

# 四川理县小歧村冰碛物角砾土抗剪强度特性研究

李 骅 锦, 冯 文 凯, 许 强, 周 飞

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**在岷江上游的干暖河谷地区分布有众多高陡且持续变形的大型冰碛物堆积体, 现场调查研究发现, 该类冰碛物具有极强的水敏性。利用室内力学强度试验和 SWCC 试验, 对不同含水率下冰碛物的水敏特征进行了研究。结果表明: 冰碛物土体中黏粒含量低(17%), 遇水易崩解, 加之土体的大颗粒性, 使得土体凝聚力、内摩擦角均随其饱和度增加而减小, 其中内摩擦角可减小到最初的  $1/3$  左右, 凝聚力减小到最初的  $1/8$  左右; 当其饱和度介于  $10\% \sim 70\%$  时, 土体水敏性表现尤其明显。根据物质组分特征, 利用 MATLAB 编程, 确定了凝聚力偏移量的修正公式, 并建立了 Mohr-Coulomb 准则修正模型。该模型能较好反映该类角砾土的力学特性, 对该类土力学特性的研究有参考价值。

**关 键 词:**水敏性; SWCC 曲线; 物质组分; 强度模型; 凝聚力偏移量

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.12.009

在岷江上游干暖河谷区域分布着众多大型、特大型的冰碛堆积体, 这些冰碛堆积体在河谷沿岸形成了大量高陡的自然边坡, 且持续变形较为显著。由于该区域沿河建有大量城镇, 故这些边坡的稳定状态对这些城镇的建设与城镇居民的安全有着重大的影响。观测发现, 在地震和降雨作用下, 该类大型冰碛堆积体斜坡的稳定性会降低, 尤其在降雨作用下, 该类型冰碛堆积物强度参数下降显著。这些冰碛堆积体经历了寒冷气候条件-气候变暖-干暖少雨的气候变迁历史, 随着它们从高海拔寒冷地区运移下来, 先前土体中的冰块逐渐融化, 而后堆积在河谷两岸。土体从冻土到过饱和再到现今因干燥少雨气候而水分逐渐丧失, 其强度和稳定性也在逐渐变化。目前堆积物在天然情况下含水率低, 但变形时有发生, 尤其在雨季会有明显的变形迹象。因此研究该类冰碛物力学强度随含水率的变化特点及其稳定性十分必要。

由于冰碛物多处于高寒高海拔地区, 随着人类工程建设区域的不断扩展, 在这些地区的建设工程活动也越来越频繁。因此, 国内外学者针对冰碛物堆积体在工程应用方面的专门研究也多了起来, 特别是在研

究有关冰碛堆积体的工程地质问题以及其内部物质组成、成因和结构特征等方面特征的研究尤为突出<sup>[1-3]</sup>。但是涉及到冰碛堆积体含水率方面的研究工作却不是很多, 所以也很难找到关于该领域冰碛物堆积体力学特性研究的文献。

非饱和土力学特性的研究离不开对其土水特征曲线的研究, 其数学表达形式对非饱和土体强度公式和其本构关系表达有十分重要的意义。随着科技的进步, 越来越多的数学模型被用以描述非饱和土的土水特征曲线。土水特征曲线的数学建模会根据土体类型的不同而调整, 目前, 有对数函数的幂函数形式、幂函数形式、对数函数形式以及分形模型形式 4 类的土水特征曲线数学模型形式<sup>[4-7]</sup>。

本文针对该类水敏性极高的角砾土, 以四川理县小歧河冰碛物角砾土为研究对象, 开展了一系列物理力学试验, 就该类土的物质成分类比黄土, 从微观和宏观上分析该类土具有较高水敏性的原因, 而后分析了其重塑土的土水特征曲线, 找出了该类土具有极强水敏性的饱和度区间。最后结合其力学参数, 基于 Mohr-Coulomb 准则, 建立数学模型, 推导出了适宜场地角

砾土力学特性的计算公式,并提出了凝聚力偏移量概念。

## 1 水敏性分析

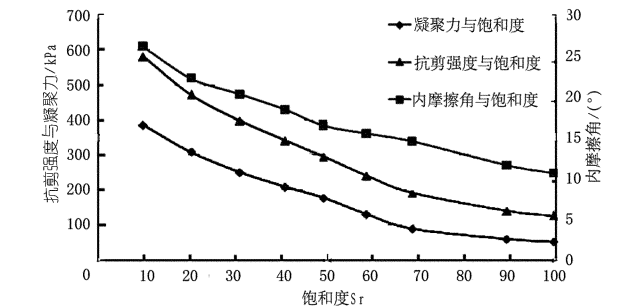
### 1.1 梯度饱和度试样的力学强度试验

试样土采用小歧村角砾土,土体特性指标见表 1。按饱和度变化量 10 作为基本梯度,配置试样,每个饱和度和配置 5 个试样。

容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )		天然含 孔隙 饱			颗粒组成/%			
天然	饱和	水率/ %	比 e	和 度	>2.00 mm	2.00~0.15 mm	0.15~0.076 mm	<0.076 mm
19.42	20.45	5.25	0.54	27.96	51.90	29.75	18.52	2.53

试验仪器采用携带式岩、土力学性质多功能试验仪。按照试验操作步骤,对单级饱和度试样施加 5 级逐级增大的正应力。单次试验垂向应力保持不变,记录下试样破坏时的剪切油缸压力表读数,作为单次剪切强度指标,并测算出试样的饱和度。最后整理出各个饱和度情况下角砾土的凝聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$ ,并结合场地的基本情况,运用 Mohr - Coulomb 准则计算出不同饱和度情况下土的抗剪强度。试验及计算结果见表 2,强度参数与饱和度关系见图 1。

饱和度 $S_r$	凝聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )	抗剪强度/kPa
9.83	385.07	27	580.65
20.40	309.08	23	472.01
30.98	250.73	21	398.07
40.86	209.82	19	341.99
49.27	177.53	17	294.88
58.68	131.16	16	241.23
68.68	89.80	15	192.65
89.35	59.98	12	141.57
99.54	53.22	11	127.83



从图 1 中可以看出,该类土在天然含水率条件下强度较高,工程地质性质良好。随着其含水量的升高,土的强度参数迅速下降,土体达到饱和时,强度值最低。试验结果揭示了场地角砾土具有较为特殊的力学性质,即天然低湿度情况下具有高强度和低压缩性,在

浸水后会发生强度大幅下降和变形大幅突增的特性<sup>[8]</sup>。其中内摩擦角可减小到最初的 1/3 左右,凝聚力可减小到最初的 1/8 左右,说明该类角砾土具有较强水敏性。

### 1.2 物质组分分析试验

试验仪器采用全岩 X 射线粉晶衍射仪,波谱图见图 2,衍射分析结果见表 3。

分析表 3 数据可知,场地角砾土主要由伊利石、绿泥石、石英与长石 4 种矿物成份组成。其中石英、长石,约占比重 66%。长石、石英均是性质稳定的矿物,广泛存在于大自然中,绿泥石遇水不表现出特殊的性质,伊利石遇水虽然不发生膨胀,但会崩散。故笔者认为该类土中含有较多的伊利石是造成该类角砾土拥有较强水敏性的重要原因。

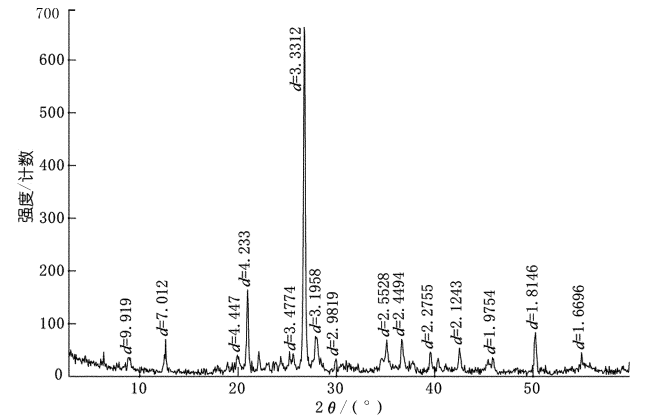


图 2 全岩 X 射线粉晶衍射试验波谱图

表 3 全岩 X 射线粉晶衍射分析								%
蒙托石	伊利石	高岭石	绿泥石	石英	长石	方解石	白云石	
0	17.79	0	16.43	54.18	12.00	0	0	

### 1.3 水敏性综合分析

由于“水敏性”一词被广泛运用到描述黄土性质上,故本文将该类角砾土与黄土做一个比较。结合前人研究结果,中国黄土粒度成分以粉砂为主,并且粗粉砂的含量大于细粉砂。黄土矿物成分复杂,以石英、长石为主,含有少量其他矿物,其主要成分为石英、长石、云母和方解石类,几乎占碎屑矿物总量的 80% ~ 90%<sup>[9-11]</sup>。重矿物以普通角闪石、绿帘石和不透明矿物含为主<sup>[10]</sup>,多数为 10 ~ 100  $\mu\text{m}$  粒级矿物,含量约为 4% ~ 7%。分析该类角砾土矿物成分所占比重与黄土矿物成分所占比重,发现两者主要物质种类及其所占比重基本相似。

再对比两者级配关系,基于前人研究结果,我国水敏性黄土粉土颗粒含量较多,水敏性黄土粉土颗粒中粒径为 0.05 ~ 0.005 mm 者一般占半数以上,以 55% ~

60% 者居多,大于 0.25 mm 的粒径在黄土中极为少见<sup>[12]</sup>。黄土的粒度组成主要集中于粉砂粒级,其中粗颗粒粉土的含量大于细颗粒粉土。但就砂粒含量的变化来看,自鄂尔多斯之西北向东南转移,砂砾粒径有渐次由粗变细的趋势<sup>[13]</sup>。研究表明,黄土的水敏性强是因为水分的加入能削弱粒子间的连结,从而导致黄土中孔隙急剧加大,最后产生塌陷<sup>[14]</sup>。

结合表 1 数据可以总结得到,该类角砾土具有以下性质:场地土颗粒整体粒径较大,具有大孔隙;土颗粒间连接矿物主要为伊利石,其遇水后松散;土中黏土类矿物仅含伊利石,且黏粒含量较低。与水敏性黄土的特征基本类似<sup>[15]</sup>。

## 2 土水特征曲线(SWCC)试验

针对该类角砾土具有较强水敏性这一特点,在三轴仪上进行了脱湿和吸湿两种条件下的土水特征曲线试验,得到了基质吸力( $u_a - u_w$ )与饱和度  $S_r$  的关系,分析了其土水特征曲线的特点。

试样土采用小歧村角砾土,土体特性指标见表 1。试验仪器采用土水特征曲线三轴仪,进行了重塑土的干湿循环特性的 SWCC 试验。土水特征曲线反映了土体饱和度与基质吸力间的关系,本文选用 D. G. Fredlund 和 A. Q. xing 的模型<sup>[4]</sup>进行数据拟合,即

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

其中
$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)}$$

式中, $a$  为进气值函数的土性参数,其值略大于空气进气值; $b$  为当基质吸力超过土的进气值时,土中水流出率函数的土性参数; $c$  为残余含水量函数的土性参数; $\psi$  为基质吸力; $\psi_r$  为残余含水量所对应的基质吸力; $\theta$  为体积含水量; $\theta_s$  为饱和体积含水量。本文  $\psi_r$  取值为

2 000 kPa。该类土体干湿循环特性曲线如图 3 所示,土土特征曲线拟合数据见表 4,强度参数见表 5。

表 4 土水特征曲线拟合数据

项目	拟合参数			进气时对应的体积	进气值/
	$a$	$b$	$c$	含水率/%	kPa
脱湿过程	47.03	0.717	0.321	26.56	149.3
吸湿过程	34.14	0.574	0.212	17.4	

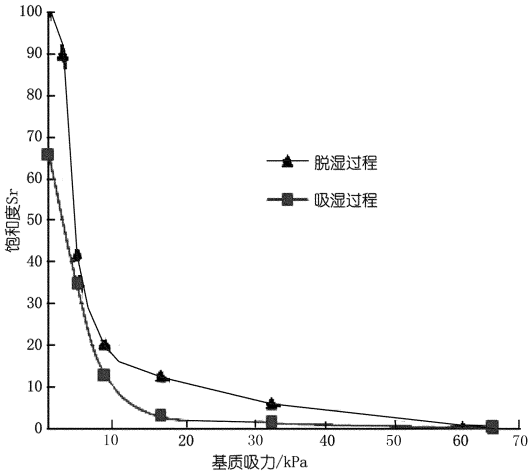


图 3 土水特征曲线三轴仪试验结果

通常情况下,土体饱和度越低,其基质吸力也就越大。在脱湿过程中,随着基质吸力的增加,试样饱和度下降,孔隙比也就会对应地减小,试样产生收缩<sup>[16]</sup>。但当基质吸力增大到一定数值后,试样饱和度不再发生较大变化。吸湿过程有类似特征。

分析图 3 可知,该类土土水特征曲线可以分为 3 个阶段,即:试样饱和度高于 70% 时,基质吸力随饱和度变化量不大,属于缓慢变化阶段;试样饱和度介于 10% ~ 70% 时,基质吸力变化显著,为显著变化阶段;试样饱和度低于 10% 时,基质吸力变化趋于缓和,为平缓变化阶段。

故笔者认为,该类角砾土具有较强水敏性这一特点主要体现在饱和度的显著变化阶段。

表 5 角砾土力学强度参数汇总

试样编号	饱和度 $S_r$	凝聚力/ CkPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	脱湿吸力/ kPa	吸湿吸力/ kPa	抗剪强度 $\tau_f/\text{kPa}$	正应力/ kPa	脱湿过程有效 应力/kPa	吸湿过程有 效应力/kPa
1	9.83	385.07	27.00	20.70	11.14	580.65	383.85	180.51	274.44
2	20.40	309.08	23.00	8.74	4.93	472.01	537.08	358.73	436.39
3	30.98	250.73	21.00	5.09	3.22	398.07	664.96	507.12	565.20
4	40.86	209.82	19.00	3.54	2.44	341.99	759.20	614.63	659.70
5	49.27	177.53	17.00	2.76	2.02	294.88	818.72	682.82	719.33
6	58.69	131.16	16.00	2.18	1.69	241.23	861.04	733.08	761.73
7	68.68	89.80	15.00	1.76	1.45	192.65	875.88	755.01	776.61
8	89.35	59.98	12.00	1.22	1.11	141.57	799.17	690.36	699.95
9	99.54	53.22	11.00	1.04	1.00	127.83	703.45	599.78	604.25

3 基于 Mohr - Coulomb 准则的强度公式修正

基于前述研究,该类角砾土与纯土体的性质有较大的区别,前人的非饱和土力学强度模型采用的均是纯土体力学理论,故得到的公式在物理力学性质上略有欠缺,最终公式无法较好解释该类角砾土的力学特性,影响其推广。

笔者认为,该类角砾土本是四相土体,由于其物质成分、赋存条件以及其运移过程与冰雪运移密切相关,故其水敏性极高。对该类角砾土基于 Bishop 公式进行模型修正时,发现其  $\chi$  范围是  $(-207.32, 248.69)$ ,波动较大,超出前人的研究结果。故本文针对该类角砾土力学特性,建立如下数学模型。

$$\tau_f = c' + \sigma \times \tan \varphi' + R \tag{2}$$

以上模型基于 Mohr - Coulomb 准则,在公式末尾添加了一个  $R$  项,称之为凝聚力偏移量。

3.1 凝聚力偏移量公式的确定

由前文试验可知,该类土体饱和度介于 10% ~ 70% 时,水敏性极强。为了使凝聚力偏移量能较好解释该类土极强的水敏性,故本文选取饱和度介于 10% ~ 70% 的参数进行凝聚力偏移量的数学建模

$$R = f(Sr, u_a - u_w) \tag{3}$$

令该类土抗剪强度为第 1 个因子  $B_0$ ,饱和度幂指数与基质吸力幂指数的乘积为第  $i$  个因子  $B_i$ ,其中

$$B_i = Sr^e (u_a - u_w)^f \tag{4}$$

则  $B_0$  与  $B_i$  在以  $e, f$  为变量情况下的关联系数为

$$y_i(k) = \frac{(a + b\rho)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_i(k) + b\rho} \tag{5}$$

其中,  $\Delta_i(k) = |x_{ki} - x_{oi}|$ ,  $(i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n)$ ;  $a = \min \Delta_i(k)$ ,  $b = \max \Delta_i(k)$ ;  $\rho$  称为分辨系数,通常情况下  $\rho = 0.5$ 。

$B_0$  与  $B_i$  的总体关联度为

$$r_i = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{k=1}^{mn} y_i(k) \tag{6}$$

代入数据后发现,当  $e = 1, f = 1$  时,两者的总体关联度最高。故定义凝聚力偏移量为

$$R = p \times (u_a - u_w) \times Sr - q \tag{7}$$

式中,  $p$  为模型与基质吸力的相关系数,  $q$  为场地系数。

3.2 凝聚力偏移量参数的确定

把场地实验数据和模型基本形式写入 MATLAB 后,得到偏移量模型参数值。模型中  $p$  为一无量纲化的常数,得到  $p = \left(\frac{c^*}{\varphi^*}\right) T_{(u_a - u_w)}^{3.89}$ ,  $q$  为一量纲化常数,赋

予单位为 kPa,得到  $q = T_{(\gamma)}^{2.13}$ 。

在本试验中,得到  $p = 5.671, q = 630.1$ 。该模型的推算结果与场地试验数据结果相似度极高,故本文选择该强度公式,其形式如下。

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \varphi' + p(u_a - u_w) Sr - q = \bar{c} + \sigma \tan \varphi' \tag{8}$$

式中,  $c'$  为饱和土的有效凝聚力;  $\varphi'$  为饱和土有效内摩擦角;  $\bar{c}$  为修正凝聚力,其中  $\bar{c} = c' + R$ ;  $R$  为凝聚力偏移量,其中  $R = p \times (u_a - u_w) \times Sr - q$ ;  $c^*$  为饱和状态下角砾土的凝聚力值,无单位;  $\varphi^*$  为饱和状态下角砾土的内摩擦角度数值,无单位;  $T_{(u_a - u_w)}$  为饱和状态下的脱湿吸力值,无单位;  $T_{(\gamma)}$  为饱和状态下角砾土容重值,无单位。

4 结 论

(1) 岷江上游冰碛物角砾土遇水后力学强度下降极快,饱水土的摩擦角减小到最初的 1/3 左右,凝聚力更是减小到最初的 1/8 左右。

(2) 该类角砾土颗粒粒径整体较大,具有大孔隙;土颗粒间连接矿物主要为伊利石,其遇水后松散;土中黏土类矿物仅含伊利石,且黏粒含量较低。从结构与物质组分上解释了该类角砾土的水敏性。

(3) 土体饱和度的变化体现在其孔隙比的变化上,该类冰碛物角砾土土水特征曲线的变化可以分为 3 个阶段,在饱和度介于 10% ~ 70% 时其力学强度特性发生显著变化,即本文定义的显著变化阶段,该类土水敏性极强。

(4) 基于 Mohr - Coulomb 准则的模型公式,提出了凝聚力偏移量计算公式和修正强度模型,且其计算值与场地试验值吻合度极高。

参考文献:

[1] 徐永福. 膨胀土地基承载力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 22(2): 238 - 242.

[2] Gens A, Alonso E E. A frame work for the behavior of unsaturated expansive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 1013 - 1032.

[3] 孔官瑞. 膨胀土边坡稳定性试验及数值分析[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1990.

[4] Fredlund D. G., Morgenstern N. R.. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(GTS): 447 - 66.

[5] 郑颖人, 赵尚毅, 时卫民, 等. 边坡稳定分析的一些进展[J]. 地下空间, 2001, 21(5): 450 - 454.

[6] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic Properties of Porous media[R]. Hydrology Paper no. 3. Civil Engineering DeP. Colorado State Univ. Fort Collins, Colo. 1964.

[7] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated hydraulic

conductivity from moisture retention data[J]. Soil Science,1974,117:311-314.

[8] 盛岱超,杨超. 关于非饱和土本构研究的几个基本规律的探讨[J]. 岩土工程学报,2012,34(3):438-456.

[9] 王永炎. 黄土中石英颗粒表面结构与中国黄土的成因[J]. 地理学报,1982(1):10-13.

[10] 刘东生. 黄土的物质成分与结构[M]. 北京:科技出版社,1966.

[11] 陈正汉,方祥位. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. 岩土力学,2009,30(1):1-11.

[12] 余文龙. 黄土结构性定量化研究新进展[J]. 水文地质工程地质,2011,38(5):120-126.

[13] 赵树德. 土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2001.

[14] 郭敏霞,张少宏,邢义川. 非饱和原状黄土湿陷变形及孔隙压力特性[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(6):785-788.

[15] 贾国英. 黄土湿陷性与物性关系的研究[J]. 电力学报,2004,19(4):344-346.

[16] 汪东林. 非饱和重塑黏土干湿循环特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2007,9(26):1862-1867.

(编辑:赵凤超)

Study on shear strength properties of moraine breccia soil at Xiaoqi Village of Lixian County

LI Huajin, FENG Wenkai, XU Qiang, ZHOU Fei

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** There are plenty of huge high and steep moraine deposits that are in continuous deformation in the dry and warm valley area of the upper Minjiang River, and severe water sensitivity are discovered for these moraine material. In the indoor mechanical strength test and SWCC test, the water sensitivity characteristics of the moraine material under different water content were analyzed. The results showed that the moraine soil with low clay content(17%) is prone to disintegration when encountering water; moreover, because of larger soil particle, the soil cohesion and internal friction angle all decrease with the increase of saturation, in which, the internal angle can reduce to about 1/3 of the initial value, the cohesion can reduce to about 1/8; when the saturation is in the scope of 10% ~70/%, the water sensitivity is especially obvious. Using MATLAB program, the modification formula of cohesion offset and modification model of Mohr – Coulomb criterion are established, which can well reflect the mechanical characteristics of the breccia soil and has reference value for the research on the mechanical characteristics of this kind of soil.

**Key words:** water sensitivity; SWCC; material composition; strength formula; cohesion offset

· 简 讯 ·

王光谦院士到长江委作《大数据时代的水利》科技讲座

2015 年 5 月 28 日下午,长江水利委员会举办 2015 年领导干部科技讲座。中国科学院院士、全国政协常委王光谦应邀作题为《大数据时代的水利》的科技讲座。委领导刘雅鸣、陈飞、杨淳、陈琴出席讲座。委副主任魏山忠主持讲座。

王光谦院士介绍了大数据时代特征以及水利大数据的需求、特点和挑战,以全球河网、全球水情预报、基于大数据的中长期预报和天河工程为例,系统阐述了水利大数据的应用情况。他精彩的讲座赢得了参会人员的热烈掌声。随后,王光谦与参会人员开展了互动交流,就大数据在水利工作中的具体应用方式等问题进行了现场解答。

魏山忠对王光谦院士的精彩讲座表示感谢。他说,王光谦院士的讲座内容丰富、资料翔实、思路开阔、旁征博引、对策有力、指导性强,对我们做好新形势下的治江工作具有深刻的启示意义。希望大家认真消化讲座内容,积极转变工作思路和方法,不断提高长江治理开发与保护的能力和水平,为长江水利健康可持续发展作出新的更大贡献。

委副总工,委机关有关部门及水保局、委属有关单位领导班子成员、工作人员、技术人员共 300 余人聆听了讲座。

(长 江)