

地下连续墙施工稳定液的试验研究

郑玉辉^{1, 2}

(1. 吉林大学, 吉林 长春 130026; 2. 吉林省水利水电勘测设计研究院, 吉林 长春 130012)

摘要: 分析目前地下连续墙施工稳定液的现状, 简要叙述聚合物溶液的性能特点, 为适应当前地下连续墙施工成槽的需要, 采用优选法研制了一种新型地下连续墙稳定液——聚合物溶液, 并且与目前应用的细分散泥浆进行性能对比, 显示出极大的优越性。这种稳定液能够满足极松散的流砂层和较软弱土层, 可用于泥浆无力阻止塌方的槽段, 或者用于处理已塌方的槽段施工。最后, 探讨了聚合物溶液的护壁作用机理, 为新型地下连续墙施工稳定液的研制提供理论依据。

关键词: 土木工程; 连续墙; 聚合物溶液; 稳定液; 护壁机理

中图分类号: TU 472; TV 543

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5914 - 05

AN EXPERIMENTAL STUDY OF POLYMER SOLUTION FOR UNDERGROUND DIAPHRAGM WALL

ZHENG Yu-hui^{1, 2}

(1. Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Institute of Survey and Design of Hydraulic and Hydropower in Jilin, Changchun 130012, China)

Abstract: Current situation of construction stabilizing fluid for underground diaphragm wall is analyzed. Characteristic property of polymer solution is fully discussed. Optimum seeking method is used to study a new kind of construction stabilizing fluid for underground diaphragm wall-polymer solution. This solution is compared with slurry solution and displays its superiority-can meet the requirements of extremely loose floating sand layers, soft soil layers, and construction sections where slurry can't resist collapse, or collapsed construction section. Finally, the mechanism of protecting hole wall of polymer solution is discussed. It provides academic basis for the development of this new kind of construction stabilizing fluid for underground diaphragm wall.

Key words: civil engineering; underground diaphragm wall; polymer solution; stabilizing fluid; mechanism of protecting hole wall

1 引言

现代的成槽技术在不断完善, 这就要求有相应的稳定液与之匹配。目前最适用、最先进的成槽方法是抓斗成槽法^[1], 而与此方法相适应的稳定液还不成熟。从成槽机具对不透水膜(泥皮)产生的影响来看, 若用抓斗式的成槽机械, 由于机具在几秒钟

时间内可挖深 0.5 m, 形成新的壁面, 在如此短暂的时间里, 泥浆不可能形成有防坍性能的泥皮^[2]。因此, 在提升抓斗时, 槽底两壁面会发生塌方现象。此外, 抓斗在槽段内要上下运动, 容易把槽壁面上的不透水膜碰落。在多数情况下, 槽内的泥浆又会立即在那一部分壁面上向土层渗透, 若上述过程形成新的不透水膜被成槽机具连续大面积碰落时, 壁面就会在新膜形成之前坍塌^[3]。如果用一种稳定液,

收稿日期: 2004 - 05 - 17; **修回日期:** 2004 - 07 - 27

作者简介: 郑玉辉(1971 -), 男, 1996 年于长春地质学院探矿工程专业获硕士学位, 现为博士研究生、高级工程师、主任工程师、吉林大学应用技术学院兼职副教授, 主要从事岩土工程的设计、施工、科研及钻探新方法的研究与开发工作。E-mail: yzheng123@126.com。

它能渗透到土体内部而不是表面胶结土层, 那么抓斗上下起吊的时候就不会影响这种不透水膜或影响很小, 且这种稳定液渗透到地层中越深, 胶结作用越好, 槽壁越容易稳定, 这种胶结作用是致稳的重要因素。因此, 稳定液的性能好坏对槽壁稳定起着决定性的作用。随着深基础及其他地下工程的增多, 槽壁稳定将会成为更为突出的问题, 稳定液在地下连续墙施工中的作用也就明显^[4]。

2 国内稳定液的现状

长期以来, 国内槽壁稳定液主要采用细分散淡水泥浆。这种细分散淡水泥浆是含盐量小于 1%, 含钙量小于 120×10^{-6} g/g, 含有分散性聚合物的分散性泥浆。其组成除粘土、碳酸钠和水外, 为满足成槽需要, 往往加有降失水剂和稀释剂^[5]。这种泥浆组成简单, 配制费用较低, 适用于槽壁内外压差较大和胶结性能较好的粘性土和泥质胶结的砂性土等土体。

根据现有资料, 地下连续墙稳定液的发展可分为 5 个阶段, 最新一代为聚合物溶液^[6]。这种聚合物溶液在国内地下连续墙施工中还少见报道。细分散泥浆属于第二代, 其护壁的主要机理^[7]是: (1) 以泥浆液柱的静水压力平衡槽壁土体的侧向压力; (2) 由泥浆和地下水之间形成的压差, 使泥浆在槽壁表面形成一种不透水膜(泥皮), 对槽壁表层有一定的胶结作用。其组成简单、处理剂使用少、配制简单, 可在一般的松软破碎地层使用, 因此, 在今后相当长的时间内, 它仍将在合适的条件下得到应用。

但细分散淡水泥浆存在一些明显的缺点, 将限制其使用范围的扩大^[8]:

(1) 细分散泥浆的性能不稳定, 易受外界离子(特别是高价阳离子)的影响, 对外界的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 等离子非常敏感;

(2) 细分散泥浆体系中粘土颗粒分散细, 一般粘度较大、流变性能差、地表沉砂困难、固相含量高, 因此钻进效率低;

(3) 细分散泥浆体系是分散性泥浆, 对岩屑和孔壁岩层无抑制作用, 因此不仅泥浆粘度和切力较高、泥浆难以净化, 且槽壁不易维护, 特别是“水敏性”地层, 易造成坍塌事故。

由此可见, 细分散泥浆已很难保证土质复杂和深墙施工的需要, 致使槽段施工中塌方事故时有发生^[9]。因此, 有必要研制防塌性能优异的稳定液,

以适应极不稳定槽段的护壁需要。

3 聚合物溶液的组成和性能特点

几乎所有的水溶液聚合物都有一定的胶结土体作用^[10]。有些聚合物可用于泥浆中, 但因这些聚合物的吸附构型多为多点环吸附, 为非晶态结构, 所以, 吸附膜松弛, 胶结性不好。根据对聚合物胶结土粒机理的认识, 研制具有强胶结性能的聚合物溶液。

聚合物溶液的基本组成是聚合物 A、聚合物 B、助剂 A 和助剂 B 水溶液。聚合物 A 和聚合物 B 均为一种有机高分子化合物, 分子量在几万到几百万之间, 含有羧基、酰胺基、羟基等。聚合物溶液在组成和性能上与细分散泥浆比较有以下特点^[11]: 这种稳定液由一种或几种水溶性聚合物组成, 配制时不加粘土, 使用时又有很好的自身净化能力; 维持其无固相体系, 有比泥浆好的护壁防塌能力。若其应用于槽壁稳定液, 对解决极松散的流砂层和极软弱土层的槽壁稳定问题, 将发挥重要作用^[12]。

3.1 胶结性能强

经水洗的河砂, 制成圆柱状并晾干, 该砂样如浸入清水中, 沾水便散, 放入泥浆中会很快变软, 后逐渐塌落; 同样的砂样, 如放到上述的聚合物溶液中会久泡不散。

3.2 自身净化性能好

由于该溶液中含有线型大分子, 该聚合物又有很好的成膜性, 所以, 对钻掘下来的土屑到地面后很容易沉降清除, 使溶液自身基本保持无固相体系。

3.3 对灌注混凝土的质量影响小

防塌性强可以减少和清除灌注混凝土时槽壁塌方对混凝土质量的影响。槽内溶液中的粘土含量很少, 且溶液的粘度低、密度小, 对混凝土的接触稀释作用和受粘土污染影响均较小。

4 聚合物溶液正交试验与分析

本次试验采用优选法, 根据大量的试验先确定各组成因素的加量范围: 聚合物 A(0.5%~1.2%)、聚合物 B(5%~15%)、助剂 A(0.010%~0.035%)和助剂 B(0.5%~1.2%)。范围确定后对聚合物 A、聚合物 B、助剂 A 和助剂 B 组成的水溶液进行正交试验, 选取“三水平四因素”的正交试验表, 从正交试验中选最优组成。试验过程中为减少试验的误差, 每

组组成都进行 3 次以上的试验，取其平均值，试验的因素与水平列于表 1。正交试验与失水量见表 2。

表 1 组成因素及其水平表
Table 1 Factors of composition and contents

组成因素	聚合物 A/%	聚合物 B/%	助剂 A/%	助剂 B/%
1	0.50	5.00	0.010	0.50
2	0.80	10.00	0.025	0.80
3	1.20	15.00	0.035	1.20

表 2 正交试验表
Table 2 Normal test

组成成分	聚合物 A/%	聚合物 B/%	助剂 A/%	助剂 B/%	视粘度 / $(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	失水量(0.7 MPa) 单层滤纸 / $(\text{mL} \cdot (30 \text{ min})^{-1})$
1	A1(0.5)	B1(5)	A1(0.010)	B1(0.5)	4.25	135.0
2	A1(0.5)	B2(10)	A2(0.025)	B2(0.8)	6.00	65.0
3	A1(0.5)	B3(15)	A3(0.035)	B3(1.2)	7.50	68.0
4	A2(0.8)	B1(5)	A3(0.035)	B2(0.8)	5.00	44.0
5	A2(0.8)	B2(10)	A1(0.010)	B3(1.2)	7.00	90.0
6	A2(0.8)	B3(15)	A2(0.025)	B1(0.5)	9.50	60.0
7	A3(1.2)	B1(5)	A2(0.025)	B3(1.2)	7.00	52.0
8	A3(1.2)	B2(10)	A3(0.035)	B1(0.5)	9.00	45.5
9	A3(1.2)	B3(15)	A1(0.010)	B2(0.8)	12.50	87.5
极 1	268	231.0	312.5	240.5		
极 2	194	200.5	177.0	196.5		
差 3	185	215.5	157.5	210.0		
R	83	31.0	155.0	44.0		

注：括号“()”内数值单位为%。

从表 2 可以看出，对聚合物溶液的失水量影响最大的是助剂 A 和聚合物 A，从中可以选取最优组成：聚合物 A 3(1.2%)、聚合物 B 2(10%)、助剂 A 3(0.035%)和助剂 B 2(0.8%)。对最优组成进行性能测试得： $\eta_A = 10.5$ ；失水量 $V_f = 29 \text{ ml}$ 。从中可以看到失水量与表中相比是最小的，是所选取的最优组成。对最优组成做砂样滚动试验(4 h)，砂样基本不掉粒，土样变软。

为了证明聚合物溶液的性能优于细分散泥浆，同时做了对比试验，结果如表 3 所示(同样采用优选法)。

从表 3 可以看出，对失水量影响最大的是粘土和 Na-CMC。从各因素对失水量影响的极差表中优选组成如下：5%粘土、0.25%纯碱、0.2%Na-CMC，对优选组成做失水量试验，测得失水量 $V_f = 13.2 \text{ ml}$ ，与正交试验表中组成相比，失水量最小。同时将配

表 3 正交试验表
Table 3 Normal test

组成成分	粘土 /%	纯碱 /%	Na-CMC /%	失水量(0.7 MPa) 双层滤纸 / $(\text{ml} \cdot (30 \text{ min})^{-1})$
1	A1(3)	B1(0.15)	A1(0.10)	18.6
2	A1(3)	B2(0.20)	A2(0.15)	16.9
3	A1(3)	B3(0.25)	A3(0.20)	15.5
4	A2(4)	B1(0.15)	A3(0.20)	14.9
5	A2(4)	B2(0.20)	A1(0.10)	16.0
6	A2(4)	B3(0.25)	A2(0.15)	17.9
7	A3(5)	B1(0.15)	A2(0.15)	15.8
8	A3(5)	B2(0.20)	A3(0.20)	17.2
9	A3(5)	B3(0.25)	A1(0.10)	15.0
极 1	51.0	49.3	49.6	
极 2	48.8	50.1	50.6	
差 3	48.0	48.4	47.6	
R	3.0	1.7	3.0	

注：括号“()”内数值单位为%。

制好的泥浆在滚炉中(岩样放在其中)滚动 4 h 后取出，岩样滚动前后的变化情况如下：粘性土微胀、砂性及泥砂土样全散。

从对比试验可看出，聚合物溶液的性能明显优于细分散泥浆，岩样滚动试验表明细分散泥浆只适用于粘性土和泥质胶结的砂性土，且粘度较高，流动性差，槽壁的稳定主要靠压差及其形成的泥皮来维持。而聚合物溶液粘度低，密度小，槽壁的稳定主要靠聚合物分子渗透胶结作用维持。因此，聚合物溶液的性能明显优于细分散泥浆。

从以上对聚合物溶液的性能测试可知，聚合物溶液的护壁防塌性能好于细分散泥浆，特别是对极松散的流砂层。

5 聚合物溶液护壁作用机理探讨

聚合物溶液保护槽壁的作用机理，是聚合物分子在槽壁表面层及进入槽壁土粒孔隙的内表面上，吸附形成的聚合物分子膜对土粒产生胶结作用。如果把泥浆护壁看作向墙壁上涂泥的话，那么聚合物护壁类似于涂漆，漆层虽薄，但远比泥皮强劲，其“涂层”不仅在壁面上，且深入护壁内部。

5.1 聚合物在液 - 固界面上吸附的某些特性

(1) 聚合物吸附的作用力

推动聚合物自溶液向槽壁表面吸附的作用力有

聚合物的憎水效应、聚合物与土粒间的范德华引力、氢键力和在合适条件下的静电引力、化学键力。因有前两项存在, 聚合物可在任何土质表面上吸附, 包括带相同电荷符号的土粒表面上, 而且在聚合物的摩尔浓度(X)极低 [$X=(1/e)^n$, 其中 n 为聚合物的聚合度, $e=2.718$] 的情况下, 也能发生吸附。

(2) 这种聚合物的吸附往往是不可逆的, 因为一个大分子上有许多个链节吸附在土体表面上。虽然一个链节的吸附能很小 (K_T), 但总的吸附能 (mK_T) 很大。所以, 分子一旦吸附上去, 脱附下来就比较困难。

(3) 吸附量随聚合物与水亲合的不良性而上升。

(4) 聚合物可有多分子层吸附, 吸附达到平衡的时间很长。

(5) 吸附速度与聚合物的憎水性、聚合物与土体表面的电性、聚合物分子量等有关。聚合物憎水性相对强, 电性符号相反且分子量较小的, 吸附速度快, 这样的聚合物将被优先吸附。

(6) 聚合物吸附膜的厚度和膜的致密程度与聚合物分子量、吸附构型和聚集态结构类型等有关。分子量很大, 为“多点环吸附”和非晶态结构, 形成的吸附膜厚, 但膜的致密度低; 相反, 分子量较小, 呈“平卧吸附”构型, 又称为晶态结构的聚合物, 吸附膜的厚度较小, 但膜的致密度高。

(7) 无机电解质和低分子有机物对聚合物在土体表面上的吸附具有重要影响。高价阳离子会引起带阴离子基聚合物分子交联。适度交联有利于增加吸附层内的链段密度; 过度交联会引起聚合物失去水深性。高价阳离子又是聚合物分子阴离子基与粘土间吸附的桥接离子, 有助于两者的吸附。

(8) 温度对聚合物吸附的影响至今还少见有适用于所有体系的普遍规律, 随温度增高吸附量增加和减少的结果都有报导。对水溶性聚合物, 升温会引起分子亲水基脱水, 低程度脱水, 有助于吸附; 严重脱水, 聚合物会发生聚结。聚合物抗升温脱水性能主要与亲水基团有关, 其中非离子型聚合物抗温性能较差。

5.2 聚合物在液-固界面上的吸附过程

聚合物自溶液向槽壁表面吸附直到成膜的过程, 大致包括初始吸附阶段, 吸附膜发育阶段和吸附平衡阶段。

(1) 初始吸附阶段

初始吸附阶段是指吸附开始的瞬间, 在此瞬间

内聚合物分子和水分子在土粒表面发生竞争吸附。竞争吸附的形势对流砂层槽壁的稳定性的影响。如果水分子在竞争吸附中占据优势, 槽壁塌落便可随即发生; 反之则趋于稳定。显然, 聚合物的吸附速度是影响其能否具有吸附优势的主要因素。聚合物的浓度对吸附竞争形势有重要影响, 浓度太小是不利的, 太高的浓度同样不利于聚合物的吸附, 这是因为高浓度的溶液中, 聚合物分子间的距离变小, 分子间作用力增强, 分子相互绕结在一起, 使分子向界面迁移受到束缚, 吸附速度减慢。

(2) 聚合物吸附膜的发育阶段

聚合物吸附膜的发育阶段是聚合物经初始吸附阶段, 有一定数量的聚合物大分子在土粒表面和跨越两个土粒的间隙形成类似网状吸附。正是这个大分子吸附网的胶结作用, 克服了水对土粒的润湿、剥落等作用, 使槽壁得到初步稳定。随着吸附的连续进行, 一方面槽壁表面上的大分子吸附网不断加密, 另一方面溶液在压差作用下向槽壁内部深入, 在土体孔隙的内表面上同样出现大分子的吸附胶结作用。随着吸附的不断进行, 大分子吸附网逐渐形成连续覆盖槽壁表面和孔隙内表面的膜。当膜加密到能阻止水分子通过时, 在槽壁及聚合物溶液进入的深度内, 都被聚合物分子吸附膜所胶结。该膜即使用水冲洗也很难脱落, 槽壁自表面到一定深度范围内因被胶结而得以稳定。膜的发育越快、越致密, 胶结作用越强。

(3) 聚合物吸附的平衡阶段

聚合物吸附因有不可逆性和多分子层吸附等特点, 使其吸附达到平衡的时间较长。对护壁而言, 吸附何时达到平衡并不重要, 重要的是在达到吸附平衡之前, 聚合物分子的初始吸附速度和膜的加密速度及膜的致密程度。从上面聚合物护壁作用机理的探讨中可知, 聚合物溶液具有以下特点:

- ① 吸附速度快;
- ② 吸附构型为多点平卧吸附;
- ③ 聚合物分子与岩石的键合能级高;
- ④ 聚合物的聚集体应属晶态结构。

6 结 论

通过以上对现有稳定液的简要分析和对聚合物泥浆的试验及性能测试得出以下几点结论:

(1) 单一的细分散泥浆不能满足土质复杂和深槽施工的护壁要求, 应研制适应这种情况的新型稳

定液。

(2) 通过聚合物溶液和泥浆的性能比较, 聚合物溶液有比泥浆优异的护壁防塌性能。

(3) 以上试验的聚合物溶液适合于极松散的流砂层和较软弱土层, 还可用于泥浆无力阻止塌方的槽段或用于处理已塌方的槽段。

(4) 聚合物溶液护壁机理的探讨为聚合物溶液的研制提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.(Gu Xiaolu, Qian Hongji, Liu Huishan, et al. Ground and Foundation(Third edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.(in Chinese))
- [2] 应惠清. 基坑支护工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.(Ying Huiqing, Engineering of Pit Support[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.(in Chinese))
- [3] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.(Gu Xiaolu, Qian Hongji, Liu Huishan, et al. Ground and Foundation(Second Edition)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993.(in Chinese))
- [4] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(Gong Xiaonan. Design and Construction Handbook of Pit Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [5] 地基处理手册编委会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.(The Edition Committee of Foundation Dealing Handbook. Handbook for Foundation Treatment[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.(in Chinese))
- [6] 丛蔼森. 地下连续墙的设计与施工与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(Cong Aisen. Application of Design and Construction of Underground Diaphragm Wall[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [7] 刘广志. 国外地下连续墙施工设备与工艺[M]. 北京: [s. n.], 1993. 67 - 73.(Liu Guangzhi. Construction Equipment and Technology of abroad Diaphragm Wall[M]. Beijing: [s. n.], 1993. 67 - 73.(in Chinese))
- [8] 李世忠. 钻探工艺学(中册)[M]. 北京: 地质出版社, 1989.(Li Shizhong. Probing Technology(Volume II)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.(in Chinese))
- [9] 赵志缙, 应惠清. 简明深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.(Zhao Zhiji, Ying Huiqing. Concise Design and Construction Handbook of Pit Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.(in Chinese))
- [10] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Handbook of Pit Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [11] 王文臣. 钻孔冲洗与注浆[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.(Wang Wenchen. Washing and Grouting of Drilling[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [12] 赵志缙. 建筑施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.(Zhao Zhiji. Building Construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989.(in Chinese))