

汶川大地震液化宏观现象概述

曹振中¹, 袁晓铭^{1*}, 陈龙伟¹, 孙锐¹, 孟凡超²

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 防灾科技学院防灾工程系, 北京 101601)

摘要: 2008年5月12日我国四川发生的8.0级汶川大地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震, 但关于这次地震液化问题目前认识尚少。通过专项考察工作, 得到了此次地震液化地理分布及与地震烈度的关系, 概述了此次地震液化的宏观现象, 包括喷水冒砂、地面塌陷、地裂缝和震害等几个方面, 并通过与唐山和海城地震液化情况对比, 初步分析了本次地震液化的特点以及新现象。结果表明, 此次地震液化分布广, 液化宏观现象与以往几次大地震很不相同, 出现了很多值得深入研究的新问题, VI区内液化、砾石层液化、高喷水头、地表喷出物类型多和液化伴随地裂缝而加重震害等是其中的代表。

关键词: 汶川地震; 液化; 宏观现象

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)04-0645-06

作者简介: 曹振中(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: yxmiem@163.com。

Summary of liquefaction macrophenomena in Wenchuan Earthquake

CAO Zhen-zhong¹, YUAN Xiao-ming¹, CHEN Long-wei¹, SUN Rui¹, MENG Fan-chao²

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Department of Disaster Prevention

Engineering, Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Beijing 101601, China)

Abstract: On May 12, 2008, a catastrophic earthquake of magnitude 8.0, the epicenter of which was located at Wenchuan, struck Sichuan Province, which is the most destructive earthquake in China since 1949. However, the liquefaction matters are hardly understood even until now. The liquefaction geographic distribution and the relationship between liquefaction behaviors and seismic intensity are presented, and the liquefaction macrophenomena including sandboils and watersprouts, ground subsidence, ground fissures are summarized. A brief summary of the structural damage caused by the liquefaction is also introduced. Comparing with the previous liquefaction phenomena in Tangshan Earthquake and Haicheng Earthquake, the preliminary analysis reveals new characteristics of the liquefaction behaviors and proposes new liquefaction matters worthy of further research. The liquefaction phenomena are quite different from the previous ones, and further investigation and analysis need to be conducted. The liquefaction in intensity VI, gravel soil liquefaction, high watersprouts, rich ejected soil types and liquefaction with fissures are the typical macrophenomena in the shock.

Key words: Wenchuan Earthquake; liquefaction; macrophenomenon

0 引言

地震液化问题一直备受关注并已经取得了很多成果^[1]。由于地震的罕遇性, 目前国内外主要侧重于室内试验以及数值模拟^[2], 另外也开始开展现场人工激振液化试验研究^[3]。

地震震害调查是获取工程震害资料和经验最重要的手段^[4-5], 也是工程抗震理论和分析方法发展最重要的基础^[6-7]。以往国内河源(1962)、邢台(1966)、通海(1970)、海城(1975)和唐山(1976)等几次大地震中, 都开展了深入的震害调查工作, 为我国乃至世界工程抗震技术的发展起到了很大的推动作用。

2008年5月12日, 我国四川发生了8.0级汶川大地

震。此次地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震, 地震重灾区的范围已经超过10万平方公里, 汶川地震的强度、烈度都超过了唐山大地震, 给人民生命财产造成巨大损失。关于此次地震房屋建筑方面的破坏已经有不少报道和一些研究成果发表, 但关于此次地震液化问题尚少报道。

2008年7月, 中国地震局组织了汶川大地震科学考

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目(2008B001); 公益性地震行业科研专项项目(200708001); 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715017); 国家科技支撑计划(2006BAC13B02-0203)和国家科技部国际合作项目(2009DFA71720)

收稿日期: 2009-01-04

*通讯作者

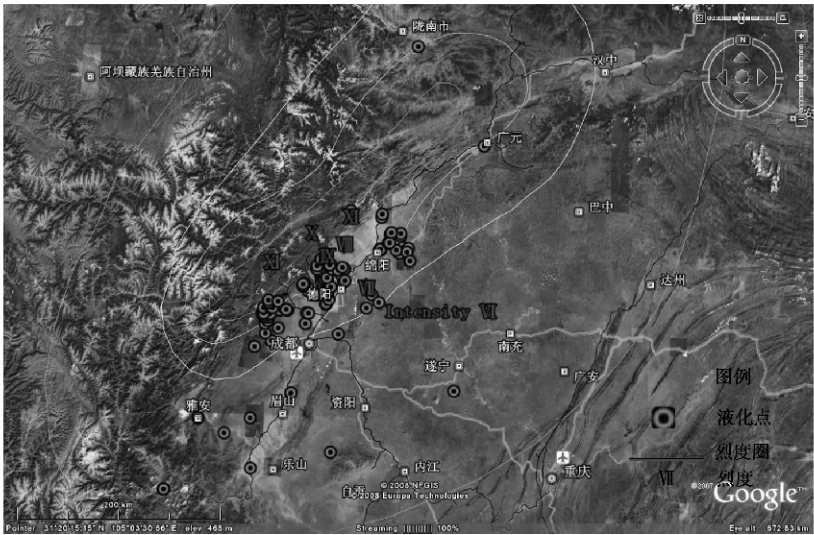


图 1 汶川地震液化分布

Fig. 1 Distribution of liquefaction in Wenchuan Earthquake

察专项研究，并专门成立了有十余人参加的液化调查组。调查组对成都地区、德阳地区、眉山地区、乐山地区、遂宁地区、雅安地区和绵阳部分地区进行了两个多月的实地考察，以镇（乡）为单位进行实地排查，有了较新的发现，对本次地震液化宏观现象有了较为完整的认识。

1 液化分布和范围

目前所发现汶川地震液化点如图 1 所示，其中圆点代表液化点，同心椭圆状线代表烈度圈，分别代表烈度 VI、VII、VIII、IX、X、XI 度区域的等震线。从图中可见，汶川地震中液化现象在烈度 VI、VII、VIII、IX、X、XI 度区内均有发现。

到目前为止，已发现 118 个液化点（带），这里所谓点（带）的含义是以村为单位，即使某一村庄出现很多液化及房屋破坏，这里也以一点计算。就图中而言，这 118 液化点之间至少间隔 2 km。

本次地震液化范围几乎涉及了所有主震区，涵盖面积长约 500 km，宽约 200 km。东最远为遂宁市安居区，距离震中约 210 km；南到雅安市汉源县（防灾科技学院调查结果），距离震中约 200 km；北至甘肃陇南市（甘肃省地震局提供），距离震中约 280 km。

值得注意的是，烈度 VI 度区内也发现了 8 处液化，而且分布在成都、眉山、乐山、遂宁、雅安等 5 个不同的地区。

由于此次地震高烈度区主要位于山脉之中，故在 X、XI 度区的液化现象相对较少。从液化分布来看，液化集中在面积长约 160 km、宽约 60 km 的长方形区域，长边方向与等震线长轴方向一致，主要液化区域为成都、德阳和绵阳 3 个地区，其中德阳地区是 3 个主要液化地区液化程度最重的地区，成都地区液化程

度属于中等，绵阳地区液化程度最轻。

2 液化宏观现象

2.1 喷水冒砂

判定场地液化现象是否发生最直接的证据就是喷水冒砂，喷水高度、时间、喷砂量，能够在一定程度上反映液化层的深度、厚度等情况。本次地震液化中不同喷水高度所占液化点比重的统计结果如图 2 所示，从图中看出，喷水高度从几十厘米到十几米不等，其中 1~3 m 左右居多。

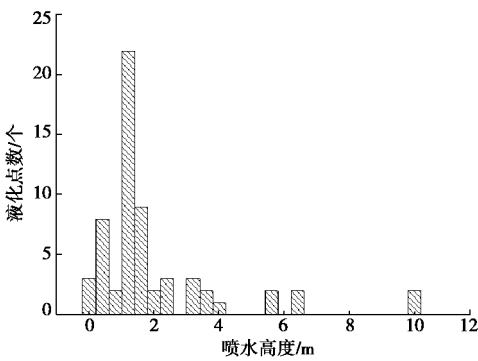


图 2 液化点喷水高度统计

Fig. 2 Statistic results of ejected water height

值得注意的是，调查中发现 4 个不同地方主震时地表喷水高度超过 10 m，且分别位于成都、绵阳、雅安和德阳 4 个不同的地区，其中最近两处距离均超过 30 km。如在德阳地区绵竹祥柳村，水柱高度超过两根电线杆（图 3）。在成都地区都江堰永寿村，绵阳地区安县土门镇，喷水高度达到村里的天线架，水柱高度均在 10 m 以上。这种喷水高度在 10~15 m 的现象，在以往地震中基本没有见到。按照液化基本原理，初步推测应是深层土液化所致。



图 3 喷水高度达两根电线杆

Fig. 3 Double wire-pole height of ejected water

另外,此次地震液化喷水时间一般仅持续几分钟,但也有个别比较长的。如在什邡市思源村、广汉市双石桥村,地震后一个多月,仍有冒水现象,而在乐山市新联村,冒水现象持续 3 个月之久。原因尚待查明。

此次地震喷砂形式有以往常见的形似火山的喷出砂堆(图 4),也有串珠式的喷砂孔。与以往地震相比,此次地震液化喷砂量总体不大,一般均小于 5 m^3 ,但在有井和池的地方出现较大喷砂量。例如,在绵竹市兴隆镇,有 60 余口井在震后被埋,井中有大量砂土填充物。在什邡市思源村,一个 $50\text{ m}\times 20\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的游泳池,地震前池中干涸,震中液化使池底拱起,砂水混合物填充池内,使得游泳池目前只有 1 m 深(图 5),池边有近 50 m 长的裂缝,并有约 5 m^3 的喷砂。



图 4 喷砂形成小火山堆

Fig. 4 Crater induced by ejected sand



图 5 喷水冒砂将干涸的游泳池填埋

Fig. 5 Dry swimming pool filled by ejected water and sand

2.2 地面塌陷

喷水冒砂后,地下砂土流失,较容易形成坑陷,此次地震中发现十余个村庄有典型的液化导致塌陷现

象出现。

在绵竹市祥柳村,主震时方圆 300 亩范围内农田有喷砂冒水现象,并出现直径 $3\sim 4\text{ m}$ 、深 $1\sim 2\text{ m}$ 塌陷坑 8 处,坑边有砾石喷出(图 6),主震一两个月之后仍有新塌陷形成。在 VI 度区的眉山地区洪雅县菜地坎村,5 月 14 日(主震后第三天)中午 12 时水稻田中冒水,水柱高度 30 cm ,持续 1 min 之后突然下陷,形成一个直径 2 m 深 2 m 的大坑(图 7)。



图 6 地震时喷水冒砂后塌陷

Fig. 6 Pit emerged after ejecting water and sands



图 7 地表主震第三天冒水后塌陷

Fig. 7 Pit emerged at 3 days after main shock

2.3 地裂缝

本次地震中, $70\%\sim 80\%$ 的液化场地均伴有地裂缝产生,裂缝长短不一,从 $100\sim 200\text{ m}$ 到数公里(图 8)。

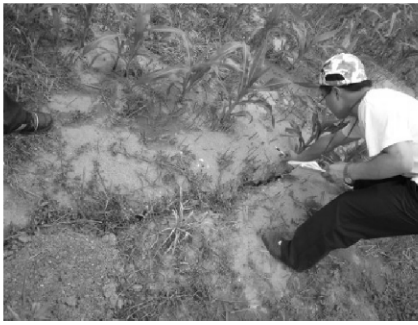


图 8 裂缝中喷水冒砂

Fig. 8 Sand ejecting from ground fissures

以往地震中,液化往往形成圆形和串珠式的喷砂孔,此次地震这一现象并不多见,伴有地裂缝的情况则更为普遍。正因为如此,此次地震中液化场地上的

工程结构基本上都遭到破坏,如结构开裂和沉降等,液化起到了加重震害的作用。像在唐山和海城地震中液化场地对房屋的减震作用,本次地震中到目前为止仍未发现。

另外,需要关注的是调查中常有“伴随着裂缝的一张一合,从裂缝中喷水冒砂”现象,是断层造成的地表破裂,还是液化导致地裂缝产生,有待进一步的研究。

本文上面给出的液化点是以喷水冒砂、塌陷和裂缝等宏观现象为依据得到的结果,事实上,地表未发现喷水冒砂现象并不意味着土层中没有发生液化。例如,绵竹市兴隆镇,地表上液化宏观现象并不显著,但村中几十口井中在地震中被大量的砂土填埋,显然这一区域已经大面积液化。如果没有井,仅靠一般宏观现象判断,很可能误认为该地区是非液化或液化程度较轻的地区。因此,汶川地震的实际液化情况无疑比我们目前发现的要广。同时,这次的调查经验也表明,对如何准确确定和识别场地是否液化的问题,需探求新的方法和测试手段^[8]。

3 喷出物及可能的液化土类

本次地震液化中,液化地表喷出物的种类较以往地震明显丰富,几乎涵盖了所有的砂类,包括了粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾石,甚至卵石。

3.1 粉-细砂

就总体情况,此次地震液化场地 50%~60%的地表喷出物为粉砂、细砂。图 9 为绵竹市板桥镇兴隆村一村民住宅室内喷砂,覆盖 5~10 cm 厚的浅黄色细砂,地面错位 10~20 cm,导致房屋主体结构严重开裂。



图 9 地表喷出物——粉砂
Fig. 9 Ejected fine sand

3.2 中-粗砂

此次地震液化场地 20%~30%的地表喷出物为中砂、粗砂。图 10 为德阳地区兴隆镇毗卢小学喷砂情况,水柱高 3 m,几分钟后停止,砂量约 5 m³,地面下沉 20~30 cm,教室地面隆起,墙体严重开裂,学校无喷水冒砂地方房屋损坏较轻,仅有落瓦、少量微裂缝。



图 10 地表喷出物——中砂
Fig. 10 Ejected medium sand

3.3 砾石土

此次地震中,目前发现砾-卵石喷出十余处,最大直径 3~15 cm。在绵阳市民主村,150 亩水田范围内均有零星喷水冒砂孔,其中一喷砂面积 20 m²,孔周围残留直径 3~5 cm 的鹅卵石(图 11)。在绵竹市白虎头村,村长家中深 3 m 的水井,地震时被喷出物填满,井中物为砾石土,卵石直径最大 15 cm(图 12)。



图 11 砾石喷出地表
Fig. 11 Ejected gravel sand



图 12 井中砾石土填充物
Fig. 12 Well filled by ejected gravel sand

3.4 可能的液化土类

本次地震液化中,近一半以上的地表喷出物为粉砂、细砂,最初认为是地下的粉、细砂层液化所致。但是,从目前收集到的工程地质资料来看,在成都平原主要为冲、洪积的砾石层,很难发现有较厚的砂层。同时,此次地震中地表喷砂量远不及唐山地震,主要是由于唐山地区分布较厚的砂层。因此,尽管地表喷出物为粉砂、细砂的情况较多,但很有可能是砂砾层发生了液化,由于上覆土层的阻隔,只有其中的粉、细砂能喷出地表。另外,此次地震液化喷水持续时间

明显比唐山地震短,地下液化层的超孔隙水压力消散较快,进一步说明砂砾层液化的可能性较大。这样,本次地震液化土类应以砂砾土为主,以往的砂土液化判别方法极有可能不适于成都平原的大部分地区。

4 余震液化

此次地震余震液化现象较为显著,这一现象在我国唐山和海城地震中未见报道。2008年5月12日8.0级主震时,在距离震中较远、Ⅶ度区的德阳市柏隆镇果园村发生了液化,2008年5月25日6.4级余震时再次液化(图13)。



图 13 余震时再次液化

Fig. 13 Secondary liquefaction after shock

按照现有的认识,可液化的砂土应是越震越密实,一次地震后应该是更难液化。1980年南斯拉夫蒙特内哥罗7级地震中,某一场地发生液化,但其上建筑物没有破坏。一个月后在同一地点又发生了一次强度略低于前一次的地震,该场地没有液化但建筑物受到明显破坏。这一现象一方面说明液化场地有减震作用,另一方面说明原来可液化的砂土在一次地震后趋于密实,下一次地震后则没有发生液化,同目前的认识相同。但是,此次汶川地震中,主震液化的场地,在余震震级更低的情况下仍能液化,也就是说液化之后场地变得更容易液化,原因值得进一步查明和分析。

进一步,目前国内外液化判别方法都是基于震后的液化调查资料得到的,震前震后土特性参数改变肯定对液化判别式的准确性存在一定的影响。土性参数是如何改变,改变多少,对判别式影响多大,液化前后土性的抗液化强度到底如何变化,仍需深入研究。

5 液化引起的工程震害

本次地震中,如喷水冒砂、地表裂缝、地面沉降等液化宏观现象普遍,同时,液化也对农田、公路、桥梁、居民住宅、工厂、学校等造成了不少破坏。

据不完全统计,有上千亩农田受到液化震害不同程度的影响。共有20余个村庄的水井不同程度地发生了喷水冒砂现象,严重影响了村民的饮水问题。有120多个村庄(自然村)的房屋住宅不同程度地受到了液

化震害,液化发生的场地,结构性差的农房直接倒塌,即使设有圈梁、构造柱的房屋,整体倾斜、下沉现象也较多。除了农房之外不少其他结构类型的建筑也受到了液化影响。江油火车站整个车站地基都出现了喷水冒砂现象,车站外观较完整,内部受损严重,目前已拆除。地震中共有8所学校不同程度地受到了砂土液化的影响,其中典型的是板桥学校,液化带穿越,基础一侧下沉,墙体倾斜、开裂,教学楼现已全部拆除。另外,到目前为止,共发现5处工厂受到了液化震害,其中一些厂房已废弃。受篇幅所限,其中具体情况本文略去。

6 结论和讨论

通过专项现场调查和初步分析,本文对汶川大地震液化的宏观现象取得了初步认识,概括如下:

(1)本次地震液化涉及范围广泛,主要分布在成都、德阳和绵阳3个地区,集中在长约160 km、宽约60 km的长方形区域内,长边方向与等震线长轴方向一致,德阳地区液化最为严重,成都地区次之。

(2)本次地震从低烈度的Ⅵ度区到Ⅺ度高烈度区均有液化现象出现,Ⅷ度区较为集中。值得注意的是,烈度Ⅵ区内出现多处液化现象,且分布在5个不同的地区。

(3)本次地震液化喷水高度从几十厘米到十几米不等,1~3 m居多,值得注意的是在不同地区多处出现10 m以上喷水;此次地震液化喷水时间一般仅为几分钟,平均意义上比唐山地震时短不少,初步推测是两次地震液化土类型不同所致。

(4)本次地震液化地表喷出物的种类较以往明显丰富,几乎涵盖了所有砂类,近一半以上为粉砂和细砂,但成都平原主要为冲、洪积的砾石层,未发现较厚的砂层,同时本次地震液化喷水时间较短、喷砂量相对较少,初步推断本次地震液化土类应以砾石土为主,以往的砂土液化判别方法极有可能不适于成都平原的大部分地区。

(5)本次地震液化大多伴有地裂缝产生,导致农田蓄水困难,其上部的工程结构遭到破坏,到目前为止还没有发现如唐山和海城地震中液化对房屋减震那样的现象;此次地震液化中的地裂缝,是断层引起还是液化造成,有待进一步研究。

(6)此次地震液化分布是以常规宏观现象为判据,但从实际情况看,将无明显宏观现象而实际上已经液化的场地误判为非液化场地的情况肯定存在的,实际地震液化情况无疑应比目前发现的多,也需探求新手段以正确地甄别出液化场地和非液化场地。

致谢:衷心感谢为本文提供资料的薄景山研究员、周正华研

究员、李山有研究员、郭恩栋研究员、刘爱文研究员和王东升教授。同时感谢四川省地震局和各级政府的大力支持配合。

参考文献:

- [1] 汪闻韶. 土体液化与极限平衡和破坏的区别和关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 1 - 10. (WANG Wen-shao. Distinction and interrelation between liquefaction state of limit equilibrium and failure of soil mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [2] SEED R B, RIEMER M F, CETIN K O, et al. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework[R]. EERC 2003-06, California: Earthquake Engineering Research Center, 2003.
- [3] Brady Ray Cox, M S. Development of a direct test method for dynamically assessing the liquefaction resistance of soils in situ[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2006.
- [4] 中国科学院工程力学研究所. 海城地震震害[M]. 北京: 地震出版社, 1979. (Institute of Engineering Mechanics. Haicheng earthquake damages[M]. Beijing: Seismic Press, 1979. (in Chinese))
- [5] 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京: 地震出版社, 1989. (LIU Hui-xian. Great Tangshan Earthquake of 1976[M]. Beijing: Seismic Press, 1989. (in Chinese))
- [6] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988. (HU Yu-xian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismic Press, 1988. (in Chinese))
- [7] 刘惠珊. 1995 年阪神大地震的液化特点[J]. 工程抗震, 2001(1): 22 - 26. (LIU Hui-shan. Some features of liquefaction during the 1995 Great Hanshin-Awaji Earthquake[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2001(1): 22 - 26. (in Chinese))
- [8] 孙锐, 袁晓铭. 基于强震记录快速识别场地液化的频率下降率法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1372 - 1379. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming. The method of frequency decrease rate for fast identification of site liquefaction from surface acceleration records[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1372 - 1379. (in Chinese))

“桩与深基础国际峰会—中国 2010” 在上海举行

“桩与深基础国际峰会—中国 2010”于 2010 年 3 月 10 日至 12 日在上海市徐家汇 Pullman 大酒店举行。中外桩与深基础工程领域的一批著名专家学者、行业领袖、工程承包商、桩机设备制造商、企业家及政府部门官员等共约 270 人参加了峰会。

中国科学院资深院士、同济大学终身一级荣誉教授孙钧先生任峰会组委会主席；中国建筑业协会深基础分会顾问史佩栋教授任执行主席；香港岩土工程学会主席何毅良、中国工程勘察大师王锺琦任组委会特别顾问；上海市土木工程学会秘书长傅德明及浙江理工大学副教授俞峰分任大会秘书长和执行秘书长。同济大学研究生院副院长黄宏伟教授代表特邀嘉宾在开幕式上致贺词。

上海市基础工程公司顾问总工桂业琨、上海市土木工程学会副理事长白云教授、浙大网新集团总工程师吴世明教授等我国著名的桩与深基础工程专家分别主持了大会。在两天 8 场大会中, 有 19 位中外专家发表了精彩的演讲, 演讲的内容主要有: 史佩栋: 桩在中国的起源及历史上的应用; 孙钧: 大桥桩基静动力分析研究; 何毅良: 香港桩基础设计施工技术发展更新篇; 美国深基础协会主席 Rudolph P. Frizzi: 深基础施工技术的进步与质量控制; 香港特区政府路政署官员、港珠澳大桥香港工程项目主管 Albert Chan: 港珠澳大桥在地质勘探中的经验分享; 澳大利亚 Coffey 岩土公司高级顾问 Kim Chan: 软土地基

的沉降控制; 意大利土力公司发展副总裁 Federico Pagliacci: 通用打桩钻机的应用; 华东建筑设计研究院副总工程师王卫东: 我国在建中的第一高楼“上海中心”及天津 117 大厦和天津“津塔”的桩基设计特点; 上海市基础工程公司副总工程师李耀良: “上海中心”主楼的桩基施工; 德国 MENCK 有限责任公司海洋地质专家 Martin Ros 及销售经理 Lutz Mertschat: 海洋打桩作业面临的挑战; 北京市中南土木工程集团总工程师李玲: 北京奥运鸟巢工程的桩基施工技术; 浙江大学教授张忠苗: 钻孔灌注桩后注浆技术在中国的应用与创新综述; 浙江理工大学副教授俞峰: 静力触探锥尖阻力确定砂土中钢管桩承载力的设计新方法, 等。

本次峰会与以往国际土力学及岩土工程学会等所举行的涉及桩与深基础工程的会议之间有一明显的区别是, 以往有关的国际会议大多以学术交流为主, 而本次峰会则为产学研政各方人士搭建了沟通互动的平台, 共同分享本领域在科研设计施工与机械设备等各方面的最新成果, 以协力促进桩与深基础工程的进一步发展和应对日趋复杂的挑战。与会人士认为, 此次峰会必将在世界桩和深基础技术发展史中留下深厚的足迹。

本次国际峰会上演讲的 PPT 已刻制了光盘。本刊读者凡有需要者可发 E-mail 至 dyp5188@163.com 与峰会组委会联络处丁源萍主任联系。

(史佩栋 丁源萍 供稿)