

深基坑圆形冻土帷幕力学性能模型试验研究

东兆星, 齐燕军, 周国庆

(中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 利用自行设计加工的大型深基坑冻结模拟试验台, 进行大直径圆形冻土帷幕受力与变形的物理模拟试验, 获得深基坑开挖过程中圆形冻土帷幕水平位移随基坑开挖深度、开挖半径和冻土平均温度等影响因素的变化规律以及冻土帷幕暴露段水平变形规律。试验结果表明, 冻土帷幕水平位移随基坑开挖深度和开挖半径的增大而增大, 随冻土的平均温度降低而减小。随着开挖深度的增加, 冻土帷幕暴露段的水平变形不断增大, 且表现为“中间大、两头小”的变形特征; 不同温度下冻土帷幕的弹性变形占总变形量的比值不同, 由 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 30% 增加到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 90%。对几个影响因素进行综合分析可知, 冻土帷幕水平变形的主要影响因素是基坑半径和开挖深度, 而帷幕平均温度、厚度及施工段高的影响相对较小。

关键词: 土力学; 深基坑; 冻土帷幕; 位移; 模型试验研究

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4362 - 05

MODEL EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROUND-SHAPED FROZEN SOIL WALL IN DEEP PIT

DONG Zhaoxing, QI Yanjun, ZHOU Guoqing

(School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: In order to understand the artificial freezing technology employed in the deep pit, a physical model test of stress and deformation of large diameter round-shaped frozen soil wall was carried out on a self-developed large test rig. The laws were obtained among the horizontal displacement of the frozen soil wall and the factors of the excavation depth, frozen soil wall diameter, and the average of temperature of frozen soil. The changing laws in the exposure of frozen soil wall were also obtained. The results show that the horizontal displacement of wall increases as the depth and diameter increase during excavation, but decrease as the average of temperature decreases. The horizontal displacement of the exposure of frozen soil wall increases as the excavation depth increases, and the characteristics of the larger deformation in the center and the smaller ones in both sides were obtained. There are the different ratios of elastic displacement to the total displacement under different temperatures, and it increases from 30% ($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$) to 90% ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$). The analysis indicates that the diameter and depth of foundation pit are the major factors that affect horizontal displacement of the frozen soil wall, and the effects of average of temperature, wall thickness and excavation height are comparatively smaller.

Key words: soil mechanics; deep pit; frozen soil wall; displacement; model experimental study

1 引言

目前, 大量深基坑工程的出现, 给工程建设带

来了很多问题, 如基坑的坍塌、涌水、涌砂和临近建筑物的破坏等。据统计, 在 20 世纪 90 年代中期以前, 我国深基坑工程事故发生率达 30% 左右^[1, 2],

收稿日期: 2006 - 09 - 14 ; **修回日期:** 2006 - 12 - 13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534040)

作者简介: 东兆星(1966 -), 男, 博士, 1987 年毕业于中国矿业学院矿山建筑系矿井建设专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: dongzx1966@163.com

其中设计与施工不当引起的事故约占 80%。为解决深基坑支护难的问题, 在实际工程中又出现多种支护结构和方法, 如钢板桩、深层搅拌桩、旋喷桩、钻孔灌注桩、地下混凝土连续墙、注浆帷幕、沉井法、土钉和土层锚杆以及几种方法相结合的支护方式。这些支护方法在长期的工程应用中取得了大量的成功经验, 并且得到了不断发展^[3], 但都存在一些不足, 其共同缺点是防水性能差、涌水涌砂引发地面沉降、受复杂的地层条件和地面建筑条件的制约等。

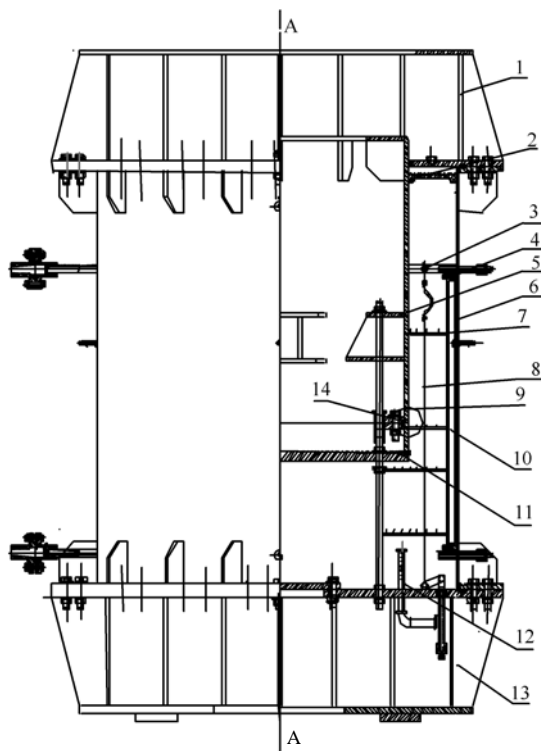
随着制冷技术的发展和人工冻结法的应用, 一些发达国家已将人工地层冻结技术广泛应用于许多不同种类的深基坑工程中^[4]。冻结法应用于深基坑支护工程具有安全可靠性好、适应性强、环境影响小、可控性较好等优点。近年来, 人工冻结施工工艺、应用范围、施工规模都日益扩大, 成为岩土工程尤其是特殊地质和工程条件下工程施工的重要方法之一^[5]。

大量工程实践表明, 对于开挖深度超过 20 m, 甚至超多 30 m 的深基坑工程, 人工冻土围护结构以其稳定性、整体性好和良好的隔水性能成为首选的支护方法, 有时几乎是惟一可选的方法。而国内虽然在冻结凿井工程方面已经掌握很高的技术, 但在人工冻结围护结构用于深大基坑支护方面, 与国外相比还有很大差距, 其原因除了人们在心理上不敢应用冻结法于尚未涉及的地下工程领域外, 主要是冻结法在深大基坑支护方面应用的理论和技术储备不足, 又无施工经验可供参考。因此深入研究深基坑开挖中冻土帷幕围护结构的变形性能和稳定性, 进而对冻土帷幕进行优化设计, 将具有重要的理论和实践意义。

2 试验系统

为了研究深大圆形基坑中冻土帷幕的变形性能, 根据相似理论, 利用相似准则, 专门设计加工了大型深基坑冻结模拟试验台。试验台由台体、加载系统、冻结系统、掘砌模拟系统、试验监控与数据采集系统和控温系统等组成, 如图 1 所示。

试验台内、外筒体的直径分别为 1.5 m 和 2.0 m, 台体高度为 3.2 m, 最大承载能力为 1.0 MPa^[6]。试验台模拟基坑原型尺寸为 $\phi 30 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 冻土帷幕厚度为 4 m, 帷幕嵌固深度为 25 m。试验用土为粉质砂土。



1—上盖体; 2—顶囊; 3—集液管; 4—侧囊挡板; 5—顶推架; 6—外筒体; 7—热电偶串; 8—冻结管; 9—内筒体; 10—侧囊; 11—封底板; 12—泄水管; 13—下盖体; 14—位移计位置

图 1 深基坑冻结模拟试验台

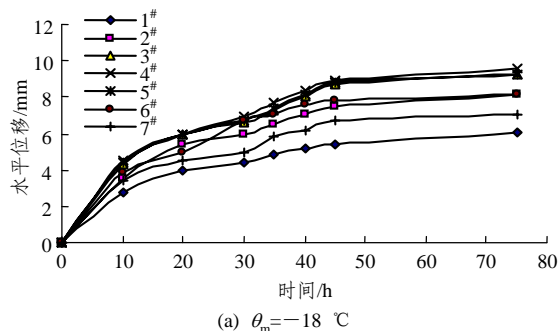
Fig.1 Frozen model test rig of the deep pit

冻土帷幕水平位移量测采用 YHD - 30 型位移计, 均匀布置在冻土帷幕暴露段, 掘进段高为 2 m, 7 个位移计(1#~7#)分别布置在段高(自上而下)范围内 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 m 处。

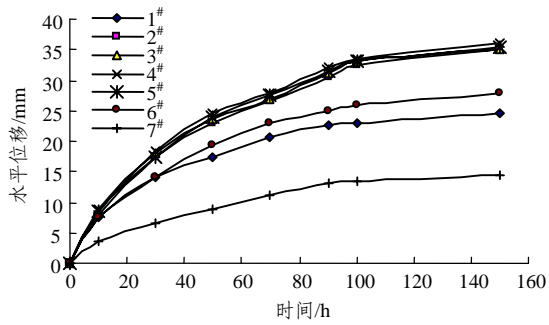
3 试验结果及分析

3.1 冻土帷幕水平变形

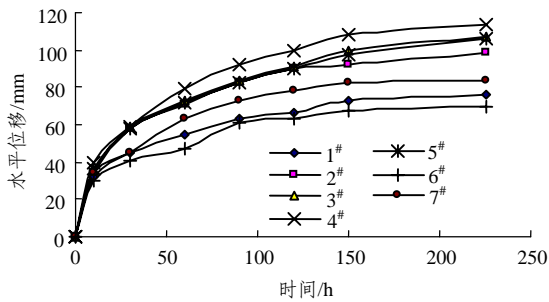
图 2 是不同温度下, 当开挖结束时, 冻土帷幕的水平位移随开挖时间的变化规律(图中监测时间为开始到变形趋于稳定为止)。图 3 所示为冻土帷幕水平变形与基坑开挖深度的变化曲线。



(a) $\theta_m = -18 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) $\theta_m = -12\text{ }^\circ\text{C}$



(c) $\theta_m = -4\text{ }^\circ\text{C}$

图2 开挖结束不同温度下冻土帷幕水平位移曲线

Fig.2 Horizontal displacement curves of frozen soil wall under different temperatures after excavation completed

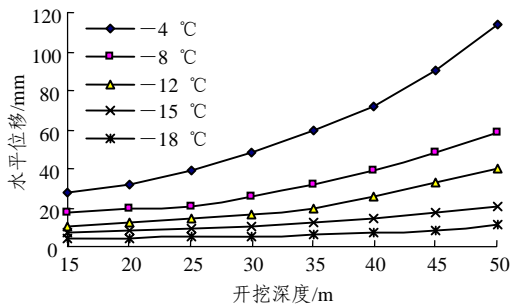


图3 冻土帷幕水平位移随开挖深度变化曲线

Fig.3 Variation curves between pit depth and horizontal displacement of frozen soil wall

从图2, 3的试验结果可知:

(1) 基坑开挖结束时, 即开挖至深 50 m 时, 随着基坑深度(与开挖时间成正比)的增加, 冻土帷幕的水平变形量在增大; 随着平均温度的降低, 冻土帷幕的水平变形量在减小。

平均温度为 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 当开挖结束时, 在 20 m 深处, 冻土帷幕水平位移量平均值为 2.7 mm; 而 30, 40, 50 m 深处的水平位移量平均值分别为 3.8, 5.5, 8.1 mm; 平均温度为 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 20, 30, 40, 50 m 深处的水平位移量分别为 24.7, 35.3, 55.6,

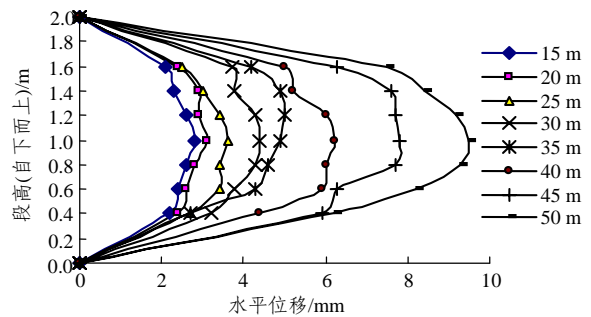
94.2 mm, 为 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 时水平位移量的 9.15~11.63 倍。

由于试验条件的限制, 上述模型试验的位移量不包括冻土帷幕的超前变形量。

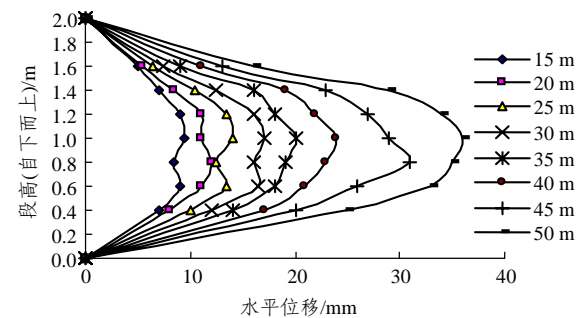
(2) 在基坑最终开挖深度以上, 冻土帷幕的水平变形量随着开挖时间的增加趋于稳定, 帷幕不同温度下, 变形趋于稳定的时间不同, 由 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 时的 75 h 增加到 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的 225 h。

3.2 冻土帷幕暴露段水平变形特征

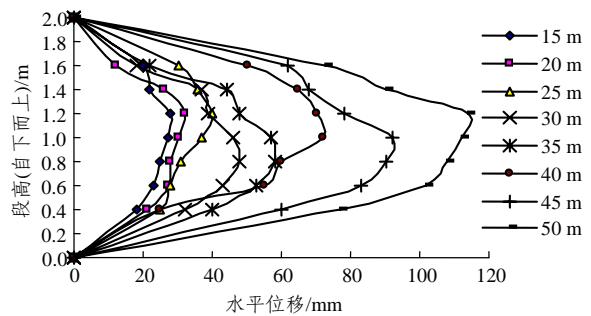
图4是平均温度 $\theta_m = -18\text{ }^\circ\text{C}$, $-12\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-4\text{ }^\circ\text{C}$ 时冻土帷幕暴露段变形曲线。



(a) $\theta_m = -18\text{ }^\circ\text{C}$



(b) $\theta_m = -12\text{ }^\circ\text{C}$



(c) $\theta_m = -4\text{ }^\circ\text{C}$

图4 冻土帷幕暴露段变形曲线

Fig.4 Deformation curves of exposure zone of freezing soil curtain

从图4的试验研究结果可知:

(1) 冻土帷幕暴露段的水平变形符合“中间大、两头小”的变形特征。

(2) 随着开挖深度的增加, 冻土帷幕暴露段的水平变形不断增大。

(3) 冻土帷幕平均温度在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及开挖深度 15 m 时, 水平位移最大值为 2.8 mm; 到开挖深度 50 m, 水平位移最大值为 9.6 mm, 相差 3.4 倍。

(4) 冻土帷幕平均温度在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及开挖深度 15 m 时, 水平位移最大值为 9.5 mm, 到开挖深度 50 m, 水平位移最大值为 35.4 mm, 相差 3.7 倍。

(5) 冻土帷幕平均温度在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及开挖深度 15 m 时, 水平位移最大值为 26.7 mm, 到开挖深度 50 m, 水平位移最大值为 113.4 mm, 相差 4.2 倍。

3.3 冻土帷幕弹性变形和蠕变变形特征

冻土帷幕的径向水平位移由两部分组成: 一部分为可恢复的弹性变形; 一部分为不可恢复的非弹性变形。模型试验量测中, 一组试验完成后, 卸除顶囊和侧囊压力, 量测出可恢复的变形量即为弹性变形量, 剩余变形量即为蠕变变形量。图 5 为不同试验温度下随深度变化弹性变形量与总变形量比值的曲线。

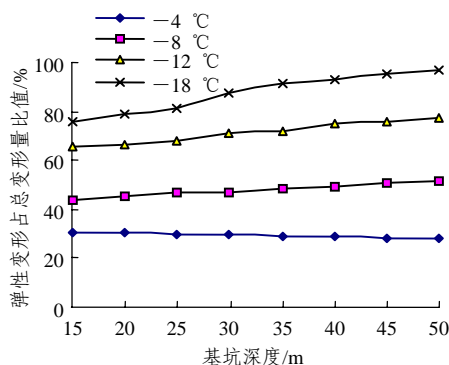


图 5 弹性变形量占总变形量比值与基坑深度关系曲线

Fig.5 Curves of ratios of elastic displacement to total displacement

由试验结果^[7]可知, 冻土帷幕在平均温度 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下弹性变形量占总变形的 30%, 而且随深度的增加有较小的减小趋势, 说明对于 4 m 厚的冻土帷幕在深度较大时, 其水平变形由塑性变形主导, 失稳的可能性较大, 因此对于 15 m 及更深的基坑开挖, $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻土墙温度要慎重考虑采用。随着帷幕温度的降低, 弹性变形在总变形中占的比重逐渐增加。实际工程中常用的 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时塑性变形仍占总变形 22.4%~34.7%, 因此, 基坑的整体变形应考虑蠕变的影响。 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时弹性变形占到总变形达 90% 左右, 说明此时冻土的帷幕具有一定的整体性和刚

度, 对非嵌固帷幕体, 应主要考虑倾覆力矩的作用。

4 冻土帷幕水平变形与诸影响因素的关系分析

基坑开挖过程中, 冻土帷幕的水平变形大小直接影响了基坑的稳定性, 通过模型试验研究, 获得水平位移与诸影响因素的关系式, 将为深基坑设计与施工提供技术指导。研究表明, 冻土帷幕在基坑开挖过程中的变形特征受很多因素影响, 其中冻土帷幕的强度(用其平均温度表示)、基坑开挖深度、基坑半径和冻土帷幕厚度为主要影响因素。对试验结果按相似准则加以归纳, 得到了冻土帷幕水平位移与诸影响因素的关系为

$$\frac{U}{R} = A \left(\frac{\theta_m}{\theta_d} \right)^B \left(\frac{H}{R} \right)^C \left(\frac{R_0}{R} \right)^D \left(\frac{\delta}{R} \right)^E \quad (1)$$

式中: U 为冻土帷幕水平位移(m); δ 为冻土帷幕厚度(m); θ_m 为冻土帷幕平均温度的负值($^{\circ}\text{C}$); θ_d 为温度值, 且有 $\theta_d = t_d - t_c$, 其中, t_c 为土的结冰温度, t_c 为盐水温度($^{\circ}\text{C}$); H 为基坑开挖深度(m); R_0 为冻土帷幕中间面半径(m); R 为基坑半径(m); A, B, C, D, E 均为拟合系数。

式(1)的回归结果为

$$\frac{U}{R} = 1.69 \times 10^{-4} \left(\frac{\theta_m}{\theta_d} \right)^{-0.59} \left(\frac{H}{R} \right)^{1.76} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{2.02} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{-0.64} \quad (2)$$

对于冻结法凿井工程, 根据有关研究成果^[8], 冻结壁变形与凿井深度、掘进段高、冻土平均温度、段高暴露时间的关系(砂土^[8])可以表示为

$$\frac{U}{R_0} = K \left(\frac{\theta_m}{\theta_d} \right)^{-3.7} \left(\frac{H}{R_0} \right)^{0.755} \left(\frac{\tau_2 v}{R_0} \right)^{0.336} \left(\frac{h}{R_0} \right)^{3.44} \quad (3)$$

式中: h 为掘进段高, τ_2 为段高暴露时间, v 为开挖速度。

由式(3)可知, 凿井工程中冻结壁变形的主要影响因素是冻结壁的平均温度和段高值, 段高暴露时间和凿井深度影响不大。通过与凿井工程中冻结壁变形的的主要因素对比分析, 可以得到:

(1) 凿井工程中, 由于掘进深度较大, 凿井深度的增加值相对于其原有深度值变化较小, 故其对于冻结壁变形的相对影响不大, 而对于深基坑工程, 基坑开挖深度变化的相对值较大, 对冻土帷幕变形

的影响相对比较显著。

本文认为,造成上述两者的不同,除了上述原因外,还有就是两类工程中冻土帷幕厚度与开挖半径之比的巨大差异所致,凿井工程中冻结壁可以认为是厚壁筒结构,而在深基坑工程中,冻土帷幕接近于薄壁结构;另外对于浅部地下开挖工程(如深基坑工程),作用在冻土帷幕上的土侧压力近似以直线增加,当开挖到一定深度后,由于圆筒形结构在水平方向的圆环挤压效应和竖直方向的成拱效应,土侧压力就不会再同浅部那样按直线增加,增加将变缓(因为开挖深度是以水平地压表示的);另外,根据有关研究成果^[9, 10],可能是由于深部土体的性质不同于浅部所致。

(2) 施工段高对凿井工程中冻结壁变形影响显著,但对于深基坑工程,施工段高对冻土帷幕水平变形影响不大,鲁先龙^[11]的试验结果也证明了这一结论。

5 结 论

利用自行设计加工的大型深基坑冻结模拟试验台,首次进行了大直径圆形冻土帷幕受力与变形的物理模拟试验,得到了以下主要结论:

(1) 冻土帷幕的水平变形量随着基坑深度的增加而增大;随着平均温度的降低而减小;冻土帷幕的水平变形量随着开挖时间的增加趋于稳定,在不同温度下,变形趋于稳定的时间不同,由 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的75 h增加到 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的225 h。

(2) 冻土帷幕的水平变形由弹性变形和蠕变变形组成,随着冻土温度的不同,弹性变形占总变形的比值也不同,由 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的30%提高到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的90%左右。

(3) 通过对几个影响因素进行综合分析可知,冻结粉质砂土帷幕水平变形的主要影响因素是基坑半径和基坑开挖深度,冻土帷幕平均温度、厚度和施工段高的影响相对较小。

参考文献(References):

[1] 唐业清,李启民,崔江余. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(TANG Yeqing, LI Qimin, CUI Jiangyu. Analysis and treatment of accidents of pit engineering[M]. Beijing:

China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))

[2] 曾宪明,林润德,易平. 基坑与边坡事故警示录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(ZENG Xianming, LIN Runde, YI Ping. Caution on accidents of foundation pit and landside slope[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))

[3] 赵志缙,应惠清. 简明深基坑设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.(ZHAO Zhijin, YING Huiqing. Handbook of design and construction of deep pit[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.(in Chinese))

[4] REBHAN D. Artificial ground freezing theory and application of the method liquid nitrogen[C]// The 6th IIR International Conference on Cryogenics. Prague: [s. n.], 2000: 202 - 203.

[5] MA W. Review and prospect of the studies of ground freezing technology in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 218 - 224.

[6] 东兆星. 圆形深基坑中人工冻土帷幕力学性能研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.(DONG Zhaoxing. Study on the mechanical performances of artificial frozen soil wall in round-shaped deep pit[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.(in Chinese))

[7] 齐燕军. 深基坑中圆形冻土墙变形特性研究[硕士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.(QI Yanjun. Study on deformation characteristics of round-shaped frozen soil wall in deep pit[M. S. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.(in Chinese))

[8] 崔广心,杨维好,吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.(CUI Guangxin, YANG Weihao, LU Henglin. Frozen soil wall and shaft wall in deep and thick surface soil[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998.(in Chinese))

[9] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外载的基础理论——深土力学[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 123 - 126.(CUI Guangxin. Basic theory for analyzing loads on underground structure in deep alluvium—mechanics of deep soil[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 123 - 126.(in Chinese))

[10] 崔广心. 深土冻土力学——深土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 97 - 99.(CUI Guangxin. Mechanics of frozen soil for deep alluvium—a new field of frozen soil mechanics[J]. Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2): 97 - 99.(in Chinese))

[11] 鲁先龙. 深基坑中圆形冻土墙与内衬相互作用的探讨[博士学位论文][D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2002.(LU Xianlong. Interaction laws between ice wall and supporting structure in circular deep excavation[M. S. Thesis]. Beijing: China Coal Research Institute, 2002.(in Chinese))