

文章编号: 1000-7598-(2000)01-0005-05

浅层顶管施工引起的土体移动^{*}

方从启

孙 钧

(上海交通大学 土木建筑工程系, 上海 200030)

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 顶管施工引起包括地面沉降和土的轴向移动在内的土的运动。土的这些运动可能导致邻近构筑物和管线的损坏。理论分析和现场实测都显示, 在类似于上海等地的软土地层中顶管施工, 顶管周围土的运动问题是三维的。基于半解析数值方法的基本原理, 将轴向离散而在径向和环向选取位移函数, 构造了解析解函数。给出了包括位移函数、刚度矩阵和荷载矩阵在内的理论分析过程, 从而建立了半解析单元法。利用半解析单元法将顶管施工中三维土运动问题转化成一维数值计算。利用所建立的半解析单元法, 就软土地层中顶管工程实例计算了施工所引起的土体位移。结果表明, 半解析元法用于计算顶管施工中顶管周围土的移动, 可以得到较为满意的结果。由于计算所需要的单元数减少, 处理该问题所需要的时间也明显减少。根据分析与计算结果还得到了一些有价值的结论。

关键词: 顶管, 半解析元法, 土, 位移

中图分类号: TU 43 文献标识码: A

作者简介: 方从启, 男, 36 岁, 博士, 讲师, 从事岩土力学与工程、地下结构理论与计算方面的研究。

Ground movements induced by pipe jacking in shallow underground soils

Fang Congqi

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Sun Jun

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Pipe jacking in soft soils may induce ground movements including ground settlement and axial movement of soils below the ground surface. These movements can lead to damages of nearby structures and utilities. Both theoretical analyses and field observations have shown that pipe jacking in such a kind of soft soil ground as in Shanghai area, movements of soils around the pipes is of three-dimension. Based on the basic principle of semi-analytical method, a procedure for the computation of soil movements is developed which discretize axial direction while adopting displacement functions in radial and circular directions. Regular functions are set up and semi-analytical element method is constituted. Displacement functions, stiffness matrices and load matrices are presented in details. By making use of the semi-analytical element method, the three-dimensional soil movements problem of pipe jacking is transferred to a one-dimensional numerical calculation. The value of a calculated case of pipe jacking in soft soils is compared to that of observations. The results show that semi-analytical element method is a satisfied way to predict soil displacements induced by pipe jacking in shallow soft soils. Due to the sharp reduction of the number of the element, the time needed for processing this problem is much less. Some useful conclusions have been obtained according to the analyses and calculations.

Key Words pipe jacking, semi-analytical element method, soil displacement

1 前 言

顶管施工技术近年来在我国发展迅猛。市政工程中采用顶管施工可以将作业面移入地下, 从而避免了对地面交通的影响。只要施工前选线合理, 施工方法恰当, 构筑物并不妨碍施工的正常进行。由于大直径顶管施工时在地下开挖引起卸载, 虽然后续管节起到支撑作用, 但开挖时开挖面四周的土体因应力松弛已向开挖面和隧洞空间膨胀, 仍会引起地层损失。以前有学者^[1]认为, 对于粘性土, 可近似地认为所有的地层损失均表现为地面沉降。但从上海等软土地层顶管工

程的实践看, 土体的移动形式是复杂的, 其运动既有竖向分量(沉降或隆起), 也有水平分量, 其中水平分量包括土体沿顶管轴线方向的运动。

数值计算及工程实例表明^[2,3], 顶管施工时, 工具管前方土体的移动对邻近已有的构筑物有明显的破坏作用。由于顶管在作业中既有开挖又有沿轴向的顶进, 且施工中土体轴向位移量随深度变化, 所以工具管附近土体的运动表现为非线性的三维特征。

收稿日期: 1999-04-12。

^{*} 国家自然科学基金重点资助项目(No. 59738160); 上海交通大学基金资助。

2 计算模型

半解析元法是一种基于变分原理的半解析数值方法,其特点是在运动规律明确的方向采用解析函数,而在运动规律尚不明确的方向进行数值计算,从而减少计算单元的数目。将土介质与顶管结构作为一个系统,根据土体的位移变化规律,在两个方向选取适当的位移函数以建立解析解函数,在另一个方向将系统离散并采用分片插值函数。这一过程把土介质与顶管结构作为一个系统沿轴向划分成段单元或环单元,单元中环向和径向的解析函数族与轴向的分片插值函数一起构成半解析解函数,即

$$u(x, \theta, r) = \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q R_m(r) \Theta_n(\theta) \sum_{k=1}^s N_k(x) a_{kmn} \quad (1)$$

式中 $R_m(r)$, $\Theta_n(\theta)$ 分别表示径向和环向解析函数,可根据所研究问题的位移规律恰当选取; $N_k(x)$ 为轴向离散的分片插值函数; a_{kmn} 为广义自由度,它是离散化方程中的未知量,在本文中它是位移; $a_{mnk} = \{u \ v \ w\}$ 。作为解析函数的构成要素, a_{kmn} 不是独立的,它是与解析函数 $R_m(r)$, $\Theta_n(\theta)$ 和离散插值函数 $N_k(x)$ 均有关的变量。解析方向的解析函数和离散方向的插值函数的共同调整使得控制方程和边界条件得以满足。

这样,原来的三维问题转换成了只在一个方向离散的数值计算,从而减小了单元的数目和计算时间,提高了计算效率。

顶管开挖后,在开挖面形成由土体原始应力场和扰动场的迭加状态。在软土地层中,因为扰动场的影响范围有限,所以当覆土层厚度较大时可近似地取厚壁圆筒作为计算模型,如图 1 所示。对于半解析元法,增加圆筒的壁厚不会造成计算上的任何困难。实际上,壁厚甚至可以增加至无限大。

分析表明^[3],径向位移 u 随 r 的增大而减小,当 $r \rightarrow \infty$ 时 $u \rightarrow 0$ 。所以用解析解来表示径向位移,即把径向作为非离散方向。因为 $1/r$ 是径向位移计算式 u 中的基本量,故用 $(1/r)^n$ 作为解析函数来逼近径向位移是合适的。在横截面的环向也用解析函数来逼近位移。

在顶管轴线方向,亦即施工中的前进方向,由于位移的变化规律尚不清楚,故将该方向作为离散方向。

这样,在沿顶管轴线方向用一系列垂直于轴线的平面将系统离散成环单元,如图 2 所示。

3 半解析元法分析过程

3.1 半解析函数

基于上述径向和环向解析,轴向离散的半解析元

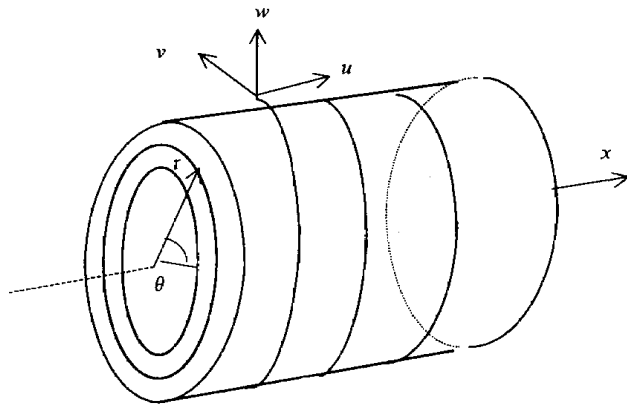


图 1 计算模型

Fig. 1 Computational model

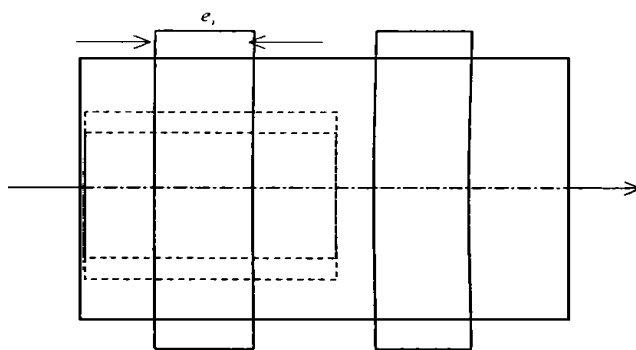


图 2 半解析单元

Fig. 2 Semi-analytical element

分析方案,构造如下位移函数:

当 $r \geq R$ 时

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q \cos m\theta \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{k=1}^s N_k(\xi) u_{kmn} \\ v &= \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q \sin m\theta \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{k=1}^s N_k(\xi) v_{kmn} \\ w &= \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q \cos m\theta \left(\frac{R}{r}\right)^{n-1} \sum_{k=1}^s N_k(\xi) w_{kmn} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当 $r \leq R$ 时

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q \cos m\theta \left(\frac{r}{R}\right)^n \sum_{k=1}^s N_k(\xi) u_{kmn} \\ v &= \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q \sin m\theta \left(\frac{r}{R}\right)^n \sum_{k=1}^s N_k(\xi) v_{kmn} \\ w &= \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q \cos m\theta \left(\frac{r}{R}\right)^{n-1} \sum_{k=1}^s N_k(\xi) w_{kmn} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $\left(\frac{R}{r}\right)^n$ 为径向解析函数,其特点是当 $r > R$ 时,有 $r \rightarrow \infty$, $\left(\frac{R}{r}\right)^n \rightarrow 0$; $\cos m\theta$, $\sin m\theta$ 均为环向解析函数,其中 $\sin m\theta$ 是自选函数,将它定义为

$$\overline{\sin m\theta} = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ \sin\theta, & m \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

环向解析函数采用三角函数的优点是收敛较快; p, q 分别为环向、径向解析函数所取的级数的总项数; $N_k(\xi)$ 是离散的轴向插值函数, 其中

$$\xi = \frac{x}{e_i} \tag{5}$$

s 为分片多项式插值函数 $N_k(x_i)$ 的插值项数, 在此处的半解析元中, 结点变成结面. $N_k(x_i)$ 的确定原则为当 x_i 取第 k 个结面 x_{ik} 时有

$$\sum_{k=1}^s N_k(x_k) a_{kmn} = a_{kmn} \tag{6}$$

其中 $u_{kmn}, v_{kmn}, w_{kmn}, N_k(x_i)$ 与项数 s 有关^[4].

将式(2), (3)写成矩阵形式, 有

$$\begin{aligned} \{u\} &= \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q [N]_{mn} \{ \delta_{mn} = \\ &\sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q [N_1]_{mn} [N_2]_{mn} [N_3]_{mn} \{ \delta_{mn} \delta_{2mn} \delta_{3mn} \}^T = \\ &[N] \{ \delta \} \end{aligned} \tag{7}$$

式中 N_1, N_2, N_3 为轴向离散插值函数.

$$\{ \delta_{mn} \} = \{ \delta_{1mn} \delta_{2mn} \delta_{3mn} \}^T \tag{8}$$

上式中, 当 $s = 3$ 时, 有

$$\left. \begin{aligned} \{ \delta_{1mn} \}^T &= \{ u_{1mn} v_{1mn} w_{1mn} \}^T \\ \{ \delta_{2mn} \}^T &= \{ u_{2mn} v_{2mn} w_{2mn} \}^T \\ \{ \delta_{3mn} \}^T &= \{ u_{3mn} v_{3mn} w_{3mn} \}^T \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

3.2 半解析单元应变列阵

半解析单元应变列阵为

$$\begin{aligned} \{ \epsilon \} &= \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_r \\ \gamma_{x\theta} \\ \gamma_{\theta r} \\ \gamma_{rx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{u}{x} \\ \frac{v}{r\theta} + \frac{w}{r} \\ \frac{w}{r} \\ \frac{u}{r\theta} + \frac{v}{x} \\ \frac{w}{r\theta} + \frac{v}{r} - \frac{v}{r} \\ \frac{u}{r} + \frac{w}{x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{u}{e_i \xi} \\ \frac{v}{r\theta} + \frac{w}{r} \\ \frac{w}{r} \\ \frac{u}{r\theta} + \frac{v}{e_i \xi} \\ \frac{w}{r\theta} + \frac{v}{r} - \frac{v}{r} \\ \frac{u}{r} + \frac{w}{e_i \xi} \end{Bmatrix} = \\ &\sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q [B]_{mn} \{ \delta_{mn} = [B] \{ \delta \} \end{aligned} \tag{10}$$

式中 $[B]$ 为几何矩阵.

3.3 内力矩阵

设土体为弹-粘塑性材料, 即材料在屈服前表现为弹性变形, 而在屈服后表现为粘塑性变形. 用 Bingham 模型来描述介质的特性, 总应变由弹性应变和粘塑性应变组成:

$$\{ \epsilon \} = \{ \epsilon_e \} + \{ \epsilon_{vp} \} \tag{11}$$

式中 $\{ \epsilon \}$ 为总应变; $\{ \epsilon_e \}$ 为弹性应变分量; $\{ \epsilon_{vp} \}$ 为

粘塑性应变分量.

内力矩阵为

$$\{ \sigma_R \} = [\sigma_{xR} \sigma_{\theta R} \sigma_{rR} \tau_{\theta rR} \tau_{rxR} \tau_{x\theta R}]^T = [D_R] \{ \epsilon_R \} \tag{12}$$

式中 σ 为正应力; τ 为剪应力; $\sigma_{rR}, \tau_{rxR}, \tau_{\theta rR}$ 为顶管结构与土介质接触面上相互作用力. $[D_R]$ 为土介质的弹性矩阵.

3.4 半解析单元刚度矩阵与荷载矩阵

半解析单元的刚度矩阵由土介质的单元刚度矩阵 $[KR]$ 和顶管结构的刚度矩阵 $[KS]$ 组成, 即第 i 个单元的单元刚度矩阵为

$$[K_i] = [KR_i] + [KS_i] \tag{13}$$

式中

$$\left. \begin{aligned} [KR_i] &= e_i \int_0^{2\pi} \int_R^\infty \int_0^1 [B]^T [D_R] [B] r d\xi dr d\theta \\ [KS_i] &= R e_i \int_0^{2\pi} \int_0^1 [B]^T [D_S] [B] d\xi d\theta \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

式中 R 为顶管半径; $[D_R]$ 和 $[D_S]$ 分别为土介质与结构的弹性矩阵. 采用 Euler 时间积分法, 当土体进入粘塑性状态时弹性矩阵仍然用 $[D_R]$ 表示.

计算时考虑开挖释放荷载、顶进力和摩擦力. 其中顶进力为

$$\{ F_i \}_{mn} = e_i \int_0^{2\pi} \int_0^1 [N_R]^T_{mn} \{ q_R \} d\xi d\theta \tag{15}$$

顶管顶进力由顶进系统作用于顶管管节上, 逐节传递并由工具管作用于土体上. 简化后得式(15)中的顶进力向量为

$$\{ q_R \} = \{ P_x \ 0 \ 0 \}^T \tag{16}$$

式中 P_x 由施工参数确定.

3.5 平衡方程

顶管施工过程中介质-结构系统的半解析元分析过程也应满足平衡方程, 即在任一时刻 t_n 都应满足

$$\int_\Omega [B]^T \sigma^n d\Omega + f^n = 0 \tag{17}$$

式中 $[B^n]$ 为 t_n 时刻的应变矩阵; σ^n 为 t_n 时刻总应力; f^n 为施工过程中各种体力、面力和集中力作用下在 t_n 时刻所产生的等效结面力.

经过上述的过程, 已建立了用半解析元法计算土体位移的理论体系, 此后仅需要在计算程序中进行数值迭代.

4 实例计算

上海市河流污水治理工程中的一段顶管工程采用直径为 1 650 mm 的泥水平衡式工具管, 其中的一段顶管线路穿越河底, 其覆土厚度小于 12 m, 最小覆土厚度为 2.5 m. 沿轴向选取包括工具管在内的 10 m 线路

为研究系统,其中开挖面前方长度为 4 m,开挖面后方长度为 6 m。利用半解析元法,将土介质与顶管结构系统划分成 12 个单元,分别计算各种深度土层的轴向位移。

4.1 项数收敛性检验

解析方向级数的项数取为 $p = q = 3$ 。用不同的单元数计算轴向位移,结果见下表。

附表 不同的单元数计算的轴向位移结果表

Table Computation results of axial displacements
varying with the number of elements

单元数	2	4	6	8	10	12	实测值
u / mm	11.67	25.09	33.16	42.34	47.19	49.35	45.0

从附表看出,单元数太少时计算误差很大。例如取 4 个单元计算的结果与取 12 个单元计算的结果相差 49%。随着单元数的增加,计算结果趋于收敛。当单元数大于 10 时,收敛已很明显。

4.2 土体位移

图 3~图 5 分别为顶管轴线上方 2 m、3 m 和 4 m 处的土体轴向位移的计算值与实测值。计算结果表明,顶管顶进时开挖面前方和后方的土体均有轴向移动。开挖面前方约 0.7 m 范围内土体向前移动,而在约 0.7~3.0 m 的范围内土体的移动方向与顶进方向相反。土体向后的移动是由于开挖释放荷载的作用。

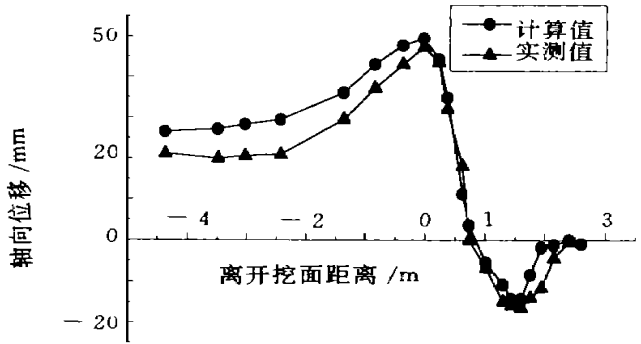


图 3 离轴线 2 m 处土的轴向位移

Fig. 3 Axial displacement (2 meters from the axis)

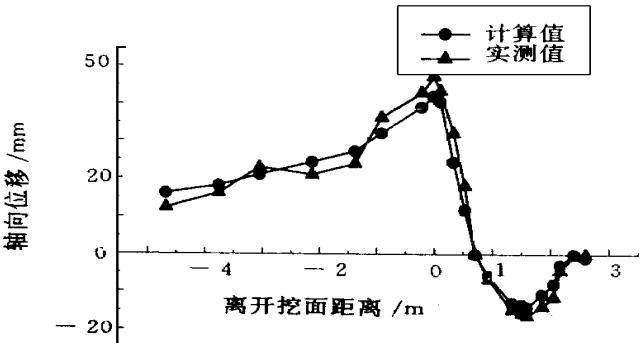


图 4 离轴线 3 m 处土的轴向位移

Fig. 4 Axial displacements(3 meters from the axis)

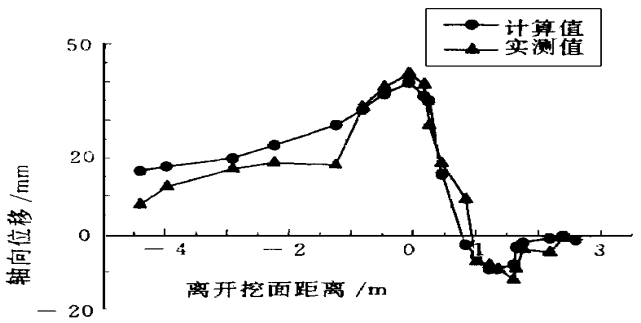


图 5 离轴线 4 m 处的轴向位移

Fig. 5 Axial displacements(4 meters from the axis)

在摩擦力作用下工具管后部及后续管节外围的土体轴向位移沿轴向变化较为缓慢。就同一轴向位置而言,从顶管轴线向上,土体轴向位移渐小。

图 6 所示是地面沉降,由于在垂直于轴线方向沉降槽有一定规律^[4],图中只给出同一截面处的最大沉降值。

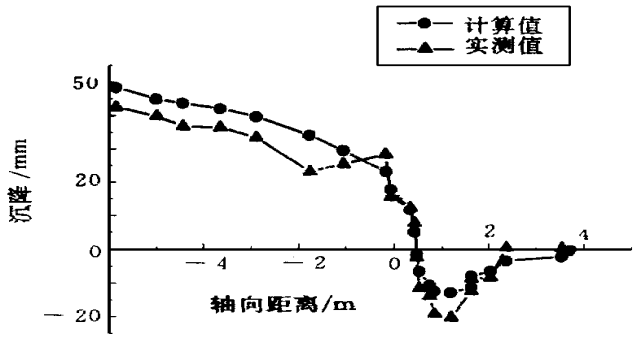


图 6 横截面最大地面沉降

Fig. 6 Maximum settlements

5 结 论

(1) 用半解析单元法分析顶管施工中浅层地下土体的移动,由于在一些方向利用了解析函数,因而单元数大为减少,计算值随单元数的增加能很快收敛。

(2) 顶管施工时在开挖面的前方既有土体的向前移动,也有土体的向后移动。

(3) 顶管轴线上方土体的轴向位移量随离轴线的距离增大而减小。

参 考 文 献

1 Attewell P B. An overview of site instigation and long-term tunneling-induced settlement in soil [A] . Engineering Geology of Underground Movement In: Proc. of the 23 rd Annul Conference of the Engineering Group of the Geotechnical Society [C] . Nottingham, 1988. 55 ~ 61.

2 方从启. 基于半解析元法研究顶管施工引起的地层运动: [博士学位论文] [D] . 上海: 同济大学, 1998.

3 方从启, 王承德. 顶管施工中的地面沉降及其估算[J]. 江苏理工大学学报, 1998, (4): 106~110.

4 曹志远, 张佑启. 半解析数值分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992. 27~29.

简讯

全国水利水电地下建筑物信息网学术研讨会在宜昌召开

全国水利水电地下建筑物信息网和中国水力发电工程学会地下工程专业委员会联合举办的学术研讨会于 1999 年 12 月 1~5 日在宜昌召开。参加会议的单位有水利水电规划设计总院、长委设计院、黄委设计院、国家电力公司和水利部有关省院、长江三峡开发总公司、小浪底建管局、二滩水电开发公司、清江水电开发公司、南京水科院、中科院武汉岩土所、武警水电三峡工程指挥部、水电六局、七局、八局、中国人民解放军总参工程兵第四设计院、武汉水电大学等三十六个单位, 有七十多位代表。会议共收到学术论文 35 篇, 并编印了会议论文集。

会议由正网长单位—黄委设计院林秀山副院长致开幕词, 并代表地下建筑物信息网对本届四年来的工作进行了总结, 对全体网员单位的大力支持表示感谢, 特别对在《地下工程技术》网刊方面投资较多的单位, 如二滩水电开发公司、广东省水利水电设计院、中科院武汉岩土所、小浪底建管局、黄委设计院等单位在大会上提出表扬。

参加大会学术报告的 13 位同志重点介绍了三峡、二滩及小浪底工程情况, 另外还交流了水布垭、天生桥二级、岩滩等工程的设计、科研、施工及地下工程数值计算和支护新理论。会议期间, 大会组织参观了三峡工程、葛洲坝水利枢纽及清江隔河岩水电站工程。长江三峡工程是中国也是世界最大的水利枢纽工程, 技术条件复杂, 代表们在现场对宏伟的三峡工程施工场面感到欢欣鼓舞。从建国初期修建的古田溪, 狮子滩到今天设计修建的二滩、小浪底、三峡大型工程, 工程技术人员感到特别自豪和骄傲。葛洲坝和隔河岩等水利枢纽, 在洪峰到来时拦蓄了大量洪水, 减轻了下游堤防压力, 取得了明显的防洪减灾效益, 使代表们进一步认识到水利水电工程的重要作用及施工质量的重要性。与会同志认为, 这是一次难得的相互学习交流的好机会。

会议期间召开了网长会议, 进一步总结了四年来黄委设计院担任正网长期间的工作。在上级两总院的领导下, 在全体网员单位的支持和黄委会勘测规划总院的重视和关怀下, 信息网在学术交流和编辑出版发行《地下工程技术》网等方面作了大量工作, 得到全网成员的肯定。经总院协商, 网长会议研究并提请全网大会通过, 产生了下一届正、副网长单位。

- 正网长单位: 长江水利委员会勘测规划设计院;
- 副网长单位: 黄委设计院、天津院、成都院、西北院、昆明院、福建省院、广东省院等 10 个单位。
- 代表们希望在新一届网长的领导下, 再接再厉, 把全网工作提高到一个新水平。

(余诗刚)