浅析高层建筑基坑土钉支护施工中分层开挖间隔时间控制方法

蔡灿柳　赵清荣　沈贵松
（总参工程兵科研三所，洛阳，471023）

提　要　土钉支护作为一种新的挡土技术，由于经济、可靠且施工快速简便，已得到迅速推广和应用。长期以来，由于多种原因，始终没有分层开挖时间合理控制方法。本文通过分析水泥浆体强度增长规律、水泥浆体抗压强度与钢筋粘结力的关系，讨论施工进度合理控制方法。可供广大工程技术人员施工设计参考。

一　引　言

在基坑开挖中，土钉支护现已成为桩、墙、撑、锚支护之后又一项较为成熟的支护技术。土钉大致可分成两类：击入钉和注浆钉。注浆钉的钢筋或钢管外裹水泥砂浆或水泥净浆浆体(以下简称水泥浆体)。本文主要针对注浆钉讨论施工进度问题。

土钉支护工程施工进度控制的关键环节是分层开挖间隔时间。现行由冶金部制定的土钉支护施工规程中，规定分层开挖间隔时间以“水泥浆体强度达到设计强度的70%以上”为依据。很明显该项规定对大多数工程过于保守，在实际土钉支护工程施工中也难以实行。由建设部委托清华大学等单位主编的“土钉支护设计与施工技术条例”中对土钉施工的分层开挖时间没有明确规定。第 4.1.1 条要求在未完成上层作业面的土钉与喷射混凝土支护以前，不得进行下一层深度的开挖。该项规定比较模糊，“完成上层作业面的土钉与喷射混凝土支护”所指时间不确切，是施工工艺完成，还是支护能力达到设计要求。显而易见，这两种理解中，前者没有考虑安全因素；后者则需要较长的分层开挖间隔时间，影响施工进度，降低工作效率。

不难看出，目前土钉支护施工中，下一层开挖间隔时间的确定尚没有较好方法，人们大多凭感觉、经验、周边环境的重要程度、工期要求、作业空间大小、土方开挖速度、土质情况等拟定下一层开挖时间。大量工程实践表明，下一层开挖间隔时间太大，导致施工工期延长；下一层开挖间隔时间太小，注浆钉的水泥浆体强度太低，易导致边坡失稳，造成不可挽回的损失。本文通过分析水泥浆体强度增长规律、水泥浆体抗压强度与钢筋粘结力的关系，讨论施工进度合理控制方法。

二　施工中土钉抗力确定方法

在大多数土钉设计方法中，均假定土钉为受拉工作，不考虑其抗弯刚度。所以在基坑开挖期间，按总安全系数分析下一层开挖后极限状态稳定时，土体破坏面上的土钉抗力 T_R 由下列四种情况确定，并取其较小值：

(1)土钉受拉拔出破坏。土钉从破坏面内侧的稳定土体中拔出：

$$T_R = \pi D L_a \tau_{UK} \tag{1}$$

(2)土钉受拉拔出破坏。土钉从破坏面内侧稳定土体长度内水泥浆体中拔出：

$$T_R = \pi d L_a \tau_{GK} \tag{2}$$

(3)土钉受拉拔出破坏。土钉从破坏面外侧的失稳土体中拔出：

$$T_R = \pi D(L - L_a)\tau_{UK} + R \tag{3}$$

(4)土钉受拉拔出破坏。土钉从破坏面外侧失稳土体长度内水泥浆体中拔出：

$$T_R = \pi d(L - L_a)\tau_{GK} + R \tag{4}$$

式中：d 为钢筋的直径；D 为土钉孔径；L_a 土钉伸入稳定土体中的长度；L 土钉总长；R 为支护面层能够给与土钉端部的拉力，取决于土钉与面层的粘结强度以及面层的抗弯、抗剪能力；τ_{UK} 为土钉与土体界面粘结强度标准值；注浆压力及成孔方法对界面的粘结性能产生重大影响。在压力注浆下，土钉周围的土体密实度提高，土体性能改善，与土钉粘结性能大大提高。并且随龄期的增加而提高。τ_{GK} 为土钉钢筋与水泥浆体之间的界面粘结强度；主要与钢筋的表面状况、水泥浆体的抗压强度等有关。

三　水泥浆体早期强度增长规律

水泥浆体强度的增长与养护时间、温度、湿度等条件密切相关。土钉中的水泥浆体在

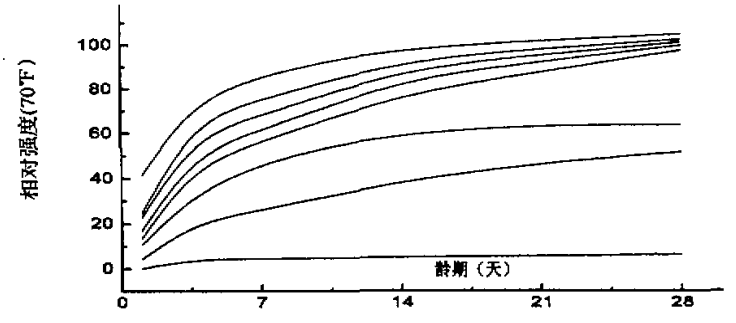


图 1　养护时间对水泥浆体抗压强度的影响

注：(1)试件系浇注，密封并保持于注明的温度下；(2) 配比资料：水灰比=0.53，砂率：40%；(3) 含气量：未加气 I 型水泥；(4)由上至下养护温度依次为 115、100、85、75、55、50、33、16℉。

养护期间，温度相对恒定，湿度通常满足水泥浆体养护的湿度要求，主要变化因素是养护时间。硅酸盐水泥浆体的强度随养护时间的增加而增长。图 1 给出了水泥砂浆强度发展规律。水泥砂浆的强度早期发展较快，后期较慢。分析回归养护温度为 21℃情况下的强度发展曲线，可得出如下公式：

$$R_T/R_{28} = 18.3993 + 8.3462T - 0.1992T^2 \tag{5}$$

式中：T 为水泥浆体养护时间(d)；R_T/R_{28} 为水泥浆体 T 养护时间的抗压强度与 28 天时的抗压强度之间的比值(%)。

四　水泥浆体抗压强度与钢筋粘结力的关系

土钉支护中钢筋粘结力在施工早期是极其重要的参数，后期由于钢筋的粘结力通常能满足土钉的抗拔力要求，一般不作为重要参数考虑。钢筋的粘结力主要由水泥浆体与钢筋之间的摩擦力和附着力而产生，水泥浆体对钢筋的收缩也有一定的影响。通常随抗压强度的增大，钢筋的粘结强度也增大。水泥浆体抗压强度在 20MPa 以内时，大致成正比关系。图 2 给出了水泥浆体的抗压强度与钢筋粘结强度关系曲线。由图中曲线可明显看出，变形钢筋的粘结力高于光面钢筋。在 $0<R_T\leqslant 20$MPa 情况下，分析回归图 2 中的变形钢筋粘结强度与抗压强度关系曲线。可得如下公式：

$$\tau = 0.0395 + 0.2186R_T \tag{6}$$

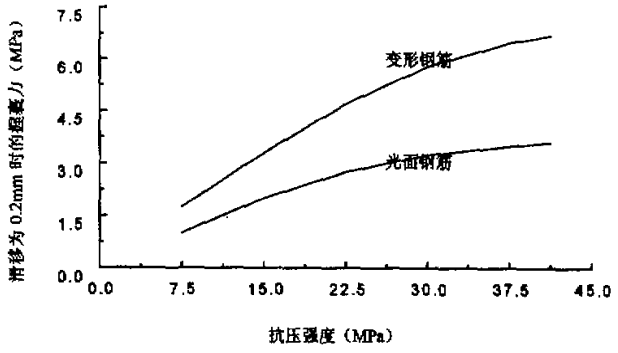


图 2　水泥浆体抗压强度对粘结强度的影响

五　施工进度合理控制

土钉支护的基坑或边坡设计方案确定后，施工期间，水泥浆体的强度是影响土钉抗拔力的主要因素。式(5)、(6)给出了水泥浆体抗压强度与养护时间、水泥浆体抗压强度与钢筋粘结力的关系回归方程式。按 M20 砂浆将(5)式代入(6)式，可得钢筋粘结力 τ 与养护时间 T 的关系如式(7)。

$$\tau = 0.8435 + 0.3649T - 0.0087T^2 \tag{7}$$

在土钉支护设计中，土钉中水泥浆体与土体间的粘结力通常由现场试验结果来确定。在没有任何试验资料的情况下，一般按土体的抗剪强度计算：

$$\tau_{\pm} = C + \sigma_i \mathrm{tg}\phi \tag{8}$$

式中：ϕ为土的内摩擦角；C为土的内聚力；σ_i为某处土的竖向应力

众所周知，当钢筋的粘结强度较低时，土钉拔出破坏主要发生在钢筋与水泥浆体的界面；当钢筋的粘结强度达到或超过某一值后，土钉的拔出破坏则主要发生在水泥浆体与土体之间的界面上。即(2)式与(1)式之比或(4)式与(3)式之比大于或等于1：

$$\frac{T_{R2}}{T_{R1}} = \frac{d\tau_{GK}}{D\tau_{UK}} \geq 1 \quad \text{或者} \quad \frac{T_{R4}}{T_{R3}} = \frac{\pi d(L-L_a)\tau_{GK} + R}{\pi D(L-L_a)\tau_{UK} + R} \geq 1 \tag{9}$$

式中：T_{R1}、T_{R2}、T_{R3}、T_{R4}分别为(1)、(2)、(3)、(4)式算出的土钉抗拔力。因此，土钉施工期间或土钉支护作用早期，土钉的抗拔力主要由钢筋的粘结强度决定。当钢筋的粘结强度足够大时，土钉的工作状态进入设计工作状态，按土钉正常设计方法验算其稳定性。当钢筋的粘结强度较小时，边坡的稳定性主要取决于钢筋的粘结强度，按土钉与钢筋的实际粘结强度验算其稳定性。

土钉支护工程施工期间，由于水泥浆体的强度处于由低向高的发展过程中，土钉支护施工中下一层开挖间隔时间则可依据水泥浆体与钢筋的实际粘结力，按土钉抗拔力计算公式(2)、(4)推算。通过不同龄期的钢筋的实际粘结力验算土钉施工中开挖下一层后边坡的稳定性，从而确定下一层安全开挖的最短间隔时间。

参考文献

[1] 陈肇元等：《土钉支护在基坑工程中的应用》，北京，中国建筑工业出版社，1997.8。

[2] 曾宪明等：《岩土深基坑喷锚网支护原理、设计、施工指南》，上海，同济大学出版社，1997.1。

[3] 程良奎等：《岩土加固实用技术》，北京，地震出版社，1994.5。

[4] 王异等.：《混凝土手册》，吉林，吉林科学技术出版社，1985.10。

[5] 黄士元等：《近代混凝土技术》，陕西，陕西科学技术出版社，1998.10。

[6] 黄士元等：《混凝土科学》，北京，中国建筑工业出版社，1986.9。