

# 合肥新桥国际机场原状非饱和膨胀土的 土水特性研究\*

汪明武 杨江峰 李 健 秦 帅

(合肥工业大学土木与水利工程学院,合肥 230009)

**摘要:** 土水特性影响并控制着非饱和膨胀土的工程特性。基于扫描电子显微镜试验和 GDS 非饱和应力路径系统试验,对合肥新桥机场场地原状非饱和膨胀土在失水和吸水过程中土水特征曲线进行研究,并数值反演相应的土水特征曲线、相对渗透系数和土水扩散系数,研究得出工程区域原状膨胀土微结构易于形成微裂隙,吸湿土水特征曲线较失水过程的土水特征曲线存在明显的滞后性。数值分析结果表明, Fredlund 模型与实测结果吻合较好,研究结果为新桥机场膨胀土地基处理方案的制定提供了一定依据。

**关键词:** 非饱和土; 膨胀土; 土水特征曲线; 相对渗透系数

## SOIL-WATER CHARACTERISTICS OF UNDISTURBED AND UNSATURATED EXPANSIVE CLAYS IN THE XINQIAO INTERNATIONAL AIRPORT AREA OF HEFEI

Wang Mingwu Yang Jiangfeng Li Jian Qin Shuai

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Soil-water characteristics play roles in engineering behaviors of undisturbed and unsaturated expansive clays. Based on SEM and other experiments, microstructures and shrinkage-swelling properties were discussed for the unsaturated expansive clays in the area of Xinqiao International Airport in Hefei. Moreover, soil-water characteristic curves (SWCCs) during drying and wetting process were measured by means of GDS triaxial stress path system, and numerical simulations and comparisons were conducted for the corresponding SWCC, relative hydraulic conductivity and soil-water diffusivity. The results showed that the measured SWCCs during wetting process behaved hysteresis with reference to that during drying process. The simulation SWCC using Fredlund model was in good agreement with the measured curve. These results provided a certain basis for making a rational foundation treatment plan for the Xinqiao International Airport founded on expansive clays.

**Keywords:** unsaturated soil; expansive clay; soil-water characteristic curve; relative hydraulic conductivity

膨胀土是一种典型的非饱和黏性土,具有显著的吸水膨胀和失水收缩特性<sup>[1-2]</sup>,其引起的工程灾害素有“工程中的癌症”之称,故非饱和膨胀土特性一直是工程界十分关心的重要问题,而诸多研究表明,非饱和膨胀土中的气和水可随着含水率不同而变化的特点是导致其性质复杂的主要因素,且非饱和膨胀土的工程特性受其土水特性影响和控制<sup>[3-6]</sup>,所以弄清非饱和膨胀土的土水特性,是认识非饱和膨胀土力学性能的前提。土水特征曲线(Soil Water Characteristic Curve,简称 SWCC)是表征土水特性的重要指标,是指土体的含水量与吸力之间的关系曲线,其受矿物成分、孔隙结构、干湿循环、应力状态和压实度等不确定因素影响和控制,从而导致人们至今对非饱和膨胀土的土水特性的认识不足。国外 Fredlund、Gens、Gardner、Van Genuchten、

Wheeler 和 Rahardjo 等对非饱和黏性土、砂土的 SWCC 开展过较深入的研究<sup>[3-6]</sup>;国内在这方面研究相对较晚,主要由于当时从国外引进的非饱和土试验设备较少。近些年来,随着国内先进非饱和土试验设备的推广和开发,我国土水特性的试验研究水平也得到了长足的进步<sup>[7-8]</sup>,主要研究代表有陈正汉、包承纲、缪林昌<sup>[9]</sup>、龚壁卫、孔令伟、叶为民、胡瑞林和詹良通等,取得一定进展和重要成果<sup>[10-12]</sup>。综合国内外文献报道,针对非饱和膨胀土的土水特性研究相对较少,特别是考虑原状膨胀土胀缩特性

\* 国家自然科学基金项目(41172274)。

第一作者:汪明武,男,1972年,博士,教授,博士生导师。

E-mail: geotechnics@foxmail.com

收稿日期:2012-05-05

和受荷状况的土水特性报道,以往土水特性研究主要是针对重塑的砂土、黏土,试验方法主要是采用压力板和渗析方法等,但它们得到的土水特性难以反映工程现场原状膨胀土的三维受荷状态和场地膨胀土胀缩特性,且大多无法实测水分变化过程中体积变化情况,而这些因素关系到膨胀土的工程特性,由吴宏伟和詹良通开发的非饱和 GDS 系统则能解决上面的难题<sup>[6]</sup>,也为探讨水分迁移中非饱和和膨胀土的土水特性提供了新的途径。现场膨胀土特性随着含水量、矿物成分和分布区域不同而表现出明显的差异性,故为深入分析实际工程场地原状非饱和膨胀土的土水特性,本研究基于四维应力控制方法对原状膨胀土的土水特性展开探讨,以便为认清非饱和和膨胀土的工程特性及制定最佳膨胀土治理的最佳方案提供一定依据。

### 1 工程区域膨胀土基本特性

合肥新桥国际机场位于合肥市肥西县高刘镇,机场拟建 22 个站坪客机位,飞行区等级为 4E。机场工程场地区域膨胀土分布广,场地膨胀土的基本特性如表 1 和表 2 所示<sup>[14]</sup>,场区膨胀土为弱—中等膨胀土。X 射线衍射试验(XRD)研究表明:场地膨胀土黏土矿物主要以蒙脱石和伊利石为主,其他矿物成分主要为石英。现场原状膨胀土微结构的典型特征见扫描电子显微镜试验(SEM)结果(图 1)。由图 1 可见:现场原状膨胀土的微结构主要以叠聚体接触为主,叠聚体间夹有较大的团聚体,此种微结构对干湿循环敏感,利于微孔隙和微裂隙发育。膨胀土体 1% 的含水量的变化就可引起胀缩变形,而这会导致机场跑道失稳,故开展工程区域非饱和和膨胀土的土水特性研究,对制定最佳的地基处理方案和确保场道工程安全运行具有重要的意义。

表 1 工程区域膨胀土物理参数

Table 1 Physical parameters of expansive soils in the project area

最大干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水量 $w / \%$	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	液性指数 $I_p$	最优含水 量 / %
1.84	23.2	48.0	23.8	24.2	16.0

表 2 工程区域膨胀土的胀缩特性

Table 2 Swelling-shrinkage properties of expansive clays

自由膨胀率 $\delta_{ef} / \%$	膨胀率 $\delta_e / \%$	收缩系 数 $\lambda$	膨胀力 $p_e / kPa$	50 kPa 作用下的 膨胀率 / %
46.30	0.35	0.33	67.50	0.37

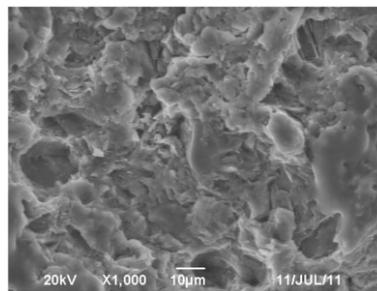


图 1 原状膨胀土电镜扫描图片

Fig.1 SEM photograph of undisturbed expansive clay

## 2 试验研究

目前,土水特征曲线研究方法主要有试验、数值模拟和理论分析方法,其中土水特征曲线试验方法主要有压力板法、盐溶液法、滤纸法和电位计法等,各方法各具优缺点,不同方法获得的土水特性曲线常存在差别,这主要是由于不同方法间的测试原理不同。为分析新桥机场场地膨胀土荷载条件下失水和吸水过程中土水特性,便于工程应用,采用近期发展起来的 GDS 四维应力方法来开展研究。

### 2.1 试验设备

试验设备采用 GDS 生产的非饱和应力路径测试系统,探讨在围压和偏应力不变、吸力不同条件下原状非饱和土的土水特征曲线。GDS 非饱和和三轴试验系统主要由加压系统、反压控制系统和测量系统构成。系统采用高精度的双向湿—湿差压传感器(DPT)测量体变,以确保体变测量不受温度和压力的影响并具有较高的精度和分辨率;并采用轴平移技术测量吸力,以避免汽化和长时间测量带来的体积测量误差等。系统具有比一般测试系统精度高的优点,压力分辨率为 1 kPa,体积分辨率为 1 mm<sup>3</sup>。

### 2.2 试验原理

基于 GDS 三轴试验系统四维应力路径方法的土水特性测试原理:利用轴平移技术,使土样的基质吸力等于施加孔隙气压力与孔隙水压力之差,即在保持轴向压力、径向压力及孔隙气压不变的前提下,通过反压控制器改变孔隙水压并一直维持到吸力平衡,实现增湿或脱湿过程;基于烘干法测定试验结束后的试样含水量,且利用每个阶段反压体积变化反算相应的含水量,即可获得荷载条件下非饱和和膨胀土的土水特性曲线。

### 2.3 试验步骤

#### 2.3.1 制样

基于现场非扰动取得的大体积非饱和膨胀土,现场取样见图 2,并封装运至室内,按 SL 237—1999《土工试验规程》用钢丝锯和切土器等制成直径为

39.1 mm、高为 80 mm 的圆柱状试样,将其装入饱水器中抽气并饱和 6 d 以上。

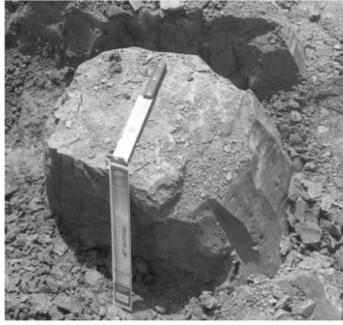


图 2 现场大体积非扰动取样  
Fig.2 Undisturbed sampling of soil mass in site

### 2.3.2 装 样

从饱水器中小心取出试样后称重,装入套好橡皮膜的承膜筒内,借助三瓣膜将试样安装于 GDS 陶土板上,使其与陶土板紧密接触,试样的另一端加透水石并接上试样帽,加上底部涂抹过硅胶的内室,以防止内室漏水,然后给内室加脱气水至一定高度,排除参照管及内室连接管中的气泡。为了避免长时间试验导致水分蒸发,应在水面上加几滴煤油。检查内室是否漏水再加装外室并紧固。

### 2.3.3 试 验

首先检查系统是否漏气,相关传感器清零,并按照本次试验方案设置各阶段的试验参数。检查气源和其他设备是否正常。在保证一切正常后,开始试验。试验中注意设备运行状况,试验结束后必须按一定顺序降低各加压系统至零,小心卸样并及时称重,并采用烘干法测定试样最后阶段的含水量。

### 2.3.4 数据整理及处理

将采集数据导入 Excel 处理及反算各阶段体积含水量,并作图和分析。

### 2.4 试验方案

土水特性试验具体方案中设置了脱水过程和吸

水过程,以模拟现场干湿循环作用对非饱和和膨胀土土水特性的影响,并在土水特性试验前设置了试样饱水过程,即试验的 0~1 阶段,以克服装样过程中试样部分水分丧失引起的误差。土水特性试验中轴向压力和径向压力分别为 510,505 kPa,试验 1~6 阶段为失水过程,7~9 阶段则为吸水过程,各阶段吸力平衡条件见表 3,试验中四维应力实测结果见图 3。本试验中各吸力平衡是在围压和偏应力不变的条件完成的,而孔隙水压和孔隙气压是预先设置的,吸力平衡是根据孔隙水体积变化与时间的关系判定每个阶段的终止,本试验吸力平衡判断条件为连续 24 h 内反向体积变化小于  $50 \text{ mm}^3$ 。

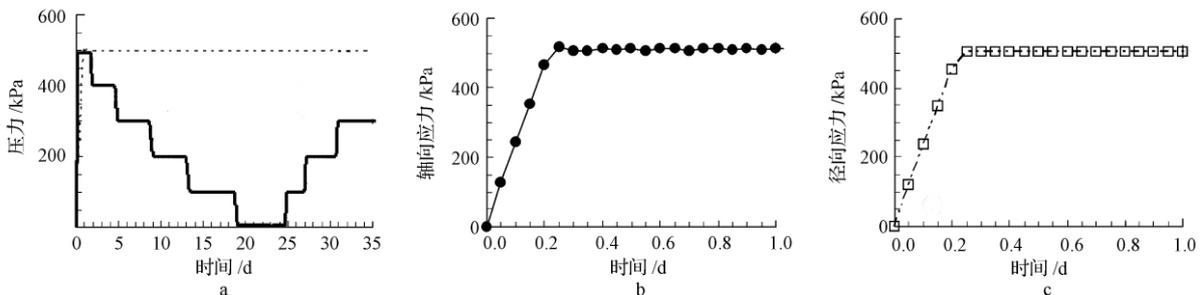
表 3 试验吸力平衡条件

Table 3 Suction balance condition of tests

试验阶段	孔隙气压 $u_a$ /kPa	孔隙水压 $u$ /kPa	基质吸力 $\psi$ /kPa	说明
0	0	0	0	饱水过程
1	500	495	5	饱水过程
2	500	400	100	失水过程
3	500	300	200	失水过程
4	500	200	300	失水过程
5	500	100	400	失水过程
6	500	5	495	失水过程
7	500	100	400	吸水过程
8	500	200	300	吸水过程
9	500	300	200	吸水过程

### 2.5 试验结果

试验实测结果见图 4 和图 5 所示。由图 4 可知:在饱水试验阶段,因为低吸力,反向体积和体积应变增长较快,表现出明显的吸水膨胀特性;失水试验阶段中,试样的体积应变和总体积在失水过程中,曲线增长率当吸力超过 100 kPa 后明显放大,见图 4,土水特征曲线也表现出相应的规律,见图 5,而轴向应变增长规律未出现明显变化,表明工程现场原状膨胀土的进气值约为 100 kPa;吸水过程中,总体



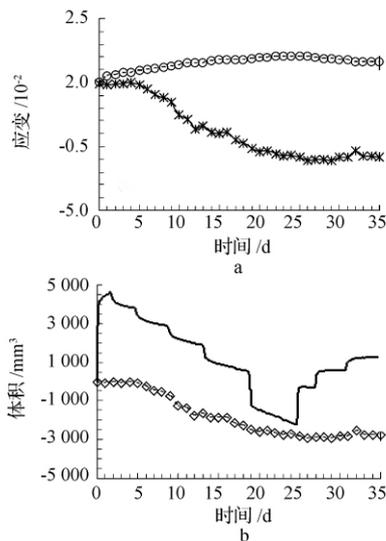
a—土中气、水压应力-时间曲线; b—轴向应力-时间曲线; c—径向应力-时间曲线

— 孔隙水压; ..... 孔隙气压; —●— 轴向应力; —□— 径向应力

图 3 试验中的孔隙水压、孔隙气压、轴向应力和径向应力时程曲线

Fig.3 Time histories of pore water pressure, pore air pressure, axial stress and radial stress in the test

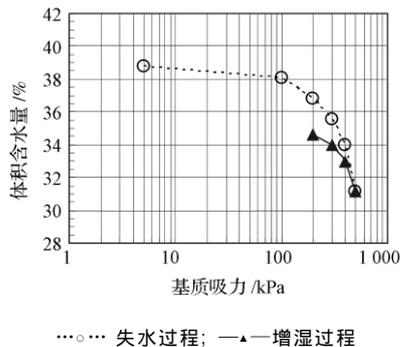
积和体积应变则不随吸力变化发生明显变化,反向体积变化量也明显小于失水过程,表现出明显的滞后性,见图4。从图5结果可知:体积含水量随着基质吸力的增大而减小,并可见干、湿过程的实测土水特征曲线特性不同,表明干湿循环过程对膨胀土的微结构及孔隙的影响较大,脱湿及吸湿过程的土水特征曲线特点不同,工程区域原状非饱和和膨胀土存在明显的水力滞后特性。



a—轴向应变—时间曲线; b—体积—时间曲线  
 ……轴向应变; —\*—体积应变; ——反向体积; - - - - 总体积

图4 应变和体积实测曲线

Fig. 4 Measured curves of volume and strain changes



……失水过程; —▲—增湿过程

图5 实测土水特征曲线

Fig. 5 Measured soil-water characteristic curves

### 3 数值模拟

非饱和膨胀土土水特性试验研究周期长,且测试水平要求高,不利于工程现场人员应用,为此,基于试验结果并针对工程现场膨胀土特点构建土水特性数值模型显得尤为重要。而膨胀土特性受应力状况、孔隙比、矿物含量等多种因素影响,且土水特征曲线不能同时准确描述吸湿和脱湿状态部分的试验数据。为此,本文在此仅分析原状膨胀土的失水过

程土水特征曲线,数学模型选择了具有代表性的 Gardner 模型、Van Genuchten 模型和 Fredlund 模型,它们对应的数学模型如下。

Gardner 模型:

$$F(\psi) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{1 + a\psi^b} \quad (1a)$$

Van Genuchten 模型:

$$F(\psi) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (a\psi)^b]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (1b)$$

Fredlund 模型:

$$F(\psi) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^b \right] \right\}^c} \quad (1c)$$

式中:  $\theta$  为体积含水量,取值范围为  $(\theta_r, \theta_s]$ ,  $\theta_s$  和  $\theta_r$  分别为饱和体积含水量和残余体积含水量;  $\psi$  为基质吸力,取值范围为  $(0, \psi_r]$ ,  $\psi_r$  为当含水量降低到残余含水量  $\theta_r$  时所对应的基质吸力;  $a$ 、 $b$  和  $c$  为曲线形状参数,  $a$  为与进气值有关的参数,  $b$  为在基质吸力大于进气值之后与土体脱水速率有关参数,  $c$  为与残余含水量有关参数。

为分析模拟曲线与试验实测值间的趋近程度,采用相关系数  $R^2$  来评估模拟效果,即:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\theta - \theta_2)^2}{\sum(\theta - \theta_1)^2} \quad (2)$$

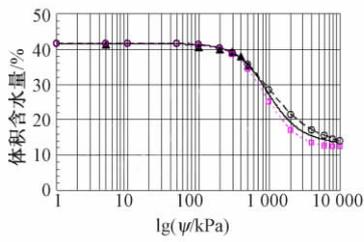
式中:  $\theta$  和  $\theta_1$  分别为体积含水量试验实测值和平均值;  $\theta_2$  为基于数学模型的模拟值。

基于上面试验实测值和式(1)数学模型的数值反演结果见图6。由图6可见,对工程区域非饱和和膨胀土的土水特征曲线采用 Fredlund 模型效果较好。但非饱和膨胀土土水特征数值模拟问题是一个复杂问题,本文模型参数还有待其他工程实例验证和完善。各模型的模拟参数和相关系数见表4。基于表4获得参数,即可对工程区域非饱和和膨胀土的不同吸力和含水量下的相对渗透系数和扩展系数进行分析。图7为基于 Mualem 模型和 Van Genuchten 模型的相对渗透系数和扩展系数数值分析结果。

表4 土水特征曲线数值模拟参数和相关系数

Table 4 Simulation parameters for SWCCs and correlation coefficients

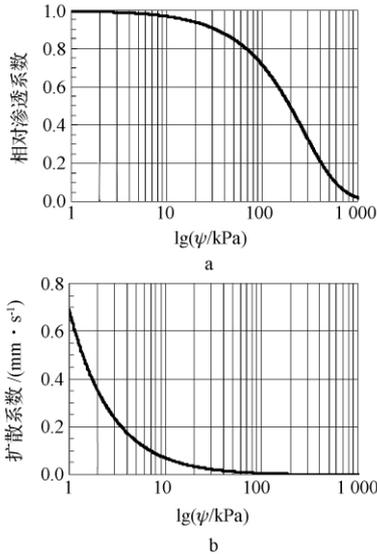
参数	Gardner 模型	Van Genuchten 模型	Fredlund 模型
$a$	$1.720 \times 10^{-6}$	$1.050 \times 10^{-2}$	802.856
$b$	1.955 0	1.985	1.982
$c$	—	0.496	1.808
$R^2$	0.829 9	0.947	0.950



▲ 实测值; --- Gardner 模型; - · - · Van Genuchten 模型;  
— Fredlund 模型

图6 实测土水特征曲线与模拟曲线对比

Fig. 6 Comparisons of measured and simulated SWCCs



a—相对渗透系数; b—扩散系数

图7 非饱和膨胀土的相对渗透系数和  
土水扩散系数模拟曲线

Fig. 7 Simulated curves of relative hydraulic conductivity  
and soil-water diffusivity of unsaturated expansive clays

#### 4 结 语

非饱和膨胀土土水特性问题是一个复杂问题,本研究基于试验和数值分析方法探讨了合肥新桥国际机场工程场地原状膨胀土的微结构和土水特性,得出工程区域膨胀土微结构易受干湿循环影响,实测土水特征曲线也证实工程区域原状膨胀土吸水 and 失水过程的土水特征曲线性态不同,具有明显的水力滞后性,土水特征曲线数值分析结果表明 Fredlund 模型与实测土水特征曲线较吻合,为揭示

工程场地膨胀土特性和制定地基处理方案提供了一定依据。以上结论是基于试验结果得出的,但还需开展大量试验验证和完善,对其还需开展非饱和和强度试验和工程现场试验研究,此也是后续研究内容。

#### 参考文献

- [1] Du Yanjun, Li Shenglin, Hayashi Shigenori. Swelling-Shrinkage Properties and Soil Improvement of Compacted Expansive Soil, Ning-Liang Highway[J]. Engineering Geology, 1999, 53(3/4): 351-358.
- [2] Wang M, Chen G. A Novel Coupling Model for Risk Analysis of Swell and Shrinkage of Expansive Soils [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2011, 62(7): 2854-2861.
- [3] Van Genuchten M T. A Close-From Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [4] Fredlund D G, Xing A. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [5] Ng C W W, Zhan L T, Cui Y J. A New Simple System for Measuring Volume Changes in Unsaturated Soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 757-764.
- [6] Wheeler S J, Sharma R S, Buisson M S R. Coupling of Hydraulic Hysteresis and Stress-Strain Behaviour in Unsaturated Soils [J]. Geotechnique, 2003, 53(1): 43-54.
- [7] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 147-169.
- [8] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 129-136.
- [9] 缪林昌, 刘松玉. 南阳膨胀土的水分特征和强度特性研究 [J]. 水利学报, 2002(7): 87-92.
- [10] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究 [J]. 岩土力学, 2004, 5(12): 1915-1918.
- [11] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727-732.
- [12] 叶为民, 钱丽鑫, 白云, 等. 由土-水特征曲线预测上海非饱和和软土渗透系数 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1262-1265.
- [13] 李志清, 胡瑞林, 王立朝, 等. 非饱和和膨胀土 SWCC 研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 730-734.
- [14] Wang Mingwu, Ge Kang, Zhu Darong. Experimental Study of Engineering Behaviors on Improved Expansive Soils in the Xinqiao Airport Runway of Hefei [J]. Advanced Materials Research, 2011, 261/263: 1329-1335.

#### · 信 息 ·

由中国建筑科学研究院、中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会主办、福州大学土木工程学院承办的第十四届空间结构学术会议暨庆祝空间结构委员会成立 30 周年于 2012 年 11 月 1—4 日在福州隆重举行。来自全国各地的 116 个单位的 280 位代表参加了会议。本次大会的主题是“三十年来我国空间结构的进步、发展与今后展望”除了邀请 5 位国内知名专家就当前空间结构发展的重要问题及空间结构中的重大工程做大会发言,另外还有 100 余篇论文以分组发言的形式进行学术交流。