单孔复合锚固法的机理和实践

程良奎
（冶金部建筑研究总院，北京，100088）

提　要　本文论述了单孔复合锚固法的基本原理、工作机理和工程实践。与传统的锚固法相比，单孔复合锚固法能将荷载分散地传递给钻孔内的几个较短的固定段，不会发生粘结效应逐步弱化或“脱开”现象，能有效地调用天然地层强度，显著地提高锚杆承载力。作者还指出了传统的锚杆设计中，将固定长度上杆体与注浆体，注浆体与地层之间的粘结应力视为均匀分布是不合理的。在计算锚杆承载力时，应引入固定长度有效因子这一概念。

一　前　言

在岩土体中埋设锚杆，由于围绕杆体的灌浆体与岩土体的弹性特征同杆体的弹性特征难于协调一致，因此岩土锚杆受荷时，不能将荷载均匀分布于固定长度上，会出现严重的应力集中现象。在多数情况下，随着锚杆上荷载的增大，在荷载传至固定长度最远端之前，在杆体与灌浆体或灌浆体与地层界面上就会发生粘结效应逐步弱化或脱开的现象。这是与固定长度上粘结应力分布的不均匀性紧密相关的。

锚杆固定段粘结效应逐步弱化或“脱开”，会大大降低地层强度的利用率。如图1(a)所示，当处于固定长度深部的地层强度被利用的条件下，那么固定段前端的地层已超出其极限强度值，该处锚杆与土体界面上只具有某些残余强度。然而能有这样一种锚固方法，它可将荷载分散地传递给钻孔内几个较短的固定长度上，而不会发生粘结效应逐步弱化或“脱开”，因而可以有效地调用天然地层强度，同时能显著地提高锚杆承载力图1(b)，这就是本文要论述的单孔复合锚固体系(SBMA 法)。

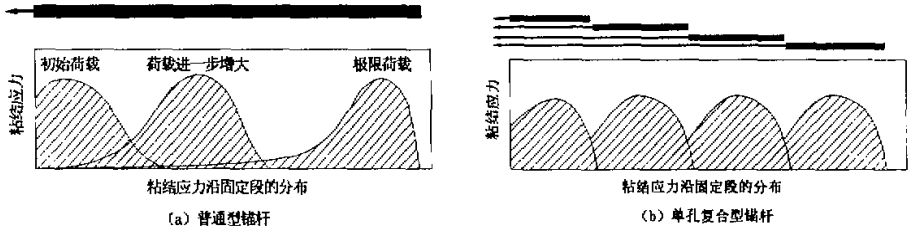


图 1　单孔复合锚固法与普通锚固法的比较

二　单孔复合锚固法的基本概念

单孔复合锚固系统是在同一个钻孔中安装几个单元锚杆，而每个单元锚杆有自己的杆体，自由长度和固定长度，而且承受的荷载也是通过各自的张拉千斤顶施加的，并通过预先的补偿张拉(补偿各单元锚杆在同等荷载下因自由段长度不等而引起的位移差)而使各单元锚杆承受相同的荷载。

当单元锚杆的固定长度很小，而不会发生粘结效应逐步弱化或“脱开”的情况下，能最大限度地调用锚杆整个固定长度范围内的地层强度。此外，使用这种锚固系统的整个固定长度理论上是没有限制的，锚杆承载能力可随固定长度的增长而提高。而对普通锚杆而言，当固定长度大于 8～10m 时，其承载能力增量很小或无任何增加。

当锚杆的固定段位于非均质地层中时，可以合理调整单元锚杆的固定长度，即比较软弱的地层中单元锚杆的固定长度应大于比较坚硬的地层中的单元锚杆的固定长度。而这样就能使不同的地层强度都得到充分的利用。如果需要，单孔复合型锚杆可采用全长涂塑的无粘结钢绞线，并绕承载体弯曲呈“U”型的单元锚杆复合而成。该种锚杆完全处于多层防腐的环境中。既可用作高耐久性的永久性锚杆；也可用作可拆除芯体(钢绞线)的临时性锚杆。

三　单孔复合锚固法的试验研究

从 1997 年开始，笔者主持的课题组对单孔复合锚固法进行了试验研究。

我们开发的单孔复合锚固法是一种压力分散型锚杆。它由无粘结钢绞线(预应力筋)、承载体、灌浆体及锚头组成。绕过承载体弯曲成“U”型的无粘结钢绞线构成一个独立的单元锚杆。在同一钻孔中，可安放多个单元锚杆(图 2)。

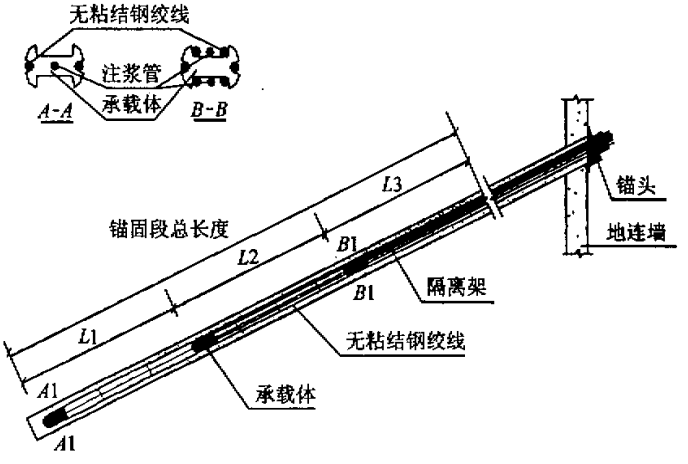


图2　单孔复合锚固体系（压力分散型锚杆）的结构构造

为了揭示单孔复合型锚杆的工作特点及粘结应力分布规律，我们进行了现场锚杆抗拔试验，锚杆轴力及粘结应力分布有限元分析和工程锚杆应力测定等项研究工作。

1. 现场锚杆抗拔试验

在北京中银大厦基坑工程和广州凯城东兴大厦边坡工程大量应用了单孔复合型锚杆。并对相似条件下的单孔复合型锚杆与普通锚杆进行了抗拔试验，试验结果见表 1。

表 1　单孔复合锚杆的现场抗拔试验

锚杆类型	荷载传递方式	单元锚杆个数	单元锚杆固定长度（m）	锚杆总固定长度（m）	地层地质条件	锚杆抗拔力（kN）	试验现场
普通锚杆	拉力型	1	21.0	21.0	粉质粘土、细、中砂	1200	北京中银大厦
单孔复合锚杆	压力分散型	4	4.5、5.0 5.0、5.0	19.5	粉质粘土、细、中砂	1480	北京中银大厦
普通锚杆	拉力型	1	18	18	粉质粘土	510	广州凯城东兴大厦
单孔复合锚杆	压力分散型	3	6.0、6.0 6.0	18	粉质粘土	810	广州凯城东兴大厦

锚杆抗拔试验结果表明：

在相似条件下，单孔复合锚杆比普通锚杆的承载力提高 23%～58%，显然这是由于单孔复合型锚杆的整个锚固长度上粘结应力分布较均匀，各单元锚杆固定长度较短，不会出现逐步粘结破坏现象，固定长度周围的地层强度得到合理利用的结果。

应当说明，锚杆的抗拔试验是结合工程进行的，锚杆荷载并没有达到破坏值，且压力分散型锚杆各单元锚杆的承载能力还受到灌浆体轴向抗压能力的限制，因而单孔复合锚杆(压力分散型锚杆)的各单元锚杆固定长度上的粘结能力并未充分发挥，其提高承载能力的潜在优势并未完全被揭示。

2. 单孔复合锚杆轴力及粘结应力分布的有限元分析

计算分析时，取钻孔直径为 130mm，注浆体强度等级为 M25，单孔复合(压力分散)型锚杆由 3 个单元锚杆组成，各单元锚杆的固定长度均为 5m，锚杆的总固定长度为 15m。普通(压力型)锚杆的固定长度也为 15m，并假定：注浆体为弹性各向同性材料；土体介质符合 Drucker-Prager 屈服准则的各向同性的弹塑性材料；不考虑地层覆盖层压力的作用。

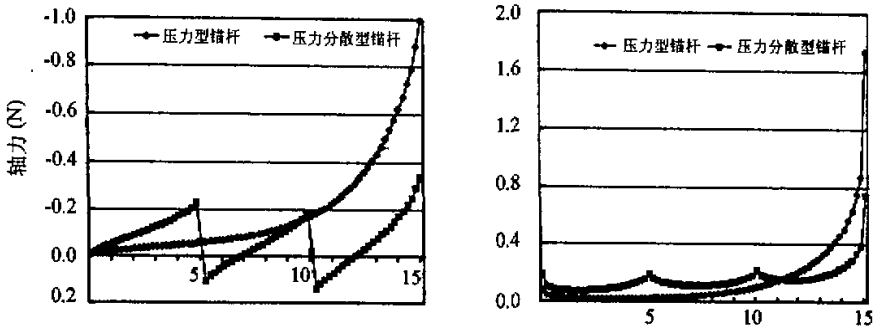
按该假定条件，问题的求解可归结为平面轴对称问题，计算分析时采用 8 节点等参元。

图 3(a)是取单位荷载(kN)作用时压力型与压力分散型锚杆的轴力曲线。图 3(b)为取单位荷载(kN)作用时压力型与压力分散型锚杆的注浆体—土体界面上的粘结应力分布曲线。计算时土的弹性模量为注浆体的 1/400，泊松比为 0.3。

图 3 显示：

(1)单孔复合(压力分散型)锚杆固定长度上的轴力及注浆体—土体界面上的粘结应力峰值远小于普通(压力型)锚杆，仅为普通锚杆的 0.33 和 0.43，大大改善了锚杆固定长度轴力

和粘结应力分布的不均匀性。



(a)轴力曲线　　(b)粘结应力分布曲线

图3　普通（压力）型与单孔复合（压力分散）型锚杆的轴力曲线与粘结应力分布曲线

(2)单孔复合型锚杆的轴力和注浆体—土体界面上的粘结应力分布在 15m 长的整个固定长度范围内，普通锚杆的轴力和注浆体—土体界面上的粘结应力分布范围远比压力分散型为小，轴力主要集中分布在约 8.0m 长度范围内，粘结应力主要分布在约 6.0m 长度范围内。

从锚杆的有限元分析资料可以看出，单孔复合锚杆可大大降低注浆体—土体界面上的粘结应力，并能较均匀地分布于整个锚固长度上。

3. 锚杆固定长度灌浆体轴向应力的测定

曾在中银大厦基坑工程中，测定了单孔复合(压力分散型)锚杆各单元锚杆固定段注浆体的轴向应力，结果表明：

(1)固定于中细砂层中的单元锚杆，其固定长度为 5.0m，测得的灌浆体轴向应力随锚杆荷载的增加而增加(图 4)。当荷载为 220kN 时，轴向应力分布主要集中在 2m 范围以内。

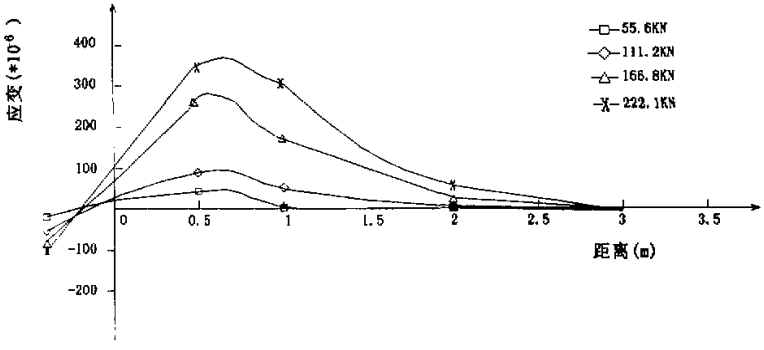


图 4　锚杆锚固体应力分布曲线

(2)对单孔复合锚杆的各单元锚杆施加荷载时，各单元锚杆固定段注浆体的轴向应力

数值有一定差异，但分布形态是相似的。这说明，与普通锚杆不同，单孔复合型锚杆可以大幅度降低固定段灌浆体的应力峰值，并使轴向应力分布在整个锚固长度上，同时还说明，在砂质土中，在充分发挥单元锚杆预应力筋(2 根直径为 Φ12.7mm 钢绞线)的抗拉强度的条件下，单元锚杆的固定长度可比 5.0m 短得多，可能 2.0～3.0m 是较为适宜的。

总之，通过锚杆的抗拔试验、有限元分析及应力测试，从不同的侧面揭示了单孔复合型锚杆独特的荷载传递机制，在外力作用下这种新型锚杆的应力能较均匀地分布在整个固定长度上。因而能充分利用土层的抗剪强度，显著地提高锚杆的承载力。

四　单孔复合锚固法的工程应用

单孔复合锚固在国内外岩土锚固工程中获得迅速发展。我国冶金部建筑研究总院近年来开发的单孔复合锚固法是一种压力分散型锚杆。已在基坑及边坡工程中共使用 20000 余根单元锚杆。在中国银行基坑工程的中细砂及粉质粘土地层中，由 4 个单元锚杆组成的单孔复合型锚杆承载力达 1500kN 时仍未见破坏，并全部实现了芯体拆除，从根本上排除了对开发周边地下空间的障碍。香港在新机场建设中，采用单孔复合锚固法创造了单根土层锚杆承载力的新纪录。位于砂和完全风化崩解的花岗岩层中的单孔复合型锚杆，由 7 个单元锚杆组成，单元锚杆的固定长度分别为 5m 和 3m，锚杆固定总长度达 30m，在 3000kN 荷载作用下，未见异常变化。台湾大地工程有限公司已完成单孔复合型锚杆的总长度达 80000m，主要用于基坑工程的可拆除地锚。

英国是开发单孔复合型锚杆较早的国家之一。至今使用已相当广泛。设置在 Bracklesham Beds 粘土中的由 5 个单元锚杆组成的单孔复合型锚杆，用测力计测得到的锚杆总荷载为 1337kN。

在日本边坡加固工程中广泛采用的被称之为 KTB 的锚固工法，实质上就是一种单孔复合型锚杆。它也是一种压力分散型锚杆。将无粘结钢绞线绕承载体弯曲成“U”型，构成单元锚杆，一般由 3 至 4 个单元锚杆组成单孔复合锚杆。该种锚杆用于土层，强风化或软弱破碎的岩层中的极限承载力通常为 800～1200kN。

五　关于改进锚杆设计的讨论

目前关于锚杆的设计，锚杆的极限承载力与锚杆的固定长度成正比。计算锚杆极限承载力的方程式为：

$$T_u = \pi \cdot D \cdot L \cdot q_s$$

式中　T_u——锚杆的极限承载力；

D——钻孔直径；

L——固定段长度；

q_s——灌浆体与土体界面上的粘结强度。

在上述表达式中，是将锚杆受荷过程中固定长度上周边的粘结应力视为均匀分布。然而，正如前面已经提到的那样，由于锚杆杆体、灌浆体以及经过灌浆处理的地层的弹性模量是不协调的，在杆体—灌浆体或地层—灌浆体界面处的逐步“分离”阻碍着粘结应力的

均匀分布。因此，假定锚杆荷载传递过程中，作用在锚固段整个周边的粘结应力均视为均匀分布，并采用锚杆的承载力与锚固长度成正比的设计原则是不合理的。

通过单孔复合锚杆与普通锚杆现场试验，有限元分析与工程锚杆的应力测试。可以对传统的锚杆设计公式作如下修正，即

$$T_u = \pi \cdot D \cdot L \cdot \psi \cdot q_s$$

或 $$T_u = \pi \cdot D \cdot L \cdot \psi \cdot \alpha \cdot C_u$$

式中 T_u —— 锚杆极限承载力；

L —— 锚杆固定段长；

D —— 钻孔直径；

q_s —— 灌浆体与地层间的粘结强度；

ψ —— 与固定长度有关的有效因子；

α —— 粘结系数；

C_u —— 地层的平均不排水抗剪强度。

粘结系数 α，它与设置锚杆地层的变异以及钻孔和施工技术的变化有关。有效因子 ψ 则是随着固定长度的增加地层强度有效利用率逐渐减低的一种系数。

英国 A.D Barley 通过在粘土中对 61 个单元锚杆的试验，其中有 21 个单元锚杆和 2 根普通锚杆发生了破坏，对其结果分析整理后，综合考虑了粘结系数以及有效锚固长度随固定长度增加而降低的影响，得出了伦敦极坚硬的粘土中锚杆固定长度与综合有效因子(f_c)的关系曲线（图 5）。

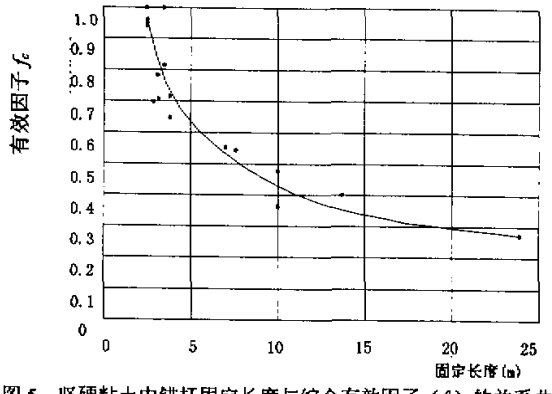


图 5 坚硬粘土中锚杆固定长度与综合有效因子（f_c）的关系曲线

图 5 表明，当使用短的(2.5～3.5m)固定长度时有效因子为 0.95～1.0，几乎能完全调用粘土的抗剪强度。此后随着固定长度的增加，综合有效因子 f_c 急剧下降。当使用很长的(25m)的固定长度时，锚杆的有效因子 f_c 可降低到 0.25。

笔者认为，在锚杆设计中，必须建立固定长度有效因子的概念。但对砂质土、软粘土、硬粘土、软岩、中硬岩、硬岩等不同地层，固定长度的有效因子 ψ 随长度变化的规律是不同的。今后应通过更多的试验获得不同地层中的有效因子，为修改锚杆设计提供定量的

科学依据。

六 结 语

1.与传统的锚固法相比，在同一钻孔中安设多个单元锚杆的单孔复合锚固法能使粘结应力较均匀地分布在整个锚固长度上，因而能更有效地利用地层强度。

2.设计单孔复合锚固法时，除应考虑地层强度的变异性外，应特别重视地层抗剪强度的有效利用率将随锚杆固定长度的缩短而提高。

3.单孔复合锚固法的固定长度可达 30m，其承载力可随固定长度的增加而成比例地提高，为在土层及软弱破碎岩石力中大幅度提高单根锚杆的承载力，提供经济有效的方法。

4.随着锚杆荷载的增大，锚杆固定段前端过高的粘结应力峰值会导致注浆体与地层或注浆体与杆体界面处粘结效应弱化或分离。因而以往的锚杆极限承载力计算公式将沿固定段全长的粘结应力按均匀分布处理是不合理的。在计算锚杆承载力时，应引入固定长度有效因子 ψ 。该值随锚杆固定长度的增加而急剧减小。

5.若单孔复合型锚杆的预应力筋采用涂塑的无粘结钢绞线，则能形成多层防腐体系，既可用作高耐久性的永久锚杆，也可用作可拆除芯体(钢绞线)的临时锚杆。

参考文献

[1] 程良奎：《深基坑锚杆支护的新进展》，见中国岩土锚固工程协会编《岩土锚固新技术》，北京，人民交通出版社，1998。

[2] 程良奎：《分散压缩型（可拆芯式）锚杆》，见陈惠玲编《高效预应力结构设计施工实例应用手册》，北京，中国建筑工业出版社，1998。

[3] Barley A D. The single bore multiple anchor system. In: proc. Ground Anchorages and Anchored Structures. London:Thomas Telford, 1997.

[4] Woods R I, Bakhordari K. The influence of bond stress distribution on ground anchor design. In : proc. Ground Anchorages and Anchored Structures. London: Thomas Telford, 1997.