

真空与覆水联合加固工业厂房 软基的试验研究

倪洪波, 姜 炎, 王承军

(南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘 要:根据使用要求与现场条件,某大面积工业厂房软基采用真空与覆水联合加固技术进行处理。在真空预压系统中,应用了由软式透水管与薄层砂垫层组成的新型水平排水体。加固范围西侧存在夹砂层,采用双排黏土搅拌桩进行密封处理;加固范围北侧有邻近的厂房和道路,以单排黏土搅拌桩与单排水泥土搅拌桩作为防护措施,实践证明所用防护措施有效。经过对现场测试数据的整理分析、土工试验数据的对比研究,认为真空与覆水联合加固技术处理软基是成功的,并推算出本工程真空预压的影响范围达到 40 m 左右。

关键词:工业厂房;软基;真空预压;覆水;水平排水体;深部密封;试验研究

作者简介:倪洪波(1974—),男,江苏淮安人,本科,工程师,主要从事岩土工程方向的科研、设计与项目管理等工作。

0 引 言

真空预压法是一种技术先进、无污染、行之有效的排水固结加固地基方法,具有施工简便、工期短、无需分级加载、能大面积消除地基沉降、造价低等优点。通常情况下,此法最大加载值为 80~90 kPa,对于提高承载力与消除沉降要求较高的地基,常用真空联合堆载预压法进行处理,其所用堆载材料常为土石方,当大量土石方难以取得或成本较高时,就要设法使用其他堆载材料,如膜上覆水等。本文结合某大面积工业厂房工程,对真空与密封膜上覆水堆载联合加固厂房软基进行了现场试验研究,结果表明该软基加固方法取得了成功。

1 加固要求及地质条件

拟建的工业厂房占地 13 548 m²,加固要求消除地基的最大沉降量不小于 570 mm,地基平均固结度大于 90%,并具有不低于 100 kPa 的承载力。

该厂房地基地貌单元属长江河漫滩,地形平坦,地势低洼,土层自上而下分布及其物理力学性质指标见表 1,主要不良地质为分布较厚的新近沉积的淤泥质粉质黏土(②-1),该层含水量高、孔隙比大、压缩性高、强度低。在加固区西侧②-1 层中分布有②-1a 层透镜体,此层层底最大埋深为 11 m,竖向渗透系数为 1.19×10^{-4} cm/s,水平向渗透系数为 2.73×10^{-4} cm/s,为强透水透气层。

表 1 加固前地基土层物理力学性质指标

土 层	层 号	层厚 (m)	ω (%)	r (kN/m ⁻³)	e	I_p	I_L	$\alpha_{1\sim 2}$ (MPa ⁻¹)	$E_{s1\sim 2}$ (MPa)	直剪(快剪)	
										C/kPa	ϕ (°)
素填土	①	0.5~3	38.1	18.2	1.077	16.5	0.93	0.521	4.010	17.1	10.8
淤泥质粉质黏土	②-1	3.8~14.8	41.4	17.7	1.168	14.5	1.46	0.724	3.069	9.1	15.5
粉 砂	②-1a	0.7~3.8	28.9	18.6	0.896			0.229	9.041	10.0	31.1
淤泥质粉质黏土	②-2	1.7~11.8	38.1	17.9	1.110	13.6	1.33	0.605	3.538	9.5	16.6
淤泥质粉质黏土	②-3	0.8~13.5	35.9	17.9	1.077	13.0	1.28	0.585	3.670	9.7	16.8

2 地基加固方案

2.1 地基加固方法

根据地基处理要求与地质条件,经过技术经济对比分析,本工程地基处理方法采用真空与覆水联合加固法,采用水作为堆载材料,它具有荷载明晰、便于计算、加卸载方便、速度快、加固区受载均匀、密封膜容易保护等优点,但在覆水前,需在加固区四周密封沟外边沿做好围堰。

处理范围为厂房外墙建筑轴线各向外扩出 5 m,面积共计 16 048 m²,如图 1 所示。真空预压停泵标准为:按实测沉降曲线推算的固结度大于 90%,连续 5 d 实测沉降速率小于 2 mm/d。

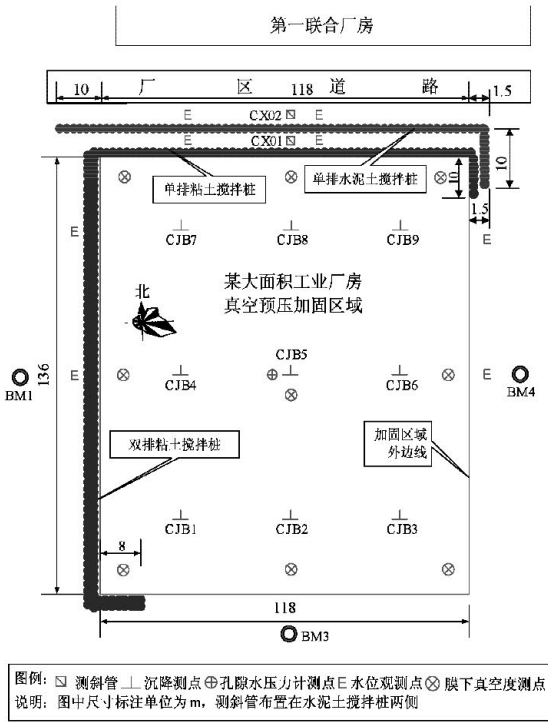


图 1 地基加固区域与监测点布置图

2.2 竖向排水体设计

本工程选用 C 型塑料排水板作为竖向排水体,呈梅花型布置,间距 1 m。根据地质条件,将场地分为 4 个分区(I 区深 13 m, II 区深 16~18 m, III 区深 20 m, IV 区深 18 m,如图 2 所示)打设塑料排水板。

2.3 水平排水体设计

当地砂源紧缺、价格昂贵,在确保真空预压处理效果的前提下,为降低工程造价,本工程以软式透水管(外径 50 mm)与厚 20 cm 砂垫层相结合作

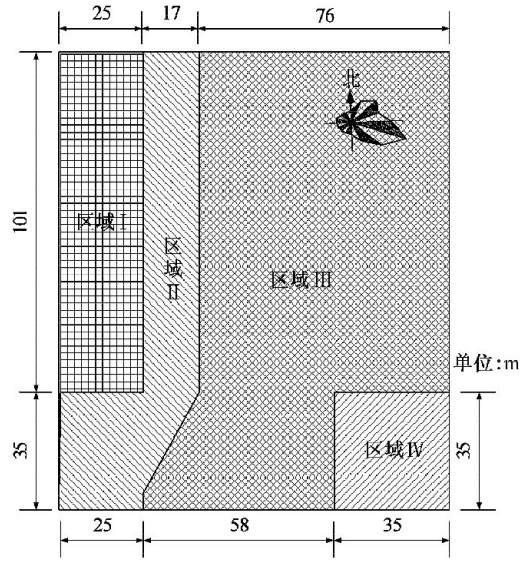


图 2 塑料排水板分区示意图

为新型水平排水体(在每两排塑料排水板中间沿东西方向布设一条软式透水管),与厚 40 cm 砂垫层作为水平排水体相比,每平方米可节约 15.6 元,充分发挥了砂垫层与软式透水管各自的优点。

2.4 真空加压系统设计

根据加固面积的大小、形状与土层的结构特点,再结合以往工程实践经验,本工程按每套 7.5 kW 真空泵设备可控面积为 1 000 m²,确定共需 16 套 ZYB-7.5 型真空预压离心泵(在东、西两侧分别布设 8 套)。

2.5 围堰与堆载设计

在覆水前,需在加固区四周密封沟外边沿做好围堰。用土方填筑、分层压实形成 2.1 m 高的围堰,以 2 m 深的膜上覆水作为堆载,可在地表形成累计 20 kPa 的压力增量。

2.6 深部密封与工程防护措施设计

真空预压处理地基的技术关键是在地基中形成足够、稳定的真空度,因此必须确保密封系统具有良好的密封性。为了切断加固区西侧②-1a 砂层透镜体的透水透气途径,采用沿加固区西侧边线打设双排黏土搅拌桩(桩直径 0.5 m,间距 0.35 m,排距 0.35 m,深 12 m)形成防渗帷幕作为深部密封防护措施,见图 1。黏土搅拌桩是用黏土作为主要材料,通过深层搅拌机械,在地基深处就将原状土和黏土浆液强制搅拌后形成的桩体。

加固区北侧边线与已建第一联合厂房外墙面相距 35 m,与厂区道路相距 7 m,厂区道路总宽 16 m。为确保已建第一联合厂房稳定与安全,避

免厂区道路产生结构性破坏,采取沿加固区北侧边线打设单排黏土搅拌桩(桩直径 0.5 m,间距 0.35 m,深 12 m)形成一道防渗帷幕,在距加固区北侧边线 1 m 处打设单排水泥土搅拌桩(桩直径 0.5 m,间距 0.35 m,深 12 m)形成一道具有支挡与防渗作用的围护挡墙作为防护措施,如图 1 所示。

黏土搅拌桩、水泥土搅拌桩都采用“预搅下沉、喷浆搅拌提升、停浆复搅下沉、再喷浆搅拌提升”的“两喷四搅”工艺施工。黏土搅拌桩的黏土掺入量以泥浆比重大于 1.4 来控制,水泥土搅拌桩的水泥用量为 50 kg/m,水灰比为 0.4~0.5。

3 监测仪器与监测点布设

试验现场监测内容包括真空度、表面沉降、侧向水平位移、超静孔隙水压力、地下水位等,在加固区及其周边布设的监测仪器与监测点如图 1 所示,其中布设 1 处共 7 只孔隙水压力计(深度分别为 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m、15 m),测斜孔 CX01、CX02 分别位于水泥土搅拌桩两侧。BM1、BM3、BM4 为水准控制点,到加固区边线的水平距离依次为 36 m、38 m、38 m。为监控第一联合厂房与厂区道路的安全,共布置 4 排沉降监测点,与加固区北侧边线分别相距 7.2 m、17.5 m、34.2 m、35 m,分别位于厂区道路、厂区道路、第一联合厂房散水及墙体上。

4 监测结果分析

4.1 膜下真空度分析

膜下平均真空度变化过程线如图 3 所示。从

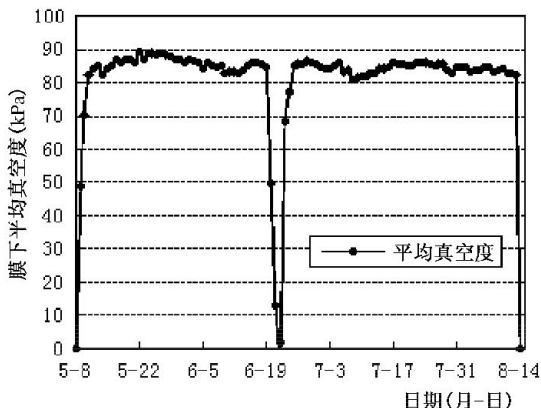


图 3 膜下平均真空度变化过程线

图中可以看出,自 5 月 8 日开始抽真空 3 天内,膜下真空度迅速上升并达到 80 kPa 以上;在持续抽真空期间(除抽真空中期降水、停泵、补膜外),膜下真空度都稳定在 80~90 kPa,表明真空加压系统、密封系统运转效果良好及新型水平排水体的水平排水、传递真空度的功效明显,使真空压力持续、稳定,有力地促进了地基排水固结与强度增长。

4.2 加固区内沉降分析

从 3 月 23 日原始场地平整结束到 8 月 14 日停泵卸载,地基各沉降测点的平均沉降曲线、平均沉降速率曲线见图 4、图 5。由图可知,3 月 23 日~5 月 7 日在砂垫层荷载作用下,地基开始产生排水固结,但沉降量与沉降速率较小;自 5 月 8 日开始抽真空,地基沉降量、沉降速率陡增;随着抽真空持续进行,地基沉降量继续增大,沉降速率逐渐减小;到后期,地基沉降趋于稳定,沉降速率也明显减小,至 8 月 14 日卸载,各测点累计沉降量在 705.48~961.44 mm 之间,平均累计沉降量为 827.53 mm;自 7 月 24 日,实测平均沉降速率开始小于 2 mm/d,至 8 月 13 日,沉降速率为 0.01~0.12 mm/d,平均沉降速率为 0.06 mm/d;至真空预压结束,所消除地基沉降量与最后沉降速率满足地基处理要求。

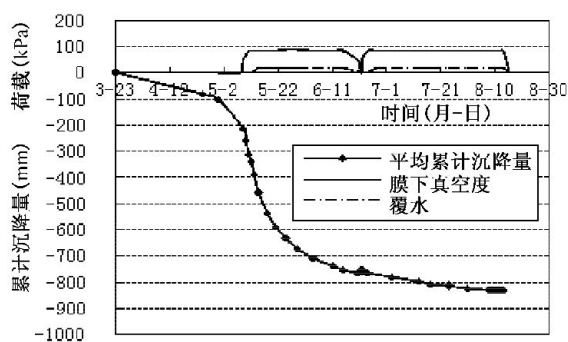


图 4 各沉降测点平均沉降曲线

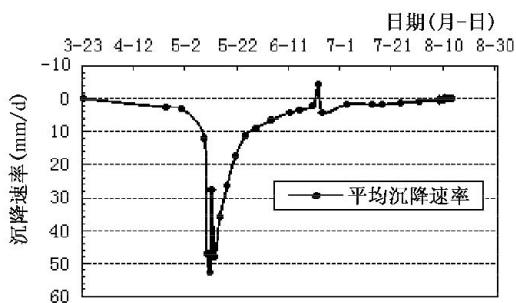


图 5 各沉降测点平均沉降速率曲线

4.3 加固地基最终沉降量与固结度计算

设定地基沉降按指数曲线规律变化,用指数曲线拟合实测沉降曲线,推求最终沉降量。计算公式如下:

$$S_t = S_0 + \alpha \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\beta}} \right) \quad (1)$$

式中, (t_0, S_0) 为沉降曲线的拐点; S_t 为 t 时刻的沉降量; S_0 为指数曲线起点 t_0 时的沉降量; α 、 β 为待定系数。

根据式(1)可推得最终沉降量 S_∞ 如式(2)所示:

$$S_\infty = S_0 + \alpha \quad (2)$$

截止 8 月 13 日,推求的各测点最终沉降量及固结度结果见表 2,平均固结度为 95.9%,满足地基处理要求。

表 2 地基固结度计算表

序号	测点	实测累计沉降量 (mm)	最终沉降量 (mm)	固结度 (%)
1	CJB1	712.61	784.76	90.8
2	CJB2	961.44	1 018.94	94.4
3	CJB3	868.41	911.75	95.2
4	CJB4	705.48	741.76	95.1
5	CJB5	936.10	953.26	98.2
6	CJB6	860.46	884.87	97.2
7	CJB7	707.20	721.64	98.0
8	CJB8	935.26	955.27	97.9
9	CJB9	760.77	791.90	96.1
平均		827.53	862.68	95.9

4.4 土体侧向水平位移分析

由深层水平位移曲线(图 6、图 7)可知:在真空预压过程中,地基土向加固区中心发生侧向位移;至抽真空结束,CX01、CX02 处土体最大侧向变形均发生于地表,分别达到 294.1 mm 和 201.5 mm,

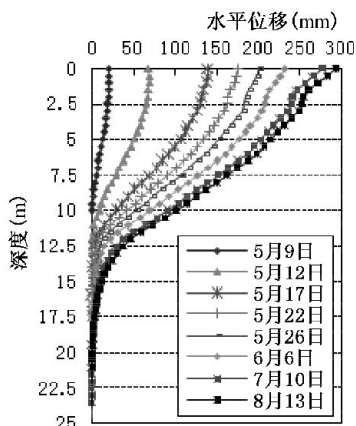


图 6 CX01 水平位移曲线

从 CX01 到 CX02,两孔仅相距 0.6 m,但土体最大侧向变形量却削减了 31.5%,表明水泥土搅拌桩起到了一定程度的抵抗土体水平位移的作用。自地表向地基深处,侧向水平位移呈递减趋势,规律性良好;侧向水平位移影响深度达到 17.5 m 深的土层,可见真空预压影响深度较大。

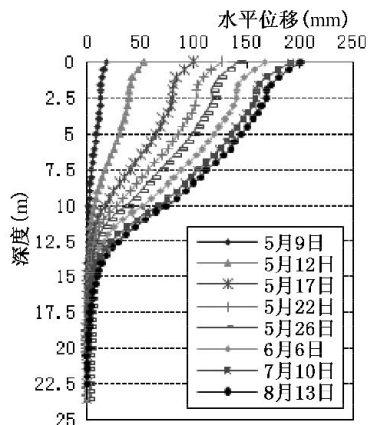


图 7 CX02 水平位移曲线

4.5 孔隙水压力分析

从超静孔隙水压力变化过程线(图 8)看出,抽真空初期至恒载阶段,地基内部负超静孔压逐渐增加,其中 10 m 深度最大超静孔压达到 -60 kPa; 6 月 20 日~6 月 21 日,由于降水、停泵,负超静孔压明显减小;6 月 27 日~7 月 13 日降雨较多,地下水水位逐渐上升,负超静孔压逐渐减小,7 月 13 日地下水水位上升到最大,负超静孔压也相应减小到最小。整个真空预压与堆载期间,地基内部超静孔压都处于负压状态,表明地基有效应力逐渐增长,强度逐渐增加。

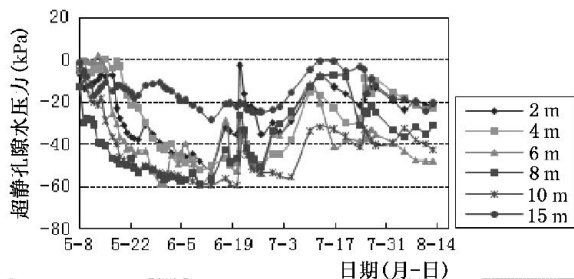


图 8 超静孔隙水压力变化过程线

5 加固效果检验

5.1 地基承载力检测

本工程采用 3 种方法检测地基承载力,结果

如下:

(1) 由静力触探试验检测结果可知,加固后,锥尖阻力 q_c 、比贯入阻力 P_s 、压缩模量 E_s 、承载力 f_k 分别提高了 85%、96%、66%、62%,承载力平均值为 123 kPa;

(2) 由十字板剪切试验检测结果可知,加固后,十字板强度 C_u 、承载力 f_k 分别提高了 75%、76%,承载力平均值为 114 kPa;

(3) 由标准贯入试验检测结果可知,加固后,

标准贯入击数 $N_{63.5}$ 、承载力 f_k 分别提高了 100%、46%,承载力平均值为 131 kPa;

可见,地基加固处理后,地基承载力为 114~131 kPa,满足地基处理要求。

5.2 地基土室内物理力学指标检测

地基加固前后,在加固区内分别选取两处进行钻孔取样,对比分析土体物理力学性质指标的变化,见表 3。

表 3 地基加固前后土性指标对比

土性指标	单位	G1 试验孔			G2 试验孔			两孔均值		
		加固前	加固后	变化率(%)	加固前	加固后	变化率(%)	加固前	加固后	变化率(%)
ω	%	42.6	35.5	-16.7	42.4	36.9	-13.0	42.5	36.2	-14.8
ρ_d	g/cm^3	1.24	1.37	+10.5	1.2	1.34	+11.7	1.22	1.355	+11.1
e		1.198	0.992	-17.2	1.2	1.032	-14.0	1.199	1.012	-15.6
a_v	MPa^{-1}	0.74	0.5	-32.4	0.7	0.6	-14.3	0.72	0.55	-23.4
E_s	MPa	3.0	4.2	+40.0	3.0	3.7	+23.3	3.0	3.95	+31.7
C_q	kPa	6.0	13.4	+123.3	3.6	12.3	+241.7	4.8	12.85	+182.5
ϕ_q	。	5.9	15.1	+155.9	5.7	11.2	+96.5	5.8	13.15	+126.2

由检测结果可知,地基加固处理后, ω 、 e 、 a_v 有了较大幅度地减小,幅度平均在 14.8%~23.4%, ρ_d 、 E_s 、 C_q 、 ϕ_q 有了较大幅度地提高,幅度平均在 11.1~182.5%,土体物理力学性质指标得到了明显改善,表明地基加固效果显著。

6 真空预压对周围地表影响范围分析

根据所布设沉降测点的平面位置与累计沉降量,选取 4 个典型断面用沉降曲线法来分析真空预压对加固区周边的影响趋势,推知本工程真空预压大致的影响范围,如图 9、图 10、图 11、图 12 所示,据此,可得出以下结论:

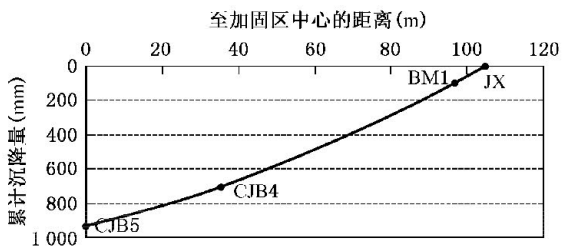


图 9 对西边地基影响范围断面图

(1) 由图 9 可知,在有双排黏土搅拌桩阻隔的情况下,本工程真空预压对加固区外西边地基的

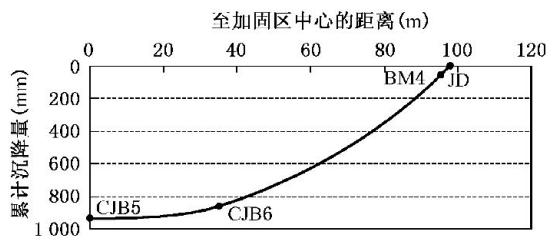


图 10 对东边地基影响范围断面图

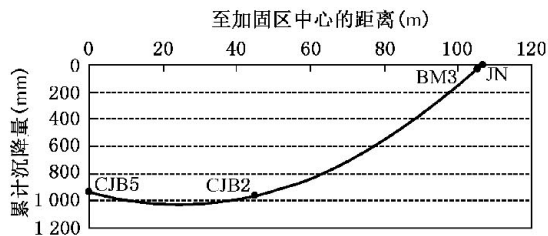


图 11 对南边地基影响范围断面图

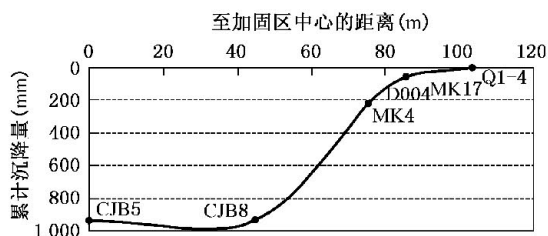


图 12 对北边地基影响范围断面图

影响范围达到 44.2 m(对西边地基,真空预压引起的沉降会影响到点 JX,经计算,点 JX 到加固区中心的水平距离为 103.2 m,减去加固区宽度 118 m 的一半,即为点 JX 到加固区西侧边线的距离);

(2) 由图 10、图 11 可知,在没有搅拌桩阻隔的情况下,本工程真空预压对加固区外东边、南边地基的影响范围达到 40.6 m;

(3) 由图 12 可知,虽然有单排黏土搅拌桩与单排水泥土搅拌桩阻隔,但距离加固区北侧边线 7.2 m、17.5 m 的道路、距离加固区北侧边线 34.2 m 的第一联合厂房散水仍有沉降量发生,可见真空预压对邻近建筑物有一定程度的影响;距离加固区北侧边线 35 m 的第一联合厂房墙体未发生沉降量,经分析,原因主要有:单排黏土搅拌桩与单排水泥土搅拌桩有一定程度的阻隔作用,第一联合厂房地基已被真空预压加固处理过、土质较好,厂房墙体下又设有桩基础。

7 结 语

(1) 采用真空与覆水联合加固工业厂房软基,处理后各项指标满足地基处理要求,效果显著,表明所用处理方法是科学合理的,并且经济效益明显,加固取得了成功。

(2) 真空度在 3 天内迅速上升并达到 80 kPa 以上,且始终均匀分布并稳定在 80~90 kPa,表明真空加压系统、密封系统运转效果良好,打设的双排黏土搅拌桩对②-1a 层强透水透气层的阻隔起了显著作用。

(3) 采用新型水平排水体传递真空度和进行水平排水是成功的,功效明显,有力地促进了地基排水固结与强度增长。

(4) 现场研究表明,真空预压对加固区外地基的水平影响范围达到 40~44 m,需要引起重视;在有单排水泥土搅拌桩阻隔的情况下,真空预压对加固区外地基的水平影响范围可缩小到 35 m 左右。

(5) 本工程覆水堆载、新型水平排水体、深部密封及防护措施的设计与应用可为类似工程的设计与应用提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 赵维炳,刘家豪. 排水固结加固软基技术指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005.