

混凝土结构收缩应力问题研究

梅明荣¹, 葛世平², 陈 军¹, 卓家寿¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 2. 上海地铁总公司, 上海 200031)

摘要 扼要阐述了混凝土干缩变形及其分析方法, 采用两种方法研究混凝土干缩应力的变化规律. 对于估算法, 其结果比较可靠, 而计算湿度场方法仅仅是处于探讨阶段. 当考虑混凝土干缩作用时, 结构的应力值要大于不考虑干缩的影响, 特别是对于薄壁或薄板结构. 通过有限元仿真, 对上海地铁地下车站混凝土框架结构的干缩应力进行了计算, 在一定程度上揭示了结构干缩应力的变化趋势.

关键词 湿度 ; 干缩 ; 徐变收缩应力 ; 有限元 ; 混凝土结构

中图分类号 : U231+ .4 ; TU921

文献标识码 : A

文章编号 : 1000-1980(2002)01-0073-06

混凝土由于其所含水分的变化、化学反应等因素引起的体积缩小称为干缩. 当混凝土结构处于自由状态时, 这样的收缩不会导致不良后果. 但实际上由于基础、配筋或相邻部分的约束会引起拉应力. 混凝土的抗拉强度不高, 容易产生裂缝, 从而会影响结构的承载能力和耐久性, 特别是对于薄壁结构. 收缩是非荷载作用引起混凝土结构裂缝最常见的因素, 作为一项重要变形性能, 国内外有关学者对此做了大量研究工作^[1~3]. 然而专门关于混凝土干缩应力分析的研究则不多见^[4,5].

上海地铁车站混凝土框架结构的两侧是混凝土连续墙, 底部为软土基. 结构的约束条件较为复杂. 在施工后期, 框架的侧墙出现了明显的裂缝, 且多数呈 45° 角的走向. 初步分析认为混凝土早期的温度应力、干缩变形是结构产生开裂的主要原因. 本文将着重讨论混凝土干缩应力分析方法以及干缩应力对地铁车站框架结构的影响.

1 干缩应力分析

1.1 混凝土干缩特性

混凝土干缩的机理比较复杂, 有几种不同的观点, 如毛细管张力学说认为收缩与干燥过程中毛细管中水的弯液面有关. 在毛细管水蒸发过程中, 混凝土处于不断增强的压缩状态, 导致混凝土外观体积的缩小. 表面张力学说认为吸附水一旦从水泥凝胶上脱离, 表面张力就要增加, 胶粒被压缩从而引起固体颗粒体积变化. 此外, 还有其他的一些学说. 从几种干缩机理学说来看, 干燥产生水泥石收缩不是单一机理可解释清楚的, 而是多种原因重叠交错造成的.

影响混凝土收缩的因素很多. 从材料角度来看, 水泥品种、集料品种、配合比以及细掺料的种类与掺量、外加剂的种类与掺量等等都对收缩有影响; 从施工角度来看, 混凝土结构周围的环境条件对收缩有很大影响, 如相对湿度越低收缩值越大、表面覆盖层可以降低收缩应力; 从结构的角度来看, 结构断面尺寸、体积与表面积的比值也对收缩有显著的影响. 因此, 要想真正弄清混凝土干缩产生的原因以及相应的预防措施, 就必须从上述三个方面综合考虑, 才能找出有效的对策来防止干缩裂缝的发生.

1.2 干缩的理论解方法

前面已阐述了混凝土产生干缩的重要因素是混凝土内部水分的蒸发. 要了解干缩应力的分布状态, 首先要了解混凝土内部湿度变化的基本规律以及变形与湿度的关系.

有关试验研究表明^[4],混凝土内部相对湿度的变化规律和温度一样,可以较好地服从扩散方程

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = k \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

其边界条件为

$$k \frac{\partial U}{\partial n} = \beta_1 (U_F - U_B) \quad (2)$$

式中: U ——湿度,即单位重量的混凝土所含水的重量,是坐标和时间的函数; U_F ——混凝土表面的湿度; U_B ——周围的平衡湿度; k ——湿度扩散系数; β_1 ——水分交换系数。

由于式(1)(2)与描述温度场的数学表达式完全相似,因此,温度场边值问题的解法可以完全套用到湿度扩散场的求解。当相对湿度为单调变化时,湿度引起的混凝土变形与湿度变化成线性关系,这样就可以计算干缩应力。本文将采用该方法对典型浇注块进行干缩应力分析。但在很多情况下,相对湿度引起的变形与相对湿度并不成线性关系,且相对湿度引起的变形也不是完全可逆的。文献[6]给出了考虑混凝土相对湿度与温度耦合变化的结构徐变与干缩应力的计算模式,采用 Prony-Dirichlet 级数表示应力松弛函数,可以比较精确地计算干缩应力。然而与混凝土的温度场和温度应力相比,人们对其湿度场及其干缩应力了解得还很少,特别是有关参数及边界条件往往不易确定或难以找出相对准确的范围。所以,这条途径计算干缩应力是比较困难的。目前国际上通常采用的是估算方法。

1.3 收缩的估算方法

混凝土收缩表达式是表示混凝土收缩变形与龄期关系的数学方程式,一般是通过实测试验数据回归分析得出。由于在实际工程中,很难将干缩变形与其他收缩变形区分开。在特定的实验室条件下或者忽略某些次要因素,可将收缩曲线作为干缩曲线处理。常用的有双曲线函数式、指数函数式和对数函数式。比如根据有关研究^[1],对于高强混凝土收缩变形采用指数形式所得的相关系数比较高,其形式如下:

$$\epsilon_s(t) = \epsilon_{s,\infty} (1 - ae^{-bt}) \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{s,\infty}$ ——实验室标准条件下的混凝土收缩终值; a, b ——试验常数; t ——收缩时间。

在实际工程中,应用上述表达式时还要考虑许多影响混凝土收缩的因素,如环境温度、相对湿度、混凝土配合比、养护方法、结构的表面积以及结构的配筋率等因素,通过乘上相应的修正系数,可得到实际混凝土结构的收缩值。

有关混凝土收缩的估算公式有多种形式^[1,2],例如我国‘混凝土收缩与徐变的试验研究’专题协作组提出的估算公式,欧洲混凝土委员会/国际预应力联合会(CEB/FIP)方法,美国混凝土学会(ACI)方法,日本土木学会方法等等,虽然各自的表达形式有所不同,但所考虑的影响因素却大同小异。本文采用如下形式:

$$\epsilon_s(t) = \epsilon_{s,\infty} (1 - ae^{-bt}) M_1 M_2 M_3 \cdots M_{10} \quad (4)$$

其中 $M_1 \sim M_{10}$ 为影响混凝土收缩因素的修正系数。

有了干缩变形表达式,应用初应变法就可以计算混凝土干缩应力。另一种计算收缩的实用处理方法^[5]是将收缩换算成‘收缩当量温差’,即收缩所产生的变形相当于引起同样变形所需要的温度。该方法实质上也是初应变法。

2 初应变法

一般认为混凝土干缩、徐变特性是由一些共同因素所决定的,两者的变化曲线也相似^[2]。因此,研究干缩应力也常采用研究徐变的初应变法进行。对于混凝土材料,在低应力水平下,可将其当作弹性-徐变体材料,其物理方程在单向应力状态下可表示为

$$\epsilon(t) = \sigma(\tau_0) \delta(t, \tau_0) + \int_{\tau_0}^t \delta(t, \tau) d\sigma(\tau) + \alpha T(t) + \epsilon^s(t) \quad (5)$$

采用有限元求解时,将公式(5)离散,并以增量形式表示。在 τ_i 时刻的 $\epsilon(\tau_i)$ 为

$$\epsilon(\tau_i) = \sum_{n=0}^{i-1} \Delta\sigma(\tau_n) \delta(\tau_i, \tau_n) + \Delta\sigma(\tau_i) \delta(\tau_i, \tau_i) + \alpha T(\tau_i) + \epsilon^s(\tau_i) \quad (6)$$

于是,在 $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}$ 时段,应变增量

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon^c + \Delta \epsilon^E + \Delta \epsilon^T + \Delta \epsilon^s$$

(7)

其中 $\Delta \epsilon^E(\tau_i) = \frac{\Delta \sigma(\tau_i)}{E(\tau_i)}$, 是未知的瞬时弹性应变增量. $\Delta \epsilon^T(\tau_i) = \alpha \Delta T(\tau_i)$, 为变温引起的应变增量. $\Delta \epsilon^c(t_1)$
 $= \sum_{n=0}^{i-1} \Delta \sigma(\tau_n) [\delta(t_i, \tau_n) - \delta(\tau_{i-1}, \tau_n)]$, 为徐变引起的应变增量, 与应力历史有关. $\Delta \epsilon^s(\tau_i) = \epsilon^s(\tau_i) - \epsilon^s(\tau_{i-1})$, 为自身体积变形或干缩变形引起的应变增量, 其值是由实测的曲线提供. $\Delta \epsilon(\tau_i)$ 是总的实际应变增量, 而 $\Delta \epsilon^0 = \Delta \epsilon^c + \Delta \epsilon^T + \Delta \epsilon^s$ 是初应变增量. 由式(7) 得到

$$\Delta \sigma(\tau_i) = E(\tau_i) (\Delta \epsilon - \Delta \epsilon^c - \Delta \epsilon^T - \Delta \epsilon^s)$$

(8)

以上是在单向应力状态下的物理方程, 而对于二向应力状态, 式(8) 改写成矩阵形式:

$$\Delta \sigma(\tau_i) = D(\tau_i) [\Delta \epsilon_i - \Delta \epsilon_i^c - \Delta \epsilon_i^T - \Delta \epsilon_i^s]$$

(9)

对于干缩变形 $\epsilon_s(t)$, 可以写出其增量形式

$$\Delta \epsilon_s(\Delta \tau) = \epsilon_{0,\infty} e^{-bt} (1 - e^{-b\Delta \tau}) M_1 M_2 \cdots M_{10}$$

(10)

对于平面问题, 初应变按下式计算:

$$\{\epsilon_{e0}\} = \begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_{x0} \\ \Delta \epsilon_{y0} \\ \Delta \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_x^s \\ \Delta \epsilon_y^s \\ \Delta \gamma_{xy}^s \end{Bmatrix}$$

(11)

3 典型算例

以刚性地基上混凝土浇注块为例. 浇注块长 24 m、高 2 m. 考虑对称性, 取一半进行计算. 单元网格如图 1.

首先采用已知干缩变形曲线的估算方法(简称方法甲)计算该浇注块的干缩应力, 按式(4) 考虑干缩变形, 取收缩终值 $\epsilon_{0,\infty} = 3.24 \times 10^{-4}$, $b = 0.01$. 混凝土弹模为 32 GPa 并随龄期变化. 在线弹性徐变范围内, 其计算结果如表 1 所示.

表 1 混凝土浇注块的最大应力、位置和时间(方法甲)

Table 1 Maximum stress and its position in concrete block for day 401

项 目	σ_x			σ_y		
	最大值/MPa	位置	时间/d	最大值/MPa	位置	时间/d
温度徐变应力	10.762	(4.50, 0.25)	401	0.715	(1.50, 0.25)	401
温度徐变干缩应力	16.322	(10.50, 0.75)	401	1.301	(1.50, 0.25)	401
温度应力	13.209	(4.50, 0.25)	401	0.977	(1.50, 0.25)	401

为从整体上了解干缩对结构应力的影响, 图 2 和图 3 是第 401 d 的单元应力值. 其中, 每个单元中分子是 σ_x 值, 分母是 σ_y 值. 比较这两张图, 可以看出由于厚度较薄, x 向受约束较强, 当考虑干缩的影响时, σ_x 比 σ_y 变化更为明显, 最大应力值的位置也发生了变化.

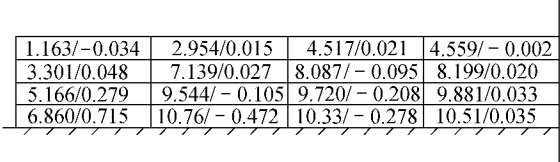


图 2 第 401 d 温度徐变应力值

Fig.2 Thermal creep stress for day 401

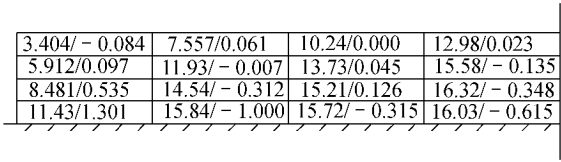


图 3 第 401 d 温度徐变干缩应力值

Fig.3 Thermal and shrinkage creep stress for day 401

其次采用计算湿度场方法(简称方法乙)计算浇注块的干缩应力. 如第 3 节中所述, 首先计算湿度场, 求得混凝土内部湿度变化的规律后, 根据干缩变形和相对湿度之间的关系计算结构的收缩应力.

在湿度场计算中, 取湿度扩散系数 $k = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$, 表面湿度交换系数 $\beta_1 = 2 \times 10^{-4} \text{ m/h}$. 材料的收缩

系数 $\alpha_{sh} = 3.5 \times 10^{-4}$, 其余计算参数与方法甲相同, 不同之处在于: (a) 计算时段的设计. 与温度扩散系数相比, 湿度扩散系数 k 小得多. 所以, 以 90 d 为一个时段, 总共 30 年 (即 10800 d). (b) 计算中相对湿度取 30% 和 20% 两种工况. (c) 假设外界的湿度变化为线性函数. 计算从初始相对湿度一直降到零为止.

表 2 为用方法乙计算混凝土浇注块的最大应力、位置和时间. 该结果的大致规律与方法甲计算的结果相近, 但数值的大小与产生时间有较大区别.

表 2 混凝土浇注块的最大应力、位置和时间(方法乙)

Table 2 Maximum stress and its position in concrete block for day 10801

工况	相对湿度 = 30%			相对湿度 = 20%		
	最大应力/MPa	位置	时间/d	最大应力/MPa	位置	时间/d
σ_x	17.882	(10.5, 1.75)	10801	11.925	(10.5, 1.75)	10801
σ_y	1.467	(1.5, 0.75)	10801	0.977	(1.50, 0.75)	10801

用方法乙计算干缩应力还存在着许多问题, 如相对湿度边界条件、湿度与变形关系、时间步长等如何考虑的问题. 其实, 方法甲和方法乙两者之间并不具有可比性. 对于方法乙来说, 收缩应力的值很大程度上取决于相对湿度的取值, 相对湿度值越小, 则收缩应力越大. 而方法乙则是通过实测的收缩变形来计算温度干缩应力的. 方法乙由于无法正确反映实际过程中湿度与收缩之间的关系, 其数学物理模型的正确性还有待验证, 因此采用方法乙计算干缩应力还只是处于探讨阶段.

4 地铁车站框架结构的温度干缩应力计算

在考虑温度收缩的同时, 采用估算方法对上海地铁车站混凝土框架结构进行温度干缩应力的分析计算. 地铁车站框架模型如图 4.

计算参数如下: 混凝土导温系数为 $0.0028 \text{ m}^2/\text{h}$, 混凝土的水化热绝热温升采用指数形式, 其中 $\theta_0 = 27^\circ\text{C}$, $m = 0.31 \text{ d}^{-1}$. 混凝土弹性模量为 32 GPa , 徐变度表达式为: $C(t, \tau) = (0.9 + 4.82/\tau^{1.0})(1 - e^{-0.0026(t-\tau)}) \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$. 混凝土的收缩变形 $\epsilon_s(t)$ 形如式(2)所示, 其中 a, b 为 1.0 和 0.01. ϵ_s^0 为标准状态下的极限收缩, 一般为 $\epsilon_s^0 = 3.24 \times 10^{-4}$. 计算时段从施工开始至第 4 d, 计算步长为 0.3 d, 此后, 按 0.5 d 的步长至施工的第 15 d. 后期再逐步加大步长, 以 10 d 为步长直至延续 5 个月.

图 5、图 6 为典型时刻温度徐变应力与温度徐变干缩应力的等应力线. 由于地下连续墙的强约束作用, 最大温度徐变拉应力出现在侧墙的内壁, 且在中板或底板的连接处. 墙内侧出现较大的竖向拉应力, 说明这部分易产生水平走向的裂纹. 若加上纵轴向较大的拉应力, 则开裂方向与水平成一角度, 这与实际裂缝的位置及走向基本相符. 考虑了干缩影响之后, x 向应力变化不很明显, 等值线的

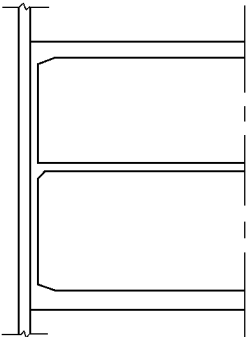


图 4 地铁车站框架计算简图
Fig.4 Calculation model of metro frame structure

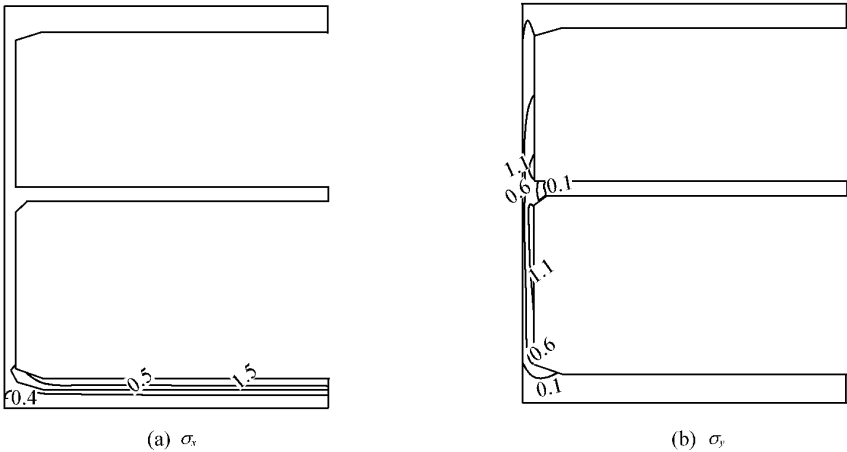


图 5 12月21日温度徐变应力等值线
Fig.5 Contour of thermal stress for Dec.21

形状变化也不大,而 γ 向应力的变化则非常明显.

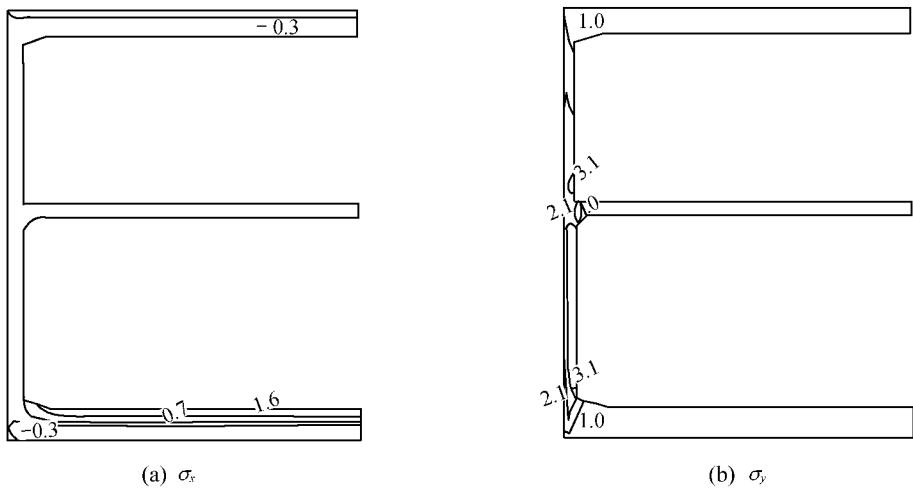


图 6 12 月 21 日温度徐变干缩应力等值线

Fig.6 Contour of thermal and shrinkage stress for Dec.21

表 3 是考虑了干缩影响的最大温度徐变干缩应力值及其发生的位置.由于干缩应力的影响,应力的变化非常明显,尤其是在 γ 方向上.从最大应力值来看,该结果与只考虑温度徐变应力比较,最大应力值从 1.84 MPa 变为 4.31 MPa.从以上数据可以看到,干缩对薄壁结构的影响相当明显,达到了不考虑干缩影响时的最大应力值的 2 倍以上.

表 3 温度徐变干缩应力计算结果

Table 3 Calculated results of thermal and drying creep stress of metro frame structure

结构区域	σ_x /MPa	坐标	时间	结构区域	σ_y /MPa	坐标	时间
底板	2.627	(10.48,0.75)	12 月 11 日 *	底板	3.232	(0.07,0.20)	2 月 21 日 **
侧墙(下)	0.540	(0.33,1.42)	12 月 11 日 *	侧墙(下)	4.308	(0.33,6.22)	12 月 11 日 *
中板	0.685	(0.70,6.99)	12 月 21 日 *	中板	2.991	(0.07,6.57)	2 月 21 日 **
侧墙(上)	0.467	(0.33,7.48)	12 月 11 日 *	侧墙(上)	3.788	(0.33,7.48)	12 月 11 日 *
顶板	0.534	(0.33,12.64)	2 月 21 日 **	顶板	1.991	(0.07,12.27)	2 月 21 日 **

* 表示施工的第 1 年; * 表示施工的第 2 年.

5 小 结

通过对混凝土典型浇注块和框架结构的平面问题研究,探讨了混凝土干缩应力和温度徐变干缩应力的变化规律.采用了两种方法计算干缩应力.对于已知干缩变形曲线的估算方法,其结果是比较可靠的,而对于直接计算湿度场方法还只是处于探讨阶段,许多问题有待解决.当考虑混凝土干缩作用时,结构的应力值要大于不考虑干缩的影响,特别是对于薄壁或薄板结构,湿度扩散相对比较快一些,干缩的影响更大.地铁车站混凝土结构的计算结果表明,在实际工程中这类结构的干缩应力影响不容忽视.

参考文献:

[1] 黄国兴,惠荣炎.混凝土的收缩[M].北京 中国铁道出版社,1990. 97 ~ 118.
[2] 周履,陈永春.收缩徐变[M].北京 中国铁道出版社,1994. 82 ~ 83,179 ~ 181.
[3] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京 中国铁道出版社,1999. 263 ~ 281.
[4] 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. 298 ~ 305.
[5] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京 中国建筑工业出版社,1997. 17 ~ 34.
[6] Majorana C E, Vitaliani R.Numerical modeling of creep and shrinkage of concrete by finite element method[A]. In Bicanic N, Mang H. Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structure[C]. Swansea,U. K Pineridge Press,1990. 773 ~ 784.

Study on Drying Shrinkage and Creep of Concrete Structures

MEI Ming-rong¹, GE Shi-ping², CHEN Jun¹, ZHUO Jia-shou¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;

2. Shanghai Metro Corporation, Shanghai 200031, China)

Abstract : Some methods are introduced for analysis of drying shrinkage and creep of concrete structures. Two methods are adopted for research of the variation of shrinkage stress of concrete. The result of the estimation method is reliable, while the method of humidity field calculation is still under study. The stress value, in consideration of the influence of concrete shrinkage, should be larger than the value without consideration of the influence. Based on FEM simulation, the drying shrinkage stress of the structural frame of the Shanghai Metro Station is calculated, and the trend of variation of drying shrinkage stress is revealed to a certain extent.

Key words : humidity ; drying shrinkage ; shrinkage stress ; finite element method ; concrete structure

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年,是我国中文核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得全国优秀高校自然科学学报二等奖,以及全国水利系统优秀期刊、江苏省优秀期刊称号。本刊每逢单月出版,国内外公开发行,邮发代号:28-63,每期定价 8.00 元,全年订费 48.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址 南京市西康路 1 号《河海大学学报》编辑部,邮政编码 210098。