

程永辉

正高级工程师，博士生导师

长江科学院土工所副所长

水利部岩土力学与工程重点实验室副总工

研究领域

长期从事**水利水电工程岩土问题**的研究与新技术开发，包括**复杂地基与基础处理、岩土边坡加固及应急抢险技术、特殊岩土介质特性与工程应用**等。

研究课题

先后主持或参与完成国家科技支撑计划、国家重点研发计划、水利行业专项、水利科技推广、重大工程科研项目等30余项。

研究成果

获美国发明专利1项，国家发明专利30余项；参与出版专著4部，参编行业标准3项，发表论文30余篇。获大禹一等奖1项、湖北省发明二等奖1项、长江科技进步一等奖1项。

伞型锚快速锚固技术 及工程应用

汇报人：**程永辉**

长江水利委员会长江科学院
水利部岩土力学与工程重点实验室

中国·沈阳 2025.04.11

提纲

Outline

一 工程背景

四 技术优势

二 技术难题

五 工程应用案例

三 伞型锚技术研发



工程背景

■ 我国岩土工程灾害频发，严重威胁基础设施的建设与运行

- 我国地质条件复杂，基础设施面临的工程灾害数量多、范围广、破坏力大
- 边坡滑坡、基坑底板抗浮、隧洞大变形、结构物倾倒等是**运行期**常见典型工程问题

典型灾害

建设过程中



广西玉林市基坑垮塌



石武高铁木兰隧道塌方



鄂北调水膨胀土渠道滑坡



大盈江水电站引水隧洞塌方

运行过程中



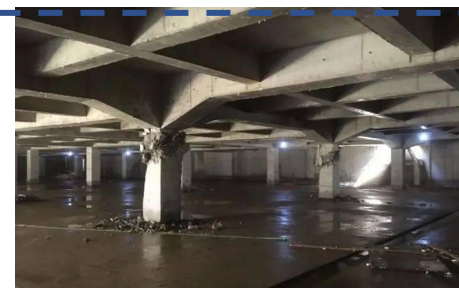
梅大高速路基滑坡



成昆铁路边坡滑坡



输变电塔倾斜



地下室抗浮事故

■ 渠道边坡工程灾害



引江济淮工程膨胀土大型滑坡现场



技术难题

二、技术难题

■ 岩土灾害的快速和高效加固是现阶段的难题

- 整体加固手段以支挡工程以及注浆锚固为主
- 浅层加固多采用框格梁进行防护



抗滑桩加固

造价高、时效性低、
扰动大



挡墙加固滑坡

加固效果差
时效性低



注浆锚杆加固

锚固力小
时效性低



框格梁加固

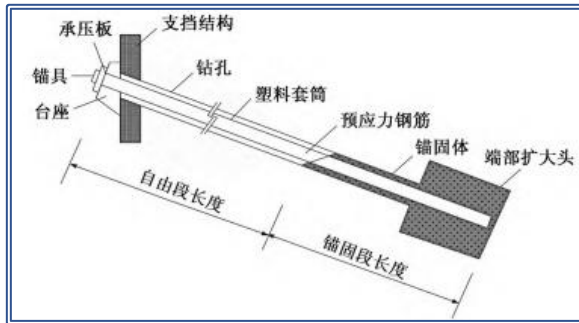
锚固力小
时效性低

常用边坡加固技术无法兼顾锚固力与时效性，无法实现岩土体快速加固

二、技术难题

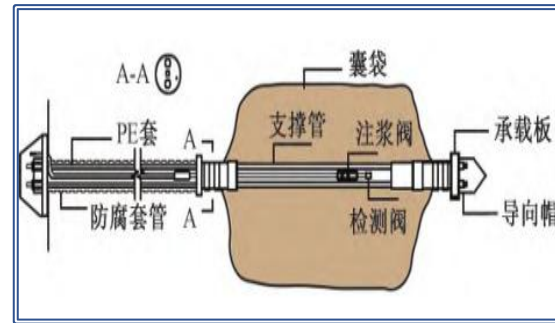
■ 机械扩体锚可实现快速高效锚固，但技术发展滞后

- 通过张拉、挤压、扭转等手段，增加锚固端作用宽度或直径，实现扩体后增强与周围岩土体的相互作用，快速提供较大的锚固能力



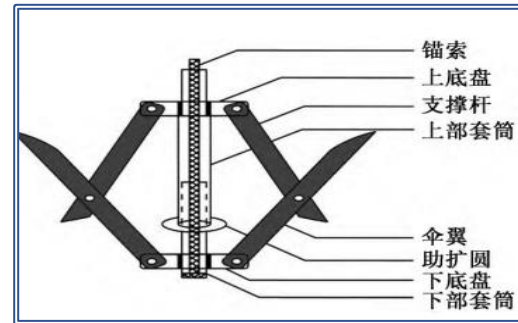
注浆扩体锚

时效性低
质量不可控



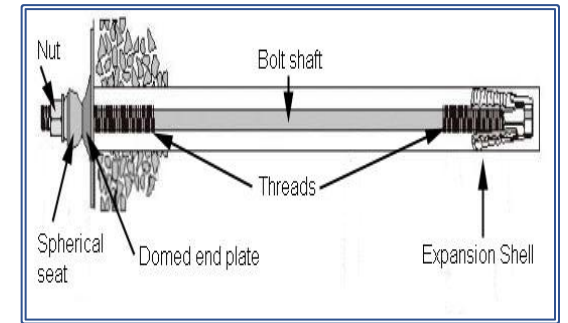
囊式扩体锚

锚固力小
工艺复杂



压涨扩体锚

锚固力小
结构稳定性差



胀壳锚杆

锚固深度小
扭胀难度大

现有机械扩体锚实用性普遍偏低，无法实现规模化应用



伞型锚技术研发

三、技术研发

■ 依托国家级、省部级等多类科研项目，开展伞型锚技术研发及理论研究

序号	项目名称	项目类型	经费 (万元)	主持/参与
1	堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备	国家重点研发专项	1912	主持课题
2	渠道边坡和渠堤工程应急抢险快速修复关键技术与装备研究	国家重点研发专项	536	主持专题
3	重大滑坡-锚固体系演化机理与设计关键技术	国家重点研发专项课题	499	参与
4	膨胀土边坡长期变形演化状态及力学机制	国家自然科学基金项目	27	主持
5	基于摄动理论的土质边坡滑动力特征辨识与预警方法研究	基本科研业务费项目	30	主持
6	新型张拉自锁伞型锚快速加固土质边坡技术的推广应用	水利部科技推广项目	145	主持
7	伞型锚土体快速锚固新技术	水利部先进技术示范项目	60	主持
8	高渗压作用下裂隙岩体流变力学特性与渗流演化机理研究	基本科研业务费项目	30	主持

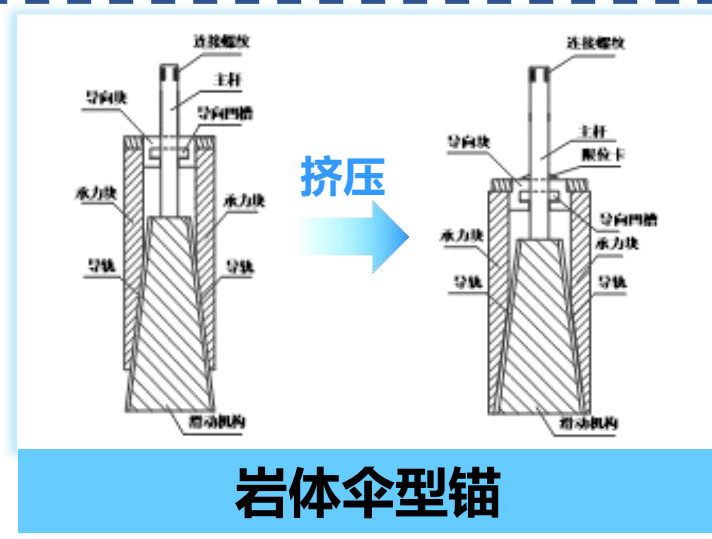
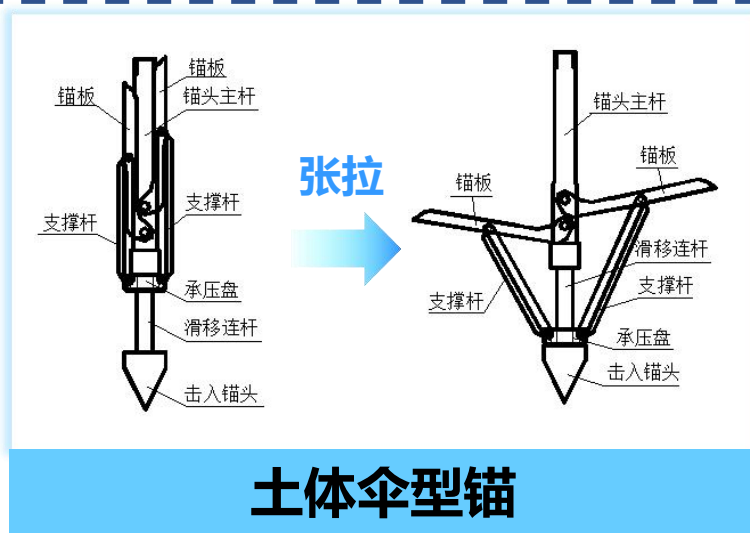
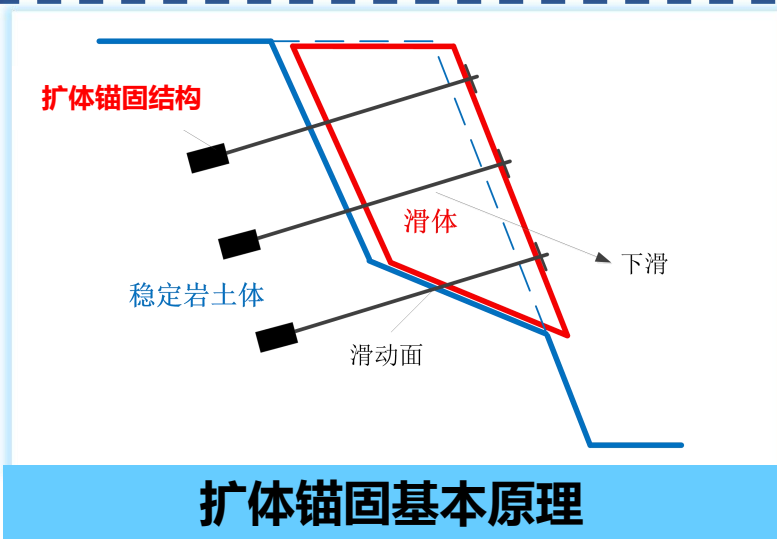
■ 研究团队在岩土锚固方面持续研究，取得了一系列原创技术

自2010年至2024年，本团队**历经14年**分阶段研发，开发了以土体和岩体伞型锚为核心的岩土体快速锚固技术

第一阶段	2010年~2015年	基本原理研究和产品开发
第二阶段	2016年~2019年	装备开发与应用推广
第三阶段	2020年~2024年	产品、设计、施工标准化

形成适用于工程建设中的**高效加固、应急抢险**的标准化技术体系

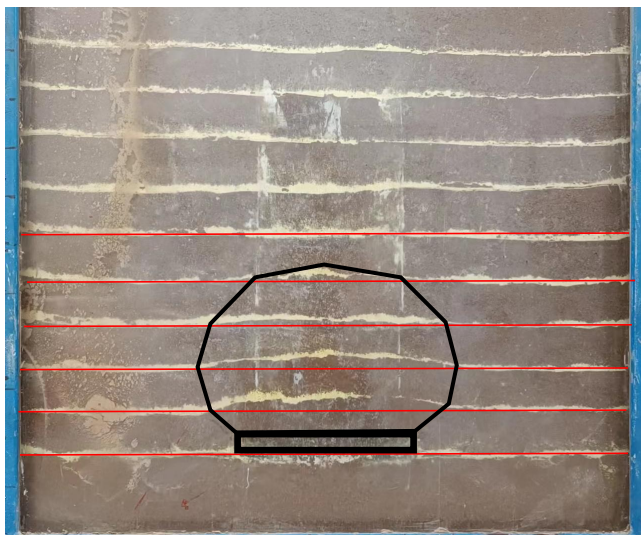
- **扩体锚固基本原理：**在滑面以下的稳定岩土体中安置扩体锚固结构，通过该锚固结构与周边岩土体相互作用，进而调动大范围岩土体自身抗力，提供即时锚固力，将滑坡体与下层稳定岩土体紧密联系起来，使滑体的抗滑力大于下滑力，阻止滑坡继续下滑，维持初始稳定状态，达到应急抢险的目的。
- **研发产品类型：**土体伞型锚、岩土伞型锚



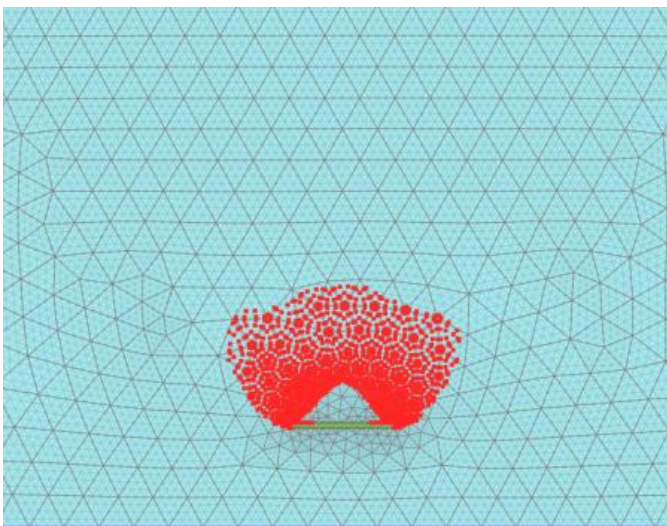
土体与岩体锚固机制差异巨大，分别开展了大量的**试验**研究工作

■ 土体伞型锚锚固机制

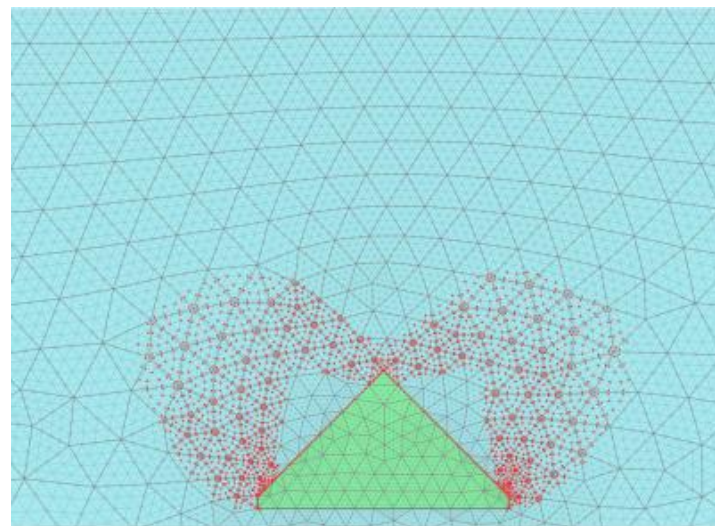
开展了系列深埋锚板拉拔模型试验，研究了拉拔过程中锚土相互作用**影响范围及破裂面形态**；在试验基础上，模拟了锚板拉拔过程，研究了板前土体的**塑性区变化规律及压密核特征**；计算分析了压密核在拉拔过程中的锚固体特征及锚固机制。



锚土相互作用范围



形成板前压密核

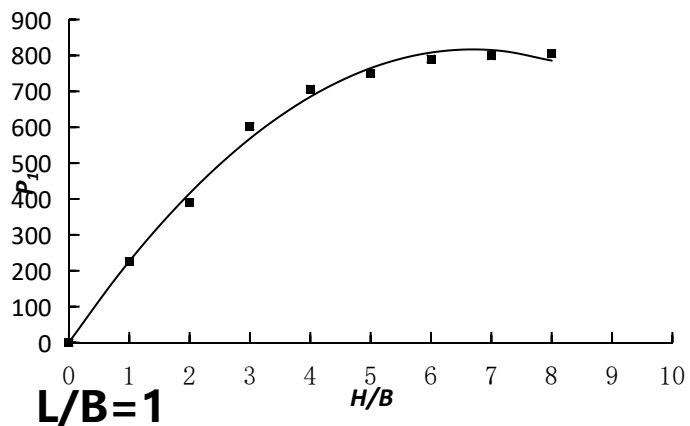


压密核位移过程中的锚固体形态

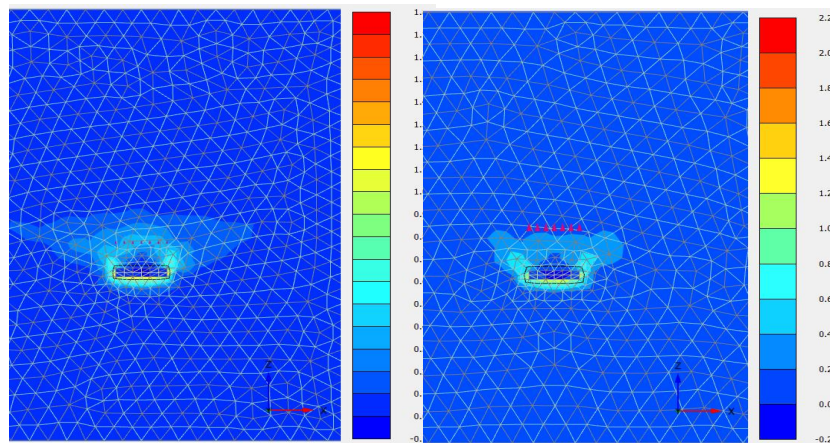
拉拔前期在板前形成板前压密核，压密核形态稳定后，与周围土体相互作用，形成形态稳定且尺寸更大的锚固体，最终由锚固体提供稳定的锚固力。

■ 土体伞型锚锚固承载特性

开展了不同埋深比的模型试验及数值计算，分析了埋深比对锚板单位面积抗拔力的影响；开展了不同锚板尺寸下的模型试验及数值计算，分析了长宽比对锚板单位面积抗拔力的影响。

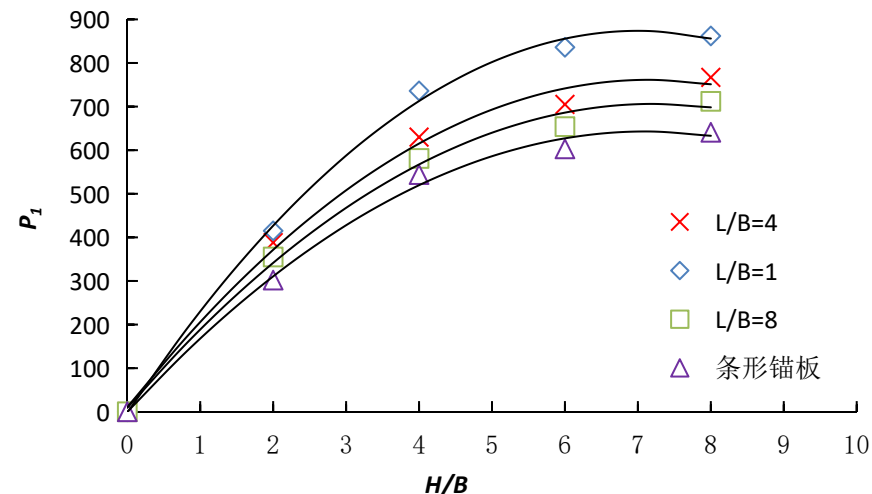


单位面积抗拔力-埋深比



L/B=4

L/B=8

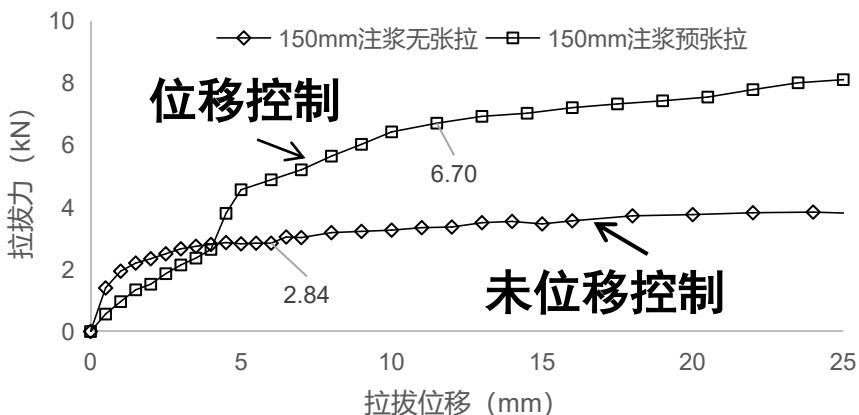


单位面积抗拔力-长宽比

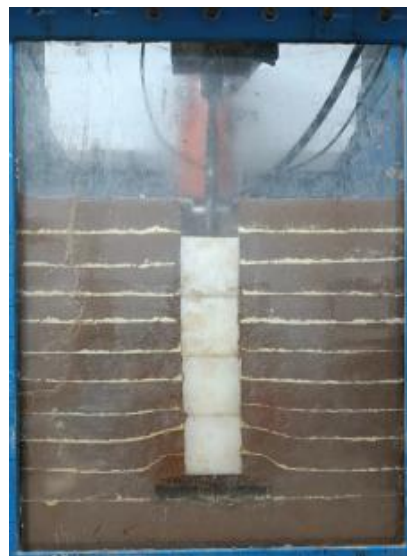
- 1、埋深比较小时，单位面积抗拔力随埋深比的增长而增长；埋深比较大时，增长趋缓；
- 2、随着锚板长宽比的增长，锚板单位面积抗拔力逐渐减小，且减小速率在降低，当长宽比 $L/B > 8$ 时，锚板单位面积抗拔力与条形锚板相近。

■ 浆-锚协同锚固

室内模拟锚板前存在注浆体的拉拔模型，测试了是否进行位移控制条件下的注浆体-锚板叠加锚固效果，并分析了位移控制条件下的浆锚协同锚固特征。



注浆体-伞型锚叠加锚固曲线



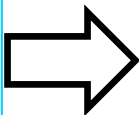
位移控制



未位移控制

协同后锚板和注浆体的叠加锚固力出现**明显的突变增加**，叠加后的锚固力明显**大于**二者单独锚固的和；注浆体-锚板叠加条件下，**拉拔影响范围**会出现一定程度的增加。

■ 土体伞型锚施工工法



钻孔



下锚



注浆



张拉



钻孔



浆锚隔离



注浆



张拉

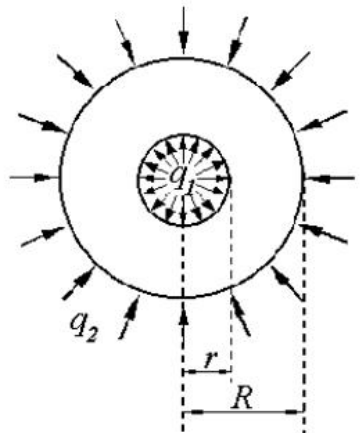
形成伞型锚的高效加固与应急抢险等工程的标准化技术体系



■ 岩体伞型锚锚固机制

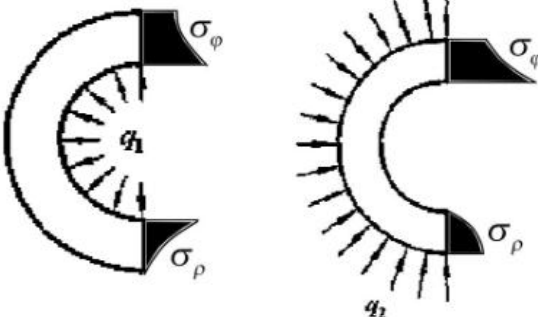
利用圆孔扩张理论，推导了弹性阶段锚杆拉拔力与锚头径向变形的关系。

圆筒受均布压力问题



应
力

变
形



$$\begin{cases} \sigma_\rho = -\frac{R^2 - \rho^2}{R^2 - r^2} q_1 - \frac{1 - \frac{\rho^2}{R^2}}{1 - \frac{\rho^2}{r^2}} q_2 \\ \sigma_\phi = \frac{R^2 + \rho^2}{R^2 - r^2} q_1 - \frac{1 + \frac{\rho^2}{R^2}}{1 - \frac{\rho^2}{r^2}} q_2 \end{cases}$$

$$u_\rho = \frac{1}{E} \left[-(1 + \mu) \frac{r^2 R^2 (q_2 - q_1)}{\rho (R^2 - r^2)} + (1 - \mu) \frac{q_1 r^2 - q_2 R^2}{R^2 - r^2} \rho \right]$$

对于有强约束（高围压）的情况

对于无约束的情况

$$F = k_2 s = \frac{ES}{\left[-\frac{(1 + \mu)rR^2}{(R^2 - r^2)} \left[\frac{2r^2}{(1 + \mu)r^2 + (1 - \mu)R^2} - 1 \right] + (1 - \mu) \frac{r^3 - \frac{2R^2 r^3}{(1 + \mu)r^2 + (1 - \mu)R^2}}{R^2 - r^2} \right]} s$$

$$F = k_4 s = \frac{ES}{\left[(1 + \mu) \frac{rR^2}{R^2 - r^2} + (1 - \mu) \frac{r^3}{R^2 - r^2} \right]} s$$

■ 岩体伞型锚锚固机制

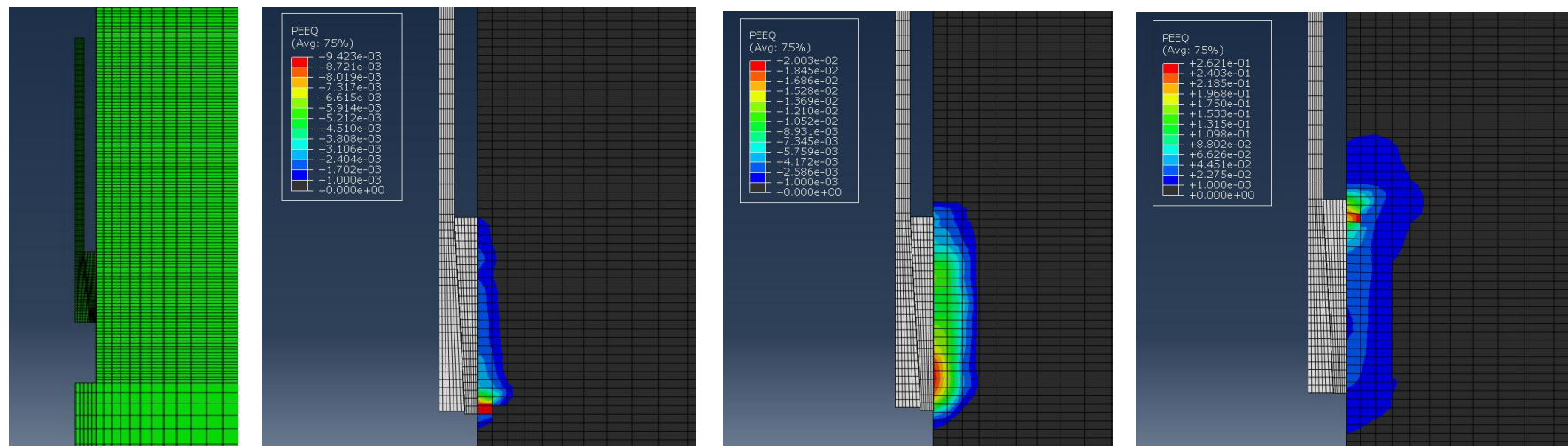
采用数值方法，分析了岩体伞型锚拉拔过程中锚杆、锚头的变形与受力特征以及岩体的塑性区发展规律。

模型：
二维平面对称模型

锚头、锚杆：
完全弹性

岩体：
摩尔库伦弹塑性本构

加载方式：
锚杆位移加载



岩体塑性区发展

- 岩体发生塑性应变后锚杆拉应力超过1000MPa
- 岩体在压剪作用下，进入塑性阶段，锚头持续向上滑移，锚头上部岩体塑性扩大，最终发生拉拔破坏

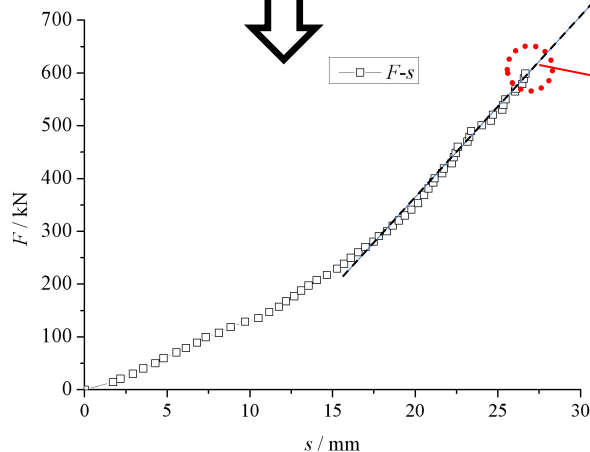
■ 岩体伞型锚锚固承载特性

开展了室内模拟试验，模拟了锚头张开后与孔壁接触挤压的过程，测试了岩锚的锚固力增长曲线。



试验布置

受锚杆尺寸和强度限制，发生锚杆断裂，最大拉拔力为600kN，锚头结构未发生明显的塑性变形



拉拔荷载-位移曲线



破坏形态（锚头直径60mm）

直径 (mm)	长度 (mm)	锚固力 (kN)
60	150	650
90	225	1460
120	300	2600
240	600	10400

不同尺寸锚头的锚固力

扩体直径可调控，适用于不同类型岩体快速加固，**适应变形能力强，潜在锚固力无限大。**

三、技术研发

伞型锚产品开发及工程应用

伞型锚在渠道边坡、隧洞等抢险加固中成功应用，走在国内前列

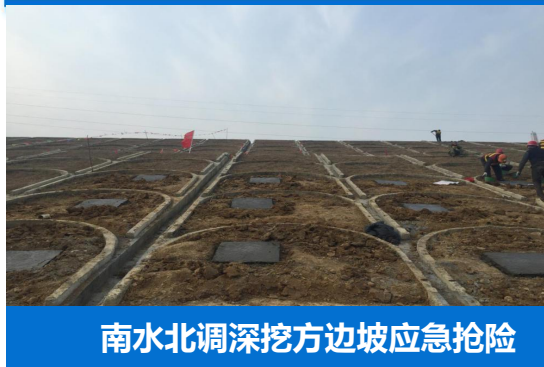
土体伞型锚



岩体伞型锚



应急抢险

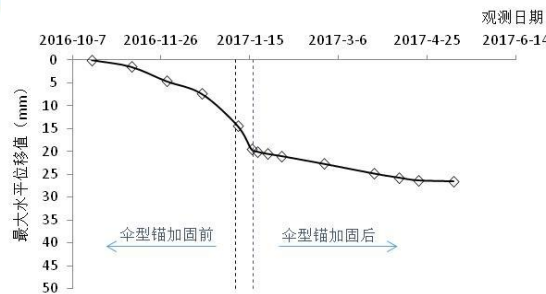


快速加固



- 南水北调中线工程辉县段防汛道路土质边坡抢险加固
- 南水北调中线工程邓州段渠道膨胀土高边坡抢险加固
- 鄂北地区水资源配置工程膨胀土高边坡加固
- 南水北调中线工程抢险物资储备
- 2020年陶岔管理处土建工程安全事故应急演练
- 湛江国际机场高边坡加固工程
- 丽江三义机场改扩建工程边坡加固工程

抢险效果



南水北调挖方边坡加固前后边坡位移

抢险表扬信



应急抢险受业主好评

三、技术研发

■ 研发团队发表SCI/EI论文**15篇**；授权专利**10项**；软件著作权**4项**；出版专著**2部**

发明专利



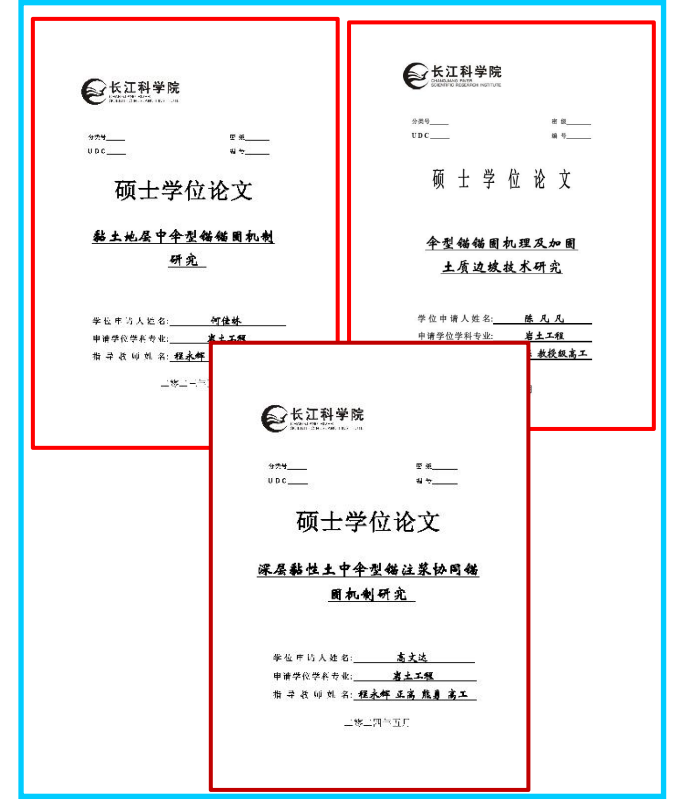
推广证书



专著/论文



研究生培养

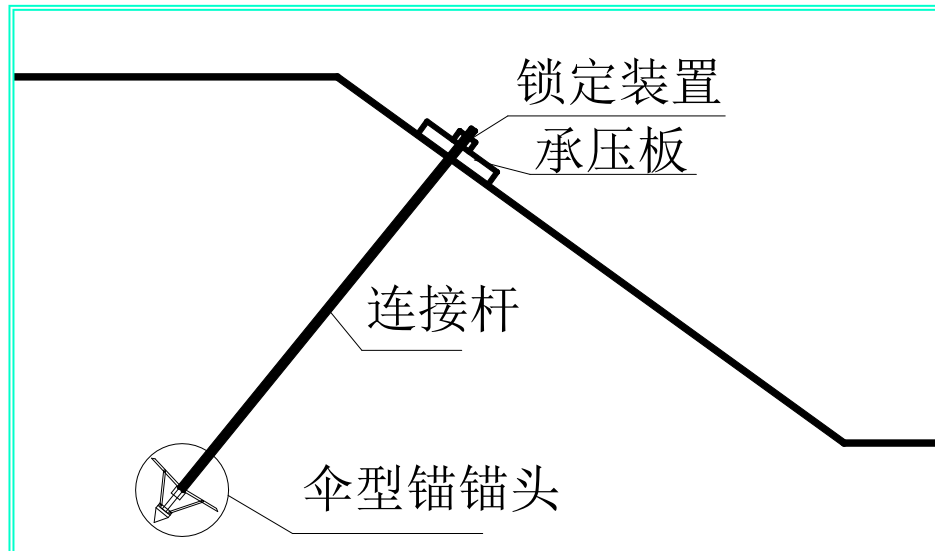


四

技术优势

■ 伞型锚加固的工程质量优势

- 可即时锚固，锚固时效性高
- 锚固力大，锚固工程质量可靠
- 具有加工硬化特性，安全余度大
- 施加预应力，变形控制和抗震能力强



土体伞型锚基本组成

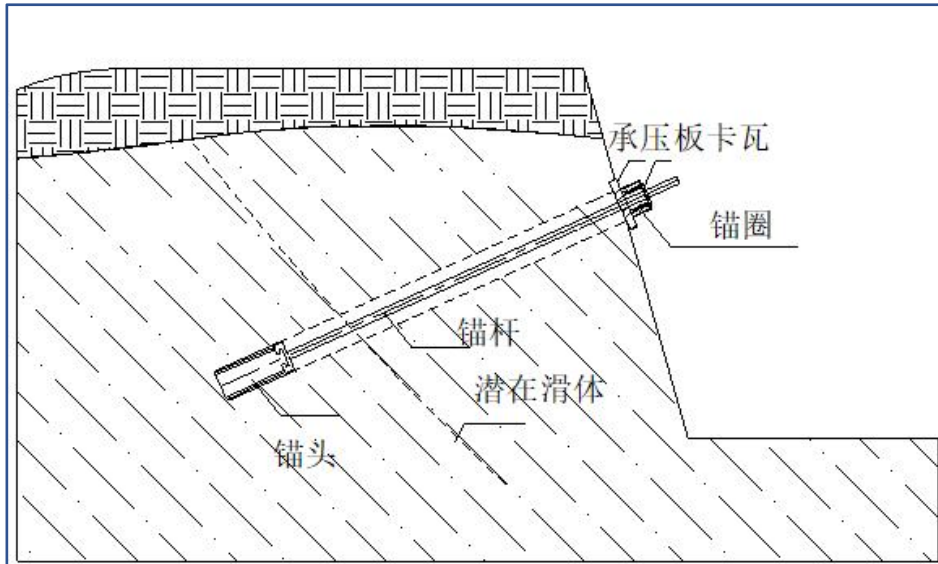


土体伞型锚配件与材料

四、技术优势

■ 伞型锚加固的工期优势

- 施工工艺简单，速度快
- 即时发挥锚固效果，起效快
- 不依赖注浆，无需等待龄期



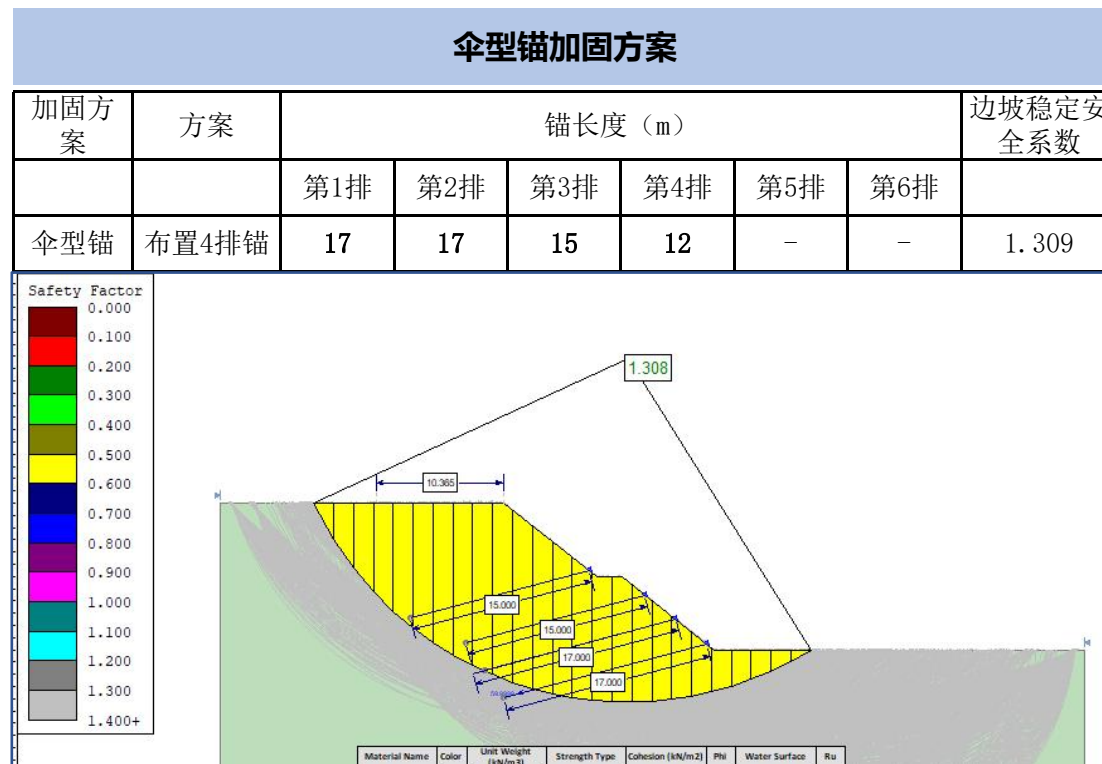
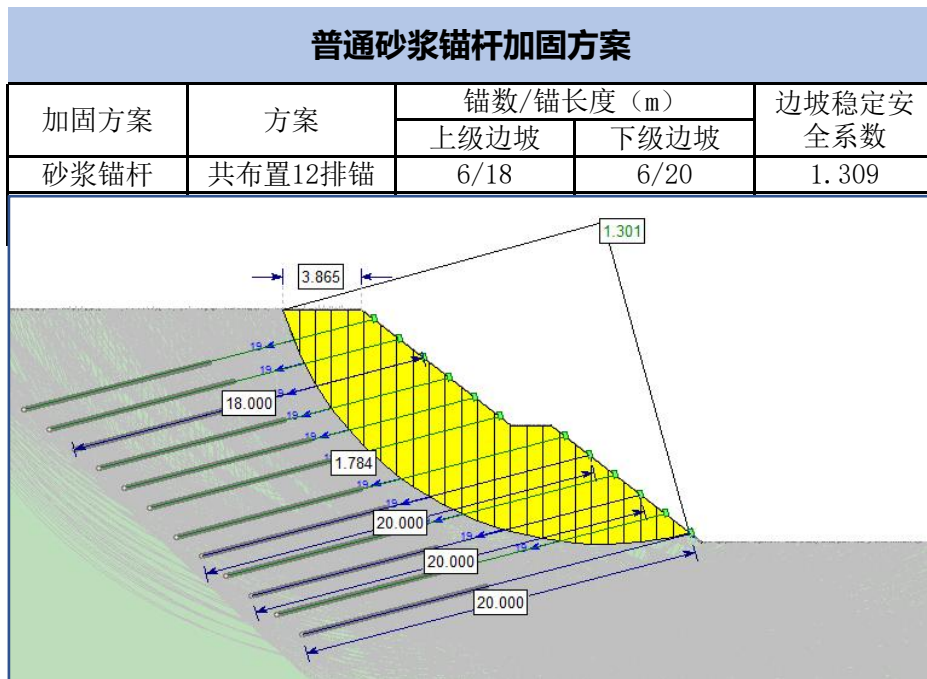
岩体伞型锚基本组成



岩体伞型锚实物

四、技术优势

■ 伞型锚加固的造价优势



砂浆锚杆加固方案：沿坡肩每100m，需20m长砂浆锚杆300根，18m长砂浆锚杆300根，约需102.0万元，沿坡肩每延米加固价格为10200元**。**



伞型锚加固方案：沿坡肩每100m，需17m长伞型锚100根，15m长伞型锚50根，12m长伞型锚50根，约需76.5万元；沿坡肩每延米加固价格为7650元**。**

五

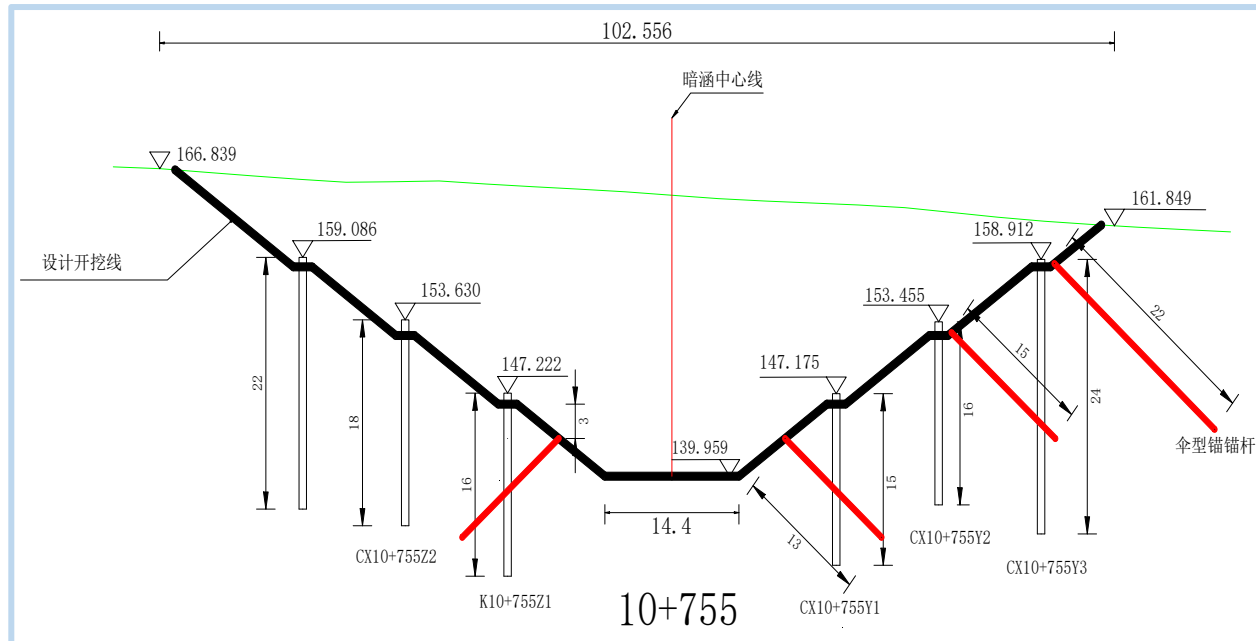
工程应用案例

5.1 鄂北调水工程建设期的高边坡加固

- 鄂北调水工程膨胀土渠段最大挖深30m，平均挖深15m，临时边坡1: 1.5，开挖接近建基面，产生滑坡，削坡卸载均无效，采用伞型锚对边坡进行加固后再开挖。



膨胀土深挖方边坡滑坡



伞型锚加固设计断面图

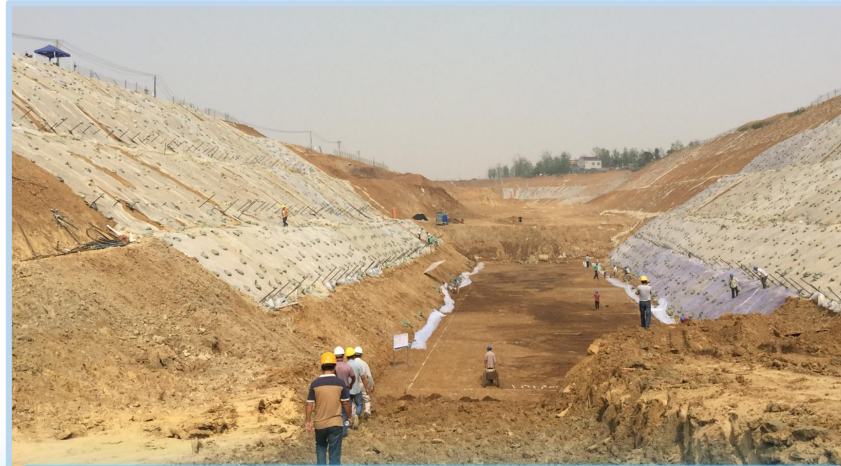
单锚锚固力设计值120kN,间距2m,左岸设置一排,长15m;右岸三排,自上而下分别为22m、15m、13m;左岸布置于一级马道上;右岸分别为二级马道、一级马道及一级马道以下3m。

5.1 鄂北调水工程建设期的高边坡加固

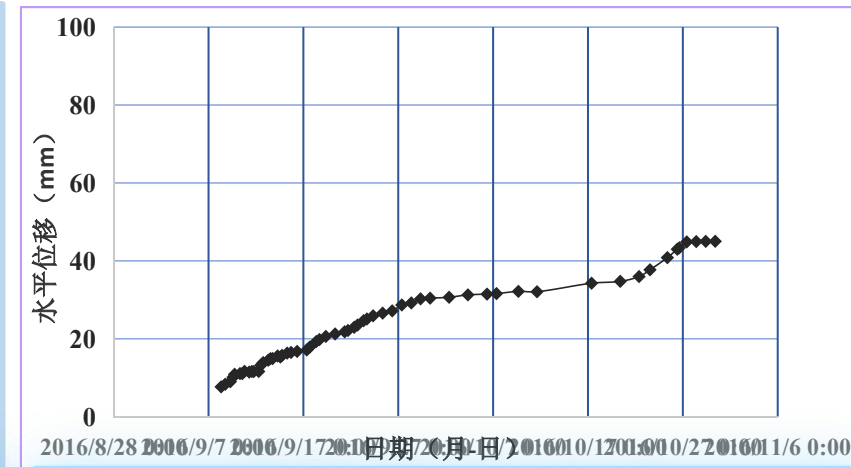
- 采用伞型锚对开挖边坡进行了快速加固，长期监测数据显示，加固后边坡变形收敛，边坡处于稳定状态，保障了暗涵工程的顺利完成。



伞型锚加固后



伞型锚加固渠底开挖



伞型锚加固渠底开挖

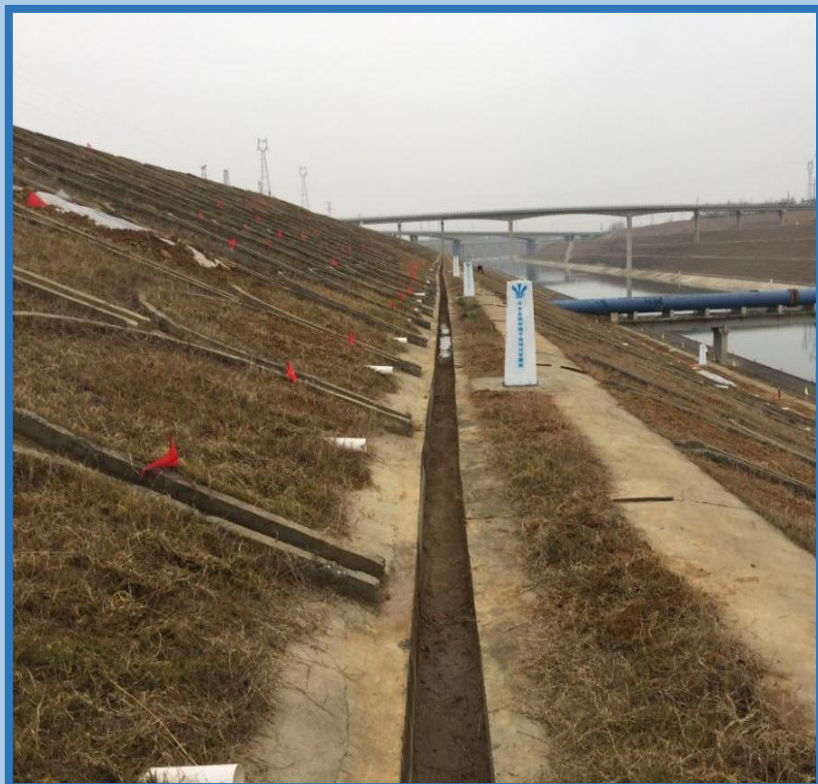
加固前边坡位移持续发展，加固完成后，开挖或暴雨期间，边坡位移增大，开挖或降雨过后，边坡位移快速收敛。

5.1 鄂北调水工程建设期的高边坡加固



伞形锚加固效果，得到了鄂北地区水资源配置工程建设与管理局、湖北省人民政府的好评与宣传

5.2 南水北调中线运行期的快速加固与修复



混凝土连拱大面积断裂

拱脚排水沟挤裂

5.2 南水北调中线运行期的快速加固与修复



施工前安全与技术培训



连夜组装潜孔钻机

5.2 南水北调中线运行期的快速加固与修复



伞型锚人工安装



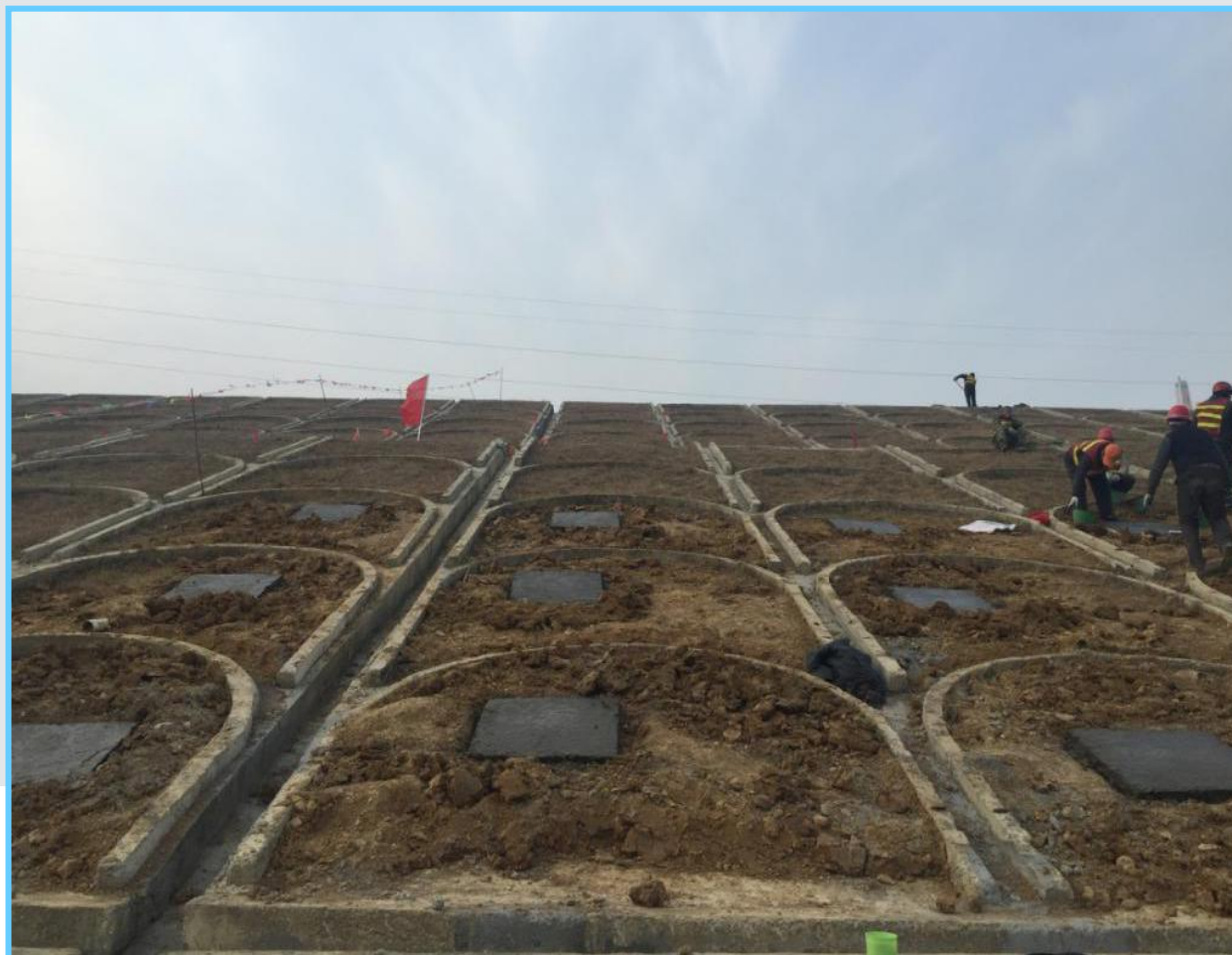
锚杆注浆

5.2 南水北调中线运行期的快速加固与修复



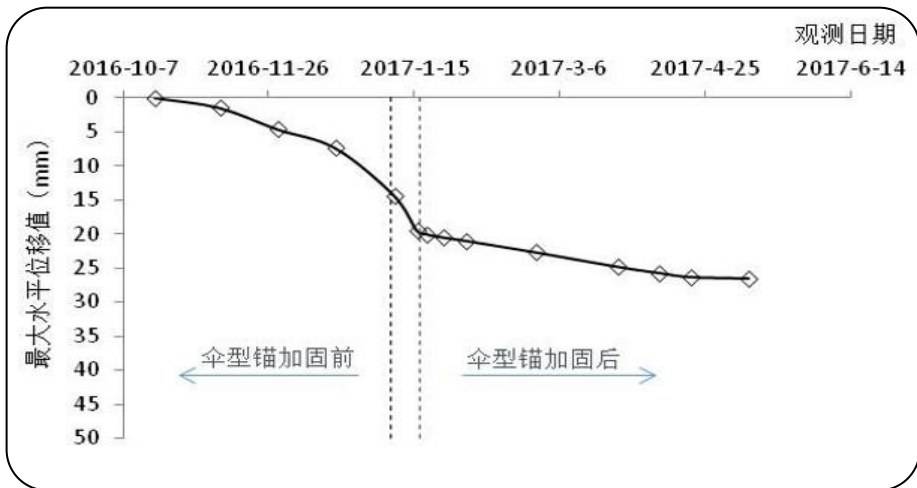
张拉锁定

5.2 南水北调中线运行期的快速加固与修复



素混凝土封顶保护

5.2 南水北调中线运行期的快速加固与修复



2017年1月20日，抢险加固完成后，水平位移快速收敛，滑移趋势抑制

01

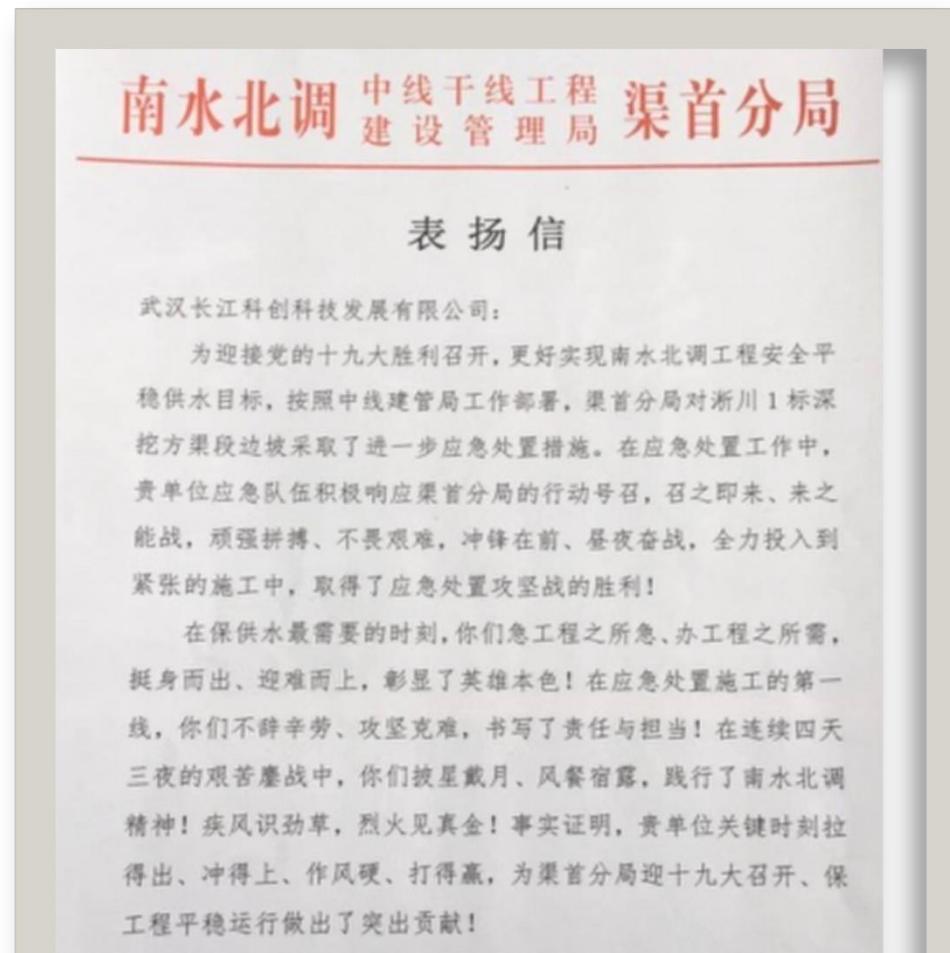
锚力计表现为先增后降，表明边坡已趋稳定，伞型锚加固效果明显

02

2017年9月，采用伞型锚等方案进行永久工程修复

03

5.2 南水北调中线运行期的快速加固与修复



伞型锚快速加固效果，得到了南水北调中线干线工程建设管理局的表扬

5.3 南水北调中线运行期的边坡快速加固

2016年7月9日至14日，因受特大暴雨袭击，南水北调中线干线辉县段渠坡多处出现变形问题。**东河暗渠上游、苏门山渠末端、小官庄**等多处险情。

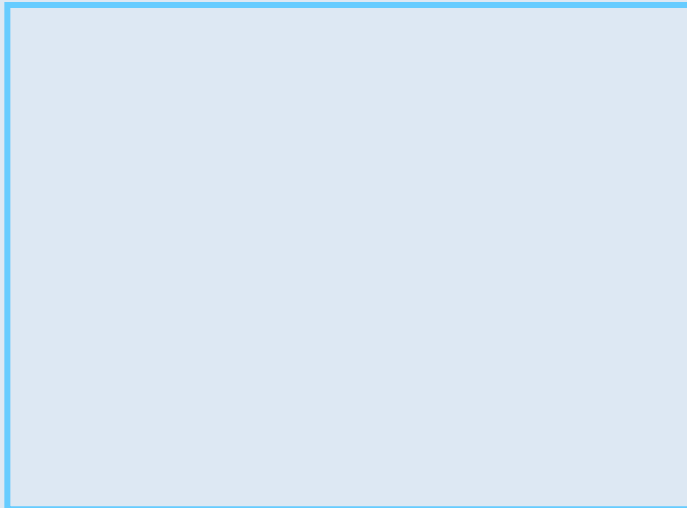
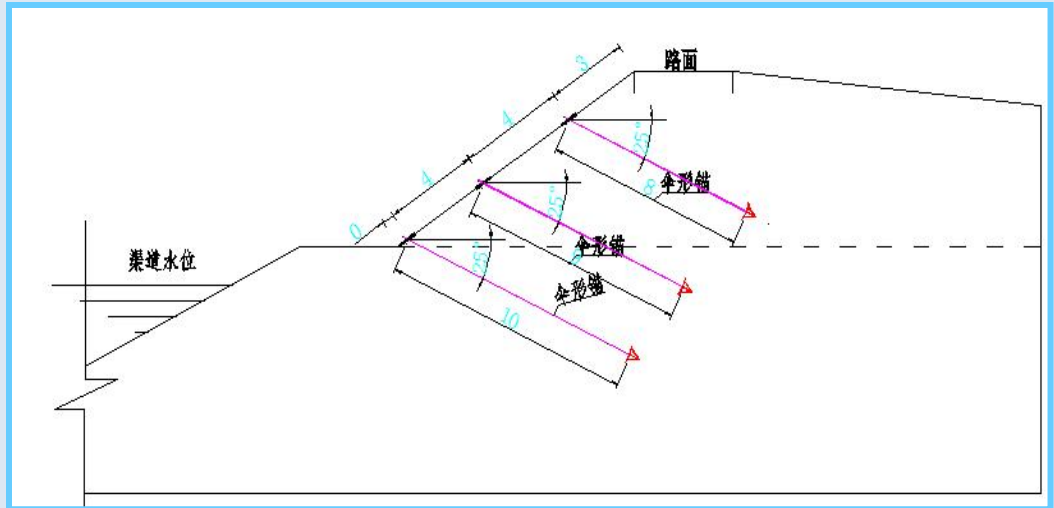
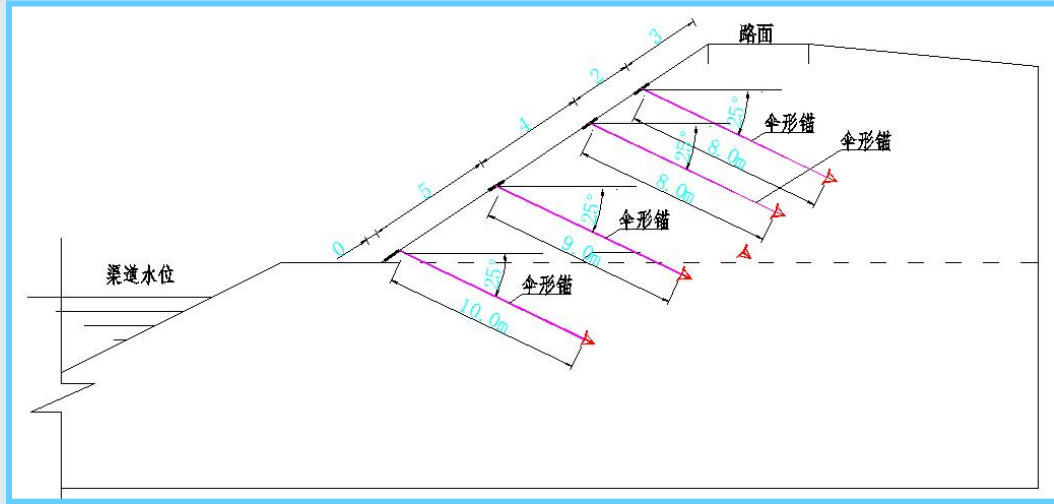


坡面隆起变形



边坡塌方

5.3 南水北调中线运行期的边坡快速加固



5.3 南水北调中线运行期的边坡快速加固

加固前



加固后



5.4 丽江机场改扩建工程建设期的边坡加固

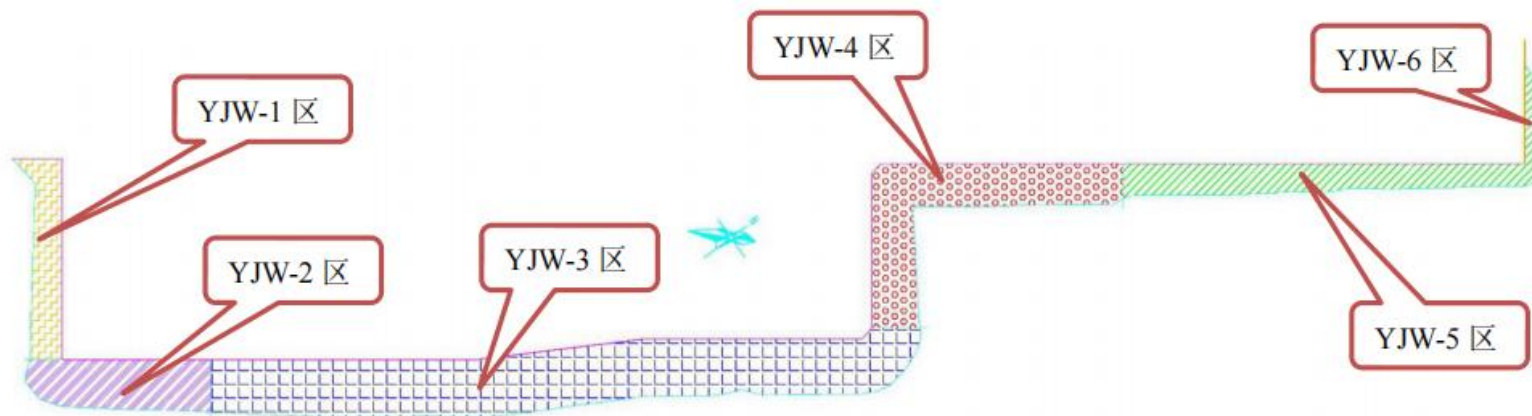


图6.4-1 挖方边坡平面布置图

表6.4-1 挖方边坡坡型特征

分区	范围	沿坡肩长度 (m)	最大挖方高 度 (m)	备注
YJW-1	(A=19691.5,B=20977.62)~(A=19691.5,B=21029.5) 转(A=19486.5,B=21029.5)	257.0	16.0	
YJW-2	(A=19486.5,B=21029.5)~(A=19486.5,B=21184.5)	155.0	24.0	
YJW-3	(A=19486.5,B=21184.5)~(A=19486.5,B=21460.4)转 (A=19507.5,B=21633.9)~(A=19507.5,B=21862.0)转(A=19519.5,B=21872.0)	694.0	29.0	坡顶存在机 场高速
YJW-4	(A=19519.5,B=21872.0)~(A=19676.5,B=21872.0)转 (A=19686.5,B=21882.0)~(A=19686.5,B=22134.0)	423.6	24.0	
YJW-5	(A=19686.5,B=22134.0)~(A=19686.5,B=22551.5)	417.5	16.0	
YJW-6	(A=19686.5,B=22551.5)~(A=19812.5,B=22551.5)	126.0	8.0	

5.4 丽江机场改扩建工程建设期的边坡加固

针对永久加固工程，利用伞型锚与坡面框架梁相结合，实现了边坡整体加固，显著提高了坡面防护的整体稳定性。



伞型锚加固



坡面框格梁



坡面根植土

5.5 湛江机场建设期的边坡加固

利用伞型锚与坡面框架梁相结合，实现了高陡边坡整体加固，显著提高了坡面防护的整体稳定性，节约了显著土地资源。



伞型锚施工



边坡开挖

5.6 安阳机场运行期的边坡加固

针对安阳机场运行边坡变形问题，对边坡进行整体加固，显著提高了整体稳定性，有效控制了边坡变形。



坡面钻孔



注浆锁定



施工完毕

5.7滇中引水建设期的隧洞围岩加固


岩体伞型锚对隧洞围岩进行加固，有效控制了变形发展



岩体伞型锚加固安装过程

结束语

- 伞型锚加固锚固力大、施工快速，加固质量、工期及造价优势明显，相比其他技术，具有更好的时效性和经济性。
- 伞型锚可适用于边坡、基坑、隧洞、输变电基础等加固、抗浮、变形控制、防倾倒等，也可用于运行维护过程中的工程抢险加固。



汇报完毕
敬请批评指正