

考虑膨胀效应的超长钢筋混凝土结构应力数值计算方法

程 井¹,常晓林²,周 伟²

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:针对考虑混凝土自生体积膨胀效应的超长钢筋混凝土结构施工期温度应力的特点,提出了基于分离式钢筋混凝土有限元模型及叠加原理的分步算法来计算其应力及应变。钢筋采用三维空间的杆系单元来离散,混凝土自生体积变形采用等效温度荷载来模拟计算。分步计算钢筋混凝土结构在常规荷载及自生体积变形作用条件下的应力应变场,再进行叠加即可得到结构的真实应力应变场。以南水北调中线工程某泵站厂房超长底板为例对该算法进行了验证,结果表明该方法理论思路清楚,能够较好地反映结构的真实受力特性,适合于工程应用。

关键词:非线性有限元;超长钢筋混凝土结构;叠加原理;自生体积变形;膨胀混凝土;温控仿真
中图分类号:TV315;TV332 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2010)S1-0028-05

超长无缝钢筋混凝土结构是近年来发展起来的一种技术,主要原理为通过混凝土的自生体积膨胀及钢筋的约束作用产生预压应力,来抵消一部分混凝土后期温降收缩导致的拉应力,增大无缝混凝土浇筑块的尺寸。由于不设置伸缩缝,可以节省成本,缩短工期,且能极大地提高建筑物的抗震性能,目前已经广泛应用于各种土木结构及水工结构^[1-3]。但由于补偿收缩钢筋混凝土结构受力复杂,涉及施工期瞬态温度场、混凝土弹性模量变化、混凝土徐变效应、自生体积变形以及钢筋与混凝土之间的相互作用等,目前大部分只是依据经验公式进行施工设计,缺少较为成熟的数值计算方法。

目前大体积混凝土结构温度应力的有限元技术已经很成熟^[4-6],可以通过混凝土的等效弹性模量来考虑混凝土的徐变效应^[7-8]。如果施工过程中采用通水冷却措施,先采用半解析法获得水管附近混凝土的温度变化,然后根据降温效果采用等效的负水化热荷载来模拟计算^[9-10]。对于混凝土的自生体积变形,也可以采用等效温度来计算^[11-12]。

钢筋混凝土结构与普通大体积混凝土结构温控计算有 2 点不同。①考虑温度荷载时,钢筋和混凝土的线胀系数一般不同;②钢筋不存在自生体积变形,因此,在采用等效温度荷载来模拟自身体积变形时,钢筋部分是不能施加温度荷载的。这导致了计

算的困难。目前钢筋混凝土结构有限元模型主要有 3 种:整体式模型、分离式模型和组合式模型^[13-14]。本文选择了分离式钢筋模型。应力计算过程分为 2 步:第 1 步,钢筋和混凝土均考虑线胀系数,先计算施工期结构瞬态温度场,然后依据温度场计算结果施加温度荷载和常规荷载,计算结构的应力应变场;第 2 步,依据混凝土的自生体积变形和混凝土的线胀系数来假定等效的温度荷载,施加边界约束条件计算结构的应力应变场,此时混凝土仍考虑其真实的线胀系数,但不考虑钢筋单元的线胀系数。计算过程中,采用相同的时间步长和混凝土弹性模量。因为混凝土的等效弹性模量仅仅与时间有关,在每个时间点近似为线弹性问题。依据混凝土弹性徐变理论,当应力比不超过 0.5 时可以不考虑混凝土的塑性变形,叠加原理是适用的^[6]。因此,可以采用叠加原理来分析,将温度应力及自生体积变形应力叠加,所得综合应力即为混凝土的真实仿真应力。由于分开考虑温度荷载和自生体积荷载能够真实反映钢筋的约束作用,故可以为工程提供较好的参考价值。

最后,编制了相应程序,并对某实际工程进行了计算分析,所得结果为工程提供了重要的参考依据。

1 计算基本理论

施工期温度场的计算理论本文不再赘述,可参

考文献 [6] 本节主要介绍考虑徐变效应的应力场、自生体积变形的计算原理及钢筋混凝土构件的有限元离散模型。

1.1 混凝土徐变应力应变关系

混凝土是弹性徐变体 ,特别是其早期荷载徐变较大。在仿真计算过程中采用等效弹性模量来考虑混凝土的徐变影响 ,采用增量法求解徐变应力。对于空间问题 ,应力应变列阵分别为 $\boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{xz}]^T$ 和 $\boldsymbol{\sigma}=[\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{xz}]^T$ 。假定混凝土在时段 $\Delta\tau=\tau_n-\tau_{n-1}$ 内应力增量和应变增量分别为 $\Delta\sigma_n$ 和 $\Delta\varepsilon_n$ $\Delta\varepsilon_n$ 可以表示如下 :

$$\Delta\varepsilon_n=\Delta\varepsilon_n^e+\Delta\varepsilon_n^C+\Delta\varepsilon_n^T+\Delta\varepsilon_n^0+\Delta\varepsilon_n^S \quad (1)$$

其中
$$\Delta\varepsilon_n^e=\frac{1}{E(\bar{\tau}_n)}\boldsymbol{Q}\Delta\sigma_n \quad (2)$$

$$\Delta\varepsilon_n^C=\eta_n+\alpha(t_n,\bar{\tau}_n)\boldsymbol{Q}\Delta\sigma_n \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon_n^T=\alpha\Delta T_n\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \chi(1+\mu) & 0 & 0 \\ & & & & \chi(1+\mu) & 0 \\ & \text{对} & & & & \chi(1+\mu) \\ & \text{称} & & & & \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 : $\Delta\varepsilon_n^e,\Delta\varepsilon_n^C,\Delta\varepsilon_n^T,\Delta\varepsilon_n^0,\Delta\varepsilon_n^S$ 分别为该时段内的弹性应变增量、徐变增量、温度应变增量、自生体积变形增量、干缩应变增量 ; $E(\bar{\tau}_n)$ 为 $\Delta\tau$ 时段内混凝土的平均弹性模量 ; $\alpha(t_n,\bar{\tau}_n)$ 为混凝土的徐变度 ; $\boldsymbol{Q}$ 为泊松比的矩阵。

由式 (1)~(3) 可以得到三维复杂应力状态下应力增量与应变增量的关系 :

$$\left[\frac{1}{E(\bar{\tau}_n)}+\alpha(t_n,\bar{\tau}_n)\right]\boldsymbol{Q}\Delta\sigma_n=\Delta\varepsilon_n-\eta_n-\Delta\varepsilon_n^T-\Delta\varepsilon_n^0-\Delta\varepsilon_n^S \quad (6)$$

或

$$\Delta\sigma_n=\bar{\boldsymbol{D}}_n(\Delta\varepsilon_n-\eta_n-\Delta\varepsilon_n^T-\Delta\varepsilon_n^0-\Delta\varepsilon_n^S) \quad (7)$$

其中
$$\bar{\boldsymbol{D}}_n=E_n^*\boldsymbol{Q}^{-1}$$

$$E_n^*=\frac{E(\bar{\tau}_n)}{1+E(\bar{\tau}_n)\alpha(t_n,\bar{\tau}_n)}$$

式中 : $\bar{\boldsymbol{D}}_n$ 为弹性矩阵 ; E_n^* 为该时段的混凝土等效弹性模量。

1.2 混凝土徐变应力有限元计算

混凝土徐变应力有限元计算的增量平衡方程为

$$\boldsymbol{K}\Delta\delta=\Delta P_n^L+\Delta P_n^C+\Delta P_n^T+\Delta P_n^0+\Delta P_n^S \quad (8)$$

式中 : $\boldsymbol{K}$ 为系统整体刚度矩阵 ,由单元刚度矩阵

$$\boldsymbol{K}_e=\iiint_{\Omega_e}\boldsymbol{B}^T\bar{\boldsymbol{D}}_n\boldsymbol{B}d\Omega \text{ 叠加而成 ;}\Delta P_n^L,\Delta P_n^C,\Delta P_n^T,$$

$\Delta P_n^0,\Delta P_n^S$ 分别为外荷载、徐变、温度、自生体积变形及干缩应变引起的节点荷载增量。 ΔP_n^L 可通过对相应的边界面积分或域积分求得 ,其他通过域积分求得 ,如徐变引起的节点荷载增量 :

$$\Delta P_n^C=\iiint\boldsymbol{B}^T\bar{\boldsymbol{D}}_n\eta_nd\Omega \quad (9)$$

求得节点位移增量 $\Delta\delta_n$ 后 ,可由式 (7) 得到单元应力增量 $\Delta\sigma_n$ 。单元应力等于各时段应力增量之和 ,即

$$\sigma_n=\Delta\sigma_1+\Delta\sigma_2+\Delta\sigma_3+\cdots+\Delta\sigma_n=\sum\Delta\sigma_n \quad (10)$$

1.3 钢筋混凝土有限元离散模型

3 种钢筋混凝土有限元模型中 ,整体式模型是将钢筋弥散于整个单元中 ,并把单元视为均质材料 ,材料的刚度矩阵由钢筋和混凝土的刚度矩阵 2 部分组成而成 ,显然 ,这种模型不能反映钢筋对混凝土自生体积变形的约束作用。分离式模型分别把钢筋和混凝土离散成不同的单元 ,通过联结单元来反映钢筋和混凝土之间的相互作用。而组合式模型介于两者之间 ,又分为分层组合式和复合单元 2 种 ,分层式将构件沿纵向分成若干混凝土条带和钢筋条带 ,复合式则在单元内部考虑钢筋对刚度矩阵的贡献。组合式模型由于将钢筋和混凝土的相互作用统一在单元刚度矩阵内部 ,仍然不能反映钢筋和混凝土之间的相互温度约束作用。因此采取分离式模型 ,分别用三维杆单元和六面体实体单元来模拟钢筋和混凝土。对于大型问题 ,如果假定结构在弹性范围内工作 ,混凝土与钢筋之间黏结良好 ,不考虑塑性变形及开裂 ,可以不用联结单元。此时 ,混凝土和钢筋通过在公共节点处等位移来实现关联。假定膨胀混凝土的钢筋基本承受轴向力作用。如图 1 中 ,钢筋单元 $s_1\sim s_4$ 与周围的六面体单元通过共用节点 $k_1\sim k_5$ 发生关联。组装刚度矩阵时 ,分别将钢筋单元和实体混凝土单元的刚度矩阵组装到整体刚度矩阵中 ,然后进行求解。

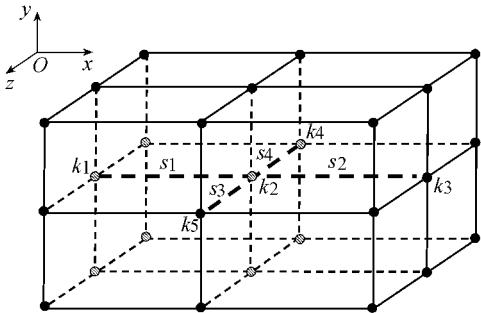


图 1 钢筋和混凝土离散模型

记整体坐标系为 $\{i \ j \ k\}$,钢筋单元 P_1P_2 的局部坐标系为 $\{i' \ j' \ k'\}$,见图 2 ,则有

$$i'=\frac{1}{l_e}(x_{21}^ei+y_{21}ej+z_{21}ek) \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned}x_{21}^e &= x_2^e - x_1^e \\y_{21}^e &= y_2^e - y_1^e \\z_{21}^e &= z_2^e - z_1^e\end{aligned}$$

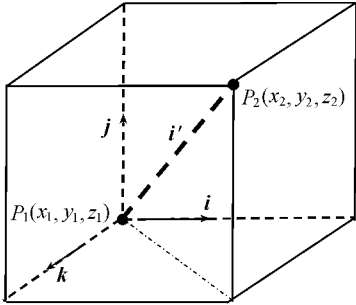


图2 钢筋的三维杆单元

通过三维坐标变换可以得到钢筋的单元刚度矩阵^[15]：

$$K^e = R^{eT} K'^e R^e \tag{12}$$

其中 K'^e 为钢筋单元局部坐标系下的刚度矩阵, R^e 为转换矩阵：

$$K'^e = \frac{AE}{l^e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$R^e = \frac{1}{l^e} \begin{bmatrix} x_{21}^e & y_{21}^e & z_{21}^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{21}^e & y_{21}^e & z_{21}^e \end{bmatrix} \tag{14}$$

2 工程应用实例

南水北调中线工程某泵站厂房底板为弹性地基上 20 m×50 m×3 m 的钢筋混凝土板块,6 月 1 日开始浇筑混凝土(第 1 年的第 152 天)。采用掺膨胀剂的 C30 混凝土,导热系数为 8.165 kJ/(m·h·℃),线胀系数为 0.78×10⁻⁵℃⁻¹,泊松比为 0.167。其他热力学材料参数拟合函数见表 1。钢筋弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,线胀系数为 1.1×10⁻⁵℃⁻¹。基础较为松软,弹性模量为 5 GPa,泊松比为 0.3。浇筑时平均地温为 20℃,混凝土浇筑温度为 19.95℃,浇筑后第 10 天拆模。养护期及后期低温季节采取表面保温措施。浇筑块在靠近上下面处布置 2 层钢筋网,

表 1 混凝土热力学参数

参数	计算公式
绝热温升 (℃)	$\alpha(\tau) = 35\tau / (1.5 + \tau)$
弹性模量 (GPa)	$E_c = \begin{cases} 3.1\tau & \tau \leq 7 \\ 53.6 - 156.7 \exp(-\tau^{0.226}) & \tau > 7 \end{cases}$
自生体积变形 (10 ⁶)	$C_s(\tau) = \begin{cases} 0.4\tau^3 - 8.4\tau^2 + 52.8\tau + 9.6 & \tau \leq 7 \\ 0.0076\tau^2 - 1.09\tau + 111.51 & 7 < \tau \leq 90 \\ 72.6 & \tau > 90 \end{cases}$
混凝土徐变度 (10 ⁻⁶ MPa ⁻¹)	$\alpha(t, \tau) = (6.9 + 138.2\tau^{-0.45}) \cdot \{1 - \exp[-(0.118 + 0.29\tau^{-0.625})(t - \tau)^{0.44}]\}$

注: τ 表示混凝土的龄期, d。

钢筋直径为 26 mm,横纵向间距均为 150 mm。有限元计算模型及坐标系定义见图 3~4。

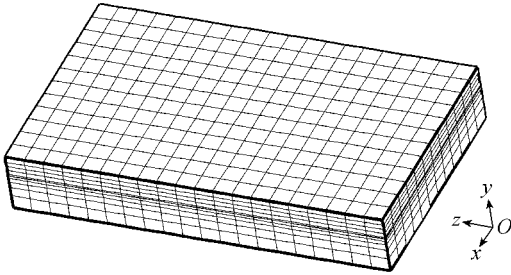


图3 混凝土底板及部分地基有限元模型

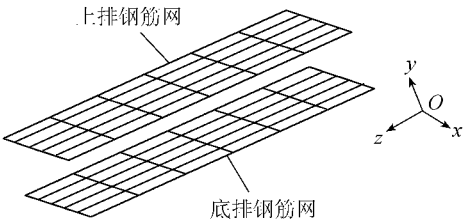


图4 钢筋网一角

工程区气温拟合曲线为

$$T(\tau) = 11.75 + 15.54 \cos\left[\frac{2\pi}{365}(\tau - 196)\right]$$

计算时长为 2 年,采用变步长计算,0~1 d 步长为 0.1 d,1~6 d 步长为 0.5 d,后期步长逐渐加大至 5 d。温度场计算结果见图 5,其中典型点 P1、P2、P3 分别为板块中心点的底部、中心和顶部节点。施工期底板混凝土最高温度在 24~40℃ 之间。中心混凝土温度最高,在第 158 天(龄期为 6 d)时达到极值 39.9℃,然后逐渐下降。后期各点温度基本随气温曲线起伏变化,各点温度随着距表面深度增加的变化幅度减小,且与气温曲线的相位差变大。表面混凝土在第 372 天时温度最低,保温时为 2.2℃。

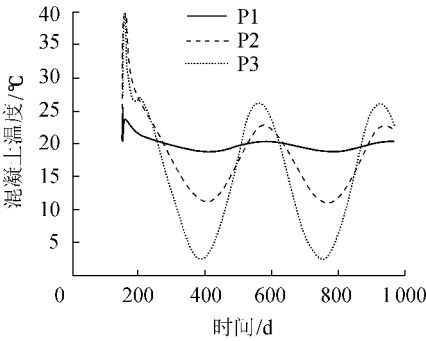


图5 底板不同深度处温度时程变化

Z 方向温度应力、自生体积变形应力及综合应力计算结果见图 6~8,X 方向应力与此类似,限于篇幅不再给出图例,分析结果如下：

a. 混凝土底板沿高度方向温度应力很小,主要为水平向应力。对于 Z 方向温度应力,见图 6,初期主要为压应力,中心部分达 2 MPa。然后随着混凝土

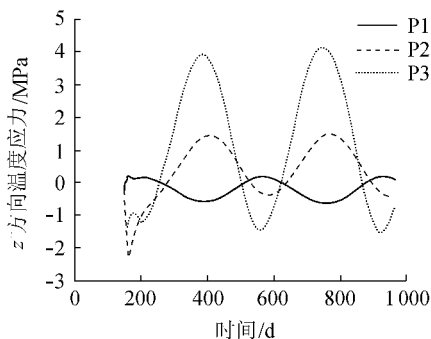


图6 底板不同深度处 z 方向温度应力时程变化

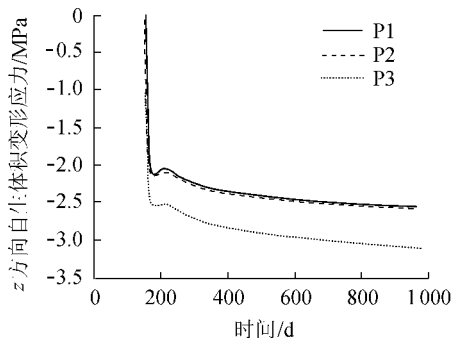


图7 底板不同深度处 z 方向自生体积变形应力时程变化

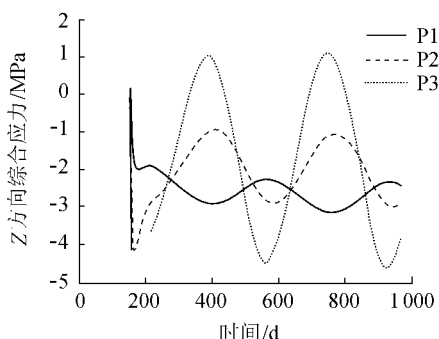


图8 底板不同深度处 z 方向综合应力时程变化
平均温度的逐渐下降,压应力逐渐减小甚至在中心和顶部部分变为拉应力。冬季顶部拉应力达 4 MPa,中心部分为 1.4 MPa。之后随着温度升高拉应力又逐渐减小,如此反复。 x 方向温度应力与 z 方向类似,冬季顶部最高温度拉应力为 3.7 MPa。

b. 自生体积变形应力主要为压应力,随混凝土自生膨胀变形和弹性模量的增大而不断增大。 z 方向体积变形产生的压应力达 2.2 ~ 3.2 MPa, x 方向压应力达 1 ~ 3.2 MPa。另外,靠近上下钢筋网的混凝土应力要比中心部分的大。

c. 叠加后,低温季节底板混凝土表面及中心最大拉应力显著减小,各方向水平拉应力云图见图 9、图 10。混凝土 z 方向最大拉应力约为 1.2 MPa 左右, x 方向最大拉应力约为 1 MPa。可见,混凝土自身体积变形可以极大地减小混凝土的后期应力。从图中还可以发现, z 方向综合应力分布在表面的中

心部分呈马鞍形,有 2 个极值区。

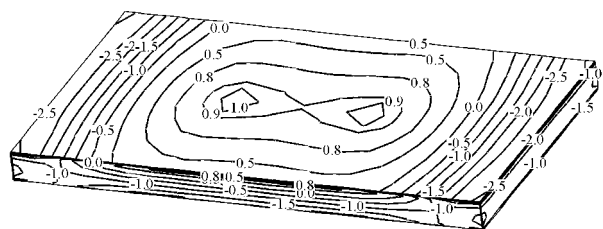


图9 底板第 372 天 z 方向综合应力等值线(单位:MPa)

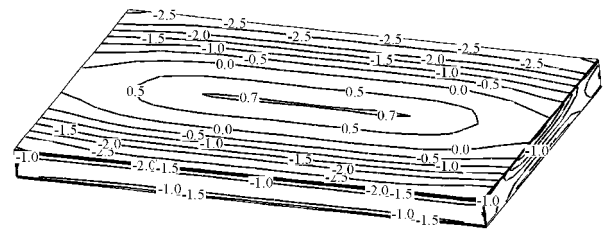


图10 底板第 372 天 x 方向综合应力等值线(单位:MPa)

3 结 语

超长无缝钢筋混凝土结构施工期温度应力计算复杂,涉及混凝土材料性能、施工措施、气温、地质条件及钢筋布置等多项因素,传统的设计理论很难解决这些问题。为此,笔者基于大体积混凝土计算的相关理论和钢筋混凝土结构有限元理论,依据钢筋混凝土结构的变形及受力特性,提出了基于叠加原理的各种应力数值计算方法。计算结果表明该方法可以用于实际工程的设计和计算。

a. 该方法能够很好地模拟混凝土的温度变形、自生膨胀变形、钢筋的实际布置情况,计算结果能够反映钢筋混凝土结构的温度应力以及自生体积变形产生的应力。

b. 计算时假定混凝土与钢筋之间黏结完好,且混凝土为弹性徐变体,不产生塑性变形。

c. 典型大型工程实例计算结果表明,自生体积变形可以在混凝土内部产生约 2 MPa 的预压应力。这将非常有效地降低混凝土后期表面及内部拉应力。另外计算还发现,钢筋不仅可以通过约束混凝土的变形在内部中心产生预压应力,还可以有效地减小表面混凝土的膨胀拉应力。

该方法计算的一个主要困难是钢筋单元的生成,特别是结构较大且钢筋布置较为复杂时,前处理工作量很大。本文采用参数化建模,可以方便地生成钢筋单元。

参考文献:

- [1] 葛军,张新培. 钢筋混凝土超长结构无缝设计研究综述[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(2): 12-15.
- [2] 徐沛然. 补偿混凝土收缩技术在超长结构无缝设计施工

中的应用[J].施工技术,2005(4):52-54.

[3]李茂生.超长钢筋混凝土框架结构的无缝设计[J].铁道标准设计,2005(1):84-85.

[4]BAZANT Z P,PANULA L. practical prediction of time-dependent deformations of concrete ;Part 1 :shrinkage[J]. Material and Structures ,1978 65(11) 301-316.

[5]BAZANT Z P,PANULA L. Practical prediction of time-dependent deformations of concrete ;part 2 :basic creep[J]. Material and Structures ,1978 65(11) 317-328.

[6]朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.

[7]朱伯芳.关于混凝土徐变理论的几个问题[J].水利学报,1985(3):35-40.

[8]朱伯芳.混凝土徐变方程参数拟合的约束极值法[J].水利学报,1995(7):75-76.

[9]朱伯芳,蔡建波.混凝土坝水管冷却效果的有限元分析

[J].水利学报,1985(4):27-36.

[10]朱伯芳.大体积混凝土非金属水管冷却的降温计算[J].水利水电技术,1997 28(6):30-34.

[11]朱伯芳.微膨胀混凝土自生体积变形的计算模型和试验方法[J].水利学报,2005(12):18-21.

[12]张国新,杨为中,罗恒,等.MgO 微膨胀混凝土的温降补偿在三江拱坝的研究和应用[J].水利水电技术,2006,37(8):20-23.

[13]吕西林,金国芳,吴小涵.钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M].上海:同济大学出版社,1997.

[14]沈聚敏,王传志,江见鲸.钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M].北京:清华大学出版社,1993.

[15]FISH J,BELYTSCHKO T. A first course in finite elements [M]. England :JohnWiley ,2007.

(收稿日期 2009-11-04 编辑:高建群)

(上接第19页)

20~30m。在树种选择上尽量考虑本地物种,同时注意引进外地树种,使树种搭配合理,兼顾同一季节内树种大小、高低、颜色搭配及不同季节间景观的变化。

7.2 竖向规划

竖向规划的基本原则是满足防洪安全的需要;尽量使工程自然化(如利用自然水位变化创造生态湿地、生态步道等个性生态景观);尽量减少土方工程量。竖向规划的主要内容包括亲水空间、滩地利用、人行通道等。

7.3 交通系统规划

交通系统规划的主要目的是增强景观的可达性,提高滨水区空间的利用效率。交通系统规划主要是对包括机动车、非机动车、步行交通、水上交通、桥梁等的规划,要依据景观建设的目标、景观所在地段的功能定位、景观欣赏人群、文化底蕴等特征考虑不同交通类型的组合。

参考文献:

[1]KATSUMISEKI K. Project for creation of river rich in nature-towards a richer environment in towns and on watersides[J]. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering ,1995(4):86-87.

[2]GORE J A ,SHIELDS F D. Can large rivers be restored ?[J]. Bioscience ,1995 45 :142-152.

[3]Hydraulic design of steam restoration project[R]. Vicksburg :

US Army Corps of Engineers 2001.

[4]FISCHEINICH J. Stream management-concepts and methods in stream protection and restoration[R]. Vicksburg :US Army Waterways Experiment Station ,1999.

[5]杨芸.论多自然河流型河流治理治理法对河流生态环境的影响[J].四川环境,1999,18(1):19-24.

[6]DENNEMAN W D ,AD P ,GAO R ,et al. Environmental aspects of the restoration of river ecosystems in the Netherlands[J]. Water Science and Technology ,1995 31(8):147-150.

[7]刘树坤.刘树坤访日报告:日本城市河道的景观建设和管理(九)[J].海河水利,2005(3):66-68.

[8]刘树坤.水利建设中的景观和水文化[J].水利水电技术,2003 34(1):30-32.

[9]郑州市生态水系概念性规划[R].北京:中国水利水电科学研究院,2006.

[10]岳隽.城市河流的景观生态学研究:概念框架[J].生态学报,2005 25(6):1422-1429.

[11]日本河川治理中心.滨水景观设计公司.护岸设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.

[12]刘滨谊.滨水景观设计[M].大连:大连理工大学出版社,2002.

[13]王薇,李传奇.城市河流景观设计之探析[J].水利学报,2003 34(8):117-121.

[14]束晨阳.城市河道景观设计模式探析[J].中国园林,1999,15(1):8-11.

[15]GB50513—2009 城市水系规划规范[S].

[16]SL431—2008 城市水系规划导则[S].

(收稿日期 2009-08-04 编辑:骆超)