

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.014

疏浚淤泥真空排水室内试验仪器研制

张凌云^{1,2},周源^{1,2},陆志浩³,张莹^{1,2}

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京210098;
2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏南京210098;3.中国电力工程顾问集团华东电力设计院,上海200063)

摘要:针对疏浚淤泥真空排水室内试验小模型筒的尺寸效应以及方形箱边界摩擦影响较大的问题,研制了以大直径圆筒为试验容器的疏浚淤泥真空排水室内试验仪器装置。装置包含模型箱、排水系统、加压系统、真空抽气系统、阀门控制系统、尾水收集系统和量测系统7个主要部分。通过3组对比试验,在3种真空度作用下对仪器装置进行了测试,试验结果符合真空排水的基本规律,同时证实了最优真空度的存在。

关键词:疏浚淤泥;真空排水室内试验;仪器研制
中图分类号:TU415;U616⁺.26**文献标志码:**A**文章编号:**1000-1980(2015)02-0172-06

Instrument development for dredged sludge vacuum drainage laboratory test

ZHANG Lingyun^{1,2}, ZHOU Yuan^{1,2}, LU Zhihao³, ZHANG Ying^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. East China Electric Power Design Institute, China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China)

Abstract: In consideration of the size effect of the small-scale cylinder and the obvious lateral friction effect of the square box in a dredged sludge vacuum drainage laboratory test, an instrument for the dredged sludge vacuum drainage laboratory test was developed, with a large-diameter cylinder used as the test container. The instrument consists of seven parts, including the model box, drainage system, pressure system, vacuum pumping system, valve controlling system, tail water collection system, and measurement system. Three groups of comparative experiments for instrument testing under three vacuum conditions show that the test results accord with the basic law of vacuum drainage, and also confirm the existence of the optimal vacuum degree.

Key words: dredged sludge; vacuum drainage laboratory test; instrument design

我国是一个沿海城市较多、河流湖泊分布较广的国家,河流、港口的泥沙淤积问题严重,港口、码头的清淤过程中会产生大量疏浚淤泥^[1-2]。目前多数疏浚淤泥采用堆场放置处理,不仅占用了大量的土地资源,而且污染环境,因此需要对疏浚淤泥进行脱水处理,以解决疏浚淤泥堆场放置占用土地资源的问题。

疏浚淤泥具有含水率高、强度低、渗透性低等特点。目前工程中对疏浚淤泥等软土的处理,常用的有真空脱水法、堆载脱水法和真空-堆载联合作用脱水法等^[3-5]。疏浚淤泥现场排水试验设备要求高,实施难度大,国内外开展了大量的室内模拟试验^[6-14]。我国开展的室内试验研究采用模型箱作为试样容器,以小模型筒和方形箱为主^[15-16]。小模型筒的半径小,排水板排水的影响半径大于模型筒的实际半径,排水作用不能充分发挥,不能准确地反映排水规律。根据比表面积的定义可知,大直径模型与小模型相比,单位体积内试样与边界的接触面积较小,边界摩擦小,边界效应的影响也小。对于方形箱,其角部区域单位体积的试样与

收稿日期:2014-04-29

基金项目:国家自然科学基金(51109070)

作者简介:张凌云(1990—),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要从事环境岩土研究。E-mail:zhanglingyun90@126.com

容器边界接触面积大于其他部位,边界摩擦对试验效果的影响较大。因此,小模型筒的尺寸效应和方形箱的边界效应对试验效果的影响较大。

笔者围绕疏浚淤泥排水问题,研制一种可以减小尺寸效应和边界效应的疏浚淤泥真空排水室内试验仪器装置,并通过几组试验实例,模拟了疏浚淤泥真空排水过程,对真空排水试验的基本规律^[5-7]和最优真空度的存在^[17-18]进行了验证。

1 疏浚淤泥真空排水室内试验仪器装置设计

1.1 仪器装置的组成

疏浚淤泥真空排水室内试验仪器装置包含 7 个主要部分:模型箱、排水系统、加压系统、真空抽气系统、阀门控制系统、尾水收集系统和量测系统,见图 1。

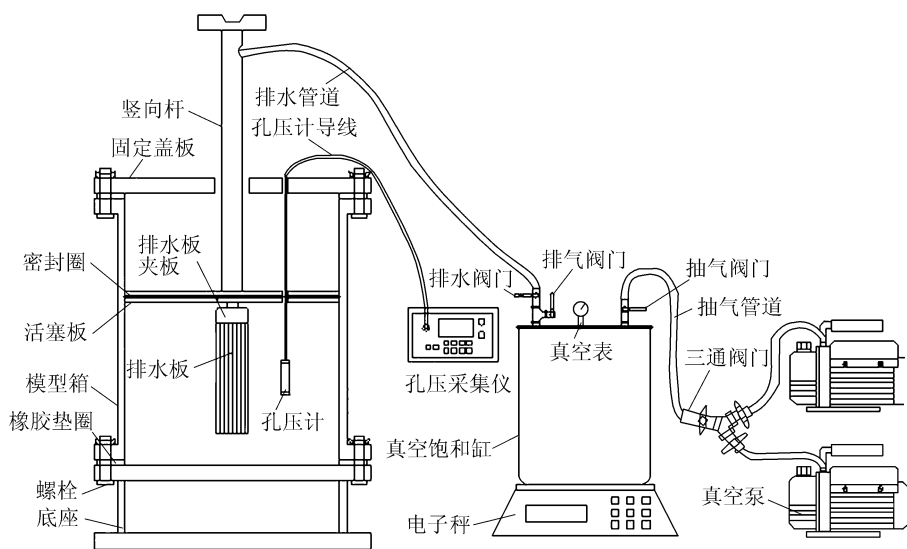


图 1 疏浚淤泥真空排水室内试验仪器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus of dredged sludge vacuum drainage laboratory test

模型箱材料为 1 cm 厚的有机玻璃,内径为 43 cm,高度为 45 cm,模型箱与底座的连接以及两节之间的连接通过法兰盘和螺栓实现。

排水系统由塑料排水板、排水板夹板和排水管道组成。塑料排水板通过排水板夹板与排水管道连接,排水板夹板固定在活塞板中间洞口。

加压系统包括活塞板、竖向杆、固定盖板。活塞板与竖向杆通过螺旋连接。竖向杆穿过固定盖板中心的洞口,保证竖向杆不倾斜,使活塞板均匀下沉。

真空抽气系统的真空负压来源为旋片式真空泵,试验装置采用飞越真空泵 1 L 迷你型 FY-1H-N。由于试验周期较长,需要配置 2 台真空泵轮流工作,以防真空泵过热损坏。2 台真空泵通过三通阀门和真空抽气管道与饱和缸相连,饱和缸通过排水管道与排水系统相连,完成真空度的传递。

阀门控制系统用来控制真空度和气流方向。采用5个控制阀门,分别位于真空泵与饱和缸连接管道间、饱和缸的进水口和漏气口。调节真空度的阀门为饱和缸排气口的球形阀门。饱和缸进水口的阀门控制饱和缸和模型箱内部的连通。三通阀门的2个分阀门与2台真空泵连接,控制真空泵的工作。

饱和缸作为模型箱与真空泵连接的中间介质起着收集尾水的作用。

量测系统主要量取真空度、抽水质量、试样泥面高度以及孔压。真空度是试样排水快慢程度的重要控制因素,通过控制球阀调节需要的真空度。采用弹簧管真空表测量真空度,量测范围为 0 ~ 100 kPa。采用电子秤称量尾水的质量,电子秤量程为 0 ~ 30 kg。试样的泥面高度通过模型箱外部的厘米刻度条读取,刻度条均匀分布在模型箱的四周。孔压计位于试样内部,孔压计的导线与模型箱外部的孔压采集仪连接。

1.2 仪器装置的整体连接方式

a. 模型箱的连接。模型箱单节模型圆筒与底座用法兰盘相连,中间垫一层橡胶圈,用螺栓固定。

- b. 排水系统和加压系统连接。**塑料排水板夹板固定在活塞板中间的洞口,用硅胶粘结。排水板夹板的上部连接真空排水管道,下部固定塑料排水板。活塞板中间洞口与竖向杆通过螺旋连接。
- c. 真空抽气系统连接。**真空排水管道的一端与塑料排水板夹板相连,另一端与真空饱和缸上的进水口接口套接。真空抽气管道与真空饱和缸上抽气口接口套接,另一端与三通阀门主阀门接口套接,三通阀门的2个分阀门分别与2个真空泵接口套接。
- d. 尾水收集系统连接。**真空饱和缸的进水口通过排水管道与塑料排水板相连,抽气口与三通阀门的主阀门相连。
- e. 量测系统的连接。**孔压计导线从活塞板1/2半径处穿过,用硅胶粘结固定,孔压计导线与孔压采集仪相连。真空表固定在饱和缸的盖子上。饱和缸放置在电子秤上。

2 试验方法

2.1 试样的制备

疏浚淤泥真空排水室内试验的对象为疏浚淤泥。试样的制备过程为:(a)称取风干疏浚淤泥的质量;(b)根据预设的初始含水率,计算需要加水的质量;(c)风干疏浚淤泥充分浸泡后用搅拌机搅拌,搅拌均匀后取样测其含水率。测得含水率与预设初始含水率误差小于1%认为试样合格,试样制备完成,否则,改变试样和水的比例,重新搅拌均匀,取样测其含水率,直至满足要求。

2.2 具体试验操作步骤

- a. 组装模型箱。**将模型箱与底座用螺栓连接固定。在模型箱内壁涂上一层薄凡士林,减小活塞板下沉的阻力。
- b. 连接排水系统和加压系统。**将塑料排水板夹板用硅胶粘结在活塞板中间缺口,静置24 h以上,将塑料排水板套进排水板夹板用胶带固定好。将排水管道与排水板夹板的另一端套接,固定。将竖向杆套进盖板,再与活塞板连接。
- c. 连接真空抽气系统及阀门控制系统。**将真空泵与三通阀门的分阀门套接,三通阀门的主阀门与饱和缸抽气口套接,并分别用不锈钢螺旋卡箍卡紧。
- d. 连接尾水收集系统。**与塑料排水板相连的管道另一端与饱和缸进水口套接,用不锈钢螺旋卡箍卡紧。
- e. 安装量测系统。**安装孔压计、真空表。饱和缸放置在电子秤上,将电子秤读数清零。厘米刻度条贴在模型箱外表面的四周。
- f. 仪器整体的连接。**将制备的试样装入模型箱中。将塑料排水板、活塞板、竖向杆、盖板、排水管道连接好的整体竖直向下,慢慢将塑料排水板插入试样。待活塞板与泥面完全贴合,将盖板的孔与模型箱上部的孔对好,用螺栓连接固定,保证竖向杆的竖直下沉。最后将密封袋套在整个模型箱上,用绳子绑扎固定。
- g. 开始试验。**调节阀门,启动真空泵。读取抽水质量、真空度、孔压频率、温度、沉降等参数。
- h. 结束试验。**试验的抽水质量、沉降量在48 h内无明显变化,停止试验。对试验结束后的试样取样测含水率,并进行颗粒分析试验。取样后将模型箱内剩余试样清除干净,用水冲洗排水固结仪,晾干。

3 仪器验证试验与结果分析

3.1 试样基本性质

试样采用温州疏浚淤泥,参考JTG E40—2007《公路土工试验规程》^[19],通过试验得到淤泥的基本性质指标:含水率为50%~110%,液限为48.5%,塑限为25%,塑性指数为23.5,相对密度为2.63,砂粒组质量分数为4.3%,粉粒组质量分数为69.3%,黏粒组质量分数为26.4%,颗粒分布曲线如图2所示。

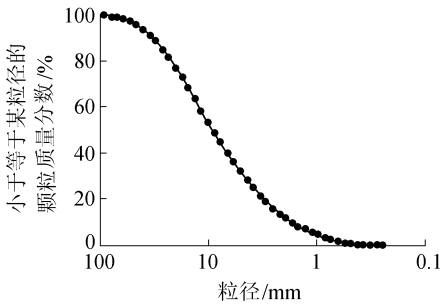


图2 温州疏浚淤泥试样颗粒分布曲线

Fig. 2 Particle-size distribution of Wenzhou dredged sludge sample

3.2 试验前后物理性质变化

利用设计的系统进行了3组真空排水室内试验。通过对比试验前后的物理性质指标,可以对不同条件下的试验结果进行分析。由表2可知,初始含水率相同时,真空度为60 kPa的试验组加固效果最好。

表1 试验初始条件与参数取值

Table 1 Initial experimental conditions and parameters

试验编号	试样直径/ cm	试样高度/ cm	真空度/ kPa	初始 含水率/%	最终 含水率/%	最终 沉降量/cm
1	43	31.1	30	97	68.0	7.45
2	43	31.1	60	97	51.6	9.11
3	43	31.4	90	97	66.7	7.73

3.3 抽水量分析

图3(a)是抽水量随时间的变化曲线。由图3(a)可知,30 kPa真空度下,抽水量曲线近似直线。60 kPa和90 kPa真空度下试验的抽水量曲线分3个阶段:试验开始5 d内为快速排水阶段,抽水量迅速上升;试验中期为稳定排水阶段,抽水量平稳上升;试验后期为缓慢排水阶段,抽水量上升缓慢,趋于平缓^[18]。30 kPa作用下抽水效果最差,60 kPa与90 kPa作用下的抽水量变化趋势接近,不同之处体现在试验中期,60 kPa的稳定排水阶段周期较长,抽水量大于90 kPa。在初始含水率相同的情况下,真空度为60 kPa的试验抽水量最大,30 kPa和90 kPa的抽水量相近,说明真空度不是越大越好,存在某个真空度使排水效果最好,在本试验中,最优真空度约为60 kPa。

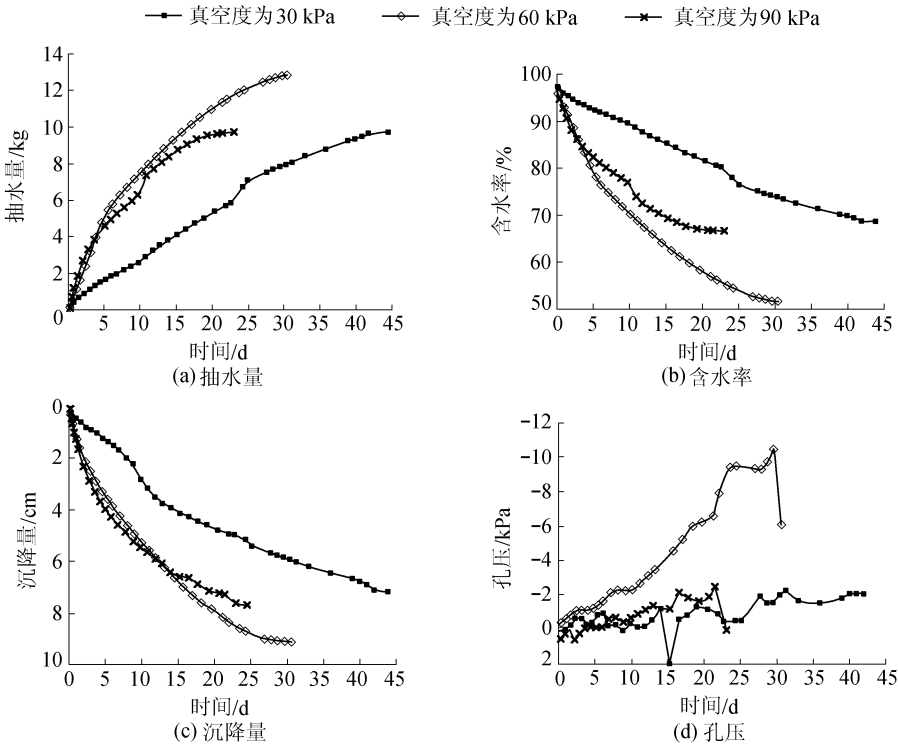


图3 抽水量、含水率、沉降量和孔压随时间变化曲线

Fig. 3 Variations of water pumping, moisture content, settlement, and pore water pressure with time

3.4 含水率分析

图3(b)是含水率随时间变化的曲线,曲线分3个阶段:快速排水阶段,含水率迅速下降;稳定排水阶段,含水率平稳下降;缓慢排水阶段,含水率下降缓慢,趋于平缓。在本试验中初始含水率相同的情况下,真空度为60 kPa的试验含水率降低效果最好,说明存在最优真空度。

3.5 沉降量分析

图3(c)是沉降量随时间变化的曲线。在初始含水率相同的情况下,真空度为60 kPa的试验沉降量最大,说明真空度不是越大越好,即最优真空度约为60 kPa。

3.6 孔压分析

由图3(d)可知,孔压随着时间增长而增大。初始含水率相同的情况下,真空度为60 kPa的试验孔压增值最大,说明在60 kPa真空度下孔压得到了有效的传递,排水固结效果最好。

3.7 讨论

由试验结果知,试验存在最优真空度,即其他条件相同的情况下,真空度在60 kPa左右试验效果最好。试验数据的规律和试验结果与课题组前人的研究一致^[17-18],说明试验装置具有准确性。从验证试验结果来看,试验装置功能能够满足疏浚淤泥的真空排水室内试验研究的需要。通过调节真空度的大小,可以研究不同真空度对疏浚淤泥的真空排水室内试验效果的影响。此外,试验装置还能进行其他方面的试验研究。分别调节初始含水率的值、模型箱的高度、模型箱的尺寸,可以研究不同初始含水率、不同高度、不同尺寸的试样对疏浚淤泥的真空排水室内试验效果的影响。

4 结 论

a. 疏浚淤泥真空排水室内试验仪器装置的设计主要是模型箱的设计以及变量的控制方法。试验装置的设计功能能够满足疏浚淤泥真空排水室内试验研究的需要。

b. 装置采用大直径的圆筒作为模型箱,能够模拟实际工程中淤泥排水体的排水过程。通过调节真空度、初始含水率、模型箱高度、模型横截面,可研究不同真空度、初始含水率和模型箱尺寸对疏浚淤泥真空排水室内试验效果的影响。

c. 由验证试验可知,利用仪器装置进行的试验符合疏浚淤泥真空排水的规律^[17-18,20]。试验过程分为快速排水阶段、稳定排水阶段和缓慢排水阶段。试验结果验证了最优真空度的存在。

参考文献:

[1] 姜洪生, 励建全, 高桥正男. 河道疏浚淤泥固化处理设备、流程及应用[J]. 中国市政工程, 2011(6): 34-35. (JIANG Hongsheng, LI Jianquan, TAKAHASHI Masao. A study of sludge consolidation treatment equipment, flow and application of river channel training[J]. China Municipal Engineering, 2011(6): 34-35. (in Chinese))

[2] 张铁军, 丁建文, 邓东升, 等. 生石灰处理高含水率疏浚淤泥的含水率变化规律研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2775-2791. (ZHANG Tiejun, DING Jianwen, DENG Dongsheng, et al. Study on variation of lime treatment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (9): 2775-2791. (in Chinese))

[3] PENG Jie, XIONG Xiong, MAHFOUZ A H, et al. Vacuum preloading combined electroosmotic strengthening of ultra-soft soil [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3282-3295.

[4] 刘汉龙, 李豪, 彭劼, 等. 真空-堆载联合预压加固软基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 145-149. (LIU Hanlong, LI Hao, PENG Jie, et al. Vacuum preloading reinforcement of soft foundation, laboratory test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 145-149. (in Chinese))

[5] 吴桂芬, 高玉峰, 魏代现, 等. 真空和堆载两种预压法的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 95-98. (WU Guifen, GAO Yufeng, WEI Daixian, et al. Experimental study on indoor vacuum and surcharge two preloading method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (Supl): 95-98. (in Chinese))

[6] 邓东升, 洪振舜, 刘传俊, 等. 低浓度疏浚淤泥透气真空泥水分离模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 250-253. (DENG Dongsheng, HONG Zhenshun, LIU Chuanjun, et al. Low concentration dredging sludge aeration vacuum sedimentation model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 250-253. (in Chinese))

[7] van IMPE W F, van MIEGHEM J, VANDYCKE S, et al. Underwater vacuum consolidation of dredged sludge-A case history [C]//LEE C F, LAU C K, NG C W W, et al. Proceedings of the 3rd International Conference on Soft Soil Engineering. Leiden: Balkema Publishers, 2001: 499-506.

[8] CHU J, BO M W, CHOA V. Improvement of ultra-soft soil using prefabricated vertical drains [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(6): 339-348.

[9] BO M W, CHOA V, WIBG K S, et al. Constant rate of loading test on ultra-soft soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 162(6): 347-348.

[10] INDRARATNA B, REDANA I W. Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(2): 180-184.

[11] SAOWAPAKPIBOON J, BERGADO D T, VOOTIPRUEX P, et al. PVD improvement combined with surcharge and vacuum preloading including simulations[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(1): 74-82.

[12] SAOWAPAKPIBOON J, BERGADO D T, YOUWAI S, et al. Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains (PVDs) with and without vacuum preloading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(1): 1-11.

[13] SATHANANTHAN I, INDRARATNA B. Laboratory evaluation of smear zone and correlation between permeability and moisture content[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(7): 942-945.

[14] CAO Yonghua, YIN Changquan. Solutions of technical problems in ultra-soft soil improving projects[C]//LI G, CHEN C. Proceedings of International Conference on Applied Mechanics and Materials. Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2013: 1398-1402.

[15] 周源, 刘传俊, 吉锋, 等. 透气真空快速泥水分离技术室内模型试验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(2): 215-220. (ZHOU Yuan, LIU Chuanjun, JI Feng, et al. AVMWS laboratory model test technology [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2010, 30(2): 215-220. (in Chinese))

[16] 周源, 高玉峰. 透气真空排水法对疏浚淤泥表面水的促排作用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 165-169. (ZHOU Yuan, GAO Yufeng. Promotion of aeration vacuum dewatering method for surface water of dredged sludge[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(2): 165-169. (in Chinese))

[17] 周源. 疏浚淤泥透气真空泥水分离试验研究及影响因素分析[D]. 南京: 河海大学, 2010.

[18] 唐译. 高含水率疏浚淤泥真空排水试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2012.

[19] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].

[20] 陆志浩, 周源, 张莹. 初始含水率对白马湖疏浚淤泥透气真空排水效果的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 57-61. (LU Zhihao, ZHOU Yuan, ZHANG Ying. Impact of initial moisture content on aeration vacuum drainage of dredged sludge in Baima Lake[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(1): 57-61. (in Chinese))

· 简讯 ·

第四届全国土木工程安全与防灾学术论坛将在南京举行

由中国工程院主办,东南大学、南京工业大学、江苏省土木建筑学会等承办的第四届全国土木工程安全与防灾学术论坛将于2015年5月7—9日在南京举行。论坛征稿范围和领域包括:建筑(房屋与构筑物)工程安全与防灾;桥梁工程安全与防灾;水利工程安全与防灾;地下(岩土与隧道)工程安全与防灾;土木工程高性能材料及其力学性能与耐久性;土木工程各类灾害的形成机理与防护对策;土木工程灾害评估。

土木工程安全与防灾学术论坛是2009年由杨秀敏院士和吕志涛院士发起的一个学术高峰论坛,分别于2009年5月、2011年5月和2013年5月在南京连续举办过三届。论坛具有高规格的特点,每届均有近10位院士与会,全部报告均为特邀报告,报告人一般为院士、千人计划、长江学者、国家杰出青年或国家科技进步奖获得者等业内知名专家,每次听众人数接近500人。

(本刊编辑部供稿)