

Study on Relationship between Drilling Deformation and *In-Situ* Stresses under the High Stress Force

Peng Ma

Zhejiang Huadong Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang
Email: ma_p@ecidi.com

Received: Oct. 14th, 2017; accepted: Oct. 28th, 2017; published: Nov. 2nd, 2017

Abstract

The general burial depth of water diversion tunnel of Jinping II Hydropower Station is about 1500 - 2000 m and the maximum depth is about 2525 m. It has the characteristics of large depth, long hole line length and wide diameter which is an extra large underground hydropower project. The maximum *in-situ* stresses can reach more than 70 MPa. In the tunnel excavation process, due to the existence of high ground stress, local rock body appeared strong rockburst and deformation. It often occurs rock cake and hole wall deformed or even collapsed in stress testing, which put great difficulties to the test. Based on the theoretical analysis of the stress state around the hole wall, the television camera in the borehole hole, analysis of the uniaxial compressive test results of the rock, and various test methods of the rock stress, the influence of the borehole deformation on the geostress test and the relationship between the stress of the rock mass are proved. Then solutions are made to eliminate and reduce the impact, and obtain the reliable original rock stress test results under high stress conditions.

Keywords

Jinping II Hydropower Station, High Pressure, *In-Situ* Stresses, Hole Wall Deformation, Water Pressure Cracking, In Hole Television Camera

高应力条件下岩体钻孔变形与地应力关系研究

马 鹏

浙江华东工程安全技术有限公司, 浙江 杭州
Email: ma_p@ecidi.com

收稿日期: 2017年10月14日; 录用日期: 2017年10月28日; 发布日期: 2017年11月2日

摘要

锦屏二级水电站引水隧洞上覆岩体一般埋深1500~2000 m, 最大埋深约为2525 m, 具有埋深大、洞线长、洞径大的特点, 为超深埋长隧洞特大型地下水电工程。最大地应力可达到70 MPa以上, 在隧洞开挖过程中, 由于存在超高的地应力, 局部岩体出现了强烈的岩爆和变形。地应力测试钻孔中经常出现岩饼现象, 孔壁则会出现变形甚至塌落, 给地应力测试造成很大的困难。通过孔壁周围应力状态的理论分析、钻孔孔内电视摄像、岩石单轴抗压试验成果分析和多种岩体地应力测试方法等研究, 证明钻孔变形对地应力测试的影响, 及其与岩体地应力之间的关系, 找到了消除和减少影响的解决办法, 得到在高应力条件下的可靠的岩体原始地应力测试成果。

关键词

锦屏二级水电站, 超高压, 地应力, 孔壁变形, 水压致裂, 孔内电视

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锦屏二级水电站工程规划了7条平行布置的穿越锦屏山的隧洞: 其中2条起交通作用的辅助洞(开挖洞径5.25~6.50 m)采用钻爆法开挖, 并于2008年8月贯通; 4条引水隧洞开挖断面12.4~13.0 m, 其中2#和4#引水隧洞采用钻爆法分上、下台阶开挖, 1#和3#引水隧洞采用TBM全断面掘进; 1条施工排水洞(开挖洞径7.20 m)采用TBM掘进。每条引水隧洞长约16.7 km, 一般埋深1500~2000 m, 最大埋深2525 m [1]。

隧洞进入深埋段后, 出现了多种高应力破坏形式。完整性好的脆性大理岩洞段常见的高应力破坏形式有片帮、破裂、应力节理和岩爆; 完整性一般的大理岩洞段, 高应力破坏还会受结构面的孔径影响, 形成高应力—结构面破坏组合型破坏; 完整性差的大理岩洞段挤压变形、应力坍塌是常见的围岩失稳形式[1]。

然而, 在埋设2000 m左右的隧洞内进行地应力测试钻孔时, 不仅出现了大量的饼状岩芯, 并发现了一定数量的钻孔孔壁崩落现象, 孔径发生变形呈椭圆型, 对岩体原始地应力测试产生很大困难。通过孔壁周围应力状态的理论分析、钻孔孔内电视摄像、岩石单轴抗压试验成果分析和多种岩体地应力测试方法等研究, 证明钻孔变形对地应力测试的影响, 及其与岩体地应力之间的关系, 找到了消除和减少影响的解决办法, 得到在高应力条件下的可靠的岩体原始地应力测试成果。

2. 孔壁周围的应力状态

现行的《水电水利工程岩体应力测试规程》(DL-T5367-2007)和《水利水电岩石试验规程》(SL264-2001)中推荐的方法有: 孔壁应变法、孔底应变法、孔径应变法、水压致裂法和表面应变法五种。前四种均需要在测试岩体中钻孔。钻孔孔壁周围的应力状态和变化, 或多或少对地应力测试产生影响。

未打钻之前, 应力处于平衡状态。打钻后(小孔半径为 a), 钻孔周围的原岩应力平衡状态被破坏, 为保持平衡, 孔壁应力重新分布。多数研究者研究孔壁周围的应力状态应用Kirsch方程[2], 即:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \Delta p \frac{a^2}{r^2}; \\
 \sigma_\theta &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \Delta p \frac{a^2}{r^2}; \\
 \sigma_z &= \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta; \\
 \sigma_{r\theta} &= \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta.
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中:

σ_r 、 $\sigma_{z\theta}$ 、 σ_θ 和 σ_z 分别为作用于孔壁的径向应力、剪切应力、切向应力和垂直应力;

σ_H 和 σ_h 分别为最高和最低水平原岩主应力, 见图 1;

σ_v 为原岩垂直应力;

r 为到中心轴的径向距离;

θ 为从 σ_H 方向按逆时针方向计算所;

ν 为岩石泊松比;

Δp 为超过岩石孔隙压力多余的钻孔流体压力。

从式(1)可知, 最大应力为切向应力, σ_θ 沿 σ_H 的起拱线作用在 $\theta = 90^\circ$ 和 270° 方向上。

当 $r = a$ 时, 即为孔壁的应力状态, 由式(1)可知, 在孔壁上, 切应力为 0, 可不予考虑。 σ_θ 和 σ_z 是角度 θ 的函数, 在 $\theta = 90^\circ$ 或 270° 时, σ_θ 和 σ_z 取最大值, 则式(1)变为

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \Delta p; \\
 \sigma_\theta &= 3\sigma_H - \sigma_h - \Delta p; \\
 \sigma_z &= \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h).
 \end{aligned}$$

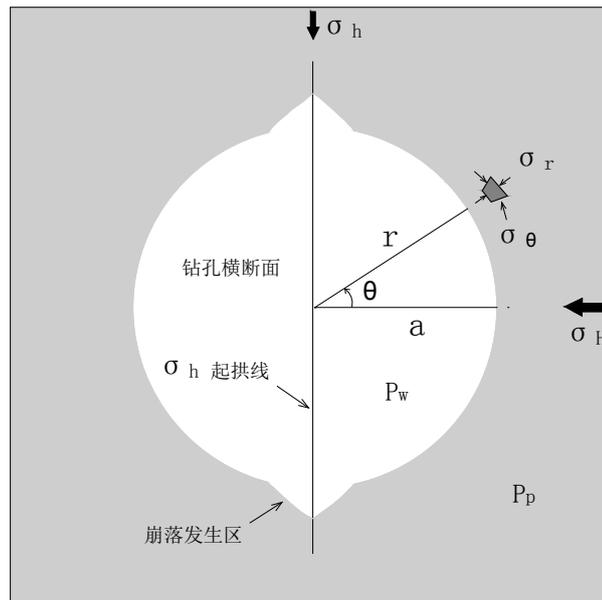


Figure 1. Far-field principal stresses around a vertical borehole
图 1. 钻孔横断面周围应力状态

如果 Δp 变小, 则 σ_r 变小, σ_θ 变大, 如果 σ_θ 超过岩石的抗压强度, 则岩石发生剪切破坏, 即发生孔壁崩落。

3. 钻孔电视摄像

钻孔全景电视摄像是使用武汉长盛 JL-IDOI 型和武汉固德 GD3Q-A 型彩色高清晰数字全孔壁钻孔彩色电视摄像系统, 仪器配备外径为 $\Phi 52$ 和 $\Phi 70$ mm 的探头, 图像水平分辨率为 795 pixels, 垂直分辨率为 0.2 mm, 深度记数精度为 0.1 mm, 自带编辑分析软件, 可处理制成展开的孔壁图象或制成三维芯样图象。

在地应力测试孔钻进结束后, 进行了钻孔全景电视摄像。从展开的孔壁图象上可清晰的看见孔壁崩落的现象, 见图 2。锦屏二级水电站辅助洞 12#横通洞 DK12-4 钻孔的电视图像见附图 1~附图 3。

4. 岩石强度试验成果分析

试验岩芯取自距锦屏二级水电站辅助洞 11#横通洞 45 m 的 A 洞, 属于白山组地层。取芯断面共设置了 3 个地质钻孔: 两个水平孔 B、C 距底板 1 m, 孔深 10 m; 斜孔 A 向南倾斜且位于 A 洞横断面内, 与水平面夹角约 45° 。3 个钻孔的内径均为 50 mm。共取 11 块岩样进行单轴抗压试验, 18 块岩样进行三轴压缩试验。

4.1. 单轴抗压试验

锦屏大理岩室内单轴抗压试验成果汇总于表 1 [1]。试验成果显示单轴强度的离散性比较大, 强度最低 98 MPa, 最高 144 MPa, 平均 113 MPa。试验测得的大理岩强度稍低于现场的锤击判断, 岩样运输过程中的强度损失可能是一个重要因素。综合考虑, 白山组大理岩的单轴强度应该在 120 MPa 以上。

4.2. 三轴压缩试验

锦屏大理岩室内常规三轴压缩试验分为 3 组, 每组 5~8 个试样, 围压范围覆盖 2~50 MPa。不同围压条件下的峰值强度和残余强度成果汇总于表 2 [1]。

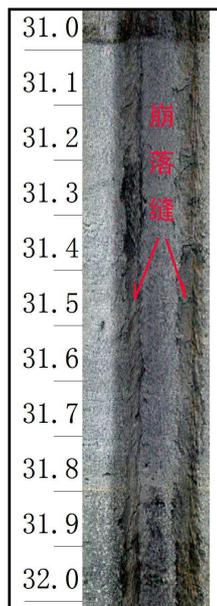


Figure 2. The caving seam of hole wall

图 2. 孔壁崩落缝

Table 1. The summary table of single-axis strength test
表 1. 单轴试验强度汇总表

试样标号	单轴强度 σ_c (MPa)
A38	105
A45	122
A47	124
A48	105
A49-1	105
A49-2	101
B11	123
B34	99
B35	98
C29	144
C35	121

Table 2. The summary table of three-axis test peak intensity and residual strength
表 2. 三轴试验峰值强度和残余强度汇总表

试样编号	围压(MPa)	峰值强度(MPa)	残余强度(MPa)	峰值强度 - 残余强度(MPa)
A46-1	2	143	42	101
A19-3	10	174	90	84
A19-4	15	193	115	78
A23-1	30	249	203	46
A22	40	281	252	29
C23-2	50	309	283	26

5. 地应力测试方法研究及成果分析

5.1. 测试方法研究

从 1993 年开始在锦屏二级水电站 5 km 长探洞中的地应力测试,到 2011 年锦屏二级水电站 17 km 辅助洞地应力测试结束为止,先后采用了孔壁应变法、孔径应变法、孔底应变法、水压致裂法和表面应变法五种方法,进行岩体原始地应力的测试。

在高应力区,由于孔径的变形、孔壁的破坏和岩芯的饼化,孔壁应变法和孔径应变法两种地应力测试方法都未能取得较好的测试结果;而孔底应变法和表面应变法虽然取得了较好的测试数据,但应力计算过程中岩体变形模量的确定难度较大,测试计算结果所反应的原始地应力可靠度降低。

水压致裂法具有独特的技术特点和优势,通过测试设备和仪器的技术改进,我们成功地研制出一套现场实测压力近 100 MPa 的超高压岩体水压致裂法地应力测试系统,以及对现场测试方法的不断研究,克服了孔壁塌落和孔径变形的影响,完成了 8 组超高应力条件下的岩体三维地应力测试,测试技术和能力达到全国乃至世界的先进水平,解决了锦屏超高应力条件下的原位地应力测试难题。

5.2. 水压致裂法地应力测试成果分析

σ_{DK12} 测试点位于锦屏辅助洞 12 号横通道(桩号 BK10 + 300)附近的 B 洞北侧地板和洞壁上,大致埋深 1995 m,布置一组三维水压致裂法地应力测试钻孔,在测试过程中先后钻了 4 个垂直孔(12-1、12-4、12-5 和 12-6 孔)和 4 个水平孔(12-2、12-3、12-7 和 12-8 孔),钻孔位置及方向见图 3。岩性为白山组(T_{2b})

灰~灰白色致密厚层块状臭大理岩。先后采用了超高压油泵和超高压水泵作为加压设备的一整套超高压水压致裂法地应力测试系统进行测试，取得了大量的、完整的、可靠的测试数据，DK12-4~DK12-6 孔单孔二维地应力测试成果见表 3。

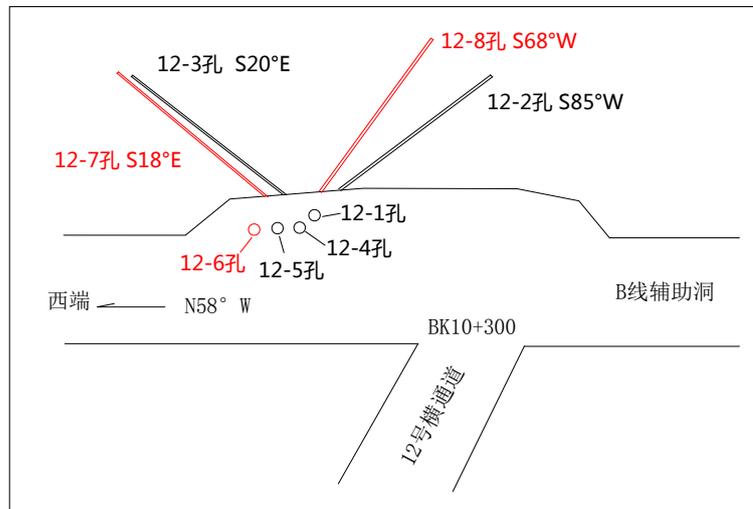


Figure 3. The Geostress Measurement Drillhole Location plan in Cross-channel No. 12

图 3. 12 横通道地应力测试孔布置示意图

Table 3. The *in-situ* stress test results table of DK12-4~DK12-6 vertical hole by using hydraulic fracturing method
表 3. DK12-4~DK12-6 垂直孔水压致裂法地应力测试成果表

测试段深度(m)	最小主应力 σ_h (MPa)	最大主应力 σ_H (MPa)	$3\sigma_H - \sigma_h$ (MPa)
12-4 孔(垂直)			
10.43~11.43	22.11	36.11	86.22
12.05~13.05	18.13	29.13	69.25
13.24~14.68	19.64	30.64	72.28
14.75~15.75	31.15	44.15	101.31
15.90~17.34	36.17	62.17	150.33
17.45~18.45	55.18	98.18	239.36
18.14~19.58	62.19	108.19	262.38
18.98~20.42	62.20	113.20	277.39
28.25~29.25	47.29	81.29	196.58
12-5 孔(垂直)			
36.50~37.50	62.87	113.87	278.74
12-6 孔 (垂直)			
16.30~17.30	37.17	66.17	161.34
17.80~18.80	38.18	64.18	154.37
19.30~20.30	36.20	64.20	156.40
20.50~21.50	40.21	65.21	155.42
29.90~30.90	38.30	69.30	169.61
32.65~33.65	47.33	71.33	166.66
35.40~36.40	62.36	108.36	262.72
37.25~38.25	41.38	75.38	184.76

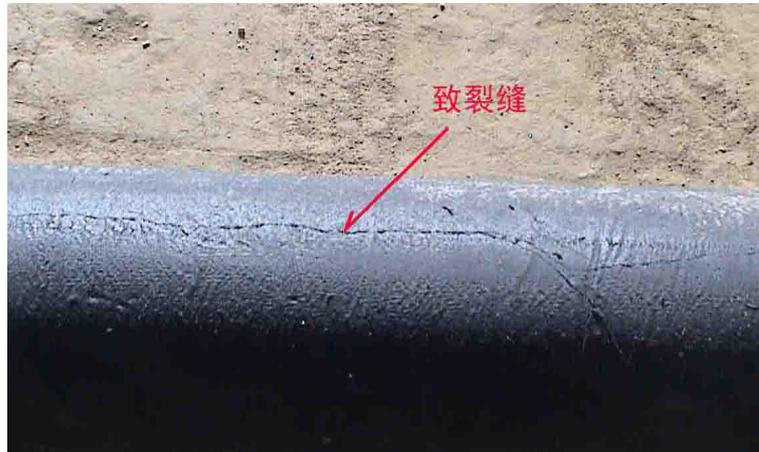


Figure 4. The crack mark on the hole wall
图 4. 孔壁致裂缝印痕



Figure 5. The caving seam mark of hole wall
图 5. 孔壁崩落缝印痕

在岩体水压致裂后对测试段的致裂缝进行了印模和定向，可以明显的看到在同一个印模器上同时印出有两条对称的致裂缝(σ_H 方向)和两条对称的塌落缝(σ_h 方向)，两者夹角相差 90° ，见图 4 和图 5。

6. 结论

1) 从 DK12-4 孔的电视图像(附图 1~附图 3)可以清楚的看出，孔深 17.55 m 以上孔壁光滑，未出现有塌落现象，而孔深 17.55 m 以下孔壁则出现有明显的两条崩落缝。

2) 根据 DK12-4 孔水压致裂法地应力测试成果(表 3)，采用 Kirsch 方程进行计算分析，孔深 10.43~17.34 m 测试段的 $3\sigma_H - \sigma_h$ 值在 69.25~150.33 MPa，孔深 17.45 m 以下测试段的 $3\sigma_H - \sigma_h$ 值在 196.58~277.39 MPa，远大于岩石的单轴抗压强度的平均值 120 MPa。

3) 测试结果表明，钻孔水压致裂地应力测试所得的岩体水平主应力值的高低与钻孔电视图像相显示的崩塌现象吻合，即在高应力条件下存在孔壁崩塌现象，以及只有在 $3\sigma_H - \sigma_h$ 值远大于岩石单轴抗压强度时发生孔壁崩塌，且应力值越高崩塌缝越宽。

4) 孔壁两条崩塌缝连线的方向就是岩体最小水平主应力的方向。

参考文献 (References)

- [1] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 褚卫江. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1999-2009.
- [2] 瞿玉树. 对孔壁崩落预测地应力方法评价[J]. 河南理工大学学报(自然科学报), 2011, 30(6): 662-667.

附录

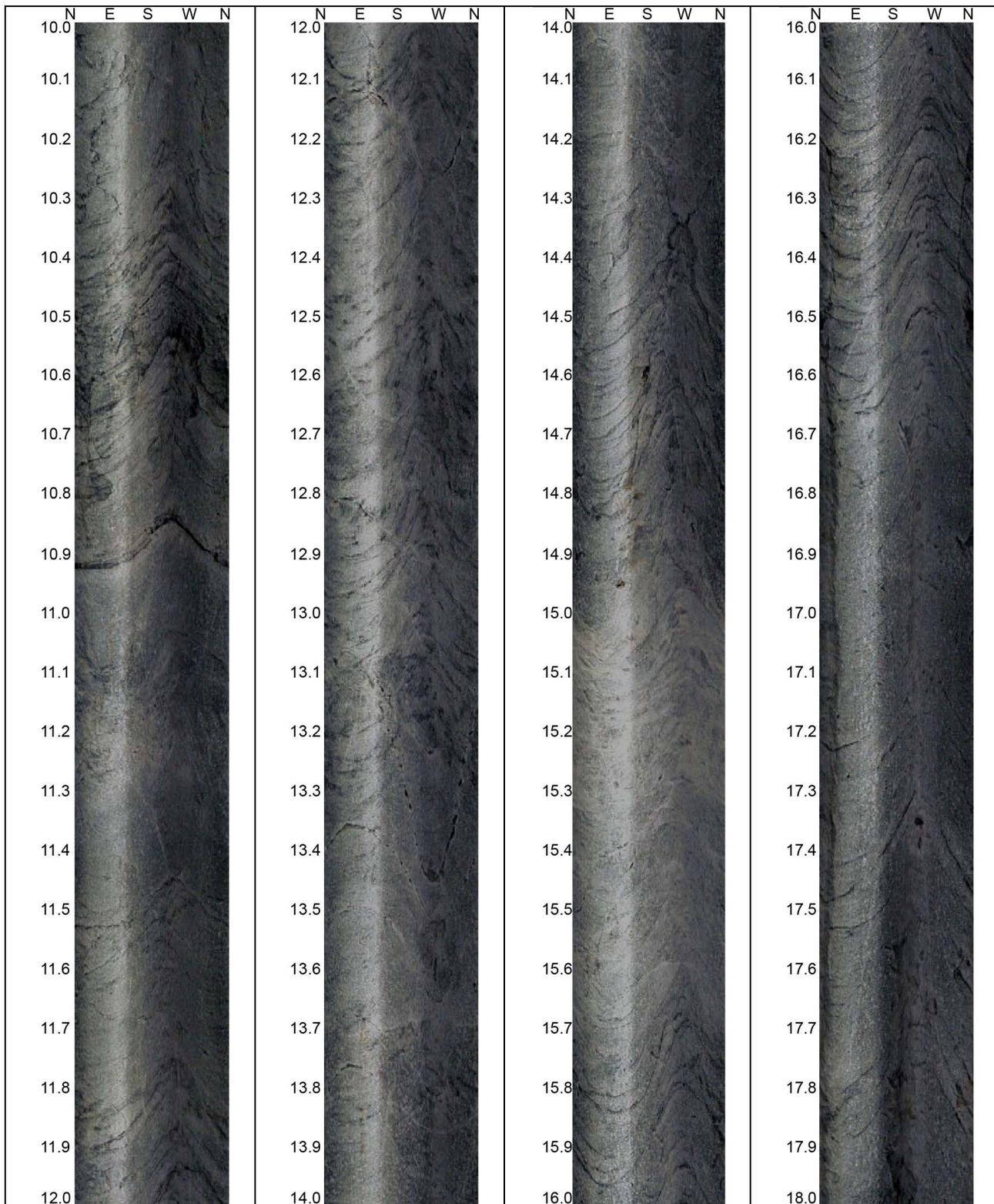


Figure A1. Borehole television image of DK12-4 vertical hole (hole depth 10 - 18 m)

附图 1. DK12-4 垂直孔钻孔电视图像(孔深 10~18 m)

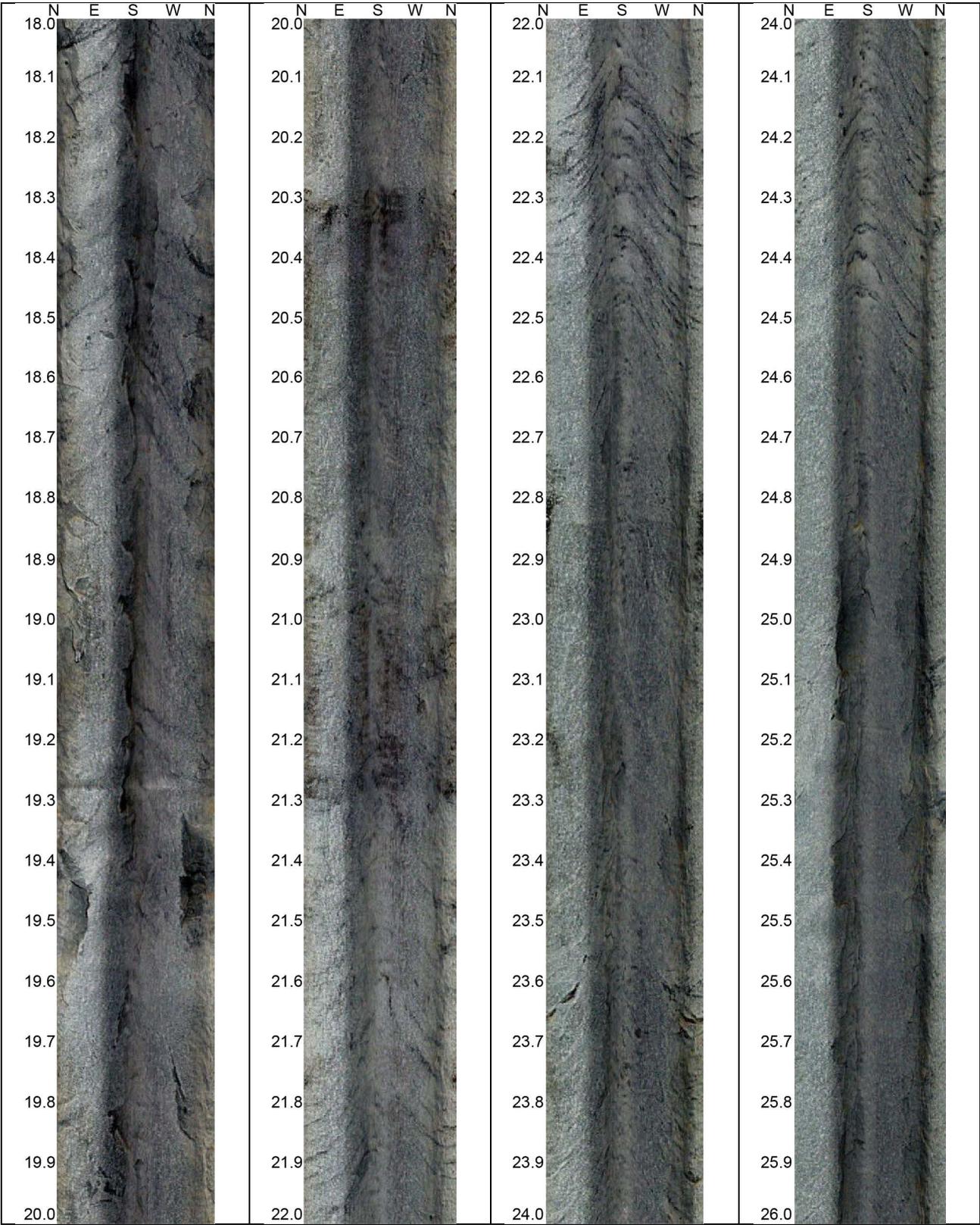


Figure A2. Borehole television image of DK12-4 vertical hole (hole depth 18 - 26 m)

附图 2. DK12-4 垂直孔钻孔电视图像(孔深 18~26 m)

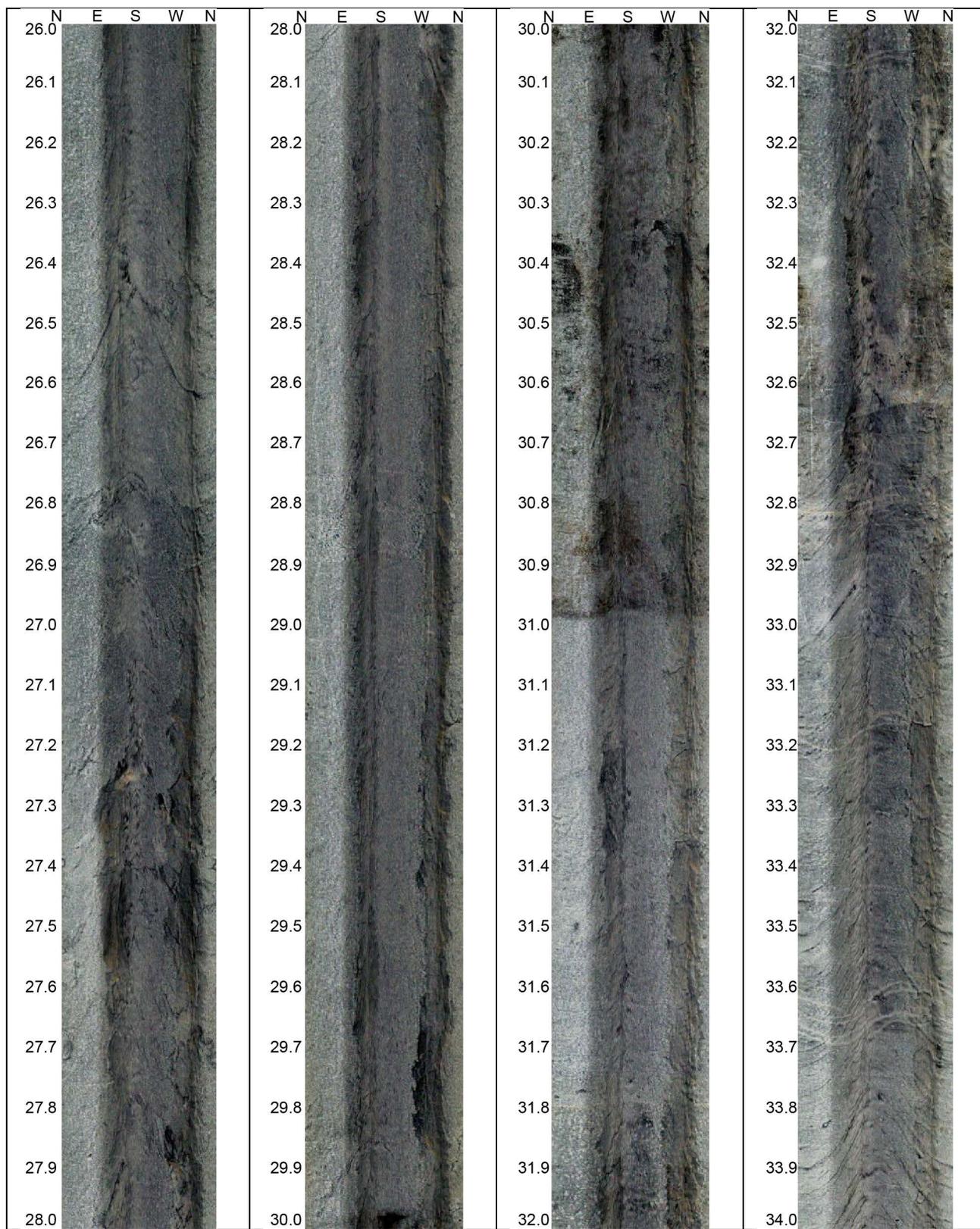


Figure A3. Borehole television image of DK12-4 vertical hole (hole depth 26 - 34 m)

附图 3. DK12-4 垂直孔钻孔电视图像(孔深 26~34 m)

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org