

DOI: 10.11779/CJGE201704012

# 浅析国内外最新预应力锚杆标准中的技术差异

付文光<sup>1</sup>, 胡建林<sup>2</sup>, 周建明<sup>3</sup>

(1. 深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东 深圳 518054; 2. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088;

3. 苏州市能工基础工程有限责任公司, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 与国外相比, 国内锚杆标准中的技术尚有改进空间。借鉴欧美日最新标准, 建议: 增加一种锚杆结构划分方法, 即按内部结构划分为黏结段、非黏结段及张拉段; 基本试验可调整细分为基本调查试验及适应试验, 并将前者定性为探究性试验; 可采用表观自由长度替代弹性变形以作为锚杆抗拔试验变形评价指标; 研究及增加在锚固段与自由段分界处设置止浆塞的技术要求; 明确荷载分散型锚杆的张拉只应采用荷载控制方法; 研究及增加对锚筋驻留荷载的提离检查; 锚杆锁定荷载提高至不小于0.9倍设计承载力。

**关键词:** 锚杆结构; 基本试验; 表观自由长度; 止浆塞; 荷载控制张拉方法; 提离检查; 锁定荷载

**中图分类号:** TU431      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2017)04-0676-07

**作者简介:** 付文光(1970-), 男, 教高, 注册岩土工程师, 主要从事岩土工程科研、设计咨询、工程管理及监测检测等工作。E-mail: zgjy1992@126.com。

## Technical differences in worldwide latest standards for prestress anchors

FU Wen-guang<sup>1</sup>, HU Jian-lin<sup>2</sup>, ZHOU Jian-ming<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Gongkan Geotechnical Group Co., Ltd., Shenzhen, 518054; 2. China Jingye Engineering Co., Ltd., Beijing 10088, China;

3. Suzhou Nenggong Foundation Engineering Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:** The anchor technology in China's standards has some room for improvement compared with the foreign ones. Based on the latest standards of European Union, USA and Japan, some suggestions are put forward: (1) An anchor structure division method is proposed, that is, the internal structure is divided into tendon bond length, tendon free length and tension length. (2) The base tests are adjusted and subdivided into investigation test and suitability test. (3) The apparent free length can be used as the deformation evaluation index for anchor tests instead of elastic deformation. (4) The technical requirements for setting the packer between fixed length and free length are investigated. (5) Only the load control tension method can be used for the load dispersion anchor. (6) The lift-off check for resident load on the anchor tendon should be studied and added. (7) The lock load should be raised to more than 0.9 times the design load.

**Key words:** anchor structure; base test; apparent free length; packer; load control tension method; lift-off check; lock load

## 0 引言

国内预应力锚杆工程应用水平已稳居世界前列, 但理论研究水平实事求是地说与国际先进水平尚有一定的差距, 学习及研究国外技术标准, 仍是一条缩短差距的捷径。本文从锚杆的概念与术语、类型、结构、力学机理、试验等多个方面, 对国内外标准中锚杆的技术差异进行对比分析介绍, 以图能够与业界人士一起学习, 从而改进及提高国内锚杆技术水平。

本文所介绍的国外标准主要指欧美日的能够代表着其国内或地区内最高技术水平及最新的专项技术标准, 如: 欧洲标准 EN 1537—2013《特种岩土工程的实施—锚杆》<sup>[1]</sup>; 美国标准 DC35.1—2014《预应力岩层与土层锚杆的建议》<sup>[2]</sup>; 日本标准 JGS 4101—2012

《地锚设计、施工标准及说明》<sup>[3]</sup>。同时亦参考了几本相关典型标准, 如欧洲标准 EN 1997—1《欧洲规范 7: 岩土工程设计—第 1 部分: 通则》<sup>[4]</sup>, ISO 标准 ISO/DIS 22477—5《岩土工程勘察与试验—岩土工程结构试验—第 5 部分: 锚杆试验》<sup>[5]</sup>; 美国标准 FHWA—IF—99—015《岩土工程手册 4: 地层锚杆和锚固体系》<sup>[6]</sup>, 英国标准 BS 8081:1989《锚杆实践规范》<sup>[7]</sup>等。这些标准中有些国内尚没有的作法作者将另文介绍, 本文重点介绍及分析讨论国内外标准中的矛盾与差异。

本文中为叙述简明起见, 欧美日标准中共性内容

均简称为欧美日标准, 欧美标准中共性内容均简称欧美标准, 以此类推; 不标明“早期”字样时均指现行标准。

## 1 几个概念和术语

为避免误解及混乱, 先介绍一下国外标准中一些与锚杆相关的概念及术语。

(1) 国外早期标准中锚杆术语并不统一, 如欧洲国家标准通常采用 ground anchor 或 ground anchorage 一词, 加入 ground 一词以与混凝土锚固等其它类型锚固相区别, 直译为地层锚杆, 简称地锚或锚杆。欧洲标准目前普遍采用 ground anchor 一词, 简写为 anchor, 较少采用 anchorage 一词。美国早期标准中, 通常采用 prestressed anchor 一词, 最新标准目前也普遍采用 anchor 一词, 但 anchorage 一词仍在作为术语使用, 用来指称锚头的锚固体系, 包括锚头、承压板、喇叭管(国内称为过渡管)、防腐措施等。

(2) 欧洲早期标准中, anchor 通常指预应力锚杆, 偶尔也指其它类型的非预应力锚杆, 如岩栓、锚定锚等。岩栓 (rock bolt), 指把钢筋或其它材料锚固在岩层里的一种特殊的安装时就张紧的锚杆, 横穿节理裂隙主动提高岩石之间的摩擦力以加固岩体。岩栓类型十分广泛, 如注浆锚杆、树脂卷锚杆、缝管锚杆、水胀锚杆、涨壳锚杆、楔缝锚杆、中空注浆锚杆等, 其中锚固段远端采用机械装置、扩张后与孔壁产生摩阻力来提供约束的岩栓称为机械式岩栓 (mechanical rock bolt)。锚定锚 (deadman anchorage,) 亦称锚碇锚, 指采用混凝土块、梁、板或金属钩、锚、锚等构件作为锚定件, 水平向或近似水平向安装在岩土体表面(安装后可覆盖)的锚固构件。美国早期标准中, anchor 包括土层、岩层及既有填土中的锚杆(不包括锚定板挡墙等后填土挡土结构中的锚定件, 这点与欧洲早期标准不同), 均设置有自由段, 按是否施加预应力分为预应力锚杆及非预应力锚杆两类: ①如果其结构由锚头、自由段及注浆黏结形成的锚固段 3 部分组成, 对锚筋施加了预应力, 称为 pre-stressed anchor, 即预应力锚杆; ②如果其结构由锚头、自由段及约束构件组成, 没有施加预应力, 称为 non pre-stressed anchor, 直译为非预应力锚杆, 其约束构件可为浆体、螺旋锚 (screw anchor)、锚定件或岩栓等; ③如果岩层锚杆 (rock anchor) 施加了预应力, 则可称为预应力锚杆。岩层锚杆简称岩锚, 狹义上指有锚固段、自由段及锚头的钢筋或钢绞线预应力锚杆, 主动加固岩层, 与土层锚杆类似; 广义上不引起歧义时包括了岩钉及岩栓。岩钉 (rock dowel), 指把钢筋或其它材料

锚固在岩层里的一种特殊的不张紧的锚杆, 被动地支撑关键岩石以加固岩体。可见与国内“岩钉”的概念不同, 国内“岩钉”一般指设置在岩层中的全长黏结注浆锚杆。了解这些名词术语历史有助于理解欧美早期文献。

(3) 欧美最新标准中, anchor 术语仅指钻孔注浆黏结型预应力锚杆, 黏结材料可为水泥系及树脂系, 这与国内“锚杆”概念不同。国外“锚杆”不管是否施加了预应力、必须设置有自由段, 而国内“锚杆”广义上包含了所有类型的锚固件, 包括了土钉等没有设置自由段的锚固件。为避免混淆, 本文中“锚杆”为“预应力锚杆”的简称, 采用国外概念, 仅指钻孔注浆黏结型预应力锚杆, 不包含土钉、岩钉、岩栓、锚定锚等其它类型的锚固件。

(4) 欧美最新标准中, 全长注浆黏结、不设置自由段也不施加预应力时, 称为土钉 (soil nail)。美国最新标准中, 全长黏结锚杆 (fully bonded anchor) 并非指土钉, 而是这样一类锚杆: 锚筋自由段不设防护套, 通过注入缓凝浆体或张拉后注浆使其被浆液包裹, 锚杆张拉后, 浆液凝固, 与周围地层黏结。欧日标准没有为这类锚杆定义术语。

(5) 欧美最新标准中, 锚筋与注浆体界面的黏结采用 bond 一词; 浆体与地层界面的黏结, 欧洲标准采用 fixed 一词, 为清晰起见, 本文将前者译为黏结, 后者均译为锚固, 以示区别。①浆体与地层的黏结段, 欧洲标准通常采用 fixed anchor length 一词, 国内称为锚固段; 浆体与地层的非黏结段, 欧洲标准采用 free anchor length 一词, 美国标准采用 free stressing length 一词, 可直译为应力自由段, 国内称为自由段。②锚筋与浆体的黏结段, 欧美标准采用 tendon bond length 一词, 本文译为锚筋黏结段、简称黏结段; 锚筋与浆体的不黏结段, 欧洲标准采用 tendon free length 一词, 可直译为锚筋自由段; 美国标准采用 free unbonded length 一词, 直译为自由无黏结段, 本文均译之为锚筋非黏结段、简称非黏结段。

名词术语及相应概念是一门学科或技术的核心。科学工作者必须明白, 任何科学中的基本概念都不单单是名词而已, 它们凝结着科学理论, 而且学科核心概念之间的内在联系也决定着学科理论体系的逻辑结构<sup>[8]</sup>。因此, 非常有必要重视及研究这些名词术语。

## 2 基本结构

欧美日标准中锚杆结构划方法分大同小异, 均以两种方式划分: ①按浆体与地层锚固与否划分为“锚

固段”与“自由段”;②按浆体与锚筋黏结与否划分为“黏结段”与“非黏结段”。其中目标划分得最为详细,其结构简图及各部分名词术语如图1所示。

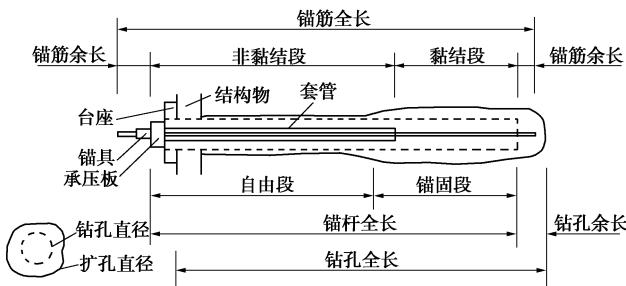


图1 锚杆各部位术语 (引自该标准说明图-2.2)

Fig. 1 Terms for every part of anchor

第1种划分以锚杆整体作为一个研究对象,侧重于锚杆与地层之间的力、即“外力”的相互作用关系,各部位的功能为:锚固段提供与地层之间的抗拔力,自由段将锚固段置于假定破裂面以外,锚头段承受千斤顶张拉荷载等各种外来荷载。第2种划分以锚杆的内部结构作为研究对象,侧重于锚杆内部之间的力、即“内力”的相互作用关系,各部位的功能为:张拉段承受并传递千斤顶张拉荷载,与非黏结段共同提供弹性变形量及产生预应力,非黏结段维持预应力并将应力传递给拉力型锚杆的黏结段或压力型锚杆的承载体;拉力型锚杆的黏结段将锚筋拉力以剪力形式传递给锚固体及锚固段,压力型锚杆以压力形式将锚筋拉力传递给锚固体及锚固段。

两种划分各有所用,各司其职,可参见后文。国内标准中目前没有第2种“黏结段”与“非黏结段”的划分方法。在国内标准基础上,借鉴国外标准,本文建议锚杆结构划分方法及各部位名词术语见图2。

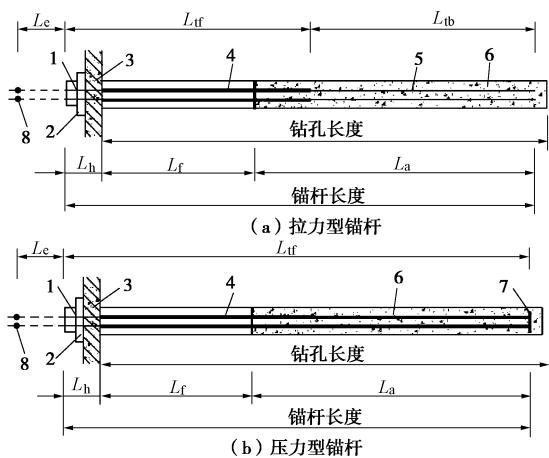


图2 本文建议的锚杆结构划分方法及各部分命名  
1-锚夹具; 2-承压板; 3-锚座; 4-套管或无黏结锚筋;  
5-锚筋; 6-浆体; 7-承载体; 8-夹持点;  $L_{tb}$ -黏结段;  
 $L_{tf}$ -非黏结段;  $L_e$ -张拉段;  $L_a$ -锚固段;  $L_f$ -自由段;  $L_h$ -锚头段

图2 本文建议的锚杆结构划分方法及各部分命名

Fig. 2 Division and terms of anchor structure

图2中:①锚杆全长分为锚固段、自由段及锚头段3部分,其中锚固段指浆体与周边地层的锚固长度,自由段指锚固段至钻孔孔口之间,锚头段指钻孔孔口至锚夹具之间;②锚筋全长分为黏结段、非黏结段及张拉段3部分,其中黏结段指浆体与锚筋的黏结长度,非黏结段指黏结段至锚夹具之间,张拉段指锚夹具至千斤顶夹持点之间。第1方法即国内目前方法。

采用上述划分方法,目前一些模糊概念或说法可表达得更为准确清晰:规范要求计算锚杆自由段的弹性变形、对自由段防腐,实际上指计算锚筋非黏结段的弹性变形、对非黏结段防腐;验算锚筋的锚固段长度,实际上指锚筋的黏结段长度;要求锚筋外露于锚具外的长度不宜小于1.5 m以利于张拉,简单说就是张拉段不宜小于1.5 m,等等。这里再强调一下:从图2中可清楚看出,压力型锚杆有锚固段没有黏结段,其自由段与非黏结段完全是两回事。

### 3 锚杆试验类型

除了观察锚杆蠕变性能的试验外,欧标中常用的锚杆力学性能试验分为探究试验、适应试验及验收试验3类,美日标准与之有所不同但大同小异<sup>[9]</sup>:

(1) 探究试验 (investigation test): 为求取锚杆浆体-地层界面极限抗力及判断锚杆在工作荷载范围内特性的载荷试验。探究试验应能够为设计者求取与地层条件和使用的材料相关的极限抗拔力,能够通过在地层-浆体界面产生破坏以检验新型锚杆。在缺少试验地层或地层条件类似但锚杆工作荷载较以往更高时,均应进行探究试验。试验数量由设计者确定,最大试验荷载应采用多循环法,加至破坏。锚筋承载能力不能再提高时,可采用比设计预期较短的锚固段以能在地层-浆体界面产生破坏,但得到的抗力不能等比例用于较长锚固段。

(2) 适应试验 (suitability test): 为证实某一具体锚杆设计胜任某一具体地层条件的载荷试验。适应试验在工程现场实施,每种地层环境至少3个,最大试验荷载与验收试验相同,或为1.5倍(长期锚杆)或1.2倍(临时锚杆)的锚杆工作荷载。根据具体情况决定采用多循环法及单循环法。探究试验比适应试验要严格得多,出于成本及时间考虑,一般来说,没有经验的地层及新型锚杆等应进行探究试验,有经验的地层可不进行探究试验而选择适应试验。除了验证设计参数外,适应试验的一个重要作用是获取锚杆的荷载-变形特性,作为验收试验的依据。

(3) 验收试验。为确认每条锚杆符合验收条件的载荷试验。每条工作锚杆都应验收试验,最大试验荷

载为设计荷载及1.25倍锁定荷载中的较大值, 采用单循环法。

国内外通常认为, 工程试验按目的大致可分为探究性及验证性两大类: 探究性试验不知道或不预定目标, 根据试验结果确定, 是“求取”, 例如测定天然岩土层承载力的静载试验; 验证性试验事先预定目标, 然后通过试验去验证, 例如锚杆验收试验。验证性试验只注重结果, 而探究性试验更注重过程, 二者是有区别的。欧美日标准中, 探究试验为探究性试验, 适应试验则为验证性试验, 两者各有所用, 各司其职。

验收试验国内外要求基本相同。探究试验及适应试验在国内标准中合并为基本试验。好处是基本试验兼具探究试验与验证试验功能, 不好处是哪个功能也没能完全胜任: 最大荷载一般规定为2倍预期设计值, 采用多循环法, 因没有试验至破坏状态, 锚杆的极限抗拔力到底有多少往往并不知道, 基本试验做完后, 通常测不出该地层提供的黏结强度极限值, 不能为设计提供准确的依据, 也很难评定施工工艺的优劣, 也就很难提出改善建议, 探究性作用大打折扣, 这个工程完成了, 下个类似工程抗拔力能否提高一些心中没数, 无益于技术水平的提高。同时, 国内验收最大试验荷载一般为设计荷载的1.2~1.5倍, 基本试验荷载远大于验收荷载且张拉方式不同, 两者荷载~变形特性有较大不同, 基本试验得到的数据很难直接作为验收试验依据。因此, 建议相关标准把基本试验调整细分为基本调查试验及适应试验, 并将前者定性为探究性试验; 或把基本试验明确定性为探究性试验, 增加适应性试验作为一种新的试验类型。

另外, 欧美日标准中锚杆蠕变试验作法相差较大, 国内作法与美标最为接近, 可参见笔者文献[9, 10]。

## 4 表观自由长度

欧美日标准中采用“锚筋表观自由长度”概念, 意为: 根据荷载试验得到的弹性变形, 计算得到的锚筋总无黏结长度。锚杆荷载试验获得的总变形与塑性变形之差即为弹性变形, 按下式计算锚杆表观自由长度  $L_{app}$ , 式中  $A_t$ 、 $E_s$ 、 $\delta_e$ 、 $\Delta P$  分别是锚筋的横截面积、弹性模量、弹性变形及试验荷载范围值(最大荷载减去初始荷载):

$$L_{app} = A_t E_s \delta_e / \Delta P \quad (1)$$

作为性能评价指标(例如验收依据)时, 拉力型锚杆  $L_{app}$  的上限取  $L_{tf}+L_e+0.5L_{tb}$ , 压力型锚杆取  $1.1L_{tf}+L_e$ , 两类锚杆  $L_{app}$  的下限取  $0.8L_{tf}+L_e$ 。①  $L_{app}$  小于下限指标通常意味着锚筋及锚杆的实际自由段长度不足, 可能会导致荷载传递到了自由段、即锚固体在

假定的整体稳定滑移面以外, 不过也可能是因为张拉设备不同轴或锚头内锚筋引起的摩擦造成的; ②以前假定荷载沿黏结段的传播速率均匀, 故设定了  $L_{app}$  上限。但是黏结应力均匀分布的概念仅在部分岩石锚杆中近似适用、在土层锚杆中不适用, 故上限指标主要作为岩石锚杆(不打算进行蠕变试验时)验证试验的替代性验收指标, 如果没有满足这个指标, 随后仍可进行蠕变试验以最终验收。

国内标准目前仍在使用国外几十年前的作法, 将弹性变形指标作为锚杆验收依据, 一般规定拉力型锚杆在最大试验荷载下所测得的弹性变形, 应超过该荷载下杆体自由段长度理论弹性变形的80%, 且小于杆体自由段长度与1/2锚固段长度之和的理论弹性变形。可见与国外标准有5点不同: ①采用了自由段与锚固段的概念; ②采用的最大试验荷载没有扣除初始荷载; ③没有计取张拉段长度; ④不适用于压力型锚杆; ⑤采用了弹性变形作为验收直接评价指标。将前述3点缺陷修正后, 拉力型锚杆弹性变形计算公式为式(1)的变形, 上、下限指标分别如下式所示:

$$\Delta_{e\text{上}} = (L_{tf} + L_e + 0.5L_{tb}) \Delta P / A_t E_s, \quad (2)$$

$$\Delta_{e\text{下}} = 0.8 (L_{tf} + L_e) \Delta P / A_t E_s. \quad (3)$$

可见, 弹性变形量与表观自由长度作为锚杆性能评价指标时没有本质上的区别, 但后者更直观、概念更明确。

## 5 止浆塞

理想状态下, 抗拔力应该完全由锚固段提供, 自由段不应提供。为达到这个目的, 自由段最好不与地层黏结, 即自由段没有浆体填充, 这样, 构造上需要在锚固段与自由段之间设置止浆塞类物理隔离件, 如图3所示。设置了止浆塞之后, 即使自由段被浆液填充, 因为止浆塞的物理隔离作用, 也可以阻断锚固段与自由段之间的应力传递。理想状态下, 设置了止浆塞后的应力传递机理见图3。

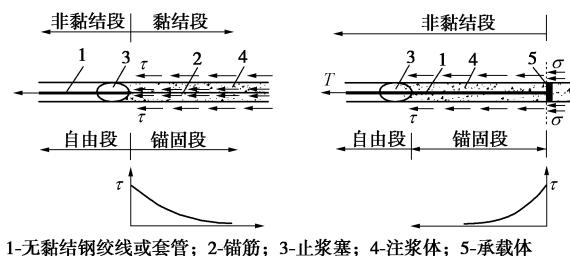


图3 锚杆理想结构及应力分布简图

Fig. 3 Structure and stress distribution of anchors

如果不设置止浆塞, 为使注浆饱满, 通常孔口返浆后才能停注, 此时自由段内就充满了或几乎充满了

浆液，与锚固段浆体连续而成为一体，导致了应力从锚固段不可避免地传递到自由段。锚杆自由段应穿过假定破裂面1~2 m，其目的是将锚固段置于假定破裂面以内的稳定土体中，使锚固段的应力不回传于假定破裂面以外的不稳定土体中。没有止浆塞时，锚固段与自由段之间没有明确的物理界面，无法确定锚固段的起点，如图4所示。因锚固段的起点位置不明确，黏结应力 $\tau$ 的分布范围也就无法明确，“自由段”并不自由、也在产生黏结力，“锚固段”也就变得不明不白。这不仅严重影响锚杆的设计计算，还会因自由段产生了黏结力而对锚固结构的安全造成隐患。可见，止浆塞看起来只是一个构造措施，但它却是构成锚固段、区别锚固段与自由段的关键，作用至关重要。

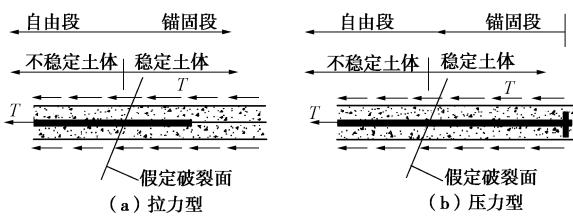


图4 无止浆塞时的锚固段传力简图

Fig. 4 Stress distribution of anchor without packer

国外锚杆规范中，通常要求在自由段与锚固段交接处设置压气、压水或压混合液等液体膨胀的止浆塞、灌浆袋、封堵器、止浆环等，或者较为简单的单向阀、分隔膜等，以及采用带有自止浆功能的马歇管、袖阀管等，其作用有二：一是使锚固段在注浆时形成封闭的空间，有利于提高灌浆压力或为多次注浆提供条件，从而提高锚杆抗拔力；二是把锚固段与自由段分隔开，使自由段尽量保持无浆；即使允许自由段内填充浆液，也可使其与锚固段的浆体相互独立而不相连。美标特别强调，锚杆直径较大时，必须要考虑锚固段近端的应力向自由段的传递问题；日标特别图示，基本调查试验（即探究试验）、适性试验（即适应试验）及蠕变试验必须要设置止浆塞；欧标特别说明，不设置止浆塞时，也可在自由段采用不能传递应力的材料。

国内除了《水电水利工程预应力锚索施工规范》DL/T 5083—2010等个别规范，绝大多数规范，基坑的、边坡的、基础的及锚杆专项规范，都没有设置止浆塞的要求，工程中也就极少有设置的，弊端也是显而易见的。笔者在某锚杆科研项目中，采用工程锚杆对止浆塞的功能进行了现场验证：主要地层为深圳地区残积砂质黏性土，按基本试验结果及类似工程经验，锚固段为5 m时的极限抗拔力约为400~500 kN。工程锚杆为总长度25 m的拉力型锚杆，分2种锚型，均不设置止浆塞，锚型1及锚型2的黏结段分别为5 m及20 m。锚型1有近100条，锚型2有200多条，两

者试验最大荷载均达到了900 kN，没有差别。试验结果说明：锚固段并非黏结段；不设置止浆塞时，黏结段5 m并不等效于锚固段5 m，锚固段实际有效长度远不止5 m，所以才能产生高达900 kN的抗拔力，如果仅为5 m不可能有这么大，从而证实了止浆塞的重要作用。

## 6 荷载分散型锚杆的张拉方法

荷载分散型锚杆通常分为压力分散型及拉力分散型两类，国内标准中压力分散型锚杆如图5所示。



图5 国内规范中的压力分散型锚杆结构简图

Fig. 5 Pressure-dispersive anchor structure in China's standards

国内对荷载分散型锚杆张拉及锁定时，大多采用补偿张拉法，原理为：按先长后短顺序依次张拉单元锚杆，逐次预先补偿在相同荷载作用下因非黏结段长度不等引起的弹性变形差，再整体张拉并锁定。

该方法为位移控制张拉方法，通过控制单元锚杆变形来实现控制施加到单元锚杆上的荷载的目的。锚杆变形为弹性变形与塑性变形之和，补偿张拉过程中无法测定单元锚杆的塑性变形，只能用测得的总变形替代弹性变形。补偿荷载是基于弹性位移计算的，实际控制却基于总变形，必然会造成部分补偿荷载，即不能把设计预期的补偿荷载全部施加给单元锚杆；这样，在总张拉荷载达到设计预期时，单元锚杆之间仍然存在着荷载差，较长的钢绞线因塑性变形相对较大弹性变形相对较小而承担的荷载要少一些，较短的单元锚杆承担了更多的荷载。此外，补偿荷载通常较小很难准确施加，补偿张拉时没被补偿的单元锚杆的工作锚夹片也会加大与被补偿单元锚杆之间的荷载差。

国内有时也采用单拉单锁定法，机理为<sup>[11]</sup>：将总张拉荷载按某种方式分配给各单元锚杆，单元锚杆逐组张拉锁定，张拉荷载之和即总张拉荷载；因单元锚杆张拉时是荷载直接控制，不用考虑变形，可避免产生荷载差。这种方法由于锚固段的应力叠加，后张拉的单元锚杆会对已张拉的产生卸载效应，造成已张拉单元锚杆预应力损失，如图6所示，故各单元锚杆张拉荷载之和小于设计总张拉荷载且差值很难估算。

欧美日标准中没有把荷载分散型锚杆单独作为一种类型列入，欧美标准中将之作为一种避免锚固段应力集中的措施，即非黏结段错列布置以使锚固段前后

错开, 要求张拉时须采取荷载控制方式, 采取合适的张拉设备、锚夹具及张拉方法, 使每条锚筋都能够达到验证荷载且不会超张拉(尤其是较短的锚筋)。荷载控制张拉方法近几年已经在国内开始应用, 但尚未列入相关标准中, 建议研究采用。

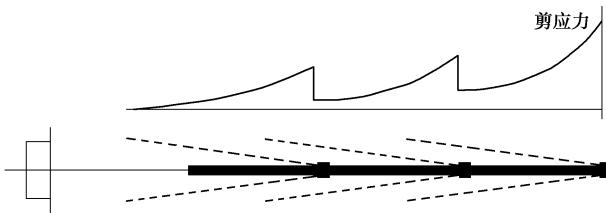


图 6 应力扩散及沿轴向分布示意图

Fig. 6 Stress dispersion and distribution along axial direction

## 7 锁定荷载

因千斤顶张拉及锚夹具锁定而在锚筋上产生的预应力称为驻留荷载, 初始驻留荷载称为锁定荷载, 即千斤顶收油、锚夹具刚刚锁定时锚筋上持有的荷载。锁定荷载  $P_0$  是一个重要的锚杆设计参数, 通常受锚杆设计承载力  $N_d$  及锚筋材料抗拉强度  $f_k$  双重控制。

欧美标准侧重于锚筋材料强度控制, 没有给出  $P_0$  与  $N_d$  的明确关系。大致上, 欧标要求  $P_0 \leq 0.6f_k$ ,  $f_k$  为锚筋材料抗拉强度特征值(即国内的材料抗拉强度标准值), 因其规定  $N_d \leq 0.65f_k$ , 即大致上  $P_0 \geq 0.9N_d$ ; 美标大致上要求  $P_0 \geq 0.85N_d$ , 最高不得大于  $1.1N_d$ ; 日标侧重于设计承载力控制, 要求锁定荷载~稳定驻留荷载均不小于“设计抗拔力”(“设计抗拔力”概念与国内有所不同), 大致可认为  $P_0 \geq N_d$ 。

国内标准大部分建议  $P_0 \approx 0.75N_d \sim 0.9N_d$ , 少部分允许  $P_0$  最低可为  $0.5N_d \sim 0.6N_d$ , 很少要求  $P_0 > 0.9N_d$ 。可见, 国内标准要求或建议的锁定荷载相对偏低。

一方面, 锚杆用于支护结构时, 所承受的岩土侧压力通常按主动土压力计算, 需要结构产生一定的变形量, 如果变形太小, 岩土压力可能居于主动土压力与静止土压力之间, 导致锚杆实际承受荷载偏大, 故允许锚杆产生一定变形; 而且, 锚筋也不宜长时间工作在高应力状态下, 所以锁定荷载不宜太高, 应尽量低一些。另一方面, 锁定荷载的主要作用即控制结构物的变形, 所以也不能太低, 太低则达不到目的。以基坑锚杆为例, 如果锁定荷载较低, 锚杆受力随着土方开挖将逐渐增加, 最大达到设计承载力(有标准称为承载力设计值, 有标准称为承载力标准值, 这里不加区别统称为设计承载力), 随着内力增加变形加大。内力从锁定荷载增加到设计承载力的过程中, 锚杆的变形增量不得影响到结构物的安全, 也不得导致结构

物的变形超出允许值, 应以此作为确定锚杆最低锁定荷载的原则。如果锁定荷载较小, 如小于  $0.9N_d$ , 而非黏结段又较长时, 锚杆变形增量很难满足这一原则, 很可能导致结构物变形超出允许值, 尤其对那些压力型锚杆。举例: 一级桩锚基坑, 锚杆非黏结段 25 m 长, 锚筋为 1860 MPa 级 4φ15.2 高强低松弛钢绞线, 弹性模量为 200 MPa, 设计承载力为 600 kN, 锁定值为设计值的 0.75 倍, 即 450kN, 则锚杆内力从锁定值增加到设计值时, 弹性变形增加约 33.5 mm; 塑性变形按弹性变形的 1/2 估算, 锚杆总变形约 50.2 mm, 而基坑规范通常规定一级基坑的坡顶位移允许值为 30~40 mm, 说明了锚杆锁定荷载如果偏低则或许不能满足支护结构的变形要求。

## 8 提离试验

提离试验(lift-off test)也称提离检查(lift-off check), 即不松开锚具的拉拔试验, 目的是检验锚筋上的驻留荷载, 具体方法为: 千斤顶跨立在锚头上, 不松开锚具, 把荷载逐级增加到锚筋上, 直到锚具被提起离开承压板, 通常拉开 1 mm 距离, 最小可为 0.1 mm, 观察千斤顶的压力表, 压力增长速率突然降低时, 即发生了提离现象, 此时的张拉荷载即为锚筋上的驻留荷载。提离试验通常应用于两种场合: ①锚杆锁定后即进行, 目的是检验锁定荷载是否满足设计要求, 同时也可确定荷载锁定损失。锁定损失与千斤顶类型和锚筋自由长度有关, 可考虑通过超张拉补偿; ②锚杆长期工作后进行, 目的是检查锚筋上驻留荷载的大小, 为判断结构的安全程度提供依据。日本标准中某提离检查案例如图 7 所示(改编自该规范附录图-9.2)。

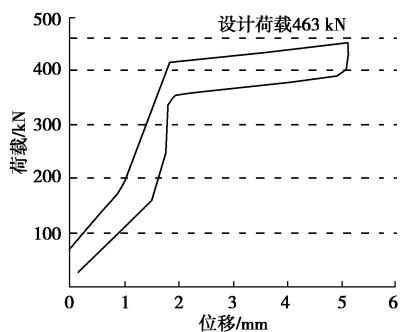


图 7 提离试验案例

Fig. 7 Example of lift-off tests

欧美日标准把提离试验作为检测锚杆驻留荷载的唯一准确办法, 并排除了使用锚杆测力计、荷载传感器等其它方法; 要求张拉后即检查锁定荷载, 严格时要求在锁定数日后再次提离检查。而国内通常采用锚杆测力计等传感器来了解锚筋驻留荷载, 这类传感器

示值受多种因素影响误差较大,与千斤顶示值之间普遍存在着较严重的“不匹配”现象<sup>[12]</sup>,方法的准确程度不高,建议研究提高检查方法并采用。

## 9 其 它

国内外标准中的技术差异还有很多,如设计计算方法,地层腐蚀性的判定及防腐方法,钻孔的水密性试验,锚杆的防腐试验及波动荷载试验,长期锚杆的完好性调查、试验及分级等,不再赘述,可参见笔者文献[9, 10]、《美国标准<岩、土层预应力锚杆的建议DC35.1—14>简介》、《日本<地锚设计·施工标准及说明JGS4101—2012>简介》、《欧洲目前主要锚杆技术标准简介之一~之七》及《国外预应力锚杆技术标准新进展及技术特点》等相关拙作。

## 10 结 论

借鉴欧美日标准,国内锚杆技术标准在以下几方面有一定改进余地:

(1) 建议增加一种锚杆结构划分方法,即按内部结构划分为黏结段、非黏结段及张拉段。

(2) 基本试验可调整细分为基本调查试验及适应试验,并将前者定性为探究性试验;或把基本试验明确定性为探究性试验,增加一种适应性试验类型。

(3) 可采用表观自由长度替代弹性变形以作为锚杆抗拔试验变形评价指标。

(4) 建议研究及增加在锚固段与自由段分界处设置止浆塞的技术要求。

(5) 宜明确荷载分散型锚杆的张拉只能采用荷载控制方法。

(6) 可研究及增加对锚筋驻留荷载的提高检查。

(7) 建议锚杆锁定荷载提高至不小于0.9倍设计承载力。

## 参考文献:

- [1] EN 1537 Execution of special geotechnical works: ground anchors[S]. 2013.
- [2] PTI DC35.1—14 Recommendations for prestressed rock and soil anchors[S]. 5th ed. 2014.
- [3] JGS4101—2012 グラウントアンカー—設計 施工基準、同解説[S]. 2012. (JGS4101—2012 Standard code and explain of design and construction for ground anchor[S]. 2012. (in Japanese))
- [4] EN 1997—1 Eurocode 7: Geotechnical design - Part1: General rules[S]. 2004.
- [5] ISO/DIS 22477—5 Geotechnical investigation and testing- Testing of geotechnical structures-Part 5: Testing of anchorages[S]. 2009.
- [6] FHWA—IF—99—015 Geotechnical engineering circular No.4: ground anchors and anchored systems[S]. 1999.
- [7] BS 8081 British standard code of practice for ground anchorages[S]. 1989.
- [8] 薛守义, 刘汉东, 著. 岩体工程学科性质透析[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. (XUE Shou-yi, LIU Han-dong. Perspective about nature of subject on rock mass engineering[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [9] 付文光. 国内外锚杆试验类型简介[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 191 - 197. (FU Wen-guang. Brief introductions for testing type of anchorage at home and abroad[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 191 - 197. (in Chinese))
- [10] 付文光, 周凯, 罗小满. prEN ISO 22477-5 等规范中锚杆载荷试验方法简介—欧洲目前主要锚杆技术标准简介之四[J]. 岩土锚固工程, 2014(4): 15 - 23. (FU Wen-guang, ZHOU Kai, LUO Xiao-man. Introduction of the anchor test-Introduction 4 of Europe main anchor technology standards[J]. Geotechnical Anchor Engineering, 2014(4): 15 - 23. (in Chinese))
- [11] 付文光, 胡建林. 荷载分散型锚杆张拉方法探讨与研究[J]. 铁道工程学报, 2011(9): 44 - 44. (FU Wen-guang, HU Jian-lin. The discussion and research on tensile methods for load-dispersive anchor[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(9): 44 - 44. (in Chinese))
- [12] 付文光, 于会来, 耿培. 预应力锚索应力测量误差的试验研究与对策[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 487 - 491. (FU Wen-guang, YU Hui-lai, GENG Pei. Experimental and solution of stress measurement error of pre-stress anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 487 - 491. (in Chinese))