

岩土工程参考资料

Collection of References on
Geotechnical Engineering

Vol. 5 No. 1

深 基 坑 开 挖

Geotechnical Engineering Information

Service at Tong-jí University

同济大学岩土工程情报资料站

编 者 的 话

编印《岩土工程参考资料》，是同济大学岩土工程情报资料站乘1982年12月中国建筑学会在天津开会期间，邀请与会的若干成员和非成员单位参加的第四次座谈会上大家提出的要求，现在它和大家见面了。

本刊将刊登岩土工程方面的译文、文摘、国内外文献述评、专题题录，以及准备在国内杂志发表的论文的详细摘要等；目的是为了帮助岩土工程工作者之间开展科技交流，了解国内外新的发展动向及水平；帮助大家节省查阅文献资料的时间，弥补外语语种方面的局限性和扩大视野。

本刊暂定为不定期刊物，以“专辑”的形式出版，将分别由我情报站或者有关成员单位承担选题、选文、组织翻译、审校、定稿等工作。具备条件的成员单位可以自己推荐承担某一专辑的选题、译校、出版等工作，再由我情报站发行、交流。

凡经本刊选用的文稿将酌量支付稿酬。

我们衷心希望能得到顾问委员会各位委员以及各成员单位的关心和支持，并欢迎岩土工程工作者踊跃投稿，共同办好这份刊物。

1988年4月

深基坑开挖专辑开容简介

本专辑从深基坑开挖的不同侧面收入了英、美、日等国的八篇颇具特色的研究论文，对深基础开挖研究者具有一定的参考价值。

日本的田中文次等一文介绍了一个成功地在软弱地基中控制地基变形的实例。工程所在地周围是密集的公共建设和民用住宅，固而要求严格控制基地开挖的地基变形，采用了扶壁式支撑墙。文章从地基变形分析到具体的支撑墙设计，施工全过程，以及对为检验墙体效果进行的实测内容都作了叙述。理论值和实测值证明支撑墙作为控制变形的对策是行之有效的。

日本的大志万和也和船越敦的“地下连续墙基础的设计”一文指出地下连续墙基础是一种新开发的基础型式，但至今还未确立一种设计方案。该文对目前提出的几种方法进行了概括性的总结，并举一例进行介绍。设计的基本思路是将地下连续墙墙体作为弹性体。将周围地基土用相应不同系数的弹簧代替。计算内容有地基反力计算、在水平和竖向荷载作用下的墙体稳定性验算、沉降计算和墙体内力计算等。

英国的J.Washbourne一文对地下连续墙基坑进行了三维稳定性分析，特别指出泥浆支护勾壁中经常发生的拱作用效应，并尝试将这种情况考虑到稳定性的分析中去。

Thomas D O'Rourke 一文就由支撑开挖引起的地面移动进行了检测，并特别强调了地面运动与施工过程中可能引起的各种情况之间的关系，得出基坑墙体的变形类型与接近基坑的地表面的位移类型有关。最后对砂土和软粘土中支撑开挖的工程史料做了总结，并建议采用观察数据来控制地面的运动。

D.M.Potts 和A.B.Fourie的“临时支撑挡墙的性状：数值计算结果”一文，采用有限单元法研究施工类型和土的原始应力对单个支撑挡墙性能的影响，并采用弹塑性本构定律模拟土的性质，并假定刚性支撑作用在墙的顶部。从而得出高

K_0 和低 K_0 土层中，开挖墙或回填墙中杆的支撑力和墙体弯矩。并指出近似极限平衡方法计算的支撑力和弯矩都偏保守。

泰国 D.T. Bergado 等一文讨论了曼谷软粘土挖方及桩基的特性，从设置了完整量测元件的两个挖方试验，表明传统方法高估了超孔隙水压力，还讨论了挖方的水平和垂直位移以及稳定性的概率分析。对于桩基础根据收集的 29 根桩的荷载试验资料，用静力公式计算单桩承载力值，得出长桩的极限承载力值可用总应力法和有效应力法计算；但对于短桩，无论用总应力法和有效应力法计算极限承载力，结果均偏高。

英国的 G.W.E. Milligan 一文对锚固板桩墙附近的土体变形情况进行了深入的讨论，指出简单速度场只能用来予估柔性悬壁挡土墙后的土体变形，对于任何在剪切中会发生剪胀的土体来说，它就无能为力了。因此，作者提出采用试验的方法研究一种可以分成若干区域的更加复杂的变形场，并将与悬臂墙有关的模型试验和用简单速度场分析的结果应用到实践中去。

D.A. Bruce 的一文综合评述了主要在过去十年中有关桩的灌浆法方面所发表的资料。通过对大直径桩进行二次灌浆，可较好地发挥桩的表面摩擦力和底端承载力，使桩的极限荷载提高达三倍。文中详细介绍了在桩内置入设备提高桩的性能的方法以及灌浆对在粘性土和非粘性土中桩身摩阻力与底端承载力的提高作用。最后总结了四条重要结论，并指出对于受到异常施工活动而影响了性能的常规桩，灌浆也可作为很好的补救措施。

本专辑由同济大学岩土工程情报资料站负责编辑出版，参加译校工作的有同济大学地下建筑与工程系洪毓康、徐和、李向范、陈三江、陈永福、王沅、任奋芝和段兵廷等同志。

目 录

一．软弱地基大开挖时变形控制	(1)
二．地下连续墙基础的设计	(21)
三．地下连续墙三维稳定性分析	(13)
四．支撑开挖引起的地面位移	(37)
五．临时支撑挡墙的性状：数值试验结果	(59)
六．曼谷软粘土挖方及桩基特性	(100)
七．锚固板桩墙附近土体的变形	(118)
八．以灌浆法增强大直径桩的性能	(146)

软弱地基中大开挖时的变形控制

[日]田中文次、细矢正弘

桥本美喜男、森田哲士

前言：

近年来，由于地皮征用困难，净化水厂、污水处理厂等大型设施不得不建造在冲积地带之类的软弱地基上，随着基坑开挖，常常发生基坑周围地表下陷等问题。

本文所举的事例，是一个在超软弱地基上进行大规模明挖的工程实例。

本工程中的开挖初期，发现了在原设计中没有预料到的变形特征。由于工程周围的公共设施及民用住宅高度集中，使得施工环境极为复杂，因此，当完全难以控制后续的地基变形时，一度立即中断施工，讨论阻止变形的根本性的对策。根据多方面的讨论结果一致认为：在实施阻止大规模的变形的对策的同时，对施工进行严格管理和控制能保证平安完成后续工程；这是一个成功地在软弱地基中控制地基变形的好例子。

本文中，着眼于作为控制地基变形对策而实施的扶壁式支撑墙（以下简称支撑墙），从地基变形分析到具体的支撑墙设计、施工全过程，以及为了检验其成效而进行实测的内容都作了叙述。

作为阻止地基大开挖变形的对策——支撑墙法，至今还没有过实例。而且，也没有建立相应的理论分析方法。这里，根据现场观察进行施工管理，由理论值与不断的实测值，来验证支撑墙的效果，由此，可以确认作为控制变形的对策，此法是行之有效的。

1. 由支撑墙控制变形

(1) 地质概要：

本工程建设的地点位于江户川和中川之间的低洼地带。上部冲积层中自然埋

砂层(A_5 层)和漫滩沼泽泥层(A_6 层)相当发达, 下部冲积层是洪水期的堆积层, 由软弱粘土层(A_2 层: $N=0-5$)和砂土层(A_3 层: $N=5-20$)交叉组成。此区域在关东平原也是有名的地基沉降带, 为此, 在周围做了大量的负摩阻力试验。

具有代表性的地层见图 1 所示。

另外, 将工程区域周围的地层模型化得图 2 所示的结果, 在开挖现场南侧, 软弱粘性土很厚, 根据土层厚度与最深开挖位置的关系可知这种软粘土容易直接受到地基变形的影响。

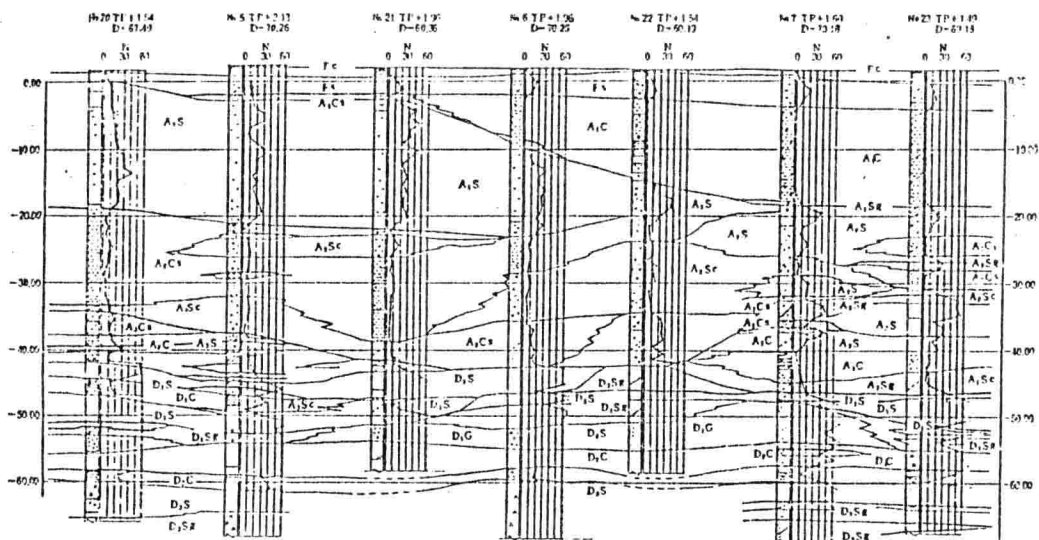


图1 地层剖面图(A-A)

由于开挖现场的后背紧挨着中学校舍等公共设施及民用住宅, 再加上软弱的地基条件, 因而阻止地基变形是决定本工程成败的关键。

(2) 由于开挖引起的地基变形之机理及相应对策

在软弱地基中, 采用斜坡明挖法进行开挖时, 在开挖面及周围地基土中产生变形的机理表现为图 3 所示模式。

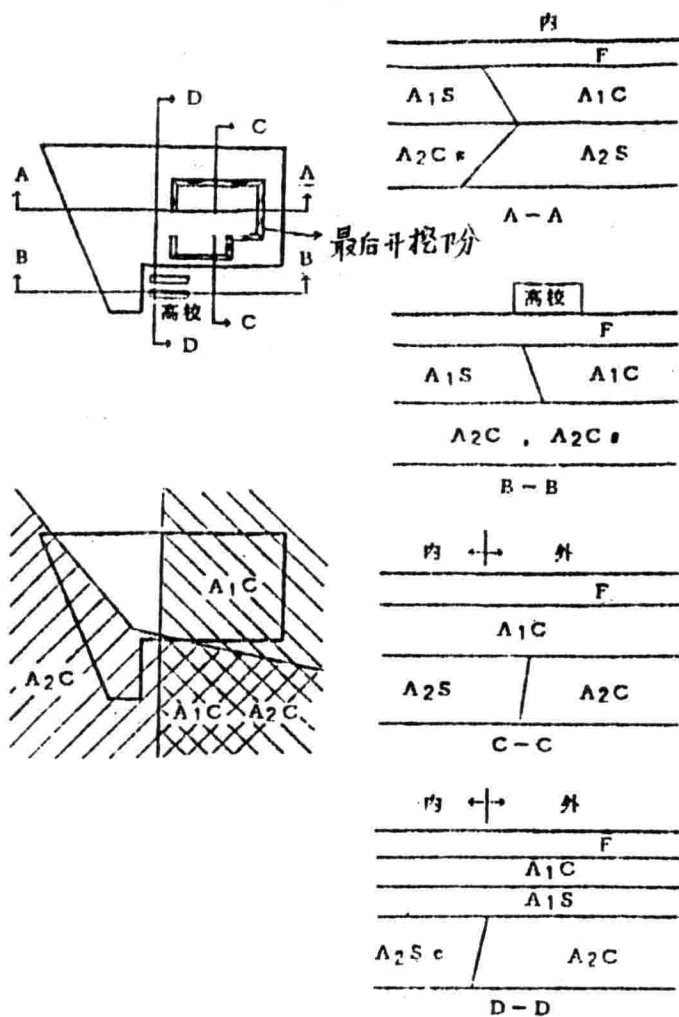


图2 土层组成模式

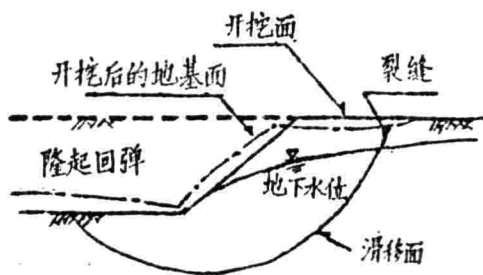


图3 开挖后地基变形性状

一般性的基坑开挖引起的基础变形的原因可列举如下几点：

①在斜坡处产生滑坡现象，随之周围地表产生沉降。

②随着开挖深度增加，整个开挖斜面向坑内移动，在开挖面的后背产生沉降

③由于开挖解除了上覆压力，基坑底部产生回弹及斜坡面坍方。

④由于开挖，基坑产生聚水作用，周围地基土产生自然排水，有时还人工降水由此使周围地基土中的地下水位下降，粘性土的有效应力增加，产生固结沉降。

⑤在基坑下部有承压饱和砂层时，随着开挖进行，上覆压力减小，产生流砂、管涌现象。

由此可知，基坑开挖取土，不仅改变了地基土内的原始应力状态，而且也使地下水位发生了变化，并使很大的范围受到影响。

为此，将本工程计划分为二步。第一步开挖中，在施工前为了加强斜坡面强度，对地基土进行了改良，再在工程区域周围打入了钢板桩及钢管式排桩，用以阻止浅层地下水的流失。

但是，在开挖初期，由于在开挖处的周围有一部分明显地产生了下沉现象，为此中断了下一步的开挖，为了制止地基变形的继续发生，要讨论阻止变形的根本性施工对策（以下简称变形对策）。

（3）变形对策的选定：

在软弱地基中用明挖法开挖基坑，作为阻止地基变形的对策，常用如下几种方法。

①加固（改良）地基土。

②打入抗滑桩。

③平衡压重法。

④打入双重板桩等壁状式结构物。

⑤土锚法。

本工程中，开挖面积达 $450\text{m} \times 320\text{m}$ ，挖土量约为 220万m^3 ，开挖深度为 24m ，无论是开挖面积还是深度及土方量，其规模是空前之大。软弱地基的大变形是明显的，因而采用一般的地基加固方法及抗滑桩等对策还难以控制变形。

因此，在第二步开挖时，周围地基土产生侧向变形，固结沉降以及随之而来的建筑物基础上的负摩阻力等影响较大。因而，作为一种阻止变形的施工对策要使其满足：

①用大刚度的结构物来阻止地基土的侧向变形。

②由深墙阻止深层地下水的渗流。

因而决定采用地下连续墙的扶壁式支撑墙，作为阻止地基变形的施工对策。大规模地实施此种方法以往是没有过先例的，在设计中作了如下考虑。

(4) 支撑墙的分析思路：

我们知道用化学药剂灌注法加固地基，有提高其承载强度，防止周围地基土松弛等效果，因而在开挖斜面附近，某一宽度范围内注入化学药剂，使得地基土固化，地基变形系数增大，由此可推断，地基加固部分成为刚度较大的承载体，可减小开挖变形。

这里，为了把握地基变形的程度，在改变加固宽度、加固强度、加固深度等因素的情况下，用有限单元法进行分析，以确定相应效果的变化情况。当地基根据计算结果分析变形系数达到 $E=10000\text{ kgf/cm}^2$ ，加固宽度在5.0m时，开挖引起的周边变形较小。目前，从施工角度来说，使加固了的地基变形系数达到 $E=1000\text{ kgf/cm}^2$ 是可行的，例如用喷浆法施工。

另外，将整个斜坡面均匀地加固，从经济上与施工上来看都是相当困难的，所以考虑使用间断的支撑墙，将其压缩到所需刚度，当间断的墙体与墙之间的土成为一个整体共同作用时，可以推断，原地基的变形系数会大幅度上升，成为一个墙土复合地基，这里按图4所示顺序，加上必要的假定及机能，进行理论分析，以确定其效果，再对扶壁式支撑墙加以讨论及实施。

支撑墙的具体模型如图5所示，将间断的墙体刚度“稀释”，置换成等效的均匀地基，增大变形系数进行分析。

另外，用三维有限元验证了墙体间的土无滑移现象，可以确认此时由于地基改良改善了墙壁间的土，加大了支撑效果。

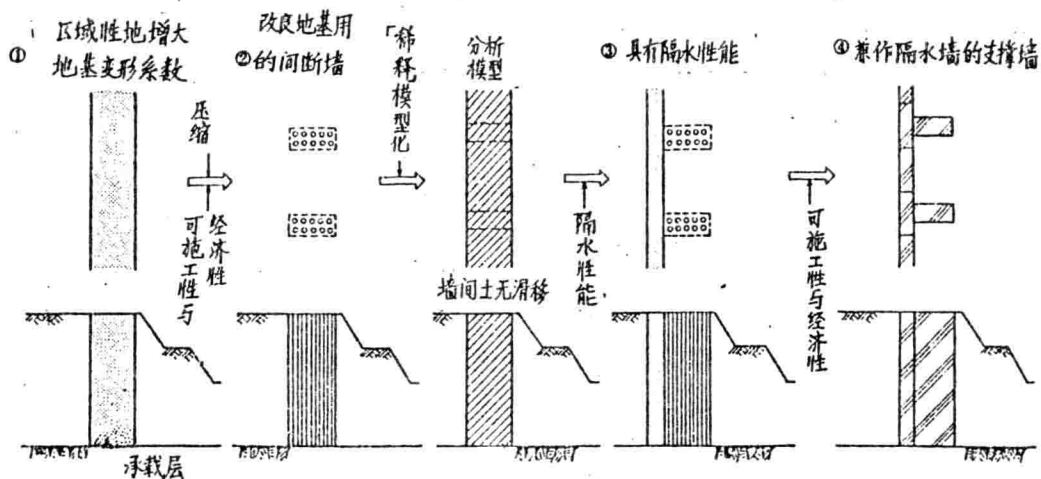


图4 支撑墙的分析顺序

$$E_c I_c = E' I'$$

$$I_c = B H^3 / 12$$

$$I' = B H^3 / 12$$

这里 E_c : 钢筋混凝土的弹性模量。

E' : 计算模型的弹性模量。

I_c : 钢筋混凝土墙的截面惯性矩。

I' : 计算模型在宽度 B 范围内的截面惯性矩。

这里, 在分析模型中使用的表观上的单元弹性模量 E' :

$$E' = E_c \cdot I_c / I'$$

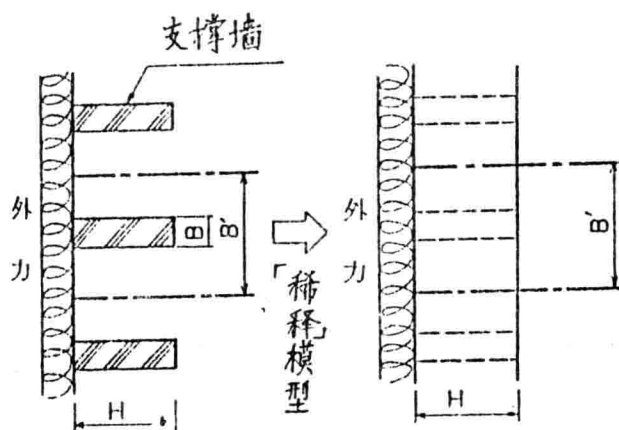


图5 支撑墙的模式化

(5) 地下连续墙的形状：

评价间断地设置的墙体，按以下顺序进行：

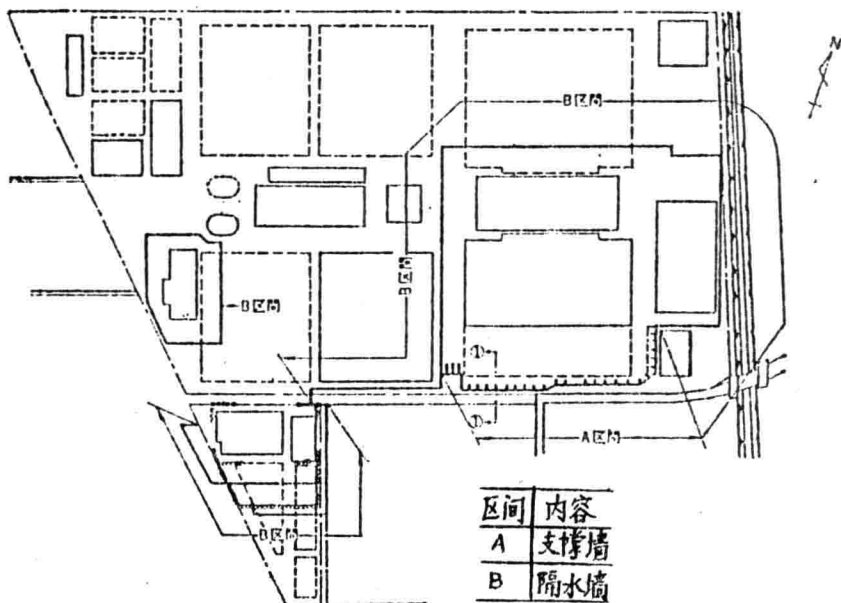
顺序1：为了控制开挖引起的变化，在斜坡面部分设置连续墙，将施工宽度作为有效的复合地基，增大变形系数加以分析。

顺序2：将墙体作为平面连续体，将墙的抗弯刚度按墙的间距“稀释”，在变形系数等价的基础上决定墙的形状、刚度，认为壁间的土无滑移现象。

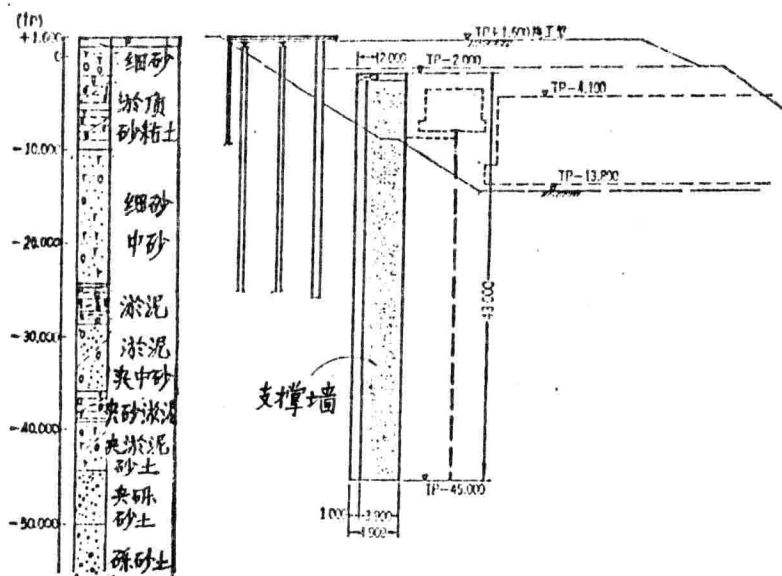
在设计中，以以上的思路为基础，按墙与地基土的复合地基的变形系数达到 $10000\text{kg}/\text{cm}^2$ 来确定墙体的间隔与形状。

图6 所示的是支撑墙的构造，支撑墙是把间断的墙体用连续墙连接起来的结构，墙的深度是以阻止周围地基土中的地下水往抽水井中渗透为准，即兼作隔水墙。另外，为了使扶壁与壁状的地下连续墙共同作用，在顶部用 1.0×2.0 大小的钢筋混凝土梁刚接起来。

支撑墙的平面形状考虑未来设施的增加，使扶壁墙的扶壁尾部可以加长，即使在支撑墙附近开挖也能将地基变形控制住。

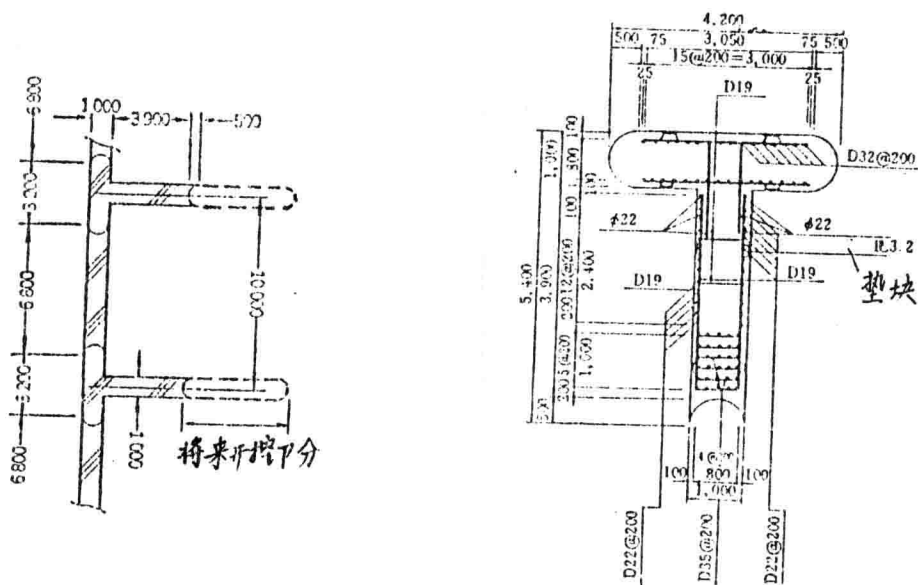


(1) 支撑墙、隔水墙整体平面图



孔号 No.13

(2) 支撑墙标准单元图



(3) 支撑墙1-1 断面

(4) T 型断面配筋图

图6 扶壁式支撑墙的位置和构造

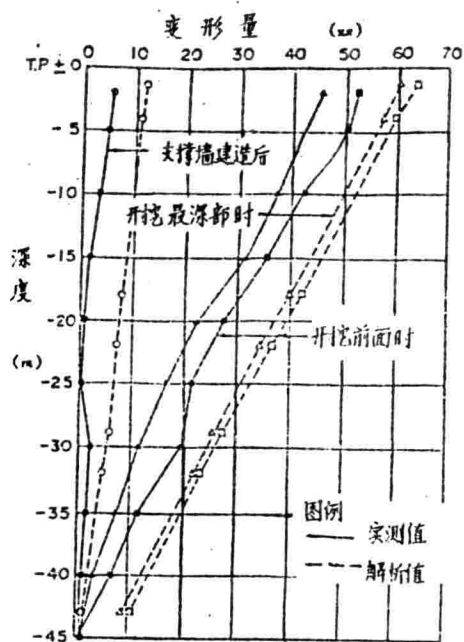


图7 支撑墙的变形

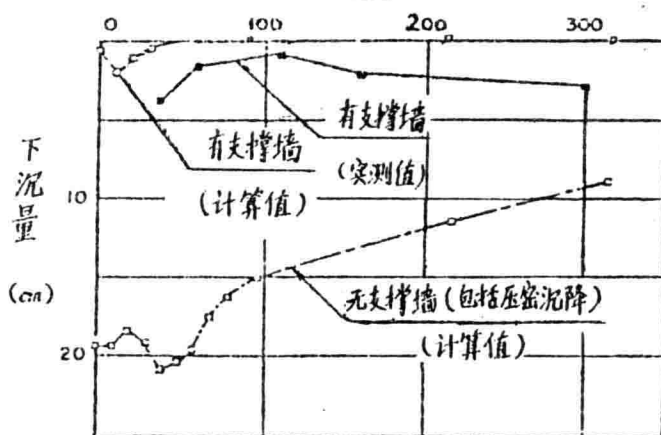


图8 墙背地基的下沉量 (开挖最深时)

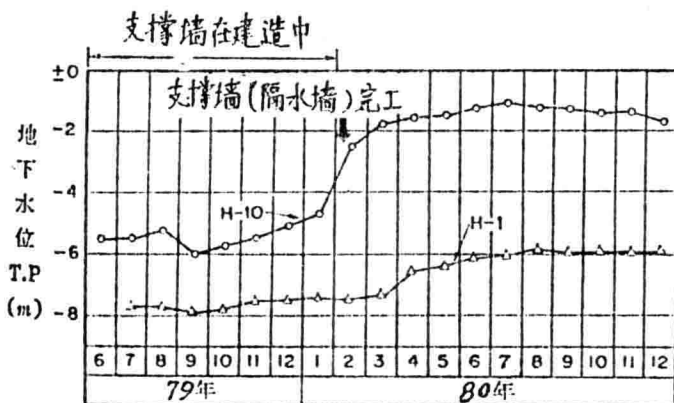
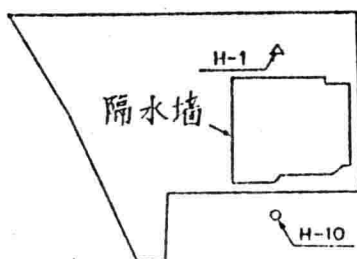


图9 地下水头随时间变化量

2. 验证支撑墙的效果

作为阻止变形对策的扶壁式支撑墙完工后,为了验证理论值与实测值的吻合度,而且为了依照施工管理进行开挖,观测支撑墙与周围土层的动向,设置了倾斜仪、钢筋应力计、土压力盒及孔隙水压力盒。

(1) 支撑墙的变形

图7所示的是由倾斜仪测得的支撑墙变形结果以及用非线性有限元计算的变形结果,其期间是支撑墙竣工后到基坑开挖结束。

由于扶壁式支撑墙包围基坑,工程一开始,在基坑内进行了抽水,而产生水位差,水压力作用于墙体上,使其产生若干变形,其后,开挖到支撑墙处,支撑墙的顶部产生了40mm的变位,地基土的蠕变位移为50mm。

如果将支撑墙的实测变形机理模型化,支撑墙可以看作象受土压作用的混凝土挡土墙一样发生刚体位移,并显示出理论值与实测值有良好的一致性。另外,由于变形表现出倾向开挖侧的刚体位移,在支撑墙中的钢筋应力计没有显示较大的应力值,这也为支撑墙的刚体变位提供依据。

(2) 支撑墙背后地基土的沉降

图8显示了支撑墙背后地基土的下沉状况。支撑墙竣工后,由于开挖引起的地基下沉主要发生在靠近支撑墙背后附近的较小范围内,其值也很小。另外,距支撑墙较远的地方也发现了下沉现象,但这被认为是由于大面积的自固结引起的。

同一图中,也将用有限元计算的理论与实测值进行了对比,由此可知,有无支撑墙使地基下沉量有很大差别。

(3) 周围地基土中的地下水位

图9表示了支撑墙建造过程中地基土下部砂层(AS层)的水位随时间变化的情况,随着墙体的建造,到墙体建造完毕,墙体外侧的地下水位一直上升,这就说明支撑墙的隔水作用很明显。

以上根据支撑墙的变形、背后地基土沉降及地下水位变化的实测结果论证了支撑墙的效果。另外，将墙体进行刚度“稀释”的模型化，由此进行了有限单元的理论分析；通过对比，认为能较好地模拟开挖过程地基变形机理，因而这种理论分析是有价值的。

结束语：

本工程的建设地点处于在关东平原也是少有的低洼地带，再加之，在冲积层中有特有的超软弱地基，周围建筑物集中，施工环境是十分不利。因此，在第一次开挖之前，实行了地基加固、拦截周围地下水等措施。

但是，在工程开挖初期，因发现了没有预料到的变形特征，工程一度中断，同时为了在第二次深部开挖中能控制地基变形及防止地下水渗失掉，从各个方面，对阻止变形的施工对策进行了充分讨论。

在考虑对策时，首先考虑结构构造及形式，表观上以与间断的墙体刚度等效为原则，使用“稀释”模型，以此确定地基变形系数，再用有限单元法分析确认其效果。以此为基础，以尽量减小渗流、侧向变形、下沉等因素对邻近建筑物影响为目的，其中最主要的是以控制侧向变形来设计用地下连续墙连结的扶壁式支撑墙，此墙同时用作隔水墙。

支撑墙，隔水墙的施工花费一年时间，施工也特别慎重。另外，观察开挖时支撑墙的变形、应力、周围地基土的下沉、地下水位、周围公共建筑物的变形变化，认为是安全的情况下进行下一步开挖。根据观察结果，认为设计此对策性支撑墙时，预测值与实际值较一致，此对策达到了如期效果。另外，为了掌握隔水效果，把握地下水的影响，在进行地下水位预测的同时做了抽水试验。

正如本工程所看到的，施工前对土质状况、分析方法、分析模型的假定进行周密细致的处理，可以相当准确地预测地基变形，而且在本工程看来，在软弱地基中设置兼作隔水墙的阻止地基变形的大刚度支撑墙不仅有效，还能如期顺利完工。

在大型的土木施工时，对于周围的建筑物要负重大的社会责任，特别是大规模开挖中，必须充分考虑相应的控制地基变形的对策。本文若对于从事土木设计及施工的第一线技术人员能提供参考的话，作者将感到荣幸。

鸣谢：

在本工程的施工对策规划中，设置了由各方面有经验的人员组成的“技术讨论委员会”，使官方、学者、民群成为一体，共同进行讨论，特别是论文编辑委员会会长丸安东京理科大学教授细心地给予了指导，使工程圆满完成，在此致以深深的谢意。

另外，在施工时，对于大成・清水JV，鹿岛・大林JV，西松・钱高JV日以继夜的努力工作深表谢意；在论文撰写阶段，得到了清水建设服务公司的五十岚，町田两人及东京都水道局的田口、野神两人的协助，在此一并致谢。

【参考文献】

略

译自《土木学会论文集》No.355/VI-2

同济大学 陈永福 译 陈三江 校