

用石灰及水泥土柱稳定边坡和深开挖

Bengt B. Broms教授* 唐念慈译

(新加坡南洋工学院)

提 要

本文介绍用生石灰粉或水泥与软粘土就地搅拌在地基内形成土柱以稳定沟槽, 深开挖以及边坡的设计与施工方法。石灰土柱具有石灰用量低, 施工振动小, 挤土扰动少, 透水性好的优点。文中讨论了石灰土的强度机理, 石灰土柱的受力及破坏形式, 给出了计算图式及应取的安全系数值。全文结合瑞典工程实例阐述。

一、引 言

在斯堪的纳维亚国家内常用石灰土柱稳定极软粘土层内的深开挖和边坡。现场及室内试验说明此法亦能在东南亚采用, 用来增加新加坡和马来西亚沿海海相软粘土的稳定性, 因为这些粘土与瑞典西南部的粘土极为相似。

此种加固方法采用一种搅拌器将生石灰(CaO)或水泥与软粘土就地拌和, 形成直径为0.5m, 最大长度可达15m的石灰土或水泥土柱。设备接装在履带机上(图1)生石灰储放在牵引的储罐内^[2,4,5]。

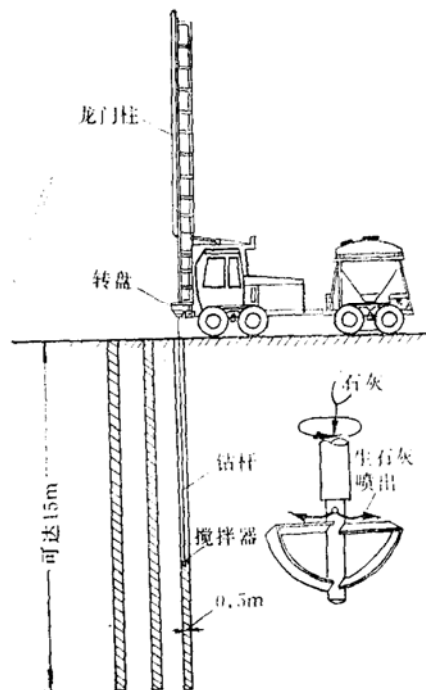


图1 LSP4型石灰土柱机

* 国际土力学基础工程学会新任主席瑞典Bengt B. Broms教授于1985年11月1日应邀来南京工学院土木工程系讲学。本文是讲学内容之一, 中译稿由南京工学院唐念慈教授译出, 限于篇幅, 本刊略有删节——编者。

二、用石灰或水泥稳定软粘土

软粘土在与生石灰或水泥拌和后抗剪强度增大。在石灰用量(以土的干重计)为10~12%以内时,强度一般随石灰含量增多而增大。对于抗剪强度为10至15kPa的软粘土而言,强度的相对提高通常为原有抗剪强度的10至50倍。这种相对提高一般随粘土的液限增大而减低。如石灰含量超出12%左右,抗剪强度或土柱的承载能力不再增大,甚至强度可能减低,而在用水泥时看来却无这样一个上限。当粘土的塑性指数高时一般以用石灰为宜,而砂质或粉质土塑性指数较低,则以采用水泥为有利。

水泥的优点是处理方便,在东南亚又比石灰便宜,生石灰的优点则是要求彻底搅拌的程度比水泥要低,同时用石灰稳定的土渗透性高,石灰土柱在土中还将起着竖向排水井的作用,而用水泥后土的渗透性通常反而减低。

三、边坡的稳定性

可按图2说明的方法用石灰土柱改善软粘土边坡的稳定性。例如瑞典哥德堡 Tuve 地区曾用石灰土柱部份加固一个新近受到滑坡影响的场地。

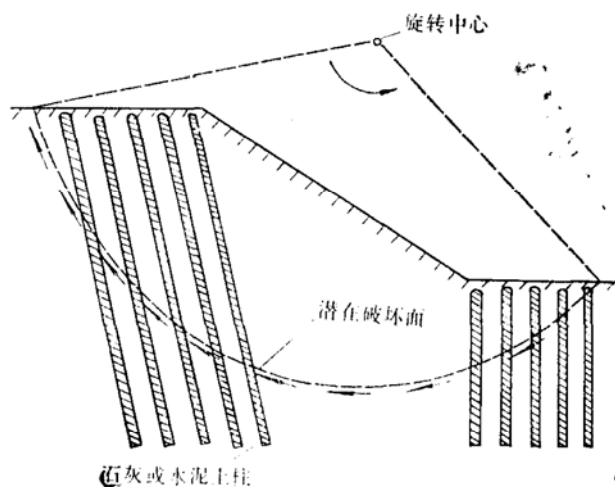


图2 用石灰或水泥土柱稳定边坡

沿土中潜在破坏或滑裂面上的平均抗剪强度可从下式估得:

$$c_{av} = c_u(1 - a) + s_{col} \cdot a \quad (1)$$

式中 c_u 为土的原有抗剪强度例如由原位十字板试验测定; s_{col} 为柱内加固土的平均抗剪强度; a 是柱的相对面积, 即土柱的总截面积与加固土面积之比(NA_{col}/BL)。

加固土的抗剪强度 s_{col} 取决于柱内的法向压力, 又和周围未加固土相比的柱的相对刚度有关。计算中建议取用总的自重压力及加固土的摩擦角 ϕ_u^{col} 为 30° 。

土所需加固的范围可通过分析不同潜在滑裂面的稳定性来计算。分析中的安全系数至少应为1.5。

石灰土柱法可代替混凝土桩, 木桩或钢桩。在某些情况下打桩会引起滑坍, 因为打桩使土受到重塑并产生高的孔隙水压力。设置石灰或水泥土柱则对未加固土的抗剪强度的减损较小, 因为土与石灰搅拌时土的侧向挤出很小, 设置柱体而产生的任何超孔隙压力的消散较快。

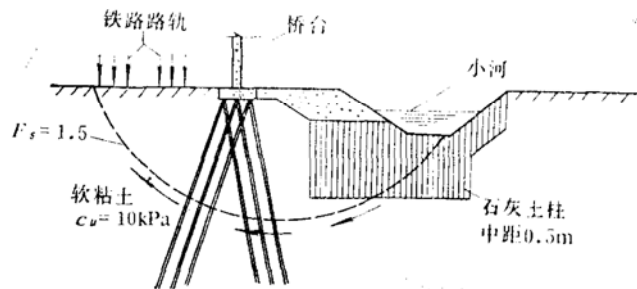


图3 桥台用石灰土柱加固(Ekström及Tränk, 1979)

透水性粉土或砂层中在孔隙水压力高时采用石灰土柱亦属有利。石灰土柱使平均抗剪强度提高从而有利于边坡的稳定。

图3所示为用石灰土柱提高离桥台很近的边坡稳定性^[6]。石灰土柱设置在桥台与相邻小河之间, 间距按土柱直径相应取为0.5m。加固区内的石灰土柱面积约占加固区总面积的80%。

用此法有可能将圆弧滑动法计算的安全系数提高到1.5。未加固的层状软粘土的原始不排水抗剪强度是低的, 约为10kPa, 而含水量约60%。石灰土柱内加固后粘土的平均抗剪强度按室内试验估计至少可达45kPa, 这相应于加固区的平均抗剪强度为35kPa(0.8×45)。要比其他方案例如采用大直径就地灌注桩或不用桩而直接使小河流经涵洞的方案为经济。

图4所示为石灰或水泥土柱法的另一种应用, 此时石灰土柱用于增加锚碇板桩墙的稳定。墙前所设柱有双重作用, 即施工时增大墙上作用的横向被动土压力, 而在开挖区内将来在柱上要建的基础沉降亦将减少。墙脚处最大被动土压力增大是由于石灰土柱提高了粘土的平均抗剪强度。同时因为生石灰产生膨胀而使发挥被动土压力所需的侧向位移量亦减小了。石灰土柱也设在板桩墙后以减少主动土压力, 因而也减小了土锚中的力。

石灰或水泥土柱可以代替板桩作为沟槽的侧向支承(图5), 各柱应部份搭接以便形成实体墙。墙的重量如同重力式挡墙可用来抵抗墙后的侧向土压力及可能有的水压力。石灰土柱墙身抵抗倾复力矩所需的厚度随开挖深度的增大而增加。如果能将墙后的水压力减小, 则开挖深度较大时石灰土柱法也将是经济的。在开挖下水道管线用的沟槽时, 便可能从开挖端头起随着开挖进行而铺设管段。运走加固过的土也比未加固的软粘土方便。

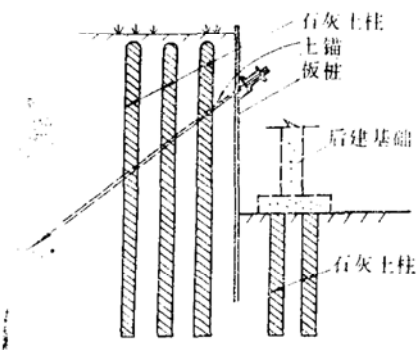


图4 锚碇板桩墙用石灰土柱加固

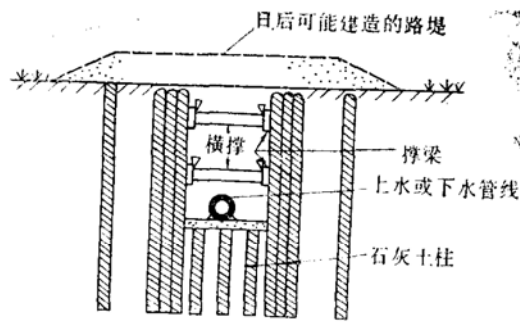


图5 用石灰土柱加固沟槽, 柱身搭接以防单根土柱倾复。

在深沟槽中石灰土柱甚至是在地下水位以下的长期性状亦是满意的。例如 Ska-Edeby 一处4m深试验槽曾在10年左右后开挖, 发现石灰土柱墙并无显著损坏, 槽内地下水位约在地面以下1m处。

在开挖深度小于4至5m时石灰土柱常比板桩经济。在设计石灰或水泥土柱墙时, 应同时考虑倾复破坏或底部隆起以及平面或圆弧滑动面穿过石灰土柱墙身的剪切破坏。

石灰土柱用于深开挖时其性状部份地取决于每根石灰土柱表面具有的抗拉强度较低的薄石灰层。例如挖出的柱身上粘着在表面的未加固的粘土很易剥除。沿开挖边缘的第一排土柱会在此弱层中出现张裂缝。当沿墙的这些裂缝中充满水时静水压力便很高, 能使单根土柱发生倾复破坏, Ska-Edeby已出现过这种情况。将柱身紧靠, 重叠设置能避免单独柱身间的软弱层, 防止柱身倾复而形成坚实连续的墙身。沟槽一般可在设置土柱后约一个月开挖。

当石灰土柱的屈伏强度大于20至30kN(2.2~3.3t)并为直的石灰土柱时, 墙身尺寸一般受倾复控制。使柱墙倾复破坏的水与土压力由墙身的自重来抵抗。旋转中心取在开挖底紧靠墙面处。如墙上仅有水压力则必须满足下述关系, 见图6(a)。

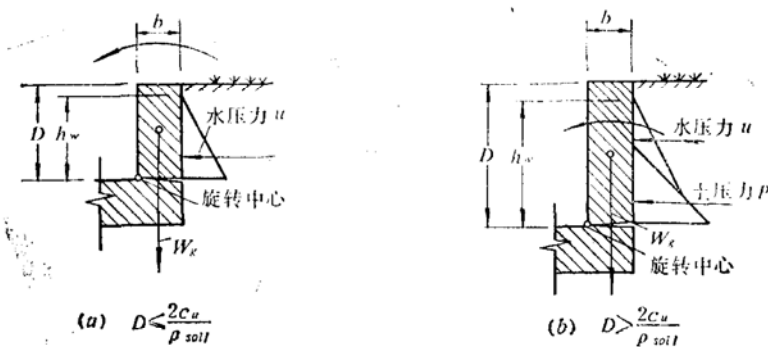


图6 倾复破坏

$$0.5W_g b > \frac{1}{6} h_w^3 \rho_w \quad (2)$$

式中 W_g 及 b 相应为墙重及宽度, h_w 为墙后裂缝中相对于坑底的水位高度而 ρ_w 为水的容重

1(0kN/m³)。当 h_w 等于开挖深度时式(2)可简化为

$$\frac{b}{D} \geq 0.58 \sqrt{\rho_u / \rho_{c oi}} \quad (3)$$

其中 $\rho_{c oi}$ 为柱身材料的容重, 当 $\rho_{c oi} = 16 \text{ kN/m}^3$ 时则

$$\frac{b}{D} \geq 0.46 \quad (4)$$

当开挖深度超过某一临界值, ($2c_u / \rho_{soil}$, ρ_{soil} 为土的容重)墙后的侧向土压力亦将影响稳定。然而, 实际的侧向土压力要比朗金土压力理论计算值要小, 因为此法未考虑沿柱墙的摩擦力或粘着力。此种侧向土压力折减在库伦土压力理论中可加以考虑, 因此用朗金土压力理论是偏于保守的。

作用在柱墙上的侧向土压力可在墙后设置一排或几排柱来减小(图5)。这样侧向土压力便可按考虑了柱体承载力后的土的平均抗剪强度计算。石灰或水泥土柱可设成斜的, 使抵抗力矩力臂增大而增强效果。

曾在斯德哥尔摩南约10km的Huddinge(KV Myren), 在很软的粘土中($c_u = 7 \text{ kPa}$)用石灰土柱稳定3.5m深的试验槽。当墙后区淹水及墙后裂缝灌水后, 墙身侧移约50mm, 由水压力及朗金土压力理论计算的侧向土压力产生的倾复力矩大致等于石灰土柱块体按式(2)计算的自重稳定力矩。

石灰土柱墙设计中还必须考虑抗剪切破坏稳定性。验算可假定沿如图7所示倾斜破坏面或沿开挖底部水平面进行。为了简化计算可假定破坏面成60°倾斜。当 $h_w / b \geq 1.7$ 时墙也将受到水压力。当墙后裂隙全部由水充填时则可得下式。

$$h_w / b \leq \sqrt{3} + \sqrt{\frac{4c_{coi} + \rho_{coi}}{b\rho_w} + \frac{2D\rho_{coi}}{3b\rho_w}} \quad (5)$$

式中 c_{coi} 是柱身材料的粘聚力, ρ_{coi} 为容重。如图7(b)所示, 当 $(D - 1.7b)$ 大于 $2c_u / \rho_{soil}$ 时墙后土压力也将影响稳定性。

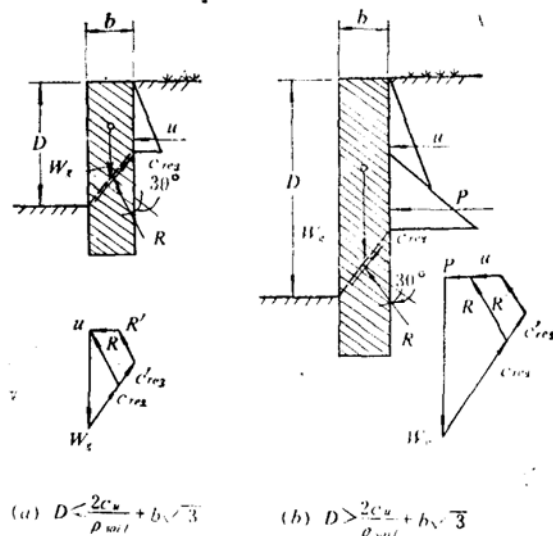


图7 剪切破坏

当开挖深度大于 $6c_u/\rho_{soil}$, 同时开挖长度相对深度而言为较大时, 可能发生坑底隆起破坏。坑底可如图8所示予以加固。

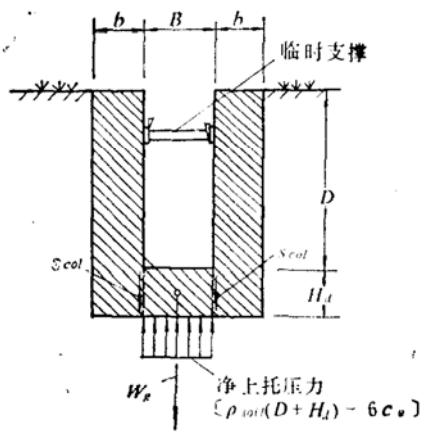


图8 坑底隆起

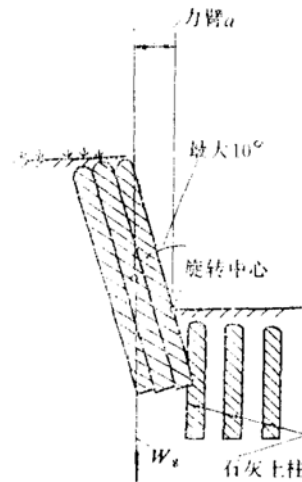


图9 用倾斜土柱增加深开挖的稳定性

当石灰土柱相互搭接时柱内加固土的不排水抗剪强度将控制设计。防止坑底隆起破坏所需柱体长度(H_d)可按下式计算:

$$H_d > \frac{BD\rho_{soil}}{2s_{col}} - \frac{3c_u B}{s_{col}} \quad (6)$$

柱体的抗剪强度 s_{col} 受上述破坏面上作用的法向压力影响。

在导得式(6)中曾假定开挖长度相对宽度而言是长的, 同时槽底以下的粘土层厚度大于开挖宽度。坑底隆起破坏的危险性可因沟槽分成短段开挖而减小。如粘土层的深度小于宽度, 则所需的柱长将比按式(6)计算的为短。如柱体不完全搭接则在分析中应采用粘土的原始抗剪强度而不是柱体材料的抗剪强度 s_{col} 。

当槽底已用石灰或水泥土柱加固以防坑底隆起破坏而石灰土柱的间距并不很大($<1m$)则一般在坑底设一层砂或卵石已足以支承大直径下水管道。

石灰土柱墙的抗倾复稳定性, 如图9所示, 可将墙向后倾斜而得到提高, 或如图10所示方式设置而起扶壁作用。这样在扶壁间的未加固土亦能对墙的抗倾复稳定性起作用。墙身即使仅稍有小的倾斜也能较多地增大稳定性。墙的稳定性的于是取决于通过石灰土柱或在其下的圆弧或平直破坏面上的平均抗剪强度。

Sahlberg(1979)曾描述了一例用石灰土柱在很软的粘土($c_u = 10kPa$)中加固深开挖的工程^[10, 11]。石灰土柱是倾斜的, 以提高其效益。Sahlberg 估计石灰土柱造价比通常的板桩墙造价减少30~40%。

用石灰或水泥土柱加固深开挖时设计首先是用朗金理论以折减的抗剪强度计算墙上作用的土压力。于是实测的土的抗剪强度, 例如用现场十字板试验测得, 须除以一个安全度分系数 f_c (一般为1.5)。接着可算得石灰土柱墙的宽度。墙的宽度及斜度一般取决于绕开挖底部一点倾复(图6)的危险性。下一步决定石灰土柱根数, 这在一般情况取决于沿水平、倾斜或圆弧破坏面的剪切破坏。此种破坏是由于图7所示的侧向土压力及水压力所造成。

柱体长度取决于坑底以下柱墙上的被动土压力。被动土压力应至少等于墙后侧向土压力

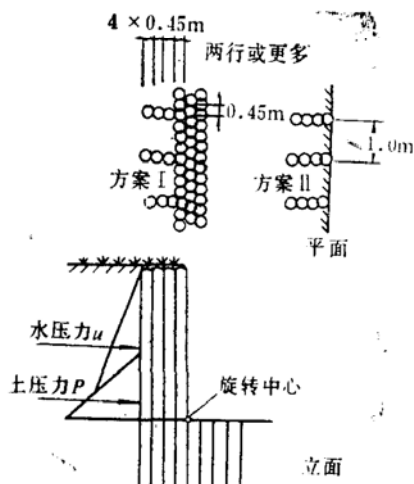
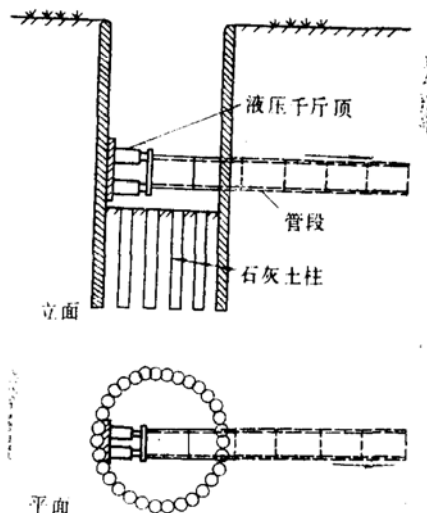


图10 用扶壁增加稳定性

图11 用石灰土柱加固软粘土深竖井，
管段穿过石灰土柱墙身

及水压力。接着应再校核开挖坑底部隆起的稳定性，安全系数至少应为1.5。

石灰土柱的横撑宜按墙后作用的水压力设计，作为一项防止墙后裂缝偶然为水所充填时的一种安全措施。在深开挖中或在柱体的承载力不确定时墙身应至少在两个标高上加以支撑。如柱体倾斜且墙后水压力以及墙身位移业经校核，则可以省去支撑。

亦应对降低墙后水压力的可能性加以研究，如若水位能降低1m则柱体数往往可大为减少。

四、顶 管 法

建造深埋的下水管线如用顶管法时也可采用石灰土柱(图11)。石灰土柱用于加固施工所需的深竖井的壁和底。混凝土管节可用千斤顶穿过石灰土柱墙。墙是按作用在有支撑的板桩墙上的侧向土压力设计的。石灰土柱墙的抗剪强度及承载力必须足以支承墙内由作用在墙上的侧向土压力产生的环向力。墙身也作为将管节顶过墙身进入土中的液压千斤顶的支承。竖井底部亦设置石灰土柱以防止坑底隆起破坏。

参 考 文 献

- [1] Bredenberg, H., (1983), Lime Coulmns for Ground Improvement at New Cargo Terminal in Stockholm, Proc. 8th European Conf. Soil Mech. & Found. Engg., Vol. 2, pp. 881-884, Helsinki, Finland.
- [2] Broms, B., (1983), Stabilization of Soft Clay with Lime Columns. International Seminar on Construction. Problems in Soft Soils, 1-3 December 1983 Singapore, pp. 30. Also in Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground, 10-11 Jan., 1984, Singapore, pp. 120-133.
- [3] Broms, B. & Boman, P., (1975), Lime Stabilized Columns, Proc. 5th Asian Regional Conference, Bangalore, India. Vol. 1, pp. 227-234.

- [4] Broms, B. & Boman, P., (1976), Stabilization of Deep Cuts with Lime Columns. Proc. V European Conf. Soil Mech. & Found. Engg., Vol. 1, pp. 207-210. Tokyo, Japan.
- [5] Broms, B. B. & Boman, P., (1977), Stabilization of Soil with Lime. Ground Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 23-32.
- [6] Ekström, A. and Tränk, R., (1979), Kalkpelarmetoden. Tillämpningar for Stabilisering av Brostöd Och Rörgrav. (The Lime Column Method. Stabilization of Bridge Abutments and Trenches). Proc. Nordic Geotechnical Meeting, Helsinki, Finland pp. 258-268. (In Swedish).
- [7] Holm, G., Bredenberg, H. and Broms, B. B., (1981), Lime Columns as Foundation for Light Structures. Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Engg., Vol. 3. pp. 687-694.
- [8] Holm, G., Tränk, R. and Ekström, A., (1983a), Improving Lime Column Strength with Gypsum. Proc. 8th European Conf. Soil Mech. & Found Engng., Vol. 2, pp. 903-907, Helsinki, Finland.
- [9] Holm, G., Tränk, R., Ekström, A. and Torstensson, B-A., (1983b), Lime Columns under Embankments - A Full Scale Test, Proc. 8th European Conf. Soil Mech. & Found. Engg., Vol. 2, pp. 909-912, Helsinki, Finland.
- [10] Lahtinen, P. O. and Vepsäläinen, P. E., (1983) Dimensioning Deep-Stabilization Using the Finite Element Method. Proc. 8th European Conf. Soil Mech. & Found. Engg, Vol. 2 pp. 933-936 Helsinki, Finland.
- [11] Sahlberg, O., (1979), Kalkpelarstabilisering for djupt ledningsschakt i lös lera. (Stabilization of an excavation in Soft Clay with Lime Columns), Nordic Geotechnical Meeting, Helsinki, Finland, pp. 295-296. (in Swedish).
- [12] Sahlberg, O., and Boman, P., (1979), Kalkpelarmetoden-Uppföljning av en rörgravs-stabilisering. (The Lime Column Method-Evaluation of a Stabilized Cut). Swedish Council for Building Research, Project 780, 745-7.

Stabilization of Slopes and Deep Excavations with Lime and Cement Columns

Bengt B. Broms

(Nanyang Technological Institute, Singapore)

Abstract

In this paper the method of design and construction of lime and cement columns for the stabilization of trench, deep excavations and slopes is introduced. Lime or cement columns are installed by mixing unslaked lime powder or cement insitu with soft clay. It has the advantages of good in permeability, low lime consumption, without vibration during construction and less soil displacement disturbances. The strength mechanism, the loading and rupture theory, the design scheme and safety factor should be taken in design of lime columns are also given. The text is illustrated with Swedish case histories.