

Settlement Control Technology for Deep and Thick Soft
Foundation of South Linkage Expressway of Hangzhou Bay
Cross-sea Bridge



杭州湾跨海大桥南岸接线 深厚软基沉降控制技术

宁波市高等级公路建设指挥部
南京水利科学研究院
辽宁省交通规划设计院
南通路桥工程有限公司
浙江公路水运工程咨询公司

编著



人民交通出版社
China Communications Press

Settlement Control Technology for Deep and Thick Soft Foundation of
South Linkage Expressway of Hangzhou Bay Cross-sea Bridge

杭州湾跨海大桥南岸接线 深厚软基沉降控制技术

宁波市高等级公路建设指挥部

南京水利科学研究院

辽宁省交通规划设计院 编著

南通路桥工程有限公司

浙江公路水运工程咨询公司

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要从科研和技术的角度,对用5种加固方法控制杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路深厚软基工后沉降的技术与效果进行全面总结,提出了高速公路深厚软基工后沉降控制技术的基本设计原则。本书从杭州湾软土的特性到加固方法的有效性,从不同方法加固效果的比较到设计计算方法的确立,从现场施工质量的控制到加固所需专用材料标准的建立,从新材料的运用到研究中创新点的诞生,都全面作了介绍,对类似工程具有一定的借鉴性。

本书可供从事公路施工、设计、科研及管理的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

杭州湾跨海大桥南岸接线深厚软基沉降控制
技术 / 宁波市高等级公路建设指挥部等编著. —北京:
人民交通出版社, 2010. 5
ISBN 978-7-114- 08259- 7

I. ①杭… II. ①宁… III. ①跨海峡桥—桥梁工程—
软土地基—地基沉降—控制—杭州市 IV. ①U448. 19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 060012 号

书 名: 杭州湾跨海大桥南岸接线深厚软基沉降控制技术

著 作 者: 宁波市高等级公路建设指挥部 南京水利科学研究院 辽宁省交通规划设计院
南通路桥工程有限公司 浙江公路水运工程咨询公司

责任编辑: 沈鸿雁 王文华

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 11.5

字 数: 275 千

版 次: 2010年5月 第1版

印 次: 2010年5月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114- 08259- 7

定 价: 30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《杭州湾跨海大桥南岸接线深厚软基沉降控制技术》

编审委员会

主任委员:陈有华

副主任委员:胡永安 夏育照 李 毅 刘慈军 娄 炎

成 员:胡铁权 王百林 徐懋刚 何 宁 朱凤艳

张 希 杨 昊 关秉洪 邢忠锋 安发响

叶伟建 刘鸿雁 叶伟胜 张全根 吴 伟

陈 键

《杭州湾跨海大桥南岸接线深厚软基沉降控制技术》

编写(审)组

组 长:娄 炎

副 组 长:刘慈军 何 宁 李 毅 朱凤艳 张 希

成 员:胡铁权 王百林 徐懋刚 叶伟建 刘鸿雁

叶伟胜 张全根 王文治 徐仁标 张洪波

吴 伟 俞天润 王东妹 周 科 张 杰

张 桓 陈 键 雷 霞 曹江良 邵海波

傅 裕 祁远江 郑 宁 杨 昊 娄 斌

王国利 邢忠锋 安发响 匡少华 董英杰

前 言

杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路起于杭州湾跨海大桥南岸,止于宁波市绕城高速,公路全长 58km,为举世瞩目的杭州湾跨海大桥的重要组成部分。它连接宁波、上海两市,沟通沪杭、杭甬、甬台等多条高速,把宁波城区和西北各县(市)区紧密连在一起,对进一步完善宁波乃至浙江的交通网布局,发挥宁波—舟山港的区位优势,完善宁波地区以港口为龙头的集疏运网络系统具有重要意义;对加大宁波对余慈地区的辐射,推动宁波市委的“六大联动”和“五个统筹”战略决策的落实,使宁波更好地接轨上海、融入长三角,进而推进宁波现代化建设发展具有深远意义。

高速公路工后沉降的有效控制,是一个系统的、全过程的控制工程,不能缺少工程中的任何一个环节。它包含对软土性质及其加固技术的正确认识和全面了解,设计方案的恰当选择,施工过程的科学安排,施工技术的准确运用,以及施工管理和监督的规范化、科学化等。

杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路软基里程约 40km,占全路长的 70%左右;软土厚度大,一般都在 20~30m,部分达到 40m,区域软土层位沿路线变化较大、比较复杂,路基宽度达到 35m,路基底宽达到 50m 以上,路基对下卧层影响深度加大。为制订经济合理的软基处理方案,满足工程建设需要,宁波市高等级公路建设指挥部选择总长 2 103.5m(K118+400~K119+900 和 K134+000~K134+603.5)软基路段作为深厚软基加固的领先试验段,组织科研单位、设计单位和施工单位对杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路深厚软土地基处理的设计、科研、施工与质量管理进行了试验研究。在各方面的共同努力下,杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路建设顺利,科研、设计、施工及管理各方面取得了丰硕成果,本书是对杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路建设及试验研究中所取得的科研成果的系统总结。

本书主要从科研和技术的角度,对用 5 种加固方法控制杭州湾跨海大桥南接线高速公路深厚软基的工后沉降技术与效果进行全面总结,对 5 种高速公路深厚软基工后沉降控制加固方法,试验段基本情况、研究方法及技术路线进行简单介绍;介绍了试验段软土特性的详细研究成果,建立了本地区土性指标数据库和统计关系成果,为本地区类似工程建设打下了一个良好基础;介绍了 5 种深厚软基工后沉降控制加固处理方法的有效性的试验研究成果:充分利用试验研究中大量现场试验取得的孔隙水压力、地表沉降、地基分层沉降、地基侧向水平位移、桩顶应力、桩间土压力等观测资料,从控制工后沉降机理、土性指标等方面分别进行了试验研究的 5 种深厚软基工后沉降控制加固处理方法的有效性分析和对比研究,在高速公路深厚软土地基工后沉降控制中首次使用刚柔长短桩复合地基工法,并取得成功,首次用实测数据证实刚性桩复合地基中桩与桩间土所受荷载的分配规律,首次提出土拱效应是通过路堤的抗剪强度来传递与形成的观点,也指出高速公路深厚软基工后沉降控制技术中需改进与继续研究的问题。本书还对 5 种高速公路深厚软基控制工后沉降处理工法进行总结,对包括施工组织安排、施工机械、施工工艺、新材料、质量管理方法等在内的高速公路深厚软基工后沉降控制处理

技术开展了系统研究,建立其成套施工工艺和质量管理技术,提出三个专用材料的标准;对高速公路深厚软基控制工后沉降处理技术设计方法进行归纳总结和完善,总结制定了预压法和复合地基法的设计流程和设计计算方法,提出了高速公路深厚软基工后沉降控制技术的基本设计原则。

本书的出版得到宁波市高等级公路建设指挥部和南京水利科学研究院出版基金资助,在编写过程中参考了大量的技术文献,引用了国内外许多专家学者的研究成果和资料,在此表示诚挚的感谢。由于作者水平有限,书中难免有不当之处,恳请各位专家和读者批评指正。

作 者

2010 年 2 月

目 录

第 1 章	工程概况	1
第 2 章	试验段工程软基加固方案设计	3
2.1	高速公路软基处理的目标	3
2.2	高速公路软基处理的基本思路	3
2.3	软基加固方案	3
第 3 章	试验段软基加固方法概述	6
3.1	堆载预压法和真空联合堆载预压法	6
3.2	CFG 桩复合地基法	7
3.3	预应力管桩复合地基法	7
3.4	预应力管桩与水泥搅拌桩复合地基法	7
3.5	研究方法、技术路线	8
第 4 章	现场原位观测、测试及试验检测	9
4.1	现场原位观测	9
4.2	现场原位测试	11
4.3	复合地基工程质量效果试验检测	11
第 5 章	试验段软土特征研究	12
5.1	试验段软土特征总体评价	12
5.2	试验段地基软土特征分析	14
5.3	试验段软土特征指标相关关系	19
5.4	试验段软基加固方法与土性特征的关系	23
第 6 章	试验段软基加固试验研究	26
6.1	堆载预压法	26
6.2	真空联合堆载预压法	35
6.3	CFG 桩复合地基法	60
6.4	预应力管桩复合地基法	73
6.5	预应力管桩和水泥搅拌桩的刚柔长短桩复合地基法	87
6.6	试验段路基预抛高调坡效果分析	100
6.7	试验段地基加固方法比较	101
6.8	研究成果推广应用	111
第 7 章	高速公路软基处理施工工艺及管理技术	114
7.1	堆(超)载预压法	114
7.2	真空联合堆载预压法	122
7.3	CFG 桩复合地基法	126
7.4	预应力管桩复合地基法	130

7.5 预应力管桩和水泥搅拌桩联合桩复合地基法 133

7.6 高速公路中不同软基处理方法相互衔接施工工艺 136

7.7 软基处理材料的工程应用标准 139

第 8 章 高速公路软基处理设计、计算方法 145

8.1 预压法的设计与计算 145

8.2 刚性桩(管桩、CFG 桩)复合地基的设计与计算 152

8.3 长短桩复合地基的设计与计算 156

8.4 高速公路深厚软基下长短桩复合地基优化设计讨论 162

8.5 高速公路软土路基预抛高设计 165

8.6 高速公路软基处理检测、监测设计..... 167

参考文献..... 169

第 1 章 工 程 概 况

宁波杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路软基里程约 50km, 占全路长的 87% 左右; 软土厚度大, 一般都在 20~30m, 部分达到 40m; 层位沿路线变化较大、比较复杂; 加上本路为双向六车道, 路基宽度达到 35m, 路基底宽达到 50m 以上, 路基对下卧层影响深度加大, 这些情况都是以往路段不常遇到的。深厚软土地基加固技术的正确应用和工后沉降量的有效控制是建好这条路的关键, 也是修建这条路的重点和难点。

为研究杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路超深软基处理的加固方案, 积累施工经验, 指导全线超深软基处理的施工, 选择总长 2 103. 5m (K118+400~K119+900 和 K134+000~K134+603. 5) 软基路段作为深厚软基加固的领先试验段。该两路段一处位于慈溪境内的慈北冲积平原地带, 另一处位于宁波江北区的姚江冲积平原区。它们分别代表本路两种不同的地层类型, 前者属软土地基上有一定厚度的相对硬壳层情况; 后者属软土地基露头, 且土性在本路段是最差的情况。

试验段将慈溪境内的 K118+400~K119+900 分为 14 小段 N1~N14; 把江北区的 K134+000~K134+603. 5 分为 3 小段 S1~S3。在这 17 小段落中设计了“堆载预压与超载预压法”、“真空+堆载预压法”、“CFG 桩复合地基法”、“预应力管桩复合地基法”和“联合桩复合地基法”共五种软基加固方案。另从中选取了 10 个小段作为重点试验断面, 通过对重点试验断面进行现场勘察与原位测试、室内土工试验、埋设仪器进行现场观测, 以及对各种地基处理方案的加固效果进行检验等试验研究工作, 研究出适合宁波地区特点的深厚软土地基的加固技术和相应的施工工艺及有效的现场管理办法, 从而得到技术先进、经济合理、切实可行的处理方法, 以解决宁波地区的深厚软基问题。

试验段地基软弱土层共三个工程地质层, 五个亚层, 自地表向下分为:

②₁ 层: 亚黏土 (Q_4^{3+4m})。位于地表, 浅层为耕植土, 上部褐黄色, 下部灰黄色, 大部分为软塑状, 少数为可塑状, 厚度普遍偏小, 一般在 2. 0m 左右, 广泛分布于试验路表层, 为相对硬壳层, 因厚度小, 不能作为路堤或结构物的持力层。

②₂ 层: 淤泥质亚砂土 (或淤泥质亚黏土) (Q_4^{3+4m})。该层在试验路慈溪段全线分布, 灰色, 呈流塑状, 饱和; 本层厚度不是太大, 一般 6~7m, 部分路段厚度达 10~11m。本层具有水平层理, 土层不太均匀, 常是淤泥质亚砂土和淤泥质亚黏土层交替出现, 因此土体强度沿深度变化起伏较大。本层中还常有一层液性指数 I_L 超过 2. 0 的软土, 厚度在 2m 左右, 埋深在 4~6m 之间, 非常软弱。本层总体上属软弱土层, 其含水率偏高, 孔隙比大, 压缩性高, 强度总体偏低, 不能作为持力层, 需要作专门处理。

③₁ 层: 淤泥质亚黏土 (Q_4^{3+4m}), 个别深度处为淤泥质黏土。该层在试验路全线分布, 呈灰色、深灰色, 流塑状, 饱和; 在慈溪段本层厚度大, 一般 20~30m, 自南向北厚度逐渐变厚, 埋深都在地表 9~12 m 以下; 本层土质比较均匀, 偶见少量夹层, 具有水平层理; 本层土含水率偏高, 孔隙比大, 强度低, 压缩性高, 在路堤荷载作用下变形量大, 需要作专门处理; 尤其是在地表以下 15~25m 处, 该层含水率更高、压缩性更大, 该深度在压缩层范围内, 在做处理方案时应

予特别考虑；在江北地段该层直接露于地表，厚度沿路纵向起伏变化较大，从 12m 变化到 26m，其物理力学性质比慈溪段还要差；该层是全路段软基处理的重点。

③₂ 层：亚黏土(Q_4^{2+ml})。在现有的勘探深度(40m)范围内，只在一些路段见到本层。本层土呈灰色，以流塑状为主，少数软塑，饱和，大部分埋深都在距地表 35m 深以下，中等压缩性，不宜作为桩基持力层。

⑤₁ 层：亚黏土。

⑤₂ 层：细砂、粉砂层(Q_3^{al-pl})。本层厚度有 10m 左右，属稍密状态，部分为中密，可做桩基持力层。

第 2 章 试验段工程软基加固方案设计

2.1 高速公路软基处理的目标

对软土地基的加固处理,其基本原则是安全适用、技术先进、确保质量、经济合理、保护环境。在高速公路软土地基处理中:首先是避免路堤施工中出现稳定问题,防止施工中路堤产生滑动破坏,保证路堤连续正常施工;其次就是路堤建好后其工后沉降满足规范要求,即满足中华人民共和国交通运输部标准《公路路基施工技术规范》(JTG F10—2006)的规定要求:高速公路的桥台与路堤相邻处容许工后沉降 $\leq 0.10\text{m}$,过渡段及小型结构物容许工后沉降 $\leq 0.20\text{m}$,一般路段容许工后沉降 $\leq 0.30\text{m}$;第三,使高速公路软土地基在经过处理后满足行车要求,在结构物处没有较大的不均匀沉降发生,公路路面有较好的平整度,避免行车跳跃、颠簸和桥头跳车,提高高速公路的使用质量,大大减少运行期的养护成本。

2.2 高速公路软基处理的基本思路

高速公路软土地基目前常采用的加固技术有:堆(超)载预压、塑料排水板结合堆载预压、水泥搅拌桩(粉喷桩)、碎石桩、强夯等方法。近年来真空排水预压法在加固高速公路软土地基上得到越来越多的应用,CFG 桩和预应力管桩等复合地基加固方法在高速公路软基处理上也开始得到应用。针对试验段软土层深厚而填土高度中等等特点,按照如前所述高速公路软基处理以控制工后沉降(桥台与路堤相邻处容许工后沉降 $\leq 0.10\text{m}$,过渡段及小型结构物容许工后沉降 $\leq 0.20\text{m}$,一般路段容许工后沉降 $\leq 0.30\text{m}$)为目标,同时保证地基施工和高速公路运营期稳定的基本原则,确定试验段工程软基加固一般路段以预压排水固结为主,桥头连接路段以桩组成复合地基为主,同时综合考虑工后沉降和工程造价,对部分路堤填筑高度较低的桥头连接路段采用真空联合堆载预压法的基本思路。

2.3 软基加固方案

按照上述高速公路软基处理的目标和基本思路,根据类似工程经验,通过技术经济比较(见表 2-1),结合本工程的软基分布及工程力学特性,经计算与对比分析,采用了以下软基加固的原则方案:一般路段以真空联合堆载预压处理为主、堆土超载预压处理作为比较的方法;桥头连接路段采用管桩、CFG 桩、水泥搅拌桩(桩长取设计处理深度的 1/2,占总桩数的 3/4)+管桩(桩长取设计处理深度,占总桩数的 1/4)相联合的复合地基加固等方法来处理。

试验段工程软基处理具体分段处理方法如表 2-2 所示。其中真空联合堆载预压和超载预压加固处理的垂直排水通道,N13 区采用直径 30mm 的透水软管,N5 区采用 150mm 宽高性能塑料排水板(F 板),其余各区采用高性能 C 型排水板。

高速公路深厚软基主要处理方法比较(设计处理深度 30m 为例)

表 2-1

处理方法	主要工程特点	主要参数比较	总造价 (元/m ²)	造价比 (%)
堆载预压	工后沉降大,填土速率受限,施工 期长,应用成熟	排水板间距 1.2m,超载土方 3m 深, 沉降土方 1m 深,砂垫层 50cm 厚	155	100
真空联合堆载	工后沉降较大,填土速率不限,工 期较长,应用成熟	排水板间距 1.2m,真空预压 150d,沉 降土方 1m 深,砂垫层 50cm 厚,护膜土 工布 1 层	265	170
水泥搅拌桩	工后沉降较小,深层成桩困难,工 期短,应用基本成熟	桩距 1.4m,桩径 50cm,垫层 50cm,格 栅 1 层	300	190
CFG 桩	工后沉降小,成桩质量较好,对软 土扰动大,工期短,应用较少	桩距 2.3m,桩径 50cm,垫层 50cm 厚, 格栅 1 层	375	240
预应力管桩	工后沉降小,施工简便,工期短, 应用少	桩距 2.8m,桩径 50cm,壁厚 6.5cm, 厚 50cm,1m 见方承台板,垫层 50cm 厚,格栅 2 层	420	270
水泥搅拌桩联 合管桩	工后沉降较小,施工简便,工期 短,应用很少	搅拌桩桩距 1.7m,桩径 50cm,管桩桩 距 3.4m,桩径 50cm,壁厚 6.5cm,1m 承 台厚 50cm,垫层 50cm 厚,格栅 1 层	417	270

试验段划分

表 2-2

区号	起 讫 桩 号	长度 (m)	路堤设计 高度 (m)	路段 类型	软土 最大深度 (m)	处 理 方 案		
						处理方法	深度 (m)	间距 (m)
N1	K118+400~K118+465	65	3.5	一般	30.0	真空堆载(C板)	31.0	1.2
	K118+465~K118+525	60	3.4	桥头	30.0	真空+超载 1m(C板)	31.0	1.0
N2	K118+563~K118+593	30	6.4	桥头	31.0	预制管桩	37.0	2.4
	K118+593~K118+623	30	4.0				37.0	3.0
N3	K118+623~K118+699	76	4.1	一般	31.0	CFG 桩	32.0	2.5
	K118+699~K118+729	30	4.3	桥头	31.0		32.0	2.0
N4	K118+777~K118+827	50	4.2	桥头	31.0	真空+超载 1m(C板)	32.0	1.0
N5	K118+827~K118+935	108	4.3	一般	30.0	真空堆载(F板)	31.0	1.2
N6	K118+935~K119+035	100	3.5	一般	30.0	真空堆载(C板)	31.0	1.2
N7	K119+035~K119+085	50	2.7	桥头	30.0	真空堆载(C板)	31.0	1.0
N8	K119+115~K119+145	30	3.2	桥头	30.0	联合桩	37.0	1.7
	K119+145~K119+175	30	3.3				37.0	2.1
N9	K119+175~K119+453	278	4.4	一般	30.0	真空堆载(C板)	31.0	1.0
N10	K119+453~K119+483	30	5.0	桥头	30.0	CFG 桩	36.0	2.5
	K119+483~K119+513	30						2.0
N11	K119+573~K119+603	30	4.8	桥头	30.0	CFG 桩	36.0	2.0
	K119+603~K119+633	30						2.5

续上表

区号	起 讫 桩 号	长度 (m)	路堤设计 高度 (m)	路段 类型	软土 最大深度 (m)	处 理 方 案		
						处理方法	深度 (m)	间距 (m)
N12	K119+633~K119+733	100	4.5	埋涵	30.0	真空堆载(C板)	31.0	1.2
N13	K119+733~K119+833	100	3.5	一般	30.0	真空堆载(透水软管)	31.0	1.2
N14	K119+833~K119+900	67	2.8	一般	30.0	堆载超载 1m(C板)	31.0	1.2
S1	K134+000~K134+100	100	2.5	一般	28.0	堆载预压(C板)	29.0	1.2
	K134+100~K134+170	70	3.0	桥头	28.0	真空预压(C板)	29.0	1.0
S2	K134+218~K134+268	50	3.7	桥头	30.0	真空+超载 1m(C板)	31.0	1.0
	K134+268~K134+325	57	4.2	一般		真空预压(C板)		1.2
	K134+325~K134+375	50	4.5	桥头		真空+超载 1m(C板)		1.0
S3	K134+413~K134+443	30	4.5	桥头	35.0	真空堆载(C板)	35.0	1.0
	K134+443~K134+574	131	4.2	一般				1.2
	K134+574~K134+604	30	3.9	桥头				1.0

第3章 试验段软基加固方法概述

3.1 堆载预压法和真空联合堆载预压法

饱和软黏土具有高含水率、高压缩性、低强度等特点,应采取特殊方法对深厚饱和软黏土地基进行处理。在时间允许的情况下,一般路段饱和软黏土地基处理最经济合理而且质量易保证的方法是排水固结预压法。它是指黏土地基在荷载作用下,因其渗透性很小,在加载瞬时土体不能压缩而使荷载全部转化为超静孔隙水应力;随着时间增长,土体中孔隙水慢慢排出,超静水压力逐渐消散,有效应力增大,孔隙比减小,地基发生固结变形,地基土强度逐步增强。由于软土的塑性特征显著,建筑物施工前地基处理阶段软基因加载固结产生的加固效果是永久性的,即软土的固结压缩和强度增长在加固荷载部分或者全部卸除后仍将基本维持不变。由于在地面建筑物施工前预先对软基加载使其固结,故排水固结法也成为预压法。

排水固结法主要由排水系统和加荷系统两部分组成。排水系统由水平排水层(地面兼作垫层)和竖向排水通道组成;竖向排水通道目前常用材料有塑料排水板、袋装砂井、普通砂(或碎石)井(桩)、透水软管等。荷载施加包括地面堆土(石)或充水、抽真空、降低地下水位等方式;按照施加预压荷载与设计永久建筑物荷载之间的关系,排水固结法又分为欠载、等载和超载三种。对于力学性质指标很低的饱和软黏土地基,为控制工后变形,至少要采取等载,一般宜超载,超载压力大小随着预压时间增加而减小。

排水固结加固中最传统的加载方式是堆载。对于深厚软基,其沉降量一般很大,为有效减小工后沉降,单纯采用堆载预压法时必须采取很大的超载压力和很长的预压时间,因软土固结速率很慢,堆载时为了保证地基稳定,必须严格控制填土速率而使填土施工期较长。总而言之,一般的堆载预压法存在加固期长、加固深度浅、工后沉降大,施工过程中应严格控制加载速率等问题。排水固结预压法用于高速公路控制工后沉降的方式同复合地基不一样,后者是通过桩体同地基复合形成复合地基使地基模量提高以控制地基沉降的发生,从而达到高速公路控制工后沉降的目的;而预压法是通过预压作用使地基固结变形在施工期基本完成,以减少后期沉降,从而达到高速公路控制工后沉降的目的。当地基软弱,而且工期比较紧时,除了通过插设竖向排水通道加快地基固结外,还利用真空预压加固时地基向内收缩、不存在稳定问题而使堆载过程可快速完成等特点,将真空预压与堆载预压结合起来使用,从而形成真空联合堆载预压法(堆载预压中的超载部分以真空压力替代)。这样,一方面加大超载压力,另一方面缩短填土期、延长预压期,使路基的沉降在施工期内能完成绝大部分,从而有效减少工后沉降。真空联合堆载排水固结预压可以发挥真空预压和堆载预压各自的优势,提高加荷速率、缩短工期、增大加固深度及减少工后沉降量。

真空联合堆载预压的加固,实际上是在对路堤地基实施超载预压加固,超载部分就由真空荷载来代替,其最大荷载可达 $80\sim 90\text{kPa}$,相当于 $4\sim 5\text{m}$ 的填土荷载,大大超过路面荷载(一般不超过 30kPa)和一般的超载(2m 左右的填土)。这不仅实现了等载预压加固,而且还真正

起到了超载预压加固的作用。真空荷载施加方便、迅速,几天就可加到 80kPa,不存在分级施加的问题。由于有真空预压,只要塑料排水板有足够大的通水量,真空度可以传递到土层的深部而损失较小,使深层软土得到较好的加固,从而在加固期间能消除较多的沉降量。真空联合堆载加固能解决以下两方面问题:①较快与较经济地解决深厚软基上路堤的工后沉降量,使路堤工后沉降量最终能控制在要求的范围以内;②路堤施工工期能大大缩短,同时也基本上无须担心路堤在施工中会有失稳与安全的问题。

3.2 CFG 桩复合地基法

CFG(cement fly ash gravel pile)桩是在碎石桩的基础上掺加适量石屑、粉煤灰和水泥加水拌和,制成一种黏结强度较高的半刚性桩体,又称水泥粉煤灰碎石桩,是建筑行业已经推广应用的一种地基处理新技术。

CFG 桩加固软弱地基主要有两种作用,即桩体作用和挤密作用。CFG 桩可在全长范围内发挥其摩擦力和端承力,桩体强度具有可调性(通常在 C8~C15 之间变化),可避免散体材料桩(碎石桩、砂桩)及低强度材料桩(石灰桩、灰土桩)由于桩身强度的限制而使荷载传递深度有限的缺陷,可大幅度提高地基的承载力;成桩过程中桩周土体受到沉管挤压作用而密实,加上桩体压缩性小,复合地基的整体压缩模量很大,压缩量小。用 CFG 桩复合地基方法处理深厚软土地基,可达到有效消除沉降和提高地基承载力的双重目的。CFG 桩属高黏结强度桩,和褥垫层、桩间土一起组成复合地基,通过调整桩长、桩距和褥垫层厚度,既可以较好地满足承载力要求,也较容易调整天然地基和复合地基之间的差异沉降。该方法主要适用于软基性质很差、软土层深厚等情况下的桥头及连接路段的地基加固。

3.3 预应力管桩复合地基法

预应力管桩复合地基法,是利用静压桩机或动力打桩机将生产厂家预制的钢筋混凝土预应力空心薄壁管桩沉入地基,地面荷载主要通过管桩向深层硬土层或基岩传递,同时桩间土也承担部分荷载。预应力管桩复合地基的加固原理与 CFG 桩复合地基基本相同,其加固深厚软基中的管桩为刚性桩体,桩可在全长范围内发挥其摩擦力,同时也发挥桩的端承力。桩和褥垫层、桩间土一起组成复合地基,通过调整桩长、桩顶承台面积大小、桩距和褥垫层材料和厚度,既可较好地满足承载力要求,也较容易调整天然地基和复合地基之间的差异沉降。该方法因其质量容易控制,生产和施工工艺成熟,控制工后沉降效果好,用于高速公路软基加固主要适用于软基性质很差、软土层深厚等情况下的桥头及连接路段的地基加固。

3.4 预应力管桩与水泥搅拌桩复合地基法

预应力管桩及水泥搅拌桩联合桩复合地基中,水泥搅拌桩是用水泥作为固化剂,通过深层搅拌与被加固软土地基强制搅拌,在软土地基中形成水泥土桩桩体。水泥土桩是一种介于刚性桩和散体材料桩之间的一种可压缩的柔性桩体,其桩身强度可达 1MPa,变形模量可达 100~200MPa。水泥搅拌桩软基加固技术具有施工快速、造价低的优点,但是存在施工质量不

容易控制、加固深度浅、深层加固效果难保证等问题；而预应力管桩其生产和施工工艺技术成熟，具有桩身质量稳定可靠、施工工期短、承载力高、处理深度大、监理方便等特点，尤其在高速公路控制路基工后沉降效果好，但造价相对较高。鉴于以上原因，根据高速公路控制工后沉降的具体要求，取长补短，把两者结合起来应用，针对高速公路深厚软土地基浅层附加应力大、土质软、压缩量大等特点，以造价低廉的水泥搅拌桩为主进行加固，获得较大置换率和较好的加固效果，同时避免了水泥搅拌桩深层加固效果难保证的缺陷；在深层，附加应力小，土质好于浅层，利用造价贵但质量容易保证的管桩加固，可以在保证高速公路控制沉降要求的同时，节省地基处理费用。管桩及水泥搅拌桩联合形成刚柔、长短结合的长短桩复合地基，同管桩桩顶承台、褥垫层、桩间土一起组成复合地基，既可以较好地满足承载力要求，也较容易调整天然地基和复合地基之间的差异沉降。因此长预应力管桩与短水泥搅拌桩联合形成的刚柔长短桩复合地基法，是一种在高速公路深厚软基处理中值得研究和推广应用的桥头路段和桥头过渡路段的新技术。该方法适用于软基性质较差、软土层深厚等情况下的桥头及连接路段的地基加固。

3.5 研究方法、技术路线

本研究遵循的技术路线和采用的研究手段是：以现场原位观测、原位测试和试验检测等试验研究为主，辅以一定的室内试验，结合理论分析，得出适合宁波地区的深厚软土地基上高速公路的加固技术和相应的施工工艺、质量管理体系和各加固方法的效果、优劣，以及在本地区软土地基的适用范围，完成对杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路建设的指导，保证杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路优质工程建设目标，为宁波地区和我国高速公路建设服务。具体研究方法有如下几个方面：

(1) 试验研究路段设置重点观测断面，布置孔隙水压力计、水位测量管、土压力计、应力计、地表沉降标、分层沉降管、断面沉降管、测斜管等原型观测仪器，对软基处理全过程进行全面观测。

(2) 结合试验段开展高速公路深厚软基处理技术施工工艺研究，包括选择和改进施工机械，确定施工方法、施工顺序、特殊情况下的施工工艺、真空预压法和超载预压法的卸荷标准等。

(3) 结合试验段开展高速公路深厚软基处理技术质量控制技术研究，如真空度的监督控制方法，垂直排水通道打设深度和打设质量监督控制技术，复合地基法中薄壁管桩、CFG 桩、水泥搅拌桩的质量控制技术。

(4) 结合试验段开展高速公路深厚软基处理技术质量评定方法和标准研究。

(5) 利用试验段检测、观测成果对试验段 5 种高速公路深厚软基处理方法加固效果进行研究，进行优劣比较，研究各自适合的工况和特点。

(6) 充分利用试验段丰富的检测、观测资料，应用软土弹塑性、固结、流变、施工扰动损伤等理论，对深厚软土地基的应力传播和工后沉降变化规律进行研究，对高速公路深厚软土地基工后沉降计算分析的基本理论和设计计算方法进行研究，提升高速公路深厚软基处理技术的理论研究水平和设计能力。

第4章 现场原位观测、测试及试验检测

4.1 现场原位观测

现场原位观测是确保软基处理成功的关键环节,其目的是:监控施工期地基稳定性,为控制施工速率提供依据,确保施工期安全;检验加固效果,保证工程质量;揭示软基变形规律,据此预测工后沉降,指导后期路面施工安排,验证设计计算结果的准确性。

1) 现场原位观测的主要方法

(1)地表沉降观测。通过原地面沉降标观测,掌握地基某一点沉降量、沉降速率、沉降变化规律。

(2)分层沉降观测。在地基不同深度埋设沉降环,采用电磁式沉降仪测量,通过测量沉降环的位置变化,可得到地基土体在荷载作用下的总沉降量、各土层的相对压缩量等。

(3)横向全断面沉降观测。在路堤底原地面埋设横穿整个路堤的全断面沉降管,利用全断面沉降观测仪(小松鼠)观测地基横向差异沉降变化情况,研究路堤荷载作用下地基横断面附加应力分布特性规律。

(4)地基水平位移观测。在路堤坡脚处埋设测斜管,用活动式测斜仪测量,及时了解地基软弱土层在路堤荷载作用下的水平位移情况,根据位移速率和土体变形状况来指导施工。施工过程中有失稳迹象,可及时报警,确保边坡稳定。

(5)孔隙水压力观测。选用稳定性好、灵敏度高的钢弦式孔隙水压力仪,检测施工期间地基土体在荷载作用下不同深度内的超静孔隙水压力的消长规律,及时了解土体的固结状态和强度增长情况,并通过孔压系数来控制施工速率。

(6)水位观测。在预压排水固结法加固区外侧埋设水位观测管,采用电测水位计对地基中水位进行观测,研究真空预压法中真空影响范围、影响大小和影响规律。并利用测得地基中地下静水位对预压法中测得的加固区孔隙水压力进行修正计算,分析预压法中超静孔隙水压力消散规律。

(7)真空度观测。它包括膜下真空度、加固区不同深度范围地基软土中的真空度和加固区垂直排水通道不同深度的真空度监测。采用高精度真空表进行测量,分析真空预压作用下真空度沿垂直排水通道以及其在地基软土中的传递规律,为研究真空预压加固机理服务。

(8)桩体和桩间土土压力观测。选用稳定性好、灵敏度高的钢筋应力计、混凝土应变计、土压力盒,检测路堤荷载加载过程中桩体所受内力以及桩和桩间土分担的荷载,研究复合地基荷载传递和分担变化规律,包括复合地基桩土共同作用机理,桩、土应力比,桩身荷载传递与桩间土应力分布规律,为研究复合地基的沉降特性及其影响因素服务。