

基于锚索张拉试验中岩土力学非线性响应的诊断与工程解读

易湘华

中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司 湖北 宜昌 443002

摘要: 在国际岩土工程实践中, 现场试验数据若偏离理想弹性曲线, 常引发对工程质量的疑虑。本文以印尼某抽水蓄能电站高边坡预应力锚索张拉试验为背景, 针对其中一束被判定为数据“异常”的锚索(编号No.3)开展系统分析。该锚索设计荷载600kN, 长度30m, 锚固段6m。通过全过程采集蠕变、永久变形及弹性变形数据, 并依据ASTMD4435、EN1537:2020及BS8081:2022等国际规范进行评估, 发现该锚索在0.7-0.9倍设计荷载区间出现的永久变形显著增长, 实质上是锚固段岩体内部裂隙压密、局部塑性区形成并达到新稳定平衡的真实力学响应。研究表明, 在复杂地质条件下, 锚固系统的验收应以其在验证荷载下的最终稳定性和整体性能为依据, 而非单纯追求荷载-变形曲线的绝对光滑。通过数据解读与规范应用, 最终促成国际团队共识, 推动项目顺利实施。

关键词: 预应力锚索; 张拉试验; 异常数据; 永久变形; 蠕变; 岩土相互作用; 国际规范; 非线性响应

1 引言

在高边坡支护工程中, 预应力锚索的长期可靠性至关重要。现场原型张拉试验是验证设计与施工质量的关键环节。然而, 由于岩土体的非均质性和不连续性, 锚索-岩土复合系统的力学响应常与理想模型存在差异, 这类“异常”数据易引发工程团队担忧, 甚至影响项目推进。

本文依托印尼某抽水蓄能电站高边坡工程, 该工程对5束设计荷载为600kN的拉力型预应力锚索进行了分级张拉试验。其中, No.3锚索的试验数据因在中间荷载级表现出明显的非线性特征, 受到外方工程师质疑。我们通过系统分析, 阐明该“异常”实为岩体真实力学行为的体现, 并最终推动形成技术共识。

2 试验方案与数据采集方法

为确保评估结果的一致性与可比性, 所有锚索均遵循预先制定的标准化张拉试验流程。

2.1 试验荷载分级

采用8级加载, 荷载等级分别为设计荷载($T_p = 600\text{kN}$)的0.2、0.4、0.55、0.7、0.8、0.9、1.0及1.25倍。最高1.25 T_p (750kN)为验证荷载(ProofLoad), 用于检验锚索系统的极限性能与安全储备。

2.2 整体分级张拉与测量流程

试验以0.2倍设计荷载(F_1)作为基准荷载和每次测量的零点。对于每一个更高的目标荷载等级(F_i), 均严格遵循以下加载-持载-卸载循环:

2.2.1 加载与蠕变观测: 从基准荷载 F_1 平稳加载至目标荷载 F_i 。在 F_i 荷载下, 分别稳压1、5、10、15、20分钟, 并精确记录各时间点的绝对位移值(即穿心式千斤顶活塞的伸出量)。相邻时间点的位移差值即为该时段内的蠕变量(Δ)。工程上通常以15-20分钟内的位移增量是否显著衰减并趋于稳定, 作为蠕变收敛的判据^[3]。

2.2.2 总变形量测量: F_i 荷载下稳压周期结束时的最终位移值, 与0.2 T_p 基准位移值的差值, 记录为从0.2 T_p 加载至 F_i 所产生的总变形量($S_{total,i}$)。

2.2.3 卸载与永久变形测量: 从 F_i 缓慢、平稳地卸荷回至0.2 T_p 基准荷载 F_1 。位移稳定后, 测量此时的位移值, 其与初始 F_1 位移值的差值, 即为该次加载-卸载循环所产生的永久变形量($S_{permanent,i}$)。

2.2.4 弹性变形量计算: 各荷载等级下的弹性变形量($S_{elastic,i}$)计算公式为:

$$S_{elastic,i} = S_{total,i} - S_{permanent,i}$$

该方法可清晰分离系统在不同荷载下的弹性、塑性及蠕变响应。

3 No.3锚索试验数据整体评估

在分析局部非线性特征前, 首先评估该锚索是否满足规范核心要求。

3.1 蠕变性能分析

蠕变反映了岩土材料与结构在恒定荷载下随时间发展的变形特性, 其收敛性是评估长期稳定性的核心。

表1: No.3锚索各级荷载下观测到的最大蠕变值

张拉等级	0.2	0.4	0.55	0.7	0.8	0.9	1	1.25

续表

张拉力 F_i (KN)	120	240	330	420	480	540	600	750
No.3蠕变值 (mm)	0	0.06	0.16	0.22	0.14	0.16	0.24	0.1

分析过程如下:

3.1.1 绝对量值: 该锚索在所有荷载等级下的蠕变值均远小于工程中常采用的1mm控制标准, 最大值仅为0.24mm (1.0 T_p 时), 表现优异。

3.1.2 收敛性: 所有等级的蠕变观测数据均清晰显示, 位移增量在5-15分钟内迅速衰减并趋于一个稳定值。这完全满足了ASTMD4435^[1]及EN1537:2020等规范中关于蠕变率必须随时间显著递减并最终趋近于零的强制性要求^[3]。

结论: 该锚索的蠕变性能完全合格, 表明锚固系统在长期荷载作用下具有优异的变形稳定性。

3.2 永久变形占比分析

永久变形占总变形的比例, 是衡量系统是否处于健康、以弹性为主导工作状态的关键指标。

表2: 最大验证荷载 (1.25 T_p) 下的永久变形占比

锚索编号	总变形量 Stotal(mm)	永久变形量 Spermanent(mm)	永久变形占比
No.3	111.46	16.58	14.88%

分析与规范对照:

3.2.1 行业准则: 国际岩土工程界广泛采纳的经验法则是, 在验证荷载下, 永久变形量占总变形量的比例不应超过20%~30% (即弹性变形应占据主导地位, 达70%~80%以上)。这一原则在BS8081:2022^[4]等权威规范中有所体现。

3.2.2 数据评估: No.3的永久变形占比仅为14.8%左右, 远低于30%的保守上限。这强有力地证明, 卸载后绝大部分变形得以恢复, 系统整体上表现为以弹性响应为主, 锚固段岩体并未发生不可接受的宏观剪切破坏或滑移。

3.2.3 永久变形成分: 实测的永久变形值是由岩体内部裂隙压密与局部塑性屈服、钢绞线微塑性变形、锚墩下岩土体压实以及张拉系统自身的装配间隙闭合等多种因素叠加产生的。因此, 一个数值较小但非零的永久变形, 是真实且合理的^[5]。

结论: 基于最终验证荷载下的性能表现, 该锚索的永久变形指标高度合格, 满足国际通用标准。

3.3 弹性变形符合度分析

弹性变形的实测值与理论计算值的一致性, 是验证设计参数准确性、材料性能以及张拉施工工艺可靠性的重要尺度。

表3: 1.0倍设计荷载下弹性变形符合度

锚索编号	实测伸长值(mm)	理论弹性变形(mm)	符合度
No.3	78.22	86.86	90.05%

分析如下:

理论伸长值 (或弹性变形) 基于胡克定律计算, 充分考虑了自由段及外露段钢绞线的弹性拉伸。EN1537:2020等规范通常允许实测值与理论值之间存在 $\pm 10\%$ 的合理偏差 (即90%~110%的符合度范围)。

如表3所示, 在1.0倍设计荷载下, 实测弹性变形值与理论计算值的符合度为90.05%, 落在EN1537:2020允许的90%~110%合理区间内, 验证了设计与施工的可靠性。

整体初步结论: 基于上述三项指标, No.3锚索性能初步判定合格。但其荷载-变形过程中呈现的非线性趋势仍需深入解读^[2]。

4 异常现象描述

No.3锚索的永久变形累积量在0.7 T_p 至0.9 T_p 荷载区间 (420kN至540kN) 出现显著加速增长 (见图3及表4), 具体表现为:

0.7 T_p 时永久变形累积量为4.16mm, 较上一级增量达2.30mm;

0.8 T_p 时为6.84mm, 增量2.68mm;

0.9 T_p 时增至12.98mm, 增量达6.14mm。

随后在1.0 T_p 及1.25 T_p 荷载下, 增量分别降至3.02mm和0.58mm, 增长速率急剧放缓。这种荷载-变形曲线中段的“非线性凸起”是引发外方疑虑的主要焦点^[5]。

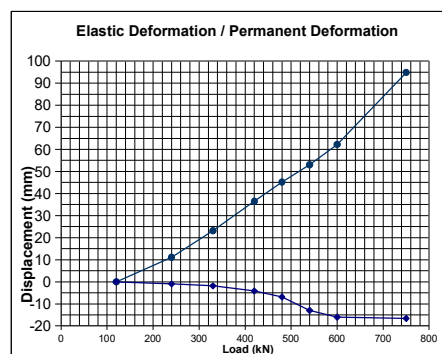


图3弹性形变与永久形变趋势图

表4: No.3锚索永久变形累积与增量

荷载等级($\times T_p$)	永久变形累积量(mm)	相邻等级增量(mm)
0.4	0.98	0.98
0.55	1.86	0.88
0.7	4.16	2.30
0.8	6.84	2.68
0.9	12.98	6.14
1.0	16.00	3.02
1.25	16.58	0.58

5 基于岩土力学的机理分析

我们认为,这一现象并非系统失效征兆,而是锚固段岩体在受力过程中的真实力学响应:

5.1 应力触发与局部调整:当荷载增至0.7-0.9倍设计荷载区间时,传递至该束锚索6米长锚固段上的剪应力,可能恰好达到了该特定位置岩体中原有裂隙网络、节理面或相对软弱夹层的屈服强度临界点。

5.2 塑性区发展与非弹性压密:该区域内,岩体不再表现为纯弹性,而是发生局部塑性屈服、裂隙被进一步压密闭合。该过程消耗额外能量,宏观上表现为永久变形增量显著上升,实质是岩体内部的应力调整与自我强化。

5.3 应力重分布与新平衡建立:一旦这个局部塑性区充分发展并形成一个新的、类似“梨形”或“灯泡形”的应力分布区,荷载便能更有效地向更深部、更完整的岩体传递。至此,系统完成了一次内部调整,建立了一个新的、更高荷载水平的稳定平衡状态。这恰好解释了为何在随后1.0Tp及1.25Tp的更高荷载下,永久变形增量急剧减小,系统表现出更强的稳定性。

6 与国际规范的符合性论证

6.1 最终状态优先原则:ASTMD4435与EN1537:2020强调“基于性能的验收”,即关注系统在验证荷载下是否安全稳定。No.3锚索在1.25Tp下蠕变值极小(0.1mm)、永久变形占比低(14.88%)、变形完全收敛,满足终极性能要求。

6.2 收敛性作为关键判据:规范要求变形必须在观测期内收敛。值得注意的是,即使在永久变形增量较大的0.7-0.9Tp荷载级,该锚索的蠕变数据仍显示快速收敛,表明变形过程可控、非发展性。

6.3 试验的诊断价值:这种荷载-变形曲线的非线性特征,非但不是缺陷,反而具有重要的工程诊断价值。通过试验数据的理性分析,本质上真实揭示了锚固段岩体的非均质性和实际力学特性,验证了在设计荷载下,系统在经历可能的内部调整后,依然拥有充足的安全裕度来承受更高的验证荷载。

7 综合讨论与工程启示

7.1 思维转变:从理想模型到真实响应

在复杂地质环境中,应接受试验数据可能呈现非线性特征。工程师需培养诊断式分析能力,区分外部干扰与岩体自身力学响应,并基于系统最终状态进行判断。

7.2 规范的情景化应用

应用国际规范应理解其“基于性能”的核心理念,而非机械套用条文。验收的根本标准在于系统在验证荷载下的安全稳定,而非过程曲线是否绝对平滑。

7.3 技术沟通策略

面对数据争议,应建立基于共享数据、透明分析和公认标准的沟通平台。通过将焦点从“是否合格”转向“如何科学理解岩体响应”,可将技术挑战转化为共识契机。

7.4 原型试验的深层价值

锚索张拉试验不仅是质量检验手段,更是珍贵的原位岩土力学试验。其所揭示的岩体非线性响应信息,对参数反演、模型校准和施工优化具有重要实践意义^[6]。

8 结论

通过对No.3锚索张拉试验数据的系统剖析,形成以下结论:

8.1 No.3锚索在0.7-0.9倍设计荷载区间出现的永久变形突变,是锚固段非均质岩体经历裂隙压密、塑性区形成并达到新稳定平衡的真实力学过程,非质量缺陷表现。

8.2 该锚索在验证荷载下表现出优异的稳定性,完全满足国际规范性能要求,具备充足安全裕度。

8.3 在国际工程项目中,应基于岩土力学原理进行数据诊断,灵活运用规范核心原则,通过专业技术沟通凝聚共识。

8.4 工程师应超越对“理想曲线”的追求,立足真实岩体行为,依据系统最终稳定状态进行工程判断,保障决策稳健可靠。

参考文献

- [1]ASTMInternational.ASTMD4435-21StandardGuideforMonitoringRockAnchors[S].WestConshohocken,PA,2021.
- [2]EuropeanCommitteeforStandardization.EN1537:2020Executionofspecialgeotechnicalwork-Groundanchors[S].Brussels,2020.
- [3]王军,刘洋,陈立平.岩土锚固系统蠕变特性试验研究与工程应用[J].岩土工程学报,2021,43(5):821-828.
- [4]BritishStandardsInstitution.BS8081:2022Codeofpracticeforgoutedanchors[S].London,2022.
- [5]张建国,杨帆,周涛.预应力锚索荷载-变形非线性响应机理与控制[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3342-3350.
- [6]程良奎,范景伦.岩土锚固新技术与发展趋势[J].土木工程学报,2024,57(1):1-12.