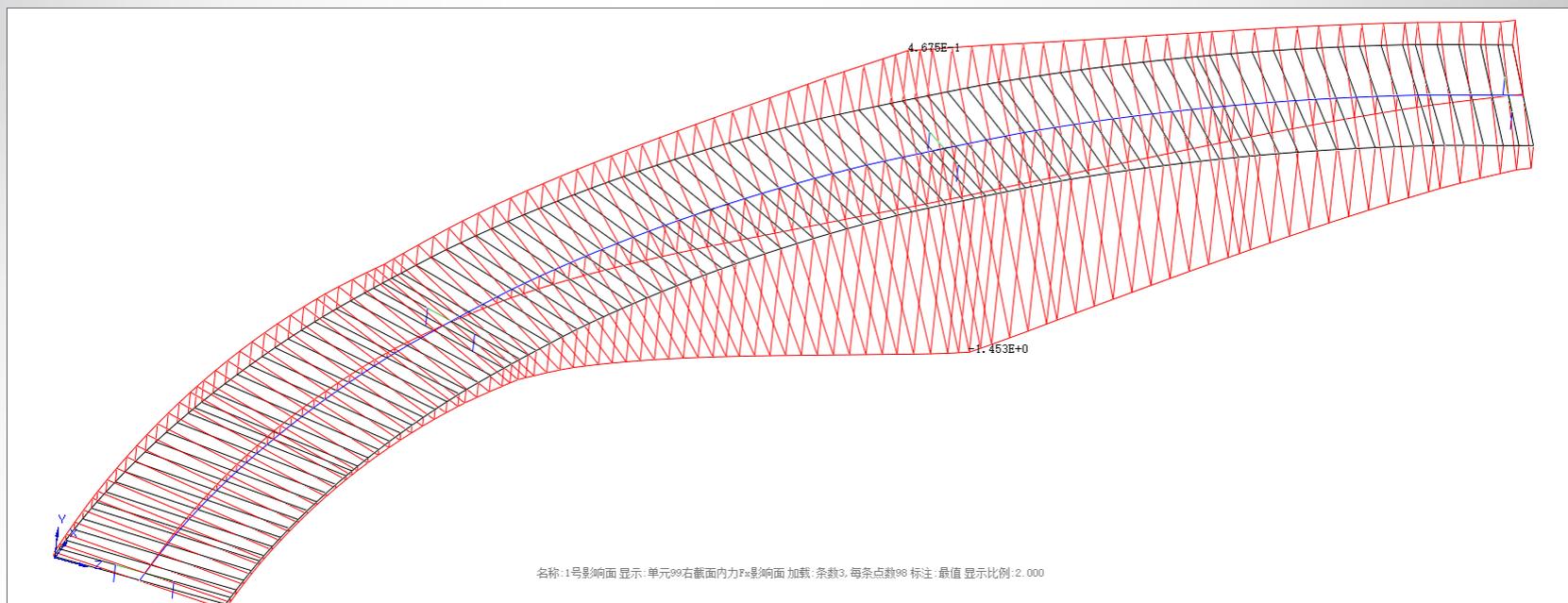


a) 支座 1-1 受力最不利



b) 支座 3-1 受力最不利

新混规内容——慧加



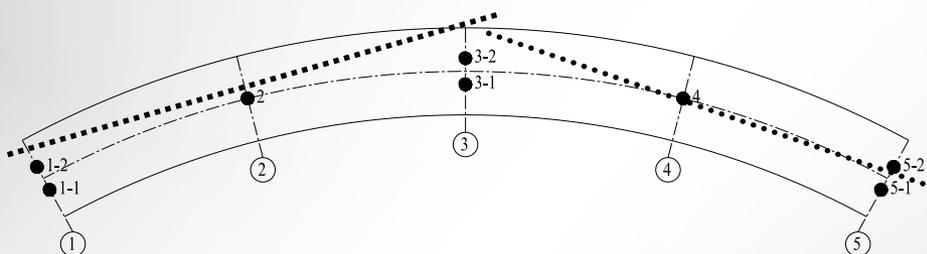
活载支座反力影响面

新混规内容——慧加

	恒载	整体温度		梯度温度		基础变位		车道荷载		人群荷载		组合	
		max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
87	-8130.07	0.15	-0.15	76.69	-153.37	275	-288.39	428.01	-1963.84	0	0	-7055.01	-12367.12
88	-24208.58	0.72	-0.72	78.82	-39.41	374.32	-368.86	196.48	-2333.86	0	0	-23544.55	-29107.53
89	-42280.34	2	-2	201.74	-100.87	497.85	-479.82	248.31	-3015.59	0	0	-41320.37	-48665.47
90	-9599.34	1.42	-1.42	103.06	-206.13	271.28	-288.33	438.22	-1761.64	0	0	-8476.68	-13488.24
91	-3536.41	0.37	-0.37	34.78	-69.57	112.27	-118.2	605.63	-1020.56	0	0	-2230.90	-5712.11
92	-37558.99	0.11	-0.11	84.95	-42.48	561.07	-552.33	228.37	-2607.16	0	0	-36731.95	-43099.41
93	-36705.66	1.46	-1.46	174.23	-87.11	495.65	-481.11	462.49	-2395.89	0	0	-35347.46	-41835.79
94	-5385.04	0.9	-0.9	55.33	-110.66	160.84	-171.24	505.67	-1023.32	0	0	-4233.23	-7636.48

支座 单元号	支座 编号	li(m)	永久作用		可变作用			
			结构 形成	基础 变位	整体 温度	梯度 温度	车道 荷载	人群 荷载
87	'1-1	4	-517.30	88.37	0.00	27.22	479.84	0
88	'1-2	0	-551.50	128.80	0.00	51.58	-679.73	0
93	'2-1	0	-3039.00	-690.80	0.00	-101.70	-798.03	0
89	'3-1	4	-1261.00	470.70	0.00	-5.80	320.89	0
90	'3-2	0	-1266.00	476.70	0.00	51.56	-759.59	0
94	'4-1	0	-3039.00	-690.80	0.00	-101.70	-294.35	0
91	'5-1	4	-517.30	88.37	0.00	27.22	172.68	0
92	'5-2	0	-551.50	128.80	0.00	51.58	-3.53	0
稳定效应 (kN*m)			-6592.64		/			
失稳效应 (kN*m)			/		4088.22			
稳定性系数			1.61					

刚体倾覆——慧加



单梁抗倾覆计算

主梁与支座		移动荷载	
主梁单元序	1-86	均布荷载	10.500000
支座单元序	(87,88,89,90),(91,92,93,94),(95,96,97,98),(99)	集中荷载	316.000000
		人群荷载	3.000000
		车荷载	...
桥面布置		人行道	
护栏		布置形 <input type="text" value="两侧人行道"/>	
布置形	<input type="text" value="两侧护栏"/>	单侧宽度	1.000000
单侧宽度	0.500000	荷载值	2.400000
荷载值	10.000000	铺装	
隔离带		布置形 <input type="text" value="桥面满铺"/>	
布置形	<input type="text" value="无隔离带"/>	荷载值	1.200000
宽度/区间	0.000000		
荷载值	0.000000		

计算

稳定力矩		倾覆力矩						
类型	计算值	冲击系数	qk	Ω	Pk	e	计算值	
自重	25815.90	车道,1	0.39	3.59	83.80	333.93	2.13	-1074.63
护栏	4985.76	车道,2	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铺装	30500.80	车道,3	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
分隔带	0.00	人群						0.00
人行道	0.00							
合计	61302.46	合计						-1074.63

倾覆安全系数=稳定力矩/倾覆力矩=57.05

新混规内容——慧加计算书

设计控制选项

计算书生成位置：
E:\慧加软件\慧加算例\W4.2 浏览

- 计算控制
 - 文件计算
 - 活载计算
- 验算控制
 - 截面调整系数
 - 持久状况承载能力极限状态计算
 - 持久状况正常使用极限状态计算
 - 持久状况预应力混凝土构件应力计算
 - 短暂状况应力计算
 - 支反力计算
 - 主梁倾覆计算**
 - 水平位移计算
 - 材料统计

文档结构图

- 1.4.2 参考书目
- 1.5 主要材料特性
 - 1.5.1 混凝土
 - 1.5.2 预应力钢束
- 1.6 模型简介
- 1.7 设计荷载及荷载组合
 - 1.7.1 设计荷载
 - 1. 施工阶段或工况
 - 2. 二期恒载
 - 3. 活载
 - 4. 沉降
 - 5. 温度效应
 - 1.7.2 荷载组合
- 1.8 计算内容
 - 上部结构验算
 - 2.1 截面调整系数
 - 2.2 混凝土单梁(全预应力)
 - 2.3 **主梁倾覆验算**
 - 2.3.1 倾覆轴线 1
 - 2.3.2 倾覆轴线 2
 - 2.3.3 倾覆轴线 3
 - 2.3.4 倾覆轴线 4
 - 2.4 主梁倾覆验算
 - 2.4.1 支座受压验算
 - 2.4.1.2 抗倾覆系数验算
 - 1、第 1 排支座最不利工况
 - 2、第 2 排支座最不利工况
 - 3、第 3 排支座最不利工况
 - 4、第 4 排支座最不利工况
 - 2.4.2 支反力计算
 - 2.6 水平位移计算
 - 2.7 小结

物理力矩

控制	计算值	恒	活	风	水	计算值
自重	8268.40	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
二期	5287.41	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
横摆	7633.93	0.35	0.00	0.00	0.00	-961.09
分属桥	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	-2387.67
人行道	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合计	219.44	0.00	0.00	0.00	0.00	-3229.72

倾覆安全系数=物理力矩/恒力矩=31.28

从上表可知，主梁倾覆抗倾覆计算满足规范第 4.1.8 条第二款规定。

2.4 主梁倾覆验算

2.4.1 支座受压验算

支座位号	位置	验算温度(kN)		标准温度(kN)		基础温度(kN)		汽车荷载(kN)		人群荷载(kN)		组合(kN)	
		MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.
97	-688.81	0.26	-0.26	60.93	-30.46	25.46	-25.46	310.88	-870.07	-0.00	-0.00	-4.28	-1970.62
98	-1878.20	0.20	-0.20	355.66	-177.83	109.56	-109.56	301.34	-1141.14	-0.00	-0.00	-856.18	-2841.84
99	-1878.20	0.20	-0.20	355.66	-177.83	109.57	-109.57	301.00	-1141.14	-0.00	-0.00	-856.77	-2841.92
100	-468.81	0.26	-0.26	60.93	-30.47	25.46	-25.46	309.20	-878.88	-0.00	-0.00	-7.45	-1970.37
101	-1900.95	0.26	-0.26	89.24	-178.48	43.21	-43.21	331.93	-858.07	-0.00	-0.00	-1153.77	-3499.68
102	-3726.11	0.21	-0.21	119.05	-238.10	64.28	-64.28	309.31	-1161.34	-0.00	-0.00	-1298.16	-3738.08
103	-3726.06	0.21	-0.21	119.05	-238.10	64.28	-64.28	309.34	-1161.09	-0.00	-0.00	-1298.05	-3737.67
104	-1900.93	0.26	-0.26	89.24	-178.48	43.21	-43.21	331.70	-893.30	-0.00	-0.00	-1153.45	-3495.74

2.4.2 抗倾覆系数验算

1. 第 1 排支座最不利工况

计算结果如下表所示。

支座位号	支座位号	结构形式	永久作用		可变作用		支座位号	结构形式	支座位号	可变作用	支座位号	结构形式	支座位号	结构形式	支座位号	结构形式
			恒力矩	活力矩	恒力矩	活力矩										
101	1-1	2.00	-468.81	25.46	0.26	60.93	43.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
101	1-2	0.00	-1900.95	-0.67	-0.26	-178.48	-867.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
98	2-1	2.80	-1878.20	-89.46	-0.20	355.66	-128.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
102	2-2	0.00	-3726.11	89.45	0.21	119.05	1995.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
99	3-1	2.02	-1878.20	7.95	-0.20	355.65	18.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
103	3-2	0.00	-3726.06	27.83	0.21	-138.10	-188.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
100	4-1	1.28	-468.81	-2.88	0.26	60.93	202.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
104	4-2	0.00	-1900.93	-2.89	-0.26	-178.48	-248.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

倾覆安全系数 = 3.76

从上表可知，主梁倾覆抗倾覆计算满足规范第 4.1.8 条第二款规定。

2. 第 2 排支座最不利工况

计算结果如下表所示。

支座位号	支座位号	结构形式	永久作用		可变作用		支座位号	结构形式	支座位号	可变作用	支座位号	结构形式	支座位号	结构形式	支座位号	结构形式
			恒力矩	活力矩	恒力矩	活力矩										
101	1-1	2.00	-468.81	25.46	0.26	60.93	43.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
101	1-2	0.00	-1900.95	-0.67	-0.26	-178.48	-867.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
98	2-1	2.80	-1878.20	-89.46	-0.20	355.66	-128.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
102	2-2	0.00	-3726.11	89.45	0.21	119.05	1995.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
99	3-1	2.02	-1878.20	7.95	-0.20	355.65	18.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
103	3-2	0.00	-3726.06	27.83	0.21	-138.10	-188.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
100	4-1	1.28	-468.81	-2.88	0.26	60.93	202.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
104	4-2	0.00	-1900.93	-2.89	-0.26	-178.48	-248.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

倾覆安全系数 = 3.76

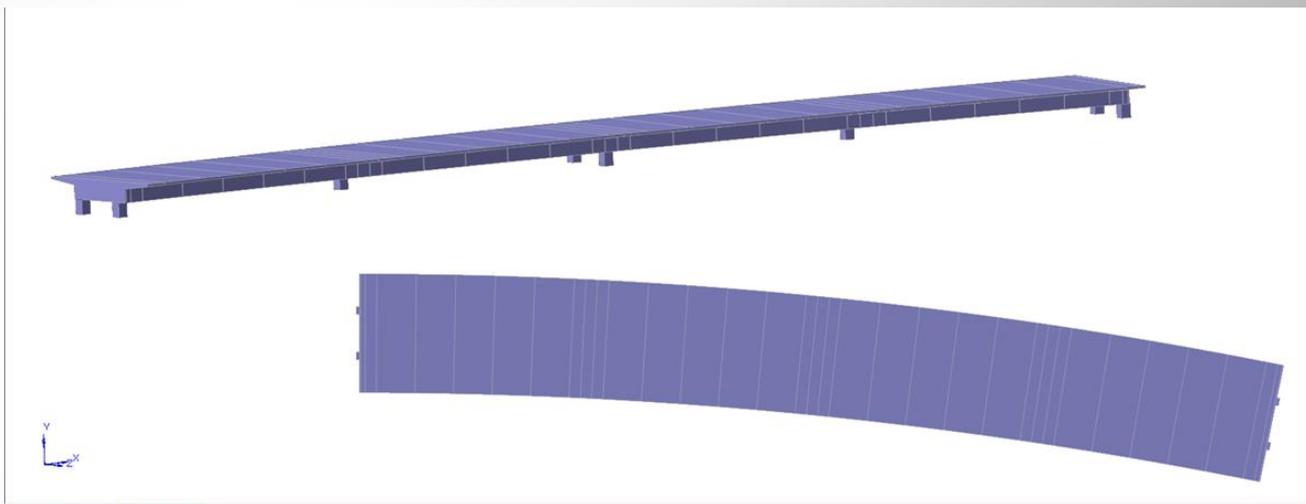
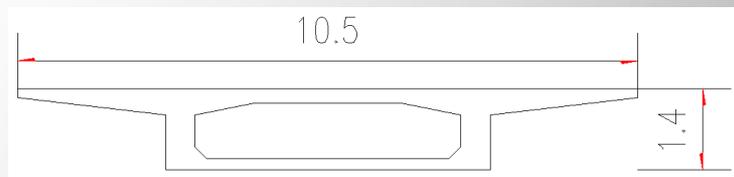
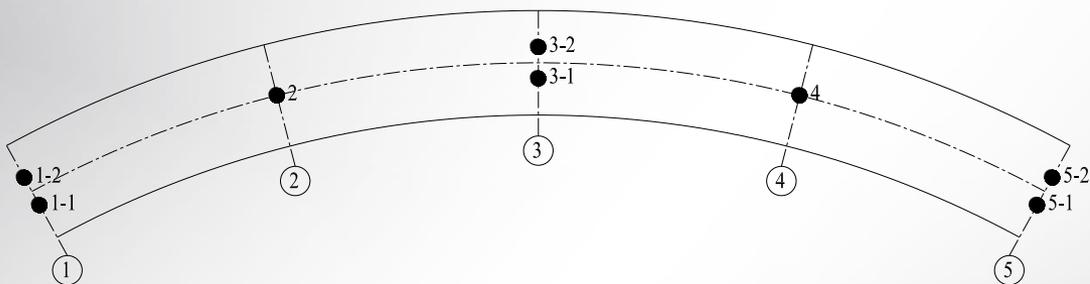
从上表可知，主梁倾覆抗倾覆计算满足规范第 4.1.8 条第二款规定。

2. 第 2 排支座最不利工况

计算结果如下表所示。

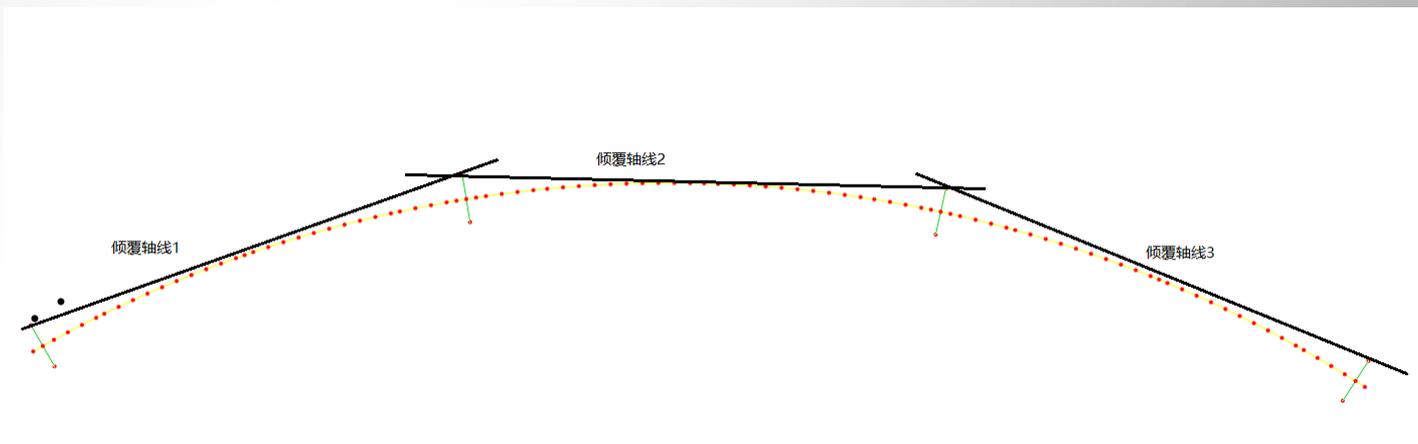
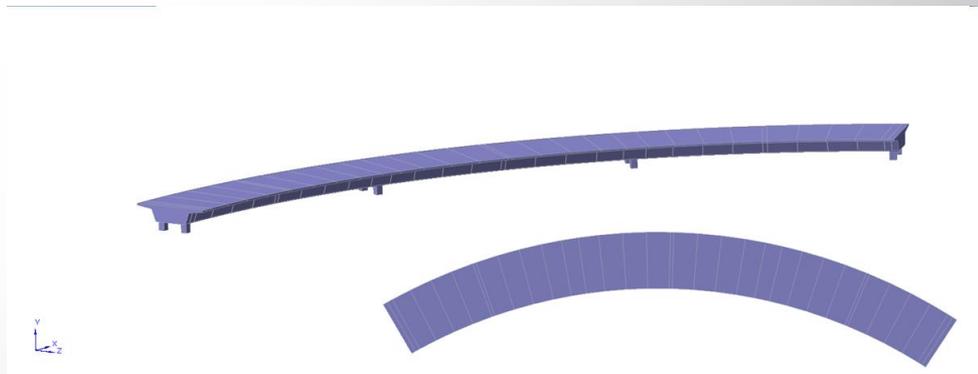
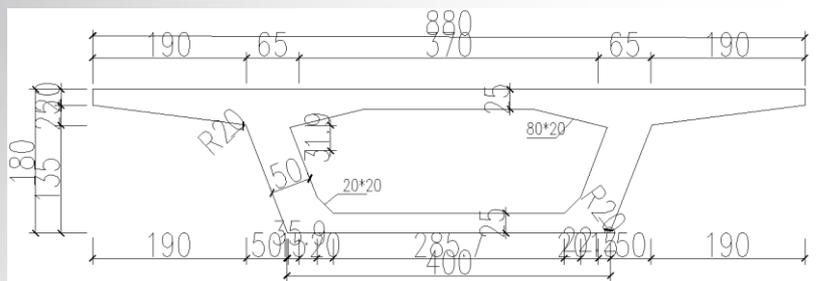
支座位号	支座位号	结构形式	永久作用		可变作用		支座位号	结构形式	支座位号	可变作用	支座位号	结构形式	支座位号	结构形式	支座位号	结构形式
			恒力矩	活力矩	恒力矩	活力矩										
101	1-1	2.00	-468.81	25.46	0.26	60.93	43.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
101	1-2	0.00	-1900.95	-0.67	-0.26	-178.48	-867.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
98	2-1	2.80	-1878.20	-89.46	-0.20	355.66	-128.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
102	2-2	0.00	-3726.11	89.45	0.21	119.05	1995.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
99	3-1	2.02	-1878.20	7.95	-0.20	355.65	18.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
103	3-2	0.00	-3726.06	27.83	0.21	-138.10	-188.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
100	4-1	1.28	-468.81	-2.88	0.26	60.93	202.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
104	4-2	0.00	-1900.93	-2.89	-0.26	-178.48	-248.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

实例分析



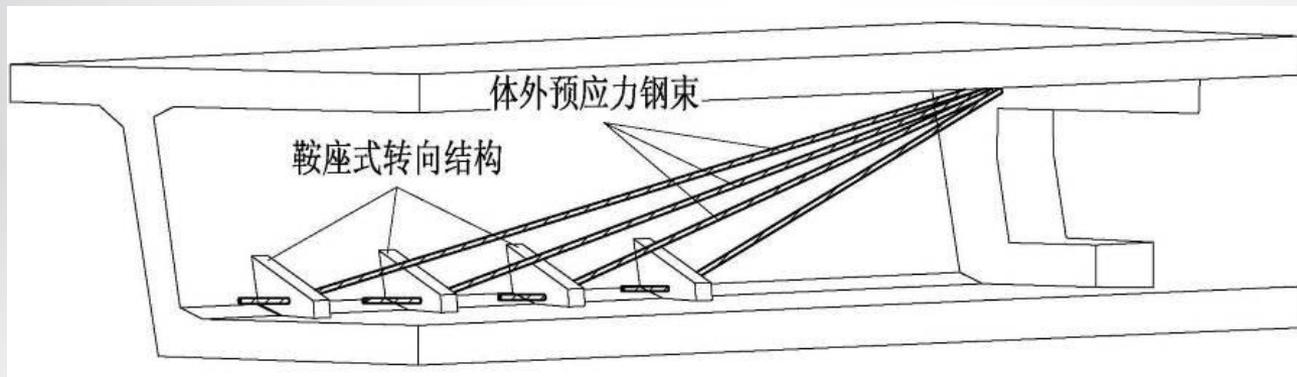
4 × 20m连续箱梁桥，曲线半径为400m

实例分析

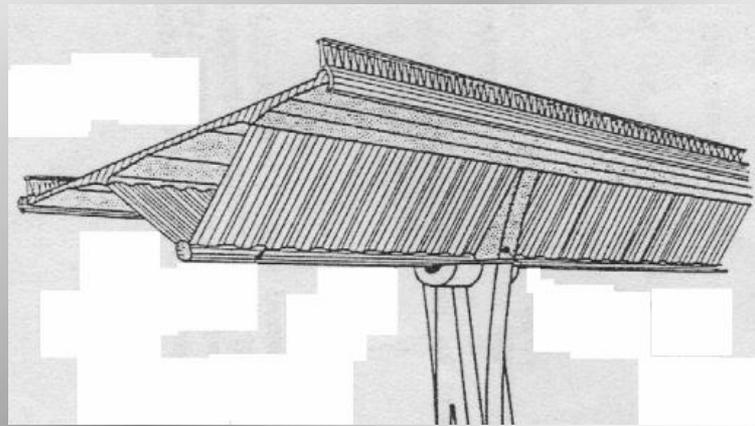


4 × 20m连续箱梁桥，曲线半径为400m

体外束应用



苏通桥体外束



法国Maupre桥

体外束应用



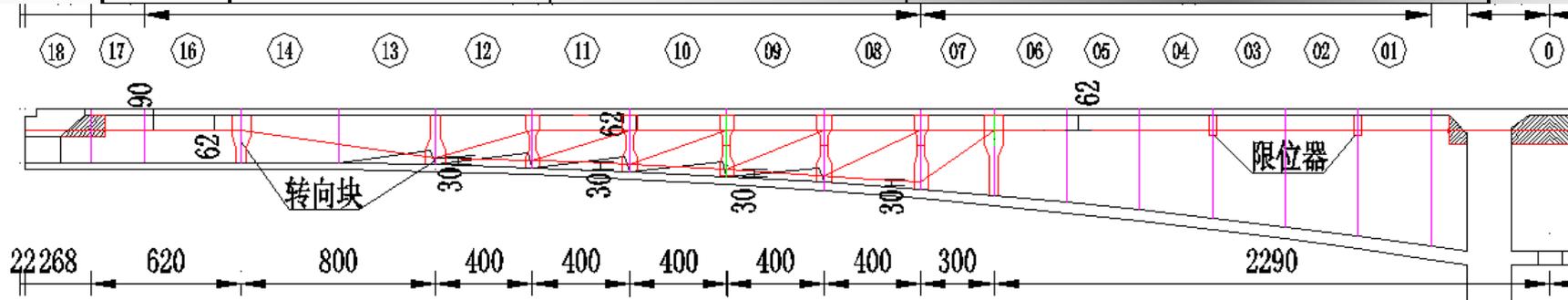
转向块施工前后



上海沪闵高架工程及转向块布置

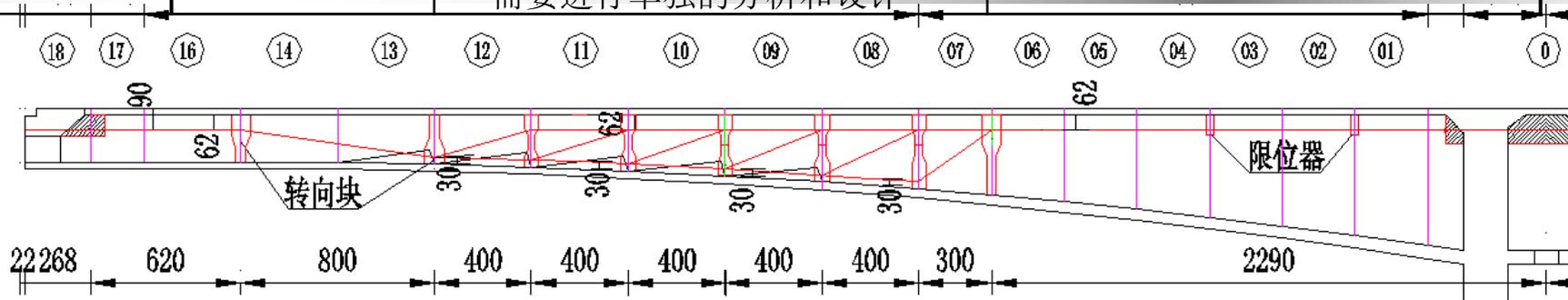
体外束特点

	内容	体外预应力结构	体内预应力结构
构造	钢束位置	混凝土结构外部	混凝土结构内部
	钢束与结构关系	一般体外预应力体系与结构是无粘结的，与结构相应截面的变形不协调	与结构完全粘结，在任意截面与结构的相应截面变形协调
	钢束构造及防护措施	体外钢束本身；HDPE管道；水泥灌浆或非刚性灌浆材料	波纹管道；水泥灌浆
	特殊构造措施	转向结构及锚固结构；体外束体系	不需要特殊的构造措施



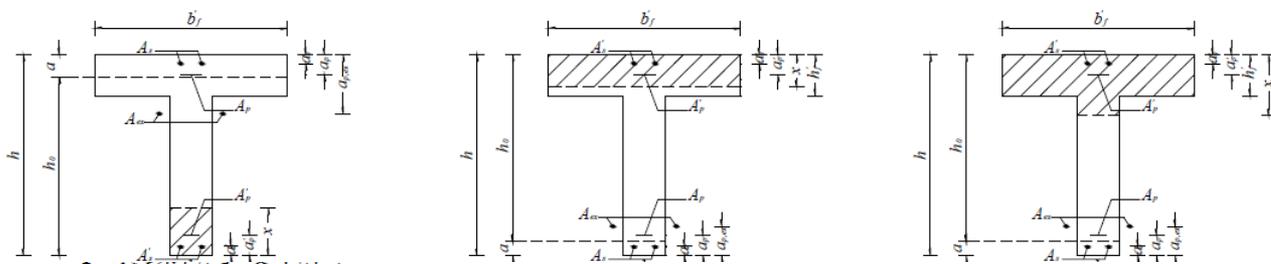
体外束特点

	内容	体外预应力结构	体内预应力结构
设计与计算	预应力摩擦损失	仅转向弯曲段有摩擦损失，直线段部分几乎没有	受管道不平整和摩擦影响，预应力损失较大
	其他预应力损失	由于体外束与结构不发生共同变形，由分批张拉、混凝土收缩徐变产生的预应力损失与体内束计算方法不同	体内束与截面变形协调，由分批张拉、混凝土收缩徐变等产生的预应力损失引起的预应力损失较体外束大
	抗弯极限承载力	由于体外索变形在锚固点或转向处之间平均分配，故其极限变形小，钢束极限应力一般较低，需要更多的钢束或钢筋面积来满足极限承载力	钢束变形与截面混凝土协调，体内索在结构破坏时局部至屈服，极限承载力较高
	特殊非线性因素	体外预应力钢束在转向处有滑移；体外预应力钢束与结构变形不协调产生二次效应	没有特殊非线性因素
	特殊构造设计	体外预应力钢束的转向结构和锚固结构是体外预应力结构特有的关键构造，需要进行单独的分析设计	一般无需局部位置设计



新混规内容——体外束

5.2.5 采用纵向体外预应力钢筋的 T 形截面受弯构件，其正截面抗弯承载力计算应符合下列规定（图 5.2.5）：（新增）：



$$\gamma_0 M_d \leq f_{cd} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + (f'_{pd} - \sigma'_{p0}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (5.2.5-1)$$

$$f_{sd} A_s + f_{pd} A_p + \sigma_{pe,ex} A_{ex} = f_{cd} b x + f'_{sd} A'_s + (f'_{pd} - \sigma'_{p0}) A'_p \quad (5.2.5-2)$$

5.2.9 矩形、T形和I形截面的受弯构件，当配置竖向预应力钢筋、箍筋和弯起钢筋时，其斜截面抗剪承载力计算应符合下列规定(图 5.2.9)：

$$\gamma_0 V_d \leq V_{cs} + V_{sb} + V_{pb} + V_{pb,ex} \quad (5.2.9-1)$$

$$V_{cs} = 0.45 \times 10^{-3} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 b h_0 \sqrt{(2 + 0.6P) \sqrt{f_{cu,k}} (\rho_{sv} f_{sv} + 0.6 \rho_{pv} f_{pv})} \quad (5.2.9-2)$$

$$V_{sb} = 0.75 \times 10^{-3} f_{sd} \sum A_{sb} \sin \theta_s \quad (5.2.9-3)$$

$$V_{pb} = 0.75 \times 10^{-3} f_{pd} \sum A_{pb} \sin \theta_p \quad (5.2.9-4)$$

$$V_{pb,ex} = 0.75 \times 10^{-3} \sum \sigma_{pe,ex} A_{ex} \sin \theta_{ex} \quad (5.2.9-5)$$

新混规内容——体外束

表 6.2.2 系数 k 和 μ 值

预应力 钢筋类型	管道种类	k	μ	
			钢绞线、钢丝束	预应力螺纹钢筋
体内预应 力钢筋	预埋金属波纹管	0.0015	0.20~0.25	0.50
	预埋塑料波纹管	0.0015	0.15~0.20	—
	预埋铁皮管	0.0030	0.35	0.40
	预埋钢管	0.0010	0.25	—
	抽芯成型	0.0015	0.55	0.60
体外预应 力钢筋	钢管	0	0.20~0.30 (0.08~0.10)	—
	高密度聚乙烯管	0	0.12~0.15	—

表 6.2.8 各阶段预应力损失值的组合

预应力损失值的组合	先张法构件	后张法体内预应 力混凝土构件	后张法体内体外 混合预应力混凝土构件	
			体内预应力 钢筋	体外预应力 钢筋
传力锚固时的损失 (第一批) σ_{II}	$\sigma_{I2} + \sigma_{I3} + \sigma_{I4} + 0.5\sigma_{I5}$		$\sigma_{II} + \sigma_{I2} + \sigma_{I4}$	
传力锚固后的损失 (第二批) σ_{III}	$0.5\sigma_{I5} + \sigma_{I6}$		$\sigma_{I5} + \sigma_{I6}$	

慧加体外束

体外束计算

体外束总数: 6

体外束号: 1

组成体外束的单元(从左到右依次): 93, 94, 95, 96, 97

张拉应力MPa: 1302

曲线段摩擦系数: 0.09

钢筋总回缩量(mm): 13

抗拉强度标准值MPa: 1860

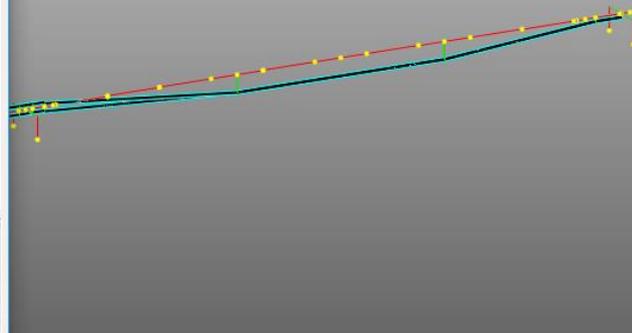
钢筋松弛系数: 0.3

张拉形式: 两端张拉

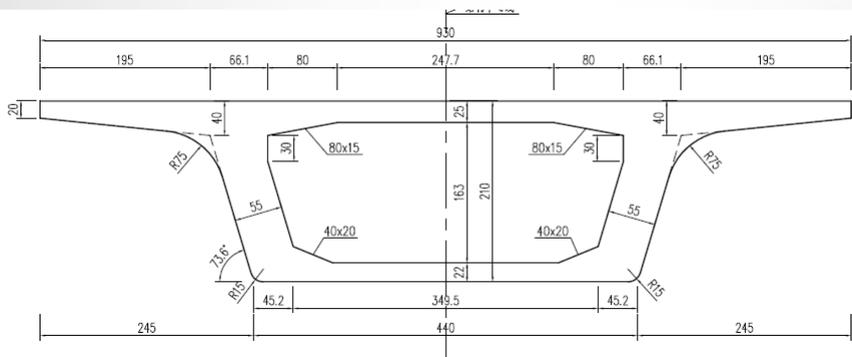
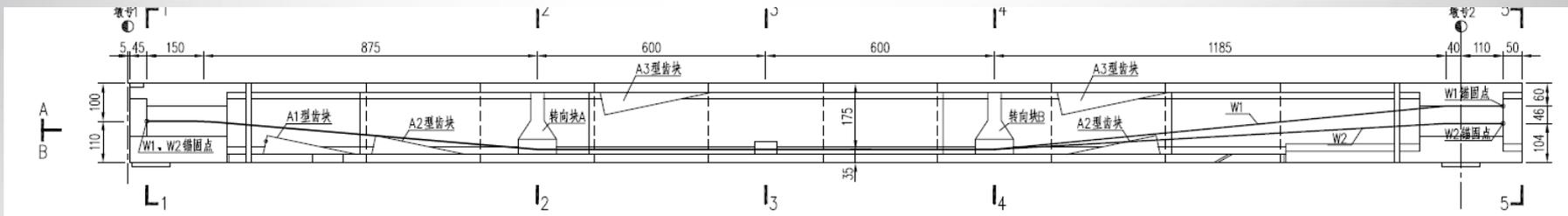
一次张拉
 超张拉

序号	单元号	对应索力
1	93	10516.62
2	94	10436
3	95	0345.6345
4	96	10425.45
5	97	10516.62

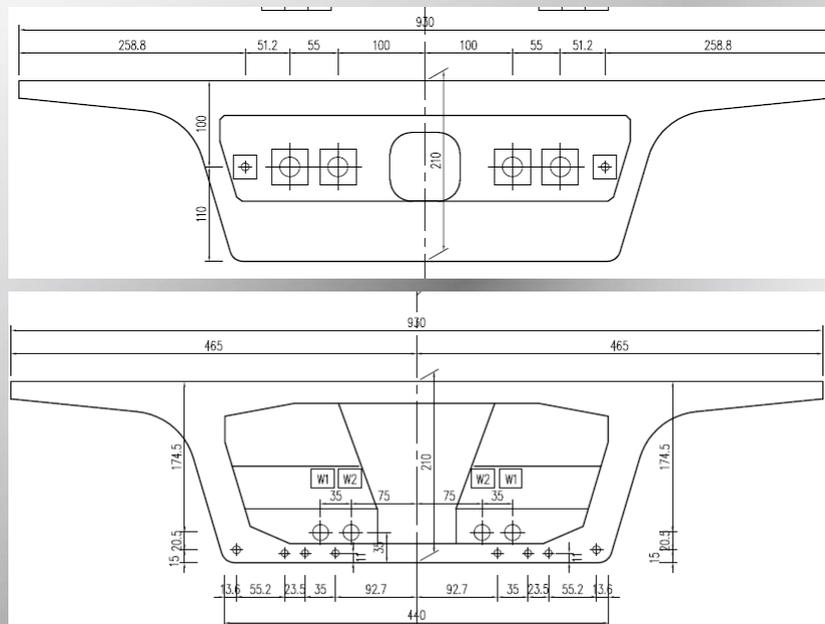
The diagram shows a horizontal beam supported by two vertical columns. A tendon is shown as a red line with yellow nodes, curving upwards between the columns. A '转向块' (turn block) is located at the peak of the tendon. The main beam is labeled '主梁' and the tendon is labeled '体外束'.



实例分析



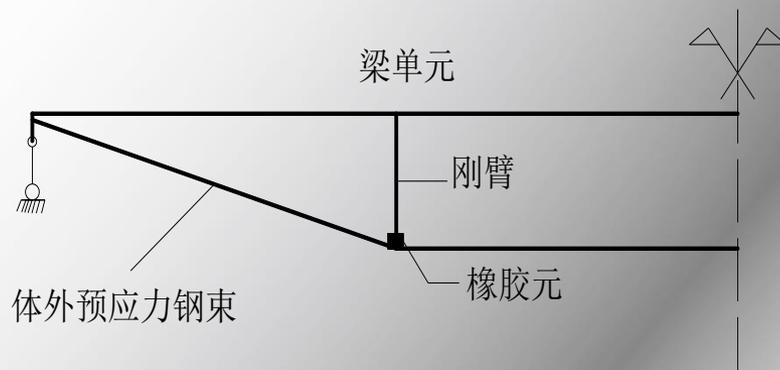
4*35m节段施工连续梁



实例分析

体外束分析

- 体外束单元模拟（轴向刚度杆单元）
- 转向块模拟（带刚臂单元/网格横隔梁）
- 体外束滑移（橡胶单元）
- 体外束工具应用（损失计算及有效张拉力）
- 施工过程中体外束模拟（先上力再上杆件）



谢谢您的聆听!