

文章编号: 1000-7598(2010)11-3594-05

水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析

胡其志¹, 周辉², 肖本林¹, 肖衡林¹

(1. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学和工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要:通过对顺层岩质边坡中地下水力作用进行分析,认为地下水力作用主要为沿结构面分布的裂隙水压力和拖拽力。分析了滑动破坏中的控稳优势结构面,认为该面上的张裂隙静水压力、滑动面扬压力以及拖拽力的大小均取决于后缘张裂隙的充水高度。将典型岩石边坡进行简化假设,利用简化后的边坡水力学分析模型,推导出边坡稳定系数和决定边坡稳定性的张裂隙充水临界高度的表达式。选取实际边坡进行分析和计算,验证了公式的合理性,结果表明地下水作用下边坡稳定系数的降低主要与静水压力有关,而渗透力的影响很小。

关键词:水力作用;顺层岩质边坡;优势结构面;稳定性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Analysis of stability of rock bedded slope under hydraulic pressure

HU Qi-zhi¹, ZHOU Hui², XIAO Ben-lin¹, XIAO Heng-lin¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: By analyzing the effect of groundwater water on rock bedded slope, it is found that the stresses of groundwater mainly act as fissured water pressure and drag force on structural plane. And through the analysis of the dominant joint plane controlling the stability in sliding failure, this paper holds that the fissured hydrostatic tension on this plane, the pressure on sliding surface and the drag force are all decided by water filling at the back edge of the fissure. In this paper, also on the assumption that typical rock slope samples are simplified, making use of the simplified hydraulic model of slopes, two numerical expressions are presented. One is about the slope stability and the other is about the critical height of water filling in cracks which decides the slope stability. Based on the analysis and calculation of actual slopes, the proposed formula is proved to be reasonable. It is also concluded that the decrease in slope stability under the influence of groundwater is mainly related to hydrostatic pressure instead of its penetration.

Key words: hydraulic pressure; rock bedded slope; dominant joint plane; slope stability

1 引言

随着一些国家大项目的实施,如三峡工程、西电东送、南水北调、青藏铁路以及西部高速公路网的建设,沿线所经过的地区地形地质条件复杂,顺层岩质边坡稳定性问题成为一个非常突出和亟待解决重大课题。确保这些顺层边坡在施工和运行期间的稳定,对于保证这些建设工程的顺利开展和充分发挥工程应有的作用,具有重要的意义。

水是影响边坡稳定性的重要因素之一,众多的滑坡中大多数与水的作用密切相关。研究表明,

90%的自然边坡和人工边坡的破坏与地下水的活动有关^[1-2]。地下水对边坡稳定性的作用是一个相当复杂的过程,边坡岩土体介质的水力学作用机制还没有被人们系统地认知,在理论研究和工程运用方面需要进一步的研究和完善,一方面,工程实践中采用传统的水力学理论,即仅考虑地下水对边坡岩土体的作用,进行边坡稳定性分析时除了考虑地下水对边坡岩土体介质的物理化学作用外,主要考虑地下水的力学作用即静水压力和渗透力作用。另一方面,地下水作为地质因素对岩体的物理力学性质有着重要影响,在边坡工程中普遍存在应力场和渗

收稿日期: 2010-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10772190); 交通部科技项目(No. 2008353-342-310); 湖北工业大学博士基金(No. BSQD0912)。

第一作者简介: 胡其志,男,1969年生,博士,副教授,主要从事岩土材料性质和边坡稳定方面的研究。E-mail: hqz07161@163.com

流场的耦合，但由于岩体渗流场和应力场耦合较为复杂，其研究理论还不成熟，还不能在工程实践中很好的应用。因此，在计算地下水水力作用的分布和大小，往往对其水力学模型进行了一定的简化，同时，由于对地下水的作用机制研究得不够充分以及人们认识上的差异性，常常导致在实际工程应用中出现水压力重复计算的现象^[3]。

1977 年 Hoek 和 Bray^[4]对典型的岩石边坡在地下水作用下的抗滑稳定进行了详细地分析计算，采用传统的水力学理论，给出了典型顺层岩质边坡的水力分布，并通过大量的实例计算，认为饱水边坡比干燥边坡的滑动稳定系数减小 70%左右得到了与工程实际较为一致的结论。在 Hoek 的研究基础上，本文对典型岩石边坡进行简化假设，利用简化后的边坡水力学分析模型，进行顺层岩质边坡的稳定性分析。

2 边坡中的地下水力作用

地下水是影响边坡稳定的重要因素^[5-6]，在顺层岩质边坡稳定性分析中地下水的作用主要为结构面中的水力作用，即沿结构面分布的裂隙水压力和渗透力。渗透力是指地下水在边坡中的流动对岩土体介质产生的一种作用力，渗透力的分布与大小取决于地下水在边坡中的水力梯度。对于边坡工程而言，地下水在边坡中的运动一般符合达西定律，即渗透力与水力梯度呈线性关系，力的作用方向与水力梯度矢量方向一致。结构面裂隙水压力为作用于结构面法向的静水压力，其大小取决于结构面上的水头分布，如图 1 所示。

对于岩质边坡中的结构面来讲，无论是否有充填物，地下水产生渗透压力最终转化为作用在岩层上下壁面上的拖拽力

$$t_0 = bJ = b\gamma_w i \quad (1)$$

式中： b 为结构面开度； J 为渗透力； γ_w 为水的重度； i 为结构面处的水力坡度。在边坡稳定性分析中，结构面中地下水的渗透力最终转化为作用在结构面壁的拖拽力，精确的计算该力的大小比较困难，考虑渗透力与结构面上的拖拽力存在差别，取地下水渗流对层面上部岩体的拖拽力为总拖拽力的 1/2，则地下水渗流对层面上部岩体的拖拽力为

$$t = \frac{1}{2}t_0 = \frac{1}{2}b\gamma_w i \quad (2)$$

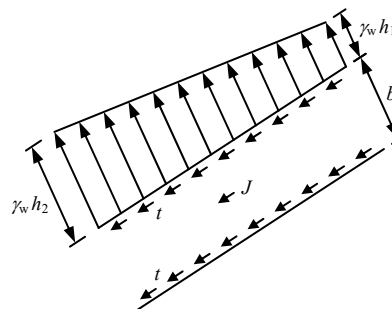


图 1 结构面水力分布

Fig.1 Distribution of hydraulic forces on structural plane

岩质边坡的破坏有很多型式，对于顺层岩质边坡，平面滑动破坏是其最常见的一种破坏类型，其特点是滑动面一般是软弱结构面，侧边界为无约束的自由边界或陡倾角断裂，边坡后缘常形成近似垂直的贯通张裂隙。软弱结构面、侧向临空面（或断裂面）以及贯通的垂直张裂隙形成了控制顺层岩质边坡的控稳优势结构面，这种优势结构面不仅决定了顺层边坡的变形及破坏模式，同时也是地下水运动的重要地质载体^[7]。

对于上述分析，为了能对典型边坡进行计算，根据 Hoek 和 Bray 给出的典型岩石边坡横剖面图，并假设：①破裂滑动面为一平面，并与坡面平行；②破裂滑动面必须在坡面出露，即破坏滑动面的倾角必须小于坡角；③破裂滑动体在其破坏时不存在两端的摩擦；④张裂缝竖直，其走向与坡面和滑动面走向一致；⑤水进入张裂隙后可沿滑动面渗透并从坡脚流出。

在忽略地震力和动水压力等的情况下，有如图 2 所示的水力学模型，该水力模型虽然在某些特殊条件下存在不合理^[8]，但由于该模型简单、受力清晰，对于下端为张开型且具有一定泄水能力的软弱结构面又具有较好的适用性。模型中地下水对优势结构面的水力作用包括后缘张裂隙静水压力和软弱结构面上的扬压力及拖拽力。

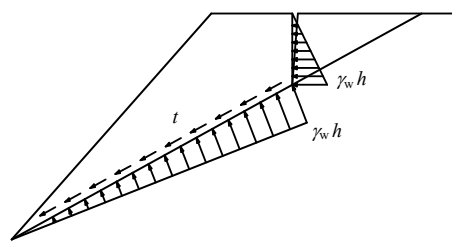


图 2 顺层边坡优势结构面水力学模型

Fig.2 Hydraulic model of dominant joint plane of consequent rock slope

后缘张裂隙充水后,张裂隙内的静水压力将对潜在的滑体产生两方面的不利影响:一是张裂隙静水压力沿滑面向上的分力减小了滑面的有效法向应力,进而降低了边坡的抗滑力。二是沿滑面切向向下的分力增加了边坡的下滑力。后缘张裂隙内的静水压力表达式为

$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \quad (3)$$

式中: h 为后缘张裂隙充水高度。软弱结构面上的扬压力沿结构面法向作用,其存在直接降低了边坡的抗滑力,则扬压力的表达式为

$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma_w hL \quad (4)$$

式中: L 为滑面长度。结构面的拖曳力沿滑动方向向下作用,增加了边坡的下滑力,由式(2)可知,其值为

$$T = \frac{1}{2} \gamma_w bLi = \frac{1}{2} \gamma_w bh \quad (5)$$

从式(3)~(5)可以看出,优势结构面上的张裂隙静水压力、滑动面扬压力以及拖曳力的大小均取决于后缘张裂隙的充水高度,因此,边坡稳定性分析时后缘张裂隙充水高度是一个极其重要的参数。

3 顺层边坡水力学分析模型

现在讨论图2所示边坡稳定性情况。平面滑动采用刚体滑移模型进行分析,设滑体断面面积为 A ,滑面长度为 L ,岩体重度为 γ ,坡面倾角为 β ,岩层倾角为 α ,滑面内摩擦角为 φ ,凝聚力为 c ,则坡体在重力作用下的下滑力 T 和抗滑力 R 分别为

$$\left. \begin{aligned} T &= A\gamma \sin \alpha \\ R &= A\gamma \cos \alpha \tan \varphi + cL \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

边坡稳定性系数定义为坡体抗滑力和下滑力的比值,则图2中边坡的抗滑移的安全稳定性系数 K_s 为

$$K_s = \frac{R}{T} = \frac{A\gamma \cos \alpha \tan \varphi + cL}{A\gamma \sin \alpha} \quad (7)$$

由式(7)可知,考虑式(3)~(5)中的水压力作用时,边坡稳定性系数为

$$K_s = \frac{(W \cos \alpha - P_2 - P_1 \sin \alpha) \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha + P_1 \cos \alpha + T} \quad (8)$$

式中: W 为滑块的重量。从式(8)可以看出,在

优势结构面的水力作用下边坡的稳定性大大降低。如前所述,地下水对顺层边坡优势结构面的水力作用包括后缘张裂隙静水压力和软弱层面上的扬压力及拖曳力,其大小取决于边坡后缘张裂隙的充水高度:张裂隙充水高度越大,边坡的稳定性越低。因此,可以把张裂隙充水高度的临界值作为评价边坡稳定性的判据。将式(3)~(5)代入式(8)可得到极限平衡状态下的张裂隙临界充水高度的表达式:

$$h_{cr} = \frac{1}{2(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi)} \left\{ [(b + L \tan \varphi)^2 + \frac{8}{\gamma_w} (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi) (W \cos \alpha \tan \varphi + cL - W \sin \alpha)]^{\frac{1}{2}} - (b + L \tan \varphi) \right\} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,决定顺层岩质边坡稳定性的张裂隙充水临界高度与边坡的外形、裂隙的开启度、滑面内的摩擦角、凝聚力等有关。

4 工程应用

以湖北省三峡翻坝高速公路某顺层边坡为例。该边坡为硬岩质顺向坡,基岩出露,岩性为风化砂岩,产状为 $300^\circ \angle 25^\circ$,边坡侧边界节理陡立,风化严重,内充填20~30 cm的黏土,滑体后缘张裂隙近似陡立,倾角为 80° ,滑动层面平直,可见明显的风化痕迹。该边坡在路基开挖后,因降雨产生顺层滑坡,滑体厚3 m左右,如图3所示。



图3 现场滑坡图

Fig.3 The scene of slope sliding

为了进行计算,将边坡简化成图4,各计算参数:滑动层面天然凝聚力 $c=22$ kPa、天然内摩擦角 $\varphi=20^\circ$,饱和凝聚力 $c=12$ kPa、饱和内摩擦角 $\varphi=16^\circ$,滑面长度 $L=16$ m,层面渗透系数从上至下依次为0.22、0.16、1.50 m/s,层面开度分别为0.4、0.5、1.1 cm,张裂隙横向汇流宽度为9.0 m、径流系

数 $\psi=0.75$ ，滑坡发生时 10 min 降雨强度 $q=1.3$ mm/min。

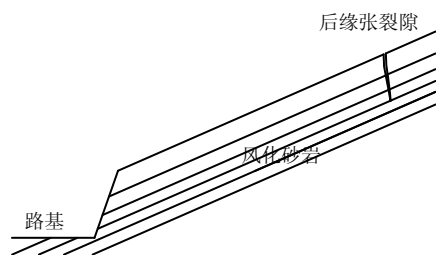


图 4 边坡失稳模型

Fig.4 Model of consequent rock cutting slope

由式 (8) 进行计算得天然状态下该边坡的稳定系数为 1.9，而在滑坡发生时的强降雨条件下，其稳定系数仅为 0.9，边坡的稳定系数降低了 53%。若不考虑降雨条件下边坡中的水力作用，仅考虑滑面的力学参数取饱和值，则边坡的稳定系数为 1.1，滑面强度参数的弱化使边坡的稳定系数降低了 0.8，边坡中的水力作用使其稳定系数降低了约 0.2。再根据式 (9) 计算得边坡后缘张裂隙临界充水高度 $h_{cr}=1.2$ m，临界降雨强度 $q_{cr}=0.9$ mm/min，小于滑坡发生时 10 min 降雨强度 $q=1.3$ mm/min，导致滑坡破坏的发生，比较式 (3)~(5) 可得

$$T : P_1 : P_2 = b : h : L \quad (10)$$

由式 (10) 可以看出，渗透力 T 远小于滑动面静水压力 P_1 、 P_2 ，因为一般情况下层面开度 b 比张裂隙充水高度 h 和滑面长度 L 小 2~5 个数量级。

对地下水压力作用下边坡的稳定性作进一步分析，滑面取饱和强度参数。仅考虑滑动面静水压力 P_1 、 P_2 ，而不考虑渗透力 T 时，边坡稳定系数为 0.91；仅考虑渗透力 T ，而不考虑滑动面静水压力 P_1 、 P_2 时，边坡稳定系数为 1.11。可见，对于该顺层边坡，地下水压力作用下边坡稳定性系数的降低主要由静水压力 P_1 、 P_2 所致，渗透力 T 对边坡稳定系数的影响很小。而由文献[9-11]的研究，对土质边坡而言，静水压力和渗透力均能明显地改变土质边坡的稳定性，这是顺层岩质边坡和土质边坡稳定性分析中地下水压力作用一个显著的差别。

5 结 论

(1) 地下水是影响边坡稳定的重要因素，在顺层岩质边坡中地下水的作用主要为沿结构面分布的裂隙水压力和拖曳力。

(2) 对于顺层岩质边坡最常见的是平面滑动破坏，滑动破坏中的控稳优势结构面不仅决定了顺层

边坡的变形及破坏模式，同时也是地下水运动的重要地质载体。

(3) 控稳优势结构面上的张裂隙静水压力、滑动面扬压力以及拖曳力的大小均取决于后缘张裂隙的充水高度，因此，边坡稳定性分析时后缘张裂隙充水高度是一个极其重要的参数，其临界值与边坡的外形、裂隙的开度、滑面内的摩擦角、凝聚力等有关。

(4) 对于顺层岩质边坡，地下水压力作用下边坡稳定性系数的降低主要由静水压力 P_1 、 P_2 所致，渗透力 T 对边坡稳定系数的影响很小。

参 考 文 献

- [1] 张作辰. 滑坡地下水作用研究与防治工程实践[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 80-85.
ZHANG Zuo-chen. Mechanism of groundwater effect landslide stability and control construction[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1996, 4(4): 80-85.
- [2] 汤平, 李刚, 徐卫军. 水及开挖卸荷对岩质边坡稳定性影响分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 2): 21-24.
TANG Ping, LI Gang, XU Wei-Jun. Influence of water and unloading on rocky slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Supp.2): 21-24.
- [3] 何满朝, 姚爱军, 鹿粗, 等. 边坡岩体水力学作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 662-666.
HE Man-chao, YAO Ai-jun, LU Cu, et al. Study of mechanical functions of underground water in slope rockmass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6): 662-666.
- [4] HOEK E, BRAY J W. Rock slope engineering[M]. London: Revised Second Edition, 1977.
- [5] 张国新, 武晓峰. 裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响-渗流、变形耦合作用的 DDA 法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1269-1275.
ZHANG Guo-xin, WU Xiao-feng. Influence of seepage on the stability of rock slope-coupling of seepage and deformation by DDA method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(8): 1269-1275.
- [6] 盛金昌, 速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 92-98.
SHENG Jin-chang, SU Bao-yu. Comment on the research of coupled stress and fluid flow in fractured rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(2): 92-98.
- [7] 陈金刚, 张景飞. 充填物的力学响应对裂隙渗流的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 577-580.
CHEN Jin-gang, ZHANG Jing-fei. Influence of mechanical responses of fillings on fracture seepage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(4): 577-580.

- [8] 舒继森, 王兴中, 周毅勇. 岩石边坡中滑动面水压分布假设的改进[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 509—512.
SHU Ji-sen, WANG Xing-zhong, ZHOU Yi-yong. Improving on assumption for water pressure distributing on failure surface in rock slope[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(5): 509—512.
- [9] 高小育, 廖红建, 丁春华. 渗流对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 69—72.
GAO Xiao-yu, LIAO Hong-jian, DING Chun-hua. Seepage effects on soil slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(1): 69—72.
- [10] 邓燕红. 考虑非饱和影响土质边坡的稳定性分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2006, 23(增刊 1): 51—53.
DENG Yan-hong. Stability analysis of landslide considering non-saturation influence[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2006, 23(Supp.1): 51—53.
- [11] 魏宁, 茜平一, 傅旭东. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 778—781, 786.
WEI Ning, QIAN Ping-yi, FU Xu-dong. Effects of rainfall infiltration and evaporation on soil slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(5): 778—781, 786.

宏微观岩土力学与岩土技术国际研讨会 (IS-Shanghai 2010) 在同济大学胜利召开

2010年10月10日至12日, 由国际土力学与岩土工程协会 (ISSMGE) 和中国土木工程学会土力学与岩土工程分会 (CISMGE) 主办, 同济大学和日本山口大学联合承办, 上海港湾集团协办的宏微观岩土力学与岩土技术国际研讨会 (IS-Shanghai 2010) 在同济大学中法中心胜利召开。本次会议得到了国家自然科学基金委员会、光华同济大学土木工程学院基金的资助, 以及上海市土木工程学会的大力支持。

本次会议由同济大学常务副校长李永盛教授、同济大学土木工程学院地下建筑与工程系蒋明镜教授和 ISSMGE TC105 专业委员会主席 Malcolm Bolton 教授 (剑桥大学) 分别担任大会组织委员会主席、学术委员会主席和顾问委员会主席。会议筹备工作始自 2008 年初。自会议一号通知以来, 会议得到了国内外岩土力学与岩土工程界诸多知名专家、学者、同行的积极响应和大力支持。会议共收到来自 24 个国家和地区的 422 篇论文摘要和 246 篇论文全文, 经过专家严格评审和遴选, SCI 检索源期刊《Geotechnique》主题刊 (themed issue) 收录论文 18 篇, SCI 检索源期刊《Granular Matter》特刊 (special issue) 收录论文 9 篇, 国际英文期刊《Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China》收录论文 2 篇。会议论文集 (上下卷) 由荷兰 CRC Press 公司出版, 蒋明镜教授、刘芳博士、Malcolm Bolton 教授为论文集主编, 共收录会议论文 174 篇。

2010年10月10日, 蒋明镜教授主持了会议开幕式, 同济大学常务副校长李永盛教授、国家自然科学基金委员会工程与材料学部水利学科主任李万红教授、ISSMGE TC105 专业委员会主席 Malcolm Bolton 教授、中国土木工程学会土力学与岩土工程分会常务副理事长李广信教授 (清华大学)、同济大学土木工程学院院长顾祥林教授出席了开幕式, 李永盛教授、Malcolm Bolton 教授和李广信教授在大会开幕式上热情洋溢地致辞。

会议期间, 180 余名与会代表围绕土体宏微观特性、离散元数值模拟方法和岩土工程应用技术 3 个会议主题, 就最新相关研究成果及发展趋势进行了深入交流和探讨。蒋明镜教授 (同济大学, 中国)、Malcolm Bolton 教授 (University of Cambridge, 英国)、Kenichi Soga 教授 (University of Cambridge, 英国)、Richard J. Jardine 教授 (Imperial College, 英国)、Stefan Luding 教授 (Universiteit Twente, 荷兰)、Félix Darve 教授 (Institute National of Polytechnique of Grenoble, 法国)、Marte Gutierrez 教授 (Colorado School of Mines, 美国)、Masayuki Hyodo 教授 (Yamaguchi University, 日本) 和 Matthew Coop 教授 (City University of Hong Kong, 中国香港) 受邀为大会作了主题报告。东北大学唐春安教授受邀为大会作了邀请报告。国内专家周创兵教授、蔡袁强教授、郑宏教授、郑刚教授、陈正汉教授、刘松玉教授、王兰民教授、黄茂松教授、叶为民教授、沈水龙教授、刘斯宏教授、宋波教授、韦昌富教授、陈仁朋教授出席了会议并担任会场主席。会议期间的口头报告共计 70 余个, 学术海报展示共计 18 组。此外, 10月12日下午, 在 Malcolm Bolton 教授的主持下, 中外学者就宏微观土力学的发展方向 (Are we making a practical impact?) 展开了主题讨论, 中外学者踊跃发言, 对离散元方法优缺点及其在岩土工程中的应用前景展开了热烈讨论。

会议期间, ISSMGE TC105 专业委员会成员召开了工作会议, 规划和商定了 TC105 专业委员会的未来学术活动, 并选举产生新的 TC105 专业委员会核心成员: Masayuki Hyodo 教授出任 TC105 专业委员会主席、蒋明镜教授出任副主席, Kenichi Soga 教授出任秘书长。此外, 工作会议还确定了下一届研讨会将于 2014 年在英国剑桥大学举办。

10月12日晚, 研讨会的闭幕式暨欢送晚宴在同济戴斯酒店召开。同济大学金音笛艺社在晚宴上与与会代表吹奏了多个国家的经典曲目。在《友谊地久天长》的笛声中, 研讨会圆满落下帷幕, 各国参会组织及代表一致盛赞会议承办单位同济大学在本次会议组织工作中的杰出贡献, 并表达了对同济大学周密细致工作的衷心感谢。

(IS-Shanghai 2010 秘书组 供稿)