

岩土锚固工程的长期性能与安全评价

中冶集团建筑研究总院

程良奎

1、岩土锚固的长期性能

岩土锚固的长期性能是指工作两年以上的岩土锚固工程的力学稳定性与化学稳定性。

世界各国17项监测和检测岩土锚固工程的长期性能见下表：

岩土锚固工程的长期性能与安全评价

程良奎¹, 韩 军², 张培文¹

(1. 中冶集团建筑研究总院, 北京 100088; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430030)

摘要: 岩土锚固在我国土木、水利和建筑工程中已得到广泛应用, 其成效显著。岩土锚固的长期性能与安全评价是当前岩土工程界普遍关注的一个热点问题, 也是影响岩土锚固工程安全性的一个关键问题。对国内外重力坝、边坡、地下洞室、码头、干船坞、结构抗浮与基坑等 17 项岩土锚固工程长期性能的分析研究后指出: 锚杆设计具有足够的安全富裕度, 对锚杆结构整个长度实施完善的防腐保护, 采用和发展具有良好化学与力学稳定性的锚杆技术, 认真履行高标准的锚杆验收试验和建立完整的岩土锚固工程长期监测与维护管理体系是提高岩土锚固长期性能的主要途径和有效方法。初步建立了岩土锚固工程安全评价模式, 还论述了锚固工程危险源的辨认方法, 锚杆长期性能的监测与检测, 岩土锚固安全工作临界指标以及岩土锚固病害的处治方法。

关键词: 岩土工程; 岩土锚固; 长期性能; 安全评价; 承载力; 防腐保护; 初始预应力; 病害处治

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)05 - 0865 - 08

**LONG-TERM PERFORMANCE AND SAFETY ASSESSMENT OF
ANCHORAGE IN GEOTECHNICAL ENGINEERING**

表 1 国内外部分岩土锚固工程的长期性能^[2~8]Table 1 Long-term performance of partial ground anchorages^[2~8] at home and abroad

国家或地区	工程类型	工程名称	锚杆(索)安设年份	锚杆锁定荷载/kN	长期性能简要概述	原因分析	处治措施
阿尔及利亚	重力坝锚固	切尔伐斯坝加高工程	1934	10 000	使用 35 a 后锚杆荷载平均损失率 5%(按国内外有关规范规定, 锚杆荷载变化 < 10%, 都是容许的)		
法国	重力坝锚固	朱克斯坝工程	1974	1 300	使用几个月后, 有几根锚杆锚固段出现钢绞线断裂现象	锚杆的应力水平为筋体抗拉强度极限值的 67%, 导致筋体在高拉伸状态下应力腐蚀	
南非	挡土墙锚固	普莱顿湾上游围堤	1986~1989	-	8 a 后检查(包括检测)所有锚杆状态良好	优良的防护系统和完全有效的封孔灌浆, 阻止了水和空气接触钢绞线与锚头	
	高架桥锚固	娄里爵士通道高架桥	1983~1984	1 062	10 a 后对 10% 的锚杆进行了拉拔试验, 情况良好。一般锚杆荷载损失 0.5%~5%, 有 2 根锚杆荷载分别增加 0.06% 和 0.006%, 拆开 3 根以混凝土包裹的锚杆, 仅锚头有轻微腐蚀, 筋体未有腐蚀, 无蚀坑为抑制充泥层理面的顺层破坏, 1976 年用 145 根承载力为 500 kN 的锚杆锚固边坡, 至 1978 年 6 月, 锚杆测力计显示, 锚杆荷载已超过锁定荷载值的 60%, 于是新安装了 15 根 750 kN 锚杆, 并将原锚杆的荷载调整到原设计载荷的 120%(600 kN)。此后锚杆荷载仍不断增加, 到 1979 年, 经抗拔试验表明, 所有锚杆的现存承载力下降。1981 年 8 月, 该区大雨后, 边坡继续位移, 锚杆荷载进一步增加, 开挖检查到某些锚杆在紧挨锚头之下出现腐蚀	锚头轻微腐蚀是由于验收试验后混凝土封闭的时间延误了 28 d	
	边坡防护	德班外环线与萨尼亚道路立交桥	1975~1981	500~750		锚杆的安全系数小于 1.5; 附近有一条铁路, 存在杂散电流; 边坡存在持续位移, 节理裂隙张开, 使锚杆暴露于地下水的侵蚀环境中	将所有锚杆的工作荷载降低到原设计值的 30%; 对锚头下方的空隙重新灌浆; 并新安装了 160 根锚杆, 确保锚杆的安全系数大于 1.5。此后又经历了 11 a, 情况良好
	边坡锚固	佛罗伦萨沃塞斯特边坡工程	1989	300~21 700 (312 根)	使用 6 a 后, 对 10% 的工程锚杆进行了抗拔试验, 锚杆现存的承载力比锁定荷载低 15%~20%	地下水呈酸性(pH 值为 4.78~5.00), 75% 锚杆在锚固段上部未封孔灌浆。锚头下方钢绞线张拉后裸露	计划于次年进行抗拔试验并采取相应的处治措施

	钢板桩 锚固	泰晤士河 锚拉钢桩	1969	500	使用 21 a 后, 即 1990 年 2 月 26 日锚杆杆体断裂; 钢板桩倾倒, 离开原来的起重机平台近 30 m	锚杆的防护存在严重 缺陷, 1~2 根锚杆首 先腐蚀破坏, 引起相 邻锚杆超载, 出现成 排钢板桩倾倒, 包括 有 2 根锚杆固定的系 统钢板桩也出现倾倒 对所有工作锚杆进行 并通过 1.5 倍工作荷 载的验收试验, 安装 测力计的锚杆锚头采 取良好的防腐处理
英国	结构抗 浮	利物浦桑 登多克废 水处理工 程	1985	1 950	对 65 根锚杆中的 9 根安装了测力计, 经 10 a 的监 测, 锚杆初始荷载(锁定荷载)变化为 -2%~+3%, 性能良好	
	综合码 头和干 船坞锚 固	普利茅斯 德文波斯 皇家造船 厂	1971~ 1974	2 000	对在海水中工作了 22 a 的全部锚杆(224 根)进行了 抗拔试验表明(并以最保守的方法评估), 锚杆能承 受的工作荷载降低了 61%(14 [#] 船坞)和 38%(15 [#] 船 坞), 未完全用护套并暴露在轻微腐蚀环境中的钢绞 线, 在工作 22 a 后直径缩小了 1~2 mm	按评估的锚杆荷载继续 使用, 并增补锚杆, 以 满足工程设计的锚杆抗 力 对每根锚杆的上下方喷 补防腐材料, 锚头上部 裸露的钢绞线涂油脂并 加上护套
美国	挡土墙 锚固	-	1974	210	采用 $\phi 35$ mm 的钢筋锚杆背拉挡土墙; 使用 2 a 后, 其中几根锚杆断裂, 并像标枪一样由墙内飞出	筋体未加防护, 该区 域有烧煤的火车头掉 下的煤渣形成硫酸, 使地下水具有腐蚀性
德国	重力坝 锚固	EDER 大 坝	1992~ 1993	4 500	对 104 根锚杆进行拉拔试验, 在 26 个月后, 锁定荷 载平均损失为 1.4%, 也未见腐蚀征兆, 长期性能良 好	对全部锚杆实施并通 过了验收试验, 施加 预应力荷载是在几周 或几个月内采用锁定 荷载(4 500 kN)的 50%, 80%和 100%的 间隔分步骤施加
中国 香港	挡土墙 锚固	-	1977	1 050	3 a 后检查, 有 1 根锚杆自由段处的 2 根钢绞线腐蚀 破坏, 对 45 根锚索金相检验表明, 对自由段锚筋采 用涂油套管保护前裸露 1~8 个月及 16~36 个月的 钢绞线, 直径分别减少 2.7%和 12.0%	锚头下方无防腐保 护, 在锚杆张拉与锚 头封闭保护期间有很 长时间耽搁

续表 1

国家或地区	工程类型	工程名称	锚杆(索)安设年份	锚杆锁定荷载/kN	长期性能简要概述	原因分析	处治措施
瑞士	管线桥墩锚固	-	1976	1 130~1 150	使用 5 a 后,有 3 根锚杆锚固段筋体(距自由段 0.5 m)处出现腐蚀断裂,导致锚固桥墩破坏引发倒塌	锚杆锚固段处于透水的填土和砾石层中,地下水含硫酸盐和氯化物,施工质量低劣,缺少压水试验,锚固段仅采用水泥浆简单防腐,注浆量也	不足
中国	坝基锚固	安徽梅山水库坝基锚固工程	1963	2 400~3 240	使用 8 a 后,3 根锚杆的部分钢丝(直径 $\phi 5.0$ mm)出现断裂	承载力为 3 240 kN 的锚杆杆体由 165 根钢丝组成,钢丝受力不均,控制应力过高,引起应力腐蚀	
	边坡工程	西南某大型边坡锚固工程	1990	1 500~2 000	使用 10 a 后,部分锚杆锚头拆开后检查,锚具与钢绞线出现锈蚀	外露筋体及锚具未及时封闭,锚头处封闭层太薄,局部仅有厚 10 mm 的砂浆	
	基坑支护	北京华正大厦基坑工程	2004	300	3 a 后对 4 根土层锚杆进行抗拔试验,极限承载力均大于 480 kN,未见荷载损失,锚杆长期性能良好		

所调查的工程实例类型和所属国家及地区

- 国家：

阿尔及利亚、法国、南非、英国、
德国、美国、中国、瑞士、香港

- 工程类型：

混凝土坝、挡土墙、边坡、高架
桥、钢板桩、地下工程、基坑、码头、
结构抗浮

国内外**17项**锚固工程长期性能结果表明：

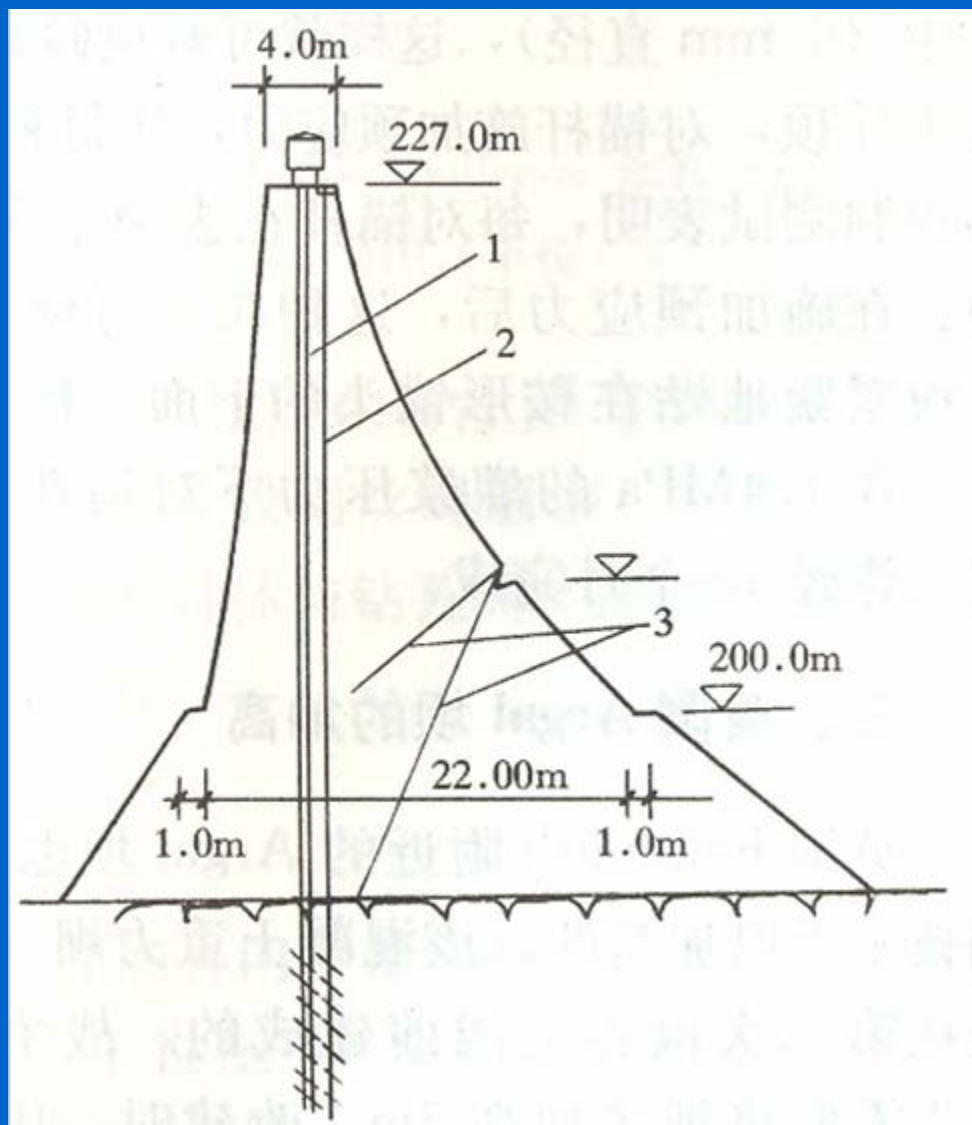
长期性能	工程项目	所占比重
良好	7	41.2%
基本良好、局部出现病害	5	29.4%
恶化、出现严重工程病害	5	29.4%

具有良好的长期性能的锚固工程的基本条件：

- 足够的设计安全度
- 全面有效的防腐措施
- 严格规范的锚杆（索）验收试验

反之，则会引发长期性能恶化与工程危害：

- 锚杆承载力显著下降；
- 被锚固地层与结构物变形急剧发展；
- 筋体与锚具锈蚀，筋体截面减小乃至断裂等



- 1—锚杆，10MN；
- 2—1967年安装的锚杆，2MN；
- 3—排水孔

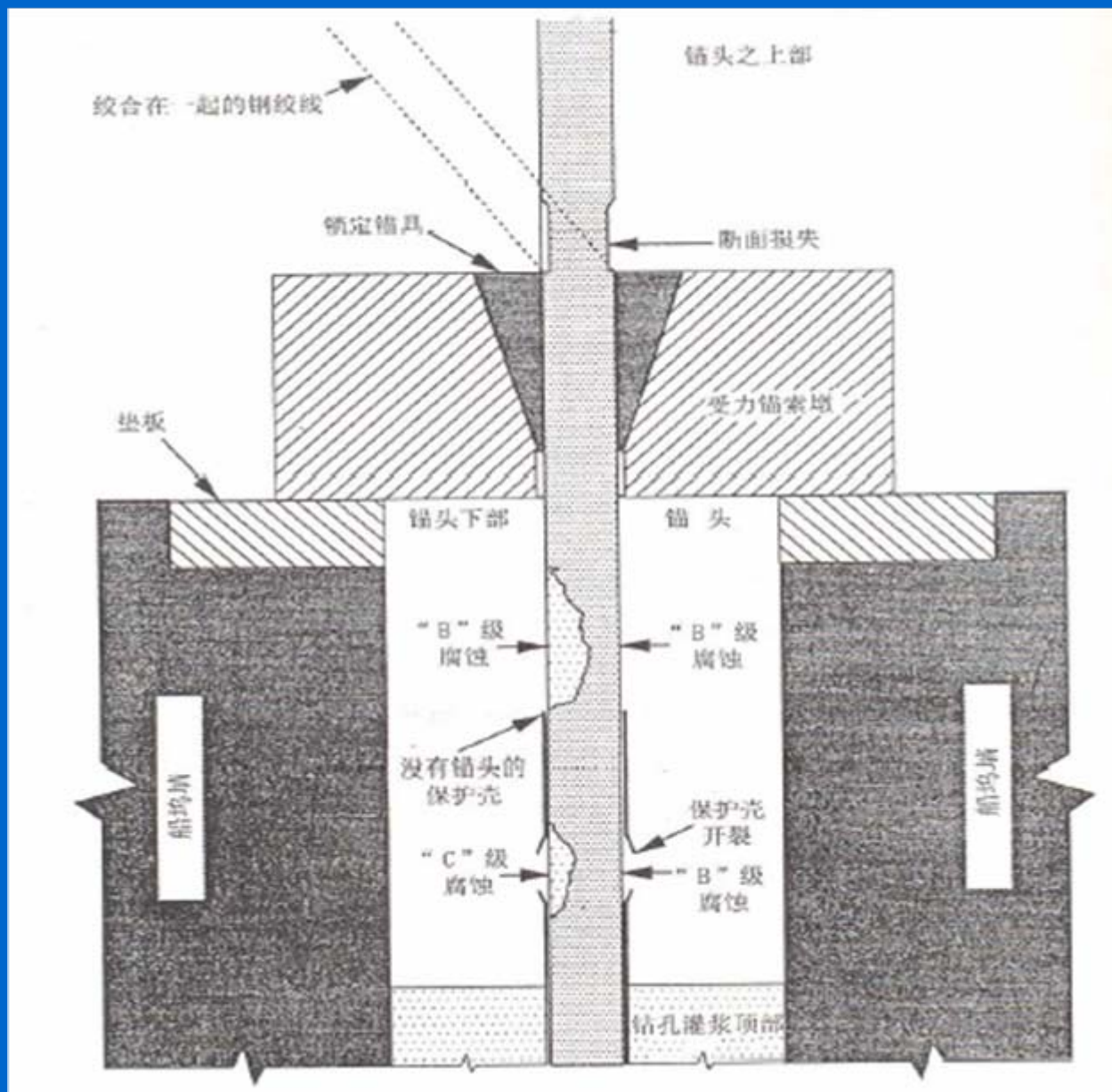
世界上第一座采用锚固技术的重力坝
—阿尔及利亚舍尔法坝

该坝用**10MN**的预应力锚杆加固**20**年后，
锚杆预应力损失达**6%**，**30**年后锚杆预应力又
损失**3%**，共计损失达**9%**，后用**20**余根
2.0MN的锚杆至今，使用状况良好。

南非某立交桥边坡 .使用2a后边坡位移严重，测力计显示，锚杆荷载超过锁定荷载的60%，将所有锚杆的工作荷载降低到原设计值的30%，并重新安装了150根锚杆，确保安全系数大于1.5，此后又经历11a，情况良好。

英国普利茅斯皇家造船厂核潜艇修理，兴建一综合码头，需对原船坞墙加固，共需安装 331 根（包括原 220 根）锚索。

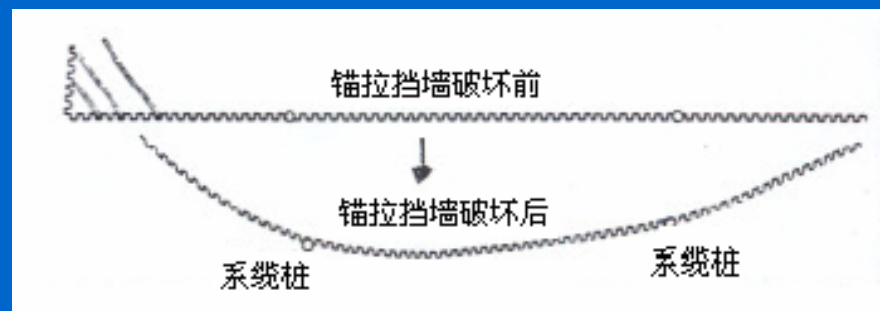
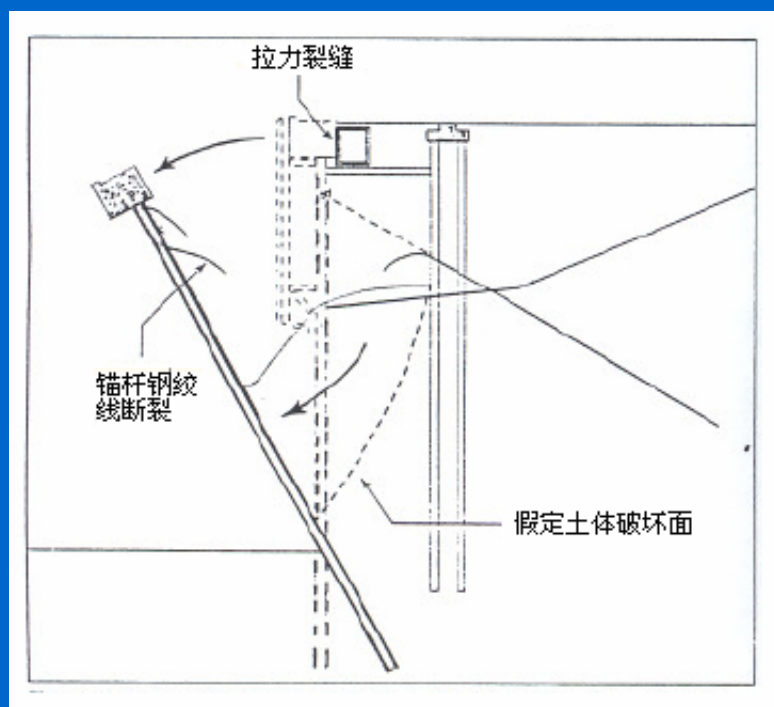
对原 220 根在海水中工作 22 年锚索进行了腐蚀和极限承载能力的测试，局部锚杆的现有承载力的仅为原有锚杆承载力的 39%。临近锚头自由段钢绞线出现了严重腐蚀。



锚头钢绞线典型断面图以及腐蚀分级

英国泰晤士河某锚拉挡土墙工程

工作21a后，因锚杆断裂出现钢板桩倒塌。



国内西南某大型边坡因锚头的保护层 过薄出现了腐蚀



锚头保护层龟裂





凿开后锚具及钢绞线的锈蚀



锚索使用 10 年后锚头防护油脂漏光

出现工程病害的原因：

- 锚杆设计安全度不足，导致被锚固的结构物变形急剧发展，而地层裂隙断开，又为裂隙水的侵蚀提供了契机；
- 局部锚杆失效，使邻近锚杆超载而引发大面积破坏；
- 锚杆控制应力（锁定荷载）大于抗拉强度标准值的60%，引发钢绞线应力腐蚀；

- 临近锚头的自由锻筋体裸露，封孔灌浆不到位；
- 长期工作在海水或酸性水侵蚀环境中，且锚杆自由段筋体无套管防护；
- 锚杆工作范围遭受杂散电流；
- 锚头保护层厚度不足而开裂，大气水入渗而腐蚀。

2、提高岩土锚固性能的途径和方法

(1) 锚杆设计应有足够的安全度

- 安全系数；
- 自由段长度（永久自由）；
- 传力结构与基底岩土体的承载力相适应；
- 正确评价作用于结构物的极端荷载；

(2) 建立有效的锚杆（索）防护体系

- 准确诊别工作环境的腐蚀程度
- 双层防护
- 自由段永久自由，确保荷载传递给锚固段地层
- 锁定后务必进行密封灌浆
- 钻头保护层厚不小于5cm
- 采用环氧涂层钢绞线
- 电绝缘性能测试锚杆防护体系质量

电绝缘性能测定法用于测定锚杆防护系统的完善性

(已收入瑞士和欧洲锚杆规范)

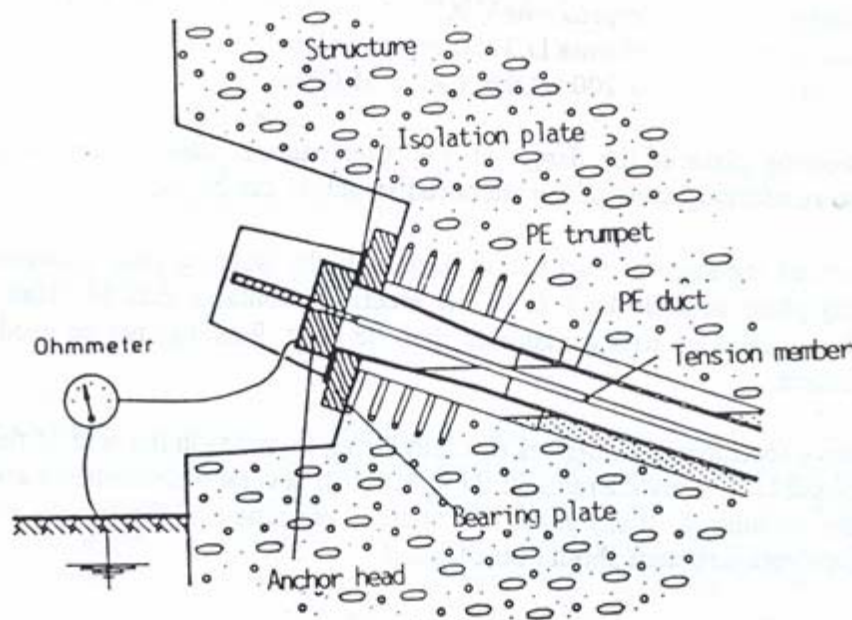
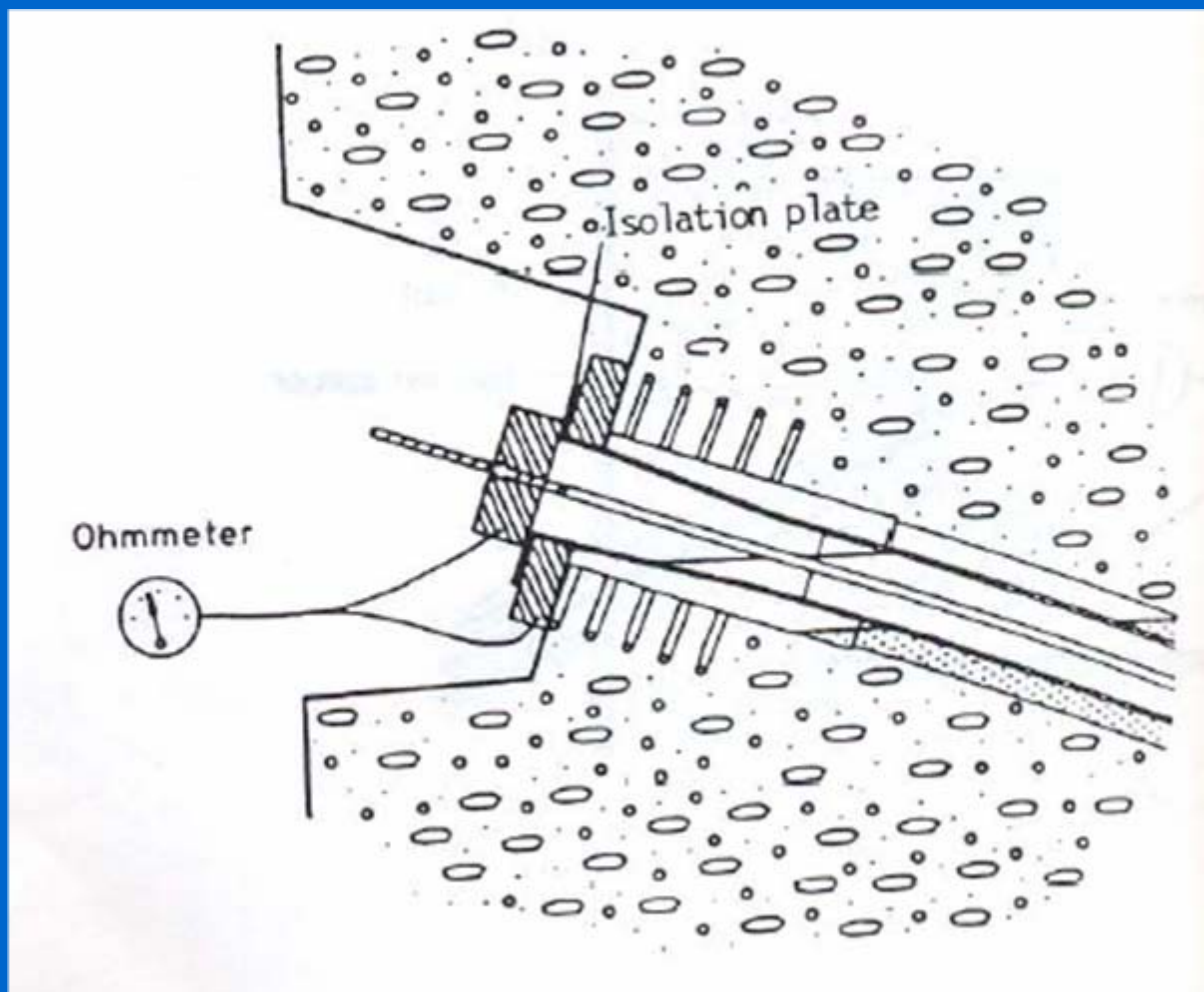


Fig. 1: ERM I at the stressed anchorage

锚杆杆体与地层之间的电阻值:

$$R_I \geq 0.1 M\Omega$$

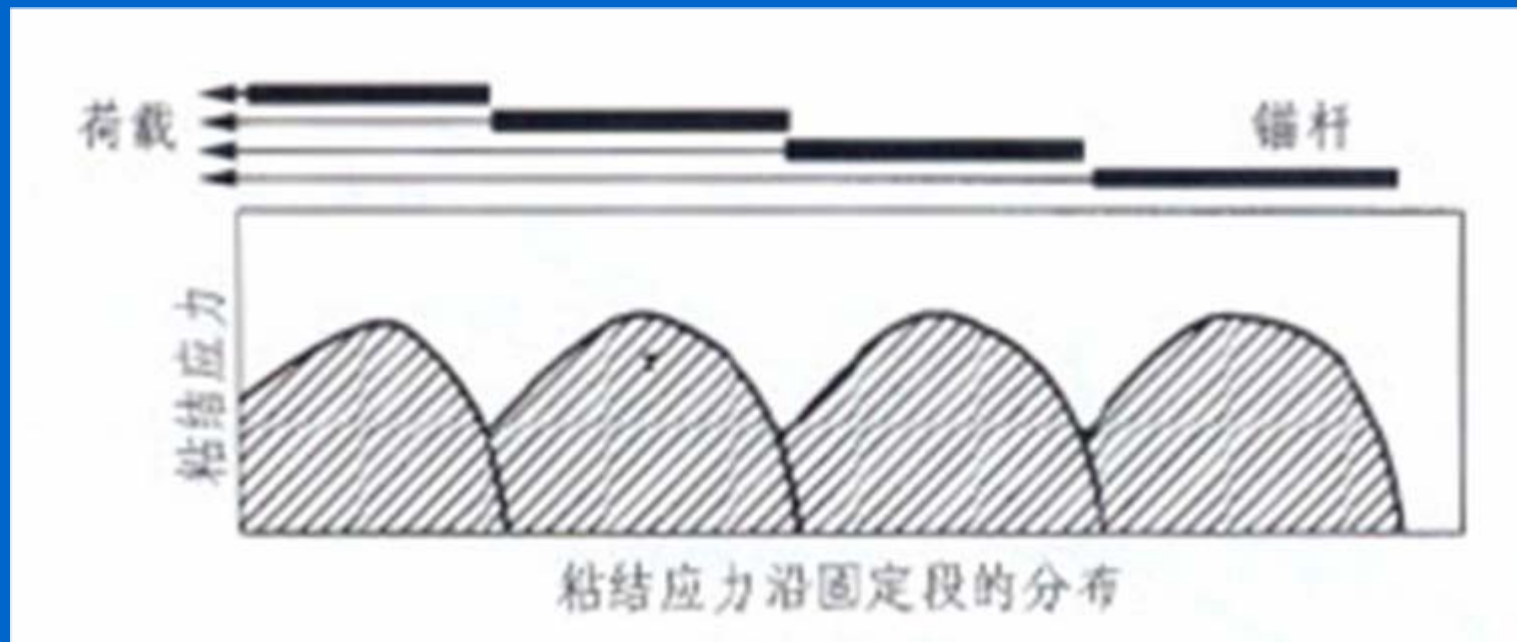


锚头与承载板间的电阻 $R_{II} \geq 100M\Omega$

(3) 发展能改善力学与化学稳定性的锚固结构

——复杂岩或土层中的锚固

推行剪应力分布均匀、蠕变变形小的
压力分散型锚杆



——在节理裂隙严重发育或溶蚀性岩层中工作
发展袋式挤压型锚杆

——在变异荷载条件下工作
发展扩体型锚杆，以抑制附加位移

——在海水或强腐蚀性地层中工作
可考虑采用环氧涂层钢绞线、纤维增强塑料等筋体材料

(4) 认真履行锚杆的验收试验

锚杆验收合格的条件：

验收试验荷载

永久： $1.5N_T$

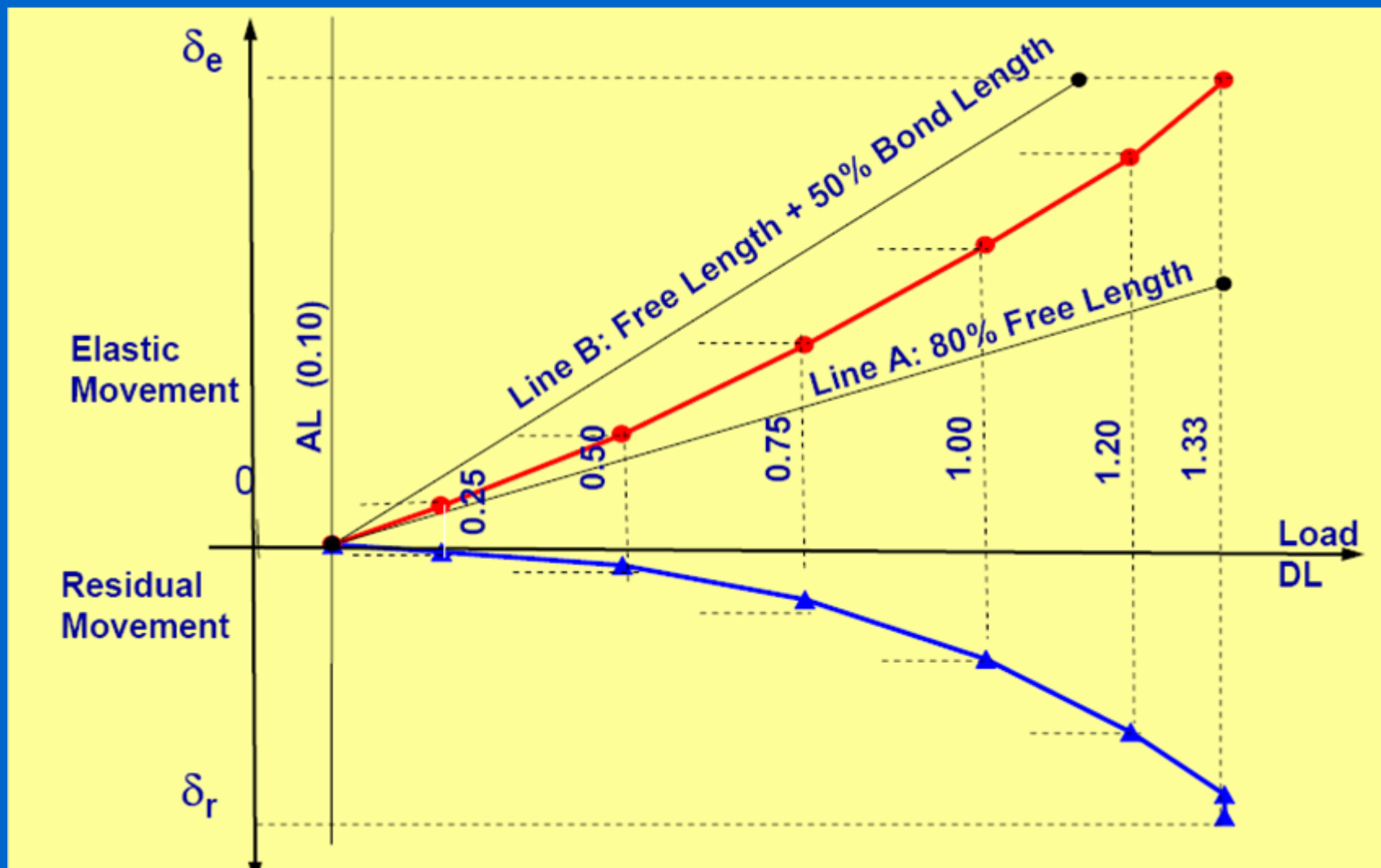
临时： $1.2N_T$

蠕变量 $1\sim 10\text{min} \leq 1.0\text{mm}$

$6\sim 60\text{min} \leq 2.0\text{mm}$

弹性位移应满足要求

弹性位移应满足要求

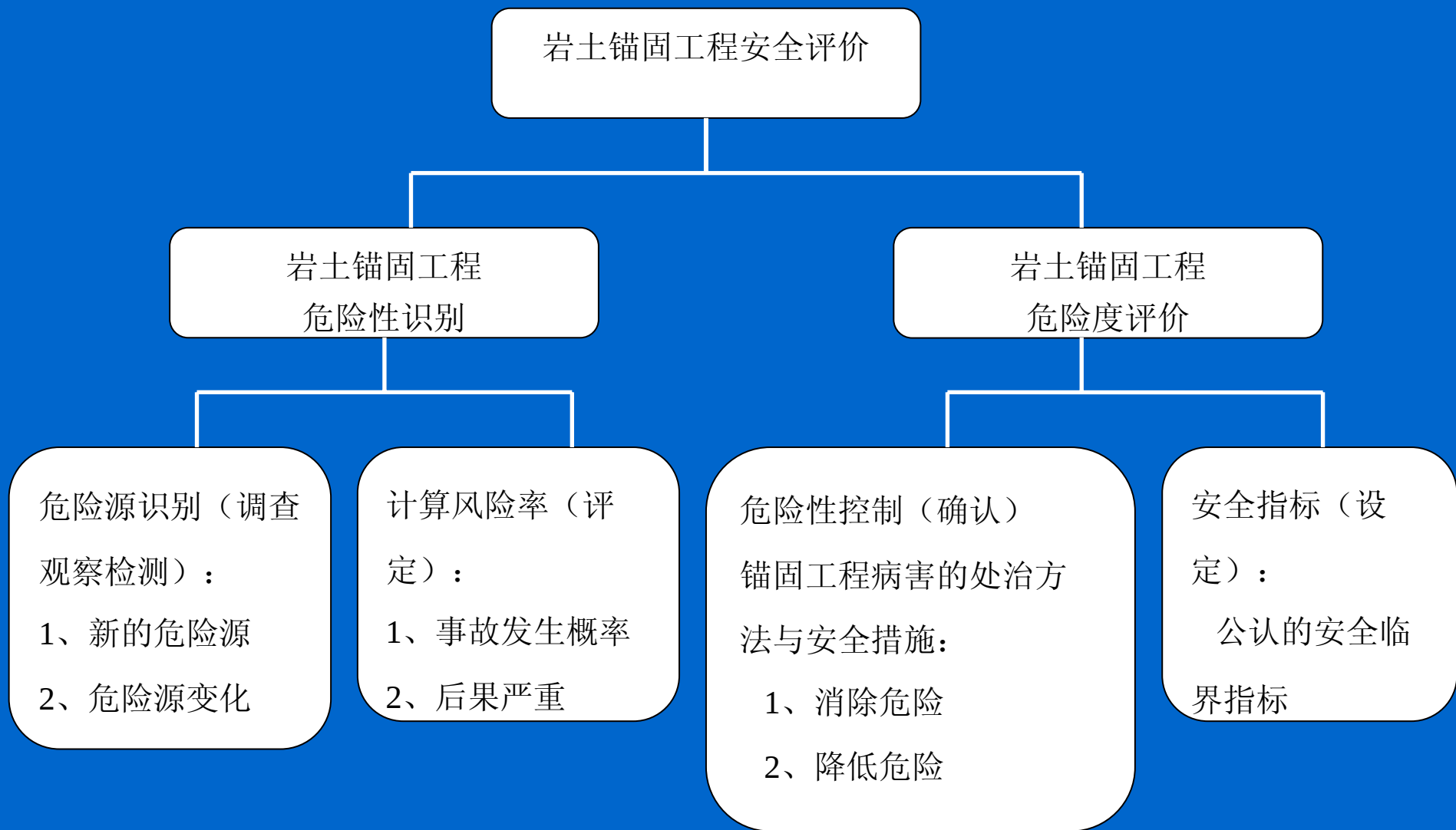


(5) 建立完整的锚固工程长期监测与维护管理体系

对岩土锚固工程建立完整的锚杆长期性能监测、检测系统，加强对岩土锚固工程的维护管理与安全评价，切实掌握岩土锚固工程整个生命周期内的安全工作状态。对少量或个别安全度不足的锚杆，应及时采取有效的处理措施。

3、建立岩土锚固工程的安全评估体系

(1) 安全评价模式



（2）锚固工程危险源识别

——防排水设施的完好程度

——腐蚀介质或杂散电流

——暴雨及临近处开挖、爆破

——地震可能引起的砂、土液化

——锚杆及周边处结构物是否有异常变形
迹象

(3) 锚固长期性能的监测与检测

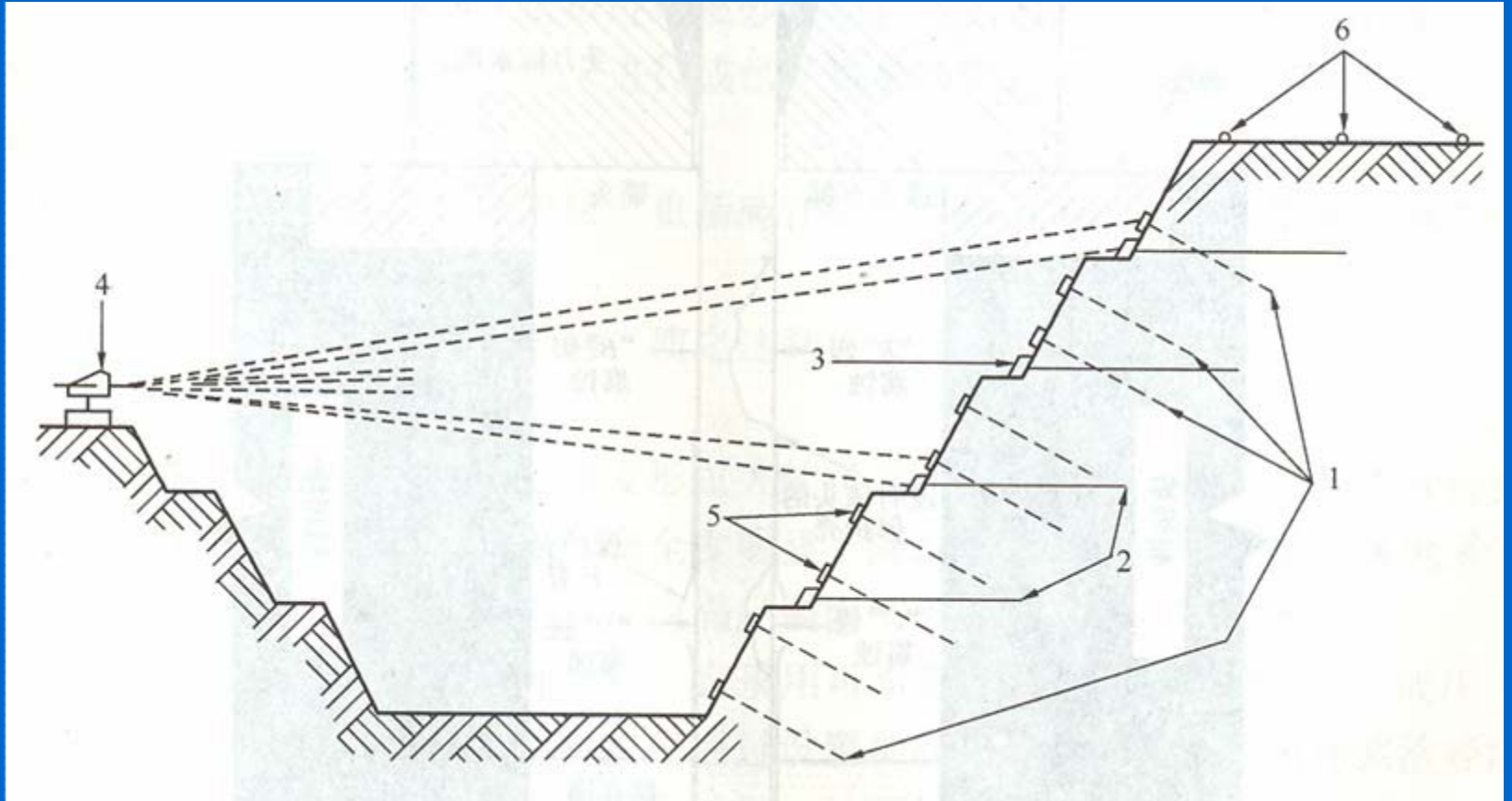
——现有的锚杆极限承载力

——锚杆初始预应力变化

——锚头位移及被锚固结构物的变位

——腐蚀情况

边坡位移监测:



边坡锚杆锚头、坡面及坡体内的位移观测图

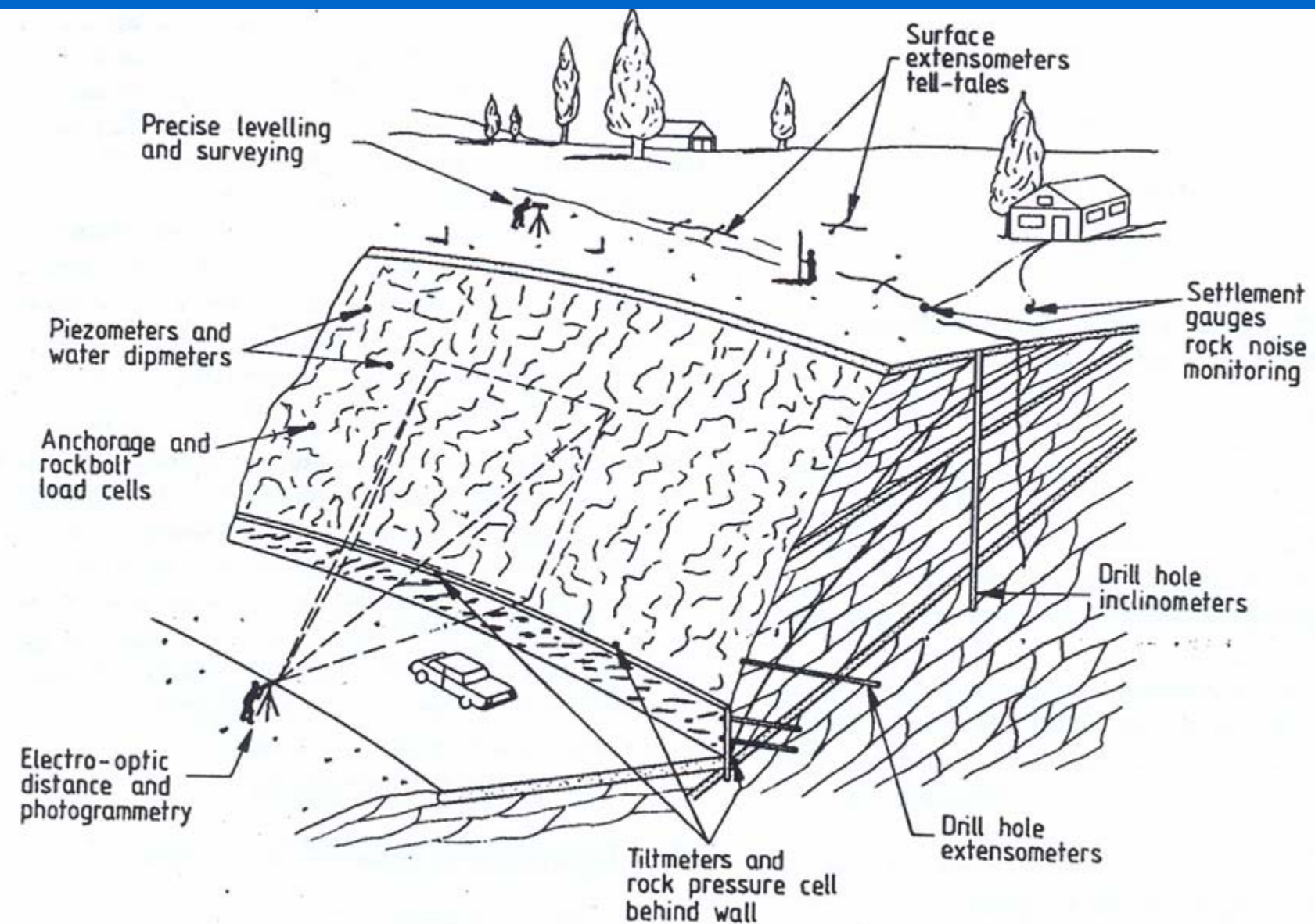
1—锚杆；2—地中多点位移计；3—多点位移计测点；
4—光波测距仪；5—锚头位移测点；6—水准测量测点

锚杆的拉力监测：



丹东前阳工程测试仪器厂生产的锚杆拉力测力计





英国普利茅斯皇家造船厂核潜艇修理，兴建一综合码头，需对原船坞墙加固，共需安装 331 根(包括原 220 根) 锚索。

对原 220 根在海水中工作 22 年锚索进行测试

- 检查锚头上部、下部的腐蚀状况
- 确定钢绞线现有承载力的拉拔试验
- 自由段长的循环加载试验
- 对锚头上下钢绞线进行金相分析及环境勘测

安全评价结论

- 15 号船坞，目前各锚杆平均可接受的工作荷载为 1243 kN。
- 14 号船坞各锚杆平均可接受的工作荷载为 781 kN，仅为原有承载力的 39%，这是由于钢绞线的机械损伤较为严重。
- 2 股钢绞线已不能工作。
- 自由段钢绞线使用了聚乙烯护套，其所受腐蚀可忽略不计。
- 裸露在海洋环境下工作 22 年的钢绞线，能继续承受较大的但在下降的剩余荷载。

(4) 工程安全临界技术指标的建议

永久性岩土锚固工程安全临界技术指标（建议值）

Tabel2 the safety critical index for permanent ground anchorages (suggestion)

项目	安全指标
●锚杆极限抗拔力	降低率 $\leq 10\%$
●锚杆初始预应力（锁定荷载）	变化幅度 $\leq \pm 10\%$
●锚杆锚头或锚固结构的位移速率与位移量	位移速率 $\leq 0.02\text{mm/d}$ 且趋于收敛
●锚杆的腐蚀状况	筋体锈蚀引起的 横截面减少率 $\leq 10\%$

(5) 岩土锚固工程病害处治

—— 一般性处治

—— 增设锚杆

—— 完善或全新建立完整的长期性能监测系统

谢谢