

---

# midas Civil 技术资料

## ----砼时间依存性设置-收缩徐变及强度发展

### 目录

<b>midas Civil 技术资料</b>	<b>1</b>
---砼时间依存性设置-收缩徐变及强度发展	1
<b>1 时间依存材料设置-强度发展</b>	<b>2</b>
1.1 强度发展概述	2
1.2 以 CEB-FIP、韩国规范为例设置强度发展函数	3
1.2.1 选用 CEB-FIP 规范设置强度发展函数	3
1.2.2 选用韩国规范设置强度发展函数	5
<b>2 时间依存材料设置-收缩徐变</b>	<b>6</b>
2.1 根据 D62 规范附录 F.2.1 计算徐变系数与程序计算结果对比	6
2.2 根据 D62 规范 F.1.1 手算收缩应变与程序计算结果对比	8
<b>参考文献</b>	<b>10</b>

北京迈达斯技术有限公司

桥梁部

2013/04/12

# 1 时间依存材料设置-强度发展

## 1.1 强度发展概述

混凝土的抗压强度和弹性模量会随时间而变化，其水化反应会持续十几年，强度也随之不断增长。实际的 PSC 结构或桥梁施工中，准确设置初始材龄，合理地考虑这种混凝土的强度发展是必要的。程序考虑时间依存材料（强度发展）是根据国外规范建议公式，模拟混凝土材料强度发展或者弹性模量随时间变化的，同时，程序也可以自行定义时间依存材料的强度发展函数。

中国规范目前没有对强度发展给出具体的规定，所以设计者做结构分析时，如果想考虑龄材料的强度发展，需借鉴其他国家的相关规范的规定。

选用韩国规范计算发展强度，其混凝土抗压强度和弹性模量计算方法如下。

$$f_{ck}(t) = \frac{t}{a + bt} f_{91}$$

混凝土强度小于 30MPa，单位质量（W<sub>c</sub>）为 1450~2500kg/m<sup>3</sup> 时：

$$E_c(t) = 0.043W_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}(t)} \quad (\text{Mpa})$$

混凝土强度大于 30MPa，单位质量（W<sub>c</sub>）为 1450~2500kg/m<sup>3</sup> 时：

$$E_c(t) = 0.030W_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}(t)} + 7700 \quad (\text{Mpa})$$

式中：

$f_{91}$ ——91d 抗压强度；  $f_{ck}(t)$ ——任意时间 t 的抗压强度；

$E_c(t)$ ——28d 弹性模量； a、b——混凝土抗压强度系数；根据水泥类型决定

a 和 b 的值。

选用 CEB-FIP 规范，即国际混凝土结构协会的标准来考虑强度发展。

$$\sigma_c(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t_{eq}/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \sigma_{c(28)}$$

式中：

s——水泥种类系数；

$\sigma_{c(28)}$  ——28d 抗压强度；

t<sub>1</sub>——1day

选用 Japan(Hydration)规范

$$f_{ck}(t) = \frac{t}{a + bt} d_{28} f_{ck}$$

式中： $f_{ck}$ ——混凝土 28d 抗压强度

a、b、 $d_{28}$ ——混凝土抗压强度系数，根据水泥类型决定；

针对以上规范的 a、b、 $d_{28}$  这三项参数取值可参考表 1-1：

表 1-1 a、b、 $d_{28}$  这三项参数取值

水泥种类	a	b	$d_{28}$
早强水泥	2.9	0.97	1.07
一般水泥	4.5	0.95	1.1
缓凝水泥	6.2	0.93	1.15

## 1.2 以 CEB-FIP、韩国规范为例设置强度发展函数

输入时间依存材料（强度发展）时，需要输入混凝土 28d 抗压强度标准值或者 91d 抗压强度标准值，但要考虑圆柱体和立方体强度的换算关系，很难把握。在做设计时，如果要考虑强度发展，无论采取那种规范的强度发展函数，我们借鉴的应该是强度发展的趋势曲线，而非某个具体的强度值，故可以通过下述原则设置强度发展函数。

以我国规范 C50 混凝土为例，其 28d 弹性模量  $E=3.45 \times 10^7 \text{KN/m}^2$ ，无论我们采用哪种规范，最终我们期望得到的是 28d 的弹模 E 值约等于 D62-04 中规定的值，强度发展的趋势按照我们选取的规范规定。那么，我们可以通过定义一个总龄期为 28d 的施工阶段，运行后在结果表格中查看施工阶段的弹性模量 E，如果 28d 时，E 值约等于 D62-04 中规定的龄设计强度对应的 E 值，这时在定义强度发展函数时，输入的 28d 或 91d 抗压强度值可近似认为是符合要求的。

### 1.2.1 选用 CEB-FIP 规范设置强度发展函数

对于中国规范 C50 龄，采用 CEB-FIP 规范，输入 28d 抗压强度  $50 \times 0.827 = 41.35 \text{MPa}$ （RS 水泥），施工阶段里结构初始材龄定义 10d，持续时间定义 18d（刚好总天数为 28d），如图 1-1 所示。

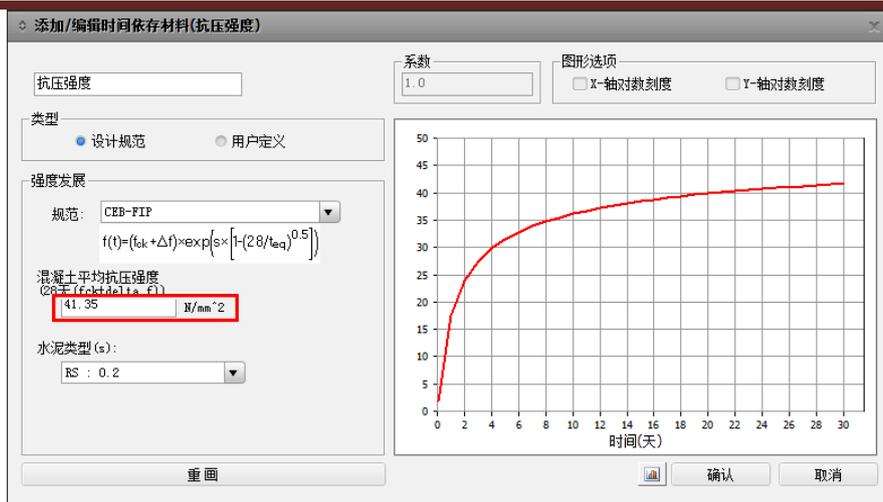


图 1-1 CEB-FIP 规范抗压强度定义



图 1-2 施工阶段设置

表 1-2 28d 弹性模量 E

单元	开始材龄	结束材龄	开始弹性模量 (N/mm <sup>2</sup> )	结束弹性模量 (N/mm <sup>2</sup> )	累积收缩	徐变系数
在施工阶段0号块中的单元特性值。						
Stage	0号块		适用			
1	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
2	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
3	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
4	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
5	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
6	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
7	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
8	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
9	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
10	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
11	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
12	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
13	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
14	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
15	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000
16	10.00	28.00	32261.7840	34508.8350	0.0000	0.0000

从表 1-2 中我们可以看到，在 28d 混凝土弹性模量约等于  $3.45 \times 10^7 \text{KN/m}^2$ ，在图 1-1 中填入的 28d 抗压强度值 41.35MPa（即换算系数为 0.827）可认为是近似准确的，如此处弹模值与 D62 规定的弹模值不一致，可继续调整输入的强度值，或者根据设计者自己的试验数据调整。

### 1.2.2 选用韩国规范设置强度发展函数

同样对于中国规范 C50 砼，采用韩国规范，输入 91d 抗压强度 58MPa，水泥类型选用“一般水泥”（ $a=4.5$ ； $b=0.95$ ），施工阶段设置同上，如图 1-3 所示。

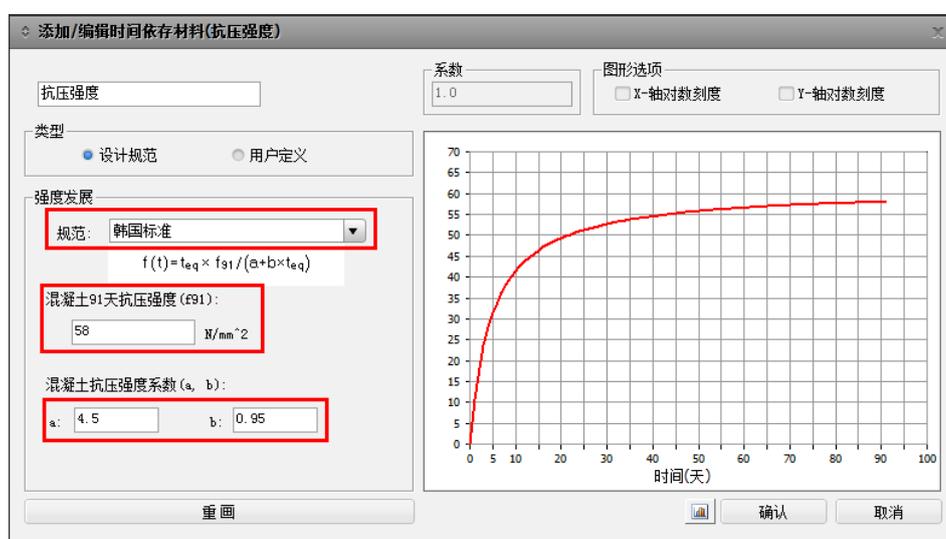


图 1-3 韩国规范抗压强度定义

表 1-3 28d 弹性模量 E

单元	开始材龄	结束材龄	开始弹性模量 (N/mm <sup>2</sup> )	结束弹性模量 (N/mm <sup>2</sup> )	累积收缩	徐变系数
在施工阶段(0号块)中的单元特性值。						
Stage	0号块		适用			
1	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
2	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
3	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
4	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
5	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
6	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
7	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
8	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
9	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
10	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
11	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
12	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
13	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
14	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
15	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000
16	10.00	28.00	31478.6059	34498.7373	0.0000	0.0000

通过计算，根据表 1-3 所示，28d 混凝土弹性模量近似为  $3.45 \times 10^7 \text{KN/m}^2$ ，这时，在图 1-3 中填入的 91d 抗压强度值 58Mpa 可认为是近似准确的。

表 1-4 总结出中国规范 C50-C20 在 CEB-FIP 规范下 28d 抗压强度值与在韩国规范下 91d

抗压强度值。

表 1-4 28d 抗压强度或 91d 抗压强度

规范类型	C50	C40	C30	C20
CEB-FIP 28d抗压强度 (Mpa)	41.35	34.6	27.1	16.7
韩国规范 91d抗压强度 (Mpa)	58	49.9	40.65	24.38

综上所述，如此设置的核心是，我们借鉴的是某一个规范给出的龄强度发展趋势，以某一龄期（28d 或 91d）的龄强度标准值为对照点，进行强度发展函数设置。

## 2 时间依存材料设置-收缩徐变

混凝土的收缩是指混凝土体内水泥凝胶体中游离水蒸发而使本身体积缩小的一种物理化学现象，即其硬化过程中发生体积变化的现象，它是一种不依赖于荷载而与时间、气候等因素有关的干燥变形。混凝土的徐变是指在持续荷载作用下，混凝土结构变形将随时间增长而不断增加的现象。徐变在加载初期发展较快，而后逐渐减慢，其延续时间可达数十年。

因此，在混凝土结构设计中，收缩徐变是一个不可忽略的重要影响因素，根据 JTG D62-2004 规范，混凝土收缩徐变必须考虑。

Civil 如何定义收缩徐变及其与施工阶段的关联，详见《桥梁荟》3 月刊。

### 2.1 根据 D62 规范附录 F.2.1 计算徐变系数与程序计算结果对比

程序计算：

以零号块为例，在初始材龄  $t_0$  为 15d，计算材龄  $t$  为 47d，程序计算徐变系数为 0.5136，如下表：

单元	开始材龄	结束材龄	开始弹性模量 (kN/m <sup>2</sup> )	结束弹性模量 (kN/m <sup>2</sup> )	累积 收缩	徐变系数
在施工阶段[0号块]中的单元特性值。						
Stage		0号块		适用		
7	15.00	47.00	34500000.0000	34500000.0000	-0.0000	0.5136
8	15.00	47.00	34500000.0000	34500000.0000	-0.0000	0.5136
9	15.00	47.00	34500000.0000	34500000.0000	-0.0000	0.5136
10	15.00	47.00	34500000.0000	34500000.0000	-0.0000	0.5136

根据规范计算：

根据规范 D62-04 式 F.2.1，

**F.2.1** 混凝土的徐变系数可按下列公式计算:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (F.2.1-1)$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (F.2.1-2)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}} \quad (F.2.1-3)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \quad (F.2.1-4)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \quad (F.2.1-5)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_{RH} + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (F.2.1-6)$$

$$\beta_{RH} = 150 \left[ 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (F.2.1-7)$$

式中  $t_0$ ——加载时的混凝土龄期(d);  
 $t$ ——计算考虑时刻的混凝土龄期(d);  
 $\phi(t, t_0)$ ——加载龄期为  $t_0$ , 计算考虑龄期为  $t$  时的混凝土徐变系数;  
 $\phi_0$ ——名义徐变系数;  
 $\beta_c$ ——加载后徐变随时间发展的系数。

式中  $f_{cm}$ 、 $f_{cm0}$ 、 $RH$ 、 $RH_0$ 、 $h$ 、 $h_0$ 、 $t_1$  的意义及其采用值与第 F.1.1 条相同。

**F.1.1** 混凝土的收缩应变可按下列公式计算:

$f_{cm}$ ——强度等级 C20 ~ C50 混凝土在 28d 龄期时的平均立方体抗压强度(MPa),  $f_{cm} = 0.8f_{cu,k} + 8\text{MPa}$ ;

$f_{cu,k}$ ——龄期为 28d, 具有 95% 保证率的混凝土立方体抗压强度标准值(MPa);

$\beta_{RH}$ ——与年平均相对湿度相关的系数, 公式(F.1.1-4)适用于  $40\% \leq RH < 90\%$ ;

$RH$ ——环境年平均相对湿度(%);

$\beta_{sc}$ ——依水泥种类而定的系数, 对一般的硅酸盐类水泥或快硬水泥,  $\beta_{sc} = 5.0$ ;

$h$ ——构件理论厚度(mm),  $h = 2A/u$ ,  $A$  为构件截面面积,  $u$  为构件与大气接触的周边长度;

$RH_0 = 100\%$ ;

$h_0 = 100\text{mm}$ ;

$t_1 = 1\text{d}$ ;

$f_{cm0} = 10\text{MPa}$ 。

如上图, 式中计算徐变主要跟混凝土加载龄期 ( $t_0$ ) 和计算龄期( $t$ )、混凝土标号强度 ( $f_{cm}$ 、 $f_{cm0}$ )、所处环境相对湿度 ( $RH$ 、 $RH_0$ ) 以及结构的构建理论厚度 ( $h$ 、 $h_0$ )。

每项参数根据规范和程序定义值分别取值如下:

$t_0=15\text{d}$ 、 $t=47\text{d}$ 、 $t_1=1\text{d}$   
 $f_{cm}=0.8f_{cu,k}+8=0.8 \times 5+8=48\text{MPa}$ 、 $f_{cm0}=10\text{MPa}$   
 $RH=70\%$ 、 $RH_0=100\%$   
 $h=2205.37\text{mm}$ 、 $h_0=100\text{mm}$

单元	类型	h (mm)	v/s (mm)
1	构件的理论厚	721.37	0.00
2	构件的理论厚	900.26	0.00
3	构件的理论厚	1133.04	0.00
4	构件的理论厚	1408.91	0.00
5	构件的理论厚	1715.68	0.00
6	构件的理论厚	2040.27	0.00
7	构件的理论厚	2205.37	0.00
8	构件的理论厚	2205.37	0.00
9	构件的理论厚	2205.37	0.00
10	构件的理论厚	2205.37	0.00
11	构件的理论厚	2040.27	0.00
12	构件的理论厚	1715.68	0.00
13	构件的理论厚	1408.91	0.00
14	构件的理论厚	1133.04	0.00
15	构件的理论厚	900.26	0.00
16	构件的理论厚	721.37	0.00

根据 F.2.1 求解得:

$$\beta_{RH} = 150 \left[ 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250$$

$$= 150 \times [1 + (1.2 \times 0.7)^{18}] (2205.37/100) + 250 = 3701.47 > 1500, \text{取 } 1500;$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_{RH} + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3}$$

$$= \left[ \frac{(47-15)/1}{1500 + (47-15)/1} \right]^{0.3} = 0.3133$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}}$$

$$= \frac{1}{0.1 + (15/1)^{0.2}} = 0.5498$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}}$$

$$= \frac{5.3}{(48/10)^{0.5}} = 2.4191$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}}$$

$$= 1 + \frac{1 - 0.7}{0.46(2205.37/100)^{1/3}} = 1.23256;$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

$$= 1.23256 \times 2.4191 \times 0.5498 = 1.63933;$$

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$$

$$= 1.63933 \times 0.3133 = 0.5136$$

可见，程序计算结果和依据规范计算结果，徐变系数一致。

## 2.2 根据 D62 规范 F.1.1 手算收缩应变与程序计算结果对比

程序计算值：

收缩开始时龄期  $t_0=3d$ ，计算龄期  $t=47d$ ，程序计算 47d 收缩应变为  $-6.0569e-6$



根据规范计算值：

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

$$= \left[ \frac{(47-3)/1}{350\left(\frac{2205.37}{100}\right)^2 + (47-3)/1} \right]^{0.5} = 0.016075$$

$$\beta_{RH} = 1.55[1 - (RH/RH_0)^3]$$

$$= 1.55[1 - (0.7/1)^3] = 1.01835$$

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

$$= [160 + 10 \times 5 \times (9 - 48/10)] \times 10^{-6} = 0.00037$$

$$\epsilon_{cso} = \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}$$

$$= 0.00037 \times 1.01835 = 0.00037679$$

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cso} \cdot \beta_s(t - t_s)$$

$$= 0.00037679 \times 0.016075 = 6.0569e-6$$

这里手算值与程序计算值也是一致的，但需注意，程序为了统一变形的查看，将收缩应变均设为了负值。以下是附录 F 的相关内容，供参考。

## F.1 收缩应变

**F.1.1** 混凝土的收缩应变可按下列公式计算：

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

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

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

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

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

式中  $t$ ——计算考虑时刻的混凝土龄期(d)；

$t_s$ ——收缩开始时的混凝土龄期(d),可假定为 3~7d；

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

$\epsilon_{cso}$ ——名义收缩系数；

$\beta_s$ ——收缩随时间发展的系数；

$f_{cm}$ ——强度等级 C20~C50 混凝土在 28d 龄期时的平均立方体抗压强度(MPa),  $f_{cm} = 0.8f_{cu,k} + 8\text{MPa}$ ；

$f_{cu,k}$ ——龄期为 28d, 具有 95% 保证率的混凝土立方体抗压强度标准值(MPa)；

$\beta_{RH}$ ——与年平均相对湿度相关的系数, 公式(F.1.1-4)适用于  $40\% \leq RH < 90\%$ ；

$RH$ ——环境年平均相对湿度(%)；

$\beta_{sc}$ ——依水泥种类而定的系数, 对一般的硅酸盐类水泥或快硬水泥,  $\beta_{sc} = 5.0$ ；

$h$ ——构件理论厚度(mm),  $h = 2A/u$ ,  $A$  为构件截面面积,  $u$  为构件与大气接触的周边长度；

$RH_0 = 100\%$ ；

$h = 100\text{mm}$ ；

$t_1 = 1\text{d}$ ；

$f_{cm0} = 10\text{MPa}$ 。

## 参考文献

1. 交通部, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 JTG D62-2004, 北京: 人民交通出版社, 2004;
2. midas Civil2010 分析设计原理;