

市政工程新技术及工程实例丛书

国内外重大地下工程事故 与修复技术

白云 肖晓春 胡向东 ◎ 主编

中国建筑工业出版社

市政工程新技术及工程实例丛书

国内外重大地下工程事故 与修复技术

白云 肖晓春 胡向东 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

国内外重大地下工程事故与修复技术/白云,肖晓春,胡向东
主编. —北京:中国建筑工业出版社, 2011. 12

(市政工程新技术及工程实例丛书)

ISBN 978-7-112-13746-6

I. ①国… II. ①白…②肖…③胡… III. ①地下工程-工程
事故-案例-世界②地下工程-修复-案例-世界 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 227147 号

本书共分 7 章,全面、系统、详细地介绍了国内外 6 个重大工程事故过程、原因和修复工作。这些重大工程案例涉及软土深基坑工程、软土隧道联络通道工程、盾构隧道工程,不仅有建设期发生灾难的情况,也有运营初期发生事故的实例。编著者相信,通过对这些重大地下工程事故的深刻剖析,从技术和风险管理角度上讲,将有助于国内同行提高对地下工程建设的认识。

本书可供城市地铁隧道、越江越海隧道、取排水隧道和公共事业等隧道设计与施工的工程技术人员、科研人员及大专院校有关专业师生作技术参考。

* * *

责任编辑:王梅 刘瑞霞

责任设计:李志立

责任校对:王誉欣 陈晶晶

市政工程新技术及工程实例丛书
国内外重大地下工程事故与修复技术
白云 肖晓春 胡向东 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:12 字数:297千字

2012年1月第一版 2012年1月第一次印刷

定价:36.00元

ISBN 978-7-112-13746-6

(21499)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

正打算写一段前言，看到了英国同事刚发来的一则工程事故信息。这起事故发生在埃及开罗的地铁盾构区间段，2009年9月3日（星期四）晚，位于开罗最古老区域之一的Bab Al-She'riya区Al-Geish街的路面突然出现了一个直径15~20m、深20m的巨大空洞，导致停在该位置的一辆小汽车落入洞内，邻近的10栋建筑中的80户家庭作了紧急撤离，所幸无人员伤亡。初步了解的事故起因是：本次地层空洞是由一块刚出土压平衡盾构盾尾的邻接块管片（10点位置）掉落引起的。事故原因正在调查中。我猜测可能由以下几个或综合因素所引起：管片误拼装、螺栓未紧固？千斤顶未顶紧？同步压浆压力过大？……

其实，近几年国内外地下工程事故是层出不穷的，如何减少这些恶性地下工程事故？这不仅是业内人士最为关心的话题，也是政府官员们时时关注的问题。人们首先要问的问题是，为何科学技术在不断进步，而地下工程的事故却与时俱增？要回答这个问题，就必须先谈一下当今地下工程的特点。

当今地下工程的特点可以概括为4句话：地下工程越挖越深，隧道掘进越来越长，地下结构尺寸越做越大，周边环境越来越复杂。同时，我们还容易发现，地下工程的数量和规模也呈非线性增长趋势，这从客观上要求地下工程必须以比以往更快的速度完成，从而导致从事地下工程的人力资源严重不足，事故恶性程度越来越高。在今天的高度信息化社会，一旦发生地下工程事故，可能会在一个小时内传遍全球，以前在很多国家即使发生地下工程事故，也没有多少人知道。

我们不得不承认，目前的地下工程施工技术还有不少缺陷，行业内很多人缺乏正确的地下工程风险管理理念，在风险管理上流于形式，遇到风险首先想到的是推卸责任，更糟糕的是，好了伤疤忘了痛，导致有些事故反复发生。

也许是出于对公司的信誉考虑，或是因为人的本能，事故责任单位和有关人员一般并不愿意公布所有的事故细节，这也给行业内有关人士吸取经验教训带来不便。本书的3位作者花了大量的时间和精力，从国内外数以百计的地下工程事故中，遴选出事故恶性程度高、资料收集相对齐全、事故类型较为典型的案例，从工程概况、事故与抢险过程、原因分析、修复方案和教训与提高等诸多方面给予总结。希望本书的出版有助于业内人士吸取教训，安全优质地建造更多的地下工程，让地下工程为人类的可持续发展提供更多的作用。

本书前言由白云编写，第1章由肖晓春博士编写，第2章由胡向东博士编写，第3章、第4章由白云编写，第5章由白云、肖晓春编写，第6章、第7章由白云编写。

本书由长江学者和创新团队发展计划资助（IRT1029）。

目 录

第 1 章 新加坡地铁隧道工程事故案例	1
1.1 概述	1
1.2 工程概况	2
1.3 事故发生与抢险过程	6
1.4 事故原因调查与分析	10
1.5 修复方案的比选与论证	23
1.6 修复方案的实施	29
1.7 事故教训与启示	38
第 2 章 原苏联圣彼得堡地铁隧道案例	41
2.1 工程概况	41
2.2 事故发生与修复过程	45
2.3 事故原因分析	55
2.4 修复方案	58
2.5 教训与提高	67
第 3 章 巴西圣保罗地铁隧道工程事故案例	70
3.1 概述	70
3.2 事故发生概况	71
3.3 工程概况	72
3.4 塌方机理初步推断	78
3.5 技术研究院 (IPT) 调查事故	83
小结	93
第 4 章 中国台湾高雄地铁工程事故案例	95
4.1 工程概况	95
4.2 事故与抢险过程	98
4.3 事故原因分析与隧道管片补强方案	102
4.4 教训与提高	110

第 5 章 上海地铁 4 号线工程事故案例	111
5.1 工程概况	111
5.2 事故与抢险过程	112
5.3 原因分析	113
5.4 修复方案比选与论证	113
5.5 修复方案的实施	122
第 6 章 荷兰电车隧道工程事故案例	155
6.1 概述	155
6.2 工程概况	156
6.3 事故与抢险过程	161
6.4 涌水冒砂原因分析	162
6.5 降水井管堵塞原因分析	169
6.6 修复方案（新方案）	172
6.7 教训与提高	182
第 7 章 总结	185
7.1 技术总结	185
7.2 管理总结	185

第 1 章 新加坡地铁隧道工程事故案例

1.1 概 述

众所周知，新加坡是一个资源贫乏面积狭小的岛国，东西方向 42km，南北向 23km，面积约 710km²。可是新加坡人民“不求最大但求最佳”，在建国初期国父李光耀先生就提出通过建设世界一流的基础设施和世界一流的服务体系来吸引外来资本落户。在一流的基础设施中，城市轨道交通（Mass Rapid Transit System，简称 MRT）无疑扮演着重要角色。新加坡的地铁建设始于 20 世纪 70 年代，尽管起步较晚，但起点却很高。新加坡地铁开发的业主——新加坡陆路交通管理局（Singapore Land Transport Authority，简称 LTA）一方面借鉴了英国的标准与规范，同时良好的语言环境与开放的市场吸引了世界范围的优秀人才与企业参与到新加坡的轨道交通建设中。



图 1-1 新加坡版图及部分地铁线路

截至 2009 年底，新加坡轨道交通投入运营的线路有东北线（North East Line），东西线（East West Line），南北线（North South Line）以及部分环线（Circle Line）。上述线路的分布情况参见图 1-1。正在建设的线路有环线的部分区段，市区线（Down Town Line）。根据 LTA 最新发布的轨道交通开发规划网络，到 2020 年将还要建设汤姆生线（Thomson Line）和部分线路的延长线，运营总里程将达到 260km 左右，满足 650 万人口的方便出行。

和所有其他国家和地区轨道交通发展的历程一样，新加坡的轨道交通建设也是经验与教训并存。在不断探索适合新加坡自身特点的新方法、新材料、新工艺和新理论的过程中，也付出了一定的代价和学费。其中 Nicoll 快速道坍塌事故就是新加坡地铁建设史上最为严重的一次工程事故。2004 年 4 月 20 日下午 3:30，新加坡地铁环线 C824 标段紧邻 Nicoll 快速道的一段明挖区间隧道在开挖至第 10 道支撑（约 33m 深度）的时候出现了坍塌事故。事故造成了约 100m 左右区间隧道围护体系的彻底崩溃，4 人死亡，紧邻事故段的 Nicoll 大道下陷以及周边一些城市生命管线严重损毁。本章将主要介绍这次事故的总体情况、事故原因调查与分析、修复方案比选与实施以及事故带给我们的教训与启示等。

1.2 工程概况

1.2.1 地铁环线总体情况

毋庸置疑，在新加坡规划的地铁网络中，环线将是最重要的一条线路，它将与所有其他的放射线进行换乘。环线总长 33.6km，共设 29 座车站，其中 3 座车站预留将来开发。工程静态总投资 67 亿新币（约合人民币 335 亿元）。整条环线分 5 期分步实施，计划工期为 2001~2009 年，本文所述的 C824 标段为第一期。项目的开发业主为 LTA。目前工程总体拖期，到 2010 年估计只能部分区段开通，地铁环线一期的线路情况如图 1-2 所示。

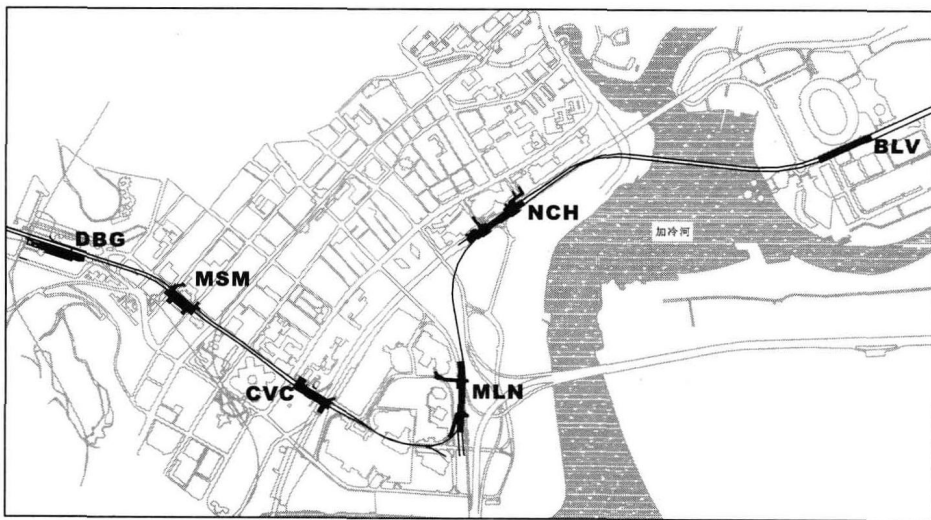


图 1-2 地铁环线一期线路分布情况

1.2.2 C824 标段总体情况

C824 标段线路总长约 2.8km，包括 Nicoll Highway 车站（简称 NCH 车站）（地下 3 层）和 Boulevard 车站（简称 BLV 车站）（部分地下 3 层），以及相关区间隧道。区间隧道中有 800m 位于加冷河底，采用盾构掘进施工，盾构始发井位于 BLV 车站的端头，接收井位于加冷河的西侧，为直径 34m 的圆工作井，其他区段均采用明挖法施工。C824 标段

的总体布置见图 1-3。

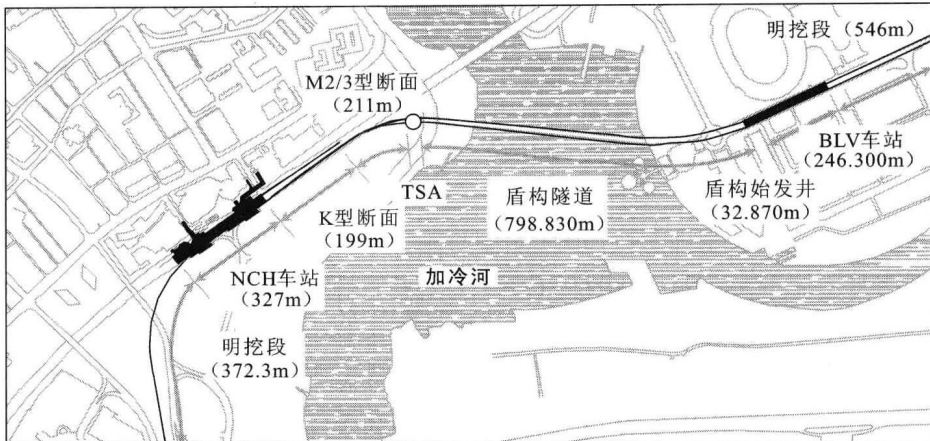


图 1-3 地铁环线 C824 标段的总体布置情况

C824 标段是设计施工总承包合同，该合同于 2001 年 5 月 30 日授给由日本西松 (Nishimatsu) 建设公司和新加坡本地的 Lum Chang 施工公司组成的联营体 (以下简称 NLCJV)，中标价为 2.73 亿新币 (约合人民币 13.65 亿元)。合同工期为 4 年半，到 2006 年 1 月 30 日竣工。联营体将永久工程设计委托给美国的茂盛 (Maunsell) 咨询公司，Maunsell 也同时负责对临时工程设计进行审查。地下连续墙施工分包给法国 Bachy 地基公司，Kori 公司负责钢支撑安装，Hiap Shing 公司负责土方开挖，L&M 负责施工监测等。C824 标段总体组织架构及各方逻辑关系见图 1-4。

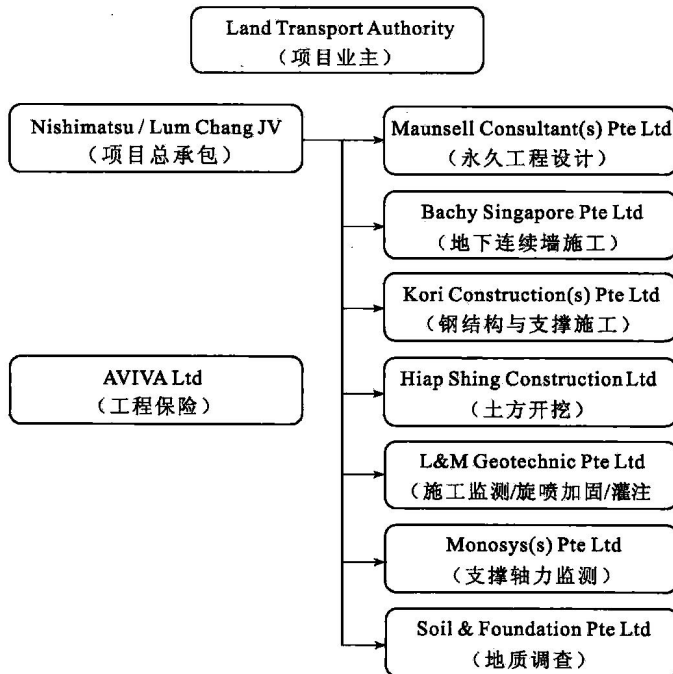


图 1-4 地铁环线 C824 标段的总体组织架构与逻辑关系^[1-1]

事故区段为圆工作井的西侧 100m 范围，此范围内有一根 66kV 的电缆斜穿基坑。出于经济考虑，维护体系根据不同的地质条件设计为不同的断面形式（即不同的地墙插入深度和支撑道数）。事故范围主要为 M2 和 M3 型断面。按照 NLCJV 的职责划分，该区段属于 Nishimastu 公司全权负责，因此此次事故对作为联营体一方的 Lum Chang 公司影响甚微。事故区段的平面布置见图 1-5。

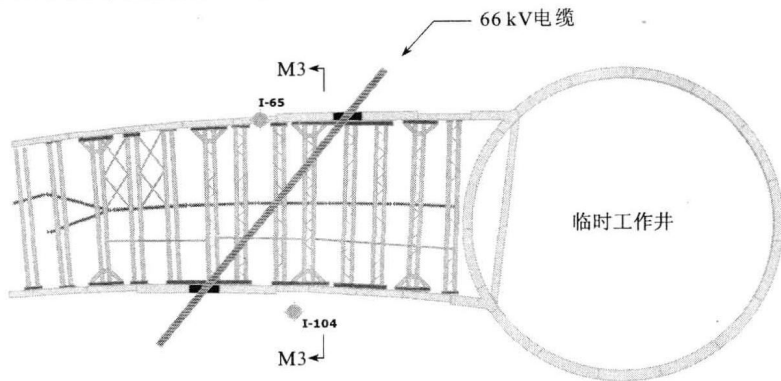


图 1-5 事故区段的平面布置图

1.2.3 事故区段的地层特性与断面形式

图 1-6 为工程失事区段的卫星地形图片，从图片可以看出 C824 的路线紧邻 Nicoll 快速道，在 Nicoll 快速道的北侧是与之平行的 Beach 路。Beach 路南侧的全部陆地是通过两次围海造地形成的。在 20 世纪 40 年代围海造地形成了 Beach 路和 Nicoll 快速道之间的陆地，Nicoll 快速道的南侧则是 20 世纪 70 年代围海造地形成，也就是说工程失事的区段至今仅仅沉降固结了 40 年，可谓一片年轻的热土。

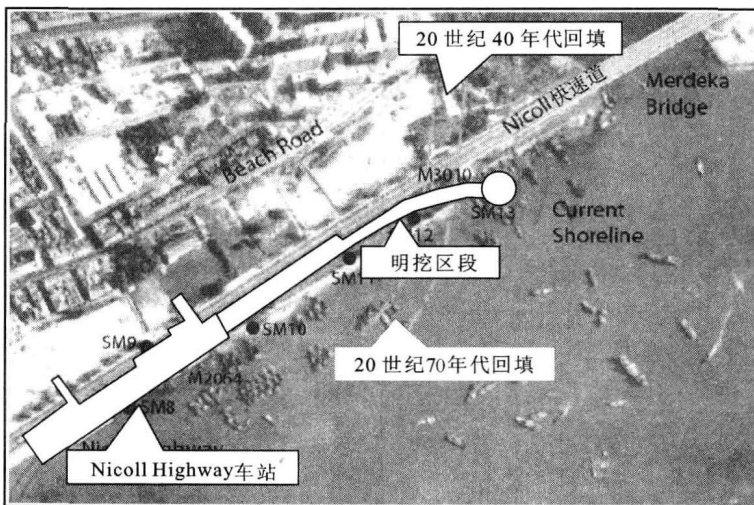


图 1-6 C824 标段失事区段地形卫星图^[1-2]

失事的区段最大挖深约 33m，宽度约 20m，在当时是新加坡开挖深度最大的基坑。围护体系采用 800mm 厚的地下连续墙，从上到下共设 10 道钢支撑，中间设立柱桩。在第 9 道和第 10 道支撑之间有一层 1.6m 旋喷加固层作为暗撑，在最终开挖面的底部设计 3.0m 厚的旋喷加固层作为施工阶段的底板。施工顺序为标准的明挖顺作，开挖至底标高后现浇两个矩形箱涵供将来列车通行需要。箱涵底部的钻孔桩将为区间隧道提供永久支撑。工程的典型区间断面参见图 1-7。

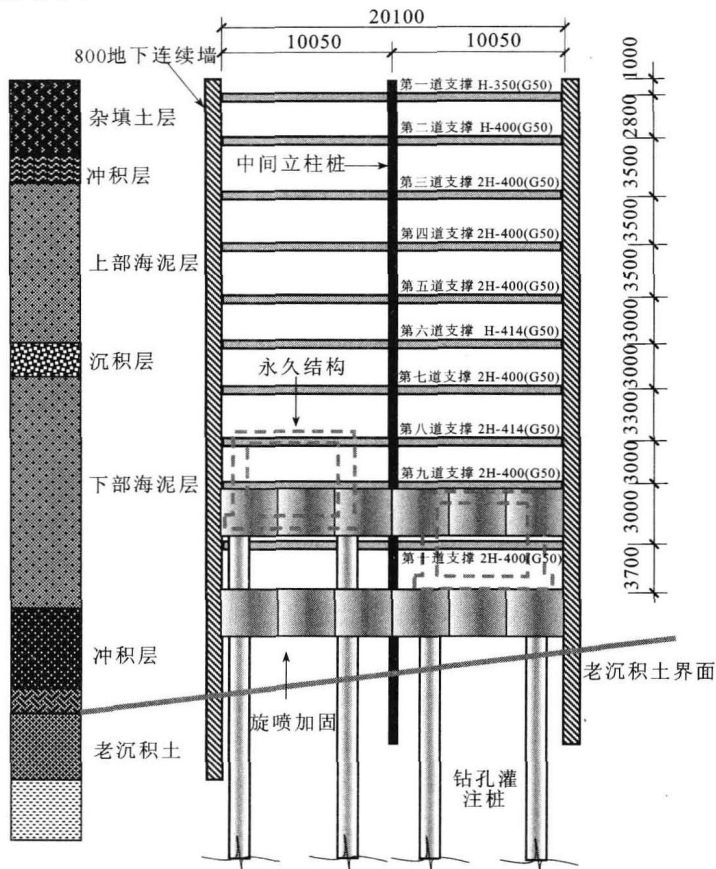


图 1-7 失事区段的典型断面 (M3-M3)^[1-2]

地层的分布从上到下依次为：4~5m 厚的填土层；5~30m 厚的海泥层（Marine Clay，以下简称 MC），在海泥层的中部有一层厚度不等的冲积层，海泥层的底部则是相对坚硬（SPT 值大于 50）的老沉积土（Old Alluvium，以下简称 OA）。地下连续墙一般要插入到老沉积土 3~5m。在该事故区段这层老沉积土不是水平成层的，在 Nicoll 大道的一侧相对较浅。由土层分布的情况来看，整个开挖都是在海泥层内进行的，这层土总体表现为软弱、欠固结和透水性差，从而也导致基坑开挖过程中围护体系的变形具有显著的时空效应。总包在进行围护体系设计时考虑到老沉积土界面的起伏较大，将整个明挖区段划分为若干个不同的区间断面进行设计，及不同的地下墙厚度和深度，以求最佳的经济效果。坍塌的区间为 M2 和 M3 型断面，K 型断面也曾出现过险情。

1.3 事故发生与抢险过程

1.3.1 事故发生前的一些前兆

海恩法则指出,“每一起严重事故背后,必然有29次轻微事故和300起未遂先兆,以及1000起事故隐患”。这一法则强调重大事故往往都有从量变到质变的发展过程。Nicoll大道的坍塌事故也不例外。在2004年4月20日大坍塌之前就曾经历过若干次小事故,遗憾的是这些险情并没有让承包商引起足够的警惕,而最终酿成惨剧。

(1) 盾构始发井事故

2003年8月5日,在盾构始发井的开挖挖至第7道支撑时,位于角部的S530斜撑的混凝土牛腿突然碎裂,随后地下墙背后出现明显的沉降槽,最大土体沉降超过400mm,土体测斜仪的最大读数超过500mm。相邻幅地下墙的接头出现开裂。事故发生后立即停止了继续开挖,重新浇注了更大尺寸的牛腿,并对第6道支撑进行了重新加力,同时加大了对这一区域的监测频率。针对这一事故业主认为由于墙后土水压力荷载取值偏小而导致支撑结构过载,而承包商则认为设计不存在问题,经过历时3个月的反复讨论后承包商承诺将加大监测频率并辅以一系列的应急预案,就这样开挖又重新开始。

(2) K型地下墙断面事故

K型墙断面紧邻重要建筑物和管线,开挖深度也较大,被业主(LTA)视为高风险的断面。该断面于2003年6月开始开挖,到2003年7月挖至第3道支撑的时候出现纵向滑坡而停工,9月又重新开始开挖。到2003年12月附近的I-63测斜孔达到警戒值,2004年1月初地下墙的测斜值突然大幅增加而越过设计变形极限值。由于地下墙的变形过大导致S286A号支撑的牛腿出现裂缝,同时附近的地下墙接头也出现开裂,情形与前述的事故如出一辙。施工因此立即停止,并采取一系列的阻险措施,包括在第1~6道支撑各加装一根斜撑,在开挖面上浇注300mm的素混凝土作为临时支撑,对墙后的土体进行化学灌浆等。

(3) M2和M3型地下墙断面事故

在M2和M3型断面开挖过程中也同样出现地下墙变形超出设计变形的情况,承包商则通过反演分析对变形控制的标准进行放松,而确保开挖继续下去。在这期间基坑旁边构筑物也不同程度地受到了一些影响,主要包括地面沉降、建筑墙体裂缝以及构筑物的损坏等情况,屋主投诉不断。

1.3.2 事故发生过程与阻险措施

(1) 钢围檩屈服

截止到2004年4月20日,明挖段M2型和M3型断面已经开挖到第10道支撑的标高,上午8:00有两组工人在基坑底下作业,分别进行开挖面平整和支撑安装准备工作。上午8:45左右现场工人听到了异常的响声,这种响声每10min就传来一次。9:15联营体的现场工程师Andy Wong在进行现场检查时又听到两声,Andy Wong发现S338北侧围檩的加劲槽钢和翼缘出现屈服(图1-8)。10min后又发现S335南侧的围檩屈服。10:00左右现

场工程师向施工经理和 LTA 的相关人员报告了现场情况，并要求监测单位提供 I-104 测斜孔的最新读数，但监测单位反馈最近三天没有测读数，4 月 17 日读数是 349.81mm。10:30 承包商的项目经理、现场经理和现场工程师对现场进行了联合检查，发现围檩屈服的情况更加严重，响声更频繁。

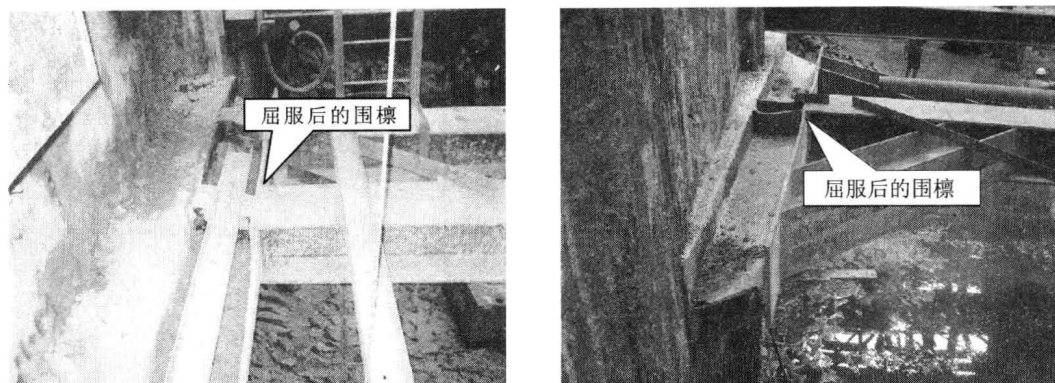


图 1-8 失事前围檩的屈服情况^[1-1]

(2) 应急预案

对现场进行了联合检查之后承包商意识到了事情的严重性，立即研究应急预案和对策。首先考虑尽快把第 10 道支撑装上，但是支撑施工的分包商认为要让第 10 道支撑真正发挥作用可能需要至少 4~5d 时间，大量的作业人员在基坑底下的安全没有保障，因此该提议遭到了分包商的拒绝。接下来又考虑在开挖面上浇 200mm 厚的素混凝土垫层作为临时支撑，在围檩的上部浇注 C50 的混凝土作为对围檩上部的加强，在下部加焊槽钢作为补强。大家认为该方案实施快捷而且很快能见到效果，得到了一致同意。

(3) 体系崩溃

下午 1:00~2:00 承包商开现场协调会，在会上分析了最新的地下墙变形和支撑轴力的读数。I-104 的读数从 4 月 17 日的 349.81mm 发展到 4 月 20 日的 440.55mm，3d 时间地下墙变形增加了 90mm，见图 1-9 (a)。支撑的实时监测数据表明从上午 10 点开始第 9 道支撑的轴力开始下降，而第 8 道支撑的轴力则相应上升，见图 1-9 (b)。在开会的同时现场正在实施应急预案，对开挖面进行了适当的平整，1:30 左右混凝土罐车来到了现场，开始对围檩进行混凝土补强浇注，但是由于围檩的下垂厉害混凝土根本就立不住。

下午 2:00~3:00，承包商在现场办公室召开又一个内部会议，在会上项目经理将现场出现的险情以及采取的应对措施向项目副总指挥进行了汇报。

下午 3:00，LTA 在现场办公室召开紧急会议，承包商在会上说明了现场的情况和采取的应急预案，并表态应急预案应该能控制住险情。

下午 3:30，在基坑地下作业的一名工人发现第 9 道支撑 (S355) 的围檩和支撑已经完全脱开了，当看到这一情况时，开始向基坑上面跑，同时听到后面有坍塌的响声，停了 2min 左右，坍塌又继续，当这名工人到达地面时整个现场已经被腾起的烟尘所笼罩，这就是地铁工程界所说的 Nicoll 快速道塌方事故 (Nicoll Highway Collapse)。整个坍塌的区段长约 100m 左右，4 人死亡，塌方的过程中有煤气管线断裂并起火，66kV 电缆损毁而导

致新加坡部分区域断电等。塌方前后的现场图片见图 1-10。

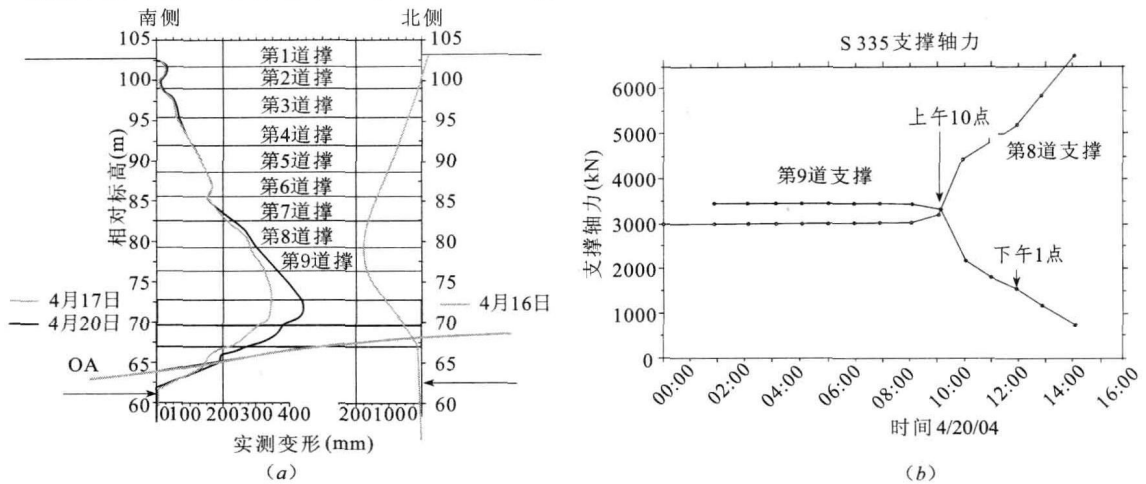


图 1-9 失事前地下墙的变形与支撑的轴力变化^[1-3]

(a) 地下墙变形; (b) 支撑轴力

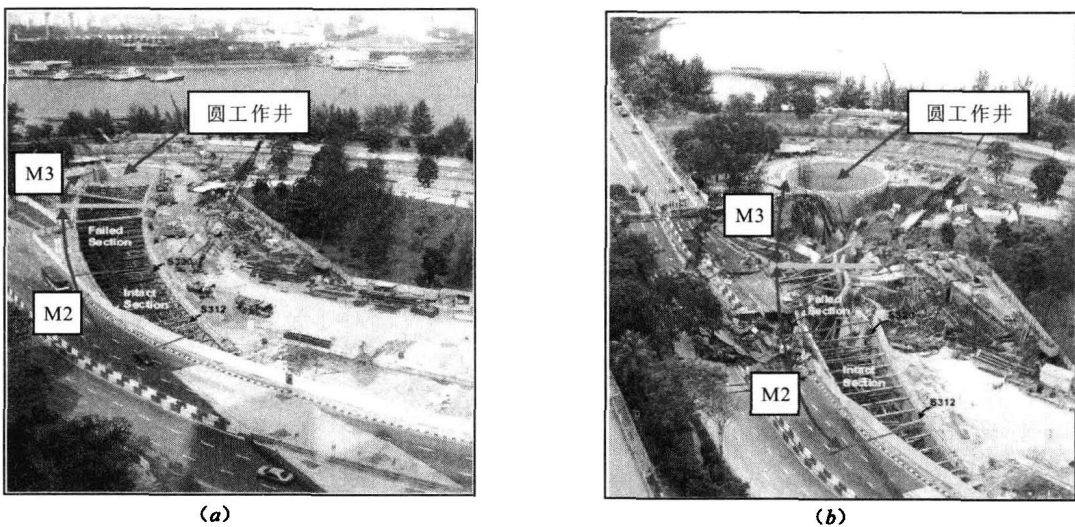


图 1-10 失事前后的现场图片^[1-1]

(a) 坍塌前; (b) 坍塌后

从对失事过程的分析可以发现：事故首先从第 9 道支撑的围檩屈服开始，接着是第 9 道支撑失效，荷载部分转移到第 8 道支撑导致第 8 道支撑的围檩屈服，接着第 8 道支撑失效，在两道支撑失效的情况下地下连续墙出现断裂，围护体系彻底崩溃，两侧的墙后土体下陷。

1.3.3 事故发生后的临时恢复

Nicoll 快速道坍塌事故除了导致约 100m 长的明挖隧道彻底损毁外，对周边的环境也产生了较严重的破坏。如 Nicoll 快速道下陷导致新加坡主干高速路交通中断，Nicoll 快速道是新加坡的一条主干交通道，交通中断直接影响到整个新加坡的交通情况。66kV 电缆损毁导致部分地区的供电中断，这些地区是高档写字楼集中的商务区。一些城市管线

(如煤气、上水、下水等)也发生损毁并失去使用功能,这些都产生了较严重的社会负面影响和重大损失。如何尽快对损毁的周边环境设施和结构进行临时恢复以将对社会的影响程度降到最低同样十分关键。

事故后的坍塌区域形成了一个大的漏斗,最大深度约15m。漏斗的深部采用泡沫混凝土进行充填,回填至一定标高后对坡面进行适当加固便于施工机械下到坑底作业。对掩埋的障碍物如钢支撑、施工设备和地下连续墙进行尽可能地清理,然后回填到原地面并在原围护墙的外侧再施工新的围护墙,对道路交通及其他城市管线进行恢复。整个临时恢复的过程参见图1-11(a)~(f)。

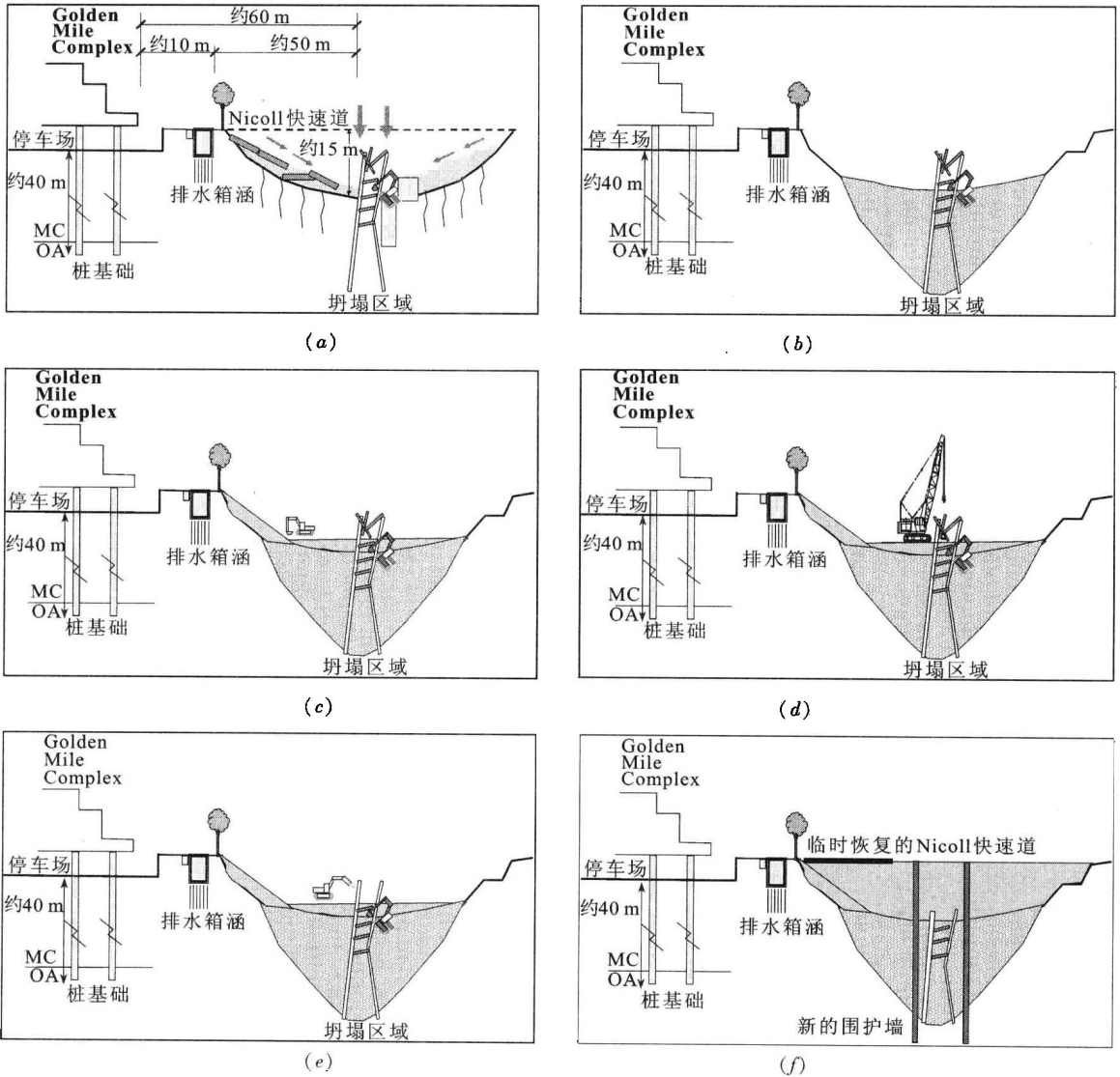


图 1-11 坍塌后采取的临时恢复措施

- (a) 坍塌发生后的断面; (b) 对深部区域采用泡沫混凝土回填; (c) 对坡面进行稳定;
 (d) 清除部分钢支撑及障碍物; (e) 凿除地下连续墙清除下陷的设备;
 (f) 施工新的围护墙、回填并恢复交通

1.4 事故原因调查与分析

事故发生后对事故发生的原因调查与分析工作随即展开。通过为期一年的全面深入调查,最终形成了各方认可的一致意见和权威的调查分析报告。调查结果表明,围护体系设计的严重错误、反演分析中存在技术瑕疵以及施工监测不力等是导致事故发生的主要原因。其中围护体系设计中的严重错误又主要体现在两个方面:①在土-结构相互作用的有限元模拟分析中,对饱和软土采用排水条件下的参数,使得水土荷载较实际情况偏小,进而低估了围护体系的变形和内力,使围护体系设计偏于不安全;②支撑与围檩的连接细部设计中错误地选用了局部屈曲失稳的悬伸长度,导致结构偏于不安全,以及后来又用槽钢代替胫板在极限承载力增加不大的情况下,体系的延性却大大降低,短短数小时内体系彻底崩溃,应急预案来不及反应。

1.4.1 有限元模拟开挖分析中的错误

目前对深开挖围护体系的设计主要有传统的荷载-结构模型和考虑土-结构相互作用的连续介质模型(有限单元和有限差分法)。中国普遍采用传统的荷载-结构模型进行设计,有限元分析结果作为校核。而另一些国家和地区则明确规定用有限元的计算分析结果作为围护体系设计的依据,新加坡就属于这种情况。LTA的特殊合同条件明文规定,深开挖围护体系的设计要基于有限元模拟分析的结果进行。

(1) 土-结构相互作用分析方法与假定

C824 标段临时围护体系设计中,对土-结构相互作用采用了有限单元法进行模拟分析,采用的有限元分析软件是 PLAXIS 7.2。该软件以模拟土体的非线性特性见长,包括土体非线性变形、地下水渗流场、土-结构的相互作用分析等,在新加坡地下空间开发设计分析中被广泛采用。相对传统的一维梁-弹簧模型而言,二维的有限元分析模型能更好地模拟基坑在各个开挖阶段的土体和结构的物理力学表现。但是正确应用该类有限元分析软件需要恰当处理好以下问题:①分析模型的边界条件和初始条件;②土体本构模型选择,需要输入的模型参数及其物理力学意义;③施工过程和顺序在模型中的恰当反映;④对计算结果的合理解释与应用。

软件 PLAXIS 7.2 中提供了多种特性的材料和相关的本构模型,从材料特性上分有:可排水介质、不排水介质和无孔介质 3 种材料,本构模型有 Mohr-Coulomb 模型和土体软化模型等。Mohr-Coulomb 模型有四个基本输入参数,分别为杨氏模量 E 和泊松比 ν ,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。对于排水条件下黏聚力和内摩擦角应输入有效应力强度指标 $c = c'$, $\varphi = \varphi'$,不排水条件下则是总应力强度指标 $c = c_u$, $\varphi = 0$ 。在该事故的调查报告中把按照排水条件输入参数的分析方法称为方法 A,后者称方法 B。

(2) 方法 A 与方法 B 的比较

C824 的围护体系设计是采用的方法 A,这点也成为调查专家组关注的焦点。正如前面所介绍的,在开挖深度范围内大部分为海泥,该土层具有含水量高,强度低和透水性差的特点。对该土层采用排水强度指标会导致高估土体强度,从而使计算的围护体系的变形

和内力较实际情况偏低，最终导致围护体系的设计偏于不安全。为了更好地论证这一点，事故调查专家组又按方法 B 进行了平行的模拟分析，在方法 B 中除了黏聚力 c 和内摩擦角 φ 按不排水条件考虑外，其他输入参数与方法 A 相同。图 1-12 和图 1-13 分别给出了按不同分析方法得出的地下连续墙的变形和弯矩的分布情况。不同分析方法的结果对比分析表明，方法 B 得出的地下墙变形是方法 A 的 2 倍左右，而方法 B 得出的地下墙弯矩多处超出包络图，峰值点超出达 2 倍多。

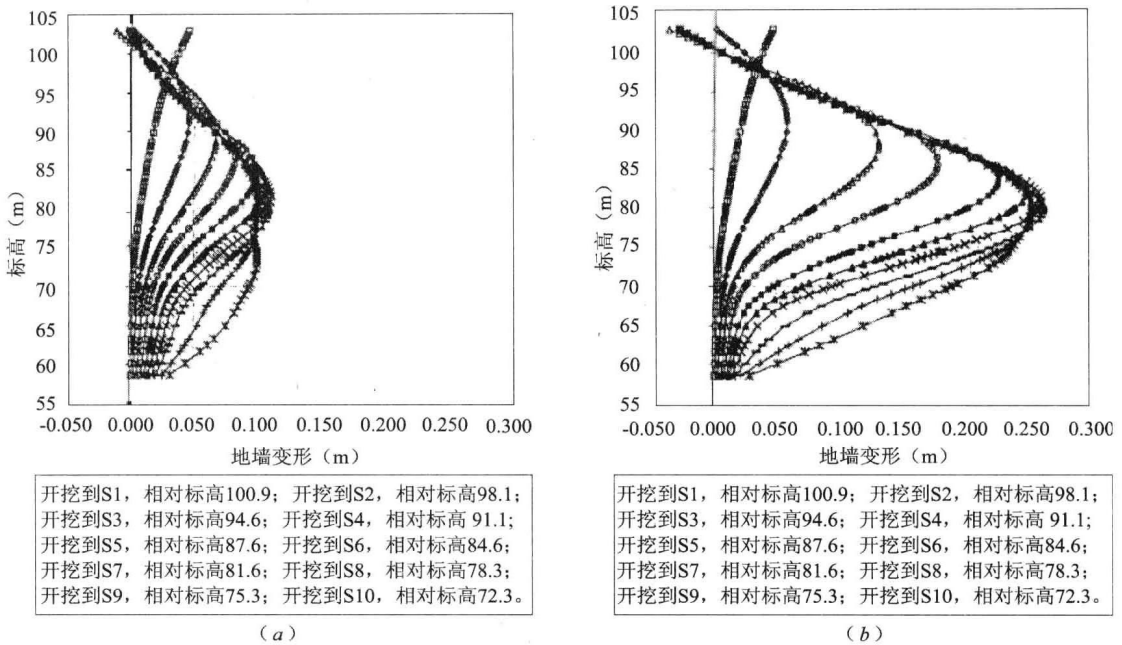


图 1-12 不同分析方法地下连续墙的变形分布

(a) 方法 A 的分析结果; (b) 方法 B 的分析结果

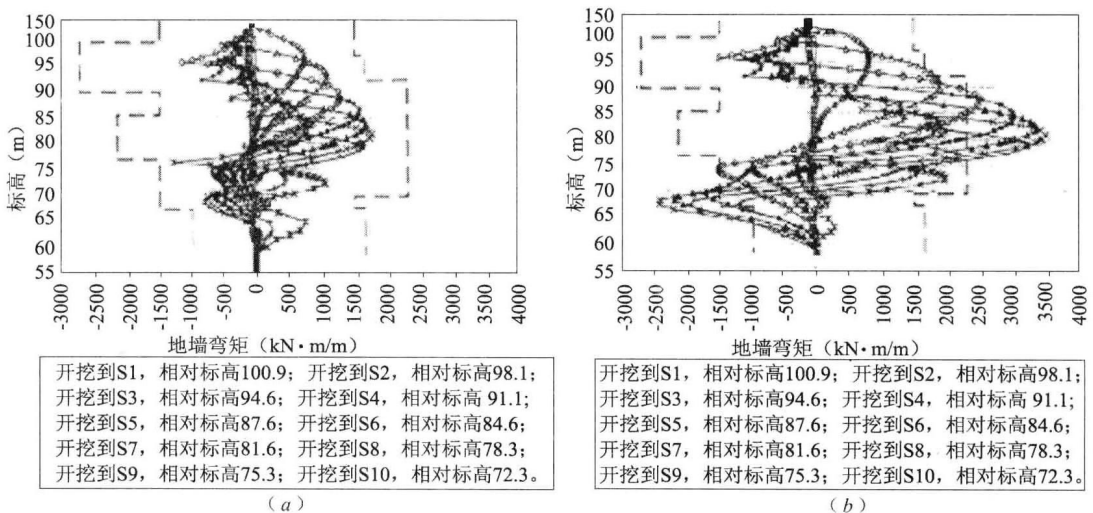


图 1-13 不同分析方法地下连续墙的弯矩分布

(a) 方法 A 的分析结果; (b) 方法 B 的分析结果