

地下连续墙的理论与实践

陆震铨
祝国荣

编译



中 国 铁 道 出 版 社

1987年·北京

地下连续墙的理论与实践

陆震铨

祝国荣

编译

中 国 铁 道 出 版 社

1987年·北京

内 容 简 介

地下连续墙在地下建筑工程及基础施工中已得到了广泛地应用，近年来日本在这方面的技术成就最为引人注目。本书共分十五章，较全面地介绍了地下连续墙的基本理论和施工技术，而且搜集了大量欧美和日本的工程实例。本书在编译过程中，得到了日本大林组的协助，提供了宝贵的技术资料，增补了反映这方面的最新技术内容，具有一定的参考价值。

地下连续墙的理论与实践

陆震铨 祝国荣 编译

中国铁道出版社出版

责任编辑 冯秉明 封面设计 安宏

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：15.625 插页：1 字数：339 千

1987年11月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3,500册 定价：3.30元

编译者话

地下连续墙施工方法从五十年代开发迄今已三十余年，在世界范围内取得很大发展。其中以日本的工程实绩及技术进步最为引人注目。

1975年山海堂出版的由藤井清光、植田进武、堀井阳三、森乔等著的《地下连续墙施工方法的理论与实际》一书较全面系统地反映了这一施工方法的基本理论和施工技术，而且引用了大量欧美和日本的工程实例。对应用这项施工方法者有相当重要的参考价值。该书出版十年来施工技术又有了进步，垂直精度可达 $\frac{1}{2000}$ ，槽段掘削深度已达100m左右，成槽机具已从BW型多头钻，导板抓斗，凯里（KELLY）式抓斗发展到HYDRO FRAISE液压掘削机。使用这些成槽机具和新型泥浆技术，即使在填海区，块石地层（地下水为海水，又极易发生漏浆）内也成功地进行了地下墙工程。此外，在废浆处理技术上也已取得成效，目前在东京、大阪的施工现场已能100%地将废浆处理后废弃。

在地下连续墙的结构和构造方面，柱列式地下墙也得到广泛应用。已从现场浇注柱列式地下墙发展为自凝泥浆预制桩柱列式地下墙了。预应力板式预制地下连续墙技术也发展得很快，已经用预制板地下连续墙作为地下结构物的侧墙，来有效而可靠地承担由地震引起的纵向水平力的作用。

为此，我们在《地下连续墙施工方法的理论与实际》一书的基础上整理并增补了一些反映这方面最新技术的内容。增译的资料选自：

1. 社团法人 土质学会编：講習会テキスト《連続地

目 录

第一章	施工方法概述	1
1.1	地下连续墙施工方法	1
1.2	地下连续墙施工方法的发展	2
1.3	作为施工用的临时挡土墙	4
1.4	作为主体结构的地下外墙	5
1.5	作为桩的应用方式	6
1.6	本章小结	7
1.7	基本术语	7
第二章	深槽的稳定力学	11
2.1	粘土层内的深槽	11
2.2	干砂层中的深槽	15
2.3	有地下水的砂层中的深槽	18
2.4	在粉砂及粉质砂层中的深槽	20
2.5	拱效应	20
2.6	深槽稳定的进一步分析	21
2.7	有助于稳定的其他因素	25
2.8	深槽周围的地面沉降	29
第三章	泥浆对深槽壁面的作用	31
3.1	泥浆对壁面的保护作用	31
3.2	漏 浆	34
3.3	膨润土膜的强度	41
3.4	界面化学现象	42
第四章	护壁泥浆技术概述	45
4.1	护壁泥浆的功能	45
4.2	护壁泥浆技术的发展	46
4.3	护壁泥浆的材料	47

4.4	膨润土的化学作用	49
4.5	膨润土泥浆的性质	50
第五章	泥浆的应用	53
5.1	护壁泥浆与地质条件	53
5.2	泥浆的拌制	55
5.3	泥浆试验	58
5.4	泥浆的调整	64
5.5	根据地质情况合理使用泥浆	67
5.6	泥浆的废弃	69
第六章	废泥浆的处理和废弃	70
6.1	废泥浆的性质	70
6.2	现行的法律规定	72
6.3	废泥浆的处理方法	75
6.4	本章小结	83
第七章	各种成槽施工方法	84
7.1	概 述	84
7.2	ELSE 施工方法	88
7.3	ICOS 施工方法	90
7.4	凯里 (KELLY) 式导杆抓斗施工方法	95
7.5	BW 施工方法	96
第八章	工程计划	125
8.1	施工调查与施工计划的制订	125
8.2	现场准备工作	127
8.3	导 墙	128
8.4	墙厚与墙段长度	130
8.5	装修与精度	131
8.6	成槽机的选择	131
8.7	施工注意事项	133
第九章	地下连续墙的混凝土浇注	140
9.1	一般的必要条件	140

9.2	混凝土的配合比	143
9.3	浇注混凝土	147
9.4	粘着强度	150
9.5	钢筋笼的加工与插入	156
9.6	施工接缝	158
9.7	对于施工接缝效果的观察	164
9.8	使用预制混凝土板的地下连续墙	168
9.9	施工中的问题与对策	173
第十章	柱列式地下连续墙施工方法	181
10.1	柱列式地下连续墙施工方法的种类和特点	181
10.2	就地灌注桩系的柱列式地下墙施工方法	190
10.3	原位土搅拌桩系的柱列式地下墙施工方法	203
10.4	预制混凝土桩的柱列式地下墙施工方法	216
10.5	钢管桩系的柱列式地下墙施工方法	226
10.6	泥浆固化系柱列式地下墙施工方法	237
10.7	柱列式地下墙设计和施工的几个问题	245
第十一章	施工实例	255
11.1	共用箱涵工程	255
11.2	壁式桩工程	258
11.3	防护墙工程	262
11.4	靠近基础进行成槽的试验	265
11.5	地下汽车道的建设工程	267
11.6	干船坞建设工程	272
11.7	大厦的地下墙工程	273
11.8	地下停车场工程	280
11.9	地下铁道工程	282
11.10	防渗墙工程	295
11.11	污水处理工程	300
11.12	竖井的侧墙工程	305
11.13	若干最近的工程实例	308

第十二章 理论分析与设计方法	322
12.1 过去的状况	322
12.2 地下墙的位移	323
12.3 干土的极限理论	326
12.4 湿粘土的极限理论	335
12.5 有限单元法	346
12.6 支护工程	369
12.7 基础结构物	379
12.8 后张法	388
12.9 本章的总结	390
第十三章 地下连续墙的现场测试管理	395
13.1 作用于地下连续墙的侧压力	395
13.2 挡土墙的量测管理技术	400
13.3 地下连续墙挡土结构监测管理实例	412
13.4 地下连续墙垂直承载力的测试	426
第十四章 地下连续墙工程的应用	434
14.1 地下铁道工程	434
14.2 下穿式立体交叉	446
14.3 地下连续墙使用于建筑方面	449
14.4 地下连续墙用于土坝防渗墙	455
14.5 应用于水利建筑物方面	460
14.6 圆形及椭圆形的结构物	462
14.7 在沉井下沉中利用泥浆	465
14.8 有特殊的不透水性的地下连续墙	467
第十五章 最近的研究课题	470
15.1 新型泥浆(聚合物泥浆)	470
15.2 新的钢筋接头方法	485
15.3 对于泥浆经济价值的判断	488

第一章 施工方法概述

1.1 地下连续墙施工方法

所谓地下连续墙施工方法，就是预先进行成槽作业，形成具有一定长度的槽段，在槽段内放入预制好的钢筋笼，并浇注混凝土建成墙段，如此连续施工，各墙段相互连接构成一道完整的地下墙体。由于这种施工方法可以开挖任意深度和断面的深槽，所以能根据设计要求，建造各种深度，宽度，形状，长度和强度的地下墙。施工中，无论在成槽时，还是在槽段完成之后，深槽内均需经常充满泥浆，借泥浆的护壁作用，保持土体的稳定，使墙体在筑成之前不会出现槽壁坍塌的危险。

在充满泥浆的深槽中浇注混凝土的工作利用导管法进行，混凝土从深槽底部自下而上将泥浆置换出来。相邻墙段之间采用特殊的施工接缝相互连接，构成一道地下墙体。

与使用模板构筑的结构物一样，地下连续墙亦具有钢筋混凝土结构应有的足够强度。因此可以将地下连续墙设计为承受垂直荷载，弯曲应力以及水平剪应力的结构物。

施工顺序见图 1—1，①沿着已建成的墙段端部，进行下一个墙段的成槽作业，在深槽内灌满适应于地质情况的泥浆借以保护壁面。②为形成与相邻墙段之间的连接缝，插入一根圆管，即接头管（又叫锁口管）。③将在地面上制作的钢筋笼用起重机吊入槽段。④插入导管，浇注混凝土，然后拔出接头管。被混凝土所置换出来的泥浆全部送进贮存槽，

调整泥浆性能，以便重新使用。墙段长度随施工方法而异，一般在1.5m至10.0m之间。重复进行上述工序，构筑成连续的地下长墙。

这种施工方法的特点是应用特殊的液体来支护深槽，即所谓护壁泥浆。这种泥浆起初是用水溶解膨润土制作。目前为改善泥浆护壁性能和防止变质，又使用了掺加剂。此外还出现了不使用膨润土的护壁泥浆，称作聚合物泥浆。

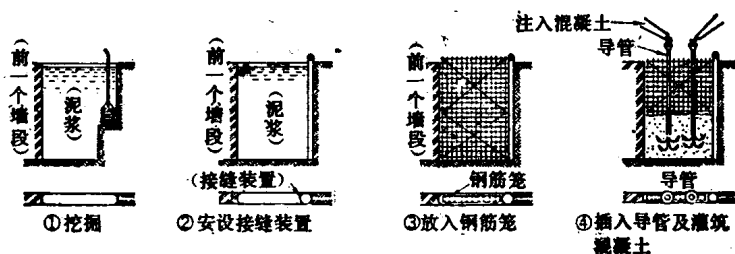


图 1—1 地下连续墙的施工顺序

由于开挖是在充满泥浆的深槽中进行的，因而以往常将用这种方法建成的墙称为泥浆墙 (Slurry wall)，或称作泥浆式地下墙；由于这种称谓表达得不确切，目前各国又称之为隔墙 (diaphragm wall)，在日本则称作地下连续壁。

1.2 地下连续墙施工方法的发展

1.2.1 概 述

在泥浆中进行开挖作业，是近期发展起来的施工方法。起源于1914年的石油钻井工程，当时在钻井井筒中注满水，随着钻屑的混入成为泥浆。在施工过程中发现泥浆能堵塞地下水及天然气，并支护着井筒壁不发生坍塌。还了解泥

浆中若混入了太多的硬块，会妨碍钻进。

1921年发表了泥浆开挖技术的报告；1929年才正式使用膨润土制作的泥浆。1931年马许(Marsh)发明了测定泥浆性质的漏斗粘度计，这是迄今还在使用的一种测定粘度的工具。

至于在泥浆支护的深槽中建造地下墙的施工方法则是1938年意大利米兰的C.维得(C. Veder)开发的。于1948年首次在充满泥浆的长槽中进行了首次试验。这次试验是为了证实建造堤坝的防渗墙的可能性，当时所用的泥浆是用膨润土制的。1950年在意大利进行了两项使用泥浆深槽建造地下墙的大工程。其一是在圣玛丽亚(Santa Maria)大坝下卵石砂砾混合地层中建造深达40m的防渗墙。另一是在凡那弗罗(Venafro)附近由S.M.E.电力公司使用的贮水池及横跨河流的引水工程，这是在高渗透性的地层中建造深达35m的防渗墙。这些地下墙不仅只隔断地下水流，还同时要承受垂直及水平的荷载，而需具备很大的强度。按预定工期建成了地下连续墙。建成后经过观测检查以及从墙身取样试验，确认其性能、精度及强度均符合要求。同时还证明仅挡土用钢板桩一项就可节省大量工费。

此后在各种不利条件下的深基础工程中，地下连续墙均被认为特别有效。

在1950~1960的十年间，这项技术继续进步着，其中包括膨润土泥浆对地基的支护作用方面的研究。研究工作由柏林大学的H.罗伦茨(H. Lorenz)，格拉斯大学的C. Veder，以及意大利的伊柯斯(ICOS)公司等专业机构进行。特别是ICOS公司把它成功地应用于各种领域。

地下墙的施工技术也取得了进步。其结果是既掌握了泥浆成槽作业的各种方法，又能够建造适宜于各种用途的地下连续墙。不论是在混有卵石的坚硬地层中成槽，还是在

硬地层中建造防渗墙在技术上都有进步。

建造地下连续墙的技术已在全世界得到推广, 1954年遍及欧洲各国, 1956年在南美各国, 1957年在加拿大, 1959年在日本, 最后在1962年又推广于美国。

1.2.2 在日本的发展

日本于1955年前后开始引进就地灌注混凝土桩的机械与技术, 1959年对于地下连续墙技术引进了ICOS施工方法, 并用这种施工方法进行了地下防渗墙的施工。随着日本的经济的发展, 建设工程的数量和规模亦日益扩大, 为了解决大承载力的桩基础和建筑工程产生的噪音、振动、烟尘污染及地基下沉等公害问题, 就地灌注混凝土桩和地下连续墙施工方法就迅速得到了发展。

地下墙作为一种挡土墙, 由于其钢筋混凝土结构断面厚度大, 具有大的弯曲刚度, 只要支撑结构使用得当, 墙体变形可以很小。虽然不能像钢板桩那样重复使用, 但对于基坑开挖工程量大、工期长的工程来说经济上还是合算的。此外还具有施工噪音及振动小的优点。随着施工精度的提高, 地下墙不但作为一种施工时的临时结构物。还可以作为主体结构地下外墙或其一部分, 从而增大了使用价值。此外还可以作为一种承载力大的桩基础来承受垂直荷载。

地下墙成槽机械有各种形式, 主要是抓斗式和利用泥浆循环的掘削式。成槽机的掘削部分可分为钢索悬挂, 装在刚性杆的下端和沿着预先设置的刚性导杆上下等三种形式。各种成槽机械的挖土斗或钻头各有特点, 掘削方式和性能亦各不相同。

1.3 作为施工用的临时挡土墙

以钢筋混凝土构筑的地下连续墙的墙体因其刚度大, 无

需主体结构在基坑开挖侧面之间回填土，具有对基坑周围土体和结构物影响微小的优点。所以完全可作挡土墙使用。

作为挡土墙除了能承受作用于墙面上的侧压力（土压加水压），不产生超过允许限度的变形外，还应具有挡水防渗能力。对后者的要求，不仅混凝土本身不能有缺陷，而且墙段之间的接缝应有充分的不透水性。为此，必须保证成槽精度，以免相邻墙段的墙面间产生垂直方向的不吻合状态。虽然各种成槽机械的成槽精度不相同，但对于能在成槽过程中进行测斜纠偏的机械来说，则精度基本上差不多。

随着墙体施工精度和混凝土浇注质量的提高，地下连续墙已不仅能作为临时挡土墙来设计，并可作为主体结构的地下外墙来设计了。

1.4 作为主体结构的地下外墙

这种工法在发展初期就有把它作为主体结构地下外墙的一部分的应用方式。随着施工实例增多，成槽机械日益完善，施工精度亦愈来愈好，遂出现了将地下连续墙直接作为地下主体结构外墙的尝试。单独作为主体结构地下外墙的地下连续墙不但要承受侧向土水压力，还必须能够作为抗震墙承受地震的纵向水平力的作用，以及作为桩基承受结构物的垂直荷载。

作为抗震墙，承受上部结构传递来的地震力，地下连续墙应具有适应这种功能的槽段接头构造形式。这种构造不但应有可靠的挡水性能，还要能传递应力。此外槽段接头所具有的刚性也大为有利于构造设计。现在已研究出能够尽可能满足上述要求的各种接头形式。有许多已申请了专利权。至于只有挡水效果而不能传递应力的槽段接头形式，必须另设传递应力的构造，并作相应的理论分析。

地下连续墙和内部结构之间的接头，多数采用使地下墙面的接合部分作成凹凸形的榫接方式和预埋钢筋或螺栓的方式，或将这两种方式合并使用。

这些接头形式均先在实验室内制作试件经过试验，并在实际现场条件下施工的墙体内采取试件进行试验后，确认其各种性能。

由于混凝土是在泥浆下用导管法浇注的，受施工管理的影响很大。所以亦必须在实际的地下连续墙体内取样进行试验，测定其强度和强度值的分散性。

1.5 作为桩的应用方式

即使对于承受土水压力的地下连续墙，也不宜在自重作用下产生大的沉降。如果由另外布置的桩来支承，还需有传递荷载的纵向接头，是非常不经济的。墙体自重 在深度为 10m 时相当于 24t/m^2 ，同样，在 30m 时为 72t/m^2 ，在 40m 时为 96t/m^2 ，这对于土层的长期允许承载力来说，是一个相当大的数值。

由于地下连续墙和就地灌注混凝土桩的施工方法相类似，只是由于断面形状的不同使承载力的机理略有不同，所以还是能够作为完全的支承桩来使用。关键问题是必须将深槽底部的沉渣加以清除，并防止在成槽时使持力层受到扰动。承载力试验证明，充分注意上述问题进行施工的地下墙就充分具有桩的承载力性能。

除了将地下连续墙墙体的埋入部分作为桩来使用之外，也可采用地下墙工法施工条形桩。由于断面为矩形，其桩尖单位面积承载力和通常的圆形桩虽有不同，但相差不大。至于对于水平力来说，则有着明确的方向性。不同的荷载方向，长条形桩的刚度亦不相同。因此在设计中应加以考虑或

者采用十字形的断面，或在基础桩的平面布置中安排好地下墙桩的位置和方向，根据水平荷载的方向加以调整。

1.6 本章小结

地下连续墙施工方法在日本已有二十多年历史，不论在施工机械方面，在墙体构造、接头构造方面或者在施工的工程数量方面都有了很大的发展。此外，在沉渣处理，泥浆的应用技术和施工精度的提高等方面亦同样取得很大进步。但是由于施工对象是复杂的地层，又只能在地面上不能直视的条件下进行地下作业，所以偶有疏忽或者技术不熟练，就会发生事故。即使同一个公司，使用同一种机械进行施工，作为主体结构物的地下墙和作为施工临时结构的地下墙相比较，后者的精度和质量就差很多，这就说明了施工者的熟练和重视是何等重要。

为了保证槽壁稳定要使用泥浆，而成槽时排出的混有泥浆的土砂以及使用后变质的泥浆的处理，成了新的公害问题，必须加以解决。可以认为，排土和排浆的处理费用的增大已成为影响这种施工方法发展的重要课题。

由于成槽机械能力的增大，精度提高，最近已在地下仓库工程中应用深度达100m的地下连续墙。此外，在基坑深度比较浅的情况下已开始使用预制板地下连续墙。

1.7 基本术语

地下连续墙施工方法所使用的专业用语并不很多，为便于理解下面各章内容，现作必要的说明如下：

“护壁泥浆” (Stabilizing fluid) 在成槽时，防止槽壁坍塌，保持周围土体稳定的液体。主要成分有水、膨润土及化学物质等。

“泥浆的稳定性” (Stability)，指护壁泥浆不发生沉淀，经常保持着一定状态的性质。一般对于这种性质的要求很高；稳定性也是用以判断膨润土质量的指标。

“漏浆” (Circulation loss)，指泥浆向地层中渗漏流失，这会导致槽壁面坍塌。

“屈服值” (Yield value)，对静止的泥浆逐渐增加压力使之发生流动，其开始流动时的压力称作屈服值，在屈服值大的泥浆内，固体颗粒难于沉淀。

“盐分的作用”，泥浆一般在受到盐分的作用后性质会恶化。制备泥浆所用的水之含盐量如达500ppm以上，就会影响泥浆的质量。以淡水为主要成份的泥浆在接触到含盐的水以后，性质就会变坏。

“钙盐的作用”，泥浆一般容易受到钙盐的污染，出现凝胶状态，结果使泥浆的稳定性恶化。特别是混凝土对泥浆有很坏的作用。

“反循环” (Reverse circulation)，在成槽时泥浆从深槽顶部注入，成槽机掘削的土砂与泥浆一起通过设在成槽机内的泥浆泵从槽底经泥浆管被吸上来。

“触变性” (Thixotropy)，胶体 (Colloid) 经搅拌后所降低的强度，当恢复了静止状态后，又能逐渐恢复的能力。

“凝胶” (Gel)，即胶质液体失去了流动性，而成为如固体状态那样的物质。

“凝胶化” (Gellation)，(1) 泥浆经过长期静止状态后变成凝胶。(2) 泥浆在离子作用下，特别是受钙离子的作用而变成凝胶状态。

“溶胶” (Sol)，胶体保持流动性，成为液体状态的物质。

“粘性”表示泥浆的流动内摩擦。其绝对单位为泊，百分之一泊称厘泊。在地下连续墙施工中，一般用漏斗粘度计来测定粘性。

“漏斗粘度计”把500ml的泥浆倒入一定尺度的漏斗粘度计里，测定泥浆全部流出所需时间（秒）；水大约为19s，护壁泥浆必须在20s以上。也有用在1500ml的容器中倒入946ml液体加以测定的方法，国外多采用这种测定值。

“失水”泥浆在失水量试验中所滤出的水。

“失水量试验”在以滤纸垫底的试验容器中倒入试验泥浆，在泥浆上部施加规定的压力，经过一定时间（一般用 3kgf/cm^2 的压力，经过30min），测定经滤纸渗出的水量和附着在滤纸上的滤饼的厚度与性质，两者之值以小为优。测定失水量的加压时间可用15min，也有用7.5min的。前者所得失水量值的1.5倍，或后者所得值的2倍，大致与30min失水量值相同。

“地下连续墙” (Diaphragm wall)，在开挖的深槽中建造的长墙。

“地下连续墙施工方法” (Construction of diaphragm wall)，即建造地下连续墙的施工方法；广义地说，还包括不用混凝土建造的防渗墙，隔振墙，及使用这种施工方法专用的成槽机建造长方形、多角形，多角圆形以及其他形式的支承桩等。

“深槽” (Trench)，在建造地下连续墙时，向地面下垂直开挖的深槽。

“坍塌” (Collapse) 是指槽壁面的坍塌。土体由于地层压力平衡原来处于稳定状态，经成槽后破坏了这种平衡，就逐渐发生坍塌。在存在地下水的地方，这种现象将发生得更快。

Diaphragm wall