



水下浇注混凝土膜效应机理

赵明时

(中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要: 随着现代地连墙工程的广泛应用, 水下浇注混凝土埋管深度控制不精确和基坑开挖后地连墙大面积露筋问题逐渐暴露出来。为了加强地连墙施工过程质量控制、提高地连墙墙体质量, 以水下浇注混凝土为考察对象, 首次提出水下浇注混凝土膜效应及其形成阶段和性质的概念, 同时提出膜效应以膜厚度作为衡量标准和以膜阻力作为表征方法的理念, 根据现场试验和理论分析得出膜效应的影响因素, 并提出控制埋管深度的主要措施。根据膜效应和地连墙大面积露筋的特点, 首次提出水下浇注混凝土边膜滞留效应的概念和影响因素, 对地连墙大面积露筋事故的成因进行分析, 并提出减少地连墙大面积露筋的主要措施。

关键词: 水下浇注混凝土; 膜效应; 埋管深度; 大面积露筋; 边膜滞留效应

中图分类号: TU 745.39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0173-07

Mechanism of membrane effect during pouring of underwater concrete

ZHAO Ming-shi

(CCCC First Navigational Engineering Design Institute of Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: With the broad application of modern diaphragm wall engineering, problems including inaccurate depth of buried pipes control during pouring of underwater concrete and large-area exposure of the reinforced bar for the diaphragm wall after excavation of the foundation pit exposed gradually. For the purposes of strengthening the project process control and improving the quality of diaphragm wall, we put forward the concept of the membrane effect of underwater pouring concrete and its formation stages and nature for the first time taking the underwater pouring concrete as the investigation objective. At the same time we put forward the concept of taking the membrane thickness as the measurement standard and the membrane resistance as the characterization method. According to field tests and theoretical analyses, we get to know the influential factors of the membrane effect, and put forward main measures for controlling the depth of buried pipes. According to the characteristics of the membrane effect and large-area exposure of the reinforcement, we put forward the concept of edge-membrane stranding effect and the influential factors for the first time. Based on the cause analysis of large-area reinforcement exposure, we put forward main measures for reducing the large-area reinforcement exposure.

Keywords: underwater pouring concrete; membrane effect; depth of buried pipes; large-area exposure of reinforced bar; edge-membrane stranding effect

1 研究背景

1.1 工程背景

随着城市规模不断扩大, 房屋、地铁、市政和港口工程越来越多, 地连墙受到广泛的推广和

应用^[1-2]。根据地连墙施工规范的要求, 地连墙混凝土采用水下导管浇注的方式进行, 导管埋入混凝土宜为2~4 m, 混凝土面上升速度不小于2 m/h^[3-4]。然而, 在水下浇注混凝土过程中, 工程技术人员

收稿日期: 2015-11-02

作者简介: 赵明时(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事地基基础与港口工程施工技术管理工作。

采用测绳能够探测到的位置其实是混凝土上沉积物的高程,由于规范没有对该层沉积物进行定义和规定,因此在实际施工中,导管理深往往偏小^[5],是偏于不安全的。

随着大量基坑的开挖,许多地连墙出现大面积露筋事故^[6],并且在某些工程中这种大面积露筋的情况会出现在绝大多数地连墙墙体上,特别是当地连墙穿越较厚砂层或者有侵蚀性地下水时,地连墙大面积露筋尤为明显。从露筋表象来看,地连墙墙面夹砂是露筋的主要原因。而从夹砂的砂质分析,其性质与水下浇注混凝土时形成的沉积物基本相符,也就是说墙体夹砂主要来源于沉积物。众所周知,地连墙大面积露筋会严重影响地下结构的安全性和耐久性^[7]。因此,为了进一步加强施工过程质量控制、提高地连墙墙体质量,对水下浇注混凝土沉积物的研究十分必要。

1.2 技术背景

膜效应起源于自然生物学的细胞膜,细胞膜是一种具有选择渗透性的活性膜,通过细胞膜,细胞实现了有益物质的传输和有害物质的防御^[8]。膜技术在二十世纪六七十年代就开始有研究报道,特别是近些年,随着世界性水资源的匮乏和环境的污染,膜技术在水处理领域得到空前的发展,膜技术的应用给人类带来巨大的经济效益和社会效益^[9]。

但是在工程界,膜效应的研究在国内外开展得较少,人们对膜效应的认识仅限于一般的建筑界面的原理分析^[10],尚处于理论和实践的摸索阶段,还缺乏系统性的研究和工程实践的指导。本研究针对水下浇注混凝土埋管深度不足和地连墙大面积露筋的工程质量问题,提出水下浇注混凝土膜效应及相关概念,从膜效应的角度考察水下浇注混凝土时的施工因素对施工过程控制和墙体质量的影响。

2 水下浇注混凝土的膜效应

2.1 膜效应的概念

在泥浆护壁条件下进行水下浇注混凝土,部分沉渣和泥浆会通过顶面混凝土、在混凝土和泥

浆分界面形成具有隔离作用的膜。从微观角度假定,混凝土是由无数个单位混凝土分子组成,那么根据渗透原理,部分泥浆和沉渣会通过表层混凝土分子进入混凝土内部一定深度,当达到渗透平衡时,形成相对稳定的膜,这就是水下浇注混凝土的膜效应原理。从宏观角度看,这层膜即为沉积物。

2.2 膜效应的形成阶段

从地连墙墙顶钻芯试验情况来看,水下浇注混凝土的膜主要分为基层、分离层和滤饼层3部分,即水下浇注混凝土膜效应的形成分为3个阶段^[11](图1)。

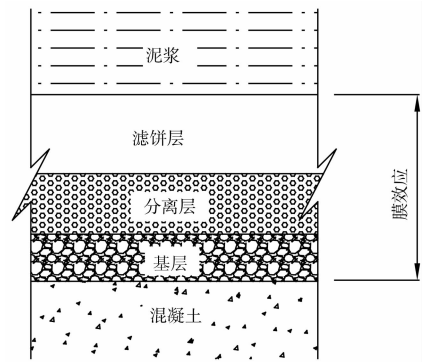


图1 膜效应形成阶段

- 1) 基层:以混凝土骨料(石子和中粗砂)为主,该层含有较多水泥浆,因此具有一定固结性。
- 2) 分离层:骨料粒径及固结性由下至上递减,部分沉渣和泥浆(含泥浆中悬浮的细砂)渗入该层,并在内部通道沉积。
- 3) 滤饼层:无法通过膜的隔离物(主要是沉渣)。

2.3 膜的性质

1) 隔离膜。

这是膜的基本性质,也是水下浇注混凝土膜效应研究的基础,即一旦形成膜,膜将能够把混凝土和泥浆分开,有效地降低了泥浆和沉渣对混凝土的负面影响。

2) 活性膜。

水下浇注混凝土形成的膜并不是一个封闭的系统,在混凝土浇注过程中具有一定的自我修复能力,且会随着浇注环境的变化而有所改

变。如果在水下浇注混凝土时的相当一段时间内膜的状态和性质不发生突变，说明膜的稳定性高。

3) 张力膜。

从物理学角度看，膜具有一定的张力。水下浇注混凝土时，膜下混凝土自下而上给膜施加压力，当该压力大于膜的张力时，膜将受到破坏，此时膜下混凝土会突破膜进入泥浆中。

3 膜效应的影响因素

3.1 膜效应的表征方法和衡量标准

根据水下浇注混凝土埋管深度控制的实际情况，膜效应以膜阻力作为表征方法，以膜厚度作为主要衡量标准。

1) 膜阻力。

根据 Darcy 定律，水下浇注混凝土膜效应的阻力为：

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R} \quad (1)$$

式中： J 为膜通量； ΔP 为跨膜压差； μ 为泥浆动力学黏度； R 为过滤阻力。

从实际工程地连墙水下浇注混凝土及后期墙顶钻芯试验情况看，膜效应的影响因素主要是跨膜压差、泥浆黏度和过滤阻力^[12]。

2) 膜厚度。

从质量控制方面考虑，膜越薄，水下探摸混凝土面的精确度越高，埋管深度的保证率越高；从工程造价方面考虑，膜越薄，混凝土超浇高度的控制越精确，成本控制的保证率越高。因此，以实际工程应用为依托，本研究涉及的膜效应的衡量标准主要为膜厚度。

膜的上表面：地连墙浇注结束后，使用测绳所能探摸到的高程。

膜的下表面：地连墙开挖后，从膜的上表面进行芯取样，当某一断面所取混凝土强度低于配合比混凝土强度 20% 或低于设计强度时，即认为该断面为膜的下表面。

膜厚度即为膜的上表面高程与膜的下表面高程之差。

3.2 跨膜压差

$$\Delta P = P_c - P_w \quad (2)$$

式中： P_c 为膜下混凝土压强； P_w 为膜上泥浆压强。（忽略膜厚度的影响）

3.2.1 膜的状态

从物理学角度看，水下浇注混凝土成膜后，膜具有 3 种状态。

1) 稳定状态：当膜下混凝土和膜上泥浆相对静止时，膜上下压强互相平衡，即 $\Delta P = 0$ ，此时膜处于稳定状态。

2) 波动状态：当水下浇注混凝土时，膜下混凝土压强 P_c 会在某一时间段大于膜上泥浆压强 P_w ，即 $\Delta P > 0$ ，此时膜处于波动状态。

根据张力膜和活性膜的性质，跨膜压差 ΔP 保持在一定范围内，由于膜存在张力和自我修复性，即使膜处于波动状态却依然能保持相对稳定，膜下混凝土不会突破膜进入泥浆中。

3) 沸腾状态：当膜张力不足以平衡跨膜压差 ΔP 时，活性膜的稳定性遭到破坏，膜下混凝土和膜上泥浆出现沸腾。再次成膜时，膜的厚度（主要是基层和分离层）明显增加。

3.2.2 跨膜压差对膜效应的影响

结合膜状态的假定和地连墙施工情况，跨膜压差 ΔP 的大小主要取决于水下混凝土浇注速度。以唐山港地区地连墙板桩码头工程的地连墙墙顶钻芯试验为例，给出膜厚度随水下混凝土浇注速度的变化曲线。

1) 结果分析。

如图 2 所示，当浇注速度从 6 m/h 提高到 20 m/h 时，膜厚度由初始的 2 m 减少到 0.8 m，这说明膜厚度的变化趋势为随着浇注速度的提高而减小。

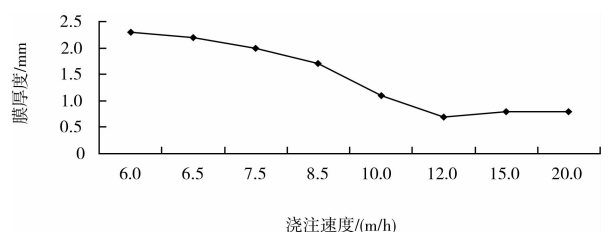


图 2 膜厚度随浇注速度的变化

从芯样来看,膜的基层和分离层的厚度随着浇注速度的提高而增大,膜的滤饼层的厚度随着浇注速度的提高而减小,但是膜厚度的大小主要取决于滤饼层的厚度。

2) 工程价值。

从埋管深度控制和地连墙墙顶凿除量方面考虑,提升浇注速度和浇注前槽底除砂能够在一定程度上保证地连墙施工质量和成本。

3.3 泥浆黏度

以唐山港地区地连墙板桩码头工程和于家堡交通枢纽工程为例,考察在不同浇注环境下,膜厚度随泥浆黏度的变化情况(图3)。从混凝土浇注环境来看,于家堡交通枢纽工程所在浅层地下水具有承压性,局部土层含有大量粉土,其垂直和水平方向渗透系数差异较大。另外,于家堡交通枢纽工程地连墙深61 m,而唐山港地区地连墙板桩码头工程地连墙深30 m。

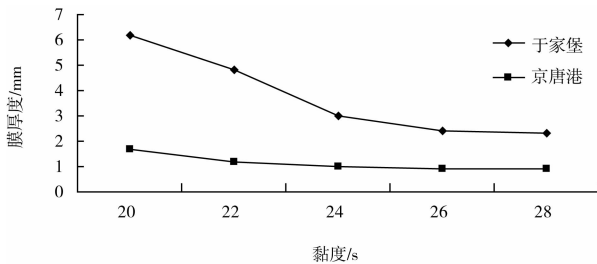


图3 不同浇注环境下膜厚度随泥浆黏度的变化

1) 结果分析。

从厚度变化趋势可以看出,膜厚度随着泥浆黏度的增加而降低。一方面,泥浆黏度较大时,泥浆流动时内部阻力大,泥浆渗入混凝土较为困难,同时泥浆黏度较大时其携砂能力增强,槽底沉渣变少且槽壁稳定性增强;另一方面,当膜处于波动状态时,要破坏泥浆内部结构链的静切力,也就是说泥浆黏度越大,泥浆对膜的约束大,即泥浆黏度对混凝土浇注速度的提升具有负面影响,同时泥浆黏度较大时可能会引起搅拌困难及泵力不足等问题^[13]。

在不良的混凝土浇注环境下,泥浆黏度对膜厚度的影响较为明显,主要原因在于:1) 长时间浇注导致沉渣过厚;2) 地下水和混凝土等因素会

引起泥浆性质的下降。因此,适当提高泥浆黏度能够有效减小膜厚度。

2) 工程价值。

在水下浇注混凝土过程中,从膜厚度和槽壁稳定性方面考虑,应该提高泥浆黏度;从浇注速度、泥浆制作和输送方面考虑,应该降低泥浆黏度。

在实际工程中,往往是将新鲜泥浆和槽内旧浆混合使用,以降低施工成本。这就要求技术人员在施工过程中认真分析所在工程地连墙混凝土的浇注环境,提出合理的泥浆混合指标,从而达到质量和效益的双赢。

3.4 过滤阻力

根据膜状态的假定,过滤阻力是膜自身的属性(隔离膜)。从隔离膜的自身属性分析,隔离膜的过滤阻力主要取决于膜的组成成分(石子、砂、水泥等)、流动性(主要是混凝土塌落度)和膜厚度等,且它们之间是存在一定内在联系的。膜的组成成分、流动性和膜厚度较易理解,且在众多文献中已有详细论述,这里仅对减水剂和泥浆pH值对过滤阻力的影响进行分析。从膜效应的形成阶段来看,减水剂和泥浆pH值对基层和分离层影响较大,因此减水剂和泥浆pH值对膜厚度的变化仅包括基层和分离层。

1) 结果分析。

如图4所示,为不同减水剂作用下塌落度随时间的变化。试验表明掺用减水剂能改善混凝土的初始和易性,但是对于混凝土运输及浇注而言,使用高效减水剂的混凝土,其后期塌落度损失比使用低效减水剂的混凝土更大,更容易产生离析泌水,混凝土浇注时膜厚度越大。

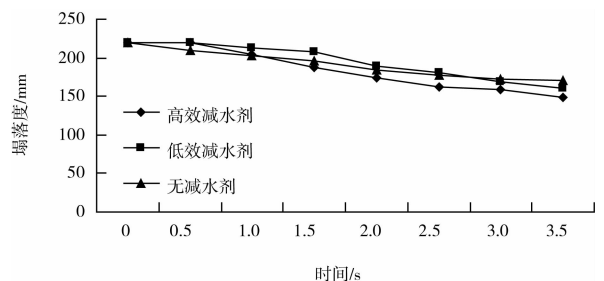


图4 不同减水剂作用下塌落度随时间的变化

如图5所示,为不同泥浆pH值环境下膜厚度的变化。从地连墙钻芯结果看,在泥浆护壁条件下水下浇注混凝土,泥浆pH值越大,膜厚度越大。这说明,泥浆pH值越大,泥浆中所含的碱性物质对混凝土的和易性破坏越严重,混凝土离析越严重。

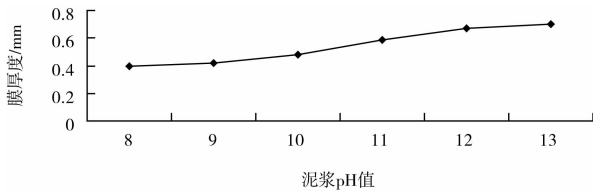


图5 膜厚度随泥浆pH值的变化

2) 工程价值。

从混凝土强度和耐久性方面考虑,应使用高效减水剂^[14];但是对于实际工程而言,考虑到搅拌站供应混凝土和地连墙浇注等时间因素对混凝土和易性的影响,应使用低效减水剂。这就要求技术人员在施工过程中综合考虑减水剂对墙体质量的影响,提出合理的减水率。

泥浆使用一段时间后,除了考虑比重、黏度和砂率以外,pH值是影响膜效应的重要因素。当泥浆pH值较高时,必须补充新浆以降低泥浆pH值,减小泥浆对混凝土和易性的负面影响,从而达到减小膜厚度的目的。

综上,为了保证导管理入混凝土面的深度,要尽量减小膜厚度。根据膜效应影响因素的分析结果和水下浇注混凝土的实际情况,提出减小膜厚度的施工方法,即提高浇注速度、浇注前槽底除砂、控制膨润土用量和使用低效减水剂。以京唐港26[#]~27[#]泊位地连墙板桩码头工程为例,混凝土浇注速度控制在12 m/h,浇注前槽底除砂2 h,每立方米混凝土使用膨润土11 kg,减水剂减水率为6%。

4 水下浇注混凝土的边膜滞留效应

4.1 边膜滞留效应的概念

水下浇注混凝土成膜后,槽壁附近的膜在上

升过程中会有一部分滞留于槽壁上,这就是所谓的边膜滞留效应。从工程表象看,边膜滞留效应表现为地连墙墙面夹砂。

机理分析:理想状态下(槽壁绝对光滑)进行水下浇注混凝土,只要保证膜的下表面高于导管底口,就可以认为地连墙不会产生墙面夹砂的现象。但是,在泥浆护壁条件下水下浇注混凝土,槽壁面具有一定的粗糙度,边膜若要在混凝土上升过程中滞留在槽壁上,从力学角度分析,边膜必须达到受力平衡状态。如图6所示,边膜受力主要来源于跨膜压差产生的顶托力 F 、膜体错流产生的提升力 T 和挤压力 N_1 、膜在波动或沸腾状态下的水平冲力 N_2 、混凝土水平流动产生的挤压力 N_3 、边膜受到的其它阻力 f (钢筋和保护层板等)。

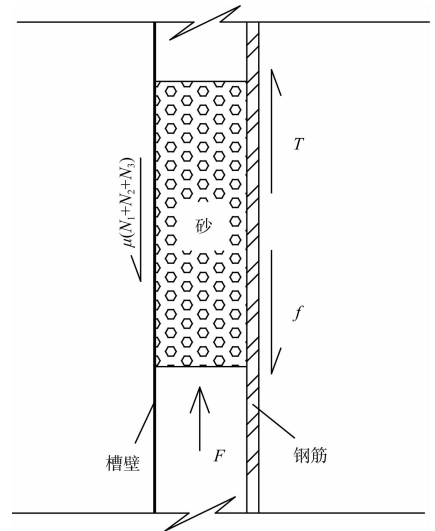


图6 边膜滞留效应形成机理

产生边膜滞留效应时,边膜受力达到平衡:

$$F + T = \mu(N_1 + N_2 + N_3) + f \quad (3)$$

式中: μ 为摩擦系数。

4.2 边膜滞留效应的影响因素

根据地连墙大面积露筋的实际情况,边膜滞留效应以边膜滞留厚度(即墙面夹砂的厚度)作为主要衡量标准。根据膜效应理论和边膜滞留效应的形成机理,结合水下浇注混凝土的实际情况,从以下方面对边膜滞留效应的影响因素(地连墙大

面积露筋原因)进行介绍。

1) 混凝土性质。

基坑开挖后,从地连墙墙面夹砂的砂质分析,所夹带的砂并不是沉于槽底的沉渣,而是混凝土中的中粗砂,即砂来源于膜效应所形成的分离层。也就是说,分离层的性质直接影响到边膜滞留效应的作用效果。根据前述膜效应影响因素的理论分析和试验结果,混凝土自身的性质是影响分离层厚度的重要因素,也是地连墙墙面夹砂影响因素之一。

2) 浇注速度。

规范中规定了浇注速度不小于2 m/h,这也令绝大多数工程技术人员对浇注速度有所忽视。从混凝土浇注过程质量控制方面考虑,提高浇注速度有益于埋管深度的控制;但是从墙体地连墙墙体质量方面考虑,提高浇注速度,无疑增大了错流产生的挤压力 N_1 和膜在波动或沸腾状态下的水平冲力 N_2 。如图7所示,为在不同浇注速度下边膜滞留厚度的变化。当浇注速度超过16 m/h时,地连墙墙面夹砂显著增加,特别是当浇注速度超过20 m/h时,地连墙产生大面积露筋,甚至钢筋以内50~60 mm还存在夹砂的现象。这说明,提高浇注速度对边膜产生的托举力不足以抵抗产生的摩擦力,也就是说浇注速度过快,增大了地连墙大面积露筋的风险,不利于地连墙墙体质量控制。

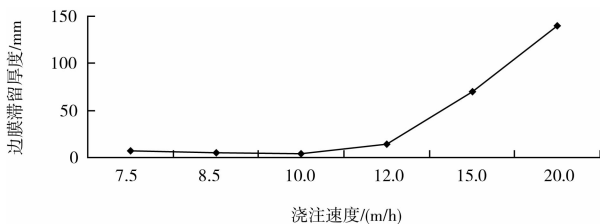


图7 边膜滞留厚度随浇注速度的变化

另一方面,根据膜状态的假定,浇注速度过快,会导致膜进入沸腾状态,再次成膜时,膜的分离层厚度明显增加,这也给地连墙墙面夹砂带来了负面影响。

3) 保护层厚度。

从现场开挖情况看,钢筋保护层厚度越小,越容易产生边膜滞留效应,即槽壁和钢筋对边膜的束缚作用越明显。

4) 埋管深度。

从边膜滞留效应的形成机理和膜的芯样结果进行分析,埋管过浅影响的主要力学指标为:跨膜压差产生的顶托力 F 大幅度下降、膜体错流产生的挤压力 N_1 和混凝土水平流动产生的挤压力 N_3 大幅度上升。理论上,浇注时混凝土液面是均匀上升的,即使埋管深度较浅,如果降低浇注速度,也不容易产生边膜滞留效应。但是导管浇注条件下,混凝土从导管底口流出后是存在水平流动的,混凝土液面的上升也不是均匀的,而是以导管底口为中心在一定影响范围内上升速度较快,而在影响范围以外上升速度较慢。若要边膜滞留于槽壁上,势必存在错流现象,而从现场浇注情况来看,埋管深度越浅,槽壁附近错流现象越明显,边膜滞留厚度越大,即地连墙墙面夹砂越厚。

在实际工程中,混凝土浇注的主要操作人员为普通工人,根据调查几乎有人在混凝土浇注过程中有意识的降低浇注速度,而浇注速度的控制主要是靠埋管深度进行调节的。根据现场混凝土浇注和后期基坑开挖情况来看,埋管越浅,混凝土浇注速度越快,后期地连墙大面积露筋的风险越高。

5) 泥浆性质。

从近些年泥浆研究情况看,大多数学者和工程技术人员常常把泥浆和槽壁的稳定性和联系在一起^[15-16]。同样,在实际工程应用中,只要在泥浆护壁条件下槽壁能够保持稳定,工程技术人员基本不会添加新鲜泥浆。

但是根据泥浆对水下浇注混凝土膜效应的影响分析及边膜滞留效应的假定,泥浆同样是墙面夹砂的重要影响因素。当每立方米混凝土膨润土使用量小于6 kg时,地连墙会出现较厚的墙面夹

砂现象; 当每立方米混凝土膨润土使用量大于 14 kg 时, 地连墙几乎不会产生墙面夹砂现象。因此, 为了减少地连墙大面积露筋情况的发生, 施工过程中应当及时更换泥浆 (图 8)。

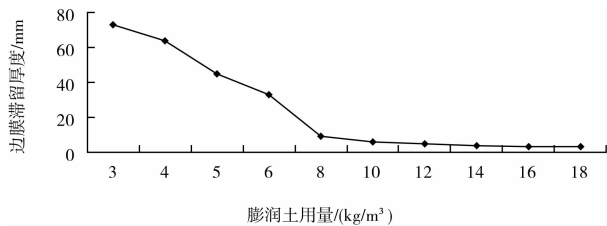


图 8 边膜滞留厚度随膨润土用量的变化

综上, 根据边膜滞留效应及其影响因素的分析, 在水下浇注混凝土施工过程中, 要想降低地连墙大面积露筋的风险, 除了注意膜效应的几个影响因素外, 还需要注意以下 3 方面的内容: 控制混凝土浇注速度上限; 施工时钢筋笼尽量保持在槽段正中的位置或设计时加大钢筋笼保护层的厚度; 在膜厚度可能较大的情况下 (例如槽段较深或存在不良地质条件等), 导管的埋深宜偏于保守, 以于家堡交通枢纽工程 61 m 深地连墙为例, 为了保证导管理入混凝土面的深度, 施工过程中导管理入深度始终控制在 4~8 m。

5 结语

1) 膜效应理念的提出, 不仅解决了埋管深度这一地连墙施工过程质量控制的问题, 更重要的是它减小了边膜滞留效应发生的几率, 从而降低了地连墙大面积露筋的风险, 提高了地连墙墙体质量。

2) 边膜滞留效应理念的提出, 不仅对目前大量基坑出现的地连墙大面积露筋做出了合理的解释, 更重要的是它为地连墙施工规范中的空白或不足提供了借鉴, 也为地连墙设计提供了参考。

3) 膜效应应用于水下浇注混凝土施工, 不是对传统工程概念的颠覆, 而是通过试验和理论分

析, 在遵循科学规律的基础上, 对旧事物的一种新的认识和评判, 为工程科学的发展提供了更为广阔的空间, 使其具有更加强大的生命力。

参考文献:

- [1] 杨永文. 杭州软土地区排桩墙与 T 型地连墙深基坑变形性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [2] JTJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] JTJ 303—2003 港口工程地下连续墙结构与施工规程[S].
- [4] DGTJ 08-2073—2010 地下连续墙施工规程[S].
- [5] 任振东, 杜士俊, 刘海民. 地连墙质量通病的预防和治理[J]. 水运工程, 2009(12): 99-104.
- [6] 田海波, 张海波, 吕培林, 等. 地铁车站地下连续墙露筋事故原因分析及处理[J]. 建筑技术, 2011, 42(4): 321-324.
- [7] 武清玺, 江泉. 码头结构的健康诊断及安全性评价[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 75-78.
- [8] 斯皮尔莱克斯. 细胞生理学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] Klezcewski E B A, Roeshk H D W. Reuse of sand filter backwash water using membranes [J]. Filtration, 1997, 34(1): 28-29.
- [10] 吕爱民. 建筑界面的膜效应[J]. 建筑学报, 2004(2): 66-67.
- [11] 李旋, 尤朝阳, 黄刚华, 等. 自生动态膜生物反应器的研究进展[J]. 工业水处理, 2014, 34(2): 11-14.
- [12] 熊江磊. 自生动态膜的形成过程及其过滤性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [13] 罗云峰. 地下连续墙成槽施工中的泥浆性能研究和探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 447-450.
- [14] 郑广军, 邵伟, 纪晓辉, 等. 羧基改性减水剂的配制与性能研究[J]. 新型建筑材料, 2012, 39(8): 25-27.
- [15] 王云岗, 章光, 胡琦. 钻孔灌注桩孔壁稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3 281-3 287.
- [16] 史世雍, 章伟. 深基坑地下连续墙的泥浆槽壁稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1 418-1 421.