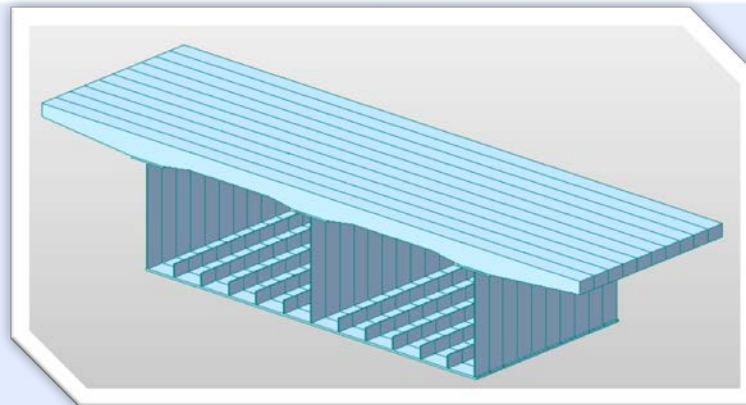


一、组合结构计算原理

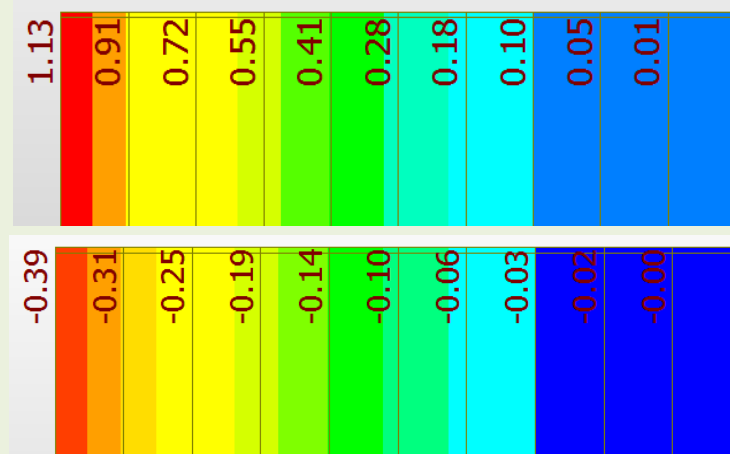
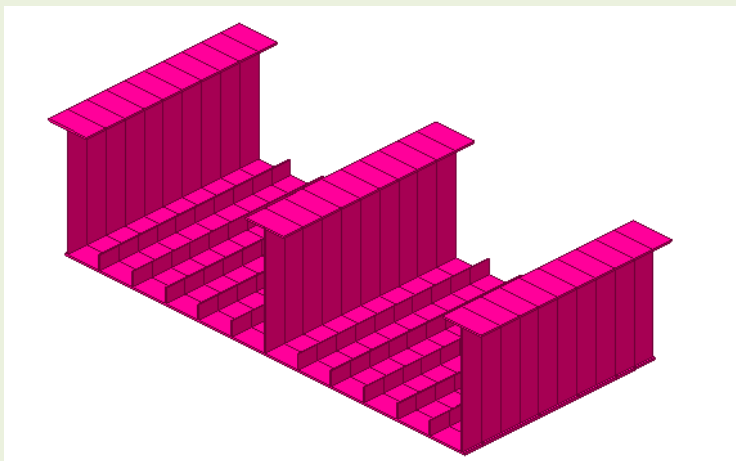
- 1.组合截面形成过程中的应力累加
- 2.组合截面应力计算方法
- 3.虚拟荷载法计算混凝土板降温效应
- 4.基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应



二、钢-混凝土组合桥梁分析实例

- 1.项目简介
- 2.单元划分及SPC导入联合截面
- 3.边界及施工荷载
- 4.设置施工阶段及施工阶段联合截面
- 5.使用阶段——活载及沉降

1.组合截面形成过程中的应力累加——架设钢箱自重效应

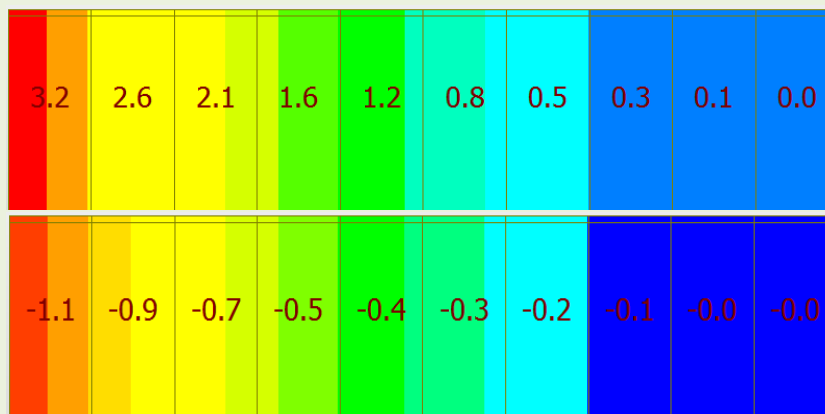
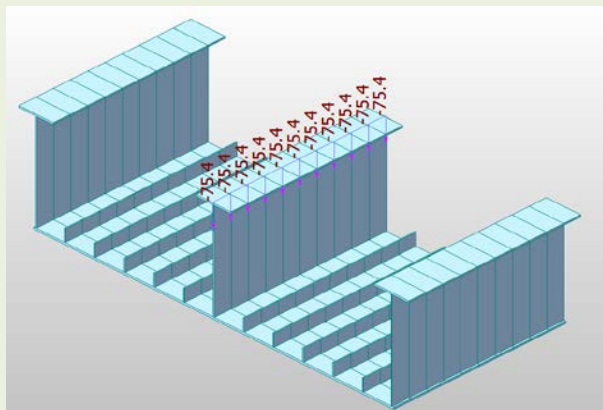


自重荷载效应		
项目	数值	备注
弯矩M	-118458551.010000	钢箱自身效应
钢箱刚度I	129364655770.800000	钢箱自身抗弯惯距
M/I	-0.000916	曲率
钢材顶应力点yst	1228.820600	相对钢箱自身形心坐标
钢材底应力点ysm	421.181400	
钢材顶应力	-1.13	曲率x至形心距离
钢材底应力	0.39	

注:

- 1.此阶段仅架设钢箱，内力及应力仅与钢箱本身的截面特性有关。
- 2.查看结果时选择part1即可。

1.组合截面形成过程中的应力累加——桥面板湿重



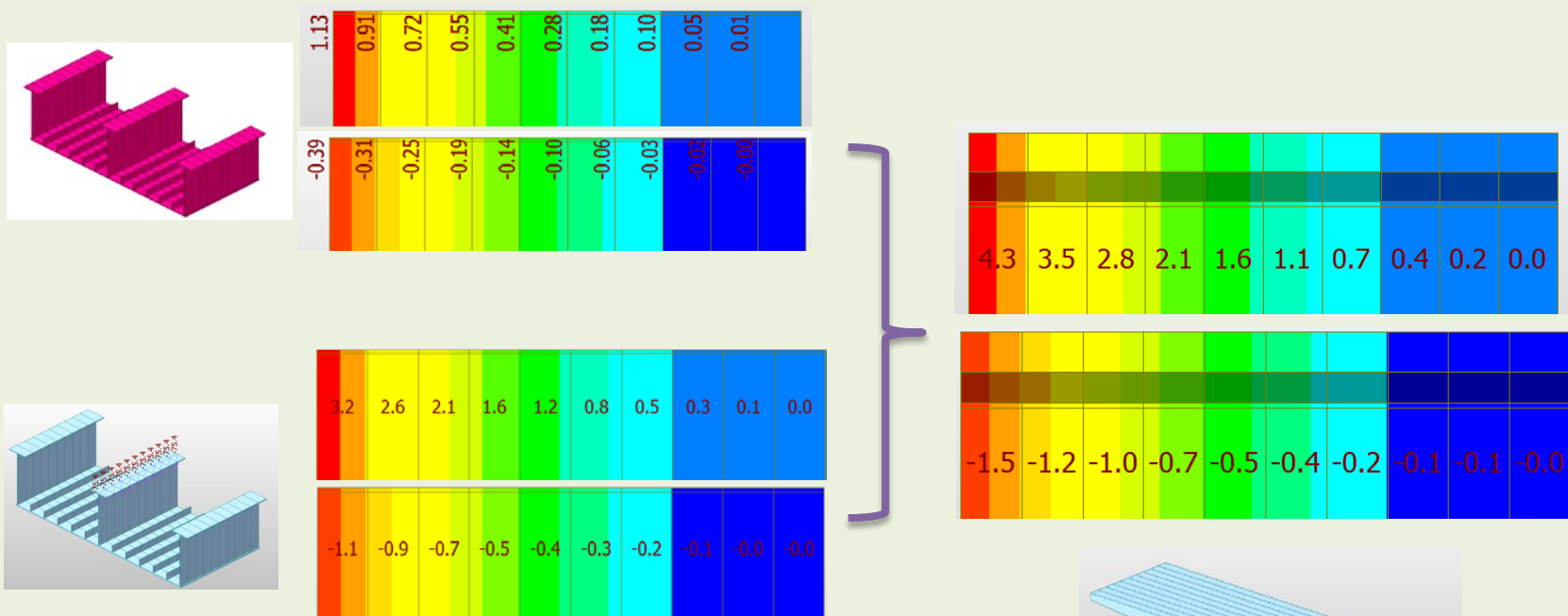
混凝土湿重荷载效应		
项目	数值	备注
弯矩M	-339345000.000000	混凝土湿重效应
钢箱刚度I	129364655770.800000	钢箱自身抗弯惯距
M/I	-0.002623	曲率
钢材顶应力点 _{yst}	1228.820600	
钢材底应力点 _{ysm}	421.181400	相对钢箱自身形心坐标
钢材顶应力	-3.22	
钢材底应力	1.10	曲率x至形心距离

注:

1.此阶段混凝土桥面板在钢箱上浇筑，混凝土湿重作为外荷载作用在钢箱上，内力及应力仅与钢箱本身的截面特性有关。

2.此法施工应注意定义材料时将混凝土材料的自重修改为0，避免重复加载。

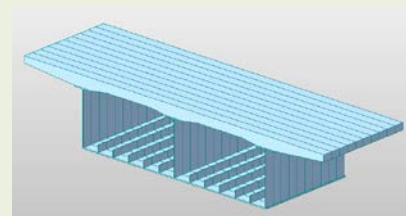
1.组合截面形成过程中的应力累加——叠合截面形成后应力



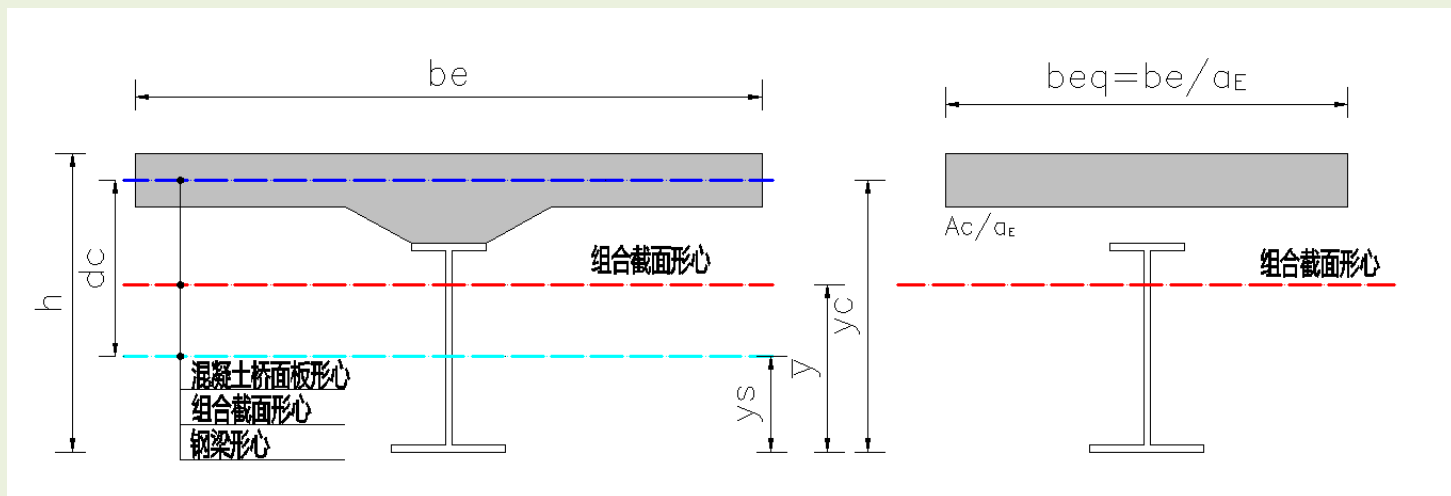
注:

1.显然至此混凝土桥面板不受力，仅钢箱梁承受混凝土及钢的自重效应。

2.桥面板形成后二期荷载等后续荷载将有全截面承担。



2. 组合截面应力计算——换算截面特性计算



$$I_0 = I_s + \frac{I_c}{\alpha_E} \quad A_0 = \frac{A_s A_c}{\alpha_E A_s + A_c}$$

$$I = I_0 + A_0 d_c^2 \quad A = A_s + \frac{A_c}{\alpha_E}$$

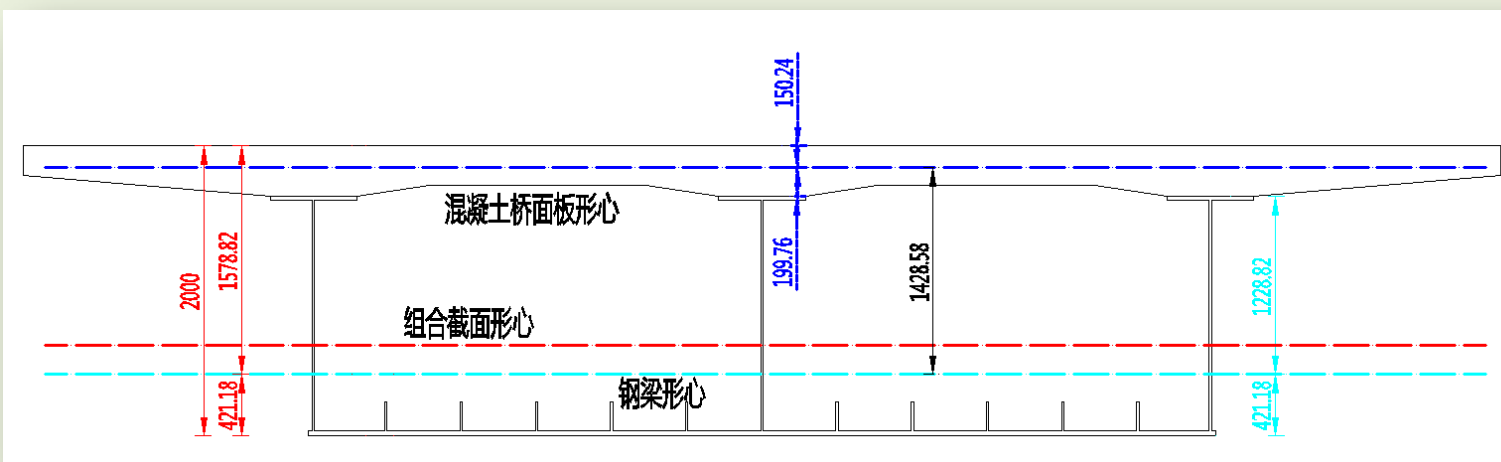
$$\bar{y} = \frac{A_s y_s + \frac{A_c y_c}{\alpha_E}}{A_s + \frac{A_c}{\alpha_E}}$$

注：

1. I_s A_c y_s y_c 通过AUTOCAD或其余工具比较容易得到。
2. I_0 A_0 是中间值，不是最终换算截面特性

2. 组合截面应力计算——换算截面特性计算

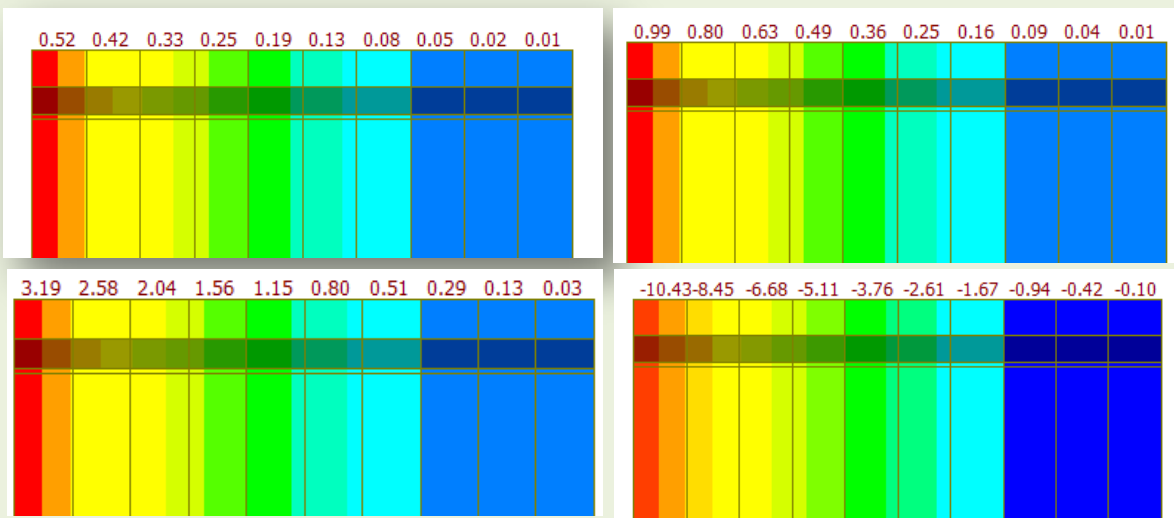
输入截面及材料特性		
项目	数值	备注
混凝土有效弹性模量修订系数	1.000000	静力时为1, 收缩、徐变根据右侧表格计算
混凝土弹性模量 E_c	34500.000000	《钢-混凝土组合梁》表3.1.5
钢材弹性模量 E_s	206000.000000	《钢-混凝土组合梁》表3.2.7
工字钢 A_s	341960.000000	
钢材自身惯性矩 I_s	129364655770.800000	
钢重心到自身顶距离	1228.820600	
钢重心到自身底距离	421.181400	AUTOCAD可得, 惯性矩及重心均为至自身顶底距离 截面特性中可查程序对应值: A Iyy Czp Czm
混凝土截 A_c	3016496.000000	
混凝土自身惯性矩 I_c	24221374366.811800	
混凝土重心到自身顶	150.243700	
混凝土重心到自身底	199.756300	



2. 组合截面应力计算——换算截面特性计算

换算截面特性		
项目	数值	备注
混凝土等效弹性模量 E_{cp}	34500.000000	折算后弹性模量
弹模比 $n_L = E_s/E_{cp}$	5.971014	钢弹模/折算后弹性模量
混凝土折算后面积 A_{ce}	505189.864078	混凝土面积/弹模比
I_0	133421148079.805000	计算换算截面特性中间值
换算截面面积 A_0	203924.633935	
d_c	1428.576900	钢形心到混凝土形心距离
换算截面特性： I_{0L}	549597058284.991000	换算截面惯性矩
换算截面特性： A_{0L}	847149.864078	换算截面面积
y_s	421.181400	钢材形心到底距离
y_c	1849.758300	混凝土形心到底距离
换算截面特性：重心距顶高度	726.902184	换算后形心距全截面顶距离
换算截面特性：重心距底高度	1273.099816	换算后形心距全截面底距离
混凝土顶应力点 y_{ct}	726.902184	
混凝土底应力点 y_{cm}	376.902184	计算应力点距换算截面形心距离
钢材顶应力点 y_{st}	376.902184	
钢材底应力点 y_{sm}	1273.099816	

2. 组合截面应力计算——二期荷载效应



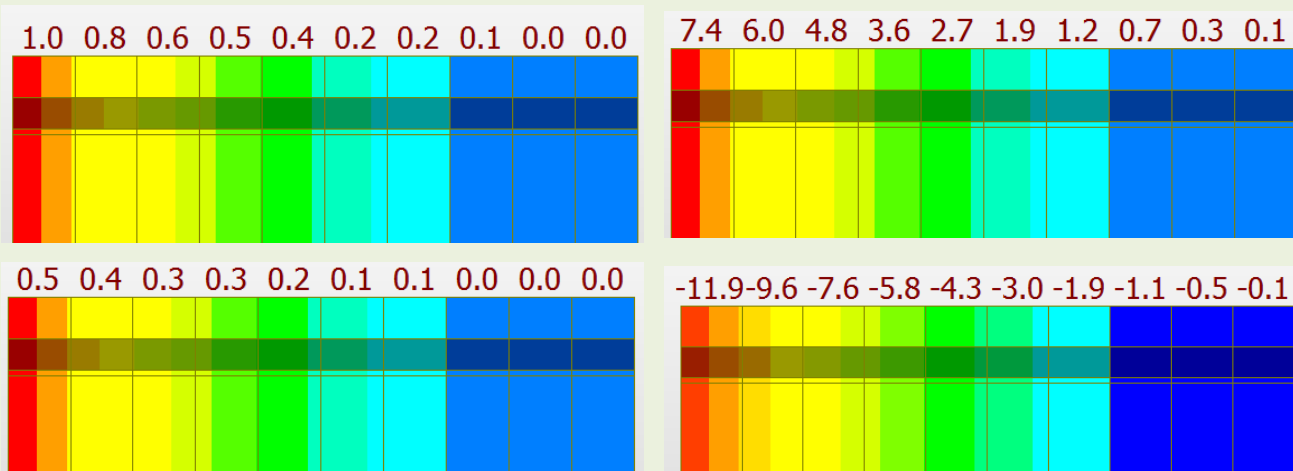
静力荷载效应		
项目	数值	备注
弯矩M	4500000000.000000	用二期荷载校核比较方便
叠合后抗弯刚度I	549597058284.991000	引用“计算截面表格”中值
M/I	0.008188	曲率
钢材顶应力点yst	376.902184	
钢材底应力点ysm	1273.099816	引用“计算截面表格”中值
混凝土顶应力点yct	726.902184	
混凝土底应力点ycm	376.902184	
钢材顶应力	3.09	
钢材底应力	-10.42	曲率x至形心距离
混凝土顶应力	1.00	混凝土应力需/弹模比
混凝土底应力	0.52	



注:

1. 换算为钢材后，计算混凝土应力需要除弹模比。
2. 应力结果通过选择“应力部分”查看钢及混凝土的应力。
3. 实际结构为了校核联合后截面特性查看二期荷载的应力比较方便。

2. 组合截面应力计算——累计荷载效应



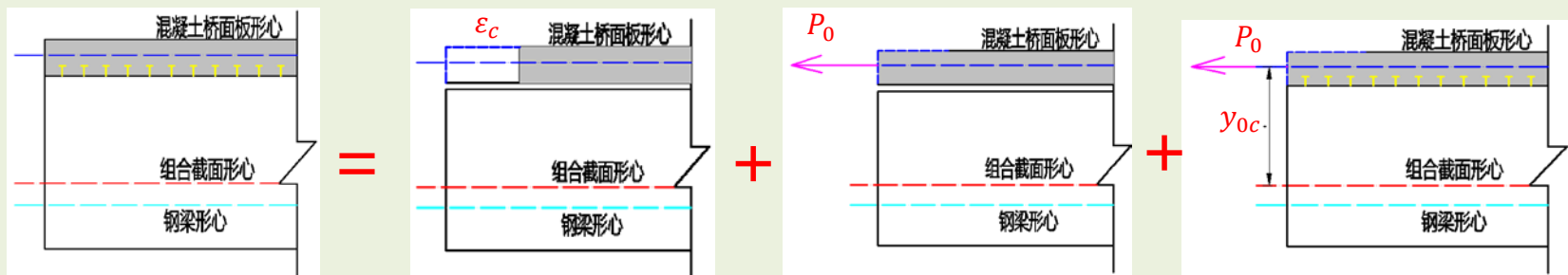
成桥组合结构累计应力

阶段	荷载	混凝土顶	混凝土底	钢材顶	钢材底
假设钢箱梁	钢箱自重	0.00	0.00	-1.13	0.39
浇筑桥面板	混凝土自重	0.00	0.00	-3.22	1.10
桥面板形成	无	0.00	0.00	0.00	0.00
二期荷载	二期荷载	-1.00	-0.52	-3.09	10.42
累计效应		-1.00	-0.52	-7.43	11.91

小结：

1. 显然叠合梁的最终应力与施工工艺直接相关。
2. 通过施工阶段设置中分离变量形式可以得到单项荷载的效应。
3. 组合截面应力及内力查看需选择“部分”。

3. 虚拟荷载法计算混凝土板升降温后应力



B. 0.2 虚拟荷载法可按下列步骤计算：

1 假定钢梁与混凝土之间无连接，混凝土桥面板在温度、收缩等作用产生自由形变 ϵ_c 。

2 根据混凝土桥面板的应变及有效弹性模量求解虚拟荷载 P_0 ；将该虚拟荷载 P_0 反向施加于混凝土桥面板形心上，使混凝土桥面恢复形变 ϵ_c 。

3 恢复钢梁与混凝土桥面板之间的连接，释放 P_0 ，求解截面应力。

4 将以上 3 个步骤的应力进行叠加。

$$P_0 = E_c A_c (t_s \alpha_s - t_c \alpha_c), M_0 = P_0 y_{0c} \quad (\text{B. 0.4-7})$$

B. 0.3 组合截面各位置处的应力增量可按下列公式计算：

混凝土桥面板截面：

$$\Delta \sigma_c = \frac{1}{n_L} \left[\frac{P_0}{A_{0L}} + \frac{M_0}{I_{0L}} y_{0L}^c \right] - \frac{P_0}{A_c} \quad (\text{B. 0.3-1})$$

钢梁截面：

$$\Delta \sigma_s = \frac{P_0}{A_{0L}} + \frac{M_0}{I_{0L}} y_{0L}^s \quad (\text{B. 0.3-2})$$

注：

1. 仅混凝土板升降温，应力计算相对简单，可以通过上述过程非常容易得到其效应。
2. 收缩徐变与混凝土板降温效应相当，可通过同样方法得到，仅计算集中力 P_0 方法不同。

3. 虚拟荷载法计算混凝土板升降温后应力

B. 0.2 虚拟荷载法可按下列步骤计算：

1 假定钢梁与混凝土之间无连接，混凝土桥面板在温度、收缩等作用下产生自由形变 ϵ_c 。

2 根据混凝土桥面板的应变及有效弹性模量求解虚拟荷载 P_0 ；将该虚拟荷载 P_0 反向施加于混凝土桥面板形心上，使混凝土桥面恢复形变 ϵ_c 。

3 恢复钢梁与混凝土桥面板之间的连接，释放 P_0 ，求解截面应力。

4 将以上 3 个步骤的应力进行叠加。

$$P_0 = E_c A_c (t_s \alpha_c - t_c \alpha_c), M_0 = P_0 y_{0c} \quad (\text{B. 0.4-7})$$

B. 0.3 组合截面各位置处的应力增量可按下列公式计算：

混凝土桥面板截面：

$$\Delta \sigma_c = \frac{1}{n_L} \left[\frac{P_0}{A_{0L}} + \frac{M_0}{I_{0L}} y_{0L}^c \right] - \frac{P_0}{A_c} \quad (\text{B. 0.3-1})$$

钢梁截面：

$$\Delta \sigma_s = \frac{P_0}{A_{0L}} + \frac{M_0}{I_{0L}} y_{0L}^s \quad (\text{B. 0.3-2})$$

式中： P_0 ——虚拟荷载(N)，通过混凝土在作用(或荷载)效应下的应变求解；

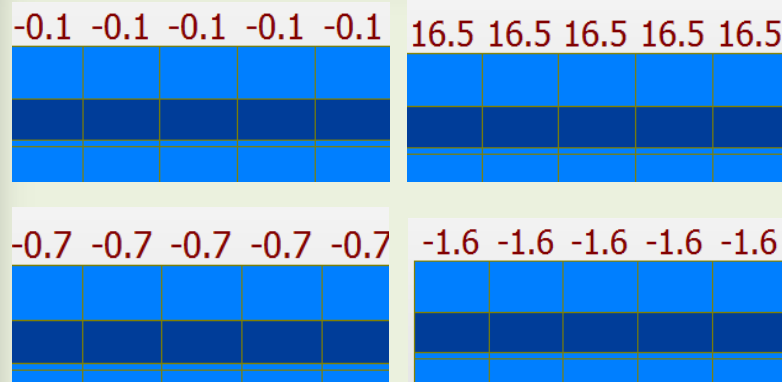
M_0 ——虚拟荷载由于偏心产生的弯矩(N·mm)；

A_{0L} ——换算截面面积(mm²)；

I_{0L} ——换算截面惯性矩(mm⁴)；

y_{0L}^c ——混凝土桥面板所求应力点至换算截面中和轴的距离(mm)；

y_{0L}^s ——钢梁所求应力点至换算截面中和轴的距离(mm)。



仅混凝土顶板升降温荷载效应		
项目	数值	备注
Δt	10	混凝土整体升降温度数
弹模比 $n_L = E_s/E_{cp}$	5.971014	温度梯度计算时 $n_L = n_0$
换算截面特性: I_{0L}	549597058284.991000	
换算截面特性: A_{0L}	847149.864078	
E_c	34500.000000	引用“计算截面表格”中值
A_c	3016496.000000	
α_c	0.00001	
p_0	10406911.2	等效荷载轴心力 P_0
y_{c0}	576.7	桥面板形心到换算截面形心距离
M_0	6001233640.433940	等效荷载弯矩 M_0
混凝土顶应力点 y_{ct}	726.90	
混凝土底应力点 y_{cm}	376.90	引用“计算截面表格”中值
钢材顶应力点 y_{st}	376.90	
钢材底应力点 y_{sm}	1273.10	
混凝土板顶应力	-0.06	
混凝土底应力	-0.70	右侧公式
钢材顶应力	16.40	
钢材底应力	-1.62	

3. 基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应

6.2.4 混凝土桥面板收缩作用应按钢梁与混凝土桥面板结合后开始计入。混凝土构件的收缩量可采用名义收缩系数乘以收缩折减系数计算得到。名义收缩系数可按表 6.2.4-1 所列数值采用；收缩折减系数可根据混凝土桥面板与钢梁结合前发生的龄期和理论厚度按表 6.2.4-2 采用。

表 6.2.4-1 混凝土名义收缩系数 $\varepsilon_{sh} \times 10^3$

40% ≤ RH < 70%	70% ≤ RH < 99%
0.529	0.310

- 注：1 本表适用于一般硅酸盐类水泥或快硬水泥配制而成的混凝土；
2 本表适用于季节性变化的平均温度为 -20℃ ~ 40℃；
3 本表数值系按 C40 混凝土计算所得，对于强度等级为 C50 及以上混凝土，表列数值应乘以 $\sqrt{32.4/f_{ck}}$ ，式中 f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值，按本规范表 3.1.3 采用。

2 考虑徐变影响的收缩截面应力增量：

$$P_0 = E_{cs} A_c \varepsilon_{sh}(t, \tau), M_0 = P_0 y_{0c} \quad (\text{B. 0.4-3})$$

有效弹性模量比：

$$n_L = n_0 [1 + \phi_L \phi(t, t_0)] \quad (\text{B. 0.4-4})$$

式中： E_{cs} ——考虑徐变影响时混凝土收缩作用的有效弹性模量 (MPa)；

ε_{sh} ——混凝土的收缩应变；

ϕ_L ——混凝土收缩作用的徐变因子，取 0.55。

表 6.2.4-2 收缩折减系数

理论厚度 (mm)	现浇	龄 期 (d)							
		3	7	14	30	60	90	180	360
50	1.00	1.00	0.79	0.67	0.51	0.37	0.29	0.18	0.10
100	1.00	1.00	0.89	0.83	0.73	0.63	0.55	0.42	0.29
150	1.00	1.00	0.93	0.88	0.82	0.74	0.68	0.57	0.44
200	1.00	1.00	0.95	0.91	0.86	0.80	0.76	0.66	0.55
250	1.00	1.00	0.96	0.93	0.89	0.84	0.80	0.73	0.63
300	1.00	1.00	0.96	0.94	0.91	0.87	0.84	0.77	0.68
350	1.00	1.00	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.80	0.72
400	1.00	1.00	0.97	0.96	0.93	0.90	0.88	0.82	0.76
450	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.84	0.78
500	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.86	0.80

注：钢与混凝土桥面板结合前发生的龄期和理论厚度为表列数值中间值时，折减系数可按直线内插法取值。

注：

1. 由规范可知计算收缩所需的 P_0 、 M_0 与桥面板降温方法相似。

2. 较降温需要特别计算如下内容：

- 混凝土收缩应变
- 混凝土换算弹性模量

3. 基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应

(1) 混凝土收缩应变

6.2.4 混凝土桥面板收缩作用应按钢梁与混凝土桥面板结合后开始计入。混凝土构件的收缩量可采用名义收缩系数乘以收缩折减系数计算得到。名义收缩系数可按表 6.2.4-1 所列数值采用；

收缩折减系数可根据混凝土桥面板与钢梁结合前发生的龄期和理论厚度按表 6.2.4-2 采用。

表 6.2.4-1 混凝土名义收缩系数 $\epsilon_{cs0} \times 10^3$

$40\% \leq RH < 70\%$	$70\% \leq RH < 99\%$
0.529	0.310

注：1 本表适用于一般硅酸盐类水泥或快硬水泥配制而成的混凝土；

2 本表适用于季节性变化的平均温度为 $-20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ ；

3 本表数值系按 C40 混凝土计算所得，对于强度等级为 C50 及以上混凝土，表列数值应乘以 $\sqrt{32.4/f_{ck}}$ ，式中 f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值，按本规范表 3.1.3 采用。

表 6.2.4-2 收缩折减系数

理论厚度 (mm)	现浇	龄 期(d)							
		3	7	14	30	60	90	180	360
50	1.00	1.00	0.79	0.67	0.51	0.37	0.29	0.18	0.10
100	1.00	1.00	0.89	0.83	0.73	0.63	0.55	0.42	0.29
150	1.00	1.00	0.93	0.88	0.82	0.74	0.68	0.57	0.44
200	1.00	1.00	0.95	0.91	0.86	0.80	0.76	0.66	0.55
250	1.00	1.00	0.96	0.93	0.89	0.84	0.80	0.73	0.63
300	1.00	1.00	0.96	0.94	0.91	0.87	0.84	0.77	0.68
350	1.00	1.00	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.80	0.72
400	1.00	1.00	0.97	0.96	0.93	0.90	0.88	0.82	0.76
450	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.84	0.78
500	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.86	0.80

注：钢与混凝土桥面板结合前发生的龄期和理论厚度为表列数值中间值时，折减系数可按直线内插法取值。

注：

1. 理论厚度 $h = 2A/u$ ，A 为混凝土桥面板的截面积，u 为混凝土桥面板与大气接触的周边长度。

2. 表中混凝土龄期取为 7 天，表示混凝土浇筑完成至开始受力的时间。

项目	数值	备注
相对湿度百分比	70	定义收缩徐变材料时内容
C40 混凝土名义收缩系数 $\times 10^3$	0.31	根据右侧表 6.2.4-1 取值
混凝土抗压强度标准值 f_{ck}	32.4	
标号折减	1	注释 3 中的修正，c40 c50 混凝土无需修正
最终名义收缩系数 ($\epsilon_{cs0} \times 10^3$)	0.31	
理论厚度 1	250	根据右表 6.2.4-2 差值得到
系数 1	0.96	
理论厚度 2	300	
系数 2	0.96	
实际理论厚度	289	
收缩折减系数 (β_s)	0.96	
收缩应变 ($\epsilon_{sh} = \epsilon_{cs0} \times \beta_s$)	0.00029760	《钢-混凝土组合梁》6.2.4

3. 基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应

(1) 混凝土收缩应变

F.1.1 混凝土的收缩应变可按下列公式计算：

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cso} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (F.1.1-1)$$

$$\epsilon_{cso} = \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (F.1.1-2)$$

$$\epsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cm0})] \cdot 10^{-6} \quad (F.1.1-3)$$

$$\beta_{RH} = 1.55[1 - (RH/RH_0)^3] \quad (F.1.1-4)$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (F.1.1-5)$$

2 按下列公式计算自 t_0 至 t 时的收缩应变值 $\epsilon_{cs}(t, t_0)$ ：

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = \epsilon_{cso}[\beta_s(t - t_s) - \beta_s(t_0 - t_s)]$$

式中的名义收缩系数 ϵ_{cso} 按表 F.1.2 采用。

理论厚度	300
收缩开始时的龄期 t_s	3
受力开始的龄期 t_0	7
计算时间的龄期 t	1E+50
收缩时间发展系数应变 ($t_0 - t_s$)	0.035612228
收缩应变 ($t - t_s$)	1
收缩时间发展系数 ($t - t_0$)	0.964387772

《钢-混凝土组合桥梁设计规范》与《04混规》收缩折减系数不同。《钢混》取 $t \rightarrow \infty$ 时的收缩应变最终值，并建议计算收缩应变时取终值。

可采用名义收缩系数乘以收缩折减系数。收缩折减系数是考虑钢与混凝土桥面板结合前发生的龄期对收缩应变值进行的折减，采用下列公式计算得到：

$$\gamma_c = \frac{\epsilon_{cs}(\infty, t_s) - \epsilon_{cs}(t_b, t_s)}{\epsilon_{cs}(\infty, t_s)} \quad (5)$$

式中： $\epsilon_{cs}(t_b, t_s)$ ——收缩开始时的龄期为 t_s ，计算考虑的龄期为 t_b 时的收缩应变；

$\epsilon_{cs}(\infty, t_s)$ ——收缩开始时的龄期为 t_s 的收缩应变最终值。

表 6.2.4-2 收缩折减系数

理论厚度 (mm)	现浇	龄 期 (d)							
		3	7	14	30	60	90	180	360
50	1.00	1.00	0.79	0.67	0.51	0.37	0.29	0.18	0.10
100	1.00	1.00	0.89	0.83	0.73	0.63	0.55	0.42	0.29
150	1.00	1.00	0.93	0.88	0.82	0.74	0.68	0.57	0.44
200	1.00	1.00	0.95	0.91	0.86	0.80	0.76	0.66	0.55
250	1.00	1.00	0.96	0.93	0.89	0.84	0.80	0.73	0.63
300	1.00	1.00	0.96	0.94	0.91	0.87	0.84	0.77	0.68
350	1.00	1.00	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.80	0.72
400	1.00	1.00	0.97	0.96	0.93	0.90	0.88	0.82	0.76
450	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.89	0.84	0.78
500	1.00	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.86	0.80

注：钢与混凝土桥面板结合前发生的龄期和理论厚度为表列数值中间值时，折减系数可按直线内插法取值。

3. 基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应

(2) 混凝土折减刚度

2 考虑徐变影响的收缩截面应力增量:

$$P_0 = E_{\text{eq}} A_c \epsilon_{\text{sh}}(t, \tau), M_0 = P_0 y_{0c} \quad (\text{B. 0. 4-3})$$

有效弹性模量比:

$$n_L = n_0 [1 + \phi_L \phi(t, t_0)] \quad (\text{B. 0. 4-4})$$

式中: E_{eq} ——考虑徐变影响时混凝土收缩作用的有效弹性模量 (MPa);

ϵ_{sh} ——混凝土的收缩应变;

ϕ_L ——混凝土收缩作用的徐变因子, 取 0.55。

等效弹性模量折减系数		
项目	数值	备注
理论厚度1	250	
系数1	1.95	《钢-混凝土组合梁》表6.2.3
理论厚度2	300	
系数2	1.92	
实际理论厚度	289	2A/U
差值结果	1.9266	
混凝土抗压强度标准值fck	32.4	C40 C50不用调整
标号折减	1	
最终徐变系数	1.9266	
Φ_L 收缩	0.55	
Φ_L 徐变	1.1	
混凝土有效弹性模量修订系数(收缩)	2.05963	计算不同效应将其填入左表
混凝土有效弹性模量修订系数(徐变)	3.11926	

表 6.2.3 混凝土徐变系数 $\phi(t, t_0)$

理论 厚度 (mm)	40% $\leq$ RH<70%								70% $\leq$ RH<99%							
	加载龄期 t_0 (d)								加载龄期 t_0 (d)							
	3	7	14	30	60	90	180	360	3	7	14	30	60	90	180	360
50	4.40	3.75	3.30	2.85	2.50	2.31	2.02	1.77	3.05	2.60	2.28	1.98	1.73	1.60	1.40	1.23
100	3.90	3.33	2.92	2.53	2.21	2.05	1.79	1.57	2.83	2.41	2.12	1.83	1.61	1.49	1.30	1.14
150	3.65	3.12	2.74	2.37	2.08	1.92	1.68	1.47	2.72	2.32	2.04	1.76	1.54	1.43	1.25	1.09
200	3.50	2.99	2.62	2.27	1.99	1.84	1.61	1.41	2.65	2.26	1.99	1.72	1.51	1.39	1.22	1.07
250	3.39	2.89	2.54	2.20	1.93	1.78	1.56	1.36	2.60	2.22	1.95	1.69	1.48	1.37	1.20	1.05
300	3.31	2.82	2.48	2.14	1.88	1.74	1.52	1.33	2.56	2.19	1.92	1.66	1.46	1.35	1.18	1.03
350	3.24	2.77	2.43	2.10	1.84	1.70	1.49	1.30	2.53	2.16	1.90	1.64	1.44	1.33	1.17	1.02
400	3.18	2.72	2.39	2.06	1.81	1.67	1.46	1.28	2.51	2.14	1.88	1.63	1.43	1.32	1.15	1.01
450	3.14	2.68	2.35	2.03	1.78	1.65	1.44	1.26	2.49	2.12	1.86	1.61	1.41	1.31	1.14	1.00
500	3.10	2.64	2.32	2.01	1.76	1.63	1.42	1.25	2.47	2.11	1.85	1.60	1.40	1.30	1.14	0.99

注:

- 1.《钢-混凝土组合桥梁设计规范》给出了明确的有效弹模比的计算方法。
- 2.其中混凝土的徐变系数可以通过查表内插方法方便得到。

3. 基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应

(3) 有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩效应

2 考虑徐变影响的收缩截面应力增量：

$$P_0 = E_{c\phi} A_c \epsilon_{sh}(t, \tau), M_0 = P_0 y_{0c} \quad (B. 0. 4-3)$$

有效弹性模量比：

$$n_L = n_0 [1 + \phi_L \phi(t, t_0)] \quad (B. 0. 4-4)$$

式中： $E_{c\phi}$ ——考虑徐变影响时混凝土收缩作用的有效弹性模量 (MPa)；

ϵ_{sh} ——混凝土的收缩应变；

ϕ_L ——混凝土收缩作用的徐变因子，取 0.55。

2) 矩形温差：即假定钢梁温度一致、混凝土结构温度一致。

$$P_0 = E_c A_c (t, \alpha_s - t_c \alpha_c), M_0 = P_0 y_{0c} \quad (B. 0. 4-7)$$

反算等效降温荷载 Δt

项目	数值	备注
α_c	0.00001	
反算等效降温荷载 Δt	-29.7600	混凝土整体升降温度数

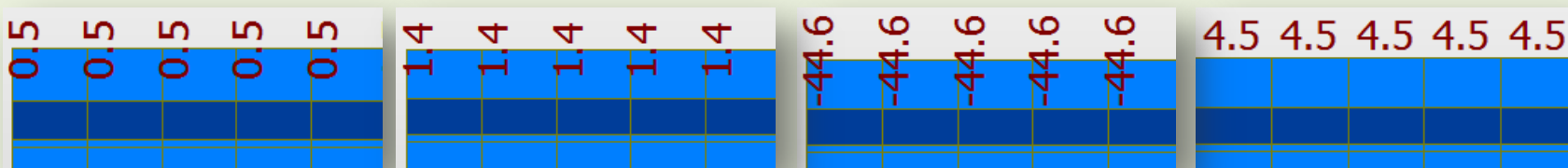
仅混凝土顶板升降温度荷载效应

项目	数值	备注
Δt	-29.76	混凝土整体升降温度数
弹模比 $n_L = E_s/E_{c\phi}$	12.298081	温度梯度计算时 $n_L = n_0$
换算截面特性： I_{OL}	422829089254	
换算截面特性： A_{OL}	587241.853575	
E_c	16750.581415	引用“计算截面表格”中值
A_c	3016496.000000	
α_c	0.00001	
p_0	-15037151.2	等效荷载轴力 P_0
y_{c0}	831.9	桥面板形心到换算截面形心距离
M_0	-12509141283	等效荷载弯矩 M_0
混凝土顶应力点 y_{ct}	982.13	
混凝土底应力点 y_{cm}	632.13	引用“计算截面表格”中值
钢材顶应力点 y_{st}	632.13	
钢材底应力点 y_{sm}	1017.88	
混凝土板顶应力	0.54	
混凝土底应力	1.38	右侧公式
钢材顶应力	-44.31	
钢材底应力	4.51	

收缩应变 ($\epsilon_{sh} = \epsilon_{cs0} \times \beta_s$)	0.00029760	《钢-混凝土组合梁》6.2.4
混凝土等效弹性模量 $E_{c\phi}$	16750.581415	引用“计算截面表格”中值
A_c	3016496.000000	引用“计算截面表格”中值
p_0	15037151.2	等效荷载轴力 P_0
y_{c0}	831.9	桥面板形心到换算截面形心距离
M_0	12509141283	等效荷载弯矩 M_0
弹模比 $n_L = E_s/E_{c\phi}$	12.298081	引用“计算截面表格”中值
换算截面特性： I_{OL}	422829089254	
换算截面特性： A_{OL}	587241.853575	
混凝土顶应力点 y_{ct}	982.13	
混凝土底应力点 y_{cm}	632.13	引用“计算截面表格”中值
钢材顶应力点 y_{st}	632.13	
钢材底应力点 y_{sm}	1017.88	
混凝土板顶应力	0.54	
混凝土底应力	1.38	右侧公式
钢材顶应力	-44.31	
钢材底应力	4.51	

3. 基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应

(3) 有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩效应



混凝土	
弹性模量:	1.6751e+004 N/mm ²
泊松比:	0.2
线膨胀系数:	1.0000e-005 1/[C]
容重:	0 N/mm ³

单元	荷载工况	方向	参考位置	1st 材料	1st 弹性 (N/mm ²)
11	等效收缩	局部坐标	+边(顶)	输入	16750.5814
12	等效收缩	局部坐标	+边(顶)	输入	16750.5814
13	等效收缩	局部坐标	+边(顶)	输入	16750.5814
14	等效收缩	局部坐标	+边(顶)	输入	16750.5814

混凝土板顶应力	0.54
混凝土底应力	1.38
钢材顶应力	-44.31
钢材底应力	4.51

注：

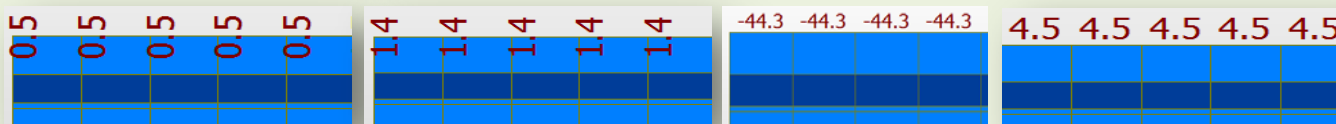
1. 显然从虚拟荷载法本身考虑，完全可以将收缩效应通过温度梯度的方法计算。

2. 模型计算有效弹性模量的温度梯度效应需做如下修改：

- 修改材料的弹性模量为有效弹性模量
- 输入温度梯度荷载时应按有效弹性模量

3. 基于有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩、徐变效应

(3) 有效弹性模量的虚拟荷载法计算收缩效应



添加/编辑时间依存材料(徐变/收缩)

名称: 设计规范:

China (JTG D62-2004)

28天龄期混凝土立方体抗压强度标准值, 即标号强度 (f_{cu}, k): N/mm^2

$f_{cm} = 0.8 f_{cu}, k + 8$

环境年平均相对湿度 ($40 \sim 99$): %

构件理论厚度: mm

$h = 2 A_c / u$ (A_c : 构件截面面积, u : 构件与大气接触的周边长度)

水泥种类系数 (B_{sc}):

收缩开始时的混凝土龄期: day

施工顺序

位置	材料类型	材料	叠合阶段	材龄	h	刚度	刚度系数	叠合刚度
1	材料	1: Q345	钢梁	0	0	...	...	...
2	材料	2: C50	混凝土板形	7	288.	...	...	...

施工阶段

阶段:

名称:

持续时间: 天

单元	开始 材龄	结束材龄	开始弹性模量 (N/mm^2)	结束弹性模量 (N/mm^2)	累积 收缩
在施工阶段[收缩徐变]中的单元特性值。					
Stage	收缩徐变		适用		
11	37.0	365037.00	16750.5814	16750.5814	-0.00029742
12	37.0	365037.00	16750.5814	16750.5814	-0.00029742

混凝土

弹性模量: N/mm^2

泊松比:

线膨胀系数: $1/[C]$

容重: N/mm^3

混凝土板顶应力	0.54
混凝土底应力	1.38
钢材顶应力	-44.31
钢材底应力	4.51

注:

1. 通过修改弹性模量及持续时间可得到相应的收缩应变值。
2. 最终收缩应力与理论值基本一致。(误差是由于总的收缩量不一致造成)
3. 收缩徐变终值与截面本身无关, 可以通过临时替换混凝土截面查看。(组合截面不能输出此值)
4. 程序计算名义收缩系数按《04混规》得到, 上图输入数据均为了对比方便输入。

(3) 有效弹性模量的虚拟荷载法计算徐变效应

B. 0. 4 虚拟荷载的确定应符合下列规定：

1 徐变引起的永久作用截面应力增量：

$$P_0 = E_{\text{cgp}} A_c \epsilon_0 \phi(t, \tau), M_0 = P_0 y_{0c} \quad (\text{B. 0. 4-1})$$

有效弹性模量比：

$$n_L = n_0 [1 + \phi_L \phi(t, t_0)] \quad (\text{B. 0. 4-2})$$

式中： y_{0c} ——混凝土桥面板形心至换算中和轴的距离(mm)；

E_{cgp} ——考虑徐变影响时永久作用的有效弹性模量(MPa)；

ϵ_0 ——组合梁混凝土桥面板形心处在 t_0 时刻的初应变；

n_L ——钢与混凝土的有效弹性模量比；

n_0 ——钢与混凝土的弹性模量比；

$\phi(t, \tau)$ ——混凝土的徐变系数；

注：

1.理论上可以用有效荷载法计算徐变效应，仅 P_0 M_0 的计算方法与收缩不同。

2.由于徐变效应不同于收缩效应，与受力后的应变直接相关，实际结构各截面受力不同从而徐变效应不同。

3.Civil程序分析相对简单，只需要将混凝土的弹性模量修改为有效弹性模量即可（与收缩有效弹性模量不同）。

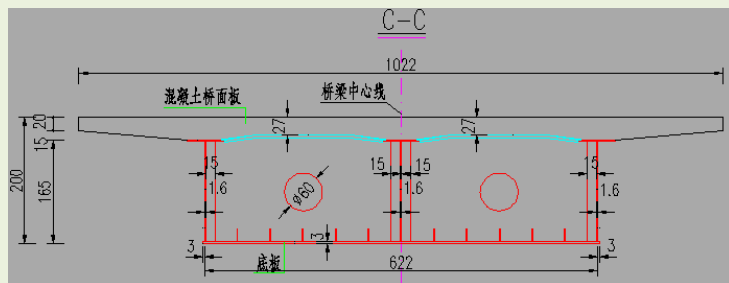
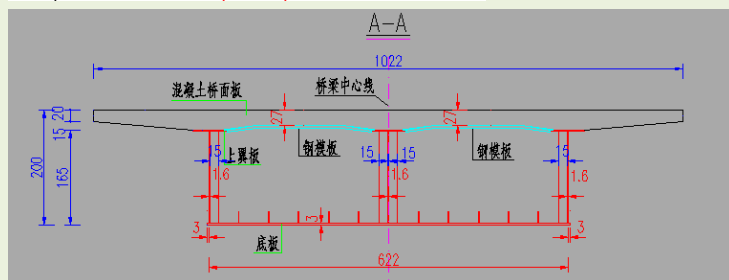
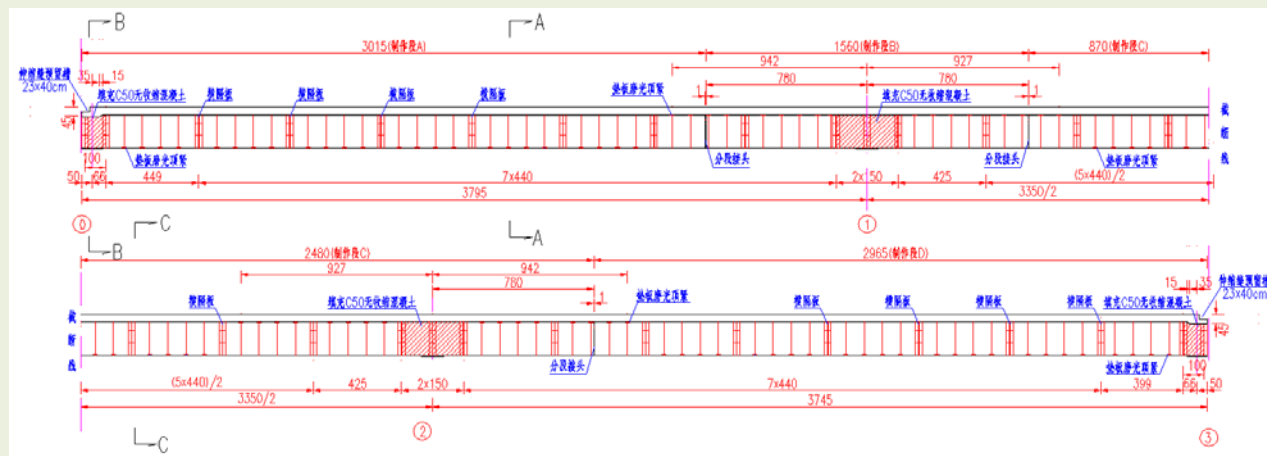
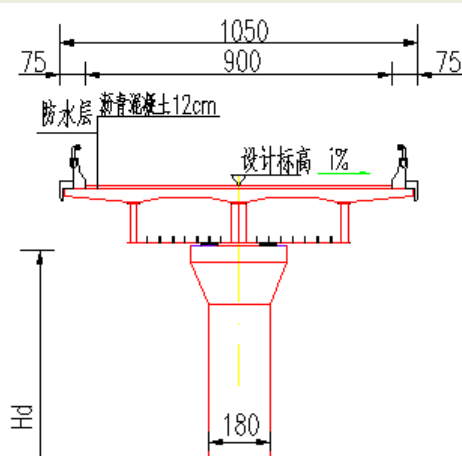
本章小结：

- 1.组合结构的最终应力状态与施工阶段相关，通过各阶段累加可以得到最终效应，但各阶段的截面特性因根据具体的施工工艺确定。
- 2.混凝土桥面板升降温可以通过等效荷载法计算。
- 3.混凝土收缩同样可以根据等效荷载法计算，但需计算混凝土有效弹性模量。
- 4.从校核计算结果考虑可以用混凝土降温模拟收缩效应。
- 5.Civil程序计算有效刚度下的收缩、徐变效应仅需将混凝土弹性模量修改为有效弹性模量。

本章小结：

- 1.组合结构的最终应力状态与施工阶段相关，通过各阶段累加可以得到最终效应，但各阶段的截面特性因根据具体的施工工艺确定。
- 2.混凝土桥面板升降温可以通过等效荷载法计算。
- 3.混凝土收缩同样可以根据等效荷载法计算，但需计算混凝土有效弹性模量。
- 4.从校核计算结果考虑可以用混凝土降温模拟收缩效应。
- 5.Civil程序计算有效刚度下的收缩、徐变效应仅需将混凝土弹性模量修改为有效弹性模量。

1. 项目简介

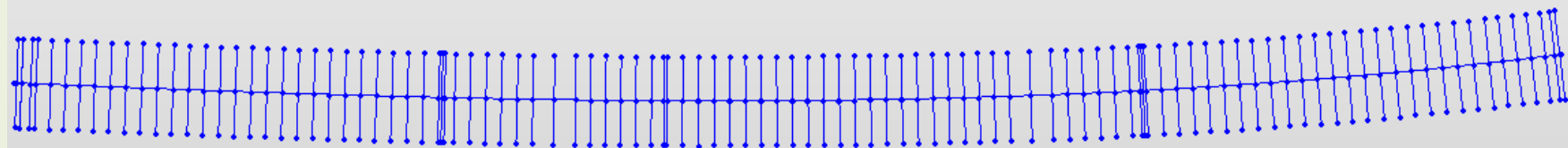
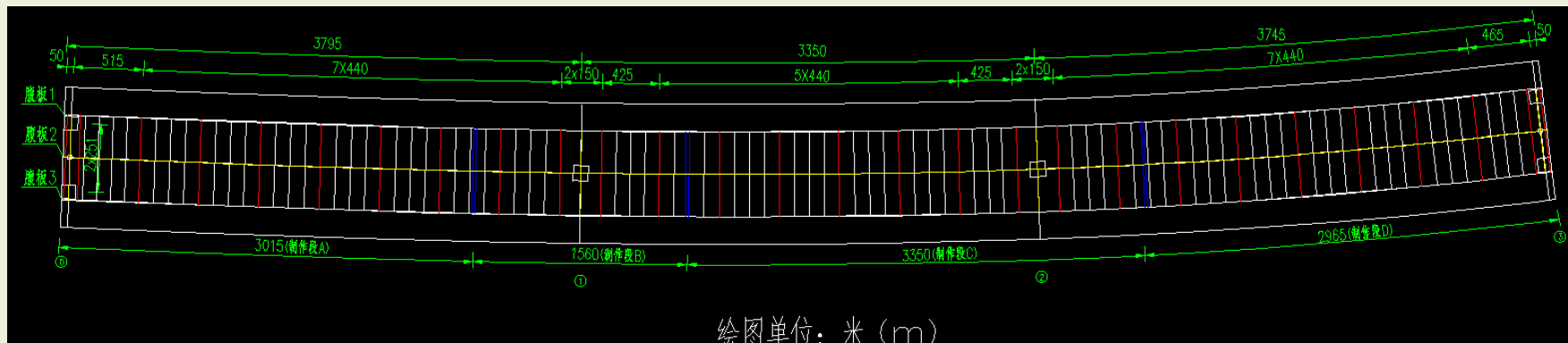


本桥为某高速路联络线匝道桥中的一联，桥梁全宽 10.5m。本联上部结构采用 (38+33.5+37.5) m 钢混组合连续梁，下部结构桥墩为柱式，基础为承台接灌注桩；桥台为肋板式，基础为承台接灌注桩。

主梁为单箱双室，梁高 2 米宽 10.22m，预制高 1.65m，钢箱底板厚 30mm，上翼板厚 25mm，腹板厚 16mm，钢材均采用 Q345qD，分 4 段预制后现场采用高强螺栓拼接。钢箱顶部混凝土桥面板厚 0.27m，采用 C50 无收缩混凝土现浇。

顶板混凝土预应力钢束采用高强低松弛钢绞线，管道采用金属波纹管成型。设计摩阻系数 $\mu=0.25$ ，孔道偏差系数 $K=0.0015$ 。

2. 单元划分及SPC导入联合截面——建立单元节点



S. Name	On	Fr...	Lock	Color
[0]				white
标注				green
分割节点				white
隔板位置				red
轮廓线				white
模型				yellow
拼接单元				blue
永久支撑线				yellow

结构组: 5
模型 [节点数=0 ; 单元数=123]
分割节点 [节点数=0 ; 单元数=138]
隔板位置 [节点数=0 ; 单元数=62]
永久支撑线 [节点数=0 ; 单元数=8]
拼接单元 [节点数=0 ; 单元数=12]

注：

1. 曲线桥梁可以通过导入CAD线形的方法建立单元节点。

2. 导入技巧：

- 节点位置：支撑线、截面变化位置、加载荷载位置（隔板、横梁等）
- CAD根据上述内容分层，Civil程序可根据图层将导入内容分组。
- 节点最终位置通过连接节点位置得到（Civil程序不能识别圆曲线）
- 导入CAD图形的绘制单位应与Civil一致。
- 可绘制辅助线（支撑线，加载点等）一并按或分批导入便于后续操作。

2. 单元划分及SPC导入联合截面——SPC导入联合截面

(2) SPC导入联合截面

1

2

3

钢材

规范: GB03 (S)

数据库: Q345

混凝土

规范:

数据库:

弹性数据

设计类型: 钢材

材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 各向异性

弹性模量: 2.0600e+005 N/mm²

泊松比: 0.3

线膨胀系数: 1.2000e-005 1/[C]

容重: 76.98 N/mm³

☐ 使用质量密度: 7.85 N/mm³/g

混凝土

弹性模量: 3.4500e+004 N/mm²

泊松比: 0.2

线膨胀系数: 1.0000e-005 1/[C]

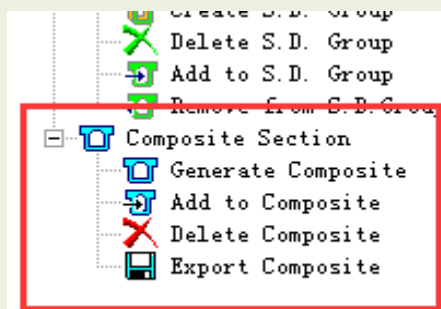
容重: 2.5e-005 N/mm³

☐ 使用质量密度: 2.549e-009 N/mm³/g

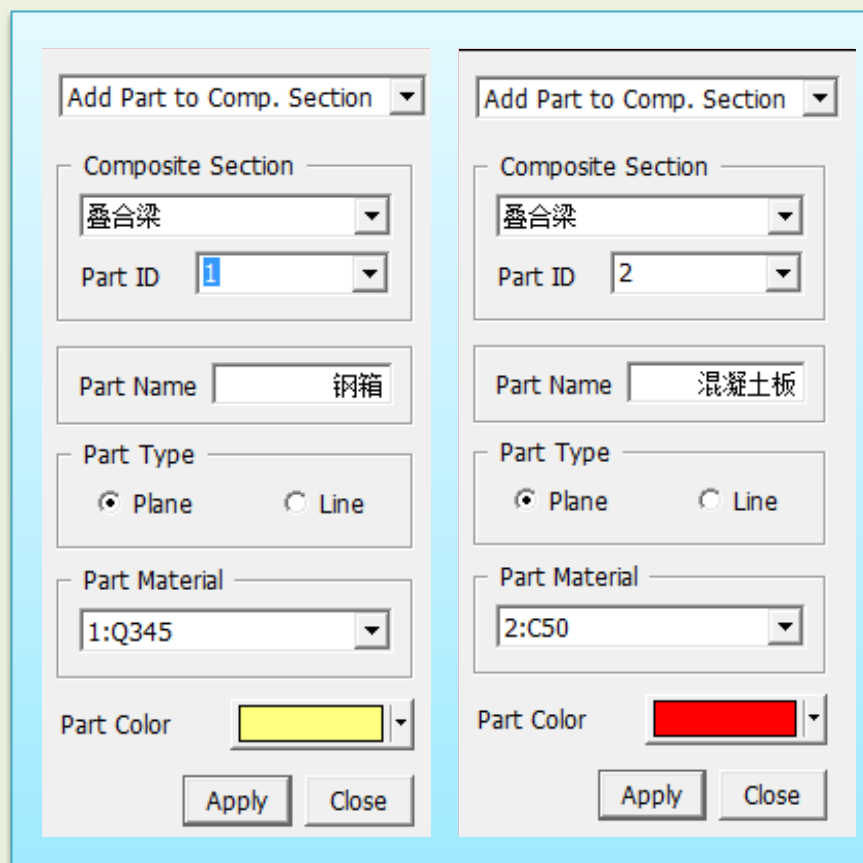
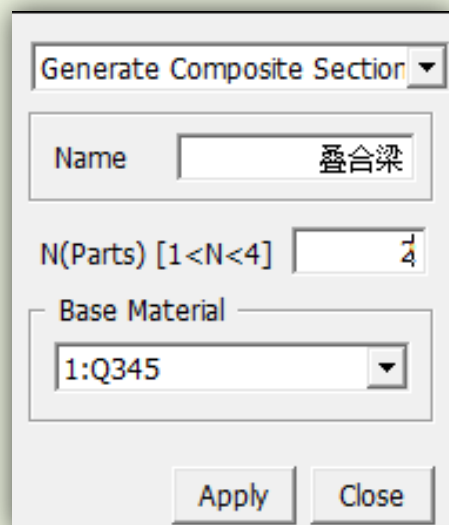
2. 单元划分及SPC导入联合截面——SPC导入联合截面

(2) SPC导入联合截面

4



5

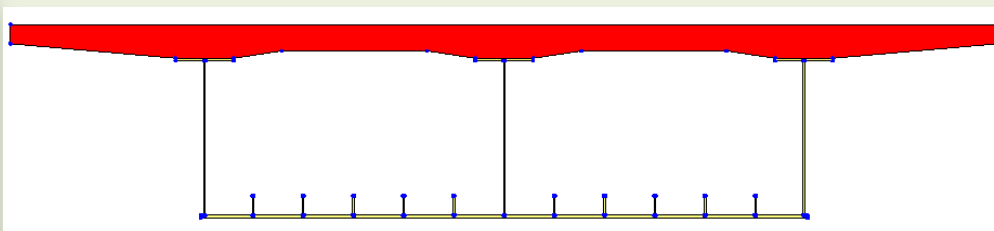
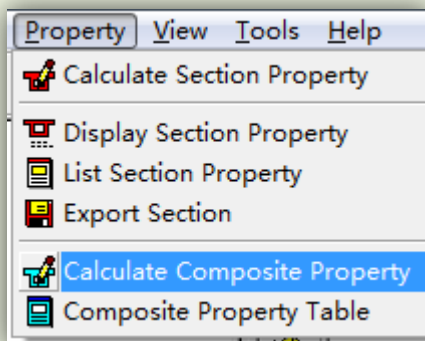


6

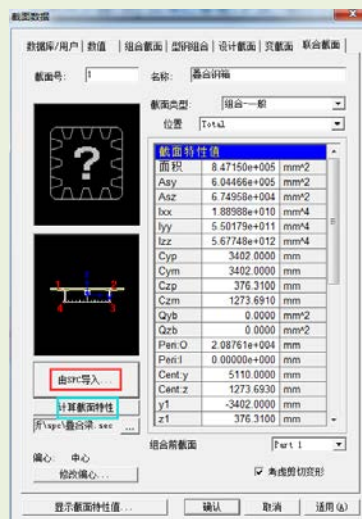
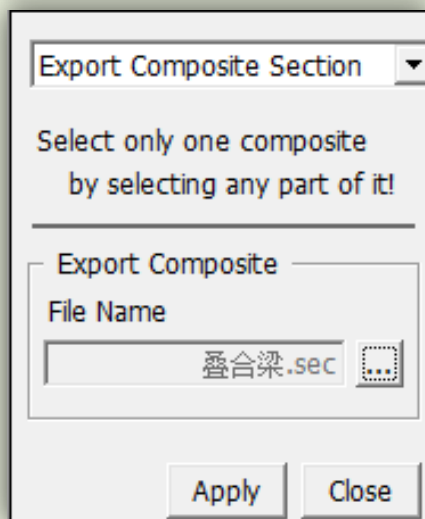
2. 单元划分及SPC导入联合截面——SPC导入联合截面

(2) SPC导入联合截面

7



8



9

2. 单元划分及SPC导入联合截面——SPC导入联合截面

(2) SPC导入联合截面

10

Composite Section Property Table

Composite: 叠合梁

Parts: 钢箱 + 混凝土板

	Value [Length-Unit:mm]
Area	847149.864078
SAx	604466.095800
SAy	67495.778649
Ixx	550178689264.058110
Iyy	5677476765929.859400
Ixy	-0.035156
J	18898768374.510948
(+)Cx	5110.000000
(-)Cx	5110.000000
(+)Cy	727.305374
(-)Cy	1273.694626

Close

截面类型: 组合-一般

位置: Part 2

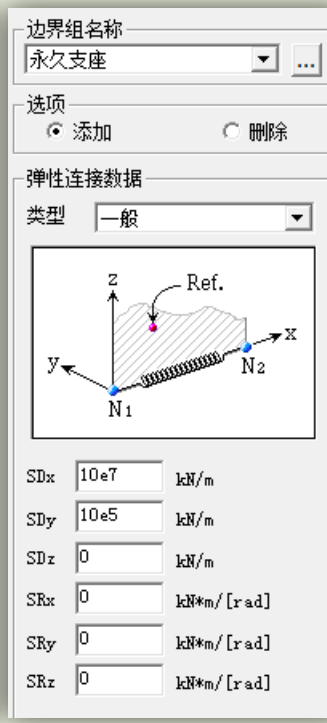
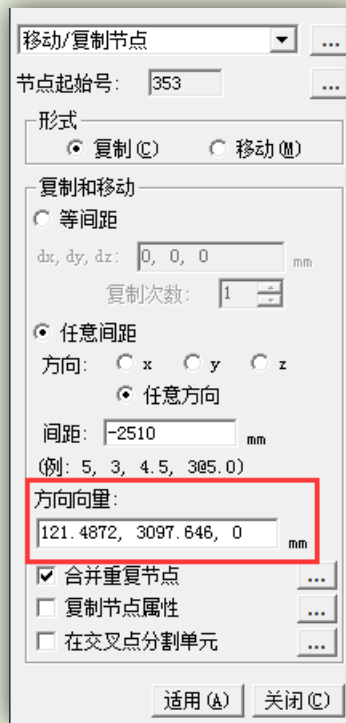
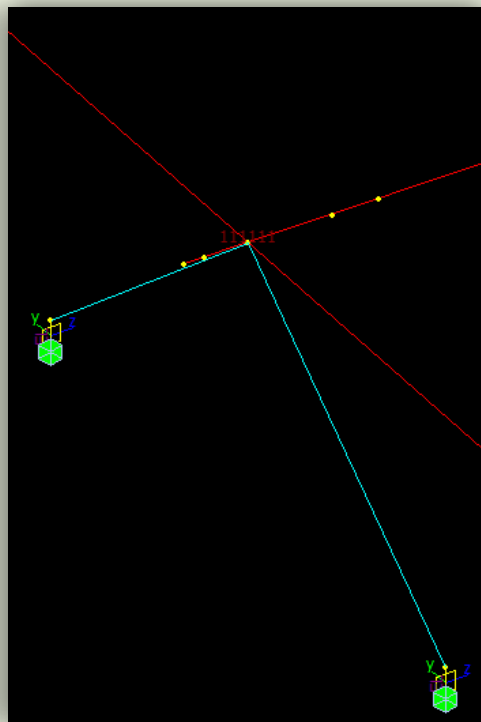
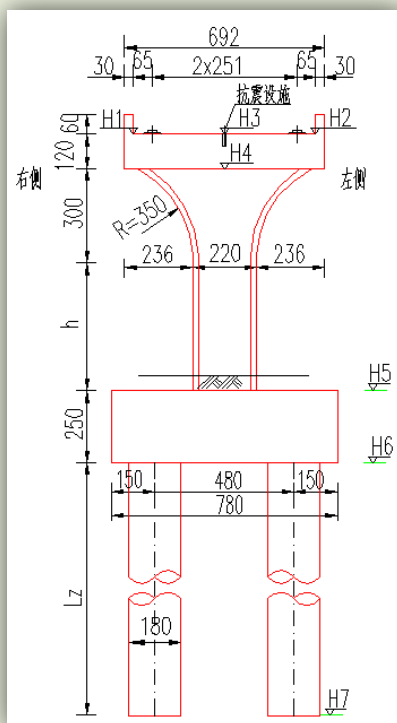
Cym	5110.0097	mm
Czp	150.2437	mm
Czm	199.7563	mm
Qyb	0.0000	mm ²
Qzb	0.0000	mm ²
Peri:O	2.08762e+004	mm
Peri:I	0.00000e+000	mm
Cent:y	5110.0097	mm
Cent:z	1850.7593	mm
y1	-5110.0097	mm
z1	150.2437	mm
y2	150.2437	mm
z2	150.2437	mm
y3	5110.0103	mm
z3	-49.7563	mm
y4	-5110.0097	mm
z4	-49.7563	mm
Zyy	0.0000	mm ³
Zzz	0.0000	mm ³

组合前截面: Part 1

11

3. 边界及施工荷载

(1) 边界



注：

- 1.永久边界应根据施工图设置约束方向（固定支座，单向固定支座，双向固定支座，一般橡胶支座）。
- 2.复制支座上下节点时，可通过点选辅助单元确定任意复制方向。
- 3.弹性连接为单元坐标，SDx为支座抗压（拉）刚度。
- 4.临时边界要保证施工阶段分段几何不可变（不是机动体系）。

3. 边界及施工荷载

(2) 荷载

静力荷载工况

名称:

工况:

类型:

说明:

号	名称	类型
1	桥面板湿重	施工阶段荷载 (CS)
2	铺装	施工阶段荷载 (CS)
3	防撞护栏	施工阶段荷载 (CS)
4	隔板重	施工阶段荷载 (CS)
5	墩顶混凝土	施工阶段荷载 (CS)
6	预应力	施工阶段荷载 (CS)
7	自重	施工阶段荷载 (CS)

定义荷载组

名称:

后缀:

(例: 1 3 5 6 7 to 20 by 2)

↓Z ↓A ↑ ↓

添加(A) 编辑(M) 删除(D) 删除未选(I)

自重
二期
预应力
混凝土湿重
墩顶混凝土

梁单元荷载 (单元)

荷载工况名称:

荷载组名称:

选项: ☒ 添加 ☐ 替换 ☐ 删除

荷载类型:

☒ 偏心

☒ 中心 ☐ 偏心

方向:

距离 (m):

I-端:

J-端:

方向:

投影: ☐ 是 ☒ 否

数值:

☒ 相对值 ☐ 绝对值

x1: x2: x3: x4:

w:

单位: kN/m

荷载类型	荷载值	单位
桥面板湿重	-78	(kN/m)
铺装	-47.52	(kN/m)
防撞护栏 (偏心4.8m)	-10	(kN/m)
隔板重	-28	(kN)
墩顶混凝土	-220	(kN/m)
预应力	1392	(mPa)

注:

1.荷载工况:

- 查看单项内力结果
- 荷载组合

2.荷载组: 施工阶段调用。

3.利用辅助单元很容易得到隔板位置, 横梁位置, 支撑线位置等等, 便于加载。

梁頂面鋼束

钢束坐标N1	起点至梁端	2.56	
	终点至梁端	2.46	
X	Y	Z	R
2.56	0	-0.6	0
6.06	0	-0.15	8
102.94	0	-0.15	8
106.44	0	-0.6	0

添加/编辑钢束形状

钢束名称: 组: 默认值

钢束特性值:

分岔给单元:

输入类型: ☒ 2-D ☐ 3-D

曲线类型: ☐ 样条 ☒ 圆弧 ☐ 抛物线

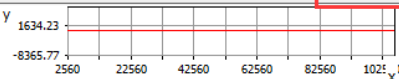
钢束端部直线段长度: 开始: mm 结束: mm

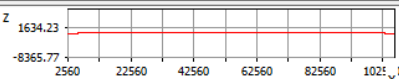
☒ 标准钢束 钢束数量:

无应力场长度 用户定义长度 开始: 结束: mm

布置形状: ☐ 直线 ☐ 曲线 ☒ 单元

坐标轴: ☐ 直线 ☐ 曲线

Y: 

Z: 

	x(mm)	y(mm)	z(mm)	R(mm)
1	2560.0	0.0000	-600.00	0.0000
2	6060.0	0.0000	-150.00	8000.0000
3	10294.0	0.0000	-150.00	8000.0000
4	10644.0	0.0000	-600.00	0.0000
5				

对称点: ☐ 开始 ☒ 最后 生成对称钢束

钢束布置插入点: ☒ I-端 ☐ J-端 单元:

假想x轴方向: ☒ I->J ☐ J->I 单元:

绕x轴旋转角度: [deg] ☒ 投影

偏心: y: mm z: mm

确认(O) 取消(C) 适用(A)

Figure 10-10 shows the construction stage definition interface. It includes four sub-images illustrating the process of adding and defining construction stages and joint sections. The first sub-image shows the 'Add Construction Stage' dialog box with a table of stages. The second and third sub-images show the 'Add/Edit Construction Stage Joint Section' dialog box with a cross-section diagram and a table of joint properties. The fourth sub-image shows the 'Add/Edit Construction Stage Joint Section' dialog box with a table of joint properties.

- 1.施工阶段联合截面设置以截面为对象进行相关的设置。
- 2.施工阶段设置的材料理论厚度龄期的优先级高于定义单元时赋予的值。
- 3.一般截面类型根据激活施工阶段不同程序可以自动识别同样截面不同的单元。
- 4.混凝土湿重模拟桥面板形成过程注意将材料的容重改为0。
- 5.定义收缩徐变函数时注意标号强度为N mm单位体系。

5. 使用阶段荷载——温度

单元温度荷载

荷载工况名称
整体升温

荷载组名称
默认值

选项
☒ 添加 ☐ 替换 ☐ 删除

温度
初始温度: 0 [C]
最终温度: 25 [C]

荷载工况名称
温度梯度降温

荷载组名称
默认值

选项
☒ 添加 ☐ 替换 ☐ 删除

截面类型
☒ 一般截面 ☐ PSC/组合

方向
☐ 局部-y ☒ 局部-z

参考位置
☐ 中心 ☒ +y边(顶) ☐ -y边(底)

截面温度
初始温度: 0 [C]

材料特性: ☐ 单元 ☒ 用户定义

弹性模量 206000 N/mm²
线膨胀系数 1.2e-005 1/[C]

参考: ☒ 顶 ☐ 底

B ☐ 截面 ☒ 48 mm

H1 ☐ Z1 ☒ 350 mm

H2 ☐ Z1 ☒ 2000 mm

T1 -0.45 [C] T2 -0.45 [C]

添加 编辑 删除

No.	Ref.	B	H1	H2
1	T	1...	0	100
2	T	1...	100	200
3	T	9377	200	274
4	T	3849	274	350
5	T	48	350	2000

适用 关闭

注：

- 1.组合截面整体升降温即使连续梁也有自应力。
- 2.温度梯度要综合考虑截面宽度的变化以及温度梯度折线的变化。
- 3.不同材料应分别输入其弹性模量及膨胀系数。
- 4.注意温度梯度一般输入的参考位置是顶。

5. 使用阶段——活载及沉降

表 4.3.1-3 桥涵设计车道数

桥面宽度 W(m)		桥涵设计车道数
车辆单向行驶时	车辆双向行驶时	
$W < 7.0$		1
$7.0 \leq W < 10.5$	$6.0 \leq W < 14.0$	2
$10.5 \leq W < 14.0$		3
$14.0 \leq W < 17.5$	$14.0 \leq W < 21.0$	4
$17.5 \leq W < 21.0$		5
$21.0 \leq W < 24.5$	$21.0 \leq W < 28.0$	6
$24.5 \leq W < 28.0$		7
$28.0 \leq W < 31.5$	$28.0 \leq W < 35.0$	8

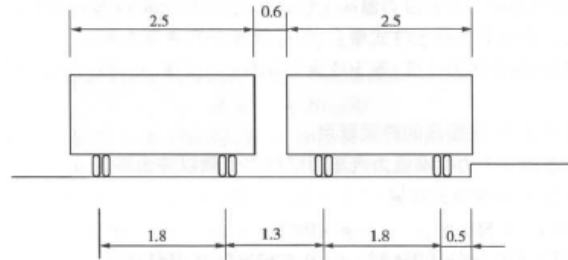
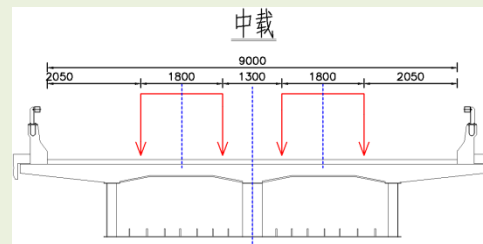
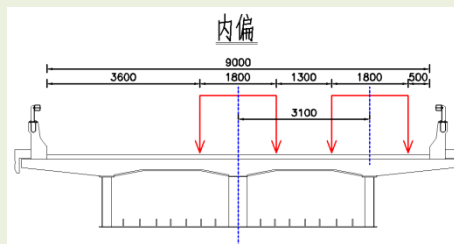
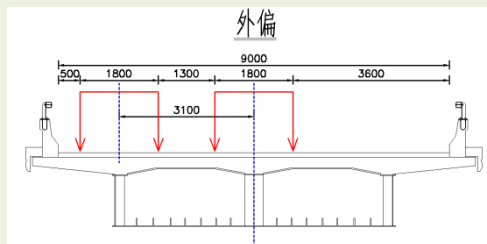


图 4.3.1-3 车辆荷载横向布置



注：

1. 车道数量根据规范表4.3.1-3及行车道宽度确定。
2. 一般结构考虑内偏外偏及中载计算足以。
3. 直桥可进建立一个车道通过定义荷载工况时输入比例系数调整为多车道。

5. 使用阶段——活载及沉降

2014GTSpix

将荷载转换成质量

质量方向：
☐ X ☐ Y ☐ Z
☐ X、Y ☐ Y、Z ☐ X、Z
☒ X、Y、Z

转换的荷载种类：
☒ 节点荷载
☒ 梁单元荷载
☒ 板单元荷载
☒ 压力荷载 (流体压力)

重力加速度: 9806 mm/sec²

荷载工况/组合值系数
荷载工况: 整体升温
组合值系数: 1

荷载工况	系数
桥面板湿重	1

添加 编辑 删除

删除质量数据

确认 取消

移动荷载分析控制数据

荷载控制选项
加载位置: ☒ 影响线加载 ☐ 所有点
生成影响点:
☒ 每个线单元上影响线点数量: 3
☐ 点之间距离: 300 mm

计算位置
板单元: ☐ 内力 (中心) ☒ 内力 (中心+节点)
☐ 应力
杆系单元: ☐ 内力 (最大值) ☒ 内力 (标准 + 当前内力/应力)
☒ 应力

计算选项
☒ 反力 ☒ 全部 ☐ 组:
☒ 位移 ☒ 全部 ☐ 组:
☒ 内力 ☒ 全部 ☐ 组:
☒ 汽车荷载等级 ☒ 公路I级 ☐ 公路II级

冲击系数
规范类型: JTG D60-2004
结构基频方法: 用户输入

f [Hz] 1.51

重力加速度: 9806 mm/sec²
初始温度: 0 [C]

☐ 在图形显示中, 将梁顶标高与楼面标高 (X-Y平面) 对齐
☐ 在图形显示中, 将板顶标高与楼面标高 (X-Y平面) 对齐

5. 使用阶段——活载及沉降

1. 车道数量根据规范表4.3.1-3及行车道宽度确定

2. 一般结构考虑内偏外偏及中载计算足以。

模态号	频率	
	(rad/sec)	(cycle/sec)
1	0.462074	1