

虚拟单元法求解渗流流量

李守德^{1,2}, 朱岳明³, 程德虎⁴

(1.河海大学 岩土工程水利部重点实验室, 南京 210098; 2.河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098;
3.河海大学 水电学院, 南京 210098; 4.南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100053)

摘要: 提出了计算渗流场流量的虚拟单元法, 推导了虚拟单元法有限元方程, 并探讨了虚拟单元法的有限元实现方法, 建立了虚拟单元法求解渗流流量的理论和方法体系。二维径向渗流和平底坝基算例比较分析表明, 虚拟单元法具有计算精度高及有限元实现简单并容易编写通用程序等优点。虚拟单元法与中线法计算流量具有相同的精度, 但在应用上虚拟单元法有一定优势。

关键词: 渗流; 流量计算; 虚拟单元法; 中线法

中图分类号: TV 139.14

文献标识码: A

Virtual element method for seepage discharge calculation

LI Shou-de^{1,2}, ZHU Yue-ming³, CHENG De-hu⁴

(1.Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Institute, of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Transfer Middle Route Project, Beijing 100053, China)

Abstract: Virtual element method is put forward for seepage discharge calculation. The equations of finite element method about virtual element are derived; and then the finite element method disposal techniques are discussed; so that the theoretical system and application method can be well established. Based on the analysis of calculation examples of centripetal seepage problem and flat-bottomed dam foundation seepage, it is shown that the discharge calculation with virtual element method will get a high precision. Virtual element method is endowed with unique superiority in the aspects of finite element method application.

Key words: seepage; discharge calculation; virtual element method; midline method

1 引言

在渗流问题的计算方法中, 仅对于一部分比较简单的边值问题, 采用解析方法可以得到精确解或近似解, 而有限元方法由于能够处理各类复杂的介质条件和边界条件, 得到了十分广泛的应用。采用有限元方法进行渗流场计算时可直接得到单元节点水头, 再依据节点水头进行流量计算。流量计算通常可采用以下几种方法: (1) 流网法 通过有限元计算等得到单元节点水头, 绘出流网图后依据流网进行流量计算, 该方法比较费时费力, 同时绘制误差会降低计算精度。(2) 过流断面法 先确定某一过流断面, 然后根据该断面被单元网格切割形成的分段上的水力梯度代表值, 通过分段上有向断面与

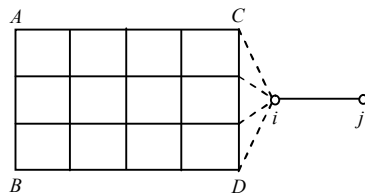
渗流流速的点积计算各分段过流量, 并累加为该断面总过流量, 例如单元边线法和单元中线法^[1-2]。中线法计算精度好于边线法, 在实践中应用比较广泛。过流断面法需要确定与断面相关单元的情况, 对于计算量大和较复杂的空间问题, 使用起来较冗繁。(3) 节点流量法 利用求解的单元节点水头代入有限元方程可直接计算单元节点流量, 对流入或流出边界上的节点流量求和即可获得渗流场过流量, 或如文献[3]中, 针对沿单元边线所划分的某半幅单元对于边线上节点的流量贡献求和, 可以求出通过该断面的流量。该方法避免进行水力梯度计算, 有一定的优点, 但是仍然需要确定与过流断面相关单元情况, 要求判断过流断面的方向性, 对程序编写质量要求较高。

笔者基于一维单元与实体单元结合的计算技术^[4-6], 提出采用虚拟单元方法计算渗流场的流量, 计算精度较高, 容易编写通用程序, 有较好的理论意义和推广应用价值。

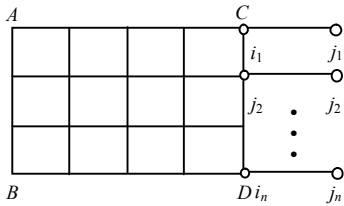
2 虚拟单元法的基本原理

2.1 基本思路

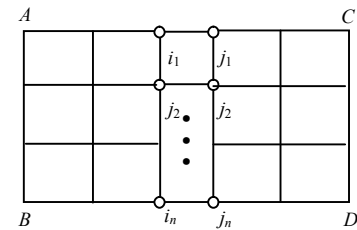
渗流流量求解是指对通过某全部或部分过流断面的流量的计算, 大多数情况下渗流流量计算可以归结为渗流场边界上的流量计算。本文首先就常水头过流边界上的流量计算, 引入渗流流量计算的虚拟单元法。



(a) 情况 1



(b) 情况 2



(c) 情况 3

图 1 虚拟单元设置
Fig.1 Dummy element

某渗流场计算域如图 1(a)中 $ABCD$ 、 CD 为待求流量的常水头边界。若设置一维虚拟单元 ij , 同时将 CD 边界上所有节点通过一维连接单元与虚拟单元 ij 某一节点连接, 如图 1(a)所示, 通过边界 CD 的渗流量等于虚拟单元中的流量。在计算中保证 CD 边界上的水头值等于或接近于实际值, 则虚拟单元流量等于或接近于通过断面 CD 的实际流量。当过流边界 CD 上为不相等水头边界或其他边界形式时, 可根据具体的边界形式, 将边界划分为 n 段, 每一分段为相同水头边界, 则通过设置 n 个

虚拟单元, 可以计算得到各分段边界上的渗流流量, 或累加得到总体渗流流量, 如图 1(b)所示。当过流断面不是渗流场边界时, 过流断面将分割计算域。将过流断面两侧单元节点以虚拟单元相连接, 则可以计算得到各虚拟单元流量, 然后累加得到整个过流断面的流量, 如图 1(c)所示。

2.2 一维虚拟单元的渗透特征

以 2 节点一维虚拟单元为例, 令截面积为 A , 段长为 l , 流速 v 与水力梯度 i 关系符合达西定律:

$$v = -k_g i \quad (1)$$

式中: k_g 为虚拟单元渗透系数。取虚拟单元水头分布模式为线性分布, 则

$$v = -k_g \Delta h / l \quad (2)$$

式中: 水头差 $\Delta h = h_{\text{外侧}} - h_{\text{内侧}}$; l 为虚拟单元长度, 流速以流出系统为正。

2.3 系统有限元方程

对包含实体和一维虚拟介质的无源稳定渗流系统, 以最小能量耗散原理^[4]建立系统范函:

$$\chi = \chi_V + \chi_I \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \chi_V &= \int_V \frac{1}{2} k \nabla h \nabla h + \int_{\Gamma_V} h v d\Gamma; \\ \chi_I &= \int_I \frac{1}{2} A k_g (\nabla h)^2 dl + \sum_{j_1, j_2}^{n_g} q h \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中: h 为水头; v 为渗流流速; Γ 为有向边界; k 为计算域的渗透系数; q 为节点流量。

可以证明, 范函 χ 对水头取变分得到的欧拉方程对应于渗流微分方程。

对划分单元网格的有限元系统建立范函:

$$\begin{aligned} \chi &= \sum_{i=1}^n \int_V \frac{1}{2} k (\mathbf{B}\{h\}^e)^T \mathbf{B}\{h\}^e dV + \sum_{j=1}^{m_r} \int_{\Gamma} N\{h\}^r v d\Gamma + \\ &\quad \sum_{i=1}^{n_g} \int_I \frac{1}{2} A k_g (\mathbf{B}_g\{h\}^e)^T \mathbf{B}_g\{h\}^e dl + \sum_{j_1, j_2}^{n_g} q h \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\{h\}^e$ 为单元节点水头列阵; $\{h\}^r$ 为单元边界水头列阵; $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{B}_g$ 为导数矩阵; N 为形函数; n_g 为虚拟单元总数。

范函 χ 对节点水头取变分可以得到包含实体单元和一维虚拟单元的无源稳定渗流系统的有限元方程:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \int_V \mathbf{B}^T k \mathbf{B} dV \{h\}^e + \sum_{j=1}^m q + \\ \sum_{i=1}^{n_g} \int_I A \mathbf{B}_g^T k_g \mathbf{B}_g dl \{h\}^e + \sum_{j_1, j_2}^{n_g} q = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

整体方程组可以写为

$$([K] + [K]_g)\{h\}^e + [Q] = 0 \quad (7)$$

式中: $[K]$ 为实体单元相关渗透矩阵; $[K]_g$ 为虚拟单元相关渗透矩阵; $[Q]$ 为节点流量列阵。

实体单元渗透矩阵为

$$[K]^e = \int_V B^T k B dV \quad (8)$$

虚拟单元渗透矩阵为

$$[K]_g^e = \int_l A B_g^T k_g B_g dl \quad (9)$$

对于 2 节点线性单元, 式(9)简化表达为

$$[K]_g^e = \begin{bmatrix} K_g & -K_g \\ -K_g & K_g \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: K_g 为虚拟单元流量系数, 在有限元方法中可以直接对其赋值, 使编程简化。

3 虚拟单元法的有限元实现

3.1 虚拟单元流量系数取值

设置虚拟单元后, 渗流场近似值将会偏离实际值, 这一问题可以有两种解决办法: (1) 对虚拟单元的流量系数 K_g 取很大的值, 则由于虚拟单元上的水头损失很小, 渗流场计算结果接近于实际值; (2) 采用迭代的方法, 即通过在迭代过程不断调整虚拟单元边界条件, 使得渗流场边界上的计算结果与实际边界条件趋于一致。计算表明, 采用设置大流量系数的方法比较简单, 计算过程稳定, 渗流场计算可以有较好的精度。

实际问题中, K_g 值应根据实际渗流场的渗透特征选取。定义渗流场的拟阻力系数:

$$K_T = \bar{k} A_T / l_T \quad (11)$$

式中: $\bar{k}$ 为渗流场平均渗透系数; A_T 为渗流场平均过水断面面积; l_T 为渗流场平均渗径。

一般取 $K_g = K_T \times 10^5$ (可采用估算值) 可以获得较好的计算精度, 应用中 K_g 取值避开了虚拟单元截面和单元长度等参量, 是非常方便的。

3.2 等水头过流边界虚拟单元简化

渗流场流量计算的问题, 大多可以归结为求解一段或几段边界条件相同的过流边界流量。例如, 土石坝渗流问题中下游边界可能较为复杂, 而上游边界为统一的常水头边界; 水闸等挡水建筑物, 一般上下游均为常水头边界; 基坑降水问题中, 远端补给边界可视为常水头边界, 有时坑内渗流流出边界也可以作为常水头边界等; 对于特定复杂边界过

流量计算问题, 若该边界具有若干简单的统一边界条件, 则可以通过若干个虚拟单元求和的办法求解该复杂边界的过流量。

将具有统一边界的过流断面上所有节点通过若干一维连接单元连接到同一个虚拟单元 (图 1), 通过对连接单元和虚拟单元设置大的流量系数, 使渗流场计算结果趋近于实际值。当连接单元流阻力为 0 时, 表示连接单元上无水头损失, 即与虚拟单元相连的各节点具有相同的水头值。在整体方程组中, 与虚拟单元节点 i 及与其相连的 j 个节点相关的元素不防放到整体矩阵的后面部分可表示为

$$\begin{bmatrix} * & \dots & * & \dots & * \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & \dots & k_{ii} & \dots & k_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & \dots & k_{ji} & \dots & k_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * \\ \vdots \\ h_i \\ \vdots \\ h_{i+j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * \\ \vdots \\ q_i \\ \vdots \\ q_{i+j} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $*$ 为普通元素, 带下标的元素对应的行和列是与 $i \sim i+j$ 各个节点有关的元素。

因为 $h_i \sim h_{i+j}$ 是具有相同值的未知量, 方程组有 i 个线性无关组。对第 $i \sim i+j$ 各个方程相加最后得到 i 个方程的方程组:

$$\begin{bmatrix} * & \dots & * \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Sigma * & \dots & \Sigma k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * \\ \vdots \\ h_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * \\ \vdots \\ \Sigma q \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: Σ 表示对与 i 节点及与其连接的所有节点相关的渗透矩阵元素求和。

由此可见, 由若干一维连接单元到同一个虚拟单元的节点未知量, 可以简化为同一个节点未知量, 从而避开了连接单元, 使求解过程得到很大的简化, 编程中只要将相连接的各节点取相同的未知量装配整体矩阵就可以很容易地求解。

4 虚拟单元法比较验证

4.1 有限边界二维径向渗流计算验证

比较虚拟单元法和解析方法对同一渗流场流量计算的成果, 能够直接地考查虚拟单元法的计算情况。本节基于二维径向渗流的解析解, 验证虚拟单元法的计算精度, 并比较虚拟单元法和中线法的计算情况。

4.1.1 算例概况

二维径向渗流算例基本情况: 计算域为半径 $R_1 = 10 \text{ m}$ 和 $R_2 = 20 \text{ m}$ 的圆所构成的圆环, 计算域厚 1.0 m , 如图 2 所示。渗流场渗透性为各向同性,

渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ m/s, 在虚拟单元法中取 $K_g = 1.0 \times 10^5$ m·m/s; 在 R_1 的内圆边界上, $h_1 = 0$ m, 在 R_2 的外圆边界上, $h_2 = 10$ m。

本算例分别使用解析法和中线法对虚拟单元法求解渗流流量进行计算验证。有限元方法中考虑了普通 3 节点单元和 4 节点等参单元, 分别在不同的网格剖分条件下计算比较, 其中 10×90 剖分步数的 3 节点和 4 节点单元网格剖分情况分别见图 3。虚拟单元法中虚拟单元设置于计算域内边界上, 中线法中过流断面选择为某一圈单元组的单元切向中线连接而成的正多边形。有限元计算中均采用双精度变量进行计算。

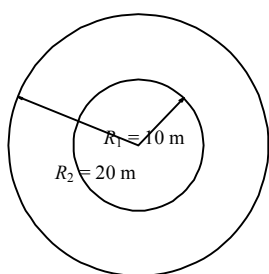
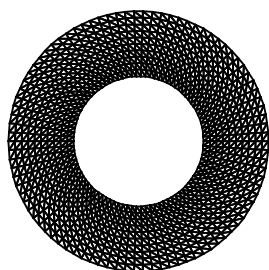
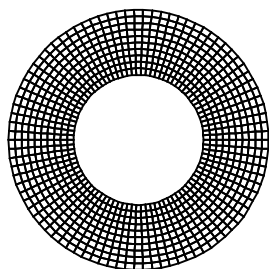


图 2 二维径向渗流算例计算域
Fig.2 Example of 2-D centripetal seepage



(a) 3 节点



(b) 4 节点

图 3 节点单元
Fig.3 FEM mesh

4.1.2 二维径向渗流解析解

二维径向渗流微分方程为

$$\frac{d}{dr} \left(rk \frac{dh}{dr} \right) = 0, \quad (R_1 \leq r \leq R_2) \quad (14)$$

边界条件:

$$\begin{cases} h = h_1, r = R_1; \\ h = h_2, r = R_2 \end{cases} \quad (15)$$

利用分离变量法求解微分方程:

$$\begin{aligned} h &= h_2 + \frac{h_2 - h_1}{\ln(R_1 / R_2)} \ln(r / R_2) = \\ &h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\ln(R_1 / R_2)} \ln(r / R_1) \end{aligned} \quad (16)$$

计算域边界流量可得

$$Q = 2\pi k \frac{h_2 - h_1}{\ln(R_2 / R_1)} \quad (17)$$

4.1.3 计算结果与分析

解析法以及虚拟单元法和中线法在不同网格剖分情况下的计算结果见表 1。

表 1 二维径向渗流流量计算成果表
Table 1 Calculation comparison of centripetal seepage

计算方法	有限元剖分情况	流量计算结果 (10^{-2} m ³ /s)
解析解		9.064 719 6
虚拟单元法 中线法	3 节点单元, $n_r = 10$; $n_\theta = 90$	9.072 484 0 9.072 486 2
虚拟单元法 中线法	3 节点单元, $n_r = 90$; $n_\theta = 360$	9.065 062 8 9.065 064 9
虚拟单元法 中线法	4 节点单元, $n_r = 10$; $n_\theta = 90$	9.072 484 6 9.072 488 6
虚拟单元法 中线法	4 节点单元, $n_r = 60$; $n_\theta = 360$	9.065 063 3 9.065 066 0

注: n_r 、 n_θ 分别为径向和环向剖分步数。计算结果取 8 位有效数字以便于几种方法的比较, 下同。

计算结果表明, 虚拟单元法和中线法计算结果相当接近, 二者流量计算的相对误差很小。当采用精细的网格剖分模型时, 虚拟单元法和中线法计算结果都趋近于解析解, 这也说明两种方法都具有相当高的计算精度, 而网格剖分精细程度是决定求解精度的根本因素。

4.2 有限边界平底坝基渗流计算验证

为了考察网格不均匀性对虚拟单元法计算精度的影响, 设计了平底坝基渗流场算例, 并考察在较为任意的单元剖分情况下采用虚拟单元法和中线法的计算情况。

4.2.1 算例概况

平底坝基渗流场算例基本情况: 平底坝基为均质土地基, 坝宽 10 m, 上下游水头差 10 m, 计算域厚度为 1 m; 计算域为水平方向以坝中心线为对称轴向上下游各 15 m, 竖直方向为坝底面以下 20 m, 如图 4 所示。渗流场渗透性为各向同性, 渗

透系数 $k = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 在虚拟单元法中取 $k_g = 1.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{m/s}$ 。边界条件为上下游地基表面为常水头边界, 其中上游边界水头 $h_1 = 10 \text{ m}$, 下游边界水头 $h_2 = 0 \text{ m}$, 为方便计算分析其余边界均设定为不透水边界。

本算例中, 采用 0.1 m 剖分步长得到的流量计算结果作为较精确解用以比较分析, 其渗流场等势线计算结果见图 6。有限元网格剖分只采用 3 节点单元, 剖分情况较为任意, 见图 5。虚拟单元法中考虑了分别在上游水头边界和下游水头边界设置虚拟单元两种情况, 中线法中考虑 3 种较为任意的过流断面路径, 如图 5 中示意的路径①~③, 计算中定义了右手螺旋方向为过流断面的正方向。有限元计算中采用了双精度变量。

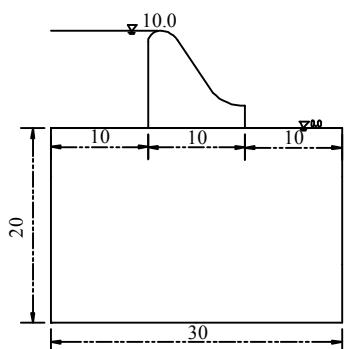


图 4 平底坝基渗流算例计算域(unit: m)
Fig.4 Example of foundation seepage under flat-bottomed dam(unit: m)

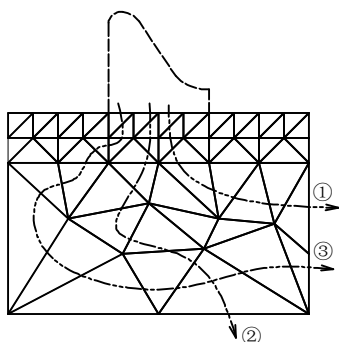


图 5 平底坝基渗流算例剖分情况及过流断面选取
Fig.5 FEM mesh and the calculation sections

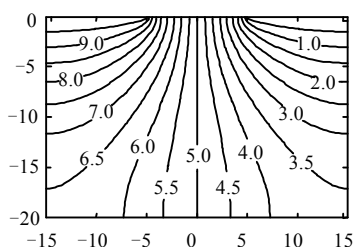


图 6 平底坝基渗流等势线图 (单位: m)
Fig.6 Water head isoline of the seepage field (unit: m)

4.2.2 计算结果与分析

计算结果见表 2。计算表明, 在较大的剖分尺度和较为任意的网格剖分条件下流量计算结果与较精确解相对误差也较大, 达到 13.8 %。在固定的网格剖分情况下, 虚拟单元法与中线法计算结果接近。对于选取的 3 个较为任意的过流断面, 流量计算结果相同, 说明在中线法中, 单元的计算水头梯度 (在 3 节点单元中为常数值, 在 4 节点单元中取等参单元中心点的计算值) 能够较精确地代表整个中线断面上的水头梯度, 而不是一般意义上的近似代表值。

表 2 平底坝基渗流流量计算成果表

Table 2 Calculation comparison of dam foundation seepage

计算方法	有限元剖分情况	流量计算结果 /($10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)
虚拟单元法 (较精确)	4 节点矩形单元, 剖分步 长 0.1m	6.244 587 5
虚拟单元法	剖分图 8, 虚拟单元设在 上游边界	-7.105 418 5 (注: 负号表示流入)
虚拟单元法	剖分图 8, 虚拟单元设在 下游边界	7.105 418 1
中线法	剖分图 8, 过流断面 1	7.105 418 1
中线法	剖分图 8, 过流断面 2	7.105 418 1
中线法	剖分图 8, 过流断面 3	7.105 418 1

4.3 讨论

虚拟单元法和中线法计算结果非常接近, 当采用精细的网格剖分模型时, 虚拟单元法和中线法计算结果都趋近于实际值。

在程序编写中, 采用中线法时, 对于任一个过流断面, 需要搜索该断面所通过的单元信息以计算过流断面方向, 并通过向量运算计算断面渗流量; 虚拟单元法由于只需要在某过流断面设置虚拟单元, 特别是大多数情况下只需在常水头边界上设置虚拟单元时, 则只需要使用一个虚拟单元, 并令该断面各节点水头为同一个未知量就可以求解。

5 结 论

通过理论和数值计算研究, 可得到以下结论:

(1) 本文提出了虚拟单元法求解渗流场流量的方法, 建立了虚拟单元法有限元理论和方法。

(2) 在三维问题计算中, 虚拟单元法由于只对应节点进行虚拟单元处理, 可以避免过流断面法中处理空间曲面的复杂性。

(3) 虚拟单元法具有精度高、使用灵活、有限元实现简单并容易编写通用程序等优点, 值得在实践中推广应用。

(4) 中线法具有高精度的本质原因是: 对于一般 3 节点和 4 节点等取作线性水头分布模式的单元类型来说, 单元中点的计算水力梯度能够精确代表该单元的中线断面水力梯度。

参考文献

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990.
- [2] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻, 等. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [3] 朱岳明. Darcy 渗流量计算的等效结点流量法[J]. 河海大学学报, 1997, (4): 105—108.
ZHU Yue-ming. Darcy seepage discharge calculation with node method[J]. *Journal of Hohai University*, 1997, (4): 105—108.
- [4] 李守德. 不可逆热力学理论在多孔介质渗流问题中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [5] 李守德, 徐红娟, 田军. 均质土坝管涌发展过程的渗流场空间性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 2001—2004.
LI Shou-de, XU Hong-juan, TIAN Jun. Researches on 3-dimensional seepage fields of soil dam under piping erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 2001—2004.
- [6] 王水林, 葛修润. 渗流问题的数字网络方法[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 20—23.
WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Digital network method for seepage problem[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(3): 20—23.
- [7] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 1999.

海峡两岸轨道交通建设与环境工程高级技术论坛 2008 年 11 月 4—7 日在杭州成功举行

由同济大学土木工程学院等 16 个单位主办, 浙江省建筑业行业协会地下工程分会等 4 单位承办, 杭州市土木建筑学会等 5 单位协办的海峡两岸轨道交通建设与环境工程高级技术论坛于 2008 年 11 月 4—7 日在浙江省杭州市新侨饭店隆重举行。论坛得到了中国土木工程学会、香港工程师学会岩土分部、台湾财团法人地工技术研究发展基金会及香港岩土工程学会的共同努力支持。

出席论坛开幕式的有中科院院士、同济大学终身一级荣誉教授孙钧先生, 国际亚新工程顾问集团董事长莫若楫博士, 台湾高速铁路有限公司执行长欧晋德博士, 香港工程师学会岩土分部主席、香港岩土工程学会主席何毅良先生, 上海申通地铁集团董事长、上海市土木工程学会理事长应名洪先生, 同济大学土木工程学院院长朱合华教授, 上海隧道工程股份有限公司总经理周文波博士, 中国土木工程学会城市轨道交通技术推广委员会主任委员、北京城建设计研究总院宋敏华院长, 北京交通大学土木建筑工程学院副院长张鸿儒教授, 中国工程勘察大师王钟琦、张旷成, 中国工程设计大师、浙江省土木建筑学会副理事长益德清, 台湾交通大学工学院院长方永寿教授, 台湾世曦工程顾问公司董事长、中央大学原工学院院长李建中教授, 台湾交通部参事陈晋源先生, 浙江省建筑业行业协会副会长兼秘书长崔一帆等海峡两岸三地业界知名专家、业者和中青年学者共 260 余人。

浙江省建筑业行业协会地下工程分会会长史佩栋教授主持了大会开幕式, 各主办单位的专家代表共同主持了各场报告会。

本次论坛旨在以科学发展观为指导, 总结交流两岸各地在轨道交通建设方面所积累之宝贵经验, 所取得之创新成果, 以及所遭遇的困难和应对措施, 以利于迎接今后新的挑战, 争取更辉煌的成就。

在两天紧张的 8 场大会中, 有 27 位专家做了学术报告。其议题涉及了两岸三地轨道交通建设发展中的若干大事件大课题的重要经验总结, 以及当前轨道交通建设中凸显的重要热点难点问题, 诸如: 线网站点规划设计研究、政策法规及技术标准研究、工程安全与风险管控、隧道施工控制与变形分析、车站深开挖设计施工技术、沿线近接施工影响研究、列车减振降噪技术等等。报告内容涉及了国内外数十座城市的众多案例。报告普遍受到了与会者的高度评价。

李建中教授在大会闭幕式上作了本次论坛的学术总结, 史佩栋教授致闭幕词。与会者认为, 这次论坛是两岸三地轨道交通建设领域的一次群贤毕至、少长咸集、精英汇聚的大会, 它必将成为我中华大地进一步发展轨道交通建设的一个重要里程碑。

在会议期间, 全国政协委员、杭州市人大常委会副主任、民革杭州市委主任委员陈重华女士宴请了全体台湾嘉宾, 杭州市台办主任陈建伟作陪。

本次论坛的文集已由人民交通出版社正式出版, 于会议报到之日首发。全书含特邀报告、专题论述等共 62 篇, 计 81 万字、A4 开本 420 余页, 彩色精印。由于文集中论及的众多城市, 其社会、经济、历史、环境和地质条件各有特点, 而在某些问题上又具有一定的共性, 因此可以认为, 该文集必将成为世界各地今后发展轨道交通建设的一本重要参考文献。