

国际隧道快速掘进学术讨论会 论文译文集

(1991年6月, 美国)

地矿部勘探技术研究所

THE INSTITUTE OF EXPLORATION TECH
MINISTRY OF GEOLOGY & MINERAL RESOURCES

1992.1

前 言

1991年6月16—20日在美国华盛顿州西雅图市召开了第十届国际隧道工程学术讨论会。本届会议为隧道快速掘进专题讨论会，发表论文53篇，分别由美、英、法、德、意、日、加、奥、瑞典等国提供。

为使我国井巷掘进界同仁尽快了解本行业的国际发展动向，地矿部勘探技术研究所组织地矿、铁道等系统有关专家、教授、工程技术人员将从中选出的30篇论文译成中文，供大家参考。

本译文集由勘探所情报室宋爱志同志初审，刘志伟、王德崇、田志坤同志终审，参加编辑、出版发行的同志为宋爱志、龙嘉洞、陈章杰、陈瑛瑛。

在本译文集出版过程中，承蒙地矿部坑探处、勘探所坑探室的大力支持，谨此表示衷心的感谢。

由于编译水平有限，错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

1992年元月

目 录

国际隧道快速掘进学术讨论会概况·····	饶希践(1)
大跨度公路隧道衬砌的设计·····	(3)
隧道喷射混凝土衬砌的特性·····	(6)
利用大口径钻孔为 Price Road 排水隧道进行地下工程调查·····	(10)
美国对软地层新奥法的探讨·····	(17)
预制混凝土管片在普赖斯公路排水隧道中的应用·····	(23)
在洛杉矶地铁 A146 合同施工中控制地层流失和地面沉降的化学注浆法·····	(33)
采用高密度聚乙烯作为气水阻隔层——洛杉矶红线地铁施工经验·····	(39)
为隧道掘进提供支护的垂直冷冻管地层冻结法·····	(43)
波士顿市区地下混合型地层隧道施工·····	(46)
化学灌注冲积层和松散填土——洛杉矶地铁隧道的掘进作业·····	(50)
用泥浆盾构从现有建筑物下方安全通过时对密封压力及泥浆的综合考虑—— 实例研究·····	(57)
长距离顶管法在美国新泽西州塞爾維爾的应用·····	(64)
休斯顿市大、小型顶管工程·····	(68)
在纽约 Staten 岛 Oakwood 海滨阻截管道工程中应用遥控直线顶管工艺的 实 践·····	(75)
管拱隧道掘进法用于 I—285 公路下的 Marta 公交运输扩建工程·····	(82)
隧道和竖井——Des Plaines 系统·····	(90)
IVAR 工程·····	(96)
STATEN 岛上的软地层隧道开挖·····	(101)
波哥大洛斯拉莱斯引水隧道·····	(106)
拉菲亚特布鲁费隧道设计与施工·····	(114)
Hanging Lake 隧道控制爆破·····	(119)
隧道防水和新奥法·····	(124)
美国西部干线铁路隧道的加固和扩建·····	(129)
克雷格工程立井掘进新工艺·····	(140)
用反井钻进法穿过人工冻结地层建造竖井·····	(148)
在硬岩地层中使用 V—mole 竖井钻机的经验·····	(154)
英吉利海峡隧道开挖——一个成功的事迹·····	(160)
硬岩斜孔自动推进磨料喷射扩孔器／采掘器·····	(165)
自控法优化天井钻机性能和使用寿命·····	(169)
超导超级对撞机原机试验室群施工初步设计·····	(177)

国际隧道快速掘进学术讨论会概况

(Rapid Excavation & Tunneling Conference)

饶希践

(地矿部勘探司坑探处)

一、简况

此次会议是由美国、加拿大采矿冶金工程师协会和隧道工程协会共同组织召开的，挂靠单位是美国科罗拉多矿业学院。

会议于1991年6月在美国华盛顿州西雅图(Seattle)市召开。参加这次会议的有五大洲20多个国家，743名代表。美国代表约占一半，其次是加拿大、英国、法国、德国的代表较多，日本有20多人。中国有6人参加这次会议，其中统配煤矿总公司4人，能源部、地矿部各1人。

会议于西雅图市中心区威斯頓饭店(Westin Hotel)举行，配合这个会议还举办了采掘技术与装备展览会。参展的有来自西欧、北美的许多厂商。

会议以大会发言为主，辅助以录象、幻灯。三个报告厅同时作报告，各人可根据自己感兴趣的内容自由选择参加，个人发言后接着提问和解答问题，会议开得比较活泼，没有圆桌会议。

会后组织了三项参观：一项是去加拿大维多利亚(Victoria)游览；第二项是去爱达荷州(Idaho)参观一个6000ft地下银矿；第三项是参观西雅图市新掘进的地铁隧道。

二、主要学术内容

此次会议的大会发言学术内容共分十三部分，53篇文章，现介绍如下：

一、规划与设计(Design and Planning)

有4篇文章，作者是美国、英国、墨西哥和加拿大人

二、地质技术(Geotechnical)

有3篇文章，作者都是美国人

三、地层支护(Ground Support)

有4篇文章，作者都是美国人

四、涌水与瓦斯控制(Water and Gas Control)

有4篇文章，作者都是美国人

五、软弱地层施工实例(Soft Ground Case Histories)

有5篇文章，作者是美国、法国、瑞士人

六、小直径隧道和顶管工程(Small Diameter Tunnels and Pipe Jacking)

有4篇文章，作者都是美国人

七、TBM(隧道掘进机)施工实例(TBM Case Histories)

有4篇文章，作者是德国、瑞典和美国人

八、复杂地层施工实例(Difficult Ground Case Histories)

有4篇文章，作者是美国和意大利人

九、传统的地下开挖法(Conventional and Underground Excavation)

有4篇文章，作者是美国、瑞典和奥地利人

十、竖井和天井(Shafts and Raises)

有4篇文章,作者是加拿大、美国和德国人

十一、海峡隧道 (Channel Tunnel)

有4篇文章,作者是美国、英国和法国人

十二、新技术的应用 (Applications of New Technology)

有5篇文章,作者是美国和日本人

十三、未来的重点工程 (Major Projects of the Future)

有4篇文章,作者是美国和丹麦人

三、体会

从上述文章来看,这次学术会议的内容是极其丰富的,涉及到地下工程各种类型,从掘进方法到技术装备各个方面,水平也是较高的,反映出当今世界范围内的许多重大工程施工状况和技术水平。

如:英吉利海峡海底隧道 (ENGLISH CHANNEL TUNNEL) 是英国通向欧洲大陆的交通枢纽,是现今欧洲最大的工程,这条隧道从英国东海岸的多佛尔 (Dover) 到法国西海岸的加来,总长约50km,其中海底部分37.5km,由两条直径7.6m的环形车道和一条直径4.8m的服务道组成。海峡水深40—60m,隧道顶板岩厚17—40m,岩层均匀,硬度不大,此隧道由英法两国从各自一端施工,双方均采用TBM法,用盾构式联合掘进机在白垩纪岩层中掘进。英国用机是自制的,法国用机是美制的Putzmeister型,一天三班作业,日进尺约15m。海底部分法国负责施工16km,其余由英国负责。法国一端要掘一个大竖井,直径和深度均为55m。支护加固方面,坑口部分用了注浆、锚杆、浇

注混凝土,海底隧道部分用预制钢筋混凝土管片衬砌,其形状为圆形,每块管片的规格为长2m、宽1.4m、厚0.32m。隧道于1987年正式开工,计划于1993年完工,工程总造价约180亿美元,目前服务道已打通。

哥伦比亚的肯曼 (Kemano) 隧道,直径5.7m,长16km。美国犹他州的锡尔 (Syr) 隧道,直径3.6m,长9.2km。这些大型隧道的施工,都显示了较高的技术水平,后者使用罗宾斯硬岩联合掘进机,在页岩泥砂岩和石灰岩中创造了班进尺57m,日进尺127m的世界纪录。

从一些论文实例可以看出,有些工程地质条件和施工环境是很差的,如土质松软或岩石极坚硬,工程埋藏浅,地表建筑物多,地势低洼,涌水量大等都给施工带来了艰难性,但现代的掘进技术已经能够克服各种困难或不利条件,使一个个宏伟工程胜利竣工。

如波士顿港口清污隧道,在海平面以下4.6m深处掘进,在覆盖层仅7m的6栋建筑物下通过;挪威的伊佛尔隧道,用TBM法穿过抗压强度为5000psi的石英脉2100ft,这无疑是个创纪录的数字,同时,还穿过了覆盖层不足30ft的沼泽地,这在施工技术和装备方面都是高难度的。

通过参加这次学术会议,了解了世界上许多大型隧道工程施工技术发展动向,开阔了眼界,增长了知识,为坑探工程对外开发,争取承包更大的工程,树立了信心。这次会议上也结交了一些朋友,彼此建立了联系,会后经常收到他们寄来的一些资料。

大跨度公路隧道衬砌的设计

[美国] C.R.Nelson等

提 要

在大型隧道中,薄膜防水系统会使衬砌与锚杆和喷射混凝土加固的岩体部分地脱开。当因冷却和湿度降低而产生收缩时,在开挖时因脱开会导致衬砌的松接合,这样就增大了拉伸应力,从而要求附加超过欧洲惯例的钢筋并提高预防衬砌断裂的能力。混凝土在热天浇注,而在寒冷的条件下使用,这更增加了问题的严重性,而岩体的蠕变可以减轻问题的严重程度。接触注浆可使这一问题减轻,但不能使之完成消除。

前 言

美国地下施工工业正在采纳一种安设在最终衬砌和锚杆及混凝土加固的岩体之间的薄膜防水系统。这种方法在欧洲已获得广泛应用。该薄膜防水系统常常是一种柔韧的聚乙烯或聚氯乙烯与排水或保护材料结合在一起而形成的,它设置在最终衬砌外侧,贴在锚杆和喷射混凝土加固的岩体上。采用这种防水系统的欧洲隧道的设计者和承包商讨论认为,最终混凝土衬砌常常仅需很少或根本不需要采用加强钢筋。然而,我们认为,这些防水系统沿整个隧道边界设置时,会阻止粘结,降低接触面抗剪能力,从而使混凝土衬砌与锚杆和喷射混凝土加固的岩体部分地脱开。这种脱开现象连同冷却及干燥收缩,会使混凝土衬砌在开挖时产生松接合,从而增加衬砌中的拉伸应力。本文拟对这种情况进行分析。

分 析 过 程

下面以宽约12.6m,高约10.4m的环形

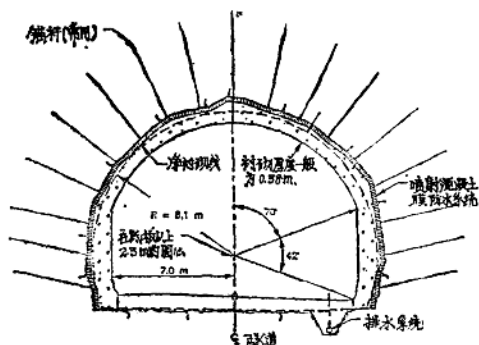


图 1 隧道衬砌

隧道(图1)为例,来说明混凝土衬砌的松接合问题。岩体由锚杆、喷射混凝土系统和现浇钢筋混凝土衬砌来支护。虽然锚杆和喷射混凝土系统能为岩石提供临时支护,但为了支护和保护防水薄膜并为建筑目的提供一个光滑表面,混凝土衬砌仍是必要的。万一锚杆和喷射混凝土系统失效,衬砌常常用于支护岩体。如图1所示,假设衬砌层最小厚度为38mm。

对岩体和衬砌相互作用的分析采用的是有限元法。衬砌被分解成许多结构单元,而岩体分解成许多连续的单元。虽然衬砌和岩体被防水薄膜隔开,但如果载荷使衬砌向外偏斜(即进入岩体内),它们就会产生相互作用。然而,如果载荷使衬砌从岩体上移开,那么就假设它们没有相互作用。考虑到这种作用,用一些压缩弹簧来连接衬砌和岩体。也就是说,如果衬砌和岩体开始接触,其刚性与岩性相协调的弹簧就顶住衬砌,反

之, 如果衬砌脱离岩体, 那么弹簧就不再接触并从模型中取消。分析时采用了岩体的弹性参数。岩体和混凝土的弹性参数如表 1、表 2 所示。

表1 岩体性质

弹性模量, E	6.9GPa
泊松比, ν	0.3
密度, ρ	2820kg/m ³

表2 混凝土性质

弹性模量, E	24.8GPa
泊松比, ν	0.2
密度, ρ	2400kg/m ³

假设作用在衬砌上的载荷条件是: 自重, 岩体载荷, 地下水载荷和蠕变作用及收缩作用。假设作用在衬砌上的岩体载荷是垂直压力, 如图 2 所示。在排水系统失效的情况下, 从岩体中渗下的地下水产生的载荷作用在隧道构筑物上, 在隧道顶拱上方或下方其静压头是变化的。地下水载荷作为活性载荷的情况来处理。

影响衬砌与岩体脱离的主要因素是混凝土的蠕变和收缩。混凝土在炎热的天气浇注而在寒冷的天气中使用会使这一问题更加严重。虽然岩体的蠕变会减轻这一问题, 但对其进行分析是不能忽视的。混凝土的蠕变、冷却、干燥收缩被模拟成一种热效应, 其基本温度等于浇注时稳态岩体的温度和冬季使用的混凝土的温度。用于进行分析的整个蠕变和收缩过程的热效应当量为 -58°C , -29°C 和 0°C 。

根据美国国家公路和运输局学会采用的公路桥梁标准规范, 对这些载荷加上载荷系数。

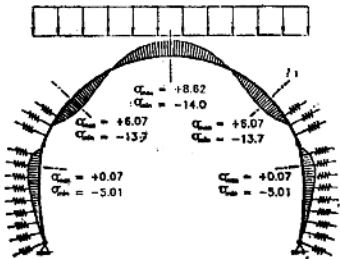
衬砌—岩体相互作用的分析得出一个非线性弹性解。由于解的非线性而导致附加或取消用于连接衬砌到岩体上的弹簧。假设有 6 种载荷分布方式, 如表 3 所示。载荷分布方

方式 I 和 II (图 2) 有相同的外载, 138KPa 岩体载荷和自重; 热效应当量为 -58°C 和 0°C 。载荷分布方式 III 和 IV (图 3) 的载荷有自重和顶拱以上 3 m 的静水压, 相应的热效应当量为 -29°C 和 0°C 。载荷分布方式 V 和 VI (图 4) 包括所有载荷 (自重, 138KPa 岩体载荷和 3 m 静压头地下水载荷), 热效应当量为 -29°C 和 0°C 。在图 2—图 4 中, 分析时都包括自重, 且温度都在变化。

表3 载荷分布方式

方式	垂直岩体载荷	地下水静压	蠕变和收缩	图号
I	138KPa	0	-58°C	2a
II	138KPa	0	0°C	2b
III	0	3m	-29°C	3a
IV	0	3m	0°C	3b
V	138KPa	3m	-29°C	4a
VI	138KPa	3m	0°C	4b

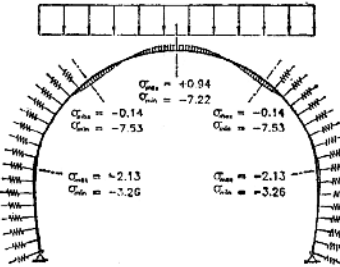
均布岩体载荷



应力单位: MPa

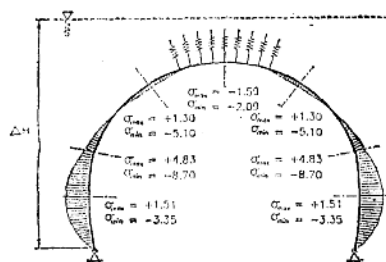
图2A 载荷分布方式 I

均布岩体载荷



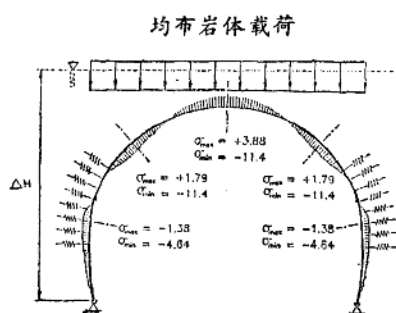
应力单位: MPa

图2B 载荷分布方式 II



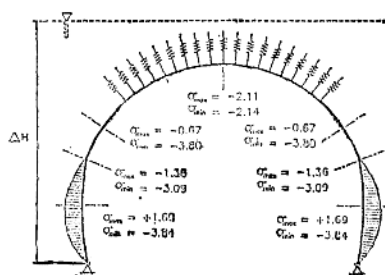
$\Delta H = 13.4\text{m}$, 应力单位: MPa

图3A 载荷分布方式 III



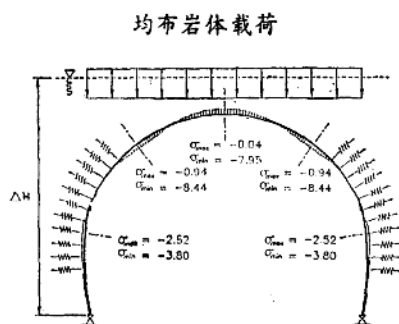
$\Delta H = 13.4\text{m}$, 应力单位: MPa

图4A 载荷分布方式 V



$\Delta H = 13.4\text{m}$, 应力单位: MPa

图3B 载荷分布方式 IV



$\Delta H = 13.4\text{m}$, 应力单位: MPa

图4B 载荷分布方式 VI

宋爱志 译

隧道喷射混凝土衬砌的特性

[加拿大] Z. Eisentein 等

提 要

由于喷射混凝土具有复杂的流变性,因此会导致地层与构筑物之间产生相互作用。且这种相互作用明显不同于其它隧道衬砌方法。同理,喷射混凝土测量仪器也会带来一些特殊的问题,特别是在施工期间对传递给衬砌的应力进行测定时。

本文首先讨论了影响应力分布的喷射混凝土的特性,同时介绍了在一个软地层隧道中获得的测量结果。结论着重提出了一些使用喷射混凝土作初期或永久支护的隧道的实际设计建议。

前 言

施工时及施工后正确测量传递到衬砌上的载荷大小是大多数现代化隧道建设方法的一个重要特点。由于喷射混凝土的强度和模量会随时间而自然增长,还由于它具有蠕变性和收缩性,因此,其特性与其它类型的衬砌具有较大的区别。这些特性和浅埋隧道的设计和监测结果成为近期的研究目标。在这里有必要回顾一下这些研究内容,主要集中在喷射混凝土的早龄期性能以及它对衬砌载荷发展的影响。

1) 逐渐硬化

图1为一个典型的新奥法开挖的软弱地层隧道中靠近开挖面的一段隧道。随着开挖面的推进,喷射混凝土逐渐硬化。这对传递到衬砌上的载荷实际上有明显的影

响,由于拱效应的恰当模拟,三维模拟得出的载荷小于二维模拟得出的载荷,当引用更为切实且在不断增加的喷射混凝土模量时,载荷会明显地变得更小。

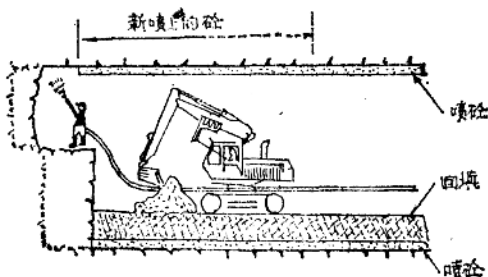


图1 软地层新奥法施工的典型方案

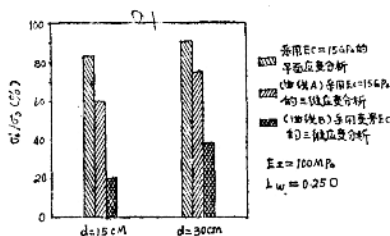
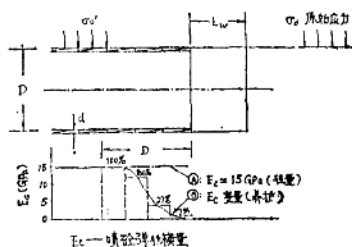


图2 喷射混凝土硬度变化
对衬砌载荷的影响

2) 蠕变性

众所周知,由混凝土在其结构内允许应力再分布,因此,在一定情况下,人们希望混凝土有蠕变性(Andriolo, 1984)。Rokahr和Lux (1987)的深埋隧道三维有限元分析,对喷射混凝土的蠕变和松弛进行了模拟试验,分析表明:这些特性能使衬砌总荷载有所降低,如图2所示。Schubert (1988)的实地研究肯定了蠕变和松弛对衬砌设计目的的重要性,并指出这些特点有利于内应力的合理再分布,并从实际上消除了弯矩。

3) 收缩性

象在混凝土中一样,喷射混凝土的收缩性与隧道内的相对湿度有密切的关系,Go-lser等(1989)指出:因在隧道周边选取的测点不同,Vienna地铁喷射混凝土衬砌各测点的收缩应变值相差非常大。这一点已得到Heinz和Rocha (1990)及Kuwajima (1991)的肯定。他们已证明:收缩应变值的变动同隧道的排水和通风条件有密切的关系。

早龄期特性

Kuwajima (1991)通过大量的试验室试验,对选定喷射混凝土的性质随着时间变化情况进行了研究。为简要起见,被测试的喷射混凝土有关特性参数概括在表1中。参照Edmonton南部轻轨交通系统(SLRT.)隧道中的浇注条件,下面将论及的喷射混凝土样品按这一可比条件在试验室进行浇注,并且在不同龄期进行测试,以确定其性能随时间的变化情况。

表1 试验室模拟喷射混凝土组成

石子/砂子	水泥含量	水灰比(3)	外加剂/水泥(3)
1:1	350kg/m ³ (1)	0.5~0.6	0.05(2)

注:(1) 水泥型号50: 抗硫化

(2) 氢氧化钾基速凝剂

(3) 重量比

通常可以假定,地层和初期衬砌间的短

期相互作用绝大多数是在开挖面后大约两个直径远的地方产生的。采用这一标准,喷射混凝土的“早龄期”可定为开挖两倍直径远距离的时间。举一个典型的隧道开挖的例子,开挖速度为每班8小时推进1.8m,隧道直径6m。喷射混凝土的“早龄期”则为53小时(3班/天)至160小时(1班/天),所以喷射混凝土的样块试验在这段时间内进行。

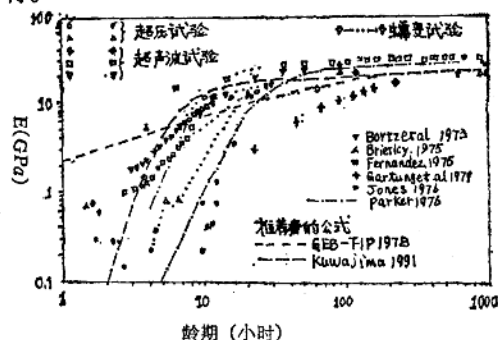


图2 弹性模型随龄期的变化
(Kuwajima 1991)

图3表明了弹性模量随龄期的变化情况,被测样块采用ASTMC469测试程序进行静压试验。采用ASTMD 2845标准进行超声试验,如Kuwajima (1991)指出的那样。图3还表明了已发表的数据和用于描述弹性模量随时间变化的关系曲线。由于受衬砌厚度的影响,样品尺寸受到限制,因此测定弹性模量通常比较困难,而将弹性模量表达成抗压强度的函数则比较方便。这个关系可由下式表达:

$$E_c = \frac{c_1 f_{cc}^{d_1}}{1 + \frac{c_1 f_{cc}}{c_2} (d_1 + d_2)} \quad [1]$$

式中: $c_1 = 1306$ $c_2 = 7194$ $d_1 = 1.92$ $d_2 = 0.363$, f_{cc} 单位为MPa, E_c 单位为Gpa。曲线点描述的详图由Kuwajima (1991)给出。

对新喷射的混凝土而言,由于其蠕变变形非常大,故需采用试验方法来确定不同龄

期样品的关联参数。蠕变试验采用 Byfor 1980年和Neville 1981年的“传统”技术进行：即蠕变量是一个未受载荷作用的样块的变形量与一个相同的正受载样块的变形量的差值。

这些试验的结果用一个三元粘弹性模型来分析 (Flügge, 1967)。如图 4 所示, 样块的弹性模量 (E) 体现了样块加载过程中的反应情况。加载过程大约为30秒。阻尼系数 (η) 是一个与时间有关的分量, 它使样块首先对瞬间加载呈现出象钢体一样的反应, 而后允许样块随时间变形。在平衡状态, 所有的载荷均由与时间相关的弹性体 (E_t) 所承担。这个简单的流变模型能够很好地与试验室数据相适应 (Kuwajima, 1991)。图 4 说明了根据蠕变试验获得的弹性体的特性。我们可以观察到, 样品的特性在 10h 之内对时间的依赖性较强, 随后趋于平缓。阻尼的变化同样存在这一类似的现象 (Kuwajima, 1991), 其变化情况未能描述在图中。

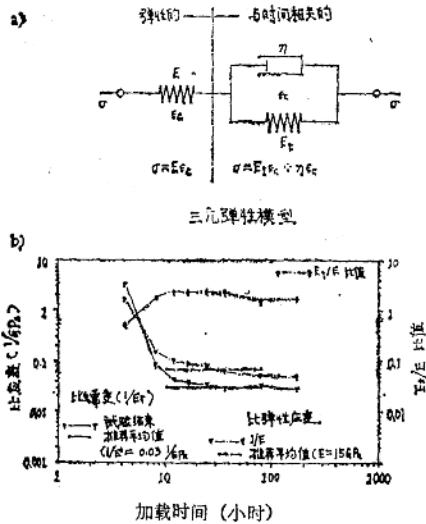


图 4 由试验室确定的比应变随时间的变化情况

根据分析应力和应变控制试验, Ku-

wajima 在 1991 年指出: 喷射混凝土的粘弹性系数可取为 $E = 15 \text{ GPa}$; $1/E_t = 0.03 \text{ GPa}^{-1}$, $E_t/\eta = 0.03 \text{ min}^{-1}$, 同时指出: 在应力分析方面可忽略最初的 10 小时。因为在这一期间, 喷射混凝土中产生的负载值较小。这些分析表明其偏差大约为 10~15%, 这一偏差被认为是可以接受的。

就一般的隧道施工速度而言, 地层与衬砌之间的载荷传递分析表明: 忽略阻尼的影响并不影响计算的精确度 (即瞬时蠕变)。因此, 粘弹性模型可由两个串联的弹性体 (弹性的和与时间相关的) 替代。它可由一个具有“等效”模量的等效弹性体替代。在分析浅埋隧道时, 可假定等效弹性模数为:

$$E_{eq} = \frac{E \cdot E_t}{E + E_t} = 10 \text{ GPa} \quad [2]$$

下面将要论述的 Edmonton 南部轻轨交通系统隧道 (SLRT) 实例记录分析及 Golsersoetal 在 1989 年的论述均表明: 在浅埋隧道中, 喷射混凝土衬砌中的应力极少超过喷射混凝土抗压强度的 10%。应当指出, 对深埋隧道或应力值较高的衬砌而言, 图 4 中的粘弹性模型可能是不适合的。当衬砌应力值超过其强度的 30% 时, 不能预测其线性蠕变性, 并且, 该线性模型将与实际情况出现严重偏差。在这种情况下, 正如 Pottler 1990 年所指出的那样, E_{eq} 可能偏低。

采用新奥法掘进的 SLRT 北滩隧道在量测传统上一直采用接触式测压仪测量传递到喷射混凝土衬砌上的应力 (Sauer 和 Sharma, 1977), 但这种型式式的可靠性很大程度上取决于安装工艺, 因此, 有人曾尝试过使用埋于混凝土内的应变计来测量衬砌的内力 (即 Brierly 1975; Schubert 1988 Kuwajima 1991)。然而, 在整理测量结果方面存在很大困难, 并需要详细的调查, 而这些调查工作在隧道掘进工程中很难按常规进行。Kuwajima 在 1991 年曾尝试一种更为直接的方法来测量喷射混凝土衬砌的内应力,

这种方法的基础是传统上用于岩石动力学的测量岩压水力囊(flat-jack)试验。有关 这种方法的特别设计的仪器及试验过程和应用范围,超出了这篇文章的范围。但值得一提的是,这种试验已证明可以经济、快速和可靠地评估龄期超过两天的喷射混凝土衬砌的内应力。

以上三种技术方法均已用于Edmonton南部轻轨交通系统(SLRT)的一个隧道中。该隧道的地层是硬的冰碛(E=60MPa)。隧道属于浅埋型(土层覆盖厚度8 m,隧道直径6 m)。其地质技术和结构的详细情况已由Phelps和Parandt在1989年介绍过,该隧道由Kuwajima (1991)采用1989系Negro提出的设计方法并做了大量的分析。这种方法考虑了三维应力释放、隧道内壁的土层软化和土层与衬砌的相互作用等因素(Eisens-ten和Negro 1990)。按照以前的项目中研讨的数据,他提出了在土层与衬砌相互作用期间的等效喷射混凝土模量为10GPa的假设。

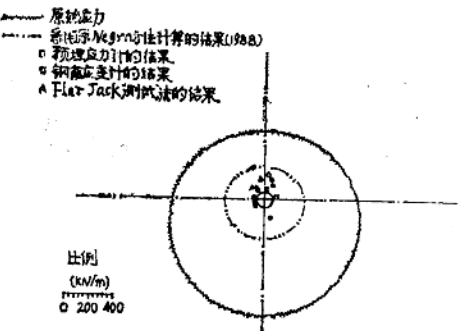


图5 隧道衬砌侧压力的计算值和测量值

图5对采用上述方法测定的若干个测点的侧向压力作了一个比较。采用应变计在加筋处测得的结果也包括在该图中。很明显,任何一个测量值均未超过计算方法给出的值,这表明位于安全范围内。值得一提的是,计算推导的应力值小于喷射混凝土80小时抗压强度的10%。最具说服力的结论是:与使用现场测点应力计算的数据相比,侧向压力值较小。显而易见,在开挖过程中,地层能够承受应力再分布的最大应力,因为最大的地表位移保持在10mm左右。

喷射混凝土与钢拱肋间的载荷分配

松软地层隧道的典型衬砌方法包含钢拱肋或格栅拱(Eisenteinand Heinz 1989)。可以假定,在侧压力方面,喷射混凝土与钢拱肋的载荷应按照每一构件的杨氏模量与面积的乘积之比进行比例分配(Heilbrunner等, 1982)即:

$$\frac{T_{\text{钢拱肋}}}{T_{\text{喷射混凝土}}} = \frac{EA_{\text{钢拱肋}}}{EA_{\text{喷射混凝土}}} \quad (3)$$

为了证实这个关系式的可靠性,并由于沿隧道沿线观察到的载荷分布不规则,有必要在相似的圆周点或相同的截面处布置测量仪器。对上述的SLRT隧道来说,由埋置和焊接震动线拉伸仪测量到的两种侧压力之间的比例大约为16%(Kuwajima 1991)。这和使用已假定的等值喷射混凝土模量通过方程3算到的18%基本相符。概括在表2中的其它结果同样表明这一比例式可作为一种简化手段用于预测新奥法施工的隧道中的喷射混凝土和钢拱肋的载荷分配。应当注意,

表2 方程3的验证情况

参考文献	EA钢拱肋/EA喷射混凝土 测量值	EA钢拱肋/EA喷射混凝土 计算值	附 注
Eisentein和Kuwajima 软岩中开挖的隧道(1990)	11%	10%	K=2 采用flat-jack方法和压力计的测量结果
Aydan等 (1988—3PFEW)	77.7%	88.2%	k比较复杂,采用可靠的数学计算结果

方程3隐含地假定了原始应力比值 $K=1$ ；但对其他的 K 值，也能给出可以接受的结果。

值得一提的是，一个类似的比值可以由Hoek和Brown (1980, 258) 提出的用于联合支护系统的方程式计算出来。应用他们的方程对这里论述的实例进行计算得出的结果与采用方程3得出的结果仅相差3%。由于方程3具有简便性，人们乐意采用它。

结 论

最近的实验结果和理论研究表明：喷射混凝土隧道衬砌中的早期荷载相对较小。喷射混凝土的流变特性，特别是早期流变特性

是造成这一结果的部分原因。由Albert大学最近完成的实验室和现场调查研究肯定了这些早期评估方法并以简化方式补充了一些必要的参数，用于考虑喷射混凝土的复杂的流变特性。举例而言，可以肯定 $E_{c0}=10\text{GPa}$ 这一假定等效模量将引起从事软地层隧道喷射混凝土设计的工作人员的特殊兴趣。同样，钢拱肋只承受一小部分荷载这一论据也值得引起注意并值得进一步研究，因为这将产生更为经济的设计方案。

张 明 译

胡汉月 校

利用大口径钻孔为Price Road 排水隧道进行地下工程调查

〔美国〕G S. Brierleg等

提 要

位于亚利桑那州Tempe的Price Road排水隧道是和大城市Phoenix (菲尼克斯) 外环高速公路一起修筑的排水系统的一部分。该外环工程又是更大型高速公路系统的一部分，包括诸如Papago高速公路排水隧道等其它大型排水隧道。系用大口径孔底观察钻孔以获取为设计这些隧道所需的地下资料。根据大口径钻孔中得到的地下资料对经验参数的调整，并成功地编入土工技术设计简明报告中，它能令人满意地预见地层性状，构成了改进土工设计标准的基础，并使有效评价第三者的费用风险更简便。本文的目的是介绍这一工程地下勘察实施的方案，说明评价地下构筑施工所用的方法。

工 程 介 绍

本工程位于亚利桑那Tempe城东侧附近

并沿着Price Road展开。该工程区域北面以Salt河为界，东面以经亚利桑那运输部(ADOT)批准的Outer Loop高速公路通行权的用地为界，西面以Price Road为界，南面以Superstition高速公路为界。

Price Road排水隧道工程包括一条大约5538m (18 000ft)长的、终了直径为5.5m (18ft)的排水隧道，该隧道在新的高速公路施工以前已完工。该隧道定线的大部分坐落在经ADOT批准的Outer Loop高速公路通行权用地之内，并横贯六条大街：Southern大街，Broadway路，Apache大道，Victory路，University路和第一街，并穿过Southern Pacific铁路的道路通行用地。在上述七处架设了桥梁以便为计划的高速公路提供空间。在定线的南端，该隧道穿过Tempe运河及Superstition高速公路的正下方，

其终点在该高速公路中心线以南大约154m (500ft)处。在其定线北端,该隧道穿过附近的现有建筑物群,并从一个大型沥青工厂/露天采石场的正下方通过。

初始的钻进方案中,拟议中的隧道在地表以下28m (90ft)沿Outer Loop高速公路路向北行驶的正向车道定线,据此第一批钻孔相应地得以确定。在该方案的后期,隧道定线向西转到它目前的位置,在University路以南向北行驶的车道正下方,以及在University路以北向南行驶的车道正下方。在南竖井处,该隧道的仰拱抬高距地表约22m (70ft)深处,在北竖井处则抬高到距地表约25m (80ft)深处。

地质环境

自然环境

该地区的地形非常接近于平坦地形,有一缓坡北边朝向Salt河,南面朝向在Broadway路附近分水岭处的南竖井。自然地表标高范围从Salt河附近的363m (1181ft)到Broadway路的368m (1197ft)及南竖井的366m (1191ft)。由于建筑施工及批准的道路用地,该工程地区的植被是稀疏的。该工程地区的地表排水设施贫乏,雨季很快会变成泥泞地带。

区域地质情况

本工程位于Phoenix盆地的Salt河谷地段,坐落在盆地与山脉自然地理区的沙漠地区。盆地与山脉地区的区域地质构造主要由于在早中生代至中新代地质时期较大的扭曲造成的。该盆地与山脉区域的沙漠区的特点是具有许多由较宽的地堑状盆地所分割的大量断层组山系,这些地堑状盆地是在晚第三纪形成的。这些盆地已由很厚的由相邻山脉的强烈冲蚀造成的粗粒冲积层沉积物所充填。

Salt河自Superstition-Goldfield-Mazatzal山脉向东搬运冲积层而给Phoenix盆地提供了沉积物。当盆地被填满时,Salt河

以复杂的网状河床方式蜿蜒曲折地流过山谷,并使冲积物沉积在老河床上,再改换方向流入新的河道。随着每次山脉向北、向东的上升,河流的恢复过程会造成对穿过该河流形成的洪泛区的向下切割,而且对洪泛区的分割留下了完整的冲积台地。在该施工区内可辨别出两个地质冲积台地—Lehi台地和Mesa台地。这些台地由易变的、固结的、粗劣分选的砂、砾石和卵石的混合物所组成,其中含有少量的漂砾、淤泥、粘土及碳酸盐胶结物。这些沉积物当地称之为砂-砾石-卵石(SGC),并从地表向深部延伸至246m (800ft)到369m (1200ft)。因台地内地层的局部冲刷与二次沉积,造成在很短距离内其组成会有较大的变化。

由于河流废弃了每一次以前形成的洪泛平原,这些台地的表面是由相对很薄的一层细砂、泥、粘土组成的细粒冲积层所覆盖的。这种细粒冲积层是在洪水泛滥期间作为河滩沉积物和风积尘土沉积下来的,后者是由于风吹和漫流冲蚀而再次生成和再次沉积的。在施工区内,细粒沉积层从松散未固结的物质变化到极坚硬的类似于岩石的泥灰质物质。

施工区的泥灰石主要限于台地的更细粒的冲积层与上部的砾石中,尤其是较老的Mesa台地。泥灰石的侧向延伸从非泥灰石变至类岩石状,在存在泥灰石的地区,对于下覆砂层而言,也会提出架桥强度问题。

地下勘察方案

概述

为该工程调查进行的地下勘察由59个勘察钻孔组成,其中有13个大口径观察钻孔,46个反循环冲击钻孔。大口径观察钻孔沿隧道定线按大约461m (1500ft)间距钻进,而冲击钻孔则沿隧道定线按大约154m (500ft)间距钻进。在五个沉井法施工的竖井处还钻进了额外的冲击钻孔。

地下调查方案的一个目标是确定计划中的隧道中心线以东或以西约15m (50ft) 处全部钻孔的位置, 以免破坏计划中隧道水平内的地层。在上述隧道定线中因水平上的变化, 四个冲击钻孔会穿过计划中的隧道水平。作为该定线的变化结果, 大口径钻孔已从最终的隧道中心线偏离了5m (16ft) 至88m (285ft)。

当在整个深度内安设0.9m (3ft) 直径钢质观察套管之前, 要钻成每个大口径钻孔(LDB), 并从地表起进行测井。然后, 从孔底至计划中的隧道顶部之上大约4.6至6.2m处再对每个钻孔进行观察。钻出每个冲击钻孔, 并在钻进时连续测井。冲击钻孔的测井工作包括记录推进每英尺套管所需的冲击次数, 回收钻屑的目测分类以及土壤潮湿状况的观察。对从大口径钻孔中获得的大块岩样进行一组筛分分析、阿特堡极限和含水量的测试。除五眼大直径钻孔外, 每个钻孔在完成地质测井后, 随即用挖掘出的岩土进行回填。这五眼大直径钻孔加以保留, 并沿整个深度安设套管, 以便未来的隧道承包商们能在有代表性的地段观察地层情况。

这类地下工程调查期间, 对地下水的观测只限于在每个孔的钻进和测井过程中对地下水情况的观测。地下水观测包括在冲击钻孔延伸期间对岩样湿度的描述以及在大口径钻孔钻进与观察期间对岩样湿度及钻孔状况的描述。在另一个合同中, 沿拟订的隧道定线指定了三眼观测井以监视地下水的水质和水位。

大口径钻进方案

钻进并观测了11眼直径为0.9m (9ft) 的钻孔, 以便评估Price Road排水隧道的土层状况。在松散、不稳定地层, 或在砂卵石地层中含有许多大块卵石及巨砾, 因而难以沿螺旋翼片带出时, 钻进的困难就出现了。由于孔壁的严重坍塌和崩落而不得不废弃了两眼附加的大口径钻井, 所以不可能进

行孔内观察。钻成的钻孔均延伸到地面以下平均约26m (85ft) 深处, 一般是在8至10个工作小时内完成的。

使用Watson 5000型螺旋钻机钻进大直径钻孔, 该钻机装在一台通常用于沉井钻进的美式65t吊车上。利用一长为1.4m (4.5ft) 装有连续螺旋翼片的旋转主动钻杆钻进钻孔, 螺旋钻进是由回转推进的螺旋钻头将其全长1.4m (4.5ft) 钻入土层中来实现的。然后停止钻进并将螺旋钻提出孔外, 而带出的碎岩土则旋离螺旋送至碎石堆中。这一过程就构成一个螺旋钻进回次, 并在测试钻孔报告上记为一个“AP”。此后, 螺旋钻下入钻孔中再重复上述过程, 直至达到裸孔所要求的深度为止。

在钻机上要委派一地质学家, 以便在钻进期间采集土样, 并编制钻孔柱状图, 这包括土层分类、有关地下水含量的表述、坍塌问题、胶结情况以及钻进中的其它困难。对于土层, 一般按照ASTM工序及统一的土层分类体系进行土层的钻进记录。

一旦完成螺旋钻进后, 钻机便被运至下一个大直径钻孔处, 同时用另一辆吊车将直径为0.9m (3ft) 的钢制观察套管放入钻好的井眼中。本工程共建造了五个观察套管孔, 每个套管上有一组共12个25cm (10in) 宽、61cm (24in) 高的可用作观察并能对土层取样的窗口, 这些窗口从底部一直延伸到距套管底部以上12m (38ft) 处。还有3个宽25cm (10in)、高30cm (12in) 尺寸较小的窗口, 可进行附加的土层观察, 这三个窗口在最上部取样窗口之上约3m (10ft) 处或距套管底部15m (48ft) 处。全部这15个窗口均用可取下的钢门盖着, 门可在套管内操作。

安放观察套管之后, 一位地质学家可乘坐观察笼下到套管底部对每个钻孔进行最初的孔内测井并取样。用网眼钢板作观察笼的顶和底, 以便提供更好的照明, 并便于将观

察笼下至套管底部。

每个观察口处,测井过程包括首先测量笼子外侧到钻孔孔壁的距离,该距离在孔内观察报告中被记为钻孔的“井径测量”。此后在每个取样窗口取出22至27kg(50至60lb)。公称直径小于6.4cm(2.5in)的块状土样。用类似于螺旋钻进中的描述方法对土层作目测编录。有关土层中地下水含量及简易取样等均在有关土层描述及变化的附记中加以记述。在上部三个较小的窗口处,除不进行块状土样取样外,要描述土层情况、记录土层变化及有关地下水含量的观察和简易采样等。

反循环冲击钻孔

钻了46个直径为16.8cm(6.6in)的反循环冲击钻孔,其深度在地表以下23至31m(75~100ft),以便补充从大直径钻孔中取得的资料。这些冲击钻孔是专门在每个大直径孔的附近钻进的,以便补充在大直径孔中所遇到的土层资料,并将在大直径孔内观察时得到的土层资料与小直径钻孔中获得的资料联系起来。

所有冲击钻孔均使用一台AP-1000型反循环带冲锤的钻机钻进。该型钻机用一内燃打桩机推进一双壁主动套管,打桩机每分钟冲击95次,额定冲击功为10984J(8100ft-lbs),还可通过一增压器使冲击功增至16272J(12000ft-lbs)。利用一台装在钻机上的大型空压机提供的压气清除钻屑。空气被压入套管壁间的环状空间,从钻头处排出钻屑并经套管内通道返回到泄料旋流器。内套管的内径为10.8cm(4.25in),与该尺寸非常接近的岩土可完整无缺地被带出来。

由于该施工区冲积层的性质,故选用冲锤式钻机,使用常规的回转钻进法要使钻孔穿过粗粒的砂、砾、卵石地层是极其困难的。与其它型式的冲击钻机相比,该冲锤式钻机有以下优点:可提供连续的冲击记数记录;可以大块的形式排出岩土;采用标准贯

入试验(SPT)取土样时,可不必从钻孔中取出主动套管。派往该冲锤式钻机的地质学家可观察到所穿过的土层,并制作出各种测井图表,包括:土层分类,冲击记数记录,以及关于地下水含量,胶结情况,相对密度和SPT测试结果的说明等。

为解释冲击钻孔的资料,以下变量应予说明:

1) 土层类型。含砂量大的岩土层要比含砾、卵石石量大的岩土易于贯穿。卵石与粘土成分间的松散砂囊不易从单独的贯入资料中确认。

2) 贯入阻力。套管每打入0.3m(1ft)所需的冲击次数。对于所遇岩土层的冲击次数资料作了以下有代表性的估计:

粘土质至砂质淤泥

0~15次/0.3m(次/ft)

带有碳酸盐胶结物的淤泥

弱胶结的 15~25次/0.3m(次/ft)

中等胶结的 25~40次/0.3m(次/ft)

强胶结的

40~100以上次/0.3m(次/ft)

纯的松散砂土 10~20次/0.3m(次/ft)

致密或粘土质砂土

20~30次/0.3m(次/ft)

纯而松散的砂质砾石或砾砂

20~35次/0.3m(次/ft)

致密或粘土质砂与砾石的混合物

30~45次/0.3m(次/ft)

含卵石的岩土层其冲击次数少于45次/0.3m(ft)的极少,而冲击次数大于200次/0.3m(ft)的则经常出现。为估计含有卵石的地层,冲击次数及单个卵石之间“充填”材料的贯入特性应经过仔细地观测。

3) 细小颗粒的存在。淤泥或粘土,尤其在砾、卵石上覆盖了胶结粘土或在砂层充填材料内有胶结粘土,都会影响土层的性状。已从以前的大口径钻孔勘探方案中确定,当粘土以重量计含有2~3%时,就会

使岩土粘结在一起,而且对颗粒事实上不会细小的砂-砾-卵石沉积能提供很大的粘 结力。

4) 土壤湿度。将岩屑从钻孔中排出的空气循环在某种程度上使岩土变干,因此,来自旋流器的土样中所观察到的任何湿度均被解释为只说明孔内岩土的相当湿度。

5) 内燃冲锤的能量。由冲锤传给套管的冲击能量是冲锤气缸内产生燃烧作用的结果。对于冲锤能量的研究认为,需要将冲锤工作效率中的各种变化记录到冲击次数加以标准化。因为解释此种钻进资料的地质学家们具有在砂-砾-卵石中使用这种钻进技术的丰富经验,故尚未作出为本工程用的这一标准化所要求的正规计算。

实验室测试方案

实验室测试方案的目的是提供土层分类的资料,并提出地下水含量剖面图。在测试之前,所有直径超过大约6.4cm (2.5in) 的颗粒均从试样中除去。在钻进方案中取得的土样均被送至亚利桑那运输部的土壤测试实验室。送至实验室的每批样品中包括有一个较小的双层包裹好的拉锁包式样品,它是被运来立即做地下水含量测试的。此后大量的样品或是用以作土层分类测试,或是被保存起来。土层分类测试包括筛分分析,如若能用则还要进行阿特堡极限测试。此后,实验室的数据与钻进以及孔内观察的资料结合起来,以便提出评估地层性状用的工程资料剖面图。

地下剖面图

已研究出隧道用的地下土层状况的综合剖面图。根据土层成分及沉积特性,将土层分为两组。A组由上部的细粒冲击物组成,B组是砂-砾-卵石地层。

A组冲积层是一层薄的表土层,它是由风蚀、层状冲蚀以及细粒土壤漫滩沉积而成的,它覆盖了整个施工地区。该组的一般组成情况是泥质到砂质淤泥和纯砂到淤泥砂,

并覆盖着次生砂与砾石和少量粘土及淤泥的混合物,后者是向下面的砂-砾-卵石的过渡层。施工区中A组延深至地表以下达2.5m (8 ft) 至8.6m (28ft)。A组的土层一般来说是干的到稍许潮湿并且是非塑性到中等塑性的。根据胶结的程度,A组土层进一步细分为两组:A₁组从不含到含有极软的碳酸钙夹层或结核,A₂组从中硬发展到类似岩石的钙质层。

B组砂-砾-卵石沉积物中含有冲积层内初次出现卵石的深度以下的各种地层。砂-砾-卵石的构成变化极大,有大量夹层及透镜状岩土层,其构成变化从砂到巨砾以至整个粒度尺寸范围内的复杂混合物。砂-砾-卵石沉积层的总体变化从中等致密到极致密。砾石、卵石和巨砾一般接近于浑圆,砂子也是接近于圆形到略带棱角形的。

碳酸钙与砂-砾-卵石的胶结作用在未胶结到中等程度胶结间变化。胶结作用一般只局限在砂-砾-卵石层的上部,而在地面以下约11m (35ft) 深处,在任何钻孔中均未见到胶结现象。砂-砾-卵石的胶结程度最好的地区在距Salt河最远的工程的南部地段。砂-砾-卵石的胶结作用包括砾石、卵石外的碳酸钙包覆层,及不太常见的砂质充填物质的轻度胶结作用。

除了碳酸钙以外,砂-砾-卵石中的少量粘土也起到一定的胶结作用。砂-砾-卵石中的粘土以砂粒上脆弱的“晕圈”和孔隙内充填物的形式而存在。粘土常常将砂粒“粘结”到砾石及卵石上面,并充填在颗粒间隙中,从而使渗透性下降。通过使用大直径钻孔的资料可确定,只加入少量的粘土〔对于可通过6.4m (2.5in) 筛,以重量计大约为2~30%的粘土〕,便可产生有效的胶结作用。

在近距离内,尽管不同的砂-砾-卵石沉积物在粒径、成分及分布方面变化很大,已经查明,粘土含量随深度的变化趋势可以沿